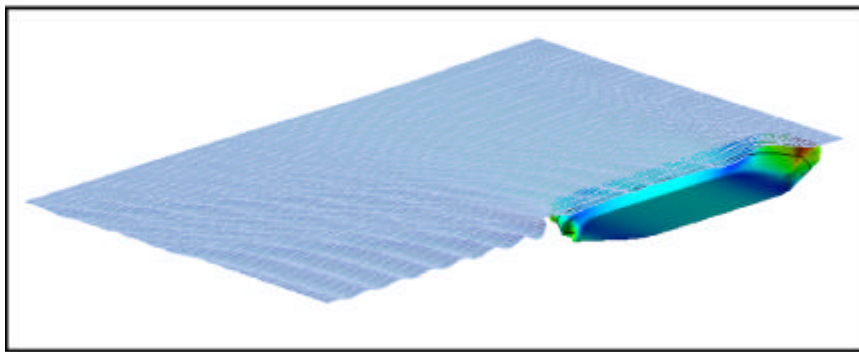




Untersuchung der Umströmung eines flachgehenden, getunnelten Binnenschiffes einschließlich des Nachstromfeldes

Bericht Nr. 1495

Oktober 1998

Auftraggeber: **Arbeitsgemeinschaft der industriellen
Forschungsvereinigungen**

Versuchsanstalt für Binnen-
schiffbau Duisburg

Name der Forschungsstelle(n)

10662 N / VI

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

1.04.1996 bis 30.06.1998

Bewilligungszeitraum

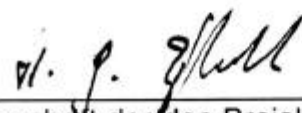
Schlußbericht für den Zeitraum : 1.04.1996 bis 30.06.1998

Forschungsthema :

Untersuchung der Umströmung eines flachgehenden,
getunnelten Binnenschiffes einschließlich des Nach-
stromfeldes

Duisburg, 30.10.1998

Ort, Datum



Unterschrift der/des Projektleiter(s)



**Untersuchung der Umströmung eines flachgehenden, getunnelten
Binnenschiffes einschließlich des Nachstromfeldes**

Duisburg, den 30.10.1998

Fachbereich Hydromechanik

Der Bearbeiter:

(Dr.-Ing. W. Grollius)

Fachbereich I:

(Dr.-Ing. H.G. Zibell)

**Europäisches Entwicklungszentrum für
Binnen- und Küstenschifffahrt**
Versuchsanstalt für Binnenschifffahrt e.V., Duisburg

(Prof. Dr. P. Engelkamp)

Gliederung

Zusammenfassung

1. Einleitung
2. Theoretische Grundlagen, Stand der Erkenntnisse
 - 2.1 Definition des Koordinatensystems
 - 2.2 Strömung mit Zähigkeit am Hinterschiff
 - 2.3 Potentialtheoretische Gesetzmäßigkeiten
 - 2.4 Gesetzmäßigkeiten des Flachwasserwiderstandes
3. Zielsetzung, Versuchsplanung und –durchführung
 - 3.1 Modell
 - 3.2 Versuchsplanung und -durchführung
4. Begleitende theoretische Berechnungen
5. Ergebnisse
 - 5.1 Widerstand
 - 5.2 Strömung im Körpernahbereich
 - 5.3 Strömung im Körperfernbereich
 - 5.4 Visualisierungsversuche
6. Vergleich der verwendeten Berechnungsverfahren
7. Symbolverzeichnis
8. Literaturverzeichnis



Zusammenfassung

Um detaillierte Informationen über die Umströmung eines flachgehenden, getunnelten Binnenschiffes zu erhalten, sind auf drei typischen Wassertiefen an dem Modell eines modernen Motorgüterschiffs Widerstands- und Strömungsmessungen im Körpernah- und -fernfeld durchgeführt worden.

Die Messungen wurden durch Berechnungen mit modernen potentialtheoretischen CFD-Verfahren (Programme SHALLO und POTFLOW) ergänzt. Zusätzlich wurden Visualisierungsversuche verschiedener Art gefahren, um die Art der Umströmung des völligen Hinterschiffes analysieren zu können. Wesentliches Ziel dieser Betrachtung war es, zu erwartende Ablösungserscheinungen sichtbar zu machen.

Dieses Ziel konnte erreicht werden. Ferner konnten die Grenzen des Programms SHALLO in bezug auf die Einsatzfähigkeit für Flachwasserprobleme aufgezeigt und klarer definiert werden.

Die Untersuchung liefert einen wesentlichen Beitrag in Hinblick auf das Ziel, geeignete Prognoseverfahren für Sog- und Nachstrom zu entwickeln, um damit die zur Zeit noch mit Unsicherheiten behafteten Methoden zur Auslegung der Schiffsantriebsanlage zu verbessern.

Die Arbeitsgemeinschaft der industriellen Forschungsvereinigungen (AiF) hat dieses Projekt mit Mitteln des BMWi in dankenswerter Weise gefördert.

Die Berechnungen mit dem Programm POTFLOW wurden von Herrn Dipl.-Ing. H. Lochte-Holtgreven durchgeführt, Herr Dipl.-Ing. B. Baumgarten war verantwortlich für die Auswertung der Meßergebnisse, Herr Dipl.-Ing. S. List bearbeitete die farbigen Abbildungen. Ihnen sei an dieser Stelle dafür gedankt.



1. Einleitung

Bei Binnenschiffen ist die Projektierung der Antriebsanlage auch heute noch mit Unsicherheiten behaftet. Dies beruht in erster Linie darauf, daß verlässliche Methoden zur Bestimmung von Sog und Nachstrom bisher fehlen. Die tiefere Ursache liegt in der komplizierten Form des - in der Regel getunnelten - Hinterschiffs, der schwierig abzuschätzenden Umströmung im begrenzten Fahrwasser und der extrem hohen Belastung, unter der Binnenschiffspropeller arbeiten. Erschwerend wirkt sich der unverhältnismäßig große Einfluß der Zähigkeit auf die Schiffsumströmung unter Flachwasserbedingungen aus, worüber bisher keine ausreichenden Erkenntnisse vorliegen.

Sog und Nachstrom stellen Wechselwirkungseffekte zwischen Schiff und Propeller dar, die zwischen den induzierten Geschwindigkeiten am Propellerflügel und der Anströmung entstehen. Obwohl die Einflüsse des Propellers dominieren, besteht eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Analyse des Gesamtproblems darin, die Randbedingungen zu kennen, die seine Arbeitsweise bestimmen. Diese ergeben sich aber aus der ungestörten Umströmung des frei geschleppten Schiffskörpers.

Untersuchungen dieser Art sind bisher relativ selten geblieben, da insbesondere der versuchstechnische Aufwand für die Aufmessung des Strömungsfeldes sehr hoch ist. Eine richtungsweisende experimentelle Arbeit dieser Art stammt von Laute [1], der bereits in den frühen 30er Jahren die Umströmung eines seegehenden Frachters experimentell untersuchte. Mitte der 70er Jahre wurden am IfS/Hamburg umfangreiche Messungen an einem Seeschiffsdoppelmodell im Windkanal durchgeführt und durch theoretische Berechnungen ergänzt [2, 3, 4]. Die Geschwindigkeitsmessungen mit 5-Loch-Kugelsonde wurden wenige Jahre später durch Laser-Messungen ergänzt. Dieses Meßverfahren wurde damit in die Deutsche Schiffbauforschung eingeführt.

Ende der 80er Jahre haben das IfS / Hamburg, die HSVA / Hamburg und die VBD in Gemeinschaftsarbeiten damit begonnen, den Einfluß der begrenzten Wassertiefe auf das Strömungsproblem am Beispiel von seegehenden Schiffsförmern zu erforschen [5, 6].

Mitte der 90er Jahre wurden auch typische Binnenschiffsförmern in derartige Untersuchungen einbezogen, wobei in verstärktem Maße theoretische Berechnungsverfahren zu Vergleichszwecken herangezogen wurden [7, 8, 9].

Die vorliegende Arbeit knüpft an diese Untersuchungen an, wobei der Schwerpunkt entsprechend der Aufgabenstellung auf der Analyse der Hinterschiffsumströmung liegt. Die Untersuchung umfaßt die experimentelle Ermittlung von charakteristischen Größen des Strömungsfeldes, wie örtliche Geschwindigkeiten und Drücke sowie die Verformung der Wasseroberfläche. Daneben werden vergleichende potentialtheoretische Berechnungen gezeigt, um den Einfluß der Zähigkeit kenntlich zu machen.



Erstmalig werden hier Visualisierungen für die Strömung an einer getunnelten, völligen Hinterschiffsform gezeigt, die sich von denen sogenannter 'Standardschiffe' maßgeblich unterscheiden.



2. Theoretische Grundlagen, Stand der Erkenntnisse

2.1 Definition des Koordinatensystems

Es wird ein kartesisches rechtshändiges Koordinatensystem benutzt. Der Nullpunkt liegt auf halber Schiffslänge auf der Mittellängsebene und in der ungestörten Wasseroberfläche. Die X-Achse ist positiv in Richtung Schiffsbug, die Z-Achse positiv nach unten.

2.2 Strömung mit Zähigkeit am Hinterschiff

In einer fundamentalen Arbeit hat Graff [10] Mitte der 30er Jahre die Prandtl'sche Grenzschichttheorie auf den Fall des „schwimmenden Körpers“ angewendet. Dabei liegen seine Leistungen insbesondere darin, daß er bei geschickter Auswahl „vergleichbarer Körperformen“ durch eine Gegenüberstellung theoretischer und experimenteller Ergebnisse auch ohne Computerhilfe in der Lage war, zum Thema „Schiffswiderstand“ quantitative Aussagen über den Formfaktor des Reibungswiderstandes und über den Ablösungswiderstand in Abhängigkeit von der Körperdicke bzw. -völligkeit zu erzielen. Naturgemäß enthält die Arbeit auch Aussagen über den Charakter der ursächlichen Körperumströmung, worüber nachfolgend eine kurze Zusammenfassung gegeben wird.

In Gegenüberstellung zur Potentialströmung ist die zähe Strömung dadurch gekennzeichnet, daß sich um den Schiffskörper eine Grenzschicht aufbaut, in der die Differenzgeschwindigkeiten im körperfernen Feld (Über- und Untergeschwindigkeiten) aufgrund der Schubspannungswirkung abgebremst werden, so daß sie auf der Körperoberfläche schließlich verschwinden. Dementsprechend gelten für das Fernfeld die Gesetzmäßigkeiten des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes, für das Nahfeld die des Reynoldsschen Ähnlichkeitsgesetzes. Zwischen den durch die Erdschwere und die kinematische Zähigkeit des Mediums bedingten Kräfte treten Wechselwirkungen auf, die sich z.B. in der Änderung der benetzten Oberfläche, Divergenz der Stromlinien durch Wellenbildung u.ä. ausdrücken.

Abhängig von der Reynoldszahl R_n ist zwischen laminarer Grenzschicht ($R_n < 10^5$) und turbulenter Grenzschicht ($R_n > 10^5$) zu unterscheiden. Erstere tritt am realen Schiff wegen der herrschenden hohen Reynoldszahl praktisch nicht auf. Um am Modell eine bessere Strömungsähnlichkeit zu erzeugen, d.h. eine turbulente Grenzschicht, werden dort am Vorschiff künstliche Turbulenzerzeuger in Form von Sandstreifen oder Stolperdrähten angebracht.

Die Grenzschichtdicke δ nimmt mit wachsender Länge, vom Vorsteven ausgehend, stetig zu, solange der Flüssigkeitstransport in Gebiete mit sinkendem Druck erfolgt (stabiler Strömungszustand). Instabile Strömungszustände herrschen dagegen in Gebieten mit wachsendem Druck, die in der Regel im Hinterschiff auftreten. Hier kann es insbesondere bei plötzlichem Druckanstieg zu Ablösungen der Grenzschicht



kommen, weil die Strömung infolge des stetigen Energieverlustes nicht mehr in der Lage ist, dieser Druckänderung zu folgen. Dies entsteht oft an der hinteren Schulter völliger Schiffe. Ablösungen können auch bei Kantenströmungen auftreten, wo durch Grenzschichtverdünnung Impulsverluste entstehen, so daß der Strömungszustand nicht weiter aufrechterhalten werden kann.

Das Ergebnis ist in diesen Fällen eine Verzögerung der Strömung in der ursprünglichen Richtung und das Auftreten von Wirbelströmungen in der Größenordnung des Propellers. Ein bekanntes Beispiel ist das Phänomen des Kimmwirbels im Hinterschiffsbereich. Der Effekt der Ablösung ist in der Regel mit einem zusätzlichen Energieaufwand verbunden, der sich in einer Erhöhung des Widerstands ausdrückt. Man spricht in diesem Zusammenhang vom ablösungsbedingten Druckwiderstand oder kurz vom Ablösungswiderstand.

Existierende Rechenmodelle sind derzeit noch nicht in der Lage, mit Sicherheit die Bereiche auf der Schiffsoberfläche zu identifizieren, in denen Ablösungseffekte einsetzen. Eine wesentliche Aufgabe von experimentellen Strömungsuntersuchungen ist deshalb, dieses Phänomen sichtbar zu machen. Die Zielsetzung wird u.a. auch hier verfolgt.

2.3 Potentialtheoretische Gesetzmäßigkeiten

Potentialtheoretisch läßt sich am Beispiel des schwimmenden Körpers für den Grenzfall verschwindender Wellenbildung (Modell des tiefgetauchten Doppelkörpers) zeigen, daß das Verhältnis aus örtlicher Geschwindigkeit V und Anströmgeschwindigkeit u_0 unabhängig von der Größe der letzteren konstant ist:

$$V(X, Y, Z) / u_0 = \text{konst.}(X, Y, Z) \quad (2.1)$$

Von diesem Zusammenhang ausgehend ergibt sich aus dem Ansatz der stationären Bernoulli-Gleichung für eine Stromlinie längs der verformten Oberfläche

$$V(X, Y, \zeta) / u_0 = f_1((\zeta(X, Y) \cdot g) / u_0^2) \quad (2.2)$$

mit der Erdbeschleunigung g und der Auslenkung der verformten Oberfläche ζ . Für eine Stromlinie längs des Bodens des begrenzten Fahrwassers ergibt sich

$$V(X, Y, h) / u_0 = f_2(\Delta p(X, Y, h) / (\rho / 2 \cdot u_0^2)) \quad (2.3)$$

mit der Wassertiefe h und der Dichte ρ . Wegen Gl. (2.1) gilt dementsprechend für die Oberflächenverformung

$$(\zeta(X, Y) \cdot g) / u_0^2 = \text{konst.}(X, Y) \quad (2.4)$$



und für den Bodendruck

$$\Delta p (X,Y,h) / (\rho / 2 \cdot u_0^2) = \text{konst.}(X,Y) \quad (2.5)$$

mit $\Delta p = \rho g \zeta$.

Die Gültigkeit dieser Gesetzmäßigkeiten konnte vom Verfasser in [11] am Beispiel analytischer Einfeldschiffsformen für einen relativ weiten Geschwindigkeitsbereich nachgewiesen werden.

Die Skalierung der kennzeichnenden Größen des Strömungsfeldes entsprechend Gln. (2.1), (2.4) und (2.5) wird hier verallgemeinert angewendet, um die Froudeschen und die Reynoldsschen Einflüsse auf das Strömungsproblem voneinander abzugrenzen.

2.4 Gesetzmäßigkeiten des Flachwasserwiderstandes

Der Flachwasserwiderstand als Integral der Druckverteilung über der Körperoberfläche, wie es z.B. von Lunde in [12] gezeigt wird, ist u.a. eine komplizierte Funktion von Anströmgeschwindigkeit, Körperlänge und Wassertiefe. Es ist in dieser Form für praktische Anwendungen nicht verwertbar.

Aus empirischen Untersuchungen ist bekannt, daß die Einflüsse von F_n -Zahl, F_{nh} -Zahl und L/h -Verhältnis in gewissen Geschwindigkeitsbereichen überwiegen (siehe auch [13, 14]). Man kann folgende Definitionen als annähernd gültig betrachten:

a) $0 < F_{nh} < 0,5 - 0,6$

Bereich des verschwindenden Flachwassereinflusses. Es gilt für den Beiwert des Restwiderstandes C_R (Restwiderstand gleich Gesamtwiderstand abzüglich äquivalentem Plattenwiderstand)

$$C_R = C_R (F_n) \quad (2.6)$$

b) $0,5 - 0,6 < F_{nh} < 0,7 - 0,9$

unterkritischer Flachwasserbereich, kein Einfluß des L/h -Verhältnisses. Hier gilt

$$C_R = C_R (F_{nh}) \quad (2.7)$$



c) $0,7 - 0,9 < F_{nh} \leq \infty$

transkritischer und überkritischer Geschwindigkeitsbereich. Hier tritt der Einfluß des L/h-Verhältnisses (L = Schiffslänge) hinzu

$$C_R = C_R(F_{nh}, L/h) \quad (2.8)$$

Die Schwankungen der Grenzen resultieren aus dem zusätzlichen Einfluß des Volumenkoeffizienten des Körpers $C_{vol} = \forall/L^3$. Tendenzmäßig verschieben sie sich mit wachsender Körperdicke im Fall b) in Richtung der kleineren Werte, wodurch der Bereich a) verkleinert, der Bereich c) vergrößert wird.

Zum Beispiel konnten in [13] diese Zusammenhänge durch umfangreiche Widerstandsmessungen für SWATH-Schiffe gezeigt werden.

Kommerzielle, völlige Binnenschiffe, wie das hier untersuchte, fahren grundsätzlich in dem als Fall b) gekennzeichneten Geschwindigkeitsbereich. Dabei ergibt sich eine natürliche obere Geschwindigkeitsbegrenzung dadurch, daß an der hinteren Schulter des Schiffskörpers durch Erreichen der örtlichen Stauwellengeschwindigkeit eine massive Querwelle auftritt, die eine weitere Geschwindigkeitssteigerung verhindert. In der Regel wird der Betriebspunkt so gewählt, daß dieses Phänomen vermieden wird. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von dem ökonomischen, d.h. wirtschaftlich vertretbaren Betriebszustand, auf den die Antriebsanlage ausgelegt wird.

Die Aussage von Gl. (2.7) im Fall b) knüpft in gewisser Weise an das Widerstandsumrechnungsverfahren von Schlichting [15] an, der davon ausgeht, daß bei gleichen Wellenlängen auf tiefem und auf flachem Wasser auch die Restwiderstände gleich sind. Anlässlich seines Vortrages wurde Kritik dahingehend geäußert, daß doch offensichtlich dabei auch unterschiedliche Wellenhöhen an der Schiffsaußenhaut auftreten würden, was zwangsläufig zu unterschiedlichen Widerständen führen müsse. Dieser scheinbare Widerspruch löst sich auf, wenn man nicht von absoluten, sondern von normierten Größen ausgeht. Dementsprechend gilt die Aussage Schlichtings für die Restwiderstandsbeiwerte C_R , wobei dann offensichtlich gemäß Abschn. 2.3 sowohl die normierten Widerstandsdruckintegrale, als auch die normierten Wellen an der Außenhaut gleich sein müssen. Dies ergibt sich zwangsläufig aus dem Vergleich der Beziehungen für den Druckbeiwert (Gl. (2.5)) und für die dimensionslose Oberflächenverformung (Gl. (2.4)).

Die nachfolgend dargestellte Untersuchung orientiert sich an dem praxisnahen Fall b). Insbesondere kann bei Variation der Wassertiefe durch Einhaltung der F_{nh} -Zahl davon ausgegangen werden, daß sich ähnliche Strömungsfelder einstellen.

Unter Verwendung der oben dargestellten Skalierung können feststellbare Unterschiede dann nur entweder nichtlineare Froudezahl-abhängige, oder Reynoldszahl-abhängige Effekte, oder schließlich auch Wechselwirkungseffekte zwischen beiden ausdrücken. Begleitende Berechnungen mit einem nichtlinearen potentialtheoreti-



schen Verfahren, wie im vorliegenden Fall mit dem Programm SHALLO, das die Randbedingung der freien Wasseroberfläche nichtlinear berücksichtigt, helfen dabei, die genannten alternativen Möglichkeiten weiter einzugrenzen und zu identifizieren.



3. Zielsetzung, Versuchsplanung und -durchführung

3.1 Modell

Als Untersuchungsobjekt wurde ein modernes Motorgüterschiff in Einschrauberausführung mit klassischer Tunnelform ausgewählt. Die Linien des Schiffes sind aus der Typenreihe „Binnenschiff der Zukunft“ [16] entnommen worden. Aus dem darin vorgestellten Katalog verschiedener Vor- und Hinterschiffsformen wurden für Vor- bzw. Hinterschiff die Varianten M1344 bzw. M1386 ausgewählt. Das im Original 110 m lange Schiff wurde durch Reduzierung des parallelen Mittelschiffes auf $L_{OA} = 86,0$ m verkürzt und im Maßstab 1:12 als Holzmodell mit der Bezeichnung **M1548** gebaut. Die kürzere Länge wurde vorgezogen, um den Breiteneinfluß des Schlepptanks, der durch diese bestimmt wird, gering zu halten.

Das Modell wurde auf den Spanten Nr. 17 und 19 mit einem Turbulenzerzeuger in Form eines Sandstreifens mittlerer Körnung (f ca. 1 mm) versehen.

Für den gewählten Tiefgang von $T = 2,5$ m (Konstruktionstiefgang) ergeben sich folgende Hauptabmessungen:

Bez:	Dim.	$\lambda = 12$	$\lambda = 1$
L_{OA}	m	7,167	86,0
$L_{WL} = L_{BP}$	m	7,107	85,28
B	m	0,947	11,36
T	m	0,208	2,5
∇	m^3	1,1495	1986,4
S	m^2	8,887	1279,8

Charakteristische Merkmale des Vorschiffs (Anl. 1) sind V-förmige Spanten und eine integrierte Schubplatte. Das sehr schlank gehaltene Hinterschiff zeichnet sich durch eine balkonartige Verbreiterung des Achterdecks aus, das in einem sog. Scheinspiegel endet, wobei die senkrechte Seitenwand nahezu bis zur Konstruktionswasserlinie herunterreicht. Das eigentliche Unterwasserschiff hat scharf auslaufende Wasserlinien ähnlich einem Kreuzerheck.

Der in Anl. 1 abgebildete Spantenriß basiert auf Bauspanten, die in einem Abstand von 1 m entsprechend 83,3 mm im Modell angeordnet sind.



3.2 Versuchsplanung und -durchführung

Das Hauptziel der Untersuchung waren Strömungsmessungen im Nah- und Fernfeld des Schiffskörpers, wobei insbesondere dem Einfluß der Wassertiefe im Sinne des Flachwasserproblems eine maßgebliche Bedeutung zukam. Mit der Festlegung des Wassertiefen-Tiefgangsverhältnisses von

$$h/T = 3,5 ; 2,0 ; 1,0$$

ergeben sich in Verbindung mit dem festgelegten Tiefgang von $T = 2,5$ m realistische Fahrwasserverhältnisse, wie sie z.B. auf dem Rhein anzutreffen sind:

h/T	$(h-T)/T$	h (m)	h_F (m)
3,0	2,0	7,5	5,0
2,0	1,0	5,0	2,5
1,5	0,5	3,75	1,25

Begleitet wurden die Strömungsmessungen von regulären Widerstandsmessungen, die sehr ausführlich durchgeführt wurden. Sie hatten u.a. gemäß Abschn. 2.4 den Zweck, die obere, natürliche Geschwindigkeitsgrenze zu ermitteln, um davon ausgehend geeignete Referenzgeschwindigkeiten für die Strömungsmessungen auf den verschiedenen Wassertiefen festlegen zu können. Die nach Abschn. 2.4, Fall b) verfolgte Absicht, identische F_{nh} -Zahlen zu untersuchen, konnte nur annähernd verwirklicht werden, weil die Versuche aus ökonomischen Gründen teilweise kombiniert gefahren werden mußten. Die nachfolgende Tabelle zeigt die ausgewählten Geschwindigkeitsvarianten für die untersuchten Wassertiefen, für die detaillierte Strömungsmessungen durchgeführt wurden:

h/T	h (m)	V_s (km/h)	V_s (m)	F_n	F_{nh}
3,0	7,5	21,72	6,034	0,2086	0,7035
2,0	5,0	18,11	5,030	0,1739	0,7182
1,5	3,75	14,96	4,156	0,1437	0,6854

Die Strömungsmessungen gestalteten sich als aufwendig und mußten aufgrund der Vielzahl der Meßstellen in mehreren Versuchsserien gefahren werden. Ergänzend wurden Visualisierungsversuche durchgeführt, um eingehendere Aussagen über das Verhalten der Grenzschicht im Hinterschiffsbereich zu erhalten. Im einzelnen sind folgende Messungen und Versuche für jede Wassertiefe durchgeführt worden:



a) Messungen im Körperrahfeld

- 1) Drücke an der Außenhaut im Hinterschiffsbereich, Bauspanten Nr. 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 und 24, insgesamt 90 Meßstellen
- 2) Wellenkontur an der Außenhaut mit kapazitiven Goldstreifen-Klebesonden, 6 Sonden am Hinterschiff, 6 Sonden am Vorschiff, 1 Referenzsonde mittschiffs, Ergänzung durch Seitenfotos
- 3) Geschwindigkeitsaufmessungen (3D) in der Propellerebene (Bauspt. Nr. 3) mit 5-Loch-Kugelsonde, 110 Meßpositionen
- 4) Messung des nominellen Nachstroms in der Propellerebene (Bauspt. Nr. 3) mit Rotationsharke (5 Staurohre), 19 Winkelpositionen

b) Messungen im Körperfernfeld

- 1) Aufmessung der Oberflächenverformung neben dem Schiff, 9 kapazitive Wellensonden, ortsfeste Anordnung, kontinuierliche Messung
- 2) Aufmessung der Bodendrücke, 5 Differenzdruckdosen, im Tankboden eingelassen, kontinuierliche Messung

c) Visualisierungsversuche

- 1) Farbanstrichversuche mit Farbstreifen auf den Bauspanten Nr. 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 und 24
- 2) Kontrastmittelversuche, Ausstoß von Kontrastmittel (Milch) aus den Druckanbohrungen der Bauspanten Nr. 3, 5, 7, 9 und 11
- 3) Wollfadenversuche, Anbringung von Wollfaden-Fahnen im Bereich der Bauspanten Nr. 3, 5, 7, 9, 11 und 13, Abstand zur Außenhaut sowohl 4,25 mm als auch 9,5 mm

Anl. 2 gibt den Anriß der Bauspanten wieder, die mit Druckanbohrungen versehen wurden, einschließlich der vorgesehenen Propellerposition. Anl. 3 stellt den WL-Anrißplan dar, der als Orientierung für die Montage der Klebesonden zur Erfassung der Wellenkontur auf der Außenhaut diente.

