

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Annuß, Helmut; Dehm, G.; Hein, Wolfgang; Schröder, H. Th.

Korrosion an Spundwänden - Wand-Dickenmessungen mit Ultraschall

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102989>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Annuß, Helmut; Dehm, G.; Hein, Wolfgang; Schröder, H. Th. (1976): Korrosion an Spundwänden - Wand-Dickenmessungen mit Ultraschall. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 40. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 23-48.

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.



Ing. (grad.) H. Annuß

G. Dehm

Dr. rer.nat. W. Hein

Dipl.-Ing. H.-Th. Schröder

KORROSION AN SPUNDWÄNDEN

WAND-DICKENMESSUNGEN MIT ULTRASCHALL

Corrosion at sheet pilings

Supersonic wall-thickness measurements

Zusammenfassung

Im norddeutschen Küstengebiet sind in den letzten Jahren an zahlreichen Stahlspundwänden Dickenmessungen mit Ultraschall durchgeführt worden. Aufgrund der Ausmessungen lassen sich im Unterwasserbereich drei Korrosionstypen unterscheiden.

Aus den maximalen Abrostungen wurden die Korrosionsraten errechnet, wobei vereinfacht angenommen wird, daß die Korrosion nur einseitig erfolgt und hinter der verfüllten Wand vernachlässigbar klein ist.

Mit Hilfe der ermittelten Werte lassen sich für den planenden und bauenden Ingenieur die Spundwanddicken abschätzen, die in einem bestimmten Wasser für eine vorgegebene Gebrauchsdauer erforderlich sind

Summary

In the northern German coastal area supersonic thickness measurements at various steel sheet pilings were carried out. According to the measurements three corrosion types can be distinguished in the sub-water area.

The corrosion rates were calculated according to the maximum rustings, which leads to the simplified assumption that the corrosion takes place only on one side and that it is negligible small behind the filled wall.

By means of the ascertained values the planning and constructing engineer can determine the thicknesses of the sheet piling, which are necessary in a certain water for an alleged time of use.

I n h a l t

	Seite
1. Einleitung	25
2. Typen der Abrostungsprofile	25
3. Waddickenmessung	26
3.1 Ultraschallmessungen	26
3.1.1 Reinigung der Meßstellen	26
3.1.2 Meßverfahren	26
3.1.3 Genauigkeit der Meßergebnisse	27
3.2 Zerstörende Messungen	27
3.3 Unsicherheit der Ergebnisse	27
4. Meßergebnisse	28
4.1 Küstenkanal im Stadtgebiet Oldenburg	28
4.2 Dockhafen Emden	29
4.3 Außenhafen Emden	31
4.4 Elbehafen Brunsbüttel	32
4.5 Columbuskaje Bremerhaven	32
4.6 Wilhelmshaven	34
4.7 Hafen Norddeich und Benersiel	35
4.8 Ostfriesische Inseln	36
4.9 Helgoland	38
4.10 Tonnenhof Kiel	41
4.11 Zerstörende Prüfungen im Bereich der WSD Nord	41
5. Diskussion der Ergebnisse	41
5.1 Korrosionsprofile	42
5.2 Korrosionsraten	46
6. Zusammenfassung.	47

1. Einleitung

Stahlbauwerke, wie sie z.B. Stahlspundwände darstellen, korrodieren in natürlichen Wässern unterschiedlich stark. Während im Süßwasser - Fluß- und Kanalwasser - im allgemeinen nur eine schwache Abrostung eintritt, sind sie im Seegebiet einer starken Korrosion ausgesetzt. Da insbesondere der Hafenaufbau mit diesem Problem konfrontiert ist, hatte der Ausschuß für Korrosionsfragen der Hafentechnischen Gesellschaft in den vier norddeutschen Häfen: Bremerhaven, Cuxhaven, Kiel und Hamburg Korrosionsversuche durch Auslagerung von Winkeln aus Baustahl U ST 37 über 12 Jahre durchführen lassen.

Auf die Ergebnisse der umfangreichen Arbeit, bei der nicht nur die Abrostung verfolgt, sondern auch ausführliche Analysen der Wässer u.a. Untersuchungen durchgeführt wurden, sei hier nur hingewiesen.^{x)}

Schon seit längerer Zeit führt die BAW - insbesondere im deutschen Küstenbereich - Dickenmessungen mit Ultraschall an Spundwänden durch. Aufgrund dieser zerstörungsfreien Messungen ist es möglich geworden, zu Aussagen über die noch vorhandene Standsicherheit der Bauwerke zu gelangen. Es erschien daher naheliegend, das in der BAW vorhandene, recht umfangreiche Material mit den o.a. Untersuchungsergebnissen zu vergleichen. Dabei mußten selbstverständlich Vereinfachungen in Kauf genommen werden und Einzelerscheinungen unberücksichtigt bleiben.

2. Typen der Abrostungsprofile

Aus der bereits erwähnten Arbeit der HTG sind die in Abb. 1 gezeigten schematisierten Abrostungsprofile nach 6 und 12 Jahren entnommen. Es lassen sich 3 Typen unterscheiden:

1. In Kiel liegt ein sauberes Wasser mit annähernd konstantem Wasserstand vor. Die weitaus stärkste Korrosion findet sich kurz unterhalb des Normalwasserstandes; nach unten nimmt sie ab.
2. In Cuxhaven und Hamburg ist im Tidewechselbereich selbst eine sehr geringe Korrosion zu finden, was auf einen Schutz durch Öl u.a. Substanzen des Hafengewässers zurückgeführt wurde. Kurz unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers findet sich auch hier die stärkste Korrosion. Würde der "Tafelberg" der Wasserwechselzone herausgeschnitten, so ließe sich dieser Typ auf den vorher beschriebenen zurückführen.
3. In Bremerhaven ist die Korrosion in einem stark verschmutzten und mit organischen Substanzen aus der Fischverwertungsindustrie belastetem stehendem Wasser eines Dockhafens untersucht worden. Im Unterwasserbereich tritt über die ganze Länge eine ziemlich gleichmäßige Korrosion auf.

Allen Abrostungsprofilen gemeinsam ist die starke Korrosion im Überwasserbereich der Spritzwasserzone.

x) HTG, Ausschuß für Korrosionsfragen:

Untersuchung über das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl in Hafengewässern des deutschen Küstengebietes (Nord- und Ostsee)
Herausgeber: HTG, 2 Hamburg 11, Dalmannstraße 1

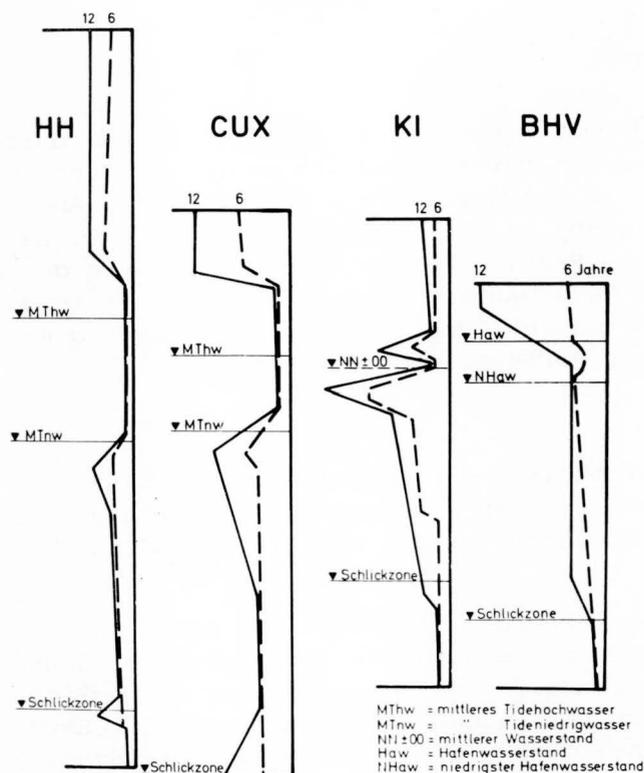


Abb.1 Vergleich der Abrostungskurven an den vier Auslagerungsorten

3. Wanddickenmessung

3.1 Ultraschallmessungen

Wie bereits erwähnt, wurden die Wanddicken der Spundbohlen mittels Ultraschall nach entsprechender Oberflächenvorbereitung gemessen. Es waren an den Bauwerken einzelne Spundbohlen in Abständen von 50 bis 200 m als Meßbohlen festgelegt worden, mit Meßstellen jeweils 50 oder 100 cm untereinander. Die Korrosion über die Profillänge kann also nur grob angegeben werden.

3.1.1 Reinigung der Meßstellen

Für das einwandfreie Ansetzen bzw. Ankoppeln des Schallkopfes ist eine sorgfältige Reinigung der Meßflächen von Bewuchs und Rost erforderlich. Im allgemeinen war mit Hammer und Drahtbürste oder besser, wo vorhanden, mit Nadelhammer, gesäubert worden.

