

Marinehafen Wilhelmshaven – Ersatz der Kajen im Neuen Vorhafen

Ulf Matthiesen, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
 Dirk Eickmeyer, Wasser- und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven

1 Einleitung

1.1 Überblick

Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Wilhelmshaven erfolgt derzeit die Grundinstandsetzung der Ost- und Westkaje im Neuen Vorhafen Wilhelmshaven. Dies erfolgt über eine vorgesetzte Uferwand mit Verfüllung zwischen alter und neuer Wand.

Der Neue Vorhafen bildet die Zufahrt zur Seeschleuse, der sog. 4. Einfahrt in Wilhelmshaven. Er wird als tideabhängiger Marinehafen genutzt und untersteht als Bestandteil des Marinestützpunkts Heppenser Groden dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg). Er hat eine Länge von rd. 1400 m und eine Breite von rd. 600 m und ist somit Deutschlands größter Marinehafen. Die zu sanierenden Kajen haben eine Gesamtlänge von ca. 2,2 km. Nach Fertigstellung der Ost- und Westkaje ist eine Sanierung des an die Ostkaje angrenzenden Einfahrtsbauwerks (Ostmolenkopf) geplant (Bild 1).

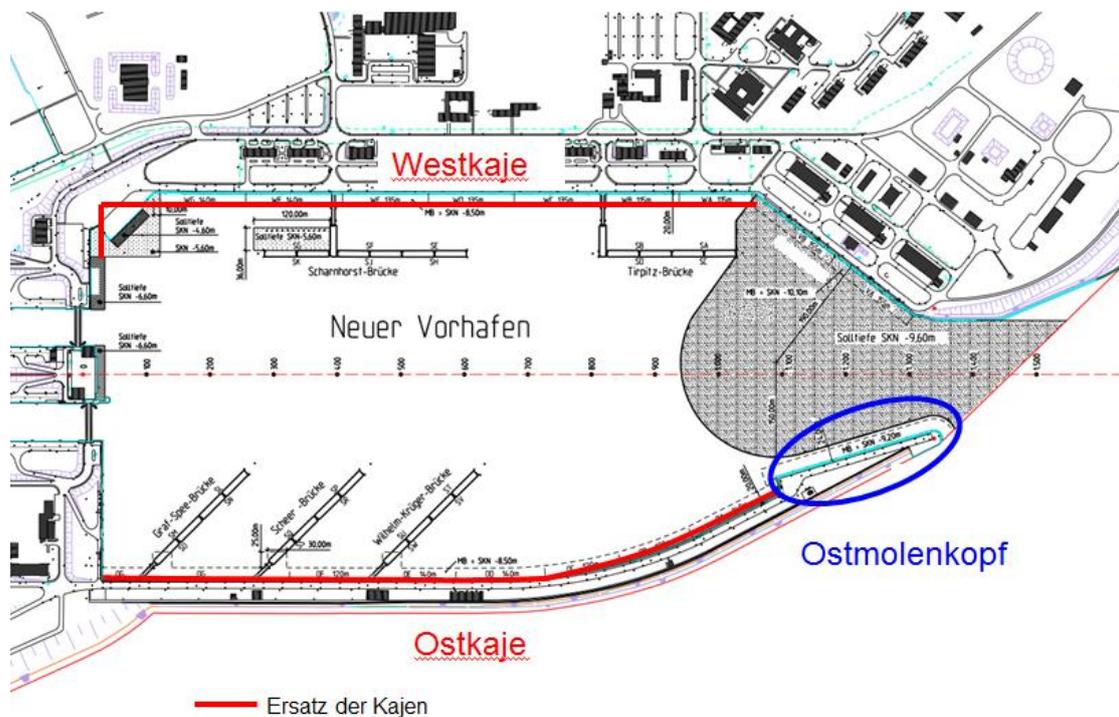


Bild 1: Lageplan Neuer Vorhafen Wilhelmshaven

1.2 Historie

Die Ost- und Westkaje wurden zwischen 1960 bis 1963 neu errichtet und bestehen aus einer kombinierten Spundwand aus Trag- und Füllbohlen. Die Kajen unterscheiden sich nach dem Bau nur in der Verankerungsart und -höhe. Die Spundwände der Ostkaje sind bei NN +0,40 m durch 1:1 geneigte Ankerpfähle, die der Westkaje bei NN –1,00 m durch (schlaffe) Horizontalverankerungen (Rundstahlanker mit Ankerwand) gehalten (Bild 2 und Bild 3).

Beim Bau wurden die Spundwände der Ostkaje gerammt. Hierbei kam es insbesondere in Bereichen der Leiternischen zu Schlosssprüngen. Diese, sowie Risse in den Spundwänden wurden anschließend saniert. Die Spundwände der Westkaje wurden im Rüttel-Spül-Verfahren eingebracht ohne größeren Schaden zu nehmen.

Bereits beim Bau der Kajen traten Sackungen in der Hinterfüllung auf, die sich über die Jahre hinweg fortsetzten. Sie wurden u.a. auf Schlosssprünge und die lockere Lagerung der Hinterfüllung zurückgeführt. Bei Rammsondierungen 1973/1974 wurden - besonders an der Westkaje - ungenügende Festigkeiten bis 8 m unter Spundwandkopf festgestellt. Daraufhin wurden 1973 Rütteldruckverdichtungen an der Westkaje durchgeführt, die neben guten Verdichtungserfolgen zu einer Überlastung der Spundwand führten, was sich an bis zu 5 cm großen Verschiebungen am Spundwandkopf zeigte. An der Ostkaje wiesen besonders die Auffüllungsbereiche hinter den Leiternischen ungenügende Festigkeiten auf. Daraufhin wurde 1974 in die Auffüllung der Ostkaje eine Zement-Bentonit-Suspension bzw. ein Silikatgel verpresst.

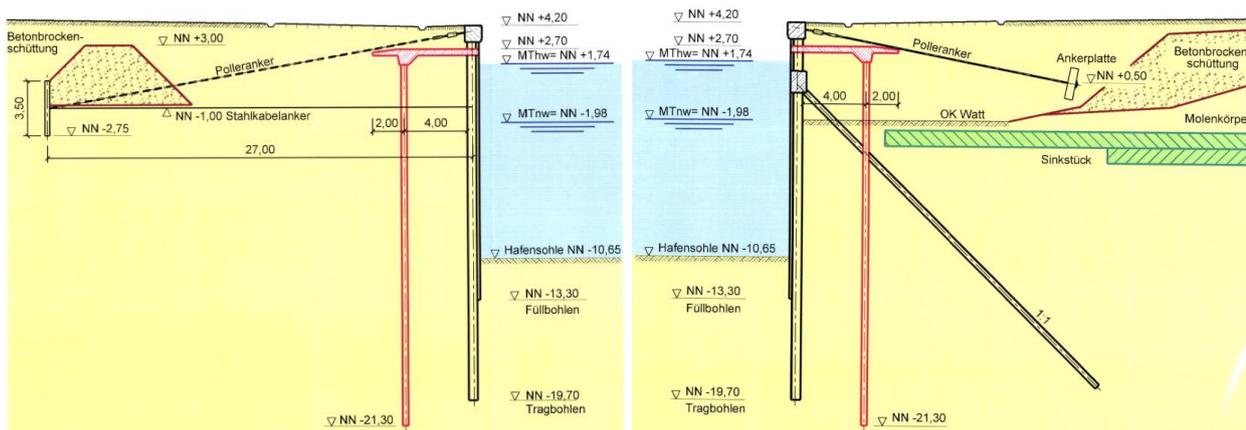


Bild 2: Querschnitt Bestandswand Westkaje

Bild 3: Querschnitt Bestandswand Ostkaje

In der Ursprungsstatik der Kajen wurde eine Wasserüberdruckhöhe von 1,0 m angesetzt. Messungen (1983) im Ostmolenkörper ergaben Differenzen zwischen Grundwasserspiegel und Hafenwasserstand von bis zu 2,0 m. Eine Nachrechnung der Kajen mit realen Druckhöhen ergab, dass die zulässigen Spannungen der Spundwände und die Ankertragfähigkeiten überschritten waren. Daraufhin wurde eine den Erddruck abschirmende Betonplatte (siehe Bild 2 und Bild 3)

hinter den Kajen eingebaut. Die rechnerisch erforderliche Ankerkraft ließ aber weiterhin vermuten, dass die aufnehmbare Ankerkraft zu gering ist. Zur Verringerung der Wasserdruckdifferenz wurde entlang der Westkaje zusätzlich eine Dränage angeordnet.

Ende der 1980er Jahre sind die ersten Durchrostungen der Füllbohlen aufgetreten. Eine 1987 errichtete Kathodenschutzanlage in Kombination mit einem Korrosionsanstrich bis NN $-0,2$ m konnte weitere Durchrostungen nicht verhindern. Ab 2000 wurden die Hinterfüllung und der Boden auf mikrobielle Belastungen untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass im Boden hinter den Spundwänden Sulfat reduzierende und Schwefel oxidierende Bakterien leben, die zu einer landseitigen Korrosion der Spundwandoberflächen mit Lochfraß führen. Aufgrund der Risse und Leckstellen in den Spundwänden haben die Bakterien gute Lebensbedingungen. Durch Korrosionslöcher in den Spundwänden fließt der hinterfüllte Boden aus, was zu Sackungen an der Kajenoberfläche führt. Ein ständiges Hinterfüllen mit neuem Material ist daher erforderlich.

Der rechnerische Nachweis der Standsicherheit ist nach den heutigen Bemessungsansätzen nicht zu erbringen. Die vorgenannten Maßnahmen können die Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit der Kajen nicht dauerhaft gewährleisten so dass ein Ersatz der Spundwände erforderlich ist.

2 Baugrund und Wasserdrücke

2.1 Baugrundaufbau

Im Untersuchungsgebiet wurden bis in eine Tiefe von NN -33 m ausschließlich quartäre Schichten erbohrt. Die ältesten Sedimente stammen aus dem Pleistozän. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Sande großer bis sehr großer Festigkeit. Die holozänen Schichten spiegeln das Zurückweichen und Vordringen der nacheiszeitlichen Nordsee wieder, wobei es zu Rinnenbildungen kam, in denen sich Sande unterschiedlicher Festigkeiten und Nebenanteile abgelagert haben. Der Baugrundaufbau gliedert sich wie folgt:

Landseitig der Kajen (siehe Bild 4):

- Auffüllung aus Sanden und Klei, örtlich ist Bauschutt (Steingröße) eingelagert, stark schwankender Festigkeit
- Klei breiiger bis weicher Konsistenz
- Holozäne Sande geringer bis großer, bereichsweise sehr großer Festigkeit
- Schluffige tonstreifige Sande geringer bis mittlerer Festigkeit als Band in die holozänen Sande eingelagert
- Pleistozäne Sande überwiegend sehr großer Festigkeit

An der Hafensohle wasserseitig der Kajen:

- Schlick flüssiger Konsistenz

In allen Bodenschichten ist gemäß Baugrundgutachten (BAW) mit Hindernissen aus Steinen, Blöcken (z. B. Wasserbausteine, Trümmerreste aus der Sprengung der Seeschleuse und Teilen des Ostmolenkopfes nach dem 2. Weltkrieg, Bauschutt), Injektionsgut, Metallteilen etc. zu rechnen.

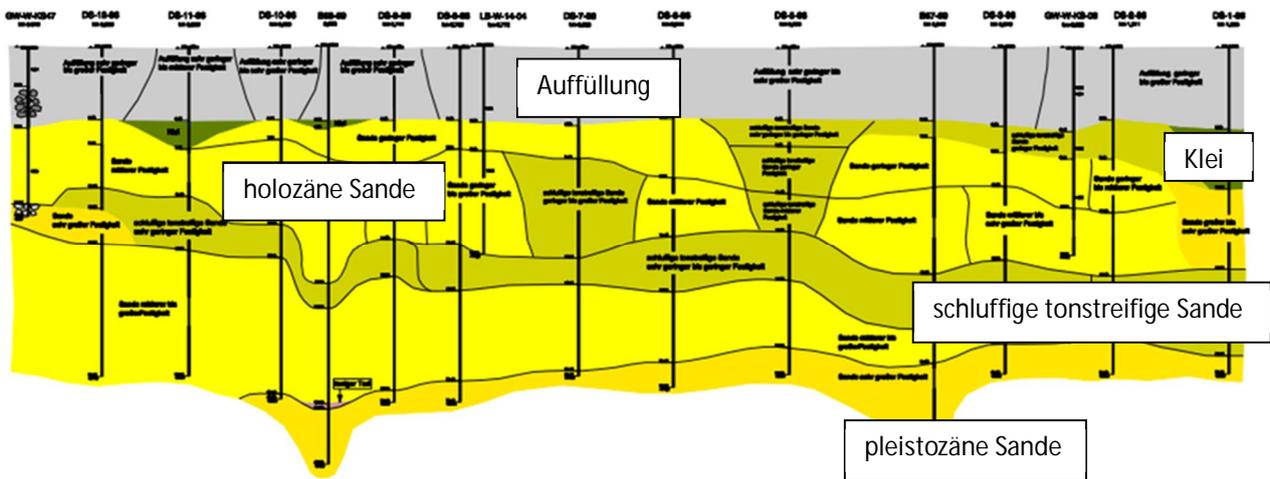


Bild 4: Baugrundaufbau (Beispiel: landseitig Westkaje)

Des Weiteren zeigte die Baugrunderkundung eine unzureichende, teilweise fehlende Einbindung der Füllbohlen in den Sandboden unterhalb des Schlicks, was theoretisch einen landseitigen Bodenaustrag unterhalb der Füllbohlen zur Folge hat.

2.2 Wasserdruckansätze

An der Ost- und Westkaje liegen grundsätzlich unterschiedliche hydraulische Situationen vor. Die Ostkaje ragt in die Jade hinein und das Tidewasser kann beidseitig der Kaje (jade- und hafenseitig) zu- und abfließen. Die Westkajenwände werden vom landseitigen zuströmenden Grundwasser und vom tidebedingten Hafenwasserstand beansprucht.

Für die Herleitung der lastfallabhängigen Wasserdruckansätze als Randbedingung in den erdstatischen Berechnungen wurden Wasserstandsmessungen durchgeführt. Je Kaje wurden an drei längs der Kaje verteilten Stellen die Grundwasserstände sowie an einer Stelle die Hafenwasserstände messtechnisch erfasst (Bild 5). Zusätzlich wurden zur Erfassung des Einflusses von schiffsinduzierten Wasserstandsänderungen auf die erdstatischen Wasserdruckansätze entsprechende Fahrmanöver mit einem Schlepper und zeitgleiche Grundwasserstandsmessungen durchgeführt.

Unter Berücksichtigung der tide- und schiffsinduzierten Grundwasser- und Hafenwasserstandsänderungen wurden die lastfallabhängigen Wasserdruckansätze für die jeweilige Kajenseite ermittelt.

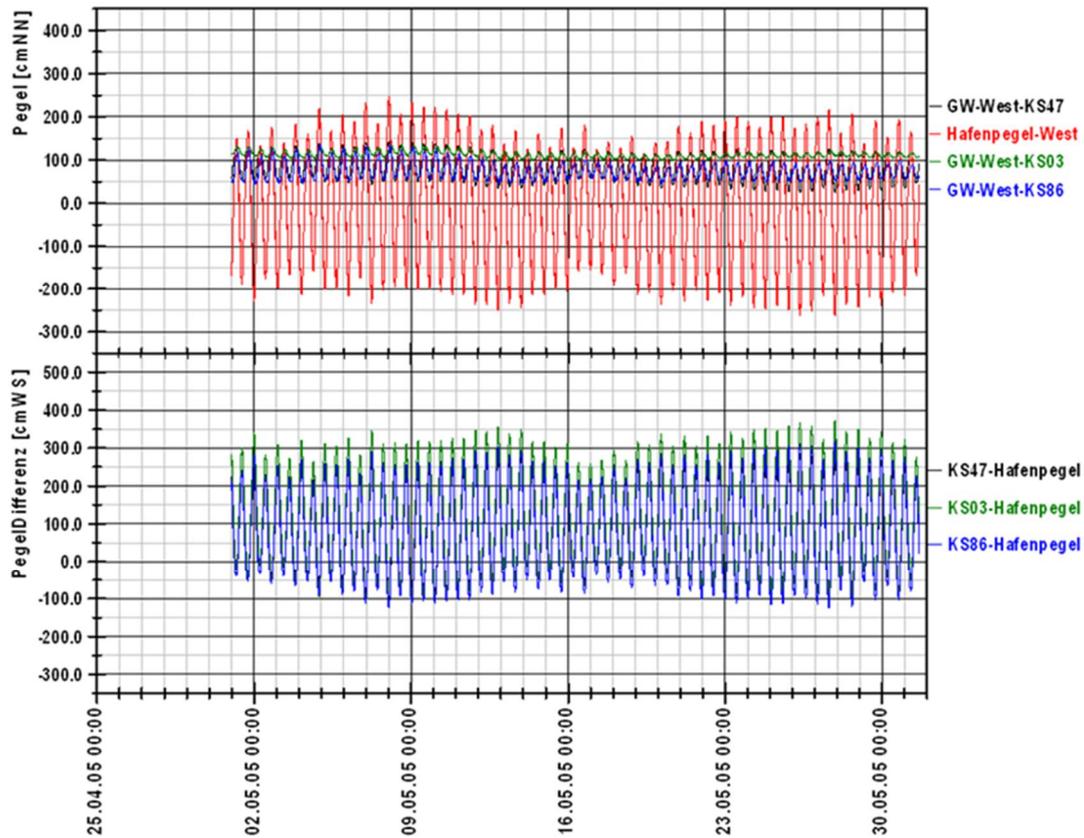


Bild 5: Messdaten Westkaje (Mai 2005)

3 Planung

3.1 Allgemein

Die Grundinstandsetzung der Kaje erfolgt über eine vorgesetzte Uferwand in einem Abstand von 5,00 m zur alten Kaje mit Verfüllung zwischen alter und neuer Wand (Bild 6). Die neuen Kajeiwände bestehen aus einer rückverankerten kombinierten Spundwand mit Stahlbetonüberbau. Der Geländesprung zwischen Hafensohle und Kajeoberkante beträgt ca. 15 m. Der Stahlbeton-Überbau wird in fugenloser Bauweise hergestellt. Die Spundwände werden mit einer Beschichtung und einer kathodischen Korrosionsschutzanlage vor Korrosion geschützt. Zusätzlich wird die Landseite der Spundwände mit Hilfe einer alkalischen Vorsatzschale (Beton-schürze) gegen mikrobielle Korrosion geschützt.

3.2 Kombinierte Spundwand

Die kombinierte Spundwand besteht aus gekoppelten HZ 1080M bzw. HZ 880M Tragbohlen und AZ 26 Füllbohlen. Im Vorwege der Rammung der Spundwand werden aufgrund der erkundeten Hindernisse verrohrte Räumungsbohrungen in der Spundwandtrasse bis in eine Tiefe von 2,5 m oberhalb UK Tragbohle bzw. bis 0,5 m oberhalb UK Füllbohle ausgeführt, um die Spundwandelemente lagegenau einzubringen und um Schlosssprengungen zu vermeiden. Zusätzlich werden mitlaufende Schlossdetektoren an die Tragbohlen angebracht, um eine visuelle Überwachung von möglichen Schlosssprüngen während der Rammung der Füllbohlen sicherzustellen.

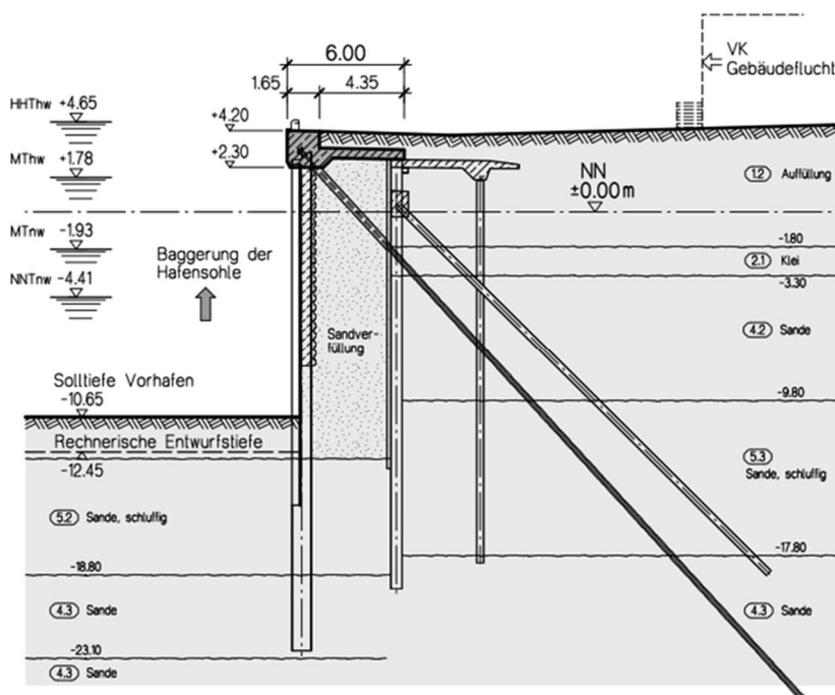


Bild 6: Querschnitt neue und bestehende Kajenwand (Quelle: WTM Engineers)

3.3 Rückverankerung

Die Rückverankerung der Kajenwand erfolgt durch Verpressmantelpfähle (VM-Pfähle). Diese bestehen aus einem Stahlrammpfahl (HP 360x152, S355 J2) mit spezieller Fußausbildung in Form eines aufgeschweißtem keilförmigen Pfahlschuhs (Bild 7). Der Pfahlschuh ist im Vergleich zum Pfahlschaft vergrößert (Querschnitt 46 x 46 cm) und hinterlässt beim Einrammen einen Hohlraum, der rambbegleitend mit Zementmörtel über eine am Pfahlschaft angebrachte Verpressleitung verfüllt wird. Die Umhüllung des Stahlträgers mit Zementsuspension bewirkt neben der Erhöhung der äußeren Tragfähigkeit einen Schutz vor mikrobiell induzierter Korrosion (MIC). Die VM-Pfähle werden so geneigt, dass die vorhandene Verankerung unterfahren wird und eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen wird (i.d.R. 1,1:1).



Bild 7: VM-Pfahl, Pfahlschuh (Drauf- und Seitenansicht)

Das Einbringen der Tragbohlen als auch der Rückverankerung hat durch Rammung zu erfolgen, da beim Rütteln und Vibrieren nachteilige Auswirkungen infolge Bodenverflüssigung auf die vorhandene Wand- und Pfahlkonstruktion zu erwarten sind.

4 Bauausführung

4.1 Allgemein

Die Bauausführung erfolgt durch die Arge Marinehafen Wilhelmshaven bestehend aus den Firmen Josef Möbius Bau GmbH (heutige Strabag Wasserbau GmbH), Ludwig Voss GmbH und die Ed. Züblin AG (alle Unternehmensverbund Strabag SE). Im Oktober 2012 hat die Bauausführung mit einer geplanten Bauzeit von 4 Jahren begonnen.

4.2 Schlickaustausch

In einem ersten Arbeitsschritt war der Schlick zwischen der bestehenden Kajenwand und der neu zu errichtenden Kajenwand auszuräumen, um Setzungen der Auffüllung hinter der neuen Wand zu vermeiden und um Zusatzlasten auf die Konstruktion durch eingelagerte Weichschichten, negative Mantelreibung und Porenwasserüberdrücke aus unkonsolidierten Zuständen auszuschließen. Zudem befinden sich im Schlick organische Stoffe, die als Nährstoffe für sulfatreduzierende Bakterien (SRB) in Frage kommen. Die Füllbohlen der alten Kaje binden nur unzureichend - örtlich gar nicht - in den Sandboden unterhalb der Schlickschicht ein. Bevor die Rammarbeiten beginnen konnten, war das Fußauflager der alten Wand durch Austausch des Schlickes und die Vorschüttung einer Sandberme zu sichern (Bild 8). Dies erfolgte in 2 Arbeitsschritten. In einem 1. Arbeitsschritt wurde der Schlick bis auf eine Tiefe von ca. NN -11,50 m abgebaggert. Im 2. Arbeitsschritt erfolgte die Schlickentfernung des verbliebenen Schlicks mittels Wasserinjektions(WI)-Gerät (Bild 9). Hierbei wird von einem Schiff über einen mit Düsen

versehenen Balken Wasser in die Schlickschicht injiziert und diese somit in Suspension gebracht. Der aufgewirbelte Schlick wird nachfolgend im Verdrängungsverfahren durch eingebrachten Sand ersetzt. Der Schlickaustausch und der Einbau der Sand-Vorschüttung erfolgten abschnittsweise, um eine maßgebliche Schwächung des Fußauflagers der alten Kajenwand zu vermeiden. Die Verformungen der bestehenden Kajenwand blieben hierbei innerhalb des definierten Toleranzbereichs, der mittels numerischer Simulationen von WTM Engineers ermittelt wurde.

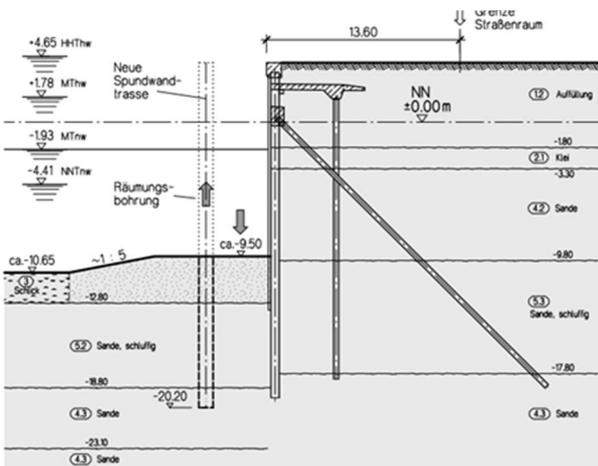


Bild 8: Bauphase Einbau Sandberme, Räumungsbohrung Kajen-trasse
 (Quelle: WTM Engineers)

Bild 9: Einsatz WI-Gerät

4.2 Räumungsbohrungen und Spundwandrammung

Im Vorwege der Rammung der Spundwand wurden aufgrund der erkundeten und zu erwartenden Hindernisse verrohrte Räumungsbohrungen in der Spundwandtrasse ausgeführt. Das gefördert Bohrgut sollte hierbei nach Heraushebung der Hindernisse, soweit geeignet, als Verfüllmaterial wieder eingebaut werden. Bei der Ausführung der Räumungsbohrungen sowie dem anschließenden Rammen der Tragbohlen wurde folgender Sachverhalt festgestellt:

- Im Zuge der Wiederverfüllung der Räumungsbohrungen kam es bei einer Vielzahl der Bohrungen zu einem erheblichen Mehrverbrauch an Füllmaterial.
- Beim Einbringen der Tragbohlen drangen mehrere Tragbohlen bei Aufbringung sehr geringer Rammenergie mehrere Meter in den Baugrund ein.

Um die Ursachen des sog. Durchrutschens der Tragbohlen sowie des Mehrverbrauchs an Füllmaterial zu ermitteln, wurden Untersuchungen mittels Drucksondierungen (CPT) im Bereich der Rammtrasse und der bereits eingebauten Tragbohlen durchgeführt (Bild 10). Des Weiteren wurden unterschiedliche Füllmaterialien für die Wiederverfüllung der Räumungsbohrungen auf Ihre Eignung untersucht.

Ursache des Durchrutschens der Tragbohlen waren die geringen Festigkeiten in den oberen Bereichen der wiederverfüllten Räumungsbohrung. Die Untersuchungen ergaben, dass die Kornverteilung des Verfüllmaterials (Sand-Kies-Gemisch, KG 0/8 bzw. Feinsand) – im gegebenen Rahmen - wenig Einfluss auf dessen Lagerungsdichte nach dem Verfüllen hat. Entscheidend für das Erreichen einer ausreichenden Lagerungsdichte war, das Verfahren der Verfüllung der Räumungsbohrungen der Sinkgeschwindigkeit des einzubauenden Materials entsprechend anzupassen. Eine zu schnelle Verfüllung der Bohrung hat vermutlich aufgrund der erzeugten aufwärts gerichteten Strömung innerhalb der Verrohrung zu einer starken Entmischung und einer Schichtung des eingefüllten Materials geführt. Gleichzeitig kam es zu einem Austrag des Feinmaterials durch ein Auslaufen über die Oberkante der Verrohrung.



Bild 10: Durchführung CPT im Bereich der Tragbohlen

Durch einen entsprechend definierten Verfüllvorgang mit einer projektspezifischen vorgegebenen Verfülldauer je Bohrung und einer Vorgabe zum Ziehen der Verrohrung konnte eine ausreichend hohe Festigkeit des Verfüllguts innerhalb der Räumungsbohrung und somit eine entsprechend gute Rammung der Tragbohlen erzielt werden. Des Weiteren ließen sich somit die Mehrverbräuche eingrenzen.

Die Rammung der Tragbohlen erfolgte mit einem IHC S 90 Hydraulikhammer, gemäß ZTV-W LB 214 in 2 horizontalen Ebenen geführt, mäklergeführt am Kopf und in Höhe der Wasserlinie durch eine Rammführung (Bild 11). Zusätzlich wurden die Tragbohlen unter Wasser mit Hilfe eines mitlaufenden Führungsschlittens beim Stellen parallel geführt.

Die Tragbohlen an der Westkaje haben eine Länge von ca. 30 m. Die Rammung erfolgte im großen Pilgerschritt. Als Trägergerät für die wasserseitigen Arbeiten diente die Hubinsel MP45, um die Standsicherheit im tidebeeinflussten Vorhafen zu gewährleisten. Der anschließende Einbau der Füllbohlen erfolgte mittels eines Hochfrequenzrüttlers. Aufgrund von Schäden an den Schlossverbindungen sowie der Korrosionsbeschichtung musste ein Teil der Trag- und Füllbohlen bereits während der Ausführung gezogen und nach anschließender Sanierung wieder eingebaut werden.



Bild 11: Rammung der Tragbohlen

4.3 Probelastungen

4.3.1 Statische Probelastungen Schrägpfähle

Zur Überprüfung der Bemessungsgrundlagen der VM-Pfähle wurden vorgezogene Pfahlprobelastungen an 3 Standorten (A, B und C) entlang der Westkaje an lotrechten Pfählen durchgeführt (Bild 12). Alle Pfähle gründeten im Sandhorizont, welcher lokal unterschiedliche Festigkeiten aufweist. Überlagert wird die Sandschicht von einer weichen Kleischicht und einer Auffüllungsschicht, die Mantelreibung in diesen Schichten wurde versuchstechnisch ausgeschaltet. Die Pfähle hatten entsprechend den Baugrundverhältnissen unterschiedliche Pfahllängen. Die Verpresslängen in den Sanden betragen 9,75 m (Probepfahl A), 10,75 m (Probepfahl B) und 14,40 m (Probepfahl C).

Pfahl A und Pfahl B versagten bei der max. Prüflast $P_p = 3500$ kN, beim Probepfahl C wurde die maximale Prüflaststufe von 3500 kN ohne Eintreten eines Pfahlversagens erreicht (Bild 13). Die von der BAW vorgegebenen charakteristischen Bruchwerte für Mantelreibung für die unterschiedlichen Festigkeitsbereiche der Sande konnten durch die vorgezogenen Probelastungen bestätigt werden.

An den späteren Bauwerkspfählen werden zusätzlich an 3 Standorten jeweils 2 Bauwerkspfähle statisch beprobt. Die Rammung der VM-Schrägpfähle hat im Dezember 2014 begonnen.



Bild 12: Probelastungsaufbau, Probefeld C

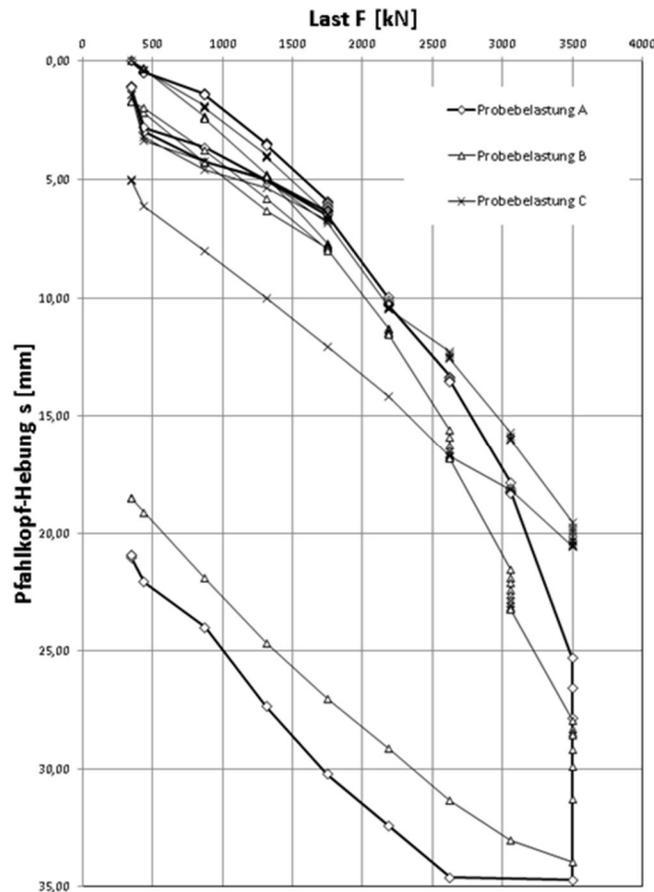


Bild 13: Widerstands-Hebungs-Linien Pfahlprobelastungen VM-Pfähle

4.3.2 Dynamische Probelastungen Tragbohlen

Zum Nachweis der Tragfähigkeit der Tragbohlen der kombinierten Spundwand wurden dynamische Probelastungen an 4 Standorten durchgeführt. Hierbei wurden an jeder zu prüfenden Tragbohle 3 dynamische Probelastungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt:

- rambbegleitende Messung und Messung des letzten Rammschlags (end-of-driving)
- dynamische Probelastung nach einer Standzeit der Tragbohle von einem Tag (Restrike 1)
- dynamische Probelastung nach einer Standzeit der Tragbohle von 2-3 Wochen (Restrike 2)

Der Prüfablauf wurde so gewählt, um den sog. Anwachseffekt zu erfassen und um genauere Aussagen zur Tragfähigkeit treffen zu können. Die Auswertung der Probelastungen erfolgte nach dem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung (CAPWAP). Alle 4 beprobten Standorte wiesen bereits mit dem Restrike 1 mit gemessenen Tragfähigkeiten von 8165 kN bis 10127 kN eine ausreichende Tragfähigkeit gegenüber der Ausführungsstatik auf. Zwischen dem

1. und dem 2. Restrike wurden Anwachseffekte von max. 15,5 % ermittelt (siehe Beitrag Kidane – Errichtung von Offshore Windparks).

5 Ausblick

Im Anschluss an die Grundinstandsetzung der Ost- und Westkajen ist eine Sanierung des an die Ostkaje angrenzenden Einfahrtsbauwerks, d.h. der Fangedamm und der Ostmolenkopf geplant. Das Einfahrtsbauwerk wurde zwischen 1938 und 1940 erbaut. Nach dem 2. Weltkrieg wurden Teile der Konstruktion gesprengt. Beim Wiederaufbau (1959-1962) wurden Bereiche wegen der starken Beschädigung abgebrochen bzw. Spundbohlen abgebrannt und anschließend eine kombinierte Spundwand in einem Abstand von 1,5 m zur verbliebenen Konstruktion vorgebaut (Bild 14).

