

Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 18 S 0100 5

**Minimierung der Wellenbildung schneller, konventioneller
Einrumpfschiffe auf flachem Wasser**

von

Dipl.-Ing. Bodo Baumgarten

Dr.-Ing. Walter Grollius

Projektleiter: Dr.-Ing. Hans-Georg Zibell

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

Direktor:

Prof. Dr. Paul Engelkamp

Februar 1999



**Minimierung der Wellenbildung schneller, konventioneller
Einrumpfschiffe auf flachem Wasser**

Duisburg, den 09.02.1999

Fachbereich Hydromechanik

Die Bearbeiter:

.....
(Dipl.-Ing. B. Baumgarten)

.....
(Dr.-Ing. W. Grollius)

Fachbereich I:

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

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

.....
(Prof. Dr. P. Engelkamp)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 18 S 0100 5 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.



Gliederung

Zusammenfassung

Summary

1. Einleitung
 2. Ziel des Vorhabens
 3. Untersuchte Schiffe
 4. Experimentelle Untersuchung
 - 4.1 Versuchsdurchführung
 - 4.2 Versuchsauswertung
 - 4.3 Ergebnisse
 - 4.3.1 Widerstandsversuche
 - 4.3.1.1 Fahrgastschiff; Ausgangsform und Modifikation
 - 4.3.1.2 Feuerlöschboot; Ausgangsform und Modifikation
 - 4.3.2 Wellenprofil an der Außenhaut
 - 4.3.2.1 Fahrgastschiff; Ausgangsform und Modifikation
 - 4.3.2.2 Feuerlöschboot; Ausgangsform und Modifikation
 - 4.3.3 Wasseroberflächenverformung
 - 4.3.3.1 Fahrgastschiff; Ausgangsform und Modifikation
 - 4.3.3.2 Feuerlöschboot; Ausgangsform und Modifikation
 5. Numerische Berechnungen
 - 5.1 SHALLO-Berechnungen
 - 5.1.1 Vorbemerkungen
 - 5.1.2 Aufgabenstellung
 - 5.1.3 Charakterisierung der Schiffsformen
 - 5.1.4 Grundlagen des Berechnungsverfahrens, numerische Probleme
 - 5.1.5 Ergebnisse
 - 5.2 SWBQISD-Berechnungen
 - 5.2.1 Widerstand
 - 5.2.2 Wellenbilder
 - 5.2.3 Wellenprofile
 - 5.2.4 Schlußfolgerungen
 6. Symbolverzeichnis
 7. Literatur
- Anhang

Zusammenfassung

Ziel dieses FE-Vorhabens war, die Wellenbildung an einem schnellen Einrumpfschiff bei Fahrt auf flachem und seitlich begrenztem Fahrwasser rechnerisch und experimentell zu ermitteln und durch Modifikation der Schiffsform zu verbessern.

Um die Arbeit hinsichtlich des zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereiches von unterkritisch bis weit überkritisch umfassender zu gestalten, ist zusätzlich ein zweites Einrumpfschiff für den Verkehr auf Binnenwasserstraßen als Untersuchungsobjekt herangezogen worden.

Für den unterkritischen Geschwindigkeitsbereich (Froude-Tiefenzahl, $F_{nh} < 1.0$) wurde ein Zweischauben-Fahrgastschiff, für den transkritischen ($0.9 \leq F_{nh} \leq 1.2$) und überkritischen ($F_{nh} > 1$) Bereich ein Zweischauben-Feuerlöschboot ausgewählt.

Der für die Untersuchung vorgegebene Einsatzbereich beider Fahrzeuge reichte von der Flachwasserfahrt ($h/T = 2$) bis hin zu Tiefwasserbedingungen ($h/T > 6$).

Die mit den Ausgangsversionen und den Modifikationen der beiden Schiffstypen durchgeführten Modellversuche dienten der Bestimmung der Schleppleistung, des Trimms und der Absenkung, der Wellenkontur entlang der Außenhaut und der Wasseroberflächenverformung im Umfeld der Fahrzeuge in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Wassertiefe.