3.1.2 Meßverfahren

Als Meßprinzip wurde das Ultraschall-Impulsverfahren mit einer Frequenz von 4 MHz angewandt. Der Meßkopf (SE-Kopf) ist für derartige Unterwasser-einsätze von der BAW entwickelt worden. Als Meßgerät stand ein Ultraschallgerät MPR 10 der Fa. KLN Dr. Lehfeld zur Verfügung. Das Meßgerät ermöglicht es, nach zuvor vorgenommener Kalibrierung an einer Stufenplatte mit genau definierten Stahldicken einen Meßbereich von 10 mm Wanddicke auf dem Bildschirm der Kathodenstrahlröhre auf 100 mm darzustellen. Die ermittelte Wanddicke läßt sich mit einer Genauigkeit von 0,1 mm ablesen.

3.1.3 Genauigkeit der Meßergebnisse

Die Meßgenauigkeit ist abhängig von einer einwandfreien Ankoppelung. Unter Berücksichtigung der rauhen Spundwandoberfläche dürfte sie innerhalb $\pm 0,3$ mm liegen. Die Einzelmessungen wurden jeweils so oft wiederholt, bis ein eindeutiger Wert innerhalb der Fehlergrenzen gewährt war.

3.2 Zerstörende Messungen

Von der WSD Kiel lagen der BAW außerdem ältere Wanddickenmessungen an Spundwänden vor. Bei diesen Untersuchungen waren in verschiedenen Höhenlagen den Spundbohlen durch Schweißen Probestücke entnommen und nach der Reinigung - Abätzen der Rostschicht - die Wandstärke vermessen worden. Bei diesem Verfahren war es jedoch nicht möglich, das Profil der Abrostungskurven auch nur annähernd zu bestimmen. Es dürften aber die jeweils am stärksten korrodierten Stellen mit erfaßt sein. Bei der vorliegenden Auswertung wurden nur diese Meßwerte berücksichtigt.

3.3 Unsicherheit der Ergebnisse

Für eine Aussage über die tatsächliche Korrosion muß die Wanddicke des Ausgangsprofils vorliegen. Erfahrungsgemäß können die Wanddicken von Spundbohlen bei Anlieferung um einige zehntel Millimeter dicker sein als die theoretischen Maße. So wurde in einem Falle aus einer Spundwand in einer Höhe, in der offensichtlich nur eine geringe Abrostung erfolgt war, eine Probe entnommen, geätzt und vermessen. Es ergab sich eine Wanddicke von 14,8 mm gegenüber einer theoretischen von 14,3 mm.

Andererseits ist aber zu berücksichtigen, daß die Korrosionsrate in den ersten Jahren stärker ist und mit der Zeit abnimmt. In Abb.2, entnommen aus der angeführten Arbeit der HTG, läßt sich die Abnahme der Korrosionsrate in Abhängigkeit von der Zeit erkennen.

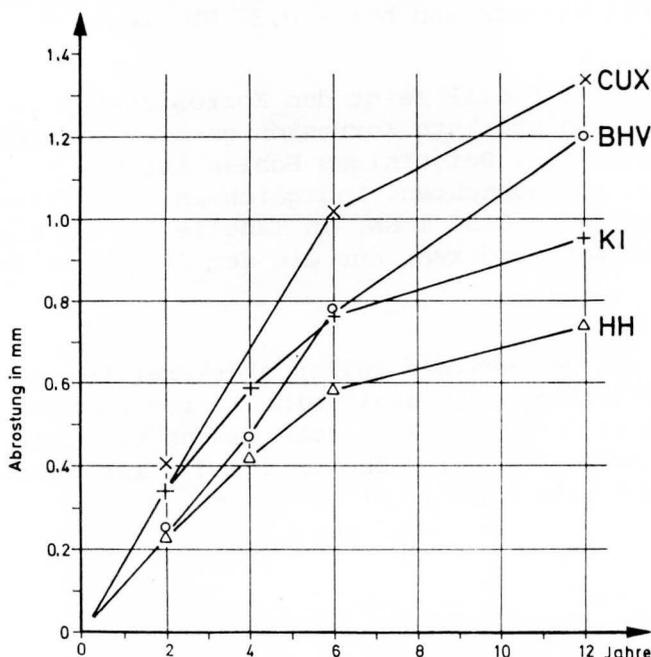


Abb.2 Mittlere Dickenabnahme in Abhängigkeit von der Auslagerungszeit. Abrostung nach Gewichtsverlust errechnet

Ausdrücklich bemerkt werden muß, daß es sich hierbei um Mittelwertbildung aus dem Gesamtgewichtsverlust eines Auslagerungsprofiles handelt, also nicht um Stellen maximaler Korrosion.

4. Meßergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es nicht möglich, die einzelnen Ergebnisse anzuführen; es genügt aber, sie zusammengefaßt wiederzugeben. Bei den meisten Messungen hat sich bestätigt, daß die stärkste Korrosion an den Spundwandbergen auftritt, während sie in den Tälern und insbesondere an den Stegen wesentlich geringer, oft sogar vernachlässigbar klein ist. Um die Arbeit nicht zu umfangreich werden zu lassen, beziehen sich im folgenden die Messungen nur auf die Berge, und zwar auf die Stellen stärkster Korrosion; bei anderen Angaben wird zusätzlich darauf hingewiesen.

4.1 Küstenkanal im Stadtgebiet Oldenburg

Die geringste Korrosion tritt im Süßwasser auf. Im Jahre 1967 wurden an einer Reihe von Spundbohlen des Küstenkanals im Stadtbereich Oldenburg Messungen ausgeführt. Der Küstenkanal führt ein Süßwasser, wie sich aus einer Analyse mit

pH-Wert	7,3
Leitfähigkeit	320 μ s/cm
Gesamtsalzgehalt	120 mg/l
Gesamthärte	6,5° dH
Chlorid	41 mg/l
Sulfat	14 mg/l

ergibt. Die Uferspundwand war in den Jahren 1926 - 1928 gerammt worden, so daß für die Auswertung eine Standzeit von 40 Jahren eingesetzt werden kann.

Gemessen wurden 16 Spundbohlen im Bereich von - 1,50 m bis + 3,50 m NN, wobei der Normalwasserstand bei - 0,35 NN liegt.

Das ermittelte Profil zeigt den Korrosionstyp 1: Kurz unterhalb des Wasserstandes wird die stärkste Korrosion gemessen. Im Überwasserbereich ist die Korrosion gering. Bei einigen Bohlen ist bei + 1,00 m NN eine etwas stärkere Korrosion zu beobachten. Lediglich in zwei Fällen findet sich die stärkste Korrosion bei + 0,50 m NN. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Messungen niedergelegt, und zwar nur die der Berge und der Stellen der stärksten Korrosion.

Wenn man von den wenigen Fällen stärkerer Korrosion absieht, ergibt sich bei einer 40-jährigen Standzeit eine Korrosionsrate für die am stärksten gefährdete Zone unter der Wasseroberfläche von kleiner als 0,06 mm pro Jahr. Nur an zwei Stellen: Meßbohle 2 und C ist stärkere Korrosion aufgetreten. Der Grund läßt sich nicht erkennen.

Tabelle 1: Wändickenmessungen im Bereich maximaler Abrostung an Spundbohlen des Küstenkanals im Stadtgebiet Oldenburg
(Normaler Wasserstand - 0,35 m NN - Meßstelle - 0,50 m NN)

Meßbohle	Profil	theor. Dicke mm	gem. Dicke mm	Abtragung mm	Korrosionsrate		Bem.
					mm/a	40 J.	
1	Larssen IV	15,5	14,4	1,1	0,028		
2	II	10,5	6,9	3,6	0,090		
3	III	14,5	14,1	0,4	0,010		
4	II	10,5	9,0	1,5	0,038		
			8,5	2,0	0,050		Tal
5	II	10,5	9,0	1,5	0,038		
			8,4	2,1	0,053		Tal
6	II	10,5	8,1	2,4	0,060		
7	II	10,5	8,5	2,0	0,050		
8	II	10,5	8,2	2,3	0,058		
9	II	10,5	7,9	2,6	0,065		
10	II	10,5	9,0	1,5	0,038		
11	II	10,5	8,9	1,6	0,040		
12	II	10,5	7,8	2,7	0,068		
13	II	10,5	8,1	2,4	0,060		
15	II	10,5	8,1	2,4	0,060		
A	II	10,5	9,2	1,3	0,033 - 1,00 m		
			8,5	2,0	0,050 + 0,50 m		
C	IV	15,5	11,5	4,0	0,100		

4.2 Dockhafen Emden

Im Jahre 1969 wurden im Hafen Emden Messungen durchgeführt. Im Dockhafen tritt das Abrostungsprofil nach Typ 3 auf. Im allgemeinen findet sich über Profillänge eine verhältnismäßig gleichförmige Korrosion, die nach unten etwas geringer wird. In einigen Fällen ist etwas stärkere Korrosion in der Mitte der Spundbohlen zu finden. In keinem Falle treten jedoch solch scharfe Maxima wie bei Typ 1 und 2 und auch nicht direkt unter der Wasseroberfläche auf.

