

ZUR KORROSION VON STAHLSPUNDWÄNDEN
IN WASSER

On the corrosion of sheet pilings
in waters



Wolfgang Hein, Dr. rer. nat. Oberregierungsrat in der Bundesanstalt für Wasserbau bis 1989.

Geboren 1926, Chemiestudium an der Universität Mainz von 1949 bis 1958, Institut für Gießereitechnik Düsseldorf von 1958 bis 1962, Institut für Reaktorbauelemente der Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe von 1962 bis 1970, in der Bundesanstalt für Wasserbau von 1970 - 1989.

Neben Veröffentlichungen in den ersten beiden Instituten Veröffentlichungen in der BAW vorwiegend auf dem Gebiet der Korrosion im Wasser und an wetterfesten Stählen.

Inhaltsangabe

Es wird gezeigt, daß bei der Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser die Abrostung nicht linear mit der Zeit zunimmt sondern einer Potenzfunktion folgt; d. h. die Korrosionsrate nimmt mit der Standzeit ab. Aufgrund einer Vielzahl von Messungen kann im Süßwasser die zu erwartende maximale Abrostung recht gut abgeschätzt werden. Auch bei der Korrosion im Brackwasser des deutschen Küstengebietes läßt sich die maximale Abrostung befriedigend abschätzen, während im Meerwasser die Werte ortsabhängig stark schwanken und nur eine grobe Abschätzung möglich ist.

Summary

This paper shows that the corrosion of sheet pilings in waters does not grow linearly with the time, i.e. the corrosion rate decreases. A lot of measurements existing for fresh water makes it possible to fairly well estimate the maximum corrosion rate to be expected. Nearly the same goes for brackish waters of the German coastal area, while for sea-water the measuring results differ very much dependent on local conditions so that only rough estimations of the maximum corrosion rate are possible.

<u>INHALT</u>	Seite
Teil 1 Allgemeines zur Korrosion von Stahl in Wasser	3
1 Einleitung und Veranlassung	3
2 Der zeitliche Verlauf der Korrosion	4
3 Korrosion im Emden Hafen	5
4 Messung von Spundwänden	7
4.1 Dickenmessung mit Ultraschall	8
4.2 Unsicherheiten der Dickenmessungen	9
4.3 Korrosionsprofile	11
Teil 2 Süßwasser	12
5 Korrosion in Süßwasser	12
5.1 Mittellandkanal	13
5.2 Andere Gewässer	14
6 Folgerungen für den Bau von Stahlspundwänden in Süßwasser	19
Teil 3 Brack- und Meerwasser	21
7 Korrosion in Brack- und Meerwasser	21
7.1 Brackwasser: Nordseeküste	21
7.2 Meerwasser: Nordsee	25
7.3 Meerwasser: Ostsee	28
7.4 Ostfriesische Sielhäfen	29
8 Diskussion der Ergebnisse	30
8.1 Zeitabhängigkeit der Korrosionsrate	30
8.2 Ortsabhängigkeit der Korrosionsrate	30
8.3 Größe der Korrosionsrate	31
9 Folgerungen für den Bau von Stahlspundwänden in Brack- und Meerwasser	31
10 Zusammenfassung	33
11 Weiteres Vorgehen	34
12 Literatur	35
13 Meßberichte (unveröffentlicht)	36

Teil 1 Allgemeines zur Korrosion von Stahl im Wasser

1 Einleitung und Veranlassung

Im Wasserbau werden in großem Umfang Stahlspundbohlen eingesetzt. Für den Süßwasserbereich seien nur die Einfassungen der Ufer von schiffbaren Flüssen und Kanälen mit Stahlspundwänden erwähnt. Aber auch im Brackwasser, z. B. in Häfen der deutschen Nord- und Ostseeküste oder im Meerwasser, wie es an den der Küste vorgelagerten Inseln angetroffen wird, gelangen Stahlspundbohlen bei den Hafengebiefestigungen wie Molen, Kaianlagen usw. zum Einsatz.

Abgesehen von den statischen Anforderungen, die an die Spundwände zu richten sind, ist bei der Planung für die vorgesehene Lebens- bzw. Gebrauchsdauer die von der Natur des jeweiligen Wassers abhängige Korrosion bei der Wahl des Spundwandprofils zu berücksichtigen.

Oft kann beim Bau einer Spundwand aus der Abrostung an einer benachbarten Anlage auf die zu erwartende Korrosion geschlossen werden. In anderen Fällen lassen sich Literaturstellen für die Abschätzung der Korrosion heranziehen. So werden als Planungsgrundlage bei der Errichtung von Stahlspundwänden häufig die Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" (EAU 1985) /1/, die beispielhaft auch für andere Literaturstellen in diesem Zusammenhang angeführt seien, herangezogen. Hierin ist unter 8.1.10.1 "Korrosion im Süßwasser" beschrieben:

"Stahlspundwände haben sich in Süßwasser seit Jahrzehnten bewährt, sofern sie weder Sandschliff noch chemischen Angriffen ausgesetzt sind. Ein besonderer Schutz ist dann im Süßwasser nicht nötig, da z.B. in Deutschland nur eine mittlere Schwächung von 0,012 mm im Jahr auf der Wasserseite festgestellt worden ist. Die Korrosion verteilt sich im Süßwasser fast gleichmäßig über die gesamte freie Spundwandhöhe."

Weiter ist unter 8.1.10.2 "Korrosion in aggressivem Wasser und in Seewasser" u.a. aufgeführt:

"...Bei starker Korrosion in Seewasser kann in wärmeren Gebieten auf der Wasserseite mit einer jährlichen Schwächung in der Hauptangriffszone um im Mittel 0,14 mm, in deutschen Seehäfen um 0,12 mm gerechnet werden. Ungünstige Verhältnisse können die Korrosion mehr als verdoppeln"

Alberts, Eißfeldt und Schuppener /2/ berichteten auf der Baugrundtagung 1986 in Nürnberg über die Beurteilung alter Spundwandbauwerke an den norddeutschen Küsten. Sie weisen darauf hin, daß "neue Spundwände schneller korrodieren als ältere". Aufgrund eigener Messungen und anderer, neuerer Veröffentlichungen kommen sie ferner zu dem Schluß, daß an den norddeutschen Küsten mit erheblich höheren Abrostungen gerechnet werden muß als die einschlägigen Handbücher wie z.B. die bereits erwähnten Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" /1/, das Grundbau Taschenbuch /3/ oder das Spundwand Handbuch /4/ angeben.

Morley und Bruce /5/ haben in einer Arbeit Wanddickenmessungen an einer großen Anzahl von Spundwänden in Meerwasser ausgewertet. Für die Niedrigwasserzone, die in ihrem Bericht die Zone stärkster Korrosion ist, geben sie für das Vereinigte Königreich

(Großbritannien) eine Korrosionsrate von	0,18 mm/a
Zypern	0,16 mm/a
Vereinigte Arabische Emirate	0,13 mm/a

an. Wijngaard /6/ fand im Bereich der niederländischen Küste in der "Gezeiten- und Spritzzone", d. h. in dem Bereich stärkster Abtragung, Korrosionsraten von 0,12 mm/a bis 0,27 mm/a.

In einer Studie der Public Works Canada /7/ wird in der Zusammenfassung der Entwurfskriterien für den Bereich maximaler Abrostung zwischen - 1,0 und + 1,0 m, bezogen auf den Bemessungswasserspiegel, eine Korrosionsrate von 0,25 mm/a zugrunde gelegt.

Bei der Bundesanstalt für Wasserbau wurden bzw. werden seit 1967 Wanddickenmessungen mit Ultraschall an Stahlspundwänden in Flüssen und Kanälen sowie im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste durchgeführt. Mit den vorhandenen Daten soll im vorliegenden Bericht drei Fragen nachgegangen werden.

1. Sind die Korrosionsraten zeitabhängig?
2. Sind die Korrosionsraten ortsabhängig?
3. Sind die in den Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" (EAU 1985) /1/ für den Bereich des Süßwassers und im aggressiven Wasser und Seewasser angeführten Korrosionsraten nach den vorliegenden Erkenntnissen noch zutreffend?

2 Der zeitliche Ablauf der Korrosion

Bei der flächenhaften, ungestörten Korrosion in der Atmosphäre verringert sich aufgrund der mehr oder weniger diffusionshemmenden Wirkung der sich aufbauenden, oxidischen Deckschicht der Korrosionszuwachs in Abhängigkeit von der Zeit. In Bild 1 ist als Beispiel der Verlauf einer ungestörten Korrosion dargestellt. Wie von Schwenk und Ternes /8/, Becker, Dhingra und Thoma /9/ und Bohnenkamp, Burgmann und Schwenk /10/ beschrieben, folgt dieser Kurvenverlauf der atmosphärischen Korrosion der Gleichung

$$G = c \times t^n$$

wobei

- G die Gewichts- oder Dickenabnahme
- c die jeweilige Korrosionskonstante
- t die Standzeit und
- n der Anstieg der Kurve ist.

Der Korrosionszuwachs verringert sich pro Zeiteinheit mit steigender Standzeit. Diese differentielle Massenverlust- bzw. Korrosionsrate läßt sich in der Praxis nur schwer ermitteln /8/, da dafür eine Vielzahl von Messungen erforderlich wäre. Günstiger ist die Bestimmung der integralen Korrosionsrate - im folgenden nur als Korrosionsrate bezeichnet. Sie errechnet sich aus dem Gesamtmassenverlust bezogen auf die Standzeit, entspricht also dem Anstieg, d. h. dem Tangens der Geraden vom Ausgangspunkt zur jeweiligen Gesamtabrostung. Mit steigender Standzeit wird der Anstieg kleiner.

Die o.a. Gleichung für die Korrosion stellt sich in ihrer logarithmischen Form

$$\lg G = \lg c + n \lg t$$

als lineare Funktion dar. In doppel-logarithmischem Maßstab liegen demnach

die Korrosions- bzw. Massenverluste, aber auch die Korrosionsraten auf Geraden.

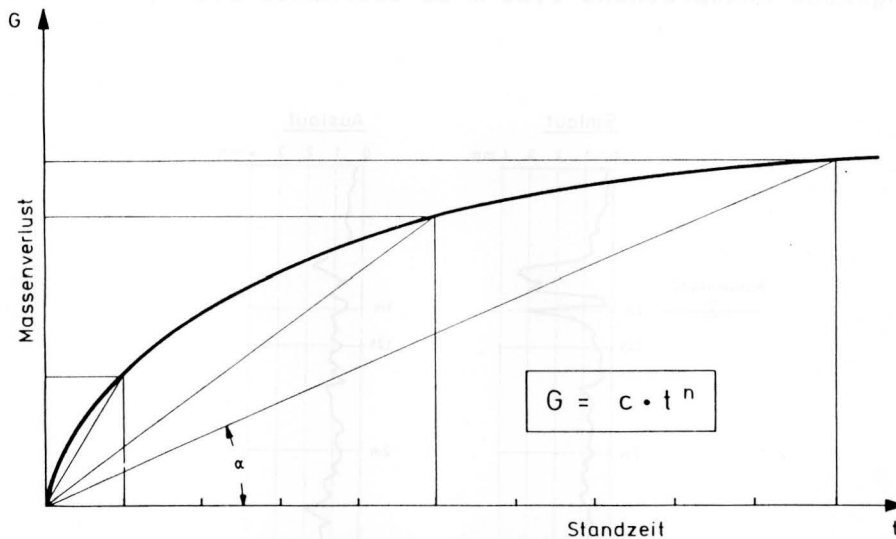


Bild 1: Korrosionsverlauf und Korrosionsrate: $\operatorname{tg} \alpha = G : t$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, daß die Korrosion und auch die Korrosionsrate zeitabhängig und daher bei Angaben dieser Größen immer auf die Standzeit zu beziehen ist. Da in einem Gewässer sich trotz der gegenüber der Atmosphäre unterschiedlichen Korrosionsbedingungen eine Deckschicht bilden kann, ist damit zu rechnen, daß die ungestörte Korrosion auch im Wasser der genannten Korrosions-Zeitgleichung folgt.

3 Korrosionsversuche im Emdrer Hafen

Während es bei Korrosionsversuchen in der Atmosphäre ausreicht, kleine Blechtafeln auszulagern, ist das bei der Korrosion im Wasser nicht aussagekräftig. In einer Arbeit der HTG /11/ wird darauf hingewiesen, daß kleine, in verschiedenen Tiefen ausgelagerte Bleche keinen Vergleich mit über die gesamte Wassertiefe durchgehenden Bauteilen z.B. Spundwänden zulassen. Bei Auslagerungsversuchen im Wasser müssen daher die eingesetzten Profile vom Überwasserbereich bis zur Sohle reichen.

Das zwischen schwach versalztem Flußwasser (oligohaline Zone) mit 0,5 - 5 % Salz und Küstenbrackwasser (polyhaline Zone) mit 18 bis 30 % Salz stark schwankende Emdrer Hafenwasser wird von den Nordwestdeutschen Kraftwerken zur Kühlung benutzt. Zwischen dem Kühlwassereinlauf, d.h. der Entnahmestelle aus einem Hafenbecken des neuen Binnenhafens und dem Auslauf des aufgewärmten Kühlwassers in den Industriehäfen besteht eine mittlere Temperaturdifferenz von 4,6 K bei sonst gleicher Wasserzusammensetzung und gleichem absoluten Sauerstoffgehalt. Hein und Klein /12/ führten in den Jahren 1974 bis 1980 eine Untersuchung über den Temperatureinfluss auf das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl durch. Die am Ein- und Auslauf eingesetzten, über die ganze Länge auf 0,1 mm genau vermessenen Probebleche reichten von 1 m über dem Wasserspiegel bis zur Hafensohle. Bei der Entnahme nach 1, 2, 4 und 6 Jahren wurden die nach dem Abbeizen der Rostschicht verbliebenen Restdicken je cm mehrfach bestimmt und gemittelt. In Bild 2 sind die Korrosionsprofile (beidseitige Abrostung einseitig aufgetragen) nach sechsjähriger Auslagerung wiedergegeben. Um die Unterwasserkorrosion beider Profile vergleichen zu können, wurde bei allen entnom-

menen Blechen die Abrostung von 0,25 m unter dem Wasserspiegel d. h. unter der Belüftungszone entsprechend 1,25 m ab Oberkante bis 4,50 m ab Oberkante gemittelt.

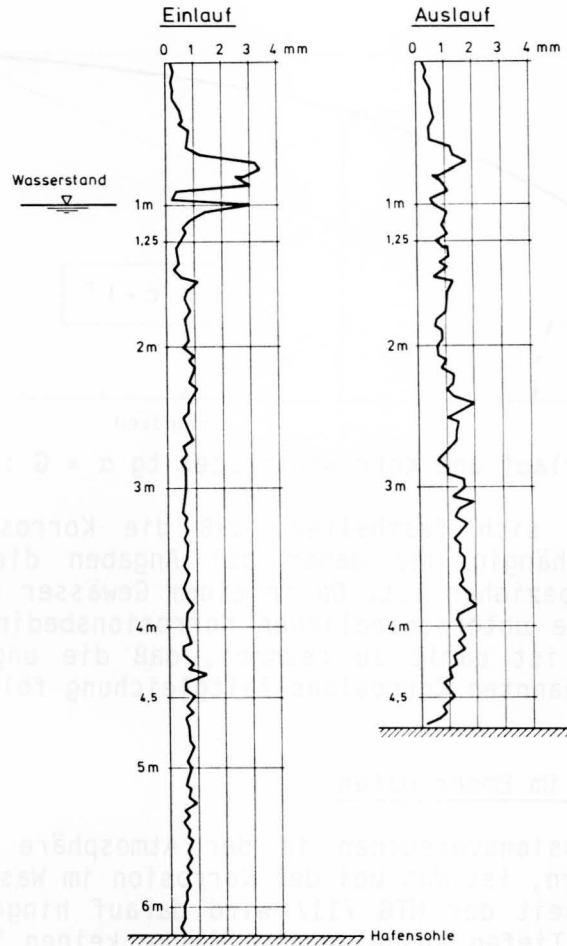


Bild 2: Korrosionsprofile nach 6jähriger Auslagerung im Emden Hafen

Aus Tabelle 1 geht deutlich die Verlangsamung der Korrosion mit der Zeit und damit die Abnahme der Korrosionsrate hervor.

