

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Gabrys, Ulrike; Binder, Günter**

## **Bewertung der Korrosion von Spundwänden. FuE-Abschlussbericht A39510210108**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106999>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

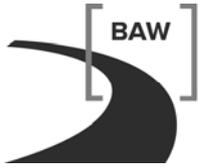
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): Bewertung der Korrosion von Spundwänden. FuE-Abschlussbericht A39510210108. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

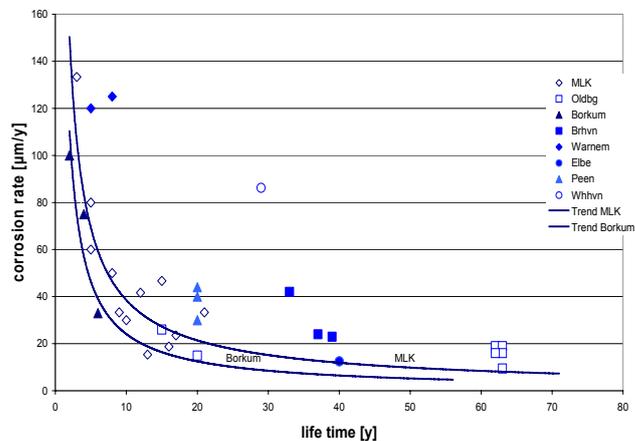


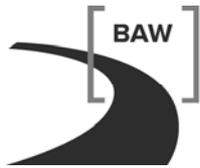
# FuE-Abschlussbericht

## Bewertung der Korrosion von Spundwänden

**A395 102 10108**

Corrosion of sheet piles





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

## **Bewertung der Korrosion von Spundwänden**

Auftraggeber: Bundesanstalt für Wasserbau

Auftrag vom: Antrag 2001 (F & E 8159)

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A395 102 10108

Aufgestellt von: Abteilung: Bautechnik  
Referat: Stahlbau und Korrosionsschutz  
Bearbeiter: G. Binder, U. Gabrys

Karlsruhe, 30. Juni 2011

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

## Zusammenfassung

In der Vergangenheit wurde bereits in verschiedenen Arbeiten der Zusammenhang der abnehmenden Abrostung der Spundwandbauwerke mit zunehmender Standzeit hergestellt. Darüber hinausgehend war es Ziel dieser Arbeit zu untersuchen, inwieweit sich Abrostungsraten wiederum mit der Aggressivität der die Spundwand umgebenden Gewässer in statistisch begründete Abhängigkeit stellen lassen.

Die Untersuchungen wurden auf der Grundlage von vorliegenden Abrostungsmessungen und aktuell gemessenen Wasserparametern durchgeführt. Mit der Verwendung der Bewertungszahl  $W_o$  für die Korrosivität von Gewässern nach DIN 90929 wurde die Möglichkeit geprüft, die Abrostungsraten (Abrostung/Anzahl der Jahre Standzeit) unterschiedlichster Spundwände mit unterschiedlichen Gewässertypen in ein Variationsdiagramm zu fassen. Durch die Einführung des Produkts der Abszisse aus  $W_o$  und Sauerstoffsättigung verbesserte sich die statistische Signifikanz. Eine weitere Erhöhung der statistischen Sicherheit trat ein, wenn Bauwerke unter 20 Jahre Standzeit, wegen ihrer abnorm hohen Abrostungsraten, eliminiert wurden. Die im Variationsdiagramm für verschiedene Korrosionszonen erstellten Ausgleichskurven gehorchten jeweils Exponentialgleichungen. Damit ist die Abrostung an Spundwandbauwerken zu berechnen bzw. auch dem Diagramm zu entnehmen, wenn der Chemismus bzw. die Aggressivität des Immersionsmediums vorab bestimmt und die vorgesehene Standzeit eingesetzt wird. Neben Mittelwertskurven wurden Vertrauensbereiche berechnet und grafisch dargestellt.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass unberuhigt vergossene („alte“) Stähle kein abweichendes Korrosionsverhalten gegenüber beruhigt vergossenen („modern“; hoher Si- und niedriger P-Gehalt) haben. Zudem konnten die Untersuchungen belegen, dass das Zulegieren von Cu keinen Vorteil hinsichtlich des Abrostungswiderstandes bringt.

Eine Überprüfung der in der DIN 90929 verwendeten Korrosionswahrscheinlichkeit auf Basis von  $W_o$  zeigt, dass die dort vorgeschlagenen Korrosionsraten den hohen Abrostungen der Niedrigwasserzonen bei Spundwandbauwerken entsprechen.

## Inhaltsverzeichnis

## Seite

1	Bewertung der Korrosion von Spundwänden (BAW 8159 bzw. A395 102 10108)	1
1.1	Einleitung und Fragestellung	1
2	Bisherige Ergebnisse	2
2.1	Stand der Forschung - Literatur	2
2.2	Beiträge zum ECSC-Forschungsvorhaben Nr. 7210 und deren Resultate	3
2.2.1	Chemische Zusammensetzung der Immersionsmedien	4
2.2.2	Untersuchungen der Rostprodukte	5
2.2.3	Stahluntersuchungen	5
2.2.4	Elektrochemische Untersuchungen	7
2.2.5	Korrosion an den Spundwandbauwerken	8
2.2.6	Herleitung einer Abrostungsformel	10
3	Resultate der Untersuchungen dieser Arbeit	12
3.1	Abrostungseinflüsse	12
3.1.1	Der Bezug der Abrostung zur Salinität des Wassers - frühere Untersuchungen	14
3.1.2	Bezug der Abrostungsraten zur Wasseraggressivität	15
3.1.2.1	Alter der Bauwerke	15
3.1.2.2	Salinität bzw. elektrische Leitfähigkeit	16
3.1.2.3	Die Stahlaggressivität des Wassers – die Korrosivität $W_0$	16
3.1.2.4	Der Einfluss von $W_0$ und Sauerstoff ( $O_2$ )	18
3.2	Weitere Beeinflussungen der Abrostungsraten	21
3.2.1	Wasseraggressivität im Sommer und Winter	22
3.2.2	Einfluss von Anlegestellen	22
3.2.3	Einfluss der Stahlerzeugnisse	24
3.3	Vertrauensbereiche der Abrostungskurven	24
3.4	Vergleich der Abrostungsraten mit DIN 50929	25
3.5	Betrachtung der Korrosivität unter verschiedenen Bedingungen	27
3.6	Einfluss der Spundwandstahltypen auf das Abrostungsverhalten	29
3.7	Anomale Löcher	31
4	Ausblick – Folgeforschung	31
5	Literatur	32

## Bildverzeichnis

## Seite

Abb. 1: Beziehung der Abrostung von Spundwänden zur Standzeit nach [2]	2
Abb. 2: Maximale Abrostung und Standzeit in Meerwasserzonen nach [3]	3
Abb. 3: Mehrgipfelige Verteilung des Produkts $W_o \times O_2$ (Sommerdaten)	4
Abb. 4: Stahlzuordnung auf Basis der P-Gehalte und der Alter (zum Zeitpunkt der Erhebung (2003))	6
Abb. 5: Stahlgefügebild (BW-Nr. 41; ASTM-Korngröße: 8,2) mit typischem perlitisch-ferritischen Gefüge; lineare Anordnung durch dunkle MnS-Züge.	7
Abb. 6: Von potentiodynamischen Messungen abgeleitete Korrosionsraten von vier Stählen	8
Abb. 7: Verteilung der Korrosionsraten der untersuchten Spundwandbauwerke (hier: UWZ)	8
Abb. 8: Korrosionsabtrag (oben) und Korrosionsraten (unten) in Abhängigkeit zur Standzeit (Meerwasser UWZ aus [1])	9
Abb. 9: Mittlere Abrostungsraten (UW) im Bezug zur Nutzungsdauer (Standzeit)	13
Abb. 10: Ausgleichskurven für Abrostungsraten (UWZ) unterhalb und oberhalb des Alters von 20 Jahren	14
Abb. 11: Abrostungsraten von Spundwandbauwerken (UWZ) in verschiedenen Gewässern	15
Abb. 12: Zusammenhang der Abrostung und der Leitfähigkeit des Immersionsmediums	16
Abb. 13: Zusammenhang von elektrischer Leitfähigkeit und $W_o$	17
Abb. 14: Korrosionsraten in Abhängigkeit vom $W_o$ -Wert (Unterwasserzone, alle Alter)	18
Abb. 15: Variation der $W_o$ und $O_2$ -Gehalte der untersuchten Gewässer (Sommerwerte)	19
Abb. 16: Korrosionsraten in Abhängigkeit vom $W_o \times O_2$ -Wert (UWZ, alle Alter)	19
Abb. 17: Korrosionsraten in Abhängigkeit vom $W_o \times O_2$ -Wert (UWZ, >21 Jahre)	20
Abb. 18: Abhängigkeit der Korrosionsrate von $W_o \times O_2$ (>21 Jahre, maximale Abrostung)	20
Abb. 19: Abrostungsraten in der UWZ mit (Rauten) und ohne Anlegestellen (Quadrate)	23
Abb. 20: Abrostungsraten in der NWZ mit (Rauten) und ohne Anlegestellen (Quadrate)	23
Abb. 21: Korrosionsraten in Abhängigkeit vom $W_o \times O_2$ -Wert (UWZ, >21 Jahre) (Dreiecke: Beruhigt vergossene „moderne“ Stähle)	24
Abb. 22: Ausgleichskurve mit Vertrauensbereichen der Abrostungsraten	25
Abb. 23: Mittlere Abrostungsraten – Lage der DIN-Werte im Niedrigwasserbereich	26
Abb. 24: Maximale Abrostungsraten – Lage der DIN-Werte im Niedrigwasserbereich	27
Abb. 25: Abrostungslinien über die Tiefe zweier unterschiedlicher Stahltypen (jeweils OW)	30

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Verteilung von Rostmineralen	5
Tabelle 2: Vergleich der Abrostungen in Seewasser (in [mm] nach 60 Jahren Standzeit)	10
Tabelle 3: Matrix über die Korrosionseinschätzung versch. Parameter nach statistischer Auswertung	11
Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten zw. $W_o$ /Korrosionsrate in versch. Korrosionszonen	21
Tabelle 5: Abrostung nach DIN 50929 in Abhängigkeit von $W_o$ und Spundwandalter	26
Tabelle 6: Untersuchungsergebnisse von vier ausgewählten Stählen	28
Tabelle 7: Bestimmung der Legierungselemente der Spundwandstähle in [M.-%]	29

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1	Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden (XXXI PIANC- Kongress 2006)
Anlage 2	Sammlung aller verwendeten Daten auf der CD
Anlage 3	Liste der Spundwandbauwerke
Anlage 3.1	Abrostungsraten der Spundwände und dazugehörige Wasserdaten
Anlage 3.2	Abrostungsraten der Spundwände und dazugehörige Wasserdaten
Anlage 4	Zwischenbericht 2005
Anlage 5.1	Ausgleichskurven der Abrostungsraten im Spritzwasserbereich (Mittel/Maximal)
Anlage 5.2	Ausgleichskurven der Abrostungsraten im Niedrigwasserbereich (Mittel / Maximal)
Anlage 5.3	Ausgleichskurven der Abrostungsraten im Unterwasserbereich (Mitte / Maximal)

## **1 Bewertung der Korrosion von Spundwänden (BAW 8159 bzw. A395 102 10108)**

### **1.1 Einleitung und Fragestellung**

Das Forschungsvorhaben „Bewerten der Korrosion von Spundwänden“ (BAW-Nr. 8159; Netzplan-Nr. A395 102 10108) hat die Ermittlung von Abrostungsursachen von Spundwandbohlen zum Ziel. Dazu wurden u.a. Grundsatzuntersuchungen an Stählen, Rost und Immersionsmedien von ausgewählten Spundwandbauwerken durchgeführt und die Resultate für statistische Auswertungen zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen waren gleichzeitig Teil eines von der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl (European Community for Steel and Coal, ECSC) geförderten Untersuchungsvorhabens (Design Method for Steel Structures in Marine Environment including the Corrosion Behaviour, Nr. 7210 [1]). Zur grundsätzlichen Unterstützung des ECSC-Vorhabens, wie auch zur Klärung spezieller Fragestellungen, wurde dieser FuE-Auftrag bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) eingerichtet. Darüber hinaus hat das Forschungsvorhaben BAW-Nr. 8159 sich auch die Aufklärung eigener Fragestellungen, welche für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung von Interesse sind, als Zielsetzung vorgegeben. Folgende Fragenkomplexe sind diesbezüglich zu behandeln bzw. klären:

- Sind Immersionsmedien hinsichtlich ihrer Korrosivität zu erfassen bzw. detaillierter zu gliedern?
- Kann der korrosive Abtrag in unmittelbarem Zusammenhang mit der Stahlaggressivität des Immersionsmediums gestellt werden?
- Gibt es einen Einfluss des Spundwandstahltyps auf die Abtragungsgeschwindigkeit?
- Sind sogenannte Anomale Löcher (Korrosion außerhalb der üblichen Hauptabrostungszonen) erfassbar?

Ziel der Untersuchung ist es, die Einflussfaktoren der Korrosion zu erfassen und eine überschaubare Darstellung zur Ableitung der zu erwartenden Korrosion an Spundwandbauwerken mit bekannten Immersionsmedien zu liefern. Dazu sollen u.a. die vorliegenden Abrostungswerte von Spundwänden in Bezug zur Salinität der Immersionsmedien gestellt werden.

## 2 Bisherige Ergebnisse

Der Stand der bisher bekannten, wesentlichen Untersuchungen zur Problematik der Spundwandabrostung soll im Folgenden in zusammengefasster Form wiedergegeben werden:

### 2.1 Stand der Forschung - Literatur

In verschiedenen früheren Untersuchungen wurde das Problem der Spundwandkorrosion bereits aufgegriffen. In einem kurzen Überblick werden deren Resultate hier nochmals in ihren wesentlichen Aussagen zusammengefasst:

Durch die Auswertung der Abrostungen verschiedener Bauwerke stellte Hein [2] fest, dass korrosive Prozesse bei der Spundwandkorrosion nicht linear verlaufen, sondern einer Exponentialfunktion folgen. Hierbei wurden die Abrostungswerte von überwiegend im Brackwasser befindlichen Bauwerke verwendet. Für die Abrostung im Meerwasser schlägt Hein vor, die mittlere Korrosion entsprechend Abb. 1 anzusetzen.

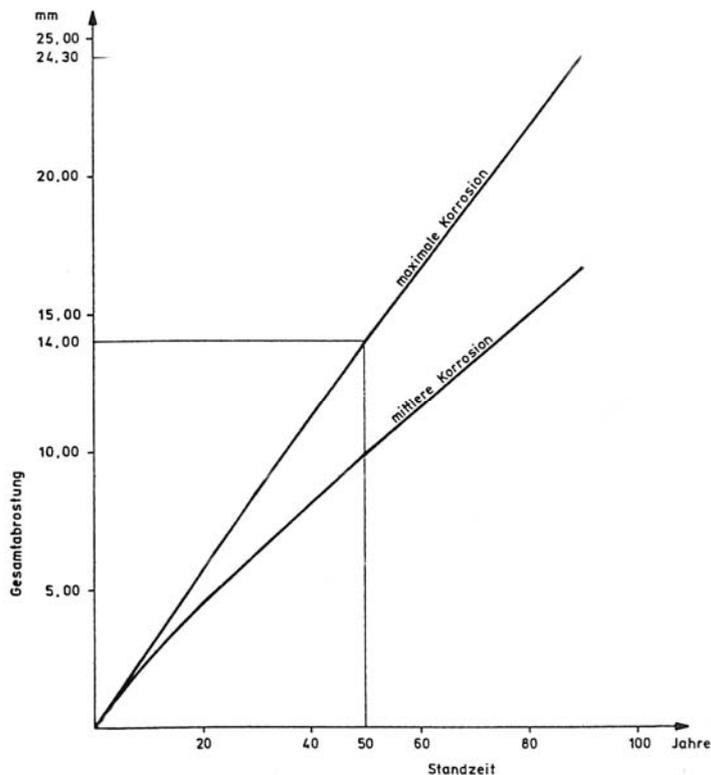
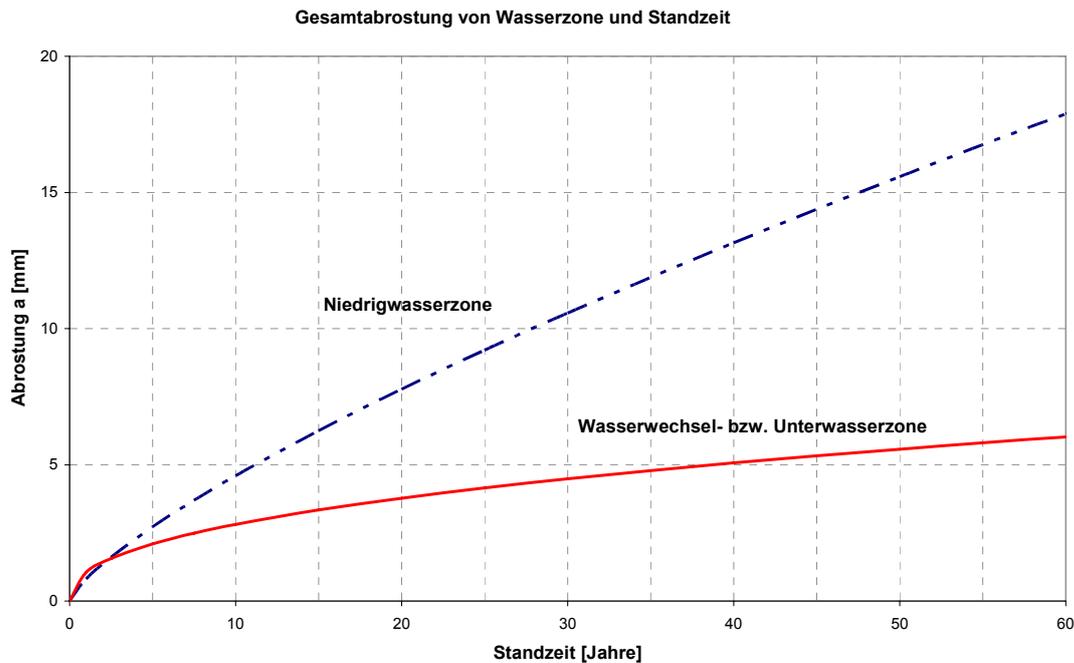


Abb. 1: Beziehung der Abrostung von Spundwänden zur Standzeit nach [2]

Mit umfangreichem Datenmaterial auf Basis der Untersuchungen von Restwanddickenmessungen der BAW (Referat K1) wurden diese Resultate nochmals verfeinert und letztlich verifiziert ([3], EAU 1996). Auch hierbei konnte festgestellt werden, dass die Beziehung Abrostung zur Standzeit nicht linear verläuft (Abb. 2), sondern einer Exponentialfunktion entspricht.



**Abb. 2:** Maximale Abrostung und Standzeit in Meerwasserzonen nach [3]

Die Darstellung der Abb. 2 zeigt zudem, dass die Korrosion in den verschiedenen Zonen (Unterwasserzone (UWZ), Niedrigwasserzone (NWZ) und Wasserwechselzone (WWZ)) einer Spundwandbohle unterschiedlich ausgeprägt ist. Hinsichtlich der Abrostung ist ferner der erwartete starke Einfluss der Salinität der Immersionsmedien festzustellen

## 2.2 Beiträge zum ECSC-Forschungsvorhaben Nr. 7210 und deren Resultate

Aus den Untersuchungen des BAW-Forschungsvorhabens wurden Grunddaten des Wasserchemismus und der Spundwandabrostung zur statistischen Berechnung der Abrostung von Spundwandbohlen erstellt. Darüber hinaus wurden in chemisch-mineralogischen und materialkundlichen Untersuchungen Daten für weitere Untersuchungen geliefert. Die Daten der Spundwandabrostungen basierten auf den o. g. Restwanddickenmessungen der BAW. Mit der statistischen Behandlung der Daten ließ sich schließlich eine Abrostungsformel herleiten, so dass für die Bemessung der Spundbohlendicke auch die Korrosion berücksichtigt werden könnte (semiprobabilistischer Ansatz). Die Resultate des ECSC-Vorhabens (beendet 2005) werden im Folgenden kurz zusammengefasst (siehe auch Anlage 1).

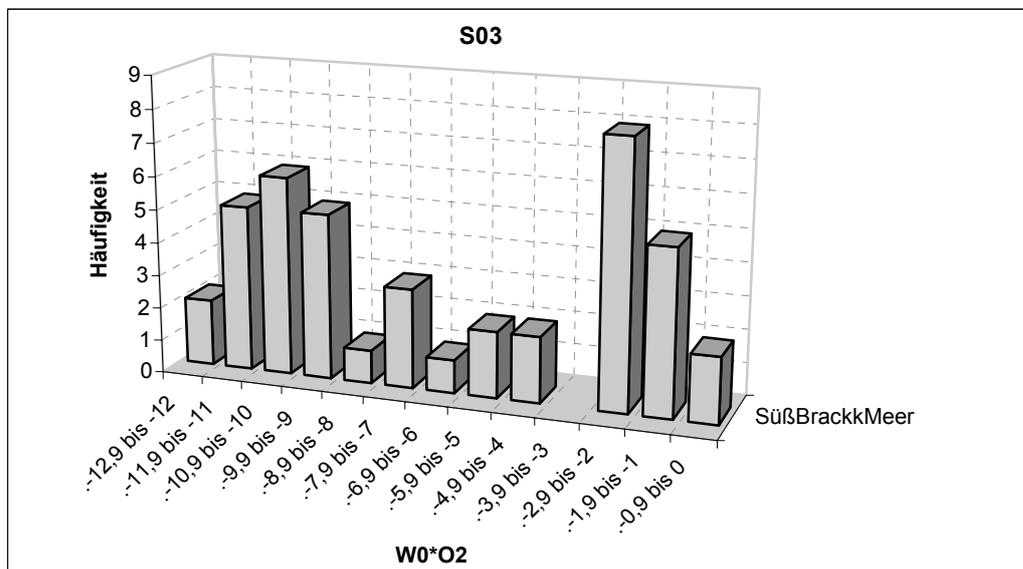
### 2.2.1 Chemische Zusammensetzung der Immersionsmedien

Durch die Bestimmung der Ionenkonzentrationen der Wässer, in welchen die ausgewählten Spundwandbauwerke stehen, wurde eine Neueinteilung der drei Gruppen – Meer-, Brack- und Binnenwasser – erstellt.