Tabelle 2 gibt die Stellen der größten Korrosion wieder.

Im allgemeinen kann im Emdener Hafen mit einer jährlichen Abrostung von ca. 0,1 mm gerechnet werden. Die Korrosionsrate liegt im neuen Binnenhafen am Südkai mit ca. 0,2 mm jedoch etwa doppelt so hoch. Am Südkai ist wohl die regste Umschlagstätigkeit im Emdener Hafen (Erz und Kohle) zu verzeichnen. Evtl. wirkt sich hier ein stärker verschmutztes Wasser aus.

Tabelle 2: Wanddickenmessungen im Bereich maximaler Abrostung an Spundbohlen im Hafen Emden (Dockhafen)
(Mittlerer Hafenwasserstand + 1,10 m NN)

Meßbohle	Profil	theor. Dicke mm	Baujahr	Meßstelle m NN	gem. Dicke mm	Abtragung mm	Korrosionsrate mm/a
Neuer Binnenhafen - Südkai							
1	Larssen IV neu	14,8	1936/38	- 2,50	8,4	6,4	0,20
2				- 2,50	6,9	7,9	0,25
3				- 2,50	9,0	5,8	0,18
4				- 2,50	8,2	6,2	0,19
5				- 1,50	9,2	5,2	0,16
6				- 0,50	10,0	4,8	0,15
7				+ 0,50	12,3	2,5	0,08
8				+ 0,50	7,1	7,7	0,24
9				+ 0,50	8,7	6,1	0,12
Industriehafen Marinekai							
1	Larssen III	14,2	1939/40	+ 1,50	12,1	2,1	0,07
2				± 0	13,1	1,1	0,04
3				± 0	11,4	2,8	0,09
4				± 0,50	11,7	2,5	0,08
5				± 0	10,9	3,3	0,11
6				± 0	10,7	3,5	0,12
7	Krupp III	10,0		± 0	7,6	3,4	0,11
8				- 2,0 x)	9,2	0,8	0,03
9				- 2,0 x)	9,9	0,1	0,01
10				+ 1,30 xx)	7,4	2,6	0,09
11				± 0	8,6	1,4	0,05
12				+ 0,50	7,7	2,3	0,08
13				± 0 bis - 1,50	9,8	0,2	0,01
Alter Liegehafen - Staatswerft							
1	Larssen III neu	13,0	1952	+ 1,50 xx) + 1,00	12,1 Tal Lochfraß	0,9	0,05
Neuer Liegehafen - Staatswerft							
1	Larssen II neu	10,2	1935	+ 0,50	7,7	2,5	0,07
Emdener Fahrwasser - Anlegebrücke Tonnenhof - Stahlrammpfahl							
1		10,0	1952	+ 0,50	8,5	1,5	0,09
2				+ 1,00	7,9	2,1	0,12

x) darüber Beton

xx) oberhalb MHW

Die Korrosion ist in dem vorliegenden Brackwasser mit einem durchschnittlichen

pH-Wert	von	7,8
Chloridgehalt		4,3 g/l
Sulfatgehalt		550 mg/l

demnach höher als im Süßwasser. Nochmals hingewiesen werden soll ausdrücklich, daß sich keine ausgesprochenen scharfen Maxima der Abtragung gebildet haben.

4.3 Außenhafen Emden

Vollkommen anders als im Dockhafen verhält sich die Korrosion im tidebeeinflussten Außenhafen. Es tritt der ausgesprochene Typ 2 auf, bei dem kurz unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers die Korrosion ein deutliches Maximum zeigt. Im Tidebereich selbst ist die Korrosion minimal. Oberhalb der Wasserwechselzone wurde nicht gemessen. In Tab. 3 sind die maximalen Abrostungswerte wiedergegeben.

Durch den höheren Salzgehalt im Außenhafen ist eine stärkere Korrosion als im Dockhafen zu erwarten, dem laufend Süßwasser zufließt. Die durchschnittliche Korrosionsrate liegt unter 0,15 mm pro Jahr, jedoch steigt sie im Bereich der Verladeanlagen (VW-Umschlagplatz, Bohle 5 - 9) um ca. 0,1 mm auf etwa 0,25 mm pro Jahr.

Tabelle 3: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwandbohlen im Emdener Außenhafen
(Mittleres Tideniedrigwasser - 1,20 m NN)

Meßbohle	Profil	theor. Dicke mm	Baujahr	Meßstelle m NN	gem. Dicke mm	Abtragung mm	Korrosionsrate mm/a
1	Larssen V	20,5	1932 +34	- 2,20	16,2	4,3	0,12
2				- 2,20	16,4	4,1	0,11
3				- 2,20	16,4	4,1	0,11
4				- 2,00	16,9	3,6	0,10
5				- 2,00	10,3	10,2	0,28
				- 3,00	17,0	3,5	0,10
6				- 2,00	9,0	11,5	0,32
7				- 2,00	11,6	8,9	0,25
8				- 2,00	12,3	8,2	0,23
9				- 2,00	9,8	10,7	0,30
10				- 2,00	14,9	5,6	0,16
1a	IV neu	14,8	1939 - 40	- 2,00	10,2	4,6	0,15

An Meßbohle 5 - 9 Abrieb durch anliegende Schiffe

4.4 Elbehafen Brunsbüttel

Sieben Jahre nach Fertigstellung wurde an der Kaianlage Elbehafen Brunsbüttel die Dicke an der Spundwand gemessen. Die Messungen, die nach relativ kurzer Zeit nach Fertigstellung durchgeführt wurden, sollten als Grundlage für vorzusehende Korrosionsschutzmaßnahmen dienen. Sie erfolgten im Bereich + 1,00 m bis - 5,00 m NN, wobei das MThW bei + 1,40 m, das MTnW bei - 1,26 m NN liegt. Allgemein wurde nur eine geringe Korrosion gefunden, wobei noch keine Maxima der Abrostung erkennbar waren. Eine Zuordnung zu den beschriebenen Typen ist ebenfalls noch nicht möglich.

Tabelle 4: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden im Elbehafen Brunsbüttel
(Mittleres Tideniedrigwasser - 1,26 m NN)

Meßbohle	Profil	theor. Dicke mm	Meßstelle m NN	gem. Dicke mm	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
1	Larssen 32	10,5	- 1,00	9,6	0,9	0,13
2			ganze Höhe	10,2	0,3	0,04
3			- 5,00	10,1	0,4	0,06
	- 2,00 bis - 3,00		Messung nicht möglich			
4			- 3,00	9,8	0,7	0,1

Die schwächere Korrosion an den Meßstellen 2 und 3 dürfte darauf zurückzuführen sein, daß hier hinterfüllt ist, während 1 und 4 beidseitig vom Wasser umspült wird. Bezieht man, wie auch bei den übrigen Messungen geschehen, auf Spundwände, die nur einseitig von Wasser benetzt werden und bei denen daher die rückwärtige Korrosion gering und vernachlässigbar ist, so kann hier mit einer jährlichen Korrosionsrate von 0,06 mm gerechnet werden, wobei bei längerer Standzeit mit der Abnahme der Korrosionsrate sicherlich etwas geringer sein kann.

4.5 Columbuskaje Bremerhaven

Die Spundbohlen der Columbuskaje Bremerhaven wurden im Jahre 1928 gerammt. Im Jahre 1967, also nach 39-jähriger Standzeit sind die noch vorhandenen Wanddicken mit Ultraschall ausgemessen worden, um die eingetretene Korrosion zu erfassen und festzustellen, welche Sicherheit noch im Bauwerk vorhanden ist.

In Bremerhaven liegt ein Brackwasser vor, bei dem sich die Tide auswirkt. Die Abrostungsprofile entsprechen dem Typ 2: in der Wasserwechselzone eine geringe, kurz unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers die stärkste Abrostung. Die gefundenen Abrostungskurven sind so charakteristisch, daß, um eine Aussage über die Gefährdung der Spundwand zu erhalten, das Ausmessen der charakteristischen Punkte der Bohle ausreichte. Das mittlere Tidehochwasser liegt auf + 3,53 m NN, das mittlere Tideniedrigwasser auf + 0,33m NN.

Im Jahre 1975 wurden die Messungen an der Columbuskaje in Bremerhaven wiederholt. In Tab. 5 sind die Meßergebnisse beider Meßreihen wiedergegeben.

Tabelle 5: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden an der Columbuskaje Bremerhaven
(Mittleres Tideniedrigwasser + 0,33 m NN).

