



Stahlsorte
AMLoCor

AMLoCor
die Stahlsorte
mit erhöhtem
Korrosionswiderstand
für den Stahlwasserbau



Einleitung

ArcelorMittal's Stahlsorte mit verminderter Korrosion ist zweifellos eine Bereicherung für die Planung neuer Kaimauern. Seit mehr als einem Jahrhundert kommen Stahlspundbohlen weltweit beim Bau von Kaianlagen als zuverlässige und kostengünstige Lösung 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. 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. Weitere wirkungsvolle, aber auch kostenintensive Lösungen sind Beschichtungen und kathodischer Korrosionsschutz.

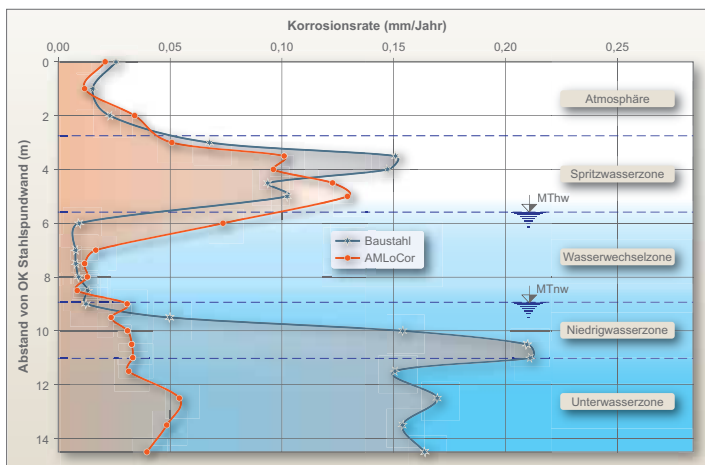


Abb. 1. Korrosionsraten in nordeuropäischen Häfen.

Vor mehr als 20 Jahren haben die europäischen Spundwandhersteller begonnen, sich intensiv mit der Dauerhaftigkeit ihrer Produkte zu beschäftigen. Hierzu sind Wanddickenmessungen in zahlreichen nordeuropäischen Häfen und Wasserstraßen durchgeführt worden. 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 Stahlsorten in verschiedenen Häfen über längere Zeiträume getestet und viele Laboruntersuchungen unter Berücksichtigung einer breiten Palette von Einflüssen durchgeführt. Darüber hinaus wurden in Stahl- und Walzwerken Versuche durchgeführt, um die Produktion derartiger Sonderstahlsorten zu optimieren. Das Ergebnis dieser Entwicklungsarbeit ist die Familie der Stahlsorte AMLoCor mit verminderter Korrosion.

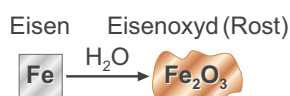
ArcelorMittal arbeitet daran, sein gesamtes Produktprogramm, inklusive der kombinierten Spundwandssysteme, in AMLoCor anzubieten. Aktuell sind Z-Profile in dieser Stahlsorte lieferbar.



Abb. 2. Stranggießen von AMLoCor.

Korrosion

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 Eisenoxid, 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, welches anstelle des Stahls durch Korrosion abgetragen wird (z.B. galvanische Anoden aus Aluminium). Oder aber es wird eine elektrische Spannung (Fremdstrom) aufgebracht, welche die erforderlichen Elektronen zum Schutz des Stahls abgibt. Korrosion ist ein hochkomplexes Thema mit vielen Einflussparametern, auf das in der vorliegenden Broschüre nicht näher eingegangen wird. Weitere Informationen werden auf Anfrage von unserer Technischen Abteilung zur Verfügung gestellt.

