



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Materialwahl und Korrosions- schutz für korrosionsgefährdete BSA-Komponenten in Strassen- tunnel

**Choix du matériel et protection des EES-composantes me-
nacées par la corrosion dans les tunnels routiers**

**Material selection and protection of the corrosion endan-
gered of safety and operational components in road tunnels**

AFRY Schweiz AG
Reto Buchmann
Oliver Scherer

Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, SGK
Markus Büchler
Carl-Heinz Voûte

Kontra Korrosion, Rickenbacher GmbH
Ferdi Rickenbacher
Thomas Schmidt

**Forschungsprojekt AGT 2014/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnel-
forschung (AGT)**

Dezember 2021

1716

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Materialwahl und Korrosions- schutz für korrosionsgefährdete BSA-Komponenten in Strassen- tunnel

**Choix du matériel et protection des EES-composantes me-
nacées par la corrosion dans les tunnels routiers**

**Material selection and protection of the corrosion endan-
gered of safety and operational components in road tunnels**

AFRY Schweiz AG
Reto Buchmann
Oliver Scherer

Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, SGK
Markus Büchler
Carl-Heinz Vouë

Kontra Korrosion, Rickenbacher GmbH
Ferdi Rickenbacher
Thomas Schmidt

**Forschungsprojekt AGT 2014/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnel-
forschung (AGT)**

Dezember 2021

1716

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Reto Buchmann (Ingenieurbüro)

Mitglieder

Ferdi Rickenbacher (Fachleitung Metallischer Überzug und Beschichtungen)

Markus Büchler (Fachleitung Nichtrostender Stahl und Aluminium)

Oliver Scherer (Ingenieurbüro, Stv. Projektleitung)

Rolf Ruckstuhl (Ingenieurbüro)

Begleitkommission

Präsident

Jörg Vogelsang (SIKA)

Mitglieder

Christian Gammeter (ASTRA)

Franz Flury (zentras)

Markus Faller (EMPA)

Martin Klupsch (Witt&Sohn)

Roland Martin (ASTRA)

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	9
Résumé	13
Summary	17
1 Einleitung	21
1.1 Ausgangslage.....	21
1.2 Auftrag.....	23
1.3 Forschungsziele	23
1.4 Vorgehen.....	25
1.5 Abgrenzung	26
1.6 Begriffsdefinitionen	27
2 Literaturstudie Normen, Regelwerke	33
2.1 Nichtrostender Stahl und Aluminium.....	33
2.1.1 Betrachtete Normen und Regelwerke	35
2.1.2 Beurteilung der Normen und Regelwerke	41
2.2 Metallischer Überzug und Beschichtungen.....	41
2.2.1 Einführung	41
2.2.2 Betrachtete Normen und Regelwerke	41
2.2.3 Definitionen zur Korrosion – Bereich Beschichtung.....	42
2.2.4 Analyse der Normen und Regelwerke	44
3 Materialien und Korrosionsschutzsysteme.....	47
3.1 Definition und Einflussgrössen.....	47
3.2 Aufbau des Korrosionssystems.....	47
3.3 Reale Korrosionssysteme	47
3.3.1 Reale Korrosionssysteme – Beispiel Beschichtung.....	48
3.3.2 Reale Korrosionssysteme – Beispiel Zink.....	50
3.3.3 Reale Korrosionssysteme – Beispiel Duplexsystem.....	51
3.4 Detailabklärungen zu nichtrostenden Stählen	52
3.4.1 Flächenkorrosion.....	52
3.4.2 Loch- und Spaltkorrosion	52
3.4.3 Spannungsrisskorrosion.....	53
3.4.4 Interkristalline Korrosion.....	54
3.4.5 Austenitische Stähle.....	54
3.4.6 Ferritische Stähle	55
3.4.7 Duplexstähle.....	56
3.4.8 Untersuchungen Mont Blanc Tunnel.....	56
4 Analyse IST-Situation	59
4.1 Analyse Schadensfälle	60
4.1.1 Korrodierte Laufräder Strahlventilatoren (Schadenfall 011)	61
4.1.2 Lampengehäuse Seelisbergtunnel (Schadenfall 012)	61
4.1.3 Gubrist Tunnel: Aufhängungen, Befestigungen, Türen (Schadenfälle 015 und 016)	61
4.1.4 Kirchenwaldtunnel, neue Befestigungselemente (Schadenfall 013).....	62
4.1.5 Lärmschutzgalerie Hergiswil (Schadenfall 021).....	62
4.1.6 Strahlventilatoren aus Tunnels am Walensee (Schadenfall 017)	63
4.1.7 Aeschertunnel, Brandklappen, Vorprüfung vor Garantieende (Schadenfall 014).....	63
4.1.8 Uetlibergtunnel, Abluft und Brandklappen (Schadenfall 007)	63
4.1.9 A2 Gotthard Strassentunnel, Kontrolle Abluftklappen (Schadenfall 006)	64
4.1.10 A2 Gotthard Strassentunnel, Trockeneisreinigung der Abluftklappen (Schadenfall 006)	64
4.1.11 Kerenzbergtunnel, Lampengehäuse aus Aluminium (Schadenfall 019)	64

4.1.12	Signalträger Tunnel Entlisberg (Schadenfall 008)	65
4.1.13	Strahlventilatoren Tunnel Entlisberg (Schadenfall 003)	65
4.1.14	Strahlventilatoren Tunnel Uetliberg (Schadenfall 001)	65
4.1.15	Strahlventilatoren Tunnel Gubrist (Schadenfall 002)	65
4.1.16	Strahlventilatoren Tunnel Isisberg (Schadenfall 005)	65
4.1.17	Strahlventilatoren Tunnel Hafnerberg und Entlisberg (Schadenfall 004 a/b)	66
4.1.18	Strahlventilator Bubenholztunnel, Lochkorrosion am Schalldämpfer (Schadensfall 010)	66
4.1.19	Prüfbericht EMPA "Strahlventilator", Bruch Rotorschaukel	66
4.1.20	Fazit aus der Analyse von durchgeführten Untersuchungen	67
4.2	Erkenntnisse aus der Umfrage	67
4.2.1	Bauteile aus nichtrostendem Stahl	68
4.2.2	Bauteile aus Aluminium	69
4.2.3	Bauteile mit metallischem Überzug und Beschichtungen	70
4.3	Erkenntnisse aus Situationsaufnahmen vor Ort	71
4.3.1	Tunnel Entlisberg	71
4.3.2	Tunnel Buchrain	74
4.4	Zusammenfassung IST-Zustandserfassung	75
5	Korrosivität der Tunnelatmosphäre	79
5.1	Atmosphäre in Strassentunnels	79
5.1.1	Generelle Einflussfaktoren auf die Korrosivität	79
5.1.2	Raumklima im Strassentunnel	82
5.1.3	Kleinklima im Strassentunnel	83
5.2	Definition und Einflussgrössen	84
5.2.1	Einleitung	84
5.2.2	Wassereintrag	84
5.2.3	Einfluss Luftfeuchtigkeit und Taupunktabstand	84
5.2.4	Tausalze	85
5.2.5	Austrocknen von Verunreinigungen	86
5.2.6	Abgase von Verbrennungsmotoren	86
5.2.7	Belüftung	86
5.2.8	Schlussfolgerung	87
5.3	Tunnelklima am Beispiel des Gotthard Strassentunnels	87
5.3.1	Ausgangslage	87
5.3.2	Raumklima im Gotthard Strassentunnel	87
5.3.3	Schlussfolgerungen	92
5.4	Kategorisierung von Strassentunnel	92
5.4.1	Einflussfaktoren	92
5.4.2	Möglichkeit der Kategorisierung	93
5.5	Zusammenfassung Korrosivität	93
6	Prozess Auswahl Werkstoff/ Schutzsystem	95
6.1	Einleitung	95
6.2	Nutzungsvereinbarung bez. Werkstoff/ Schutzsystem	95
6.3	Werkstoffauswahl 1. Stufe	96
6.4	Werkstoffauswahl 2. Stufe	97
7	Betrachtete BSA-Komponente	99
7.1	BSA-Komponente	99
7.2	Klasseneinteilung in BSA-Baugruppen	99
7.3	Materialien/ Korrosionsschutzsystem pro BSA-Baugruppe	101
8	Gefährdung, Risiko	103
8.1	Methodik	103
8.1.1	System	104
8.1.2	Risikoermittlung	105
8.1.3	Risikobewertung und Massnahmenplanung	109
8.2	Anwendung der Methodik - Beispiel	110

9	Kosten und Verfügbarkeit	113
9.1	Gesamtkostenbetrachtung	113
9.1.1	Methodik	113
9.1.2	Neubeschaffung	115
9.1.3	Sanierung / Ersatz im Betrieb	122
10	Empfehlungen Auswahl Material und Korrosionsschutzsysteme	127
10.1	Einleitung	127
10.2	Nicht kontrollierbare Komponenten	127
10.3	Kontrollierbare Komponenten	128
11	Empfehlungen Planung bis Betrieb	129
11.1	Empfehlungen Phase Projektierung	129
11.1.1	Allgemeine Hinweise bezüglich der Vorgehensweise	129
11.1.2	Allgemeine Hinweise in Bezug auf den Korrosionsschutz	130
11.1.3	Hinweise für Bauteile aus nichtrostenden Stählen	130
11.1.4	Hinweise für bestimmte Bauteile	132
11.2	Empfehlungen Phase Ausführung	133
11.3	Empfehlung Phase Betrieb	133
11.4	Fragen und Antworten aus der Praxis	133
12	Empfehlungen zu Normen und Regelwerken	137
12.1	Empfehlungen zum Umgang mit den gängigen Normen und Regelwerken	137
12.2	Hinweise zur Anwendung der SIA Norm 179, Kapitel 2.31	137
12.3	Hinweise zum ASTRA Merkblatt	138
	Glossar	155
	Literaturverzeichnis	157
	Projektabschluss	161

Zusammenfassung

Das Nationalstrassennetz umfasst über 250 Strassentunnel, was rund 300 Tunnelkilometern entspricht. Die Mehrzahl dieser Tunnel sind mit Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA-Komponenten) im Fahrraum ausgerüstet, welche dem sehr aggressiven Tunnelklima ausgesetzt sind. Es sind unzählige Instandhaltungsprojekte zur Behebung von Korrosionsschäden nötig, um den zuverlässigen und sicheren Betrieb aufrecht zu erhalten. Massnahmen im Tunnelfahrraum sind grundsätzlich kostenintensiv, da sie in der Regel nur nachts und mit relativ hohem Aufwand durchgeführt werden können.

Die zweckmässige Materialwahl, verbunden mit einem geeigneten Korrosionsschutz, ist daher ein zentrales Thema in der Planung, Ausführung und Wartung der BSA-Komponenten in Tunneln. Eine ungenügende Materialwahl respektive ein ungeeignetes Korrosionsschutzsystem kann ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen und hohe Folgekosten für die Instandhaltungs- und Reparaturmassnahmen verursachen. Schadensfälle sind in den letzten Jahren in nicht vernachlässigbarer Anzahl eingetreten. Andererseits ist ein übertriebener Korrosionsschutz unwirtschaftlich und ebenfalls zu vermeiden.

Die korrekte Materialwahl für die BSA-Komponenten ist daher von zentraler Bedeutung und in hohem Masse kostenrelevant. Die Problematik besteht darin, dass die Korrosionsbeständigkeit nur als Systemverhalten verstanden werden kann. Dabei ist die Nutzungsdauer der Komponenten die Folge der spezifischen Eigenschaften des Werkstoffs sowie des Korrosionsschutzsystems, des Umgebungsmediums im Tunnel sowie der konstruktiven und betrieblichen Randbedingungen. Diese gegenseitige Wechselwirkung hat zur Folge, dass auch hochwertige Werkstoffe versagen können, wenn extreme klimatische Bedingungen, ungünstige spaltbehaftete Konstruktionen sowie unzureichender Unterhalt auftreten. Es handelt sich dabei um ein Systemverhalten, wobei die Situation im Tunnel durch folgende Faktoren zusätzlich verschärft wird:

- Die sich im Betrieb einstellende Tunnelatmosphäre ist nur teilweise eine Folge der klimatischen Aussenbedingungen. Sie ist vor allem bestimmt durch objektspezifische Faktoren.
- Die Tunnelatmosphäre wiederum ist nur bedingt aussagekräftig in Bezug auf das korrosionsrelevante Kleinklima, welches sich im Betrieb auf den BSA-Komponenten ausbildet. Vielmehr ist die Detailkonstruktion sowie die lokale Feuchte und Temperaturverteilung bestimmend.
- Die modernen Tausalze enthalten zusätzlich Kalzium- und Magnesiumchloride, welche zu einem deutlich erschwerten Abtrocknen und zu aggressiveren Bedingungen führen.
- Die regelmässigen Inspektionen und Reinigungen ermöglichen nur bedingt, den Unterhalt und die Beurteilung sicherheitsrelevanten Komponenten sicherzustellen.

Die Vielzahl an Einflussfaktoren verhindert die Prüfung des Korrosionsverhaltens der verschiedenen Werkstoffe und Korrosionsschutzsysteme unter definierten Laborbedingungen in beschleunigten Versuchen. Ebenso ist die definierte Auslagerung von Komponenten in verschiedenen Tunneln nur bedingt zielführend, da die beschränkte Anzahl an Tunnels und die begrenzte Prüfdauer kaum allgemeingültige Informationen liefern können. Es folgt, dass die sich einstellenden relevanten Randbedingungen kaum prognostiziert werden können. Ohne deren Kenntnis ist es aber nicht möglich eine adäquate Wahl des Korrosionsschutzsystems zu treffen. Diese Problematik wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens behandelt. Der vorliegende Bericht zeigt praktikable Lösungen für eine wirtschaftliche Materialisierung der BSA-Komponenten auf. Diese wurden durch die Auswertung bekannter Erfahrungen und die systematische Erfassung der Erfahrungen mit bestehenden Anlagen, zusammen mit theoretischen Überlegungen und dem Einbezug konstruktiver Gegebenheiten, entwickelt. Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben auf die gesammelten Erfahrungen mit dem Betrieb von Strassentunnels zurückgegriffen. Damit wurde die effektiv relevante betriebliche Erfahrung ausgewertet. Sie diene als Basis für die weiterführende Entwicklung von Lösungsansätzen in Bezug auf die zukünftige Planung und den Betrieb von Tunneln. Die folgenden Werkstoffe wurden im Rahmen des

Projektes behandelt: nichtrostender Stahl, Stahl verzinkt und/oder beschichtet sowie Aluminiumlegierungen.

Die Auswertung der Schadensfälle, der Begehungen sowie der Umfragen haben gezeigt, dass gleiche Bauteile mit gleicher Exposition im selben Tunnel starke Unterschiede bezüglich Korrosionszustand zeigen. Zudem werden im selben Tunnel für gleiche Anwendungen unterschiedliche Werkstoffe und Korrosionsschutzsysteme eingesetzt. Es zeigte sich, dass die vorliegenden Dokumentationen in Bezug auf Ausführungsdetails und tatsächliche Exposition oft ungenügend sind. Dennoch konnten konkrete Schlussfolgerungen gezogen werden:

Nichtrostender Stahl Gruppe II nach SIA 179 (z. B. 1.4301 oder A2): Es wurden häufig an der freien Oberfläche erhebliche Korrosionserscheinungen gefunden. In Spaltsituationen im Bereich von Verschraubungen waren Korrosionserscheinungen besonders ausgeprägt.

Nichtrostender Stahl Gruppe III nach SIA 179 (z. B. 1.4571 oder A4): Auf der freien Oberfläche wurden wenig Korrosionserscheinungen festgestellt und der Korrosionsfortschritt ist vergleichsweise gering. Dieser Befund deckt sich auch mit Rückmeldungen aus dem Unterhalt, wo Elemente aus der Gruppe III im Allgemeinen als problemlos bezeichnet werden. Häufig sind hingegen Korrosionserscheinungen in Spaltsituationen bei Elementen der Gruppe III rapportiert. In einem Fall wurde Spannungsrisskorrosion an einer Schraube der Gruppe III (A4) beobachtet. Ebenso wurden an Mantelblechen von Strahlventilatoren in ausgeprägten Spaltsituationen hohe Lochkorrosionsgeschwindigkeiten und Wanddurchbrüche beobachtet. Bei gleicher Exposition ist sowohl an der freien Oberfläche als auch in Spaltsituationen der Korrosionsfortschritt bei Bauteilen der Gruppe III im Vergleich zu Elementen aus der Gruppe II deutlich geringer.

An Bauteilen aus nichtrostendem Stahl der Gruppe IV und V nach SIA 179 wurde keine Lochkorrosion oder andere Korrosionserscheinungen rapportiert. In einem Fall wurde im Labor bei neuen Verbindungselementen eine reduzierte Beständigkeit der äussersten Oberflächenschicht festgestellt. Dies wurde auf eine nicht korrekte Verarbeitung zurückgeführt. Dies zeigt die Bedeutung der Verarbeitung und Nachbehandlung bei Bauteilen aus nichtrostendem Stahl.

Elemente aus Aluminiumlegierungen: Bei unbeschichteten Aluminiumbauteilen können starke Korrosionserscheinungen und auch Korrosionsschäden auftreten. Es muss davon ausgegangen werden, dass auch höchstbeständige Aluminiumwerkstoffe in den aggressiven Bedingungen im Tunnel Korrosionserscheinungen zeigen. Bei beschichteten Bauteilen wird das Aluminium gut geschützt, solange die Beschichtung intakt ist und nicht abblättert. Die Korrosionserscheinungen am Aluminium können anhand der weissen Korrosionsprodukte einfach identifiziert werden. Allerdings ist die Angriffstiefe und damit das Schadensausmass nur schwer abzuschätzen.

Elemente aus verzinktem Stahl: Die Korrosionsschutzwirkung des unedlen Metalls Zink basiert auf der Bildung einer Deckschicht aus Zinkkarbonat. Bei typischen Expositionen in Tunneln wird der Einsatz durch den hohen Korrosionsabtrag beschränkt. Feuerverzinkte Stahlkonstruktionen mit zusätzlicher Beschichtungen (Duplexierung) sind aber in der Lage, längere und technisch realistische Schutzdauern zu erreichen.

Basierend auf den Umfragen, den untersuchten Schadensfällen sowie der Diskussion der klimatischen Bedingungen und der korrosionsschutzspezifischen Eigenheiten wird deutlich, dass es keine Ideallösung in Bezug auf die Werkstoff- / Korrosionsschutzwahl gibt. Angesichts dieser vielfältigen Anforderungen wurde ein Prozess entwickelt, welcher die relevanten Einflussgrössen beschreibt und Hilfestellung bei der Projektierung bietet. Dieser Prozess basiert auf folgenden Dokumenten und Aspekten:

- Die Nutzungsvereinbarung: Diese regelt die Nutzungs- und Schutzziele. Sie enthält alle für die Auswahl von Werkstoffen und Schutzsystemen relevanten Aspekte.
- Werkstoffauswahl erste Stufe: Dabei werden die primären technischen Kriterien berücksichtigt auf deren Basis mögliche Werkstoffe und Schutzsysteme identifiziert werden.
- Werkstoffauswahl zweite Stufe: Aus den technisch möglichen Werkstoffen und Schutzsystemen wird in der zweiten Stufe eine weitere Auswahl unter finanziellen und ästhetischen Aspekten vorgenommen.

Dieser Prozess hat den Vorteil, dass das gesamte Beanspruchungskollektiv sowie die Bauherrenvorgaben aus der Nutzungsvereinbarung berücksichtigt werden. Eine Behandlung der Dauerhaftigkeit und der Werkstoffauswahl wird in der Folge auf Basis einer Risikobetrachtung vorgenommen. Diese Werkstoffauswahl der ersten Stufe beinhaltet die folgenden Schritte:

- Systemdefinition und -abgrenzung
- Risikoermittlung: In diesem Schritt werden die Gefahren identifiziert sowie die zu erwartenden Eintretenswahrscheinlichkeit und das Schadensausmass von Ereignissen bestimmt. Das resultierende Risiko ist ein Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit und Ausmass des Ereignisszenarios.
- Risikobewertung: Die im vorherigen Schritt ermittelten Risiken werden auf ihre Akzeptanz bewertet. Das heisst es werden Akzeptanzkriterien benötigt, die festlegen, ob ein Risiko als tragbar erachtet werden kann.
- Massnahmenplanung: Werden in der Analyse Risiken identifiziert, die nicht als akzeptabel eingestuft werden, sind Massnahmen zur Risikoreduktion festzulegen und auf ihre Wirksamkeit zu prüfen. Massnahmen können technischer, betrieblicher oder organisatorischer Natur sein. Die Beurteilung der Verhältnismässigkeit einer Massnahme stellt die Risikoreduktion dem Aufwand gegenüber.

Mit dieser Vorgehensweise ergibt sich ein geschlossener Prozess, welcher basierend auf der Nutzungsvereinbarung und der Risikobetrachtung eine Auswahl von Werkstoffen sowie Korrosionsschutzsystemen für die BSA-Komponenten ermöglicht. Dieser Ansatz erlaubt es konkret unterschiedliche Strategien anzuwenden. Damit wird es beispielsweise möglich für bestimmte Komponenten Werkstoffe mit geringerem Korrosionsschutz einzusetzen, sofern die daraus resultierenden erhöhten Risiken korrekt behandelt werden. Zu diesen Massnahmen gehören unter anderem:

- Technische Massnahmen konstruktiver Art oder als Rückfallebene
- Wahl eines anderen Werkstoffs oder Schutzsystems
- Betriebliche oder organisatorische Massnahmen

Die Wirksamkeit einer Massnahme ist jeweils durch erneute Ermittlung des Risikos (nach Massnahme) und Bewertung in der Risikomatrix zu prüfen. Um die Verhältnismässigkeit einer Massnahme zu beurteilen, ist die Wirksamkeit dem Aufwand zur Umsetzung gegenüberzustellen.

In der Folge der Risikobewertung können sich verschiedene Werkstoff- und Schutzszenarien ergeben, welche zu vergleichbaren Risiken führen. Deren weitere Differenzierung soll auf Basis einer Gesamtkostenbetrachtung in der Werkstoffauswahl in der zweiten Stufe erfolgen. Als Werkzeug zur Berechnung der Lebenszykluskosten wird das Life Cycle Costing (LCC) verwendet, welches die Kosten- und Zahlungsströme von Investitionsalternativen über deren Nutzungsdauer bewertet. Damit sollen die Lebenszykluskosten mittels Variantenvergleich minimiert werden.

Die vorliegende Untersuchung entwickelt basierend auf Literatur, Normen und Erfahrungswerten einen risikobasierten Ansatz zur Materialisierung von BSA-Komponenten. Damit wird es möglich, die gegenseitige Wechselwirkung der verschiedenen Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Auswahl von Werkstoff sowie Korrosionsschutzsystemen, welche eine optimale Nutzungsdauer unter Berücksichtigung von äusseren Faktoren wie Kosten, Verfügbarkeit und Unterhalt ermöglichen. Anstelle einer strikten Werkstoffvorgabe ist auf der Basis einer Systembetrachtung eine optimierte Vorgehensweise basierend auf der Nutzungsvereinbarung, der Risikobetrachtung und der Gesamtkostenbetrachtung möglich. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Berücksichtigung von Massnahmen, welche es erlaubt, die Risiken innerhalb der erforderlichen Grenzen zu halten. Zu diesen technischen Massnahmen gehören konstruktive Anpassungen (z. B. Fangsicherung) Werkstofftechnische Modifikationen (z. B. ein höherwertiges Schutzsystem) oder organisatorische Schritte (z. B. Kompletter Austausch der Komponenten nach 15 Jahren). Dies ermöglicht planerische Massnahmen und erlaubt es, die spezifischen Gegebenheiten der verschiedenen Objekte zu berücksichtigen.

Résumé

Le réseau routier national comprend plus de 250 tunnels routiers, ce qui correspond à environ 300 kilomètres de tunnels. La majorité de ces tunnels sont équipés d'équipements d'exploitation et de sécurité (composants EES) dans l'espace de circulation qui sont exposés au climat très agressif des tunnels. Ce fait est responsable que d'innombrables projets de maintenance sont nécessaires pour réparer les dommages causés par la corrosion afin de maintenir un fonctionnement fiable et sûr. Les mesures dans l'espace de circulation des tunnels routiers sont généralement coûteuses, car elles ne peuvent être réalisées que de nuit au prix d'efforts relativement importants.

Le choix approprié des matériaux, associé à une protection anticorrosion adéquate, est par conséquent une question centrale dans la planification, l'exécution et la maintenance des composants EES dans les tunnels. Un choix inapproprié des matériaux ou des systèmes inadaptés de protection contre la corrosion peuvent représenter un risque de sécurité considérable et des coûts inhérents élevés pour les mesures de maintenance et de réparation. De plus, cela entraîne des perturbations du trafic désagréables. Ces dernières années, un nombre non négligeable d'événements dommageables se sont produits. D'autre part, une protection excessive contre la corrosion n'est pas rentable et doit également être évitée.

Le choix opportun des matériaux pour les composants EES est par conséquent d'une importance capitale et a une grande incidence sur les coûts. La problématique se caractérise par le fait que la résistance à la corrosion ne peut être comprise que comme un comportement du système. La durée d'utilisation des composants dans ce cadre, est le résultat des propriétés spécifiques du matériau et du système de protection contre la corrosion, du milieu ambiant dans le tunnel ainsi que des conditions limites structurelles et opérationnelles. Cette interaction mutuelle signifie que même les matériaux de haute qualité peuvent s'avérer défaillants en cas de conditions climatiques extrêmes, de constructions fissurées défavorables et d'un entretien insuffisant. Il s'agit d'un comportement du système, dans lequel la situation dans le tunnel est aggravée par les facteurs suivants:

- L'atmosphère du tunnel qui se développe pendant l'exploitation n'est que partiellement le résultat des conditions climatiques extérieures. Elle est principalement déterminée par des facteurs spécifiques à l'objet.
- L'atmosphère du tunnel, à son tour, n'est que partiellement significative en termes de microclimat pertinent pour la corrosion qui se forme sur les composants EES pendant l'exploitation. Ce sont plutôt la construction détaillée ainsi que l'humidité locale et la répartition de la température qui s'avèrent déterminants.
- Les sels de dégel modernes contiennent également des chlorures de calcium et de magnésium, ce qui rend le séchage beaucoup plus difficile et les conditions plus agressives.
- Les inspections et nettoyages réguliers ne permettent que dans une mesure limitée d'assurer l'entretien et l'évaluation des composants importants pour la sécurité.

La multitude de facteurs d'influence empêche de vérifier le comportement à la corrosion des différents matériaux et systèmes de protection contre la corrosion dans des conditions de laboratoire définies, dans le cadre d'essais accélérés. De la même manière, l'externalisation définie des composants dans différents tunnels n'est efficace que de manière conditionnelle, car le nombre restreint de tunnels et la durée limitée de l'essai peuvent difficilement fournir des informations générales. Il s'en suit que les conditions limites pertinentes qui se présentent peuvent difficilement être prédites. Or, sans connaître ces conditions, il n'est pas possible de faire un choix adéquat du système de protection contre la corrosion. Cette problématique a été traitée dans le cadre de ce projet de recherche. Le présent rapport montre des solutions praticables pour une matérialisation économique des composants EES. Celles-ci ont été développées grâce à l'évaluation des expériences connues et l'enregistrement systématique des expériences avec les systèmes existants, conjointement avec les considérations théoriques et l'intégration de conditions constructives.

Pour cette raison, le présent projet de recherche s'est appuyé sur l'expérience accumulée dans l'exploitation des tunnels routiers. Ainsi, l'expérience opérationnelle effectivement pertinente a été évaluée. Elle a servi de base à la poursuite du développement d'approches de solutions concernant la planification et l'exploitation future des tunnels. Les matériaux suivants ont été traités dans le cadre du projet: acier inoxydable, acier galvanisé et/ou revêtu ainsi qu'alliages d'aluminium.

L'évaluation des cas de dommages, les inspections et enquêtes ont montré que les mêmes composants avec la même exposition dans le même tunnel présentent de fortes différences en ce qui concerne l'état de corrosion. En outre, différents matériaux et systèmes de protection sont utilisés dans le même tunnel pour les mêmes applications. Il est apparu que la documentation disponible est souvent insuffisante concernant les détails d'exécution effectifs. Néanmoins, des conclusions concrètes ont pu être tirées:

Acier inoxydable du groupe II selon SIA 179 (par ex. 1.4301, A2): des signes significatifs de corrosion ont souvent été trouvés sur la surface exposée. Les phénomènes de corrosion étaient particulièrement prononcés en situation d'interstice dans la zone des connexions vissées.

Acier inoxydable du groupe III selon SIA 179 (par ex. 1.4571 ou A4): peu de signes de corrosion ont été constatés sur la surface exposée et la progression de la corrosion est comparativement faible. Cette constatation est également cohérente avec le retour d'information de l'entretien, où les éléments du groupe III sont généralement décrits comme ne posant aucun problème. En revanche, des phénomènes de corrosion sont fréquemment rapportés pour les éléments du groupe III en situation d'interstice. Dans un cas, une corrosion fissurante sous contrainte a été observée sur une vis du groupe III (A4). De même, des vitesses de corrosion perforante élevées et des percées de parois ont été observées sur les tôles des enveloppes de turbo ventilateurs dans des situations d'entrefer prononcées. À exposition égale, tant sur la surface libre que dans les situations d'interstices, la progression de la corrosion des composants du groupe III est significativement plus faible par rapport à celle des éléments du groupe II.

Aucune corrosion perforante ou autre signe de corrosion n'a été signalé sur les composants en acier inoxydable des groupes IV et V selon SIA 179. Dans un cas, le laboratoire a trouvé une résistance réduite de la couche de surface la plus externe sur des éléments de connexion neufs. Cela a été attribué à un traitement incorrect. Cela montre l'importance du traitement et du traitement ultérieur des composants en acier inoxydable.

Éléments en alliage d'aluminium: Les composants en aluminium non revêtus peuvent présenter de forts signes de corrosion et également des dommages dus à la corrosion. Il faut partir du principe que même les éléments en aluminium très résistants montreront des signes de corrosion dans les conditions agressives des tunnels. Dans le cas des composants revêtus, l'aluminium est bien protégé tant que le revêtement est intact et ne s'écaille pas. Les signes de corrosion sur l'aluminium peuvent être facilement identifiés à l'aide des produits de corrosion blancs. Cependant, la profondeur de l'attaque et l'étendue des dommages sont difficiles à estimer.

Éléments en acier galvanisé: L'effet de protection contre la corrosion du métal commun le zinc, est basé sur la formation d'une couche extérieure en carbonate de zinc. Dans le cas d'expositions typiques dans les tunnels, son utilisation est limitée par la forte érosion due à la corrosion. Les structures en acier galvanisé à chaud avec des revêtements supplémentaires (duplex) sont cependant en mesure d'obtenir des durées de protection plus longues et techniquement réalistes.

Sur la base des enquêtes, des cas de dommages examinés ainsi que de la discussion des conditions climatiques et des caractéristiques spécifiques à la protection contre la corrosion, il devient clair qu'il n'y aucune solution idéale en ce qui concerne les choix des matériaux et de protection contre la corrosion. Compte tenu de ces diverses exigences, un processus a été développé pour décrire les variables d'influence pertinentes et offrir une aide à la planification de projet. Ce processus est basé sur les documents et aspects suivants:

- L'accord d'utilisation: Il régit les objectifs d'utilisation et de protection. Il contient tous les aspects pertinents pour le choix des matériaux et des systèmes de protection.
- Première étape de la sélection des matériaux: Les principaux critères techniques sont pris en compte sur la base desquels les matériaux et les systèmes de protection possibles sont identifiés.

- Deuxième étape de la sélection des matériaux: Parmi les matériaux et les systèmes de protection possibles, une autre sélection est effectuée en tenant compte des aspects financiers et esthétiques.

Ce processus présente l'avantage de prendre en compte l'ensemble du spectre des contraintes ainsi que les spécifications du maître d'ouvrage issues de l'accord d'utilisation. Un traitement de la durabilité puis la sélection des matériaux sont ensuite effectués sur la base d'une évaluation des risques. Cette première étape de sélection des matériaux comprend les étapes suivantes:

- Définition et délimitation du système
- Identification des risques: Les risques sont identifiés dans cette étape ainsi que la probabilité d'occurrence attendue et l'étendue des dommages causés par les événements sont déterminés. Le risque qui en résulte est un produit de la probabilité d'occurrence et de l'étendue du scénario de l'événement.
- Évaluation des risques: les risques identifiés à l'étape précédente sont évalués quant à leur acceptation. Cela signifie que des critères d'acceptation sont nécessaires pour déterminer si un risque peut être considéré comme acceptable.
- Planification des mesures: si l'analyse identifie des risques qui ne sont pas classés comme acceptables, des mesures de réduction des risques doivent être définies et leur efficacité doit être vérifiée. Les mesures peuvent être de nature technique, opérationnelle ou organisationnelle. L'évaluation de la proportionnalité d'une mesure compare la réduction du risque à l'effort.

Cette approche aboutit à un processus fermé qui permet de sélectionner les matériaux et les systèmes de protection contre la corrosion pour les composants EES sur la base de l'accord d'utilisation et de l'évaluation des risques. Cette approche permet d'appliquer concrètement différentes stratégies. Il est ainsi possible, par exemple, d'utiliser des matériaux avec une protection moindre contre la corrosion pour certains composants, à condition de gérer correctement les risques accrus qui en résultent. Ces mesures comprennent notamment:

- Des mesures techniques de nature constructive ou comme niveau de repli
- Choix d'un autre matériau ou système de protection
- Mesures opérationnelles ou organisationnelles

L'efficacité d'une mesure doit être vérifiée dans chaque cas en déterminant à nouveau le risque (après la mesure) et en l'évaluant dans la matrice des risques. Afin d'évaluer la proportionnalité d'une mesure, son efficacité doit être comparée à l'effort nécessaire à sa mise en œuvre. L'évaluation des risques peut déboucher sur différents scénarios de matériaux et de protection, qui conduisent à des risques comparables. Leur différenciation ultérieure doit avoir lieu sur la base d'une considération globale des coûts dans la sélection des matériaux lors de la deuxième étape. L'outil utilisé pour le calcul des coûts du cycle de vie est le Life Cycle Costing (LCC), qui évalue les flux de coûts et financiers des alternatives d'investissement sur leur durée de vie utile. Cela est destiné à minimiser les coûts du cycle de vie en comparant les variantes.

La présente étude développe une approche basée sur les risques pour la matérialisation des composants EES basée sur la littérature, les normes et les valeurs empiriques. Cela permet de prendre en compte l'interaction mutuelle des différents facteurs d'influence. Cette approche permet la sélection des matériaux ainsi que des systèmes de protection contre la corrosion qui assurent une durée de vie optimale en tenant compte de facteurs externes tels que les coûts, la disponibilité et la maintenance. Au lieu d'une spécification stricte des matériaux, une approche optimisée basée sur l'accord d'utilisation, l'évaluation des risques et l'évaluation des coûts totaux est possible sur la base d'une évaluation du système. Cette approche permet de prendre en compte des mesures qui assurent de maintenir les risques dans les limites requises. Ces mesures techniques comprennent des adaptations constructives (par. ex. dispositif de retenue), des modifications matérielles (par. ex. un système de protection de qualité supérieure) ou des mesures organisationnelles (par. ex. le remplacement complet des composants après 15 ans). Cela permet des mesures de planification et de prendre en compte les conditions spécifiques des différents objets.

Summary

There are over 250 road tunnels in the national road network. This corresponds to around 300 kilometres of tunnels. The majority of these tunnels have operating and safety equipment installed in the traffic area that is exposed to the aggressive climate in the tunnel. This is why so many maintenance projects are needed to repair the damage caused by corrosion and ensure the use of the roads in the tunnel remains safe and reliable. As a rule, work in the traffic area of road tunnels is cost and labour intensive since it can normally only be done at night.

That is why choosing the right kind of materials and a suitable form of corrosion protection is a key part of the planning, implementation and maintenance of operating and safety equipment components in tunnels. A poor choice of materials or inappropriate corrosion protection systems can represent considerable safety risks and entail high follow-up maintenance and repair costs. This leads to unwanted delays in traffic. The level of cases of damage in recent years has been enough to warrant attention. By the same token, too much corrosion protection is uneconomical and should also be avoided.

Selecting the right material for operating and safety equipment components is therefore of central importance and has a big impact on the bottom line. The problem lies in the fact that corrosion resistance can only be properly understood as part of a system's performance. The service life of a component is determined by the specific properties of the materials, corrosion protection system, ambient medium in the tunnel and the structural and operational framework conditions. The interaction between all these factors means that even high-quality materials can fail under extreme climatic conditions, if there are gaps in the structures and if there isn't enough maintenance. The system's performance is then determined by the conditions in the tunnel that are further exacerbated by the following factors:

- The atmosphere created in the tunnel during its use is only partially a result of the external climatic conditions. It is primarily determined by object-specific factors.
- On the other hand, the atmosphere in the tunnel only has a limited impact with regard to the corrosion-relevant micro-climate that develops on the operating and safety equipment components when the tunnel is in use. The detailed engineering work, and local humidity levels and temperature distribution have much more of an impact in this regard.
- The de-icing salt using nowadays also contains calcium and magnesium chloride, which make it much more difficult for the tunnel to dry out and they create more aggressive conditions.
- If the tunnel is inspected and cleaned on a regular basis, this can ensure, to a limited extent, that the safety-relevant components are serviced and assessed

Because there are so many influencing factors, it is not possible to test the corrosion behaviour of the various materials and corrosion protection systems under defined laboratory conditions in accelerated tests. Likewise the specific removal of components from different tunnels is only partially expedient, as the limited number of tunnels and duration of the test is not likely to provide information that can be applied in general. This makes it very difficult to accurately forecast the relevant framework conditions. Without this knowledge, it is not possible to choose a corrosion protection system that would be adequate. This problem was addressed within the framework of this research project. This report provides practicable solutions for the economical realisation of operating and safety equipment components. These were compiled on the basis of evaluations of empirical knowledge and the systematic recording of empirical knowledge with existing systems, combined with theoretical considerations and the inclusion of constructive conditions.

That is why the current research project draws on the empirical knowledge gained from the operation of road tunnels. The empirical knowledge actually relevant to the operation was therefore assessed. It served as the basis for the further development of solutions for the

future planning and operation of tunnels. The following materials were included as part of the project: stainless steel, galvanised steel and/or coated as well as aluminium alloys.

The assessment of the cases of damage, inspections and surveys revealed that the same components under the same level of exposure in the tunnels exhibited significant differences in terms of the extent of their corrosion. In addition, different materials and corrosion protection systems are used in the same tunnel for the same applications. It was found that the documentation available is often insufficient in terms of execution details and actual exposure. This notwithstanding, specific conclusions could be drawn:

Stainless steel Group II according to SIA 179 (e.g. 1.4301 or A2): Significant signs of corrosion were often found on exposed surfaces. Signs of corrosion were particularly pronounced where there were gaps around the fittings.

Stainless steel Group III according to SIA 179 (e.g. 1.4571 or A4): Only a few signs of corrosion were detected on the exposed surfaces and the advancement of the corrosion is comparatively low here. This is also the case according to feedback from maintenance where elements from Group III are described as being problem-free. In contrast to this, signs of corrosion are often reported where there are gaps in elements belonging to Group III. In one particular case, stress corrosion cracking was observed on a screw belonging to Group III (A4). Likewise, high pitting corrosion rates and breaks in the walls were observed on the sheet metal casing of jet fans where there were large gaps. When subjected to the same exposure, the advancement of the corrosion in Group III components is significantly lower than that of elements from Group II, both on exposed surfaces and in the gaps.

No pitting corrosion or other signs of corrosion were reported on stainless steel components from Groups IV and V according to SIA 179. Laboratory tests detected reduced resistance in the outermost layer of the surface in a case with new fasteners. This was attributed to faulty workmanship. This highlights the importance of proper workmanship and the post-treatment of stainless steel components.

Elements made from aluminium alloys: Signs of severe corrosion and even damage from corrosion can arise in the case of uncoated aluminium components. It must therefore be assumed that even highly resistant aluminium materials will show signs of corrosion under the aggressive conditions in the tunnel. If the aluminium components are coated they will be well protected, provided the coating is intact and does not flake off. With the white corrosion products, the signs of corrosion can be easily identified on the aluminium. However, the extent of the corrosion, and therefore the subsequent damage, is more difficult to gauge.

Elements made from galvanised steel: The outer layer of zinc carbonate protects the base metal of zinc against corrosion. Under typical exposure conditions in tunnels, its use is limited on account of the high removal rate of metal caused by corrosion. However, hot-dip galvanised steel structures with additional coatings (duplex coating) are able to provide longer and technically realistic periods of protection.

Based on the surveys, investigated cases of damage as well as the argument on climatic conditions and unique qualities relating to corrosion protection, it becomes evident that there is no ideal solution with regard to choice of protection for the materials or against corrosion. Given the diversity of these requirements, a process was developed to describe the relevant influential variables and help with the planning. This process is based on the following documents and aspects:

- The User Agreement: This governs the usage and protection objectives. It contains all the aspects involved in the selection of materials and protection systems.
- First stage in the selection of materials: The primary technical criteria are taken into account and used to identify the possible materials and protection systems.
- Second stage in the selection of materials: From these technically viable materials and protection systems, a further selection is made on the basis of financial and aesthetic considerations.

This process provides the benefit of taking into account the entire stress collective as well as the client's specifications from the User Agreement. The durability and choice of

materials is then processed on the basis of a risk assessment. The selection of materials in the first stage goes through the following steps:

- The definition and delimitation of the system
- Identifying the risks: This step identifies the hazards and determines the anticipated probability of occurrence and extent of the damage resulting from the events. The resulting risk is a product of the probability of occurrence and the extent of the event scenario.
- Risk assessment: The risks identified in the previous step are evaluated for their acceptance. This means that acceptance criteria are needed to determine whether a risk can be considered as acceptable or not.
- Action planning: If the analysis identifies risks that are not deemed acceptable, measures to mitigate these risks must be defined and tested for their effectiveness. Measures can be of a technical, operational or organisational nature. The assessment of the proportionality of a measure weighs up the risk reduction against the work and expenditure involved.

This approach creates a closed process that facilitates a selection of materials and corrosion protection systems for operating and safety equipment components based on the User Agreement and risk assessment. Different strategies can be applied with this approach. This makes it possible, for example, to use materials with lower corrosion protection for certain components, provided that the resulting increased risks are specifically addressed. These measures include:

- Technical measures for construction purposes or as a safety back-up
- Opting for a different material without a protection system
- Operational or organisational measures

The effectiveness of a measure must be checked by determining the risk again (according to the measure) and assessing it in the risk matrix. In order to assess the proportionality of a measure, its effectiveness must be compared with the work and expenditure required to implement it.

The risk assessment can yield different materials and protection scenarios that lead to comparable risks. These are to be further differentiated on the basis of a total cost analysis in the selection of materials in the second stage. Life Cycle Costing is the tool used to evaluate the cost and cash flows of investment alternatives over their useful life. The variants are compared in order to minimise the life cycle costs.

Working off reference literature, standards and empirical values, the present study puts forward a risk-based approach for the realisation of operating and safety equipment components. This makes it possible to take into account the mutual interaction of the various influencing factors. This approach permits a selection of materials and corrosion protection systems that offer an optimal service life while taking into account external factors such as cost, availability and maintenance. Working on the basis of a system assessment, a strict material specification can be replaced with an optimised procedure based on the User Agreement, the risk assessment and the total cost analysis. This approach makes it possible to consider measures that allow the risks to be kept within the necessary limits. These technical measures include constructive adjustments (e.g. catch mechanisms), material modifications (e.g. a higher-quality protection system) or organisational steps (e.g. the complete replacement of the components after 15 years). This facilitates planning measures and makes it possible to take into account the specific conditions of the various objects.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das Nationalstrassennetz umfasst über 250 Strassentunnel, was rund 250–300 Tunnelkilometer entspricht. Die Mehrzahl dieser Tunnel sind mit Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA-Komponenten) im Fahrraum ausgerüstet, die dem sehr aggressiven Tunnelklima ausgesetzt sind. Solche Komponenten sind z. B. Ventilatoren, Abluftklappen, Beleuchtungskörper, Trassen, Signalträger, Sensoren, Türen. Werden diese auf die Anzahl Tunnelobjekte / -kilometer hochgerechnet, so resultiert eine sehr grosse Menge an Komponenten in einer stark korrosiven Umgebung.

Diese Tatsache ist dafür verantwortlich, dass unzählige Instandhaltungsprojekte zur Behebung von Korrosionsschäden nötig sind, um den zuverlässigen und sicheren Betrieb aufrecht zu erhalten. Massnahmen im Fahrraum von Strassentunnel sind grundsätzlich kostenintensiv, da sie in der Regel nur nachts und mit relativ viel Aufwand (Sperrung, Hebebühnen, Bewilligungen, Inspektionen, ...) durchgeführt werden können. Beispielhaft sei z. B. ein Sanierungsprojekt an 14 zehnjährigen Strahlventilatoren erwähnt, welches Kosten in der Höhe von CHF 300'000–450'000 verursacht, abhängig von der gewählten Variante. Dies ist kein Einzelfall, sondern vielmehr die Regel.

Wird die Gesamtheit der Tunnels, die Vielfalt der kritischen BSA-Komponenten und die vorgesehene Nutzungsdauer in Betracht gezogen, resultieren hohe Kosten, die auf Korrosion zurückzuführen sind. Davon ist ein Teil unvermeidbar, denn die Korrosion kann nicht unterbunden, sondern nur verlangsamt werden). Ein recht hoher Anteil jedoch ist auf Probleme zurückzuführen, welche durch angemessene Massnahmen verhindert werden könnten.

Die zweckmässige Materialwahl, verbunden mit einem geeigneten Korrosionsschutz, ist ein zentrales Thema in der Planung, Ausführung und Wartung der BSA-Komponenten in Tunneln. Eine ungenügende Materialwahl resp. ungeeignete Korrosionsschutzsysteme können einerseits ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen, andererseits können hohe Folgekosten für die Instandhaltungs- und Reparaturmassnahmen entstehen und es können unangenehme Verkehrsbehinderungen resultieren. Schadensfälle sind in den letzten Jahren in nicht vernachlässigbarer Anzahl eingetreten. Andererseits ist ein übertriebener Korrosionsschutz unwirtschaftlich und ebenfalls zu vermeiden. Im Unterschied zum ungenügenden Fall, bleibt die Übererfüllung des Korrosionsschutzes in der Regel unentdeckt.

Die Korrosionsprozesse von BSA-Komponenten sind von vielen Variablen abhängig. Die folgenden primären Problematiken bestehen:

1. Unklare Grundlagen: Für die Evaluation optimaler Werkstoffe und Korrosionsschutzsysteme ist die Kenntnis der möglichen Korrosionssysteme inkl. der Beanspruchungskollektive notwendig, ebenso das Ausfallverhalten der typischen Werkstoffe resp. Korrosionsschutzsysteme, sowie der Nutzungsdauer / Schutzdauer. Während die Aggressivität der Tunnelluft als quasi-Ortsklima einigermaßen bekannt ist, bestehen beispielsweise Unsicherheiten zum Kleinklima (z. B. Wirkung von Partikeln, Schadstoffen und Aerosolen).
2. Änderung der Beanspruchungen: Durch die Zunahme von modernen aber zugleich aggressiveren Tausalzen (mit Anteilen Calcium- und Magnesiumchlorid) in Kombination zum Natriumchlorid entstehen erhöhte Beanspruchungen für die Korrosionsschutzsysteme. Bis anhin vermeintlich beständige Werkstoffe korrodieren deutlich und schneller, sodass die erwartete Nutzungsdauer nicht sicher erreicht wird oder die Sicherheit nicht mehr gewährleistet ist.
3. Ungünstiges Design: Korrosionsschutz ist nur so gut wie seine Schwachstelle. Bereits im Design und bei der Werkstoffwahl, sowie bei Details der Ausführung und insbesondere auch bei der Montage, entstehen Schwachstellen, welche vermeidbar gewesen wären und welche zu verfrühter Korrosion führen.

4. Sicherheit und Werkstoffwahl: Die Sicherheit resp. die Tragsicherheit hat für gewisse Bauteile oberste Priorität. Hierzu gehört auch, dass das Ausfallverhalten der Werkstoffe bekannt und entsprechend berücksichtigt wird, und zwar im Design, in der Ausführungsphase und in der Nutzungsphase (Inspektion, Kontrollen). Vermehrt lässt sich feststellen, dass mit dem Einsatz von „V4A“ (z. B. 1.4571) auf vermeintlich einfache Weise versucht wird, Korrosionsprobleme zu lösen. Die Folgeprobleme (Lochfrass, Spannungsrisskorrosion, heikle Verarbeitung, schwierige Kontrollen, Reinigung, etc.) und die hohen Materialkosten werden kaum berücksichtigt. Ähnliches gilt für „Halterungen“, für die gemäss ASTRA TM 23 001-12120 [73] nur nichtrostende Stähle, Gruppe V (gemäss SIA 179 [4]) zulässig sind. Dies bedeutet faktisch, dass für eine Aufhängung eines Strahlventilators nur noch sehr wenige und schwierig zu beschaffenden Werkstoffen in Frage kommen. Wo die Schnittstelle zum Gehäuse liegt und wie die Verbindung realisiert wird, ist weitgehend ungeklärt.
5. Unzureichende Schutzdauer: Die erwartete Schutzdauer wird selten erreicht. Duplexsysteme reagieren beispielsweise aufgrund der Zusatzbeanspruchungen nicht wie erwartet und erreichen markant reduzierte Schutzdauern. Nachbesserungen und Instandstellung vor Ort für gewisse Korrosionssysteme sind zu zeitraubend und zu kostenintensiv, sowie qualitativ anspruchsvoll und folglich bezüglich der tatsächlich erreichten Schutzqualität bedenklich.
6. Nachhaltiger Unterhalt als korrosionstechnisch korrekt ausgeführte Instandstellung ist vor Ort, trotz eingeschränkter Nutzung, nur schwierigste machbar. Nachbesserungen und Instandstellung vor Ort für gewisse Korrosionssysteme sind zu zeitraubend und zu kostenintensiv, sowie qualitativ anspruchsvoll und folglich bezüglich der tatsächlich erreichten Schutzqualität bedenklich.
7. Unzureichende Ausführungskontrollen: Ausführungskontrollen mit Verfahrensprüfungen oder Prüffolgeplänen mit Haltepunkten fehlen. Die Nutzungsdauer sowie die Schutzdauer als wichtige Grundlage für die Wahl des Korrosionsschutzsystems, wird zu wenig berücksichtigt. Bei Korrosionsschutzsystemen mit Feuerverzinkung und Beschichtung („Duplexsystem“) wird bezüglich Anforderungen für den Stahl, den Untergrund, der Ausführung und der Qualitätskontrolle sowohl der Feuerverzinkung als auch der Ausführung der Deckbeschichtungen zu wenig Beachtung geschenkt. Montageverletzungen werden nicht fachgerecht ausgebessert. Bei der Behebung von Montageverletzungen oder Gewährleistungsmängeln wird „gespart“.
8. Im Tunnel haben sich als nichtrostende Stahlwerkstoffe die Stähle 1.4529 (Befestigungen) und 1.4571 (restliche Anwendungen) durchgesetzt. Letztgenannter ist ein Ur-Produkt aus der Zeit, in welcher noch keine tiefgeköhlten Stähle (z. B. 1.4404) hergestellt werden konnte. Zudem zeigt sich anhand von Schadensfällen, dass der Werkstoff 1.4571 der korrosiven Atmosphäre im Tunnel nicht immer zuverlässig genügt. Hier ist der Wirksamkeitsbetrachtung vermehrt Beachtung zu schenken. Demgegenüber ist zu hinterfragen, ob die stetig zunehmenden Anforderungen an die Werkstoffe für alle Bauteile berechtigt sind. Beispielsweise wäre bei Bauteilen, an bei denen über Jahre keine Schäden bekannt sind, eine Reduktion der Werkstoffqualität zu untersuchen.
9. Die Anforderungen an den Korrosionsschutz in Ausschreibungen für BSA werden, ohne ersichtlichen Grund, sehr unterschiedlich und oft zu unpräzise definiert. Dies birgt vergaberechtliche Risiken und führt nicht selten zu langwierigen Verhandlungen während der Ausführung.
10. Die Anforderungen betreffend Materialpaarung, Herstellung, Lieferung und Lagerung wird häufig vernachlässigt.
11. Die Kontrolle und Wartung der Bauteile (Reinigung z. B. von nichtrostenden Stählen) bezüglich Korrosion ist in vielen Fällen unzureichend.
12. Es werden z.T. Materialien gefordert, die für gewisse Halbzeuge und Bauteile nicht erhältlich und/oder nicht zweckmässig sind.
13. Anweisungen für die Gesamtkostenbetrachtungen fehlen in diversen vorhandenen Planungsgrundlagen oder werden in den Nutzungs- und Sicherheitsvereinbarungen nicht ausreichend dargelegt.

Insgesamt besteht ein grosses Einsparpotential während der Nutzungsdauer des Produktes.

1.2 Auftrag

Zwischen etwa 1985 und 2000 wurden von der Hilti AG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe, Werkstoffe und Korrosion (IBWK) der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) -Zürich umfangreiche Forschungsarbeiten zum Korrosionsverhalten von Befestigungselementen in Strassentunneln (vgl. [76], [77] und [78] und Kap. 3.4.8) durchgeführt, wobei schwerpunktmässig nichtrostende Stähle untersucht wurden. Zum Verhalten von C-Stählen mit handelsüblichen Korrosionsschutzbeschichtungen und Aluminiumlegierungen sind keine entsprechenden Forschungsarbeiten bekannt. An solchen Bauteilen sind aber in der Vergangenheit verschiedentlich Schäden bekannt geworden, ohne dass deren Ursache systematisch untersucht resp. Lehren daraus gezogen wurden. Die systematische Untersuchung des Korrosionsverhaltens in Tunnelanwendungen mittels Langzeitversuchen wäre somit wünschenswert, aber mit einem grossen Aufwand und einem langen Zeithorizont verbunden.

Im vorliegenden Forschungsbericht wird durch die Auswertung bekannter Erfahrungen und die systematische Erfassung der Erfahrungen mit bestehenden Anlagen zusammen mit theoretischen Überlegungen und dem Einbezug konstruktiver Gegebenheiten die Grundlage für wirtschaftliche und praktikable Lösungen geschaffen werden können.

1.3 Forschungsziele

Im Forschungsprojekt werden die nachfolgend aufgeführten und mit römischen Ziffern bezeichneten Hauptthemen behandelt. Unterthemen in den Hauptthemen sind mit arabischen Ziffern aufgeführt. Die folgenden Forschungsziele werden in den einzelnen Haupt-/ Unterthemen verfolgt.

I) Literaturstudie Normen, Regelwerke

- 1) Zusammentragen und analysieren der aktuellen kantonalen, nationalen und internationalen Regelwerke sowie der gängigen Praxis (ASTRA, Tiefbauämter).
 - Die Zweckmässigkeit, Gültigkeit und Widersprüchlichkeit der gängigen Normen/ Regelwerke ist beurteilt.
 - Hinweise zur Anwendbarkeit der Schweizer Norm (SN) Europäische Norm (EN) Internationale Organisation für Normung (ISO) 12944 [15] und anderen typischen Korrosionsschutznormen sind geben
 - Unterschiedliche Begrifflichkeiten in den einzelnen Normen/ Regelwerken sind abgeglichen und definiert.

II) Analyse IST-Situation (2), (3), (4)

- 2) Analyse von aktuellen Schadenfälle:
 - Übersicht über aktuelle Schadenfälle und Erfahrungen in Strassentunneln ist erlangt.
 - Die Klärung der folgenden Fragen ist erfolgt:
 - „Wieso ist es zum Schaden gekommen?“
 - „Wie hätte der Schaden verhindert werden können?“
 - „Was kann aus dem Schaden gelernt werden?“
 - „Wo liegen die Unterschiede zu vergleichbaren Situationen ohne Schadensfolge?“
- 3) IST- Zustandsermittlung durch Umfrage bei Betreibern, Planern und Lieferanten
 - Eine Zuordnung der typischsten Mängel/ Schäden pro Korrosionssystem resp. pro Korrosionsschutzsystem ist erfolgt.
 - Eine Zusammenstellung der Erfahrungen der Betreiber und Lieferanten ob und wenn ja welche Schadenfälle bezüglich Korrosion im Zusammenhang mit BSA-Komponenten bekannt sind, ist erfolgt. Die Erfahrungen der Planer fliessen über das Forschungsteam ein.
 - Die Klärung der folgenden Frage ist erfolgt: Welche Korrosionsschutzsysteme und Materialien funktionieren in der Praxis gut (inkl. Einschätzung dazu warum das so ist)?

- Die Erfahrungen im Zusammenhang mit Korrosionsschutzsystemen im Unterhalt sind zusammengestellt.
- 4) IST- Zustandsermittlung durch Situationsaufnahme der aktuell eingesetzten Korrosionsschutzsysteme und Materialien
- Eine Charakterisierung der vorkommenden Korrosionssysteme („Werkstoff plus Medium“) ist für die ausgewählten Vertreter pro BSA-Gruppe erfolgt.

III) Korrosivität der Tunnelatmosphäre (5)

- 5) Beurteilung der Korrosivität der Tunnelatmosphäre (Tunnelklima- wie auch Kleinklima). Eine Beurteilung der Korrosivität der Tunnelatmosphäre im Hinblick auf das Tunnel- wie auch das Kleinklima ist erfolgt.
- 6) Erstellen von Gefährdungsanalysen von typischen BSA-Komponenten
 - Für die typischen BSA-Komponenten ist eine Gefährdungsanalyse erfolgt, aus der folgendes ersichtlich ist:
 - Risiko bei einem Defekt einer betrachteten BSA-Komponente
 - Korrosionsschutzsystem welches unter Berücksichtigung des Risikos bei einem Defekt einer BSA-Komponente am geeignetsten ist

IV) Materialien und Korrosionsschutzsysteme

- 7) Diskussion verschiedener Materialien und Korrosionsschutzsysteme für den Einsatz in Strassentunneln
 - Eine Darstellung der wichtigsten Aspekte bezüglich Materialwahl und Korrosionsschutz für korrosionsgefährdete BSA-Komponenten ist gemacht
 - Die Anforderungen an die Materialwahl und den Korrosionsschutz sind für die ausgewählten Vertreter pro BSA-Gruppe diskutiert der „best practice“ ist dargestellt.
 - Für die ausgewählten Vertreter pro BSA-Gruppe sind konkrete Empfehlungen betreffend Materialwahl und Korrosionsschutz, Konstruktion und Verarbeitung, Qualitätssicherung, Unterhalt und Wartung abgegeben.
 - Die Themen Herstellung, Verfügbarkeit und Anwendung von Korrosionsschutzsystemen ist in die Betrachtungen eingeflossen.
- 8) Gesamtkostenbetrachtung typischer BSA-Elemente inkl. Massnahmenmöglichkeiten
 - Eine Kosten-/ Nutzenbetrachtung von verschiedenen Korrosionsschutzsystemen für typische BSA-Komponenten ist gemacht.

V) Empfehlungen Planung bis Betrieb

- 9) Verfassen von Empfehlungen für Planung, Ausschreibung, Realisierung und Betrieb und Hinweise für die Anpassung der Regelwerke, z. B. SIA 179, Kap. 4.1 [4]:
 - Textpassagen für Ausschreibungen bezüglich Vorgaben an die Materialwahl und den Korrosionsschutz sind gemacht.
 - Hinweise für die Anwendung der SIA 179 Kap. 4.1 [4] liegen vor.
 - Konkrete Methoden / Prüfverfahren / Prüfpläne für Abnahme und Wartung werden sind vorliegend
 - Die Klärung der folgenden Frage ist erfolgt: Was muss in den einzelnen Projektphasen (Planung, Ausschreibung, Realisierung, Betrieb) beachtet werden damit dem Korrosionsschutz Genüge getan wird?
 - Konstruktive Vorschläge an den Schnittstellen von kritischen BSA-Komponenten sind gemacht (z. B. Schnittstelle Strahlventilator zu seiner Aufhängung)
 - Die Thematik „Korrosionsschutz und Garantie“ ist analysiert, Empfehlungen dazu sind abgeleitet.
- 10) Dokumentation der Forschungsarbeit in einem Schlussbericht
 - Genehmigter Schlussbericht mit praxisnahen Empfehlungen liegt vor
 - Vorhandene Beispiele für Checklisten/ Prüfpläne werden im Anhang des Gesamtberichts aufgeführt.

1.4 Vorgehen

Der Fokus der Forschung liegt auf folgenden BSA-Komponenten, welche erfahrungsgemäss bezüglich Korrosion anfällig sind, respektive ein grosses Kosteneinsparpotential bezüglich Korrosionsschutzsystemen und Unterhalt aufweisen (weitere Anmerkungen vgl. Kap. 7):

- Strahlventilatoren inkl. Aufhängung und Anker
- Kabeltrassen
- Abluftklappen
- Signalträger
- Sensoren, Beleuchtungskörper
- Türen

Die Arbeit wird in folgende Phasen gegliedert:

1. Zusammentragen und analysieren der aktuellen kantonalen, nationalen und internationalen Regelwerke (Richtlinien, Normen, Merkblätter, Weisungen, etc.) sowie der gängigen Praxis seitens ASTRA, Tiefbauämtern, etc. Insbesondere werden Aspekte wie die Zweckmässigkeit, Gültigkeit und Widersprüchlichkeit beurteilt.
2. Zusammentragen und analysieren von aktuellen Schadensfällen: Wieso ist es zu dem Schaden gekommen? Wie hätte der Schaden verhindert werden können? Was kann aus dem Schaden gelernt werden? Unterschied zu vergleichbaren Situationen ohne Schadensfolge?
3. Umfrage bei Betreibern, Planern, Lieferanten zu Erfahrungen mit
 - Schadensfällen
 - Korrosionsschutzsystemen im Unterhalt
 - Herstellung, Verfügbarkeit, Anwendung von Korrosionsschutzsystemen
4. Situationsaufnahme der aktuell eingesetzten Korrosionsschutzsysteme und Materialien in Schweizer Strassentunneln. Begehungen und Situationsanalyse von repräsentativen Strassentunneln. Der Fokus betreffend Komponentenauswahl und Augenmerk wird anhand der analysierten Schadensfälle und der Ergebnisse aus der Umfrage festgelegt.
5. Beurteilen der Korrosivität der Tunnelatmosphäre (Tunnel- wie auch Kleinklima). Dabei wird insbesondere berücksichtigt, dass die Tunnelatmosphäre aufgrund von betrieblichen (z. B. Normalbetrieb, Tunnelreinigung, Ereignis), wie auch von örtlichen (z. B. Höhenlage, Taumiteileinsatz, Feuchtigkeit) und/oder verkehrstechnischen Gegebenheiten ((z. B. durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV), Lastwagenanteil (LW-Anteil)) sehr unterschiedlich sein kann. Die Tunnelatmosphären werden primär durch den Chlorid- und Schwefeldioxidgehalt, Festkörper (z. B. Russ und Abrieb), Tausalzeinsatz, Befuchtung und Reinigungsmittel charakterisiert.
6. Erstellen von Gefährdungsanalysen von typischen BSA-Komponenten in Strassentunneln als Basis für die Definition von Strategien.
7. Diskussion verschiedener Materialien und Korrosionsschutzsysteme für den Einsatz in Strassentunnel. Dabei werden Themen wie Korrosionsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit, Kosten, Verfügbarkeit, etc.) diskutiert.
8. Gesamtkostenbetrachtung für typische BSA-Komponenten inkl. Massnahmenmöglichkeiten unter Berücksichtigung der Kosten für Herstellung, Korrosionsschutz und Unterhalt. Die Kostenbetrachtung wird unter Berücksichtigung der gesamten Nutzungsdauer inklusive allfälliger Ausbesserungen oder Erneuerungen des Korrosionsschutzsystems oder Austausch der Komponenten bei reduzierter Nutzungsdauer geführt. Ebenso wird berücksichtigt, dass gewisse Komponenten durch den raschen technologischen Wandel nach relativ kurzer Zeit (15 Jahre) ohnehin ausgewechselt werden und folglich der Korrosionsschutz „nur“ auf diese Zeit ausgelegt werden soll.
9. Verfassen von Empfehlungen für Planung, Ausschreibung, Realisierung und Betrieb und Hinweise für die Anpassung der Regelwerke, z. B. die SIA 179, Kap. 4.1 [4].
10. Dokumentation der Forschungsarbeit in einem Schlussbericht.