Meß- bohle	Profil	theor. Dicke mm	Meß- stelle m NN	gem. Dicke mm	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
1967						
250	Larssen II Kasten	14,3	- 0,25	9,4	4,9	0,13
280			- 0,25	9,9	4,4	0,11
330	Larssen V	22,0	- 0,25	17,6	4,4	0,11
370			- 0,25	16,9	5,1	0,13
410	Larssen II Kasten	14,3	- 0,25	10,9	3,4	0,07
450			- 0,25	9,8	4,5	0,12
570			- 0,25	10,6	3,7	0,10
610	Larssen V	22,0	- 0,25	17,0	5,0	0,13
770			- 0,25	16,4	5,6	0,14
810			- 0,25	17,1	4,9	0,13
850			- 0,50	16,4	5,6	0,14
1976						
250	Larssen II Kasten			8,3	6,0	0,13
280				10,1	4,2	0,09
335	Larssen V			16,5	5,5	0,12
370				16,4	5,6	0,12
410	Larssen II Kasten			10,3	4,0	0,09
450				11,4	2,9	0,06
570				10,2	4,1	0,09
610	Larssen V			17,0	5,0	0,11
770				15,4	6,6	0,14
810				15,8	6,2	0,13
850				14,8	7,2	0,15

Aus den Messungen der beiden Untersuchungsreihen ist zu entnehmen, daß an der Columbuskaje in Bremerhaven mit einer jährlichen Korrosionsrate von 0,12 mm zu rechnen ist.

Die Ergebnisse beider Reihen zeigen zudem eine gute Übereinstimmung. Das weist darauf hin, daß bei langen Standzeiten Unterschiede in der Korrosion sich nivellieren.

4.6 Wilhelmshaven

Im alten und neuen Vorhafen, in dem sich die Tide auswirkt, wurden 1975 Messungen an Spundbohlen ausgeführt. Die Abrostungsprofile entsprechen in etwa dem Typ 2. In der Wasserwechselzone wird in den meisten, aber nicht allen Fällen, eine etwas geringere Korrosion gefunden als ober- und unterhalb. Das Korrosionsmaximum kurz unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers ist nur sehr gering ausgeprägt. Z.T. nimmt die Korrosion nach unten verhältnismässig gleichförmig ab. Eine vermessene Spundbohle (Nr.10) liegt im eigentlichen Dockhafen. Hier zeigt sich wie im Hafen Emden der ausgesprochene Typ 3, d.h. fast gleichförmige Korrosion über die ganze Länge. Die Ergebnisse der Messungen gibt Tabelle 6 wieder.

Tabelle 6: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden in Wilhelmshaven
(Mittl. Tidehochwasser + 1,63 m NN, mittl. Tideniedrigw. - 1,99 mNN)

Meßbohle	Profil	theor. Dicke mm	Baujahr	Meßstelle m NN	gem. Dicke mm	Abtragung mm	Korrosionsrate mm/a
Neuer Vorhafen							
1	KSII (Krupp)	11,7	1961 - 62	- 3,00	10,0	1,7	0,13
2				- 1,00	10,0	1,7	0,13
3				- 2,00	9,0	2,7	0,20
4		14,5		- 1,00	13,5	1,0	0,08
5		11,7		- 2,00	9,0	2,7	0,21
6				- 3,00	7,9	3,8	0,29
7				- 4,00	9,9	1,8	0,14
8			1954	- 3,00	10,7	1,0	0,05
9				- 2,00	9,2	2,5	0,12
10	Dockhafen		1962	- 2,00	10,6	1,1	0,09
Alter Vorhafen							
1	Hoesch IV	14,0	1957	- 1,00	13,2	0,8	0,04
2				- 2,00	10,7	3,3	0,18
3				- 2,00	10,4	3,6	0,20
4				- 2,00	11,0	3,0	0,17
5	Larssen II	14,8	1955	- 3,00	11,3	3,5	0,18
6				- 3,00	10,0	4,8	0,24
7				- 1,00	11,4	3,4	0,17
8			1953	- 3,00	10,8	3,0	0,14
9				- 1,00	12,7	2,1	0,10
10				- 2,00	10,2	4,6	0,21
11				- 2,00	12,7	2,1	0,10

Bei einem Teil der Messungen konnte wegen Schlick nur bis - 2,00 bzw. - 3,00 m NN gemessen werden. Von einzelnen Ausnahmen abgesehen, die noch stärker korrodiert sind, kann in Wilhelmshaven demnach mit einer jährlichen Abrostungsrate von 0,2 mm, im Dockhafen mit 0,08 mm gerechnet werden.

4.7 Hafen Norddeich und Benersiel

Der Hafen Norddeich und Benersiel befinden sich direkt an der Nordseeküste. Im Jahre 1970 wurden hier Wanddickenmessungen durchgeführt. In Norddeich tritt wiederum in etwa Abrostungstyp 2 auf. Dabei ist allerdings auffallend, daß die schwache Abrostung in der Wasserwechselzone hier nur etwa ab der oberen Hälfte anzutreffen ist. Im übrigen ist ein scharfes Maximum der Abrostung kurz unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers nur in einem Falle (Nr.8) zu finden. Bei zwei Messungen (Nr. 5 und 6) liegt die unterste Messung oberhalb dieser Linie, weshalb diese Werte nicht als die maximale Abrostung angesehen werden können.

Im Hafen Benersiel wurde praktisch zwischen mittlerem Tidehoch- und Tideniedrigwasserstand gemessen. Die Korrosion verläuft im Meßbereich ziemlich gleichförmig ohne ausgeprägte Maxima. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 wiedergegeben.

Tabelle 7: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden der Häfen Norddeich und Benersiel

(Mittleres Tidehochwasser: Norddeich + 1,16 m NN
Benersiel + 1,30 m NN)
(Mittleres Tideniedrigwasser: Norddeich - 1,30 m NN
Benersiel - 1,37 m NN)

Meß- bohle	Profil	theor. Dicke mm	Bau- jahr	Meß- stelle m NN	gem. Dicke mm	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
Hafen Norddeich							
1	Larssen III neu	13,0	1948	- 1,50	10,9	2,1	0,10
2			1948	- 2,00	8,7	4,3	0,20
3			1950	- 2,95	7,2	5,8	0,29
4			1950	- 1,45	10,6	2,4	0,22
5			1954	- 0,25	11,2	1,8	0,11
6			1954	- 0,75	10,1	2,9	0,18
7	Hoesch IV	14,0	1936	- 1,25	9,4	4,6	0,14
8			1936	- 1,75	10,8	3,2	0,09
Hafen Benersiel							
1	Larssen III neu	13,0	1965	+ 0,60	11,8	1,2	0,24
2				- 1,50	11,4	1,6	0,32
3				- 0,50	11,7	1,3	0,26
4				+ 1,50	11,9	1,1	0,22

Auffallend ist die sehr starke Korrosion an Bohle 2 + 3 in Benersiel, die nach unten zunimmt. Der Grund der verstärkten Korrosion ist nicht bekannt. Die Korrosionsrate kann mit 0,2 mm pro Jahr angenommen werden.

4.8 Ostfriesische Inseln

Bei den Messungen wurden ähnliche Abrostungsprofile des Typs 2 wie in Norddeich und Bengersiel gefunden. Im allgemeinen tritt auch hier der Bereich der geringsten Abrostung auf halber Höhe der Wasserwechselzone auf. Ebenso sind die Abrostungen über die unter Tideniedrigwasser liegenden Profile ziemlich gleichförmig, lediglich in Borkum sind an einigen Meßstellen ausgesprochen scharfe Maxima zu finden. Außer den maximalen Abrostungswerten im Wasser sind in Tabelle 8 noch Wanddickenmessungen an der Schumacherwand in Spiekeroog aufgenommen. Diese Spundwand befindet sich über dem mittleren Tidehochwasser und dürfte nur bei Sturmfluten benetzt werden. Auffallenderweise finden sich hier die stärksten Korrosionen nicht am Berg sondern am Steg, so daß in der Tabelle diese Abrostungswerte aufgenommen wurden.

