

BAWEmpfehlung

**Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen:
Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und
Interpretation (ESM)**

Ausgabe 2017

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53

76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0

Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de

www.baw.de

Verfasser

Anne Heeling, Bundesanstalt für Wasserbau

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2017

| Inhaltsverzeichnis | | Seite |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| | Vorbemerkung | 1 |
| 1 | Problemstellung | 1 |
| 2 | Begriffe | 2 |
| 2.1 | Korrosion | 2 |
| 2.2 | Korrosionszone | 2 |
| 2.3 | Korrosionstyp | 2 |
| 2.4 | Spundwanddickenmessung | 3 |
| 2.5 | Restwanddicke | 3 |
| 2.6 | Ausgangswanddicke | 4 |
| 2.7 | Abrostung, Abrostungsrate | 4 |
| 2.8 | Restnutzungsdauer | 5 |
| 3 | Korrosionmilieus am Bauwerk | 5 |
| 3.1 | Korrosion im freien Wasser | 5 |
| 3.1.1 | Korrosionszonen | 5 |
| 3.1.2 | Korrosionsintensität | 8 |
| 3.2 | Korrosion an der Luft | 9 |
| 3.3 | Korrosion im Boden | 9 |
| 4 | Kennwerte der Korrosion | 10 |
| 4.1 | Tragfähigkeit | 10 |
| 4.2 | Gebrauchstauglichkeit | 12 |
| 4.3 | Beurteilung der Restnutzungsdauer | 12 |
| 5 | Untersuchung eines Spundwandbauwerkes | 13 |
| 5.1 | Qualitative Untersuchung | 13 |
| 5.2 | Spundwanddickenmessung | 15 |
| 5.2.1 | Messtechnik | 15 |
| 5.2.2 | Messstellen und Datenumfang | 16 |
| 5.2.3 | Planung und Vorbereitung einer Messkampagne | 21 |
| 5.2.4 | Durchführung der Messung | 23 |
| 6 | Der Messbericht: Dokumentation und Interpretation einer Spundwanddickenmessung | 24 |
| 6.1 | Veranlassung der Wanddickenmessung | 25 |
| 6.2 | Beschreibung des Bauwerks | 25 |
| 6.3 | Beschreibung der Messkampagne | 26 |
| 6.4 | Verifikation und Aufbereitung der Messwerte | 26 |
| 6.5 | Darstellung der Messergebnisse | 28 |
| 6.5.1 | Restwanddicken je Station und Messlage | 29 |
| 6.5.2 | Mittlere Restwanddicke und reduziertes Widerstandsmoment des Bauwerks | 30 |
| 6.6 | Festlegung und Verifikation der Korrosionszonen | 31 |
| 6.6.1 | Vier-Zonen-Modell | 31 |
| 6.6.2 | Drei-Zonen-Modell | 32 |
| 6.6.3 | Verifikation der Korrosionszonen | 32 |
| 6.7 | Mittlere Abrostung und Abrostungsrate | 33 |
| 6.7.1 | Vier-Zonen-Modell | 33 |
| 6.7.2 | Drei-Zonen-Modell | 34 |
| 6.8 | Minimale Restwanddicke, Maximale Abrostung und Abrostungsrate | 34 |

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.8.1 | Vier-Zonen-Modell | 35 |
| 6.8.2 | Drei-Zonen-Modell | 36 |
| 6.8.3 | Abrostungsanomalien und Anomale Löcher | 36 |
| 6.9 | Beurteilung des aktuellen Korrosionszustandes, Prognose der Restnutzungsdauer | 37 |
| 6.9.1 | Schadensdokumentation | 37 |
| 6.9.2 | Kennwerte der Korrosion | 37 |
| 6.9.3 | Korrosionsintensität | 38 |
| 6.9.4 | Vergleich mit historischen Daten | 38 |
| 6.10 | Empfehlungen | 38 |
| 6.10.1 | Sanierungsempfehlung | 38 |
| 6.10.2 | Inspektionsrhythmus | 39 |
| 7 | Spundwanddickenmessungen im Rahmen der Bauwerksinspektion | 39 |
| 7.1 | Regelwerke im Zuständigkeitsbereich der WSV | 39 |
| 7.2 | Inspektionsrhythmus | 39 |
| 7.2.1 | Inspektionsrhythmus nach VV-WSV 2101 | 39 |
| 7.2.2 | Erst- und Folgemessung am Spundwandbauwerk | 40 |
| 7.3 | Schadensklassifizierung | 40 |
| 7.3.1 | Schadensklassifizierung nach MSV | 40 |
| 7.3.2 | Schadensklassifizierung am Spundwandbauwerk | 41 |
| 8 | Übertragbarkeit von Abrostungsraten | 42 |
| 9 | Milieu-Beprobung | 43 |
| 9.1 | Verfahren nach dem Drei-Zonen-Modell | 43 |
| 9.1.1 | Datengrundlage | 44 |
| 9.1.2 | Kennwerte der Korrosion | 44 |
| 9.2 | Verfahren nach DIN 50929-3, Beiblatt 1 | 45 |
| 9.3 | Praxistauglichkeit | 45 |
| | Literatur | 46 |
| | Regelwerke | 47 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: | Benennung der Korrosionsintensität | 8 |
| Tabelle 2: | Anzahl und Verteilung der Messquerschnitte an einer Station | 19 |
| Tabelle 3: | Annahmekennwert k für $p=0,975$ und $1-\alpha = 0,95$ in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n ; berechnet nach John (1979) | 35 |
| Tabelle 4: | Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Tragfähigkeit und der Schadensklasse: mittlere Abrostung und Abrostungsrate, maximale Muldentiefe | 37 |
| Tabelle 5: | Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit: gemessene und geschätzte maximale Abrostung, geschätzte maximale Abrostungsrate | 38 |
| Tabelle 6: | Schadensklassen (SK) für Spundwandbauwerke in Anlehnung an das MSV | 41 |

Bildverzeichnis

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 1: | Mittel- und Maximalwerte der Abrostungen an Stahlspundwänden im Süß- und Meerwasser (nach EAU 2012, E35-3 und E35-4 auf Grundlage von BAW-Daten) | 1 |
| Bild 2: | Korrosionstypen | 3 |
| Bild 3: | Korrosionszonen nach dem Vier-Zonen-Modell (in Anlehnung an Alberts und Heeling, 1997) | 6 |
| Bild 4: | Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell (European Communities, 2007) | 7 |
| Bild 5: | Vergleich: Korrosionszonen nach dem Drei- und Vier-Zonen-Modell | 7 |
| Bild 6: | Übergang Spritzwasserzone / Luftzone | 9 |
| Bild 7: | Stofffluss zur Entstehung mikrobiell induzierter Korrosion (nach Graff, 2003) | 10 |
| Bild 8: | Tragfähigkeit einer Spundwand | 11 |
| Bild 9: | Gebrauchstauglichkeit einer Spundwand | 12 |
| Bild 10: | Hammerschlag-Methode | 14 |
| Bild 11: | Wanddickenmessung mit Ultraschall: Messprinzip | 15 |
| Bild 12: | Station, Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte am Beispiel einer Spundwand mit U-Profil | 17 |
| Bild 13: | Beschreibung der Messlagen eines Messquerschnittes (links: U-Profil; rechts: Z-Profil) | 19 |
| Bild 14: | Messlagen einheitlicher Ausgangswanddicke am wasserseitigen Flansch eines Doppel-T-Trägers einer gemischten Spundwand (PL: Pfahl links; PR: Pfahl rechts) | 20 |
| Bild 15: | Spundwanddickenmessung mit Messkette | 22 |
| Bild 16: | Spundwanddickenmessung: Personal im Wasser und an Land | 23 |
| Bild 17: | Reinigung von Messstelle von Rost und Bewuchs | 24 |
| Bild 18: | Lageplan mit Kennzeichnung zweier getrennt ausgewerteter Teilbauwerke („Baujahr 1985“ und „Baujahr 1987“) und Stationen der aktuellen und einer früheren Messkampagne | 25 |
| Bild 19: | Lage der Messquerschnitte | 26 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 20: | Bestimmung der Restwanddicke bei Mulden | 27 |
| Bild 21: | Korrektur der Ausgangswanddicke | 28 |
| Bild 22: | Restwanddickenprofile einer Station mit drei Messlagen am Beispiel einer Spundwand mit konstantem Wasserstand | 29 |
| Bild 23: | Mittlere Restwanddicken und reduzierte Widerstandsmomente eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand unter Tideeinfluss | 30 |
| Bild 24: | Festlegung der Korrosionszonen im Vier-Zonen-Modell Links: grün: anhand der Wasserstände eindeutig definierte Korrosionszonen-Grenzen; rot: vom Gutachter festzulegende Grenzen Rechts: Korrosionszonen im Profil der mittleren Restwanddicken eines Bauwerks (Beispiel für ein Gewässer mit konstantem Wasserstand) | 31 |
| Bild 25: | Linksschiefe Lognormalverteilung der Abrostungen einer Korrosionszone (hier die Spritzwasserzone einer 13 Jahre alten Spundwand; nach Alberts und Heeling, 1997) | 32 |
| Bild 26: | Mittlere Abrostungen und Abrostungsraten eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand ohne Tideeinfluss | 33 |
| Bild 27: | Berechnung der tiefenbezogenen mittleren Abrostung \bar{a} mittels nichtstetiger Exponentialfunktion Links: Formeln (4a – 4f) für unterschiedliche Höhenbereiche Rechts: Profil der mittleren Abrostungen am Beispiel einer Spundwand im Tidebereich | 34 |
| Bild 28: | Normale und anomale Löcher | 37 |
| Bild 29: | Beispiel: Bestimmung der Schadenklasse bzgl. flächiger Korrosion aus der gewichteten mittleren Abrostung | 42 |

Anlagenverzeichnis

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Anlage 1: | Kurzanleitung Spundwanddickenmessung |
| Anlage 2: | Vorlagen Protokolle |
| Anlage 3: | Datenstruktur |
| Anlage 4: | Mittlere und geschätzte maximale Abrostungsraten in Norddeutschen Gewässern |

Vorbemerkung

Das Referat „Geotechnik Nord“ (K1) der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Dienststelle Hamburg, führt seit 1982 regelmäßig Restwanddickenmessungen an Spundwänden der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) durch (s.a. Heeling, 2010). Bei der Fremdvergabe von Spundwanddickenmessungen im Zuständigkeitsbereich der WSV steht das Referat K1 bei Bedarf beratend und prüfend zur Verfügung. Das Karlsruher Bautechnik-Referat „Stahlbau und Korrosionsschutz“ (B2) der BAW befasst sich mit Untersuchungen an Stahlwasserbauten und deren Ausrüstungen. In beiden Referaten wurden und werden Forschungs- und Entwicklungs- (FuE-) Vorhaben zu Fragen der Korrosion durchgeführt.

Die vorliegende Empfehlung richtet sich in erster Linie an die WSV und stellt auf Grundlage der Erfahrungen der BAW eine Empfehlung zur effizienten und fachgerechten Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation von Restwanddickenmessungen dar. Sofern kein entsprechender Hinweis erfolgt, gelten alle nachfolgenden Aussagen nicht nur für Spundwände, sondern sinngemäß auch für verwandte Bauwerke wie z.B. Stahlpfähle.

1 Problemstellung

Spundwände aus Stahl sind weit verbreitete Bauteile in Häfen und an Wasserstraßen. Die Lebensdauer ist jedoch aufgrund korrosionsbedingter Wanddickenverluste begrenzt. Für den Betreiber sind sowohl der aktuelle Erhaltungszustand als auch die Restnutzungsdauer von wirtschaftlicher Bedeutung. Die Beurteilung der Bauwerke beruht auf dem Kenntnis der mittleren und der minimalen Restwanddicke bzw. – unter Berücksichtigung der Ausgangswanddicke – auf der mittleren und maximalen Abrostung.

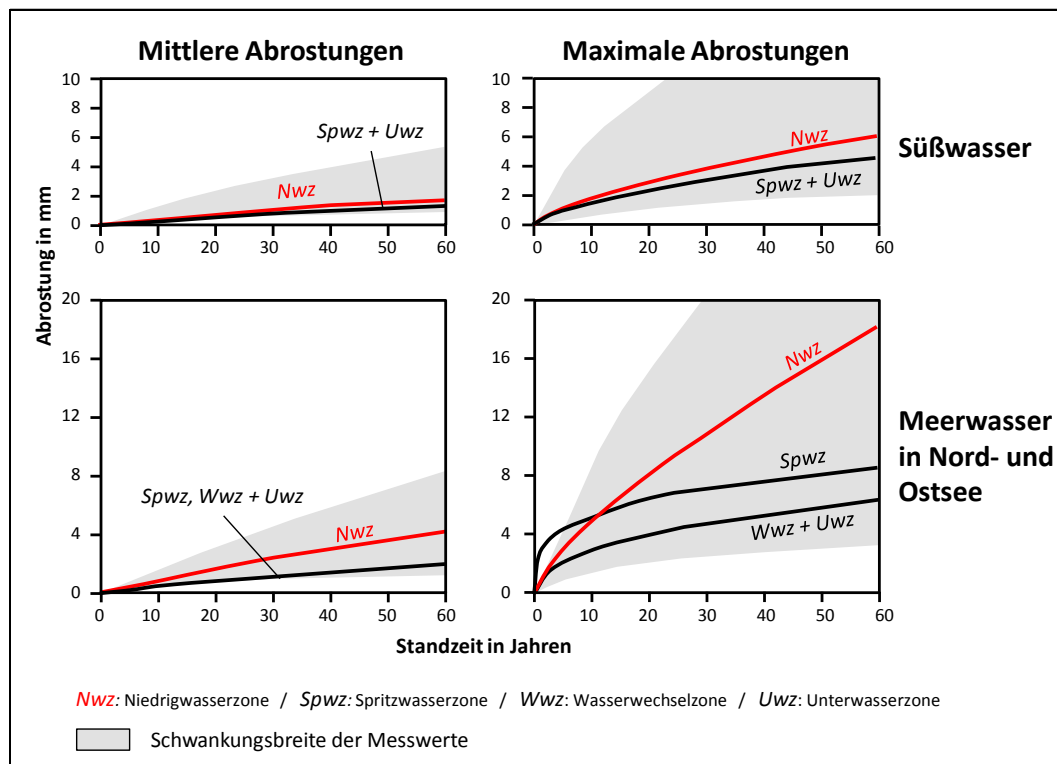


Bild 1: Mittel- und Maximalwerte der Abrostungen an Stahlspundwänden im Süß- und Meerwasser (nach EAU 2012, E35-3 und E35-4 auf Grundlage von BAW-Daten)

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Daten zum Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden im Wasser (z.B. „Empfehlungen des Arbeitsausschusses ‚Ufereinfassungen‘ Häfen und Wasserstraßen. EAU 2012“, s. Bild 1; DIN EN 1993-5). Diese Werte weisen jedoch standortbedingt eine große Spannweite auf (s. graue Flächen in Bild 1) und sind damit nur eingeschränkt für eine Prognose der Abrostungsgeschwindigkeit geeignet.

Die zuverlässige Beurteilung des Korrosionszustandes kann deshalb nur auf Grundlage von Messungen vor Ort erfolgen. Da aber Intensität und Typus der Korrosion selbst am einzelnen Spundwandbauwerk stark schwanken, ist zur Beurteilung des Korrosionszustandes eine große Anzahl von Einzelmessungen erforderlich, die mit geeigneten Verfahren durchzuführen und gezielt über das Bauwerk zu verteilen sind.

Spundwanddickenmessungen sind personal-, zeit- und kostenintensiv. Sie werden meist mit Einsatz von Tauchern und unter schwierigen Bedingungen durchgeführt: in Schleusen und an engen Wasserstraßen, nahe stark frequentierter Hafenanlagen, bei Wind und Wellen, starker Strömung oder im trüben Wasser.

2 Begriffe

2.1 Korrosion

Die DIN EN ISO 8044 definiert Korrosion als „*physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt ...*“. Bei Spundwänden korrodiert der Stahl infolge Reaktion mit Wasser und Sauerstoff zu Rost, was zu Wanddickenverlusten führt.

2.2 Korrosionszone

Bei der elektrochemischen Korrosion treffen die Reaktionspartner Stahl, Wasser und Sauerstoff vor allem in Höhe des Wasserspiegels aufeinander. Auch mechanische Einflüsse wie Schiffsstoß, Fenderreibung oder Eisgang wirken überwiegend hier. Der Übergangsbereich Wasser / Luft wird deshalb häufig auch als *Hauptkorrosionszone* bezeichnet. In anderen Tiefenbereichen (wechsel-)wirken andere Einflussfaktoren, die dort zu unterschiedlicher Korrosionsintensität und -typus führen. Als Folge kommt es längs der Spundwandhöhe in Abhängigkeit von der Lage relativ zum Wasserspiegel zur Ausbildung von Korrosionszonen.

Die Auswertung einer Spundwanddickenmessung erfolgt deshalb getrennt nach Korrosionszonen.

Folgende Wasserstände sind maßgeblich:

- in Gewässern mit konstantem Wasserstand: Mittelwasser (MW)
- in tidebeeinflussten Gewässern: Mittleres Tidehochwasser (MThw), Mittleres Tideniedrigwasser (MTnw)
- in Schleusen: Oberwasser (OW), Unterwasser (UW)

Die Festlegung und Benennung von Korrosionszonen kann nach unterschiedlichen Verfahren erfolgen und ist in Abschn. 3.1.1 beschrieben.

2.3 Korrosionstyp

Korrosion tritt an der Spundwand i.d.R. weder gleichmäßig noch gleichförmig auf. In den BAW-Merkblättern „Schadensklassifikation an Verkehrsbauwerken“ (MSV, 2015) und „Bauwerksinspektion“ (MBI, 2010) werden folgende Korrosionstypen unterschieden:

- *Flächige Korrosion*: gleichmäßig flächig (s. Bild 2, links)
- *Mulden-/Narbenkorrosion*: punktuell deutlich erhöhte Korrosionsintensität, die im Extremfall zu Durchrostungen führt (s. Bild 2, Mitte und rechts)
- *Spaltkorrosion*: im Übergangsbereich unterschiedlicher Bauwerksteile (z.B. im Bereich der Bohlen-schlösser)

- *Kantenabrostung*: an exponierten Stellen z.B. durch mechanischen Abrieb oder Kantenflucht des Korrosionsschutzes
- *Kontaktkorrosion*: (= Bimetallkorrosion) infolge Elektronenfluss zwischen Metallen verschiedener Potentiale

Die am Spundwandbauwerk bei weitem häufigsten Korrosionsformen sind die flächige und die Mulden-/Narbenkorrosion, während Spaltkorrosion, Kantenabrostung und Kontaktkorrosion nur untergeordnet auftreten.

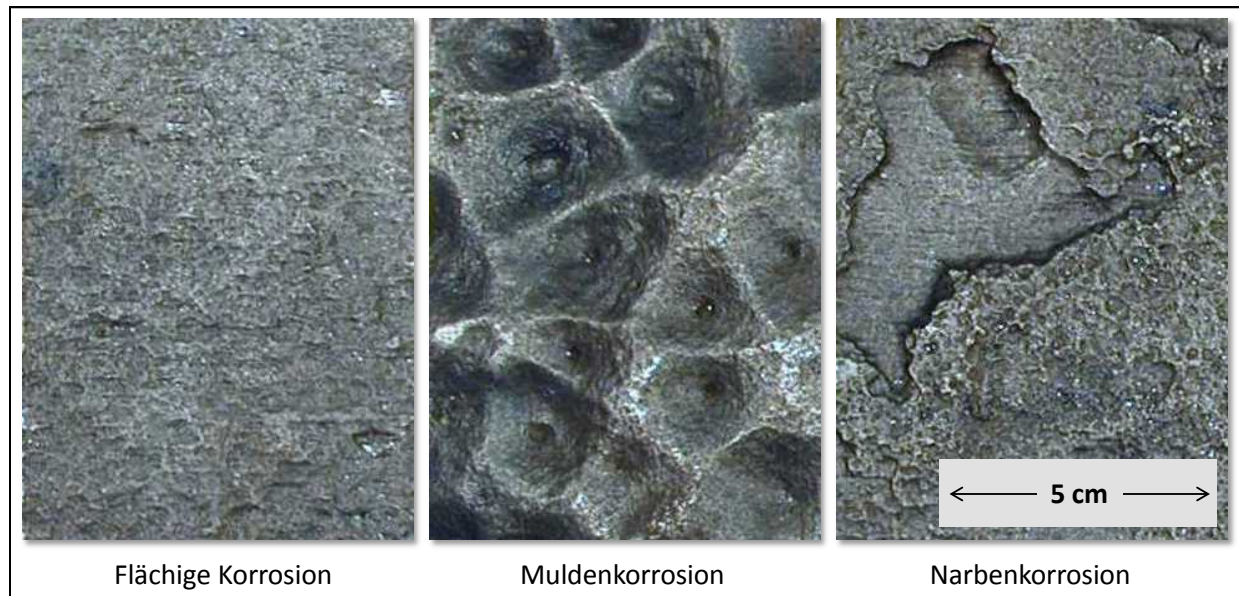


Bild 2: Korrosionstypen

Eine Beschreibung von Korrosionserscheinungen und deren Ursachen ist z.B. HTG (2009) zu entnehmen.

2.4 Spundwanddickenmessung

Eine Spundwanddickenmessung ist ein Verfahren zur Ermittlung der Grundlagen für die Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Spundwänden. Sie kann auch im Rahmen einer Bauwerksprüfung im Sinne der EAU 2012, Abs. 14.1, bzw. (im Zuständigkeitsbereich der WSV) im Sinne der Verwaltungsvorschrift „Bauwerksinspektion“ VV-WSV 2101 (2010) ausgeführt werden (s. Abschn. 7).

2.5 Restwanddicke

Die Restwanddicke t ist der Ergebniswert einer Spundwanddickenmessung. Die Gesamtheit der Restwanddicken einer Spundwand beschreibt den Ist-Zustand des Bauwerks.

Die Bestimmung der mittleren Restwanddicke \bar{t} erfolgt (je nach Kontext: je Messpunkt oder je Korrosionszone) aus den Einzelmesswerten t_1, t_2, \dots, t_n nach dem geometrischen Mittel $\bar{t}_{geom} = \sqrt[n]{t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n}$, welches zur Beschreibung von Wachstumsprozessen – wie der Korrosion – geeignet ist. Relevante Abweichungen zum arithmetischen Mittel \bar{t}_{arithm} treten nur bei stark streuenden Einzelwerten auf; dann liegt das geometrische Mittel jedoch wegen $\bar{t}_{arithm} \geq \bar{t}_{geom}$ auf der sicheren Seite. Löcher und Mulden gehen nicht in die Berechnung der mittleren Restwanddicke ein.

Die kleinste gemessene Restwanddicke entspricht nur in Ausnahmen (z.B. bei Löchern mit $t_{\min} = 0$ mm) der tatsächlichen minimalen Restwanddicke (s. Abschn. 6.8.3). Ein Schätzwert für die minimale Restwanddicke (bzw. für die maximale Abrostung, s. Abschn. 2.7) wird entsprechend Formel (5), Abschn. 6.8.1, bzw. Formel (6), Abschn. 6.8.2, bestimmt.

Restwanddicken werden in Millimetern mit einer Nachkommastelle und Schätzwerte für die minimale Restwanddicke werden ganzzahlig angegeben.

2.6 Ausgangswanddicke

Die Ausgangswanddicke t_0 ist die Wanddicke einer Spundwand zum Zeitpunkt des Einbringens.

Die Plan-Ausgangswanddicke ist der theoretische Wert entsprechend Herstellerangabe bzw. Planunterlagen. Die tatsächliche Ist-Ausgangswanddicke kann vom Planwert z.B. aufgrund von Walztoleranzen bei der Herstellung oder infolge fehlerhafter Planunterlagen abweichen. Am Bauwerk ist dies nur dann erkennbar, wenn Restwanddicken gemessen werden, die größer sind als die (zu gering angenommene) Plan-Ausgangswanddicke. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, die Ausgangswanddicke bereits vor dem Einbringen der Spundwand zu bestimmen und in den Bestandsunterlagen zu dokumentieren.

Werden falsche Plan-Ausgangswanddicken im Rahmen einer Spundwanddickenmessung festgestellt, so sind diese zur (vermuteten) Ist-Ausgangswanddicke zu korrigieren (s. Abschn. 6.4).

Alle Auswertungen zur Beschreibung des Korrosionszustandes basieren auf der Ist-Ausgangswanddicke. Wird der Auswertung eine zu hohe Ausgangswanddicke zugrunde gelegt, werden Abrostung und Abrostungsrate (s. Abschn. 2.7) überschätzt, und die Restnutzungsdauer (s. Abschn. 2.8) wird unterschätzt.

Ausgangswanddicken werden in Millimetern mit einer Nachkommastelle angegeben.

2.7 Abrostung, Abrostungsrate

Wanddickenverluste werden nicht nur durch korrosive, sondern auch durch nicht-korrosive Mechanismen wie Schiffsstoß, Fenderreibung oder Eisgang verursacht. Im Folgenden wird der Wanddickenverlust einer Spundwand zusammenfassend und unabhängig von seiner Ursache vereinfachend als (je nach Kontext: punktuelle, mittlere oder maximale)

$$\text{Abrostung } a = \text{Ausgangswanddicke } t_0 - \text{Restwanddicke } t \quad \text{in mm} \quad (1)$$

bezeichnet. Die Abrostung kann folglich nur in Kenntnis der Ausgangswanddicke bestimmt werden. Die mittlere Abrostung wird (je nach Kontext: je Messpunkt, je Messquerschnitt oder je Korrosionszone) als geometrisches Mittel (s. Abschn. 2.5) bestimmt. Als maximale Abrostung wird ein Schätzwert nach Formel (5), Abschn. 6.8.1, bzw. nach Formel (6), Abschn. 6.8.2, errechnet.

Die

$$\text{Abrostungsrate } \alpha = \frac{\text{Abrostung } a}{\text{Spundwandalter zum Zeitpunkt der Wanddickenmessung}} \quad \text{in mm/Jahr} \quad (2)$$

ist die (punktuelle, mittlere oder maximale) Abrostungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Wanddickenmessung, mittels der die verbleibende Restnutzungsdauer (s. Abschn. 2.8) prognostiziert wird.

Abrostungen werden in Millimetern mit einer Nachkommastelle, Schätzwerte für die maximale Abrostung ganzzahlig und Abrostungsraten in Millimetern pro Jahr mit zwei Nachkommastellen, z.T. (z.B. in der DIN 50929, Beiblatt 1¹) auch in μm , angegeben.

¹ In der DIN 50929-3 wird die Abrostungsrate als „Korrosionsrate r“ bezeichnet.

2.8 Restnutzungsdauer

Die Restnutzungsdauer einer Spundwand ist ein Schätzwert, der angibt, wie lange das Bauwerk noch funktionsstüchtig ist. Die Restnutzungsdauer errechnet sich bzgl. Tragfähigkeit aus der aktuellen mittleren Restwanddicke und der mittleren Abrostungsrate und bzgl. Gebrauchstauglichkeit aus der aktuellen minimalen Restwanddicke und der maximalen Abrostungsrate (s.a. Abschn. 2.7).

3 Korrosionmilieus am Bauwerk

Die größten Wanddickenverluste treten an der dem freien Wasser zugewandten Bauwerksseite auf, während die Korrosion an der Luft oder im Boden meist nur von untergeordneter Relevanz ist.

3.1 Korrosion im freien Wasser

3.1.1 Korrosionszonen

Die Benennung und Festlegung der Korrosionszonen kann – i.d.R. basierend auf den Daten einer Spundwanddickenmessung – nach zwei unterschiedlichen Verfahren erfolgen:

- nach dem Vier-Zonen-Modell oder
- nach dem Drei-Zonen-Modell.

3.1.1.1 Korrosionszonen nach dem Vier-Zonen-Modell

Üblicherweise (z.B. Alberts und Heeling, 1997; EAU 2012) wird das Bauwerk je nach Gewässertyp (konstanter oder wechselnder Wasserstand) in bis zu vier Korrosionszonen unterteilt (s. Bild 3):

- Spritzwasserzone (Spwz): ca. 1 m bis 2 m oberhalb von MW bzw. MThw
- Wasserwechselzone (Wwz): nur in Gewässern mit regelmäßig wechselnden Wasserständen
 - in Tidegewässern zwischen MThw und MTnw
 - in Schleusen zwischen OW und UW
- Niedrigwasserzone (Nwz): ca. 1,0 m bis 2,5 m im Bereich des MW bzw. unterhalb MTnw
- Unterwasserzone (Uwz): ständig vom Wasser bedeckter Bereich (unterhalb Nwz)

Die Hauptkorrosionszone entspricht bei Gewässern mit konstantem Wasserstand der Nwz und in Tidegewässern oder Schleusen der Spwz und/oder der Nwz.

Nachteilig an dieser gängigen Form der Einteilung ist die nicht eindeutige Definition der Nwz. Deren Höhenlage kann selbst an einem einzelnen Bauwerk von Spundbohle zu Spundbohle deutlich schwanken. Auf die Festlegung der Korrosionszonen anhand der Ergebnisse einer Restwanddickenmessung nach dem Vier-Zonen-Modell wird in Abschn. 6.6 eingegangen.

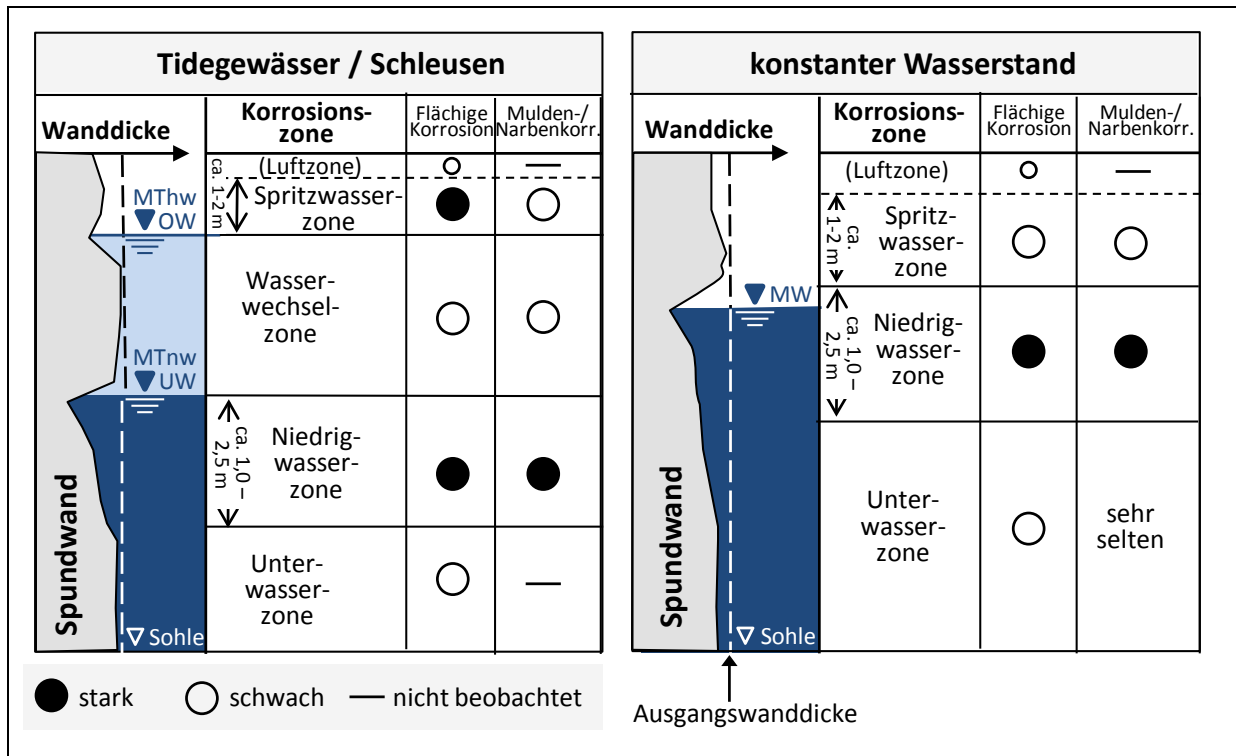


Bild 3: Korrosionszonen nach dem Vier-Zonen-Modell (in Anlehnung an Alberts und Heeling, 1997)

3.1.1.2 Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell

Als Ergebnis eines von der European Coal and Steel Community (ECSC) geförderten Forschungsprojektes zu den Ursachen der Korrosion von Stahlbauwerken im marinen Milieu (European Communities, 2007; BAW, 2015 und 2017) kann das Korrosionsbild alternativ auch wie folgt beschrieben werden:

Die Spundwand wird längs ihrer Höhe je nach Gewässertyp in bis zu drei eindeutig definierte Korrosionszonen unterteilt (Bild 4):

- Spwz: oberhalb von MW bzw. MThw oder OW
- WWz: nur in Gewässern mit regelmäßig wechselnden Wasserständen
 - in Tidegewässern zwischen MThw und MTnw
 - in Schleusen zwischen OW und UW
- Uwz: unterhalb von MW bzw. MTnw oder UW

Bei dieser Einteilung werden die Abrostungen innerhalb einer Korrosionszone tiefenabhängig durch Exponentialfunktionen dargestellt (s. Abschn. 6.8.2).

Die Exponentialfunktion der Uwz (rot-gestrichelte Linien in Bild 4) gibt auch die hohen Abrostungen in der Nwz des Vier-Zonen-Modells unmittelbar über und unter MW bzw. MTnw oder UW zutreffend wieder. Eine weitere Unterteilung ist deshalb nicht erforderlich.