Die BSA-Komponenten bestehen aus verschiedenen Werkstoffen und Korrosionsschutzsystemen mit unterschiedlichen, spezifischen Eigenschaften. Die Materialisierung hat sich bis heute aus den Bedürfnissen des Marktes und gewisser Erfahrungen entwickelt. Mittlerweile bestehen vereinfacht gesagt zwei Gruppen von „Schutzphilosophien“:

- Einsatz metallischer Werkstoffe mit einer erhöhten Beständigkeit wie nichtrostender Stahl und Aluminium
- Einsatz metallischer Werkstoffe mit einer geringen Beständigkeit wie unlegierter Stahl oder Aluminium, welche einen zusätzlichen Schutz wie z. B. eine Beschichtung benötigen

Für diese Forschungsarbeit wird eine korrosionstechnisch gut bekannte und auch hier sinnvolle Unterteilung getroffen, welche diese zwei Gruppen abbildet:

„Aktiver Korrosionsschutz“: Metalle / Metalllegierungen mit einer sog. Passivschicht und sehr geringer Metallauflösung in bestimmter Umgebung. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Werkstoffgruppen betrachtet

- nichtrostender Stahl
- Aluminiumlegierungen

Passiver Korrosionsschutz: Unlegierter oder niedriglegierter Stahl, der ohne weiteren Schutz korrodieren würde und deshalb entweder mit einem metallischen Überzug und/oder einer Beschichtung geschützt wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Systeme berücksichtigt:

- Stahl beschichtet
- Stahl feuerverzinkt (Bandverzinkung, Stückgut-Feuerverzinkung)
- Stahl feuerverzinkt plus beschichtet (Duplexsystem)

Die Forschungsthemen werden wo sinnvoll möglich in den Fachbereichen „Nichtrostender Stahl und Aluminium“ und „Metallischer Überzug und Beschichtungen“ bearbeitet.

Die in der Forschungsarbeit abgeleiteten Erkenntnisse und Empfehlungen werden allgemein verfasst, d.h. bei den Empfehlungen wird auf eine Unterscheidung in die oben aufgeführten Fachbereiche verzichtet. Somit wird das Thema „Materialwahl und Korrosionsschutz für korrosionsgefährdete BSA-Komponenten in Strassentunneln“ gesamthaft abgehandelt.

1.5 Abgrenzung

Die folgenden Abgrenzungen gelten für den vorliegenden Forschungsbericht:

- Die Untersuchungen beziehen sich örtlich ausschliesslich auf Strassentunnel des schweizerischen Strassennetzes. Es werden ausschliesslich Komponenten betrachtet, die sich im Kontakt mit der Tunnelatmosphäre befinden (primär Fahrraum). Offene Strecken werden nicht berücksichtigt.
- Die messtechnische Erfassung der Korrosivität der Tunnelatmosphäre ist nicht vorgesehen, da dadurch nur lokale Momentaufnahmen erstellt werden und wichtige und stark veränderliche Einflussfaktoren wie Tausalzeinsatz, Verkehrsmenge, Wetter etc. nur mit enormem Aufwand erfasst werden können. Dies ist im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes nicht möglich und für die Zielerreichung nicht erforderlich.
- Auslagerungsversuche sind auf Grund der langen Standdauer nicht vorgesehen und ebenfalls für die Zielerreichung nicht erforderlich.
- Zwischendeckenaufhängungen und Metallkonsolen auf denen Zwischendecken aufgelegt werden, sind aus dem Forschungsprojekt ausgegrenzt.
- Lärmschutzverkleidungen sind aus dem Forschungsprojekt auszugrenzen, sie gehören auch nicht zur BSA. Die Thematik wird im Gesamtbericht im weiteren Vorgehen behandelt, dort wird vorgeschlagen, einen Nachfolgebericht dazu zu erstellen.
- Die Thematik „Dauerhaftigkeit von Bewehrung“ wird aus dem Forschungsprojekt ausgegrenzt. Die Thematik „Dauerhaftigkeit von Ankern“ wird nur im Hinblick auf das Forschungsziel 9 „Verfassen von Empfehlungen für Planung, Ausschreibung, Realisierung und Betrieb und Hinweise für die Anpassung der Regelwerke, z. B. SIA 179, Kap. 4.1“ behandelt, alle weiteren Anker spezifischen Aspekte werden aus dem Forschungsprojekt ausgegrenzt.

- Die folgenden Normen/ Regelwerke/ Merkblätter waren während der Erstellung des vorliegenden Forschungsberichtes in Überarbeitung und werden darum ausgegrenzt:
- Das Forschungsprojekt berücksichtigt die Erfahrungswerte der letzten ca. 20 Jahre mit den entsprechenden Betriebs- und Randbedingungen. Beispielsweise können Veränderungen in der Abgaszusammensetzung, im Unterhalt oder in der Tausalzzusammensetzung zu abweichenden Ergebnissen führen.
- Die Thematik „Schachtabdeckungen in Tunneln“ wird aus dem Forschungsprojekt ausgegrenzt.

1.6 Begriffdefinitionen

In dieser Arbeit sind unterschiedliche Werkstoffe zu betrachten, die über unterschiedliche Definitionen zu korrosionsrelevanten Aspekten und nachfolgend (vereinfacht und gekürzt) beschrieben sind.

Einleitend und zum gemeinsamen Verständnis werden die folgenden wichtigsten Begriffe definiert (Die meisten Definitionen erfolgen auf Basis der EN ISO 8044:2015 [45]).

1. Bereich Korrosionswesen

- Korrosion
- *corrodere* [lateinisch]: zernagen, zerstören, zersetzen
- Physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann. [45]
- Korrosionserscheinung
- Korrosionserscheinung, die eine Beeinträchtigung der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, verursacht [45].
- Durch Korrosion verursachte Veränderung in einem beliebigen Teil des Korrosionssystems [45].
- Korrosionssystem
- System, das aus einem oder mehreren Metallen und allen Teilen der Umgebung besteht, die die Korrosion beeinflussen. [45]
- Hinweise:
- Der Begriff „Umgebung“ umspannt das „Korrosionsmedium“, welches aus Angriffsmitteln besteht, sowie auch Teile der Umgebung wie z. B. Beschichtungen, Oberflächenschichten.
- Vereinfacht ausgedrückt besteht das Korrosionssystem aus „*Werkstoff im Korrosionsmedium*“.
- Da die Bearbeitung der Werkstoffe von Einfluss ist auf die „Beständigkeit“ dient für die praktische Anwendung die Betrachtung eines erweiterten Korrosionssystems aus „*verarbeiteten Werkstoffen im Beanspruchungskollektiv*“
- Korrosivität
- Fähigkeit eines Korrosionsmediums, in einem gegebenen Korrosionssystem Korrosion zu verursachen [45]
- Angriffsmittel
- Stoff, der Korrosion verursacht, wenn er mit einem Metall in Berührung kommt. [45]
- Korrosionsmedium
- Umgebung, die ein oder mehrere Angriffsmittel enthält. [45]
- Korrosionsversagen
- Korrosionsschaden, gekennzeichnet durch den vollständigen Verlust der Funktionsfähigkeit des technischen Systems. [45]
- Rost
- Sichtbares Korrosionsprodukt, das hauptsächlich aus hydratisierten Eisenoxiden besteht. [45]

- Korrosionswahrscheinlichkeit
- Qualitativer und/oder quantitativer Ausdruck für die erwarteten Korrosionserscheinungen in einem definierten Korrosionssystem. [45]
- Nutzungsdauer
- Zeitabschnitt, in dem das Korrosionssystem, die Anforderungen an die Funktionsfähigkeit erfüllt. [45]
- Angriffstiefe
- Entfernung zwischen einem Punkt auf einer durch Korrosion beeinträchtigten Metalloberfläche und der ursprünglichen Oberfläche des Metalls. [45]
- Örtliche Korrosion
- Korrosion, die vorzugsweise an bestimmten Stellen der dem Korrosionsmedium ausgesetzten Metalloberfläche abläuft. Anmerkung: Örtliche Korrosion kann z. B. zu Löchern, Rissen oder Gräben führen. [45]
- Gleichmässige Flächenkorrosion
- Allgemeine Korrosion, die mit nahezu gleicher Geschwindigkeit auf der gesamten Oberfläche abläuft. [45]
- Lochkorrosion
- Örtliche Korrosion, die zu Löchern führt, d.h. zu Hohlräumen, die sich von der Oberfläche in das Metallinnere ausdehnen. [45]
- Spaltkorrosion
- Örtliche Korrosion in Zusammenhang mit Spalten, die in bzw. unmittelbar neben einem Spaltbereich abläuft, der sich zwischen der Metalloberfläche und einer anderen Oberfläche (metallisch oder nichtmetallisch) ausgebildet hat. [45]
- Interkristalline Korrosion
- Korrosion in oder neben den Korngrenzen eines Metalls. [45]
- Spannungskorrosion
- Vorgang, bei dem Korrosion und Dehnung des Metalls als Folge innerer und aufgebrachtter Zugspannungen beteiligt sind. [45]
- Rissbildung als Folge von Spannungskorrosion. [45]
- Passivierung
- Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit durch Bildung einer Passivierungsschicht. [45]
- Passiver Zustand
- Zustand eines Metalls als Folge von Passivierung. [45]
- Passivierungsschicht / Passivschicht
- Dünne, festhaftende Schutzschicht, die sich auf der Metalloberfläche durch Reaktion zwischen dem Metall und der Umgebung gebildet hat. [45]
- Atmosphärische Korrosion
- Korrosion mit der Erdatmosphäre – bei Umgebungstemperatur – als Korrosionsmedium. [45]
- Örtliche Umgebungsbedingungen
- Die um ein Bauwerk herrschenden atmosphärischen Bedingungen. Anmerkung: Diese Bedingungen bestimmen die Korrosivitätskategorie. Sie schliessen meteorologische Parameter und Einflüsse durch Verunreinigungen ein. [45]
- Kleinklima
- Die Bedingungen an der Grenzfläche zwischen einem Bauteil und seiner Umgebung. Das Kleinklima ist einer der entscheidenden Faktoren zur Bewertung von Korrosionsbelastungen. [15]
- Befeuchtungsdauer
- Zeitdauer, während der eine metallische Oberfläche mit einem adsorbierenden und/oder flüssigen Elektrolytfilm bedeckt ist, der in der Lage ist, atmosphärische Korrosion hervorzurufen. [45]

2. Bereich Bauwesen

- Die in dieser Arbeit betrachteten Komponenten betreffen die Produktgruppen „Maschinen“ und „Bauprodukte“ (z. B. Tragwerke in der Form von Signalträgern, Aufhängungen von Strahlventilatoren).
- Aus diesem Bereich des Bauwesens sind weitere Begriffe mit teilweise anderen Definitionen von Bedeutung. Nachfolgend eine Auswahl:
- Dauerhaftigkeit [35]
 - Die Dauerhaftigkeit gemäss [35] bezieht sich ausschliesslich auf Korrosion. Durch fachgerechte Festlegungen wird sichergestellt, wie Korrosion zu vermeiden ist oder wie Korrosion durch entsprechende Korrosionsschutzregelungen zu begrenzen ist.
 - Die Dauerhaftigkeit von Bauteilen hängt von ihrer Verwendung, von den Umgebungsbedingungen und von etwaigen Oberflächenbehandlungen ab.
 - Werden Bauteile aus Stahl oder Aluminium regelgerecht gestaltet und hergestellt, ist mit einer Verschlechterung ihrer Eigenschaften nur dann zu rechnen, wenn Korrosionen auftreten kann. Korrosion kann durch geeignete Korrosionsschutzmaßnahmen nachhaltig vermieden werden. Die vorgesehene Lebensdauer eines Bauteils wird durch entsprechende Wartung erreicht
 - Bei Bauteilen aus witterungsbeständigem Stahl nach EN 10025-5 [46] oder aus nichtrostendem Stahl nach EN 10088 [11] lässt sich die Lebensdauer des Bauteils abschätzen. EN 1993-1-4 [41] enthält Hinweise zur Dauerhaftigkeit von nichtrostendem Stahl
 - EN 1090-2 [36] und EN 1090-3 [37] enthalten Hinweise für das Aufbringen von Korrosionsschutzsystemen sowie Anforderungen an die Vorbehandlung der Stahl- bzw. Aluminiumoberfläche. Die Wahl des Schutzsystems hängt von den Umgebungsbedingungen ab
 - Es existiert kein direktes Prüfverfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit. Diese wird indirekt durch eine Prüfung der Umgebungsbedingungen beurteilt, in Verbindung mit den in der Bauteilspezifikation angegebenen Anforderungen an den Oberflächenschutz.
- Bauprodukt
 - Jedes Produkt (Bausatz) das hergestellt wird und in Verkehr gebracht wird, um dauerhaft in Bauwerke oder Teile davon eingebaut zu werden, und dessen Leistung sich auf die Leistung des Bauwerkes im Hinblick auf die Grundanforderungen an Bauwerke auswirkt
- Bauwerk
 - Bauten sowohl des Hoch- als auch des Tiefbaus. Alles was baulich erstellt wird oder von Bauarbeiten herrührt.
- Tragfähigkeit [35]
 - Wert oder mehrere Werte für die Lasten, die vom Bauteil getragen werden können. Die Werte beziehen sich entweder auf eine einzelne Belastungsart und -richtung oder auf mehrere Lasten, die in verschiedenen Richtungen wirken, sowie auf einen festgelegten Tragfähigkeitswiderstand nach EN1990 [38] und den maßgebenden Teilen von EN 1993 [39], EN 1994 [42] oder EN 1999 [43]. Für Bausätze bezieht sich die Tragfähigkeit auf vom Bausatz aufgenommene Lasten und Lastkombinationen, die für das Tragwerk bei der vorgesehenen Verwendung maßgebend sind.
 - ANMERKUNG Der Begriff „Tragfähigkeit“ bezieht sich in dieser Europäischen Norm EN 1090 [35] auf Fälle, bei denen die Belastungen vorwiegend ruhend sind, sodass der Einfluss von sich wiederholenden Belastungen mit einem Ermüdungspotential nicht berücksichtigt werden muss. Die Kriterien für die Berücksichtigung von Ermüdung sind für Stahlbauteile in EN 1993 [39] und für Aluminiumbauteile in EN 1999 [43] angegeben.
- Tragende Bauteile
 - Bauteile zur Sicherstellung der mechanischen Festigkeit und Stabilität und/oder des Feuerwiderstandes unter Berücksichtigung von Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Tragende Bauteile können gegebenenfalls als solche direkt verwendet werden oder sind zum Einbau in ein Tragwerk vorgesehen
- Ausführungsklassen

- Ausführungsklassen 1 bis 4, bezeichnet als EXC1 bis EXC4, wobei die Anforderungen von EXC1 bis EXC4 ansteigen [35]. Die Ausführungsklasse wird bestimmt über die Schadensfolgeklasse, der Beanspruchungskategorie und der Herstellkategorie.
- Ausführungsklassen können für das gesamte Tragwerk, für einen Teil des Tragwerks oder für spezielle Details gelten. Ein Tragwerk kann mehrere Ausführungsklassen enthalten. Ein Detail oder eine Gruppe von Details wird normalerweise einer Ausführungsklasse zugewiesen. Allerdings muss die Auswahl einer Ausführungsklasse nicht notwendigerweise für alle Anforderungen gleich sein. Wird keine Ausführungsklasse festgelegt, gilt EXC2. Eine Auflistung der Anforderungen, die von den Ausführungsklassen abhängen, ist in A.3 enthalten.
- ANMERKUNG 1: Die Wahl der Ausführungsklassen hängt ab von Herstellungskategorien und Beanspruchungskategorien, in Verbindung mit den in Anhang B von EN 1990 [38] definierten Schadensfolgeklassen.
- ANMERKUNG 2: (siehe [36], Tab. A.3, 7.1): Die Anforderungen der Ausführungsklassen sind für geschweißte Bauteile an die Teile der EN ISO 3834 [18] gekoppelt:
- EXC3 und EXC4: Teil 2: Umfassende Qualitätsanforderungen
- EXC2: Teil 3: Standard-Qualitätsanforderungen
- EXC1: Teil 4: Elementare Qualitätsanforderungen
- Nutzungsdauer
- Die Nutzungsdauer ist insbesondere für die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Bedeutung. In Bezug auf die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit einer Kunstbaute während der geplanten Nutzungsdauer wird unterschieden zwischen den Bauteilen, welche keine Unterhaltsarbeiten benötigen und jenen, welche in regelmässigen Intervallen unterhalten oder ersetzt werden. Für die letzteren ist die vorgesehene Nutzungsdauer in der Projektbasis einzeln zu nennen.
- Die vorgesehene Nutzungsdauer beeinflusst die Wahl der konstruktiven Details, der Materialien und der Abmessungen. Das Auswechseln oder Instandsetzen von Verschleiss teilen und Elementen mit beschränkter Lebensdauer muss schon bei der Projektierung geplant werden mit dem Ziel, den Aufwand und die Verkehrsbehinderung auf ein Minimum zu beschränken.
- Nutzungsvereinbarung (Bundesamt für Strassen, Fachhandbuch Kunstbauten, Technisches Merkblatt 22001-24110: 2011, [71])
- Die Nutzungsvereinbarung ist auf Grund eines Dialoges zwischen Bauherrschaft und Projektverfassenden zu erstellen.
- Die Nutzungsvereinbarung ist gemäss der Richtlinie des ASTRA „Projektierung und Ausführung von Kunstbauten“ Anhang 5 [1] zu erstellen.
- Die Nutzungsvereinbarung ist stufengerecht, fallweise für das Globale Erhaltungskonzept, das Massnahmenkonzept und das Massnahmenprojekt sowie für das Generelle Projekt, das Ausführungsprojekt und das Detailprojekt, vom Projektverfasser und vom ASTRA-Projektleiter zu erarbeiten, verfeinern und gegenseitig zu unterzeichnen.
- Die Dokumentenvorlage gemäss [1] dient in erster Linie als Gedankenstütze für den Inhalt der Nutzungsvereinbarung in normalen Fällen. In Abhängigkeit des projektierten Objektes (Brücke, Stützwand, Schutzgalerie, Schallschutzwand, etc.) und der projektierten Arbeiten (Instandsetzung, Ausbau, Neubau) ist der Inhalt der Dokumentvorlage anzupassen und zu ergänzen: Die Dokumentvorlage ist nicht abschliessend und entbindet den Projektverfassenden in keiner Weise von seiner Verantwortung.
- In der Nutzungsvereinbarung sind im Allgemeinen aufgeführt (vgl. Anhang 5 [1]):
- Allgemeine Ziele für die Nutzung des Bauwerkes
- Umfeld und Drittanforderungen
- Bedürfnisse des Betriebes und des Unterhaltes
- Besondere Vorgaben des Kantons
- Normbezogene Bestimmungen
- Schutzziele und Sonderrisiken
- Tragwerkskonzept
- Das Tragwerkskonzept enthält:

- wesentliche Aussagen zur Form und zum Tragsystem der Kunstbauten
- Angaben zu den Abmessungen, Baustoffen und konstruktiven Details
- Hinweise zu den vorgesehenen Bauverfahren.
- Das Tragwerkskonzept ist in der Regel das Ergebnis eines Variantenstudiums. Hierfür werden verschiedene Varianten in Hinblick auf Erfüllung der Nutzungsanforderungen und Entwurfsrandbedingungen untersucht.
- Projektbasis
- Ausgehend vom Tragwerkskonzept sind die Nutzungszustände und Gefährdungsbilder durchzudenken und entsprechende Massnahmen zur Gewährleistung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sind festzulegen. Die Projektbasis beschreibt somit alle Gefährdungsbilder und alle massgebenden Nutzungszustände während der geplanten Nutzungsdauer, die bei der Projektierung zu berücksichtigen sind und sie enthält die dafür vorgesehenen Massnahmen zur Gewährleistung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Kunstbaute.
- Die Projektbasis ist die technische Umsetzung des Auftrages des Kantons, d.h. der Nutzungsvereinbarung, durch den Projektverfasser. Sie wird vom Projektverfasser erstellt und gegebenenfalls auf besonderen Wunsch des Kantons hin ergänzt.
- In der Projektbasis sind in der Regel folgende Punkte aufgeführt:
 - Die geplante Nutzungsdauer
 - Die betrachteten Gefährdungsbilder
 - Die betrachteten Nutzungszustände
 - Die Anforderungen an Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sowie die Massnahmen zur deren Gewährleistung
 - Die angenommenen Baugrundverhältnisse
 - Die wesentlichen Annahmen für die Tragwerks- und Berechnungsmodelle
 - Die akzeptierten Risiken: Die Projektbasis bezieht sich auf das ganze Bauwerk und deckt die Ausführungs- und Nutzungsphase ab. Die konkrete Erarbeitung der Projektbasis durch den Projektverfasser kann zu Anpassungen der Nutzungsvereinbarung führen, die aber vom Kanton gutgeheissen werden müsse

3. Bereich Passiver Korrosionsschutz

- Schutzdauer [15]:
- Erwartete Standzeit eines Beschichtungssystems bis zur ersten Teilerneuerung. Nach ISO 12944-5 dient der Rostgrad Ri 3 gemäss ISO 4628-3 als Kriterium für die Einstufung der Beschichtungssysteme hinsichtlich ihrer Schutzdauer.
- Hinweise:
 - Bei einem Rostgrad Ri 3 weist 1% der betrachteten Oberfläche Korrosion auf.
 - bei einem Duplexsystem bezieht sich die Schutzdauer auf die Haftfestigkeit des Beschichtungssystems auf dem verzinkten Untergrund
 - Die Nutzungsdauer kann länger sein als die Schutzdauer
 - Die Gewährleistungsfrist ist in der Regel kürzer als die Schutzdauer

2 Literaturstudie Normen, Regelwerke

2.1 Nichtrostender Stahl und Aluminium

Gemäss SN EN 10088-1:2014 [11] wird nichtrostender Stahl wie folgt definiert:

Nichtrostende Stähle enthalten mehr als 10.5% Chrom und höchstens 1.2 % Kohlenstoff.

In der gleichen Norm werden Werkstoffnummern für die nichtrostenden Stähle anhand der chemischen Zusammensetzung festgelegt. Ein verbreitetes Nachschlagewerk für nichtrostende Stähle stellt der "Stahlschlüssel" dar, in dem Werkstoffbezeichnungen, Werkstoffnummern und Hersteller für diverse Länder aufgeführt sind. Der Stahlschlüssel wird jährlich aktualisiert.

Nichtrostende Stähle können nach ihrer Gefügestruktur eingeteilt werden. Die grösste Bedeutung haben austenitische und ferritische Stähle sowie Duplexstähle. Duplexstähle enthalten sowohl Körner mit austenitischer als auch mit ferritischer Struktur.

Austenitische Stähle weisen ein kubisch-flächenzentriertes (Kfz) Gitter auf. Das Kfz-Gitter enthält 12 Gleitebenen. Austenitische Stähle weisen deshalb eine gute Kaltumformbarkeit auf. Die Streckgrenze ist eher gering. Im Gegensatz dazu weisen ferritische Stähle ein kubisch raumzentriertes (krz) Gitter auf. Dieses weist nur 8 Gleitebenen auf, was zu generell erhöhten Streckgrenzen führt. Damit sich ein Kfz-Gitter bildet, ist ein ausreichend hoher Gehalt an Austenitbildnern erforderlich. Oft ist daher der Nickelgehalt grösser als 8%. Die austenitischen nichtrostenden Stähle haben eine erhöhte Anfälligkeit auf Spannungsrisskorrosion im Vergleich zu ferritischen nichtrostenden Stählen.

Bei den Duplexstählen wird eine Kombination der Vorteile beider Strukturen angestrebt. Im Vergleich zum Austenit weisen sie einen geringeren Nickelgehalt auf, was auch einen günstigeren Preis zur Folge hat.

Der Zusatz von Molybdän verbessert die Lochkorrosionsbeständigkeit, die Zugabe von Titan oder Niob hat die Bildung von Karbiden zur Folge. Dies wiederum unterdrückt die Bildung von Chromkarbiden beim Schweisprozess. Die Bildung von Chromkarbiden führt zu einer Verarmung an Chrom in der Matrix, was die Korrosionsbeständigkeit im Bereich der Korngrenzen vermindern kann. Alternativ werden heute zur Verhinderung dieser Chromkarbidbildung meist kohlenstoffarme nichtrostende Stähle eingesetzt.

In Tab. 1 ist die Bedeutung der Werkstoffnummer bei nichtrostenden Stählen aufgeführt. Tab. 2 zeigt eine Auswahl von nichtrostenden Stählen.

In der Norm EN ISO 8044:2015 [45] sind zahlreiche Grundbegriffe im Bereich Korrosion von Metallen und Legierungen beschrieben (vgl. Kap. 1.6).

Tab. 1 Bedeutung von Werkstoffnummern, aus *Edelstahl Rostfrei Merkblatt 821*

1.40..:	}	Cr-Stähle mit < 2,5 % Ni	ohne Mo, Nb oder Ti
1.41..:			mit Mo, ohne Nb oder Ti
1.43..:	}	Cr-Stähle mit ≥ 2,5 % Ni	ohne Mo, Nb oder Ti
1.44..:			mit Mo, ohne Nb oder Ti
1.45..:	}	Cr, CrNi- oder CrNiMo-Stähle mit Sonderzusätzen (Cu, Nb, Ti,..)	
1.46..:			

In Tabelle 2 ist eine Auswahl häufig verwendeter nichtrostender Stähle zusammengestellt.

Tab. 2 häufig verwendete nichtrostende Stähle

Werkstoff Nr.	Gefüge, Gehalt wichtiger Legierungselemente
1.4003	ferritisch ca. 12%Cr
1.4301	austenitisch, 18% Cr, 8% Ni
1.4401	austenitisch, 18% Cr, 11% Ni, 2- 2.5% Mo
1.4404	wie 1.4401 aber tiefer C-Gehalt → schweisssbar
1.4571	wie 1.4401 aber Zugabe von Ti → schweisssbar
1.4425	austenitisch, 18%Cr, 14% Ni, 2.5 – 3% Mo
1.4529	austenitisch, 20%Cr, 25% Ni, 7 – 7% Mo
1.4362	Duplex, 23% Cr, 4% Ni, 0.1 – 0.6% Mo
1.4462	Duplex, 22% Cr, 5.5% Ni, 2.5 – 3.5% Mo

Als Mass für die Beständigkeit gegen Korrosion (Lochkorrosion) von Legierungen aus nichtrostendem Stahl wird häufig die Wirksumme beigezogen. Zwei der am meisten verwendeten Formeln für Wirksumme sind unten angegeben:

$$W = \%Cr + 3.3 \times \%Mo \text{ (nach Edelstahl Merkblatt 821) [88]}$$

$$W = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + n \times \%N \text{ (nach SIA Merkblatt 2029) [60]}$$

Zu beachten ist, dass die Wirksumme nur einen Hinweis auf die Korrosionsbeständigkeit geben kann. Die tatsächliche Beständigkeit ist abhängig von einer Vielzahl weiterer Faktoren wie z. B.: Gefüge, Wärmebehandlung / Schweissung, Oberflächenzustand, Verunreinigungen / weitere Legierungselemente oder Umformung.

Befestigungselemente wie z. B. Schrauben und Muttern werden entsprechend ihrer Legierungsklasse sowie der Struktur (austenitisch) mit der Kennung A1 – A5 bezeichnet. Häufig verwendet werden A2 Elemente (z. B. Werkstoff Nr. 1.4301), A4 (z. B. Werkstoff Nr. 1.4401) oder auch A5 (z. B. Werkstoff Nr. 1.4571). Es ist darauf hinzuweisen, dass A4 und A5 Befestigungselemente in die gleiche Beständigkeitsklasse fallen, z. B. Gruppe III nach SIA 179: A5 weist demnach im Vergleich zu A4 nicht eine höhere Korrosionsbeständigkeit auf. Bei Stählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (<0.03%) kann zusätzlich der Buchstabe L angefügt werden. Bei höher legierten Werkstoffen wird die Werkstoffnummer, z. B. 1.4529 auf dem Befestigungselement angegeben.

Aluminium ist ebenfalls ein passiver Werkstoff. Im Gegensatz zum nichtrostenden Stahl ist der Passivfilm jedoch nicht elektronenleitend. Dies kann sich günstig auf die Korrosionsfortschrittgeschwindigkeit auswirken, da bei vielen Aluminiumlegierungen keine Elementbildung zwischen passiven und aktiv korrodierenden Bereichen innerhalb des Aluminiumbauteils erfolgen kann. Zudem sind die Korrosionsprodukte elektrisch isolierend. Wenn ein Bauteil nach einem Korrosionsangriff abtrocknet, kann sich bei der Korrosionsstelle eine vergleichsweise dichte Produkteschicht bilden. Auch bei einer erneuten, temporären, Benetzung mit Wasser ist der Korrosionsfortschritt dort gering. Kommt es jedoch zur Bildung eines galvanischen Elements mit anderen, edleren Werkstoffen, z. B. nichtrostendem Stahl, können erhebliche Korrosionsgeschwindigkeiten auftreten, da in diesem Fall eine leistungsfähige Kathode zur Verfügung steht.

Grundsätzlich ist Aluminium bei Anwesenheit von Chloriden schlecht beständig, da diese zu lokalen Korrosionsangriffen führen können. Es existieren Legierungen, die als "meerwasserbeständig" bezeichnet werden. Im Wesentlichen sind dies Legierungen, die als Hauptlegierungselement Magnesium enthalten, z. B. die Legierung AlMg3. Eine vollständige Beständigkeit bei Anwesenheit von Chloriden wird auch durch diese meerwasserbeständigen Legierungen nicht gewährleistet. Legierungen mit Hauptlegierungselement Kupfer (Legierungen der 2000er Serie) sind vergleichsweise schlecht korrosionsbeständig. Sie

sollten deshalb in korrosiver Umgebung nicht eingesetzt werden. Legierungen der 2000er Serie werden aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Festigkeiten eingesetzt. Solche Legierungen haben sich in der Luftfahrt bewährt, kommen aber für Tunnelanwendungen nicht in Frage.

Der Korrosionsfortschritt bei Aluminiumlegierungen kann trotz Anwesenheit von Chloriden eher langsam sein, unter der Voraussetzung, dass die Oberfläche regelmässig komplett abtrocknen kann und kein Kontakt zu einer leistungsfähigen Kathode, z. B. einem Bauteil aus nichtrostendem Stahl, besteht.

Das Aluminium bildet nur einen Passivfilm im pH Bereich von ca. 4 bis 8.4 aus. Deshalb ist Aluminium für den Einsatz in direktem Kontakt mit Beton oder in Bereichen, wo hochalkalisches Betonwasser auf die Bauteile gelangen kann, nicht geeignet. Auch in Bedingungen wo eine aggressive Atmosphäre vorliegt und an der Oberfläche pH Werte < 4 erreicht werden, wie dies z. B. in Strassentunnels der Fall sein kann, bildet das Aluminium keinen Passivfilm aus und es können hohe Korrosionsgeschwindigkeiten auftreten. Aus diesem Grund dürfen auch meerwasserbeständige Aluminiumlegierungen in der Tunnelatmosphäre nie ohne zusätzliche Beschichtung oder Oberflächenbehandlung eingesetzt werden.

2.1.1 Betrachtete Normen und Regelwerke

Die folgenden Normen und Regelwerke wurden im Bereich „nichtrostende Stähle und Aluminium“ mit Bearbeitungsstand 30.06.2017 vertiefter betrachtet.

Tab. 3 Übersicht betrachtete Normen und Regelwerke, Metallische Werkstoffe im Tunnel

Verweis	Bezeichnung	Titel	Weit. Bez.	Jahr
	SN EN ISO 12944-2	Beschichtungsstoffe-Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen		1998
	SIA 179	Befestigungen im Beton und Mauerwerk Anmerkung: Wird zurzeit überarbeitet	SN 505263:2013 de	1998
	ZTV-ING - Teil 5 (Deutschland)	Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise		2014/12
	Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt Bauteile, Technisches Merkblatt 23001-12210	Zonen / Klimatische Bedingungen		2015
	Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt Bauteile, Technisches Merkblatt 23001-12220	Werkstoffwahl und Korrosionsschutz		2015
	Merkblatt 828	Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle an der Atmosphäre		2016
	RVS 09.0222 (Österreich)	Projektierungsrichtlinie Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Tunnelausrüstung		04.07.2002
	PLaPB 800.542.1000 (TLü) Dokument Nr. 800.542.1000 (Österreich)	Technische Richtlinie Tunnel – Lüftung		01.01.2013
	PLaPB 800.542.2000 (TLü) Dokument Nr. 800.542.2000 (Österreich)	Technische Spezifikation Tunnel – Lüftung		01.01.2013
	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.3-6 (Österreich)	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.3-6, Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen		22.04.2014
	Allgemeine technische Spezifikationen für	6.1A -Anhang A		01.02.1999

elektromechanische Materialien und Schutzarten für elektromechanische Einrichtungen (ATS) sche Ausrüstungen auf den Hochleistungsstrassen		
Kanton Basel-Landschaft		
ATS 01	Korrosionsschutz, Farbanstriche	2006
Kanton Basel-Stadt		
Tiefbauamt, Elektromechanik		

Norm SIA 179 [4]

Die Norm SIA 179:2019 behandelt Befestigungen in Beton und Mauerwerk. Die Anwendung der Norm ist dabei beschränkt auf mineralische Baustoffe. Aluminium wird in dieser Norm nicht behandelt.

Die nichtrostenden Stähle werden entsprechend ihrer Beständigkeit in Gruppen I – V eingeteilt (vgl. Tab. 4). Für verschiedene Expositionen werden die Einsatzmöglichkeiten der Stahlgruppen aufgeführt. Für den Einsatz in Strassentunnels werden Stähle der Gruppe V als gut geeignet bezeichnet. Die Stähle der Gruppe IV werden für diese Anwendung als bedingt geeignet bewertet.

Tab. 4 Einteilung der nichtrostenden Stähle in Gruppen (nach SIA 179)

Gruppe	Austenitisches Gefüge	Austenitisch / ferritisches Gefüge
II	1.4301, 1.4303, 1.4306, 1.4541	
III	1.4401, 1.4404, 1.4406, 1.4429, 1.4435, 1.4436, 1.4571	
IV	1.4439, 1.4539	1.4462
V	1.4529, 1.4547, 1.4565	

Merkblatt 828 "Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle an der Atmosphäre" [88]

Von der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei werden diverse Merkblätter betreffend Einsatz von nichtrostenden Stählen herausgegeben. Das Merkblatt 828 [88] teilt die Stähle in Gruppen mit unterschiedlicher Korrosionswiderstandsklassen (KWK) ein und es werden typische Anwendungsgebiete genannt. Die Anwendung "Strassentunnel" ist für Stähle der KWK 5 aufgeführt, zu der z. B. der Stahl 1.4529 gehört.

EN ISO 12944-2, "Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme" [15]

In dieser Norm EN ISO 12944-2:2018 [15] werden u. a. atmosphärische Umgebungsbedingungen in Korrosivitätskategorien eingeteilt. Es werden Kategorien von C1 (unbedeutend) bis C5 (sehr stark) festgelegt.

ASTRA Fachhandbuch BSA [73], [74]

Im Technischen Merkblatt Bauteile, "Zonen, Klimatische Bedingungen" mit Nr. 23001-12210 [74], werden verschiedene Zonen mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wo BSA Elemente zum Einsatz kommen, festgelegt.

Der Fahrbahnbereich im Tunnel wird wie folgt charakterisiert:

Wechselnde klimatische Bedingungen, aggressive Atmosphäre mit Immissionen von der Fahrbahn (Tau-Salz, Abrieb, Abgase). Keine natürliche Abwaschung durch Regen. Der Temperaturbereich liegt zwischen -20 und +40 °C, die Luftfeuchtigkeit kann bis zu 100% rH betragen. Der Fahrbahnbereich Tunnel wird der Korrosivitätskategorie C5 nach EN ISO 12944-2 [15] zugeordnet.

Im Technischen Merkblatt Bauteile "Werkstoffwahl und Korrosionsschutz" mit Nr. 23001-12120 [73] werden Anwendungsbereiche festgelegt. Dabei wird unterschieden zwischen

- Befestigungen mineralischer Untergrund – Metall (z. B. Schraube, Anker)
- Befestigungen Metall – Metall (z. B. Schraube)
- Halterung leichte Ausführung, z. B. für Leuchten, Kabelkanäle oder Kameras
- Halterung schwere Ausführung, z. B. für Strahlventilatoren, Rahmen für Abluftklappen
- Gehäuse

Unter Halterung wird das Bauteil zwischen Primärbauwerk und Gehäuse verstanden. Als Primärbauwerk sind zu betrachten: Wände und Decken von Tunnels und Gebäuden, Betonkonstruktionen, Fundamente.

Im Merkblatt ist für jede Korrosivitätskategorie nach EN ISO 12944-2:1998 [15] eine Tabelle vorhanden, die angibt welches Material und welcher Korrosionsschutz für welchen Anwendungsbereich zu wählen ist.

Für die Korrosivitätskategorie C5, unter welche der Fahrbahnbereich Tunnel in etwa fällt, wird für nichtrostende Stähle folgende Angabe gemacht:

Bei Befestigungen (mineralischer Untergrund – Metall und Metall-Metall) sind Stähle der Gruppe V nach SIA 179 einzusetzen, d.h. z. B. aus Stahl 1.4529. Aluminium darf für die Befestigungen nicht eingesetzt werden.

Für Halterungen (leicht und schwer) sollen Stähle mindestens der Gruppe IV nach SIA 179 verwendet werden, z. B. 1.4439 oder 1.4462

Für Gehäuse sind gemäss dieser Richtlinie auch Stähle der Gruppe III nach SIA 179 zulässig, wie z. B. 1.4404, 1.4571 oder 1.4435.

Werden die nichtrostenden Stähle beschichtet, ist das Beschichtungssystem gemäss Korrosivitätskategorie C5 auszulegen (siehe oben).

Aluminium darf für Befestigungen nicht eingesetzt werden, bei Halterungen sind der Einsatz zulässig, sofern mit definierten Systemen beschichtet wird. Bei Gehäusen ist auch anodisiertes Aluminium zulässig, aber nur, wenn das Bauteil statisch nicht relevant ist, z. B. bei Kühlrippen.

Allgemeine Technische Spezifikation für elektromechanische Einrichtungen (ATS), Tiefbauamt Kanton Basel-Landschaft [91]

Für verschiedene definierte Zonen werden Angaben zur Materialwahl gemacht. Der Fahrraum im Tunnel wird der "Zone 3" zugeteilt. Diese ist umschrieben mit "Fahrraum in Tunnel, Tunnelportalbereich, Nischen, bzw. nasse, ungelüftete Räume mit stark korrosiven Einflüssen.

Für das Kabeltragsystem wird für diese Zone eine Ausführung in nichtrostendem Stahl (inkl. Befestigungselemente) verlangt. Alternativ dazu kann der Kabelkanal aus glasfaserverstärkten Kunststoff bestehen.

Schaltkästen sind in dieser Zone möglichst zu vermeiden, falls unvermeidbar (z. B. SOS Kasten) sind diese in nichtrostendem Stahl auszuführen.

Gehäuse von Signalen und Lampen sind aus nichtrostendem Stahl "einbrennlackiert" auszuführen. Befestigungselemente sollen aus nichtrostendem Stahl bestehen.

Im Kapitel "Materialwahl" werden die Stahlsorten nicht genauer umschrieben. Dies erfolgt im Kapitel "Bezeichnung" mit untenstehender Tabelle. Darin werden Tunnels den Korrosivitätsklassen 4 und 5 zugeordnet. Die Kriterien dafür werden nicht angegeben. Die aufgeführte Materialwahl ist für beide Korrosivitätsklassen die gleiche. Die Anwendungen werden in "nichttragende Teile (Gehäuse, Rahmen)" mit Nutzungsdauer < 20 Jahre, in "Befestigungen, Verbindungselemente" mit Nutzungsdauer < 20 Jahre und "Tragende Teile, die statisch nachgewiesen werden müssen" Nutzungsdauer > 20 Jahr unterteilt. Für die beiden

letztgenannten Anwendungskategorien werden jeweils die gleichen Stahlsorten verlangt (1.4529 und 1.4539). Für die erstgenannte Anwendungskategorie ("Gehäuse und Rahmen") sind jeweils die Stähle 1.4574, 1.4404 und 1.4435 aufgeführt.

Umgebung		Anwendung		
Korrosivitätsklasse	Lage	Nichttragende Teile (Gehäuse, Rahmen)	Befestigungen, Ver- bindungselemente	Tragende Teile, die statisch nachgewie- sen werden müssen
		Nutzungsdauer ≤ 20 J	Nutzungsdauer ≤ 20 J	Nutzungsdauer ≥ 20 J
5 sehr starke Belas- tung	z.B. Belchentunnel und Bauteile mit spe- ziellen Anforderungen (in Absprache mit AWS)	WST.Nr. 1.4571 oder WST.Nr. 1.4435 oder WST.Nr. 1.4404**	WST.Nr. 1.4529 oder WST.Nr. 1.4539	WST.Nr. 1.4529 oder WST.Nr. 1.4539
4 starke Belastung	z.B. N2 Abschnitt Ba- sel - Augst, alle Tunnels HLS	WST.Nr. 1.4571 oder WST.Nr. 1.4435 oder WST.Nr. 1.4404**	WST.Nr. 1.4529 oder WST.Nr. 1.4539	WST.Nr. 1.4529 oder WST.Nr. 1.4539
3 mässige Belastung	z.B. übrige Strecken der HLS	WST.Nr. 1.4571 oder WST.Nr. 1.4435 oder WST.Nr. 1.4404**	WST.Nr. 1.4571* oder WST.Nr. 1.4404	WST.Nr. 1.4529 oder WST.Nr. 1.4539

*) Im Falle von Lieferproblemen kann bei fertigen Verankerungen (z.B. Dübel) auf Werkstoff Nr. 1.4401 zurückgegriffen werden.

**) WST.Nr. 1.4404 hat bei Temperaturen $> 250^\circ$ ein anderes Verhalten als WST.Nr. 1.4571

ATS 01, Kanton Basel-Stadt, Korrosionsschutz, Farbanstriche [92]

Anforderungen bezüglich Korrosionsschutzes für elektrische Betriebsmittel wie Elektro-schränke, Ventilatoren, etc. werden festgelegt. Dafür massgebend sind die Umweltbedin-gungen am Aufstellungsort.

So wird der Verkehrsraum, Nischen und Notausgänge (nicht belüftet) der Klasse 1 zuge-teilt. Hier erfolgt der Schutz durch Werkstoffwahl, d. h. nichtrostende Stähle. Innerhalb die-ser Klasse 1 gilt:

Befestigungen (nicht wieder gelöst): 1.4401, 1.4435, 1.4436 oder 1.4571. Der Schrauben-schaft muss unmittelbar vor und die Schraubenmutter unmittelbar nach der Montage mit einer hochwertigen Schutzmasse grundiert werden.

Befestigungen, welche für Unterhaltszwecke wieder gelöst werden: 1.4529 und 1.4539
Gehäusematerial: 1.4401, 1.4435, 1.4436 und 1.4571

Stahlkonstruktionen mit einer Materialstärke $> 1\text{cm}$ können, wenn im Lastenheft umschrie-ben und im Realisierungspflichtenheft (RPH) dokumentiert im folgender Minimalausfüh-rung hergestellt werden:

- Feuerverzinkt
- Pulverbeschichtet (oder gleichwertig)

Vor dem Aufbringen des Farbanstrichs ist eine Werksprüfung erforderlich.

Projektierungsrichtlinie Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Tunnelausrüstung, Richtlinien und Vorschriften für das Strassenwesen (RVS) 09.0222 (Österreich) [66]

Die Richtlinie wird vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie herausgegeben. Uns liegt die Ausgabe vom 4.7.2002 vor.

Unter Kapitel 10.5, Materialien, wird festgehalten, dass bei Einsatz von nichtrostendem Stahl im Regelfall ein nichtrostender Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 zu verwenden ist. Für folgende Bauteile wird der Einsatz der Qualität 1.4571 explizit vorgeschrieben:

- Konstruktionen, Konsolen etc.
- Kabelrinnen
- Verschraubungen
- NRN Türen und NRN Standelement
- Nischenböden in NRN und EN
- Verteiler in Nischen
- Verschlüsse
- Verkehrszeichen
- Einbauten in Versorgungs kanal, hier ist alternativ Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) möglich.

Aluminium darf ausschliesslich mit einem Cu-Gehalt $\leq 0.1\%$ nach ÖNORM EN 573-3 Tabelle 5 und 6 eingesetzt werden. Bei der Verbindung mit anderen Materialien sind Massnahmen gegen Kontaktkorrosion vorzusehen. Aluminiumteile im Tunnelfahrraum sind mit Korrosionsschutz gemäss DIN 4113, Teil 1, Punkt 10 zu versehen.

Technische Richtlinie Tunnel – Lüftung (TLü), PLaPB 800.542.1000 (Österreich) [67]

Diese Richtlinie wird von der ASFiNAG (Strassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft) herausgegeben. Uns liegt die Ausgabe mit der Dokument Nr. 800.542.1000 vom 1.1.2013 vor.

Unter Kapitel 3.1.2.3. "Korrosionsschutz" wird ausdrücklich auf die Bestimmungen RVS 09.02.22 hingewiesen.

In Kapitel 3.1.2.3.7. "Bearbeitung von Aluminium" wird darauf hingewiesen, dass Aluminium vor Korrosion durch Streumiteleinwirkung sowie vor elektrochemischer Korrosion (elektrische Auftrennung) zu schützen ist. Das Aluminium ist zu eloxieren und zu versiegeln (gemäss DIN 4113, Teil 1)

Technische Spezifikation Tunnel – Lüftung (TLü), PLaPB 800.542.2000 (Österreich)

Diese Technische Spezifikation wird von der ASFiNAG (Strassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft) herausgegeben. Uns liegt die Ausgabe mit der Dokument Nr. 800.542.2000 vom 1.1.2013 vor.

Betreffend Werkstoffwahl wird für Lagerbüchsen bei Lüftungs klappen Angaben gemacht. Sie sollen aus Werkstoffen bestehen die gute Schmiereigenschaften haben und trotzdem die geforderten Korrosionseigenschaften aufweisen. Sinterbronze ist explizit dafür nicht zulässig

Bei der Materialauswahl für das Laufrad muss auch die Korrosionsfestigkeit (auch interkristalline- und Spannungskorrosion) berücksichtigt werden.

Anlageteile, speziell erwähnt sind dabei das Schutzgitter und der Diffusor, welche nicht aus Edelstahl bestehen. Diese müssen mit einem entsprechenden Korrosionsschutz versehen werden.

Für die Ventilatorabsperriklappe sind in folgender Tab. 5 Anforderungen an die Werkstoffe aufgeführt:

Tab. 5 Anforderungen an Werkstoffe für Ventilatorabsperriklappen aus PLaPB 800.542.2000

Werkstoffe		
	Abluft	Zuluft
Ventilatorabsperriklappe	Rostfreier Edelstahl	mind. S235JR+AR (feuerverzinkt)
Lagerbüchse und Gleitflächen	Edelstahl	Edelstahl
Gestänge	Rostfreier Edelstahl	S235 (korrosionsgeschützt)
Drehachse	Rostfreier Edelstahl	S235 (korrosionsgeschützt)
Allgemeine Anforderungen		
max. Stellzeit für 90°-Bewegung	20 sec	
Temperaturanforderung	lt. RVS 09.02.22 (Zuluft) bzw. RVS 09.02.31 (Abluft)	

ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise (Deutschland) [62]

Diese Richtlinie "Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten" wird von der Bundesanstalt für Strassenwesen herausgegeben. Uns liegt die Ausgabe 2014/12 vor.

Grosse Teile der Richtlinie befassen sich mit der Primärkonstruktion, doch wird auch der Innenausbau behandelt.

In Kapitel 5.2.8 wird verlangt, dass Befestigungsmittel für Tunneleinbauten aus Nichtrostendem Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4529 oder 1.4547 nach DIN EN ISO 3506 sowie nach DIN EN 10088 bestehen.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.3-6, Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen (Deutschland) [65]

Diese Zulassung wird vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) herausgegeben und ist vom 22.4.2014

In Tabellen 1 werden diverse nichtrostende Stahlsorten Korrosionswiderstandsklassen (KWK) zugeteilt. In Tabelle 1.1 werden für verschiedene Expositionen erforderliche Korrosionswiderstandsklasse angegeben. Zur KWK IV gehören Stähle wie 1.4439 oder 1.4539, zu KWK V, z. B. der Stahl 1.4529.

So ist im Spritzwasserbereich mindestens die Korrosionswiderstandsklasse IV erforderlich. Im Strassentunnel (hohe Belastung durch Schwefeldioxid) die Korrosionswiderstandsklasse V. Es wird vermerkt, dass durch regelmässige Reinigung zugänglicher Konstruktionen die Korrosionsbelastung erheblich verringert werden kann, so dass eine Abminderung um eine KWK möglich ist. In Tabelle 2 wird die Korrosionswiderstandsklasse für Schrauben angegeben. So gehören Schrauben vom Typ A2 der KWK II an, Schrauben vom Typ A4 und A5 der KWK III. Höher legierte Schrauben sind mit der Werkstoffnummer zu bezeichnen.

2.1.2 Beurteilung der Normen und Regelwerke

Die Normen und Regelwerke beurteilen die Atmosphäre in den Strassentunnels generell als sehr aggressiv, ohne diese Atmosphäre aber näher zu definieren. Sie wird der höchsten Korrosivitätskategorie zugeteilt. Entsprechend werden für Befestigungselemente Stähle der höchsten Beständigkeitsklasse gefordert. Dies gilt sowohl für die Schweiz als auch für Deutschland. Nur in Österreich sind auch Stähle der Gruppe III nach SIA 179 zulässig. Für Halterungen sind in der Schweiz auch Stähle der Gruppe IV zulässig.

In den Normen und Regelwerken wird in Bezug auf die Korrosivitätskategorie nicht zwischen verschiedenen Expositionen, Höhenlagen, Temperaturprofilen oder Verkehrsaufkommen unterschieden, was grundsätzlich eine abgestufte Materialwahl erlauben würde. Grund dafür dürfte sein, dass die Einflussgrößen in der Praxis schwierig zu erheben und zu bewerten sind. Es besteht somit die Gefahr, die Beanspruchung zu unterschätzen. Die einzige technische Spezifikation, die diesbezüglich die Tunnelbauwerke unterteilt, ist die "Allgemeine technische Spezifikation für elektromechanische Einrichtungen (ATS)" [91] des Kantons Basel-Landschaft. Auf die Wahl der nichtrostenden Stahlsorte hat dies jedoch in dieser Spezifikation keinen Einfluss.

Die ATS-01 [91] des Tiefbauamts Basel Stadt lässt für Befestigungselemente, die nicht wieder gelöst werden, auch Stähle der Gruppe III nach SIA 179 zu, sofern der Schraubenschaft und Mutter mit einer "hochwertigen Schutzmasse" versehen wird. Diese wird jedoch nicht weiter spezifiziert. Ob der kritische Spaltbereich im Gewinde mit dieser Schutzmasse ausreichend geschützt wird, ist fraglich.

2.2 Metallischer Überzug und Beschichtungen

2.2.1 Einführung

Der Ansatz „passiver Korrosionsschutz“ soll die Korrosion des Untergrundes hauptsächlich durch Fernhalten des aggressiven Umgebungsmediums verhindern resp. die Korrosion des Substrats hinauszögern.

Das Umgebungsmedium beansprucht zunächst den Werkstoff „Beschichtung“ resp. den Zinküberzug. Dieses Prinzip zehrt von einem „Anfangsabnutzungsvorrat“ und funktioniert befristet. Dies führt zu der sogenannten „Schutzdauer“.

Von wesentlicher Bedeutung ist, dass

- Beschichtungen mit einem Polymer-Bindemittel die Diffusion von Wasserdampf (kleineren Molekülen sowie Ionen) durch den Film nicht gänzlich verhindern können
- hingegen metallische Überzüge praktisch diffusionsdicht sind gegenüber Wasserdampf
- die Beschichtung vollflächig mit dem Substrat verbunden ist und es bleibt.
- Passiver Korrosionsschutz nur so gut ist wie seine Schwachstelle

1. Beschichtungen als Korrosionsschutzsysteme sind grundsätzlich wie folgt aufgebaut:
 - Oberflächenvorbereitung oder Oberflächenvorbehandlung
 - Beschichtungssystem
2. Die zu beschichtende Konstruktion erfüllt zudem bestimmte Anforderungen an das Design und an die Fertigung, sodass keine systematischen Schwachstellen mit verkürzter Schutzdauer entstehen.

2.2.2 Betrachtete Normen und Regelwerke

Die folgenden Normen und Regelwerke wurden im Bereich „Metallischer Überzug und Beschichtungen“ mit Bearbeitungsstand 30.06.2017 vertiefter betrachtet (vgl. Tab. 6).

Tab. 6 Übersicht betrachtete Normen und Regelwerke, Metallischer Überzug und Beschichtungen

Verweis	Bezeichnung	Titel	Weit. Bez.	Jahr
	SN EN ISO 12944	Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme		2018/2020
	ISO 850X Reihe	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen		-
	ISO 4628	Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden		2016
	ISO 19840	Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme		2012
	ISO 1461	Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrachte Zinküberzüge (Stückverzinken)		2009
	ISO 14713-1/2	Zinküberzüge - Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion		2017
	SIA 263	Stahlbau	SN 505263:2013 de	2013
	SIA 263/1	Stahlbau Ergänzende Festlegungen	SN 505263/1:2013 de	2013
	SIA 118/263	Allgemeine Bedingungen für Stahlbau	SN 507263	2004
	SIA 260	Grundlagen der Projektierung von Tragwerken	SN 505260	2013
	SIA 269	Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken		2011
	SIA 465	Sicherheit von Bauten und Anlagen		1998
	SIA Merkblatt 2017	Erhaltungswert von Bauwerken		2000
	EN 1090-1	Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Teil 1, Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile		
	EN 1090-2	Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Teil 2, Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile		
		Beitrag zum Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen - Ursachen und Lösungsvorschläge zum Problem der Rissbildung		2005
	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) - Teil 4	Stahlbau, Stahlverbundbau - Abschnitt 1 Stahlbau, Kap. Schweissverbindungen		2003
	DAst-Richtlinie 022	Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen		2016
	Norsok M-501	Coating Systems		06.02.2012
		Fachhandbuch BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen), technisches Merkblatt Bauteile, Komponenten, Werkstoffwahl und Korrosionsschutz	23001-12120	2015

2.2.3 Definitionen zur Korrosion – Bereich Beschichtung

Die Beschichtung kann als eigener Werkstoff betrachtet werden, ist jedoch zusammen mit dem zu schützenden Untergrund als Verbundwerkstoff anzusehen. Obwohl diese Betrachtungsweise nicht der Regelfall ist, kann dadurch das Verhalten in einigen Fällen besser erklärt werden.

Je nach Exposition der Beschichtung und dessen Untergrund treten bei einem Korrosionssystem mit Beschichtungen unterschiedliche Schädigungsbilder auf.

Die ISO 4628-Normenreihe [27] beschreibt die für Beschichtungen typischen acht Schädigungsbilder. Nachfolgend und in Ergänzung zum Kap 1.6 die wichtigsten Begriffe und Kriterien, ergänzt mit Erläuterungen:

Bewertungssystem von Schäden [ISO 4628-1] [27]

In der ISO 4628-1 [27] erfolgt eine allgemeine Einführung in die Thematik.

Blasengrad [ISO 4628-2] [27]

In der ISO 4628-2 [27] erfolgt die Bewertung von Schäden an Beschichtungen auf Basis der Grösse und Menge von Blasen.

Rostgrad [ISO 4628-3] [27]

In der ISO 4628-3 [27] erfolgt die Bewertung von Schäden an Beschichtungen auf Basis des Rostgrads.

Der Rostgrad beschreibt, wie viel Flächenanteil einer Beschichtung mit Punktrost („Rost-durchbrüche“) durchsetzt ist und bezieht sich - aufgrund der definierten Korrosionsprodukte „Rost“ - eingeschränkt auf den Untergrund mit dem Werkstoff Stahl. Untergründe aus Zink sind somit nicht enthalten, sodass ein schadhaftes Duplexsystem (Stahl mit Feuerverzinkung plus Beschichtung) nicht in der gleichen Art bewertet werden kann.

Der Rostgrad Ri 3 z. B. beziffert ein Flächenanteil von 1% und definiert dieses Limit als die Schutzdauer eines Beschichtungssystems. Ob sich dieses Kriterium auf eine ganze Anlage bezieht inkl. Kanten, Schweissnähte, oder sich auf allgemeine Flächen oder ein ganzes Bauteil beschränkt, bleibt offen.

Mit dem Rostgrad Ri 3 ist erst ausgesagt, dass ein Handlungsbedarf zur Erhaltung angezeigt ist. Dazu sind etwa folgende Optionen möglich:

- Bewusst nichts tun
- System beobachten und Veränderung an Referenzfläche dokumentieren
- Periodische Überprüfung auf Einhaltung eines Grenzkriteriums (z. B. Restwanddicke)
- Lokale Instandhaltung (Reparatur, Ausflecken)
- Erneuerungsteilbeschichtung
- Integrale Totalerneuerung des Korrosionsschutzes

Fazit

Mit dem Rostgrad Ri 3 ist noch nichts ausgesagt zur Tragfähigkeit des Bauwerks resp. zur Minderung der Tragfähigkeit.

Rissgrad [ISO 4628-4] [27]

In der ISO 4628-4 [27] erfolgt die Bewertung von Schäden an Beschichtungen auf Basis der Menge und Grösse von Rissen.

Abblätterungsgrad [ISO 4628-5] [27]

In der ISO 4628-4 [27] erfolgt die Bewertung von Schäden an Beschichtungen auf Basis der Menge und Grösse von Abblätterungen.

Die folgenden, weniger relevanten Normen aus der gleichen Reihe, werden der Vollständigkeit halber aufgeführt:

Kreidungsgrad nach dem Samtverfahren [ISO 4628-7] [27]

Für Beschichtungssysteme mit UV-Strahlungsbeanspruchung

Enthaftung am Ritz [ISO 4628-8] [27]

Bewertung der von einem Ritz oder einer anderen künstlichen Verletzung ausgehenden Enthaftung und Korrosion für Beschichtungssysteme im Unterwassereinsatz

Filiformkorrosion [ISO 4628-10] [27]

Anwendungen von Beschichtungen auf Aluminium und Zink

Zusammenfassung

Für die vorliegende Arbeit und für beschichtete Komponenten ist die ISO 4628-3 [27] „Rostgrad“ die wichtigste Norm aus dieser Reihe, auch deshalb, weil die Schutzdauer eines Beschichtungssystems damit definiert ist. Diese Norm bezieht sich auf Stahl.

Bei Beschichtungen aus Zink entstehen auch andere Schädigungsbilder, welche sich nicht ausreichend mit dieser Normenreihe (ISO 4628) beschreiben lassen. Das Ende der Schutzdauer von einem Duplexsystem (Stahl mit Feuerverzinkung plus Beschichtung) kann beispielsweise mit der aktuell gültigen ISO 12944-5 [15] nicht mit dem Rostgrad beschrieben werden. Es gilt dort die Zeitspanne mit Haftfestigkeit des Beschichtungssystems auf dem verzinkten Untergrund.

2.2.4 Analyse der Normen und Regelwerke

1. Fehlendes Berücksichtigen moderner Aufbaumittel

Die aktuelle Praktik verwendet Tausalze mit Zusätzen, z. B. Calcium- und Magnesiumchlorid, deren Wechselwirkung auf die Werkstoffe in Tunnels nicht bekannt sind.

2. Fehlende Norm-Definition für Strassentunnelatmosphären

Ausgangspunkt für jede korrosionstechnische Betrachtung und Auslegung müssten einerseits die geforderte Nutzungsdauer (resp. die Schutzdauer, hier meistens zeitgleich), andererseits die zu erwartenden Beanspruchungen sein.

Die heute angewendeten Unterlagen berücksichtigen weder die Situation in der Schweiz (z. B. lange Strassentunnels), noch die zunehmende Verwendung von aggressiverem Tausalz, noch den aktuellen Stand der Technik bezüglich Normklimatas, noch die zunehmende Beanspruchungsfolgen durch Stickoxide. Das aktuelle und zukünftige Beanspruchungskollektiv sollte deshalb ein Überprüfen der Korrosionswiderstandsklassen (KWK) nach sich ziehen.

Das Merkblatt 828 [88] teilt die Stähle in Gruppen mit unterschiedlichen KWK ein, und es werden für die Anwendung "Strassentunnel" Stähle der KWK 5 aufgeführt. Das kann für die Schweiz reichen, muss es aber nicht.

Die ISO 12944-2:2018 [15] geht für die Wahl von Beschichtungssystemen oder Duplexsystemen von Korrosivitätskategorien aus, die mit „CX“ erweitert wurde, welche bereits seit einigen Jahren existiert (ISO 9223: 2012 [13]).

Das Fachhandbuch BSA [73] geht noch von der maximalen Kategorie „C5“ aus, welche in 12944-2:1998 die höchste Korrosionsklasse darstellte. Die Anforderung ist mit der neuen SN EN ISO 12944_2:2018 anzupassen.

3. Definition „Rostgrad“ für beschichteten Stahl

Die Schutzdauer von Beschichtungen ist gemäss ISO 4628-3 [27] definiert mit „Erreichen eines Rostgrades Ri 3“.

Dieses Kriterium bedeutet, dass 1% der Oberfläche mit durch die Beschichtung drängendem „Rost“ (also Eisen-Korrosionsprodukte im weitesten Sinne) behaftet sind. Umgangssprachlich spricht man auch von Punktrost (bei atmosphärisch bewitterten Flächen) oder Rostpusteln (bei Beschichtungen im Unterwasserbereich).

Für die praxisnahe Beurteilung ist festzuhalten, dass

- diese Prüfung nur an gereinigten und komplett zugänglichen Flächen wirklich durchführbar ist.
- Oder andernfalls dieser Zeitpunkt übersehen wird

Weiter wird dieses Kriterium in der Praxis unter folgenden Fragestellungen unterschiedlich angewendet:

- Gilt es für die gesamte Stahlkonstruktion oder für „ausgewählte“ oder „relevante“ Bereiche?
- Sind Kanten und Schweissnähte inbegriffen oder nicht?
- Gilt es auch für Duplexsysteme (feuerverzinkter Stahl plus Beschichtung)?

Weitere Anmerkungen vgl. Ausführungen in Kap. 2.2.3.

4. Schutzdauer und Tragfähigkeit

Mit dem Rostgrad Ri 3 ist noch nichts ausgesagt zu einer allenfalls geminderten Tragfähigkeit des Stahltragwerks (vgl. weitere Anmerkungen in Kap. 2.2.3).

In den allermeisten Fällen ist zum Zeitpunkt „Ende der Schutzdauer“ die Tragfähigkeit einer Stahlkonstruktion noch nicht gefährdet. Naturgemäss sind zunächst nur Extremstellen betroffen: Stellen mit minderwertigem Schutz auf Seite Werkstoff, sowie Stellen mit aggressiverem Kleinklima auf Seite Umgebungsmedium oder analog ein stärkeres Beanspruchungskollektiv (exponierte, oder stärker mechanisch beanspruchte Stellen, z. B. Schraubknoten).

In der Praxis werden Rostgrade bis 5% oder eine lokale Angriffstiefe von 1 mm in Kauf genommen bis zur Totalerneuerung eines Stahltragwerks, zumal im Regelfall Plus-Walztoleranzen und Rundungszuschlägen bei Blechdicken im Spiel sind.