Die experimentell ermittelten Ergebnisse weisen im Falle des Feuerlöschbootes eine durch die Modifizierung erzielte Verbesserung des Geschwindigkeit-Schleppleistungs-Verhältnisses auf allen untersuchten Wassertiefen aus. Auch die Wellen entlang der Außenhaut des modifizierten Fahrzeuges fallen deutlich niedriger aus als bei der Ausgangsversion. Dagegen zeigten sich zwischen den von beiden Versionen des Feuerlöschbootes hervorgerufenen Wellenfeldern in der Umgebung der Fahrzeuge keine erwähnenswerten Unterschiede.

In jeder Hinsicht unbedeutend erwies sich die Modifizierung des Fahrgastschiffes.

Die vorgesehenen Strömungsberechnungen mit dem CFD-Programm SHALLO konnten nur teilweise durchgeführt werden. Während das Programm bei mäßigen Froude-Zahlen F_n Ergebnisse lieferte (Fahrgastschiff), versagte es bei hohen F_n (Feuerlöschboot). Ursache ist ein mathematisches Detailproblem im Schiffsnahbereich, das in der verwendeten Programmfassung noch nicht zufriedenstellend gelöst ist und unter Extrembedingungen (hier: Umströmung von Wellenabweiskanten) zum Abbruch der Rechnung führt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, daß noch weitere, systematische Untersuchungen zur Konsolidierung der Methode notwendig sind.

Die Strömungsberechnungen mit dem CFD-Programm SWBQISD lieferten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modellmessungen und Berechnungen sowohl für den Wellenwiderstand als auch für die Wellenprofile.



Die Berechnungen mit dem Programm SWBQISD wurden am Institut für Schiffstechnik (ISD) der Gerhard Mercator-Universität Duisburg von Herrn Dr. T. Jiang durchgeführt.

Summary

It was the object of the research project to determine the surface wave system of a monohull ship sailing on a waterway restricted in depth and width by numerical and experimental methods.

As research objects a double-screw passenger ship for the subcritical speed range and a fire brigade boat for supercritical speed were chosen. By modifications of the hull shape it was attempted to reduce the wave systems. In the first case the modification had no effect on wave generation. In the second case an improvement of the speed to power ratio and a reduction of the wave height at the hull surface could be reached.

The results of the computations with the program SHALLO lead to the conclusion that the influence of the hull modifications show up in the wave pattern while there are still considerable differences to the experimental results. The predicting power of this code is restricted and further improvements are necessary. The results obtained with the code SWBQISD both for the wave resistance and for the wave pattern are in excellent agreement with the experiment.



1. Einleitung

Das Phänomen der Wellenbildung um ein fahrendes Schiff auf flachem Wasser zeichnet sich dadurch aus, daß im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich etwa ab einer Froude-Tiefenzahl $F_{nh} > 0.5 - 0.6$ mit zunehmender Geschwindigkeit im Wellenbild Veränderungen auftreten. Die Wellen werden kürzer und steiler als auf unbegrenzter Wassertiefe und der Öffnungswinkel der Diagonalwellen vergrößert sich. Leistung, Trimm und Absenkung nehmen verstärkt zu.

Im transkritischen Geschwindigkeitsbereich ($0.9 < F_{nh} < 1.2$) erreicht der von ursprünglich kopflastig auf achterlastig wechselnde Trimm sein Maximum, wobei der einsetzende dynamische Auftrieb stetig zunimmt. Der Winkel der Diagonalwellen öffnet sich bis auf 90 Grad, so daß diese nun querab vom Schiff verlaufen, während die Periode der Querwellen unendlich groß wird. In Verbindung mit dem stark achterlichen Trimm bildet sich meist eine große Heckwelle aus. In seitlich begrenztem Wasser (Flüsse, Kanäle) entwickeln sich in der Nähe des Schiffskörpers zusätzliche, instationäre Querwellen, die mit erhöhter Geschwindigkeit nach vorne ablaufen (Solitons). Das Schiff fährt sozusagen seinen eigenen Wellen hinterher [Helm, 1940; Graff et al., 1964; Ertekin et al., 1985].