Tabelle 1: Mittlere Abrostung und Korrosionsraten der im Emden Hafen ausgelagerten Bleche unterhalb der Belüftungszone

Dauer der Auslagerung	Mittlere Abrostung		Korrosionsrate	
	Einlauf	Auslauf	Einlauf	Auslauf
1 Jahr	400 μm	380 μm	400 $\mu\text{m/a}$	380 $\mu\text{m/a}$
2 Jahre	480 μm	590 μm	240 $\mu\text{m/a}$	295 $\mu\text{m/a}$
4 Jahre	610 μm	960 μm	154 $\mu\text{m/a}$	240 $\mu\text{m/a}$
6 Jahre	680 μm	1190 μm	113 $\mu\text{m/a}$	198 $\mu\text{m/a}$

In Bild 3 sind die gemittelten Abrostungen gegen die Auslagerungszeit aufgetragen. Die Abrostungskurven ähneln den aus der atmosphärischen Korrosion bekannten Kurvenzügen. Die zitierte Feststellung, daß "neue Spundwände schneller korrodieren als ältere", wird bestätigt, d. h. zum Beginn der

Standzeit tritt eine stärkere Korrosion auf als nach längerer Standzeit. Demnach gilt auch für die Korrosion in stehendem oder schwach fließendem Wasser die bereits erwähnte Korrosions-Zeitgleichung.

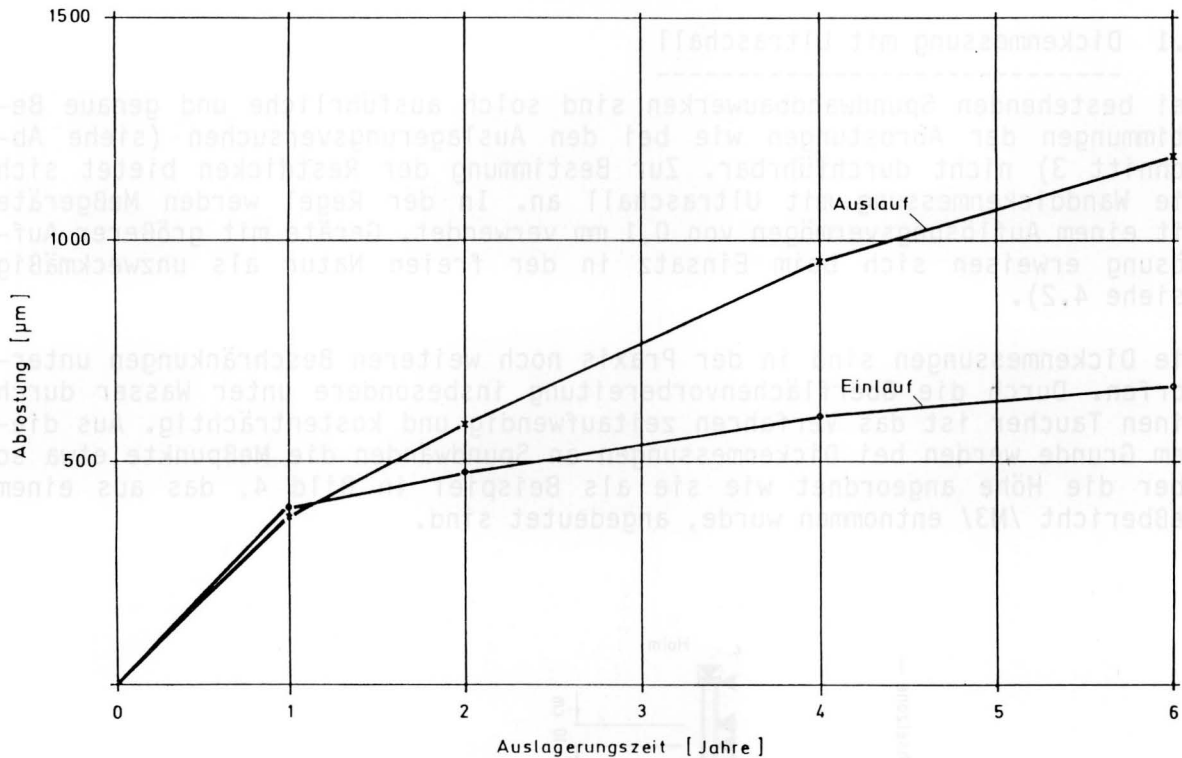


Bild 3: Mittlere beidseitige Abrostung von Blechen im Emdener Hafen unter dem Wasserspiegel. Mittlere Temperaturdifferenz 4,6 K

Im logarithmischen Maßstab ergibt sich für die Abrostung eine ansteigende, für die Korrosionsraten eine abfallende Gerade.

Dieser vorstehend für den Emdener Hafen beschriebene Korrosionsverlauf, das muß nochmals ausdrücklich hervorgehoben werden, tritt nur in einem stehenden oder schwach fließenden Gewässer auf. Hier ist keine starke Strömung evtl. gar mit Sandtransport vorhanden, wodurch die entstehenden Korrosionsprodukte laufend abgeschliffen und der Abtrag schneller fortschreiten würde.

4 Messung von Spundwänden

Statische Beanspruchungen erfordern je nach Einsatz eine bestimmte Wanddicke der Bohlen. Durch die Abrostung in der natürlichen Umgebung tritt über die Zeit eine Schwächung des Profils ein, so daß die mögliche Nutzungsdauer des Stahlwasserbauteils u.a. durch die Korrosion bestimmt wird. Bei gerammten, einseitig wasserberührten Spundwänden ist bei längeren Standzeiten im allgemeinen nur die Korrosion auf der Wasserseite zu berücksichtigen, während die Korrosion auf der Bodenseite vernachlässigt werden kann. In aggressiven Böden gibt es Ausnahmen, die in der vorliegenden Arbeit jedoch unberücksichtigt bleiben.

Um beim Bau eines Spundwandbauwerkes die vorgesehene Nutzungsdauer zu erreichen, muß die Abrostung über die Standzeit abgeschätzt und bei der Wahl der Wanddicke der Spundbohlen berücksichtigt werden. Zur Überprüfung der Standsicherheit oder zur Bestimmung der noch zu erwartenden Nutzungsdauer älterer Stahlwasserbauten sind die Restwanddicken zu bestimmen.

4.1 Dickenmessung mit Ultraschall

Bei bestehenden Spundwandbauwerken sind solche ausführliche und genaue Bestimmungen der Abrostungen wie bei den Auslagerungsversuchen (siehe Abschnitt 3) nicht durchführbar. Zur Bestimmung der Restdicken bietet sich die Wanddickenmessung mit Ultraschall an. In der Regel werden Meßgeräte mit einem Auflösungsvermögen von 0,1 mm verwendet. Geräte mit größerer Auflösung erweisen sich beim Einsatz in der freien Natur als unzweckmäßig (siehe 4.2).

Die Dickenmessungen sind in der Praxis noch weiteren Beschränkungen unterworfen. Durch die Oberflächenvorbereitung insbesondere unter Wasser durch einen Taucher ist das Verfahren zeitaufwendig und kostenträchtig. Aus diesem Grunde werden bei Dickenmessungen an Spundwänden die Meßpunkte etwa so über die Höhe angeordnet wie sie als Beispiel in Bild 4, das aus einem Meßbericht /M3/ entnommen wurde, angedeutet sind.

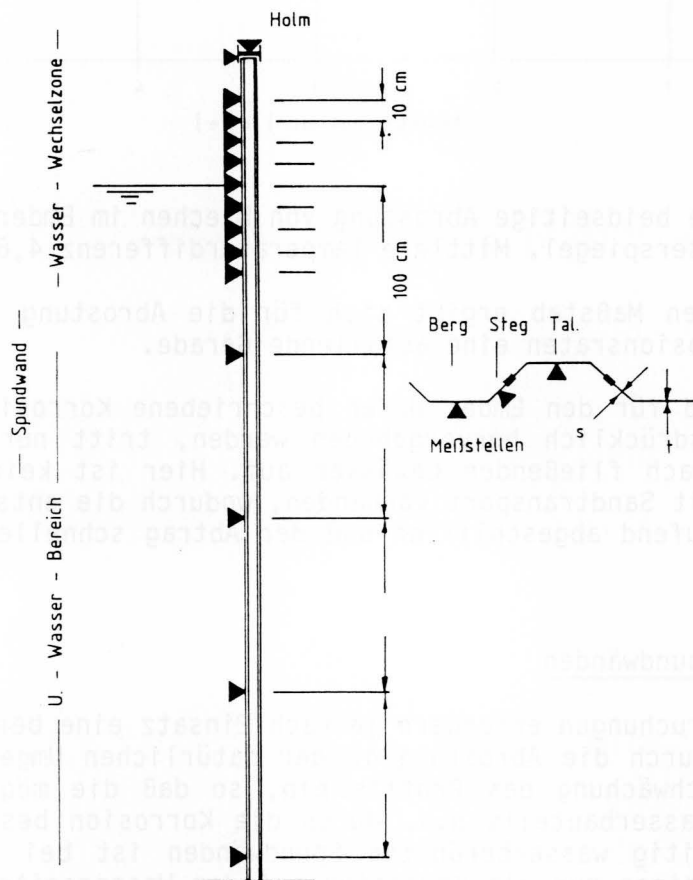


Bild 4: Anordnung der Meßstellen an einer Spundbohle

Im Bereich des Wasserspiegels bzw. bei Gezeitenbewegung um Tideniedrigwasser, d.h. in der Belüftungszone findet sich im allgemeinen die stärkste Abrostung, weshalb hier auch die Meßpunkte dicht, z. B. mit einem Abstand von 10 cm, angeordnet werden. In größeren Tiefen werden größere Distanzen zwischen den Meßpunkten - im vorliegenden Falle 1 m - gewählt. Die mittlere Abrostung läßt sich durch die Ultraschallmessungen an Spundwänden in der Natur nicht bestimmen, da das eine Vielzahl von Messungen erfordert, was aber aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist. Für die vorliegenden Untersuchungen über das Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden in Wasser werden daher die Bereiche der maximalen Abrostung herangezogen, bei deren Messung aber auch einige Unsicherheiten zu beachten sind.

4.2 Unsicherheiten der Korrosionsmessungen

Die Genauigkeit der Ultraschallmessungen hängt von der Auflösung des Meßgerätes und den Meßbedingungen wie Entrostung, Rauigkeit der Oberfläche, Ankopplung u.a. ab. Für die Unsicherheit der Korrosionsmessungen spielen zudem zwei weitere Punkte eine entscheidende Rolle.

1. Die Abrostung ist nach Bild 5 über die Höhe der Spundwand unregelmäßig. In vielen Fällen treten Korrosionsmaxima kurz unterhalb des Wasserspiegels in der Belüftungszone auf. Da in diesem Bereich nach Bild 4 in einem Abstand von je 10 cm gemessen wird, werden die Restwanddicken an den Stellen stärkster Abrostung oder in der Nähe dieser Stelle erfaßt. Der sich durch die örtlichen Unterschiede ergebende Meßfehler ist gering.

Anders jedoch, wenn die Bereiche stärkster Abrostung unterhalb der Belüftungszone liegen. Da nach Bild 4 mit einer Distanz von 1 m gemessen wird, kann die wirklich vorhandene geringste Restwanddicke in einiger Entfernung vom Meßpunkt der geringsten Dicke liegen und somit kleiner als die gemessene sein.

2. Die ursprüngliche, beim Einbau vorhandene Wanddicke an der Meßstelle ist im allgemeinen nicht bekannt. Nur selten kann von der Soll Dicke ausgegangen werden; in den meisten Fällen ist erfahrungsgemäß die Wanddicke der Spundbohlen beim Einbau größer als die Soll Dicke. Bei der Auswertung der Ultraschallmessungen finden sich nun bei der Korrosion im Süßwasser fast immer Stellen, die offensichtlich nicht oder zumindest nur sehr gering abgerostet sind, an denen demnach die Ausgangsdicke noch voll oder nahezu voll vorhanden sein dürfte.

Bei einer Reihe von Spundbohlen wurden stellenweise Restwanddicken gemessen, die über den Toleranzgrenzen nach den Technischen Lieferbedingungen /13/ Ziffer 5.1.2 : Soll Dicke + 0,5 mm bzw. 6 % liegen.

Wegen der nicht bekannten Ausgangsdicke wird, wie in Bild 5, /M3/ dargestellt, für die Berechnung der Abrostung im Süßwasser immer die größte gemessene Dicke oder, falls diese geringer als der Sollwert ist, dieser als Ausgangsdicke zugrunde gelegt.

Im Brack- und Meerwasser finden sich - anders als im Süßwasser - keine Stellen, die nicht oder nur sehr gering abgerostet sind, an denen demnach die Ausgangsdicke noch voll oder nahezu voll vorhanden ist. Nur in sehr seltenen Fällen werden bei den vorliegenden Messungen Stellen mit größerer Wanddicke als die Soll Dicke angetroffen.

Ist nun die wahre Dicke einer Spundbohle um 0,5 mm stärker als die Solldicke, so ergeben sich für die Korrosionsrate nach

20 Jahren Standzeit Fehler von 25 $\mu\text{m/a}$
 50 " " " " 10 $\mu\text{m/a}$.

Es kann daher angenommen werden, daß die tatsächliche Abrostung an Spundwänden im Brack- und Meerwasser größer ist als in der Literatur angegeben und bei den vorliegenden Untersuchungen gefunden.

Für den vorliegenden Bericht werden in Brack- und Meerwasser trotz der genannten Unsicherheiten die Solldicken als Ausgangswanddicken und die gemessenen, geringsten Wanddicken zur Berechnung der Korrosion bzw. Korrosionsraten zugrunde gelegt.

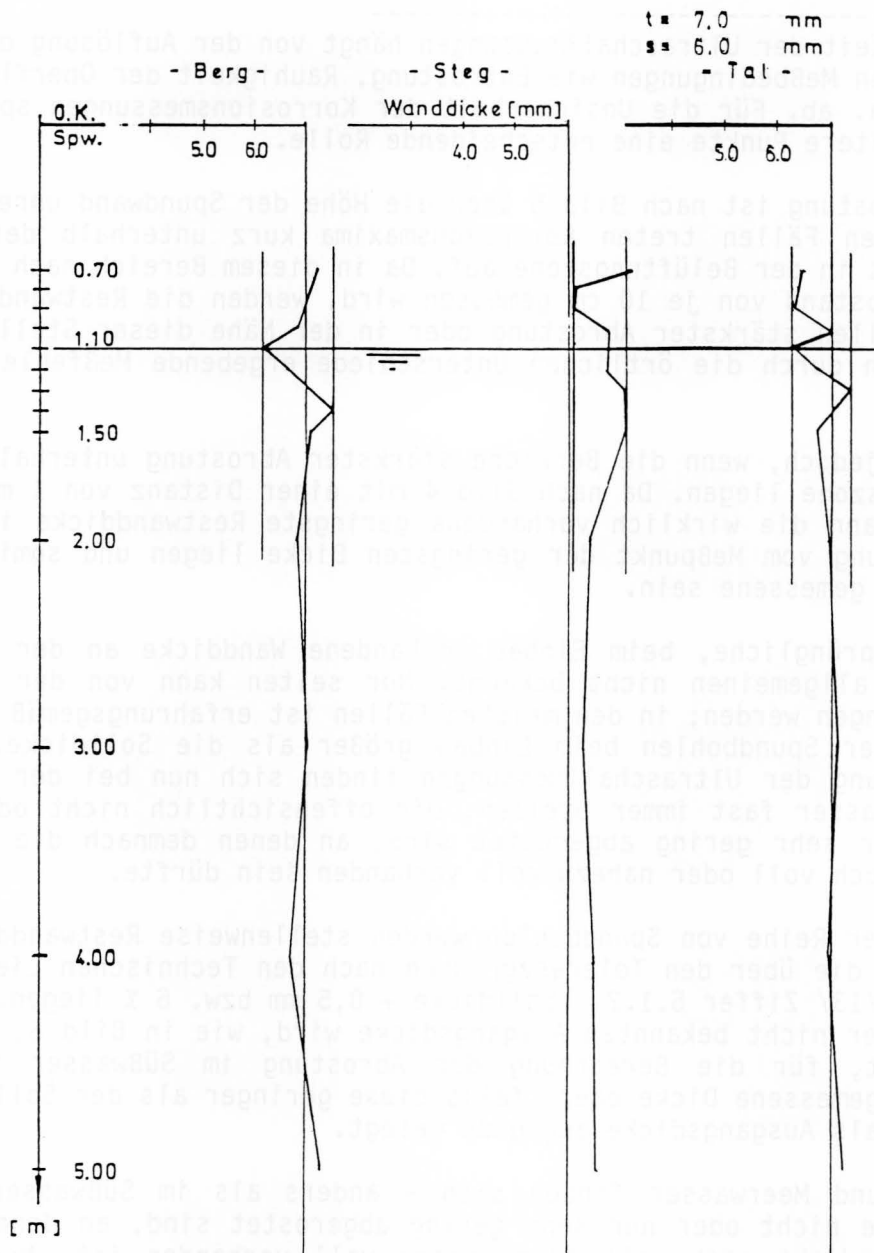


Bild 5: Bestimmung der maximalen Abrostung

4.3 Korrosionsprofile

Bei der Untersuchung von Spundbohlen im Mittellandkanal wurden die Restwanddicken nach dem in Bild 4 angeführten Schema mit Ultraschall gemessen. Aus Bild 5 geht deutlich hervor, daß die Korrosion großflächig nicht einheitlich verläuft, sondern daß es Zonen unterschiedlicher Abtragungen gibt. In vielen Fällen findet sich ein Korrosionsmaximum im unmittelbaren Bereich unter dem Wasserspiegel, der Belüftungszone. Teilweise sind die Stellen stärkster Korrosion tiefer oder im Überwasserbereich zu finden. Eine Auswirkung der Schifffahrt bzw. der durch die Schifffahrt erzeugten Wasserbewegung auf die Korrosion läßt sich nicht erkennen.

