

BAWEmpfehlung

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

Ausgabe 2022

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

Copyright: Creative Commons BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

| Inhaltsverzeichnis | | Seite |
|---------------------------|--|--------------|
| | Vorbemerkung | 1 |
| 1 | Problemstellung | 1 |
| 2 | Begriffe | 2 |
| 2.1 | Korrosion | 2 |
| 2.2 | Korrosionszone | 2 |
| 2.3 | Korrosionstyp | 3 |
| 2.4 | Spundwanddickenmessung | 3 |
| 2.5 | Restwanddicke | 4 |
| 2.6 | Ausgangswanddicke | 4 |
| 2.7 | Abrostung, Abrostungsrate | 5 |
| 2.8 | Restnutzungsdauer | 5 |
| 3 | Korrosionsmilieus am Bauwerk | 6 |
| 3.1 | Korrosion im freien Wasser | 6 |
| 3.1.1 | Korrosionszonen | 6 |
| 3.1.2 | Korrosionsintensität | 9 |
| 3.2 | Korrosion an der Luft | 9 |
| 3.3 | Korrosion im Boden | 10 |
| 4 | Kennwerte der Korrosion | 11 |
| 4.1 | Tragfähigkeit | 11 |
| 4.2 | Gebrauchstauglichkeit | 12 |
| 4.3 | Beurteilung der Restnutzungsdauer | 13 |
| 5 | Untersuchung eines Spundwandbauwerkes | 14 |
| 5.1 | Qualitative Untersuchung | 14 |
| 5.2 | Spundwanddickenmessung | 15 |
| 5.2.1 | Messtechnik | 15 |
| 5.2.2 | Messstellen und Datenumfang | 17 |
| 5.2.3 | Planung und Vorbereitung einer Messkampagne | 22 |
| 5.2.4 | Durchführung der Messung | 24 |
| 6 | Der Messbericht: Dokumentation und Interpretation einer Spundwanddickenmessung | 25 |
| 6.1 | Veranlassung der Wanddickenmessung | 26 |
| 6.2 | Beschreibung des Bauwerks | 26 |
| 6.3 | Beschreibung der Messkampagne | 26 |
| 6.4 | Verifikation und Aufbereitung der Messwerte | 27 |
| 6.5 | Darstellung der Messergebnisse | 29 |
| 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 | 34 |
| 6.7.1 | Vier-Zonen-Modell | 34 |
| 6.7.2 | Drei-Zonen-Modell | 34 |
| 6.8 | Minimale Restwanddicke, Maximale Abrostung und Abrostungsrate | 35 |
| 6.8.1 | Vier-Zonen-Modell | 35 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6.8.2 | Drei-Zonen-Modell | 36 |
| 6.8.3 | Abrostungsanomalien und Anomale Löcher | 37 |
| 6.9 | Beurteilung des aktuellen Korrosionszustandes, Prognose der Restnutzungsdauer | 38 |
| 6.9.1 | Schadensdokumentation | 38 |
| 6.9.2 | Kennwerte der Korrosion | 38 |
| 6.9.3 | Korrosionsintensität | 39 |
| 6.9.4 | Vergleich mit historischen Daten | 39 |
| 6.10 | Empfehlungen | 39 |
| 6.10.1 | Tragfähigkeitsbewertung | 39 |
| 6.10.2 | Instandsetzungsempfehlung | 39 |
| 6.10.3 | Inspektionsrhythmus | 40 |
| 7 | Spundwanddickenmessungen im Rahmen der Bauwerksinspektion | 40 |
| 7.1 | Regelwerke im Zuständigkeitsbereich der WSV | 40 |
| 7.2 | Inspektionsrhythmus | 41 |
| 7.2.1 | Inspektionsrhythmus nach VV-WSV 2101 | 41 |
| 7.2.2 | Erst- und Folgemessung am Spundwandbauwerk | 41 |
| 7.3 | Schadensklassifizierung | 42 |
| 7.3.1 | Schadensklassifizierung nach MSV bzw. MSV-A | 42 |
| 7.3.2 | Schadensklassifizierung am Spundwandbauwerk | 43 |
| 8 | Übertragbarkeit von Abrostungsraten | 44 |
| 8.1 | Korrosionszonen | 44 |
| 8.2 | Bauwerke | 44 |
| 9 | Milieu-Beprobung | 45 |
| 9.1 | Verfahren nach dem Drei-Zonen-Modell | 45 |
| 9.1.1 | Datengrundlage | 46 |
| 9.1.2 | Kennwerte der Korrosion | 46 |
| 9.2 | Verfahren nach DIN 50929-3, Beiblatt 1 | 47 |
| 9.3 | Praxistauglichkeit | 47 |
| | Literatur | 48 |
| | Regelwerke | 50 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Benennung der Korrosionsintensität | 9 |
| Tabelle 2: | Anzahl und Verteilung der Messquerschnitte an einer Station | 20 |
| Tabelle 3: | Annahmekennwert k für $p=0,975$ und $1-\alpha = 0,95$ in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n ; berechnet nach John (1979) | 36 |
| Tabelle 4: | Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Tragfähigkeit und der Schadensklasse: mittlere Restwanddicke, mittlere Abrostung und Abrostungsrate, Muldentiefen | 38 |
| Tabelle 5: | Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit: geschätzte minimale Restwanddicke, geschätzte maximale Abrostung und Abrostungsrate, Löcher | 38 |
| Tabelle 6: | Schadensklassen (SK) für Spundwandbauwerke in Anlehnung an das MSV (2018) bzw. das MSV-A (2023) | 42 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Mittel- und Maximalwerte der Abrostungen an Stahlspundwänden im Süß- und Meerwasser (nach EAU 2020, Abb. 8.25 und 8.26 auf Grundlage von BAW-Daten) | 2 |
| Abbildung 2: | Korrosionstypen | 3 |
| Abbildung 3: | Korrosionszonen nach dem Vier-Zonen-Modell (in Anlehnung an Alberts und Heeling 1997) | 6 |
| Abbildung 4: | Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell (European Communities 2007) | 7 |
| Abbildung 5: | Vergleich: Korrosionszonen nach dem Drei- und Vier-Zonen-Modell | 8 |
| Abbildung 6: | Übergang Spritzwasserzone / Luftzone | 10 |
| Abbildung 7: | Stofffluss zur Entstehung mikrobiell induzierter Korrosion (nach Graff 2003) | 11 |
| Abbildung 8: | Tragfähigkeit einer Spundwand | 12 |
| Abbildung 9: | Gebrauchstauglichkeit einer Spundwand | 13 |
| Abbildung 10: | Hammerschlag-Methode | 15 |
| Abbildung 11: | Wanddickenmessung mit Ultraschall: Messprinzip | 16 |
| Abbildung 12: | Bestimmung der Restwanddicke bei Mulden | 17 |
| Abbildung 13: | Station, Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte am Beispiel einer Spundwand mit U-Profil | 18 |
| Abbildung 14: | Beschreibung der Messlagen eines Messquerschnittes | 20 |
| Abbildung 15: | Messlagen einheitlicher Ausgangswanddicke am wasserseitigen Flansch eines Doppel-T-Trägers einer gemischten Spundwand | 21 |
| Abbildung 16: | Spundwanddickenmessung mit Messkette | 23 |
| Abbildung 17: | Spundwanddickenmessung: Personal im Wasser und an Land | 24 |
| Abbildung 18: | Reinigung von Messstelle von Rost und Bewuchs | 25 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 19: | Lageplan mit Kennzeichnung zweier getrennt ausgewerteter Teilbauwerke („Baujahr 1985“ und „Baujahr 1987“) und Stationen der aktuellen und einer früheren Messkampagne | 26 |
| Abbildung 20: | Lage der Messquerschnitte | 27 |
| Abbildung 21: | Korrektur der Ausgangswanddicke | 28 |
| Abbildung 22: | Restwanddickenprofile einer Station mit drei Messlagen am Beispiel einer Spundwand mit konstantem Wasserstand | 30 |
| Abbildung 23: | Mittlere Restwanddicken und reduzierte Widerstandsmomente eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand unter Tideeinfluss | 31 |
| Abbildung 24: | Festlegung der Korrosionszonen im Vier-Zonen-Modell | 32 |
| Abbildung 25: | Rechtsschiefe Lognormalverteilung der Abrostungen einer Korrosionszone (hier die Spritzwasserzone einer 13 Jahre alten Spundwand; nach Alberts und Heeling 1997) | 33 |
| Abbildung 26: | Mittlere Abrostungen und Abrostungsraten eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand ohne Tideeinfluss | 34 |
| Abbildung 27: | Berechnung der tiefenbezogenen mittleren Abrostung \bar{a} mittels nichtstetiger Exponentialfunktion, links: Formeln (5a – 5f) für unterschiedliche Höhenbereiche, rechts: Profil der mittleren Abrostungen am Beispiel einer Spundwand im Tidebereich | 35 |
| Abbildung 28: | Normale und anomale Löcher | 37 |
| Abbildung 29: | Beispiel: Bestimmung der Schadenklasse bzgl. flächiger Korrosion aus der gewichteten mittleren Abrostung | 43 |

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“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Standort Hamburg, führte zwischen 1982 und 2017 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 weiterhin bei Bedarf beratend und prüfend zur Verfügung. Das Karlsruher Bautechnik-Referat „Stahlbau und Korrosionsschutz“ der BAW befasst sich mit Untersuchungen an Stahlwasserbauten und deren Ausrüstungen. Ebenfalls zur Karlsruher Abteilung Bautechnik gehörig, hat das Referat „Infrastrukturmanagement“ die BAW-Merkblätter MBI (2010) „Bauwerksinspektion“, MSV (2018) „Schadenklassifikation an Verkehrswasserbauwerken“ sowie MSV-B (2022) „Schadensbewertung an Verkehrswasserbauwerken der Inspektionskategorie B“ verfasst. Das MSV (2018) wird 2023 durch das MSV-A „Schadensbewertung an Verkehrswasserbauwerken der Inspektionskategorie A“ ersetzt. Bei der BAW wurden bzw. 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. Aufgrund der Vielfalt der auftretenden Korrosionsbilder sowie unterschiedlichster Situationen vor Ort (bauliche Besonderheiten, Nutzung, Zugänglichkeit etc.) handelt es sich im Folgenden um Angaben, die evtl. an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden müssen. Im begründeten Einzelfall ist der ingenieurmäßige Sachverstand diesen Empfehlungen vorzuziehen.

Sofern kein entsprechender Hinweis erfolgt, gelten alle nachfolgenden Aussagen nicht nur für Spundwände, die dem freien Wasser ausgesetzt und mit Boden hinterfüllt sind, 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 der Kenntnis der mittleren und der minimalen Restwanddicke bzw. – unter Berücksichtigung der Ausgangswanddicke – auf der mittleren und maximalen Abrostung.

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 2020“, s. Abbildung 1; DIN EN 1993-5, Tab. 4-2). Diese Werte weisen jedoch standortbedingt eine große Spannweite auf (s. graue Flächen in Abbildung 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.

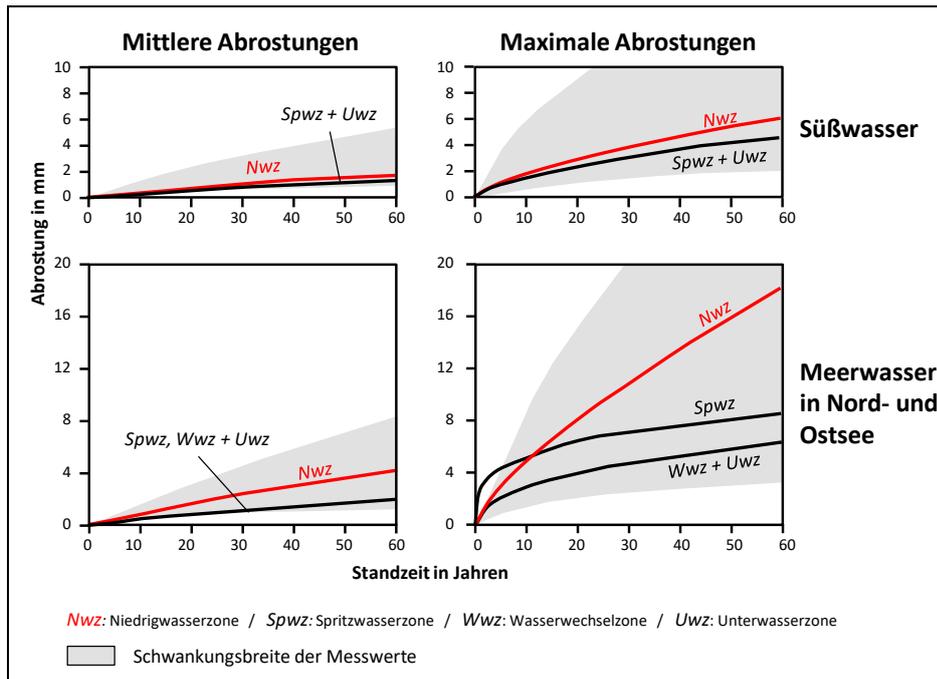


Abbildung 1: Mittel- und Maximalwerte der Abrostungen an Stahlspundwänden im Süß- und Meerwasser (nach EAU 2020, Abb. 8.25 und 8.26 auf Grundlage von BAW-Daten)

2 Begriffe

2.1 Korrosion

Die DIN EN ISO 8044 definiert Korrosion als „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem metallenen Werkstoff 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. Im BAW-Merkblatt „Schadensklassifikation an Verkehrsbauwerken“ (MSV 2018 bzw. MSV-A 2023) werden folgende Korrosionstypen unterschieden:

- *Flächige Korrosion*: gleichmäßig flächig (s. Abbildung 2, links)
- *Mulden-/Narbenkorrosion*: punktuell deutlich erhöhte Korrosionsintensität, die im Extremfall zu Durchrostungen führt (s. Abbildung 2, Mitte und rechts; in der intensiven, flächigen Ausprägung wie in Abbildung 2, Mitte, dargestellt, tritt Muldenkorrosion jedoch nur in Ausnahmen auf)
- *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 Korrosion und die punktuelle Mulden-/Narbenkorrosion, während Spaltkorrosion, Kantenabrostung und Kontaktkorrosion nur untergeordnet auftreten.

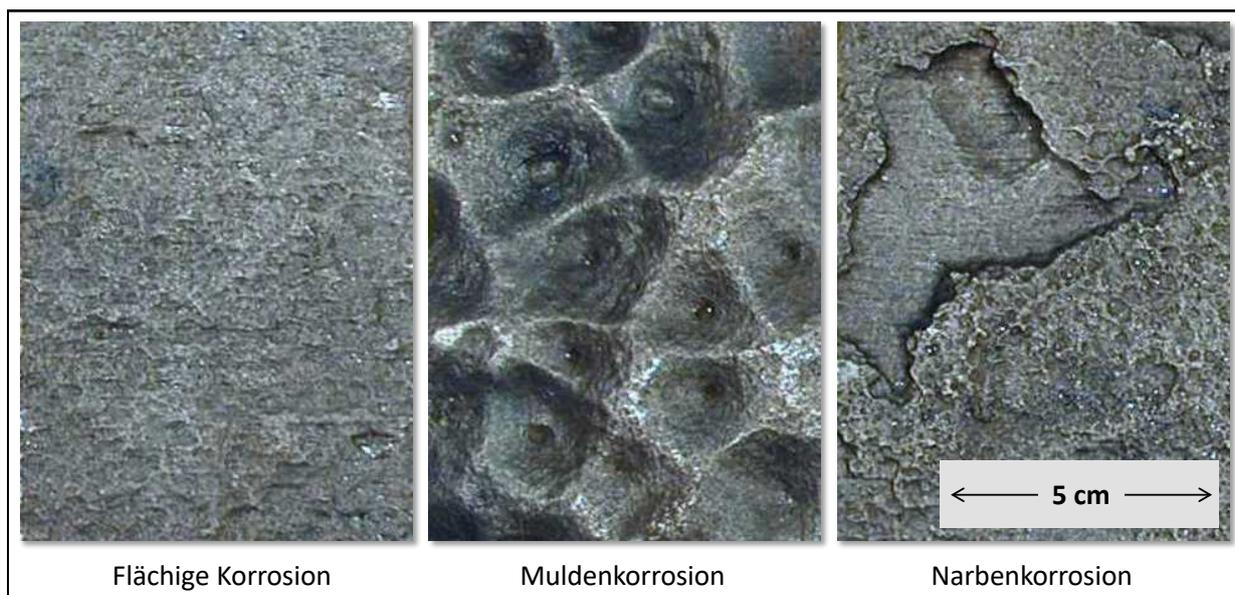


Abbildung 2: Korrosionstypen

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 2020, Abs. 13.2, bzw. (im Zuständigkeitsbereich der WSV) im Sinne der Verwaltungsvorschrift „Bauwerksinspektion“ VV-WSV 2101 (2022) 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. Restwanddicken von Löchern t_{Loch} und Mulden t_{Mulde} gehen nicht in die Berechnung der mittleren Restwanddicke ein¹.

Die kleinste gemessene Restwanddicke $t_{min_gemessen}$ entspricht nur in Ausnahmen (z. B. bei Löchern mit $t_{Loch} = 0,0$ mm) der tatsächlichen minimalen Restwanddicke t_{min} der Spundwand (s. Abschn. 6.8). Ein Schätzwert für die minimale Restwanddicke (bzw. für die maximale Abrostung, s. Abschn. 2.7) wird entsprechend Formel (6), Abschn. 6.8.1, bzw. Formel (7), Abschn. 6.8.2, bestimmt.

Gemessene Restwanddicken werden in Millimetern mit einer Nachkommastelle und Schätzwerte ganzzahlig angegeben.

2.6 Ausgangswanddicke

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

Die Plan-Ausgangswanddicke t_{0_Plan} ist der theoretische Wert entsprechend Herstellerangabe bzw. Planunterlagen. Die tatsächliche Ist-Ausgangswanddicke t_{0_Ist} kann vom Planwert z. B. aufgrund von Walmtoleranzen 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).

Solange jedoch keine Hinweise auf eine von den Planunterlagen abweichende Ist-Ausgangswanddicke vorliegen, gilt: $t_{0_Ist} = t_{0_Plan}$.

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. Analog führt eine zu niedrige Ausgangswanddicke zu einer Überschätzung der Restnutzungsdauer.

Ausgangswanddicken werden in Millimetern mit einer Nachkommastelle angegeben.

¹ Eine Einbeziehung der i. d. R. punktuellen Mulden und Löcher würde zu einer Unterschätzung der relevanten mittleren Restwanddicke z. B. für die Bestimmung der Tragfähigkeit (Abschn. 4.1) oder für die Berechnung der Mulden-Restwanddicke (Abschn. 5.2.1.2) führen. Rechnerisch wäre zudem die mittlere Restwanddicke bei Einbeziehung von Löchern stets $\bar{t}_{geom} = 0$ mm.

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 \bar{a} wird (je nach Kontext: je Messpunkt, je Messquerschnitt oder je Korrosionszone) als geometrisches Mittel $\bar{a}_{geom} = \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n}$ bestimmt. Als maximale Abrostung A_{max} wird ein Schätzwert nach Formel (6), Abschn. 6.8.1, bzw. nach Formel (7), 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.

Gemessene 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 1²) auch in μm bzw. μm pro Jahr, angegeben.

2.8 Restnutzungsdauer

Die Restnutzungsdauer einer Spundwand ist ein Schätzwert, der angibt, wie lange das Bauwerk noch funktionstüchtig ist, sofern die zuvor vorherrschenden Korrosionseinflüsse weiterhin wirken. Die Restnutzungsdauer errechnet sich

- bzgl. Tragfähigkeit aus der aktuellen mittleren Restwanddicke und der mittleren Abrostungsrate und
- bzgl. Gebrauchstauglichkeit aus der aktuellen geschätzten minimalen Restwanddicke und der maximalen Abrostungsrate

(s. a. Abschn. 2.7). Die Restnutzungsdauer wird ganzzahlig in Jahren angegeben.

² In der DIN 50929-3, Beiblatt 1, wird die Abrostungsrate als „Korrosionsrate r“ und die Abrostung als „Spundwanddickenminderung X_r“ bezeichnet.