Erst bei Fahrt im überkritischen Bereich ($F_{nh} > 1.2$) ist eine Verbesserung des Wellenbildes und damit auch des Fahrverhaltens zu erwarten, d.h. Trimm und Absenkung nähern sich dann den Tiefwasserwerten. Die erforderliche Antriebsleistung unterschreitet die auf tiefem Wasser benötigte Leistung. Die Wellenbildung geht mit wachsender Froudezahl F_n stetig zurück.

Von schnellen Flachwasserfahrzeugen ist bekannt, daß ein starker achterlicher Trimm im hohen unterkritischen Geschwindigkeitsbereich als Hauptursache für schlechte Fahrleistungen in Verbindung mit starker Wellenbildung anzusehen ist. Derartige Schiffe haben dann auch in der Regel Schwierigkeiten, den transkritischen Bereich zu überwinden, um überkritisch zu fahren.

Es gibt weltweit eine große Anzahl von Untersuchungen schneller Schiffe für den Einsatz in tiefem Wasser [z.B. Nordström, 1951; Helm, 1964; Rader 1980; Langenberg, 1988; Müller-Graf, 1988; 1998]. Ziel der Untersuchungen war es meist, die erforderlichen Leistungs-Geschwindigkeits-Relationen festzustellen und zu verbessern. Eine Widerstands- bzw. Leistungsminimierung solcher Schiffe besteht zwar im überwiegenden Maße in einer Verringerung des dominierenden Wellenwiderstandes. Die vom Schiff erzeugten Wellen wurden in diesen Untersuchungen jedoch nur selten aufgemessen oder rechnerisch ermittelt.

Vereinzelt sind Untersuchungen dieser Art auch für schnelle Schiffe auf flachem Wasser durchgeführt worden. Die bekanntesten Veröffentlichungen - u.a. über auftretende Vorlaufwellen (Solitons) - sind von Graff [Graff et. al., 1964] und Ertekin [Ertekin et. al., 1985]. Hier sind in allen Fällen die Wellen aufgemessen und das Phänomen der Solitons nachgewiesen und beschrieben worden.

2. Ziel des Vorhabens

In der Binnenschiffsflotte existieren neben den relativ langsam fahrenden Transporteinheiten wie Motorgüterschiffe, Koppelverbände und Schubverbände auch leistungsstarke Sonderschiffe, die wegen ihres speziellen Einsatzzwecks hohe Fahrgeschwindigkeiten erreichen müssen. Hierzu zählen Fahrgastschiffe, Fahrzeuge der Wasserschutzpolizei, Feuerlöschboote und Behördenfahrzeuge (Bereisungsschiffe u.a.).

Es ist abzusehen, daß in der kommerziellen Transportschifffahrt zukünftig schnelle Schiffe für spezielle Dienstleistungen eingesetzt werden, um Straßen- und Schienenverkehr zu entlasten. Vorstellbar sind z.B. Containerschiffe für den Transport kleinerer, hochwertiger Ladungseinheiten, Kühlschiffe, Kurierschiffe und RO-RO-Schiffe für den Autotransport. Diese Schiffseinheiten werden auch weiterhin zu einem großen Teil als Einrumpfschiffe gebaut werden, weil sich dieses Konzept bewährt hat und weil viele Einrichtungen auf den Binnenwasserstraßen wie Kanäle, Schleusen, Hafenanlagen, Verladeeinrichtungen u.a. auf diesen Schiffstyp ausgerichtet sind.