Nach den EAU 1985 /1/ soll sich die Korrosion im Süßwasser fast gleichmäßig über die gesamte freie Spundwandhöhe verteilen, was nach den Meßergebnissen am MLK bei stehendem oder schwach bewegtem Süßwasser nicht als allgemein gültig anzusehen ist.

Im aggressiven Wasser und Meerwasser liegen nach den EAU 1985 /1/ die Hauptangriffzonen im Bereich des Mittelwassers (MW) bzw. etwas unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers (MTnW).

Bild 6 aus /6/ zeigt ein typisches Korrosionsprofil von Spundwänden entlang der niederländischen Küste.

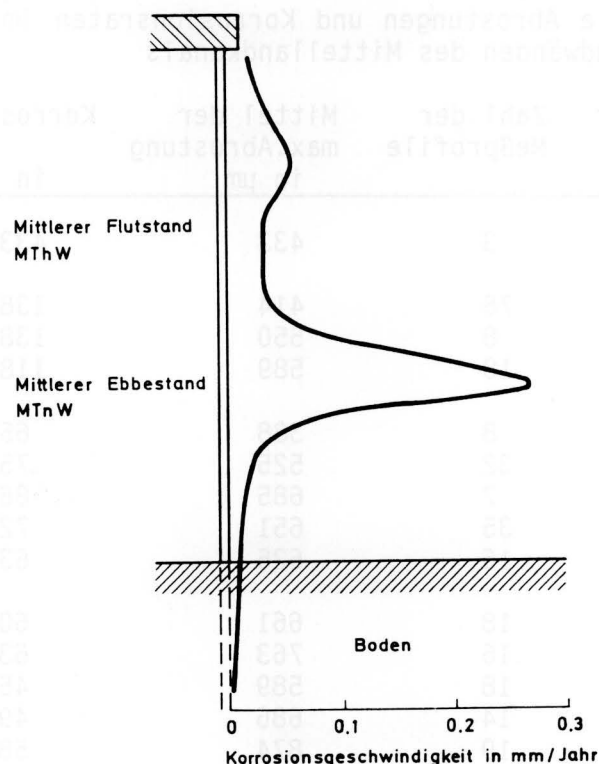


Bild 6: Typisches Korrosionsprofil von Spundwänden entlang der niederländischen Küste

Für die norddeutsche Küste kann an Spundwänden, die der Tide ausgesetzt

sind, das Profil bestätigt werden. Auch aus anderen Literaturstellen, ist dieses typische Korrosionsverhalten im Tidebereich bekannt.

Bei Dockhäfen mit konstantem Wasserspiegel wird häufig das Korrosionsmaximum kurz unterhalb des Wasserspiegels angetroffen; oft, besonders an Anlegestellen von Schiffen, Verladeanlagen u. a. sind aber die Bereiche stärkster Abrostung in größere Tiefen verschoben.

Teil 2 Süßwasser

5 Korrosion in Süßwasser

In einer früheren Arbeit von Hein /14/ wurde gezeigt, daß bei konstantem Wasserspiegel, wie er auch am Mittellandkanal vorhanden ist, die Korrosion im Unter- und Überwasserbereich getrennt voneinander betrachtet werden kann.

Bei der Korrosion im Überwasserbereich wirkt Wellenschlag, Spritzwasser, erhöhte Luftfeuchtigkeit usw. mit ein. Die Korrosion läßt sich daher weder mit der atmosphärischen noch mit der Unterwasserkorrosion vergleichen. Da die Abrostungen zudem stark schwanken, wird im folgenden nur die Korrosion im Unterwasserbereich zur Auswertung herangezogen.

Tabelle 2: Maximale Abrostungen und Korrosionsraten im Unterwasserbereich an Spundwänden des Mittellandkanals

Standzeit	Zahl der Standorte	Zahl der Meßprofile	Mittel der max. Abrostung in μm	Korrosionsrate in $\mu\text{m/a}$
1	1	3	433	433
2				
3	2	78	414	138
4	2	8	550	138
5	5	18	589	118
6	2	8	388	65
7	9	32	525	75
8	2	7	685	86
9	11	35	651	72
10	5	16	625	63
11	6	18	661	60
12	4	16	763	63
13	5	18	589	45
14	4	14	686	49
15	5	19	874	58
16	6	21	705	44
17	16	50	830	49
18	11	33	736	41
19				
20				
21	4	16	961	46

5.1 Mittellandkanal

Um einen Überblick über bisher insgesamt aufgetretene Abrostungen zu erhalten, veranlaßte im Jahre 1985 die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte in Hannover Dickenmessungen mit Ultraschall an den Spundwänden des Mittellandkanales auf der gesamten Länge des Kanales. Insgesamt wurde an 100 verschiedenen Stellen jeweils eine Bohle mit Rücken, Steg und Tal vermessen. Die Ergebnisse sind in vier Meßberichten der BAW /M1 bis M4/ niedergelegt.

In Tabelle 2 - das gilt auch für alle weiteren in diesem Bericht aufgeführten Werte - sind die Mittelwerte der maximalen Abrostungen aller Bohlen einer Standzeit und die zugehörigen Korrosionsraten im Unterwasserbereich angegeben.

Die Auftragung der Abrostungswerte ergibt ein relativ unübersichtliches Bild. Optisch günstiger verhält sich die Wiedergabe der Korrosionsraten im logarithmischen Maßstab. In Bild 7 tritt trotz einiger stärkerer Abweichungen die mit der Zeit deutlich fallende Tendenz hervor. Werden die in Abschnitt 4.2 erwähnten Unsicherheiten berücksichtigt, so ist im allgemeinen von etwas stärkerer Abrostung als gemessen auszugehen. Die eingetragene Regressionsgerade wurde daher durch die Maximalwerte gezogen, mit Ausnahme der Messung nach einjähriger Standzeit, die nur durch eine Stelle bzw. 3 Meßreihen belegt ist.

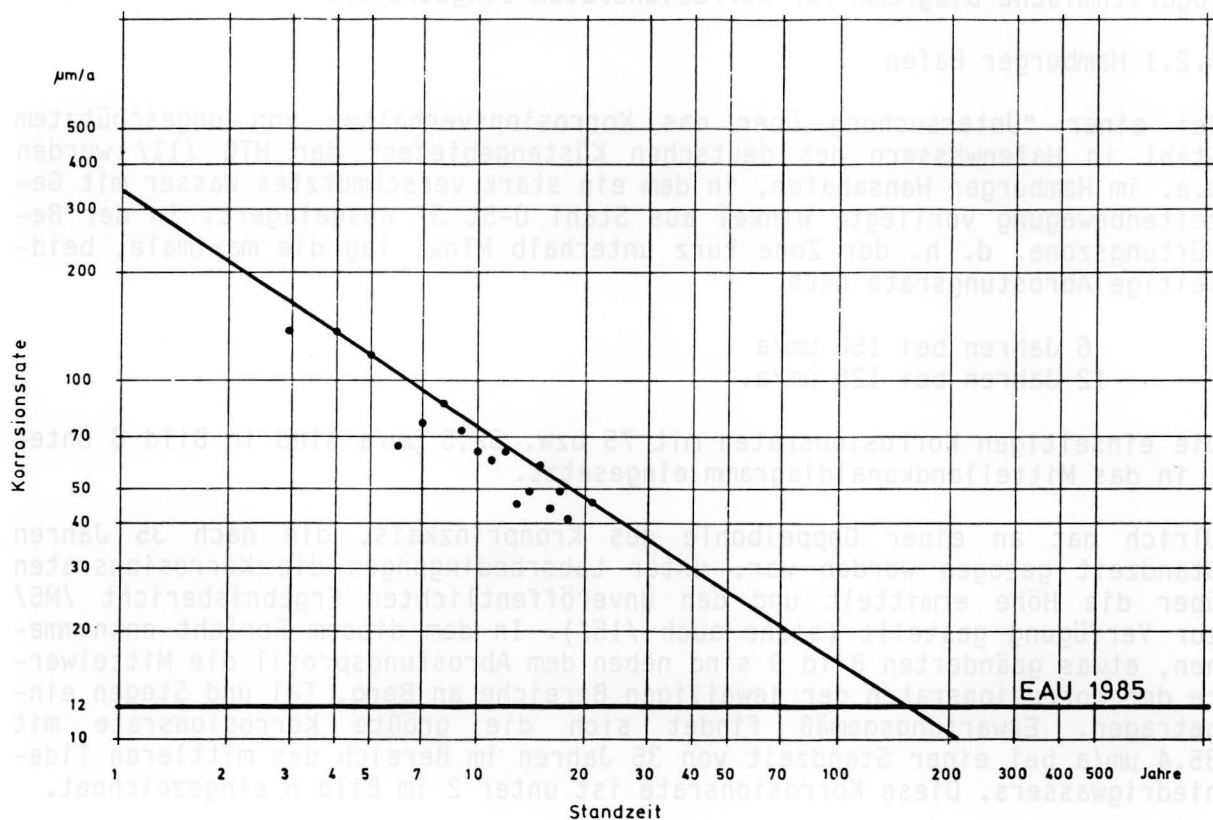


Bild 7: Maximale Korrosionsraten an Spundwänden des MLK in logarithmischem Maßstab

Wird diese Gerade als Maßstab für die Abschätzung der Korrosionsrate im Mittellandkanal zugrunde gelegt, so läßt sich für die in den EAU 1985 /1/ angegebene Korrosionsrate von 0,012 mm/a eine erforderliche Standzeit von etwa 160 Jahren ermitteln, bis dieser niedrige Wert für die maximale Gesamtkorrosion erreicht ist. D. h., da mit einer derartig langen Nutzungsdauer für Spundwände nicht zu rechnen ist, muß bei der Bemessung von einer höheren Abrostungsrate ausgegangen werden (siehe 6).

5.2 Andere Gewässer

Aufgrund der unter 5.1 beschriebenen, zahlreichen Dickenmessungen ist es für den Mittellandkanal möglich, die zu erwartende, mittlere maximale Korrosion der Stahlspundwände abzuschätzen. Leider stehen für andere Gewässer solche Reihenuntersuchungen nicht zur Verfügung. An einem Bauwerk aus Spundbohlen werden meistens erst dann Restwanddickenmessungen durchgeführt, wenn z.B. die Standsicherheit nachgewiesen werden muß. Es liegen daher für einzelne Bauwerke wenn überhaupt jeweils nur wenige Messungen nach unterschiedlichen Standzeiten vor. Der Korrosionsverlauf kann aus solch wenigen Messungen nicht allgemein gültig abgeschätzt werden. Es stellt sich daher die Frage, ob die Abrostungen in anderen Binnengewässern mit der im Mittellandkanal vergleichbar sind.

Im folgenden sind die in anderen Gewässern ermittelten, maximalen Korrosionsraten in das beim Mittellandkanal erhaltene, in Bild 8 dargestellte, logarithmische Diagramm für Korrosionsraten eingetragen.

5.2.1 Hamburger Hafen

Bei einer "Untersuchung über das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl in Hafengewässern des deutschen Küstengebietes" der HTG /11/ wurden u.a. im Hamburger Hansahafen, in dem ein stark verschmutztes Wasser mit Gezeitenbewegung vorliegt, Winkel aus Stahl U-St 37 ausgelagert. In der Belüftungszone, d. h. der Zone kurz unterhalb MTnw, lag die maximale, beidseitige Abrostungsrate nach

6 Jahren bei 150 $\mu\text{m/a}$
12 Jahren bei 125 $\mu\text{m/a}$.

Die einseitigen Korrosionsraten mit 75 bzw. 62,5 $\mu\text{m/a}$ sind in Bild 8 unter 1 in das Mittellandkanaldiagramm eingesetzt.

Ulrich hat an einer Doppelbohle des Kronprinzkais, die nach 35 Jahren Standzeit gezogen worden war, unter Laborbedingungen die Korrosionsraten über die Höhe ermittelt und den unveröffentlichten Ergebnisbericht /M5/ zur Verfügung gestellt (siehe auch /15/). In dem diesem Bericht entnommenen, etwas geänderten Bild 9 sind neben dem Abrostungsprofil die Mittelwerte der Korrosionsraten der jeweiligen Bereiche an Berg, Tal und Stegen eingetragen. Erwartungsgemäß findet sich die größte Korrosionsrate mit 35,4 $\mu\text{m/a}$ bei einer Standzeit von 35 Jahren im Bereich des mittleren Tideniedrigwassers. Diese Korrosionsrate ist unter 2 im Bild 8 eingezeichnet.

Alle drei, im Hamburger Hafen ermittelten maximalen Korrosionsraten korrespondieren mit den Werten des Mittellandkanals.