3 Korrosionsmilieus 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 und in Kenntnis der maßgeblichen Wasserstände – nach zwei unterschiedlichen Verfahren erfolgen:

- nach dem Vier-Zonen-Modell (Abschn. 3.1.1.1) oder
- nach dem Drei-Zonen-Modell (Abschn. 3.1.1.2)

3.1.1.1 Korrosionszonen nach dem Vier-Zonen-Modell

Üblicherweise (z. B. Alberts und Heeling 1997; EAU 2020) wird das Bauwerk je nach Gewässertyp (konstanter oder wechselnder Wasserstand) in bis zu vier Korrosionszonen unterteilt (s. Abbildung 3):

- Spritzwasserzone (Spwz): ca. 1 m bis 2 m oberhalb von MW bzw. MThw oder OW
- 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 oder UW
- Unterwasserzone (Uwz): ständig vom Wasser bedeckter Bereich unterhalb Nwz)

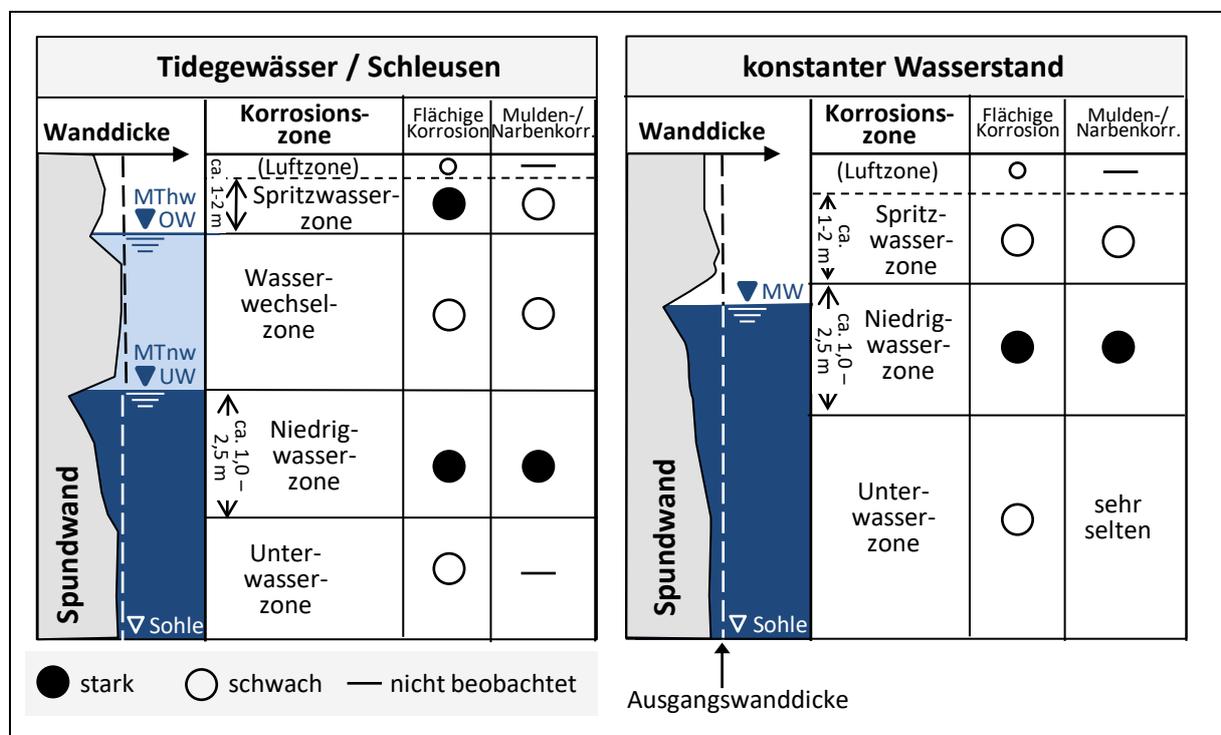


Abbildung 3: Korrosionszonen nach dem Vier-Zonen-Modell (in Anlehnung an Alberts und Heeling 1997)

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. 6.6.1 eingegangen.

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; Heeling 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 (Abbildung 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: bis 4 m unterhalb von MW bzw. MTnw oder UW

Bei dieser Einteilung werden die Abrostungen innerhalb einer Korrosionszone nicht als konstant angesehen, sondern tiefenabhängig durch Exponentialfunktionen dargestellt (s. Abschn. 6.7.2).

Die Exponentialfunktion der Uwz (rot-gestrichelte Linien in Abbildung 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.

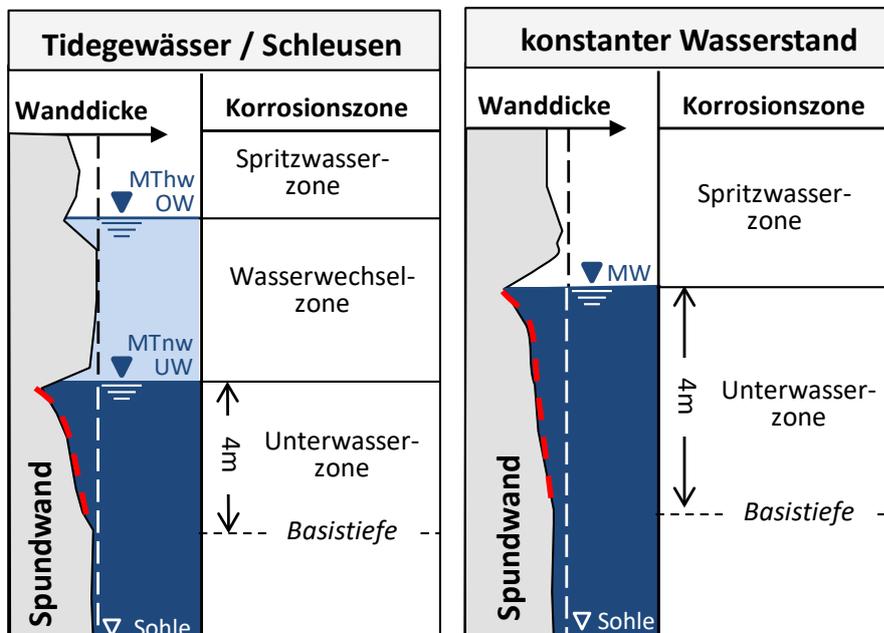


Abbildung 4: Korrosionszonen nach dem Drei-Zonen-Modell (European Communities 2007)

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

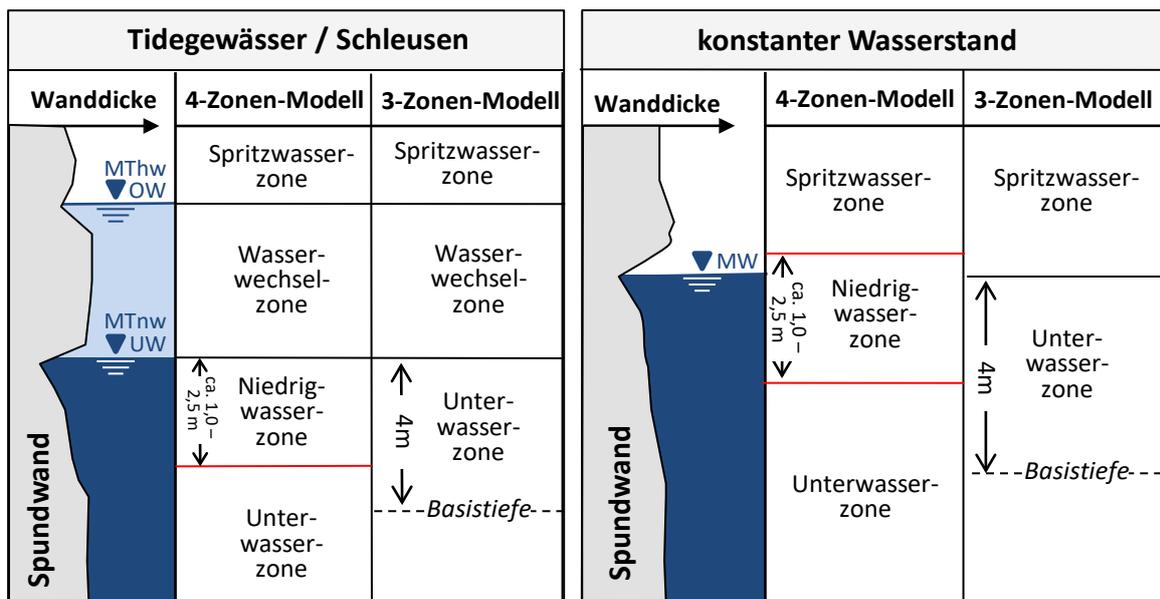
3.1.1.3 Methodenvergleich Vier- und Drei-Zonen-Modell

Abbildung 5 stellt die Korrosionszonen des Drei- denen des Vier-Zonen-Modells gegenüber.

Die Einteilung in Korrosionszonen nach dem **Drei-Zonen-Modell** ist eindeutig - die Korrosionszonen werden ausschließlich anhand der maßgeblichen Wasserstände festgelegt - und sie führt zu einer schematisierten Darstellung des Restwanddickenprofils eines Bauwerkes. Das Modell erlaubt mittels Exponentialfunktionen die Berechnung der Abrostung in beliebiger Tiefe. Es dient als Grundlage zur Bestimmung der Kennwerte der Korrosion mittels Milieu-Beprobung (s. Abschn. 9.1). Das Drei-Zonen-Modell bietet sich z. B. für einen grundsätzlichen Vergleich des Korrosionsmilieus verschiedener Spundwandstandorte an oder für den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Messkampagnen am gleichen Bauwerk.

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 zur Planung von Instandsetzungsmaßnahmen exakter eingrenzen.

Bei der Auswertung einer Spundwanddickenmessung im Rahmen der Bauwerksinspektion im Zuständigkeitsbereich der WSV sollte deshalb das Vier-Zonen-Modell angewendet werden.



— anhand des Korrosionsbildes am Einzelbauwerk festzulegen

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

3.1.2 Korrosionsintensität

Langjährige Untersuchungen (z. B. Hein 1990) 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 Abbildung 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 α als konstant angesehen werden kann³:

- 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).

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

Tabelle 1: Benennung der Korrosionsintensität⁴

| Kennwert der Korrosion | Bauwerksalter in Jahren | Abrostungsrate α in der Niedrigwasserzone in mm / Jahr | | |
|---|-------------------------|---|---------------|-------------|
| | | Benennung der Korrosionsintensität | | |
| | | <i>gering</i> | <i>mittel</i> | <i>groß</i> |
| 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 |

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. Abbildung 6) zeigen.

³ 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.

⁴ Strenggenommen beruhen die aufgelisteten Abrostungsraten auf der Summe aus wasser- und bodenseitigen Wanddickenverlusten, wobei letztere nach unseren Erfahrungen jedoch vernachlässigbar sind (s. Abschn. 3.3).



Abbildung 6: Übergang Spritzwasserzone / Luftzone

Die EAU 2020, Abs. 8.1.10.3, geht von einer „atmosphärischen Korrosion“ oberhalb der Spwz 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 würden die mittlere und maximale Abrostung bzw. 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

Zur Korrosion an der dem Boden zugewandten Bauwerksseite liegen nur wenige Informationen vor, da die Untersuchung eine landseitige Freilegung der Spundwand erfordern würde.

Sofern die Spundwand in natürlich gewachsene, nicht aggressive Böden (s. DIN 50929-3) einbindet, kann die bodenseitige Korrosion vernachlässigt werden.

Bei beidseitiger Einbindung gibt die EAU 2020, Abs. 8.1.10.3, in nicht aggressiven, natürlich gewachsenen Böden sowie bei Sand-Hinterfüllung (sofern die Wellentäler der Spundwand vollständig eingeeidet sind) eine beidseitige Abtragungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/Jahr an.

Eine Abschätzung der Korrosionsintensität kann für Spundwände im Boden auch anhand der Bodenbeschaffenheit nach DIN 50929-3 erfolgen. DIN EN 1993-5, Tab. 4-1, listet korrosive Dickenverluste an Pfählen und Spundbohlen für unterschiedliche Böden und Standzeiten auf.

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*.

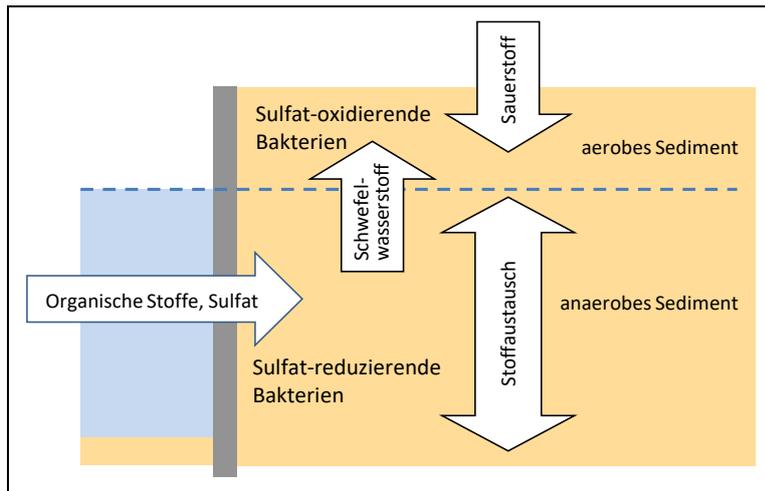


Abbildung 7: Stofffluss zur Entstehung mikrobiell induzierter Korrosion (nach Graff 2003)

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; Wennekamp 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. Abbildung 7).

Sulfatreduzierende Bakterien produzieren Schwefelwasserstoff, der in der Spundwand zum Lochfraß führt, und sulfatoxidierende 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 Stahlsplundwänden 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 Abbildung 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.

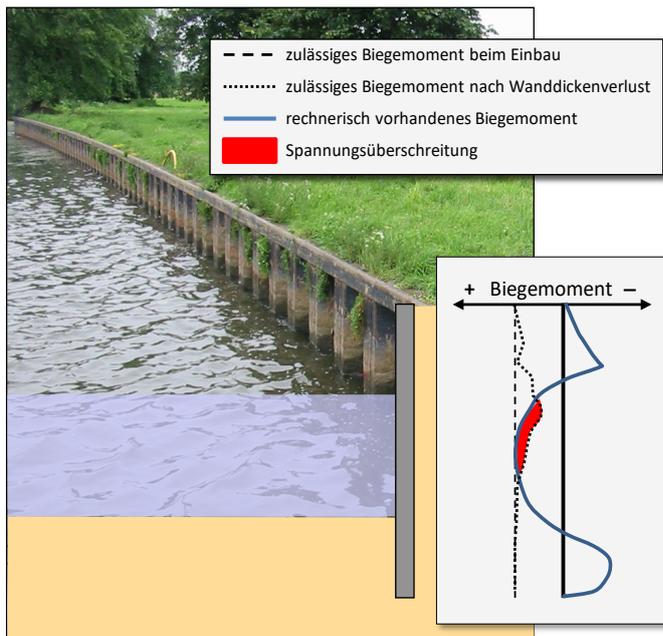


Abbildung 8: Tragfähigkeit einer Spundwand

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

mittleren Restwanddicke \bar{t}

(s. a. EAU 2020, Abs. 8.1.10.2). 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 Wändickenverlust 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 Wändicken-Messwerte der Bohlenrücken (Berg- und Talbohle) zugrunde gelegt werden, da nur diese das Widerstandsmoment maßgeblich beeinflussen.

4.2 Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit im Sinne dieser Empfehlung ist die Fähigkeit der Spundwand, eine ausreichende und dauerhafte Stützung des anstehenden Bodens sicherzustellen (dies entspricht der „Dauerhaftigkeit“ nach EAU 2020, Abs. 8.1,10.2):

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. Abbildung 9).



Abbildung 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 $t_{min_gemessen}$ bzw. die daraus abgeleitete maximale Abrostung a_{max} zugrunde gelegt werden, sondern ein statistisch ermittelter Schätzwert A_{max} , s. Formeln (6) und (7).

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 2020, Abs. 8.1.10.2).

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 t_{min} bzw. der geschätzten maximalen Abrostung A_{max} und Abrostungsrate α_{max} eine besondere Bedeutung zu.

Bei frei im Wasser stehenden Spundwandbauwerken oder Dalben ist hingegen die Tragfähigkeit und damit die mittlere Restwanddicke \bar{t} und die mittlere Abrostung \bar{a} und Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ 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 aktuelle 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 beschädigten Korrosionsschutz die Abrostungsrate unter- bzw. die Restnutzungsdauer überschätzt werden (da die geringen Wanddickenverluste aus der Zeit des intakten Korrosionsschutzes eine aktuell 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) und/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 Instandsetzung 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 (Abbildung 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.



Abbildung 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

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. 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 abzuschleifen. Dieses Vorgehen würde zu zusätzlichen Materialverlusten von mehreren Millimetern führen und damit dem Anspruch einer zerstörungsfreien Wanddickenmessung zuwiderlaufen. Lediglich für spezielle (Non-Standard-) Fragestellungen kann eine Entnahme von Spundwandmaterial sinnvoll bzw. erforderlich sein.
- Der Reinigungsaufwand zur Vorbereitung der Messflächen sollte in Abhängigkeit vom vorliegenden Korrosionstyp möglichst gering sein.

- Die Wanddicken müssen mit einer Messgenauigkeit von etwa $\pm 0,1$ mm bestimmt werden können. Das Messgerät sollte metrische Maßeinheiten verwenden und kalibrierbar sein.
- Die Messwerte müssen verifizierbar und reproduzierbar sein.
- Es sollten punktuelle Wanddicken ermittelt werden können (nicht nur Mittelwerte innerhalb eines größeren Messareals).

5.2.1.1 Restwanddickenmessung mit Ultraschall

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 (Abbildung 11). Aus der Zeitdifferenz zwischen Sendeimpuls und Rückwandecho kann in Kenntnis der materialspezifischen Geschwindigkeit des Ultraschalls auf die Dicke des Prüfmaterials geschlossen werden.

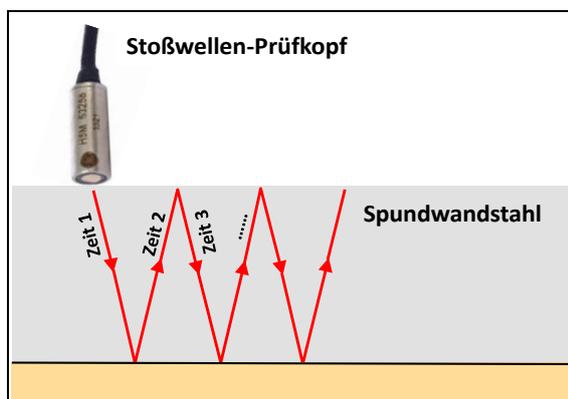


Abbildung 11: Wanddickenmessung mit Ultraschall: Messprinzip

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 annähernd 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. Abschn. 5.2.1.2).
- 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.⁵
- Die Messwert-Qualität muss z. B. visuell mittels Oszilloskop oder programmgesteuert durch automatisierte Mehrfachmessungen überprüfbar sein. 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.

⁵ Die Schallgeschwindigkeit im Stahl beträgt etwa das Vierfache von der im Wasser; ein nicht berücksichtigter Wasserspalt von nur 0,25 mm würde damit eine nicht vorhandene Stahldicke von ca. 1 mm vortäuschen (s. a. Alberts 1987)

- Idealerweise kann bei reiner Flächenkorrosion mit nur geringem Reinigungsaufwand messtechnisch zwischen Stahl einerseits und Rost, Beschichtung und/oder Bewuchs andererseits unterschieden werden⁶.

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

5.2.1.2 Muldentiefen mit Tiefenlehre

In Mulden lässt sich die Prüfkopfachse des Ultraschallgerätes i. d. R. nicht senkrecht zur Stahloberfläche ansetzen⁷. Die Tiefe wird deshalb mittels Tiefenlehre gemessen. Anschließend wird die Mulden-Restwanddicke entspr. Abbildung 12 und Formel (4) als Differenz zwischen dem Mittelwert der Ultraschall-Restwanddicken am Mulden-Messpunkt und der Tiefenlehre-Muldentiefe berechnet:

$$\text{Muldenrestwanddicke } t_{\text{Mulde}} = \text{mittlere (Ultraschall-)Restwanddicke } \bar{t}_{\text{Messpunkt}} - \text{Muldentiefe } x_{\text{Tiefenlehre}} \text{ in mm} \quad (4)$$

Bei der Messung mit der Tiefenlehre ist zu berücksichtigen, dass diese ungenauer und fehleranfälliger als die Ultraschallmessung ist:

- Für die manuelle Ablesung der Tiefenlehre ist eine gute Sicht unter Wasser erforderlich.
- Das 4-Augen-Prinzip kann nicht stattfinden.
- Eine Überprüfung der Messwert-Qualität ist nicht möglich, so dass z. B. eine nicht-senkrechte Ausrichtung der Tiefenlehre unbemerkt bleibt.
- Eine messtechnisch automatisierte Eliminierung von Rost oder Bewuchs ist nicht möglich, so dass der Reinigung der meist kleinen, unebenen Aufstandsfläche eine größere Bedeutung zukommt.

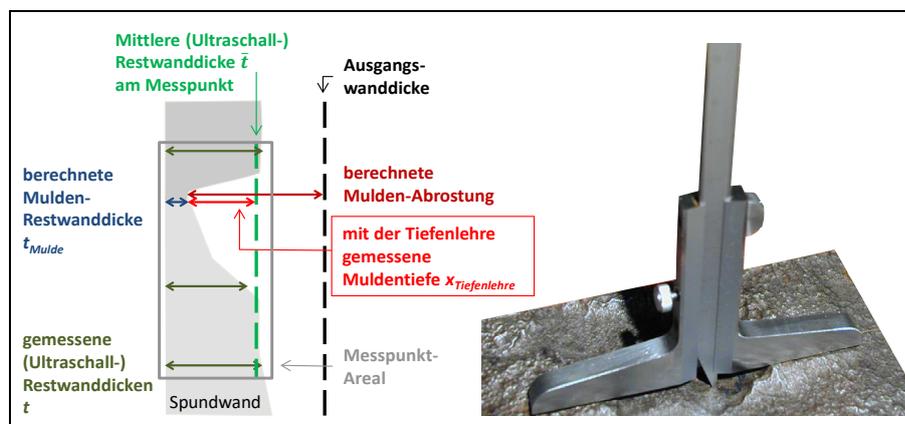


Abbildung 12: Bestimmung der Restwanddicke bei Mulden

5.2.2 Messstellen und Datenumfang

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

⁶ 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 evtl. 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.

⁷ Bei den Narben mit ihrer eher ebenen Grundfläche ist hingegen eine Ultraschallmessung i. d. R. möglich und sinnvoll.

