

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Heeling, Anne**

## **Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlpundwänden in Häfen und an Wasserstraßen. FuE- Abschlussbericht B3952.05.04.10158**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106562>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlpundwänden in Häfen und an Wasserstraßen. FuE-Abschlussbericht B3952.05.04.10158. 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**  
**Ermittlung und Bewertung des**  
**Korrosionszustandes von**  
**Stahlspundwänden in Häfen und an**  
**Wasserstraßen**

**B3952.05.04.10158**



**April 2019**

**FuE-Abschlussbericht**  
**Ermittlung und Bewertung**  
**des Korrosionszustandes von Stahlpundwänden**  
**in Häfen und an Wasserstraßen**

Beginn des Vorhabens: Juni 2001

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3952.05.04.10158

Aufgestellt von:           Abteilung:       Wasserbau im Küstenbereich  
                                  Referat:         Geotechnik Nord (K5)  
                                  Projektleiterin: Heeling

Hamburg, April 2019

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

## **Zusammenfassung**

Stahlspundwände überbrücken Geländesprünge in Häfen und an Wasserstraßen. Sie sind eines der am häufigsten eingesetzten Bauteile im Wasserbau und stellen im Bereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ein relevantes Investitionsvermögen dar. Ihre Lebensdauer ist durch korrosive Wanddickenverluste begrenzt. Zur Planung zukünftiger Investitionsmaßnahmen ist die Kenntnis des aktuellen Korrosionszustandes, d.h. die noch vorhandene Restwanddicke und die prognostizierte Restnutzungsdauer, für den Betreiber einer Hafenanlage oder Wasserstraße von großer Bedeutung bzgl. Wirtschaftlichkeit und Sicherheit.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden

- die Korrosionseinflüsse einschließlich ihrer Wechselwirkungen näher untersucht,
- ein BAW-Verfahren zur Prognose der maximalen Abrostung weiterentwickelt und
- die Durchführung und Auswertung von Spundwanddickenmessungen hinsichtlich ihrer Aussagekraft optimiert,
- Alternative Messverfahren und –geräte geprüft, um den Aufwand bei der Spundwanddickenmessung zukünftig zu reduzieren und
- als Vergabegrundlage für die WSV eine Empfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von Spundwanddickenmessungen erstellt.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Problemdarstellung und Ziel	1
2	Stand des Wissens	1
2.1	Korrosionsbild	1
2.2	Kennwerte der Korrosion	2
2.3	Bestimmung der maximalen Abrostung	3
3	Untersuchungen und Ergebnisse	5
3.1	Untersuchungen im Rahmen des EU-Projektes „Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour.“	5
3.1.1	Mittlere und maximale Abrostung	5
3.1.2	Korrosionseinflüsse	7
3.1.3	Spundwanddickenmessungen	10
3.2	Messtechnik	11
3.3	BAWEmpfehlung „Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen: Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation (ESM)“	16
4	Ausblick	18
5	Zusammenfassung	18
6	Literatur	20

<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 1: <i>Korrosionstypen und -intensitäten in den Korrosionszonen („Vier-Zonen-Modell“ aus der ESM [BAW 2017, s.a. Abs. 3.3], in Anlehnung an Alberts und Heeling, 1997)</i>	2
Bild 2: Mittel- und Maximalwerte der Abrostungen an Stahlspundwänden im Süß- und Meerwasser (aus ESM 2017, nach EAU 2012, E35-4 auf Grundlage von BAW-Daten)	3
Bild 3: Berechnung der tiefenbezogenen mittleren Abrostung $\bar{a}$ mittels nichtstetiger Exponentialfunktion („Drei-Zonen-Modell“ aus ESM, nach Statsoft 2004, Anlage 3)	6
Bild 4: Station, Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte am Beispiel einer Spundwand mit U-Profil	10
Bild 5: Wanddickenmessung mit pulsierendem Wirbelstrom, Labortest	13
Bild 6: Vergleichende Restwanddickenprofile (grün: Wirbelstrom, rot: Ultraschall)	13
Bild 7: Wanddickenmessung mittels Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, Labortest	14
Bild 8: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, Feldtest Tangermünde 2014	15
Bild 9: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, Feldtest Tangermünde: Vergleichende Restwanddickenprofile (rot: BAW-Universalmeßgerät, grün: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät)	15
Bild 10: Formulare zur Datenerfassung (aus ESM 2017)	16
Bild 11: Restwanddickenprofil (aus ESM 2017)	17

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Empfohlene Anzahl und Verteilung der Messquerschnitte an einer Station (aus ESM 2017)	11
Tabelle 2: Benennung der Korrosionsintensität aus ESM (2017)	17

### **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: <i>Uerkvitz, R. (Statsoft Europe GmbH 2003): Analyse von Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau. Hamburg, unveröffentlicht.</i>	
Anlage 2: <i>Uerkvitz, R. (Statsoft Europe GmbH 2002): Datenerhebung zur Korrosion an Spundwänden in Binnen- und Küstengewässern. Hamburg, unveröffentlicht.</i>	
Anlage 3: <i>Uerkvitz, R. (Statsoft Europe GmbH 2004): Einflussfaktoren auf die Korrosion. Hamburg, unveröffentlicht.</i>	
Anlage 4: <i>Uerkvitz, R. (Statsoft Europe GmbH 2005): Einflussfaktoren auf die Korrosion. Berechnungsbeispiel. Hamburg, unveröffentlicht.</i>	
Anlage 5: <i>Heeling, A. (2010): Ein Vierteljahrhundert Spundwanddickmessung bei der Bundesanstalt für Wasserbau. Tagungsband der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“, Berlin, 18.02.2010</i>	

## 1 Problemdarstellung und Ziel

Stahlspundwände überbrücken Geländesprünge in Häfen und an Wasserstraßen. Sie sind eines der am häufigsten eingesetzten Bauteile im Wasserbau und stellen im Bereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ein relevantes Investitionsvermögen dar. Ihre Lebensdauer ist durch korrosive Wanddickenverluste begrenzt. Zur Planung zukünftiger Investitionsmaßnahmen ist die Kenntnis des aktuellen Korrosionszustandes, d.h. die noch vorhandene Restwanddicke und die prognostizierte Restnutzungsdauer, für den Betreiber einer Hafenanlage oder Wasserstraße von großer Bedeutung bzgl. Wirtschaftlichkeit und Sicherheit.

Ziel des FuE-Vorhaben war es,

- die Korrosionseinflüsse einschließlich ihrer Wechselwirkungen näher zu untersuchen,
- ein BAW-Verfahren zur Prognose der maximalen Abrostung weiter zu entwickeln und
- Spundwanddickenmessungen hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu optimieren.

Die o.g. Punkte wurden im Rahmen eines EU-Projektes bearbeitet (Abschn. 3.1). Darüber hinaus wurden folgende Themen für das FuE-Vorhaben untersucht:

- Um den Aufwand bei der Spundwanddickenmessung zukünftig zu reduzieren, wurden alternative Messverfahren und -geräte geprüft (Abschn. 3.2).
- Als Vergabegrundlage für die WSV wurde eine Empfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von Spundwanddickenmessungen erstellt (Abschn. 3.3).

## 2 Stand des Wissens

Das Referat Geotechnik Nord der BAW, Standort Hamburg, führt seit 1982 regelmäßig Restwanddickenmessungen an Spundwandbauwerke der WSV durch (s.a. Anlage 5) und verfügt somit über einen reichen Erfahrungsschatz auf diesem Gebiet.

### 2.1 Korrosionsbild

Vor dem FuE-Vorhaben war bereits bekannt, dass Stahlspundwände weder gleichmäßig noch gleichförmig rosten:

- Längs der Spundwandhöhe bilden sich unterschiedliche Korrosionszonen („Vier-Zonen-Modell“: Luft-, Spritzwasser-, Niedrigwasser- und Unterwasserzone; ggf. Wasserwechselzone, s. Bild 1) aus, in denen unterschiedliche Korrosionstypen und -intensitäten auftreten. Die Abrostungen einer Korrosionszone sind i.d.R. lognormalverteilt.

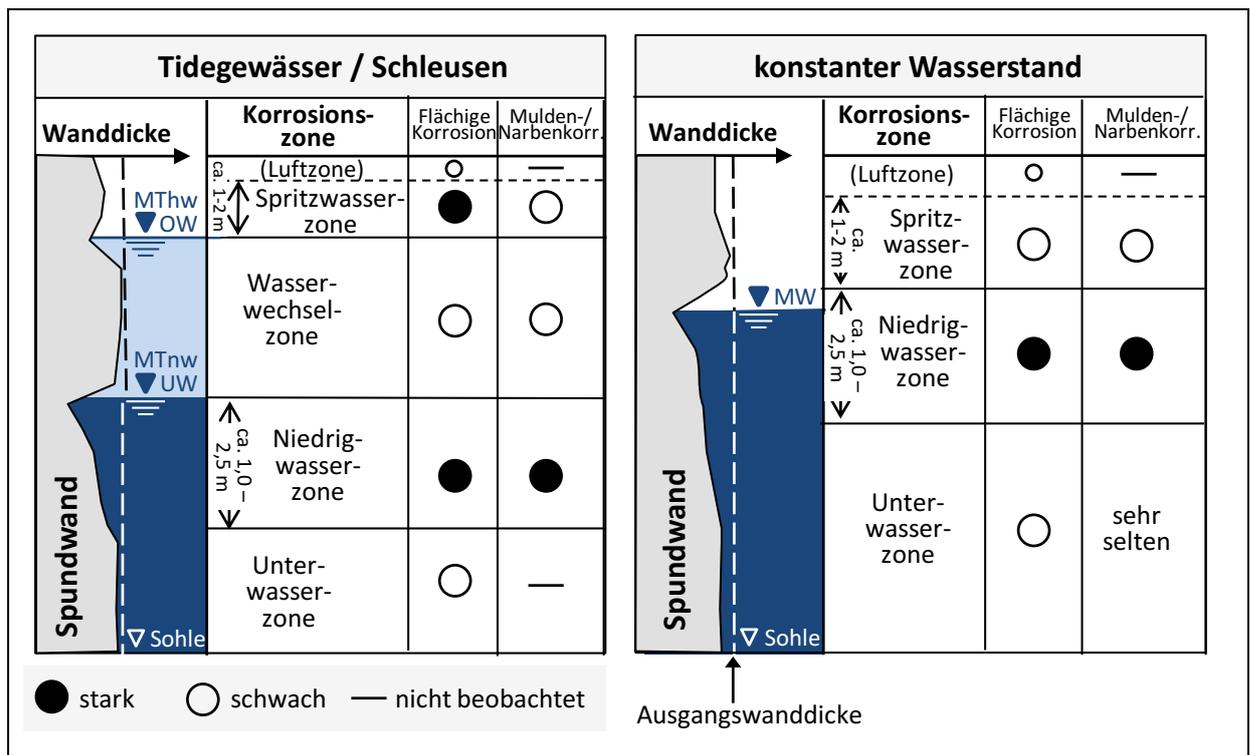


Bild 1: Korrosionstypen und -intensitäten in den Korrosionszonen („Vier-Zonen-Modell“ aus der ESM [BAW 2017, s.a. Abs. 3.3], in Anlehnung an Alberts und Heeling, 1997)

- Junge Spundwände rosten schneller als alte (s. z.B. Alberts et al. 1986, Hein 1990, Alberts 2001).
- Wanddickenverluste werden auch durch nichtkorrosive, mechanische (z.B. Schiffsstoß, Fenderreibung, Eisgang) oder biologische Mechanismen (MIC = mikrobiell induzierte Korrosion) verursacht.

## 2.2 Kennwerte der Korrosion

Ebenfalls bekannt war, dass sich die Beschreibung des aktuellen Erhaltungszustandes und die Prognose der Restnutzungsdauer auf die beiden Grundfunktionen eines Spundwandbauwerkes und damit auf die Beurteilung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit beziehen müssen:

- Auf eine Spundwand wirken Lasten aus Erd- und Wasserdruck. Infolge von Wanddickenverlusten kann es zu Spannungsüberschreitungen kommen, so dass die rechnerische Tragfähigkeit nicht mehr gegeben ist. Die Beurteilung der aktuellen Tragfähigkeit erfolgt anhand der mittleren Restwanddicke. Zur Prognose der Restnutzungsdauer wird die mittlere Abrostungsrate herangezogen.
- Eine Spundwand hält den Boden im Hinterfüllungsbereich zurück. Als Folge von Durchrostungen kann es zu einem Ausspülen des Bodens, zur Bildung von Hohlräumen und schließlich zu Sackungen und Bodeneinbrüchen und damit zu einem Versagen bzgl. Gebrauchstauglichkeit kommen. Zur Beurteilung der aktuellen Gebrauchstauglichkeit ist

die Kenntnis der minimalen Restwanddicke erforderlich, zur Prognose der Restnutzungsdauer die maximale Abrostung.

Nach den Erfahrungen der BAW ist zur Beurteilung der Restnutzungsdauer in erster Linie die Gebrauchstauglichkeit maßgeblich.

Damit sind die mittlere und die minimale Restwanddicke bzw. die mittlere und die maximale Abrostungsrate die Kennwerte zur Beurteilung des Korrosionszustandes eines Spundwandbauwerkes. Die im Rahmen einer Vielzahl von Messeinsätzen im Zuständigkeitsbereich der WSV erhobenen mittleren und maximalen Abrostungen der BAW-Datenbank WaDiMe (WandDickenMessung) sind bereits 1996 in Form von Abrostung/Standzeit-Diagrammen für Süß- und Meerwasser (Bild 2) in die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ eingegangen (EAU 1996; s.a. EAU 2012).

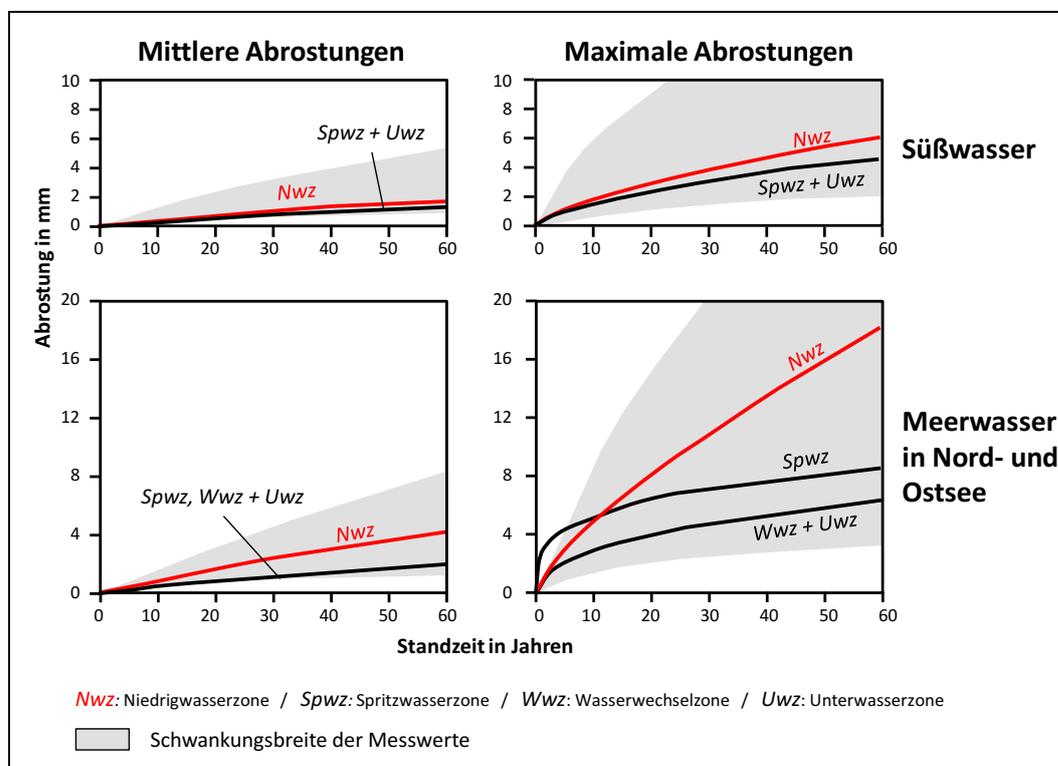


Bild 2: Mittel- und Maximalwerte der Abrostungen an Stahlspundwänden im Süß- und Meerwasser (aus ESM 2017, nach EAU 2012, E35-4 auf Grundlage von BAW-Daten)

Ohne Messungen am Spundwandbauwerk ist die Prognose des Auftretens erster Durchrostungen jedoch aufgrund der großen Streuung der maximalen Abrostungen altersgleicher Bauwerke nicht möglich (graue Flächen in Bild 2).

### 2.3 Bestimmung der maximalen Abrostung

Alberts und Heeling haben bereits 1997 gezeigt, dass sich die mittlere Restwanddicke bzw. die mittlere Abrostung aus den Messwerten einer Spundwanddickenmessung durch einfache Mittelwertbildung zuverlässig ableiten lässt.

Anders die minimale Restwanddicke bzw. die maximale Abrostung eines Spundwandbauwerks: sie kann – vor allem in Bereichen intensiver Korrosion – aus messtechnischen Gründen nicht sicher bestimmt werden. Damit ist die wahre minimale Restwanddicke nur in Ausnahmefällen Bestandteil der Messwerte einer Wanddickenmessung. In Alberts und Heeling (1997) wurde ein Rechenmodell vorgestellt, das es erlaubt, aus den Wanddicken in der Niedrigwasserzone ohne Berücksichtigung der äußeren Korrosionseinflüsse die geschätzte maximale Abrostung nach Formel (1) für die obere Toleranzgrenze lognormalverteilter Daten  $T_{oben}$  zu bestimmen

$$\text{geschätzte maximale Abrostung } A_{max} = T_{oben} = e^{\bar{x}_{ln} + k_{n;0,975;0,95} \cdot s_{ln}} \quad \text{in mm} \quad (1)$$

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

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

und daraus die Restnutzungsdauer zu prognostizieren. Seit damals konnte die Zuverlässigkeit der Formel immer wieder bestätigt werden:

- Wiederholungsmessungen am selben Spundwandbauwerk im Abstand mehrerer Jahre führten zu übereinstimmenden Prognosen des Zeitpunktes, an dem mit dem Auftreten erster Durchrostungen zu rechnen ist.
- Vor Ort ließen sich rechnerisch prognostizierte, aber bis dato nicht erkannte Durchrostungen tatsächlich bestätigen.
- Nachauswertungen früherer Messkampagnen bestätigten nachträglich gesichtete Durchrostungen, die zum Zeitpunkt der Erstmessung und -auswertung zwar schon existiert haben müssen, aber nicht erkannt worden waren.

### **3 Untersuchungen und Ergebnisse**

Die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Restwanddickenmessungen wird bei der BAW durch die eigenentwickelte Datenbankanwendung WaDiMe unterstützt. Die WaDiMe-Programme wurden zwischen 2007 und 2014 kontinuierlich weiterentwickelt. Die archivierten Daten bildeten die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen im Rahmen des FuE-Vorhabens. Die Programmierarbeiten wurden von Fa. Skill Networks, Hamburg, durchgeführt.

#### **3.1 Untersuchungen im Rahmen des EU-Projektes „Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour.“**

Das FuE-Vorhaben unterstützte 2001 – 2005 das EU-Projekt „Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour.“ der European Coal and Steel Communities (European Communities 2007), das von der BAW (Referate „Geotechnik Nord“ und „Stahlbau und Korrosionsschutz“) mit Partnern aus Luxemburg (Projektleitung), Frankreich und Italien durchgeführt wurde.

Gemeinsames Ziel des EU-Projektes war es, die Korrosionseinflüsse einschließlich ihrer Wechselwirkungen detailliert zu untersuchen und ein Prognosemodell für den Ansatz der Korrosion bei der Bemessung von Stahlspundwänden zu erstellen. Die Aufgabe der BAW gliederte sich in drei Teilbereiche:

- Weiterentwicklung eines BAW-Rechenmodells zur Prognose der maximalen Abrostung einschl. Einbeziehung der mittleren Abrostung (Abschn. 3.1.1)
- Untersuchung der Korrosionseinflüsse (Abschn. 3.1.2)
- Optimierung der Durchführung von Spundwanddickenmessungen hinsichtlich ihrer Aussagekraft (Abschn. 3.1.3)

##### **3.1.1 Mittlere und maximale Abrostung**

Zunächst sollte das BAW-Modell zur Schätzung der maximalen Abrostung (Abschn. 2.3) geprüft und weiterentwickelt werden. Durch die Fa. Statsoft Europe GmbH, Hamburg, wurde 2003 die WaDiMe-Datenbank analysiert.

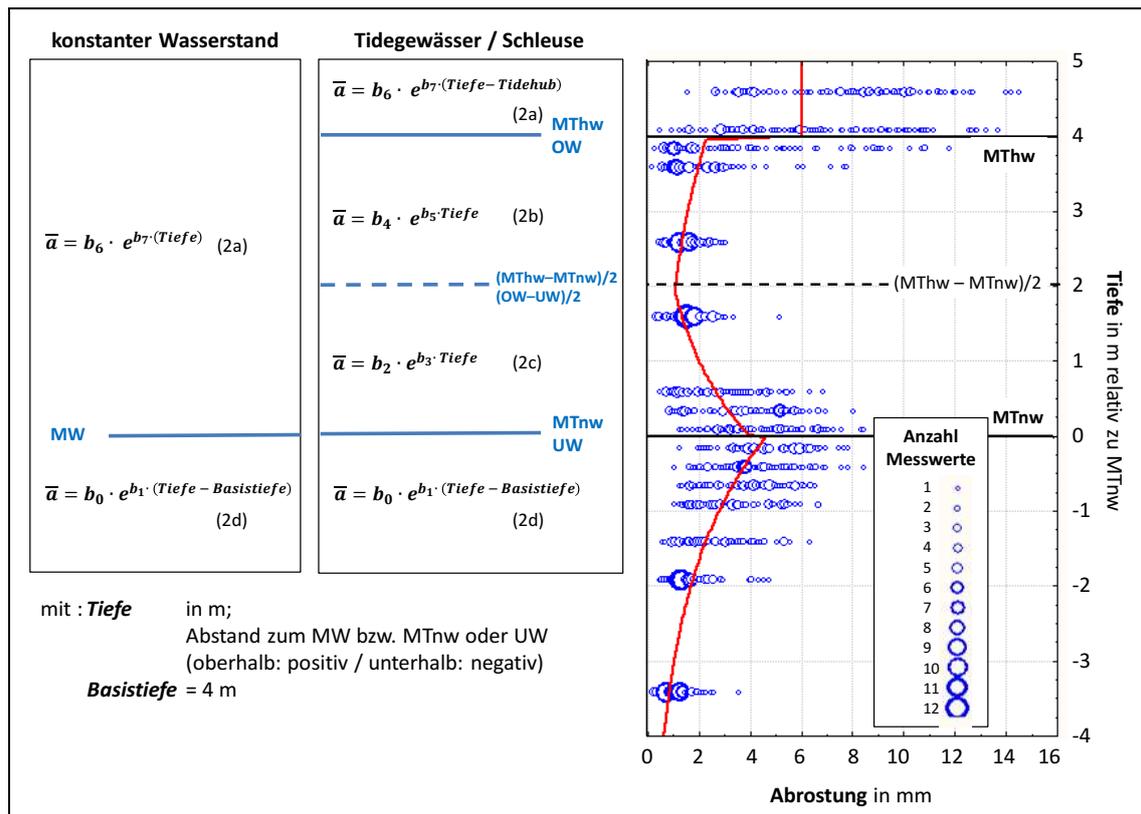
Es wurden systematische Abrostungsunterschiede zwischen den Messlagen (Berg, Tal, Flanke) als Hauptursache für die bisweilen beobachteten mehrgipfligen Verteilungskurven der Messwerte identifiziert. Bezüglich der Korrosionszonen zeigten die untersuchten Bauwerke zwei Tendenzen:

- Der Übergang zwischen zwei Korrosionszonen zeigt sich oft in einem scharfen Sprung der Abrostungswerte.
- Innerhalb einer Korrosionszone gibt es eine exponentielle Abhängigkeit der Abrostungen von der Tiefe.

Gleichzeitig ergab die statische Analyse aber auch, dass die Streuung der Abrostungswerte zwischen den einzelnen Stationen (d.h. den untersuchten einzelnen Spundwandbohlen) und den Messpunktlagen eines Bauwerkes meist größer ist als zwischen den Korrosionszonen.

Der vollständige Statsoft-Bericht ist Anlage 1 zu entnehmen.

Alternativ zu der in Alberts und Heeling (1997) beschriebenen Unterteilung der Spundwandhöhe in Spritzwasser-, Niedrig- und Unterwasserzone sowie ggf. Wasserwechselzone („Drei-Zonen-Modell“, Bild 1) lässt sich die Abrostung an einer Stahlspundwand über alle Tiefenbereiche hinweg insgesamt auch als un stetige Exponentialfunktion darstellen (Bild 3). Der zugehörige Statsoft-Bericht von 2004 ist auf Anlage 3 dargestellt.



**Bild 3:** Berechnung der tiefenbezogenen mittleren Abrostung  $\bar{a}$  mittels nichtstetiger Exponentialfunktion („Drei-Zonen-Modell“ aus ESM, nach Statsoft 2004, Anlage 3)

links: Formeln (2a – 2d) für unterschiedliche Korrosionszonen, getrennt für Gewässer mit konstantem und wechselndem Wasserstand

rechts: Beispiel: Profil der mittleren Abrostungen einer Spundwand im Tidebereich

Die Tiefe in den Formeln (2a) – (2d) wird stets relativ zum Mittelwasser (MW) bzw. zum Mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) oder – bei Schleusen – zum Unterwasser (UW) berechnet. Unterhalb einer sog. „Basistiefe“ von 4 m unter MW bzw. MTnw zeigen die Spundwände eine konstante mittlere Abrostung  $b_0$  („Basisabrostung“). Die Regressionskoeffizienten  $b_0$  bis  $b_7$  können über die loglineare Regression aus den Daten einer Wanddickenmessung ermittelt werden. Formel (2a) gilt für die Spritzwasserzone, Formeln (2b) und (2c) beziehen sich auf die Wasserwechselzone und entfallen folglich in Gewässern mit konstantem Wasserstand, und Formel (2d) beschreibt die mittlere Abrostung in der Unterwasserzone.

Zur Bestimmung der maximalen Abrostung werden die Gleichungen (2) um einen „Spreizungsfaktor“ erweitert, der aus dem Stichprobenumfang und der geschätzten Standardabweichung der Abrostungswerte bestimmt wird, s.a. Formel (3):

$$\text{geschätzte maximale Abrostung } A_{max} = b_x \cdot e^{b_y \cdot \text{Tiefe}} \cdot e^{2 \cdot s_{ln}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad \text{in mm} \quad (3)$$

mit:  $b_x, b_y$  Regressionskoeffizienten, ermittelt aus den Daten der Unterwasserzone mittels gängiger Statistikprogramme  
 $\text{Tiefe}$  Abstand zum [MW / MTnw / UW] – Basistiefe = 0 - (-4) m = 4 m  
 $s_{ln}$  Schätzwert für die Standardabweichung der logarithmierten Daten  
 $n$  Stichprobenumfang (Anzahl der Daten der Unterwasserzone)

Die maßgebliche Tiefe – das heißt die Tiefe, in der mit den größten Abrostungen zu rechnen ist - befindet sich i.d.R. im oberen Bereich der Unterwasserzone, also in Höhe des bzw. knapp über oder unter MW bzw. MTnw oder UW. Allgemein beträgt die maximale Abrostung sowohl in der Niedrigwasser- als auch in der Spritzwasserzone an jedem Tiefenpunkt etwa das Zwei- bis Dreifache der mittleren.

Aus den Abrostungen an der Mittel- oder Niedrigwasserlinie kann die Lebensdauer von Stahlspundwänden aus den Parametern der Weibullverteilung geschätzt werden. Als Maß für eine relevante Abrostung wurde eine minimale Restwanddicke von 80 % der Ausgangswanddicke zugrunde gelegt. Das entspricht nach dem BAW-Merkblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken“ (MSV 2018) noch einer Schadensklasse SK 3; ab SK4 wären Sofortmaßnahmen erforderlich. Die Datenauswertung ergab, dass bereits nach 23 Jahren jedes 10. Bauwerk die kritische Restwanddicke erreicht hat, nach 48 Jahren jedes 2. Bauwerk und nach 57 Jahren etwa 63,2% der Bauwerke. Dem steht eine geplante Nutzungsdauer von 50 – 80 Jahren gegenüber.

### 3.1.2 Korrosionseinflüsse

Die Regressionskoeffizienten  $b_0 - b_7$  der Tiefenfunktionen (2a) – (2d) und (3) zur Berechnung der mittleren und der maximalen Abrostung müssten sich auch ohne Restwanddickenmessungen vor Ort als Funktion aus Drittgrößen (den Korrosionseinflüssen) darstellen lassen. Grundsätzlich lassen sich drei Gruppen von Einflussfaktoren unterscheiden:

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

Folglich musste eine Messkampagne geplant und durchgeführt werden, im Rahmen derer an ausgewählten Spundwänden neben den Restwanddicken auch die zugehörigen Einflussfaktoren zu ermitteln waren, wobei bzgl. der Restwanddicken weitgehendst auf bereits untersuchte Bau-

werke zurückgegriffen werden sollte. Anlage 2 stellt das von der Fa. Statsoft 2002 entwickelte Untersuchungskonzept im Detail vor.

Zur **Planung der Messkampagne** wurde in einem ersten Schritt 2003 die WaDiMe-Datenbank von der Fa. Statsoft (Anlage 2) ausgewertet. Diese Vorauswertung zeigte, dass die Parameter *Alter*, *Gewässertyp* und das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein einer *Dränanlage* einen relevanten Einfluss auf die Korrosion haben, voneinander unabhängig sind und sich deshalb als kontrollierte Faktoren eignen. In einem zweiten Schritt wurde nach Prüfung verfügbarer Bauwerke das Untersuchungsprogramm noch einmal überarbeitet (Anlage 3):

#### Feste Faktoren:

Es wurden nur Spundwände mit U-Profilen und ohne Korrosionsschutz und ohne Dränanlage berücksichtigt, bei denen Restwanddickenmessungen in der Spritz-, Niedrig- und Unterwasserzone vorlagen.

#### Kontrollierte Faktoren:

Die Bauwerksauswahl für die Messkampagne sollte sich an den folgenden Parametern mit jeweils drei bzw. zwei Kategorien orientieren:

- Alter (Kategorien: Bauwerkalter bis 18 Jahre / 19 - 30 Jahre / über 30 Jahre),
- Gewässermilieu (Kategorien: süß / brackisch / salzig),
- Liegeplatz (Kategorien: vorhanden / nicht vorhanden).

Zur Sicherstellung eines aussagekräftigen, homogenen Datenbestandes sollten die  $3 \times 3 \times 2 = 18$  möglichen Kategorie-Kombinationen mit je zwei Bauwerken abgedeckt werden, so dass insgesamt 36 Bauwerke für das Untersuchungsprogramm benötigt wurden. In der WaDiMe-Datenbank erfüllten 2003 nur 25 Bauwerke die genannten Kriterien. Für diese Spundwände mussten lediglich die Umgebungsparameter bestimmt werden. Für die fehlenden Bauwerke waren zusätzlich auch die Restwanddicken zu ermitteln.

#### Freie Faktoren:

Als weitere potentielle Einflussgrößen wurden bei der Bauwerksauswahl chemische und physikalische Eigenschaften des Spundwandstahls, Standortbedingungen wie Tide, Strömung / Turbulenz und chemische Gewässereigenschaften berücksichtigt.

Die anschließende **Datenauswertung** zur Bestimmung der Korrelationseinflüsse von Statsoft (2004) ist Anlage 3 zu entnehmen. Zusammenfassend wurden zunächst folgende Teilaufgaben im Rahmen der Datenauswertung wurden bearbeitet:

- Aus einzelnen Gewässer-Messwerten wurden vier Hauptkomponenten berechnet: Salzfaktor, Säurefaktor, Schmutzfaktor und O<sub>2</sub>-Faktor. Die zugehörigen Sommer- und Winterschwankungen gingen als Saisonfaktoren in die Analyse ein. Außerdem wurden für einige Parameter Tiefgradienten bestimmt.
- Das Gewässer wurde als Ergebnis einer Clusteranalyse einer der vier Milieugruppen *limnisch*, *limnisch-brackisch*, *brackisch* oder *brackisch-marin* zugeordnet.

- Der Spundwandstahl wurde über eine vorgeschaltete Clusteranalyse den Kategorien *Grobstahl* oder *Feinstahl* zugeordnet: Grobstahl mit niedrigem Siliziumgehalt; Feinstahl mit hohem Siliziumgehalt, mehr Legierungsbestandteilen wie Chrom, Nickel und Molybdän und kleinerem Korn.

Für die Regressionskoeffizienten und den Spreizungsfaktor jeder Korrosionszone wurde aus den Messwerten, deren Saisonfaktoren und Tiefengradienten, den o.g. Hauptkomponenten und Kategorisierungen eine Schätzfunktion angegeben.

Beispielhaft sei hier die Prognosegleichung für den Koeffizienten  $b_0$  dargestellt, der entsprechend Formel (2d) der Basiskorrosion, d.h. der mittleren Abrostung in Höhe der Basistiefe bei 4 m unter MW (bzw. MTnw oder UW) entspricht:

$$\begin{aligned} b_0 = & 1,160 - 0,142 \cdot \text{Stahl}(\text{„Grobstahl“}) + 0,9481 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„limnisch“}) \\ & - 0,706 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„limnisch-brackisch“}) + 0,0255 \cdot \text{„Gewässer“}(\text{„brackisch“}) \\ & - 0,392 \cdot \text{„StrömBin“}(\text{hoch}) + 0,1593 \cdot \text{LnAlter}(1) + 0,1666 \cdot \text{Tide} \cdot \text{LnAlter}(1) \\ & + 0,3647 \cdot \text{„StrömBin“} \cdot \text{„Säurefaktor“}(1) \end{aligned} \quad (4)$$

Zur Lösung dieser Formel sind neben den eigentlichen Messwerten, den Gleichungen zur Kategorisierung und zur Bestimmung der Hauptkomponenten noch weitere Tabellen („Design-Matrizen“) erforderlich. Diese sind Anlage 3 zu entnehmen. Der komplexe Lösungsweg wird in Anlage 4 an einem Beispiel erläutert.

Insgesamt ergibt sich für die Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe ein Vorhersagemodell mit einem Schätzfehler von  $\pm 0,5$  mm, das 88% der Variabilität der Basisabrostungen erklärt. Der zugehörige Gradient  $b_1$  (s. Formel 2d) lässt sich mit 74% erklärter Variabilität auf rund  $\pm 0,2$  und der Kennwert für die multiplikative Streuung der Abrostungswerte (entsprechend Formel 3) mit 67% erklärter Variabilität auf  $\pm 0,4$  genau abschätzen. Damit können die mittlere und die maximale Abrostung an jedem beliebigen Punkt unterhalb von MW bzw. MTnw aus den Korrosionseinflüssen auch ohne örtliche Restwanddickenmessung ermittelt werden.

Die Abrostung  $b_6$  an der Tideniedrig- oder Tidehochwasserlinie lässt sich mit 82% erklärter Variabilität aus Stahl, Strömung, Tide, Liegeplatz, Gewässermilieu und dem Tiefegradienten der Redoxspannung in 0 - 4 m unter Niedrigwasserniveau auf  $\pm 2$  mm genau abschätzen. Der zugehörige Spreizungsfaktor an und über der Wasserlinie (Spritzwasserzone) lässt sich mit 63% erklärter Variabilität aus Alter, Stahl, Strömung, Tide und den Saisonfaktor für den Säuregehalt auf  $\pm 0,5$  abschätzen. Für eine multifaktorielle Schätzung des Abrostungsgradienten in der Spritzwasserzone und der Korrosionsparameter in der Wechselwasserzone war keine ausreichende Datengrundlage vorhanden.

Die Ergebnisse der Messkampagne und das Berechnungsbeispiel wurden zudem in European Communities (2007, Anhang B und C) veröffentlicht. Die Beurteilung des Korrosionszustandes auf der Grundlage einer Milieubeprobung wurde u.a. in Eißfeldt und Heeling (2005), Binder et al. (2006), Heeling und Alberts (2006), Heeling (2007) und Heeling (2009) vorgestellt.

### 3.1.3 Spundwanddickenmessungen

Im Rahmen des EU-Projektes sollte auch die Durchführung von Spundwanddickenmessung hinsichtlich ihrer statistischen Aussagekraft hinterfragt werden. Das Ziel ist es, durch eine ausreichende Anzahl von Einzelmessungen an repräsentativen Messorten zu einem repräsentativen, homogenen Datenkollektiv zu gelangen.

Um den Korrosionszustand eines *Bauwerks* bestimmen zu können, werden die Restwanddicken üblicherweise an mehreren Spundbohlen (*Stationen*) ermittelt. An jeder Station wird in unterschiedlichen Höhen (*Messquerschnitte*) und an unterschiedlichen, charakteristischen Punkten des Spundwandquerschnittes (*Messlagen*) gemessen, z.B. auf dem Spundwandberg, an den Flanschen / Stegen / Flanken und im Spundwandtal. Jeder *Messpunkt* einer Spundwand lässt sich damit als Kombination von Station, Messquerschnitt und Messlage beschreiben. An jedem Messpunkt werden mehrere *Einzelmessungen* gemessen. Bild 4 zeigt beispielhaft die Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte einer Station mit U-Profil.

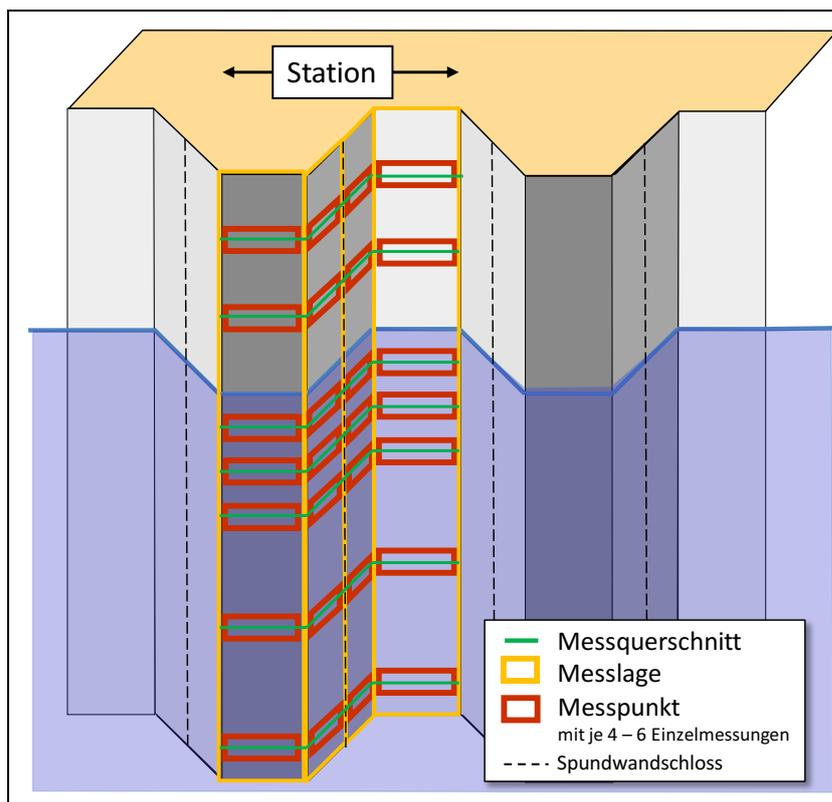


Bild 4: Station, Messquerschnitte, Messlagen und Messpunkte am Beispiel einer Spundwand mit U-Profil

Die große Streuung der Restwanddicken eines Bauwerkes erschwert jedoch die Bestimmung der mittleren und maximalen Abrostung.

Die statistische Auswertung der WaDiMe-Datenbank ergab, dass der vertikale Abstand der Messquerschnitte längs der Spundwandhöhe oberhalb des MW (bzw. MTnW oder UW) und bis

4 m darunter idealerweise bei 0,5 – 1 m betragen sollte, unterhalb 4 m Tiefe dann 1 – 2 m. Von den maßgeblichen Wasserständen sollte mindestens ein Abstand von 0,2 m (im Stillwasser 0,1 m) eingehalten werden. Je Messpunkt sind etwa 4 bis 6 Einzelmessungen sinnvoll. Für jede Korrosionszone sollten insgesamt mindestens 100 Messwerte verfügbar sein. Tabelle 1 fasst diese Anforderungen zusammen.

Tabelle 1: *Empfohlene Anzahl und Verteilung der Messquerschnitte an einer Station (aus ESM 2017)*

Höhenbereich	Anzahl Messquerschnitte	Bemerkung
oberhalb MW bzw. MThw oder OW	≥ 2	Mindestmesshöhe 1 m
zwischen MThw und MTnw bzw. OW und UW	2 - 4	nur in Tidegewässern und Schleusen: • Anzahl abhängig von der Höhe • gleichmäßig verteilt
unterhalb von MW bzw. MTnw oder UW	≥ 4	• Anzahl abhängig von der Höhe • Mindestmesshöhe 2 m • obere 4 m: Messabstand 0,5 m – 1,0 m unterhalb 4 m: Messabstand 1,0 m – 2,0 m
<b>Hinweise</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• insgesamt mindestens 100 Einzelwerte pro Bauwerk und Höhenbereich</li> <li>• Geringere Messquerschnittsabstände (&lt; 0,5 m) können zur Festlegung der Korrosionszonen zwar hilfreich sein; diese zusätzlichen Daten sind jedoch bzgl. der Mindestanzahl der Einzelmesswerte <u>nicht</u> zu berücksichtigen.</li> <li>• Abstand von den maßgeblichen Wasserständen: ≥ 0,2 m; im Stillwasser ≥ 0,1 m.</li> </ul>		

Die Auswertung der WaDiMe-Datenbank ergab, dass zufällige Unterschiede nur durch eine größere Zahl von Messstationen pro Bauwerk ausgeglichen werden können. Viele Messungen an wenigen Stationen (d.h. eine größere Anzahl an Messquerschnitten, Messlagen, Messpunkten und Einzelmessungen) führen hingegen zu inhomogenen Datenkollektiven, die keine repräsentative Abschätzung minimaler und maximaler Abrostung erlauben.

### 3.2 Messtechnik

Spundwanddickenmessungen sind u.a. aufgrund des hohen Personalaufwandes (Tauchereinsatz) zeit- und kostenintensiv. Ein Ziel des FuE-Vorhabens bestand deshalb darin, durch Optimierung der Messtechnik den Aufwand zu vermindern.

Folgende Anforderungen sind grundsätzlich an die Messtechnik zu stellen:

- Die Untersuchung muss zerstörungsfrei erfolgen.
- Die Wanddickenmessungen müssen über und unter Wasser durchführbar sein.
- Die Wanddicken müssen mit einer Messgenauigkeit von etwa ± 0,1 mm bestimmt werden können.
- Die Messwerte müssen verifizierbar und reproduzierbar sein.

- Innerhalb eines Messareals sollten sowohl mittlere als auch punktuelle, minimale Wanddicken ermittelt werden können.
- Der Reinigungsaufwand zur Vorbereitung der Messflächen sollte möglichst gering sein.
- Die Bedienung des Messgerätes sollte möglichst einfach sein.

Üblicherweise werden Restwanddicken von Stahlspundwänden im Wasser mittels Ultraschall gemessen. Dabei wird ein Ultraschall-Impuls ausgesendet und das an der Stahlrückwand reflektierte Echo empfangen. Aus der Zeitdifferenz zwischen Sendeimpuls und Rückwandecho kann in Kenntnis der materialspezifischen Geschwindigkeit des Ultraschalls auf die Dicke des Prüfmaterials geschlossen werden.

In der Praxis werden häufig kleine Wanddickenmessgeräte mit Digitalanzeige verwendet, die keine Aussage zur Messwertqualität erlauben und deshalb für Spundwanddickenmessungen ungeeignet sind. Von der BAW wurde bis 2014 eine Gerätekonfiguration („Universalmessgerät“) eingesetzt, bei der der Messkopf zwar vom Taucher an die Spundwand geführt wird, der Messwert aber an Land abgelesen und mittels Oszilloskop beurteilt werden kann. Ein Magnet hält den Prüfkopf bewegungsfrei auf der Spundwandoberfläche. Für Messungen über dem Wasserspiegel wird über eine von der BAW entwickelte Halterung ein definierter Wasservorlauf geschaffen, der nicht in den Wanddickenmesswert mit eingeht.

Sowohl die Kleingeräte als auch das Universalmessgerät erfordern eine Reinigung der Messfläche bis auf den blanken Stahl. Dieser Arbeitsschritt ist besonders zeitintensiv.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden deshalb Vergleichstests zwischen dem bewährten Universalmessgerät und solchen Alternativverfahren durchgeführt, bei denen nach Herstellerangaben auf das Entfernen von Rost, Anstrichen und Bewuchs ganz oder weitgehend verzichtet werden kann:

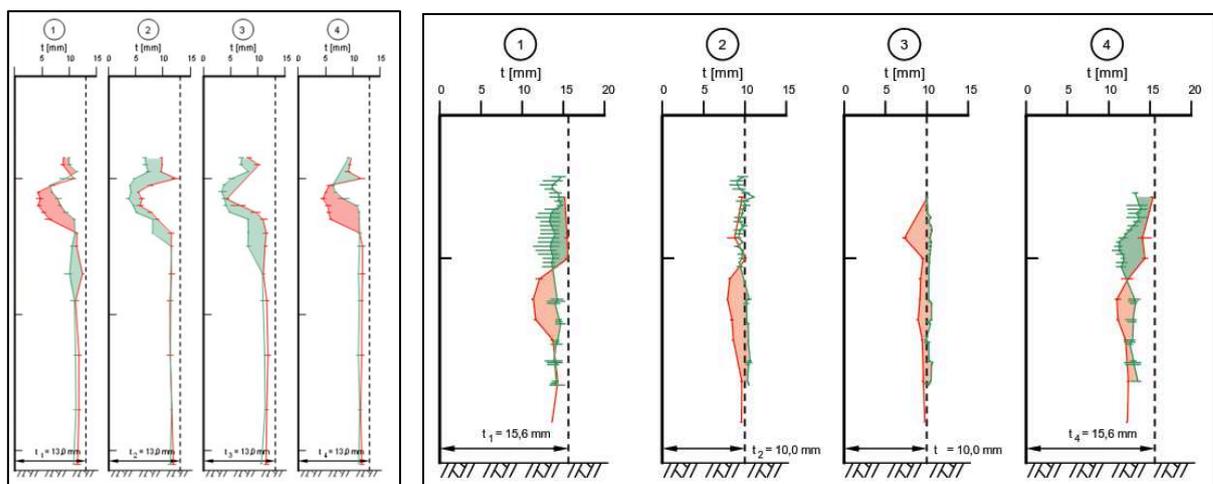
### **Pulsierender Wirbelstrom**

In Zusammenarbeit mit der Fa. Röntgen Technischer Dienst GmbH (RTD), Bochum, wurde das Verfahren „Incotest“, bei dem Stahlwanddicken mittels pulsierendem Wirbelstrom bestimmt werden, getestet. Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass keine punktuellen Abrostungen gemessen werden können, da die Spundwanddicke der gesamten Aufstandsfläche des Prüfkopfes gemittelt wird: lokal begrenzte Abrostungsmaxima, die auf Durchrostungen hinweisen, können auf diese Weise nicht bestimmt werden.

Unter Laborbedingungen wurde 2006 die Wanddicke mittels Wirbelstrom zunächst an gereinigten Stahlplatten ermittelt (Bild 5 links) und mit Ultraschallmessungen sowie mit der aus Tauchwägungen abgeleiteten, wahren mittleren Wanddicke der Platten verglichen (Bild 5 rechts). Insgesamt neigte das Incotest-Verfahren zu einer geringen Unterschätzung der Stahldicke, liegt damit aber auf der sicheren Seite.



**Bild 5:** Wanddickenmessung mit pulsierendem Wirbelstrom, Labortest  
 rechts: Vergleich der mittleren Restwanddicken der Messplatten lt. Tauchwägung (schwarz), Wirbelstrom (grün) und Ultraschall (rot)



**Bild 6:** Vergleichende Restwanddickenprofile (grün: Wirbelstrom, rot: Ultraschall)  
 links: Feldtest Eckernförde 2007  
 rechts: Feldtest Neustadt 2008

Nachdem der Labortest zu befriedigenden Ergebnissen führte, folgte 2007 ein Messeinsatz an der Ostmole des Marinestützpunktes Eckernförde, bei dem die Praxistauglichkeit von Incotest geprüft werden sollte. Bild 6 zeigt links die Ergebnisse im vergleichenden Restwanddickenprofil: die Spundwanddicke wird beim Wirbelstrom- im Vergleich zum Ultraschall-Verfahren um bis zu 5 mm teils über- teils unterschätzt. Diese widersprüchlichen Ergebnisse führten zu einem erneuten Feldtest 2008 an der Bundesgrenzschutzmole in Neustadt/Holstein, der aber ähnliche Resul-

tate lieferte (Bild 6 rechts). Selbst die Lage der Hauptkorrosionszone ließ sich nicht eindeutig bestimmen. Damit war die Messungenauigkeit des Wirbelstromverfahrens unter realen Einsatzbedingungen so groß, dass die Restwanddicken nicht verlässlich bestimmt werden konnten.

### Ultrabreitbandverfahren

2009 führten Labortests mit dem Ultrabreitbandverfahren der Fa. EvoLogics GmbH, Berlin, erwartungsgemäß (da es sich um ein auf Ultraschall basierendes Verfahren handelt) zu zutreffenden Restwanddicken. Ein für 2010 geplanter Feldtest konnte seitens der Herstellerfirma mangels ausreichender Kapazitäten nicht durchgeführt werden.

### Mehrfachecho-Ultraschall

2014 wurden in Zusammenarbeit mit Fa. Domeyer GmbH & Co. KG, Bremen, ein Labor- und ein Feldtest mit dem Mehrfachecho-Ultraschall-Messgerät Cygnus Dive der Fa. Cygnus Instruments Ltd., Dorchester (GB), durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird die Laufzeit einer Gruppe von drei aufeinanderfolgenden Spundwand-Echos ausgewertet: das erste Echo, welches durch eine evt. vorhandene Rost- oder Farbschicht beeinflusst wird, wird ignoriert (Bild 7 links); die Wanddicke wird automatisch aus dem zweiten Echo ermittelt.

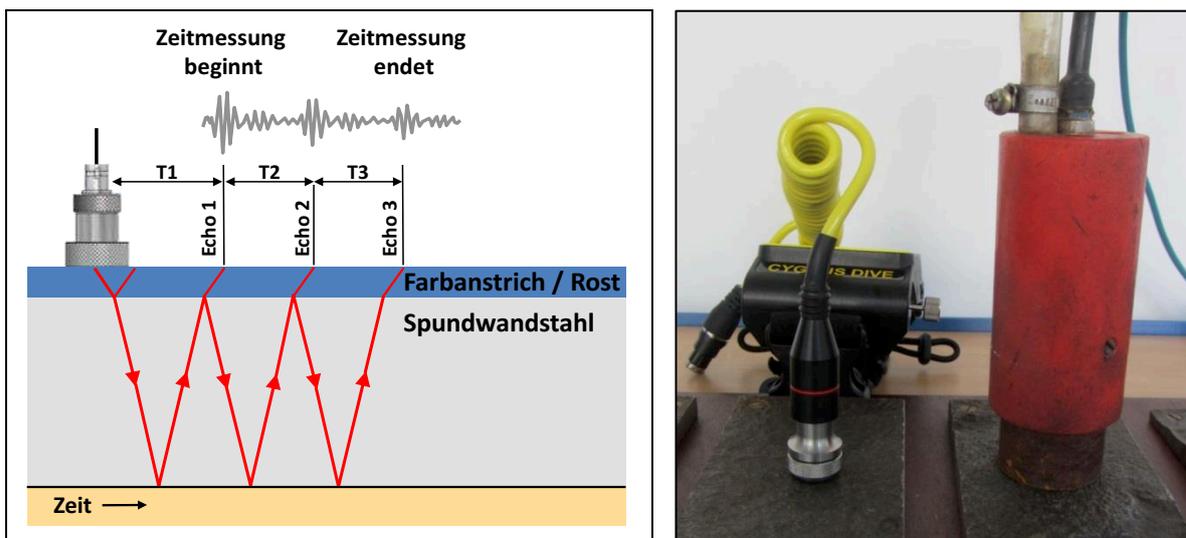


Bild 7: Wanddickenmessung mittels Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, Labortest

links: Funktionsprinzip nach Cygnus Instruments Ltd.

rechts: Prüfköpfe (links: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, rechts: Magnethalterung des BAW-Universalmeßgerätes)

Sowohl der Labor- (Bild 7 rechts) als auch der Feldtest (Bild 8) verlief positiv:

- Das Mehrfachecho-Verfahren lieferte zutreffende, reproduzierbare Messwerte sowohl hinsichtlich der Mittleren als auch hinsichtlich der Maximalen Abrostungen (Bild 9).
- Der Aufwand zur Reinigung der Messstellen konnte deutlich reduziert werden.
- Die Bedienung ist einfacher als die des Universalmeßgerätes der BAW, und die Messwerte lassen sich besser verifizieren.

- Die Messkonfiguration beinhaltet ein Armband mit großer Digitalanzeige für den Taucher, so dass dieser den eigentlichen Messvorgang unmittelbar nachvollziehen kann.



Bild 8: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, Feldtest Tangermünde 2014

links: Wanddickenmessung mit Cignus Dive ohne Messpunktreinigung

rechts: Wanddickenmessung mit BAW-Universalmessgerät mit gereinigten Messpunkten

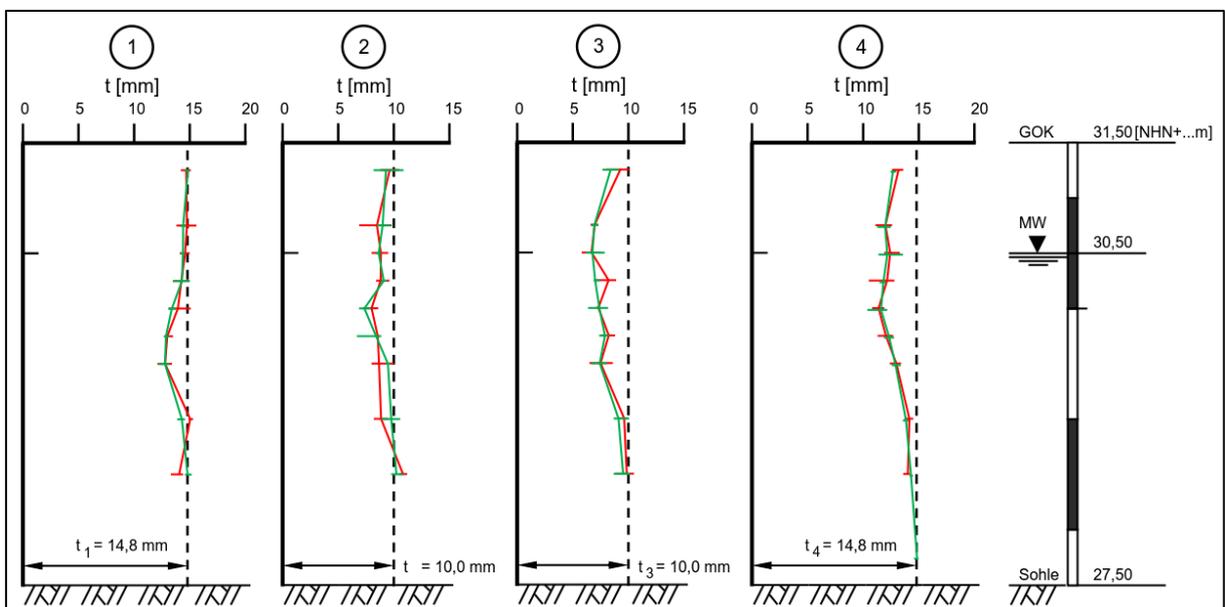


Bild 9: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät, Feldtest Tangermünde: Vergleichende Restwanddickenprofile (rot: BAW-Universalmessgerät, grün: Mehrfachecho-Ultraschall-Gerät)

2014 wurde das Mehrfachecho-Ultraschall-Messgerät Cygnus Dive für die BAW angeschafft. Der Messaufwand hat sich im Vergleich zum Universalmessgerät etwa halbiert.



- Die Auswertung und Interpretation einer Spundwanddickenmessung einschl. Darstellung und Verifikation der Daten wird erläutert. Bild 6 zeigt beispielhaft die Darstellung in Form von Restwanddickenprofilen.

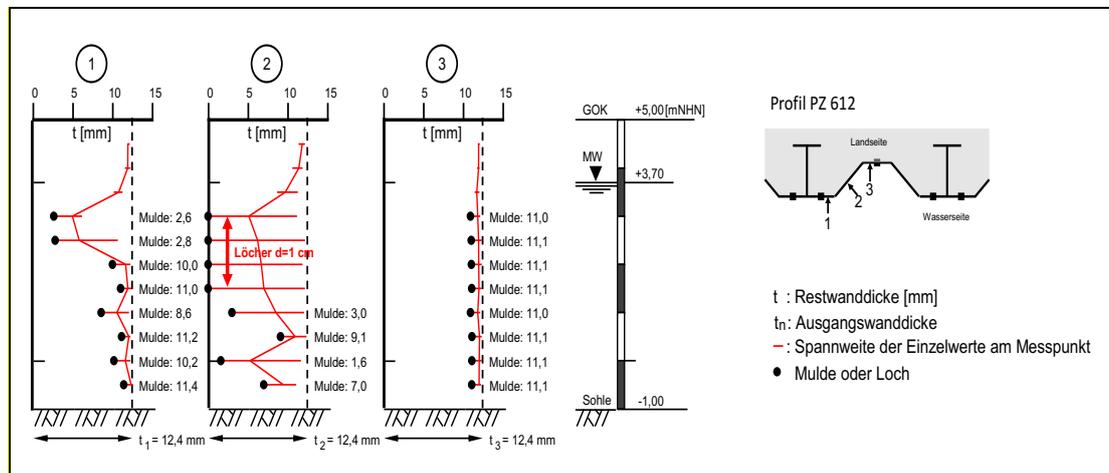


Bild 11: Restwanddickenprofil (aus ESM 2017)

- Zur Plausibilisierung der im Rahmen der Messkampagne ermittelten mittleren und maximalen Abrostungsraten wird im ESM eine Benennung der Korrosionsintensität für Bauwerke unterschiedlichen Alters eingeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Benennung der Korrosionsintensität aus ESM (2017)

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

Zusätzlich werden in der Anlage 4 der ESM – fußend auf einer Auswertung der WaDiMe-Datenbank – mittlere und maximale Abrostungsraten für Spundwände an ausgewählten Norddeutschen Gewässern vorgelegt.

- Einen weiteren Themenschwerpunkt im ESM bildet die statistische Ermittlung der Kennwerte der Korrosion aus den Einzelmesswerten, mittels derer der aktuelle Korrosionszustand bestimmt und die Restnutzungsdauer prognostiziert werden kann.
- Die ESM beschreibt, wie im Zuständigkeitsbereich der WSV im Rahmen einer Bauwerksinspektion eine Spundwanddickenmessung zu bewerten ist.

Einen ausführlicheren Überblick über die Inhalte der ESM gibt der BAW-Brief 3/2018 (Heeling 2018).

#### **4 Ausblick**

Auch mit Abschluss des vorliegenden FuE-Vorhabens besteht weiterer Forschungsbedarf z.B. zu folgenden Themen:

- Örtlich werden an Spundwänden sog. „anomale Löcher“ (s.a. ESM 2017) beobachtet, die in keinem statistischen Zusammenhang mit der ansonsten geringen, flächigen Abrostung der Spundwand stehen und deren Entstehung ungeklärt ist.
- Als Folge des Klimawandels werden erhöhte Luft- bzw. Wassertemperaturen z.B. die Säure- und O<sub>2</sub>-Faktoren im Gewässer beeinflussen und das Korrosionsverhalten bestehender Spundwandbauwerke verändern. Steigende Wasserstände werden zu einer Verschiebung bzw. zu einer Überlagerung alter und neuer Korrosionszonen führen. Beide Phänomene werden die Prognose der Restnutzungsdauer erschweren.
- Mittels künstlicher Intelligenz könnten Restwanddicken-Daten so ausgewertet werden, dass sich bisher nicht erkannte Einflüsse auf das Abrostungsverhalten von Spundwänden eruieren lassen (wissensbasierte Datenbankanalyse).
- ...

#### **5 Zusammenfassung**

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden“ war die BAW bis 2005 gemeinsam mit Partnern aus Italien, Luxemburg und Frankreich am EU-Projekt „Design Method for Steel Structures in Marine Environments Including the Corrosion Behaviour“ beteiligt (European Communities, 2007). Die statistische Datenauswertung durch die BAW erfolgte mit Unterstützung der Fa. Statsoft Europe GmbH, Hamburg. Das EU-Projekt lieferte eine Vielzahl von Erkenntnissen zu Korrosionseinflussfaktoren und deren Wechselwirkungen, die detailliert dem Endbericht (European Communities, 2007) zu entnehmen sind und auf Fachveranstaltungen vorgestellt wurden.

Die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Restwanddickenmessungen wird bei der BAW durch die eigenentwickelte Datenbankanwendung WaDiMe unterstützt. Die WaDiMe-Programme wurden zwischen 2007 und 2014 weiterentwickelt. Die Programmierarbeiten wurden von der Fa. Skill Networks, Hamburg, durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit den jeweiligen Herstellern bzw. Vertreibern von Messgeräten wurden zwischen 2006 und 2014 alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung durch Vergleichsuntersuchungen im Labor und am Spundwandbauwerk in der Natur bzgl. Praxistauglichkeit und Messgenauigkeit geprüft und bewertet. Bei den Vergleichsuntersuchungen lieferte lediglich das Mehrfachecho-Ultraschall-Verfahren Cygnus Dive im Labor und Vor-Ort zutreffen-

de, reproduzier- und verifizierbare Messwerte bei gleichzeitig geringerem Aufwand bei der Reinigung der Messstellen und einfacher Bedienbarkeit.

Die mittleren und maximalen Abrostungen aus der BAW-Datenbank WaDiMe sind als Anhaltswerte für das Abrostungsverhalten in den einzelnen Korrosionszonen von Spundwänden im Meer- und Süßwasser in die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ (z.B. EAU, 2012) eingegangen.

Damit Wanddickenmessungen von den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern vermehrt an Ingenieurbüros vergeben werden können, wurde die BAW Empfehlung „Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen: Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation (ESM)“ erarbeitet (BAW 2017), die zukünftig als Ausschreibungsgrundlage für Wanddickenmessungen dienen kann. Die ESM wurde im BAW Brief 03/2018 vorgestellt.

Eine Zusammenfassung des FuE-Vorhabens erfolgte zudem in Heeling (2017).

## 6 Literatur

- Alberts, D.; Eißfeldt, F. und Schuppener, B. (1986): Beurteilung alter Spundwandbauwerke an den Norddeutschen Küsten. Vortrag auf der Baugrundtagung, 22. – 24.09.1986, Nürnberg.
- Alberts, D. und Heeling, A. (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden. Statistische Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 75, S. 77 – 94, Karlsruhe.  
[https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/102752/mb75\\_Alberts\\_Heeling.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/102752/mb75_Alberts_Heeling.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Alberts, D. (2001): Korrosionsschäden und Lebensdauerabschätzung an Stahlspundwänden und -pfählen im Wasserbau. Vortrag auf der Tagung „Korrosionsschutz in der maritimen Technik“ des Germanischen Lloyd, 12.12.2001, Hamburg.
- Binder, G.; Heeling, A.; Uerkvitz, R. (2006): Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Korrosion von Spundwänden. Kongressbeitrag zum 31. PIANC-Kongress, 14. – 18.05.2006, Estoril.  
<https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/104867/2006-08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- EAU (1996): Empfehlungen des Arbeitsausschusses “Uferneimfassungen”. Häfen und Wasserstraßen. EAU 1996. 9. Aufl., Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- EAU (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses “Uferneimfassungen”. Häfen und Wasserstraßen. EAU 2012. 11. Aufl., Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Eißfeldt, F. und Heeling, A. (2005): Beurteilung der Korrosion an Spundwandbauwerken. Vortrag auf dem BAW-Kolloquium „Erfahrungsaustausch zur Planung, Bemessung und Ausführung von Uferwänden aus Stahlspundbohlen“, 22.09.2005, Hamburg.  
<https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/1/vortrag3.pdf>
- ESM (2017): BAW-Empfehlung Spundwanddickenmessung in Häfen und an Wasserstraßen: Grundlagen, Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation (ESM). Ausgabe 2017. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe  
[https://izw.baw.de/publikationen/empfehlungen/0/BAWEmpfehlung\\_Spundwanddickenmessung\\_Heeling\\_2017.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/empfehlungen/0/BAWEmpfehlung_Spundwanddickenmessung_Heeling_2017.pdf)
- European Communities (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final report. ECSC Steel RTD program. Contract number 7210-PR/317.
- Heeling, A. und Alberts, D. (2006): Description and assessment of the corrosion state on corroded sheet pile walls. Kongressbeitrag zum 31. PIANC-Kongress, 14. – 18.05.2006, Estoril.

- Heeling, A. (2007): Beurteilung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden mittels Restwanddickenmessungen und Milieubeprobung. Vortrag auf dem Kongress der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG), 12. – 14.09.2007, Dresden.
- Heeling, A. (2009): Beurteilung des Korrosionszustandes mittels Restwanddickenmessungen und Milieubeprobung. TU Hamburg-Harburg, Vortrag auf dem Workshop „Spundwände“, 29.09.2009, Hamburg.
- Heeling, A. (2017): Ermittlung und Bewertung des Korrosionszustandes von Stahlspundwänden in Häfen und an Wasserstraßen. In: BAWMitteilungen Nr. 100, S. 39 – 53, Karlsruhe.  
[https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/102490/mb\\_100\\_04\\_Heeling\\_Ermittlung.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/102490/mb_100_04_Heeling_Ermittlung.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Heeling, A. (2018): Spundwanddickenmessungen in Häfen und an Wasserstraßen - Neue BAW-Empfehlung *ESM* erschienen. BAWBrief 3/2018, Karlsruhe.  
[https://izw.baw.de/publikationen/briefe/0/BAWBrief\\_03\\_2018.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/briefe/0/BAWBrief_03_2018.pdf)
- Hein, W. (1990): Zur Korrosion von Stahlspundwänden im Wasser. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 67. Karlsruhe  
[https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb67\\_Hein.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb67_Hein.pdf)
- MSV (2018): Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.  
[https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt\\_Schadensklassifizierung\\_an\\_Verkehrswasserbauwerken\\_MSV\\_2018.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Schadensklassifizierung_an_Verkehrswasserbauwerken_MSV_2018.pdf)

Bundesanstalt für Wasserbau  
Hamburg, April 2019

# **Anlage 1**

## **Analyse von Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau.**

**R. Uerkvitz (Statsoft Europe GmbH, 2003)**

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
Problemstellung	2
Untersuchungsmethode	4
Standortauswahl	4
Analyseschritte	5
Variationsursachen für Messwerte	7
Analyseverfahren	7
Verteilungsform	8
Bauwerke und Messpunktlagen	9
Stationen und Abrostungszonen	14
Tiefenfunktion der Abrostungen	22
Prinzip loglinearer Funktionen	22
Tiefenfunktion der Spundwände	24
Basisabrostung und Abrostungsraten	27
Gesamtfunktion über alle Tiefen	34
Schätzung kritischer Restwanddicken	37
Schätzung der maximalen Abrostung	37
Erforderliche Stichprobengröße	39
Schätzung aus Alter und Standortfaktoren	41
Lebensdaueranalyse	44
Zusammenfassung	47
Literaturverzeichnis	49

## Problemstellung

Die Nutzungsdauer von Stahlspundwänden und -pfählen im Wasserbau wird durch Korrosionsprozesse begrenzt und erfordert daher eine daran orientierte Überprüfung der mittleren und minimalen Wanddicken. Da im Rahmen einer solchen Überprüfung nur bestimmte Messpunkte einzelner Pfähle eines Bauwerks untersucht werden können, ist eine Abschätzung der Restwanddicken des jeweiligen Bauwerks aus Stichprobendaten erforderlich. Die Zuverlässigkeit dieser Abschätzung ist nur dann gegeben, wenn das zugrundeliegende Datenkollektiv repräsentativ für das Gesamtbauwerk ist und ein homogenes Verteilungsmuster zeigt. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, lässt sich mit den Methoden der schließenden Statistik das Risiko des Unterschreitens einer kritischen Restwanddicke an einem beliebigen Pfahl des Bauwerks quantifizieren.

In der bisherigen Praxis einer Spundwandüberprüfung wurde die Restwanddicke in bestimmten Höhenlagen (Messquerschnitte) an vom jeweiligen Profil abhängigen Punkten (Messlagen) eines Spundwandpfahls (Station) mit einem Ultraschallgerät gemessen. Wenn eine durch Mulden- oder Narbenkorrosion verursachte Unebenheit der Oberfläche an bestimmten Punkten keine Ultraschallmessung erlaubte, wurden ergänzende Messungen der Muldentiefe mit einer Tiefenlehre vorgenommen und die lokale Restwanddicke rechnerisch aus der mittleren Restwanddicke am Ansatzpunkt ermittelt. Der Umfang einer Bauwerksüberprüfung war sehr unterschiedlich: 3 - 9 Stationen pro Bauwerk, etwa 10 - 20 Messquerschnitte pro Station, 4 - 10 Messlagen pro Querschnitt sowie 4 - 6 Messungen an jedem dieser Punkte. Für die jeweiligen Bauwerke resultieren daraus zumeist 200 bis 3000 Messwerte.

Die BAW-Hamburg entwickelte ein Verfahren zur Abschätzung der mittleren und minimalen Restwanddicken auf der Grundlage bauwerksbezogener Stichprobendaten. Diese Abschätzung erfolgte nach Höhenzonen getrennt aus dem gemeinsamen Verteilungsmuster der Ultraschallmessungen für mehrere Stationen und mehrere Messlagen. Eine Prognose maximaler Abrostungstiefen wurde aus den Parametern der Häufigkeitsverteilung der Messwerte als obere Toleranzgrenze abgeleitet, die nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 2,5% überschritten werden dürfte. Damit lässt sich näherungsweise das Risiko der Durchrostung eines Spundwandpfahls erfassen, welches den möglichen Versagensfall für das untersuchte Bauwerk beschreibt und so eine klare Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen der zuständigen Bauingenieure liefert.

Die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens zur Abschätzung der mittleren und minimalen Restwanddicken wird bei einigen Bauwerken durch eine heterogene Struktur der Messdaten beeinträchtigt. Die Verteilungsform der Abrostungswerte ist stets asymmetrisch mit einem hohen Anteil an niedrigen Werten, wird aber auch manchmal durch Nebenmaxima im höheren Wertebereich gekennzeichnet. Außerdem fehlt bei einigen Bauwerken eine klare Höhenzonierung der Abrostungsmaxima, was eine Zusammenfassung der Messwerte einzelner Querschnitte zu definierten Datenkollektiven erschwert. Da die statistischen Prognoseverfahren für die Abrostung aber grundsätzlich homogene Verteilungsformen fordern, ist die Repräsentativität der Abschätzung von Restwanddicken für das Gesamtbauwerk also nicht immer gewährleistet.

Im Rahmen eines von der *European Commission of Steel and Coal (ECSC)* geförderten Forschungsvorhabens führt die BAW eine Untersuchung zur Klärung des Mess- und Auswertungsverfahrens an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau durch. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine methodische Grundlage für die Auswahl von Messpunkten in Orientierung an den Erfordernissen der darauf aufbauenden statistischen Prognoseverfahren für die mittlere und maximale Abrostung zu erarbeiten. Die bisherige Praxis der Analyse von Ultraschallmessungen soll kritisch bewertet und durch neue Vorschläge ergänzt werden, um die Zuverlässigkeit der Risikoabschätzung für den Versagensfall einer korrodierten Spundwand zu erhöhen.

## Untersuchungsmethode

Ausgangspunkt für die nachfolgende Analyse ist eine Studie der BAW zu Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden aus dem Jahr 1997, in der die heutige Praxis der statistischen Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung erarbeitet wurde. Als Datenbasis für eine erneute Betrachtung der methodischen Grundlagen des Abschätzungsverfahrens dient eine Datenbank der BAW-Hamburg mit Messungen von Wanddicken an etwa 300 Bauwerken. In die Auswahlkriterien einzelner Bauwerke zur exemplarischen Bearbeitung wurden die vorläufigen Ergebnisse der Datenbankauswertung einbezogen, welche bereits vom Autor im Abschlussbericht des Jahres 2002 zur geplanten Datenerhebung im Rahmen des ECSC-Projekts vorgestellt wurden.

### Standortauswahl

Die nachfolgende Untersuchung soll ein möglichst breites Spektrum von Bauwerkstandorten abdecken, damit eine standortübergreifende Einschätzung der Erfordernisse an repräsentative Wanddickenmessungen erarbeitet werden kann. Die ausgewählten Bauwerke haben Spundwände unterschiedlichen Alters mit U-Profilen oder gemischtem Profiltyp (Tabelle A1-1).

*Tabelle A1-1: Auswahl von Bauwerken mit archivierten Wanddickenmessungen*

NR	Ort	Bauwerk	Profiltyp	Alter [Jahre]
31	Neustadt	BGS-Mole Hafenseite	UR	20
46	Kiel	Umschlagskaje	EA	16
54	Eckernförde	Ostmole Wellenschutzwand Seeseite	EI	8
80	Büsum	Bauhofskaje Bauabschnitt I	UR	9
84	Espelkamp Hafen	MLK Alter 15	UG	15
87	Niederwöhren	MLK Alter 10	UG	10
95	MLK Bereich Minden	MLK Alter 15	UG	15
101	Bad Essen Wittlage	MLK Alter 10	UR	10
116	MLK	MLK Alter 5	UR	5
121	Wilhelmshaven	Westkaje 2. Abschnitt	UR	24
127	Wilhelmshaven	Ostkaje	UR	21
138	Borkum	Südliche Hafenwand	UR	10
146	MLK	MLK Alter 5	UG	5
151	Kating	Sielöffnung Nordseite	UR	18
153	Kating	Binnenhafen Südseite	UR	18
165	Flensburg	Bootshafen Würthembergbrücke	UR	16
299	Kiel	Wellenschutzwand Seeseite	EI	10
300	Kiel	Brandenburger Ufer	EA	13

Um eine Beeinträchtigung der Korrosionswerte durch wechselnde Einflussfaktoren zu vermeiden, wurden grundsätzlich Bauwerke ohne Korrosionsschutz, ohne Durchrostung und ohne Dränanlage ausgewählt. Darüber hinaus sollten jeweils zwei Bauwerke etwa gleichen Alters sein und in den Standortbedingungen Milieu, Tide, Wellen und Liegeplatz (abgesehen von einer Ausnahme) übereinstimmen, damit die Abrostungsunterschiede innerhalb eines Bauwerks mit den Unterschieden zwischen Bauwerken gleicher Umwelt verglichen werden können.

Tabelle A1-2: Gruppierung der ausgewählten Bauwerke nach Standortbedingungen

NR	Profiltyp	Milieu	Tide	Liegeplatz	Wellen	Alter [J]
146	UG	süß	ohne Tide	nein	nein	5
116	UR	süß	ohne Tide	nein	nein	5
101	UR	süß	ohne Tide	nein	nein	10
87	UG	süß	ohne Tide	nein	nein	10
95	UG	süß	ohne Tide	nein	nein	15
84	UG	süß	ohne Tide	nein	nein	15
165	UR	salzig	ohne Tide	ja	nein	16
31	UR	salzig	ohne Tide	ja	nein	20
80	UR	salzig	mit Tide	ja	nein	9
138	UR	salzig	mit Tide	ja	nein	10
127	UR	brackisch	ohne Tide	ja	nein	21
121	UR	brackisch	ohne Tide	ja	nein	24
151	UR	brackisch	mit Tide	nein	nein	18
153	UR	brackisch	mit Tide	ja	nein	18
300	EA	salzig	ohne Tide	ja	nein	13
46	EA	salzig	ohne Tide	ja	nein	16
54	EI	salzig	ohne Tide	nein	ja	8
299	EI	salzig	ohne Tide	nein	ja	10

Insgesamt wurden Wanddickenmessungen von 18 Bauwerken mit einem Alter zwischen 5 und 24 Jahren untersucht. Davon liegen sechs in limnischen, vier in brackischen und acht in marinen Gewässern. Die Hälfte der Standorte besitzt einen Liegeplatz. Die Standorte lagen zumeist in tidefreien Gewässern und abgesehen von zwei Ausnahmen in Gewässern ohne starke Wellenwirkung.

### **Analyseschritte**

Als Erstes sollen die Ursachen der bei einigen Bauwerken beobachteten Inhomogenität von Datenkollektiven aus Wanddickenmessungen geklärt werden. Dafür werden jeweils zwei Bauwerke vergleichbarer Lage herangezogen und zunächst die Gesamtverteilung der Daten über alle Stationen, Querschnitte und Messlagen geprüft und dann die jeweiligen Streuungsanteile ermittelt. Die Streuungszerlegung erfolgt mit Hilfe einer Regressionsanalyse im *Allgemeinen Linearen Modell* (zu den statistischen Verfahren, s. Bortz 1989). Aus der Größe dieser Streuungsanteile kann abgeschätzt werden, ob beispielsweise verschiedene Messlagen zu einem homogenen Datenkollektiv für die Abschätzung der mittleren und maximalen Abrostung zusammengefasst werden können.

Auf der Grundlage der Ergebnisse des ersten Bearbeitungsschrittes wird dann geprüft, ob in den Ultraschallmessungen an den Spundwänden eine Höhenzonierung der Abrostung erkennbar ist. Für diese Analyse müssen Messdaten für verschiedene Stationen und Messlagen zusammengefasst werden, damit ein ausreichend großes Datenkollektiv in den einzelnen Höhenbereichen verfügbar ist. Als Alternative zur bisherigen Analysepraxis, bei der bestimmte Messquerschnitte zu Abrostungszonen zusammengefasst wurden (z.B. Niedrigwasserzone, Unterwasserzone), wird in der vorliegenden Arbeit die Bestimmung einer Tiefenfunktion für die Abrostung mit

Hilfe der Regressionsanalyse vorgestellt. Als Ergänzung zu den Ultraschallmessungen werden Muldenmessungen mit der Tiefenlehre herangezogen. Die Abschätzung mittlerer und maximaler Abrostung erfolgt aus den Parametern dieser Tiefenfunktion heraus und wird mit anderen Schätzverfahren verglichen. Außerdem wird der erforderliche Messaufwand zur Gewährleistung einer vorgegebenen Präzision bei der Ermittlung von Restwanddicken abgeschätzt (Stichprobenplanung).

Abschließend wird die Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden aus messbaren Einflussgrößen heraus erörtert. Dabei wird untersucht, ob sich die Modellparameter der Tiefenfunktion für die Abrostung als Funktion anderer Messgrößen darstellen lassen. In einem solchen Falle ließen sich minimale Restwanddicken über eine multifaktorielle Vorhersagefunktion aus Drittgrößen (z.B. Alter, Gewässerparameter) grob abschätzen. Unabhängig davon könnte mit Hilfe der Weibullverteilung eine univariate Lebensdauerabschätzung von Spundwänden aus kritischen Restwanddicken erfolgen. Die dazu erforderlichen Messwerte werden von der BAW im Rahmen des *ECSC*-Projekts nach dem im vorangegangenen Projektbericht vorgeschlagenen Datenerhebungsplan erarbeitet.

## Variationsursachen für Messwerte

### Analyseverfahren

Der Vergleich mittlerer Abrostungen beruht stets auf jeweils zwei Bauwerken mit gleichen Standortbedingungen. Für die Messlagen und Messquerschnitte der Bauwerke müssen einheitliche Bezugsniveaus erstellt und darauf bezogene Vergleichsbereiche definiert werden. Dafür wurden die Knotentiefen der Messquerschnitte auf *Tiefe zu Mittelwasser* (bzw. Tideniedrigwasser) umgerechnet und in Intervallen von einem Meter gruppiert. Wenn eines der Vergleichsbauwerke Messungen in größerer Knotentiefe als das andere hatte, konnten diese im Vergleich nicht berücksichtigt werden. Gleiches gilt auch für Messlagen, die jeweils bei beiden Bauwerken übereinstimmen müssen. Spiegelgleiche Messpunktlagen an Spundwandbohlen wurden für den Vergleich zusammengefasst und entsprechend umkodiert (z.B. *rechtes* oder *linkes Tal Mitte* bei U-Profilen), wenn ein Vergleich sonst nicht möglich gewesen wäre.

Die Zerlegung der Gesamtstreuung von Ultraschallmessungen erfolgt auf der Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells (ALM), bei der kategoriale Größen wie beispielsweise *Messpunktlage* ebenso wie die metrische Größe *Tiefe zu Mittelwasser (MW)* in die multiple Regressionsanalyse einbezogen werden können. Ein multiples lineares Regressionsmodell fasst eine abhängige Größe  $Y$  als gewichtete Summe einer oder mehrerer unabhängiger Größen (Prädiktoren)  $X_1 \dots X_K$  auf, beispielsweise in der Form:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_K X_K + \dots + b_{KJ} X_K X_J + e \quad (\text{A1-1})$$

Darin kann  $Y$  ein Korrosionsparameter sein (Abrostung),  $X_K$  eine zugehörige Einflussgröße (z.B. Bauwerk, Tiefe, Messpunktlage), und  $e$  stellt eine normalverteilte Zufallsgröße (Fehler, Residuum) dar. Die Koeffizienten  $b_0 \dots b_K$  werden über die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate berechnet. Die multiplikativen Terme  $X_K X_J$  in (1) repräsentieren die linearen Zweifach-Interaktionen zwischen den Einflussgrößen und die Koeffizienten  $b_{kj}$  deren Gewicht in der Vorhersagefunktion. Ein hohes Gewicht von Interaktionen (Wechselwirkungen) zwischen den Einflussfaktoren signalisiert, dass die mittlere Abrostung je nach Kombination von beispielsweise Messlage und Tiefe völlig unterschiedlich verläuft.

Qualitative Faktoren mit zwei Stufen (z.B. zwei Bauwerke) lassen sich in kodierter Form mit den Werten -1 oder +1 in eine Regressionsgleichung einbringen. Der Regressionskoeffizient  $b$  des kodierten Faktors entspricht dann der halben Niveauverschiebung (Effekt) der Zielgröße durch den Wechsel beider Faktorausprägungen (Bauwerk A zu B). Bei der Effektkodierung wird ein kategorialer Faktor mit  $k$  Ausprägungen (z.B. vier Messpunktlagen) indessen durch  $k - 1$  Dummy-Variablen dargestellt, die bei allen Kodierungsvariablen durchgehend für die letzte Ausprägung den Wert -1 annimmt. Auf diese Weise lassen sich varianzanalytische Fragestellungen wie die Streuungszersetzung mit regressionsanalytischen Verfahren bearbeiten (zu Einzelheiten des ALM s. Bortz 1989).

### Verteilungsform

Da die Streuungszersetzung der Abrostungswerte im ALM an eine Normalverteilung der Werte in den Teilgruppen (z.B. Bauwerke) gebunden ist, muss zunächst die Verteilungsform der Messwerte geprüft werden. In allen untersuchten Fällen wurde die bisherige Einschätzung von Alberts und Heeling (1997) bestätigt, dass die Ultraschallmessungen an den Spundwandbohlen einer Lognormalverteilung entsprechen (Bild A1-1).

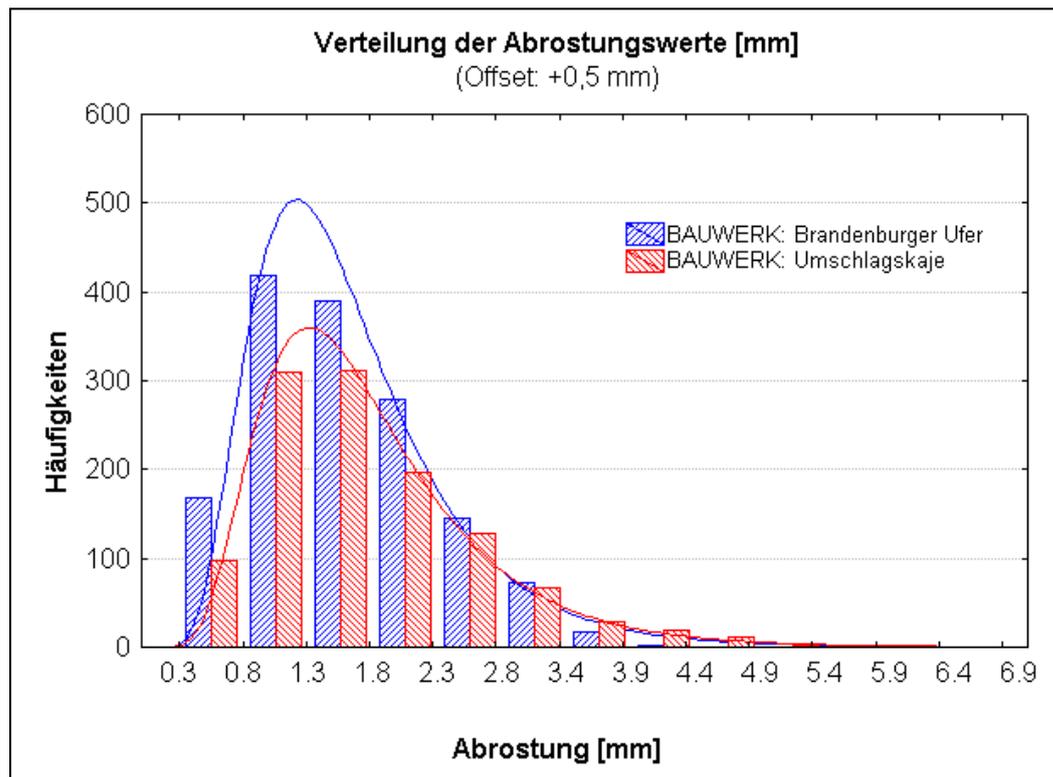


Bild A1-1: Lognormalverteilung der Abrostungswerte von Bauwerk Nr. 46 und 300

Eine Lognormalverteilung ist als Normalverteilung der Logarithmen von Daten definiert und zeigt auf der ursprünglichen Messwertskala ein asymmetrisches Verteilungsbild mit Schwerpunkt im niedrigen Messwertebereich und weit nach oben ausgreifender Streuung (s. Johnson und Kotz 1970). Diese Asymmetrie resultiert aus dem auf der Log-Ebene additiven Streuungsmaß  $S_{ln}$  zum logarithmischen Mittelwert, welches auf der ursprünglichen Messwertskala zum Streuungsfaktor wird ( $e^{S_{ln}}$  nach oben und  $1/e^{S_{ln}}$  nach unten). Dieser Umstand ist insbesondere bei der Festlegung von Korrosionszonen von Bedeutung, worauf noch eingegangen wird.

Die Anpassung der Messdaten an eine Lognormalverteilung nach dem Lillefors-Test verlief für die Bauwerke und verschiedene Teilkollektive zumeist positiv. Die Lognormalverteilung ist nur für einen positiven Wertebereich definiert. Da sich aufgrund der Messungenauigkeit von lokalen Restwanddicken und Ausgangswanddicken rechnerisch mitunter negative Abrostungswerte ergaben, mussten die Messwerte für die Verteilungsanpassung bei den meisten Bauwerken um eine kleine Konstante nach oben korrigiert werden. Diese Konstante (Offset) lag zumeist bei 0,5 mm, selten bei 1,0 mm.

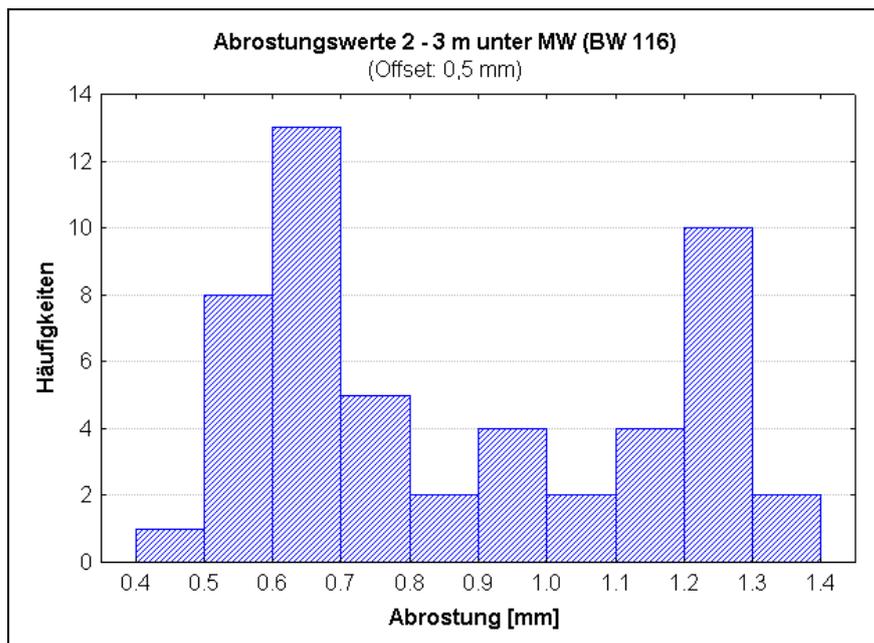


Bild A1-2: Bimodale Häufigkeitsverteilung von Abrostungswerten eines Tiefenbereichs

Die Verteilungsbilder der jeweiligen Datenkollektive zeigten sich für die Gesamtbauwerke sehr geschlossen (homogen), bei Aufteilung nach Tiefe, Messlage oder Station aber mitunter sehr unregelmäßig mit Haupt- und Nebenmaxima (Bild A1-2). Solche mehrgipfligen Verteilungsformen werden oft als Mischkollektiv angesprochen, das sich aus homogenen Teilkollektiven mit unterschiedlichen Schwerpunkten und unterschiedlicher Streuung zusammensetzt.

Die Ursachen eines Mischkollektivs lassen sich über Streuungserlegung (Varianzanalyse) ermitteln, bei der systematische Unterschiede zwischen Abrostungsniveaus in Form von Streuungskomponenten transparent werden, die eine Mittelwertvariation in Abhängigkeit von bestimmten Gruppierungsfaktoren (z.B. Messlage) ausdrücken. Bei lognormalverteilten Daten muss sich die Streuungserlegung allerdings entsprechend auf logtransformierte Messdaten beziehen, da sonst die einzelnen Variationskomponenten falsch berechnet werden und somit nicht aussagekräftig sind.

### **Bauwerke und Messpunktlagen**

Die Zerlegung der Gesamtstreuung von Ultraschallmessungen erfolgt für jeweils zwei Bauwerke mit gleichen Standortbedingungen auf der Grundlage des Allgemeinen Linearen Modells (ALM), bei der als Gruppierungsfaktoren Bauwerk, Messlage und Höhenlage zu Mittelwasser (bzw. Tideniedrigwasser) eingesetzt werden. Die einzelnen Variationsursachen erwiesen sich zwar einem F-Test zufolge in fast allen Fällen als signifikant, aber das Testverfahren konnte leider aufgrund fehlender Varianzhomogenität innerhalb der Gruppen (Bartlett-Test) nicht validiert werden. Die nachfolgende Analyse beschreibt also zunächst nur die Verhältnisse in den 18 untersuchten Bauwerken, die aber immerhin ein großes Spektrum von Standortbedingungen abdecken.

Tabelle A1-3: Streuungsanteile von Bauwerk, Messlage, Tiefe sowie Interaktionen

Effekt	Variationskomponenten von logarithmierten Abrostungswerten								
	Mittlere Abweichungsquadrate (MQ) vom Bezugsniveau Schätzung im allgemeinen linearen Modell								
	116u146	87u101	84u95	31u165	80u138	121u127	151u153	46u300	54u299
BAUWERK	0.04	0.85	11.12	23.45	51.68	7.40	1.23	6.38	8.62
MESSLAGE	1.23	4.40	0.16	8.34	1.43	3.78	0.58	7.99	7.52
TIEFE	9.54	7.78	0.78	24.18	5.98	1.50	1.42	24.04	11.92
BW x MESSLAGE	0.21	1.44	0.40	1.41	2.86	15.65	1.02	2.51	7.37
BW x TIEFE	2.31	0.31	0.56	1.03	1.36	0.29	0.28	1.07	1.24
MESSLAGE x TIEFE	1.43	1.09	0.17	0.73	3.32	0.18	0.29	2.09	4.66
Reststreuung	0.11	0.12	0.09	0.10	0.20	0.06	0.09	0.14	0.19

Die jeweiligen Streuungsanteile für die Bauwerke sind oft klein, da die Abrostungsmittel dicht beieinander liegen (BW 116 und 146), in einigen Fällen aber sehr hoch (BW 80 und 138), weil trotz vergleichbarer Standortbedingungen offenbar große Unterschiede in den Restwanddicken bestehen. Bei einigen Bauwerken (z.B. 121 und 127) verhalten sich die Abrostungswerte der einzelnen Messpunktlagen völlig unterschiedlich, was aus dem hohen Variationsanteil der korrespondierenden Interaktionsterme (BW x MESSLAGE) hervorgeht. Nur bei wenigen Bauwerken ist die Abhängigkeit der Abrostung von der Tiefe so stark ausgeprägt, dass andere Unterschiede davon überdeckt werden (BW 31 und 165, BW 46 und 300). Die Messpunktlage weist neben der Tiefe die größten Unterschiede im Abrostungsniveau auf (Bild A1-3) und zeigt zudem in vielen Fällen eine Wechselwirkung mit der Tiefe (MESSLAGE x TIEFE), d.h. das jeweilige Tiefenprofil der Abrostungswerte verläuft bei den Messlagen nicht parallel sondern völlig uneinheitlich (z.B. BW 54 und 299).

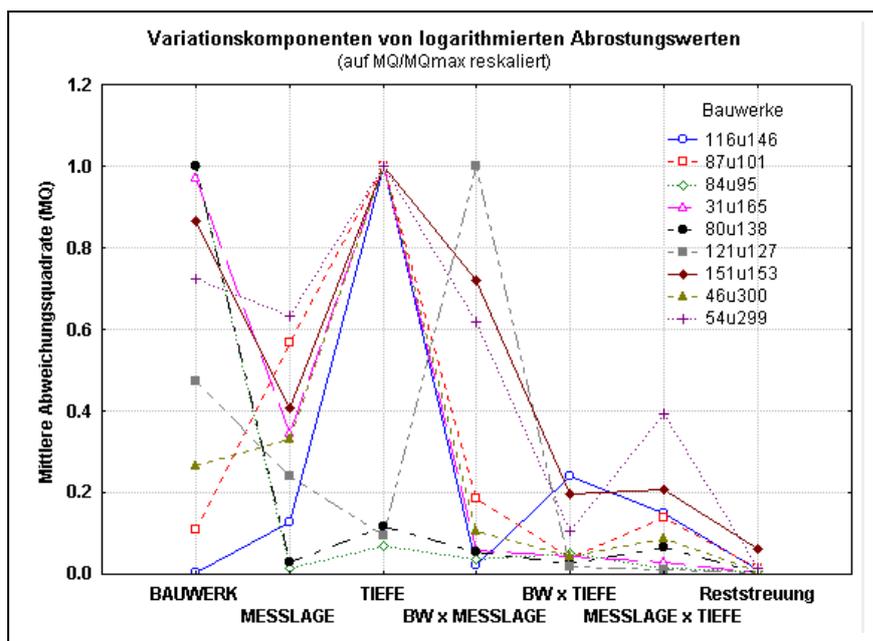


Bild A1-3: Streuungsanteile von Bauwerk, Messlage, Tiefe und Interaktionen

Damit sind also die Messpunktlage und deren Wechselwirkungen mit anderen Einflussgrößen als Hauptursache für die Inhomogenität in den Messwertkollektiven gleicher Höhenzone identifiziert, die so häufig bei der Analyse von Ultraschallmessungen beobachtet wurden. Die Abrostungsunterschiede zwischen den Messpunktlagen sind etwa halb so groß wie die Unterschiede zwischen den Tiefenzonen.