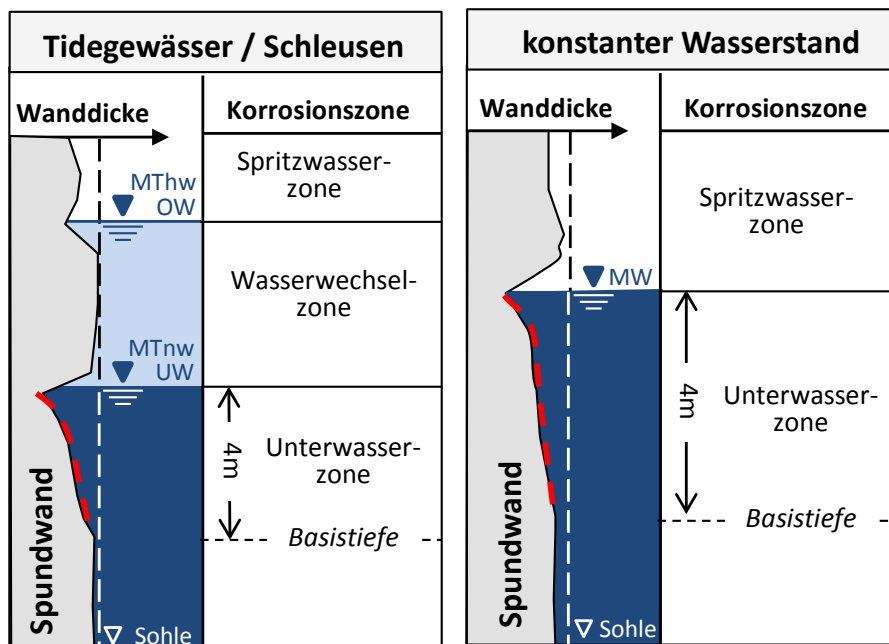
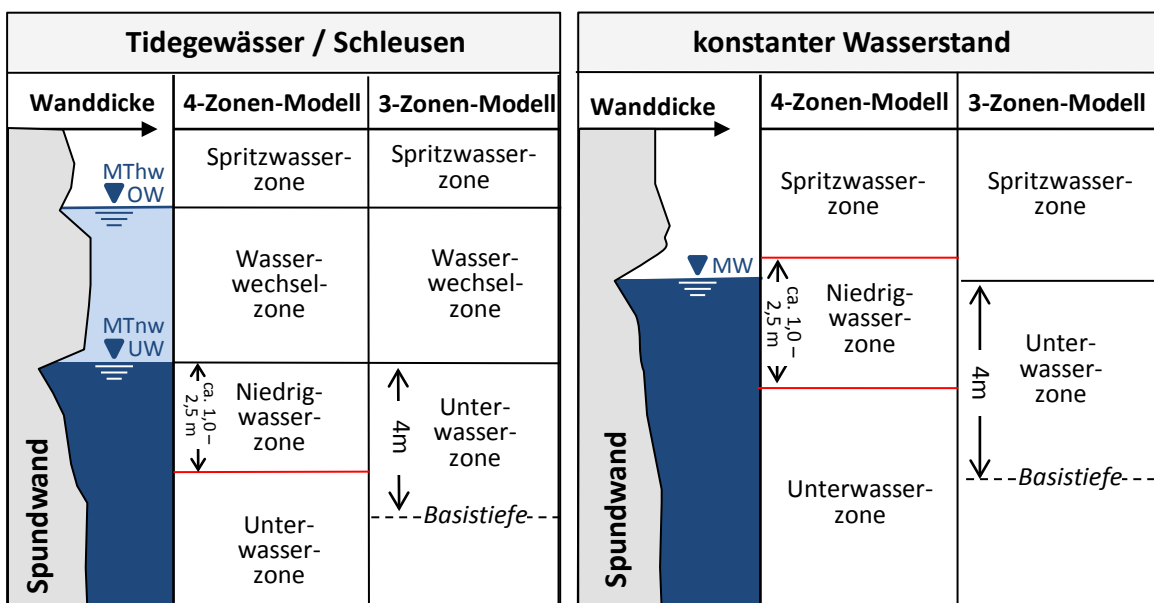


Bild 4: Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell (European Communities, 2007)

Unterhalb der sogenannten Basistiefe bei 4 m unter MW bzw. MTnw oder UW (s. Bild 4) ist – dies haben Untersuchungen der BAW gezeigt – die Korrosion konstant, d.h. eine Tiefenabhängigkeit der Abrostung ist nicht feststellbar.

3.1.1.3 Methodenvergleich Vier- und Drei-Zonen-Modell

Die Einteilung in Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell ist eindeutig und führt zu einer schematisierten Darstellung des Restwanddickenprofils eines Bauwerkes.



— anhand des Korrosionsbildes am Einzelbauwerk festzulegen

Bild 5: Vergleich: Korrosionszonen nach dem Drei- und Vier-Zonen-Modell

Das Drei-Zonen-Modell erlaubt mittels Exponentialfunktionen die Berechnung der Abrostung in beliebiger Tiefe und bietet sich z.B. für einen Vergleich des Korrosionsmilieus verschiedener Spundwandstandorte an.

Demgegenüber orientiert sich die Einteilung nach dem Vier-Zonen-Modell stärker am Einzelbauwerk, erfordert aber Erfahrung bei der Festlegung der Korrosionszonen. Bereiche intensiver Korrosion – und damit auch sanierungsbedürftige Spundwandabschnitte – lassen sich exakter eingrenzen. Bei der Auswertung einer Spundwanddickenmessung im Bereich der WSV sollte deshalb das Vier-Zonen-Modell angewendet werden.

3.1.2 Korrosionsintensität

Langjährige Untersuchungen (z.B. Hein, 1989) haben ergeben, dass Spundwände anfänglich schneller korrodieren. Dies zeigt sich auch am zunächst steileren und später flacheren Verlauf der Kurven in den Abrostung/Zeit-Diagrammen in Bild 1. Ursächlich ist die mit dem Spundwandalter zunehmende Rostschicht, die als natürlicher Korrosionsschutz wirkt. Nach European Communities (2007) werden deshalb drei Altersgruppen unterschieden, innerhalb derer die Abrostungsrate als konstant angesehen werden kann²:

- junge Bauwerke: < 20 Jahre
- Bauwerke mittleren Alters: 20 – 30 Jahre
- alte Bauwerke: > 30 Jahre

Die Korrosionsintensität kann nach Tabelle 1 anhand der mittleren und der geschätzten maximalen Abrostungsrate (s. Abschn. 2.7) in der Nwz klassifiziert werden. Die angegebenen Werte gelten für hinterfüllte Spundwände im Wasser ohne Korrosionsschutz. Sie beruhen auf einer Auswertung von ca. 140 Bauwerken aus der BAW-Datenbank (s.a. Anlage 4).

Tabelle 1: Benennung der Korrosionsintensität

| Kennwert der Korrosion | Bauwerksalter in Jahren | Abrostungsraten in der Niedrigwasserzone in mm / Jahr | | |
|---------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|--------|
| | | Benennung der Korrosionsintensität | | |
| | | gering | mittel | groß |
| Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ | < 20 | < 0,04 | 0,04 – 0,10 | > 0,10 |
| | 20 - 30 | < 0,03 | 0,03 – 0,08 | > 0,08 |
| | > 30 | < 0,02 | 0,02 – 0,06 | > 0,06 |
| Geschätzte maximale Abrostungsrate α_{max} | < 20 | < 0,20 | 0,20 – 0,40 | > 0,40 |
| | 20 - 30 | < 0,15 | 0,15 – 0,35 | > 0,35 |
| | > 30 | < 0,10 | 0,10 – 0,30 | > 0,30 |

Die angegebenen Abrostungsraten gelten nicht für frei im Wasser stehende Spundwände (z.B. Wellenschutzwände, Leitwände), nichtverfüllte Dalben oder für Pfähle: Hier tritt eine beidseitige Korrosion auf.

² Die DIN 50929-3, Beiblatt 1, geht vereinfachend von einer konstanten Abrostungsrate nach bereits zehn Jahren Standzeit aus. Nach den Erfahrungen der BAW sollte jedoch den Angaben nach European Communities (2007) gefolgt werden.

3.2 Korrosion an der Luft

Bei Spundwänden, deren Oberkante deutlich über MW (bzw. MThw oder OW) liegt, folgt oberhalb der etwa 1 m bis 2 m mächtigen Spwz die Luftzone, in der das Bauwerk lediglich witterungsbedingt mit Feuchtigkeit in Berührung kommt.

Der Übergang von der Spwz zur Luftzone kann sich z.B. in einem Wechsel von Korrosionstyp und/oder -intensität, im unterschiedlichen Bewuchs oder in Form eines Farbumschlages (s. Bild 6) zeigen.

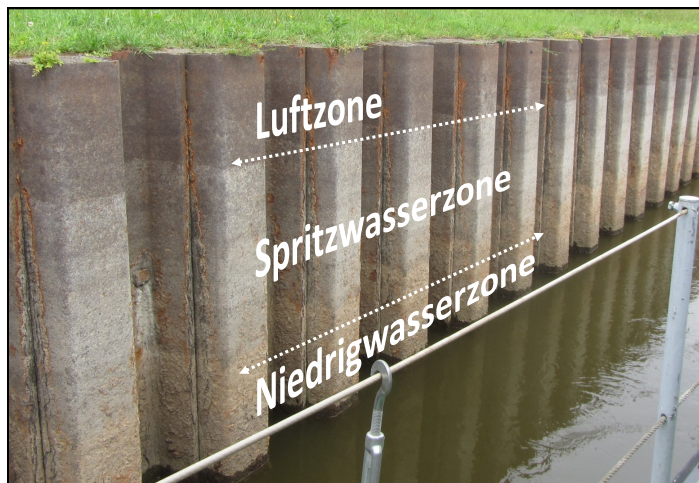


Bild 6: Übergang Spritzwasserzone / Luftzone

Die EAU 2012 geht von einer „atmosphärischen Korrosion“ von ca. 0,01 mm/Jahr aus. Die Erfahrungen der BAW bestätigen grundsätzlich diese geringe Korrosionsintensität. Damit ist die Abrostung hier vernachlässigbar gering, so dass die Luftzone bei Spundwanddickenmessungen i.d.R. nicht untersucht wird. Es sollte aber unbedingt vermieden werden, Messwerte der Luftzone vereinfachend der Spwz zuzuordnen. Auf diese Weise würde die mittlere und maximale Abrostungsrate der Spwz unterschätzt werden.

Örtlich – zum Beispiel an jungen Spundwänden im Meerwasser – treten jedoch auch in der Luftzone relevante Abrostungen auf. In diesen Ausnahmefällen ist die Luftzone als zusätzliche Korrosionszone in die Spundwanddickenmessung einzubeziehen und im Messbericht zu beschreiben.

3.3 Korrosion im Boden

Sofern die Spundwand in natürlich gewachsene, nicht aggressive Böden (s. DIN 50929-3) einbindet, kann die bodenseitige Korrosion vernachlässigt werden: die EAU 2012 gibt bei beidseitiger Einbindung im Boden eine Abrostungsrate von insgesamt 0,01 mm/Jahr an.

Sofern jedoch z.B. Entlastungsöffnungen, Entwässerungsschlitze oder Durchrostungen eine Luft/Wasser-Zufuhr ermöglichen, kann es lokal zu einer relevanten bodenseitigen Abrostung und damit zu beidseitiger Korrosion kommen. Weiterhin tritt die beidseitige Korrosion bei nicht vollständig hinterfüllten Spundwänden (z.B. bei unvollständiger Einerdung der landseitigen Täler) oder bei unvollständig verfüllten Dalben auf.

Eine besondere Variante der Korrosion im Boden ist die *Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)* oder *Biokorrosion*. Sie tritt nur untergeordnet auf und wurde bei Messkampagnen der BAW bisher nur an wenigen Bauwerken an der Nordsee und am Mittellandkanal beobachtet (s.a. Graff, 2003; Potthoff, 2004; Wennkamp und Ruthemann, 2002). MIC entsteht zusätzlich zu und unabhängig von der Korrosion im freien Wasser meist im Hinterfüllungsbereich, wenn ein Zutritt von Sulfaten und/oder organischen Stoffen von der Wasserseite in den Hinterfüllungsbereich stattfindet (s. Bild 7).

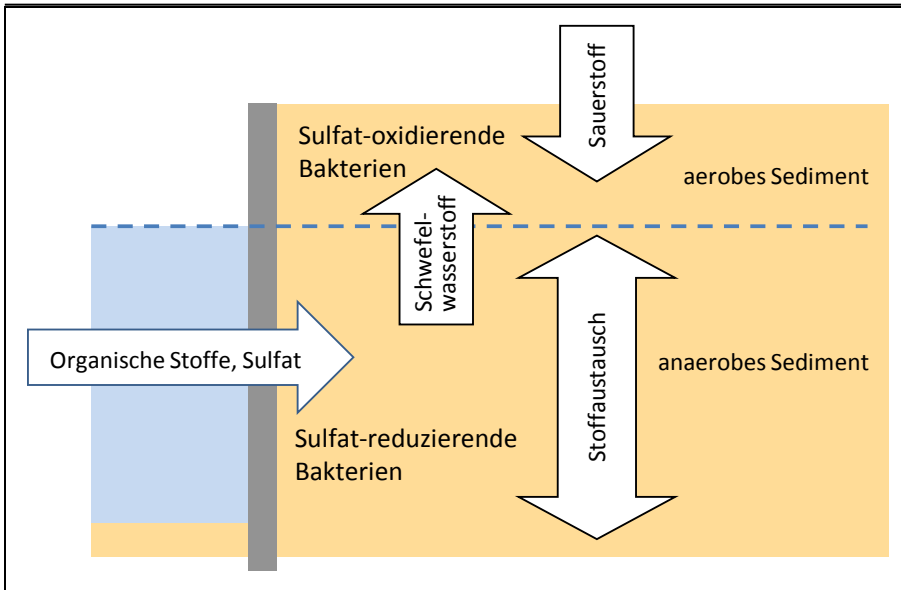


Bild 7: Stofffluss zur Entstehung mikrobiell induzierter Korrosion (nach Graff, 2003)

Sulfat-reduzierende Bakterien produzieren Schwefelwasserstoff, der in der Spundwand zum Lochfraß führt, und sulfat-oxidierende Bakterien wandeln diesen in Schwefelsäure um, die ebenfalls den Spundwandstahl angreift. Die MIC zeigt sich als lokal erhöhte Abrostung auf der Bodenseite, während wasserseitig augenscheinlich nichts auf eine intensive Korrosion hindeuten muss. Mögliche Anzeichen für MIC sind ausgeprägter Lochfraß mit blankem Stahl oder das Auftreten großer, schwarzer Pusteln. Im Hinterfüllungsbereich kann ein schleimiger Belag (*Biofilm*) auftreten.

Nach HTG (2009) sind an Stahlspundwänden MIC-bedingte Abrostungsraten von 1,5 mm pro Jahr keine Ausnahme.

4 Kennwerte der Korrosion

Die Beschreibung des aktuellen Erhaltungszustandes und die Prognose der Restnutzungsdauer beziehen sich auf die beiden Grundfunktionen eines Spundwandbauwerkes und damit auf die Beurteilung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Beide werden von korrosionsbedingten Wanddickenverlusten beeinflusst.

4.1 Tragfähigkeit

Auf eine Spundwand wirken Lasten aus Erd- und Wasserdruck. Bei einem Wanddickenverlust kann es zu Spannungsüberschreitungen kommen, so dass die rechnerische Tragfähigkeit nicht mehr gegeben ist. In Bild 8 ist dargestellt, wie das zulässige Biegemoment, das eine Spundwand zum Zeitpunkt des Einbaus aufweist, durch den Wanddickenverlust reduziert werden kann, so dass es das rechnerisch vorhandene Biegemoment unterschreitet. Hieraus ergeben sich unzulässige Spannungsüberschreitungen und damit ein Verlust der Tragfähigkeit.

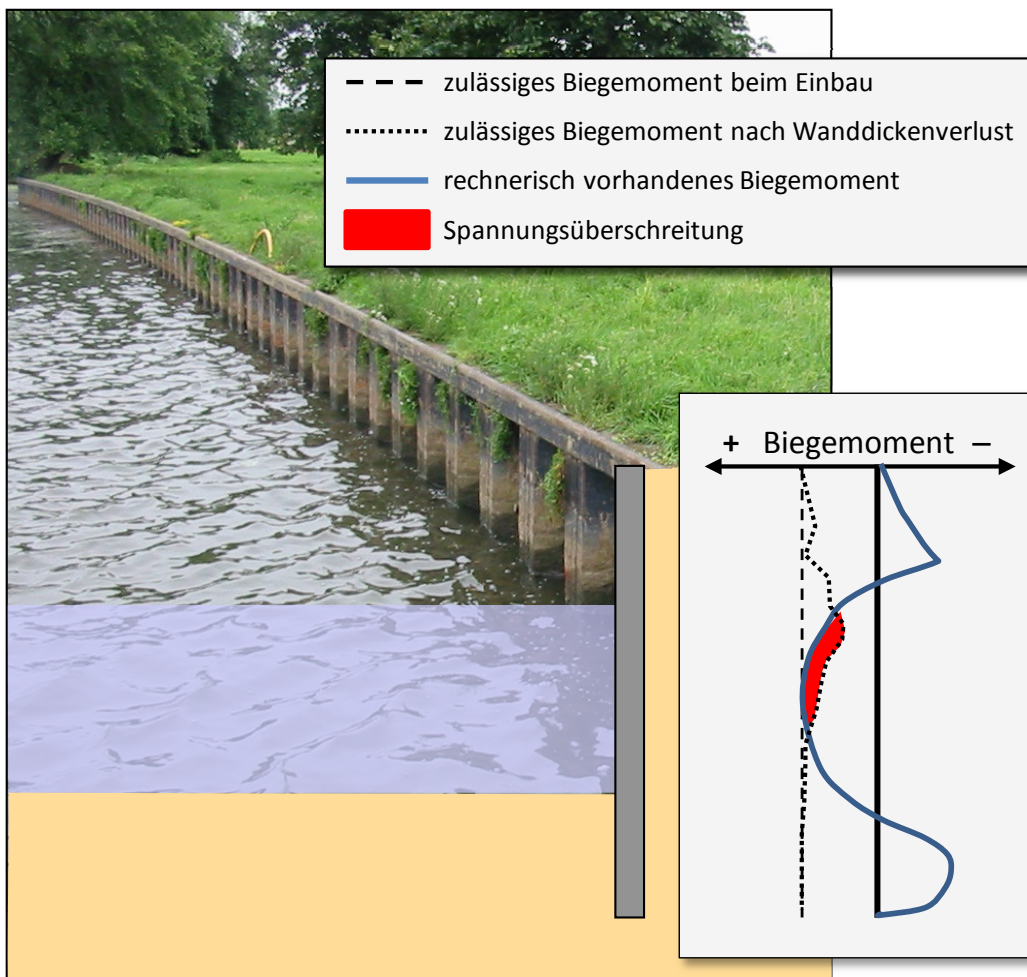


Bild 8: Tragfähigkeit einer Spundwand

Die Beurteilung der aktuellen Tragfähigkeit erfolgt i.d.R. seitens eines Tragwerkplaners unter Berücksichtigung der

mittleren Restwanddicke \bar{t}

(s.a. EAU 2012, Abs. 8.1.8.2). Zur Prognose der Restnutzungsdauer wird die

mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$

herangezogen. Die Berechnung der Tragfähigkeit erfolgt unter Zugrundelegung des korrosionsbedingt reduzierten Widerstandsmomentes W_x . Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass das Widerstandsmoment im Neuzustand W_0 proportional zum Wanddickenverlust abnimmt:

$$\text{reduziertes Widerstandsmoment } W_x = \text{Widerstand im Neuzustand } W_0 \cdot \frac{\text{mittlere Restwanddicke } \bar{t}}{\text{Ausgangswanddicke } t_0} \text{ in cm}^3/\text{m} \quad (3)$$

Dabei sollten vereinfachend i.d.R. nur die Wanddicken-Messwerte der Bohlenrücken zugrunde gelegt werden, da nur diese das Widerstandsmoment maßgeblich beeinflussen.

4.2 Gebrauchstauglichkeit

Eine Spundwand muss den Boden im Hinterfüllungsbereich zurückhalten. Als Folge von Durchrostungen kann es durch Wellen und Grundwasserströmung zu einem Ausspülen des Bodens, zur Bildung von Hohlräumen und schließlich zu plötzlichen Sackungen und Bodeneinbrüchen landseitig der Spundwand kommen (s. Bild 9).

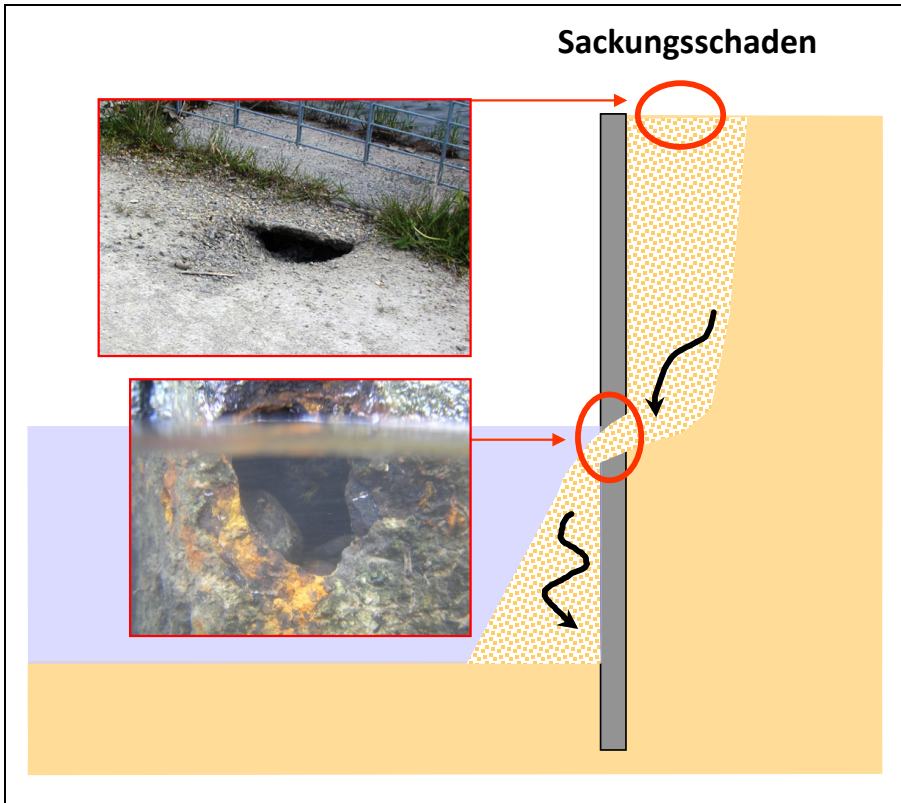


Bild 9: Gebrauchstauglichkeit einer Spundwand

Zur Beurteilung der aktuellen Gebrauchstauglichkeit ist die Kenntnis der

minimalen Restwanddicke t_{min}

des Bauwerkes erforderlich. Wie in Abschn. 6.8 erläutert, kann jedoch nicht die gemessene minimale Restwanddicke bzw. die daraus abgeleitete maximale Abrostung a_{max} zugrunde gelegt werden, sondern ein statistisch ermittelter Schätzwert A_{max} , s. Formeln (5) und (6).

Die Prognose der Restnutzungsdauer hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit erfolgt über die

maximale Abrostungsrate α_{max}

Erfahrungsgemäß treten die ersten Durchrostungen bei U-Profilen häufig in der Mitte der Bergbohle und bei Z-Profilen am Übergang vom Flansch zum bergseitigen Steg auf (s.a. EAU 2012, Abs.8.1.8.2).

4.3 Beurteilung der Restnutzungsdauer

Nach den Erfahrungen der BAW ist für die Restnutzungsdauer einer hinterfüllten Spundwand in erster Linie die Gebrauchstauglichkeit maßgeblich. Damit kommt der minimalen Restwanddicke bzw. der maximalen Abrostung und Abrostungsrate eine besondere Bedeutung zu.

Bei frei im Wasser stehenden Spundwandbauwerken oder Dalben ist hingegen die Tragfähigkeit und damit die mittlere Restwanddicke und die mittlere Abrostung und Abrostungsrate relevant.

Korrosionsschutzmaßnahmen (z.B. Schutzanstrich, Opferanode, kathodischer Korrosionsschutz) verhindern die Korrosion weitgehend, so dass eine Beurteilung des Korrosionszustandes bei intaktem Korrosionsschutz i.d.R. nicht erforderlich ist. Problematisch ist die Prognose der Restnutzungsdauer jedoch bei nur zeitweise korrosionsgeschützten Bauwerken. Ein intakter, nachträglich aufgebracht Korrosionsschutz konserviert den bereits vorhandenen Wanddickenverlust. Sobald ein Korrosionsschutz nicht mehr funktionstüchtig ist (z.B. infolge einer Beschädigung des Schutzanstriches) setzt die „normale“ Korrosion erneut ein.

Würde die mittlere oder maximale Abrostungsrate auf Grundlage der Gesamtstandzeit einer nur zeitweise korrosionsgeschützten Spundwand bestimmt werden, so würde

- bei einem nachträglich aufgebracht, intakten Korrosionsschutz die Abrostungsrate über- bzw. die Restnutzungsdauer unterschätzt werden (da die Korrosion vor dem Aufbringen des Korrosionsschutzes zwar zum gemessenen Wanddickenverlust geführt hat, aktuell aber nicht mehr auftritt) bzw.
- bei einem aktuell beschädigten Korrosionsschutz die Abrostungsrate unter- bzw. die Restnutzungsdauer überschätzt werden (da die geringen Wanddickenverluste aus der Zeit des intakten Korrosionsschutzes eine geringere Abrostungsgeschwindigkeit vortäuschen).

Die tatsächliche, aktuelle Abrostungsrate ließe sich aus den gemessenen Wanddickenverlusten nur in Kenntnis des Zeitraums bestimmen, während dem der Korrosionsschutz funktionstüchtig war/ist. Diese Information steht aber oft nicht zur Verfügung, so dass eine Beurteilung der Restnutzungsdauer bei temporär korrosionsgeschützten Bauwerken nicht oder nur eingeschränkt möglich ist.

5 Untersuchung eines Spundwandbauwerkes

Die Beurteilung des Erhaltungszustandes eines Spundwandbauwerkes kann

- durch eine qualitative Untersuchung (Abschn. 5.1) oder
- quantitativ durch eine Wanddickenmessung mittels Ultraschall (Abschn. 5.2)

erfolgen. Nach aktuellem Stand des Wissens können der Erhaltungszustand und die Prognose der Restnutzungsdauer jedoch nur durch eine Wanddickenmessung zuverlässig beurteilt werden.

Die qualitative Untersuchung und die Wanddickenmessung können in regelmäßigen Zeitabständen im Rahmen der Bauwerksinspektion durchgeführt werden (s. Abschn. 7). Sofern aber Schäden festgestellt werden (direkt z.B. in Form von Löchern oder indirekt z.B. als Sackungen im Hinterfüllungsbereich), sollte umgehend eine Akutmessung durchgeführt werden, um den geschädigten Bereich einzugrenzen und eine Sanierung initiieren zu können.

Alternativ besteht zudem die Möglichkeit, den Korrosionszustand mittels einer

- Milieu-Beprobung (Abschn. 9)

abzuschätzen.

5.1 Qualitative Untersuchung

Bei einer qualitativen Untersuchung wird das gesamte Bauwerk über und unter Wasser einer Tast- und Sichtkontrolle unterzogen. Vorhandene Schäden (Beulen, Risse, Schlosssprengungen, Durchrostungen usw.) werden schriftlich und fotografisch dokumentiert; ein geeignetes Formular ist Anlage 2 zu entnehmen.

Über Wasser sollte zusätzlich eine Untersuchung nach der *Hammerschlag-Methode* erfolgen, bei der die Spundbohlen an allen Querschnittsbereichen (Spundwand-Berge, -Flanken und -Täler) systematisch abgeklopft werden (Bild 10). Nach dem Klang des Hammerschlages lassen sich intakte Spundwandabschnitte mit

„hartem“ Aufschlag von Bereichen mit Restwanddicken unter 3 mm („weicher“ Aufschlag) unterscheiden. Weiterhin können von Rost oder Bewuchs bedeckte Löcher aufgefunden werden.



Bild 10: Hammerschlag-Methode

Wenn lediglich eine qualitative Aussage zum allgemeinen Erhaltungszustand des Spundwandbauwerkes benötigt wird (z.B. an einer augenscheinlich intakten Spundwand), genügt die alleinige Durchführung der qualitativen Untersuchung. Jedoch sollte auch im Rahmen einer Spundwanddickenmessung zusätzlich an den einzelnen Messstationen eine qualitative Untersuchung an jeweils ca. zehn benachbarten Bohlen erfolgen (s. Abschn. 5.2.4).

Falls aufgrund der Erfahrung mit Nachbarbauwerken der Verdacht auf hohe Korrosionsintensität besteht (z.B. infolge MIC, s. Abschn. 3.3), sollte alle 50 m ein ca. 5 m breiter Spundwandabschnitt vollständig gereinigt und vom Taucher auf Löcher inspiziert werden. Über Wasser kann zudem mittels Hammerschlag untersucht werden, ob von der Landseite ausgehende, relevante Wanddickenverluste aufgetreten sind, die an der Luftseite (bisher) zu keinen sichtbaren Spuren geführt haben.

5.2 Spundwanddickenmessung

Eine Kurzanleitung zur Durchführung einer Spundwanddickenmessung ist der Anlage 1 zu entnehmen. Formulare zur Datenerhebung (Stationsprotokoll, Messwerte-Protokoll) mit Beispielen finden sich in Anlage 2.

5.2.1 Messtechnik

Üblicherweise werden Restwanddicken an Stahlspundwänden im Wasser zerstörungsfrei mittels Ultraschall gemessen: Ein Ultraschall-Impuls wird ausgesendet; anschließend wird das an der Stahlrückwand reflektierte Echo empfangen (Bild 11). Aus der Zeitdifferenz zwischen Sendeimpuls und Rückwandecho kann in Kenntnis der materialspezifischen Geschwindigkeit des Ultraschalls auf die Dicke des Prüfmaterials geschlossen werden.

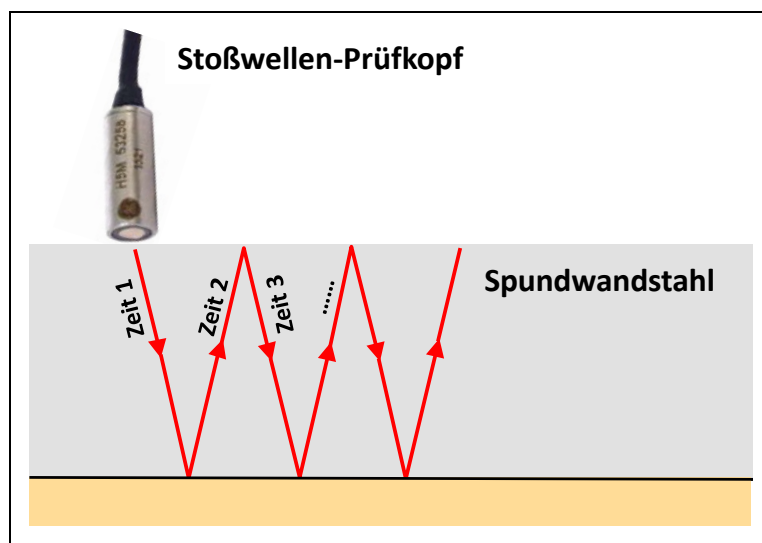


Bild 11: Wanddickenmessung mit Ultraschall: Messprinzip

Für eine Wanddickenmessung mit Ultraschall müssen folgende Bedingungen erfüllt sein (s.a. Alberts, 1987):

- Die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils muss zugänglich sein.
- Vorder- und Rückseite des Bauteils müssen parallel verlaufen, was bei Spundwänden meist der Fall ist.
- Die Prüfkopfachse muss bewegungsfrei senkrecht zur Stahloberfläche stehen (Mulden werden deshalb i.d.R. nicht per Ultraschall sondern mittels Tiefenlehre gemessen, s. Bild 20).
- Programmtechnisch oder durch geeignete Adapter, die einen definierten Wasservorlauf garantieren, ist zu vermeiden, dass Laufzeitunterschiede im Wasser und im Stahl zu einer Fehlinterpretation der Wanddicke führen.

Unerheblich ist hingegen, welches Medium sich auf der Rückseite befindet (Rost, Wasser, Boden, Luft).

Grundsätzlich sind bei Spundwanddickenmessungen – unabhängig vom gewählten Verfahren – folgende Anforderungen an Messtechnik und Durchführung zu stellen:

- Die Wanddickenmessungen müssen über und unter Wasser durchführbar sein.
- Die Untersuchung muss \pm zerstörungsfrei erfolgen. Lediglich für spezielle (Non-Standard-) Fragestellungen kann eine Entnahme von Spundwandmaterial sinnvoll bzw. erforderlich sein. Beim Reinigen der Stahloberfläche lässt sich ein geringer Wanddickenverlust meist nicht vermeiden. Für Bereiche intensiver Korrosion wird jedoch gelegentlich empfohlen, die Stahloberfläche vor dem Messen bis auf den Grund der tiefsten Mulden und Narben abzuschleifen. Dieses Vorgehen würde zu zusätzlichen Material-

verlusten von mehreren Millimetern führen und damit dem Anspruch einer zerstörungsfreien Wanddickenmessung zuwiderlaufen.

- Der Reinigungsaufwand zur Vorbereitung der Messflächen sollte möglichst gering sein. Idealerweise kann automatisch zwischen Stahl einerseits und Rost, Beschichtung und/oder Bewuchs andererseits unterschieden werden, so dass die Reinigung entfällt³.
- Die Wanddicken müssen mit einer Messgenauigkeit von etwa $\pm 0,1$ mm bestimmt werden können. Das Messgerät sollte metrische Maßeinheiten verwenden und mittels Metall-Prüfkörpern kalibrierbar sein.
- Die Messwerte müssen verifizierbar und reproduzierbar sein.
Dies beinhaltet die Überprüfbarkeit der Messwert-Qualität (z.B. visuell mittels Oszilloskop oder programmgesteuert durch automatisierte Mehrfachmessungen).
In der Praxis werden häufig Kleingeräte mit Digitalanzeige verwendet. Die alleinige Anzeige des Messwertes erlaubt jedoch keine Beurteilung der Messwertqualität und damit keine Verifikation der Daten. Kleinmessgeräte sind deshalb für Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen als ungeeignet anzusehen.
- Es sollten punktuelle Wanddicken ermittelt werden können (nicht nur Mittelwerte innerhalb eines größeren Messareals).