Die in den Anlagen 4 und 5 gezeigten Fotos vermitteln einen Eindruck von den aufwendigen Vorbereitungen, die u.a. für die Messung der Außenhautdrücke und der Verformung der Wasseroberfläche notwendig waren.



4. Begleitende theoretische Berechnungen

Für die vorgesehenen Berechnungen kamen zwei potentialtheoretische Programme zum Einsatz, nämlich das Programm **SHALLO** [17] (Lizenzgeber HSVA/Hamburg) und das Programm **POTFLOW** [18] nach Kux.

Das Programm SHALLO ist ein nichtlineares, finites Randelementeverfahren, das auf Rankin-Quellen basiert, die in den Kollokationspunkten der Flächenelemente des Körpernetzes und oberhalb der Kollokationspunkte des Wasseroberflächennetzes angeordnet sind. Die Besonderheit des Verfahrens besteht darin, daß es, ausgehend von der linearen Lösung des Strömungsproblems, durch Iteration die nichtlineare Differentialgleichung der Oberflächenbedingung löst und damit die Verformung der Wasseroberfläche berechnet. Zielgrößen der Berechnung in jedem Iterationsschritt sind zunächst die Ergiebigkeiten der Quellen, die entsprechend modifiziert werden.

Nachdem die Grundaufgabe gelöst ist, können für jeden Punkt des Flüssigkeitsraums die zugehörigen Drücke und Geschwindigkeiten ausgegeben werden. Die Integration des Druckes und seiner Momente über der Körperoberfläche liefert in Verbindung mit den ebenfalls erfaßten hydrostatischen Kraftgrößen u.a. Aussagen über den Widerstand sowie über Trimm und Tauchung, falls diese Größen freigegeben sind.

Das Programm POTFLOW basiert auf dem Verfahren von Hess und Smith [18], bei dem die Flächenelemente des Körpernetzes jeweils mit konstanten Quellverteilungen belegt werden. Die freie Oberfläche kann hier nicht berücksichtigt werden, so daß (für den Fall von Schiffsrümpfen) immer Doppelkörper (Spiegelung an der Symmetrieebene, bei Schiffen also die Ebene durch die Ruhewasserlinie) behandelt werden.

Diese Programme sind auch in der Lage, orthogonale Begrenzungen des Flüssigkeitsraums (Boden- und Seitenbegrenzungen) zu erfassen (Spiegelungstheorem) und sind dementsprechend für die Behandlung der Bewegung eines Schiffes im Kanal, wie im vorliegenden Fall, geeignet. Schiefwinklige Seitenbegrenzungen aber auch orthogonale Begrenzungen können alternativ durch Einführung zusätzlicher Quellbelegungen auf der Kanalböschung erfaßt werden.

Die Programme können grundsätzlich als Einstieg für verschiedene Verfahren zur Grenzschichtberechnung gelten, die Informationen über den Verlauf der potentialtheoretischen Stromlinien längs des untersuchten Körpers benötigen.

Die Ergebnisse von SHALLO und POTFLOW werden hier gegenübergestellt, um den Einfluß der Wellenbildung auf die Umströmung des Schiffskörpers zu zeigen. Um vergleichbare Ausgangsbedingungen zu gewährleisten, wurden bei beiden Verfahren nahezu identische Körpernetze verwendet. Anl. 6 zeigt das SHALLO-Netz, das sich nur durch das Überwasserschiff, das notwendigerweise bei der Berechnung der Wellen vorhanden sein muß, und durch eine „Anfasung“ der Knicklinienkanten von

seinem Gegenstück unterscheidet. Nur in der Berechnung mit SHALLO ist der Einfluß der seitlichen Tankbegrenzung berücksichtigt worden.

Während die Rechenzeiten für POTFLOW, ausgeführt auf einem Pentium-Rechner, in der Größenordnung von Minuten liegen, ist der zeitliche Aufwand bei SHALLO sehr hoch. Die nachfolgende Tabelle gibt die Antwortzeiten für die drei untersuchten Wassertiefenvarianten wieder, die auf einer leistungsfähigen Workstation vom Typ HP9000/785 mit 1GB Kernspeicherausbau erzielt wurden. Dabei wurden jeweils 8 Iterationsschritte (SWEEPS) für die Approximationsrechnung vorgegeben.

h (m)	Fn	Körpernetz (FE.-Zahl)	WO-Netz (FE.-Zahl)	Summe FE	R.-Zeit (h)
7,5	0,2086	2054	3000	5054	ca. 14
5,0	0,1739	2054	4025	6079	ca. 8
3,75	0,1437	2054	8874	10928	ca. 42

Die Zeiten schwanken naturgemäß mit der Rechnerbelegung (Multiuserbetrieb). Die beiden letzten Rechnungen erstreckten sich allerdings über das Wochenende, an dem keine weiteren Benutzer den Berechnungsablauf beeinflussen.



5. Ergebnisse

In Anlage 45 sind die Titel sämtlicher Ergebnisdarstellungen aufgeführt. Nachfolgend wird darauf in einer konzentrierten Form Bezugnehmend auf die Hauptfragen und Zielsetzungen dieser Untersuchung näher eingegangen.

5.1 Widerstand

Die Auftragung der Ergebnisse über der F_{nh} -Zahl (Anl. 8) bringt die in Abschn. 2.4 charakterisierten Abhängigkeiten des Restwiderstandes klar zum Ausdruck. Insbesondere aus der Darstellung von Trimm und Tauchung ist zu entnehmen, daß der zusätzliche Einfluß des L/h -Verhältnisses, der den Übergang zwischen den Fällen b) und c) kennzeichnet, bei etwa $F_{nh} = 0,6$ einsetzt. Daß dieser Grenzwert hier relativ niedrig liegt, ist der völligen Form des untersuchten Schiffstyps zuzuschreiben. Die untersuchten F_{nh} -Varianten, kenntlich durch die eingetragenen Berechnungsergebnisse aus SHALLO, liegen demnach bereits im Anfangsbereich des Falles c). Wie aus der Auftragung der Restwiderstände zu entnehmen ist, ist die Bereichsgrenze auch noch selbst eine Funktion des L/h -Verhältnisses, denn bis $L/h = 17$ gilt noch $C_R = C_R(F_{nh}) = \text{konstant}$ für den untersuchten Fall konstanter F_{nh} -Zahlen, was darüber hinaus nicht mehr zutrifft.

Demnach bleibt für die nachfolgenden Betrachtungen festzuhalten, daß von den drei untersuchten Wassertiefenvarianten die Fälle $h = 7,5 \text{ m}$ und $h = 5,0 \text{ m}$ noch vergleichend im Sinne der in Abschn. 2.3 herausgestellten Gesetzmäßigkeiten betrachtet werden können, was jedoch für den Fall $h = 3,75 \text{ m}$ nur noch bedingt zulässig ist. Vereinfachend werden zur Differenzierung **die Begriffe des mäßigen und des verstärkten Flachwassereinflusses** eingeführt, der hier auf den dritten Fall angewendet werden soll.

Um die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung hervorzuheben, sind in Anl. 7 die der letzteren zugeordneten Meßpunkte durch „Querkurven“ miteinander verbunden worden. Die eingetragenen Berechnungsergebnisse aus SHALLO liegen grundsätzlich niedriger als die Meßwerte, folgen aber - insbesondere bei mäßigem Flachwassereinfluß - der Tendenz der eingetragenen Querkurven. Die Differenzen zwischen Messung und Rechnung können gemäß Abschn. 2.1 als Zähigkeitseinflüsse gewertet werden. Gemäß der völligen Schiffsform dürfte der überwiegende Anteil davon den ablösungsbedingten Widerstand darstellen, der demnach in dem untersuchten Geschwindigkeitsbereich von $F_n = 0,15$ bis $F_n = 0,2$ in der Größenordnung des Wellenwiderstandes liegt.

Der starke Abfall der berechneten Werte für Widerstand und Tauchung bei $h = 3,75 \text{ m}$, die aus diesem Trend herausfallen, deutet an, daß SHALLO bei großen L/h -Verhältnissen zu niedrige Ergebnisse liefert. Die Ursache liegt mit großer Wahrscheinlichkeit in dem Spiegelungsalgorithmus, der in dem Berechnungsverfahren zur Beschreibung des Flachwassereffekts verwendet wird. In [11] konnte vom Verfasser



durch Vergleich mit Messungen gezeigt werden, daß Spiegelungsberechnungen den verstärkten Flachwassereinfluß auf die unterschiedlichen Größen des Strömungsfeldes nicht mehr ausreichend genau wiedergeben. Darin wurden auch Grenzwerte des L/h -Verhältnisses angegeben, die mit dem oben genannten größenordnungsmäßig übereinstimmen.

5.2 Strömung im Körpereich

Die Anlagen 9, 10 und 11 zeigen die normierte Axialkomponente der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene des Propellers (Bauspant Nr.3). Aus der Verteilung über der Propellerkreisfläche ergibt sich durch Integration und Mittelwertbildung die sogenannte mittlere nominelle Nachstromziffer w_n , die in Anl. 12 als Funktion der Modell-Reynoldszahl aufgetragen ist. Diese Darstellung vermittelt aufgrund ihres integralen Charakters in besonders deutlicher Weise den Einfluß des geschwindigkeitsabhängigen Zähigkeitseinflusses auf die Hinterschiffsumströmung. Unter potentialtheoretischen Gesichtspunkten müßte diese Größe in ideeller Flüssigkeit einen konstanten Wert annehmen, während sie in realer Flüssigkeit mit steigender Wassertiefe und wachsender Schiffsgeschwindigkeit stetig abnimmt.

Als ein besonderes Phänomen der Hinterschiffsströmung zeigt sich in den Geschwindigkeitsdarstellungen in der seitlichen 90-Grad-Position ein konzentrisches Isotaengebiet, in dem die Geschwindigkeiten zu seinem Mittelpunkt hin sehr stark abnehmen. Dieses Gebiet wandert mit abnehmender Wassertiefe stetig von der Mittschiffsebene weg nach außen und ist Ausdruck eines starken Kantenwirbels, auf den nachfolgend noch näher eingegangen wird.

Aus der Darstellung der normierten Oberflächenverformung an der Außenhaut des Schiffes (Anl. 13) sind mehrere Rückschlüsse zu ziehen.

Bemerkenswert ist zunächst die qualitative Ähnlichkeit der Wellenzüge für den Bereich mäßigen Flachwassereinflusses, die selbst für den untersuchten Extremfall $h = 3,75$ m weitgehend erhalten bleibt.

Weiterhin ist festzustellen, daß die normierte „Mittschiffsmulde“ nahezu linear mit steigender F_{nh} -Zahl, also wachsender Wassertiefe, abnimmt und damit demselben Trend folgt wie die zugehörigen C_R -Werte in Anl. 7. Hieraus ist zwangsläufig zu folgern, daß sich unter idealen Bedingungen, d.h. bei exakt gleichen F_{nh} -Zahlen im Bereich $F_{nh} < 0,6$ und mäßiger Wassertiefenbegrenzung eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den Varianten der genannten Größen unabhängig von der Wassertiefe zeigen müßte. Diese Folgerung unterstreicht die in Abschn. 2.4 aufgeführten Anmerkungen zum Widerstandsumrechnungsverfahren von Schlichting.

Schließlich kommt in der Darstellung noch ein Zähigkeitseffekt zum Ausdruck, der als sogenannter „verhinderte Druckanstieg“ im Heckbereich bekannt ist. Er resultiert aus dem Energieverlust der Grenzschichtströmung und führt zu einer Widerstandserhöhung.

Die in den Anlagen 14 bis 16 dargestellten gemessenen Drücke an der Außenhaut werden gegenüber den errechneten nur wenig durch die örtlichen Änderungen der Körperform beeinflusst. Diese Erscheinungsform kommt den Vorstellungen von einer



„zählen“ Strömung sehr entgegen. Ganz anders verhält sich die ideale Flüssigkeit, die auf Kantenumströmungen unmittelbar durch Geschwindigkeitssteigerungen und dementsprechend mit einem Druckabfall reagiert. Dies wird besonders deutlich an der äußeren Tunnelkante im Bereich des Propellerzulaufs. Markant ist auch der Druckanstieg am Ende des Totholzes und im Bereich des Achterstevens. In den Messungen ist dieser am ersteren nur andeutungsweise erkennbar. Der Bereich des Stevens selbst konnte aus technischen Gründen nicht in die Messung einbezogen werden. Auffällig sind jedoch in der Messung die relativ hohen Unterdrücke am flachen Boden und besonders im Kimmbereich an der hinteren Schulter (Bereich des Tunneleinlaufs), die in der Rechnung schwächer in Erscheinung treten.

Hinsichtlich des Wassertiefeneinflusses ist in den normierten, gemessenen Drücken eine stetige Zunahme der Unterdrücke am Schiffsboden mit abnehmender Wassertiefe feststellbar, in Übereinstimmung mit der Zunahme der normierten Mittschiffsmulde (Anl. 13). Auch die normierten Überdrücke im Stevenbereich nehmen - allerdings kaum erkennbar- zu. Die Berechnungen zeigen die gleichen Tendenzen für die Fälle mäßigen Flachwassereinflusses (Anlagen 14 und 15), deutliche - wie schon ausgeführt - Unterschiede sind jedoch im Fall des verstärkten Flachwassereinflusses erkennbar (Anlage 17), der durch den Spiegelungsalgorithmus vermutlich nur unzureichend wiedergegeben wird.

Die weit über die Schiffsbreite hinausreichende dreidimensionale Geschwindigkeitsaufmessung in der Propellerebene liefert eine ausdrucksvolle Darstellung der eingangs erwähnten Wirbelströmung im Bereich des Propellertunnels (Anlagen 17,18, und 19). Diese Erscheinung wird offensichtlich ausgelöst durch eine Strömung, die sowohl die innere als auch die äußere Tunnelkante unter einem gewissen Winkel quer zur Laufrichtung der Knicklinien trifft und sich wegen des erhöhten Impulsverlustes in den Gebieten ansteigenden Drucks hinter der überquerten Kante ablöst. Die abgelösten Strömungsfäden formieren sich zu einem Wirbeltrichter, der mit verminderter Geschwindigkeit nach hinten abwandert, so daß sich in der Propellerebene schließlich eine rotierende kreisförmige Strömung zeigt, deren Strömungskomponenten sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung zu ihrem Zentrum hin stetig abnehmen. Die Drehbewegung stellt sich auf der Backbordseite des Schiffes als Rechtsdrall in Richtung der positiven Schiffslängsachse dar. Mit abnehmender Wassertiefe verlagert sich das Zentrum des Wirbels, bedingt durch die Zunahme des Drucks im Bereich des Totholzes stetig nach außen, während die Einengung des unteren Freiraums zu einer Abplattung des Gebietes führt, das zunehmend die Form einer liegenden Ellipse annimmt.

Die Ursache für festgestellte Drehrichtung läßt sich aus den Darstellungen nicht erklären. Ebenso ergeben sich keine Aussagen über den Charakter der ursächlichen Strömungsablösungen und ihren Entstehungsort. Hierauf wird in den weiter unten dargestellten Visualisierungsversuchen näher eingegangen.

Das Bild der berechneten Potentialströmung ist völlig anders geartet, da sie ihren Grundvoraussetzungen entsprechend u.a. auch wirbelfrei ist. Dementsprechend zeigen sich im gesamten Bereich des betrachteten Querschnitts Geschwindigkeitsvektoren die mehr oder weniger stark in Richtung des hinteren Staupunktes weisen, der im oberen Bereich des Achterstevens liegt. Im Bereich der äußeren Tunnelkante zei-



gen sich erhöhte Rückstromgeschwindigkeiten. Mit zunehmendem Abstand vom Schiffskörper nimmt die Intensität der Strömung ab, um schließlich an den Rändern der ausgemessenen Querschnittsfläche eine Form anzunehmen, die mit der Messung weitgehend übereinstimmt.

5.3 Strömung im Körperfernbereich

In der Darstellung der Oberflächenverformung (Anlagen 20 bis 22) und der Drücke am Gewässerboden (Anlagen 23 bis 25) sind zur Verdeutlichung die Linien des Nullniveaus durch Wahl einer anderen Farbe besonders kenntlich gemacht worden.

Bei den Oberflächenverformungen zeigen sich zwischen Messung und Rechnung gute qualitative Übereinstimmungen, die in der Darstellung des Überdruckfeldes am Bug, der Ausbildung der Mittschiffsmulde und der divergierenden und der querlaufenden Wellen hinter dem Schiff zum Ausdruck kommen. Auch quantitativ ergeben sich bis zur hinteren Schulter gute Übereinstimmungen. Erst dahinter führt der fehlende Druckanstieg im Hinterschiff im Fall der realen Flüssigkeit verglichen mit den Berechnungsergebnissen zu einer schwächeren Ausbildung der nachlaufenden Wellen.

Die bisherigen Feststellungen gelten für die Fälle mäßiger Wassertiefenbegrenzung (Anlagen 20 und 21). Im Fall des verstärkten Flachwassereinflusses sind selbst die qualitativen Übereinstimmungen nur noch andeutungsweise vorhanden (Anl. 22).

Für die Bodendrücke ergeben sich ähnliche qualitative und quantitative Tendenzen. Auch hier zeigen sich in den Berechnungsergebnissen im Nachlaufeld höhere Druckamplituden, als sie in der Messung wiedergegeben werden. Andersgeartet sind jedoch die Drücke im Bereich der Mitschiffsmulde. Hier zeigen die Messungen umgekehrt größere Amplituden als die Berechnungen. Nur noch schwach ist die Ähnlichkeit der Druckfelder im Fall des verstärkten Flachwassereinflusses (Anl. 25).

5.4 Visualisierungsversuche

Vorbemerkungen

Um die Strömungsablösungen im Tunnelbereich sichtbar zu machen, sind drei Verfahren angewendet worden, die alle gewisse Nachteile und Unzulänglichkeiten besitzen.

Bei der Kontrastmittelzugabe ist ein nach außen offener Reservebehälter über eine Schlauchleitung mit dem ins Modellinnere geführten Druckmeßrohr verbunden, das durch die Wandung geführt plan auf der Außenhaut des Modells endet. Innerhalb der Verbindungsleitung ist eine Pumpe zwischengeschaltet, die das zähe Kontrastmittel (hier Kondensmilch) unter geringem Druck zum Ausfließen bringt. Der Druck baut sich zwar in der Umgebung der Bohrung schnell ab, verfälscht aber die



Strömungsbedingungen örtlich so, daß der sichtbar gemachte Stromfaden an seinem Anfang deutlich eine Anlaufstrecke erkennen läßt und erst dahinter die echte Strömung wiedergibt. Im vorliegenden Fall kann die Länge der Strecke aus der Fotoaufnahme leicht abgeschätzt werden, weil der Kontrastmittelausstoß an sämtlichen Bohrungen eines Spantes synchron erfolgte.

Für die Messungen wurden 5 Meßspanten ausgewählt. Da die Versuche spantweise durchgeführt wurden, erforderte die Untersuchung eines Strömungszustandes insgesamt 5 Meßfahrten.

Bei den Wollfadenversuchen wurden die Meßspanten mit Nägeln bestückt, an denen in einem definierten Abstand von der Außenhaut Wollfäden von ca. 20 mm Länge mit Miniaturösen befestigt waren. Diese Lagerung gewährleistete eine gute Drehfähigkeit der Fahnen. Bei den Versuchen waren sämtliche Meßspanten (insgesamt 6) mit den beschriebenen Strömungsindikatoren ausgerüstet, so daß der Versuch mit einer Fahrt abgeschlossen war.

Mit dieser Technik lassen sich Ablösungserscheinungen wohl kaum nachweisen, denn die montierten Nagelreihen bewirken einen örtlichen Druckanstieg, der die Grenzschichtströmung massiv beeinflußt. Die Beeinflussung kann mit der Wirkung eines „Grenzschichtzauns“ verglichen werden. Infolgedessen stellt das erzeugte Strömungsbild nur ein schwaches Abbild der wirklichen Verhältnisse dar.

Der Farbanstrichversuch hat von allen vorgestellten Methoden den geringsten Einfluß auf das untersuchte Strömungsfeld. Nachteilig ist jedoch, daß er nur ein zweidimensionales Abbild der Grenzschichtströmung in unmittelbarer Nähe der Außenhaut liefert. Grundsätzlich sind die ausgezogenen Farbspuren ein Maß für die örtlich wirkenden Wandschubspannungen, die in Richtung der Stromlinien verlaufen.

Ein weiterer Nachteil der Methode ist die Tatsache, daß die Konsistenz der verwendeten Farbe einen maßgeblichen Einfluß auf die Intensität der Verlaufsmuster hat. Da die Spezialfarbe vor jedem Versuch neu angerührt werden muß, ist ein Vergleich unterschiedlicher Versuche mit Unsicherheiten behaftet. Ferner beginnt die Farbe erst bei einer gewissen Mindestschubspannung zu verlaufen. Dadurch kann der falsche Eindruck entstehen, daß die Strömung partiell verschwindet, was physikalisch gar nicht möglich ist.

Voll ausgebildete Ablösung sichtbar zu machen ist mit dem Farbanstrich naturgemäß im Gegensatz zum Kontrastmittelversuch nicht möglich. Ob und welche Verlaufsmuster als Indiz für den Beginn einer Ablösung betrachtet werden können, muß zunächst offen gelassen werden.

Ergebnisse

In den Anlagen 26 bis 37 sind die Ergebnisse der Visualisierungsversuche gruppenweise den untersuchten Wassertiefen entsprechend zusammengefaßt worden. Ergänzend ist jeder Gruppe ein Bild zugeordnet, das die potentialtheoretisch berechnete Geschwindigkeitsverteilung auf der Körperoberfläche beinhaltet (Anlagen 29, 33 und 37). Die Geschwindigkeiten sind dimensionsbehaftet dargestellt, um z.B. einen direkten Vergleich mit den Mustern des Farbanstrichversuchs zu ermöglichen.



Die Erörterung der unterschiedlichen Versuchsergebnisse wird hier am Fallbeispiel der mittleren Wassertiefe $h = 5,0$ m durchgeführt (Anlagen 30 bis 33). Die beiden anderen Fälle liefern qualitativ ähnliche Strömungsbilder. Auf Detailunterschiede wird hier nicht näher eingegangen.

Kontrastmittelausstoß (Anl. 30)

Aus den Bildern ist gut zu erkennen, daß nach der Anlaufstrecke der zunächst kompakte Stromfaden mehr oder weniger stark zerfasert. Diese Erscheinungsform bleibt entweder erhalten und verschwindet in einem relativ kurzen Abstand hinter der Außstoßstelle, oder es bildet sich eine wolkenartige Formation, die sich auf einer relativ langen Strecke dahinter nebelartig auflöst. Die letztere Darstellung kann zweifellos als sichtbares Abbild der abgelösten Strömung gewertet werden.

Nach diesem Indiz zeigen sich in dem untersuchten Hinterschiffsbereich zwei Arten von Ablösung, nämlich „Flächenablösung“ an der äußeren Seitenwand oberhalb der äußeren Tunnelkante und im Tunnel im Bereich des Scheitels sowie „Kantenablösung“, die an beiden Tunnelkanten auftritt, wobei sich an der inneren Tunnelkante (Fortsetzung der Kimm aus dem parallelen Mittelschiff) ein verstärkter Ablösungseffekt zeigt, was mit der besonderen Strömungsausbildung in diesem Bereich zusammenhängt. Während die äußere Kante nur von der Tunnelströmung überquert wird, treffen sich an der inneren Kante Tunnelströmung und Strömung aus dem Bereich des Schiffsbodens und überkreuzen sich, wobei die Tunnelkomponente abwärts, die Bodenkomponente aufwärts gerichtet ist. Aufgrund der geometrischen Lage der Stromfäden entwickelt sich eine rotierende Strömung, die auf der abgebildeten Backbordseite des Schiffes in Fahrtrichtung gesehen einen Rechtsdrall besitzt. Diese rotierende Strömung bildet sich in der Propellerebene in der Form des in den Anlagen 17 bis 19 gezeigten Wirbels ab und erklärt dessen Drehrichtung.

Die Frage nach dem Entstehungsort der Ablösung läßt sich wegen der Beschränkung der Untersuchung auf nur wenige Spanten nicht mit Sicherheit beantworten. Die abnehmende Tendenz in Richtung Vorschiff läßt nur die Folgerung zu, daß dieser auf jeden Fall vor Bauspant Nr. 11 liegt.

Wolffadenversuch (Anl. 31)

Hier zeigt sich ein Strömungsbild, das - paradoxerweise - der Potentialströmung ähnlich ist (Anl. 33). In beiden Darstellungen wird die Überquerung der äußeren Tunnelkante durch die innere Tunnelströmung und der inneren Tunnelkante durch die Strömung aus dem Bereich des Schiffsbodens richtig wiedergegeben. Es fehlt jedoch die abwärtsgerichtete Komponente der Tunnelströmung an der inneren Kante. Diese ist demnach vermutlich als Ursache für das Entstehen des Kantenwirbels anzusehen.



Die oben erwähnte Ähnlichkeit beider Strömungsbilder beruht vermutlich auf dem künstlichen Druckanstieg, der durch die angebrachten Wollfaden-Fahnen erzeugt wird, wodurch das Phänomen der Ablösung offensichtlich vollständig unterdrückt wird.

Farbanstrichversuch (Anl. 32)

Im Gegensatz zum Wollfadenversuch ist hier das Phänomen der sich kreuzenden Strömungsanteile an der Tunnelinnenkante deutlich sichtbar. Auch an der Tunnelaußenkante ist sehr detailliert die sich örtlich allmählich verändernde Richtung der überquerenden Strömung zu erkennen. Ein besonderes Detail ist der Scheitelbereich des hinteren Tunnels, in dem kaum Farbverläufe auftreten. Hieraus muß man schließen, daß die vorher erzeugte Rotationsströmung hier eine sehr starke axiale Verzögerung erfährt, sich also bildhaft gesprochen sozusagen auf der Stelle dreht.

Ob das örtliche Auftreten außergewöhnlich kleiner Axialgeschwindigkeiten in der Umgebung „normaler Strömungsverhältnisse“ ein Indiz für beginnende Ablösung ist, soll an dieser Stelle offengelassen werden.

Es ist noch anzumerken, daß Farbverlaufsspuren, die – wie feststellbar – auf den Tunnelkanten exakt der Form dieser Knicklinien folgen (besonders gut zu erkennen in Anlage 36), möglicherweise durch besondere Effekte der örtlichen Oberflächenspannung hervorgerufen werden, also vermutlich nicht der untersuchten Strömung selbst zuzuordnen sind.