Allerdings ist zu beachten, dass sich bei einer Weiternutzung der Konstruktion die Korrosion am Untergrund sich fortsetzen wird. Betroffen ist nicht nur der Bereich des (sichtbaren) Korrosionsangriffs, sondern auch der benachbarte beschichtete Bereich durch sogenannte Unterwanderung.

Der weitere Verlauf der Stahlschädigung unter einer Beschichtung ist schwierig zu prognostizieren, da sie nicht nur vom jeweiligen Korrosionssystem abhängig ist, sondern auch von der Wechselwirkung zwischen dem schadhaften Teil der Beschichtung und der angrenzenden, noch intakten Beschichtung, sowie dem frei gelegten Untergrund mit Korrosionsprodukten. Auch die Art und Menge des umgebenden Elektrolyt sowie die klimatischen Bedingungen haben einen grossen Einfluss auf den weiteren Schadenmechanismus und seinen Verlauf.

Beispielsweise haben aktive Grundbeschichtungen (z. B. Zinkstaub) bei atmosphärisch bewitterten Beschichtungen oder solchen im Unterwassereinsatz einen positiven Einfluss auf den weiteren Schädigungsverlauf in dem Sinne, dass zunächst ein eher flächenhafter Angriff am Stahl entsteht und die Unterwanderung der angrenzenden Beschichtung für eine beschränkte Zeitdauer doch eher gehemmt ist.

Nachdem sich die Kleinstelle mit Punktrost vergrössert hat, entsteht ausgehend vom Zentrum der Schadstelle die Korrosion am Stahl. Die dann zu erwartenden Korrosionsraten ergeben sich mindestens gemäss herrschender Korrosivitätskategorie. Dazu folgender Vorbehalt: Sind im vorhandenen Kleinklima bereits Schmutzablagerungen, Chloride etc. und andere ungünstigere Bedingungen (Spalten, ablösende Beschichtung) an dieser schadhaften Stelle vorhanden, wird das ohnehin aggressive örtliche Kleinklima noch verstärkt. Die Folgen sind dann beispielsweise beschleunigte Muldenkorrosion und beschleunigte Unterwanderung.

Hinweise im Hinblick auf die Forschungsarbeit:

Das Schutzdauer-Kriterium Rostgrad Ri 3 gemäss ISO 4628-3 ist für die Praxis schwierig umsetzbar und hat beschränkte Aussagekraft für die tatsächliche Standfestigkeit des Beschichtungssystems (z. B. für die Anwendung Stahlkonstruktion als Signalträger)

Bei ausschreibenden Instanzen führt es zu einem falschen Verständnis zur tatsächlichen Leistungsfähigkeit von Beschichtungen, z. B. auf Seite Bauherrschaft/ Projektverfasser. Es suggeriert einen verfrühten und möglicherweise ungeeigneten Zeitpunkt für die vermutete

Totalerneuerung des Korrosionsschutzes von Investitionsgütern wie Stahlbrücken o.ä. Objekte.

Wird andererseits die Schutzdauer über einen Rostgrad Ri 3 gestreckt, ist folglich ein neues prüfbares Grenzkriterium zu schaffen für die Weiternutzung bis zum Zeitpunkt X: z. B. eine kritische Angriffstiefe resp. eine Mindestrestwanddicke, bezogen auf ein kritisches Bauteil.

5. Schichtdickenmessung

Die Schutzdauer von Beschichtungen ist u.a. von der Schichtdicke abhängig, sodass ihre sichere Bestimmung an jeder Stelle des Objekts ein Grunderfordernis ist.

3 Materialien und Korrosionsschutzsysteme

3.1 Definition und Einflussgrößen

Ein Korrosionssystem stellt ein offenes System dar (inkl. der vermeintlichen Ausnahme: Dicht geschweisste Hohlkörper), bei dem der Energie- und Stoffaustausch mit der Umgebung solange stattfindet, bis das System in einem energetisch stabilen Zustand ist. Dieser Zustand ist nach vollständiger Korrosion des metallischen Werkstoffs erreicht. Massgebend für die Reaktionen ist die Phasengrenze zwischen Werkstoff und Medium. Die Korrosionserscheinung findet dabei als ortgebundene Reaktion an einer Phasengrenze statt, welche in gewissen Fällen eine Dreiphasengrenze ist.

3.2 Aufbau des Korrosionssystems

Für korrosionstechnische Betrachtungen dient die Systemeinheit Werkstoff und Medium als Basis. Im einfachsten Sinne besteht also das Korrosionssystem aus dem Werkstoff im Umgebungsmedium. Eine schematische Darstellung ist in (Abb. 1) gezeigt.



Abb. 1 Werkstoff im Umgebungsmedium

Dabei ist wesentlich, dass die Korrosionsbeständigkeit nie eine Werkstoffkerngrösse ist. Die Beständigkeit eines Werkstoffs lässt sich nur unter Berücksichtigung des Gesamtsystems bewerten.

3.3 Reale Korrosionssysteme

Für erste korrosionstechnische Betrachtungen ist die einfache Systemeinheit *Werkstoff und Medium* genügend. Jedoch ist in der Praxis und im Normalfall das System beliebig komplizierter. Das reale Korrosionssystem berücksichtigt:

- Verarbeiteter Werkstoff:
- Kaltumformung (Gewinde einer Schraube M16 in A4, Biegekanten)
- Schweisskonstruktion (Spalten, Wärmeeinflusszone, Oxidschichten wie Anlauffarben)
- verschiedene Werkstoffe in Kombination (Mischkonstruktion, Einfluss von galvanischen Elementen)
- eine elektrisch isolierende Beschichtung
- Deckschichten (z. B. eine schwer wasserlösliche Zinkkarbonat-Deckschicht)
- Ein differenziertes Umgebungsmedium resp. ein Beanspruchungskollektiv:
- Ortsklima (abgestufte Korrosivitätskategorien nach Norm, ISO 12944)
- Kleinklima
- Temperatureinflüsse (Jahreszeiten, Prozesswärme, Brand)
- Strahlung (UV-Strahlung mit Degradation von Polymerwerkstoffen)

- Zusammensetzung des Umgebungsmediums (Aerosole, Gischt, Niederschlag)
- Verschiedene Zustände des Umgebungsmediums (Eis, Schnee, Regen, Nebel)
- Einwirkungsdauer wie zum Beispiel die Befeuchtungsdauer (Time of Wetness TOW)
- unterschiedliche Umgebungsmedien (Dreiphasengrenzen, unterschiedliche Nutzungsphasen, Schmutzablagerungen)
- Strömung des Umgebungsmediums (Abrasion, Tropfenschlag, Luv/Lee-Seite)
- Chemische Einflüsse (Reinigungsmittel, Desinfektion)
- Mechanische Einflüsse: Steinschlag, Flächenpressungen, Reinigungsprozesse)
- Auftausalz

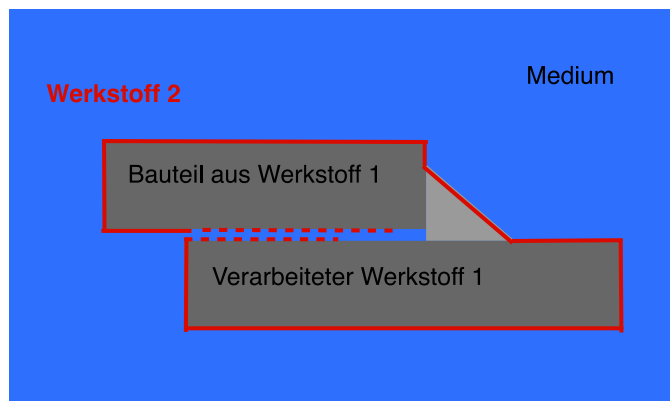


Abb. 2 Schematische Darstellung reales Korrosionssystem

Ein Beispiel für die schematische Darstellung eines realen Korrosionssystems für eingeschweisste Konstruktion aus Werkstoff 1 mit Spalten, beschichtet mit Werkstoff 2 (ausgenommen Spaltbereich) ist in Abb. 2 dargestellt.

3.3.1 Reale Korrosionssysteme – Beispiel Beschichtung

Die Beschichtung – Werkstoff 2 in einem Medium in Abb. 2 stellt ein gutes Beispiel für ein Korrosionssystem dar. Das Beispiel zeigt wie Korrosionssystem aus einer Kombination von Werkstoffen und Angriffsmedium aufgebaut ist und welche komplexen Einflussparameter im Spiel sind. Damit wird deutlich wie die erwartete Schutzdauer zu Stande kommt.

Funktionsprinzip

Beim Ansatz „passiver Korrosionsschutz“ soll die Korrosion des Untergrundes hauptsächlich durch Fernhalten des aggressiven Umgebungsmediums verhindern resp. Vermindern werden.

Weil das Umgebungsmedium einerseits den Werkstoff „Beschichtung“ angreift und sogar penetriert, andererseits hierdurch auch der Verbund zwischen Werkstoff 1 und Werkstoff 2 (die Beschichtung) beansprucht wird, funktioniert dieses Prinzip befristet, was zum Begriff Schutzdauer führt. Von wesentlicher Bedeutung ist der Sachverhalt, dass die Beschichtung vollflächig mit dem Substrat verbunden ist und dass dieser Verbund erhalten bleibt. Diese Korrosionsschutzsysteme werden grundsätzlich wie folgt aufgebaut:

- Oberflächenvorbereitung oder Oberflächenvorbehandlung
- Applikation des Beschichtungssystems

Die Beschichtung verfügt zusammengefasst über einen bestimmten inneren Widerstand gegen äussere Beanspruchungen. Bei Erreichen der Schutzdauer ist der Schutzvorrat erschöpft.

Naturgemäss haben ein unterschiedliche Abnutzungsvorrat oder unterschiedliche Beanspruchungen Folgen auf die Schutzdauer.

Bei der Umsetzung eines passiven Korrosionsschutzes sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

Umsetzung

1. Zunächst sollte die Konstruktion so ausgestaltet sein, dass die Einwirkungen des Ortsklimas nicht erhöht werden (z. B., dass Niederschläge ablaufen können und nicht stehen bleiben) und sich keine erhöhten Beanspruchungen in einem Kleinklima einstellen können (Schmutzablagerungen, Spalten, Bereiche mit längerer Befeuchtungsdauer).
2. In einem zweiten Schritt muss das Bauteil so gestaltet sein, dass alle Oberflächen zugänglich sind für eine Oberflächenvorbereitung oder eine -vorbehandlung. So sind z. B. Spalten infolge unterbrochener Schweissnähte zu vermeiden. Dies trifft vor allem auch beim Badprozess wie die Stückgutfeuerverzinkung zu.)
3. Damit der metallische Überzug nicht so leicht verletzt wird und die Beschichtung sich einheitlich dick ausbilden kann, sind scharfe Kanten zu vermeiden resp. die Konstruktion so zu verputzen, dass keine scharfkantigen Erhebungen mehr bestehen und die Kanten gerundet sind. Das Umsetzen dieser Anforderungen gelingt bei Stahlkonstruktionen mit höheren Wanddicken, jedoch nicht bei dünnen Blechbauteilen, sodass dann andere Massnahmen (Design, andere Korrosionsschutzsysteme) einzusetzen sind.
4. Mit der Oberflächenvorbereitung ist ein einheitlicher metallischer Ausgangszustand zu schaffen für die Haftung der Beschichtungsstoffe: definierte Freiheit von Korrosionsprodukten, Oxiden, Korrosionsstimulatoren, Staub, artfremden Verunreinigungen (wie z. B. Markierungen), sowie eine definierte Rauigkeit oder die Erzeugung einer haftungsvermittelnden Schicht.
Selbstredend ist für diesen Prozessschritt sicherzustellen, dass das Resultat der Oberflächenvorbereitung erhalten bleibt: Geschützte Umgebung (z. B. im Werk) mit gesicherten Klimabedingungen (genügendem Taupunktabstand, Erzeugung und Einhaltung eines bestimmten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsfensters für die nachfolgenden Beschichtungen).
Im Falle einer Oberflächenvorbehandlung wird hingegen eine Konversionsschicht erzeugt, bei dieser spielt die Rauigkeit eine geringere Rolle.
5. Es ist ein Systems mit „gesicherter Beständigkeit“ (Nachweis von bestandenen Beständigkeitsprüfungen nach ISO 12944-6 [15], oder ein zertifizierten Systems (z. B. BAST) zu wählen.
6. Es muss eine optimale Ausführung des Systems, innerhalb der zulässigen Verarbeitungsgrenzen, mit komfortablen Randbedingungen und nicht grenzwertigen (genügend Zwischentrockendauer, abgestimmt auf tatsächliche Temperaturen und Schichtdicken) erfolgen.
7. Es hat eine schwachstellenfreie Ausführung (umfassende Prüfung auf Porenfreiheit und Erfüllung der Schichtdicken) zu erfolgen.
8. Über die gesamte Umsetzung hat eine umfassende Qualitätssicherung: mit Rückverfolgbare Dokumentation aller qualitätsrelevanten Prozessschritte zu erfolgen.

Endprodukt, Zusammenfassung

Ein erfolgreicher Korrosionsschutz mittels Beschichtungen basiert auf Vorleistungen am Werkstoff 1 (Design, Verputzarbeiten etc.), verlangt zwingend eine bestimmte Oberflächenvorbereitung, und ist letztlich das Zusammenspiel von einigen Wertschöpfungsschritten, welche eigentlich mehr sind als die Summe der Beiträge. Auf Seite Werkstoff ist zu ergänzen: Der Korrosionsschutz mittels Beschichtungen ist nur so gut wie seine Schwachstelle, sei es die Gestaltung von Werkstoff 1 und die konstruktive Ausbildung von Details, oder die Oberflächenvorbereitung am Werkstoff 1, oder die geringste Schichtdicke des Werkstoffs 2. Auf Seite Beanspruchung ist zu beachten, dass die Stelle mit der höchsten Beanspruchung entscheidend ist in Bezug auf die Erreichung der angedachten Schutzdauer.

Verhalten der beanspruchten Beschichtung

Ein passiver Korrosionsschutz mittels Beschichtungen unterliegt Beanspruchungen, welche ihren Abbau und ihre Zerstörung nach sich ziehen. Dieser ist in drei Phasen unterteilt:

1. Glanzverlust, Farbtonänderung, Kreiden und Deckschicht Filmabbau
2. Weiterer Filmabbau, Versprödung, Haarrisse, Quellung und partielle Mikroausbrüche
3. Blasen, Unterwanderung, Schichtentrennung (Delamination), Unterrostung und Perforation des Substrates.

Nach dem Abbau der Beschichtung und des anfänglichen Abnutzungsvorrat ist ein Teil oder Vollerneuerung des Korrosionsschutzsystems erforderlich. Der Anfangsabnutzungsvorrat muss an jeder Stelle des Objekts ein bestimmtes Minimum betragen. Andernfalls fällt die Schutzdauer verkürzt aus.

3.3.2 Reale Korrosionssysteme – Beispiel Zink

(I) Stückgut-Feuerverzinkung gemäss ISO 1461 [20]

Der metallische Überzug, welcher beim Feuerverzinken gebildet wird, besteht aus Legierungsschichten. Die oberste Schicht ist idealerweise die kristalline Reinzinkschichtphase, welche das typische Zinkblumenmuster zeigt.

Die Korrosionsschutzwirkung des unedlen Metalls Zink basiert auf der Bildung einer Deckschicht aus Zinkkarbonat. Diese ist praktisch wasserunlösliche und korrosionshemmende Schicht, welche sich allerdings erst mit der Zeit durch die Reaktion mit Kohlendioxid bei Luftkontakt aufbaut. Wird dieser Vorgang der Schichtbildung aus Zinkkarbonat durch Kondensatwasserkontakt auf der jungen Feuerverzinkung behindert, entsteht wasserlösliches Zinkhydroxid (Weissrost). Dabei können erhöhte Abtragsraten von bis über 30 µm/a auftreten. Der Weissrost wird daher bald von Rotrost verdrängt, welcher Korrosion der Eisen/Zink-Legierungsschicht oder des Grundwerkstoffs anzeigt.

Zink ist ein amphoterer Metall: in saurem oder alkalischem Wasser geht Zink mit zunehmenden Abtragsraten in Lösung. Für praktische Anwendungen reicht das Einsatzspektrum in erster Näherung über eine pH-Wert-Bandbreite von ca. 6.5 bis 12.

Saure Niederschläge und insbesondere deren Aufkonzentration an Stellen mit verzögertem Abtrocknen lassen Abtragsraten von bis zu 10 µm/a entstehen. Gemäss SN EN ISO 12944-2:2018 ist für die höchste Korrosivitätskategorie CX mit einem Abtrag von 8.4 bis 25 µm/a zu rechnen. Der zu erwartende flächige Abtrag der Feuerverzinkung in einem aggressiven Klima ist etwa linear. Dabei ist zu beachten, dass seit 1998 die Zinkabtragsraten von auf Bewitterungsständen ausgelagerten Prüfkörpern, dank Umweltschutzmassnahmen und in der Folge geringeren Mengen Schwefeldioxid in der Atmosphäre, etwas abgenommen haben.

Abtragsraten für Tunnelatmosphären sind nicht normiert. Diese dürften jedoch der Kategorie CX entsprechen. Insgesamt ist Zink für eine Anwendung in Tunnelatmosphäre technisch uninteressant, da bei Zinkschichtdicken von 80 µm höchstens ca. ab 10 Jahre Schutzdauer zu erwarten sind.

Hingegen sind feuerverzinkte Stahlkonstruktionen mit geeigneten zusätzlichen Beschichtungen in der Lage, auf längere und technisch realistische Schutzdauern zu kommen. Solche Beschichtungen müssen u.a. sicherstellen, dass an der gestrahlten Phasengrenze aus Zink keine sauren Reaktionsprodukte entstehen, welche Zink angreifen. Ausserdem sind die oft sauren Beanspruchungen fernhalten.

Die Schichtdicken der Feuerverzinkung sind einerseits legierungsbedingt und andererseits wanddickenabhängig, sowie geringfügig prozessabhängig. Bis zu einem gewissen Ausmass wäre es von Vorteil, mehr „Abnutzungsvorrat“ durch erhöhte Zinkschichtdicken zu erzeugen. Dem gegenüber stehen verminderte Kohäsion innerhalb der Legierungsschichten, welche die Schutzwirkung von dickeren Zinkschichten zusätzlich verringert.

Optimal zum Feuerverzinken geeignete Stähle weisen einen definierten und tiefen Silizium- und Phosphorgehalt auf (Bezug: ISO 14713-2 [32]). Andernfalls bildet sich die Reinzinkschichtphase nicht oder nur beschränkt aus, oder es entstehen weniger stabile Legierungsschichten, welche weniger gut haften und z. B. bei einem nachfolgendem Feinstrahlen (Sweepen) leichter abplatzen. Unberuhigte Stähle (z. B. St 52, S355) weisen diesbezüglich höhere Gehalte auf und reagieren während dem Tauchen im flüssigen Zink anders: Es wachsen dicke und sprödere Legierungsschichten auf, bekannt als Sandelin- und/oder Seabisty-Effekte.

- Bei Gehalten von $\text{Si} + \text{P} < 0.03\%$ entsteht eine gleichmässige zunächst noch silbrig-helle Zinkschicht und ggf. ein Zinkblumenmuster.
- Bei Gehalten von $\text{Si} + \text{P} > 0.03$ bis 0.013% entsteht eine ungleichmässige dicke Zinkschicht (Sandelin-Effekt).
- Bei Gehalten von $\text{Si} + \text{P} > 0.13$ bis 0.28% entsteht eine gleichmässige, matte, schichtdickenmässig mittlere Zinkschicht (Sebisty-Effekt).
- Bei Gehalten von $\text{Si} + \text{P} > 0.28\%$ entsteht eine ungleichmässige, dicke, raue, sprödere Zinkschicht (Sandelin-Effekt).

(II) Verzinkte Schrauben

Im Zusammenhang mit einem duplexierten System sind die Verbindungselemente, welche mitbeschichtet werden, ebenfalls von Bedeutung. Oft weisen sie eine deutlich geringere Dicke der Zinkschicht auf als die zu verbindenden Konstruktionen. Ausserdem kann die Situation eintreten, dass sie nach dem Feinstrahlen einen Grossteil ihrer Schichtdicke verloren haben.

Galvanisch verzinkte Schrauben gemäss SN EN ISO 2081 sind aufgrund der geringen Zinkschichtdicken und der Problematik der Wasserstoffbildung für den Einsatz in Tunnels unzulässig. Grössere Schichtdicken auf hochfesten Schrauben können nur durch Feuerverzinken erreicht werden. Diesbezüglich sind EN 14399-3 [51] und -4[52], zu beachten.

3.3.3 Reale Korrosionssysteme – Beispiel Duplexsystem

Beim Duplexsystem sind theoretisch folgende Varianten möglich:

Werkstoff 1: Baustahl geschweisst, Bandstahl oder Blech (Coil, als Halbzeug)

Werkstoff 2: Zinküberzug wie folgt:

- a Schmelztauchüberzug Stückgutfeuerverzinkung nach ISO 1461 [12]. Schichtdicken bei ab 6 mm Wanddicke ab $70 \mu\text{m}$
- b Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band oder Blech aus Baustahl nach EN 10326 [50]. Schichtdicken $18 - 42 \mu\text{m}$, je nach Vorgabe
- c Kontinuierlich mit Aluminium-Zink-Überzügen veredeltes Band und Blech nach EN 10215 [49]: Auflagegewicht bis 300 g/m^2 (Schichtdicken bis ca. $28 \mu\text{m}$), je nach Vorgabe
- d Galvanisch abgeschiedene Überzüge: Hier nicht betrachtetes Verfahren (ungeeignet für den Einsatz in Tunnels)

Werkstoff 3: Beschichtungssystem (mit vorgängiger Oberflächenvorbereitung oder –Vorbehandlung des Zinküberzugs und ggf. dito für die verzinkten Verbindungselemente)

Folgen

Ein „echtes“ Duplexsystem ist lediglich im Fall von Variante a) gegeben. Werden hingegen beispielsweise aus bandverzinkten Bandstahlgemäss b) oder c) Teile ausgeschnitten, sind die entstandenen Schnittkanten frei von Zink und nicht mehr geschützt. Zudem sind sie scharfkantig und kaum fehlerfrei zu beschichten. Das ist eine ungünstige Ausgangssituation für die nachfolgenden Beschichtungen des Duplexsystems auf folgenden Gründen: Es fehlt aktive Grundierung und folglich liegt lediglich eine passive Beschichtung mit Barrierewirkung vor. An den Kanten besteht zudem das Problem von unterschichtdicken mit erhöhtem Risiko von Fehlstellenbildung.

Aus diesen Gründen kommt für Tunnels nur eine Schmelztauchverzinkung mit anschliessender Beschichtung als Duplex System in Frage.

3.4 Detailabklärungen zu nichtrostenden Stählen

3.4.1 Flächenkorrosion

Unter den Bedingungen, welche in Tunnels vorherrschen wird Stahl, Zink und Aluminium starke Flächenkorrosion zeigen. Der Einsatz dieser Werkstoffe kommt daher nur in Kombination mit einer zusätzlichen Beschichtung in Frage.

Demgegenüber sind nichtrostende Stähle mit einem schützenden Passivfilm für Flächenkorrosion geschützt. Diese Werkstoffklasse kann folglich ohne zusätzliche Beschichtung entsprechend Abb. 1 im Umgebungsmedium eingesetzt werden. Dieser Passivfilm bindet sich spontan beim Kontakt mit dem Umgebungsmedium. Er kann sich nach Beschädigung auch spontan neu bilden. Die gleichmässige Flächenkorrosion tritt bei nichtrostenden Stählen nur bei hohen Säurekonzentrationen auf. Bei hohen Temperaturen wird diese Flächenkorrosion zusätzlich begünstigt. Im Tunnel ist diese Angriffsform jedoch eher von untergeordneter Bedeutung. Nur im Falle von starken Aufkonzentration von Säure ist diese zu erwarten. Dies erfolgt insbesondere durch Reaktion von Stickoxiden und Schwefeldioxyden aus Verbrennungsmotoren, welche zu Schwefelsäure und Salpetersäure reagieren können.

Nichtrostende Stähle sind daher prinzipiell gut für den Einsatz in Tunnels geeignet. Allerdings treten bei unzureichender Legierungszusammensetzung werkstoffspezifische Korrosionsarten auf, welche zum schnellen Versagen führen können. Diese werden im Folgenden diskutiert.

3.4.2 Loch- und Spaltkorrosion

Die Beständigkeit gegenüber Loch- und Spaltkorrosion wird wesentlich durch die Legierungselemente Chrom, Molybdän und auch Stickstoff bestimmt. Die Wirksumme (vgl. Kapitel 2.1) wird üblicherweise als Mass für die Beständigkeit von nichtrostenden Stählen gegenüber Lochkorrosion verwendet. Zu beachten ist, dass die Wirksummen nur einen Hinweis auf die Korrosionsbeständigkeit geben kann, da sie lediglich die Legierungszusammensetzung berücksichtigt und dabei annimmt, dass alle Elemente homogen in der Metallmatrix gelöst vorliegen. Die tatsächliche Beständigkeit ist aber abhängig von einer Vielzahl weiterer Faktoren wie z. B.: Gefüge, Intermetallische Phasen, Segregationen, Wärmebehandlung, Schweissung, Oberflächenzustand, Verunreinigungen sowie Verarbeitungsprozessen.

Die Korrosionsschutzwirkung von nichtrostenden Stählen basiert auf der Bildung eines Passivfilms. Dieser unterbindet den weiteren Korrosionsprozess nahezu vollständig. Nach neuesten Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass kontinuierlich lokale Aktivierung von Korrosion und Repassivierung auf den Oberflächen von nichtrostenden Stählen ablaufen. Diese sogenannte metastabile Lochkorrosion wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst:

- Nichtmetallische Einschlüsse führen zu bevorzugten Stellen von Korrosionsaktivierung aufgrund der Störung der Passivität. Dabei spielen mechanische Spannungen aber auch Temperaturveränderungen eine wesentliche Rolle
- Nach erfolgter Aktivierung erfolgt meist die Neubildung des Passivfilms. Diese sogenannte Repassivierung wird durch lokal verringerte Legierungszusammensetzung oder beim Korrosionsangriff freigesetzten Substanzen ungünstig beeinflusst werden.
- Unter sehr ungünstigen Bedingungen kann die Repassivierung nicht erfolgen. Stattdessen entwickelt sich die metastabile Lochkorrosion in ein stabiles Lochwachstum.

Die Bildung von stabiler Lochkorrosion wird durch grosse oder zahlreiche nichtmetallische Einschlüsse, die Bildung von intermetallischen Phasen, Säure, hohe Chloridgehalte begünstigt. In Spalten werden diese Bedingungen zusätzlich verschärft. Die Legierungselemente Molybdän und Stickstoff spielen im Zusammenhang mit dem Repassivierungsprozess eine entscheidende Rolle.

Bei der metastabilen Lochkorrosion wird oft beobachtet, dass die Korrosionsauslösende Stelle (z. B. der nichtmetallische Einschluss) nach der Repassivierung aufgelöst wurde.

Dieser Prozess kann folglich als eine Art Selbstheilung der Metalloberfläche bezeichnet werden.

Kritisch bezüglich des Auftretens von Lochkorrosion ist das Vorliegen von Einschlüssen. Diese führen zu einer behindern die Passivität und begünstigen die Aktivierung von metastabiler Lochkorrosion an der Metalloberfläche und können in gewissen Fällen durch deren Zusammensetzung den Repassivierungsprozess behindern. Besonders kritisch sind dabei die Mangansulfideinschlüsse, Chromkarbide und Intermetallische Phasen mit Molybdän (Sigma Phase (Zusammensetzung prüfen)). Insbesondere die Chromkarbide, welche vor allem beim Schweißen entstehen, können ausgeprägte negative Auswirkungen durch Veränderung der lokalen Legierungszusammensetzung haben. Dieser Prozess wird als Sensibilisierung bezeichnet. Wird der nichtrostende Stahl erhitzt, z. B. beim Schweißen, können sich Ausscheidungen aus Chromkarbiden bilden. Diese entziehen dem Grundmaterial Chrom, was die Korrosionsschutzwirkung in der Umgebung vermindert. An diesen Stellen wird die Beständigkeit gegenüber Lochkorrosion reduziert. In der Regel treten die Chromkarbide bei Korngrenzen auf. Dem kann begegnet werden, indem Stähle mit speziell tiefen Kohlenstoffgehalt verwendet werden. Wenn kein Kohlenstoff mehr zu Verfügung steht, können sich entsprechend auch keine Chromkarbide mehr bilden. Als Beispiel ist der Stahl 1.4404 zu nennen der durch den niedrigen Kohlenstoffgehalt schweisbar ist. Dies im Gegensatz zu der Stahlqualität 1.4401. Eine andere Möglichkeit ist die Zugabe von Karbidbildnern. Dies sind insbesondere Elemente wie Titan oder Niob. Dies ist beim Stahl 1.4571 der Fall, der ebenfalls schweisbar ist. Im Gegensatz zum 1.4404 werden hier zwar Ausscheidungen erzeugt, diese bestehen aber aus Titan- oder Niobkarbid und führen damit nicht zu einer Verringerung der Chromkonzentration und keiner Sensibilisierung. Die sich bildenden Partikel können aber trotzdem die Passivierung beeinflussen.

Das Risiko von Loch- und Spaltkorrosion steigt mit zunehmender Chloridbelastung und abnehmender Beständigkeit des nichtrostenden Stahls. Ab einer Beaufschlagung von ca. $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ muss erfahrungsgemäss bei nichtrostenden Stählen der Gruppe II nach SIA 179 mit Korrosion gerechnet werden.

3.4.3 Spannungsrissskorrosion

Voraussetzung für das Auftreten von Spannungsrissskorrosion ist das Vorliegen von mechanischen Spannungen einem empfindlichen Werkstoff – sowie einem Spannungsrissskorrosionsauslösenden Medium. Nur in Kombination aller drei Faktoren ist das Auftreten von Spannungsrissskorrosion möglich. Gefährlich ist die Spannungsrissskorrosion deshalb, weil hohe Risswachstumsgeschwindigkeiten auftreten können, welche mit nur sehr geringem Korrosionsabtrag einhergehen. Daher sind sie vergleichsweise schwierig zu erkennen ist. Es kommt dabei oft zum verformungsarmen spröden Versagen des gesamten Bauteils.

Bis heute sind nicht alle Aspekte der Spannungsrissskorrosion vollständig verstanden. Es soll hier aber eine vereinfachte Darstellung geschildert werden, welche die wesentlichen Aspekte zu erklären vermag.

Im Kapitel Lochkorrosion wurde erläutert, dass es beim Einsatz von nichtrostenden Stählen stets zu Aktivierungs- und Repassivierungsprozessen kommt. Insbesondere bei Bauteilen unter mechanischer Spannung kommt es dabei zu sogenanntem Kriechen. Dies sind minimale plastische Verformungen unterhalb der Streckgrenze. Während diese Verformung nicht zum Bruch führt, kann sie den Passivfilm lokal zerstören. In der Folge wird Korrosion aktiviert und es kommt zur anschliessenden Repassivierung.

Bei Vorliegen von aggressiven Bedingungen, wie tiefem pH-Wert und hohen Chloridkonzentrationen kann diese Repassivierung behindert sein und es kommt zu relevanter Metallauflösung. In ungünstigen Fällen erfolgt diese stets im Bereich mit maximaler Spannungs-konzentration, sodass sich nach zahlreichen Aktivierungs- und Repassivierungsprozessen ein relevanter Metallverlust abzuzeichnen beginnt. Dies Kerbbildung, welche üblicherweise senkrecht zur Lasttrichtung ist, führt zu einer weiteren Erhöhung der

Spannungskonzentration und zu einer weiteren Konzentration der Aktivierungs- und Repassivierungsprozesse auf die sich bildenden Risspitze.

Damit wird deutlich, dass sämtliche Prozesse, welche die Aktivierung begünstigen und die Repassivierung behindern zu einer Verstärkung der Spannungsrisskorrosion führen müssen:

- Höhere mechanische Spannungen führen zu verstärkten Kriechprozessen und somit Aktivierung. Dieser Effekt ist insbesondere an Bauteilbereichen mit erhöhten Spannungsintensitätsfaktoren der Fall.
- Austenitische nichtrostende Stähle weisen eine höhere Anzahl Gleitebenen auf was für die gute Umformbarkeit verantwortlich ist. Diese führt aber zu einem verstärkten Kriechen und begünstigt damit das Auftreten von Spannungsrisskorrosion.
- Ferritische nichtrostende Stähle verfügen über weniger Gleitebenen und haben daher höhere Festigkeiten. Die stark verringerte Kriechneigung macht diese Werkstoffe weitgehend immun gegen Spannungsrisskorrosion. Allerdings führt Wasserstoff im Gefüge zu einer Begünstigung des Kriechens. Als Folge davon zeigen die ferritischen nichtrostenden Stähle eine erhöhte Neigung zu Spannungsrisskorrosion bei Wasserstoffbelastung. Makroskopisch führt dies zu Wasserstoffversprödung.
- Tiefe pH-Werte, erhöhte Chloridgehalte, Sulfide sowie erhöhte Temperaturen führen zu einer Behinderung der Repassivierung und begünstigen somit das Risswachstum.

Damit wird deutlich, dass der erhöhte Gehalt an Molybdän und Stickstoff, welche sich günstig auf die Repassivierung auswirken, zu einer deutlichen Erhöhung der Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion führen müssen. Die bei der Aktivierung auftretende Korrosion wird minimiert, die Kerbbildung unterbunden und eine hohe Dauerhaftigkeit in aggressiven Medien erreicht.

3.4.4 Interkristalline Korrosion

Bei der Interkristallinen Korrosion erfolgt der Korrosionsangriff entlang der Korngrenzen oder korngrenzennahen Bereichen. Gemäss [Kunze] werden dabei folgende Vorgänge unterschieden:

- Verarmung der korngrenzennahen Bereiche an Legierungselementen durch Bildung von Ausscheidungen in den Korngrenzen (Sensibilisierung). Insbesondere beim Schweißprozess kann dies auftreten, indem es bei nichtrostenden Stählen zur Ausscheidung von Chromkarbiden kommt, die zu einer Chromverarmung des umgebenen Materials führen.
- Ein chemischer Angriff auf Ausscheidungen in den Korngrenzen, z. B. ein Angriff auf Titankarbide bei titanstabilisierten austenitischen Stählen.
- Bevorzugter Korrosionsangriff auf die Korngrenze infolge Anreicherung von Spurenelementen wie Phosphor oder Silizium.

Von den genannten Vorgängen hat für den Einsatz von nichtrostenden Stählen die Verarmung an Chrom in den korngrenzennahen Bereichen durch die Bildung von Ausscheidungen (z. B. Chromkarbiden) die grösste praktische Bedeutung. Dieser Sensibilisierung kann begegnet werden indem tiefgekohte Stähle mit einem Gehalt $< 0.03\%$ Kohlenstoff eingesetzt werden, z. B. der Stahl 1.4404. Eine andere Möglichkeit ist die Zugabe von Karbidbildnern wie Titan. Diese bilden mit dem Kohlenstoff Verbindungen und Ausscheidungen und verhindern so die Entstehung von chromverarmten Zonen, z. B. der Stahl 1.4571. Dabei soll der Titangehalt dem 5-fachen Kohlenstoffgehalt entsprechen. Dieser führt aber zur Bildung von Ausscheidungen entlang der Korngrenze.

3.4.5 Austenitische Stähle

Die austenitischen Stähle sind die am meisten verbreiteten nichtrostenden Stähle. Aufgrund ihres Gefüges weisen sie eine hohe Zahl an Gleitebenen auf und sind daher gut umformbar. Allerdings sind sie durch das austenitische Gefüge empfindlicher auf

Spannungsrisskorrosion als beispielsweise ferritische Stahlsorten. Es besteht ein grosses Angebot an Stahlsorten mit unterschiedlichen Wirksummen und Eigenschaften.

Die austenitischen Stähle gelten als gut schweisssbar. Es besteht keine Gefahr von Gefügeumwandlungen wie Grobkornbildung oder Kaltrissneigung. Um eine Sensibilisierung beim Schweißen zu vermeiden, müssen tiefgekohte Stahlsorten (z. B. 1.4404) oder Stahlsorten mit Karbidbildnern (z. B. 1.4571) verwendet werden.

Vergleich 1.4404 – 1.4571

Um das Korrosionsverhalten von 1.4401 zu verbessern, war es früher nur möglich Elemente wie z. B. Titan zuzugeben, die zur Entwicklung des Stahles 1.4571 führten (Zugabe von Titan). Die Herstellung von tiefgekohten Stählen wie z. B. dem Stahl 1.4404 war erst später technisch mit dem Aufkommen der AOD und VOD Verfahren möglich.

Das Korrosionsverhalten der beiden Stähle ist ähnlich, jedoch nicht in allen Punkten gleichwertig. Durch die vorhandenen Titancarbid-Ausscheidungen ist der Stahl 1.4571 anfälliger auf Lochkorrosion als der Stahl 1.4404. Da die Lochkorrosion häufig einen Ausgangspunkt für chloridinduzierte Spannungsrisskorrosion darstellt, ist dementsprechend auch die Beständigkeit gegen chloridinduzierte Spannungsrisskorrosion geringer. Auch die Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion ist bei 1.4571 geringer als bei 1.4404, da die Ausscheidungen als bevorzugte Angriffsstellen darstellen (vergleiche Kapitel 1.1.4).

Das Vorliegen von Ausscheidungen führt dazu, dass auch viele mechanische Eigenschaften beim Stahl 1.4571 im Vergleich zu 1.4404 reduziert sind, wie z. B. Kerbschlagzähigkeit und Kaltumformbarkeit. Die Titankarbide reduzieren die Duktilität. Besser ist jedoch die Warmfestigkeit von 1.4571. Sie liegt mit ca. 400°C höher als beim Stahl 1.4404 mit etwa 300 bis 350°C.

Die Zerspanbarkeit und die Schweisssbarkeit sind bei beiden Werkstoffen gleich gut. Die Polierfähigkeit ist beim Stahl 1.4571 aufgrund der Ausscheidungen im Vergleich zum Stahl 1.4404 geringer.

Für den Einsatz im Strassentunnel spricht beim 1.4404 die bessere Loch- und Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit gegenüber dem Stahl 1.4571. Die Warmfestigkeit ist jedoch etwas geringer was im normalen Betrieb nicht von Bedeutung ist.

Stahl 1.4529, Verarbeitung

Als Vertreter der Gruppe V nach SIA 179: kommt häufig der Stahl 1.4529 bei Befestigungselementen zum Einsatz. Er zeichnet sich durch eine sehr gute Beständigkeit, insbesondere gegenüber chloridinduziertem Lochfrass aus. Zu beachten ist, dass dieser Stahl fachgerecht verarbeitet werden muss. Werden z. B. ungeeignete Umformverfahren eingesetzt, besteht die Gefahr der Bildung der Sigma Phase infolge Überhitzung. Dabei handelt es sich um eine molybdänhaltige intermetallische Phase. Dies hat zur Folge, dass dem Grundmaterial Molybdän entzogen wird, und so die Korrosionsbeständigkeit deutlich reduziert wird. Es sind Fälle bekannt, bei denen für Verarbeitung von 1.4529 die dieselben Prozessparameter wie für 1.4301 eingesetzt wurden. Dies führte zum Verlust der Korrosionsschutzwirkung des 1.4529. Sachgemässe Verarbeitung ist daher von zentraler Bedeutung.

3.4.6 Ferritische Stähle

Die Ferritischen Stähle weisen im Vergleich zu austenitischen Stählen ein Gefüge mit weniger Gleitebenen auf. Dadurch wird eine höhere Festigkeit erreicht und die Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion ist geringer. Das Gefüge hat jedoch auch zur Folge, dass die Kerbschlagzähigkeit abnimmt und die Stähle weniger gut umformbar sind. Die Schweisssbarkeit ist geringer, es besteht eine Neigung zu Grobkornbildung und Aufhärtung durch Martensitbildung, was die Gefahr der Rissbildung steigert. Mit geeigneten Schweiszsusätzen und Schweisstechnologie lässt sich dies vermeiden, was jedoch einen grösseren Aufwand bedeutet.

Aufgrund der Nachteile wie der Umformbarkeit werden ferritische Stähle kaum für BSA Elemente im Tunnel eingereicht. Dies obwohl sie aufgrund der höheren Festigkeit und geringer Empfindlichkeit auf Spannungsrisskorrosion eine prüfenswerte Alternative darstellen würden. In der SIA Norm 179 werden keine ferritischen Stähle aufgeführt, die im Fahrraum eines Tunnels eingesetzt werden können.

3.4.7 Duplexstähle

Die Duplexstähle verfügen über ein zweiphasiges Gefüge, mit einem Anteil von ferritischen und austenitischen Körnern von je etwa 50 %. Dabei wird eine Kombination der Vorteile der austenitischen Stähle (hohe Duktilität) mit jenen der ferritischen Stähle (hohe Festigkeit) angestrebt. Gleichzeitig kann der Anteil der vergleichsweise teuren Legierungselemente Nickel im Vergleich zu austenitischen Stählen reduziert werden. Dies wird u. A. durch die Zugabe von Stickstoff erreicht. Bekanntester Vertreter der Duplexstähle ist der Stahl 1.4462. Dieser Stahl ist in der Norm SIA 179 [5] in der gleichen Beständigkeitsklasse (IV) eingeteilt wie die austenitischen Stähle 1.4439 und 1.4539.

Um die Beständigkeit weiter zu verbessern, wurden die sogenannten Super-Duplex Stähle entwickelt. Dabei ist im Vergleich zum 1.4462 sowohl die Festigkeit als auch die Beständigkeit gegen Lochkorrosion und Spannungsrisskorrosion weiter verbessert. Ein häufig verwendeter Stahl dieser Gruppe ist der Stahl 1.4410.

Zur Differenzierung der Korrosionseigenschaften von Duplexstählen wird häufig folgende

Die Super-Duplex Stähle weisen eine Wirksumme W von > 40 auf während Standard-Duplexstähle eine solche von > 32 aufweisen (berechnet mit $W = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$)

Um die Kosten der Duplexstähle zu senken, wurden die Lean-Duplex Stähle entwickelt. Diese weisen eine Korrosionsbeständigkeit auf, die im Bereich des Stähle 1.4307 und 1.4404 liegt. Gleichzeitig ist die Festigkeit dieser Stähle fast doppelt so hoch wie von den austenitischen Stähle 1.4307 und 1.4404. Für die Lean-Duplex Stähle wurde der Gehalt an vergleichsweise teuren Nickel reduziert und dafür Stickstoff und Mangan zulegiert. Häufig verwendete Vertreter diese Klasse sind der Stahl 1.4162 und 1.4362, die eine Wirksumme von 26 aufweisen. Die Norm SIA 179 [5] teilt diese Stähle in die gleiche Korrosionswiderstandsklasse III ein, wie z. B. den austenitischen Stahl 1.4404.

Die Duplexstähle sollten nicht über Temperaturen über ca. 200°C – 250°C (abhängig vom Werkstoff) ausgesetzt werden, da sonst die Gefahr einer Versprödung besteht.

3.4.8 Untersuchungen Mont Blanc Tunnel

Ende der 1980er Jahre und Anfang der 1990'er Jahr wurden Auslagerungsuntersuchungen von vorgespannten Stahlproben im Mont Blanc Tunnel durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden von der Hilti AG und der ETH Zürich begleitet. Untersucht wurden eine Auswahl an nichtrostenden Stählen. Die Versuche und die Resultate sind in verschiedenen Publikationen erschienen:

- H. Haselmair, R. Morach, H. Boehni: Field and Laboratory Testing of High-Alloy Steels and Nickel Alloys Used in Fastenings in Road Tunnels, Corrosion – Vol 50, No. 2, February 1994 [77]
- H. Haselmair: Stress Corrosion Cracking of Type 303 Stainless Steel in a Road Tunnel Atmosphere, Material Performance, June 1992 [78]
- H. Böhni, H. Haselmair, A. Übeleis, Corrosion-resistant Fastenings in Road Tunnels, Field Tests, Structural Engineering International, April 1992 [76]

Der Tunnel ist 11.6 km lang. Er ist stark befahren und daher herrschen dort auch vergleichsweise aggressive Bedingungen. Für die Versuche wurde eine Nische, etwa 1 km vom französischen Portal ausgewählt. Die Temperaturen bewegen sich dort zwischen 6°C

und 30°C bei einem Mittelwert von 18.5°C. Die im Test verwendeten Materialien sind in Abb. 6 aufgeführt.

1987 wurden insgesamt 960 Proben aus unterschiedlichen Materialien eingebaut. Diese Proben wurden nach unterschiedlichen Zeitspannen zwischen 9 und 36 Monaten ausgebaut und im Labor auf den Korrosionszustand hin untersucht. In Abb. 7 und 8 sind die Resultate zusammengefasst. Abb. 7 zeigt die Ausdehnung der von Lochfrass und Spaltkorrosion betroffenen Fläche in % der Probenoberfläche, Abb. 8 die maximale Angriffstiefe. Beim Material 303 (1.4305) wurde zusätzlich noch Spannungsrisskorrosion festgestellt.

Aufgrund der Resultate werden die Materialien in 3 Gruppen eingeteilt (H. Böhni, H. Haselmair, A. Übeleis, Corrosionresistant Fastenings in Road Tunnels, Field Tests, Structural Engineering International, April 1992 [76]):

- Als ungeeignet für den Einsatz als Befestigungselemente im Beton im Mont Blanc Tunnel werden folgende Materialien bewertet: C-Stahl (ungeschützt), C-Stahl mit organischer Beschichtung, Chromstähle (wie 1.4104 und 1.4521), CrNi-Stähle (1.4305, 1.4301), CrNiMo Stähle vom Typ 316 (1.4571), hMo Stähle wie 1.4439, Aluminiumlegierungen, Messing und Monel K500.
- Als geeignet mit Einschränkungen, z. T. auch wegen der hohen Kosten und schwierigen Verarbeitung werden bezeichnet: Duplex Stahl 318L (1.4462), CuNi2Si, Ni Legierung 625 und Hastelloy, Titan, Alloy 24 (1.4565).
- Als optimale Materialwahl werden bezeichnet: NO8925 (1.4529) und 254 SMO, beides Stähle die etwa 6% Molybdän enthalten.

In einer weiteren Publikation (H. Haselmair: Stress Corrosion Cracking of Type 303 Stainless Steel in a Road Tunnel Atmosphere, Material Performance, June 1992 [78]) wird auf die Neigung zur Spannungsrisskorrosion des Stahle 303 eingegangen. Am Schluss wird eine Warnung ausgesprochen für den Einsatz dieses Stahles in Umgebungen wo Chloride vorhanden sind und saure Bedingungen entstehen können, wie dies im Tunnel möglich ist. Unter diesen Bedingungen soll der Einsatz als Befestigungselement strikt vermieden werden.

4 Analyse IST-Situation

Der ursprüngliche Ansatz war, ein möglichst aussagekräftiges Abbild der tatsächlichen Situation zu erhalten (IST-Zustand). Dazu dienten u.a. Betreiberumfragen nach einem vorbestimmten Muster, welche dann ausgewertet wurden.

Bereits bei der Evaluation der Umfrage zeigte sich, dass dieses Ansinnen heikel ist und dass die Möglichkeit von Fehlinterpretationen innerhalb der verschiedensten Korrosionssystemen (Werkstoff plus Umgebungsmedium) besteht.

Tatsächlich hat sich das noch stärker bestätigt als befürchtet. Es sind zwei Hauptgründe zu erkennen:

- Statistische quantitative Gründe: Der Rücklauf der Umfragen ergab nicht eine genügende Anzahl, um eine statistisch belastbare Aussage abzugeben. Sie genügen sogar kaum für eine Trendaussage. Analoges gilt für die betrachteten Schadensfälle, die ebenfalls in einer statistisch nicht ausreichenden Anzahl vorliegen.
- Qualitative Gründe: 1) Unzureichend definiertes Umgebungsmedium, 2) Unzureichendes Fachwissen zu den Werkstoffen und zur Korrosion

Dazu einige Erläuterungen:

1. Kleinklima: Während die Aggressivität der Tunnelluft als quasi-Ortsklima einigermaßen bekannt ist, bestehen beispielsweise Unsicherheiten zum Kleinklima. So ist die Wechselwirkung von Partikeln, Schadstoffen und von Aerosolen (Streusalz, Russ, Abrieb, etc.) auf die unterschiedlichen Werkstoffe und Korrosionsschutzsysteme weitgehend unbekannt. Somit kann der gleiche Werkstoff im gleichen Objekt an einer bestimmten Stelle seinen Anforderungen genügen, an einer anderen Stelle aber nicht.
2. Änderung des Umgebungsmediums: Durch die Zunahme von modernen aber zugleich aggressiveren Tausalzen (mit Anteilen Calcium- und Magnesiumchlorid) entstehen erhöhte Beanspruchungen an die Korrosionsschutzsysteme. Ob und seit wann diese Tausalze eingesetzt wurden und von welchem Einfluss die Art des eingesetzten Tausalzes und dessen Austrag ist, konnte bei der Umfrage nicht berücksichtigt werden.
3. Gewisse Aggregate bestehen aus verschiedenen Werkstoffen sowie innerhalb des gleichen Werkstoffes mit unterschiedlicher Bearbeitung, welche vertiefte Kenntnisse für eine Beurteilung verlangen würden. Dazu zwei Beispiele:
 - Während der Werkstoff, z. B. als Lampengehäuse aus Aluminium, noch erkannt wird, sind Feinheiten wie der tatsächliche Legierungstyp (z. B. „seewasserbeständige Legierung“, oder die Herstellart (z. B. „Aluminium-Stranggussprofil“, oder eine Nachbehandlung (z. B. Eloxiert), oder die Art einer zusätzlichen Beschichtung (z. B. „Pulverbeschichtung) bei einer typischen Inspektion nicht erkennbar. Das kann dazu führen, dass der Werkstoff „Aluminium“ pauschal als „nicht genügend beständig“ bewertet werden könnte.
 - Bei nichtrostendem Stahl ist, nebst der Stahlzusammensetzung, der Oberflächenzustand (z. B. die Glätte der Oberfläche, oder die Nachbehandlung wie „gebeizt und passiviert“, von grosser Bedeutung. Diese Werkstoffeigenschaften können im Rahmen einer Inspektion ebenfalls nicht erfasst werden.
4. Bei einer einfachen Sichtprüfung auf Korrosionsangriffe fehlen zudem in der Regel eine ausreichende Reinigung aller relevanten Oberflächen und eine ausreichende Beleuchtung.
5. Bei einer Inspektion werden die Aggregate vor allem einer Sichtprüfung unterzogen. Untersuchungen und zerstörungsfreie Untersuchungen sind nicht die Regel. Dabei wird es von vornherein, je nach Fach- und Erfahrungswissen des Prüfers, und je nach Objekt, gewisse Prioritäten geben. Die Sichtprüfung erfolgt also nicht objektiv.
6. Bei einfachen Inspektionen können viele relevante Oberflächen gar nicht inspiziert werden. Beispielsweise ist bei einer A4-Schraubverbindung der unter Spannung stehende Schraubenschaft mit Gewinde nicht einsehbar. Ein allfälliger Korrosionsangriff mit Spannungsrisskorrosion wäre zudem von blossen Auge nicht sichtbar, selbst bei einer sauberen Oberfläche.
7. Die Beurteilung für „Objekt mit Mangel“ oder „Objekt problemhaft“, ist technisch sehr dehnbar. Die Begriffe „Korrosionsschaden“ und „Korrosionserscheinung“ und deren

Unterschiede werden bei den involvierten Betreibern unterschiedlich verstanden. Aus Sicht der Betreiber besteht erst dann ein Problem, wenn die Anlage nicht mehr verfügbar ist. Dies kann in der Umfrage zu irreführenden Bewertungen führen.

8. Die Ergebnisse der Sichtprüfung werden beim Ausfüllen der Umfragevorlagen beurteilt, gewichtet, abgestuft, gerundet. Somit werden sie nochmals gefiltert. Beim Auswerten der Umfrage entsteht schliesslich eine dritte Filterung.

Daraus folgt, dass Die korrosionstechnisch korrekte Zustandsbeurteilung eines Korrosionssystems in der Nutzungsphase komplex, anspruchsvoll und aufwändig ist. Die Ergebnisse zum IST-Zustand sind mit diesem Hintergrund mit einer Unsicherheit behaftet und vor allem von dokumentarischem Wert.

4.1 Analyse Schadensfälle

Abb. 3 zeigt die Schadensfälle, welche im Rahmen der Forschungsarbeit berücksichtigt wurden. Die Abb. 3 zeigt einen reduzierten Ausschnitt. Die Gesamtliste mit der detaillierten Auflistung und Beurteilung der Schadensfälle ist dem Anhang I.1 zu entnehmen.

Abb. 3 Liste der betrachteten Schadensfälle (reduziert)

Nr.	Anlage	Korrosionsschutz	Schadensbild	Betriebsdauer bis Feststellung	Objekt	Verkehrsart
001	Strahlventilator	Duplex-System	Ablösung der organischen Beschichtung	1-3 Jahre	Uetliberg	RV ≥2-spurig
002	Strahlventilator	Duplex-System	Ablösung der organischen Beschichtung	1-3 Jahre	Gubrist	RV ≥2-spurig
003	Strahlventilator	Duplex-System	Ablösung der organischen Beschichtung	1-3 Jahre	Entlisberg	RV ≥2-spurig
004a	Strahlventilator	Duplex-System	Ablösung der organischen Beschichtung	7-9 Jahre	Entlisberg	RV ≥2-spurig
004b	Strahlventilator	Duplex-System	Ablösung der organischen Beschichtung	7-9 Jahre	Hafnerberg	RV ≥2-spurig
005	Strahlventilator	Duplex-System	punktueller Ablösung der organischen Beschichtung	4-6 Jahre	Islisberg	RV ≥2-spurig
006	Abluftklappe	1.4571	Lochkorrosion	10 Jahre	Gotthard Strassent.	GV
007	Abluftklappe	1.4571	Spalt- und Lochkorrosion	4 Jahre	Uetliberg	RV ≥2-spurig
008	Signalträger	Duplex-System	Korrosionsprodukte (Zink), Ablösung organ. Beschichtung	4-6 Jahre	Entlisberg	RV ≥2-spurig
009	Strahlventilator	Aluminium-Guss	Schaufelbruch Lauf-schaukel	1-3 Jahre	Div. Tunnel	GV / RV
010	Strahlventilator	1.4571	Lochfrasskorrosion Schalldämpfer	7-9 Jahre	Bubenholz	RV ≥2-spurig
011	Strahlventilator	AlSi12 - Guss	Starke Korrosionsangriffe	5 Jahre	Quarten	RV ≥2-spurig
012	Lampengehäuse	AlSi13+Thermolackierung	Korrosionserscheinungen bis ca. 50 µm Tiefe	12 Jahre	Seelisberg	RV ≥2-spurig
013	Befestigungselement	1.4529	Deutlich reduzierte Beständigkeit	0 Jahre	Kirchenwald	RV ≥2-spurig
014	Abluftklappe	1.4571	Lochkorrosion	5 Jahre	Aescher	RV ≥2-spurig
015	Befestigungselement	Gruppe I nach SIA 179	Spalt- und Lochkorrosion	18 Jahre	Gubrist	RV ≥2-spurig

016	Befestigungselement	Gruppe II nach SIA 179	Spaltkorrosion	18 Jahre	Gubrist	RV ≥2-spurig
017	Strahlventilatoren Befestigungselement	Gruppe II nach SIA 179	Spalt- und Lochkorrosion, Spannungsrissskorrosion	6 Jahre	Walensee	RV ≥2-spurig
018	Strahlventilatoren Lochblech	Nichrostender Stahl	geringfügige Korrosionserscheinungen	6 Jahre	Walensee	RV ≥2-spurig
019	Lampengehäuse	Aluminium-Guss	starke Korrosionserscheinungen am Gehäuse	31 Jahre	Kerenzerberg	RV ≥2-spurig
020	Strahlventilator	Aluminium EN AC-48000	Bruch Rotorschaukel aus Aluminium-Guss	8 Jahre	-	GV

4.1.1 Korrodierte Laufräder Strahlventilatoren (Schadenfall 011)

Bei der 1993 durchgeführten Revision der Strahlventilatoren aus den Tunnels Quarten Süd und Schoren-West wurden starke Korrosionsangriffe an den Laufrädern nach einer Einsatzdauer von ca. 5 Jahren festgestellt. Für die Laufräder wurde der Werkstoff AlSi12 verwendet. Diese Legierung ist gut giessbar und gilt innerhalb der Aluminiumlegierungen als vergleichsweise gut korrosionsbeständig. Von gewissen Herstellern wird sie auch als "meerwasserbeständig" bezeichnet.

Die Untersuchungen im Labor ergaben Angriffstiefen von 10–15 mm Tiefe. Die Korrosion hat sich dabei weitgehend entlang von Poren, Lunkern und Oxidhäuten ins Innere des Materials ausgebreitet. Die gesamte Oberfläche war von Korrosion betroffen. Die Untersuchungen ergaben ausserdem, dass die Gussqualität als "schlecht" zu bezeichnen ist. Rissbildungen wurden nicht festgestellt. Von einer weiteren Verwendung der Laufräder wurde abgeraten.

4.1.2 Lampengehäuse Seelisbergtunnel (Schadenfall 012)

3 Lampengehäuse aus dem Seelisbergtunnel wurden 1993 auf ihren Korrosionszustand hin untersucht. Die Gehäuse bestehen aus der Legierung AlSi13 (Materialstärke ca. 2 mm) und einer Thermolackierung (45 µm). Dabei dürfte es sich um eine Einbrennlackierung mit Pulverlacken handeln. Die Gehäuse waren ca. 12 Jahre im Einsatz.

Die Untersuchung ergab, dass die Beschichtung stellenweise abgeblättert ist. Darunter waren weissliche Korrosionsprodukte sichtbar. Die Oberfläche war aufgeraut der Abtrag mit ca. 50 µm gering. Risse wurden keine beobachtet.

Bei der Beurteilung wurde darauf hingewiesen, dass Aluminiumlegierungen in der Tunnel Atmosphäre nur bedingt beständig sind. Ein Vergleich mit dem Mont Blanc Tunnel, der bekannt ist für seine sehr aggressive Atmosphäre, zeigt, dass der Fortschritt im Seelisbergtunnel bei weniger aggressiven Bedingungen klar langsamer erfolgt. So wurden im Mont Blanc Tunnel nach einer Auslagerungszeit von 3 Jahren Lochtiefen von 0.8 mm festgestellt, im Seelisbergtunnel solche von 0.05 mm nach 12 Jahren.

Im Weiteren wurden Reflektoren, Elektrokabel und Dichtungen untersucht. Dichtungen schwarz (möglicherweise Neopren) waren in gutem Zustand, während die weisse Dichtung nur noch eine geringe Elastizität aufwies. Die Elektrokabel und Reflektoren waren in einem guten Zustand.

Die gemessenen Chlorid Beaufschlagungen lagen zwischen 21 und 76 µg/cm². Dies ist ein stark erhöhter Wert, welcher an nichtrostenden Stählen der Gruppe II nach SIA 179 [5] zu Lochkorrosion führt.

4.1.3 Gubrist Tunnel: Aufhängungen, Befestigungen, Türen (Schadenfälle 015 und 016)

Die Bauteile wurden 2003 vor Ort beurteilt. Zudem wurden ausgewählte Elemente im Labor detailliert untersucht.

Es wurden Befestigungselemente aus der Gruppe II und III nach SIA 179 [5], teilweise gemischt, eingesetzt. Für Befestigungen im Beton wurden Qualitäten der Gruppe III verwendet.

Der überwiegende Teil der Befestigungs- und Verbindungselemente aus nichtrostendem Stahl weist Spaltkorrosion auf.

Bauteile der Gruppe II zeigen sowohl bezüglich Lochtiefe als auch bez. Lochdichte deutlich stärkere Korrosionserscheinungen als solche aus der Gruppe III. Die Lochtiefen an der Gruppe III betrugen ca. 0.1–0.3 mm, während Gruppe II bis 1 mm festgestellt wurde. Im Gewindebereich sind die Angriffstiefen kleiner als 0.1 mm.

Ausserhalb des Spaltbereiches waren bei Befestigungselementen aus der Gruppe III keine Lochkorrosion vorhanden, bei Elementen aus Gruppe II war auch dort Lochkorrosion vorhanden.

Die durchgeführten Rissprüfungen ergaben keine Hinweise auf durch Spannungsrissskorrosion verursachte Risse. Rissähnliche Strukturen stellen sich bei genaueren Untersuchungen als Doppelungen (fabrikationsbedingte Materialüberlagerungen) heraus.

Die gemessenen Chloridbeaufschlagungen waren sehr unterschiedlich. Während an Signalisationsanlagen und Brandklappen häufig sehr hohe Werte (über 130 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) gemessen wurden, wurden an den übrigen Bauteilen mittlere bis geringe Chloridgehalte (340 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) gemessen.

4.1.4 Kirchenwaldtunnel, neue Befestigungselemente (Schadenfall 013)

Die Korrosionsbeständigkeit von verschiedenen für den Einsatz vorgesehenen neuen Befestigungselementen aus 1.4529 der Gruppe V nach SIA 179 [5] wurde 2009 überprüft.

Elektrochemische Untersuchungen zeigten eine für die Werkstoffqualität ungewöhnlich stark reduzierte Lochkorrosionsbeständigkeit. Diese Reduktion der Beständigkeit beschränkte sich auf den Oberflächenbereich und war die Folge der Wärmeentwicklung während dem Umformprozess der Bauteile. Durch Elektropolieren oder Beizen sowie Passivieren konnte das Korrosionsverhalten deutlich verbessert werden.

4.1.5 Lärmschutzgalerie Hergiswil (Schadenfall 021)

Im 2014 wurde der Korrosionszustand von Trägern sowie von Wand- und Deckenverkleidungen untersucht. Für Verankerungen von Trägern wurden teilweise "Staifix" Stangen aus dem Stahl 1.4429 der Gruppe III nach SIA 179 [5] verwendet. Ausser punktförmigen Korrosionserscheinungen an einer Stange wurden keine Korrosionsangriffe festgestellt. Das Alter betrug 31 Jahre.

Bei Elektroinstallationen sind Befestigungselemente aus der Gruppe II und III vorhanden. Teilweise wurden dort vergleichsweise geringe Korrosionsangriffe festgestellt.

Stahl Bei verzinkten Bauteilen ohne organische Beschichtung ist die Verzinkung oft stark oder vollständig abgetragen und es hat bereits Korrosion am Grundmaterial eingesetzt. Bei Stahlträgern mit Duplexbeschichtung ist die Schutzdauer der organischen Beschichtung in der Regel erreicht oder überschritten. Stellenweise hat bereits Korrosion am Grundmaterial eingesetzt, in den meisten Fällen ist noch eine Zinkschicht vorhanden, die das Grundmaterial vor Korrosion schützt. Bei den Stützen wurde die organische Beschichtung vor 20 Jahren erneuert. Der Zustand ist insgesamt gut. Es sind nur wenige, kleinflächige Beschädigungen mit Roststellen vorhanden. Die Beschädigungen dürften durch Steinschläge verursacht worden sein.

Befestigungselemente bestehen aus nichtrostendem Stahl. Bei Bauteilen der Gruppe III war keine Korrosion vorhanden, während bei Elementen der Gruppe II Rostflecken festgestellt wurden.

Die Wandverkleidungen und Deckenverkleidungen bestehen zum Teil aus beschichteten Rahmen aus Aluminium. Bei Nietverbindungen und Schrauben sowie an Kanten ist die Beschichtung abgeblättert. In den übrigen Bereichen ist die Beschichtung nach wie vor gut haftend.

Zusammenfassend wurden an Elementen der Gruppe III Lochkorrosion mit Angriffstiefen bis ca. 30 µm festgestellt, bei Staifix Ankern aus 1.4429 (ebenfalls Gruppe III) bis 120 µm. Bei Elementen aus der Gruppe II wurde Lochkorrosion mit Angriffstiefen bis 1.2 mm (bei Gewindestange) beobachtet.