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

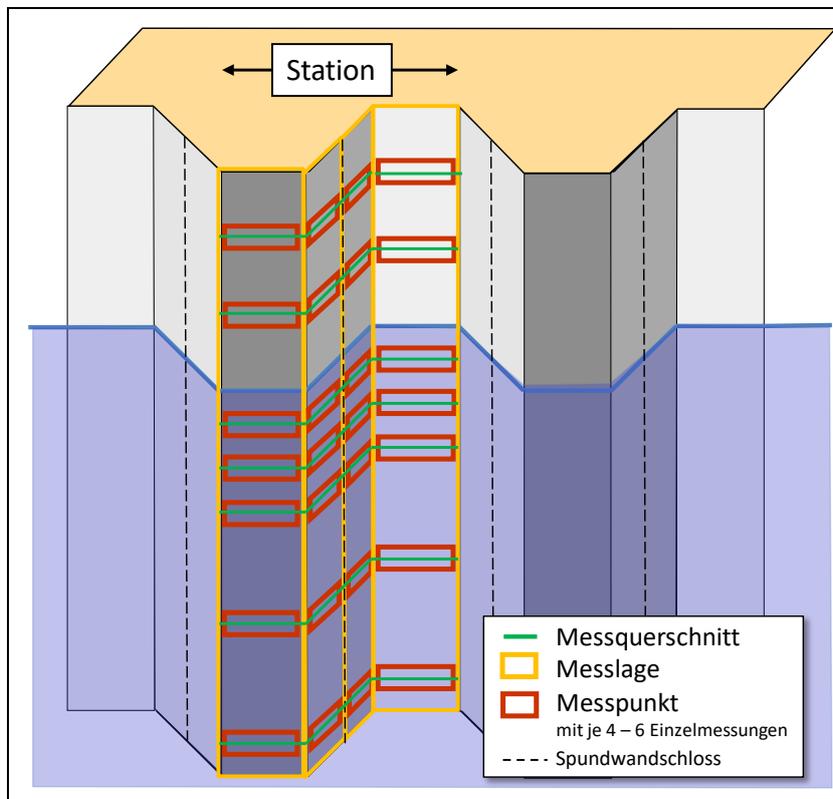


Abbildung 13: Station, Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte am Beispiel einer Spundwand mit U-Profil

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 *Einzelmessungen* gemessen.

Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte einer Station 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

- Bauwerkalter,
- 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, wobei entspr. Abschn. 5.2.2.6 eine ausreichende Anzahl von Messwerten erhoben werden muss).

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 Depo- nien 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)

Im Rahmen einer Messkampagne, die die Verteilung der Abrostungen am Bauwerk zutreffend abbildet, soll- ten 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 Mess- querschnitte untersucht.

Die Messquerschnitte werden entsprechend ihrer Höhenlage ab Geländeoberkante GOK Spundwand als De- zimalzahl in m benannt. Die Festlegung der Messquerschnittsabstände orientiert sich an den Beurteilungs- kriterien der Spundwand bzgl. Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit:

- Zur Beurteilung der **Tragfähigkeit** und zur Abgrenzung der Korrosionszonen ist eine detaillierte Dar- stellung des Verlaufs der mittleren Restwanddicken \bar{t} (s. Abbildung 23) erforderlich. Dies erfordert ei- nen 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 t_{min} bzw. der geschätzten maximalen Abrostung A_{max} , die entsprechend Abschn. 6.8 das Ergebnis einer statistischen Auswertung der Messwerte sind. Ein aussagekräftiger Schätzwert der maximalen Abros- tung entsprechend der Formeln (6) oder (7) basiert auf möglichst gleichmäßig über das Bauwerk ver- teilten 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 von 0,2 m zu den maßgeblichen Wasserständen eingehalten werden, da nur so eine eindeutige Zuordnung der Mess- werte zu den Korrosionszonen möglich ist (im Grenzbereich zweier Korrosionszonen überlagern sich unterschiedliche Korrosionseinflüsse).

Die Beurteilungen von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit stellen also grundsätzlich widersprüchli- che 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 Tragfähig- keit 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 | | |

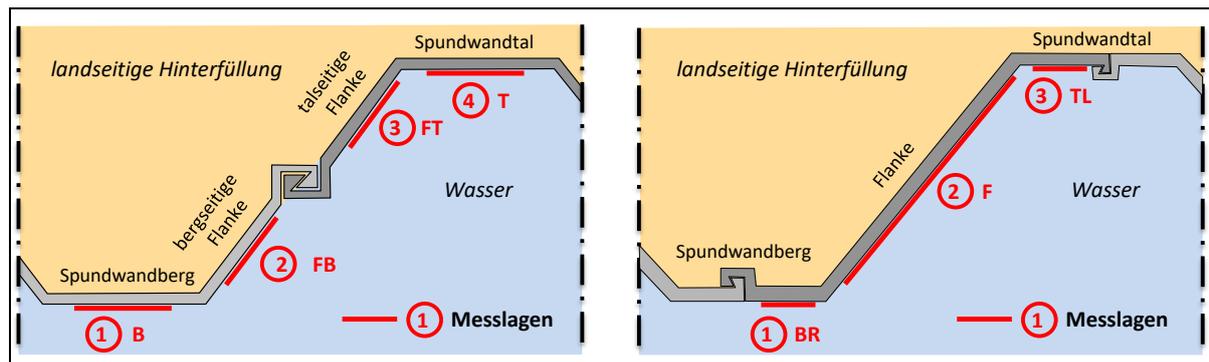


Abbildung 14: Beschreibung der Messlagen eines Messquerschnittes (links: U-Profil; rechts: Z-Profil)

Die vier Messlagen in Abbildung 14, 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 Abbildung 22 die Messlagen 1 und 2 mit Messlage 3). Zeigen sich an den Messpunkten einer Messlage deutlich unterschiedliche Einzelmesswerte, so kann es sinnvoll sein, die Messlage feiner zu gliedern: z. B. könnte die *Flanke (F)* in Abbildung 14, rechts, über die gesamte Spundwandhöhe

in die drei Messlagen *Flanke bergseitig (FB)*, *Flanke mittig (FM)* und *Flanke talseitig (FT)* unterteilt werden.

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. In Abbildung 15 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.

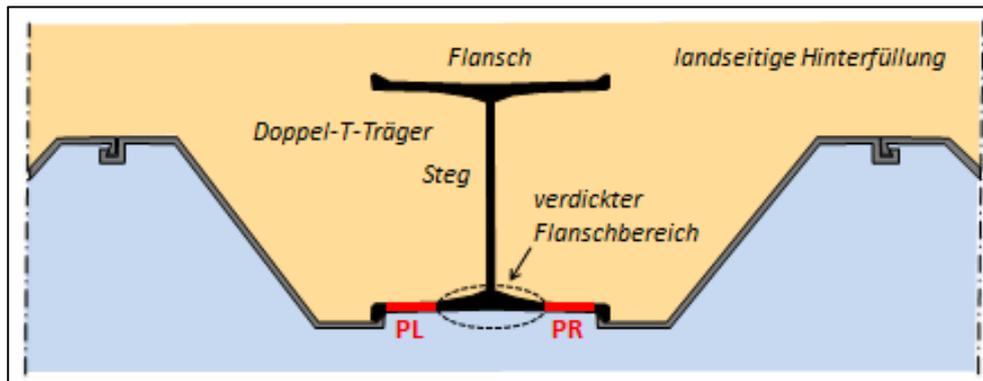


Abbildung 15: Messlagen einheitlicher Ausgangswanddicke am wasserseitigen Flansch eines Doppel-T-Trägers einer gemischten Spundwand (PL: Pfahl links; PR: Pfahl rechts)

- 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. 100 cm² großes Areal im Schnittpunkt einer Messlage mit einem Messquerschnitt dar (vgl. Abbildung 13), das sich i. d. R. über die gesamte Breite der Messlage erstreckt („Messstreifen“).

5.2.2.6 Einzelwerte

Jeder Messpunkt sollte über die gesamte Breite der Messlage mit jeweils 4 bis 6 Ultraschall-Einzelmessungen (zusätzlich ggf. Muldentiefen mit Tiefenlehre) untersucht werden. Zusätzlich sind 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)
 - evtl. zur Unterteilung in Teilbauwerke erforderlich
 - Nutzung und Nutzungsänderungen (z. B. Anleger, Liegestelle, Lagerfläche, Umschlag, Ladestation)
 - evtl. zur Unterteilung in Teilbauwerke erforderlich
 - Sonderbauteile (z. B. Einläufe, Durchlässe, Fender)
 - evtl. zur Unterteilung in Teilbauwerke erforderlich
 - Spundwandquerschnitt mit Bauwerksober- und -unterkante, Sohltiefe und maßgeblichen Wasserständen
 - Festlegung der Messquerschnitte
 - Festlegung, ob der Auswertung das Drei- oder Vier-Modell zugrunde gelegt wird
 - Festlegung und Verifizierung der Korrosionszonen im Rahmen der Auswertung
 - Stahlprofil
 - Profiltyp (z. B. U-Profil, Z-Profil, s. Anlage 2) → Festlegung der Messlagen
 - Widerstandmoment, Ausgangswanddicke, Stahlsorte

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 evtl. 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* (Abbildung 16) 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.



Abbildung 16: 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 Schiffs-KKS-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)

Die Dauer einer Messkampagne hängt neben der Bauwerkslänge und der Anzahl der Stationen vom Messgerät, von Spundwandhöhe und -profiltyp (und damit von der Anzahl der Messquerschnitte und Messlagen), von den Tauchbedingungen (Tidegewässer, Strömung, Trübung), vom Korrosionszustand und vom Reinigungsaufwand (Intensität von Rost, Bewuchs) ab. Bei drei bis vier Messlagen und acht bis zehn Messquerschnitten ist für die Spundwanddickenmessung ca. ein Tag pro zwei bis drei 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 (Abbildung 17). Der Taucher kommuniziert über Sprechfunk mit dem Begleitpersonal an Land. Die Datendokumentation und die Kontrolle der Messdatenqualität sollten durch das begutachtende Ingenieurbüro erfolgen.



Abbildung 17: Spundwanddickenmessung: Personal im Wasser und an Land

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
- 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 (Abbildung 18), 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 evtl. ein Nachschleifen erforderlich sein. Die Reinigung der Messpunkte sollte sich über die gesamte Breite der Messlage erstrecken.



Abbildung 18: *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 (Anlage 2, S. A2-13)
- 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 Verhältnisse 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 anzugeben, ob es sich um eine Erst-, Folge- oder Akutmessung handelt. Im Falle einer Folgemessung sind die Ergebnisse der früheren Messkampagne anzugeben. Bei Akutmessungen (wobei es sich sowohl um Erst- als auch um Folgemessungen handeln kann) 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 (Abbildung 19)

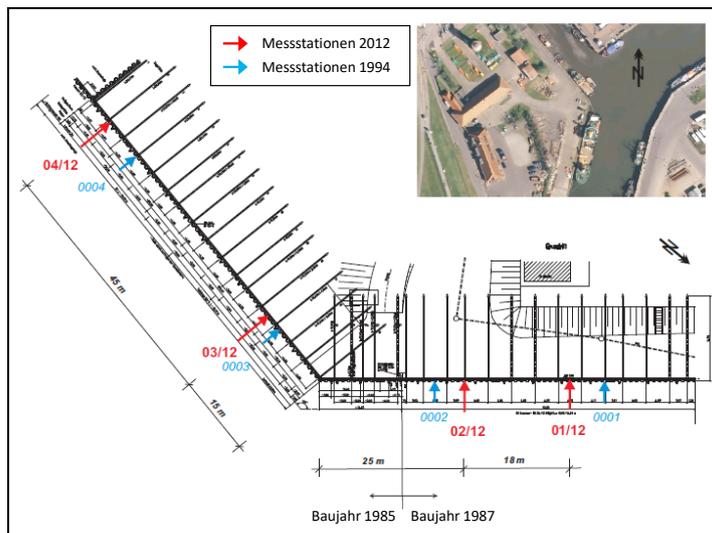


Abbildung 19: Lageplan mit Kennzeichnung zweier getrennt ausgewerteter Teilbauwerke („Baujahr 1985“ und „Baujahr 1987“) und Stationen der aktuellen und einer früheren Messkampagne

- Baujahr, bauliche Historie
- Nutzung und Nutzungsänderungen
- Sonderbauteile
- Abschätzung der Belastung aus Wellengang, Strömung, Eisgang, Sandschliff (sofern erkennbar)
- Spundwandquerschnitt mit Bauwerksober- und -unterkante, Sohltiefe und maßgeblichen Wasserständen (s. a. Abbildung 20)
- Stahlprofil → Profiltyp, Widerstandsmoment, Ausgangswanddicke, Stahlsorte
- 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. Abbildung 19),
 - Systemschnitt mit Messquerschnitten (Abbildung 20).

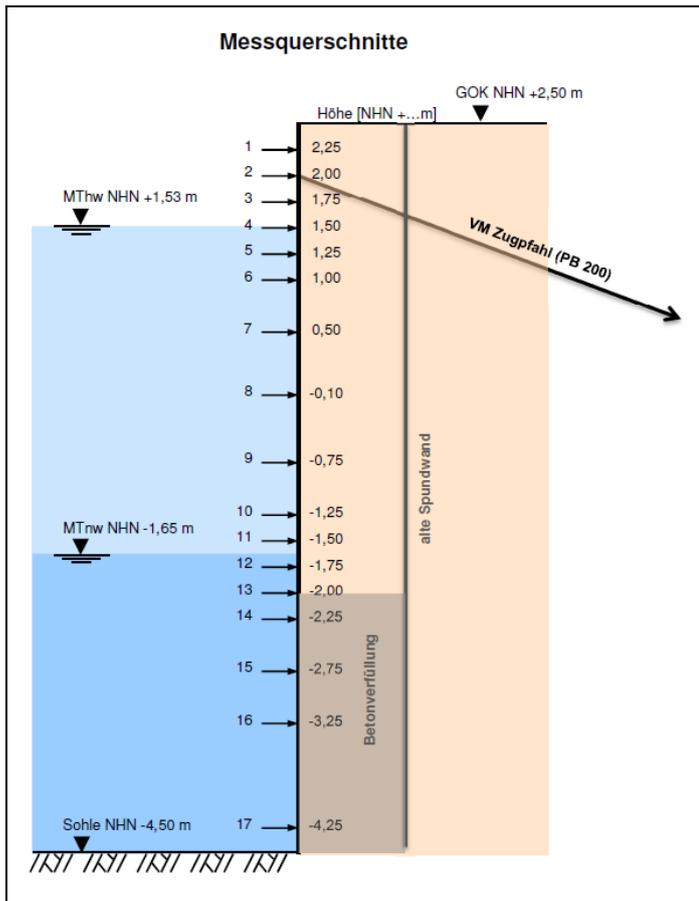


Abbildung 20: Lage der Messquerschnitte

6.4 Verifikation und Aufbereitung der Messwerte

Sofern *Mulden* gemessen wurden, wird jede Mulden-Restwanddicke als Differenz zwischen dem Restwanddicken-Mittelwert des nächstgelegenen Messpunktes und dem Messwert der Tiefenlehre bestimmt (s. Abschn. 5.2.1.2) und als Einzelmesswert 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 \bar{t} entspr. Abschn. 2.5 nicht berücksichtigt; sie gehen jedoch in die Bestimmung der maximalen Abrostung ein.

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

- „Ausreißer“ sollten nur im begründeten Verdacht einer Fehlmessung eliminiert werden. Darauf ist dann im Messbericht hinzuweisen.
- Falls die Messwerte in ihrer Größenordnung atypisch sind (im Vergleich mit Abbildung 1, Tabelle 1, Anlage 4 oder DIN EN 1993-5), 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 auszuwertender 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 geringere Abrostungsraten (obwohl die Rate bei niedrigerem Spundwandalter höher sein müsste), so ist zu prüfen, ob fälschlicherweise 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, Lagerfläche) 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.

In Abbildung 21 wird beispielhaft eine derartige Korrektur erläutert:⁸

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).

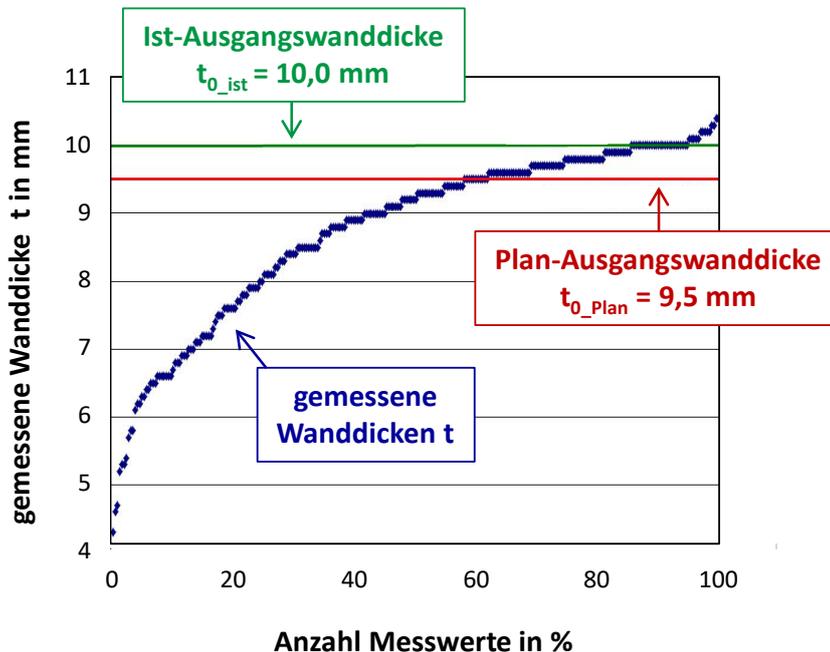


Abbildung 21: Korrektur der Ausgangswanddicke

⁸ Die zeichnerische Plausibilisierung der Ausgangswanddicke ist einer rechnerischen (z. B. durch die Festlegung von $t_{0,ist}$ als 90%-Quantil der gemessenen Wanddicken) vorzuziehen, da nicht von einer stetigen Verteilung der Restwanddicken ausgegangen werden kann.

Die Anpassung der Ist-Ausgangswanddicke sollte mit Augenmaß erfolgen: Unterschiedliche Ausgangswanddicken erfordern im Rahmen der Auswertung eine Unterteilung in Teilbauwerke und führen damit zu weniger Daten je Teilbauwerk.

- Treten ausschließlich negative Abrostungen auf, so ist davon auszugehen, dass die zugrunde gelegte Ausgangswanddicke grob falsch ist.

In diesem Fall kann im Rahmen der aktuellen Messkampagne lediglich geprüft werden, ob die Spundwand im Istzustand tragfähig bzw. gebrauchstauglich ist; eine Prognose der Restnutzungsdauer ist hingegen nicht möglich. Nach ca. sechs Jahren sollte dann eine erneute Wanddickenmessung durchgeführt werden, bei der die aktuelle maximale Wanddicke der Prognose der Restnutzungsdauer als Ausgangswanddicke zugrunde gelegt wird.

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 Messwerte-Protokoll, s. Anlage 2, S. A2-10) beigelegt.

Zur Darstellung der Messergebnisse im Messbericht gehören

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

Auf Grundlage dieser Darstellungen werden

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

Getrennt nach Korrosionszonen werden dann

- die mittlere Abrostung \bar{a} und Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ (Abschn. 6.7, Abbildung 26) sowie
- mittels statistischer Verfahren die Schätzwerte für die minimale Restwanddicke t_{min} , die maximale Abrostung A_{max} und die maximale Abrostungsrate α_{max} (Abschn. 6.8)

bestimmt.

Zusätzlich werden die Ergebnisse der qualitativen Untersuchung dokumentiert (z. B. entsprechend dem Protokoll „Bauwerksbesichtigung“, s. Anlage 2, S. 2-12).

6.5.1 Restwanddicken je Station und Messlage

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

- wird je Messlage ein Einzelprofil angezeigt. Die Einzelprofile sind mit der jeweiligen Messlagennummer gekennzeichnet (in Abbildung 22: Messlagen 1, 2 und 3), deren Lage der Schemazeichnung rechts zu entnehmen ist; hier wird auch die Profilbezeichnung (in Abbildung 22: PZ 612) 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 die Löcher einer Lochgruppe wird zusätzlich – wie bei der Messlage 2 in Abbildung 22 – der ungefähre Durchmesser in cm angegeben.
- Die vertikal verlaufende rote Profillinie verbindet die Restwanddicken-Mittelwerte.

- Die Ist-Ausgangswanddicke $t_{0,ist}$ ist als gestrichelte vertikale schwarze Linie dargestellt und im jeweiligen Profil als Zahlenwert je Messlage (in Abbildung 22: t_1 bis t_3) unterhalb des Profils angegeben.
- In der Maßstabsleiste rechts der Restwanddicken-Profile sind die zugehörigen NHN-Höhen von Sohle und Geländeoberkante GOK (= Spundwandoberkante) sowie die maßgeblichen Wasserstände angegeben.

Gelegentlich zeigen auch die Messlagen einer Station ein unterschiedliches Abrostungsverhalten (s. z. B. Messlage 3 [linkes Spundwandtal] in Abbildung 22, die im Gegensatz zu den Messlagen 1 [Berg rechts] 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.