Die Ionenkonzentrationen der Wässer liegen hinsichtlich der Sommer- und Winterwerte in denselben Größenordnungen vor. Jahreszeitlich bedingte Veränderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei den maßgeblichen korrosiven Parametern (Chlorid, Sulfat, Calcium, pH-Wert und Säurekapazität) sind die Konzentrationen im Sommer gegenüber Winter durchschnittlich höher, was nur z. T. mit einem Eindampfungseffekt, bzw. jahreszeitlich wechselnden Zuflüssen vom Festland (insbesondere bei Brackwasser!) zu erklären wäre.

Bei der allgemeinen Zuordnung der Verteilung der Wasseraggressivität ( $W_o$ ; Erklärung weiter unten) zeigte sich in der Vergangenheit, dass es innerhalb der drei wesentlichen Gewässertypen (Binnen-, Brack-, Meerwasser) erhebliche Streuungen gibt (Abb. 3;  $W_o$ -Angaben, als Produkt mit der Sauerstoffsättigung ( $O_2$ ), auf Basis von Messdaten im Sommer 2003).



**Abb. 3:** Mehrgipfelige Verteilung des Produkts  $W_o \times O_2$  (Sommerdaten)

Hingegen sind die Konzentrationen des löslichen organischen Kohlenstoffes im Winter deutlich erhöht. Möglicherweise hat dies mit der (eingeschränkten) biologischen Aktivität der Meeresbewohner bzw. Pflanzen bei niedrigeren Temperaturen zu tun.

## 2.2.2 Untersuchungen der Rostprodukte

Rostproben der Unter- und Niedrigwasserzonen der Binnengewässer zeigen, im Unterschied zu Brack- und Meerwasser (ca. 3-4 M.-% im Mittel!), kaum Anreicherungen an Schwefel (S). In den Spritzwasserzonen aller drei Wassertypen liegen die Schwefel-Gehalte meist unter 0,15 M.-%. Dies spricht, insgesamt betrachtet, weniger für eine (zufällige) Sulfat-Ausfällung aus dem Wasser, sondern für einen Einbau bzw. eine aktive Beteiligung bei der Rostbildung durch Schwefel bzw. Sulfat. Kohlenstoff (C) liegt in allen Wassertypen und -zonen, hier besonders in der Unter- und Niedrigwasserzone, angereichert vor (u.a. durch Eisenverlust beim Korrosionsvorgang!). Meist dürfte es sich um Ausfällungen von Karbonatphasen (Calcit, Aragonit) handeln. Quarzanteile könnten durch Wassertransport (evtl. auch Eis!?) an die morphologisch rauen, korrodierenden Spundwandflächen eingebracht worden sein. Goethit ( $\alpha$ -FeOOH) und Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sind typische, ubiquitäre Rostminerale. In der Salzwasserkorrosion tritt erwartungsgemäß oftmals Akaganeit ( $\beta$ -FeOOH) auf, welcher als Hinweis für chloridinduzierte Korrosion gilt. Auf Grund des Vorkommens des Indikatorminerals Siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) kann Mikrobiell Induzierte Korrosion (MIC) für einige Bauwerke nicht ganz ausgeschlossen werden (s. Tabelle 1). Green rust ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Hydroxidmineral mit Einlagerungen von Karbonat, Sulfat und Chlorid in den Zwischenschichten) kommt bei einer Rostprobe vor.

**Tabelle 1:** Verteilung von Rostmineralen

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

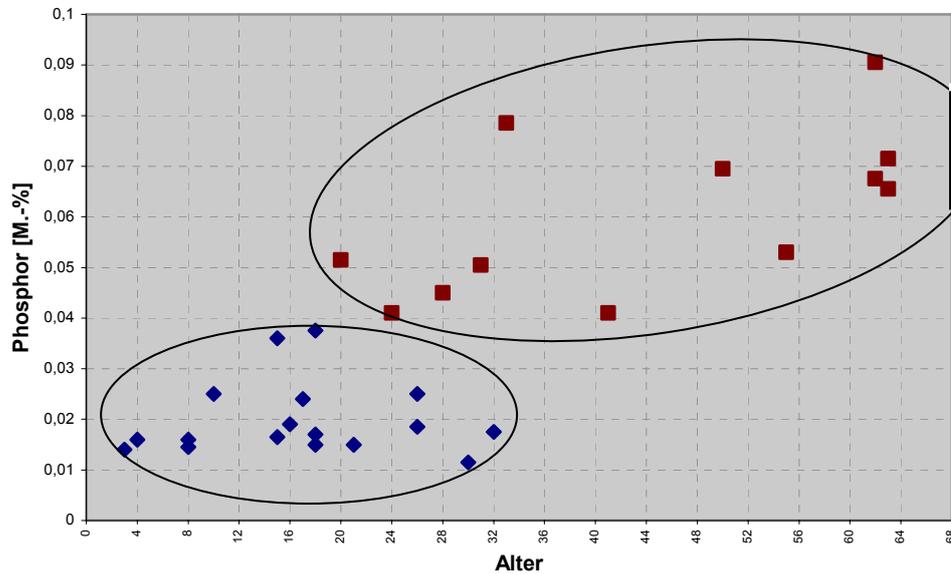
+ = Anwesenheit; - = Fehlen; Nr. = (BW-Nr.) Bauwerksnummer

Nr. 10, 130 u. 122 für Wilhelmshaven; Nr. 17 für Kiel; Nr. nn5 u. 230 für Travemünde

## 2.2.3 Stahluntersuchungen

### Chemische Analytik

Grundsätzlich sind alle untersuchten Stahlproben, auf Grund der chemischen Zusammensetzung, als Spundbohlenstähle ( $\cong$  Baustahltypen) zu kennzeichnen. Dabei lassen sich Stahlproben mit höheren Phosphorkonzentrationen (0,03 bis 0,1 M.-%) tendenziell als frühere Generation zuordnen (s. Abb. 4). Bei einem Alter mit jünger als 20 Jahre (zum Zeitpunkt der Erhebung 2003) tritt deutlich erniedrigter P-Gehalt (< 0,05 M.-%) auf. Daraus kann geschlossen werden, dass zwei Hauptgruppen (mit einem Übergangsbereich zwischen 20 und 32 Jahren) von Stählen existieren: Alte Stähle mit erhöhten und jüngere Stähle mit erniedrigten P-Gehalten. Dies stimmt mit der Änderung des Herstellungsprozesses von Stählen (u.a. beruhigt vergossen mit daraus folgender Erhöhung des Si-Gehaltes) überein.



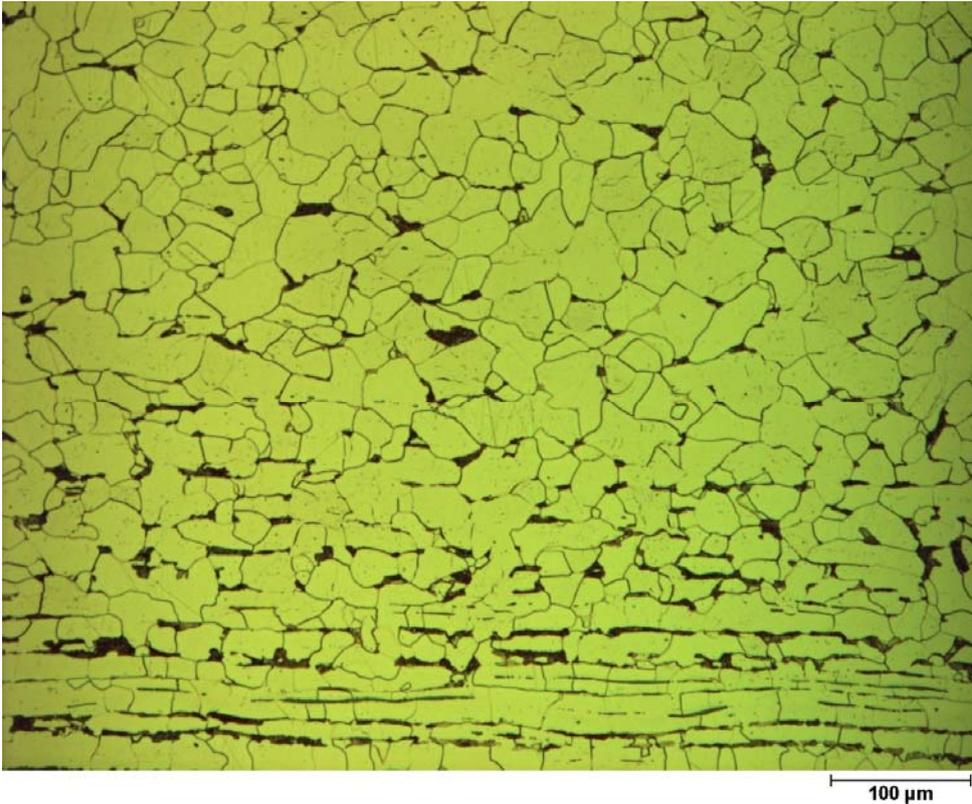
**Abb. 4:** Stahluordnung auf Basis der P-Gehalte und der Alter (zum Zeitpunkt der Erhebung (2003))

### Mechanische Eigenschaften

Hinsichtlich der Einordnung der vorliegenden Stahltypen kann gesagt werden, dass die meisten der untersuchten Stähle die geforderten Werte für Streckgrenze und Zugfestigkeit eines (modernen) S270GP (gemäß DIN EN 10248-1) erreichen, also im Rahmen von Baustählen liegen.

### Gefügeuntersuchungen

Die Anschliffe der Stähle zeigen unter dem Mikroskop ausschließlich das erwartete ferritisch-perlitische Gefüge, welches typisch für Baustähle ist. Die Lineation des Gefüges ist im inneren eines Stahlbleches deutlicher ausgeprägt als im (rekristallisierten) äußeren Bereich (Abb. 5). Bei der Abrostung einer Spundwandbohle kann dies dazu genutzt werden, die korrodierte Seite (Land oder Wasser) eindeutig zu bestimmen, was bei einer bloßen Restwanddickenmessung durch Ultraschall nicht möglich ist, orientierte Probennahme vorausgesetzt.



**Abb. 5:** Stahlgefügebild (BW-Nr. 41; ASTM-Korngröße: 8,2) mit typischem perlitisch-ferritischem Gefüge; lineare Anordnung durch dunkle MnS-Züge.

#### 2.2.4 Elektrochemische Untersuchungen

Mit Hilfe von Stromdichten-Potential-Messungen wurden Stahlproben von Spundbohlen in künstlichem Meerwasser untersucht. Der bei variablen Potentialen erzielte Korrosionsstrom konnte dabei, mit Hilfe der Tafel-Gleichung und der Berechnung nach Faraday, in Korrosionsraten ( $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ ) umgerechnet werden. Es wurden Stähle von vier Spundbohlen zur vergleichenden Untersuchung ausgewählt. Dabei zeigten sich gewisse Unterschiede der im Labor gemessenen Korrosionsraten (Abb. 6), 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 (vergl. Tab. 6, Abschnitt 3.5).

“Neue Stahltypen” (BW-Nr. 67) sind beruhigt vergossen (hoher Si-Gehalt) und zeigen geringere Korrosion.

Kleine Korndurchmesser (reziprok zur ASTM-Zahl) scheinen die Korrosion (geringfügig) einzuschränken (BW-Nr. 67).

Ein Einfluss des Kohlenstoffequivalents ( $\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr}+\text{Mo}+\text{V})/5 + (\text{Ni}+\text{Cu})/15$ ) ist nicht erkennbar (vergleiche auch Werte in Tab. 6, Abschnitt 3.5).

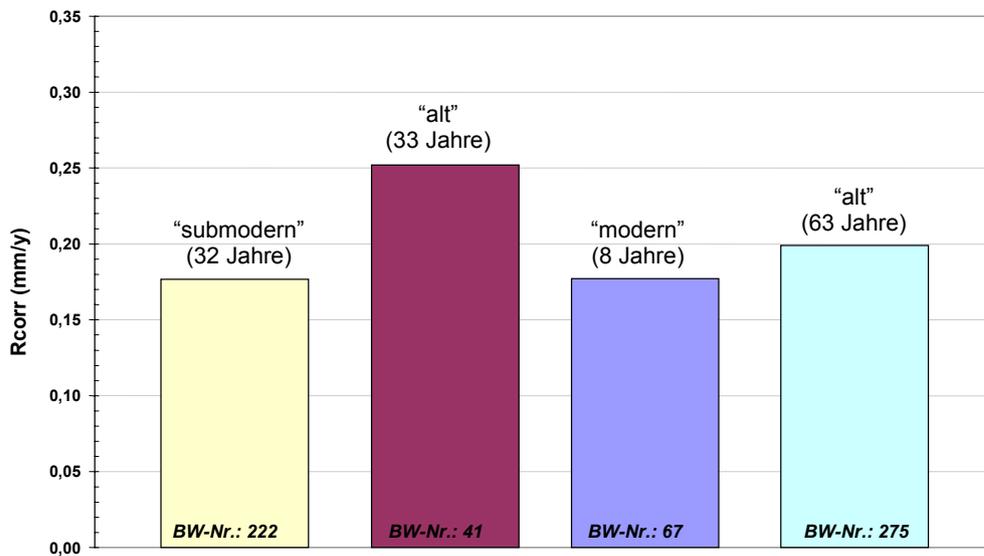


Abb. 6: Von potentiodynamischen Messungen abgeleitete Korrosionsraten von vier Stählen

### 2.2.5 Korrosion an den Spundwandbauwerken

Einen Überblick der Abrostungsraten in der Unterwasserzone (UWZ; hier: mittlere Abrostungsrate in  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ ) in Form einer Verteilung gibt die Abbildung 7. Auch hier deuten sich mehrere Maxima an, die evtl. den drei Gewässertypen Rechnung tragen. Gleichzeitig ist jedoch hier eine Überlagerung der Alter der Spundwandbauwerke mit ihrer möglicherweise unterschiedlichen Korrosionswiderstandsfähigkeit und unterschiedlichen Beanspruchung gegeben.

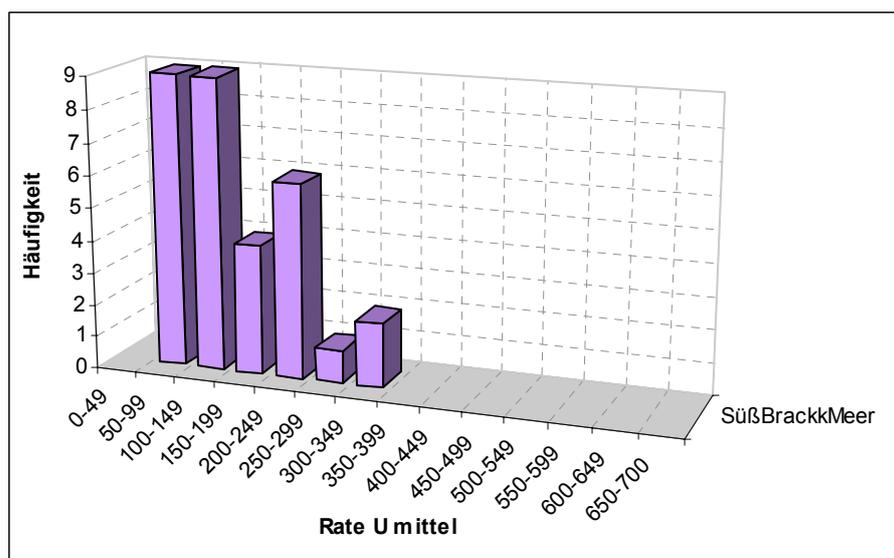
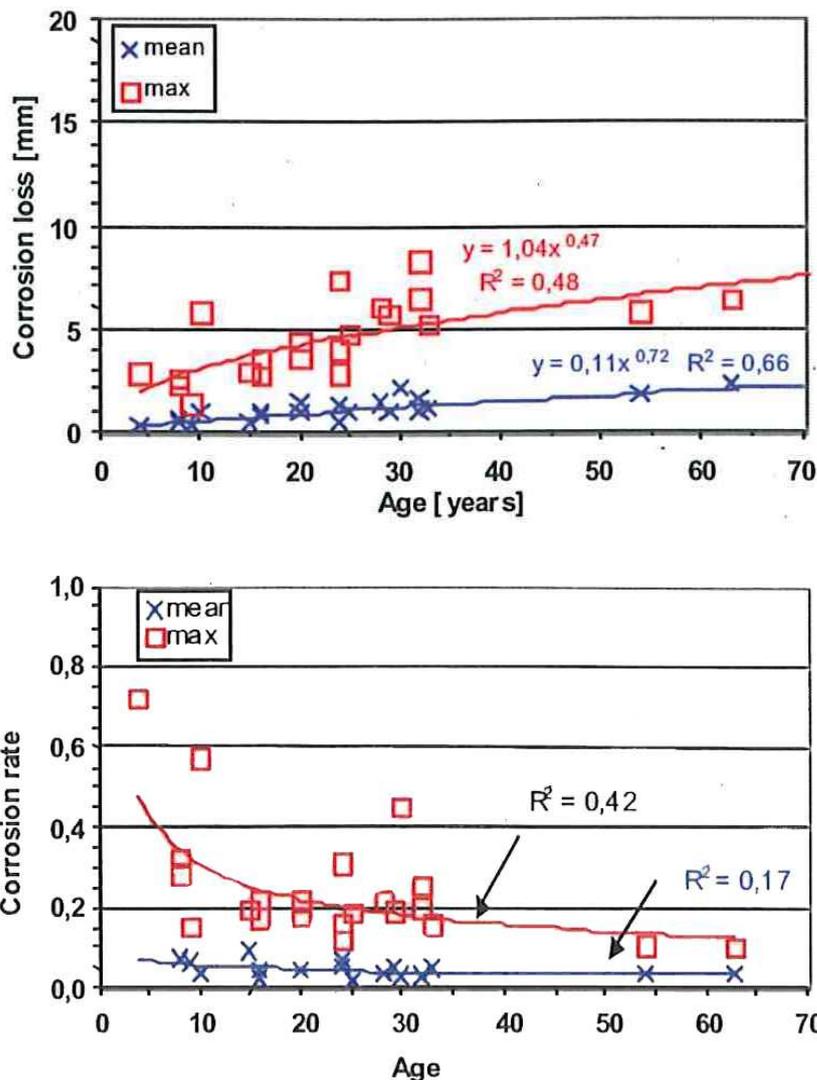


Abb. 7: Verteilung der Korrosionsraten der untersuchten Spundwandbauwerke (hier: UWZ)

Die Zusammenstellung und Auswertung der Abrostungsdaten für die Nord- und Ostsee ergaben Abrostungen (am Beispiel der Unterwasserzone), welche den früheren Untersuchungen gemäß Abb. 1 und Abb. 2 entsprechen (s. Abb. 8a). Stellt man die Reduzierung der Wanddicke durch Korrosion in Form von Korrosionsraten ( $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ ) dar, so stellen sich ebenfalls zeitabhängige Kurvenverläufe ein, die aber bei der Mittelwertbildung nicht sehr ausgeprägt ist (Abb. 8b).



**Abb. 8:** Korrosionsabtrag (oben) und Korrosionsraten (unten) in Abhängigkeit zur Standzeit (Meerwasser UWZ aus [1])

In Tabelle 2 wurden zum Vergleich die Mittelwerte der (wesentlich umfangreicheren) EAU-Daten den Resultaten der ECSC-Auswertung gegenübergestellt (Unterwasserzone (UWZ), Niedrigwasserzone (NWZ)). Grundsätzlich liegen in der Auswahl der verwendeten Daten der zweiten Spalte ähnliche Werte wie in der EAU [3] vor, so dass hier von einer gewissen

Repräsentativität der ausgewählten Proben ausgegangen werden kann (vergl. auch Abb. 2 mit 8a!).

**Tabelle 2:** Vergleich der Abrostungen in Seewasser (in [mm] nach 60 Jahren Standzeit)

Medium - Zone	ECSC*	EAU	EN 1993-5	ECSC**
Seewasser UWZ (max)	7	5,5 – 6		1,3 – 3,0
Seewasser NWZ (max)	20	18		2,0 – 5,4
Seewasser UWZ (mittl.)	2	2	~ 2,3	
Seewasser NWZ (mittl.)	5,5	4	~ 4,6	

\*BAW in [1]; \*\* Arbed steel (in [1]) für Nordsee, 50 Jahre)

## 2.2.6 Herleitung einer Abrostungsformel

Zunächst wurde mit Hilfe der Bestimmung der linearen Regression versucht, Einflussparameter für die Korrosion nachzuweisen. Mit Sicherheit können dabei das Bauwerksalter und Salzkonzentration der dazugehörigen Immersionsmedien als wesentliche Größen genannt werden. Jedoch zeigen alle Auswertungen, dass damit alleine der Korrosionsfortschritt nur unzureichend beschrieben werden kann. Die Suche nach weiteren Einflussparametern und deren Einbindung ist nur mit aufwendigen Methoden statistischer Verfahren zu bewerkstelligen. Durch die Datenbehandlung mittels multifunktionaler Faktoranalyse konnte dann herausgefunden werden, dass die Korrosion grundsätzlich mit

- einer Basiskorrosion  $b_0$  und
- einem 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 auch hier in die drei bekannten Korrosionszonen unterteilt werden:

- $b_0$  und  $b_1$  für den Bereich unterhalb des Tiedeniedrigwassers.
- $b_2$  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:

$$Y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_3 + b_4 \times x_4 + \dots + b_m \times x_m .$$

Die einflussreichsten statistisch nachgewiesenen Parameter sind in Tabelle 3 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 Korrosionsgradienten  $b_1$ , welcher die Abrostung über die Spundwandhöhe beschreibt.

