

Binnenwasserstraßen – Entwurf, Betrieb, Unterhaltung (1.2)

Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden

Dr.rer.nat. Günter Binder

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl.-Geol. Anne Heeling

Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

Dr.-Ing. Ralf Uerkvitz

StatSoft (Europe) GmbH, Hamburg

Zusammenfassung

Die Kenntnis von Abrostungsraten von Spundbohlen ist eine wichtige Größe für die Planung von Spundwandbauwerken. Daran bemessen sich die zu ergreifenden Schutzverfahren (Beschichtung oder/und Elektrochemischer Schutz) wie auch die prognostizierte Nutzungsdauer. Eine grobe Einschätzung der Abrostung ist einerseits durch DIN-Verfahren und andererseits mit Hilfe von Abrostungskurven durch die Auswertung umfangreichen Datenmaterials gegeben. Mit den vorgelegten Untersuchungen wurde über die Korrosionsmechanismen hinaus versucht, die Einflussparameter der Korrosion zu erfassen und damit die Vorhersage über die Abrostung zu präzisieren. Das Ergebnis umfangreicher statistischer Auswertungen zeigt, dass neben der Zeit der Einwirkung (Alter), externe Einflüsse (Wasserbeschaffenheit, Tide & Strömung, Anlegestelle) auch intrinsische Eigenschaften des Baustahls (Stahltyp entsprechend seines Herstellungsprozesses) wesentliche Bedingungen für die Abrostung sind. Diese kann unter Berücksichtigung dieser Variablen mittels einer Polynomfunktion (tiefenabhängig) beschrieben und berechnet werden.

1. Einführung und Problemstellung

Spundwandbauwerke sind grundsätzlich der Korrosion ausgesetzt. Nicht selten sind Spundbohlen bereits nach 20 Jahren durchgerostet, u.a. auch in niedrigsalinarem Gewässer. Dabei sind zwei maßgebliche Einflüsse festzuhalten:

- Herausbildung eines Korrosionselementes
- Salzgehalt des Immersionsmediums

Bei Untersuchungen von Schäden im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) konnte auch häufig mikrobiell bedingter Lochfraß, sowohl von der Wasserseite als auch von der Rückseite beobachtet werden.

Ein weiterer Faktor, welcher die Korrosion beeinflussen sollte, ist die Zusammensetzung des Stahles. Häufig wird von Spundwänden älterer Produktion mit angeblich höherem Korrosionswiderstand berichtet.

Umfangreiche Untersuchungen von Restwanddickenbestimmungen und deren statistische Verwertbarkeit wurden in der Vergangenheit bereits vorgelegt (Alberts & Heeling, 1997). Es wurden dabei einerseits Korro-

sionszonen deutlich herausgestellt und andererseits abweichende Korrosionsraten in unterschiedlichen Gewässertypen festgestellt. Die weite Streuung der Resultate ermöglichte allerdings keine genaue Vorhersage der Abrostungsgeschwindigkeit.

Für die WSV ist es wichtig, zukünftig, ausgehend von einer vorgesehenen Standzeit, die Dicke der Spundwandbohlen optimal zu wählen bzw. eine Entscheidungshilfe zwischen Abrostungszuschlag und Korrosionsschutz durch Beschichtung zu bekommen.

Die Untersuchungsergebnisse basieren auf einem von der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl (ESCS) genehmigten Untersuchungsvorhaben (Bemessung von Stahlspundwänden) sowie einem Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

2. Untersuchungsmethoden

Auf Grund der festgestellten großen Streuungen bei der Korrosionsgeschwindigkeit von Spundwandbohlen innerhalb von Wassermediengruppen ist erkennbar, dass weitere Einflussfaktoren, z.B. über den Salzgehalt hinaus, die Korrosion mitgestalten. Ziel der Untersuchung ist es, die Einflussfaktoren der Korrosion zu erfassen. Dazu wird zunächst versucht, die Abrostungswerte (umfangreiches Datenmaterial liegt bei der BAW im Referat K1 der Dienststelle Hamburg vor) von Bauwerken in Bezug zur Salinität der Immersionsmedien zu stellen. Durch Bestimmung der Rostphasen (IR-Spektroskopie, Röntgenbeugung) kann ein Einfluss der Mikroorganismen möglicherweise nachgewiesen bzw. ausgeschlossen werden. Darüber hinaus sollen Gefüge und Abrostungsverhalten älterer Spundwandstähle den „Jüngeren“ gegenübergestellt werden.