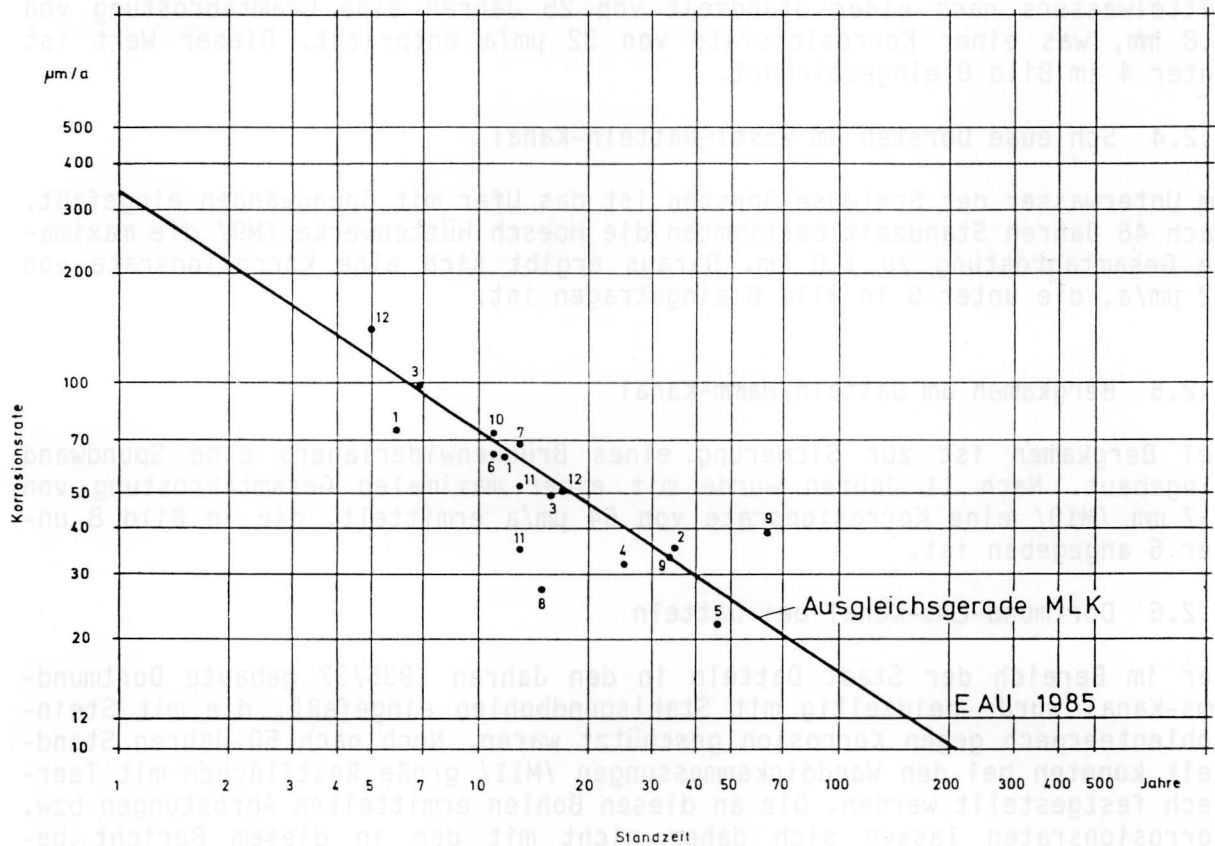


Bild 8: Maximale Korrosionsraten in Binnengewässern

5.2.2 Elbehafen Brunsbüttel

Für den Elbehafen Brunsbüttel waren 1966 Spundbohlen gerammt worden, die 1973 nach 7jähriger Standzeit /M6/ und 1982 nach 16jähriger Standzeit /M7/ ausgemessen wurden. Obwohl sich schon das Brackwasser bemerkbar macht, stimmen die unter 3 in Bild 8 eingetragenen Korrosionsraten mit $98 \mu\text{m/a}$ bzw. $49 \mu\text{m/a}$ mit den erwarteten mittleren maximalen Korrosionsraten recht gut überein.

5.2.3 Lecker Au bei Niebüll

Die Umspundung der Widerlager der Straßenbrücke über die Lecker Au bei Niebüll zeigt, wie von den Hoesch Hüttenwerken /M8/ mitgeteilt, im Bereich des Mittelwassers nach einer Standzeit von 25 Jahren eine Gesamtabrostung von $0,8 \text{ mm}$, was einer Korrosionsrate von $32 \mu\text{m/a}$ entspricht. Dieser Wert ist unter 4 im Bild 8 eingezeichnet.

5.2.4 Schleuse Dorsten am Wesel-Datteln-Kanal

Im Unterwasser der Schleuse Dorsten ist das Ufer mit Spundwänden eingefaßt. Nach 46 Jahren Standzeit bestimmten die Hoesch Hüttenwerke /M9/ die maximale Gesamtabrostung zu $1,0 \text{ mm}$. Daraus ergibt sich eine Korrosionsrate von $22 \mu\text{m/a}$, die unter 5 in Bild 8 eingetragen ist.

5.2.5 Bergkamen am Datteln-Hamm-Kanal

Bei Bergkamen ist zur Sicherung eines Brückenwiderlagers eine Spundwand eingebaut. Nach 11 Jahren wurde mit einer maximalen Gesamtabrostung von $0,7 \text{ mm}$ /M10/ eine Korrosionsrate von $64 \mu\text{m/a}$ ermittelt, die in Bild 8 unter 6 angegeben ist.

5.2.6 Dortmund-Ems-Kanal bei Datteln

Der im Bereich der Stadt Datteln in den Jahren 1935/37 gebaute Dortmund-Ems-Kanal wurde beidseitig mit Stahlspundbohlen eingefaßt, die mit Steinkohlenteerpech gegen Korrosion geschützt waren. Noch nach 50 Jahren Standzeit konnten bei den Wanddickenmessungen /M11/ große Restflächen mit Teerpech festgestellt werden. Die an diesen Bohlen ermittelten Abrostungen bzw. Korrosionsraten lassen sich daher nicht mit den in diesem Bericht beschriebenen vergleichen, die sich auf ungeschützten Stahl beziehen.

Auf der Westseite des Kanals bei km 20,7 und auf der Ostseite von km 20,2 bis 21,0 sind 1974 unkonservierte Spundbohlen geschlagen worden. Nach 13 Jahren Standzeit wurden auf der Westseite an einer Meßstation eine maximale Korrosionsrate von $69 \mu\text{m/a}$, auf der Ostseite im Mittel aus 5 Meßstationen $68 \mu\text{m/a}$ ermittelt. Auch dieser Wert 7 im Bild 8 liegt in unmittelbarer Nähe der Regressionsgeraden.

5.2.7 Beckenhafen Andernach

Im Beckenhafen Andernach wurden 3 Bohlen /M12/ vermessen, davon jedoch nur 1 über die gesamte Länge, und zwar in einem Abstand von jeweils 1 m . Bei einer Sollstärke von $11,5 \text{ mm}$ wurde an der Bohle als größte Dicke $11,5 \text{ mm}$, als geringste Dicke $11,1 \text{ mm}$ gemessen. Mit einer maximalen Gesamtabrostung

von 0,4 mm errechnet sich bei einer Standzeit von 15 Jahren die Korrosionsrate zu 27 $\mu\text{m/a}$, die unter 8 in Bild 8 eingetragen ist.

Im Beckenhafen Andernach liegt zwar keine Strömung vor, doch ist mit einem sich oft ändernden Wasserspiegel des Rheins zu rechnen. Daher kann sich ein Korrosionsmaximum nicht so deutlich ausbilden wie bei einem stehenden oder schwach fließenden Gewässer mit konstantem Wasserspiegel. Der vom Wasserstand abhängige, jeweils aktuelle, stärkste Korrosionsangriff verteilt sich über einen größeren Höhenbereich der Spundwand. Die ermittelte größte Korrosionsrate liegt daher deutlich unter der erwarteten.

5.2.8 Schleuse Schwabenheim am Neckar

Im Vorhafen der Schleuse Schwabenheim am Neckar, in dem ein ruhiges Wasser mit praktisch konstantem Wasserspiegel ansteht, wurden an drei Stellen jeweils an mehreren Stahlspundbohlen die Restwanddicken gemessen /M13/. Bei einer Standzeit von 34 Jahren ergab sich aus der mittleren maximalen Abrostung eine Korrosionsrate von 34 $\mu\text{m/a}$, die unter 9 in Bild 8 angeführt ist.

Auch im unmittelbaren Einfahrbereich der Doppelschleuse wurde an vier Stellen jeweils an Berg, Tal, Steg der Spundwand die Restwanddicke bestimmt. Mit im Mittel 2,4 mm fand sich eine sehr starke Abrostung, wie sie sonst in stehenden Süßwasser nur selten beobachtet wird. Bei einer Standzeit von 63 Jahren errechnet sich die Korrosionsrate zu 39 $\mu\text{m/a}$, die ebenfalls unter 9 in Bild 8 eingetragen ist. Die ermittelte, erhöhte Korrosion wird offensichtlich durch starke Wasserbewegung erzeugt, hervorgerufen durch ein- und ausfahrende Schiffe, Sog beim Füllen der Schleuse u.ä. Die Korrosionsrate ist daher nicht mit der in einem ruhigen Gewässer zu vergleichen.

5.2.9 Schleuse Bad Abbach

An der Schleuse Bad Abbach / Donau werden z.Z. noch relativ wenige Schleusungen durchgeführt. Vorwiegend wird der Wasserspiegel in der Schleusenkammer auf Unterwasser gehalten. An den Spundwänden treten, hervorgerufen durch den Bewuchs mit Süßwasserschwämmen, starke Korrosionsanfrassungen auf. Von diesen Schäden abgesehen wurden an zwei Bohlen die Abrostungsprofile bestimmt /M14/. Dabei ergab sich eine mittlere maximale Abrostung zu 69 $\mu\text{m/a}$ bei einer Standzeit von 11 Jahren. Im Unterwasser wurde diese zu 77 $\mu\text{m/a}$ gefunden. Der Mittelwert von 73 $\mu\text{m/a}$ ist unter 10 im Bild 8 eingetragen.

5.2.10 Schleuse Regensburg

An der Schleuse Regensburg wurden ein Korrosionsprofil im Oberwasser und drei im Unterwasser ausgemessen /M14/. Auffallend ist, daß die Abrostung an den Spundwandbergen merklich größer ist als an den Stegen und in den Tälern. Wird die Abrostung aus allen Messungen berücksichtigt, so ergibt sich eine Korrosionsrate von 35 $\mu\text{m/a}$ bei einer Standzeit von 13 Jahren. Legt man jedoch nur die Abrostung von den Bergen zugrunde, so berechnet sich die Korrosionsrate zu 52 $\mu\text{m/a}$. In Bild 8 sind beide Werte unter 11 eingezeichnet.

5.2.11 Bremen-Hemelingen

An der Liegestelle im Oberwasser der Schleuse Bremen-Hemelingen sind Spund-

wandprofile M 122 U eingebaut. Bei diesen Profilen sollen sowohl die Bohlenrücken als auch die Stege eine Ausgangsdicke von 10,0 mm aufweisen. Würden diese Werte bei der Bestimmung der Korrosionsraten /M15 /zugrunde gelegt, so ergäbe sich nach 17jähriger Standzeit an den Stegen eine zwei bis mehrfach stärkere Abrostung als an Berg und Tal, was aufgrund der vorliegenden Messungen unrealistisch erscheint. Zur Berechnung der Korrosionsrate wird daher im vorliegenden Falle für Berg und Tal von der Sollstärke - die gemessenen Höchstwerte weichen tatsächlich nur geringfügig von diesen ab - ausgegangen; bei den Stegen werden hingegen die stärksten gemessenen Wanddicken als Ausgangswerte benutzt.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich dann aus drei Meßstellen bei einer Standzeit von 17 Jahren eine mittlere maximale Korrosionsrate von 54 µm/a. Dieser in Bild 8 unter 12 eingetragene Wert liegt praktisch auf der Geraden.

Spundwanddoppelbohle

Kronprinz kai

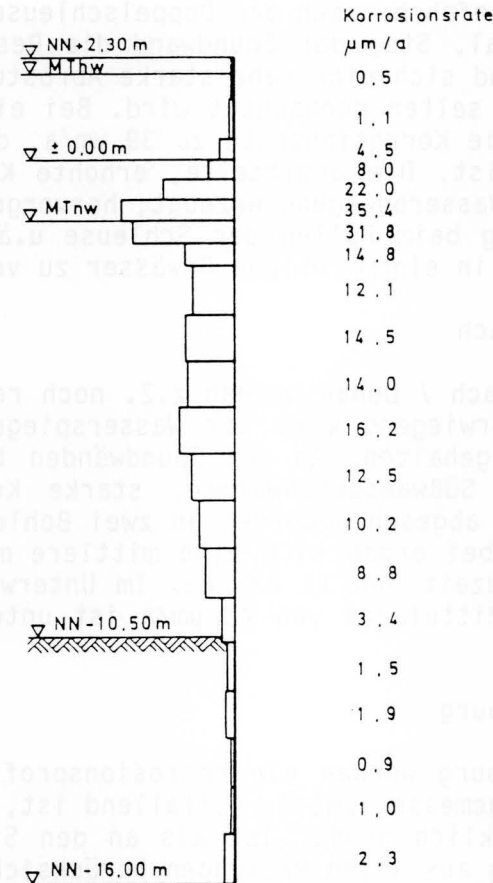


Bild 9: Korrosionsprofil und Korrosionsraten am Kronprinz kai im Hamburger Hafen

Im Unterwasser des Wehres sind Larssen 24 - Bohlen eingebaut, die an den Rücken eine Ausgangsdicke von 15,6 mm an den Stegen von 10,0 mm aufwiesen. An zwei Meßstellen konnte hier von den Soll- bzw. gemessenen stärksten Dicken ausgegangen werden. Nach 5 Jahren Standzeit ergab sich eine Korro-

sionsrate von $143 \mu\text{m/a}$. Wie aus Bild 8 ersichtlich liegt dieser ebenfalls unter 12 eingetragene Wert etwas oberhalb der Geraden. Das ist erklärbar, da hier bei Hochwasser starke Strömung auftritt, die die Korrosion durch Abrieb beeinflusst.

6 Folgerungen für den Bau von Stahlspundwänden in Süßwasser

Bei der Auswahl von Stahlspundwänden ist wie bereits oben erwähnt u.a. die zu erwartende Korrosion zu berücksichtigen. Nach den Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" (EAU 1985) /1/ und anderer Literatur (z.B. /3/ /4/) wird für die Korrosion im Süßwasser eine mittlere Schwächung von $0,012 \text{ mm/a}$ zugrunde gelegt. Es wird dabei vorausgesetzt, daß die Korrosion auf der Bodenseite über die Standzeit gesehen vernachlässigbar gering ist. Nach der angesprochenen Literatur verläuft die Abrostung linear; d.h. die zu erwartende Gesamtabrostung beträgt $0,012 \text{ mm/a}$ multipliziert mit der vorgesehenen Standzeit bzw. Nutzungsdauer der Anlage. Wie die vorliegenden Ergebnisse zeigen, nimmt jedoch die Abrostung im Wasser nicht linear mit der Zeit zu, sondern folgt einer Potential-Funktion (Bild 10). Für den Bau von Stahlspundwänden im Wasser sind daher Folgerungen zu ziehen.

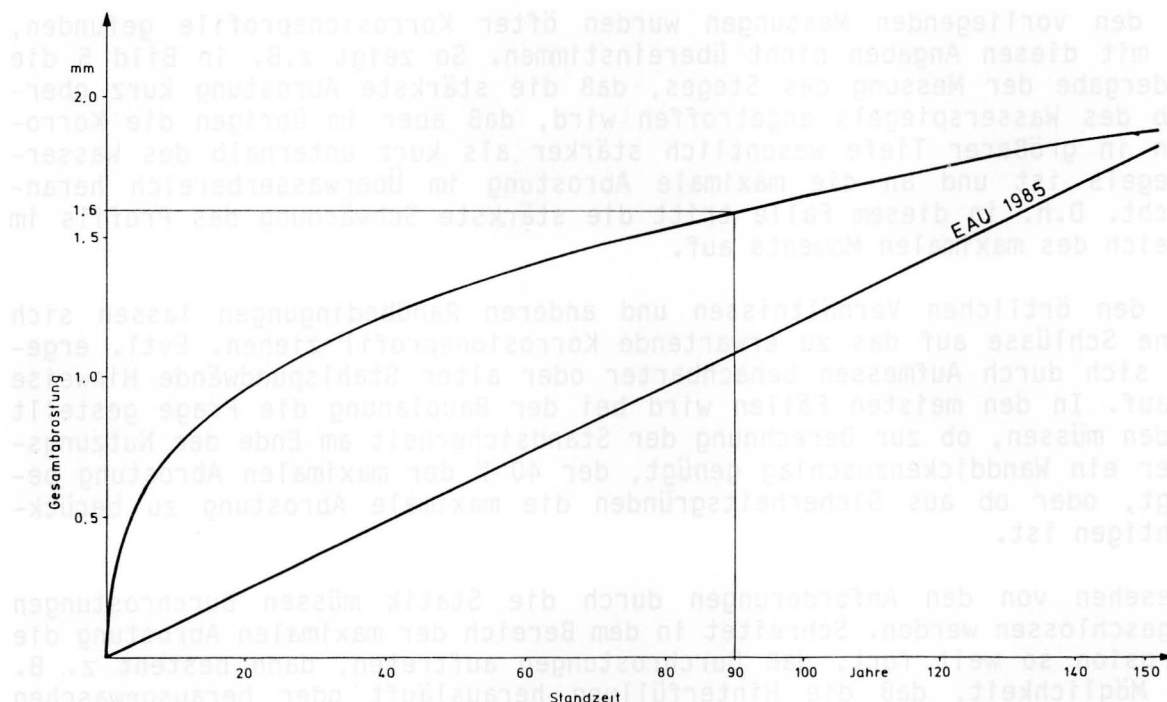


Bild 10: Gesamtabrostung über die Standzeit in Süßwasser

Wie aus den vorliegenden Messungen ersichtlich, findet sich die stärkste Korrosion häufig kurz unterhalb des Wasserspiegels. (Die Korrosion im Überwasserbereich wird im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt.) Oft fallen diese Stellen größter Abrostung nicht mit den Bereichen maximaler statischer Beanspruchung zusammen (siehe z.B. EAU 1985 /1/ 8.2.8).

