

Binnenwasserstraßen - Entwurf, Bau, Betrieb und Unterhaltung (1.2)

Beschreibung und Beurteilung des Korrosionszustandes korrodierter Stahlspundwände

Dipl.-Geol. Anne Heeling

Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

Dipl.-Ing. Dirk Alberts (†)

Einführung

Die Beschreibung des Korrosionszustandes eines Spundwandbauwerkes orientiert sich an den beiden Grundfunktionen einer Spundwand:

- Korrosive Wanddickenverluste führen zu einer Verringerung der Tragfähigkeit. Unterschreitet das infolge von Korrosion reduzierte aufnehmbare Biegemoment das rechnerisch vorhandene, kommt es zu Spannungsüberschreitungen (Bild 1). Für die Beurteilung der Standesicherheit einer bestehenden Wand ist die Kenntnis der Mittleren Restwanddicke bzw. der Mittleren Abrostung erforderlich, aus der über das (Rest-) Widerstandsmoment das aktuell aufnehmbare Biegemoment berechnet werden kann. Die Beurteilung der Restnutzungsdauer setzt zudem die Kenntnis der Mittleren Abrostungsrate (= Mittlere Abrostung [mm] / Standzeit [Jahre]) voraus.
- Eine Spundwand muss den Boden im Hinterfüllungsbereich zurückhalten. Lokale Durchrostungen können jedoch zu einem Ausspülen des hinterfüllten Bodens infolge Wellen und Grundwasserströmung, damit zur Bildung von Hohlräumen hinter der Spundwand und schließlich zu Sackungen und Bodeneinbrüchen im Hinterfüllungsbereich führen. Die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit erfolgt auf Grundlage der Minimalen Restwanddicken bzw. der Maximalen Abrostung. Die Restnutzungsdauer wird aus der Maximalen Abrostungsrate (= Maximale Abrostung [mm] / Standzeit [Jahre]) prognostiziert.

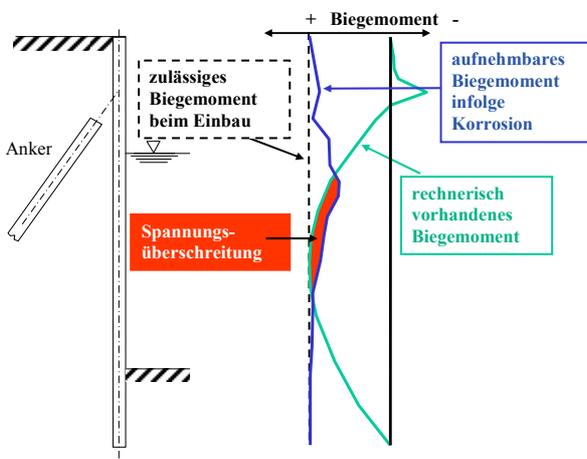


Bild 1: Beurteilung der Standesicherheit einer Spundwand

Spundwände korrodieren jedoch nicht gleichmäßig; tatsächlich unterscheiden sich die Abrostungen eines

Bauwerks sehr stark von einer Bohle zur nächsten. Darüber hinaus variiert die Korrosion selbst einer einzelnen Spundwandbohle nicht nur längs ihrer Höhe, sondern zusätzlich auch längs ihres Querschnittes. Für eine zutreffende Beschreibung dieser komplexen Situation muss ein Restwanddicken-Messprogramm deshalb eine ausreichende Anzahl qualitativ hochwertiger Messwerte liefern, aus denen dann die Korrosionskennwerte ermittelt werden können.

Gleichzeitig ist das Messprogramm unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren: Spundwanddickenmessungen sind aufgrund des erforderlichen Tauchereinsatzes teuer und müssen zudem oft unter extrem schwierigen Bedingungen (trübes, unruhiges Wasser) durchgeführt werden. Sie erfordern deshalb eine sorgfältige Planung, Vorbereitung und Durchführung.

Die Bundesanstalt für Wasserbau führt regelmäßig Wanddickenmessungen durch und verfügt als Ergebnis über eine Datenbank, die mehr als 360.000 Einzelmesswerte von ca. 350 Bauwerken beinhaltet (und damit einen Wert von etwa 3 Mio. € darstellt). Diese Daten wurden im Rahmen eines von der EUROPEAN COAL AND STEEL Company der EU geförderten Projektes gezielt statistisch ausgewertet (ECSC, 2005).