Es wurde vorgeschlagen, alle Befestigungselemente der Gruppe II zu ersetzen, während Elemente der Gruppe III regelmässig (alle 3–5 Jahre) zu kontrollieren sind. Elemente der Gruppe II haben sich auch in bewitterten Zonen als nicht korrosionsbeständig gezeigt.

Es liegen keine Angaben zur Chlorid Beaufschlagung vor.

4.1.6 Strahlventilatoren aus Tunnels am Walensee (Schadenfall 017)

Die Strahlventilatoren wurden 1987 in Betrieb gesetzt. Sie wurden mit Elementen der Gruppe III nach SIA 179 [5] befestigt. Die Untersuchung erfolgte 1993. An vielen dieser Elemente sind Spalt- und Lochkorrosion vorhanden. Typischerweise betrugen die Angriffstiefen 50 µm beim Tunnel Schoren im Tunnel Quarten nur 15 µm. Die grössten Angriffstiefen an nichtrostenden Stahlelementen wurde bei den Silentblöcken mit ca. 200 µm festgestellt, dort wo Korrosionsprodukte des C-Stahles auf den nichtrostenden Stahl gelangen konnten. An einer untersuchten Schraube der Gruppe III (A4) wurde Spannungsrisskorrosion festgestellt, in einer stark umgeformten Zone im Gewindebereich.

Bei den Dübeln (Gewindestangen) wurde Lochkorrosion bis ca. 15 µm festgestellt, im einbetonierten Teil wurde keine Korrosion beobachtet.

Auf der Innenseite besteht das Lochblech aus nichtrostendem Stahl, Korrosionserscheinungen wurden praktisch keine gefunden, nur im Bereich von Nietenköpfen im unteren Bereich wurden deutliche Korrosionsangriffe festgestellt.

Die Chloridbeaufschlagung liegt bei vielen Messstellen zwischen 20 und 60 µg/cm². Der grösste Messwert beträgt 162 µg/cm².

4.1.7 Aeschertunnel, Brandklappen, Vorprüfung vor Garantieende (Schadenfall 014)

Die Aktennotiz Betr. 220480.24 wurde am 16.05.2011 am Ende der 3-jährigen Garantiezeit verfasst.

Die Brandklappen bestehen aus 1.4571 der Gruppe III nach SIA 179 [5]. Praktisch alle Klappen weisen auf der Fahrraumseite visuell sichtbare Salzablagerungen und örtliche Korrosionen auf. Analysen zur Chloridbeaufschlagung wurden nicht durchgeführt. Auf der Oberseite sind bei Schrauben und Nieten Verfärbungen vorhanden. Weitere Korrosionserscheinungen wurden um die Spalten bei den Schraubverbindungen festgestellt (Abb. 23 und Abb. 24).

4.1.8 Uetlibergtunnel, Abluft und Brandklappen (Schadenfall 007)

Der Bericht wurde nach der Begehung vom 29.04.2013 verfasst. Der Tunnel wurde 2009 dem Verkehr übergeben.

Die Abluft- und Brandklappen bestehen aus dem Werkstoff 1.4571 (Gruppe III nach SIA 179 [5]). Es wurden visuelle Untersuchungen durchgeführt. Analysen der Chloridbeaufschlagung wurden keine durchgeführt. An folgenden Stellen wurden Korrosionsangriffe (Loch- und Spaltkorrosion) beobachtet (Abb. 25 und Abb. 26):

- Im Falz der Lamellen (Spaltkorrosion)
- Im Kontaktbereich der Gegenfläche (Lamellen-Kontaktflächen), Lochkorrosionsangriffe bis 1 mm Durchmesser, in dichter Abfolge
- Spaltkorrosion im Abschlusswinkel
- Auf allgemeiner Blechoberfläche auf Seite Fahrraum (Lochkorrosionsangriffe)

4.1.9 **A2 Gotthard Strassentunnel, Kontrolle Abluftklappen (Schadenfall 006)**

Der Bericht wurde aufgrund einer Kontrolle vom 26./27.09.2011, nach einer Betriebsdauer von 10 Jahren, erstellt. Die Klappen bestehen aus 1.4571 (Gruppe III nach SIA 179 [5]). Analysen der Chloridbeaufschlagung wurden keine durchgeführt.

- Die Klappen sind funktionsfähig
- Auf den Klappenblättern sind starke Verkrustungen aus Schmutz und Russpartikeln vorhanden. Darunter wurde Lochkorrosion gefunden (Abb. 27).

4.1.10 **A2 Gotthard Strassentunnel, Trockeneisreinigung der Abluftklappen (Schadenfall 006)**

Der Bericht wurde aufgrund von Reinigungsversuchen vom 27./28.06.2012 erstellt.

- Im Rahmen der Reinigungsversuche wurden die Ablagerungen analysiert. Dabei wurde ein Gehalt von 90% NaCl festgestellt, 3.5% Russ, der Rest besteht aus mineralischem Staub und Metallverbindungen (Analyse TU Wien).
- Nach der Reinigung, die Trockeneisreinigung habe sich bewährt, waren auf der gereinigten Unterseite der Lamellen, Korrosionserscheinungen auf der Oberfläche zu sehen (Abb. 28).

4.1.11 **Kerenzerbergtunnel, Lampengehäuse aus Aluminium (Schadenfall 019)**

Der Bericht wurde am 09.08.2017 verfasst. Der Korrosionszustand von Lampengehäusen im Kerenzerbergtunnel wurde visuell im Rahmen einer Begehung begutachtet. Ein Lampengehäuse wurde ausgebaut und der Korrosionszustand im Labor detaillierter untersucht. Bei den Lampengehäusen handelt es sich um rechteckige Kästen mit einem Klappdeckel, in dem eine Glasscheibe gefasst ist. Das Gehäuse und der Rahmen des Deckels bestehen aus beschichtetem Aluminiumguss. Genauere Angaben zu den Materialien liegen nicht vor. Auf der einen Seite ist der Deckel mit drei Scharnieren aus nichtrostendem Stahl befestigt, auf der anderen Seite sind zwei Schnappverschlüsse vorhanden. Feder und Schrauben bestehen aus nichtrostendem Stahl, der Verschlussgriff selbst besteht aus beschichtetem Aluminium. An beiden Schmalseiten des Lampengehäuses ist eine Lasche mit einem Loch angebracht, die zur Montage an der Decke dienen. Anker (Gewindestangen) aus nichtrostendem Stahl sind im Beton der Tunneldecke eingelassen. Zwischen der Tunneldecke und der Lasche des Lampengehäuses ist eine U-Scheibe aus Kunststoff eingesetzt worden. Die U-Scheibe auf der Unterseite der Befestigungslasche sowie die Mutter bestehen aus nichtrostendem Stahl. Die Leuchten wurden 1986 montiert. In den letzten Jahren sind Fälle aufgetreten, wo sich die Befestigung des Lampengehäuses auf der einen Seite gelöst hat. Vermutet wird Korrosion als Ursache. Die Fälle sind jedoch nicht genauer dokumentiert. In 5 Jahren ist vorgesehen, alle Leuchten im Rahmen einer Instandsetzung zu ersetzen.

In 5 Querschnitten (3x im Adaptionbereich in den ersten ca. 300 m), 1x in Tunnelmitte, 1x kurz vor der Tunnelausfahrt) wurden die Leuchten visuell untersucht.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben folgende Resultate:

- Korrosionserscheinungen wurden vor allem an den Aluminiumgehäusen festgestellt.
- An den Elementen aus nichtrostendem Stahl an den Lampengehäusen und den Befestigungselementen wurden praktisch keine Korrosionsangriffe festgestellt. Der Grund dafür dürfte auf eine Elementbildung zwischen dem nichtrostenden Stahl als Kathode und dem Aluminium als Anode zurückzuführen sein. Anhand des Stempels bei den Schraubenmutter ist zu schliessen, dass mehrheitlich Befestigungselemente der Qualität A4 eingesetzt wurden, doch sind auch A2 Elemente vorhanden.
- Aufgrund der visuellen Untersuchung sind die Korrosionserscheinungen im Aluminiumgehäuse im Adaptionbereich stärker ausgeprägt als in Tunnelmitte und am Tunnelende. Dies dürfte auf die dort erhöhte Sprühnebel- und Spritzwasserbelastung zurückzuführen sein.

- Die Variation des Korrosionszustandes an Gehäusen innerhalb des gleichen Tunnelquerschnittes (im gleichen Tunnelkilometer) ist gross
- Der stärkste Korrosionsfortschritt wurde im Bereich der Kontaktstellen zu nichtrostenden Stahlelementen festgestellt, d.h. bei den seitlichen Laschen am Gehäuse für die Befestigung an der Decke und im Bereich der Befestigungen der Scharniere (vgl. Abb. 25 in der Beilage). Ausgehend vom Lochrand in der Befestigungslasche wurde ein Korrosionsfortschritt im Millimeterbereich und auch Rissbildungen beobachtet.
- Aufgrund der Untersuchungen kann ein Versagen der Aluminiumbauteile im Adaptionbereich innerhalb der nächsten 5 Jahre nicht ausgeschlossen werden.

4.1.12 Signalträger Tunnel Entlisberg (Schadenfall 008)

Der Untersuchungsbericht aus dem Jahre 2011 hält fest, dass das applizierte Duplex-System nach einem 4-jährigen Einsatz auf der Nationalstrassen überfordert war. Das Beschichtungssystem war bezüglich Schichtdicke (Schutzvorrat) als zu schwach geplant und unter Missachtung geeigneter Normen. Die notwendige Kenntnis und Gegenkontrolle bei den involvierten Stellen nicht gegeben.

4.1.13 Strahlventilatoren Tunnel Entlisberg (Schadenfall 003)

Der Bericht aus dem Jahre 2014 dokumentiert den Zustand des Duplexsystems bei einer Nutzungsdauer von 9 Jahren. Das Duplexsystem wurde mit einer Beschichtungsdicke von 170 µm spezifiziert. Die organische Beschichtung hat die Schutzdauer erreicht. Die Restnutzungsdauer ist durch die Schutzwirkung der Verzinkung noch gegeben.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben folgende Resultate:

- Korrosionserscheinungen wurden vor allem an den Aluminiumgehäusen festgestellt.

4.1.14 Strahlventilatoren Tunnel Uetliberg (Schadenfall 001)

Im Jahre 2010 (1.5 Jahre nach der Abnahme) kam es zu grossflächigen Ablösungen der organischen Beschichtung am Gehäuse und Schalldämpfer. Im Rahmen der Ursachenermittlung wurde ein unterlassener Prozessschritt während der chemischen Vorbereitung der verzinkten Oberfläche vor der Applikation der organischen Beschichtung als Fehlerursache eruiert. Sämtliche Strahlventilatoren mussten unter Betrieb saniert werden. Der Korrosionsschutz wurde vollständig erneuert.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben folgende Resultate:

- Trotz des internen Qualitätssicherungssystems der Lieferanten konnte die fehlerhafte Applikation des Oberflächenschutzes beim Sublieferanten nicht während der Herstellung erfasst werden.

4.1.15 Strahlventilatoren Tunnel Gubrist (Schadenfall 002)

Im 2010 (2 Jahre nach Installation) wurden Ablösungen der Pulverbeschichtungen im Bereich des angeschweissten Motorklemmenkasten-Supports am Gehäusemantel erfasst. Die Analyse zeigte eine ungenügende Vorbehandlung der verzinkten Oberfläche aufgrund der ungenügenden Zugänglichkeit des Bereichs. Die Regeln der Konstruktionstechnik (Zugänglichkeit) war für diesen Bereich nicht erfüllt.

4.1.16 Strahlventilatoren Tunnel Islisberg (Schadenfall 005)

Im 2014 (5 Jahre nach Installation) wurden an einem Strahlventilator eine flächige, Ablösungen der organischen Beschichtung an einer Motorstrebe (eingeschweisstes Blech) erfasst. Die Haftung der restlichen Beschichtung am Aggregat war intakt entsprach den Erwartungen. Die Ursache wurde nicht detaillierter ermittelt. Aufgrund der Ausprägung der Ablösung wäre eine ungenügende Vorbehandlung der Blechkanten eine mögliche Erklärung.

4.1.17 Strahlventilatoren Tunnel Hafnerberg und Entlisberg (Schadenfall 004 a/b)

Der Bericht aus dem Jahre 2014 dokumentiert den Zustand der Duplexbeschichtung bei einer Nutzungsdauer von 7–9 Jahren. Die organische Beschichtung wurde 2005 aufgebracht.

Der 6-schichtige Aufbau (Totalschichtdicke 420 µm) weist lokale Schadstellen in der Organbeschichtung an neuralgischen Stellen auf. Die Verzinkung ist grösstenteils noch intakt. Grösste Schwachstelle des Aggregats ist die Beschichtung des Antriebsmotors, welcher in einer minderen Korrosionsschutzklasse erstellt wurde.

4.1.18 Strahlventilator Bubenholztunnel, Lochkorrosion am Schalldämpfer (Schadensfall 010)

Im Rahmen von 2013 durchgeführten Wartungsarbeiten und Inspektionen wurden auf der Unterseite des Schalldämpfers (Mantel) durchgehende Lochkorrosion festgestellt. Die Strahlventilatoren wurden 2005 installiert. Die Funktionsfähigkeit des Strahlventilators ist gewährleistet.

Die Lochkorrosion erfolgte von der Innenseite her. Auf der Unterseite des Schalldämpfers, zwischen Mantelblech und Isolationsmaterial kann sich Sprühnebel / Kondenswasser ansammeln. Zusammen mit den Chloriden stellen sich dort Bedingungen ein, in denen der Stahl 1.4571 nicht ausreichend beständig ist. Es liegen dort ausgeprägte Spaltbedingungen vor. Ablagerungen an dieser Stelle können nicht ausgewaschen werden.

4.1.19 Prüfbericht EMPA "Strahlventilator", Bruch Rotorscheufel

Der Bericht wurde am 03.06.2016 verfasst und von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in anonymisierter Fassung zur Verfügung gestellt.

Bei einem Strahlventilator kam es zum Bruch einer Rotorscheufel. Bruchstücke bis 30x25 cm Grösse wurden auf die Fahrbahn geschleudert. Die Rotorscheufeln und die Schaufelsitze sind aus einer AISi12CuNiMg – Legierung (EN AC-48000) hergestellt. Das Rotor Laufrad besteht aus galvanisch verzinktem Stahl. Im Gegensatz zu den übrigen Oberflächen, war der Schaufelfuss im Spaltbereich zwischen Schaufelfuss und Klemmbanken nicht mit einer organischen Beschichtung versehen.

Der Schadensfall wurde ausführlich untersucht. Die Untersuchungen ergaben eine Schädigung durch Chlorid-induzierte Spannungsrisskorrosion. Im Kontaktbereich zwischen Schaufelfuss und Schaufelsitz kam es zum Aufbau von zusätzlichen Zugspannungen infolge der Bildung von Korrosionsprodukten. Somit waren alle drei Faktoren die gleichzeitig vorliegen müssen damit Spannungsrisskorrosion erfolgen kann, erfüllt:

- Spannungsrisskorrosionsempfindlicher Werkstoff
- Korrosive Umgebung (Chlorid belastete Tunnelatmosphäre), Untersuchungen an Wischproben ergaben eine Chloridbeaufschlagung von rund 50–200 µg/cm².
- Relativ hohe, über längere Zeit wirkende, Zugspannungen

Nicht beurteilt werden konnte, ob auch herstellungs- und montagebedingte Eigenspannungen die Schädigung durch Spannungsrisskorrosion begünstigten.

Nachdem bei fortschreitender Spannungsrisskorrosion die Restbelastbarkeit überschritten wurde, kam es zu einem spröden Gewaltbruch.

Im Bericht wird auf einen Fall hingewiesen, wo Schaufeln eines Strahlventilators aus demselben Werkstoff brachen. Ursache für die Schädigung war in diesem Fall eine Schwingungsrisskorrosion.

Im Weiteren wird im Prüfbericht der EMPA festgestellt, dass "die für Schaufeln und Schaufelsitze des Rotors verwendeten Werkstoffe für den Einsatz in Chlorid belasteten feuchten Autobahntunnelatmosphären, wie sie typisch für Schweizer Strassenverhältnisse sind, ungeeignet sind und insgesamt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko darstellen."

4.1.20 Fazit aus der Analyse von durchgeführten Untersuchungen

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen können die Erkenntnisse wie folgt zusammengefasst werden:

- Elemente aus einer Stahlqualität der Gruppe II nach SIA 179 [5] (A2) weisen in der Tunnelatmosphäre häufig Loch- und Spaltkorrosionsangriffe auch an der freien Oberfläche auf.
- Elemente der Gruppe III (A4) weisen in vielen Fällen Korrosionserscheinungen im Spaltbereich auf. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um Spalten bei Befestigungselementen, bei Abdichtungen oder bei nicht durchgeschweissten Konstruktionen handelt. Spaltbedingungen können sich auch unter Verkrustungen und Ablagerungen einstellen. Auf der freien Oberfläche sind im Vergleich zu Stählen der Gruppe II deutlich weniger Korrosionserscheinungen zu beobachten.
- In einem Fall wurde Spannungsrisskorrosion rapportiert an einer Schraube der Gruppe III (A4) bei einem Strahlventilator
- Bei gleicher Exposition und Expositionsdauer ist der Korrosionsfortschritt bei Stählen der Gruppe II nach SIA 179 [5] grösser als bei Gruppe III.
- In verschiedenen Fällen wurden im gleichen Tunnel für die gleiche Anwendung unterschiedliche Stahlsorten gemischt eingesetzt. Beispielsweise sind am gleichen Bauteil Schrauben der Gruppe II und III vorhanden.
- Lochkorrosion an Elementen aus 1.4529 der Gruppe V wurden bei den aufgeführten Untersuchungen keine gefunden. In einem Fall wurde jedoch festgestellt, dass in der äussersten Schicht der neuen Bauteile die Korrosionsbeständigkeit stark reduziert war. Der Fall zeigt, eine korrekte Umformung und Bearbeitung des Werkstoffes entscheidend für die Korrosionsbeständigkeit ist.
- Bauteile aus unbeschichtetem Aluminium weisen in der Tunnelatmosphäre zum Teil starke Korrosionsangriffe auf. Bei Rotorschaukeln aus unbeschichtetem Aluminium sind Schadensfälle bekannt, wo es zum Bruch der Schaukeln gekommen ist. Bei beschichteten Bauteilen ist der Angriff in der Regel geringer, doch sind an Stellen wo die Beschichtung beschädigt wird, meist bei Ecken und Kanten und bei Verbindungselementen, ebenfalls Korrosionsangriffe vorhanden.
- In verschiedenen Fällen kam es bei der Applikation der Duplexbeschichtung zu Mängeln im Herstellungsprozess. Dies führt innert weniger Jahre zum Versagen des Korrosionsschutzes. Die Herstellung wurde bei Sublieferanten ausgeführt.
- Die Spezifikation der Duplexbeschichtung war in einigen Projekten nicht ausreichend.

4.2 Erkenntnisse aus der Umfrage

Folgende Umfragen wurden durchgeführt und in die Auswertung mit einbezogen:

Tab. 7 Übersicht durchgeführte Umfragen, Bezeichnung

Bezeichnung	Umfrage	Datum
U-B-01-1	GE VII, O. Rupar, G. Sutter	02.02.2017
U-B-01-2	NSU, Chr. Krismer	17.02.2017
U-B-03	GE, VI, P. Hässig	16.02.2017
U-B-04	NSNW, D. Lenzin, M. Grässlin, M. Stocker	16.03.2017
U-B-05	Zentras, F. Flury	U-B-05

Folgende Umfragen bei Herstellern wurden durchgeführt und in die Auswertung mit einbezogen:

Tab. 8 Übersicht durchgeführte Umfragen, Bezeichnung

Bezeichnung	Umfrage	Datum
U-H-01	Hersteller Strahlventilatoren A	06.02.2017
U-H-02	Anmerkung Hersteller Strahlventilatoren B	Div.

4.2.1 Bauteile aus nichtrostendem Stahl

Teilweise konnten bei den Bauteilen aus nichtrostendem Stahl keine detaillierten Angaben zur Werkstoffqualität (Werkstoff Nummer) festgehalten werden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass es sich in diesen Fällen um die eine Qualität der Gruppe III nach SIA 179 [5], z. B. 1.4571, handelt.

Die Rückmeldungen der Betreiber betreffen vor allem Gehäuse und Halterungen. Zu den Befestigungselementen wurden von Betreiberseite vergleichsweise wenig Angaben gemacht.

- Die Trassen aus einem Werkstoff der Gruppe III werden als problemlos bezeichnet. Zu den entsprechenden Halterungen und Befestigungen dieser Trassen werden keine spezifischen Angaben gemacht.
- Signalkörper und Signalaufhängungen aus Werkstoffen der Gruppe III, teilweise mit einer Beschichtung versehen, bereiten ebenfalls auch nach Einsatzdauern von mehr als 13 Jahren keine Probleme und haben sich bewährt. Die gleiche Feststellung gilt für Beleuchtungskörper aus beschichtetem nichtrostendem Stahl nach einer Einsatzdauer von 20 Jahren.
- Bei Fluchttüren aus nichtrostendem Stahl (mutmasslich Gruppe III) wurden keine Korrosionserscheinungen gemeldet, in einem Fall wird an einer Tür ohne Beschichtung von Flugrost berichtet.
- Bei Abluftklappen aus dem Stahl 1.4571 der Gruppe III wurde geringe Lochkorrosion festgestellt. Die Funktion sei jedoch nicht beeinträchtigt.
- Bei Strahlventilatoren ist es in mehreren Fällen im Schalldämpfermantelblech aus 1.4571 der Gruppe III zu Lochkorrosion, auch durchgehende Löcher, gekommen.
- Bei einer Rückmeldung wird von Schrauben der Gruppe III (A2) berichtet, die nach 4 Jahren Korrosionsschäden aufwiesen.
- Gehäuse aus 1.4571 der Gruppe III für die Sensorik weisen auch nach mehr als 8 Jahren keine Probleme im Betrieb auf.

Von Seite der Strahlventilatorenhersteller liegen zwei Rückmeldungen (Hersteller A und B) vor.

Gemäss Angaben von Hersteller A setzt sich zunehmend der Stahl 1.4404 anstelle des Stahles 1.4571 durch. Diese entsprechen beide der Gruppe III. Die Verfügbarkeit des Stahles 1.4404 auf dem Markt sei gut, diejenige vom Stahl 1.4571 nimmt ab. Zudem sei die Verarbeitung von 1.4404 einfacher als von 1.4571. Diese Entwicklung ist auch international zu beobachten: In Frankreich kommt nur 1.4404 zum Einsatz, in Deutschland wird zunehmend 1.4404 eingesetzt, ebenso in Skandinavien. Der 1.4404 ist auch das Wunschsystem des Herstellers A. Das Handling der Teile ist einfacher, kleinere Transport- und Montageschäden lassen sich bei nichtrostendem Stahl einfacher beheben als bei einem System mit organischer Beschichtung. Generell sind gemäss Hersteller A ca. 80% der ausgelieferten Ventilatoren Ausführungen aus nichtrostendem Stahl.

Für die Befestigungen wird in Deutschland der Stahl 1.4529 verwendet, da dies dort vorgeschrieben ist, sonst kommt 1.4404 zum Einsatz. Bei der Verarbeitung von 1.4529 ist besonderes Wissen, insbesondere beim Schweißen aber auch Umformen, erforderlich.

Schadensfälle sind beim Hersteller A nur ein kleines Problem. Weitere Angaben werden vom Hersteller A nicht gemacht.

Von einem weiteren Hersteller von Strahlventilatoren (Hersteller B) kann nicht bestätigt werden, dass sich der Stahl 1.4404 gegenüber dem Stahl 1.4571 durchsetzt. Der Stahl wird nach seinen Angaben vereinzelt gefordert. Hersteller B setzt 1.4404 jedoch vermehrt ein, da der Stahl 1.4571 zeitweise nicht verfügbar war. International sei der Stahl 1.4571 nicht üblich, hier ist AISI 316 (L) der übliche Werkstoff, welcher ebenfalls der Gruppe III entspricht.

Folgende Erkenntnisse gehen aus der Herstellerumfrage hervor:

- Gemäss Aussagen beider Hersteller nimmt die Verfügbarkeit von 1.4571 tendenziell ab.

- Beide Hersteller bestätigen, dass international 1.4404 resp. AIS 316L der am meisten nachgefragte Werkstoff sei.
- Die Verarbeitung von 1.4404 ist einfacher als von 1.4571
- 1.4404 ist das bevorzugte Material des Herstellers A
- Die Verarbeitung von 1.4529 erfordert hohe Fachkenntnisse
- Gegenüber einem System mit organischer Beschichtung lassen sich leichte Schäden beim nichtrostenden Stahl einfacher ausbessern

Fazit

Von Gehäusen und Halterungen aus Stählen der Gruppe III nach SIA 179 [5] werden in vielen Fällen auch nach längerer Einsatzdauer (grösser als 10 Jahre) keine Probleme durch die Betreiber gemeldet. Dabei wurde zwar zum Teil an Bauteilen starke Korrosionserscheinungen in Form von den Lochkorrosion festgestellt. Da diese die Funktion noch nicht beeinträchtigten, wurde noch keine Korrosionsschäden berichtet. Bei den Strahlventilatoren wurden starke Lochkorrosion beim Schalldämpfermantelblech gemeldet. In gewissen Fällen wurden auch Durchrostungen beobachtet.

Zu Befestigungselementen wurden von Betreiberseite her wenige Angaben gemacht. Bei einer Rückmeldung wurde berichtet, dass an Befestigungselementen aus einem Stahl der Gruppe II schon nach wenigen Jahren starke Korrosionserscheinungen auftreten können.

Diese Beobachtungen bestätigen die Schlussfolgerung der Analyse der Schadenfälle. Mit nichtrostenden Stählen der Gruppe III kann kein zuverlässiger und dauerhafter Korrosionsschutz in der Tunnelanwendung erreicht werden.

4.2.2 Bauteile aus Aluminium

Es wurden keine Korrosionsschäden an Aluminiumgehäusen von Beleuchtungskörpern oder Kamerategehäusen von den Betreibern berichtet. Nur wenn es zur Bildung eines galvanischen Elements mit nichtrostenden Schrauben oder Nieten kam, traten lokal stark erhöhte Korrosionsgeschwindigkeiten auf. Dabei kann es zu ausbrechenden Halterungen kommen und in gewissen Fällen waren Sofortmassnahmen erforderlich. Die Aluminiumgehäuse für Beleuchtungskörper weisen in der Regel eine Beschichtung auf. Die Kombination von Aluminium mit einem Beschichtungssystem hat sich gut bewährt. In einem Fall wurde von einem eloxierten Gehäuse berichtet, bei dem auch nach 8 Jahren Betrieb keine Probleme festgestellt wurden.

Starke Korrosionsangriffe wurden an Abzweigdosens aus Aluminiumdruckguss festgestellt. Ähnliches wurde an Kamerategehäusen festgestellt. Während die eloxierten Elemente keine nennenswerten Korrosionserscheinungen erkennbar waren, kam es bei nicht beschichteten Gusselementen der Halterung zum Korrosionsschaden.

Fluchtwegsschilder aus Aluminium wiesen nach wenigen Jahren starke Korrosionserscheinungen auf. Bei Beleuchtungskörpern aus Kunststoff mit Aludeckeln mit Einbrennlackierung wurden im Bereich der Haltesplinte aus nichtrostendem Stahl lokale Korrosionserscheinungen festgestellt.

Fazit

Bei Bauteilen aus Aluminium wird nach wenigen Jahren von starken Korrosionserscheinungen berichtet, sofern diese nicht beschichtet oder eloxiert sind. Starke Korrosionserscheinungen, bis hin zu Ausbrüchen, können beim Kontakt zu Befestigungselementen aus nichtrostendem Stahl auftreten, auch wenn das Aluminiumbauteil beschichtet oder eloxiert ist. Aufgrund der vorliegenden Beobachtungen zeigen Aluminiumgussteile ein schlechteres Verhalten als extrudierte Bauteile. Unabhängig von der Legierungszusammensetzung ist bei Aluminium ohne zusätzliche Beschichtung in der Tunnelatmosphäre mit Korrosion zu rechnen. Die Bildung von galvanischen Elementen führt zu einer erheblichen Erhöhung der Korrosionsgeschwindigkeit.

Grundsätzlich ist mit einer Korrosionsbeständigeren Legierungen ein besseres Verhalten zu erwarten. Es liegen aber zu wenig Daten vor, um eine konkrete Schlussfolgerung

vorzunehmen. Insgesamt darf Aluminium aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nur in Kombination mit einer Beschichtung eingesetzt werden.

4.2.3 Bauteile mit metallischem Überzug und Beschichtungen

Korrosionserscheinungen an Bauteilen mit Duplexsystemen bestehend aus metallischem Überzug und Beschichtungen sind insbesondere an Strahlventilatoren, Signalträger, Signaljoch und Fluchttüren beobachtet worden.

Die Auswertung der Rückfragen Betreiber hat ein unterschiedliches Bild ergeben. Während bei duplexierten Signalträger nach mehr als 13 Jahren Nutzung keine Probleme bekannt waren, fällt auf, dass bei duplexierten Strahlventilatoren nach rund 10 bis 15 Jahren der Korrosionsschutz ersetzt werden musste. Teilweise sei der Aufbau unklar.

Die Betreiberbefragung haben aufgrund folgender Effekte eine beschränkte Aussagekraft:

- Die zu untersuchenden Teile sind nicht gereinigt
- Nicht alle Oberflächen sind einsehbar
- Die einfache Sichtprüfung wird punktuell ohne definierte Hilfsmittel (Beleuchtung) von ungeschulten Personen durchgeführt. Das Prüfergebnis entspricht nicht dem IST-Zustand. Das erhaltene Ergebnis wird interpretiert und beim Beschreiben nochmals vereinfacht.
- Ein allfällig kritischer Zustand wird womöglich nicht erkannt
- Ein relevanter Zustand (Blasengrad, Rostgrad) wird beim typischen Verschmutzungsgrad oberhalb des oft nicht gereinigten Fahrtraums leicht übersehen
- Trotz dieser Einschränkungen sind gewisse Aussagen möglich, welche im Folgenden zusammengefasst sind.

Signalträger

Die Erfahrung aufgrund von Untersuchungen bei Signalträgern nach längerem Einsatz zeigt in Einzelfällen sehr wohl auch Schäden, welche bei den typischen Tunnelinspektionen und -reinigungen aber nicht entdeckt worden waren.

Bei älteren grösseren Signalträgern aus Hohlprofilen sind weniger deren Duplexsysteme, sondern diejenigen der Konsolen problematische Bereiche mit Verbindungselementen, Kanten, Schlitzlöcher. In diesen Bereichen war die Konstruktion gemäss heutigem Stand der Technik korrosionstechnisch ungünstig und die Ausführung mangelhaft.

Zu letzteren ist festzuhalten, dass das Prinzip mit in Schlitzlöcher gleitenden Gewindestangen, sogenannten oft ausgeführt Loslagern, korrosionstechnisch sehr ungünstig ist. Die Beschichtung wird bei dieser Konstruktion zwangsläufig beschädigt.

Bei einem anderen leichteren Typ von Signalträgern sind Korrosionsschäden infolge ungünstiger Konstruktion und mehrfachen Ausführungsmängeln entstanden. Diese waren zum Teil auf ungeeignete Beschichtungsstoffe und ungenügenden Schichtdicken zurückzuführen.

Fluchttüren

Nebst eigentlichen Duplexsystemen sind erwähnenswert, dass teilweise auch Fluchttüren und Beleuchtungskörper aus nichtrostendem Stahl (ohne nähere Bezeichnung) mit zusätzlichen Beschichtungen versehen sind und diese nach Jahren Nutzung frei sind von Auffälligkeiten. Dieses Konzept wird in Skandinavien schon längere Zeit mit Erfolg angewendet.

Strahlventilatoren

Bei Strahlventilatoren werden Duplexsysteme teilweise auf dünnen Blechen angewendet. Dabei fällt auf, dass die Korrosionsschäden grösstenteils von Kanten ausgehen.

Fazit

Die Beobachtungen in Bezug auf duplexierten Bauteile sind folgende Schlussfolgerungen möglich:

1. Die Teilkomponenten wurden nicht als Ganzes stückverzinkt, sondern die Blechteile wurden aus bandverzinktem Blech hergestellt. In diesem Fall fehlt der Zinküberzug an Kanten gänzlich. Allenfalls wurden an solchen Stellen direkt die Deckbeschichtung appliziert, d.h. ohne Oberflächenvorbereitung und ohne Grundbeschichtung.
2. Mechanische Verletzungen infolge Transportes und Montage wie beispielsweise Zink- oder Beschichtungsabplatzungen an exponierten Kanten wurden beobachtet, welche nicht vollständig und fachgerecht ausgebessert wurden
3. Es liegen ungenügend gerundete Kanten vor. Dies ist insbesondere bei dünneren Blechteilen der Fall. Zudem wurden die Kanten nicht vorgelegt.
4. Es wurde ungenügende Oberflächenvorbereitung festgestellt: Die verzinkten Flächen sind nicht ausreichend mit 100% deckendem Beschuss gestrahlt worden (Feinstrahlen), oder allfälliger Weissrost wurde nicht erkannt und/oder nicht vollständig entfernt. Ausserdem ist auch hier auf verzinkten Untergründen sicherzustellen, dass keine unzulässigen Korrosionsstimulatoren auf den Flächen vorhanden sind. An dieser Stelle ist anzumerken, dass in den Normen und Empfehlungen wichtige Aussagen zu Qualitätsmerkmalen für das Sweepen fehlen und folglich das Risiko für Mängel erhöht ist.
5. Es wurden ungeeignete Beschichtungsmittel eingesetzt. Wiederholt kommen auch Pulverbeschichtungen zum Einsatz, wobei unsicher ist, ob diese nach Norm genügen (z. B. DIN 55633, EN 15773) und wie die Teile damit ausgeführt worden sind.
6. Es liegt ein ungeeigneter Ablauf der Beschichtungs- und Montageprozesse vor: Jedes Bauteil muss vor dem Zusammenbau geschützt werden. Konzentrierte Krafteinleitungen auf die Beschichtung sind zu vermeiden.
7. Es traten geringe Schichtdicken und Poren auf.
8. Es wurde schwache Haftung der Beschichtung auf dem Zinküberzug festgestellt. In diesem Zusammenhang sollte nach dem Sweepen eine zusätzliche Oberflächenbehandlung ausgeführt werden.
9. Es liegen stärkere belastete Beschichtung infolge schneller Luftströmung mit Tropfenschlag vor.

Zusammengefasst ist das Duplexsystem auch für einen Einsatz in Tunnelatmosphären geeignet, auch wenn der Erfahrungsaspekt aufgrund von den neueren Tausalzen fehlt.

Jedoch zeigt sich, dass in der Tunnelanwendung jede Schwachstelle im Korrosionsschutz zwangsläufig zum Tragen kommt. Der korrosionstechnisch korrekte oder optimierte Gestaltung, sowie eine Ausführung ohne Schwachstellen kommt somit eine grosse Bedeutung zu. Zu Letzteren ist anzumerken, dass infolge einer Vielzahl von einzelnen Ausführungsschritten die Möglichkeit von Schwachstellen erhöht ist. Ihre Vermeidung ist aber ein Muss.

4.3 Erkenntnisse aus Situationsaufnahmen vor Ort

4.3.1 Tunnel Entlisberg

Am 30.05.2017 fand eine Situationsaufnahme der BSA Ausrüstungen im Tunnel Entlisberg in der Röhre Fahrtrichtung Zürich, statt. Der Verkehrsfreigabe für die Röhre Zürich erfolgte 2004. Der Tunnel weist eine Länge von ca. 550 m auf. In den ersten ca. 100 m von den Portalen weist er einen Rechteckquerschnitt auf, im mittleren Bereich ein hohes Tunnelgewölbe. Durch den Tunnel führen 3 Fahrspuren sowie 1 Pannestreifen. In den beiden Rechteckquerschnitten sind an der Decke jeweils 6 Strahlventilatoren nebeneinander montiert. Im Tunnel sind Befestigungselemente im Beton aus nichtrostendem Stahl 1.4529 der Gruppe V nach SIA 179 [5] gefertigt.

Wischproben

Im Bereich der beiden Portale und in der Tunnelmitte wurde jeweils eine Wischprobe entnommen und in Bezug auf Chloridgehalt analysiert (Tab. 9). In Tunnelmitte und am

Tunnelende sind Chlorid Beaufschlagungen von mehr als $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ vorhanden. Die Wischproben wurden jeweils auf dem Gehäuse von Adaptionaleuchten entnommen.

Niedrigere Chloridgehalte im Einfahrtbereich als in Tunnelmitte und im Ausfahrtbereich wurden auch andernorts schon festgestellt (z. B. auf Lampengehäusen im Kerenzertunnel). Dies dürfte auf einen gewissen Abwascheffekt im Einfahrtbereich zurückzuführen sein. Im Gegensatz zu porösen Materialien (z. B. Beton) dringen die Chloride bei glatten Oberflächen nicht in die Tiefe ein und können daher auch leichter wieder durch Spritzwasser / Sprühnebel abgewaschen werden.

Tab. 9 Gemessene Chloridbeaufschlagungen

Entnahmestelle	Chloridbeaufschlagung [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]
Einfahrt	5
Mitte	15
Ausfahrt	16

Untersuchte Bauteile

Tab. 10 gibt eine Übersicht über die untersuchten Bauteile und deren Werkstoffe (soweit bekannt) in drei Tunnelquerschnitten. Demontagen wurden keine durchgeführt. Es wurden nur visuelle Untersuchungen vorgenommen.

Tab. 10 Untersuchte Bauteile und Werkstoffe

Tunnelquerschnitt	Bauteil	Werkstoffe
Portal Zürich, im Bereich Strahlventilatoren	Strahlventilator (SV)14	Befestigungselemente A4 und A2 beim Dämpfer Rotor: Aluminium ("meerwasserbeständig" beschichtet) Lochblech Schalldämpfer innen: nichtrostender Stahl (Qualität unbekannt) Gehäuse: Stahl verzinkt beschichtet
	Kabeltrasse Halterung	1.4571, Befestigungselemente A4, Trasse aus GFK
	Adaptionsbeleuchtung	Gehäuse aus Kunststoff, seitliche Deckel aus Alu mit Verschluss und Haltesplint aus Werkstoff der Gruppe III nach SIA 179
	Fluchttüre	Nichtrostender Stahl beschichtet
Tunnelmitte	Signalträger	Befestigungselemente 1.4529 und 1.4539, Träger: nichtrostender Nichts-tender Stahl beschichtet
	Halfenschienen	1.4571
	Kabeltrasse	1.4571, Befestigungselemente A4, Trasse aus GFK
	Gehäuse Leuchten	Alu beschichtet
Portal Chur, im Bereich Strahlventilatoren	Strahlventilator SV24	wie Seite Zürich
	Kabeltrasse Halterung	1.4571, Befestigungselemente A4, Trasse aus GFK
	Adaptionsbeleuchtung	Gehäuse aus Kunststoff, seitliche Deckel aus Alu mit Verschluss und Haltesplint aus Werkstoff der Gruppe III nach SIA 179

Befund

Die Befestigungselemente aus nichtrostendem Stahl der Gruppe III (A4) bei den Strahlventilatoren befinden sich generell in einem guten Zustand. Es sind praktisch keine Korrosionserscheinungen zu sehen. Die Schrauben aus nichtrostendem Stahl der Gruppe III (A4) am Gehäuse sind metallisch blank. Möglicherweise findet dort im Spaltbereich ein gewisser Schutz durch den verzinkten Stahl des Gehäuses statt. Die Elemente aus nichtrostendem Stahl der Gruppe II (A2) an den Dämpfern weisen stellenweise Korrosionserscheinungen auf, vor allem in Spalten.

Die Befestigungselemente der Ventilatoren an der Tunneldecke aus 1.4529 erscheinen generell dunkel (Abb. 36). Bei den Rotoren ist die Beschichtung teilweise beschädigt. Am darunterliegenden Aluminium sind weissliche Korrosionsprodukte zu sehen. Die Angriffstiefe konnte nicht untersucht werden (Abb. 35).

Das Lochblech aus nichtrostendem Stahl beim Schalldämpfer ist generell in einem guten Zustand, nur an den Kanten sind teilweise leichte Korrosionserscheinungen zu sehen (Abb. 34). Die Beschichtung am äusseren Gehäuse ist an diversen Stellen beschädigt, am Ventilator Seite Chur etwas stärker als beim Ventilator Seite Zürich.

Die Kabeltrasse aus 1.4571 befindet sich an der freien Oberfläche in einem guten Zustand. Bei Spaltsituationen sind jedoch an vielen Stellen z. T. deutliche Korrosionserscheinungen sichtbar. Insbesondere ist dies sichtbar bei den Halterungselementen und Befestigungselementen aus Materialqualitäten der Gruppe III nach SIA 179 [5] auf der Unterseite (Abb. 33). Bei einzelnen U-Scheiben fällt eine starke Korrosion auf. Möglicherweise wurden in diesen Fällen U-Scheiben der Qualität A2 eingesetzt.

An der Signalträgerkonstruktion in Tunnelmitte sind bei einigen Befestigungselementen, vor allem beim Übergang U-Scheibe – beschichteter nichtrostender Stahl nichtrostender leichte Korrosionserscheinungen sichtbar. An den Schrauben aus 1.4529 sowie 1.4539 sind keine Korrosionsprodukte zu sehen. Auch die Gewindestangen sind metallisch blank. An Befestigungselementen aus A4 (Gruppe III nach SIA 179 [5]) sind im Spaltbereich teilweise Korrosionsprodukte sichtbar (Abb. 30).

An einer ebenfalls am Signalträger montierten Videokamera mit einem Gehäuse aus nichtrostendem Stahl (vermutlich Gruppe III nach SIA 179 [5]) sind auf der Unterseite braune Flecken (Korrosionsprodukte) sichtbar. Bei einer Schweissnaht der Halterung, die nicht vollständig durchgeschweisst wurde, sind im Spaltbereich wenige Korrosionsprodukte vorhanden. Die übrigen Flächen des Kameragehäuses und der Halterung (abseits von Spalten) sind metallisch blank.

Die Lampengehäuse und Kabelverteilboxen aus beschichtetem Alu sind ausgehend von Ecken und Kanten Ablösungen der Beschichtung vorhanden (Abb. 31). Darunter sind weissliche Korrosionsprodukte sichtbar. An einer ebenfalls dort montierten Kabelverteilbox aus verzinktem Stahl sind nur wenige weissliche Korrosionsprodukte sichtbar.

An den Stirnseiten der Leuchtkästen sind Deckel aus Alu vorhanden, die mit einem Verschluss aus nichtrostendem Stahl versehen sind und mittels eines Splintes aus nichtrostendem Stahl befestigt sind. An Splinten und Verschluss aus nichtrostendem Stahl bei den Leuchten sind keine Korrosionsprodukte sichtbar. Am Aluminiumdeckel sind wenige weissliche Korrosionsprodukte sichtbar (Abb. 37).

Fazit

Die Die visuellen Untersuchungen im Tunnel Entlisberg, zeigen, dass bei Elementen der Gruppe III gemäss an freier Oberfläche praktisch keine Korrosion auftritt. Bei Spaltsituationen kann es jedoch zu Korrosionsangriffen kommen. In vielen Fällen sind an diesen Stellen nur wenig Korrosionsprodukte sichtbar, was auf einen eher geringen Korrosionsfortschritt hindeutet. Es ist jedoch schwierig den genauen Korrosionszustand im Spaltbereich einzuschätzen. Etwas stärker dürften aufgrund der visuellen Beurteilung die Korrosionsangriffe im Spaltbereich bei den Halterungen des Kabeltrasses zu sein. Starke Lochkorrosion

an Befestigungselementen aus Legierungen der Gruppe III konnten im Tunnel Entlisberg im Rahmen der durchgeführten visuellen Begutachtung nicht festgestellt werden.

An Befestigungselementen aus der Gruppe II (nur beim Dämpfer des Ventilators) sind Korrosionsprodukte sichtbar. Mutmasslich sind bei einzelnen Schraubverbindungen U-Scheiben aus der Gruppe II verwendet worden, die vergleichsweise stark korrodieren. Dies ist auch ungünstig für die anliegenden Elemente aus höher legiertem nichtrostendem Stahl, da dort durch die anliegenden Korrosionsprodukte ebenfalls Korrosionsangriffe begünstigt werden können.

An hochlegierten Befestigungselementen der Gruppen III und IV (1.4529, 1.4539) sind praktisch keine Korrosionserscheinungen erkennbar, doch sind im Spaltbereich beim Übergang zu nichtrostenden Stählen der Gruppen I und II, teilweise Korrosionsprodukte vorhanden.

Bei beschichteten Aluminiumelementen sind in der Regel Abblätterungen der Beschichtung ausgehend von Ecken und Kanten vorhanden. Auf der Aluminiumoberfläche sind weissliche Korrosionsprodukte des Aluminiums sichtbar. Die Angriffstiefe ist beim Aluminium visuell schwierig abzuschätzen, dies gilt auch für den Rotor des Strahlventilators.

4.3.2 Tunnel Buchrain

Untersuchungen und Resultate

Am 28.03.2017 fand eine Situationsaufnahme der BSA Ausrüstungen im Tunnel Buchrain statt. Untersucht wurden dabei Strahlventilatoren und Beleuchtungen nach ca. 10 Jahren Einsatzdauer.

Die Strahlventilatoren sind mit Hilfe eines Rahmens an der Decke befestigt. Der Rahmen und die Befestigungselemente bestehen aus der Stahlqualität der Gruppe III nach SIA 179 [5]. Die Dübel im Beton sind aus nichtrostendem Stahl der Gruppe V (1.4529). Zusätzlich ist eine Absturzsicherung mit einer Kette vorhanden (Abb. 38). Bei den Schraubverbindungen aus nichtrostendem Stahl der Gruppe III (A4), sowohl bei der Befestigungs-konstruktion als auch am Gehäuse, sind teilweise im Spaltbereich Korrosionsprodukte vorhanden (Abb. 39).

Auf der Unterseite des Schalldämpfers wurden Löcher aufgrund von Lochkorrosion gefunden (Abb. 40). Dieser Mantel besteht aus nichtrostendem Stahl der Gruppe III (1.4571). Die Korrosion erfolgte von der Innenseite her. Offenbar können Kondensationserscheinungen sowie Salzablagerungen innerhalb des Isolationsmaterials im Schalldämpfer nicht ausgewaschen werden, was zu aggressiven Bedingungen und zu Lochkorrosion am Mantelblech des Schalldämpfers führte.

Die Leuchten des Leuchtbandes im Tunnel sind gleich konstruiert wie im Tunnel Entlisberg. An den Stirnseiten der Leuchtkästen sind Deckel aus Aluminium vorhanden, die mit einem Verschluss aus nichtrostendem Stahl versehen sind und mittels eines Splintes aus nichtrostendem Stahl befestigt sind. Der Zustand ist vergleichbar mit dem im Tunnel Entlisberg. Die Teile aus nichtrostendem Stahl sind metallisch blank, am Aluminiumdeckel sind wenige weissliche Korrosionsprodukte sichtbar.

Bei beleuchteten Signalkästen wurden am beschichteten Gehäuse aus nichtrostendem Stahl im Kantenbereich Korrosionsangriffe festgestellt.

Fazit

An Bauteilen und Befestigungselementen aus nichtrostendem Stahl der Gruppe III tritt auf der freien Oberfläche praktisch keine Korrosion auf, während bei Spaltbedingungen in vielen Fällen Korrosionsprodukte sichtbar sind. Die entsprechenden Befunde des Tunnels Entlisberg werden bestätigt. Die Mäntel des Strahlventilators (Schalldämpfer) bestehen im Tunnel Buchrain im Gegensatz zum Tunnel Entlisberg aus nichtrostendem Stahl der Gruppe III. Es konnten sich Bedingungen auf der Innenseite einstellen, die zu Lochkorrosion am Mantel führten.

4.4 Zusammenfassung IST-Zustandserfassung

Die Ergebnisse der IST-Situationsanalyse sind vorsichtig zu bewerten. Insgesamt sind pro Bauteil / BSA-Komponente nur wenige untersuchte Fälle rapportiert. Eine statistische Auswertung ist mit der vorhandenen Datengrundlage nicht möglich.

Des Weiteren bestehen mehrere Unsicherheiten, ob der tatsächliche Zustand relevanter Teile effektiv erfasst wurde. Es beginnt damit, dass Sichtprüfungen an nicht gereinigten Teilen mit nicht definierten Methoden von ungeschulten Personen durchgeführt werden. In der Regel werden keine nichtzerstörenden Untersuchungen ausgeführt. Ein allfällig kritischer Zustand kann nicht eingesehen werden (spannungsführender Bereich eines Schraubenschaftes/Ankers). Ein demnächst relevanter Zustand (Blasengrad, Rostgrad) wird bei einem typischen Verschmutzungsgrad oberhalb des (nicht gereinigten) Fahrtraums leicht übersehen. Das Prüfergebnis der Sichtprüfung wird interpretiert und beim Beschreiben nochmals vereinfacht.

Allgemeine Feststellungen

Aus der Analyse der Schadensfälle und der Auswertung der Umfragen können die in der Forschungsidee definierten Komponenten bestätigt werden. Ergänzend kommen Kammerngehäuse und deren Halterungen hinzu.

Der detaillierte korrosionstechnische Zustand eines Systems mit seiner Werkstoff- und Verarbeitungsvielfalt ist in der Nutzungsphase vor Ort praktisch nicht erfassbar.

Werkstoffbestimmungen oder –Nachprüfungen bei der Abnahme oder bei periodischen Inspektionen sind nicht die Regel. Es verbleiben Unsicherheiten bezüglich der tatsächlich verbauten Werkstoffe auf allen Ebenen (System, Komponente, Halterung, Verbindungselemente). Analoges lässt sich zu Details der Ausführung von Korrosionsschutzsystemen (Beispiel Duplexsystem) feststellen. Diese Unsicherheiten können systematischen Charakter haben oder betreffen Ausnahmen.

In verschiedenen Fällen wurde beobachtet, dass im gleichen Tunnel für die gleiche Anwendung unterschiedliche Stähle eingesetzt wurden. Beispielsweise sind am gleichen Träger Befestigungselemente (Schrauben) aus nichtrostendem Stahl der Gruppe II und der Gruppe III (A2 und A4) vorhanden.

Angaben zur Exposition und dem Klima liegen in den meisten rapportierten Fällen nicht vor. Dies ist auf den vergleichsweise hohen Aufwand zur Erhebung dieser Daten zurückzuführen. Ob ein Korrosionsschutzsystem funktioniert oder nicht hängt aber wesentlich vom tatsächlich herrschenden Kleinklima ab. Ohnehin ist schon das Tunnelklima der Strassentunnelluft schwer zu definieren, da dies tunnelspezifisch ist und starke jahreszeitliche Schwankungen aufweist. Die Auswirkungen der in letzter Zeit zunehmend eingesetzten aggressiveren Tausalze wie Calcium- und Magnesiumchlorid sind noch nicht bekannt. Das Kleinklima an der Komponente selbst basiert auf dem Ortsklima und ist in der Regel aus konstruktiven und nutzungsbedingten Gründen aggressiver. Teilweise wurden bei gleichen Bauteilen, bei gleicher Exposition im selben Tunnel starke Unterschiede im Korrosionszustand festgestellt.

Die Anforderungen des aktuellen BSA-Handbuchs [72] in Bezug auf die Materialwahl werden häufig nicht eingehalten. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass viele Objekte vor Herausgabe des BSA-Handbuchs [72] erstellt wurden.

Elemente aus nichtrostendem Stahl

Im Allgemeinen wurden auf Elementen aus Stahl der Gruppe III (SIA 179 [5]) auf der freien Oberfläche wenig Korrosionserscheinungen festgestellt. Vereinzelt wurden Lochfrassangriffe auf freier Oberfläche beobachtet z. B. bei Abluftklappen, der Korrosionsfortschritt ist aber vergleichsweise gering. Dieser Befund deckt sich auch mit Rückmeldungen aus dem Unterhalt, wo Elemente aus der Gruppe III im Allgemeinen als problemlos bezeichnet werden. Häufig sind hingegen Korrosionserscheinungen in Spaltsituationen bei Elementen der Gruppe III (SIA 179 [5]) rapportiert. In einem Fall wurde Spannungsrisskorrosion an einer Schraube der Gruppe III (A4) beobachtet. Ebenso sind Mantelblechen von

Strahlventilatoren in ausgeprägten Spaltsituationen hohe Lochkorrosionsgeschwindigkeiten und Waddurchbrüche beobachtet.

Bei Elementen aus der Gruppe II wurden im Gegensatz zu Gruppe III auch häufig an der freien Oberfläche Korrosionserscheinungen gefunden. Bei gleicher Exposition ist der Korrosionsfortschritt sowohl an der freien Oberfläche als auch in Spaltsituationen im Vergleich zu Elementen aus der Gruppe III deutlich grösser.

Bei Elementen aus der Gruppe IV und V (SIA 179 [5]) wurde keine Lochkorrosion oder andere Korrosionserscheinungen rapportiert. In einem Fall wurde im Labor bei neuen Verbindungselementen eine reduzierte Beständigkeit der äussersten Schicht festgestellt. Dies wurde auf eine nicht korrekte Verarbeitung zurückgeführt. Dies ist ein Hinweis, dass insbesondere auch bei diesen Elementen aus Stahl der höheren Beständigkeitsklassen der Verarbeitung besondere Beachtung geschenkt werden muss.

Nichtrostende Stahlelemente in Verbindung mit Aluminium- oder C-Stahlbauteilen können eine gewisse kathodische Schutzwirkung erfahren. Die dazu erforderliche Elementbildung führt im Gegensatz dazu jedoch zu einem beschleunigten Korrosionsangriff am unedleren Material (Aluminium oder C-Stahl).

Bei spaltbehaftenden Verbindungen aus nichtrostenden Stählen aus unterschiedlichen Beständigkeitsklassen besteht die Gefahr, dass der nichtrostende Stahl aus der geringeren Beständigkeitsklasse zu korrodieren beginnt und die dabei entstehenden Korrosionsprodukte ein aggressives Milieu schaffen. Dieses kann in der Folge auch beim nichtrostenden Stahl aus der höheren Beständigkeitsklasse Korrosion auslösen, auch wenn dieser in der durch das Tunnelklima und Tunnelatmosphäre gegebenen Exposition an sich beständig wäre.

Elemente aus Aluminium

Sowohl aufgrund der Umfragen als auch aufgrund von rapportierten Schadensfällen ist zu schliessen, dass bei unbeschichteten Aluminiumbauteilen starke Korrosionserscheinungen und auch Korrosionsschäden auftreten können. Bei beschichteten Bauteilen wird das Aluminium gut geschützt, solange die Beschichtung intakt ist und nicht abblättert. Diese Ablösung der Beschichtung erfolgt häufig von Kanten ausgehend.

Visuell sind die Korrosionsstellen am Aluminium anhand der weissen Produkte auszumachen, der Korrosionsfortschritt (in die Tiefe) ist jedoch aufgrund einer visuellen Beobachtung schwer abzuschätzen.

Besonders gross kann der Korrosionsfortschritt bei einer Elementbildung mit nichtrostendem Stahl sein.

Metallische Überzüge und Beschichtungen

Die Umfragen ergaben keine ausreichend gesicherten Ergebnisse zum Ist-Zustand. Dafür wären tiefer gehende Zustandsbeurteilungen als lediglich Sichtprüfungen nötig und mehr Kenntnisse zum tatsächlich ausgeführten Korrosionsschutz. Leider existieren in der Regel keine Aufzeichnungen und keine QS-Dokumente.

Ein metallischer Überzug aus Zink kommt in einem Strassentunnel mit einer Korrosivitätskategorie von C5 resp. CX auf einen Abtrag von bis zu ca. 8 µm pro Jahr und ist deshalb kaum geeignet für längere Standzeiten.

Korrekt dimensionierte Beschichtungen für die Korrosivitätskategorie von C5 resp. CX sind relativ unempfindlich gegenüber der Tunnelatmosphäre, denn sie verkraften eine grosse Bandbreite bezüglich pH-Wert und Chloride.

Wird Zink jedoch zusätzlich beschichtet (Duplexsystem) entsteht bei korrekter Ausführung und bezüglich der Schutzdauer mehr als die Summe der beiden Korrosionsschutzmassnahmen. Für ein erfolgreiches Duplexsystem sind jedoch mehrere Ausführungsschritte erforderlich, von denen jeder einzelne zwingend nötig ist für das Gesamtergebnis einer langen Schutzdauer.

„Duplexsysteme“ fanden/finden insbesondere bei Signalträgern und Strahlventilatoren Anwendung. Bei beiden Anwendungen startet oder zeigt sich Korrosion insbesondere bei Kanten und Spalten, sowie ausgehend von Stellen mit mechanischen Belastungen.

Ebenfalls zeigt sich, dass Komponenten mit Duplexsysteme der Korrosivität in Tunnelatmosphären gewachsen sind, sofern Design, System und Ausführung in korrosionstechnischer Hinsicht korrekt ausgeführt sind.

Während die Signalträger und ihre Halterungen eher als Investitionsgüter ausgeführt sind und einfache Gebilde mit hohen Wanddicken darstellen, zeigen Strahlventilatoren eine filigranere leichtere Bauweise mit vielen Bauteilen, und somit viele Kanten, Spalten, Schraubverbindungen. Hinzu kommt, dass Signalträger bauteilgrössenbedingt eher von hohen Zinkschichtdicken profitieren als Strahlventilatoren als Blechkonstruktion.

Gemäss dem alten Grundsatz „Korrosionsschutz ist nur so gut wie seine Schwachstelle“ ist die schwachstellenfreie Umsetzung sowohl die Herausforderung als auch das Problem.

Die vorgefundenen Schwachstellen können von zufälligem oder systematischem Charakter sein. Der Ist-Zustand zeigt hinreichend genau auf, dass systematische Schwachstellen bestehen, nämlich auf Seite der Konstruktionsweise und auch auf Seite der Ausführung. Bei Ersteren wären gewisse Modifikationen bei den Vorgaben möglich und umsetzbar. Bei der Ausführung kommt man hingegen zum Schluss, dass diese eher ein Zufallsprodukt ist als ein Produkt mit gesicherter Qualität. Hinzu kommt, dass veraltete technische Regeln, ungenügende Standards und Messtechniken vorhanden sind. Hier besteht Verbesserungspotential.

Schlussfolgerungen

Aufgrund der Anzahl und Vergleichbarkeit der Rückmeldungen und der verfügbaren Dokumentation der Schadensfälle sind keine statistischen Auswertungen wie z. B. der Ausfallwahrscheinlichkeit von einzelnen Bauteilen möglich. Trotzdem zeigen die verfügbaren Daten, dass verschiedentlich Schäden an Bauteilen aufgetreten sind:

Soll sichergestellt werden, dass keine Korrosionsschäden auftreten, also eine "Null-Toleranz" erreicht wird, bestätigen sich die im Normenwerk aufgeführten Anforderungen. Die vorliegenden Rückmeldungen der Betreiber und die Schadensfälle lassen keinen belegbaren Spielraum für Abweichungen zu.

Die zur Verfügung stehenden Daten lassen keine Differenzierung der Korrosionsgefährdung von Bauteilen betreffend der Lage und Anordnung im Tunnel, des Verkehrsaufkommens und der geografischen Lage des Tunnels zu.

Teilweise wurden bei gleichen Bauteilen, bei gleicher Exposition im selben Tunnel starke Unterschiede im Korrosionszustand festgestellt. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Exposition und klimatischen Verhältnisse einen grossen Einfluss auf die Korrosion haben, beispielsweise ist bekannt, dass z. B. die "time of wetness" (vgl. auch Anmerkungen in Kap. 5.2.3 dazu) bei einem Bauteil ein wesentlicher Faktor für den Korrosionsfortschritt darstellt. Die Erfassung der klimatischen Verhältnisse ist jedoch aufwändig. Das dürfte der Grund sein, dass die diesbezügliche Datenlagen in den bearbeiteten Quellen sehr schwach ist. Bei neuen Objekten stellt sich zudem das Problem, dass die klimatischen Bedingungen bei Einbau der BSA Elemente nicht bekannt sind. Zudem ist die zukünftige Entwicklung schwer abschätzbar. Dies führt zum Schluss, dass die Einteilung der Anforderungen an den Korrosionsschutz der BSA Elemente aufgrund der Einbausituation / Exposition im Tunnel basierend auf den ausgewerteten Umfragen und Schadenfällen bei der vorliegenden Datenlage nicht möglich ist.

Um trotz der Datenlage, fallweise eine differenzierte Betrachtungsweise zu ermöglichen und gegebenenfalls vom Normenwerk abzuweichen, ist eine risikobasierte Analyse erforderlich. Ein solcher Ansatz wurde entwickelt und wird im Kapitel 8 beschrieben. Je nach Situation ist es so möglich, auch gegenüber den Anforderungen des Normenwerks, weniger beständige Werkstoffe einzusetzen. Gegebenenfalls sind Zusatzmassnahmen erforderlich, wie z. B. Zusatzsicherungen oder der Ersatz des Bauteils nach einem definierten Zeitintervall.

5 Korrosivität der Tunnelatmosphäre

5.1 Atmosphäre in Strassentunnels

5.1.1 Generelle Einflussfaktoren auf die Korrosivität

Die Korrosivität von Atmosphären ist im informativen Anhang der SN EN ISO 9223:2012 [13] gemäss Tabelle 1 definiert. Die SN EN ISO 12944-2:1998 [15] bezieht sich ebenfalls auf diese Kategorien der Vorläufer-Norm, und somit noch ohne die Kategorie CX.

Bei der Betrachtung der Korrosivität gemäss SN EN ISO 9223:2012 [13] werden die folgenden Parameter berücksichtigt:

- Temperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Beaufschlagung der Oberflächen mit Schwefeldioxid
- Beaufschlagung der Oberflächen mit Chloriden

Diese Einflussgrössen zeigen deutlich, dass es sich einerseits um eigentliche Luftparameter, aber auch um Ablagerungseffekte auf der Metalloberfläche handelt, bei welchem die Wechselwirkung zwischen Metall und Luft eine zentrale Rolle spielen. Diese Einflussfaktoren sind nicht ausreichend, um die Korrosivität der Tunnelatmosphäre abschliessend zu behandeln. Vielmehr sind sämtliche, in Tab. 12 aufgeführten Faktoren für die Korrosivität in Betracht zu ziehen.

Die Korrosivität in Strassentunnels wird durch keine der Kategorien in Tab. 11 abgedeckt. Bei Strassentunnels entsteht aus dem Ortsklima, dem Fahrzeugverkehr (inkl. der Fahrzeugabwärme, Schnee und Wassereintrag), der Tunnelbelüftung, der Erdwärme und einer Kombination der Kategorie CX mit C5 für Innen- und Aussenräume. Es liegen die Bedingungen in schlecht belüfteten Räumen kombiniert mit aggressiven Verbrennungsgasen vor. Insgesamt entsteht ein Beanspruchungskollektiv mit gegenüber dem Ortsklima erhöhter Temperatur und Feuchtigkeit, mit Salzsprühnebel, fehlender Reinigung durch regelmässige Niederschläge sowie aggressiven Verbrennungsgasen, welche Schwefeldioxide und Stickoxide sowie Russpartikel enthalten, Schwefeldioxide und Stickoxide können bei Kondensation zu Schwefelsäure und Salpetersäure reagieren. Zudem sind Ablagerungen von Staub und Russ zu erwarten und es wurde auch verschiedentlich der Eintrag von Schwefelwasserstoff durch das Bergwasser beobachtet. Unter diesen Bedingungen kann sich ausgehend von einem aggressiven Raumklima im Tunnel ein aggressives Kleinklima in den Ablagerungen auf den BSA-Komponenten bilden. Dabei ist zu erwarten, dass es in Spaltsituationen zu einer zusätzlichen Verschärfung der Korrosivität kommt. Bei der Diskussion der Korrosivität der Tunnelatmosphäre sind die spezifischen lokalen Bedingungen zu berücksichtigen. Dabei ist zwischen dem Ortsklima, dem Raumklima und dem Kleinklima zu unterscheiden.

