

Sellhorn INGENIEURGESELLSCHAFT MBH

- Hafenanbau
- Wasserbau
- Brücken, Tunnel
- Offshore-Anlagen
- Hochbau



Teilfeld 5
D-20459 Hamburg
Tel.: +49 40-361201-0
Fax: +49 40-361201-28
info@sellhorn-hamburg.de
www.sellhorn-hamburg.de

Sperrwerk Billwerder Bucht



Entwurf
Bauüberwachung

Airbus Erweiterungsfläche



Planung
Infrastruktur

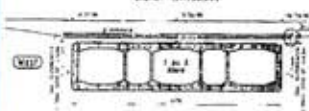
Unterführung Waltershof



Projektsteuerung
Entwurf

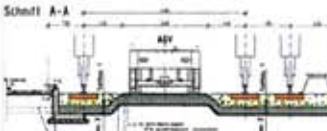
Schutzbauwerk Elbtunnel

Stufen 107.958.000



Entwurf
Bauüberwachung

Containerterminal Altenwerder



Planung
Infrastruktur

Hafenerweiterung Colombo



Machbarkeitsuntersuchung

Schutzbauwerk für den Elbtunnel in Hamburg – Entwurfskriterien

Andreas Knoll, Manfred Voß

1 Bestimmung der Gefährdungssituation des Tunnels

Der Sicherheitsstandard des vorhandenen Neuen Elbtunnels wurde für die Situation nach der Anpassung der Fahrinne und für den zugehörigen Schiffsverkehr untersucht. Es wurden im Hinblick auf die künftig insgesamt geringere Überdeckung des Tunnels mögliche kritische Situationen infolge des Schiffsverkehrs erkannt:

- Schiffsstrandungen auf den aufsteigenden Streckenabschnitten des Neuen Elbtunnels
- Kollisionen von Schiffen und Containern mit dem Lüfterbauwerk Mitte
- Schiffssunk (Wracklast) auf dem Neuen Elbtunnel
- Notankerwurf – der Anker fällt auf den Neuen Elbtunnel
- Notankerwurf – der Anker fällt auf die Elbsohle und wird über den Tunnel geschleppt

Anhand von Tragwerksanalysen [1] konnten die Auswirkungen dieser nach der

Fahrinnenanpassung in Katastrophensituationen gegebenen Szenarien auf das bestehende Tunneltragwerk überprüft werden. In anschließenden Zuverlässigkeitsanalysen wurden die Szenarien zudem anhand semiprobabilistischer Daten z.B. über

- den vorhandenen Schiffsverkehr
- den prognostizierten Schiffsverkehr nach Inbetriebnahme des Container-Terminals in Altenwerder
- bisherige Notsituationen unter Berücksichtigung der im Vorfeld ermittelten Tragreserven des Bauwerks gutachtlich geprüft [2] und Einzel- sowie Gefährdungspotentiale quantifiziert.

Die Szenarien wurden letztlich anhand der Wiederholraten eines theoretischen Tragwerksversagens im Vergleich mit anderen Ingenieurbauwerken bewertet sowie abschließend mit anderen Verkehrssystemen verglichen.

Als unzulässiges Hauptgefährdungspotential wurde die Beschädigung der Tun-

Zusammenfassung

Der Neue Elbtunnel 1.–3. Röhre kreuzt als Senkkastenkonstruktion im Bereich zwischen Hamburg-Waltershof und Hamburg-Othmarschen die Fahrinne der Elbe (s. Abb. 1). Aufgrund der mit der Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt (Vertiefung auf NN –16,70 m) verbundenen Verringerung der Tunnelüberdeckung gegenüber dem vorhergehenden Zustand (Tiefe NN –14,90 m), dem künftig sich ändernden Schiffsverkehr und der Sorge, dass sich hierdurch eine Verschlechterung für den Sicherheitsstandard des seit 1968 errichteten sechsspürigen Bundesautobahn-Tunnels ergeben könnte, wurde die neue Situation unter dem Aspekt heutiger Sicherheitskriterien untersucht.

Es zeigte sich, dass Schutzmaßnahmen für den Elbtunnel anzuordnen sind, um auch nach der Fahrinnenanpassung in Katastrophensituationen (z.B. Notankerwürfe) den notwendigen Sicherheitsstandard künftig zu gewährleisten.