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

**Tabelle 3:** Matrix über die Korrosionseinschätzung versch. Parameter nach statistischer Auswertung

<i>Haupteinflüsse</i>	<b>Bo Basis- abrostung</b>	<b>B1 Abrostungs- gradient</b>	<b>B6 Abrostungs- gradient</b>	<b>Sfak 4 Spreiz- faktor</b>	<b>Sfak 1 Spreiz- Factor</b>
Bereich: Tiefe bzw. Zone	≥ 4m	0 – 4m	Tide	Spritzwasser	Abrostung
Sicherheit	83%	78%	80%	71%	74%
Abweichung	±0,6mm	±0,2mm	±2,0mm	±0,4mm	±0,4mm
Alter	+	++	+++		+
Stahltyp grob	--	+	--	+	+
Stahltyp fein	++	-	++		
Liegeplatz			--	+	+
Strömung	--		++		+
Tide	+	+	+		+
Gewässer limnisch	---	+++	---		+
Gewässer limnisch-brack	---	+++	-		
Gewässer brackisch	+	+	+		
Gewässer brack-marin	+	+	+		
Sauerstoff	--		--		
Säure-Kapazität		+++			
Säure-Kapaz. (saisonal)	-				
Redox Gradient		--			
Leitfähigkeit Gradient		+			
Sauerstoff Gradient		-			
<i>Zusammenspiel</i>					
Stahl (fein) + Alter			++		
Strömung + Alter	-				
Tide + Alter	-				
Strömung + Salz			++		
Tide + Säure Kapaz.		++			
Tide + O <sub>2</sub> (saisonal)		--			

Zunahme (+ ... +++ von gering bis stark) und Abnahme der Korrosion (- ... --- von gering bis stark)

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

Die Formel zur Bestimmung der Abrostung  $Y$  (Formel (1) gilt nur für die NWZ) hat den Nachteil, dass sie

- sehr aufwändig einzusetzen und zu berechnen ist, dass
  - verschiedene Bewertungen zur Steigerung bzw. Senkung der Korrosion widersprüchlich sind (s. Tabelle 3)
  - und letztlich die Formel nur im engen Bereich der jeweiligen vier Wasserklassen zulässig ist.
- Entsprechend wurde nach vorliegenden Informationen diese Formel bisher kaum angewendet. Unstrittig ist, dass der Salzgehalt des Immersionsmediums ein wichtiger Faktor ist, der die Korrosion steuert. In den Auswertungen umfangreicher Daten wurde daher auf die strikte Unterscheidung von Meer- und Binnenwasser geachtet.

### **3 Resultate der Untersuchungen dieser Arbeit**

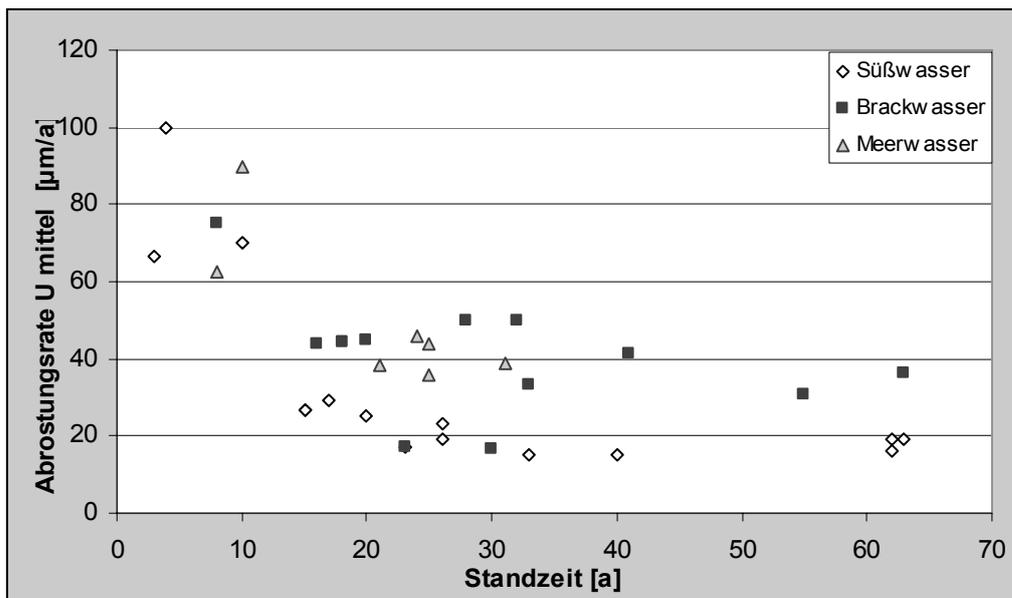
Mit den Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens (BAW-Nr. 8159; Netzplan-Nr. A395 102 10108) soll die Möglichkeiten geprüft werden, inwieweit der Wasserchemismus alleine in den Zusammenhang mit der Abrostung der Spundwände gebracht werden kann. Dazu wurden die im EU-Forschungsvorhaben ausgewählten Daten von Spundwandbauwerken, Abrostungsdaten wie auch chemische Zusammensetzung der Immersionsmedien, hier grundsätzlich wieder verwendet. Hinsichtlich der dort erfolgten systematischen und auf Repräsentativität ausgerichteten Auswahl von Bauwerken (u.a. Anteile an Anlegern/Nichtanlegern, Alters- und Immersionsmedienverteilung) erscheint dies sinnvoll.

Die für das EU-Vorhaben ermittelten Daten (Anlage 2) wurden nochmals verschiedensten statistischen Auswertungen unterzogen (Auswahl in den Anlagen 3.1 und 3.2). Ziel war es, einen möglichst einfachen und nachvollziehbaren Zusammenhang zwischen Abrostung der Spundwände und deren Umgebungseinflüsse bzw. Elektrolyten herzustellen.

#### **3.1 Abrostungseinflüsse**

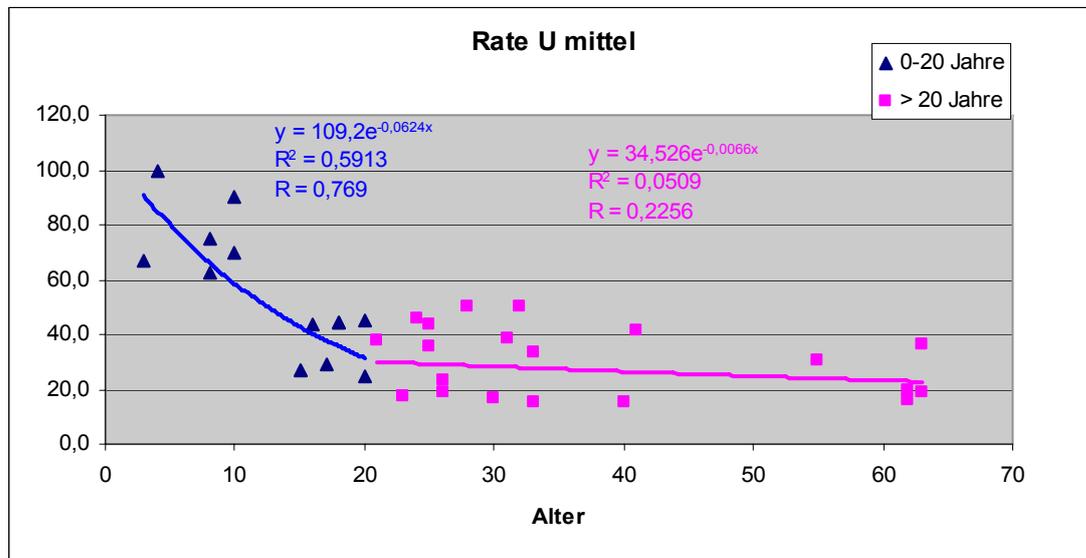
Zunächst sollen die Abrostungsdaten nochmals hinsichtlich des Einflusses der Gewässertypen mit statistischen Methoden untersucht werden. Als erster Ansatz hierzu wird hierbei die mögliche Beziehung der Salinität (synonym hierfür  $W_o$  nach DIN 50929) der Immersionsmedien zu den tatsächlichen Abrostungen der Bauwerke überprüft. Durch Bestimmung der Rostphasen (IR-Spektroskopie, Röntgenbeugung) kann ein möglicher Einfluss von Mikroorganismen nachgewiesen bzw. für die hier verwendeten Bauwerke ausgeschlossen werden. Weitere Daten, wie z.B. Gefüge und Abrostungsverhalten älterer Spundwandstähle gegenüber den „jüngeren“, können dagegen in die Betrachtungen aufgenommen werden.

Die Abrostungen von Spundwänden wurden in der Vergangenheit meist im Vergleich zum Alter der Bauwerke, und hier noch unterteilt in Immersionsmedien (Meer- und Binnenwasser), betrachtet. Dabei wurde zunächst ein Zusammenhang mit den Abrostungsraten ( $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ ) für die ausgewählten Bauwerke bestätigt: Diese verringern sich pauschal mit der Nutzungsdauer, was sich z.B. für den Unterwasserbereich der ausgewählten Daten dieser Untersuchungen, ebenfalls ermitteln ließ (Abb. 9).



**Abb. 9:** Mittlere Abrostungsraten (UW) im Bezug zur Nutzungsdauer (Standzeit)

Die Verringerung der Abrostungsraten ist zunächst der hohen Anfangskorrosion von (blankem) Stahl in Wasser geschuldet. Bei genauerer Betrachtung der Abb. 9 unter zu Hilfenahme statistischer Methoden zeigt sich, dass die Abrostungsraten in den ersten 10 bzw. 20 Jahren Standzeit deutlich erhöht sind. Mit zunehmender Standzeit nehmen allerdings die Abrostungsraten kaum mehr ab. Bei der genauen Betrachtung fällt nun auf, dass die allgemein anerkannte Abhängigkeit der Abrostungsrate vom Alter vorwiegend durch die Abrostung der ersten 20 Jahre eines Spundwandbauwerks geprägt ist. Dieser Eindruck verstärkt sich, wenn man die Abrostungsraten (Abrostung/Standzeit) wie in Abb. 10 aufgeschlüsselt betrachtet: Hier sind, zur Verdeutlichung dieser Beobachtung, die Abhängigkeiten (Rate U mittel / Alter) dem Alter entsprechend getrennt mit Ausgleichsgeraden dargestellt. Dabei ist zudem zu beobachten, dass bereits ab einem Alter von zehn Jahren die Abrostungsraten nahezu indifferent verlaufen. Ältere Bauwerke rosten demzufolge, insgesamt betrachtet, linear ab, da die starke Anfangskorrosion sich „verdünnt“. Diese Feststellung ist wichtig für spätere Betrachtungen und Berechnungen.



**Abb. 10:** Ausgleichskurven für Abrostungsraten (UWZ) unterhalb und oberhalb des Alters von 20 Jahren

### 3.1.1 Der Bezug der Abrostung zur Salinität des Wassers - frühere Untersuchungen

In der Literatur und im o.g. ECSC-Forschungsvorhaben finden sich viele Darstellungen, welche den Zusammenhang von Abrostung und Standzeit wiedergeben. Die Abrostung erfolgt dabei im Bezug auf das Bauwerksalter nicht linear sondern exponentiell. Zudem werden die Zusammenhänge für die jeweiligen Wasser- bzw. Immersionstypen getrennt betrachtet.

Die Resultate der chemischen Wasseranalysen dieser Arbeit sollen als Basis dienen, einen "Korrosivitätsfaktor" (siehe z.B.  $W_o$ ) je Gewässer zu bilden. Als Vorarbeit bzw. Test wurden zunächst Abrostungsdaten von Stahlprofilen und Salzgehaltsbestimmungen norddeutscher Häfen einer früheren Veröffentlichung aus dem Jahre 1975 (Hein et al. [4]) ausgewählt und verglichen (Daten der Unterwasserzone aus Tabelle 2 in [4]). Ein möglicher Zusammenhang wird in einem x-y-Diagramm gezeigt. In der Darstellung der Abb. 11 wurde u.a. die Leitfähigkeit (in etwa äquivalent zum Gesamtsalzgehalt) der vier betrachteten Standorte, unter Einbeziehung des Sauerstoff- und Kaliumpermanganatverbrauchs (x-Achse), in Zusammenhang mit der Abrostungsrate (y-Achse) gestellt. Neben der Quotientenbildung durch den Permanganatverbrauch, welcher einer Sauerstoffzehrung entspricht, wurde auch noch Sauerstoff als Faktor im Korrosivitätsfaktor F ( $F = \text{Leitfähigkeit} \times \text{O}_2\text{-Sättigung} / \text{KMn-Verbrauch}$ ) eingebracht, so dass letztlich Sauerstoff verstärkt gewertet wurde.

Die Auslagerungsdauer war mit zwölf Jahren bei allen Lokalitäten identisch. Es wurden die Abrostungsdaten im Unterwasserbereich ausgewählt, da sich der unmittelbare Einfluss der Aggressivität der Wässer auf die Abrostung, im Unterschied zur Spritzwasserzone und zum atmosphärischen Bereich, am Besten zeigen sollte. Der Zusammenhang wird in Abb. 11 ersichtlich (im Detail sind in dieser Darstellung die Abrostungen für Unterwasser (Dreiecke)

und für die „Belüftungszone“ (Quadrate) getrennt dargestellt). Die einseitigen Abrostungsraten lassen sich mit Werten von 65 bis 210  $\mu\text{m}$  ermitteln und liegen damit vergleichsweise zwischen mittlerer und maximaler Abrostungsrate gegenüber Spundwandbauwerken in der UWZ.

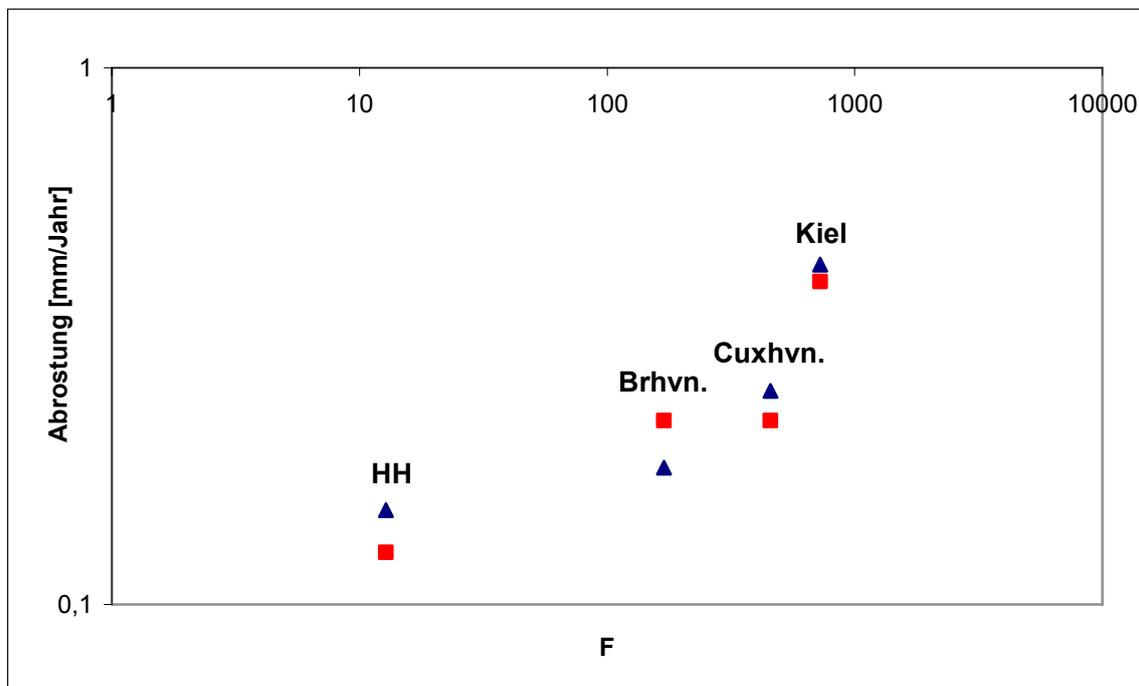


Abb. 11: Abrostungsraten von Spundwandbauwerken (UWZ) in verschiedenen Gewässern

### 3.1.2 Bezug der Abrostungsraten zur Wasseraggressivität

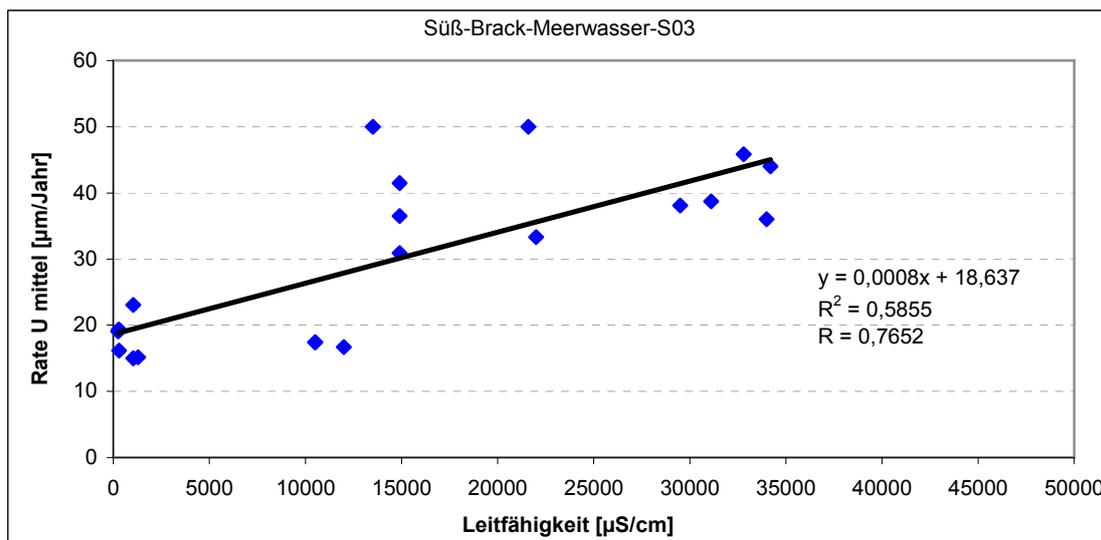
#### 3.1.2.1 Alter der Bauwerke

Zunächst ist festzuhalten, dass „frischer“ Stahl eine aktive Oberfläche bietet, die vollkommen dem korrosiven Angriff des Wassers ausgesetzt ist. Mit der Dauer der Einwirkung und den Umsetzungen kommt es zur Ablagerung von Korrosionsprodukten auf der Stahloberfläche. Diese verhindern offensichtlich einen Korrosionsfortschritt entsprechend der Anfangskorrosion (Änderung der Reaktionskinetik!). Zudem sind die Anfangskorrosionsmessungen noch mit der Unsicherheit der Spundbohlendicke durch die Abweichungen der realen Bohlendicke von der nominellen Dicke (Walztoleranz) möglicherweise verfälscht. Mit der Abrostung über die Länge der Standzeit egalisiert sich dieser Fehler. Auch aus Gründen der baupraktischen Verhältnisse scheint es erlaubt zu sein, Abrostungsdaten jüngerer Spundwandbauwerke in der statistischen Auswertung nicht zu berücksichtigen: Die Standzeit bzw. Nutzungsdauer liegt nämlich gewöhnlich bei 50 bis 70 Jahren, und die Abrostung bzw. die Abrostungsrate ist gerade dann

für diese vorgesehene Zeitspanne interessant. Zur Vergleichbarkeit aller Abrostungen an Spundwänden wurde für diese Arbeit die sogenannte Abrostungsrate (Abrostung in [mm / Standzeit], bzw. in [ $\mu\text{m}$  / Standzeit]) eingeführt.

### 3.1.2.2 Salinität bzw. elektrische Leitfähigkeit

Die aussichtsreichste Möglichkeit, eine Spundkorrosion in den Zusammenhang mit dem Wasserchemismus zu stellen, ist im Unterwasserbereich zu finden, da das Medium weitestgehend unbeeinflusst von äußeren, oftmals temporären Erscheinungen (Wellengang, Schiffsanleger, ..) bleibt. Abb. 12 zeigt z.B. eine Korrelation zwischen Abrostungsraten und Salinität (elektrischer Leitfähigkeit) für den Unterwasserbereich der hier vorliegenden Daten über alle Wassertypen hinweg. Die unerwartet gute Korrelation dürfte trotz des oben erwähnten starken Einflusses des Ionengehalts der Medien eher ein Zufall sein. Weitere Korrelationen ließen sich darüberhinaus nicht finden.