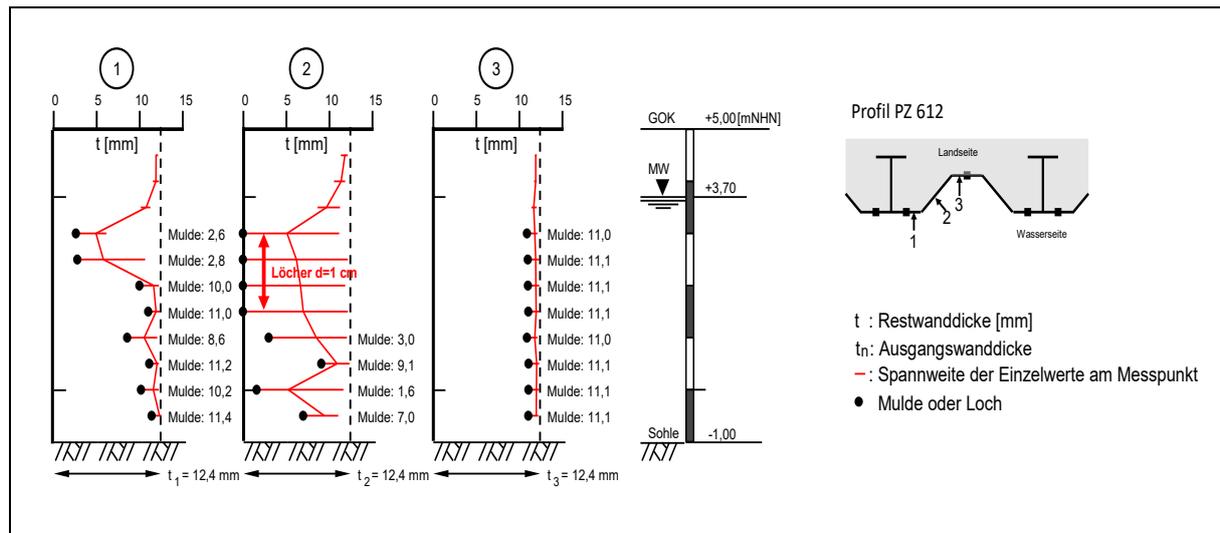


Abbildung 22: Restwanddickenprofile einer Station mit drei Messlagen am Beispiel einer Spundwand mit konstantem Wasserstand

6.5.2 Mittlere Restwanddicke und reduziertes Widerstandsmoment des Bauwerks

Analog zu den Restwanddicken-Profilen der Stationen und Messlagen wird ein Profil der mittleren Restwanddicke \bar{t} für das Gesamtbauwerk und – daraus abgeleitet – ein Profil des korrosionsbedingt reduzierten Widerstandsmoments W_x erstellt (Abbildung 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 Messquerschnitt, 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 $\text{cm}^3/\text{lfd. m}$.

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

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

sinnvoll sein.

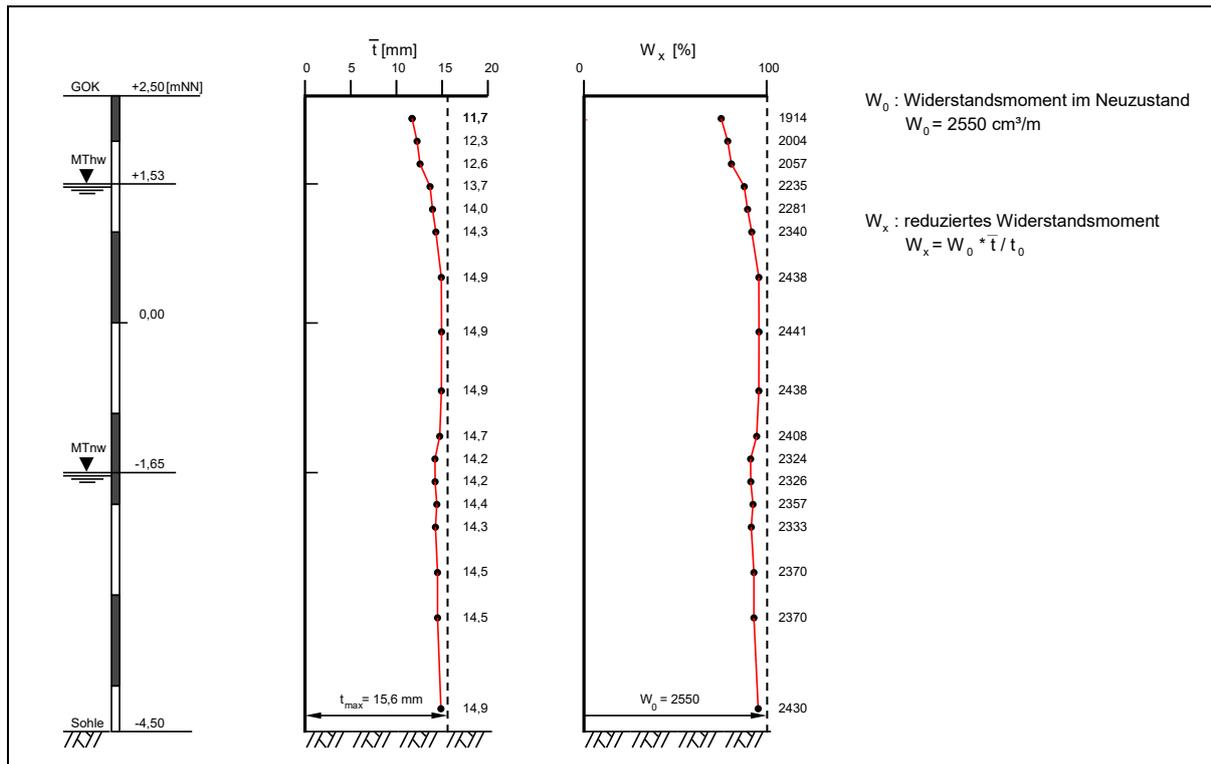


Abbildung 23: Mittlere Restwanddicken und reduzierte Widerstandsmomente eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand unter Tideinfluss

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. Abbildung 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

Abbildung 24 zeigt links und mittig für Gewässer mit konstantem und wechselndem Wasserstand, 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 (Abbildung 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 (Abbildung 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.

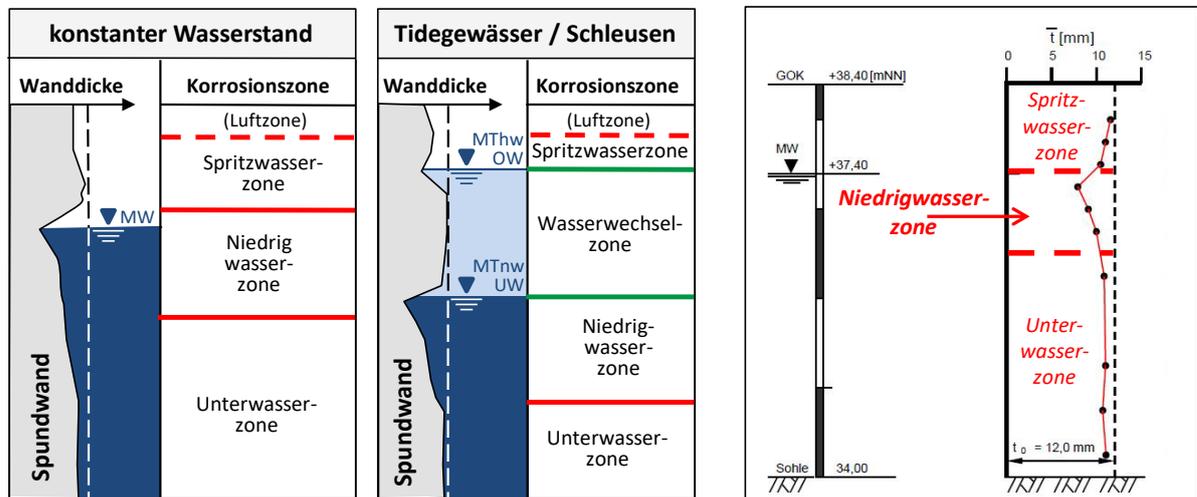


Abbildung 24: Festlegung der Korrosionszonen im Vier-Zonen-Modell links und Mitte:
 grün: anhand der Wasserstände eindeutig definierte Korrosionszonen-Grenzen;
 rot: vom Gutachter festzulegende Grenzen
 rechts: Korrosionszonen im Profil der mittleren Restwanddicken eines Bauwerkes (Beispiel für ein Gewässer 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 rechtsschief bzw. linkssteil lognormalverteilt sind⁹: 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. Abbildung 25).

Im Falle einer perfekten Lognormalverteilung der Abrostungen stimmt der Verlauf der Dichtefunktion (rote Linie in Abbildung 25) exakt mit den grauen Histogrammsäulen überein (dazu ist eine Skalierung der Dichtefunktion zur Anpassung an die Klassenbreite der Histogrammsäulen erforderlich¹⁰).

⁹ Daten sind lognormalverteilt, wenn die logarithmierten Daten normalverteilt sind. Die Lognormalverteilung ist typisch für Wachstumsprozesse.

¹⁰ In Abbildung 25 beträgt der Skalierungsfaktor der Dichtefunktion 0,5 bei einer gewählten Klassenbreite der Histogrammsäulen von 0,5mm.

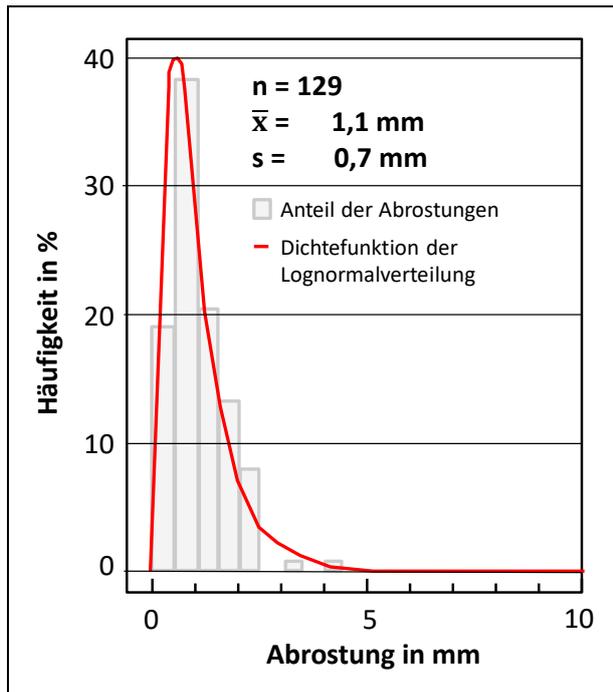


Abbildung 25: Rechtsschiefe Lognormalverteilung der Abrostungen einer Korrosionszone (hier die Spritzwasserzone einer 13 Jahre alten Spundwand; nach Alberts und Heeling 1997)

Für die Auswertung einer Spundwanddickenmessung ist bereits eine prinzipielle Übereinstimmung – wie in Abbildung 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 Histogrammen 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. Bei nicht lognormalverteilten Abrostungen wäre deshalb ein iterativer Prozess bestehend aus einer Neuordnung der Daten (zu Teilbauwerken, zu unterschiedlichen Messlagen, zu korrigierten Korrosionszonen) und einer erneuten Überprüfung erforderlich.

6.7 Mittlere Abrostung und Abrostungsrate

Aus den mittleren Restwanddicken \bar{t} und der Ist-Ausgangswanddicke $t_{0,Ist}$ wird ein Profil der mittleren Abrostung \bar{a} (s. Abbildung 26 für das Vier-Zonen-Modell und Abbildung 27 für das Drei-Zonen-Modell) 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 \bar{a} und Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ eines Bauwerks verbinden die vertikalen roten Linien den Mittelwert der an einem Messquerschnitt bestimmten mittleren Abrostung und Abrostungsrate; zusätzlich sind die Zahlenwerte angegeben.

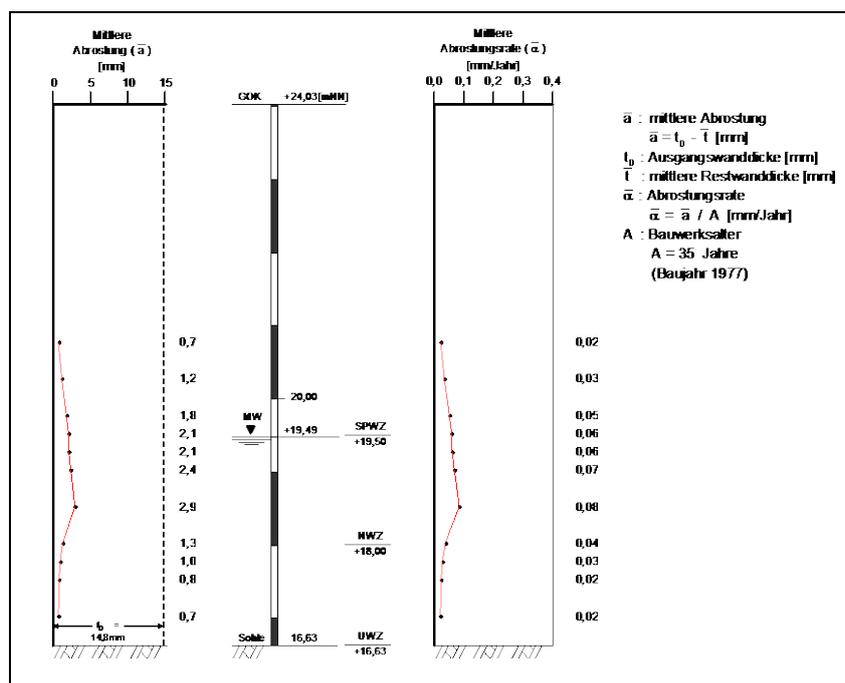


Abbildung 26: Mittlere Abrostungen und Abrostungsraten eines Bauwerks am Beispiel einer Spundwand ohne Tideinfluss

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 \bar{a} in Form einer nichtstetigen Exponentialfunktion (Abbildung 27: Formeln 5a – 5f) dargestellt. Die Regressionskoeffizienten b_0 bis b_7 werden für jeden der in Abbildung 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.

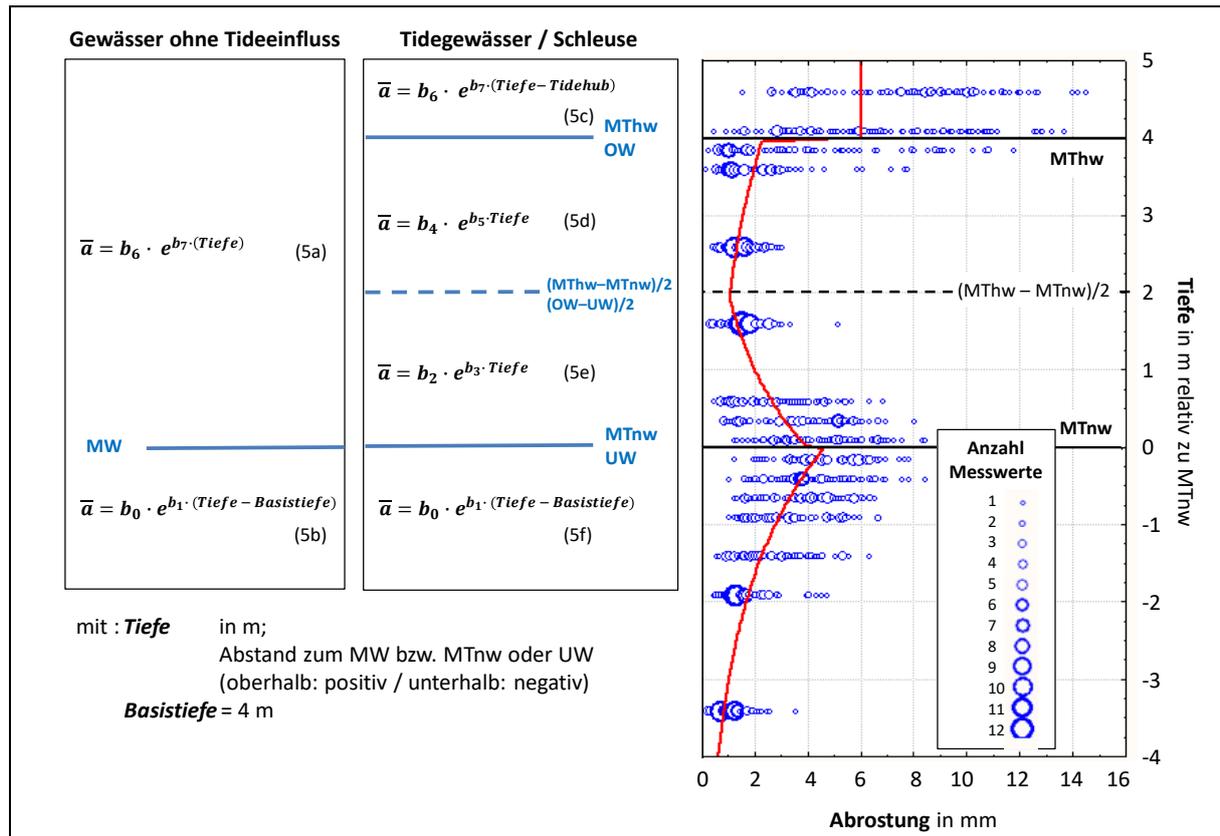


Abbildung 27: Berechnung der tiefenbezogenen mittleren Abrostung \bar{a} mittels nichtstetiger Exponentialfunktion, links: Formeln (5a – 5f) für unterschiedliche Höhenbereiche, rechts: Profil der mittleren Abrostungen am Beispiel einer Spundwand im Tidebereich

6.8 Minimale Restwanddicke, Maximale Abrostung und Abrostungsrate

Zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit eines Spundwandbauwerkes ist die Kenntnis der minimalen Restwanddicke t_{min} bzw. der maximalen Abrostung a_{max} und für die Prognose der Restnutzungsdauer die der maximalen Abrostungsrate α_{max} 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 t_{min} ein Bestandteil des Datenkollektivs einer Spundwanddickenmessung ist. Würde man also einfach die geringste gemessene Wanddicke $t_{min, gemessen}$ ungeprüft zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit heranziehen, so würde die wahre minimale Restwanddicke über- und damit die maximale Abrostung a_{max} unterschätzt werden.

6.8.1 Vier-Zonen-Modell

Ein aussagekräftiger Schätzwert A_{max} für die wahre maximale Abrostung a_{max} des Bauwerkes lässt sich aus den Daten der Nwz mittels der Formel (6) für die obere Toleranzgrenze lognormalverteilter Daten T_{oben} bestimmen:

$$\text{geschätzte maximale Abrostung } A_{max} = T_{oben} = e^{\bar{x} \ln + k_{n;0,975;0,95} \cdot s \ln} \text{ in mm} \quad (6)$$

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 (6) 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 (6) bei Alberts und Heeling (1997) beschrieben.

Nach den Erfahrungen der BAW liefert Formel (6) eine gute Grundlage für die Prognose der Restnutzungsdauer hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit. Jedoch wird das Ergebnis stark durch die subjektive Festlegung der Nwz beeinflusst, deren Abrostungswerte die Datengrundlage für die Prognose bilden.

6.8.2 Drei-Zonen-Modell

Die geschätzte maximale Abrostung A_{max} für eine bestimmte Tiefe kann nach dem Drei-Zonen-Modell in Anlehnung an die Formeln für die mittlere Abrostung \bar{a} (5a – 5f, s. Abbildung 27) berechnet werden, wobei die Gleichungen um einen zusätzlichen Faktor erweitert werden, der die Spannweite der Messwerte berücksichtigt (s. Formel (7); 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 die höchsten Abrostungen 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 (5b) bzw. (5f) aus Abbildung 27 exakt für den Wasserspiegel bestimmt werden (auch wenn hier eine Sprungstelle in der nichtstetigen Exponentialfunktion vorliegt):

$$\text{geschätzte maximale Abrostung } A_{max} = b_x \cdot e^{b_y \cdot \text{Tiefe}} \cdot e^{2 \cdot s_{ln} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}} \quad \text{in mm} \quad (7)$$

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

Tiefe entsprechend Formeln (5b) bzw. (5f):
= Abstand zum [MW / MTnw / UW] – Basistiefe = 0 m – (-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 $a_{max_gemessen}$ vorkommen, die größer ist als der Schätzwert A_{max} . In diesem Fall ist $a_{max_gemessen}$ 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“ (Abbildung 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. mikrobieller 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.

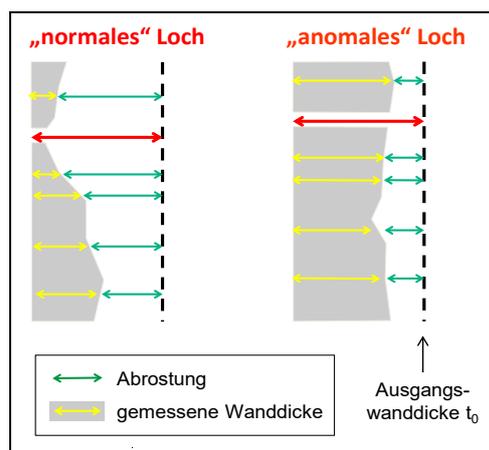


Abbildung 28: Normale und anomale Löcher

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 Bauwerksbe-sichtigung, s. Anlage 2, S. A2-12) und nach MSV bzw. ab 2023 nach MSV-A zu klassifizieren (s. Abschnitt 7.3.1).

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 Ta-belle 5).

Tabelle 4: Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Tragfähigkeit und der Schadensklasse: mittlere Restwanddicke, mittlere Abrostung und Abrostungsrate, Muldentiefen

| Korrosions- zone | Höhen- bereich in mNHN | | Mittlere Restwand- dicke \bar{t} | Mittlere Abrostung \bar{a} | | Mittlere Abrostungs- rate $\bar{\alpha}$ | Mulden | | | | |
|------------------------------|------------------------------|---------|--|------------------------------------|--------------------|--|------------|----------------------------------|-------|--------------------|---------------------|
| | von | bis | | in mm | in mm | | in mm/Jahr | Tiefe $x_{Tiefenlehre}$ in mm | | | flächig? (J / N) |
| | | | von | | | bis | | geom. Mittel | in mm | in % ¹⁾ | |
| (Luftzone) | (GOK) | | | | | | | | | | |
| Spwz | | | | | | | | | | | |
| (Wwz) | | | | | | | | | | | |
| Nwz | | | | | | | | | | | |
| Uwz | | (Sohle) | | | | | | | | | |
| | | | | in mm | in % ¹⁾ | | | | in mm | in % ¹⁾ | |
| OK Spwz bis Basistiefe | (von) | (bis) | | | | | | | | | |

¹⁾ relativ zur Ist-Ausgangswanddicke t_{0_Ist}

Tabelle 5: Kennwerte der Korrosion zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit: geschätzte mini-male Restwanddicke, geschätzte maximale Abrostung und Abrostungsrate, Löcher

| Korrosions- zone | Höhen- bereich in mNHN | | Minimale Restwand- dicke $t_{min}^{1)}$ | Maximale Abrostung $A_{max}^{1)}$ | Maximale Abrostungs- rate $\alpha_{max}^{1)}$ | Löcher | | | |
|---------------------|------------------------------|---------|---|---|---|--------|-------|--------------|--------|
| | von | bis | | | | in mm | in mm | in mm / Jahr | Anzahl |
| | | | von | bis | | | | | |
| (Luftzone) | (GOK) | | | | | | | | |
| Spwz | | | | | | | | | |
| (Wwz) | | | | | | | | | |
| Nwz | | | | | | | | | |
| Uwz | | (Sohle) | | | | | | | |

¹⁾ Schätzwerte, s. Abschn. 6.8

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 bzw. je länger existieren wahrscheinlich bereits Löcher¹¹.