Gemäss SIA 179 [5] ist das Ortsklima die Atmosphäre am Standort des Bauwerks. In Räumen ist das Ortsklima nur in untergeordneten Masse für die Korrosionsbeanspruchung massgebend. Das entsprechende Raumklima wird primär von der Feuchtigkeits-, Temperatur- und/oder Schadstoffbelastung im Rauminnern bestimmt.

Das Kleinklima umfasst die Bedingungen an der Grenzfläche zwischen einem Bauteil und seiner Umgebung. Das Kleinklima ist gemäss [15] einer der entscheidenden Faktoren zur Bewertung von Korrosionsbelastungen.

Tab. 11 Beschreibung der Korrosivitätskategorien gemäss SN EN ISO 9223:2012 [13]

Korrosivitäts-kategorie (C) ^a	Korrosivität	Typische Umgebungen Innen	Beispiele ^b im Freien
C1	unbedeutend	Beheizte Räume mit niedriger relativer Luftfeuchte und unbedeutender Luft-verunreinigung, z. B. Büros, Schulen, Museen.	Trockene oder kalte Klimazone, atmosphärische Umgebung mit sehr geringer Verunreinigung und kurzer Befeuchtungsdauer, z. B. bestimmte Wüstengebiete, Zentrum der Arktis/Antarktis.
C2	Gering	Unbeheizte Räume mit schwankender Temperatur und relativer Luftfeuchte. Seltene Kondensation und geringe Luft-verunreinigung, z. B. Lager, Sporthallen.	Gemässigte Klimazone, atmosphärische Umgebung mit geringer Luftverunreinigung ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), z. B. ländliche Gebiete, kleine Städte. Trockene oder kalte Klimazone, atmosphärische Umgebung mit kurzer Befeuchtungsdauer, z. B. Wüsten, subarktische Regionen.
C3	Mässig	Räume mit gelegentlicher Kondensation und mässiger Luftverunreinigung aus Produktionsprozessen, z. B. Anlagen zur Lebensmittelherstellung, Wäschereien, Brauereien, Molke-reien.	Gemässigte Klimazone, atmosphärische Umgebung mit mässigen Luftverunreinigungen ($\text{SO}_2: 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), oder mit geringer Beeinflussung durch Chloride, z. B. Stadtgebiete, Küstenbereiche mit geringen Ablagerungen von Chloriden. Subtropische und tropische Klimazone, Atmosphäre mit geringen Verunreinigungen.
C4	stark	Räume mit häufiger Kondensation und hoher Luftverunreinigung aus Produktionsprozessen, z. B. Industrieanlagen, Schwimmbäder.	Gemässigte Klimazone, atmosphärische Umgebung mit hoher Luftverunreinigung ($\text{SO}_2: 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oder mit wesentlicher Beeinflussung durch Chloride, z. B. Stadtgebiete mit Luftverunreinigungen, Industriegebiete, Küstenbereiche, nicht im Bereich von Salzwasser-Sprühnebel, starke Belastung durch Enteisungssalze. Subtropische und tropische Klimazone, Atmosphäre mit mässiger Verunreinigung.
C5	sehr stark	Räume mit sehr hoher Häufigkeit der Kondensation und/oder hoher Luftverunreinigung aus Produktionsprozessen, z. B. Bergwerke, Hohlräume für industrielle Zwecke, nicht belüftete Hallen in sub-tropischen und tropischen Klimazonen	Gemässigte und subtropische Klimazone, atmosphärische Umgebung mit sehr hoher Luftverunreinigung ($\text{SO}_2: 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), und/oder mit signifikanter Beeinflussung durch Chloride, z. B. Industriegebiete, Industriegebiete, Küstenbereiche, geschützte Stellen an der Küstenlinie.
CX	extrem	Räume mit nahezu ständiger Kondensation oder ausgedehnten Belastungszeiten bei extrem hoher Luftfeuchte und/oder Räume mit hoher Luftverunreinigung aus Produktionsprozessen, z. B. nicht belüftete Hallen in feucht-tropischen Klimazonen mit eindringender Verunreinigung aus der Aussenluft, einschliesslich in Gebieten der Luft enthaltener Chloride und korrosions-fördernden Staubs	Subtropische und tropische Klimazone (sehr lange Befeuchtungsdauer), atmosphärische Umgebung mit einer sehr hohen Luftverunreinigung durch SO_2 (mehr als $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) einschliesslich begleitender und produktionsbedingter Verunreinigungen und/oder stark beeinflusst durch Chloride, z. B. Gebiete mit intensiver industrieller Nutzung mit extrem hoher Verunreinigung, Küsten- und Offshore-Bereiche, zufälliger Kontakt mit Salzsprühnebel.

ANMERKUNG 1

Die Ablagerung von Chloriden in Küstenbereichen ist stark abhängig von den Variablen, die den Transport von Meersalz ins Landesinnere beeinflussen, wie z. B. Windrichtung, Windgeschwindigkeit, örtliche topographische Beschaffenheit, vor Wind schützende der Küste vor-gelagerte Inseln, Entfernung des Standortes vom Meer usw.

ANMERKUNG 2

Extremer Einwirkungen von Chloriden, die typisch für die Spritzwasserzone am Meer oder stark salzhaltigen Sprühnebel sind, fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm.

ANMERKUNG 3

Die Einteilung der Korrosivität von speziellen Betriebsatmosphären, z. B. in der chemischen Industrie, fällt nicht in den Anwendungsbereich dieser Internationalen Norm.

ANMERKUNG 4

Aufgrund der Anwesenheit von hygroskopischen Salzen können nicht überdachte und durch Regen abgewaschene Flächen in Meeresatmosphären, auf denen sich Chloride ablagern, eine höhere Korrosivitätskategorie aufweisen.

ANMERKUNG 5

Eine ausführliche Beschreibung der Typen von gering korrosiven Atmosphären in Innenräumen, die den Korrosivitätskategorien C1 und C2 entsprechen, ist in ISO 11844-1 enthalten. Die Korrosivitätskategorien in Innenräumen IC1 bis IC5 werden definiert und es erfolgt eine Einteilung.

a In Umgebungen, für die die Kategorie CX erwartet wird, wird empfohlen, die Einteilung der atmosphärischen Korrosivität auf der Grundlage der Massenverluste durch Korrosion nach einem Jahr vorzunehmen.

b Die Konzentration von Schwefeldioxid (SO₂) sollte mindestens ein Jahr lang bestimmt werden und ist als Jahresmittelwert anzugeben

Tab. 12 Wichtige Verunreinigungen, welche die Korrosivität beeinflussen, gemäss EN ISO 9223:2012 [13]

Verunreinigung	Konzentration / Ablagerung (jährlicher Mittelwert)	Quellen
SO ₂	Landatmosphäre: 2 bis 15 (µg/m ³) Stadtatmosphäre: 5 bis 100 (µg/m ³) Industrieatmosphäre: 50 bis 400 (µg/m ³)	Die Hauptquellen für SO ₂ sind die Nutzung von Kohle und Öl sowie Emissionen aus Industrieanlagen.
NO ₂	Landatmosphäre: 2 bis 25 (µg/m ³) Stadtatmosphäre: 20 bis 150 (µg/m ³)	Verkehr ist die Hauptquelle für NO ₂ -Emissionen
HNO ₃	Landatmosphäre: 0.1 bis 0.7 (µg/m ³) Stadt-/Industrieatmosphäre: 0.5 bis 4 (µg/m ³)	HNO ₃ korreliert mit NO ₂ . Hohe Konzentrationen von NO ₂ , organische Verbindungen und UV-Licht erhöhen die Konzentration
O ₃	20 bis 90 (µg/m ³)	O ₃ (Ozon) wird in der Atmosphäre durch eine Wechselwirkung zwischen Sonnenlicht, Sauerstoff und Verunreinigungen gebildet. Die Konzentrationen sind höher in verunreinigten Landatmosphären und geringer in städtischen Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen
H ₂ S	Normal: 1 bis 5 (µg/m ³) Überdachung zum Schutz gegen industrielle und tierische Verunreinigungen: 20 bis 25 (µg/m ³)	Es gibt einige natürliche Quellen, wie z. B. Sümpfe und vulkanische Aktivitäten. Die höchsten Konzentrationen stammen aus der Zellstoff- und Papierindustrie und der Landwirtschaft.
Cl ₂	Normal: 0.1 (µg/m ³) Einige Industrieanlagen: bis zu 20 (µg/m ³)	Die Hauptquelle ist die Emission aus der Zellstoff- und Papierindustrie
Cl ⁻	Normal: 0.1 bis 200 (µg/m ³) In Abhängigkeit von der geographischen Situation - in Meeresatmosphären: 300 bis 1 500 (µg/m ³)	Die Hauptquellen sind das Meer und die Enteisung von Strassen
NH ₃	Geringe Konzentrationen: < 20 (µg/m ³) Dicht an der Quelle: bis zu 3000 (µg/m ³)	Düngung von landwirtschaftlich genutzten Flächen und Emissionen aus der Industrie und Erzeugung von Lebensmitteln können zu den höchsten Mittelwerten führen.
Teilchen-PM ₁₀	Landatmosphäre: 10 bis 25 (µg/m ³) Stadt-/Industrieatmosphäre: 30 bis 70 (µg/m ³)	Landatmosphäre: größere inerte Komponenten Stadtatmosphäre: Gebiete mit hoher Verkehrsdichte, korrosive Komponenten.

		Industrieatmosphäre: Emissionen aus der Produktion können zu hohen Konzentrationen führen.
Teilchen (Schwebstaub-ablagerungen)	Landatmosphäre: 450 bis 1 500 (mg/(m ² · a)) Stadt-/Industrieatmosphäre: 1 000 bis 6 000 (mg/(m ² · a))	Landatmosphäre: grössere inerte Komponenten Stadt- und Industrieatmosphäre: korrosionsaktive Komponenten (SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻)
Russ	Landatmosphäre: < 5 (mg/(m ² · a)) Stadt- und Industrieatmosphäre: bis zu 75 (mg/(m ² · a))	Eine Hauptquelle ist die Verbrennung von Kohle und Holz. Dieselruß von Kraftwagen ist eine andere Quelle.

ANMERKUNG:

Die Tabelle führt allgemeine Grenzwerte für Konzentrationen oder Ablagerungen von Verunreinigungen ein. Die realen (tatsächlichen) Bereiche unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Grad der Industrialisierung und von der Anwendung von Maßnahmen zur Minderung von Verunreinigungen (gesetzliche Massnahmen, nachsorgende Technologien usw.) in den jeweiligen Teilen der Welt.

Diese Bestandteile der Luft stellen die Grundbelastung durch Verunreinigungen im weiteren Sinn dar. Damit diese Verunreinigungen korrosiv wirken, müssen sie zunächst an die Bauteiloberfläche gelangen und dort deponiert werden. Die Menge der deponierten Verunreinigungen ist ebenfalls von Bedeutung.

Entscheidend für die Korrosionsbeanspruchung ist also weniger die Konzentration (ausgedrückt als mg/m³), sondern die Kontamination der Fläche mit Verunreinigungen (ausgedrückt in mg/m²) resp. die Kontaminationsleistung (ausgedrückt in mg/m² pro Zeiteinheit), sowie das Vorhandensein eines Elektrolyten. Die Deponierung der Verunreinigungen kann beispielsweise nass via Aerosole, oder trocken über die Schwerkraft erfolgen.

Im Tunnel ist die Deponierung der Verunreinigungen einerseits über die Schwerkraft gegeben, wobei dann eher Oberseiten als Untersichten von statischen Konstruktionen betroffen sind, und andererseits und insbesondere durch den Fahrzeugwind, sodass sich auf der Luvseite dickere Ablagerungen ausbilden können. Diese Ablagerungen summieren sich innerhalb eines Tunnelreinigungszyklus zu dickeren Schichten auf, da der reinigende Regen fehlt und die Ablagerungen im Regelfall auch nicht vom Wind oder durch Vibrationen mechanisch entfernt werden. Es entsteht in und unter den Ablagerungen ein eigenes Kleinklima.

Die Wirkung der Luftströmgeschwindigkeit und damit die Kontaminationsleistung ist bei dynamisch beanspruchten Komponenten, wie beim Laufrad eines Strahlventilators, um ein Vielfaches höher, auch wenn Ablagerungen eher abgeschleudert werden. Bei erhöhten Luftströmgeschwindigkeiten entstehen mitunter noch andere Schädigungsformen (Erosion, Abrasion).

5.1.2 Raumklima im Strassentunnel

Das Raumklima im Tunnel besteht aus den im Tunnelquerschnitt messbaren Parametern. Es setzt sich zusammen aus der Aussenluft, welche beispielsweise eine Korrosivitätskategorie C3 aufweist, sowie der im Tunnel abgegebenen Verunreinigungen. Hinzu kommen eingetragene Wasser- und Schneemassen inkl. Tausalzen. Ausserdem besteht ein grosser Einfluss über die Temperatur der Luft im Tunnel und der Oberflächentemperatur der Tunnelwände und Tunnelkomponenten.

In kaltem oder trockenem Klima wird die Korrosivität deutlich geringer sein als in feuchtem und warmem Klima. Aufgrund der spezifischen Bedingungen im Tunnel ist es aber unmöglich, aus den Klimadaten der Aussenluft auf die Aggressivität im Tunnel zu schliessen. Dabei sind wesentlich der Eintrag von Wasser in Form von Gisch aus Regen- sowie Schmelzwasser, die Veränderung der Lufttemperatur als Funktion der Belüftungssituation, die örtliche Bergtemperatur sowie die Tunnelabdichtung und das Entwässerungssystem zu berücksichtigen.

Bei der Bewertung der Korrosivität der Raumklimas im Tunnel darf nicht nur die chemische Wirkung von Säuren und Salzen berücksichtigt werden. Vielmehr treten in Tunnels durch den beschränkten Querschnitt hohe Luftgeschwindigkeiten auf. Durch die Einwirkung von Abrieb, Staub und Sand kommt es in der Folge zu Erosion an den Bauteiloberflächen. Gerade die kombinierte Einwirkung von mechanischer und chemischer Einwirkung kann zu einer verstärkten Korrosion auf Oberflächen führen. Dies trifft insbesondere auf Bauteilelemente zu, auf welche Salz und Sand gestreut werden. Vorüberfahrende Fahrzeuge verspritzen salzhaltiges Wasser und schleudern Salz und mineralische Bestandteile an die Bauteiloberflächen.

Als Folge dieser Einwirkungen stellt sich entlang des Tunnels eine signifikante Variation des Klimas ein. Dies betrifft sicherlich die Temperatur, aber auch die Benetzung mit Wasser kann entlang des Tunnels stark variieren, was zu starken Variationen der Korrosivität der Atmosphäre und zu wichtigen Unterschieden im Kleinklima führt.

5.1.3 Kleinklima im Strassentunnel

Aus Sicht des Korrosionsverhaltens von Werkstoffen ist das Kleinklima an der unmittelbaren Bauteiloberfläche von zentraler Bedeutung. Das Raumklima im Tunnel ist in Bezug auf diese Randbedingungen nur ein Faktor von vielen. Von zentraler Bedeutung sind die folgenden Einflussfaktoren:

- Wärmebrücken, welche zu einer lokalen Unterschreitung des Taupunkts führen und damit die Dauer der Benetzung mit Wasser erhöhen.
- Orientierung der Bauteiloberfläche, welches eine Ablagerung aber auch ein Abwaschen der Schadstoffe begünstigt oder verhindert. Ausserdem sind gewisse Tunnelgewölbeflächen nicht zugänglich für die reguläre Tunnelreinigung.
- Spaltbedingungen, welche sich sowohl in Bezug auf Feuchtigkeit, Schadstoffanreicherung aber auch Korrosionsprozesse als besonders kritisch erweisen können.
- Die Zusammensetzung von Tausalzen
- Temperatureinflüsse (Jahreszeiten, Prozesswärme, Brand)
- Strahlung (UV-Strahlung mit Degradation von Polymerwerkstoffen)
- Unterschiedliche Zusammensetzung des Umgebungsmediums (Konzentration, Aerosole, Gischt, Niederschlag)
- Verschiedene Zustände des Umgebungsmediums (Eis, Schnee, Regen/Nebel)
- Einwirkungsdauer der Feuchtigkeit (Time of Wetness TOW)
- unterschiedliche Umgebungsmedien (Dreiphasengrenzen, unterschiedliche Nutzungsphasen, Schmutzablagerungen)
- Strömung des Umgebungsmediums (Abrasion, Tropfenschlag, Luv/Lee-Seite)
- Chemische Einflüsse (Reinigungsmittel, Desinfektion)
- Mechanische Einflüsse: Steinschlag, Flächenpressungen, Reinigungsprozesse)

Aufgrund der Bedeutung des Kleinklimas ist es nicht möglich generelle Aussagen zum Korrosionsverhalten von gesamten Bauteilen oder Komponenten basierend auf dem Raumklima im Strassentunnel zu machen. Das Kleinklima kann bei künstlicher Bewitterung nicht nachgestellt werden.

5.2 Definition und Einflussgrössen

5.2.1 Einleitung

Die Verteilung des Raumklimas, ausgehend von den Portalen in Kombination mit der geologischen Situation und der Belüftung, führt zusammen mit den lokalen Faktoren, welche das Kleinklima definieren, zu komplexen Konfigurationen. Oft wird das Auftreten von stark korrosiven Bedingungen auf örtlich begrenzte Bereiche des Strassentunnels limitiert. Die Wechselwirkung zwischen Kleinklima und Raumklima im Tunnel sowie den relevanten konstruktiven Details wird in den folgenden Kapiteln exemplarisch diskutiert.

5.2.2 Wassereintrag

Die Benetzungsdauer der Bauteile ist eine der zentralen Bedingungen, welche das Korrosionsverhalten kontrollieren. In diesem Sinne ist der Eintrag von Wasser in Form von Gisch, welche mit dem Verkehrsstrom mitgetragen wird, grundsätzlich ungünstig. Es ist aber hinreichend bekannt, dass kontinuierlich beregnete Oberflächen ein vergleichsweise günstiges Korrosionsverhalten zeigen, da hygroskopische Salze, Säuren und auch Verunreinigungen regelmässig abgewaschen werden. So kann im Bereich des Einfahrtportals zwar eine starke Benetzung der Bauteile mit Wasser auftreten. Wenn es sich dabei in erster Linie um Regenwasser handelt, kann es zu einem reinigenden Effekt der Oberflächen kommen, welcher gerade aufgrund regelmässiger Benetzung die Bildung von stark aggressiven Kleinklimatas verhindert. Umgekehrt kann die erhöhte Feuchtigkeit im Portalbereich den Korrosionsfortschritt begünstigen, wenn der reinigende Effekt gegenüber der Benetzung untergeordnet ist.

In den Abschnitten hinter den Portalen kommt es zwar noch zu Eintrag von Gisch und zur Ablagerung von Salzen. Diese Verunreinigungen können aber aufgrund der begrenzten Wassermenge nicht mehr abgewaschen werden.

In Tunnelbereichen, welche weiter vom Portalbereich entfernt sind, kommt es zwar nur noch beschränkt zur Ablagerung von Salzen, die erhöhten Temperaturen können aber in den Kleinklimatas mit hygroskopischen Salzen in Kombination mit Säuren zu einer verstärkten Korrosion führen.

In der wärmeren Tunnelmitte sinkt die relative Luftfeuchtigkeit ab. Abhängig von der Abdichtung und dem Entwässerungssystem kommt es dabei zu einem Trocknungseffekt, welcher die Korrosion weitgehend verhindert oder stark verlangsamt. Bei einer Änderung der Lüftungsverhältnisse und somit der klimatischen Bedingungen kann jedoch auch in solchen Bereichen die Korrosionsgeschwindigkeit stark zunehmen.

Wenn diese warme Tunnelluft mit erhöhter Luftfeuchtigkeit in die kälteren Bereiche des Ausfahrtportals kommt, wird der Taupunkt unterschritten und es kommt wieder zu Kondensation. Dabei ist es entscheidend, ob es während des Betriebs des Tunnels zur Ablagerung von Salzen und Verunreinigungen auf den Bauteiloberflächen gekommen ist, wie dies beispielsweise im zeitweisen Baustellenbetrieb zu erwarten ist. So kann sich auch beim Ausfahrtportal ein Bereich mit stark erhöhter Korrosivität ausbilden.

Diese Diskussion hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie deckt weder den Fall mit Gegenverkehr ab, noch wird die spezifische Lüftungssituation behandelt. Sie zeigt aber deutlich die Komplexität der Mechanismen, welche im Zusammenhang mit dem Wassereintrag zu beachten sind.

5.2.3 Einfluss Luftfeuchtigkeit und Taupunktabstand

In der Nutzungsphase ist die Anwesenheit eines Elektrolyten auf der Werkstoffoberfläche der Auslöser für Korrosionsvorgänge. Abgesehen von Situationen mit Gisch und vollflächig nassen Konstruktionen sind weitere Einflussfaktoren und somit Zustände zu

betrachten, denn im Kleinklima ist die direkt an der Werkstoffoberfläche herrschende Luftfeuchtigkeit von zentraler Bedeutung.

Die nach Norm korrosionstechnisch bedeutsame Luftfeuchtigkeit startet bei 80% (ungeachtet von allfälligen Schmutzdepots oder Salzen auf den Werkstoffoberflächen). Berücksichtigt sind Verunreinigungen, Oberflächenrauigkeiten sowie gewisse Salze, welche zu diesem Grenzwert von 80% für den Beginn atmosphärischer Korrosion führen.

Als Befeuchtungsdauer (Time of Wetness TOW) gilt die Dauer pro Jahr, in welcher die Luftfeuchtigkeit oberhalb von 80% liegt, wiederum ungeachtet der Situation an der Bauteiloberfläche.

Auf sauberen Flächen entstehen erst unmittelbar vor dem Erreichen von 100 r.H. (resp. von Kondensation) genügend dicke Elektrolytfilme für technisch relevante Korrosion. Oberhalb von 80 bis ca. 98% können also saubere Stahloberflächen monatelang frei von Korrosionserscheinungen bleiben.

Die Benetzung der Verunreinigungen auf den Metalloberflächen ist von zentraler Bedeutung für das Auftreten von Korrosion. Die Diskussion hat gezeigt, dass nicht ein direkter Eintrag von Wasser erforderlich ist. Es kann bereits bei erhöhter Luftfeuchtigkeit zur Kondensation kommen. Dabei ist Hygroskopische Wirkung der Verunreinigungen von Bedeutung. Ebenso wichtig ist aber auch die Oberflächentemperatur.

Auf Befestigungselementen, welche in Kontakt mit der kälteren Tunnelwand sind, ist die lokale relative Luftfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche höher als in der Tunnelluft. Wenn es zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur kommt, entsteht Kondenswasser auf der Metalloberfläche. Die Taupunkttemperatur wird durch hygroskopische Salze zusätzlich verringert.

In diesem Zusammenhang sind nicht nur kalte Aussenwände zu beachten. Vielmehr kann es auch während der Nacht zur Abkühlung von Bauteilen kommen. Wenn während dem Tag feuchtere warme Luft eingetragen wird, kommt es auf den betroffenen Bauteilen zu Kondensation. Dieser Effekt spielt vor allem bei den Tunnelportalen und im Sommer eine grössere Rolle.

5.2.4 Tausalze

Die Tausalze sind die wesentliche Verunreinigung, welche die Korrosivität des Raumklimas im Tunnel bestimmen. Diese korrosive Wirkung basiert primär auf der Bildung von hygroskopischen Salzen, welche das Austrocknen der abgelagerten Salze verhindert. Das typische, traditionelle Tausalz (Auftausalz, Auftaumittel) ist schlichtes Kochsalz, NaCl. Im Falle von NaCl liegt die Sättigungsfeuchte bei ca. 76% relativer Luftfeuchtigkeit. Oberhalb dieses Wertes nimmt kristallines NaCl Wasser aus der Umgebungsluft auf und verflüssigt schliesslich zu einem hochleitfähigen Elektrolyten. Ein Tropfen mit NaCl kann somit erst unter 75% relativer Luftfeuchtigkeit austrocknen. Als Folge davon entstehen kristallines NaCl und der Korrosionsprozess kommt auf der trocknen Oberfläche wieder zum Stillstand.

Nebst der hygroskopischen Wirkung sowie der hohen Leitfähigkeit wirken die Chloride ungünstig auf die Beständigkeit von metallischen Werkstoffen. Es kommt beim Überschreiten der kritischen Konzentration bei passiven Werkstoffen zu Lochkorrosion und schliesslich möglicherweise zur Spannungsrisskorrosion. Zu beachten ist zudem, dass die Lochkorrosion temperaturabhängig ist und oberhalb einer kritischen Temperatur („CPT“) auftreten kann (vgl. Kapitel 3.4.2). Das ist folglich bei tragenden Bauteilen zu berücksichtigen, zumal Spannungsrissskorrosion üblicherweise vom Grund einer Lochkorrosion in stärker verformten Bereichen ausgeht.

Mit dem Einsatz von Tausalzen, welche zusätzlich CaCl_2 enthalten, wird die hygroskopische Wirkung der Ablagerungen stark erhöht. Das CaCl_2 hat eine Sättigungsfeuchte von ca. 35% relativer Luftfeuchtigkeit. Dadurch wird ein Austrocknen praktisch komplett

verhindert und die Korrosionsbeanspruchung wird stark verschärft: Es kommt zu verlängerter Befeuchtungsdauer und erhöhter Konzentration im Elektrolyten.

Diese tiefen Sättigungsfeuchten verlängern die wirksame Befeuchtungsdauer stark. Dieser Aspekt ist – zusammen mit den oben erwähnten Einflüssen in Kombination – mitverantwortlich für Korrosionsvorgänge an nichtrostenden Stählen mit Wirksummen von bis zu 27.

5.2.5 Austrocknen von Verunreinigungen

Korrosion ist nur möglich, wenn an der Metalloberfläche Wasser vorhanden ist. Aus diesem Grund ist die Benetzungsdauer der BSA-Komponenten von zentraler Bedeutung und ein schnelles Trocknen erwünscht.

Wenn es aber bei der Benetzung der Oberflächen mit Wasser nicht zum Abwaschen der Verunreinigungen kommt, entsteht während dem Trocknungsprozess eine Erhöhung der Konzentration der gelösten Salze. Dabei steigt z. B. die Chlorid-Konzentration an und der pH-Wert sinkt ab.

Bevor die Feuchtigkeit trocknen kann, muss sich im Wasser eine nahezu gesättigte Lösung gebildet haben. Dabei entstehen stark aggressive Bedingungen. Während dieses Vorgangs können für die Korrosion kritische Konzentrationen erreicht werden.

Der Umfang und die Einwirkdauer hängt in höchstem Masse vom lokal vorliegenden Kleinklima ab. Insbesondere langsame und langanhaltende Abtrocknungsphasen begünstigen Korrosionsvorgänge. Betroffen sind besonders Kleinklimatas bei Spalten und Ablagerungen.

5.2.6 Abgase von Verbrennungsmotoren

Verbrennungsmotoren erzeugen Schwefeldioxid, Stickoxide und Russ. Schwefeldioxid und Stickoxide reagieren im Wasser sauer und bilden Schwefelsäure resp. Salpetersäure. Der sich bildende Russ lagert sich auf den Oberflächen ab und begünstigt die kathodischen Reaktionen. Zusammen mit der erhöhten Temperatur im Tunnel führt dies zu einer Erhöhung der Korrosionsgeschwindigkeit. Die Spaltbedingungen in und unter Ablagerungen erschweren zudem ein Austrocknen und Verlängern die Befeuchtungsdauer.

Der Umfang des Abgasausstosses hängt von der Verkehrsdichte und vor allem auch dem Anteil an schweren Dieselfahrzeugen zusammen. Erfahrungsgemäss spielt auch die Höhenlage des Tunnels eine wesentliche Rolle. Da die Motoren auf tiefere Lagen optimiert sind, nimmt der Anteil an Russ bei höhergelegenen Alpentunnels zu.

5.2.7 Belüftung

Vom ASTRA wurde mitgeteilt, dass in vielen Tunnels vor wenigen Jahren eine Umstellung von aktiver Belüftung auf eine passive Belüftung erfolgt ist. Bei passiver Belüftung erfolgt der Luftaustausch nur durch den vom Verkehr verursachten Luftstrom. Nur bei einem Absinken der Luftqualität oder in Notfällen wird die Lüftung auf aktive Belüftung umgeschaltet.

Eine derartige Umstellung der Lüftung kann deutliche Änderungen des Raumklimas im Tunnel zur Folge haben. Im ungünstigen Fall kann dies zu einem, mindestens bereichsweisen, Anstieg der Luftfeuchtigkeit und Verlängerung der Befeuchtungsdauer führen, was aus korrosionstechnischer Sicht ungünstig ist.

Nach dieser Umstellung sind die Betriebserfahrungen zur Beständigkeit von Werkstoffen nicht mehr direkt vergleichbar mit der heutigen Situation. Mit der aktiven Belüftung wurde in vielen Fällen ein Beitrag zur Minderung der Beanspruchungen geleistet, den es heute so nicht mehr gibt.

5.2.8 Schlussfolgerung

Die Zusammenstellung der verschiedenen Einflussgrössen ist nicht vollständig und die dargelegten Abhängigkeiten nicht abschliessend. Die erläuterten Effekte zeigen aber deutlich die Komplexität der Zusammenhänge. Selbst kleine Umstellungen im Betrieb, wie ein zeitweiser Gegenverkehr, Modifikationen in der Lüftung oder gar ein Brandfall erhöhen die Korrosionsgefährdung.

5.3 Tunnelklima am Beispiel des Gotthard Strassentunnels

Effekte auf das Raumklima im Tunnel werden im Folgenden am Beispiel des Gotthard Strassentunnels weiter dargelegt.

5.3.1 Ausgangslage

Beim Gotthard Strassentunnel ist in der Zwischendecke ein Korrosions-Monitoring System eingebaut. Ziel ist die Überwachung der Wirksamkeit einer Hydrophobierung an der Deckenunterseite hinsichtlich der Korrosion der Bewehrung der Zwischendecke und des Feuchtehaushalts in der Betondecke. Dazu wurden an diversen Stellen verteilt über die Tunnellänge Sensoren installiert mit denen die Temperatur und die Feuchtigkeit sowohl im Fahrraum als auch im Zuluft- und Abluftkanal erfassen. Das installierte Monitoringsystem liefert Klimadaten von Standorten verteilt über die ganze Länge des Tunnels. ((ASTRA Bericht 080091/000454, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK) Nr. 11054 [84]))

Das Monitoring wurde im Hinblick auf die Aufgabenstellung (Untersuchung der Korrosion der Bewehrung der Zwischendecke) eingerichtet. Die Klimadaten, insbesondere diejenigen aus dem Fahrraum geben jedoch auch Hinweise auf das Klima, dem die BSA Elemente ausgesetzt sind. Verschiedene der in der Auswertung der Daten erhaltene Erkenntnisse sind auch im Hinblick auf die Exposition von BSA Elementen aussagekräftig. Deshalb werden im Folgenden verschiedene im Bericht dargestellte Erkenntnisse zusammengefasst.

Der Gotthard Strassentunnel wird im Gegenverkehr betrieben. Er weist eine Querlüftung auf. Die Lüftung wird gesteuert abhängig vom Verkehrsaufkommen. Bei weniger als 400 Fahrzeugen pro Stunde wird die aktive Lüftung abgestellt.

5.3.2 Raumklima im Gotthard Strassentunnel

In Abb. 4 sind die erfassten Mittel- und Extremwerte der Temperatur im Fahrraum des Gotthard Strassentunnel über die Länge des Jahres 2013 dargestellt. Eingezeichnet ist zudem die Lage der Tunnellüftungen. Deutlich ist erkennbar, dass diese einen Einfluss auf den Temperaturverlauf haben. In der Darstellung sind die erheblichen Temperaturunterschiede zwischen Portalbereich und Tunnelmitte sowie die grossen Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalwert sichtbar.

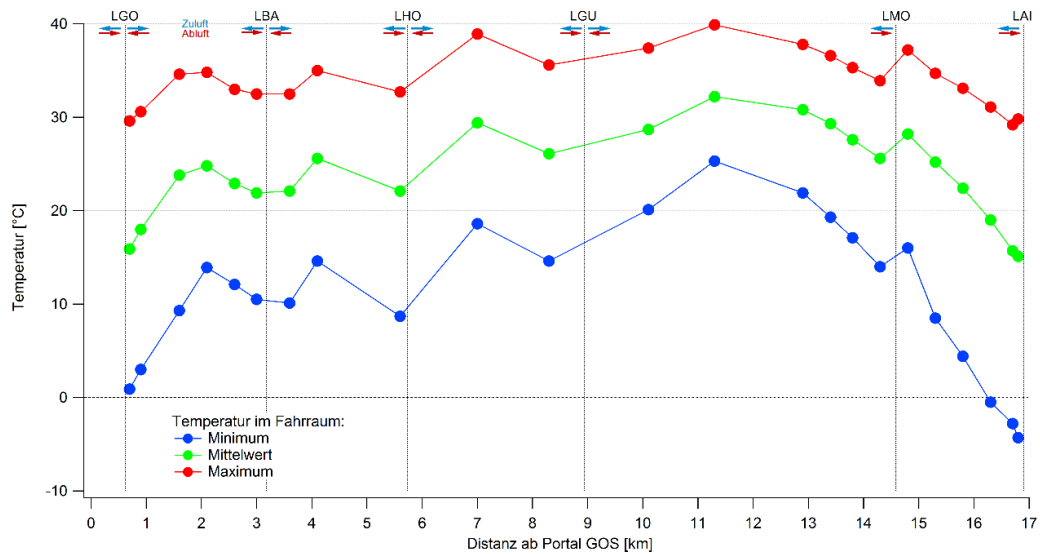


Abb. 4 Temperatur im Gotthard Strassentunnel im Jahr 2013, Mittel- und Extremwerte [84]

In den Abb. 5 und Abb. 6 ist die relative Luftfeuchtigkeit im Fahrraum dargestellt (Messwerte 2013). Hohe Luftfeuchtigkeit ($> 80\%$ rH) können kurzzeitig weit in den Tunnel hinein auftreten. Wie bei der Temperatur ist auch hier der Einfluss der Lüftungsanlagen zu erkennen.

Zusätzlich zu den Mittel- und Extremwerten ist auch der Anteil der Messwerte mit Luftfeuchtigkeit $> 76\%$ rH (Abb. 2a) und $> 34\%$ rH (Abb. 2b) aufgetragen. Eine Luftfeuchtigkeit von 76% rH entspricht der Sättigungsfeuchte von NaCl (vgl. Kapitel 0). Das NaCl nimmt ab diesem Wert Feuchtigkeit aus der Luft auf und es bildet sich ein gut leitfähiger Elektrolyt. In Abb. 5 ist zu erkennen, dass dieser Wert in den ersten ca. 1,5 km ausgehend von den Portalen häufig überschritten wird. Weiter entfernt vom Portalbereich wird dieser Wert jedoch nur während vergleichsweise kurzer Zeit erreicht.

Wie in Kapitel 0 beschrieben haben MgCl_2 und CaCl_2 im Vergleich zu NaCl eine deutlich tiefere Sättigungsfeuchte von unter 40% rH. In Abb. 6 ist der Anteil der Messwerte mit einer Luftfeuchtigkeit $> 34\%$ rH, der Sättigungsfeuchte von MgCl_2 , dargestellt. Diese Feuchtigkeit liegt im Bereich der mittleren Feuchtigkeit im Tunnel. Dementsprechend wird diese Feuchtigkeit wesentlich häufiger erreicht als die Sättigungsfeuchte von NaCl (74% rH), wie ein Vergleich mit Abb. 5 zeigt. Auch im mittleren Tunnelbereich wird der Wert von 34% rH häufig überschritten.

In Abb. 7 sind die Extrem- und Mittelwerte des Taupunktabstands im Gotthard Strassentunnel aufgetragen. Ist der Taupunktabstand $\leq 0^\circ$ treten Kondensationen auf. In der Darstellung ist zudem der Anteil der Messwerte mit einem Taupunktabstand $< 3^\circ$ aufgeführt. In dem Grenzwert 3° sind Ungenauigkeiten in der Temperatur und Feuchtemessung sowie Einflüsse durch Druckunterschiede berücksichtigt. Entsprechend den Temperaturen und Feuchtigkeit in den ersten ca. 1,5 km ab den Portalen ist dort der Anteil der Messwerte mit einem geringen Taupunktabstand besonders hoch.

Generell ist zu beachten, dass für das Auftreten von Kondensationen an Bauteiloberflächen die entsprechende Bauteiltemperatur und das Kleinklima entscheidend ist und nicht das Raumklima im Tunnel. Eine vergleichsweise massive Betondecke wird eine andere Temperatur aufweisen als metallische BSA-Elemente. Trotzdem können die dargestellten Messwerte Tendenzen und Zusammenhänge aufzeigen.

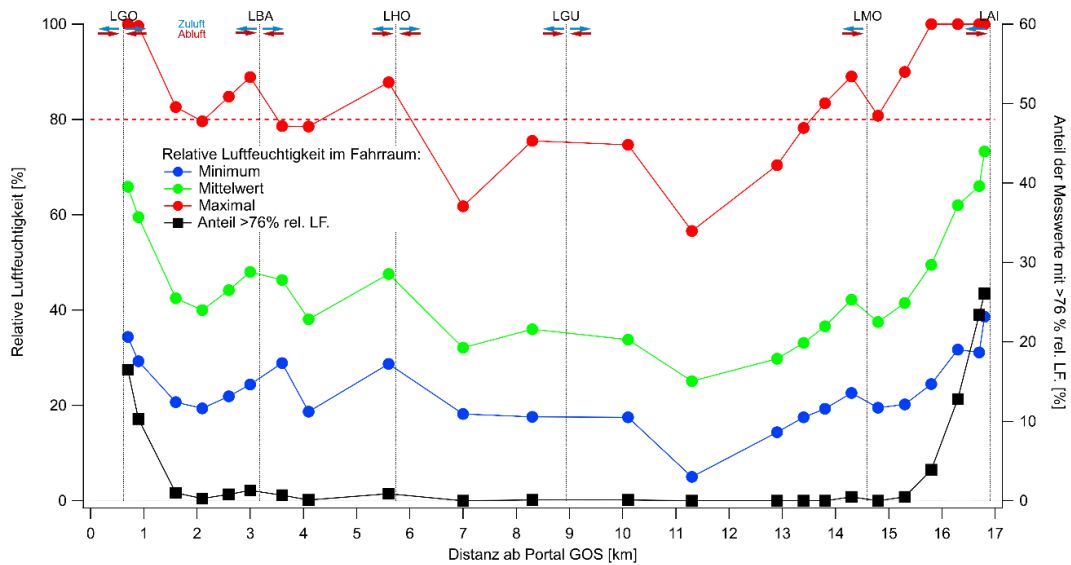


Abb. 5 Relative Luftfeuchtigkeit im Gotthard Strassentunnel im Jahr 2013, Mittel- und Extremwerte sowie Anteil der Messwerte > 76%rH (Sättigungsfeuchte von NaCl) [Grafik neu erstellt, Daten aus [85]]

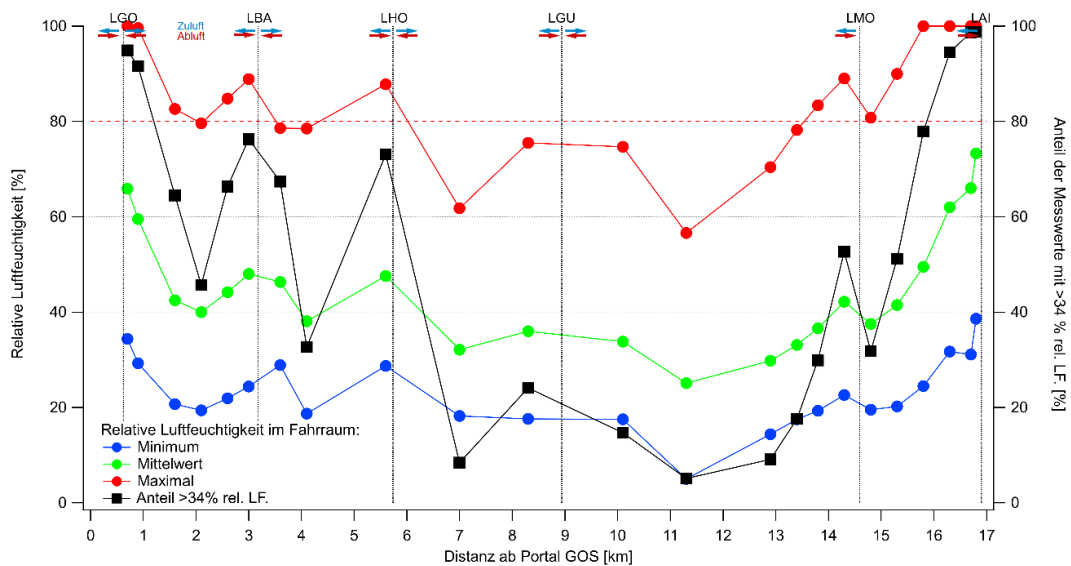


Abb. 6 Relative Luftfeuchtigkeit im Gotthard Strassentunnel im Jahr 2013, Mittel- und Extremwerte sowie Anteil der Messwerte > 34%rH (Sättigungsfeuchte von MgCl₂) [Grafik neu erstellt, Daten aus [85]]

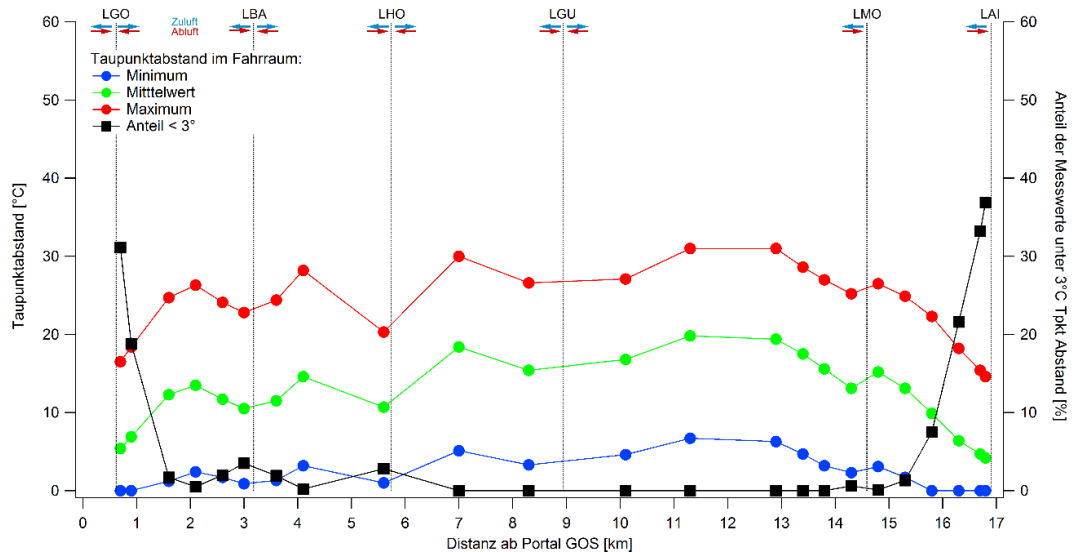


Abb. 7 Taupunktabstand im Gotthard Strassentunnel im Jahr 2013, Mittel- und Extremwerte sowie Anteil der Messwerte mit Taupunktabstand $< 3^{\circ}$ [84]

In einer weiteren Auswertung wurde der Einfluss von Einzelereignissen auf die Korrosion der Bewehrung in der Zwischendecke untersucht (ASTRA Bericht 080091/000, SGK Nr. 14072 [85]). Dabei zeigt sich, dass bei Regen die Luftfeuchtigkeit im Tunnel innert kurzer Zeit ansteigen kann. Entscheidend für das Auslösen von Korrosion an der Bewehrung der Zwischendecke ist jedoch nicht die Luftfeuchtigkeit an sich oder der Sprühnebel. Den grössten Einfluss auf die Korrosion haben Kondensationerscheinungen auf der Oberfläche der Zwischendecke. Die Kondensationen sind umso wahrscheinlicher, je kälter der Beton der Zwischendecke ist. Deshalb treten solche Ereignisse im Winterhalbjahr häufiger auf als im Sommer. Kommt es zu Kondensation kann innert kurzer Zeit viel Feuchtigkeit auch in grössere Tiefen des Betons eindringen. Zusammen mit dem dadurch eingeschleppten Salz können Korrosionsprozesse an der Bewehrung ausgelöst werden. Abb. 8 zeigt den deutlichen Anstieg der Luftfeuchtigkeit im Fahrraum in einem Zeitfenster von wenigen Stunden, ausgelöst durch ein Niederschlagsereignis. Dieser Anstieg ist auch in grösserer Entfernung von den Portalen messbar.

Abb. 9 zeigt ein Beispiel für den Verlauf des Betonwiderstandes der Zwischendecke und den Korrosionsstrom von Messproben im Beton. Sobald der Taupunkt unterschritten wird, dringt Wasser inkl. Schadstoffe in den Beton ein und der Korrosionsprozess wird ausgelöst resp. stark beschleunigt.

Im Vergleich zu einer Zwischendecke bestehen BSA Elemente jedoch häufig aus metallischen Werkstoffen und haben demzufolge eine andere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Ausserdem sind sie nicht porös. Trotzdem sind auch Parallelen vorhanden. Bei Unterschreiten der Taupunkttemperatur auf der Bauteiloberfläche können auch auf BSA Elementen erhebliche Feuchtigkeitsmengen infolge Kondensation anfallen. Diese können zusammen mit schon vorhandenen Salzablagerungen Korrosion auslösen. Im Weiteren kann bei Kondensationereignissen Feuchtigkeit auch in Spalten eindringen und gleichzeitig Schadstoffe dorthin transportieren. Die Abtrocknung in den Spalten ist stark erschwert. Korrosionsprozesse können somit dort weiter fortschreiten, auch wenn an der freien Oberfläche bereits eine Abtrocknung erfolgt.

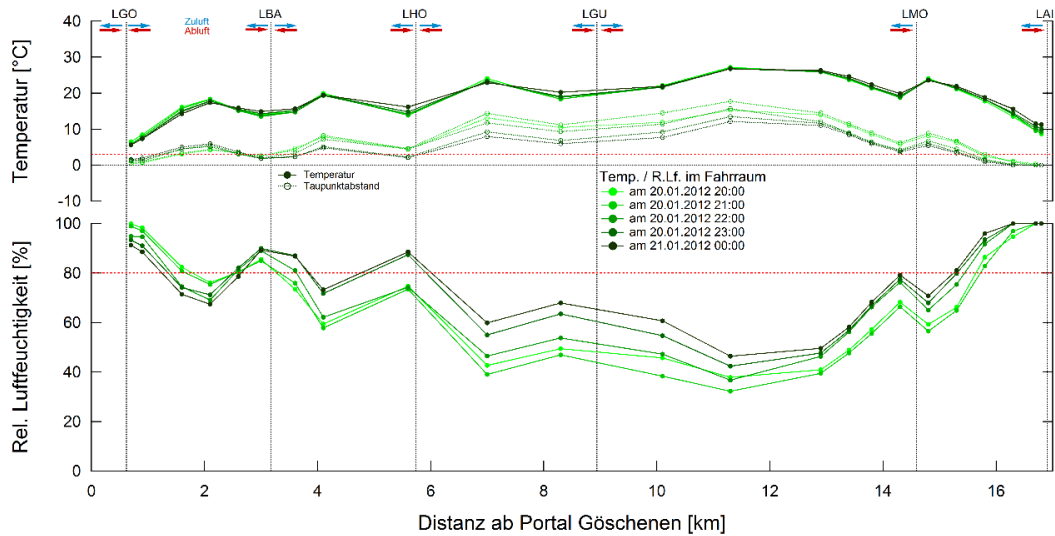


Abb. 8 Änderung der Temperatur, des Taupunktstandes und der relativen Luftfeuchtigkeit innert weniger Stunden bei Einsetzen von Regen [85]

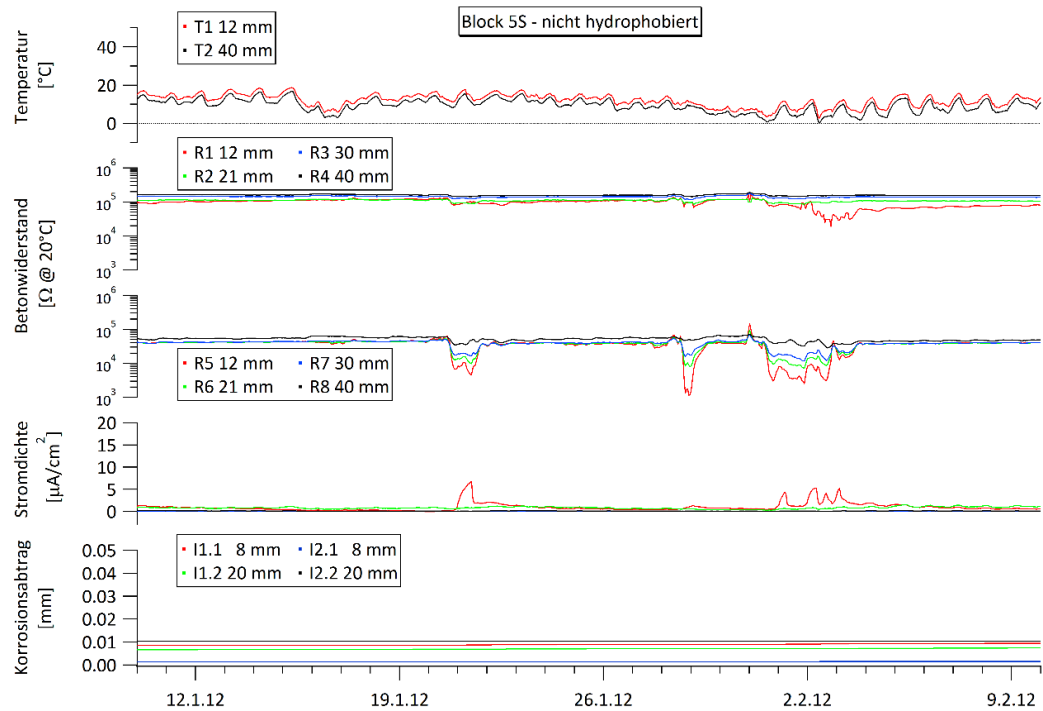


Abb. 9 Beispiel für die Änderung des Betonwiderstandes bis in grössere Tiefen und Zunahme des Korrosionsstromes am 21.1. und 29.1.2012 [85]

5.3.3 Schlussfolgerungen

- Die Temperaturen und Feuchtigkeit im Fahrraum eines Tunnels (Raumklima) können im Verlauf eines Jahres über einen grossen Bereich variieren.
- Das Raumklima im Tunnel wird stark von den Lüftungsverhältnissen beeinflusst. Diese wiederum können über das Jahr und wie im Fall des Gotthard Strassentunnels je nach Verkehrsaufkommen variieren.
- Allgemeingültige Aussagen über das Klima in Strassentunnels können nicht gemacht werden. Es ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, die bei jedem Tunnel wieder anders sind.
- Die grössten Änderungen des Raumklimas im Tunnel und die höchste Feuchtigkeit treten im Bereich der Portale auf, im Falle des Gotthard Strassentunnels in einem Bereich bis ca. 1.5 km ab Portal. Somit sind dort auch Unterschreitungen des Taupunktes am häufigsten.
- Bei auch nur vergleichsweise kurzem Unterschreiten des Taupunktes können grössere Mengen Wasser auf der Oberfläche kondensieren. Entscheidend ist das vorliegende Kleinklima.
- Starke Kondensation oder Sprühnebelbildung in den Portalbereichen kann zu einem Abwaschen von abgelagerten Salzen führen. Somit können trotz stärkerer Kondensation und ausgeprägterem Salzeintrag im Portalbereich günstigere Verhältnisse vorliegen, da die hygroskopischen Salze entfernt werden.
- Das kondensierte Wasser vermag bei BSA-Elementen in enge Spalten eindringen und dort je nach vorhandenen resp. eingeschleppten Schadstoffen Korrosionsprozesse auslösen. Aufgrund des Kleinklimas im Spaltbereich können dort Korrosionsprozesse weiter ablaufen, auch wenn auf der Oberfläche der Bauteile eine Abtrocknung stattfindet.
- Abgesehen von den Portalbereichen wird die Sättigungsfeuchte für NaCl nur während kurzer Zeitabschnitte erreicht. Wird dagegen CaCl_2 oder MgCl_2 als Taumittel eingesetzt ist die Sättigungsfeuchte während eines substanziellen Teils des Jahres überschritten. Dies ist nicht nur im Portalbereich sondern im ganzen Tunnel der Fall. Der Korrosionsfortschritt dürfte daher bei Einsatz von CaCl_2 oder MgCl_2 deutlich grösser sein.

5.4 Kategorisierung von Strassentunnel

5.4.1 Einflussfaktoren

Auf das Raumklima in einem Tunnel wirken eine ganze Reihe von Einflussfaktoren

Einflüsse der Lage

- Länge des Tunnels
- Höhenlage
- Klima (Korrosivitätskategorien) bei den Portalen
- Überdeckung des Tunnels, Abdichtung, Verkleidungen

Verkehr

- Verkehrsaufkommen
- Art des Verkehrs (Personenwagen, Lastwagen, Anteil Dieselmotoren)
- Verkehrsführung (Gegenverkehr oder Verkehr in Gegenrichtung)

Betrieb

- Lüftungsverhältnisse, Regelung der Lüftung
- Reinigungsintervalle
- Taumiteleintrag, Art des Taumittels

5.4.2 Möglichkeit der Kategorisierung

Wie oben ausgeführt, bestehen eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die das Raumklima im Tunnel beeinflussen. Wie am Beispiel des Gotthard Tunnels gezeigt, kann das Raumklima im Tunnel im Verlaufe eines Jahres erheblichen Schwankungen unterworfen sein. Zudem bestehen grosse Variationen über die Tunnellänge. Die entsprechenden Daten sind in der Regel nicht vorhanden. Wie das oben aufgeführte Beispiel des Gotthard Strassentunnel zeigt, können diese nur mit einem vergleichsweisen hohen Aufwand erhoben werden.

Die Beanspruchung eines bestimmten Bauteils ist wie im Kapitel 5.1 dargelegt abhängig vom dort herrschenden Kleinklima, welches sich vom Raumklima im Fahrraum noch differenzieren kann.

Aufgrund dieser Ausgangslage ist es nicht möglich die Tunnels in der Schweiz in Kategorien betreffend die zu erwartende Beanspruchung von BSA-Elementen einzuteilen.

5.5 Zusammenfassung Korrosivität

Das Klima im Fahrraum ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (vgl. Kapitel 5.4.1). Dieses kann sich über die Tunnellänge und auch im Verlauf eines Jahres erheblich ändern. Klimadaten, die die ganze Tunnellänge umfassen, sind nur in den wenigsten Fällen vorhanden. Wie im Kapitel 5.1 beschrieben, ist die tatsächliche korrosive Beanspruchung eines Bauteils bestimmt durch das vom Kleinklima. Dieses kann vom Raumklima im Fahrraum deutlich abweichen. So ist in Spaltsituationen ein anderes Kleinklima vorhanden als an der freien Oberfläche eines Bauteils. In jedem Tunnel und an jeder Lage im Tunnel z. B. Decke oder Wandbereich) unterscheidet sich somit die Korrosionsbeanspruchung abhängig von Temperatur, Geometrie und Position der BSA-Komponenten im Tunnelquerschnitt. Es ist daher praktisch unmöglich die Tunnels in Kategorien hinsichtlich ihrer Korrosivität einzuteilen. Jeder Tunnel und jeder Standort weisen seine eigenen klimatischen Verhältnisse auf.

Aufgrund der Resultate der Untersuchungen im Gotthard Strassentunnel (Kapitel 5.3) ergeben sich folgende Punkte, die neben anderen Faktoren einen wichtigen Einfluss auf die Korrosivität haben:

Auftreten von Kondensationen

- Ausserhalb des Spritzwasserbereiches ist das Auftreten von Kondensationsereignissen ein wichtiger Faktor, der die Wasserbeaufschlagung und somit die Korrosivität bestimmt. Während solchen Phasen ist es möglich, dass Wasser auch in Spalten eindringt.
- Im Bereich der Portale ist mit deutlich mehr Kondensationserscheinungen zu rechnen als in Tunnelmitte. Dieser Einfluss relativiert sich jedoch bei kürzeren Tunnellängen.

Wahl des Taumittels

- Im Hinblick auf die Korrosion ist der Wahl des Taumittels grosse Beachtung zu schenken. Der Einfluss auf die Beständigkeit und die Korrosionsgeschwindigkeit von BSA-Elementen kann aufgrund der unterschiedlichen Sättigungsfeuchte erheblich sein.

Fazit

Jeder Tunnel hat seine eigene Atmosphäre und innerhalb des Tunnels variiert diese in Abhängigkeit der Länge und der Jahreszeit. Es ist somit nicht möglich spezifische Daten zur weiteren Präzisierung der Angriffsbedingungen bei der Spezifizierung des Korrosionsschutzsystems heranzuziehen.

6 Prozess Auswahl Werkstoff/ Schutzsystem

6.1 Einleitung

Basierend auf den Umfragen, den untersuchten Schadensfällen sowie der Diskussion der klimatischen Bedingungen und der korrosionsschutzspezifischen Eigenheiten wird deutlich, dass es keine Ideallösung in Bezug auf die Werkstoff/Korrosionsschutzwahl gibt. Ebenso zeigt sich die Abhängigkeit von Werkstoff, Klima, Herstellung, Verarbeitung und Einbau. Angesichts dieser vielfältigen Anforderungen wurde ein Prozess entwickelt, welcher die relevanten Einflussgrößen beschreibt. Dieser wird im Folgenden beschrieben. Abb. 10 zeigt einen Auswahlprozess für die Werkstoff und Schutzsystemauswahl. Dieser ist folgendermassen aufgebaut und ist in der vorgegebenen Reihenfolge zu durchlaufen:

- Erstellen der Nutzungsvereinbarung
- Werkstoffauswahl 1. Stufe (primär technische Kriterien, zwingend zu erfüllen)
- Wenn genau ein Material resultiert → geeignetes Material ist damit bestimmt und der Prozess ist abgeschlossen
- Wenn mehrere Materialien resultieren → Werkstoffauswahl 2. Stufe
- Wenn kein Material resultiert → Anforderungen hinterfragen, anpassen und die Werkstoffauswahl 1. Stufe wiederholen.
- Werkstoffauswahl 2. Stufe (primär finanzielle, ästhetische Kriterien)

Die zu durchlaufenden und in Abb. 10 dargestellten Schritte werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

6.2 Nutzungsvereinbarung bez. Werkstoff/ Schutzsystem

Es hat eine Festlegung der Nutzungs- und Schutzziele zu erfolgen. Darin enthalten sind alle für die Auswahl der Werkstoffe / Schutzsysteme relevanten Aspekte, die Vorgaben aus dem ASTRA Fachhandbuch Kunstbauten [71] und der ASTRA Richtlinie „Projektierung und Ausführung von Kunstbauten“ Anhang 5 [1]. Eine Auswahl der Themen ist in folgender Liste gegeben (nicht abschliessend und generell gültig):

- Systemgrenzen
- Funktion
- Zu berücksichtigende Normen, resp. akzeptierte Normabweichungen
- Nutzungsdauer
- Art und Häufigkeit der Wartung & Unterhalt, Erneuerungsintervall
- Tunnelspezifische Einwirkungen (Tausalz, Feuchtigkeit, Abgase, ...)
- Ausserordentliche Einwirkungen (Brände, Chemieunfälle, Kollisionen, ...), wie lange oder unter welchen Bedingungen muss z. B. ein Bauteil bei diesen Einwirkungen funktionieren.
- Risikoakzeptanz
- Einheitlichkeit
- ggf. Umweltschutz, Ästhetik

Die Nutzungsvereinbarung für den Werkstoff / Schutzsystem kann als separates Dokument erstellt werden oder als Teil in der allgemeine Nutzungsvereinbarung (z. B. vom Bau, gem. Art. 2.2 SIA-Norm 260 [6]) enthalten sein. Häufig wird die Nutzungsvereinbarung nicht explizit erarbeitet, sondern entsteht laufend und z.T. unbewusst im Rahmen der Projekterstellung (z. B. im technischen Beschrieb). Dies wird aus folgenden Gründen als problematisch beurteilt. Die Nutzungs- und Schutzziele:

- sind ggf. nicht einheitlich und übergeordnet für alle Gewerke definiert.
- sind ggf. nicht explizit zwischen Bauherrn und Planer abgestimmt und genehmigt.
- werden ggf. nicht laufend nachgeführt und allen zugänglich gemacht.
- werden ggf. zu spät definiert.

6.3 Werkstoffauswahl 1. Stufe

Die Werkstoffauswahl nach Stufe 1 hat insbesondere gemäss den technischen Aspekten zu erfolgen. Dabei sind die Herstellbarkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die weiteren Anforderungskriterien und die Risikobetrachtung in Bezug auf Korrosion zu berücksichtigen. Diese verschiedenen Aspekte werden im Folgenden weiter ausgeführt.

Herstellbarkeit

Bei der Herstellbarkeit wird beurteilt, ob die Werkstoffe in der verlangten Ausführung verfügbar sind und etablierte Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren bestehen. Insbesondere sind folgende Themen relevant:

- Werkstoff in der erforderlichen Halbzeuge verfügbar (z. B. Bleche, Profile, ...) und in der erforderlichen Frist lieferbar.
- Schweissbarkeit
- Mechanische Bearbeitbarkeit (Spanabhebend, Umformung, ...)
- Geeignet für den vorgesehenen Korrosionsschutz, wie Verzinkung oder Beschichtung oder Vollbadbeizung bei nichtrostenden Stählen
- Kombination mit anderen Werkstoffen möglich

Gebrauchstauglichkeit

Bei der Gebrauchstauglichkeit sind sämtliche Anforderungen an eine BSA-Komponente zu berücksichtigen. Das zu erstellende Bauteil muss dabei insbesondere die folgenden Kriterien erfüllen:

- Funktionalität: Die verlangte Funktion muss gewährleistet sein
- Dauerhaftigkeit: die Nutzungsdauer muss erreicht werden
- Instandhaltbarkeit: das Bauteil muss unterhalten werden können (wenn dies nötig ist) und der Aufwand muss angemessen sein
- Brandschutz: Ein verlangter Brandschutz muss gewährleistet sein
- Ästhetik: Anforderungen an die Optik müssen erfüllt werden

Risikobetrachtung Korrosion

Die relevanten Einflussgrössen und die Vorgehensweise bei der Bewertung der Korrosionsbedingten Risiken sind in Kapitel 8 behandelt.

Weitere Kriterien

Möglicherweise werden weitere Kriterien definiert, die zwingend zu erfüllen sind. Insbesondere sind dies z. B. Umwelt- und/ oder Nachhaltigkeitskriterien, Kostenaspekte oder optische Aspekte.

6.4 Werkstoffauswahl 2. Stufe

Kosten und weitere Kriterien

Wenn mehrere Werkstoffe und Schutzsysteme die Kriterien der 1. Stufe erfüllen, erfolgt die weitere Auswahl primär nach wirtschaftlichen Aspekten. Wie dies erfolgen kann, ist in Kap. 9 am Beispiel „Strahlventilator“ dargestellt.