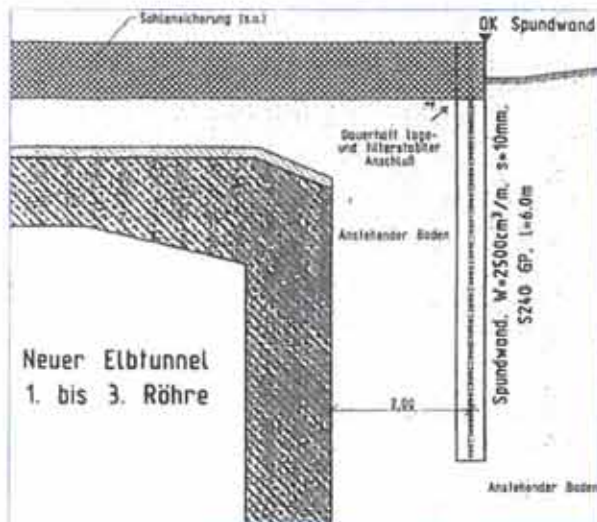


Abb. 3: Spundwände

ermöglichen, ergänzen das Schutzkonzept.

4 Entwurfskriterien

4.1 Ankerabweiskonstruktion

Auf Grundlage der aus dem Bau des Neuen Elbtunnels (1.-3. Röhre) und der 4. Röhre Elbtunnel bekannten Bau- und Grundverhältnisse sowie zusätzlich 1999 durchgeführter Drucksondierungen in der Elbe wurden bodenmechanische Parameter für die zu erwartende Eindringtiefe der ggf. in Notsituationen eingesetzten 20-t-Bemessungsanker festgelegt. Für die neuen Bemessungszustände nach der Anpassung der Fahrrinne wurde unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und mit den Erfahrungen von Ankerherstellern eine dauerhafte Tunnelüberdeckung von 4,0 m gefordert. Bereiche, in denen dieses Überdeckungsmaß unterschritten wird, müssen durch Abweiskonstruktionen gesichert

nach der Fahrrinnenanpassung und der Höhenlage des Tunnels auf einer Länge von 1.320 m im Bereich der Tunnelelemente II bis VII (s. Abb. 1) zu sichern.

Bei der Abweiskonstruktion handelt es sich um eine »im Schloss gerammte«, senkrechte Spundwand für beide Seiten der Tunnelkonstruktion. Der planmäßige Abstand zwischen der Tunnelaußenkante und der Spundwand beträgt 2,00 m. Die Oberkante der Spundwände folgt im wesentlichen dem Verlauf der Tunnel-OK und liegt damit etwa zwischen NN -19,00 m ungefähr in Strommitte und NN -11,40 m im Uferbereich. Der Überstand oberhalb der Tunneloberkante beträgt 1,50 m, wo es geometrisch möglich ist. Die Rammitoleranzen für die 6,0 m langen Bohlen wurden wie folgt festgelegt

- OK Spundwand: ± 15 cm
- Horizontale Positionierung: ± 15 cm Abweichung am Kopf
- Vertikalität: max. 2 % Abweichung von

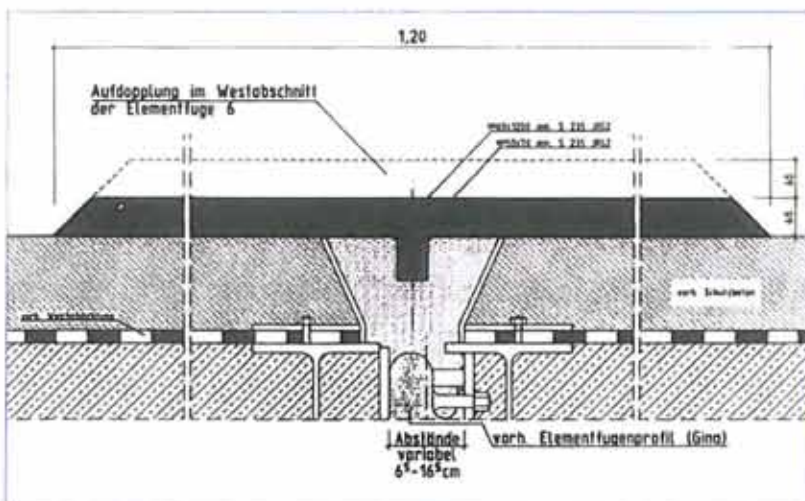


Abb. 4: Fugenabdeckung



Abb. 5: Sohlsicherung

werden. Der Tunnel ist damit aufgrund der Profilierung der Elbsohle

der Lotrechten (gemessen am oberen Meter).

Die statischen Berechnungen erfolgten für die Spundwände als Abweiskonstruktion und als Erosionsschutz.

Neben den Nachweisen der Verformungen mit unterschiedlichen Ankergriffpunkten unter Berücksichtigung der verklammerten Steinschüttung als elastische Feder wurde auch der Durchstanznachweis für die Bemessungsankerspitze dem Entwurf zugrundegelegt.

Für die Bemessung der Spundwand als Erosionsschutz der Sohlsicherung wurde von einer 2 m tiefen Kolkbildung und einer zusätzlich horizontal wirkenden Ersatzflächenlast ausgegangen.

4.2 Fugenabdeckung (Abb. 4)

Die einzelnen Tunnelelemente sind durch aufwändige Fugenkonstruktionen voneinander getrennt. Zum Schutz der in den Tunnelelementfugen liegenden Gina-Abdichtungsprofile gegen geschleppte Anker oder sich in den Elbsand eingrabende Teile mit hohem spezifischen Gewicht (z.B. Metallhüttenschlacken der Sohlsicherung) sind Abdeckbleche aus Breitflachstahl der Güte S 235 JRG2 mit einer Dicke von 60 mm vorgesehen. Diese werden in den fünf Elementfugen zwischen den Elementen II bis VII angeordnet und sind mit Knaggen lagestabilisiert. Bedingt durch die geringe Überdeckung der Elementfuge zwischen den Tunnelelementen VI und VII wird dort eine Aufdopplung der o. g. Bleche vorgenommen, um die Auftriebssicherheit für den Lastfall »Schiffssog« zu gewährleisten.

4.3 Sohlsicherung

Eine dauerhafte Sohlsicherung muss sowohl der natürlichen Tideströmung als auch den schiffsbedingten Belastungen wie z.B. Sohldruckänderungen, Rück- und Nachlaufströmungen und insbesondere dem Heckschraubenstrahl des Bemessungsschiffs standhalten. Die Sohlsicherung zwischen den Ankerabweis-

wänden war daher auf einer Länge von 590 m in dem Bereich der gesamten Fahrrinne sowie bis zu 30 m über die eigentlichen Fahrinnengrenzen hinaus unter Einschluss der Elementfugen (zwischen den Tunnelementen II und III am Südufer sowie zwischen den Elementen VI und VII am Nordufer) für die Belastung durch große Containerschiffe und Massengutfrachter auszulegen.

Als möglicher Ansatz für die Bemessung und Konstruktion der Sohlsicherung wurde der hinter dem Bemessungsschiff auf die Elbsohle einwirkende Heckschraubenstrahl bei 100 % P (Maschinenleistung) bzw. 100 % n_0 (Nennzahl der Schraube) in Betracht gezogen. Die volle Maschinenleistung wird jedoch im Allgemeinen nur auf offener See gefahren, da die Maschinen zum Schutz der Antriebsanlagen nur langsam auf die voll zur Verfügung stehende Leistung hochgefahren werden. Die maximale Schraubendrehzahl im Manövrierbetrieb entspricht je nach Schiff etwa 65–70 % n_0 (entspricht ca. 30–35 % P). Das kurzfristige Hochfahren der Maschinenanlage auf die maximal zur Verfügung stehende Leistung beinhaltet die Gefahr thermischer Überlastung wichtiger Maschinenteile und wird für den normalen Manövrierbetrieb vermieden. Nach Konsultation des Oberhafenamtes konnte verifiziert werden, dass hohe Maschinenleistungen im Hamburger Hafen auf Notmanöver beschränkt sind.

Neben dem Verwaltungsentwurf für die Sohlsicherung (verklammerte Stein-

schüttung) waren in der Ausschreibung Sondervorschläge (z.B. lose Steinschüttung, Sandcontainer und Sandsäcke) ausdrück-

lich erwünscht. Hierfür wurden detaillierte Entwurfs- und Bemessungsgrundlagen [5] entwickelt und mit Fachämtern abge-

Beschreibung	Entwurfsparameter	Quelle
Bemessungsschiff »Sovereign Maersk« (Post-Panmax Containerschiff)		FHH – WiB / Oberhafenam Daten zum Bemessungsschiff: Reederei Maersk
Schiffslänge Schiffsbreite max. Tiefgang	$l_s = 347,0$ m $b_s = 42,80$ m $t_s = 13,80$ m (entspricht dem max. zulässigen Tiefgang)	
Tragfähigkeit Maschinenleistung Schraubendurchmesser Nennzahl Heckschraube	92.600 dwt $P = 52.200$ kW $D = 8,50$ m $n_0 = 1,57$ 1/s bei 100 % Maschinenleistung	
Passiergeschwindigkeit großer Schiffe im Bereich des Neuen Elbtunnels	$V_s \leq 8,0$ kn = 4,1 m/s	FHH – WiB / Oberhafenam
Kielfreiheit (keel-clearance) Squat	$KC_{brutto} = 1,50$ m $sq = f(V_s)$ für $V_s = 8,0$ m/s $sq = 0,2$ m $KC_{netto} = KC_{brutto} - sq$ $KC_{netto} = 1,30$ m	FHH – WiB / Oberhafenam Diagramm nach Römisch
Rück- und Nachlaufströmung	$V_{rm} = \frac{b_s \cdot t_s \cdot P_s}{A_s - A} \text{ [m/s]}$	Felkel /Steinweller (BAW) [7]
Kanalquerschnitt bei MTrw Hauptspantquerschnitt Rückströmung Nachlaufströmung	$A_k = 5.400$ m ² $A_s = 560$ m ² $V_{rm} = 0,5$ m/s $V_{nl} = V_{rm} = 0,5$ m/s	
Schiffssog	$Z_s = 7,5$ kN/m ²	Planung 4, Röhre Neuer Elbtunnel
Heckschraubenstrahl Strahlgeschwindigkeit Notfall: 100 % n_0 Bemessungslastfall ¹⁾ :70 % n_0 Geschwindigkeit über der Sohle [m/s]	$V_s = 0,95 \cdot n_0 \cdot D \text{ [m/s]}$ $V_0 = 12,7$ m/s $V_0 = 8,9$ m/s $V_{s,sohle} = 0,95 \cdot n_0 \cdot D \cdot 0,71 \left(\frac{A_s}{D}\right) \text{ [m]}$	EAU 76.2 (E 83) EAU 76.2 (E 83)
Soll-Tiefe der Fahrinnensohle Abst. Schraubennachse/ OK Sohlsicherung	NN –16,70 m $h_p = \frac{1}{2} D + KC_{netto} + \Delta H \text{ [m]}$	Planfeststellung 1999
Abstand ΔH Soll-Tiefe Fahrinnensohle – OK Sohlsicherung Fahrinnenmitte:	OK Sohlsicherung \geq OK Tunnel + 1,5 m (wo geometrisch möglich) max $\Delta H = 18,90 - 16,70$ m = 2,20 m max $h_p = 7,75$ m min $V_{sohle} = 6,9$ m/s	Sellhorn Ingenieurgesellschaft [8]
Abstand Schraube–Sohlsicherung Strömungsgeschwindigkeit bei 70% n_0 Fahrinnengrenzen: Abstand Schraube–Sohlsicherung Strömungsgeschwindigkeit bei 70% n_0	min $\Delta H = 16,85 - 16,70$ m = 0,15 m min $h_p = 5,7$ m max $V_{sohle} = 9,4$ m/s + 1,16 m/s = 10,6 m/s	
1) Maschinenstufe »voll voraus unter Manöverbedingungen« (z.B. in Häfen)		

Tabelle 1: Schiffsinduzierte Belastungen der Elbsohle in der Fahrinne über dem Elbtunnel

Beschreibung	Entwurfsparameter	Quelle
Verklammerte Steinschüttung (in der Fahrrinne) Schüttsteinklasse II MH-Steine Zementmörtelverguss Verklammerungsspannung zulässige Strömungsgeschwindigkeit	$100 - 300 \text{ mm} \rightarrow d_{10} = 0,20 \text{ m}, d_{95} = 0,30 \text{ m}$ $\rho_s = 3,7 \text{ t/m}^3 \rightarrow \Delta' = 2,7$ Resthohlraumgehalt > 25 % $r_s = 100 \text{ kN/m}^2$ $\text{zul } V_{\text{Sohle}} = B \cdot \sqrt{d_{10} \cdot g \cdot \Delta' \left[1 + 6 \cdot 0,2 \cdot \frac{r_s}{g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_{10}} \right]}$	nach Römisch [9]
Schichtdicke	$\text{zul. } V_{\text{Sohle}} = 14,0 \text{ m/s} > \max V_{\text{Sohle}} = 10,6 \text{ m/s}$ $d \geq 1,5 \cdot d_{100} = 1,5 \cdot 0,33 = 0,50 \text{ m}$	
Lose Steinschüttung (außerhalb der Fahrrinne) erforderlicher Durchmesser der Steine Schüttsteinklasse III MH-Steine	$d_{10} \geq \frac{V^2 \cdot \text{Sohle}}{B^2 \cdot g \cdot \Delta'} [m]$ $150 - 450 \text{ mm}$ $d_{10} = 0,30 \text{ m}$ $d_{95} = 0,45 \text{ m}$ $d_{100} = 0,50 \text{ m}$ $\rho_s = 3,7 \text{ t/m}^3$ $\Delta' = 2,7$	EAU 7.6.3 (E 83)
Stabilitätsbeiwert zul. Strömungsgeschwindigkeit	$B = 1,25$ (Zentralruder) zul. $V_{\text{Sohle}} = 4,3 \text{ m/s}$ (max $V_{\text{Sohle}} = 4,4 \text{ m/s}$) $d \geq 1,5 \cdot d_{100} = 0,75 \text{ m}$	
Schichtdicke Sandcontainer und Sandsäcke (außerhalb der Fahrrinne) erforderlicher äquivalenter Durchmesser	$erf. d_{\text{eq}} = \frac{V^2 \cdot \text{Sohle}}{C^2 \cdot B^2 \cdot g \cdot \Delta'} [m]$ bei dichten Packungen gilt für	nach Römisch [10]
Sandfüllung:	$C = 1,25$	
Durchmesser	$B = 1,25$ $D' = 0,95$	
Volumen	$d_{\text{eq}} \geq 0,85 \text{ m}$ $V_{\text{Sohle}} \geq 0,5 \text{ m}^3$	

Tabelle 2: Stabilitätsnachweis der Sohlsicherung

stimmt, um sicherzustellen, dass die Belastung an der Elbsohle für alle Angebotsvarianten und Fälle des künftigen Schiffsverkehrs richtig eingeschätzt wurden. Im Ausschreibungsverfahren konnten so allgemein gültige hydraulische Bemessungsvorgaben für die Sohlsicherung zur Verfügung gestellt werden (Tab. 1 und 2).

Ausgehend von folgenden Bemessungsschiffen wurden Strahlgeschwindigkeiten über der Sohle festgelegt:

- für die Fahrrinne (tiefes Fahrwasser): »Sovereign Maersk« als Containerschiff der Post-Panamax Generation
- für Bereiche außerhalb der Fahrrinne (flaches Fahrwasser): Schlepper und Küstenmotorschiffe.

Die schiffsinduzierten Belastungen waren in den Lastfallkombinationen mit der Tideströmung ($V_{\text{Tide}} = 1,16 \text{ m/s}$) zu superponieren. Ausgehend von ermittelten Wahrscheinlichkeit von Notsituationen und damit einhergehenden Belastungen aus Schiffsmanövern ergaben sich im Vergleich mit zulässigen Wiederholraten nach [6] Strömungsbelastungen an der Sohle in der Fahrrinne von max $V_{\text{Sohle}} = 10,6 \text{ m/s}$ (s. Tabelle 1) außerhalb der Fahrrinne von max $V_{\text{Sohle}} = 4,4 \text{ m/s}$.

Für die obere Klasse der Schiffsgrößen (> 12,5 m Tiefgang) war danach »nur« die Maschinenstufe »Voll voraus unter Manöverbedingungen« anzusetzen, dies entspricht ca. 35 % der Maschinenleistung oder 70 % der Schraubennendrehzahl. Für das gewählte Bemessungsschiff »So-

vereign Maersk« (Tiefgang = 13,80 m) ergibt sich bei 35 % P bzw. 70 % n_0 an den Fahrinnengrenzen eine Strahlgeschwindigkeit über der Sohle von $V_{\text{Sohle}} = 9,4 \text{ m/s}$. Dies entspricht etwa der Strömungsgeschwindigkeit hinter einem Schiff mit einem Tiefgang von 12,5 m bei 100 % P bzw. 100 % n_0 .

Für die Druckänderung infolge Schwall und Sunk wurde analog der bereits bei der 4. Röhre Elbtunnel verwendeten Bemessungsgröße $Z_A = 7,5 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

Nach Auswertung der Angebote und den darauf folgenden Bietergesprächen ergab sich, dass aufgrund der hohen Bemessungsströmungen keine Alternativen zur verklammerten Steinschüttung mit nachweisbarer Lagestabilität aufgezeigt werden konnten.

Die Herstellung der Filterstabilität gegen die Sande des Planum oberhalb der Tunnelelemente war zunächst mit Geokunststoffen geplant. Aufgrund von Erosionserscheinungen an der gebaggerten Elbsohle (Riffel, Kolke) wurde kurzfristig entschieden, eine Auffüllung mit filterstabilem Kornmaterial vorzunehmen. Diese Ausführung hat sich bewährt.

5 Schlussbetrachtung

Die Herstellung dieses Schutzbauwerkes in bis zu 20 m Wassertiefe mit den hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der Elbe und den Behinderungen durch Schiffsbewegungen im Elbfahrwasser verlangte den ausführenden Firmen F+Z und

Hirdes ein Höchstmaß an technischer Innovation und Kompetenz ab. Dank des Könnens und der engagierten Mitarbeit der Firmen konnte ein Bauwerk im zeitlichen und finanziellen Rahmen entstehen, das u.E. so noch nicht ausgeführt worden war. Die pragmatisch zielgerichtete Zusammenarbeit zwischen bauausführenden Firmen, den Entwurfs- und Bauleitungsbereichen des Bauherrn (Baubehörde Hamburg) und des entwerfenden und bauüberwachenden Ingenieurbüros (Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH) gewährleistete die Erstellung eines Bauwerks, welches hoffentlich nicht allzu oft seine Funktionsfähigkeit beweisen muss.

Schrifttum

- [1] Statische Untersuchungen zum Neuen Elbtunnel 1. bis 3. Röhre im Zuge der BAB 7, Beanspruchungen der Tunnelröhre durch geänderte Überdeckungen und Wasserstände und Konsequenzen für Sonderlastfälle, wie Wrackbelastung, Ankerstoß und Ankerzug. Ingenieurbüro Professor Duedeck und Partner GmbH, Braunschweig, 4.8.1998
- [2] Schutzmaßnahmen für die 1-3. Röhre des Neuen Elbtunnels im Zuge der Elbvertiefung/Varianten zum Schutz des Tunnels vor Beanspruchungen durch Ankerzug. Ingenieurbüro Professor Duedeck und Partner GmbH, Braunschweig, 12.12.1998. Inkl. Anlage 50: Statische Berechnung zur Abschätzung des Spundwandprofils vom 29.10.1998
- [3] Schutz des Neuen Elbtunnels bei Vertiefung des Elbfahrwassers. Zusammenstellung von Grundlagen für die Planfeststellung - Studie zur Machbarkeit. Baubehörde der Freien und Hansestadt Hamburg/Tiefbauamt - Projekte Ingenieurbau TI 321, 18.2.1998
- [4] BAB A7 - Neuer Elbtunnel Hamburg (1. bis 3. Röhre) Schutzbauwerk im Fahrwasser. Hydraulische Bemessung der Sohlsicherung. Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg, 3.11.1999
- [5] Grundbau-Taschenbuch. Teil 1, S. 12, Hrsg. und Schriftl.: Ulrich Smolczyk, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 1996
- [6] K. Felkel, H. Steinweller: Druck und Strömung unter im Kanal fahrenden Schiffen. Schiff und Hafen, 25. Jg., Heft 8/1973, S. 691-696
- [7] BAB A7 - Neuer Elbtunnel Hamburg (1. bis 3. Röhre). Schutzbauwerk im Fahrwasser - Entwurf. Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg, 18.06.1999
- [8] G. Hackmann, K. Römisch: Die Colcrete-Matte und die verklammerte Steinschüttung. HANSA, 133. Jg., Heft 8/1996
- [9] M. Fuehrer, H. Pohl, K. Römisch: Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protection of various constructions. PIANC-Bulletin, No. 58, 1987

Dr.-Ing. Andreas Knoll, Behörde für Bau und Verkehr, Hamburg, Tiefbauamt-TS1; Dipl.-Ing. Manfred Voß, Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH, Teilfeld 5, 20459 Hamburg, Tel. 040/361 20 10