Tabelle 8: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden der ostfriesischen Inseln

Meß- bohle	Profil	theor. Dicke mm	Bau- jahr	Meß- stelle m NN	gem. Dicke mm	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
Wangeroog		MThW + 1,26 m NN MTnW - 1,48 m NN					
1	Larssen II	10,2	1956	- 2,00	6,4	3,8	0,27
2				- 2,00	6,4	3,8	0,27
3				- 2,00	7,3	2,9	0,21
4	Larssen 32	10,5	1962	- 1,00	8,1	2,4	0,30
5				- 2,00	6,5	4,0	0,50
6				- 2,00	7,1	3,4	0,43
Spiekeroog		MThW + 1,25 m NN MTnW - 1,34 m NN					
1	Larssen III neu	13,0	1964	- 1,30	11,3	1,7	0,28
2				- 0,30	11,6	1,4	0,23
				nur über MTnW gemessen			
3				+ 0,20	9,2	3,8	0,63
				nur über MTnW gemessen			
Langeoog		MThW + 1,27 m NN MTnW - 1,37 m NN					
Südmole							
1	Hoesch V	18,0	1938/39	-0,90	13,5	4,5	0,15
2				-1,90	12,1	5,9	0,19
3				-1,40	14,4	3,6	0,12
4				-0,90	13,9	4,1	0,13
Ostmole							
1	Larssen V	20,5	1938/39	-0,05	18,7	1,8	0,06
				nur über MTnW gemessen			
2				-1,55	14,9	5,6	0,18
3				-1,55	17,5	3,0	0,10
4				-1,55	15,9	4,6	0,15

Tabelle 8: Fortsetzung

Meß- bohle	Profil	theor. Dicke mm	Bau- jahr	Meß- stelle m NN	gem. Dicke mm	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
Baltrum	MThW + 1,00 m NN						
	MTnW - 1,30 m NN						
1	Larssen II	10,2	1959	- 1,04	8,3	1,9	0,17
2				- 1,04	9,9	0,3	0,03
3	Larssen 32	10,5	1968	- 1,04	8,1	2,2	0,73
4				- 2,04	8,7	1,5	0,50
Norderney	MThW + 1,12 m NN						
	MTnW - 1,27 m NN						
1	Larssen III	14,2	1952	- 1,84	8,8	5,4	0,30
2			1934	3,5 +)	11,6	2,6	0,07
3	Larssen II	9,5	1954	4,0 +)	7,3	2,2	0,14
4	neu			4,5 +)	7,0	2,5	0,16
5				4,0 +)	8,1	1,4	0,09
	+) unter Oberkante Spundwand						
Borkum	MThW + 1,04 m NN						
	MTnW - 1,26 m NN						
Leitwand-Fischerbalje							
1	Klöckner 3D	11,0	1937/39	0,00	9,8	1,2	0,04
				nur über MTnW gemessen			
2	Klöckner 5D	14,0		- 1,00	8,2	5,8	0,18
				nur über MTnW gemessen			
3	Hoesch V	18,0		- 1,00	8,8	9,2	0,29
4				- 1,00	10,8	7,2	0,23
Westliche Hafenvand							
1	Klöckner II	9,5	1938	- 1,00	9,0	0,5	0,02
2	Klöckner III	11,0		- 2,00	6,6	4,4	0,14
3				- 2,00	7,9	3,1	0,10
Nördliche Hafenvand							
1	Larssen V	20,5	1939	- 2,00	13,8	6,7	0,22 Tal
2				- 2,00	18,2	2,3	0,07
3				- 2,00	15,6	3,9	0,16 Tal
4				- 1,00	19,7	0,8	0,03
Ostkaje							
1	Larssen IV	14,8	1939	- 0,50	8,0	6,8	0,22
	neu						
2				- 0,50	8,9	5,9	0,19
3				- 0,50	12,2	2,6	0,08
4				+ 0,50	11,8	3,0	0,10 Tal
6				- 1,50	13,7	1,1	0,04
7				- 0,50	13,0	1,8	0,06
8				- 1,50	13,3	1,5	0,05
9				- 1,50	14,7	0,1	0,01
Ostmole							
1	Klöckner 4D	11,0	1938/39	- 2,50	9,4	1,6	0,05
2				- 2,50	7,2	3,8	0,12
3				- 1,50	10,1	0,9	0,03
Spiekeroog Schumacherwand							
	über MThW in atmosphärischer Zone gemessen in den Stegen						
1	Klöckner XII	12,0	1936	+ 4,55	9,0	3,0	0,07
2				+ 4,55	11,2	0,8	0,01
3	Hoesch OaV	9,5		+ 5,05	5,9	3,6	0,08
4				+ 5,05	6,7	2,8	0,07
5				+ 4,55	6,5	3,0	0,09
6				+ 5,55	7,9	1,6	0,05

Die Ergebnisse der Spundwanddickenmessungen an den ostfriesischen Inseln lassen sich recht gut auf einen Nenner bringen und zusammenfassen. Als maximale Korrosionsrate im Unterwasserbereich ist mit einem durchschnittlichen Wert von ca. 0,16 mm pro Jahr zu rechnen. Es gibt Stellen, wo z.B. durch Strömungen Sandschliff u.ä. eine stärkere Korrosion auftritt.

Von diesem Durchschnittswert weichen die Korrosionsraten in den Häfen Wangerooge, Spiekeroog und z.T. Baltrum stark ab. Sie liegen in Wangerooge und Spiekeroog etwa doppelt so hoch, während auf Baltrum an zwei Stellen extrem hohe Korrosionsraten gefunden wurden.

Schließlich ist noch zu erwähnen, daß die Korrosion über Wasser etwa halb so groß ist wie im Wasser.

4.9 Helgoland

Die Spundwände der Insel Helgoland stehen in Meerwasser, das einen Salzgehalt von etwa 3,5 % besitzt. Auch hier findet sich der Korrosionstyp 2: Ein Maximum der Korrosion ist kurz unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers festzustellen, nach oben wird etwa ab der Hälfte der Wasserwechselzone eine sehr geringe Korrosion beobachtet. Die maximalen Abrostungswerte sind in der Tabelle 9 niedergelegt.

Bei dem Großteil der untersuchten Spundwände zeigt sich eine Korrosionsrate im Bereich der maximalen Abrostung von ca. 0,15 mm pro Jahr. An einigen Stellen, insbesondere am Nordostbohlwerk, wird eine wesentlich höhere Korrosionsrate von ca. 0,35 mm pro Jahr gefunden, an einer Stelle ist die Spundwand durchgerostet.

Diese Spundbohle (10) wird beidseitig umspült, so daß bei Annahme einer einseitigen Korrosion die Korrosionsrate mit denen an anderen Stellen des Nordostbohlwerkes übereinstimmt.

Tabelle 9: Wanddickenmessungen im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden der Insel Helgoland
(MThW + 0,74 m NN, MTnW - 1,58 m NN)

Meß- bohle	Profil	theor. Dicke mm	Bau- jahr	Meß- stelle m NN	gem. Dicke mm	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
Südhafen							
1	Larssen III	14,2	1957	- 2,00	13,2	1,0	0,07
2			1936	- 2,00	12,6	1,6	0,04
3			1936	- 2,00	11,2	3,0	0,08
4			1957	- 2,00	11,4	2,8	0,19
5			1936	- 2,00	10,8	3,4	0,09
7	Krupp III	10,5	1936	- 2,00	10,8		-
8			1936	- 2,00	9,6	0,9	0,03
9	Larssen III	14,2	1959	- 2,00	13,6	0,6	0,05
10			1959	- 2,00	12,2	2,0	0,15
11			1959	- 2,00	13,9	0,3	0,02
12			1936	- 2,00	12,0	2,2	0,06
13			1936	- 2,00	11,8	2,4	0,07
14			1936	- 2,00	10,5	3,7	0,10
15			1936	- 2,00	10,2	4,0	0,11
16			1936	- 2,00	10,5	3,7	0,10
17			1936	- 2,00	11,1	3,1	0,09
18			1936	- 2,00	12,0	2,2	0,06
19			1936	- 2,00	8,5	5,7	0,15
20			1935	- 2,00	9,2	5,0	0,14
21			1935	- 1,50	8,7	5,5	0,15
22			1935	- 2,00	8,2	5,3	0,14
23			1935	- 2,00	10,7	3,5	0,10
24			1935	- 2,00	12,5	1,7	0,05
25			1935	- 2,00	6,5	7,7	0,21
26			1935	- 2,00	5,1	9,1	0,25
27			1935	- 2,00	11,4	2,8	0,08
28			1935	- 1,50	9,2	5,0	0,14
29			1935	- 1,50	9,1	5,1	0,14
30			1935	- 1,50	8,5	5,7	0,15
31			1935	- 1,50	8,1	6,1	0,17
32			1935	- 1,00	8,1	6,1	0,17
33			1935	- 2,50	9,5	4,7	0,13
34			1935	- 1,00	8,5	5,7	0,15
Nordostbohlwerk Nordmole							
2	Larssen IV neu	14,8	1936	- 3,00	6,0	8,8	0,24
3			1936	- 2,50	9,7	5,1	0,14
4			1936	- 2,50	9,7	5,1	0,14
5			1936	- 2,00	6,5	8,3	0,23
6			1936	- 3,00	7,2	7,6	0,21
7			1936	- 3,00	5,2	9,6	0,27
8			1936	- 3,00	6,9	7,9	0,22
9			1936	- 2,75	4,9	9,9	0,28
10			1936	- 3,75	2,7	12,1	0,34
			(bei	- 2,75	Loch)		
Uferkaje Dünenhafen							
1	Krupp IV	13,4	1936	- 1,75	7,9	5,5	0,15
2			1936	- 1,75	6,0	7,4	0,21
3			1936	- 1,25	7,5	5,9	0,16
4			1936	- 1,25	8,2	5,2	0,14
5			1936	- 1,25	8,3	5,1	0,14

Tabelle 10: Wanddickenmessungen (maximale Abrostung) an aus Spundwänden herausgeschweißten Proben

Bauwerk	Profile	theor. Dicke mm	Baujahr	Abtra- gung mm	Korrosions- rate mm/a
Trave 25,9	Larssen III	14,2/14,7	1929	2,3	0,08
		14,2/14,3		1,3	0,05
		14,2/14,0		2,0	0,07
Kammerspundwand Gieselau-Schleu- se	Krupp KS	11,7/10,6	1937	1,0	0,05
		11,7/11,0		1,0	0,05
		11,7/13,4		1,0	0,05
Hafen Uetersen	Larssen II	10,2/11,0	1931	1,6	0,06
		10,2/11,2		2,0	0,08
		10,2/10,6		1,6	0,06
Schleuse Strohbrück	Larssen III	14,2/15,0	1930	1,6	0,06
		14,2/15,7		2,3	0,09
		14,4/15,1		2,1	0,06
Hafen Neustadt	Larssen III	14,2/14,7	1926	1,8	0,06
		14,2/14,8		1,2	0,04
		14,2/14,8		2,8	0,09
Innenhafen Glückstadt	Larssen II	10,2/10,8	1930	1,5	0,06
		10,2/11,0		2,2	0,08
		10,2/10,7		1,3	0,05
Glückstadt Binnenhafen	Larssen II	10,2/10,4	1934	3,0	0,13
		10,2/10,9		2,1	0,09
		10,2/10,5		1,4	0,06
Glückstadt Außenhafen	Kasten	14,5/15,0	1937	2,3	0,12
		14,5/14,8		2,6	0,13
	Union II Hoesch IV	14,0/13,2	1937	1,0	0,05
		14,0/13,6		2,2	0,11
Schiffssammel- stelle Drehbrücke Rendsburg	Larssen Ia	7,5/ 7,4	1930	4,3	0,16
		7,5/ 7,9		3,4	0,13
		7,5/ 7,6		3,7	0,14
Tonnenhof Kiel-Holtenau	Larssen III	14,3	1927	5,4	0,18
		14,3		4,7	0,16
		14,3		3,8	0,13
Seezeichenhafen Wittdün	Rote Erde	12,0	1914	8,6	0,20
		12,0		6,6	0,15
		12,2		5,9	0,14
Hafen Hörnum	Klößner III	11,0/11,3	1936	3,2	0,16
		11,0/11,3		2,3	0,12
		11,0/11,0		3,0	0,15
Hafen Büsum	Larssen I	8,0/ 9,8	1911	5,0	0,11
		8,0/ 9,8		4,8	0,10
		8,0/ 9,9		3,7	0,08
	Krupp K II	8,2/10,3	1934	2,8	0,12
		8,2/10,0		2,1	0,09
		8,2/ 9,9		3,2	0,14
Helgoland Binnenhafen	Krupp	13,0/10,0	1939	3,5	0,19
				3,0	0,17
				3,2	0,18
				4,0	0,22
				3,0	0,17
		5,5	0,31		

4.10 Tonnenhof Kiel

Bereits aus früheren Beobachtungen und auch aus der bereits zitierten Arbeit der HTG ist die starke Korrosion im Ostseewasser bekannt. Im Jahre 1972 wurden im Bereich des Tonnenhofes Kiel-Holtenau Messungen durchgeführt. Hier weist das Wasser im Mittel einen Salzgehalt von 1,5 % und eine Leitfähigkeit von $21 \cdot 10^3 \mu\text{s/cm}$ auf. Im Bereich unter dem normalen Wasserstand war ein Großteil der Bohlen bereits durchgerostet, beim Rest lag eine sehr starke Abtragung vor. Die Messungen wurden nur unter Wasser durchgeführt. Aus den früheren Untersuchungen der HTG ist aber ersichtlich, daß hier der Typ 1 mit einem sehr starken Korrosionsmaximum kurz unter dem Wasserspiegel und einem zweiten starken Maximum kurz über dem Wasserspiegel vorliegt.

Bei einer ursprünglichen Dicke der Profile von 10,2 mm und einer Standzeit von 43 Jahren (Baujahr 1929) ergibt sich daraus eine Korrosionsrate von mehr als 0,2 mm pro Jahr.

4.11 Zerstörende Prüfungen im Bereich der WSD Nord

Im Bereich der WSD Nord sind bereits in den Jahren 1957 Spundwanddickenmessungen durchgeführt worden. Da damals jedoch das Ultraschallmeßverfahren noch nicht zur Verfügung stand, wurden Stücke aus der Spundwand mit Schweißbrennern herausgeschnitten und nach dem Reinigen ausgemessen. In Tabelle 10 sind die gefundenen maximalen Abrostungswerte wiedergegeben. Eine Aufnahme des Abrostungsprofiles war auf diesem Wege jedoch nicht zu erhalten.

Die Ergebnisse decken sich recht gut mit den vorher zitierten Untersuchungen mit Ultraschall. Bei den untersuchten Bohlen, die von salzarmem Wasser benetzt werden, wurde eine Korrosionsrate von ca. 0,06 mm/Jahr festgestellt. Im Brackwasser, im Tidebereich mit unterschiedlichem Salzgehalt, schwankt die Korrosionsrate um höhere Werte, um ca. 0,15 mm pro Jahr. Das Ostseewasser bei Kiel bewirkt eine noch stärkere Korrosion um ca. 0,18 mm pro Jahr. Meerwasser, wie es an der Nordseeküste und den nordfriesischen Inseln vorliegt, weist wiederum eine geringere Korrosionsrate von etwa 0,15 mm, in Büsum sogar von nur 0,10 mm pro Jahr auf.

Erstaunlich hoch mit ca. 0,20 mm pro Jahr - z.T. wesentlich darüberliegt an den Meßbohlen die Korrosionsrate in Helgoland.

5. Diskussion der Ergebnisse

Bei den vorliegenden Dickenmessungen an Spundwänden in verschiedenen Wässern ist eine Auswertung für Korrosionsuntersuchungen nur bedingt möglich. Um eine genaue Aussage über die Korrosion zu erhalten, wäre es notwendig, die Meßpunkte der Dickenmessungen sehr eng nebeneinanderzulegen. Das ist wirtschaftlich und auch praktisch nicht durchzuführen. In den beschriebenen Fällen wurden die Spundbohlen im allgemeinen in einem Abstand von 50 - 100 cm vermessen. Es ist leicht einzusehen, daß bei solchen Zwischenräumen jeweils die absoluten maximalen Abrostungen an einer Bohle nur in Ausnahmefällen zu erfassen sind. Trotzdem erscheinen die erhaltenen Wer-

te genau genug, um einen Anhalt über die in den untersuchten Gewässern zu erwartende Korrosion über längere Zeiträume zu erhalten.

Für die Auswertung ist nur der Unterwasserbereich herangezogen.

5.1 Korrosionsprofile

In der bereits erwähnten Arbeit der Hafenbautechnischen Gesellschaft waren an ausgelagerten Winkeln aus Stahl, die nach der Auslagerungszeit sehr genau vermessen wurden, drei Typen der Korrosion aufgetreten. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse lassen sich alle in die schematisierten Abrostungsprofile mit nur geringen Vorbehalten einordnen.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Abrostungsprofile einiger Bohlen aus allen untersuchten Spundwänden eingetragen. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Korrosion nur einseitig erfolgt und an der hinterfüllten Rückseite vernachlässigbar klein ist.

Während die starke Verkleinerung der Längen in allen Fällen gleich ist, ist die Dicke bzw. Abtragung in Abb.3 in vergrößertem, in Abb. 4 u. 5 in natürlichem Maßstab eingezeichnet.

Typ 1: Freiwassertyp

Bei den Auslagerungsversuchen der HTG wurde in Kiel, d.h. Ostseewasser, in dem sich die Tide nicht mehr bemerkbar macht, ein charakteristisches Korrosionsprofil gefunden. Direkt unter der Wasseroberfläche tritt eine sehr starke Korrosion mit einem ausgesprochenen Maximum auf. In der Wasserlinie selbst ist die Korrosion gering, direkt darüber zeigt sich aber wiederum ein ausgeprägtes Maximum. Die Spundwandmessungen im Küstenkanal im Stadtbereich Oldenburg ergab Profile, die diesem beschriebenen Typ recht gut entsprechen, wie aus Abb.3 zu ersehen ist.