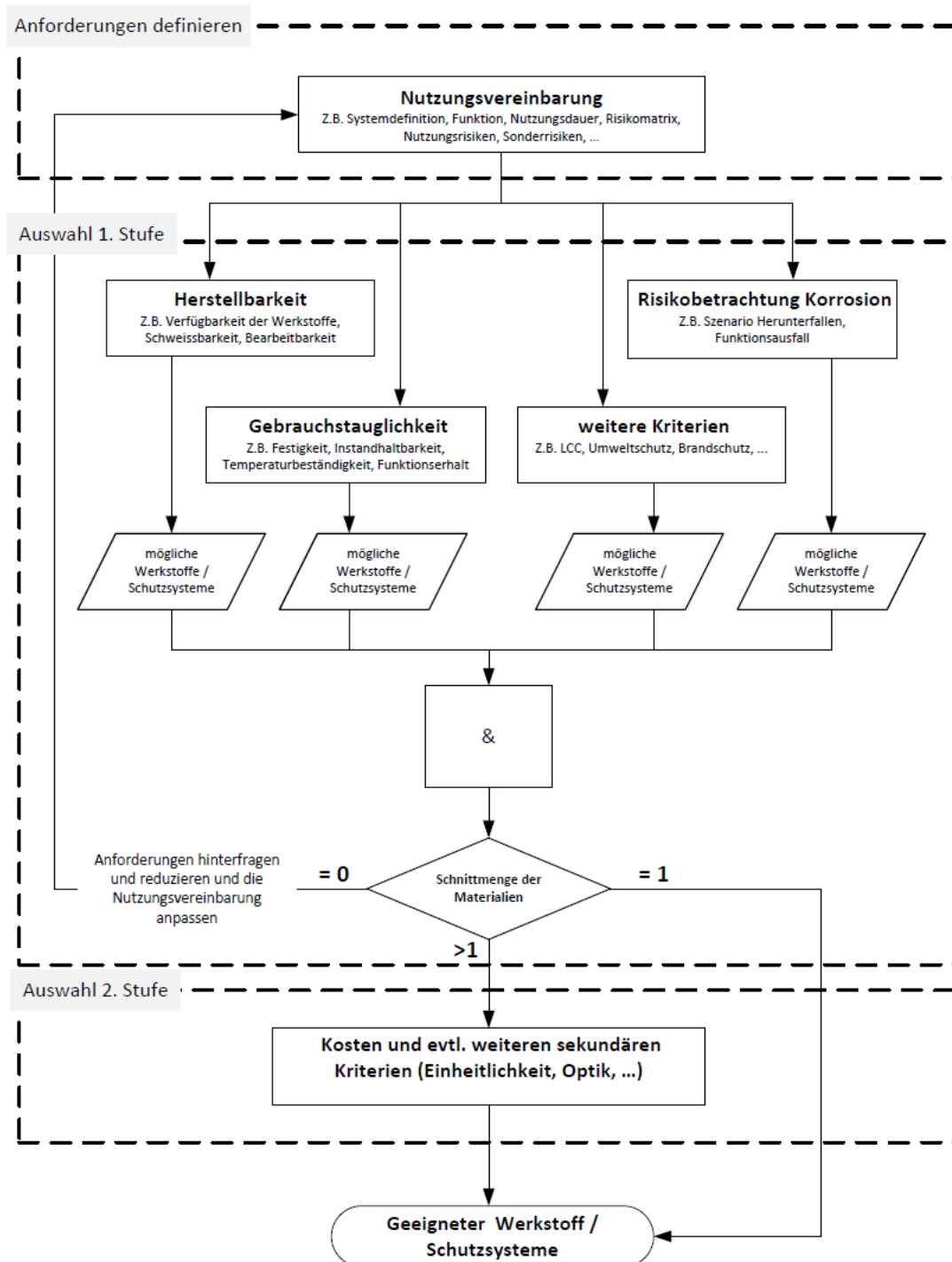


Abb. 10 Prozess Auswahl Werkstoff/ Schutzsystem

7 Betrachtete BSA-Komponente

7.1 BSA-Komponente

In dem Beitragsgesuch wurde bereits eine Auswahl an BSA-Komponenten getroffen, welche in diesem Forschungsprojekt untersucht werden sollten. Es wurden Komponenten ausgewählt, welche erfahrungsgemäss bezüglich Korrosion anfällig sind, respektive ein grosses Kosteneinsparpotential bezüglich Korrosionsschutzsystemen und Unterhalt aufweisen.

In diesem Forschungsprojekt werden nur Komponente der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung betrachtet, welche sich im Tunnelfahrraum befinden.

Aus der Analyse der Schadenfälle und der Auswertung der Umfragen (vgl. Kapitel 4) können die im Beitragsgesuch definierten Komponenten bestätigt werden. Ergänzend kommt die Videoüberwachungsanlage Verkehr (VTV) hinzu.

In diesem Forschungsprojekt werden somit folgende BSA-Komponenten betrachtet:

- Strahlventilatoren: Ventilatoren im Tunnel zur Regelung der Längsströmung
- Kabeltrassen: Tragkörper für Kabel
- Abluftklappen: Klappen oder Schieber, die den Tunnelfahrraum vom Abluftkanal trennen
- Signalträger: Träger (z. B. Traverse) für die Befestigung jeder Art von Signalen (z. B. Fahrstreifenlichtsignal)
- Sensoren: Alle Arten von Sensoren, welche im Tunnelfahrraum installiert sind z. B. Strömungsmessung, Sichttrübungsmessung, Rauchmelder, Verkehrszähler
- Beleuchtungskörper: Leuchten im Tunnelfahrraum (Durchfahrtsbeleuchtung, Adaptationsbeleuchtung, Brandnotbeleuchtung)
- Türen und Tore: Alle Arten von Türen und Tore, welche im Tunnelfahrraum installiert sind. Dazu zählen Notausgangstüren, SOS-Türen, Service-Türen und Service-Tore.
- Videoüberwachungsanlage Verkehr (VTV): Fixe Kameras für Ereignisdetektion und visuelle Beobachtung des Verkehrs. Der Fahrbahnbereich des Tunnels, die Ausstellnischen und die Tunnelvorzonen werden mittels Kameras überwacht.

7.2 Klasseneinteilung in BSA-Baugruppen

Die betrachteten BSA-Komponenten bestehen je aus mehreren Bauteilen, die verschiedene Funktionen übernehmen. Eine Beurteilung jedes einzelnen Bauteils in Bezug auf Gefährdung, Risiko und Werkstoff-/Schutzsystemauswahl kann im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht durchgeführt werden. Daher werden die relevanten Bauteile der betrachteten BSA-Komponenten in den folgenden Baugruppen zusammengefasst.

Baugruppe 1: Anker

Die Baugruppe lässt sich grob wie folgt charakterisieren:

- Anker zur Befestigung der Halterung am Beton
- Eingeschraubter Ankerteil ist nicht einsehbar. Korrosionserscheinungen sind nur am einsehbaren Teil (Schraubenkopf, Unterlagscheiben, Gewindeüberstand) erkennbar.
- Anker sind hohen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt.

Baugruppe 2: Stahlbau - Verbindungselemente (Schrauben, Muttern, etc.)

Die Baugruppe lässt sich grob wie folgt charakterisieren:

- Verbindungselemente zur Befestigung der Halterung und Fertigteile am Gehäuse oder von Gehäuseteilen untereinander
- Eingeschraubter Gewindeteil ist nicht einsehbar. Korrosionserscheinungen sind nur am einsehbaren Teil des Verbindungselementes (Schraubenkopf, Mutter, Unterlagscheibe, Gewindeüberstand) erkennbar.
- Je nach Einsatzzweck sind Verbindungselemente hohen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt.
- Die Werkstoffauswahl der Verbindungselemente muss in Abhängigkeit von den zu verbindenden Materialien erfolgen. Empfehlungen dazu sind in Kap. 10 aufgeführt.
- → Verbindungselemente werden daher nicht in Bezug auf Gefährdung und Risiko nach der in Kap. 8 vorgestellten Methodik beurteilt.

Baugruppe 3: Stahlbau - Halterung

Die Baugruppe lässt sich grob wie folgt charakterisieren:

- Element, welches zur Befestigung des Gehäuses oder des Fertigteiles am Tunnel/ Bauwerk notwendig ist
- Halterung ist hohen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt.
- Halterung ist einsehbar und zugänglich. Reinigung ist ohne Ausbau möglich.
- Ggf. mit Anforderungen an die Optik
- Typische Vertreter der Klasse: Halterungen Strahlventilatoren, Signalträger, Ausleger Kabeltrassen

Baugruppe 4: Stahlbau - Gehäuse

Die Baugruppe lässt sich grob wie folgt charakterisieren:

- Gehäuse können tragende oder nicht tragende Funktionen ausüben.
- Belastungen sind in der Regel eher gering.
- Gehäuse enthält die Ausrüstung/Fertigteile (z. B. Elektromotor bei Strahlventilatoren, Treibriegel bei Türen, Wellen, Gestänge, etc.).
- Gehäuse ist einsehbar und zugänglich. Reinigung ist ohne Ausbau möglich.
- Ggf. mit Anforderungen an die Optik
- Typische Vertreter der Klasse: Schalldämpfer Strahlventilatoren, Gehäuse Strahlventilatoraktivteil, Beleuchtungskörper und Türen

Baugruppe 5: Fertigteile

Die Baugruppe lässt sich grob wie folgt charakterisieren:

- In der Regel sind dies Standardbauteile, welche zugekauft werden.
- Sie sind nicht in jeder gewünschten Ausführung (Material, Korrosionsschutz) lieferbar.
- Fertigteile bestehen in der Regel aus verschiedenen Materialien
- Typische Vertreter der Klasse sind: Signale, Videokamera, Sensoren aller Art, Elektromotoren, Lager
- Es handelt sich um Bauteile mit sehr individuellem Gefährdungspotential. Generelle Aussagen können zu den Bauteilen nicht getroffen werden. Empfehlungen zur Werkstoff-/Schutzsystemauswahl sind in Kap. 10 aufgeführt.
- → Verbindungselemente werden daher nicht in Bezug auf Gefährdung und Risiko nach der in Kap. 8 vorgestellten Methodik beurteilt.

Hinweise in Bezug auf das ASTRA Merkblatt 23-001-12120 «Werkstoffwahl und Korrosionsschutz» [74]

Die hier vorgenommene Gruppeneinteilung der BSA-Komponenten weicht in folgenden Kriterien vom ASTRA Merkblatt [74] ab:

- Halterung: Das ASTRA Merkblatt unterscheidet zwischen leichten und schweren Halterungen. Für die Betrachtung von Gefährdung und Risiko nach der Methodik gemäss Kap. 8 ist die Unterscheidung in leichte und schwere Halterung nicht notwendig, weshalb darauf verzichtet wird.
- Gehäuse: Im ASTRA Merkblatt findet bei Gehäusen mit tragender Funktion ein Sprung in eine andere Baugruppe statt. Gehäuse mit tragender Funktion werden dort wie eine Halterung betrachtet. In der Betrachtung von Gefährdung und Risiko nach der Methodik gemäss Kap. 8 wird die Belastung beim Gehäuse berücksichtigt, ein Gruppensprung, analog zum ASTRA-Merkblatt ist nicht vorgesehen.

7.3 Materialien/ Korrosionsschutzsystem pro BSA-Baugruppe

In Tab. 13 sind die wesentlichen Bauteile der betrachteten BSA-Komponenten aufgeführt den in Kap. 7.2 beschriebenen BSA-Baugruppen zugeteilt. In Tab. 13 sind ebenfalls die typischen Werkstoffe/ Schutzsysteme aufgeführt, in denen die BSA-Bauteile heute verbaut sind.

Tab. 13 Einteilung BSA-Komponenten in BSA-Baugruppen, Darstellung der typischen Werkstoffe/ Schutzsysteme in denen die BSA-Bauteile heute verbaut sind.

Komponente	Baugruppe	typische Werkstoffe/Schutzsystem					Bemerkung
	Anker Verbindungselement Halterung Gehäuse Fertigteil	Stahl / Guss beschichtet Stahl feuerverzinkt Stahl Duplex beschichtet NIRO Gruppe 1 NIRO Gruppe 2 NIRO Gruppe 3 NIRO Gruppe 4 Aluminium Andere					
Generell							
Anker	x				x		typisch und praktisch ausschliesslich 1.4529
Verschraubung	x	o	o	x	x		A4, selten A2 oder verzinkte Ausführung
Stahlventilator							
Aufhängekonstruktion	x	x	x	x	x		typisch sind 1.4404, 4571, 1.4539. letzteres erst seit dies im FHB gefordert war
Aktivteil (Schacht)	x	x	x	x			typisch sind 1.4404, 1.4571
Schalldämpfer	x	x	x	x			typisch sind 1.4404, 1.4571
							Lochblech praktisch immer NIRO Gruppe 3
Motor	x	x					Beschichtung für C5-lang heute erhältlich, war vor einiger Zeit nicht der Fall
Lauftrad	x			x		x	Meerwasserbest. Al-Leg für 250° z.B. AlSi9MgT6 oder AlSi7Mg 0,3T6, für 400°C geschweisste Laufräder aus z.B. 1.4571
Schwingungsdämpfer	x			x			Gehäuse
Abluftklappe							
Rahmen	x			x			typisch ist 1.4571
Lamellen	x			x			typisch ist 1.4571
Wärmeschutzhäube	x			x			typisch ist 1.4571
Antrieb	x	x					

Komponente	Baugruppe	typische Werkstoffe/Schutzsystem	Bemerkung
	Anker Verbindungselement Halterung Gehäuse Fertigteil	Stahl / Guss beschichtet Stahl feuerverzinkt Stahl Duplex beschichtet NIRO Gruppe 1 NIRO Gruppe 2 NIRO Gruppe 3 NIRO Gruppe 4 Aluminium Andere	
Kabeltrassen im Tunnel			
Ausleger	x	x x	typisch sind 1.4404, 4571, 1.4539. Letzteres erst seit dies im FHB gefordert wird.
Kabelbahn	x	x	typisch sind 1.4404, 1.4571
Signalträger			
Konsolen	x	x x x	
Träger	x	x x	
Notausgangstüren			
Türkonstruktion	x	x	z.T. mit Beschichtung zur Farbgebung
Beleuchtungskörper			
Aufhängung		x	
Gehäuse		x	
Videokamera			
Konsole	x	x	typisch sind 1.4404, 1.4571
Gehäuse	x	x	typisch sind 1.4404, 1.4571
Kamera	x	x	
Tunnelsensoren			
Konsole	x	x	typisch sind 1.4404, 1.4571
Gehäuse	x	x	typisch sind 1.4404, 1.4571
Systemkomponenten		x x	

8 Gefährdung, Risiko

An mechanisch belastete Bauprodukte, Tragwerke, Stahlkonstruktionen, Maschinen oder ähnliche komplexe Gebilde bestehen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit im weiteren Sinn, die nicht mit der Gewährleistungsfrist enden, sondern während der gesamten Nutzungsdauer fort gelten. Insbesondere im Zusammenhang mit der Sicherheit von Personen während des gesamten Lebenszyklus. Entsprechende Vorgaben in Bezug auf Schutzziele und akzeptierte Risiken sind im Sinne einer Nutzungsvereinbarung (oder in Anlehnung an eine solche) für Bauteile oder Komponenten zu definieren. Diese Vorgaben stellen wiederum zwingende Kriterien dar, die u.a. mit der richtigen Auswahl an Werkstoffen bzw. Schutzsystemen zu gewährleisten sind, insbesondere betreffend Risiken in Zusammenhang mit Korrosion. Zur Überprüfung dieser Vorgaben ist als Bestandteil des Auswahlprozesses eine Risikobetrachtung Korrosion in die Projektierung einzugliedern.

Die in aktuellen Regelwerken und Dokumentationen des In- und nahen Auslands beschriebenen Verfahren zur Gefahrenanalyse und Risikobewältigung in Strassentunneln, befassen sich in erster Linie mit der Personensicherheit ausgehend von den Initialereignissen Verkehrsunfall, Brand (infolge Verkehrsunfall oder Selbstentzündung von Fahrzeugen) und Gefahrgutereignis [2], [94]. In den quantitativen Risikoanalysen werden tunnel- und streckenspezifische Charakteristiken (Tunnellänge, BSA-Ausstattung, Verkehrsart, Verkehrsaufkommen etc.) erfasst und in den Risikoberechnungen berücksichtigt. Ausfälle von technischen Systemen werden nur insofern berücksichtigt, als dass bei einem geringen Prozentsatz der Initialereignisse, die zur Bekämpfung des Ereignisses oder zur Fluchtunterstützung notwendigen Anlagen nicht zur Verfügung stehen (z. B. Ausfall Tunnellüftung bei Brandereignis). Personen- oder Sachschäden infolge Bauteileversagen – z. B. durch Korrosion – werden i.d.R. nicht berücksichtigt. Dies ist für diese Risikoanalysen auch nicht notwendig, da derartige Ereignisse im Vergleich zu Verkehrsunfällen als sehr selten angenommen werden können und einen äusserst geringen Einfluss auf das Risiko haben. Bei dieser Annahme wird gleichwohl davon ausgegangen, dass die Systeme sowohl korrekt dimensioniert sind als auch vorschriftsmässig betrieben und gewartet werden, sodass eine hohe Zuverlässigkeit zu erwarten ist und keine Gefahr für die Verkehrsteilnehmer von den Systemen ausgeht. Um dies zu gewährleisten, empfiehlt es sich jedoch bei der Projektierung dieser Anlagen ebenfalls auf risikobasierte Methoden zurückzugreifen.

Nachfolgend wird deshalb eine Methodik zur Risikoanalyse und -beurteilung betreffend Bauteilversagen infolge Korrosion aufgezeigt. Dabei wird das Ziel verfolgt, ein möglichst einfaches Verfahren aufzuzeigen, welches mit vergleichsweise geringem Aufwand umgesetzt werden kann, ohne die Komplexität des Themas zu vernachlässigen. Der Fokus liegt auf der Analyse der BSA-Baugruppen (Einteilung gem. Kap. 7.2).

8.1 Methodik

Das Vorgehen einer Risikoanalyse gliedert sich üblicherweise in folgende Schritte und wird auch in vorliegender Untersuchung in dieser Form übernommen:

- Systemdefinition und -abgrenzung
- Risikoermittlung: In diesem Schritt werden die Gefahren identifiziert sowie die zu erwartenden Häufigkeiten (Eintretenswahrscheinlichkeit) und Schadensausmasse von Ereignissen bestimmt. Das resultierende Risiko ist ein Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit und Ausmass des Ereignisszenarios.
- Risikobewertung: Die im vorherigen Schritt ermittelten Risiken werden auf ihre Akzeptanz bewertet. D.h. es werden Akzeptanzkriterien benötigt, die festlegen, ob ein Risiko als tragbar erachtet werden kann. Diese können z. B. in einer Risikoakzeptanzmatrix abgebildet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein absolut sicherer Zustand nicht existiert.
- Massnahmenplanung: Werden in der Analyse Risiken identifiziert, die nicht als akzeptabel eingestuft werden, sind Massnahmen zur Risikoreduktion zu identifizieren und auf ihre Wirksamkeit zu prüfen. Massnahmen können technischer, betrieblicher oder

organisatorischer Natur sein. Die Beurteilung der Verhältnismässigkeit einer Massnahme stellt die Wirksamkeit (Risikoreduktion) dem Aufwand gegenüber. Dies erfolgt vielfach mittels Nutzen-/Kosten-Betrachtungen.

Dieses Konzept liegt den meisten Risikoanalysen zugrunde. Hingegen bestehen grosse Unterschiede in Umfang und Bearbeitungstiefe der verschiedenen Methoden und Ansätze. Dies betrifft auf der einen Seite die Bandbreite möglicher Gefahrenszenarien und Schadenindikatoren, auf der anderen Seite die Ermittlung und Bewertung der Risiken anhand qualitativer oder quantitativer Methoden. Qualitative Methoden zeichnen sich gegenüber quantitativen Methoden durch eine geringere Komplexität und entsprechend einem geringeren Aufwand aus. Die Einstufung der Ereignisszenarien hinsichtlich Häufigkeit und Ausmass beruht dabei weitgehend auf Erfahrungswerten. Bei quantitativen Methoden wird der Ereignisablauf vom Initialereignis über die Ereigniskette bis zur Schadenskonsequenz modelliert und quantifiziert. Dies ermöglicht eine transparente Analyse der massgeblichen Einflussfaktoren bzw. derer Abhängigkeiten sowie insbesondere auch eine konkrete Quantifizierung der Verhältnismässigkeit von Massnahmen. Dies erfordert jedoch eine in Umfang und Qualität ausreichende Datenbasis bzw., falls nur unzureichend vorhanden, die Erhebung entsprechender Daten.

Aufgrund der hier gestellten Zielsetzung eines möglichst einfachen Verfahrens, welches mit einem verhältnismässigen Aufwand durchgeführt werden kann, sowie der statistisch eher schlecht erfassten Korrosionsschadensfällen in Tunneln (unzureichende Datenlage) beruht die vorgestellte Methodik auf folgenden Grundsätzen:

- Die Risikoanalyse wird qualitativ durchgeführt.
- Die Risikoanalyse beruht somit weitgehend auf Erfahrungswerten und der gängigen Lehrmeinung. Es sind in der Betrachtung deshalb Werkstoffe zu wählen, die bereits verbreitet in Tunneln eingesetzt werden.
- In der Risikoanalyse werden nur Korrosionsschäden, die zu einem Bauteileversagen führen und in direkter Folge Personen- und/oder Sachschäden verursachen können, betrachtet. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf dem Aspekt Sicherheit für den Tunnelbenutzer.
- Korrosionsschäden, die kein Versagen des Bauteils verursachen, sondern zu einer Beeinträchtigung der Funktion oder erhöhtem Instandhaltungsaufwand führen können, sind nicht Betrachtungsgegenstand der Risikoanalyse. Indirekt mögliche Personenschäden (z. B. findet gleichzeitig ein Brandereignis statt und eine Notausgangstür kann aufgrund eines Korrosionsschadens nicht geöffnet werden) werden nicht berücksichtigt. Resultierende Finanzschäden, z. B. aufgrund eines notwendigen Austauschs bzw. einer Sanierung eines Bauteils, können im Nachgang zur Risikoanalyse, falls noch entsprechende Auswahlmöglichkeiten bestehen, in einer Kostenanalyse berücksichtigt und abgewogen werden (siehe auch Abb. 10 aus Kap. 6).

Die in der Risikoanalyse berücksichtigten Schadenindikatoren sind:

- Personenschäden: Verletzte und Todesopfer
- Sachschäden: Schäden an betrachtetem Objekt und/oder Tunnelinfrastruktur
- Beschränkung der Verfügbarkeit des Tunnels oder der Strecke: Spurabbau oder Sperren unter Berücksichtigung der Dauer

Nicht berücksichtigt werden die im ASTRA Risikomanagement [2] zusätzlich aufgeführten Indikatoren Umweltschäden sowie Einschränkung Amtstätigkeit.

8.1.1 System

Die Risikoanalyse befasst sich ausschliesslich mit BSA-Komponenten im Fahrraum. Es werden die BSA-Baugruppen Anker, Halterung und Gehäuse berücksichtigt. Wie bereits in Kap. 7 erwähnt, werden die Baugruppen Verbindungselemente und Fertigteile nicht in der Methodik zur Werkstoff- / Schutzsystemauswahl und somit auch nicht in der Risikoanalyse beurteilt.

Es gelten die folgenden Annahmen:

- Die Bauteile und Werkstoffe unterliegen bestimmungsgemässen, nutzungsbedingt „normalen“ Beanspruchungen. Unfallbedingte Beanspruchungen werden als nicht bestimmungsgemässe Beanspruchungen eingestuft und umfassen den Brandfall sowie Beanspruchungen durch Chemieunfälle.
- Die betrachteten Komponenten, Baugruppen und Schutzsysteme werden nicht über ihre vorgesehene Nutzungsdauer hinaus eingesetzt.
- Es wird davon ausgegangen, dass alle Bauteile korrekt dimensioniert und fachgerecht verarbeitet sind.

Ebenfalls zum System gehört die Tunnelatmosphäre. Es muss von der Korrosivitätskategorie C5 bzw. CX ausgegangen werden.

8.1.2 Risikoermittlung

Gefahrenidentifikation

Die von einem Bauteileversagen ausgehende Gefahr ist das Herunterfallen der betroffenen Komponente. Das in der Risikoanalyse betrachtete Gefahrenszenario wird wie folgt definiert: „Korrosion führt dazu, dass eine BSA-Komponente herunterfällt und einen Personenschaden, Sachschaden oder eine Beschränkung der Tunnelverfügbarkeit verursacht.“

Häufigkeitsklassen

Für die qualitative Einstufung der Häufigkeit werden folgende Häufigkeitsklassen verwendet: (Tab. 14 Häufigkeitsklassen):

Tab. 14 Häufigkeitsklassen

Häufigkeit	Klassifikation	Qualitative Definition
1	Äusserst gering	Kann nahezu ausgeschlossen werden
2	Gering	Es muss nicht davon ausgegangen werden
3	Mittel	Kann selten vorkommen
4	Erheblich	Kann erwartungsgemäss eintreffen
5	Gross	Es muss damit gerechnet werden

Ausmassklassen

Zur qualitativen Einstufung der direkten Konsequenzen eines Ereignisses werden folgende Ausmassklassen (Tab. 15) verwendet:

Tab. 15 Ausmassklassen

Ausmass	Klassifikation	Qualitative Definition		
		Personenschäden	Sachschäden	Beschränkung der Verfügbarkeit
1	Gering	Keine	Klein	Keine
2	Mittel	Leichtverletzte	Mittel	Kurze / begrenzte Beschränkung (z. B. kurzzeitiger Spurabbau, kurze Sperrung)
3	Erheblich	Schwerverletzte	Bedeutend	Sperrung (maximal einige Tage)
4	Gross	Tote	Schwerwiegend	Sperrung über längere Zeit (Wochen)

Zur Bestimmung des Risikos ist für das jeweilige Szenario das höchste für die drei Schadensindikatoren (Personenschäden / Sachschäden / Beschränkung Verfügbarkeit) bestimmte Ausmass ausschlaggebend.

Einschätzung von Häufigkeit und Ausmass

Um dem Ziel einer einfachen Verfahrensweise gerecht zu werden, wird für die Methodik folgender Ansatz gewählt:

Die *Häufigkeit* eines Versagens bzw. Herunterfallens wird nicht für ein einzelnes Bauteil einer BSA-Komponente bestimmt, sondern für die BSA-Baugruppen gemäss Kap. 7.2 unter Berücksichtigung des Werkstoffs bzw. Schutzsystems sowie weiterer entscheidender Einflussfaktoren. Diese Häufigkeitsklasse ist dann unter diesen Voraussetzungen allgemeingültig für die BSA-Baugruppe, losgelöst von der BSA-Komponente, bei der sie zum Einsatz kommt. Die Einflussfaktoren berücksichtigen sowohl betriebliche Randbedingungen (allenfalls vorgegeben durch Nutzungsvereinbarung) als auch mechanische Beanspruchungen und sind nachfolgend in Tab. 16 aufgeführt.

Tab. 16 Einflussfaktoren der Häufigkeit eines Bauteileversagens

Einflussfaktor	Einstufung	Beschreibung
Inspektion	Vorgesehen? Ja / Nein	Ob eine visuelle Inspektion auf Korrosionsschäden vorgesehen ist, wird durch die Betreiberangaben bestimmt (Nutzungsvereinbarung). Der Faktor Inspektion hat nur einen Einfluss, wenn das Bauteil an sich inspiziert werden kann (ein Anker kann z. B. nicht inspiziert werden), und der Korrosionsschaden bei dem betrachteten Material bzw. Schutzsystem visuell erkennbar ist. Durch den Einflussfaktor Inspektion wird also der Aspekt „Erkennbarkeit“ abgedeckt.
Reinigung	Vorgesehen? Ja / Nein	Auch der Faktor Reinigung der Komponente hängt von den Betreiberangaben ab. Der Faktor hat nur Einfluss für Bauteile oder Bereiche, die einer Reinigung zugänglich sind.
Belastung	Beanspruchung? Niedrig / Hoch	Der Faktor Belastung berücksichtigt die bestimmungsgemässe, mechanische Beanspruchung (Nutzlast, Schwingungen, Eigengewicht, Empfindlichkeit) und die Dimensionierung des Bauteils (korrekt dimensioniert oder stark überdimensioniert). So unterliegt z. B. ein Anker einer hohen Belastung (korrekt dimensioniert auf hohe Nutzlast und allenfalls Schwingungen, minimale Korrosion kann bereits kritisch sein), während ein Signalträger (vielfach überdimensioniert, praktisch nur Eigengewicht, eine gewisse Korrosion ist unkritisch) eher eine niedrige Belastung aufweist.

Beispielhaft sind nachfolgend die Häufigkeitsbewertungen für verschiedene Werkstoffe / Schutzsysteme, die für die betrachteten Baugruppen Anker, Halterung und Gehäuse üblicherweise zur Verfügung stehen, aufgeführt.

- Anker: Bei Ankern spielen die Einflussfaktoren keine Rolle, da sie für Inspektionen und Reinigungen nicht zugänglich sind und in punkto Belastung immer von einer hohen Belastung auszugehen ist.

Tab. 17 Beispiel Häufigkeiten für Baugruppe Anker

Werkstoff / Schutzsystem	Einflussfaktoren			Häufigkeit Szenario „Herunterfallen“
	Inspektion	Reinigung	Belastung	
C-Stahl und verzinkt	Nein	Nein	Hoch	5
Nichtrostender Gr. I, A2	Nein	Nein	Hoch	5
Nichtrostender Stahl Gr. II, z. B. 1.4404	Nein	Nein	Hoch	3
Nichtrostender Stahl Gr. III, z. B. 1.4539	Nein	Nein	Hoch	2
Nichtrostender Stahl Gr. IV, z. B. 1.4529	Nein	Nein	Hoch	1

- Halterung (Tab. 18): Bei Halterungen können grundsätzlich alle drei Faktoren einen Einfluss auf die Häufigkeit haben, bei der Inspektion und Reinigung hängt es jedoch vom

betrachteten Werkstoff bzw. Schutzsystem ab. So kann ein verzinkter und/oder beschichteter Stahl gut auf Korrosionserscheinungen geprüft werden, während bei nichtrostenden Stählen die Erkennbarkeit eines Korrosionsschadens kaum gegeben ist. Andersrum verhält es sich bei der Reinigung: durch eine regelmässige Reinigung können Korrosionsschäden an nichtrostenden Stählen vorgebeugt werden, während dies bei verzinkten / beschichteten Stählen i.d.R. nicht der Fall ist.

Tab. 18 Beispiel Häufigkeiten für Baugruppe Halterung

Werkstoff / Schutzsystem	Einflussfaktoren			Häufigkeit Szenario „Herunterfallen“
	Inspektion	Reinigung	Belastung	
C-Stahl, beschichtet	Ja	Ja / Nein	Hoch	3
	Ja	Ja / Nein	Niedrig	2
	Nein	Ja / Nein	Hoch	4
	Nein	Ja / nein	Niedrig	4
C-Stahl und verzinkt	Ja	Ja / Nein	Hoch	3
	Ja	Ja / Nein	Niedrig	2
	Nein	Ja / Nein	Hoch	4
	Nein	Ja / nein	Niedrig	4
C-Stahl, Duplex	Ja	Ja / Nein	Hoch	2
	Ja	Ja / Nein	Niedrig	1
	Nein	Ja / Nein	Hoch	4
	Nein	Ja / nein	Niedrig	4
Nichtrostender Stahl Gr. I, A2	Ja / Nein	Ja	Hoch	5
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	4
	Ja / Nein	Nein	Hoch	5
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	4
Nichtrostender Stahl Gr. II, z. B. 1.4404	Ja / Nein	Ja	Hoch	2
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	1
	Ja / Nein	Nein	Hoch	4
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	3
Nichtrostender Stahl Gr. III, z. B. 1.4539	Ja / Nein	Ja	Hoch	1
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	1
	Ja / Nein	Nein	Hoch	1
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	1
Nichtrostender Stahl Gr. IV, z. B. 1.4529	Ja / Nein	Ja	Hoch	1
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	1
	Ja / Nein	Nein	Hoch	1
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	1

- Gehäuse (Tab. 19): Bei den Gehäusen gelten die gleichen Anmerkungen wie bei den Halterungen. In Bezug auf die Häufigkeit des Herunterfallens werden die Gehäuse jedoch leicht niedriger eingestuft als die Halterungen, da die Belastungen bei den Gehäusen i.d.R. geringer ausfallen.

Tab. 19 Beispiel Häufigkeiten für Baugruppe Gehäuse

Werkstoff / Schutzsystem	Einflussfaktoren			Häufigkeit Szenario „Herunterfallen“
	Inspektion	Reinigung	Belastung	
C-Stahl, beschichtet	Ja	Ja / Nein	Hoch	2
	Ja	Ja / Nein	Niedrig	1
	Nein	Ja / Nein	Hoch	3
	Nein	Ja / nein	Niedrig	3
C-Stahl und verzinkt	Ja	Ja / Nein	Hoch	2
	Ja	Ja / Nein	Niedrig	1
	Nein	Ja / Nein	Hoch	3
	Nein	Ja / nein	Niedrig	3
C-Stahl, Duplex	Ja	Ja / Nein	Hoch	2
	Ja	Ja / Nein	Niedrig	1
	Nein	Ja / Nein	Hoch	3
	Nein	Ja / nein	Niedrig	3
Nichtrostender Stahl Gr. I, A2	Ja / Nein	Ja	Hoch	4
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	2
	Ja / Nein	Nein	Hoch	4
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	3
Nichtrostender Stahl Gr. II, z. B. 1.4404	Ja / Nein	Ja	Hoch	2
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	1
	Ja / Nein	Nein	Hoch	3
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	2
Nichtrostender Stahl Gr. III, z. B. 1.4539	Ja / Nein	Ja	Hoch	1
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	1
	Ja / Nein	Nein	Hoch	1
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	1
Nichtrostender Stahl Gr. IV, z. B. 1.4529	Ja / Nein	Ja	Hoch	1
	Ja / Nein	Ja	Niedrig	1
	Ja / Nein	Nein	Hoch	1
	Ja / Nein	Nein	Niedrig	1

Es wird betont, dass die in den Tabellen oben angegebenen Häufigkeiten Beispiele anhand grober, ungefährender Abschätzungen darstellen. Die Risikoanalyse sollte in einem ersten Schritt eine detaillierte Betrachtung der verschiedenen Korrosionsprozesse für die untersuchte Baugruppe/Werkstoff-Kombination beinhalten (siehe Beispiel in Anhang II). Der Korrosionsprozess mit der höchsten ermittelten Häufigkeit eines Bauteileversagens geht anschliessend in die übergeordnete Häufigkeitseinstufung gemäss der oben aufgeführten Tab. 17 bis Tab. 19 ein.

Bei der Bewertung des Ausmasses (Tab. 20) werden hingegen nur die Eigenschaften der betrachteten BSA-Komponente berücksichtigt. Baugruppe und Werkstoffwahl haben keinen Einfluss auf die Ausmasskriterien. Folgende Kriterien kommen zur Anwendung:

- Montageort der Komponente: hier stellt sich in erster Linie die Frage, ob die Komponente auf die Fahrbahn fallen kann oder nicht (potenzielle Gefahr für Personen)
- Grösse / Gewicht der Komponente: dieses Kriterium hat entscheidenden Einfluss auf das Schadensausmass

Anhand dieser Kriterien wird das Ausmass gemäss nachfolgender Tabelle bestimmt. Für die Risikoermittlung gilt immer das höchste für die drei Schadenindikatoren bestimmte Ausmass (fett dargestellt).

Tab. 20 Ausmassbestimmung anhand der Kriterien Montageort und Grösse / Gewicht der BSA-Komponente

Montageort	Grösse / Gewicht	Ausmass			Beispiel
		Personen-schäden	Sach-schäden	Verfügbarkeit	
Unkritisch: Gegenstand kann nicht auf die Fahrbahn fallen	Klein	1	1	1	Apparateschild seitlich
	Mittel	1	1	1	Schachtdeckel
	Gross	1	1	1	
Bedingt kritisch: Gegenstand kann möglicherweise auf die Fahrbahn fallen	Klein	1	1	1	
	Mittel	1	1	2	Sichttrübesensor, Leuchte Notausgangstüre
	Gross	2	2	2	Strahlventilator seitlich, Ampeln, Funkantennen
Kritisch: Gegenstand fällt mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die Fahrbahn	Klein	1	1	1	Apparateschild an der Decke
	Mittel	3	2	2	Rauchmelder, Leuchte, Kabeltrasse
	Gross	4	3	3	Strahlventilator, Signalträger

Die Kombination aus Häufigkeit und Ausmass ergibt dann für die berücksichtigte Werkstoffwahl der ausgewählten Baugruppe für die ausgewählte Komponente den Risikowert: Risiko = Häufigkeit × Ausmass.

Es gilt anzumerken, dass mit dieser Methodik die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit des Gefahrenszenarios teils im Ausmass berücksichtigt wird. Üblicherweise wäre für das gesamte Ereignis (Herunterfallen einer Komponente aufgrund von Bauteileversagen infolge Korrosion führt zu einem Schaden) die Häufigkeit zu bestimmen. Das Ausmass des Ereignisses könnte dann auf mehrere Ausmassklassen verteilt werden, z. B. anhand einer Gewichtung gemäss einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Vorliegend wird für die Einstufung des Ereignisses bezüglich Ausmass ein realistisch zu erwartendem, wahrscheinlichem Ausmass angenommen. Es wird dabei nicht der schlechteste Fall (worst case) betrachtet, der i.d.R. eine geringere Wahrscheinlichkeit aufweist.

Der Vorteil der Methodik ist die Definition von Kategorien, die auf die einzelnen Baugruppen und Komponenten immer anwendbar sind. Das Verfahren bietet somit eine relativ einfache Bestimmung des Risikos für verschiedene Werkstoffe und Schutzsysteme unter Berücksichtigung der definierten Einflussfaktoren.

8.1.3 Risikobewertung und Massnahmenplanung

Die Bewertung des ermittelten Risikos (vor Massnahmen) erfolgt anhand von drei Akzeptanzklassen, die in der Risikomatrix (Abb. 11) dargestellt sind.

Die Akzeptanzklassen sind wie folgt definiert:

- Nicht akzeptabel (roter Bereich): Risiken im roten Bereich sind nicht zulässig. Risikoreduzierende Massnahmen sind zwingend zu ergreifen, unabhängig vom Aufwand, um zumindest in den gelben Bereich zu gelangen.
- Tolerabel (gelber Bereich): Für Risiken im gelben Bereich sind risikoreduzierende Massnahmen zu prüfen und, falls verhältnismässig, umzusetzen. Grundsätzlich wäre das Ziel, dass sämtliche Risiken im grünen Bereich liegen. Ist der Aufwand der möglichen Massnahmen zur Erreichung dieses Ziels jedoch unverhältnismässig hoch oder sind alle weitergehenden Massnahmen ausgeschöpft, so können Risiken im gelben Bereich

mit Einverständnis des Betreibers (Risikoeigner) toleriert werden. Diese Risiken sollten über den Lebenszyklus der Komponente und des Bauteils regelmässig überprüft werden.

- Akzeptabel (grüner Bereich): Risiken im grünen Bereich sind zulässig und tragbar und bedürfen keiner weiteren Massnahmen.

Häufigkeit	Gross	5	5	10	15	20
	Erheblich	4	4	8	12	16
	Mittel	3	3	6	9	12
	Gering	2	2	4	6	8
	Äusserst gering	1	1	2	3	4
			1	2	3	4
			Gering	Mittel	Erheblich	Gross
			Ausmass			

Abb. 11 Risikomatrix mit drei Akzeptanzklassen

Die Prüfung risikoreduzierender Massnahmen muss also zwingend für Risiken im roten und gelben Bereich durchgeführt werden. Zu diesen Massnahmen gehören (Aufzählung nicht abschliessend):

- Technische Massnahmen konstruktiver Art oder als Rückfallebene, z. B. Fangsicherung bei Strahlventilatoren
- Wahl eines anderen Werkstoffs oder Schutzsystems
- Betriebliche oder organisatorische Massnahmen (z. B. Inspektionsintervalle verkürzen, Vorgaben aus Nutzungsvereinbarung bzgl. Reinigung / Inspektion mit dem Betreiber prüfen und ggfs. anpassen)

Die Wirksamkeit einer Massnahme ist jeweils durch erneute Ermittlung des Risikos (nach Massnahme) und Bewertung in der Risikomatrix zu prüfen. Um die Verhältnismässigkeit einer Massnahme zu beurteilen, ist die Wirksamkeit dem Aufwand zur Umsetzung gegenüberzustellen. Aufgrund des hier gewählten Ansatzes ist auch für diese Beurteilung wiederum eine qualitative Abwägung nötig. Die Wirksamkeit kann z. B. in die Kategorien klein, mittel und gross eingestuft werden, je nachdem wie stark der Risikowert reduziert oder auch nicht reduziert wird, oder ob die Massnahme einen Wechsel der Akzeptanzklasse ermöglicht. Die gleichen Kategorien können auch für den Aufwand verwendet werden. Der Aufwand kann in Form erhöhter Kosten, aber auch durch erhöhten Personaleinsatz oder betriebliche Einschränkungen (z. B. Nachsperrungen) anfallen, die qualitativ zu bewerten sind. Eine Massnahme, die von der Wirksamkeit höher oder gleich eingestuft ist wie der Aufwand, kann als verhältnismässig angesehen werden (z. B. mittlere Wirksamkeit gegenüber kleinem Aufwand).

8.2 Anwendung der Methodik - Beispiel

Die Methodik wird nachführend am Beispiel einer Halterung für die BSA-Komponente Strahlventilator oberhalb Fahrbahn aufgezeigt.

Als zur Auswahl stehende Werkstoffe werden ein C-Stahl mit einem Duplex-Schutzsystem, sowie die nichtrostenden Stähle 1.4571 (Gruppe III) und 1.4539 (Gruppe IV) berücksichtigt. Es wird weiterhin angenommen, dass eine periodische Reinigung stattfindet, jedoch keine Inspektionen vorgesehen sind. Die Belastung der Halterung ist als hoch einzustufen.

Das Ausmass für die BSA-Komponente Strahlventilator (Montageort oberhalb Fahrbahn, hohes Gewicht) ist gemäss Tab. 20 aufgrund der zu erwartenden Personenschäden als gross (Ausmass 4) einzustufen. Es wird angenommen, dass vorerst keine Fangsicherung vorgesehen ist.

Für die verschiedenen Werkstoffe ergeben sich somit folgende Risiken vor Massnahmen:

Tab. 21 Risikobewertung vor Massnahmen

Werkstoff	Häufigkeit				Ausmass			Risiko
	Inspektion	Reinigung	Belastung	Bewertung	Montageort	Gewicht / Grösse	Bewertung	
C-Stahl Duplex	Nein	Ja	Hoch	4	Kritisch	Gross	4	16
1.4571	Nein	Ja	Hoch	2	Kritisch	Gross	4	8
1.4539	Nein	Ja	Hoch	1	Kritisch	Gross	4	4

Für eine Halterung im Werkstoff 1.4539 wird ein akzeptables Risiko ermittelt, sodass für diese Variante keine weiteren Massnahmen notwendig wären. Diese Variante stellt jedoch auch die teuerste Lösung dar. Für die anderen beiden Varianten werden nicht akzeptable bzw. tolerable Risiken ermittelt, die die Prüfung von Massnahmen zur Risikoreduktion erfordern.

Folgende mögliche Massnahmen werden identifiziert:

- Massnahme I: Installation einer Fangsicherung
- Massnahme II: periodische Inspektion der Bauteile auf Korrosionsschäden vorsehen

Massnahme I

Die Massnahme I hat keinen Einfluss auf die Häufigkeit, jedoch auf das Ausmass bei allen Fällen. Das Versagen und Herunterfallen sind als genauso häufig einzustufen, jedoch fällt die Komponente nicht mehr in die Fahrbahn, sodass das zu erwartende Ausmass reduziert wird. Für den Schadenindikator Personenschäden reduziert sich das Ausmass auf den Wert 1 (keine Schäden, Tab. 15), bei Sachschäden und Beschränkung der Verfügbarkeit ist von einem Ausmass der Stufe 2 auszugehen (mittlere Sachschäden, kurze / begrenzte Beschränkung der Verfügbarkeit). Dieser Wert ist entscheidend für die Bestimmung des Risikos nach Massnahme, welches in Tab. 8 dargestellt ist:

Tab. 22 Risikobewertung nach Umsetzung Massnahme I

Werkstoff	Häufigkeit			Ausmass				Risiko
	Inspektion	Reinigung	Belastung	Bewertung	Montageort	Gewicht / Grösse	Bewertung	
C-Stahl Duplex	Nein	Ja	Hoch	4	Kritisch*	Gross	2	8
1.4571	Nein	Ja	Hoch	2	Kritisch*	Gross	2	4
1.4539	Nein	Ja	Hoch	1	Kritisch*	Gross	2	4

*Fangsicherung vorgesehen

Sowohl beim Stahl mit Duplexbeschichtung als auch beim Stahl der Gruppe III wird durch die Massnahme ein Wechsel der Akzeptanzklasse erzielt. Bei Einsatz eines Stahls der Gruppe III liegt das Risiko nach Umsetzung der Massnahme I im akzeptablen Bereich.

Massnahme II

Beim Duplexsystem können durch periodische Inspektionen Korrosionsschäden erkannt und somit einem Versagen vorgebeugt werden. Durch die Massnahme kann entsprechend der Häufigkeit des Szenarios reduziert werden. Bei den nichtrostenden Stählen ist die Erkennbarkeit von Korrosionsschäden nicht gegeben, visuelle Inspektionen haben in diesem Fall keinen Einfluss auf die Häufigkeit. Weiterhin wird das Ausmass durch die Massnahme nicht reduziert, da bei einem Herunterfallen immer noch von Todesfällen auszugehen ist. Für den Stahl mit Duplex-Schutzsystem wird mit der Massnahme II eine Risikoreduktion erzielt mit einem Wechsel der Akzeptanzklasse von nicht akzeptabel zu tolerabel.

Tab. 23 Risikobewertung nach Umsetzung Massnahme II

Werkstoff	Häufigkeit				Ausmass			Risiko
	Inspektion	Reinigung	Belastung	Bewertung	Montageort	Gewicht / Grösse	Bewertung	
C-Stahl Duplex	Ja	Ja	Hoch	2	Kritisch	Gross	4	8
1.4571	Ja	Ja	Hoch	2	Kritisch	Gross	4	8
1.4539	Ja	Ja	Hoch	1	Kritisch	Gross	4	4

Kombination Massnahmen I und II

Die Kombination aus den Massnahmen I und II erbringt eine Verbesserung für die Variante Stahl mit Duplex-Schutzsystem: sowohl die Häufigkeit als auch das Ausmass können reduziert werden, sodass das verbleibende Risiko im akzeptablen Bereich zu liegen kommt (Tab. 24).

Tab. 24 Risikobewertung nach Umsetzung der Massnahmenkombination I und II für die Variante Stahl mit Duplexsystem

Werkstoff	Häufigkeit				Ausmass			Risiko
	Inspektion	Reinigung	Belastung	Bewertung	Montageort	Gewicht / Grösse	Bewertung	
C-Stahl Duplex	Ja	Ja	Hoch	2	Kritisch*	Gross	2	4

*Fangsicherung vorgesehen

Massnahmenbewertung

Sowohl die Massnahme I (für die Variante Stahl 1.4571) als auch die Massnahmenkombination I und II (für die Variante Stahl mit Duplexbeschichtung) sind sehr wirksam, da die entsprechenden Risiken eine Reduktion von der tolerablen bzw. nicht akzeptablen zur akzeptablen Klasse erfahren. Der Aufwand kann hingegen als klein eingestuft werden, insbesondere da die Massnahme auch von den Kosten nicht höher als die Werkstoffwahl 1.4539 einzustufen sind. Die Massnahmen können entsprechend als verhältnismässig eingestuft werden.

9 Kosten und Verfügbarkeit

9.1 Gesamtkostenbetrachtung

In der Wahl eines Werkstoffs bzw. eines Korrosionsschutzsystems stellen neben der Eignung für die vorgesehene Beanspruchung und Atmosphäre ebenfalls die Kosten ein entscheidendes Kriterium dar. Um eine ausreichende Entscheidungsgrundlage zu erhalten, ist die Kostenberechnung über den Lebenszyklus der Komponenten durchzuführen, unter Berücksichtigung unterhaltsbedingter Aufwendungen und der Nutzungsdauern der verschiedenen Systeme. Eine rein auf den Beschaffungspreis ausgerichtete Entscheidung, wie es heute oft gängige Praxis ist (der Auftrag geht an den Anbieter mit dem tiefsten Angebot), greift oft zu kurz und führt nicht zum angestrebten Kostenoptimum über den Lebenszyklus. So können höhere Investitionen gerechtfertigt sein, wenn dadurch geringere Folgekosten, die in der Gesamtkostenbetrachtung überwiegen, zu erwarten sind.

Als Instrumentarium zur Berechnung der Lebenszykluskosten bietet sich das Life Cycle Costing (LCC) an, welches die Kosten- und Zahlungsströme von Investitionsalternativen über deren Nutzungsdauer bewertet [95]. Eine für BSA geeignete Grundlage zur Modellierung der Kostenströme stellt die Norm EN 60300-3-3:2004 [53] dar, an der sich die vorliegende Untersuchung orientiert hat, insbesondere in Bezug auf zuverlässigkeits- bzw. ausfallbedingte Kosten. Das LCC hat das Ziel, Lebenszykluskosten mittels Variantenvergleich zu minimieren. Es stellt keine Kosten-/Nutzenanalyse dar, z. B. zur vergleichenden Bewertung unterschiedlicher, risikomindernder Massnahmen zur Erreichung eines bestimmten Sicherheitsniveaus. Vorliegend wird es im Prozess der Werkstoffauswahl als Vergleichsbasis genutzt zur Bestimmung der über den Lebenszyklus günstigsten Variante. Es gilt jedoch anzumerken, dass das LCC im Planungsprozess generell sämtliche Aspekte der BSA abdecken sollte. Ein Einsatz als Gestaltungsinstrument in der Auswahl und in der Bestimmung des Umfangs erforderlicher BSA zur Einhaltung der Sicherheits- und Verfügbarkeitsziele bei optimierten Lebenszykluskosten ist ab Konzeptphase zu begrüssen.

9.1.1 Methodik

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt als Summierung der in den einzelnen Jahren anfallenden Kosten. In der Regel ist einem Vergleich verschiedener Varianten der gleiche Betrachtungszeitraum zugrunde zu legen. Bei unterschiedlichen Nutzungsdauern sollte sich der Betrachtungszeitraum entsprechend nicht auf die Nutzungsdauer der jeweiligen Variante bzw. BSA-Komponente beschränken, sondern auf eine übergeordnete Nutzungsphase im System Strassentunnel. Bei langlebigen Objekten, wie Strassentunneln, bieten sich dafür die Zeitpunkte grosser Erneuerungsmassnahmen an [95]. Vorliegend wird entsprechend als begrenzender Zeitpunkt die Gesamterneuerung BSA festgelegt, bei der aufgrund des technologischen Fortschritts, der Anpassung an den aktuellen Stand der Regelwerke sowie im Sinne der Unterhaltsplanung Nationalstrassen (UPlaNS)-Philosophie, nach der während der anschliessenden 15 Jahre keine projektgestützten baulichen Massnahmen mehr nötig sein sollen, üblicherweise ein Komplettersatz der BSA erfolgt. Diese Gesamterneuerungen finden i.d.R. ca. alle 30 Jahre pro Tunnelobjekt statt. Das bedeutet, dass je nach betrachteter Komponente mehrere Teillebenszyklen in der Kostenanalyse berücksichtigt werden.

Die Lebenszykluskosten der BSA werden folgenden Lebenszyklusphasen zugeteilt. In der vorliegenden Untersuchung werden nur die Betreiberkosten berücksichtigt, Nutzerkosten und Kosten Dritter (z. B. Staukosten oder Umweltkosten) werden nicht betrachtet.

- **Entwicklung:** Zur Phase Entwicklung gehören sämtliche Kosten von der Konzeption über die Planung bis zur Ausschreibung und Angebotsauswertung. In der Variantenuntersuchung für die Werkstoffauswahl werden diese Kosten nicht berücksichtigt, da sie für alle Varianten identisch sind und somit keinen Einfluss auf den Auswahlprozess haben.

- **Beschaffung und Inbetriebnahme:** Diese zu Beginn des Lebenszyklus einmalig auftretenden Kosten umfassen die Kaufpreise der Komponenten sowie sämtliche für Lieferung, Montage, Inbetriebnahme, Tests und Abnahmen, Schulung und Dokumentation notwendigen Leistungen. Hier sind es in erster Linie die Kaufpreise der Komponenten, die je nach Werkstoffwahl grosse Unterschiede in den Beschaffungskosten bewirken können.
- **Betrieb und Erhaltung:** Sämtliche regelmässigen oder mehrfach anfallenden Kosten während der Nutzungsdauer, wie Wartung (präventive Instandhaltung), Reparaturen / Instandsetzung (korrektive Instandhaltung) sowie Betriebskosten, werden in dieser Lebenszyklusphase berücksichtigt. Auch einmalige Kosten, die im Betrachtungszeitraum z. B. aufgrund begrenzter Nutzungsdauern der verschiedenen Varianten entstehen (Sanierung oder Ersatz), müssen für den Variantenvergleich in die Berechnung eingehen.
- **Ausserbetriebnahme und Entsorgung:** Hier werden die am Ende des Betrachtungszeitraums einmalig anfallenden Kosten für Demontage, Rückbau, Abtransport und Entsorgung ebenso wie die Einnahmen durch den Schrottverkauf einkalkuliert. Da diese Leistungen üblicherweise im Rahmen der Gesamterneuerung erbracht werden, werden die entsprechenden Synergien in der Kalkulation berücksichtigt.

Die Kosten werden in der vorliegenden Untersuchung als Summe eines undiskontierten Kostenstroms berechnet, d.h. der Zeitpunkt einer Investition spielt in der Kostenbetrachtung keine Rolle. Zinserträge und damit eine Abwertung gegenüber dem Gegenwartswert für später anfallende Kosten werden somit nicht berücksichtigt. Damit soll zum einen eine einfache Vergleichsbasis geschaffen werden, zum anderen sollen Diskussionen um den Zeitpunkt einer möglichen Ersatzmassnahme oder Sanierung vermieden werden, die wiederum Abwägungen zwischen zunehmendem Verschleiss mit einhergehenden, erhöhten Instandhaltungs- und/oder Instandsetzungskosten und Kosteneinsparungen aufgrund späterer Investitionen bedingen. Weiter soll ebenfalls von Diskussionen um die Höhe einer zu berücksichtigenden Diskontierungs-/Zinsrate abgesehen werden.

BSA-Komponenten im Fahrraum, bei denen unterschiedliche Werkstoff- bzw. Schutzsystemvarianten zur Diskussion stehen und für die sich entsprechend eine Kostenbetrachtung als Entscheidungshilfe lohnt, sind Strahlventilatoren und Signalträger. Wenig interessant, da kaum Spielraum besteht, sind Komponenten wie Lampen, Sensoren, Konsolen etc., bei denen das Material meist vom Hersteller vorgegeben ist und Sanierungen kaum möglich sind. Für Abluftklappen und Notausgangstüren ist keine Beurteilung nötig, da bei diesen Komponenten grundsätzlich nichtrostende Stähle eingesetzt werden und andere Materialien nicht zur Diskussion stehen.

Folgende Analysen werden durchgeführt:

- **Neubeschaffung Strahlventilatoren:** Berechnung der Lebenszykluskosten für ein Neubauprojekt (fiktiver Durchschnittstunnel mit 12 Strahlventilatoren) von der Beschaffung bis zur Entsorgung. Berücksichtigt werden Ausführungen in nichtrostenden Stählen der Gruppe III und IV sowie die Variante Stahl mit Duplexbeschichtung. Der Einfluss der Rohstoffpreise, der geplanten Sanierung sowie nicht geplanter Sanierung (Reparatur, korrektive Instandhaltung aufgrund Schadensfalls) wird untersucht.
- **Sanierung Strahlventilator im Betrieb:** Für die Variante Stahl mit Duplexbeschichtung werden für den Fall, dass der Korrosionsschutz für die verbleibende geplante Nutzungsdauer nicht mehr ausreichend gewährleistet ist, die möglichen Massnahmen Sanierung und Ersatz des Strahlventilators einander gegenübergestellt.

9.1.2 Neubeschaffung

In der LCC-Analyse für den Fall Neubeschaffung werden folgende Strahlventilatorvarianten verglichen:

- Variante Duplex: Ausführung in Stahl mit Duplexbeschichtung, Aufhängung in Stahl 1.4539 (nichtrostend der Gruppe IV gemäss Forderung im Fachhandbuch BSA)
- Variante Gruppe III: Ausführung in nichtrostendem Stahl der Gruppe III (1.4404 oder 1.4571), Aufhängung in Stahl 1.4539
- Variante Gruppe IV: Ausführung komplett in Stahl der Gruppe IV, Aufhängung in Stahl 1.4539

Der untersuchte Betrachtungszeitraum beträgt 30 Jahre (bis zur nächsten Gesamterneuerung). Die Untersuchung wird für einen „Durchschnittstunnel“ mit 12 Strahlventilatoren und einem Ersatzventilator auf Lager durchgeführt. Es werden die Kostenarten gemäss nachfolgender Tab. 25 berücksichtigt.

Tab. 25 Kostenarten in der Gesamtkostenbetrachtung Strahlventilatoren

Kostenart	Häufigkeit	Quellen
Beschaffung und Inbetriebnahme		
Beschaffungskosten <i>Kosten der Strahlventilatoren (13 Stk.)</i>	1-malig am Beginn des Betrachtungszeitraums	Umfrage Hersteller
Prüfungen im Werk / Lieferung / Montage / IBN / Tests und Abnahme / Projektmanagement / Werkplanung / Schulung / Dokumentation / Pikett-Dienst		Erfahrungswerte aus Projekten der Autoren
Betrieb und Erhaltung		
Sanierungskosten <i>Kosten Revision Strahlventilatoren</i>	1-malig im Betrachtungszeitraum	Umfrage Hersteller
Demontage / Montage / Transporte / IBN / Tests und Abnahmen / Nachsperrungen / Dokumentation		Erfahrungswerte aus Projekten der Autoren
Wartung und Unterhalt	Jährlich	
Nachsperrungen		Erfahrungswerte aus Projekten der Autoren
Inspektionen, Reinigungen gemäss Wartungsvertrag		
Reparaturkosten	Jährlich verteilt anhand Ausfallraten	
Schadensfälle Motoren <i>Schadensfälle Korrosion</i>		Erfahrungswerte und Schätzungen
Ausserbetriebnahme und Entsorgung		
Entsorgungskosten	1-malig am Ende des Betrachtungszeitraums	
Kosten Aufwand		Erfahrungswerte und Schätzungen
• <i>Einnahmen Schrott</i>		

Es fliessen nur Kosten in direktem Zusammenhang mit den Strahlventilatoren in die Berechnung ein. Übergeordnete Aufwendungen, die ohnehin für das Tunnelobjekt oder die BSA erbracht werden müssen, sind nicht Gegenstand der Betrachtung. Kosten, die nur teils den Strahlventilatoren zuzuordnen sind, wie z. B. die Kosten wartungsbedingter Nachsperrungen, werden anteilmässig berücksichtigt. Kosten, die aufgrund der Werkstoffwahl variieren können, sind in Tab. 25 kursiv dargestellt. Grundsätzlich könnte die Betrachtung des Variantenvergleichs auf diese Kosten beschränkt werden, da die restlichen Kosten für alle Varianten gleich sind. Diese werden jedoch der Vollständigkeit halber für den Lebenszyklus mitberücksichtigt. Nicht enthalten sind die Energiekosten, da diese von den jeweiligen Verträgen mit den lokalen Energieversorgern abhängig sind und zudem häufig nicht über den alleinigen Verbrauch von Einzelkomponenten bestimmt werden können. Für den Variantenvergleich spielen diese Kosten keine Rolle.

Die Kosten der Strahlventilatoren in den verschiedenen Ausführungsvarianten wurden in einer Herstellerumfrage ermittelt. Die Resultate werden weiter unten erläutert. Es wird grundsätzlich erwartet, dass die Beschaffungskosten für die Ausführungsvarianten in nicht-rostenden Stählen höher ausfallen als für die Duplex-Variante. Hingegen können die nicht-rostenden Varianten Vorteile bei den Folgekosten über den restlichen Lebenszyklus bieten. Hier sind insbesondere die Kosten geplanter Sanierungen sowie die Reparaturkosten aufgrund allfälliger Schadensfälle von Interesse.

Rein unter dem Betrachtungswinkel der Materialwahl wäre zu erwarten, dass die nichtrostenden Varianten ohne notwendige Sanierung über den gesamten Betrachtungszeitraum von 30 Jahren eingesetzt werden können. Beim Duplex-System ist hingegen davon auszugehen, dass die organische Beschichtung nach ca. 10 bis 15 Jahren abgetragen ist und die Zinkschicht einen Schutz von weiteren 5 bis 10 Jahren bietet. Nach Auflösung der Zinkschicht, aber noch vor massgeblicher Schädigung des Grundmaterials – d.h. nach 20 bis 25 Jahren – wäre spätestens eine Sanierung oder ein Ersatz vorzusehen. Limitierend bei allen Varianten ist jedoch nicht das Material, sondern die Nutzungsdauer der Motoren bzw. der Motorlager. Seitens Hersteller wird eine Revision der Motoren nach spätestens 15 Jahren empfohlen. Dies wird in vorliegender Untersuchung als geplante Sanierung nach 15 Jahren bei allen Varianten berücksichtigt. Bei dieser Gelegenheit wird der Strahlventilator dann komplett saniert:

- Überholung der Motoren
- Komplette Zerlegung und Reinigung der Strahlventilatoren
- Teile aus nichtrostendem Stahl werden gebeizt und passiviert
- beschichtete Teile werden neu beschichtet
- die Laufräder werden neu gewuchtet
- die Schalldämpfer werden neu befüllt
- Nachkontrolle und Probelauf

Die entsprechenden Kosten wurden ebenfalls in der Herstellerumfrage ermittelt. Zur Bestimmung der notwendigen Transporte und Nachsperrungen wurde angenommen, dass je 2 Strahlventilatoren gleichzeitig saniert werden (Sanierung unter Betrieb).

Die Bestimmung der Reparaturkosten erfolgt anhand von Zuverlässigkeitsbetrachtungen. Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit ihre geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für eine gegebene Zeitspanne (die geplante Nutzungsdauer) erfüllen kann [16]. Kenngrösse der Zuverlässigkeit ist der Mean Time Between Failures (MTBF)-Wert bzw. dessen Kehrwert, die Ausfallrate λ [1/Jahr]. In einem ersten Schritt werden die Kosten zur Reparatur eines Schadens an einem Strahlventilator berechnet. Dazu gehören die Kosten zur Instandsetzung des Ventilators für den bestimmten Schadensfall sowie alle einhergehenden Aufwendungen (Nachsperrung, Demontage / Montage, Transporte, IBN, Tests, Abnahme, Dokumentation). Dieser Wert wird anschliessend mit der Anzahl an installierten Strahlventilatoren sowie der für diesen Schadensfall gegebenen Ausfallrate multipliziert. Auf diese Weise erhält man die jährlich zu erwartenden Reparaturkosten. Die gesamten zu erwartenden Reparaturkosten werden durch Aufsummierung über alle Jahre des Betrachtungszeitraums berechnet. Dabei werden jeweils die ersten drei Jahre nach Erstinstallation sowie nach Sanierung nicht berücksichtigt, da diese unter die Garantiebestimmungen fallen. Für die Motoren wird gemäss Herstellerangaben von einem MTBF-Wert von 55 Jahren ausgegangen. Das entspricht einer Ausfallrate λ_{Motor} von 0.0182 pro Jahr. In Bezug auf Korrosionsschäden wird von Schäden ausgegangen, die eine Sanierung des Strahlventilators oder eines Teils davon vor der geplanten Sanierung bzw. vor dem Rückbau am Ende des Betrachtungszeitraum erfordern. Es wird von sogenannten zufälligen Fehlern ausgegangen, nicht von systematischen Fehlern im Korrosionsschutz. Dies können z. B. Folgeschäden von unentdeckten Transport- oder Montageschäden sein, aber auch ein zufälliger Fehler in einer Materialcharge. Zufällige Fehler sind unabhängig von Alter oder Betriebsdauer einer Komponente. Anhand von Erfahrungswerten der Autoren wird für die Duplex-Variante die Annahme getroffen, dass von 12 Strahlventilatoren über einen Zeitraum von 15 Jahren 2 Stück saniert werden müssen. Die so ermittelte Ausfallrate λ_{Duplex} beträgt 0.0111 pro Jahr. Für die Gruppe III- / Gruppe IV-Varianten wird vorerst von einer zehnmal geringeren Ausfallrate ausgegangen. Aus der Praxis sind keine

Schadensfälle für diese Materialien bekannt. Der Einfluss der korrosionsbedingten Ausfallraten wird in einer Sensitivitätsanalyse überprüft.