Vorteile von AMLoCor

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

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 eher 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 (siehe Abb. 4.). 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, wissenschaftlichen Untersuchungen stetig verbessert werden, um die gewünschten Stahlanforderungen, angefangen bei der Dauerhaftigkeit bis hin zur Fertigung und den Schweißseigenschaften, 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. 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. Spritzwasserzone [SpWz] und Wasserwechselzone [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 gewöhnlichem 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.**

Eigenschaften von AMLoCor

Derzeit können, je nach Spundwandprofil, **Stahlsorten mit Streckgrenzen von 320 MPa (N/mm²) und mehr** hergestellt werden. Die Tabelle mit Kombinationen aus lieferbaren Stahlsorten und Spundwandprofilen wird regelmäßig aktualisiert. Die aktuellste Ausgabe finden Sie auf unserer Homepage.

Schweiß- und Laschenverbindungen, sowie speziell angefertigte Sonderprofile, sind ebenfalls im Detail untersucht worden.

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-Dehnungs-Diagramme 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_{eH} , gefolgt von einer langen elastisch-plastischen Verformung und Anstieg der Festigkeit bis zum Erreichen der Zugfestigkeit R_m . Das Verhältnis R_m/R_{eH} von AMLoCor ist dem einer

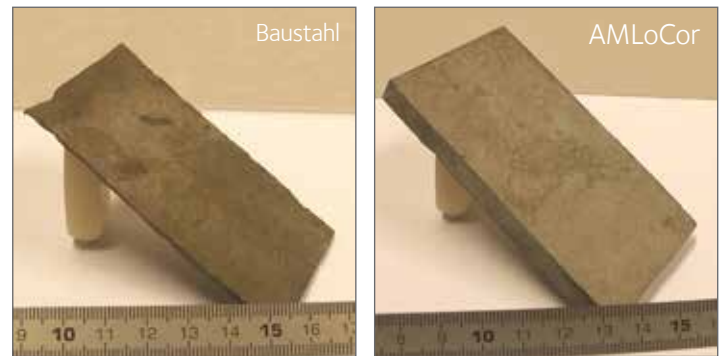


Abb. 3. 15 Jahre in einem großen, nordeuropäischen Hafen ausgelagerte Probekörper.

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 England und 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.

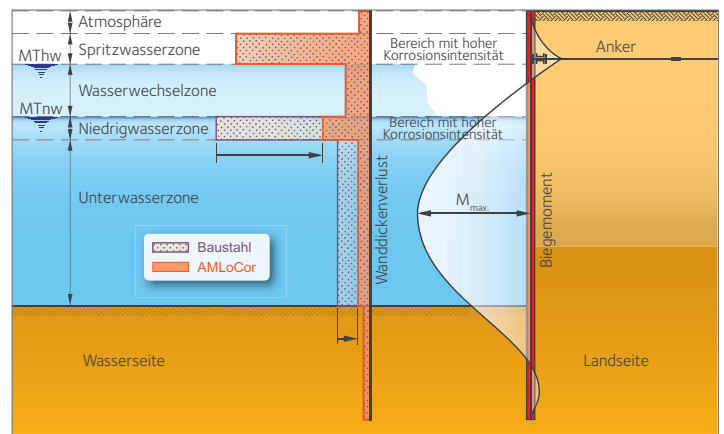


Abb. 4. Typischer Wanddickenverlust im Küstenbereich (MThw: Mittleres Tidehochwasser; MTnw: Mittleres Tideniedrigwasser).

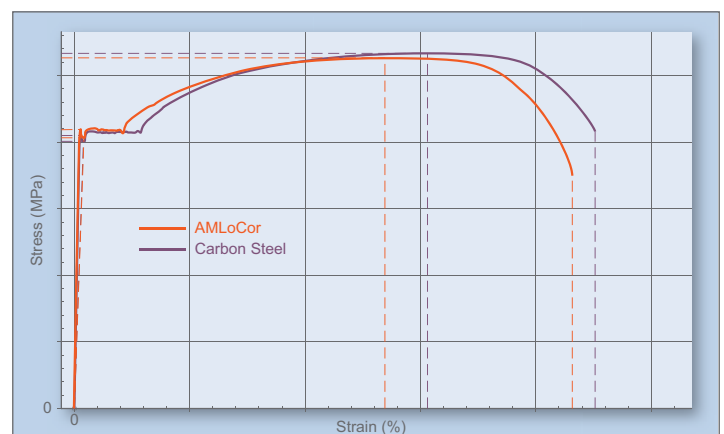


Abb. 5. Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Standardgüte S 355 GP sehr ähnlich. Die Kerbschlagzähigkeit von AMLoCor übertrifft die Anforderung (27J bei 0°C) der künftigen DIN EN 10248.