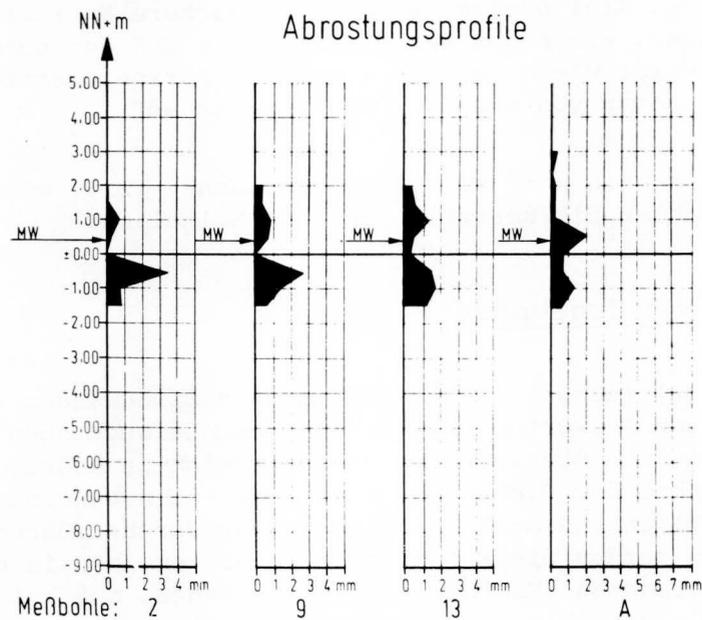


Abb. 3 Abrostungsprofile im Küstenkanal im Stadtbereich Oldenburg

Das Maximum der Korrosion unter der Wasseroberfläche tritt deutlich und an allen Meßstellen hervor, im Überwasserbereich ist ein Maximum ebenfalls - jedoch nicht so stark ausgeprägt - in einem Falle übertrifft hier die Korrosion aber die unter Wasser sogar erheblich -. Der vorliegende Freiwassertyp läßt sich demnach evtl. noch unterteilen in

- a) mit ausgesprochenem zweitem Korrosionsmaximum direkt über dem Wasserspiegel
- b) ohne ausgesprochenem zweitem Korrosionsmaximum direkt über dem Wasserspiegel.

Typ 2: Tidetyp

In Hamburg und Cuxhaven, wo sich die Tide stark auswirkt, wurde der zweite Korrosionstyp gefunden. Direkt unter dem mittleren Tideniedrigwasser tritt auch hier die stärkste Korrosion auf. In der Wasserwechselzone hingegen ist die Korrosion gering, im atmosphärischen Bereich wieder stärker.

Im Prinzip das gleiche Abrostungsprofil wurde bei den Spundwandmessungen in allen Tidegebieten gefunden. Eine Auswahl dieser Messungen sind in Abb. 4 wiedergegeben.

Auch bei diesem Tidetyp läßt sich wiederum eine Unterteilung vornehmen. In Häfen beginnt das Gebiet der schwächsten Abrostung unmittelbar über dem mittleren Tideniedrigwasser (Schutz durch Öl und andere Schmutzstoffe im Wasser?), während in freieren Seelagen dieses Gebiet erst etwa auf halber Höhe der Wasserwechselzone auftritt. Man kann also unterteilen in

- a) Hafen)
- b) offene See) Korrosion mit Tide

Erwähnt werden soll noch, daß einige Autoren wie Klas u. Steinrath, Humble, Determann, Kubota und Mitarb. in ihren Untersuchungen bzw. Beschreibungen die genannten beiden Korrosionstypen angeben.

Typ 3: Dockhafentyp

Im Fischereihafen Bremerhaven war im Untersuchungsbereich eine ziemlich gleichmäßige nach unten leicht abnehmende Korrosion festzustellen. Scharfe Korrosionsmaxima traten nicht auf. Bei den bereits erwähnten Auslagerungsversuchen der HTG war ursprünglich angenommen worden, daß es sich hier durch die besonderen Gegebenheiten des stark verschmutzten Wassers um einen Sonderfall handelte. Die vorliegenden Untersuchungen zeigten jedoch, daß auch im Dockhafen Emden und Wilhelmshaven der gleiche Abrostungsverlauf auftritt.

In Abb.5 sind einige Korrosionsprofile aus den genannten Häfen wiedergegeben.

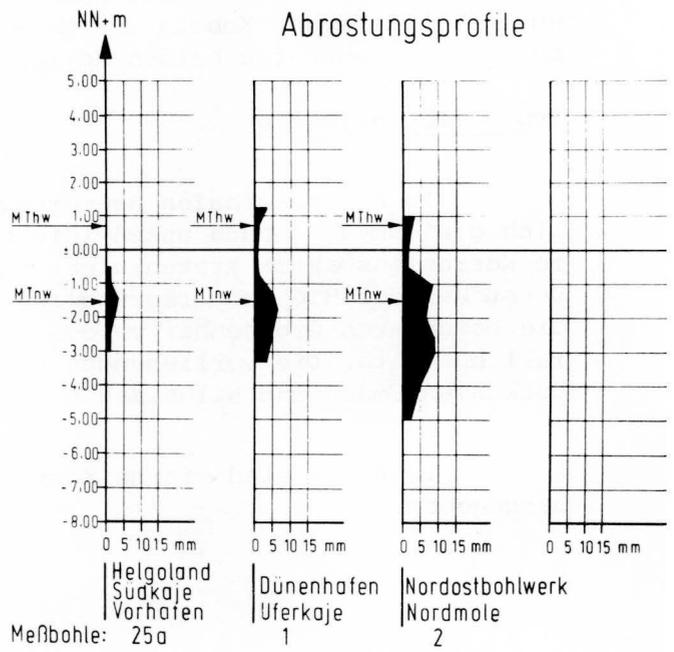
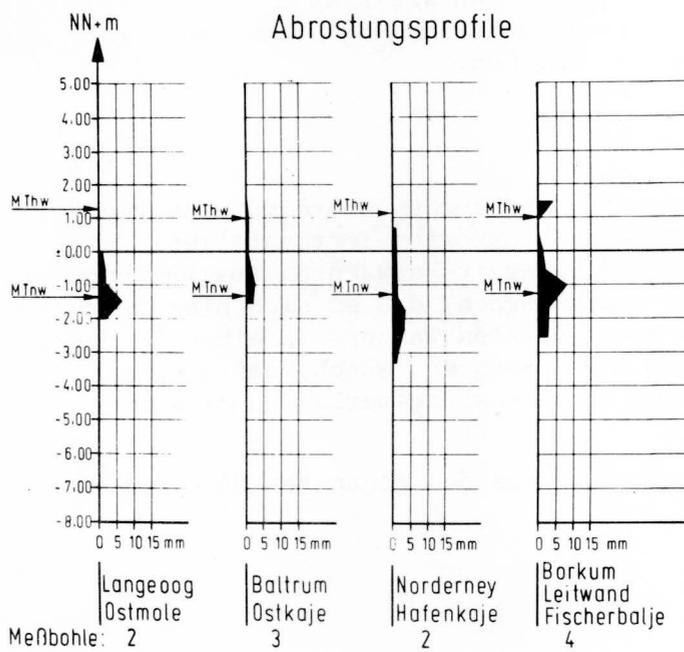
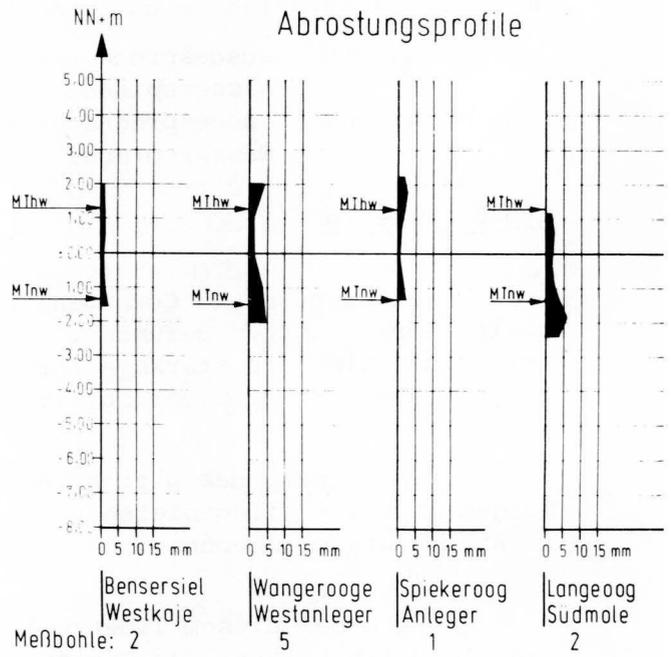
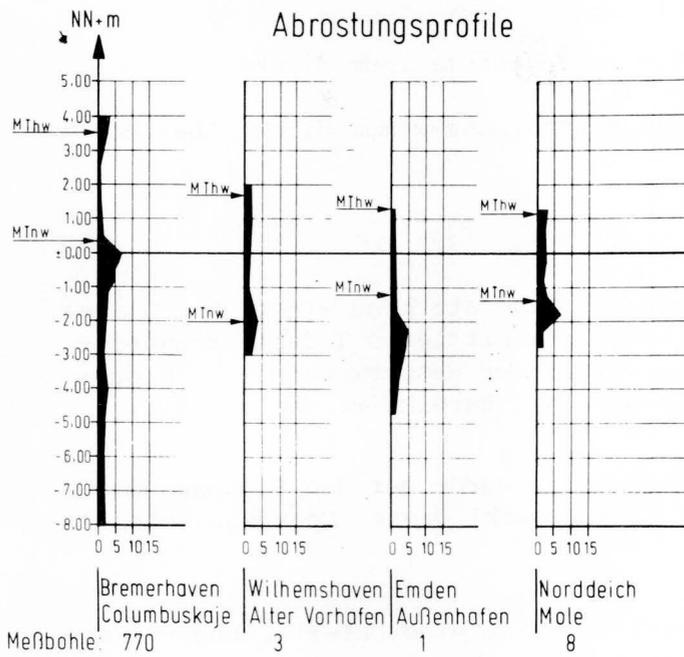


Tabelle 11: Korrosionsraten im Bereich der maximalen Abrostung an Spundwänden im norddeutschen Küstengebiet

(U = Ultraschallmessung, M = mechanische Messung
 S = salzarmes bis Süß-, B = Brack-, O = Ostsee-,
 N = Nordsee bzw. Meerwasser, E = erschwerte Korrosion z.B.
 durch Sandschliff u.a.)