Jährliche Reinigungen werden bei allen Varianten eingerechnet und sind Bestandteil des Wartungsvertrags mit dem Lieferanten. Periodische Inspektionen werden in einem Intervall von 5 Jahren angenommen.

Die Aufwandkosten der Entsorgung werden anhand von Erfahrungswerten aus Gesamterneuerungsprojekten berücksichtigt. Für die Schrotteinnahmen werden die Schrottpreise von Baustahl, Edelstahl (V4A) und Elektromotoren berücksichtigt.

In der Herstellerumfrage wurden 4 Hersteller angefragt, 3 Rückmeldungen wurden erhalten. Die Hersteller wurden gebeten, Neupreise (Kostenbasis 2017) für folgende Ventilatorvarianten anzugeben:

- Durchmesser 710 mm, Leistung 30 kW
- Durchmesser 1'250 mm, Leistung 45 kW
- Durchmesser 1'250 mm, Leistung 70 kW
- Durchmesser 1'400 mm, Leistung 70 kW

Die Preise wurden jeweils für folgende Ausführungen angefragt (Aufhängung jeweils in 1.4539):

- Stahl mit Duplexsystem (verzinkt und Beschichtung 320 µm)
- Stahl mit Duplexsystem reduziert (verzinkt und Beschichtung 160 µm)
- Nichtrostender Stahl Gruppe III (1.4404 oder 1.4571)
- Nichtrostender Stahl Gruppe IV (Komplettausführung 1.4539)

Als Berechnungsgrundlage wurde eine zu liefernde Stückmenge von 12 Strahlventilatoren zugrunde gelegt, in einer Ausstattung gemäss den typischen Anforderungen in der Schweiz: Schalldämpfer beidseitig, Laufrad in Alu-Guss, störungsfreier Betrieb während 2 Stunden bei 250 °C, Kabelschwanz 5 m ohne Klemmenkasten.

Zusätzlich wurden der prozentuale Anteil der Materialkosten am Neupreis sowie die Kosten der Revision eines Strahlventilators als Prozentsatz des Neupreises für die verschiedenen Varianten und Ausführungen angefragt.

Aus den eingegangenen Rückmeldungen wurde für die Untersuchung ein „Durchschnittsventilator“ gebildet durch Mittelung aller Preise für die verschiedenen Grössen- und Leistungsvarianten. Weiter wurden in der Variante Duplex die Preise der beiden Ausführungen mit unterschiedlichen Beschichtungsdicken berücksichtigt. Die so erhaltenen Preise für den Durchschnittsventilator sind in der Tab. 26 aufgeführt.

Tab. 26 Preise eines Durchschnittsventilators für die untersuchten Varianten anhand der Rückmeldungen aus der Herstellerumfrage

Variante	Neupreis (1 Strahlventilator)	Anteil Materialkosten am Neupreis	Kosten einer Revision
Duplex	CHF 31'850	5%	42% vom Neupreis
Gruppe III	CHF 36'075	20%	36% vom Neupreis
Gruppe IV	CHF 48'200	25%	27% vom Neupreis

In Bezug auf den Anteil der Materialkosten am Neupreis lag eine enge Übereinstimmung bei den Rückmeldungen der Hersteller vor. Bei den Kosten der Revision hingegen streuten die Werte zwischen 18% und 70% des Neupreises. Die Angaben in Tab. 15 sind die Mittelwerte. Die grosse Streuung bei den Herstellerangaben wird in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt.

Um den Einfluss der Rohstoffpreise auf den Neupreis der Ventilatoren zu untersuchen, wurde der jeweilige Anteil der Materialkosten am Neupreis mit der Entwicklung der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB)

Materialpreisindizes im Zeitraum Dezember 2002 bis März 2017 verrechnet. Für die Varianten Gruppe III und Gruppe IV wurde der Index für nichtrostenden Stahl berücksichtigt, während bei der Duplex-Variante der Mittelwert der Indizes für Stabstahl, Profilstahl, Flachprodukte und Stahlbleche verwendet wurde (siehe Abb. 12). Die anhand dieser Berechnung erhaltene Preisentwicklung der drei Varianten ist in Abb. 13 dargestellt. Da der Anteil Materialkosten bei der Duplex-Variante sehr gering ist, fallen auch Preisschwankungen aufgrund der Rohstoffpreisentwicklung gering aus, während bei den Varianten der nichtrostenden Stähle die Schwankungen entsprechend der höheren Anteile deutlich ausgeprägter sind. Anhand der Verläufe in Abb. 13 wurde ein Durchschnittspreis für jede der drei untersuchten Varianten gebildet, der die historische Entwicklung der Rohstoffpreise berücksichtigt (siehe Tab. 27). Ebenfalls angegeben in Tab. 27 ist das durchschnittliche Preisverhältnis zwischen den nichtrostenden Varianten und der Duplex-Variante, sowie die historischen Ober- und Untergrenzen dieses Verhältnisses über den betrachteten Zeitraum. Für die weiteren Untersuchungen der Kosten werden diese Durchschnittswerte als Basis genutzt.

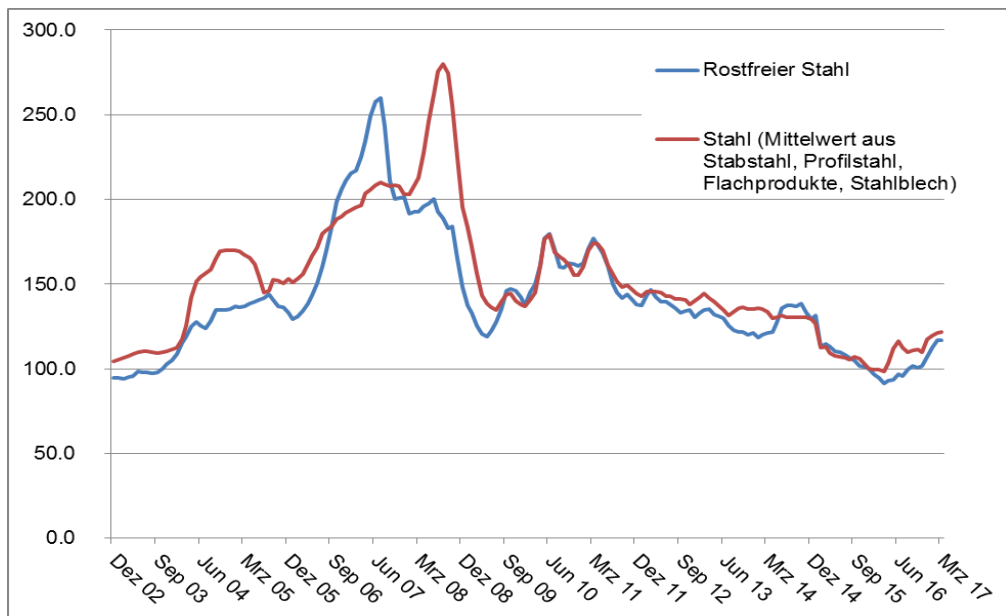


Abb. 12 Entwicklung der Rohstoffpreise gemäss KBOB Materialpreisindizes (Basis 100 = Dezember 2015)

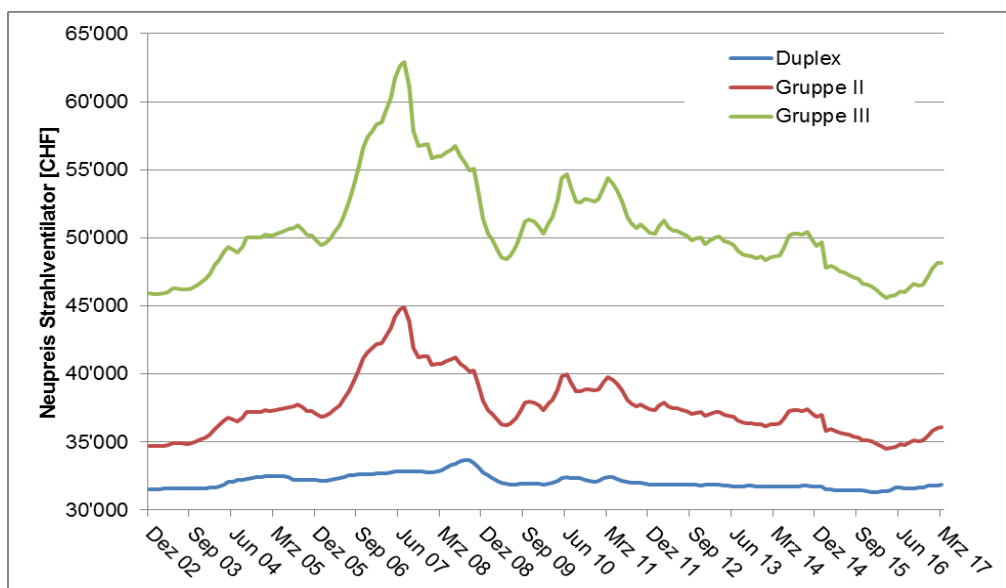


Abb. 13 Theoretische historische Entwicklung der Strahlventilator-Neupreise aufgrund der Rohstoffpreisentwicklung

Tab. 27 Durchschnittliche Neupreise der Strahlventilatorvarianten unter Berücksichtigung der Rohstoffpreisentwicklung und Preisverhältnis der nichtrostenden Varianten gegenüber der Duplex-Variante

Variante	Durchschnittspreis 2002-2017	Preisverhältnis gegenüber Duplex-Variante	
		Durchschnitt	Unter- / Obergrenze
Duplex	CHF 32'100	-	-
Gruppe III	CHF 37'600	1.17	1.09 / 1.37
Gruppe IV	CHF 50'700	1.58	1.45 / 1.92

Die Resultate der Lebenszykluskostenberechnung unter Berücksichtigung der in Tab. 25 aufgeführten Kostenarten sind für den Durchschnittsfall (Neupreise gemäss Tab. 27, Kosten der Revision gemäss Tab. 26) in Abb. 14 dargestellt. Wie zu erwarten und anhand der Preise in Tab. 27 ersichtlich, sind die Beschaffungskosten für die Duplex-Variante am niedrigsten, für die Variante Gruppe III leicht höher (+14% gegenüber Duplex-Variante) und für die Gruppe IV deutlich höher (+46% gegenüber Duplex-Variante). Die Sanierungskosten, die bei allen Varianten aufgrund der Motorrevisionen vorgenommen werden müssen, sind bei den nichtrostenden Varianten geringfügig niedriger als bei der Duplex-Variante, die Unterschiede sind jedoch vernachlässigbar. Reparaturkosten aufgrund Motorschäden sowie Kosten für Wartung und Unterhalt sind identisch bei den drei Varianten. Entsorgungskosten und Schrotteinnahmen fallen kaum ins Gewicht. Entscheidend über den gesamten Betrachtungszeitraum sind, neben den Beschaffungskosten, die Reparaturkosten aufgrund Korrosionsschäden. Mit den oben getroffenen Annahmen zu den Ausfallraten liegen die zu erwartenden Reparaturkosten bei der Duplex-Variante 8- bis 10-mal höher als bei den Varianten mit nichtrostenden Stählen. Dies ergibt über den ganzen Lebenszyklus gesehen den (knappen) Ausschlag für die Variante Gruppe III, die zwar in der Anschaffung leicht teurer ist als die Duplex-Variante, deren Folgekosten jedoch niedriger liegen. Aufgrund der hohen Beschaffungskosten ist die Variante Gruppe IV die ungünstigste Variante. Die für die berücksichtigten Kostenarten ermittelten Gesamtkosten liegen für die Variante Gruppe III bei ca. CHF 1'341'500, für die Variante Duplex bei ca. CHF 1'367'400 (+2% gegenüber Variante Gruppe III), und für die Variante Gruppe IV bei ca. CHF 1'514'300 (+13% gegenüber Variante Gruppe IV).

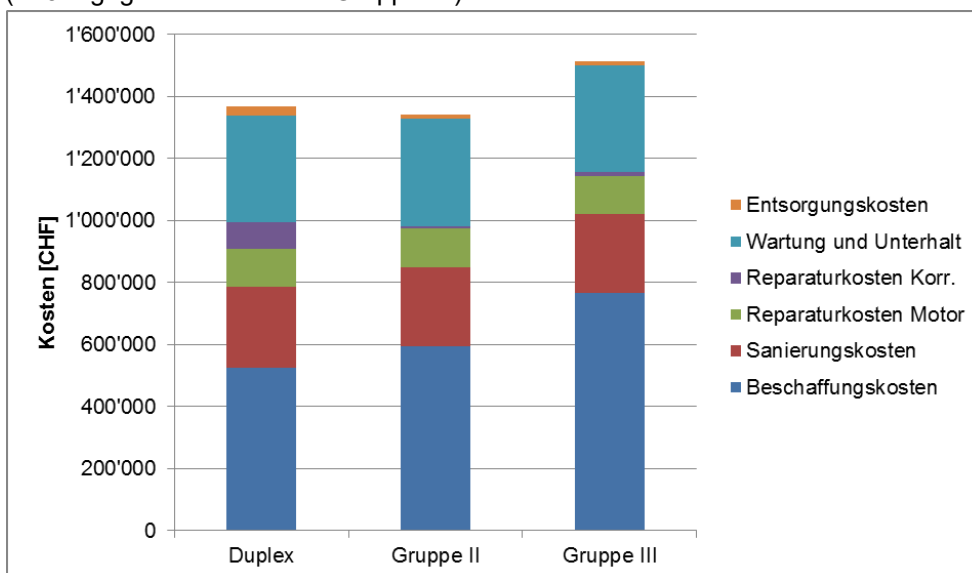


Abb. 14 Lebenszykluskosten der drei untersuchten Varianten für den Durchschnittsfall

Der Einfluss der Rohstoffpreisentwicklung und der möglichen Bandbreiten der Sanierungskosten gemäss Herstellerangaben sind in Abb. 15 und Abb. 16 ersichtlich. Abb. 15 zeigt die Gesamtkosten der Variante Gruppe III (grüne Linie) in Funktion des Neupreisverhältnisses des Gruppe III-Ventilators gegenüber dem Duplex-Ventilator. Die Gesamtkosten der

Duplex-Variante, die ohnehin nur geringfügig aufgrund der Rohstoffpreisentwicklung variieren (Abb. 13), sind für das Durchschnittspreisniveau gemäss Tab. 27 abgebildet (blaue Linie). Die äusseren, vertikalen, gepunkteten Linien stellen die historischen Grenzen 2002–2017 des Preisverhältnisses gemäss Tab. 3 dar (1.09 und 1.37). Die vertikale, gestrichelte Linie entspricht dem Durchschnittswert von 1.17. Die Schnittpunkte dieser Linie mit den durchgezogenen grünen und blauen Linien entsprechen den Kostendarstellungen in Abb. 14, die Variante Gruppe III ist bei diesem Neupreisverhältnis leicht günstiger als die Variante Duplex. Dort wo sich die blaue und grüne Linie schneiden befindet sich der Grenzwert, über dem die Gruppe III-Variante in der Gesamtkostenbetrachtung teurer wird als die Duplex-Variante. Der Grenzwert entspricht dem Preisverhältnis von 1.24. Die blauen und grünen gepunkteten Linien wiederum stellen die Gesamtkosten bei hohen (obere Linien) bzw. niedrigen Sanierungskosten (untere Linien) innerhalb der von den Herstellern angegebenen Bandbreiten für die Kosten der Revision dar. Die Gesamtkosten könne um ca. $\pm 9\%$ vom Durchschnittsfall abweichen. Das Grenzverhältnis, ab dem die Duplex-Variante günstiger als die Gruppe III-Variante ist, verschiebt sich bei höheren Kosten nach rechts zu höheren Werten, wenn auch nur geringfügig. Abb. 16 zeigt den Vergleich zwischen der Variante Gruppe IV und der Variante Duplex auf. Grundsätzlich lassen sich die gleichen Aussagen treffen wie für die Abb. 15. Es ist jedoch klar ersichtlich, dass innerhalb der historischen Grenzen 2002–2017 des Neupreisverhältnisses die Variante Gruppe IV nie kostengünstiger ist als die Duplex-Variante.

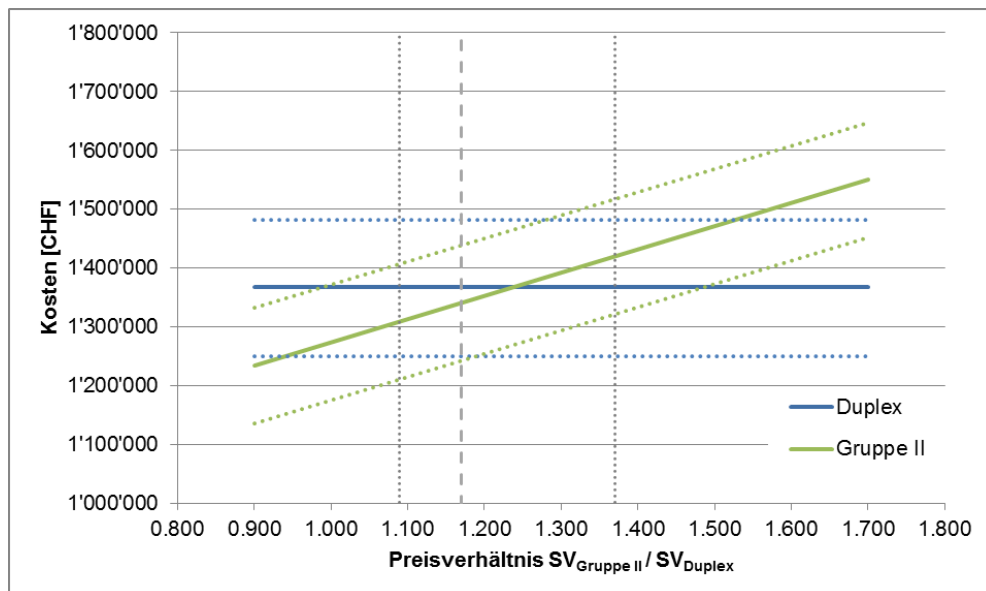


Abb. 15 Gesamtkostenvergleich der Varianten Gruppe III und Duplex in Funktion des Neupreisverhältnisses und über die Bandbreite der gemäss Herstellerangaben möglichen Sanierungskosten

Um den Einfluss der Ausfallraten zu untersuchen, wurde in Abb. 17 der Grenzwert des Neupreisverhältnisses, ab dem die Duplex-Variante über den Betrachtungszeitraum kostengünstiger als die Gruppe III- bzw. Gruppe IV-Variante ist, für verschiedene korrosionsbedingte Ausfallraten der Duplexvariante λ_{Duplex} aufgetragen. Je geringer die Ausfallrate desto geringer auch die korrosionsbedingten Reparaturkosten und desto niedriger der Grenzwert des Preisverhältnisses, ab dem die Duplex-Variante die kostengünstigere Variante darstellt. Infolge leicht höherer Gesamtkosten bei der Gruppe IV-Variante gegenüber der Gruppe III-Variante bei ähnlichem Preisverhältnis zur Duplex-Variante, liegt das Grenzverhältnis ab dem die Duplex-Variante kostengünstiger wird bei der Gruppe IV-Variante tiefer (gestrichelte Linien) als bei der Gruppe III-Variante (durchgezogene Linien). Weiter ist in Abb. 17 der Grenzwert des Preisverhältnisses in Funktion des Verhältnisses der Ausfallraten der nichtrostenden Varianten, λ_{Inox} , zur Ausfallrate der Duplex-Variante, λ_{Duplex} , aufgetragen. Je geringer das Verhältnis desto geringer sind die zu erwartenden Kosten durch Korrosionsschäden bei den nichtrostenden Varianten. Diese gehen asymptotisch gegen 0. Bereits bei einem Verhältnis von 0.1 sind sie äusserst gering, wie in Abb. 14 ersichtlich. Bei hoch angenommener Ausfallrate der Duplex-Variante ($\lambda_{\text{Duplex}} = 0.0222$

Ausfälle / Jahr, d.h. von 12 Strahlventilatoren müssen in 15 Jahren 4 Stück repariert werden) und mit tiefen Rohstoffpreisen (Preisverhältnis von 1.45 gemäss Tab. 27) kann auch die Gruppe IV-Variante konkurrenzfähig zur Duplex-Variante werden (grüne gestrichelte Linie in Abb. 17). Jedoch wäre in diesem Fall die günstigste aller Varianten die Gruppe III-Variante. Bei den entsprechenden Rohstoffpreisen läge das Preisverhältnis zwischen der Duplex- und der Gruppe III-Variante nämlich bei 1.09.

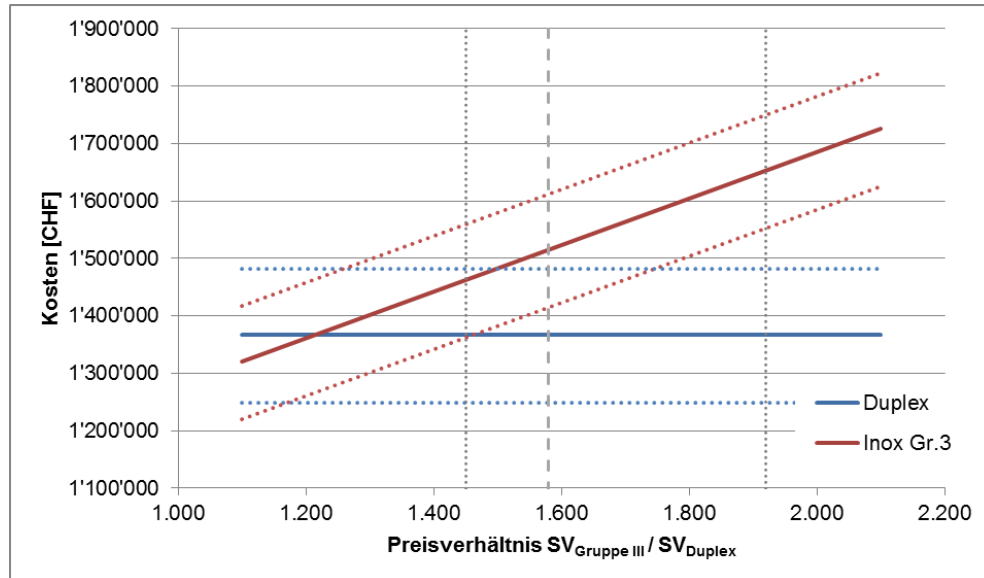


Abb. 16 Gesamtkostenvergleich der Varianten Gruppe IV und Duplex in Funktion des Neupreisverhältnisses und über die Bandbreite der gemäss Herstellerangaben möglichen Sanierungskosten

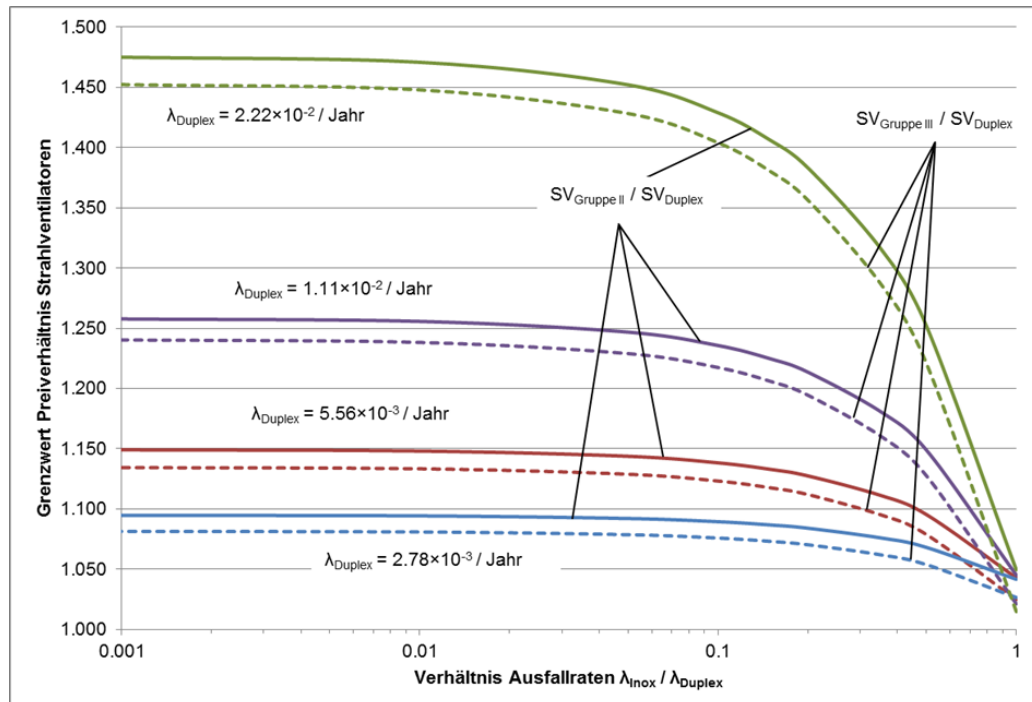


Abb. 17 Grenzwert des Preisverhältnisses, ab dem die Duplex-Variante kostengünstiger als die nichtrostende Variante ist, in Funktion des Verhältnisses der Ausfallraten $\lambda_{Inox} / \lambda_{Duplex}$ für verschiedene korrosionsbedingte Ausfallraten der Duplex-Variante

9.1.3 Sanierung / Ersatz im Betrieb

Im vorherigen Kapitel wurde eine Methode aufgezeigt, wie in der Planung eines Neubau- oder Erneuerungsprojekts anhand der aktuellen Situation der Rohstoffpreise und der zu erwartenden Ausfallrate der Strahlventilatoren eine Entscheidung für eine Ausführungsvariante anhand der Lebenszykluskosten getroffen werden kann. Nachfolgende Analyse bezieht sich auf den Fall, wo der Betreiber im laufenden Betrieb mit der Notwendigkeit von Ausbesserungsmassnahmen konfrontiert wird. Die Fragestellung, ob für die Restdauer bis zu einer Gesamterneuerung gemäss UPlaNS-Strategie überhaupt Massnahmen oder allenfalls nur punktuelle Massnahmen vorzunehmen sind, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Diskussion. Es wird davon ausgegangen, dass ein Weiterbetrieb bis zur nächsten Gesamterneuerung keine Option darstellt, da z. B. erkennbar ist, dass der Korrosionsschutz über diese Dauer nicht mehr gewährleistet ist und erste Korrosionserscheinungen oder sogar bereits punktuelle Schäden festgestellt wurden. Die Untersuchung behandelt die Fragestellung, wann sich eine Sanierung und wann sich eher ein Ersatz (Neubeschaffung) der betroffenen Strahlventilatoren lohnt. Es werden dabei nur die für den Betreiber entstehenden Kosten betrachtet. Weitergehende Aspekte, wie z. B. der Zeitraum, über den die Massnahme stattfindet (wenige Wochen für den Ersatz im Vergleich zu mehreren Monaten bei der Sanierung), sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

Die Analyse wird für die Ausführungsvariante Stahl mit Duplex-Schutzsystem durchgeführt. Bei nichtrostenden Stählen ist i.d.R. nicht von Korrosionsschäden auszugehen, und falls es dennoch zu Schäden kommt, ist das betroffene Bauteil ohnehin auszutauschen. D.h. es stellt sich nicht die Frage nach einer Sanierung im Sinne einer Auffrischung des Korrosionsschutzes. Die Untersuchung behandelt zwei verschiedene Ventilatorgrössen (Durchmesser von 710 mm und 1'250 mm), um den Einfluss der unterschiedlichen Materialmengen zu berücksichtigen. Bei kleineren Ventilatoren lohnt sich aufgrund der geringeren Materialmenge eventuell eher ein Ersatz.

Folgende Annahmen und Angaben liegen den Berechnungen zugrunde:

- Es werden folgende Kostenstellen berücksichtigt:
 - Revision bzw. Neubeschaffung der Ventilatoren
 - Nachtsperungen
 - Transporte / Montage / Demontage / Inbetriebnahme / Tests / Abnahmen
 - Entsorgung
- Für die Kosten der Revision bzw. der Neubeschaffung eines Ventilators werden die Ergebnisse der Herstellerumfrage herangezogen. Für die kleine Variante (710 mm) liegen die Kosten einer Revision im Schnitt bei 50% des Neupreises eines Ventilators. Die Bandbreite der verschiedenen Herstellerangaben liegt zwischen ca. 25% und 75% des Neupreises. Bei der grossen Variante (1'250 mm) betragen die Kosten der Revision im Schnitt 43% des Neupreises, die Bandbreite liegt zwischen ca. 19% und 67%.
- Es wird von durchschnittlichen Rohstoffpreisen gemäss Materialpreisindex über den Zeitraum Dezember 2002 bis März 2017 ausgegangen.
- Es wird angenommen, dass die Massnahme unter Betrieb stattfindet, d.h. die Längslüftung muss in reduzierter Form weiterhin funktionsfähig sein. Das bedeutet für die Sanierung, dass maximal 2 Strahlventilatoren gleichzeitig saniert werden.
- Pro Nachtsperung können von einer Mannschaft 4 Installationsvorgänge durchgeführt werden (eine Montage gilt als 1 Installationsvorgang, eine Demontage gilt als 1 Installationsvorgang). Eine Mannschaft kann somit pro Nachtsperung 2 Strahlventilatoren austauschen.
- Es wird angenommen, dass beim Ersatz zwei Mannschaften im Tunnel arbeiten, d.h. es werden 4 Maschinen ausgetauscht. Bei der Sanierung werden, wie oben beschrieben, immer nur 2 Ventilatoren demontiert bzw. montiert.
- Pro LKW (1 Transport) können 4 Strahlventilatoren transportiert werden.

Die Berechnungsergebnisse sind exemplarisch für den Fall von 4 Strahlventilatoren in Abb. 18 dargestellt unter Annahme durchschnittlicher Revisionskosten. Für beide Varianten (710 mm und 1'250 mm) stellt die Sanierung jeweils den günstigeren Fall dar. Der Ersatz ist um 36% (710 mm) bzw. um 70% (1'250 mm) teurer als die Sanierung. Dies ist in

erster Linie bedingt durch die höheren Kosten der Neubeschaffung, zusätzlich kommen noch die Entsorgungskosten hinzu, die bei der Sanierung nicht anfallen. Der Ersatz zeichnet sich durch geringere Kosten bei Nachsperrungen und Transporten aus, da weniger davon benötigt werden.

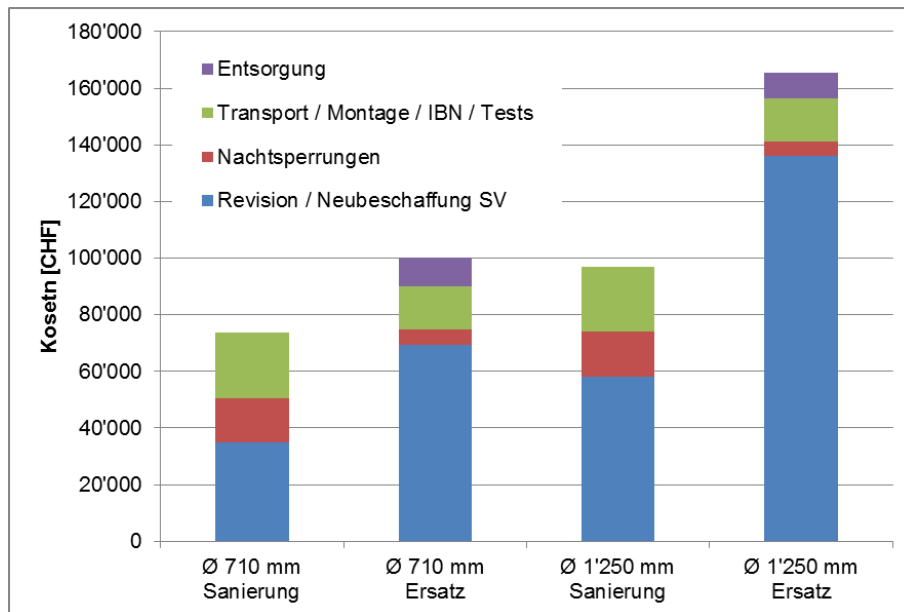


Abb. 18 Sanierungs- und Ersatzkosten für 4 Strahlventilatoren der Grössen 710 mm und 1'250 mm bei mittleren Revisionskosten und durchschnittlichen Rohstoffpreisen

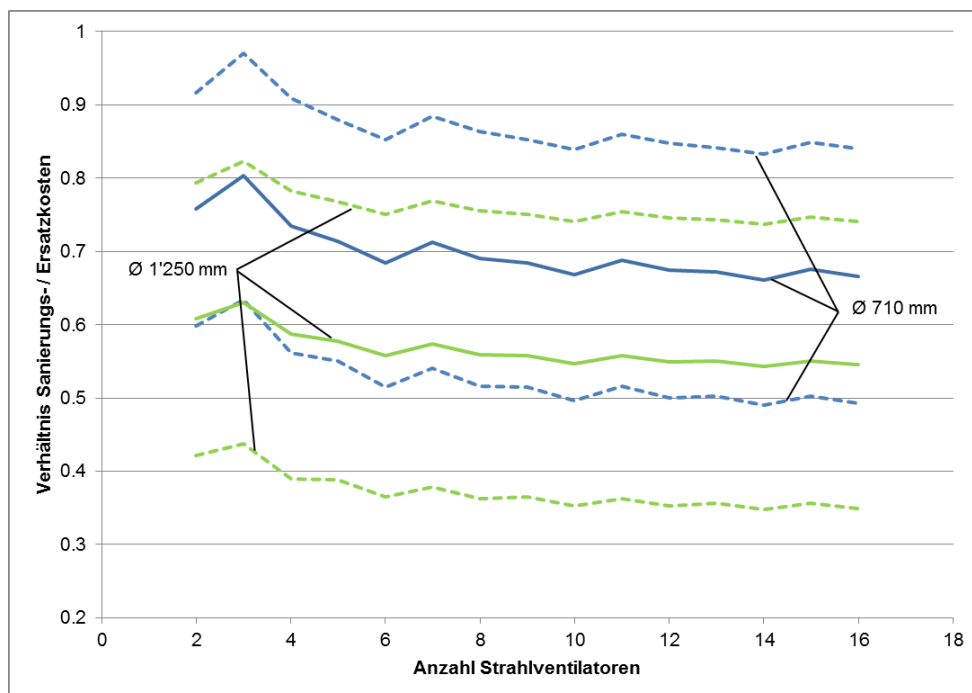


Abb. 19 Verhältnis der Sanierungs- zu den Ersatzkosten in Funktion der Anzahl Strahlventilatoren für die Varianten 710 mm (blaue Linien) und 1'250 mm (grüne Linien): durchgezogene Linien stellen den Fall mit mittleren Revisionskosten dar, gestrichelte Linien stellen die Fälle mit den Ober- und Untergrenzen der Revisionskosten gemäss Herstellerangaben dar.

Der Einfluss der Anzahl zu sanierenden bzw. zu ersetzenden Ventilatoren ist in Abb. 19 aufgezeigt, in der das Verhältnis der Sanierungs- zu den Ersatzkosten in Funktion der Anzahl Ventilatoren für die gesamte Bandbreite der gemäss Herstellerangaben möglichen Revisionskosten dargestellt ist. Die durchgezogenen Linien stellen dabei den Fall mittlerer Revisionskosten dar, die gestrichelten Linien repräsentieren die Bandbreite der verschiedenen Herstellerangaben. Es zeigt sich, dass – unter Annahme durchschnittlicher Rohstoffpreise – das Verhältnis der Sanierungs- zu den Ersatzkosten immer unter 1 liegt und somit die Sanierung immer den günstigeren Fall darstellt, selbst bei hoch angenommenen Sanierungskosten. Bei kleinen Ventilatorgrössen liegen die Ersatzkosten näher an den Sanierungskosten als bei grossen Ventilatoren aufgrund der geringeren Materialmenge. Je niedriger die Anzahl der Ventilatoren desto geringer fallen die Unterschiede zwischen Sanierungs- und Ersatzkosten aus, da hier die Kosten für Nachsperrungen und Transporte einen grösseren Einfluss haben. Bei höheren Stückzahlen nimmt dieser Einfluss ab und es dominieren die Revisions- bzw. Neubeschaffungskosten.

Abb. 20 und Abb. 21 zeigen am Beispiel von 4 Strahlventilatoren das Verhältnis der Sanierungs- zu den Ersatzkosten in Funktion der Entwicklung der Rohstoffpreise (Abszisse) und der Revisionskosten (Ordinate). Die Werte 1 auf den Achsen repräsentieren dabei jeweils den Mittelwert (Mittelwert der Rohstoffpreise über den Zeitraum Dezember 2002 bis März 2017 sowie Mittelwert der Revisionskosten gemäss Herstellerangaben). Die Abszisse zeigt eine Bandbreite von -50% bis +80% des langjährigen Mittels der Rohstoffpreise. Es zeigt sich, dass die Rohstoffpreise kaum einen Einfluss auf die Preise und somit auf das Kostenverhältnis haben. Dies ist bedingt durch die Tatsache, dass der Materialanteil am Neupreis der Ventilatoren nur ca. 5% beträgt. Die Revisionskosten (Ordinate) haben hingegen einen grösseren Einfluss auf das Kostenverhältnis, jedoch wird der Ersatz der Ventilatoren erst bei gegenüber dem Mittel 80% höheren (710 mm-Variante) bzw. 120% höheren (1'250 mm-Variante) Revisionskosten günstiger als die Sanierung (gelbe Felder). Die Obergrenze gemäss Herstellerangaben liegt bei weniger als 60% über dem Mittel.

Die dieser Untersuchung zugrunde liegenden Angaben und Annahmen lassen somit das Fazit zu, dass innerhalb der historischen Grenzen der Rohstoffpreise und anhand der gemäss Herstellerumfrage zu erwartenden Kosten für Revisionen und Neubeschaffungen von Strahlventilatoren, eine Sanierung immer kostengünstiger als ein Ersatz ist.

Variante Ø710mm Duplexsystem																
	Entwicklung Rohstoffpreise (Basis 1 = Mittel 12/2002 - 03/2017)															
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8		
Revisionskosten (Basis 1 = Mittelwert)	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48		
	0.40	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	
	0.50	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	
	0.60	0.61	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.58	
	0.70	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	
	0.80	0.68	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	
	0.90	0.71	0.71	0.71	0.71	0.70	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	
	1.00	0.75	0.74	0.74	0.74	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	
	1.10	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	
	1.20	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	
	1.30	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	
	1.40	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	
	1.50	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	
	1.60	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	
	1.70	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	
	1.80	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	
	1.90	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.03	1.02	
	2.00	1.10	1.10	1.09	1.09	1.09	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	
	2.10	1.14	1.13	1.13	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11	1.11	1.10	1.10	1.10	1.09	1.09	
	2.20	1.17	1.17	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15	1.15	1.14	1.14	1.13	1.13	1.13	1.12	

Abb. 20 Verhältnis der Sanierungs- zu den Ersatzkosten für 4 Strahlventilatoren der Variante 710 mm in Funktion der Rohstoffpreise (Abszisse) und der Revisionskosten (Ordinate): gelbe Felder zeigen ein Verhältnis > 1 (Ersatz günstiger als Sanierung), blaue Felder zeigen ein Verhältnis < 1 (Sanierung günstiger als Ersatz)

Variante Ø1250mm Duplexsystem															
		Entwicklung Rohstoffpreise (Basis 1 = Mittel 12/2002 - 03/2017)													
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Revisionskosten (Basis 1 = Mittelwert)	0.50	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40
	0.60	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.43
	0.70	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
	0.80	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50
	0.90	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
	1.00	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57	0.57
	1.10	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
	1.20	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.64
	1.30	0.70	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67
	1.40	0.74	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71
	1.50	0.78	0.77	0.77	0.77	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74
	1.60	0.81	0.81	0.81	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78	0.78
	1.70	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81
	1.80	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85
	1.90	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88
	2.00	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.91
	2.10	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95
	2.20	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98
	2.30	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
	2.40	1.10	1.09	1.09	1.09	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.05	1.05

Abb. 21 Verhältnis der Sanierungs- zu den Ersatzkosten für 4 Strahlventilatoren der Variante 1'250 mm in Funktion der Rohstoffpreise (Abszisse) und der Revisionskosten (Ordinate): gelbe Felder zeigen ein Verhältnis > 1 (Ersatz günstiger als Sanierung), blaue Felder zeigen ein Verhältnis < 1 (Sanierung günstiger als Ersatz)

10 Empfehlungen Auswahl Material und Korrosionsschutzsysteme

10.1 Einleitung

Die Wahl der Werkstoffe und der zugehörigen Korrosionsschutzsysteme lässt sich nicht losgelöst von der Funktion der Komponente, deren Exposition sowie der mit dem Element verknüpften Risiken beurteilen. Bei der Werkstoffwahl soll daher die Vorgehensweise in Kapitel 6 befolgt werden, wobei die Risikobewertung in gemäss Kapitel 8 miteinzubeziehen ist. In der Folge ist es nicht möglich generelle Empfehlungen für die Wahl des Werkstoffs und des Korrosionsschutzsystems zu machen, da diese sich als Folge dieser Vorgehensweise ergeben.

Es ist aber dennoch sinnvoll übergeordnete Aspekte, welche bei dem Auswahlprozess von Relevanz sind und die sich bei anderen Systemen bewährt haben zusammenzustellen. Diesen Konzepten ist gemeinsam, dass der Unterhalt, die Kontrollierbarkeit und die Austauschbarkeit von Bauteilen bei der Wahl des Werkstoffs und des Korrosionsschutzsystems ein erhöhter Stellenwert berücksichtigt werden. In der Folge werden für nicht kontrollierbare oder austauschbare Komponenten sehr hohe Anforderungen an den Werkstoff gestellt. Umgekehrt können einfach einsehbare, austauschbare und kontrollierbare Komponenten auch durch kostengünstigere Werkstoffe oder Korrosionsschutzsystemen ausgeführt werden. Die Kontrollierbarkeit und Austauschbarkeit sind selbstverständlich direkt mit der Konstruktion und der Detaillösung verknüpft. Es ist daher nicht möglich konkrete Vorgaben zu machen. Die wesentlichen Aspekte sollen aber im Folgenden diskutiert werden.

Für Stahlbauten gilt in der Schweiz seit 2014 die EN 1090-2. Gemäss dieser Norm gelten erhöhte Anforderungen an die Projektierung und Ausführung von Stahltragwerken, welche einen gesamtheitlicheren Ansatz verfolgen. So ist eine Ausführungsklasse (EXC) aufgrund von Beanspruchungskategorien (SC) und Schadensfolgeklassen (CC) festzulegen. Daraus werden u.a. die Massnahmen für den Korrosionsschutz abgeleitet. Der Denkansatz mit Schadensfolgeklassen müsste folgerichtig auch für Tunnelausrüstungen angewendet werden.

10.2 Nicht kontrollierbare Komponenten

Nicht kontrollierbare Komponenten beinhalten sämtliche Befestigungselemente an der Tunnelstruktur. Diese befinden sich teilweise im Beton oder verfügen über spaltbehaftete Gewindegänge. Dies hat zur Folge, dass die statisch kritischen Bereiche der Befestigungselemente nicht oder nur mit sehr grossem Aufwand kontrollierbar sind. In der Folge müssen diese aus nichtrostendem Stahl gefertigt werden.

Die Wahl der Legierungszusammensetzung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten. Dabei sollen die folgenden Grundsätze beachtet werden:

- Verbindungselemente von normal belasteten Bauteilen (i.d.R. Gehäuseteile) müssen mindestens die gleiche Werkstoffklasse wie der bessere der beiden zu verbindenden Werkstoff aufweisen.
- Verbindungselemente von hoch belasteten Bauteilen (i.d.R. Halterung) müssen mindestens denselben Werkstoff wie der bessere der beiden zu verbindenden Bauteile aufweisen.

10.3 Kontrollierbare Komponenten

Für kontrollierbare und austauschbare Komponenten ermöglicht der risikobasierte Ansatz eine alternative Vorgehensweise. So können gut prüfbare und im Hinblick auf die Tragweite bei einem Bauteilversagen nicht relevante Komponenten bezüglich Materialwahl und Korrosionsschutzsystem einfach und kostengünstig ausgeführt werden. Im Rahmen von regelmässigen Kontrollen sind diese Elemente zu prüfen und gegebenenfalls zu tauschen. Voraussetzung dabei ist, dass vorliegende Korrosionserscheinungen in den kritischen Bauteilbereichen zuverlässig erkannt werden können.

Elemente mit grosser Tragweite bei einem Bauteilversagen müssen demgegenüber bezüglich Materialwahl und Korrosionsschutzsystem entsprechend aufwendig und kostenintensiv ausgeführt werden

11 Empfehlungen Planung bis Betrieb

11.1 Empfehlungen Phase Projektierung

Im vorliegenden Kapitel werden Hinweise für das Vorgehen bei der Materialauswahl für BSA-Elemente hinsichtlich des Korrosionsschutzes im Rahmen der Projektierung gegeben. Dabei gibt es generelle Hinweise, welche für sämtliche Werkstoffe relevant sind. Zudem gibt es spezifische Hinweise, welche spezifisch für die jeweiligen Werkstoffklassen und Korrosionsschutzsysteme sind.

11.1.1 Allgemeine Hinweise bezüglich der Vorgehensweise

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und den Vorgaben der SN EN 1090-2:2018 ergeben sich allgemeine Anforderungen, welche im Rahmen der Projektierung zu berücksichtigen sind.

Voraussetzung ist die Erarbeitung einer Nutzungsvereinbarung, welche die Anforderungen an die einzelnen BSA-Komponenten definiert. Weiter sind die Ausführungsklassen zu bestimmen. Auf Basis dieser Dokumente erfolgt die Auswahl der Werkstoff und des Korrosionsschutzes unter Berücksichtigung der im Forschungsvorhaben erarbeiteten risikobasierten Betrachtung. Abschliessend muss ein Qualitätsmanagementplan erstellt werden. Diese Schritte werden im Folgenden weiter ausgeführt.

Erarbeitung einer Nutzungsvereinbarung

Es ist eine Nutzungsvereinbarung gemäss SIA 260:2013 für die verschiedenen BSA-Komponenten auszuarbeiten. Die Nutzungsvereinbarung muss folgende Informationen enthalten:

- Nutzungsdauer der einzelnen Bauteile
- Betrachtete Gefährdungsbilder
- Anforderungen an die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit
- Akzeptierte Risiken

Ermitteln der Ausführungsklassen

Generell ist bei der Projektierung die SN EN 1090-2:2018 "Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken" zu befolgen. Diese Norm definiert auch Anforderungen, die im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit von BSA Elementen relevant sind:

Für jedes Bauteil muss eine Ausführungsklasse festgelegt werden. Es existieren 4 Ausführungsklassen (EXC1 bis EXC4). Über die Ausführungsklasse sind im Normenwerk eine Vielzahl von Anforderungen für die Ausführung der Bauteile sowie deren Abnahme definiert.

Auswahl der Werkstoffe und des Korrosionsschutzes

Die Auswahl der Werkstoffe resp. Werkstoffklassen ist mit der im Forschungsprojekt erarbeiteten risikobasierten Methodik durchzuführen. Die Methodik ist in Kapitel 6 und 8 beschrieben. Entsprechend ist für jedes Bauteil eine Risikoanalyse durchzuführen.

Erstellen eines Qualitätsmanagementplans

Im informativen Anhang wird in der Norm eine Checkliste für den Inhalt eines Qualitätsmanagementplans aufgeführt. Im Hinblick auf den Korrosionsschutz von BSA Elementen sind nachstehend aufgeführte Punkte dieser Checkliste von Bedeutung:

- Bescheinigungen für Konstruktionsmaterialien einschliesslich Verbrauchsmaterialien
- Schweissnachweise und Berichte über die Qualifizierung des Schweissverfahrens
- Rückverfolgbarkeit von Konstruktionsmaterialien bis zum fertiggestellten Bauteil
- Vorbereitung der Nahtflanken vor dem Schweissen

- Schweißen und fertiggestellte Schweißungen
- Oberflächenvorbereitung und -behandlung

Zudem geht aus der Checkliste hervor, dass innerhalb des Qualitätsmanagementplans ein Prüfplan erstellt werden muss. Im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit von BSA Elementen werden darin Art, Umfang, Ort und Zeitpunkt der geplanten Prüfungen festgelegt. Ausserdem werden die zu erreichenden Kriterien definiert. Zudem wird auf die entsprechenden zugehörigen Normen verwiesen. Weiter werden die Zuständigkeiten für die Kontrollen und die erforderliche Qualifikation festgelegt.

Ausserdem sind im Prüfplan die Kontrollen zu definieren, welche während der Nutzungsdauer erfolgen. Diese müssen die Erreichung der Vorgaben der Nutzungsvereinbarung sicherstellen.

11.1.2 Allgemeine Hinweise in Bezug auf den Korrosionsschutz

Es ergeben sich spezifische Aspekte, welche übergeordnet berücksichtigt werden müssen und welche Auswirkungen auf die Auswahl der Werkstoffe und des Korrosionsschutzes haben. Diese werden im Folgenden diskutiert.

Vermeiden von galvanischer Elementbildung

Sollen in einem BSA Element unterschiedliche Werkstoffe eingesetzt werden, ist darauf zu achten, dass sich keine galvanischen Elemente bilden können. Bei einer galvanischen Elementbildung kann die Korrosionsgeschwindigkeit des unedleren Metalls erheblich erhöht werden. Ungeeignet sind beispielsweise die Paarungen Nichtrostender Stahl – C-Stahl, Nichtrostender Stahl – verzinkter Stahl oder nichtrostender Stahl – Aluminium. Sollen solche Materialpaarungen eingesetzt werden, sind die Materialien galvanisch voneinander zu trennen.

Schweisverbindungen

Der Qualitätskontrolle von Schweisverbindungen kommt gemäss SN EN 1090-2:2018 im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit eine grosse Bedeutung zu. Diese Schweißungen müssen aus Qualitätsgründen möglichst schon im Werk erstellt werden. Bei Schweißungen vor Ort ist es in der Regel schwierig und sehr aufwändig eine ausreichende Qualität zu erreichen.

Grundsätzlich müssen Schweisverbindungen vollständig durchgeschweisst und spaltfrei ausgeführt werden.

In der Norm SN EN 1090-2:2018 sind Anforderungen ans Schweißen in Abhängigkeit von der Ausführungsklasse festgelegt. So werden Angaben zur Qualifizierung des Schweißverfahrens, des Schweißpersonals, Hinweise zur Vorbereitung und Ausführung gemacht sowie zu den Abnahmekriterien.

11.1.3 Hinweise für Bauteile aus nichtrostenden Stählen

Die Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Stählen wird nicht nur durch die Korrosionsbeständigkeit des Ausgangswerkstoffs bestimmt, sondern auch durch die Konstruktion und Verarbeitung. Folgende Konstruktionsbedingte und herstellungsbedingte Faktoren können die Korrosionsbeständigkeit negativ beeinflussen:

- Vorliegen von Spalten
- Durch Umformprozesse hervorgerufene Gefügeveränderungen
- Unsachgemässe Schweißungen und unzureichende Nachbehandlungen
- Produktionsbedingte Verunreinigungen auf der Oberfläche
- Beschädigungen der Oberfläche, z. B. Kratzer
- Für die Reinigung im Betrieb unzugängliche Oberflächen
- Konstruktionsbedingte Oberflächen, welche im Betrieb die Anreicherung von aggressiven Substanzen begünstigen

Durch folgende Massnahmen lässt sich eine entsprechende Beeinträchtigung der Korrosionseigenschaften vermeiden resp. erkennen:

Konstruktive Massnahmen

Bei der Konstruktion von Bauteilen ist generell zu beachten, dass möglichst keine Spalten und keine Möglichkeiten für Schmutzansammlungen vorliegen. Da Schraubverbindungen immer Konstruktionen mit ausgeprägten Spaltbedingungen darstellen, sind diese entsprechend auf ein Minimum zu beschränken. Als Alternative bieten sich in vielen Fällen Schweissverbindungen an. Bei Schweissungen an nichtrostenden Stählen muss generell eine Beizbehandlung und Passivierung vorgenommen werden. Anlauffarben im Schweissnahtbereich können unter keinen Umständen toleriert werden, da diese die Korrosionsbeständigkeit unzulässig beeinträchtigen.

Weitere Informationen zum Schweissen von nichtrostenden Stählen, z. B. der Wahl des Schweisszusatzwerkstoffs oder Hinweise zum Normenwerk, sind im Merkblatt 823 "Schweissen von Edelstahl Rostfrei" der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 4. Überarbeitete Auflage 2004, aktualisierter Nachdruck 2007 [88], gegeben.

Beizen

Verunreinigungen auf der Bauteiloberfläche oder Oxidschichten, die beim Schweissprozess entstanden sind, können die Korrosionsbeständigkeit reduzieren. Durch eine Beizbehandlung, meist mit einer Säure, werden diese Verunreinigungen und Oxidschichten entfernt. Durch eine Beizbehandlung werden zudem oberflächliche Gefügeveränderungen oder Fremdmetalleinschlüsse, wie sie bei Herstellprozessen entstehen können, beseitigt.

Beizmittelrückstände sind stark korrosive und müssen vollständig entfernt werden. Sie dürfen unter keinen Umständen auf andere Bauteile gelangen. Vorzugsweise ist anschliessend eine Passivierung der gebeizten Bauteile vorzunehmen.

Hinweise betreffend geeigneter Beizlösungen und Beizverfahren sind in der Norm ASTM A380/A380-M:2006 [70] gegeben. Diese Norm weist auch auf Prüfverfahren hin, wie der Erfolg einer Beizbehandlung beurteilt werden kann.

Das Beizen auf der Baustelle bietet gegenüber dem Beizen im Werk verschiedenen Probleme und Besonderheiten, die zu berücksichtigen sind und auch die Wahl des Beizprozesses mitbestimmen [85], [86]. Zu den Besonderheiten des Beizens auf der Baustelle gehören u.a. die Geometrie und die Zugänglichkeit der Bauteile sowie erschwerte Arbeitsbedingungen, Schutz benachbarter Bauteile, Auffangen und Entsorgung von Spülwässern. Es sind diverse gesetzliche Auflagen zu erfüllen (Bewilligungen, Lagerung der Beizmittel, Umweltschutz, Arbeitssicherheit). Die Bauteile sind so zu konstruieren, dass der Beizprozess und anschliessende Spülungen möglichst einfach durchzuführen sind.

Weitere Informationen zum Beizen gibt das Merkblatt 826 "Beizen von Edelstahl Rostfrei" der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei [89].

Passivieren

Unter Passivieren einer nichtrostenden Stahloberfläche wird eine Behandlung verstanden, die zur Bildung einer schützenden Passivschicht führt. Dazu gehört die Reinigung der Oberfläche von aggressiven Substanzen und Entfernen von auf der Oberfläche vorliegenden Eisenionen und Eisenverbindungen. Der Aufbau einer Passivschicht auf der Bauteiloberfläche wird so gefördert, was sich günstig auf die Korrosionseigenschaften auswirkt. Die negative Auswirkung von Oberflächenverletzungen durch Kratzer kann so zumindest teilweise kompensiert werden. Mögliche Passivierungsbehandlungen und Erfolgskontrollen sind in den Normen ASTM A380/A380-M-13 [69] und A967/A967M-13 [70] beschrieben. In der Schweiz wird in den letzten Jahrzehnten der ec-pen erfolgreich für die Qualitätssicherung der Verarbeitungsqualität eingesetzt. Für den Passivierungsprozess werden im Vergleich zum Beizprozess, weniger aggressive Lösungen verwendet. In der Regel sind dies salpetersäure- oder zitronensäurehaltige Lösungen. Grundsätzlich ist eine Passivierungsbehandlung bei allen Bauteilen aus nichtrostendem Stahl zu empfehlen.

Aufgrund der Schwierigkeiten einer Schweissung sowie der Nachbehandlung sind Schweissungen auf der Baustelle nach Möglichkeit zu unterlassen.

Weitere Anforderungen an den Qualitätsmanagementplan

Der Qualitätsmanagementplan muss im Hinblick auf die Sicherung der Korrosionsbeständigkeit von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl folgende Anforderungen umfassen:

- Sicherstellung, dass die an der Verarbeitung beteiligten Firmen über die notwendige Qualifikation verfügen.
- Lieferung der Werkstoffzeugnisse und von Schweisszusätzen für jede Charge von Bauteilen vor der Montage
- Definition und Nachweis der Nachbehandlung
- Definition von Prüfverfahren für die Qualitätskontrolle der Nachbehandlung durch Beizen und Passivieren zwecks Wiederherstellung Korrosionsbeständigkeit nach der Verarbeitung

Prüfung der Korrosionsbeständigkeit

Die tatsächlich vorliegende Korrosionsbeständigkeit eines Bauteils aus nichtrostendem Stahl kann nur durch entsprechende Messungen am Bauteil geprüft werden. Erfahrungsgemäss ist es sinnvoll eine solche Prüfung in der Qualifikationsphase der Bauteile aber auch von einzelnen Chargen während der Bauphase durchzuführen. Die Prüfungen sind im Prüfplan aufzunehmen und die Abnahmekriterien sind zu definieren.

Als Korrosionstest kommen die Kontrolle der Korrosionsbeständigkeit mittels Bestimmung der kritischen Lochfrastemperatur nach ASTM G48 in Frage. Alternativ kann eine Kontrolle mittels ec-pen durchgeführt werden. Dabei wird vergleichend das Lochfrasspotenzial in einer definierten Salzlösung auf dem Grundmaterial, der Schweissnaht und der Wärmeinflusszone gemessen.

Die Prüfungen sind vor der Montage der ersten Bauteile durchzuführen. Bei Kleinteilen, wie z. B. Befestigungselementen kann auch eine chargenweise Prüfung erfolgen. Bei Fertigteilen können alternativ auch entsprechende Herstellergarantien eingefordert werden.

11.1.4 Hinweise für bestimmte Bauteile

Im Zusammenhang mit der Risikobasierten Werkstoffwahl für BSA-Komponenten stellt die Absturzsicherung eine Option bei der Wahl von Werkstoffen und Korrosionsschutzsystemen dar.

Absturzsicherung

Bei Fertigung einer Absturzsicherung aus dem gleichen Material wie die Halterung des zu sichernden Elementes besteht die Gefahr, dass bei beiden parallel Korrosionseffekte auftreten und das Korrosionsschäden zeitgleich auftreten. Dieses Problem kann verhindert werden, wenn Werkstoffe mit unterschiedlichem Korrosionsverhalten und Schädigungsmechanismus verwendet werden.

Beispielsweise ist bei einer Konstruktion aus nichtrostendem Stahl die Absturzsicherung aus verzinktem Stahl zu fertigen. Die beiden Materialien haben ein unterschiedliches Korrosionsverhalten. Zudem ist bei der Absturzsicherung aus verzinktem Stahl eine visuelle Kontrolle des Korrosionszustandes z. B. der Kette möglich. Sind braune Korrosionsprodukte sichtbar, zeigt dies das Ende der Wirkungsdauer des Korrosionsschutzes aus Zink und die Absturzsicherung ist auszuwechseln. Voraussetzung für den Einsatz von Absturzsicherung sind regelmässige visuelle Kontrollen. Der Anker in der Tunneldecke, ein Element, das nicht ausgewechselt werden kann, ist aus hochlegiertem Stahl der Gruppe V nach SIA 179 [5] zu fertigen.

11.2 Empfehlungen Phase Ausführung

Generell ist darauf hinzuweisen, dass die Ausführung gemäss den Anforderungen der EN 1090-2:2018 erfolgen muss.

Bei der Ausführung ist darauf zu achten, dass die im Qualitätsmanagementplan definierten Schritte eingehalten werden. Die gegebenenfalls erforderlichen Korrekturmassnahmen müssen umgesetzt werden. Die Verantwortlichkeiten und Abläufe sind vorgängig klar zu definieren.

Werden Unternehmervarianten eingereicht, so kann die Auswahl der Werkstoffe resp. der Werkstoffklassen mit der im Forschungsprojekt erarbeiteten Methodik geprüft werden. Die Methodik ist in Kapitel 6 und 8 beschrieben. Die Auswirkungen auf den Qualitätsmanagementplan sind zu prüfen. So sind z. B. Prüfpläne und einzufordernde Nachweise und Werkstoffzeugnisse anzupassen.

11.3 Empfehlung Phase Betrieb

Hinweise für Bauteile aus nichtrostendem Stahl

Bei Bauteilen aus nichtrostendem Stahl ist darauf hinzuweisen, dass mit visuellen Kontrollen der Korrosionszustand nur bedingt erfasst werden kann. In den kritischen Bereichen, wie z. B. Spalten, ist der Korrosionszustand nicht einsehbar. Um den Korrosionszustand auch in nicht einsehbaren Bereichen zu erfassen, sind Demontagen erforderlich. Im Weiteren sind gewisse Korrosionsarten, wie z. B. Spannungsrisskorrosion von Auge nicht zuverlässig feststellbar. Dazu sind entsprechende Laboruntersuchungen erforderlich.

11.4 Fragen und Antworten aus der Praxis

Tab.28 Fragestellungen aus der Praxis

Fragestellung	Antwort, Vorgehen, Referenz
1. Spalte, Kontaktmasse	
a) Wann sind Kontaktmassen erforderlich?	U.a. falls sich konstruktionsbedingte Spalten nicht vermeiden lassen.
b) Was ist die Funktion (Abdichten, Kontakt schaffen, Verhindern von Spalten)?	In Spalten kann sich ein Mikroklima bilden, welches eine erhöhte Korrosionsverhalten. Durch das Abdichtungen wird dies verhindert/gemindert.
c) Welche Materialien/Produkte kommen für Kontaktmassen in Frage?	Mögliche Beispiele sind 1K Polyurethan, z. B. Sikaflex®-521 FC, Dinitrol 1000
d) Sind Kontaktmassen auch bei verschlossenen Hohlräumen notwendig?	Für kritische/tragende Strukturen sind Hohlräume konstruktionstechnisch zu vermeiden.
e) Wann gilt ein Spalt als kritisch (Spaltbreite) ggf. differenziert nach Werkstoff?	Sobald sich in einem Spalt Material ansammeln kann, kann sich dort ein kritisches Mikroklima einstellen.
2. Nichtrostende Stähle Vor- und Nachbehandlung	
a) Was gilt es bezüglich vor und Nachbehandlung (z. B. Beizen, Passivieren, Anlassfarben) zu berücksichtigen.	siehe Kapitel 11.1.3
b) Sind Materialzertifikate (Schmelzzeugnisse) notwendig? wenn ja wann?	3.1B Prüfzeugnis nach DIN EN 10204 sind zweckmässige Qualitätssicherungsinstrumente. Diese sollten bei der Werkprüfung bzw. der Lieferung eingefordert werden.
3. Schweißen von Nichtrostenden Stählen	
a) Was ist bei dem Zusatzmaterial zu berücksichtigen?	Es gibt keine allgemeingültige Formulierung. Schweißzusätze sind u.a. in Abhängigkeit des Schweißverfahrens definiert (u.a. gem. ISO 3581, 14343, 17633).
b) Nachbehandlung?	Es gibt keine allgemeingültige Formulierung. Die Nachbehandlung richtet sich nach dem eingesetzten Werkstoff, der Geometrie/Dicke der Konstruktion und des verwendeten Schweißverfahrens.