6. Vergleich der verwendeten Berechnungsverfahren

Um den Einfluß der verformten, freien Wasseroberfläche zu zeigen, sind die Berechnungsergebnisse der Programme **SHALLO** und **POTFLOW** für die Drücke an der Außenhaut und für die Geschwindigkeiten in der Propellerebene gegenübergestellt worden (Anlagen 38 bis 43). Generell liefert SHALLO höhere Unterdrücke am Schiffsboden und an der äußeren Tunnelkante, sowie einen höheren Druckanstieg am Achtersteven als dem hinteren Staupunkt. In der Propellerebene zeigen sich höhere Geschwindigkeiten. Ursache der festgestellten Unterschiede ist sicherlich zu einem Teil die vernachlässigte seitliche Fahrwasserbegrenzung bei POTFLOW, der überwiegende Anteil dürfte aus der Berücksichtigung der Oberflächenverformung bei SHALLO stammen. Bemerkenswert ist aber die qualitative Ähnlichkeit der Ergebnisse, besonders in Anbetracht der Tatsache, daß die Berechnungszeiten von SHALLO, verglichen mit POTFLOW, enorm hoch sind (s. auch Abschn. 4).



7. Symbolverzeichnis

B	Schiffsbreite
C_P	Druckbeiwert
C_R	Restwiderstandsbeiwert
C_{vol}	Volumenkoeffizient
F_n	Froudesche Zahl
F_{nh}	Froudesche Tiefenzahl
g	Gravitationskonstante
h	Wassertiefe
h_F	Flottwasserhöhe
L	Schiffslänge
L_{BP}	Länge zwischen den Loten
L_{OA}	Länge über Alles
L_{WL}	Länge in der Wasserlinie
R_n	Reynoldszahl
S	benetzte Oberfläche
T	Tiefgang
$u_O = -V_S$	Anströmgeschwindigkeit
$V\{u, v, w\}$	Vektor der örtlichen Geschwindigkeit
V_S	Geschwindigkeit des Schiffes
$\nabla = Vol$	Verdrängung
w_n	nominelle Nachstromziffer
X, Y, Z	karthesische Koordinaten
Z_V	Absenkung
Δp	dynamischer Druckanteil in der Flüssigkeit
ν	kinematische Zähigkeit des Wassers
δ	Grenzschichtdicke
ζ	Oberflächenverformung
λ	Maßstabszahl
ρ	Dichte des Wassers
ϕ	Körnungsmaß (Turbulenzерzeuger)
Θ	Trimmwinkel

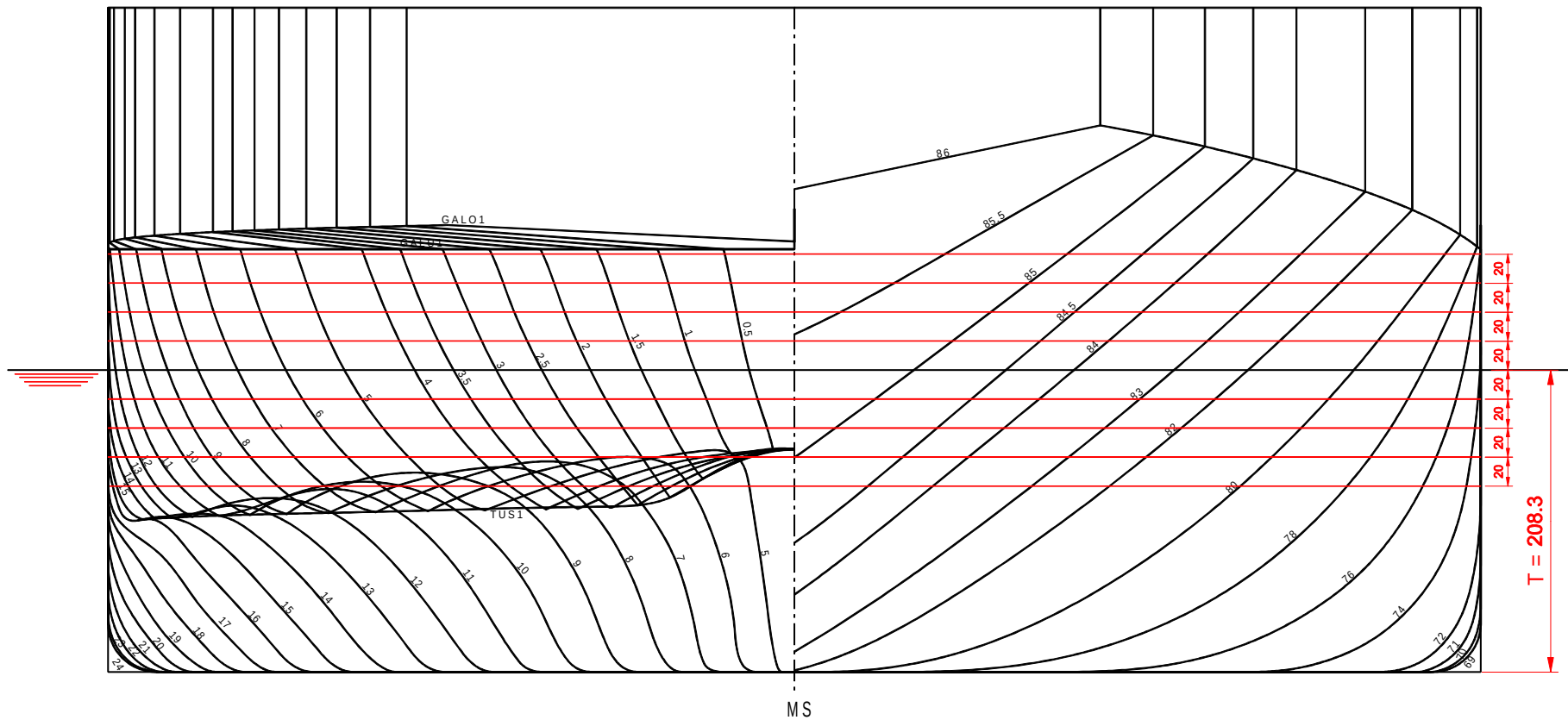
8. Literaturverzeichnis

- [1] Laute, W.: Untersuchungen über Druck- und Strömungsverlauf an einem Schiffsmodell. Jahrbuch der STG, 1933
- [2] Hoffmann, H.P.: Untersuchung der 3-dimensionalen, turbulenten Grenzschicht an einem Schiffsdoppelmodell im Windkanal. Institut für Schiffbau, Universität Hamburg, Bericht Nr. 343, 1976
- [3] Wieghardt, K., Kux, J.: Nomineller Nachstrom auf Grund von Windkanalversuchen. Jahrbuch der STG, 74. Bd., 1980
- [4] Kux, J.: Berechnungsverfahren der Schiffshydrodynamik - Vergleich der Ergebnisse mit Messungen. Jahrbuch der STG, 83. Bd., 1989
- [5] Lochte-Holtgreven, H., Müller, E.: Ablösungen an Hinterschiffen, Maßstabs- einfluß sowie Vergleich nicht begrenzter und begrenzter Wassertiefe bei großen, völligen Schiffen. VBD-Bericht Nr. 1239, Duisburg, 1989
- [6] Kux, J., Müller, E.: Einfluß des flachen Wassers auf die Schiffsumströmung am Beispiel des Series-60-Schiffes, $C_B = 0,6$. Jahrbuch der STG, 86. Bd., 1992
- [7] Pagel, W., Rieck, K., Grollius, W., Gronarz, A.: Experimentelle und theoretisch-numerische Strömungsuntersuchungen an Binnenschiffen. VBD-Bericht Nr. 1366, Duisburg, 1995
- [8] List, S., Gronarz, A.: Modellversuche zur Validierung von Berechnungsverfahren für begrenzte Wassertiefe. VBD-Bericht Nr. 1445, Duisburg, Januar 1997
- [9] Laudan, J., Marzi, J.: Weiterentwicklung verfügbarer Rechenverfahren zur Anwendung in begrenztem Fahrwasser. HSVA-Bericht Nr. 1615, Hamburg, 1996
- [10] Graff, W.: Untersuchungen über den Ablösungswiderstand völliger Schiffsformen. Jahrbuch der STG, 35. Bd., 1934
- [11] Grollius, W.: Untersuchung des Strömungsfeldes analytischer Schiffsformen auf flachem Wasser im Geschwindigkeitsbereich geringer Wellenbildung. Schiff u. Hafen, Heft 9, 1975, 27. Jahrg.
- [12] Lunde, J. K.: On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, September 1951, pp. 25 - 85



-
- [13] Grollius, W.: Flachwassereinfluß auf Widerstand, Leistung und Fahrverhalten von Small Waterplane Area Twin Hulls (SWATH). VBD-Bericht Nr. 1378, Duisburg, 1995
 - [14] Grollius, W., Lochte-Holtgreven, H., Müller, E., Guesnet, T.: Results of Modell Tests with Fast Unconventional Ships in Shallow Water. Proceedings of the Third International Conference on Fast Sea Transportation, Lübeck-Travemünde, September 1995
 - [15] Schlichting, O.: Schiffswiderstand auf beschränkter Wassertiefe. Jahrbuch der STG, 35. Bd., 1934
 - [16] Heuser, H.: Entwurf von Vor- und Hinterschiffen für Großmotorschiffe und Optimierung von Formgebung, Vortrieb und Steuern für Binnen-Großmotorschiffe. VBD-Bericht Nr. 1260, Duisburg, 1980
 - [17] Jensen, G.: Berechnung der stationären Potentialströmung um ein Schiff unter Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingung an der Wasseroberfläche. Institut für Schiffbau, Universität Hamburg, Bericht Nr. 484, Juli 1988
 - [18] Hess, J.L., Smith, A.M.O.: Calculation of Non Lifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies. Douglas Aircraft Co., Inc., Aircraft Division, Report No. E.S. 40622, 1962

SPANTENRISS (Bauspanten) Modell M 1548



$\lambda = 12.00$

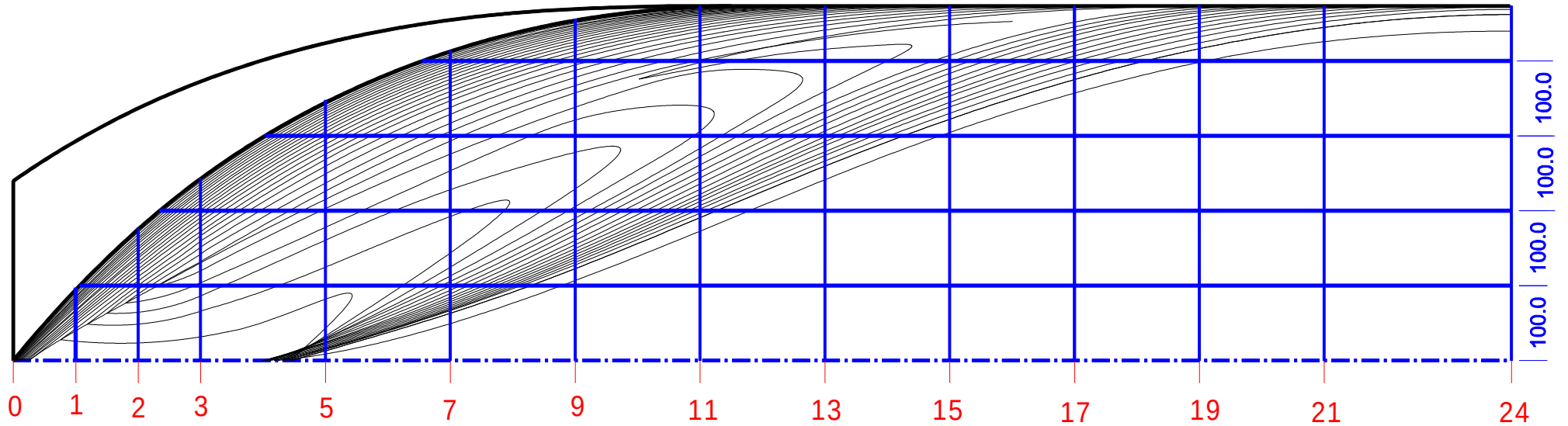
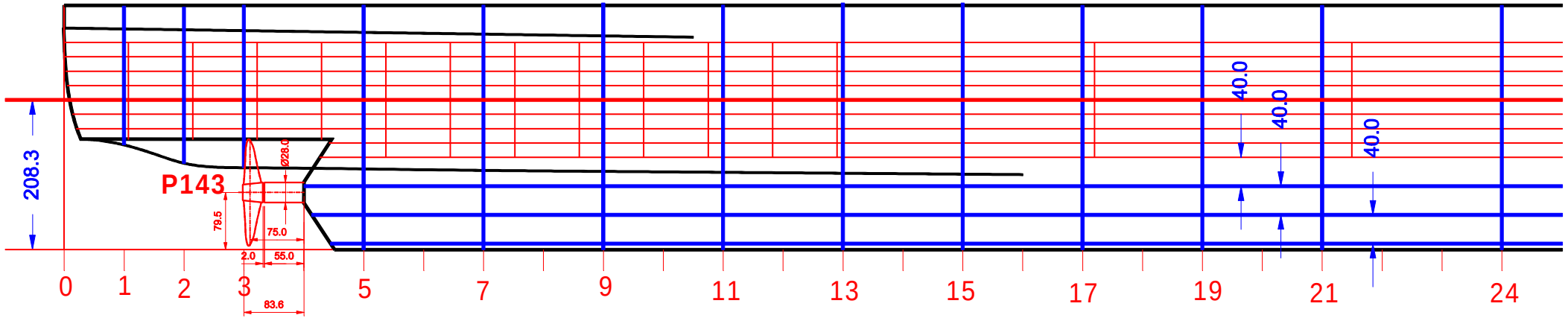
Spt.-Abst. = 83.33 mm

$L_{pp} = 7106.7 \text{ mm}$

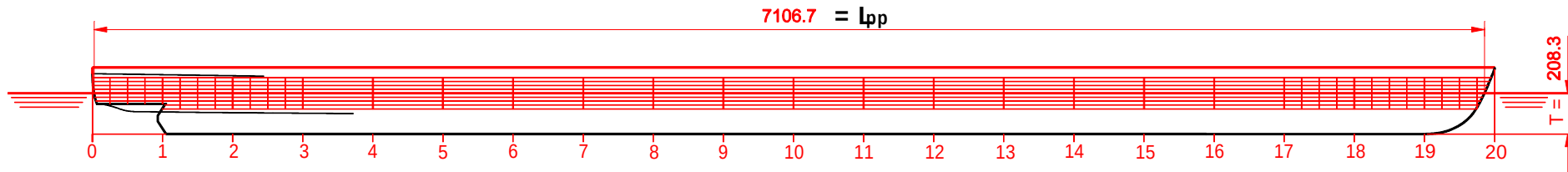
$B = 946.67 \text{ mm}$

ANRISSPLAN FÜR FOTONETZE, MODELL M 1548

L_{pp} = 7106.7mm
Spt.-Abst. = 83.3mm
T = 208.3mm



ANRISSPLAN FÜR DAS FOTONETZ M 1548



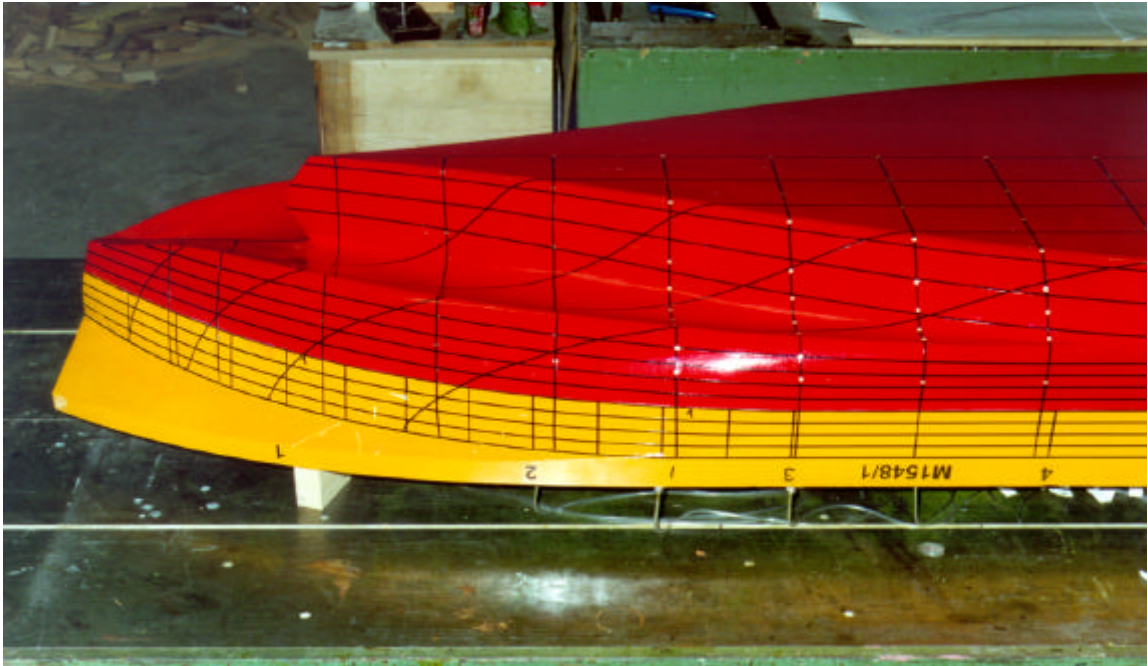
L_{0-20}	=	7106.7mm	Turbulenzerzeuger
Spt.-Abst.	=	358.3mm	Art : Sandstreifen
T	=	208.3mm	Lage : Spt. <u>17 und 19</u>

Höhenabstand = 8 x 20 mm

Längenabstand= 358.3mm

Längenabstand= 12 x 89.6 mm am Heck

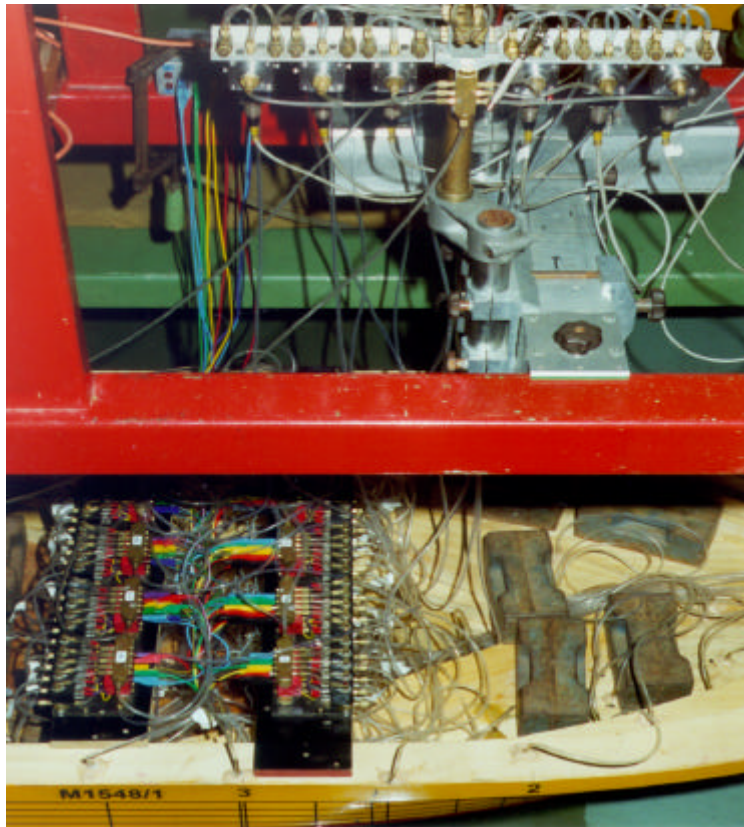
Längenabstand= 12 x 89.6 mm am Bug



Motorgüterschiff M 1548, Hinterschiff mit Druckanbohrungen



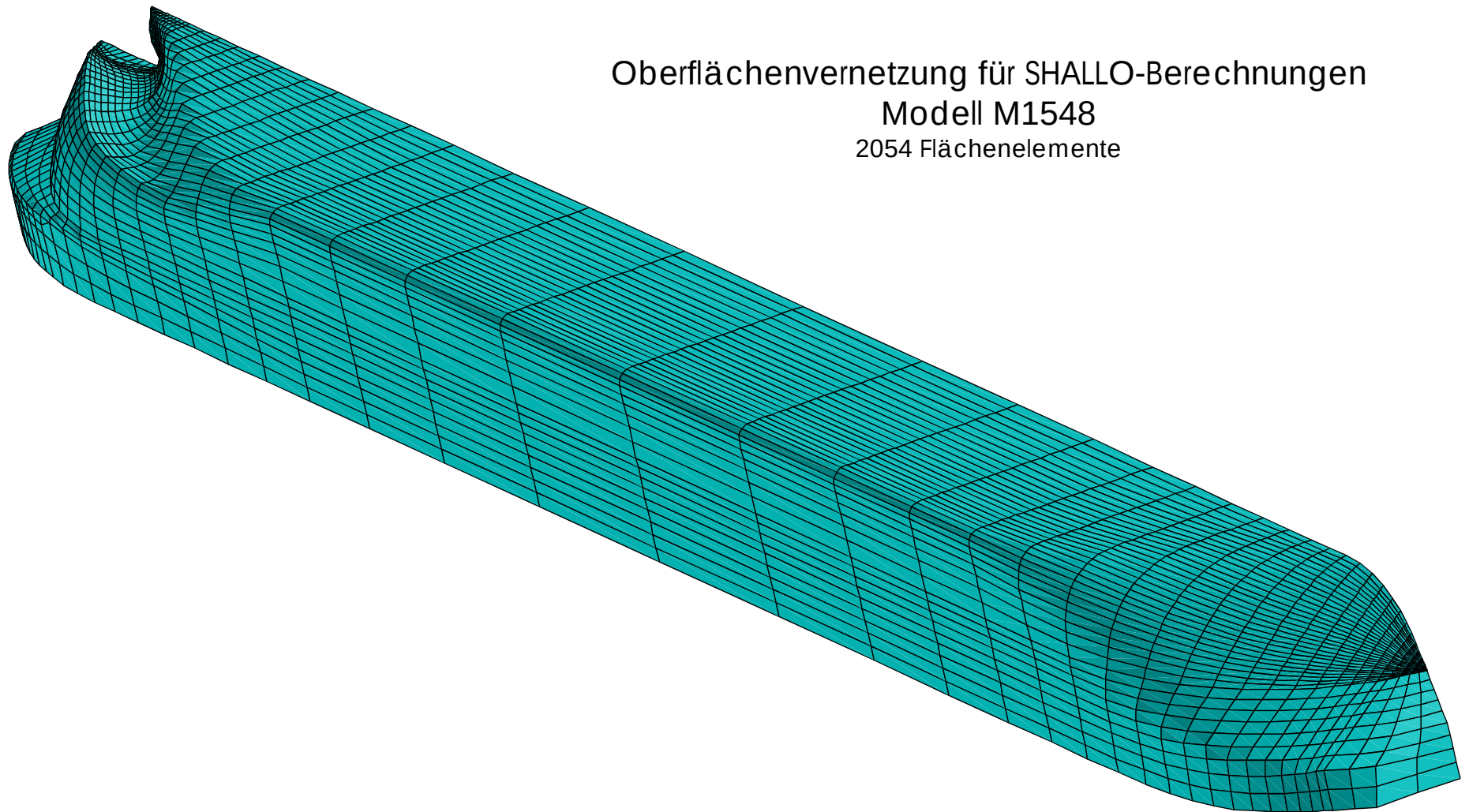
Ansicht von hinten



Motorgüterschiff M 1548, Meßeinrichtung für Drücke an der Außenhaut
oben : Batterie aus Differenzdruckdosen , montiert auf der Schleppwagenbühne
unten : Batterie aus elektrischen Meßstellen - Umschaltventilen



Ortsfeste Anordnung der Wellensonden im Meßquerschnitt des Schlepptanks



Oberflächenvernetzung für SHALLO-Berechnungen
Modell M1548
2054 Flächenelemente

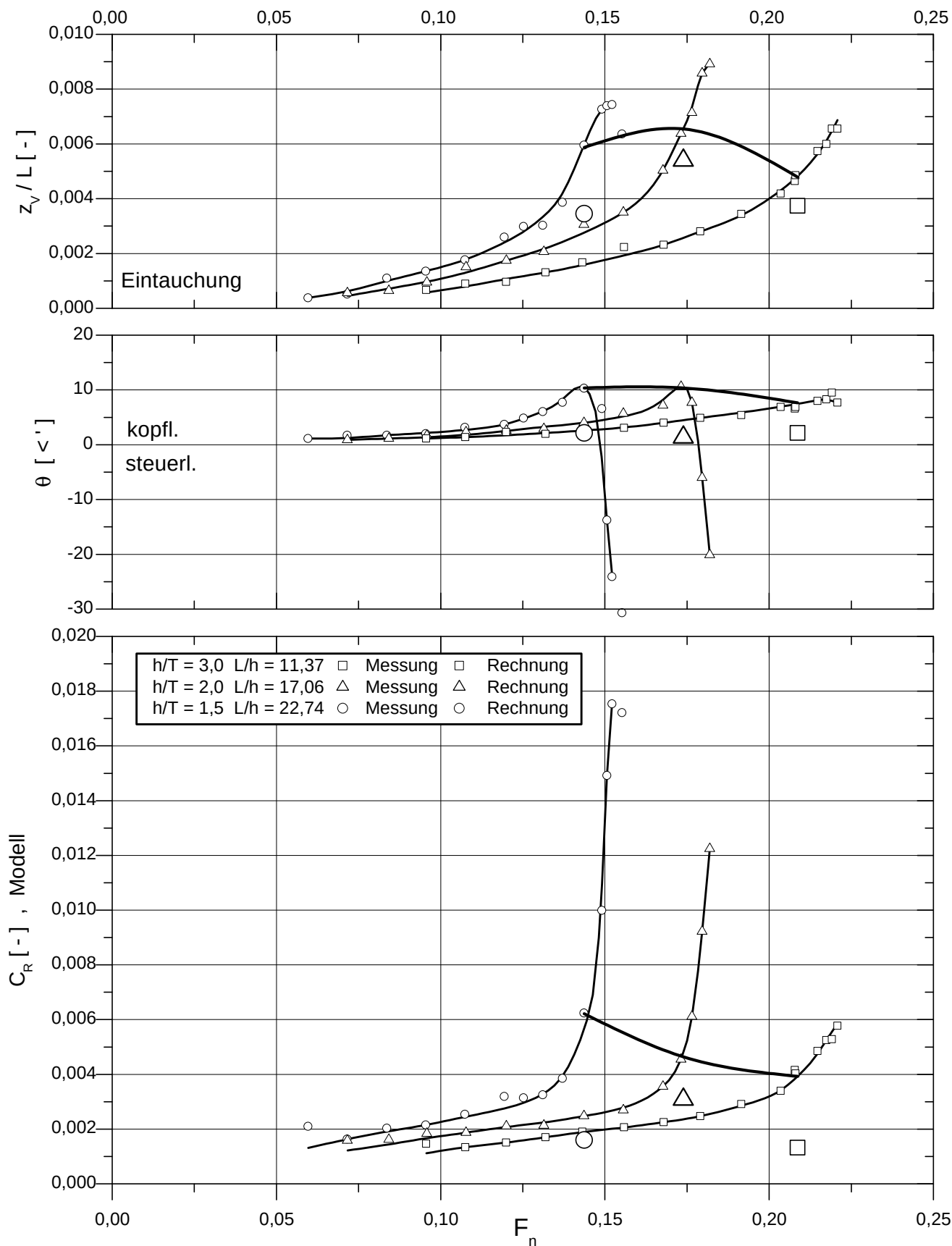
Widerstandsmessungen
Funktion der Fn-Zahl
Motorgüterschiff M 1548