Stahlsorten AMLoCor Blue für Spundwandprodukte, sowie zugehörige mechanische Eigenschaften, Bemessungsvorgaben und Ausführungsbestimmungen, werden in der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-30.10-55 des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) geregelt.



Abb. 6. Probekörper in einem großen nordeuropäischen Hafen.



Abb. 7. Prototyp eines Ultraschall-Messgeräts.

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 der korrosionsbedingte Wanddickenverlust (LoT), der für AMLoCor gegenüber einem gewöhnlichen Baustahl 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.

$$\text{CIR} = \frac{\text{LoT}_{\text{Stahl}}}{\text{LoT}_{\text{AMLoCor}}} \Rightarrow \text{LoT}_{\text{AMLoCor}} = \frac{\text{LoT}_{\text{Stahl}}}{\text{CIR}}$$

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: $\text{LoT} < \text{Mindestdicke}$.

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, 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 von gängigen Spundwandstahlsorten gelten.

Kostenvergleich

Im Vergleich zur ungeschützten Stahlspundwandlösung aus gewöhnlichem Baustahl 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⁾.

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.

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.

Anarbeitung, Verbindungen und Instandhaltung

Für das Schweißen dieses "besonderen" Stahls 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. Die Ausführungsbestimmungen und Schweißverfahren sind in der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-30.10-55 geregelt.

Das C9 Eckprofil ist in der Stahlsorte AMLoCor lieferbar. Für die Verfügbarkeit weiterer Eckprofile in AMLoCor Blue ist unsere technische Abteilung anzufragen.

Verbindungen müssen sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Um Beschädigung von Verbindungszubehör wie Gurte und Bolzen zu vermeiden, ist sicherzustellen, dass nicht miteinander verträgliche Stahlsorten voneinander 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.

Installation

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 ein Rammversuch in schwer rambbarem 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 zertifiziert hat. 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, wie ein unlegierter Stahl (Baustahl) mit gleicher Streckgrenze, einbringbar ist.

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

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 Bestimmung 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

Bei AMLoCor können alle gängigen Beschichtungssysteme für standard Spundwandstahlsorten eingesetzt 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. Eine Verzinkung in Verbindung mit AMLoCor wird nicht empfohlen, da der Korrosionsschutz bereits durch die Wahl der Stahlsorte sichergestellt wird.

Spundwände aus AMLoCor benötigen keine besondere Instandhaltung. Je nach dem Berechnungsansatz ist eine regelmäßige Überwachung der Beschichtung und der Restwanddicke zu empfehlen.



Abb. 8. AMLoCor Beam Blank zum Walzen von Spundbohlen.

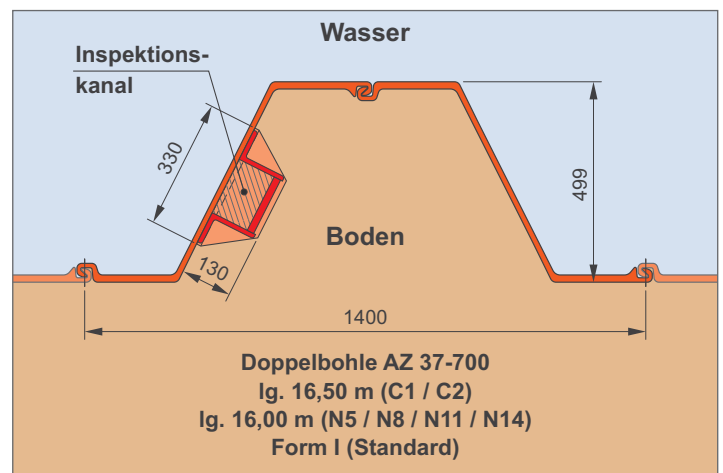


Abb. 9. Detail einer Sonderbohle zur Überwachung der Restwanddicke.

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.



Fallstudie: Hafen von Shoreham, England

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 Hydraulikramme, 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.

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.

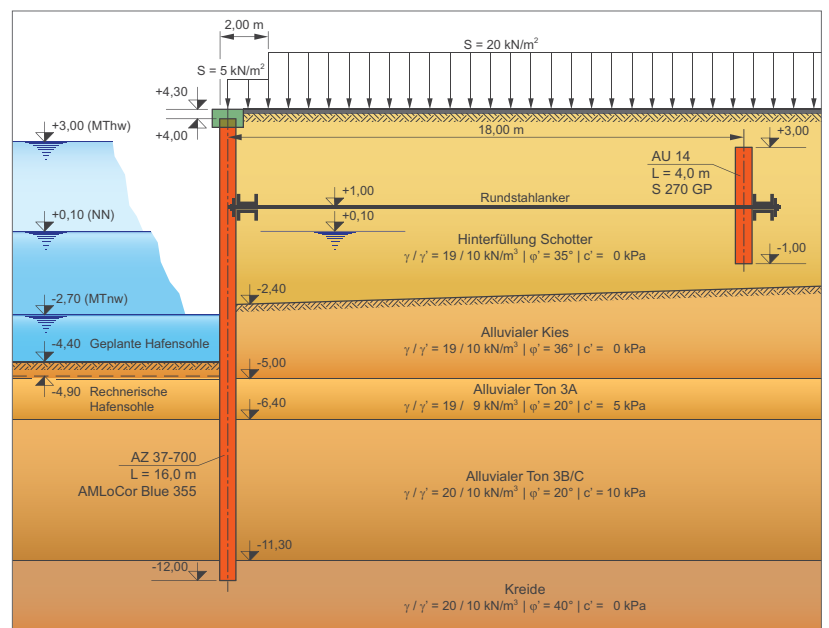


Abb. 10. Hafen von Shoreham, Querschnitt.

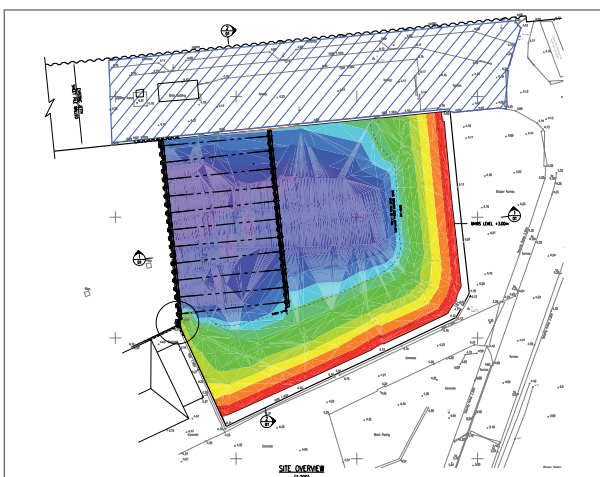


Abb. 11. Hafen Shoreham, Lageplan der Uferwand.



Abb. 12. Hafen von Shoreham, AMLoCor Stahlspundwand.



AMLoCor

Die neue Lösung für
den Stahlwasserbau.

Reduzierung der
Wanddickenverluste
in Seewasser um den
Faktor 3 bis 5.



Referenz

Spundwandprodukte aus AMLoCor Blue. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.10-55. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). Berlin, 01.11.2016.

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, Verdienstausfall, 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 3.2017.

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

E spundwand@arcelormittal.com

spundwand.arcelormittal.com