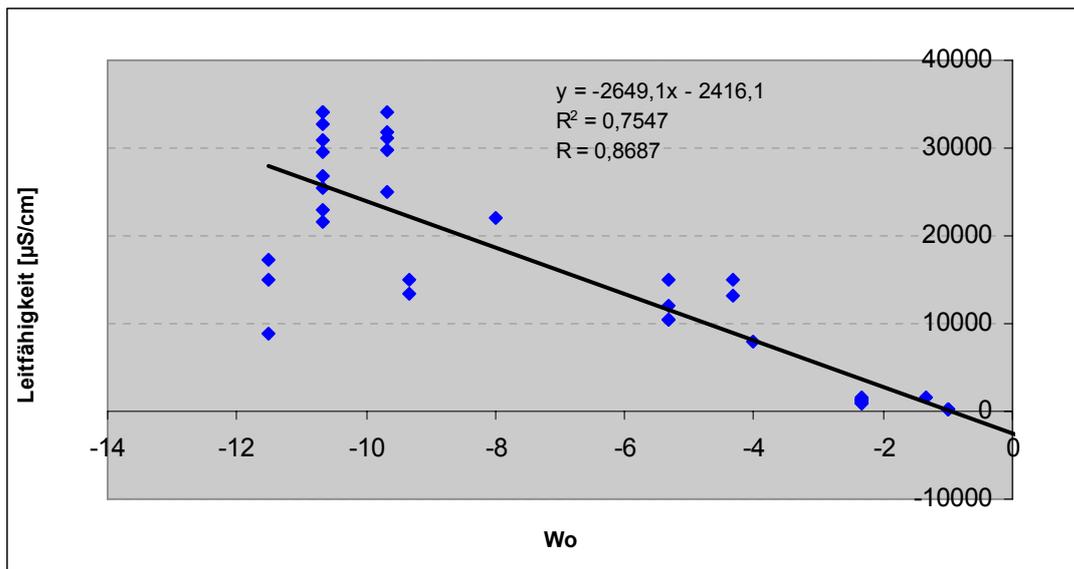
**Abb. 12:** Zusammenhang der Abrostung und der Leitfähigkeit des Immersionsmediums

### 3.1.2.3 Die Stahlaggressivität des Wassers – die Korrosivität $W_0$

Die Stahlaggressivität eines Gewässers kann ein Hinweis auf die Wirksamkeit des Elektrolyten hinsichtlich der zu erwartenden Abrostung einer Spundwand sein, welche in diesem wiederum eingetaucht ist. Hierbei bietet sich die Korrosivität der Immersionsmedien ( $W_0$ ) nach DIN 50929 an. Die DIN 50929 schlägt neben der Merkmalsbestimmung (Wasserart und Lage des Objekts) eine Bestimmung der chemischen Parameter (Cl- und Sulfat-Gehalt, Säurekapazität, Ca-Gehalt, pH-Wert sowie gfs. elektrisches Potential) vor, welche jeweils eine Bewertungsziffer zugeordnet bekommen und schließlich über einen Algorithmus zu einer

Bewertungsziffer ( $W_o$ ). Eine genaue Beschreibung der Ermittlung von  $W_o$  ist in DIN 50929, Teil 3 (Tabellen 6 und 7, Abschnitt 3.6) gegeben.

Der Zusammenhang der elektrischen Leitfähigkeit mit  $W_o$ , wie er in Abb. 13 dargestellt ist, kommt nicht unerwartet, da in beiden Parametern die selben Ionenkonzentrationen maßgeblich sind.



**Abb. 13:** Zusammenhang von elektrischer Leitfähigkeit und  $W_o$

In dieser Arbeit wurden alle bekannten chemischen Einflussfaktoren der Immersionsmedien der jeweiligen untersuchten Spundwandbauwerke bestimmt. Demzufolge kann  $W_o$  für alle in der Statistik verwendeten Bauwerke mit ihren Abrostungsdaten einfach berechnet und eingesetzt werden.

Ziel ist es, über die verschiedenen Gewässertypen hinweg (Binnen-, Brack- und Meerwasser), in einem einheitlichen Diagramm für die jeweiligen Abrostungszonen, die Abrostung von Spundwänden mit den  $W_o$ -Werten zu vergleichen bzw. in Korrelation zu setzen (s. Abb. 14).

Vorraussetzung für die „Erlaubnis“ Korrelationen anzuvisieren ist die Gaus'sche Verteilung der jeweiligen Daten bzw. Population. In der Abbildung 3 (Abschnitt 2.2.1) wurden dazu ein Säulendiagramm bzw. Histogramm erstellt. Grundsätzlich wird diese Forderung erfüllt. Hinsichtlich der  $W_o$ -Daten ist eine dreihöckrige Verteilung zu erkennen, die den drei Wassertypen (Meer-, Brack- und Binnenwasser) Rechnung trägt.

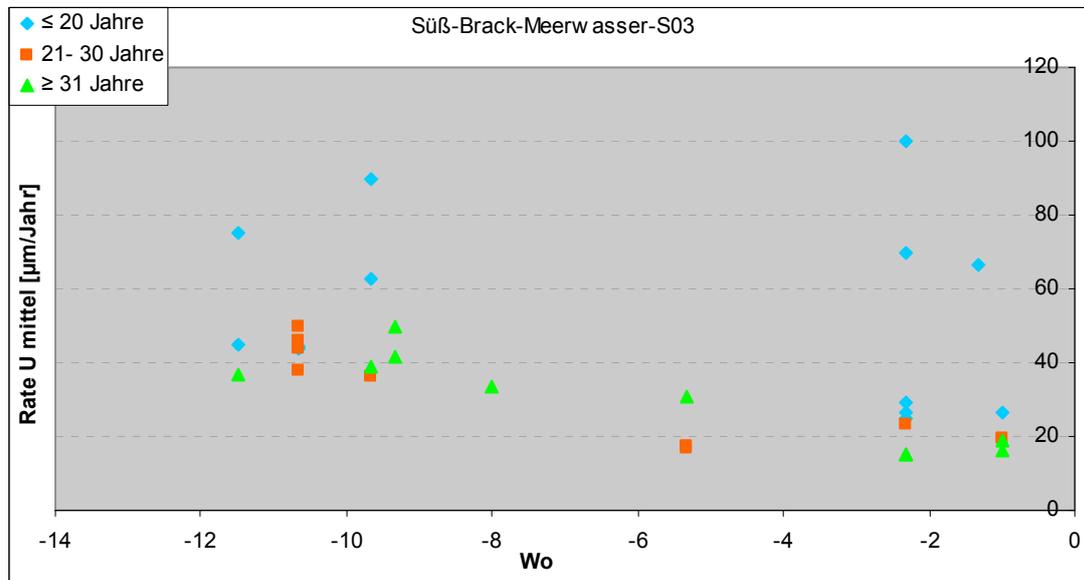
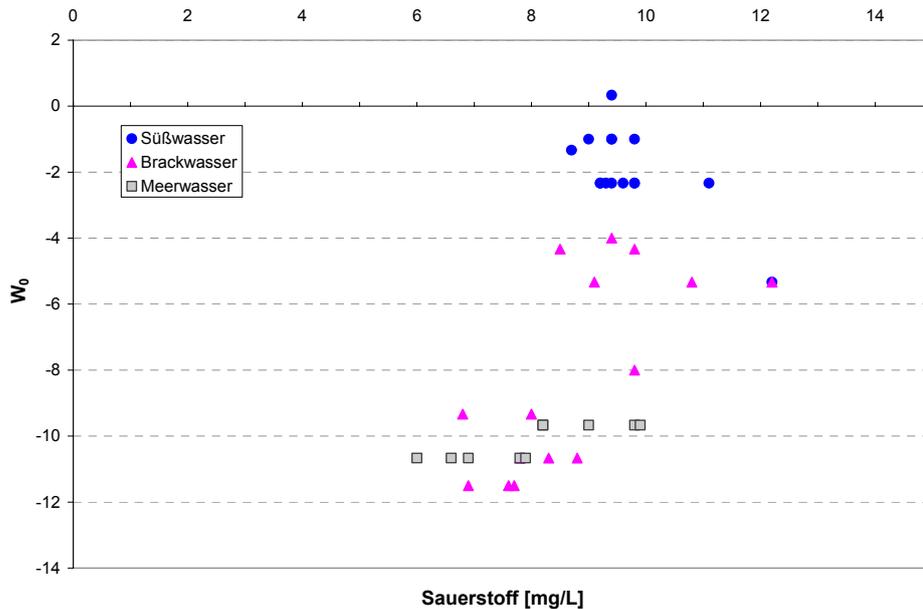


Abb. 14: Korrosionsraten in Abhängigkeit vom  $W_o$ -Wert (Unterwasserzone, alle Alter)

### 3.1.2.4 Der Einfluss von $W_o$ und Sauerstoff ( $O_2$ )

In der vorliegenden Berechnung des Summenparameters  $W_o$  fehlt nach den Erfahrungen bei der BAW ein wesentlicher Faktor: Der Sauerstoffgehalt des Gewässers. So konnte z.B. bei einer Spundwand, welche im Moorwasser eingebettet war, nach 20 Jahren Standzeit keine Abrostung festgestellt werden, wiewohl die Boddenaggressivität ( $B_o$ ) entsprechend  $W_o$  bei  $-35$  lag. Es liegt die Vermutung nahe, dass kein Oxydant vorhanden war und die pH-Wert-Absenkung durch Huminsäure alleine keine Korrosion bewerkstelligte. In den folgenden Darstellungen wird auf Grundlage der  $O_2$ -Bestimmung die Sauerstoffsättigung (korrigiert mit der Temperatur) als Faktor (0,85 z.B. für 85 %  $O_2$ -Sättigung) eingeführt, was zu einer gewissen Differenzierung der Werte auf der x-Achse führt. In Abb. 15 sind die gemessenen  $O_2$ -Konzentrationen der Immersionsmedien der untersuchten Spundwandbauwerke im Variationsdiagramm mit den  $W_o$ -Werten dargestellt. Es deutet sich an, dass dadurch eine Spreizung auf der x-Achse erfolgen wird und somit eine größere Differenzierung der Aggressivität der Wässer erreicht werden kann. In Abb. 16 sind alle (mittleren) Abrostungsraten der untersuchten Spundwände im Unterwasserbereich (UWZ) und die Aggressivitätsmerkmale der zugehörigen Immersionsmedien ( $W_o \times O_2$ ) gegeneinander angetragen. Tendenziell werden dadurch die Korrelationsfaktoren erhöht, was im Einklang mit der Erweiterung mit den korrosionsverursachenden Parametern steht. Es fällt auf, dass gerade im geringer aggressiv liegenden x-Achsenabschnitt die Korrosionsraten höher sind, als erwartet. Zunächst wurden daher zwei mögliche Erklärungen hierfür näher betrachtet:

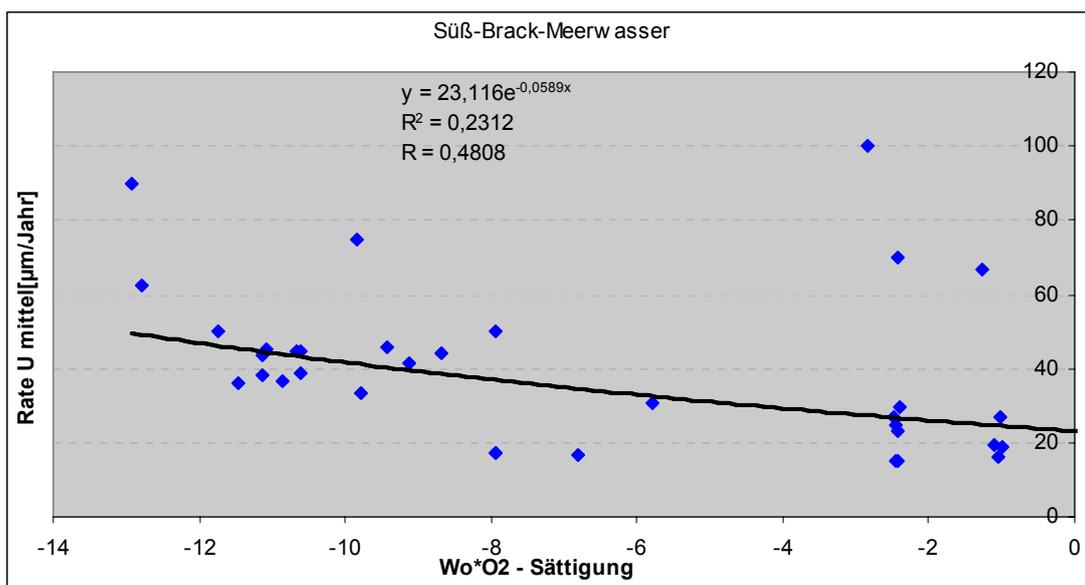
- 1) Die Abhängigkeit gilt nur in Bereichen unterhalb von  $W_o \times O_2$ -Bereichen von  $-5$ , d.h. bei Immersionsmedien höherer Stahlaggressivität



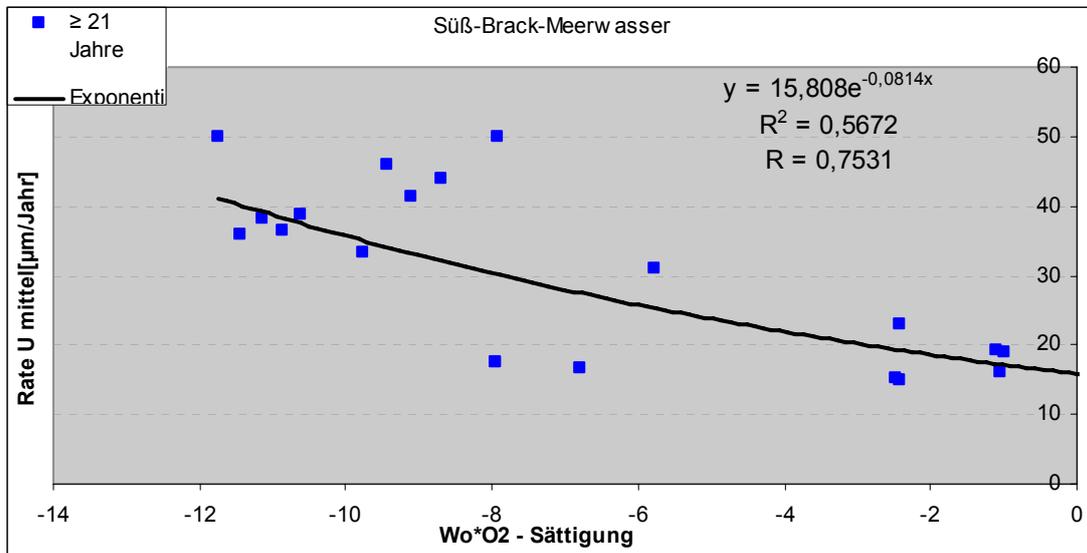
**Abb. 15:** Variation der  $W_0$  und  $O_2$ -Gehalte der untersuchten Gewässer (Sommerwerte)

2) Die Einflüsse der erhöhten Abtragsraten jüngerer Spundwandbauwerke stören die Beziehung.

In der Darstellung der Abb. 17 wurden alle Bauwerke mit einem Alter unter 21 Jahren ausgeschlossen. Dadurch wurde die „Verfälschung“ durch die hohen Anfangskorrosionsraten junger Bauwerke unterbunden und die Beziehung (Exponentialgleichung) zeigt eine relativ gute und signifikante (> 99%) statistische Zuverlässigkeit, wie sie sich bereits in Abb. 16 andeutete.

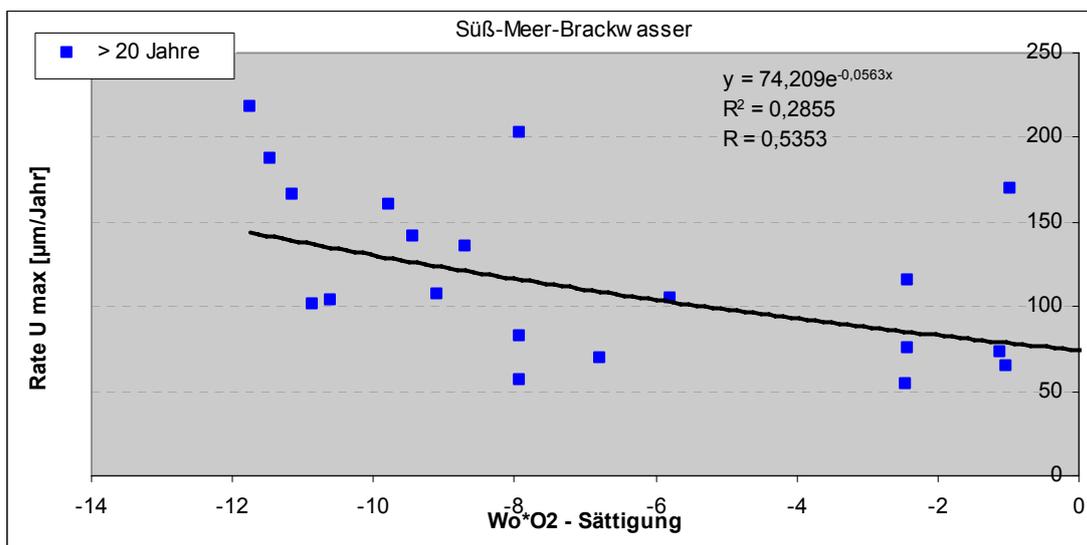


**Abb. 16:** Korrosionsraten in Abhängigkeit vom  $W_0 \times O_2$ -Wert (UWZ, alle Alter)



**Abb. 17:** Korrosionsraten in Abhängigkeit vom  $W_0 \times O_2$ -Wert (UWZ, >21 Jahre)

In Abb. 18 wurde nun die Gewässeraggressivität  $W_0$  mit der maximalen Korrosion im Unterwasserbereich im xy-Diagramm korreliert. Es ergab sich ebenfalls eine Signifikanz von knapp 99 % (s. Tabelle 5), was insofern wiederum überraschend ist, als Lochkorrosion grundsätzlich eine breite Streuung aufweist und auch größerer Zufälligkeit ausgesetzt ist.



**Abb. 18:** Abhängigkeit der Korrosionsrate von  $W_0 \times O_2$  (>21 Jahre, maximale Abrostung)

Gerade hier zeigt sich nun der Vorteil, nur Werte von Bauwerken mit über 20 Jahre Standzeit einzusetzen. Die Abrostungsraten „beruhigen“ sich offensichtlich, da Ausreißer, bzw. die starke Anfangskorrosion wegfallen. Es ist hierzu auch anzumerken, dass die Restwanddickenbe-

stimmung nach wenigen Jahren Standzeit allein schon wegen der Wanddickenschwankungen (Walztoleranz) äußerst unsicher sind. Zudem ist eine Berechnung an Bauwerken mit höherer Standzeit, z.B. > 20 Jahre, überaus sinnvoll, da diese auch der tatsächlichen Standzeit der Praxis eher entspricht.

Betrachtet man frühere Untersuchungen (Hein [2], EAU [3]), so flachen auch dort nach 20 Jahren Standzeit die Abrostungskurven ab bzw. steigen diese kontinuierlicher an (vergl. Abb. 8b und Abb. 10). Bei vielfältigen Berechnungen im Variationsdiagramm zeigt sich in den Korrelationskoeffizienten (R) nun ebenfalls die Verbesserung der Signifikanz, wenn der Teil der statistischen Population mit Alter unter 20 Jahren ausgeschlossen wird (Tabelle 4). Die Abrostung der verbleibenden Paare (< 20 Jahre Standzeit) bleibt natürlich unverändert, da hier die Abrostung und somit auch die Abrostungsraten der ersten 20 Jahre mit enthalten sind! Die Einzelwerte der verwendeten Datensätze sind in den Anlagen 3.1 (Sommermessung) und 3.2 (Wintermessung) zusammengestellt.

**Tabelle 4:** Korrelationskoeffizienten zwischen  $W_0$ /Korrosionsrate in versch. Korrosionszonen

	R alle	n alle	Korr.	R ab 21 Jahre	n ab 21 Jahre	Korr.	R ab 31 Jahre	n ab 31 Jahre	Korr.
S mittel S03	0,367	28	95	0,557	16	95	0,6786	9	95
S mittel W04	0,0538	28		0,1944	16		0,4671	9	
S max S03	0,5352	28	95	0,8103	16	99	0,8517	9	99
S max W04	0,2676	28		0,5587	16	95	0,643	9	
N mittel S03	0,6256	35	99	0,7902	21	99	0,8498	11	99
N mittel W04	0,4528	35	99	0,6544	21	99	0,7356	11	99
N max S03	0,6794	35	99	0,7515	21	99	0,8028	11	99
N max W04	0,4412	35	95	0,5076	21	95	0,6155	11	
U mittel S03	0,4808	35	99	0,7531	21	99	0,8709	11	99
U mittel W04	0,3596	35		0,724	21	99	0,7893	11	99
U max S03	0,4274	35	95	0,5343	21	95	0,5353	11	
U max W04	0,3032	35		0,3701	21		0,8709	11	99

S = Spritzwasserzone, N = Niedrigwasserzone, U = Unterwasserzone

R = Korrelationskoeffizient; n = Probenanzahl, Korr. = statistische Sicherheit

### 3.2 Weitere Beeinflussungen der Abrostungsraten

Im Folgenden wird geprüft, welche Parameter die Abrostung bzw. die Korrosionsraten an Spundwänden ebenfalls mit beeinflussen. Dazu wurden die Erhebungen des ECSC-Forschungsvorhabens genutzt und nochmals genauerer Betrachtung unterzogen.

### 3.2.1 Wasseraggressivität im Sommer und Winter

In den Jahren 2003 und 2004 wurden zwei Messkampagnen zur chemischen Bestimmung der Ionen-Konzentrationen der Immersionsmedien durchgeführt. Grundsätzlich zeigte sich, dass der Gehalt an korrosionsbestimmenden Parametern, mit Ausnahme von Sauerstoff, im Winter erniedrigt vorliegt (der Sättigungsgrad von Sauerstoff ist, wegen seiner Temperaturabhängigkeit, im Sommer wiederum deutlich erhöht!). Dies hat wesentliche Auswirkungen auf die berechenbaren  $W_o$ -Werte, welche sich dementsprechend im Winter, gegenüber dem Sommer, im Mittel von -8 auf -6 verändern (siehe Anlagen 3.1/3.2 bzw. 4). Damit stellt sich auch die Frage der maßgeblichen Einflussnahme der jahreszeitlichen Schwankungen auf die Korrosion. In xy-Variationsdiagrammen, welche mit dem Produkt von  $W_o \times O_2$  der beiden Jahreszeiten berechnet worden sind, ist festzustellen, dass die Abhängigkeit der Korrosionsraten vom Produkt  $W_o \times O_2$  im Sommer deutlicher zum Ausdruck kommt als im Winter (s. Werte in Tabelle 4). Man kann damit auch den Schluss ziehen, dass der Sommereinfluss deutlich überwiegt, was der jahreszeitlichen Erhöhung von  $W_o$  Rechnung tragen würde. Dieser Effekt wäre auch dahingehend plausibel, als chemische Reaktionen bei höheren Temperaturen wesentlich schneller ablaufen und somit prägender in der Gesamtbetrachtung sein sollten.