Basierend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen sowie einer mehr als 20-jährigen Erfahrung mit Spundwanddickenmessungen soll hier gezeigt werden, wie ein geeignetes Messprogramm durchzuführen ist und wie die Ergebnisse ausgewertet und dargestellt werden sollten.

Spundwanddickenmessungen

Noch vor der eigentlichen Restwanddickenmessung führt eine systematische visuelle Kontrolle zu einer ersten Beschreibung des allgemeinen Erhaltungszustandes der Spundwand, der bei der Planung des Umfangs des eigentlichen Untersuchungsprogramms unbedingt berücksichtigt werden sollte. Dabei beschreibt der Taucher z.B. Anzahl und Größe vorhandener Löcher und Risse sowie die Intensität von Rost und Bewuchs. Weitere Informationen bietet die sog. Hammer-schlag-Methode, bei der der Taucher die Wand systematisch abklopft und aus dem Klang des Hammeraufschlages intakte Spundwandabschnitte von Bereichen mit nur noch geringer Restwanddicke unterscheiden kann.

Zur direkten Messung der Restwanddicken sollte ein Universal-Ultraschall-Messinstrument mit folgenden Eigenschaften verwendet werden (Alberts & Schuppe-ner, 1991, s. Bild 2):

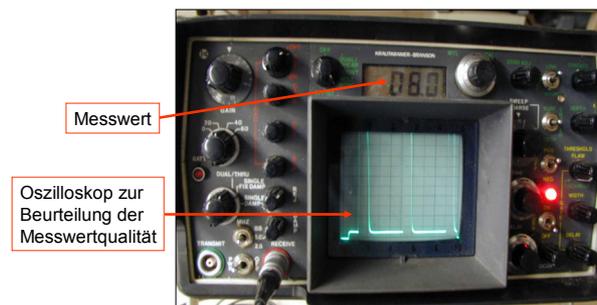


Bild 2: Universal-Ultraschall-Messgerät

- Digitalanzeige zum direkten Ablesen des Messwertes
- Oszilloskop für eine visuelle Kontrolle der Messwertqualität
- Digitalanzeige zum direkten Ablesen des Messwertes
- Oszilloskop für eine visuelle Kontrolle der Messwertqualität
- Schockwellenaufsatz, der die Berechnung der Wanddicke aus der Laufzeitverzögerung zweier aufeinander folgender Schallimpulse erlaubt
- Spezialadapter zur Gewährleistung eines definierten Wasservorlaufes (s. Bild 3)

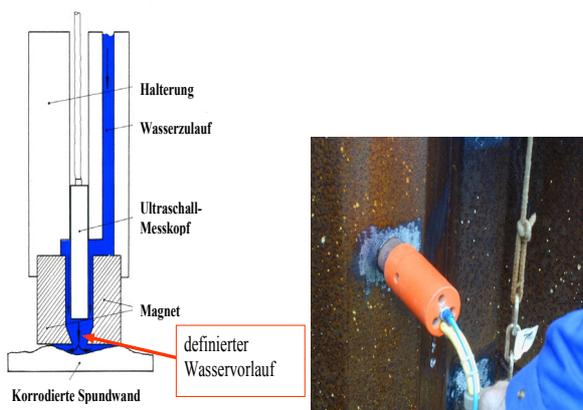


Bild 3: von der BAW entwickelter Spezialadapter

Der Einsatz eines Universal-Ultraschall-Messinstrumentes setzt eine relativ glatte Stahloberfläche voraus. Deshalb müssen die Messpunkte zunächst unbedingt mittels Hammer und Sandstrahlung gereinigt werden.

Trotzdem kann in Bereichen starker Muldenkorrosion zusätzlich der Einsatz einer Schieblehre erforderlich werden (s. Bild 4). Der Schieblehren-Messwert (d.h. die Muldentiefe) wird dann vom Mittelwert der am gleichen Messpunkt ermittelten Restwanddicken subtrahiert.



Bild 4: Muldentiefen-Messung mittels Schieblehre

Auswahl und Anzahl der Messpunkte

Bei einem Spundwandbauwerk mittlerer Länge (ca. 500 m) sollten die Restwanddicken an ca. 10 - 12 gleichmäßig verteilten Spundbohlen über die gesamte Geländesprunghöhe (über und unter Wasser) gemessen werden. Zusätzlich sollte etwa die gleiche Anzahl von Bohlen visuell und mittels Hammerschlag-Methode untersucht werden.