Als Beispiel für ein unterschiedliches Verhalten der Abrostungswerte einzelner Messpunktlagen im Vergleich von Bauwerken sollen hier BW 121 und BW 127 angeführt werden (Bild A1-4). Das zugehörige Interaktionsbild der über die Regression geschätzten KQ-Mittel (Kleinste-Quadrate-Mittel der logarithmierten Abrostungswerte) zeigt eine entgegengesetzte Tendenz der Abrostungsmaxima für Messlagen. Beim Bauwerk Nr. 127 (Wilhelmshaven, Ostkaje) sind die Abrostungswerte über alle Tiefenbereiche hinweg in BM-Lage (Berg-Mitte) des U-Profils am größten, Bei Bauwerk Nr. 121 (Wilhelmshaven, Westkaje) sind sie dagegen in BM-Lage am kleinsten. Im Flankenbereich RFT (rechte Flanke-Tal) zeigt BW 121 seine größte Abrostung, BW 127 aber ein Abrostungsminimum. Nur im Talbereich RTM des U-Profils (rechtes Tal-Mitte) entsprechen sich in etwa die Abrostungsniveaus.

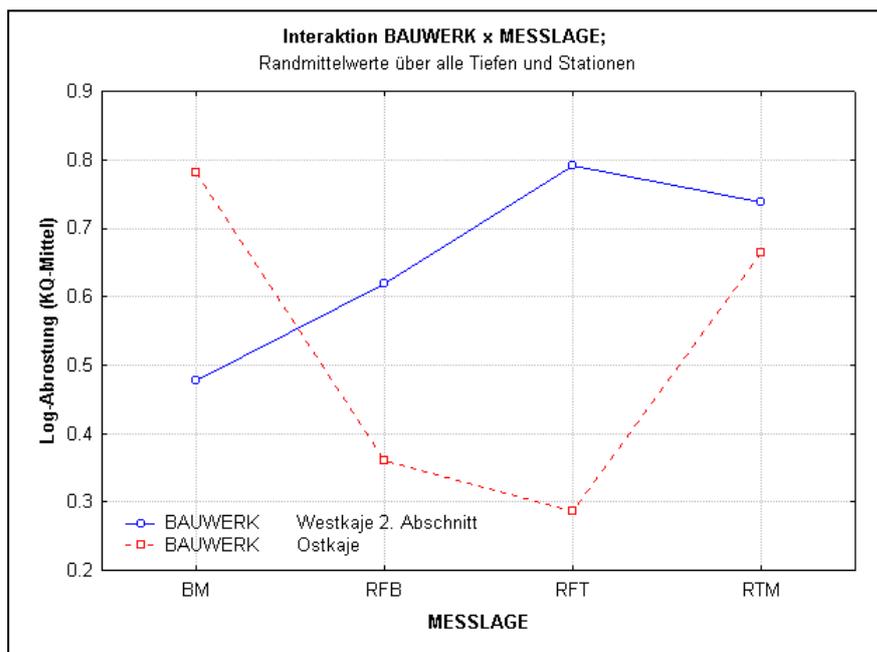


Bild A1-4: Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Messlage (BW 121 und 127)

Als Beispiel für eine starke Wechselwirkung zwischen den Abrostungswerten einzelner Messpunktlagen und der Tiefe werden hier BW 54 und BW 299 mit gemischten Spundwänden dargestellt (Bild A1-5). Das Interaktionsbild der über die Regression geschätzten KQ-Mittel (logarithmierte Abrostungswerte) zeigt eine entgegengesetzte Tendenz der Abrostungsmaxima für Messlagen unter und über der Mittelwasserlinie. Die Abrostungswerte in Tallage TL (Tal links) des EI-Profils sind unter MW-Niveau am kleinsten, über MW-Niveau dagegen am größten. Die Abrostungswerte im Flankenbereich LFM (linke Flanke-Mitte) zeigen ein ähnliches Verhalten. Im Pfahlbereich LPR (linker Pfahl rechts) liegen die Abrostungswerte unter MW stets über den TL-Werten, über MW jedoch unter ihnen.

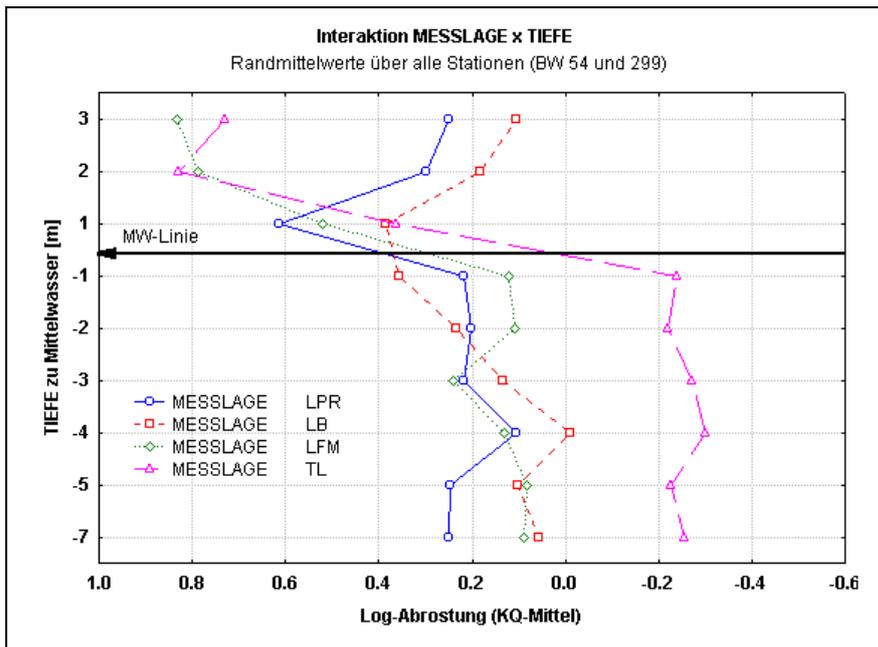


Bild A1-5: Wechselwirkung zwischen Messlage und Tiefe (BW 54 und 299)

Bei Bauwerken ohne ausgeprägte Wechselwirkung zwischen Messlage und Tiefe (z.B. BW 121 und 127 unterhalb der Mittelwasserlinie) resultieren die Abrostungsunterschiede der Messpunktlagen in einer Bimodalität (Zweigipfligkeit) der lognormalen Häufigkeitsverteilung, die über mehrere Meter Tiefe hinweg erhalten bleibt (Bild A1-6 und A1-7). Dabei liegen die Abrostungswerte der Flankenbereiche im U-Profil (RFB und RFT) eng beieinander und insgesamt tiefer als die Werte für den Berg- und Talbereich.

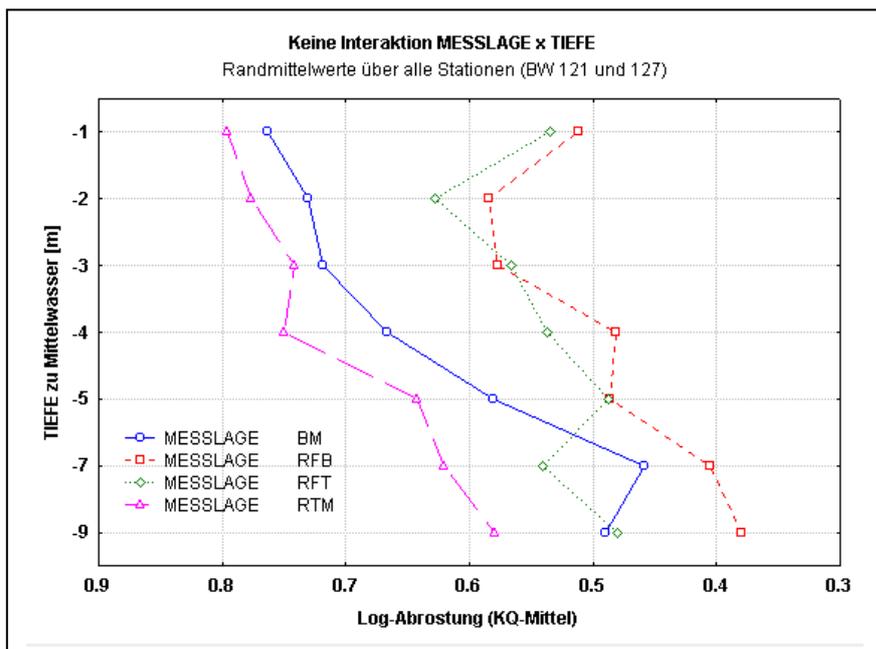


Bild A1-6: Paralleles Abrostungsverhalten der Messlage nach Tiefe (BW 121 und 127)

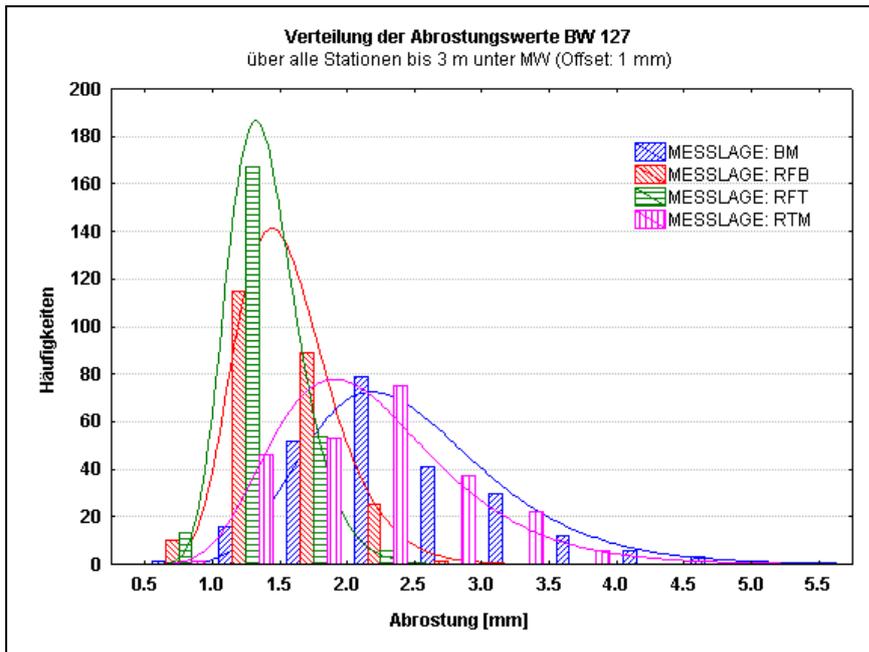
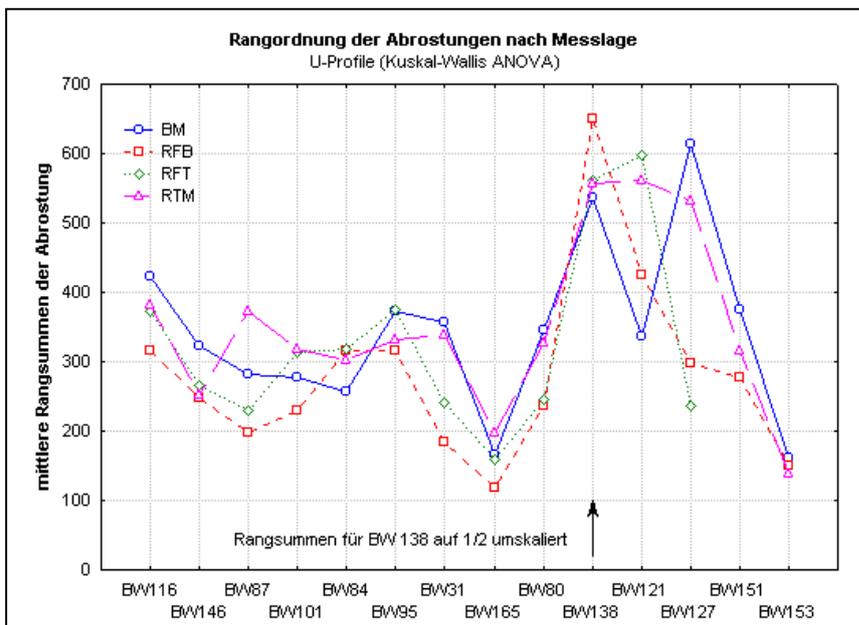


Bild A1-7: Multiples Histogramm für Abrostungswerte nach Messlage (BW 127)

Auch über alle Tiefenbereiche und Stationen eines Bauwerks erwiesen sich die Abrostungsunterschiede der Messlagen im nichtparametrischen Vergleichstest (Kruskal-Wallis) zumeist als signifikant (zum Verfahren, s. Siegel 1956). Ein nachgeschalteter multipler Vergleich der mittleren Ränge zur Bildung homogener Teilgruppen (Post-Hoc-Analyse) erlaubte jedoch in vielen Fällen bei den U-Profilen die Zusammenlegung der Messwerte für Berg- und Tallagen zu einem Gesamtkollektiv. Bei den meisten Bauwerken waren in diesen Lagen die Abrostungswerte am höchsten (Bild A1-8), so dass eine Analyse sich auch ohne die Gefahr einer Unterschätzung der Abrostung auf diese Messpunkte beschränken kann. Nur BW 84, 121 und 138 zeigen mit niedrigen Abrostungswerten im Bergbereich des Profils ein abweichendes Verhalten (BW 138 ist mit doppelt so hohen Rangsummen als Ausreißer zu bewerten).

Bild A1-8: Rangvergleich von Abrostungswerten nach Messlage (U-Profile)



Bei den vier untersuchten Bauwerken mit gemischten Spundwänden (E-Profilen) ergibt sich kein klares Bild aus der Rangordnung der Abrostungswerte nach Messlagen. In zwei von vier Fällen zeigte der Bergbereich die höchsten Abrostungen (BW 46 und 299), ansonsten in unterschiedlicher Kombination die Flanken- und Pfahlbereiche. Um hier ein deutlicheres Muster zu bekommen, müssten mehr Bauwerke mit gemischtem Profiltyp hinzugezogen werden, die allerdings nicht zum Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit zählen.

### Stationen und Abrostungszonen

Im nachfolgenden Abschnitt soll sich die Zerlegung der Gesamtstreuung von Ultraschallmessungen auf jeweils ein Bauwerk beziehen, damit auch das unterschiedliche Abrostungsverhalten der einzelnen Messstationen transparent wird. Sie erfolgt ebenfalls auf der Grundlage des allgemeinen linearen Modells (ALM), bei dem als Gruppierungsfaktoren Station, Messlage und Höhenlage zu Mittelwasser (bzw. Tideniedrigwasser) eingesetzt werden. Auch hier erwiesen sich die einzelnen Variationsursachen zwar einem F-Test zufolge zumeist als signifikant, aber die Tests konnten nach Bartlett nicht validiert werden.

Im Ergebnis zeigt sich deutlich, dass die Inhomogenität in den Messwertkollektiven durch ein sehr unterschiedliches Verhalten der einzelnen Stationen eines Bauwerks verstärkt wird (Tabelle A1-4). Bei sieben Bauwerken waren die Abrostungsunterschiede zwischen den Stationen am stärksten, bei zwei Bauwerken (127 und 54) zwischen den Messlagen und bei neun Bauwerken zwischen den Tiefenlagen. Auch bei den Bauwerken mit ausgeprägter Tiefenzonierung waren die Unterschiede in der Abrostung zwischen Stationen oder Messlagen zumeist mehr als halb so groß wie zwischen Tiefenlagen.

Tabelle A1-4: Streuungsanteile von Station, Messlage, Tiefe sowie Interaktion

Effekt	Variationskomponenten von logarithmierten Abrostungswerten Mittlere Abweichungsquadrate (MQ) vom Bezugsniveau Schätzung im allgemeinen linearen Modell																	
	116	146	87	101	84	95	31	165	80	138	121	127	151	153	46	300	54	299
STATION	8.1	1.2	7.5	5.1	0.5	7.7	1.3	0.4	8.9	7.2	1.5	0.8	3.1	0.9	5.8	4.5	6.9	5.5
MESSLAGE	0.9	0.7	5.6	1.2	0.2	0.3	10.9	1.6	2.0	2.1	4.4	26.5	1.6	0.4	17.8	2.3	11.9	5.7
TIEFE	3.0	8.3	4.3	8.0	0.1	3.9	21.2	12.9	3.9	1.6	6.9	4.3	4.1	2.9	46.1	1.7	7.4	175.2
Interaktion	0.6	0.7	0.5	0.8	0.5	0.6	2.0	0.2	0.3	1.3	1.2	1.5	0.3	0.1	0.5	0.8	1.7	3.0
Reststreuung	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2

Insgesamt ergibt sich ein ausgeglichenes Spektrum von Variationsursachen in den Ultraschallmessungen (Bild A1-9), das die bisherige Auswertung von Höhenzonen als Hauptkriterium für die Schätzung von mittleren und maximalen Abrostungen in Frage stellt. Bei einer Zusammenfassung korrespondierender Messquerschnitte zur Höhengliederung der gemessenen Restwanddicken eines Bauwerks wurde stets vorausgesetzt, dass die Unterschiede zwischen Stationen und Messpunktlagen zu vernachlässigen sind.

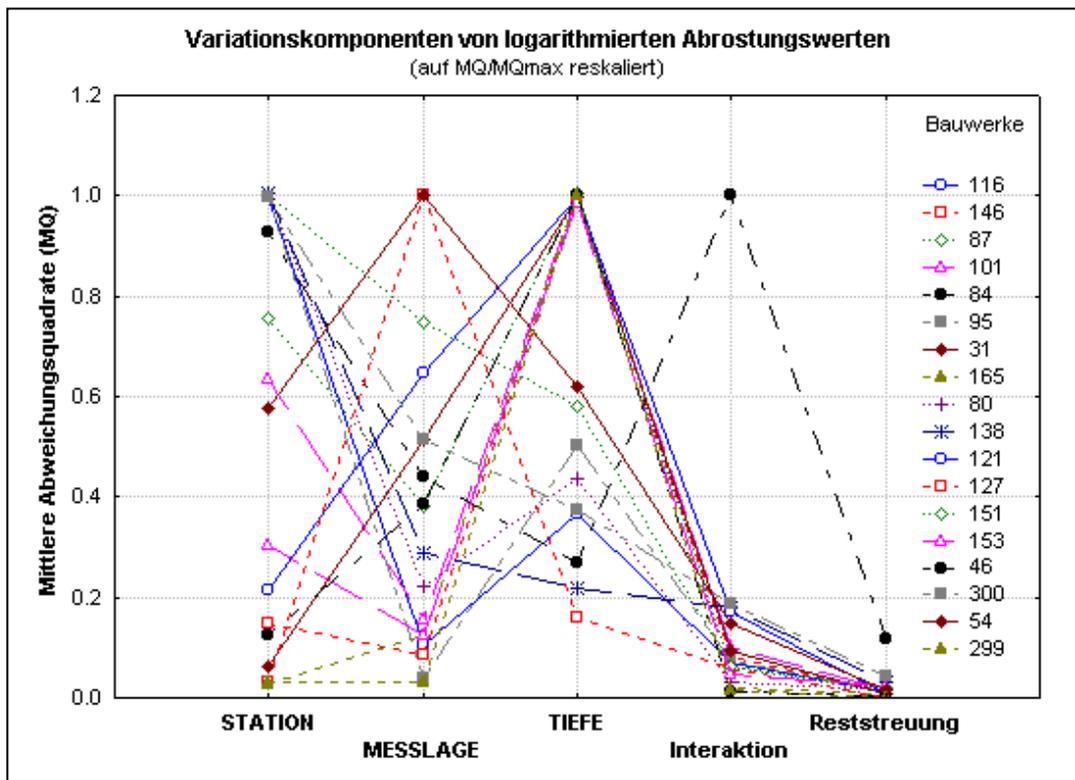


Bild A1-9: Streuungsanteile von Station, Messlage, Tiefe und Interaktion

Die auf Unterschiede zwischen den Stationen rückführbaren Streuungsanteile in den Messwertkollektiven sind für die Praxis der Korrosionsschätzung ein schwerwiegenderes Problem als Unterschiede nach Tiefe oder Messpunktlage. Letztere dürften eng an die eigentlichen Korrosionsprozesse gekoppelt sein und können als systematische Einflussfaktoren in die Datenauswertung eingehen. Unterschiede in den Korrosionswerten je nach Abstand von der Mittelwasserlinie spiegeln den Einfluss eines wechselnden Korrosionsmilieus wieder (Luft, Wasser, etc.). Korrosionsunterschiede zwischen Messpunktlagen an U- und E-Profilen können materialabhängige Grenzen zur Ausbildung lokaler Anodenzentren anzeigen und somit elektrochemisch bedingt sein.

Bei systematischen Unterschieden zwischen den Stationen infolge besonderer lokaler Gegebenheiten, sollten die zugehörigen Spundwände als separates Bauwerk behandelt werden. Zufällige Unterschiede zwischen einzelnen Stationen einer Spundwand werfen hingegen die Frage auf, wann eine Ultraschalluntersuchung repräsentativ für das Gesamtbauwerk ist. Diese Frage wird im Zusammenhang mit der Stichprobenproblematik weiter unten erörtert.

Als Beispiel für ein unterschiedliches Verhalten der Abrostungswerte einzelner Stationen über alle Messpunktlagen soll hier BW 95 angeführt werden (Bild A1-10). Im Bereich zwischen 2-4 m unter der Mittelwasserlinie zeigt Station 0003 Abrostungswerte, die weit über denen der anderen beiden Stationen liegen. Über der Mittelwasserlinie nimmt die Spreizung der Werte für alle Stationen zu, und unmittelbar darunter wechselt deren Rangabfolge. Die Stationen zeigen also

weder ein einheitliches Tiefenprofil noch eine Übereinstimmung in den korrespondierenden Abrostungswerten.

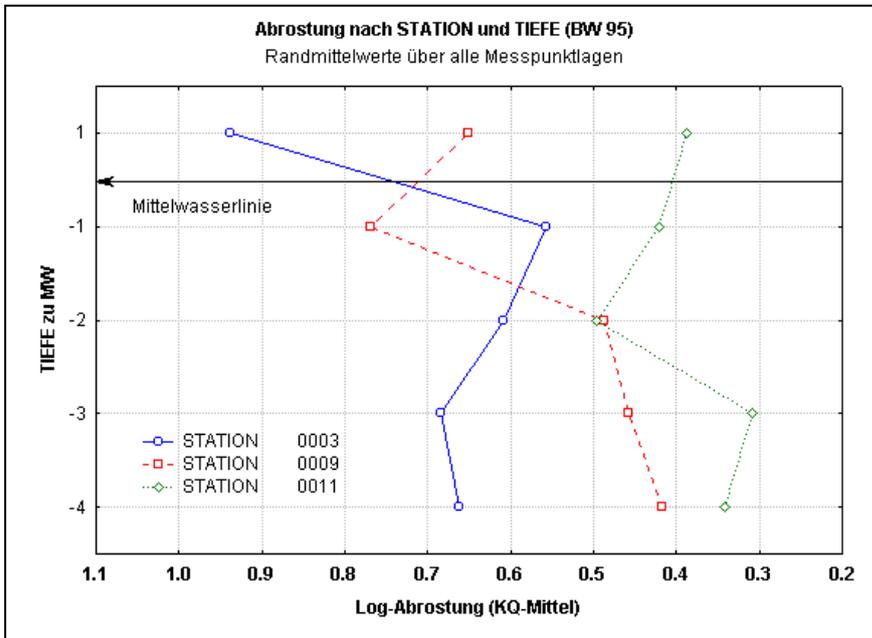
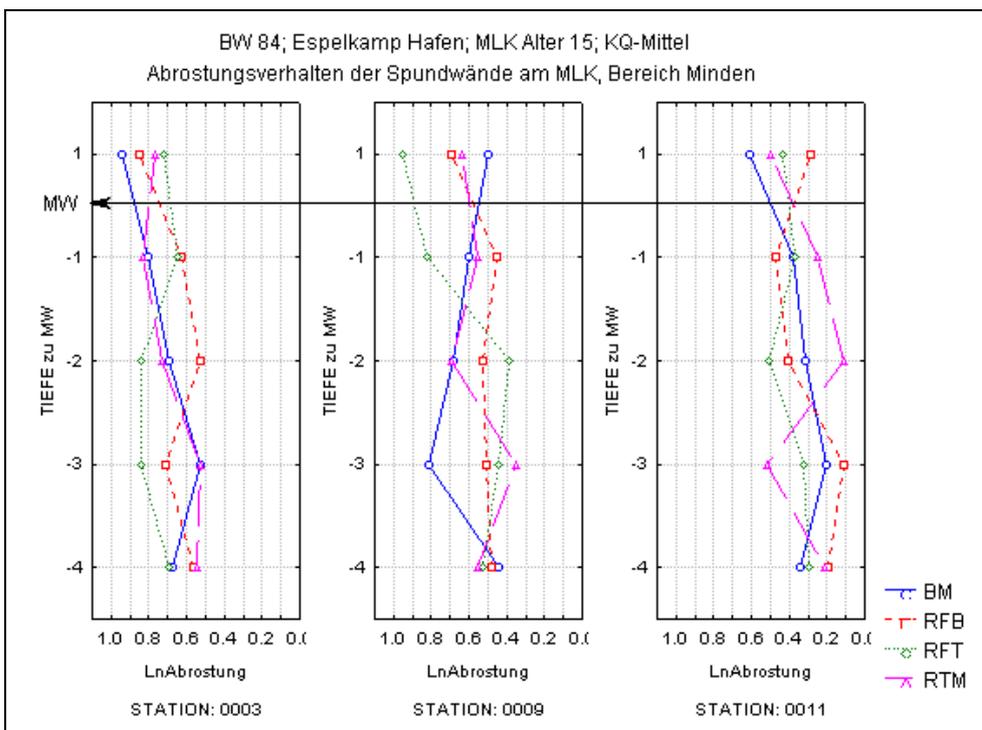


Bild A1-10: Abrostungsniveaus der Stationen nach Tiefe (BW 95, MKL bei Minden)

Die Spreizung der Abrostungswerte gleicher Tiefe wird bei einigen Bauwerken (z.B. BW 87, 84 und 300) durch erhebliche Unterschiede in den zugehörigen Messpunktlagen verstärkt, die dort als zweitstärkste Variationsursache in den Ultraschallmessungen auftreten (Tabelle A1-4). Dadurch wird eine Zusammenfassung der Messquerschnitte aller Messpunktlagen für alle Stationen zur Abschätzung mittlerer und maximaler Abrostung problematisch.

Bild A1-11: Abrostungsniveaus von Station nach Tiefe und Messlage (BW 84, MKL)



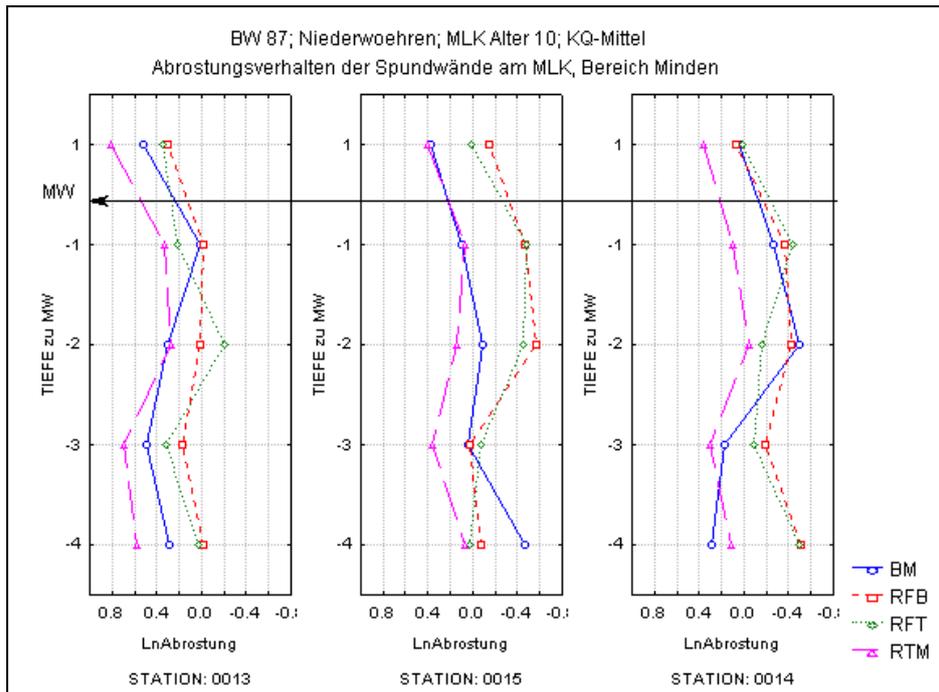


Bild A1-12: Abrostungsniveaus von Station nach Tiefe und Messlage (BW 87, MKL)

Auch unter Berücksichtigung dieser Unterschiede zeichnen sich bei vielen Bauwerken zwei Tendenzen in Bezug auf Tiefenzonierung ab: (a) ein Wechsel des Korrosionsmilieus führt zu einem scharfen Sprung in den Abrostungswerten, und (b) bei gleichem Korrosionsmilieu gibt es eine Tiefenfunktion, die über einen Tiefenbereich von mehreren Metern verläuft.

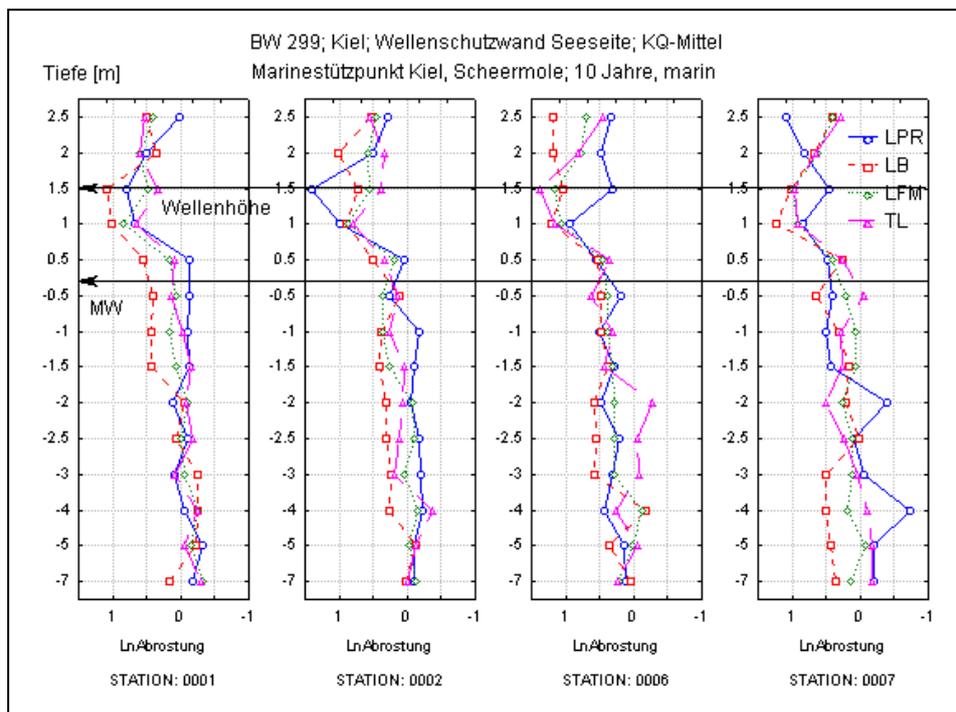


Bild A1-13: Wechsel des Abrostungsmilieus (BW 299)

Ein Beispiel für Abrostungsunterschiede durch Milieuwechsel ist Bauwerk 299 (Kiel, Wellenschutzwand), wo sich die mittleren Abrostungen trotz der Unterschiede zwischen Stationen und Messlagen im Unterwasser-, Spritzwasser- und Luftbereich deutlich verändern (Bild A1-13). Unterhalb der Mittelwasserlinie sind bei allen Stationen mit der Tiefe abnehmende Abrostungsmittel erkennbar.

Das Bauwerk 54 (Eckernförde, Ostmole, Wellenschutzwand Seeseite) zeigt ein ähnliches Verhalten (Bild A1-14). Auch hier ist ein mehrfacher Wechsel der Abrostungswerte am Übergang zum Unterwasser-, Spritzwasser- und Luftbereich erkennbar. Diese Unterschiede entsprechen in etwa der bisherigen Praxis einer Zonierung von Restwanddicken nach Abstand vom Mittelwasserniveau.

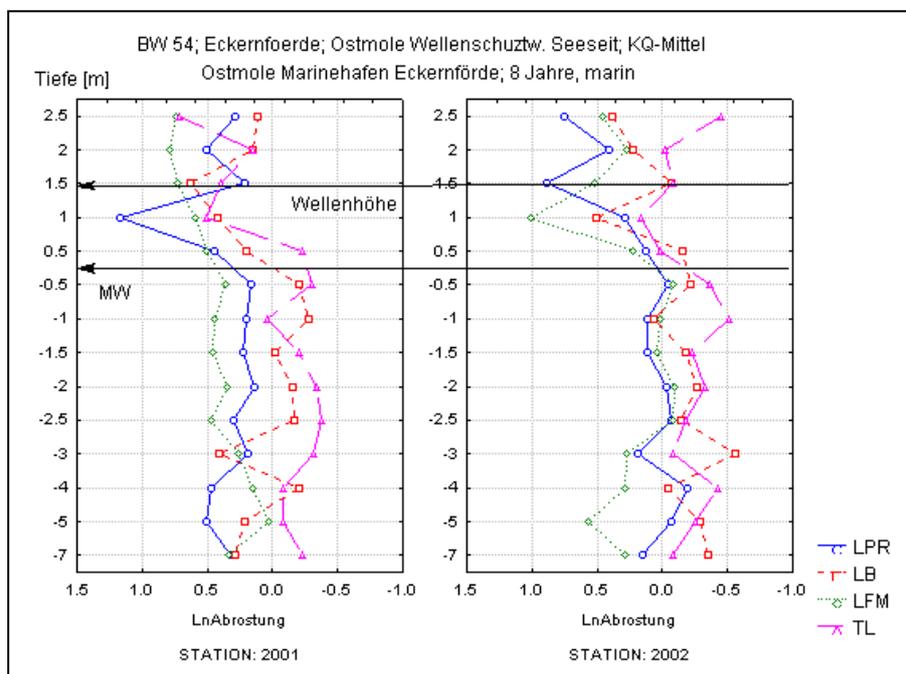


Bild A1-14: Wechsel des Abrostungsmilieus (BW 54)

Zwei Beispiele für Abrostungsunterschiede in Tidegewässern sind die Bauwerke 80 (Büsum) und 138 (Borkum), wo sich die Abrostungen im Unterwasser-, Wechselwasser- und Luftbereich sprunghaft verändern (Bild A1-15 und A1-16).

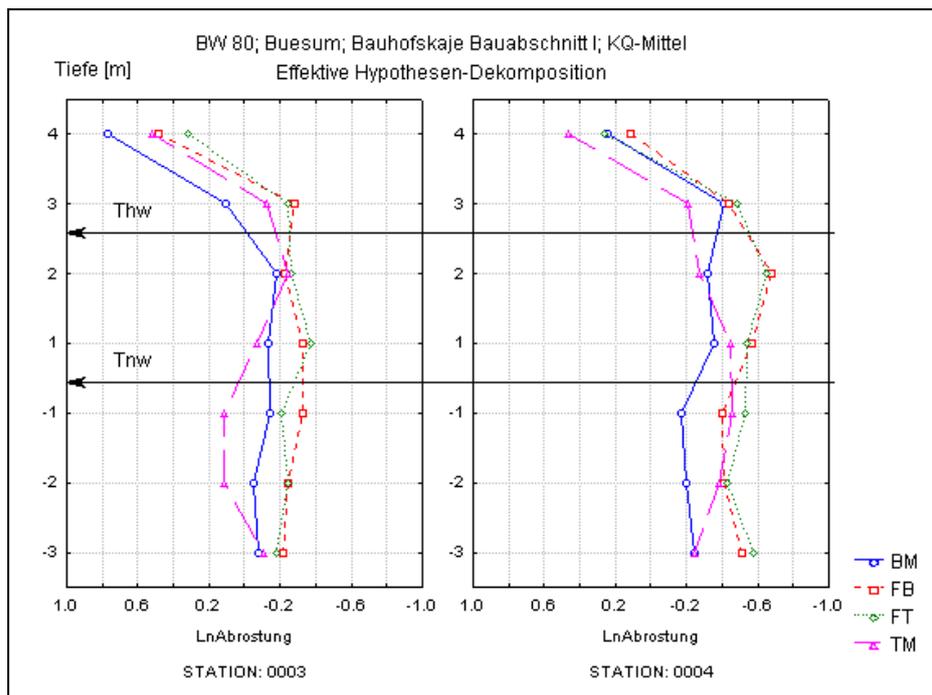


Bild A1-15: Wechsel des Abrostungsmilieus in Tiedegewässern (BW 80)

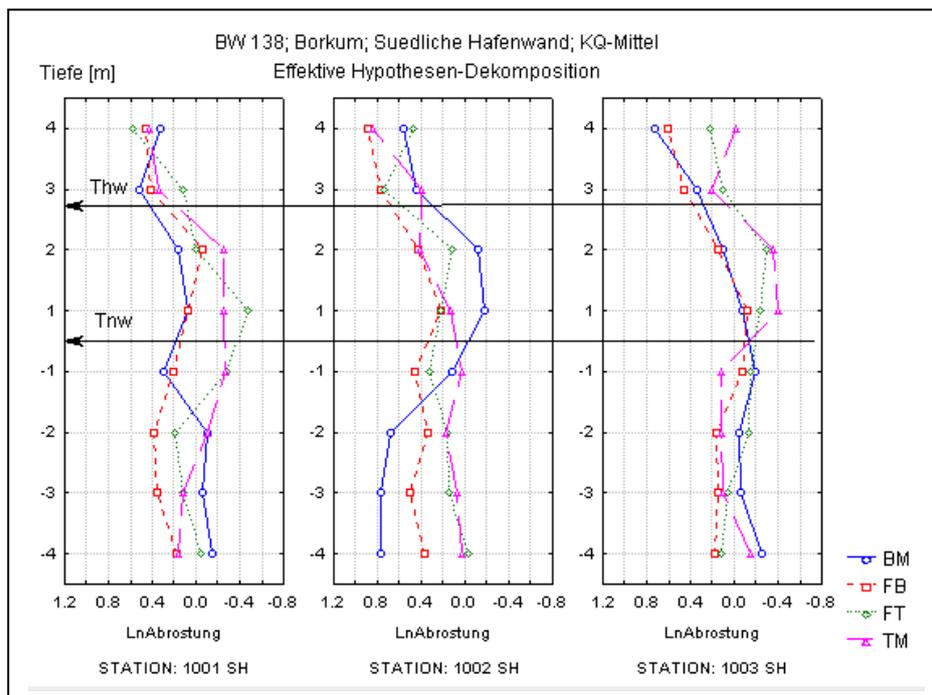


Bild A1-16: Wechsel des Abrostungsmilieus in Tiedegewässern (BW 138)

Zwei Beispiele für eine Tiefenfunktion der Abrostungsmittel unterhalb der Mittelwasserlinie sind die Bauwerke 46 und 300 (Kiel), wo sich die logarithmierten Abrostungswerte über fünf Meter hinab in etwa linear vermindern (Bild A1-17 und A1-18).

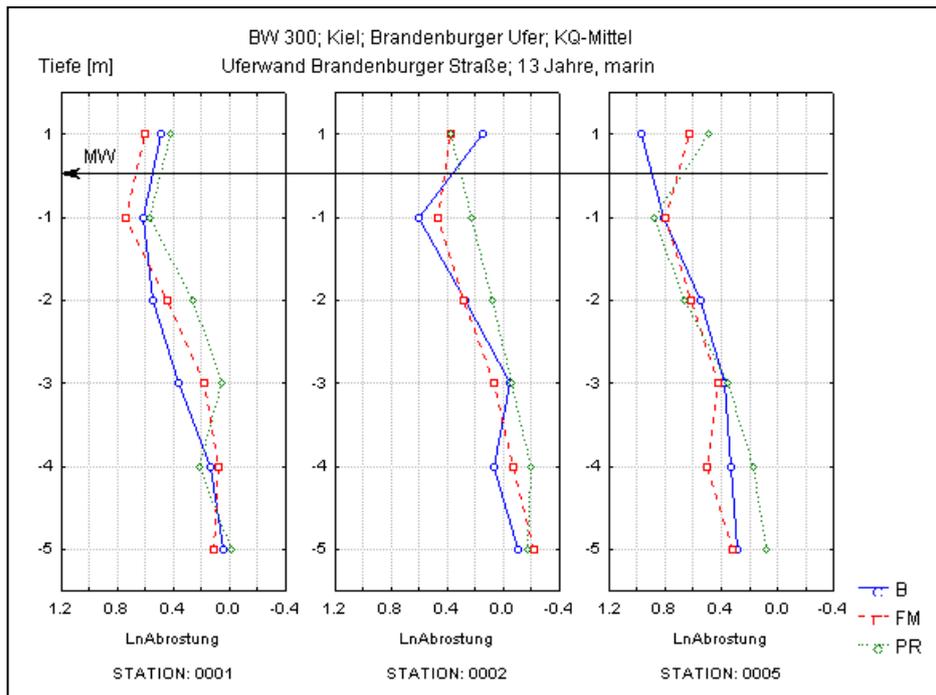


Bild A1-17: Tiefenfunktion der Abrostungswerte unter Mittelwasser (BW 300)

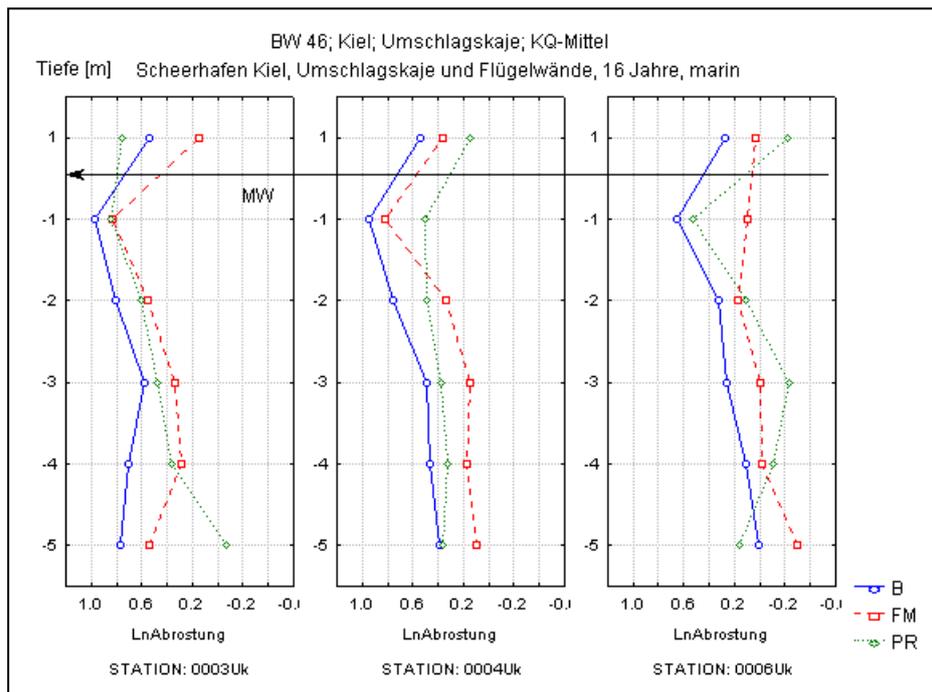


Bild A1-18: Tiefenfunktion der Abrostungswerte unter Mittelwasser (BW 46)

Diese im Verlauf der Mittelwertkurven erkennbaren Tendenzen einer Tiefenfunktion der Abrostung innerhalb eines Abrostungsmilieus werden im nachfolgenden Abschnitt mit der Regressionsanalyse untersucht. Ein solches Vorgehen bietet den Vorteil einer klaren Trennung von Abrostungszonen nach messbaren Milieugrenzen und einem Abrostungsgradienten innerhalb dieser Grenzen, der auf Drittfaktoren zurückzuführen sein muss. Eine Zonierung von Restwanddicken innerhalb eines Tiefenbereichs, wie sie in der bisherigen Praxis in Form einer Trennung

in Niedrigwasser- und Unterwasserzone durchgeführt wurde, ist letztlich von der Interpretation der lokalen Ultraschallmessungen abhängig und besitzt keine ursächliche Beziehung zu einem sich sprunghaft änderndem Korrosionsfaktor.

## Tiefenfunktion der Abrostung

### Prinzip loglinearer Funktionen

In der vorliegenden Arbeit kann der bisherigen Einschätzung von Alberts und Heeling (1997) gefolgt werden, dass die Ultraschallmessungen an den Spundwandbohlen einer Lognormalverteilung (Normalverteilung der logarithmierten Werte) folgen. Die bereits beschriebene Asymmetrie dieser Verteilung mit einem Streuungsfaktor ( $e^{S_{ln}}$  nach oben und  $1/e^{S_{ln}}$  nach unten) anstelle eines additiven Streumaßes wirkt sich auch auf das Streubild von Regressionsfunktionen aus. Wenn eine logarithmierte Zielgröße  $LnY$  (z.B. Abrostungswerte) als Funktion von  $X$  dargestellt wird:

$$LnY = a + b X, \quad (A1-2)$$

ergibt sich aus dem Standardschätzfehler  $S_{ln}$  der Regression ein gleichmäßiges paralleles Streuungsband um die Regressionsgeraden (Bild A1-19). Der Standardschätzfehler lässt sich aus der Standardabweichung der abhängigen Variable  $LnY$  und dem zugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (Anteil der erklärten Varianz) oder aus der Varianz der Residuen (mittlere quadratische Abweichung von der Regressionsgeraden) ermitteln.

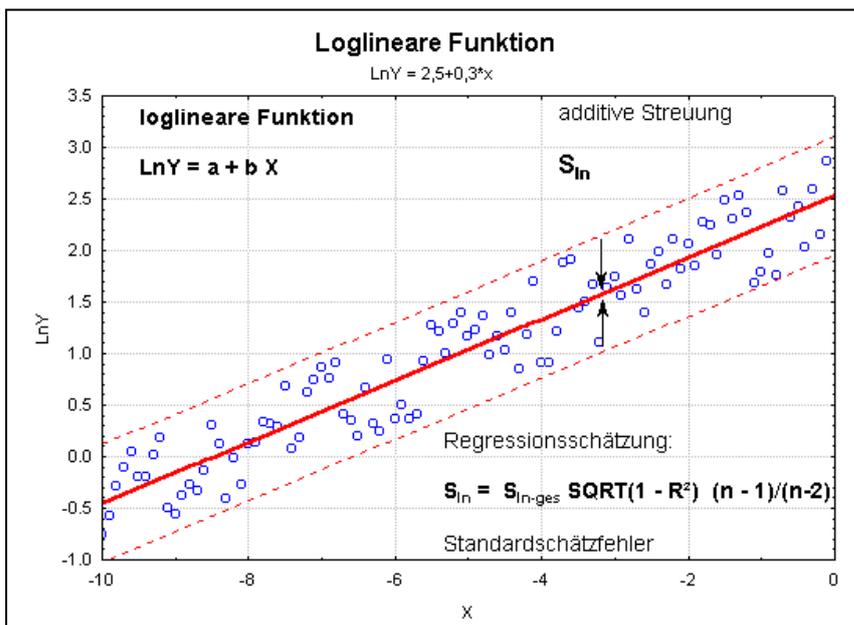


Bild A1-19: Prinzip loglinearer Tiefenfunktion

Aus der Rücktransformation einer loglinearen Funktion auf die ursprüngliche Messwertskala wird daraus eine Exponentialfunktion für  $Y$ :

$$Y = a' e^{b X}, \quad (A1-3)$$

mit dem Absolutglied  $a' = e^a$ , das aus dem Koeffizienten  $a$  der zugehörigen loglinearen Regression berechnet wird ( $e$  ist die Eulersche Zahl 2,718). Der Regressionskoeffizient  $b$  lässt sich über

$$K = 100 (e^{-b X} - 1), \quad (A1-4)$$

in die Verlustrate  $K$  umrechnen, die beispielsweise eine prozentuale Veränderung der Abrostung pro Meter Tiefe ausdrücken kann. Diese Exponentialfunktion hat grundsätzlich ein asymmetrisches Streuungsband um die Regressionslinie herum, welches sich bei starkem Anstieg  $b$  zu einem Trichter formt (Bild A1-20).

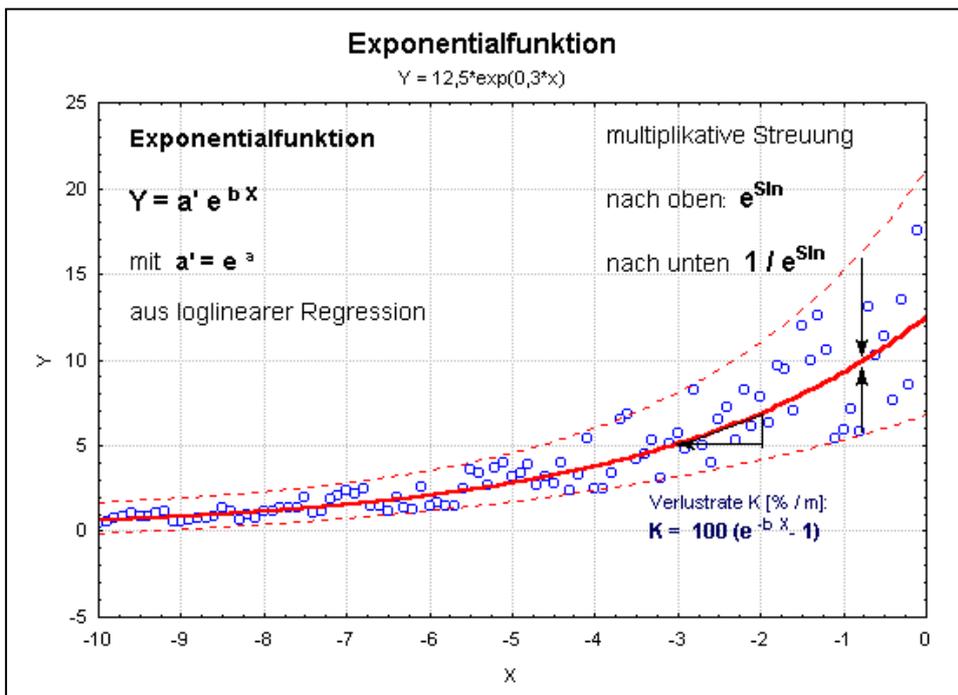


Bild A1-20: Prinzip der korrespondierenden Exponentialfunktion

Die trichterförmige Streuung resultiert aus dem Streuungsfaktor  $e^{Sln}$  ( $1/e^{Sln}$  nach unten), der im niedrigen Wertebereich mit einem kleinen Mittelwert (bzw. Punkt auf der Regressionslinie) und im hohen Bereich mit einem großen Mittelwert multipliziert wird.

Wenn das Prinzip einer loglinearen bzw. exponentiellen Funktion auf die Tiefenabhängigkeit von Abrostungswerten angewendet wird, empfiehlt sich eine Modifikation des Modells (Bild A1-20a). Wenn als unabhängige Variable  $X$  die Tiefe unter Mittelwasser (bzw. Tideniedrigwasser) eingesetzt wird, gibt der Koeffizient  $a'$  die mittlere Abrostung unmittelbar auf Mittelwasserniveau an und die aus dem Koeffizienten  $b$  resultierende Verlustrate  $K$  die prozentuale Abrostungszunahme pro Meter oberhalb der Mittelwasserlinie. Diese Form eignet sich also für eine Beschreibung der Tiefenfunktion im Spritzwasser-, Wechselwasser- und Luftbereich, aber nicht für den Unterwasserbereich. Dort wäre eine modifizierte Exponentialfunktion der Form

$$Y = a'' e^{b(X-X_0)} \tag{A1-5}$$

angebracht, bei der  $X_0$  die untere Bezugstiefe ist und sich daraus  $a'' = a' / e^{b X_0}$  ergibt. Auf diese Weise gibt der Koeffizient  $a''$  die mittlere Abrostung für eine noch zu definierende Basistiefe unter Mittelwasserniveau an und die aus dem Koeffizienten  $b$  resultierende Verlustrate  $K$  die prozentuale Abrostungszunahme pro Meter oberhalb der Basistiefe. Wenn die jeweiligen Funk-

tionen für Unterwasser-, Spritzwasser-, Wechselwasser- und Luftbereich kombiniert werden, lässt sich die Abrostung als un stetige Exponentialfunktion der Tiefe darstellen.

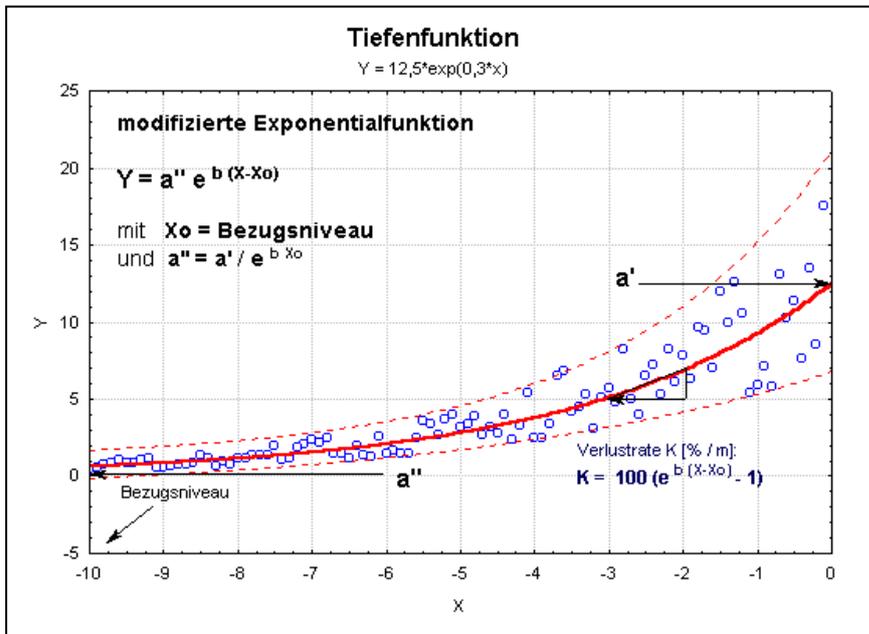


Bild A1-20a: Modifizierte Exponentialfunktion

### Tiefenfunktion der Spundwände

Um eine Regressionsanalyse mit möglichst homogenen Daten durchführen zu können, wurden gemäß der im Abschnitt *Variationsursachen* dargestellten Auswertung bei allen Bauwerken nur die Messpunktlagen im Berg- und Talbereich berücksichtigt. Die Analyse beschränkte sich zunächst auf Ultraschallmessungen an allen Stationen eines Bauwerks, wurde aber dann durch Hinzunahme von Muldenmessungen mit der Tiefenlehre ergänzt. Insgesamt wiesen sieben Bauwerke im Bereich unter der Mittelwasserlinie eine exponentielle Tiefenabhängigkeit der Abrostung auf. Auf der ursprünglichen Messwerteskala zeigten die Abrostungswerte im zugehörigen Punktediagramm den charakteristischen Streuungstrichter einer Exponentialfunktion mit lognormalverteilten Daten, der bei loglinearer Darstellung zu einem parallelen Streuband wird.

Als Beispiel sollen hier Bauwerke 300 und 46 dienen, für die ausreichend viele Messungen zur Einschätzung eines Streumusters verfügbar sind. Die Werthäufigkeiten im Streudiagramm (Scatterplot) werden jeweils als Kreis unterschiedlichen Durchmessers dargestellt, damit nicht vereinzelte Punktlagen überinterpretiert werden (Bild A1-21 und A1-22).

Ohne die Betrachtung einer Tiefenfunktion würden einzelne Messpunkte mit hohen Abrostungen im oberen Tiefenbereich bis 1 Meter unter Mittelwasserlinie den Mittelwert stark erhöhen und eine Abrostungszone (Niedrigwasserbereich) vortäuschen, die nicht den eigentlichen Schwerpunkten der Abrostungswerte entspricht. Die loglineare Darstellung der Tiefenfunktion zeigt dagegen ein homogenes Streuband, bei dem nur wenige Einzelpunkte außerhalb des 95%-Prognoseintervalls liegen (Bild A1-22).

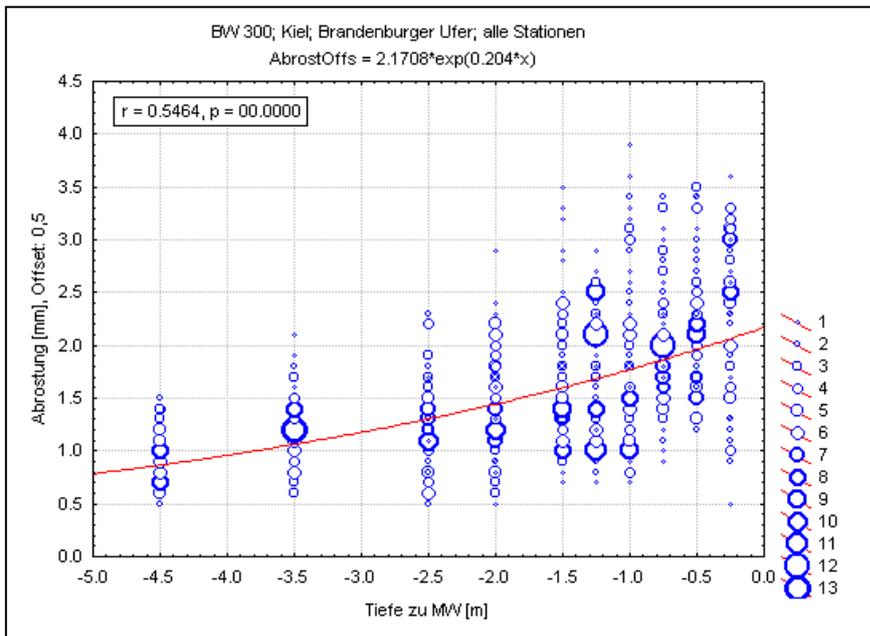


Bild A1-21: Abrostung als Exponentialfunktion der Tiefe (BW 300)

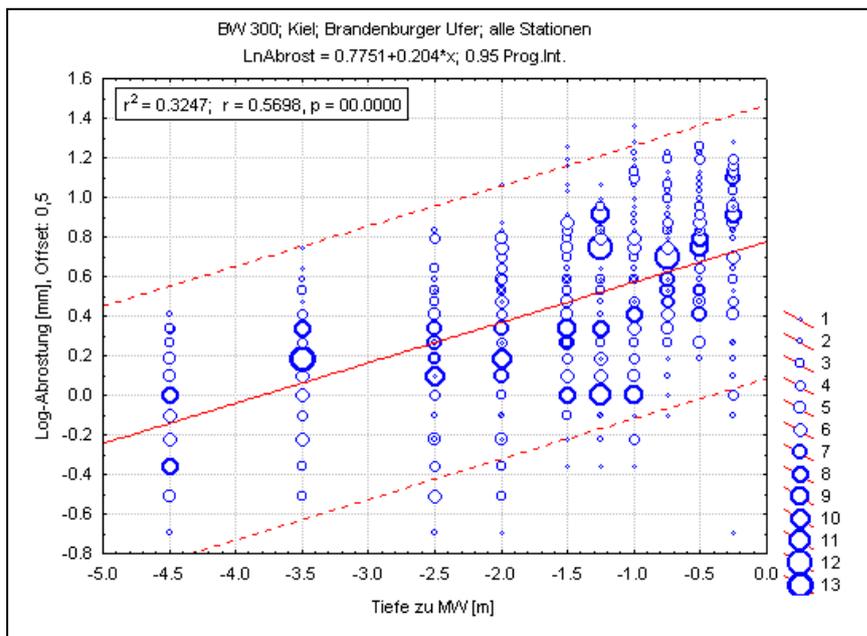


Bild A1-22: Loglineare Darstellung der Tiefenfunktion (BW 300)

Ein ähnliches Verhalten zeigen die Abrostungswerte von Bauwerk 31 (Bild A1-23 und A1-24). Obwohl dort relativ wenige Messwerte verfügbar sind, ist der charakteristische Streuungstrichter der exponentiellen Tiefenfunktion erkennbar. In der loglinearen Regression zeigt sich wie üblich ein paralleles Streuband. Wenn für Bauwerk 46 die Messpunkte im Bereich bis 5 m unter der Mittelwasserlinie dargestellt werden, bilden sie einen Streuungstrichter, der bei loglinearer Darstellung in ein paralleles Band übergeht (Bild A1-25 und A1-26). Diese Beispiele sollen zeigen, dass Muster im Verhalten lognormalverteilter Daten auf der ursprünglichen Skalenebene oft schwer zu erkennen sind und manchmal zu Irrtümern führen können.

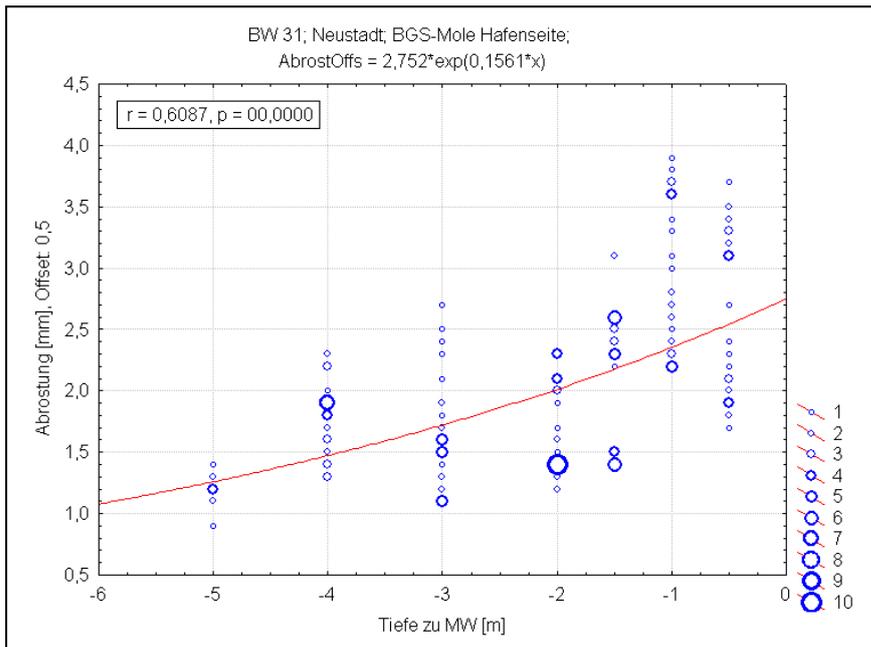


Bild A1-23: Abrostung als Exponentialfunktion der Tiefe (BW 31)

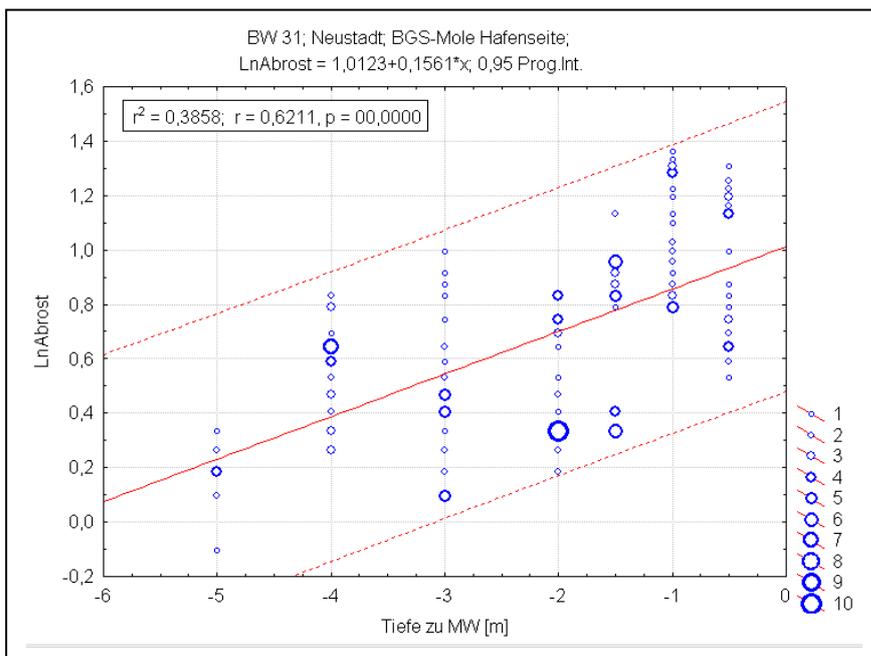


Bild A1-24: Loglineare Darstellung der Tiefenfunktion (BW 31)

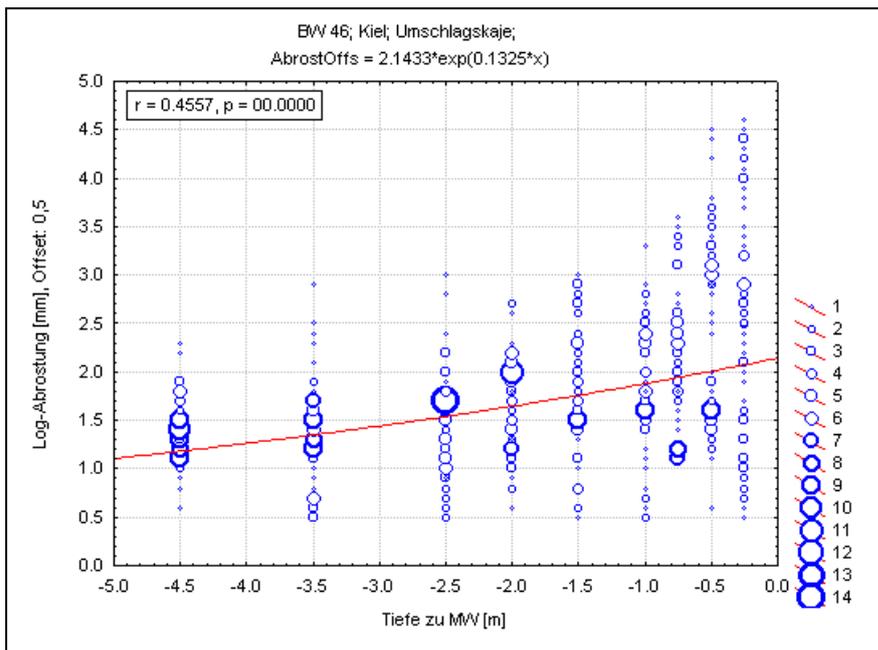


Bild A1-25: Abrostung als Exponentialfunktion der Tiefe (BW 46)

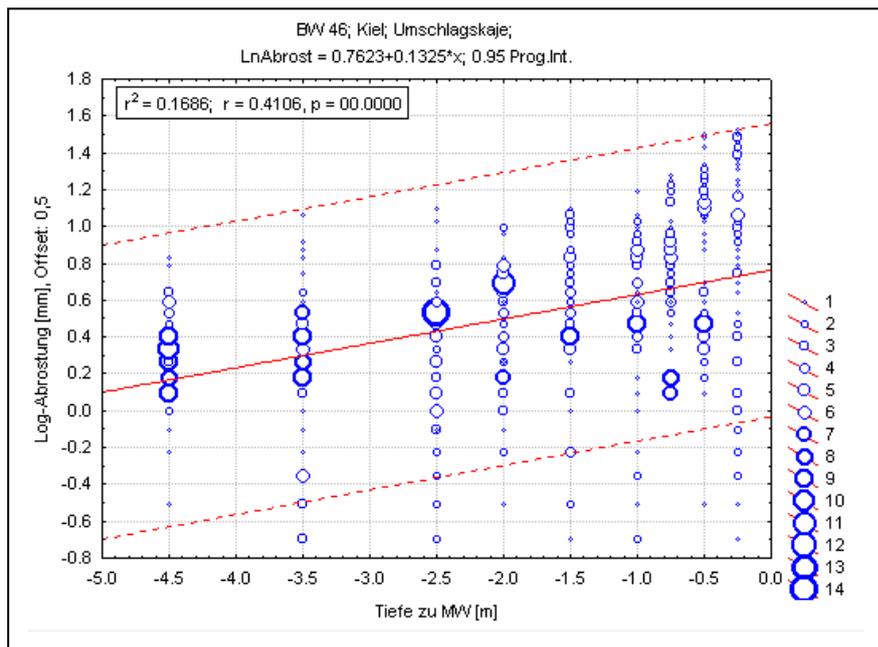


Bild A1-26: Loglineare Darstellung der Tiefenfunktion (BW 46)

### Basisabrostung und Abrostungsraten

Unterhalb von 5 m Tiefe ist bei keinem der untersuchten Bauwerke ein Abrostungsgradient erkennbar. Die Log-Abrostungswerte verhalten sich in größeren Tiefen von bis zu 10 m unter Mittelwasserniveau eher als logparabolische Funktion der Tiefe, die etwa bei 5 m Tiefe asymptotisch ausläuft (eine parabolische Regressionsfunktion hat lineare und quadratische Glieder). Dieses Verhalten ist bei mehreren Bauwerken zu beobachten (z.B. BW 46, 299, 127). Im Bereich zwischen Mittelwasser und 5 m Tiefe kann die logparabolische Funktion durch eine loglineare Funktion approximiert werden (Bild A1-27, A1-28 und A1-29), darunter können die mittleren

Abrostungen in etwa als konstant angesehen werden. Dieses einheitliche Abrostungsniveau wird nachfolgend als "Basisabrostung" und der Übergangsbereich dazu als "Basistiefe" angesprochen.

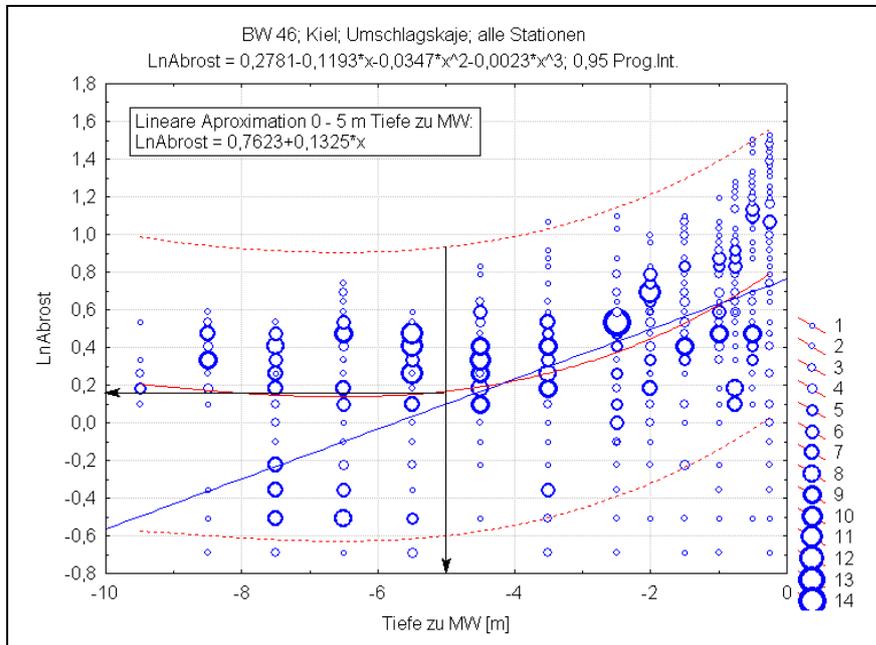


Bild A1-27: Logparabolische Funktion und loglinear Approximation (BW 46)

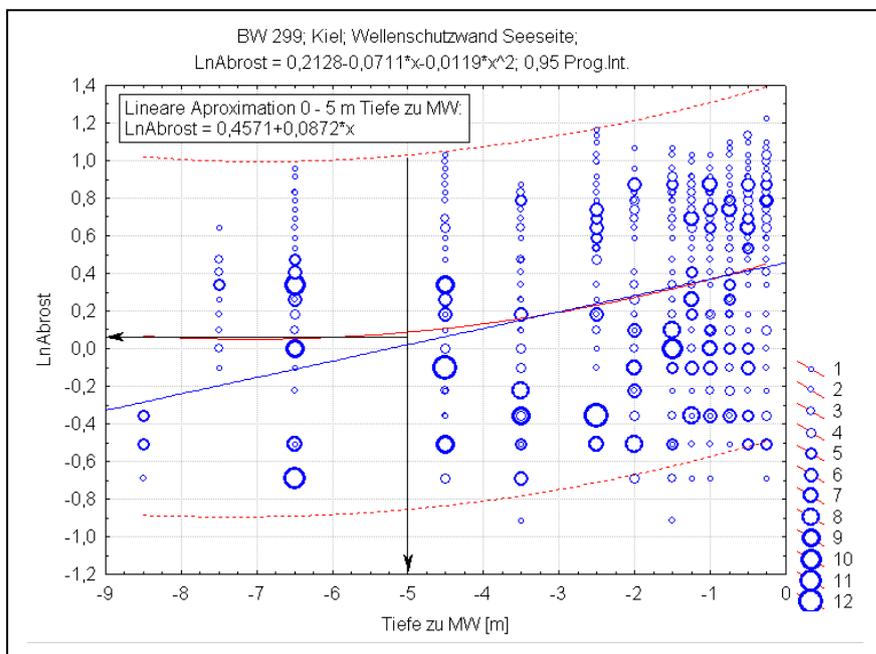


Bild A1-28: Logparabolische Funktion und loglinear Approximation (BW 299)

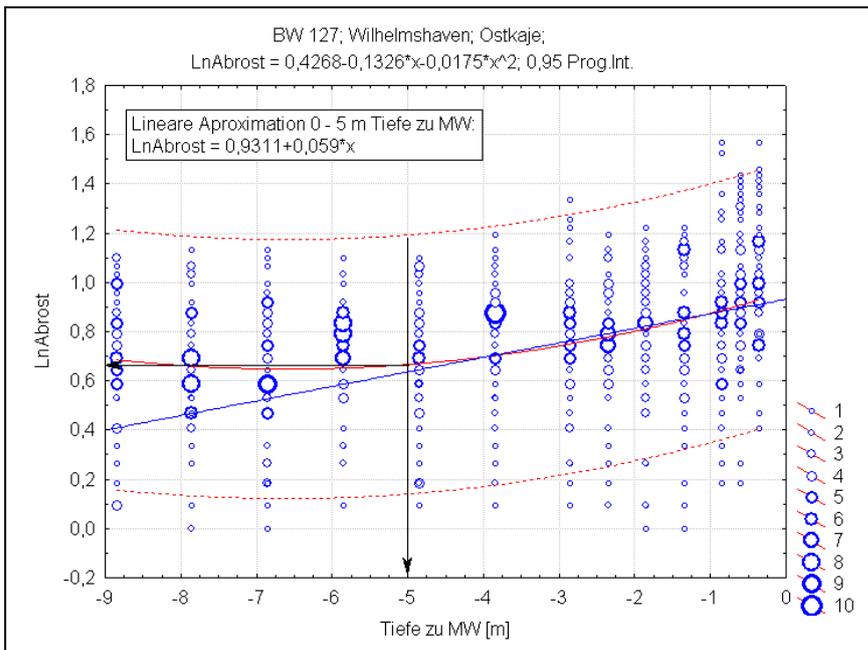


Bild A1-29: Logparabolische Funktion und loglineare Approximation (BW 127)

Bauwerke, die keinen Abrostungsgradienten aufweisen, zeigen zumeist ein gleichbleibendes Abrostungsniveau, das in etwa der Basisabrostung der Bauwerke mit Tiefenfunktion entspricht. Die Log-Abrostungen zeigen dort eine symmetrische Streuung, die ursprünglichen Abrostungswerte eine asymmetrische Streuung um den geometrischen Mittelwert herum (Bild A1-30, A1-31 und A1-32).

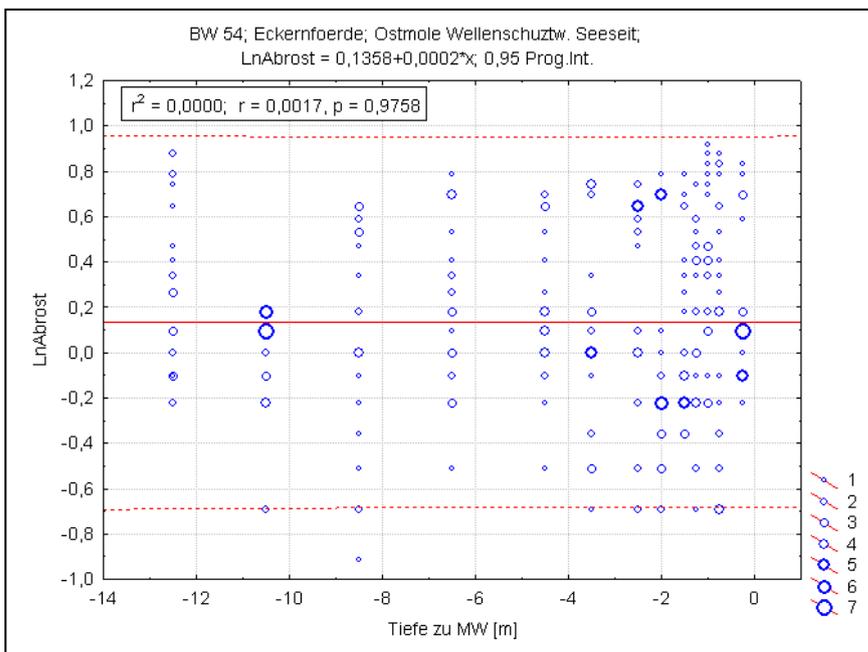


Bild A1-30: Gleichbleibende Log-Basisabrostung in allen Tiefen (BW 54)

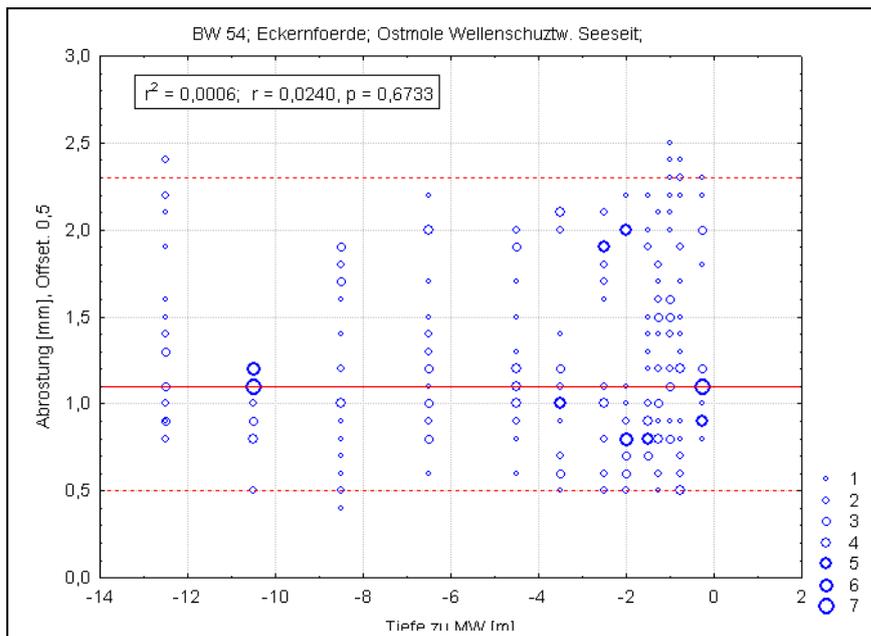


Bild A1-31: Asymmetrische Streuung um den Schwerpunkt (BW 54)

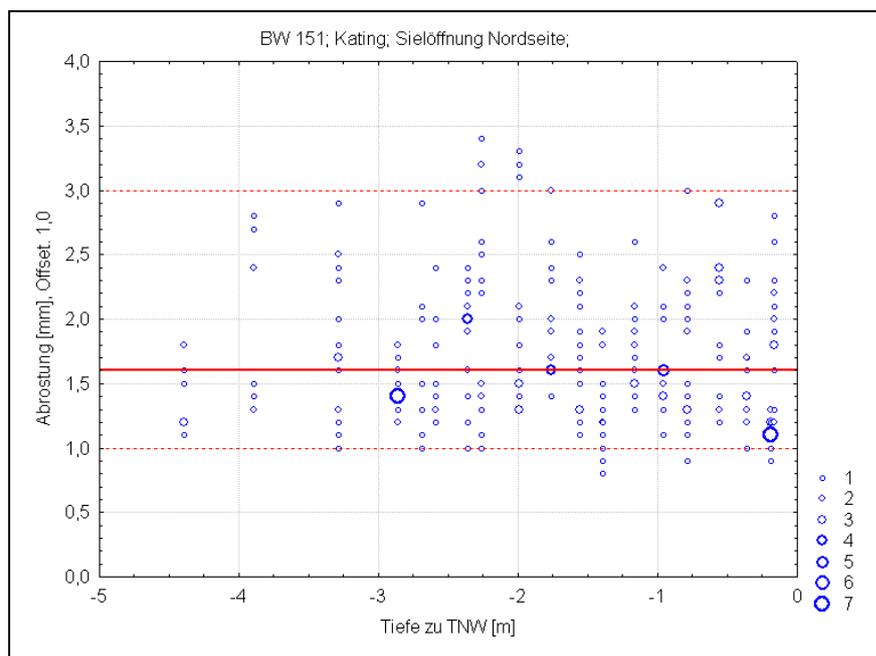


Bild A1-32: Asymmetrische Streuung um den Schwerpunkt (BW 151)

Bei Bauwerk 138 erwies sich die Streuung aufgrund unbekannter Ursachen so inhomogen, dass eine Ausreißerbetrachtung erforderlich war (Bild A1-33). Im Bereich bis 3,5 m Tiefe traten weit oberhalb des Medians sehr viel höhere Abrostungswerte als bei allen anderen Bauwerken auf.

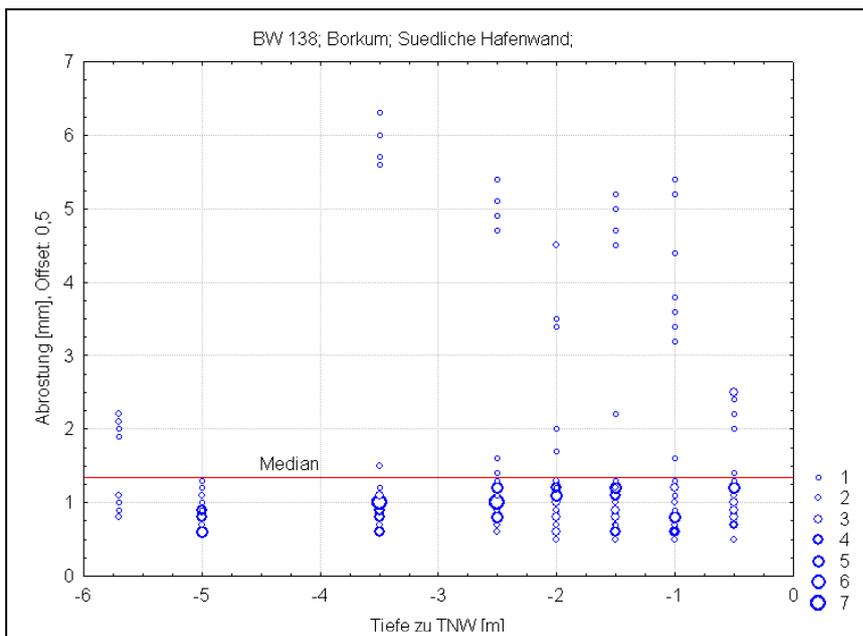


Bild A1-33: Inhomogene Streuung um den Schwerpunkt (BW 138)

Diese hohen Werte gehörten überwiegend zur Messlage *Berg-Mitte* einer Station (1002) und sind im zugehörigen Box-Whisker-Plot als Ausreißer erkennbar (Bild A1-34 und A1-35).

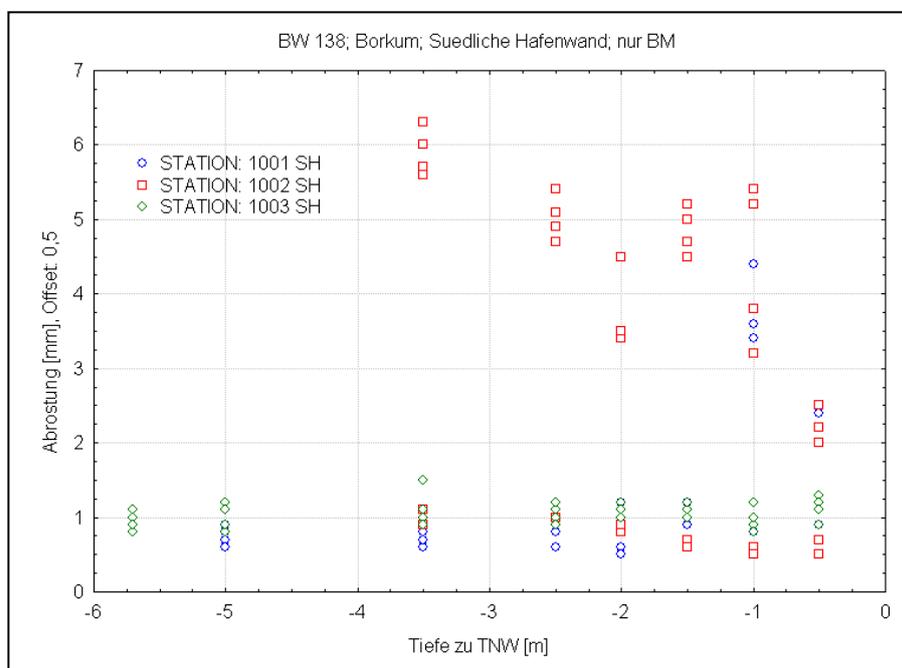


Bild A1-34: Inhomogene Streuung nach Stationen und Messlagen (BW 138)

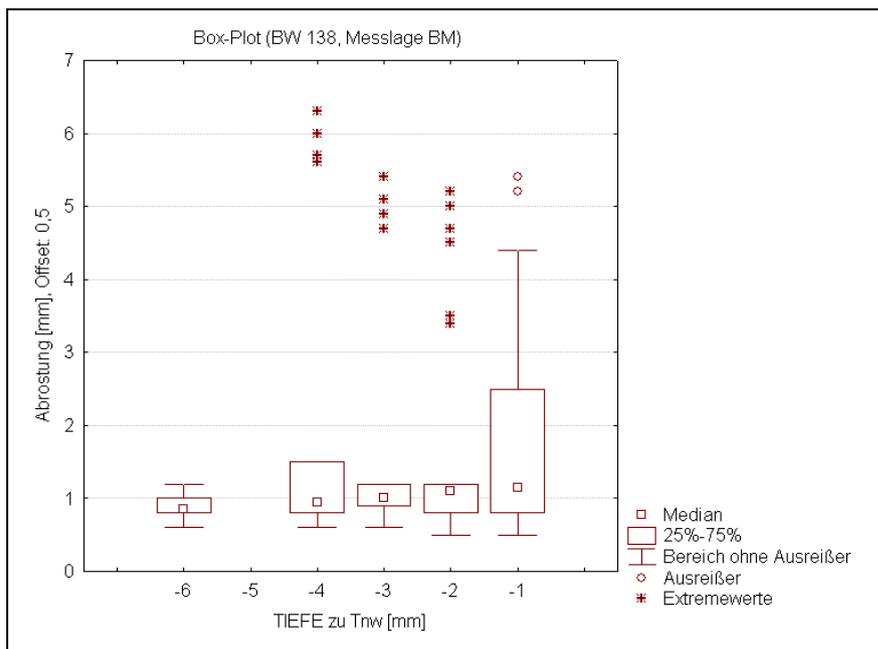


Bild A1-35: Ausreißerdiagnose nach Tiefenlagen (BW 138)

In einer Übersicht aller Tiefenfunktionen wird deutlich, dass die mittleren Abrostungen bei vielen Bauwerken in etwa 5 m Tiefe unter Mittelwasser bzw. Tideniedrigwasser zusammenlaufen (Bild A1-36). Bei dieser Auswertung wurden die jeweiligen Basisniveaus über Abzug des rechnerisch erforderlichen Offsets wieder so nach unten korrigiert, dass der kleinste Messwert bei 0 lag. Die mittleren Abrostungen (geometrisches Mittel) liegen dort zwischen 0,5 und 1,5 mm. Abgesehen von Bauwerk 165, wo die Tiefenfunktion infolge weniger Messwerte nur sehr unsicher geschätzt werden kann, erhöht der Abrostungsgradient die Werte um 0,5 bis 1,0 mm an der Mittelwasserlinie. Diese hohen Werte haben in der bisherigen Praxis der Auswertung von Ultraschallmessungen zur Ausgliederung einer separaten "Niedrigwasserzone" geführt. In Bezug auf Basisabrostung und Gradient verhalten sich Spundwände mit U-Profilen wie die gemischten Spundwände (E-Profile).

Die Gradienten liegen bei den untersuchten Bauwerken zumeist zwischen 0,06 und 0,20, bei Bauwerk 165 jedoch sogar bei 0,38 (Tabelle A1-55). Die zugehörigen Raten ergeben eine Abrostungszunahme von rund 6% bis 23% pro Meter zur Mittelwasserlinie hin (Bild A1-37). Der Streuungsfaktor für die Spreizung der einzelnen Abrostungswerte um diese Mittel herum (SPREAD) liegt zwischen 1,2 und 1,6, mit Höchstwerten bei den E-Profilen (Tabelle A1-5).

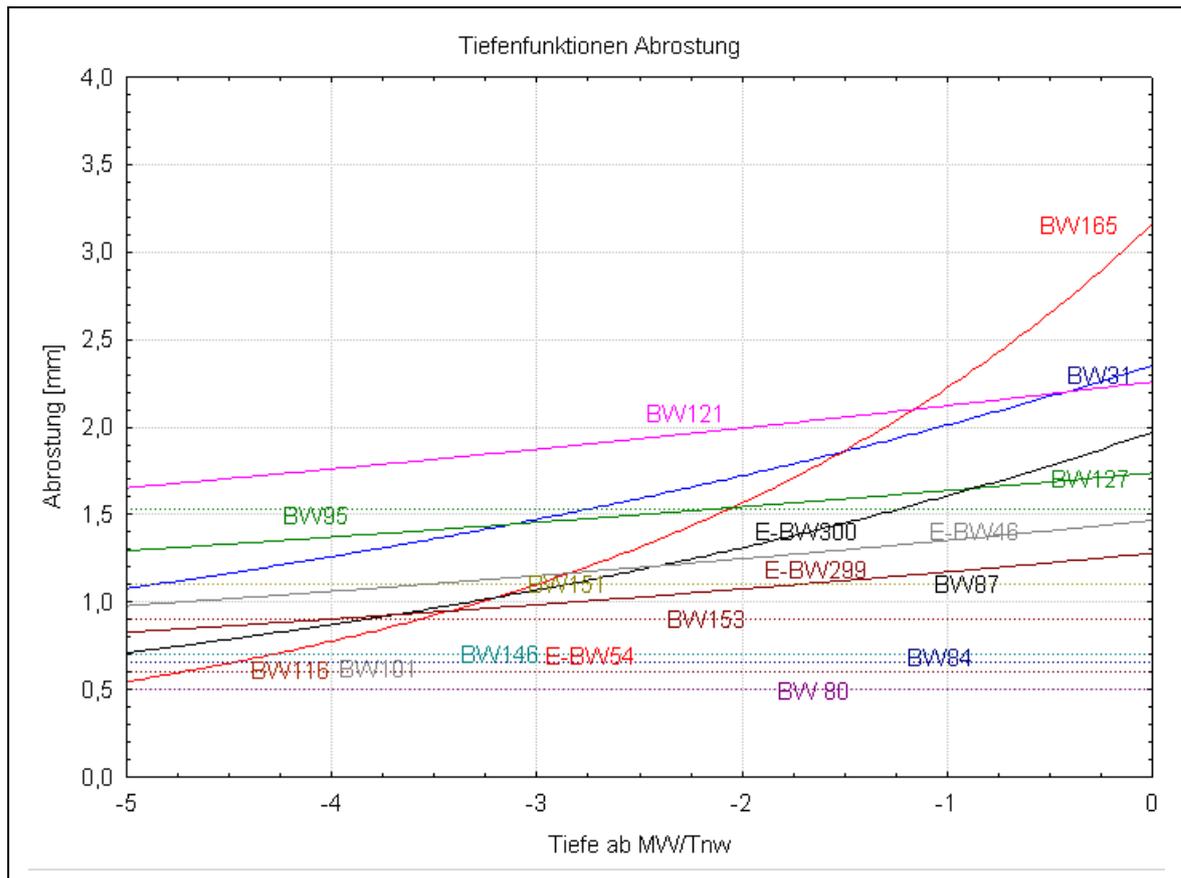


Bild A1-36: Tiefenfunktionen und Basisabrostungen (alle Bauwerke)

Tabelle A1-5: Basisabrostung, Tiefengradient und Streuungsfaktor

Bauwerk	Profiltyp	SIGMALn	SPREAD (Streuungsfaktor)	BETA (Gradient)	RATE (pro Meter)	Abrostung (Basisniveau)	Abrostung (MW/Tnw)
146	UG	0,330	1,39	0,00	0,00	0,66	0,66
116	UR	0,330	1,39	0,00	0,00	0,66	0,66
101	UR	0,353	1,42	0,00	0,00	0,68	0,68
87	UG	0,320	1,38	0,00	0,00	1,08	1,08
95	UG	0,252	1,29	0,00	0,00	1,53	1,53
84	UG	0,167	1,18	0,00	0,00	0,60	0,60
165	UR	0,213	1,24	0,35	42,05	0,55	3,16
31	UR	0,265	1,30	0,16	16,89	1,08	2,35
80	UR	0,354	1,42	0,00	0,00	0,39	0,39
138	UR			0,00	0,00		
127	UR	0,274	1,32	0,06	6,08	1,29	1,74
121	UR	0,258	1,29	0,06	6,44	1,65	2,26
151	UR	0,301	1,35	0,00	0,00	1,15	1,15
153	UR	0,288	1,33	0,00	0,00	0,95	0,95
300	EA	0,350	1,42	0,20	22,63	0,71	1,97
46	EA	0,403	1,50	0,08	8,40	0,98	1,47
54	EI	0,426	1,53	0,00	0,00	0,74	0,74
299	EI	0,484	1,62	0,09	9,11	0,83	1,28

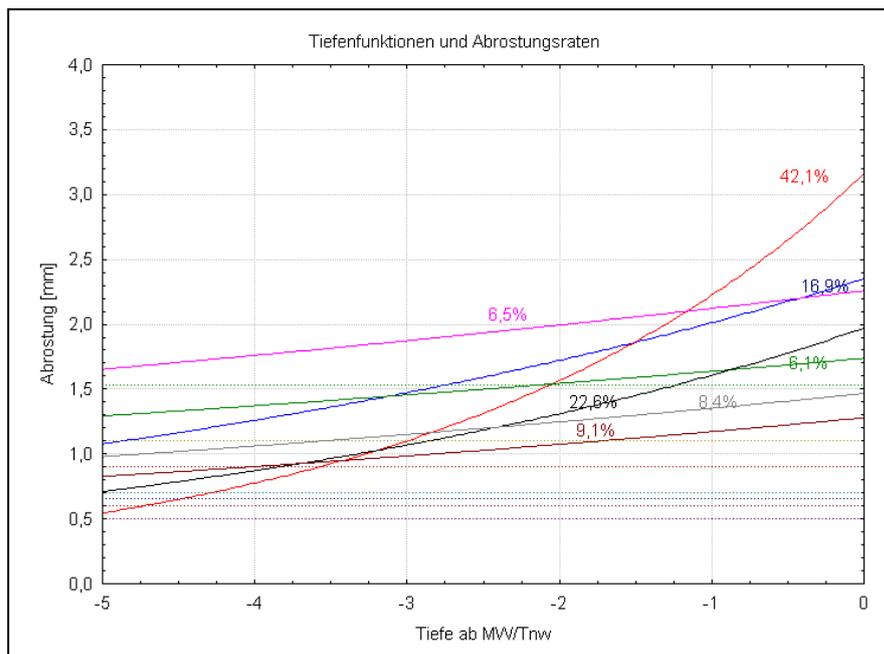


Bild A1-37: Abrostungsdaten vom Basisniveau (alle Bauwerke)

### Gesamtfunktion über alle Tiefen

Auch oberhalb der Wasserlinie wie beispielsweise in der Spritzwasser- oder Luftzone sind höhenabhängige Abrostungsgradienten zu beobachten, so dass sich die Abrostung an einer Stahlspundwand über alle Tiefenbereiche hinweg insgesamt als unstetige Exponentialfunktion der Tiefe darstellen lässt. Das nachfolgende Beispiel gibt eine Exponentialfunktion mit einer Unstetigkeitsstelle an der Mittelwasserlinie an:

$$\text{Abrostung} = \begin{cases} b_0 \exp(b_1 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} < 0 \\ b_2 \exp(b_3 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq 0 \end{cases} \quad (\text{A1-6})$$

worin  $b_0$  bis  $b_3$  Regressionskoeffizienten sind, die indirekt über die loglineare Regression ermittelt werden können. Wenn die Abschätzung über einen Tiefenbereich mit mehrfachem Wechsel des Korrosionsmilieus verläuft, besitzt diese Funktion analog zu (A1-6) noch weitere Unstetigkeitsstellen.