In Bild 9 nach der Arbeit von Ulrich /M5/ (siehe auch /15/) sind in das Korrosionsprofil einer nach 35 Jahren am Kronprinzkai im Hamburger Hafen gezogenen Spundbohle die Korrosionsraten eingetragen. Bleibt der untere Teil der Spundbohle über der Hafensohle (Schlick) unberücksichtigt, so

ergibt sich bis zum Bereich der maximalen Abrostung eine für die Zone maximaler statischer Beanspruchung maßgebliche Korrosionsrate von $14,0 \mu\text{m/a}$, was 40 % der maximalen Korrosionsrate entspricht.

Auch bei den Auslagerungsversuchen im Hamburger Hafen /11/ wurden in der Bewuchszone nach 12jähriger Auslagerung 40 % der Korrosion der Belüftungszone gefunden, während es nach 6jähriger Auslagerungszeit noch 53 % waren.

Diese Ergebnisse bestätigen für längere Standzeiten die in der EAU 1985 /1/ unter 8.1.10.3 Hauptangriffszonen vermerkte Angabe: "Bei Verankerung mit üblicher Ankerlage beträgt im Bereich des größten Moments der Spundwand die Korrosion nur 30 bis 40 % der obigen Werte (Hauptangriffszonen bzw. Bereiche maximaler Abrostung)."

In der Praxis wird oft von einer theoretischen Nutzungsdauer von 90 Jahren ausgegangen. Könnte für diese Zeit für die Korrosion in stehendem oder schwach fließendem Süßwasser diese Aussage als allgemein gültig zugrunde gelegt werden, dann würden die Angaben der EAU 1985 /1/ zur Berechnung der Standsicherheit ausreichen. Die Dickenabminderung verläuft aber nicht generell nach diesem Schema.

Bei den vorliegenden Messungen wurden öfter Korrosionsprofile gefunden, die mit diesen Angaben nicht übereinstimmen. So zeigt z.B. in Bild 5 die Wiedergabe der Messung des Steges, daß die stärkste Abrostung kurz oberhalb des Wasserspiegels angetroffen wird, daß aber im übrigen die Korrosion in größerer Tiefe wesentlich stärker als kurz unterhalb des Wasserspiegels ist und an die maximale Abrostung im Überwasserbereich heranreicht. D.h. in diesem Falle tritt die stärkste Schwächung des Profils im Bereich des maximalen Moments auf.

Aus den örtlichen Verhältnissen und anderen Randbedingungen lassen sich keine Schlüsse auf das zu erwartende Korrosionsprofil ziehen. Evtl. ergeben sich durch Aufmessen benachbarter oder alter Stahlspundwände Hinweise darauf. In den meisten Fällen wird bei der Bauplanung die Frage gestellt werden müssen, ob zur Berechnung der Standsicherheit am Ende der Nutzungsdauer ein Wanddickenzuschlag genügt, der 40 % der maximalen Abrostung beträgt, oder ob aus Sicherheitsgründen die maximale Abrostung zu berücksichtigen ist.

Abgesehen von den Anforderungen durch die Statik müssen Durchrostungen ausgeschlossen werden. Schreitet in dem Bereich der maximalen Abrostung die Korrosion so weit fort, daß Durchrostungen auftreten, dann besteht z. B. die Möglichkeit, daß die Hinterfüllung herausläuft oder herausgewaschen wird, was Setzungen auf der Landseite nach sich zieht. Es ist daher für die Bauplanung von Interesse, ob innerhalb der vorgesehenen Nutzungsdauer mit Durchrostungen zu rechnen ist.

Nach Bild 10 beträgt bei einer Nutzungsdauer von 90 Jahren die maximale Abrostung 1,6 mm.

In einem stehenden oder schwach fließenden Süßwasser ist demnach bei einer ausreichend dimensionierten Spundwand mit Durchrostungen nicht zu rechnen (abgesehen von Sonderfällen wie z.B. Korrosion von der Bodenseite, Beeinflussung durch andere Bauteile oder Streustrom, Einleitung von aggressiven Wässern u.a.).

Teil 3 Brack- und Meerwasser

7 Korrosionsmessungen in Brack- und Meerwasser

Durch den gegenüber Süßwasser wesentlich höheren Salzgehalt in Brack- und Meerwasser tritt hier eine verstärkte Korrosion ein.

7.1 Brackwasser: Nordseeküste

In unmittelbarer Küstennähe und insbesondere in den Mündungstrichtern der Flüsse steht ein Brackwasser mit Gezeitenbewegung an, das in seinem von der Tide abhängigen Salzgehalt schwankt.

7.1.1 Bremerhaven

Relativ viele Wanddickenmessungen liegen von Bremerhaven vor. In dem Mündungstrichter der Weser wirkt sich die Tide mit einem mittleren Tidehub von etwa 3,50 m aus.

Restwanddickenmessungen wurden an den Rücken der Spundbohlen der 1928 gerammten Columbus- und der 1971 errichteten Stromkaje sowie an der Nordmole durchgeführt (Bild 11). Bei allen Ultraschallmessungen zeigten sich die stärksten Abrostungen um bzw. kurz unterhalb MTnw.

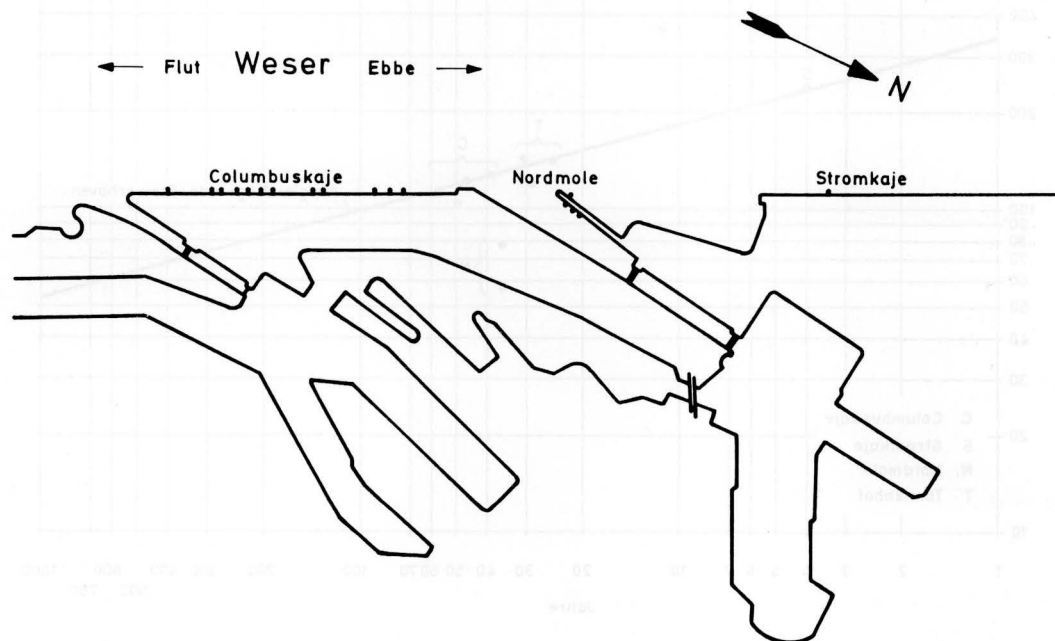


Bild 11: Teil der Hafenanlagen Bremerhaven

Die an der Columbuskaje nach unterschiedlichen Standzeiten ermittelten Korrosionsraten sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Es fällt auf, daß die Einzelwerte nur verhältnismäßig gering - maximal $20 \mu\text{m/a}$ - vom jeweiligen Mittelwert abweichen.

Tabelle 3: Wanddickenmessungen an Spundbohlen der Columbuskaje

Messung	Standzeit a	Anzahl der Meßstellen	Korrosionsrate $\mu\text{m/a}$	Meßbericht
1967	39	10	127	/M16/
1975	47	10	122	/M17/
1978	50	8	105	/M18/
1986	58	8	111	/M19/

In Bild 12 sind die an der Columbuskaje ermittelten Korrosionsraten unter C eingetragen. Deutlich läßt sich die mit der Zeit abfallende Tendenz erkennen.

An der Stromkaje wurde nach 4jähriger Standzeit an 2 Spundbohlen die maximale Korrosionsrate mit 238 $\mu\text{m/a}$ ermittelt, die in Bild 12 unter S eingezeichnet ist.

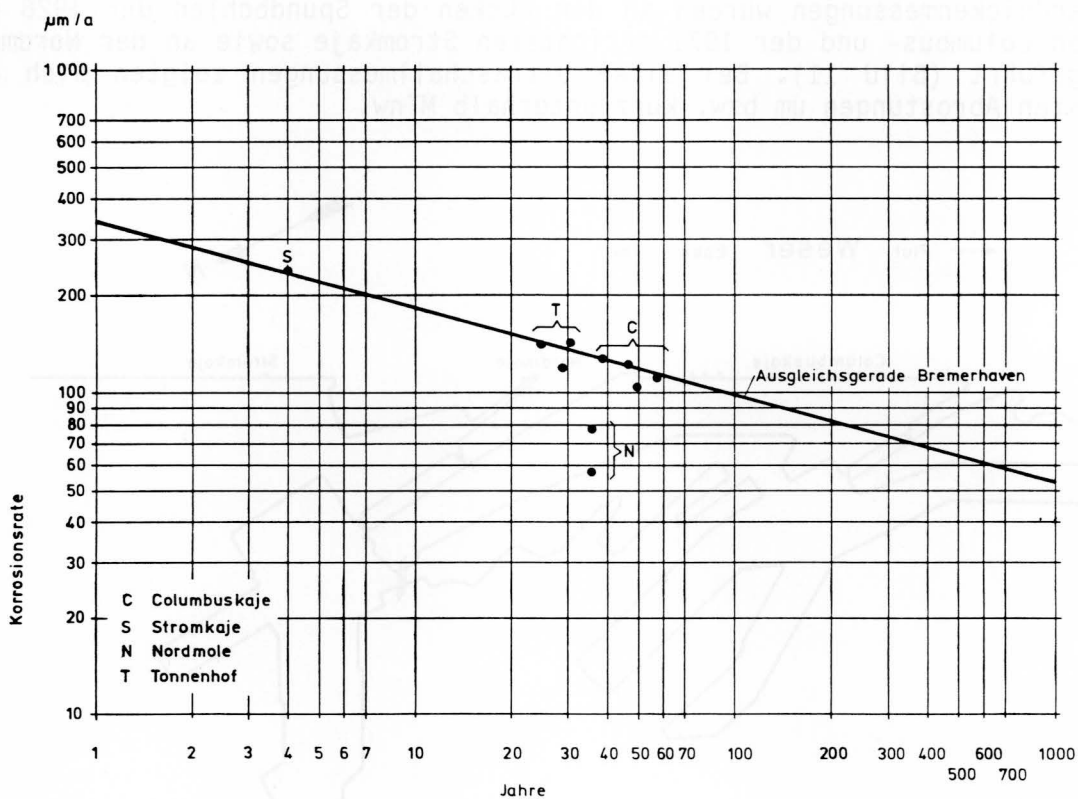


Bild 12: Korrosionsraten im Brackwasser Bremerhaven

Je eine Spundbohle wurde an der Nordmole Weserseite und zum Vorhafen vermessen. Die nach 46jähriger Standzeit erhaltenen, in Bild 12 unter N angeführten Korrosionsraten sind mit 78 bzw. 57 $\mu\text{m/a}$ sehr gering. Der Grund für die geringe Abrostung ist nicht bekannt.

Im Hafen des Tonnenhofes, der in Bild 11 nicht mehr eingezeichnet ist, wurde 1984 an 7 Bohlen jeweils am Berg, Steg und Tal das Korrosionsprofil

/M20/ aufgenommen. Da die Korrosionsraten der Stege deutlich geringer als die von Berg und Tal sind, bleiben die ersteren im folgenden unberücksichtigt.

An den zwei untersuchten, 1953 geramten Bohlen wurde nach 31jähriger Standzeit an einer Bohle nur eine sehr geringe Korrosionsrate, an der anderen eine von 145 $\mu\text{m/a}$ gefunden. Bei den beiden 1955 eingebauten Bohlen ergab sich nach 29 Jahren eine Korrosionsrate von 120 $\mu\text{m/a}$. Von den drei 1959 geramten Bohlen ist eine offensichtlich durch den Hafenbetrieb stark geschädigt da die Korrosionsrate mehr als doppelt so groß wie die der beiden anderen mit 140 $\mu\text{m/a}$ ist. Auch diese angegebenen drei Werte des Tonnenhofs sind unter T in Bild 12 eingezeichnet.

Wenn von den Ergebnissen der Nordmole abgesehen wird, zeichnet sich trotz einiger Schwankungen ein im logarithmischen Maßstab linear abfallender Wert der Korrosionsrate ab.

7.1.2 Wilhelmshaven

Im Marinehafen von Wilhelmshaven wurden 1975 /M21/ und 1982 /M22/ die Restwanddicken der Spundbohlen bestimmt. Tabelle 4 gibt die Meßergebnisse wieder, wobei für den alten Vorhafen nur die Messungen an Spundwandrücken und -tal, im übrigen die Messungen, soweit ermittelt, an Rücken, Steg und Tal berücksichtigt wurden.

Tabelle 4 Wanddickenmessungen an Spundbohlen in Wilhelmshaven

	Baujahr	Messung	Standzeit a	Anzahl der Meßstellen	Korr.-Rate $\mu\text{m/a}$
Alter Vorhafen	1953	1975	22	10	136
	1955	1975	20	6	131
Vorhafen 4. Einfahrt	Ostkaje	1962	1975	13	120
			1982	20	78
	Westkaje	1962	1975	13	28
		1982	20	60	114

In Bild 13, in das als Bezug die Ausgleichsgerade von Bremerhaven eingezeichnet ist, sind die in Wilhelmshaven ermittelten Korrosionsraten eingetragen. Die erhaltenen Werte weichen teilweise von der Ausgleichsgeraden nur geringfügig, teilweise allerdings auch stärker ab.

7.1.3 Hafen Emden

Der Hafen Emden ist zum größten Teil Dockhafen mit konstantem Wasserspiegel. Da zudem der Salzgehalt jahreszeitlich stark schwankt /12/ und die Temperatur durch Kühlwassereinleitung der Nordwestdeutschen Kraftwerke in den einzelnen Hafenteilen unterschiedlich ist, erscheint es nicht angebracht, die Ergebnisse von Spundwandausmessungen mit denen in Brackwasser in Beziehung zu setzen.