Das Untersuchungsprogramm berücksichtigte 41 Spundwandbauwerke mit einer breiten Varietät der

- Salzgehalte (Kategorie: Süß-, Brack- und Meerwasser)
- Altersstruktur der Bauwerke (Kategorien: < 20, 20 bis 30 und > 30 Jahre)
- Nutzung der Spundwand (z.B. als Anlegestelle).

Grundsätzlich wurden U-Profile ohne Korrosionsschutz ausgewählt. Von allen Spundbohlen wurden Stahl- und Rostproben genommen

3. Ergebnisse

3.1 Chemische Zusammensetzung der Immersionsmedien

Es wurden Messungen zur Untersuchung des Chemies der Gewässer im Winter 2003 und im Sommer 2004 durchgeführt.

Die gravierendsten Auffälligkeiten und Tendenzen seien im Folgenden kurz qualitativ beschrieben:

Durch die chemischen Wasseranalysen an den ausgewählten Bauwerken konnte eine Zuordnung in drei Gruppen (Meer-, Brack- und Binnenwasser) erstellt werden.

Die gemessenen Wassertemperaturen bestätigen die jahreszeitlich bedingten Unterschiede der Probenentnahme. Auffallend ist dabei, dass Abstände der Som-

mer- und Wintertemperatur bei allen drei Gewässertypen nahezu identisch sind (Süßwasser ~ $\Delta 17^{\circ}\text{C}$, Brack- und Meerwasser jeweils ~ $\Delta 19^{\circ}\text{C}$).

Jahreszeitlich bedingte Konzentrationsänderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Chlorid: Im Süßwasser liegen die Konzentrationen im Sommer gegenüber Winter durchschnittlich deutlich höher, teilweise Faktor 4! Brack- und Meerwasser weisen hingegen nur geringe Erhöhungen im Sommer auf (Ausnahmen siehe Anmerkungen).

Sulfat: Im Süß- und Meerwasser liegen keine bzw. nur geringe saisonale Konzentrationsänderungen vor. Hingegen weist das Brackwasser im Sommer meist höhere Konzentrationen auf (Faktor 1,1 bis 3).

Calcium, pH-Wert und Säurekapazität: Meist sind die Konzentrationen und Werte in den Jahreszeiten gleich hoch. Lediglich im Brack- und Süßwasser deuten sich gelegentlich Erhöhungen im Sommer an.

Wasseraggressivität (Wo): Aus den oben angeführten Parametern wurden die Wo-Werte beider Messserien gemäß DIN 50929 berechnet und gegenübergestellt. Ausgeprägte Tendenzen gibt es nicht. Es zeigte sich allerdings, dass im Süßwasser die Sommerwerte wesentlich breiter streuen als im Winter (ΔWo von 4 auf 8,5), während für die Bereiche des Brack- und Meerwassers das Gegenteil der Fall ist (ΔWo von 6 bzw. 7 nach 3,5 bzw. 4,5). Als Ursache der Schwankungen ist vor allem der Wechsel der Konzentration von Chlorid anzuführen.

Die **elektrische Leitfähigkeit** stellt als Summenparameter ein Maß für den Gesamtionenanteil der Wässer dar. Insgesamt sind deutliche jahreszeitliche Schwankungen in der Gesamtheit der Messergebnisse zwischen Sommer und Winter zu registrieren (Faktor: 0,5 bis 2,5!).

Das **Redoxpotential** gilt als Maß der Gesamtheit der ablaufenden reduzierenden und oxidierenden Reaktionen. Tendenziell ist das Potential im Sommer meist geringfügig erhöht. Dabei ist dieser „Trend“ im Süßwasser bis zu Faktor 2 ausgeprägt.