5.2.2 Messstellen und Datenumfang

Die Gesamtheit der bei einer Spundwanddickenmessung zu erhebenden Daten und ihre Beziehungen zueinander sind Anlage 3 zu entnehmen.

Um den Korrosionszustand eines *Bauwerks* auf der Grundlage eines statistisch aussagekräftigen Datenbestandes bestimmen zu können, sind die Restwanddicken an mehreren Spundbohlen (*Stationen*) zu ermitteln.

An jeder Station wird in unterschiedlichen Höhen (*Messquerschnitte*) und an unterschiedlichen, charakteristischen Punkten des Spundwandquerschnittes (*Messlagen*) gemessen, z.B. auf dem Spundwandberg, an den Flanschen / Stegen / Flanken und im Spundwandtal.

Jeder *Messpunkt* einer Spundwand lässt sich damit als Kombination von Station, Messquerschnitt und Messlage beschreiben. An jedem Messpunkt werden mehrere *Einzelwerte* gemessen.

Bild 12 zeigt beispielhaft die Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte einer Station mit U-Profil.

³ Beispielsweise kann beim Mehrfachecho-Ultraschall-Verfahren mittels geeigneter Software die Laufzeit einer Gruppe von drei aufeinanderfolgenden Spundwand-Echos ausgewertet werden: Das erste Echo, welches durch eine evt. vorhandene Rost- oder Farbschicht beeinflusst wird, wird ignoriert, und die Wanddicke wird automatisch aus dem zweiten und dritten Echo ermittelt; eine Interpretation der Echos durch den Anwender entfällt. Durch die automatische Nichtberücksichtigung der Rostschicht kann gegenüber den herkömmlichen Ultraschall-Messgeräten der Aufwand zur Reinigung der Messstellen deutlich reduziert werden. Gleichzeitig lassen sich die Messwerte besser verifizieren.

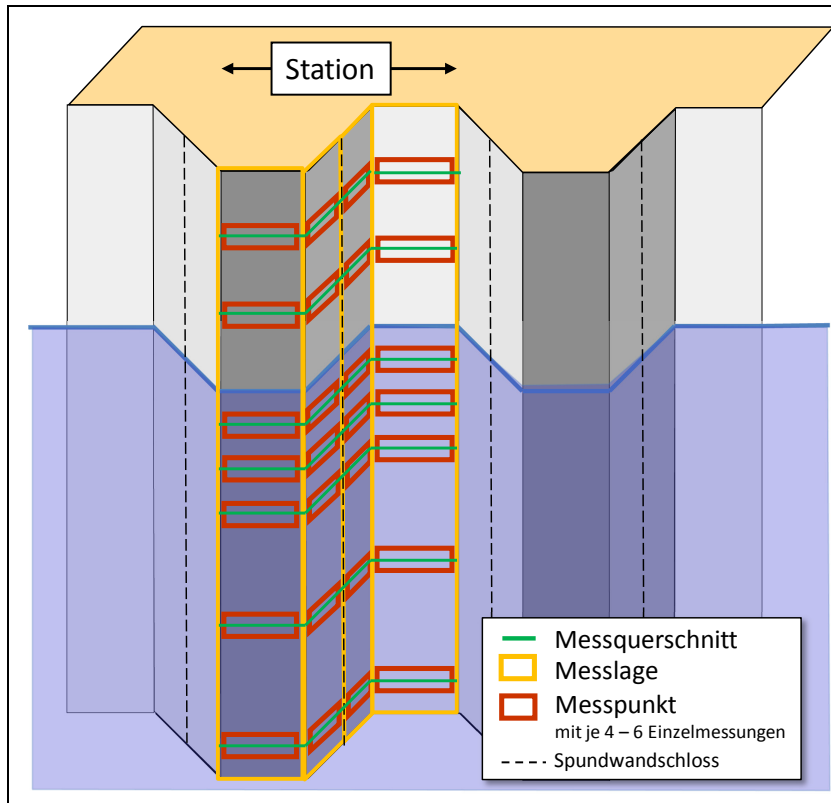


Bild 12: Station, Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte am Beispiel einer Spundwand mit U-Profil

5.2.2.1 Bauwerk

Ein Bauwerk im Sinne einer Wanddickenmessung ist ein Spundwandabschnitt, für den ein \pm einheitliches Korrosionsverhalten zu erwarten ist. Eine Spundwand sollte deshalb in mehrere, getrennt auszuwertende Teilbauwerke unterteilt werden bei einem (relevanten) Wechsel z.B. von

- Bauwerksalter,
- Stahlprofil (\rightarrow unterschiedliches Widerstandsmoment, unterschiedliche Ausgangswanddicke),
- Korrosionsschutz,
- maßgeblichen Wasserständen (z.B. inner- und außerhalb einer Schleusenkammer oder an Staustufen).

5.2.2.2 Station

Je (Teil-)Bauwerk sollte ca. alle 50 m bis 100 m, gleichmäßig über das Bauwerk verteilt, eine Spundbohle (Station) gemessen werden, mindestens aber drei Stationen je Bauwerk (bei Spundwandlängen < 50 m: mindestens zwei Stationen).

Jede Station erhält eine eindeutige Bezeichnung. Ein aussagekräftiger Stationsname besteht z.B. aus einem Kürzel für die Lage der Station in Kombination mit einer laufenden Nummerierung – alternativ oder ergänzend können auch die Bohlennummern verwendet werden – und dem Jahr der Messung (z.B. AH02-2015 für die 2. Station im Teilbauwerk „Außenhafen“, deren Wanddicken 2015 gemessen wurde).

Bei der Festlegung von Anzahl und Lage der Stationen sind örtliche Besonderheiten zu berücksichtigen:

- Auffälligkeiten im Abrostungsbild (z.B. Stärke der Rostschicht)
- unterschiedliche Nutzung (wenn z.B. ein Teil des Bauwerkes als Anleger genutzt wird) oder bei Deponien im Hinterland
- bei örtlich besonders exponierter oder besonders geschützter Lage
- an Sonderbauwerken (z.B. Einläufen)
- Bei Folgemessungen sollte nicht an den gleichen Bohlen gemessen werden, wie bei der vorhergehenden Messkampagne (s. Abschn. 7.2.2).

Für ein Datenkollektiv, das die Verteilung der Abrostungen am Bauwerk zutreffend abbildet, sollten nicht nur die Spundwandabschnitte mit augenscheinlich geringster oder größter Korrosionsintensität untersucht werden, sondern auch solche mit „normaler“ Korrosion.

5.2.2.3 Messquerschnitt

An jeder Station werden in verschiedenen Höhenlagen sowohl über als auch unter Wasser mehrere Messquerschnitte untersucht.

Die Messquerschnitte werden entsprechend ihrer Höhenlage ab Oberkante (OK) Spundwand als Dezimalzahl in m benannt. Die Festlegung der Messquerschnittsabstände orientiert sich an den Beurteilungskriterien der Spundwand bzgl. Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit:

- Zur Beurteilung der Tragfähigkeit und zur Abgrenzung der Korrosionszonen ist eine detaillierte Darstellung des Verlaufs der mittleren Restwanddicken (s. Bild 23) erforderlich. Dies erfordert einen geringen Abstand der Messquerschnitte vor allem im Bereich der Hauptkorrosionszone und in Höhe der Wasserstände, und führt somit zu einem hohen Untersuchungsaufwand.
- Die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit erfolgt auf der Grundlage der minimalen Restwanddicke bzw. der geschätzten maximalen Abrostung, die entsprechend Abschn. 6.8 das Ergebnis einer statistischen Auswertung der Messwerte ist. Ein aussagekräftiger Schätzwert der maximalen Abrostung entsprechend der Formeln (5) oder (6) basiert auf möglichst gleichmäßig über das Bauwerk verteilten Messquerschnitten in Höhenabständen zwischen 0,5 m und 2 m. Abstände < 0,5 m erhöhen die Aussagekraft des Datenkollektivs nicht. Darüber hinaus sollte ein Mindestabstand zu den maßgeblichen Wasserständen eingehalten werden, da nur so eine eindeutige Zuordnung der Messwerte zu den Korrosionszonen möglich ist (im Grenzbereich zweier Korrosionszonen überlagern sich unterschiedliche Korrosionseinflüsse).

Die Beurteilungen von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit stellen also grundsätzlich widersprüchliche Anforderungen sowohl an die Abstände der Messquerschnitte als auch an deren Lage relativ zu den maßgeblichen Wasserständen.

Tabelle 2 gibt eine Empfehlung zur Verteilung der Messquerschnitte wieder, die diese unterschiedlichen Aspekte berücksichtigt und damit eine gleichzeitige Beurteilung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ermöglicht.

Tabelle 2: Anzahl und Verteilung der Messquerschnitte an einer Station

| Höhenbereich | Anzahl Messquerschnitte | Bemerkung |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| oberhalb MW bzw. MThw oder OW | ≥ 2 | zumindest zu untersuchende Spundwandhöhe: 1 m |
| zwischen MThw und MTnw bzw. OW und UW | 2 - 4 | nur in Tidegewässern und Schleusen: <ul style="list-style-type: none"> Anzahl abhängig von der Höhe gleichmäßig verteilt |
| unterhalb von MW bzw. MTnw oder UW | ≥ 4 | <ul style="list-style-type: none"> Anzahl abhängig von der Höhe zumindest zu untersuchende Spundwandhöhe: 2 m obere 4 m: Messabstand 0,5 m – 1,0 m unterhalb 4 m: Messabstand 1,0 m – 2,0 m |
| Hinweise | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Geringere Messquerschnittsabstände (< 0,5 m) dienen der Festlegung der Korrosionszonen; diese zusätzlichen Daten sind jedoch bei der Anzahl der erforderlichen Einzelmesswerte entsprechend. Abschn. 5.2.2.6 <u>nicht</u> zu berücksichtigen. Abstand von den maßgeblichen Wasserständen: ≥ 0,2 m; im Stillwasser ≥ 0,1 m. | | |

5.2.2.4 Messlage

In Abhängigkeit vom Profiltyp sind unterschiedliche Messlagen möglich, die mit einer fortlaufenden Nummer benannt und als Kombination u.a. folgender Kürzel beschrieben werden können (eine Auflistung sinnvoller Messlagen unterschiedlicher Profiltypen ist Anlage 2 zu entnehmen):

- | | | | |
|----------|----------------------|----------|--------|
| B | Berg / bergeseitig | L | links |
| T | Tal / talseitig | M | mittig |
| F | Flanke / Steg | R | rechts |
| P | Pfahl / Trägerprofil | | |

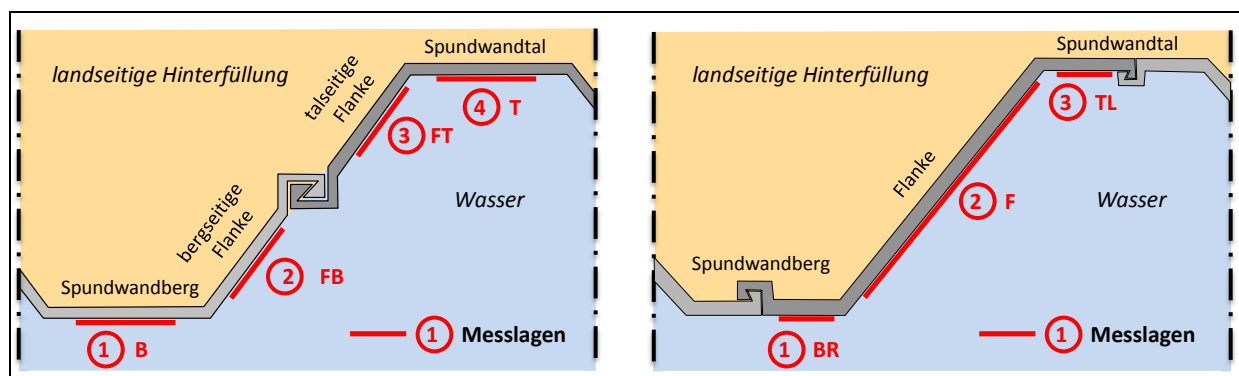


Bild 13: Beschreibung der Messlagen eines Messquerschnittes (links: U-Profil; rechts: Z-Profil)

Die vier Messlagen in Bild 13, links, sind mit Berg (B), Flanke, bergseitig (FB), Flanke, talseitig (FT) und Tal (T) und die drei Messlagen rechts mit Berg, rechts (BR), Flanke (F) und Tal, links (TL) zu beschreiben.

Bei der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass einzelne Messlagen eine unterschiedliche Korrosionsintensität aufweisen können (vgl. z.B. in

Bild 22 die Messlagen 1 und 2 mit Messlage 3).

Beispiele für Besonderheiten:

- Bei einigen Profiltypen variieren die Ausgangswanddicken im Profilquerschnitt. Dies ist z.B. bei gemischten Spundwänden der Fall: Bei den mit Füllbohlen verbundenen Doppel-T-Trägern weisen die Flansche keine einheitliche Ausgangswanddicke auf, sondern verdicken sich zum Steg hin. Im Bild 14 sind beispielhaft die Flansch-Abschnitte mit einheitlichen Ausgangswanddicken rot markiert. Nur in diesen Bereichen ist folglich die zur Berechnung der Abrostung erforderliche Ausgangswanddicke bekannt, und deshalb sollte nur hier gemessen werden.

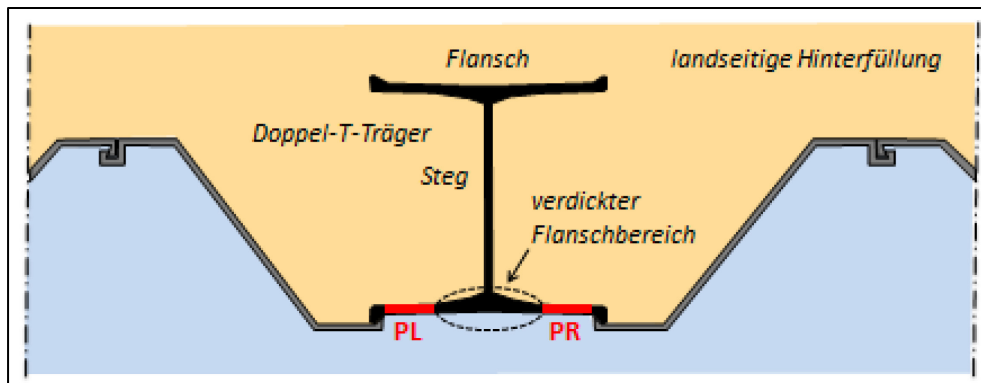


Bild 14: Messlagen einheitlicher Ausgangswanddicke am wasserseitigen Flansch eines Doppel-T-Trägers einer gemischten Spundwand (PL: Pfahl links; PR: Pfahl rechts)

- Spezielle Dalben-Bauformen sind im Unterwasserbereich auf den Bergbohlen mit Lamellen verstärkt. Dort können keine verlässlichen Messwerte erfasst und nur die Wanddicken der Flanken gemessen werden. Die Abrostungen werden dann auf die Bergbohlen des gleichen Messquerschnittes übertragen.

5.2.2.5 Messpunkt

Ein Messpunkt stellt ein ca. 10 cm² großes Areal im Schnittpunkt einer Messlage mit einem Messquerschnitt dar (vgl. Bild 12).

5.2.2.6 Einzelwerte

Jeder Messpunkt sollte über die gesamte Breite der Messlage mit jeweils 4 bis 6 Einzelmessungen untersucht werden. Zusätzlich ist die Anzahl und Größe aller beobachteten Löcher zu dokumentieren.

Für eine aussagekräftige, statistisch belastbare Beurteilung des Erhaltungszustandes sind pro Bauwerk pro Korrosionszone insgesamt mindestens 100 Einzelmesswerte erforderlich (dabei werden die zur Festlegung der Korrosionszongrenzen mittels Messquerschnittsabständen < 0,5 m generierten Werte nicht mitgezählt; s. Hinweise in Tabelle 2). In Abhängigkeit von der Höhe, der Länge und der Komplexität des Bauwerkes kann auch eine deutlich größere Anzahl von Einzelmesswerten je Korrosionszone (bis zu 500) sinnvoll sein.

Führt das Messprogramm an einem Bauwerk zu weniger als 100 Messwerten je Korrosionszone (z.B. bei sehr kurzen Spundwänden und/oder geringen Spundwandhöhen), so ist es nicht sinnvoll, mehr Einzelmessungen je Messpunkt durchzuführen oder den Höhenabstand der Messquerschnitte über die Angaben der Tabelle 2 hinaus weiter zu verringern. Die Aussagekraft einer Messkampagne kann nur durch eine größere Anzahl von Stationen erhöht werden, auch wenn dies einen höheren Aufwand erfordert.

5.2.3 Planung und Vorbereitung einer Messkampagne

Eine Spundwanddickenmessung findet in enger Zusammenarbeit zwischen dem Auftraggeber (Eigentümer, Betreiber), dem Gutachter und dem Taucher statt.

Die Planung einer Messkampagne beginnt mit einer Grundlagenermittlung. Für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung einer Spundwanddickenmessung sind folgende Informationen und Unterlagen erforderlich, die vom Bauwerksbetreiber im Vorwege zur Verfügung zu stellen sind. Im Zuständigkeitsbereich der WSV liegen diese Daten i.d.R. in der Bauwerksinspektionsakte vor.

- Lageplan
- Informationen zum Spundwandbauwerk
 - Baujahr
 - Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Messung → Berechnung der Abrostungsrate im Rahmen der Auswertung → Restnutzungsdauer
 - Bauliche Historie (Umbauten, Erweiterungen)
 - evt. Unterteilung in Teilbauwerke erforderlich
 - Nutzung und Nutzungsänderungen (z.B. Anleger, Liegestelle, Lagerfläche, Umschlag, Ladestation)
 - evt. Unterteilung in Teilbauwerke erforderlich
 - Sonderbauteile (z.B. Einläufe, Durchlässe, Fender)
 - evt. Unterteilung in Teilbauwerke erforderlich
 - Spundwandquerschnitt mit Bauwerksobere- und -unterkante, Sohltiefe und maßgeblichen Wasserständen
 - Festlegung der Messquerschnitte
 - Festlegung der Korrosionszonen im Rahmen der Auswertung
 - Stahlprofil
 - Profiltyp (z.B. U-Profil, Z-Profil, s. Anlage 2) → Festlegung der Messlagen
 - Widerstandsmoment, Ausgangswanddicke, Stahlorte

Sofern die Widerstandsmomente und Ausgangswanddicken der Stahlprofile nicht bekannt sind, können diese in den Spundwandhandbüchern der Hersteller (z.B. HSP, 2014), in einschlägigen Zahlentafelwerken (z.B. Pörschmann, 1993; Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 1995; Vismann, 2012; Witt, 2009) oder – unter Berücksichtigung des Baujahres der Spundwand – in antiquarischen Werken (z.B. Dortmund-Hörder Hüttenverein, 1938 und 1960, oder in früheren Ausgaben der vorgenannten Zahlentafeln) nachgeschlagen werden.
 - Sofern vorhanden: Art und Zustand des Korrosionsschutzes
- Aufgabenstellung (Erstmessung / Folgemessung / Akutmessung), s. Abschn. 6.1
- bei Folgemessungen: Ergebnisse früherer Bauwerksinspektionen; Beschreibung evt. vorliegender Schäden möglichst einschließlich Fotodokumentation; Hinweise auf MIC am Bauwerk oder an Nachbarbauwerken

In Kenntnis der Spundwandhöhe sowie der Anzahl und Lage der geplanten Messquerschnitte sollte eine *Messkette* (Bild 15) vorbereitet werden, die dem Taucher ein einfaches Auffinden der geplanten Messflächen selbst im trüben Wasser ermöglicht. Dabei handelt es sich um eine Kette mindestens in der Länge der freien Spundwandhöhe, die an der Spundwandoberkante befestigt wird und an der die Messquerschnitte nummeriert und mit Fähnchen markiert sind.



Bild 15: Spundwanddickenmessung mit Messkette

Im Rahmen einer *Ortsbegehung* mit Auftraggeber, Taucherfirma und Gutachter wird der Messeinsatz bzgl. des erforderlichen Equipments und des zu erwartenden Zeitaufwandes geplant. Im Detail sind dabei z.B. folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- die wasser- und die landseitige Zugänglichkeit der Spundwandanlage (Messeinsatz vom Schiff oder von Land mittels Leiter oder Arbeitsplattform; Anleger sind während der Messkampagne freizuhalten)
- an Liegestellen die Möglichkeit, Schiffe umzurangieren (andernfalls müssen die Messungen an anderer Stelle erfolgen; bei Langzeitliegestellen sollte jedoch eine möglicherweise erhöhte Korrosion berücksichtigt werden, z.B. infolge Kontaktkorrosion oder aufgrund von Streuströmen verursacht durch SchiffskKS-Anlagen)
- Frischwasser- und Stromanschlüsse nahe der geplanten Stationen

Weiterhin ist im Rahmen des Ortstermins zu klären, ob für die Bauwerksinspektion Schifffahrtssperrungen erforderlich sind, welche der folgenden Arbeits- und Hilfsmittel wann benötigt werden und wer diese zur Verfügung stellt:

- Wanddickenmessgerät, ggf. Ersatzgerät
- bei wasserseitiger Zugänglichkeit: Arbeitsschiff
bei landseitiger Zugänglichkeit: Arbeitsplattform oder Leiter für den Taucher
- Platz für das Taucherequipment (ggf. Container)
- regen- und sonnengeschützter Messplatz (ggf. Container)
- Reinigungsgeräte (s. Abschn. 5.2.4)
- bei Messungen über Wasser: Wasseranschluss oder Tauchpumpe bzw. Koppelmittel
- Stromanschluss oder Stromaggregat
- Baustellenkompressor für Druckluftgeräte (mind. 7 bar)

In Abhängigkeit vom Messgerät, von Spundwandhöhe und -profiltyp (und damit von der Anzahl der Messquerschnitte und Messlagen), vom Korrosionszustand und vom Reinigungsaufwand (Intensität von Rost, Bewuchs) ist für die Spundwanddickenmessung ca. ein Tag pro zwei Stationen erforderlich, so dass sich eine Messkampagne je nach Bauwerkslänge über mehrere Tage oder Wochen erstrecken kann.

Spundwanddickenmessungen sollten möglichst im Sommer durchgeführt werden. Nachteilig bei Messkampagnen im Winter sind z.B. Witterung, Wellengang, kürzeres Tageslicht und die Reinigungsgerätefunktion (z.B. Viskosität der Schmiermittel).

5.2.4 Durchführung der Messung

Spundwanddickenmessungen finden in enger Zusammenarbeit zwischen

- dem Taucher im Wasser, der den eigentlichen Messvorgang durchführt, und
- dem Begleitpersonal an Land oder auf dem Schiff, welches für die Datendokumentation verantwortlich ist und die Qualität der Messdaten überprüft,

statt (Bild 16). Der Taucher kommuniziert über Sprechfunk mit dem Begleitpersonal an Land. Die Datendokumentation und die Kontrolle der Messdatenqualität sollten durch das begutachtende Ingenieurbüro erfolgen.

Der Messvorgang an einer Station verläuft wie folgt (Protokollvordrucke können Anlage 2 entnommen werden):

- Einmessen der Lage der Station
- Stationsprotokoll (Anlage 2, S. A2-2) ausfüllen
- Anbringen der Messkette



Bild 16: Spundwanddickenmessung: Personal im Wasser und an Land

- je Messpunkt:
 - qualitative Beschreibung der Stahloberfläche (Korrosionstyp und -intensität)
 - sofern vorhanden: Beschreibung von Korrosionsschutz, Beschichtung, Bewuchs
 - Reinigung

Viele Messgeräte erfordern eine blanke, ebene Metalloberfläche und damit eine Reinigung der Stahloberfläche mittels Hochdruckreiniger (mind. 200 bar), Nadelhammer (Bild 17), Winkelschleifer oder Sandstrahlung. Unterwasser werden üblicherweise Druckluftgeräte verwendet. In der Regel entscheidet der Taucher vor Ort, welches Reinigungsgerät zum Einsatz kommt. Beim Einsatz des Nadelhammers kann evt. ein Nachschleifen erforderlich sein.



Bild 17: Reinigung von Messstelle von Rost und Bewuchs

- Messung der Wanddicke mittels Ultraschall, Messung der Muldentiefen mittels Tiefenlehre
- Messwerte-Protokoll ausfüllen (Anlage 2, S. A2-10)
- Qualitative Untersuchung an ca. zehn benachbarten Spundbohlen
- Fotodokumentation

Die Erfahrung zeigt, dass das Ausfüllen der Protokolle von Hand auf Papier (im Gegensatz zu einer ausschließlich digitalen Datenerfassung) sinnvoll ist: Auf diese Weise können Bemerkungen zu allen Teilaspekten der Messung frei editiert und durch Handskizzen ergänzt werden. Empfehlenswert ist auch das Führen eines Feldbuches mit allen Informationen zum Messeinsatz, das die Bearbeitung des Messberichtes auch durch einen anderen Bearbeiter oder zu einem späteren Zeitpunkt erleichtert. Auch hinsichtlich der oft schwierigen Verhältnissen vor Ort (Feuchtigkeit, Witterung) ist eine doppelte Datenerfassung - Papier und digital - sinnvoll.

6 Der Messbericht: Dokumentation und Interpretation einer Spundwanddickenmessung

Der Messbericht ist zeitnah zu erstellen und sollte folgende Themen behandeln:

- Veranlassung der Wanddickenmessung (Abschn. 6.1)
- Beschreibung des Bauwerks (Abschn. 6.2)
- Beschreibung der Messkampagne (Abschn. 6.3)
- Verifikation und Aufbereitung der Messwerte (Abschn. 6.4)
- Darstellung der Messergebnisse (Abschn. 6.5)
- Festlegung und Verifikation der Korrosionszonen (Abschn. 6.6)
- Mittlere Abrostung und Abrostungsrate (Abschn. 6.7)
- Minimale Restwanddicke, Maximale Abrostung und Abrostungsrate (Abschn. 6.8)
- Beurteilung des aktuellen Korrosionszustandes, Prognose der Restnutzungsdauer (Abschn. 6.9)
- Empfehlungen (Abschn. 6.10)

Die im Folgenden dargestellten Abbildungen entstammen BAW-Gutachten zu unterschiedlichen Spundwandbauwerken im Zuständigkeitsbereich der WSV.

6.1 Veranlassung der Wanddickenmessung

Es ist zu angeben, ob es sich um eine Erst-, Folge- oder Akutmessung handelt. Im Falle einer Folgemessung sind die Ergebnisse der früheren Messkampagne anzugeben. Bei Akutmessungen sind die vorhandenen Schäden zu beschreiben.

6.2 Beschreibung des Bauwerks

Folgende Informationen zum Bauwerk sind - sofern bekannt - im Messbericht anzugeben:

- Auftraggeber / Betreiber / Eigentümer, Taucher, Gutachter
Lageplan des Spundwandbauwerkes mit Kennzeichnung von Teilbauwerken (Bild 18)

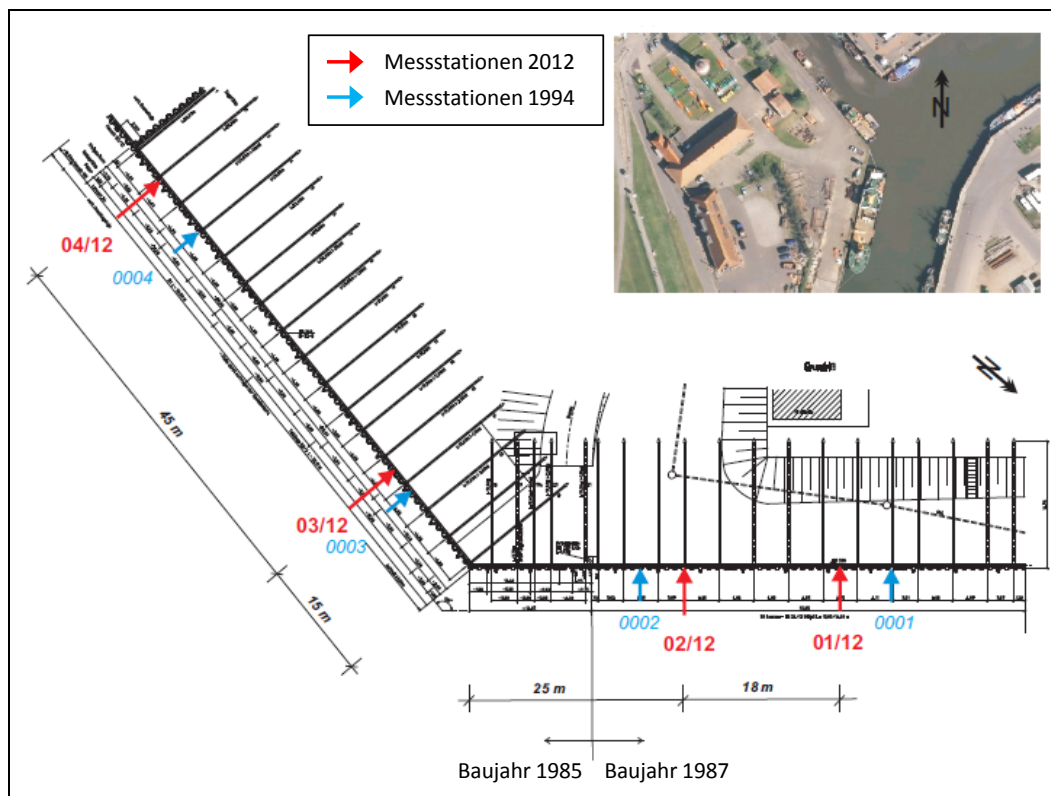


Bild 18: Lageplan mit Kennzeichnung zweier getrennt ausgewerteter Teilbauwerke („Baujahr 1985“ und „Baujahr 1987“) und Stationen der aktuellen und einer früheren Messkampagne

- Baujahr, bauliche Historie,
- Nutzung und Nutzungsänderungen
- Sonderbauteile
- Abschätzung der Belastung aus Wellengang, Strömung, Eisgang, Sandschliff (sofern erkennbar)
- Spundwandquerschnitt mit Bauwerksobere- und -unterkante, Sohlentiefe und maßgeblichen Wasserständen
- Stahlprofil → Profiltyp, Widerstandsmoment, Ausgangswanddicke, Stahlorte
- sofern vorhanden: Art und Zustand von Korrosionsschutzmaßnahmen

6.3 Beschreibung der Messkampagne

Die Beschreibung der Messkampagne beinhaltet

- allgemeine Angaben (Messzeitraum, Messtechnik)
- Untersuchungsprogramm einschließlich
 - Lageplan der Stationen (auch früherer Messkampagnen sofern vorhanden und bekannt; s. Bild 18),
 - Systemschnitt mit Messquerschnitten (Bild 19).

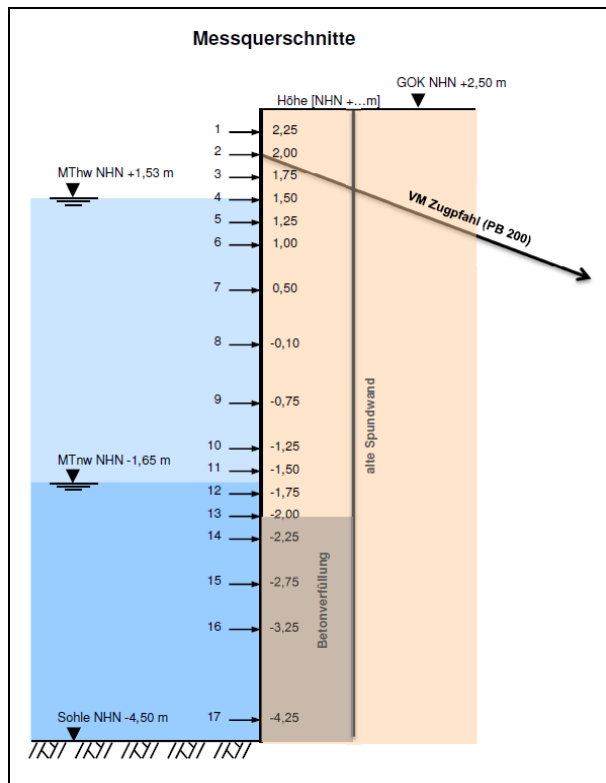


Bild 19: Lage der Messquerschnitte

6.4 Verifikation und Aufbereitung der Messwerte

Sofern *Mulden* gemessen wurden, wird die Mulden-Restwanddicke als Differenz zwischen dem Restwanddicken-Mittelwert des nächstgelegenen Messpunktes und dem Messwert der Tiefenlehre bestimmt (Bild 20) und als Einzelwert registriert.

Jedes erkundete *Loch* wird – unabhängig von seiner Größe – als Einzelwert der Restwanddicke $t = 0$ mm registriert und dem nächstgelegenen Messpunkt zugeordnet. Mulden und Löcher werden bei der Bestimmung der mittleren Restwanddicke entspr. Abschn. 2.5 nicht berücksichtigt.