### 3.2.2 Einfluss von Anlegestellen

Anliegende Schiffe können die Korrosion an Spundwänden in vielfältiger Weise beeinflussen: Durch ständiges Bewegen und Reiben z.B. wird der (schützende) Korrosionsbelag immer wieder entfernt, so dass ständige Anfangskorrosion eintritt. Nicht auszuschließen ist auch ein elektrochemischer Einfluss, welcher in sich in Form einer Elementbildung zwischen Schiff und Spundwand aufbauen könnte. Darüber hinaus könnten sich zwischen dem Schiffkörper und der Spundwand spezifische korrosive, chemisch bedingte Milieus einstellen.

In Abb. 19 sind, analog zur Abb. 17, für den Unterwasserbereich (UWZ) die Abhängigkeiten der Korrosionsraten von den  $W_o \times O_2$  –Daten aufgeschlüsselt dargestellt: Unterschiede in der Korrosionsrate bzw. Lage der Abrostungskurven sind aus dieser Darstellung allerdings nicht erkennbar bzw. als marginal einzustufen. Hingegen wäre ein Einfluss von scheuernden Schiffen eher in der Niedrigwasserzone vorstellbar. Daher wurden die Verhältnisse auch für diese Zone überprüft. In Abb. 20 sind die Abrostungsraten von Spundwänden mit und ohne Anlegestellen mit Ausgleichskurven für mittlere Korrosionsraten der Niedrigwasserzone (NWZ) dargestellt. Die Kurven besitzen grundsätzlich unterschiedliche Steigungen, jedoch ist nicht erkennbar, dass Spundwände mit Anlegestellen eine signifikant erhöhte Abrostungsrate zeigen. Offensichtlich sind bei den ausgewählten Objekten Fenderungen wirksam, bzw. die Entfernung von Schiff zur Uferbefestigung ausreichend groß um Scheuern und elektrochemische Wirkung zu erzielen.

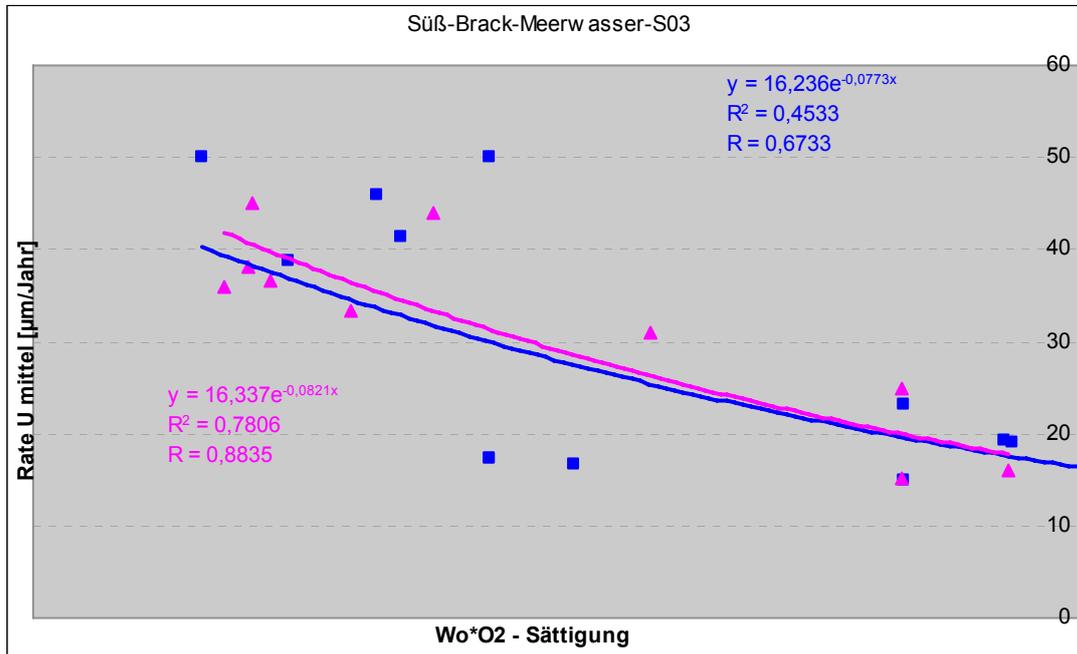


Abb. 19: Abrostungsraten in der UWZ mit (Rauten) und ohne Anlegestellen (Quadrate)

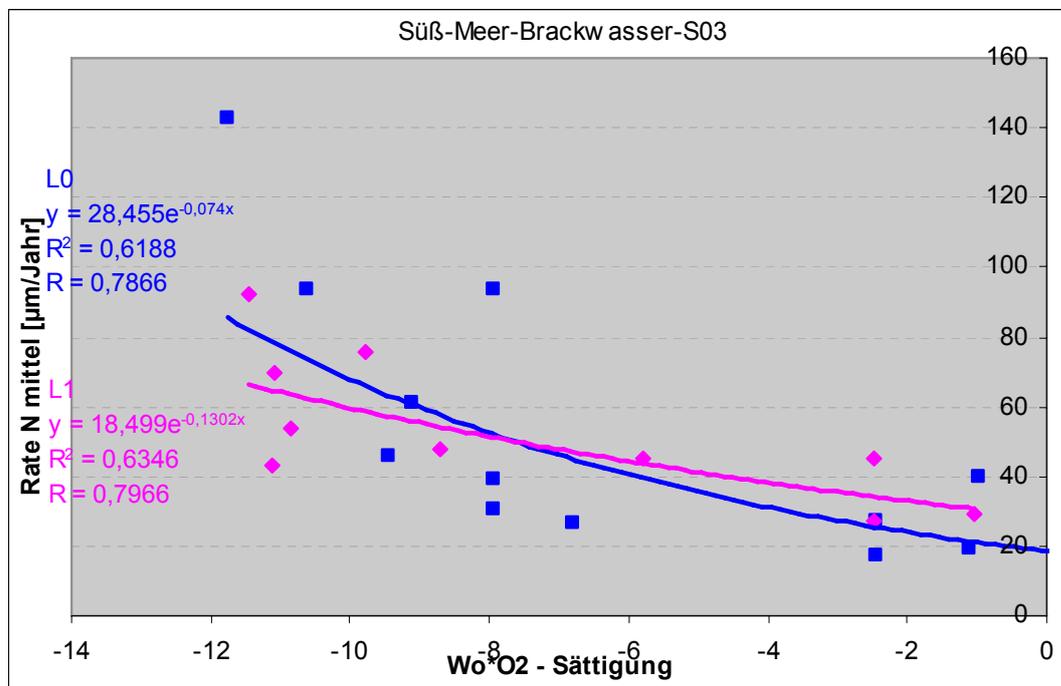
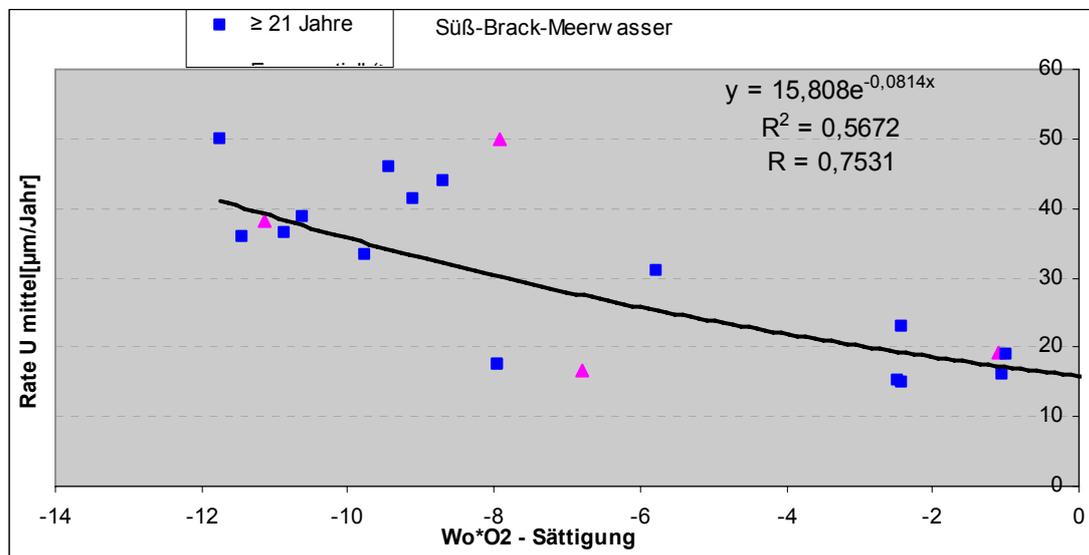


Abb. 20: Abrostungsraten in der NWZ mit (Rauten) und ohne Anlegestellen (Quadrate)

### 3.2.3 Einfluss der Stahlerzeugnisse

In den Diagrammen zur Herleitung des Zusammenhanges Wasseraggressivität / Korrosionsrate wurden letztlich Stahltypen unter einem Alter von 21 Jahren eliminiert. Durch diese (statistisch begründete) Maßnahme sind gleichzeitig die jüngeren Stahltypen überproportional aussortiert worden, so dass die „alten“ Stähle ein Übergewicht in der Kurvenermittlung bekommen haben. In Abb. 21 (in Anlehnung an Abb. 17) sind diese „modernen“, phosphorarmen Stähle durch Dreiecke gekennzeichnet. Es zeigt sich, dass diese sich um die Ausgleichskurve scharren und keinerlei Tendenzen zur stärkeren oder schwächeren Korrosion zeigen – zumindest für den Unterwasserbereich.



**Abb. 21:** Korrosionsraten in Abhängigkeit vom  $W_o \times O_2$ -Wert (UWZ, >21 Jahre) (Dreiecke: Beruhigt vergossene „moderne“ Stähle)

### 3.3 Vertrauensbereiche der Abrostungskurven

Die erzeugten Ausgleichskurven der xy-Diagramme (Abrostungsraten versus  $W_o \times O_2$ ) können in gewisser Weise als Nomogramm für die zu erwartende Abrostungsraten bei neu zu erstellenden Spundwandbauwerken benutzt werden (s. Abb. 17 und 18), wenn  $W_o$  nach DIN 50929 und die Sauerstoffsättigung der Immersionsmedien jeweils vorab bestimmt werden. Am Schnittpunkt des Abszissenwertes mit der Ausgleichskurve kann dann an der Ordinate die zu erwartende Korrosionsrate für Bauwerke mit mindestens 20 Jahre Standzeit abgeleitet werden. Die vorliegenden Resultate des Zusammenhanges von Abrostungsraten und Korrosivität werden nun noch durch Bestimmung der Vertrauensintervalle um die Mittelwertsfunktion ergänzt. Ausgehend von der Ausgleichskurve der Abb. 17 sind nun in Abb. 22 die Vertrauensbereiche für die beiden häufig genutzten Intervalle (95% und 99% Sicherheit) mit eingetragen. Die konkrete Anwendung erfolgt nun mit Hilfe der Ausgleichskurve von Abb. 22: Der Aus-

gangswert der Korrosivität für  $W_o \times O_2$  wird mit einem Wert von -2 angesetzt. Die daraus ablesbare mittlere Korrosionsrate liegt bei etwa 18  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ . Wird bei der Spundwandbemessung nun eine Sicherheit von 95 % aller Fälle der Abrostungsrate gewünscht (d.h. 95 % der möglichen Fälle sind darin enthalten), so liegt der anzurechnende jährliche Abtrag bei 36 im oberen, bzw. im unteren Bereich bei 10  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ . Entsprechend ist für eine 99%-ige Sicherheit die obere Rate mit 46 und für die untere Rate mit 8  $\mu\text{m}/\text{Jahr}$  anzusetzen. Im Verlauf zur höheren Wasseraggressivität weitet sich das Feld auf („Horneffekt“), so dass entsprechend höhere Abrostungsraten bei den jeweiligen Vertrauensbereichen anzusetzen sind. Alle weiteren Mittelwertskurven der verschiedenen Korrosionszonen mit dazugehörigen Vertrauensbereichen sind in den Anlagen 5.1 bis 5.3 dargestellt.

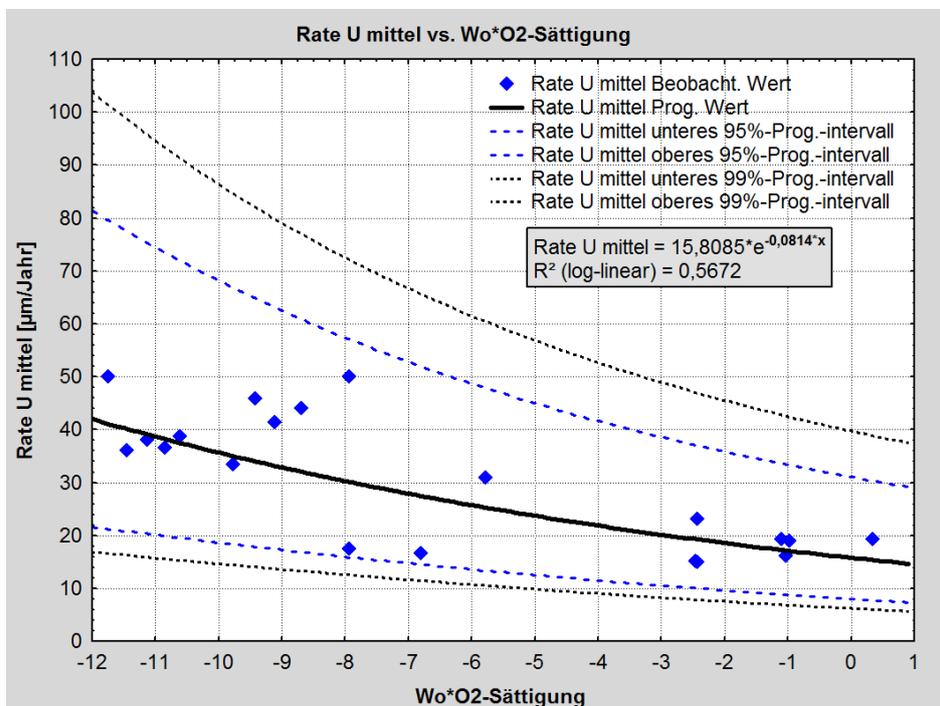


Abb. 22: Ausgleichskurve mit Vertrauensbereichen der Abrostungsraten

### 3.4 Vergleich der Abrostungsraten mit DIN 50929

Die DIN 50929, Teil 3, Tabelle 6 (Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung) empfiehlt Abrostungsraten entsprechend des Ionengehaltes bzw. der Korrosivität der Immersionsmedien. Nach Kenntnis des Verfassers sind diese Zusammenhänge nie einer eingehenden Prüfung unterzogen worden, obwohl sie häufig als „Ratgeber“ benützt worden sind und trotz ihres Alters (Ausgabe 1985) aktuell immer noch Verwendung finden. Den Werten der Abrostungsraten nach DIN 50929 sind  $W_o$ -Bereiche zugeordnet (siehe Tab. 5). Dabei wird wiederum zwischen mittleren („mittlere Abtragsrate“, bezogen auf 100 Jahre Standzeit) und maximalen Abrostungsraten („maximale Eindringtiefe“,

bezogen auf 30 Jahre Standzeit) unterschieden. In Tabelle 5 sind die von der DIN 50929 empfohlenen Abrostungsraten in der kompletten Übersicht mit Vergleicheswerten der Unterwasserzone dieser Arbeit aufgelistet. Es ist festzustellen, dass die Übereinstimmung sehr gering ist.

**Tabelle 5:** Abrostung nach DIN 50929 in Abhängigkeit von  $W_o$  und Spundwandalter

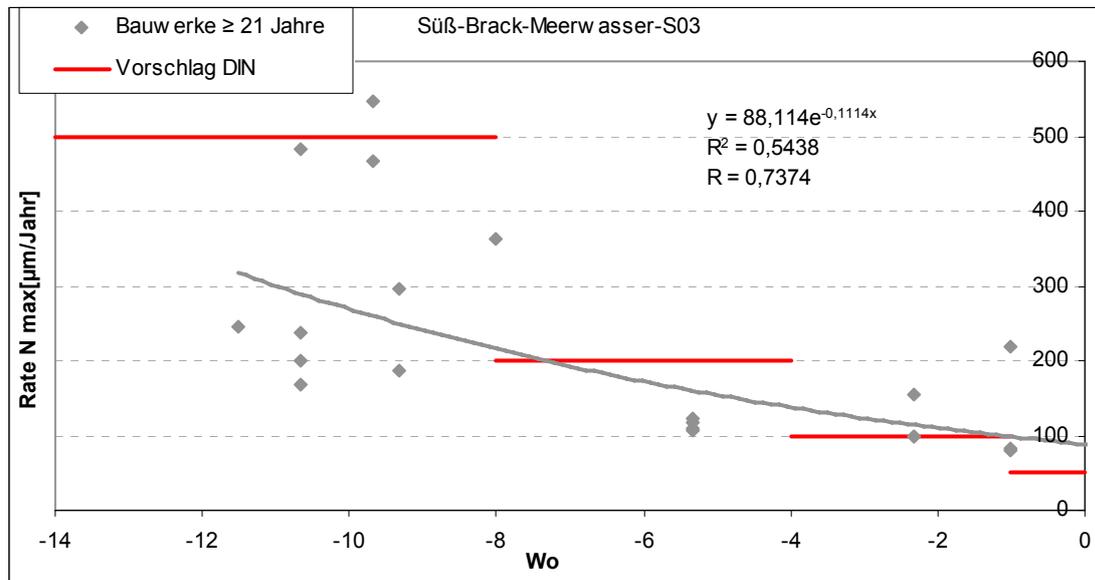
$W_o/W1$ - Werte	Mittlere Abtrags- rate (mm/a) <sup>1</sup>	max. Eindring- tiefe (mm/a) <sup>2</sup>	Mittlere Korrosions- rate (UWZ) <sup>3</sup>	Max. Korrosions- rate (UWZ) <sup>3</sup>
$\geq 0$	0,01	0,05		
-1 bis -4	0,02	0,1	$0,018 \pm 0,002$	$0,080 \pm 0,010$
< -4 bis -8	0,05	0,2	$0,026 \pm 0,004$	$0,105 \pm 0,015$
< -8	0,1	0,5	$0,036 \pm 0,006$	$0,130 \pm 0,010$

<sup>1</sup> Standzeit 100 Jahre nach DIN; <sup>2</sup> Standzeit 30 Jahre nach DIN; <sup>3</sup> diese Arbeit

Die DIN-Abrostungswerte und ihre dazugehörigen  $W_o$ -Bereiche wurden nun mit den Abrostungsraten der Niedrigwasserzone dieser Arbeit verglichen und die Werte in die hier erstellten Variationsdiagramme eingetragen. Dabei wurde eine relativ gute Übereinstimmung erzielt. Die mittlere Abtragsrate nach DIN mit der mittleren Abrostungsrate der Niedrigwasserzone dieser Untersuchungen ist in Abbildung 23 verglichen. Für die maximale Eindringtiefe (Lochfraß!?) nach DIN ergibt sich eine Ähnlichkeit in der Korrosivität mit der maximalen Abtragsrate im Bereich der Niedrigwasserzone (Abb. 24).



**Abb. 23:** Mittlere Abrostungsraten – Lage der DIN-Werte im Niedrigwasserbereich



**Abb. 24:** Maximale Abrostungsraten – Lage der DIN-Werte im Niedrigwasserbereich

Zusammenfassend kann zur DIN-Einteilung gesagt werden, dass die vorgeschlagenen Abrostungswerte der DIN tendenziell hoch angesetzt sind, da sie mit den Daten des höchsten korrosiven Abtrags dieser Arbeit, der Niedrigwasserzone, am besten harmonisieren.

### 3.5 Betrachtung der Korrosivität unter verschiedenen Bedingungen

Aus den Laboruntersuchungen mittels potentiodynamischer Messungen zeigten die Stähle „alten Typus“ die höchsten Korrosionsraten (siehe Abb. 6, Abschnitt 2.2.4). Hierdurch ergab sich jedoch keine Übereinstimmung mit den in situ gemessenen Korrosionsraten, deren Mittelwerte z.B. im Unterwasserbereich 3 bis 8fach niedriger liegen. Im Vergleich zu Werten der Abrostungen an den Bauwerken, sind die Beobachtungen daher meist widersprüchlicher Natur:

- Die „alten Stahltypen“ (BW-Nr. 275 und 41) zeigen hier geringere Abrostungsraten (37 resp. 33 µm/a) als „modernere“ Stähle (BW-Nr. 222 (50 µm/a); BW-Nr. 67 weist dank des geringen Alters automatisch eine zu hohe Korrosionsrate (63 µm/a) auf (siehe Tab. 6).
- BW-Nr. 222 zeigt z.B., bei relativ niedriger Wasseraggressivität ( $W_o = -8$ ), eine relativ hohe Korrosionsrate am Bauwerk auf, wohingegen derselbe Stahl im Labor die geringste Abrostung zeigt (vergl. Werte in Tab. 6).
- Die aus den Laborversuchen ermittelten Abrostungsraten entsprechen Werten, wie sie am Bauwerk nur im gut durchlüfteten bzw. anodischen Bereich auftreten. Hier ist die maximale Abrostungsrate der Spritzwasserzone zu nennen, wenn man die hohe Abrostungsrate des Bauwerks Nr. 67 ausser Acht lässt (vergl. Tab. 6).