Aufgrund unterschiedlicher Korrosionsmedien variiert die Korrosion längs der Höhe einer Spundwandbohle hinsichtlich Typus und Intensität (*Korrosionszonen*).

Tabelle 1 (nächste Seite) empfiehlt Anzahl und Abstand der zu messenden Querschnitte.

Zusätzlich sollten bei der Festlegung der Messquerschnitte folgende Regeln beachtet werden:

- Der Höhenabstand zwischen zwei Messquerschnitten sollte mindestens 0,5 m betragen; kleinere Abstände führen bei der späteren Ermittlung der Korrosionskennwerte nicht zu genaueren Ergebnissen.
- Der Abstand der Messquerschnitte von der oberen bzw. unteren Grenze einer Korrosionszone (MW, MThw, MTnw) sollte mindestens 0,2 m betragen, da nur dann eine eindeutige Zuordnung der Messwerte zu einer bestimmten Korrosionszone möglich ist.

Je Messquerschnitt sollte - in Abhängigkeit vom Spundwand-Profiltyp - im Bereich von Bohlenberg und -tal sowie auf den Flanken je eine zuvor sorgfältig gereinigte Messpunkt-Fläche von ca. 10 cm × 10 cm mit jeweils maximal 6 Einzelwerten gemessen werden (s. Bild 5).

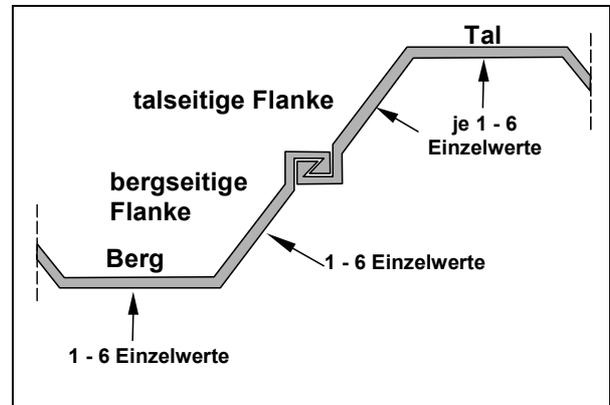


Bild 5: Messpunktanlagen längs eines Messquerschnittes

Für eine sinnvolle Beurteilung des Korrosionszustandes sind pro Bauwerk und Korrosionszone insgesamt mindestens 100 Einzelmesswerte erforderlich. In Abhängigkeit von der Höhe der Korrosionszone kann auch eine größere Anzahl von Einzelwerten (bis zu 500 Werte) sinnvoll sein. Führt das oben beschriebene Messkonzept zu weniger als 100 Werten je Korrosionszone, so ist es nicht sinnvoll, mehr Einzelwerte an einem Messpunkt zu erheben oder den Höhenabstand zwischen den Messquerschnitten zu verringern. Für eine bessere Aussagekraft der Messwerte sollte hingegen die Anzahl der untersuchten Einzelbohlen vergrößert werden.

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)
Beschreibung und Beurteilung des Korrosionszustandes korrodierter Stahlspundwände

Höhenbereich	Anzahl Messquerschnitte	Bemerkungen
Spritzwasserzone (oberhalb MW bzw. MThw)	≥ 2	Mindestmesshöhe 1 m
Wasserwechselzone (zwischen MTnw und MThw)	2 - 4	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl abhängig von der Zonenhöhe gleichmäßig verteilt
Unterwasserzone (unterhalb von MW bzw. MTnw)	≥ 2	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl abhängig von der Zonenhöhe Mindesthöhe 1 m obere 4 m: Messabstand 0,5 m – 1,0 m unterhalb 4 m: Messabstand 1,0 m – 2,0 m

Tabelle 1: Empfohlene Verteilung der Messquerschnitte längs der Höhe einer Spundwandbohle