Am Einfahrtsbauwerk zeigen sich, wie bereits bei der Ost- und Westkaje, Verschiebungen der Konstruktion und Versackungen der Hinterfüllung. Beim Molenkopf sind zusätzlich Verschiebungen gegenüber dem angrenzenden Fangedammblock eingetreten. Die Verschiebungen werden u.a. durch größere Baggertiefen der Hafensohle als in der Planung angesetzt hervorgerufen. Des Weiteren haben Schädigungen des Fangedamms durch die Sprengung einen Einfluss. Die Versackungen werden u.a. auf (festgestellte) Löcher in den Spundwänden zurückgeführt, aus denen die hinterfüllten Sande austreten.

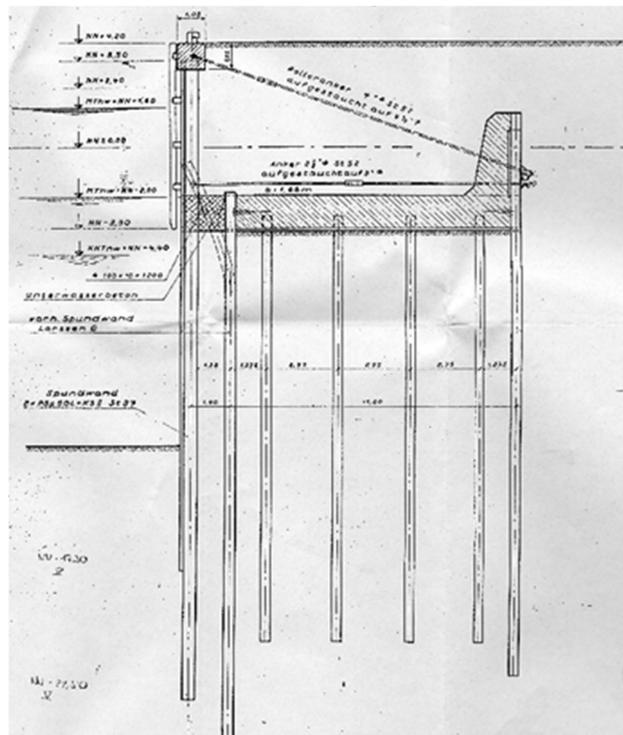


Bild 14: Fangedammkonstruktion Einfahrtsbauwerk nach dem Wiederaufbau

Um die Standsicherheit und die Nutzungsmöglichkeiten der Ostmole bewerten zu können, wurden bereits erste numerische Berechnungen (2-D) durchgeführt (Bild 15). Aufgrund der komplexen Randbedingungen hinsichtlich Bauzustand, Strömungsbedingungen und Baugrundaufbau (Trümmerreste) ist geplant diese Berechnungen durch eine 3-D Modellierung zu ergänzen, um Versagensmechanismen zutreffender erfassen und entsprechende Sanierungsmaßnahmen planen zu können.

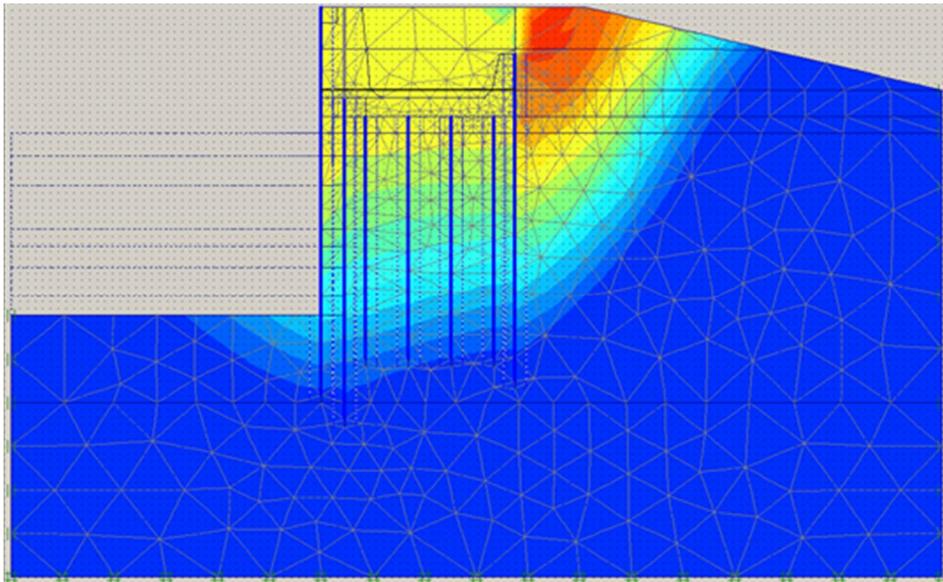


Bild 15: Verformung der Fangedammkonstruktion (2-D FEM Berechnungen)

Literatur

- Binder, G. 2003: Mikrobiell Induzierte Korrosion an Spundwänden aus Stahl – Strategien zur Vermeidung, BAW-Brief 1/2003, S. 5 – 10
- EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen, 10. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- ZTV-W LB 214 (2008): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Spundwände, Pfähle, Verankerungen (Leistungsbereich 214)