Die **Sauerstoffkonzentration** ist im Winter geringfügig erhöht. Hingegen ist der Sauerstoffsättigungsgrad im Sommer, wegen Temperaturabhängigkeit, nicht unerwartet höher.

Die Konzentrationen des **löslichen organischen Kohlenstoffes** (DOC) sind in allen drei Gewässertypen im Winter deutlich erhöht. Möglicherweise hat dies mit der (eingeschränkten) biologischen Aktivität der Meeresbewohner bzw. Pflanzen bei niedrigeren Temperaturen zu tun.

Die **Nitratgehalte** im Meerwasser lagen im Sommer unter der Nachweisgrenze. Brackwasser ist dadurch gekennzeichnet, dass die Konzentrationen in den Jahreszeiten stark schwanken. Bei den Binnengewässern ist im Winter überwiegend eine Nitratkonzentrationserhöhung festzustellen. Hier dürfte der Stoffumsatz einschließlich Denitrifikation aufgrund der Temperaturen erheblich eingeschränkt worden sein. Andererseits können auch erhöhte anthropogene Zufuhren die Ursache sein. Zusammen mit den Temperaturen bilden sie den „Verschmutzungsgrad“ eines Gewässers ab.

Die **restlichen Messparameter** (Phosphat, Säurekapazität, etc.) liegen hinsichtlich der Sommer- und Winterwerte in ähnlichen Größenordnungen vor.

Tiefenprofilierung

In der Sommer-Messkampagne 2004 wurden Tiefenprofilierungen durchgeführt. Hier wurden vor allem Zunahmen der Sauerstoffgehalte nach „Rühren“ mittels Schiffspropeller festgestellt. Nach einer bestimmten Warte- bzw. Regenerationszeit stellten sich die Ausgangsverhältnisse wieder ein.

Die generelle Probennahme bzw. Messung erfolgte jeweils in Viertelschritten zur Tiefe (oberflächennahe Messung, sowie 25 %, 50 % und 75 % der Tiefe). Die hier erzielten Resultate zeigen grundsätzlich niedrige Gradienten. Lediglich Lokaltäten, deren Gewässer eine Art Beckenstruktur aufweisen (z.B. „abgeschlossene“ Häfen) und damit schlecht durchströmt sind, bilden ein Konzentrationsgefälle aus. Im Sommer-Winter-Vergleich zeigt z.B. Sauerstoff im Sommer eine deutliche Verarmung zur Tiefe hin. Eventuell ist hier die Sauerstoffzehrung durch höhere Wassertemperaturen und damit verbundenes Wachstum größer als im Winter. Die Temperaturen selbst sowie der pH-Wert zeigen jeweils eine geringfügige Abnahme mit der Tiefe. Diese Tendenz ist überwiegend nur im Sommer erkennbar. Bei der Lokaltät Wilhelmshaven (Marinearsenal, Ostkaie) lagen die kühleren Schichten im Winter obenauf (Atmosphäreinfluss).

Die Salzgehalte verhalten sich nicht eindeutig. So ist in Wilhelmshaven eine Abnahme zur Tiefe hin nur im Winter festzustellen, während in Travemünde im Winter die ansatzweise vorhandene Zonierung egalisiert wird.

Wasserchemismus und Abrostung

Abrostungen von Spundwänden wurden im Vergleich zur Salinität der Immersionsmedien und dem Alter der Bauwerke betrachtet. Dabei wurde zunächst ein Zusammenhang mit den Abrostungsraten ($\mu\text{m}/\text{Jahr}$) für die ausgewählten Bereiche der Salinität (Wo) bestätigt. Zugleich verringern sich aber die Abrostungsraten mit der Nutzungsdauer.

Da aber Standzeit (Aufbau von schützenden Rostschichten) und Salinität von Einfluss sind, wurde mittels 3-D Darstellung versucht die Abrostung damit in Zusammenhang zu stellen. Es zeigte sich jedoch, dass hier noch zu große Ungenauigkeiten vorliegen. Eine Verbesserung der Zuordnung konnte unter Einbeziehung der O_2 -Konzentration erreicht werden.