Am Beispiel von Bauwerk 31 (Neustadt) mit U-Profilen soll eine unstetige Tiefenfunktion dargestellt werden. In der loglinearen Version steigt die Abrostung vom Basisniveau bis zur Mittelwasserlinie, dann folgt ein scharfer Abfall an dieser Stelle und schließlich eine Erniedrigung der Abrostung in der Luftzone (Bild A1-38).

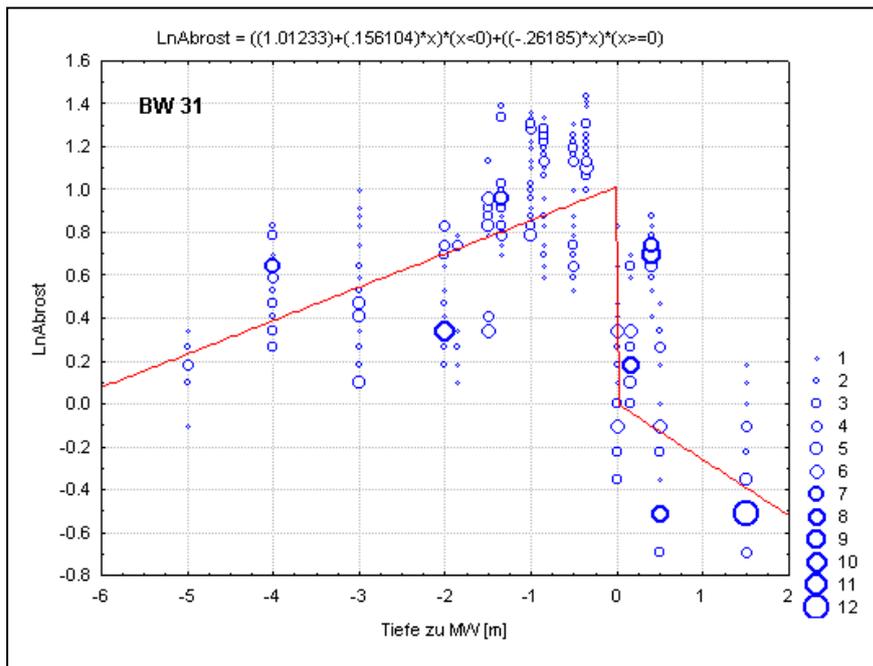


Bild A1-38: Unstetige Tiefenfunktion für die Log-Abrostung (BW 31)

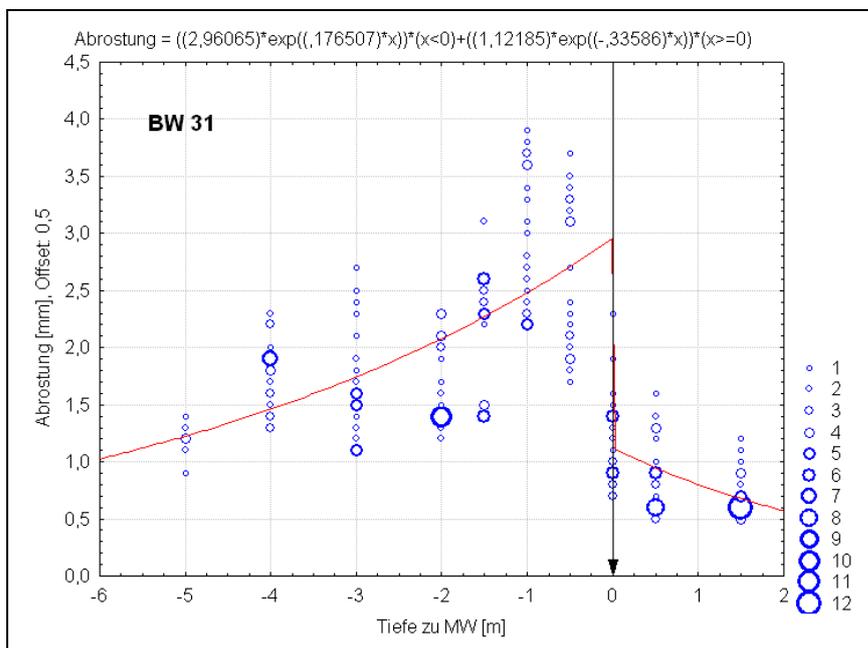


Bild A1-39: Unstetige Exponentialfunktion der Abrostung (BW 31)

Die korrespondierende Exponentialfunktion für Bauwerk 31 zeigt den steilen Abrostungsgradienten bis zur Mittelwasserlinie sowie den zweiten Gradienten in der Luftzone (Bild A1-39).

Als Beispiel für eine loglineare Tiefenfunktion mit mehreren Unstetigkeitsstellen soll hier Bauwerk 299 (Kiel) mit E-Profilen dienen. Dort wechselt das Korrosionsmilieu oberhalb der Mittelwasserlinie noch einmal durch die Spritzwasserzone, welche in etwa die maximale Wellenhöhe

markiert. Außerdem reicht die Sohlltiefe weit unter den Gradientenbereich hinab, so dass ab 5 m Tiefe die Basisabrostung separat ausgewiesen wird. Dadurch ergeben sich drei Unstetigkeitsstellen in der loglinearen Regression und in der korrespondierenden Exponentialfunktion (Bild A1-40 und A1-41). Hier ist der Gradient in der Spritzwasserzone steiler als unter der Mittelwasserlinie. In der Luftzone fällt dann das Abrostungsmittel tief ab.

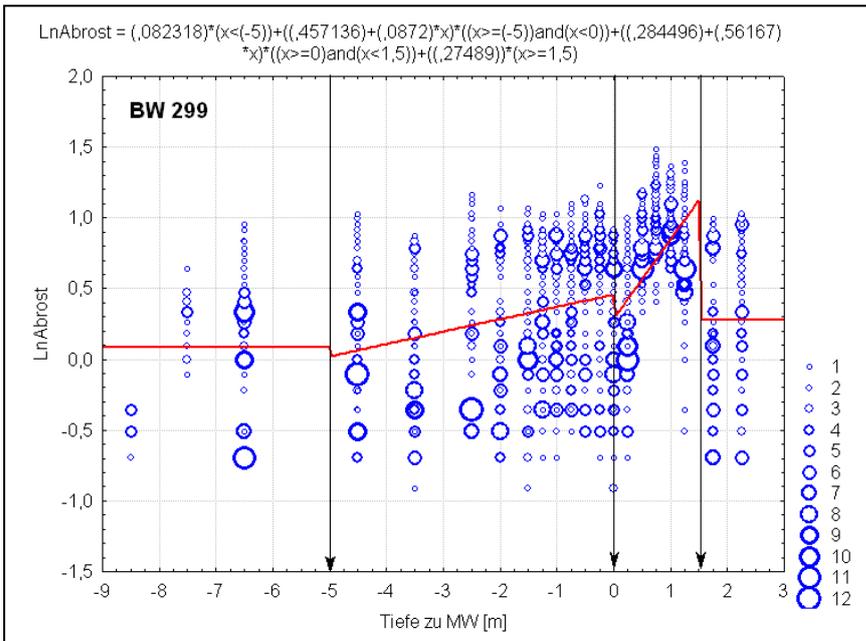


Bild A1-40: Loglineare Funktion mit mehreren Unstetigkeitsstellen (BW 299)

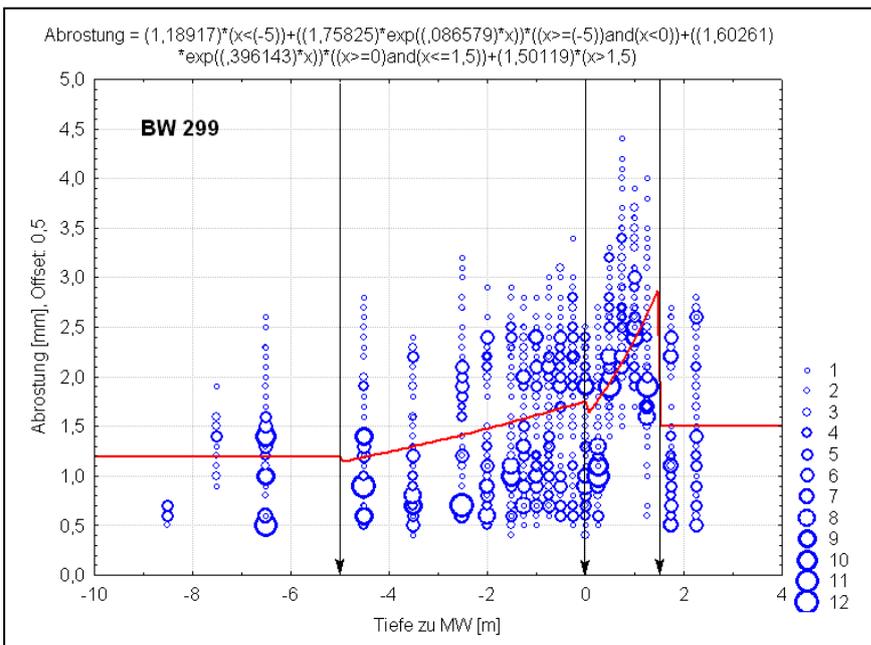


Bild A1-41: Exponentialfunktion mit mehreren Unstetigkeitsstellen (BW 299)

## Schätzung kritischer Restwanddicken

Aus der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen exponentiellen Tiefenfunktion der Abrostung lassen sich kritische Restwanddicken abschätzen. Das Grundprinzip der Abschätzung sind Konfidenz- und Prognoseintervalle eines Regressionsmodells. Die obere Konfidenzgrenze einer Regressionsgeraden für die Log-Abrostung wird folgendermaßen formuliert (siehe Hartung 1995):

$$b_0 + b_1 \text{Tiefe}_0 + t_{0,95; n-2} s_e \sqrt{1/n + (\text{Tiefe}_0 - \text{mittlere Tiefe})^2 / (n-1) s_{\text{Tiefe}}^2} \quad (\text{A1-7})$$

wobei  $b_0$  das Absolutglied ist und  $b_1$  der Steigungskoeffizient der loglinearen Regressionsgleichung, der kritische Wert  $t_{1-\alpha; n-2}$  sich auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit  $\alpha$  bezieht, und  $s_e$  den Standardfehler der Schätzung angibt. Der Standardschätzfehler  $s_e$  berechnet sich als Wurzel aus der Residualvarianz:

$$s_e^2 = \Sigma [\text{LnAbrost}_i - (b_0 + b_1 \text{Tiefe}_i)]^2 / (n - 2), \quad (\text{A1-8})$$

wobei die Differenz  $\text{LnAbrost}_i - (b_0 + b_1 \text{Tiefe}_i)$  zwischen Beobachtungs- und Vorhersagewerten als *Residuen* bezeichnet werden. Weil bei den Spundwänden innerhalb einer Höhenzone nur eine geringe Tiefenspanne von bis zu 5 m abgegriffen wird, ist der Ausdruck  $(\text{Tiefe}_0 - \text{mittlere Tiefe})^2 / (n-1) s_{\text{Tiefe}}^2$  in (8) zu vernachlässigen. Die Werte  $t_{1-\alpha; n-2}$  liegen für 5% Irrtumswahrscheinlichkeit bei den zumeist verfügbaren großen Stichprobenumfängen von mehr als 100 Messwerten etwa bei 2, so dass Formel (8) sich vereinfacht zu:

$$b_0 + b_1 \text{Tiefe}_0 + 2 s_e / \sqrt{n}. \quad (\text{A1-9})$$

Dieser Ausdruck kann zur Schätzung der charakteristischen mittleren Abrostung (Log-Werte) im Sinne der Euronorm herangezogen werden, der etwas modifizierte Ausdruck:

$$b_0 + b_1 \text{Tiefe}_0 + 2 s_e \sqrt{1 + 1/n} \quad (\text{A1-10})$$

zur Schätzung von Überschreitungsanteilen. Wenn die zugehörigen Parameter über die loglineare Regression geschätzt werden, kann die maximale Abrostung aus der korrespondierenden exponentiellen Tiefenfunktion berechnet werden.

### Schätzung der maximalen Abrostung

Aus den Prognosegrenzen der loglinearen Tiefenfunktion der Abrostung lassen sich entsprechende Grenzen der zugehörigen modifizierten Exponentialfunktion ableiten:

$$Y = a'' e^{b(X-X_0)} e^{2 S_{\ln} \sqrt{1+1/n}} \quad (\text{A1-11})$$

bei der  $X_0$  die untere Bezugstiefe ist,  $a'' = a' / e^{b X_0}$  und  $S_{\ln}$  der Standardschätzfehler der loglinearen Regression. In einfacher Form lässt sich Ausdruck (A1-11) schreiben als:

$$\text{MaxAbrost} = \text{Basisabrostung} \times e^{(\text{Gradient} \times (\text{Tiefe} - \text{Basistiefe}) \times \text{Spreizung})^2 \sqrt{1+1/n}} \quad (\text{A1-12})$$

Auf dieser Grundlage wurden maximale Abrostungswerte am Basisniveau in 5 m Tiefe und an der Mittelwasserlinie berechnet. Diese Werte wurden der üblichen Schätzung von Überschreitungsanteilen mit k-Faktoren nach DIN 55303 (Teil 5) gegenübergestellt, die sich jeweils aus der Log-Standardabweichung oder aus dem Standardschätzfehler der loglinearen Regression erge-

ben (Tabelle A1-6). Die Ergebnisse lagen trotz unterschiedlicher Berechnungsverfahren eng beieinander.

*Tabelle A1-6: Schätzung maximaler Abrostung und resultierende minimale Restwanddicken für den Unterwasserbereich (BW 300a, 54a und 299a inklusive Muldenmessungen)*

BW	MaxBasisabrostung aus Regression	MaxMW-Linie aus Regression	MaxBasisabrostung mit k-Faktoren	MaxMW-Linie mit k-Faktoren	Restwanddicke Minimum
146	1.29	1.29	1.37	1.37	8.01
116	1.29	1.29	1.35	1.35	6.71
101	1.39	1.39	1.47	1.47	6.61
87	2.05	2.05	2.15	2.15	8.45
95	2.54	2.54	2.67	2.67	3.76
84	0.84	0.84	0.87	0.87	8.16
165	0.84	4.85	0.89	5.13	3.15
31	1.83	4.00	1.91	4.20	6.00
80	0.79	0.79	0.84	0.84	11.21
127	2.24	3.01	2.33	3.11	6.99
121	2.77	3.79	2.82	3.85	5.71
151	2.10	2.10	2.19	2.19	7.90
153	1.69	1.69	1.82	1.82	8.81
300	1.43	3.97	1.46	4.05	6.03
300a	1.51	4.19	1.54	4.28	5.81
46	2.19	3.29	2.24	3.35	6.71
54	1.75	1.75	1.83	1.83	8.25
54a	2.08	2.08	2.19	2.19	7.92
299	2.18	3.37	2.24	3.46	6.63
299a	2.33	3.63	2.40	3.73	6.37

Bei einigen Bauwerken wurden die Muldenmessungen mit der Tiefenlehre in die Berechnung einbezogen, wobei die Abrostung dann aus der Differenz zwischen Muldenmessung und dem geometrischen Mittel der lokalen Restwanddicken ermittelt wurden (BW 300, 54 und 299). Diese Messungen fügen sich nahtlos in das Verteilungsbild und das jeweilige Streuungsdiagramm von Abrostung und Tiefe ein (Bild A1-42 und A1-43).

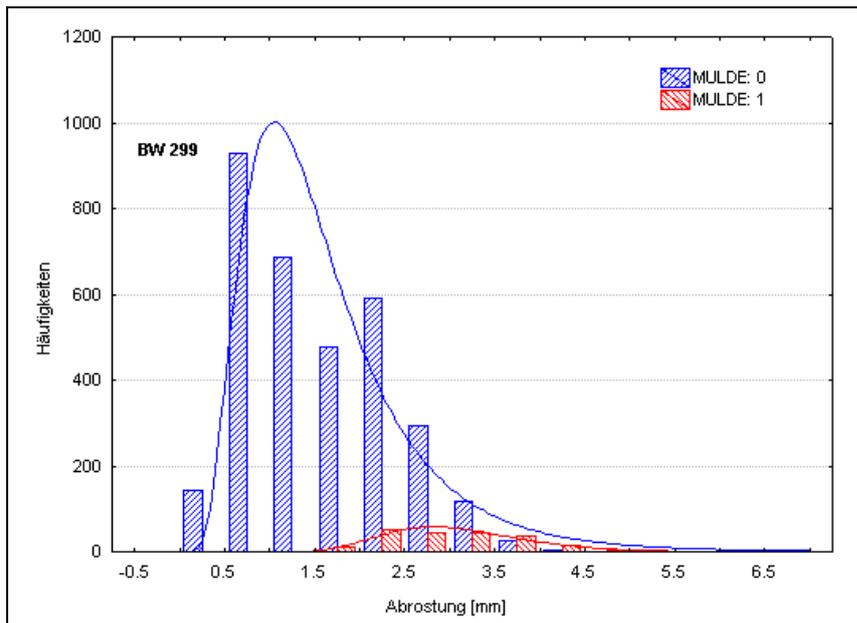


Bild A1-42: Ultraschall- und Muldenmessungen (BW 299)

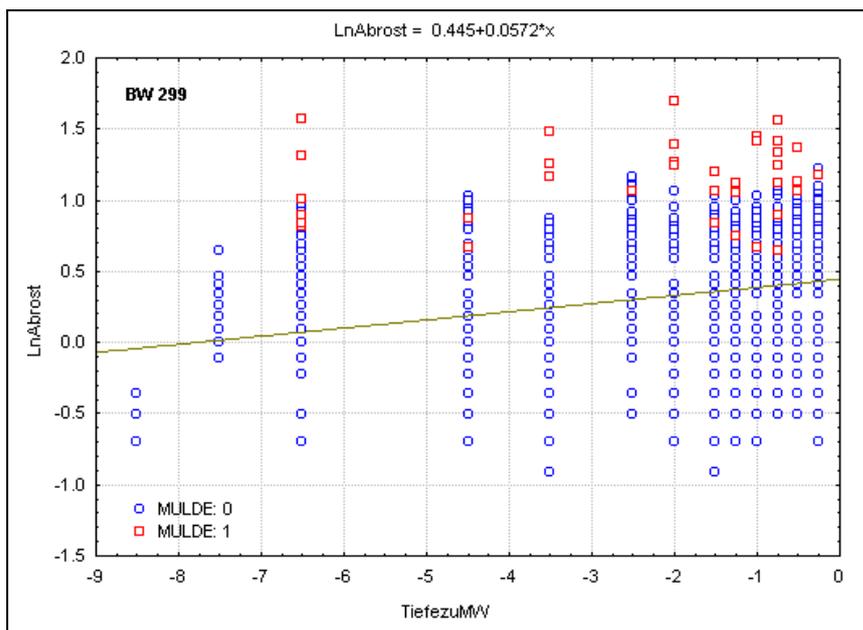


Bild A1-43: Tiefenfunktion mit Ultraschall- und Muldenmessungen

### **Erforderliche Stichprobengröße**

Damit die Parameter der exponentiellen Tiefenfunktion hinreichend genau bestimmt werden können, sollten oberhalb der Mittel- oder Tideniedrigwasserlinie und bis 5 m darunter Messquerschnitte im vertikalen Mindestabstand von 50 cm festgelegt werden, ab 5 m Tiefe dann im Abstand von 1 m. In der bisherigen Praxis ist durchaus ähnlich verfahren worden, wobei im besonders kritischen Bereich um die Mittelwasserlinie herum die Abstände der Querschnitte manchmal sogar noch enger gelegt wurden. Das Hauptkriterium für die Stichprobenplanung sollte jedoch die Kompensation der weiten Streuung zwischen den Abrostungswerten der ein-

zelenen Stationen sein, die eine Bestimmung der für das gesamte Bauwerk repräsentativen Tiefenfunktion der Abrostung erschwert (Bild A1-44). Innerhalb einer Zone, die durch Wechsel des Korrosionsmilieus festgelegt wird, muss in Orientierung an eine vorgegebene Prognosesicherheit stets eine noch zu bestimmende Mindestanzahl an Ultraschallmessungen durchgeführt werden.

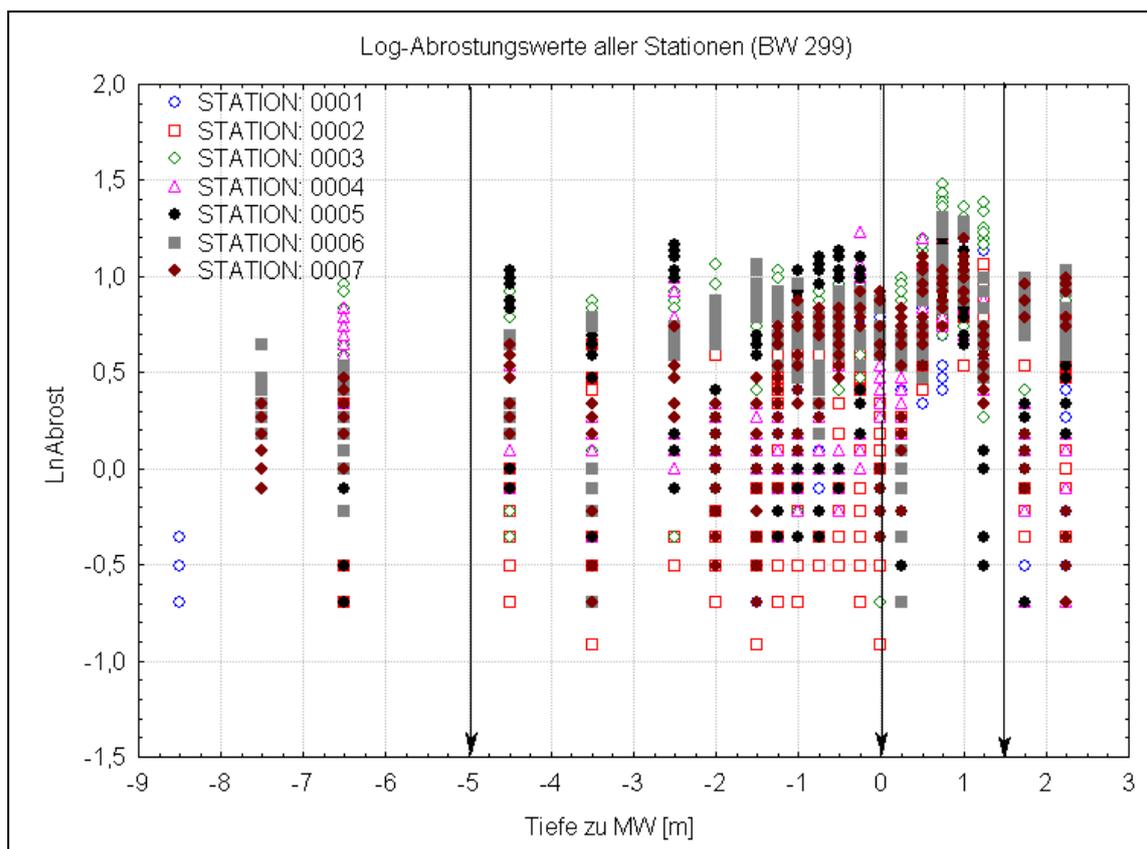


Bild A1-44: Abrostungswerte einzelner Stationen (Bauwerk 299)

Die erforderliche Stichprobengröße zur Begrenzung des Prognosefehlers ist für lognormalverteilte Daten anders zu berechnen als für normalverteilte Daten. Nach Uerkvitz und Götz (1989) errechnet sich die erforderliche Stichprobengröße für einen vorgegebenen maximalen prozentualen Schätzfehler im geometrischen Mittelwert näherungsweise als:

$$N = 1,54 \cdot 10^5 \cdot \text{Sigma}_{\ln}^2 / \%Fehler^2 \quad (A1-13)$$

Aus den Log-Standardabweichungen für den Unterwasserbereich der untersuchten Bauwerke resultieren für einen Schätzfehler von bis zu 10% im geometrischen Mittelwert der Abrostung Stichprobenumfänge zwischen 40 und 400, welche bisher auch zumeist realisiert wurden (Tabelle A1-7). Die korrespondierenden absoluten Schätzfehler liegen zwischen 0,03 und 0,16 mm, was weit unter dem zulässigen Fehler von  $\pm 0,5$  mm liegt. Als groben Richtwert sollte darum mindestens 100 Werte pro Abrostungszone angestrebt werden. Diese könnten sich beispielsweise aus zwei Querschnitten im 50 cm Abstand an 10 Stationen, zwei Messpunktlagen pro Querschnitt (z.B. Berg- und Talmitte bei U-Profilen) sowie drei Messungen pro Messpunktlage ergeben.

*Tabelle A1-7: Berechnete Stichprobenumfänge für den Unterwasserbereich*

BW	1 Profiltyp	2 SIGMALn Unterwasserzone	3 N vorhanden	4 N10% gefordert	5 Präzision Geomittel
146	UG	0.330	164	168	0.03
116	UR	0.330	213	168	0.03
101	UR	0.353	190	192	0.03
87	UG	0.320	180	158	0.05
95	UG	0.252	173	98	0.08
84	UG	0.167	150	43	0.03
165	UR	0.213	100	70	0.16
31	UR	0.265	190	108	0.12
80	UR	0.354	144	193	0.02
127	UR	0.274	540	116	0.09
121	UR	0.258	288	103	0.11
151	UR	0.301	270	140	0.06
153	UR	0.288	104	128	0.05
300a	EA	0.366	917	206	0.10
46	EA	0.403	899	250	0.07
54a	EI	0.466	333	335	0.04
299a	EI	0.502	870	388	0.07

### **Schätzung aus Alter und Standortfaktoren**

Als Ausblick auf künftige Bestimmungsverfahren soll nun die Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden aus messbaren Einflussgrößen untersucht werden. Dabei gilt es zu klären, ob die Modellparameter der Tiefenfunktion für die Abrostung wiederum als Funktion anderer Messgrößen darstellbar sind. In der Zone unterhalb der Mittelwasserlinie sind die wichtigsten Parameter (a) das Basisniveau und (b) die zugehörige Basistiefe, (c) der Abrostungsgradient, sowie (d) der Streuungsfaktor, welcher sich über den Standardschätzfehler der zugehörigen loglinearen Regression schätzen lässt (Bild A1-45).

Aus den untersuchten Spundwanddaten zeichnet sich ab, dass die Basistiefe grundsätzlich etwa bei 5 m Tiefe liegt und die mittlere Basisabrostung eine Funktion des Spundwandalters ist (Bild A1-46). Der Abrostungsgradient besitzt bei marinen Standorten teilweise sehr viel höhere Werte als bei limnischen und ändert sich auch mit dem Alter des Bauwerks. Als Ursachen für den Abrostungsgradienten kommen Gewässerparameter in Betracht, die ebenfalls eine Tiefenfunktion aufweisen und so als Korrosionsfaktoren zu identifizieren sind (z.B. Schwebstoffe, Sauerstoff).

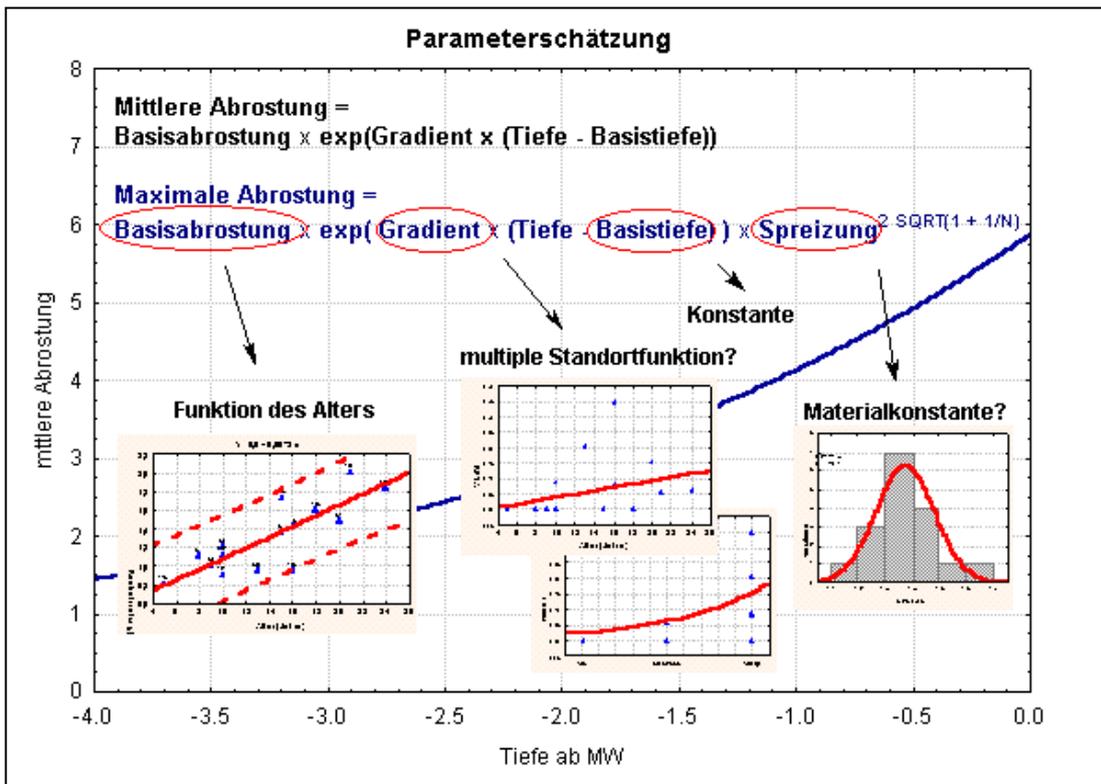


Bild A1-45: Ableitung der Parameter der Abrostungsfunktion aus Drittgrößen

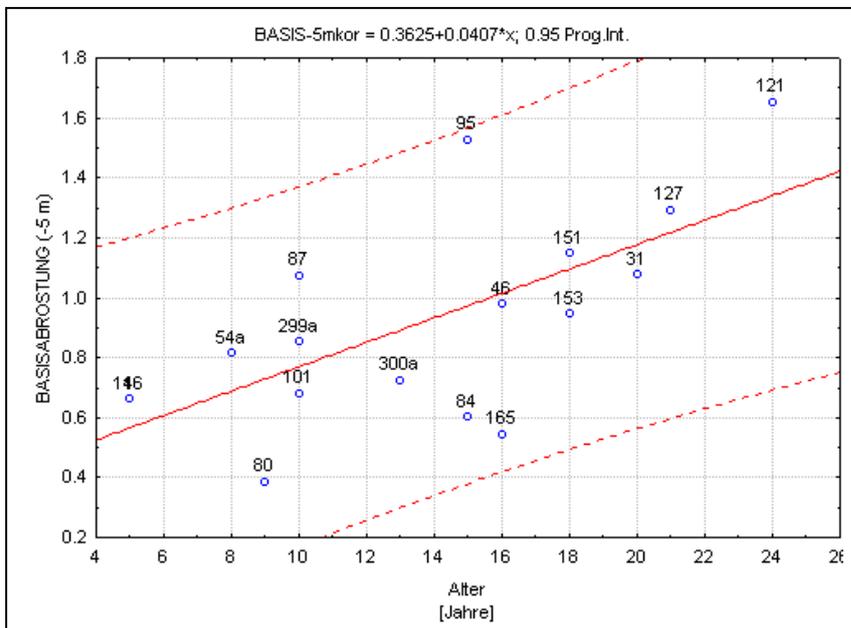


Bild A1-46: Abhängigkeit der Basisabrostung vom Spundwandalter

Die Spreizung der Abrostungswerte um den jeweiligen Funktionswert herum zeigt insgesamt nur eine geringe Variabilität, ist aber bei E-Profilen stets höher als bei U-Profilen (Bild A1-47 und A1-48). Da diese Reststreuung in den Ultraschallmessungen eng an den Profiltyp gebunden ist, könnte sie eine Art Materialkonstante darstellen.

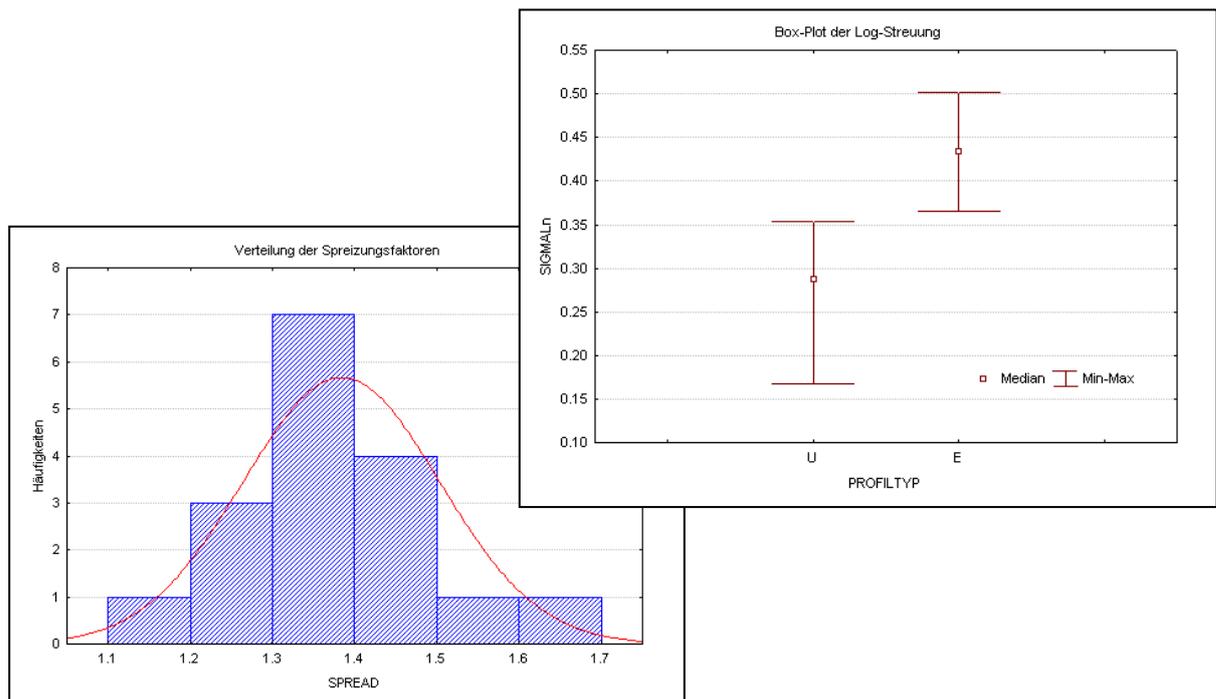


Bild A1-47 und A1-48: Bandbreite der Reststreuung nach Profiltyp

Eine genaue Parameterbestimmung ist mangels Datengrundlage derzeit noch nicht möglich, so dass hier zunächst nur ein einfaches Zahlenbeispiel gegeben werden kann (Bild A1-49). Als Basistiefe wird 5 m unter Mittelwasser eingesetzt, als Spreizung der Mittelwert 1,3 des Streuungsfaktors für U-Profile. Die Basisabrostung errechnet sich aus der Formel  $0,36 + 0,04 \times \text{Alter}$ , und der Gradient für marine Standorte mit mehr als sieben Jahre alten Bauwerken aus der Formel  $-0,13 + 0,02 \times \text{Alter}$ . Dies ist jedoch zunächst nur ein Rechenbeispiel und darf nicht als gültige Abschätzung für die Stahlspundwände missverstanden werden.

Diese vorläufigen Ergebnisse lassen aber erwarten, dass minimale Restwanddicken später über eine multifaktorielle Vorhersagefunktion aus Drittgrößen grob abgeschätzt werden können. Auf diese Weise ließe sich bereits vor einer Ultraschallprüfung das Risiko des möglichen Versagensfalls für ein Bauwerk quantifizieren und so dem Küsteningenieurwesen ein wertvolles Instrument zur Planung von Untersuchungen liefern.

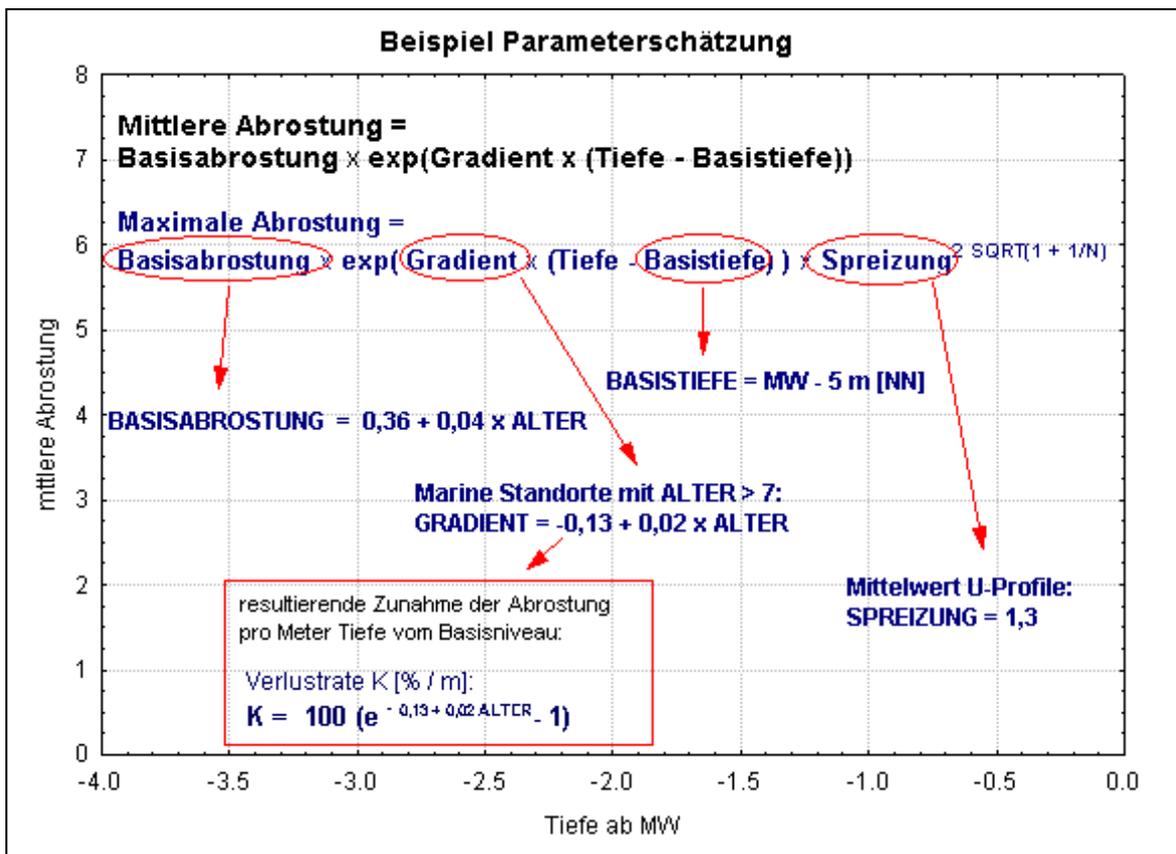


Bild A1-49: Beispiel einer Parameterbestimmung aus Drittgrößen

### Lebensdaueranalyse

Eine univariate Methode der Lebensdauerabschätzung ist die Berechnung von Ausfallzeiten mit Hilfe der Weibullverteilung (zum Verteilungsmodell, s. Hartung 1987). Die zweiparametrische Weibullverteilung wird durch die Parameter *Form* und *Skala* festgelegt. Der Parameter *Form* wird auch als Ausfallsteilheit bezeichnet und gibt die Veränderung der Ausfallrate an. Bei bestimmten Werten dieses Parameters nähert sich die Weibullverteilung anderen Verteilungsformen wie Exponential-, Lognormal- und Normalverteilung an.

Der Parameter *Skala* wird auch als charakteristische Lebensdauer bezeichnet und gibt den Zeitpunkt an, an dem 63,2% aller Teile ausgefallen sind. Andere Perzentile (z.B. der Zeitpunkt, an dem 90% Teile ausgefallen sind) lassen sich ebenfalls aus diesen Parametern ableiten. Wenn es eine ausfallfreie Zeit gibt, muss ein dritter Parameter (Lageparameter als Offset) berücksichtigt und die Lebensdauerwerte danach transformiert werden. Wenn geprüfte Teile zu einem bestimmten Zeitpunkt noch gar nicht ausgefallen sind, gehen die betreffenden Zeitpunkte als zensierte Lebensdauerwerte mit in die Analyse ein.

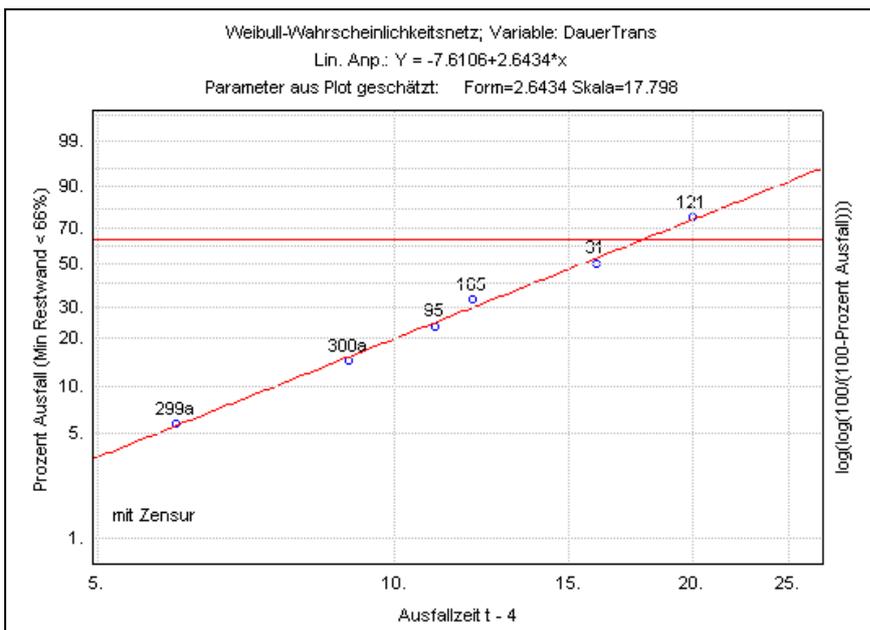


Bild A1-50: Abrostungszeitpunkte im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz

Da für eine präzise Lebensdaueranalyse von Spundwänden zur Zeit noch keine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist, kann hier zunächst nur ein kleiner Test in dieser Richtung erfolgen. Zuerst muss die Lebensdauer einer Spundwand definiert sein. Beim vorliegenden Datenbeispiel wurde diese willkürlich als das Alter festgelegt, an dem die minimale Restwanddicke weniger als Zwei-Drittel der Ausgangswanddicke beträgt (mit Offset 4). Eine saubere Definition nach bautechnischen Kriterien muss aber später noch ausgearbeitet werden. Dabei wurde die minimale Restwanddicke aus der Ist-Wanddicke und der geschätzten maximalen Abrostung errechnet. Wenn bei einem Bauwerk diese kritische Restwanddicke noch nicht unterschritten war, ging das zugehörige Alter als zensierte Lebensdauer in die Betrachtung ein (irgendwann dürfte die Abrostung ja so weit fortgeschritten sein).

Tabelle A1-8: Anpassung der Lebensdauerdaten an die Weibullverteilung

Test	Anpassungstests (ÜbersichtUEProfile) DauerTrans; Zensierung: Zuverlässigkeit (0,1) N=17 Zensiert:11 Parameter: Lage=0.0000 Form=3.3891 Skala=16.902	
	Testwert	p
Hollander-Proschan	-0.289577	p=.77214
Mann-Scheuer-Fertig	0.658183	p<0,15

Die resultierenden Lebensdauerdaten der Spundwände passten sehr gut in das Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibullverteilung (Bild A1-50) und ließen sich einem Test auf Verteilungsanpassung zufolge auch diesem Verteilungstyp zuordnen (Tabelle A1-8). Der nach der Maximum-Likelihood-Methode geschätzte Formparameter liegt bei 3,4 und der Skalenparameter bei 16,9, d.h. nach etwa 21 Jahren dürfte durch fortschreitende Korrosion die minimale Restwanddicke bei etwa 63,2% der Bauwerke unter die kritische Marke von Zwei-Drittel der Ausgangswanddicke abgesunken sein (Tabelle A1-9).

*Tabelle A1-9: Parameterschätzung für die Weibullverteilung*

Param.	ML-Schätzung für 2-Parameter-Weibull-Verteilung (ÜbersichtUEProfile) DauerTrans; Zensierung: Zuverlässigkeit (0,1) N=17 Zensiert:11				
	Param. Wert	Asympt. Std.	-95.0% LCL	+95.0% UCL	Kovar. Form/Sk.
Lage	0.00000				
Form	3.38911	1.051332	1.84516	6.22495	
Skala	16.90193	2.092772	13.25995	21.54422	-0.509042

## Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der *European Commission of Steel and Coal (ECSC)* geförderten Forschungsvorhabens wurde in der vorliegenden Arbeit auf der Grundlage einer statistischen Analyse von Korrosionsmessungen an 18 Bauwerken unterschiedlichen Standorts eine methodische Grundlage für die Abschätzung der mittleren und maximalen Abrostung an Stahlspundwänden erarbeitet. Die bisherige Praxis der Analyse von Ultraschallmessungen erwies sich in Teilen als ungeeignet, da aufgrund der üblichen Zusammenlegung inhomogener Datenkollektive keine für das Gesamtbauwerk repräsentative Prognose gewährleistet werden kann.

Die Korrosionswerte folgen allgemein einer Lognormalverteilung und zeigen sowohl für gemischte Spundwände als auch für Spundwände mit U-Profilen starke Abweichungen zwischen den einzelnen Stationen und Messpunktlagen, die in vielen Fällen stärker als die Höhenzonierung waren. Systematische Abrostungsunterschiede zwischen profilabhängigen Messlagen wurden als Hauptursache für die bisweilen beobachteten mehrgipflige Verteilungsformen der Ultraschallmessungen identifiziert. Eine Beschränkung der Auswertung auf ausgewählte Messpunkte im Berg- und Talbereich eines Profils würde zu homogeneren Datenkollektiven führen.

Ein schwerwiegendes Problem für die Praxis der Korrosionsschätzung erwächst aus den hohen Streuungsanteilen der Stationen eines Bauwerks. Wenn zwischen den Stationen infolge besonderer lokaler Gegebenheiten systematische Unterschiede des Korrosionsverhaltens bestehen, sollten die zugehörigen Spundwände als separates Bauwerk behandelt werden. Zufällige Unterschiede zwischen einzelnen Stationen einer Spundwand können allerdings nur durch die Einbeziehung einer größeren Zahl von Stationen pro Bauwerk (etwa 10) in die Ultraschalluntersuchungen ausgeglichen werden. Als Grundprinzip sollte stets eine große Anzahl an Stationen pro Bauwerk gegenüber einer kleinen Anzahl an Messpunkten pro Station angestrebt werden. Viele Messungen an wenigen Stationen führen stets zu inhomogenen Datensätzen, aus denen keine für das Gesamtbauwerk repräsentative Abschätzung kritischer Restwanddicken gewonnen werden kann.

In Bezug auf eine Höhenzonierung der Abrostungsintensität an Spundwänden zeigen die untersuchten Bauwerke zwei Tendenzen: (a) Ein Wechsel des Korrosionsmilieus führt oft zu einem scharfen Sprung in den Abrostungswerten, und (b) innerhalb eines Höhenbereichs mit gleichem Korrosionsmilieu gibt es eine exponentielle Abhängigkeit der Abrostung von der Tiefe. Als Alternative zur bisherigen Analysenpraxis, bei der auch im Bereich unter der Mittelwasser- oder Tideniedrigwasserlinie bestimmte Messquerschnitte zu Niedrigwasserzone einerseits und Unterwasserzone andererseits zusammengefasst wurden, wird in der vorliegenden Arbeit die Bestimmung einer Tiefenfunktion für die Abrostung mit Hilfe der Regressionsanalyse empfohlen. Als Ergänzung zu den Ultraschallmessungen können Muldenmessungen mit der Tiefenlehre dienen, wenn die lokale Restwanddicke aus dem geometrischen Mittelwert der Restwanddicken am Ansatzpunkt errechnet wird.

Die untersuchten Bauwerke zeigen grundsätzlich ein über mehrere Tiefenmeter hinweg verlaufendes konstantes Abrostungsmittel (Basisabrostung), das bei einigen Standorten etwa ab 5 m Tiefe in eine exponentiell zunehmende Abrostung zur Mittel- oder Tideniedrigwasserlinie hin

übergeht. Aufgrund der aus einer Lognormal-Verteilung resultierenden multiplikativen Streuung von Messwerten um die Ausgleichskurve herum, formt die Streuung einen Trichter mit entsprechend hohen Abrostungswerten an der Wasserlinie. Diese hohen Werte des kontinuierlichen Wertespektrums sind in der bisherigen Praxis der Datenauswertung in der Regel als separate „Niedrigwasserzone“ aufgefasst und ausgegliedert worden. Aus den jeweiligen Abrostungsgradienten resultieren Abrostungsraten von zumeist 5% bis 20% Zunahme pro Meter Tiefe vom Basisniveau. Auch oberhalb der Wasserlinie wie beispielsweise in der Spritzwasser- oder Luftzone sind höhenabhängige Abrostungsgradienten zu beobachten, so dass sich die Abrostung an einer Stahlspundwand über alle Tiefenbereiche hinweg insgesamt als unetwete Exponentialfunktion der Tiefe darstellen lässt.

Die Abschätzung mittlerer und maximaler Abrostung kann aus den Parametern dieser Tiefenfunktion heraus erfolgen. Als Schätzverfahren können die Konfidenz- und Prognosegrenzen des Regressionsmodells oder die üblichen Formeln zur Bestimmung von statistischen Anteilsbereichen (mit K-Faktoren) nach DIN 55303 (Teil 5) dienen, bei denen als Schätzwert für die Standardabweichung der Abrostungswerte der Standardschätzfehler der loglinearen Regression eingesetzt wird. Für die Parameterbestimmung der exponentiellen Tiefenfunktion sollten oberhalb der Mittel- oder Tideniedrigwasserlinie und bis 5 m darunter Messquerschnitte im vertikalen Abstand von 50 cm festgelegt werden, ab 5 m Tiefe dann im Abstand von 1 m. Für jede Zone sollten mindestens 100 Messwerte verfügbar sein, damit bei der Schätzung von Restwanddicken einer vorgegebenen Mindestpräzision von 10% eingehalten wird.

Als Ausblick auf künftige Bestimmungsverfahren wurde die Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden aus messbaren Einflussgrößen heraus untersucht. Den vorläufigen Ergebnissen zufolge lassen sich die Modellparameter der Tiefenfunktion für die Abrostung wiederum als Funktion anderer Messgrößen darstellen. Die Basisabrostung ist eine Funktion des Spundwandalters, der tiefenabhängige Abrostungsgradient eine Funktion von Alter und Milieu. Aufschluss über die Ursachen des Abrostungsgradient könnten später Gewässerparameter liefern, die ebenfalls einen Gradienten aufweisen und so als Korrosionsfaktoren zu identifizieren sind. Die Reststreuung in den Ultraschallmessungen ist eng an den Profiltyp gebunden und könnte somit eine Materialkonstante abbilden.

Die vorliegende Untersuchung lässt erwarten, dass minimale Restwanddicken später über eine multifaktorielle Vorhersagefunktion aus Drittgrößen grob abgeschätzt werden können. Unabhängig davon könnte mit Hilfe der Weibullverteilung eine univariate Lebensdauerabschätzung von Spundwänden aus kritischen Restwanddicken erfolgen. Ein erster Versuch der Darstellung von Mindestrestwanddicken in Abhängigkeit vom Spundwandalter im Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibullverteilung verlief erfolgreich. Für eine genauere Lebensdauerabschätzung mit univariaten oder multivariaten Verfahren sind jedoch Messwerte erforderlich, die noch von der BAW im Rahmen des ECSC-Projekts erarbeitet werden. Damit ließe sich bereits vor einer Ultraschalluntersuchung das Risiko des möglichen Versagensfalls für ein Bauwerk erfassen, und so dem Küsteningenieurwesen eine wertvolle Planungshilfe liefern.

## Literaturverzeichnis

- Alberts, D. (1997): Korrosionsschäden und Nutzungsdauerabschätzung an Stahlspundwänden und -pfählen im Wasserbau.
- Alberts, D. und Heeling, A. (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 75, S. 83-93.
- Bortz, J. (1989): Statistik für Sozialwissenschaftler. Berlin/Heidelberg.
- Deutsches Institut für Normung (1985): Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung (DIN 50 929).
- DIN-Taschenbuch 224 (1998): Statistik: Auswertungen und Genauigkeitsanalyse. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Berlin: Beuth.
- EAU (1996): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen. (9. Aufl.). Berlin, Ernst & Sohn.
- Gaensslen, H. und Schubö, W. (1973): Einfache und komplexe statistische Analyse. München, Basel.
- Hartung, J. et al. (1987): Statistik. München.
- Johnson, N. L., Kotz, S. (1970): Distributions in Statistics, vol. 1: Continuous Univariate Distributions. Boston: Houghton, Mifflin Company.
- Mood, A. M. und Graybill, F. A. (1963): Introduction to the Theory of Statistics (2nd edition). New York, McGraw-Hill.
- Moshman, J. (1953): Critical Values of the Log-Normal Distribution, Journal of the American Statistical Association, Nr. 8, S. 600-609.
- Siegel, S. (1956): Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences. London: McGraw-Hill.
- Uerkvitz, R. und Goetz, D. (1997): Schätzung von Stoffkonzentrationen in Produkten der Abfallbehandlung bei asymmetrischer Streuung von Analysenwerten, Müll und Abfall, Nr. 10, S. 621-631.
- Uerkvitz, R. und Goetz, D. (1998): Statistical Estimation of Chemical Characteristics for Dispersed Solid Matter, Waste Management & Research, Nr. 16 (1), S. 83-95.

## **Anlage 2**

# **Datenerhebung zur Korrosion an Spundwänden in Binnen- und Küstengewässern**

**R. Uerkvitz (Statsoft Europe GmbH, 2002)**

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
Problemstellung	2
Planungsmethode	3
Multifaktorielle Schätzfunktionen	3
Unabhängigkeit der Einflussgrößen	4
Versuchsplanung (DoE)	5
Archivdaten	6
Kreuzanalyse	6
Korrelationsanalyse	10
Wechselwirkungen	13
Bewertung von Parametern	16
(1) Höhenzonen an Spundwänden	16
(2) Profiltyp	17
(3) Bauwerksalter	18
(4) Gewässermilieu	19
(5) Tideeinflüsse	20
(6) Strömung und Wellen	20
(7) Dränanlagen	20
(8) Liegeplätze und Kontakte	21
(9) Streichrichtung	21
(10) Parameter nach DIN 50929	21
(11) Ergänzende Parameter	22
Untersuchungsprogramm	23
Zusammenfassung	24
Literaturverzeichnis	25

## Problemstellung

Für den Bau von Kaianlagen der Seehäfen und von Uferbefestigungen an Kanal- und Flussstrecken werden seit vielen Jahrzehnten Stahlspundwände und -pfähle eingesetzt, deren Nutzungsdauer durch Korrosionsprozesse begrenzt wird. Eine zuverlässige Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden und -pfählen auf der Grundlage statistischer Vorhersagefunktionen ist derzeit noch nicht möglich. Die Vorschläge des Normenausschuss nach DIN 50929 (Teil 3) erlauben lediglich für bestimmte Eisenwerkstoffe und Stähle eine standortbezogene Rangabstufung der Korrosionswahrscheinlichkeit als Summe von Bewertungsziffern der jeweiligen Gewässereigenschaften. Diese Wahrscheinlichkeiten werden auf einer Ordinalskala von „sehr gering“ bis „hoch“ angegeben und unterscheiden zwischen (a) der Korrosionsart (Flächenkorrosion oder Mulden- und Lochkorrosion), sowie (b) der relativen Höhenlage zur Wasserlinie (Unterwasserbereich oder Wasser/Luft-Grenze).

Die BAW hat mit in einer statistischer Datenbankauswertung für 140 Bauwerke im Salz- und Süßwasserbereich gezeigt, dass die Nutzungsdauer von Stahlspundwandbauwerken vorwiegend aufgrund von Durchrostungen in Form von Mulden- und Narbenkorrosion begrenzt wird (s. EAU 1996). Die geschätzten Maximalwerte der Abrostung lagen etwa um das Vierfache höher als die zugehörigen Mittelwerte. Aus einem Vergleich der geschätzten maximalen Abrostung für Bauwerke unterschiedlichen Alters ergab sich, dass für Spundwände mit Ausgangswanddicken von 9 – 14 mm bereits nach 20- bis 30-jähriger Standzeit mit Durchrostungen zu rechnen ist.

Eine genauere Abschätzung des Zeitpunktes für die Durchrostung ist aufgrund hoher Streuung der maximalen Abrostungswerte altersgleicher Bauwerke erst möglich, wenn die standortabhängigen Unterschiede in der Korrosionswahrscheinlichkeit quantifiziert werden können. Da das derzeit verfügbare Datenmaterial keine hinreichende Basis für die Entwicklung einer Vorhersagefunktion der Nutzungsdauer von Stahlspundbauwerken bietet, plant die BAW eine Untersuchung zur Klärung der wichtigsten Korrosionsfaktoren in Binnen- und Küstengewässern. Diese Untersuchung wird Bestandteil eines von der *European Commission of Steel and Coal (ECSC)* geförderten Forschungsvorhabens. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Grundlage für die geplante Datenerhebung in Orientierung an den Erfordernissen der sich später anschließenden statistischen Auswertungen zu erarbeiten.

## Planungsmethode

Ausgangspunkt für die nachfolgende Analyse ist eine Parameterliste der BAW, in der potenzielle Einflussfaktoren für die Korrosion an Stahlspundwänden aufgeführt werden. Diese Liste umfasst neben den Gewässerparametern nach DIN 50929 Standortbedingungen, deren Relevanz aus bisherigen Erfahrungen der BAW abgeleitet wird. Zur genaueren Einschätzung möglicher Korrosionsfaktoren dient eine Datenbank der BAW-Hamburg mit Messungen von Wanddicken an etwa 300 Bauwerken. Als Ergänzung und Interpretationshilfe stehen Ergebnisse der Werkstoffforschung zur Verfügung.

### **Multifaktorielle Schätzfunktionen**

Die Qualität der zu erhebenden Daten soll später eine Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden aus den gemessenen Einflussgrößen ermöglichen. Diese Abschätzung erfolgt mit einer multifaktoriellen Vorhersagefunktion, die über schrittweise multiple Regression bestimmt wird. Ein multiples lineares Modell fasst eine abhängige Größe  $Y$  als gewichtete Summe einer oder mehrerer unabhängiger Größen (Prädiktoren)  $X_1 \dots X_K$  auf, beispielsweise in der Form:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_K X_K + \dots + e. \quad (\text{A2-1})$$

Darin kann  $Y$  ein Korrosionsparameter sein (mittlere oder maximale Abrostung),  $X_K$  eine zugehörige Einflussgröße (z.B. Alter des Bauwerks, Chlorid-Gehalt des Gewässers), und  $e$  stellt eine normalverteilte Zufallsgröße (Fehler, Residuum) dar. Damit die Koeffizienten  $b_0 \dots b_K$  über die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate berechnet werden können, müssen die Prädiktoren  $X_1 \dots X_K$  voneinander unabhängig sein (d.h. unkorreliert, orthogonal).

Der Unterschied von einer Korrosionsabschätzung nach Ausdruck (A2-1) zur Bestimmung von Korrosionswahrscheinlichkeiten nach DIN 50929 (Teil 3) liegt in der Genauigkeit, weil hier anstelle von Rangabstufungen (gering – hoch) konkrete Zahlenwerte für Korrosionsparameter aus den zugehörigen Messwerten der Einflussfaktoren berechnet werden. Das Rechenverfahren der Schätzung als Summe von gewichteten Werten ist in beiden Fällen gleich und erfordert daher im Anwendungsfall keine höheren mathematischen Kenntnisse.

Die Wahl eines geeigneten Vorhersagemodells und die Datenerhebung stellen allerdings hohe Ansprüche an die Bearbeitung. Obiges Modell (A2-1) hat zwar eine einfache und übersichtliche Struktur, wird aber selten den komplexen Zusammenhängen in multifaktoriellen Systemen gerecht. Wenn es Wechselwirkungen (Interaktionen) zwischen den Einflussfaktoren gibt, die Wirkung  $Y$  also je nach Kombination der Ausprägungen  $X_1 \dots X_K$  völlig unterschiedlich verläuft, würde Ausdruck (A2-1) eine schlechte Anpassung an die Beobachtungswerte darstellen und müsste in folgender Weise erweitert werden:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_K X_K + \dots + b_{KJ} X_K X_J + e. \quad (\text{A2-2})$$

Die multiplikativen Terme  $X_K X_J$  in (A2-2) repräsentieren die linearen Zweifach-Interaktionen zwischen den Einflussgrößen und die Koeffizienten  $b_{kj}$  deren Gewicht in der Vorhersagefunktion. Ausdruck (A2-2) lässt sich wiederum durch Interaktionen höheren Grades (Dreifach-

Interaktionen, Vierfach-Interaktionen, usw.) erweitern, die in der Praxis jedoch oft eine untergeordnete Rolle spielen.

Wenn die Wirkung der Einflussgrößen nicht in linearer Weise, sondern beispielsweise quadratisch oder kubisch verläuft, ist je nach Datenlage Ausdruck (A2-1) durch ein Polynom höheren Grades zu ersetzen:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_1^2 + b_3 X_2^3 + \dots + b_K X_K^N + e \quad (\text{A2-3})$$

das analog zu (A2-2) durch Interaktionsterme erweitert werden kann. Ein quadratisches Modell mit linearen Zweifach-Interaktionen hat beispielsweise die Form:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_1^2 + b_{13} X_1 X_2 + \dots + b_K X_K + b_I X_I^2 + b_{KJ} X_K X_J + e. \quad (\text{A2-4})$$

Ein Korrosionsparameter  $Y$  wie *maximale Abrostung* und die zugehörigen Einflussgrößen  $X_K$  (Alter, Gewässereigenschaften) lassen sich entweder in direkter Form als Messwert oder als transformierter Wert (z.B. Logarithmus) in obige Ausdrücke (A2-1 – A2-3) einbringen. Qualitative Faktoren wie *Gewässertyp* oder *Profiltyp* werden indessen nicht unmittelbar, sondern in kodierter Form als *Dummy-Variablen* in ein Vorhersagemodell eingebracht. Falls es erforderlich ist, können obige lineare Ausdrücke auch mit nicht-linearen Funktionen (z.B. logistische) zu einer übergreifenden Schätzfunktion verschmolzen werden. Weitere Einzelheiten zur Entwicklung von Vorhersagemodellen werden ausführlich in der statistischen Fachliteratur beschrieben (s. Gaensslen und Schubö 1973, Montgomery 1995).

### **Unabhängigkeit der Einflussgrößen**

Die oben dargestellten Vorhersagemodelle stellen unterschiedliche Anforderungen an die zu erhebenden Daten. Alle Modelle fordern gleichermaßen die Unabhängigkeit (Orthogonalität) von Prädiktoren, damit Koeffizienten der Vorhersagegleichung berechnet werden können. Wenn Einflussfaktoren miteinander korrelieren, lässt sich deren Wirkung auf die Zielgröße nicht mit Regressionsverfahren auseinander halten.

Faktoren können „naturgemäß“ voneinander abhängig sein, wie beispielsweise Chlorid-Gehalte und Leitfähigkeit, oder durch ungünstige Auswahl von Beobachtungsfällen (Stichprobenstruktur). Bei naturgemäßer Abhängigkeit von Faktoren kann immer nur jeweils einer davon in die Schätzfunktion eingebunden werden. Die jeweils anderen können aufgrund verwandten Informationsgehalts (Redundanz) nichts zur Vorhersage beitragen. Eine unausgewogene Stichprobe tritt dagegen zumeist bei Archivdaten auf, so auch bei der Datenbank der BAW-Hamburg mit Wanddicken von Spundwänden: Bauwerke an Liegeplätzen sind häufiger im Salzwasserbereich als im Süßwasserbereich untersucht worden, so dass die beiden Standortmerkmale *Liegeplatz* und *Milieu* miteinander korrelieren (ohne dass naturgemäß ein Zusammenhang besteht). Auch andere Standortfaktoren variieren nicht unabhängig voneinander, weil die Struktur von Archivdaten zufällig aus der Auftragslage entstanden ist.

### ***Versuchsplanung (DoE)***

Die erforderliche Unabhängigkeit von Faktoren kann entweder (a) über ein systematisches Experiment (*Design of Experiments DoE*) oder (b) durch gezielte Standortauswahl gleicher Qualität erreicht werden. Experimente bieten den Vorteil einer Kontrolle aller beteiligten Faktoren, sind aber bei der Klärung von Korrosionsraten für Spundwände aus Kostengründen nicht durchführbar. Eine Standortauswahl analog zum Versuch bedeutet, dass beispielsweise der Salzeinfluss auf die Korrosion durch einen Vergleich von Bauwerken im Salz- und Süßwasserbereich durchgeführt wird. Wenn zusätzlich noch der Alterseinfluss geklärt werden soll, erfordert die Unabhängigkeit von Faktoren eine Standortauswahl mit alten Bauwerken im Salz- und Süßwasserbereich sowie jungen Bauwerken im Salz- und Süßwasserbereich. Bei Hinzunahme weiterer Einflussgrößen steigt die Anzahl von Kombinationen nach dem Potenzgesetz an und überschreitet das tatsächlich vorhandene Spektrum der Standortbedingungen (siehe Abschnitt *Archivdaten*).

Ein weiterer Unterschied zwischen Standortauswahl und klassischen DoE-Methoden liegt in der mangelnden Kontrollierbarkeit vieler Korrosionsfaktoren, insbesondere der chemischen Gewässereigenschaften nach DIN 50929 (Teil 3). Da chemische Parameter wie Chlorid, Sulfat, Calcium, pH-Wert und Redox-Potenzial ebenso wie viele andere Gewässereigenschaften für die bisher untersuchten Bauwerke derzeit nicht verfügbar sind, kann auch keine gezielte Standortauswahl nach daran orientierten Kriterien erfolgen. Eine Auswahl nach Süß- und Salzwassermilieu dürfte mit den Chlorid-Konzentrationen korrespondieren, führt aber leider zur hohen Redundanz in Bezug auf andere Parameter wie Sulfat und Calcium.

Die in der vorliegenden Arbeit vertretene Vorgehensweise stellt also einen praxisgerechten Kompromiss zwischen der üblichen DoE-Methodik und dem derzeitigen Kenntnisstand für korrosionsgefährdete Bauwerke in Binnen- und Küstengewässern dar. Wichtige Einflussgrößen wie *Spundwandalter* und *Gewässermilieu* sollen als „kontrollierte“ Faktoren die Standortauswahl bestimmen, alle übrigen Einflussgrößen können mangels Regelmechanismen lediglich als „freie“ Faktoren örtlich gemessen werden. Aufgrund der zu erwartenden Redundanzen bei den freien Faktoren muss allerdings deren Beitrag zur Abschätzung der Korrosion zunächst offen bleiben.

## Archivdaten

Die BAW-Datenbank mit Wanddickenmessungen (WaDiMe) für etwa 240 Bauwerke mit Stahlspundwänden erlaubt eine vorsichtige Bewertung der Einflüsse bestimmter Rahmenparameter auf die Korrosion mit Stahlspundwänden und deren Kombinationsspektrum. Aus Kostengründen soll bei dem geplanten Vorhaben vorwiegend auf die bereits untersuchten Bauwerke zurückgegriffen werden, weil für diese bereits Korrosionsparameter und Daten zu einigen Standortfaktoren verfügbar sind. Die Auswahl von Bauwerken für das Versuchsprogramm orientiert sich an den oben erläuterten DoE-Kriterien, d.h. an den am jeweiligen Standort repräsentierten Kombinationen von speziellen Korrosionsbedingungen. Zur Vervollständigung des Programms müssen dann später für eine begrenzte Zahl zusätzlicher Bauwerke Daten von anderen Ämtern angefragt oder neu erhoben werden. Für alle Bauwerke sind Gewässerparameter nach DIN 50929 (Teil 3) und weitere Parameter zu messen, auf die weiter unten noch eingegangen wird.

## Kreuzanalyse

In das Untersuchungsprogramm sollen nur die rund 200 Bauwerke ohne erkennbaren Korrosionsschutz aufgenommen werden, da sonst die tatsächlichen Korrosionseinflüsse in den Messwerten nicht klar zum Ausdruck kommen. Das Altersspektrum der Bauwerke reicht von 1 bis 67 Jahren und lässt sich in drei gleich große Klassen einteilen: jung (1-18 Jahre), mittel (19-30 Jahre) und alt (31-67 Jahre). Diese Gruppeneinteilung soll später die Berechnung nichtlinearer Zeitfunktionen für die Abrostung ermöglichen, da sich die Abrostungsgeschwindigkeiten nach bisherigen Erfahrungen über die Zeit nicht konstant verhalten.

Alle weiteren Einflussfaktoren müssen mit ihren Ausprägungen (z.B. Gewässermilieu) in diesen Altersgruppen vertreten sein, damit deren zeitunabhängiger Einfluss auf die Korrosion rechnerisch erfassbar ist. Das ist leider bei den Profiltypen und einigen anderen potenziellen Faktoren aus der Parameterliste der BAW nicht der Fall (Tabelle A2-1). Nur die Spundwände mit U-Profilen (insbesondere mit rechtwinkligem Querschnitt) finden sich durchgehend in allen Altersgruppen. Die Z-Profile sind vorwiegend in älteren Bauwerken vertreten, die gemischten Spundwände mit Einfachträgerpfahl (EA- und EI-Profile) dagegen vorwiegend in jüngeren. Andere Profiltypen sind im Datenbestand nur vereinzelt zu finden.

Tabelle A2-1: Kreuztabellierung von Altersgruppe und Profiltyp für Spundwände

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank)											
Spundwände											
Häufigkeiten von Profiltypen											
Altersgruppe	EA	UR	EI	ZG	ZR	UG	TW	DI	RP	D3	Zeile Gesamt
jung <18 J.	5	32	14	2	0	13	0	1	0	0	67
mittel 19 - 30 J.	10	43	0	2	5	3	2	0	1	0	66
alt > 31J.	2	49	0	4	11	1	0	0	0	1	68
Alle	17	124	14	8	16	17	2	1	1	1	201

Da sich somit die unterschiedliche Reaktion der Profiltypen auf die Korrosion nicht vom Zeitfaktor trennen lässt, muss die geplante Untersuchung auf die 141 Spundwände mit U-Profilen beschränkt bleiben. Die abweichende Korrosionstiefe anderer Profiltypen kann nur exemplarisch

innerhalb einer Altersgruppe erfasst werden (z.B. zwischen U- und E-Profilen bei jüngeren Bauwerken).

Die jeweilige Lage der Bauwerke wird in der BAW-Datenbank über einen nach Gewässer und Tideeinfluss kombinierten Schlüssel definiert. Um die Standortauswahl später besser in Beziehung zu Gewässereigenschaften nach DIN 50929 (Teil 3) setzen zu können, sollte dieser Schlüssel besser nach *Milieu* und *Tide* getrennt werden. Als grobe Kategorien ergeben sich für das Gewässermilieu „süß – brackisch – salzig“, die mangels genauer Messdaten zunächst aus dem Kombischlüssel *Lage* entnommen wurden. Eine Kreuztabellierung von *Altersgruppe* und *Gewässermilieu* für Spundwände mit U-Profilen zeigt, dass solche Bauwerke im Brackwasserbereich überwiegend zur älteren Gruppe gehören (Tabelle A2-2). Dadurch besteht die Gefahr, dass durch Hinzunahme nur *eines* weiteren potenziellen Korrosionsfaktors Kombinationen auftreten, die im tatsächlichen Spektrum der Standortfaktoren nicht mehr vertreten sind (d.h. leere Zellen im Versuchsdesign).

Tabelle A2-2: Kreuztabellierung von Alter und Milieu für U-Profile

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank) Spundwände mit U-Profil Häufigkeiten von Milieutypen				
Altersgruppe	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt
jung < 18 J.	23	7	15	45
mittel 19 - 30 J	17	8	21	46
alt > 31 J.	13	20	17	50
Alle	53	35	53	141

Dieses Problem wird noch durch die Bedeutung von Höhenzonen der Korrosion verschärft. Nach bisherigen Erfahrungen der BAW sind Abrostungen in der Spritzwasserzone (SPWZ) und Niedrigwasserzone (NWZ) für die Dauerhaftigkeit der Bauwerke von Bedeutung, die Abrostungen in der Niedrigwasserzone (NWZ) und Unterwasserzone (UWZ) dagegen für die Tragsicherheit. Aus Kostengründen muss die Untersuchung an Bauwerken vorgenommen werden, bei denen Korrosionsmessungen in allen drei Höhenzonen möglich sind. Es verbleiben also nur noch 83 Bauwerke aus der Datenbank, von denen nur sehr wenig junge im brackischen Milieu stehen (Tabelle A2-3).

Tabelle A2-3: Bauwerke mit Korrosionsmessungen in drei Höhenzonen

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank) Spundwände mit U-Profil, alle Höhenzonen Häufigkeiten von Milieutypen				
Altersgruppe	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt
jung < 18 J.	22	1	9	32
mittel 19 - 30 J	11	3	16	30
alt > 31 J.	5	6	10	21
Alle	38	10	35	83

Durch Hinzunahme von beispielsweise An- oder Abwesenheit von Tide am Standort der Spundwand treten bereits mehrere leere Zellen im Versuchsdesign auf. Die Kreuztabellierung für die genannten Merkmale zeigt, dass in der BAW-Datenbank keine Spundwände mit U-Profilen im tidebeeinflussten Brackwasser und Korrosionsmessungen in allen Höhenzonen aufgeführt sind (Tabelle A2-4).

Tabelle A2-4: Kreuztabellierung von Alter, Milieu und Tide

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank) Spundwände mit U-Profil, alle Höhenzonen Häufigkeiten von Milieutypen und Tide					
Altersgruppe	Tide	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt
jung	ohne Tide	21	1	5	27
jung	mit Tide	1	0	4	5
Ges.		22	1	9	32
mittel	ohne Tide	11	3	14	28
mittel	mit Tide	0	0	2	2
Ges.		11	3	16	30
alt	ohne Tide	3	6	8	17
alt	mit Tide	2	0	2	4
Ges.		5	6	10	21
Spalte Ges.		38	10	35	83

Gleiches gilt auch für die Hinzunahme anderer Standortfaktoren, wie beispielsweise An- oder Abwesenheit von Strömung im lokalen Gewässer. Die Mehrzahl der betrachteten Bauwerke (75 von 83) befindet sich an strömungsarmen Standorten (Tabelle A2-5).

Tabelle A2-5: Kreuztabellierung von Alter, Milieu und Strömung

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank) Spundwände mit U-Profil, alle Höhenzonen Häufigkeiten von Milieutypen und Strömung					
Altersgruppe	Strömung	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt
jung	nein	19	1	9	29
jung	ja	3	0	0	3
Ges.		22	1	9	32
mittel	nein	11	3	16	30
mittel	ja	0	0	0	0
Ges.		11	3	16	30
alt	nein	1	6	9	16
alt	ja	4	0	1	5
Ges.		5	6	10	21
Spalte Ges.		38	10	35	83

Aus einer Kreuztabellierung der Standorte nach *Milieu* und *Liegeplatz* lässt sich entnehmen, dass nur 3 von 38 Spundwänden im Süßwassermilieu an Liegeplätzen für Schiffe stehen und auch nur wenige im Brackwasserbereich (Tabelle A2-6). Insgesamt treten hier aber mehr Kombinationen im tatsächlichen Standortspektrum auf, als bei den korrespondierenden Kombinationen mit *Tide* oder *Strömung* (siehe Tabellen A2-4 und -5).

Tabelle A2-6: Kreuztabellierung von Alter, Milieu und Liegeplatz

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank) Spundwände mit U-Profil, alle Höhenzonen Häufigkeiten von Milieutypen und Liegeplatz						
Altersgruppe	Liegeplatz	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt	
jung	nein	21	1	1	23	
jung	ja	1	0	8	9	
Ges.		22	1	9	32	
mittel	nein	10	0	6	16	
mittel	ja	1	3	10	14	
Ges.		11	3	16	30	
alt	nein	4	2	3	9	
alt	ja	1	4	7	12	
Ges.		5	6	10	21	
Spalte Ges.		38	10	35	83	

Die aus vier Standortfaktoren resultierenden Kombinationen werden kaum noch vom Spektrum der Standortbedingungen für die Bauwerke aus der BAW-Datenbank abgedeckt. Wenn für alle Altersgruppen die Bauwerke nach Milieu, Tide und Liegeplatz ausgezählt werden, finden sich für fast die Hälfte der insgesamt 36 möglichen Kombinationen keine entsprechenden Standorte in der Datenbank (Tabelle A2-7). Auch die Kreuztabellierung anderer Merkmale liefert solche Ergebnisse.

Tabelle A2-7: Kreuztabellierung von Alter, Milieu, Tide und Liegeplatz

Daten: BAW (WaDiMe-Datenbank) Spundwände mit U-Profil, alle Höhenzonen Häufigkeiten von Milieu, Tide und Liegeplatz						
Altersgruppe	Tide	Liegeplatz	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt
jung	ohne Tide	nein	20	1	1	22
jung	ohne Tide	ja	1	0	4	5
Ges.			21	1	5	27
jung	mit Tide	nein	1	0	0	1
jung	mit Tide	ja	0	0	4	4
Ges.			1	0	4	5
mittel	ohne Tide	nein	10	0	6	16
mittel	ohne Tide	ja	1	3	8	12
Ges.			11	3	14	28
mittel	mit Tide	nein	0	0	0	0
mittel	mit Tide	ja	0	0	2	2
Ges.			0	0	2	2
alt	ohne Tide	nein	2	2	3	7
alt	ohne Tide	ja	1	4	5	10
Ges.			3	6	8	17
alt	mit Tide	nein	2	0	0	2
alt	mit Tide	ja	0	0	2	2
Ges.			2	0	2	4
Spalte Ges.			38	10	35	83

Daraus folgt für das geplante Untersuchungsprogramm, dass bestenfalls bis zu drei Standortbedingungen als „kontrollierte“ Einflussgrößen berücksichtigt werden können, alle übrigen jedoch lediglich als „freie“ Faktoren. Der überwiegende Anteil an möglichen Korrosionsfaktoren dürfte sich also nach Abschluss der Messungen als redundant erweisen und daher nur sehr wenig zur Klärung der Korrosionsursachen beitragen. Umso größer ist das Gewicht der durch Standortwahl kontrollierten Faktoren und die Möglichkeit deren späterer Substitution durch aussagekräftigere Parameter (z.B. „Milieu“ durch „Chlorid- oder Sulfatkonzentration“). Im nachfolgenden Abschnitt wird daher die Parameterliste der BAW auf Grundlage der Datenbank auf Redundanzen und korrosionsrelevante Informationsgehalte hin untersucht.

### ***Korrelationsanalyse***

Die oben dargestellte Häufigkeitsanalyse für 83 Spundwände mit U-Profilen und Korrosionsmessungen in allen Höhenzonen hat eine Unausgewogenheit im Spektrum der kombinierten Standortfaktoren gezeigt, die notwendig in Korrelationen zwischen den potenziellen Korrosionsfaktoren resultiert. Solche Korrelationen drücken verwandte Informationsgehalte (Redundanzen) aus, die eine gemeinsame Einbindung der beteiligten Größen in multifaktorielle Vorhersagemodelle ausschließen.

Die BAW-Datenbank und später zugänglich gemachte Ergänzungen zeigen für die hier betrachtete Untergruppe von Bauwerken bei einigen Parametern einseitige, manchmal auch fehlende Informationen. So wurde nur bei 2 von den 83 Spundwänden ein nennenswerter Güterumschlag dokumentiert. Für eine Analyse der Streichrichtung (d.h. Orientierung der Spundwand zur Himmelsrichtung) fehlen derzeit noch in 40% der Fälle entsprechende Angaben. Auf das Übergewicht strömungsarmer Standorte ist oben bereits hingewiesen worden.

Für die verbleibenden Parameter werden lineare Korrelationskoeffizienten berechnet, wobei die Alters- und Milieugruppen einfach auf einer Ordinalskala von 1 – 3 und die dichotomen Merkmale (z.B. An- oder Abwesenheit von Tide, Wellen, Liegeplätzen, Kontakte mit Fendern etc., sowie Dränage) als binäre Variablen eingebracht werden. Die Korrelationsmatrix zeigt, dass der Parameter *Liegeplatz* mit allen übrigen Parametern bis auf *Wellen* signifikant korreliert, und somit nach derzeitiger Datenlage keinen eigenständigen Beitrag zur Aufklärung von Korrosionsursachen leisten kann (Tabelle A2-8).

Die übrigen Parameter zeigen vereinzelt auch signifikante Korrelationen, sind also ebenfalls nicht frei von Redundanzen. Das Gewässermilieu korreliert mit Altersgruppe und Wellen, d.h. an Seestandorten finden sich häufiger alte Bauwerke in exponierter Lage. Außerdem zeigen die entsprechenden Korrelationskoeffizienten, dass alte Bauwerke häufiger mit *Dränage* ausgestattet sind und *Kontakte* mit scheuernden Gegenständen haben (z.B. Fender, Schlengel, Schiffe). Diese Parameter können also nur einen eingeschränkten Beitrag in Vorhersagemodellen leisten.

Tabelle A2-8: Korrelation zwischen Standortfaktoren von Spundwänden

Variable	Korrelationen (SpundwändeSubsample)						
	Markierte Korrelationskoeffizienten signifikant für $p < .05000$						
	Altersgruppe	Milieu	Tide	Wellen	Liegeplatz	Kontakte	Dränanlage
Altersgruppe	1.0000	<b>.2872</b>	.0206	.1597	<b>.2365</b>	<b>.3998</b>	<b>.2877</b>
	N=83	<b>N=83</b>	N=83	N=83	<b>N=83</b>	<b>N=72</b>	<b>N=76</b>
	p= ---	<b>p=.008</b>	p=.853	p=.149	<b>p=.031</b>	<b>p=.001</b>	<b>p=.012</b>
Milieu		1.0000	.2047	<b>.5077</b>	<b>.6057</b>	.1506	.1703
		N=83	N=83	<b>N=83</b>	<b>N=83</b>	N=72	N=76
		p= ---	p=.063	<b>p=.000</b>	<b>p=.000</b>	p=.207	p=.141
Tide			1.0000	-.1009	<b>.2419</b>	.0865	-.0876
			N=83	N=83	<b>N=83</b>	N=72	N=76
			p= ---	p=.364	<b>p=.028</b>	p=.470	p=.452
Wellen				1.0000	-.0462	-.0909	.1111
				N=83	N=83	N=72	N=76
				p= ---	p=.678	p=.447	p=.339
Liegeplatz					1.0000	<b>.4671</b>	<b>.3070</b>
					N=83	<b>N=72</b>	<b>N=76</b>
					p= ---	<b>p=.000</b>	<b>p=.007</b>
Kontakte						1.0000	.1900
						N=72	N=67
						p= ---	p=.124
Dränanlage							1.0000
							N=76
							p= ---

Dieser Sachverhalt wird deutlich, wenn die Korrelation zwischen möglichen Einflussgrößen und Korrosionsmaßen für Spundwände berechnet und dann mit den zugehörigen partiellen Korrelationskoeffizienten verglichen wird. Die Parameter *Altersgruppe*, *Milieu*, *Wellen* und *Dränanlage* zeigen für alle Höhenzonen signifikante Korrelationen mit der (logarithmierten) mittleren und maximalen Abrostung (LnMwSpw bis LnMaxUw). Der Tideeinfluss ist dagegen in keiner Höhenzone signifikant und die Kontakte mit scheuernden Gegenständen zeigen zumindest in den beiden oberen Zonen keinen Einfluss auf die (logarithmierte) mittlere Abrostung (Tabelle A2-9).

Diese Korrelationen können aber teilweise auch auf indirekten Beziehungen beruhen, da die Standortfaktoren ja selbst miteinander korrelieren (siehe obige Korrelationsmatrix in Tabelle A2-8). Aus diesem Grunde sind *partielle Korrelationskoeffizienten* aussagekräftiger, da bei denen die indirekten Beziehungen über Partialbildung herausgerechnet werden (d.h. rechnerische Kontrolle von Drittgrößen). Die partielle Korrelation zwischen Altersgruppe und logarithmierten Korrosionsmaßen beispielsweise kontrolliert die indirekten Beziehungen mit allen übrigen Standortparametern (Milieu, Tide, usw.).

Tabelle A2-9: Korrelation zwischen Standortfaktoren und Korrosionsmaßen

Variable	Korrelationen (SpundwändeSubsample) Markierte Korr. signifikant für $p < .05000$					
	LnMwSpw	LnMaxSpw	LnMwNw	LnMaxNw	LnMwUw	LnMaxUw
Altersgruppe	<b>.4599</b> N=75 p=.000	<b>.4940</b> N=75 p=.000	<b>.7034</b> N=75 p=.000	<b>.7025</b> N=75 p=.000	<b>.6941</b> N=75 p=.000	<b>.6276</b> N=75 p=.000
Milieu	<b>.5422</b> N=75 p=.000	<b>.5787</b> N=75 p=.000	<b>1</b> N=75 p=.000	<b>.7114</b> N=75 p=.000	<b>.5871</b> N=75 p=.000	<b>.6600</b> N=75 p=.000
Tide	-.0365 N=75 p=.756	-.0373 N=75 p=.750	.0519 N=75 p=.658	.0944 N=75 p=.421	.0200 N=75 p=.865	.1254 N=75 p=.284
Wellen	<b>.2925</b> N=75 p=.011	<b>.2362</b> N=75 p=.041	<b>.4293</b> N=75 p=.000	<b>.3451</b> N=75 p=.002	<b>.3771</b> N=75 p=.001	<b>.2935</b> N=75 p=.011
Kontakte	.0386 N=66 p=.758	<b>.2607</b> N=66 p=.034	.2220 N=66 p=.073	<b>.2819</b> N=66 p=.022	<b>.3417</b> N=66 p=.005	<b>.3912</b> N=66 p=.001
Dränanlage	<b>.3897</b> N=70 p=.001	<b>.3574</b> N=70 p=.002	<b>.2940</b> N=70 p=.014	<b>.3205</b> N=70 p=.007	<b>.3276</b> N=70 p=.006	<b>.2947</b> N=70 p=.013

Die Übersicht der partiellen Korrelationen zeigt, dass bei rechnerischer Konstanthaltung der jeweils anderen Parameter nur noch Altersgruppe und Milieu die Abrostung signifikant beeinflussen (Tabelle A2-10). Die Parameter *Kontakte* und *Dränanlage* zeigen zumindest eine signifikante partielle Korrelation mit der mittleren Abrostung im Spritzwasserbereich, sonst aber keine.

Tabelle A2-10: Partielle Korrelation zwischen Faktoren und Korrosionsmaßen

Variable	Partielle Korrelationen (SpundwändeSubsample) Markierte Korrelation signifikant für $p < .05000$					
	LnMwSpw	LnMaxSpw	LnMwNw	LnMaxNw	LnMwUw	LnMaxUw
Altersgruppe	<b>0.3918</b> N=75 p=.002	<b>0.3456</b> N=75 p=.006	<b>0.7239</b> N=75 p=.000	<b>0.7071</b> N=75 p=.000	<b>0.6134</b> N=75 p=.000	<b>0.5231</b> N=75 p=.000
Milieu	<b>0.4799</b> N=75 p=.000	<b>0.5317</b> N=75 p=.000	<b>0.6688</b> N=75 p=.000	<b>0.7028</b> N=75 p=.000	<b>0.4573</b> N=75 p=.000	<b>0.5861</b> N=75 p=.000
Tide	-0.1462 N=75 p=.261	-0.2077 N=75 p=.108	-0.1043 N=75 p=.424	-0.0629 N=75 p=.630	-0.0930 N=75 p=.476	-0.0014 N=75 p=.991
Wellen	-0.0823 N=75 p=.529	-0.1462 N=75 p=.261	0.0913 N=75 p=.484	-0.0897 N=75 p=.492	0.1341 N=75 p=.303	-0.0514 N=75 p=.694
Kontakte	<b>-0.2645</b> N=66 p=.039	0.0352 N=66 p=.788	-0.1568 N=66 p=.227	-0.0704 N=66 p=.590	0.1162 N=66 p=.373	0.1993 N=66 p=.124
Dränanlage	<b>0.3099</b> N=70 p=.015	0.2265 N=70 p=.079	0.0949 N=70 p=.467	0.1543 N=70 p=.235	0.1373 N=70 p=.291	0.1062 N=70 p=.415

Aus obiger partieller Korrelationsanalyse darf jedoch nicht abgeleitet werden, dass die nicht signifikanten Größen keinerlei Bedeutung für die Korrosionsprozesse haben. Bei einer Datenstruktur aus einem geplanten Versuch, der die Unabhängigkeit von Einflussgrößen sichert, würden keine indirekten Beziehungen auftreten und damit Korrelationen nach Auspartialisierung stabil bleiben.

### Wechselwirkungen

In jedem Fall sind zusätzlich die kombinierten Wirkungen der potenziellen Korrosionsfaktoren in Form von Wechselwirkungen (Interaktionen) zu untersuchen. Mangels besetzter Kombinationen im Standortpektrum der untersuchten Bauwerke lassen sich nur knapp die Hälfte der möglichen Interaktionen (7 von 15) zwischen den sechs Faktoren schätzen (Tabelle A2-11). Die Berechnung der Signifikanzen erfolgt mit Regressionsanalyse im Allgemeinen Linearen Modell, in das die kategorialen Größen *Altersgruppe* und *Milieu* über Dummy-Kodierung eingebunden sind.

Tabelle A2-11: Wechselwirkungen zwischen Standortfaktoren für Korrosion (p-Werte)

ALLGEM. LIN. MODELL Interaktionseffekt A * B	Univariate Ergebnisse für lineare Zweifach-Interaktionen (7 von 15 schätzbar) Sigmabeschränkte Parametrisierung, Effektive Hypothesen-Dekomposition Signifikanzlevel: $p < 0.05$						
	Freiheits- grad	LnMwSpw p	LnMaxSpw p	LnMwNw p	LnMaxNw p	LnMwUw p	LnMaxUw p
Konstante	1	0.053	0.000	0.001	0.000	0.172	0.000
Altersgruppe*Tide	2	0.557	0.951	0.722	0.619	0.971	0.910
Altersgruppe*Wellen	2	0.887	0.705	0.148	0.221	0.164	0.275
<b>Altersgruppe*Kontakte</b>	2	<b>0.042</b>	0.321	0.057	<b>0.046</b>	0.565	0.305
Tide*Kontakte	1	0.761	0.684	0.791	0.987	0.566	0.804
<b>Milieu*Dränanlage</b>	2	<b>0.025</b>	<b>0.013</b>	<b>0.002</b>	<b>0.001</b>	<b>0.022</b>	<b>0.000</b>
Wellen*Dränanlage	1	0.659	0.706	0.734	0.633	0.606	0.287
<b>Kontakte*Dränanlage</b>	1	0.524	0.061	0.052	<b>0.001</b>	0.065	<b>0.035</b>
Fehler	50						
Gesamt	61						

Eine signifikante Wechselwirkung zwischen *Milieu* und *Dränung* ist für die Abrostungen in allen Höhenzonen zu verzeichnen. Daneben treten für maximale Abrostungen in der Niedrig- und Unterwasserzone Interaktionen zwischen *Kontakt* und *Dränung* auf, außerdem vereinzelt in unterschiedlichen Zonen zwischen Kontakt und Altersgruppe.

Die meisten Wechselwirkungen beziehen sich auf maximale Abrostung in der Niedrigwasserzone, weil die hohen Korrosionsraten dieser Zone wohl durch ein besonderes Zusammenwirken der Standortbedingungen hervorgerufen werden. Bei den hier betrachteten Bauwerken wird die Korrosion also zusätzlich zu den bereits identifizierten Einflussgrößen wie *Alter* und *Gewässermilieu* durch bestimmte Wechselwirkungen mit der lokalen Dränage- und Kontaktsituation geprägt.