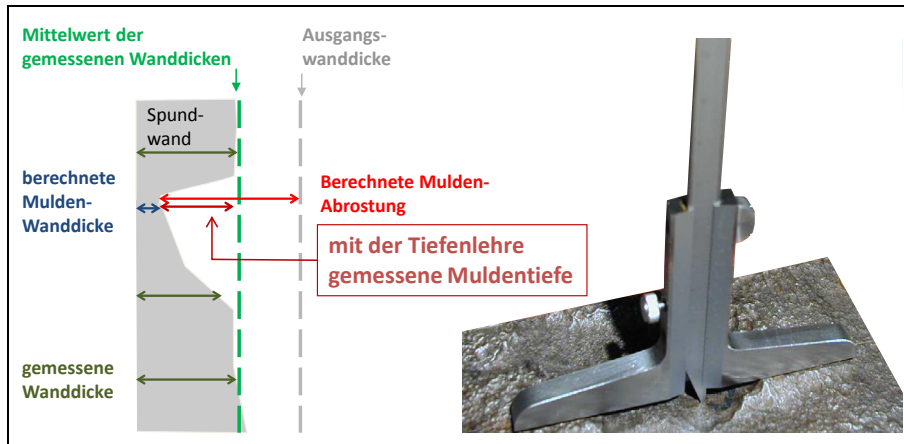


Bild 20: Bestimmung der Restwanddicke bei Mulden

Aus allen unmittelbar gemessenen bzw. aus Löchern und Mulden abgeleiteten Einzelrestwanddicken t werden entsprechend Formel (1) die Einzelabrostungen bestimmt. Anschließend wird dieser Datenbestand plausibilisiert:

- Falls die Messwerte in ihrer Größenordnung atypisch sind (im Vergleich mit Bild 1, Tabelle 2 oder Anlage 4), ist zu prüfen, ob ein systematischer Mess- oder Auswertungsfehler vorliegen kann oder ob Besonderheiten am Bauwerk ein abweichendes Korrosionsverhalten verursacht haben können (z.B. beidseitige Korrosion, Korrosionsschutz).
- Zeigen einzelne Stationen deutlich unterschiedliche Abrostungen, so ist zu prüfen, ob es sich um mehrere, aufgrund unterschiedlicher Korrosionseinflüsse (Liegestelle, Nutzung, Korrosionsschutz) getrennt auszuwertende Teilbauwerke handelt (vgl. Abschn. 5.2.2.1).
- Zeigen frühere Messkampagnen
 - bereits höhere Abrostungen, so sind die historischen und die aktuellen Ergebnisse zu hinterfragen. Mögliche Ursachen sind nicht vergleichbare Messorte mit unterschiedlichen Korrosionseinflüssen, abweichende Ausgangswanddicken oder systematische Messfehler.
 - deutlich höhere Abrostungsraten (obwohl die Rate mit zunehmendem Spundwandalter abnehmen müsste), so ist zu prüfen, ob an exakt den gleichen Bohlen gemessen wurde (bei der vorangehenden Messung wurde die schützende Rostschicht verletzt, s.a. Abschn. 7.2.2) oder ob seit der Vormessung eine Nutzungsänderung (z.B. Einrichtung einer Liegestelle, Lagefläche) stattgefunden hat.
- Negative Abrostungen – d.h. Restwanddicken, die größer sind als die Ausgangswanddicke – sind nicht möglich.
 - Treten diese nur vereinzelt auf, ist die Ursache vermutlich eine lokale Anomalie im Stahl oder eine vernachlässigbare Messungenauigkeit. In diesem Fall werden die negativen Abrostungen für die weitere Auswertung auf +0,1 mm hochgesetzt.
 - Treten gehäuft negative Abrostungen auf, so lassen diese auf eine zu hohe (und deshalb vor der eigentlichen Auswertung abzumindernde) Plan-Ausgangswanddicke schließen. Ursächlich können z.B. positive Walztoleranzen oder fehlerhafte Planunterlagen sein. In diesem Fall müssen die Ausgangswanddicken korrigiert werden. Auf die Korrektur ist im Messbericht hinzuweisen.

Im Bild 21 wird beispielhaft eine derartige Korrektur erläutert.

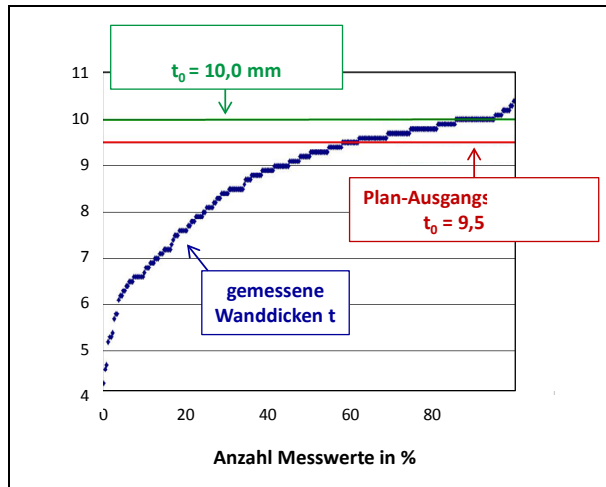


Bild 21: Korrektur der Ausgangswanddicke

In Blau wurden die Messergebnisse eines Bauwerkes als Summenkurve aufgetragen. Im Beispiel wird die Plan-Ausgangswanddicke von 9,5 mm (rote Linie) z.T. deutlich überschritten und deshalb auf die Ist-Ausgangswanddicke von 10,0 mm (grüne Linie) hochgesetzt. Einzelne Überdicken werden toleriert (die wenigen verbleibenden negativen Einzelabrostungen werden für die weiteren Auswertungen auf 0,1 mm hochgesetzt).

6.5 Darstellung der Messergebnisse

Nach Verifikation und ggf. Korrektur der Daten (die im Messbericht zu dokumentieren ist) werden alle Einzelwerte einer Wanddickenmessung dem Messbericht tabellarisch (z.B. entsprechend dem Messprotokoll, s. Anlage 2) beigefügt.

Zur Darstellung der Messergebnisse im Messbericht gehören

- die Restwanddickenprofile aller Stationen und Messlagen (Abschn. 6.5.1,
- Bild 22) sowie
- ein Profil der mittleren Restwanddicke und des reduzierten Widerstandsmomentes des Bauwerkes (s. Abschn. 6.5.2, Bild 23).

Auf Grundlage dieser Darstellungen werden

- die Korrosionszonen festgelegt und verifiziert (Abschn. 6.6).

Getrennt nach Korrosionszonen werden dann

- die mittlere Abrostung und Abrostungsrate (Abschn. 6.7, Bild 26) sowie
- mittels statistischer Verfahren die (geschätzte) minimale Restwanddicke, maximale Abrostung und Abrostungsrate (Abschn. 6.8)

bestimmt.

Zusätzlich werden die Ergebnisse der qualitativen Untersuchung dokumentiert.

6.5.1 Restwanddicken je Station und Messlage

Die Restwanddicken werden je Station und Messlage als Restwanddickenprofile höhengerecht dargestellt (Bild 22). Dabei

- wird je Messlage ein Einzelprofil angezeigt.
- Die Einzelprofile sind mit der jeweiligen Messlagennummer gekennzeichnet (in Bild 22: Messlagen 1, 2 und 3), deren Lage der Schemazeichnung rechts zu entnehmen ist; hier wird auch die Profilbezeichnung angegeben.
- Die waagerechten roten Linien kennzeichnen die Spannweite der gemessenen Einzelwanddicken am Messpunkt.
- Die schwarzen Punkte stehen für Mulden oder Löcher. Die Mulden-Restwanddicken werden rechts neben dem Profil als Zahlenwert in mm mit einer Nachkommastelle angegeben. Ein Loch wird in Form eines schwarzen Punktes am linken Profilrand bei $t = 0$ mm dargestellt und für einzelne Löcher bzw. es wird für die Löcher einer Lochgruppe – wie bei der Messlage 2 in Bild 22 – der ungefähre Durchmesser angegeben.
- Die vertikal verlaufende rote Profillinie verbindet die Restwanddicken-Mittelwerte.
- Die Ausgangswanddicke t_0 ist als gestrichelte vertikale schwarze Linie dargestellt und im jeweiligen Profil als Zahlenwert unterhalb des Profils angegeben.
- In der Maßstabsleiste rechts der Restwanddicken-Profile sind die zugehörigen NHN-Höhen von Sohle und Geländeoberkante (= Spundwandoberkante) sowie die maßgeblichen Wasserstände angegeben.

Gelegentlich zeigen auch die Messlagen einer Station ein unterschiedliches Abrostungsverhalten (s. z.B. Spundwandtal-Messlage 3 in

Bild 22, die im Gegensatz zu den Messlagen 1 (Berg) und 2 (Flanke) deutlich geringere Abrostungen aufweist). In diesem Fall sind die Daten getrennt auszuwerten, und besonderes Augenmerk ist auf die stärker korrodierten Messlagen zu richten.

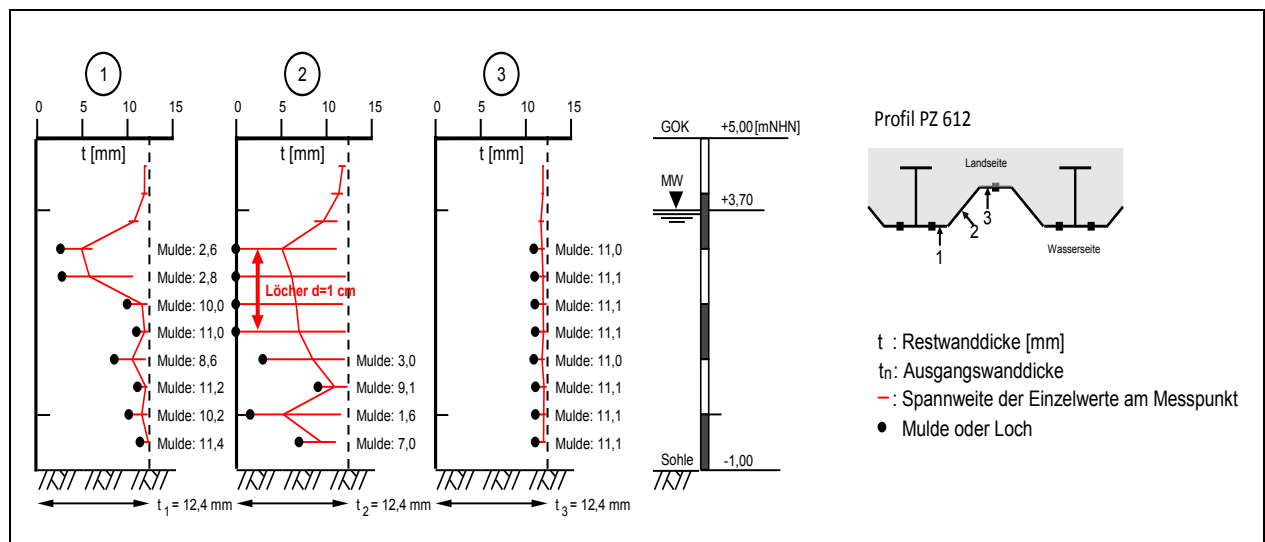


Bild 22: Restwanddickenprofile einer Station mit drei Messlagen am Beispiel einer Spundwand mit konstantem Wasserstand

6.5.2 Mittlere Restwanddicke und reduziertes Widerstandsmoment des Bauwerks

Analog zu den Restwanddicken-Profilen der Stationen und Messlagen wird das Profil der mittleren Restwanddicke \bar{t} für das Gesamtbauwerk und – daraus abgeleitet – ein Profil des korrosionsbedingt reduzierten Widerstandsmoments W_x erstellt (Bild 23, s. Formel (3)). Zur Beurteilung der Tragfähigkeit werden i.d.R. nur die Messwerte der Bohlenrücken (Berg- und Talbohle) berücksichtigt, da das Widerstandsmoment nur durch diese Querschnittsteile maßgeblich beeinflusst wird (vgl. Abschn. 4.1).

In der Profil-Darstellung der mittleren Restwanddicke und des reduzierten Widerstandsmoments eines Bauwerks

- verbindet die vertikale rote Linie die mittleren Restwanddicken je Tiefenlage, die zusätzlich als Zahlenwert angegeben sind.
- Das reduzierte Widerstandsmoment W_x wird im Profil als Prozentanteil des Ausgangswiderstandsmoments W_0 dargestellt und zusätzlich rechts neben der Profilsäule als Absolutwert in $\text{cm}^3/\text{lf. m}$.

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit des Spundwandbauwerkes kann darüber hinaus auch ein Vergleich

- vorhandenes vs. erforderliches Widerstandsmoment oder
- vorhandenes vs. zulässiges Biegemoment

sinnvoll sein.

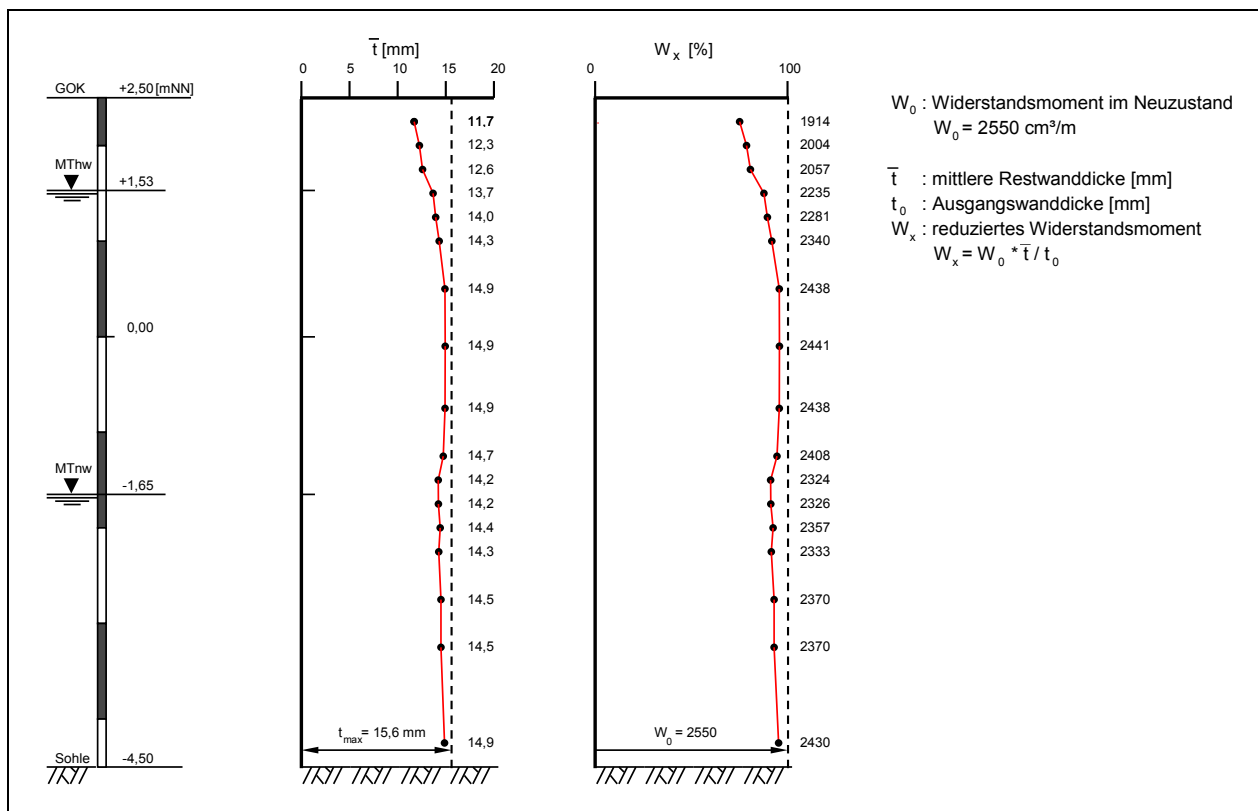


Bild 23: Mittlere Restwanddicken und reduzierte Widerstandsmomente eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand unter Tideinfluss

Die weitere Datenauswertung erfordert die Festlegung und Verifikation der Korrosionszonen, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

6.6 Festlegung und Verifikation der Korrosionszonen

Die eigentliche Auswertung beginnt mit der Festlegung und Verifikation der Korrosionszonen. Das Restwanddickenprofil des Gesamtbauwerkes (s. Bild 23) bildet dazu zusammen mit den maßgeblichen Wasserständen die Voraussetzung für eine zutreffende Bestimmung der Kennwerte der Korrosion. Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen statistischen Auswertungen beruhen auf den Datenkollektiven der einzelnen Korrosionszonen, so dass die Aussagekraft und Belastbarkeit der Korrosionskennwerte maßgeblich von einer zutreffenden Festlegung dieser Zonen abhängig ist.

6.6.1 Vier-Zonen-Modell

Bild 24 zeigt links, welche Korrosionszonen-Grenzen nach dem Vier-Zonen-Modell (s. Abschn. 3.1.1.1) über die maßgeblichen Wasserstände eindeutig definiert sind (grün) und welche Grenzen eine Vorauswertung der Messwerte erfordern (rot):

- Die Grenze zwischen Spritzwasser- und Luftzone (soweit Bestandteil der Spundwanddickenmessung) wird während der Messung vor Ort am Bauwerk festgelegt (z.B. anhand eines Farbwechsels des Spundwandstahls, s. Abschn. 3.2) und an den Messwerten überprüft.
- Die Festlegung der Niedrigwasserzone erfolgt auf der Grundlage des Profils der mittleren Restwanddicken des Bauwerkes (Bild 24, rechts). In dieser Darstellung wird der Bereich geringster Wanddicken über- und unterhalb des Wasserspiegels der Nwz zugeordnet. Da aber das Restwanddickenprofil des Bauwerkes aufgrund der Mittelwertbildung lokale Schwankungen in der Korrosionsintensität egalisiert, ist die Einteilung mit den Restwanddickenprofilen der einzelnen Stationen (Bild 22) abzugleichen, um so auch örtliche Abweichungen berücksichtigen zu können. Wenn sich im Profil der mittleren Restwanddicken keine Zone erhöhter Korrosion abzeichnet, so sollte für die weitere Auswertung der Bereich zwischen MW und zwei Meter unter MW (bzw. MTnw oder UW) als Nwz definiert werden.

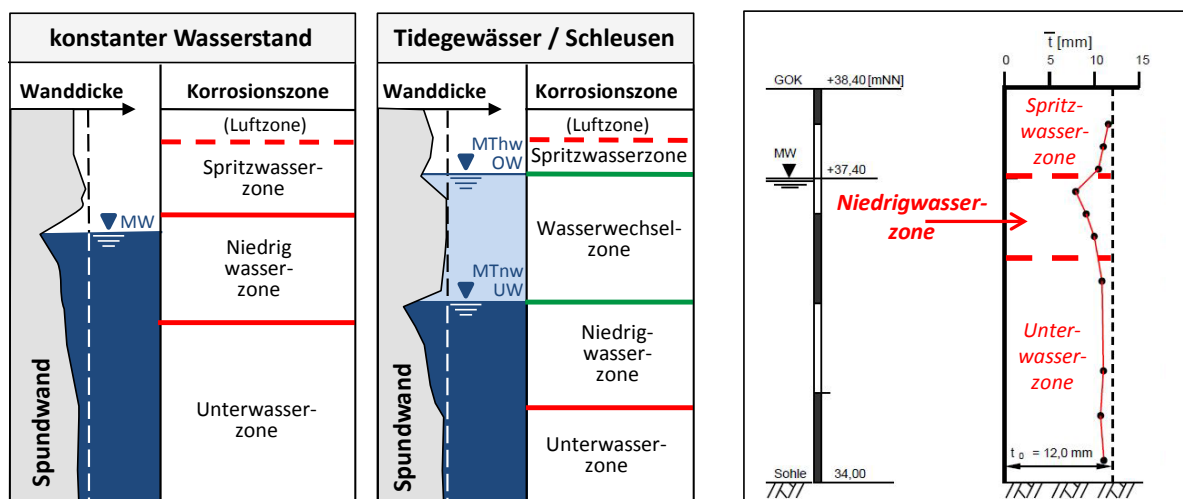


Bild 24: Festlegung der Korrosionszonen im Vier-Zonen-Modell
 Links: grün: anhand der Wasserstände eindeutig definierte Korrosionszonen-Grenzen;
 rot: vom Gutachter festzulegende Grenzen
 Rechts: Korrosionszonen im Profil der mittleren Restwanddicken eines Bauwerkes
 (Beispiel für ein Gewässer mit konstantem Wasserstand)

6.6.2 Drei-Zonen-Modell

Die Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell beruhen ausschließlich auf den maßgeblichen Wasserständen (s. Abschn. 3.1.1.2) und bedürfen deshalb keiner Vorauswertung.

6.6.3 Verifikation der Korrosionszonen

Unabhängig ob nach dem Vier- oder dem Drei-Zonen-Modell ermittelt, sind die Korrosionszonen nun zu verifizieren.

Die Kennwerte der Korrosion werden – wie in den folgenden Kapiteln beschrieben – überwiegend statistisch bestimmt. Untersuchungen (z.B. Alberts und Heeling, 1997, Uerkvitz, 2003) haben gezeigt, dass die Abrostungen einer Korrosionszone eines Bauwerkes linkschief lognormalverteilt sind⁴: Es gibt folglich keine negativen Werte, die kleineren Messwerte (links) bilden das Maximum der Häufigkeit, und die Daten streuen weit nach rechts in den Bereich der größeren Messwerte (s.a. Bild 25).

Im Falle einer perfekten Lognormalverteilung der Abrostungen stimmt der Verlauf der Dichtefunktion (rote Linie in Bild 25) exakt mit den grauen Histogrammsäulen überein (dazu muss die Klassenbreite der Histogrammsäulen an die Skalierung der Dichtefunktion angepasst sein).

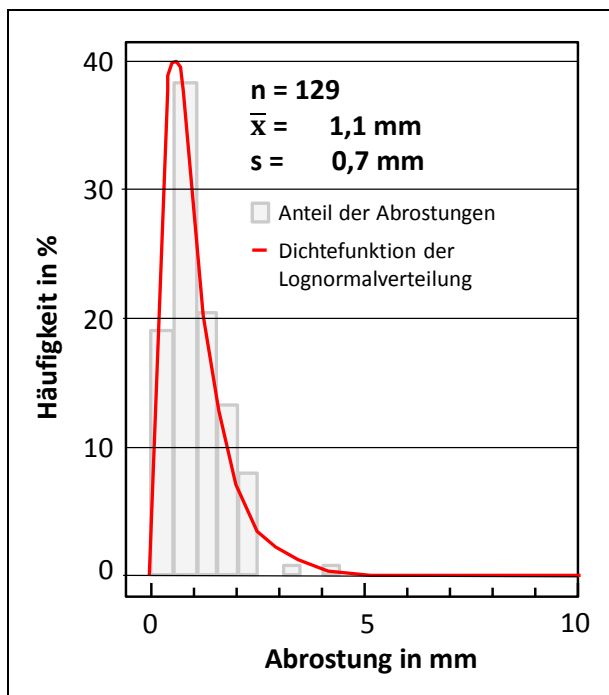


Bild 25: Linksschiefe Lognormalverteilung der Abrostungen einer Korrosionszone (hier die Spritzwasserzone einer 13 Jahre alten Spundwand; nach Alberts und Heeling, 1997)

Für die Auswertung einer Spundwanddickenmessung ist bereits eine prinzipielle Übereinstimmung – wie in Bild 25 dargestellt - ausreichend, sodass aufwändigere statistische Tests nicht erforderlich sind. Je genauer aber die statistische Verteilung der Abrostungswerte einer Korrosionszone einer Lognormalverteilung entspricht, desto aussagekräftiger sind die ermittelten Kennwerte der Korrosion. Dies gilt selbst dann, wenn die Korrosionszonen am Bauwerk nicht oder nicht eindeutig zu unterscheiden sind. Deutlich von den Histo-

⁴ Daten sind lognormalverteilt, wenn die logarithmierten Daten normalverteilt sind. Die Lognormalverteilung ist typisch für Wachstumsprozesse.

grammen abweichende Dichtefunktionen können auftreten, sobald unterschiedliche Korrosionseinflüsse für die Abrostungen ursächlich sind, beispielsweise wenn

- das Bauwerk (z.B. wegen unterschiedlicher Nutzung) bzgl. der Korrosion aus mehreren Teilbauwerken besteht, die getrennt auszuwerten wären,
- die Korrosionszonen falsch festgelegt wurden oder
- einzelne Messlagen trotz unterschiedlichem Abrostungsverhalten oder unterschiedlicher Ist-Ausgangswanddicken zusammenfassend ausgewertet wurden.

Die in den folgenden Kapiteln beschriebene Berechnung der Kennwerte der Korrosion gilt jedoch nur für lognormalverteilte Datenkollektive. Hier wäre deshalb eine Neuordnung der Daten (zu Teilbauwerken, zu korrigierten Korrosionszonen) und eine erneute Überprüfung erforderlich.

6.7 Mittlere Abrostung und Abrostungsrate

Aus den mittleren Restwanddicken und der Ist-Ausgangswanddicke wird ein Profil der mittleren Abrostung \bar{a} und – in Kenntnis des Bauwerksalters – der mittleren Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ abgeleitet. Die höhengerechten Profile erlauben einen Überblick über die Korrosionsintensität am Bauwerk.

6.7.1 Vier-Zonen-Modell

In der Profil-Darstellung der mittleren Abrostung und Abrostungsrate eines Bauwerks verbinden die vertikalen roten Linien den Mittelwert der in einer Tiefenlage bestimmten mittleren Abrostung und Abrostungsrate; zusätzlich sind die Zahlenwerte angegeben.

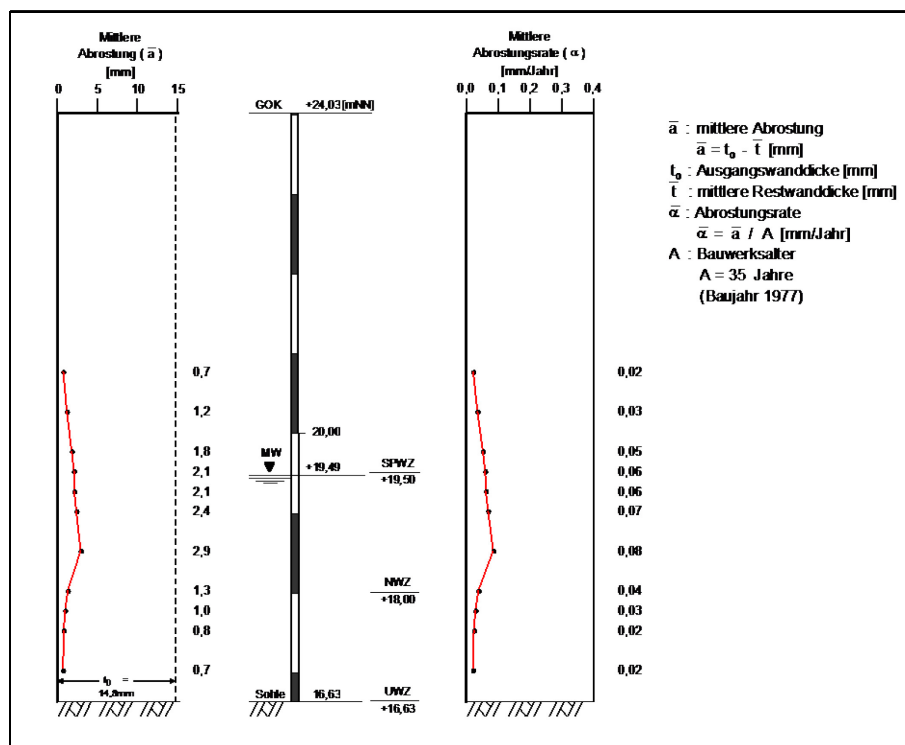


Bild 26: Mittlere Abrostungen und Abrostungsraten eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand ohne Tideeinfluss

Neben der Maßstabsleiste sind die Unterkanten der (verifizierten) Korrosionszonen angegeben.

Je Korrosionszone wird als Kennwert der Korrosion ein Mittelwert der Abrostung bzw. Abrostungsrate bestimmt.

6.7.2 Drei-Zonen-Modell

Nach dem Drei-Zonen-Modell wird die tiefenbezogene mittlere Abrostung in Form einer nichtstetigen Exponentialfunktion (Bild 27: Formeln 4a – 4f) dargestellt. Die Regressionskoeffizienten b_0 bis b_7 werden für jeden der in Bild 27 dargestellten Tiefenbereiche bestimmt. Die Regressionskoeffizienten sind das Ergebnis einer exponentiellen Regressionsanalyse der Abrostungswerte einer Wanddickenmessung, die mit gängigen Statistikprogrammen oder z.B. als Excel-Auswertung durchgeführt werden kann.

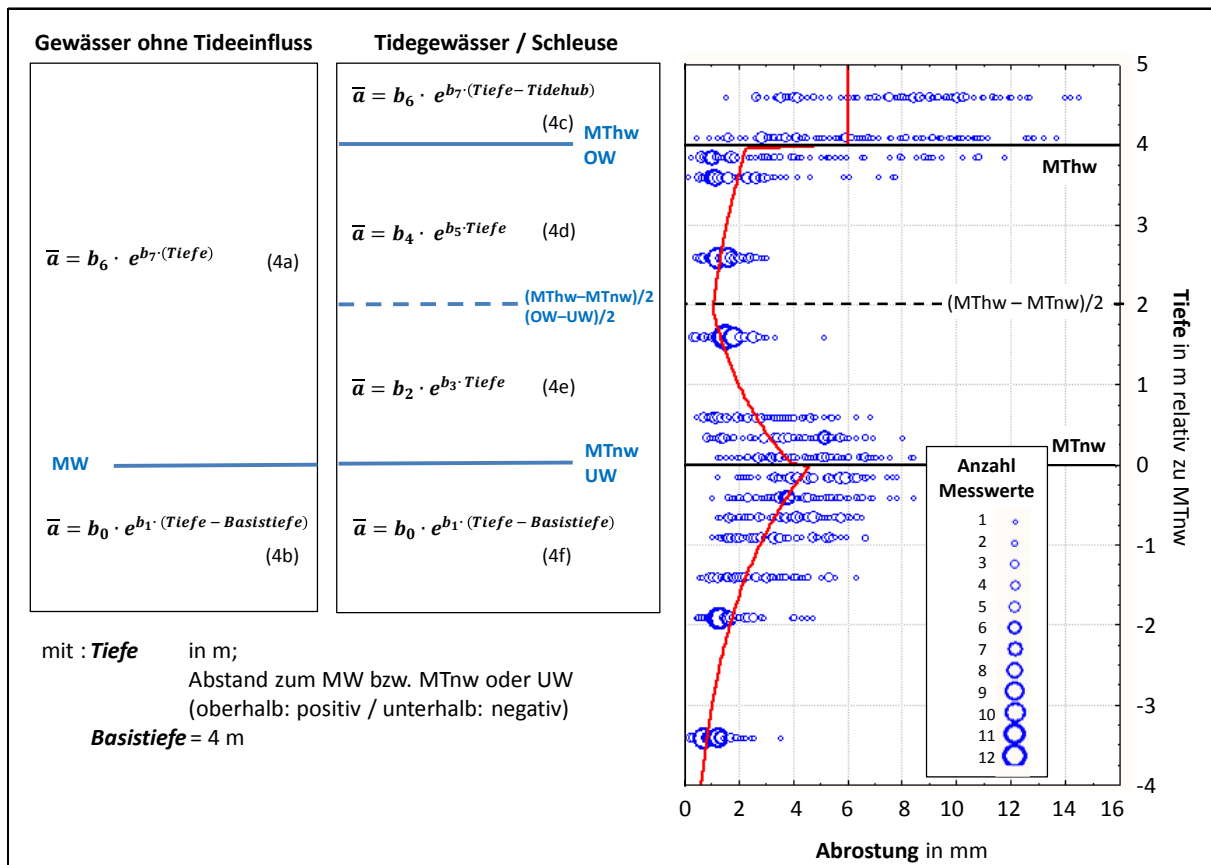


Bild 27: Berechnung der tiefenbezogenen mittleren Abrostung \bar{a} mittels nichtstetiger Exponentialfunktion
Links: Formeln (4a – 4f) für unterschiedliche Höhenbereiche
Rechts: Profil der mittleren Abrostungen am Beispiel einer Spundwand im Tidebereich

6.8 Minimale Restwanddicke, Maximale Abrostung und Abrostungsrate

Zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit eines Spundwandbauwerkes ist die Kenntnis der minimalen Restwanddicke bzw. der maximalen Abrostung und für die Prognose der Restnutzungsdauer die der maximalen Abrostungsrate erforderlich.

Untersuchungen der BAW (Alberts und Heeling, 1997) haben jedoch gezeigt, dass die Bestimmung der Wanddicke besonders bei stark strukturierten Oberflächen (d.h. in Bereichen intensiver Korrosion) an ihre messtechnischen Grenzen stößt. Deshalb kann nicht davon ausgegangen werden, dass die wahre minimale Restwanddicke ein Bestandteil des Datenkollektivs einer Spundwanddickenmessung ist. Würde man also einfach die geringste gemessene Wanddicke t_{\min} ungeprüft zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit heran-

ziehen, so würde die wahre minimale Restwanddicke über- und damit die maximale Abrostung unterschätzt werden.

6.8.1 Vier-Zonen-Modell

Ein aussagekräftiger Schätzwert für die wahre maximale Abrostung des Bauwerkes lässt sich aus den Daten der Nwz mittels der Formel (5) für die obere Toleranzgrenze lognormalverteilter Daten T_{oben} bestimmen:

$$\text{geschätzte maximale Abrostung } A_{max} = T_{oben} = e^{\bar{x}_{ln} + k_{n;0,975;0,95} \cdot s_{ln}} \quad \text{in mm} \quad (5)$$

- mit:
- T_{oben} rechte Toleranzgrenze des Toleranzintervalls
= Wertebereich, der mit einer Wahrscheinlichkeit von $(1-\alpha) \cdot 100\%$ mindestens $p \cdot 100\%$ der Werte der Grundgesamtheit enthält
 - \bar{x}_{ln} arithmetisches Mittel der logarithmierten Daten
 - $k_{n;0,975;0,95}$ Annahmekennwert (s. Tabelle 3) in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n (Abrostungswerte der Nwz); folgende Aussage trifft mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% zu: *Mindestens 97,5% der Werte der Grundgesamtheit ist kleiner oder gleich T_{oben}*
 - s_{ln} Schätzwert für die Standardabweichung der logarithmierten Daten:

$$s_{ln} = \sqrt{\frac{\sum (x_{ln} - \bar{x}_{ln})^2}{n - 1}}$$

Das heißt: bei einer erneuten (fiktiven) Wanddickenmessung kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % davon ausgegangen werden, dass 97,5 % der dann ermittelten Abrostungswerte kleiner oder gleich dem nach Formel (5) berechneten A_{max} -Wert sein werden.