Die Begründung könnte in der unterschiedlichen Ausbildung von „Schutzschichten“ durch Rost im Labor und in der Natur liegen. Das heißt, im Labor würden, auf Grund der kurzen

Versuchsdauer (Stunden), lediglich die Anfangskorrosionsraten bestimmt, zumal die Stahloberflächen für den Versuch noch durch Aufräuen aktiviert werden. Gleichzeitig besitzen Spundbohlen am Bauwerk eine (schützende!?) Zunderschicht. Andererseits leidet die Vergleichbarkeit generell auch darunter, dass die spezifischen Bauwerksverhältnisse (Immersionsmedien und Spundwandalter), nicht zu eliminieren sind. So ist z.B. mit BW-Nr. 67 ein sehr junges Alter einbezogen worden. Hier treten noch verstärkt Fehler zur Ermittlung der Abrostungsrate durch (nicht näher bekannte) Walztoleranzen auf.

Die vergleichende Überprüfung sogenannter alter Spundwände mit neueren Spundbohlen auf Basis der Labordaten widerspricht nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen der häufig verbreiteten Ansicht der größeren Korrosionsstabilität von alten Spundbohlen (u.a wegen ihres höheren Phosphorgehaltes; siehe BW-Nr. 275 und 41). An den Bauwerken selbst zeigt sich hingegen in den Mittelwerten der drei Zonen eine geringe Tendenz geringerer Abrostungsraten (siehe Tab. 6; vergl. Anlage 4).

**Tabelle 6:** Untersuchungsergebnisse von vier ausgewählten Stählen

Parameter	BW-Nr. 67	BW-Nr. 222	BW-Nr. 275	BW-Nr. 41	Anmerkung
Alter (a)	8	32	63	33	in Jahre
P [M.-%]	0,014	0,018	0,065	>0,07	Phosphor
Si [M.-%]	0,420	0,008	0,002	0,002	Silizium
Cu [M.-%]	0,154	0,161	0,331	0,058	Kupfer
CEV [M.-%]	0,46	0,30	0,23	<0,30	Kohlenstoffäquivalent
ASTM-Korngröße	10,6	8,6	8,3	8,2	Werte reziprok zum Ø
„Stahltyp“	„modern“	„submodern“	„alt“	„alt“	nach Si-, P-Gehalt**
Korrosionsrate	180	170	190	250	(µm/a) im Labor *
Abrostung UW	0,50	1,6	2,30	1,08	(mm) am Bauwerk <sup>1)</sup>
Korr.rate UW	62,5	50	36,5	33	(µm/a) am Bauwerk <sup>1)</sup>
Abrostung SprW	0,50	1,6	2,30	1,08	(mm) am Bauwerk <sup>2)</sup>
Korr.rate SprW	325	238	178	258	(µm/a) am Bauwerk <sup>2)</sup>
W <sub>o</sub> x O <sub>2</sub>	-13	-8	-11	-10	Wasser
W <sub>o</sub>	-10	-9	-12	-8	Wasser
Lokalität	Norderney, Nordsee	Travemünde, Ostsee	Marine Olpenitz, Ostsee	Kaje Olpenitz, Ostsee	

\*künstliches Meerwasser, \*\* beruhigt/unberuhigt vergossen; <sup>1)</sup> Mittelwerte, <sup>2)</sup> Maximalwerte

### 3.6 Einfluss der Spundwandstahltypen auf das Abrostungsverhalten

Neue Stähle mit geringen Zulegierungen an sogenannten korrosionshemmenden Metallen werden in neuerer Zeit desöfteren als Spundwandstahl angeboten. Die Zusammensetzung entspricht dabei den sog. Corten- bzw. WT-Stählen („witterungsbeständig“), wie er an Stahlhochbauten eingesetzt worden ist. Auf Grund von vorliegenden Abrostungsmessungen und chemischen Analysen wurde hierdurch eine vergleichende Untersuchung von Spundwandstählen mit unterschiedlichen Kupfergehalten ermöglicht.

Bei Untersuchungen der Abrostungen von Spundwänden mit identischem Immersionsmedium (Schleusen Zerben und Wusterwitz) durch das Referat K1 konnte mittels chemischer Analytik ein deutlicher Unterschied in der Zusammensetzung der Stähle festgestellt werden. Der in Zerben eingesetzte Stahl ist mit seinem hohen Kupfergehalt modernen und angeblich korrosionswiderstandsfähigen Spundbohlenstählen sehr ähnlich (Tabelle 7).

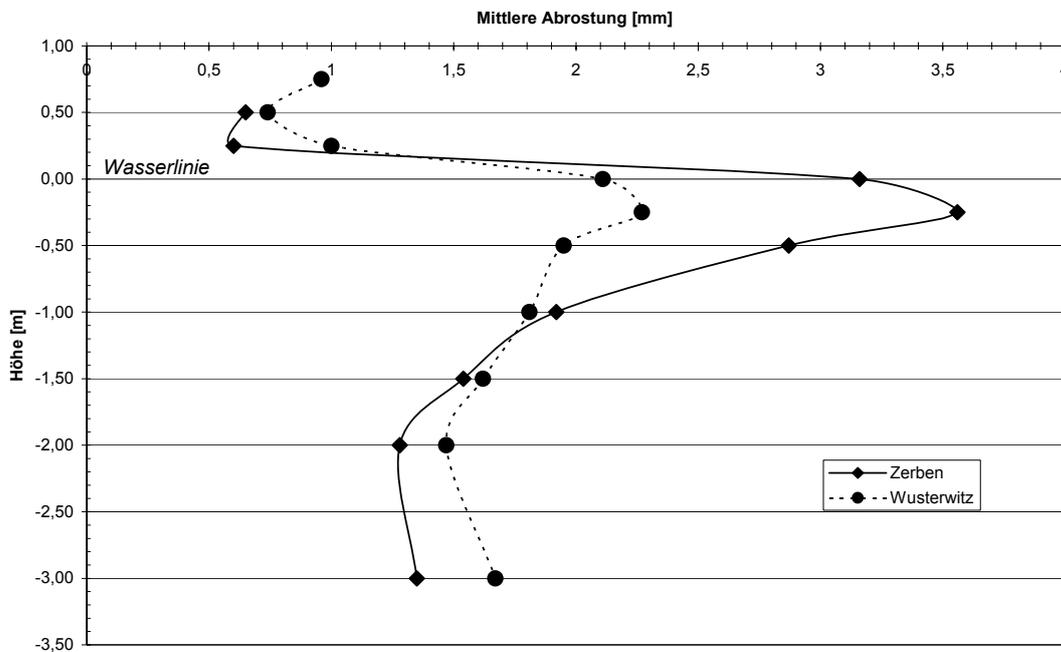
Bei Untersuchungen der Abrostungen von Spundwänden mit identischem Immersionsmedium (Schleusen Zerben und Wusterwitz) wurden die Restwanddicken mittels Ultraschallverfahren bestimmt ([5] und [6]). Bei der chemischen Analytik (Untersuchungen bei B2) konnte insgesamt jeweils „Baustahlchemismus“ festgestellt werden. Jedoch zeigte sich ein deutlicher Unterschied in der Zusammensetzung insofern, als der in Zerben eingesetzte Stahl (Probe S 141-3/4) einen deutlich höheren Kupfergehalt aufweist (Tabelle 7). Dieser Kupfergehalt von ca. 0,26 M.-% entspricht der Konzentration eines „modernen“ und angeblich korrosionswiderstandsfähigeren Spundwandstahles (z.B. nach ASTM A 690). Laut Aussagen von Stahlherstellern können derartige Cu-Konzentrationen in den Gütestufen S 270 bis S 500 eine Verminderung der Abtragsraten durch Korrosion bis zu 45 % erbringen. Ein Zulegieren von Chrom und Nickel (jeweils bis 0,5 M.-%) soll jedoch, in Kombination mit Kupfer, diesem Effekt wieder entgegenwirken und nahezu kompensieren.

**Tabelle 7:** Bestimmung der Legierungselemente der Spundwandstähle in [M.-%]

Legierungselement	Probe S141-1 Wusterwitz	Probe S141-2 Wusterwitz	Probe S141-3 Zerben	Probe S141-4 Zerben
Cu	0,04	0,04	0,29	0,23
Ni	0,15	0,14	0,05	0,04
Cr	0,05	0,06	0,02	0,02
V	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Da beide Spundwandbauwerke nahezu gleiches Alter aufweisen (Wusterwitz: 78 Jahre; Zerben: 70 Jahre) und in ein und demselben Wassertyp (Havel-Kanal) eingebaut worden sind, ist durch die Nachbarschaft die Voraussetzungen zur Vergleichbarkeit gegeben.

In Abb. 25 wurde das Abrostungsprofil beider Spundwandtypen aufgegliedert wiedergegeben. Bei nahezu gleichem Alter konnte jedoch nur ein geringer Vorteil im Korrosionsverhalten des legierten Stahles im Unterwasserbereich (unterhalb von -1m) gefunden werden. Die Abrostungsraten liegen hier rechnerisch bei 19  $\mu\text{m/a}$  für Wusterwitz bei 20  $\mu\text{m}$  für Zerben. Die oberhalb der Wasserlinie auftretenden Abrostungen sind wegen eines Schutzanstriches der Bohlen Wusterwitz nicht vergleichbar. Jedoch liegt der rechnerische Abrostungswert für Zerben bei 50  $\mu\text{m/Jahr}$ , welcher einen relativ hohen Wert für Süßwasser darstellt. Die Abrostungsverhältnisse im Spritzwasserbereich sind für beide Spundwände wieder in etwa vergleichbar, wobei der Einfluss einer möglichen Beschichtung (Wusterwitz) nicht berücksichtigt ist. Die Abrostungsmessungen an Spundwänden von Cu-legiertem Stahl ergaben somit keine zweifelsfreien Hinweise auf verbesserten Korrosionsschutz durch diesen Stahltyp.



**Abb. 25:** Abrostungslinien über die Tiefe zweier unterschiedlicher Stahltypen (jeweils OW)

Anzumerken ist hier noch, dass der relativ hohe Kupfer-Gehalt bei BW-Nr. 275 (0,33 M.-% Cu) hinsichtlich der Abrostungsraten gegenüber den weiteren Vergleichsproben ebenfalls keine Vorteile im Unterwasser- und Niedrigwasserbereich der Bauwerke erzielen konnte. Hingegen zeigt dieser Stahl in der Spritzwasserzone die geringsten Abrostungsraten. Im Laborversuch konnte die o.g. Stahlprobe keine Abrostungsverbesserungen belegen (Tab. 6).

### **3.7 Anomale Löcher**

Die Auswertungen im ECSC-Forschungsvorhaben haben gezeigt, dass Durchrostungen von Spundbohlen nicht immer mit der maximalen Abrostung (z.B. in der Tideniedrigwasser-Zone) zusammenfallen. Vielmehr können sie über die ganze Tiefe der Spundbohle verteilt sein. Bei der Zusammenstellung und Überprüfung von Spundwandkorrosionsschadensfällen deutet sich allerdings an, dass außerhalb des Wasserwechselbereiches (maximale Korrosion) die Mikrobiell Induzierte Korrosion (MIC) die Ursache für die so genannten anomalen Löcher sein sollte. Daher wurde das Thema für diese Forschungsarbeit nicht weiter in den Focus genommen. Vielmehr soll eine Zusammenfassung mit Auswertung von zahlreich untersuchten MIC-Schadensfällen durch die BAW einen Beitrag zur Aufklärung dieser Anomalie bzw. dieses Mysteriums leisten.

## **4 Ausblick – Folgeforschung**

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen haben gezeigt, dass Abrostungen an Stahlspundwänden vorhersagbar sind – in gewissen Toleranzen. Die Bestimmung des Wasserchemismus des Immersionsmediums muss dabei durchgeführt werden.

In vergleichenden Untersuchungen mit einem elektrochemischen Verfahren (potentiodynamische Polarisationskurven, open circuit measurements / OCP; in Korrosionsmesszelle) werden hingegen oftmals Diskrepanzen, bzw. sogar widersprüchliche Ergebnisse, zu den vor Ort Messungen sichtbar. Daher soll das Abrostungsverhalten der untersuchten Spundwandstahltypen nochmals im Labor umfangreich charakterisiert werden und die hieraus berechenbare Abrostung (Faraday) mit der wirklichen Abrostung der Bauwerke mit Hilfe der Statistik verglichen werden. Dabei ist vermutlich die richtige Parametereinstellung hinsichtlich der Immersionsverhältnisse im Labormaßstab zu finden, sofern diese überhaupt sich als chemisch nachstellbar erweisen können.

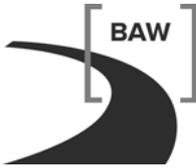
Bundesanstalt für Wasserbau  
Karlsruhe, 30. Juni 2011

Im Auftrag

Dr. Günter Binder

## 5 Literatur

- [1] Design Method for Steel Structures in Marine Environment including the Corrosion Behaviour, ECSC-Nr. 7210
- [2] Hein, W.: Zur Korrosion von Stahlspundwänden; Mittbl. d. BAW 67 (1990) 1-40
- [3] Empfehlungen des Ausschusses für Ufereinfassung (EAU); Fachausschuss Ufereinfassung der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Ernst und Sohn, Berlin, 10. Auflage 2004
- [4] Hein, W., Ladeburg, H., Mennenöh, S. & Schröder, H. Th.: Untersuchung über das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl in Hafenwässern des deutschen Küstengebietes; HTG, März 1975
- [5] Gutachten zum Erhaltungszustand der Leitwände aus Stahlspundbohlen; BAW-Nr. A 395 501 10049 (2007)
- [6] Gutachten zum Erhaltungszustand der Leitwände aus Stahlspundbohlen; BAW-Nr. A 395 501 10062 (2007)



Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden (XXXI PIANC-Kongress 2006)

### Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden

Günter Binder, Dr., Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, guenter.binder@baw.de

Anne Heeling, Dipl.-Geol., Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, anne.heeling@baw.de

Ralf Uerkvitz, Dr., Stat Soft (Europa) GmbH, Hamburg G, info@statsoft.de

### **Zusammenfassung**

Die Kenntnis von Abrostungsraten von Spundbohlen ist eine wichtige Größe für die Planung von Spundwandbauwerken. Daran bemessen sich die zu ergreifenden Schutzverfahren (Beschichtung und/oder 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 Einwirkungsdauer (Standzeit), auch externe Einflüsse (Wasserbeschaffenheit, Tide & Strömung, Anlegestelle) und 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 niedrigrisalinarem 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 Korrosionszonen 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 eines Forschungsvorhabens der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, 2005).

## 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 von 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 Anlagestelle).

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

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.

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 ( $W_o$ ): Aus den oben angeführten Parametern wurden die  $W_o$ -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 ( $\Delta W_o$  von 4 auf 8,5), während für die Bereiche des Brack- und Meerwassers das Gegenteil der Fall ist ( $\Delta W_o$  von 6 bzw. 7 nach 3,5 bzw. 4,5). Als Ursache der Schwankungen ist vor allem im Wechsel der Konzentration von Chlorid anzuführen.

Die elektrische Leitfähigkeit stellt als Summenparameter ein Maß für den Gesamtionengehalt der Wässer dar. Insgesamt gibt es 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 für die Gesamtheit der ablaufenden reduzierenden und oxidierenden Reaktionen. Tendenziell ist das Potential im Sommer meist geringfügig erhöht ist. 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 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 Lokalitäten, deren Gewässer eine Art Beckenstruktur aufweisen (z.B. „abgeschlossene“ Häfen) und damit schlecht durchströmt sind, bilden ein Konzentrationsgefälle aus. Im jahreszeitlichen Vergleich zeigt z.B. *Sauerstoff* im Sommer eine deutliche Verarmung zur Tiefe hin. Eventuell ist hier die Sauerstoffzehrung durch höhere Wassertemperaturen und damit verbundenem Wachstum größer als im Winter. Die *Temperaturen* selbst, sowie der *pH-Wert*, zeigen jeweils geringfügige Abnahme mit der Tiefe. Diese Tendenz ist überwiegend nur im Sommer erkennbar. Bei der Lokalität Wilhelmshaven (Marinearsenal; Ostkaje) lagen die kühleren Schichten im Winter obenauf (Atmosphäreneinfluss). Die Salzgehalte verhalten sich nicht eindeutig. So ist in Wilhelmshaven eine Abnahme zur Tiefe hin nur im Winter festzustellen, während in Travemünde die ansatzweise vorhandene Zonierung im Winter 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 ( $W_o$ ) 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 kommt unter Hinzuziehung der  $\text{O}_2$ -Konzentrationen 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* ( $\text{SiO}_2$ ) 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* ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sind "Durchläuferminerale" des Rostes und kommen daher überall vor. *Akaganeit* ( $\beta\text{-FeOOH}$ ) ist eine Modifikation des Rostminerals Goethit mit der Zusatzinformation einer chloridinduzierten Korrosion. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Vorkommen in den Wasserzonen (UWZ, NWZ) salzhaltiger Gewässer.

*Siderit* ( $\text{FeCO}_3$ ) ist durch das zweiwertige Eisen dem reduktiven Bereich bei gleichzeitig hohem  $\text{CO}_2$ -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 Übergangsmineeral im von  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  -  $\text{Fe}(\text{OOH})$  - System (zweiwertiges / dreiwertiges Eisen) gesehen. Das Vorkommen ist auf eine Probe (s. Tabelle 1) begrenzt.

**Tabelle 1: Verteilung von Rostmineralen**

Mineral / Zone	Quarz	Goethit/ Magnetit	Akaganeit ( $\beta$ -FeOOH)	Siderit (FeCO <sub>3</sub> )	Green rust (Fe(OH) <sub>2</sub> /(OOH))
Unterwasser	+	+	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

Durch Korrosion wird generell Eisen weggeführt wodurch sich *Kohlenstoff* und *Schwefel* im Rost anreichern können. Darüber hinaus können beide Elemente durch Ausfällungen (Calcit, Gips) aus dem Wasser angelagert werden. Schwefel spielt ferner bei der MIC eine entscheidende Rolle. Bei den Untersuchungen wurde 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-% S im Mittel!), kaum Anreicherungen an *Schwefel* (S) festzustellen. In den Spritzwasserzonen aller drei Wassertypen liegen die S-Gehalte meist unter 0,15 M-%. Dies spricht weniger für eine Sulfat-Ausfällung, als für einen Einbau bzw. aktiver 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. Tab. 2).

**Tabelle 2: Mittlere Kohlenstoff- und Schwefelgehalte von Rostproben**

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

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

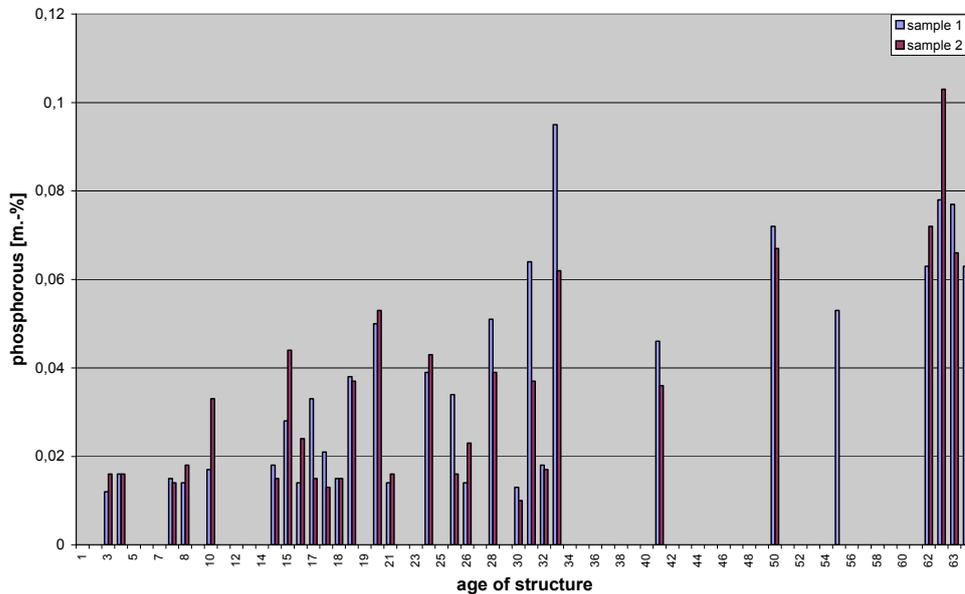
### 3.3 Stahluntersuchungen

#### 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. Abbildung 1 zeigt bei

älteren Stählen erhöhte P-Gehalte (0,03 bis 0,1 M-%) an. Bei der Altersgruppe jünger



**Abb. 1:** Phosphorgehalt im Zusammenhang zum Alter der Spundbohlen

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: Si<0,20M-%; beruhigt: 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.