$L_{OA} = 86,0 \text{ m}$

$B = 11,36 \text{ m}$

$T = 2,5 \text{ m}$

eingetragen : SHALLO-Ergebnisse



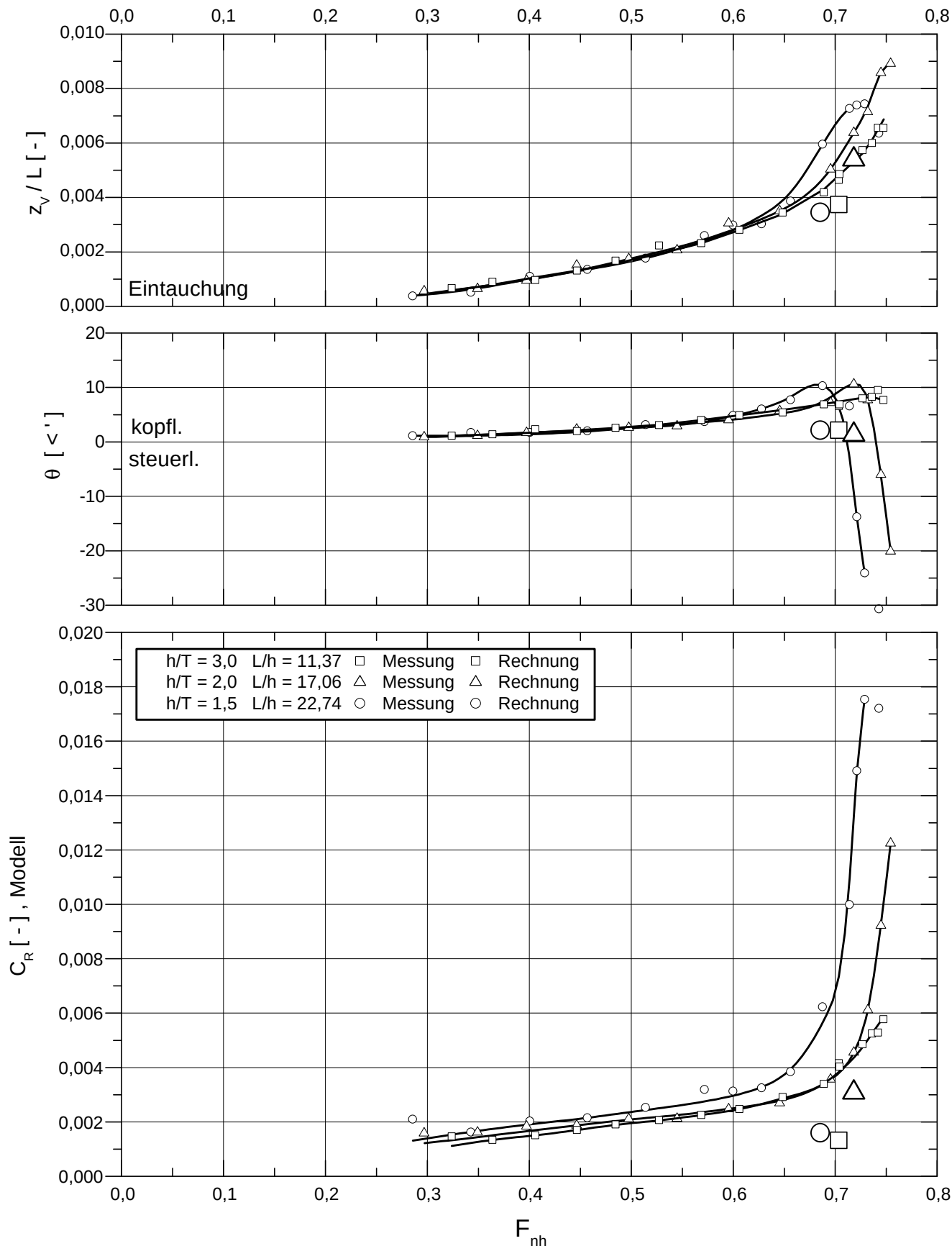
Widerstandsmessungen
Funktion der FnH-Zahl
Motorgüterschiff M 1548

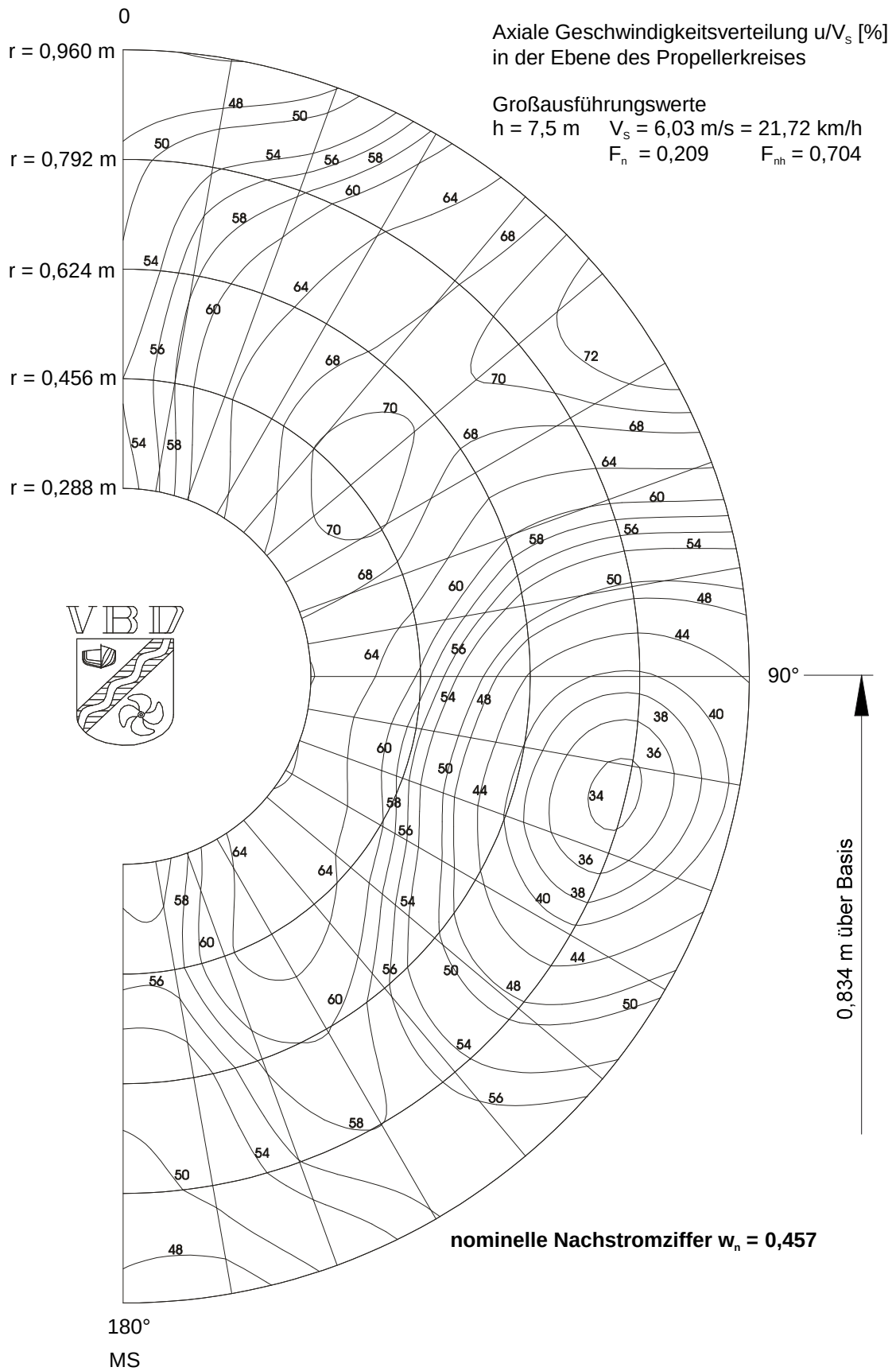
$L_{OA} = 86,0 \text{ m}$

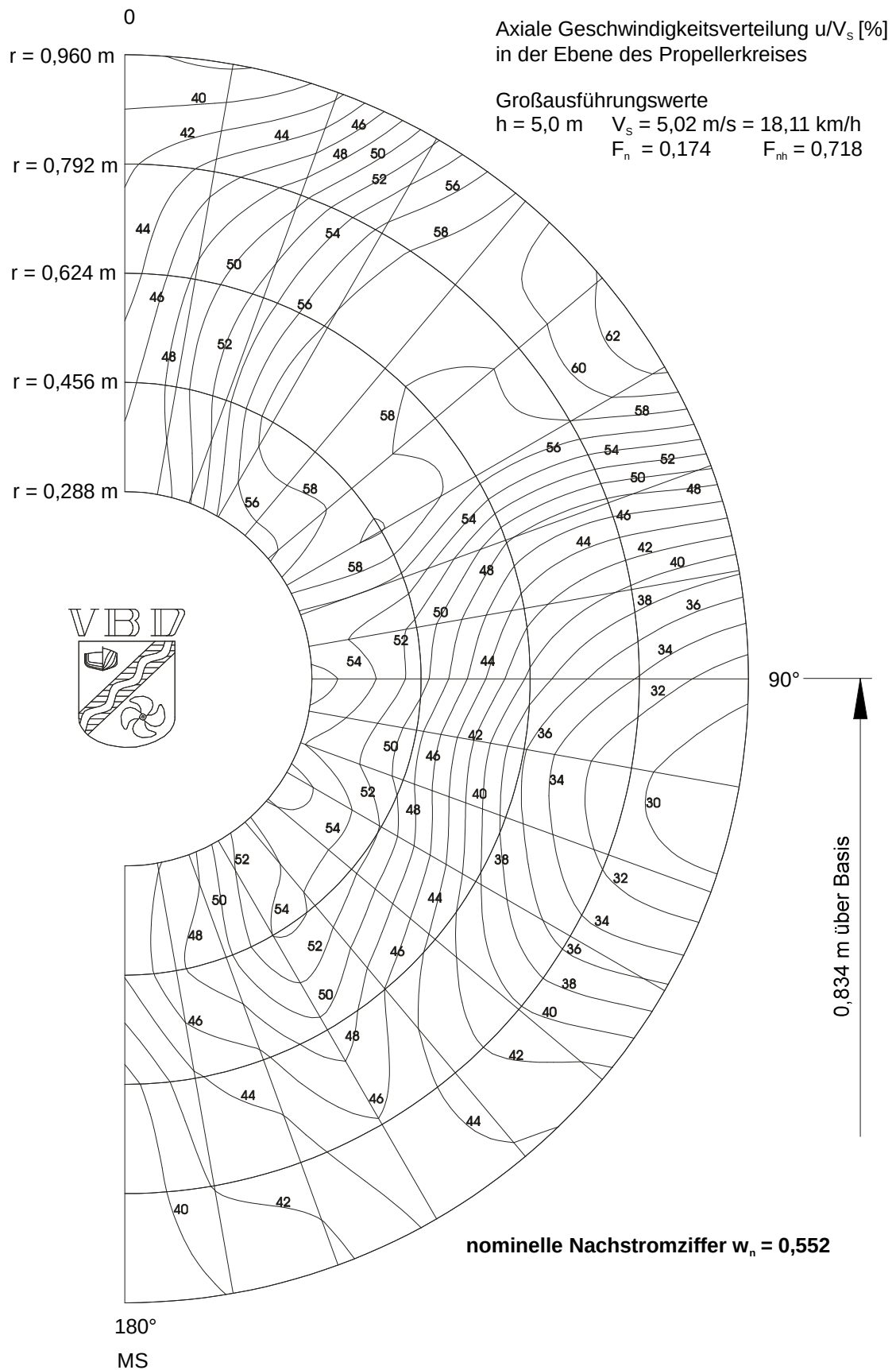
$B = 11,36 \text{ m}$

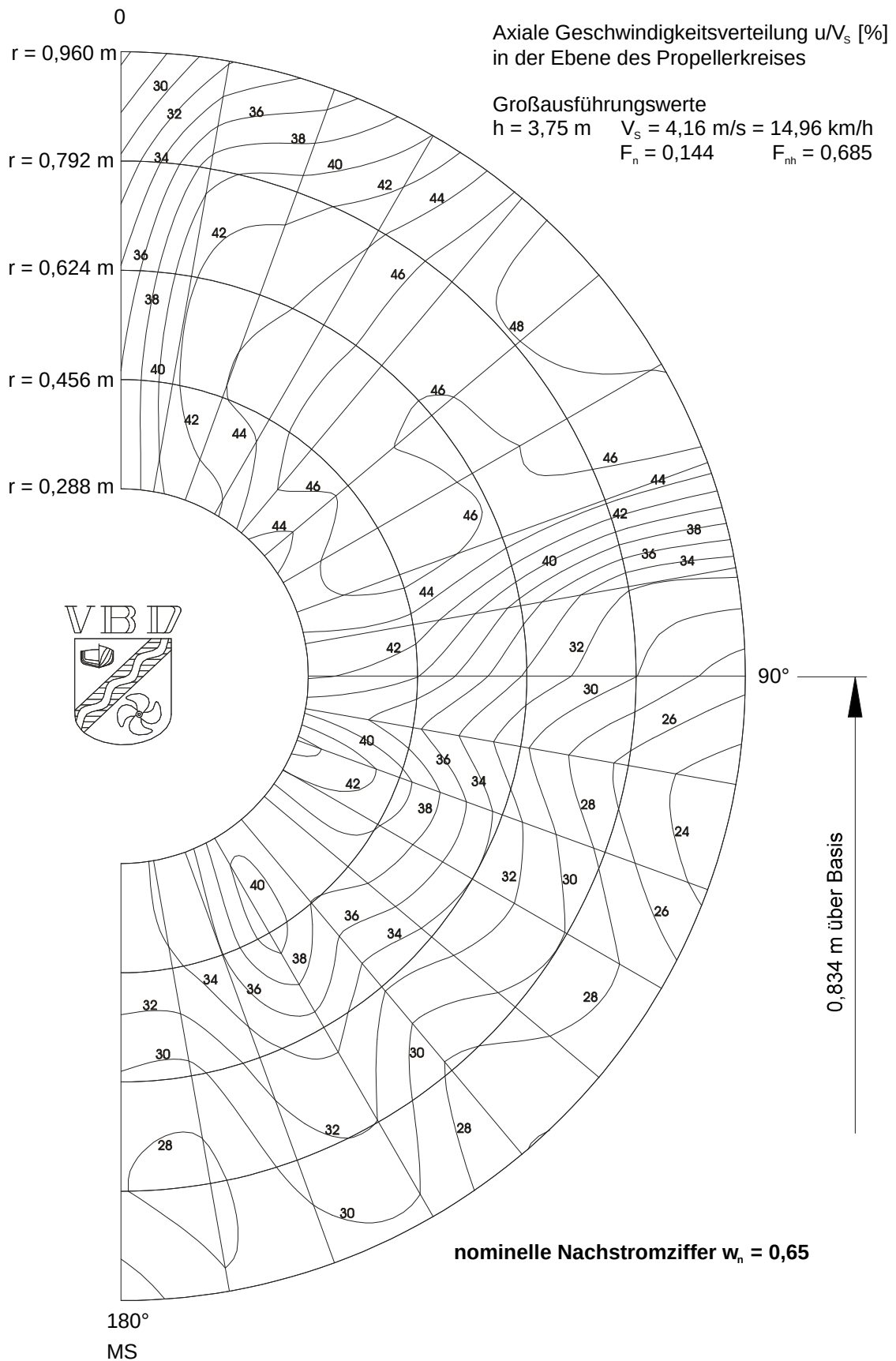
$T = 2,5 \text{ m}$

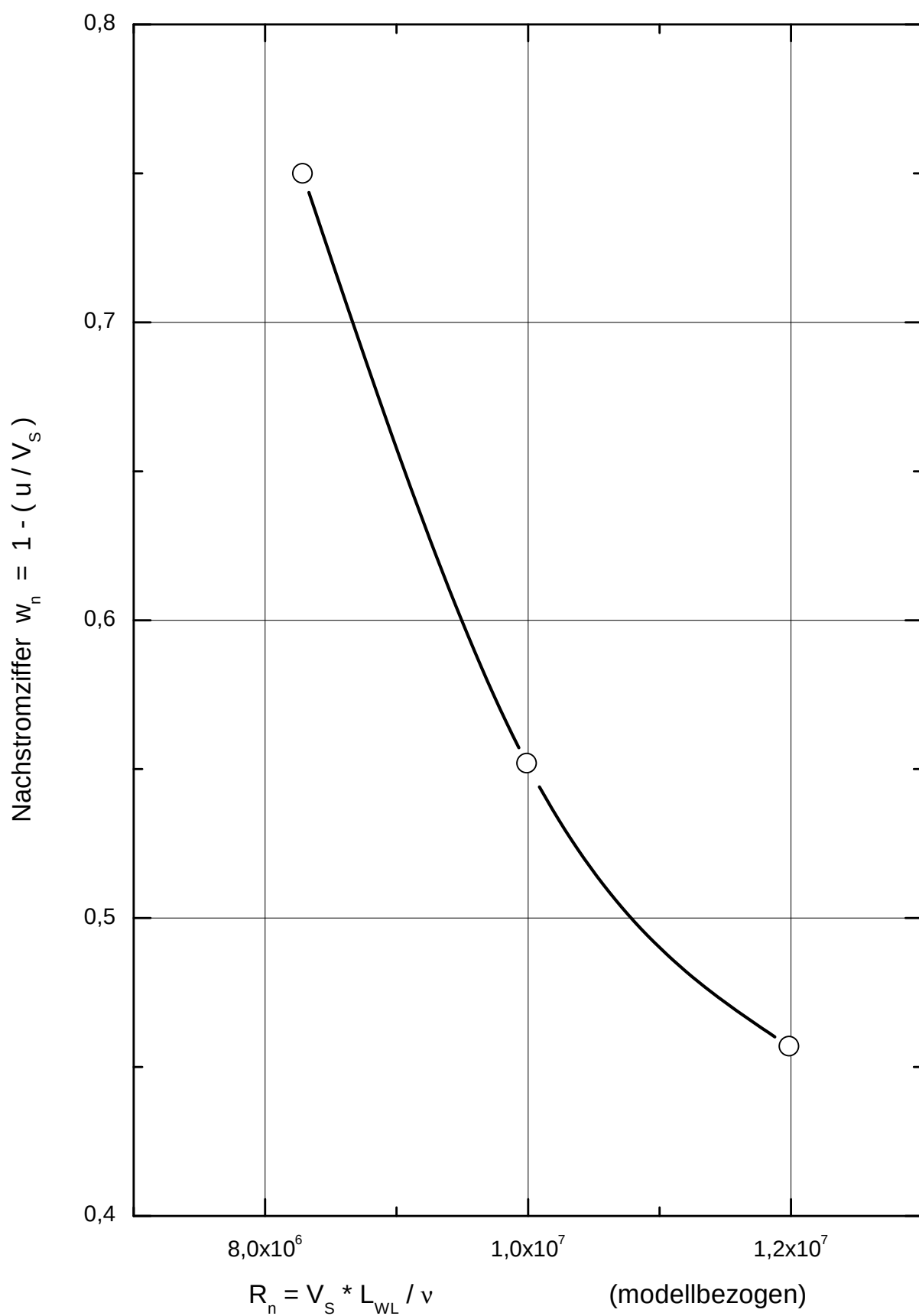
eingetragen : SHALLO-Ergebnisse





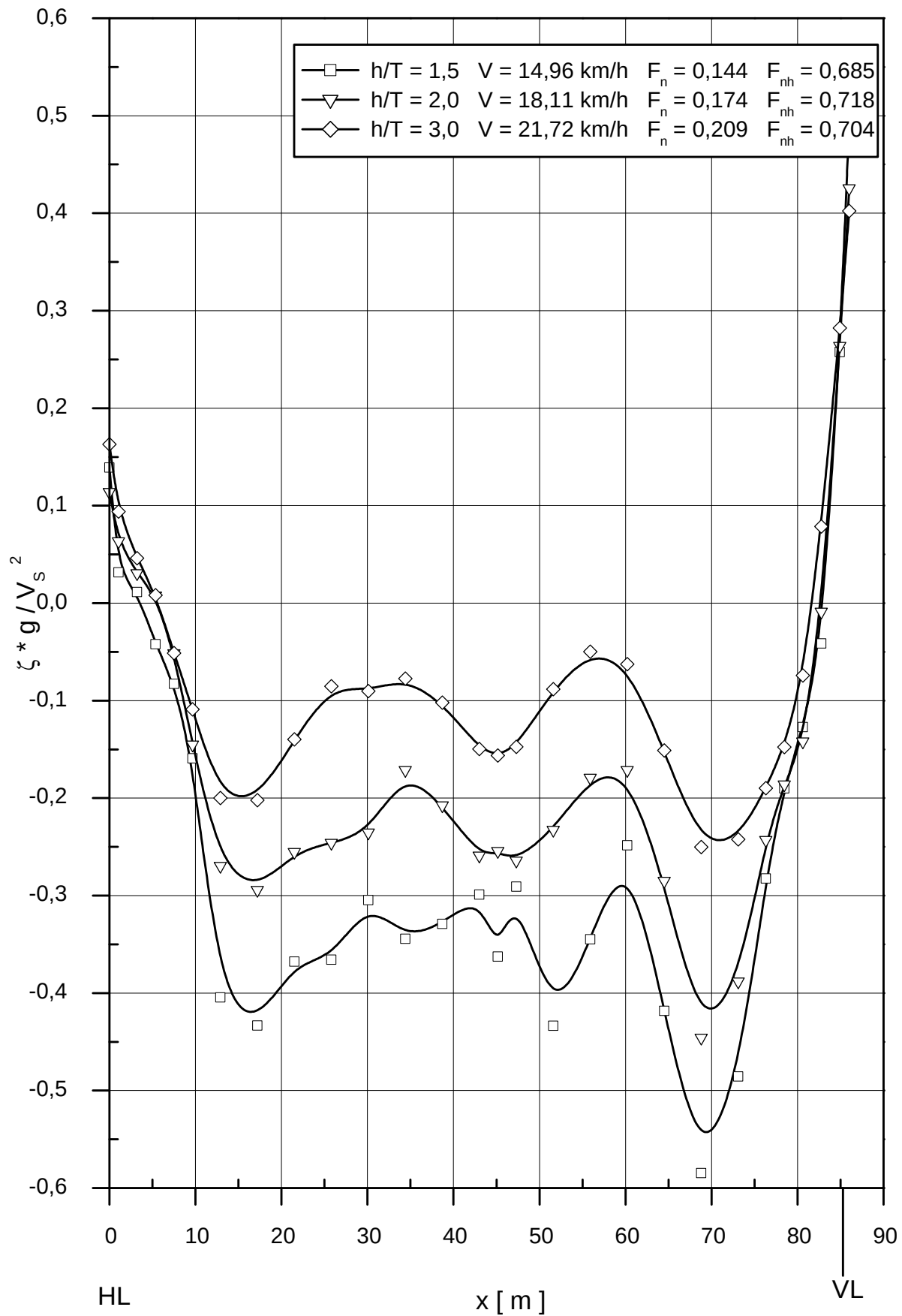


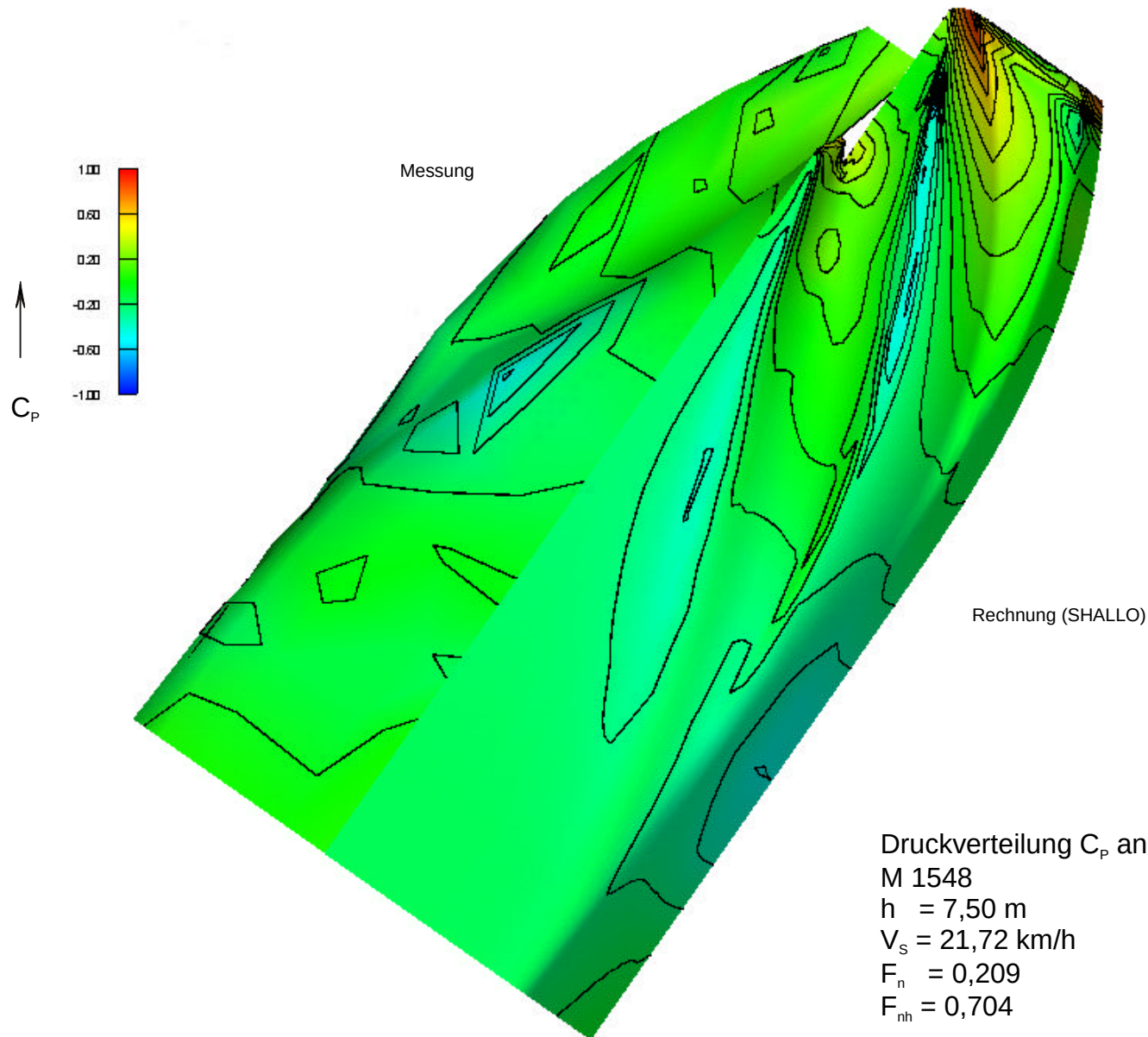


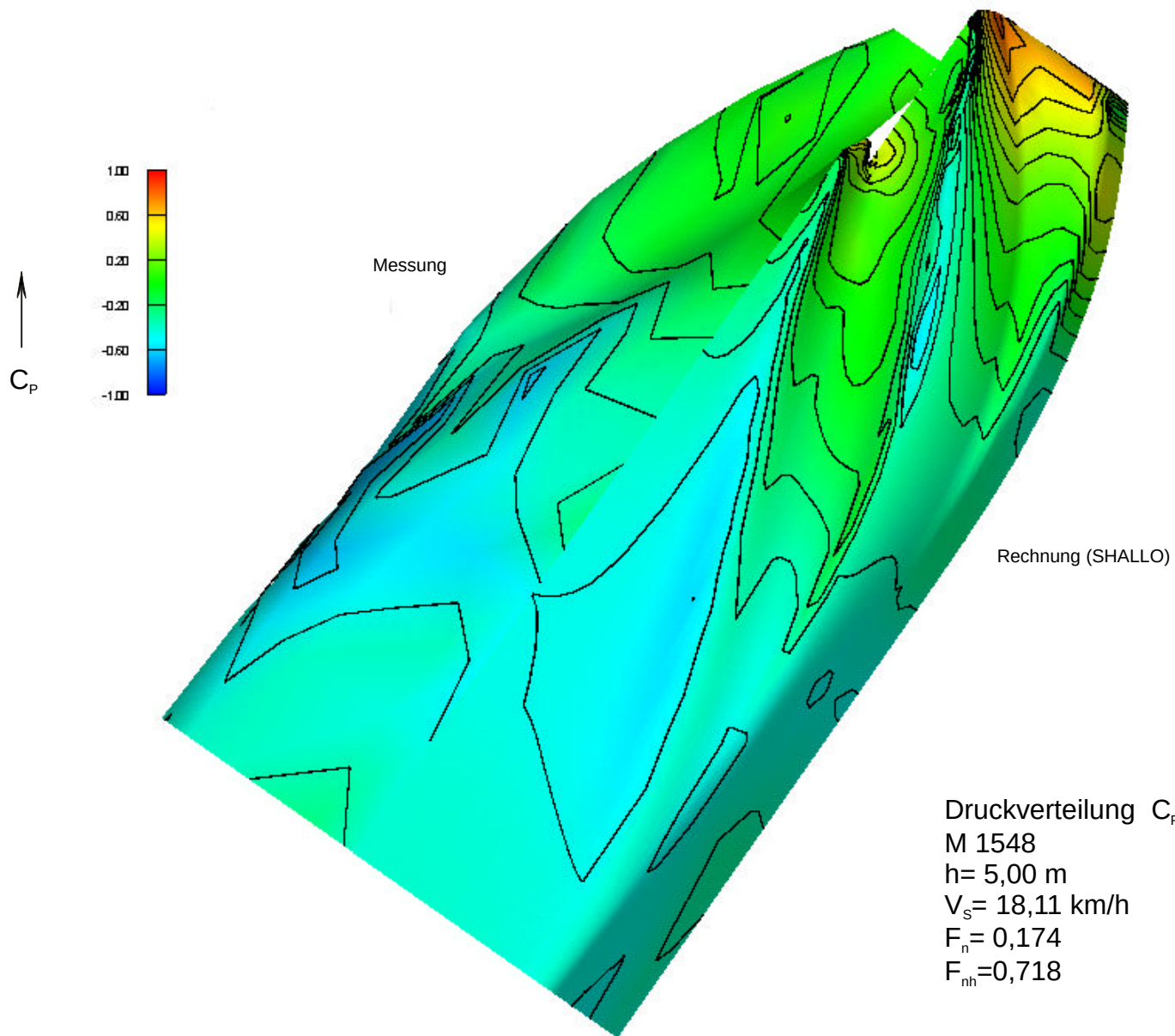


Nomineller Nachstrom als Funktion der R_n - Zahl

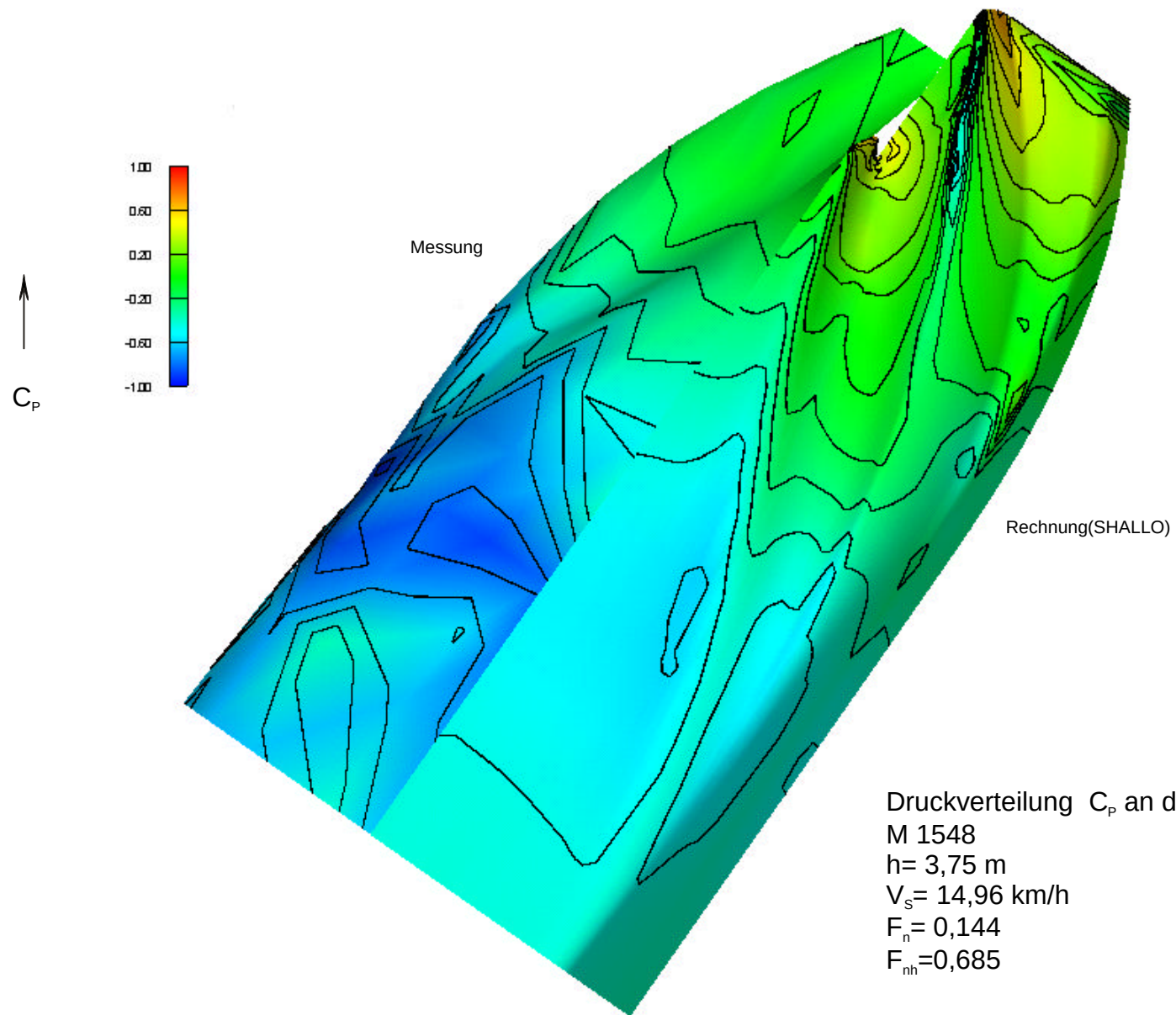
Dimensionslose Wellenhöhe an der Außenhaut Messung







Druckverteilung C_p an der Außenhaut
M 1548
 $h = 5,00$ m
 $V_s = 18,11$ km/h
 $F_n = 0,174$
 $F_{nh} = 0,718$



Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten
in der Propellerebene

u/V_s (Farbgebung) - $v/V_s, w/V_s$ (Vektoren)

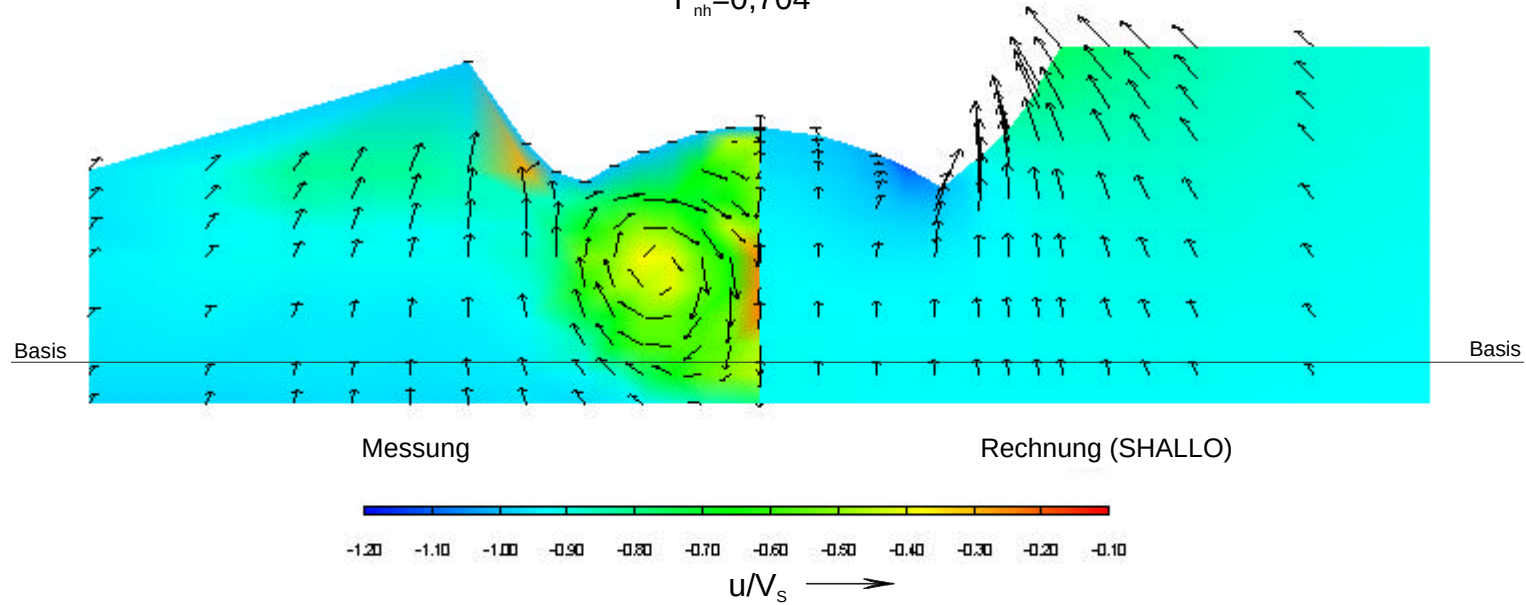
M 1548

$h=7,50$ m

$V_s=21,72$ km/h

$F_n=0,209$

$F_{nh}=0,704$



Flottwasser $h_F=5,0$ m

Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten
in der Propellerebene

u/V_s (Farbgebung) - $v/V_s, w/V_s$ (Vektoren)

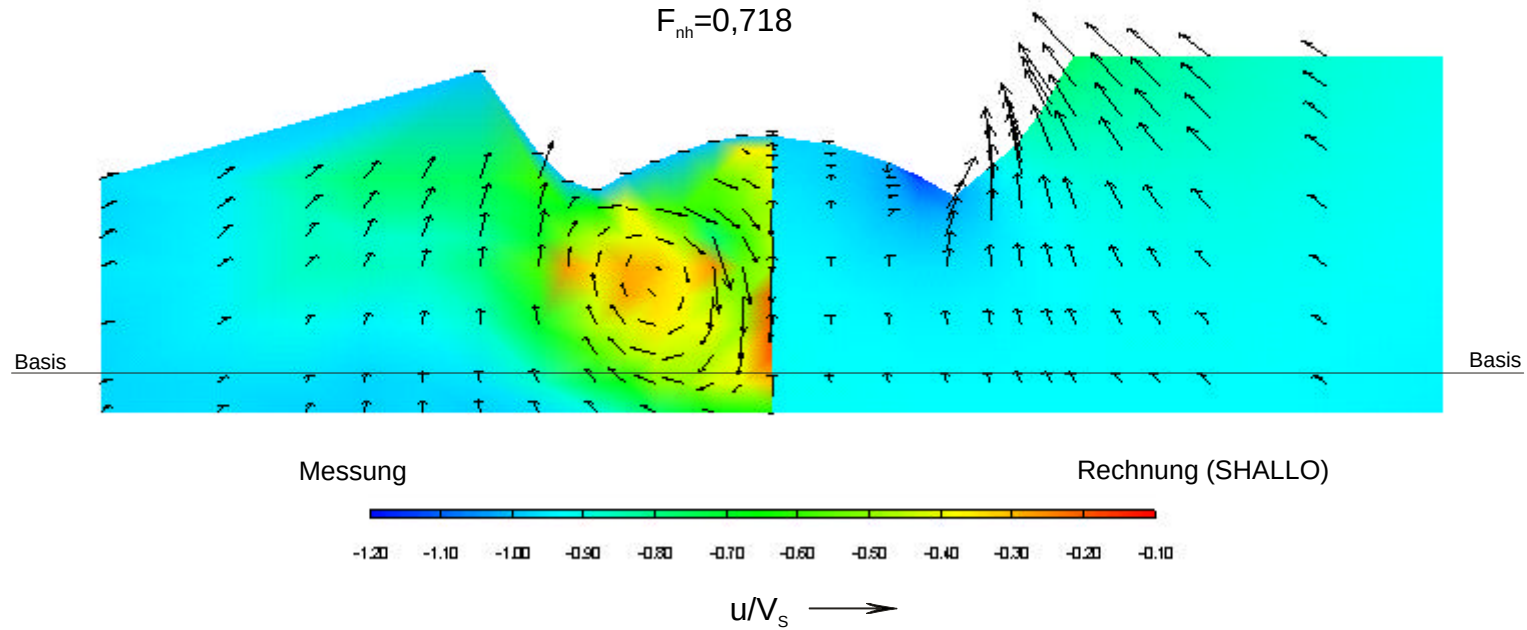
M 1548

$h=5,00$ m

$V_s=18,11$ km/h

$F_n=0,174$

$F_{nh}=0,718$



Flottwasser $h_F=2,5$ m

Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten
in der Propellerebene

u/V_s (Farbgebung) - $v/V_s, w/V_s$ (Vektoren)

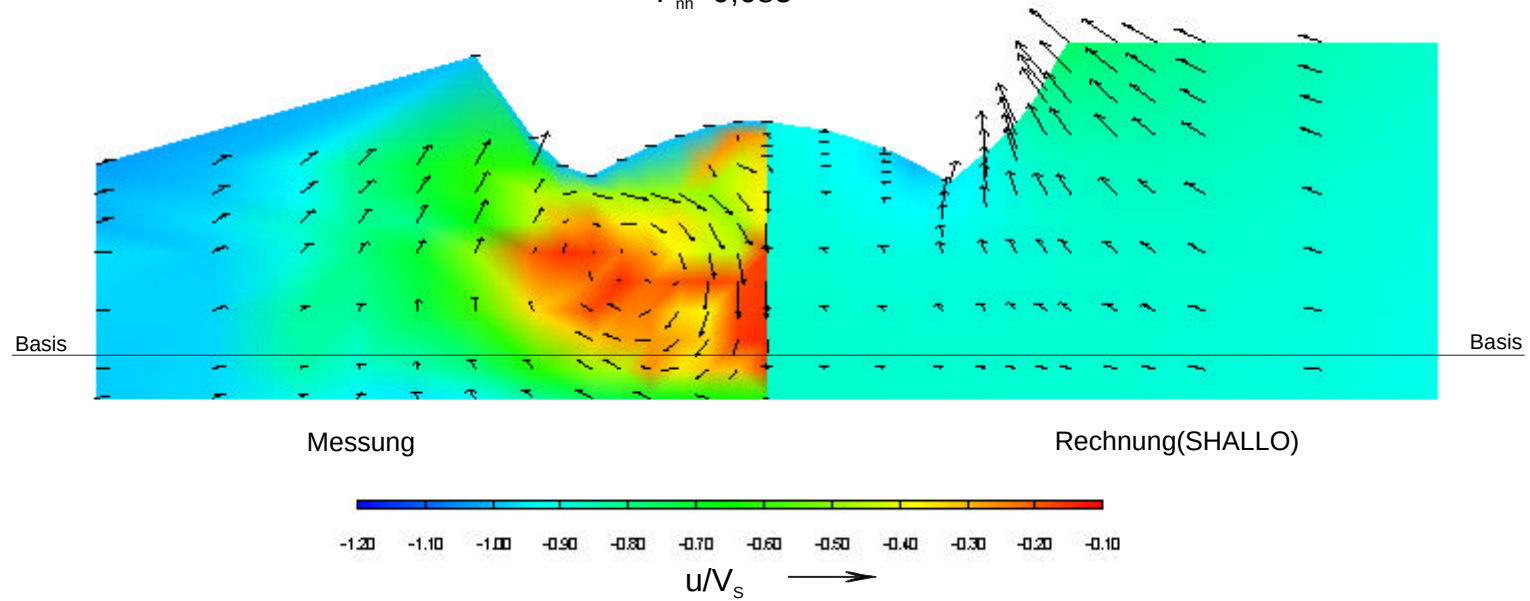
M 1548

$h=3,75$ m

$V_s=14,96$ km/h

$F_n=0,144$

$F_{nh}=0,685$



Flottwasser $h_F=1,25$ m

Verformung der Wasseroberfläche

M 1548

$h=7,50$ m

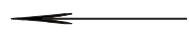
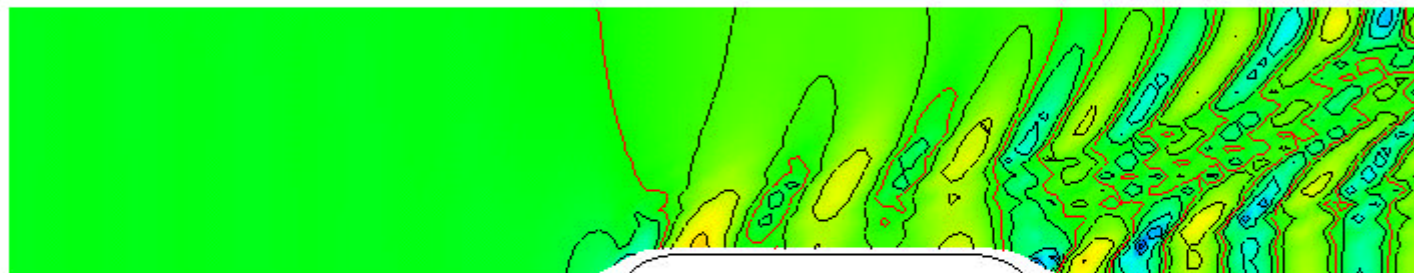
$V_s=21,72$ km/h

$F_n=0,209$

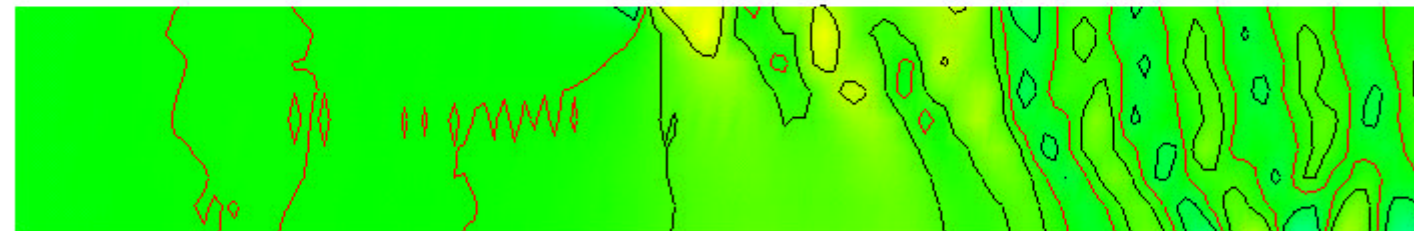
$F_{nh}=0,704$

Kanalwand

Rechnung(SHALLO)



Fahrtrichtung



Kanalwand

Messung



$$(\zeta * g) / V_s^2 \longrightarrow$$

Verformung der Wasseroberfläche

M 1548

$h=5,00$ m

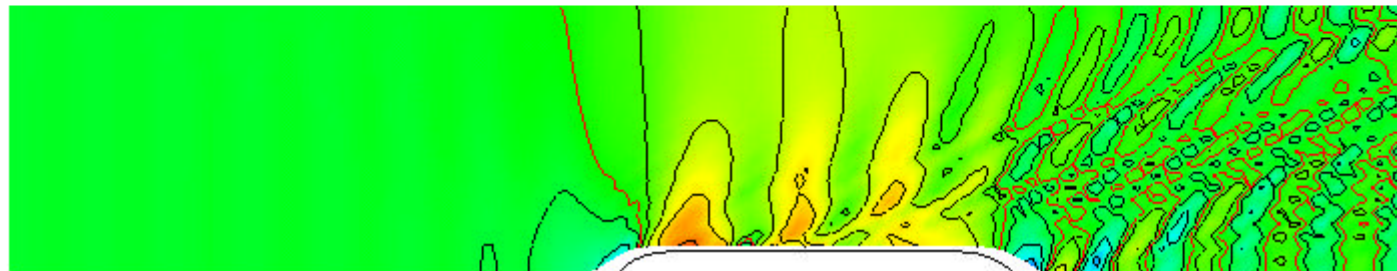
$V_s=18,11$ km/h

$F_n=0,174$

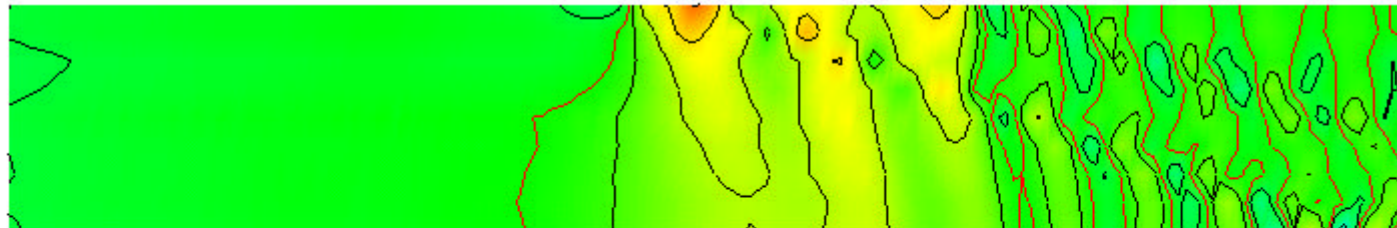
$F_{nh}=0,718$

Kanalwand

Rechnung(SHALLO)

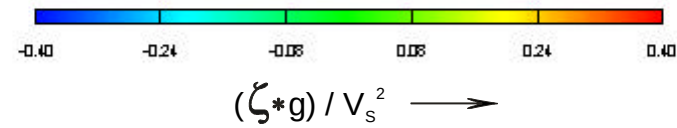


Fahrtrichtung



Kanalwand

Messung



Verformung der Wasseroberfläche

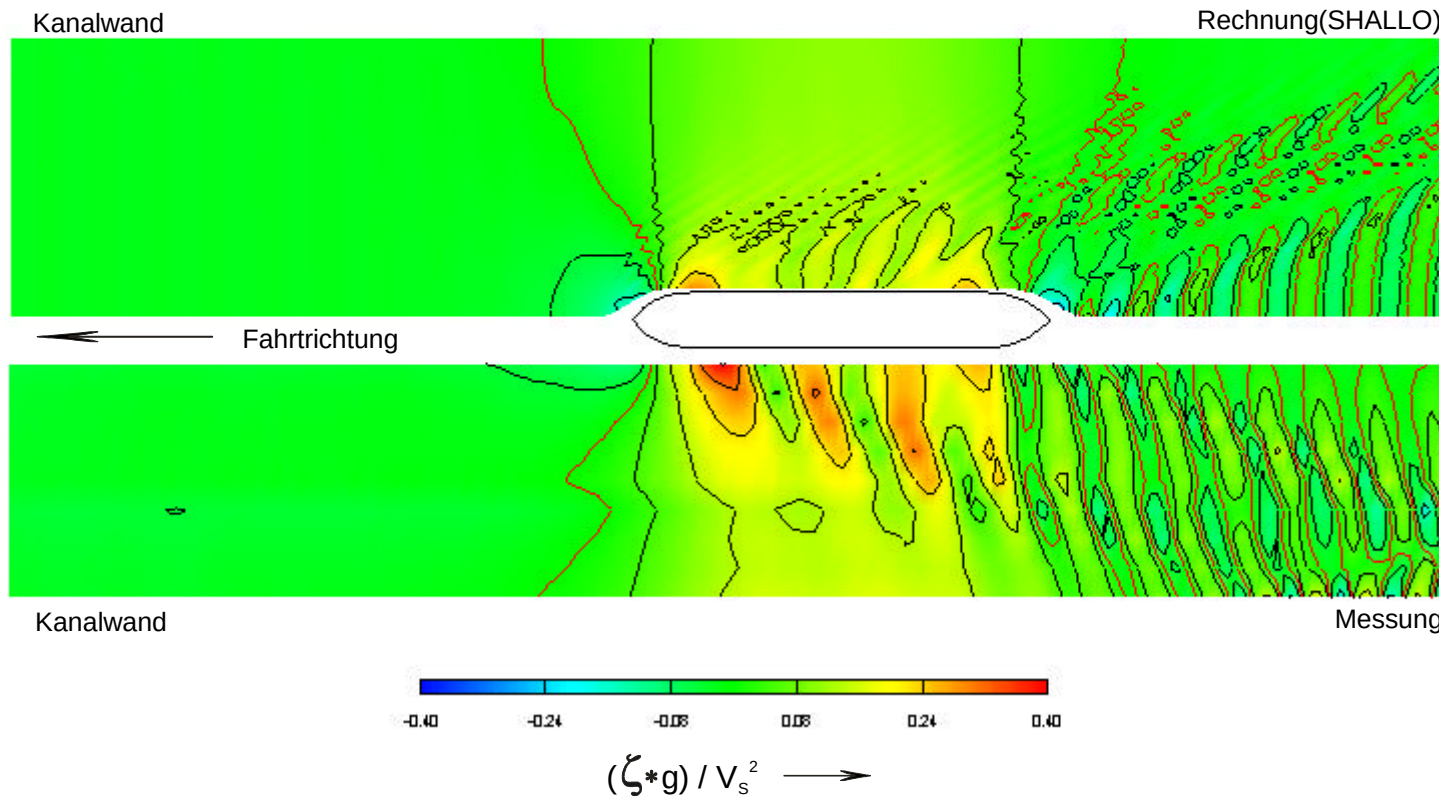
M 1548

$h=3,75$ m

$V_s=14,96$ km/h

$F_n=0,144$

$F_{nh}=0,685$



Drücke am Gewässerboden

M 1548

$h=7,50\text{ m}$

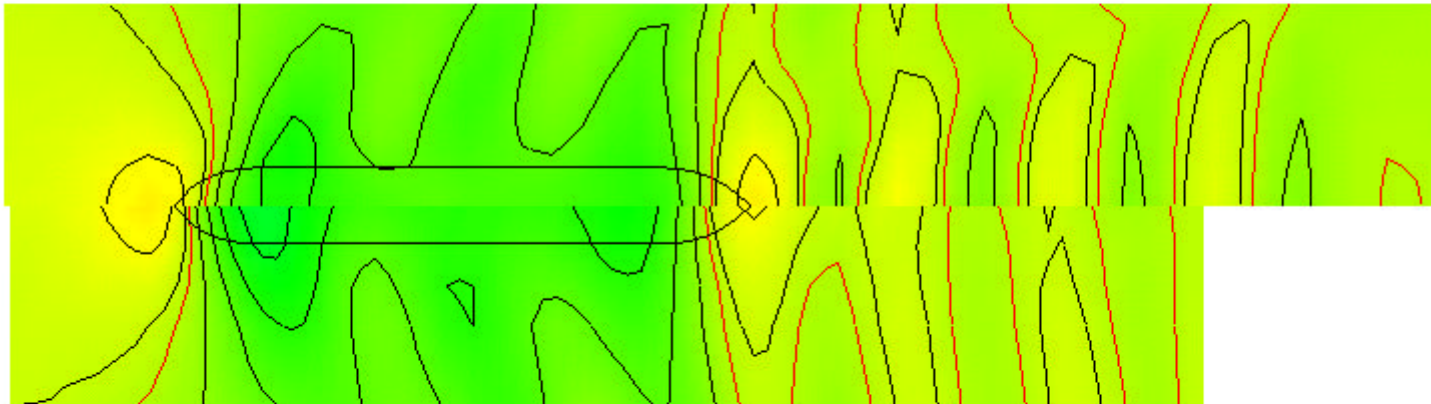
$V_s=21,72\text{ km/h}$

$F_n=0,209$

$F_{nh}=0,704$

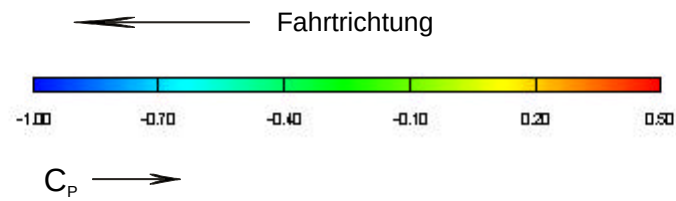
Kanalwand

Rechnung(SHALLO)