4. Ausbessern von Schäden bei der Feuerverzinkung	
a) Soll nur das „Ausbesserungen mit dem Flammverfahren, mit Zinkstaub und Flussmittel“ zugelassen werden? Sind weitere Verfahren zulässig wie z. B.: - Ausbesserung mit Zinklot - Ausbesserung mit Beschichtungsstoff, wenn die verwendeten Produkte und Applikation sämtliche Anforderungen an die Korrosivitätskategorie und die Schutzdauer erfüllen.	Die DIN EN ISO 1461 regelt das Ausbessern von Fehlstellen an feuerverzinkten Überzügen im Detail. Die Flächen müssen durch partielles maschinelles Schleifen oder durch lokales Strahlen vorbehandelt werden. Auf der Baustelle ist eine Ausbesserung mit Zinkstaubbeschichtungen / Zinkphosphat mittels Pinsel praktikabel. Bei der Ausbesserung eines Duplex-System kann auch ein äquivalentes organisches Beschichtungssystem verwendet werden.
5. Schweißen vor Ort bei nichtrostenden Stählen	
a) Unter welchen Bedingungen ist dies zulässig?	Die Schweißung vor Ort ist nur in Ausnahmesituationen zweckmässig und sollte vermieden werden. Kritisch beanspruchte Schweißungen müssen im Werk erfolgen.
6. Garantiekriterien für Beschichtungen	
a) Wie viele Jahre?	Die Mehrheit der Schadensfälle werden in den ersten Betriebsjahren festgestellt. Eine minimal Garantiedauer von 3 Jahren nach SIA erfüllt die Anforderung. Empfehlenswert ist eine Garantiedauer von 5 Jahren.
b) Welche Kriterien sind zweckmässig	Die Kriterien sind mit den übergeordneten Anforderungen abzustimmen. Nachfolgende Deklaration ist für übliche BSA-Elemente zielführend: - Rostgrad Ri 0 - keine Blasen, keine Risse, keine Ablösungen im Beschichtungsaufbau
7. Senzimiervverzinkte Bleche	
a) Zulässig, wenn ja wo?	Bandverzinkte Stähle sollten nur in schwach korrosionsbelasteten Innenbereichen eingesetzt werden (z. B. Kabelkanäle oder Klimatechnik). Aufgrund der geringen Zinkschichtdicke von 7–25 µm und der unbehandelten Schnittflächen ist der Korrosionsschutz nicht vergleichbar mit stückverzinkten Bauteilen.
8. Oberflächenvorbereitung	
a) Ist Sweepstrahlen nur für Pulverbeschichtung auf Feuerverzinkung notwendig oder auch bei Nassbeschichtung?	Die Vorbereitung richtet sich nach dem vorgesehenen Beschichtungssystem. Es kann davon ausgegangen werden, dass für beide Verfahren eine Vorbereitung benötigt wird.
b) Ist die Oberflächenvorbereitung zu definieren?	Für Duplexsysteme klassischer BSA-Elemente soll die Oberflächenvorbehandlung durch Sweepstrahlen erfolgen. Die nach Norm zulässige chemische Vorbereitung ist gemäss Erfahrung (vgl. Kap. 4.1) mit erhöhten Risiken verbunden.
9. Ausbessern von kleinen Beschichtungsschäden	
a) Was sind Beschichtungsstoffe, welche zum Ausbessern vor Ort geeignet sind?	Eine beschädigte Verzinkung kann mit Zinkphosphat (erhöhten Bindemittelanteil gegenüber Zinkstaub bietet Vorteile in der Applikation) ausgebessert werden. Idealerweise wird im Anschluss eine 2-K Beschichtungen analog dem Originalaufbau verwendet. Sind die auszubessernden Stellen nur 1-mal zugänglich oder ist Personal ohne Erfahrung mit 2-K Produkten vorgesehen kann 1-K Produkte appliziert werden. Insb. bei 1-K Produkten ist auf die Eignung einer Applikation auf Zink zu achten (Stichwort Zinkverseifung).
b) Welches sind tolerante Beschichtungsstoffe?	Tolerante Beschichtungen sind für die Applikation auf «grob gereinigten» Flächen geeignet. Produkte, welche für Handentrostete Flächen freigegeben wurden oder sich dafür eignen sind u.a. Sika Cor Poxicolor Primer HE, Sika Cor 6630, Eclatin Eclon EP OT, COROPUR 1K-FH Haft- und Isoliergrund.
c) Vorgehen (Vorbehandlung, Applikation, ...)?	1) Vorbehandlung: Salze und artfremde Verunreinigungen entfernt.

	2) Schleifen: ideale Entrostung mit maschinellen rotierenden Schleifmittel: Pma (sauber blank geschliffener Untergrund). Falls nicht stark belastet oder ein maschinelles Schleifen nicht möglich ist kann eine Handentrostung bis ST3 angewendet werden. Taupunkt und Zwischentrocknungszeiten sowie und Schichtdicken sind zu beachten/einzuhalten und zu protokollieren.
10. Epoxi als Deckschicht	
a) Ist die bei Anwendungen ohne UV-Exposition sinnvoll, resp. vorteilhaft gegenüber PUR? In Tunnelanwendung ist keine UV-Strahlung vorhanden, daher ist das «Kreiden» kein kritische Faktor.	Epoxi als Deckschichtung funktioniert grundsätzlich gut. Als abstrahierter Grundsatz: Epoxy ist beständiger gegen Laugen, PU ist beständiger gegen sauren Umgebungen. Daraus abgeleitet: PU für saurer Regen, UV-Strahlung. Die Epoxi Deckschicht ist nicht farbecht. Eine übermässig schnelle Zerstörung durch UV ist dennoch nicht zu erwarten (und entspräche eher einem optischen Makel).
11. Kontrollplan, Protokollierung	
a) Was soll / kann vom UN bezüglich Tests, Protokollierung, verlangt werden?	Vgl. Kapitel 11.1.1. In der Ausschreibung sind die minimalen an den Prüfplan sowie der Umfang der Prüfungen zu spezifizieren. Zu Beginn der Ausführung ist der bereinigte und detaillierte Prüfplan vom Unternehmer einzufohren.
12. Abnahme	
a) Was soll / kann gemessen werden? Typischerweise ist es die Schichtdicke. Was ist mit anderen Verfahren (u.a. Gitterschnitt, Keilschnitt, Stempel)?	Bei der Abnahme sollte die Schichtdicke zwingend gemessen werden. Weitere Prüfungen sind im Vorfeld mit dem Lieferanten zu definieren. Dabei kann eine Begleitplatte mit beschichtet werden, an welcher Abrissprüfungen ausgeführt werden, um Beschädigungen am Bauteil zu vermeiden. Die Ausführung ist empfehlenswert.
13. Zugelassene Beschichtungssysteme	
a) Sollen nur geprüfte und zugelassene Beschichtungssysteme gemäss SN EN ISO 12944-6 angewendet werden (gem. 23001-12121 Kontrollplan Werkstoffwahl und Korrosionsschutz)?	Für Stahlbauten entsprechen zertifizierte Beschichtungssysteme gemäss den „Technischen Lieferbedingungen und Technischen Prüfungsvorschriften für Korrosionsbeschichtungssysteme für Stahlbauten“ dem Stand der Technik. Ein Anwendung im BSA-Umfeld ist zweckmässig für Elemente mit einer kritischen Zugänglichkeit wie Signalträger, Strahlventilatoren. Dabei ist insb. das Blatt 87 der TL/TP-KOR relevant.
14. Duplex-Stähle bei hohen Temperaturen	
a) Sind Duplexstähle z. B. 1.4462 für kritische Aufhängungen im Tunnel zweckmässig?	Bei Duplexstählen (u.a. 1.4462) ergibt sich bei erhöhten Temperaturen (ab 250°C) einer Minderung der Festigkeit und der Korrosionsbeständigkeit aufgrund von Versprödung. Bei einer Brandexposition sind solche Bauteile daher speziell zu prüfen. Die erhöhten Anforderungen an den Herstellprozess (u.a. korrekte Schweissanweisungen) sind Beachtung zu schenken.

12 Empfehlungen zu Normen und Regelwerken

12.1 Empfehlungen zum Umgang mit den gängigen Normen und Regelwerken

12.2 Hinweise zur Anwendung der SIA Norm 179, Kapitel 2.31

In Kapitel 0 der Norm SIA 179:1998 ist der Geltungsbereich festgelegt. Sie gilt demnach für Befestigungen von Bauteilen aus beliebigen Werkstoffen in Untergründen aus mineralischen Baustoffen. Im Vergleich zur Vorgängernorm SIA 179:1998 wurde der Geltungsbereich explizit ergänzt durch:

- Nachträglich installierte Metalle Dübel aus Kohlenstoffstahl, nichtrostendem Stahl oder verformbaren Gusseisen
- Eingelegte Befestigungselemente aus Kohlenstoffstahl oder nichtrostendem Stahl
- Kunststoffdübel aus Polymerwerkstoff
- Setzbolzen aus Vergütungsstahl oder hochfesten nichtrostenden Stählen

Explizit vom Geltungsbereich ausgenommen werden (vgl. ebenfalls Kapitel 0):

- Verbindungen von in der gleichen Bauweise erstellten Bauteilen
- Boden- und Felsanker zur Einleitung von Zugkräften in den Baugrund
- Klebeverbindungen mit dem Untergrund
- Befestigungen in Schutzbauten und Kraftwerken
- Einlegeteile, die nur dem vorübergehenden Einsatz während des Hebens und Transportierens von Fertigteilen (vorfabrizierten Elementen) dienen.
- Nachträglich an bestehenden Bauteilen erstellte Bewehrungsanschlüsse aus Betonstahl, deren Bemessung erfolgt gemäss SIA 262.

Dies bedeutet, dass z. B. die Befestigung eines Strahlventilators in der Tunneldecke in den Geltungsbereich der Norm fällt, das Verbindungselement z. B. zwischen Halterung und Gehäuse jedoch nicht.

Im Weiteren wird in Absatz 0 12 zum Geltungsbereich der Norm festgehalten: "Sie gilt für diejenigen Befestigungen, bei denen ein Versagen eine Gefährdung von Personen oder schwerwiegende Sachschäden zur Folge hat."

Die bedeutet, dass z. B. die Befestigung eines Strahlventilators, die beim Versagen eine Gefährdung von Personen zur Folge hat, in den Geltungsbereich der Norm fällt. Die Befestigung einer Beschriftungstafel, die an der Tunnelwand montiert ist und die beim Herunterfallen keine Personengefährdung oder schwerwiegende Sachschäden zur Folge hat, fällt jedoch nicht in den Geltungsbereich dieser Norm.

Das Thema Korrosion wird im Kapitel 2.3 Dauerhaftigkeit behandelt.

Das massgebende Klima wird behandelt. Es wird unterschieden zwischen Ortsklima, Raumklima und Mikroklima (Kleinklima). Es wird auf die wesentliche Bedeutung des Kleinklima im Nahbereich der Befestigungen hingewiesen.

In der Norm ist eine Tabelle mit den Korrosivitätskategorien gemäss SN EN ISO 12944-2 mit Beispielen für typische Umgebungen aufgeführt. Tunnel des Strassenverkehrs werden der Kategorie C5-I (sehr stark) zugeordnet.

Die nichtrostenden Stähle werden in 5 Korrosionswiderstandsklassen (KWK) eingeteilt. Diese Klassifizierung erfolgt im Wesentlichen anhand des Molybdängehaltes. Der Molybdängehalt wiederum geht entscheidend in der Wirksumme ein. Alle aufgeführten nichtrostenden Stähle in einer Gruppe weisen eine vergleichbare Beständigkeit gegenüber Lochfrass und Spaltkorrosion auf. Diese Einteilung entspricht auch der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-30.3-6 vom 22.04.2014.

Ein Vergleich mit der Vorgängernorm SIA:1998 zeigt, dass die Gruppe I neu der KWK II entspricht, Gruppe II der KWK III, usw. Die Gruppe V entspricht neu der KWK V. Neu dazugekommen ist die KWK I, in der ferritische Stähle, wie z. B. 1.4003, aufgeführt sind.

Bei Vorliegen von aggressiven Medien, wie sie z. B. in Tunnels auftreten können, werden nichtrostende Stähle der KWK V als gut geeignet, und solche der KWK IV als bedingt geeignet, bezeichnet. Die im Projekt durchgeführte Auswertung von Schadensfällen, die Auswertung von Betreiberumfragen und die eigenen Erfahrungen und Kenntnisse ergaben, dass diese Materialempfehlung für Befestigungselemente, die in den Geltungsbereich der Norm SIA 179:2019 fallen, korrekt ist. Aus unserer Sicht besteht daher kein Anpassungsbedarf der SIA 179 betreffend Materialwahl im Strassentunnel.

12.3 Hinweise zum ASTRA Merkblatt

Es bestehen keine grundlegenden Widersprüche zwischen dem ASTRA Merkblatt und den Schlussfolgerungen des vorliegenden Forschungsberichts. Wesentliche Abweichungen sind die folgenden:

Die Korrosivitätskategorie ist in der vorliegenden Ausgabe auf C5 beschränkt. Die Einführung der Korrosivitätskategorie CX gemäss SN EN ISO 12944-2 wäre basierend auf den vorliegenden Diskussionen sinnvoll.

In der Korrosivitätskategorie C5 sind auch Verbindungselemente in Stahl feuerverzinkt und beschichtet (Duplex-System) zugelassen. Mit den aktuell vorliegenden Empfehlungen Verbindungselemente nur in nichtrostendem Stahl zuzulassen, wird im vorliegenden Dokument von der Spezifikation des ASTRA Merkblatts abgewichen.

Tatsächlich ermöglicht die hier vorgeschlagene Vorgehensweise auf Basis einer Risikobetrachtung auch den Einsatz von Verbindungselementen auf Basis eines Duplex Systems. Voraussetzung dafür ist jedoch die Beurteilung des daraus resultierenden Risikos und das Treffen von angemessenen Massnahmen zu dessen allfällig erforderlichen Reduktion.

Folglich bestehen keine grundlegenden Konflikte. Die Übernahme der hier vorgeschlagenen risikobasierten Vorgehensweise ins ASTRA Merkblatt wäre bei einer nächsten Revision des Dokuments zu prüfen.

Anhänge

I	Analyse IST Situation – Detailauswertungen Schadenfälle	141
I.1	Analyse IST-Situation	141
I.1.1	Liste der betrachteten Schadensfälle	141
I.1.2	Auswertung der betrachteten Schadensfälle	142
II	Abbildungen	145
II.1	Abbildungen Kapitel 4	145
II.1.1	Abbildungen Kapitel 4.1	145
II.1.2	Abbildungen Kapitel 4.3	148

I Analyse IST Situation – Detailauswertungen Schadenfälle

I.1 Analyse IST-Situation

I.1.1 Liste der betrachteten Schadensfälle

Nr	Anlage	Korrosions-schutz	Installation	Feststellung	Schadensbild	Klassierung	Ursache	Alter der Anlage bis Feststellung	Kanton	Objekt	Verkehrsart	Verkehrsaufkommen
001	Strahlventilator	Duplex-System	2009	2010	Ablösung der organischen Beschichtung	Mangel	Fehlerhafte chem. Vorb. vor Pulverbesch.	1-3 Jahre	ZH	Tunnel Uetliberg	RV ≥2-spurig	hoch
002	Strahlventilator	Duplex-System	2010	2013	Ablösung der organischen Beschichtung	Mangel	Fehlerhafte Vorb. vor Pulverbesch., chem. Vorbereitung	1-3 Jahre	ZH	Tunnel Gubrist	RV ≥2-spurig	sehr hoch
003	Strahlventilator	Duplex-System	2002	2004	Ablösung der organischen Beschichtung	Mangel	Fehlerhafte Vorb. Vor Pulverbesch.	1-3 Jahre	ZH	Tunnel Entlisberg	RV ≥2-spurig	hoch
004a	Strahlventilator	Duplex-System	2005	2013	Ablösung der organischen Beschichtung	k. Mangel	Schutzdauer der orang. Beschichtung erreicht, k. Mangel	7-9 Jahre	ZH	Tunnel Entlisberg	RV ≥2-spurig	hoch
004b	Strahlventilator	Duplex-System	2006	2013	Ablösung der organischen Beschichtung	k. Mangel	Schutzdauer der orang. Beschichtung erreicht, k. Mangel	7-9 Jahre	ZH	Tunnel Hafnerberg	RV ≥2-spurig	hoch
005	Strahlventilator	Duplex-System	2009	2014	punktueller Ablösung der organischen Beschichtung	k. Mangel	unklar...	4-6 Jahre	ZH	Tunnel Islisberg	RV ≥2-spurig	hoch
006	Abluftklappen	1.4571	2001	2011	Lochkorrosion	k. Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	10 Jahre	UR / TI	Gotthard Strassent.	GV	mittel
007	Brandklappen	1.4571	2009	2013	Spalt- und Lochkorrosion	k. Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	4 Jahre	ZH	Uetlibergtunnel	RV ≥2-spurig	mittel
008	Signalträger	Duplex-System	2007	2011	Korrosionsprodukte (Zink), Ablösung organ. Beschichtung	Mangel	zu schwaches Korrosionsschutzsystem	4-6 Jahre	ZH	Tunnel Entlisberg	RV ≥2-spurig	hoch
009	Strahlventilator	Aluminium-Guss	?	2015	Schaufelbruch Laufschaufel	Mangel	zu geringe Korrosions-beständigkeit (Nickel-Anteil)	1-3 Jahre	JU	Div. Tunnel	GV	gering
010	Strahlventilator	Edelstahl (1.4571)	2005	2013	Lochfrasskorrosion Schalldämpfer	k. Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	7-9 Jahre	ZH	Tunnel Bubenholz	RV ≥2-spurig	mittel
011	Strahlventilator	AlSi12 - Guss	1988	1993	Starke Korrosionsangriffe	Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend, schlechte Gussqualität	5 Jahre	SG	Tunnel Quarten	RV ≥2-spurig	mittel
012	Lampengehäuse	AlSi13+Thermolackierung	1981	1993	Korrosionserscheinungen bis ca. 50 µm Tiefe	k. Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	12 Jahre	NW/UR	Seelisbergtunnel	RV ≥2-spurig	mittel
013	Befestigungselement	1.4529	2009	2009	Deutlich reduzierte Beständigkeit	Mangel	Reduzierte Beständigkeit der Oberflächenschicht	0 Jahre	NW	Kirchenwaldtunnel	RV ≥2-spurig	mittel
014	Brandklappen	1.4571	2006	2011	Lochkorrosion	k. Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	5 Jahre	ZH	Aeschertunnel	RV ≥2-spurig	mittel
015	Befestigungselement	Gruppe I nach SIA 179	1985	2003	Spalt- und Lochkorrosion	Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	18 Jahre	ZH	Tunnel Gubrist	RV ≥2-spurig	sehr hoch
016	Befestigungselement	Gruppe II nach SIA 179	1985	2003	Spaltkorrosion	kein Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	18 Jahre	ZH	Tunnel Gubrist	RV ≥2-spurig	sehr hoch
017	Strahlventilatoren Befestigungselement	Gruppe II nach SIA 179	1987	1993	Spalt- und Lochkorrosion, Spannungsrisskorrosion	Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	6 Jahre	SG	Tunnels Walensee	RV ≥2-spurig	mittel
018	Strahlventilatoren Lochblech	Nichrostender Stahl	1987	1993	geringfügige Korrosionserscheinungen	k. Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	6 Jahre	SG	Tunnels Walensee	RV ≥2-spurig	mittel
019	Lampengehäuse Kerenzerbergtunnel	Aluminium-Guss	1986	2017	starke Korrosionserscheinungen am Gehäuse	Mangel	Beständigkeit nicht ausreichend	31 Jahre	SG	Kerenzerbergtunnel	RV ≥2-spurig	mittel
020	Strahlventilator	Aluminium EN AC-48000	2007	2015	Bruch Rotorschaukel aus Aluminium-Guss	Mangel	zu geringe Korrosionsbeständigkeit (gemäss Datum Beurteilung)	8 Jahre	-	-	GV	-

Abb. 22: Liste der betrachteten Schadensfälle

I.1.2 Auswertung der betrachteten Schadensfälle

Nr	BSA-Element	Schadensbild	Korrosionssystem		Gefährdungsanalyse (Lebensdauer 25 Jahre)		
			Werkstoff	Medium	Tragweite	Häufigkeit	Entdeckbarkeit
Strahlventilator							
010	Schalldämpfer	Lochkorrosion Schalldämpfer	1.4571	Tunnel-atmosphäre	zurzeit keine Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben	1 Fall untersucht	visuell bei Revision, wenn vollständig durchkorrodiert
011	Laufgrad	starke Korrosionsangriffe	AlSi12 Guss	Tunnel-atmosphäre	hohe Gefährdung, Bauteil muss ersetzt werden	1 Fall untersucht	bei Revision, genaues Ausmass der Korrosion durch Laboruntersuchungen feststellbar
017	Befestigungselemente (Schraube am Bauteil)	Lochkorrosion, Spannungsrisskorrosion	nichtrostender Stahl der Gruppe II nach SIA179 (A4 Schraube)	Tunnel-atmosphäre	Befestigungselement muss ersetzt werden	1 Fall mit Spannungsrissskorrosion	im Labor
018	Lochblech	Spalt- und Lochkorrosion im Bereich der Nieten	nichtrostender Stahl der Gruppe II nach SIA179 (A4 Schraube)	Tunnel-atmosphäre	zurzeit keine Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben	mehrere Fälle untersucht	visuell
020	Rotorschaukel	Spannungsrisskorrosion	Aluminium EN AC-48000	Tunnel-atmosphäre	-	1 Fall untersucht	bei Revision, genaues Ausmass der Korrosion durch Laboruntersuchungen feststellbar
Lampen							
012	Gehäuse	Korrosionsangriffe bis ca. 50 µm Tiefe	AlSi13 + Beschichtung	Tunnel-atmosphäre	geringe Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben, Bauteil muss nicht ersetzt werden		visuell, genaues Ausmass der Korrosion durch Laboruntersuchungen feststellbar
019	Gehäuse	starke Korrosionsangriffe, Elementbildung mit Bauteilen aus nichtrostendem Stahl	Aluminiumguss mit Beschichtung	Tunnel-atmosphäre	für weitere Nutzung zusätzliche Sicherungen erforderlich	Lampen im Einfahrts- / Adaptionsbereich	visuell, im Labor
Befestigungselemente							
013	Schrauben, Muttern	reduzierte Korrosionsbeständigkeit an der Oberfläche	1.4529	Tunnel-atmosphäre	hohe Gefährdung, Bauteil muss ersetzt / behandelt werden	1 Fall untersucht	Laboruntersuchungen erforderlich
015	Befestigungselemente (Schrauben, Muttern am Bauteil)	starke Spalt- und Lochkorrosion	nichtrostender Stahl der Gruppe I nach SIA179 (A2 Schrauben)	Tunnel-atmosphäre	Befestigungselement muss ersetzt werden	-	visuell, im Labor
016	Befestigungselemente (Schrauben, Muttern am Bauteil)	Spalt- und Lochkorrosion	nichtrostender Stahl der Gruppe II nach SIA179 (A4 Schrauben)	Tunnel-atmosphäre	zurzeit keine Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben, Entwicklung muss beobachtet werden	-	visuell, im Labor
Abluftklappe							
006	Klappenrahmen, Klappenlamellen	Lochkorrosion	nichtrostender Stahl, vermutlich 1.4571	Tunnel-atmosphäre	zurzeit keine Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben, Entwicklung muss beobachtet werden	-	visuell, nach Trockeneisreinigung
007	Klappenrahmen, Klappenlamellen	Spalt- und Lochkorrosion	1.4571	Tunnel-atmosphäre	zurzeit keine Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben, Entwicklung muss beobachtet werden	-	visuell
014	Klappenrahmen, Klappenlamellen	Spalt- und Lochkorrosion	1.4571	Tunnel-atmosphäre	zurzeit keine Gefährdung, Funktionsfähigkeit gegeben, Entwicklung muss beobachtet werden	-	visuell

Nr	Beurteilung			
	Wieso ist es zum Schaden gekommen?	Wie hätte der Schaden verhindert werden können?	Was kann aus dem Schaden gelernt werden?	Wo liegen die Unterschiede zu vergleichbaren Situationen ohne
Strahlventilator				
010	ungenügende Beständigkeit	andere Materialwahl	Kondenswasseransammlungen im Innern sind so aggressiv, dass 1.4571 nicht ausreichend beständig	-
011	schlechte Gussqualität, Werkstoff in Tunnelatmosphäre bedingt beständig	andere Materialwahl, allenfalls Beschichtung der Laufräder, Qualitätskontrolle Material	Qualitätskontrolle und Materialwahl / Korrosionsschutzsystem sind wichtig	andere Situationen wurden nicht untersucht, vermutlich bessere Materialqualität
017	ungenügende Beständigkeit	Einsatz eines Stahles mit grösserer Wirksumme	Das Auftreten von Spannungsrissskorrosion bei Befestigungselementen aus der Gruppe II nach SIA179 kann im Tunnel nicht vollständig ausgeschlossen werden	Möglicherweise spielen die im vorliegenden Fall ausgeprägten Spaltbedingungen eine Rolle
018	zurzeit kein Schaden, Werkstoff, insbesondere im Spaltbereich in der gegebenen Exposition nicht korrosionsbeständig	Einsatz eines Stahles mit grösserer Wirksumme	-	-
020	ungeeigneter Werkstoff	andere Materialwahl	an Rotorschaukeln aus Aluminium kann Spannungsrissskorrosion auftreten	vermutlich andere Materialwahl und anderes Design
Lampen				
012	kein Schaden	kein Schaden	bei aggressiven Bedingungen deutliche grösserer Angriffstiefe möglich, Al Bauteile ohne Beschichtung sind in Tunnelatmosphäre nicht voll beständig	-
019	Lebensdauer des Systems ist erreicht	anderer Werkstoff	Kombination Aluminium - nichtrostender Stahl kann den Korrosionsfortschritt infolge Elementbildung deutlich erhöhen	Kombination Aluminium - nichtrostender Stahl
Befestigungselemente				
013	vermutlich falsche Verarbeitung	korrekte Verarbeitung	korrekte Verarbeitung und Qualitätskontrolle ist entscheidend	korrekte Verarbeitung
015	Einsatz von Stahl mit ungenügender Beständigkeit	Einsatz eines Stahles mit grösserer Wirksumme	Befestigungselemente aus der Gruppe I nach SIA179 weisen im Tunnel eine ungenügende Beständigkeit auf	Stahl weist im Gegensatz zu anderen Fällen eine zu tiefe Wirksumme auf.
016	zurzeit kein Schaden	-	Befestigungselemente aus der Gruppe II nach SIA179 weisen im Tunnel eine höher Beständigkeit auf als Elemente der Gruppe I. Der Korrosionsfortschritt ist geringer, doch auch Befestigungselemente der Gruppe II weisen eine "endliche" Lebensdauer auf. Häufig tritt Spaltkorrosion auf.	-
Abluftklappe				
006	zurzeit kein Schaden, Werkstoff, insbesondere im Spaltbereich in der gegebenen Exposition nicht korrosionsbeständig	kein Schaden, Korrosionserscheinungen können durch Wahl eines höher legierte Werkstoffes vermieden werden	-	-
007	zurzeit kein Schaden, Werkstoff, insbesondere im Spaltbereich in der gegebenen Exposition nicht korrosionsbeständig	kein Schaden, Korrosionserscheinungen können durch Wahl eines höher legierte Werkstoffes vermieden werden	-	-
014	zurzeit kein Schaden, Werkstoff, insbesondere im Spaltbereich in der gegebenen Exposition nicht ausreichend beständig	kein Schaden, Korrosionserscheinungen können durch Wahl eines höher legierte Werkstoffes vermieden werden	-	-

II Abbildungen

II.1 Abbildungen Kapitel 4

II.1.1 Abbildungen Kapitel 4.1



Abb. 23 Aeschertunnel Brandklappe, Schraubverbindung



Abb. 24 Aeschertunnel Brandklappe, Lamellenunterseite

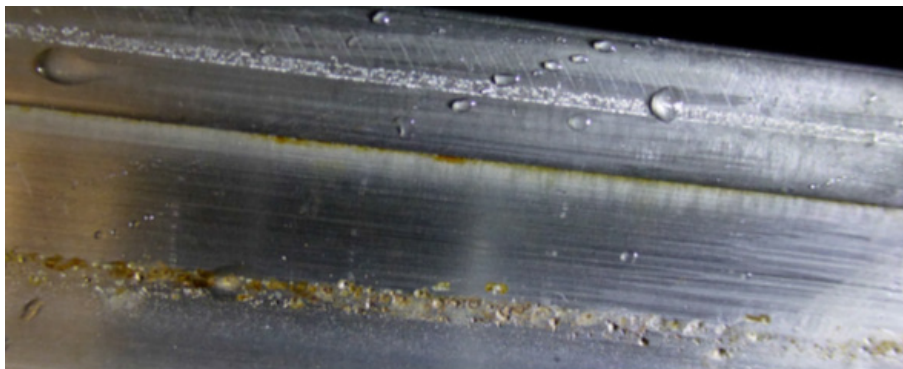


Abb. 25 Uetlibergtunnel Abluftklappen, Korrosionserscheinungen im Falz und bei der Kontaktfläche

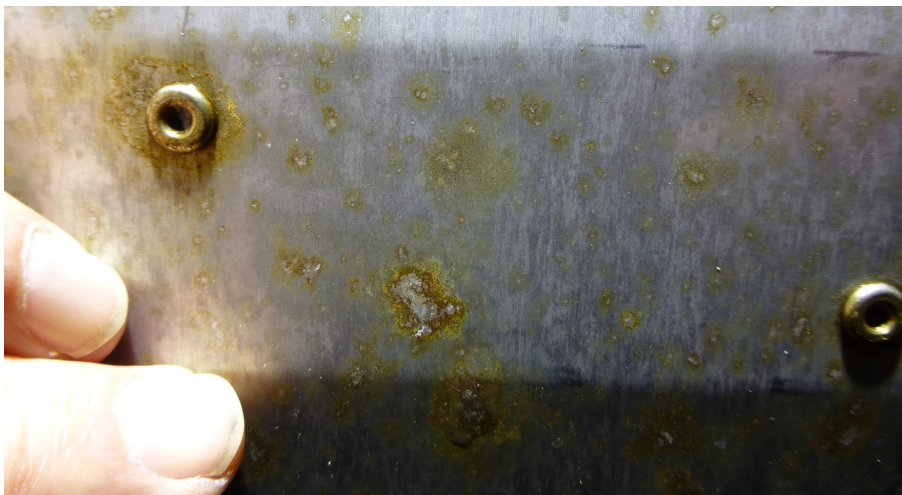


Abb. 26: Uetlibergtunnel Abluftklappen, Blechoberfläche Fahrbahnseite



Abb. 27: Gotthardstrassentunnel Abluftklappen, Schmutzablagerungen



Abb. 28 Gotthardstrassentunnel Abluftklappen, Korrosionsangriffe sind sichtbar nach Reinigung einer Lamelle

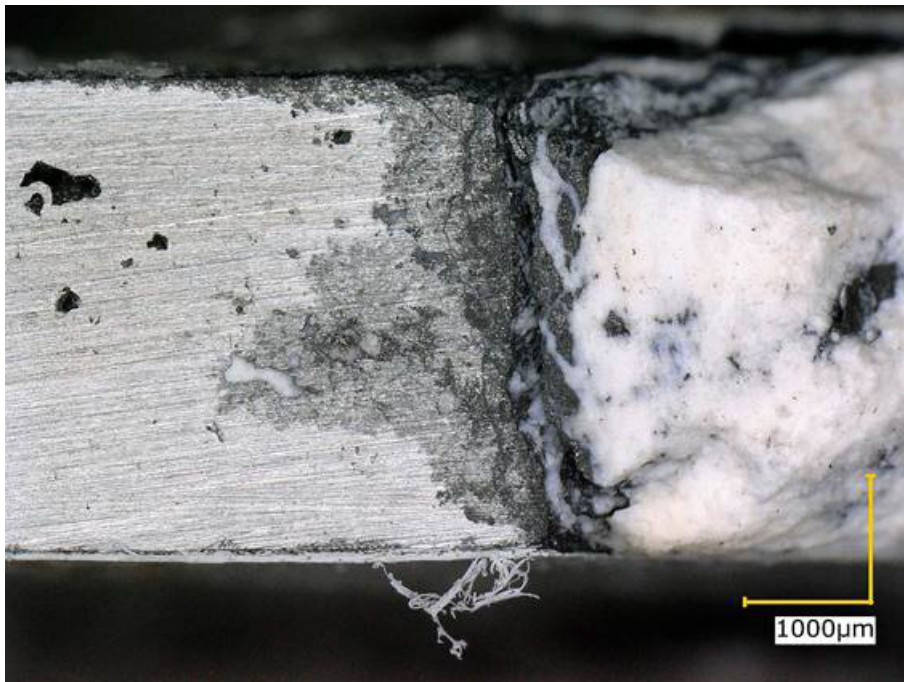


Abb. 29 Tunnel Kerenzerberg, Befestigungslasche am Alugehäuse, Korrosion ausgehend vom Lochrand (rechts im Bild)

II.1.2 Abbildungen Kapitel 4.3

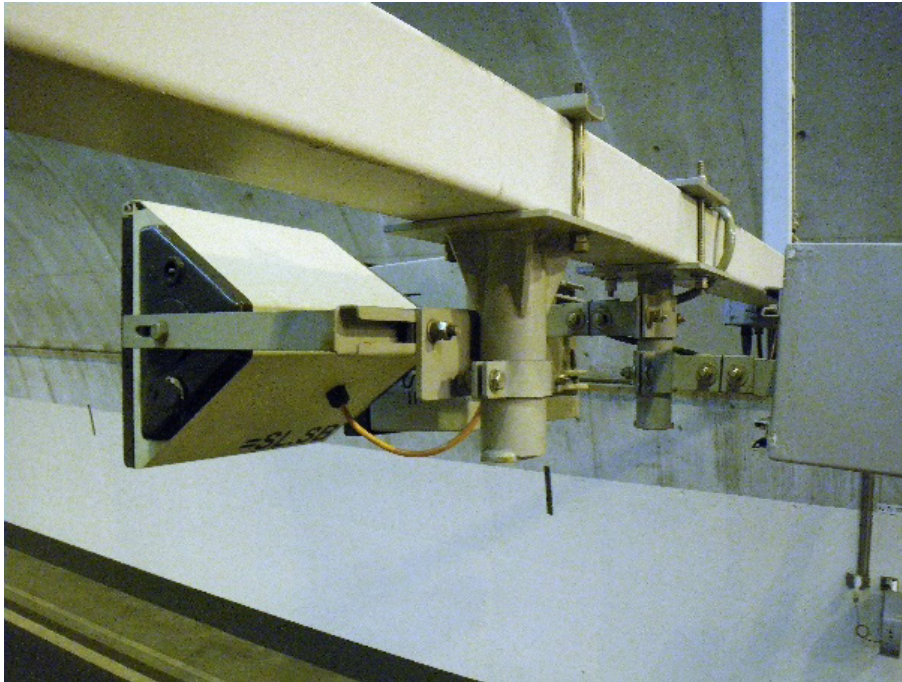


Abb. 30 Tunnel Entlisberg, Signalträger aus beschichtetem nichtrostenden Stahl, auf dem Bild sichtbare Schrauben aus 1.4529 / 1.4539, generell guter Korrosionszustand

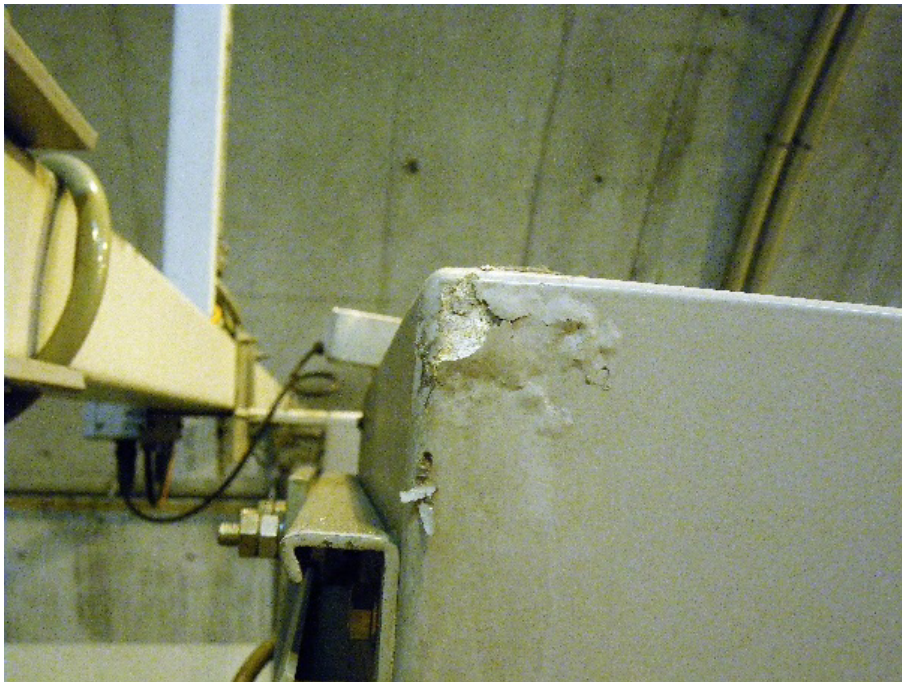


Abb. 31 Tunnel Entlisberg, Lampengehäuse aus Alu. Ablösungen und Blasenbildung der Beschichtung ausgehend von den Ecken und Kanten



Abb. 32 Tunnel Entlisberg, Schraube aus 1.4529, Korrosionsprodukte im Spaltbereich beim Übergang zum beschichteten nichtrostenden Stahl



Abb. 33 Tunnel Entlisberg, Kabeltrasse 1.4571 mit Halterung von unten, Korrosionsprodukte bei Spaltsituationen

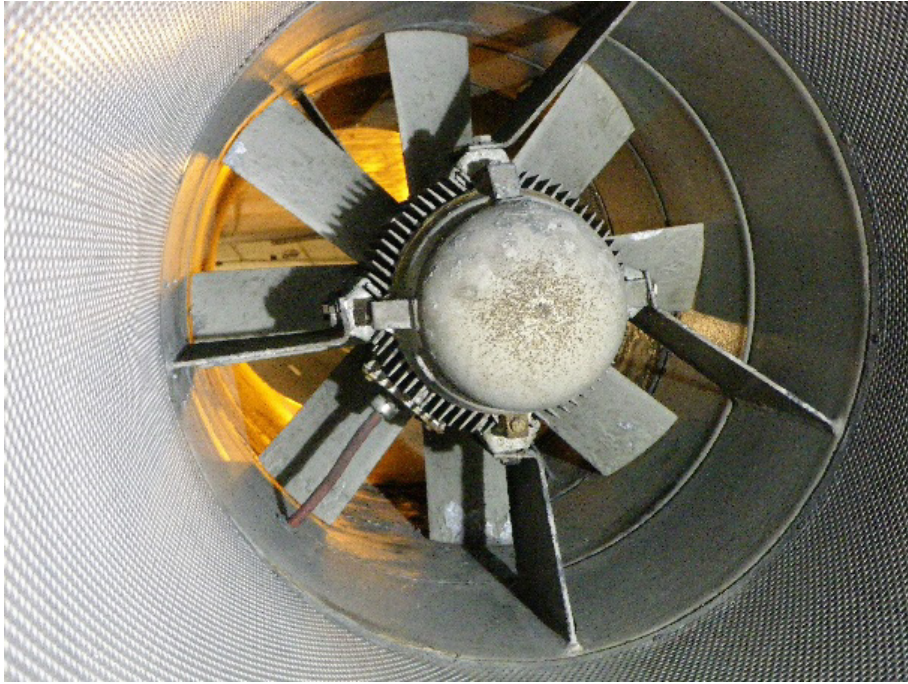


Abb. 34 Tunnel Entlisberg, Blick auf Rotor und Lochblech (SV24), Lochblech insgesamt in gutem Zustand



Abb. 35 Tunnel Entlisberg, Detail Rotor SV24, Abplatzung der Beschichtung, weisse Produkte sichtbar



Abb. 36 Tunnel Entlisberg, Aufhängung Strahlventilator, Befestigungselement aus 1.4529, dunkel verfärbt

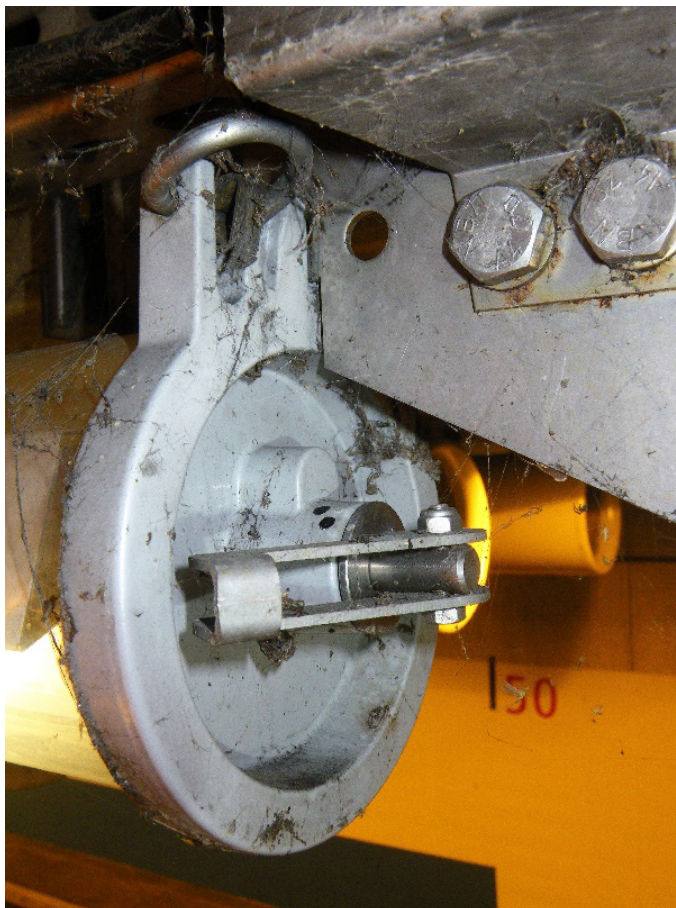


Abb. 37 Tunnel Entlisberg, Leuchte, seitlicher Leuchtendeckel aus Alu. Verschluss und Splint: keine Korrosionsangriffe sichtbar, bei Durchführung Splint wenig Alu Korrosionsprodukte vorhanden. Korrosionsprodukte sind im Spaltbereich der A4 Schrauben sichtbar (rechts oben im Bild)



Abb. 38 Tunnel Buchrain, Aufhängekonstruktion des Strahlventilators mit Absturzsicherung



Abb. 39 Tunnel Buchrain, Korrosionsprodukte im Spaltbereich bei einer Schraubverbindung am Gehäuse des Strahlventilators



Abb. 40 Tunnel Buchrain, Korrosionsangriffe unten am Schalldämpfer

Glossar

Begriff	Bedeutung
AISI	American Iron and Steel Institute
Alternativroute	Alternative zu einer Stammroute. Die Stammroute bleibt befahrbar.
ASFiNAG	Strassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft ASFiNAG
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTRA	Bundesamt für Strassen
ATS	Allgemeine technische Spezifikationen
BAST	Bundesanstalt für Strassenwesen
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA)
BZ	Betriebszustand (BZ) Bezeichnet den Signalisationszustand; beziehungsweise die Anzeigen auf mehreren zusammengehörenden Aktoren.
CC	Schadensfolgeklassen
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
CPT	Kritische Temperatur (Critical Pitting Temperature)
CX	Korrosionsschutzkategorie
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
EMPA	Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GV	Gegenverkehr
HV-Garnituren	Hochfeste vorspannbare Garnituren (Schraubverbindungen)
ISO	Internationale Organisation für Normung
IBWK	Institut für Baustoffe, Werkstoffe und Korrosion
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
Kfz-Gitter	Kubisch-flächenzentriertes (Gitter)
KWK	Korrosionswiderstandsklassen
KLZ	Kantonale Leitzentrale (KLZ)
LCC	Life Cycle Costing
LW-Anteil	Lastwagenanteil
MTBF	Mean Time Between Failures
NRN	Notrufnischen
QS	Qualitätssicherung
RPH	Realisierungspflichtenheft
RDS-TMC	Radio Data System – Traffic Message Channel (RDS-TMC)
RV	Richtungsverkehr
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Strassenwesen
SC	Beanspruchungskategorien

SGK	Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
SSV	Signalisationsverordnung (SSV)
SV	Strahlventilatoren
Stammroute	Signalisierte Route, wo der Betriebszustand der Grundzustand ist.
TM	Technisches Merkblatt
TOW	Time of Wetness
TL/TP-KOR	Technischen Lieferbedingungen und Technischen Prüfungsvorschriften für Korrosionsbeschichtungsstoffe für Stahlbauten
Umleitungsrout	Umleitung zu einer Stammroute. Die Stammroute ist nicht mehr befahrbar oder die Verlustzeit ist grösser als der Umweg über eine verfügbare Umleitungsrout.
UPlaNS-	Unterhaltsplanung Nationalstrassen
VM-CH	Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH)
VMP	Verkehrsmanagementplan (VMP)
VMZ-CH	Verkehrsmanagementzentrale Schweiz (VMZ-CH)
VTV	Verkehrsfernsehen
RLZ	Regionale Leitzentrale (RLZ)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
WTA	Wechseltextanzeige (WTA)
WWW	Wechselwegweisung (WWW)
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

Literaturverzeichnis

Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA, Richtlinie „**Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen**“, 12001: 2005
- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA, Dokumentation „**Risikokzept für Tunnel der Nationalstrassen – Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Risiken in Tunneln**“, 89005, Ausgabe 2014 V1.00

Normen

- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Allgemeine Bedingungen für Stahlbau**“, Norm SIA 118/263.
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1998), „**Befestigungen in Beton und Mauerwerk**“, Norm SIA 179.
- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2017), „**Befestigungen in Beton und Mauerwerk**“, Entwurf prSIA 179:2017-11. Anmerkung: ersetzt durch 179:2019
- [6] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Grundlagen der Projektierung von Tragwerken**“, Norm SIA 260.
- [7] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Stahlbau**“, Norm SIA 263.
- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Stahlbau Ergänzende Festlegungen**“, Norm SIA 263/1.
- [9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2011), „**Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken**“, Norm SIA 269.
- [10] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1998), „**Sicherheiten von Bauten und Anlagen**“, Norm SIA 465.
- [11] Schweizer Norm (2014), „**Nichtrostende Stähle**“, SN EN 10088.
- [12] Schweizer Norm (2009), „**Feuerverzinken**“, SN EN ISO 1461.
- [13] Schweizer Norm, „**Korrosion von Metallen und Legierungen – Korrosivität von Atmosphären – Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung**“, SN EN ISO 9223: 2012-06
- [14] Schweizer Norm, „**Hochbau – Fugendichtstoffe – Bestimmung des Haft- und Dehnverhaltens von Dichtstoffen nach Einwirkung von Wärm, Wasser und künstlichem Licht durch Glas**“, SN EN ISO 11431
- [15] Schweizer Norm (2018/ 2020), „**Korrosionsschutz von Stahlbauten**“, SN EN ISO 12944 Teil 1-8
- [16] Schweizer Norm (1998/ 2005), „**Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)**“, SN EN 50126
- [17] Europäische Norm, „**Metallische und andere anorganische Schichten Definitionen und Festlegungen, die die Schichtdicke betreffen**“, EN ISO 2064: 2000
- [18] Europäische Norm, „**Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweissen von metallischen Werkstoffen**“, EN ISO 3834
- [19] Europäische Norm, „**Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz durch Beschichtungssysteme - Beurteilung der Porosität einer trockenen Beschichtung**“, EN ISO 29601:2011
- [20] Europäische Norm, „**Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgetragene Zinküberzüge (Stückverzinken) – Anforderungen und Prüfungen**“, ISO 1461
- [21] Europäische Norm, „**Metallische und andere anorganische Überzüge – Galvanische Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlicher Behandlung**“, ISO 2081
- [22] Europäische Norm, „**Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen - Messen der Schichtdicke – Magnetverfahren**“, ISO 2178:1995
- [23] International Organization for Standardization, „**Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung**“, ISO 2409.
- [24] International Organization for Standardization, „**Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Schichtdicke**“, ISO 2808.
- [25] Europäische Norm, „**Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Schichtdicke**“, ISO 2808: 2017
- [26] International Organization for Standardization, „**Beschichtungsstoffe – Abreissversuch zur Beurteilung der Haftfestigkeit**“, ISO 4624. ANMERKUNG: Dokument zurückgezogen

-
- [27] International Organization for Standardization, „**Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden**“, ISO 4628- X Reihe ANMERKUNG: einzelne Dokumente der Reihe zurückgezogen
-
- [28] Europäische Norm, „**Schmelzschweisverbindungen (Bewertungsgruppen von Unregelmässigkeiten)**, (2003), ISO 5817
-
- [29] International Organization for Standardization, „**Vorbereiten und Prüfen**“, ISO 850x Familie.
-
- [30] Europäische Norm, „**Verbindungselemente – Feuerverzinkung Richtlinie für die Herstellung feuerverzinkter Schrauben**“, (2009), ISO 10684
-
- [31] International Organization for Standardization, „**Strahlmittel**“, ISO 1112x Familie.
-
- [32] International Organization for Standardization (2010), „**Zinküberzüge – Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen und Stahlkonstruktionen von Korrosion**“, ISO 14713-1/2
-
- [33] International Organization for Standardization (2004), „**Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme**“, ISO 19840
-
- [34] Europäische Norm, „**Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Messung der Trockenschichtdicke auf rauen Substraten und Kriterien für deren Annahme**“, (2012-09), ISO 19840
-
- [35] Europäische Norm, „**Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Teil 1, Konformitätsverfahren für tragende Bauteile**“, EN 1090-1
-
- [36] Europäische Norm, „**Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Teil 2, Konformitätsverfahren für tragende Bauteile**“, EN 1090-2
-
- [37] Europäische Norm, „**Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Teil 3, Technische Anforderungen an Aluminiumtragwerke**“, EN 1090-3
-
- [38] Europäische Norm, „**Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung**“, EN 1990
-
- [39] Europäische Norm, „**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten**“, EN 1993
-
- [40] Europäische Norm, „**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau**“, EN 1993-1-1
-
- [41] Europäische Norm, „**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen**“, EN 1993-1-4
-
- [42] Europäische Norm, „**Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton**“, EN 1994
-
- [43] Europäische Norm, „**Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken**“, EN 1999
-
- [44] Europäische Norm, „**Verbindungselemente – Galvanische Überzüge**“, EN 4042: 2001
-
- [45] Europäische Norm, „**Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe und Definitionen**“, EN 8044:2015, September 2015
-
- [46] Europäische Norm, „**Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 5: Technische Lieferbedingungen für wetterfeste Baustähle**“, EN 10025-5
-
- [47] Europäische Norm, „**Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle**“, EN 10088-1
-
- [48] Europäische Norm, „**Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken, Teil 1, Konformitätsverfahren für tragende Bauteile**“, EN 10204
-
- [49] Europäische Norm, „**Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Stahl mit Aluminium-Zink-Überzügen (AZ) - Technische Lieferbedingungen**“, EN 10215
-
- [50] Europäische Norm, „**Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Baustählen – Technische Lieferbedingungen**“, EN 10326 ANMERKUNG: einzelne Dokumente der Reihe zurückgezogen
-
- [51] Europäische Norm, „**Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau – Teil 3: System HR – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern**“, EN 14399-3
-
- [52] Europäische Norm, „**Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau – Teil 4: System HV – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern**“, EN 14399-4
-
- [53] Europäische Norm, „**Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten**“, EN 60300-3-3
-
- [54] Deutsches Institut für Normung, „**Prüfverfahren Teil 21: Bewertung von frei bewitterten Probenplatten**“, (2003), DIN 13523-21
-

- [55] DIN, Deutsches Institut für Normung, „**Industrielle Pulverbeschichtung von feuerverzinkten und sherardisierten Gegenständen aus Stahl [Duplex-Systeme] - Spezifikationen, Empfehlungen und Leitlinien**“, (2010-11), DIN EN 15773
- [56] DIN, Deutsches Institut für Normung, „**Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Pulver-Beschichtungssysteme - Bewertung der Pulver-Beschichtungssysteme und Ausführung der Beschichtung**“, (2009-04), DIN 55633
- [57] Europäische Norm, „**Freibewitterung von Beschichtung - Prüfung des Korrosionsschutzverhaltens**“, (2007), DIN 55665
- [58] DIN, Deutsches Institut für Normung, „**Beschichtungsstoffe - Prüfung von Beschichtungen auf Poren und Risse mit Hochspannung**“ (2011-2), DIN 55670
- [59] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2000), „**Erhaltungswert von Bauwerken**“, SIA Merkblatt 2017.
- [60] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, „**Nichtrostender Betonstahl**“, SIA Merkblatt 2029.
- [61] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (2003), „**Stahlbau, Stahlverbundbau - Abschnitt 1 Stahlbau, Kap. Schweissverbindungen**“, ZTV-ING-Teil 4, Bundesamt für Strassenwesen, Deutschland.
- [62] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (2014/12), „**Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise**“, ZTV-ING-Teil 5, Bundesamt für Strassenwesen, Deutschland.
- [63] TL/TP KOR Stahlbauten, „**Korrosionsschutz von Stahlbauten**“
- [64] DASt-Richtlinie 022 (2016), „**Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen**“
- [65] Deutsches Institut für Bautechnik (2014), „**Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.3.6, Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen**“, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.3-6, Ausgabe 22.04.2014, Deutschland
- [66] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2002), „**Projektierungsrichtlinie Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Tunnelausrüstung**“, RVS 09.222, Ausgabe 04.07.2002, Österreich
- [67] ASFINAG (2013), „**Technische Richtlinie Tunnel - Lüftung**“, PLaPB 800.542.1000 (TLÜ), Ausgabe 01.01.2013, Österreich
- [68] ASFINAG (2013), „**Technische Spezifikation Tunnel - Lüftung**“, PLaPB 800.542.2000 (TLÜ), Ausgabe 01.01.2013, Österreich
- [69] ASTM International, „**Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment and Systems**“, ASTM A380 / A380M - 13
- [70] ASTM International, „**Standard Specification for Chemical Passivation Treatments for Stainless Steel Parts**“, ASTM A967 / A967M - 13

Fachhandbuch des ASTRA

- [71] Bundesamt für Strassen ASTRA, „**Fachhandbuch Kunstbauten (FHB K)**“, 22001: 2018
- [72] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Fachhandbuch BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen)**“, 23000
- [73] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Fachhandbuch BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen) technisches Merkblatt Bauteile, Komponenten, Werkstoffwahl und Korrosionsschutz**“, 23001-12120
- [74] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Fachhandbuch BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen) technisches Merkblatt Bauteile, Zonen/Klimatische Bedingungen**“, 23001-12210
- [75] Bundesamt für Strassen ASTRA (2015), „**Fachhandbuch BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen) technisches Merkblatt Bauteile, Zonen/Klimatische Bedingungen**“, 23001-12220

Dokumentation

- [76] Böhni H., „**Corrosion-resistant Fastenings in Road Tunnels-Field Tests**“, *Structural Engineering International* (1992), 253-258
- [77] H. Haselmair, R. Morach, H. Boehni: **Field and Laboratory Testing of High-Alloy Steels and Nickel Alloys Used in Fastenings in Road Tunnels**, Corrosion – Vol 50, No. 2, February 1994
- [78] H. Haselmair: **Stress Corrosion Cracking of Type 303 Stainless Steel in a Road Tunnel Atmosphere**, Material Performance, June 1992
- [79] Übleis A., Felder G., „**Schadstoffe in Strassentunnels-Auswirkungen auf die Beständigkeit metallischer Werkstoffe**“, VDI Berichte Nr. 1060 (1993).

-
- [80] Morach R., „**Zur Entstehung lokaler Korrosionsangriffe auf passiven Metallen**“, *Dissertation ETH Nr. 10677, ETH Zürich 1994.*
-
- [81] Büchler M., Voute C.-H., Bindschedler D., Stalder F., „**The ec-pen in quality control: Determining the corrosion resistance of stainless steel on-site**“, *Conference on non-destructive testing in civil engineering (NDT-CE), Berlin, Conference Proceedings (2003)*
-
- [82] Faller M., Bindschedler D., „**Befestigungsmittel im Hochbau – Nichtrostende Stähle für Sonderklimaten**“, *Tagungsband der 3-Länder-Korrosionstagung 2007 in Stuttgart, GfKorr, Frankfurt (2007, 102-114)*
-
- [83] D. Bindschedler, M. Büchler, „**Beizen unter Baustellenbedingungen**“, *Tagungsband der 3-Länder Korrosionsschutztagung "Nichtrostender Stahl – Reinigen, Beizen, Passivieren, Korrosionsschutz optimieren," 2009 in Basel*
-
- [84] M. Brem., „**Gotthard-Strassentunnel, Monitoring der Zwischendecke, Dokumentation Messkampagne 2013**“, SGK Bericht 11054-3 30.10.2014, ASTRA Auftragsnummer 080091/000454
-
- [85] M. Brem., „**Gotthard-Strassentunnel, Expertise, Tunnelklima-Auswertung einzelner Niederschlagsereignisse 2012-2013**“, SGK Bericht 14072 vom 3.2.2016, ASTRA Auftragsnummer 080091/000
-
- [86] D. Bindschedler, „**Beizen von nichtrostenden Stählen, Anwendung auf der Baustelle**“, gwa 8/2009
-
- [87] **Beitrag zum Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen – Ursachen und Lösungsvorschläge zum Problem der Rissbildung**“ (2005)
-
- [88] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, „**Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle an Atmosphäre**“, *Merkblatt 828*
-
- [89] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, „**Beiden von Edelstahl Rostfrei**“, *Merkblatt 826*
-
- [90] Norsok M-501, „**Coating Systems**“, 06.02.2012].
-
- [91] Kanton Basel Landschaft, Allgemeine technische Spezifikationen für elektromechanische Einrichtungen (ATS), „**6.1A -Anhang A, Materialien und Schutzarten für elektromechanische Ausrüstungen auf den Hochleistungsstrassen**“, 01.02.1999.
-
- [92] Kanton Basel Stadt, Tiefbauamt, Elektromechanik, ATS 01, „**Korrosionsschutz, Farbanstriche**“, 2006.
-
- [93] Karl-Helmut. Tostmann „**Korrosion: Ursachen und Vermeidung**“, 28.01.2005, Wiley-VCH Verlag GmbH
-
- [94] Bundesanstalt für Strassenwesen, BASt, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B58 „**Quantitative Risikoanalyse für Strassentunnel**“, November 2007
-
- [95] Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen, VSS, „**Grndlagen zur Analyse von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassen**“, VSS 2011/705
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 04.11.2021

Grunddaten

Projekt-Nr.: 2014/004

Projekttitel: Materialwahl und Korrosionsschutz für korrosionsgefährdete BSA-Komponenten in Strassentunnel

Enddatum: 04.11.2021

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Wechselwirkung zwischen Tunnelklima, Werkstoffen und Korrosionsschutzsystemen sind komplex und lassen sich nicht durch einfache Modellversuche oder Auslagerungstests von beschränkter Dauer beschreiben. Es wurden daher im Rahmen des Forschungsvorhabens die Erfahrungswerte von realen Systemen, welche über Jahrzehnte im Einsatz waren, für die weiterführende Bewertung der Korrosionsgefährdung und der Definition von Korrosionsschutzanforderungen genutzt. Unter Einbezug der Literatur, Normen und Erfahrungswerten wurde ein risikobasierter Ansatz zur Materialisierung von BSA-Komponenten entwickelt. Damit wird es möglich die gegenseitige Wechselwirkung der verschiedenen Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Auswahl von Werkstoffen sowie Korrosionsschutzsystemen, welche eine optimale Nutzungsdauer unter Berücksichtigung von äusseren Faktoren wie Kosten, Verfügbarkeit und Unterhalt ermöglichen. Anstelle einer strikten Werkstoffvorgabe ist auf der Basis einer Systembetrachtung eine optimierte Vorgehensweise möglich. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Berücksichtigung von Massnahmen, welche es erlaubt die Risiken innerhalb der erforderlichen Grenzen zu halten. Zu diesen technischen Massnahmen gehören konstruktive Anpassungen, werkstofftechnische Modifikationen oder organisatorische Schritte. Dies ermöglicht planerische Massnahmen und erlaubt es die spezifischen Gegebenheiten der verschiedenen Objekte zu berücksichtigen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die gesetzten Ziele der Literaturstudie sowie der Ist-Analyse von Schadensfällen und Betreibererfahrungen wurden erreicht. Die betrachtete Anzahl an Komponenten wurde für die exemplarischen Anwendungsbeispiele eingeschränkt. Das Ziel für die Planung und Betrieb wurde teilweise erreicht. Das Teilziel der Erarbeitung von fertigen Ausschreibungstexten und konkreten Prüfplänen konnte aufgrund der komplexen Wechselwirkungen nicht erarbeitet werden. Stattdessen wurde ein risikobasierter Ansatz zur Materialisierung von BSA-Komponenten entwickelt. Daraus wurden Hinweise und Empfehlungen für die Planung und Realisierung formuliert.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die konkrete Anwendung der entwickelten Methodik sollte in einem BSA-Pilotprojekt über eine gesamte Projektdauer von der Projektierung bis zur Realisierung begleitet und dabei die nötigen praxisorientierten Vorlagen- und Musterdokumente erarbeitet werden, um eine zukünftig, einheitliche BSA-Umsetzung sicherzustellen. Es ist zu prüfen, ob der Prozess der Dokumentation und Sammlung von Schadensfällen im BSA-Umfeld für die zukünftige Berücksichtigung in weiteren Forschungsvorhaben näher definiert werden sollte.

Publikationen:

-

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Buchmann

Vorname: Reto

Amt, Firma, Institut: AFRY Schweiz AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die in Tunneln komplexen, variierenden klimatischen Bedingungen in Kombination mit einer grossen Anzahl verschiedener Werkstoffe bei Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen hat eine ursprünglich geplante umfassende Ausarbeitung verunmöglicht. Erschwerend kommen neuere und vielfältigere Abtausalze hinzu, die umfassende Es muss festgestellt werden, dass die ursprüngliche Zielsetzung war in diesem Zusammenhang zu optimistisch. Obwohl einige Teilziele nicht erreicht wurden (z.B. Ausschreibungstexte erstellen, festlegen detaillierter Prüfpläne), konnte dennoch eine auf Risikoanalyse basierende Methodik erarbeitet werden, mit der es möglich sein sollte, künftige Tunnelprojekte beratend begleiten zu können.

Umsetzung:

Das gesammelte Literaturmaterial sowie das spezifische Fachwissen zusammen mit den Erkenntnissen aus Tunnelbegehungen (systematische Erfassung der Erfahrungen an bestehenden Anlagen und Installationen) bildete die Grundlage für diesen Forschungsbericht. Die Kombination mit Elementen der Risikoanalyse ermöglichen eine fundierte Beurteilung einer wirtschaftlich sinnvollen Instandhaltung von BSA - Komponenten.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Renovierung der ersten Gotthard - Autoröhre bietet eine einmalige Gelegenheit zur Analyse von Korrosionsbedingungen und Korrosionsschäden an BSA - Komponenten nach 40 jähriger Betriebszeit. Diese Gelegenheit sollte dringend genutzt werden, da im Verlauf der Renovierungsarbeiten in allen klimatischen Zonen und alle damals verwendeten Werkstoffe von einer Demontage betroffen sein werden. Dies ergibt eine einmalige Gelegenheit zum Erkenntnisgewinn.

Einfluss auf Normenwerk:

Besonders die weitere Auswertung der BSA - Komponenten aus der ersten Gotthard - strassenröhre verspricht zusätzliche Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten einer grossen Zahl an Werkstoffen und deren Verwendung in Tunneln.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Vogelsang

Vorname: Jörg A.

Amt, Firma, Institut: C/O Sika Technology AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: