

Long Carbon Europe
Spundwand



ArcelorMittal

AMLoCor Stahlsorte | 2011

AMLoCor
DIE NEUEN KORROSIONS-
MINDERNDEN STAHLSORTEN
FÜR DEN KAIMAUERBAU



Einleitung

AMLoCor, ArcelorMittal's neue korrosionsmindernde Stahlsorten, werden zweifellos eine Bereicherung bei der Planung neuer Kaimauern sein. Seit mehr als einem Jahrhundert kommen Stahlspundbohlen weltweit beim Bau von Kaianlagen als zuverlässige und kostengünstige Lösungen zum Einsatz. In den großen europäischen Häfen wurden zahllose Kaimauern aus Stahlspundbohlen errichtet. Ein Aspekt, den die Planungsingenieure und Hafenbehörden dabei immer im Blick hatten, war die Dauerhaftigkeit dieser Bauwerke.

Die Korrosion von Stahl und die damit verbundene Dickenabnahme eines Spundwandprofils ist ein natürlicher Vorgang, der eintritt, wenn ungeschützter Stahl in Berührung mit Feuchtigkeit oder Wasser kommt. Allerdings hat dies Investoren und Ingenieure zu keiner Zeit davon abgehalten, die vielfältigen Vorteile der Stahlspundwand gegenüber anderen Baustoffen nicht nur im Seehafenbau zu nutzen.

Um Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit über die vorgegebene Nutzungsdauer einer Stahlkonstruktion zu gewährleisten, stehen unterschiedliche Schutzmaßnahmen zur Auswahl.



Abb. 2 Stranggießen von AMLoCor

Weitere wirkungsvolle, aber auch kostenintensive Lösungen sind Beschichtungen und kathodischer Korrosionsschutz.

Vor mehr als 20 Jahren begannen die europäischen Spundwandhersteller damit, sich intensiv mit der Dauerhaftigkeit ihrer Produkte zu beschäftigen. Sie führten hierzu Wanddickenmessungen in zahlreichen nordeuropäischen Häfen und Wasserstraßen durch. Die dabei gemessenen Korrosionsraten finden sich heute beispielsweise in den Tabellen des Eurocode 3 Teil 5 als charakteristische Korrosionsraten für handelsüblichen unlegierten Stahl (Baustahl) wieder.

Die größte Herausforderung war es, einen mikrolegierten Stahl zu entwickeln, der günstigere Eigenschaften in den unterschiedlichen Korrosionszonen einer Kaimauer bietet. So wurden mehrere

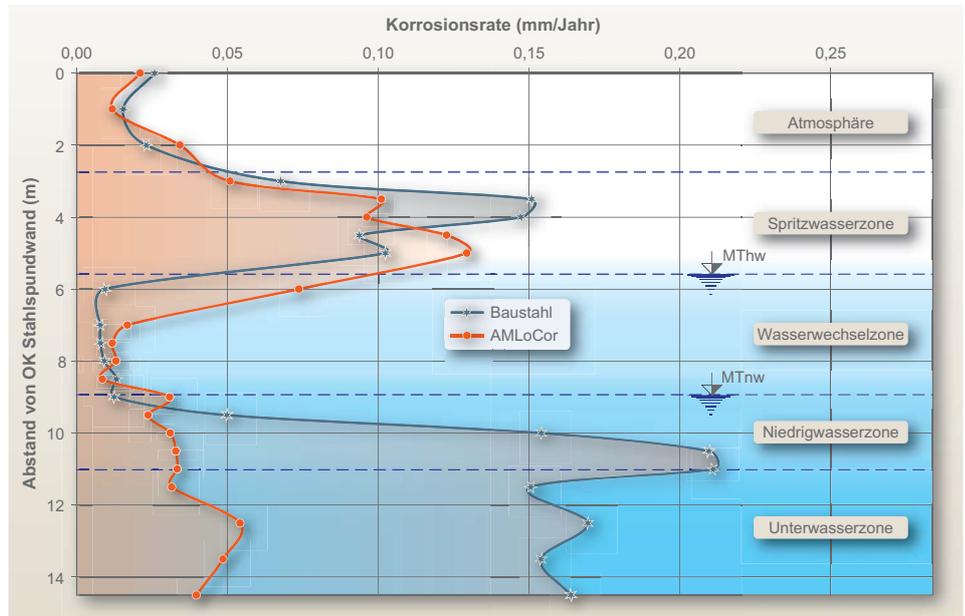


Abb. 1 Korrosionsraten in nordeuropäischen Häfen

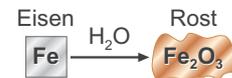
Stahlsorten in verschiedenen Häfen über längere Zeiträume getestet und viele Laboruntersuchungen unter Berücksichtigung einer breiten Palette von Einflüssen durchgeführt. Darüber hinaus wurden im Stahl- und Walzwerk Versuche durchgeführt, um die Produktion derartiger Sonderstahlsorten zu optimieren.

Eine Möglichkeit der Korrosion zu begegnen, ist der Korrosionsschutz durch Überdimensionierung. Dabei wird die korrosionsbedingte Wanddickenreduzierung über die vorgesehene Nutzungsdauer durch verringerte Querschnittswerte beim Nachweis der Stahlspundwände (häufig als statische Reserve bezeichnet) berücksichtigt.

Stahlsorten in verschiedenen Häfen über längere Zeiträume getestet und viele Laboruntersuchungen unter Berücksichtigung einer breiten Palette von Einflüssen durchgeführt. Darüber hinaus wurden im Stahl- und Walzwerk Versuche durchgeführt, um die Produktion derartiger Sonderstahlsorten zu optimieren.

Vorzüge der neuen Stahlsorten

Korrosion ist ein natürlicher elektrochemischer Vorgang, der Metalle und metallische Legierungen wie z.B. Stahl angreift. Er besteht darin, das Eisenatom im Stahl in seinen ursprünglichen Zustand, natürliches Eisenoxyd, umzuwandeln (Bildung einer Rostschicht).



Beschichtungen hemmen diese chemische Reaktion allein dadurch, dass sie die Stahloberfläche vom Elektrolyt trennen. Die Deckschicht bildet eine Barriere, die das Wandern von Reagenzstoffen zwischen dem Stahl und dem Wasser verringert. Eine Rostschicht auf der Oberfläche kann eine ähnliche Schutzwirkung haben.

Das Prinzip des kathodischen Korrosionsschutzes ist ein anderes: Die chemische Reaktion tritt zwar auf, greift aber ein mit der Konstruktion verbundenes, unedleres metallisches Element (Opferanode) an, das anstelle des Stahls durch Korrosion abgetragen wird (z.B. galvanische Anoden aus Aluminium). Oder es wird eine elektrische Spannung (Fremdstrom) aufgebracht, welche die erforderlichen Elektronen zum Schutz des Stahls abgibt. Korrosion ist ein hochkomplexes Thema, auf das wir in vorliegender Broschüre nicht näher eingehen werden.

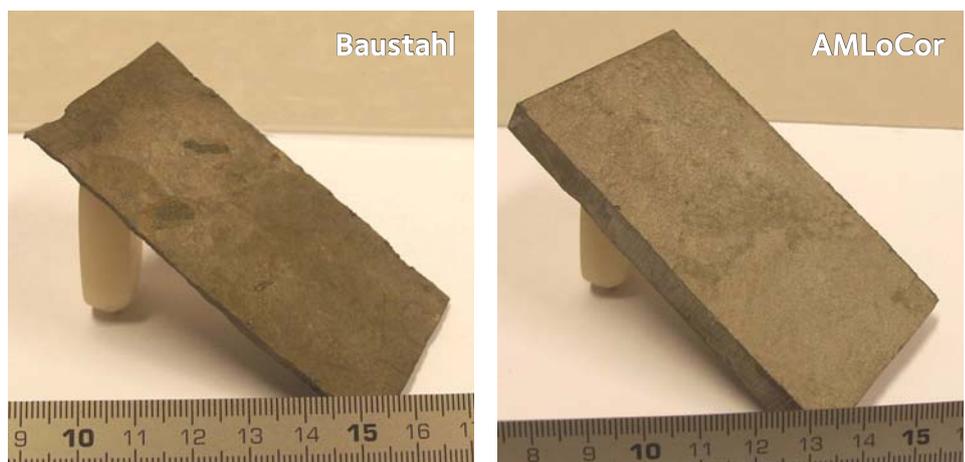


Abb. 3 15 Jahre alte Probekörper in einem großen nordeuropäischen Hafen

In dieser Veröffentlichung beschränken wir uns auf **Seewasserbauwerke**, obwohl die neuen Stahlsorten natürlich auch an Binnenwasserstraßen und -seen besonders wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Feldversuche zeigen, dass der **Wanddickenverlust bei AMLoCor je nach Beanspruchungszone um das 3- bis 5-fache geringer ist als bei Standardspundwandstählen**.

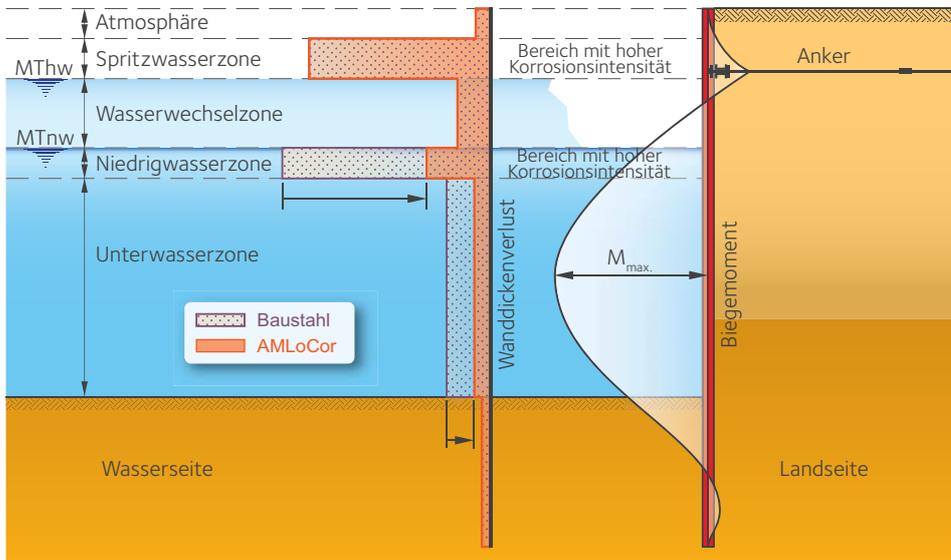


Abb. 4 Typischer Wanddickenverlust im Küstenbereich

Weiterhin zeigt eine von ArcelorMittal durchgeführte Analyse der Umweltwirkung (Ökobilanz) von Stahlkonstruktionen, dass es sich hierbei im Vergleich zu alternativen Bauweisen um ausgesprochen umweltfreundliche Lösungen handelt.

ArcelorMittal arbeitet daran, sein gesamtes Produktprogramm und somit auch die kombinierten Spundwandssysteme in AMLoCor anzubieten. Aktuell sind lediglich Z-Profile in dieser Stahlsorte lieferbar.

Der Hauptvorteil von AMLoCor besteht in der signifikanten Verringerung der Korrosionsraten in der Niedrigwasserzone (NWz) und in der Unterwasserzone (UWz).

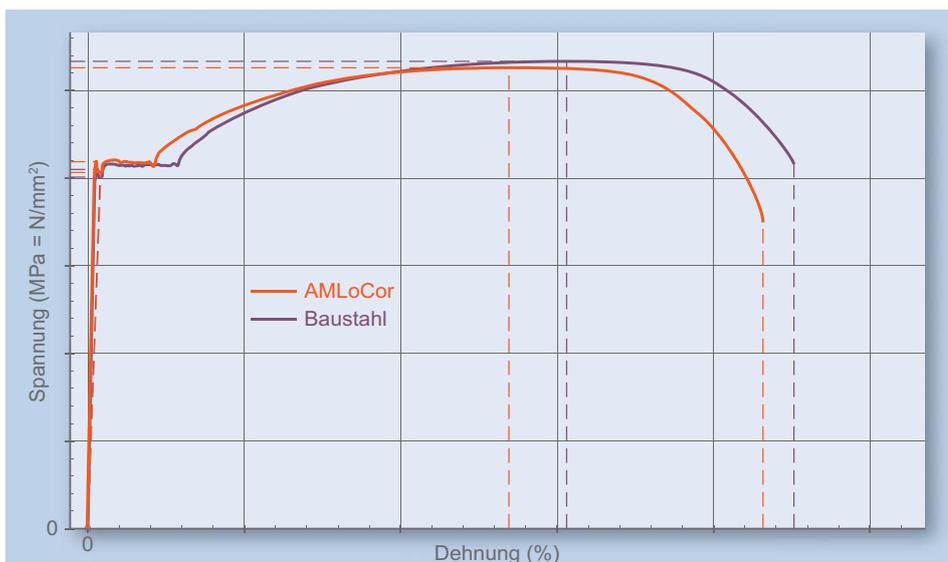


Abb. 5 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Beim Nachweis der Konstruktion berücksichtigen die Tragwerksplaner die Flächenkorrosion in der Annahme, dass der Dickenverlust über die gesamte Fläche gleichmäßig ist. Die Lochkorrosion wirkt sich dagegen mehr örtlich auf die Gebrauchstauglichkeit aus.

Im Allgemeinen treten die höchsten Biegemomente und somit auch Stahlspannungen in Bereichen auf, in denen die Korrosionsraten relativ niedrig sind, nämlich der Unterwasserzone oder dem Einbindebereich im Boden. Gelegentlich ist jedoch die Niedrigwasserzone

für die Bemessung maßgebend, weil die hohen Beanspruchungen in der Unterwasserzone durch den dort geringeren Dickenverlust ausgeglichen werden.

Die chemische Zusammensetzung des AMLoCor konnte im Verlauf der in den letzten 20 Jahren durchgeführten Forschungsprojekte stetig verbessert werden, um die gewünschten Stahlanforderungen, angefangen bei der Dauerhaftigkeit bis hin zur Fertigung und den

Schweiß Eigenschaften, zu erreichen. Die hervorragenden Eigenschaften in der Niedrigwasser- und in der Unterwasserzone wurden nachgewiesen. Obwohl es sich nicht um einen üblicherweise im Bauwesen eingesetzten Baustahl handelt, kann dieser mikrolegierte Stahl nach den für Stahlspundwände geltenden Bemessungsverfahren und technischen Vorschriften ausgelegt und eingebaut werden, z.B. nach DIN EN 1997, DIN EN 1993 Teil 5, DIN EN 10248, DIN EN 12063, EAU 2004 usw.. Dabei ist der Bemessungsansatz jedoch, unter Berücksichtigung des Stahldickenverlustes, anzupassen. Bei der Planung sind gegebenenfalls zusätzliche Schutzmethoden für die Zonen vorzusehen, in denen der Stahl weniger effizient ist (z.B. SpWz und WWz). Hierzu kommen etwa Beschichtungen, Betonverkleidungen usw. in Frage.

Wie andere Sonderstähle – etwa ASTM A690 – liegt der Tonnenpreis der Stahlgüte AMLoCor aufgrund der Kosten für die zusätzlichen Legierungselemente etwas über dem von Standard-Baustahl. Bei der Kosteneffizienz einer Lösung ist allerdings die Gesamtinvestition über die ganze Nutzungsdauer zu berücksichtigen. **In vielen Fällen wird AMLoCor langfristig die kostengünstigste Lösung darstellen.**

Darüber hinaus bietet AMLoCor Schutz vor mikrobiell induzierter Korrosion (MIC), bei der Bakterien den Lochfraß in der Niedrigwasserzone fördern. Der genaue Mechanismus dieser Korrosionsart konnte bislang wissenschaftlich noch nicht aufgeklärt werden, jedoch haben einige Seehäfen in UK und in Frankreich über diesen Sachverhalt

berichtet. Proben der neuen Stahlsorten werden derzeit über einen Zeitraum von mehreren Jahren in einem See im Norden der USA getestet, wo sie mikrobiell induzierter Korrosion (MIC) ausgesetzt sind.

Es ist eine gängige Praxis, die Rammbarkeit neuer Stahlsorten bereits im Entwicklungsstadium zu untersuchen. Obwohl es, angesichts der hohen Festigkeit des AMLoCor, keine Zweifel gab, wurde in Dänemark dennoch ein Rammversuch in schwer rambarem Boden durchgeführt, um das Verhalten eines in der Standardgüte S 355 GP gewalzten Profils mit einem in AMLoCor hergestellten zu vergleichen. Das gesamte Testprogramm wurde unter der Aufsicht einer unabhängigen Stelle durchgeführt, die das Untersuchungsergebnis zertifizierte. Die Bohlen wurden mit einer Schlagramme und einem Vibrator eingebracht, anschließend gezogen und einer Sichtprüfung und Messung

der Profilgeometrie unterworfen. Zusätzlich erfolgte während des Einbringvorganges eine Prozessdatenanalyse (PDA). Der Versuch bestätigte, dass AMLoCor unter schwierigen Einbringbedingungen ebenso gut einbringbar war wie ein unlegierter Stahl (Baustahl) mit gleicher Streckgrenze.

Derzeit können je nach Spundwandprofil **Stahlsorten mit Streckgrenzen von 320 MPa (N/mm²) und mehr** hergestellt werden.

Eine Tabelle mit Kombinationen aus lieferbaren Stahlsorten und Spundwandprofilen wird regelmäßig aktualisiert. Die jeweils aktuellste Ausgabe finden Sie auf unserer Homepage.

Schweiß- und Laschenverbindungen sowie spezialangefertigte Sonderprofile wurden ebenfalls im Detail untersucht.



Abb. 6 Probekörper in einem großen nordeuropäischen Hafen

Mechanische Werkstoffeigenschaften

Abgeleitet aus seinem Verhalten und seinen mechanischen Eigenschaften kann AMLoCor als gleichwertig mit einem üblichen Baustahl betrachtet werden. Somit kann er wie jede beliebige für warmgewalzte Spundwandprofile geeignete Standardstahlsorte – so etwa Stähle nach DIN EN 10248 – für die Projektierung eines Stützbauwerks verwendet werden. In Abbildung 5 sind zwei Spannungs-Dehnungsdiagramme für einen S 355 GP und einen AMLoCor Blue 355 Probekörper dargestellt. Beide zeigen das für Stahl charakteristische elastische Verhalten bis zum Erreichen der Streckgrenze R_{eHr} , gefolgt von einer langen elastisch-plastischen Verformung und Anstieg der Festigkeit bis zum Erreichen der Zugfestigkeit R_m . Das Verhältnis R_m/R_{eHr} ist dem einer Standardgüte S 355 GP sehr ähnlich. Die Kerbschlagarbeit des Stahls übertrifft die Anforderung (27J bei 0°C) der künftigen DIN EN 10248.

Bemessungsaspekte

Durch den Einsatz eines kathodischen Korrosionsschutzes (KKS) lässt sich Korrosion in den Niedrig- und Unterwasserzonen (Abbildung 1) gänzlich unterbinden. Beim Einsatz von AMLoCor ist hingegen der korrosionsbedingte Wanddickenverlust (LoT), der für AMLoCor gegenüber einem Standardstahl jedoch erheblich niedriger ausfällt, beim Nachweis des Tragwerks zu berücksichtigen. Zur Bemessung für die herkömmlicherweise bei Spundwänden eingesetzten Stahlgüten (siehe DIN EN 10248:1995) stehen Daten über den korrosionsbedingten Wanddickenverlust zur Verfügung. Sie basieren entweder auf örtlichen Erfahrungswerten oder auf Empfehlungen und Normen (EAU 2004, DIN EN 1993-5).

Daraus werden für den Entwurf die LoT-Werte für AMLoCor mit dem **Korrosions-Verringerungs-Faktor (CIR)** ermittelt.

$$CIR = \frac{LoT_{Stahl}}{LoT_{AMLoCor}} \Rightarrow LoT_{AMLoCor} = \frac{LoT_{Stahl}}{CIR}$$

Der CIR-Wert kann der folgenden Tabelle entnommen werden:

Zone	Niedrigwasser	Unterwasser	Spritzwasser
CIR	5	3	1

Wird ein Grenzzustandsnachweis geführt, so wird folgender Ansatz für die Nachweisführung empfohlen:

- im Grenzzustand der Tragfähigkeit werden beim Nachweis aufgrund des korrosionsbedingten Dickenverlustes (zonenweise) über das gesamte Tragwerk verringerte Bemessungswerte des Widerstandes $R_{d,cor}$ angesetzt: $E_d \leq R_{d,cor}$
- im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird die Konstruktion in jeder Zone auf Durchrostung geprüft: $LoT < \text{Mindestdicke}$.

Da die mechanischen Eigenschaften der AMLoCor-Stahlsorten absolut gleichwertig zu den normalen Spundwandsorten sind, können die Bemessungswiderstände gemäß den für Spundwandkonstruktionen gültigen Bemessungsnormen z.B. die DIN EN 1993-5 ermittelt werden.

Vorausgesetzt, es werden zum Schweißen die richtigen Zusatzwerkstoffe verwendet, so können auch die Bemessungsnachweise für die Schweißnähte nach diesen Regelwerken ausgeführt werden.

Für Nachweise nach dem Teilsicherheitskonzept sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der äußersten Sorgfalt, die bei der Herstellung von AMLoCor-Spundwandprodukten erforderlich ist, die Streuung der Eigenschaften begrenzt ist und somit uneingeschränkt die Teilsicherheitsbeiwerte für die Materialeigenschaften der Standard-Spundwand-Stahlsorten gelten.

Kostenvergleich

Im Vergleich zur ungeschützten Stahlspundwandlösung aus Standard-Stählen bietet der Einsatz von AMLoCor spürbare Einsparungen hinsichtlich des Stahlgewichts, wenn der korrosionsbedingte Dickenverlust LoT in der Unterwasserzone maßgeblich ist. Das niedrigste Gewicht einer Spundwandkonstruktion wird dagegen stets durch einen kathodischen Korrosionsschutz erreicht. Er bedingt allerdings erhebliche Zusatzkosten sowohl bei der Erstinvestition als auch bei der Instandhaltung. Der galvanische Korrosionsschutz (Opferanode) hat weiterhin ungünstige Auswirkungen auf die Umweltbilanz der Spundwandlösung¹⁾.



Abb. 7 Prototyp des US Ultraschall-Messgeräts

Die Kosten für den KKS ergeben sich proportional zur geplanten benetzten Oberfläche der Spundwand, während die Zusatzkosten für AMLoCor proportional zum Gewicht sind. Daraus resultiert, dass der Kostenvorteil der AMLoCor-Lösung umso größer ist, je leichter das Spundwandbauwerk ist.

Eckprofile, Spezialanfertigung, Einbringen, Instandhaltung

Seine spezifischen Eigenschaften machen AMLoCor in punkto Schweißen zu einem "besonderen" Stahl. So wurden spezifische Schweißverfahren entwickelt, um eine fachgerechte Schweißung sicherzustellen. Auch das Schweißpersonal muss entsprechend qualifiziert sein und geeignete Schweißelektroden sind sorgfältig auszuwählen. Weitere Auskünfte über die verschiedenen Schweißverfahren erteilen wir Ihnen gerne auf Anfrage.

Für Sonderbohlen und Laschenverbindungen kann mit Ausnahme der Schweißverfahren die DIN EN 12063 herangezogen werden.



Abb. 8 AMLoCor Beam Blank zum Walzen von Spundbohlen

Einige unserer Eckprofile sind in der Stahlsorte AMLoCor lieferbar.

Verbindungen müssen sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Um die Beschädigung von Verbindungszubehör wie Gurte und Bolzen zu vermeiden, ist sicherzustellen, dass nicht miteinander verträgliche Stahlsorten voreinander geschützt werden. Ein wesentlicher Parameter ist dabei die Kontaktfläche der unterschiedlichen Elemente. Unter sehr ungünstigen Bedingungen ist ggf. das Einlegen eines Isoliermaterials an der Kontaktstelle zwischen verschiedenartigen Bauelementen empfehlenswert.

Beim AMLoCor können die Beschichtungssysteme eingesetzt werden, die auch für Standard-Spundwand-Stahlsorten verwendet werden. Beschichtungen und kathodischer Korrosionsschutz können gemeinsam verwendet werden. Aus wirtschaftlicher Sicht kann die Kombination von AMLoCor mit einem kathodischen Korrosionsschutz in bestimmten Fällen eine kostengünstige Lösung darstellen. Dagegen ist eine Verzinkung in Verbindung mit AMLoCor nicht empfehlenswert, da diese Korrosionsschutzmethode eine sehr geringe Zusatzwirkung hat.

Spundwände aus AMLoCor benötigen keine besondere Instandhaltung. Je nach dem Berechnungsansatz kann allerdings eine regelmäßige Überwachung der Beschichtung und der Restwanddicke empfohlen sein.

Stahlspundbohlen aus AMLoCor können mit den üblichen Rammgeräten eingebracht werden: Schlagrammen, Vibratoren und hydraulischen Pressen.

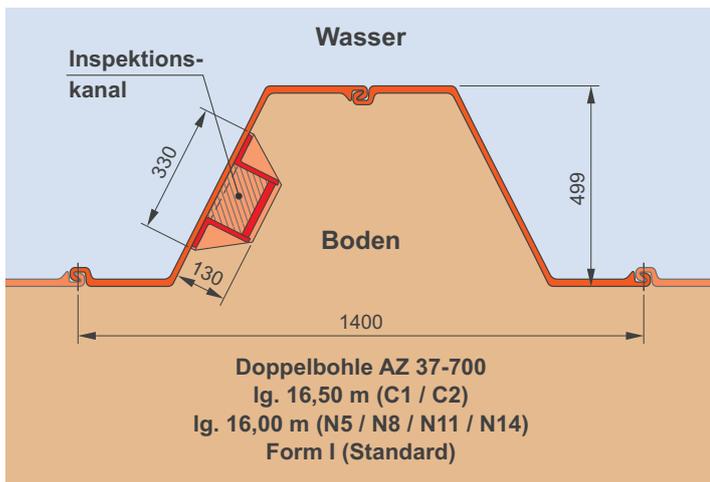


Abb. 9 Detail einer Sonderbohle zur Überwachung der Restwanddicke

Serviceleistungen

Das Fachwissen der Ingenieure unserer technischen Abteilung wird von zahlreichen Planungsingenieuren, Projektträgern und Bauunternehmen, die professionelle Beratung suchen, hoch geschätzt. Unsere Ingenieure bieten Ihnen kostenlose Beratung bei technischen Fragen. Zögern Sie nicht, mit uns Kontakt aufzunehmen, wenn Sie Informationen über ein Schweißverfahren benötigen oder technische Unterstützung bei der Planung von Sonderprofilen, der Auswahl von Dichtstoffen, Hilfestellung bei der Berechnung oder der Erstellung von Entwurfszeichnungen usw. suchen.

Die Lebensdauer von AMLoCor wird zur Zeit in verschiedenen Häfen untersucht. Unsere Forschungsabteilung hat ein Spezialmessgerät zur Messung der Restwanddicke in verschiedenen Höhen einer Spundwandkonstruktion entwickelt. Dies setzt voraus, dass im Vorfeld Sonderbohlen gefertigt und als Bestandteil der Kaimauer eingebracht werden. Über eine Inspektionsöffnung auf der Kaimaueroberfläche kann das Messgerät hinter der Spundwand eingebracht werden. Bei herkömmlichen Prüfmethode (Ultraschall-Messkopf), die von der Wasserseite aus zum Einsatz kommen, ist die Ablösung der Rostschicht notwendig. Die Korrosionsprodukte werden entfernt, was die Stahloberfläche aktiviert und den Korrosionsvorgang erneut in Gang bringt. So ergeben sich verzerrte Messreihen. Die neu entwickelte Methode liefert genauere Ergebnisse ohne die Korrosionsschicht auf der Spundwandoberfläche zu entfernen. Die Messungen können jährlich über einen Mindestzeitraum von fünf Jahren erfolgen. Unsere Forschungsabteilung bietet Projektträgern Unterstützung in Form derartiger zusätzlicher Untersuchungen des Bauobjekts an.

ArcelorMittal ist auf Wunsch auch bei der Ausarbeitung von Ausschreibungsspezifikationen für AMLoCor-Stahlsorten behilflich.

AMLoCor

DIE NEUE LÖSUNG AUS STAHL FÜR
SEEWASSERBAUWERKE

REDUZIERUNG DER WANDDICKEVERLUSTE IN
SEEWASSER UM DEN FAKTOR 3 BIS 5



Abb. 10 Spezialanfertigung einer Sonderbohle mit Inspektionskanal

¹⁾ Hettinger, A.L.; Bourdouxhe, M.P.; Schmitt, A.
"Comparative Environmental evaluation of retaining structures made of steel sheet piling or reinforced concrete". ArcelorMittal, 2010.



Fallstudie: Hafen von Shoreham, UK

Im Hafen von Shoreham (UK) wurde 2010 eine Pilotwand erstellt. Die als verankerte Spundwand (eine Ankerlage) ausgebildete Kaimauer ist ca. 30 m lang (Abschnittslänge) und hat eine freie Höhe von 8,70 m. Die Spundbohlen stammen aus einer Versuchswalzung von 16,00 m langen Profilen AZ 37-700 in der Güte AMLoCor Blue 355 mit einer Streckgrenze von 355 MPa (N/mm²). Bei dem zum Einrütteln in die ersten Meter des Bodens verwendeten Vibrator handelte es sich um ein PVE Modell '2315' mit einer maximalen Amplitude von 16 mm und einer Fliehkraft von 870 kN. Bei Bedarf wurden die Spundwandprofile mittels einer doppelwirkenden Hydraulikkranne, einem BSP Modell 'SL 30' mit einem Fallgewicht von 2,5 t und einer Fallhöhe von 1,25 m, auf Endtiefe gebracht. Bei voller Schlagleistung erreichte das Gerät pro Schlag eine Energie von 30 kNm. Die Bohlen wurden durch eine alluviale Kiesschicht (SPT mit bis zu 25 Schlägen) in eine steife alluviale Tonschicht gerammt. Einige Bohlen drangen dabei bis in die Kreideformation ein.