Kanalwand

Messung



Drücke am Gewässerboden

M 1548

$h=5,00\text{ m}$

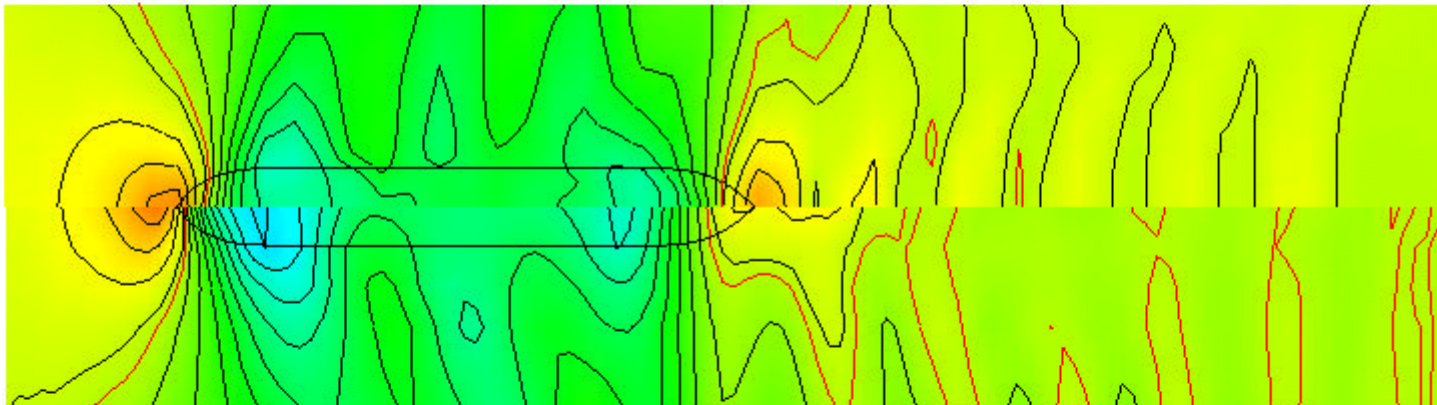
$V_s=18,11\text{ km/h}$

$F_n=0,174$

$F_{nh}=0,718$

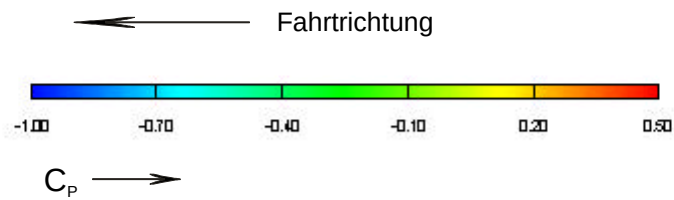
Kanalwand

Rechnung(SHALLO)



Kanalwand

Messung



Drücke am Gewässerboden

M 1548

$h=3,75$ m

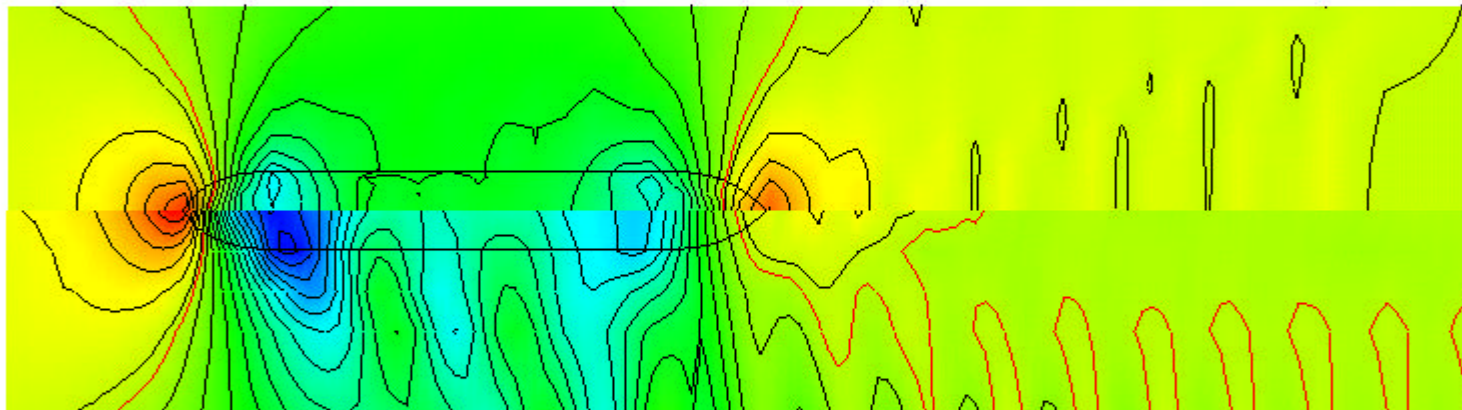
$V_s=14,96$ km/h

$F_n=0,144$

$F_{nh}=0,685$

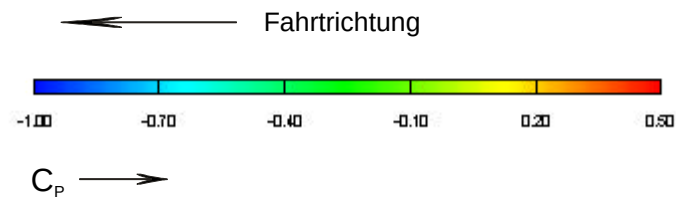
Kanalwand

Rechnung(SHALLO)



Kanalwand

Messung

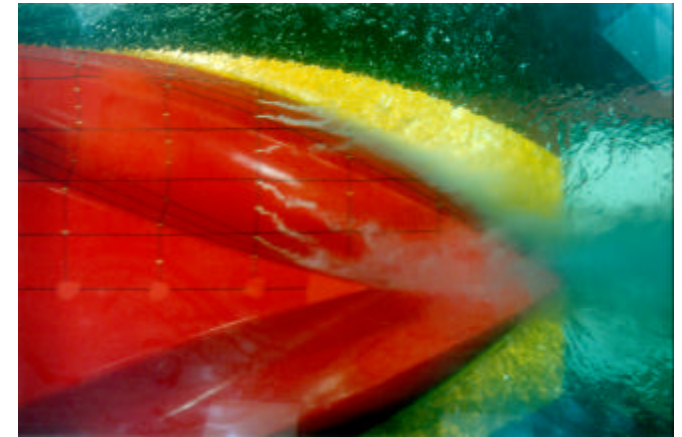




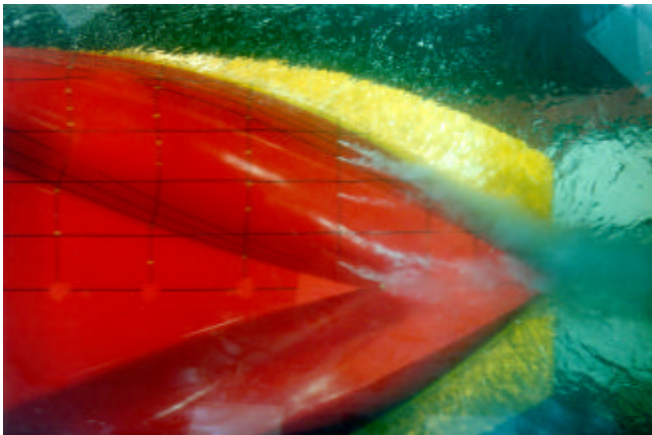
Bauspant Nr. 11



Bauspant Nr. 9



Bauspant Nr. 7



Bauspant Nr. 5



Bauspant Nr. 3

Visualisierungsversuch (I)

Kontrastmittelausstoß bei angegebenen Spanten

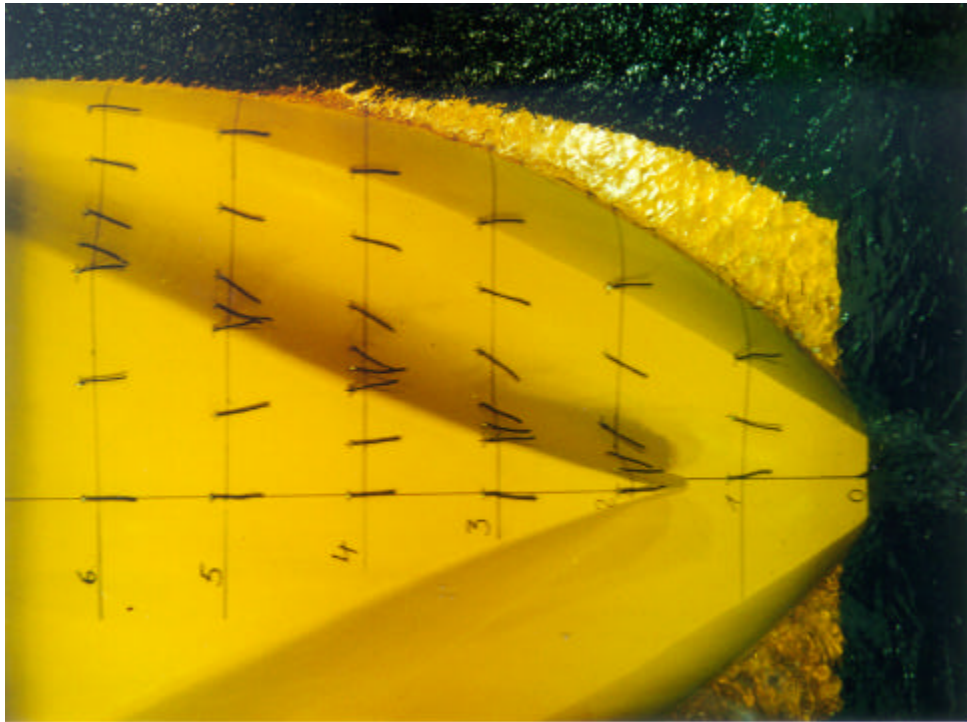
M 1548

$h = 7,5 \text{ m}$

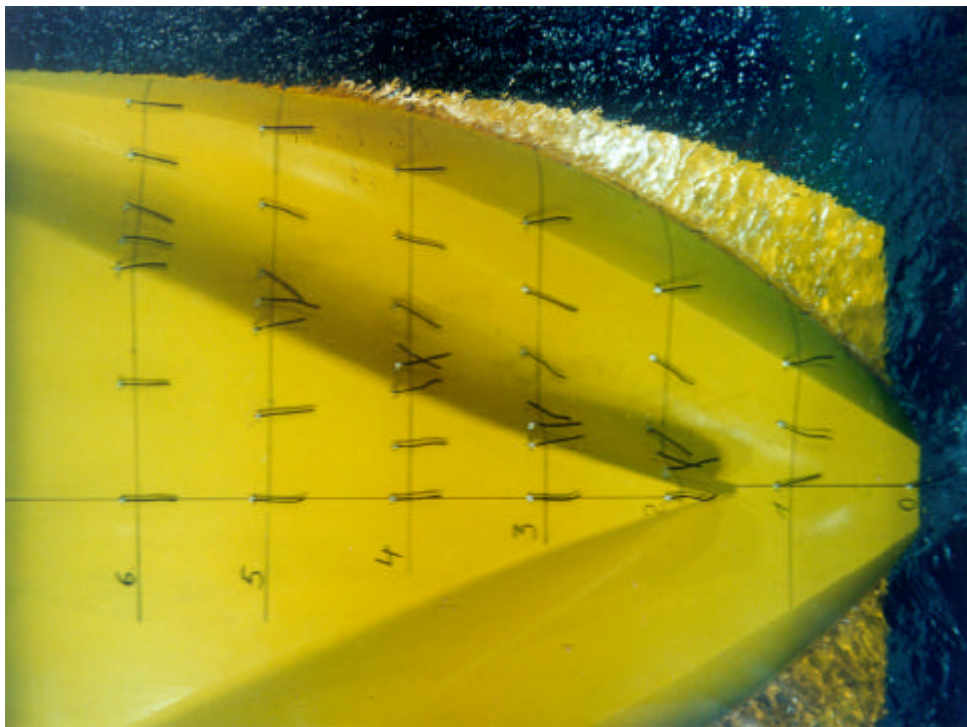
$V_s = 21,72 \text{ km/h}$

$Fn = 0,209$

$Fn_h = 0,704$



$S = 4,25 \text{ mm}$



$S = 9,50 \text{ mm}$

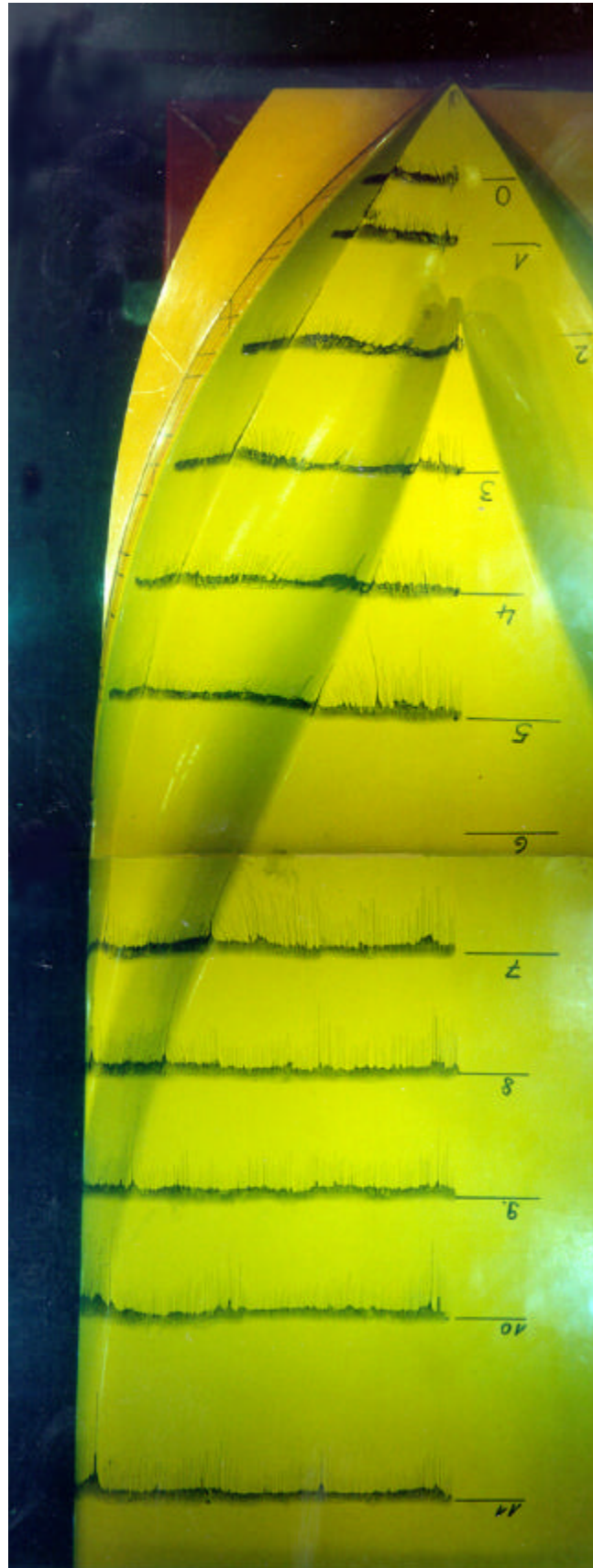
Visualisierungsversuch (II)

Wollfaden-Fahnen im angegebenen Abstand "S" von der Außenhaut

M 1548

$h = 7,5 \text{ m}$
 $V_s = 21,72 \text{ km/h}$

$Fn = 0,209$
 $Fn_h = 0,704$



Visualisierungsversuch (III)

Farbanstrichversuche

$h = 7,5 \text{ m}$
 $V_s = 21,72 \text{ km/h}$

M 1548

$Fn = 0,209$
 $Fn_h = 0,704$

Geschwindigkeiten und Drücke an der Außenhaut (SHALLO)

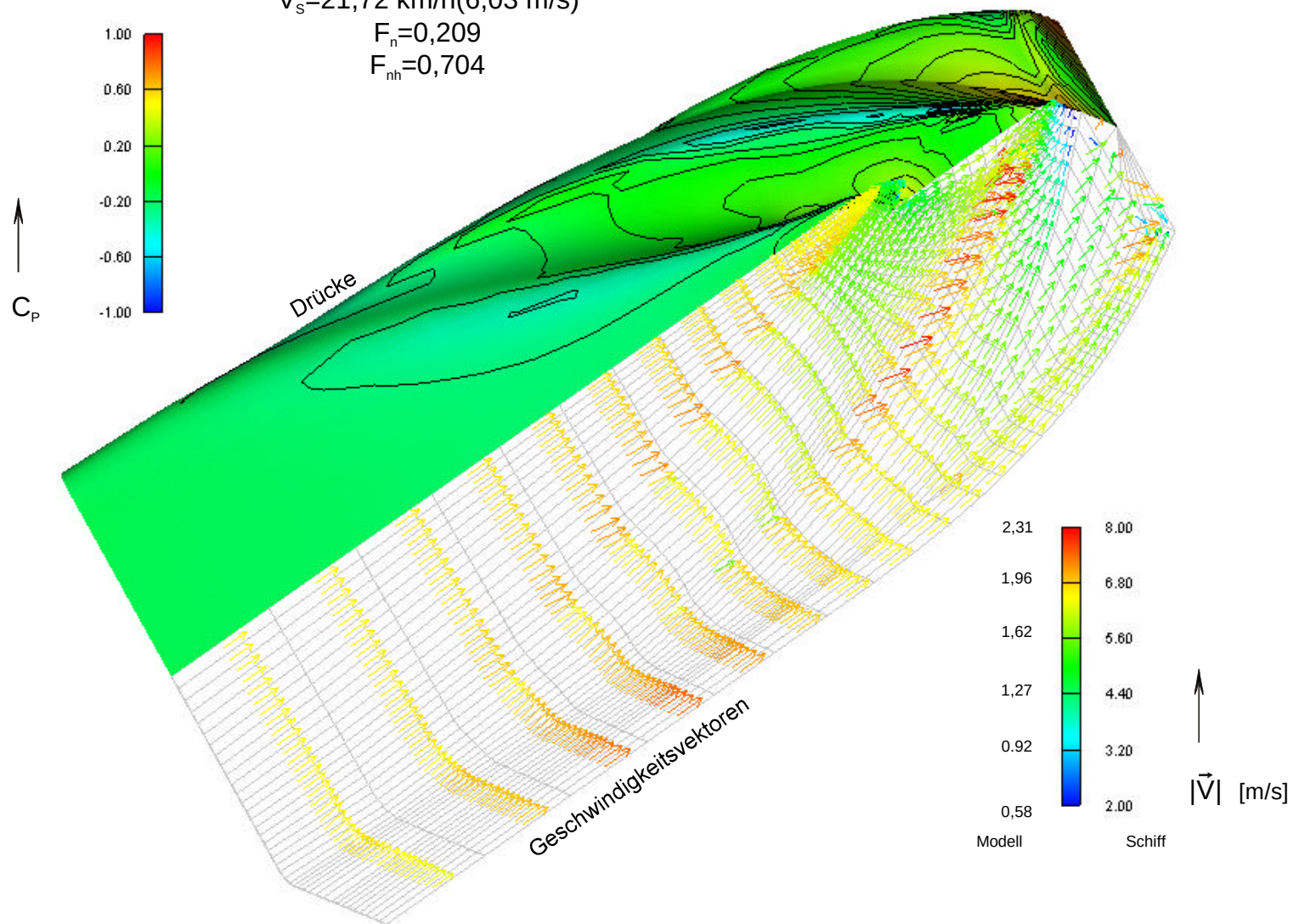
M 1548

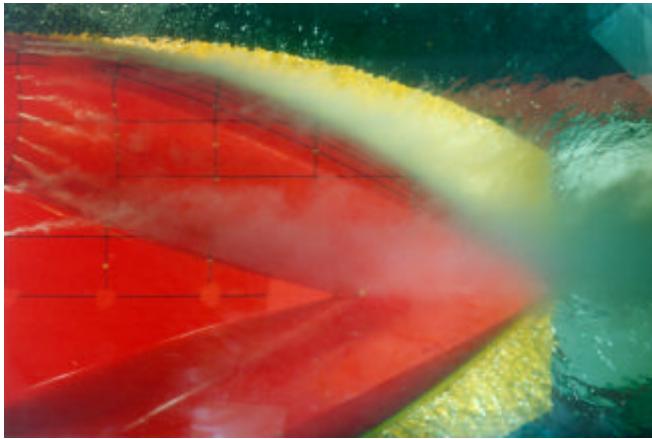
$h=7,50\text{ m}$

$V_s=21,72\text{ km/h}(6,03\text{ m/s})$

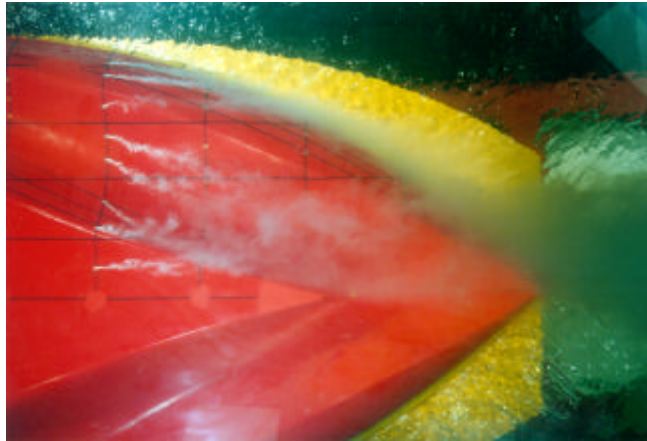
$F_n=0,209$

$F_{nh}=0,704$

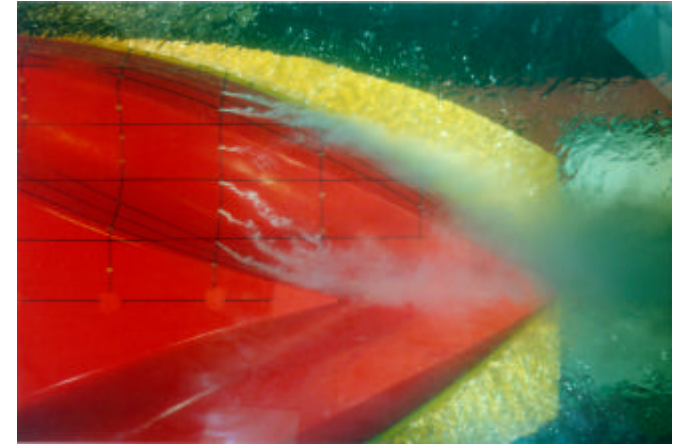




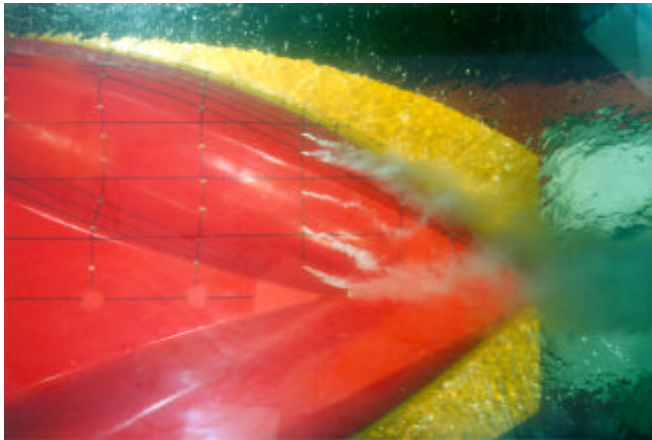
Bauspant Nr. 11



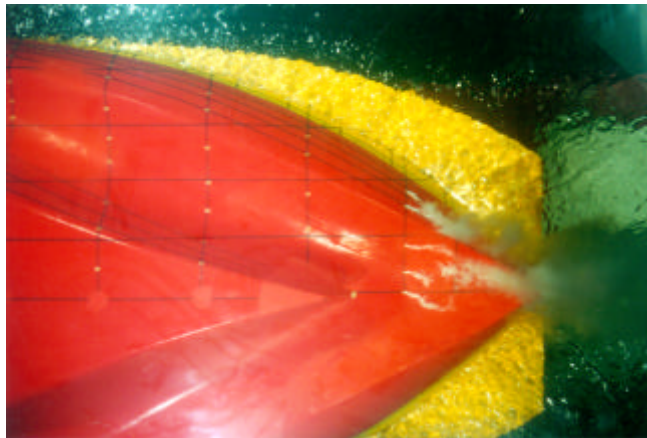
Bauspant Nr. 9



Bauspant Nr. 7



Bauspant Nr. 5



Bauspant Nr. 3

Visualisierungsversuch (I)