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

6.9.3 Korrosionsintensität

Die Korrosionsintensität kann nach Tabelle 1 auf der Grundlage der mittleren Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ und der geschätzten maximalen Abrostungsrate α_{max} in der Nwz klassifiziert werden. Treten im Ausnahmefall z. B. in der Spwz höhere Abrostungsraten als in der Nwz auf, so ist dies im Messbericht 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 Tragfähigkeitsbewertung

Wurden im Rahmen der Wanddickenmessung relevante Schäden an der Spundwand festgestellt, die die Tragfähigkeit des Bauwerkes beeinträchtigen, dann ist eine erste Bewertung der Standsicherheit auf Grundlage der Bestandsstatik erforderlich.

Aufgrund relevanter Last- oder Nutzungsänderungen, neuer Erkenntnisse z. B. zu Berechnungsmodellen oder zum Lastabtrag oder aufgrund festgestellter Fehler in der Bestandsstatik kann eine Nachrechnung erforderlich werden (BAW-Merkblatt TbW 2016).

6.10.2 Instandsetzungsempfehlung

Wurde eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Spundwand festgestellt, folgt eine Instandsetzungsempfehlung. Durchrostungen erfordern stets Instandsetzungsmaßnahmen, sofern diese eine Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit darstellen.

Als Instandsetzungsempfehlung ist zu beschreiben, welche Bereiche (d.h. Höhen- und/oder Stationsbereich) einer (kurz-, mittel- und/oder langfristigen) Instandsetzung bedürfen. Dazu sollten nicht nur die Bauwerksprofile der mittleren Restwanddicken (Abbildung 23) berücksichtigt werden, sondern auch die Restwanddickenprofile der einzelnen Stationen (Abbildung 22).

¹¹ Beispiel: Für eine 50 Jahre alte Spundwand mit einer Ausgangswanddicke t_0 von 10 mm wurde innerhalb einer Korrosionszone eine geschätzte maximale Abrostung von $A_{max} = 12$ mm ermittelt (d.h.: $A_{max} > t_0$). Daraus folgt eine maximale Abrostungsrate von $\alpha_{max} = \frac{A_{max}}{\text{Spundwandalter}} = \frac{12 \text{ mm}}{50 \text{ a}} = 0,24 \text{ mm/a}$.

Wahrscheinlich existieren zum Zeitpunkt der Wanddickenmessung also Löcher bereits seit $\frac{A_{max}-t_0}{\alpha_{max}} = \frac{2 \text{ mm}}{0,24 \text{ mm/a}} \sim 8 \text{ a}$.

Ist das statische Defizit bekannt, dann sind darauf abgestimmt gezielte Ertüchtigungsmaßnahmen zu planen. Hierzu gehören z. B. Vorschüttungen, Entwässerungssysteme zur Reduzierung des Wasserüberdrucks, Kolk-schutz, Erddruckabschirmung, Bodenverbesserung, Rückverankerung oder Querschnittsertüchtigungen (EAU 2020, Abs. 13.5.1). Auch der Ersatz des Bauwerks, evtl. in Kombination mit einer Sperrung der Spundwand oder von Teilbereichen sind bei der Planung zu berücksichtigen.

Sollten die Schäden nicht als akut standsicherheitsrelevant eingestuft werden bzw. sofern ausschließlich die Aspekte der Gebrauchstauglichkeit der Spundwand zu berücksichtigen sind, dann ist zu prüfen, inwiefern zukünftig ein Korrosionsschutz bzw. die Instandsetzung eines vorhandenen Korrosionsschutzes wirtschaftlich ist.

6.10.3 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 (2022) geregelt. Ergänzend hierzu befasst sich das MBI (2010) mit der Vorbereitung, Durchführung und Ergebnisdarstellung der Bauwerksinspektion. Für die Bewertung von Schäden sind das MSV (2018) bzw. das MSV-A (2023) und das MSV-B (2022) anzuwenden, und die Ergebnisse sind mit dem IT-Programmsystem WSVPruf (s. Görler et al. 2007) 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 (2022) bzw.
- einer Wanddickenmessung (Abschn. 5.2) in Rahmen einer Bauwerksprüfung nach VV-WSV 2101 (2022)

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 (2022) 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 2010, 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 Anlagen¹² 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 (2022) um ein Bauwerk der *Kategorie A* (z. B. Ufersicherungsbauten mit besonderem Gefährdungspotenzial und besonderer Lastbeanspruchung) handelt. Spundwände der Kategorie A sind z. B. Schleusenammerwände oder Uferwände an Krananlagen.¹³

Für Bauwerke der *Kategorie B* (z. B. Ufersicherungsbauten mit besonderem Gefährdungspotenzial) ist im Rahmen der Bauwerksinspektion nach VV-WSV 2101 (2022) lediglich eine jährliche Bauwerksbesichtigung zwingend erforderlich.

7.2.2 Erst- und Folgemessung am Spundwandbauwerk

Unabhängig von der Bauwerkskategorie und von den Vorgaben der VV-WSV 2101(2022) ist zur Bestimmung der Ist-Ausgangswanddicke (s. Abschn. 2.6) eine frühe Erstmessung – idealerweise bereits beim Spundwand-Einbau – sinnvoll. Sie ermöglicht, die Streubreite der wahren Ausgangswanddicke t_0 (verursacht z. B. durch Walztoleranzen bei der Stahlherstellung) als Grundlage für die Auswertung späterer Folgemessungen zu bestimmen. 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 evtl. 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 (2022) hinaus bereits nach ca. drei Jahren stattfinden,

- wenn die geschätzte maximale Abrostung A_{max} der Ausgangswanddicke t_0 entspricht oder sie überschreitet, am Bauwerk aber (noch) keine Durchrostungen festgestellt wurden oder
- wenn anhand der geschätzten maximalen Abrostungsrate α_{max} erste Durchrostungen innerhalb der nächsten sechs Jahre prognostiziert werden.

Bei Uferbauwerken der Kategorie B sowie bei Pfählen und Dalben sollte die Folgemessung etwa sechs Jahre vor dem anhand der geschätzten maximalen Abrostung A_{max} berechneten Auftreten erster Durchrostungen

¹² s. Anlage zur VV-WSV 2101 (2022) „Objektartenzuordnung zu Inspektionskategorien“

¹³ Die Zuordnung zu Kategorien wird im MBI (2010) erläutert.

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 bzw. MSV-A

Auf den Korrosionstypen (s. Abschn. 2.3) basiert die Zuordnung zu einer Schadensklasse (SK) entsprechend MSV (2018) bzw. MSV-A (2023), aus der das Schadensausmaß ersichtlich wird (s. Tabelle 6):

Tabelle 6: Schadensklassen (SK) für Spundwandbauwerke in Anlehnung an das MSV (2018) bzw. das MSV-A (2023)

| 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 % |

- 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.

Beispiele für Schadensklassen und mögliche Sofortmaßnahmen sind zudem dem MSV (2018) bzw. MSV-A (2023) 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 Korrosion und die Mulden-/Narbenkorrosion (sofern Mulden und Narben nicht nur vereinzelt, sondern flächig auftreten wie z. B. in Abbildung 2, Mitte) relevant. Die Datengrundlage für die Zuordnung zu einer Schadensklasse ist

- bei *flächiger Korrosion*: die Abrostung als gewichtetes Mittel der mittleren Abrostungen der Messquerschnitte $\bar{\alpha}_{\text{Messquerschnitt}}$ über die Spundwandhöhe zwischen der Oberkante der Spwz und der Basistiefe (s. Abbildung 29).

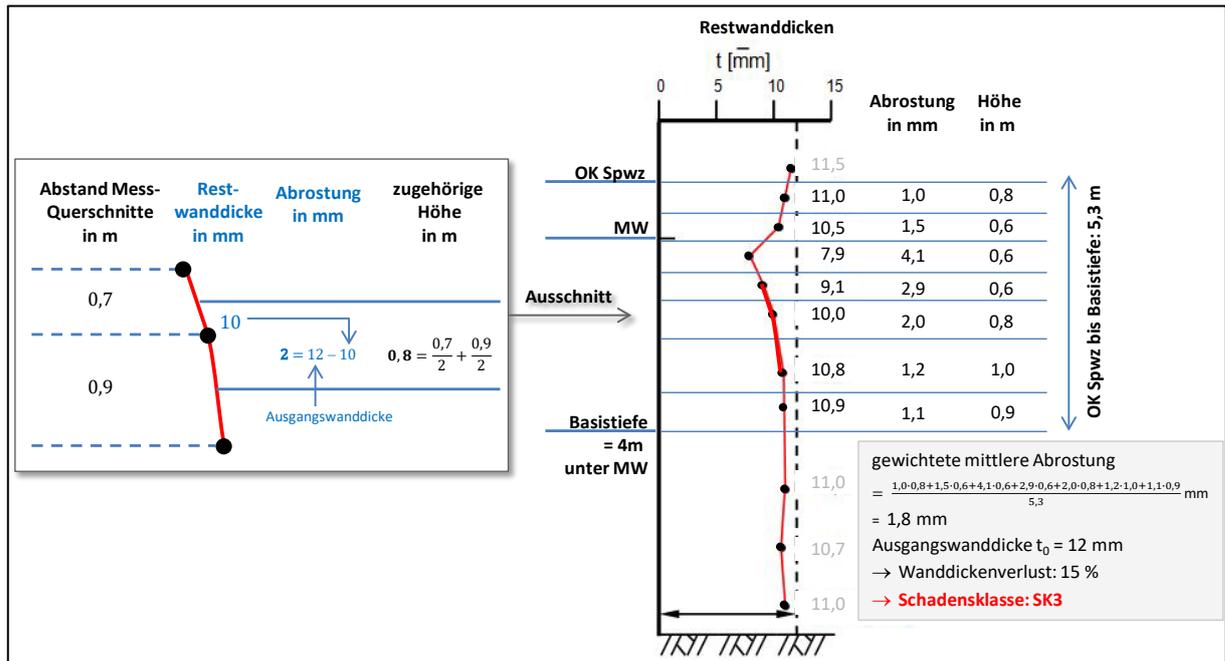


Abbildung 29: Beispiel: Bestimmung der Schadenklasse bzgl. flächiger Korrosion aus der gewichteten mittleren Abrostung

Die Wichtung ist erforderlich, da die Messquerschnitte längs der Spundwandhöhe nicht gleichmäßig verteilt sind (s. a. Tabelle 2) und die Daten somit unterschiedlich hohe Spundwandabschnitte repräsentieren. Die Höhe der Spundwandabschnitte ergibt sich aus dem Abstand der Messquerschnitte entsprechend Abbildung 29.

Bei unterschiedlichen Ausgangswanddicken der Messlagen ist die Auswertung nach Messlagen getrennt durchzuführen.

- Bei *flächig auftretender Mulden-/Narbenkorrosion*: die mittlere Muldentiefe. Vereinzelt Mulden oder Narben sind für die Schadensklassifizierung nicht relevant.
- *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.

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 (2010), Abs. 6.5, die Dringlichkeit evtl. erforderlicher Instandsetzungsmaßnahmen. Beim Auftreten von Löchern können Sofortmaßnahmen auch dann erforderlich sein, wenn das Spundwandbauwerk noch nicht in die SK4 einzuordnen ist, da die Löcher einen Bodenaustrag der Hinterfüllung verursachen und damit zum Versagen der Spundwand bzgl. Gebrauchstauglichkeit führen können.

Die Zuordnung zu Schadensklassen kann ggf. von dieser Empfehlung abweichen, sofern dies aufgrund besonderer örtlicher Gegebenheiten sinnvoll ist. Dies ist dann im Messbericht zu begründen.

8 Übertragbarkeit von Abrostungsraten

Der hohe Aufwand bei der Durchführung von Wanddickenmessungen könnte dazu verleiten, in einer Korrosionszone bzw. an einem Bauwerk ermittelte Abrostungsraten ohne weitere Messung auf eine andere Korrosionszone des gleichen Bauwerkes oder auf ein Nachbarbauwerk zu übertragen.

8.1 Korrosionszonen

Um einen Tauchereinsatz zu vermeiden, wird in der Praxis z.T. auf Messungen unter Wasser verzichtet. Jedoch lassen diese von der Spundwandoberkante aus ermittelten Abrostungsdaten der Luft-, Spritzwasser- oder Wasserwechselzone aufgrund lokal unterschiedlicher Korrosionseinflüsse keine Rückschlüsse auf den Korrosionszustand der Niedrig- und/oder der Unterwasserzone zu. Abbildung 1, Abbildung 3 und die Tabellen der Anlage 4 ermöglichen lediglich einen qualitativen Vergleich der Korrosionsintensität unterschiedlicher Korrosionszonen.

8.2 Bauwerke

Nach den Erfahrungen der BAW ist auch eine Übertragung von gemessenen Abrostungsdaten auf ein Nachbarbauwerk nicht zielführend (und steht zudem im Widerspruch zu den Vorgaben der VV-WSV 2101, 2022), 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. Instandsetzung, Nutzung) eingetreten sind.

9 Milieu-Beprobung

Die mittleren Abrostungen \bar{a} 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 \bar{a} eines Spundwandbauwerkes lassen sich tiefenabhängig als unstete Exponentialfunktion je Korrosionszone entsprechend Abbildung 27, Formeln (5a – 5f) 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 geschätzten maximalen Abrostung A_{max} werden die Gleichungen entsprechend Formel (7) 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 Metallparametern beprobt.¹⁴ 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 selbst¹⁵ und ein Anwendungsbeispiel sind in European Communities (2007), Anhang B und C, beschrieben.

¹⁴ Die Ergebnisse sind in Binder et al. (2006) zusammenfassend dargestellt.

¹⁵ 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^{16,17}, Leitfähigkeit^{16,17}, pH-Wert^{16,17}, Säurekapazität¹⁷, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)¹⁷, Redoxpotential^{16,17}, Konzentrationen von Ammonium, Calcium¹⁷, Chlorid¹⁷, Nitrat, Phosphat, Sauerstoff^{16,17}, Sulfat¹⁷
- 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 Abbildung 27, Formeln (5a) – (5f) und Formel (7) jeweils zwei Regressionskoeffizienten für die mittlere Abrostung \bar{a} und für die geschätzte maximale Abrostung A_{max} 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 Abbildung 27, Formel (5f) der Basiskorrosion entspricht, d.h. der mittleren Abrostung in Höhe der Basistiefe bei 4 m unter MW (bzw. MTnw oder UW):

$$\begin{aligned}
 b_0 = & 1.160 - 0,142 \cdot \text{Stahl}(\text{„Grobstahl“}) + 0,9481 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{limnisch}) \\
 & - 0,706 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„limnisch-brackisch“}) + 0,0255 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„brackisch“}) \\
 & - 0,392 \cdot \text{„StrömBin“}(\text{hoch}) + 0,1593 \cdot \text{LnAlter}(1) + 0,1666 \cdot \text{Tide} \cdot \text{LnAlter}(1) \\
 & + 0,3647 \cdot \text{„StrömBin“} \cdot \text{„Säurefaktor“}(1)
 \end{aligned} \tag{8}$$

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.

¹⁶ 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.

¹⁷ 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 Instandsetzungsmaßnahmen 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, Dirk (1987): Wanddickenmessungen an Stahlspundwänden. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Mitteilungsblatt der BAW 60. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, S. 143 – 153. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102878>.

Alberts, Dirk; Heeling, Anne (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden – Statistische Datenauswertung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Mitteilungsblatt der BAW 75, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, S. 77 – 94. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102752>.

BAW (Hg.) (2011): Bewertung der Korrosion von Spundwänden. FuE-Abschlussbericht A39510210108. Karlsruhe. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106999>.

Binder, Günter (2012): Neue Abrostungsdaten von Stahl im Wasser und deren Bezug zur DIN 50929. In: 3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme. Nr. 03/04 2012.

Binder, Günter; Heeling, Anne; Uerkvitz, Ralf (2006): Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden. In: PIANC-Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 31. Internationaler Schifffahrtskongress; Estoril, Portugal, 14. – 18. Mai 2006. Bonn: PIANC Deutschland, S. 40 – 44. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104867>.

Dortmund-Hörder Hüttenverein (Hg.) (1938): Larssen Stahlspundbohlen.

Dortmund-Hörder Hüttenverein (Hg.) (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, Ralf (2004): Factors influencing the corrosion of steel sheet pile walls used in hydraulic engineering. Statsoft Europe GmbH. Hamburg.

Anhang C: Uerkvitz, Ralf (2005): Factors of influence on corrosion – Example of calculation. Statsoft Europe GmbH, Hamburg.

Görler, Susann; Kühni, Katrin; Bödefeld, Jörg (2007): WSVPruf - ein IT-System für die Bauwerksinspektion nach VV-WSV 2101. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Brief, 04/2007). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100498>.

Graff, Matthias (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, Anne (2010): Ein Vierteljahrhundert Spundwanddickenmessung bei der Bundesanstalt für Wasserbau. In: Tagungsband der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“, Berlin, 18.02.2010. Online verfügbar unter <http://bauwerksdiagnose2010.dgzfp.de/Portals/bwd2010/Dokumente/bb/v02.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2022.

Heeling, Anne (2017): Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden in Häfen und an Wasserstraßen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAW-Mitteilungen 100, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, S. 39-53. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102490>.

Hein, Wolfgang (1990): Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Mitteilungsblatt der BAW 67, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102813>.

HSP (2014): Spundwandhandbuch Profiltafeln. Hoesch Spundwand und Profil GmbH. Stand Mai 2013. Online verfügbar unter http://www.piles-machinery.lv/content/files/HSP_Handbook_2013.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2022.

HTG (2009): Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V., 3. Aufl. 2009. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.htg-online.de/fileadmin/dateien/FA/FA_Korrosionsfragen/HTG-Handbuch_Dezember_2009_Korrektur_mit_Titelseite.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2022.

John, Bernd (1979): Statistische Verfahren für technische Meßreihen. Arbeitsbuch für den Ingenieur. Carl Hanser Verlag, München, Wien.

Pörschmann, Hans (Hg.) (1993): Bautechnische Berechnungstafeln für Ingenieure, 23. neubearb. Auflage, Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.

Potthoff, Susanne (2004): Bestimmung von Wanddicken an einer Spundwand bei mikrobiell beeinflusster Korrosion. In: WSD Nordwest (Hg.): Zwischen Weser und Ems, Heft 38, S. 105 – 112. Online verfügbar unter <http://docplayer.org/81054734-Bestimmung-von-wanddicken-an-einer-spundwand-bei-mikrobiell-beinflusster-korrosion.html>, zuletzt geprüft am 01.12.2022.

Uerkvitz, Ralf (2003): Analyse von Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau. Statsoft Europe GmbH, Hamburg, im Auftrage der BAW, unveröffentlicht.

Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hg.) (1995): Stahl im Hochbau. Anwender-Handbuch. 15. Auflage, Stahleisen Verlag, Düsseldorf.

Vismann, Ulrich (Hg.) (2012): Wendehorst - Bautechnische Zahlentafeln. 34., überarbeitete und erweiterte Auflage, DIN, Beuth Verlag, Berlin.

Wennekamp, Sven; Ruthemann, Marten (2002): Bakterien für Lochfraß in den Spundwänden verantwortlich. In: WSD Nordwest (Hg.): Zwischen Weser und Ems, Heft 36, S. 58 – 62. Online verfügbar unter <http://docplayer.org/30140820-Bakterien-fuer-lochfrass-in-den-spundwaenden-verantwortlich.html>, zuletzt geprüft am 01.12.2022

Witt, Karl-Josef (Hg.) (2009): Grundbautaschenbuch. 7. überarbeitete und aktualisierte Ausgabe. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Regelwerke

DIN 50929-3:2018-11: 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 1993-5:2010-05: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 5: Pfähle und Spundwände; Deutsche Fassung EN 1993-5:2007.

DIN EN ISO 8044:2020-08: Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe (ISO 8044: 2015); Deutschsprachige Fassung EN ISO 8044:2020.

EAU (2020): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“. Häfen und Wasserstraßen, EAU 2020. 12. Aufl., Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

MBI (2010) Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2010): Merkblatt Bauwerksinspektion (MBI), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102461>.

MSV (2018) Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105197>.

MSV-A (2023) Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2023): Merkblatt Schadensbewertung an Verkehrswasserbauwerken der Inspektionskategorie A (MSV-A), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110937>.

MSV-B (2022) Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2022): Merkblatt Schadensbewertung an Verkehrswasserbauwerken der Inspektionskategorie B (MSV-B), Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108621>.

TbW (2016) Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): Merkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102463>.

