



Bestimmung von Wanddicken an einer Spundwand bei mikrobiell beeinflusster Korrosion

von Dr.-Ing. Susanne Potthoff

1 Einleitung

Der Neue Vorhafen bildet die Zufahrt zur Seeschleuse in Wilhelmshaven (4. Einfahrt) und wird als tideabhängiger Marinehafen genutzt. Die Spundwände an der West- und Ostkaje wurden in den Jahren 1960 bis 1963 errichtet. Seit der Bauzeit traten eine Vielzahl von Schäden an den Wänden auf. Die ersten Durchrostungen wurden vor mehr als 15 Jahren beobachtet.

Der Artikel "Bakterien für Lochfraß in den Spundwänden verantwortlich" der Ausgabe 2002 von "Zwischen Weser und Ems" [WR02] enthält eine Zusammenstellung der vielfältigen Schäden und Sanierungsmaßnahmen. Davon ausgehend gibt er eine Einführung in die Problematik der mikrobiell induzierten Korrosion. Diese wurde an den Spundwänden im Neuen Vorhafen erstmals im Sommer 2000 nachgewiesen. Seitdem wurden in verschiedenen Untersuchungsschritten die Verteilung des Korrosionspotentials und die Auswirkungen auf die Wanddicken bestimmt. Dafür musste zunächst ein geeignetes Verfahren zur Probenentnahme entwickelt werden.

2 Ultraschallmessungen und ihre Folgen

Die Kajen wurden als Kombinierte Stahlspundwände errichtet, bei denen lange und schwere Tragbohlen mit kürzeren und leichteren Zwischenbohlen im Wechsel angeordnet sind. Die Entwicklung der Wanddicken an den Spundwänden wird seit fast 30 Jahren messtechnisch beobachtet. Bei Ultraschalluntersuchungen im Jahr 1982 betragen die gemessenen Wanddicken an den Zwischenbohlen im Mittel 70 % der Ausgangsdicken. Im Extremfall wiesen einzelne Bohlen eine Restwanddicke von lediglich 45 % auf. Als eine Konsequenz dieser Ergebnisse wurden die Spundwände 1987 mit einer Kathodenschutzanlage in Kombination mit einem Korrosionsanstrich im Überwasserbereich nachgerüstet.

Untersuchungen aus dem Jahre 1998 zeigen eine deutliche Abnahme der Abrostungen seit 1982, die auf die Wirkung des Korrosionsschutzes zurückgeführt wird. Dennoch ergeben sich für die Zwischenbohlen in der Spritz- und Niedrigwasserzone mittlere Abrostungsraten von 0,11 mm/a.



Die Abrostungen der Tragbohlen in diesem Bereich sind ungefähr halb so groß. Zudem zeigten sich bereits Ende der 80iger Jahre erste Durchrostungen an den Zwischenbohlen, die mit kleineren Blechen zugeschweißt wurden. Hieraus leitet sich eine maximale Abrostungsrate von 0,45 mm/a ab.

3 Verdacht und Bestätigung von MIC

Aufgrund des wiederholten Auftretens weiterer Durchrostungen und der aus Sandausspülungen resultierenden Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit – insbesondere die Befahrbarkeit der Kajen mit schweren LKW – stellte sich die Frage der Korrosionsursache erneut. So wurde u. a. eine mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) vermutet und die Gesellschaft für Technische Mikrobiologie und Hygieneüberwachung, Dr. Graff und Partner durch die Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, mit mikrobiologischen Untersuchungen beauftragt.

Im Sommer 2000 wurde die Spundwand an der Ostkaje in der Nähe von zwei durchgerosteten Stellen aufgeschnitten. Die Stahlproben, das ausströmende Wasser sowie die Hinterfüllung wurden hinsichtlich des Vorkommens Sulfat reduzierender und Schwefel oxidierender Bakterien untersucht. Sulfat reduzierende Bakterien (SRB) wurden in der Wasserwechselzone auf den landseitigen Stahloberflächen und im dahinter liegenden Sediment nachgewiesen. Der Nachweis schwefeloxidierender Bakterien gelang in der Spritzwasserzone.

4 MIC und das Problem der Probenentnahme

Sulfat reduzierende Bakterien (SRB) sind in allen marinen Gewässern und Böden vorhanden. Aufgrund fehlender Energie- und Kohlenstoffquellen können sie im freien Meerwasser und tief gelegenem Sediment keine Aktivitäten entfalten. In der Wasserwechselzone hinter der Spundwand werden die SRB durch den Tidehub mit einem ständigen Nachschub an Sulfat und organischen Stoffen versorgt. Es kommt zu einer direkten anaeroben Korrosion an den erdseitigen Stahloberflächen. Als Endprodukt entsteht Schwefelwasserstoff. Dieser ist in Verbindung mit dem gelösten Eisen in Form einer Schwarzfärbung des Sediments durch Eisensulfid sichtbar. Die schwefeloxidierenden Bakterien in der Spritzwasserzone nutzen den von den SRB gebildeten Schwefelwasserstoff. Korrosion wird hier durch die Freisetzung von Schwefelsäure verursacht.

Die mikrobiell induzierte Korrosion durch SRB besitzt die gleichen Mechanismen wie die "herkömmliche" Korrosion von der Wasserseite. Der Nachweis ist jedoch ungleich schwerer, da eine Entnahme von Sediment und die Untersuchung der landseitigen Stahloberflächen immer mit einer "Zerstörung" der Spundwand verbunden ist. Bei der Voruntersuchung wurden relativ kleine Stahlproben mit einer Trennscheibe entnommen. An diesen konnten teilweise keine Bakterien nachgewiesen werden – vermutlich wurden sie bei der starken Erhitzung zerstört.

Ein für die weiteren Untersuchungen entwickeltes Verfahren zur Probenentnahme sollte neben der längen- und höhenmäßigen Verteilung des Korrosionspotentials auch Aussagen bezüglich der Auswirkungen auf die Standsicherheit ermöglichen. Aufgrund der von der Landseite wirkenden Korrosion wurden stärkere Abrostungen an den hinteren, statisch bedeutsamen Flanschen der Tragbohlen vermutet. Bei den bisherigen Auswertungen war unter der Annahme einer von der Wasserseite her wirkenden Korrosion für die im Boden eingebetteten, landseitigen Flansche eine Dickenabnahme von rd. 0,01 mm/a zu erwarten (E35 [EAU96]).

5 Verfahren der Probenentnahme

In Zusammenarbeit mit dem Büro Dr. Graff und Partner, der Tauchergruppe des WSA Brunsbüttel und der BAW (Karlsruhe, Hamburg) wurde ein Probenentnahmeverfahren entwickelt, das eine Gewinnung von mikrobiell möglichst unverändertem Sediment und von Stahlproben der vorderen und hinteren Flansche erlaubt. Dabei werden schrittweise die Flansche der Tragbohlen durchbohrt und die unterschiedlichen Proben entnommen (Abb. 1).

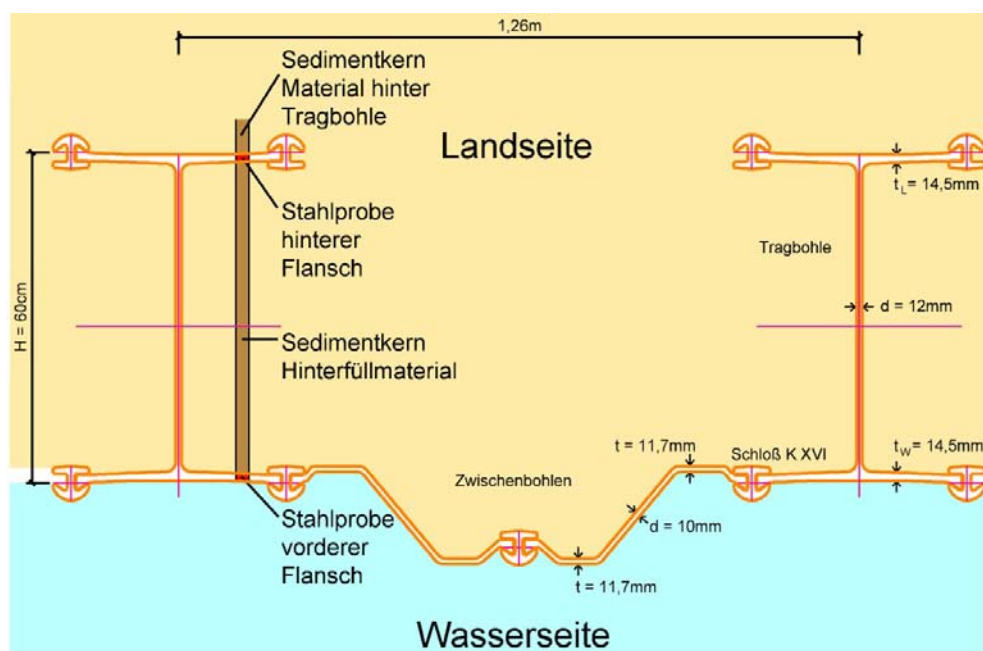


Abb. 1: Probenentnahme an den Tragbohlen

Zu Beginn sind an jeder Beprobungsstelle 2 bis 4 Bohrungen zur Befestigung des Probenentnahmegertes erforderlich. Mit einer Diamant-Bohrkrone (Durchmesser 35 mm) wird zuerst eine Stahlprobe ($d = 29 \text{ mm}$) aus dem wasserseitigen Flansch der Tragbohle entnommen (Abb. 2). Durch die Öffnung wird anschließend die Sedimentprobe aus dem Hinterfüllmaterial mittels eines Rohrs aus Acrylglas gewonnen. Anschließend erfolgt mit dem Bohrer die Entnahme der Stahlprobe aus dem hinteren Flansch (Abb. 3). Zum Abschluss wird mit einem zweiten Acrylrohr das Sediment hinter dem landseitigen Flansch gewonnen.



Abb. 2: An der Spundwand montiertes Probeentnahmegert



Abb. 3: Stahlkern in der Bohrkron

Um aussagekräftige Stahlproben zu erhalten, ist der Ansatzpunkt von besonderer Bedeutung. Die Abb. 4 zeigt die Ausbildung eines Flansches der im Neuen Vorhafen vorhandenen Peiner Spundbohle PSp 60 L. Die Flanschenden besitzen keilförmige Verdickungen, auf denen wasserseitig Schlosstähle zur Verbindung der Tragbohle mit der nebenliegenden Zwischenbohle aufgezogen sind. An den landseitigen Flanschen sind teilweise Schlösser zur Erhöhung des Widerstandsmoments vorhanden. Die inneren Flanschflächen haben eine Neigung von 4 bis 5 %. Die äußeren Flanschflächen laufen zur Hälfte ihrer Breite senkrecht zur Stegachse. An ihren beiden äußeren Enden verlaufen sie parallel zur Innenfläche. Die Ausgangsflanschdicke von 14,5 mm bezieht sich auf diesen äußeren Bereich. Für eine Entnahme von aussagekräftigen Stahlproben zur Ermittlung der Restwanddicke steht daher nur eine Breite von rd. 7 cm vom Schloss aus zur Verfügung.

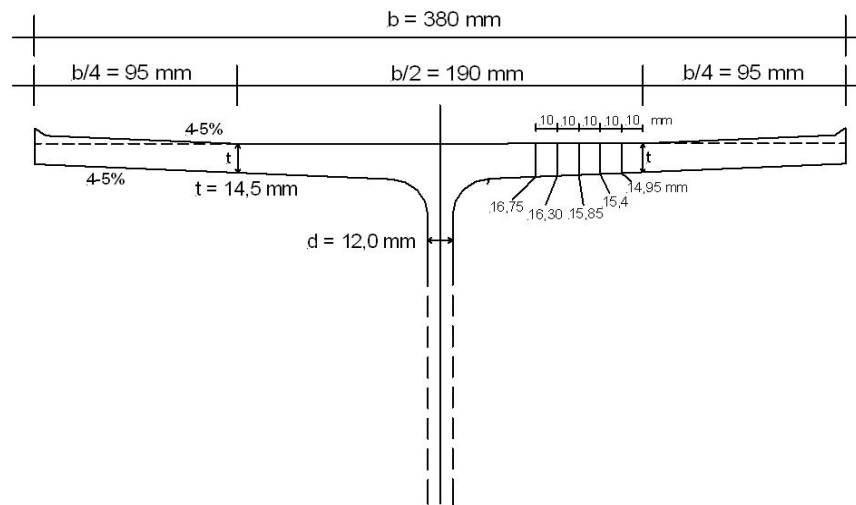


Abb. 4: Ausbildung des Flansches beim PSp 60 L

Zum Testen des entwickelten Verfahrens wurde im April 2002 eine Stelle der Westkaje in 6 Höhenlagen (Spritzwasserzone bis Niedrigwasserzone) beprobt. Die Abbildung 5 zeigt die Arbeit in der Wasserwechselzone durch Taucher des WSA Brunsbüttel. Insgesamt gesehen wurde bei der "Versuchsprobenentnahme" mit einem angemessenen Aufwand aussagefähiges Material aus dem Bereich zwischen den Flanschen der Tragbohle gewonnen. Lediglich die Entnahme von Stahlproben aus dem hinteren Flansch war schwieriger. Beim Herausziehen der Bohrkronen gingen einige der Stahlproben verloren. Diese konnten zum Teil mit Hilfe eines Magneten gerettet werden. An den Stahlkernen wurden die Restwanddicken beider Flansche bestimmt.



Abb. 5: Probenentnahme in der WWz

Das entwickelte Verfahren wurde zwischen Juni und September 2002 an jeweils 2 Stellen der Ost- und Westkaje zur Untersuchung von 8 Höhenlagen eingesetzt. Bei diesem Durchgang wurde die Unterwasserzone in die Beprobung und mikrobiologische Untersuchung einbezogen. In einem letzten Untersuchungsschritt wurden im Sommer und November 2003 an insgesamt 22 Stellen Stahlproben in Höhe des maximalen Biegemoments entnommen.

6 Verbreitung des Korrosionspotentials

An allen fünf Untersuchungsstellen zur Bestimmung des Verbreitungspotentials über die Höhe wurden physikalisch-chemische Messungen (Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential, elektrische Leitfähigkeit) vorgenommen. Diese ergaben, dass unterhalb von NN – 0,20 m die Bedingungen für die Aktivität von Sulfat reduzierenden Bakterien (SRB) gegeben sind. Darüber herrschen Bedingungen, die eine Aktivität von Schwefel oxidierenden Bakterien (SOB) ermöglichen. Bei den mikrobiologischen Untersuchungen wurden die SRB an allen Stellen der Wasserwechselzone, der Niedrigwasserzone und der Unterwasserzone nachgewiesen. Die ermittelten Konzentrationen schwanken zwischen gering und stark erhöht. Die SOB wurden außer bei einer Station der Westkaje durchgängig in der Spritzwasserzone angetroffen. In bestimmten Bereichen gelang weiterhin der Nachweis aerober und anaerober heterotropher Bakterien. Diese dienen ebenfalls als Nährstofflieferanten für die SRB und erzeugen die für deren Aktivität erforderlichen physikochemischen Bedingungen.

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen wurden von der BAW Karlsruhe durch Materialuntersuchungen am Stahl, Rost und Hinterfüllmaterial verifiziert. So wurde u. a. das Gefügebild des Stahls aus einer Zwischenbohle untersucht. Hierbei ist anhand der Lineation die ehemalige Mitte zu erkennen (Abb. 6). Die vorwiegende Abrostung der Spundbohlen von der Landseite her kann somit nachvollzogen werden.

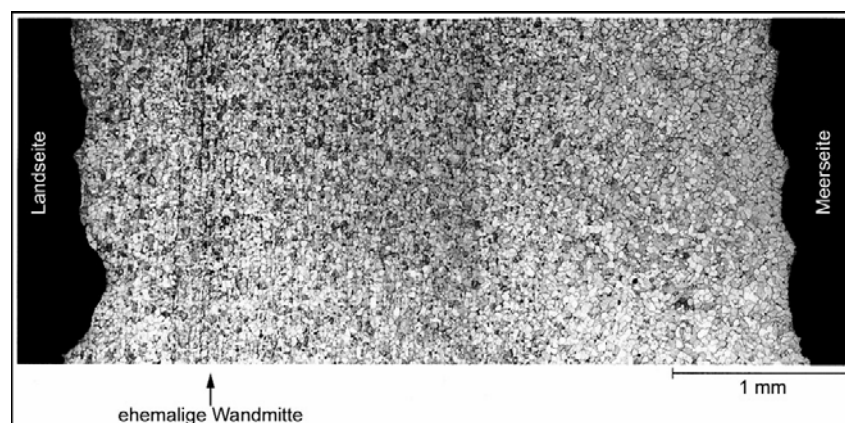


Abb. 6: Gefügebild einer Zwischenbohle

7 Restwanddicken

Für die Bestimmung der Wanddicken wurden die Stahlproben zunächst halbseitig entgratet. Verbackungen mit dem Hinterfüllmaterial und anhaftende Korrosionsrückstände wurden entfernt. Die Wanddicke ergibt sich als Mittelwert aus drei Stellen, an denen die Stahlstärke mit dem Messschieber bestimmt wurde.

Bei einer Nennflanschdicke von 14,5 mm betragen die Restwanddicken zwischen 9,2 mm und 15,6 mm. Bei den Proben mit deutlichen Überdicken wurden die Kerne vermutlich zu nah am Steg entnommen (vgl. Abb. 4). Diese Werte sind nicht in die Auswertung eingeflossen. Die Abb. 7 zeigt die Restwanddicken der vorderen, wasserseitigen und der hinteren Flansche für die Korrosionszonen nach E 35 [EAU96]. Obwohl besonders die Werte im oberen Bereich nur auf einer sehr begrenzten Probenmenge basieren, bestätigen sie die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen von 1998 für die vorderen Flansche. Die mittleren Abrostungsraten von 0,02 mm/a bis 0,035 mm/a für die landseitigen Flansche sind mindestens doppelt so hoch wie bei einer "herkömmlichen" Korrosion im Boden.

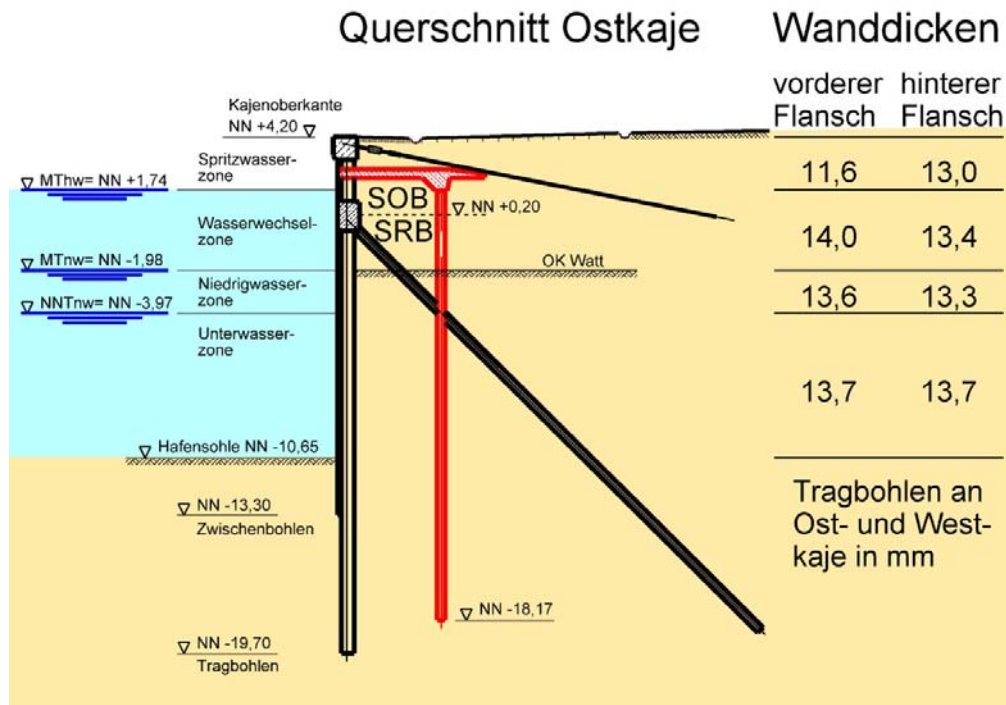


Abb. 7: Wanddicken der vorderen und hinteren Flansche

Die angegebenen Abrostungsraten stellen Minimalwerte der Abrostungen dar. Zum einen zeigt die Auswertung der Ultraschallmessungen, dass bei den vorhandenen Spundwänden aufgrund von Walztoleranzen von höheren Ausgangswandstärken ausgegangen werden muss. Zum anderen wurden auch die ausgewerteten Stahlproben vermutlich nicht alle im äußeren, parallelen Bereich der Flansche entnommen, so dass hier ebenfalls die ursprüngliche Dicke höher anzusetzen ist. Letztendlich ist anzunehmen, dass die durch MIC bedingte Abrostungsrate mit der Standzeit gestiegen ist. Eine Zufuhr von Sulfat und organischen Stoffen ist von Anfang an durch Schlosssprünge gegeben [WR02]. Die mit der Zeit entstandenen Löcher und Risse begünstigen diesen Stoffeintrag und somit eine Aufrechterhaltung der bakteriellen Aktivität im Sediment.



8 Schlussfolgerungen – Ausblick

Mit dem vorgestellten Verfahren zur Probenentnahme wurde eine Möglichkeit gefunden, die landseitigen Stahloberflächen, das Sediment hinter den Spundwänden sowie die hinteren Flansche der Tragbohlen zu untersuchen. Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Ultraschallmessungen ist dieses jedoch mit einer Zerstörung der Spundwand verbunden. Da es sich bei den durch die Bohrtechnik entstehenden Öffnungen jedoch um Löcher mit feststehenden Durchmessern handelt, konnten diese problemlos mit Packern verschlossen werden. Die Technik wurde durch die Tauchergruppe des WSA Brunsbüttel entwickelt und ersetzt ein aufwändiges Verschweißen der Öffnungen.

In insgesamt vier Beprobungs- und Untersuchungsdurchgängen wurde eine mikrobiell beeinflusste Korrosion an den Spundwänden nachgewiesen. Diese wirkt sich in einem Maß auf die hinteren Flansche der Tragbohlen aus, das bei "herkömmlichen" Korrosionsmechanismen so nicht zu erwarten wäre. Weiterhin unklar ist, wie sich die Korrosion von der Landseite auf die Verankerung auswirkt. Auch hier ist eine Abnahme der Wanddicken zu befürchten.

Die ermittelten Wanddicken und Abrostungsraten sind Grundlage für einen erneuten Standsicherheitsnachweis. Laut einer überschlägigen Berechnung sind die Biegespannungen der Spundwände bereits für den Ausgangszustand weitestgehend aufgebraucht. Bei der Bewertung unterschiedlicher Sanierungsmöglichkeiten wird das Problem der mikrobiell beeinflussten Korrosion eine maßgebende Rolle spielen. So ist bei allen möglichen Varianten die Auswirkung auf das Sediment hinter der Spundwand und die Stahlrückseiten in die Betrachtungen einzubeziehen.

9 Literatur

- [EAU96] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen EAU 1996, 9. Auflage. Hrsg.: Arbeitsausschuss "Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Berlin, Ernst & Sohn, 1996
- [Gra03] Graff, M.: Mikrobiell beeinflusste Materialzerstörung an Wasserbauwerken, Hansa, Nr. 8, 2003, S. 66 – 69
- [WR02] Wennekamp, S.; Ruthemann, M.: Bakterien für Lochfraß in den Spundwänden verantwortlich. Zwischen Weser und Ems, Hrsg.: WSD Nordwest. Heft 2002, Ausgabe 2002, S. 58 – 62