Tabelle 3: Annahmekennwert k für $p=0,975$ und $1-\alpha = 0,95$ in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n ; berechnet nach John (1979)

| n | $k_{n;0,975;0,95}$ | n | $k_{n;0,975;0,95}$ | n | $k_{n;0,975;0,95}$ | n | $k_{n;0,975;0,95}$ |
|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|----------|--------------------|
| 5 | 4,91 | 19 | 2,82 | 90 | 2,29 | 600 | 2,08 |
| 6 | 4,29 | 20 | 2,79 | 100 | 2,27 | 700 | 2,07 |
| 7 | 3,92 | 22 | 2,74 | 110 | 2,26 | 800 | 2,06 |
| 8 | 3,68 | 24 | 2,69 | 120 | 2,24 | 900 | 2,06 |
| 9 | 3,50 | 26 | 2,66 | 130 | 2,23 | 1000 | 2,05 |
| 10 | 3,36 | 28 | 2,62 | 140 | 2,22 | 1500 | 2,03 |
| 11 | 3,26 | 30 | 2,60 | 150 | 2,21 | 2000 | 2,02 |
| 12 | 3,17 | 35 | 2,54 | 200 | 2,17 | 4000 | 2,01 |
| 13 | 3,09 | 40 | 2,49 | 250 | 2,15 | 6000 | 2,00 |
| 14 | 3,03 | 45 | 2,46 | 300 | 2,13 | 8000 | 1,99 |
| 15 | 2,98 | 50 | 2,43 | 350 | 2,12 | 10000 | 1,99 |
| 16 | 2,93 | 60 | 2,38 | 400 | 2,11 | 15000 | 1,98 |
| 17 | 2,89 | 70 | 2,34 | 450 | 2,10 | | |
| 18 | 2,85 | 80 | 2,31 | 500 | 2,09 | ∞ | 1,96 |

Im Detail ist die Schätzung der maximalen Abrostung entsprechend Formel (5) bei Alberts und Heeling (1997) beschrieben.

Nach den Erfahrungen der BAW liefert Formel (5) eine gute Grundlage für die Prognose der Restnutzungsdauer hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit. Jedoch wird das Ergebnis stark durch die subjektive Festlegung der N_{wz} beeinflusst, deren Abrostungswerte die Datengrundlage für die Prognose bilden.

6.8.2 Drei-Zonen-Modell

Die geschätzte maximale Abrostung für eine bestimmte Tiefe kann nach dem Drei-Zonen-Modell in Anlehnung an die Formeln für die mittlere Abrostung (4a – 4f, s. Bild 27) berechnet werden, wobei die Gleichungen um einen zusätzlichen Faktor erweitert werden, der die Spannweite der Messwerte berücksichtigt (s. Formel (6); Uerkvitz, 2003).

Zur Berechnung der geschätzten maximalen Abrostung des Bauwerkes ist der Kennwert für diejenige Tiefe zu ermitteln, für die die höchsten Abrostungen zu erwarten ist. In der Regel befinden sich diese im oberen Bereich der Uwz, d.h. in Höhe des bzw. knapp über oder unter MW (in Tidegewässern: MTnw; in Schleusen: UW). Auf der sicheren Seite liegend sollte die geschätzte maximale Abrostung mittels der Formel (4b) bzw. (4f) aus Bild 27 exakt für den Wasserspiegel bestimmt werden (auch wenn hier eine Sprungstelle in der nichtstetigen Exponentialfunktion vorliegt):

$$\text{geschätzte maximale Abrostung } A_{max} = b_x \cdot e^{b_y \cdot \text{Tiefe}} \cdot e^{2 \cdot s_{ln}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad \text{in mm} \quad (6)$$

mit: b_x, b_y Regressionskoeffizienten, ermittelt aus den Daten der Uwz mittels gängiger Statistikprogramme

Tiefe entsprechend Formeln (4b) bzw. (4f):

= Abstand zum [MW / MTnw / UW] – Basistiefe = 0 – (-4) m = **4 m**

s_{ln} Schätzwert für die Standardabweichung der logarithmierten Daten

n Stichprobenumfang (Daten der Unterwasserzone)

6.8.3 Abrostungsanomalien und Anomale Löcher

In Ausnahmefällen kann innerhalb des Datenkollektivs eine gemessene maximale Abrostung a_{max} vorkommen, die größer ist als der Schätzwert A_{max} . In diesem Fall ist a_{max} anstelle von A_{max} der Beurteilung des Korrosionszustandes zugrunde zu legen. Ursächlich für solche hohen, statistisch nicht prognostizierbaren Einzelabrostungen sind lokal wirkende, korrosive Phänomene, von denen die restlichen Daten nicht beeinflusst wurden wie z.B.

- kleinräumige Beschädigungen der Spundwand,
- im Zuge der Stahlherstellung entstandene Anomalien oder
- die sogenannten „anomalen Löcher“ (Bild 28).

Diese meist kleinen Löcher haben keinen (statistischen) Bezug zu den gemessenen Restwanddicken. Offensichtlich haben sie eine andere Ursache als die „normalen“ Wanddickenverluste und sind wahrscheinlich das Ergebnis lokal begrenzter, z.B. mikrobakterieller Prozesse. Sie lassen sich deshalb im Gegensatz zu den „normalen“ Löchern nicht mittels einer statistischen Analyse aus den gemessenen Restwanddicken prognostizieren. Anomale Löcher können nur bei einer Messkampagne entdeckt werden.

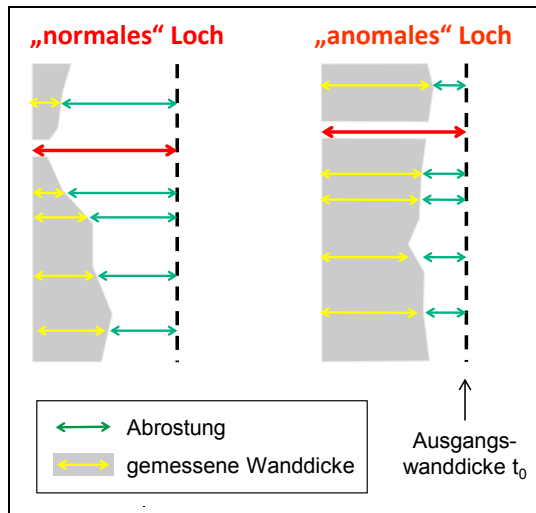


Bild 28: Normale und anomale Löcher

6.9 Beurteilung des aktuellen Korrosionszustandes, Prognose der Restnutzungsdauer

6.9.1 Schadensdokumentation

Festgestellte Schäden sind zu dokumentieren (z.B. mittels Fotos und auf dem Protokoll der Bauwerksbesichtigung, s. Anlage 2) und nach MSV zu klassifizieren (s. Abschnitt 7.3).

6.9.2 Kennwerte der Korrosion

Getrennt nach Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind im Messbericht die Kennwerte der Korrosion je (Teil-)Bauwerk und Korrosionszone zusammenfassend darzustellen (Vorlagen s. Tabelle 4 und Tabelle 5).

Tabelle 4: Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Tragfähigkeit und der Schadensklasse: mittlere Abrostung und Abrostungsrate, maximale Muldentiefe

| Korrosionszone | Höhenbereich in mNHN | | Mittlere Abrostung \bar{a} | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ | max. Muldentiefe | |
|------------------------|----------------------|---------|------------------------------|------|----------------------------------------|------------------|------|
| | von | bis | in mm | | in mm/Jahr | in mm | |
| (Luftzone) | (GOK) | | | | | | |
| Spritzwasserzone | | | | | | | |
| (Wasserwechselzone) | | | | | | | |
| Niedrigwasserzone | | | | | | | |
| Unterwasserzone | | (Sohle) | | | | | |
| | | | in mm | in % | | in mm | in % |
| OK Spwz bis Basistiefe | (von) | (bis) | | | | | |

Tabelle 5: Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit: gemessene und geschätzte maximale Abrostung, geschätzte maximale Abrostungsrate

| Korrosionszone | Höhenbereich in mNHN | | Gemessene max. Abrostung a_{max} | Geschätzte max. Abrostung A_{max} | Geschätzte max. Abrostungsrate α_{max} |
|---------------------|----------------------|---------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| | von | bis | in mm | in mm | in mm / Jahr |
| (Luftzone) | (GOK) | | | | |
| Spritzwasserzone | | | | | |
| (Wasserwechselzone) | | | | | |
| Niedrigwasserzone | | | | | |
| Unterwasserzone | | (Sohle) | | | |

Auf Grundlage der geschätzten maximalen Abrostung A_{max} bzw. der Abrostungsrate α_{max} wird die Gebrauchstauglichkeit der Spundwand beurteilt bzw. die Restnutzungsdauer ermittelt. Sobald A_{max} größer als die Ausgangswanddicke t_0 ist, ist mit Durchrostungen zu rechnen, selbst wenn diese am Bauwerk noch nicht gesichtet wurden. Je deutlicher die geschätzte maximale Abrostung die Ausgangswanddicke überschreitet, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten zahlreicher bzw. größerer Löcher.

Auf Grundlage der mittleren Abrostung \bar{a} bzw. der Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ und des daraus ermittelten reduzierten Widerstandmomentes W_x kann die Restnutzungsdauer bzgl. Tragfähigkeit prognostiziert werden.

6.9.3 Korrosionsintensität

Die Korrosionsintensität kann nach Tabelle 2 auf der Grundlage der mittleren und der geschätzten maximalen Abrostungsrate in der Nwz klassifiziert werden. Treten im Ausnahmefall z.B. in der Spwz höhere Abrostungsraten als in der Nwz auf, so ist dies gesondert zu vermerken.

6.9.4 Vergleich mit historischen Daten

Sofern bereits Wanddickenmessungen für das Spundwandbauwerk vorliegen, werden die Ergebnisse der aktuellen und früherer Messkampagnen miteinander verglichen. Widersprüche sind zu diskutieren (s.a. Abschn. 6.4).

6.10 Empfehlungen

6.10.1 Sanierungsempfehlung

Wurden im Rahmen der Wanddickenmessung relevante Schäden (vgl. Abschnitt 7.3.1) an der Spundwand festgestellt, folgt eine Sanierungsempfehlung. Dazu ist zu beschreiben, welche Bereiche (d.h. Höhen- und/oder Stationsbereich) einer (kurz-, mittel- und/oder langfristigen) Sanierung bedürfen. Dazu sollten nicht nur die Bauwerksprofile der mittleren Restwanddicken (Bild 23) berücksichtigt werden, sondern auch die Restwanddickenprofile der einzelnen Stationen (Bild 22).

Durchrostungen erfordern stets Sanierungsmaßnahmen.

Mögliche Sofortmaßnahmen sind die Verstärkung oder der Ersatz der Spundwand, evtl. in Kombination mit einer Sperrung des Bauwerks. Zudem ist zu prüfen, inwieweit zukünftig ein Korrosionsschutz bzw. die Sanierung eines vorhandenen Korrosionsschutzes wirtschaftlich ist.

6.10.2 Inspektionsrhythmus

Auf Grundlage der Ergebnisse der Spundwanddickenmessung wird der zukünftige Inspektionsrhythmus empfohlen (s. Abschn.7.2).

7 Spundwanddickenmessungen im Rahmen der Bauwerksinspektion

7.1 Regelwerke im Zuständigkeitsbereich der WSV

Die Bauwerksinspektion (Bauwerksprüfung, -überwachung und -besichtigung) wird im Zuständigkeitsbereich der WSV in der VV-WSV 2101 geregelt. Ergänzend hierzu befasst sich das MBI mit der Vorbereitung, Durchführung und Ergebnisdarstellung der Bauwerksinspektion. Für die Bewertung von Schäden ist das MSV anzuwenden, und die Ergebnisse sind mit dem IT-Programmsystem WSVPruf zu dokumentieren.

Spundwanddickenmessungen sind nach den o.g. Regelwerken kein Bestandteil einer Bauwerksinspektion, sondern gehen über den dort beschriebenen Inspektionsumfang deutlich hinaus. Die Beurteilung des Erhaltungszustandes eines Spundwandbauwerkes und die Prognose der Restnutzungsdauer können jedoch auf Grundlage

- einer qualitativen Untersuchung (Abschn. 5.1) im Rahmen der Bauwerksbesichtigung nach VV-WSV 2101 bzw.
- einer Wanddickenmessung (Abschn. 5.2) in Rahmen einer Bauwerksprüfung nach VV-WSV 2101

erfolgen. Nach aktuellem Stand des Wissens kann nur durch Wanddickenmessungen der Korrosionszustand einer Spundwand zuverlässig beurteilt werden, auch wenn diese Untersuchung in der VV-WSV 2101 nicht gefordert wird.

Für die Erstellung des Messberichtes (s. Abschn. 6) gilt im Zuständigkeitsbereich der WSV per Erlass eine Frist von sechs Wochen nach Bauwerksinspektion (s. MBI, Abs. 6.5). Während nach dem MBI im Inspektionsbericht nur Schäden erfasst werden sollen, sollte der Messbericht einer Spundwanddickenmessung auch intakte Bauwerke bzw. Bauwerksbereiche beschreiben. Der Messbericht sollte dem Inspektionsbericht beigelegt werden.

7.2 Inspektionsrhythmus

7.2.1 Inspektionsrhythmus nach VV-WSV 2101

Im Zuständigkeitsbereich der WSV unterliegen bestimmte Anlagen⁵ einem festgelegten Inspektionsrhythmus: Auch eine augenscheinlich intakte Spundwand muss mindestens alle sechs Jahre einer Bauwerksprüfung durch sachkundige Ingenieure unterzogen werden, sofern es sich nach VV-WSV 2101 um ein Bauwerk der *Kategorie A* (z.B. Ufersicherungsbauten mit besonderem Gefährdungspotenzial und besonderer Lastbeanspruchung) handelt. Spundwände der Kategorie A sind z.B. Schleusenkammerwände oder Uferwände an Krananlagen.⁶

Für Bauwerke der *Kategorie B* (z.B. Ufersicherungsbauten mit besonderem Gefährdungspotenzial) ist im Rahmen der Bauwerksinspektion nach VV-WSV 2101 lediglich eine jährliche Bauwerksbesichtigung zwingend erforderlich.

⁵ s. Anlage zur VV-WSV 2101 „Objektartenzuordnung zu Inspektionskategorien“

⁶ Die Zuordnung zu Kategorien wird in „Hinweise zur Bauwerksinspektion – Ufer im Binnenbereich“ (GDWS, 2015) bzw. im MBI erläutert.

7.2.2 Erst- und Folgemessung am Spundwandbauwerk

Unabhängig von der Bauwerkskategorie und von den Vorgaben der VV-WSV 2101 ist zur Bestimmung der Ist-Ausgangswanddicke (s. Abschn. 2.6) eine frühe Erstmessung – idealerweise bereits beim Spundwand-Einbau – sinnvoll. Darüber hinaus sollte eine frühe Erstmessung erfolgen,

- sobald starke Rostbildung auf intensive Korrosion hinweist,
- wenn an vergleichbaren Nachbarbauwerken bereits Korrosionsschäden aufgetreten sind sowie
- bei Verdacht auf Kontaktkorrosion oder MIC.

Anhand der Ergebnisse der Erstmessung wird der zukünftige Inspektionsrhythmus festgelegt. Im Rahmen von Folgemessungen wird diese Angabe überprüft und ggf. korrigiert.

Eine Folgemessung sollte nicht an denselben Bohlen erfolgen wie die Erstmessung: Auch bei Anwendung eines grundsätzlich zerstörungsfreien Verfahrens kann die Bohle durch die Reinigung einen Teil des Spundwandstahls sowie ihre schützende Rostschicht verlieren bzw. ein evt. vorhandener Korrosionsanstrich kann beschädigt werden. Als Folge rostet die Spundbohle an diesen Stellen anschließend schneller (bis zum erneuten Aufbau einer Rostschicht) und zeigt somit ein vom restlichen Bauwerk abweichendes, atypisches Korrosionsverhalten. Für einen aussagekräftigen Vergleich der Ergebnisse von Erst- und Folgemessung sollte die Folgemessung deshalb an einer Nachbarbohle durchgeführt werden.

An Spundwänden der Kategorie A sollten Folgemessungen über die Vorgaben der VV-WSV 2101 hinaus bereits nach ca. drei Jahren stattfinden,

- wenn die geschätzte maximale Abrostung der Ausgangswanddicke entspricht, am Bauwerk aber (noch) keine Durchrostungen festgestellt wurden oder
- wenn anhand der geschätzten maximalen Abrostungsrate erste Durchrostungen innerhalb der nächsten sechs Jahre prognostiziert werden.

Bei Uferbauwerken der Kategorie B sowie bei Pfählen und Dalben sollte die Folgemessung etwa 6 Jahre vor dem anhand der geschätzten maximalen Abrostung berechneten Auftreten erster Durchrostungen erfolgen. Sind erste Durchrostungen bereits innerhalb der nächsten sechs Jahre zu erwarten, so sollte eine frühere Folgemessung (wie bei Bauwerken der Kategorie A) durchgeführt werden.

Eine Wanddickenmessung sollte unabhängig von der Bauwerkskategorie zeitnah initiiert werden,

- wenn Schäden festgestellt wurden und/oder
- wenn bei der jährlichen Bauwerksbesichtigung mittels Hammerschlag-Methode (Abschn. 5.1) Bereiche sehr geringer Wanddicke detektiert wurden oder
- eine Beschädigung des Korrosionsschutzes festgestellt wurde.

Eine sanierte Spundwand sollte im Inspektionsrhythmus einer Erstmessung inspiziert werden.

7.3 Schadensklassifizierung

7.3.1 Schadensklassifizierung nach MSV

Auf den Korrosionstypen (s. Abschn. 2.3) basiert die Zuordnung zu einer Schadensklasse (SK) entsprechend MSV, aus der das Schadensausmaß ersichtlich wird (s. Tabelle 6):

- SK1: „Schäden, die am Bauwerk gefunden werden, aber voraussichtlich keine Schadensentwicklung erfahren werden, bei dem sich der Zustand weiter verschlechtern wird. ...“
Da die Abrostung ein stetig fortschreitender Prozess ist, gehören korrosive Wanddickenverluste (mit Ausnahme vereinzelter Mulden / Narben bzw. Spalten) nicht zur SK1.

- SK2 – SK4 „beschreiben den Schadensentwicklungsprozess, der sich auf die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit des Bauteils auswirkt. Mit der Schadensklasse 2 beginnt dieser Prozess und endet mit der Schadensklasse 4.“
Schäden der SK4 erfordern sofortige Maßnahmen.

Tabelle 6: Schadensklassen (SK) für Spundwandbauwerke in Anlehnung an das MSV

| Korrosionstyp | SK1 | SK2 | SK3 | SK4 |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Mulden-/Narbenkorrosion | vereinzelt | flächig Mulden-/Narbentiefe < 15 % der Ausgangswanddicke | flächig Mulden-/Narbentiefe < 30 % der Ausgangswanddicke | flächig Mulden-/Narbentiefe > 30 % der Ausgangswanddicke |
| Flächige Korrosion | – | Wanddickenverlust < 10 % | Wanddickenverlust < 25 % | Wanddickenverlust > 25 % |
| Spaltkorrosion | vereinzelt | < 15 % der Verbindungslänge | < 30 % der Verbindungslänge | > 30 % der Verbindungslänge |
| Kontaktkorrosion | – | geringe Rostentwicklung < 10 % der Fläche | Rostpusteln < 25 % der Fläche | starke Rostentwicklung > 25 % der Fläche |
| Kantenabrostung | – | Querschnittsverlust < 10 % | Querschnittsverlust < 25 % | Querschnittsverlust > 25 % |

Beispiele für Schadensklassen und mögliche Sofortmaßnahmen sind zudem dem MSV zu entnehmen.

Aus der Schadensklasse wird entsprechend MBI (2010), Abschn. 6.5, eine Prüf- oder Zustandsnote ermittelt, die die Dringlichkeit des Handlungsbedarfes definiert.

7.3.2 Schadensklassifizierung am Spundwandbauwerk

Für die Bestimmung der Schadensklasse am Spundwandbauwerk sind hauptsächlich die flächige und die Mulden-/Narbenkorrosion relevant. Die Datengrundlage für die Zuordnung zu einer Schadensklasse ist

- bei *flächiger Korrosion*: die Abrostung als gewichtetes Mittel über die Spundwandhöhe der Messquerschnittsmittelwerte zwischen der Oberkante der Spwz und der Basistiefe (s. Bild 29).
Die Wichtung ist erforderlich, da die Messquerschnitte längs der Spundwandhöhe nicht gleichmäßig verteilt sind (s.a. Tabelle 3) und die Daten somit unterschiedlich hohe Spundwandabschnitte repräsentieren. Die Höhe der Spundwandabschnitte ergibt sich aus dem Abstand der Messquerschnitte entsprechend Bild 29.
Bei unterschiedlichen Ausgangswanddicken der Messlagen ist die Auswertung nach Messlagen getrennt durchzuführen.
- Bei flächig auftretender *Mulden-/Narbenkorrosion*: die maximale Muldentiefe.
- *Spaltkorrosion*: der prozentuale Anteil der korrodierten Spundwandschlosslänge bezogen auf die freie Schlosslänge oberhalb der Gewässersohle.
- *Kontaktkorrosion* kann nur im Kontaktbereich verschiedener Metalle mit unterschiedlichem Potenzial auftreten, was an Spundwänden i.d.R. nicht der Fall ist. Möglich wäre Kontaktkorrosion z.B. an Schweißnähten (Anbauten), im Übergang zu Stahlbetonbauteilen (Schleppplatten, Kaiplatten) oder an Liegestellen, wenn langfristig stählerne Wasserfahrzeuge (Schiffe, Pontons) anliegen.
- Bei *Kantenabrostung* ergibt sich die Schadensklasse aus dem prozentualen Anteil des korrodierten Querschnittes.

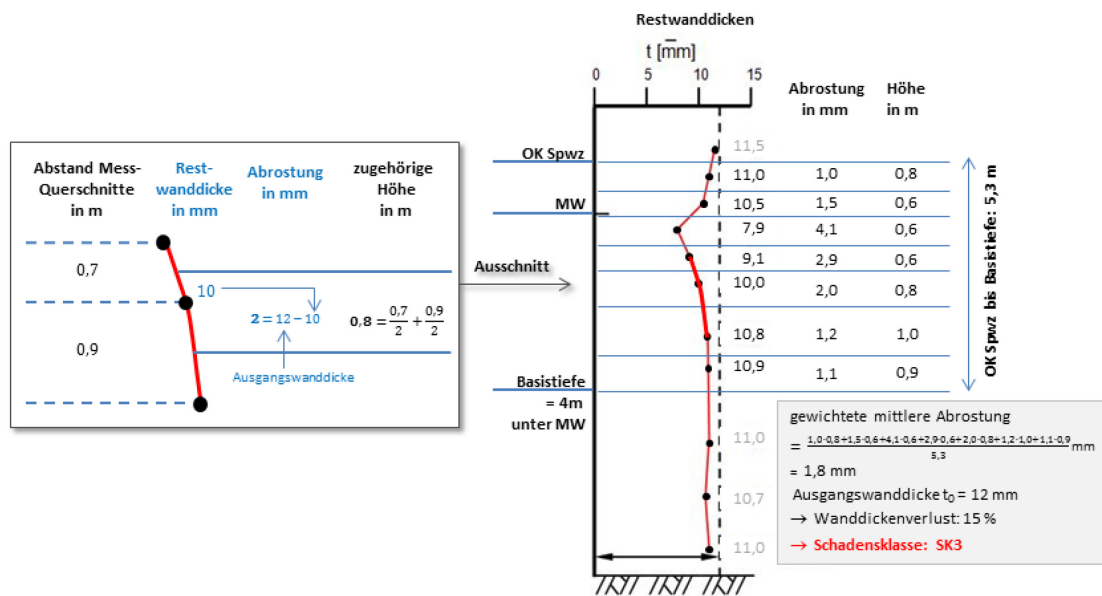


Bild 29: Beispiel: Bestimmung der Schadensklasse bzgl. flächiger Korrosion aus der gewichteten mittleren Abrostung

Die prozentualen Anteile und die daraus resultierenden Schadensklassen bzgl. der einzelnen Korrosionstypen sind im Messbericht anzugeben. Sofern die Zuordnung der Abrostungen zu den einzelnen Typen nicht eindeutig ist, stellen die Prozentanteile nur eine Schätzung dar.

Aus der Schadensklasse ergibt sich in Kombination mit der Prüf- oder Zustandsnote nach MBI, Abs. 6.5, die Dringlichkeit evt. erforderlicher Sanierungsmaßnahmen. Beim Auftreten von Löchern sind Sofortmaßnahmen auch dann erforderlich, wenn das Spundwandbauwerk noch nicht in die SK4 einzuordnen ist, da die Löcher zum Versagen der Spundwand bzgl. Gebrauchstauglichkeit führen können.

8 Übertragbarkeit von Abrostungsraten

Der hohe Aufwand bei der Durchführung von Wanddickenmessungen könnte dazu verleiten, an einem Bauwerk ermittelte Abrostungsraten ohne weitere Messung auf ein Nachbarbauwerk zu übertragen.

Nach den Erfahrungen der BAW ist dieses Vorgehen jedoch nicht zielführend (und steht zudem im Widerspruch zu den Vorgaben der VV-WSV 2101), da sich relevante Korrosionseinflüsse auch kleinräumig ändern. Dies zeigt sich z.B. an der im folgenden Kapitel beschriebenen Vielfalt der Einflussparameter und ihrer Wechselwirkungen oder – im Rahmen der Datenauswertung einer Wanddickenmessung – an der häufig beobachteten Notwendigkeit, untersuchte Spundwände in mehrere Teilbauwerke zu unterteilen.

Insofern sind auch die in Anlage 4 für verschiedene Norddeutsche Gewässer angegebenen Abrostungsraten nur als Anhaltspunkt zu verstehen. Nicht miteinander vergleichbar sind z.B. die Abrostungsraten

- von Bauwerken, die zu unterschiedlichen Altersgruppen gehören,
- korrosionsgeschützter und nicht korrosionsgeschützter Bauwerke sowie
- unterschiedlich genutzter Bauwerke.

Eine Übertragung ist nur dann möglich, wenn zuvor durch Vergleichsmessungen ein übereinstimmendes, möglichst homogenes Abrostungsverhalten verifiziert wurde und seit der Vergleichsmessung keine relevanten Änderungen (z.B. Sanierung, Nutzung) eingetreten sind.

9 Milieu-Beprobung

Die mittleren Abrostungen eines Spundwandbauwerkes lassen sich auch aus den standortspezifischen Milieu-Eigenschaften abschätzen. Dazu werden im Folgenden zwei Verfahren vorgestellt:

- nach dem Drei-Zonen-Modell (Abschn. 9.1)
- nach DIN 50929-3, Beiblatt 1 (Abschn. 9.2)

Abschn. 9.3 diskutiert die Praxistauglichkeit der beiden Verfahren.

Nach dem klassischen Vier-Zonen-Modell ist keine Abschätzung möglich.

9.1 Verfahren nach dem Drei-Zonen-Modell

Die mittleren Abrostungen eines Spundwandbauwerkes lassen sich tiefenabhängig als unstete Exponentialfunktion je Korrosionszone entsprechend Formeln (4a – 4f) darstellen, wobei die beiden Regressionskoeffizienten b_x und b_y aus den Abrostungsdaten des entsprechenden Tiefenbereiches einer Spundwanddickenmessung berechnet werden (s. Abschn. 6.7.2). Zur Bestimmung der maximalen Abrostung werden die Gleichungen entsprechend Formel (6) um einen „Spreizungsfaktor“ erweitert, der aus dem Stichprobenumfang und der geschätzten Standardabweichung der Abrostungswerte bestimmt wird (s. Abschn. 6.8.2).

Zumindest theoretisch sollten sich die beiden Regressionskoeffizienten und der Spreizungsfaktor einer Korrosionszone auch als Funktion anderer Messgrößen – den standortspezifischen Einflussfaktoren auf die Korrosion – darstellen und aus den Daten einer Milieu-Beprobung berechnen lassen. Dies kann jedoch nur gelingen, wenn die Einflussfaktoren im Detail bekannt sind.

In European Communities (2007) wurden ca. 40 Spundwandbauwerke mit U-Profilen ohne Korrosionsschutz, die gezielt anhand ihrer standortspezifischen Milieueigenschaften ausgewählt worden waren, systematisch hinsichtlich Gewässer- und Metallparameter beprobt.⁷ Danach lassen sich grundsätzlich drei Gruppen von Einflussfaktoren unterscheiden:

- exogene Faktoren (z.B. die physiko-chemischen Eigenschaften des Wassers; die mechanische Beanspruchung der Spundwand; mikrobiologische Prozesse)
- endogene Faktoren (z.B. die physiko-chemischen Eigenschaften des Spundwandstahls)
- dynamische Faktoren (z.B. Spundwandalter, Korrosionsprodukte).

Diese Faktoren können jedoch in den unterschiedlichen Korrosionszonen und/oder in Abhängigkeit vom Gewässermilieu in Kombination mit anderen Parametern sowohl korrosionsfördernd als auch -hemmend wirken. Aus diesen komplexen Wechselwirkungen folgt, dass sich Regressionskoeffizienten und Spreizungsfaktoren nicht mittels einfacher Gleichungssysteme aus wenigen Variablen errechnen lassen. Die Herleitung der Gleichungen, die Gleichungen selbst⁸ und ein Anwendungsbeispiel sind in European Communities, 2007, Anhang B und C, beschrieben.

⁷ Die Ergebnisse sind in Binder et al. (2006) zusammenfassend dargestellt.

⁸ Für einige Regressionskoeffizienten und Spreizungsfaktoren in der Spwz und Wwz konnten in European Communities (2007) mangels Datengrundlage keine Gleichungen angegeben werden. Für die bzgl. der maximalen Abrostungen relevante Uwz wurden die Prognosegleichungen jedoch vollständig ermittelt.

9.1.1 Datengrundlage

Eine Milieu-Beprobung beinhaltet die Ermittlung von Gewässer- und Metallparametern.

- Gewässerparameter:
Temperatur^{9,10}, Leitfähigkeit^{9,10}, pH-Wert^{9,10}, Säurekapazität¹⁰, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)¹⁰, Redoxpotential^{9,10}, Konzentrationen von Ammonium, Calcium¹⁰, Chlorid¹⁰, Nitrat, Phosphat, Sauerstoff^{9,10}, Sulfat¹⁰
- Metallparameter:
Kohlenstoffäquivalent (CEV), ASTM-Korngröße, Streckgrenze, Zeiligkeit, Zugfestigkeit, Gehalte von Aluminium, Arsen, Bor, Chrom, Kohlenstoff, Kupfer, Mangan, Molybdän, Niob, Nickel, Phosphor, Schwefel, Silizium

Zusätzlich erforderliche Informationen sind das Bauwerksalter, die Nutzung (Liegestelle: *vorhanden* / *nicht vorhanden*), Tide (*ja* / *nein*) und eine grobe Kategorisierung bzgl. Strömung bzw. Turbulenz (*vorhanden* / *nicht vorhanden*).

9.1.2 Kennwerte der Korrosion

Zur Abschätzung der Kennwerte der Korrosion müssen in den einzelnen Korrosionszonen entsprechend der Formeln (4a) – (4f) und (6) jeweils zwei Regressionskoeffizienten für die mittlere Abrostung und für die maximale Abrostung zusätzlich ein Spreizungsfaktor aus den Daten der Milieu-Beprobung ermittelt werden. Hier sei auf European Communities (2007) verwiesen und nur der grundsätzliche Weg erläutert:

- Aus einzelnen Gewässer-Messwerten werden vier Hauptkomponenten berechnet: *Salzfaktor*, *Säurefaktor*, *Schmutzfaktor* und *O₂-Faktor*.
- Das Gewässer wird einer der Kategorien *limnisch*, *limnisch-brackisch*, *brackisch* oder *brackisch-marin* zugeordnet.
- Aus einzelnen Stahl-Messwerten werden sechs Hauptkomponenten berechnet.
- Der Spundwandstahl wird den Kategorien *Grobstahl* oder *Feinstahl* zugeordnet.
- Für die Regressionskoeffizienten und den Spreizungsfaktor jeder Korrosionszone wird aus den Einzelwerten, deren Saisonalität (Verhältnis Sommer- zu Winterdaten) und Tiefengradienten, den o.g. Hauptkomponenten und Kategorisierungen eine Schätzfunktion angegeben. Beispielhaft sei hier die Prognosegleichung für den Regressionskoeffizienten b_0 dargestellt, der entsprechend Formel (4f) der Basiskorrosion, d.h. der mittleren Abrostung in Höhe der Basistiefe bei 4 m unter MW (bzw. MTnw oder UW) entspricht:

$$\begin{aligned}
 b_0 = & 1.160 - 0,142 \cdot \text{Stahl}(\text{„Grobstahl“}) + 0,9481 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{limnisch}) \\
 & - 0,706 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„limnisch-brackisch“}) + 0,0255 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„brackisch“}) \\
 & - 0,392 \cdot \text{„StrömBin“}(\text{hoch}) + 0,1593 \cdot \text{LnAlter}(1) + 0,1666 \cdot \text{Tide} \cdot \text{LnAlter}(1) \\
 & + 0,3647 \cdot \text{„StrömBin“} \cdot \text{„Säurefaktor“}(1)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Zur Lösung dieser Formel sind neben den eigentlichen Messwerten, den Gleichungen zur Kategorisierung und zur Bestimmung der Hauptkomponenten noch weitere Tabellen („Design-Matrizen“) erforderlich. Diese sind European Communities (2007), Anhang B, zu entnehmen. Der komplexe Lösungsweg wird im dortigen Anhang C an einem Beispiel erläutert.