VV-WSV 2101 (2022) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.) (2010): Bauwerksinspektion. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/bautechnik-betrieb/0/VV-WSV_2101_2022_Stand_10-02-2022.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2022

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; evtl. 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
- evtl. 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
- evtl. Vergleich mit historischen Daten

Fazit und Empfehlungen

- ggfs. Instandsetzungsempfehlung
- 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) Löcher: $t_{\text{Loch}} = 0 \text{ mm}$ |
| | Muldentiefe $x_{\text{Tiefenlehre}}$ | Muldenrestwanddicke t_{Mulde} S.U. |
| | Gemessene minimale Restwanddicke $t_{\text{min_gemessen}}$ | einschl. Mulden und Löcher |
| Berechnung | Mittlere Restwanddicke \bar{t} | in mm; $\bar{t} = \sqrt[n]{t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n}$ (ohne Mulden und Löcher) |
| | Muldenrestwanddicke t_{Mulde} | $t_{\text{Mulde}} = \bar{t}_{\text{Messpunkt}} - x_{\text{Tiefenlehre}}$ |
| | Abrostung a | in mm; $a = t_0 - \bar{t}$ |
| | Mittlere Abrostung \bar{a} | in mm; $\bar{a} = t_0 - \bar{t}$ |
| | Maximale Abrostung a_{max} | eines Messpunktes eines Messquerschnittes einer Korrosionszone in mm; $a_{\text{max}} = t_0 - t_{\text{min_gemessen}}$ (einschl. Mulden und Löcher) |
| | Mittlere Muldentiefe $\bar{x}_{\text{Tiefenlehre}}$ | In mm; $\bar{x}_{\text{Tiefenlehre}} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$ |
| | Geschätzte maximale Abrostung A_{max} | in mm; $A_{\text{max}} = e^{\bar{x}_{\text{Tiefenlehre}} + k_{n,0,975;0,95} \cdot s_{\ln}}$ (einschl. Mulden und Löcher) |
| | Geschätzte minimale Restwanddicke t_{min} | $t_0 - A_{\text{max}}$ |
| | Mittlere Abrostungsrate $\bar{\alpha}$ | in mm; $\bar{\alpha} = \frac{\bar{a}}{\text{Spundwandalter}}$ |
| | Geschätzte Maximale Abrostungsrate α_{max} | in mm; $\alpha_{\text{max}} = \frac{A_{\text{max}}}{\text{Spundwandalter}}$ |
| 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:

Im Stationsprotokoll ist in das Feld *Skizze Profiltyp mit Bezeichnung der Messlagen* der entsprechende Profiltyp aus der Tabelle *Profiltypen und Messlagen* (S. A2-4) mit allen theoretisch möglichen Messlagen zu kopieren. Die Messlagen, an denen tatsächlich gemessen wurde, sind zu markieren, und in der Spalte *Messlagen* sind diese Lagen anzugeben (s. Beispiel S. A2-3).

Messwerte-Protokoll

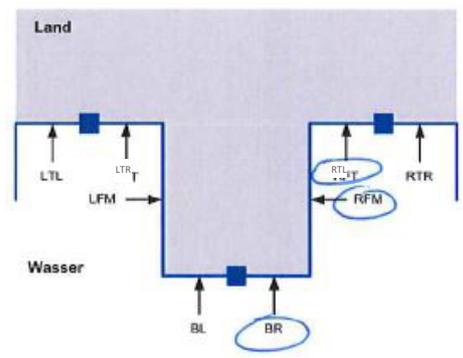
| | |
|----------|-------|
| Vorlage | A2-10 |
| Beispiel | A2-11 |

Protokoll für Bauwerksbesichtigung

| | |
|----------|-------|
| Vorlage | A2-12 |
| Beispiel | A2-13 |

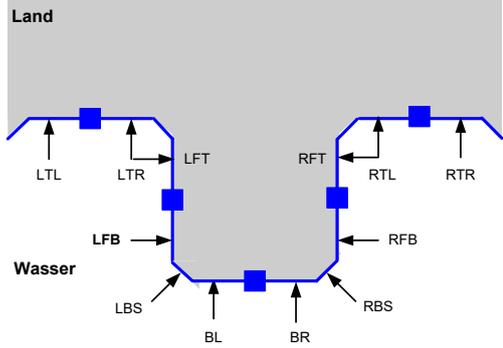
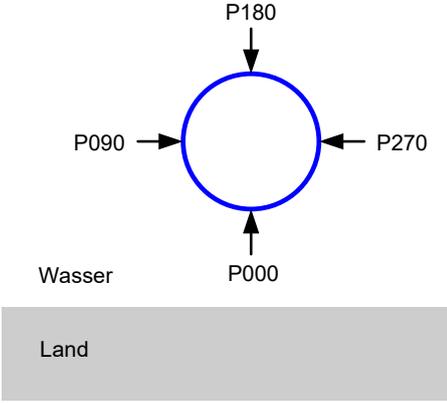
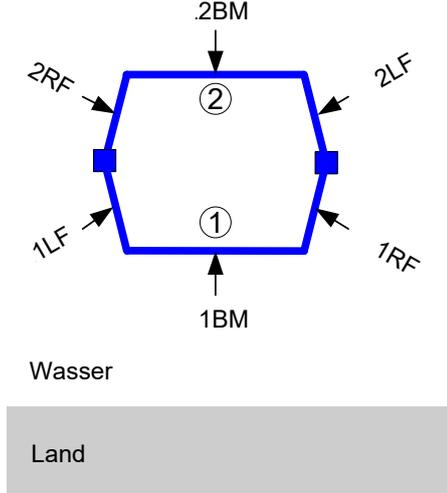
| Wanddickenmessung | |  BAW Bundesanstalt für Wasserbau | |
|---|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| - Stationsprotokoll - | | | |
| Auftragsnr.: | Auftraggeber: | | Bearbeiter: |
| Ort: | Gewässer: | km | Datum: |
| Bauwerk: | Bauwerkstyp: | Baujahr: | Alter: |
| Stationsname: | Lage der Messstation: | | |
| | Gauß-Krüger Rechtswert: | | Hochwert: |
| MW / MThw / OW: | NHN | m | MTnw / UW: |
| GOK: | NHN | m | Sohltiefe: |
| Stahlprofil: | Profiltyp: | Widerstandsmoment: | |
| | | | cm³/lfd m |
| Skizze Profiltyp mit Bezeichnung der Messlagen | | Messlage Bezeichnung | Messlage Nr. |
| | | | Ausgangs- wanddicke in mm |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| Tauchfirma: | | | |
| Reinigungswerkzeuge: | | | |
| Messgerät: | | Messkopf: | |
| Bemerkungen: | | | |

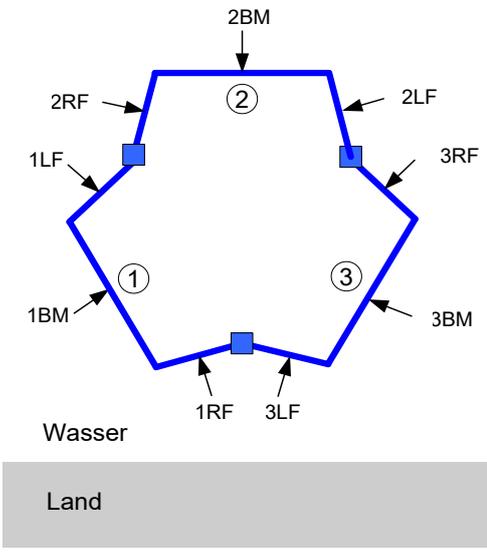
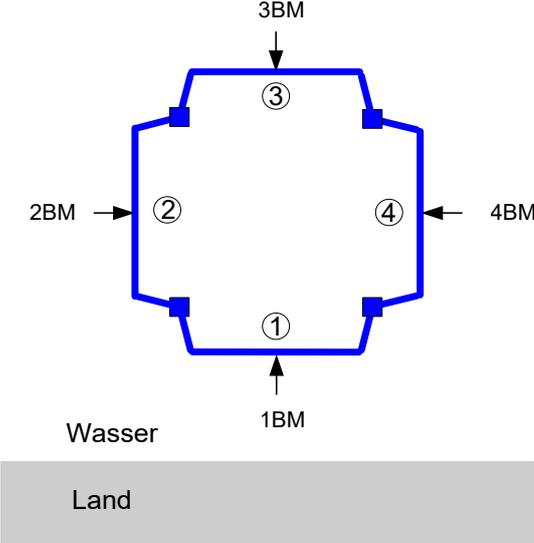
Stationsprotokoll, Beispiel

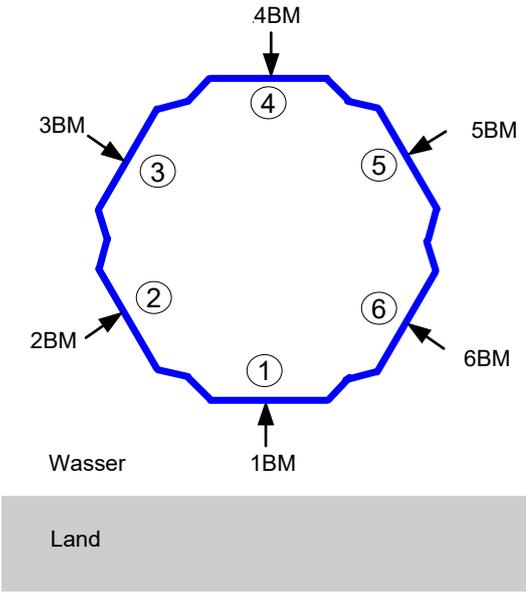
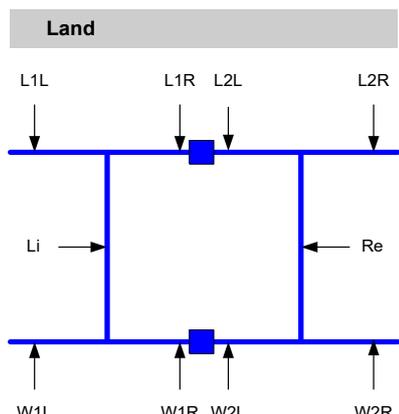
| Wanddickenmessung - Stationsprotokoll - | |  BAW <small>Bundesanstalt für Wasserbau</small> | |
|---|---|---|------------------------------|
| Auftragsnr.: <i>A395</i> | Auftraggeber: <i>WSA</i> | Bearbeiter: <i>Müster</i> | |
| Ort: <i>Berlin</i> | Gewässer: <i>Spree</i> km <i>1,23</i> | Datum: | |
| Bauwerk: <i>Binnenhafen</i> | Bauwerkstyp: <i>Spundwand</i> | Baujahr: <i>1938</i> | Alter: <i>74 Jahre</i> |
| Stationsname: <i>01 BH N/12</i> | Lage der Messstation: <i>S. Lageplan</i> <i>Nordufer</i> | | |
| | Gauß-Krüger Rechtswert: | | Hochwert: |
| 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>Amtkander, Bauhof</i> | | | |
| Reinigungswerkzeuge: | | | |
| Messgerät: <i>USA 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 vierfach (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 style="text-align: center;">nBM: Bohle n, Berg mittig</p> |
| D2 | Dalben (2 Stege) |  <p style="text-align: center;">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 | | | | | | | | | | | | |  Bundesanstalt für Wasserbau |
|--------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|------|------|------|------|------|----------------------|---|---|--|---|
| - Messwerte - | | | | | | | | | | | | | |
| Station: 01BH N/12 | | | Datum: 13.8.2012 | | | | | | Seite: 1 von 1 | | | | |
| Höhe ab GOK | Mess- kette Ifd. Nr. | Mess- lage Nr. | Wanddicke in mm | | | | | | Muldentiefe in mm | | | Daten- qualität (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 | 10,9 | 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 | |

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------|------------------|----------------|--|--|
| Bauwerksbesichtigung | | | |  BAW Bundesanstalt für Wasserbau | |
| 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: | |

Protokoll für Bauwerksbesichtigung, Beispiel

| <h2 style="margin: 0;">Bauwerksbesichtigung</h2> | | | | BAW <small>Bundesanstalt für Wasserbau</small> | | | | | | |
|--|--|---------------------------------------|------------------------------|--|----------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Auftragsnr.: <i>A395</i> | Auftraggeber: <i>WSA</i> | Ort: <i>Berlin</i> | Datum: <i>1.1.11</i> | | | | | | | |
| Bauwerk: <i>Binnenhafen</i> | Stahlprofil: <i>Hoesch III</i> | Gewässer: <i>Spree</i> km <i>1,23</i> | Seite: <i>X</i> von <i>X</i> | | | | | | | |
| Profilskizze: | | | | | | | | | | |
| Bezugshöhe: <i>38,40</i> | <i>Bohle 1</i> | <i>Bohle 2</i> | <i>Bohle 3</i> | <i>Bohle 4</i> | <i>Bohle 5</i> | <i>Bohle 6</i> | <i>Bohle 7</i> | <i>Bohle 8</i> | <i>Bohle 9</i> | <i>Bohle 10</i> |
| <i>MW</i> -1 m | ↑ <i>Korrosionsschutz</i> / <i>Luftumlauf (KF)</i> / <i>FK</i> | | | | | | | | | |
| -2 m | | | | | | | | | | |
| -3 m | | | | | | | | | | |
| -4 m | <i>FK (vermutet Mulden)</i> | | | | | | | | | |
| <i>Schle</i> -5 m | | | | | | | | | | |
| -6 m | | | | | | | | | | |
| -7 m | | | | | | | | | | |
| -8 m | | | | | | | | | | |
| -9 m | | | | | | | | | | |
| -10 m | | | | | | | | | | |
| Eintragungen: | Stahl | | | | | Korrosionsschutz | | | | |
| | MK | Mulden- / Narbenkorrosion | | | | KR | Riss | | | |
| | <u>FK</u> | Flächenkorrosion | | | | KB | Blasen | | | |
| | B | Beule | | | | KRo | Rost | | | |
| | R | Riss | | | | <u>KF</u> | fehlende Beschichtung | | | |
| | L | Loch / Durchrostung | | | | | | | | |
| Taucher: | <i>Max</i> | | | | | Unterschrift: | <i>M</i> | | | |

Anlage 3: Datenstruktur

Abbildung A3.1 zeigt vereinfacht den Tabellen-Aufbau der BAW-eigenen, relationalen Datenbank-Anwendung WaDiMe (= WandDickenMessung).¹⁸

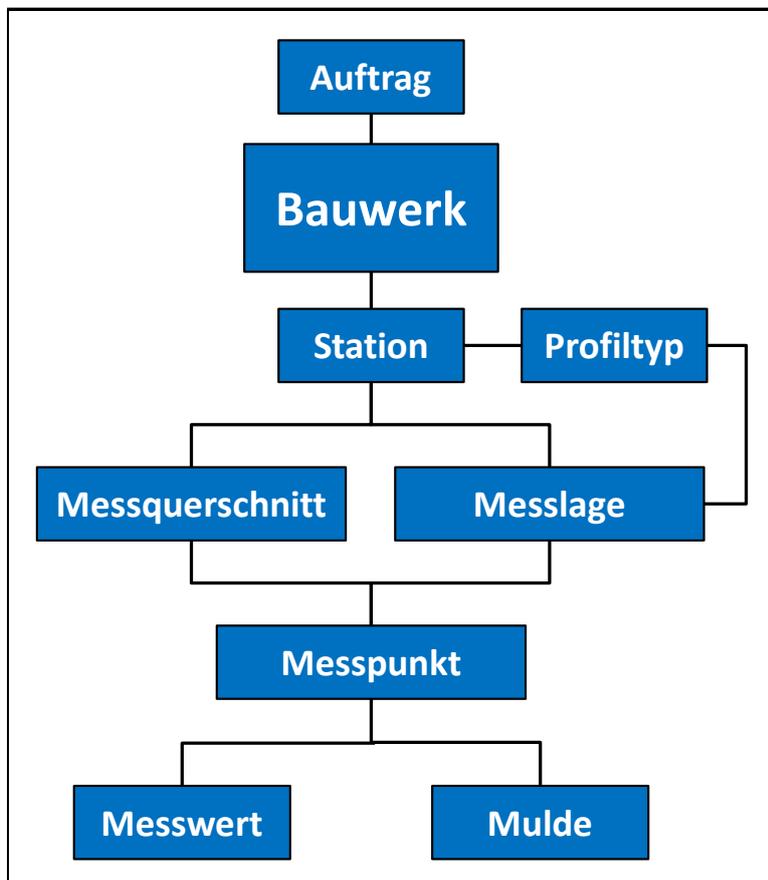


Abbildung A3.1: Schematischer Aufbau der relationalen Datenbank WaDiMe

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 Referenztabellen gehören, die hier vereinfachend nicht dargestellt wurden.

¹⁸ Die Arbeitsgruppe „Instandhaltung“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) erarbeitet ein IT-Programm zur Darstellung und Auswertung einer Spundwanddickenmessung nach ESM.

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. Abbildung A4.1) |
| Gewässer | Text | |
| km von | Dezimalzahl | |
| km bis | | |
| Lage | Text | Auswahlliste: <i>Binnengewässer / Binnengewässer Tide / Brackwasser / Brackwasser Tide / Nordsee / Ostsee / Schleusenkammer</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. <i>Klopfen, Sandstrahlen</i> |
| Luftzone | Dezimalzahl | Unterkanten der Korrosionszonen in mNHN; wird nur angegeben, wenn Korrosionszone am Bauwerk vorhanden ist |
| Spritzwasserzone | | |
| Wasserwechselzone | | |
| Niedrigwasserzone | | |
| Unterwasserzone | | |

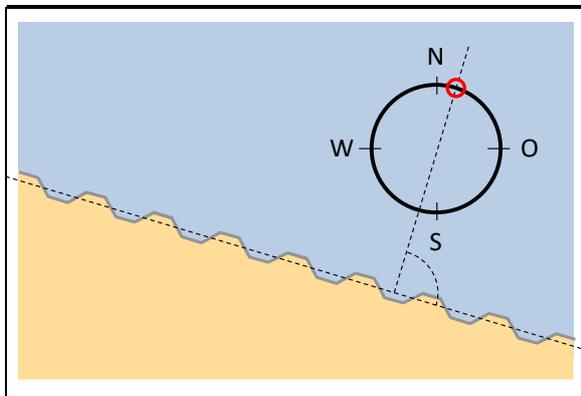


Abbildung A3.2: Normalenrichtung eines Spundwandbauwerkes

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. <i>Hoesch III</i> |
| Stahlsorte | | z. B. <i>S 240 GP</i> |
| 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 / Rohrfahl / 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 korrosiongeschützten 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.

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 Abbildung 3 (Abschn. 3.1.1.1) 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 Niedrigwasserzone 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 Abrostungsraten 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 | |