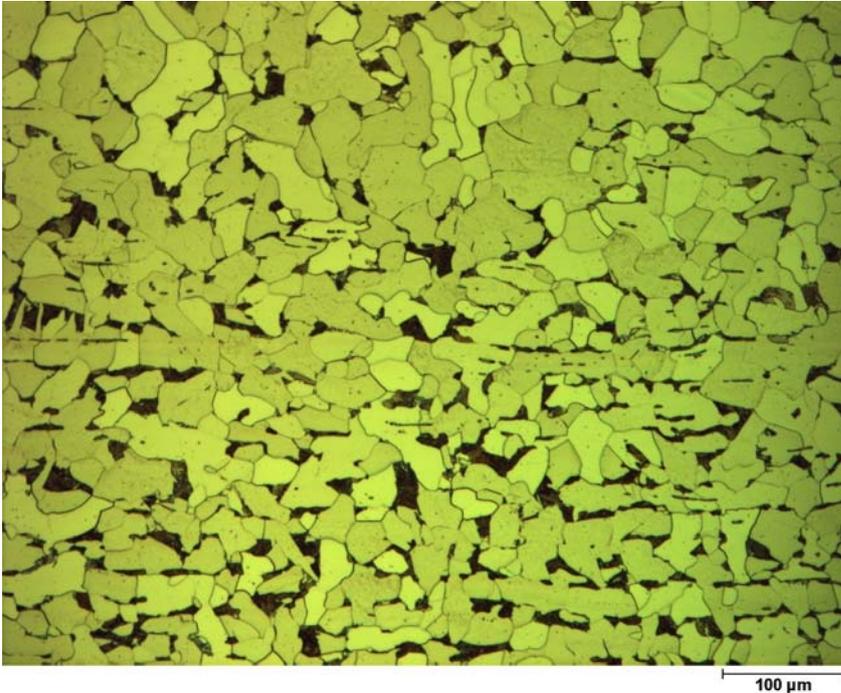
### **Gefügeuntersuchungen**

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 Anschliffe der Stähle zeigen unter dem Mikroskop ausschließlich das erwartete ferritisch-perlitische Gefüge, welches typisch für Baustähle ist (s. Abb. 2).



**Abb. 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 vergleichenden Untersuchung ausgewählt (s. Tab. 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 (rezibrok zur ASTM-Zahl) scheinen die Korrosion einzuschränken (BW-Nr. 67).
- Ein Einfluß von Legierungsbestandteilen ist nicht auszuschließen: Stähle mit niedrigem Kohlenstoffequivalent ( $CEV = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ ) erscheinen korrosionsanfälliger (Tab. 3).

Tabelle 3.: Meßparameter von vier getesteten Stählen

Bau-	Alter	P	Si	CEV	ASTM-	„Stahltyp“	Korrosions-
------	-------	---	----	-----	-------	------------	-------------

werks-Nr	(a)	[M.-%]	[M.-%]	[M.%]	Korngr.		rate (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)

Die vergleichende Überprüfung sogenannter alter Spundwände mit neueren Spundbohlen auf Basis der Labordaten 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 für die Korrosion nachzuweisen. Mit Sicherheit können dabei das Bauwerksalter und die Salzkonzentration der dazugehörigen Immersionsmedien (stellvertretend:  $W_0$ ) als wesentliche Größen genannt werden. Jedoch zeigen alle Darstellungen (s. z.B. Abb. 3) dass damit alleine der Korrosionsfortschritt nur unzureichend beschrieben werden kann. 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

- einer Basiskorrosion  $b_0$  und
- einem 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 Tiedeniedrigwassers.
- $b_2$  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, unter Berücksichtigung weiterer Einflussparameter ( $x_1, \dots, x_m$ ):

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

Die einflussreichsten statistisch nachgewiesenen Parameter sind in Tabelle 4 aufgelistet.

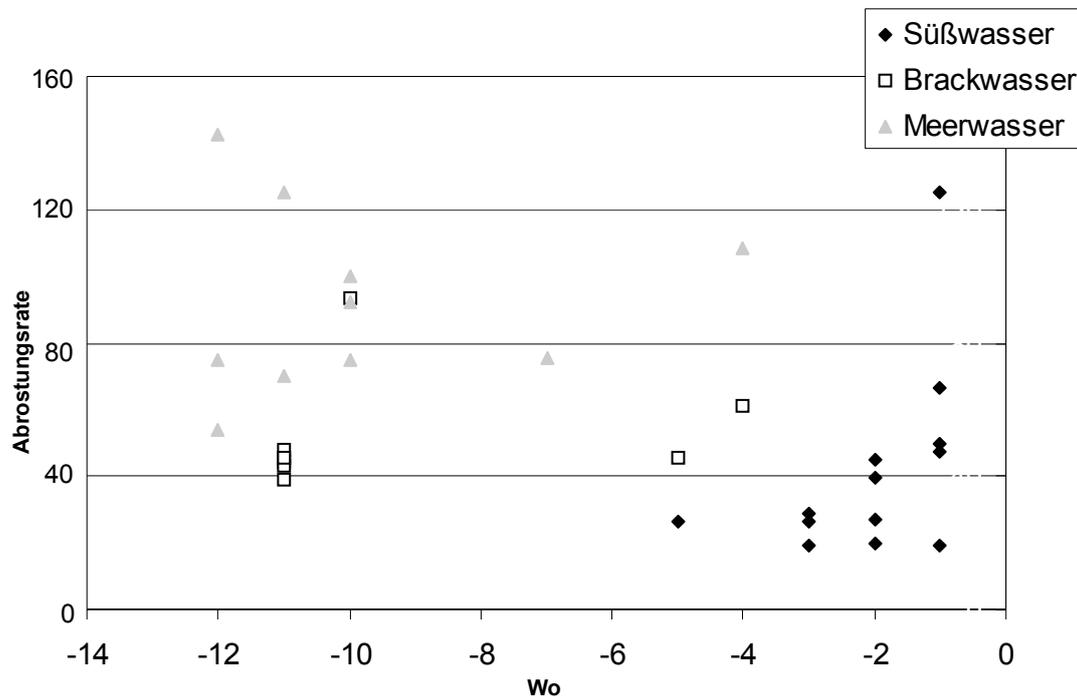


Abb. 3: Abrostungsraten (µm/Jahr) im Zusammenhang mit der Wasseraggressivität ( $W_o$ )

Tabelle 4: Statistisch nachgewiesene korrosionsrelevante Parameter

	$b_o$ Basisabrostung	$b_1$ Abrostungsgradient	$b_6$ Abrostungsgradient
Bereich (Tiefe/Zone)	≥ 4m/TNW	0 bis >4m/TNW	±0/Spritzwasser
Sicherheit / Abweichung	83% / ±0,6mm	78% / ±0,2mm	80% / ±2,0mm
Alter	v	v	v
Stahltyp	v	v	v
Liegeplatz		v	v
Strömung	v		v
Tide	v	v	v
Gewässermilieu	v	v	v
Säurekapaz.-O <sub>2</sub> -Gehalt	v	v	
Salz-O <sub>2</sub> -Gehalt			v
Säurekapaz. (saisonal)	v		
Verschmutzung (saisonal)		v	
Redox (Tiefengradient)		v	

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

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

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

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

## **5. Schlussfolgerungen**

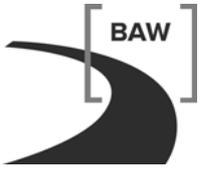
Starke Streuungen bei der Erstellung von Abrostungskurven unter Einbeziehung z.B. des Alters oder des Milieus haben gezeigt, dass damit eine Abrostungsvorhersage nur unzureichend getroffen werden kann. Mit der Erhebung und Zusammenstellung umfangreichen Datenmaterials wurde die Basis für die Ermittlung der maßgeblichen Einflussfaktoren geschaffen. Mit unsteten 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.

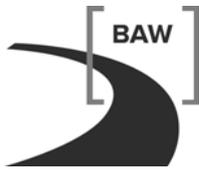
Die umfangreichen Auswertungen der Vielzahl von Daten haben auch gezeigt, dass Durchrostungen von Spundbohlen nicht immer mit der maximalen Abrostung (z.B. in der Tideniedrigwasser-Zone) zusammenfallen, sondern „unvermittelt“ in größeren Tiefen auftreten können. Diese sogenannten anomalen Löcher sind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

## **6. Literatur**

- Alberts, D. & Heeling, A.: Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden; Mittbl. d. BAW 75 (1997)
- Bewertung der Korrosion von Spundwandkorrosion; Forschungsvorhaben Nr. 8159 bei der BAW (2005)
- Uerkvitz, R.: Einflussfaktoren der Spundwandkorrosion; unveröff. Bericht, Hamburg (2004)



Sammlung aller verwendeten Daten auf der CD



Liste der Spundwandbauwerke

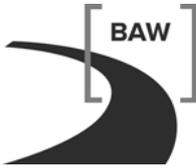
BW-Nr.	Projekt	Ort	Gewässer
<b>Süßwasser Sommer 03</b>			
105	Spundwände am alten Weserwehr	Bremen Hemelingen	Weser km 361,5
86	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Bückeburg Rusbend	MLK km 111,72
84	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Espelkamp Hafen	MLK km 80,01
112	Weserwehr Bremen-Hemelingen	Bremen Hemelingen	Weser km 361,5
87	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Niederwöhren	MLK km 120,47
132	Küstenkanal Oldenburg	Oldenburg Hundsmühlen	Küstenkanal
85.1	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Liegeplatz Lübbecke	MLK
234	Fähranleger Sehestedt, Nordseite, West	Sehestedt	NOK
83.1	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Espelkamp Fiestel	MLK km 77,46
213	Sicherheitstor Oldenburg, Küstenkanal	Hundsmühlen	Küstenkanal
124	TORFPLATZKAJE OLDENBURG	Oldenburg	Küstenkanal
85.nn	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Liegeplatz Lübbecke	MLK
160	Schleuse Oldenburg, Leitwände	Oldenburg	Küstenkanal
110	Stadtstrecke Oldenburg	Oldenburg	Küstenkanal
83nn	Abrostungsverhalten der Spundwände am MLK, Bereich Minden	Espelkamp Fiestel	MLK km 77,46
<b>Brackwasser Sommer 03</b>			
153	Stahlspundwände am Eidersperrwerk	Kating	Eider
nn5	Anleger 8, Travemünde		
14	Bollhörnkai, Kiel	Kiel	Kieler Förde
151	Stahlspundwände am Eidersperrwerk	Kating	Eider
nn6	Anleger 8a, Travemünde		
50	Liegeplatz Hulk, Marinestützpunkt Neustadt	Neustadt	Neustädter Bucht
31	Bundesgrenzschutzmole Neustadt	Neustadt	Neustädter Bucht
233	Fähranleger Sehestedt, Nordseite, Ost	Sehestedt	NOK
nn9	Bauhofskaje Brunsbüttel		
231	Nord-Ost-See-Kanal, Fähranleger	Landwehr	NOK
17	Stahlpfähle und Spundwände, Blücherbrücke Kiel	Kiel	Kieler Förde
136	Königspolder, Marinestützpunkt Emden	Emden Koenigspolder	Emden Binnenhafen
275	Marinestützpunkt Neustadt	Neustadt	Neustädter Bucht
41	Versorgungskaje Olpenitz	Olpenitz	Schleimündung
230	Eisabweisfeiler in der Trave	Travemünde	Trave
222=9	Nordermole, Travemünde	Travemünde	Trave
<b>Meerwasser Sommer 03</b>			
67	Hafen Norderney	Norderney	Nordsee Norderney
138	Schutzhafen Borkum	Borkum	Nordsee Ems
nn12	Sperrwerk Büsum, NW-Kaje	Büsum	Nordsee
266	Südkaje Hafen Hörnum	Hörnum	Nordsee Hörnum
126	Marinearsenal Wilhelmshaven	Wilhelmshaven	Binnenhafen Wilhelmshaven
127	Marinearsenal Wilhelmshaven	Wilhelmshaven	Binnenhafen Wilhelmshaven
122	Marinearsenal Wilhelmshaven, Alte Westkaje und Nordkaje	Wilhelmshaven	Hafen Wilhelmshaven
nn10	Tonnenhof Wilhelmshaven	Wilhelmshaven	
nn14	Wangeroog-Kai, außen (seit 14 Jahren mit KKS)	Wilhelmshaven	
130	Instandsetzungskaje im Nordhafen Wilhelmshaven	Wilhelmshaven	Nordhafen Wilhelmshaven

Abrostungsraten der Spundwände und dazugehörige Wasserdaten – Sommer 2003

Bauwerksnr.	Alter	Rate S mittel	Rate S max	Rate N mittel	Rate N max	Rate U mittel	Rate U max	Sauerstoffkonz.: [mg/L]	Sauerstoffsättigung [%]	W0	Wo*O2-Sättigung [%]	Liegeplatz
<b>Süßwasser Sommer 03</b>												
105	17	47,1	217,6	47,1	158,8	29,4	111,8	9,4	102,5	-2,33	-2,39	1
86	3	100,0	300,0	66,7	266,7	66,7	200,0	8,7	94,9	-1,33	-1,27	0
84	15	33,3	173,3	20,0	106,7	26,7	113,3	9,6	106,7	-2,33	-2,49	0
112	4	75,0	325,0	125,0	375,0	100,0	325,0	11,1	122,1	-2,33	-2,85	0
87	10	90,0	270,0	50,0	240,0	70,0	310,0	9,3	104,3	-2,33	-2,43	0
132	15	20,0	86,7	26,7	100,0	26,7	106,7	9,4	102,5	-1,00	-1,03	0
85.1	20	75,0	215,0	45,0	165,0	25,0	90,0	9,8	105,6	-2,33	-2,46	1
234	23	30,4	121,7	39,1	121,7	17,4	56,5	12,2	148,8	-5,33	-7,94	0
83.1	26	73,1	150,0	26,9	153,8	23,1	115,4	9,2	104,2	-2,33	-2,43	0
213	26	11,5	53,8	19,2	80,8	19,2	73,1	9,8	109,9	-1,00	-1,10	0
124	62	9,7	50,0	29,0	83,9	16,1	64,5	9,4	103,4	-1,00	-1,03	1
85.nn	33	45,5	130,3	27,3	100,0	15,2	54,5	9,8	105,6	-2,33	-2,46	1
160	62	4,8	24,2	19,4	85,5	19,4	77,4	9,4	101,3	0,33	0,34	0
110	63	0,0	0,0	39,7	217,5	19,0	169,8	9	98,1	-1,00	-0,98	0
83nn	40	47,5	97,5	17,5	100,0	15,0	75,0	9,2	104,2	-2,33	-2,43	0
<b>Brackwasser Sommer 03</b>												
153	18			44,4	266,7	44,4	83,3	7,8	99,4	-10,67	-10,60	1
nn5	14	71,4				57,1		8,5	105,2	-4,33	-4,56	
14	16	56,3	243,8	125,0	487,5	43,8	225,0	8,3	104,4	-10,67	-11,14	1
151	18	0,0	0,0	38,9	205,6	44,4	227,8	7,8	100	-10,67	-10,67	0
nn6	14	100,0				64,3		9,8	122,7	-4,33	-5,32	
50	8	100,0	537,5	75,0	337,5	75,0	287,5	6,9	85,6	-11,50	-9,84	0
31	20	20,0	90,0	70,0	365,0	45,0	220,0	7,7	96,3	-11,50	-11,07	1
233	23	82,6	226,1	30,4	108,7	17,4	82,6	12,2	148,8	-5,33	-7,94	0
nn9								9,4	113,9	-4,00	-4,56	
231	30	30,0	123,3	26,7	106,7	16,7	70,0	10,8	127,5	-5,33	-6,80	0
17	28	46,4	371,4	142,9	482,1	50,0	217,9	8,8	110,1	-10,67	-11,74	0
136	55	0,0	0,0	45,5	116,4	30,9	105,5	9,1	108,5	-5,33	-5,79	1
275	63	25,4	177,8	54,0	244,4	36,5	101,6	7,6	94,4	-11,50	-10,86	1
41	33	45,5	257,6	75,8	363,6	33,3	160,6	9,8	122,2	-8,00	-9,78	1
230	41	63,4	287,8	61,0	187,8	41,5	107,3	8	97,6	-9,33	-9,11	0
222=9	32	53,1	237,5	93,8	296,9	50,0	203,1	6,8	85	-9,33	-7,93	0
<b>Meerwasser Sommer 03</b>												
67	8	87,5	325,0	75,0	300,0	62,5	325,0	9,8	132,3	-9,67	-12,79	1
138	10	140,0	610,0	100,0	490,0	90,0	580,0	9,9	133,6	-9,67	-12,91	1
nn12	18	405,6		111,1		116,7		8,2	107,8	-9,67	-10,42	
266	25	32,0	152,0	92,0	548,0	36,0	188,0	9	118,5	-9,67	-11,46	1
126	25			48,0	168,0	44,0	136,0	6	81,5	-10,67	-8,69	1
127	21			42,9	238,1	38,1	166,7	7,8	104,4	-10,67	-11,14	1
122	24			45,8	200,0	45,8	141,7	6,6	88,4	-10,67	-9,43	0
nn10		73,5				79,4		7,9	101,9	-10,67	-10,87	
nn14	50	142		62,0		56,0		6,9	88,8	-10,67	-9,47	
130	31		167,7	93,5	467,7	38,7	103,2	8,2	109,8	-9,67	-10,61	0

Abrostungsraten der Spundwände und dazugehörige Wasserdaten – Winter 2003

Bauwerksnr.	Alter	Rate S mittel	Rate S max	Rate N mittel	Rate N max	Rate U mittel	Rate U max	Sauerstoffkonz. [mg/L]	Sauerstoffsättigung [%]	WO	WO*O2-Sättigung [%]	Liegeplatz
<b>Süßwasser Winter 04</b>												
105	17	47,1	217,6	47,1	158,8	29,4	111,8	9,8	77	-2,33	-1,80	1
86	3	100,0	300,0	66,7	266,7	66,7	200,0	9,8	68	1,33	0,91	0
84	15	33,3	173,3	20,0	106,7	26,7	113,3	10,6	80	-2,33	-1,87	0
112	4	75,0	325,0	125,0	375,0	100,0	325,0	14	111	-2,33	-2,59	0
87	10	90,0	270,0	50,0	240,0	70,0	310,0	10,1	74	-1,33	-0,99	0
132	15	20,0	86,7	26,7	100,0	26,7	106,7	7,9	60	-7,00	-4,20	0
85.1	20	75,0	215,0	45,0	165,0	25,0	90,0	10,4	78	-2,33	-1,82	1
234	23	30,4	121,7	39,1	121,7	17,4	56,5	13,8	103	-5,33	-5,49	0
83.1	26	73,1	150,0	26,9	153,8	23,1	115,4	11	83	-2,33	-1,94	0
213	26	11,5	53,8	19,2	80,8	19,2	73,1	7,4	56	-7,00	-3,92	0
124	62	9,7	50,0	29,0	83,9	16,1	64,5	7,7	58	-7,00	-4,06	1
85.nn	33	45,5	130,3	27,3	100,0	15,2	54,5	10,4	78	-2,33	-1,82	1
160	62	4,8	24,2	19,4	85,5	19,4	77,4	10,8	82	-2,00	-1,64	0
110	63			39,7	217,5	19,0	169,8	11,6	87	-3,00	-2,61	0
83.nn	40	47,5	97,5	17,5	100,0	15,0	75,0	11	83	-2,33	-1,94	0
<b>Brackwasser Winter04</b>												
153	18			44,4	266,7	44,4	83,3	8,9	65	-9,33	-6,07	1
nn5	14	71,4				57,1		9,9	72	-4,33	-3,12	
14	16	56,3	243,8	125,0	487,5	43,8	225,0	10	74	-9,33	-6,91	1
151	18			38,9	205,6	44,4	227,8	8,8	63	-9,33	-5,88	0
nn6	14	100,0				64,3		10	73	-4,33	-3,16	
50	8	100,0	537,5	75,0	337,5	75,0	287,5	10,2	73	-11,50	-8,40	0
31	20	20,0	90,0	70,0	365,0	45,0	220,0	10,6	76	-11,50	-8,74	1
233	23	82,6	226,1	30,4	108,7	17,4	82,6	8,7	65	-5,33	-3,47	0
nn9								9,2	71	-7,00	-4,97	
231	30	30,0	123,3	26,7	106,7	16,7	70,0	9,2	67	-5,33	-3,57	0
17	28	46,4	371,4	142,9	482,1	50,0	217,9	10	74	-9,33	-6,91	0
136	55			45,5	116,4	30,9	105,5	10,1	77	-7,00	-5,39	1
275	63	25,4	177,8	54,0	244,4	36,5	101,6	10,3	74	-11,50	-8,51	1
41	33	45,5	257,6	75,8	363,6	33,3	160,6	10	74	-8,00	-5,92	1
230	41	63,4	287,8	61,0	187,8	41,5	107,3	9,3	68	-9,33	-6,35	0
222=9	32	53,1	237,5	93,8	296,9	50,0	203,1	10	72	-6,50	-4,68	0
<b>Meerwasser Winter04</b>												
67	8	87,5	325,0	75,0	300,0	62,5	325,0	12,6	96	-10,67	-10,24	1
138	10	140,0	610,0	100,0	490,0	90,0	580,0	12,2	93	-6,67	-6,20	1
nn12	18	405,6		111,1		116,7		10,1	73	-6,67	-4,87	
266	25	32,0	152,0	92,0	548,0	36,0	188,0	8,7	63	-5,67	-3,57	1
126	25			48,0	168,0	44,0	136,0	10,4	78	-7,50	-5,85	1
127	21			42,9	238,1	38,1	166,7	10,8	80	-7,50	-6,00	1
122	24			45,8	200,0	45,8	141,7	10,7	80	-7,50	-6,00	0
nn10		73,5				79,4		9,9	74	-7,50	-5,55	
nn14	50	142		62,0		56,0		12,2	89	-6,67	-5,93	
130	31	87,1	167,7	93,5	467,7	38,7	103,2	10,5	78	-7,50	-5,85	0



Zwischenbericht 2005

## **F&E-Projekt (BAW-8159, ECSC-7210)**

Untersuchungen zum Wasserchemismus der verschiedenen Immersionmedien

### **Einleitung**

Mit der Bestimmung des Wasserchemismus' wird darauf abgezielt, mögliche Einflussparameter zur Abrostungsgröße von Spundwänden zu erhalten.

In Ergänzung zur Messkampagne im Sommer 2003 (Bericht *Graff&Partner*) wurden im Winter/Frühjahr 2004 Wiederholungsmessungen (sog. Winterdaten) durch das *Labor Dr. Weßling* durchgeführt.