⁹ Die Parameter wurden in mehreren Tiefen relativ zum MW (bzw. MTnw oder UW) gemessen (in Höhe des Wasserspiegels sowie in 25 %, 50 % und 75 % der Wassertiefe) und daraus Tiefengradienten bestimmt.

¹⁰ Für die Parameter wurde aus dem Verhältnis von Sommer- zu Winterwerten die sogenannte „Saisonalität“ ermittelt.

9.2 Verfahren nach DIN 50929-3, Beiblatt 1

Ebenfalls auf den Daten des EU-Projektes basierend wurde im Rahmen eines FuE-Vorhabens der BAW (2011) zur Bewertung der Korrosion von Spundwänden ein vereinfachtes Verfahren entwickelt, das in die DIN 50929-3, Beiblatt 1, eingegangen ist und für Spundwandbauwerke mit einer Mindeststandzeit von zehn Jahren eine Abschätzung der mittleren und maximalen Abrostungsrate auf Grundlage der Korrosivität erlaubt. Die Korrosivität K ist das Produkt aus dem Sauerstoffsättigungsindex $O_2\text{-Sätt}$ und der Bewertungszahlsumme W_0 der DIN 50929-3, in die wiederum neben einer Gewässerkategorisierung (*fließend, stehend, Binnensee, anaerobes Moor, Meer*), die Säurekapazität bis pH 4,3, der pH-Wert und die Konzentrationen von Chlorid, Sulfat und Calcium eingehen.

Diagramme zur Bestimmung der Abrostungsrate mittels Korrosivität sind für die Spwz, Nwz und die Uwz dem informativen Beiblatt 1 der DIN 50929-3 zu entnehmen. Nach European Communities (2007) und Binder (2012) sollten die Diagramme – auf der sicheren Seite liegend und abweichend von der DIN 50929-3 – jedoch nur für Bauwerke mit einer Mindeststandzeit von 20 Jahren angewandt werden.

9.3 Praxistauglichkeit

Die Untersuchungen der BAW in European Communities (2007) haben gezeigt, dass sich die mittleren und maximalen Abrostungen eines Spundwandbauwerkes tiefenbezogen durch eine Milieu-Beprobung bestimmen lassen. Zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit liegen für den relevanten Höhenbereich - d.h. für den oberen Teil der Unterwasserzone – Prognosegleichungen für die Regressionskoeffizienten und den Spreizungsfaktor vor.

Es hat sich aber auch gezeigt, dass eine Vielzahl von Gewässer- und Metallparametern, z.T. in unterschiedlichen Tiefen sowie im Sommer und Winter, erhoben und umfassend ausgewertet werden muss, so dass die Bestimmung der Korrosionskennwerte mittels Milieu-Beprobung deutlich aufwändiger ist als eine Restwanddickenmessung. Zur Beurteilung eines einzelnen Spundwandbauwerkes ist diese Methode damit unwirtschaftlich.

Interessant dürfte die Milieu-Beprobung jedoch z.B. für die Betreiber großer Hafenanlagen mit zahlreichen Spundwänden und Dalben sein: Hier könnten im Rahmen einer umfangreichen Messkampagne einmalig alle relevanten Gewässer- und Metall-Parameter erfasst und ausgewertet werden. Auf diese Weise könnten Sanierungsmaßnahmen für einzelne Bauwerke langfristig geplant und der Aufwand für Restwanddickenmessungen am Bauwerk minimiert werden.

Eine Alternative stellt das Verfahren nach BAW (2011), Binder (2012) und DIN 50929-3, Beiblatt 1, dar, das auf Grundlage einer reduzierten Milieubeprobung eine Abschätzung der Abrostungsrate erlaubt, jedoch nur für Bauwerke ab einem Alter von zwanzig Jahren angewendet werden sollte.

Beide Verfahren lassen jedoch nicht die Prognose der sog. anomalen Löcher (s. Abschn. 6.8.3) zu. Diese zu untersuchen bleibt zukünftigen FuE-Vorhaben vorbehalten.

Literatur

- Alberts, D. (1987): Wanddickenmessungen an Stahlspundwänden. Mitteilungsblatt der BAW Nr. 60, Karlsruhe. https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb60_Gesamt.pdf
- Alberts, D., Heeling, A. (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden – Statistische Datenauswertung. Mitteilungsblatt der BAW Nr. 75, Karlsruhe. https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb75_Gesamt.pdf
- BAW (2011): Bewertung der Korrosion von Spundwänden. FuE-Vorhaben. unveröffentlicht¹¹
- BAW (2015): Bemessung korrodierter Spundwände im Wasserbau. FuE-Vorhaben.¹¹
- BAW (2017): Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden in Häfen und an Wasserstraßen. BAW-Mitteilungsblatt 100. https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/BAWMitteilungen_100_INTERNET.pdf
- Binder, G. (2012): Neue Abrostungsdaten von Stahl im Wasser und deren Bezug zur DIN 50929. 3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme.
- Binder, G., Heeling, A., Uerkvitz, R. (2006): Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden. Kongressbeitrag zum 31. PIANC-Kongress, Estoril.
- Dortmund-Hörder Hüttenverein (Hrsg.) (1938): Larssen Stahlspundbohlen.
- Dortmund-Hörder Hüttenverein (Hrsg.) (1960): Larssen Handbuch.
- European Communities (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final report. ECSC Steel RTD program. Contract number 7210-PR/317.
Anhang B: Uerkvitz, R. (2004): Factors influencing the corrosion of steel sheet pile walls used in hydraulic engineering. Statsoft Europe GmbH. Hamburg.
Anhang C: Uerkvitz, R. (2005): Factors of influence on corrosion – Example of calculation. Statsoft Europe GmbH, Hamburg.
- Graff, M. (2003): Bericht über Untersuchungen zum mikrobiologischen Korrosionspotential an den Spundwänden im Vorhafen der 4. Einfahrt des Marinestützpunkts Wilhelmshaven. Gesellschaft für Technische Mikrobiologie und Hygieneüberwachung, Wendeburg, im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Wilhelmshaven, unveröffentlicht.
- Heeling, A. (2010): Ein Vierteljahrhundert Spundwanddickenmessung bei der Bundesanstalt für Wasserbau. Tagungsband der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“, Berlin, 18.02.2010.
- Hein, W. (1989): Korrosion von Stahlspundwänden im Wasser. Hansa, 126. Jahrg., Nr. 3 – 4.
- HSP (2014): Spundwandhandbuch Profiltafeln. Hoesch Spundwand und Profil GmbH.
- HTG (2009): Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V., 3. Aufl. 2009. Hamburg. https://www.htg-online.de/fileadmin/dateien/FA/FA_Korrosionsfragen/HTG-Handbuch_Dezember_2009_Korrektur_mit_Titelseite.pdf
- John, B. (1979): Statistische Verfahren für technische Meßreihen. Arbeitsbuch für den Ingenieur. Carl Hanser Verlag, München, Wien.

¹¹ Zu beziehen über das Infozentrum Wasserbau (IZW) bei der Bundesanstalt für Wasserbau, Postfach 210253, 76152 Karlsruhe, E-Mail: izw@baw.de

- Pörschmann, H. (Hrsg.) (1993): Bautechnische Berechnungstabeln für Ingenieure, 23., neubearbeitete. Auflage, Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.
- Potthoff, S. (2004): Bestimmung von Wanddicken an einer Spundwand bei mikrobiell beeinflusster Korrosion. Zwischen Weser und Ems, Hrsg. WSD Nordwest, Heft 38, S. 105 – 112.
- Uerkvitz, R. (2003): Analyse von Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau. Statsoft Europe GmbH, Hamburg, im Auftrage der BAW, unveröffentlicht.
- Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.) (1995): Stahl im Hochbau. Anwender-Handbuch. 15. Auflage, Stahleisen Verlag, Düsseldorf.
- Vismann, U. (Hrsg.) (2012): Wendehorst - Bautechnische Zahlentafeln. 34., überarbeitete und erweiterte Auflage, DIN, Beuth Verlag, Berlin.
- Wenckamp, S., Ruthemann, M. (2002): Bakterien für Lochfraß in den Spundwänden verantwortlich. Zwischen Weser und Ems, Hrsg. WSD Nordwest, Heft 36, S. 58 – 62.
- Witt, K.-J. (Hrsg.) (2009): Grundbautaschenbuch. 7. überarbeitete und aktualisierte Ausgabe. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Regelwerke

- MBI (2010): Merkblatt Bauwerksinspektion (MBI), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Bauwerksinspektion_MBI_2010.pdf
- MSV (2015): Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Schadensklassifizierung_Verkehrswasserbauwerke_MSV_2015.pdf
- DIN 50929-3 (1985-09): Korrosion der Metalle: Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung; Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern.
Beiblatt 1 (2014-11): Korrosionsraten von Bauteilen in Gewässern.
- DIN EN 1993-5 (2007-07): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 5: Pfähle und Spundwände; Deutsche Fassung EN 1993-5:2007.
- DIN EN ISO 8044 (2015-12): Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe (ISO 8044: 2015); Dreisprachige Fassung EN ISO 8044:2015.
- EAU (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Uferneufassungen“. Häfen und Wasserstraßen, EAU 2012. 11. vollständig überarbeitete Aufl., Arbeitsausschuss „Uferneufassungen“ der HTG und der DGGT, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- GDWS (2015): Hinweise zur Bauwerksinspektion – Ufer im Binnenbereich.
- VV-WSV 2101 (2010): Bauwerksinspektion. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin. https://izw.baw.de/publikationen/vv-wsv/0/vv-wsv-2101_2010_09.pdf
- WSVPruf: <https://intranet.wsv.bvbs.bund.de/projekte/wsvpruf/>

Anlagen

Anlage 1: Kurzanleitung Spundwanddickenmessung

| | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arbeitsunterlagen | Lageplan, Bauwerksnutzung Querprofil mit OK und UK des Bauwerks und maßgeblichen Wasserständen (MW bzw. MThw / MTnw oder OW / UW) Stahlprofil → Profiltyp, Widerstandsmoment, Ausgangswanddicke, Stahlsorte Baujahr → Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Messung Art / Zustand des Korrosionsschutzes Ergebnisse früherer Inspektionen, Beschreibung von Schäden |
| Vorbereitung | Aufgabenstellung (Erstmessung / Folgemessung / Akutmessung) Ortsbesichtigung mit Auftraggeber / Betreiber / Eigentümer, Taucher, Gutachter: <ul style="list-style-type: none">▪ Zugänglichkeit (land- / wasserseitig)▪ Wasser- / Stromanschluss▪ Zeitplan festlegen Arbeits- und Hilfsmittel: <ul style="list-style-type: none">▪ Messgerät, Ersatzgerät▪ Platz für das Taucherequipment▪ regen- und sonnengeschützter Messplatz▪ Baustellenkompressor für Druckluftgeräte (mind. 7 bar)▪ Reinigungsgeräte einschl. Hochdruckreiniger für die Vorreinigung der Messquerschnitte (bis 200 bar)▪ bei Messungen über Wasser: Wasseranschluss, Tauchpumpe / Kontaktmittel▪ Stromanschluss oder Stromaggregat▪ Messkette▪ je nach Zugänglichkeit: Arbeitsschiff, Plattform oder Leiter Stationen, Messquerschnitte und Messlagen festlegen Protokolle vorbereiten (Station, Messwerte, Bauwerksbesichtigung; Anlage 2) |
| Messung | je Station: <ul style="list-style-type: none">▪ Stationsprotokoll▪ Anbringen der Messkette▪ je Messpunkt:<ul style="list-style-type: none">– Reinigung– Durchführung der Wanddickenmessung– Messwert-Protokoll ausfüllen– Bestimmung der Muldentiefen– Beschreibung der Stahloberfläche (Korrosionstyp und -intensität)– sofern vorhanden: Beschreibung von Korrosionsschutz, Beschichtung, Bewuchs▪ Qualitative Bauwerksprüfung durchführen und protokollieren▪ Einmessen der Station▪ Feldbuch, Fotodokumentation |
| Messbericht | Veranlassung der Wanddickenmessung Beschreibung des Bauwerks Beschreibung der Messkampagne |

- Verifikation und Aufbereitung der Messwerte
- Restwanddicken aus Muldentiefen berechnen
 - Tabelle der Einzelmessungen
 - Plausibilisierung; evt. Plan-Ausgangswanddicke korrigieren
 - Restwanddickenprofil je Station und Messlage
 - Profil der mittleren Restwanddicke und des reduzierten Widerstandsmoments für das Gesamtbauwerk
- Festlegung und Verifikation der Korrosionszonen
- Festlegung der Korrosionszonen anhand des Profils der mittleren Restwanddicke
 - Prüfung der Daten je Korrosionszone auf Lognormalverteilung
 - evt. Unterteilung in Teilbauwerke
- Mittlere Abrostung und Abrostungsrate darstellen
- Geschätzte Maximale Abrostung und Abrostungsrate bestimmen
- Beurteilung aktueller Korrosionszustand, Prognose der Restnutzungsdauer
- Dokumentation der Schäden, Bestimmung der Schadensklasse
 - Kennwerte der Korrosion (Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit)
 - Korrosionsintensität
 - Evt. Vergleich mit historischen Daten
- Fazit und Empfehlungen
- ggfs. Sanierungsempfehlung
 - Empfehlung: Folgemessungen und zukünftiger Inspektionsrhythmus


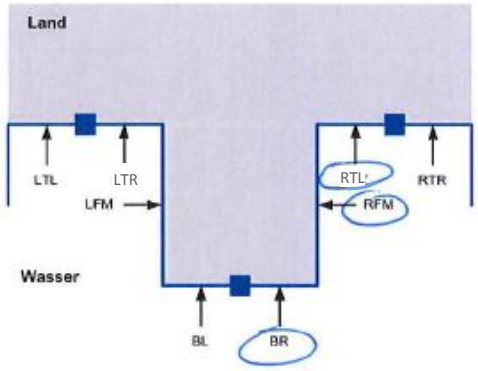
Tabelle A1.1: Parameter einer Spundwanddickenmessung (**fett-kursiv**: Kennwerte der Korrosion)

| Quelle | Parameter | Beschreibung |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Unterlagen | Spundwandalter | in Jahren zum Zeitpunkt der Wanddickenmessung; Information des Betreibers |
| | Ausgangswanddicke t_0 | in mm; aus Profiltabellen, Planunterlagen |
| | Widerstandsmoment W_0 | in $\text{cm}^3/\text{Ifd. m}$; aus Profiltabellen |
| | Stahlsorte | |
| Wanddickenmessung | Gemessene Restwanddicke t | in mm (einschl. Mulden und Löcher) |
| | Minimale gemessene Restwanddicke t_{\min} | in mm (bei Löchern: $t_{\min} = 0 \text{ mm}$) |
| Berechnung | Mittlere Restwanddicke \bar{t} | in mm; $\bar{t}_{geom} = \sqrt[n]{t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n}$ (einschließlich Mulden und Löchern) |
| | Abrostung a | in mm; $a = t_0 - t$ |
| | Mittlere Abrostung \bar{a} | eines Messpunktes, in mm; $\bar{a} = t_0 - \bar{t}$ |
| | Maximale Abrostung a_{\max} | eines Messquerschnittes oder einer Korrosionszone in mm; $a_{\max} = t_0 - t_{\min}$ |
| | Geschätzte maximale Abrostung A_{\max} | in mm; $A_{\max} = e^{\bar{x} \ln + k_n \cdot 0,975 \cdot 0,95 \cdot S_{\ln}}$ |
| | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ | in mm; $\bar{\alpha} = \frac{\bar{a}}{\text{Spundwandalter}}$ |
| | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{\max} | in mm; $\alpha_{\max} = \frac{A_{\max}}{\text{Spundwandalter}}$ |
| | Reduziertes Widerstandsmoment W_x | in $\text{cm}^3/\text{Ifd. m}$; $W_x = W_0 \cdot \frac{\bar{t}}{t_0}$ |

Anlage 2: Vorlagen Protokolle

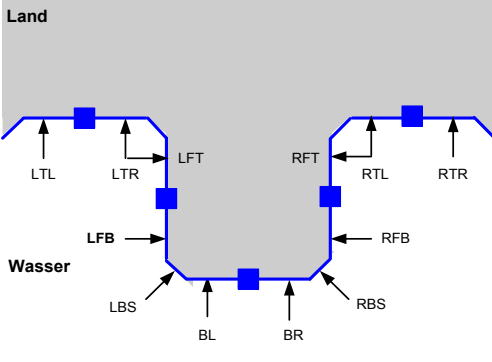
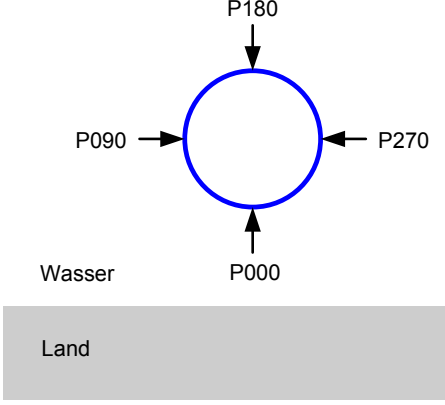
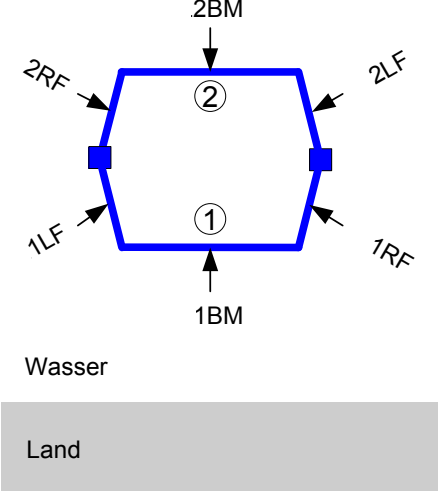
| | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Stationsprotokoll | |
| Vorlage | A2-2 |
| Beispiel | A2-3 |
| Profiltypen und Messlagen | A2-4 |
| Hinweis: | |
| <p>Im Stationsprotokoll ist in das Feld <i>Skizze Profiltyp mit Bezeichnung der Messlagen</i> der entsprechende Profiltyp aus der Tabelle <i>Profiltypen und Messlagen</i> (S. A2-4) mit allen theoretisch möglichen Messlagen zu kopieren. Die Messlagen, an denen tatsächlich gemessen wurde, sind zu markieren, und in der Spalte <i>Messlagen</i> sind diese Lagen anzugeben (s. Beispiel S. A2-3).</p> | |
| Messwerte-Protokoll | |
| Vorlage | A2-10 |
| Beispiel | A2-11 |
| Protokoll für Bauwerksbesichtigung | |
| Vorlage | A2-12 |
| Beispiel | A2-13 |

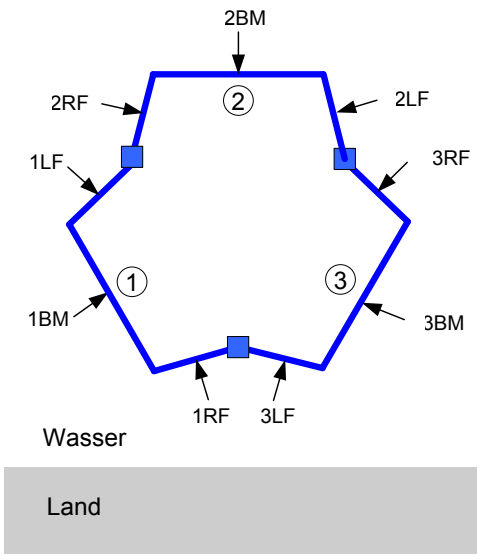
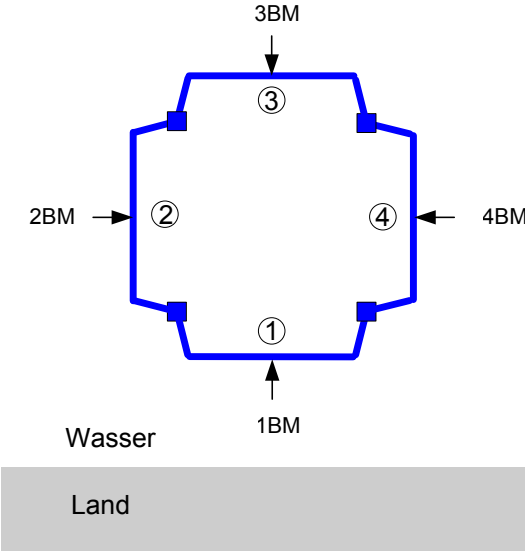
Stationsprotokoll, Beispiel

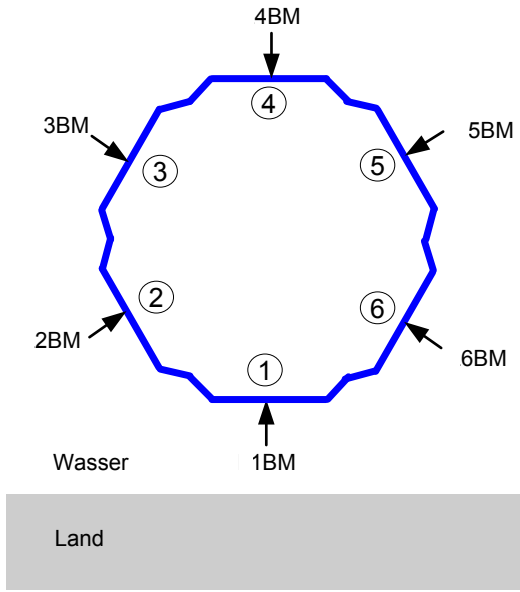
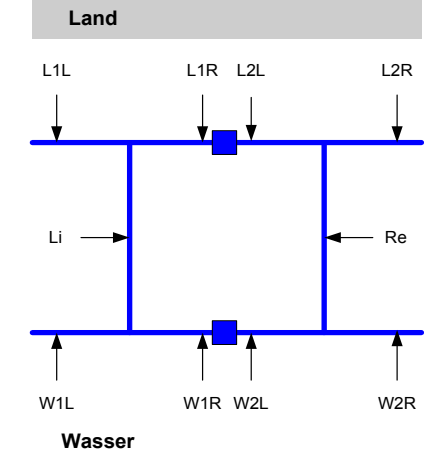
| Wanddickenmessung - Stationsprotokoll - | | |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Auftragsnr.: <i>A395</i> | Auftraggeber: <i>WSA</i> | Bearbeiter: <i>Hüster</i> | |
| Ort: <i>Berlin</i> | Gewässer: <i>Spree</i> km <i>1,23</i> | Datum: | |
| Bauwerk: <i>Binnenhafen</i> | Bauwerkstyp: <i>Spundwand</i> | Baujahr: <i>1938</i> | Alter: <i>74 Jahre</i> |
| Stationsname: <i>01BH N/12</i> | Lage der Messstation: <i>S. Lajeplan</i> <i>Nordufer</i> | | |
| MW / MThw / OW: NHN <i>+37,40</i> m | | MTnw / UW: NHN <i>-</i> m | |
| GOK: NHN <i>+38,40</i> m | | Sohltiefe: <i>4,40</i> m unter GOK | |
| Stahlprofil: <i>Hoesler III</i> | Profiltyp: <i>ZR</i> | Widerstandsmoment: <i>1600</i> cm ³ /lfd m | |
| Skizze Profiltyp mit Bezeichnung der Messlagen | Messlage Bezeichnung | Messlage Nr. | Ausgangs- wanddicke in mm |
|  | <i>BR</i> | <i>1</i> | <i>12,0</i> |
| | <i>RFM</i> | <i>2</i> | <i>9,5</i> |
| | <i>RTL</i> | <i>3</i> | <i>12,0</i> |
| Tauchfirma: <i>Aumtander, Bauhof</i> | | | |
| Reinigungswerkzeuge: | | | |
| Messgerät: <i>USH 35X</i> | | Messkopf: <i>H5KAS</i> | |
| Bemerkungen: | | | |

| Profil-typ | Profil-bezeichnung | Schemazeichnung und Bezeichnung der Messlagen |
|------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| ZR | Z-Profil Spundwand (rechtwinklig) | |
| ZG | Z-Profil Spundwand (gestreckt) | |
| UR | U-Profil Spundwand (rechtwinklig) | |
| UG | U-Profil Spundwand (gestreckt) | |

LTL/LTM/LTR: Linkes Tal links/mittig/rechts; RTL/RTM/RTR: Rechtes Tal links/mittig/rechts;
 LFT/LFM/LFB: Linke Flanke talseitig/mittig/bergseitig; RFT/RFM/RFB: Rechte Flanke talseitig/mittig/bergseitig;
 BL/BM/BR: Berg links/mittig/rechts

| Profil-typ | Profil-bezeichnung | Schemazeichnung und Bezeichnung der Messstellen |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V | Larsen vier-fach (Larsen 430) |  <p>LTL/LTR: Linkes Tal links/rechts; RTL/RTM/RTR: Rechtes Tal links/rechts; LFT/LFB: Linke Flanke talseitig/bergseitig; RFT/RFB: Rechte Flanke talseitig/bergseitig; BL/BR: Berg links/rechts; LBS/RBS: Linker/Rechter Berg seitlich</p> |
| RP | Rohrpfahl |  <p>Pnnn: Rohrpfahl mit Gradzahl im Uhrzeigersinn relativ zum Land</p> |
| P2 | Dalben (2 Bohlen) |  <p>nLF/nRF: Bohle n, linke/rechte Flanke; nBM: Bohle n, Berg mittig</p> |

| Profil- typ | Profil- bezeichnung | Schemazeichnung und Bezeichnung der Messstellen |
|----------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P3 | Dalben (3 Bohlen) |  <p style="text-align: center;">Wasser</p> <p style="text-align: center;">Land</p> <p style="text-align: center;"><i>nLF/nRF: Bohle n, linke/rechte Flanke; nBM: Bohle n, Berg mittig</i></p> |
| P4 | Dalben (4 Bohlen) |  <p style="text-align: center;">Wasser</p> <p style="text-align: center;">Land</p> <p style="text-align: center;"><i>nBM: Bohle n, Berg mittig</i></p> |

| Profil-typ | Profil-bezeichnung | Schemazeichnung und Bezeichnung der Messstellen |
|------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P6 | Dalben (6 Bohlen) |  <p>4BM 3BM 5BM 2BM 6BM 1BM Wasser Land</p> <p>nBM: Bohle n, Berg mittig</p> |
| D2 | Dalben (2 Stege) |  <p>Land</p> <p>L1L L1R L2L L2R Li Re W1L W1R W2L W2R Wasser</p> <p>LnL/LnR: Landseitig, Steg n, links/rechts; WnL/WnR: Wasserseitig, Steg n, links/rechts</p> |


| Profil-typ | Profil-bezeichnung | Schemazeichnung und Bezeichnung der Messstellen |
|------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D3 | Dalben (3 Stege) | <p>Land</p> <p>L1L L1R L2L L2R L3L L3R</p> <p>Li Re</p> <p>W1L W1R W2L W2R W3L W3R</p> <p>Wasser</p> |
| D4 | Dalben (4 Stege) | <p>Land</p> <p>L1L L1R L2L L2R L3L L3RL L4L L4R</p> <p>Li Re</p> <p>W1L W1R W2L W2R W3L W3R W4L W4R</p> <p>Wasser</p> |
| | | <p>L_nL/L_nR: Landseitig, Steg n, links/rechts; W_nL/W_nR: Wasserseitig, Steg n, links/rechts</p> |
| TW | Trägerwand | <p>Land</p> <p>Wasser L R</p> <p>L: Links; R: Rechts</p> |

| Profil-typ | Profil-bezeichnung | Schemazeichnung und Bezeichnung der Messstellen |
|------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| EI | Gemischte Spundwand, (Einfachträger, Füllbohle innen) | |
| EA | Gemischte Spundwand, (Einfachträger, Füllbohle außen) | |
| DI | Gemischte Spundwand, (Doppelträger, Füllbohle innen) | |
| DA | Gemischte Spundwand, (Doppelträger, Füllbohle außen) | |

LPL/LPR: Linker Pfahl links /rechts; RPL/RPR: Rechter Pfahl links/rechts;
 LB/RB: Linker/Rechter Berg; LT/RT: Linkes/Rechtes Tal;
 LFM/RFM: Linke/Rechte Flanke mittig; Rechte Flanke talseitig/mittig/bergseitig;
 LPnL/LPnR: Linker Pfahl n, links/rechts; RPnL/RPnR: Rechter Pfahl n, links/rechts

Messwerte-Protokoll, Beispiel

| Wanddickenmessung | | | | | | | | | | | | | BAW |
|--------------------|--------------------|--------------|-----------------|------------------|------|------|------|----------------|-------------------|---|---|------------------------------|-------------------------------------|
| - Messwerte - | | | | | | | | | | | | | |
| Station: 01BH N/12 | | | | Datum: 13.8.2012 | | | | Seite: 1 von 1 | | | | | |
| Höhe ab GOK | Messkette Ifd. Nr. | Messlage Nr. | Wanddicke in mm | | | | | | Muldentiefe in mm | | | Datenqualität (gut/schlecht) | Bemerkung / Anzahl und Größe Löcher |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | | |
| -0,40 | 1 | 1 | 10,1 | 10,1 | 10,2 | 11,7 | 11,6 | 11,7 | — | — | — | gut | |
| | | 2 | 10,3 | 9,7 | 10,1 | 10,0 | 9,9 | 10,1 | — | — | — | u | |
| | | 3 | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,7 | 11,6 | 11,4 | — | — | — | u | |
| -0,65 | 2 | 1 | 10,2 | 11,9 | 11,2 | 11,8 | 11,2 | 11,6 | — | — | — | u | |
| | | 2 | 9,6 | 10,4 | 9,7 | 9,9 | 10,3 | 9,5 | — | — | — | u | |
| | | 3 | 11,2 | 11,4 | 11,0 | 11,2 | 11,9 | 11,7 | — | — | — | u | |
| -0,90 | 3 | 1 | 9,7 | 9,8 | 11,2 | 11,5 | 11,6 | 11,6 | — | — | — | u | |
| | | 2 | 8,5 | 9,1 | 9,1 | 7,8 | 8,5 | 7,2 | — | — | — | u | |
| | | 3 | 9,9 | 10,1 | 10,0 | 10,1 | 11,1 | 11,5 | — | — | — | u | |
| -1,15 | 4 | 1 | 8,1 | 8,6 | 7,9 | 8,1 | 7,8 | | 1 | 1 | 1 | Schlecht | marbig |
| | | 2 | 6,8 | 6,8 | 6,2 | 5,4 | 6,9 | 5,8 | 1 | 1 | 1 | gut | |
| | | 3 | 7,7 | 7,6 | 8,2 | 8,0 | 7,8 | 7,9 | 1 | 1 | 1 | u | |
| -1,40 | 5 | 1 | 10,0 | 7,5 | 9,9 | 9,4 | 9,5 | 7,2 | 1 | 1 | | u | |
| | | 2 | 7,6 | 8,8 | 8,2 | 8,8 | 9,0 | 8,6 | 1 | 1 | | u | |
| | | 3 | 10,6 | 9,7 | 10,7 | 10,4 | 9,6 | 9,6 | 1 | | | u | |
| -1,65 | 6 | 1 | 10,3 | 11,6 | 11,3 | 10,0 | 12,1 | 8,9 | 1 | | | u | |
| | | 2 | 8,9 | 10,0 | 9,6 | 8,4 | 9,6 | 9,5 | 1 | | | u | |
| | | 3 | 9,6 | 10,2 | 10,7 | 10,9 | 10,3 | 10,9 | 1 | | | u | |
| -2,15 | 7 | 1 | 10,3 | 11,3 | 10,3 | 11,3 | 10,4 | 11,0 | 1 | | | u | |
| | | 2 | 9,0 | 9,2 | 10,0 | 9,6 | 9,8 | 10,1 | 1 | | | u | |
| | | 3 | 11,0 | 11,2 | 10,6 | 11,1 | 11,6 | 11,2 | 1 | | | u | |
| -3,15 | 8 | 1 | 11,4 | 11,7 | 11,9 | 11,4 | 11,2 | 11,5 | 1 | | | u | |
| | | 2 | 10,0 | 9,6 | 9,3 | 8,5 | 9,8 | 10,0 | 1 | | | u | |
| | | 3 | 11,0 | 10,5 | 10,6 | 11,0 | 11,1 | 11,8 | 1 | | | u | |
| -3,65 | 9 | 1 | 10,0 | 11,6 | 10,3 | 11,3 | 11,3 | 11,4 | 1 | | | u | |
| | | 2 | 8,9 | 9,7 | 9,8 | 10,0 | 9,6 | 10,0 | 1 | | | u | |
| | | 3 | 11,1 | 11,2 | 10,5 | 11,5 | 10,8 | 11,7 | 1 | | | u | |

| | | | | |
|--------------------------------------------------|---------------|-----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <h1 style="margin: 0;">Bauwerksbesichtigung</h1> | | | |  |
| Auftragsnr.: | Auftraggeber: | Ort: | Datum: | |
| Bauwerk: | Stahlprofil: | Gewässer: km | Seite: _von_ | |

Profilskizze:

| Bezugshöhe: | Bohle 1 | Bohle 2 | Bohle 3 | Bohle 4 | Bohle 5 | Bohle 6 | Bohle 7 | Bohle 8 | Bohle 9 | Bohle 10 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| -1 m | | | | | | | | | | |
| -2 m | | | | | | | | | | |
| -3 m | | | | | | | | | | |
| -4 m | | | | | | | | | | |
| -5 m | | | | | | | | | | |
| -6 m | | | | | | | | | | |
| -7 m | | | | | | | | | | |
| -8 m | | | | | | | | | | |
| -9 m | | | | | | | | | | |
| -10 m | | | | | | | | | | |

| Eintragungen: | Stahl | Korrosionsschutz |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------|
| | MK Mulden- / Narbenkorrosion | KR Riss |
| | FK Flächenkorrosion | KB Blasen |
| | B Beule | KRo Rost |
| | R Riss | KF fehlende Beschichtung |
| | L Loch / Durchrostung | |

Taucher:
Unterschrift:

Anlage 3: Datenstruktur

Bild A3.1 zeigt vereinfacht den Tabellen-Aufbau der BAW-eigenen, relationalen Datenbank-Anwendung WaDiMe (= WandDickenMessung).