Während die konventionellen Transporteinheiten als typische "Verdränger" nur im mäßigen unterkritischen Geschwindigkeitsbereich fahren ($F_{nh} < 0.5 - 0.6$), operieren die schnellen Spezialschiffe teilweise als "Halbgleiter" im hohen unterkritischen Geschwindigkeitsbereich ($0.5 - 0.6 < F_{nh} < 0.9$), als reine "Gleiter" im überkritischen Geschwindigkeitsbereich ($F_{nh} > 1.2$).

Bei der Projektierung eines schnellen Flachwasserfahrzeuges steht das Problem der Wellenbildung deutlich im Vordergrund, weil sich der Flachwassereffekt auf dieses Phänomen sehr nachteilig auswirkt. Besonders beim Durchfahren des transkritischen Geschwindigkeitsbereiches ($0.9 < F_{nh} < 1.2$) können in ungünstigen Fällen infolge starker achterlicher Vertrimmung Heckwellen erheblicher Größe auftreten. Der daraus resultierende massive Wellenschlag oder „Schwell“ ist gefürchtet und stellt in den beengten Binnengewässern eine erhebliche Gefahr für ankernde Schiffe, schwimmende Bauwerke, Uferbefestigungen sowie Flora und Fauna der Uferregion dar.

Der Entwurf eines schnellen Binnenschiffes ist auch heute noch mit großen Unsicherheiten behaftet, weil geeignete Unterlagen, mit denen eine sichere Abschätzung der erzeugten Wellen möglich wäre, nicht existieren. Einziges Hilfsmittel blieb in diesem Fall bisher der Modellversuch.

Aus systematischen Untersuchungen ist bekannt, daß unter Flachwasserbedingungen kleine, örtliche Detailänderungen am Schiffskörper große Auswirkungen auf die Wellenbildung und damit auf Widerstand und Antriebsleistung haben können, während sie dagegen auf tiefem Wasser nicht mehr relevant sein müssen [Grollius & Heuser, 1992]. Modellserienuntersuchungen für Flachwasserfahrzeuge sind kein geeignetes Mittel, um verallgemeinerungsfähige Aussagen über wellenarme Schiffsförmungen zu gewinnen, weil sie in einer sehr aufwendigen Variationsbreite gefahren werden müßten, was mit nicht vertretbaren Kosten und großem Zeitaufwand verbunden ist. Mit den mittlerweile verfügbaren modernen CFD-Verfahren besteht jedoch



heute die Möglichkeit, die Probleme alternativ auf theoretisch-rechnerischem Wege näherungsweise zu lösen.

Es war das Ziel des mit diesem Bericht zum Abschluß gebrachten FE-Vorhabens, die Wellenbildung an schnellen Einrumpfschiffen bei Fahrt auf flachem und seitlich begrenztem Fahrwasser experimentell und rechnerisch zu ermitteln und durch Modifikation der Schiffsform zu minimieren.

3. Untersuchte Schiffe

Ursprünglich war vorgesehen, für das FE-Vorhaben lediglich ein konventionelles Einrumpfschiff mit verhältnismäßig geringem Blockkoeffizienten C_B einzusetzen. Um die Arbeit jedoch hinsichtlich des zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereiches von unterkritisch bis weit überkritisch differenzierter zu gestalten, sind als Untersuchungsobjekte zwei Einrumpfschiffe für den Verkehr auf Binnenwasserstraßen herangezogen worden. Bei der Auswahl der beiden verwendeten Schiffe ist darauf geachtet worden, daß sie sich deutlich in der dem Linienentwurf zugrunde gelegten Dienstgeschwindigkeit unterscheiden. So ist ein Schiff für den Einsatz ausschließlich im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich mit Froude-Tiefenzahlen $F_{nh} \leq 0.8$, das andere für den Einsatz im trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich mit $F_{nh} > 1.2$ konzipiert.

Aus den der VBD von mehreren Werften dankenswerterweise zur Verfügung gestellten Schiffslinien wurden ein Fahrgastschiff und ein Feuerlöschboot ausgewählt.