3.2 Rostuntersuchungen

Die Rostmineralisation wurde mittels Röntgenbeugung (Diffraktometrie) bestimmt. Möglicherweise lassen sich hiemit Rückschlüsse auf die spezielle Ursache und den Ablauf der Korrosion erklären. Darüber hinaus wurden auch noch chemische Untersuchungen zur Bestimmung der S- und C-Gehalte durchgeführt.

Quarz (SiO_2) wird als Geschiebetransportgut eingestuft. Es ist daher stimmig, wenn Quarz nur in der Unterwasserzone (UWZ) und Niedrigwasserzone (NWZ) der Spundbohlen anzutreffen ist. Goethit ($\alpha\text{-FeOOH}$) und Magnetit (Fe_3O_4) sind „Durchläuferminerale“ des Rostes und kommen daher überall vor. Akaganait ($\beta\text{-FeOOH}$) ist eine Modifikation des Rost-

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)
 Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden

minerals Goethit mit der Zusatzinformation einer chloridinduzierten Korrosion. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Vorkommen in den Wasserzonen (UWZ, NWZ) salzhaltiger Gewässer.

Siderit (FeCO_3) ist durch das zweiwertige Eisen dem reduktiven Bereich bei gleichzeitig hohem CO_2 -Partialdruck zuzuordnen. Erfahrungsgemäß kann es, zusammen mit Sulfiden und Sulfaten, als ein Indikator für Mikrobiell Induzierte Korrosion (MIC) dienen. Die auffällig deutlichen Intensitäten von Siderit für bestimmte Bauwerke sind in Tabelle 1 aufgelistet. Demzufolge ist für diese Lokalitäten MIC nicht ganz auszuschließen.

Green rust ($\text{Fe}^{++}/\text{Fe}^{3+}$ -Hydroxide) lässt sich formelmäßig nicht genau erfassen, da neben den Hydroxiden noch Karbonat- und Sulfatlagen vorkommen können. Es wird als Übergangsmaterial im $\text{Fe}(\text{OH})_2$ - $\text{Fe}(\text{OOH})$ -System (zweiwertiges/dreiwertiges Eisen) gesehen. Das Vorkommen ist auf eine Probe (s. Tabelle 1) begrenzt.

Mineral/ Zone	Quarz	Goethit/ Magnetit	Akaganeit (β - FeOOH)	Siderit (FeCO_3)	Green rust ($\text{FeOH}_2/\text{OH}_3$)
Unterswasser	+	+	Salzwasser	Nr. 10, 130, nn5, 230	Nr. 122
Niedrigwasser	+	+	Salzwasser	Nr. 17	-
Spritzwasser	-	+	-	-	-

+ = gefunden; - = nicht nachgewiesen
 Nr. = Bauwerksnummer; 10, 130, 122 für Wilhelmshaven; 17 für Kiel; nn5, 230 für Travemünde.

Tabelle 1: Verteilung von Rostmineralen

Durch Korrosion wird generell Eisen weggeführt wodurch sich Kohlenstoff und Schwefel anreichern können. Darüber hinaus können beide Elemente durch Ausfällungen (Calcit, Gips) aus dem Wasser angelagert werden. Schwefel spielt ferner bei MIC eine entscheidende Rolle. Bei den Untersuchungen werden Schwefel und Kohlenstoff jeweils als Gesamtgehalte bestimmt, ohne Kenntnis der vorliegenden Form (elementar, als Oxid oder als Salz!).

In den wasserliegenden Zonen (UWZ/NWZ) der Binnengewässer sind, im Unterschied zu Brack- und Meerwasser (ca. 3-4 M.-% im Mittel!), kaum Anreicherungen an Schwefel (S) festzustellen. In den Spritzwasserzonen aller drei Wassertypen liegen die S-Gehalte meist unter 0,15 M.-%.