Kontrastmittelausstoß bei angegebenen Spanten

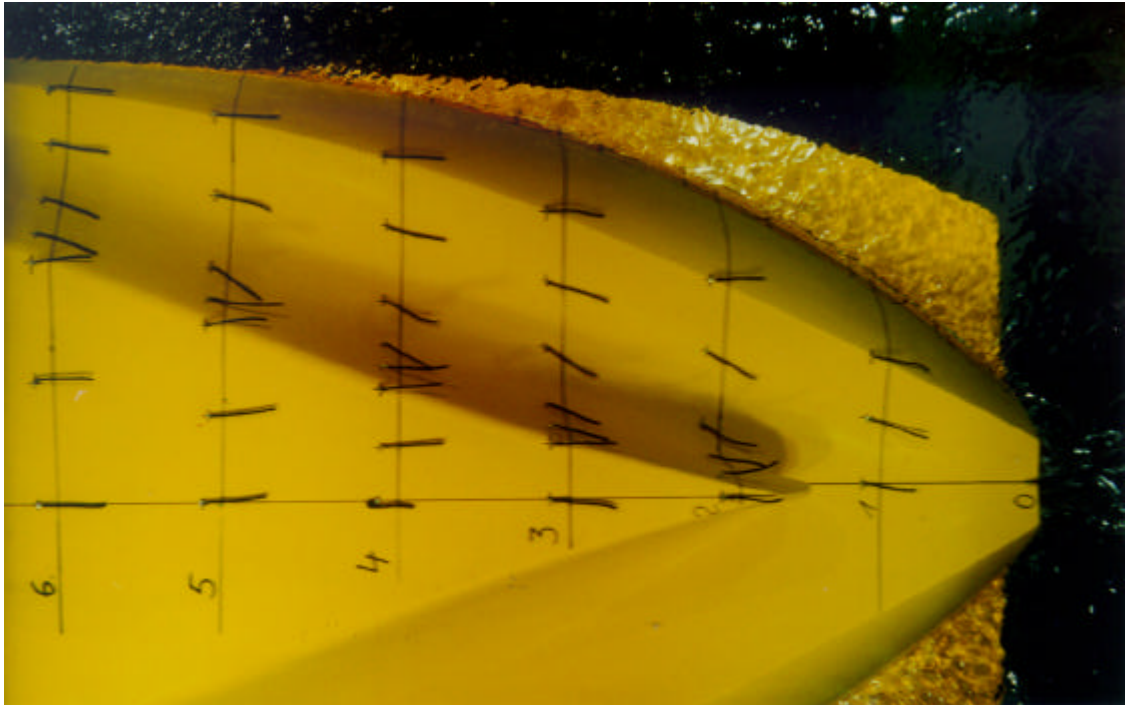
M 1548

$h = 5,0 \text{ m}$

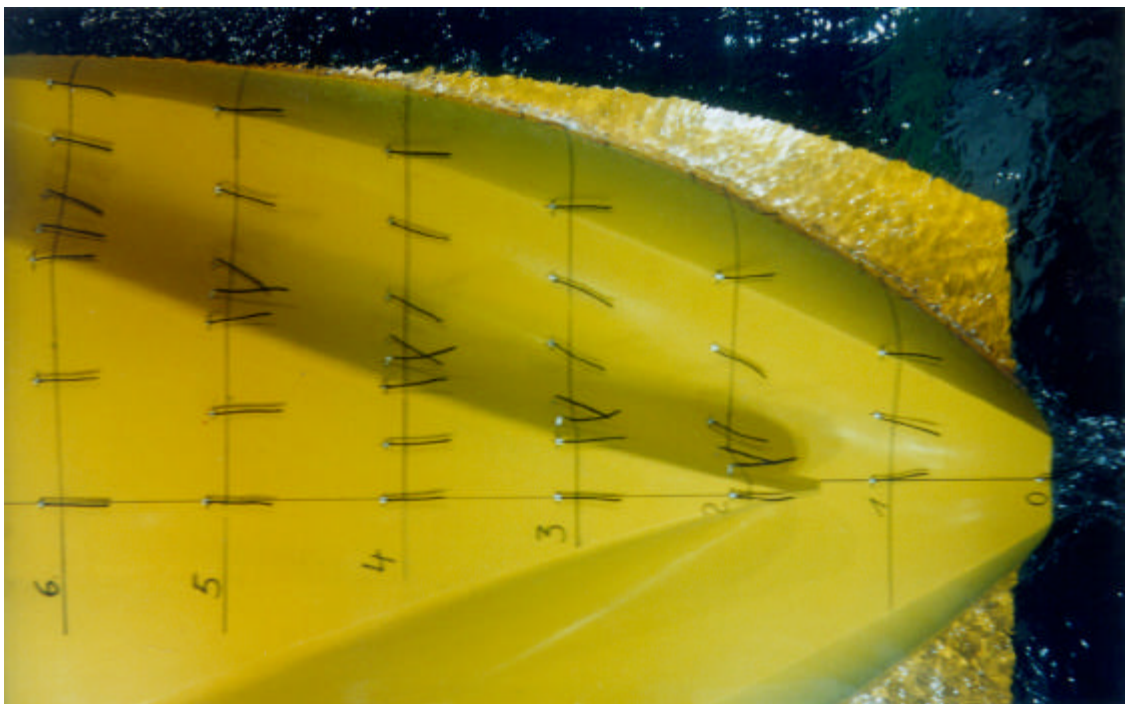
$V_s = 18,11 \text{ km/h}$

$Fn = 0,1739$

$Fnh = 0,7182$



$S = 4,25 \text{ mm}$



$S = 9,50 \text{ mm}$

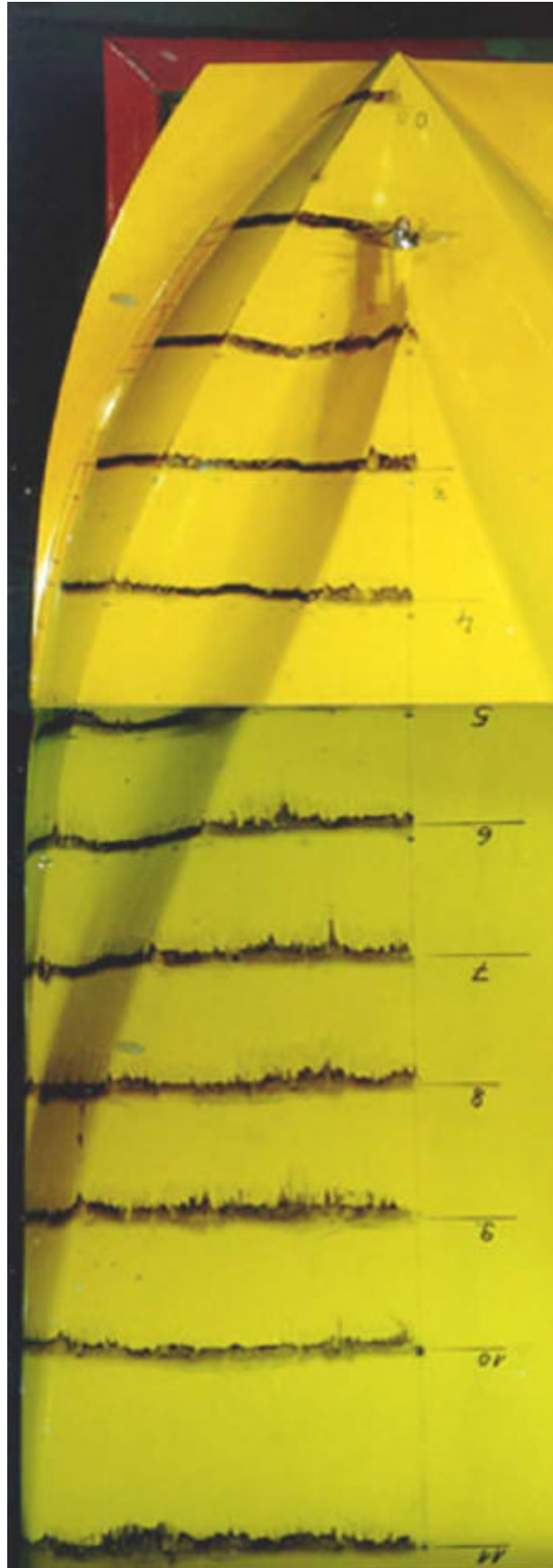
Visualisierungsversuch (II)

Wollfaden-Fahnen im angegebenen Abstand "S" von der Außenhaut

M 1548

$h = 5,0 \text{ m}$
 $V_s = 18,11 \text{ km/h}$

$Fn = 0,1739$
 $Fn_h = 0,7182$



Visualisierungsversuch (III)

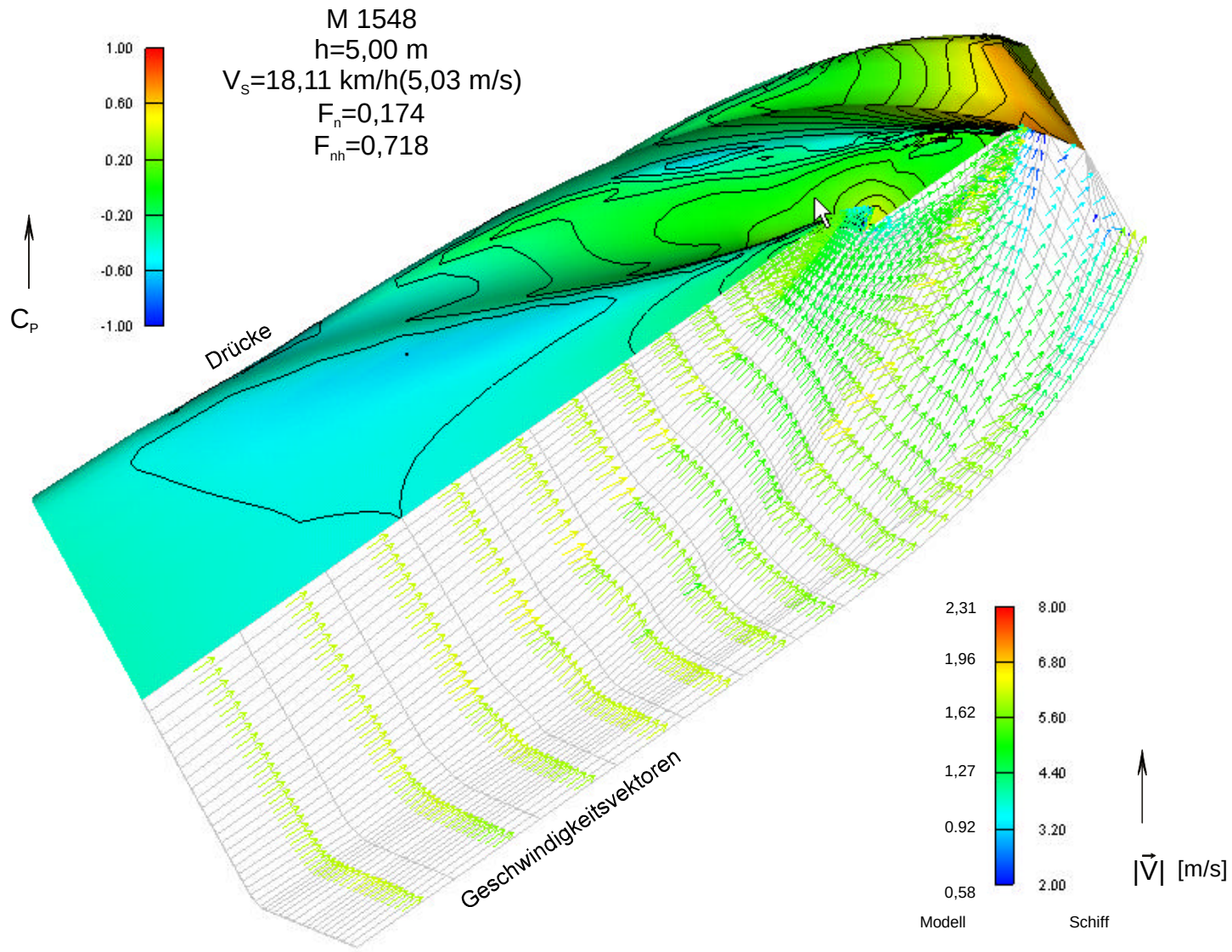
Farbanstrichversuche

$h = 5,0 \text{ m}$
 $V_s = 18,11 \text{ km/h}$

M 1548

$Fn = 0,1739$
 $Fn_h = 0,7182$

Geschwindigkeiten und Drücke an der Außenhaut (SHALLO)

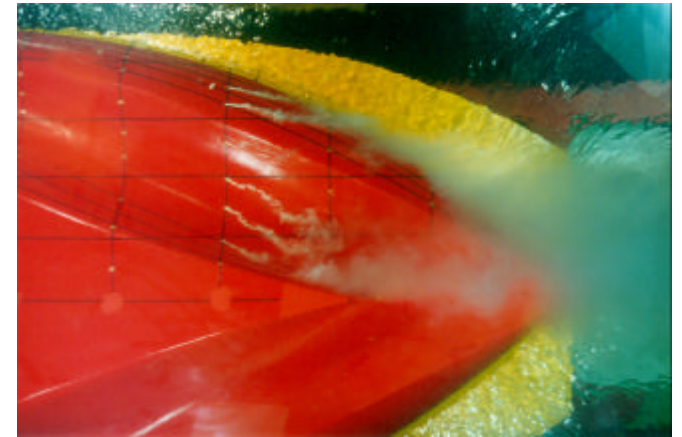




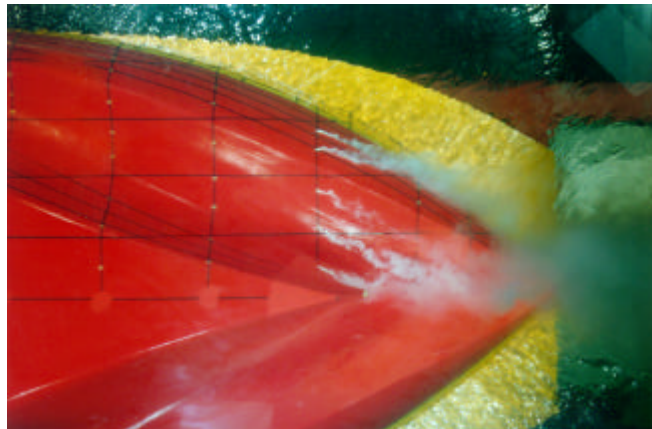
Bauspant Nr. 11



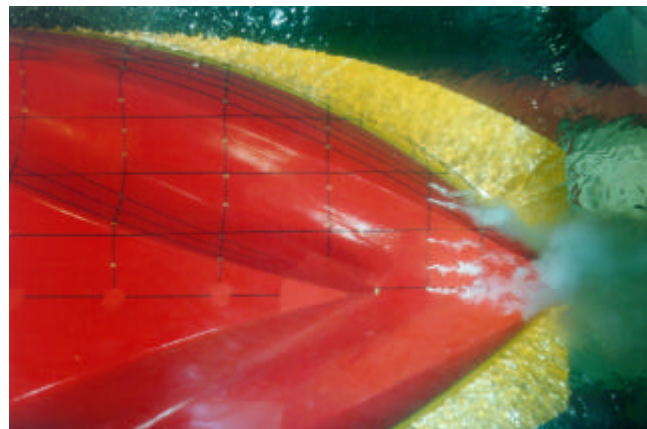
Bauspant Nr. 9



Bauspant Nr. 7



Bauspant Nr. 5



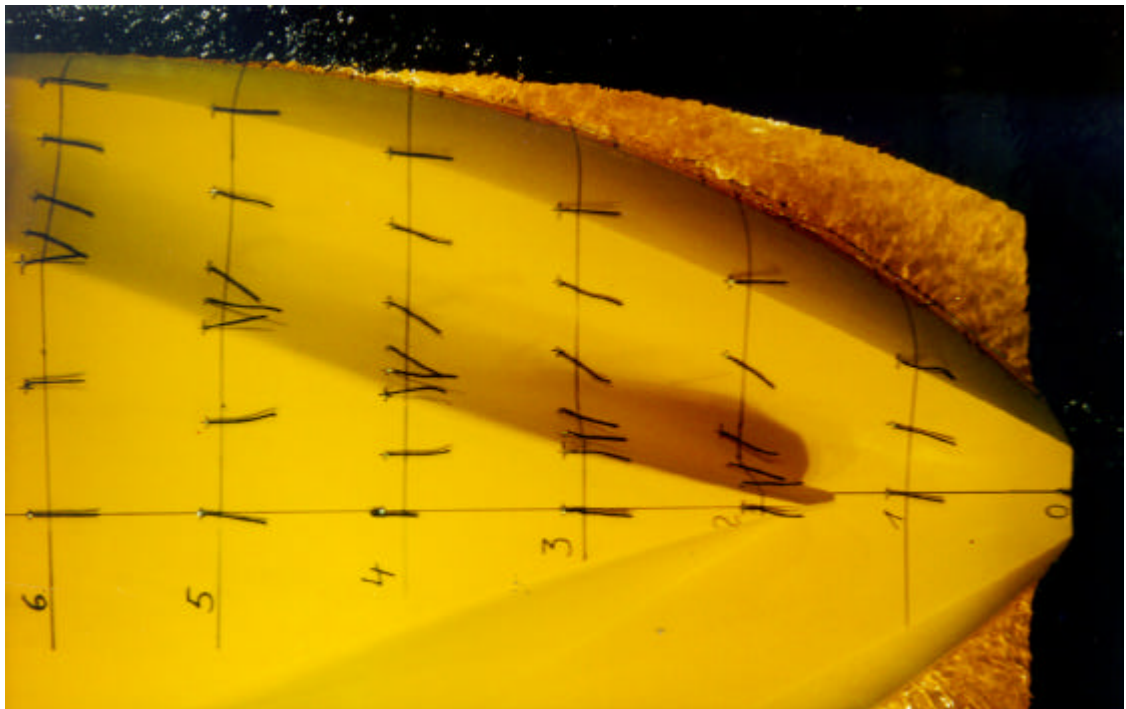
Bauspant Nr. 3

Visualisierungsversuch (I)

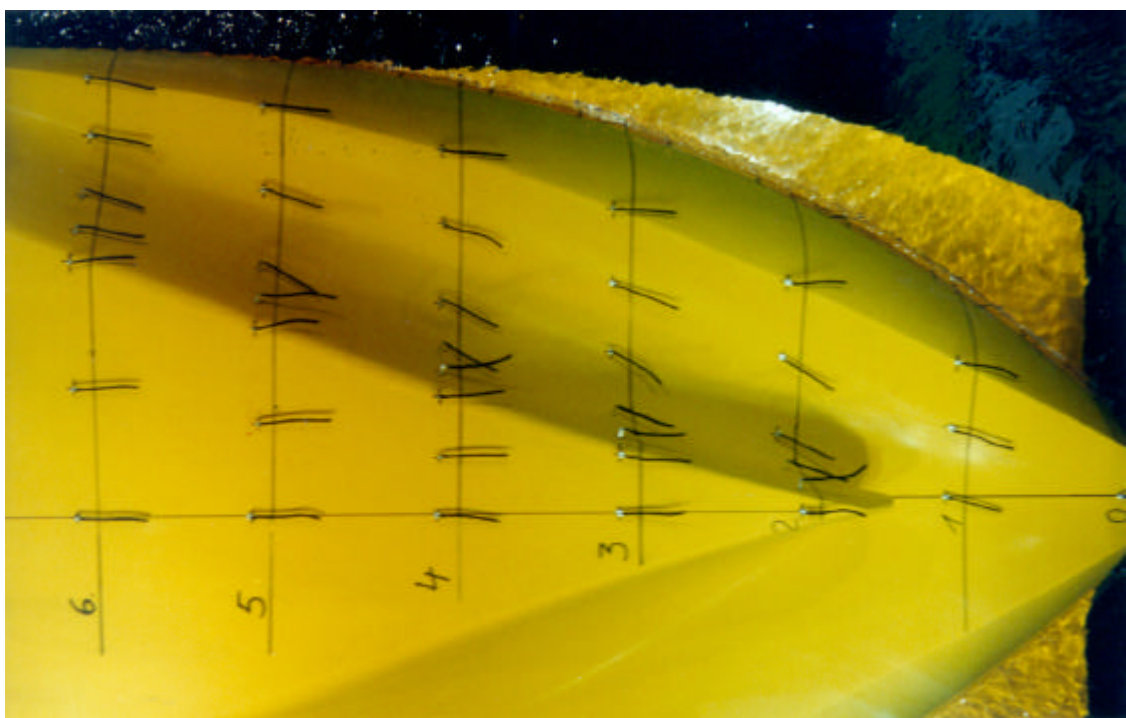
Kontrastmittelausstoß bei angegebenen Spanten

M 1548

$h = 3,75 \text{ m}$
 $V_s = 14,96 \text{ km/h}$
 $Fn = 0,144$
 $Fn h = 0,684$



$S = 4,25 \text{ mm}$



$S = 9,50 \text{ mm}$

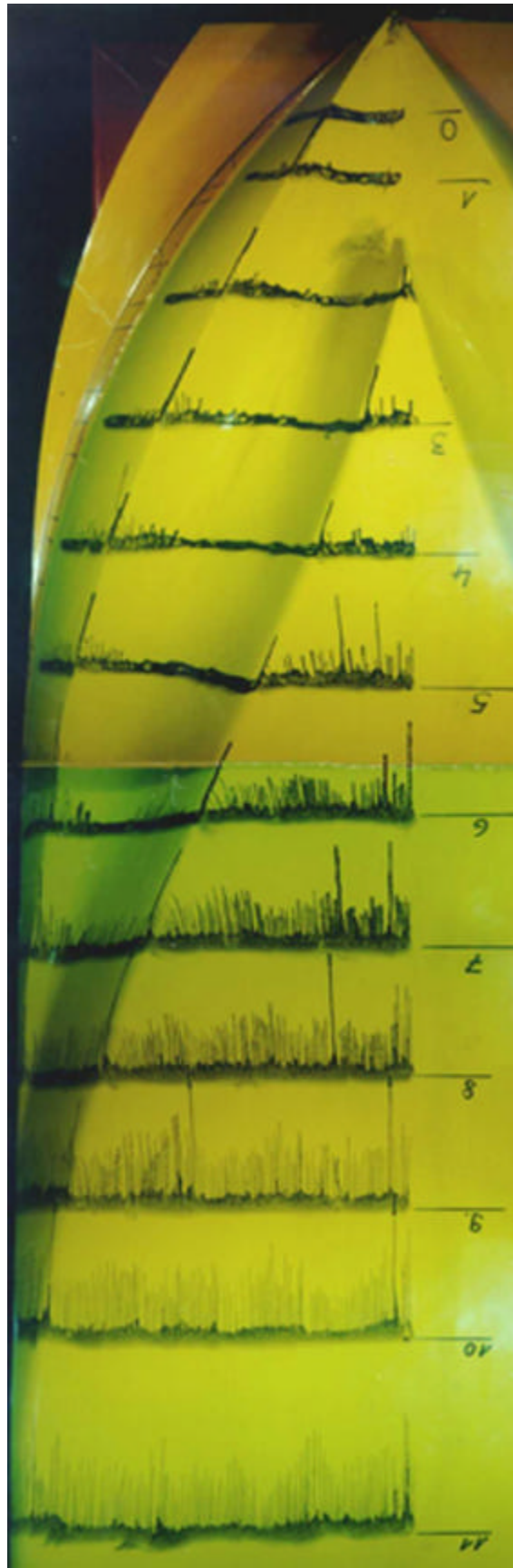
Visualisierungsversuch (II)

Wollfaden-Fahnen im angegebenen Abstand "S" von der Außenhaut

M 1548

$h = 3,75 \text{ m}$
 $V_s = 14,96 \text{ km/h}$

$Fn = 0,144$
 $Fn_h = 0,685$



Visualisierungsversuch (III)