Folgende Hypothesen lassen sich aus den geschätzten Interaktionen ableiten: Im Süß- und Salzwasser beschleunigen Dränanlagen die Korrosion in allen Höhenlagen, während eine Dränage in brackischen Gewässern die Korrosion vermindern (Bild A2-1).

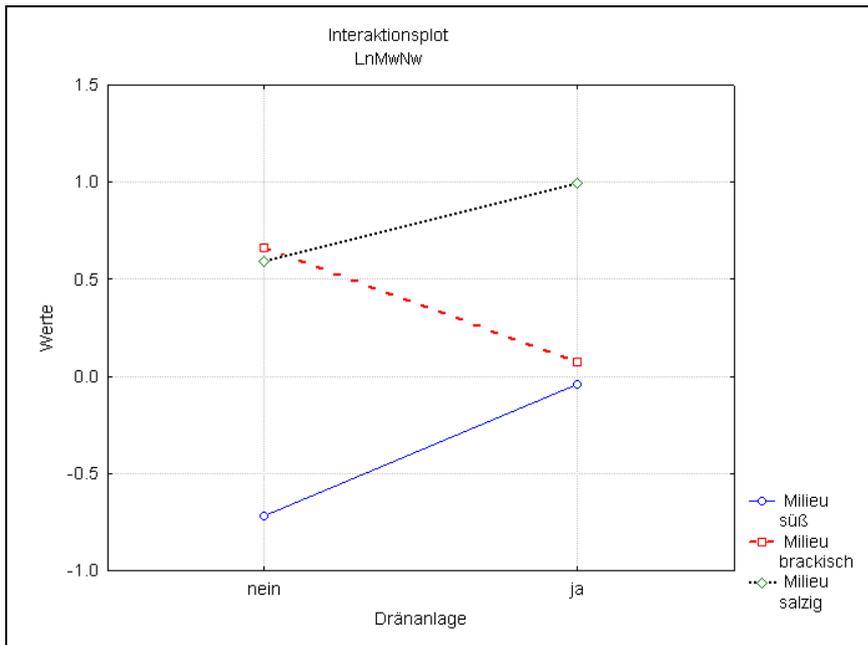


Bild A2-1: Wechselwirkungen zwischen Dränage und Milieu für die Korrosion

Auch bei Kontakten der Spundwand mit scheuernden Gegenständen (Fendern, Schiffen) kann eine Dränage die maximale Abrostung vermindern, ohne solche Kontakte fördert Dränage indes- sen sogar die Abrostung (Bild A2-2). In beiden Fällen wird also die Wirkung eines Faktors durch einen anderen Faktor umgedreht.

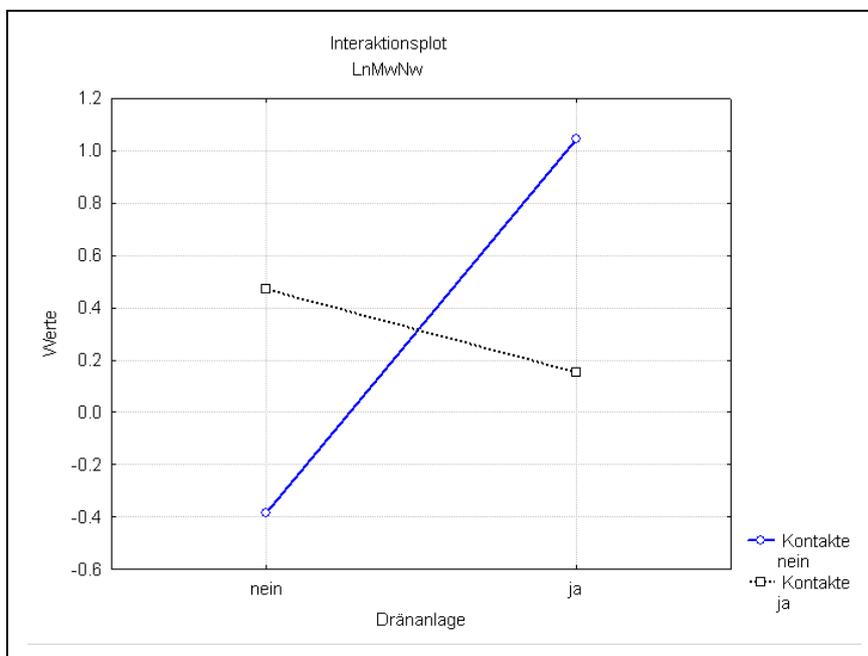


Bild A2-2: Wechselwirkungen zwischen Dränage und Kontakte für die Korrosion

Solche Wechselwirkungen dämpfen durch Gegenkompensation rechnerisch die Haupteffekte der beteiligten Einflussgrößen und verdecken daher deren tatsächliche Wirkung. Die Parameter

*Kontakte* und *Dränage* weisen in den meisten Höhenzonen keine signifikante partielle Korrelation mit Abrostungswerten auf (siehe Tabelle A2-10), weil durch Mittelung der Werte für den jeweils anderen Parameter ein einheitliches Niveau ohne korrelative Tendenzen entsteht (z.B. die mittlere Abrostung für Spundwände mit und ohne Dränage bei Mittelwertbildung für die unterschiedlichen Gewässermilieus).

Aufgrund der Unausgewogenheit im Datenbestand sollten die erwähnten Wechselwirkungen nicht überbewertet werden. Für die geplante Untersuchung folgt allerdings aus obiger Analyse von Korrelationen und Interaktionen, dass zusätzlich zu den Einflussgrößen *Alter* und *Gewässermilieu* weitere Standorteigenschaften als mögliche Korrosionsfaktoren zu berücksichtigen sind, die durch ihr besonderes Zusammenwirken in bestimmten Höhenzonen eine Abrostung begünstigen oder vermindern.

## **Bewertung von Parametern**

Für die Einbindung verschiedener Parameter aus der Vorschlagsliste der BAW in das geplante Vorhaben ist eine Zuordnung zu den „kontrollierten“ Faktoren im Sinne üblicher DoE-Methodik oder zu den „freien“ Faktoren als potenzielle Informationsquellen von Bedeutung. Eine vorsichtige Abschätzung der Bedeutung einzelner Parameter für Korrosionsprozesse soll hier auf der Grundlage obiger Analyse von Bauwerksdaten, den bisherigen Erfahrungen der BAW sowie den Veröffentlichungen aus dem Bereich der Werkstoffforschung und Gewässerkunde erfolgen. Die relevanten Parameter oder Parametergruppen werden nachfolgend im Einzelnen erörtert.

### ***(1) Höhenzonen an Spundwänden***

Der Normenausschuss unterscheidet nach DIN 50929 (Teil 3) zwischen unterschiedlichen Korrosionswahrscheinlichkeiten für die Flächenkorrosion oder Mulden- und Lochkorrosion in Bezug auf den Unterwasserbereich, die Wasser/Luft-Grenze und die Spritzwasserzone. Diese Einteilung korrespondiert mit denen von der BAW in verschiedenen Höhenzonen an Bauwerken beobachteten Korrosionsunterschieden (Alberts und Heeling 1997).

Die Werkstoffforschung geht gleichermaßen davon aus, dass an vertikalen Metallteilen entlang der Wasserlinie elektrochemische Korrosionsprozesse mit fortlaufendem Verlust an metallischem Eisen durch Oxidation zu zweiwertigem Eisen  $Fe^{2++}$  angestoßen werden. Dort bildet sich durch kleinräumige Unterschiede in der Sauerstoffzufuhr eine kleine Anode gegenüber einer großen umgebenden Kathode („Belüftungselement“) heraus (Wranglén 1985, Müller 1987).

Bei den von der BAW untersuchten Bauwerken sind Flächen- und Lochkorrosion entlang der Niedrigwasserzone am stärksten ausgeprägt. Diese Zone entspricht in tidefreien Gewässern der Höhe des Mittelwassers, in Tidegewässern der Höhe des mittleren Tideniedrigwassers MTnw. Sowohl in der darüber liegenden Spritzwasserzone als auch in der tieferliegenden Unterwasserzone sind die Abrostungen etwas schwächer.

Für die Ausbildung einer lokalen Anode entlang der Wasserlinie dürfte langfristig die Stabilität der Höhenlage des Niedrigwassers von Bedeutung sein. Der Säkulartrend der Meeresspiegelerhöhung (MTmw) in der Deutschen Bucht ist mit etwa 15 cm/Jh. für die Lebensspanne von Spundwänden zu vernachlässigen und hebt sich zudem in Tidegewässern mit dem allgemeinen Tidehubanstieg von etwa 20 cm/Jh. zugunsten einer gleichbleibenden Tideniedrigwasserhöhe in etwa auf (Lassen 1989). Von größerer Bedeutung sind die fortlaufenden Fahrwasservertiefungen in den Tideflüssen (Länder-Arbeitsgruppe 1988, Siefert und Havnoe 1988). In der Elbe hat sich dadurch das MTnw bei Hamburg seit 1950 um rund 60 cm abgesenkt. Auch in Weser und Ems haben Fahrwasservertiefungen zu erheblichen Absenkungen des Tideniedrigwassers geführt.

Da die Korrosionszone auf Tideniedrigwasserhöhe bei den untersuchten Bauwerken zumeist 1 – 2,5 m umfasst, könnte sich die MTnw-Erniedrigung bei den älteren Bauwerken (30 – 60 Jahre) als Dämpfung der maximalen Abrostung bemerkbar machen. Eine stabile Höhenlage der im Niedrigwasserbereich sehr intensiven Abrostung mit entsprechend lagestabiler Anodenausbildung müsste demgegenüber das Korrosionsmaximum verschärfen. Die MTnw-Erniedrigung

während der Nutzungszeit der Spundwände ist also ein wichtiger Parameter, der in Kombination mit Höhe und Länge der Korrosionszonen zu ermitteln ist.

## (2) Profiltyp

Die Profiltypen der Spundwände können mangels Kombination mit anderen Standortfaktoren nicht in das Versuchsprogramm aufgenommen werden, dürften aber unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Korrosionsprozesse haben. Bei den Z- und U-Profilen sind die Verbindungsstellen anders positioniert, so dass die Kathodenfläche ein anderes Verhältnis zur Anodenfläche an der Wasserlinie haben kann. Gleiches gilt auch für die gemischten Spundwände (E- und D-Profile), die eine andere räumliche Verteilung von Verbindungsstellen besitzen.

Die rechtwinkligen und gestreckten Varianten der Z- und U-Profile besitzen andere Strömungseigenschaften. Beim rechtwinkligen Profil kann es im Wasser an den Kanten zu kleinen Turbulenzen kommen, bei der gestreckten Form zur besseren Umströmung. In beiden Fällen wird der Abtransport von  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen erleichtert (Erosionskorrosion) und damit der Metallverlust erhöht (Wranglén 1985).

Bei den jüngeren Bauwerken ist ein Vergleich von Korrosionsmaßen für U-Profile und gemischten Spundwänden (E-Profil) möglich. Dabei zeigen die E-Profile in allen Höhenzonen signifikant höhere Abrostungen als die U-Profile. Z- und U-Profile unterscheiden sich zumindest bei den älteren Bauwerken nicht in der Abrostung.

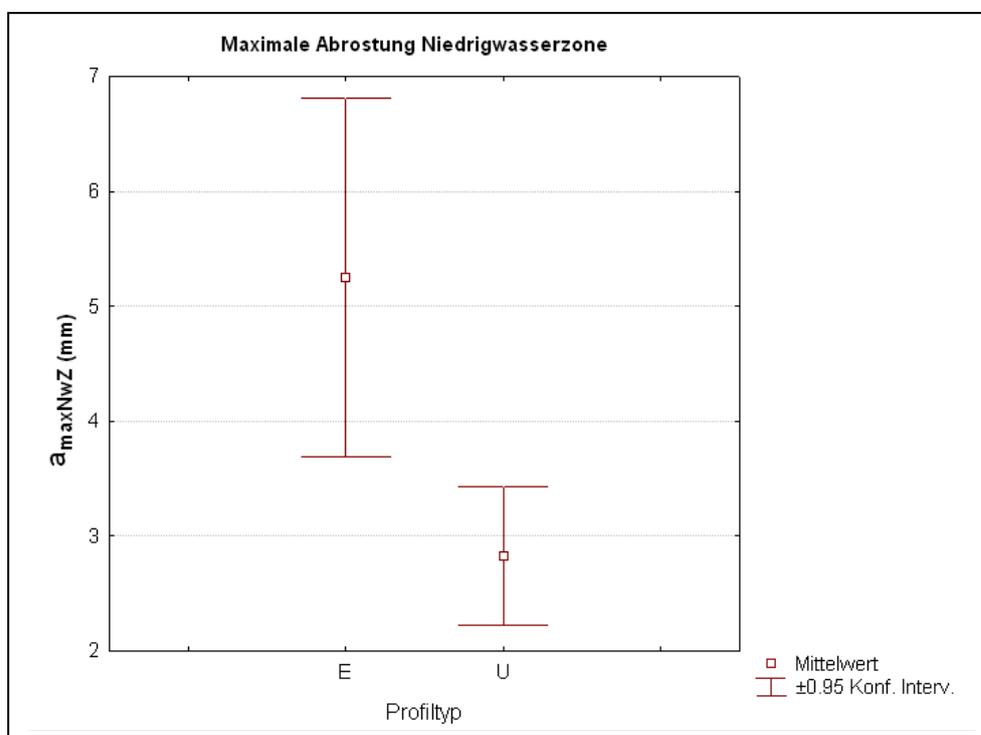


Bild A2-3: Abrostungen von jungen Spundwänden mit U- und E-Profilen

Die Z-Profile finden sich überwiegend in älteren Bauwerken, die gemischten Spundwände mit Einfachträgerpfahl (EA- und EI-Profile) indessen in jüngeren. Da diese Profiltypen nicht durch-

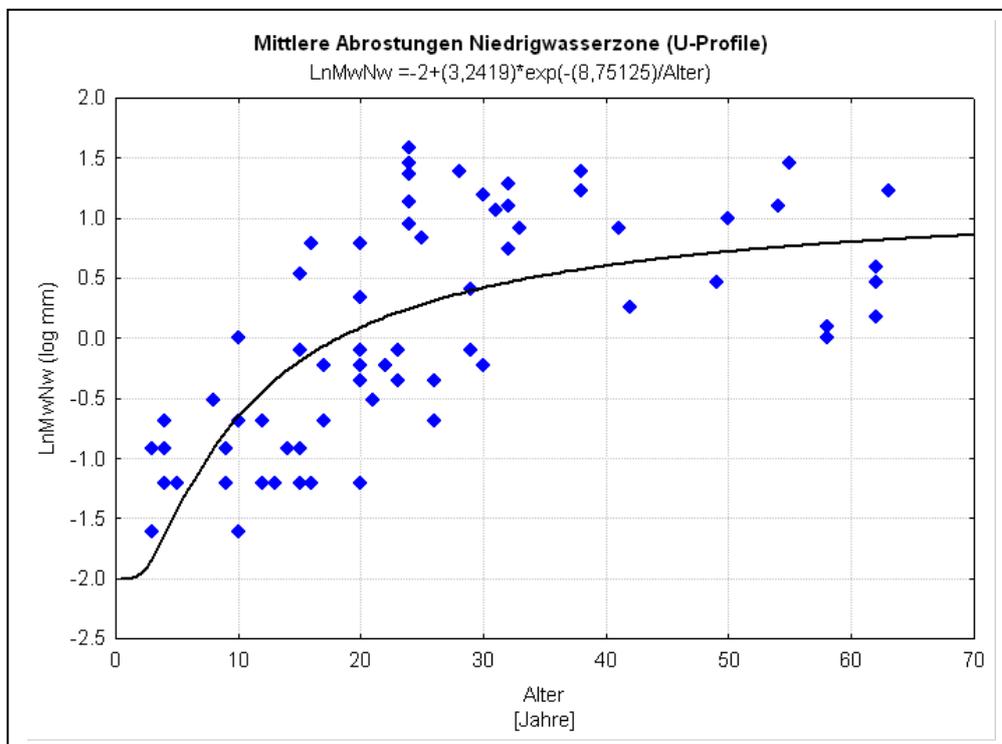
gehend wie die U-Profile in allen Altersgruppen vertreten sind, können Profile nicht im multivariaten Kontext untersucht werden.

### **(3) Bauwerksalter**

Einer der beiden wichtigsten Faktoren für die Abrostungstiefe ist das Alter des Bauwerks, das aus diesem Grunde in allen Höhenzonen signifikante partielle Korrelationen mit logarithmierten Korrosionsmaßen zeigte (Tabelle A2-10). Die lineare Korrelation mit den Gruppenrängen gibt nur einen groben Zusammenhang zwischen Alter und Abrostung wieder. Bei unifaktorieller Betrachtung können auch nichtlineare Zeitfunktionen der Korrosion untersucht werden, da die konkreten Altersangaben für die untersuchten Bauwerke aus der BAW-Datenbank verfügbar sind.

Eine gute Anpassung nichtlinearer Art bietet eine S-förmige Exponentialkurve, die gegen einen Grenzwert ausläuft. Für mittlere Abrostungen von U-Profilen im Niedrigwasserbereich läuft diese Kurve gegen den Grenzwert von (umgerechnet) 3,5 mm Abrostungstiefe aus. Der Anteil erklärter Varianz ( $R^2$ ) beträgt immerhin 46%, so dass nur 54 % an Restvariabilität für das Gewässermilieu und andere Korrosionsfaktoren verbleiben. Näherungsweise lässt sich die S-Kurve auch durch eine logarithmische Anpassungsfunktion ersetzen, die mit 47 % erklärter Varianz von vergleichbarer Güte ist.

*Bild A2-4: Zeitfunktion der Abrostungen von Spundwänden mit U-Profilen (NWZ)*



Bei der Wahl des geeigneten Anpassungsmodells ist die Frage entscheidend, ob der Korrosionsprozess durch schützende Oxidschichten (z.B. Siderite  $\text{FeCO}_3$ ) oder Rückgang mikrobieller Aktivitäten irgendwann zum Stillstand kommt.

#### **(4) Gewässermilieu**

Der Parameter *Milieu* ist aus einer Rekodierung der in der BAW-Datenbank dokumentierten Lage der Bauwerke hervorgegangen, damit Faktoren wie Salzgehalt und Tide getrennt betrachtet werden können. Das Gewässermilieu ist neben *Alter* der wichtigste Faktor für die Abrostungstiefe und zeigte in allen Höhenzonen signifikante partielle Korrelationen mit logarithmierten Korrosionsmaßen (Tabelle A2-10). Seine Wechselwirkungen mit Dränage (Bild A2-1) hat allerdings deutlich gemacht, dass *Milieu* im Gegensatz zu *Alter* als kategoriale Größe zu behandeln ist. *Alter* (metrisch) und *Milieu* (kategorial) erklären gemeinsam je nach Höhenzone 50-80 % der Varianz in den mittleren und maximalen Abrostungen der untersuchten Bauwerke.

Das Gewässermilieu ist eine Sammelkategorie mehrerer Korrosionsfaktoren. Die hydrologische Einteilung in „süß – brackisch – salzig“ erfolgt üblicherweise nach Salzgehalt oder Chloridgehalt. Der Brackwasserbereich zwischen dem limnischen und marinen Milieu wird überwiegend über einen Salzgehalt von 0,05 % - 3,0 % abgegrenzt (Riedel-Lorjé et al. 1992). Darüber hinaus korrespondiert diese Einteilung aber auch mit anderen Gewässereigenschaften, wie beispielsweise dem Spektrum an ein- und zweiwertigen Salzkationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), Redoxpotential, pH-Wert, Schwebstoffgehalt, organische Substanzen und biologische Aktivität. Eine Klärung der Ursachen für unterschiedliche Abrostungen in den jeweiligen Milieus kann als erst auf der Grundlage dieser zusätzlich gemessenen Parameter erfolgen.

Aus der Werkstoffkunde ist bekannt, dass die Korrosion bis zu einer Salzkonzentration von 3 % (Meerwasser) begünstigt wird, bei höherer Salinität aber aufgrund abnehmender Sauerstoffdiffusion im Wasser wieder abfällt (Wranglén 1985). Auch eine Temperaturerhöhung wirkt sich nur bis 80° C korrosionsfördernd aus, weil über dieser Schwelle die Sauerstoffdiffusion abnimmt. Viele Wirkungen verlaufen also in Kombination mit dem Sauerstoffangebot im Wasser.

Das lokale Sauerstoffangebot ist wiederum von weiteren Faktoren abhängig. Eine bewegte Wasseroberfläche kann bei sonst gleichen Bedingungen mehr Sauerstoff aufnehmen als eine ruhige. Damit stehen Wellen und Strömungen in einer indirekten Beziehung zum gelösten  $\text{O}_2$ -Gehalt. Ein weiterer Einflussfaktor stellt die biologische Aktivität im Gewässer dar. Das biogene  $\text{O}_2$ -Produktionsvermögen wird bei hohem Schwebstoffgehalt durch Lichtarmut im Wasser gehemmt. Der Schwebstoffgehalt ist im Brackwasserbereich der Tideflüsse (Trübungszone) infolge einer Ausfällung von Tonmineralen (Flockung, Peptisation) am größten.

In den Sommermonaten wird in dieser Zone durch Abbau organischer Substanz am meisten Sauerstoff verbraucht, so dass dann in den Tideflüssen ein saisonales  $\text{O}_2$ -Minimum auftritt (Förstner 1994). Hohe biologische Aktivität und Sauerstoffarmut in der Trübungszone führen wiederum zur bakteriellen Reduktion von Sulfaten unter Bildung von Eisensulfiden wie Pyrit ( $\text{FeS}$ ) und Markasit ( $\text{FeS}_2$ ), womit anaerobe Korrosionsvorgänge an den Spundwänden begünstigt werden.

Um diese Vorgänge im Milieukontext aufzuklären, sind folglich zusätzlich zu den Parametern nach DIN 50929 (Teil 3) Messungen des Schwebstoffgehalts, der organischen Anteile (TOC, DOC) und des  $\text{O}_2$ -Gehalts erforderlich.

### **(5) Tideeinflüsse**

In der Archivdatenauswertung haben sich bei den Spundwänden mit U-Profilen keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Abrostungen in tidefreien und tidebeeinflussten Gewässern gezeigt. Die partiellen Korrelationskoeffizienten mit den Korrosionsmaßen aller Höhenzonen waren nicht signifikant. Wechselwirkungen zwischen Tide- und anderen Standorten konnten nur teilweise berechnet werden, waren aber in keinem Kombinationsfall signifikant. Nach vorläufiger Einschätzung dürften also die Gezeiten nur eine untergeordnete Rolle bei Korrosionsprozessen spielen.

Immerhin hat der Technical Steel Research der Europäischen Kommission (1997) im überregionalen Vergleich eine signifikant stärkere Lochkorrosion bei Bauwerken in tidefreien Gewässern festgestellt. Der dieser Studie zugrundeliegende Datenbestand weist jedoch leider viele Redundanzen auf, weil Bauwerke mit starker Lochkorrosion vorwiegend älter waren und mehr Anlegevorgängen aufwiesen. Möglicherweise ist die Ausbildung lokaler Anoden an der Wasserlinie ohne den Gezeitenrhythmus prägnanter und verstärkt damit etwas die Abrostung in der Niedrigwasserzone.

### **(6) Strömung und Wellen**

Die Bedeutung dieser Parameter für die Korrosion an Spundwänden lässt sich auf der Grundlage der Archivdaten nur schwer abschätzen. Da die Mehrzahl der betrachteten Bauwerke (75 von 83) sich an strömungsarmen Standorten befindet (Tabelle A2-5), kann der Einfluss dieses Faktors nicht abgeschätzt werden. Das Auftreten von Wellen am Standort zeigte keine signifikante partielle Korrelation mit Korrosionsmaßen und auch keine signifikanten Wechselwirkungen (Tabellen A2-10 und A2-11). Nach vorsichtiger Einschätzung dürften sich also auch Strömung und Wellen nur schwach auf die Abrostung auswirken.

Nach den Erfahrungen der Werkstoffforschung können solche Gewässerparameter jedoch nicht völlig außer Acht gelassen werden. Beide Faktoren erleichtern den Abtransport von  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen aus dem Anodenbereich (Erosionskorrosion) und fördern damit Metallverluste (Wranglén 1985). Wasserbewegungen erleichtern die  $\text{O}_2$ -Diffusion und beeinflussen damit die Potentialdifferenz bei Ausbildung eines „Belüftungselements“. Außerdem ist aus bereits erwähnten Gründen eine Wechselwirkung mit dem Profiltyp zu erwarten. Starker Wellenschlag kann gemäß DIN 50929 (Teil 3) bei unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen sogar eine anodische Spannungsrisskorrosion hervorrufen.

### **(7) Dränanlagen**

Der Parameter *Dränanlagen* zeigte in der Archivdatenauswertung signifikante Wechselwirkungen mit anderen Standortfaktoren und zumindest für die mittlere Abrostung in der Spritzwasserzone eine signifikante partielle Korrelation. Dieser Faktor sollte also neben Alter und Milieu als dritter Standortfaktor in die Standortauswahl des Versuchsprogramms einbezogen werden.

Die Dränage beeinflusst (wie mehrere andere Standortfaktoren auch) das lokale Sauerstoffangebot. In der technischen Fachliteratur wird die Korrosion im Wasser und an der Luft als vorwiegend „kathodisch gesteuert“ beschrieben, so dass die mikrolokale Potentialdifferenz zwi-

schen sauerstoffreichen und -armen Zonen eine große Bedeutung hat. Interessanterweise wirkt sich die Dränage im Brackwasser - das ja eine besondere O<sub>2</sub>-Dynamik besitzt - anders aus als im limnischen und marinen Milieu (s. Wechselwirkung in Bild A2-1).

### **(8) Liegeplätze und Kontakte**

Der Parameter *Liegeplätze* ist naturgemäß mit vielen anderen Standortfaktoren korreliert, so dass er sich nicht als eigenständige Größe in das geplante Vorhaben einbinden lässt. Anders verhält sich der Parameter *Kontakte* mit scheuernden Gegenständen (Fender, Schlingel, Schiffe), der in der Archivdatenauswertung signifikante Wechselwirkungen mit anderen Standortfaktoren und zumindest für die mittlere Abrostung in der Spritzwasserzone eine signifikante partielle Korrelation zeigte. Dieser Faktor sollte also neben den drei „kontrollierten“ Faktoren Alter, Milieu und Dränage als wichtiger „freier“ Standortfaktor berücksichtigt werden.

Die Wirkung der Kontakte auf die Abrostungen kann auf verschiedenen Ursachen beruhen. Je nach Art des Fremdmaterials kann gemäß DIN 50929 (Teil 3) Kontaktkorrosion durch Potentialdifferenzen mit Fremdkathoden („Elementbildung“) auftreten. Außerdem kann eine schützende Oxidschicht durch Fremdeinwirkung abgetragen und damit ein sonst abnehmender Korrosionsvorgang erneut beschleunigt werden. Zur Vermeidung von Redundanzen können verwandte Standortfaktoren wie *Liegeplätze* und *Güterumschlag* nicht gemeinsam mit dem Parameter *Kontakte* untersucht werden. Als indirekt damit verbundene Größen könnten jedoch Schadstoffe an Schiffsliegeplätzen (Ruß, Öl, Schwefelverbindungen) eine korrosive Wirkung entfalten und sollten an den Standorten gemessen werden.

### **(9) Streichrichtung**

Die Streichrichtung stellt die Orientierung des Bauwerks zur Himmelsrichtung dar, konnte aber in ihrer Wirkung mangels Daten nicht abgeschätzt werden. Auf der Grundlage der verfügbaren Archivdaten zeigte die Streichrichtung auch bei Gruppierung nach verschiedenen Kriterien (Schatten / Licht) keinen erkennbaren Einfluss auf die Abrostungen. Die schmale Datenbasis erlaubt leider keine Klärung von möglichen Interaktionen mit anderen Standortfaktoren. Immerhin begünstigt die Schattenlage eines Bauwerks (Orientierung nach Norden) Kondenzwasserbildung, während eine Südlage im Sommer die Metalloberfläche weit über die Umgebungstemperatur aufheizen könnte (d.h. relative Anreicherung von Chlorid-Ionen, verstärkte O<sub>2</sub>-Diffusion). Nach vorsichtiger Einschätzung dürfte sich also auch die Streichrichtung eher schwach auf die Abrostung auswirken.

### **(10) Parameter nach DIN 50929**

Die Vorschläge des Normenausschusses nach DIN 50929 (Teil 3) erlauben für bestimmte Eisenwerkstoffe und Stähle eine standortbezogene Rangabstufung der Korrosionswahrscheinlichkeit aus bestimmten Gewässereigenschaften heraus (Wasserart, Konzentrationen von Chlorid-, Sulfat- und Calciumionen, Säurekapazität, pH-Wert, Objekt/Wasser-Potential). Diese Messwerte liegen für die von der BAW untersuchten Bauwerke nicht vor und sollten daher im Rahmen des geplanten Vorhabens für diese und weitere Bauwerke ermittelt werden. Sie ermöglichen später eine genauere Klärung des Einflusses der groben Kategorie *Gewässermilieu* auf die Abrostungen an Spundwänden.

### ***(11) Ergänzende Parameter***

Bei obiger Behandlung des Gewässermilieus als Standortfaktor wurde bereits dargelegt, dass zur Klärung der besonderen Verhältnisse im Brackwasserbereich weitere Parameter untersucht werden müssen: Messungen des Schwebstoffgehalts, der organischen Anteile (TOC, DOC) und des O<sub>2</sub>-Gehalts. Schwebstoffe treten im Brackwasserbereich auf (Trübungszone), können aber auch durch Schiffsschrauben aus Sedimenten resuspendiert sein. Außerdem wären im Kontext mit Liegeplätzen insbesondere Angaben zu Gewässerkontamination mit Ruß, Öl und Schwefelverbindungen (z.B. aus Schiffsmotoren) wünschenswert. Eine Analyse der Rostschichten an den Spundwänden ist erforderlich, damit elektrochemische und mikrobielle Korrosion in ihren jeweiligen Korrosionsprodukten erfassbar sind.

## Untersuchungsprogramm

Die in den vorangegangenen Abschnitten durchgeführten Analyse der Archivdaten und die vorläufige Bewertung der Parameter münden in ein Untersuchungsprogramm, dessen methodische Ausrichtung bereits im Abschnitt *Planungsmethode* erläutert wurde.

In die Untersuchung werden nur Spundwände mit U-Profilen ohne erkennbaren Korrosionsschutz eingebunden, für die in der Spritz-, Niedrig- und Unterwasserzone Korrosionsmessungen möglich oder vorhanden sind. Die Standortauswahl soll drei kontrollierte Faktoren enthalten, die nach bisherigen Erfahrungen den größten Einfluss auf die Korrosion haben:

- Altersgruppe (Bauwerksalter bis 18 Jahre, 19 - 30 Jahre, über 30 Jahre),
- Gewässermilieu (süß, brackisch, salzig),
- Dränanlagen (vorhanden, nicht vorhanden).

Nach DoE-Kriterien sollen alle 18 Kombinationen dieser Faktoren jeweils zweimal abgedeckt werden. In der BAW-Datenbank erfüllen nur 25 Bauwerke die genannten Kriterien, so dass noch 11 weitere Bauwerke untersucht werden müssen. Insbesondere die jüngeren Bauwerken in der WaDiMe-Datenbank sind selten mit Dränage versehen. Standorte im Brackwassermilieu sind zudem nicht sehr häufig vertreten. Der resultierende Versuchsplan ist in Tabelle A2-13 dargestellt.

Die Standorte der Bauwerke sollten (wenn möglich) so ausgewählt werden, dass die Ausprägungen der nachfolgenden „freien“ Faktoren in etwa in gleichen Anteilen auftreten:

- Tide (vorhanden, nicht vorhanden).
- Wellen (vorhanden, nicht vorhanden).
- Kontakte (vorhanden, nicht vorhanden).

Tabelle A2-12: Kreuztabellierung für Alter, Milieu und Dränage

Häufigkeitstabelle (Spundwände mit U-Profil)					
Kombinationen: 18					
Anzahl leerer Zellen: 4					
Altersgruppe	Dränanlage	Milieu süß	Milieu brackisch	Milieu salzig	Zeile Gesamt
jung	nein	22	1	6	29
jung	ja	0	0	0	0
Ges.		22	1	6	29
mittel	nein	10	0	9	19
mittel	ja	1	3	4	8
Ges.		11	3	13	27
alt	nein	3	4	8	15
alt	ja	2	1	2	5
Ges.		5	5	10	20
Spalte Ges.		38	9	29	76

Tabelle A2-13: Versuchsplan zur Untersuchung von Spundwänden

	Bauwerk BAW-Datenbank	Standort	Alter	Milieu	Dränanlage
1	neu	1	jung	limnisch	vorhanden
2	neu	2	jung	limnisch	vorhanden
3	neu	1	jung	brackisch	vorhanden
4	neu	2	jung	brackisch	vorhanden
5	neu	1	jung	marin	vorhanden
6	neu	2	jung	marin	vorhanden
7	BAW	1	mittel	limnisch	vorhanden
8	neu	2	mittel	limnisch	vorhanden
9	BAW	1	mittel	brackisch	vorhanden
10	BAW	2	mittel	brackisch	vorhanden
11	BAW	1	mittel	marin	vorhanden
12	BAW	2	mittel	marin	vorhanden
13	BAW	1	alt	limnisch	vorhanden
14	BAW	2	alt	limnisch	vorhanden
15	BAW	1	alt	brackisch	vorhanden
16	neu	2	alt	brackisch	vorhanden
17	BAW	1	alt	marin	vorhanden
18	BAW	2	alt	marin	vorhanden
19	BAW	1	jung	limnisch	nicht vorhanden
20	BAW	2	jung	limnisch	nicht vorhanden
21	BAW	1	jung	brackisch	nicht vorhanden
22	neu	2	jung	brackisch	nicht vorhanden
23	BAW	1	jung	marin	nicht vorhanden
24	BAW	2	jung	marin	nicht vorhanden
25	BAW	1	mittel	limnisch	nicht vorhanden
26	BAW	2	mittel	limnisch	nicht vorhanden
27	neu	1	mittel	brackisch	nicht vorhanden
28	neu	2	mittel	brackisch	nicht vorhanden
29	BAW	1	mittel	marin	nicht vorhanden
30	BAW	2	mittel	marin	nicht vorhanden
31	BAW	1	alt	limnisch	nicht vorhanden
32	BAW	2	alt	limnisch	nicht vorhanden
33	BAW	1	alt	brackisch	nicht vorhanden
34	neu	2	alt	brackisch	nicht vorhanden
35	BAW	1	alt	marin	nicht vorhanden
36	BAW	2	alt	marin	nicht vorhanden

Bei anderen Standortfaktoren ist dies wohl nach Lage der Dinge nicht möglich. Die beiden dichotomen Größen *Tide* und *Wellen* sind bereits von der BAW teilweise auf metrischem Niveau erfasst worden, jedoch nicht im niedrigen Wertebereich. Für die spätere Auswertung wäre es hilfreich, wenn Tidehub und Wellenhöhe lückenlos darstellbar sind.

Ebenfalls als freie Faktoren sind für alle Bauwerke Parameter nach DIN 50929 (Teil 3) aufzunehmen, sowie ergänzend:

- Schwebstoffgehalte (Niedrigwasserlinie -0,1 m, -0,5 m, sowie -1,0 m),
- organische Anteile (TOC, DOC),
- O<sub>2</sub>-Gehalte (Niedrigwasserlinie -0,1 m, -0,5 m, sowie -1,0 m),
- Wassertemperatur (Niedrigwasserlinie),
- Schadstoffe (Ruß, Öl, Schwefelverbindungen)
- Korrosionsprodukte (Höhenzonen Spw, Nw, sowie Uw).

Schwebstoffe und O<sub>2</sub>-Gehalte zeigen in Gewässern eine scharfe Tiefenfunktion in Dezimeteinheiten (Riedel-Lorjé et al. 1992). Die Probenahme soll also in den Sommermonaten in mehreren Tiefen erfolgen (Niedrigwasserlinie -0,1 m, -0,5 m, sowie -1,0 m). Da sich die Korrosionsprodukte in den drei Höhenzonen unterscheiden können, sind entsprechend pro Spundwand drei Rostproben jeweils in der Zonenmitte zu entnehmen.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Untersuchungsprogramm zur Klärung multifaktorieller Korrosionsprozess an Bauwerken in Binnen und Küstengewässern entwickelt. Als Grundlage zur Auswahl relevanter Einflussgrößen diente das Archiv der BAW-Hamburg mit Wanddickenmessungen an 200 Spundwänden. Nach vorläufiger Einschätzung spielen Alter und Gewässermilieu die Hauptrolle bei der mittleren und maximalen Abrostung in allen Höhenzonen. Als weitere Einflüsse kommen Wechselwirkungen mit *Dränage* und *Fremdkontakte* in Betracht. Andere Standortfaktoren stehen nur indirekt in einer Beziehung zur Korrosion, die auf Korrelationen zwischen den Einflussgrößen zurückgeht.

In dem geplanten Vorhaben werden die Bauwerke so ausgewählt, dass die Unabhängigkeit der wichtigsten Einflussgrößen gewährleistet ist. Diese Größen stehen als kontrollierbare Faktoren im Zentrum der Betrachtung. Alle weiteren Beobachtungsgrößen wie andere Standortbedingungen und Messungen der Gewässereigenschaften weisen erwartungsgemäß hohe Redundanzen auf und spielen daher für die Planung eine untergeordnete Rolle. Sie ermöglichen jedoch später die Klärung von Einzelfragen und erleichtern die Interpretation der korrosiven Wirkung von Rahmenfaktoren wie beispielsweise das Gewässermilieu.

Ziel der sich an die Datenaufnahme anschließenden Auswertung wird es sein, eine multifaktorielle Vorhersage der Abrostungstiefe an Spundwänden aus den gemessenen Einflussgrößen zu ermöglichen. Eine quantitative Schätzung mittlerer und maximaler Korrosion würde dem Küsteningenieurwesen eine solidere Entscheidungshilfe bieten, als die derzeit noch übliche grobe Rangabstufung von Korrosionswahrscheinlichkeiten nach DIN 50929.

## Literaturverzeichnis

- Alberts, D. (1997): Korrosionsschäden und Nutzungsdauer-abschätzung an Stahlspundwänden und -pfählen im Wasserbau.
- Alberts, D. und Heeling, A. (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 75, S. 83-93.
- Deutsches Institut für Normung (1985): Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung (DIN 50 929, Teil 1).
- EAU (1996): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen (9. Aufl.). Berlin, Ernst & Sohn.
- Gaensslen, H. und Schubö, W. (1973): Einfache und komplexe statistische Analyse. München, Basel.
- Länder-Arbeitsgruppe (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe. Die Küste 47:31-50.
- Lassen, H. (1989): Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste 50: 65-95.
- Montgomery, Douglas C. (1997): Design and Analysis of Experiments (4th Ed.). New York, John Wiley.
- Moulin, J. M. et al. (1997): Technical Steel Research. European Commission EUR 20043 EN.
- Müller, K. (1987): Lehrbuch der Metallkorrosion. Lehrbuchreihe Galvanotechnik (4. Aufl.), Saugau (Württ.), Eugen G. Leuze.
- Riedel-Lorjé, J.-C. et al. (1992): Salzgehalt- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe. In: ARGE ELBE.
- Riedel-Lorjé, J.-C. et al. (1994): Suspended Matter and Salinity in the Upper Brackish Water Region of the Elbe Estuary. In: Preprints of the International Symposium 'Particulate Matter in Rivers and Estuaries', Reinbek near Hamburg, 21-25 March 1994, S. 220-224.
- Siefert, W. und Havnoe, K. (1988), Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Höhe hoher Sturmfluten. Die Küste 47: 51-102.
- Förstner, U. (1994): Solutes/Solids Interactions of Metals in Estuaries. In: Preprints of the International Symposium 'Particulate Matter in Rivers and Estuaries', Reinbek near Hamburg, 21-25 March 1994, S. 73-90.

Wranglén, G. (1985), Korrosion und Korrosionsschutz. Geotechnik. In: Werkstoff-Forschung und -Technik, Band 3, B. Ilschner (Hrsg.), Berlin, Springer.

## **Anlage 3**

# **Einflussfaktoren auf die Korrosion an Stahlspundwänden im Wasserbau**

**R. Uerkvitz (Statsoft Europe GmbH, 2004)**

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
Problemstellung	2
Untersuchungsmethode	3
Multifaktorielle Schätzfunktionen	3
Unabhängigkeit der Einflussgrößen	4
Untersuchungsprogramm	5
Standortauswahl	8
Gewässerparameter	11
Milieuklassifikation mit multivariater Analyse	13
Saisonale Konzentrationsschwankungen	20
Tiefengradienten für Gewässerparameter	22
Metallparameter	25
Stahlklassifikation mit multivariater Analyse	26
Rostminerale	31
Korrosionsparameter	35
Abrostungsfunktion der Tiefe	37
Schätzung der mittleren Abrostung	41
Charakteristische Werte für die Abrostung	49
Lebensdaueranalyse	55
Korrosionsfaktionen	59
Datengrundlage für die Schätzung	59
Korrelationen zwischen Einflussgrößen	63
Altersfunktionen	66
Entwicklung multipler Schätzfunktionen	70
Schätzung der Basisabrostung $b_0$	71
Schätzung des Abrostungsgradienten $b_1$	77
Schätzung des Spreizungsfaktors $S_{\text{fak1}}$	82
Schätzung von $b_6$ der Spritzwasserzone	88
Schätzung von $S_{\text{fak4}}$ der Spritzwasserzone	93
Abschätzung aus der Wasseraggressivität $W_0$	99
Zusammenfassung	101
Literaturverzeichnis	105

## Problemstellung

Für den Bau von Kaianlagen der Seehäfen und von Uferbefestigungen an Kanal- und Flussstrecken werden seit vielen Jahrzehnten Stahlspundwände und -pfähle eingesetzt, deren Nutzungsdauer durch Korrosionsprozesse begrenzt wird. Eine zuverlässige Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden und -pfählen war bisher noch nicht möglich. Die Vorschläge des Normenausschuss nach DIN 50929 (Teil 3) erlaubten lediglich für bestimmte Eisenwerkstoffe und Stähle eine standortbezogene Rangabstufung der Korrosionswahrscheinlichkeit als Summe von Bewertungsziffern der jeweiligen Gewässereigenschaften.

Die BAW hat mit in einer statistischer Datenbankauswertung für 140 Bauwerke im Salz- und Süßwasserbereich gezeigt, dass die Nutzungsdauer von Stahlspundbauwerken vorwiegend aufgrund von Durchrostungen in Form von Mulden- und Narbenkorrosion begrenzt wird (s. EAU 1996). Eine genaue Abschätzung des Zeitpunktes für die Durchrostung ist aufgrund hoher Streuung der maximalen Abrostungswerte altersgleicher Bauwerke erst möglich, wenn die standortabhängigen Unterschiede in der Korrosionswahrscheinlichkeit quantifiziert werden können. Da das archivierte Datenmaterial keine hinreichende Basis für die Entwicklung einer Vorhersagefunktion der Nutzungsdauer von Stahlspundbauwerken bieten konnte, hat die BAW eine Untersuchung zur Klärung der wichtigsten Korrosionsfaktoren in Binnen- und Küstengewässern durchgeführt. Diese Untersuchung ist Bestandteil eines von der *European Commission of Steel and Coal (ECSC)* geförderten Forschungsvorhabens.

Ziel der vorliegende Arbeit ist eine Bestimmung minimaler Restwanddicken an beliebigen Höhenpunkten einer Stahlspundwand aus Alter, Material- und Gewässereigenschaften, um bereits vor einer Ultraschalluntersuchung das Risiko des möglichen Versagensfalls für ein Bauwerk abschätzen zu können. Außerdem soll eine Lebensdauerabschätzung von Spundwänden aus kritischen Restwanddicken erfolgen, um den prozentualen Anteil gefährdeter Bauwerke näherungsweise zu erfassen. Die Planung der Felduntersuchung wurde im ersten Zwischenbericht „Datenerhebung zur Korrosion an Spundwänden in Binnen- und Küstengewässern“ (2002, s. Anlage 2) ausführlich dargestellt. Die statistischen Kriterien zur Erlangung charakteristischer Werte für Bauwerke aus örtlichen Korrosionsmesswerten im Sinne der Euronorm wurden im zweiten Zwischenbericht „Analyse von Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau“ (2003, s. Anlage 1) entwickelt.

## Untersuchungsmethode

Ausgangspunkt für den Beginn der Untersuchung war eine Parameterliste der BAW, in der potenzielle Einflussfaktoren für die Korrosion an Stahlspundwänden aufgeführt werden. Diese Liste umfasst neben den Gewässerparametern nach DIN 50929 Standortbedingungen, deren Relevanz aus bisherigen Erfahrungen der BAW abgeleitet wird. Zur genaueren Einschätzung möglicher Korrosionsfaktoren dient eine Datenbank der BAW-Hamburg mit Messungen von Wanddicken an etwa 300 Bauwerken. Als Ergänzung und Interpretationshilfe standen Ergebnisse der Werkstoffforschung zur Verfügung.

### *Multifaktorielle Schätzfunktionen*

Die Qualität der zu erhebenden Daten soll eine Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlspundwänden aus den gemessenen Einflussgrößen ermöglichen. Diese Abschätzung erfolgt mit einer multifaktoriellen Vorhersagefunktion, die über schrittweise multiple Regression und Beste-Subset-Verfahren bestimmt wird.

In die Bestimmung von Korrosionswahrscheinlichkeiten nach DIN 50929 (Teil 3) gehen derzeit Gewässerparameter wie Chlorid-, Sulfat-, Calciumgehalt, pH-Wert, Säurekapazität und Lageparameter lediglich als ungewichtete Rangsummen in den  $W_0$ -Wert ein:

$$W_0 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_3/N_4 \quad (\text{A3-1})$$

Ein multiples lineares Modell (s. Hald 1952, Williams 1959, Walker und Lev 1953, Huang 1970) fasst dagegen eine abhängige Größe  $Y$  als gewichtete Summe einer oder mehrerer unabhängiger Größen (Prädiktoren)  $X_1 \dots X_K$  auf, beispielsweise in der Form:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_K X_K + \dots + u. \quad (\text{A3-2})$$

Darin kann  $Y$  ein Korrosionsparameter sein (mittlere oder maximale Abrostung),  $X_K$  eine zugehörige Einflussgröße (z.B. Alter des Bauwerks, Chlorid-Gehalt des Gewässers), und  $u$  stellt eine normalverteilte Zufallsgröße (Fehler, Residuum) dar. Die Bestimmung einer Zufallsstreuung erlaubt im Gegensatz zum DIN-Verfahren auch die Berechnung des möglichen Schätzfehlers in Form von Prognoseintervallen.

Damit die Koeffizienten  $b_0 \dots b_K$  über die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate berechnet werden können, müssen die Prädiktoren  $X_1 \dots X_K$  voneinander unabhängig sein (d.h. unkorreliert, orthogonal). Der Unterschied von einer Korrosionsabschätzung nach Ausdruck (A3-2) zur Bestimmung von Korrosionswahrscheinlichkeiten nach DIN 50929 (Teil 3) liegt in der Genauigkeit, weil hier anstelle von Rangabstufungen (gering – hoch) konkrete Zahlenwerte für Korrosionsparameter aus den zugehörigen Messwerten der Einflussfaktoren berechnet werden.

Die Wahl eines geeigneten Vorhersagemodells und die Datenerhebung stellen allerdings hohe Ansprüche an die Bearbeitung. Obiges Modell (2) hat zwar eine einfache und übersichtliche Struktur, wird aber selten den komplexen Zusammenhängen in multifaktoriellen Systemen gerecht. Wenn es Wechselwirkungen (Interaktionen) zwischen den Einflussfaktoren gibt, die Wirkung  $Y$  also je nach Kombination der Ausprägungen  $X_1 \dots X_K$  völlig unterschiedlich verläuft,

würde Ausdruck (2) eine schlechte Anpassung an die Beobachtungswerte darstellen und müsste in folgender Weise erweitert werden:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_K X_K + \dots + b_{KJ} X_K X_J + u. \quad (\text{A3-3})$$

Die multiplikativen Terme  $X_K X_J$  in (3) repräsentieren die linearen Zweifach-Interaktionen zwischen den Einflussgrößen und die Koeffizienten  $b_{kj}$  deren Gewicht in der Vorhersagefunktion. Ausdruck (A3-3) lässt sich wiederum durch Interaktionen höheren Grades (Dreifach-Interaktionen, Vierfach-Interaktionen, usw.) erweitern, die in der Praxis jedoch oft eine untergeordnete Rolle spielen.

Wenn die Wirkung der Einflussgrößen nicht in linearer Weise, sondern beispielsweise quadratisch oder kubisch verläuft, ist je nach Datenlage Ausdruck (A3-3) durch ein Polynom höheren Grades zu erweitern:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_1^2 + b_{13} X_1 X_2 + \dots + b_K X_K + b_I X_I^2 + b_{KJ} X_K X_J + e. \quad (\text{A3-4})$$

Ein Korrosionsparameter  $Y$  und die zugehörigen Einflussgrößen  $X_K$  (Alter, Gewässereigenschaften) lassen sich entweder in direkter Form als Messwert oder als transformierter Wert (z.B. Logarithmus) in obige Ausdrücke (A3-2 – A3-4) einbringen. Qualitative Faktoren wie *Stahlklasse* oder *Gewässertyp* werden indessen nicht unmittelbar, sondern in kodierter Form als *Dummy-Variablen* in ein Vorhersagemodell eingebracht.

### **Unabhängigkeit der Einflussgrößen**

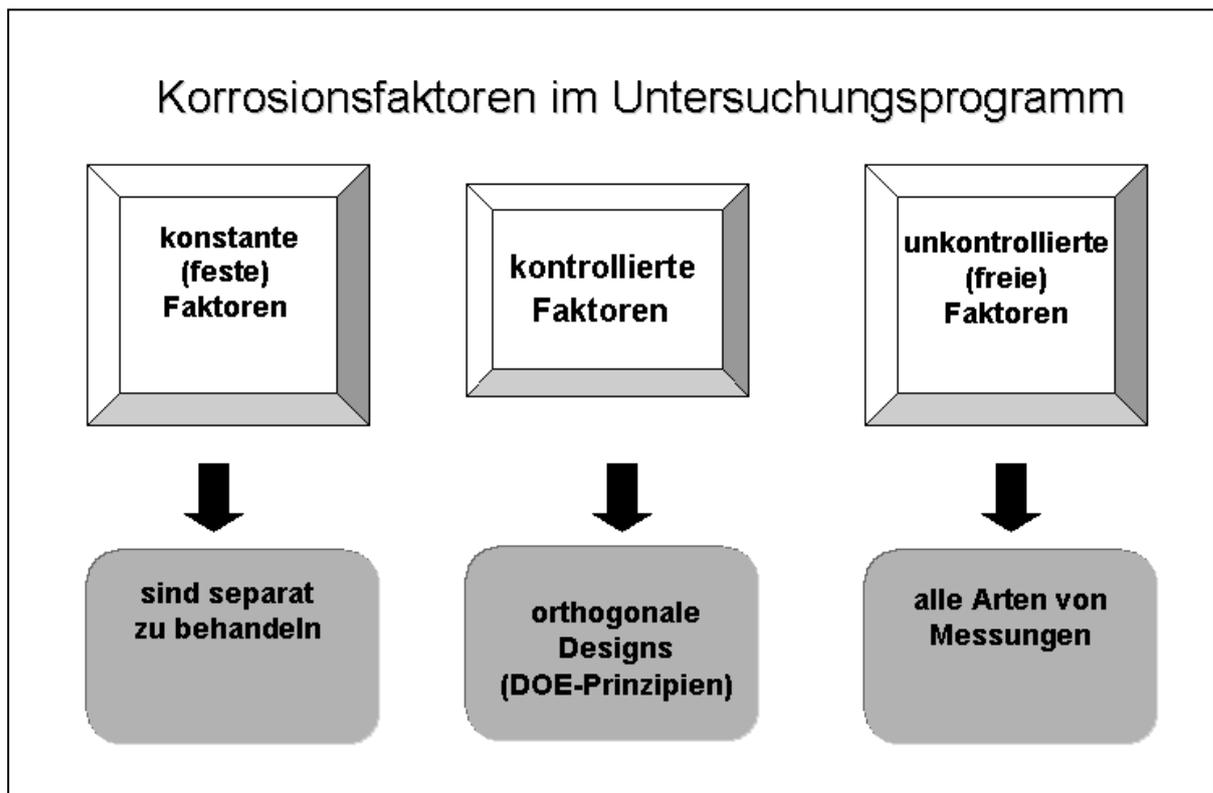
Die oben dargestellten Vorhersagemodelle stellen unterschiedliche Anforderungen an die zu erhebenden Daten. Alle Modelle fordern gleichermaßen die Unabhängigkeit (Orthogonalität) von Prädiktoren, damit Koeffizienten der Vorhersagegleichung berechnet werden können. Wenn Einflussfaktoren miteinander korrelieren, lässt sich deren Wirkung auf die Zielgröße nicht mit Regressionsverfahren auseinander halten (Turner und Stevens 1959, Blalock 1964, Gaensslen und Schubö 1973, Montgomery 1995).

Faktoren können „naturgemäß“ voneinander abhängig sein, wie beispielsweise Chlorid-Gehalte und Leitfähigkeit, oder durch ungünstige Auswahl von Beobachtungsfällen (Stichprobenstruktur). Bei naturgemäßer Abhängigkeit von Faktoren kann immer nur jeweils einer davon in die Schätzfunktion eingebunden werden. Die jeweils anderen können aufgrund verwandten Informationsgehalts (Redundanz) nichts zur Vorhersage beitragen. Eine unausgewogene Stichprobe tritt dagegen zumeist bei Archivdaten auf, so auch bei der Datenbank der BAW-Hamburg mit Wanddicken von Spundwänden: Bauwerke an Liegeplätzen sind häufiger im Salzwasserbereich als im Süßwasserbereich untersucht worden, so dass die beiden Standortmerkmale *Liegeplatz* und *Milieu* miteinander korrelieren (ohne dass naturgemäß ein Zusammenhang besteht). Auch andere Standortfaktoren variieren nicht unabhängig voneinander, weil die Struktur von Archivdaten zufällig aus der Auftragslage entstanden ist.

Die erforderliche Unabhängigkeit von Faktoren kann entweder (a) über ein systematisches Experiment (*Design of Experiments DoE*) oder (b) durch gezielte Standortauswahl gleicher Qualität erreicht werden (Montgomery 1995). Experimente bieten den Vorteil einer Kontrolle aller beteiligten Faktoren und sind auch Teil des internationalen ECSC-Projekts, können aber nur Kurzzeiteffekte für eine kleine Anzahl von Einflussgrößen klären. Eine Standortauswahl analog zum Versuch bedeutet, dass beispielsweise der Salzeinfluss auf die Korrosion durch einen Vergleich von Bauwerken im Salz- und Süßwasserbereich durchgeführt wird. Wenn zusätzlich noch der Alterseinfluss geklärt werden soll, erfordert die Unabhängigkeit von Faktoren eine Standortauswahl mit alten Bauwerken im Salz- und Süßwasserbereich sowie jungen Bauwerken im Salz- und Süßwasserbereich. Bei Hinzunahme weiterer Einflussgrößen steigt die Anzahl von Kombinationen nach dem Potenzgesetz an und überschreitet das tatsächlich vorhandene Spektrum der Standortbedingungen.

### ***Untersuchungsprogramm***

Die in der vorliegenden Arbeit vertretene Vorgehensweise stellt einen praxisgerechten Kompromiss zwischen der üblichen DoE-Methodik und dem derzeitigen Kenntnisstand für korrosionsgefährdete Bauwerke in Binnen- und Küstengewässern dar. Wichtige Einflussgrößen wie *Spundwandalter* und *Gewässermilieu* sollen als „kontrollierte“ Faktoren die Standortauswahl bestimmen, alle übrigen Einflussgrößen können mangels Regelmechanismen lediglich konstant gehalten oder als „freie“ Faktoren örtlich gemessen werden. Aufgrund der zu erwartenden Redundanzen bei den freien Faktoren muss allerdings deren Beitrag zur Abschätzung der Korrosion zunächst offen bleiben. Diese Überlegungen münden in ein Untersuchungsprogramm, das Archivdaten ebenso einbezieht wie ergänzende Messungen an Bauwerken und Gewässern.



**(a) Feste Faktoren.** In die Untersuchung werden nur Spundwände mit U-Profilen eingebunden, für die in der Spritz-, Niedrig- und Unterwasserzone Korrosionsmessungen möglich oder vorhanden sind. Um eine Beeinträchtigung der Korrosionswerte durch wechselnde Einflussfaktoren zu vermeiden, wurden Bauwerke ohne Korrosionsschutz, Durchrostung und Dränanlage ausgewählt.

**(b) Kontrollierte Faktoren.** Die Standortauswahl enthält drei kontrollierte Faktoren, deren Einfluss auf die Korrosion sich daher bei der Analyse gut trennen lässt:

- **Altersgruppe** (Bauwerksalter bis 19 Jahre, 20-30 Jahre, über 30 Jahre),
- **Gewässermilieu** (limnisch, brackisch, marin),
- **Liegeplatz** (vorhanden, nicht vorhanden).

Darüber hinaus sollten jeweils zwei Bauwerke etwa gleichen Alters sein (Nr. 1 und 2) und in den Standortbedingungen übereinstimmen, damit die Abrostungsunterschiede von Bauwerken gleicher Umwelt verglichen werden können (Tabelle A3-1).

**(c) Freie Faktoren.** Die Standorte der Bauwerke wurden so ausgewählt, dass die Ausprägungen der nachfolgenden „freien“ Faktoren sich möglichst breit über die Alters- und Milieugruppen verteilen:

- **Tide** (vorhanden / nicht vorhanden).
- **Strömung / Turbulenz** (vorhanden / nicht vorhanden).

Tabelle A3-1: Auswahl von Bauwerken für das ECSC-Projekt

Datenquelle	Nr	Alter	Milieu	Liegeplatz
BAW	1	jung	limnisch	nein
BAW	2	jung	limnisch	nein
BAW	1	jung	limnisch	ja
neu	2	jung	limnisch	ja
BAW	1	jung	brackisch	nein
neu	2	jung	brackisch	nein
BAW	1	jung	brackisch	ja
neu	2	jung	brackisch	ja
BAW	1	jung	marin	nein
BAW	2	jung	marin	nein
BAW	1	jung	marin	ja
BAW	2	jung	marin	ja
BAW	1	mittel	limnisch	nein
BAW	2	mittel	limnisch	nein
neu	1	mittel	limnisch	ja
neu	2	mittel	limnisch	ja
BAW	1	mittel	brackisch	nein
BAW	2	mittel	brackisch	nein
BAW	1	mittel	brackisch	ja
BAW	2	mittel	brackisch	ja
BAW	1	mittel	marin	nein
BAW	2	mittel	marin	nein
BAW	1	mittel	marin	ja
BAW	2	mittel	marin	ja
BAW	1	alt	limnisch	nein
BAW	2	alt	limnisch	nein
BAW	1	alt	limnisch	ja
BAW	2	alt	limnisch	ja
BAW	1	alt	brackisch	nein
BAW	2	alt	brackisch	nein
BAW	1	alt	brackisch	ja
BAW	2	alt	brackisch	ja
BAW	1	alt	marin	nein
BAW	2	alt	marin	nein
BAW	1	alt	marin	ja
BAW	2	alt	marin	ja

Ebenfalls als freie Faktoren wurden für alle Bauwerke Gewässerparameter nach DIN 50929 (Teil 3) aufgenommen. Die Vorschläge des Normenausschuss erlauben für definierte Eisenwerkstoffe und Stähle eine standortbezogene Rangabstufung der Korrosionswahrscheinlichkeit aus bestimmten Gewässereigenschaften heraus (Wasserart, Konzentrationen von Chlorid-, Sulfat- und Calciumionen, Säurekapazität, pH-Wert, Objekt/Wasser-Potential). Diese Messwerte lagen für die von der BAW untersuchten Bauwerke nicht vor und mussten daher im Rahmen des geplanten Vorhabens für diese und weitere Bauwerke ermittelt werden. Sie ermöglichen jetzt eine genauere Klärung des Einflusses der groben Kategorie *Gewässermilieu* auf die Abrostungen an Spundwänden.

Da die Gewässereigenschaften nach DIN 50929 (Teil 3) nicht vollständig charakterisiert werden, wurden zur Klärung des Sauerstoffhaushalts und örtlicher Gewässerverschmutzung weitere Parameter als freie Faktoren gemessen:

- **organische Anteile** (TOC, DOC),
- **O<sub>2</sub>-Gehalte** (Niedrigwasserlinie und darunter),
- **Wassertemperatur** (Niedrigwasserlinie),
- **Korrosionsprodukte** (Höhenzonen Spw, Nw, sowie Uw)
- **Spundwandstahl** (Chemismus, Struktur).

Eine Analyse der Rostschichten an den Spundwänden ist erforderlich, damit elektrochemische und mikrobielle Korrosion in ihren jeweiligen Korrosionsprodukten erfassbar sind. Schwebstoffe und O<sub>2</sub>-Gehalte zeigen in einigen Gewässern eine scharfe Tiefenfunktion in Dezimereinheiten (Riedel-Lorjé et al. 1992). Darum wurde zusätzlich zur oberflächennahen Gewässerbeprobung im Sommer 2003 eine Tiefenprofilierung im Zuge der Winterbeprobung 2004 vorgenommen. Der Spundwandstahl wurde auf seine chemischen und mechanischen Eigenschaften hin untersucht.

### ***Standortauswahl***

Die nachfolgende Untersuchung soll ein möglichst breites Spektrum von Bauwerkstandorten abdecken, damit eine standortübergreifende Einschätzung der Erfordernisse an repräsentative Wanddickenmessungen erarbeitet werden kann. Die Auswahl der Bauwerke für das ESCS-Projekt erwies sich als schwierig. Da die Archivdaten Korrosionsmessungen aus zwei Jahrzehnten umfassen, haben sich örtliche Bedingungen an den Spundwänden verändert und mitunter keine Metall- und Rostbeprobungen mehr erlaubt. Die Bauzeit der ausgewählten Bauwerke reicht immerhin bis in das Jahr 1925 zurück (Tabelle A3-2), so dass einige ältere Spundwände aufgrund von Vorplattungen nach Durchrostung nicht mehr zugänglich waren. Daher liegen für bestimmte Standorte zwar Gewässermessungen vor, aber keine Metall- oder Rostuntersuchungen.

Die grobe Zuordnung eines Bauwerks zum Gewässermilieu musste in einigen Fällen nach Vorliegen der Leitfähigkeits- und Chloridwerte aus der Sommerbeprobung revidiert werden. Diese Zuordnung wird in den nachfolgenden Abschnitten auf der Grundlage einer multivariaten Analyse der Gewässerparameter für alle Bauwerke neu definiert. Als Vergleich dienen Messwerte aus benachbarten Dauermessstellen und Vorgaben nach DIN 81249 (Teil 1). Die Revision der Milieuzuordnung resultiert notwendig in leichten Einbußen bei der Orthogonalität der drei kontrollierten Faktoren (Alter, Milieu, Liegeplatz). Der Grundansatz einer möglichst breiten Streuung von Chloridwerten in den drei Altersgruppen hat sich aber im Versuchsdesign dennoch als sehr robust erwiesen.

Tabelle A3-2: Auswahl von Bauwerken für das ECSC-Projekt

Nr	Bauwerk	Ort	Messjahr	Baujahr
160	Südliche Leitwand	Oldenburg	1987	1925
110	Kanalstraße	Oldenburg	1988	1925
124	Torfplatzkaje	Oldenburg	1989	1927
275	Spundwandkaje	Neustadt	1999	1936
136	Spundwandprofil Larssen III	Emden Koenigspolder	1994	1939
nn14	Wangerooge Kai ( Ing. Knabe )	Wilhelmshaven	2001	1951
230	Eisabweiser	Travemünde	1996	1955
41	Versorgungskaje	Olpenitz	1993	1960
17	Spundwände	Kiel	1989	1961
222	Hafenseite	Travemünde	1995	1963
130	Nördliche Anschlußwand	Wilhelmshaven	1994	1963
83.1	MLK Alter 26	Espelkamp Fiestel	1990	1964
83.nn	MLK Alter 39	Espelkamp Fiestel	2003	1964
231	Fähranleger Landwehr, Nordseite	Landwehr	1996	1966
213	Nordseite	Hundsmühlen	1994	1968
126	Dockliegeplatz	Wilhelmshaven	1993	1968
122	Nordkaje 1. Abschnitt	Wilhelmshaven	1992	1968
153	Binnenhafen, Südseite	Kating	1987	1969
151	Sielöffnung, Nordseite	Kating	1987	1969
nn10	Tonnenhofskaje Wilhelmshaven	Wilhelmshaven	2003	1969
105	Oberkanal im Oberen Vorhafen	Bremen Hemelingen	1987	1970
85.1	MLK Alter 20	Liegeplatz Lübbecke	1990	1970
31	BGS-Mole Hafenseite	Neustadt	1990	1970
85.nn	MLK Alter 33	Liegeplatz Lübbecke	2003	1971
9	Hafenseite	Travemünde	1995	1971
14	Bollhörnkai Nord	Kiel	1988	1972
127	Ostkaje	Wilhelmshaven	1993	1972
233	Nord-Ostsee-Kanal	Sehstedt	1996	1973
266	Vordere Spundwand	Hörnum	1999	1974
84	MLK Alter 15	Espelkamp Hafen	1990	1975
132	Anschlußwand Oberer Vorhafen	Oldenburg Hundsmühlen	1994	1979
87	MLK Alter 10	Niederwöhren	1990	1980
nn9	Bauhofskaje (Alter: 21)	Brunsbüttel		1982
67	Tonnenhofskaje	Norderney	1990	1982
nn12	Westmole, Block 1-10	Büsum	2001	1982
112	Westliche Flügelwand, UW	Bremen Hemelingen	1989	1985
50	Spundwandkasten	Neustadt	1994	1986
138	Südliche Hafenanlage	Borkum	1996	1986
86	MLK Alter 3	Bückerburg Rusbend	1990	1987
nn5	Anleger 8	Travemünde	2001	1987
nn6	Anleger 8a	Travemünde	2001	1987

Insgesamt wurden 41 Bauwerke in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Wanddickenmessungen sind für 40 Bauwerke mit einem Korrosionsalter zum Messzeitpunkt zwischen 3 und 63 Jahren verfügbar. Drei Bauwerke repräsentieren den gleichen Standort, aber ein unterschiedliches Korrosionsalter (Bauwerke 83.1/83.nn; 85.1/85.n; 222/9). Der Stahlchemismus liegt für 36 Spundwände vor, Rostminerale aber nur für 23 – 33 je nach Zone. An 38 Standorten wurden Gewässerparameter aufgenommen, an 34 mit Tiefenprofilierung. Für 37 Bauwerke können diese Charakteristika in eine übergreifende multivariate Gesamtanalyse eingebracht werden. Die Hälfte

der Standorte besitzt einen Liegeplatz. Die Standorte liegen überwiegend in tidefreien Gewässern und in Gewässern mit hoher Strömung oder Turbulenz (Tabelle A3-3).

*Tabelle A3-3: Standortbedingungen der ausgewählten Bauwerke*

Nr	Altersgruppe	Liegeplatz	Tide	Strömung
160	>30	nein	ja	hoch
110	>30	nein	ja	hoch
124	>30	ja	nein	hoch
275	>30	ja	nein	niedrig
136	>30	ja	nein	niedrig
nn14	>30	ja	ja	hoch
230	>30	nein	nein	niedrig
41	>30	ja	nein	niedrig
17	20-30	nein	nein	niedrig
222	>30	nein	nein	niedrig
130	>30	nein	nein	niedrig
83.1	20-30	nein	nein	hoch
83.nn	>30	nein	nein	hoch
231	20-30	ja	nein	hoch
213	20-30	nein	nein	hoch
126	20-30	ja	nein	niedrig
122	20-30	nein	nein	niedrig
153	0-19	ja	ja	hoch
151	0-19	nein	ja	hoch
nn10	>30	ja	nein	niedrig
105	0-19	ja	nein	niedrig
85.1	20-30	ja	nein	hoch
31	20-30	ja	nein	niedrig
85.nn	>30	ja	nein	hoch
9	20-30	nein	nein	niedrig
14	0-19	ja	nein	niedrig
127	20-30	ja	nein	niedrig
233	20-30	ja	nein	hoch
266	20-30	ja	ja	hoch
84	0-19	ja	nein	hoch
132	0-19	nein	nein	hoch
87	0-19	nein	nein	hoch
nn9	20-30	nein	ja	
67	0-19	ja	ja	hoch
nn12	0-19	nein	ja	hoch
112	0-19	nein	ja	hoch
50	0-19	nein	nein	niedrig
138	0-19	ja	ja	hoch
86	0-19	ja	nein	hoch
nn5	0-19	ja	nein	niedrig
nn6	0-19	nein	nein	niedrig

## Gewässerparameter

Das Gewässermilieu ist neben Alter der wichtigste Faktor für die Abrostungstiefe und zeigte bereits in der Voruntersuchung in allen Höhenzonen signifikante partielle Korrelationen mit logarithmierten Korrosionsmaßen (Tabelle A3-10). Alter (metrisch) und Milieu (kategorial) erklärten gemeinsam je nach Höhenzone 50-80% der Varianz in den mittleren und maximalen Abrostungen der untersuchten Bauwerke. Bei der Voruntersuchung war der Parameter *Milieu* allerdings aus einer Rekodierung der in der BAW-Datenbank dokumentierten Lage der Bauwerke hervorgegangen und somit nicht über Salzgehalt klar definiert.

Das Gewässermilieu ist eine Sammelkategorie mehrerer Korrosionsfaktoren. Die hydrologische Einteilung in „limnisch / brackisch / marin“ erfolgt üblicherweise nach Salzgehalt oder Chloridgehalt. Eine Abgrenzung der unteren und oberen Brackwassergrenze nach der elektrischen Leitfähigkeit kann gemäß DIN 81249 (Teil 1) mit 1 - 33 mS/cm vorgenommen werden. Darüber hinaus korrespondiert diese Einteilung aber auch mit anderen Gewässereigenschaften, wie beispielsweise Spektrum an zweiwertigen Salzionen, Redoxpotential, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und organische Substanz.

Die Probennahme gliedert sich in zwei Messkampagnen: Sommer 2003 (*Graff & Partner*) und Wiederholungsmessungen im Winter/Frühjahr 2004 (20. Februar bis 10. März) durch das *Labor Dr. Weißling*. Die Probennahme wurde mit der „Rüttnerflasche“ durchgeführt. Für die Tiefenprofilierung wurden Tiefen vermessen und Wasserproben gezogen oder die Messsonde in entsprechender Tiefe platziert.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Milieueinteilung aufgrund multivariater Gruppierung der Sommermesswerte vorgeschlagen. Ein Vergleich der im Sommer gemessenen Chloridgehalte mit den Winterwerten zeigt, dass bei fast allen Standorten die Chloridgehalte im Sommer höher als im Winter waren (Bild A3-1).

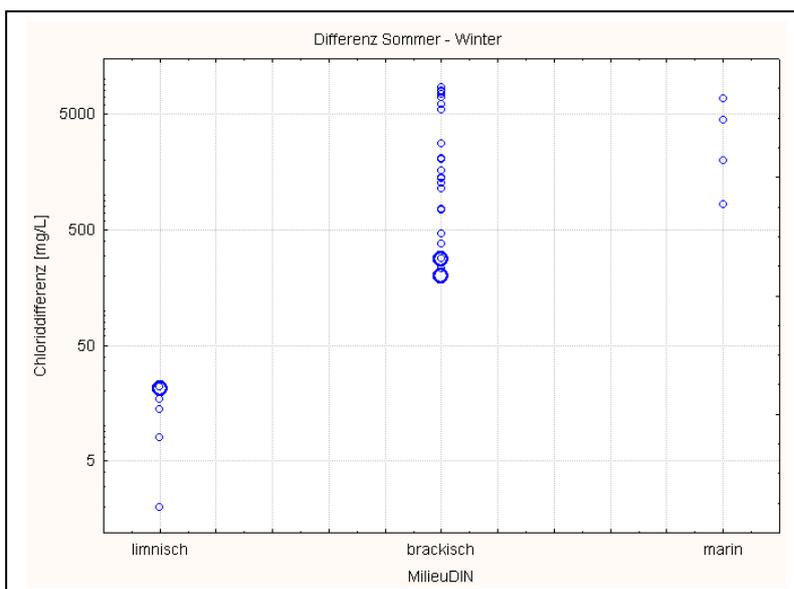


Bild A3-1: Differenz zwischen Chloridwerten aus Sommer und Winter

Der Unterschied ist im Süßwasserbereich am kleinsten und im Salzwasserbereich am größten. Die Ursache dürfte in einer lokal unterschiedlichen Aussüßung aufgrund erhöhten Oberwasserzuflusses in den regenreichen Wintermonaten liegen, von denen insbesondere küstennahe Standorte wie Buchten und Häfen betroffen sind. Wenn eine Milieuzuordnung der Standorte aufgrund der Leitfähigkeitsmessung an Sommerproben vorgenommen wird, ist eine Aussüßung des Brack- und Salzwassers im Winter zu beobachten (Bild A3-2).

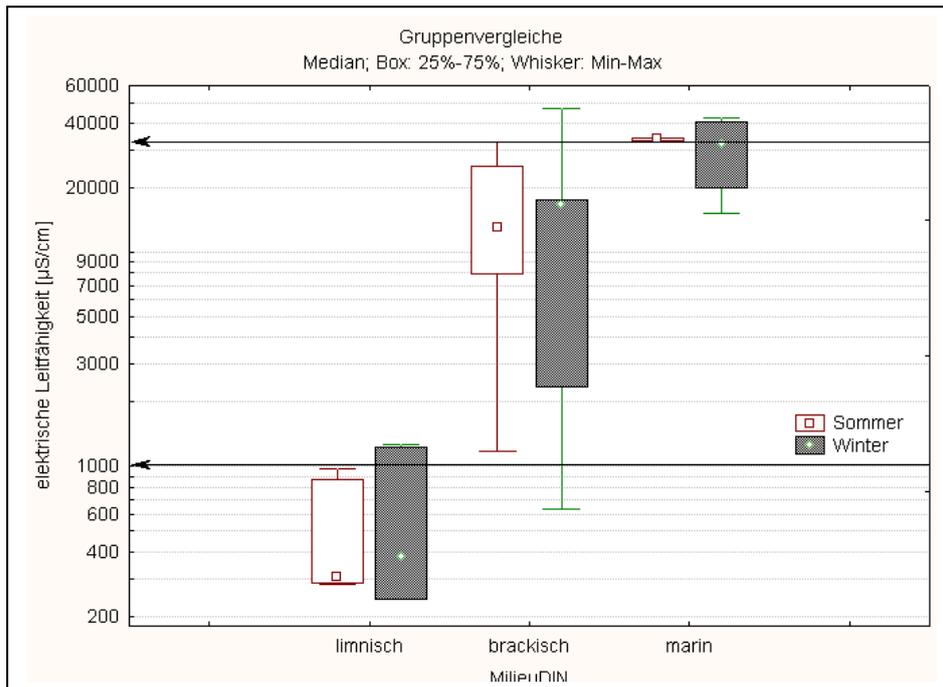


Bild A3-2: Elektrische Leitfähigkeit im Sommer und Winter

Da alle Gewässerproben oberflächennah genommen wurden, sind die abfallenden Chloridwerte im Winter teilweise auch Ausdruck einer örtlichen Schichtung von kaltem Süßwasser über wärmerem Salzwasser. Letzteres lässt sich aus der Tiefenprofilierung an mehreren Standorten bei Wilhelmshaven ablesen (Bild A3-3).

Die Repräsentativität der Sommer- und Wintermessung konnte zumindest für einige Standorte durch den Wertevergleich mit nahegelegenen Dauermessstellen gesichert werden, bei denen über mehrere Jahre monatliche Messungen durchgeführt wurden. Im Juli 2003 betrug bei Bauwerk 105 (Spundwände am alten Weserwehr) der mittlere Chloridgehalt 236,9 µg/l und bei Bauwerk 112 (Westliche Flügelwand) 230,8 µg/l, bei der nahegelegenen Dauermessstelle der ArgeWeserHemelingen im mehrjährigen Julimittel 701,7 µg/l. Die Sommermessung bei Bauwerk nn9 (Bauhofskaje Brunsbüttel) ergab 2808,6 µg/l Cl, die benachbarte Dauermessstelle (LANU-120023) 2590,6 µg/l Cl. Die Messung bei Bauwerk 230 (Eisabweispileier in der Trave) zeigte 6917,8 µg/l Cl, die 9 km entfernte Dauermessstelle (LANU-126054-Trave-9m) 6676,1 µg/l Cl. Die Abweichungen der mittleren Chloridkonzentrationen lagen also stets unter einem halben mg/l.

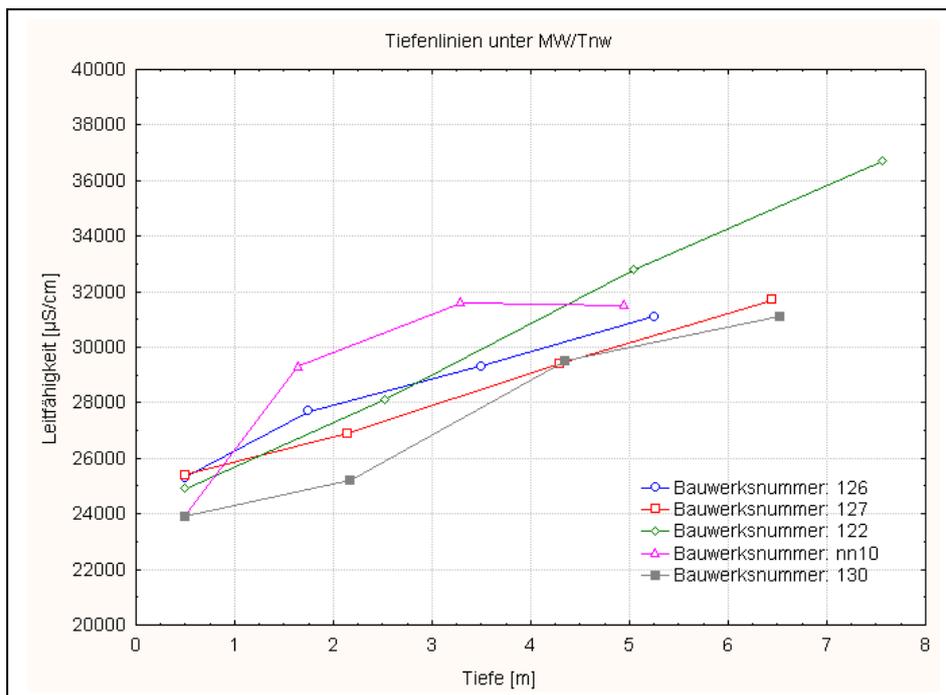


Bild A3-3: Tiefenprofile der elektrischen Leitfähigkeit im Winter

### **Milieuklassifikation mit multivariater Analyse**

Für eine Milieuklassifikation nach mehreren Gewässerparametern wurden verschiedene multivariate Verfahren miteinander kombiniert (zu den Verfahren s. Backhaus 1989, Gaensslen und Schubö 1973). Da viele Gewässerparameter hoch miteinander korrelieren (z.B. Chlorid und Sulfat), wurde zunächst eine Dimensionsreduktion mit der Hauptkomponentenanalyse vorgenommen. Dafür mussten unsymmetrisch verteilte Variablen vorher transformiert werden, teilweise über Logarithmierung oder über Dichotomisierung (Johnson 1970).

Mit den Hauptkomponenten wurde dann eine agglomerative Clusteranalyse durchgeführt (mit WARD als Fusionsregel), um die ungefähre Zahl von Gewässergruppen zu bestimmen. Die Gruppen wurden dann anschließend mit der K-Means-Clusteranalyse gefunden und stehen nun für weitere Analysen zur Verfügung. Die Gewässer anderer Bauwerke lassen sich dann später mit Hilfe einer Diskriminanzfunktion den neuen Milieugruppen zuordnen, die aus einer nachgeschalteten Diskriminanzanalyse gewonnen wurde.

Insgesamt stehen für diese Analyse pro Parameter 77 - 78 Messwerte zur Verfügung, da bei der Sommerbeprobung überwiegend zwei Messungen pro Standort gemacht wurden. Unter Berücksichtigung vereinzelter Messlücken bei verschiedenen Parametern verbleiben 73 Fälle mit kompletten Messergebnissen aller beteiligten Größen. Die resultierende Neudefinition des Milieus orientiert sich in seiner Gruppenabgrenzung nicht an den Grenzen nach Leitfähigkeit gemäß DIN 81249 (Teil 1), sondern stellt teilweise Überlappungsgruppen dar, weil auch der Verschmutzungsgrad und andere Parameter gruppenprägend sind (Tabelle A3-4).

Tabelle A3-4: Kreuztabellierung der Milieugruppen nach DIN und nach Clusteranalyse

DIN \ Cluster	limnisch	limn-brack	brackisch	brack-marin	Alle
limnisch	10	3	0	0	13
brackisch	0	10	13	30	53
marin	0	0	0	7	7
Alle	10	13	13	37	73

Die aus den Leitfähigkeitsmessungen resultierende große Gruppe der 53 Brackwasserstandorte wird in der Clusteranalyse nach anderen Gewässerparametern feiner unterteilt. Die Entwicklung dieser Neugruppierung mit vorgeschalteter Hauptkomponentenanalyse, Clusteranalyse und nachgeschalteter Diskriminanzanalyse wird nachfolgend beschrieben.

### Verteilung und Transformation

Die Konzentrationswerte von Sulfat und Phosphat zeigen eine linksgipflige Verteilung mit Annäherung an die Lognormalverteilung, so dass sie für weitere Analysen logarithmiert wurden (Bild A3-4). Viele Konzentrationen von Nitrat und Ammonium lagen unter der Nachweisgrenze, so dass hier notwendig ein mehrmodales Häufigkeitsbild entsteht.

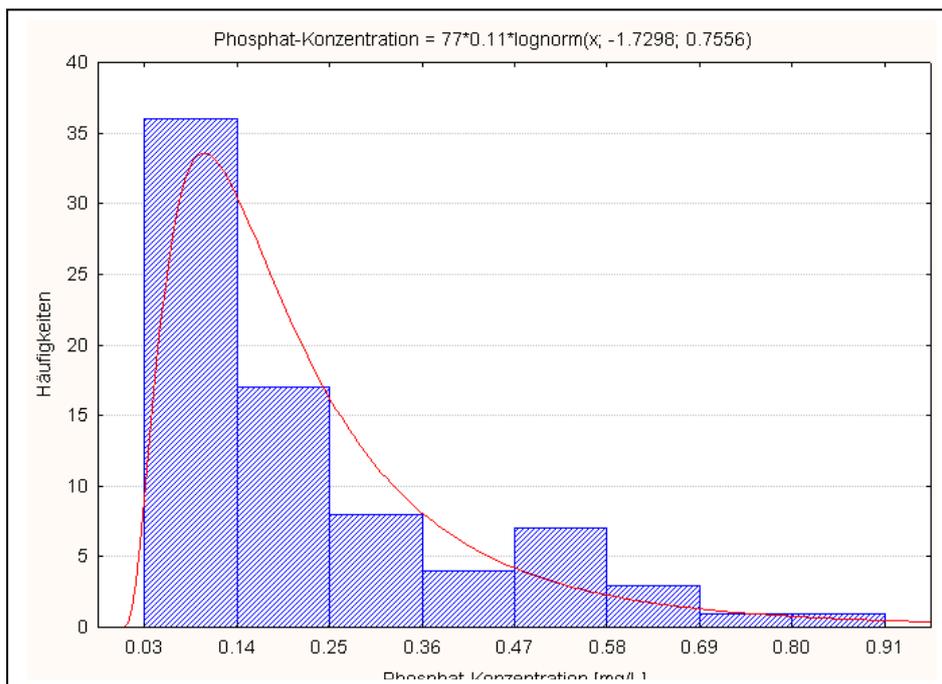


Bild A3-4: Lognormalverteilung der Phosphat-Konzentration

Die zugehörigen Messinformationen können aber über Dichotomisierung eingebracht werden, d.h. durch Bildung einer binären Variablen mit Wertebereich über und unter der Nachweisgrenze. Die übrigen Parameter wurden in der ursprünglichen Form belassen.

## Hauptkomponentenanalyse

Mit dem resultierenden Satz von 13 Variablen wurde dann eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, um die internen Korrelationen zu bündeln und ein orthogonales System von Achsen für die Clusteranalyse und die Regressionsanalyse zu bekommen. Jeder extrahierte Faktor stellt eine neu gebildete Variable dar, deren Einzelwerte (scores) eine Linearkombination von Werten der Ursprungsvariablen sind. Die Korrelation zwischen Faktor und Ursprungsvariablen wird als Ladungen des Faktors in der jeweiligen Variablen bezeichnet.

Bei der Hauptkomponentenanalyse wird die *gesamte Variabilität* einer Variablen in die Analyse einbezogen. Insgesamt wurden vier Hauptkomponenten mit einem erklärten Varianzanteil von fast 80% extrahiert. Die erste Komponente bündelt knapp 40% der Varianz und korreliert (Faktorladung) stark mit Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat, Nitrat und Calcium und wurde daher "Salzfaktor" genannt. Die zweite Komponente korreliert mit pH-Wert, Säurekapazität und Redoxspannung und wurde "Säurefaktor" genannt. Die dritte Komponente korreliert mit Wassertemperatur, Phosphat und gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) und dürfte wohl als "Schmutzfaktor" anzusprechen sein. Die vierte Komponente korreliert mit Sauerstoffkonzentration und Ammonium und wurde "O<sub>2</sub>-Faktor" genannt (Tabelle A3-5). Der Gewässerchemismus kann also durch vier Faktoren charakterisiert werden, die ein orthogonales Achsensystem bilden und sich daher für weitere Analysen besser eignen als die ursprünglichen Messwerte.

Tabelle A3-5: Faktorladungen der Hauptkomponenten

Messgröße	Salzfaktor	Säurefaktor	Schmutzfaktor	O <sub>2</sub> -Faktor
Wassertemperatur [°C]	-0,41	0,30	0,58	-0,11
pH-Wert	-0,29	0,78	0,01	-0,28
Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/L]	0,11	0,87	0,06	0,02
spez. el. Leitfähigkeit [µS/cm]	-0,96	0,05	0,08	0,04
Redoxspannung Eh [mV]	0,32	-0,37	0,06	0,09
Sauerstoffkonzentration [mg/L]	0,55	0,14	-0,02	-0,69
Chloridkonzentration [mg/L]	-0,97	0,06	0,07	0,03
NitratBin [< / > NWG]	0,86	0,00	-0,14	0,24
LnSulfat [mg/L]	-0,91	0,30	0,15	-0,04
Calciumkonzentration [mg/L]	-0,89	0,17	0,06	0,01
LnPhosphat [mg/L]	-0,09	0,15	0,74	0,39
AmmoniumBin [< / > NWG]	0,40	-0,18	0,04	0,74
Gel. org. Kohlenstoff (DOC) [mg/L]	0,03	-0,45	0,77	-0,19
Erklärte Varianz	5,07	2,00	1,54	1,37
Anteil Gesamtvarianz	0,39	0,15	0,12	0,11

Die Faktorwerte einer Gewässerprobe werden dann als Linearkombination der gemessenen Gewässerparameter berechnet. Die zugehörige Gleichung hat die Form:

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_m \cdot x_m, \quad (\text{A3-5})$$

wobei  $b_1 \dots b_m$  die jeweiligen Koeffizienten der  $m$  standardisierten Prädiktorvariablen sind (Tabelle A3-6). Ein Absolutglied  $b_0$  entfällt stets bei standardisierten Variablen.

Tabelle A3-6: Koeffizienten der vier Hauptkomponenten

Messgröße (standardisiert)	Salzfaktor	Säurefaktor	Schmutzfaktor	O2-Faktor
Wassertemperatur [°C]	-0.001	0.132	0.376	-0.070
pH-Wert	0.017	0.377	0.014	-0.107
Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/L]	0.121	0.514	0.076	0.126
spez. el. Leitfähigkeit [µS/cm]	-0.209	-0.061	-0.049	0.047
Redoxspannung Eh [mV]	0.041	-0.167	0.058	0.013
Sauerstoffkonzentration [mg/L]	0.149	0.045	0.088	-0.518
Chloridkonzentration [mg/L]	-0.213	-0.062	-0.057	0.040
NitratBin [< / > NWG]	0.181	0.118	-0.023	0.185
LnSulfat [mg/L]	-0.163	0.078	0.020	0.012
Calciumkonzentration [mg/L]	-0.181	0.008	-0.044	0.041
LnPhosphat [mg/L]	0.067	0.146	0.495	0.279
AmmoniumBin [< / > NWG]	0.069	0.040	0.029	0.538
Gel. org. Kohlenstoff (DOC) [mg/L]	0.043	-0.259	0.538	-0.248

Standardisierte Werte (Z-Werte) erhält man aus den Originalmesswerten durch Abzug des Mittelwerts und Teilen durch die Standardabweichung ( $Z = (X - MW) / S$ ). Einige Parameter gehen hier allerdings in logarithmierter oder dichotomisierter Form ein (mit 0 bzw. 1 für kleiner oder größer Nachweisgrenze), was auch bei der Standardisierung zu berücksichtigen ist (Tabelle A3-7).

Tabelle A3-7: Erforderliche Kennwerte zur Standardisierung

Messgröße	Mittelwert	Standardabweichung
Wassertemperatur [°C]	21,29	1,24
pH-Wert	8,04	0,43
Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/L]	2,34	0,43
spez. el. Leitfähigkeit [µS/cm]	15016,91	12579,31
Redoxspannung Eh [mV]	375,02	46,82
Sauerstoffkonzentration [mg/L]	8,84	1,42
Chloridkonzentration [mg/L]	7619,24	6292,54
NitratBin [< / > NWG]	0,41	0,50
LnSulfat [mg/L]	6,27	1,32
Calciumkonzentration [mg/L]	171,35	97,34
LnPhosphat [mg/L]	-1,73	0,76
AmmoniumBin [< / > NWG]	0,58	0,50
Gelöster org. Kohlenstoff (DOC) [mg/L]	4,22	2,11

## Clusteranalyse

Mit den Faktoren aus Gewässerparametern wurde dann eine agglomerative Clusteranalyse durchgeführt, wobei als Fusionsregel die WARD-Methode verwendet wurde. Es ergaben sich etwa vier Gruppen, die noch mit ausreichenden Beobachtungsfällen besetzt sind (Bild A3-5). Die Gruppenzuordnung wurde dann anschließend mit der K-Means-Clusteranalyse gefunden, welche auch die an der Clusterbildung beteiligten Faktoren identifiziert. Die Mittelwerte der Gewässerparameter für die vier gefundenen Gruppen definieren die neuen Milieuklassen (Tabelle A3-8).

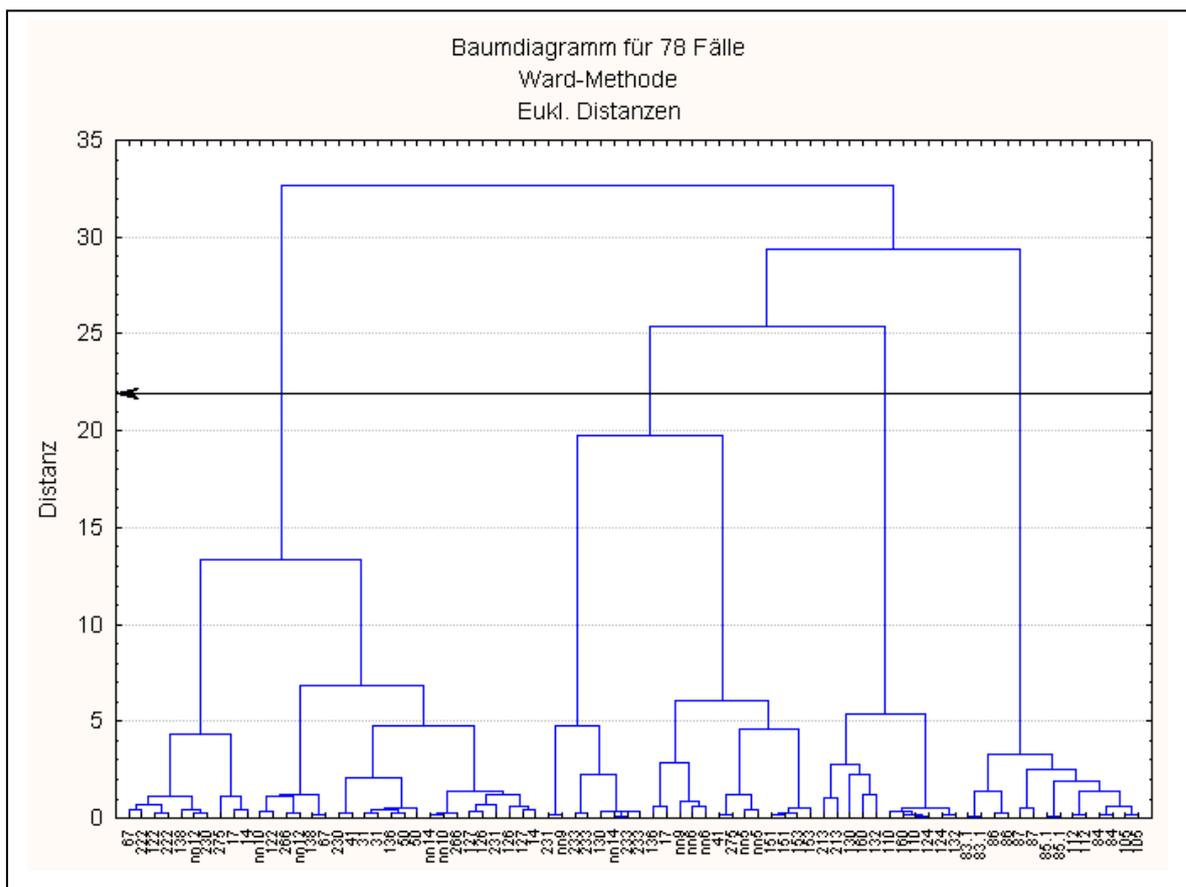


Bild A3-5: Agglomerative Clusteranalyse der Faktoren aus Gewässerparametern

Das erste Cluster zeigt niedrige Werte für elektrische Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat, und Calcium und wurde daher "limnisch" genannt. Diese Gruppe wird außerdem durch niedrige pH-Werte und niedrige Säurekapazität aber hohe Redoxspannung und hohe DOC-Werte gekennzeichnet, was auf Kontamination der Gewässer hindeutet. Das zweite Cluster hat etwas höhere Werte für elektrische Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat, und Calcium und ist daher als "limnisch-brackisch" anzusprechen. Geringere Werte an DOC, Nitrat und Phosphat als die erste Gruppe deuten auf einen entsprechend geringeren Verschmutzungsgrad hin. Das dritte Cluster ist nach Salzgehalten als "brackisch" einzustufen, zeigt aber mit den höchsten Nitrat- und Phosphat- und DOC-Werten eine starke Kontamination an. Das vierte Cluster ist "brackisch-marin" mit geringstem Sauerstoff- und Nitratgehalt aller Gruppen.