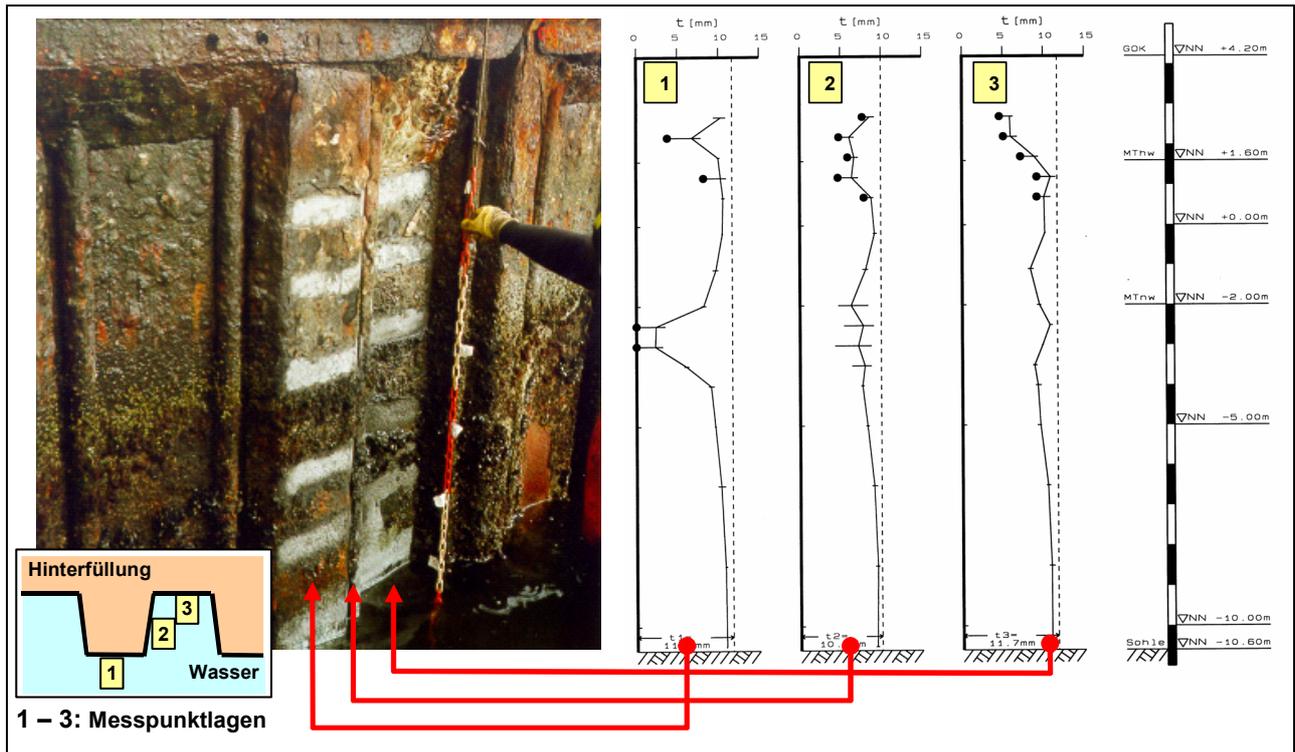


Bild 6: Darstellung der Messwerte pro Spundwandbohle und Messpunkt

Darstellung der Messergebnisse

Die Restwanddicken einer Messkampagne sollten zunächst jeweils pro Spundwandbohle und Messpunkt höhengerecht dargestellt werden (s. Bild 6). Die Gesamtheit aller Restwanddickenprofile vermittelt einen guten ersten Überblick über den Korrosionszustand des Bauwerkes.

Zusätzlich ist es sinnvoll, analog Profile zu erstellen, bei denen zusammenfassend für das gesamte Bauwerk

- die Restwanddicken,
- die Abrostungen (d.h. die Differenzen aus Ausgangswanddicke und Restwanddicke) sowie
- die Abrostungsraten (d.h. die Abrostungen dividiert durch das Alter der Spundwand zum Zeitpunkt der Wanddickenmessung)

höhengerecht dargestellt werden.

Bestimmung der Kennwerte der Korrosion

Die Auswertung einer Spundwanddickenmessung beinhaltet jedoch - über die reine Darstellung der Messwerte hinaus - auch eine Interpretation der Messwerte in Form einer Angabe der Kennwerte der Korrosion, d.h.

die *Mittlere* und *Maximale Abrostung* und *Abrostungsrate*. Aber selbst die sorgfältigste Durchführung einer Spundwanddickenmessung kann nicht garantieren, dass z.B. die geringste Restwanddicke bzw. der größte Abrostungswert des Bauwerkes tatsächlich gemessen wurden und dass sämtliche, möglicherweise existierenden Löcher gefunden wurden.