Das von der Fa. Lux-Werft und Schifffahrt GmbH, Niederkassel-Mondorf, entworfene und gebaute Fahrgastschiff, im Rahmen des vorliegenden FE-Vorhabens als Untersuchungsobjekt für den unterkritischen Geschwindigkeitsbereich ($F_{nh} \leq 0.8$) herangezogen, verkehrt überwiegend auf dem Rhein. Es handelt sich dabei um einen 2-Schrauber. Für die Versuche im großen Schlepptank der VBD ist ein Modell des Fahrgastschiffes im Maßstab $\lambda = 10$ gefertigt worden. Die Hauptabmessungen der Großausführung und des Modells der Ausgangsform des Fahrgastschiffes sind in Tab. 1 angegeben.

		Großausführung	Modell M1565
Länge in der Wasserlinie	L_{WL} [m]	39.288	3.929
Länge zw.d. Loten	L_{PP} [m]	39.288	3.929
Breite über Alles	$B_{üA}$ [m]	9.430	0.943
Breite in der KWL	B_{KWL} [m]	8.835	0.884
Tiefgang	T [m]	1.200	0.120
Verdrängung	∇ [m ³]	186.643	0.187
Benetzte Oberfläche	S [m ²]	281.96	2.820
Blockkoeffizient	C_B [-]	0.448	0.448
Völligkeitskoeffizient d. Hauptspt.	C_M [-]	0.763	0.763
Lage des Verdrängungs-Schwerpunktes bez. auf Hauptspant	LCB [m]	-1.684	-0.168

Tab. 1: Hauptabmessungen des Fahrgastschiffes, Ausgangsform.



In Anl. 1 sind die Schiffslinien der Ausgangseinheit des Fahrgastschiffes wiedergegeben. Anl. 2 zeigt eine Gegenüberstellung der Spantkonturen der Ausgangseinheit und der modifizierten Einheit dieses Schiffstyps. Die Modifizierung der Schiffslinien beschränkte sich lediglich auf eine Formänderung des Vorschiffes im Bereich Vorsteven bis Bau-Spt. 26. Voraussetzung bei der Modifizierung der Schiffsform war, die o.g. wesentlichen Hauptabmessungen, wie L_{WL} , L_{PP} , B_{KWL} und weitgehend auch ∇ , beizubehalten. Im nachhinein mußte lediglich eine unbedeutende Differenz in der Verdrängung zwischen beiden Varianten von $\Delta \nabla = 0.282 \text{ m}^3$ (Großausf.) in Kauf genommen werden.

Die Hauptabmessungen der Modifikation des Fahrgastschiffes sind in Tab. 2 aufgeführt.

		Großausführung	Modell M 1565m
Länge in der Wasserlinie	L_{WL} [m]	39.288	3.929
Länge zw.d. Loten	L_{PP} [m]	39.288	3.929
Breite über Alles	$B_{üA}$ [m]	9.430	0.943
Breite in der KWL	B_{KWL} [m]	8.835	0.884
Tiefgang	T [m]	1.200	0.120
Verdrängung	∇ [m^3]	186.361	0.186
benetzte Oberfläche	S [m^2]	281.99	2.820
Blockkoeffizient	C_B [-]	0.447	0.447
Völligkeitskoeffizient d. Hauptspt.	C_M [-]	0.763	0.763
Lage des Verdrängungs-Schwerpunktes bez. auf Hauptspant	LCB [m]	-1.706	-0.171

Tab.2 : Hauptabmessungen des Fahrgastschiffes, Modifikation.

Als Untersuchungsobjekt für den trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich ($F_{nh} > 0.8$) stellte die Fa. Meidericher Schiffswerft, Duisburg der VBD die Schiffslinien eines Zweischauben-Feuerlöschbootes für den Rhein-Herne-Kanal zur Verfügung.

Unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse im Einsatzgebiet dieses Schiffes und den Abmessungen des großen Schlepptanks der VBD, auch hinsichtlich der zu fahrenden Schleppgeschwindigkeiten, sowie der vorhandenen versuchstechnischen Einrichtungen der VBD wurde das Modell des Feuerlöschbootes im Maßstab $\lambda = 6$ hergestellt.

Die Hauptabmessungen der Ausgangseinheit des Feuerlöschbootes sind in Tab. 3 zusammengefaßt.

		Großausführung	Modell M 1568
Länge in der Wasserlinie	L_{WL} [m]	13.564	2.261
Länge zw.d. Loten	L_{PP} [m]	12.388	2.065
Breite über Alles	$B_{\ddot{U}A}$ [m]	3.87	0.645
Breite in der KWL	B_{KWL} [m]	3.650	0.608
Tiefgang	T [m]	0.935	0.156
Verdrängung	∇ [m ³]	12.855	0.0595
benetzte Oberfläche	S [m ²]	52.265	1.452
Blockkoeffizient	C_B [-]	0.275	0.275
Völligkeitskoeffizient d. Hauptspt.	C_M [-]	0.346	0.346
Lage des Verdrängungs-Schwerpunktes bez. auf HL	LCB [m]	4.866	0.811

Tab. 3 : Hauptabmessungen des Feuerlöschbootes, Ausgangsform.

In Anl. 3 sind die Schiffslinien der Ausgangseinheit des Feuerlöschbootes wiedergegeben. Anl. 4 enthält eine Gegenüberstellung der Spantkonturen des Grundtyps und des modifizierten Typs. Auch bei der Modifikation dieses Schiffes sollten, wie schon bei dem Fahrgastschiff, die wesentlichen Hauptabmessungen unverändert bleiben. Im einzelnen sind die Hauptabmessungen der Modifikation des Feuerlöschbootes der Tab. 4 zu entnehmen.

		Großausführung	Modell M 1568m
Länge in der Wasserlinie	L_{WL} [m]	13.564	2.261
Länge zw.d. Loten	L_{PP} [m]	12.388	2.065
Breite über Alles	$B_{\ddot{U}A}$ [m]	3.87	0.645
Breite in der KWL	B_{KWL} [m]	3.650	0.608
Tiefgang	T [m]	0.935	0.156
Verdrängung	∇ [m ³]	12.815	0.0593
benetzte Oberfläche	S [m ²]	52.150	1.449
Blockkoeffizient	C_B [-]	0.274	0.274
Völligkeitskoeffizient d. Hauptspt.	C_M [-]	0.346	0.346
Lage des Verdrängungs-Schwerpunktes bez. auf HL	LCB [m]	4.848	0.808

Tab. 4 : Hauptabmessungen des Feuerlöschbootes, Modifikation.



4. Experimentelle Untersuchung

4.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche für das vorliegende FE-Vorhaben gliederten sich für jeden Schiffstyp in die Meßreihen zur Ermittlung von :

a) Widerstand

Meßgrößen:	Schleppgeschwindigkeit	V_M
	Modell-Gesamtwiderstand	R_{TM}
	Trimmwinkel	Θ
	parallele Absenkung	z_V

b) Wasseroberflächenverformung

Meßgrößen:	Schleppgeschwindigkeit	V_M
	Modell-Position zur Meßstelle	x
	Wellenhöhe	ξ_W

c) Wellen an der Außenhaut

Meßgrößen:	Schleppgeschwindigkeit	V_M
	Trimmwinkel	Θ
	parallele Absenkung	z_V
	Wellenhöhe	ξ_W

Im Verlauf einer Versuchsfahrt konnten die Messungen zu a) und b) gleichzeitig erfolgen. Für die Messungen zu c) mußte eine zusätzliche Versuchsserie durchgeführt werden, da die auf der Außenhaut aufgeklebten Wellensonden, trotz ihrer Ausführung als dünne Folien, den Widerstand mehr oder weniger deutlich beeinträchtigen.