Tabelle A3-8: Mittelwerte der Gewässerparameter für Cluster

Cluster	Wassertemp. [°C]	pH-Wert	Säurekap. [mmol/L]	Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Redox Eh [mV]	Sauerstoff [mg/L]	
1	20,0	7,11	1,63	298	428,5	9,48	
2	20,2	8,19	2,82	1251	373,1	9,53	
3	22,1	8,36	2,64	10185	362,9	10,40	
4	21,7	8,11	2,27	25616	366,2	7,89	
Cluster	Chlorid [mg/L]	Nitrat [mg/L]	Sulfat [mg/L]	Calcium [mg/L]	Phosphat [mg/L]	Ammonium [mg/L]	DOC [mg/L]
1	49	11,3	45	39,7	0,214	0,068	6,00
2	345	9,2	140	78,1	0,123	0,077	1,61
3	5609	19,5	669	151,7	0,289	0,046	6,27
4	13013	4,6	1565	247,5	0,258	0,062	4,04

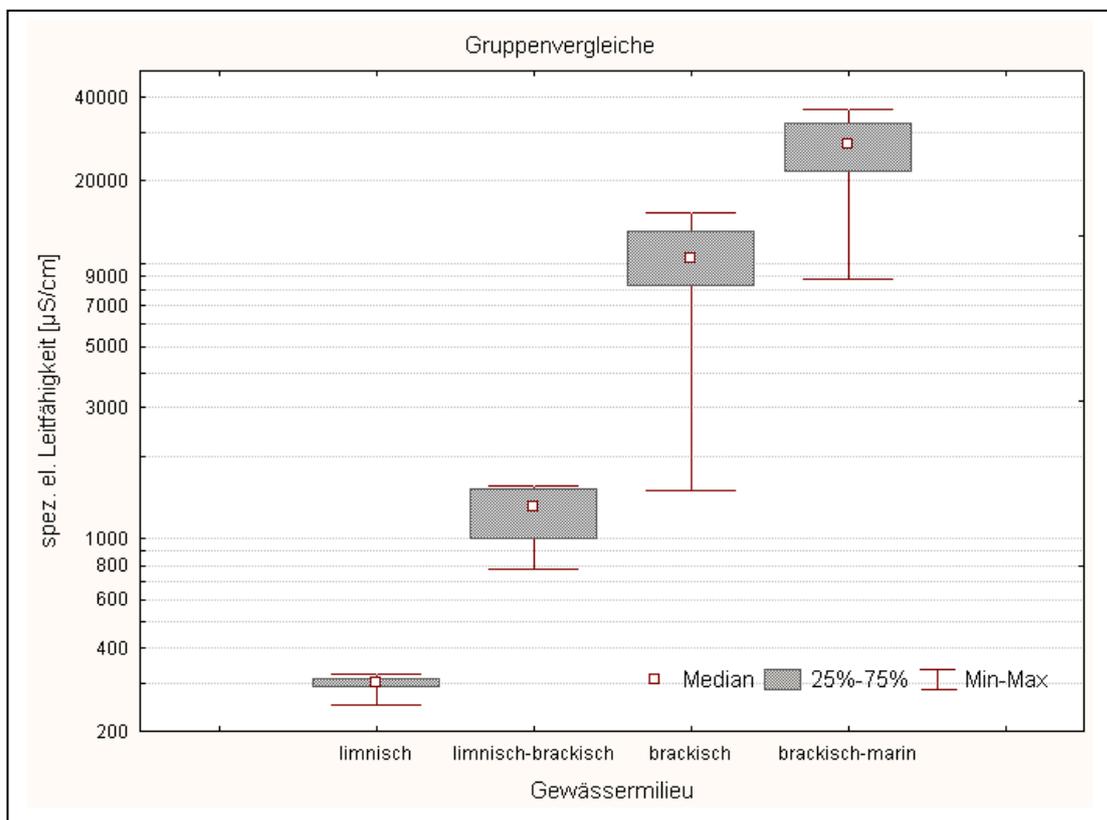


Bild A3-6: Elektrische Leitfähigkeit für neue Milieuklassen

### Diskriminanzanalyse

Mit einer nachgeschalteten Diskriminanzanalyse werden Klassifikationsfunktionen gewonnen, mit der sich andere Gewässer später den neuen Milieugruppen zuordnen lassen. Zur Gruppentrennung wird zunächst das Achsensystem der Prädiktorvariablen durch eine Transformationsfunktion (vergleichbar der Hauptkomponentenanalyse) in eine Lage gebracht, welche die Varianz der Gruppenmittelwerte gegenüber der Varianz der Residualwerte maximiert. Das neue (rotierte) Achsensystem wird aus Linearkombinationen der Prädiktorvariablen (kanonische Variable oder Root) gebildet. Die zugehörige Gleichung hat die Form:

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_m * x_m \quad (A3-6)$$

wobei  $b_0$  das Absolutglied ist, und  $b_1 \dots b_m$  die Koeffizienten der Prädiktorvariablen sind. Je größer der standardisierte Koeffizient, desto größer ist der Beitrag der entsprechenden Variablen zur Trennung zwischen den Gruppen. Die Prädiktorselektion für diese kanonischen Funktionen wurde mit schrittweisen Verfahren durchgeführt. Dabei erwiesen sich pH-Wert, Säurekapazität, Sauerstoff, Chlorid, Sulfat, Phosphat und DOC als bestimmend für die Milieugruppen.

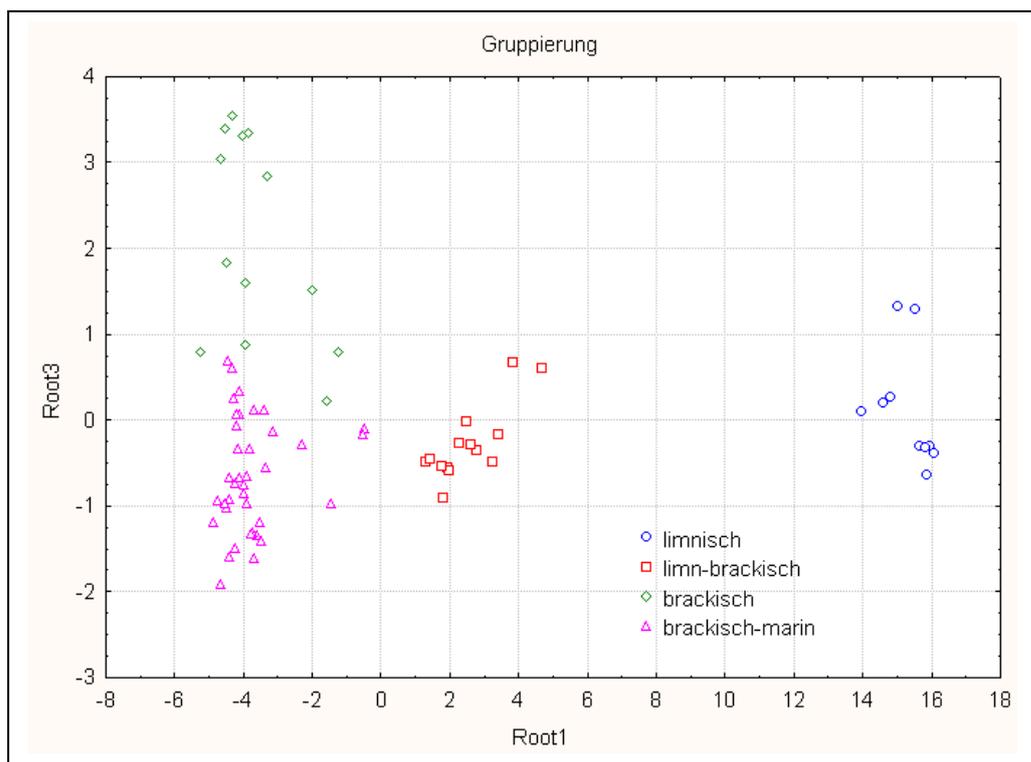


Bild A3-7: Milieuklassen im Achsensystem zweier kanonischer Funktionen

### Klassifikation und Klassifikationsfunktionen

Mit Hilfe der Klassifikationsfunktionen wird bestimmt, in welche Gruppe jeder Fall höchstwahrscheinlich gehört. Es gibt genauso viele Klassifikationsfunktionen, wie es Gruppen gibt. Jede Funktion erlaubt die Berechnung von Klassifikationswerten für jeden Fall und für jede Gruppe durch Anwendung der Formel:

$$S_i = c_i + w_{i1} * x_1 + w_{i2} * x_2 + \dots + w_{im} * x_m \quad (A3-7)$$

In dieser Formel bezeichnet der Index i die Gruppe; die Indizes 1, 2, ..., m die m Variablen; c<sub>i</sub> eine Konstante für die i-te Gruppe, w<sub>ij</sub> das Gewicht der j-ten Variable in der Berechnung des Klassifikationswertes für die i-te Gruppe; x<sub>j</sub> ist der beobachtete Wert für den entsprechenden Fall für die j-te Variable. S<sub>i</sub> ist der resultierende Klassifikationswert. Im Allgemeinen erfolgt die Klassifikation des Falls in diejenige Gruppe, für die er den höchsten Klassifikationswert besitzt.

Tabelle A3-9: Klassifikationsfunktionen für Milieuklassen (Höchstwert = Klasse)

Messgröße	limnisch	limn-brack	brackisch	brack-marin
pH-Wert	203,21	248,04	247,34	238,73
Säurekapazität bis pH 4,3	112,20	164,24	143,94	131,89
Sauerstoffkonzentration	-6,25	-12,23	-9,20	-11,32
Chloridkonzentration	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03
LnSulfat	224,60	285,21	357,09	370,70
LnPhosphat	-14,16	-21,06	-16,25	-15,98
Gelöster org. Kohlenstoff (DOC)	8,16	5,72	9,53	8,67
Konstante	-1248,77	-1918,85	-2291,22	-2261,53

Eine Milieuzuordnung anderer Gewässer erfordert also die Messung von pH-Wert, Säurekapazität, Sauerstoff, Chlorid, Sulfat (logarithmisch), Phosphat (logarithmisch) und DOC. Die Messwerte werden dann in die Klassifikationsfunktionen eingesetzt, d.h. mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert und dann zusammen mit der Konstante aufsummiert. Der höchste Klassifikationswert ergibt dann die Milieuzuordnung. Die Klassifikationsfunktion arbeitet allerdings nur dann zuverlässig, wenn die nicht enthaltenen Gewässerparameter innerhalb des üblichen Streubereichs liegen (d.h., wenn die Wassertemperatur beispielsweise lokal auf 26° C steigen und damit außerhalb des beobachteten Bereichs der Sommerwerte von 19,0°C - 23,5°C liegen würde, könnte das auch den internen Zusammenhang obiger Größen beeinträchtigen).

### Saisonale Konzentrationsschwankungen

Die Saisondynamik der Gewässerparameter beschränkt sich nicht nur auf die bereits beschriebenen Differenzen in den Chloridgehalten, sondern auch auf andere Messgrößen. Die örtliche Wassertemperatur hat erwartungsgemäß die größte Saisonschwankung, die pH-Werte die geringste. Die Salzparameter zeigen aufgrund der bereits beschriebenen Aussüßung im Winter niedrigere Werte als im Sommer und damit Saisonquotienten über 1. Bei kühleren Temperaturen kann sich mehr Sauerstoff im Wasser lösen, so dass hier der Saisonquotient im Mittel kleiner als 1 ist. Außerdem ist der Abbau organischer Substanz im Winter durch nachlassende biologische Aktivität gehemmt, was die sehr kleinen Quotientenwerte von überwiegend 0,3 bis 0,8 erklärt (Tabelle A3-10).

Tabelle A3-10: Kennwerte für Quotienten aus Sommer- und Winterwerten

Messgröße [Sommerwert/Winterwert]	Mittelwert	Median 50%	Quartil 25%	Quartil 75%
SoWi-WasTemp	8,0	7,2	5,7	10,2
SoWi-pH	1,0	1,0	1,0	1,1
SoWi-Säurekap.	1,5	1,1	1,0	1,3
SoWi-Leitf	1,3	1,3	0,8	1,4
SoWi-Redox	1,3	1,3	0,9	1,7
SoWi-O2	0,9	0,9	0,8	0,9
SoWi-Chlorid	2,0	1,4	1,1	2,1
SoWi-Sulfat	1,3	1,1	1,0	1,6
SoWi-Calcium	1,3	1,2	1,0	1,5
SoWi-DOC	0,5	0,5	0,3	0,8

Die Korrelationen zwischen den Saisonquotienten wurden mit einer Hauptkomponentenanalyse gebündelt (Tabelle A3-11). Viele Parameter zeigten ein linksgipfliges Verteilungsbild und wurden über eine Logtransformation in die Analyse eingebracht. Da für Phosphat und Ammonium keine Winterwerte verfügbar sind, konnten keine Saisonquotienten ermittelt werden. Die Nitratwerte lagen im Sommer und im Winter oft unter der Nachweisgrenze, so dass die zugehörigen Quotienten kaum Variabilität zeigten und nicht in die Hauptkomponentenanalyse eingebunden wurden.

Tabelle A3-11: Faktorladungen der Hauptkomponenten

Messgröße [Sommerwert/Winterwert]	SaisonSalz	SaisonSäure	SaisonSchmutz	SaisonO2
SoWi-WasTemp	-0,10	-0,19	-0,91	-0,12
SoWi-pH	0,02	0,75	0,26	0,33
LnSoWi-Säurekap.	0,10	0,83	0,24	0,24
LnSoWi-Leitf	0,86	0,06	-0,07	0,13
SoWi-Redox	-0,36	0,67	0,36	-0,39
SoWi-O2	0,04	0,24	0,11	0,93
LnSoWi-Chlorid	0,85	0,01	0,32	0,04
LnSoWi-Sulfat	0,89	0,15	0,13	-0,04
LnSoWi-Calcium	0,44	0,83	-0,03	0,02
SoWi-DOC	-0,49	-0,37	-0,63	-0,01
Erklärte Varianz	2,84	2,65	1,61	1,21
Anteil Gesamtvarianz	0,28	0,27	0,16	0,12

Die Faktorenstruktur der Saisonquotienten deckt sich mit der Faktorenstruktur der Sommermesswerte (vergl. Tabelle A3-5). So ergeben sich jeweils Saisonfaktoren für Salz, Säure, Verschmutzung und Sauerstoff, die insgesamt 83% der Variabilität der Quotientenwerte erklären. Diese Faktoren stehen bei der Suche nach möglichen Korrosionsursachen als neue Variablen zur Verfügung. Sie werden als gewichtete Summe der standardisierten Saisonquotienten berechnet (Tabelle A3-11b).

*Tabelle A3-11b: Faktorkoeffizienten der Hauptkomponenten*

Messgröße [Sommerwert/Winterwert]	SaisonSalz	SaisonSäure	SaisonSchmutz	SaisonO2
SoWi-WasTemp	0.084	0.210	-0.726	-0.068
SoWi-pH	-0.073	0.277	-0.021	0.194
LnSoWi-Säurekap.	-0.033	0.335	-0.075	0.097
LnSoWi-Leitf	0.334	0.008	-0.180	0.040
SoWi-Redox	-0.176	0.306	0.148	-0.415
SoWi-O2	-0.076	-0.035	0.011	0.796
LnSoWi-Chlorid	0.295	-0.128	0.172	-0.031
LnSoWi-Sulfat	0.334	0.016	-0.041	-0.129
LnSoWi-Calcium	0.150	0.438	-0.348	-0.125
SoWi-DOC	-0.106	0.021	-0.376	0.081

Zur Standardisierung sind stets Mittelwert und Standardabweichung der ursprünglichen oder transformierten Werte der Saisonquotienten aus den hier untersuchten Standorten einzusetzen (Tabelle A3-11c), auch wenn Saisonfaktoren für neue Standorte aus den Faktorkoeffizienten ermittelt werden müssen.

*Tabelle A3-11c: Erforderliche Kennwerte zur Standardisierung*

Messgröße [Sommerwert/Winterwert]	Mittelwert	Standardabweichung
SoWi-WasTemp	8.01	2.89
SoWi-pH	1.02	0.06
LnSoWi-Säurekap.	0.24	0.44
LnSoWi-Leitf	0.14	0.44
SoWi-Redox	1.30	0.40
SoWi-O2	0.88	0.19
LnSoWi-Chlorid	0.50	0.52
LnSoWi-Sulfat	0.20	0.34
LnSoWi-Calcium	0.24	0.33
SoWi-DOC	0.54	0.29

Standardisierte Werte (Z-Werte) erhält man aus den Originalmesswerten durch Abzug des Mittelwerts und Teilen durch die Standardabweichung ( $Z = (X - MW) / S$ ). Viele Parameter gehen hier allerdings in logarithmierter Form ein (z.B. die Saisonquotienten der Säurekapazität und der Leitfähigkeit), was auch bei der Standardisierung zu berücksichtigen ist (Tabelle A3-11c).

### **Tiefengradienten für Gewässerparameter**

Der Süßwasserzufluss im Winter kann örtlich zu einer Schichtung von kaltem Süßwasser über wärmerem Salzwasser führen, was an mehreren Standorten bei Wilhelmshaven zu beobachten ist (siehe oben). Weil auch andere Parameter eine Tiefenprofilierung zeigen, sollte deren möglicher Einfluss auf Tiefengradienten der Korrosion untersucht werden.

Für die Wintermessungen von Wassertemperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotential und Sauerstoffkonzentration wurden Profile mit Messungen für 25%, 50% und 75% Tiefe zur Tideniedrigwasserlinie erstellt. Für drei Bauwerke (83.1/83nn, 153, nn12) war infolge geringer Wassertiefe der Messabstand zwischen den Tiefen unter 1 m, sodass keine sinnvollen Gradienten ermittelt werden konnten und diese für Folgeanalysen auf 0 gesetzt wurden.

Bei den untersuchten Parametern liegen die meisten Mediane der Gradientenwerte bei 0, was auf eine Zufallsstreuung der Gradientenwerte infolge der üblichen Messungenauigkeiten hinweist (Tabelle A3-12). Die geringste Variationsbreite weisen die Gradienten der pH-Werte auf, die alle bei 0 oder dicht darunter liegen. Die zum Teil sehr hohen Gradienten der Leitfähigkeitswerte sind überwiegend auf die bereits angesprochene Wasserschichtung bei Wilhelmshaven zurückzuführen, werden aber auch für Hörnum (Bauwerk 266) ausgewiesen.

*Tabelle A3-12: Kennwerte für Gradienten der Wassertiefe*

Messgröße [pro Tiefenmeter]	Mittelwert	Median 50%	Quartil 25%	Quartil 75%
Gradient-Wassertemp.	0.01	0.00	-0.04	0.0
Gradient-pH	-0.01	0.00	-0.03	0.0
Gradient Leitfähigkeit	185.82	0.00	0.00	41.7
Gradient-Redoxspannung	2.22	0.10	-0.57	4.2
Gradient-Sauerstoffgehalt	0.01	0.00	-0.05	0.0

Am MKL, bei Hörnum und im NOK (Bauwerke 84, 266, 231) steigt das Redoxpotential mit der Wassertiefe. Gleiches gilt auch für den Sauerstoffgehalt am Weserwehr, an der Schleimündung und bei Wilhelmshaven (Bauwerke 105, 41, 126). Selten fallen die Sauerstoffwerte mit der Tiefe ab, wie in der Kieler Förde und im Hafen von Wilhelmshaven (Bauwerke 14, 122). Die Gradienten von Redoxspannung und Sauerstoffkonzentration sind unabhängig voneinander und sind im limnisch-brackischen bis brackisch-marinen Milieu zu beobachten (Bild A3-8).

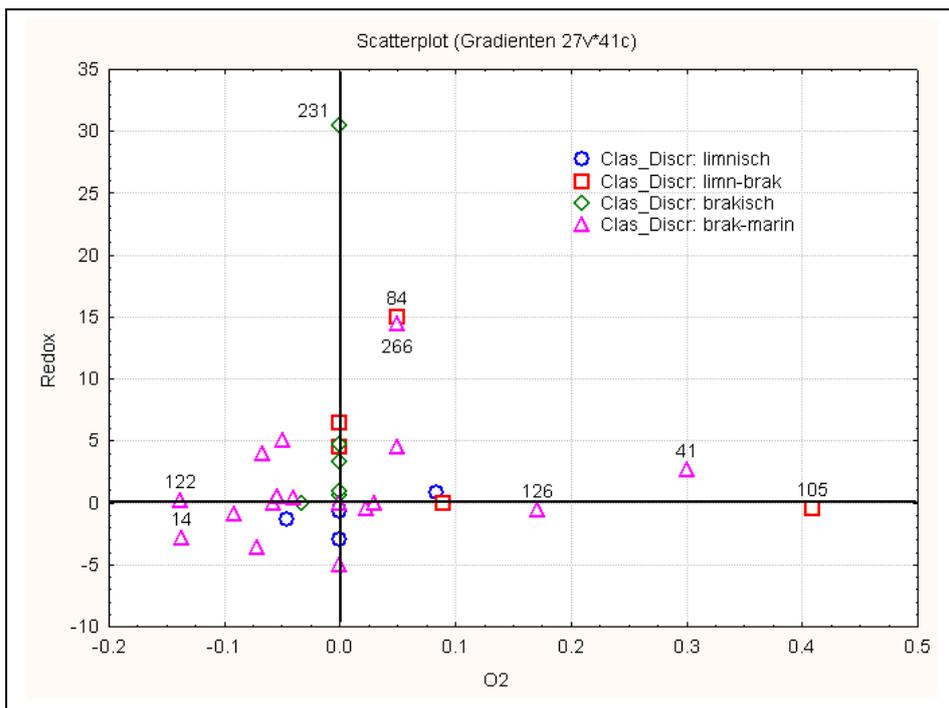


Bild A3-8: Tiefgradienten für Redoxspannung und Sauerstoffgehalt

Erwartungsgemäß korrelieren die Gradienten von Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur negativ, weil sich bei kühleren Temperaturen mehr Sauerstoff im Wasser lösen kann. Bei den genannten Bauwerken treten aber bei vergleichbaren Temperaturgradienten zu hohe oder zu niedrige Sauerstoffgradienten auf (Bild A3-9).

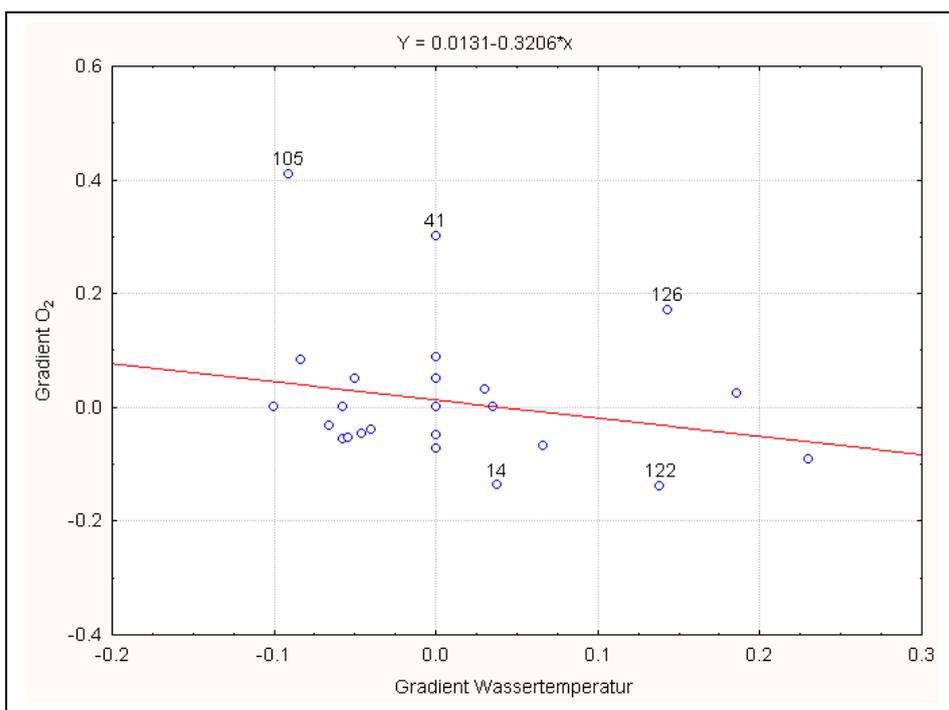


Bild A3-9: Tiefgradienten für Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt

Die jeweiligen Gradienten von pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxspannung und Sauerstoffkonzentration sind nahezu unabhängig voneinander und eignen sich so als potentielle Faktoren in der multivariaten Ursachenforschung für die Korrosion. Die beiden Erstgenannten zeigen kein homogenes Verteilungsmuster und können nur in dichotomisierter Form in die Analyse einbezogen werden (pH: 0 / <0; Leitfähigkeit: 0 / >0). Die Gradienten von Redoxspannung und Sauerstoffkonzentration sind linksgipflig verteilt und gehen in logtransformierter Form in die Analyse ein.

## Metallparameter

Über die Eigenschaften des Metalls oder die mineralogische Zusammensetzung des Rostes einer korrodierten Spundwand lagen bisher in der Datenbank der BAW keinerlei Informationen vor. Die Probennahme und chemisch-physikalische Analyse im Rahmen des ECSC-Projekts eröffnet somit erstmals die Möglichkeit, die mögliche Beziehung zwischen Metalleigenschaften und Korrosionsvorgang unter Kontrolle der jeweiligen Milieubedingungen zu untersuchen.

Die Probennahme von Stahl und Rost an den Stahlspundbohlen erfolgte durch die BAW und sollte Kenntnisse über die Korrosionsbereitschaft des Stahls eröffnen und Hinweise auf Korrosionsursachen liefern. Die Stahlproben wurden so genommen, dass die Längsstreckung der Probe in der vertikalen Spundbohlenrichtung lag, und anschließend für die chemische Analytik und die Anfertigung für Schlitze vorbereitet. Die Schlitze wurden an der Universität Karlsruhe (Institut für Werkstoffkunde I) angefertigt, mikroskopiert und einer Korngrößenvermessung unterzogen. Chemische Untersuchungen wurden im Labor von ARCELOR (ehem. ARBED), Esch-sur-Alzette mittels Emissionsspektroskopie durchgeführt.

In Orientierung an den üblichen Grenzwerten an Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel wurden alle Stahlproben von der BAW (Karlsruhe) als Baustahl klassifiziert. Auch die Anschlitze der Stähle zeigen unter dem Mikroskop das für Baustähle typische ferritisch-perlitische Gefüge. Alle gemessenen chemischen und physikalischen Eigenschaften haben allerdings eine breite Variabilität, deren möglicher Einfluss auf die Korrosion zu klären ist. Bei vielen Werten ist eine Gruppierung erkennbar, die auf verschiedene Subtypen mit unterschiedlichen Stahleigenschaften schließen lässt.

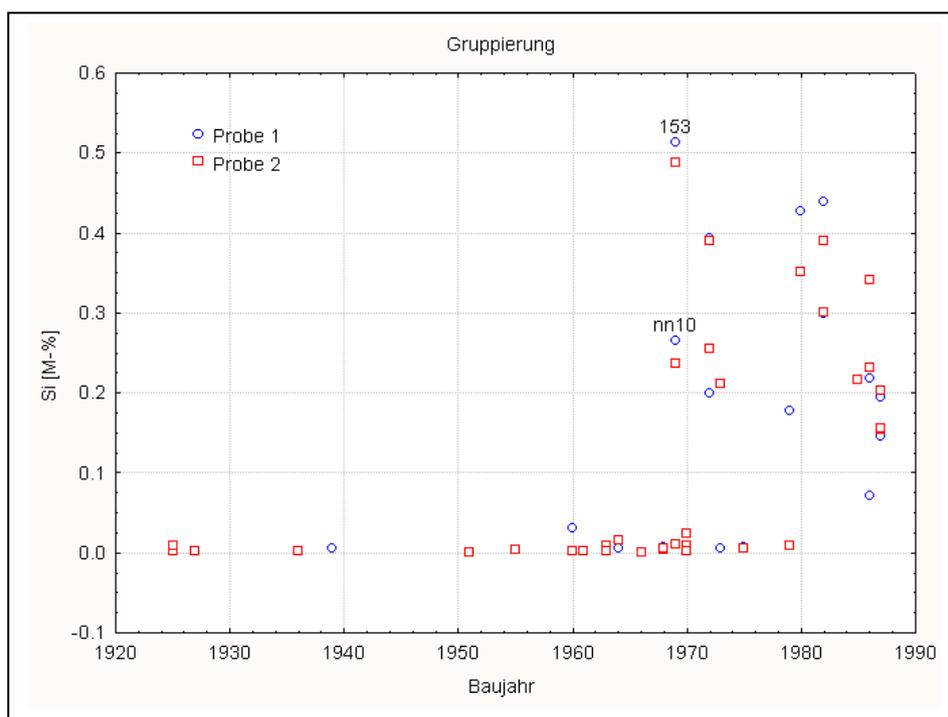


Bild A3-10: Siliziumgehalt im Stahl und zugehöriges Baualter

Bauwerke mit Spundwänden, die ab 1969 gesetzt wurden (z.B. Nr. 153 und Nr. nn10), zeigen beispielsweise sehr viel höhere Siliziumgehalte als ältere Bauwerke (Bild A3-10). Ein ähnliches Verhalten zeigen Mangan, Kohlenstoff, Aluminium und andere Elemente. In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Subklassifizierung des Stahls aufgrund multivariater Gruppierung der Messwerte vorgeschlagen.

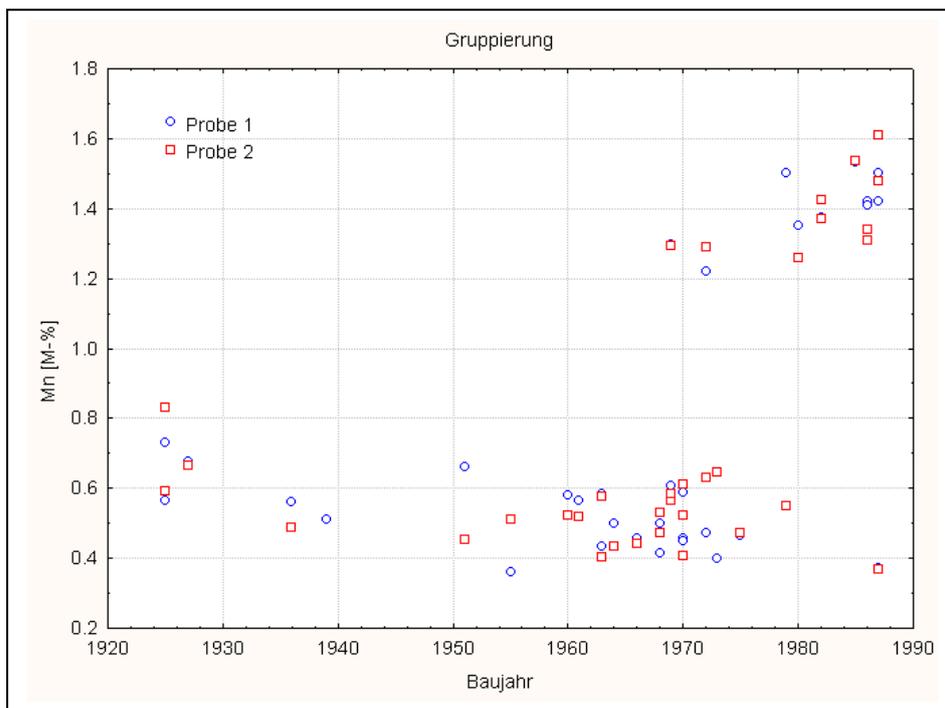


Bild A3-11: Mangangehalt im Stahl und zugehöriges Baualter

### **Stahlklassifikation mit multivariater Analyse**

Für eine Stahlklassifikation nach chemischen und physikalischen Parametern wurden verschiedene multivariate Verfahren miteinander kombiniert (ähnlich wie bei der Milieuklassifikation). Da viele Stahlparameter hoch miteinander korrelieren (z.B. Molybdän und Nickel) wurde zunächst eine Dimensionsreduktion mit der Hauptkomponentenanalyse vorgenommen. Dafür mussten die 11 unsymmetrisch verteilten Variablen vorher logarithmisch transformiert werden.

Mit den Hauptkomponenten wurde dann eine agglomerative Clusteranalyse durchgeführt (mit WARD als Fusionsregel), um die ungefähre Zahl von Stahlklassen zu bestimmen. Die Gruppen wurden dann anschließend mit der K-Means-Clusteranalyse gefunden und stehen nun für weitere Analysen zur Verfügung. Die Stahlproben anderer Bauwerke lassen sich dann später mit Hilfe einer Diskriminanzfunktion den neuen Stahlklassen zuordnen, die aus einer nachgeschalteten Diskriminanzanalyse gewonnen wurde.

Insgesamt stehen für diese Analyse pro Parameter 71 - 72 Messwerte zur Verfügung, da überwiegend zwei Stahlproben pro Standort untersucht wurden. Zwei Spundwände konnten aus technischen Gründen nicht beprobt werden (Bauwerke 266 und 126). Unter Berücksichtigung

vereinzelter Messlücken bei verschiedenen Parametern verbleiben 67 Fälle mit kompletten Messergebnissen aller beteiligten Größen.

### Hauptkomponentenanalyse

Mit dem resultierenden Satz von 23 Variablen (davon 11 logarithmierte) wurde dann eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, um die internen Korrelationen zu bündeln und ein orthogonales System von Achsen für die Clusteranalyse und die Regressionsanalyse zu bekommen. Insgesamt wurden sechs Hauptkomponenten mit einem erklärten Varianzanteil von fast 80% extrahiert. Die erste Komponente bündelt knapp 30% der Varianz und korreliert (Faktorladung) stark mit Mangan, Silizium, Cev, Korngröße, Streckgrenze und Zugfestigkeit und wird daher hier als "Härtefaktor" angesprochen. Die zweite Komponente korreliert mit Kupfer und Arsen, die dritte mit Phosphor und Bor, die vierte mit Nickel, Chrom, Molybdän und der Zeiligkeit. Die fünfte Komponente repräsentiert Kohlenstoff und die sechste den Nb-Wert und die Einschlüsse. Die Stahleigenschaften können also durch sechs Faktoren charakterisiert werden, die ein orthogonales Achsensystem bilden.

Tabelle A3-13: Faktorladungen der Hauptkomponenten aus Metallparametern

Messgröße	Faktor1	Faktor2	Faktor3	Faktor4	Faktor5	Faktor6
C	0.24	0.15	0.06	0.91	0.03	0.13
LnMn	0.92	0.07	-0.11	0.16	-0.11	0.09
LnP	-0.35	-0.10	-0.83	-0.02	-0.13	-0.16
LnS	-0.18	-0.44	-0.41	0.39	0.33	-0.35
LnSi	0.86	-0.03	0.27	0.00	0.09	0.03
Cu	0.03	-0.84	0.11	-0.16	0.11	-0.04
Ni	0.21	-0.37	0.12	0.12	0.82	0.05
Cr	0.40	-0.47	0.18	0.04	0.53	-0.13
LnAl	0.66	0.09	0.25	-0.23	0.01	0.15
LnAs	-0.44	-0.67	-0.29	-0.12	0.26	-0.12
LnV	0.66	0.29	0.05	0.07	0.24	-0.14
Mo	0.03	-0.36	0.47	0.05	0.70	0.00
LnTi	0.77	0.09	0.01	0.02	0.36	-0.22
LnNb	0.33	-0.03	-0.11	0.00	-0.03	0.73
B	0.38	0.09	-0.60	0.32	0.13	0.21
LnSn	-0.29	-0.83	0.08	0.07	0.15	-0.15
LnN	-0.01	0.12	-0.68	-0.16	-0.18	0.18
Cev	0.81	0.08	0.02	0.53	-0.02	0.13
ASTM-Korngröße	0.73	0.03	0.25	0.27	0.16	0.11
Zeiligkeit	0.38	-0.17	0.23	0.39	-0.61	0.22
Einschlüsse	0.13	-0.31	0.02	-0.20	0.05	-0.74
Streckgrenze	0.91	0.08	-0.04	-0.01	-0.08	0.20
Zugfestigkeit	0.84	0.01	-0.21	0.29	-0.13	0.13
Erklärte Varianz	6.90	2.82	2.38	1.87	2.36	1.62
Anteil Gesamtvarianz	0.30	0.12	0.10	0.08	0.10	0.07

## Clusteranalyse

Mit den Faktoren aus Metallparametern wurde dann eine agglomerative Clusteranalyse mit WARD-Methode als Fusionsregel durchgeführt. Es ergaben sich etwa zwei bis fünf Gruppen, die noch mit ausreichenden Beobachtungsfällen besetzt sind (Bild A3-12). Um die zeitliche Abhängigkeit zu dämpfen, wurde die Gruppenzahl auf zwei festgesetzt und dann anschließend der K-Means-Clusteranalyse übergeben.

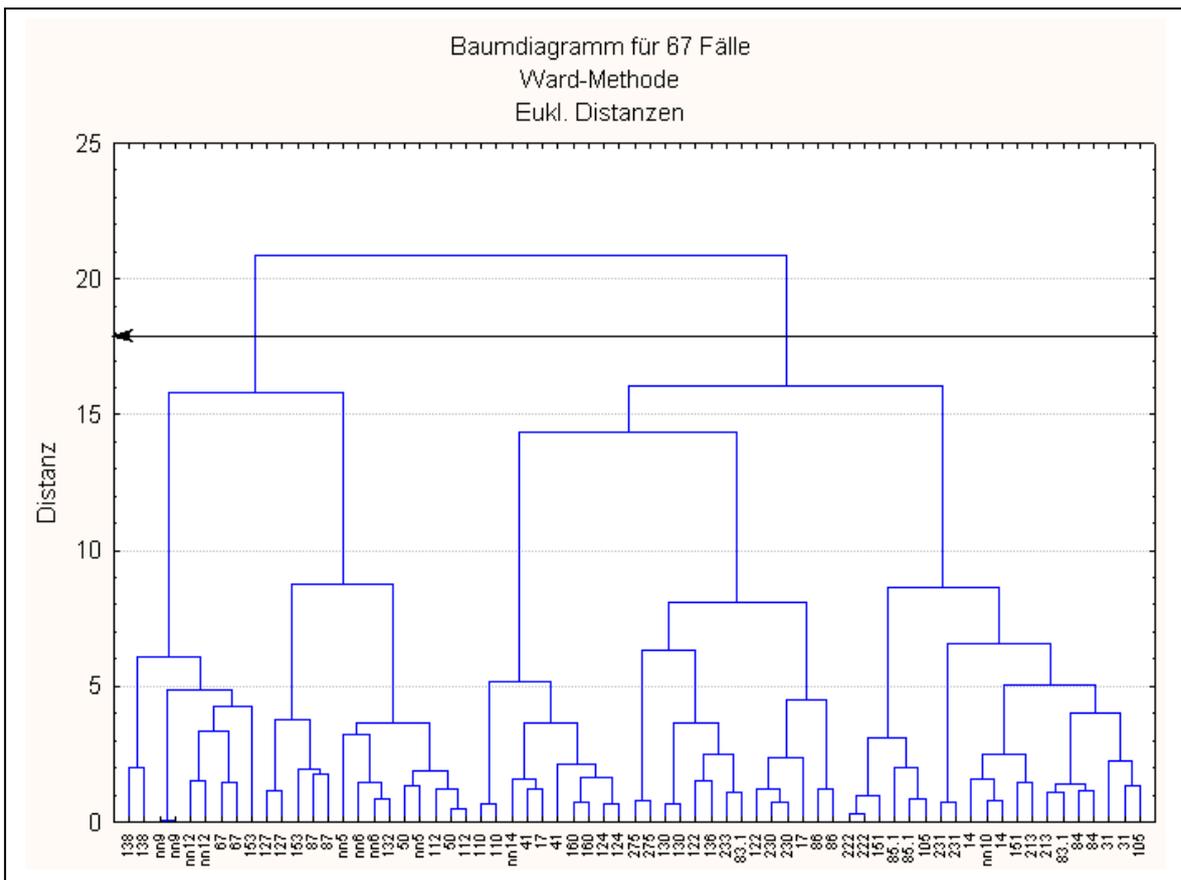


Bild A3-12: Agglomerative Clusteranalyse der Faktoren aus Metallparametern

Die Mittelwerte der chemischen und physikalischen Parameter für die vier gefundenen Gruppen definieren die beiden Stahlklassen (Tabelle A3-14). Das erste Cluster zeigt hohe Werte für Phosphor und Stickstoff, aber niedrige Werte für Kohlenstoff, Silizium und ASTM-Korngröße. Niedrige Siliziumgehalte weisen nach Einschätzung der BAW allgemein auf einen Herstellungsprozess als „unberuhigt“ vergossene Stähle hin. Das zweite Cluster zeichnet sich durch hohe Werte an Kohlenstoff und Silizium sowie an Legierungsbestandteilen Mangan, Kupfer, Nickel, Chrom und Molybdän aus. Außerdem gibt es in der zweiten Gruppe viele Einschlüsse und hohe Werte für die ASTM-Korngröße. Letztere Kennzahl wurde über die Auszählung der Kornanzahl über eine definierte Weglänge bestimmt und verhält sich entgegengesetzt zur mittleren Korngröße. Das erste Cluster wird daher einfach als "Grobstahl", das zweite als "Feinstahl" angesprochen.

Tabelle A3-14: Mittelwerte der Metallparameter für Cluster

Cluster	C [M-%]	Mn [M-%]	P [M-%]	S [M-%]	Si [M-%]	Cu [M-%]
1	0.155	0.733	0.041	0.038	0.051	0.078
2	0.180	0.821	0.019	0.045	0.196	0.133
Cluster	Ni [M-%]	Cr [M-%]	Al [M-%]	As [M-%]	V [M-%]	Mo [M-%]
1	0.029	0.030	0.016	0.015	0.003	0.004
2	0.063	0.074	0.026	0.011	0.004	0.012
Cluster	Nb [M-%]	B [M-%]	Sn [M-%]	N [M-%]	Cev [M-%]	
1	0.0014	0.0003	0.0088	0.0122	0.292	
2	0.0010	0.0003	0.0162	0.0056	0.348	
Cluster	ASTM Korngröße	Zeitigkeit	Einschlüsse	Steckgrenze ReH[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigk. Rm[N/mm <sup>2</sup> ]	
1	8.76	1.36	1.83	306	468	
2	9.46	1.37	2.10	317	476	

### Diskriminanzanalyse

Mit einer nachgeschalteten Diskriminanzanalyse werden Klassifikationsfunktionen gewonnen, mit der sich andere Stahlproben später den zwei Stahlgruppen zuordnen lassen. Zur Gruppentrennung wird zunächst das Achsensystem der Prädiktorvariablen durch eine Transformationsfunktion (vergleichbar der Hauptkomponentenanalyse) in eine Lage gebracht, welche die Varianz der Gruppenmittelwerte gegenüber der Varianz der Residualwerte maximiert. Das neue (rotierte) Achsensystem wird aus Linearkombinationen der Prädiktorvariablen (kanonische Variable oder Root) gebildet (siehe Beschreibung bei Milieuklassifizierung). Die Prädiktorselektion für diese kanonischen Funktionen wurde mit schrittweisen und Beste-Subset-Verfahren durchgeführt. Dabei erwiesen sich Kohlenstoff, Silizium, Chrom, Molybdän, Selen, und Stickstoff als bestimmend für die Stahlklassen "grob" und "fein".

Zur Trennung der Stahlklasse war nur eine kanonische Funktion erforderlich. Wenn diese gegen das Baujahr aufgetragen wird (Bild A3-13), zeigen sich beide Stahlklassen deutlich als zwei getrennte Cluster. Der Feinstahl tritt im Probenmaterial erst nach 1960 auf und wurde drei Jahrzehnte lang parallel zum älteren Grobstahl verwendet. Dieser Sachverhalt verdient eine besondere Beachtung bei der Forschung nach Korrosionsursachen, weil altersbedingte Korrosion damit bei älteren Bauwerken nicht mehr klar von materialbedingten Vorgängen zu trennen ist. Zumindest bei den mittleren und jüngeren Altersgruppen (Korrosionsalter < 30 Jahre) wäre je nach Messzeitpunkt der Materialeinfluss rechnerisch fassbar. Beide Stahlklassen sind in allen Milieugruppen bis auf das limnische gemeinsam vertreten (Tabelle A3-15). Spundwände im limnischen Milieu gehören zum Grobstahl.

Tabelle A3-15: Kreuztabellierung der Stahlklassen und Milieugruppen

Stahl \ Milieu	Milieu					Alle
	limnisch	limn-brack	brackisch	brack-marin		
Grobstahl	5	3	4	12		24
Feinstahl	0	4	2	9		15
Alle	5	7	6	21		39

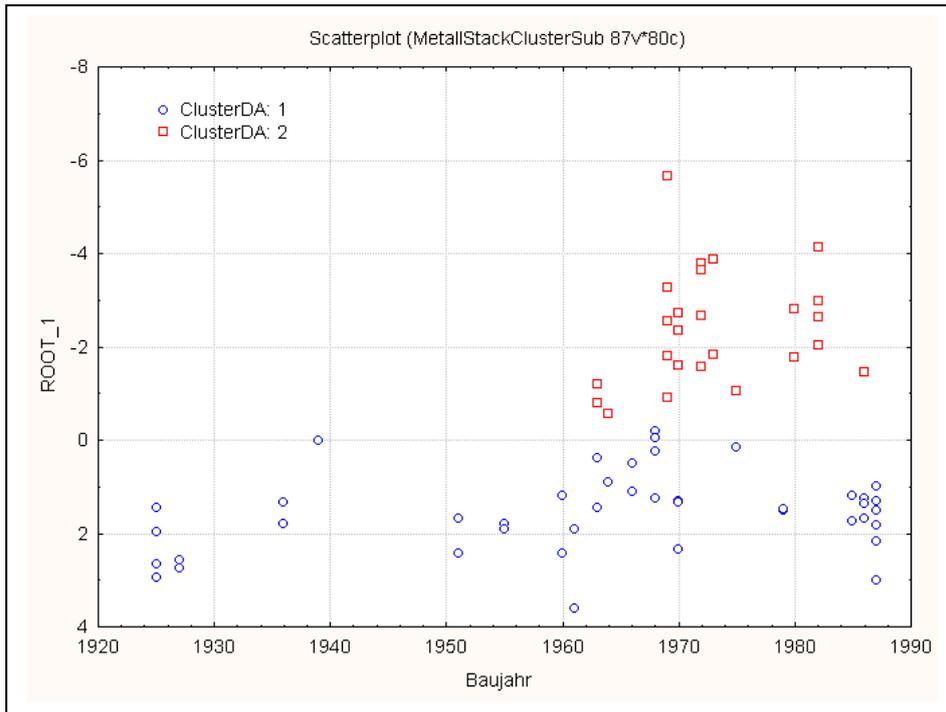


Bild A3-13: Linearkombination von Stahlparametern und Baujahr

### Klassifikation und Klassifikationsfunktionen

Mit Hilfe der Klassifikationsfunktionen wird bestimmt, in welche Gruppe jeder Fall höchstwahrscheinlich gehört (siehe Beschreibung bei Milieuklassifizierung). Da es zwei Stahlklassen gibt, werden also zwei Klassifikationsfunktionen berechnet.

Tabelle A3-16: Klassifikationsfunktionen für Milieuklassen (Höchstwert = Klasse)

Messgröße [M-%]	Grobstahl	Feinstahl
C	48,0	83,3
LnSi	-4,6	-3,3
Cr	247,6	312,1
Mo	-73,3	534,0
LnSn	-11,8	-9,2
LnN	-13,7	-16,0
Konstante	-80,3	-88,8

Eine Klassenzuordnung anderer Stahlproben erfordert also die Messung der Konzentrationen von Kohlenstoff, Silizium (logarithmisch), Chrom, Molybdän, Selen (logarithmisch), und Stickstoff (logarithmisch). Die Messwerte werden dann in die Klassifikationsfunktionen eingesetzt, d.h. mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert und dann zusammen mit der Konstante aufsummiert. Der höchste Klassifikationswert ergibt die Stahlklasse. Die Klassifikationsfunktion arbeitet nur dann zuverlässig, wenn die Grenzwerte für Baustahl eingehalten werden und die in der Funktion nicht enthaltenen chemischen und physikalischen Parameter innerhalb des üblichen Streubereichs liegen.

Wenn zwei Stahlproben aus einer Spundwand entnommen wurden, können im Überlappungsbereich der Gruppenstreuung mitunter unterschiedliche Gruppenzuordnungen pro Spundwand auftreten (z.B. Bauwerke 105, 84, 138, 83.1). Eine Stahlklassifikation kann dann nur auf den mittleren Konzentrationen beruhen und ist entsprechen nicht so aussagekräftig, wie bei einheitlicher Zuordnung durch Doppelbestimmung.

### **Rostminerale**

Für eine statistische Analyse der Rostminerale wurden in drei Korrosionszonen Rostproben genommen und eine Phasenanalyse durchgeführt, welche Auskunft über die im korrosiven Prozess entstehenden Mineralphasen geben sollte. Die Korrosionsprodukte wurden an der Seite der Spundwandbohle abgekratzt, die zum Immersionsmedium lag.

Zwei Spundwände konnten aus technischen Gründen nicht beprobt werden (Bauwerke 266 und 126). Für die meisten Bauwerke steht nur eine Probe pro Zone zur Verfügung. Für die Spritzwasserzone stehen unter Berücksichtigung vereinzelter Messlücken pro Parameter 23 Messwerte zur Verfügung, für die Niedrigwasserzone je 31 Messwerte, und für die Unterwasserzone je 33 Messwerte. Die Probenahmetiefen für die Niedrigwasserzone schwanken leider um die zugehörige Wasserstandshöhe, so dass nur die Proben für Spritzwasser- und Unterwasserzone einen klaren hydrologischen Bezug ermöglichen.

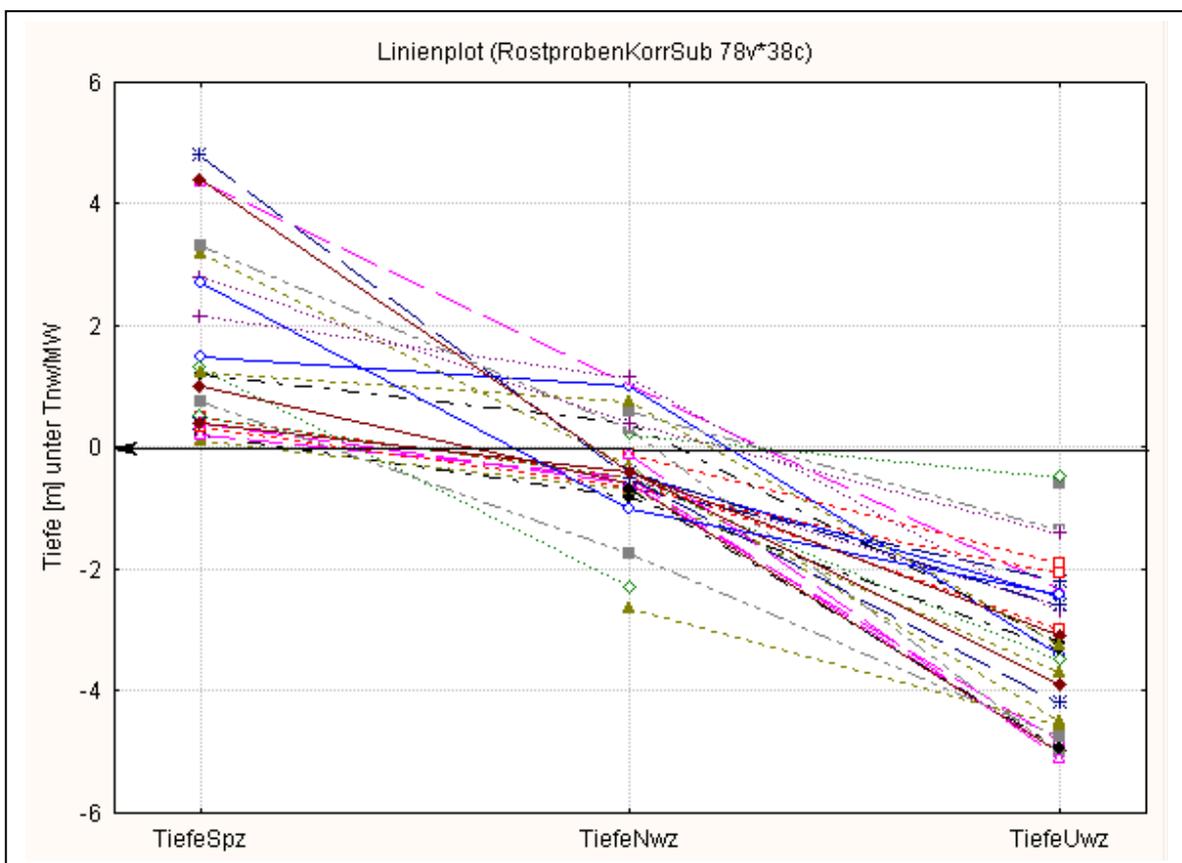


Bild A3-14: Probenahmetiefe für die rostmineralische Untersuchung

Die Untersuchungen wurden mittels Diffraktometrie an der Universität Gießen (Institut für Geowissenschaften) durchgeführt. Die Basis der Untersuchung ist die Brechung des Röntgenstrahles durch Kristallebenen der Minerale, wobei die Intensitäten der Reflexionen des Röntgenstrahles an den Mineralgehalt im Rost gekoppelt ist. Die Konzentrationen von Kohlenstoff und Schwefel im Rost wurden in Masseprozent ermittelt. Spektralintensitäten und Masseprozent zeigen einen deutlichen Unterschied in der Rostzusammensetzung der Spritzwasser- und Unterwasserzone (Tabelle A3 -17). Aragonit wurde in beiden Zonen kaum nachgewiesen. Siderit fehlt in der Spritzwasserzone, tritt aber hin und wieder in der Unterwasserzone auf. Auch Quarz und Calcit finden sich überwiegend in der Unterwasserzone, Goethit und Magnetit dagegen häufiger in der Spritzwasserzone. Die Rostproben aus der Unterwasserzone haben zudem einen höheren Anteil an Kohlenstoff und Schwefel als Proben aus der Spritzwasserzone.

*Tabelle A3-17: Kennwerte für Spektralintensitäten von Rostmineralien*

Messgröße [Intensitäten]	Spritzwasserzone			Unterwasserzone		
	Median 50%	Quartil 25%	Quartil 75%	Median 50%	Quartil 25%	Quartil 75%
Akaganeit	0,0	0,0	0,5	2,0	0,0	5,0
Lepidokrokit	3,0	2,0	5,0	2,0	0,0	3,0
Goethit	10,0	8,0	15,5	5,0	4,0	7,0
Aragonit	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Quarz	1,5	0,0	5,5	16,0	2,0	87,0
Calcit	0,0	0,0	2,0	11,0	4,0	26,0
Siderit	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	10,0
Magnetit	28,0	22,0	41,5	15,0	10,0	23,0
Kohlenstoff [M-%]	0,6	0,4	1,3	2,7	2,1	3,5
Schwefel [M-%]	0,1	0,1	0,2	1,9	0,9	3,5

Um die Vergleichbarkeit der Aussage für unterschiedliche Rostproben zu sichern, wird daher nachfolgend jede Größe (bis auf C und S) als "vorhanden" oder "nicht vorhanden" dichotomisiert. In die Gruppe "vorhanden" wurden Proben mit der Intensität  $\geq 5$  eingeordnet, in die Gruppe "nicht vorhanden" Proben mit der Intensität  $< 5$  und Stahloberflächen ohne Rost. Bei Quarz und Magnetit wurde infolge anderer Häufigkeitsverteilung die Gruppentrennung abweichend bei der Intensität 10 vorgenommen. Für Aragonit und Magnetit, die beide jeweils in zwei Spektralfrequenzen auftreten, wurde für die Dichotomisierung immer der Maxwert der Intensität verwendet.

#### Unterwasserzone

Die verfügbaren Werte der Unterwasserzone wurden auf einen möglichen Einfluss von Alter, Stahlklasse und Milieu untersucht. Sowohl die Mineralgehalte nach Intensität als auch die Masseprozent von Kohlenstoff und Schwefel erwiesen sich als unabhängig vom Korrosionsalter. Die Kohlenstoffwerte (logarithmiert) waren auch unabhängig vom Stahltyp und vom Milieu. Die Schwefelgehalte (logarithmiert) zeigten jedoch in der Kovarianzanalyse eine signifikante Abhängigkeit vom Gewässermilieu und dessen Wechselwirkung mit der Stahlklasse (Bild A3-15).

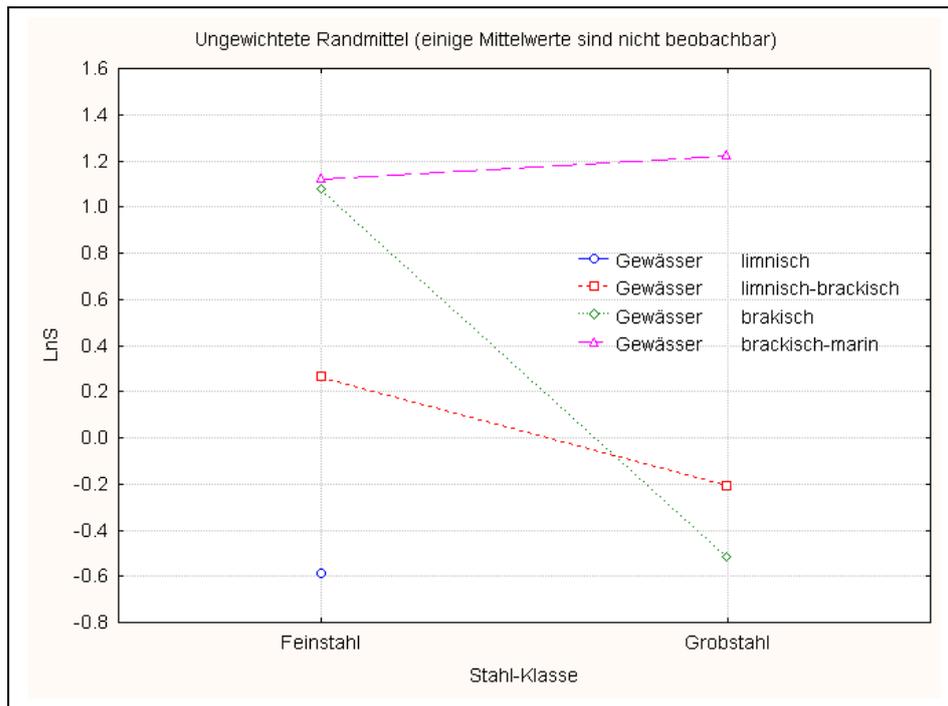


Bild A3-15: Wechselwirkung zwischen Stahlklasse und Gewässer (Unterwasserzone)

An limnisch-brackischen Standorten weisen die Rostproben altersunabhängig für beide Stahlypen gleichermaßen hohe Schwefelwerte auf. Im limnisch-brackischen und brakischen Milieu sind die Schwefelgehalte im Rost von Feinstahl geringer als von Grobstaahl. Im limnischen Milieu gibt es nur Grobstaahlproben, die aber wenig Schwefel enthalten.

Tabelle A3-18: Kreuztabellierung von Rostmineralien, Stahlklasse und Milieu

Gewässer	Stahl	Goethit		Quarz		Calcit		Siderit	
		nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
limnisch	Grobstaahl	0	5	4	1	5	0	5	0
limnisch	Feinstahl	0	0	0	0	0	0	0	0
Ges.		0	5	4	1	5	0	5	0
limnisch-brackisch	Grobstaahl	2	1	0	3	1	2	1	2
limnisch-brackisch	Feinstahl	0	3	0	3	1	2	0	3
Ges.		2	4	0	6	2	4	1	5
brackisch	Grobstaahl	1	3	2	2	0	4	3	1
brackisch	Feinstahl	0	1	0	1	0	1	0	1
Ges.		1	4	2	3	0	5	3	2
brackisch-marin	Grobstaahl	5	4	6	3	2	7	7	2
brackisch-marin	Feinstahl	6	2	3	5	3	5	4	4
Ges.		11	6	9	8	5	12	11	6
Spalte Ges.		14	19	15	18	12	21	20	13

Die Minerale Akaganeit, Lepidokrokit und Aragonit wurden in der Rostproben der Unterwasserzone nur selten nachgewiesen. Die anderen Minerale bis auf Magnetit zeigen in ihrem Vorkommen eine Milieuabhängigkeit. Diese Abhängigkeiten erwiesen sich im Test nach diskriminanzanalytischen Verfahren (Allgemeine Diskriminanzanalyse mit kategorialen Prädiktoren) als

signifikant. Goethit ist an limnischen und brackischen Standorten stets im Rost vorhanden, an limnisch-brackischen und brackisch-marinen jedoch nur teilweise. Quarz, Calcit und Siderit fehlt fast immer im limnischen Bereich und verteilt sich sehr ungleich auf die Proben aus anderen Gewässern.

Siderit zeigt zusätzlich eine Abhängigkeit vom Stahltyp: 80% der Rostproben ohne Siderit gehören zum Grobstaht, an brackisch-marinen Standorten aber sind die Verhältnisse etwas angeglichen. Dieses Muster deckt sich mit dem Verhalten der Schwefelgehalte (siehe oben), die speziell an limnisch bis brackischen Standorten eine Abhängigkeit vom Stahltyp zeigen. Möglicherweise zeigt sich damit eine unterschiedliche Resistenz der Stahlklassen im weniger aggressiven (chloridärmeren) Milieu, die in aggressiveren Gewässern keine Rolle mehr spielt. Der Feinstahl enthält nach obiger Klassifikation nicht nur mehr Silizium, sondern auch mehr Legierungsbestandteile wie Chrom, Nickel und Molybdän.

#### Spritzwasserzone

Die verfügbaren Werte der Spritzwasserzone wurden ebenfalls auf einen möglichen Einfluss von Alter, Stahlklasse und Milieu untersucht, sind aber aufgrund des kleineren Datenumfanges nicht sehr aussagekräftig. Sowohl die Mineralgehalte nach Intensität als auch die Masseprozentage von Kohlenstoff und Schwefel erwiesen sich als unabhängig vom Korrosionsalter und vom Stahltyp. Die Kohlenstoffwerte (logarithmiert) waren auch unabhängig vom Milieu. Die Schwefelgehalte (dichotomisiert) zeigten eine signifikante Abhängigkeit vom Gewässermilieu. Im limnischen bis brackischen Milieu weisen die Proben kaum Schwefel auf, während im brackisch-marinen Bereich in vergleichbaren Anteilen Proben mit und ohne Schwefel zu verzeichnen sind.

*Tabelle A3-19: Kreuztabellierung von Rostmineralien und Milieu*

Gewässer	Lepidokrokit		Goethit		Calcit		Magnetit		Schwefel	
	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
limnisch	5	0	5	0	5	0	5	0	0	0
limnisch-brackisch	4	2	0	6	5	1	0	6	5	0
brackisch	4	1	0	5	5	0	0	5	4	1
brackisch-marin	8	4	1	11	9	3	1	11	7	5
Alle	21	7	6	22	24	4	6	22	16	6

Die Minerale Akaganeit, Aragonit und Siderit fanden sich in kaum einer Probe, Quarz nur selten. Lepidokrokit und Calcit treten bei einigen Rostproben auf, Goethit und Magnetit bei der Mehrzahl. Goethit und Magnetit fehlen in den Proben aus limnischem Milieu immer, sind aber fast immer in den Proben aus anderen Milieus nachweisbar. Diese Unterschiede deuten darauf hin, dass die Korrosionsvorgänge auch in der Spritzwasserzone je nach Gewässermilieu unterschiedlich verlaufen. Besonders deutlich tritt hier der Unterschied zwischen dem limnischen Milieu und allen anderen Gewässergruppen hervor.

## Korrosionsparameter

Über die Mehrzahl der hier behandelten Bauwerke lagen bereits zur Beginn der Untersuchung Korrosionsmessungen vor, die zur Orthogonalisierung der Einflussgrößen um Messungen an weiteren Bauwerken ergänzt wurden (Bauwerke 83.1/83.nn, 85.1/85.nn, nn5, nn6, nn10, nn12 und nn14). Die oben behandelten Gewässer- und Metallanalysen im Rahmen des ECSC-Projekts eröffneten erstmals die Möglichkeit, die nachfolgend dargestellten Korrosionsparameter in einen Kontext mit Metalleigenschaften und Milieubedingungen zu stellen.

Für eine statistische Analyse der Abrostungswerte wurden Ultraschallmessungen und Muldenmessungen aller Korrosionszonen an mehreren Spundwandpfählen (Stationen) eines Bauwerks eingesetzt. Wanddickenmessungen mit dem Ultraschallverfahren sind für 40 Bauwerke mit einem Korrosionsalter zum Messzeitpunkt zwischen 3 und 63 Jahren verfügbar. Die Abrostungstiefe wurde aus der gemessenen Restwanddicke und der Istwanddicke ermittelt. Wenn sich dabei infolge der Messungenauigkeiten auch negative Abrostungswerte ergaben, wurde als Korrektur zur Abrostungstiefe jeweils eine Konstante von 0,1 - 0,6 mm als Sicherheitszuschlag addiert. Da aus der Voruntersuchung ersichtlich war, dass in Berg- und Tallagen zumeist höhere Abrostungen als im Flankenbereich der U-Profile von Spundwänden auftreten, beschränkt sich die nachfolgende Analyse zur Unterstützung der Datenhomogenität auf diese Profilpunkte.

Ergänzende Muldenmessungen sind für sieben Bauwerken verfügbar (41, 85.nn, 110, 138, nn10, nn12 und nn14). Die Restwanddicken wurden aus der manuellen Muldenmessung berechnet, indem von der Differenz der Istwanddicke und dem Median der aus Ultraschallmessungen ermittelten Restwanddicken die Muldentiefe abgezogen wurde. Vier Bauwerke zeigten zudem Durchrostungen (9, 41, 110 und 222). Die aus der Istwanddicke rechnerisch ableitbare Abrostungstiefe bei Durchrostungen kann nicht in die Parameterschätzung für die Korrosionswerte einbezogen werden. Anders als die Muldenmessungen schließen sich die Lochtiefen nicht kontinuierlich an die sonstigen Abrostungstiefen an, sondern koppeln sich völlig davon ab. Bei den genannten vier Bauwerken mit Durchrostungen traten die Löcher auch in Tiefen mit hohen Restwanddicken auf (Bild A3-16 und A3-17). Es muss sich dabei also um einen separaten Korrosionsprozess handeln, der mikrolokal wirkt und von anderen Ursachen als der breitflächig wirkende Korrosionsprozess gesteuert wird.

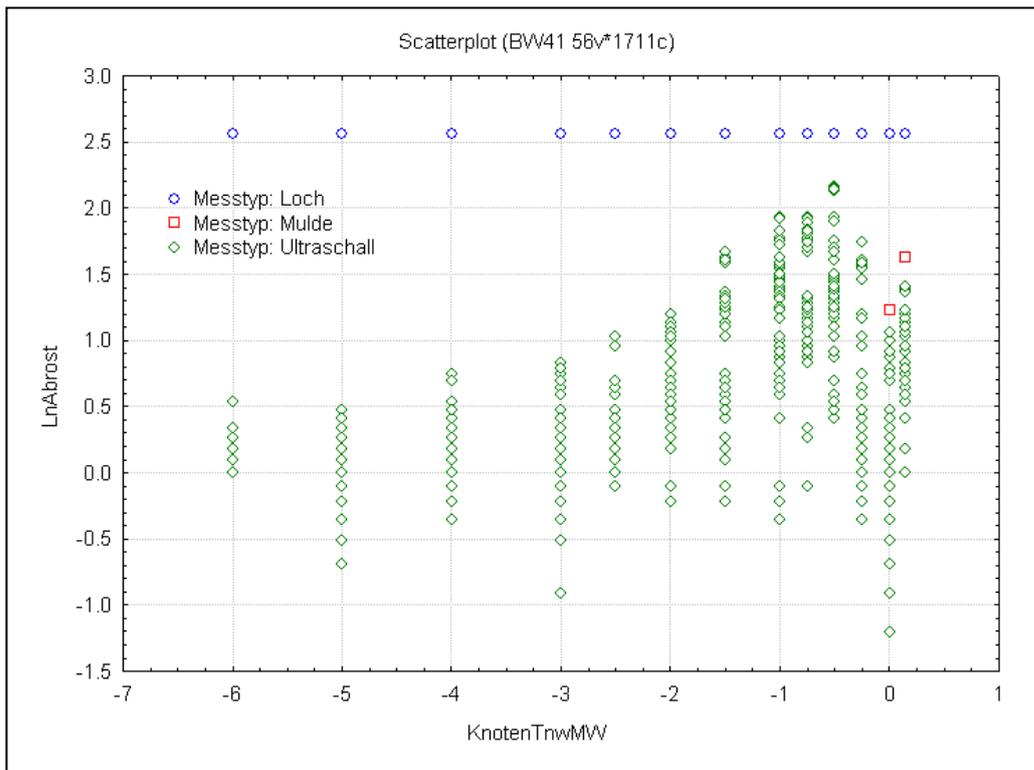


Bild A3-16: Abrostungstiefen aus Ultraschallmessungen, Mulden und Löchern

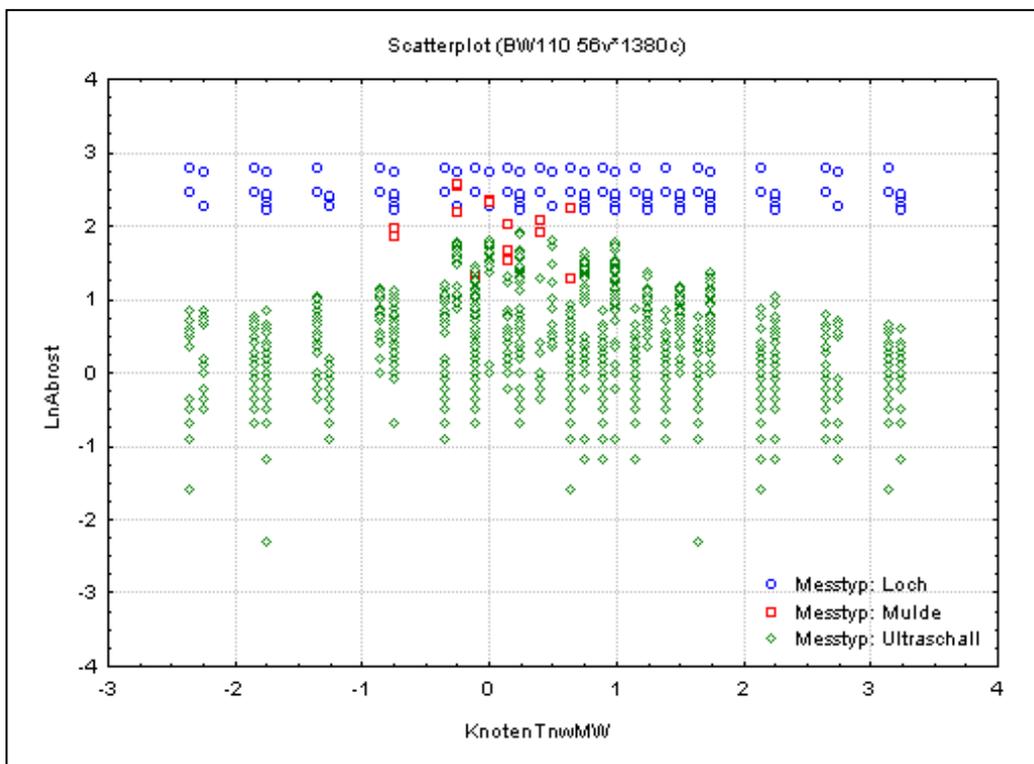


Bild A3-17: Abrostungstiefen aus Ultraschallmessungen, Mulden und Löchern

### **Abrostungsfunktion der Tiefe**

Aus der Voruntersuchung der Korrosionswerte aus der BAW-Datenbank war ersichtlich, dass sich die Abrostung an einer Stahlspundwand als Exponentialfunktion der Tiefe darstellen lässt (s. Anlage 1: ECSC-Projektbericht: *Analyse von Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden im Wasserbau*). Unter Tideniedrigwasser- oder Mittelwasserniveau zeigten alle untersuchten Bauwerke eine mittlere Basisabrostung, die entweder bis zur Sohlentiefe konstant war oder bis etwa 4 - 5 m Tiefe an einen abfallenden Abrostungsgradienten gekoppelt war. Die oft beobachteten hohen Abrostungswerte nahe der Wasseroberfläche lassen sich so als Folge dieses Gradienten erklären, der in Kombination mit einer multiplikativen Streuungskomponente von einzelnen Abrostungswerten gerade dort zu besonders hohen maximalen Abrostungen führt.

Auch oberhalb der Wasserlinie wie beispielsweise in der Spritzwasser- oder Luftzone sind höhenabhängige Abrostungsgradienten zu beobachten, so dass sich die Abrostung an einer Stahlspundwand über alle Tiefenbereiche hinweg insgesamt als unstetige Exponentialfunktion der Tiefe darstellen lässt. Das nachfolgende Beispiel gibt eine Exponentialfunktion mit einer Unstetigkeitsstelle an der Mittelwasserlinie an:

$$\text{Abrostung} = \begin{cases} b_0 \times \exp(b_1 \times (\text{Tiefe} - \text{Basistiefe})); & \text{Tiefe} < 0 \\ b_2 \times \exp(b_3 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq 0 \end{cases} \quad (\text{A3-9})$$

worin die Tiefe = 0 der Mittelwasserlinie entspricht, der exponentielle Ausdruck als Potenz der Eulerschen Zahl  $e$  (= 2,718) gebildet wird und  $b_0$  bis  $b_3$  Regressionskoeffizienten sind, die indirekt über die korrespondierende loglineare Regression ermittelt werden können. Da die Gradienten zumeist in 4 - 5 m Tiefe unter Tideniedrigwasser oder Mittelwasser in eine konstante mittlere Abrostung übergehen, wird der erste Gradient  $b_1$  für das Tiefenintervall 0 - 5 m Tideniedrigwasser oder Mittelwasser berechnet und als Basistiefe 4 m festgesetzt. Durch die Differenzbildung Tiefe - Basistiefe erhält das Absolutglied  $b_0$  eine aussagekräftige Bedeutung: Falls die Sohlentiefe eines Bauwerks weiter herabreicht, repräsentiert es die mittlere Abrostung im untersten Bereich der Spundwand (Unterwasserzone). Das Absolutglied  $b_2$  für die Spritzwasserzone repräsentiert entsprechend die mittlere Abrostung an der Mittelwasserlinie, welche infolge der Unstetigkeitsstelle mitunter von dem korrespondierenden Schätzwert aus  $b_0 \times \exp(b_1 \times 4 \text{ m})$  abweichen kann.

Wenn die Abschätzung über einen Tiefenbereich mit mehrfachem Wechsel des Korrosionsmilieus verläuft, besitzt diese Funktion analog zu (A3-6) noch weitere Unstetigkeitsstellen. Bei Tidegewässern tritt oft ein Doppelmaximum der Abrostung jeweils entlang der Tideniedrig- bzw. Tidehochwasserlinie auf, das von einem Abrostungsminimum bei der Tidehalbwasserlinie getrennt wird (Bauwerke 67, 138, nn12 und nn14). Dieses Verhalten lässt sich durch eine unstetige Exponentialfunktion der Tiefe im Wechselwasserbereich approximieren, wobei ein abfallender Abrostungsgradient von Tideniedrigwasser bis Tidehalbwasser und ein steigender Gradient darüber zu bestimmen sind (Bild A3-18 und A3-19).

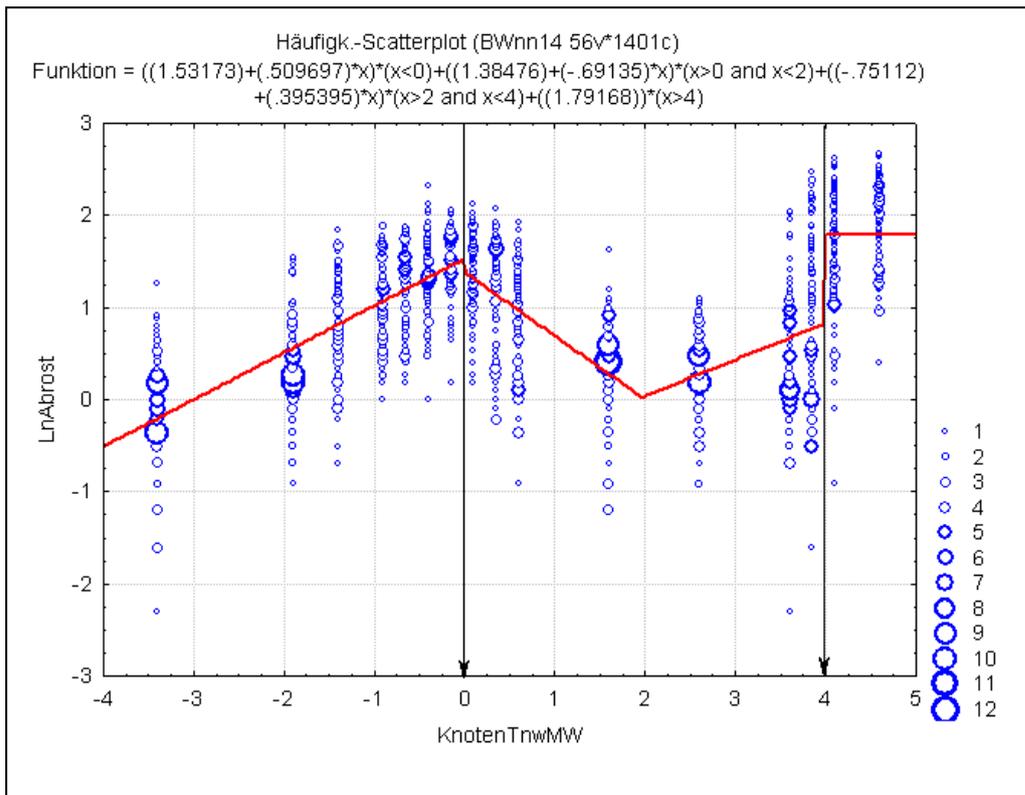


Bild A3-18: Mittlere LogAbrostungen als unstetige Tiefenfunktion

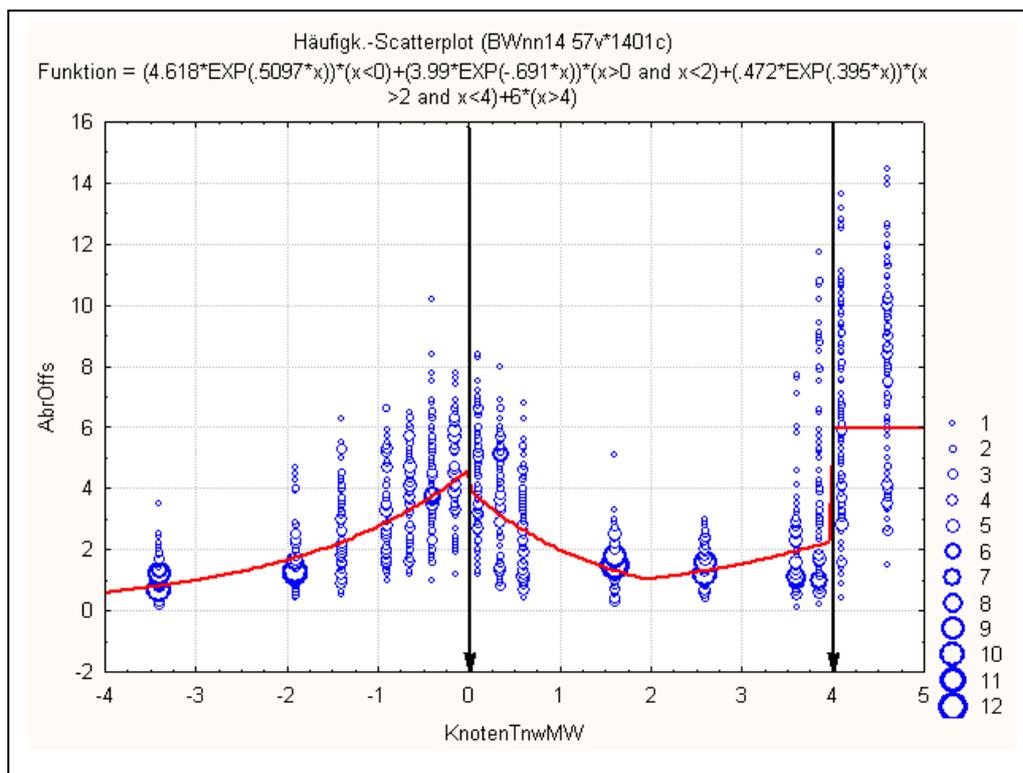


Bild A3-19: Abrostung als unstetige Exponentialfunktion der Tiefe

Daraus ergibt sich für alle Bauwerke in Tidegewässern eine Erweiterung obiger Tiefenfunktion um Unstetigkeitsstellen an der Tidehalb- und Tidehochwasserlinie:

$$\text{Abrostung} = \begin{cases} \lceil b_0 \times \exp(b_1 \times (\text{Tiefe} - \text{Basistiefe})); & \text{Tiefe} < T_{nw} \\ | b_2 \times \exp(b_3 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq T_{nw} \text{ und } \text{Tiefe} < T_{1/2w} \\ \lfloor b_4 \times \exp(b_5 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq T_{1/2w} \text{ und } \text{Tiefe} < T_{hw} \\ | b_6 \times \exp(b_7 \times (\text{Tiefe} + \text{Tidehub})); & \text{Tiefe} \geq T_{hw} \end{cases} \quad (\text{A3-10})$$

worin die Tiefe grundsätzlich relativ zum Tideniedrigwasserniveau berechnet wird, als Basistiefe 4 m eingesetzt wird und  $b_0$  bis  $b_7$  Regressionskoeffizienten sind, die indirekt über die loglineare Regression ermittelt werden können. Die erste der vier Teilfunktionen bezieht sich auf den Bereich unter Tideniedrig- oder Mittelwasser, die zweite und dritte Teilfunktion auf den Wechselwasserbereich (entfällt also in tidefreien Gewässern) und die vierte Teilfunktion auf die Spritzwasserzone. Durch Addition des Tidehubs zur Tiefe erhält das Absolutglied  $b_6$  eine aussagekräftige Bedeutung: in Tidegewässern repräsentiert es die mittlere Abrostung an der Tidehochwasserlinie (2. Abrostungsmaximum), in tidefreien Gewässern die mittlere Abrostung an der Mittelwasserlinie.

Diese Exponentialfunktion der Abrostung mit vier Teilfunktionen und entsprechend drei Unstetigkeitsstellen wird nachfolgend als generelle Darstellung des Abrostungsverhaltens in Tidegewässern und tidefreien Gewässern aufgefasst. In der Spritzwasserzone waren meistens die Messabstände an einer Spundwand kleiner als 1,5 m, so dass dann auf die Ermittlung eines Gradienten verzichtet und nur das jeweilige Absolutglied der Tiefenfunktion als geometrisches Mittel der Abrostungswerte berechnet wurde. Insgesamt müssen also je nach Situation höchstens 8 Regressionskoeffizienten berechnet werden, damit für jeden beliebigen Höhenpunkt einer Stahlspundwand die mittlere Abrostung geschätzt werden kann.

*Tabelle A3-20: Regressionskoeffizienten der un stetigen Tiefenfunktion der Abrostung*

Nr	Niedrigwasser		Wechselwasser				Spritzwasser	
	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
160	1.25	0.01	0.88	0.20	0.59	-0.15	0.32	0.00
110	0.32	0.49	2.42	-0.48	0.67	-0.49	0.69	0.00
124	0.27	0.44					0.32	0.00
275	2.49	0.06					0.95	-0.19
136	1.84	0.11						
nn14	0.60	0.51	3.99	-0.69	2.21	0.40	6.00	0.00
230	1.47	0.06					2.85	0.00
41	1.04	0.30					1.60	0.00
17	1.68	0.36					1.24	0.00
222	2.44	0.00					5.62	-0.62
130	1.19	0.25					2.54	0.00
83.1	0.63	0.11					2.25	0.00
83.nn	1.08	0.00					2.06	0.00
231	0.55	0.08					1.10	0.00
213	0.58	0.05					0.51	0.00
126	1.24	0.03						
122	1.24	-0.01					1.01	0.00
153	1.22	-0.07	0.72	-0.35	0.72	-0.35		
151	0.91	0.01	0.95	-0.34	0.95	-0.34		
nn10	1.67	0.16					2.13	0.00
105	0.88	0.12					1.55	-0.28
85.1	0.67	0.17					1.70	0.00
31	1.10	0.18					0.61	-0.60
85.nn	0.43	0.30					2.19	0.00
9	1.41	0.12					2.62	-0.59
14	1.28	0.15					1.23	0.00
127	1.08	0.05						
233	0.36	0.17					0.70	0.49
266	0.73	0.39	2.08	-0.85	2.08	-0.85		
84	0.81	-0.14					0.65	0.00
132	0.28	0.15					0.46	-0.13
87	1.01	-0.06					1.05	0.00
67	0.67	0.06	0.53	0.04	0.46	-0.04	0.73	0.00
nn12	1.08	0.19	2.07	-0.29	3.85	0.84	6.78	0.00
112	0.69	-0.01	0.49	0.18	0.57	-0.07	0.50	0.00
50	0.77	0.02					1.14	-0.38
138	0.65	0.02	0.76	-0.89	0.14	0.74	1.77	-0.47
86	0.37	0.07					0.53	0.00
nn5	1.13	-0.02					1.25	0.00
nn6	0.93	-0.01					1.20	0.00

### Schätzung der mittleren Abrostung

Bei 40 Bauwerken konnten für die Niedrigwasserzone die Regressionskoeffizienten  $b_0$  und  $b_1$  ermittelt werden, bei 34 Bauwerken für die Spritzwasserzone der Koeffizient  $b_6$ , davon nur in 8 Fällen zusammen mit dem Gradienten  $b_6$ . Bei 10 Bauwerken konnten für die Wechselwasserzone die vier Regressionskoeffizienten  $b_3$  bis  $b_5$  ermittelt werden, so dass mangels Datenbasis hier keine Ursachenforschung mit multivariaten Verfahren möglich ist (Tabelle A3-20). Mit diesen Parametern lässt sich die mittlere Abrostung einer Stahlspundwand aus der Tiefe schätzen.

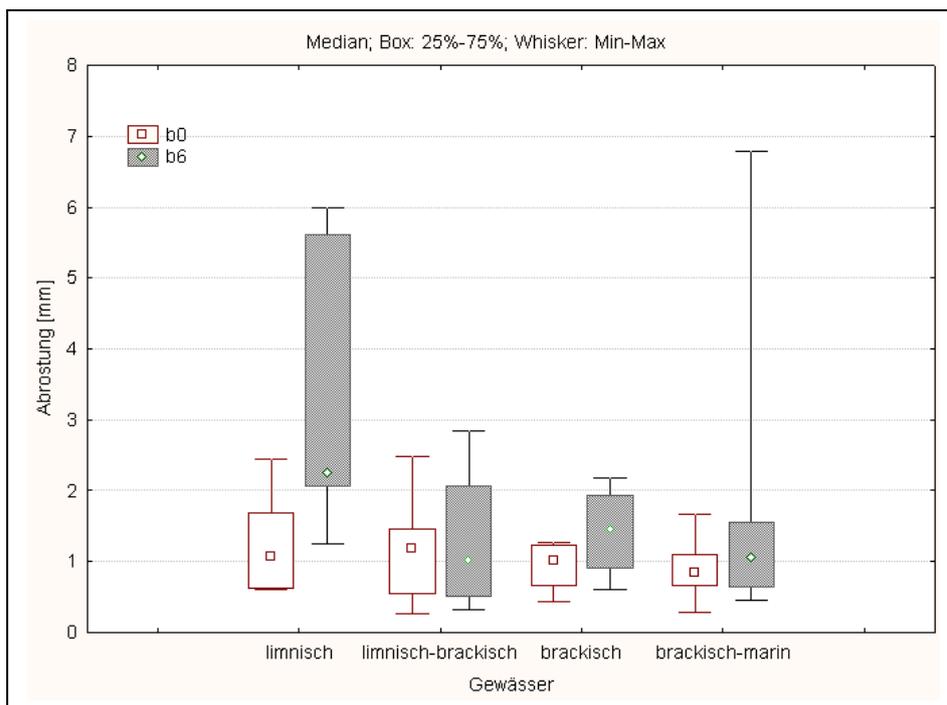


Bild A3-20: Abrostungsmittel in 4 m Tiefe und an der Wasserlinie nach Milieu

Die geschätzte Basisabrostungen  $b_0$  zeigen quer über alle Altersgruppen für die vier Gewässertypen ein vergleichbares Niveau mit geringer Variationsbreite (Bild A3-20). Die geschätzte mittlere Abrostung  $b_6$  an der Tideniedrigwasserlinie bzw. Mittelwasserlinie liegt bis auf das limnische Milieu ebenfalls auf ähnlichem Niveau, dort aber höher und mit stärkerer Streuung.

Der geschätzte Abrostungsgradient  $b_1$  der Niedrigwasserzone zeigt ebenfalls quer über alle Altersgruppen für die vier Gewässertypen ein vergleichbares Niveau und überwiegend ein positives Vorzeichen (d.h. die Abrostung steigt vom Basisniveau in 4 m Tiefe bis zum Wasserspiegel an). Bei etwa der Hälfte der Bauwerke in allen Gewässertypen liegen diese Gradienten zwischen 0 und 0,1, womit dort die Basisabrostung praktisch in allen Tiefenlagen und Mittelwasser bzw. Tideniedrigwasser konstant bleibt. Die wenigen geschätzten Gradienten  $b_7$  der Spritzwasserzone sind überwiegend negativ und zeigen eine starke Streuung, aber keine nennenswerten Unterschiede nach Milieu (Bild A3-21).

An der Mittelwasser- oder Tideniedrigwasserlinie ergeben sich infolge der Unstetigkeitsstelle der Tiefenfunktion alternative Schätzwerte für die mittlere Abrostung:

$$\text{Mittlere Abrost} (MW/Tnw) = b_0 \times \text{EXP}(b_1 \times 4 \text{ m})$$

(A3-11)

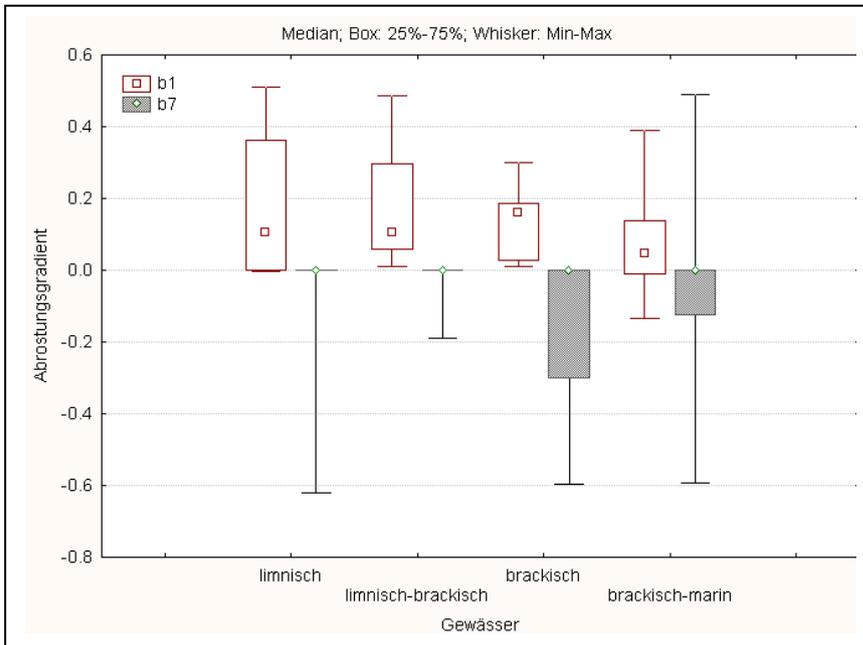


Bild A3-21: Abrüstungsgradienten in Niedrigwasser- und Spritzwasserzone nach Milieu

In Tidegewässern ergibt sich alternativ das Absolutglied  $b_2$  der jeweiligen Tiefenfunktion als geschätzter Mittelwert der Abrostung an der Mittelwasser- oder Tideniedrigwasserlinie, in tidefreien Gewässern dagegen das Absolutglied  $b_6$  für die Tiefenfunktion der Spritzwasserzone (in Tidegewässern gibt der Wert  $b_6$  die mittlere Abrostung an der Tidehochwasserlinie an). Im Konfliktfall sollte an den Unstetigkeitsstellen stets mit dem jeweils höheren Schätzwert gearbeitet werden.

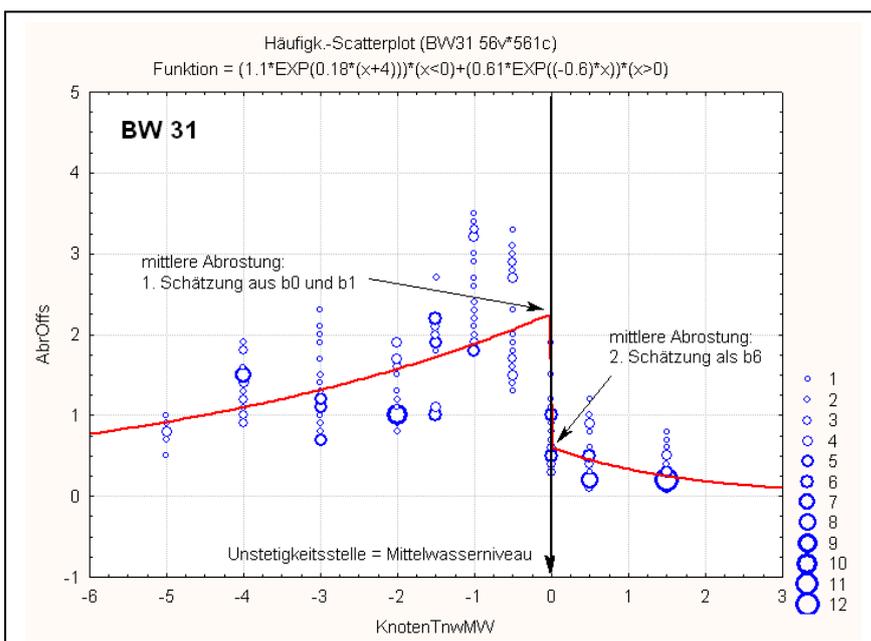


Bild A3-22: Schätzung der mittleren Abrostung an einer Unstetigkeitsstelle

Tabelle A3-21: Mittlere Abrostung an Sprungstellen der Tiefefunktion

Nr	Mittlere Abrostung (MW/Tnw) [mm]			(Thw) [mm] aus b6
	aus b0 und b1	aus b2	aus b6	
160	1.31	0.88		0.32
110	2.24	2.42		0.69
124	1.59		0.32	
275	3.16		0.95	
136	2.82			
nn14	4.63	3.99		6.00
230	1.85		2.85	
41	3.39		1.60	
17	7.16		1.24	
222	2.39		5.62	
130	3.20		2.54	
83.1	0.96		2.25	
83.nn	1.08		2.06	
231	0.77		1.10	
213	0.70		0.51	
126	1.39			
122	1.21		1.01	
153	0.91	0.72		
151	0.95	0.95		
nn10	3.11		2.13	
105	1.43		1.55	
85.1	1.32		1.70	
31	2.31		0.61	
85.nn	1.43		2.19	
9	2.29		2.62	
14	2.32		1.23	
127	1.30			
233	0.70		0.70	
266	3.47	2.08		
84	0.47		0.65	
132	0.52		0.46	
87	0.78		1.05	
67	0.84	0.53		0.73
nn12	2.30	2.07		6.78
112	0.67	0.49		0.50
50	0.83		1.14	
138	0.69	0.76		1.77
86	0.48		0.53	
nn5	1.06		1.25	
nn6	0.89		1.20	

### Schätzung der Maximalen Abrostung

In die Berechnung der maximalen Abrostung und der jeweiligen charakteristischen Werte für mittlere und maximale Abrostung gehen der Spreizungsfaktor und der Stichprobenumfang ein (s. Anlage 1).