### **Probennahme**

Die Probennahme („Rüttnerflasche“) und Messungen erfolgten im Zeitraum vom 20. Februar bis 10. März 2004. Für die Tiefenprofilierung wurden Tiefen vermessen und Wasserproben gezogen, bzw. die Messsonde in entsprechender Tiefe platziert. Für die BAW (B2) wurden Rückstellproben sämtlicher Lokalitäten bereitgestellt.

### **Messparameter**

Unter anderem soll z.B. aus der Konzentration von Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ), Sulphat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) Calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), Säurekapazität ( $K_{s4,3}$ ), pH-Wert, sowie weiteren hydraulisch bedingten Parametern die Korrosivität des jeweiligen Wassertypus' ermittelt werden ( $W_o$  nach DIN 50929, Teil 3). Im Unterwasserbereich ist zudem die Korrosion wesentlich vom vorhandenen Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) abhängig. Die Einbeziehung des Sauerstoffgehaltes in die Wasserkorrosivität oder die Kombination mit  $W_o$  ist allerdings noch zu vollziehen.

Mit der Bewertung und statistischen Auswertung der Sommerdaten wurde die Notwendigkeit verschiedener Messgrößen nochmals überprüft:

Aufgrund der niederen Konzentrationen, z.T. unter der Nachweisgrenze, wurde auf eine wiederholte Messung von Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) und Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) verzichtet.

Desweiteren konnte nach einer Auswertung im x-y-Diagramm festgestellt werden, dass zwischen dem Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) und dem löslichen organischen Kohlenstoff (DOC) ein enger statistische Zusammenhang besteht (signifikant positive lineare Regression mit einem Korrelationskoeffizient von  $r = 0,94$  und einer daher ableitbaren statistischen Sicherheit von  $> 99\%$ ). Ebenso sind die Konzentrationen beider Parameter nahezu identisch (Abb. 1). Daher wurde in der Wintermessung lediglich der lösliche Kohlenstoff bestimmt.

### **Bewertung der Resultate im Vergleich**

In Anlage 1 sind alle Messergebnisse (Sommer- und Wintermessung) zusammengestellt. Da eine umfangreiche statistische Auswertung erst im Zuge der Berechnungen hinsichtlich der Korrosionseinflüsse erfolgen wird, sei hier nur kurz auf Auffälligkeiten hingewiesen, bzw. werden lediglich Tendenzen qualitativ beschrieben.

Die bestimmten Temperaturen bestätigen die jahreszeitlich bedingten Unterschiede der Probenentnahme. Auffallend ist dabei, dass Abstände der Sommer- und Wintertemperatur bei

allen drei Gewässertypen nahezu identisch sind (Süßwasser ~ 17°C, Brack- und Meerwasser jew. ~ 19°C).

Die restlichen Messparameter liegen hinsichtlich der Sommer- und Winterwerte in den selben Größenordnungen vor. Veränderungen 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 nur geringe Erhöhungen im Sommer auf (Ausnahmen siehe Anmerkungen).

Sulphat: Im Süß- und Meerwasser liegen keine bzw. 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 in den Jahreszeiten gleich hoch. Lediglich im Brack- und Süßwasser deuten sich gelegentlich Erhöhungen im Sommer an.

Wasseraggressivität ( $W_o$ ): Aus den oben angeführten Parametern wurden die  $W_o$ -Werte beider Messserien berechnet und gegenübergestellt. Ausgeprägte Tendenzen gibt es nicht. Es zeigte sich allerdings, dass die Resultate manchmal deutlich voneinander abweichen. So fällt auf, dass im Süßwasser die Werte im Sommer wesentlich weiter streuen als im Winter ( $\Delta W_o$  von 4 auf 8,5), während für die Bereiche des Brack- und Meerwassers das Gegenteil der Fall ist ( $\Delta W_o$  von 6 bzw. 7 nach 3,5 bzw. 4,5). Als Ursache der Schwankungen sind vor allem im Wechsel der Konzentration von Chlorid zu suchen (siehe auch Anmerkungen).

Die elektr. Leitfähigkeit stellt als Summenparameter ein Maß für die Gesamtionenzahl der Wässer dar. Insgesamt gibt es deutliche jahreszeitliche Schwankungen in der Gesamtheit der Messergebnisse zwischen Sommer und Winter zu registrieren (Faktor: 0,5 bis 2,5!).

Das Redoxpotential beschreibt ein Maß für die Gesamtheit der ablaufenden reduzierenden und oxidierenden Reaktionen. Die Tendenz ist so, dass das Potential im Sommer meist geringfügig erhöht ist. Dabei ist dieser „Trend“ im Süßwasser bis zu Faktor 2 ausgeprägt.

Die Sauerstoffkonzentration ist in den Jahreszeiten nicht sehr unterschiedlich. Im Winter sind die Sauerstoffgehalte geringfügig erhöht. Hingegen ist der Sauerstoffsättigungsgrad im Sommer wegen Temperaturabhängigkeit nicht unerwartet höher.

Die Konzentrationen des löslichen organischen Kohlenstoffes 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, wie bei den Sommermessungen, 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.

### **Tiefenprofilierung**

In der Sommer-Messkampagne 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.

Durch die Betrachtung dieser Messresultate und gleichzeitiger Beratung mit der BfG und Stat-Soft wurden die Tiefenprofilmessungen auf wenige Parameter (Leitfähigkeit, Sauerstoff, pH-Wert, Redoxspannung, Wassertemperatur) beschränkt. Hierzu sei auch auf die Erkenntnisse der BAW (AK) hingewiesen, die im Ästuarbereich starke Schichtungen im „dynamischen“

Wechsel feststellen ließen und „statische“ Tiefenprofilierungen grundsätzlich wenig aussagekräftig erscheinen lassen. Aus Kompromissgründen wurde ein begrenztes Messprogramm durchgeführt.

Die Probenahme bzw. Messung erfolgte jeweils in Viertelschritten zur Tiefe (oberflächennahe Messung, sowie 25, 50 und 75 % der Tiefe). Die hier erzielten Resultate zeigen generell niedrige Gradienten (Anlage 2). Lediglich Lokalitäten, deren Gewässer eine Art Beckenstruktur aufweisen (z.B. „abgeschlossene“ Häfen) aufweisen und damit schlecht durchströmt sind, bilden ein Konzentrationsgefälle aus. In Tabelle 1 sind die Messdaten der Sommer- und Wintermessung, bezogen auf die oben beschriebene Tiefeneinteilung, gegenübergestellt. Grundsätzlich liegen die Konzentrationen in gleichen Größenordnungen vor. Lediglich Sauerstoff zeigt im Sommer eine deutliche Konzentrationsabnahme zur Tiefe hin. Evtl. ist hier die Sauerstoffzehrung durch höhere Wassertemperaturen und damit verbundenem Wachstum größer als im Winter. Die Temperaturen selbst, sowie der pH-Wert, zeigen jeweils geringfügige Abnahme mit der Tiefe. Diese Tendenz ist überwiegend nur im Sommer erkennbar. Bei der Lokalität Whhvn. Marinearsenal (Ostkaje) lagen die kühleren Schichten im Winter obenauf (Atmosphäreneinfluss). Es ist anzumerken, dass durch die Anomalie des Wassers, bei einer Temperatur von +4°C eine maximale Dichte vorliegt, die diese Schichtung ebenfalls beeinflussen wird.

**Anmerkung**

Bei einigen Lokalitäten (233-Sehestedt, nn12-Büsum, nn14-Wilhelmshaven) liegen stark veränderte Winterdaten im Chloridgehalt gegenüber den Sommerdaten vor, wodurch auch die  $W_o$ -Werte tangiert sind. Da diese Veränderungen durch die davon beeinflusste Größe der el. Leitfähigkeit tendenziell nicht bestätigt werden konnte, ist von Übermittlungsfehlern auszugehen. Hier wird demnächst das beauftragte Labor nochmals konsultiert.

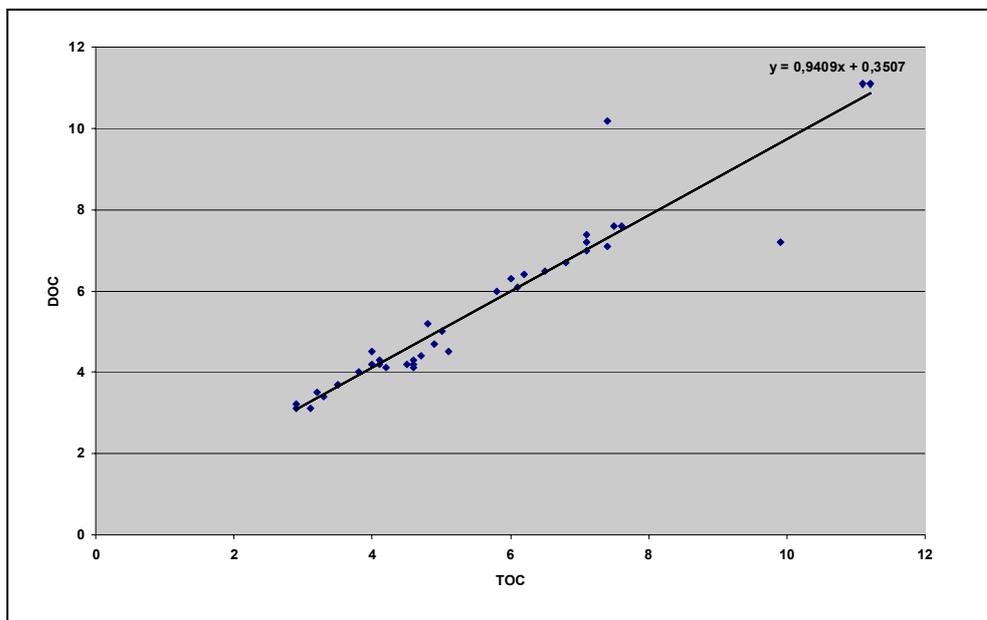
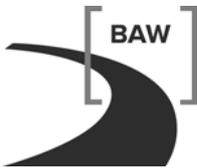


Abb. 1: Gegenüberstellung von Messdaten des organ. Kohlenstoffs (DOC/TOC [mg/L])–So 03

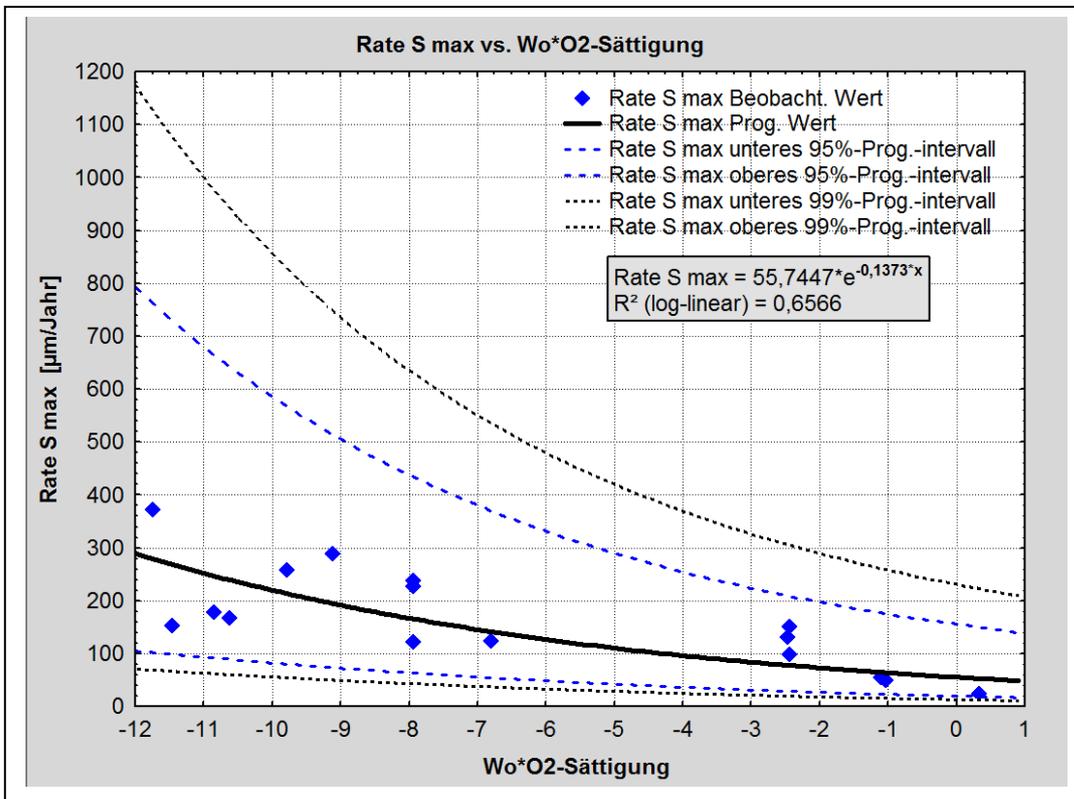
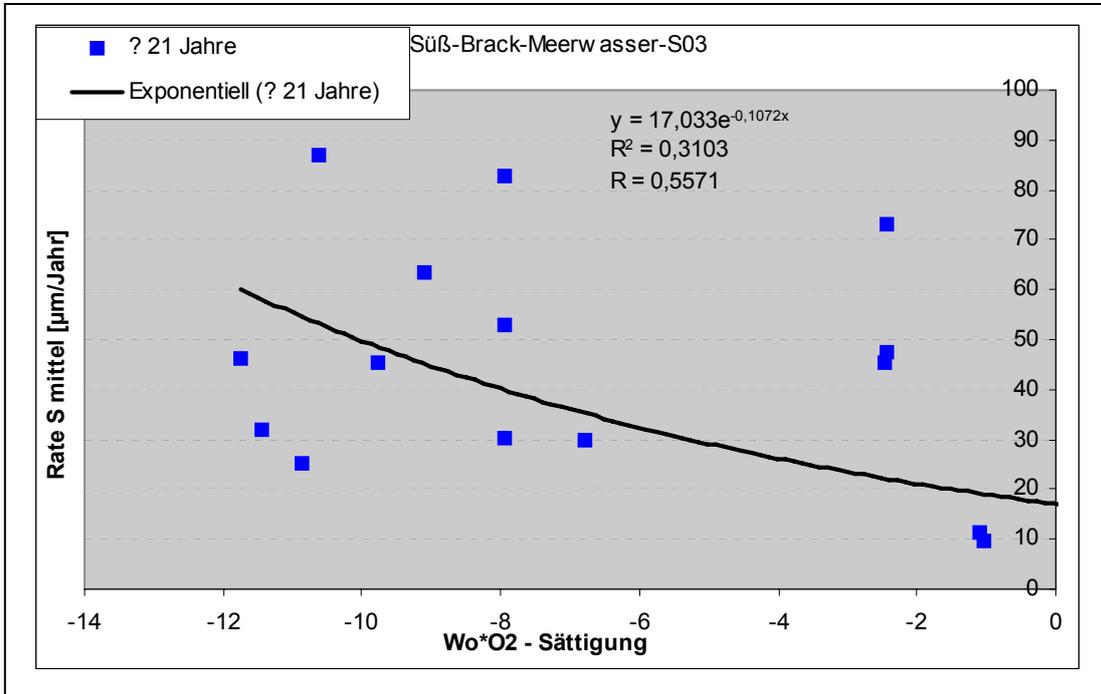
Tabelle 1: Messergebnisse von Tiefenprofilierungen – Gegenüberstellung Sommer/Winter



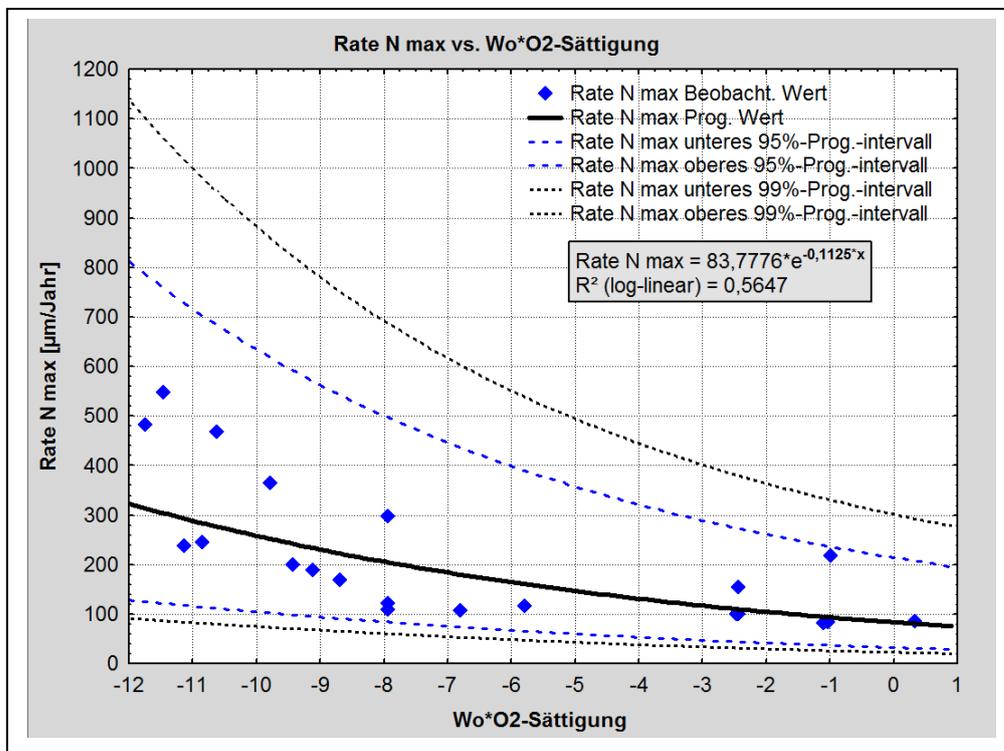
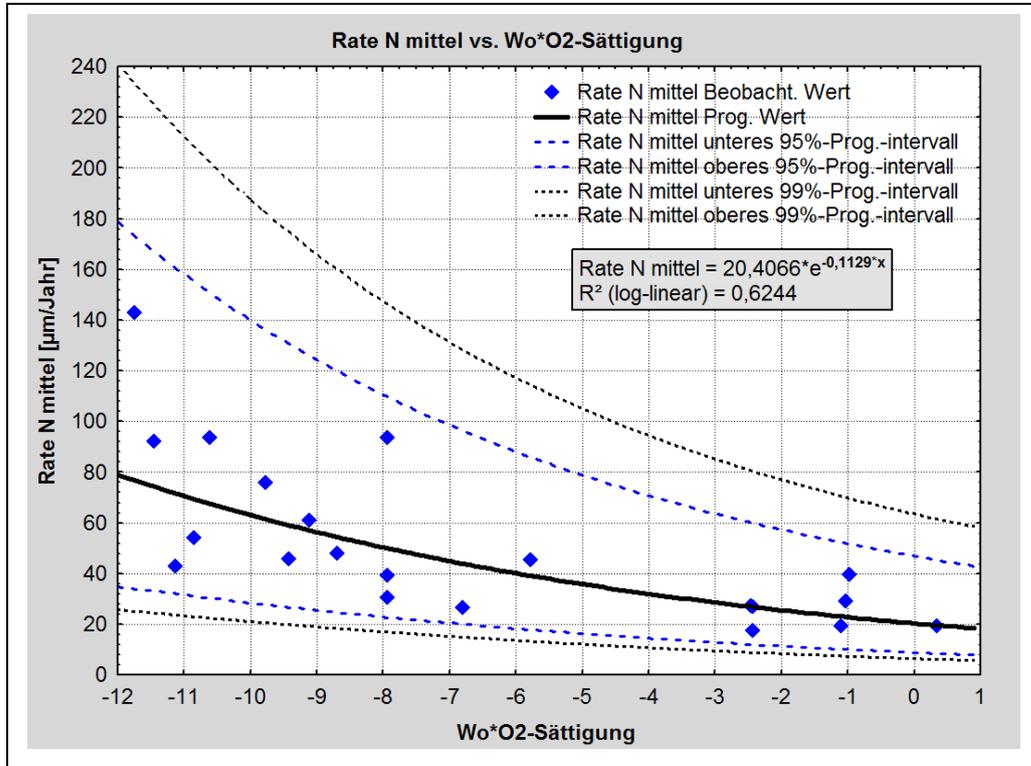
Parameter \ Lokalität	Whhv n Marinearsenal Ostkaje (~9m)		Travmde. Skand.kaje Anl. 8 (10,4m)	
	So 03	Wi 04	So 03	Wi 04
Anmerkung	Vor dem Rühren		13h nach Ablegen	
<b>Temperatur</b> oben [°C]	24,0	2,7	22,5	2,2
	23,1	3,5	22,5	2,1
	22,5	4,0	21,3	2,1
	<i>unten</i> 21,5	4,3	20,5	2,1
<b>pH-Wert</b> oben	8,2	7,7	8,3	8,2
	8,2	7,6	8,3	8,2
	8,0	7,6	8,2	8,2
	<i>unten</i> 7,9	6,6	8,1	8,2
<b>Leitfähigk.</b> oben [µS/cm]	31700	25400	14400	17100
	31700	26900	~15000	17100
	31900	29400	16800	17200
	<i>unten</i> ~34000	31700	~16000	17200
<b>Redoxpot.</b> [mV]	~ 331 (+1)	~ 213 (±1)	~ 209 (±1)	~ 426 (±1)
<b>Sauerstoff</b> oben [ppm]	7,4	10,8	9,4	9,5
	7,6	10,9	9,4	9,9
	4,7	11,1	7,8	9,8
	<i>unten</i> 2,9	11,0	6,2	9,9

Gez. Dr. Binder

Ausgleichskurven der Abrostungsraten im Spritzwasserbereich (Mittel/Maximal)



Ausgleichskurven der Abrostungsraten im Niedrigwasserbereich (Mittel/Maximal)



Ausgleichskurven der Abrostungsraten im Unterwasserbereich (Mittel/Maximal)