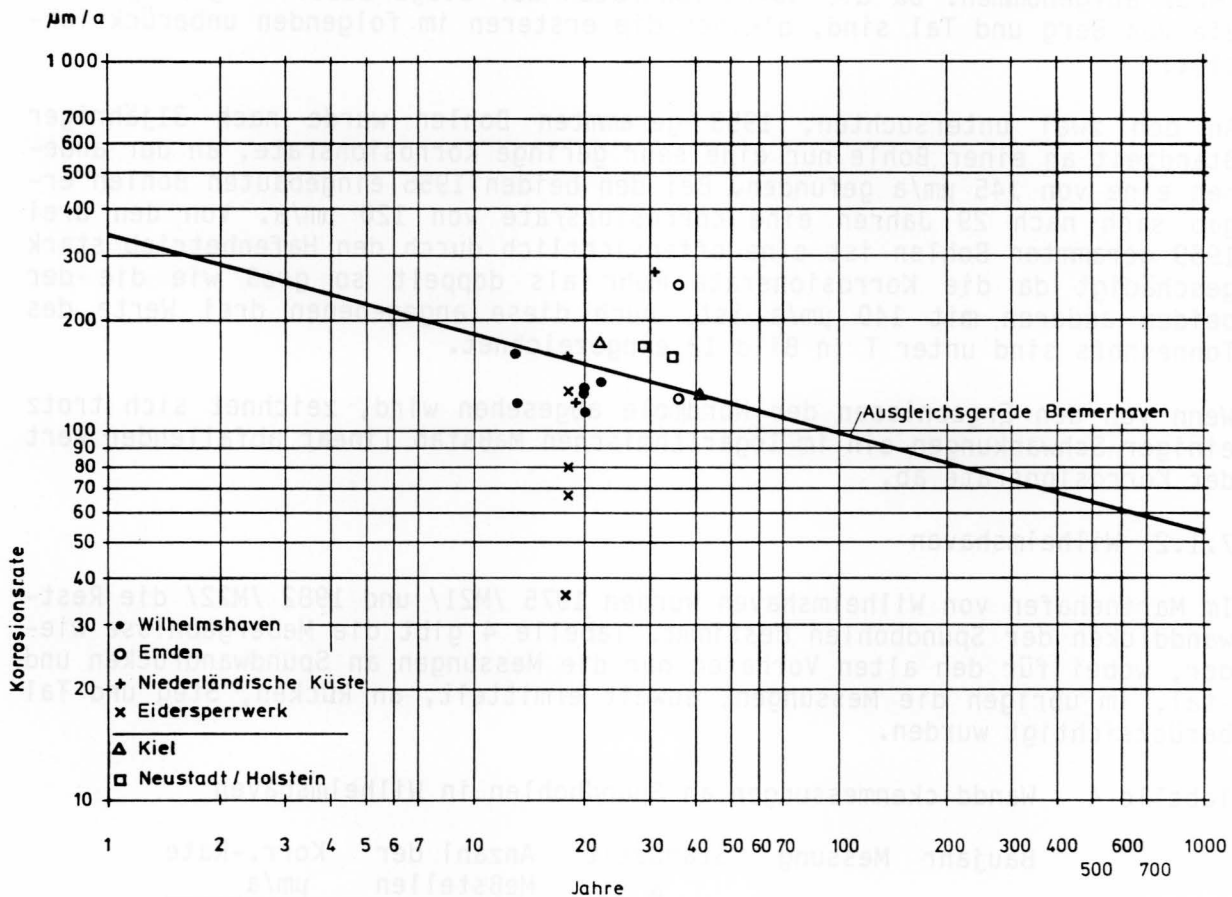


Bild 13: Korrosionsraten in Brack- und Ostseewasser

Die innerhalb des Dockhafens durchgeführten Messungen /M23/ ergeben jedoch einen Hinweis auf die Ortsabhängigkeit der Korrosion. Während im neuen Liegehafen der Staatswerft und am Marinekai im Industriehafen bei einer Standzeit von 30 bis 34 Jahren eine Korrosionsrate von etwa 75 µm/a gefunden wird, liegt sie am Südkai mit etwa 200 µm/a fast dreimal so hoch. Offensichtlich wirkt sich die Verladung von Erz und Kohle und damit das häufige Anlegen bzw. Liegen von Schiffen verstärkend auf die Korrosion aus, wie bereits vermutet.

Aufgrund dieser Beobachtung wird ein im tidebeeinflussten Außenhafen auftretender Effekt erklärlich: An der etwa 1150 m langen Spundwand tritt an den äußeren zur Ems bzw. zum Binnenhafen gelegenen Teilen bei einer Standzeit von 36 Jahren eine Korrosionsrate von 122 µm/a auf, während sie im mittleren, zur Verladung benutzten Teil auf 250 µm/a ansteigt.

In Bild 13 sind beide Werte eingezeichnet. Die Rate der ungestörten Korrosion liegt in unmittelbarer Nähe der Ausgleichsgeraden von Bremerhaven, während die durch die Verladung beeinflusste Korrosionsrate wesentlich darüber eingetragen ist.

7.1.4 Niederländische Küste

Wijngaard /6/ hat an drei Stellen der niederländischen Küste die Korrosionsraten bestimmt. Die stärksten Abrostungen, auf die im folgenden zurück-

gegriffen wird, sind in seiner Arbeit unter "Gezeiten und Spritzzone" aufgeführt.

In Delfzijl, das am westlichen Ufer der Ems gegenüber von Emden liegt, fand er nach einer Standzeit von 18 Jahren eine Korrosionsrate von 0,16 mm/a. Dieser in Bild 13 eingetragene Wert befindet sich unmittelbar an der Ausgleichsgeraden und korrespondiert mit dem von Emden.

Auch in Bruinisse in der Rheinmündung wurde mit einer Korrosionsrate von 0,12 mm/a bei einer Standzeit von 19 Jahren ein Wert ermittelt, der, wie Bild 13 zeigt, ebenfalls in der Nähe der Ausgleichsgeraden liegt.

Anders jedoch in Ijmuiden. Mit einer Korrosionsrate von 0,27 mm/a bei einer Standzeit von 31 Jahren treten Werte auf, wie sie nach Bild 13 an den Verladeanlagen des Außenhafens Emden gefunden wurden. In Ijmuiden mündet der für Seeschiffe befahrbare, nach Amsterdam führende Noordzeekanaal. Es ist nicht bekannt, an welchen Spundwänden die hohe Korrosionsrate gemessen wurde. Wahrscheinlich hängt sie mit dem Schifffahrtsweg, Schiffsanlandungen o. ä. zusammen.

7.1.5 Eidersperrwerk

An der nordfriesischen Küste schützt das Eidersperrwerk das Hinterland vor Sturmfluten, während bei normalen Gezeitenbewegungen das Wasser durch die fünf Sieltoröffnungen auf- bzw. ablaufen kann. Bei den im Jahre 1987 nach 18jähriger Standzeit durchgeführten Dickenmessungen /M24/ zeigte sich an den einzelnen Stahlspundwandbauwerken ein eigenartiges Verhalten.

Bei den Messungen, bei denen nur die Abrostung an Rücken und Tal berücksichtigt wurden, da, wie auch an anderen Orten, diese an den Stegen zum Teil wesentlich geringer sind, ergab sich für das südliche Widerlager an zwei Spundbohlen eine Korrosionsrate von 128 $\mu\text{m/a}$. Dieser, in Bild 13 eingetragene Wert liegt in der Nähe der Ausgleichsgeraden.

Anders jedoch die übrigen Werte. Am nördlichen Widerlager und Leitdamm wurde an sechs Spundbohlen mit 67 $\mu\text{m/a}$ eine Korrosionsrate ermittelt, die nur etwa halb so groß wie die am südlichen Widerlager ist.

Beide Schleusenhäfen werden nicht durchströmt. Die Korrosionsraten im Binnenhafen Nordseite mit 73 $\mu\text{m/a}$ und Außenhafen Nordseite mit 87 $\mu\text{m/a}$ - Mittelwert 80 $\mu\text{m/a}$ - liegen ebenfalls etwa doppelt so hoch wie die des Binnenhafens Südseite mit 35 $\mu\text{m/a}$ und des Außenhafens Südseite mit 37 $\mu\text{m/a}$ - Mittelwert 36 $\mu\text{m/a}$ -. Eine Erklärung für dieses Verhalten gibt es zur Zeit noch nicht.

7.2 Meerwasser: Nordsee

An den Inseln vor der deutschen Nordseeküste ist, auch wenn bei Ebbe die Wattenseite teilweise trocken fällt, mit Auswirkungen des durch die Flüsse Ems, Weser und Elbe einfließenden Süßwassers nicht oder nur in unbedeutendem Maße zu rechnen.

7.2.1 Wangerooge

Bei der Insel Wangerooge liegt das MTnw bei - 1,48 m NN.

Im Jahre 1975 wurden am Westanleger die Spundwände von Oberkante bis - 2,99 m NN vermessen /M21/. In der folgenden Tabelle 5 sind die Werte von Bohlenrücken und -tal bei dieser Tiefe, in deren Nähe offenbar das Korrosionsmaximum liegt, berücksichtigt.

1985 erfolgte eine weitere Ausmessung an einer Vielzahl von Bohlenrücken /M25/ jedoch nur jeweils bei - 2,00 m NN. Für die Abschnitte I bis III mußte als Berechnungsjahr für die Standzeit 1982 angesetzt werden, da seit dieser Zeit dieser Spundwandbereich kathodisch geschützt ist.

Tabelle 5 Wanddickenmessungen an den Spundwänden des Westanlegers der Insel Wangeroog

	Baujahr	Messung	Standzeit a	Anzahl der Messungen	Korr.-Rate $\mu\text{m/a}$
Ostseite					
Abschnitt I	1956	1975	19	6	188
Abschnitt III	1962	1975	13	3	294
Abschnitt I	1956	1982 KS	26	270	205
Abschnitt II	1957	1982 KS	25	144	250
Abschnitt III	1962	1982 KS	20	99	280
Westseite	1962	1985	23	107	280

Wie aus Bild 14 ersichtlich, schwanken die Ergebnisse stark, wobei drei Werte im Bereich 280 bis 300 $\mu\text{m/a}$ liegen, die anderen drei aber deutlich abfallen. Alle Punkte befinden sich oberhalb der Ausgleichsgeraden von Bremerhaven.

7.2.2 Langeoog

In Langeoog liegt das MTnw bei - 1,37 m NN.

Von den vier ausgemessenen Bohlen der Südmole war nur bei einer dieser Bereich erfaßt, während das an der Ostmole bei drei von vier Bohlen der Fall war /M26/.

Diese vier Meßreihen ergaben an Bohlenrücken und -tälern bei einer Standzeit von 34 Jahren eine Korrosionsrate von 141 $\mu\text{m/a}$. Der in Bild 14 eingetragene Wert liegt nur wenig oberhalb der Ausgleichsgeraden für Brackwasser in Bremerhaven.

7.2.3 Norderney

Ein auffälliges Korrosionsverhalten wurde an der Hafenkaje in Norderney gefunden /M26/. Bei einem MTnw von - 1,27 m NN ergab sich an einer 38 Jahre alten Bohle die sehr geringe Korrosionsrate von nur 61 $\mu\text{m/a}$, bei Bohlen mit 18jähriger Standzeit eine Korrosionsrate mit 137 $\mu\text{m/a}$. Da hier offensichtlich eine stark gehemmte Korrosion vorliegt, wurden diese Werte in Bild 14 nicht aufgenommen.

Eine Erklärung für die geringe Abrostung läßt sich vielleicht aus dem ähnlichen Korrosionsverhalten im Borkumer Schutzhafen (7.2.4) finden.

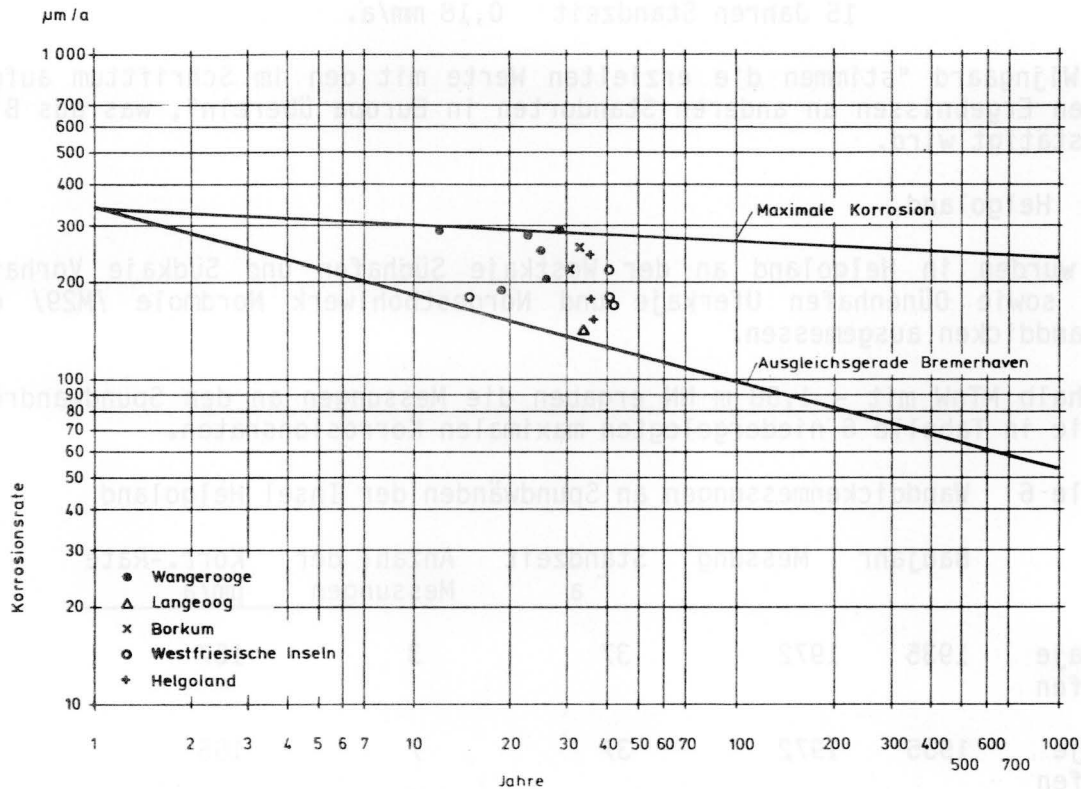


Bild 14: Korrosionsraten im Meerwasser

7.2.4 Borkum

In Borkum mit einem MTnw von - 1,26 m NN ergaben die Wanddickenmessungen /M27/ an der Leitwand Fischerbalje, die im Fahrwasser zum Wattenmeer steht, eine Korrosionsrate von 254 $\mu\text{m/a}$ nach 33jähriger Standzeit. Ebenso fand sich im Einfahrtbereich des Schutzhafens an einer Bohle der Ostkaje ein Wert von 219 $\mu\text{m/a}$ bei 31jähriger Standzeit. Beide Werte liegen merklich über der Ausgleichsgeraden von Bremerhaven.

Anders jedoch verhalten sich die vermessenen Bohlen der Ostkaje und Ostmole im Hafenbereich. Nach 31jähriger Standzeit tritt mit 55 $\mu\text{m/a}$ nur eine sehr geringe Korrosionsrate auf, die in Bild 14 ebenfalls nicht wiedergegeben ist. Nach den vorliegenden Ergebnissen erscheint es offensichtlich, daß die geringe Abrostung im Schutzhafen Borkum - das gilt auch für Norderney (7.2.3) und andere Häfen - mit dem Hafenbetrieb zusammenhängt. Wahrscheinlich wirkt sich das verschmutzte, vielleicht auch ölhaltige Wasser konservierend oder zumindest korrosionshemmend aus.

7.2.5 Westfriesische Inseln

Die von Wijngaard /6/ ermittelten Korrosionsraten in der "Gezeiten und Spritzzone" an den der niederländischen Küste vorgelagerten westfriesischen Inseln betragen für

Terschelling bei	41 Jahren Standzeit	0,18 bis 0,22 mm/a
Vlieland	42 Jahren Standzeit	0,17 mm/a
Texel	15 Jahren Standzeit	0,18 mm/a.

Nach Wijngaard "stimmen die erzielten Werte mit den im Schrifttum aufgeführten Ergebnissen an anderen Standorten in Europa überein", was aus Bild 14 bestätigt wird.

7.2.6 Helgoland

1972 wurden in Helgoland an der Westkaje Südhafen und Südkaje Vorhafen /M28/ sowie Dünenhafen Uferkaje und Nordostbohlwerk Nordmole /M29/ die Restwanddicken ausgemessen.

Unterhalb MTnW mit - 1,58 m NN ergaben die Messungen an den Spundwanddrücken die in Tabelle 6 niedergelegten maximalen Korrosionsraten.

Tabelle 6 Wanddickenmessungen an Spundwänden der Insel Helgoland

	Baujahr	Messung	Standzeit a	Anzahl der Messungen	Korr.-Rate µm/a
Westkaje Südhafen	1935	1972	37	3	157
Südkaje Vorhafen	1935	1972	37	7	155
Dünenhafen Uferkaje	1936	1972	36	2	176
Nordost- bohlwerk Nordmole	1936	1972	36	6	241

Die in Bild 14 eingezeichneten Werte streuen über den Bereich von nahe der Ausgleichsgeraden des Brackwassers von Bremerhaven bis in die Nähe der stärksten, auf Wangerooge gefundenen Korrosionsraten. Wenn auch die Korrosion am Nordostbohlwerk gegenüber der an anderen Standorten auf Helgoland wesentlich stärker erscheint, so liegt sie doch nicht außergewöhnlich hoch.