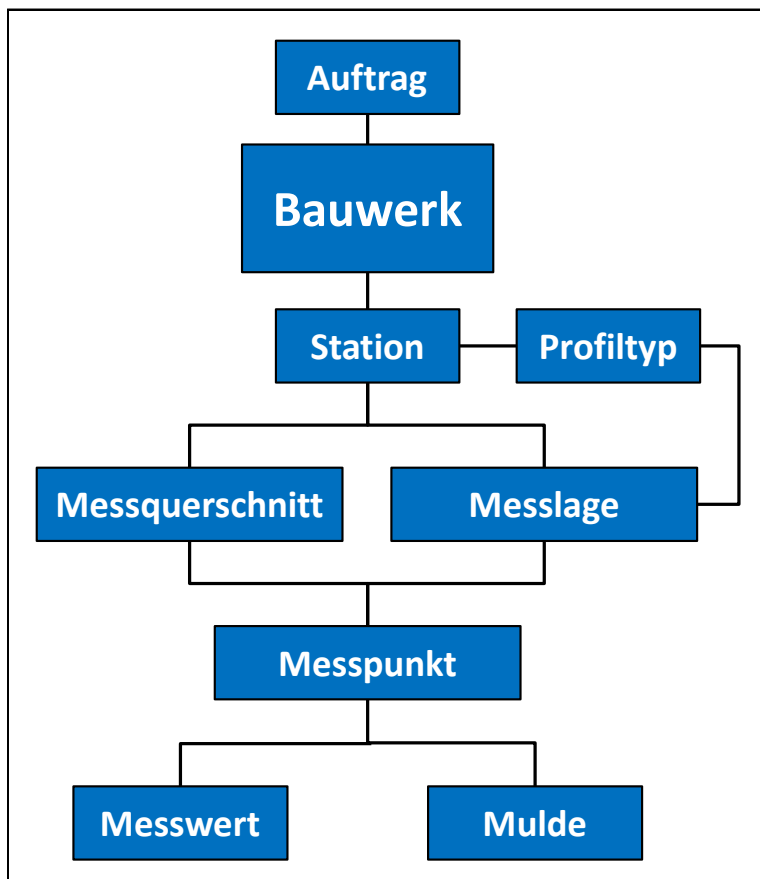


Bild A3.1: Schematischer Aufbau der relationalen Datenbank WaDiMe

Die Tabellen und ihre Verknüpfungen werden nachfolgend beschrieben. **Schlüsselfelder**, die auch eine Kombination mehrerer Felder sein können, sind **fett** dargestellt, der (kombinierte) Feldinhalt muss je Tabelle einmalig sein.

Die folgende Darstellung dient ausschließlich der Auflistung der zur Auswertung einer Wanddickenmessung erforderlichen bzw. nützlichen Informationen und ihrer Beziehungen untereinander. Die Darstellung dient nicht der Dokumentation der WaDiMe-Datenbankanwendung, die zusätzlich zahlreiche Möglichkeiten zur Eingabe von frei editierbaren Kommentaren bietet und zu der eine Vielzahl weiterer Konfigurations- und Referenztabelle gehören, die hier vereinfachend nicht dargestellt wurden.

Die übergeordnete organisatorische Struktur einer Restwanddickenmessung ist der **Auftrag**:

Tabelle A3.1: Auftrag

| Feldname | Format | Beschreibung |
|-------------------|---------|--------------------------------------------------|
| Auftragsnummer | String | |
| Auftragsjahr | Integer | |
| Ort | Text | |
| Auftraggeber | | |
| Sachbearbeitung | | aus Auswahlliste |
| Datenerfassung | | aus Auswahlliste |
| Koordinatensystem | | aus Auswahlliste, z.B. <i>Bessel, Krassowski</i> |
| Tauchbetrieb | | |

Zu jedem Auftrag gehören beliebig viele **Bauwerke**; ein Bauwerk jedoch immer nur zu einem Auftrag. Ein Bauwerk im Sinne von WaDiMe ist eine Struktur und ihr Korrosionszustand zum Zeitpunkt der Wanddickenmessung (zehn Jahre später wäre die gleiche Spundwand folglich ein anderes WaDiMe-Bauwerk).

Tabelle A3.2: Bauwerk

| Feldname | Format | Beschreibung |
|----------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [Auftrag] | | |
| Bauwerk | Text | |
| Bauwerksalter | Integer | in Jahren; Alter zum Zeitpunkt der Messung |
| Baujahr | | |
| Bauwerkstyp | Text | Auswahlliste: <i>Spundwand / nicht hinterfüllte Spundwand / Pfahl / Dalben</i> |
| Korrosionsschutz | logisch | <i>ja / nein</i> |
| Typ Korrosionsschutz | Text | Art des Korrosionsschutzes (z.B.: <i>Schutzanstrich, KKS, Opferanode</i>) |
| Normalenrichtung | Integer | in °; Räumliche Orientierung des Bauwerks (s. Bild A4.2) |
| Gewässer | Text | |
| km von | Dezimalzahl | |
| km bis | | |
| Lage | Text | Auswahlliste: <i>Binnengewässer / Binnengewässer Tide / Brackwasser / Brackwasser Tide / Nordsee / Ostsee / Schleusenammer</i> → Gewässer mit / ohne wechselnden Wasserstand → mögliche Wasserstände (s.u.) |
| MW / MThw / OW | Dezimalzahl | in mNHN; Mittelwasser, Mittleres Tidehochwasser oder Oberwasser |
| MTnw / UW | | nur bei Gewässern mit wechselnden Wasserständen: Mittleres Tideniedrigwasser oder Unterwasser |

Fortsetzung Tabelle A3.2: Bauwerk

| Feldname | Format | Beschreibung |
|-------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gerät | Text | |
| Prüfkopf | | |
| Reinigung | | z.B. Klopfen, Sandstrahlen |
| Luftzone | Dezimalzahl | Unterkanten der Korrosionszonen in mNHN; wird nur angegeben, wenn Korrosionszone am Bauwerk vorhanden ist |
| Spritzwasserzone | | |
| Wasserwechselzone | | |
| Niedrigwasserzone | | |
| Unterwasserzone | | |

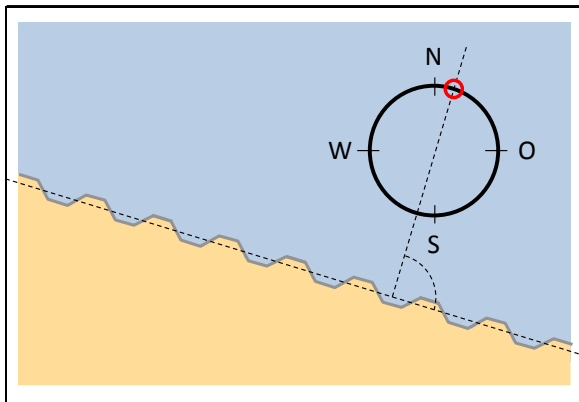


Bild A3.2: Normalenrichtung eines Spundwandbauwerkes

Zu jedem Bauwerk gehören beliebig viele **Stationen**, d.h. Spundwandbohlen, an denen Wanddickenmessungen durchgeführt wurden. Eine Station gehört stets nur zu einem Bauwerk.

Tabelle A3.3: Station

| Feldname | Format | Beschreibung |
|---------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| [Auftrag, Bauwerk] | | |
| Stationsname | String | |
| Profiltyp | | s. S. A2-4ff |
| Stahlprofil | | z.B. Hoesch III |
| Stahlsorte | | z.B. S 240 GP |
| Bemerkung Lage | Text | |
| GOK | Dezimalzahl | Spundwandoberkante in mNHN |
| Plan-Sohltiefe | | in m ab GOK; Angabe aus Planunterlagen |
| Ist-Sohltiefe | | in m ab GOK; vorbelegt mit „Plansohltiefe“; kann manuell geändert werden |

Fortsetzung Tabelle A3.3: Station

| Feldname | Format | Beschreibung |
|-------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Datum | Datum | Datum der Messung |
| Widerstandsmoment | Integer | in cm ³ / lfd. m |
| GK Rechtswert | | Gauß-Krüger-Koordinaten im Koordinatensystem wie in der Auftrag-Tabelle angegeben |
| GK Hochwert | | |

Eine Station, d.h. eine Spundbohle, hat genau einen **Profiltyp**; ein Profiltyp kann zu einer Vielzahl von Stationen gehören:

Tabelle A3.4: Profiltyp

| Feldname | Format | Beschreibung |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Profiltyp | Text | erweiterbare Auswahlliste: <i>U-Profil rechtwinklig / U-Profil gestreckt / Z-Profil rechtwinklig / Z-Profil gestreckt / gemischte Spundwand, Einfachträgerpfahl, Füllbohle innen / gemischte Spundwand, Einfachträgerpfahl, Füllbohle außen / gemischte Spundwand, Doppelträgerpfahl, Füllbohle innen / gemischte Spundwand, Doppelträgerpfahl, Füllbohle außen / Trägerwand / Rohrpfahl / Dalben mit [n] Stegen / ...</i> |
| in Referenztabelle → | theoretisch mögliche Messlagen (s. s. S. A2-4ff) | |
| in Referenztabelle → | schematische Darstellung eines Profilquerschnittes mit Messlagen (s. s. S. A2-4ff) | |

Zu jeder Station gehören beliebig viele **Messquerschnitte**, die als Höhenwerte relativ zur Spundwandoberkante definiert sind:

Tabelle A3.5: Messquerschnitt

| Feldname | Format | Beschreibung |
|------------------------------------|-------------|--------------|
| [Auftrag, Bauwerk, Station] | | |
| Höhe | Dezimalzahl | in m ab GOK |

Zu jeder Station gehören ein oder (das ist die Regel) mehrere **Messlagen**. Welche Messlagen theoretisch möglich sind, ist vom Profiltyp abhängig, der in der Tabelle Station angegeben wurde:

Tabelle A3.6: Messlage

| Feldname | Format | Beschreibung |
|------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [Auftrag, Bauwerk, Station] | | |
| Messlagennummer | Integer | |
| Messlage | Text | Auswahlliste in Abhängigkeit vom Profiltyp (s. Tabelle A2.1) |
| Plan-Ausgangswanddicke | Dezimalzahl | in mm; Angabe aus Planunterlagen |
| Ist-Ausgangswanddicke | | in mm; vorbelegt mit „Planausgangswanddicke“; kann (z.B. bei negativen Abrostungen) manuell geändert werden |

Jeder **Messpunkt** definiert sich aus der Kombination aus *Messquerschnitt* und *Messlage*

Tabelle A3.7: Messpunkt

| Feldname | Format | Beschreibung |
|-----------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------|
| [Auftrag, Bauwerk, Station, Höhe, Messlagennummer] | | |
| Anzahl Löcher | Integer | je Loch geht ein Messwert „0 mm“ in das Datenkollektiv ein |
| Datenqualität | Text | <i>gut / schlecht</i> |

Zu jedem Messpunkt gehören beliebig viele (Ultraschall-) **Messwerte**:

Tabelle A3.8: Messwert

| Feldname | Format | Beschreibung |
|-----------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------|
| [Auftrag, Bauwerk, Station, Höhe, Messlagennummer] | | |
| Messwert | Dezimalzahl | in mm; positiv; Wert der Ultraschallmessung |

Zu jedem Messpunkt gehören beliebig viele **Mulden**. Aus einer Muldentiefe kann nur dann eine Restwanddicke abgeleitet werden, wenn am selben Messpunkt auch Ultraschall-Wanddicken eingegeben wurden:

Tabelle A3.9: Mulde

| Feldname | Format | Beschreibung |
|-----------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [Auftrag, Bauwerk, Station, Höhe, Messlagennummer] | | |
| Messwert | Dezimalzahl | in mm; Wert der Tiefenlehren-Messung; die Mulden-Restwanddicke wird daraus in Kenntnis der mittleren Ultraschall-Restwanddicke errechnet |

Anlage 4: Mittlere und geschätzte maximale Abrostungsraten in Norddeutschen Gewässern

Die folgenden Tabellen und Diagramme basieren auf den Ergebnissen von Wanddickenmessungen der Bundesanstalt für Wasserbau an hinterfüllten, nicht korrosionsgeschützten Spundwänden im Wasser, die keine Anzeichen für beidseitige Korrosion zeigen. Die angegebenen mittleren und geschätzten maximalen Abrostungsraten wurden nur für solche Gewässer angegeben, in denen mindestens fünf Bauwerke untersucht wurden. Sie stellen keine Bemessungswerte dar, sondern können z.B. zur Plausibilisierung von Ergebnissen neuer Wanddickenmessungen herangezogen werden.

Die Korrosionsintensität variiert auch am einzelnen Bauwerk in Abhängigkeit vom Wasserstand. Deshalb werden in den nachfolgenden Tabellen und Diagrammen die Abrostungsraten getrennt für die einzelnen Korrosionszonen entsprechend Bild 3 (Abschn. 3.1.1) angegeben.

Da die Abrostungsgeschwindigkeit mit zunehmender Standzeit abnimmt, werden drei Altersgruppen unterschieden:

- junge Bauwerke: < 20 Jahre
- Bauwerke mittleren Alters: 20 – 30 Jahre
- alte Bauwerke: > 30 Jahre.

Die Intensität der Korrosion kann auf Grundlage der Abrostungsraten in der Nwz entsprechend Tabelle 1 (Abschn. 3.1.2) klassifiziert werden. In den folgenden Tabellen sind die Abrostungsraten entsprechend farbig hinterlegt:




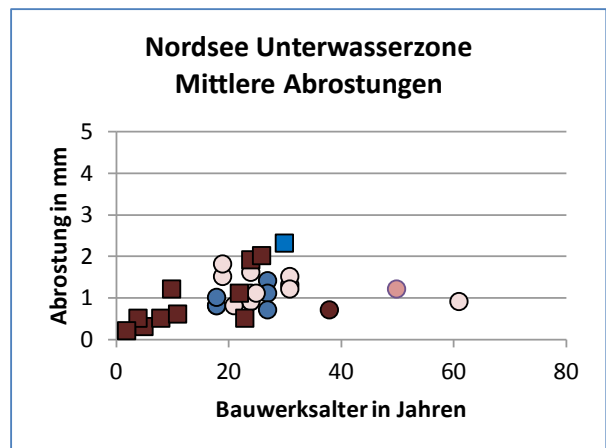
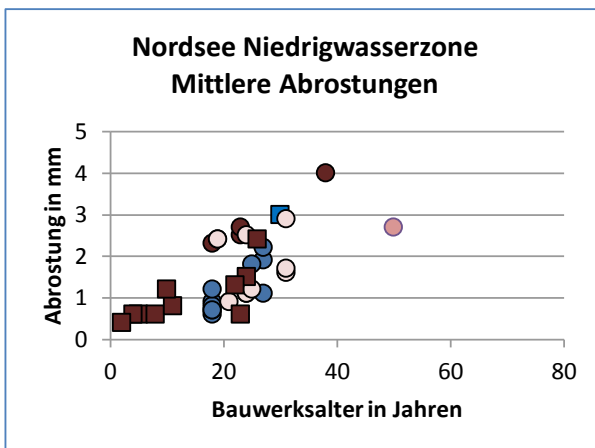
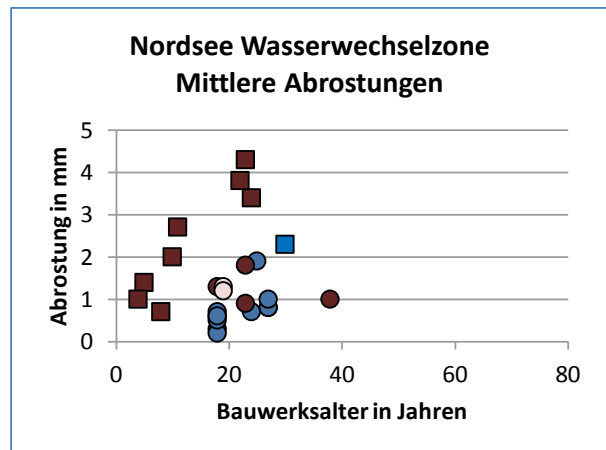
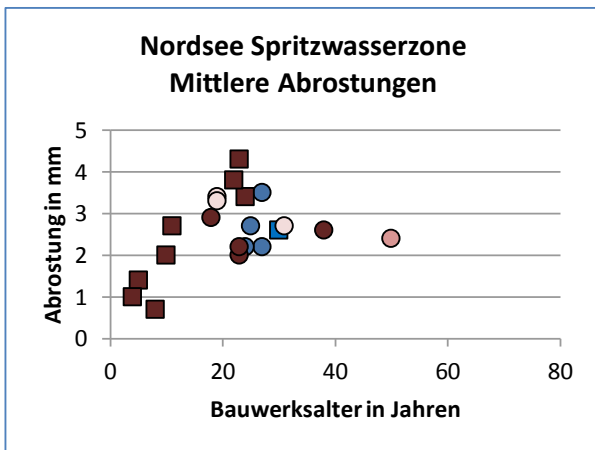
| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
|  | geringe Korrosionsintensität |
|  | mittlere Korrosionsintensität |
|  | große Korrosionsintensität |

Tabelle A4.1: Mittlere Abrostungsrate in der Nordsee

| NORDSEE | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 15 | 0,09 | 0,28 | 0,01 | 0,10 | 0,03 | 0,20 | 0,04 | 0,13 |
| | | 0,20 | | 0,06 | | 0,09 | | 0,08 | |
| 20 - 30 | 17 | 0,08 | 0,19 | 0,02 | 0,08 | 0,03 | 0,12 | 0,02 | 0,08 |
| | | 0,12 | | 0,05 | | 0,07 | | 0,05 | |
| > 30 | 6 | 0,05 | 0,09 | - | - | 0,05 | 0,11 | 0,02 | 0,05 |
| | | 0,07 | | 0,03 | | 0,07 | | 0,03 | |

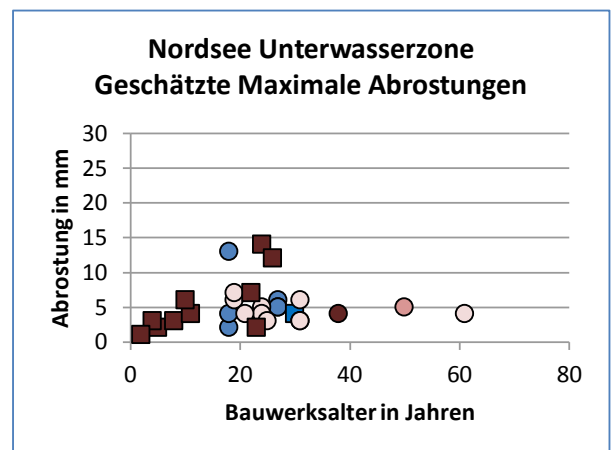
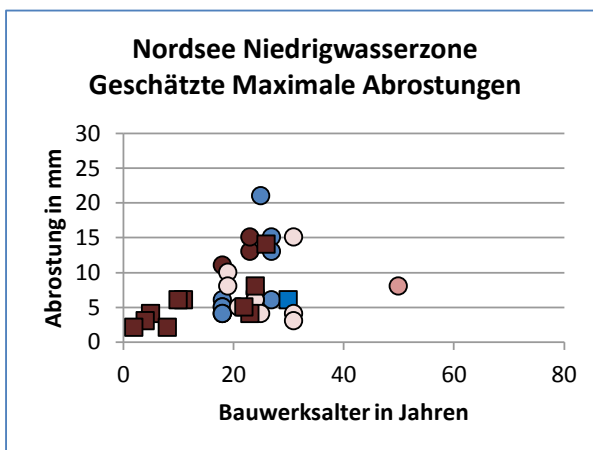
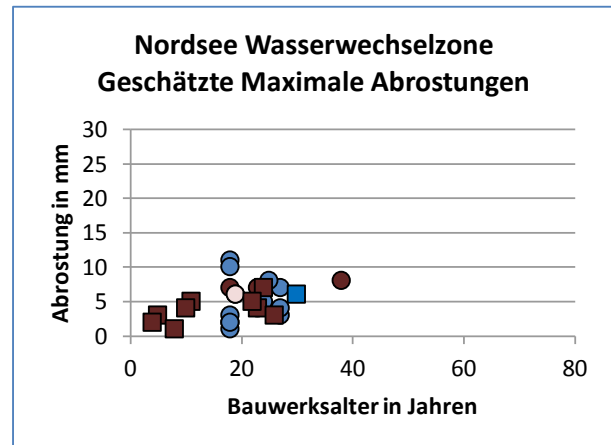
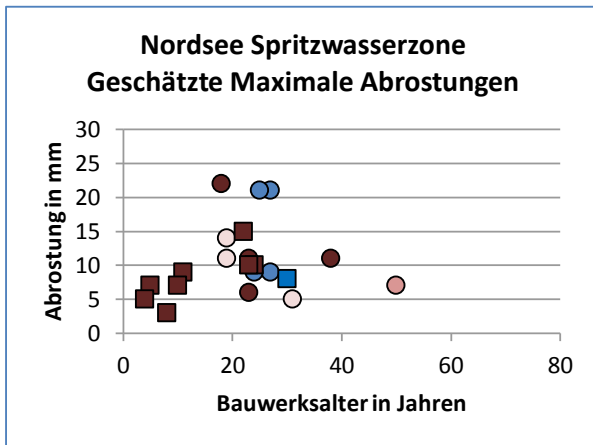


- Schleswig-Holsteinische Küste
- Dollard
- Nordfriesische Inseln
- Jade
- Niedersächsische Küste
- Ostfriesische Inseln

Bild A4.1: Mittlere Abrostungen in der Nordsee

Tabelle A4.2: Geschätzte maximale Abrostungsraten in der Nordsee

| NORDSEE | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 15 | 0,38 | 1,40 | 0,06 | 0,61 | 0,22 | 1,00 | 0,11 | 0,75 |
| | | 0,89 | | 0,34 | | 0,47 | | 0,43 | |
| 20 - 30 | 17 | 0,26 | 0,84 | 0,11 | 0,68 | 0,16 | 0,84 | 0,09 | 0,58 |
| | | 0,45 | | 0,25 | | 0,36 | | 0,22 | |
| > 30 | 6 | 0,14 | 0,29 | - | - | 0,10 | 0,87 | 0,07 | 0,19 |
| | | 0,20 | | 0,21 | | 0,35 | | 0,11 | |

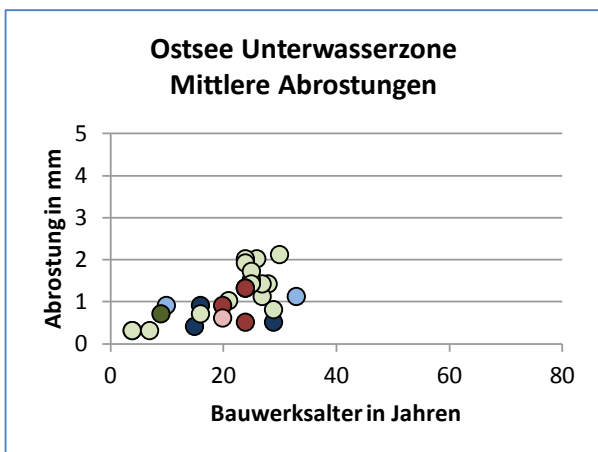
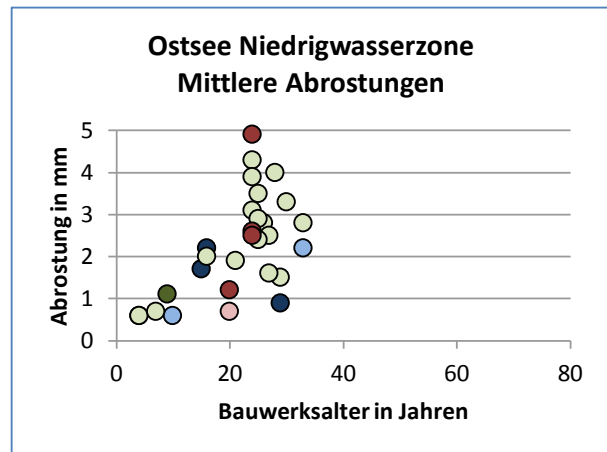
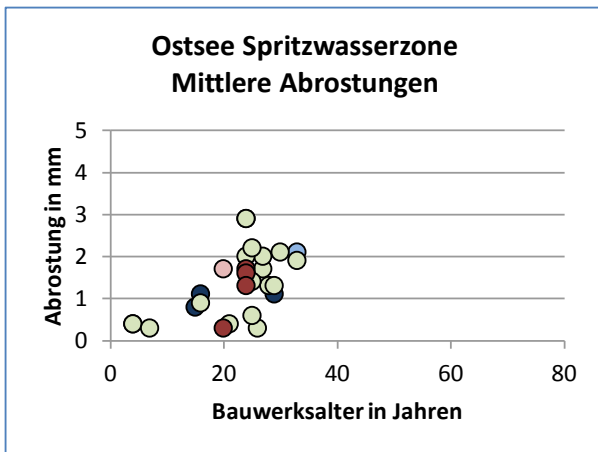


- Schleswig-Holsteinische Küste
- Dollard
- Nordfriesische Inseln
- Jade
- Niedersächsische Küste
- Ostfriesische Inseln

Bild A4.2: Geschätzte maximale Abrostungen in der Nordsee

Tabelle A4.3: Mittlere Abrostungsraten in der Ostsee

| OSTSEE | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 8 | 0,04 | 0,10 | 0,06 | 0,15 | 0,03 | 0,09 |
| | | 0,07 | | 0,12 | | 0,06 | |
| 20 - 30 | 19 | 0,01 | 0,12 | 0,03 | 0,20 | 0,02 | 0,08 |
| | | 0,06 | | 0,11 | | 0,05 | |
| > 30 | 2 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | - | - |
| | | 0,06 | | 0,08 | | 0,03 | |

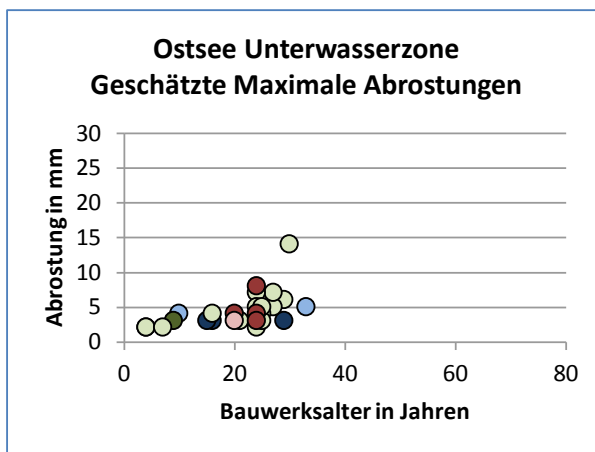
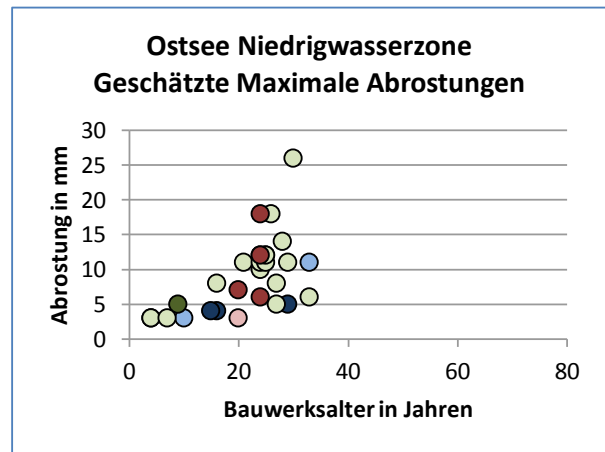
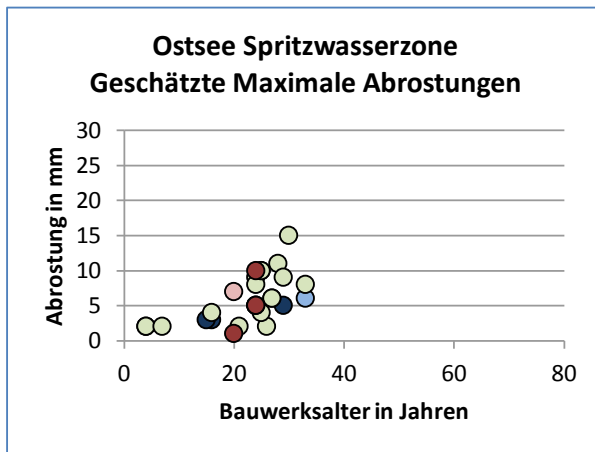


- Flensburger Förde
- Schlei
- Eckernförder Bucht
- Kieler Förde
- Lübecker Bucht
- Greifswalder Bodden

Bild A4.3: Mittlere Abrostungen in der Ostsee

Tabelle A4.4: Geschätzte maximale Abrostungsraten in der Ostsee

| OSTSEE | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 8 | 0,19 | 0,50 | 0,25 | 0,75 | 0,19 | 0,50 |
| | | 0,32 | | 0,48 | | 0,33 | |
| 20 - 30 | 19 | 0,05 | 0,50 | 0,15 | 0,87 | 0,08 | 0,47 |
| | | 0,27 | | 0,44 | | 0,20 | |
| > 30 | 2 | 0,18 | 0,24 | 0,18 | 0,33 | - | - |
| | | 0,21 | | 0,26 | | 0,15 | |

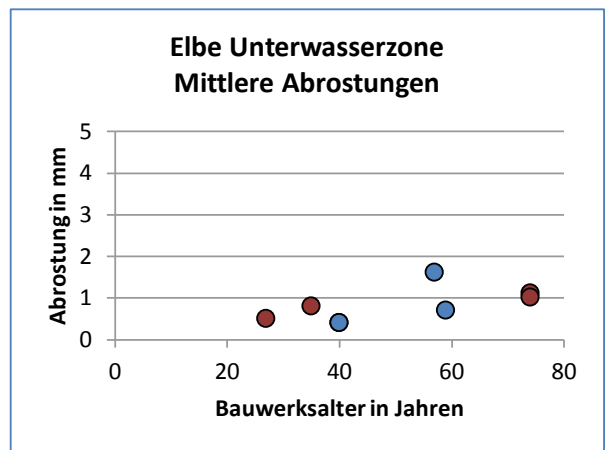
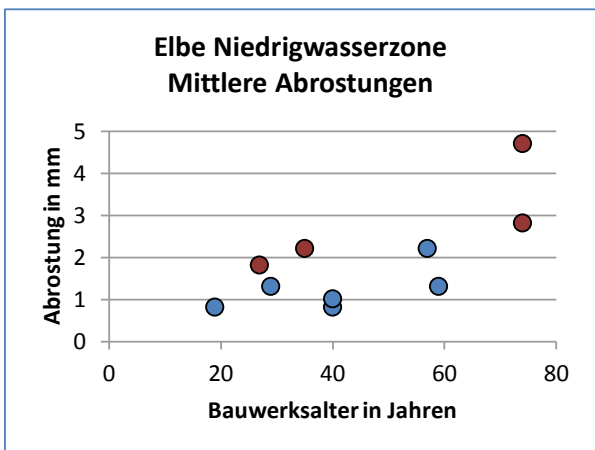
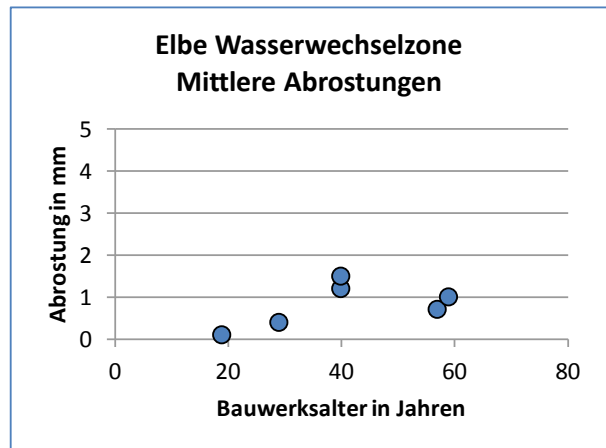
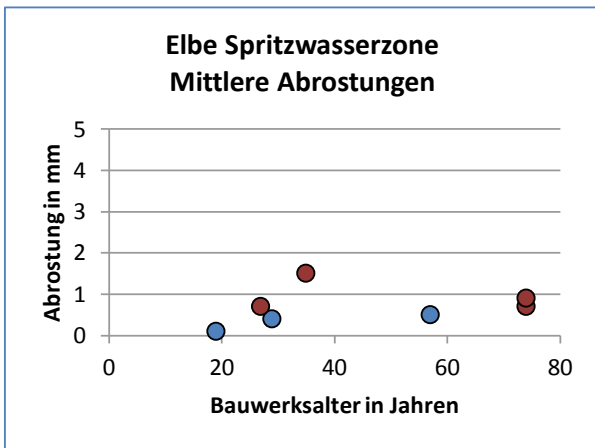


- Flensburger Förde
- Schlei
- Eckernförder Bucht
- Kieler Förde
- Lübecker Bucht
- Greifswalder Bodden

Bild A4.4: Geschätzte maximale Abrostungen in der Ostsee

Tabelle A4.5: Mittlere Abrostungsrate in der Elbe einschließlich Nebenflüssen

| ELBE | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | 0,005 | | 0,005 | | 0,04 | | - | |
| 20 - 30 | 2 | 0,01 | 0,03 | - | - | 0,05 | 0,07 | - | - |
| | | 0,02 | | 0,01 | | 0,06 | | 0,02 | |
| > 30 | 7 | 0,009 | 0,04 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,06 | 0,01 | 0,03 |
| | | 0,02 | | 0,02 | | 0,04 | | 0,02 | |