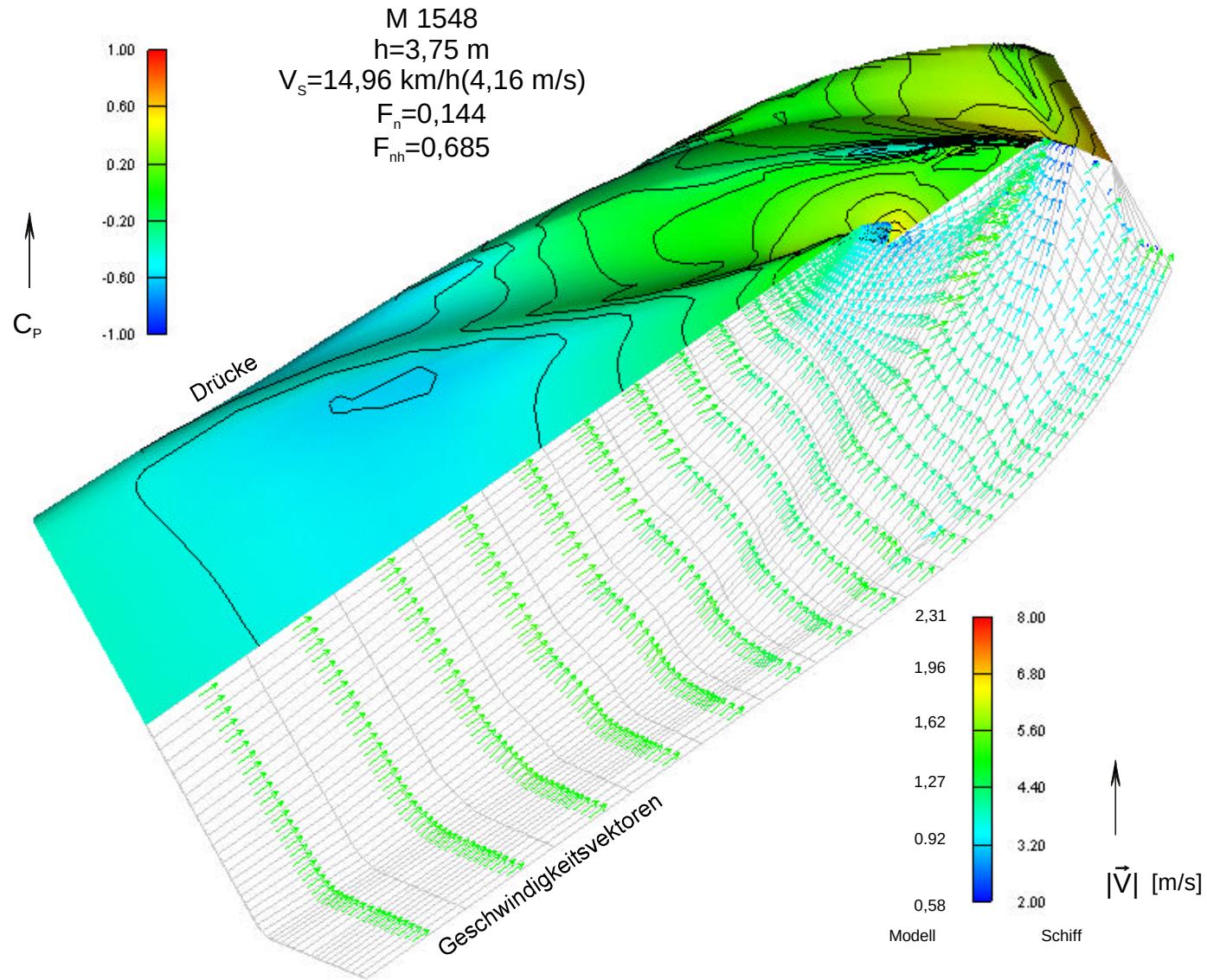
Farbanstrichversuche

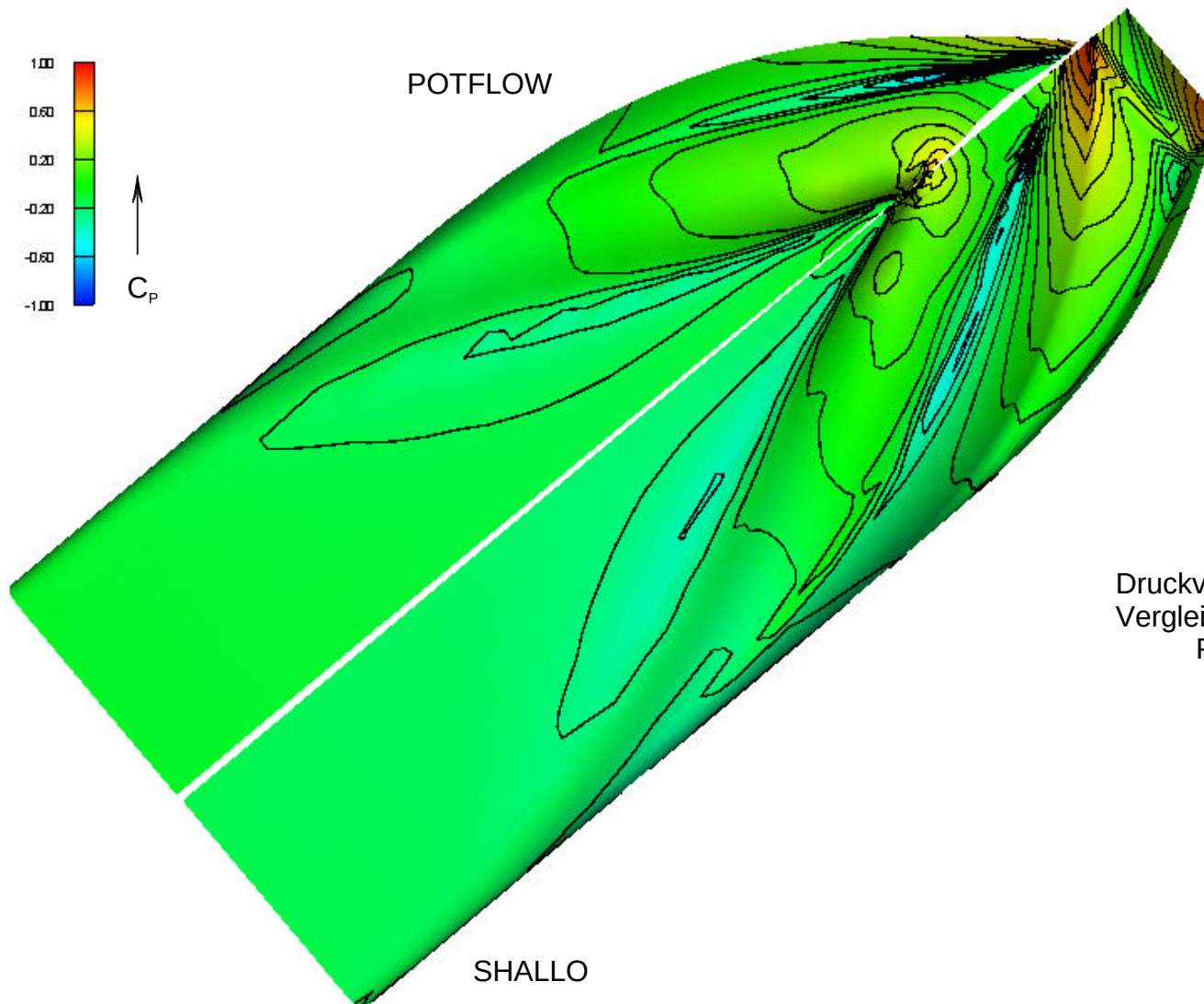
$h = 3,75 \text{ m}$
 $V_s = 14,96 \text{ km/h}$

$M 1548$

$Fn = 0,144$
 $Fn_h = 0,685$

Geschwindigkeiten und Drücke an der Außenhaut (SHALLO)





Druckverteilung an der Außenhaut
Vergleich Berechnungsergebnisse
POTFLOW / SHALLO

M1548
 $h=7,50$ m
 $V_s=21,72$ km/h
 $F_n=0,209$
 $F_{nh}=0,704$

Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten
in der Propellerebene
Vergleich Berechnungsergebnisse
POTFLOW / SHALLO

u/V_s (Farbgebung) - $v/V_s, w/V_s$ (Vektoren)

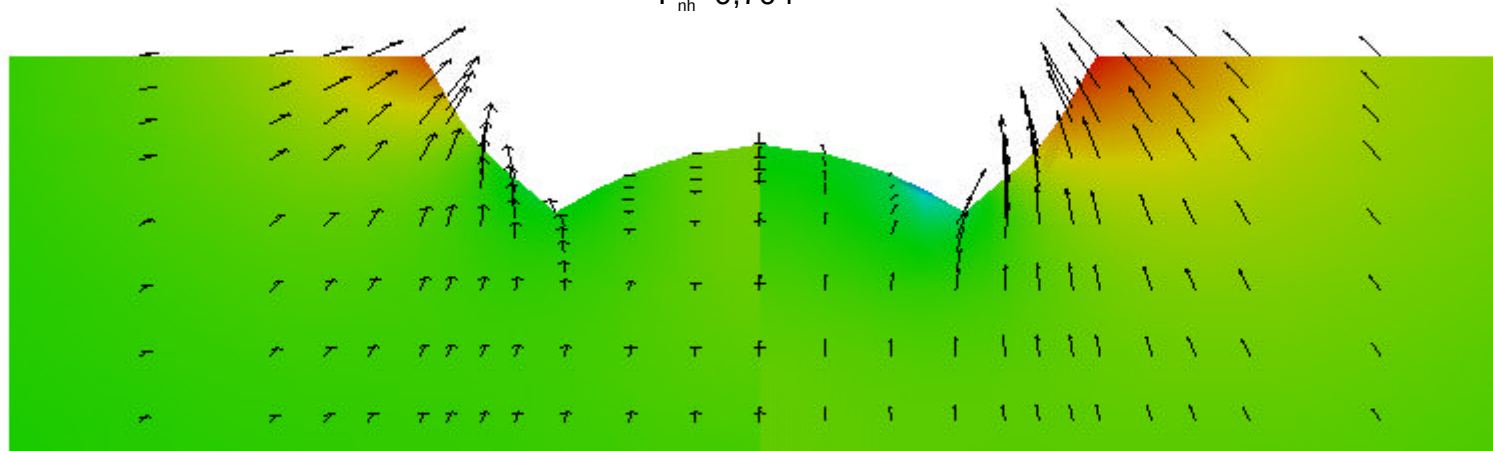
M 1548

$h=7,50$ m

$V_s=21,72$ km/h

$F_n=0,209$

$F_{nh}=0,704$

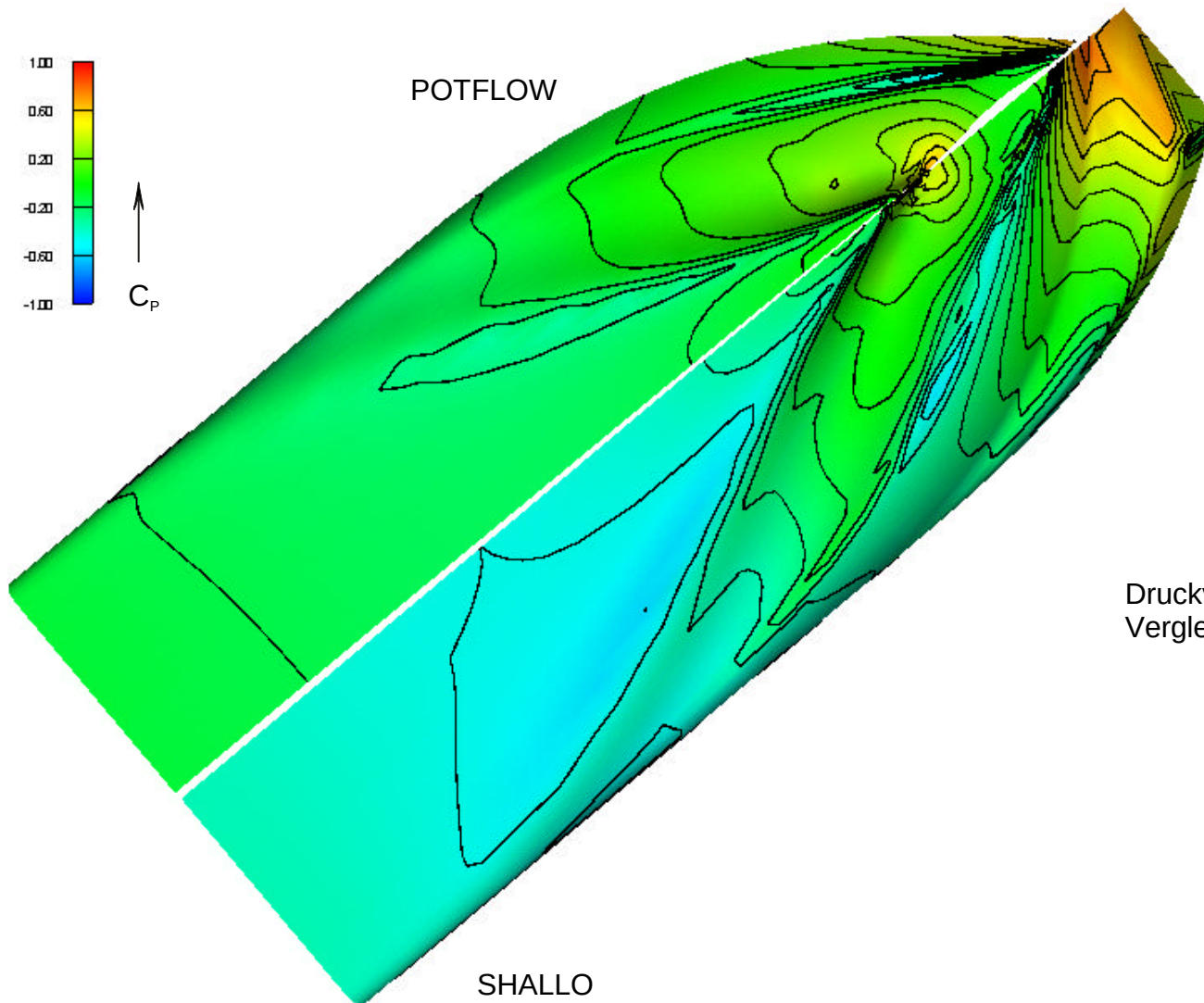


POTFLOW

SHALLO



$u/V_s \longrightarrow$



Druckverteilung an der Außenhaut
Vergleich Berechnungsergebnisse
POTFLOW / SHALLO

M1548
h=5,00 m
 $V_s=18,11$ km/h
 $F_n=0,174$
 $F_{nh}=0,718$

Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten
in der Propellerebene
Vergleich Berechnungsergebnisse
POTFLOW / SHALLO

u/V_s (Farbgebung) - $v/V_s, w/V_s$ (Vektoren)

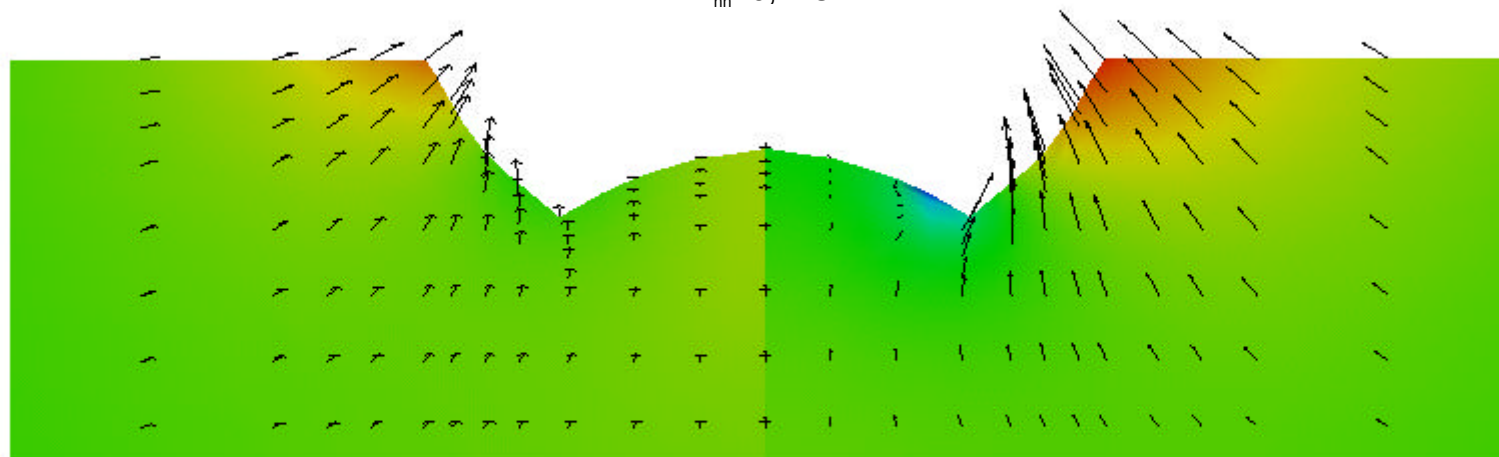
M 1548

$h=5,00$ m

$V_s=18,11$ km/h

$F_n=0,174$

$F_{nh}=0,718$

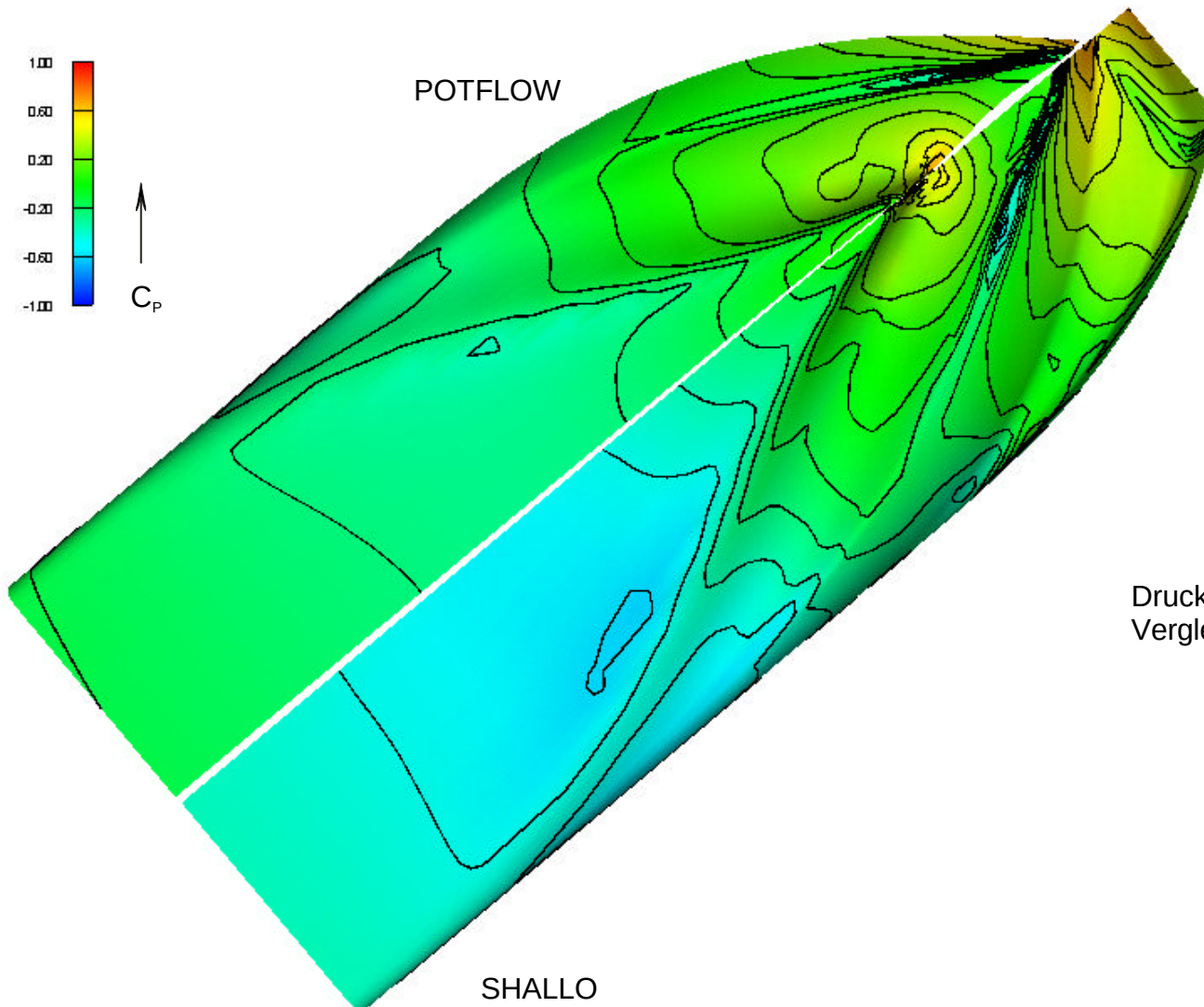


POTFLOW

SHALLO



$u/V_s \longrightarrow$



Druckverteilung an der Außenhaut
Vergleich Berechnungsergebnisse
POTFLOW / SHALLO

M1548
h=3,75 m
 $V_s=14,96$ km/h
 $F_n=0,144$
 $F_{nh}=0,685$

Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten
in der Propellerebene
Vergleich Berechnungsergebnisse
POTFLOW / SHALLO

u/V_s (Farbgebung) - $v/V_s, w/V_s$ (Vektoren)

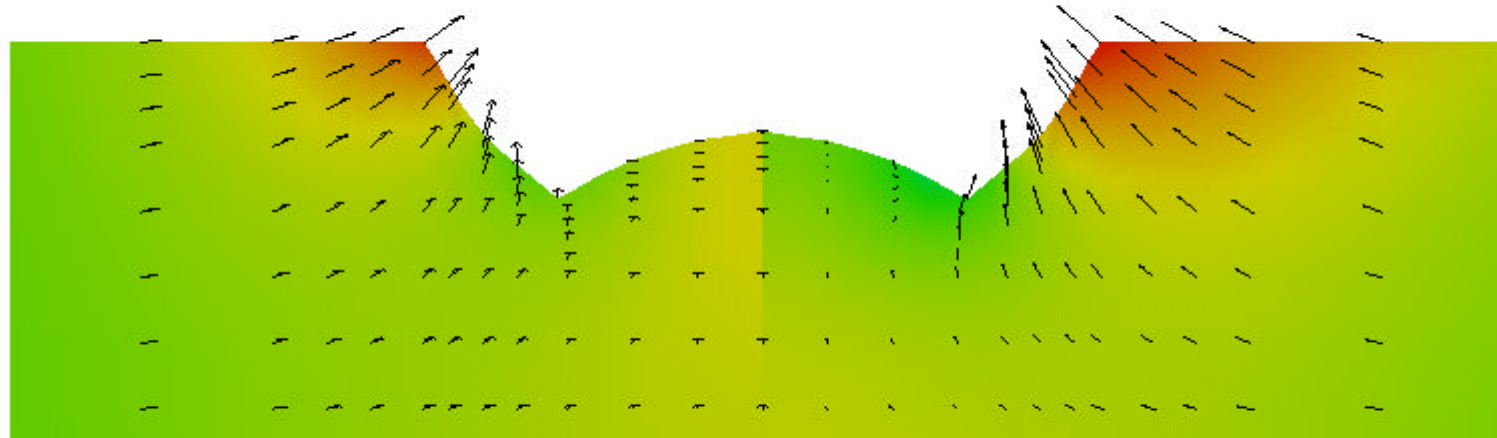
M 1548

$h=3,75$ m

$V_s=14,96$ km/h

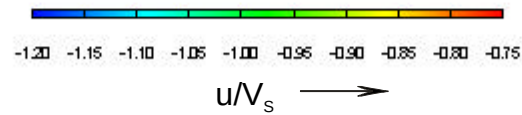
$F_n=0,144$

$F_{nh}=0,685$

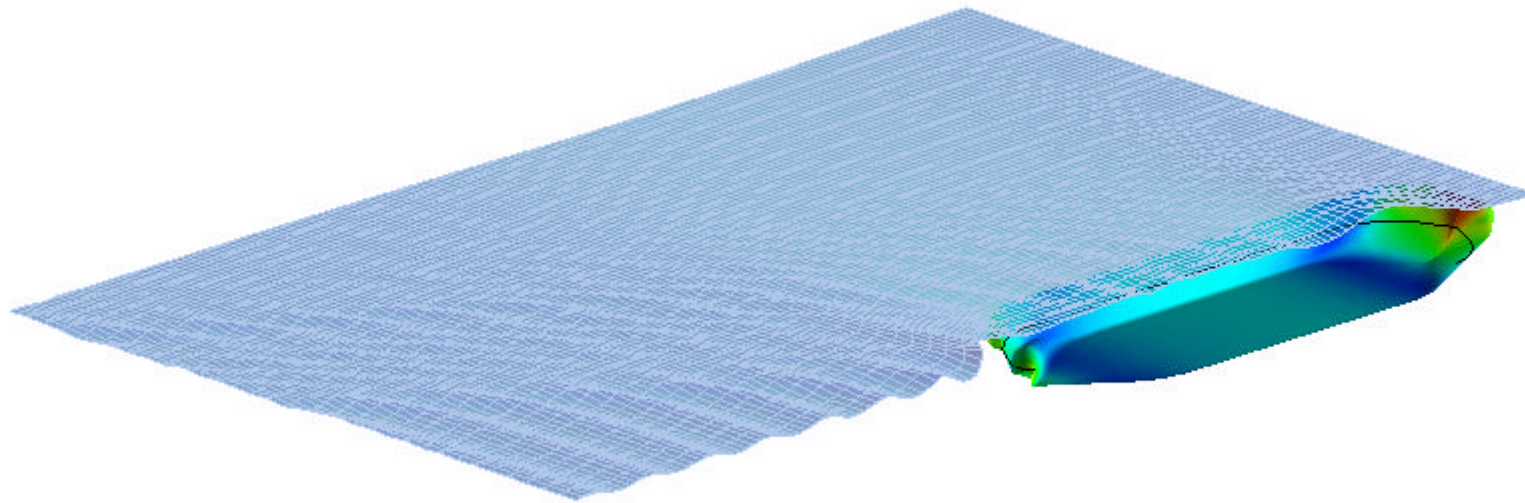


POTFLOW

SHALLO



Verformung der Wasseroberfläche und Drücke
an der Außenhaut
Berechnungsergebnisse SHALLO
M 1548
h=3,75 m
VS=14,96 km/h
Fn=0,144
Fnh=0,685



Untersuchungsergebnisse

Verzeichnis der Diagramme und Abbildungen

Titel	Anlage Nr.
Widerstand, Trimm und Absenkung als Funktion der F_n -Zahl; $h/T = 3,0; 2,0; 1,5$ Eingetragene Ergebnisse der Berechnungen mit SHALLO	7
Wie 7 Darstellung als Funktion der F_{nh} -Zahl	8
Isolinienbild der axialen Geschwindigkeiten in der Ebene des Propellerkreises $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	9
Wie 9 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	10
Wie 9 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	11
Nominelle Nachstromziffer als Funktion der Reynoldszahl R_n (Modell)	12
Dimensionslose Wellenhöhe an der Außenhaut (Messung)	13
Druckverteilung C_p an der Außenhaut ; Messung - Rechnung (SHALLO) $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	14
Wie 14 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	15
Wie 9 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	16
Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Propellerebene u/V_s (Farbgebung); v/V_s , w/V_s (Vektoren); Messung - Rechnung (SHALLO) $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	17
Wie 17 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	18
Wie 17 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	19
Höhenlinienbild der Wasseroberflächenverformung; Messung - Rechnung (SHALLO) $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	20
Wie 20 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	21
Wie 20 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	22
Isolinienbild der Druckverteilung am Gewässerboden; Messung - Rechnung (SHALLO) $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	23
Wie 23 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	24
Wie 23 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	25
Visualisierungsversuch (I); Kontrastmittelausstoß (spantweise) $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	26
Visualisierungsversuch (II); Wollfadenfahren in zwei Abständen von der Außenhaut $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	27
Visualisierungsversuch (III); Farbanstrichversuch $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	28
Geschwindigkeiten (Vektoren) und Druckverteilung (Isolinienbild) an der Außenhaut (SHALLO) $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	29
Wie 26, 27, 28 und 29 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	30, 31, 32, 33
Wie 26, 27, 28 und 29 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	34, 35, 36, 37
Druckverteilung C_p an der Außenhaut (Isolinienbild) Vergleich Berechnungsergebnisse POTFLOW /SHALLO $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	38
Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Propellerebene; u/V_s (Farbgebung); v/V_s , w/V_s (Vektoren); Vergleich Berechnungsergebnisse POTFLOW / SHALLO $h = 7,5 \text{ m}$; $V_s = 21,72 \text{ km/h}$	39
Wie 38 und 39 $h = 5,0 \text{ m}$; $V_s = 18,11 \text{ km/h}$	40, 41
Wie 38 und 39 $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	42, 43
Verformung der Wasseroberfläche und Druckverteilung an der Außenhaut (Farbgebung); 3D- Gesamtdarstellung; SHALLO; $h = 3,75 \text{ m}$; $V_s = 14,96 \text{ km/h}$	44