Gewässer	Zone	C [M.-%]	S [M.-%]
Binnenwasser	Unterswasser	~ 3	≤ 1
	Niedrigwasser	~ 3	≤ 1
	Spritzwasser	0,6	0,1
Meerwasser	Unterswasser	~ 6	~3,5
	Niedrigwasser	2,5	~ 4
	Spritzwasser	1,5	0,15
Brackwasser	Unterswasser	2,5	~ 3,5
	Niedrigwasser	2,0	~ 3
	Spritzwasser	0,9	≤ 0,1

Tabelle 2: Mittlere Kohlenstoff- und Schwefelgehalte von Rostproben

Dies spricht weniger für eine Sulfat-Ausfällung als für einen Einbau bzw. aktive Beteiligung bei der Rostbildung.

Kohlenstoff (C) reichert sich in allen Wassertypen und -zonen, hier besonders in der UWZ und NWZ, an. Meist dürfte es sich um Ausfällungen von Karbonatphasen (Calcit, Aragonit) handeln (s. Tabelle 2).

Erstaunlich ist, dass Binnengewässerproben in der UWZ und NWZ bis zu 1,7 M.-% bzw. 3,1 M.-% Schwefel aufweisen können.

3.3 Stahluntersuchungen

Chemische Analytik

Die Stahlproben aller 41 ausgewählten Bauwerke (Doppelproben) wurden chemisch analysiert und gefügekundlich untersucht. Bei wenigen Proben der Doppelbestimmung wurden Abweichungen gefunden. Die als relevant erscheinenden Elementverteilungen werden im Folgenden kurz beschreiben:

Phosphor (P) wird häufig als Ursache für verlangsamte Korrosion gesehen. Insgesamt haben lediglich sieben Proben den Grenzwert von 0,055 M.-% P überschritten.

Bild 1 zeigt bei älteren Stähle

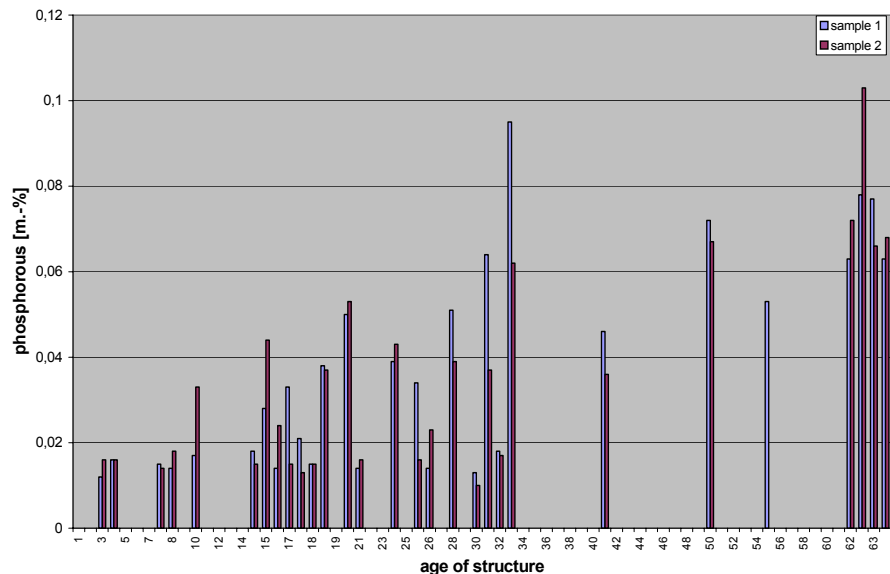


Bild 1: Phosphorgehalt im Zusammenhang zum Alter der Spundbohlen

erhöhte P-Gehalte (0,03 M.-% bis 0,1 M.-%) an. Bei der Altersgruppe jünger als 32 Jahre tritt deutlich erniedrigter P-Gehalt (< 0,02 M.-%) auf. Daraus kann geschlossen werden, dass zwei Produktionsgruppen von Spundbohlenstählen (alte Stähle hoher und jüngere Stähle niedrigerer P-Gehalte) existierten, teilweise auch zeitlich nebeneinander.