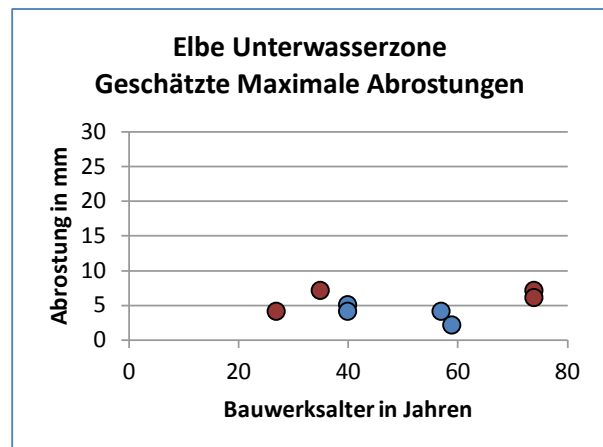
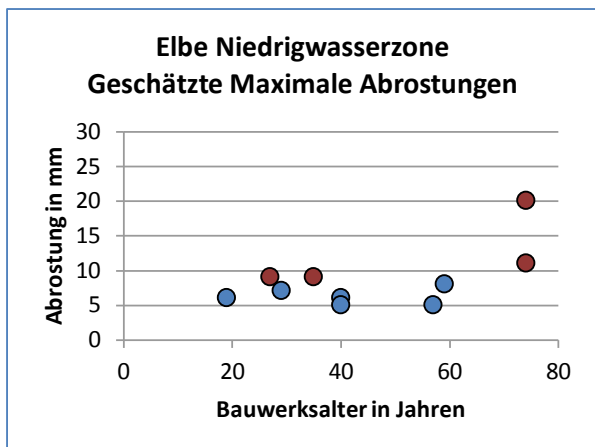
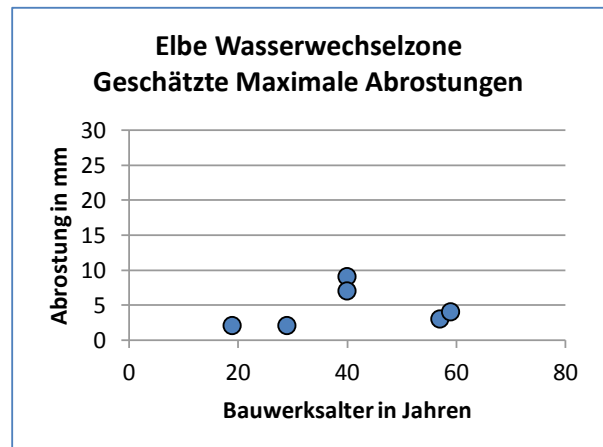
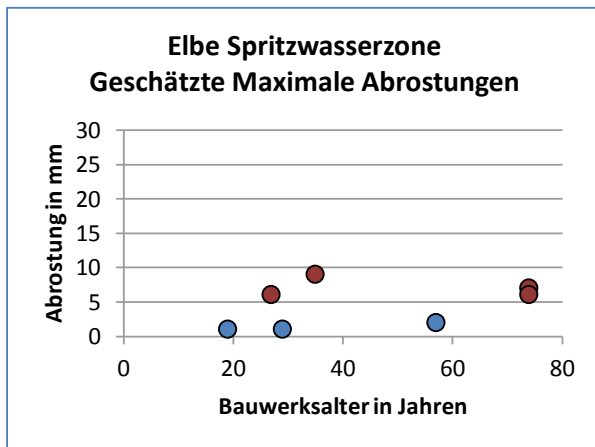


- Tidebereich
- Binnenland

Bild A4.5: Mittlere Abrostungen in der Elbe (und Nebenflüssen)

Tabelle A4.6: Geschätzte maximale Abrostungsraten in der Elbe einschließlich Nebenflüssen

| ELBE | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | 0,05 | | 0,11 | | 0,32 | | - | |
| 20 - 30 | 2 | 0,03 | 0,22 | - | - | 0,24 | 0,33 | - | - |
| | | 0,13 | | 0,07 | | 0,29 | | 0,15 | |
| > 30 | 7 | 0,04 | 0,26 | 0,05 | 0,23 | 0,09 | 0,27 | 0,03 | 0,20 |
| | | 0,12 | | 0,13 | | 0,17 | | 0,10 | |

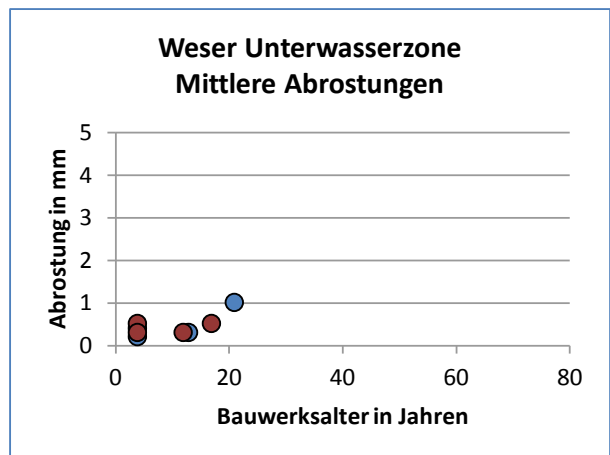
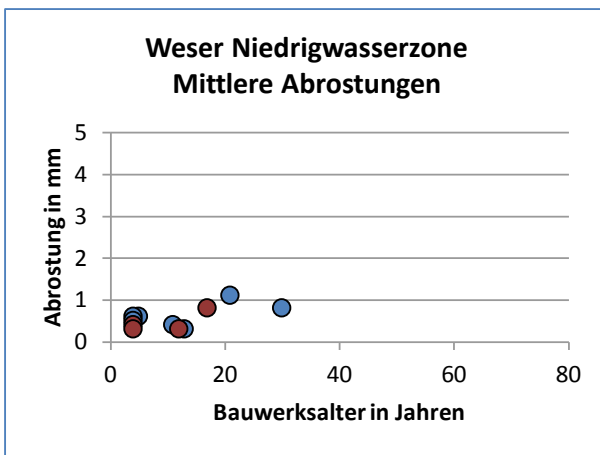
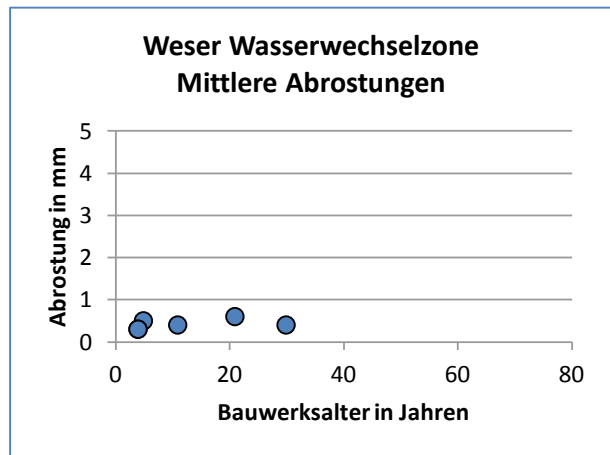
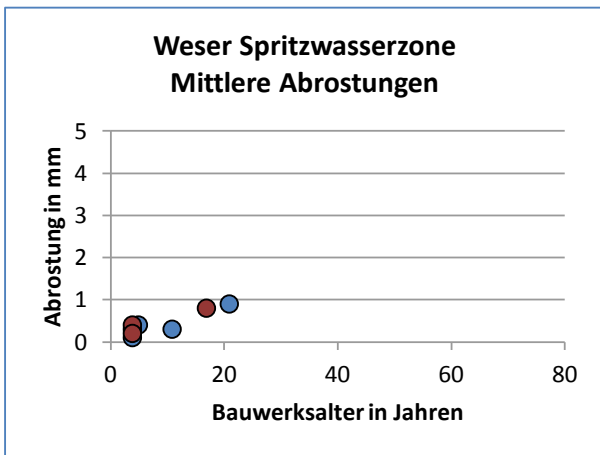


- Tidebereich
- Binnenland

Bild A4.6: Geschätzte maximale Abrostungen in der Elbe einschließlich Nebenflüssen

Tabelle A4.7: Mittlere Abrostungsraten in der Weser

| WESER | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 9 | 0,02 | 0,10 | 0,02 | 0,10 | 0,03 | 0,15 | 0,03 | 0,13 |
| | | 0,05 | | 0,06 | | 0,08 | | 0,07 | |
| 20 - 30 | 2 | - | - | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | - | - |
| | | 0,04 | | 0,02 | | 0,04 | | 0,05 | |
| > 30 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |

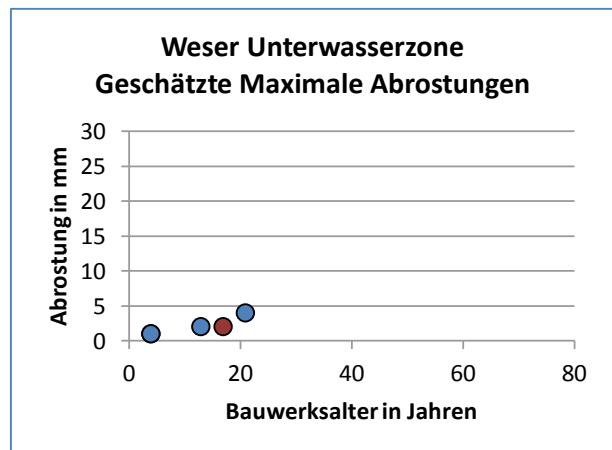
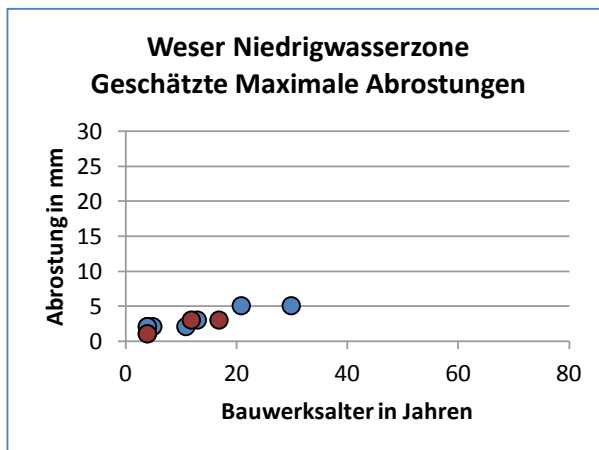
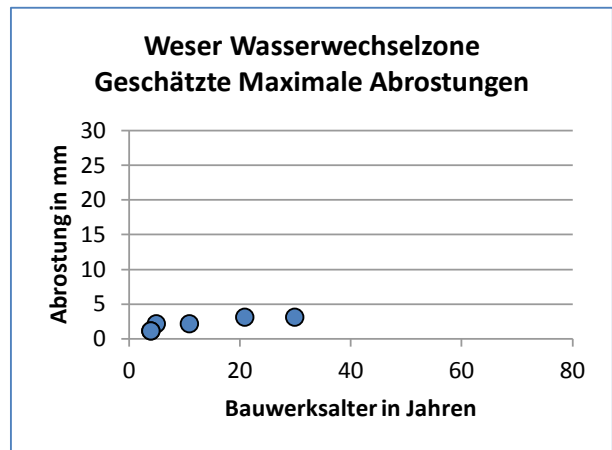
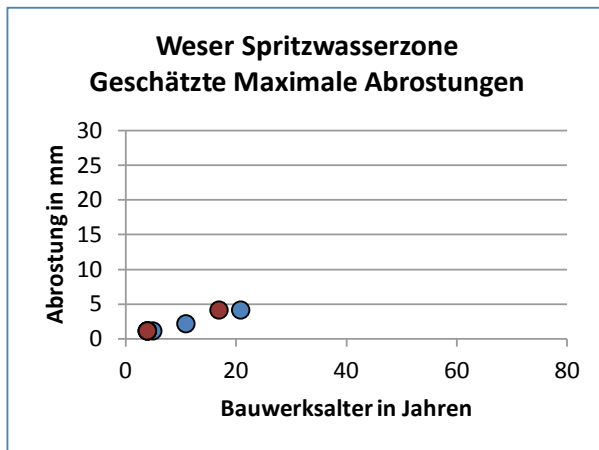


- Tidebereich
- Binnenland

Bild A4.7: Mittlere Abrostungen in der Weser

Tabelle A4.8: Geschätzte maximale Abrostungsraten in der Weser

| WESER | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 9 | 0,18 | 0,25 | 0,15 | 0,40 | 0,18 | 0,50 | 0,12 | 0,50 |
| | | 0,23 | | 0,25 | | 0,31 | | 0,26 | |
| 20 - 30 | 2 | - | - | 0,10 | 0,14 | 0,17 | 0,24 | - | - |
| | | 0,19 | | 0,12 | | 0,20 | | 0,19 | |
| > 30 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |



- Tidebereich
- Binnenland

Bild A4.8: Geschätzte maximale Abrostungen in der Weser

Tabelle A4.9: Mittlere Abrostungsraten im Mittellandkanal

| MITTELLANDKANAL | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 16 | 0,03 | 0,17 | 0,01 | 0,13 | 0,02 | 0,13 |
| | | 0,07 | | 0,04 | | 0,05 | |
| 20 - 30 | 5 | 0,05 | 0,08 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,03 |
| | | 0,07 | | 0,03 | | 0,03 | |
| > 30 | 2 | 0,04 | 0,07 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| | | 0,06 | | 0,03 | | 0,02 | |

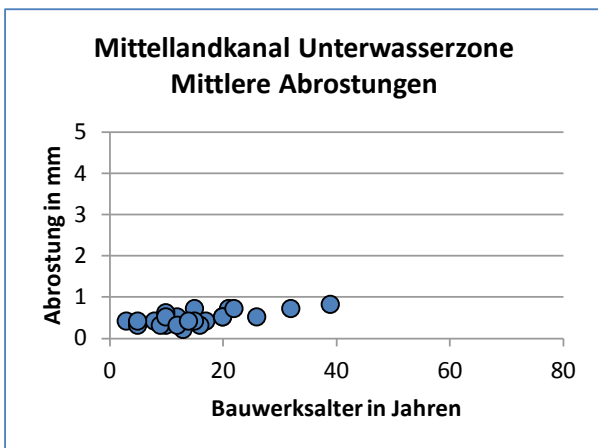
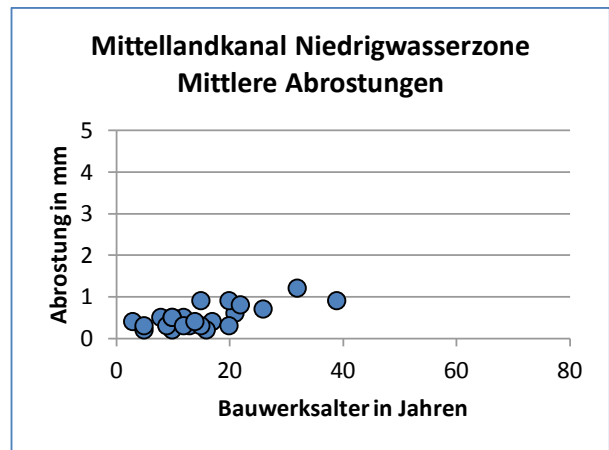
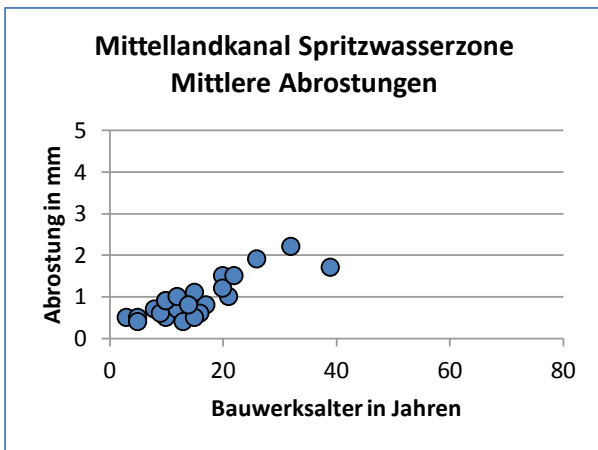


Bild A4.9: Mittlere Abrostungen im Mittellandkanal

Tabelle A4.10: Geschätzte maximale Abrostungsraten im Mittellandkanal

| MITTELLANDKANAL | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 16 | 0,15 | 0,40 | 0,06 | 0,63 | 0,06 | 0,40 |
| | | 0,30 | | 0,19 | | 0,18 | |
| 20 - 30 | 5 | 0,15 | 0,41 | 0,05 | 0,27 | 0,10 | 0,23 |
| | | 0,25 | | 0,15 | | 0,15 | |
| > 30 | 2 | 0,10 | 0,19 | 0,13 | 0,26 | 0,09 | 0,26 |
| | | 0,15 | | 0,19 | | 0,18 | |

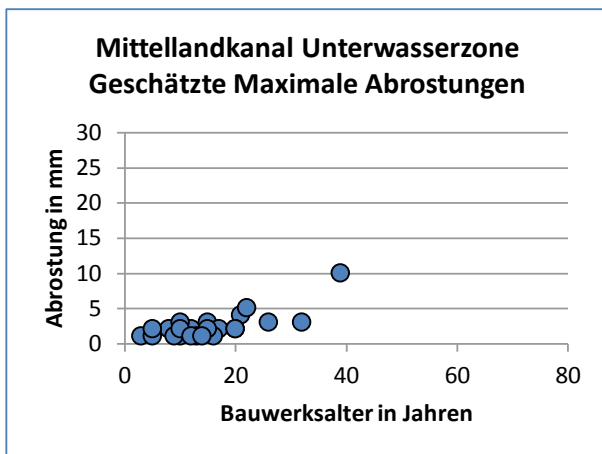
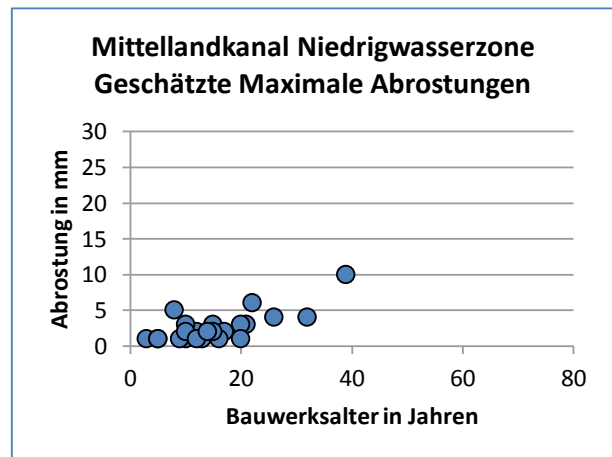
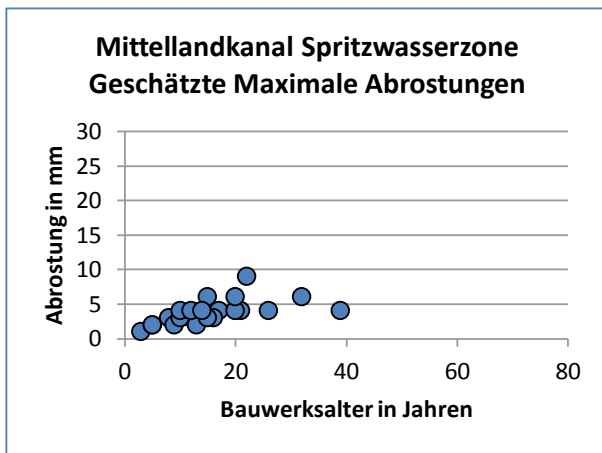
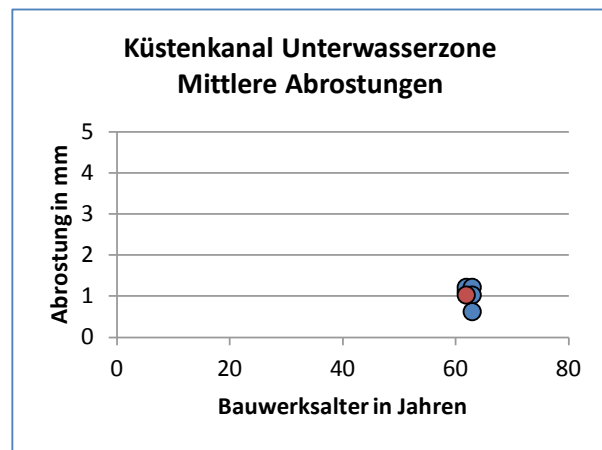
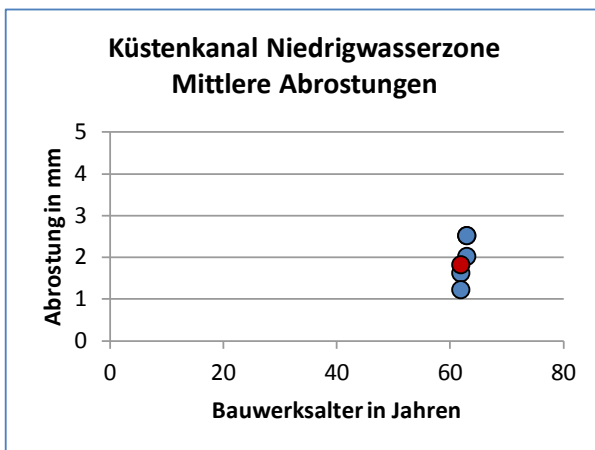
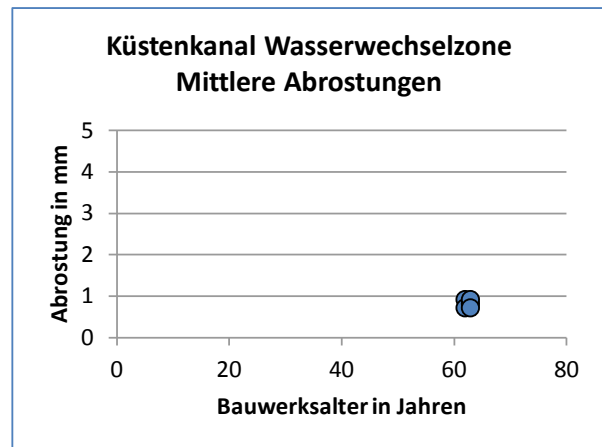
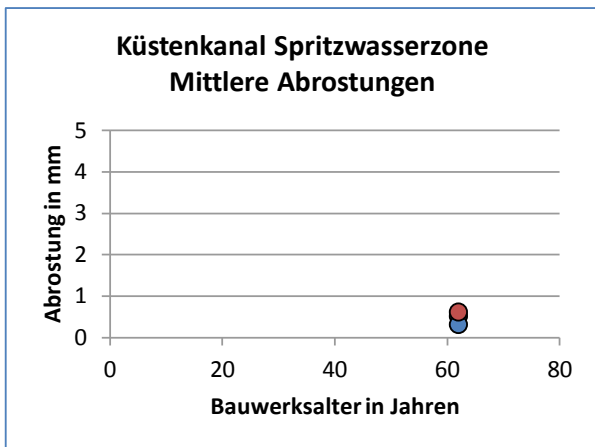


Bild A4.10: Geschätzte maximale Abrostungen im Mittellandkanal

Tabelle A4.11: Mittlere Abrostungsraten im Küstenkanal

| KÜSTENKANAL | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |
| 20 - 30 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |
| > 30 | 6 | 0,005 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,02 |
| | | 0,008 | | 0,01 | | 0,03 | | 0,02 | |

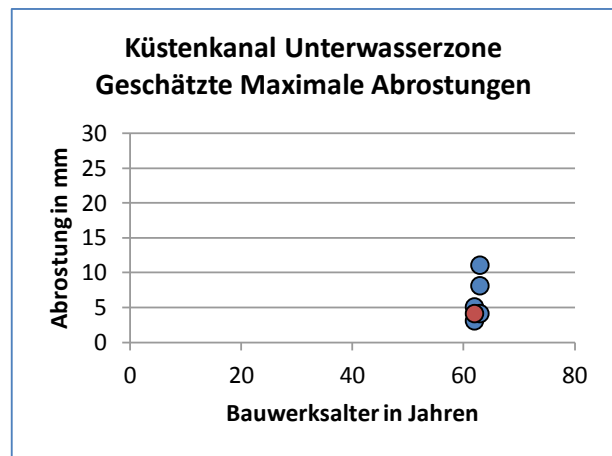
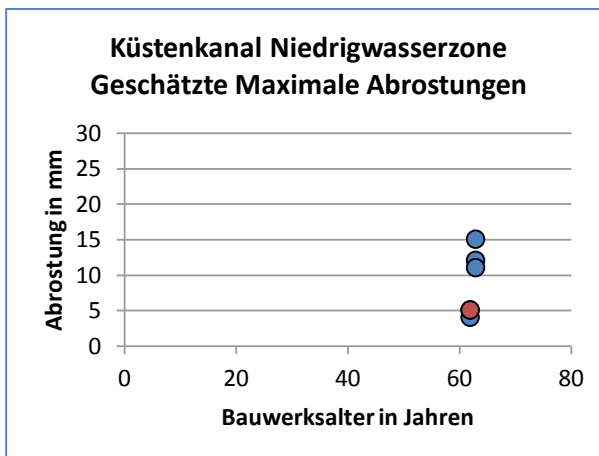
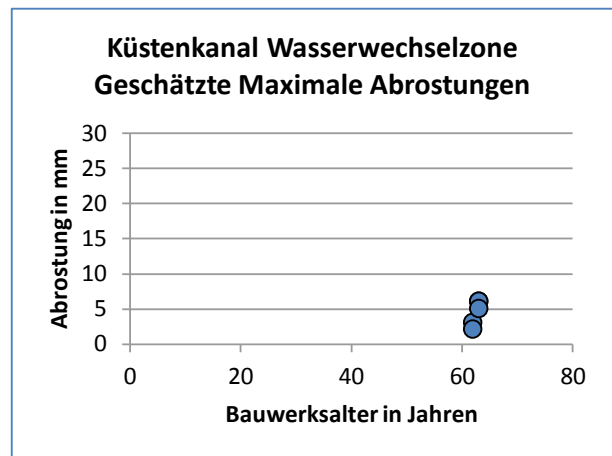
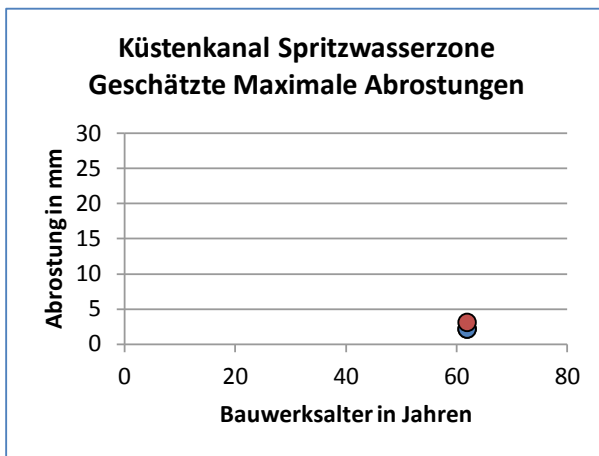


- Tidebereich
- Binnenland

Bild A4.11: Mittlere Abrostungen im Küstenkanal

Tabelle A4.12: Geschätzte maximale Abrostungsraten im Küstenkanal

| KÜSTENKANAL | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Wasserwechselzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |
| 20 - 30 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |
| > 30 | 6 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,10 | 0,07 | 0,24 | 0,05 | 0,18 |
| | | 0,04 | | 0,07 | | 0,14 | | 0,09 | |

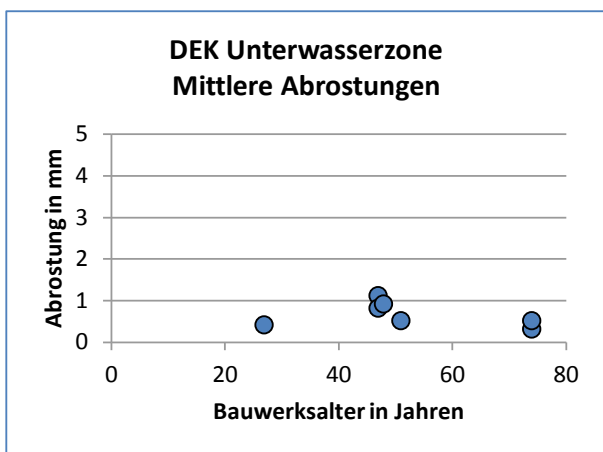
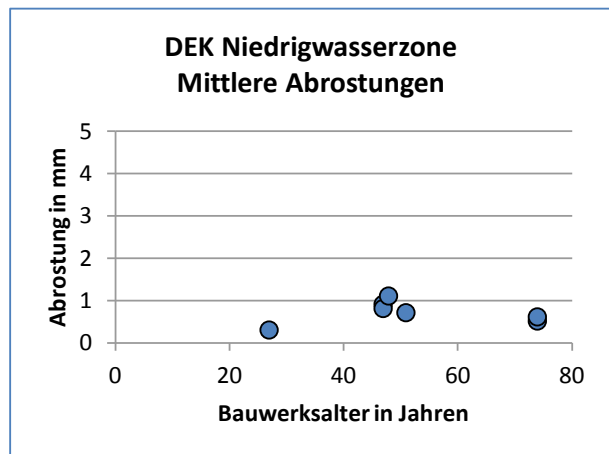
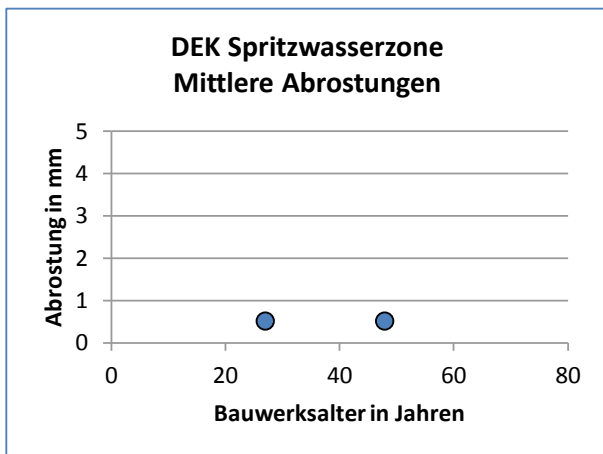


- Tidebereich
- Binnenland

Bild A4.12: Geschätzte maximale Abrostungen im Küstenkanal

Tabelle A4.13: Mittlere Abrostungsraten im Dortmund-Ems-Kanal

| DORTMUND-EMS-KANAL | | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ in mm/Jahr | | | | | |
|--------------------|-----------------|---------------------------------------------------|-----|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 0 | - | - | - | - | - | - |
| 20 - 30 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| | | 0,02 | | 0,01 | | 0,02 | |
| > 30 | 6 | - | - | 0,007 | 0,02 | 0,004 | 0,02 |
| | | 0,01 | | 0,02 | | 0,01 | |

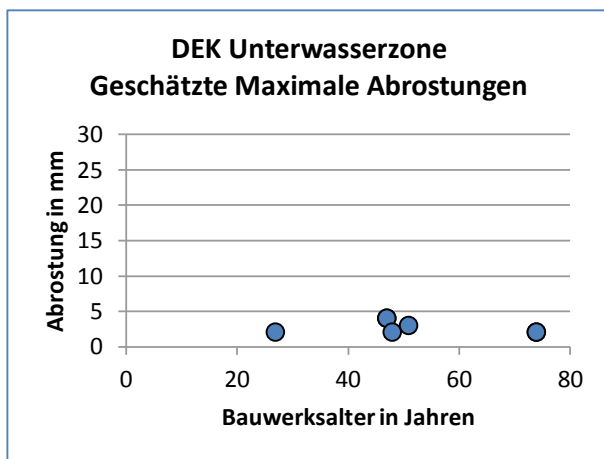
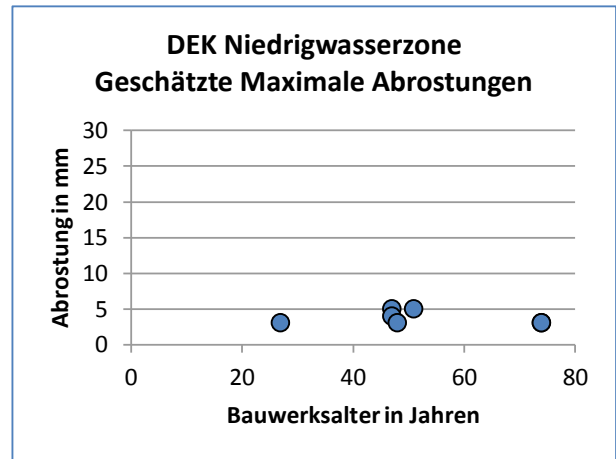
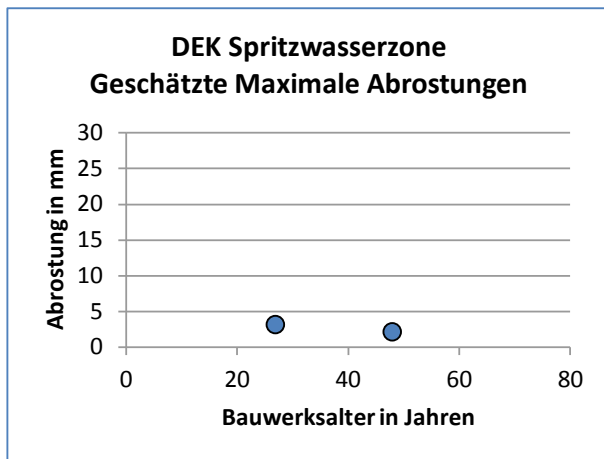


● Binnenland

Bild A4.13: Mittlere Abrostungen im Dortmund-Ems-Kanal

Tabelle A4.14: Geschätzte Maximale Abrostungsraten im Dortmund-Ems-Kanal

| DORTMUND-EMS-KANAL | | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} in mm/Jahr | | | | | |
|--------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|-----|-------------------|------|-----------------|------|
| Alter in Jahren | Anzahl Bauwerke | Spritzwasserzone | | Niedrigwasserzone | | Unterwasserzone | |
| | | von | bis | von | bis | von | bis |
| | | Mittelwert | | Mittelwert | | Mittelwert | |
| < 20 | 0 | - | - | - | - | - | - |
| 20 - 30 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| | | 0,11 | | 0,11 | | 0,07 | |
| > 30 | 6 | - | - | 0,04 | 0,11 | 0,03 | 0,09 |
| | | 0,04 | | 0,07 | | 0,06 | |



● Binnenland

Bild A4.14: Geschätzte Maximale Abrostungen im Dortmund-Ems-Kanal