Aus diesem Grunde ist eine weitergehende statistische Auswertung der Messdaten - getrennt nach Korrosionszonen - zwingend erforderlich. Frühere Untersuchungen der BAW (Alberts & Heeling, 1997) haben gezeigt, dass sich pro Korrosionszone

- die *Mittlere Restwanddicke* bzw. *Abrostung* tiefenabhängig aus dem arithmetischen Mittel oder - genauer - aus dem Erwartungswert der Lognormalverteilung der Einzelmesswerte und
- die *Maximale Abrostung* a_{max} des Gesamtbauwerkes mittels der Formel für das Obere Toleranzintervall T_0 aus den Daten der *Niedrigwasserzone* (s. Bild 7)

berechnen lassen.

Dieses Verfahren wird seit mehreren Jahren von der BAW zur Bestimmung der Maximalen Abrostung und Maximalen Abrostungsrate eines Spundwandbauwerkes angewendet und hat sich seitdem in der Praxis bewährt. Es hat jedoch einen Nachteil: die Festlegung der Niedrigwasserzone, d.h. des Bereiches höchster Abrostungen unmittelbar über- und unterhalb der MW bzw. (in Tidegewässern) der MTnw-Linie, ist eine subjektive Festlegung des jeweiligen Gutachters anhand der gemessenen Restwanddickenwerte.

Innerhalb jeder Korrosionszone bilden die Abrostungsdaten - typisch für natürliche Wachstumsprozesse - eine lognormalverteilte Grundgesamtheit. Dies bedeutet nicht, dass die Abrostungen innerhalb einer Korrosionszone in etwa konstant sind, vielmehr besteht eine Tiefenabhängigkeit, die sich als Exponentialfunktion darstellen lässt. Die Mittlere Abrostung kann deshalb allgemein nach der Formel

$$\text{Mittlere Abrostung} = b_1 \cdot e^{b_2 \cdot \text{Tiefenwert}} \quad (1)$$

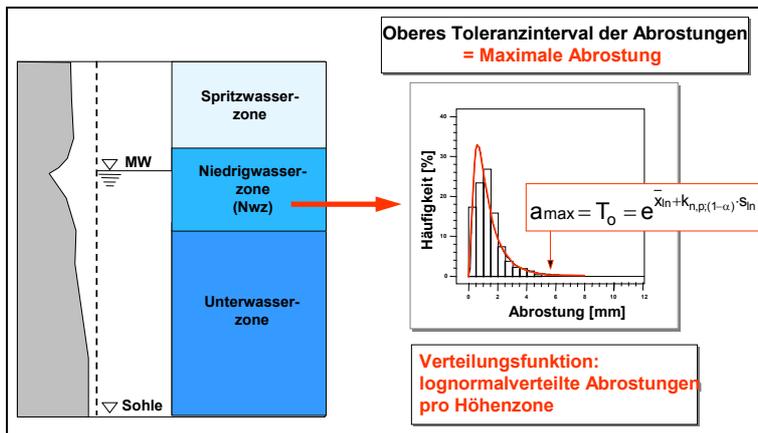


Bild 7: Berechnung der Maximalen Abrostung

Als Ergebnis des o.g. EU-Projektes (ECSC, 2005) wird hier deshalb eine praktikable Methode vorgestellt, um so die Kennwerte der Korrosion objektiver als bisher aus den Messwerten ableiten zu können:

Abweichend von der gängigen Praxis (z.B. EAU, 2004) wird die Niedrigwasserzone nicht mehr als eigenständige Korrosionszone betrachtet (und wurde deshalb auch in der Tabelle 1 nicht berücksichtigt). Stattdessen wird die Spundwand längs ihrer Höhe in folgende, eindeutig definierte Korrosionszonen unterteilt (für Gewässer ohne Tideeinfluss s. Bild 8):

- die *Spritzwasserzone* oberhalb MW bzw. MThw,
- in *Tidegewässern* die *Wasserwechselzone* zwischen MThw und MTnw sowie
- die *Unterwasserzone* unterhalb MW bzw. MTnw