7.3 Meerwasser: Ostsee

Die Ostsee kann als Binnenmeer mit starkem Süßwasserzufluß angesehen werden. Der Salzgehalt nimmt von der Verbindung zur Nordsee am Kattegat im Westen zum Bottnischen Meerbusen im Nordosten stark ab. So liegt z. B. in Kiel, im Mittel der Salzgehalt um 15 ‰ /11/, was in etwa dem Brackwasser von Cuxhaven entspricht. Im folgenden soll die Ostsee zwar getrennt behandelt, aber mit dem Brackwasser der Nordsee bei Bremerhaven verglichen werden.

7.3.1 Kiel

In Kiel macht sich die Tide nicht mehr bemerkbar. Demnach liegt ein kon-

stanter Wasserspiegel vor, wenn von dem bei starken Winden bzw. Stürmen auftretenden Stau abgesehen wird.

Am Ostufer der Kieler Förde waren bei Mönkeberg 1943 Stahlspundwände gerammt worden. 1984 nach 41jähriger Standzeit /M30/ ergab sich an drei Meßstellen, wobei jeweils zwei Bohlenrücken, -täler und -stege ausgemessen wurden, eine maximale Korrosionsrate von 123 $\mu\text{m/a}$.

An der Instandsetzungskaje am Brandenburger Ufer des Tirpitzhafens ist eine kombinierte Spundwand aus Doppel-T-Trägern mit Füllbohlen eingebaut. Nach 22jähriger Standzeit wurde 1987 die Abrostung an 6 Stellen bestimmt /M31/, und zwar jeweils am Bohlenrücken, -tal und -steg der Füllbohlen sowie dem Flansch des Trägers. Die mit 173 $\mu\text{m/a}$ ermittelte Korrosionsrate liegt nach Bild 13 ebenso wie die von Mönkeberg etwas oberhalb der Ausgleichsgeraden des Brackwassers von Bremerhaven.

7.3.2 Neustadt Holstein

Im Marinehafen Neustadt in Holstein wurde an den 1939 geramten Spundwänden nach 39 /M32/ und 45 Jahren Standzeit /M33/ an jeweils 10 Stellen das auch anderenorts auftretende Abrostungsverhalten gefunden, daß der Bohlenrücken stärker korrodiert als Bohlentäl und -steg. Im vorliegenden Falle beträgt die Korrosion an Tal und Steg weniger als die Hälfte bis etwa ein Drittel der Korrosion des Rückens.

Die in Bild 13 eingetragenen Korrosionsraten an den Spundwandrücken von 171 $\mu\text{m/a}$ nach 39 Jahren und 150 $\mu\text{m/a}$ nach 45 Jahren liegen wiederum oberhalb der Ausgleichsgeraden von Bremerhaven.

7.4 Ostfriesische Sielhäfen

Ein Sonderfall der Korrosion an Stahlspundwänden soll an dieser Stelle nur kurz erwähnt werden. In einigen ostfriesischen Sielhäfen trat sehr starke Korrosion auf, die nach verhältnismäßig kurzer Zeit zur Durchrostung führte. Hangen /16/ gibt für

Bensersiel bei einer Standzeit von 30 Jahren eine Korr.-Rate von 316 $\mu\text{m/a}$
Harlesiel " " " " 18 Jahren " " " " 528 $\mu\text{m/a}$
Neuharlingersiel " " " " 13 Jahren " " " " 731 $\mu\text{m/a}$

an.

Martini und Mennenöh /17/ haben versucht, durch Messung von Elementströmen an Blechen den Grund für die starke Korrosion zu finden. Eine eindeutige Erklärung konnten sie jedoch nicht geben. Es steht wohl fest, daß die Korrosion durch den starken Schlickfall und die dadurch erforderlichen Baggerungen beeinflußt wird.

Diese genannten, sehr großen Korrosionsraten sollen in der vorliegenden Arbeit nur allgemein auf mögliche, außergewöhnliche Korrosion hinweisen, die unter bestimmten Voraussetzungen eintreten kann. In die weitere Betrachtung werden diese Werte und damit Ausnahmefälle nicht einbezogen.

8 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse und Folgerungen der Korrosion in Süßwasser sind in Abschnitt 6 behandelt worden.

Anhand der wenigen, vorliegenden Daten aus Brack- und Meerwasser soll versucht werden, die in Abschnitt 1 angeführten Fragen zu beantworten.

8.1 Zeitabhängigkeit der Korrosionsrate

Durch eine Vielzahl von Messungen in stehendem oder schwach fließendem Süßwasser (siehe Abschnitt 5 und 6) wurde festgestellt, daß die Korrosionsrate nicht wie in den EAU 1985 /1/ angegeben konstant ist, sondern einer Potenzfunktion folgend abnimmt. Leider stehen für Brack- und Meerwasser solche Meßreihen nicht zur Verfügung. Aber schon aus den vier Messungen an der Columbuskaje in Bremerhaven an jeweils 8 bis 10 Stellen nach 39-, 47-, 50- und 58jähriger Standzeit läßt sich die mit der Zeit kleiner werdende Korrosionsrate erkennen.

An zwei weiteren Standorten in Bremerhaven nämlich an der Stromkaje und im Tonnenhof liegen die Korrosionsraten bei geringeren Standzeiten entsprechend höher. Eine durch die Werte der drei Standorte gezogene Ausgleichsgerade, um die die Einzelwerte nur wenig streuen, ergibt für die Korrosionsrate nach 1jähriger Standzeit einen Wert von ca. 340 $\mu\text{m/a}$.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß wie im Süßwasser so auch im Brack- und ebenfalls Meerwasser die Korrosion und damit die Größe der Korrosionsrate von der Standzeit abhängt.

8.2 Ortsabhängigkeit der Korrosionsrate

Wie aus den Wanddickenmessungen im Emdener Hafen hervorgeht, treten an Verladeanlagen wesentlich stärkere Abrostungen auf als an unbeeinflussten Stahlspundwänden. Dieser Sonderfall soll bei der folgenden Betrachtung ausgeklammert werden.

Das Brackwasser des Küstengebietes ist nicht einheitlich. Durch den Zufluss von Süßwasser in den Flußmündungsgebieten von Elbe, Weser, Ems und Rhein liegt hier ein stärker schwankender Salzgehalt vor als an anderen, von den Flußmündungen weiter entfernt liegenden Küstenstreifen. Daß demnach für die Küste die Korrosion ortsabhängig ist, erscheint einleuchtend.

Die der Küste vorgelagerten Inseln sind praktisch von Meerwasser umgeben. Für die westfriesische Insel Terschelling gibt Wijngaard /6/ einen Schwankungsbereich für die Korrosionsrate von 0,18 bis 0,22 mm/a bei 41jähriger Standzeit an.

Auch auf der ostfriesischen Insel Wangerooge liegen an einer Kaianlage, deren Einzelabschnitte 1956, 1957 und 1962 gebaut wurden, unterschiedliche, nach der Korrosions-Zeit-Gleichung nicht vergleichbare, Korrosionsraten vor.

Wenn aber schon auf einer Insel Stahlspundwände unterschiedlich korrodieren, so ist das erst recht für verschiedene Standorte zu erwarten, was durch die stark streuenden Meßpunkte in Bild 14 bestätigt wird.

Die Frage nach der Ortsabhängigkeit der Korrosionsrate muß daher bejaht werden, wobei es nicht Aufgabe des vorliegenden Berichtes ist, die Gründe für die starken Schwankungen herauszufinden, was auch zumindest zur Zeit gar nicht möglich ist.

8.3 Größe der Korrosionsrate

In den EAU 1985 /1/ wird für die deutschen Seehäfen mit einer über die Zeit konstanten Korrosionsrate von 0,12 mm/a gerechnet.

Aus den Meßwerten im Brackwasser von Bremerhaven ergibt sich nach 1jähriger Standzeit mit einer Korrosionsrate von 340 µm/a der gleiche Wert, wie er auch im Süßwasser gefunden wurde. Es stellt sich aber die Frage, ob diese Korrosionsrate, die in der in Abschnitt 2 angeführten Gleichung der Korrosionskonstanten c entspricht, eine für die Korrosion von Stahl von der Zusammensetzung des Wassers unabhängige Konstante oder nur zufällig ist.

Für Bremerhaven läßt sich nach Bild 12 für eine Standzeit von

10	Jahren	eine	Korrosionsrate	von	180 µm/a
20	"	"	"	"	150 µm/a
50	"	"	"	"	115 µm/a
90	"	"	"	"	100 µm/a

ermitteln. In den übrigen deutschen Seehäfen im Bereich des Brackwassers werden nach Bild 13 bei ungestörter Korrosion nur wenig abweichende Korrosionsraten zu erwarten sein.

Anders im Meerwasser, wo die Korrosionsraten stark streuen. In Bild 14 wurde durch die höchsten Werte eine Ausgleichsgerade gezogen, die ebenfalls durch 340 µm/a nach 1jähriger Standzeit geht. Ob dieser Verlauf gerechtfertigt ist, erscheint jedoch fraglich. Mangels ausreichender Messungen wird er als hypothetische Arbeitsgrundlage angenommen. Danach liegen alle im Meerwasser gefundenen Korrosionsraten zwischen diesen von 340 µm/a ausgehenden Strahlen. Als maximale Korrosionsrate ergeben sich daraus für eine Standzeit von

10	Jahren	eine	Korrosionsrate	von	300 µm/a
20	"	"	"	"	290 µm/a
50	"	"	"	"	277 µm/a
90	"	"	"	"	270 µm/a.

Werden die Mittelwerte zwischen den beiden Strahlen zugrunde gelegt, so berechnen sich die Korrosionsraten nach

50	Jahren	Standzeit	zu	196 µm/a
90	"	"	"	185 µm/a.

Diese Werte liegen deutlich höher als in den EAU 1985 angegeben.

9 Folgerungen für den Bau von Stahlspundwänden in Brack- und Meerwasser

Für die Bemessung einer Spundwand ist das auftretende, statische Moment maßgebend. Um die geforderte Nutzungsdauer zu gewährleisten, ist bei der

Berechnung die Schwächung der Spundwand durch die Abrostung zu berücksichtigen.

Da im Tidebereich praktisch immer die Zone stärkster Korrosion um bzw. kurz unterhalb MTnw auftritt, läßt sich bei der Planung des Bauwerks beurteilen, ob diese Zone mit dem Bereich größerer oder gar maximaler statischer Beanspruchung zusammenfällt. Dann muß die Spundwand so bemessen werden, daß am Ende der Nutzungsdauer nach Berücksichtigung der Gesamtabrostung - falls nicht ein passiver oder aktiver (kathodischer) Korrosionsschutz eingeplant wird - noch die für die statische Beanspruchung benötigte Wanddicke vorhanden ist.

Nach den EAU 1985 nimmt im Meerwasser die Korrosion linear zu. Für die deutschen Seehäfen berechnet sich danach die Abrostung nach: Korrosionsrate von 0,12 mm/a multipliziert mit der vorgesehenen Standzeit bzw. Nutzungsdauer. Aus den vorliegenden Ergebnissen geht jedoch hervor, daß auch die Korrosion in Brack- und Meerwasser einer Potenz-Funktion folgt.

Unter der Voraussetzung, daß die in Bild 14 eingetragenen Ausgleichsgeraden realistisch sind, was für "Bremerhaven" aufgrund der vorliegenden Messungen wahrscheinlich ist, dagegen für "maximale Korrosion" als Hypothese angenommen wird, ergeben sich die in Bild 15 wiedergegebenen Gesamtabrostungen.

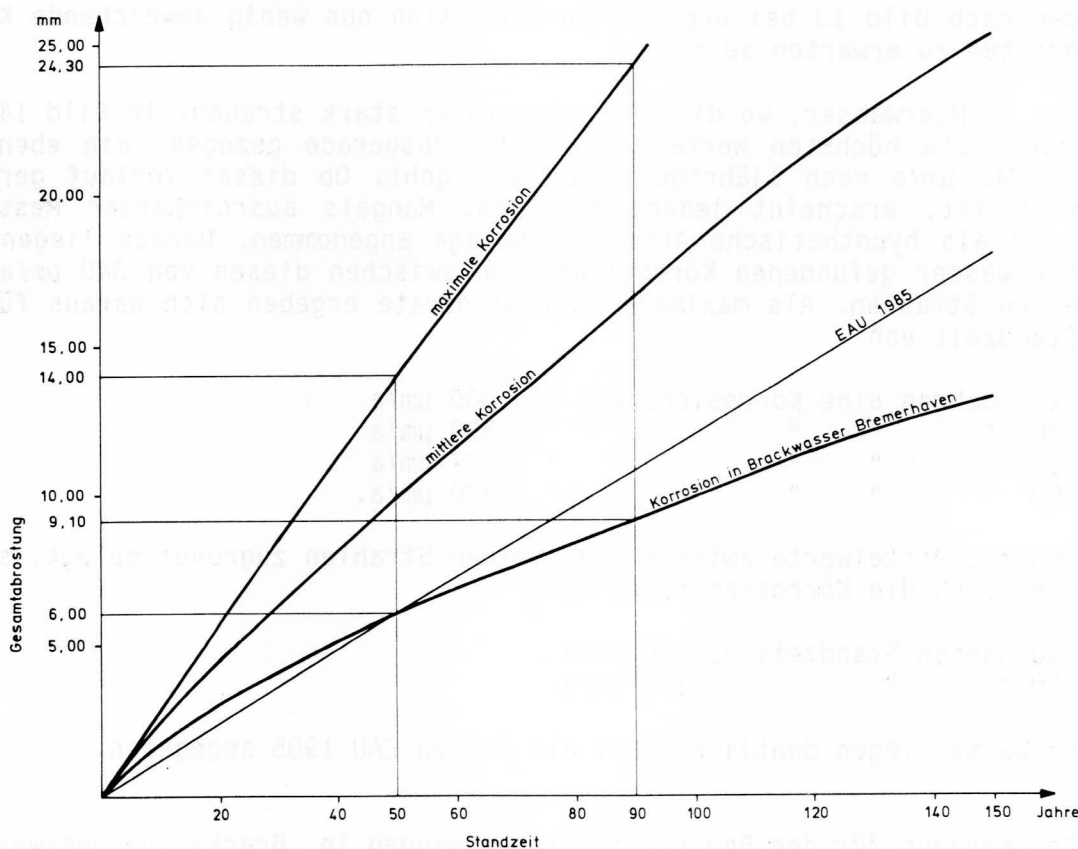


Bild 15: Gesamtabrostung im Meerwasser

In den deutschen Seehäfen, in denen Brackwasser ansteht, ist danach bei einer 50jährigen Nutzungsdauer mit einer Gesamtabrostung von 6,0 mm, bei 90jähriger Standzeit von 9,1 mm zu rechnen. Da diese Werte, wie aus Bild 15 ersichtlich, nicht sehr stark von den nach den EAU 1985 berechneten abweichen, ergibt sich, daß die in den EAU 1985 /1/ unter 8.1.10.2 angeführte "Korrosion in aggressivem Wasser und in Seewasser" mit einer linearen Korrosionsrate von 0,12 mm/a nur für Brackwasser bei Standzeiten von 50 Jahren und mehr eine Abschätzung ausreichender Dickenzuschläge erlaubt.

Anders in reinem Meerwasser. An einigen exponierten Stellen wie auf der ostfriesischen Insel Wangerooge ist mit sehr starker Korrosion zu rechnen, die vielleicht darauf zurückzuführen ist, daß sich durch Abrieb hervorgerufen z. B. durch starke Strömung evtl. mit Sandschliff eine festhaftende Korrosions- bzw. Bewuchsschicht nicht ausbilden kann, so daß hierdurch u. U. immer mit der sogenannten "Anfangskorrosion" zu rechnen wäre. Im vorliegenden Fall nimmt die Gesamtabrostung nach Bild 15 fast linear zu. Danach ist nach 50 Jahren Standzeit mit einer Gesamtabrostung von ca. 14,0 mm und 90 Jahren gar von ca. 24,3 mm zu rechnen.