Die Siliziumkonzentration (Si) ist ebenfalls ein Hinweis auf den Herstellungsprozess (unberuhigt: $\text{Si} < 0,20$ M.-%; beruhigt: $\text{Si} > 0,20$ M.-%). Demzufolge sind die untersuchten Stähle, mit Ausnahme von BW-Nr. 127, nn10, 222, 275, 41 und 14 beruhigt vergossene Stähle.

Mechanische Eigenschaften

Zur Vervollständigung der Daten, wie auch zur Prüfung der Zuordnung von Spundbohlenstahl wurden noch Prüfungen der Zugfestigkeit und der Streckgrenze durchgeführt.

Hinsichtlich der Zuordnung kann gesagt werden, dass die meisten der untersuchten Stähle die geforderten Werte für Streckgrenze und Zugfestigkeit eines (modernen) S270GP (nach DIN EN 10248-1) erreichen.

Gefügeuntersuchungen

Es wurden orientierte Schlitze angefertigt, mikroskopiert und eine Korngrößenvermessung durchgeführt. Nach den Überlegungen sollten Gefügemerkmale Einfluss auf die Korrosion haben. Denkbar sind hier die

- Anordnung der Körner (Zeiligkeit),
- Einschlüsse sowie die
- Korngröße.

Die Korngröße wurde über die Auszählung der Kornanzahl über eine definierte Weglänge bestimmt und nach ASTM bewertet. Je höher demzufolge die Kennzahl ist desto kleiner ist die mittlere Korngröße. Die Anschnitte der Stähle zeigen unter dem Mikroskop ausschließlich das erwartete ferritisch-perlitische Gefüge, welches typisch für Baustähle ist (s. Bild 2).

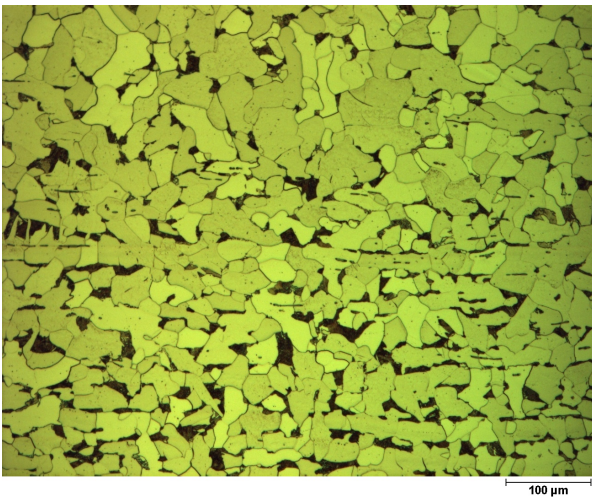


Bild 2: Typisches ferritisch-perlitisches Gefüge einer Stahlprobe

Stromdichte-Potential-Messverfahren

Mit Hilfe von Stromdichte-Potential-Messungen wurden Stahlproben von Spundbohlen in künstlichem Meerwasser untersucht. Der bei variablen Potentialen erzielte Korrosionsstrom konnte dabei über die Berechnung, entsprechend dem Faraday'schen Gesetz, in Korrosionsraten umgerechnet werden.

Es wurden Stähle von vier Spundbohlen zur

BW-Nr.	Alter (a)	P [M-%]	Si [M-%]	CEV [M-%]	ASTM-Korngr.	„Stahltyp“	Korrosionsrate (mm/a)
67	8	0,014	0,420	0,46	10,6	„modern“	0,18 (±0,01)
222	32	0,018	0,008	0,30	8,6	„submodern“	0,17 (±0,06)
275	63	0,065	0,002	0,23	8,3	„alt“	0,19 (±0,01)
41	33	>0,07	0,002	<0,30	8,2	„alt“	0,25 (±0,04)

Tabelle 3: Messparameter von vier getesteten Stählen

vergleichenden Untersuchung ausgewählt (Tabelle 3). Dabei zeigten sich z.T. deutliche Unterschiede in den gemessenen Korrosionsraten (mm/Jahr), die sich folgendermaßen interpretieren lassen:

- „Alte Stahltypen“ (gekennzeichnet durch hohen P- und niedrigen Si-Gehalt) der Proben BW-Nr. 41 und 275 neigen zur stärkeren Abrostung.
- „Neue Stahltypen“ (BW-Nr. 67) sind beruhigt vergossen (hoher Si-Gehalt) und zeigen geringere Korrosion.
- Kleine Korndurchmesser (reziprok zur ASTM-Zahl) scheinen die Korrosion einzuschränken (BW-Nr. 67).
- Ein Einfluß von Legierungsbestandteilen ist nicht auszuschließen: Stähle mit niedrigem Kohlenstoffäquivalent ($CEV = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$) erscheinen korrosionsanfälliger (Tabelle 3).

Die vergleichende Überprüfung sogenannter alter Spundwände mit neueren Spundbohlen widerspricht nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen der häufig verbreiteten Ansicht der größeren Korrosionsstabilität von alten Spundbohlen (u.a wegen ihres höheren Phosphorgehaltes).

4. Statistische Auswertungen

Zunächst wurde mit Hilfe der linearen Regression versucht, Einflussparameter nachzuweisen. Mit Sicherheit können dabei das Bauwerksalter und die Salzkonzentration (stellvertretend: W_o) der dazugehörigen Immersionsmedien als wesentliche Größen genannt werden. Jedoch zeigen alle Darstellungen (s. z.B. Bild 3), dass damit alleine der Korrosionsfortschritt nur unzureichend beschrieben werden kann.

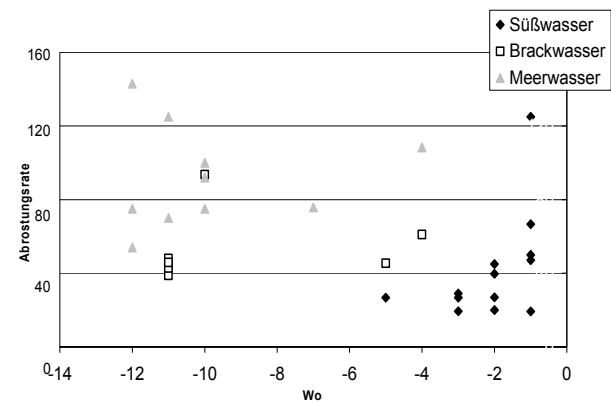


Bild 3: Abrostungsraten (µm/Jahr) im Zusammenhang mit der Wasseraggressivität (W_o)

Die Suche nach weiteren Einflussparametern und deren Einbindung ist nur mit aufwendigen Methoden statistischer Verfahren zu bewerkstelligen. Durch die Datenbehandlung mittels multifunktionaler Faktoranalyse konnte zunächst herausgefunden werden, dass die Korrosion grundsätzlich mit

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)
 Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden

- einer Basiskorrosion b_0 und
- einen tiefenabhängigen Korrosionsgradienten b_1

beschrieben werden kann. Dadurch ist es möglich, dass die spezifische Korrosion eines jeden Punktes entlang einer Spundbohle berechnet werden kann. Dabei kann grundsätzlich weiterhin in die drei bekannten Korrosionszonen unterteilt werden:

- b_0 und b_1 für den Bereich unterhalb des Tideniedrigwassers
- b_2 und b_3 , sowie b_4 und b_5 für die Wasserwechselzone und
- b_5 und b_6 für die Spritzwasserzone

Die allgemeine Gleichung der Abrostung (y) wäre demnach:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + \dots + b_m \cdot x_m$$

Die einflussreichsten statistisch nachgewiesenen Parameter sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Aus den Resultaten der multifunktionalen Faktorenanalyse konnte eine Abrostungsformel gemäß (1) entwickelt werden (Uerkvitz, 2004). Der abgeleitete polynome Ausdruck gründet auf eine Basisabrostung b_0 im Unterwasserbereich und einen Korrosionsgradient b_1 , welcher die Abrostung über die Spundwandhöhe beschreibt.

$$(1) \quad \text{mittlere Abrostung} = b_0 \cdot e^{b_1(\text{Tiefe} - \text{Basistiefe})}$$

Überprüfungen haben gezeigt, dass die gerechneten Beispiele gut mit den tatsächlich vorgefundenen Korrosionsraten übereinstimmen.