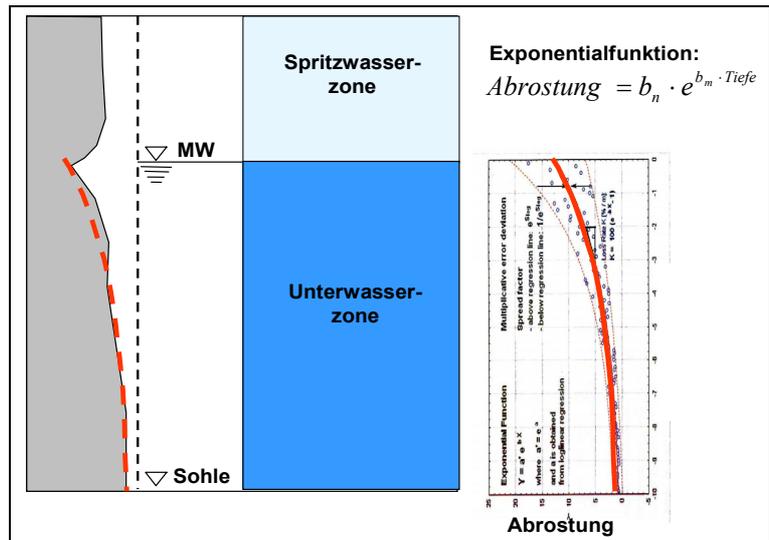


Bild 9: Berechnung der Mittleren Abrostung

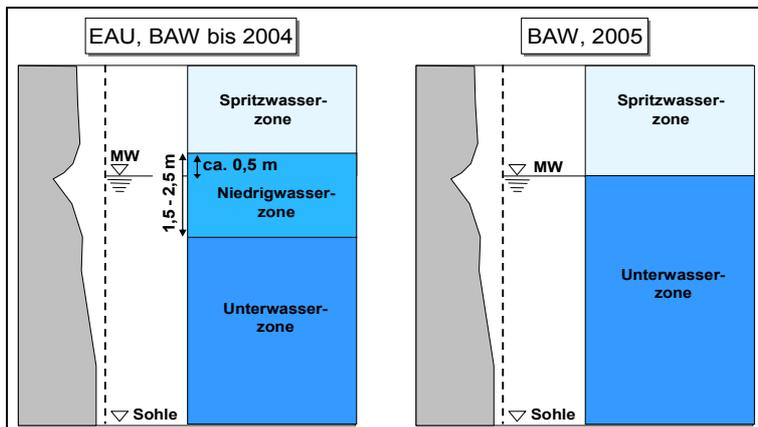


Bild 8: Neufestlegung der Benennung der Korrosionszonen

berechnet werden, wobei die Regressionskoeffizienten b_1 und b_2 mittels einer Regressionsanalyse aus den Einzelwerten einer Restwanddickenmessung pro Korrosionszone zu ermitteln sind.

Bild 9 zeigt, dass der Verlauf der Exponentialfunktion der in der Unterwasserzone gemessenen Abrostungswerte auch die hohen Abrostungen im zuvor als *Niedrigwasserzone* gekennzeichneten Tiefenbereich zutreffend wiedergibt und dass zur Berechnung der Mittleren Abrostung deshalb eine weitere Unterteilung der Zone unterhalb MW (bzw. MTnw) weder erforderlich noch sinnvoll ist.

Die gezielte Auswertung einer Vielzahl von Restwanddickenmessungen ergab jedoch

auch, dass allgemein bei Spundwänden unterhalb einer sog. *Basistiefe* von 4 m unter MW (bzw. MTnw) keine Tiefenabhängigkeit der Abrostungen mehr feststellbar ist (*Basiskorrosion*, s. Bild 10, nächste Seite).

Die Maximale Abrostung lässt sich durch Erweiterung der Exponentialfunktion (1) wie folgt nach Formel (2) tiefenabhängig aus den Daten einer Restwanddickenmessung berechnen:

$$\text{Maximale Abrostung} = b_1 \cdot e^{b_2 \cdot \text{Tiefenwert}} \cdot e^{s_{in} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}}$$

mit s_{in} = Standardabweichung der logarithmierten Daten
 n = Anzahl der Daten (2)