B a u w e r k	Messung	Stand- zeit Jahr	Korrosions- rate mm/J.	Was- ser
Oldenburg Küstenkanal	U	40	0,06	S
Trave 25,9	M	28	0,07	S
Kammerspundwand Gieselau-Schleuse	M	20	0,05	S
Hafen Uetersen	M	26	0,06	S
Schleuse Strohbrück	M	27	0,07	S
Hafen Neustadt	M	31	0,06	S
Innenhafen Glückstadt	M	27	0,06	S
	M	23	0,09	S
Dockhafen Emden Südkai	U	32	0,20 E	B
Marinekai	U	30	0,10	B
Alter Liegehafen	U	7	0,05	B
Neuer Liegehafen	U	24	0,08	B
Tonnenhof	U	7	0,10	B
Brunsbüttelkoog Elbehafen	U	7	0,06	B
Emden Außenhafen	U	26	0,15	B
Bremerhafen - Columbuskaje	M	39	0,14	B
Schiffssammelstelle				
Drehbrücke Rendsburg	M	27	0,15	B
Glückstadt Außenhafen	M	20	0,15	B
Wilhelmshafen Neuer Vorhafen	U	13	0,20	B
Alter Vorhafen	U		0,20	B
Kiel Holtenau Tonnenhof	M	30	0,17	B - O
	U	43	0,20	O
Norddeich Mole	U	16-34	0,20	N
Bensersiel Westkaje	U	5	0,25	N
Sylt, Hafen Hörnum	M	20	0,15	N
Amrum, Seezeichenhafen Wittdün	M	43	0,17	N
Hafen Büsum	M	46	0,10	N
	M	23	0,10	N
Wangerooge, Westanleger	U	14	0,27E	N
	U	8	0,40E	N
Spiekeroog, Anleger	U	6	0,25E	N
Langeroog, Südmole	U	31	0,15	N
Ostmole	U	31	0,15	N
Baltrum, Ostkaje	U	11	0,15	N
	U	3	> 0,50E	N
Norderney, Hafenkaje	U	16	0,15	N
Borkum, Leitwand Fischerbalje	U	31	0,20	N
übriger Hafen	U	31	0,15	N
Helgoland, Binnenhafen	M	18	0,18	N
Vorhafen Südkaje	U	37	0,15	N
Dünenhafen Uferkaje	U	36	0,15	N
Nordostbohlwerk	U	36	0,25E	N
Nordmole				

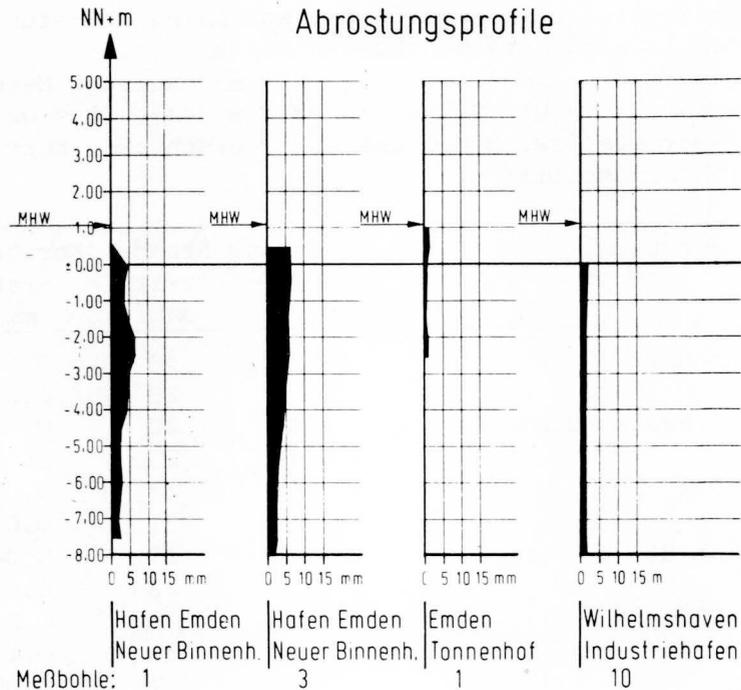


Abb. 5 Abrostungsprofile im Dockhafen

5.2 Korrosionsraten

Die Standsicherheit von Stahlspundwänden ist abhängig von den Rostdicken, d.h. am stärksten korrodierten Stellen, wobei allerdings noch die Art der statischen Beanspruchung berücksichtigt werden muß. Z.B. freistehende Spundwand, einfach oder doppelt verankerte Wand u.ä. Um bei der Planung und dem Bau von Spundwänden die Lebensdauer abschätzen zu können, sollte versucht werden, Richtwerte für die Korrosionsraten, d.h. jährliche Abrostung in den maximal gefährdeten Stellen, zu ermitteln. Das stößt jedoch in der Praxis auf einige Schwierigkeiten. In der ersten Zeit nach Einbau des Stahls korrodiert das Metall verhältnismäßig stark (s. Abb. 2). Allmählich baut sich, wenn nicht starke Strömung mit Sandschliff o.ä. es verhindert, eine Rostschicht auf, wodurch sich die Korrosion verlangsamt. Je länger demnach eine Spundwand im Wasser steht, umso mehr wird die gemessene Korrosionsrate der Langzeitkorrosion entsprechen.

Eine weitere Schwierigkeit ist die, daß bei den eingebauten Spundbohlen zwar die Sollstärke bekannt ist, in vielen Fällen diese aber um einige zehntel Millimeter überschritten wird. Auch hier wirkt sich eine lange Standzeit günstig auf die Mittelwertbildung aus. Ferner können Ultraschallmessungen aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen nicht zu dicht übereinander ausgeführt werden. Dadurch ist nicht immer die maximale Abrostung, die an einer Bohle auftritt, zu ermitteln. Letztlich gehen die Meßungenauigkeiten mit ein. Um trotz dieser Unzulänglichkeiten Werte zu erhalten, die einigermaßen Sicherheit bei den Bauberechnungen ergeben, wurden nicht die Mittelwerte der in einem Hafen an einer Mole usw. gefundenen Korrosionsraten gebildet. Vielmehr sind in der nachfolgenden Tabelle 11 Werte angegeben, die im oberen Bereich liegen. Andererseits sind aber herausfallende maximale Extremwerte nicht berücksichtigt worden, da aus irgendwelchen, unbekanntem Gründen lokal gegenüber der Umgebung wesentlich verstärkte Korrosion auftreten kann.

6. Zusammenfassung

Im norddeutschen Küstengebiet sind in den letzten Jahren an zahlreichen Stahlspundwänden Dickenmessungen mit Ultraschall zur Bestimmung der Standsicherheit durchgeführt worden. Aufgrund der Ausmessungen lassen sich im Unterwasserbereich drei Korrosionstypen unterscheiden.

Aus den maximalen Abrostungen wurden die Korrosionsraten errechnet, wobei vereinfacht angenommen wird, daß die Korrosion nur einseitig erfolgt und hinter der verfüllten Wand vernachlässigbar klein ist.

Mit Hilfe der ermittelten Werte lassen sich für den planenden und bauenden Ingenieur die Spundwanddicken abschätzen, die in einem bestimmten Wasser für eine vorgegebene Gebrauchsdauer erforderlich sind. Es muß aber ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß aus den vorliegenden Werten keine absolute Sicherheit abzuleiten ist, da unter bestimmten, nicht näher bekannten, örtlich auch unterschiedlichen Umständen eine wesentlich stärkere Korrosion auftreten kann, wie z.B. am Nordostbohlwerk der Insel Helgoland gegenüber den anderen vermessenen Stellen der Insel ersichtlich ist.