5. Schlussfolgerungen

Starke Streuungen bei der Erstellung von Abrostungskurven unter Einbeziehung z.B. des Alters oder des Milieus haben gezeigt, dass damit eine Abrostungsvorhersage nur unzureichend getroffen werden kann. Mit der Erhebung und Zusammenstellung umfangreichen Datenmaterials wurde die Basis für die Ermittlung der maßgeblichen Einflussfaktoren geschaffen. Mit unsteilen Exponentialfunktionen kann über die bisherigen Tiefengrenzen hinweg die Abrostung von Spundbohlen in jeder Höhenlage zum Wasserstand berechnet werden. Kontrollberechnungen haben gezeigt, dass man auch bei Standzeiten über 20 Jahre mit einer Abweichung von $\leq 0,5\text{mm}$ die Abrostung vorausberechnen

kann.

Die elektrochemischen Laboruntersuchungen (Stromdichte-Potential-Verfahren) zur Ermittlung der Korrosionsbeständigkeit an Probestücken zeigten hinsichtlich der Abrostung umgekehrte Tendenzen gegenüber der Natur. Möglicherweise stellen Laborresultate nur die Anfangskorrosion von Stählen fest, wobei Langzeitmechanismen, wie z.B. Schutzschichtenbildung durch Rostmineralbildung, nicht berücksichtigt werden.

Die umfangreichen Auswertungen der Vielzahl von Daten haben auch gezeigt, dass Durchrostungen von Spundbohlen nicht immer mit der maximalen Abrostung (z.B. in der Tideniedrigwasser-Zone) zusammenfallen, sondern „unvermittelt“ in größeren Tiefen auftreten können. Diese so genannten anomalen Löcher sind Objekt weiterer Untersuchungen.

Literatur

ALBERTS, D. & HEELING, A.: Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden; Mitteilungsblatt der BAW 75 (1997)

UERKVITZ, R.: Einflussfaktoren der Spundwandkorrosion; unveröffentlichter Bericht, Hamburg (2004)

BINDER, G.: Bewertung der Korrosion von Spundwandkorrosion; Forschungsvorhaben Nr. 8159 bei der BAW (2005)

Verfasser

Dr. rer. nat. Günter Binder
 Referat Stahlbau, Korrosionsschutz
 Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
 Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
 Tel.: 0721 9726 – 3260
 E-Mail: guenter.binder@baw.de

Dipl.-Geol. Anne Heeling
 Referat Geotechnik Nord (K1)
 Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), DSt Hamburg
 Wedeler Landstrasse 157, 22559 Hamburg
 Tel.: 040 81908 – 367
 E-Mail: anne.heeling@baw.de

Dr.-Ing. Ralf Uerkvitz
 StatSoft (Europe) GmbH
 Hoheluftchausee 112, 20253 Hamburg
 Tel.: 040 468866 – 0
 E-Mail: info@statsoft.de

	Basisabrostung b_0	Abrostungsgradient b_1	Abrostungsgradient b_6
Bereich (Tiefe/Zone)	$\geq 4\text{m/TNW}$	0 bis $>4\text{m/TNW}$	$\pm 0/\text{Spritzwasser}$
Sicherheit / Abweichung	83% / $\pm 0,6\text{mm}$	78% / $\pm 0,2\text{mm}$	80% / $\pm 2,0\text{mm}$
Alter	v	v	v
Stahltyp	v	v	v
Liegeplatz		v	v
Strömung	v		v
Tide	v	v	v
Gewässermilieu	v	v	v
Sre-O ₂ -Gehalt	v	v	
Salz-O ₂ -Gehalt			v
Säurekapaz. (saisonal)	v		
Verschmutzung (saisonal)		v	
Redox (Tiefengradient)		v	

TNW= Tideniedrigwasser; Verschmutzung = DOC, P, Temp. [°C]

Tabelle 4: Statistisch nachgewiesene korrosionsrelevante Parameter