Ohne Berücksichtigung des Stichprobenfehlers in den Regressionskoeffizienten (siehe Berechnung der charakteristischen Werte) lässt sich die maximale Abrostung einfach aus der geschätzten mittleren Abrostung am Tiefenpunkt, dem Spreizungsfaktor und dem 95%-Perzentil (= 1,645) der Standardnormalverteilung berechnen, wenn der maximale Abrostungswert nur von höchstens 5% der gemessenen Werte überschritten werden kann. Für die Niedrigwasserzone ergibt sich somit:

$$MaxAbrost = b_0 \times EXP(b_1 \times (Tiefe - Basistiefe)) \times (S_{fak1})^{1,645} \quad (A3-12)$$

worin die Tiefe grundsätzlich relativ zum Tideniedrigwasserniveau berechnet wird, als Basistiefe 4 m eingesetzt wird und  $S_{fak1}$  der zugehörige Spreizungsfaktor ist. Der Spreizungsfaktor für die Exponentialfunktion der Abrostung nach Tiefe wurde zumeist über den Standardschätzfehler der korrespondierenden loglinearen Regression berechnet. Der 95%-Perzentilwert der Standardnormalverteilung wird in der loglinearen Regression mit dem Standardschätzfehler multipliziert, bei der korrespondierenden Exponentialfunktion mit dem resultierenden Spreizungsfaktor potenziert. Der daraus ermittelte Gesamtfaktor  $MAX_{f1}$  muss lediglich mit der aus den Koeffizienten  $b_0$  bis  $b_1$  errechneten mittleren Abrostung multipliziert werden, um die maximale Abrostung zu schätzen.

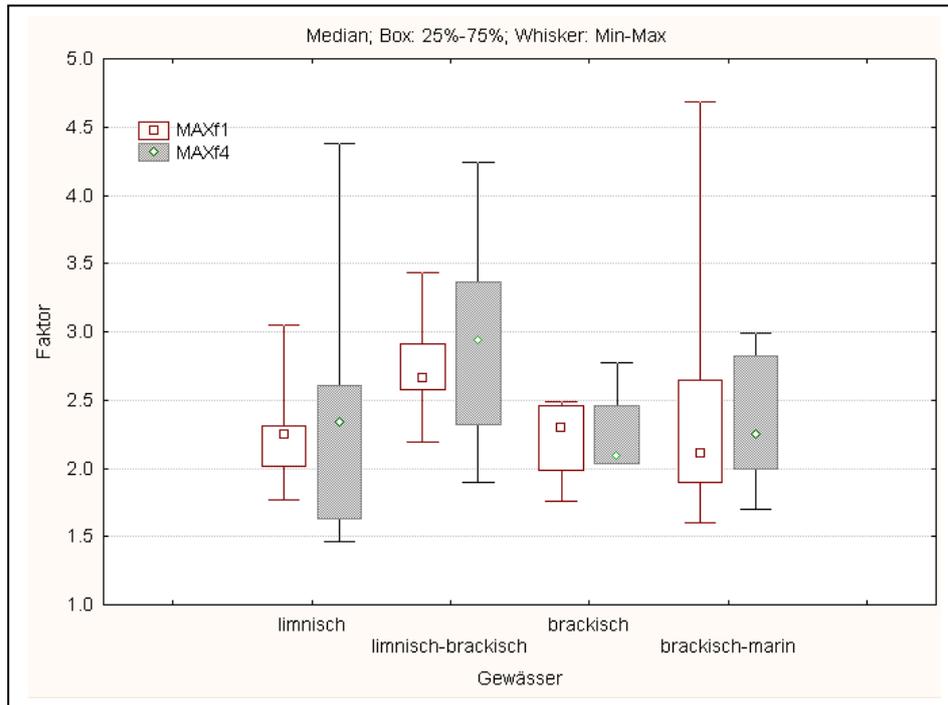
Für andere Tiefenbereiche müssen entsprechend die jeweiligen Regressionskoeffizienten  $b_3$  bis  $b_7$  und Spreizungsfaktoren  $S_{fak2}$  bis  $S_{fak4}$  in die analogen Berechnungsformeln eingesetzt werden (Tabelle A3-21). Da in der Spritzwasserzone oft kein Gradient über die Regression ermittelt werden konnte, wurde in solchen Fällen der Streuungsfaktor aus der Standardabweichung der logarithmierten Werte aus der betreffenden Zone berechnet.

Tabelle A3-22: Spreizungsfaktoren der Abrostung und ihre Potenzen zu 1,645

Nr	Niedrigwasser		Wechselwasser				Spritzwasser	
	Sfak1	MAXf1	Sfak2	MAXf2	Sfak3	MAXf3	Sfak4	MAXf4
160	1.78	2.57	1.51	1.98	1.51	1.97	1.88	2.83
110	1.82	2.69	2.20	3.65	1.83	2.71	1.57	2.10
124	1.81	2.67					1.97	3.04
275	2.05	3.26					2.41	4.24
136	1.61	2.19						
nn14	1.63	2.24	1.76	2.53	2.09	3.36	1.79	2.61
230	2.12	3.44					2.16	3.55
41	1.64	2.26					1.77	2.55
17	1.42	1.77					2.46	4.38
222	1.66	2.31					1.68	2.34
130	1.92	2.91					1.48	1.90
83.1	1.97	3.05					1.26	1.47
83.nn	1.53	2.01					1.35	1.63
231	1.81	2.66					2.02	3.18
213	1.59	2.14					1.49	1.92
126	1.61	2.19						
122	1.49	1.94					1.60	2.17
153	1.55	2.06	1.69	2.37	1.69	2.37		
151	1.70	2.40	1.71	2.41	1.71	2.41		
nn10	1.64	2.25					1.94	2.96
105	1.35	1.65					1.60	2.16
85.1	1.52	1.99					1.54	2.04
31	1.41	1.75					1.86	2.77
85.nn	1.74	2.48					1.59	2.14
9	1.51	1.97					1.89	2.85
14	1.73	2.45					1.54	2.04
127	1.81	2.66						
233	1.56	2.07					1.88	2.82
266	2.00	3.14	1.67	2.33	1.67	2.33		
84	1.45	1.84					1.94	2.97
132	1.83	2.71					1.73	2.46
87	1.62	2.20					1.52	1.99
67	1.62	2.21	1.57	2.11	1.50	1.94	1.53	2.01
nn12	1.87	2.81	1.54	2.04	1.86	2.77	1.64	2.25
112	1.42	1.78	1.43	1.81	1.51	1.98	1.46	1.87
50	1.46	1.87					1.83	2.70
138	2.56	4.69	2.11	3.42	1.80	2.63	1.74	2.49
86	1.33	1.60					1.38	1.70
nn5	1.56	2.07					1.52	2.00

Die als Potenzen der Spreizungsfaktoren  $S_{\text{fak1}}$  und  $S_{\text{fak4}}$  berechneten Gesamtfaktoren MAXf1 und MAXf4 zur Schätzung der maximalen Abrostung liegen quer über alle Altersgruppen zumeist zwischen 2 und 3, d.h. die maximale Abrostung beträgt an jedem Tiefenpunkt oft das Zwei- bis Dreifache der mittleren. Dieses Verhalten zeigt sich sowohl in der Niedrigwasserzone als auch in der Spritzwasserzone, wobei sich die Werte für die Spritzwasserzone bei den Bauwerken aber stärker unterscheiden. Drei der vier Gewässergruppen zeigen ein einheitliches Niveau in den MAX-Faktoren, im limnisch-brackischen Milieu liegen sie aber für beide Abrostungszonen deutlich höher. Maximale Abrostungen, die mehr als das Dreieinhalbfache der mittleren betragen, treten nur selten auf (Bild A3-23).

Bild A3-23: Faktoren für maximale Abrostung in Niedrigwasser- und Spritzwasserzone



Für bestimmte Tiefen sollen hier die resultierenden maximalen Abrostungen kurz dargestellt werde. In der Basistiefe von 4 m unter Mittelwasser- oder Tideniedrigwasserniveau ergibt sie sich einfach als:

$$MaxBasisAbrost (-4 m) = b_0 \times (S_{fak1})^{1,645} \quad (A3-13)$$

wobei diese Basisabrostung aus Gründen der Vergleichbarkeit auch für Bauwerke berechnet wird, die mit ihrer Sohlentiefe gar nicht so weit herabreichen.

An der Mittelwasser- oder Tideniedrigwasserlinie ergeben sich infolge der Unstetigkeitsstelle der Tiefenfunktion alternative Schätzwerte für die maximale Abrostung:

$$MaxAbrost (MW/Tnw) = b_0 \times EXP(b_1 \times 4 m) \times (S_{fak1})^{1,645} \quad (A3-14)$$

In Tidegewässern ergibt sich alternativ:

$$MaxAbrost (MW/Tnw) = b_2 \times (S_{fak1})^{1,645} \quad (A3-15)$$

in tidefreien Gewässern dagegen:

$$MaxAbrost (MW/Tnw/Thw) = b_6 \times (S_{fak1})^{1,645} \quad (A3-16)$$

wobei die letzte Schätzung in Tidegewässern die maximale Abrostung an der Tidehochwasserlinie beschreibt.

Tabelle A3-23: Maximale Abrostung auf Basis- und Mittelwasserniveau

Nr	MaxBasis [mm] aus b0	MaxAbrost (MW/Tnw) [mm]			(Thw) [mm] aus b6, Sfak4
		aus b0, b1, Sfak1	aus b2, Sfak2	aus b6, Sfak4	
160	3.22	3.37	1.74		0.91
110	0.86	6.03	8.84		1.46
124	0.73	4.24		0.98	
275	8.12	10.29		4.02	
136	4.04	6.19			
nn14	1.35	10.38	10.12		15.64
230	5.05	6.35		10.10	
41	2.35	7.67		4.07	
17	2.98	12.70		5.45	
222	5.63	5.52		13.14	
130	3.47	9.31		4.83	
83.1	1.91	2.92		3.30	
83.nn	2.17	2.17		3.37	
231	1.47	2.06		3.49	
213	1.24	1.51		0.98	
126	2.71	3.04			
122	2.39	2.34		2.19	
153	2.52	1.88	1.70		
151	2.19	2.29	2.28		
nn10	3.75	6.99		6.32	
105	1.44	2.36		3.35	
85.1	1.33	2.64		3.46	
31	1.93	4.05		1.68	
85.nn	1.07	3.55		4.69	
9	2.77	4.51		7.48	
14	3.13	5.69		2.50	
127	2.88	3.46			
233	0.74	1.45		1.97	
266	2.29	10.89	4.85		
84	1.49	0.87		1.93	
132	0.77	1.41		1.14	
87	2.22	1.73		2.09	
67	1.47	1.86	1.11		1.46
nn12	3.04	6.46	4.23		15.23
112	1.23	1.19	0.88		0.94
50	1.43	1.56		3.07	
138	3.04	3.25	2.61		
86	0.59	0.77		0.91	
nn5	2.34	2.19		2.49	
nn6	2.45	2.34		3.59	

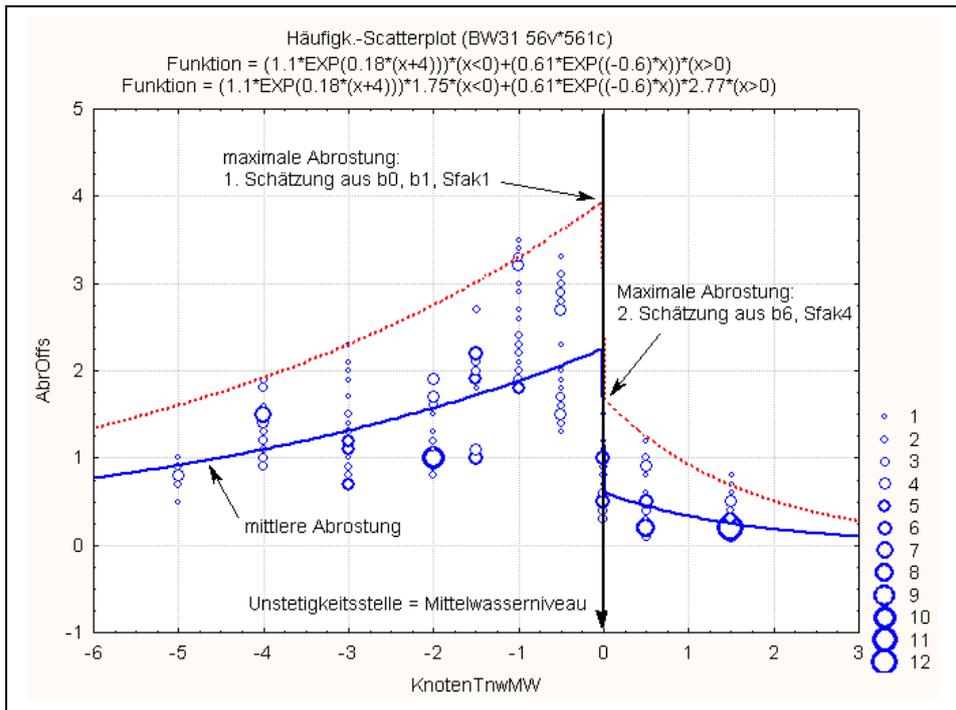


Bild A3-24: Schätzung der maximalen Abrostung an einer Unstetigkeitsstelle (BW 31)

Ein Vergleich der jeweiligen Schätzwerte für die maximale Abrostung zeigt, dass quer über alle Altersgruppen die maximale Basisabrostung infolge des Abrostungsgradienten zumeist unter der maximalen Abrostung entlang der Wasserlinie liegt (Bild A3-25).

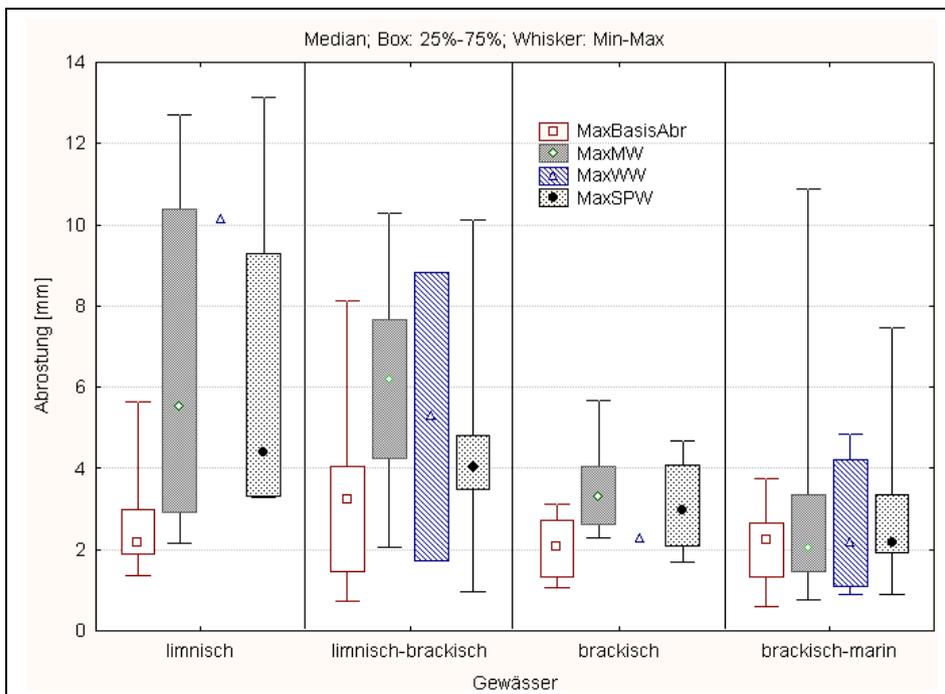


Bild A3-25: Maximale Abrostungen in verschiedenen Gewässern

Dieser Unterschied ist bei den Bauwerken im brackisch-marinen Gewässern nicht so ausgeprägt, wie in allen anderen Milieus. Die Schätzwerte für die maximale Abrostung unterscheiden sich an der Unstetigkeitsstelle der Tiefenfunktion erwartungsgemäß sehr, liegen im Gesamtspektrum der Bauwerke einer Gewässergruppe aber auf vergleichbarem Niveau. Im Einzelfall muss aus Sicherheitsgründen an den Unstetigkeitsstellen stets der jeweils höhere Schätzwert zur Ermittlung charakteristischer Kennwerte eingesetzt werden. Unabhängig vom Gewässertyp zeigt Grobstaht quer über alle Altersgruppen an der Mittelwasser- bzw. Tideniedrigwasserlinie höhere Werte für die maximale Abrostung mit einer größeren Variabilität zwischen den Bauwerken (Bild A3-26).

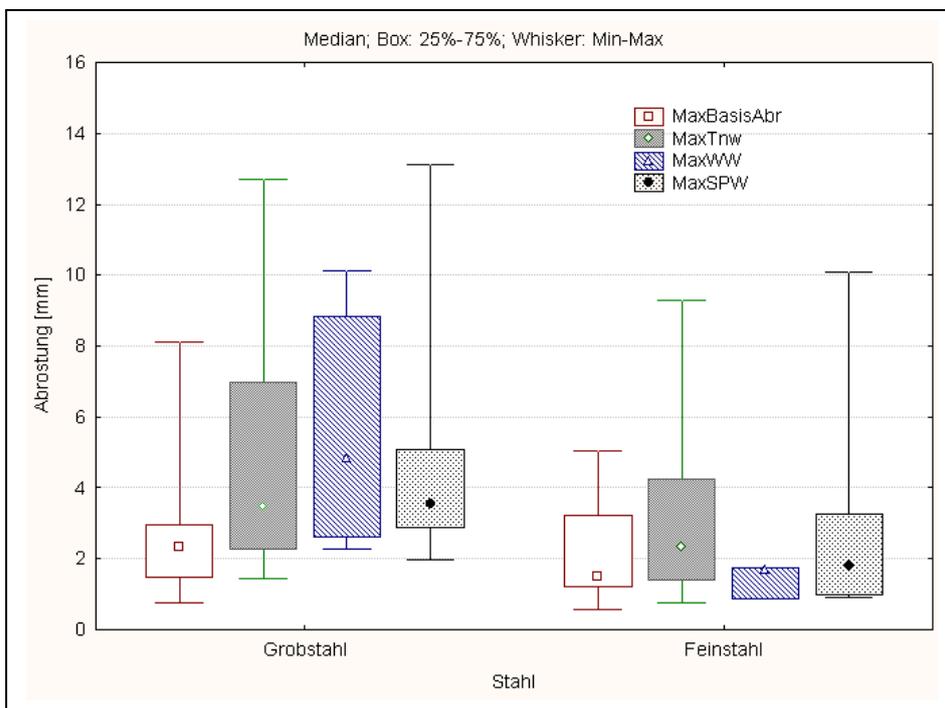


Bild A3-26: Maximale Abrostungen für verschiedene Stahlklassen

### Charakteristische Werte für die Abrostung

Aus der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen exponentiellen Tiefenfunktion der Abrostung lassen sich kritische Restwanddicken abschätzen. Das Grundprinzip der Abschätzung sind Konfidenz- und Prognoseintervalle eines Regressionsmodells (s. Anlage 1).

Die obere Konfidenzgrenze einer Regressionsgeraden für die mittlere Log-Abrostung in der Tiefe  $x$  wird folgendermaßen formuliert (s. Hartung 1995):

$$b'_0 + b_1 \text{Tiefe}_x + t_{0,95; n-2} s_e \sqrt{1/N + (\text{Tiefe}_x - \text{mittlere Tiefe})^2 / (n-1) s^2_{\text{Tiefe}}} \quad (\text{A3-17})$$

wobei  $N$  die Anzahl der Messwerte ist,  $b'_0$  das Absolutglied und  $b_1$  der Steigungskoeffizient der loglinearen Regressionsgleichung, der kritische Wert  $t_{1-\alpha; n-2}$  sich auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit  $\alpha$  bezieht und  $s_e$  den Standardfehler der Schätzung angibt. Der Standardschätzfehler  $s_e$  berechnet sich als Wurzel aus der Residualvarianz:

$$s_e^2 = \frac{\sum [\text{LnAbrost}_i - (b'_0 + b_1 \text{Tiefe}_i)]^2}{(n - 2)} \quad (\text{A3-18})$$

wobei die Differenzen  $\text{LnAbrost}_i - (a + b \text{Tiefe}_i)$  zwischen Beobachtungs- und Vorhersagewerten als *Residuen* bezeichnet werden. Weil bei den Spundwänden innerhalb einer Höhenzone nur eine geringe Tiefenspanne von bis zu 5 m abgegriffen wird, ist der Ausdruck  $(\text{Tiefe}_0 - \text{mittlere Tiefe})^2 / (n-1) s_{\text{Tiefe}}^2$  in (A3-18) zu vernachlässigen.

Die Anzahl von Abrostungsmesswerten pro Höhenzone einer Spundwand N (Stichprobenumfang) geht unmittelbar in die obige Berechnungsformel ein und zusätzlich indirekt über den Wert  $t_{1-\alpha; n-2}$ , der über die Freiheitsgrade (N - 2) ebenfalls an den Stichprobenumfang gekoppelt ist. Bei den hier untersuchten Bauwerken sind für die Zone zwischen Mittelwasser bzw. Tideniedrigwasser und 5 m Tiefe zumeist in allen Gewässergruppen rund 200 - 600 Messwerte verfügbar, für die Wechselwasser- und Spritzwasserzone dagegen nur 50 - 200 (Tabelle A3-23). Die resultierenden Werte der Studentischen t-Verteilung für 95% variieren zwischen 1,65 und 1,69 (Tabelle A3-24), können also zur Vereinfachung für alle Stichprobenumfänge auf 1,7 aufgerundet werden (auch für die Spritzwasserzone, wo die meisten Streuungskennwerte infolge geringer Messabstände unabhängig von der Regression geschätzt wurden und der t-Wert somit abweichend auf N - 1 Freiheitsgraden beruht).

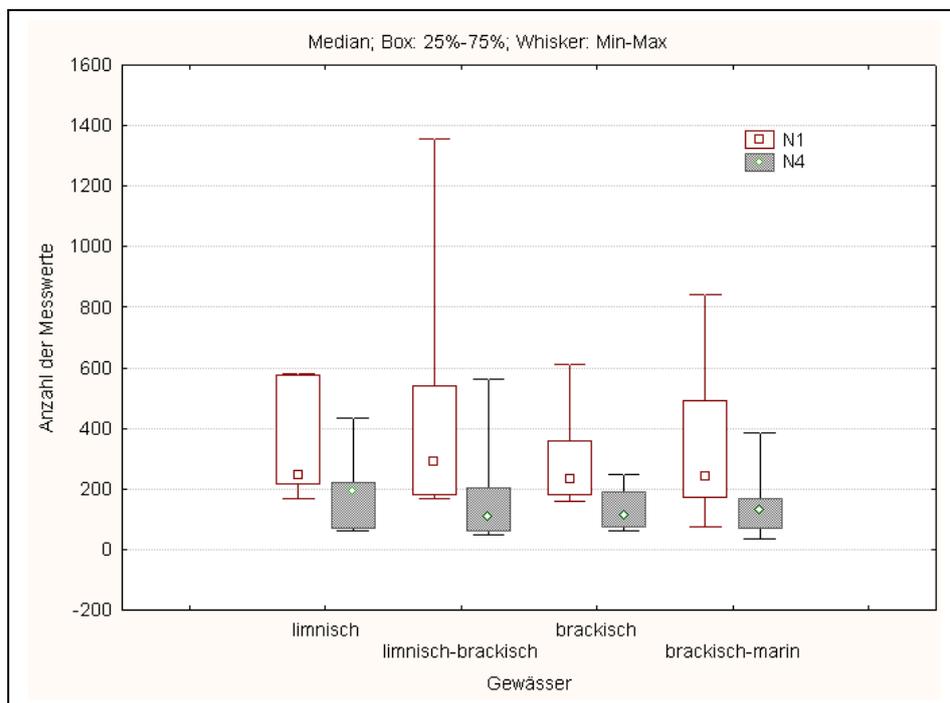


Bild A3-27: Messwerte pro Bauwerk in Niedrigwasser- und Spritzwasserzone

Tabelle A3-24: Studentsche t-Werte und Messwerteanzahl der Abrostung

Nr	Niedrigwasser		Wechselwasser				Spritzwasser	
	N1	tfak1	N2	tfak2	N3	tfak3	N4	tfak4
160	168	1.65	47	1.68	70	1.67	47	1.68
110	198	1.65	254	1.65	180	1.65	60	1.67
124	182	1.65					63	1.67
275	792	1.65					564	1.65
136	432	1.65						
nn14	582	1.65	336	1.65	262	1.65	221	1.65
230	1356	1.65					246	1.65
41	540	1.65					122	1.66
17	169	1.65					63	1.67
222	216	1.65					432	1.65
130	168	1.65					96	1.66
83.1	246	1.65					72	1.67
83.nn	575	1.65					192	1.65
231	288	1.65					162	1.65
213	168	1.65					72	1.67
126	360	1.65						
122	324	1.65					36	1.69
153	112	1.66	99	1.66	99	1.66		
151	255	1.65	175	1.65	175	1.65		
nn10	841	1.65					169	1.65
105	249	1.65					199	1.65
85.1	206	1.65					136	1.66
31	180	1.65					90	1.66
85.nn	612	1.65					247	1.65
9	77	1.67					71	1.67
14	157	1.65					63	1.67
127	600	1.65						
233	144	1.66					120	1.66
266	228	1.65	36	1.69	36	1.69		
84	212	1.65					137	1.66
132	264	1.65					144	1.66
87	180	1.65					90	1.66
67	388	1.65	120	1.66	181	1.65	62	1.67
nn12	756	1.65	384	1.65	405	1.65	131	1.66
112	168	1.65	96	1.66	48	1.68	48	1.68
50	384	1.65					240	1.65
138	230	1.65	78	1.67	77	1.67	191	1.65
86	181	1.65					120	1.66
nn5	756	1.65					168	1.65
nn6	768	1.65					384	1.65

Insgesamt vereinfacht sich die Formel zur Berechnung charakteristischer Werte für die mittlere Abrostung in der Tiefe<sub>x</sub> beispielsweise für die Niedrigwasserzone zu:

$$CharAbrost = b_0 \times EXP(b_1 \times (Tiefe_x - Basistiefe)) \times (S_{fak1})^{1,7} / \sqrt{N} \quad (A3-19)$$

mit dem Absolutglied  $b_0 = e^{b'_0}$ , das aus dem Koeffizienten  $b'_0$  der zugehörigen loglinearen Regression berechnet wird (e ist die Eulersche Zahl 2,718). Für andere Tiefenbereiche müssen entsprechend die jeweiligen Regressionskoeffizienten  $b_3$  bis  $b_7$  und Spreizungsfaktoren  $S_{fak2}$  bis  $S_{fak4}$  in die analogen Berechnungsformeln eingesetzt werden (siehe oben). Da in der Spritzwasserzone oft kein Gradient über die Regression ermittelt werden konnte, wurde in solchen Fällen der Streuungsfaktor aus der Standardabweichung der logarithmierten Werte aus der betreffenden Zone berechnet.

Tabelle A3-25: Charakteristische Werte für die mittlere Abrostung

Nr	MittelBasis Charakt. Wert [mm] aus b0	MittelAbrost (MW/Tnw) Charakt. Wert [mm]			(Thw) Ch.W. [mm] aus b6, S <sub>fak4</sub>
		aus b0, b1, S <sub>fak1</sub>	aus b2, S <sub>fak2</sub>	aus b6, S <sub>fak4</sub>	
160	1.35	1.41	0.97		0.37
110	0.34	2.41	2.64		0.77
124	0.30	1.72		0.37	
275	2.60	3.30		1.01	
136	1.92	2.93			
nn14	0.62	4.79	4.21		6.41
230	1.52	1.91		3.10	
41	1.08	3.52		1.75	
17	1.76	7.50		1.51	
222	2.59	2.54		5.86	
130	1.30	3.48		2.72	
83.1	0.67	1.03		2.35	
83.nn	1.11	1.11		2.14	
231	0.59	0.82		1.21	
213	0.62	0.75		0.55	
126	1.29	1.45			
122	1.28	1.26		1.15	
153	1.31	0.98	0.79		
151	0.97	1.01	1.01		
nn10	1.72	3.20		2.32	
105	0.90	1.48		1.64	
85.1	0.70	1.39		1.81	
31	1.15	2.41		0.68	
85.nn	0.45	1.49		2.30	
9	1.52	2.48		2.98	
14	1.37	2.50		1.35	
127	1.13	1.36			
233	0.38	0.75		0.77	
266	0.79	3.76	2.41		
84	0.85	0.49		0.72	
132	0.30	0.55		0.50	
87	1.07	0.83		1.13	
67	0.70	0.88	0.57		0.80
nn12	1.13	2.39	2.15		7.30
112	0.72	0.70	0.52		0.55
50	0.79	0.86		1.21	
138	0.72	0.77	0.88		1.89
86	0.38	0.50		0.56	
nn5	1.16	1.08		1.32	
nn6	0.97	0.92		1.27	

Charakteristische Werte für die maximalen Abrostung

Aus der oberen 95% Prognosegrenzen der loglinearen Tiefenfunktion der Abrostung lässt sich die obere Grenze der zugehörigen Exponentialfunktion ableiten, die dem charakteristischen Wert der maximalen Abrostung in der Tiefe x entspricht:

$$CharMaxAbrost = b_0 \times EXP(b_1 \times (Tiefe_x - Basistiefe)) \times (S_{fak1})^{1,7} (1 + 1/\sqrt{N}) \tag{A3-20}$$

die bis auf einen kleinen Ausdruck in der Potenz des Spreizungsfaktors dem charakteristischen Wert für die mittlere Abrostung gleicht.

Auf dieser Grundlage wurden maximale Abrostungswerte am Basisniveau in 4 m Tiefe und an der Mittelwasserlinie berechnet.

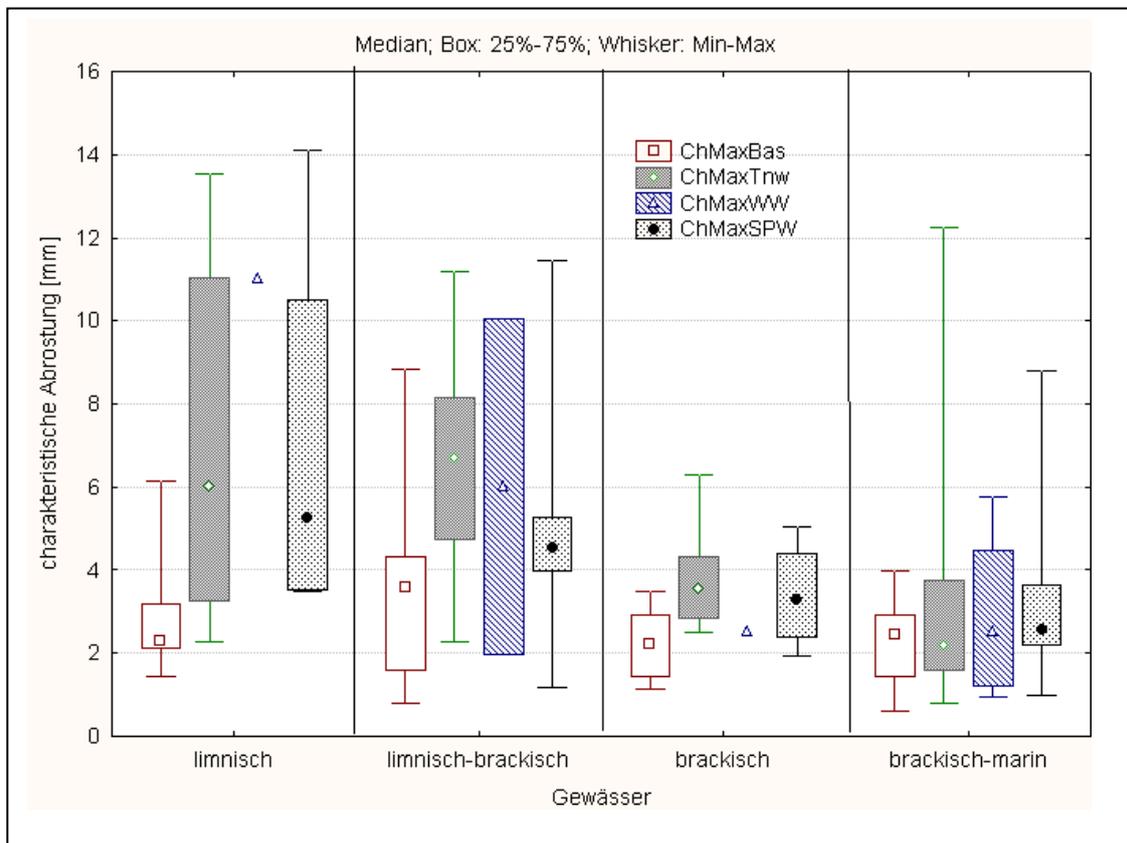


Bild A3-28: Charakteristische Werte für die maximale Abrostung

Tabelle A3-26: Charakteristische Werte für die maximale Abrostung

Nr	MaxBasis Charakt. Wert [mm] aus b0	MaxAbrost (MW/Tnw) Charakt. Wert [mm]			(Thw) Ch.W. [mm] aus b6, S fak4
		aus b0, b1, S fak1	aus b2, S fak2	aus b6, S fak4	
160	3.59	3.75	1.97		1.10
110	0.96	6.70	10.04		1.65
124	0.81	4.73		1.17	
275	8.82	11.18		4.49	
136	4.32	6.61			
nn14	1.44	11.04	11.00		17.26
230	5.44	6.85		11.46	
41	2.51	8.17		4.58	
17	3.17	13.55		6.94	
222	6.14	6.02		14.10	
130	3.92	10.50		5.27	
83.1	2.13	3.26		3.50	
83.nn	2.29	2.29		3.55	
231	1.61	2.26		3.99	
213	1.35	1.64		1.08	
126	2.90	3.25			
122	2.54	2.49		2.57	
153	2.78	2.07	1.92		
151	2.39	2.50	2.52		
nn10	3.97	7.39		7.14	
105	1.52	2.48		3.64	
85.1	1.43	2.83		3.77	
31	2.06	4.31		1.94	
85.nn	1.15	3.80		5.06	
9	3.07	5.00		8.81	
14	3.48	6.31		2.81	
127	3.10	3.73			
233	0.81	1.58		2.25	
266	2.58	12.24	5.78		
84	1.59	0.92		2.21	
132	0.85	1.55		1.27	
87	2.42	1.88		2.31	
67	1.58	1.99	1.22		1.64
nn12	3.27	6.95	4.49		16.84
112	1.31	1.27	0.96		1.06
50	1.51	1.64		3.39	
138	3.56	3.80	3.14		4.86
86	0.62	0.81		0.97	
nn5	2.47	2.31		2.70	
nn6	2.62	2.51		3.95	

### Lebensdaueranalyse

Eine univariate Methode der Lebensdauerabschätzung ist die Berechnung von Ausfallzeiten mit Hilfe der Weibullverteilung (zum Verteilungsmodell s. Hartung 1987). Die dreiparametrische Weibullverteilung wird durch die Parameter *Lage*, *Form* und *Skala* festgelegt. Der Parameter *Lage* ist die ausfallfreie Zeit. *Form* wird auch als Ausfallsteilheit bezeichnet und gibt die Veränderung der Ausfallrate an. Bei bestimmten Werten dieses Parameters nähert sich die Weibullverteilung anderen Verteilungsformen wie der Exponential-, Lognormal- und Normalverteilung an.

Der Parameter *Skala* wird auch als charakteristische Lebensdauer bezeichnet und gibt den Zeitpunkt an, an dem 63,2% aller Teile ausgefallen sind. Andere Perzentile (z.B. der Zeitpunkt, an dem 90% Teile ausgefallen sind) lassen sich ebenfalls aus diesen Parametern ableiten. Wenn es eine ausfallfreie Zeit gibt, muss der dritte Parameter *Lage* als Offset berücksichtigt und die Lebensdauerwerte danach transformiert werden. Wenn geprüfte Teile zu einem bestimmten Zeitpunkt noch gar nicht ausgefallen sind, gehen die betreffenden Zeitpunkte als zensierte Lebensdauerwerte mit in die Analyse ein.

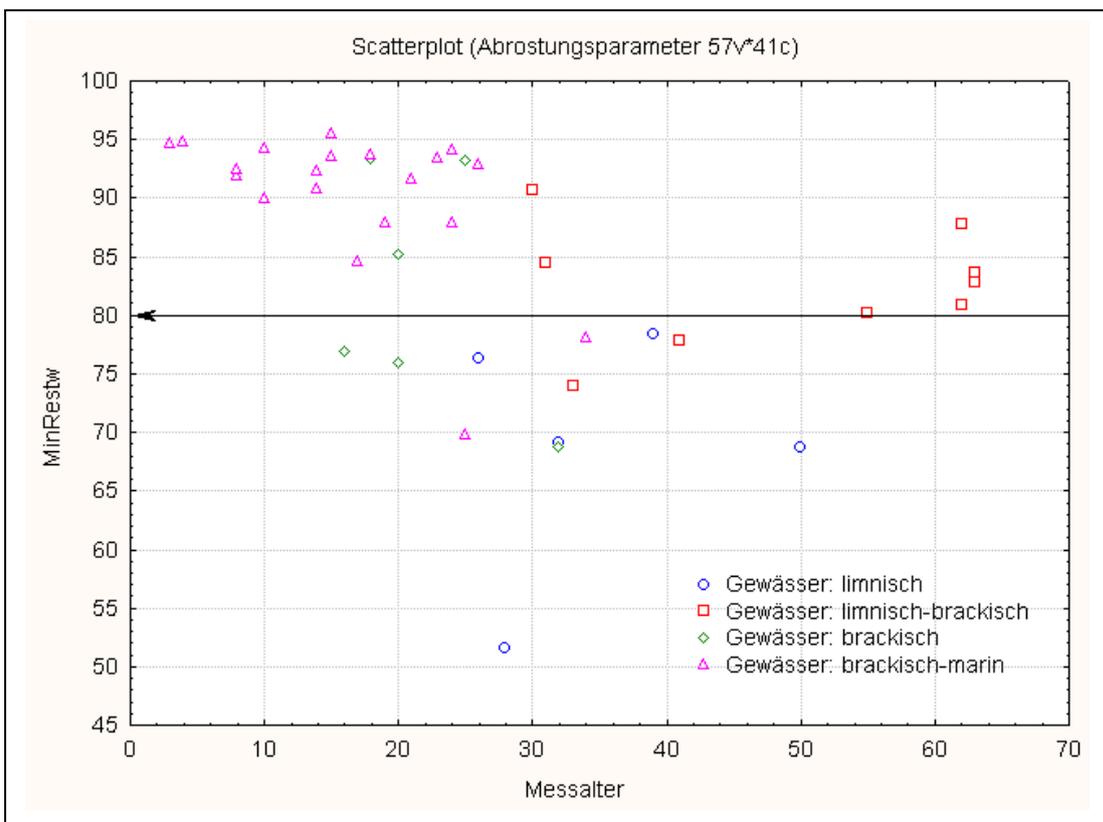


Bild A3-29: Prozentuale Restwanddicke und Abrostungszeitpunkte

Tabelle A3-27: Prozentuale Restwanddicke an der Mittel- oder Tideniedrigwasserlinie

Nr	Istwanddicke	Prozent Restwanddicke				Alter
		aus b0 , b1	aus b2	aus b6	Min	
160	10.8	87.8	91.8		87.8	62
110	14.1	84.1	82.8		82.8	63
124	8.3	80.9		96.1	80.9	62
275	19.4	83.7		95.1	83.7	63
136	14.2	80.1			80.1	55
nn14	14.8	68.7	73.0		68.7	50
230	12.9	85.6		77.9	77.9	41
41	13.0	73.9		87.7	73.9	33
17	14.8	51.6		91.6	51.6	28
222	18.2	86.9		69.1	69.1	32
130	20.5	84.4		87.6	84.4	31
83.1	9.5	89.9		76.4	76.4	26
83.nn	9.5	88.7		78.4	78.4	39
231	11.7	93.4		90.6	90.6	30
213	10.0	93.0		94.9	93.0	26
126	20.5	93.2			93.2	25
122	20.5	94.1		95.1	94.1	24
153	14.5	93.7	95.0		93.7	18
151	14.3	93.3	93.4		93.3	18
nn10	14.2	78.1		85.0	78.1	34
105	10.1	85.8		84.6	84.6	17
85.1	7.0	81.2		75.9	75.9	20
31	15.6	85.2		96.1	85.2	20
85.nn	7.0	79.6		68.7	68.7	32
9	21.6	89.4		87.9	87.9	24
14	10.0	76.8		87.7	76.8	16
127	15.6	91.7			91.7	21
233	10.8	93.5		93.5	93.5	23
266	11.5	69.8	81.9		69.8	25
84	10.0	95.3		93.5	93.5	15
132	11.5	95.5		96.0	95.5	15
87	10.5	92.5		90.0	90.0	10
67	10.4	91.9	94.9		91.9	8
nn12	19.0	87.9	89.1		87.9	19
112	12.8	94.8	96.2		94.8	4
50	15.1	94.5		92.5	92.5	8
138	13.4	94.8	94.3		94.3	10
86	10.1	95.2		94.7	94.7	3
nn5	13.7	92.3		90.9	90.9	14
nn6	15.6	94.3		92.3	92.3	14

Zuerst muss die Lebensdauer einer Spundwand nach bautechnischen Kriterien definiert sein. Beim vorliegenden Datenbeispiel wurde diese nach BAW-Vorgaben als das Alter festgelegt, an dem die minimale Restwanddicke weniger als 80% der Ausgangswanddicke beträgt (mit Offset für negative Abrostungswerte). Dabei wurde die minimale Restwanddicke aus der Ist-Wanddicke und der geschätzten mittleren Abrostung errechnet. Wenn bei einem Bauwerk diese kritische Restwanddicke noch nicht unterschritten war, ging das zugehörige Alter als zensierte Lebensdauer in die Betrachtung ein (d.h. der kritische Abrostungszustand wird erst nach der Ultraschallinspektion eintreten).

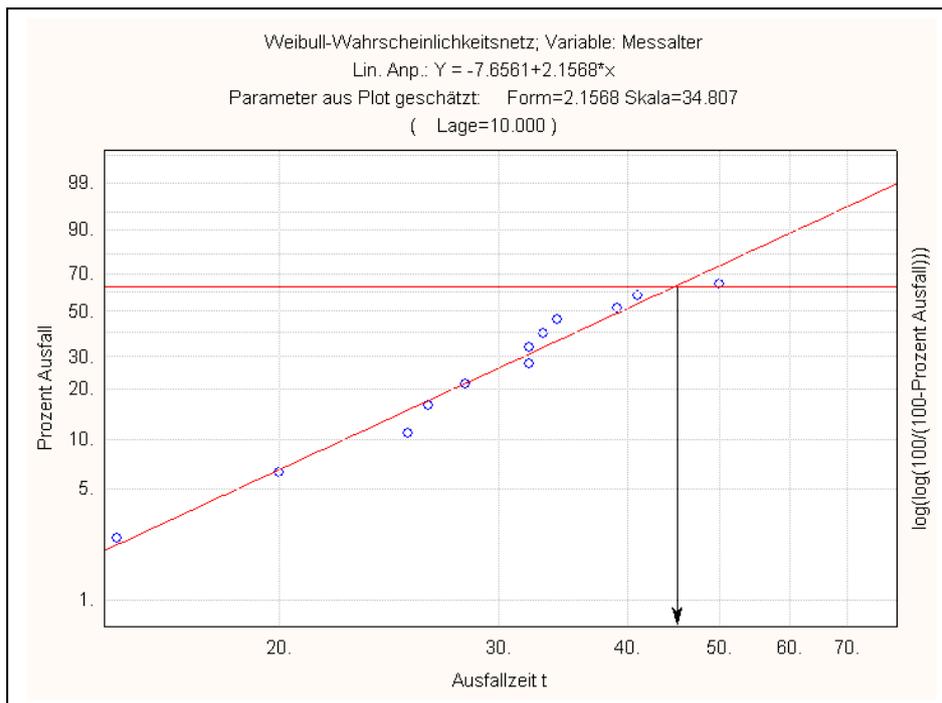


Bild A3-30: Abrostungszeitpunkte im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz

Die resultierenden Lebensdauerdaten der Spundwände passen sehr gut in das Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibullverteilung (Bild A3-30) und ließen sich einem Test auf Verteilungsanpassung nach Hollander-Proschan zufolge auch diesem Verteilungstyp zuordnen ( $p = 0,16$ ).

Tabelle A3-27b: Parameterschätzung für die Weibullverteilung

Weibull-Parameter	Schätzwert	Standardfehler (asymptotisch)	95%-Konfidenzgrenzen	
			unten	oben
Lage	10.0	3.59	3.0	10.0
Form	1.8	0.41	1.2	2.8
Skala	46.7	9.30	31.7	69.0

Der nach der Maximum-Likelihood-Methode geschätzte Lageparameter (ausfallfreie Zeit) liegt bei 10, der Formparameter bei 1,8 und der Skalenparameter bei 46,7, d.h. nach etwa  $10 + 47 = 57$  Jahren dürfte durch fortschreitende Korrosion die minimale Restwanddicke bei etwa 63,2% der Bauwerke, die älter als 10 Jahre sind, unter die kritische Marke von 80% der Ausgangswanddicke abgesunken sein (Tabelle A3-27b). Bereits nach 23 Jahren hat jedes zehnte Bauwerk

die kritische Restwanddicke unterschritten, nach 48 Jahren haben es die Hälfte der Bauwerke (Tabelle A3-27c).

*Tabelle A3-27c: Geschätzter Zeitpunkt für Ausfallanteile mit der Weibullverteilung*

Ausfallanteil [%]	Ausfallzeitpunkt	95%-Konfidenzgrenzen		Charakter. Wert
		unten	oben	
5	19	15	27	15
10	23	18	32	19
50	48	37	65	38
90	84	54	134	58

Für die Weibull-Parameter lassen sich Konfidenzintervalle berechnen, ebenso wie für die daraus abgeleiteten Perzentile. Als charakteristischer Wert ergibt sich entsprechend die einseitige 5%-Konfidenzuntergrenze. Danach hätte frühestens schon nach 19 Jahren jedes zehnte Bauwerk die kritische Restwanddicke unterschritten, nach 38 Jahren schon die Hälfte der Bauwerke (Tabelle A3-27c). Diese Abschätzung ist sehr ungenau, weil sie quer über alle Gewässergruppen und Stahlklassen geht. Für eine stratifizierte Weibullanalyse reicht jedoch der Datenumfang pro Gruppe nicht aus.

## Korrosionsfaktoren

### *Datengrundlage für die Schätzung*

Als Ausblick auf künftige Bestimmungsverfahren soll nun die Abschätzung der Nutzungsdauer von Stahlpundwänden aus messbaren Einflussgrößen untersucht werden. Anders als bei der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Lebensdaueranalyse mit der Weibullverteilung, die nur den Anteil aller Bauwerke mit minimaler Restwanddicke abschätzt, soll hier eine Abschätzung für einzelne Bauwerke an jedem beliebigen Tiefenpunkt möglich sein. Dabei gilt es zu klären, ob die Modellparameter der un stetigen Tiefenfunktion für die Abrostung wiederum als Funktion anderer Messgrößen darstellbar sind. Auf diese Weise lässt sich bereits vor einer Ultraschallprüfung das Risiko des möglichen Versagensfalls für ein Bauwerk quantifizieren und so dem Küsteningenieurwesen ein wertvolles Instrument zur Planung von Untersuchungen liefern.

In der Zone unterhalb der Mittelwasserlinie sind die wichtigsten Parameter (a) das Basisniveau  $b_0$  und (b) die zugehörige Basistiefe, (c) der Abrostungsgradient  $b_1$ , sowie (d) der Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$ , welcher sich über den Standardschätzfehler der zugehörigen loglinearen Regression schätzen lässt. Aus den untersuchten Spundwanddaten zeichnet sich ab, dass die Basistiefe grundsätzlich etwa bei 4 - 5 m Tiefe liegt und als Konstante von 4 m in die Analyse eingebracht werden kann. Für 40 Bauwerke konnten  $b_0$ ,  $b_1$  und  $S_{\text{fak1}}$  berechnet werden und stehen für die multivariate Analyse zur Verfügung.

Für andere Abrostungszonen stehen sehr viel weniger Daten zur Verfügung. Da nur 10 Bauwerke in Tidegewässern liegen, gibt es für die Regressionsparameter  $b_2 - b_5$  und  $S_{\text{fak2}} - S_{\text{fak3}}$  der Wechselwasserzone zu wenig Schätzwerte für eine Ursachenforschung. Für die Spritzwasserzone von 34 Bauwerken liegen Werte von  $b_6$  und dem Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$  vor, aber nur 9 Werte für den Gradienten  $b_7$  (alle anderen mussten wegen geringem Messabstand auf 0 gesetzt werden. Demzufolge können hier nur die Parameter  $b_6$  und  $S_{\text{fak4}}$  an die multivariate Analyse übergeben werden.

Der Datenbestand reduziert sich weiter, weil nicht für alle 40 Bauwerke die potentiellen Einflussgrößen ermittelt werden konnten. Für alle 40 Bauwerke sind Gewässeranalysen verfügbar, aber nur für 38 Bauwerke auch Stahlanalysen (Tabelle A3-28).

Tabelle A3-28: Korrosionsalter und kategoriale Einflusskandidaten für die Korrosion

Nr	Alter	Stahl	Milieu	Liegeplatz	Tide	Strömung
160	62	Feinstahl	limnisch-brackisch	nein	ja	hoch
110	63	Grobstahl	limnisch-brackisch	nein	ja	hoch
124	62	Feinstahl	limnisch-brackisch	ja	nein	hoch
275	63	Grobstahl	limnisch-brackisch	ja	nein	niedrig
136	55	Feinstahl	limnisch-brackisch	ja	nein	niedrig
nn14	50	Grobstahl	limnisch	ja	ja	hoch
230	41	Feinstahl	limnisch-brackisch	nein	nein	niedrig
41	33	Grobstahl	limnisch-brackisch	ja	nein	niedrig
17	28	Grobstahl	limnisch	nein	nein	niedrig
222	32	Grobstahl	limnisch	nein	nein	niedrig
130	31	Feinstahl	limnisch-brackisch	nein	nein	niedrig
83.1	26	Grobstahl	limnisch	nein	nein	hoch
83.nn	39	Grobstahl	limnisch	nein	nein	hoch
231	30	Grobstahl	limnisch-brackisch	ja	nein	hoch
213	26	Feinstahl	brackisch-marin	nein	nein	hoch
126	25	Grobstahl	brackisch	ja	nein	niedrig
122	24	Feinstahl	brackisch-marin	nein	nein	niedrig
153	18	Feinstahl	brackisch-marin	ja	ja	hoch
151	18	Grobstahl	brackisch	nein	ja	hoch
nn10	34	Grobstahl	brackisch-marin	ja	nein	niedrig
105	17	Grobstahl	brackisch-marin	ja	nein	niedrig
85.1	20	Feinstahl	brackisch	ja	nein	hoch
31	20	Feinstahl	brackisch	ja	nein	niedrig
85.nn	32	Grobstahl	brackisch	ja	nein	hoch
9	24	Grobstahl	brackisch-marin	nein	nein	niedrig
14	16	Grobstahl	brackisch	ja	nein	niedrig
127	21	Grobstahl	brackisch-marin	ja	nein	niedrig
233	23	Grobstahl	brackisch-marin	ja	nein	hoch
266	25	Grobstahl	brackisch-marin	ja	ja	hoch
84	15	Feinstahl	brackisch-marin	ja	nein	hoch
132	15	Feinstahl	brackisch-marin	nein	nein	hoch
87	10	Grobstahl	brackisch-marin	nein	nein	hoch
67	8		brackisch-marin	ja	ja	hoch
nn12	19		brackisch-marin	nein	ja	hoch
112	4	Feinstahl	brackisch-marin	nein	ja	hoch
50	8	Feinstahl	brackisch-marin	nein	nein	niedrig
138	10	Grobstahl	brackisch-marin	ja	ja	hoch
86	3	Feinstahl	brackisch-marin	ja	nein	hoch
nn5	14	Grobstahl	brackisch-marin	ja	nein	niedrig
nn6	14	Grobstahl	brackisch-marin	nein	nein	niedrig

Tabelle A3-29: Gewässerfaktoren als metrische Einflusskandidaten für die Korrosion

Nr	Salzfaktor	Säurefaktor	Schmutzfaktor	O2-Faktor	SaisSalz	SaisSäure	SaisSchmutz	SaisO2
160	1.3	-1.6	0.0	0.4	-1.0	-0.4	1.6	-0.3
110	1.1	-2.2	-0.3	0.0	-1.6	-0.4	1.6	-0.3
124	1.1	-2.3	-0.5	0.0	-0.1	2.6	0.3	1.4
275	-0.5	-0.4	-0.4	0.4	-0.3	-0.2	-1.7	-0.4
136	0.2	-0.4	1.6	-0.4	1.9	1.4	0.2	-0.7
nn14	-1.3	0.1	-0.3	1.6	-0.8	-0.1	-0.3	-1.8
230	0.3	0.5	0.7	1.3	-0.9	-0.3	-0.3	-0.1
41	-0.9	-0.9	-1.5	-1.9	-0.6	-1.2	-0.3	0.9
17	-0.8	-0.5	-0.6	-0.7	-0.1	-0.8	-0.2	0.1
222	-0.3	0.0	0.4	0.9	-1.0	0.0	-1.5	-0.8
130	-1.3	0.0	0.1	-0.5	0.4	1.2	0.0	-0.9
83.1	1.1	1.4	-0.8	0.6	1.5	-0.6	0.7	-0.1
83.nn	1.1	1.4	-0.8	0.6	1.5	-0.6	0.7	-0.1
231	0.1	0.3	-0.2	-1.7	-0.6	-0.8	-0.1	1.8
213	1.3	-1.9	1.4	-0.6	-0.3	2.9	0.2	1.8
126	-1.4	0.3	0.3	1.3	0.7	0.4	0.5	-1.2
122	-1.3	-0.3	0.0	0.1	0.4	0.9	0.7	-1.7
153	-0.6	0.2	1.9	1.1	1.4	0.0	-1.2	-0.2
151	-0.5	0.0	1.9	1.0	1.2	0.3	-1.7	-0.5
nn10	-1.1	-0.3	-0.4	-0.5	0.4	0.3	0.7	-0.3
105	1.2	0.6	-1.2	0.5	-0.9	-0.4	1.5	-0.1
85.1	1.1	0.7	-1.8	0.3	0.8	-0.9	0.9	0.6
31	-0.4	-0.4	-0.1	0.2	-0.2	-0.1	-2.2	-0.3
85.nn	1.1	0.7	-1.8	0.3	0.8	-0.9	0.9	0.6
9	-0.3	0.0	0.4	0.9	-1.0	0.0	-1.5	-0.8
14	-1.0	-0.4	-1.1	-0.6	-0.3	-0.1	0.0	-1.2
127	-1.1	0.0	0.4	-0.2	0.3	0.6	0.4	-1.1
233	0.5	1.0	1.3	-2.6	-0.3	-0.6	0.0	2.8
266	-1.4	0.1	-1.2	-0.5	0.0	-0.5	-0.7	1.0
84	1.1	0.9	-1.1	0.3	1.0	-0.8	0.7	0.4
132	1.2	-2.2	-0.1	0.3	-0.1	2.6	0.3	1.2
87	1.0	1.7	-1.0	-0.3	1.5	-1.4	0.4	0.6
67	-1.2	0.2	-1.0	-0.7	-1.4	0.0	0.6	-0.8
nn12	-1.0	-0.1	-0.1	1.0	0.2	-0.1	-1.5	-0.2
112	1.4	0.8	-0.7	0.0	-1.1	-0.3	1.5	-0.7
50	-0.5	-0.5	-0.1	0.6	-0.6	-0.3	-1.7	-0.5
138	-1.3	0.4	-0.6	-0.7	-0.6	0.2	0.6	-0.8
86	1.2	1.3	-0.7	1.3	1.5	-1.4	1.3	0.3
nn5	0.5	0.8	1.2	0.9	-1.3	-0.6	-0.8	0.8
nn6	0.5	1.1	1.2	-0.4	-1.3	-0.4	-0.6	0.8

Tabelle A3-30: Transformierte Gradientenwerte als Einflusskandidaten

Nr	GradLnTemp	GradpHBin	GradLeitfBin	GradLnRedox	GradLnO2
160	-1.7	<0	0	1.7	-1.6
110	-2.3	0	0	1.5	-1.9
124	-3.0	0	0	1.1	-1.6
275	-1.9	0	0	1.8	-1.6
136	-2.5	0	0	1.8	-1.8
nn14	-2.3	<0	0	1.9	-1.9
230	-2.3	0	0	2.4	-1.4
41	-1.9	0	>0	2.2	-0.7
17	-1.5	0	>0	2.3	-2.0
222	-1.9	0	0	0.9	-2.1
130	-1.0	0	>0	1.6	-2.2
83.1	-1.9	0	0	1.8	-1.6
83.nn	-1.9	0	0	1.8	-1.6
231	-1.9	0	>0	3.6	-1.6
213	-2.4	<0	0	1.7	-1.6
126	-1.2	<0	>0	1.7	-1.0
122	-1.2	0	>0	1.8	-2.8
153	-1.9	0	0	1.8	-1.6
151	-1.9	0	0	2.4	-1.9
nn10	-1.7	0	>0	1.8	-1.5
105	-2.8	0	0	1.7	-0.5
85.1	-1.9	0	0	2.4	-1.6
31	-1.9	0	0	0.0	-1.6
85.nn	-1.9	0	0	2.4	-1.6
9	-1.9	0	0	0.9	-2.1
14	-1.7	<0	>0	1.1	-2.8
127	-1.1	0	>0	1.7	-1.5
233	-1.9	<0	0	2.4	-1.6
266	-1.9	0	>0	3.0	-1.4
84	-1.9	0	0	3.0	-1.4
132	-2.7	<0	>0	1.9	-1.3
87	-1.9	0	0	2.5	-1.6
67	-2.4	<0	0	1.8	-1.9
nn12	-1.9	0	0	1.8	-1.6
112	-1.9	<0	>0	1.8	-1.2
50	-1.9	0	0	1.8	-1.6
138	-2.2	<0	0	1.9	-1.8
86	-1.9	0	0	1.8	-1.6
nn5	-1.9	0	>0	1.9	-1.6
nn6	-1.9	0	0	1.9	-1.6

Neben dem Korrosionsalter stehen als Einflusskandidaten zwei Metallklassen und vier Milieu-  
 gruppen zur Verfügung, die jeweils aus einer Clusteranalyse der Ursprungswerte hervorgegan-  
 gen sind. Für neue Bauwerke lässt sich später mit Hilfe der in den vorangegangenen Abschnitten  
 dargestellten Klassifikationsfunktionen der Diskriminanzanalyse (Tabellen A3-9 und A3-16) die  
 Zuordnung treffen. Außerdem werden binäre Größen (ja / nein) wie Liegeplatz, Tide und Strö-  
 mung berücksichtigt (Tabelle A3-28).

Die Vielzahl von chemischen Gewässerparametern wurde in Form von vier Hauptkomponenten  
 (Salzfaktor, Säurefaktor, Schmutzfaktor, O<sub>2</sub>-Faktor) in die Analyse einbezogen (Tabelle A3-29).

Diese Faktoren stellen Linearkombinationen der Ursprungsgrößen dar, welche vor der Faktorextraktion teilweise transformiert (logarithmiert, dichotomisiert) und dann standardisiert wurden. Für neue Standorte lassen sich die jeweiligen Faktorwerte aus den Messwerten und den Faktorkoeffizienten berechnen (siehe Tabelle A3-6). In gleicher Weise sind die Saisonfaktoren aus dem Verhältnis der Sommer- und Winterwerte ermittelt worden, die sich später aus den zugehörigen Koeffizienten berechnen lassen (Tabelle A3-11b).

Die Tiefegradienten der Wintermessung wurden nicht in Form von Linearkombinationen gebündelt, weil nur für 5 Parameter Gradienten berechnet werden konnten (GradLnTemp, GradpHBin, GradLeitfBin, GradLnRedox, GradLnO<sub>2</sub>). Ursprünglich wurden diese Gradienten als Veränderung des Parameterwertes pro Meter Tiefe von der aktuellen Mittelwasserlinie oder Tideniedrigwasserlinie berechnet. Aufgrund von asymmetrischen oder heterogenen Verteilungsmustern gehen diese Gradienten jedoch in transformierter Form (logarithmiert, dichotomisiert) in die Analyse ein (z.B. Gradient pH <0 / 0; Gradient Leitfähigkeit 0 / >0).

### **Korrelationen zwischen Einflussgrößen**

Die nachfolgende Ursachenforschung für die Korrosion an Stahlspundwänden erfolgt mit Hilfe der Regressions- und Kovarianzanalyse im Allgemeinen Linearen Modell (ALM). Diese Verfahren fordern die Unabhängigkeit (Orthogonalität) von Prädiktoren, damit Koeffizienten einer Vorhersagegleichung berechnet werden können, die jeweils den Einfluss von beobachtbaren Größen auf die Abrostungsstärke quantifizieren. Wenn Einflussfaktoren in einem Regressionsmodell miteinander korrelieren (d.h. kollinear sind), lässt sich deren Wirkung auf die Zielgröße nicht klar identifizieren. In solchen Fällen liefern die Einflussfaktoren redundante Informationen.

Bei kategorialen Einflussgrößen lässt sich die wechselseitige Unabhängigkeit durch eine Kreuztabellierung klären, bei metrischen Einflussgrößen durch Korrelationsanalyse und speziellen Regressionsstatistiken (semipartielle Korrelation, Toleranzwerte). Ziel des Untersuchungsprogramms war es, aus den verfügbaren Informationen der Datenbank heraus zumindest die Unabhängigkeit von Alter, Milieu und Liegeplatz zu sichern. Durch die Neudefinition des Gewässermilieus aufgrund der Clusteranalyse hat es Verschiebungen gegeben, die kleine Abhängigkeiten zur Folge hatten (Tabelle A3-31).

*Tabelle A3-31: Kreuztabellierung von Alter und Milieu (38 Bauwerke)*

Alter	Gewässer				Gesamt
	limnisch	limnisch-brackisch	brackisch	brackisch-marin	
0-19	0	0	2	11	13
20-30	2	1	3	6	12
>30	3	8	1	1	13
Alle	5	9	6	18	38

So ist die jüngste Altersgruppe im limnischen und limnisch-brackischen Milieu nicht vertreten, die älteste Altersgruppe dagegen kaum im brackisch und brackisch-marinen Milieu. Damit werden die statistisch fassbaren Einflüsse beider Größen miteinander "vermengt". Bauwerke mit und ohne Liegeplatz verteilen sich in etwa gleichmäßig auf die Altersgruppen, aber nicht ganz

ausgeglichen auf die Milieugruppen (Tabellen A3-32 und A3-33): im limnischen Milieu liegt selten ein Bauwerk mit Liegeplatz, im brackischen dagegen fast immer.

*Tabelle A3-32: Kreuztabellierung von Alter und anderen Faktoren (38 Bauwerke)*

Alter	Liegeplatz		Tide		Strömung		Stahl	
	nein	ja	nein	ja	niedrig	hoch	grob	fein
0-19	6	7	9	4	5	8	7	6
20-30	5	7	11	1	6	6	8	4
>30	6	7	10	3	7	6	8	5
Alle	17	21	30	8	18	20	23	15

*Tabelle A3-33: Kreuztabellierung von Milieu und anderen Faktoren (38 Bauwerke)*

Gewässer	Liegeplatz		Tide		Strömung		Stahl	
	nein	ja	nein	ja	niedrig	hoch	grob	fein
limnisch	4	1	4	1	2	3	5	0
limnisch-brackisch	4	5	7	2	5	4	4	5
brackisch	1	5	5	1	3	3	4	2
brackisch-marin	8	10	14	4	8	10	10	8
Alle	17	21	30	8	18	20	23	15

Die Einflussgröße "Liegeplatz" lässt sich sehr gut von anderen kategorialen Größen wie Tide, Strömung und Stahlklasse trennen (Tabelle A3-34), die sich mit ihren beiden Ausprägungen jeweils in gleichen Anteilen auf Standorte mit und ohne Liegeplatz verteilen. Standorte in Tidengewässern und tidefreien Gewässern verteilen sich nicht gleichmäßig auf Alters- und Gewässergruppen und auf Standorte mit und ohne Strömung (Tabelle A3-35). Bis auf die Kopplung an "Tide" ist "Strömung" relativ unabhängig. Die Stahlklassen verteilen sich nahezu gleichmäßig auf unterschiedliche Standortbedingungen, sind aber im limnischen Milieu nur als Grobstahl vertreten.

*Tabelle A3-34: Kreuztabellierung von Liegeplatz und anderen Faktoren (38 Bauwerke)*

Liegeplatz	Tide		Strömung		Stahl	
	nein	ja	niedrig	hoch	grob	fein
nein	13	4	8	9	9	8
ja	17	4	10	11	14	7
Alle	30	8	18	20	23	15

*Tabelle A3-35: Kreuztabellierung von Strömung und anderen Faktoren (38 Bauwerke)*

Strömung	Tide		Stahl	
	nein	ja	grob	fein
niedrig	18	0	12	6
hoch	12	8	11	9
Alle	30	8	23	15

Die einfachen bivariaten Korrelationen zwischen Gewässerfaktoren und anderen Größen geben einen kleinen Einblick in die Redundanz des Systems von Einflussgrößen. Andere Kennwerte wie semipartielle Korrelationen und Toleranzen werden bei bestimmten Verfahren der Regressionsanalyse automatisch berechnet und für die Modellbildung berücksichtigt.

Tabelle A3-36: Korrelationen zwischen Gewässerfaktoren (38 Bauwerke)

	Saisonfaktoren			
	SaisSalz	SaisSäure	SaisSchmutz	SaisO2
Salzfaktor	.0394 p=.814	-.0490 p=.770	<b>.4794</b> p=.002	<b>.4964</b> p=.002
Säurefaktor	.3368 p=.039	<b>-.6543</b> p=.000	.0443 p=.792	-.0376 p=.822
Schmutzfaktor	-.0480 p=.775	<b>.4015</b> p=.012	<b>-.4207</b> p=.009	.0047 p=.977
O2-Faktor	.1324 p=.428	.0053 p=.975	-.1052 p=.530	<b>-.5236</b> p=.001

Aufgrund der Extraktionsmethode der Hauptkomponentenanalyse sind die Gewässerfaktoren untereinander unkorreliert (d.h. orthogonal), ebenso wie die Saisonfaktoren. Zwischen beiden Faktorgruppen können allerdings Abhängigkeiten beobachtet werden. Zwischen dem Sommergehalt an Säuren (oder Basen), der Gewässerverschmutzung und dem Sauerstoffgehalt einerseits und der zugehörigen Saisonschwankung andererseits besteht ein signifikanter Zusammenhang (Tabelle A3-36). Außerdem korreliert der Salzgehalt im Sommer sowohl mit der Saisondynamik der Verschmutzung wie mit der O<sub>2</sub>-Saisonalität. Der Schmutzfaktor korreliert wiederum mit der Säure-Saisonalität. Insgesamt lassen sich also die Saisonfaktoren bei der nachfolgenden Analyse nicht immer klar von den Sommergehalten trennen.

Tabelle A3-37: Korrelationen zwischen Gewässerfaktoren und Gradienten (38 Bauwerke)

	Gradienten (transformiert)				
	GradLnTemp	GradpHBin	GradLeitfBin	GradLnRedox	GradLnO2
Salzfaktor	<b>-.5051</b> p=.001	.0147 p=.930	<b>-.4452</b> p=.005	.0874 p=.602	.3106 p=.058
Säurefaktor	.3025 p=.065	-.2143 p=.196	-.1290 p=.440	.3151 p=.054	.0845 p=.614
Schmutzfaktor	.0146 p=.931	.0827 p=.622	-.1294 p=.439	-.1503 p=.368	-.1928 p=.246
O2-Faktor	-.0898 p=.592	-.1145 p=.493	-.3211 p=.049	-.3033 p=.064	-.0190 p=.910

Zwischen Gewässerfaktoren und transformierten Gradienten treten nur in Einzelfällen Korrelationen auf (Tabelle A3-37). Der Salzfaktor korreliert mit den Tiefgradienten der Wassertemperatur, der Leitfähigkeit und des Sauerstoffgehalts. Überwiegend variieren jedoch Gewässerfaktoren unabhängig von den Tiefgradienten. Auch die Saisonfaktoren zeigen sich bis auf die O<sub>2</sub>-Saisonalität unabhängig von den Gradienten (Tabelle A3-38). Letztere korreliert mit den Tiefgradienten der Wassertemperatur, der Redoxspannung und des Sauerstoffgehalts.

Tabelle A3-38: Korrelationen zwischen Saisonfaktoren und Gradienten (38 Bauwerke)

	Gradienten (transformiert)				
	GradLnTemp	GradpHBin	GradLeitfBin	GradLnRedox	GradLnO2
SaisSalz	.1835	-.2530	-.1151	.2043	-.0516
	p=.270	p=.125	p=.491	p=.219	p=.759
SaisSäure	-.2777	.3016	.1148	-.3318	-.1497
	p=.091	p=.066	p=.492	p=.042	p=.370
SaisSchmutz	-.0764	.2549	.0901	.2186	.1891
	p=.648	p=.122	p=.590	p=.187	p=.255
SaisO2	<b>-.3711</b>	-.0232	-.0793	<b>.4253</b>	<b>.3775</b>
	p=.022	p=.890	p=.636	p=.008	p=.019

Die transformierten Tiefgradienten sind untereinander nicht notwendig orthogonal, weil sie nicht aus einer Faktorenextraktion hervorgegangen sind (Tabelle A3-39). Der Temperaturgradient korreliert naturgemäß mit den Gradienten von Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt, womit er als eigenständige Einflussgröße in der nachfolgenden Analyse unberücksichtigt bleiben muss. Der Gradient des pH-Werts variiert unabhängig von allen anderen Gradienten und ist somit eine wichtige Größe.

Tabelle A3-39: Interkorrelationen von Gradienten (38 Bauwerke)

	Gradienten (transformiert)				
	GradLnTemp	GradpHBin	GradLeitfBin	GradLnRedox	GradLnO2
GradLnTemp	1.0000	-.0924	.4688	.0473	-.3404
	p= ---	p=.581	p=.003	p=.778	p=.036
GradpHBin	-.0924	1.0000	.1202	-.0940	-.0110
	p=.581	p= ---	p=.472	p=.574	p=.948
GradLeitfBin	.4688	.1202	1.0000	.1782	-.0287
	p=.003	p=.472	p= ---	p=.285	p=.864
GradLnRedox	.0473	-.0940	.1782	1.0000	.2279
	p=.778	p=.574	p=.285	p= ---	p=.169
GradLnO2	-.3404	-.0110	-.0287	.2279	1.0000
	p=.036	p=.948	p=.864	p=.169	p= ---

### Altersfunktionen

Einer der wichtigsten Faktoren für die Abrostungstiefe ist das Alter des Bauwerks, was sich bereits in der Voruntersuchung gezeigt hat. Eine gute Anpassung nichtlinearer Art bietet eine sigmoide (S-förmige) Exponentialkurve, die gegen einen Grenzwert ausläuft. Bei der Schätzung von Korrosionsparametern der Tiefenfunktion (z.B.  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $S_{\text{fak1}}$ ) wäre die allgemeine Funktionsgleichung:

$$\text{KorrPar} = a_0 \times e^{-a_1/\text{Alter}} \quad (\text{A3-21})$$

wobei  $a_0$  und  $a_1$  als Regressionskoeffizienten zu schätzen sind und  $e$  die Eulersche Zahl ist. Der Koeffizient  $a_0$  beschreibt einen Grenzwert, gegen den der jeweilige Korrosionsparameter mit der Zeit ausläuft. Dieses Modell lässt sich über eine Logtransformation linearisieren:

$$\text{Log}_e(\text{KorrPar}) = \text{Log}_e a_0 - a_1/\text{Alter} \quad (\text{A3-22})$$

Da hier auch die Zielgröße logarithmiert werden müsste, hätte das ungünstige Implikationen für eine Ursachendiagnose bei Hinzuziehung weiterer Einflussgrößen in einem multiplen Regressi-

onsmodell: alle Korrosionsfaktoren müssten in multiplikativer Weise zusammenwirken. Ein Modell mit additivem Zusammenwirken von Korrosionsfaktoren könnte das Alter in logtransformierter Form einbinden, denn näherungsweise lässt sich eine sigmoide Kurve auch durch eine logarithmische Anpassungsfunktion ersetzen:

$$\text{KorrPar} = a_0 + a_1 \times \text{Log}_e \text{ Alter} \quad (\text{A3-23})$$

Bei dieser Formel muss die Zielgröße nicht logarithmiert werden, sondern nur die Einflussgröße Alter. Auf diese Weise lässt sich die Altersabhängigkeit der Korrosion zusammen mit anderen Einflussfaktoren in ein lineares multiples Modell einbringen.

Die nachstehenden Beispiele der Schätzung der Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe, des Abrostungsgradienten  $b_1$  unterhalb der Mittelwasserlinie bzw. Tideniedrigwasserlinie zeigt, dass eine logarithmische Anpassung anstelle der sigmoiden Kurve den Prozess hinreichend genau beschreibt (Bild A3-31 und A3-32).

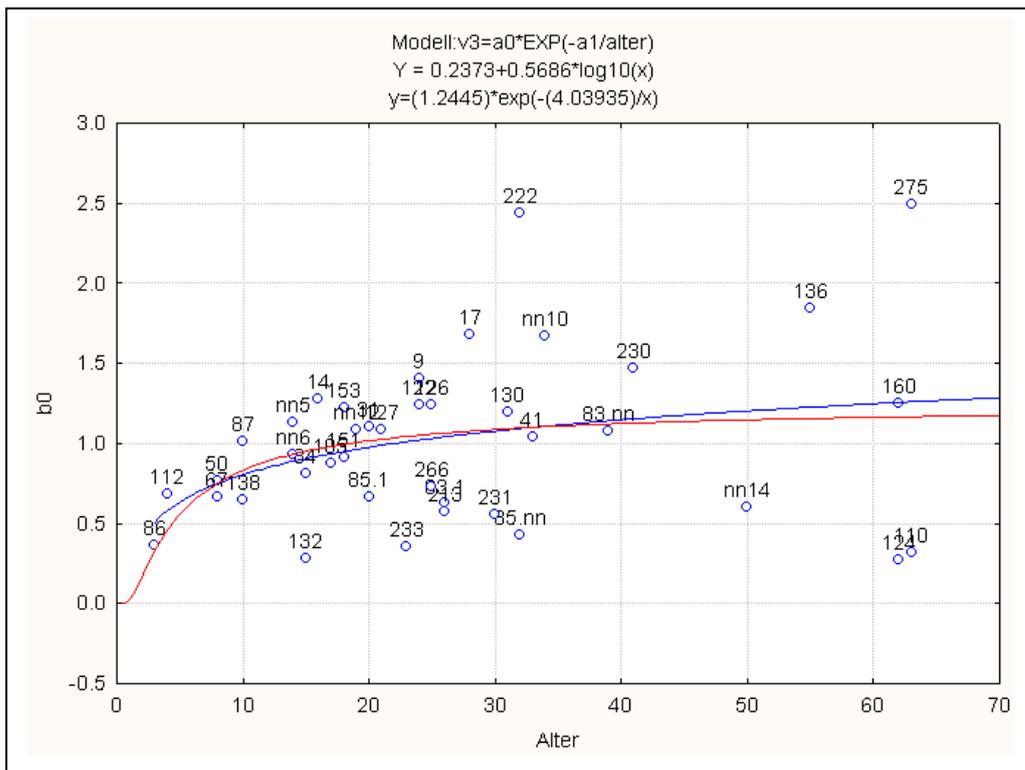


Bild A3-31: Sigmoide und logarithmische Zeitfunktion für die Basisabrostung  $b_0$

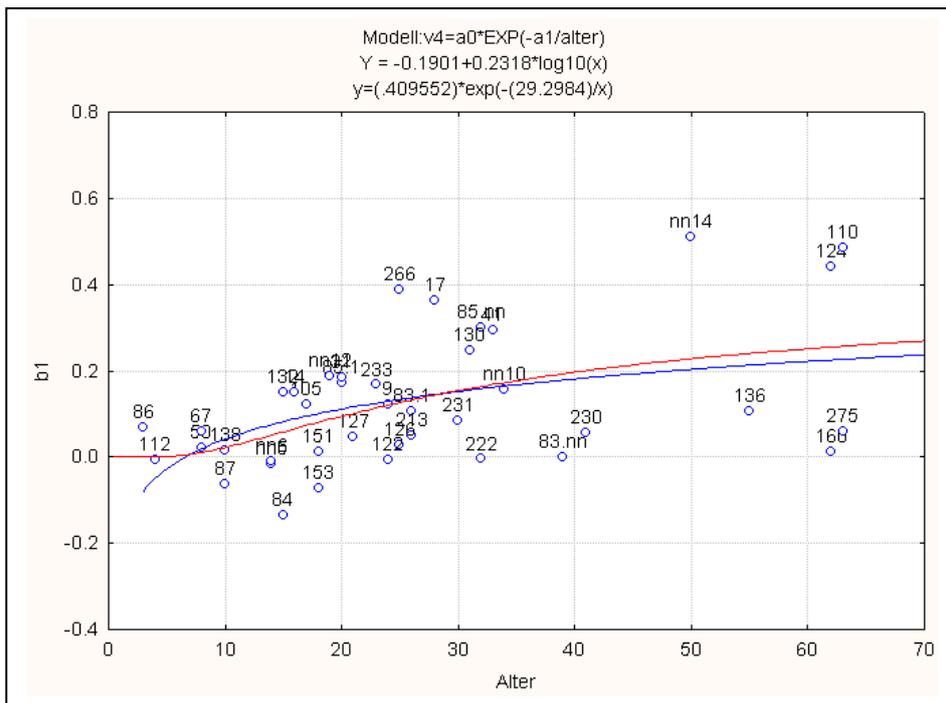


Bild A3-32: Sigmoide und logarithmische Zeitfunktion für Abrostungsgradient  $b_1$

Diese Funktionen lassen sich nicht nur als Zeitfunktion der Basisabrostung  $b_0$  und des Abrostungsgradienten  $b_1$  verwenden, sondern auch für den Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  (Bild A3-33). Die Streuung der Abrostungswerte um die mittlere Abrostung nimmt also zuerst mit der Zeit zu, läuft dann aber gegen einen Grenzwert aus. Demzufolge wirken sich unterschiedliche Angriffspunkte an der Stahloberfläche, im Profilschnitt oder zwischen den Stationen einer Spundwand in den ersten Jahren als Spreizung der jeweiligen Abrostungstiefen aus, ohne dass im Verlauf von Jahrzehnten diese Unterschiede verstärkt werden. Die Lochkorrosion steht ohnehin weder im Zusammenhang mit der mittleren Abrostung, noch mit der Streuung der Werte um die mittlere Abrostung (siehe oben). Die gedämpfte Altersfunktion des Spreizungsfaktors deutet also ebenfalls darauf hin, dass die Lochkorrosion ein eigenständiger Prozess ist, der nicht als Fortsetzung der Flächenkorrosion aufgefasst werden kann.

Die breite Streuung der Werte um diese Alterskurven herum ist Ausdruck weiterer Korrosionsfaktoren, die entweder additiv oder in Wechselwirkung (d.h. multiplikativ) mit dem Alter den Korrosionsprozess steuern. Für die Basisabrostung  $b_0$  beispielweise steht das Alter in Wechselwirkung mit dem Standortfaktor Liegeplatz (Bild A3-34). Ein über geschichtete Regression nach Standorten mit und ohne Liegeplatz getrennt berechnete Altersfunktion zeigt deutliche unterschiedliche Tendenzen: Die Basisabrostung steigt bei Standorten mit niedriger Strömung zuerst mit der Zeit stärker und dann schwächer an, während sie bei Standorten mit höher Strömung keine Altersabhängigkeit zeigt. Dies ist jedoch nur ein Beispiel von vielen möglichen Wirkungskombinationen des gesamten Spektrums an Standortfaktoren, welches in der nachfolgenden multivariaten Analyse untersucht werden soll.

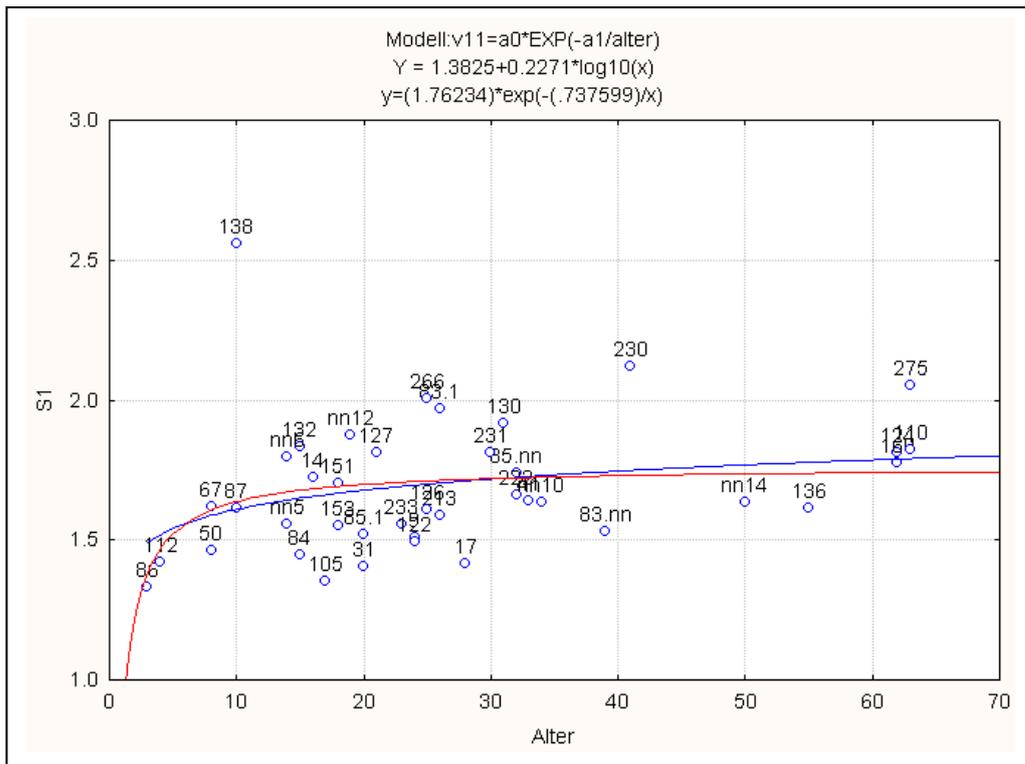


Bild A3-33: Sigmoide und logarithmische Zeitfunktion für Spreizungsfaktor  $S_{fakt}$

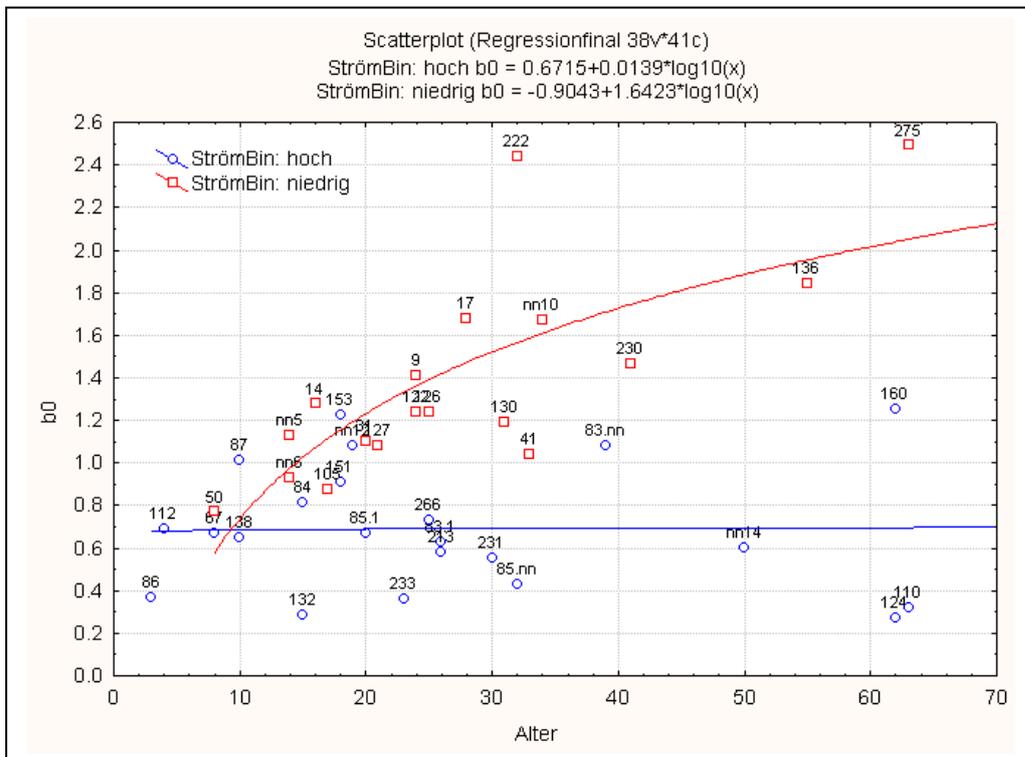


Bild A3-34: Geschichtete logarithmische Zeitfunktion für Basisabrostung  $b_0$

### Entwicklung multipler Schätzfunktionen

Mit einer multiplen Schätzfunktion lassen sich Korrosionsparameter als gewichtete Summe mehrerer Einflussfaktoren schätzen. Der jeweilige Schätzwert ist als Punkt auf einer Hyperfläche anzusprechen, der den geschätzten Mittelwert der abhängigen Größe für beliebige feste Werte von Einflussgrößen wiedergibt (Williams 1959, Walker und Lev 1953, Huang 1970). Die einzelnen Werte des zu schätzenden Korrosionsparameters streuen beidseitig um den Mittelwert, also um die Hyperfläche herum. Je kleiner diese Streuung ist, umso genauer ist die Vorhersage.

Die Grundform einer multiplen Schätzfunktion für Y aus mehrerer unabhängiger Größen (Prädiktoren)  $X_1 \dots X_K$  ist:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_K X_K + \dots + b_{KJ} X_K X_J + u \quad (A3-24)$$

Darin kann Y ein Korrosionsparameter sein (z.B. Basisabrostung  $b_0$ ),  $X_K$  eine zugehörige Einflussgröße (z.B. Gewässereigenschaften),  $X_K X_J$  die linearen Zweifach-Interaktionen und U eine normalverteilte Zufallsgröße (Fehler, Residuum). Die Einflussgrößen  $X_K$  lassen sich entweder in direkter Form als Messwert oder als transformierter Wert (z.B. als Logarithmus oder binäre Größe) in obige Ausdrücke einbringen. Qualitative Faktoren wie *Metallklasse* oder *Gewässermilieu* werden indessen nicht unmittelbar, sondern in kodierter Form als *Dummy-Variablen* in ein Allgemeines Lineares Modell (ALM) eingebracht:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{K1} DUMMY_{K1} + b_{K2} DUMMY_{K2} + \dots + b_{Kn} DUMMY_{Kn} + \dots + b_K X_K + \dots + b_{KJ} X_K X_J + \dots + u \quad (A3-25)$$

Bei der Effektkodierung (sigmabeschränkte Kodierung) werden den Fällen mit zwei Gruppen (Kategorien) der Prädiktorvariablen die Werte 1 und -1 zugeordnet (Bortz 1989). Wenn mehr als zwei Gruppen zu kodieren sind, wird für jede zusätzliche Gruppe eine weitere Prädiktorvariable benötigt. Diese trägt für die zusätzliche Gruppe jeweils den Wert 1, für die erste Gruppe nun den Wert 0 und für die zweite Gruppe unverändert -1. Die auf -1 gesetzte Gruppe ist beliebig und wird als Referenzgruppe bei der Betrachtung von Mittelwertunterschieden eingesetzt, die im zugehörigen Regressionskoeffizienten ablesbar sind. Auf diese Weise wird eine kategoriale Variable mit k Ausprägungen in k-1 Dummy-Variablen abgebildet und im Regressionsmodell repräsentiert (Tabelle A3-38). Die jeweilige Kodierung wird in Form einer Design-Matrix aufgelistet.

Tabelle A3-40: Effektkodierung am Beispiel Gewässermilieu

Gewässer	Dummy1	Dummy2	Dummy3
limnisch	1	0	0
limnisch-brackisch	0	1	0
brackisch	0	0	1
brackisch-marin	-1	-1	-1

Die Koeffizienten  $b_0 \dots b_K$  werden über die Methode der kleinsten Abweichungs-quadrate berechnet und stellen das eigenständige Gewicht der Prädiktoren  $X_1 \dots X_K$  in der Vorhersage dar. Damit

diese Koeffizienten geschätzt werden können, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Wenn die Vorhersagegleichung auch Interaktionsterme enthält, dürfen die Wertebereiche der Einflussgrößen wegen der Produktbildung nicht zu weit auseinanderliegen. Andernfalls müssen die Größen entsprechend umskaliert (z.B. standardisiert) werden.

Die wichtigste Voraussetzung ist jedoch die Unabhängigkeit (Orthogonalität) der Prädiktoren  $X_1 \dots X_K$ , d.h. die Einflussgrößen dürfen nicht miteinander korrelieren. Der eigenständige Einfluss eines Prädiktors wird berechnet, indem der indirekte Einfluss über Korrelation mit anderen Prädiktoren subtrahiert (auspartialisiert) wird. Die resultierenden Koeffizienten  $b_0 \dots b_K$  in der multiplen Vorhersagegleichung werden daher auch "partielle Regressionskoeffizienten" genannt und unterscheiden sich damit erheblich von den einfachen Regressionskoeffizienten.

Wenn zwei hoch miteinander korrelierende Prädiktoren  $X_1$  und  $X_2$  eine Zielgröße beeinflussen, wird deren Gewicht in der Vorhersage durch wechselseitiges Auspartialisieren trotzdem auf Null herabgedrückt. Dieses Problem kann durch verschiedene Auswahlverfahren (Prädiktorselektion) umgangen werden, bei dem immer nur einer der miteinander korrelierenden Prädiktoren im Modell repräsentiert ist (was nicht bedeutet, dass der jeweils andere keinen Einfluss hat!). Als Auswahlverfahren gibt es (a) das "schrittweise vorwärts" Verfahren, bei dem nacheinander die stärksten Prädiktoren in das Modell aufgenommen werden und alle übrigen unberücksichtigt bleiben, (b) das "schrittweise rückwärts" Verfahren, bei dem nacheinander die schwächsten Prädiktoren aus dem Modell entfernt werden, sowie (c) das "beste-Subset" Verfahren, bei dem alle Kombinationen von Prädiktoren in das Modell aufgenommen werden. Hauptkriterium für die Modellaufnahme ist die Toleranz eines Prädiktors, die als  $1 - R^2$  (erklärte Varianz) berechnet wird, wobei  $R^2$  hier aus der Vorhersage eines Prädiktors aus allen übrigen Prädiktoren ermittelt wird. Weitere Einzelheiten zu Vorhersagemodellen werden in der statistischen Fachliteratur beschrieben (Gaensslen und Schubö 1973, Montgomery 1995).

### ***Schätzung der Basisabrostung $b_0$***

Für die Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe wurde mit Hilfe der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Verfahren ein Schätzmodell entwickelt. Dieses Modell enthält das Abrostungsalter (standardisierte Logarithmen), die Stahlklasse (grob / fein), Strömung (ja / nein), Tide (ja / nein), das Gewässermilieu (limnisch / limnisch-brackisch / brackisch / brackisch-marin), Wechselwirkungen zwischen Strömung und Alter, zwischen Tide und Stahl sowie zwischen Tide und Gewässer und die Saisonfaktoren für Sauerstoff und Gewässerverschmutzung (Tabelle A3-41). Die meisten Einflussfaktoren sind auf dem 5% Niveau signifikant. Die Stahlklasse muss ebenso wie das Gewässermilieu im Modell integriert sein, damit für andere Faktoren (Kovariablen) wie beispielsweise Alter jeweils gruppenbezogene Regressionskoeffizienten berechnet werden.

Tabelle A3-41: Regressionskoeffizienten für Basisabrostung  $b_0$  (38 Bauwerke)

		Parameterschätzung				
	Effektstufe	Spalte	b0	Std.Fe.	t	p
Konstante		1	0.975	0.047	20.74	0.000
StrömBin	hoch	2	-0.186	0.053	-3.54	0.002
Stahl	Grobstahl	3	-0.083	0.051	-1.64	0.114
Gewässer	limnisch	4	-0.012	0.112	-0.10	0.918
Gewässer	limnisch-brackisch	5	0.007	0.115	0.06	0.952
Gewässer	brackisch	6	-0.042	0.114	-0.37	0.716
LnAlter		7	0.303	0.064	4.71	0.000
"SaisO2"		8	-0.128	0.048	-2.68	0.013
SaisSchmutz		9	-0.183	0.049	-3.73	0.001
StrömBin*LnAlter		10	-0.280	0.052	-5.37	0.000
Tide*Stahl		11	0.155	0.051	3.03	0.006
Tide*Gewässer		12	0.243	0.105	2.31	0.030
Tide*Gewässer		13	-0.209	0.107	-1.96	0.062
Tide*Gewässer		14	-0.036	0.117	-0.31	0.761

Die Regressionskoeffizienten für die kategorialen Faktoren und deren Wechselwirkung lassen sich nur interpretieren, wenn die zugehörige Kodierung aus der Designmatrix (Tabelle A3-42) hinzugezogen wird. Beim Stahl wird beispielsweise der Grobstahl auf +1 kodiert, der Feinstahl auf -1, und die erste Gruppe gegen (versus) die zweite getestet. Ein partieller Regressionskoeffizient von -0,083 für den Faktor "Stahl" bedeutet also, dass die Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe bei Spundwänden aus Grobstahl im Mittel um 0,2 mm ( $2 \times -0,083 = -0,166$ ) niedriger ist, als bei Spundwänden aus Feinstahl (Bild A3-35 links).