Da es sich bei der maximalen und der Brackwasserkorrosion um Extremwerte handelt, sollte für Meerwasser als erste Näherung der Mittelwert angesetzt werden. Günstiger erscheint es jedoch, an vorhandenen Bauwerken Spundbohlen auszumessen und aus den daraus ermittelten Korrosionsraten auf das Korrosionsverhalten zu schließen und so die zu erwartende Gesamtabrostung abzuschätzen.

10 Zusammenfassung

Stahlspundwände korrodieren im Süßwasser nach Literaturangabe wie z. B. den EAU 1985 mit einer mittleren, linearen Abrostungsrate von 0,012 mm/a. Aufgrund von Auslagerungsversuchen konnte gezeigt werden, daß im stehenden oder schwach fließenden Wasser die Korrosion nicht linear verläuft, sondern einer Korrosions-Zeitgleichung folgt. Eine Vielzahl von Wanddickenmessungen am Mittellandkanal ermöglicht es, aus der sich im doppellogarithmischen Maßstab ergebenden Geraden die über die Zeit veränderlichen, maximalen Korrosionsraten genauer abzuschätzen.

Messungen an Spundwänden an einer Reihe anderer Standorte zeigten, daß bis auf wenige Ausnahmen die ermittelten maximalen Korrosionsraten mit denen des Mittellandkanals korrespondieren.

Nach den Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" (EAU 1985) "kann bei der Korrosion in deutschen Seehäfen in der Hauptangriffszone mit einer jährlichen Schwächung um im Mittel 0,12 mm gerechnet werden. Ungünstige Verhältnisse können die Korrosion mehr als verdoppeln."

Aufgrund von Messungen im Brackwasser des Seehafens Bremerhaven konnte jedoch gezeigt werden, daß auch hier wie im Süßwasser die Korrosion über die Zeit nicht linear zunimmt, sondern einer Potenz-Funktion folgt. Wenn es auch wegen der nur wenigen, vorliegenden Messungen nicht möglich ist, diesen Verlauf in Meerwasser nachzuweisen, so muß doch davon ausgegangen werden, daß die in Abschnitt 2 angegebene Korrosions-Zeit-Gleichung in allen natürlichen Wässern Gültigkeit besitzt.

Ferner ist die Korrosion wasser- und damit ortsabhängig. Nach vorliegenden Meßergebnissen läßt sich die Korrosion an Stahlspundwänden im Brackwasser von Bremerhaven recht gut abschätzen. In anderen Seehäfen im Brackwasserbereich und auch im Ostseewasser von Kiel und Neustadt/Holstein ist nur mit gering abweichender Abrostung zu rechnen.

Demgegenüber ist die Korrosion im Meerwasser zum Teil wesentlich stärker, und sie schwankt erheblich. Selbst an einem Ort wie z. B. am Anleger der ostfriesischen Insel Wangerooge wird an verschiedenen Bauwerksteilen stark unterschiedliche Abrostung gefunden. Die Gründe dafür sind nicht bekannt. Vielleicht spielt die Korrosions- und Bewuchsschicht und deren mehr oder weniger behinderte Ausbildung z. B. durch starke Strömung eine Rolle. Für Meerwasser lassen sich daher nur in erster Näherung Mittelwerte der Korrosionsraten abschätzen, die aber merklich über- aber auch unterschritten werden können. Inwieweit daher für Brack- und Meerwasser der in den EAU 1985 angegebene Mittelwert von 0,12 mm/a angesetzt werden kann, muß für jeden Einzelfall erwogen werden.

Kurz anzumerken ist noch, daß generell an Verladeanlagen die Korrosion wesentlich größer sein kann als an benachbarten Bauwerken.

Bei der Berechnung einer Spundwand muß die für die Nutzungsdauer zu erwartende Abrostung berücksichtigt werden. Es ist festzulegen, ob die hier angesprochene maximale Rostung in den Bereich größter oder geringerer statischer Beanspruchung zu liegen kommt. Daraus ergibt sich, ob die geschätzte, zu erwartende Abrostung zu der für die statische Beanspruchung erforderliche Bohlendicke voll hinzuzuschlagen ist oder ein geringerer Zuschlag ausreicht.

11 Weiteres Vorgehen

Die vorliegende Arbeit ist als Versuch anzusehen, aufgrund der bisher nur verhältnismäßig wenigen existierenden Meßdaten Aussagen über die Korrosion von Spundwänden in Süß-, Brack- und Meerwasser zu machen. Gleichzeitig soll sie zu weiteren Untersuchungen anregen, um die Kenntnisse über die Abhängigkeit der Korrosion von verschiedenen Parametern zu erweitern.

Bei einer Fortführung der hier vorgelegten Arbeit sollte versucht werden, aus weiteren Daten - nicht nur von der deutschen Nord- und Ostsee - die vorliegenden Ergebnisse zu bestätigen, korrigieren oder genauer zu fassen.

Um die größte Ungenauigkeit (siehe Abschnitt 4.2), die Unkenntnis der Ausgangsdicke auszuschalten, ist von der Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, vorgesehen, bei Neubauten an bzw. in der Nord- und Ostsee die Ausgangsdicke der Stahlspundbohlen vor dem Einbau zu messen und die Einbaustelle festzuhalten. In größeren Zeitabständen sollen dann die sich ergebenden Korrosionsprofile ermittelt werden. So müßte es gelingen, für einzelne Standorte die Korrosionsraten genauer festzulegen.

Weitere Umweltbedingungen wie Salzgehalt des Wassers, Strömung mit oder ohne Sandtransport, Belastung durch anlegende Schiffe, Materialverladung, Hinterfüllung der Bohlen, evtl. Undichtigkeiten in der Spundwand und damit mögliche, rückseitige Korrosion sind in die Betrachtung bzw. Auswertung mit einzubeziehen. Erst eine Vielzahl von solch ausführlichen Auswertungen werden bei Kenntnis der vorherrschenden Umweltbedingungen genauere Abschät-

zungen der zu erwartenden Korrosion bei der Planung von Stahlwasserbauten in Brack- und Meerwasser ermöglichen.

12 Literatur

/1/ Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" (EAU 1985) herausgegeben vom Arbeitsausschuß "Ufereinfassungen" der Hafentechnischen Gesellschaft e. V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.
Berlin: Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1985

/2/ ALBERTS, D.; EIBFELDT, F.P.; SCHUPPENER, B.
Beurteilung alter Spundwandbauwerke an den norddeutschen Küsten
Vortrag gehalten auf der Baugrundtagung vom 22. bis 24. September 1986 in Nürnberg

/3/ Grundbau Taschenbuch Bd. 2, 3. Auflage 1982

/4/ Spundwand Handbuch, Berechnung
Hoesch Hüttenwerke AG 1985

/5/ MORLEY, J.; BRUCE, D. W.
Survey of steel piling performance in marine environments
British Steel Corporation
EGKS Forschungsvertrag Nr. 7210. KB/804
veröffentlicht durch Commission of the European Communities

/6/ WIJNGAARD, B. H.:
Spundwandkorrosion im Seewasser
Zusammenfassung des Abschlußberichtes zum EGKS Forschungsvorhaben 7210. KB/605; in: Stahl und Eisen 102 (1982) Nr. 11 S. 583/584

/7/ Public Works Canada (Hrsg.):
Studie: "Entwicklung von technischen Kriterien zur Festlegung der zulässigen Abrostungsrate bei Stahlspundwänden", März 1986

/8/ SCHWENK, W.; TERNES, H.
Rostungsgeschwindigkeit unlegierter und niedriglegierter Baustähle.
In: Stahl und Eisen 88 (1968).

/9/ BECKER, G., DHINGRA, D.; THOMA, Ch.
Mechanismus der Rostbildung auf witterungsbeständigem Stahl.
In: Arch. Eisenhüttenwesen 40 (1969).

/10/ BOHNENKAMP, K.; BURGMANN, G.; SCHWENK, W.
Untersuchung über die atmosphärische Korrosion von unlegierten und niedriglegierten Stählen in Meeres-, Land- und Industrieluft
In: Stahl und Eisen 93 (1973)

/11/ HEIN, W., LADENBURG, H.; MENNENÖH, S.; SCHRÖDER, H. Th.
Untersuchung über das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl in Hafenwässern des deutschen Küstengebietes.
Herausgegeben durch die Hafentechnische Gesellschaft e. V. Hamburg (1975).

Hein: Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser

/12/ HEIN, W.; KLEIN, K.

Untersuchung über den Temperatureinfluß auf das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl im Emdener Hafenwasser.

In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 51 (1982).

/13/ Technische Lieferbedingungen für Stahlspundbohlen, Fassung 1985.

In: Verkehrsblatt (1985) S. 918.

/14/ HEIN, W.:

Korrosion über und unter dem Wasserspiegel.

In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 55 (1984).

/15/ ULRICH, G:

Korrosionsverhalten von Stahlwasserbauten

In: Hansa 124 (1987) S. 1492 - 1504.

/16/ HANGEN, U.:

Korrosion an Stahlspundwänden in einigen ostfriesischen Sielhäfen

In: Wasser und Boden 36 (1984) H. 8 S. 381-386.

/17/ MARTINI, A.; MENNENÖH, S.:

Über die Ausbildung von Makroelementen an Spundbohlen in Meerwasser

In: Hansa 117 (1980) Nr. 23, S. 1825-1830

13 Meßberichte (unveröffentlicht)

/M1/ Berndt und Schuppener

Bericht über die Wanddickenmessung an den Spundwänden des Mittellandkanals von MLK-km 28,9 bis 63,53 (Bereich Osnabrück)

Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, April 1986

/M2/ Alberts und Schuppener

Bericht über die Wanddickenmessung an den Spundwänden des Mittellandkanals von MLK-km 71,0 bis 123,5 (Bereich Minden)

Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, April 1986

/M3/ Dehm und Wagner

Bericht über die Wanddickenmessung an den Spundwänden des MLK im Bereich km 138,100 bis km 175,000 (Bereich Hannover)

Bundesanstalt für Wasserbau, Juni 1986

/M4/ Dehm und Wagner

Bericht über die Wanddickenmessung an den Spundwänden des MLK im Bereich km 195,00 bis km 256,55 und Salzgitter-Stichkanal (Bereich Braunschweig)

Bundesanstalt für Wasserbau, Juni 1986

/M5/ Ulrich, G.

Abrostungsraten an Stahlwasserbauteilen im Hamburger Hafen

Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenbau, Baustofftechnik, 1983

/M6/ Dehm und Schröder

Bericht über die Wanddickenmessung mit Ultraschall an den Stahlspundbohlen im Bereich der Neubauabteilung Elbehafen Brunsbüttel

Bundesanstalt für Wasserbau, Mai 1973

Hein: Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser

/M7/ Annuss und Störmer

Bericht über Wanddickenmessungen mit Ultraschall an den Spundbohlen am E1-behafenen Brunsbüttel
Bundesanstalt für Wasserbau, November 1982

/M8/ Widerlagerumspundung der Straßenbrücke über die Lecker Au
Hoesch Hüttenwerke 1978

/M9/ Ufereinfassung im Unterwasser der Schleuse Dorsten am WDK
Hoesch Hüttenwerke 1987

/M10/ Spundwand zur Sicherung eines Brückenwiderlagers am DHK (km 20,722)
Hoesch Hüttenwerke 1987

/M11/ Berndt und Schuppener

Meßbericht über die Wanddickenmessung im Dortmund-Ems-Kanal zwischen

a) Kanal-km 16,644 und Kanal-km 20,734 Westseite

b) Kanal-km 16,25 und Kanal-km 21,0 Ostseite

Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, November 1987

/M12/ Tillmann

Ultraschallmessungen an Spundwänden im Beckenhafen Andernach
Barthel und Schreiber, Duisburg, Februar 1984 (durch Stadtwerke Andernach)

/M13/ Annuss und Störmer

Bericht über Ultraschall-Wanddickenmessungen an der Schleuse Schwabenheim
Bundesanstalt für Wasserbau, Juli 1986

/M14/ Dehm und Wagner

Bericht über die Wanddickenmessungen an den Spundwänden der Schleuse Bad Abbach und im Bereich Regensburg
Bundesanstalt für Wasserbau, Juli 1985

/M15/ Alberts und Schuppener

Gutachten zu den Abrostungen der Stahlspundwände im Bereich des Weserwehres Bremen-Hemelingen
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Juli 1987

/M16/ Annuss und Schröder

Bericht über die Wanddickenmessungen mit Ultraschall an Spundbohlen und Stahlrammpfählen der Columbuskaje Bremerhaven
Bundesanstalt für Wasserbau, Juni 1968

/M17/ Annuss und Schröder

Bericht über die Wanddickenmessung mit Ultraschall an Spundbohlen und Stahlrammpfählen der Columbuskaje und Stromkaje Bremerhaven
Bundesanstalt für Wasserbau, Oktober 1975

/M18/ Wanddickenmessungen an der Columbuskaje Bremerhaven, Juli 1978

Zur Verfügung gestellt durch:

Senator für Hafen, Schifffahrt und Verkehr, Bremen

/M19/ Wanddickenmessungen an der Columbuskaje Bremerhaven August 1986

Zur Verfügung gestellt durch:

Senator für Hafen, Schifffahrt und Verkehr, Bremen

Hein: Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser

/M20/ Alberts und May

Gutachten zum Erhaltungszustand der Tonnenhofkaje in Bremerhaven
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Februar 1984

/M21/ Annuss und Schröder

Bericht über die Wanddickenmessung mit Ultraschall an den Spundbohlen
im Bereich des Wasser- und Schifffahrtsamtes Wilhelmshaven
Bundesanstalt für Wasserbau, Mai 1975

/M22/ Alberts und Schuppener

Gutachten über den Erhaltungszustand der Kajen im Vorhafen zur 4. Einfahrt
in Wilhelmshaven
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, November 1982

/M23/ Dehm und Schröder

Wanddickenmessung mit Ultraschall an den Spundbohlen und Stahlrampfpfählen
im Hafbereich des Wasser- und Schifffahrtsamtes Emden
Bundesanstalt für Wasserbau, Dezember 1979

/M24/ Alberts und Schuppener

Gutachten zu den Abrostungen der Stahlspundwände im Bereich des Eider-
sperrwerks
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Oktober 1987

/M25/ Niedersächsisches Hafenamts Norden

Spundwandmessungen Wangerooge, 1985

/M26/ Annuss und Schröder

Wanddickenmessungen mit Ultraschall an den Spundbohlen im Bereich des
Wasser- und Schifffahrtsamtes Norden
Bundesanstalt für Wasserbau, Mai 1972

/M27/ Dehm und Schröder

Erläuterungsbericht über die Wanddickenmessungen mit Ultraschall an den
Spundwänden im Schutzhafen Borkum
Bundesanstalt für Wasserbau, Juli 1970

/M28/ Dehm und Schröder

Bericht über die Wanddickenmessungen mit Ultraschall an den Spundbohlen im
Bereich des Wasser- und Schifffahrtsamtes Tönning auf Helgoland
Bundesanstalt für Wasserbau, Oktober 1972

/M29/ Dehm und Zeidler

Bericht über die Wanddickenmessung mit Ultraschall an den Stahlspundbohlen
im Bereich der Gemeinde Helgoland
Bundesanstalt für Wasserbau, Oktober 1972

/M30/ Alberts und Schuppener

Wanddickenmessung an der Stahlspundwand in Kiel-Mönkeberg
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Mai 1984

/M31/ Alberts und Schuppener

Spundwanddickenmessung und Untersuchung der Spundwandhinterfüllung für die
Instandsetzungskaje Marinestützpunkt Kiel
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, April 1988

Hein: Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser

/M32/ Dehm und Knieß

Bericht über die Wanddickenmessung mit Ultraschall an den Spundwänden
der Hafenspundwand im Marinehafen Neustadt in Holstein
Bundesanstalt für Wasserbau, November 1978

/M33/ Alberts und Schuppener

Bericht über die Untersasser-Inspektion und Wanddickenmessung an der
Stahlspundwand im Marinehafen Neustadt in Holstein
Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, März 1985

1932, Mann und Knief
Bericht über die Wanddickenmessung mit Härteprobe an den Spindeln
der Wasserdampf im Hartstein im Bereich in Holzstein
Landesanstalt für Wasserbau, Wiesbaden 1932

1932, Klotz und Schuppert
Bericht über die Untersuchungen zur Wanddickenmessung an der
Hartstein im Hartstein im Bereich in Holzstein
Landesanstalt für Wasserbau, Wiesbaden, März 1932