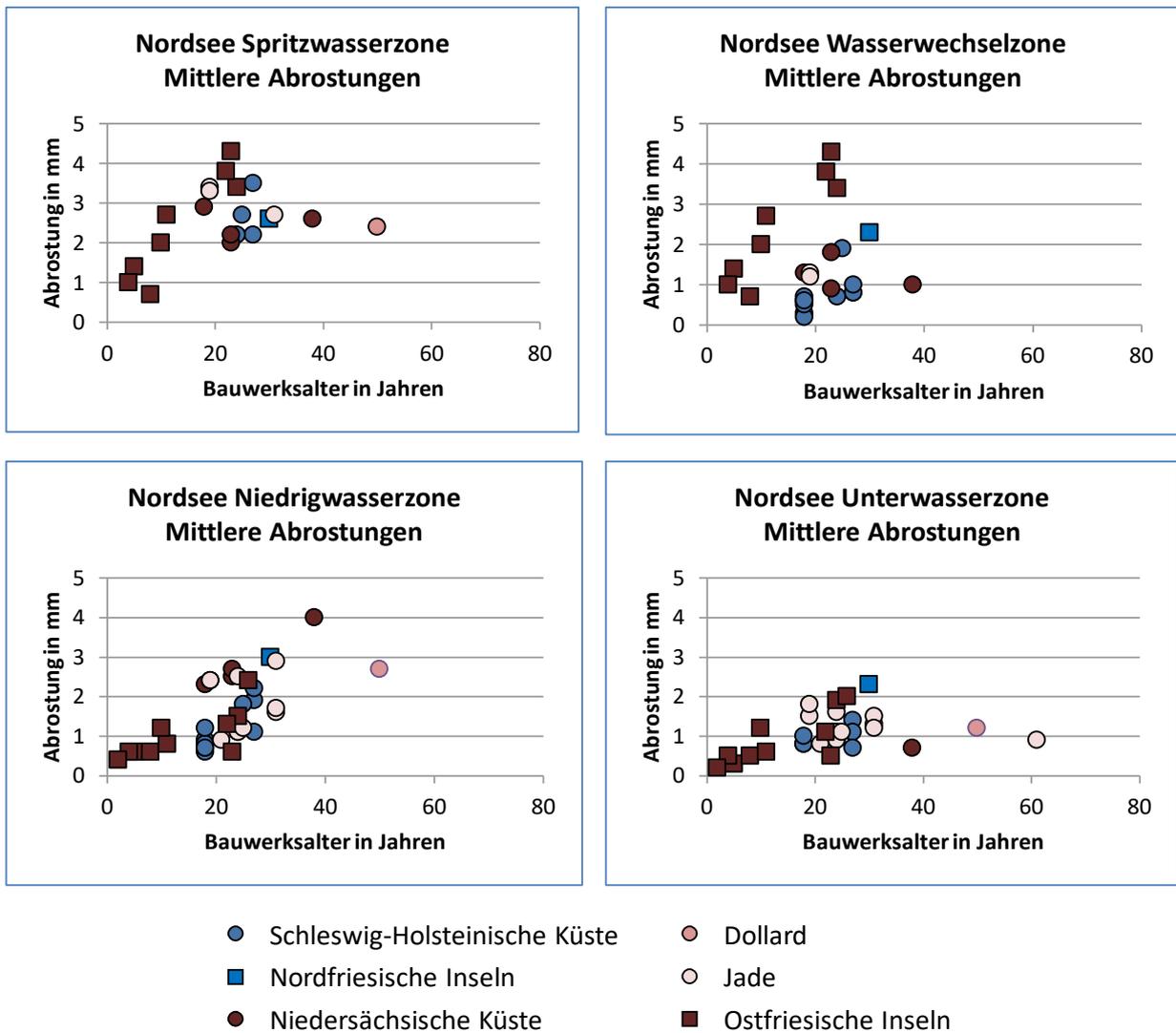


Abbildung A4.1: Mittlere Abrostungen in der Nordsee

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 | |

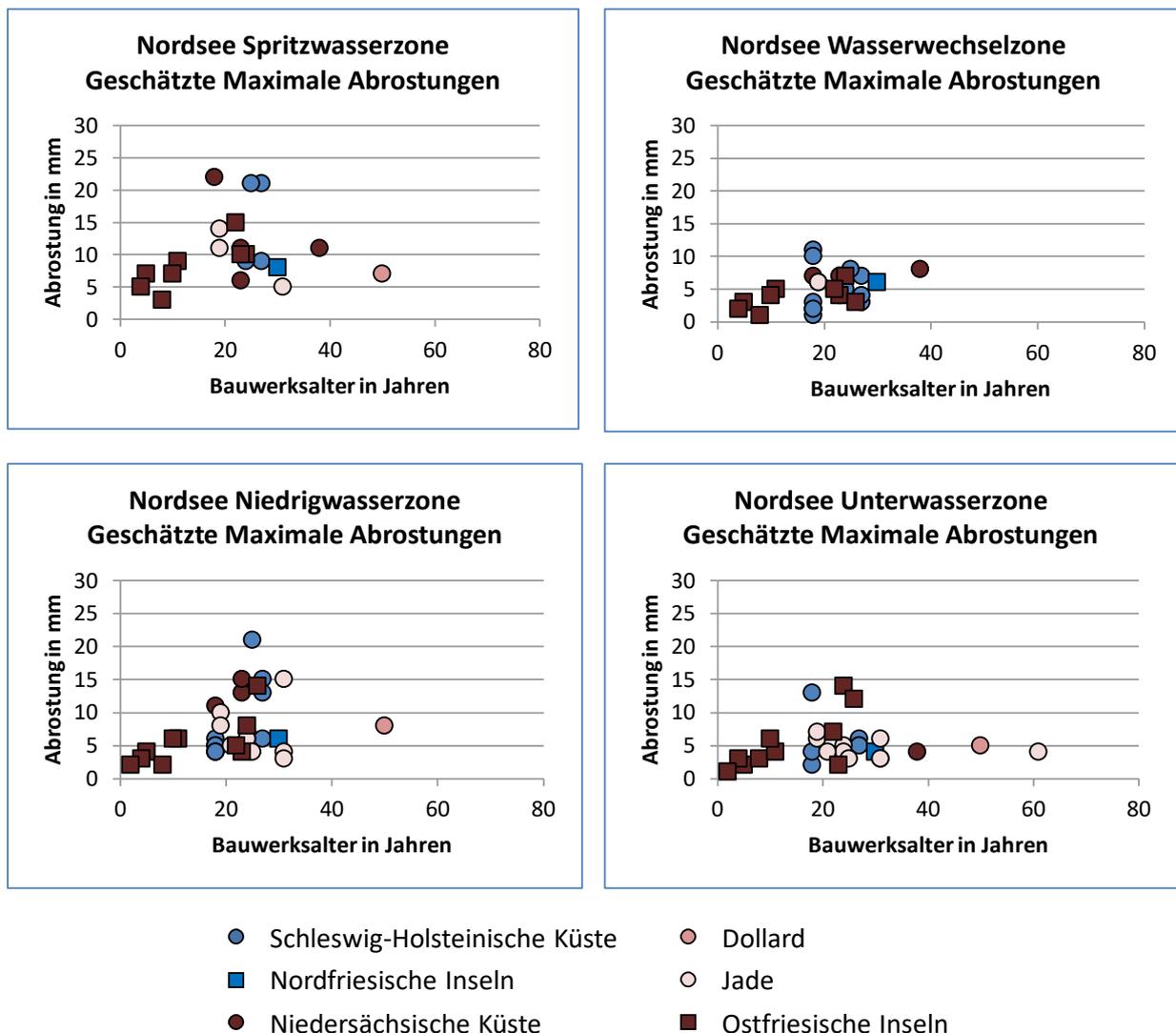
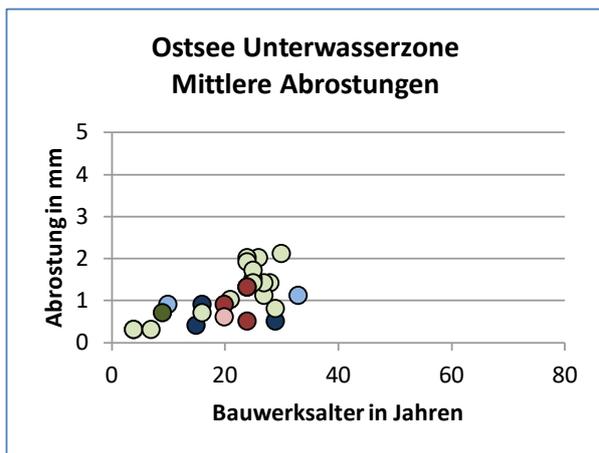
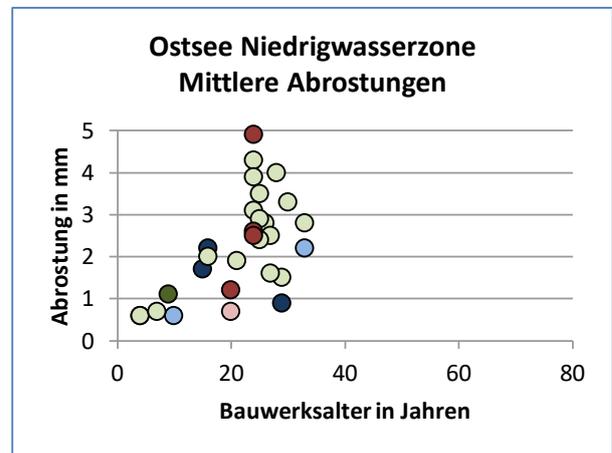
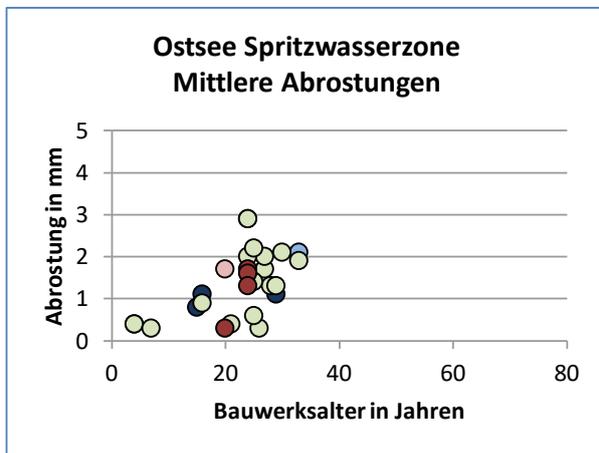


Abbildung A4.2: Geschätzte maximale Abrostungen in der Nordsee

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 | |

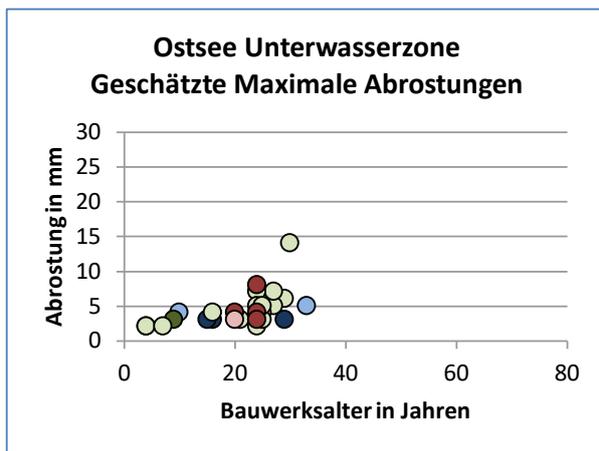
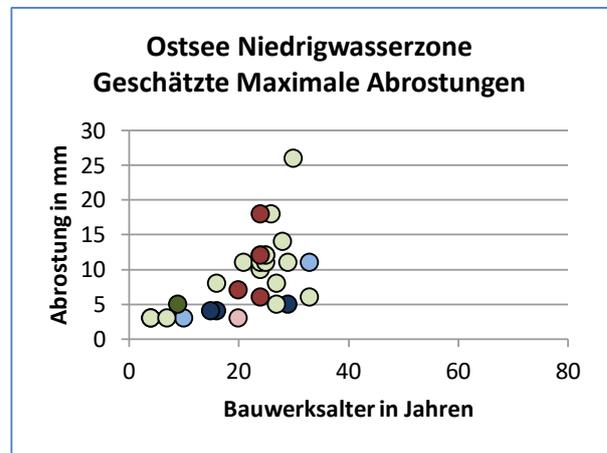
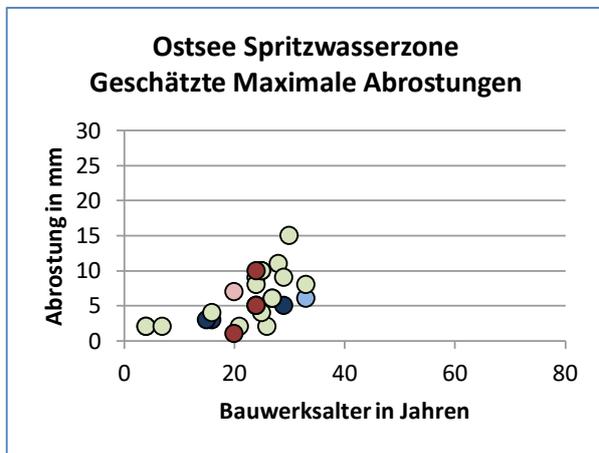


- Flensburger Förde
- Schlei
- Eckernförder Bucht
- Kieler Förde
- Lübecker Bucht
- Greifswalder Bodden

Abbildung 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

Abbildung A4.4: Geschätzte maximale Abrostungen in der Ostsee

Tabelle A4.5: Mittlere Abrostungsraten 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 | |

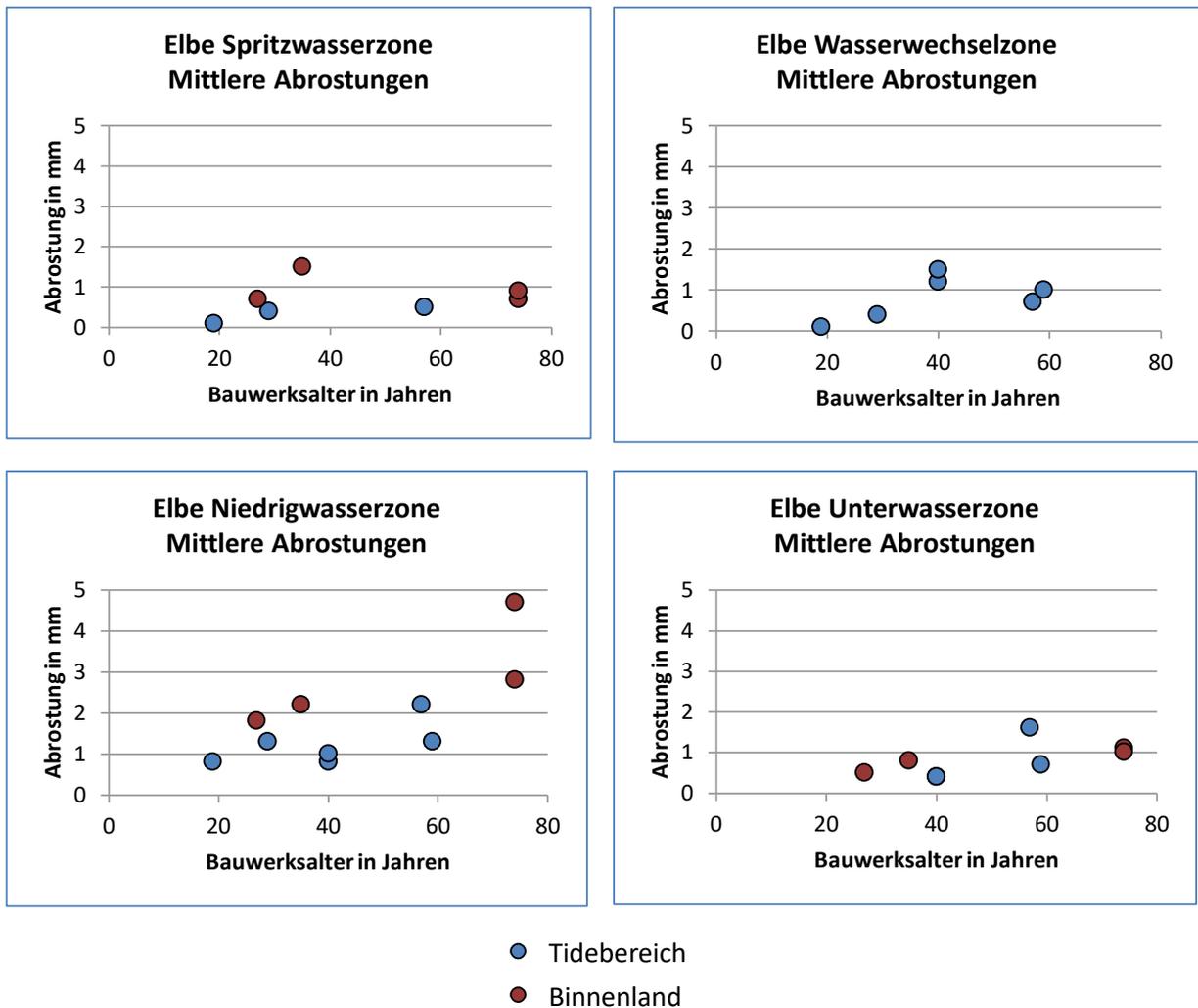


Abbildung A4.5: Mittlere Abrostungen in der Elbe (und Nebenflüssen)

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 | |

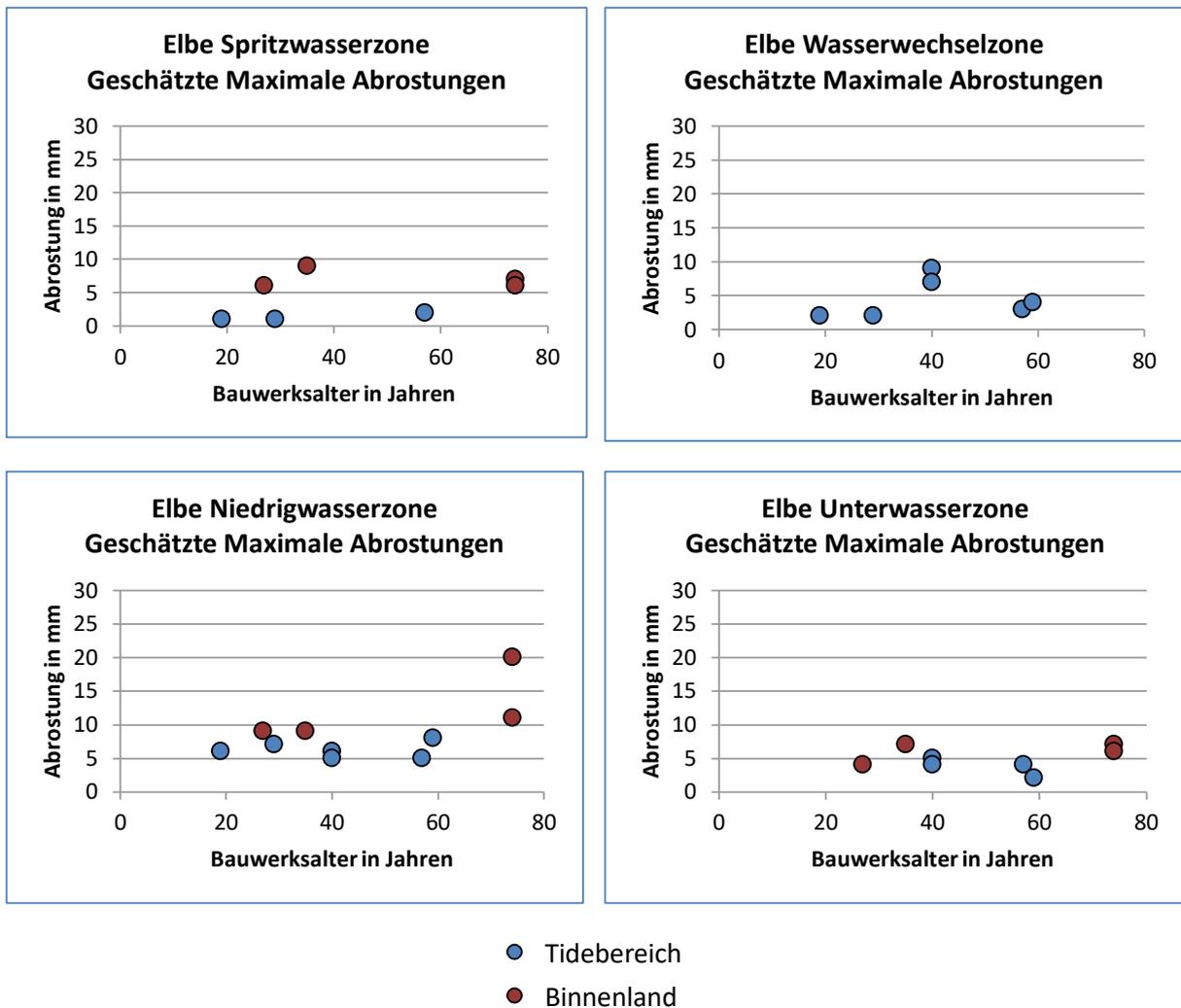
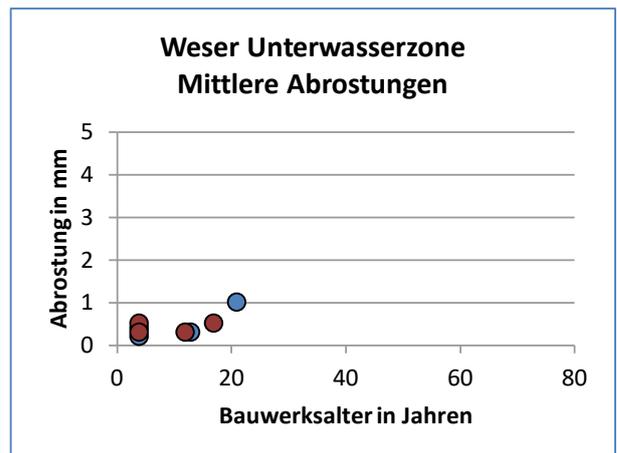
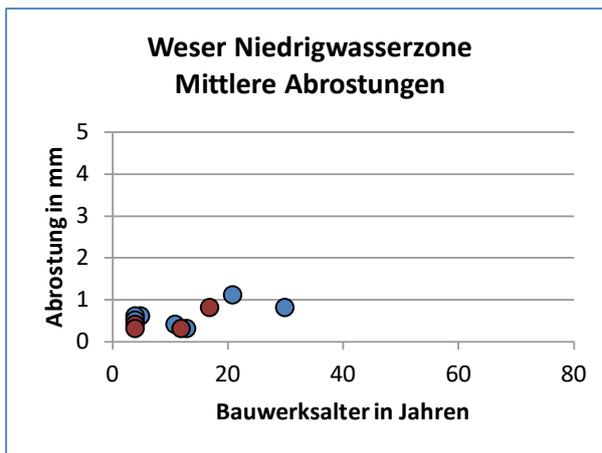
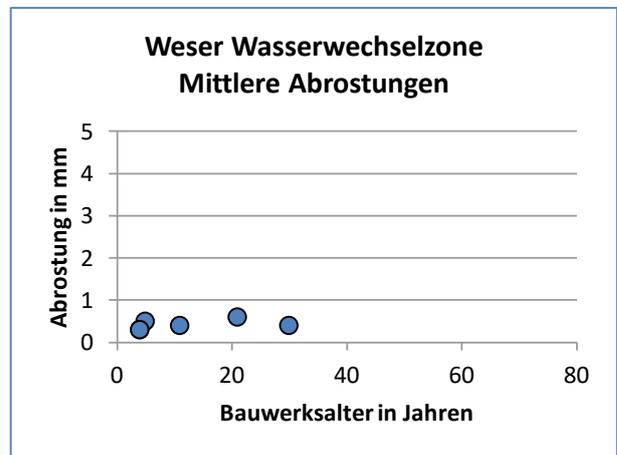
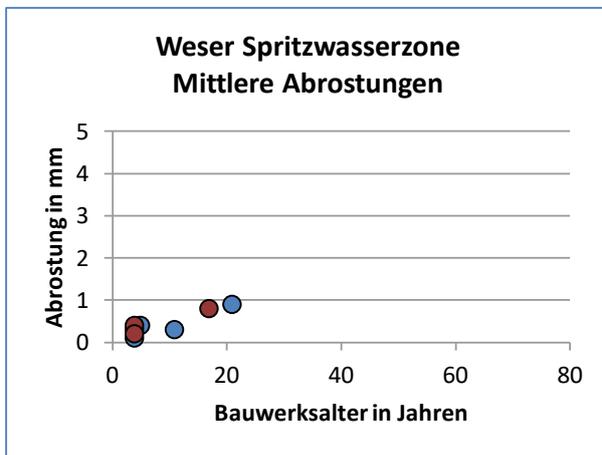


Abbildung A4.6: Geschätzte maximale Abrostungen in der Elbe einschließlich Nebenflüssen

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 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | - | | - | | - | | - | |

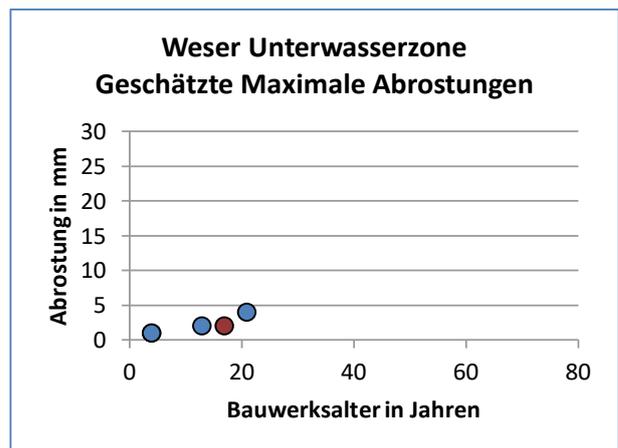
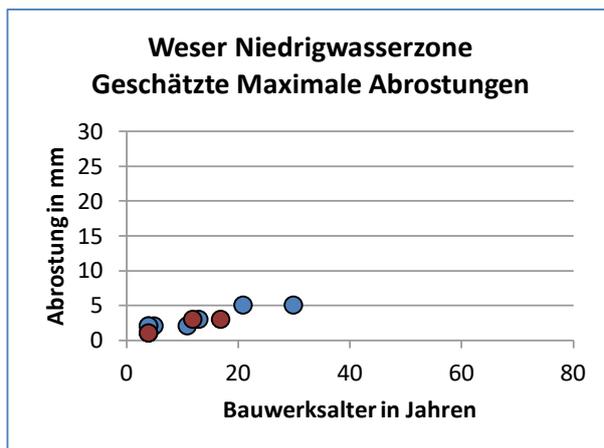
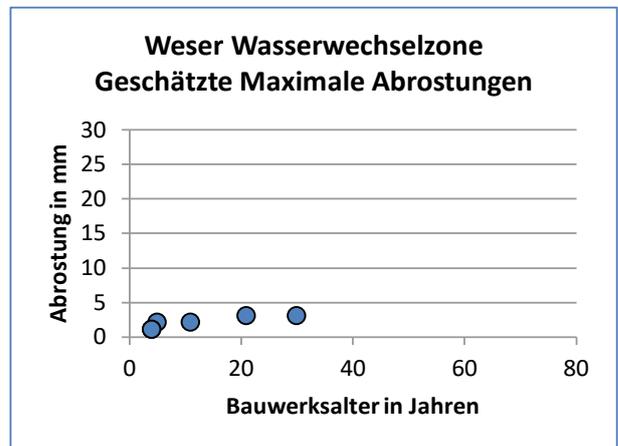
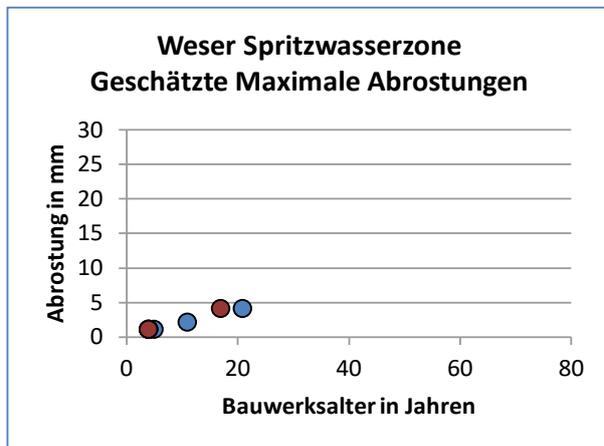


- Tidebereich
- Binnenland

Abbildung 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

Abbildung A4.8: Geschätzte maximale Abrostungen in der Weser

Tabelle A4.9: Mittlere Abrostungsraten im Mittellandkanal

| MITTELLANDKANAL | | Mittlere Abrostungsrate \bar{a} 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 | |

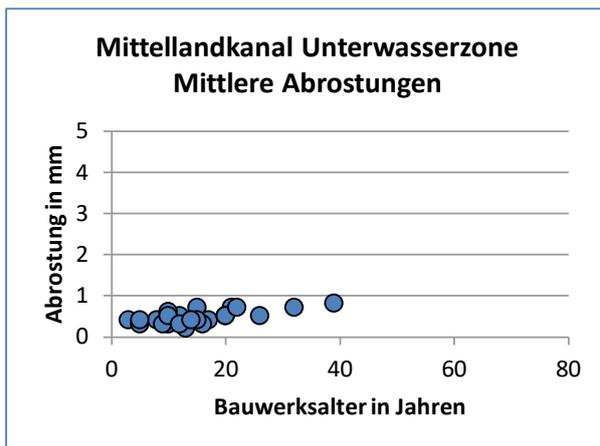
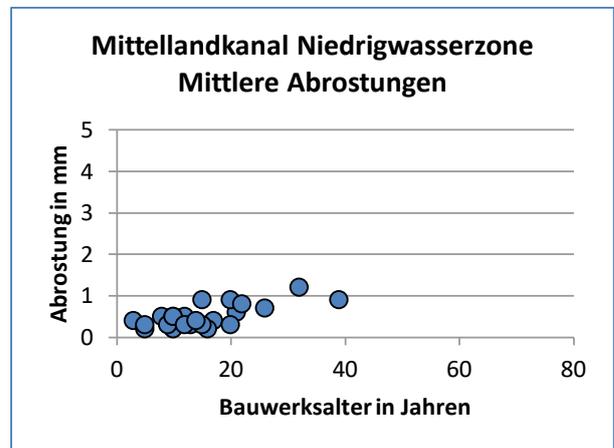
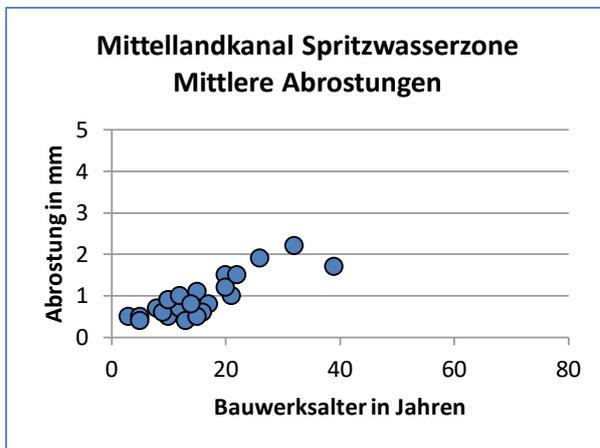


Abbildung A4.9: Mittlere Abrostungen im Mittellandkanal

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 | |

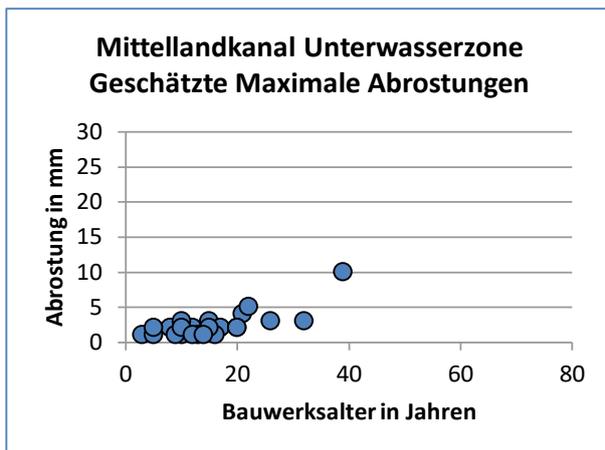
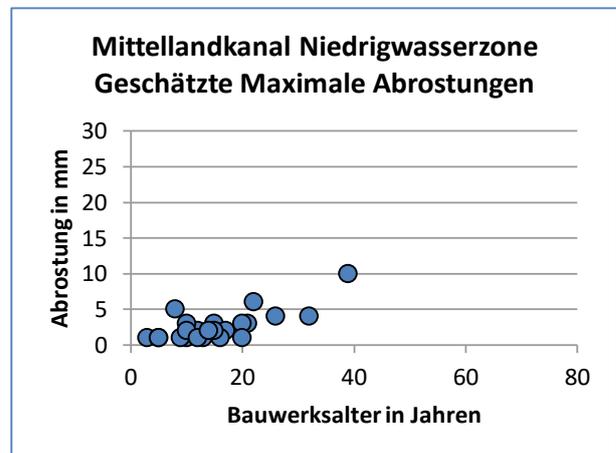
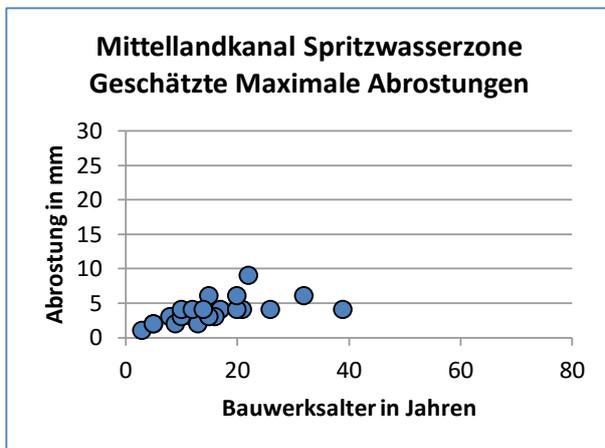


Abbildung A4.10: Geschätzte maximale Abrostungen im Mittellandkanal

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 | |

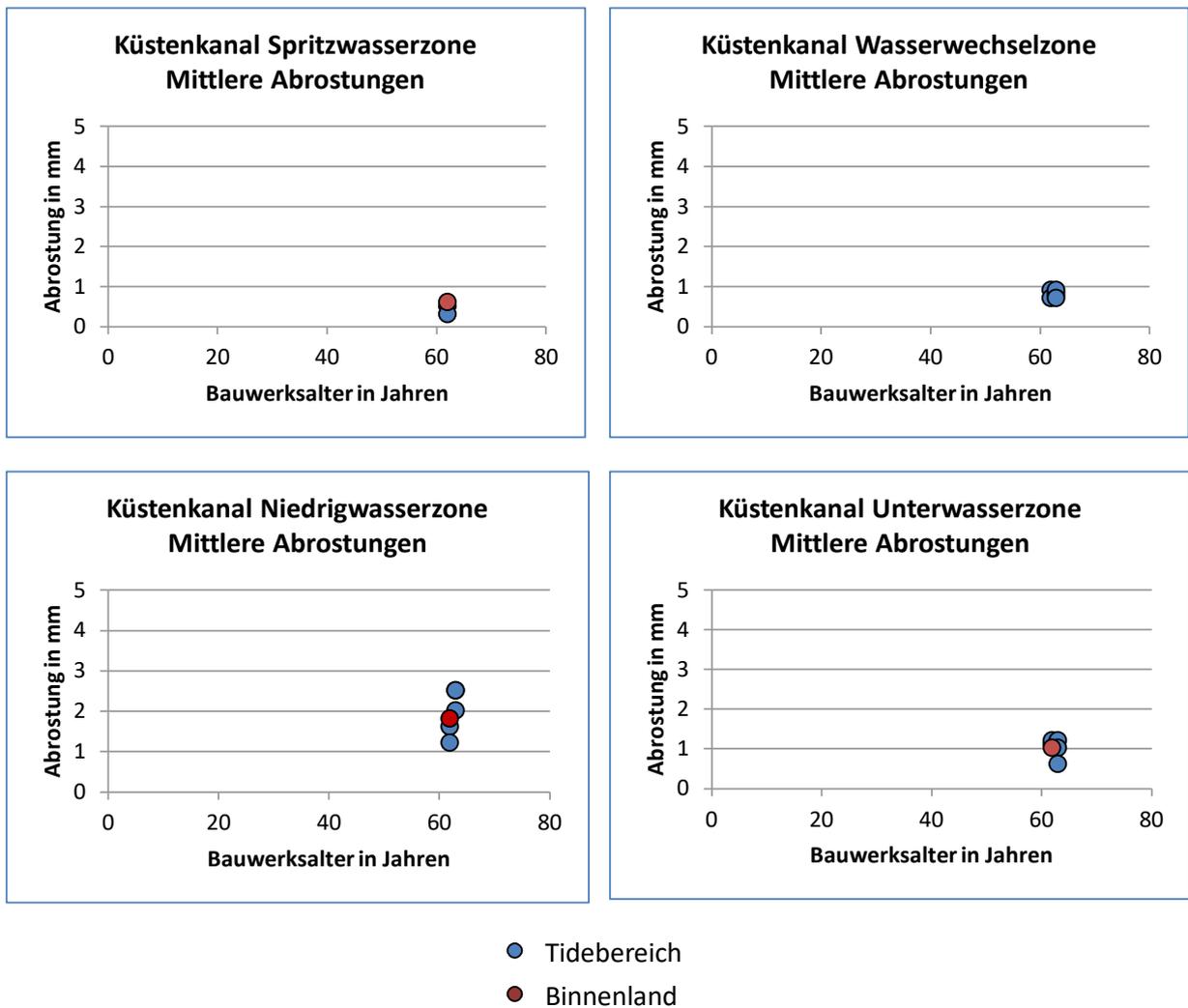
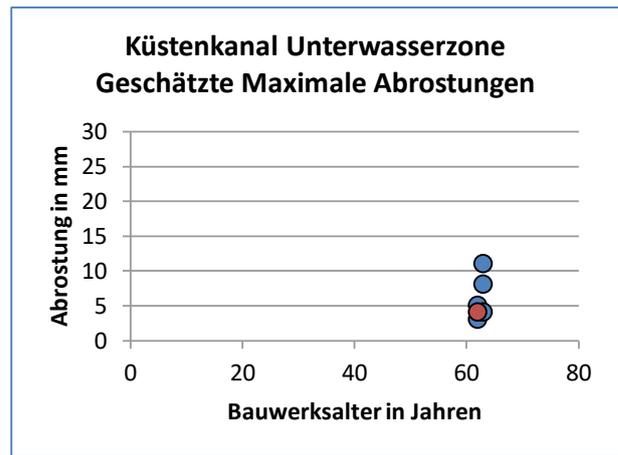
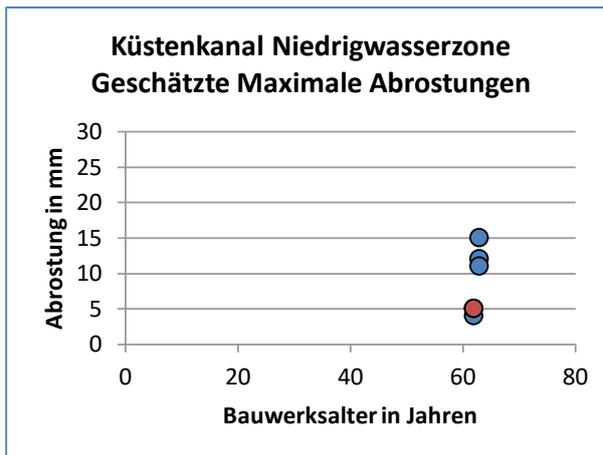
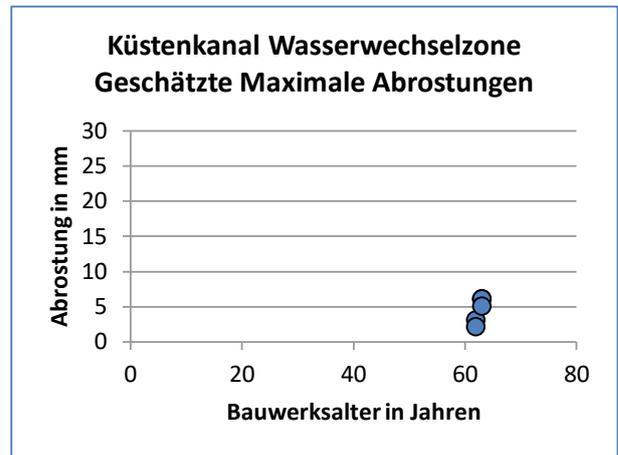
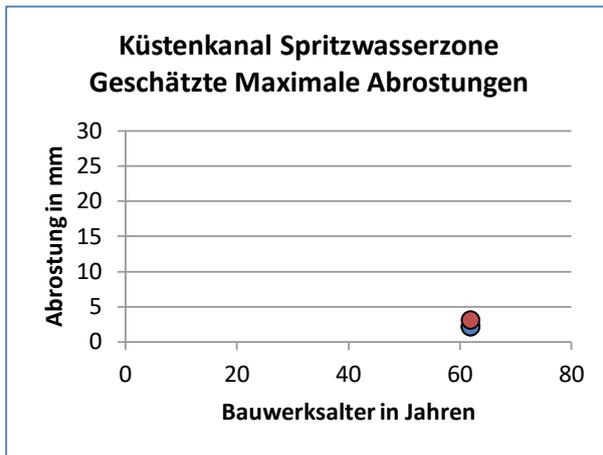


Abbildung A4.11: Mittlere Abrostungen im Küstenkanal

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 | |

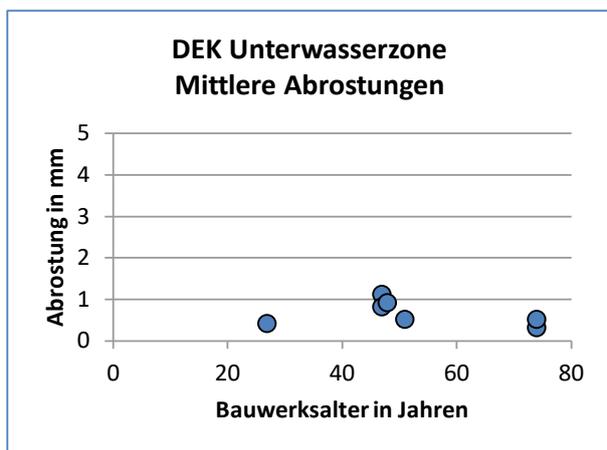
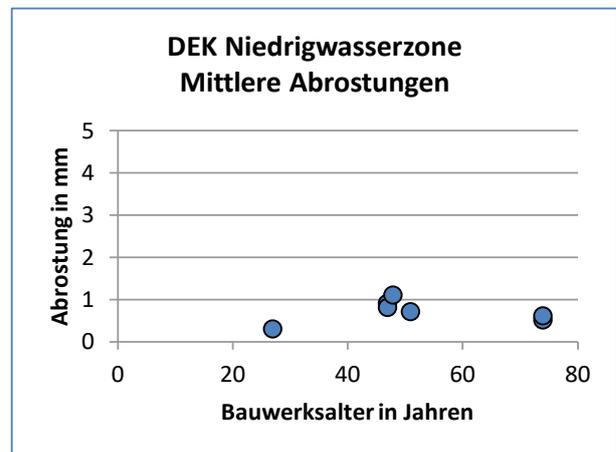
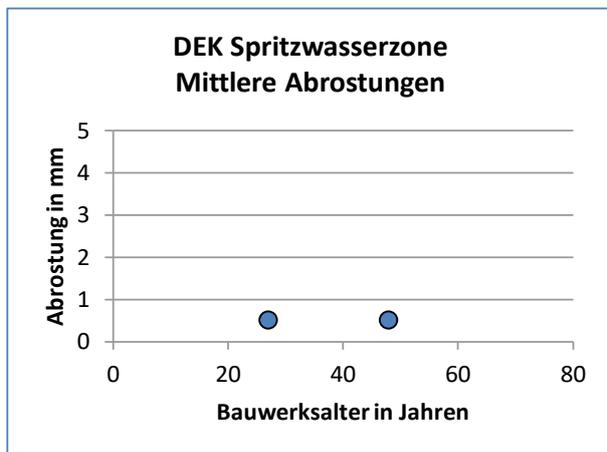


- Tidebereich
- Binnenland

Abbildung 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 | |

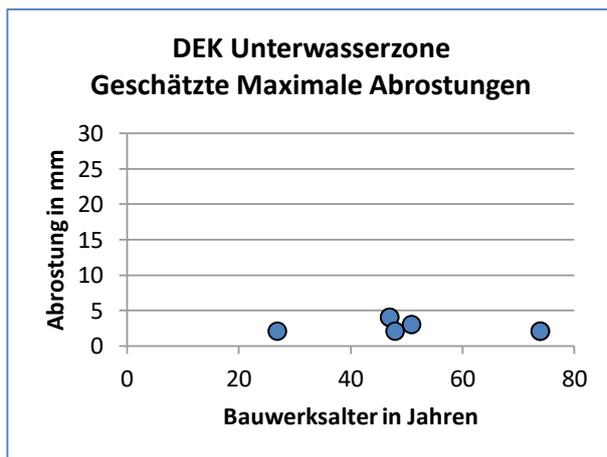
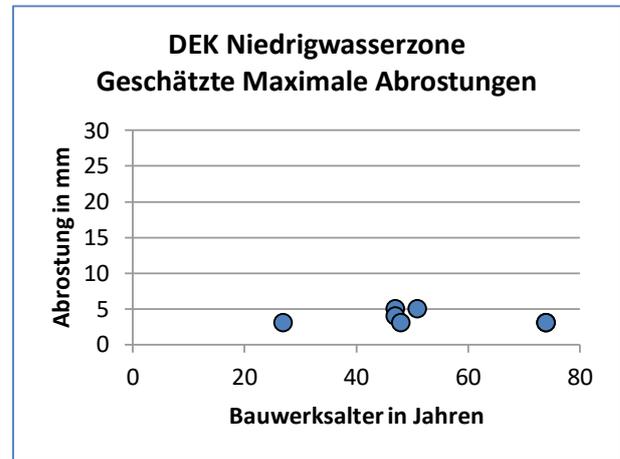
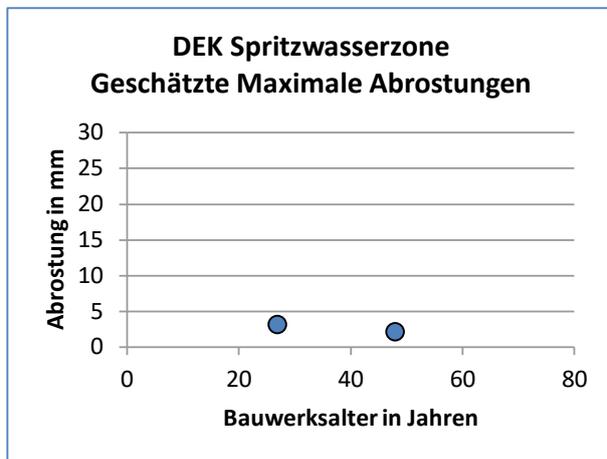


● Binnenland

Abbildung 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

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