Tabelle A3-42: Designmatrix mit Kodierung der kategorialen Faktoren (38 Bauwerke)

		sigmabeschränkte Kodierung					
	Sp.	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)
Konstante	1						
StrömBin	2	StrömBin	hoch	niedrig			
Stahl	3	Stahl	Grobstahl	Feinstahl			
Gewässer	4	Gewässer	limnisch	brack.-mar.			
Gewässer	5	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.			
Gewässer	6	Gewässer	brackisch	brack.-mar.			
LnAlter	7	LnAlter					
"SaisO2"	9	SaisO2					
SaisSchmutz	10	SaisSchmutz					
StrömBin*LnAlter	10	StrömBin	hoch	niedrig	LnAlter		
Tide*Stahl	11	Tide	nein	ja	Stahl	Grobstahl	Feinstahl
Tide*Gewässer	12	Tide	nein	ja	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
Tide*Gewässer	13	Tide	nein	ja	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
Tide*Gewässer	14	Tide	nein	ja	Gewässer	brackisch	brack.-mar.

Hohe Strömung wird auf +1 gesetzt, niedrige auf -1. Ein partieller Regressions-koeffizient von -0,186 für den Faktor "Strömung" bedeutet also, dass die Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe bei Standorten mit Strömung im Mittel um 0,4 mm ( $2 \times -0,083 = -0,372$ ) höher ist, als bei strömungsfreien Standorte (Bild A3-35 rechts). Diese Vergleiche beruhen auf korrigierten Mittelwertschätzungen der Regression (Kleinste-Quadrate-Mittel), bei der die Abrostungsmittel jeweils auf gleiche Werte aller Kovariablen bezogen sind (z.B. mittleres Alter).

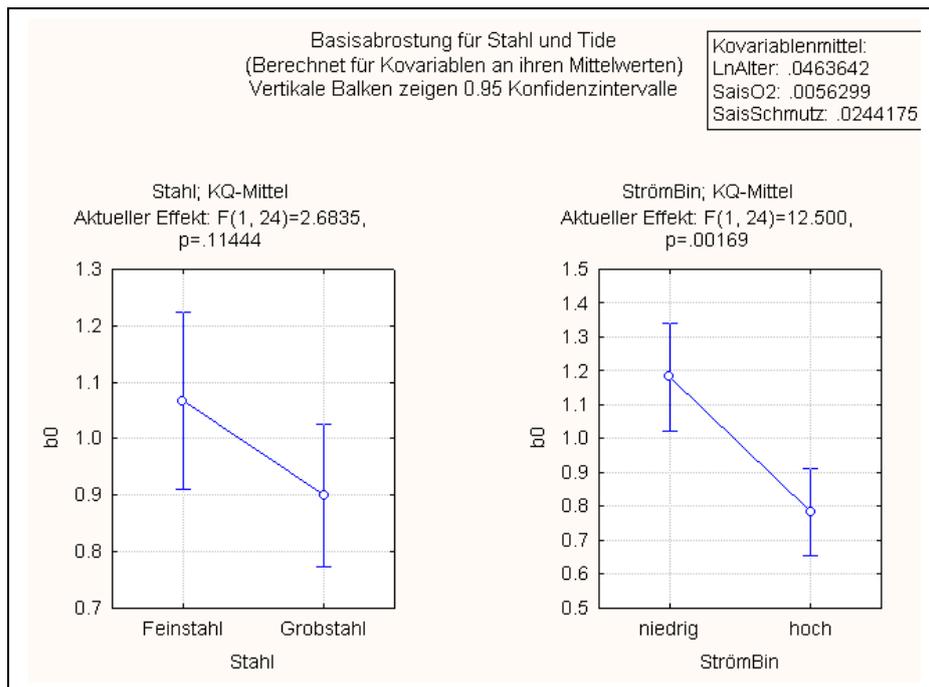


Bild A3-35: Vergleich der Basisabrostung  $b_0$  für Stahl und Strömung

Auch die Interpretation der Koeffizienten für die Interaktionen muss auf der Grundlage der Design-Matrix erfolgen. Standorte mit Tide wurden beispielsweise auf -1 kodiert, ohne Tide auf +1. Die Wechselwirkung geht als Produkte Tide x Stahl der jeweiligen Dummy-Variablen ein, wobei die Kombinationen mit dem Codeprodukt +1 gegen die mit -1 getestet werden. Der Koeffizient 0,155 für diese Wechselwirkung bedeutet, dass Kombinationen wie Grobstahl an tidefreien Standorten und Feinstahl an Tidestandorten zusammen auf Kovariablenmittel (z.B. gleiches Alter) bezogen eine etwa um 0,3 mm ( $2 \times 0,155 = -0,31$ ) höhere Basisabrostung  $b_0$  zeigen als die jeweils anderen Kombinationen (Bild A3-36). Wenn alle vier Kleinste-Quadrate-Mittel verglichen werden, dann ergeben sich für Standorte ohne Tide unabhängig vom Stahl einheitliche Basisabrostungen, für Standorte mit Tide aber eine deutliche Spreizung mit minimaler Basisabrostung beim Grobstahl und maximaler beim Feinstahl.

Eine weitere signifikante Wechselwirkung besteht zwischen Tide und Milieu. Standorte im brackisch-marinen Milieu wurden auf -1 kodiert, alle anderen auf +1 (Tabelle A3-42). Der Koeffizient 0,243 für diese Wechselwirkung (Spaltennummer 12) bedeutet, dass beispielsweise Standorte im limnischen Milieu bei Tide zusammen mit anderen Kombinationen im Mittel etwa um 0,5 mm ( $2 \times 0,243 = 0,486$ ) höhere Basisabrostung  $b_0$  zeigen, als Standorte im limnischen Milieu ohne Tide (Bild A3-37). Wenn alle 8 Kleinste-Quadrate-Mittel verglichen werden, dann ergeben sich für brackische und brackisch-marine Milieus unabhängig von der Tide einheitliche Basisabrostungen, für Standorte im limnischen und limnisch-brackischen Milieu aber eine scharfe Spreizung mit minimaler Basisabrostung beim limnischen Milieu mit Tide und limnisch-brackischen Milieu ohne Tide und maximaler beim limnischen Milieu ohne Tide und limnisch-brackischen Milieu mit Tide niedriger Strömung. Die Wechselwirkung zwischen Strömung und Alter (logarithmisch) wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben und zeigt sich

darin, dass die Basisabrostung bei niedriger Strömung zuerst mit der Zeit stärker und dann schwächer ansteigt, während sie bei hoher Strömung stabil bleibt (Bild A3-34).

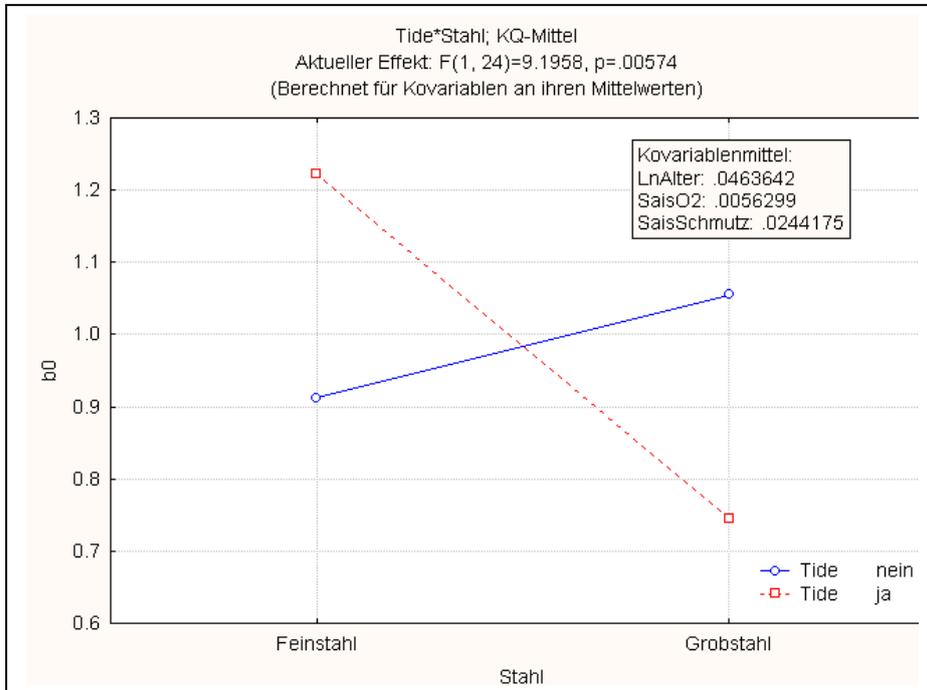


Bild A3-36: Wechselwirkung von Stahl und Tide auf Basisabrostung

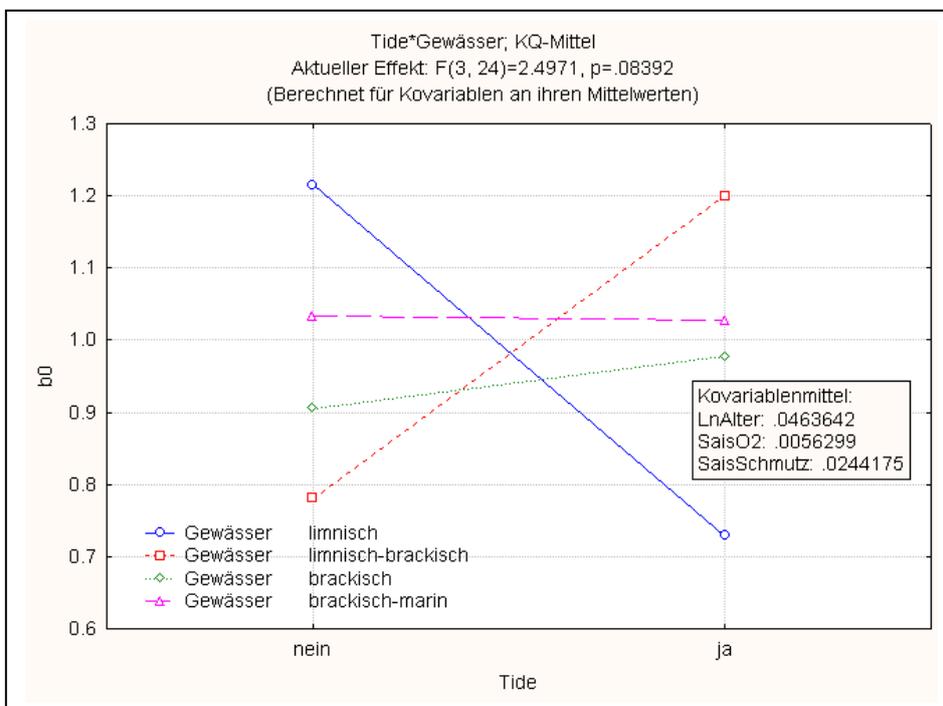


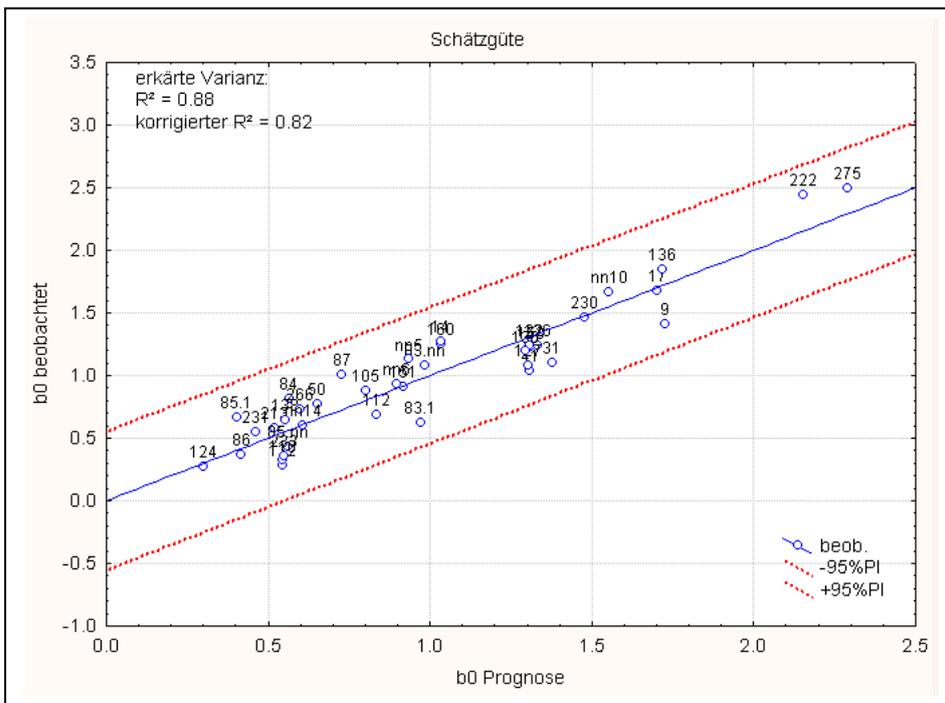
Bild A3-37: Wechselwirkung von Tide und Milieu auf Basisabrostung

Die Interpretation der Koeffizienten für Gewässerfaktoren muss auf der Grundlage der Faktorkoeffizienten erfolgen. Hohe Werte für den Saisonfaktor  $O_2$  korrespondieren mit hohen Sommer-Winterschwankungen der Sauerstoffkonzentration. Der negative Koeffizient von  $-0,128$  für diesen Saisonfaktor bedeutet also, dass eine Verminderung der jahreszeitlichen Schwankungen der Sauerstoffkonzentration um eine Standardabweichung des Faktors die Basisabrostung um  $0,1$  mm erhöht.

Niedrige Werte für den Saisonfaktor der Wasserverschmutzung (vielleicht Bilgewasser) korrespondieren mit hohen Sommer-Winterschwankungen der Wassertemperatur und des DOC-Gehalts. Der negative Koeffizient von  $-0,183$  für diesen Saisonfaktor bedeutet also, dass starke jahreszeitliche Schwankungen der Wassertemperatur und des DOC-Gehalts um eine Standardabweichung des Faktors die Basisabrostung um etwa  $0,2$  mm erhöhen.

Insgesamt ergibt sich ein Vorhersagemodell, das  $88\%$  der Variabilität der Basisabrostungen der 38 untersuchten Bauwerke erklärt. Wenn die beobachteten Werte der Basisabrostung  $b_0$  gegen die aus dem Regressionsmodell vorhergesagten Werte für  $b_0$  aufgetragen werden, ergibt sich auch unter Berücksichtigung des Vorhersagefehlers (Prognoseband) ein gutes Modell (Bild A3-38). Die Basisabrostung lässt sich somit aus Alter, Stahl, Strömung, Tide und einigen Gewässerparametern auf  $\pm 0,5$  mm genau abschätzen (Tabelle A3-43).

Bild A3-38: Prognosewerte und Schätzgenauigkeit für die Basisabrostung



Die zugehörige Schätzfunktion ergibt sich aus den Koeffizienten in Tabelle A3-41 als:

Prognosegleichung für:  $b_0$  (A3-26)

$$\begin{aligned}
 b_0 = & .9747-.186*\text{StrömBin}(\text{hoch})-.083*\text{Stahl}(\text{Grobstahl}) \\
 & -.012*\text{Gewässer}(\text{limnisch})+.0070*\text{Gewässer}(\text{limnisch-brackisch}) \\
 & -.042*\text{Gewässer}(\text{brackisch})+.3028*\text{LnAlter}-.128*\text{SaisO2} \\
 & -.183*\text{SaisSchmutz}-.280*\text{StrömBin}*\text{LnAlter}(1)+.1550*\text{Tide}*\text{Stahl}(1) \\
 & +.2428*\text{Tide}*\text{Gewässer}(1)-.209*\text{Tide}*\text{Gewässer}(2)-.036*\text{Tide}*\text{Gewässer}(3)
 \end{aligned}$$

wobei die Nummern (1) bis (3) sich auf die jeweiligen Stufen der Interaktionsterme in der Regressions-tabelle und der Design-Matrix beziehen.

Tabelle A3-43: Beobachtete und prognostizierte Basisabrostung  $b_0$

Nr	beob. $b_0$	progn. $B_0$	Residuum	95% Untergr.	95% Obergr.
160	1.25	1.03	0.22	0.45	1.62
110	0.32	0.55	-0.23	-0.06	1.15
124	0.27	0.30	-0.03	-0.24	0.85
275	2.49	2.29	0.20	1.73	2.85
136	1.84	1.72	0.13	1.19	2.24
nn14	0.60	0.61	-0.01	-0.03	1.25
230	1.47	1.48	-0.01	0.96	1.99
41	1.04	1.31	-0.27	0.79	1.83
17	1.68	1.70	-0.02	1.16	2.25
222	2.44	2.16	0.28	1.61	2.70
130	1.19	1.30	-0.10	0.78	1.81
83.1	0.63	0.97	-0.35	0.45	1.50
83.nn	1.08	0.99	0.09	0.45	1.52
231	0.55	0.46	0.09	-0.08	1.01
213	0.58	0.52	0.06	0.00	1.04
126	1.24	1.33	-0.09	0.81	1.86
122	1.24	1.31	-0.07	0.77	1.84
153	1.22	1.31	-0.09	0.73	1.89
151	0.91	0.92	-0.01	0.28	1.56
nn10	1.67	1.55	0.12	1.03	2.08
105	0.88	0.80	0.07	0.28	1.33
85.1	0.67	0.40	0.26	-0.13	0.94
31	1.10	1.38	-0.28	0.81	1.94
85.nn	0.43	0.56	-0.13	0.03	1.09
9	1.41	1.73	-0.32	1.21	2.25
14	1.28	1.03	0.24	0.50	1.56
127	1.08	1.30	-0.22	0.80	1.81
233	0.36	0.55	-0.19	0.02	1.08
266	0.73	0.60	0.13	0.03	1.17
84	0.81	0.56	0.25	0.06	1.06
132	0.28	0.55	-0.26	0.04	1.05
87	1.01	0.73	0.28	0.21	1.25
112	0.69	0.83	-0.15	0.26	1.41
50	0.77	0.65	0.12	0.08	1.23
138	0.65	0.55	0.10	-0.01	1.11
86	0.37	0.42	-0.05	-0.16	1.00
nn5	1.13	0.93	0.19	0.43	1.44
nn6	0.93	0.90	0.04	0.39	1.40

Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Korrelationen zwischen den potentiellen Einflussfaktoren lassen sich die Faktoren in der Prognosegleichung jedoch nicht eindeutig als Korrosionsursachen identifizieren. Mit Hilfe der Beste-Subset-Regression lassen sich auch alternative Modelle gleicher Leistungsgüte mit anderen Prädiktoren erstellen. Ein mögliches Modell ( $R^2 = 0,88$ ) enthält das Abrostungsalter (standardisierte Logarithmen), die Stahlklasse (grob / fein), Strömung (ja / nein), das Gewässermilieu (limnisch / limnisch-brackisch / brackisch / brackisch-marin), Wechselwirkungen zwischen Strömung und Liegeplatz sowie zwischen Strömung und Gewässer, den Säurefaktor und die Saisonfaktoren für Sauerstoff und Gewässerverschmutzung. Da die Standorteigenschaften "Tide" und "Strömung" aufgrund der Bauwerksauswahl miteinander korrelieren (Tabelle A3-35), konkurrieren sie beide als Prädiktoren um einen Platz in der Modellgleichung. Bei dem alternativen Modell fehlen also einige Effekte und Interaktionen der Tide, dafür ist die Strömung stärker im Modell vertreten.

### **Schätzung des Abrostungsgradienten $b_1$**

Für den Abrostungsgradienten  $b_1$  in 0-5 m Tiefe unter Mittelwasser- oder Niedrigwasserniveau wurde mit Hilfe des Beste-Subset-Verfahren der Regression ebenfalls ein Schätzmodell entwickelt. Dieses Modell enthält die Stahlklasse (grob / fein), Strömung (ja / nein), das Gewässermilieu (limnisch / limnisch-brackisch / brackisch / brackisch-marin), Wechselwirkungen zwischen Gewässer und Liegeplatz sowie zwischen Tide und Gewässer, den pH-Gradienten (0 / <0) in 0 - 4 m Tiefe, den Säurefaktor und den O<sub>2</sub>-Faktor für Sauerstoff und Gewässerverschmutzung (Tabelle A3-44). Die meisten Einflussfaktoren sind auf dem 5%-Niveau signifikant. Die Strömung liegt zwar knapp über dem Signifikanzlevel, muss jedoch ebenso wie Stahl und Gewässermilieu im Modell integriert sein, damit für andere Faktoren (Kovariablen) wie beispielsweise Säurefaktor jeweils gruppenbezogene Regressionskoeffizienten berechnet werden.

Tabelle A3-44: Regressionskoeffizienten für Abrostungsgradient  $b_1$  (38 Bauwerke)

	Parameterschätzung					
	Effektstufe	Spalte	$b_1$	Std.Fe.	t	p
Konstante		1	0.188	0.037	5.11	0.000
StrömBin	hoch	2	0.042	0.022	1.92	0.067
Stahl	Grobstahl	3	0.051	0.024	2.15	0.043
Gewässer	limnisch	4	0.232	0.055	4.26	0.000
Gewässer	limnisch-brackisch	5	-0.106	0.049	-2.15	0.042
Gewässer	brackisch	6	-0.069	0.047	-1.47	0.156
GradpHBin		7	-0.173	0.051	-3.37	0.003
Säurefaktor		8	-0.113	0.024	-4.74	0.000
O <sub>2</sub> -Faktor		9	-0.054	0.024	-2.19	0.039
Liegeplatz*Gewässer	1	10	0.071	0.065	1.09	0.287
Liegeplatz*Gewässer	2	11	-0.110	0.049	-2.23	0.036
Liegeplatz*Gewässer	3	12	0.024	0.082	0.29	0.772
Tide *Gewässer	1	13	-0.200	0.053	-3.75	0.001
Tide *Gewässer	2	14	0.100	0.066	1.51	0.146
Tide *Gewässer	3	15	0.127	0.071	1.79	0.086

Die Regressionskoeffizienten für die kategorialen Faktoren und deren Wechselwirkung lassen sich nur interpretieren, wenn die zugehörige Kodierung aus der Designmatrix (Tabelle A3-45) hinzugezogen wird. Beim Stahl wird beispielsweise der Grobstahl auf +1 kodiert, der Feinstahl

auf -1, und die erste Gruppe gegen (versus) die zweite getestet. Ein partieller Regressionskoeffizient von 0,051 für den Faktor "Stahl" bedeutet also, dass der Abrostungsgradient  $b_1$  in 0 - 5 m Tiefe bei Spundwänden aus Grobstaht im Mittel um 0,1 ( $2 \times 0,051 = 0,1$ ) höher ist, als bei Spundwänden aus Feinstahl (Bild A3-39 links).

Tabelle A3-45: Designmatrix mit Kodierung der kategorialen Faktoren (38 Bauwerke)

sigmabeschränkte Kodierung							
	Sp.	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)
Konstante	1						
StrömBin	2	StrömBin	hoch	niedrig			
Stahl	3	Stahl	Grobstaht	Feinstahl			
Gewässer	4	Gewässer	limnisch	brack.-mar.			
Gewässer	5	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.			
Gewässer	6	Gewässer	brackisch	brack.-mar.			
GradpHBin	7	GradpHBin					
Säurefaktor	8	Säurefaktor					
O2-Faktor	9	O2-Faktor					
Liegeplatz*Gewässer	10	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
Liegeplatz*Gewässer	11	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
Liegeplatz*Gewässer	12	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	brackisch	brack.-mar.
Tide *Gewässer	13	Tide	nein	ja	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
Tide *Gewässer	14	Tide	nein	ja	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
Tide *Gewässer	15	Tide	nein	ja	Gewässer	brackisch	brack.-mar.

Ein partieller Regressionskoeffizient von 0,042 für den Faktor "Strömung" bedeutet, dass der Abrostungsgradient  $b_1$  bei Spundwänden mit starker Strömung im Mittel um knapp 0,1 ( $2 \times 0,042 = 0,084$ ) höher ist, als bei schwacher Strömung (Bild A3-39 rechts). Diese Vergleiche beruhen auf korrigierten Mittelwertschätzungen der Regression (Kleinste-Quadrat-Mittel), bei der die Gradientenmittel jeweils auf gleiche Werte aller Kovariablen bezogen sind (z.B. mittlerer Säurefaktor), um eine Verzerrung durch Dritteinflüsse auszuschalten.

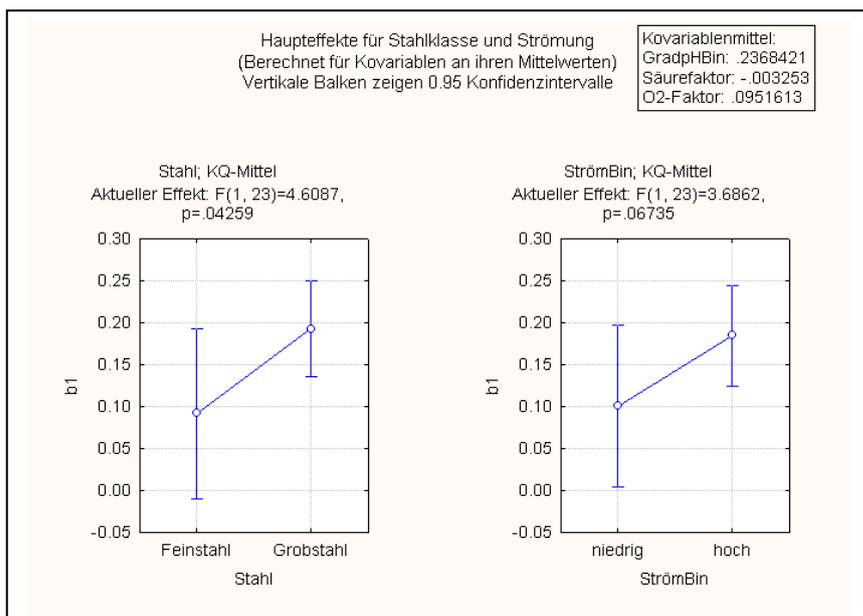


Bild A3-39: Vergleich der Abrostungsgradienten  $b_1$  für Stahlklasse und Strömung

Auch die Interpretation der Koeffizienten für die Interaktionen muss auf der Grundlage der Design-Matrix erfolgen. Standorte mit Liegeplatz wurden beispielsweise auf +1 kodiert, ohne Liegeplatz auf -1. Standorte im brackisch-marinen Milieu wurden auf -1 kodiert, alle anderen auf +1 (Tabelle A3-42). Der Koeffizient -0,11 (Spaltennummer 11) für die Wechselwirkung bedeutet, dass beispielsweise Standorte im limnisch-brackischen Milieu ohne Liegeplatz zusammen mit anderen Kombinationen einen etwa um 0,2 ( $2 \times -0,11 = -0,22$ ) niedrigeren Abrostungsgradienten  $b_1$  zeigen als Standorte im gleichen Milieu ohne Liegeplatz (Bild A3-40). Wenn alle 8 Kleinste-Quadrate-Mittel verglichen werden, dann ergeben sich für limnisch-brackische und brackische Milieus unabhängig vom Liegeplatz einheitliche Abrostungsgradienten, für andere Standorte aber eine scharfe Spreizung mit minimalem Gradienten bei limnisch-brackischem Milieu mit Liegeplatz und maximalem bei limnischem Milieu mit Liegeplatz.

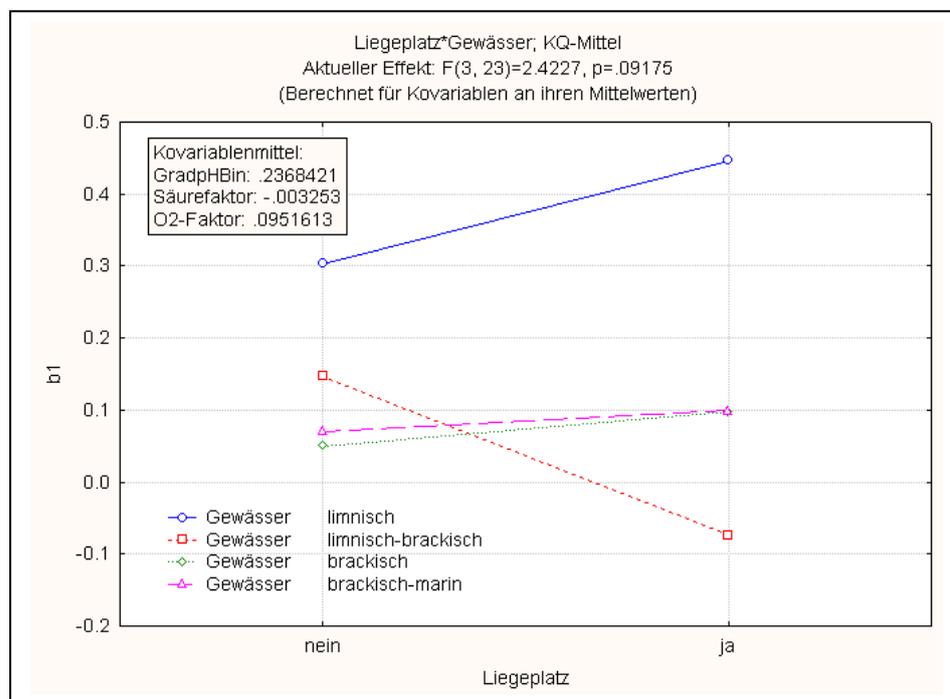


Bild A3-40: Wechselwirkung von Liegeplatz und Gewässer auf Abrostungsgradient  $b_1$

Eine weitere signifikante Wechselwirkung besteht zwischen Tide und Milieu. Standorte mit Tide wurden auf -1 kodiert, ohne Tide auf +1. Der Koeffizient -0,2 für diese Wechselwirkung (Spaltennummer 13) bedeutet, dass bestimmte Kombinationen von Tide und Milieu im Mittel einen etwa um 0,4 ( $2 \times -0,2 = -0,4$ ) niedrigeren Abrostungsgradienten  $b_1$  zeigen als andere Kombinationen (Bild A3-41). Wenn alle 8 Kleinste-Quadrate-Mittel verglichen werden, dann ergeben sich für Tidestandorte im limnischen Milieu die größten Gradienten und im limnisch-brackischen und brackischen Milieu die kleinsten Gradienten. Die Tide zeigt also in Kombination mit Milieu ein ähnliches Verhalten wie Liegeplätze.

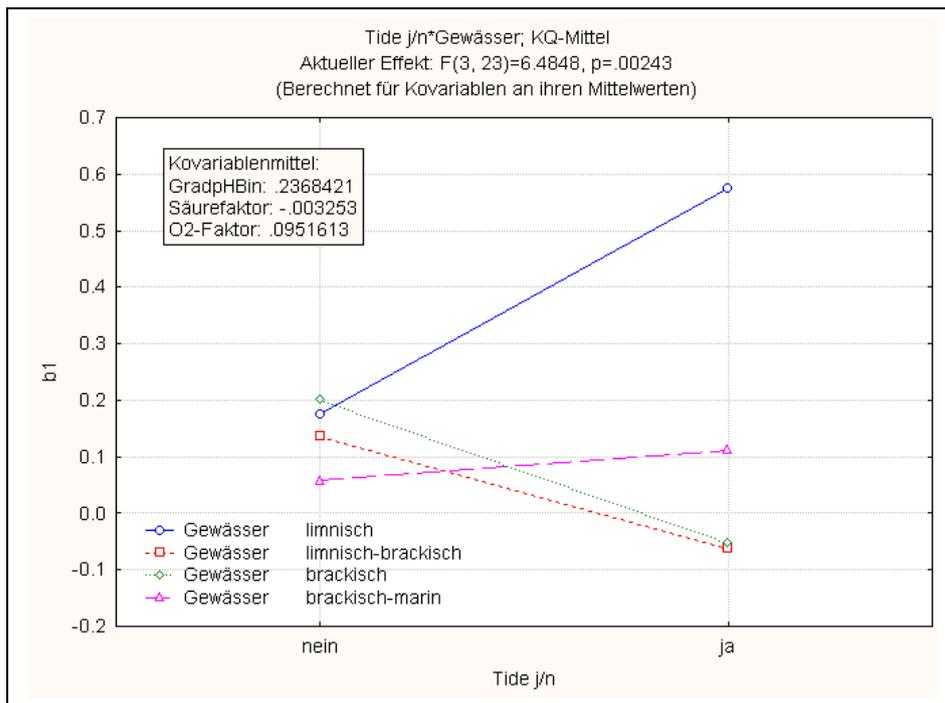


Bild A3-41: Wechselwirkung von Tide und Milieu auf den Abrostungsgradienten  $b_1$

Die pH-Gradienten wurden hier als binäre Größe mit Codewert 0 bei pH-Gradient = 0 und Codewert 1 bei pH-Gradient <0 eingebunden. Der negative Koeffizient von -0,173 für den pH-Gradienten bedeutet, dass der Abrostungsgradient  $b_1$  an Standorten ohne pH-Gradienten um rund 0,2 höher ist, als an Standorten mit steigendem Säuregehalt (also sinkendem pH-Wert) in der Tiefe. Der pH-Gradient wirkt also komplementär zum Abrostungsgradienten.

Die Interpretation der Koeffizienten für Gewässerfaktoren muss auf der Grundlage der Faktorkoeffizienten erfolgen. Hohe Werte für den Säurefaktor korrespondieren mit hohen pH-Werten und hoher Säurekapazität an der Wasseroberfläche, also einem geringen Säuregehalt der Gewässer. Der Koeffizient von -0,113 für den (standardisierten) Säurefaktor bedeutet, dass sich der Abrostungsgradient beim Ansteigen des Säuregehalts bis auf eine Standardabweichung des Säurefaktors um rund 0,1 erhöht. Diese Abschätzung gilt allerdings innerhalb der Milieugruppen, die ihrerseits noch eine Verschiebung der Säuregehalte beinhalten.

Hohe Werte für den O<sub>2</sub>-Faktor korrespondieren mit hohen Sauerstoffkonzentrationen an der Wasseroberfläche im Sommer. Der negative Koeffizient von -0,054 für diesen O<sub>2</sub>-Faktor bedeutet also, dass erst eine Verminderung der Sauerstoffkonzentration im Sommer um zwei Standardabweichungen des Faktors den Abrostungsgradienten  $b_1$  um 0,1 erhöht (also halbe Wirkung der Säurezunahme).

Insgesamt ergibt sich ein Vorhersagemodell, das 74% der Variabilität der Abrostungsgradienten der 38 untersuchten Bauwerke erklärt. Wenn die beobachteten Werte des Abrostungsgradienten  $b_1$  gegen die aus dem Regressionsmodell vorhergesagten Werte für  $b_1$  aufgetragen werden, ergibt sich auch unter Berücksichtigung des Vorhersagefehlers (Prognoseband) ein brauchbares

Modell (Bild A3-42). Der Abrostungsgradient lässt sich somit aus Stahl, Liegeplatz und Gewässereigenschaften auf rund  $\pm 0,2$  genau abschätzen (Tabelle A3-46).

Damit lässt sich die mittlere Abrostung an jedem beliebigen Punkt unterhalb der Mittelwasserlinie oder Tideniedrigwasserlinie mit den aus Drittgrößen geschätzten Parametern  $b_0$  und  $b_1$  der Tiefenfunktion auch ohne örtliche Korrosionsmessung grob bestimmen.

Tabelle A3-46: Beobachtete und prognostizierter Abrostungsgradient  $b_1$

Nr	beob. $b_1$	progn. $b_1$	Residuum	95% Untergr.	95% Obergr.
160	0.011	0.069	-0.058	-0.200	0.338
110	0.487	0.429	0.058	0.160	0.698
124	0.440	0.319	0.121	0.068	0.570
275	0.059	0.098	-0.038	-0.145	0.340
136	0.107	0.049	0.058	-0.196	0.293
nn14	0.510	0.510	0.000	0.213	0.807
230	0.058	0.080	-0.023	-0.181	0.341
41	0.295	0.291	0.004	0.051	0.531
17	0.363	0.244	0.119	-0.004	0.491
222	-0.005	0.110	-0.115	-0.130	0.350
130	0.247	0.224	0.023	-0.037	0.485
83.1	0.106	0.055	0.051	-0.185	0.296
83.nn	0.000	0.055	-0.055	-0.185	0.296
231	0.084	0.229	-0.144	-0.014	0.472
213	0.049	0.149	-0.100	-0.096	0.395
126	0.028	-0.002	0.030	-0.256	0.252
122	-0.005	0.021	-0.027	-0.212	0.255
153	-0.074	0.080	-0.154	-0.166	0.326
151	0.011	0.011	0.000	-0.286	0.308
nn10	0.156	0.181	-0.025	-0.049	0.411
105	0.123	0.030	0.093	-0.198	0.258
85.1	0.171	0.167	0.004	-0.077	0.412
31	0.185	0.213	-0.028	-0.033	0.459
85.nn	0.300	0.268	0.031	0.023	0.514
9	0.122	0.050	0.072	-0.186	0.286
14	0.149	0.187	-0.037	-0.056	0.429
127	0.046	0.139	-0.093	-0.089	0.367
233	0.167	0.064	0.103	-0.196	0.324
266	0.390	0.286	0.103	0.038	0.535
84	-0.136	-0.009	-0.127	-0.244	0.226
132	0.151	0.140	0.012	-0.114	0.393
87	-0.063	0.010	-0.073	-0.234	0.254
112	-0.008	-0.130	0.122	-0.387	0.128
50	0.021	0.022	-0.001	-0.210	0.253
138	0.017	0.088	-0.071	-0.157	0.333
86	0.068	-0.110	0.178	-0.351	0.132
nn5	-0.017	-0.009	-0.007	-0.241	0.222
nn6	-0.011	-0.007	-0.004	-0.244	0.230

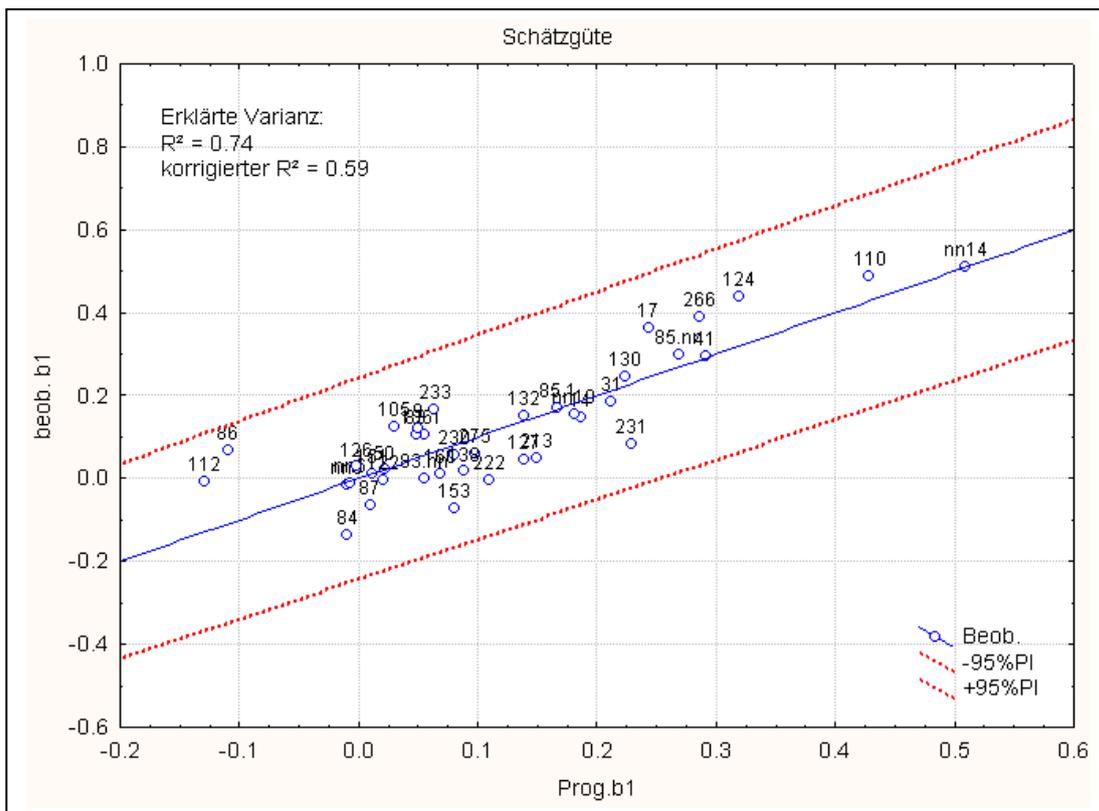


Bild A3-42: Prognosewerte und Schätzgenauigkeit für den Abrostungsgradienten  $b_1$

Die zugehörige Schätzfunktion ergibt sich aus den Koeffizienten in Tabelle A3-44 als:

Prognosegleichung für:  $b_1$  (A3-27)

$$\begin{aligned}
 b_1 = & .1881 + .0420 \cdot \text{StrömBin}(\text{hoch}) + .0505 \cdot \text{Stahl}(\text{Grobstahl}) \\
 & + .2324 \cdot \text{Gewässer}(\text{limnisch}) - .106 \cdot \text{Gewässer}(\text{limnisch-brackisch}) \\
 & - .069 \cdot \text{Gewässer}(\text{brackisch}) - .173 \cdot \text{GradpHBin} - .113 \cdot \text{Säurefaktor} \\
 & - .054 \cdot \text{O}_2\text{-Faktor} + .0714 \cdot \text{Liegeplatz} \cdot \text{Gewässer}(1) \\
 & - .110 \cdot \text{Liegeplatz} \cdot \text{Gewässer}(2) + .0239 \cdot \text{Liegeplatz} \cdot \text{Gewässer}(3) \\
 & - .200 \cdot \text{Tide} \cdot \text{Gewässer}(1) + .0998 \cdot \text{Tide} \cdot \text{Gewässer}(2) \\
 & + .1269 \cdot \text{Tide} \cdot \text{Gewässer}(3)
 \end{aligned}$$

wobei die Nummern (1) bis (3) sich auf die jeweiligen Interaktionsterme in der Regressionstabelle und der Design-Matrix beziehen.

### Schätzung des Spreizungsfaktors $S_{\text{fak1}}$

Zur Abschätzung der maximalen Abrostung aus der Tiefenfunktion wird zusätzlich zu den Koeffizienten  $b_0$  und  $b_1$  der Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  als Streuungsmaß benötigt. Für den Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  in 0 - 5 m Tiefe unter Mittelwasser- oder Niedrigwasserniveau wurde ebenfalls ein Schätzmodell entwickelt. Dieses Modell enthält die Stahlklasse (grob / fein), Tide (ja / nein), das Gewässermilieu (limnisch / limnisch-brackisch / brackisch / brackisch-marin), Wechselwirkun-

gen zwischen Gewässer und Liegeplatz, zwischen Tide und Liegeplatz sowie zwischen Tide und Gewässer, und den pH-Gradienten (0 / <0) in 0 - 4 m Tiefe (Tabelle A3-47). Bis auf Tide als Haupteffekt sind die meisten Einflussfaktoren auf dem 5% Niveau signifikant.

Tabelle A3-47: Regressionskoeffizienten für Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  (38 Bauwerke)

	Parameterschätzung						
	Effektstufe	Spalte	Sfak1	Std.Fe.	t	p	
Konstante		1	1.604	0.050	32.103	0.000	
Stahl	Grobstahl	2	0.135	0.040	3.370	0.002	
Tide	nein	3	-0.041	0.044	-0.931	0.360	
Gewässer	limnisch	4	-0.371	0.091	-4.102	0.000	
Gewässer	limnisch-brackisch	5	0.335	0.062	5.433	0.000	
Gewässer	brackisch	6	0.071	0.090	0.786	0.439	
GradpHBin		7	0.197	0.076	2.595	0.015	
Liegeplatz*Tide		1	8	-0.174	0.044	-3.925	0.001
Tide*Stahl		1	9	-0.073	0.041	-1.774	0.088
Liegeplatz*Gewässer		1	10	-0.217	0.096	-2.269	0.032
Liegeplatz*Gewässer		2	11	0.050	0.059	0.849	0.404
Liegeplatz*Gewässer		3	12	0.049	0.097	0.501	0.621

Die Regressionskoeffizienten für die kategorialen Faktoren und deren Wechselwirkung lassen sich nur interpretieren, wenn die zugehörige Kodierung aus der Designmatrix (Tabelle A3-48) hinzugezogen wird. Der Grobstahl ist auf +1 kodiert und der Feinstahl auf -1. Ein partieller Regressionskoeffizient von 0,135 für den Faktor "Stahl" bedeutet also, dass der Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  bei Spundwänden aus Grobstahl im Mittel um 0,3 ( $2 \times 0,135 = 0,27$ ) höher ist, als bei Spundwänden aus Feinstahl (Bild A3-48 Mitte). Damit erhöht sich auch bei gleicher mittlerer Abrostung die zugehörige maximale Abrostung.

Tabelle A3-48: Designmatrix mit Kodierung der kategorialen Faktoren (38 Bauwerke)

	sigmabeschränkte Kodierung							
	Sp.	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)	
Konstante	1							
Stahl	2	Stahl	Grobstahl	Feinstahl				
Tide	3	Tide	nein	ja				
Gewässer	4	Gewässer	limnisch	brack.-mar.				
Gewässer	5	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.				
Gewässer	6	Gewässer	brackisch	brack.-mar.				
GradpHBin	7	GradpHBin						
Liegeplatz*Tide	8	Liegeplatz	ja	nein	Tide j/n	nein	ja	
Tide*Stahl	9	Tide	nein	ja	Stahl	Grobstahl	Feinstahl	
Liegeplatz*Gewässer	10	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	limnisch	brack.-mar.	
Liegeplatz*Gewässer	11	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.	
Liegeplatz*Gewässer	12	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	brackisch	brack.-mar.	

Ein Regressionskoeffizient von -0,041 für den Faktor "Tide" bedeutet, dass der Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  bei Spundwänden in Tidegewässern um knapp 0,1 ( $2 \times 0,041 = 0,082$ ) höher ist, als in tidefreien Gewässern (Bild A3-43 rechts). Ein Koeffizient von -0,371 (Spaltennummer 4) zeigt an, dass  $S_{\text{fak1}}$  im limnischen Milieu etwa 0,7 ( $2 \times -0,371 = 0,742$ ) niedriger ist, als im brackisch-marinen Milieu (Bild A3-43 links).

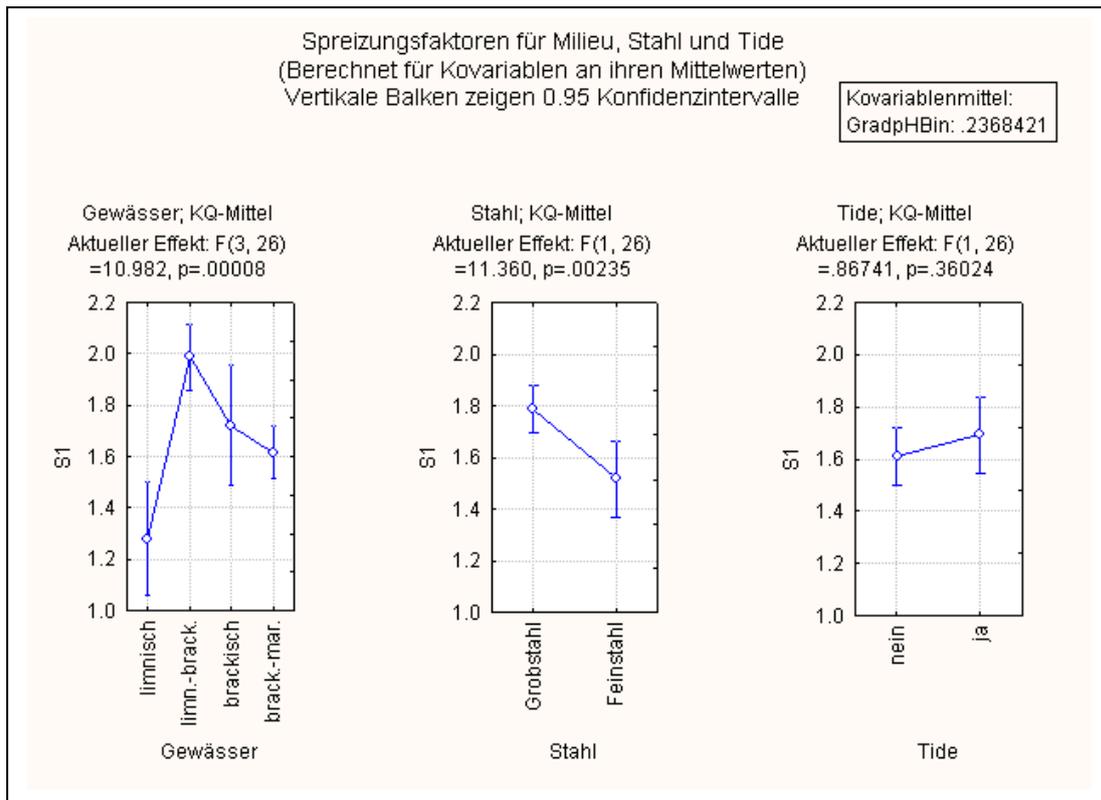


Bild A3-43: Vergleich Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$  für Stahlklasse und Strömung

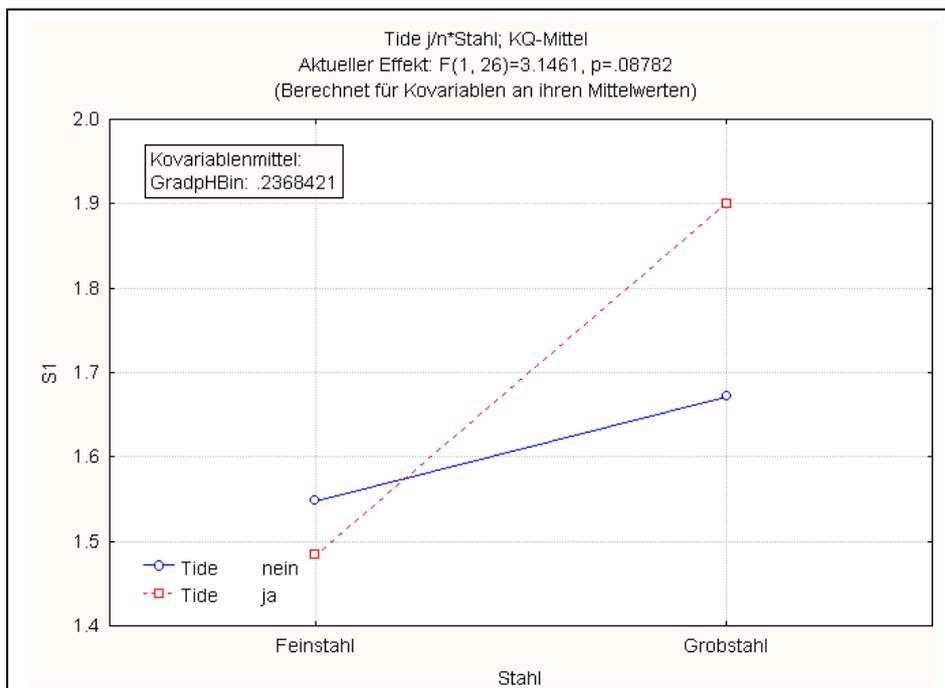


Bild A3-44: Wechselwirkung von Stahl und Tide auf Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$

Drei wichtige Interaktionen beeinflussen den Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$  (Tabelle A3-47). Der Koeffizient -0,073 (Spaltennummer 9) für die Wechselwirkung zwischen Stahl und Tide bedeutet, dass

Spundwände aus Grobstaahl im Tidegewässern oder aus Feinstahl in tidefreien Gewässern zusammen im Mittel eine etwa um 0,1 ( $2 \times -0,073 = -0,146$ ) höhere Streuung zeigen als andere Kombinationen. Wenn alle 4 Kleinste-Quadrate-Mittel auf Kovariablenmittel bezogen und verglichen werden, dann ergeben sich für Feinstahl unabhängig von der Tide niedrige Streuungen, für Grobstaahl speziell in Tidegewässern die maximalen Streuungen (Bild A3-44).

Der Koeffizient -0,174 (Spaltennummer 8) für die Wechselwirkung zwischen Liegeplatz und Tide bedeutet, dass die beiden Kombinationen von Tide mit Liegeplatz und tidefrei ohne Liegeplatz zusammen im Mittel einen um 0,2 ( $2 \times -0,11 = -0,22$ ) höheren Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  zeigen als die anderen Kombinationen (Bild A3-45). Auch zwischen Liegeplatz und Gewässer gibt es eine signifikante Wechselwirkung, wobei Standorte mit Liegeplätzen im limnischen Milieu die geringsten Streuungen zeigen (Bild A3-46).

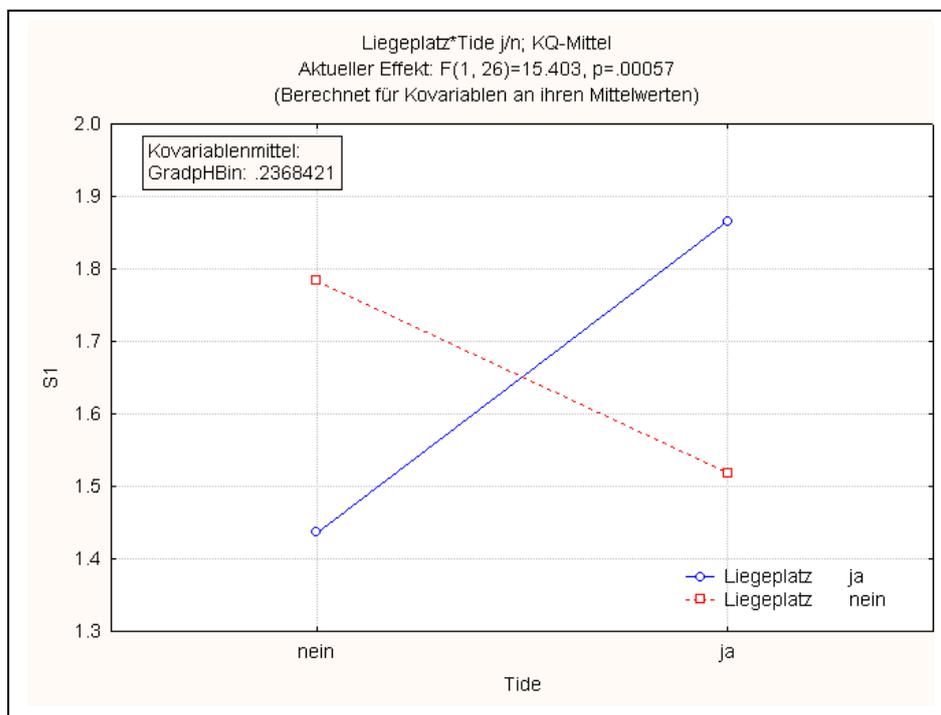


Bild A3-45: Wechselwirkung von Liegeplatz und Tide auf Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$

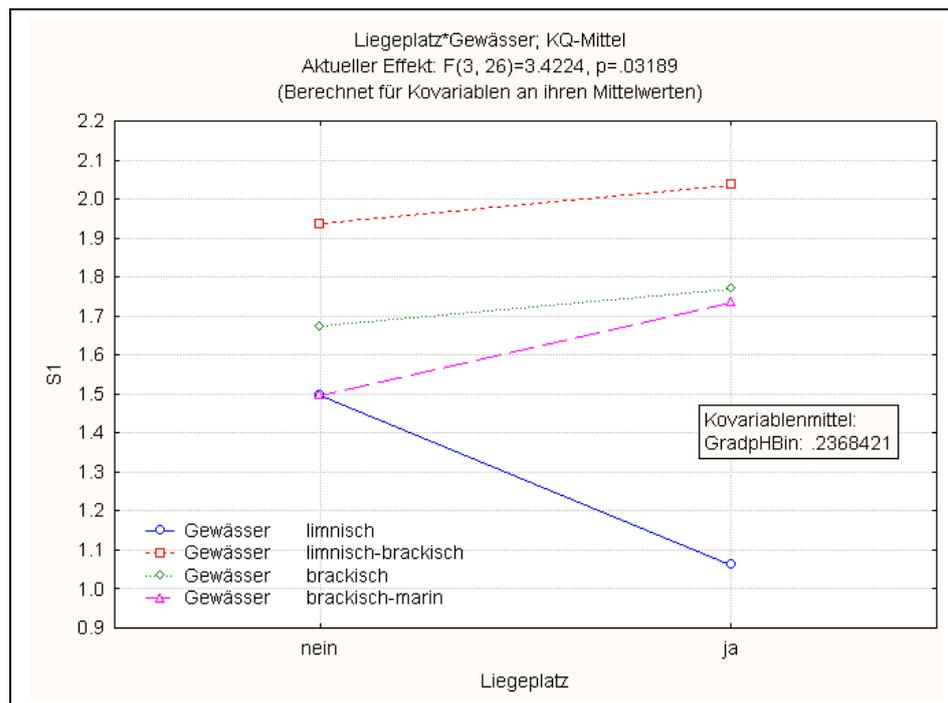


Bild A3-46: Wechselwirkung von Liegeplatz und Milieu auf Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$

Die pH-Gradienten wurden hier als binäre Größe mit Codewert 0 bei pH-Gradient = 0 und Codewert 1 bei pH-Gradient <0 eingebunden. Der Koeffizient von 0,197 für den pH-Gradienten bedeutet, dass der Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$  an Standorten mit pH-Gradienten um rund 0,2 höher ist, als an Standorten mit gleichbleibendem Säuregehalt (also stabilem pH-Wert) in der Tiefe.

Insgesamt ergibt sich ein Vorhersagemodell, das 67% der Variabilität der Abrostungsgradienten der 38 untersuchten Bauwerke erklärt. Wenn die beobachteten Werte des Spreizungsfaktors  $S_{fak1}$  gegen die aus dem Regressionsmodell vorhergesagten Werte für  $S_{fak1}$  aufgetragen werden, ergibt sich auch unter Berücksichtigung des Vorhersagefehlers (Prognoseband) ein brauchbares Modell (Bild A3-47). Der Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$  lässt sich somit aus Stahl, Liegeplatz und bestimmten Gewässereigenschaften auf  $\pm 0,4$  genau abschätzen (Tabelle A3-49).

Damit lässt sich auch die maximale Abrostung an jedem beliebigen Punkt unterhalb der Mittelwasserlinie oder Tideniedrigwasserlinie mit den aus Drittgrößen geschätzten Parametern  $b_0$  und  $b_1$  der Tiefenfunktion ohne Korrosionsmessung ermitteln.

Die zugehörige Schätzfunktion ergibt sich aus den Koeffizienten in Tabelle A3-47 als:

Prognosegleichung für:  $S_{\text{fak1}}$

(A3-28)

$$\begin{aligned}
 S1 = & 1.604 - 0.041 * \text{Tide}(\text{nein}) + 0.1351 * \text{Stahl}(\text{"Grobstahl"}) - 0.371 * \text{"Gewässer"} \\
 & (\text{limnisch}) + 0.3354 * \text{"Gewässer"}(\text{"limnisch-brackisch"}) \\
 & + 0.0711 * \text{"Gewässer"}(\text{"brackisch"}) + 0.1966 * \text{GradpHBin} - 0.174 * \text{Liegeplatz} * \text{Tide}(1) \\
 & - 0.073 * \text{Tide} * \text{Stahl}(1) - 0.217 * \text{Liegeplatz} * \text{"Gewässer"}(1) \\
 & + 0.0498 * \text{Liegeplatz} * \text{"Gewässer"}(2) + 0.0487 * \text{Liegeplatz} * \text{"Gewässer"}(3)
 \end{aligned}$$

wobei die Nummern (1) bis (3) sich auf die jeweiligen Stufen der Interaktionsterme in der Regressionstabelle und der Design-Matrix beziehen.

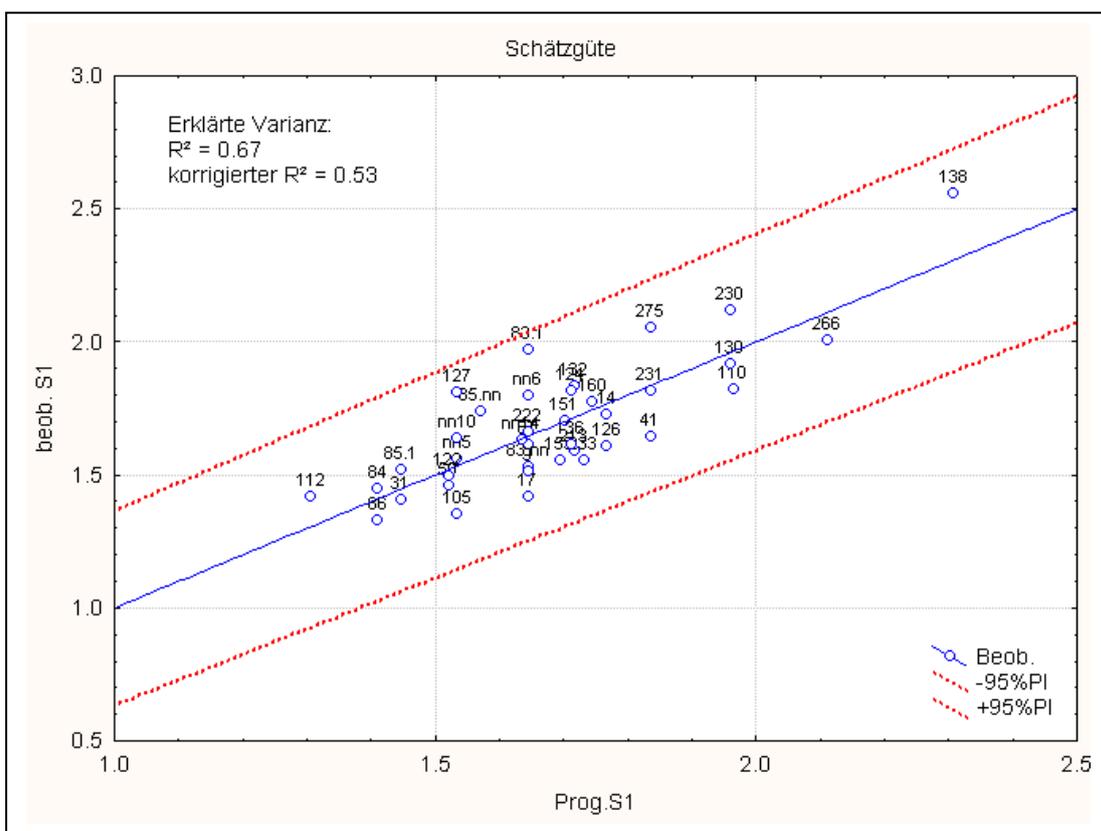


Bild A3-47: Prognosewerte und Schätznauigkeit für Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$

Tabelle A3-49: Beobachtete und prognostizierter Spreizungsfaktor  $S_{jak1}$

Nr	beob. S <sub>fak1</sub>	progn. S <sub>fak1</sub>	Residuum	95% Untergr.	95% Obergr.
160	1.78	1.75	0.03	1.32	2.17
110	1.82	1.97	-0.14	1.52	2.41
124	1.81	1.71	0.10	1.33	2.10
275	2.05	1.84	0.21	1.46	2.22
136	1.61	1.71	-0.10	1.33	2.10
nn14	1.63	1.64	0.00	1.18	2.09
230	2.12	1.96	0.16	1.55	2.37
41	1.64	1.84	-0.19	1.46	2.22
17	1.42	1.64	-0.23	1.26	2.03
222	1.66	1.64	0.02	1.26	2.03
130	1.92	1.96	-0.05	1.55	2.37
83.1	1.97	1.64	0.33	1.26	2.03
83.nn	1.53	1.64	-0.11	1.26	2.03
231	1.81	1.84	-0.02	1.46	2.22
213	1.59	1.72	-0.13	1.33	2.10
126	1.61	1.77	-0.16	1.38	2.16
122	1.49	1.52	-0.03	1.15	1.89
153	1.55	1.70	-0.14	1.26	2.13
151	1.70	1.70	0.00	1.25	2.16
nn10	1.64	1.54	0.10	1.16	1.91
105	1.35	1.54	-0.18	1.16	1.91
85.1	1.52	1.45	0.07	1.06	1.84
31	1.41	1.45	-0.04	1.06	1.84
85.nn	1.74	1.57	0.17	1.19	1.95
9	1.51	1.64	-0.13	1.26	2.02
14	1.73	1.77	-0.04	1.38	2.16
127	1.81	1.54	0.28	1.16	1.91
233	1.56	1.73	-0.18	1.34	2.12
266	2.00	2.11	-0.11	1.70	2.52
84	1.45	1.41	0.04	1.03	1.79
132	1.83	1.72	0.12	1.33	2.10
87	1.62	1.64	-0.03	1.26	2.02
112	1.42	1.31	0.11	0.88	1.74
50	1.46	1.52	-0.06	1.15	1.89
138	2.56	2.31	0.25	1.88	2.73
86	1.33	1.41	-0.08	1.03	1.79
nn5	1.56	1.54	0.02	1.16	1.91
nn6	1.80	1.64	0.15	1.26	2.02

### Schätzung von $b_6$ der Spritzwasserzone

Für die mittlere Abrostung  $b_6$  an der Tideniedrig- oder Tidehochwasserlinie wurde auf gleiche Art ein Schätzmodell entwickelt. Für die Berechnung der Koeffizienten stehen hier allerdings nur 34 Standorte zur Verfügung. Dieses Modell enthält die Stahlklasse (grob / fein), das Gewässermilieu (limnisch / limnisch-brackisch / brackisch / brackisch-marin), Wechselwirkungen zwischen Strömung und Gewässer, zwischen Tide und Gewässer sowie zwischen Liegeplatz und Gewässer und den logarithmierten Tiefgradienten der Redoxspannung in 0 - 4 m unter Niedrigwasserniveau (Tabelle A3-50). Die meisten Einflussfaktoren sind auf dem 5%-Niveau signifikant. Einige Regressionskoeffizienten können jedoch nicht geschätzt werden, weil die zugehörigen Standortkombinationen nicht im Datensatz repräsentiert sind (z.B. tidefreies Brackwasser).

Da der Tiefegradient für die Redoxspannung mit dem Faktor O<sub>2</sub>-Saisonalität korreliert (Tabelle A3-38), lässt sich alternativ ein Modell mit O<sub>2</sub>-Saisonalität anstelle des Redoxgradienten formulieren.

Tabelle A3-50: Regressionskoeffizienten für Abrostung b<sub>6</sub> (34 Bauwerke)

	Effektstufe	Parameterschätzung				
		Spalte	b <sub>6</sub>	Std.Fe.	t	p
Konstante		1	1.78	0.378	4.69	0.000
Stahl	Grobstahl	2	0.38	0.168	2.25	0.037
Gewässer	limnisch	3	2.51	0.428	5.88	0.000
Gewässer	limnisch-brackisch	4	-1.10	0.347	-3.16	0.005
Gewässer	brackisch	5	-0.85	0.696	-1.22	0.237
GradLnRedox		6	-0.30	0.148	-2.01	0.060
Liegeplatz*Gewässer	1	7	0.74	0.690	1.07	0.300
Liegeplatz*Gewässer	2	8	-1.07	0.387	-2.75	0.013
Liegeplatz*Gewässer	3	9	0.30	0.971	0.31	0.763
Tide*Gewässer	1	10	-1.23	0.578	-2.13	0.047
Tide*Gewässer	2	11	1.32	0.500	2.65	0.016
Tide*Gewässer	3	12	0.00			
StrömBin*Gewässer	1	13	-0.64	0.326	-1.97	0.064
StrömBin*Gewässer	2	14	-0.05	0.318	-0.17	0.866
StrömBin*Gewässer	3	15	0.90	0.332	2.70	0.015

Der partieller Regressionskoeffizient von 0,38 für den Faktor "Stahl" bedeutet unter Bezugnahme auf die Designmatrix (Tabelle A3-51), dass die Abrostung b<sub>6</sub> an der Wasserlinie bei Spundwänden aus Grobstaahl im Mittel um 0,8 mm (2 x 0,38 = 0,76) höher ist, als bei Spundwänden aus Feinstahl (Bild A3-48 links). Ungeachtet des Stahls ist im limnischen Milieu die Abrostung an der Wasserlinie um 5 mm (2 x 2,51 = 5,02) höher als in den anderen Gewässermilieus (Bild A3-48 rechts).

Tabelle A3-51: Designmatrix mit Kodierung der kategorialen Faktoren (34 Bauwerke)

	Sp.	sigmabeschränkte Kodierung					
		Variable	Stufe (+1)	versus (-1)	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)
Konstante	1						
Stahl	2	Stahl	Grobstahl	Feinstahl			
Gewässer	3	Gewässer	limnisch	brack.-mar.			
Gewässer	4	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.			
Gewässer	5	Gewässer	brackisch	brack.-mar.			
GradLnRedox	6	GradLnRedox					
Liegeplatz*Gewässer	7	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
Liegeplatz*Gewässer	8	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
Liegeplatz*Gewässer	9	Liegeplatz	ja	nein	Gewässer	brackisch	brack.-mar.
Tide*Gewässer	10	Tide	nein	ja	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
Tide*Gewässer	11	Tide	nein	ja	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
Tide*Gewässer	12	Tide	nein	ja	Gewässer	brackisch	brack.-mar.
StrömBin*Gewässer	13	StrömBin	hoch	niedrig	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
StrömBin*Gewässer	14	StrömBin	hoch	niedrig	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
StrömBin*Gewässer	15	StrömBin	hoch	niedrig	Gewässer	brackisch	brack.-mar.

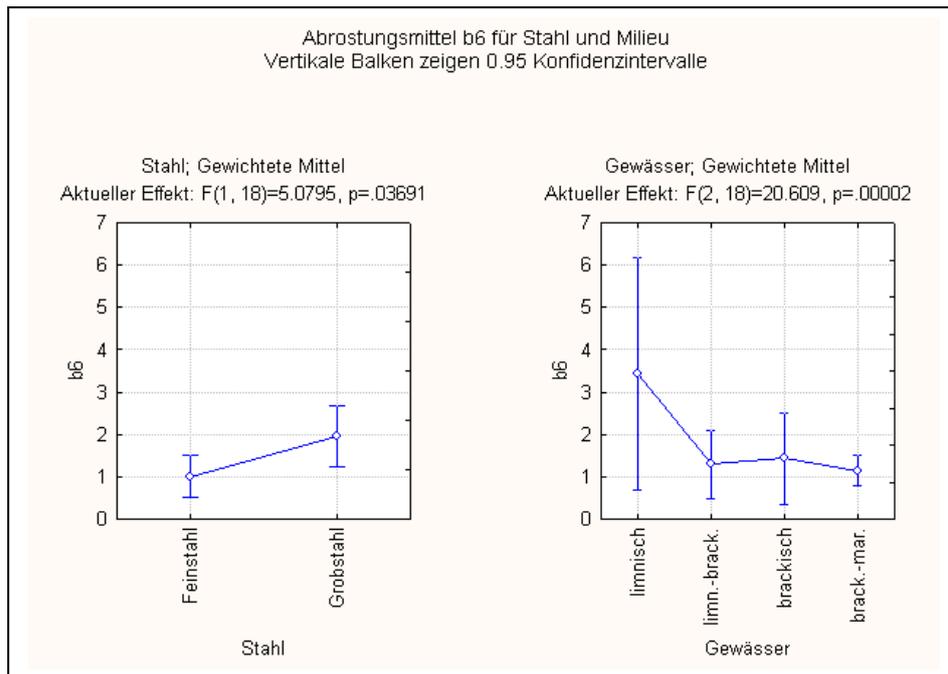


Bild A3-48: Vergleich der Abrostung  $b_6$  für Stahl und Milieu

Drei Wechselwirkungen bestimmen zusätzlich die Abrostung  $b_6$  an der Wasserlinie. Wenn alle 6 schätzbaren Kleinste-Quadrate-Mittel für Kombinationen aus Liegeplatz und Milieu verglichen werden, dann ergeben sich für brackisch-marine Standorte unabhängig vom Liegeplatz einheitliche Abrostungen, für andere Standorte aber eine deutliche Spreizung mit minimaler Abrostung im limnisch-brackischen Milieu mit Liegeplatz und maximaler im limnischen Milieu mit Liegeplatz (Bild A3-49).

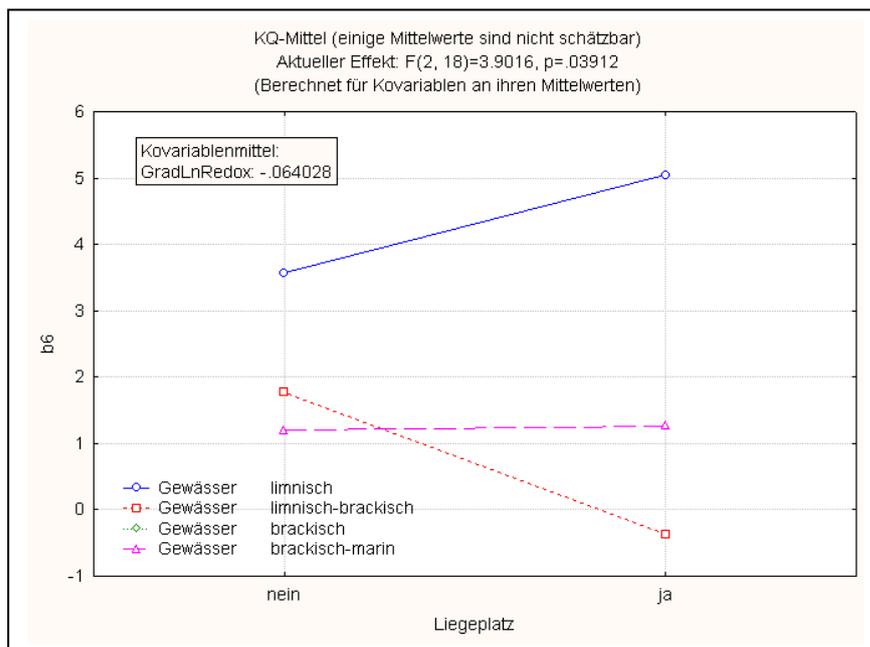


Bild A3-49: Wechselwirkung von Liegeplatz und Milieu auf Abrostung  $b_6$

Eine weitere signifikante Wechselwirkung besteht zwischen Tide und Milieu, wobei die Tide hier in Kombination mit Milieu ein ähnliches Verhalten wie Liegeplatz zeigt (Bild A3-50). Wenn alle 6 schätzbaren Kleinste-Quadrate-Mittel für Kombinationen aus Liegeplatz und Milieu verglichen werden, dann ergeben sich für brackisch-marine Standorte unabhängig von der Tide einheitliche Abrostungen, für andere Standorte aber eine deutliche Spreizung mit minimaler Abrostung im limnisch-brackischen Milieu mit Tide und maximaler im limnischen Milieu mit Tide. Die Wechselwirkung zwischen Strömung und Milieu ist relativ klein und zeigt hohe Abrostungen im limnischen Bereich mit schwacher Strömung (Bild A3-51).

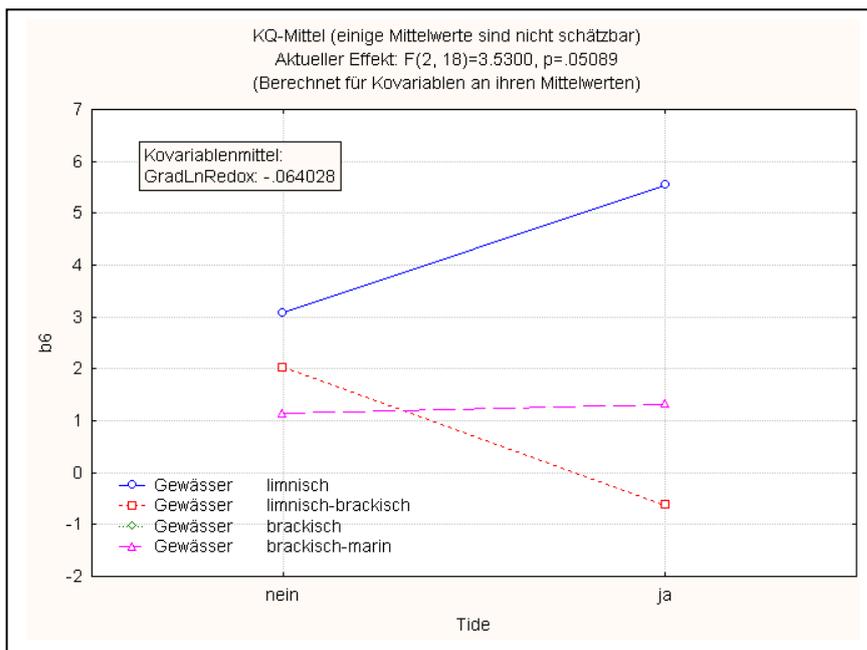


Bild A3-50: Wechselwirkung von Tide und Milieu auf Abrostung  $b_6$

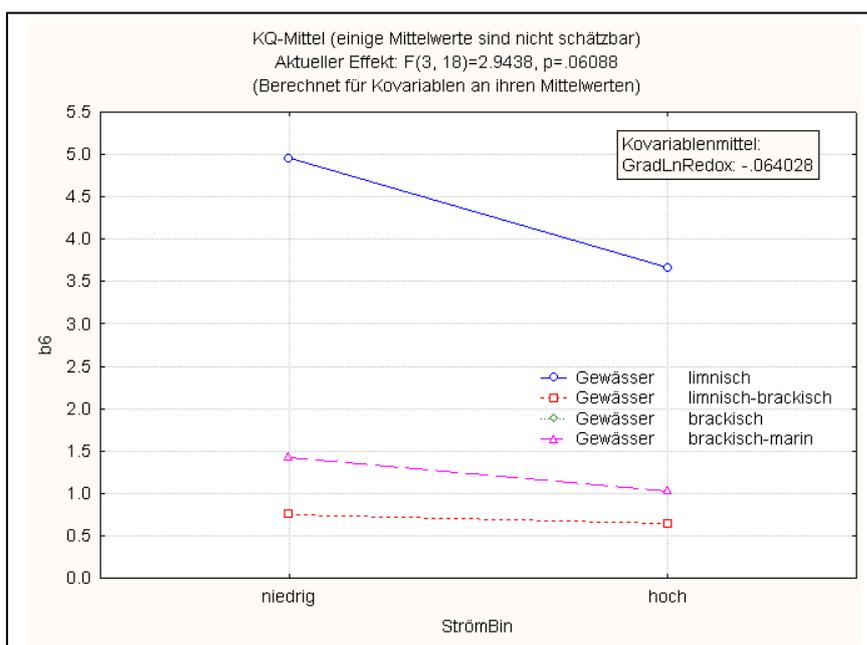


Bild A3-51: Wechselwirkung von Tide und Milieu auf Abrostung  $b_6$

Der negative Koeffizient von -0,3 für den standardisierten Tiefgradienten der Redoxspannung (logarithmisch) bedeutet, dass eine Zunahme der Redoxspannung mit der Wassertiefe die Abrostung an der Wasserlinie gegenüber Standorten mit gleichbleibender Redoxspannung vermindert.

Insgesamt ergibt sich ein Vorhersagemodell, das 82% der Variabilität der Abrostungen  $b_6$  der 34 untersuchten Bauwerke erklärt (Bild A3-52). Die Abrostung an der Wasserlinie lässt sich somit aus Stahl, Strömung, Tide, Liegeplatz und einigen Gewässerparametern auf  $\pm 2$  mm genau abschätzen (Tabelle A3-52). Die zugehörige Schätzfunktion ergibt sich aus den Koeffizienten in Tabelle A3-50 als:

Prognosegleichung für:  $b_6$  (A3-29)

$$\begin{aligned}
 b_6 = & 1.777 + 3.780 \cdot \text{Stahl}(\text{"Grobstahl"}) + 2.514 \cdot \text{"Gewässer"}(\text{"limnisch"}) \\
 & - 1.10 \cdot \text{"Gewässer"}(\text{"limnisch-brackisch"}) - 0.852 \cdot \text{"Gewässer"}(\text{"brackisch"}) \\
 & - 0.296 \cdot \text{GradLnRedox} + 0.7373 \cdot \text{Liegeplatz} \cdot \text{"Gewässer"}(1) \\
 & - 1.07 \cdot \text{Liegeplatz} \cdot \text{"Gewässer"}(2) + 0.2968 \cdot \text{Liegeplatz} \cdot \text{"Gewässer"}(3) \\
 & - 1.23 \cdot \text{Tide} \cdot \text{"Gewässer"}(1) + 1.324 \cdot \text{Tide} \cdot \text{"Gewässer"}(2) \\
 & - 0.644 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{"Gewässer"}(1) - 0.055 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{"Gewässer"}(2) \\
 & + 0.8955 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{"Gewässer"}(3)
 \end{aligned}$$

wobei die Nummern (1) bis (3) sich auf die jeweiligen Stufen der Interaktionsterme in der Regressionstabelle- und der Design-Matrix beziehen.

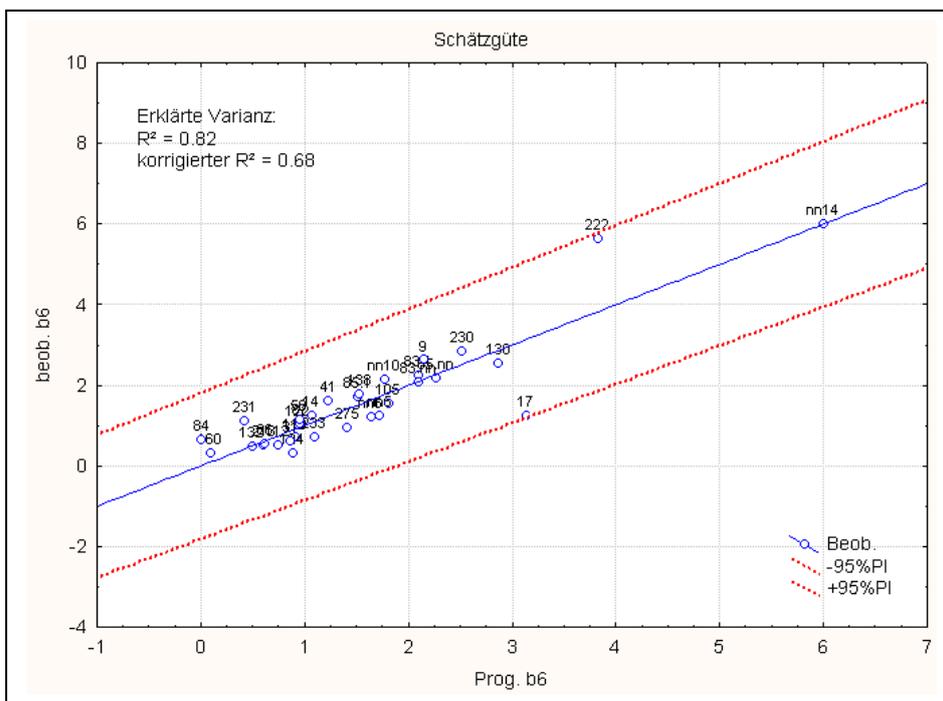


Bild A3-52: Prognosewerte und Schätzgenauigkeit für die Abrostung  $b_6$

Tabelle A3-52: Beobachtete und prognostizierte Abrostung  $b_6$

Nr	beob. $b_6$	progn. $b_6$	Residuum	95% Untergr.	95% Obergr.
160	0.69	0.92	-0.22	-1.03	2.87
110	0.32	0.10	0.22	-1.85	2.05
124	0.32	0.89	-0.57	-1.06	2.84
275	0.95	1.42	-0.47	-0.48	3.31
nn14	6.00	6.00	0.00	3.79	8.21
230	2.85	2.52	0.33	0.59	4.44
41	1.60	1.24	0.36	-0.64	3.11
17	1.24	3.14	-1.90	1.27	5.01
222	2.54	2.87	-0.33	0.95	4.80
130	5.62	3.83	1.79	1.87	5.79
83.1	2.25	2.10	0.14	0.22	3.99
83.nn	2.06	2.10	-0.04	0.22	3.99
231	1.10	0.43	0.67	-1.63	2.48
213	1.01	0.94	0.07	-0.81	2.69
122	0.51	0.61	-0.10	-1.13	2.35
nn10	2.13	1.77	0.36	0.04	3.51
105	1.55	1.81	-0.26	0.07	3.55
85.1	0.61	0.87	-0.26	-1.08	2.81
31	1.70	1.51	0.18	-0.43	3.45
85.nn	2.19	2.27	-0.08	0.37	4.16
9	2.62	2.15	0.47	0.35	3.95
127	1.23	1.07	0.16	-0.85	2.99
233	0.70	1.10	-0.40	-0.66	2.86
84	0.65	0.01	0.64	-1.83	1.85
132	0.46	0.50	-0.03	-1.24	2.23
87	1.05	0.96	0.09	-0.88	2.79
112	0.50	0.74	-0.24	-1.23	2.72
50	1.77	1.53	0.24	-0.44	3.50
138	1.14	0.95	0.18	-0.79	2.70
86	0.53	0.62	-0.09	-1.16	2.41
nn5	1.25	1.73	-0.48	0.00	3.46
nn6	1.20	1.64	-0.44	-0.10	3.38

### Schätzung von $S_{\text{fak4}}$ der Spritzwasserzone

Für den Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$  an und über der Tideniedrigwasser- oder Tidehochwasserlinie wurde ebenfalls ein Schätzmodell entwickelt. Für die Berechnung der Koeffizienten stehen hier 34 Standorte zur Verfügung. Dieses Modell enthält die Abrostungsalter (standardisierte Logarithmen), die Stahlklasse (grob / fein), Strömung (ja / nein), das Gewässermilieu (limnisch / limnisch-brackisch / brackisch / brackisch-marin), Wechselwirkungen zwischen Strömung und Gewässer sowie zwischen Tide und Gewässer und den Saisonfaktor für den Säuregehalt (Tabelle A3-50). Die meisten Einflussfaktoren sind auf dem 5%-Niveau signifikant. Einige Regressionskoeffizienten können jedoch nicht geschätzt werden, weil die zugehörigen Standortkombinationen nicht im Datensatz repräsentiert sind (z.B. tidefreies Brackwasser).

Tabelle A3-53: Regressionskoeffizienten für Spreizungsfaktor  $S_{fak4}$  (34 Bauwerke)

		Parameterschätzung					
	Effektstufe	Spalte	Sfak4	Std.Fe.	t	p	
Konstante		1	1.694	0.053	32.15	0.000	
StrömBin	hoch	2	-0.130	0.049	-2.64	0.017	
Stahl	Grobstahl	3	-0.087	0.059	-1.47	0.159	
Gewässer	limnisch	4	0.047	0.144	0.33	0.747	
Gewässer	limnisch-brackisch	5	-0.232	0.146	-1.59	0.129	
Gewässer	brackisch	6	-0.113	0.205	-0.55	0.587	
LnAlter		7	0.281	0.091	3.10	0.006	
SaisSäure		8	-0.153	0.061	-2.50	0.022	
Tide*Gewässer		1	9	-0.187	0.139	-1.35	0.194
Tide*Gewässer		2	10	0.304	0.126	2.42	0.026
Tide*Gewässer		3	11	-0.008	0.202	-0.04	0.969
StrömBin*Gewässer		1	12	-0.279	0.093	-2.99	0.008
StrömBin*Gewässer		2	13	0.212	0.090	2.37	0.029
StrömBin*Gewässer		3	14	-0.068	0.101	-0.67	0.511

Der partieller Regressionskoeffizient von -0,087 für den Faktor "Stahl" bedeutet unter Bezugnahme auf die Designmatrix (Tabelle A3-54), dass der Spreizungsfaktor für die Abrostung an und über der Wasserlinie bei Spundwänden aus Grobstahl auf Kovariablenmittel bezogen um 0,2 höher ist als bei Feinstahl. Ohne Kovariablenkorrektur verhält es sich eher umgekehrt (Bild A3-53 links). Ungeachtet des Stahls ist bei Standorten mit schwacher Strömung die Streuung um 0,3 ( $2 \times -0,13 = -0,26$ ) größer als bei hoher Strömung (Bild A3-53 rechts).

Tabelle A3-54: Designmatrix mit Kodierung der kategorialen Faktoren (34 Bauwerke)

sigmabeschränkte Kodierung							
	Sp.	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)	Variable	Stufe (+1)	versus (-1)
Konstante	1						
StrömBin	2	StrömBin	hoch	niedrig			
Stahl	3	Stahl	Grobstahl	Feinstahl			
Gewässer	4	Gewässer	limnisch	brack.-mar.			
Gewässer	5	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.			
Gewässer	6	Gewässer	brackisch	brack.-mar.			
LnAlter	7	LnAlter					
SaisSäure	8	SaisSäure					
Tide*Gewässer	9	Tide	nein	ja	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
Tide*Gewässer	10	Tide	nein	ja	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
Tide*Gewässer	11	Tide	nein	ja	Gewässer	brackisch	brack.-mar.
StrömBin*Gewässer	12	StrömBin	hoch	niedrig	Gewässer	limnisch	brack.-mar.
StrömBin*Gewässer	13	StrömBin	hoch	niedrig	Gewässer	limn.-brack.	brack.-mar.
StrömBin*Gewässer	14	StrömBin	hoch	niedrig	Gewässer	brackisch	brack.-mar.

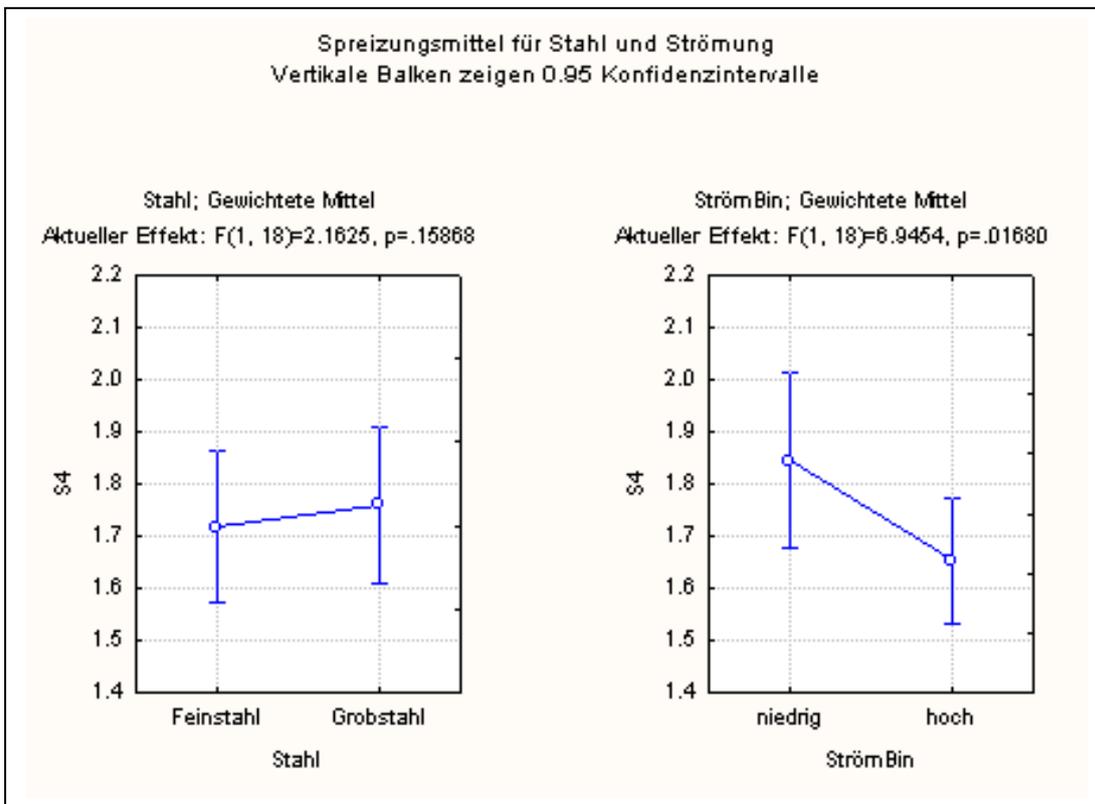


Bild A3-53: Vergleich Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$  für Stahl und Strömung

Zwei Wechselwirkungen bestimmen zusätzlich den Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$  an und über der Wasserlinie. Wenn alle 6 schätzbaren Kleinste-Quadrate-Mittel für Kombinationen aus Tide und Milieu verglichen werden, dann ergeben sich für tidefreie Standorte in allen Milieus ähnliche Spreizungsfaktoren, aber im Tidebereich eine deutliche Aufgabelung mit minimalem Spreizungsfaktor im limnisch-brackischen Milieu und maximalem im brackisch-marinen Milieu (Bild A3-49).

Der Koeffizient von 0,281 für das standardisierte Korrosionsalter (logarithmisch) zeigt eine Zunahme der Streuung im Laufe der Zeit an (also pro Standardabweichung rund 0,3). Hohe Werte für den Saisonfaktor des Säuregehalts korrespondieren mit hohen Sommer-Winterschwankungen vom pH-Wert, von der Säurekapazität und von Calciumgehalt. Der negative Koeffizient von -0,153 für diesen Säurefaktor bedeutet also, dass eine Verminderung der jahreszeitlichen Schwankungen der Säuregehalte um eine Standardabweichung dieses Faktors den Spreizungsfaktor um rund 0,2 erhöht.

Insgesamt ergibt sich ein Vorhersagemodell, das nur 63% der Variabilität der Streuung von Abrostungswerten an der Wasserlinie der 34 untersuchten Bauwerke erklärt (Bild A3-52). Der Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$  an und über der Wasserlinie lässt sich somit aus Alter, Stahl, Strömung, Tide und Gewässerparametern immerhin auf  $\pm 0,5$  genau abschätzen (Tabelle A3-52).

Eine signifikante Wechselwirkung besteht zwischen Strömung und Milieu (Bild A3-55). Wenn alle 6 schätzbaren Kleinste-Quadrate-Mittel für Kombinationen aus Strömung und Milieu vergli-

chen werden, dann ergeben sich für brackisch-marine und limnisch-brackische Standorte unabhängig von der Tide einheitliche Spreizungsfaktoren, für andere Standorte aber eine deutliche Aufgabelung mit minimalem Spreizungsfaktor im limnischen Milieu mit Tide und maximaler im limnischen Milieu ohne Tide.