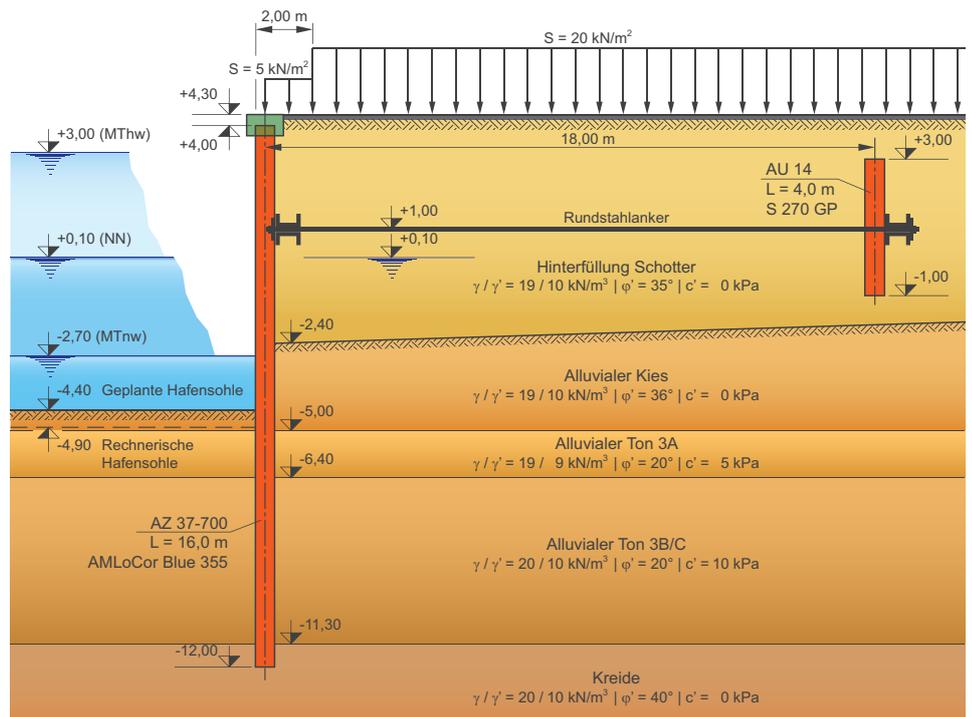


Abb. 12 Hafen von Shoreham, Querschnitt

Vier mit zusätzlichen Inspektionskanälen ausgestattete Spundbohlen wurden für die zukünftige Inspektion der Restwanddicke eingebracht, ebenso wie zwei Standardbohlen aus S 355 GP. Diese werden als

Referenzproben zum Vergleich der tatsächlichen Korrosionsraten beider Stahlsorten unter genau gleichen Bedingungen herangezogen.

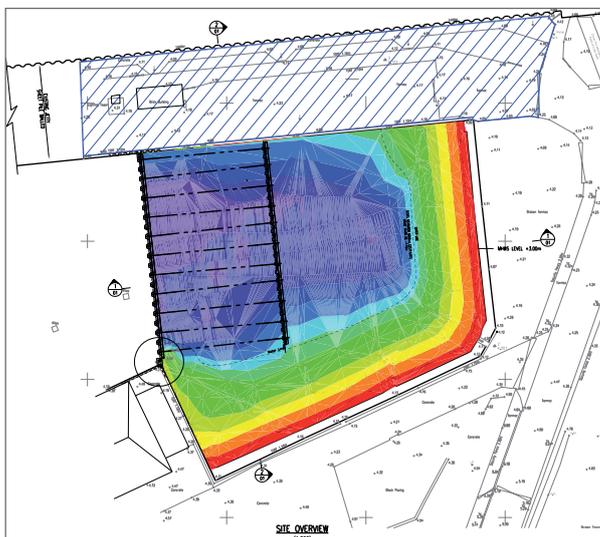


Abb. 11 Hafen Shoreham, Lageplan der Uferwand



Abb. 13 Hafen von Shoreham, AMLoCor Stahlsplundwand



Hinweis

Alle Informationen und Empfehlungen in dieser Dokumentation dienen nur der allgemeinen Information. Die Angaben sind ohne Gewähr. Für fehlerhafte Angaben oder fehlende Angaben sowie missbräuchliche Nutzung der gemachten Angaben kann ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. nicht haftbar gemacht werden. Nutzung der Informationen auf eigene Gefahr und eigenes Risiko. ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. kann in keinem Fall für Schäden, Verdienstaussfall, finanzielle Verluste oder andere Nachteile, die sich aus der Nutzung der Informationen aus dieser Dokumentation oder aus der Unmöglichkeit ihrer Nutzung ergeben sollten, haftbar gemacht werden. Änderungen am Lieferprogramm vorbehalten.

Ausgabe November 2011

ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l.

Spundwand

66, rue de Luxembourg

L-4221 Esch sur Alzette (Luxemburg)

T (+352) 5313 3105

F (+352) 5313 3290

spundwand@arcelormittal.com

www.arcelormittal.com/spundwand