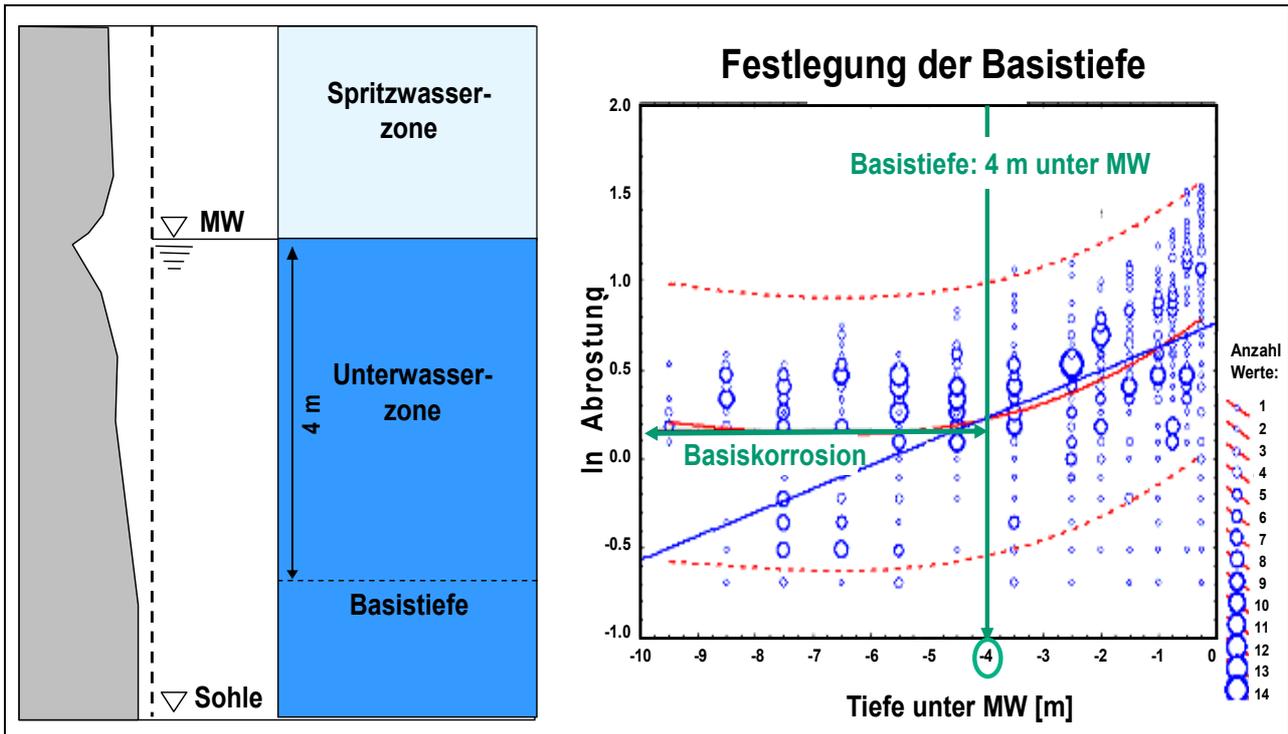


Bild 10: Basistiefe und Basiskorrosion

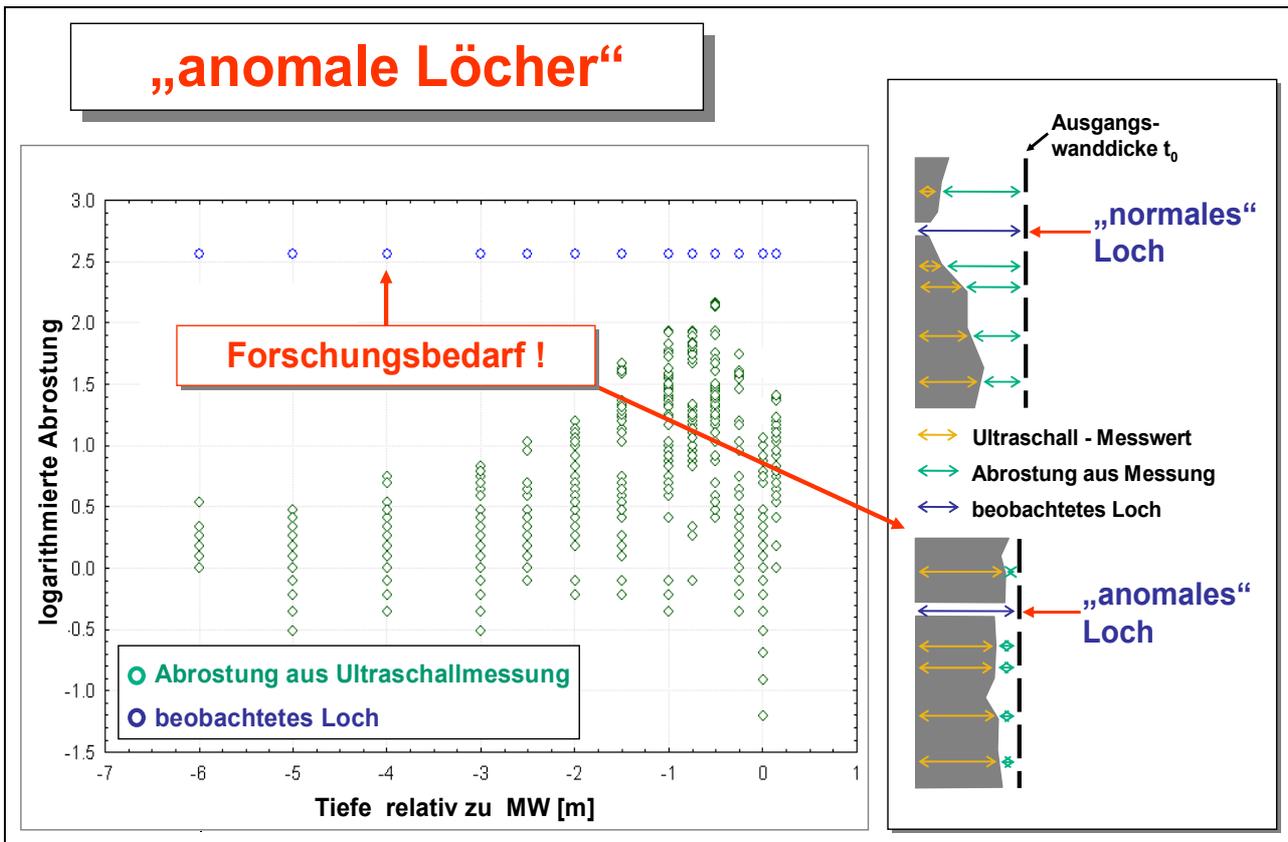


Bild 11: Anomale Löcher

Ist die nach Formel (2) prognostizierte Maximale Abrostung größer als die Ausgangswanddicke der Spundwand, so ist mit Durchrostungen zu rechnen - auch wenn im Rahmen der Inspektion noch keine Löcher gefunden wurden.

Als weiteres Ergebnis des EU-Projektes wurde festgestellt, dass die Mehrzahl der bei Spundwanddickenmessungen beobachteten Löcher keinen (statistischen) Bezug zu den gemessenen Restwanddicken haben und

im statistischen Sinne offensichtlich nicht zur gleichen Grundgesamtheit gehören (Bild 11).

Daraus folgt, dass diese Löcher eine andere Ursache als die „normalen“ korrosiven Wanddickenverluste haben - wahrscheinlich sind sie Ergebnis lokal begrenzter, mikrobakterieller Prozesse - und dass sie sich deshalb (im Gegensatz zu den „normalen“ Löchern) nicht mittels einer statistischen Analyse aus den gemessenen Restwanddicken prognostizieren lassen.

Hier besteht deshalb weiterer Forschungsbedarf: die BAW plant derzeit eine Untersuchung der Ursachen mit dem Ziel, eine Methode zur Prognose auch von anomalen Löchern zu entwickeln.

Literatur

ALBERTS, D. & B. SCHUPPENER (1991): Comparison of ultrasonic probes for the measurement of the thickness of sheet pile walls. Field Measurements in Geotechnics (FMGM 1991, Oslo), Sørum (ed.), Balkema, Rotterdam

ALBERTS, D. & A. HEELING (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden. Statistische Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“. Häfen und Wasserstraßen. EAU 2004. 10. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin

ECSC (2005): European Coal and Steel Community: Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final Report., Contract Number 7210-PR/317 (01-F6.04)

Verfasser

Dipl.-Geol. Anne Heeling
Referat Geotechnik Nord
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), DSt Hamburg
Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg
Tel.: 040 81908 – 367
E-Mail: anne.heeling@baw.de

Dipl.-Ing. Dirk Alberts (†)