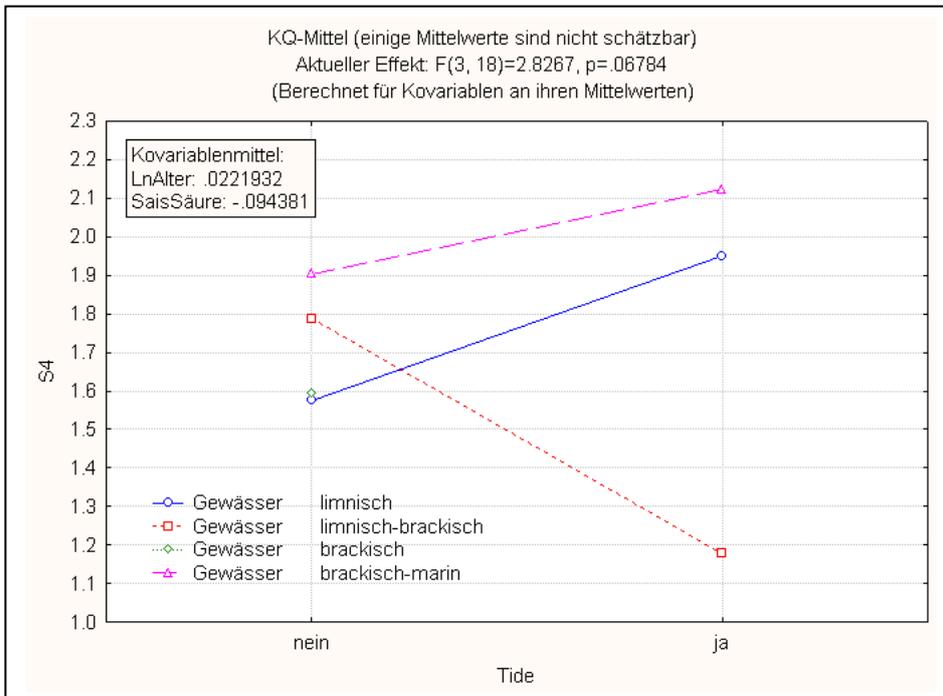


Bild A3-54: Wechselwirkung von Tide und Milieu auf Spreizungsfaktor  $S_{fak4}$

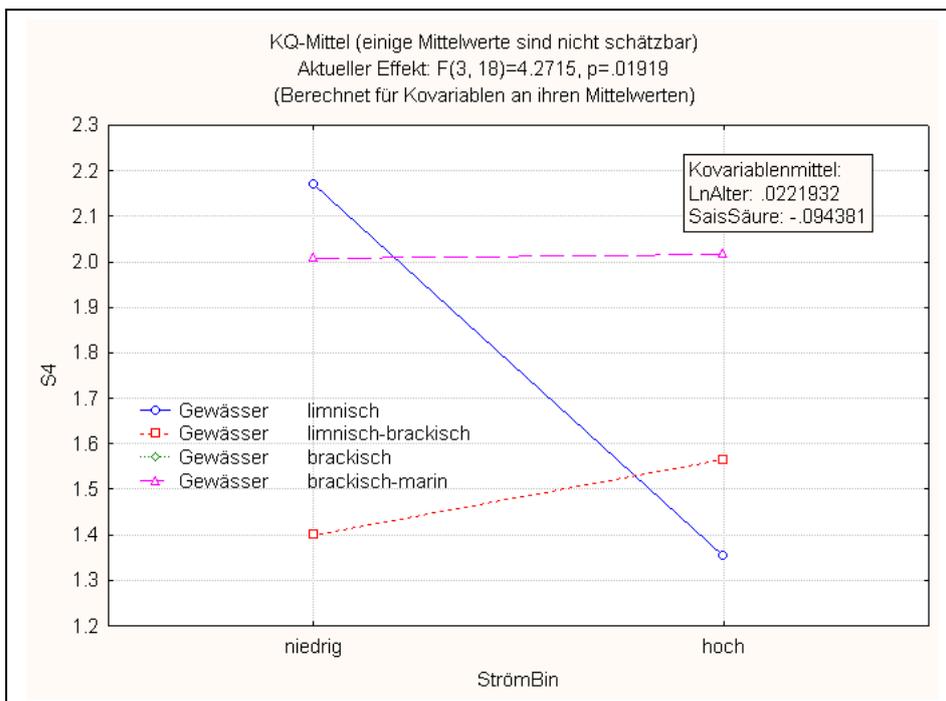


Bild A3-55: Wechselwirkung von Strömung und Milieu auf Spreizungsfaktor  $S_{fak4}$

Die zugehörige Schätzfunktion ergibt sich aus den Koeffizienten in Tabelle A3-50 als:

Prognosegleichung für:  $S_{\text{fak4}}$  (A3-29)

$$\begin{aligned}
 S_4 = & 1.694 \cdot \text{StrömBin}(\text{hoch}) - 0.087 \cdot \text{Stahl}(\text{Grobstahl}) \\
 & + 0.0470 \cdot \text{Gewässer}(\text{limnisch}) - 0.232 \cdot \text{Gewässer}(\text{limnisch-brackisch}) \\
 & - 0.113 \cdot \text{Gewässer}(\text{brackisch}) + 0.2811 \cdot \text{LnAlter} - 0.153 \cdot \text{SaisSäure} \\
 & - 0.187 \cdot \text{Tide} \cdot \text{Gewässer}(1) + 0.3045 \cdot \text{Tide} \cdot \text{Gewässer}(2) \\
 & - 0.008 \cdot \text{Tide} \cdot \text{Gewässer}(3) - 0.279 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{Gewässer}(1) \\
 & + 0.2121 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{Gewässer}(2) - 0.068 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{Gewässer}(3)
 \end{aligned}$$

wobei die Nummern (1) bis (3) sich auf die jeweiligen Stufen der Interaktionsterme in der Regressionstabelle und der Design-Matrix beziehen.

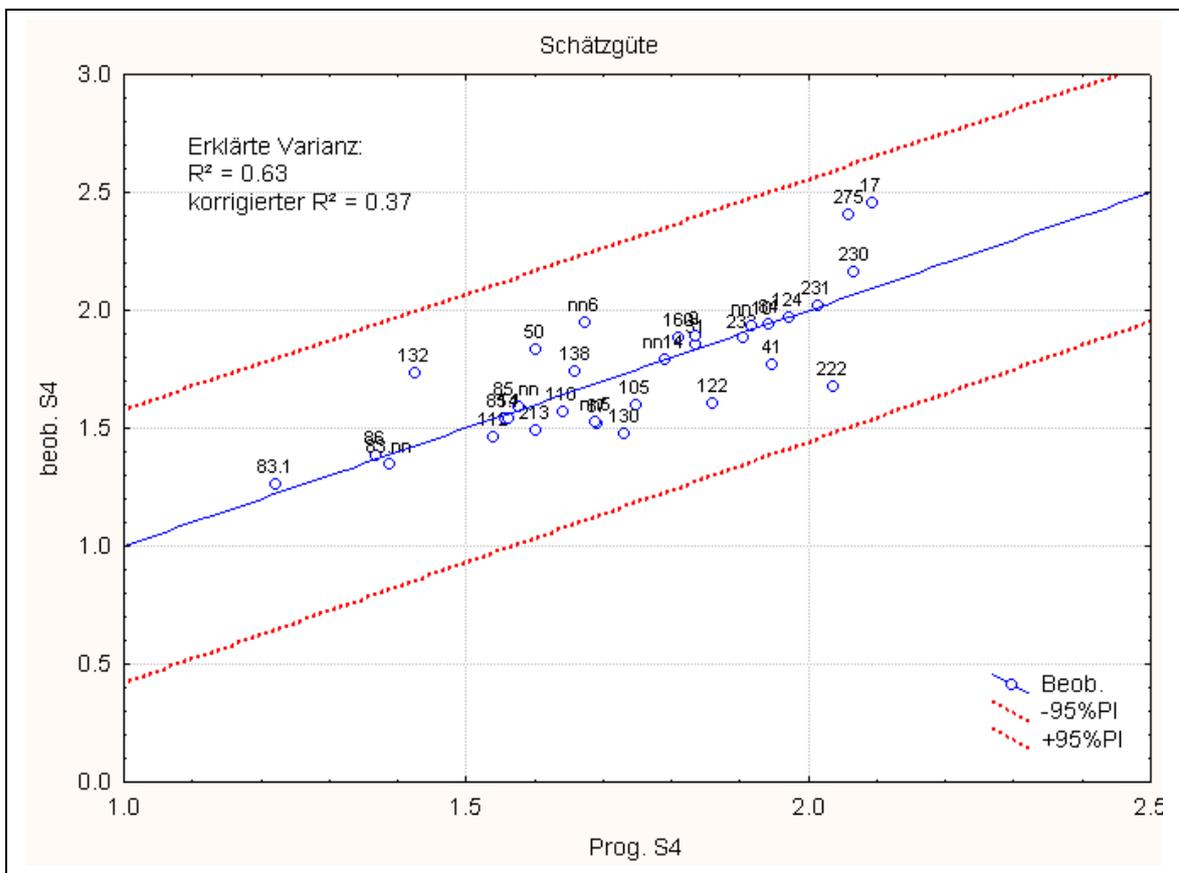


Bild A3-56: Prognosewerte und Schätzgenauigkeit für Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$

Tabelle A3-55: Beobachteter und prognostizierter Spreizungsfaktor  $S_{fak4}$

Nr	beob. Sfak4	progn. Sfak4	Residuum	95% Untergr.	95% Obergr.
160	1.57	1.64	-0.07	1.05	2.23
110	1.88	1.81	0.07	1.22	2.40
124	1.97	1.97	-0.01	1.38	2.57
275	2.41	2.06	0.35	1.52	2.60
nn14	1.79	1.79	0.00	1.13	2.46
230	2.16	2.07	0.09	1.52	2.61
41	1.77	1.95	-0.18	1.41	2.49
17	2.46	2.09	0.36	1.52	2.67
222	1.48	1.73	-0.26	1.18	2.28
130	1.68	2.04	-0.36	1.46	2.61
83.1	1.26	1.22	0.04	0.64	1.80
83.nn	1.35	1.39	-0.04	0.81	1.97
231	2.02	2.01	0.01	1.42	2.61
213	1.60	1.86	-0.26	1.33	2.39
122	1.49	1.60	-0.11	1.04	2.16
nn10	1.94	1.92	0.02	1.40	2.44
105	1.60	1.75	-0.15	1.24	2.25
85.1	1.86	1.84	0.02	1.24	2.43
31	1.54	1.56	-0.01	0.97	2.14
85.nn	1.59	1.58	0.01	0.99	2.16
9	1.89	1.83	0.06	1.33	2.34
127	1.54	1.56	-0.02	0.97	2.16
233	1.88	1.90	-0.03	1.36	2.45
84	1.94	1.94	0.00	1.38	2.50
132	1.73	1.43	0.30	0.87	1.98
87	1.52	1.69	-0.17	1.16	2.22
112	1.46	1.54	-0.08	0.95	2.13
50	1.74	1.66	0.08	1.07	2.25
138	1.83	1.60	0.23	1.07	2.14
86	1.38	1.37	0.01	0.79	1.95
nn5	1.52	1.69	-0.17	1.18	2.20
nn6	1.95	1.67	0.27	1.16	2.18

### **Abschätzung aus Wasseraggressivität $W_0$**

Abschließend soll die multiple Schätzung von Korrosionsparametern der Tiefenfunktion mit einer unifaktoriellen Abschätzung aus dem Kennwert  $W_0$  der Wasseraggressivität nach DIN 50929 (Teil 3) verglichen werden. Diese Kennwerte wurden für die Sommer- und Winterwerte der Gewässer berechnet. Als mögliche Erweiterung wurde noch das skalierte Produkt aus  $W_0$  und der Sauerstoffkonzentration berücksichtigt, brachte aber keine Verbesserung der Ergebnisse.

Tabelle A3-56: Korrelationen zwischen  $W_0$  (DIN 50929/3) und Abrostungsparameter

	Niedrigwasserzone			Spritzwasserzone	
	b0	b1	Sfak1	b6	Sfak4
W <sub>0</sub> -Sommer	-0.3574 N=40 p=.024	-0.1187 N=40 p=.466	-0.1744 N=40 p=.282	-0.2316 N=34 p=.188	-0.4017 N=34 p=.019
W <sub>0</sub> *O <sup>2</sup> /10	-0.2859 N=40 p=.074	-0.1550 N=40 p=.340	-0.2552 N=40 p=.112	-0.1618 N=34 p=.361	-0.4149 N=34 p=.015
W <sub>0</sub> -Winter	-0.3378 N=40 p=.033	-0.1974 N=40 p=.222	-0.1409 N=40 p=.386	-0.1676 N=34 p=.343	-0.4351 N=34 p=.010
W <sub>0</sub> *O <sup>2</sup> /10	-0.3578 N=40 p=.023	-0.1818 N=40 p=.262	-0.1368 N=40 p=.400	-0.2160 N=34 p=.220	-0.3952 N=34 p=.021

Die Korrelationsmatrix zwischen verschiedenen  $W_0$ -Kennwerten und Gewässerparametern zeigt einen signifikanten Zusammenhang für die Basisabrostung  $b_0$  unterhalb Mittelwasser- oder Niedrigwasser und den Spreizungsfaktor  $S_{fak4}$  der Spritzwasserzone, aber keinen für alle anderen Parameter (Tabelle A3-56). Der erklärte Varianzanteil von  $b_0$  ist aber mit 11 - 13% viel zu niedrig für eine quantitative Abschätzung, weil er einen Schätzfehler von  $\pm 1$  mm gegenüber  $\pm 0,5$  mm aus multipler Schätzung vorsieht (Bild A3-57 und A3-58). Außerdem werden bestimmte Situationen (Bauwerke 222 und 275) noch schlechter erfasst. Ohne eine Schätzmöglichkeit für den zugehörigen Gradienten  $b_1$  und den Spreizungsfaktor  $S_{fak1}$  kann der Kennwert  $W_0$  keine Grundlage für eine Schätzung mittlerer und maximaler Abrostung bieten. Auch die Schätzung des Spreizungsfaktor  $S_{fak4}$  in der Spritzwasserzone ist mit einem erklärten Varianzanteil von 16 - 19% zu gering. Da zudem die mittlere Abrostung  $b_6$  an der Wasserlinie nicht aus  $W_0$  ermittelt werden kann, bietet  $W_0$  auch für die Spritzwasserzone keinen Ansatz zur quantitativen Bestimmung von Abrostungsparametern.

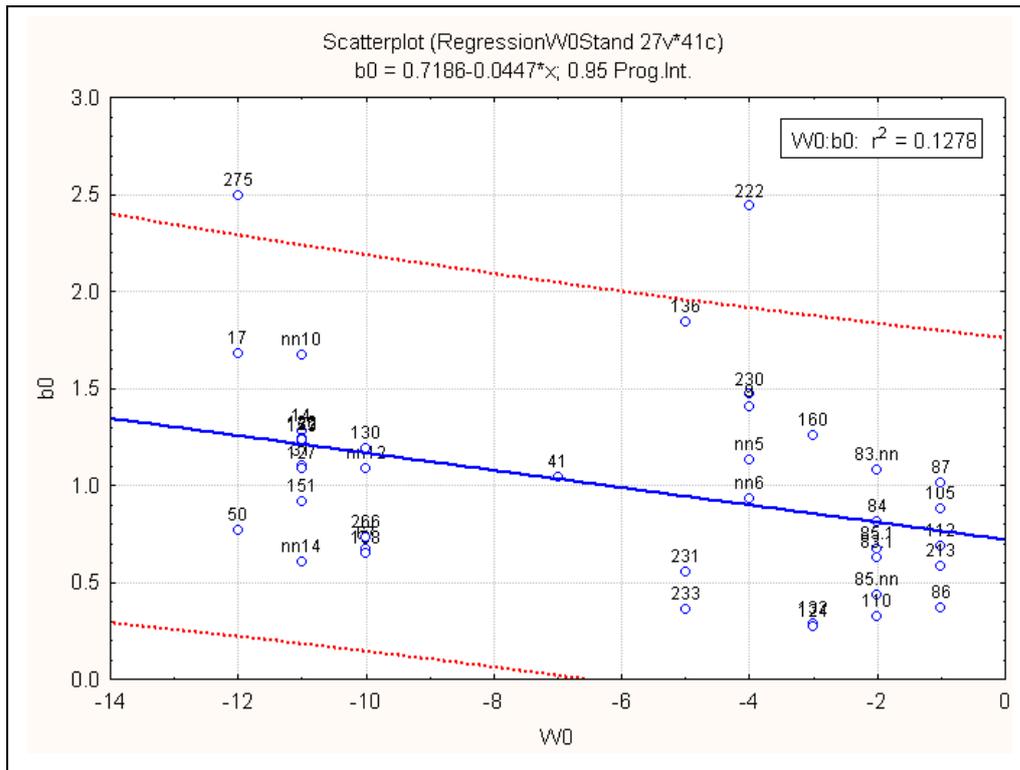


Bild A3-57: Schätzung der Basisabrostung  $b_0$  aus Sommer- $W_0$

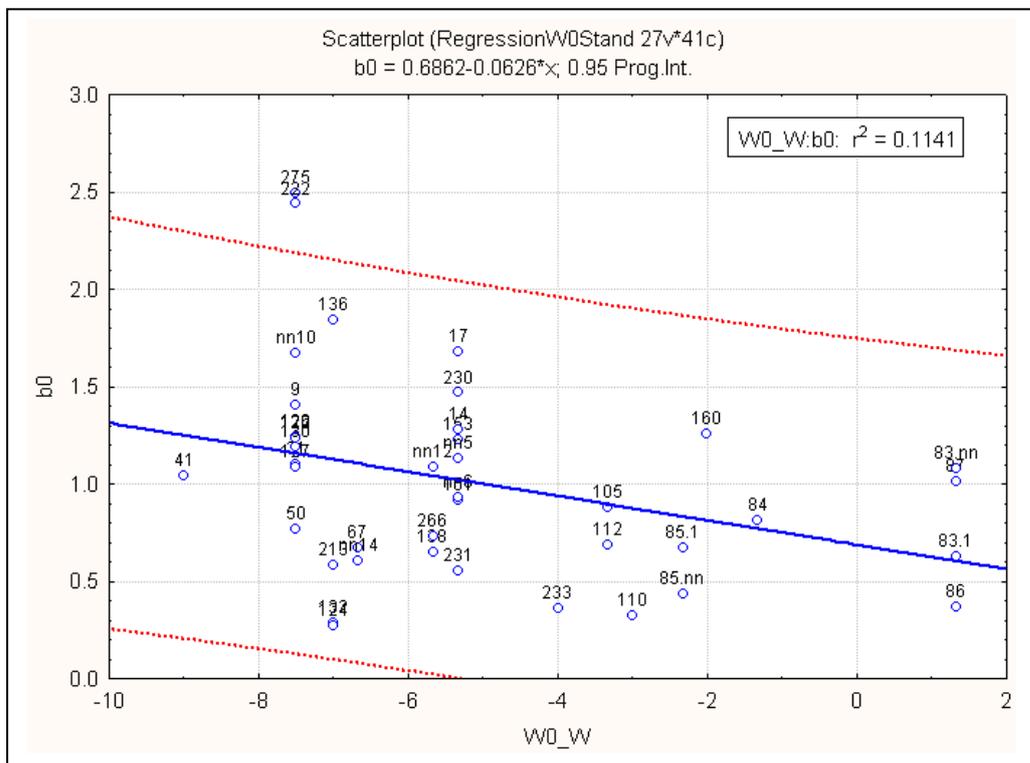


Bild A3-58: Schätzung der Basisabrostung  $b_0$  aus Winter- $W_0$

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde im Rahmen eines von der *European Commission of Steel and Coal (ECSC)* geförderten Forschungsvorhabens zur Klärung von Korrosionsprozessen an Bauwerken in Binnen und Küstengewässern ein multifaktorielles Vorhersagemodell für die Abrostungstiefe an Stahlspundwänden entwickelt. Als Datengrundlage diente das Archiv der BAW-Hamburg mit Waddickenmessungen an Spundwänden, Metallanalysen von 38 Stahlspundwänden und Gewässeranalysen an 40 Standorten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine grobe Abschätzung minimaler Restwanddicken an beliebigen Höhenpunkten einer Stahlspundwand aus Alter, Material- und Gewässereigenschaften. Damit ließe sich bereits vor einer Ultraschalluntersuchung das Risiko des möglichen Versagensfalls für ein Bauwerk erfassen. Unabhängig davon kann mit Hilfe der Weibullverteilung eine univariate Lebensdauerabschätzung von Spundwänden aus kritischen Restwanddicken erfolgen, um den prozentualen Anteil gefährdeter Bauwerke näherungsweise zu erfassen. Auf diese Weise liefert das *ECSC*-Projekt dem Küsteningenieurwesen eine wertvolle Planungshilfe, die weit über alle bisherigen Ansätze zur Risikoabschätzung - wie beispielsweise die Rangabstufung von Korrosionswahrscheinlichkeiten nach DIN 50929 - hinausgreift.

In dem Forschungsvorhaben wurden die Bauwerke so ausgewählt, dass die Unabhängigkeit der wichtigsten Einflussgrößen Abrostungsalter und Gewässermilieu gewährleistet ist. Als weitere potentielle Einflussgrößen wurden chemische und physikalische Eigenschaften des Spundwandstahls, Standortbedingungen wie Liegeplätze, Strömung und Tide sowie chemische Gewässereigenschaften berücksichtigt. Diese zusätzlichen Faktoren weisen erwartungsgemäß hohe Redundanzen auf und erlauben daher oft keine eindeutige Ursachendiagnose für den Korrosionsprozess.

Die bisherige Praxis der Analyse von Ultraschallmessungen erwies sich in Teilen als ungeeignet, da aufgrund der üblichen Zusammenlegung inhomogener Datenkollektive keine für das Gesamtbauwerk repräsentative Prognose gewährleistet werden kann. Die Korrosionswerte folgen allgemein einer Lognormalverteilung und zeigen sowohl für gemischte Spundwände als auch für Spundwände mit U-Profilen starke Abweichungen zwischen den einzelnen Stationen und Messpunktlagen, die in vielen Fällen stärker als die Höhenzonierung waren. Systematische Abrostungsunterschiede zwischen profilabhängigen Messlagen wurden als Hauptursache für die bisweilen beobachteten mehrgipfligen Verteilungsformen der Ultraschallmessungen identifiziert. Eine Beschränkung der Auswertung auf ausgewählte Messpunkte im Berg- und Talbereich eines Profils führt zu homogeneren Datenkollektiven und wurde daher für die Ursachenanalyse vorgenommen.

In Bezug auf eine Höhenzonierung der Abrostungsintensität an Spundwänden zeigen die untersuchten Bauwerke zwei Tendenzen: (a) ein Wechsel des Korrosionsmilieus führt oft zu einem scharfen Sprung in den Abrostungswerten, und (b) innerhalb eines Höhenbereichs mit gleichem Korrosionsmilieu gibt es eine exponentielle Abhängigkeit der Abrostung von der Tiefe. Als Alternative zur bisherigen Analysepraxis, bei der auch im Bereich unter der Mittelwasser- oder Tideniedrigwasserlinie bestimmte Messquerschnitte zu Niedrigwasserzone einerseits und Un-

terwasserzone andererseits zusammengefasst wurden, wird in der vorliegenden Arbeit die Bestimmung einer Tiefenfunktion für die Abrostung mit Hilfe der Regressionsanalyse empfohlen.

Die untersuchten Bauwerke zeigen grundsätzlich ein über mehrere Tiefenmeter hinweg verlaufendes konstantes Abrostungsmittel (Basisabrostung), das bei einigen Standorten etwa ab 4 - 5 m Tiefe in eine exponentiell zunehmende Abrostung zur Mittel- oder Tideniedrigwasserlinie hin übergeht. Aufgrund der aus einer Lognormalverteilung resultierenden multiplikativen Streuung von Messwerten um die Ausgleichskurve herum, formt die Streuung einen Trichter mit entsprechend hohen Abrostungswerten an der Wasserlinie. Diese hohen Werte des kontinuierlichen Wertespektrums sind in der bisherigen Praxis der Datenauswertung in der Regel als separate „Niedrigwasserzone“ aufgefasst und ausgegliedert worden. Auch oberhalb der Wasserlinie wie beispielsweise in der Wechselwasser- oder Spritzwasserzone sind höhenabhängige Abrostungsgradienten zu beobachten, so dass sich die Abrostung an einer Stahlpundwand über alle Tiefenbereiche hinweg insgesamt als unstetige Exponentialfunktion der Tiefe darstellen lässt:

$$\text{Abrostung} = \begin{cases} b_0 \times \exp(b_1 \times (\text{Tiefe} - \text{Basistiefe})); & \text{Tiefe} < T_{nw} \\ b_2 \times \exp(b_3 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq T_{nw} \text{ und } \text{Tiefe} < T_{1/2w} \\ b_4 \times \exp(b_5 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq T_{1/2w} \text{ und } \text{Tiefe} < T_{hw} \\ b_6 \times \exp(b_7 \times (\text{Tiefe} + \text{Tidehub})); & \text{Tiefe} \geq T_{hw} \end{cases}$$

worin die Tiefe grundsätzlich relativ zum Tideniedrigwasserniveau berechnet wird, als Basistiefe 4 m eingesetzt wird und  $b_0$  bis  $b_7$  Regressionskoeffizienten sind, die indirekt über die loglineare Regression ermittelt werden können. Die erste der vier Teilfunktionen bezieht sich auf den Bereich unter Tideniedrig- oder Mittelwasser, die zweite und dritte Teilfunktion auf den Wechselwasserbereich (entfällt also in tidefreien Gewässern), und die vierte Teilfunktion auf die Spritzwasserzone.

Die Abschätzung mittlerer und maximaler Abrostung sowie der zugehörigen charakteristischen Werte zu 5% Risikowahrscheinlichkeit im Sinne der Euronorm kann aus den Parametern dieser Tiefenfunktion und den zugehörigen Spreizungsfaktoren  $S_{\text{fak}1}$  und  $S_{\text{fak}4}$  heraus erfolgen. Die als Potenzen der Spreizungsfaktoren berechneten Gesamtfaktoren  $MAX_{f1}$  und  $MAX_{f4}$  zur Schätzung der maximalen Abrostung liegen quer über alle Altersgruppen zumeist zwischen 2 und 3, d.h. die maximale Abrostung beträgt an jedem Tiefenpunkt oft das Zwei- bis Dreifache der mittleren. Dieses Verhalten zeigt sich sowohl in der Niedrigwasserzone als auch in der Spritzwasserzone.

Aus den so ermittelten mittleren Abrostungen an der Mittel- oder Niedrigwasserlinie kann die Lebensdauer von Stahlpundwänden aus den Parametern der Weibullverteilung geschätzt werden. Der nach der Maximum-Likelihood-Methode geschätzte Lageparameter (ausfallfreie Zeit) liegt bei 10, der Formparameter bei 1,8 und der Skalenparameter bei 46,7, d.h. nach etwa 57 Jahren dürfte durch fortschreitende Korrosion die minimale Restwanddicke bei etwa 63,2% der Bauwerke, die älter als 10 Jahre sind, unter die kritische Marke von 80% der Ausgangswanddi-

cke abgesunken sein. Bereits nach 23 Jahren hat jedes zehnte Bauwerk die kritische Restwanddicke unterschritten, nach 48 Jahren hat es die Hälfte der Bauwerke.

Für eine multivariate Schätzung der Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe, des zugehörigen Abrostungsgradienten  $b_1$  und des Spreizungsfaktors  $S_{\text{fak1}}$  unter der Mittelwasser- oder Niedrigwasserlinie sowie der Abrostung  $b_6$  und Spreizung  $S_{\text{fak4}}$  in der Spritzwasserzone war eine ausreichende Datengrundlage von 38 bzw. 34 Standorten gegeben. Dabei wurden aussagekräftigen Einflussgrößen mit Hilfe der Beste-Subset-Regression von redundanten Faktoren abgetrennt und dann in eine Vorhersagegleichung des Allgemeinen Linearen Modells aufgenommen.

Die vorliegende Datenstruktur erlaubte allerdings nicht immer die Einbindung der Originalmesswerte in die Vorhersagegleichung. Viele Parameter mussten aufgrund asymmetrischer oder inhomogener Häufigkeitsverteilungen vor der Analyse logarithmiert oder dichotomisiert werden. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Spundwandstahls ließen sich über eine vorgeschaltete Clusteranalyse in zwei Stahlklassen bündeln: Grobstaht mit niedrigem Siliziumgehalt und Feinstahl mit hohem Siliziumgehalt, mehr Legierungsbestandteilen wie Chrom, Nickel und Molybdän und kleinerem Korn. Der Feinstahl tritt bei den untersuchten Bauwerken aber erst ab 1960 auf, der Grobstaht durchgehend. Die chemischen Gewässereigenschaften wurden ebenfalls einer Clusteranalyse unterzogen und erlaubten eine Gliederung in die vier Milieugruppen limnisch, limnisch-brackisch, brackisch und brackisch-marin. Korrelationen im Gewässerchemismus wurden als Salz-, Säure-, Schmutz- und  $O_2$ -Faktor gebündelt. Die zugehörigen Sommer- und Winterschwankungen gingen als Saisonfaktoren in die Analyse ein. Außerdem wurden für einige Parameter Tiefegradienten berücksichtigt.

Insgesamt ergibt sich für die Basisabrostung  $b_0$  in 4 m Tiefe ein Vorhersagemodell mit einem Schätzfehler von  $\pm 0,5$  mm, das 88% der Variabilität der Basisabrostungen aus Alter, Stahl, Strömung, Tide, Gewässermilieu und die Saisonfaktoren für Sauerstoff und Gewässerverschmutzung erklärt. Der zugehörige Abrostungsgradient  $b_1$  in 0 - 4 m Tiefe lässt sich aus Stahl, Liegeplatz, Gewässermilieu und dem pH-Gradienten ( $0 / <0$ ) in 0 - 4 m Tiefe, dem Säurefaktor und dem  $O_2$ -Faktor für Sauerstoff und Gewässerverschmutzung mit 74% erklärter Variabilität auf rund  $\pm 0,2$  genau abschätzen. Der Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak1}}$  als Kennwert für die multiplikative Streuung der Abrostungswerte lässt sich mit 67% erklärter Variabilität aus Stahl, Liegeplatz, Gewässermilieu und dem pH-Gradienten auf  $\pm 0,4$  abschätzen. Damit können die mittlere und maximale Abrostung sowie deren charakteristische Werte im Sinne der Euronorm an jedem beliebigen Punkt unterhalb der Mittelwasserlinie oder Tideniedrigwasserlinie auch ohne örtliche Korrosionsmessung ermittelt werden.

Auch in der rostmineralischen Untersuchung für Proben aus dem Unterwasserbereich zeigen sich Einflüsse von Stahl und Milieu. Im limnisch-brackischen und brackischen Milieu sind die Schwefelgehalte im Rost von Feinstahl geringer als von Grobstaht. Im limnischen Milieu gibt es nur Grobstahtproben, die aber wenig Schwefel enthalten. Die Minerale Akaganait, Lepidokrokit und Aragonit wurden in der Rostproben der Unterwasserzone nur selten nachgewiesen. Goethit ist an limnischen und brackischen Standorten stets im Rost vorhanden, an limnisch-brackischen und brackisch-marinen jedoch nur teilweise. Quarz, Calcit und Siderit fehlen fast immer im

limnischen Bereich und verteilen sich sehr ungleich auf die Proben aus anderen Gewässern. 80% der Rostproben ohne Siderit gehören zum Grobstahl, an brackisch-marinen Standorten aber sind die Verhältnisse etwas angeglichen. Dieses Muster deckt sich mit dem Verhalten der Schwefelgehalte, die speziell an limnisch bis brackischen Standorten eine Abhängigkeit vom Stahltyp zeigen.

Die Abrostung  $b_6$  an der Tideniedrig- oder Tidehochwasserlinie lässt sich mit 82% erklärter Variabilität aus Stahl, Strömung, Tide, Liegeplatz, Gewässermilieu und dem Tiefegradienten der Redoxspannung in 0-4 m unter Niedrigwasserniveau auf  $\pm 2$  mm genau abschätzen. Der zugehörige Spreizungsfaktor  $S_{\text{fak4}}$  an und über der Wasserlinie (Spritzwasserzone) lässt sich mit 63% erklärter Variabilität aus Alter, Stahl, Strömung, Tide und den Saisonfaktor für den Säuregehalt auf  $\pm 0,5$  abschätzen. Für eine multifaktorielle Schätzung des Abrostungsgradienten in der Spritzwasserzone und der Korrosionsparameter in der Wechselwasserzone war mit nur 9-10 Standorten keine ausreichende Datengrundlage vorhanden.

In der rostmineralischen Untersuchung für Proben aus dem Spritzwasserbereich ist zumindest ein Milieueinfluss erkennbar. Im limnischen bis brackischen Milieu weisen die Proben kaum Schwefel auf, während im brackisch-marinen Bereich in vergleichbaren Anteilen Proben mit und ohne Schwefel zu verzeichnen sind. Die Minerale Akaganeit, Aragonit und Siderit fanden sich in kaum einer Probe, Quarz nur selten. Lepidokrokit und Calcit treten bei einigen Rostproben auf, Goethit und Magnetit bei der Mehrzahl. Goethit und Magnetit fehlen in den Proben aus limnischem Milieu immer, sind aber fast immer in den Proben aus anderen Milieus nachweisbar.

Eine alternative Abschätzung von Korrosionsparametern aus dem Kennwert  $W_0$  der Wasseraggressivität nach DIN 50929-1 war mangels signifikanter Korrelation in einigen Fällen überhaupt nicht möglich, in anderen Fällen mit nur 10-20% erklärter Varianz unbefriedigend. Damit liefert die vorliegende Arbeit dem Küsteningenieurwesen erstmals ein Werkzeug zur quantitativen Abschätzung von Restwanddicken an Stahlspundwänden, das ein wertvolles Instrument bei der Berechnung erforderlicher Wanddicken für Spundwände und der kosteneffizienten Planung von örtlichen Ultraschallinspektionen bietet.

## Literaturverzeichnis

- Alberts, D. (1997): Korrosionsschäden und Nutzungsdauerabschätzung an Stahlspundwänden und -pfählen im Wasserbau.
- Alberts, D. und Heeling, A. (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 75, S. 83-93.
- Backhaus, K. et al. (1989): Multivariate Analysemethoden (5. Aufl.). Berlin: Springer.
- Blalock, H.M. (1964): Causal Inferences in Nonexperimental Research. Chapel Hill: University of North-Carolina Press.
- Bortz, J. (1989): Statistik für Sozialwissenschaftler. Berlin/Heidelberg.
- Deutsches Institut für Normung (1985): Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung (DIN 50 929, Teil 1).
- Deutsches Institut für Normung (1997): Korrosion von Metallen in Seewasser und Seemosphäre (DIN 81249, Teil 1).
- DIN-Taschenbuch 224 (1998): Statistik: Auswertungen und Genauigkeitsanalyse. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Berlin: Beuth.
- EAU (1997): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen 1996 (9. Aufl.). Ernst & Sohn, Berlin.
- Förstner, U. (1994): Solutes/Solids Interactions of Metals in Estuaries. In: Preprints of the International Symposium 'Particulate Matter in Rivers and Estuaries', Reinbek near Hamburg, 21-25 March 1994, S. 73-90.
- Gaensslen, H. und Schubö, W. (1973): Einfache und komplexe statistische Analyse. München, Basel.
- Hartung, J. et al. (1987): Statistik. München.
- Hald, A. (1952): Statistical Theory with Engineering Applications. New York: John Wiley & Sons.
- Huang, P.S. (1970): Regression and Econometric Methods. New York: John Wiley & Sons.
- Johnson, N. L. und Kotz, S. (1970): Distributions in Statistics, vol. 1: Continuous Univariate Distributions. Boston: Houghton, Mifflin Company.
- Montgomery, D.C. (1997): Design and Analysis of Experiments (4th Ed.). New York, John Wiley.

Moulin, J. M. et al. (1997): Technical Steel Research. European Commission EUR 20043 EN.

Müller, K. (1987): Lehrbuch der Metallkorrosion. Lehrbuchreihe Galvanotechnik (4. Aufl.), Saal-  
gau (Württ.), Eugen G. Leuze.

Riedel-Lorjé, J.-C. et al. (1992): Salzgehalt- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwas-  
sergebiet der Elbe. In: ARGE ELBE.

Riedel-Lorjé, J.-C. et al. (1994): Suspended Matter and Salinity in the Upper Brackish Water  
Region of the Elbe Estuary. In: Preprints of the International Symposium 'Particulate Mat-  
ter in Rivers and Estuaries', Reinbek near Hamburg, 21-25 March 1994, S. 220-224.

Sachs, L. (1990): Statistische Methoden 2: Planung und Auswertung. Berlin - Heidelberg.

Turner, M.E. und Stevens, Ch.D. (1959): The Regression Analysis of Causal Paths. Biometrics 15  
(2): 236-258.

Walker, H. M. und Lev, J. (1953): Statistical Inference. New York - Chicago.

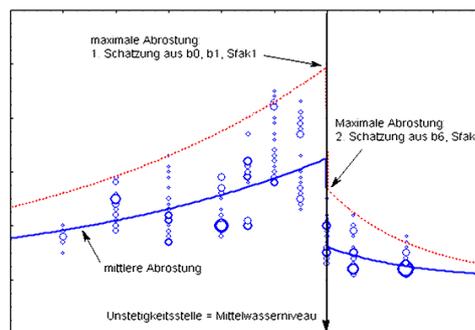
Williams, E. J. (1959): Regression Analysis. New York - London.

Wranglén, G. (1985): Korrosion und Korrosionsschutz. Geotechnik, in: Werkstoff-Forschung und  
-Technik, Band 3, B. Ilschner (Hrsg.), Berlin, Springer.

# Anlage 4

## Einflussfaktoren auf die Korrosion - Berechnungsbeispiel -

R. Uerkvitz (Statsoft Europe GmbH, 2005)



## Berechnungsbeispiel

Zu berechnen sind:

mittlere Abrostung eines 20 Jahre alten Bauwerks in 2 m Tiefe unter der mittleren Tideniedrigwasserlinie.

Berechnungsgrundlage:

Schätzung aus diversen **Standortfaktoren, Materialeigenschaften** und **Spundwandalter** (Referenzbauwerk Nr. 31, Neustädter Bucht).

### *Schritt I*

Grundlage für die Berechnung der Abrostung ist die unstetige Tiefenfunktion (10) aus dem Projektbericht (s. Anlage 3):

$$\text{Abrostung} = \begin{cases} b_0 \times \exp(b_1 \times (\text{Tiefe} - \text{Basistiefe})); & \text{Tiefe} < T_{nw} \\ b_2 \times \exp(b_3 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq T_{nw} \text{ und } \text{Tiefe} < T_{1/2w} \\ b_4 \times \exp(b_5 \times \text{Tiefe}); & \text{Tiefe} \geq T_{1/2w} \text{ und } \text{Tiefe} < T_{hw} \\ b_6 \times \exp(b_7 \times (\text{Tiefe} + \text{Tidehub})); & \text{Tiefe} \geq T_{hw} \end{cases}$$

worin die Tiefe grundsätzlich relativ zum Tideniedrigwasserniveau berechnet wird und als Basistiefe 4 m eingesetzt wird. Zur Schätzung der Abrostungswerte in 2 m Tiefe unter der mittleren Tideniedrigwasserlinie werden diese Tiefenwerte in die obere Teilfunktion eingesetzt:

$$\begin{aligned} \text{Mittlere Abrostung [mm]} &= b_0 \times \exp(b_1 \times ((-2) - (-4))) \\ &= b_0 \times \exp(b_1 \times 2) \end{aligned}$$

Zur Berechnung der mittleren Abrostung müssen also zwei Parameter geschätzt werden:

- **Basisabrostung  $b_0$**
- **Tiefengradient  $b_1$**

Die zugehörigen charakteristischen Werte können nicht aus Standortfaktoren und anderen Größen bestimmt werden, weil hierzu der Prognosefehler eines Regressionsmodells mit lokalen Daten (Ultraschallmessungen) berechnet werden muss.

## Schritt II

Schätzung der **Basisabrostung**  $b_0$  aus Drittgrößen: Die Basisabrostung lässt sich aus Alter, Stahl, Strömung, Tide und einigen Gewässerparametern auf  $\pm 0,6$  mm genau abschätzen. Dazu werden die zugehörigen Regressionskoeffizienten benötigt (**Tabelle A3-41** und Ausdruck A3-26 im **Anlage 3**):

		Parameterschätzung				
Effektstufe		Spalte	$b_0$	Std.Fe.	t	p
Konstante		1	<b>1.160</b>	0.079	14.69	0.000
Stahl	Grobstahl	2	<b>-0.142</b>	0.052	-2.73	0.011
Gewässer	limnisch	3	<b>0.948</b>	0.329	2.88	0.008
Gewässer	limnisch-brackisch	4	<b>-0.706</b>	0.210	-3.36	0.002
Gewässer	brackisch	5	<b>0.026</b>	0.112	0.23	0.822
StrömBin	hoch	6	<b>-0.392</b>	0.065	-6.01	0.000
LnAlter		7	<b>0.159</b>	0.064	2.50	0.019
O2-Faktor		8	<b>0.302</b>	0.073	4.11	0.000
SaisSäure		9	<b>-0.158</b>	0.071	-2.22	0.036
StrömBin*LnAlter		10	<b>-0.176</b>	0.061	-2.91	0.007
Tide*LnAlter		11	<b>0.167</b>	0.066	2.53	0.018
StrömBin*Säurefaktor		12	<b>0.365</b>	0.130	2.81	0.009

Die resultierende Vorhersagegleichung hat die Form:

$$\begin{aligned}
 b_0 = & 1.160 - 0.142 \cdot \text{Stahl}(\text{"Grobstahl"}) + 0.948 \cdot \text{Gewässer}(\text{"limnisch"}) \\
 & - 0.706 \cdot \text{Gewässer}(\text{"limnisch-brackisch"}) + 0.026 \cdot \text{Gewässer}(\text{"brackisch"}) \\
 & - 0.392 \cdot \text{StrömBin}(\text{"hoch"}) + 0.159 \cdot \text{LnAlter} + 0.302 \cdot \text{O2-Faktor} \\
 & - 0.158 \cdot \text{SaisSäure} - 0.176 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{LnAlter} (1) + 0.167 \cdot \text{Tide} \cdot \text{LnAlter} (1) \\
 & + 0.365 \cdot \text{StrömBin} \cdot \text{Säurefaktor} (1)
 \end{aligned}$$

wobei die Nummer (1) sich auf die jeweilige Stufe der Interaktionsterme in der Regressionstabelle und der Design-Matrix (siehe unten) beziehen.

Die Berechnungsformel stellt eine gewichtete Summe von transformierten und kodierten Beobachtungsgrößen dar, so dass vor der Anwendung die einzusetzenden Werte zu bestimmen sind. Die Kodierung muss sich streng auf die Design-Matrix beziehen (**Tabelle A3-42**), da sonst die Koeffizienten nicht mehr stimmen. Die Beobachtungswerte (**Tabelle A3 - 28**, Referenzbauwerk Nr. 31) sind:

**Alter = 20; Strömung = niedrig; Tide = nein; Liegeplatz = ja**

Zu bestimmen sind vorher folgende abgeleitete Größen (**Tabellen A3- 28 und A3 - 29**, Referenzbauwerk Nr. 31):

**Stahl = grob; Gewässer = brackisch-marin;**

**O2-Faktor = 0.237; Säurefaktor = -0.423; SaisSäure = -0.118**

wobei sich Stahlklasse und Gewässermilieu aus der Diskriminanzanalyse, der O<sub>2</sub>-Faktor, der Säurefaktor und die Saisonfaktoren aus der Hauptkomponentenanalyse ergeben (siehe unten).

Für die Kodierung wird die Design-Matrix (**Tabelle A3-42**) benötigt:

	Sp.	Variable	sigmabeschränkte Kodierung		Variable
			Stufe (+1)	versus (-1)	
Konstante	1				
Stahl	2	Stahl	<b>Grobstahl</b>	<b>Feinstahl</b>	
Gewässer	3	Gewässer	<b>limnisch</b>	<b>brack.-mar.</b>	
Gewässer	4	Gewässer	<b>limn.-brack.</b>	<b>brack.-mar.</b>	
Gewässer	5	Gewässer	<b>brackisch</b>	<b>brack.-mar.</b>	
StrömBin	6	StrömBin	<b>hoch</b>	<b>niedrig</b>	
LnAlter	7	LnAlter			
O2-Faktor	8	O2-Faktor			
SaisSäure	9	SaisSäure			
StrömBin*LnAlter	10	StrömBin	<b>hoch</b>	<b>niedrig</b>	LnAlter
Tide*LnAlter	11	Tide	<b>nein</b>	<b>ja</b>	LnAlter
StrömBin*Säurefaktor	12	StrömBin	<b>hoch</b>	<b>niedrig</b>	Säurefaktor

### **Einzusetzende Größen**

Die einzusetzenden Größen für obigen Ausdruck werden nun nachfolgend dargestellt.

#### **(A) HAUPTEFFEKTE**

**"StrömBin"(hoch) = -1**

da die beobachtete Strömung **niedrig** ist und die zugehörige Dummy-Variable dann den Wert **-1** zugewiesen bekommt.

**Stahl("Grobstahl") = +1**

da das Spundwandmaterial aus **Grobstahl** ist und die zugehörige Dummy-Variable dann den Wert **+1** zugewiesen bekommt.

**"Gewässer" (limnisch) = -1**

**"Gewässer"(" limnisch-brackisch" ) = -1**

**"Gewässer"("brackisch" ) = -1**

da das Gewässer **brackisch-marin** ist und somit alle drei Dummy-Variablen gemeinsam den Wert **-1** erhalten (**Tabelle A3-40**).

**LnAlter = -0.14**

was hier mit  $(\text{LogWert}-\text{LogMw})/\text{LogStdAbw}$  als standardisierter Wert aus dem natürlichen Logarithmus des Alters **20** berechnet wird  $(2.996-3.09)/0.68 = -0.14$ .

**"O2-Faktor" = 0.237**

und

**"Säurefaktor" = -0.423**

müssen ebenfalls als Wert einer Hauptkomponente vorher aus den standardisierten Sommerwerten (Mittelwerte aus Probe 1 und 2) berechnet werden (siehe unten).

**"SaisSäure" = -0.118**

muss als Wert einer Hauptkomponente (Saisonfaktor) vorher aus den standardisierten Verhältnissen der Sommer- und Winterwerte berechnet werden.

## **(B) INTERAKTIONEN**

Die Interaktionen (Wechselwirkungen) ergeben sich aus Multiplikation von Originalvariablen oder Dummy-Variablen. Die Nummern in den Klammern beziehen sich auf die Nummerierung der Effektstufe in der Tabelle mit den Regressionskoeffizienten (**Tabelle A3-41**) und erlaubt so eine Zuordnung zum Spaltenwert der Design-Matrix (**Tabelle A3-42**).

**"StrömBin"\*LnAlter(1) = 0.14**

ergibt sich als Produkt des Dummy-Werts für niedrige Strömung und dem standardisierten Log-Alter mit (-1) x (-0.14) = 0.14.

**Tide\*LnAlter(1) = -0.14.**

ergibt sich als Produkt des Dummy-Werts +1 für tidefreie Gewässer dem standardisierten Log-Alter mit (1) x (-0.14) = -0.14.

**"StrömBin"\*"Säurefaktor" = 0.423**

ergibt sich als Produkt des Dummy-Werts für niedrige Strömung und dem Säurefaktor mit (-1) x (-0.423) = 0.423.

## **SCHÄTZWERT für $b_0$**

Wenn diese Werte in obige Regressionsgleichung eingesetzt werden, errechnet sich folgender Schätzwert für die Basisabrostung  $b_0$ :

$$\begin{aligned} 1.317 &= 1.160 - 0.142*(+1) + 0.9481*(-1) - 0.706*(-1) + 0.0255*(-1) - 0.392*(-1) + 0.1593*(-0.14) \\ &\quad + 0.3017*0.237 - 0.158*(-0.118) - 0.176*(-1)*(-0.14) + 0.1666*(+1)*(-0.14) \\ &\quad + 0.3647*(-1)*(-0.423) \end{aligned}$$

Mit einer höheren Stellenzahl wird vom Programm der Wert 1.316 berechnet.

### Schritt III

#### **BENÖTIGTE FAKTORWERTE**

Der **O<sub>2</sub>-Faktor**, der **Säurefaktor** und der Saisonfaktor "**SaisO<sub>2</sub>**" müssen vorher als Werte von Hauptkomponente aus den Gewässeranalysen berechnet werden.

#### 1. "O<sub>2</sub>-Faktor"

Dieser Gewässerfaktor wird aus den zugehörigen Koeffizienten der Linearkombination (**Tabelle A3-6**) berechnet:

Messgröße (standardisiert)	Salzfaktor	Säurefaktor	Schmutzfaktor	O <sub>2</sub> -Faktor
Wassertemperatur [°C]	-0.001	<b>0.1323</b>	0.376	<b>-0.0699</b>
pH-Wert	0.017	<b>0.3775</b>	0.014	<b>-0.1074</b>
Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/L]	0.121	<b>0.5141</b>	0.076	<b>0.1258</b>
spez. el. Leitfähigkeit [µS/cm]	-0.209	<b>-0.0609</b>	-0.049	<b>0.0471</b>
Redoxspannung Eh [mV]	0.041	<b>-0.1672</b>	0.058	<b>0.0131</b>
Sauerstoffkonzentration [mg/L]	0.149	<b>0.0455</b>	0.088	<b>-0.5185</b>
Chloridkonzentration [mg/L]	-0.213	<b>-0.0623</b>	-0.057	<b>0.0396</b>
NitratBin [< / > NWG]	0.181	<b>0.1181</b>	-0.023	<b>0.1851</b>
LnSulfat [mg/L]	-0.163	<b>0.0784</b>	0.020	<b>0.0119</b>
Calciumkonzentration [mg/L]	-0.181	<b>0.0083</b>	-0.044	<b>0.0411</b>
LnPhosphat [mg/L]	0.067	<b>0.1463</b>	0.495	<b>0.2793</b>
AmmoniumBin [< / > NWG]	0.069	<b>0.0396</b>	0.029	<b>0.5375</b>
Gel. org. Kohlenstoff (DOC) [mg/L]	0.043	<b>-0.2593</b>	0.538	<b>-0.2479</b>

Daraus ergibt sich für den O<sub>2</sub>-Faktor folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}
 \text{"O}_2\text{-Faktor"} &= -0.0699 \cdot \text{Wassertemperatur} - 0.1074 \cdot \text{pH-Wert} \\
 &+ 0.1258 \cdot \text{Säurekapazität} + 0.0471 \cdot \text{Leitfähigkeit} + 0.0131 \cdot \text{Redoxspannung} \\
 &- 0.5185 \cdot \text{Sauerstoffkonzentration} + 0.0396 \cdot \text{Chloridkonzentration} \\
 &+ 0.1851 \cdot \text{NitratBin} + 0.0119 \cdot \text{LnSulfat} + 0.0411 \cdot \text{Calciumkonzentration} \\
 &+ 0.2793 \cdot \text{LnPhosphat} + 0.5375 \cdot \text{AmmoniumBin} - 0.2479 \cdot \text{DOC}
 \end{aligned}$$

In diesem Ausdruck sind standardisierte Verhältnisse (**Wert-Mw**)/StdAbw von Originalwerten oder deren natürliche Logarithmen enthalten.

$$\begin{aligned}
 \text{"O}_2\text{-Faktor"} &= -0.0699 \cdot (\text{Wassertemperatur-Mw}) / \text{StdAbw} - 0.1074 \cdot (\text{pH-Wert-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &+ 0.1258 \cdot (\text{Säurekapazität-Mw}) / \text{StdAbw} + 0.0471 \cdot (\text{Leitfähigkeit-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &+ 0.0131 \cdot (\text{Redoxspannung-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &- 0.5185 \cdot (\text{Sauerstoffkonzentration-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &+ 0.0396 \cdot (\text{Chloridkonzentration-Mw}) / \text{StdAbw} + 0.1851 \cdot (\text{NitratBin-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &+ 0.0119 \cdot (\text{LnSulfat-Mw}) / \text{StdAbw} + 0.0411 \cdot (\text{Calciumkonzentration-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &+ 0.2793 \cdot (\text{LnPhosphat-Mw}) / \text{StdAbw} + 0.5375 \cdot (\text{AmmoniumBin-Mw}) / \text{StdAbw} \\
 &- 0.2479 \cdot (\text{DOC-Mw}) / \text{StdAbw}
 \end{aligned}$$

Die Kennwerte zur Standardisierung (**Tabelle A3-7**):

Messgröße	Mittelwert	Standardabweichung
Wassertemperatur [°C]	21.29	1.24
pH-Wert	8.04	0.43
Säurekapazität bis pH 4,3 [mmol/L]	2.34	0.43
spez. el. Leitfähigkeit [µS/cm]	15016.91	12579.31
Redoxspannung Eh [mV]	375.02	46.82
Sauerstoffkonzentration [mg/L]	8.84	1.42
Chloridkonzentration [mg/L]	7619.24	6292.54
NitratBin [< / > NWG]	0.41	0.50
LnSulfat [mg/L]	6.27	1.32
Calciumkonzentration [mg/L]	171.35	97.34
LnPhosphat [mg/L]	-1.73	0.76
AmmoniumBin [< / > NWG]	0.58	0.50
Gelöster org. Kohlenstoff (DOC) [mg/L]	4.22	2.11

können eingearbeitet und schließlich die Originalmesswerte eingesetzt werden:

$$\begin{aligned}
 0.252 = & -0.0699*(22.4-21.29)/1.24-0.1074*(8.125-8.04)/0.43+0.1258*(2.075-2.34)/0.43 \\
 & +0.0471*(17250-15016.9)/12579.3+0.0131*(388.8-375.0)/46.8 \\
 & -0.5185*(7.75-8.84)/1.42+0.0396*(7789.85-7619.2)/6292.5+0.1851*(0-0.41)/0.50 \\
 & +0.0119*(\ln(996)-6.27)/1.32 \\
 & +0.0411*(170.65-171.35)/97.34+0.2793*(\ln(0.085)+1.73)/0.76 \\
 & +0.5375*(1-0.58)/0.50-0.2479*(4.5-4.22)/2.11
 \end{aligned}$$

Mit einer höheren Stellenzahl wird vom Programm der leicht abweichende Wert 0.237 berechnet.

## 2. "Säurefaktor"(1)

Dieser Gewässerfaktor wird aus den zugehörigen Koeffizienten der Linearkombination (**Tabelle A3-6**, siehe oben) berechnet:

$$\begin{aligned}
 \text{"Säurefaktor"} = & 0.1323*\text{Wassertemperatur}+0.3775*\text{pH-Wert} \\
 & +0.5141*\text{Säurekapazität}-0.0609*\text{Leitfähigkeit}-0.1672*\text{Redoxspannung} \\
 & +0.0455*\text{Sauerstoffkonzentration}-0.0623*\text{Chloridkonzentration} \\
 & +0.1181*\text{NitratBin}+0.0784*\text{LnSulfat}+0.0083*\text{Calciumkonzentration} \\
 & +0.1463*\text{LnPhosphat} +0.0396*\text{AmmoniumBin} -0.2593*\text{DOC}
 \end{aligned}$$

In diesem Ausdruck sind standardisierte Verhältnisse (**Wert-Mw**)/**StdAbw** von Originalwerten oder deren natürliche Logarithmen enthalten. Die Kennwerte zur Standardisierung (**Tabelle A3-7**, siehe oben) werden eingearbeitet und:

$$\begin{aligned}
 -0.422 = & 0.1323 \cdot (22.4 - 21.29) / 1.24 + 0.3775 \cdot (8.125 - 8.04) / 0.43 + 0.5141 \cdot (2.075 - 2.34) / 0.43 \\
 & - 0.0609 \cdot (17250 - 15016.9) / 12579.3 - 0.1672 \cdot (388.8 - 375.0) / 46.8 \\
 & + 0.0455 \cdot (7.75 - 8.84) / 1.42 - 0.0623 \cdot (7789.85 - 7619.2) / 6292.5 + 0.1181 \cdot (0 - 0.41) / 0.50 \\
 & + 0.0784 \cdot (\ln(996) - 6.27) / 1.32 \\
 & + 0.0083 \cdot (170.65 - 171.35) / 97.34 + 0.1463 \cdot (\ln(0.085) + 1.73) / 0.76 \\
 & + 0.0396 \cdot (1 - 0.58) / 0.50 - 0.2593 \cdot (4.5 - 4.22) / 2.11
 \end{aligned}$$

Mit einer höheren Stellenzahl wird vom Programm der Wert -0.423 berechnet.

### 3. "SaisSäure"

Dieser Saisonfaktor wird als Wert einer Hauptkomponente vorher aus den standardisierten Verhältnissen der Sommer- und Winterwerte berechnet. Dazu werden die Koeffizienten der Linearkombination (**Tabelle A3-11b**) benötigt:

Messgröße [Sommerwert/Winterwert]	SaisonSalz	SaisonSäure	SaisonSchmutz	SaisonO2
SoWi-WasTemp	0.084	<b>0.210</b>	-0.726	-0.068
SoWi-pH	-0.073	<b>0.277</b>	-0.021	0.194
LnSoWi-Säurekap.	-0.033	<b>0.335</b>	-0.075	0.097
LnSoWi-Leitf	0.334	<b>0.008</b>	-0.180	0.040
SoWi-Redox	-0.176	<b>0.306</b>	0.148	-0.415
SoWi-O2	-0.076	<b>-0.035</b>	0.011	0.796
LnSoWi-Chlorid	0.295	<b>-0.128</b>	0.172	-0.031
LnSoWi-Sulfat	0.334	<b>0.016</b>	-0.041	-0.129
LnSoWi-Calcium	0.150	<b>0.438</b>	-0.348	-0.125
SoWi-DOC	-0.106	<b>0.021</b>	-0.376	0.081

Daraus ergibt sich für den Faktor der Säure-Saisonalität folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}
 \text{"SaisSäure"} = & 0.210 \cdot \text{SoWi-WasTemp} + 0.277 \cdot \text{SoWi-pH} \\
 & + 0.335 \cdot \text{LnSoWi-Säurekap} + 0.008 \cdot \text{LnSoWi-Leitf} + 0.306 \cdot \text{SoWi-Redox} \\
 & - 0.035 \cdot \text{SoWi-O2} - 0.128 \cdot \text{LnSoWi-Chlorid} + 0.016 \cdot \text{LnSoWi-Sulfat} \\
 & + 0.438 \cdot \text{LnSoWi-Calcium} + 0.021 \cdot \text{SoWi-DOC}
 \end{aligned}$$

In diesem Ausdruck sind standardisierte Verhältnisse (**Wert-Mw**)/**StdAbw** von Originalwerten oder deren natürliche Logarithmen enthalten. Die Kennwerte zur Standardisierung (**Tabelle A3-11c**):

Messgröße [Sommerwert/Winterwert]	Mittelwert	Standardabweichung
SoWi-WasTemp	8.01	2.89
SoWi-pH	1.02	0.06
LnSoWi-Säurekap.	0.24	0.44
LnSoWi-Leitf	0.14	0.44
SoWi-Redox	1.30	0.40
SoWi-O2	0.88	0.19
LnSoWi-Chlorid	0.50	0.52
LnSoWi-Sulfat	0.20	0.34
LnSoWi-Calcium	0.24	0.33
SoWi-DOC	0.54	0.29

können eingearbeitet und schließlich die Originalmesswerte eingesetzt werden:

$$\begin{aligned}
 -0.107 = & 0.210 \cdot (14 - 8.01) / 2.89 + 0.277 \cdot (0.98 - 1.02) / 0.06 + 0.335 \cdot (\ln(1.15) - 0.24) / 0.44 \\
 & + 0.008 \cdot (\ln(1.03) - 0.14) / 0.44 + 0.306 \cdot (0.93 - 1.3) / 0.4 - 0.035 \cdot (0.73 - 0.88) / 0.19 \\
 & - 0.128 \cdot (\ln(1.16) - 0.5) / 0.52 + 0.016 \cdot (\ln(1.05) - 0.2) / 0.34 + 0.438 \cdot (\ln(1.14) \\
 & - 0.24) / 0.33 + 0.021 \cdot (1.107 - 0.54) / 0.29
 \end{aligned}$$

Mit einer höheren Stellenzahl wird vom Programm der Wert -0.118 berechnet.

## **BENÖTIGTE KLASSIFIKATIONEN**

### **1. Stahlklasse**

Bauwerke mit Stahlspundwänden, die vor 1960 gefertigt wurden, gehören wahrscheinlich grundsätzlich zum Grobstaht (Bild A3-13 im Projektbericht). Danach ist eine Klassifikation aus Materialproben erforderlich, weil parallel zwei unterschiedliche Stähle hergestellt wurden. Da es zwei Stahlklassen gibt, werden zwei Klassifikationsfunktionen berechnet. Die Messwerte werden dann in die Klassifikationsfunktionen eingesetzt (**Tabelle A3-16**),

Messgröße [M-%]	Grobstaht	Feinstaht
C	48.0	83.3
LnSi	-4.6	-3.3
Cr	247.6	312.1
Mo	-73.3	534.0
LnSn	-11.8	-9.2
LnN	-13.7	-16.0
Konstante	-80.3	-88.8

d.h. mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert und dann zusammen mit der Konstante aufsummiert. Der höchste Klassifikationswert ergibt die Stahlklasse. Die Klassifikationsfunktionen lauten:





#### **Schritt IV**

Zur Schätzung der Abrostungswerte in 2 m Tiefe unter der mittleren Tideniedrigwasserlinie werden jetzt die Schätzwerte  $b_0 = 1.316$  und  $b_1 = 0.214$  in diese Tiefenfunktion eingesetzt (Prognosewerte in **Tabelle A3-43** und **A3-46**):

$$\begin{aligned} \text{Prognose:} \quad \text{Mittlere Abrostung [mm]} &= b_0 \times \exp(b_1 \times 2) \\ &= 1.316 \times \exp(0.214 \times 2) \\ &= \underline{2.019} \end{aligned}$$

Die aus Material- und Standortparametern geschätzte mittlere Abrostung an der Spundwand in 2 m Tiefe beträgt somit rund **2 mm**.

Aus örtlicher Ultraschallmessung ergab sich demgegenüber eine Tiefenfunktion mit den Parametern  $b_0 = 1.1$  und  $b_1 = 0.185$  (beobachtete Werte in **Tabelle A3-43** und **A3-46**). Daraus errechnet sich für 2 m Tiefe:

$$\begin{aligned} \text{Gemessen:} \quad \text{Mittlere Abrostung [mm]} &= b_0 \times \exp(b_1 \times 2) \\ &= 1.1 \times \exp(0.185 \times 2) \\ &= \underline{1.592} \end{aligned}$$

Die Abweichung zwischen obigem Schätzwert und örtlicher Messung beträgt also etwa **0.4 mm**.

# **Anlage 5**

## **Ein Vierteljahrhundert Spundwanddickenmessung bei der Bundesanstalt für Wasserbau**

**A. Heeling (Bundesanstalt für Wasserbau)**

Vortrag auf der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“, Berlin, 18.02.10

## Kurzfassung

Spundwände sind weit verbreitete Bauwerke im Wasserbau: sie sichern Geländesprünge in Häfen und an Wasserstraßen. Aufgrund korrosionsbedingter Wanddickenverluste ist die Nutzungsdauer von Spundwänden jedoch begrenzt. Für die Bauwerksbetreiber sind die Kenntnis des aktuellen Korrosionszustandes und die Prognose der Restnutzungsdauer deshalb von großem wirtschaftlichem Interesse.

Die Bundesanstalt für Wasserbau führt routinemäßig Spundwanddickenmessungen mit Ultraschall durch und entwickelt dabei kontinuierlich das Messverfahren und die Auswertung weiter.



*Bild A5-1: Spundwände in Häfen und an Wasserstraßen*

## 1. Einführung

In Häfen und an Wasserstraßen sind Stahlspundwände weit verbreitete Bauwerke zur Sicherung von Geländesprüngen. Als Folge von Abrostungen ist deren Nutzungsdauer jedoch begrenzt. Für die Betreiber solcher Anlagen ist die Kenntnis der Restspundwanddicke und der daraus abzuleitenden Restnutzungsdauer deshalb eine wichtige Planungsgrundlage. Da die Größe des korrosionsbedingten Wanddickenverlustes neben dem Alter der Spundwand auch von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängt (Milieubedingungen am Standort, Eigenschaften des Spundwandstahls), können Abrostungsraten, die in der Literatur angegeben werden, nur einen Anhaltspunkt bzgl. der zu erwartenden Nutzungsdauer einer Spundwand darstellen. Belastbare Aussagen lassen sich derzeit nur aus Ultraschallmessungen unmittelbar am Bauwerk ableiten.

Solche Messungen sind jedoch, z.B. aufgrund des erforderlichen Tauchereinsatzes, zeit- und kostenintensiv. Darüber hinaus existieren weder eingeführte bzw. genormte Verfahren bzgl. Methodik und Umfang von Spundwanddickenmessungen, noch wird auf dem freien Markt Standardsoftware zur Messdateneingabe, -pflege und -auswertung angeboten. Als Folge gibt es kaum private Anbieter, die qualitativ hochwertige Spundwanddickenmessungen durchführen.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) mit Hauptsitz in Karlsruhe und Dienststellen in Hamburg und Ilmenau ist die zentrale technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde zur Unterstützung der zum Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gehörigen Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Zu den Aufgaben der BAW gehört die Begutachtung, Beratung und anwendungsbezogene Forschung im Rahmen des Aus- und Neubaus, des Betriebs und der Unterhaltung der Bundeswasserstraßen.

Die WSV besitzt – anders als die meisten Betreiber (Gemeinden, Firmen) – eine Vielzahl von Spundwänden sowohl im Binnenland als auch an der Küste. Die BAW führt seit mehr als einem Vierteljahrhundert Wanddickenmessungen an diesen vielfältigen Bauwerken durch und verfügt damit über einen (vermutlich weltweit) einmaligen Informations- und Datenbestand. Fußend auf diesen Erfahrungen wird von der BAW sowohl die Durchführung als auch die Auswertung der Messungen kontinuierlich weiterentwickelt.

## 2. Problemstellung

Korrosion beeinflusst maßgeblich die Nutzungsdauer einer Spundwand. Ohne aufwändige Messungen vor Ort sind die Betreiber von Spundwandbauwerken bei der Prognose der Restnutzungsdauer auf Abrostungsraten aus der Literatur angewiesen. So wurden in den „Empfehlungen des Arbeitsausschusses *Ufereinfassungen*“ (EAU), ein Standardwerk im Wasserbau, bis 1990 [6] mittlere jährliche Abrostungen von 0,02 mm im Süßwasser, 0,12 mm in deutschen Seehäfen und 0,14 mm in wärmeren Gebieten angegeben.

Bereits Ende der 1980iger Jahre wies HEIN [10] auf Grundlage der Erfahrungen der BAW jedoch darauf hin, dass nicht von einer konstanten Abrostungsrate ausgegangen werden kann, sondern dass sich mit zunehmender Standzeit die jährliche Abrostung verringert: jüngere Spundwände rosten schneller als ältere. Doch selbst unter Berücksichtigung einer altersabhängigen Abrostungsrate zeigte sich, dass besonders im Küstenbereich viele Spundwandbauwerke aufgrund lokaler Durchrostungen bei Weitem nicht die erwartete Nutzungsdauer von ca. 50 bis 80 Jahren erreichten [3]. Dieses Phänomen ist für die Nutzer und Betreiber bei der Beurteilung des Korrosionszustandes einer Spundwand zu beachten.

## 3. Kennwerte der Korrosion

Die Beschreibung des aktuellen Korrosionszustandes und die Prognose der Restnutzungsdauer beziehen sich auf die beiden Grundfunktionen eines Spundwandbauwerkes:

- Auf eine Spundwand wirken horizontale Lasten aus Erd- und Wasserdruck. Bei korrosionsbedingt abnehmender Wanddicke kann es zu Spannungsüberschreitungen kommen. Zur Beurteilung der aktuellen **Standicherheit** ist die Kenntnis der aktuellen mittleren Restwanddicke erforderlich. Die Prognose der Restnutzungsdauer bzgl. der Standicherheit erfolgt über die mittlere Abrostungsrate (= [Ausgangswanddicke – mittlere Restwanddicke] / Standzeit).

- Eine Spundwand muss den Boden im Hinterfüllungsbereich zurückhalten. Als Folge von Durchrostungen kann es jedoch aufgrund von Wellen und Grundwasserströmung zu einem Ausspülen des Bodens, zur Bildung von Hohlräumen und schließlich zu Sackungen und Bodeneinbrüchen landseitig der Spundwand kommen. Zur Beurteilung der aktuellen **Gebrauchstauglichkeit** ist die Kenntnis der aktuellen minimalen Restwanddicke erforderlich. Die Prognose der Restnutzungsdauer bzgl. der Gebrauchstauglichkeit erfolgt über die maximale Abrostungsrate (= [Ausgangswanddicke - minimale Restwanddicke] / Standzeit).

Die Beschreibung des aktuellen Korrosionszustandes und die Prognose der Restnutzungsdauer einer Spundwand beruhen also auf diesen Kennwerten der Korrosion, d.h. auf der mittleren und minimalen Restwanddicke bzw. der mittleren und maximalen Abrostung und Abrostungsrate.

Seit 1996 wird dies auch in der EAU [7] berücksichtigt: es werden auf den BAW-Messergebnissen basierende Diagramme für die mittlere und die maximale Abrostung in den einzelnen Korrosionszonen und für Süß- und Meerwasser angegeben (Bild A5-2).

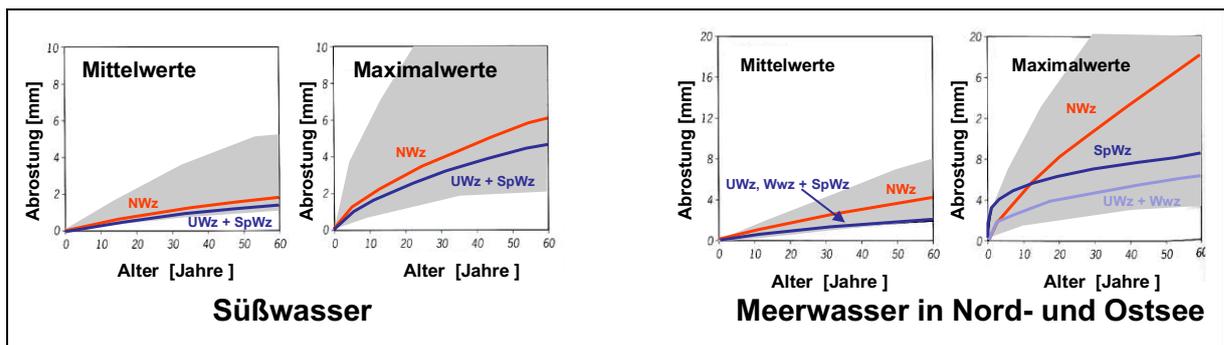


Bild A5-2: Korrosionsbedingte Wanddickenabnahme im Süß- und Meerwasser nach [7]

Spundwände rosten jedoch nicht gleichmäßig. Die Korrosion variiert aufgrund unterschiedlicher Korrosionseinflüsse selbst an einem einzelnen Bauwerk: von einer Spundbohle zur nächsten, längs der Bohlenhöhe sowie längs des Bohlenquerschnittes. Die Spundwandhöhe wird deshalb üblicherweise hinsichtlich Korrosionstypus und -intensität in unterschiedliche Zonen unterteilt: die Spritzwasserzone (SpWz in Bild A5-2 und 4), die Wasserwechselzone (WWz; in Gewässern mit Tideeinfluss), die Niedrigwasserzone (NWz; das ist der Bereich ca. 0,5 m über und 1,5 m – 2,0 m unter Mittelwasser, in der die intensivste Korrosion auftritt) sowie die Unterwasserzone (UWz). Die Kennwerte der Korrosion müssen damit für jedes Bauwerk für jede Korrosionszone bestimmt werden.

Die große Schwankungsbreite der Abrostungen (dargestellt als grauen Flächen in Bild A5-2) zeigt aber, dass auch die EAU-Diagramme nur eine grobe Schätzung der Nutzungsdauer einer Spundwand erlauben: Belastbare Aussagen erfordern Restwanddickenmessungen unmittelbar am Bauwerk.

## 4. Restwanddickenmessungen

Die Durchführung von Restwanddickenmessungen ist zeit- und kostenintensiv und muss oft unter schwierigsten Bedingungen erfolgen (Tauchereinsatz, strömendes bzw. trübes Wasser, Wellengang, Messeinsatz nahe stark frequentierter Hafenanlagen, Schleusen und in engen Wasserstraßen). Restwanddickenmessungen erfordern deshalb eine sorgfältige Vorbereitung, Durchführung und Auswertung.

### 4.1 Messgerät

Handelsübliche Ultraschallgeräte mit ausschließlich digitaler Anzeige sind für die Wanddickenmessung an Stahlspundwänden im Wasserbau nicht geeignet. Die BAW verwendet ein *Universal-Ultraschall-Messinstrument* mit folgenden Eigenschaften ([1], [2], [5]; s. Bild A5-3):

- Digitalanzeige zum direkten Ablesen des Messwertes,
- Oszilloskop zur visuellen Kontrolle der Messwert-Qualität,
- Stoßwellenprüfkopf, der die Berechnung der Wanddicke aus der Laufzeitverzögerung zweier aufeinanderfolgender Schallimpulse erlaubt,
- von der BAW entwickelter Spezialadapter zur Gewährleistung eines bekannten Wasserlaufes.

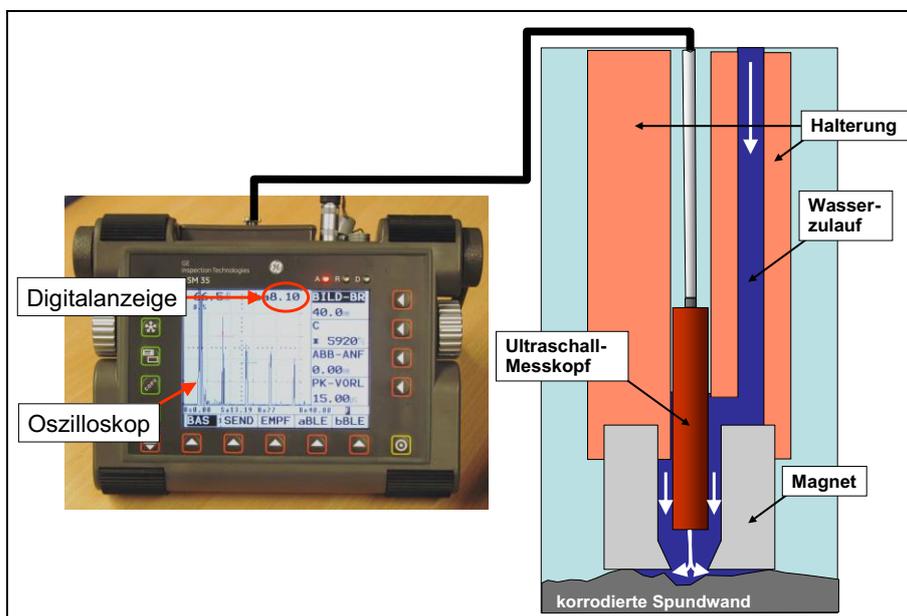


Bild A5-3: Universal-Ultraschall-Messinstrument

Die erzielte Messgenauigkeit liegt i.d.R. unter 0,1 mm ([2], [5]), was in Anbetracht der Unsicherheiten bzgl. der Ausgangswanddicke (z.B. aufgrund von Walztoleranzen), die bei Spundwänden im Wasserbau meist zwischen 6 mm und 20 mm liegt, ausreichend ist.

Der Einsatz eines Universal-Ultraschall-Messinstrumentes setzt jedoch eine relativ glatte Stahloberfläche voraus. Deshalb müssen die Messpunkte zunächst mittels Nadelhammer, Flex oder Sandstrahlung sorgfältig gereinigt werden.

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

#### 4.2 Auswahl und Anzahl der Messpunkte

Um einen aussagekräftigen Datenbestand zur Beurteilung des aktuellen Korrosionszustandes zu erhalten, sollten bei einem Spundwandbauwerk von ca. 500m Länge die Restwanddicken an ca. 10 bis 12 gleichmäßig über das Bauwerk verteilten Spundbohlen über die gesamte Höhe – also über und unter Wasser – gemessen werden. Die Tabelle in Bild A5-4 listet die Anzahl und den Abstand der je Spundwandbohle zu messenden Messquerschnitte auf. Je Messquerschnitt sollte im Bereich von Bohlenberg und -tal sowie auf den Flanken, jeweils berg- und talseitig, je eine Messpunkt-Fläche von ca. 10cm x 10cm mit jeweils maximal 6 Einzelmesswerten gemessen werden.

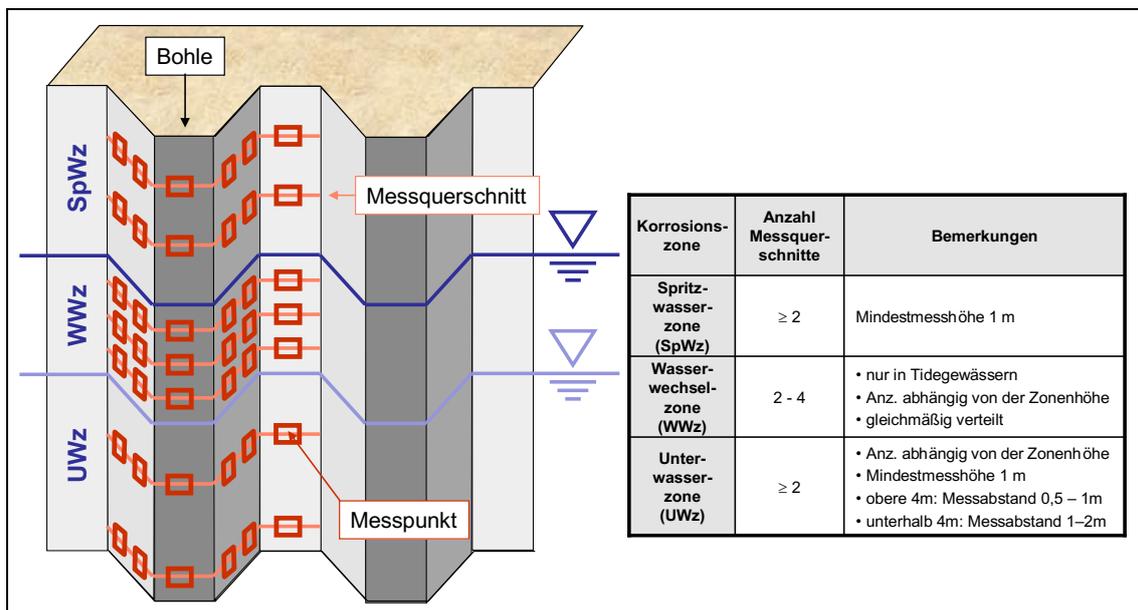


Bild A5-4: Messpunkte an einer Spundwand

Für eine aussagekräftige Beurteilung des Korrosionszustandes sind pro Bauwerk und Korrosionszone insgesamt mindestens 100 Einzelmesswerte erforderlich. In Abhängigkeit von der Höhe der Korrosionszone an der Spundwand kann auch eine größere Anzahl von Einzelwerten (bis zu 500) sinnvoll sein. Führt das beschriebene Messprogramm zu weniger als 100 Werten je Korrosionszone (z.B. bei sehr kurzen Spundwänden), so ist es nicht sinnvoll, mehr Einzelwerte an einem Messpunkt zu erheben oder den Höhenabstand zwischen den Messpunkten zu verringern.

gern. Für eine bessere Aussagekraft sollte hingegen die Anzahl der untersuchten Einzelbohlen erhöht werden.

Diese Empfehlungen sind das Ergebnis einer statistischen Analyse der BAW-Datenbank *WaDiMe* (*Wanddickenmessung*), die im Rahmen des EU-Forschungsprojektes *Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour* [8] 2001 – 2004 durchgeführt wurde. Die Datenbank *WaDiMe* umfasst die Ergebnisse der Restwanddickenmessungen seit 1982 an inzwischen ca. 420 Bauwerken mit über 420.000 Einzelwerten.

### 4.3 Auswertung

Die Restwanddicken einer Messkampagne werden je Spundbohle und Messpunkt höhengerecht dargestellt (Bild A5-5, rechts). Die Gesamtheit aller Restwanddickenprofile vermittelt einen guten Überblick über den Korrosionszustand des Bauwerkes. Darüber hinaus werden weitere Profile erstellt, bei denen zusammenfassend für das gesamte Bauwerk die Restwanddicken, die Abrostungen und die Abrostungsraten aufgetragen werden.

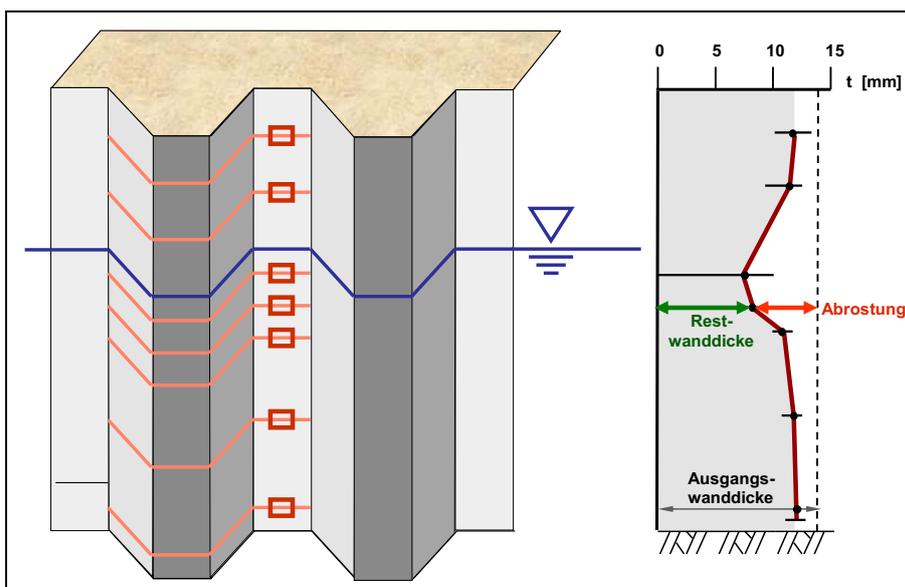


Bild A5-5: Restwanddickenprofil

Zur Ermittlung der Korrosionskennwerte, also der mittleren und der maximalen Abrostung, ist jedoch – über die rein zeichnerische Darstellung der Originalmesswerte hinaus – eine statistische Auswertung der Daten erforderlich.

Frühere Untersuchungen der BAW [9] haben gezeigt, dass die Restwanddicken eines Spundwandbauwerkes pro Korrosionszone lognormalverteilt sind. Deshalb lässt sich die **mittlere Abrostung** aus dem Erwartungswert der Lognormalverteilung der Einzelmesswerte einer Korrosionszone berechnen.

Die tatsächliche minimale Restwanddicken bzw. die **maximale Abrostung** wird bei einer Spundwanddickenmessung in der Regel nicht erfasst: oft treten nur wenige kleine Löcher oder tiefe Mulden auf der ansonsten glatten Stahloberfläche auf, die dann – unter Rost und Bewuchs verborgen – nicht registriert werden. Untersuchungen der BAW Mitte der 1990er Jahre [4] haben jedoch gezeigt, dass sich die maximale Abrostung aus den Einzelwerten einer Messkampagne gut mittels der Formel für das Obere Toleranzintervall

$$\text{Oberes Toleranzintervall } T_0 = e^{\bar{x}_{\ln} + k_{n,p;(1-\alpha)} \cdot s_{\ln}} \quad (1)$$

berechnen lässt. Ist die berechnete maximale Abrostung größer als die Ausgangswanddicke, so ist mit Durchrostungen zu rechnen, auch wenn im Rahmen der Bauwerksinspektion (noch) keine Löcher gefunden wurden.

Die maximale Abrostung des Gesamt-Spundwandbauwerkes entspricht der der Niedrigwasserzone, wo grundsätzlich die höchsten Abrostungen auftreten. Dieses Verfahren wird seit Jahren von der BAW angewendet und hat sich in der Praxis bewährt. Es hat jedoch einen Nachteil: die genaue Festlegung der Niedrigwasserzone ist rein subjektiv.

Als Ergebnis des o.g. EU-Projektes [8] wird eine praktikable Methode vorgestellt, um die Kennwerte der Korrosion objektiver als bisher aus den Messwerten ableiten zu können. Abweichend von der gängigen Praxis (z.B. [7], s.a. Bild A5-6, links) wird die Niedrigwasserzone nicht mehr als eigenständige Korrosionszone betrachtet (und wurde deshalb in der Tabelle in Bild A5-4 nicht dargestellt).

Stattdessen wird die Spundwand längs ihrer Höhe in folgende, eindeutig definierte Korrosionszonen unterteilt (s. Bild A5-6, rechts, für ein Gewässer ohne Tideeinfluss):

- die *Spritzwasserzone* oberhalb Mittelwasser (MW) bzw. Mittlerem Tidehochwasser (MThw),
- in Tidegewässern die *Wasserwechselzone* zwischen MThw und Mittlerem Tideniedrigwasser (MTnw) sowie
- die *Unterwasserzone* unterhalb MW bzw. MTnw.

Innerhalb einer Korrosionszone sind die Abrostungen jedoch nicht konstant; vielmehr besteht eine Tiefenabhängigkeit, die sich als Exponentialfunktion darstellen lässt:

$$\text{Mittlere Abrostung} = b_n \cdot e^{b_m \cdot \text{Tiefe}} \quad (2)$$

$$\text{Maximale Abrostung} = b_x \cdot e^{b_y \cdot \text{Tiefe}} \cdot e^{s_{\ln} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}} \quad (3)$$

mit: *Tiefe* bezogen auf die die jeweilige Korrosionszone definierende Wassertiefe  
 $s_{\ln}$  = Standardabweichung der logarithmierten Daten  
 $n$  = Anzahl der Daten

Die Regressionskoeffizienten  $b_x$  und  $b_y$  der Formeln (2) und (3) lassen sich mittels einer Regressionsanalyse aus den Einzelwerten einer Restwanddickenmessung pro Korrosionszone ermitteln. Bild A5-6 zeigt, dass die Exponentialfunktion der Abrostungen in der Unterwasserzone (rote, gestrichelte Linie) auch die hohen Abrostungen im zuvor als *Niedrigwasserzone* gekenn-

zeichneten Tiefenbereich zutreffend wiedergibt und dass deshalb eine weitere Unterteilung der Zone unterhalb von MW bzw. MTnw weder erforderlich noch sinnvoll ist.

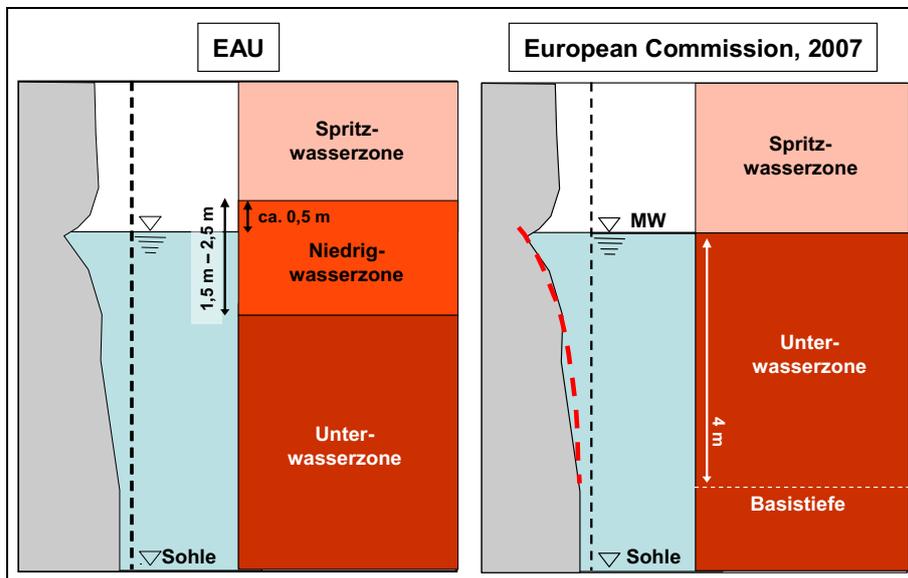


Bild A5-6: Neufestlegung der Korrosionszonen

Die statistische Auswertung der BAW-Datenbank WaDiMe ergab jedoch auch, dass allgemein bei Spundwänden ab der sogenannten *Basistiefe* von 4 m unter MW bzw. MTnw keine Tiefenabhängigkeit der Abrostungen mehr feststellbar ist (s.a. Bild A5-6).

## 5. Milieubeprobung

Da sich die Verteilung der Abrostungen entspr. Formeln (2) und (3) als Exponentialfunktion je Korrosionszone beschreiben lässt, müssten sich die Regressionskoeffizienten dieser Formeln ( $b_x$  und  $b_y$ ) nicht nur aus den Daten einer Restwanddickenmessung sondern auch aus den Ergebnissen einer Milieubeprobung ableiten lassen.

Im Rahmen des o.g. EU-Projektes [8] wurden dazu an etwa 40, gezielt aufgrund ihrer Standorteigenschaften ausgewählten Bauwerken Restwanddickenmessungen durchgeführt und dort zusätzlich eine Vielzahl von Parametern bestimmt, die sich grundsätzlich drei Gruppen zuordnen lassen:

- exogene Faktoren (z.B. die physiko-chemischen Eigenschaften des Immersionsmediums Wasser, die mechanische Beanspruchung der Spundwand infolge Fenderreibung, Eisgang oder Wellen sowie mikrobiologische Prozesse),
- endogene Faktoren (z.B. die physiko-chemischen Eigenschaften des Spundwandstahls) und
- dynamische Faktoren (z.B. Korrosionsprodukte).

Das Abrostungsverhalten einer Spundwand lässt sich aufgrund der komplexen Beziehungen zwischen exogenen und endogenen Faktoren nicht in Form einer homogenen Altersfunktion

abbilden: so ist z.B. die Basisabrostung  $b_0$  (d.h. die tiefenunabhängige Abrostung in der Unterwasserzone ab 4 m unter MW, s. Bild A5-6) in Bereichen mit Strömung unabhängig vom Spundwandalter.

Deshalb wurde eine multifaktorielle Analyse durchgeführt, um so die vielschichtigen Wechselwirkungen der Einflussparameter untereinander und in Abhängigkeit von der Korrosionszone berücksichtigen zu können: die meisten Parameter wirken nicht einheitlich korrosionshemmend oder -fördernd.

Im Ergebnis wurden folgende korrosionsrelevanten Parameter ermittelt und z.T. zu Clustern zusammengefasst:

- Bauwerksalter, Tide, Wasserströmung
- Stahlmaterial: Grob- und Feinstahl
- Wassermilieu: limnisch, limnisch-brackisch, brackisch, brackisch-marin
- Korrosionsfaktoren: Säure-,  $O_2$ -, Salz- und Schmutz-Faktor
- Jahreszeitliche Unterschiede: Säure-,  $O_2$ -, Salz- und Schmutz-Saisonalität

Darüber hinaus wurden Formeln zur Berechnung der Regressionskoeffizienten  $b_x$  und  $b_y$  für die einzelnen Korrosionszonen aufgestellt. Deren Anwendung erfordert es jedoch, Beobachtungswerte im Vorwege zu transformieren und/oder zu codieren. Für die Basiskorrosion  $b_0$  gilt z.B. folgende Formel, die jedoch erst nach einer Vielzahl von Zwischenschritten tatsächlich eine Berechnung der Abrostung erlaubt:

$$\begin{aligned} b_0 = & 1,160 - 0,142 \cdot \text{"Stahl"("Grobstahl")} + 0,9481 \cdot \text{"Wasser"("limnisch")} \\ & - 0,706 \cdot \text{"Wasser"("limnisch-brackisch")} + 0,0255 \cdot \text{"Wasser"("brackisch")} \\ & - 0,392 \cdot \text{"Strömung_binär"("hoch")} + 0,1593 \cdot \ln\_Alter + 0,3017 \cdot \text{"O}_2\text{-Faktor"} \\ & - 0,158 \cdot \text{"Säure-Saisonalität"} - 0,176 \cdot \text{"Strömung_binär"} \cdot \ln\_Alter(\text{Tab.wert}) \\ & + 0,1666 \cdot \text{"Tide"} \cdot \ln\_Alter(\text{Tabellenwert}) + 0,3647 \cdot \text{"Strömung_binär"} \cdot \text{"Säure-Faktor"}(\text{Tab.wert}) \end{aligned}$$

Auf diese Weise lässt sich derzeit die Mittlere Abrostung aus den Standort- und Bauwerkseigenschaften eines Spundwandbauwerkes je Korrosionszone mit einer erklärten Varianz von etwa 80 % prognostizieren.

## 6. Ausblick

In den letzten drei Jahren wurde das Hauptaugenmerk der BAW auf die Weiterentwicklung der Datenbankanwendung WaDiMe gelegt, da diese die Grundlage für die Auswertung der im Auftrag der WSV regelmäßig durchzuführenden Spundwanddickenmessungen darstellt. Diese Arbeit wird auch in Zukunft den Großteil unserer Kapazitäten beanspruchen.

Gleichzeitig wurden und werden alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung auf ihre Praxistauglichkeit hin geprüft und bewertet.

Zukünftig ist geplant, das modifizierte Berechnungsverfahren zur Abschätzung der charakteristischen Werte der Korrosion aus den gemessenen Restwanddicken sowie das Prognosemodell

zur Abschätzung der charakteristischen Werte der Korrosion aus Milieuparametern in WaDiMe zu implementieren und zu dokumentieren. Langfristig müsste es damit in Kenntnis der Standortigenschaften möglich sein, Spundwandbauwerke von vorn herein so zu planen, dass möglichst geringe Abrostungen zu erwarten sind.

Weiterhin ist geplant, eine detaillierte Beschreibung zur fachgerechten Durchführung und Auswertung von Ultraschall-Messungen zu erarbeiten.

## Referenzen

- [1] ALBERTS, D. (1987): Wanddickenmessungen an Stahlspundwänden. Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 60, Karlsruhe
- [2] ALBERTS, D. (1991): Ultraschallmessungen an stark korrodierten Stahlspundwänden. Hansa, 128. Jahrg., Nr. 3 – 4
- [3] ALBERTS, D., EIBFELDT, F. & SCHUPPENER, B. (1986): Beurteilung lter Spundwandbauwerke an den norddeutschen Küsten. Vortrag auf der Baugrundtagung der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 22. – 24.09.1986, Nürnberg
- [4] ALBERTS, D. & HEELING, A. (1997): Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden. Statistische Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 75, Karlsruhe
- [5] ALBERTS, D. & SCHUPPENER, B. (1991): Comparison of ultrasonic probes from the measurement of the thickness of sheet pile walls. Field measurements in geotechnics (FMGM 1991, Oslo), Sørum (ed.), Balkema, Rotterdam
- [6] EAU (1990): Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen", Häfen und Wasserstraßen – EAU 1990. 8. Auflage, Hrsg.: Arbeitsausschuß „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin
- [7] EAU (1996): Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen", Häfen und Wasserstraßen – EAU 1996. 9. Auflage, Hrsg.: Arbeitsausschuß „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [8] EUROPEAN COMMISSION (2007): Technical research. Steel products and applications for building, construction and industry. Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Contract No 7210-PR/317
- [9] HEIN, W. (1986): Über das Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden im Mittellandkanal. Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 59, Karlsruhe
- [10] HEIN, W. (1989): Korrosion von Stahlspundwänden im Wasser. Hansa, 126. Jahrg., Nr. 3 – 4



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)