Sämtliche Versuchsreihen sind nach den international üblichen Methoden unter Beachtung des Froude'schen Modellgesetzes gefahren worden. Dabei waren die Modelle in einem DMS-Kraftmeßglied eingespannt, wobei sich Trimm und Absenkung frei einstellen konnten.

Die Oberflächen der Modelle waren technisch glatt lackiert. Zur Erzeugung turbulenter Strömung an der Außenhaut sind an den Modellen 2 cm breite Sandstreifen (Körnung 1.2 – 1.5 mm) jeweils an den Spanten 17 und 19, bei einer 20-er Spantteilung der Länge zwischen den Loten L_{pp} , aufgetragen worden.

Die Versuche wurden ohne Propeller und Anhänge gefahren. Auch wurde bei dem Modell des Feuerlöschbootes auf die an der Großausführung vorhandene Spritzleiste verzichtet. Es sollte im Verlauf dieses FE-Vorhabens vielmehr versucht werden, eine Verringerung der vom Schiffskörper hervorgerufenen Wellen ausschließlich durch Formänderung zu erreichen. Zudem war bekannt, daß eine derartige Spritzleiste bei den numerischen Berechnungen, wenn überhaupt, nur unzureichend hätte berücksichtigt werden können.

Bei den Versuchen mit den Grundformen der beiden Schiffstypen wurden die, je nach Wassertiefe möglichen Geschwindigkeitsbereiche in sehr engen Geschwindigkeits-Intervallen gefahren, da die Ergebnisse Beurteilungsgrundlage für die Formvariationen waren.

Mit den modifizierten Einheiten der beiden Schiffstypen wurden die Versuche auf den einzelnen Wassertiefen jeweils auf den Geschwindigkeitsbereich beschränkt, der beim Einsatz der Fahrzeuge in der Praxis überwiegend anfällt.

Nachfolgend werden für jeden einzelnen Schiffstyp die über alle Versuchsreihen beibehaltenen Versuchsbedingungen, umgerechnet auf die Großausführung, aufgeführt.

a) Fahrgastschiff

Versuchstiefgang	$T = 1.2 \text{ m}$
Wassertiefe	$h = 2.5, 3.3, 5.0, 9.0 \text{ m}$
Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnis	$h/T = 2.08, 2.75, 4.17, 7.5$

Zur Messung der vom Fahrgastschiff verursachten Wasseroberflächenverformung wurden 5 in einer Tankquerebene angeordnete Leitwert-Wellensonden eingesetzt. Ihre seitlichen Abstände zur Mittellängsachse des Modells betrugen, umgerechnet auf die Großausführung, $y = 6 \text{ m}, 15 \text{ m}, 25 \text{ m}, 35 \text{ m}$ und 45 m . Der untersuchte F_{nh} -Bereich erstreckt sich von $0.296 \leq F_{nh} \leq 0.879$.

Die Messung der an der Außenhaut des Modells entstehenden Wellen erfolgte mittels 11 Leitwert-Wellensonden, die an StB-Seite des Modells in den Ebenen der Spanten 0 (HL), 1.5, 3, 5, 7, 10 (MS), 12, 14, 16, 17.5, 18.5, 19.5 aufgeklebt waren.

b) Feuerlöschboot

Tiefgang	$T = 0.935 \text{ m}$
Wassertiefe	$h = 1.5, 1.872, 2.5, 5.0, 6.0 \text{ m}$
Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnis	$h/T = 1.6, 2.0, 2.67, 5.35, 6.42$

Die 8 Leitwert-Wellensonden zur Aufmessung der Wasseroberflächenverformung waren in einer Tankquerebene positioniert auf $y = 2.4 \text{ m}, 4.8 \text{ m}, 8.4 \text{ m}, 12.0 \text{ m}, 15.6 \text{ m}, 19.2 \text{ m}, 22.8 \text{ m}, 28.2 \text{ m}$ (umgerechnet auf die Großausführung). Der untersuchte F_{nh} -Bereich erstreckt sich von $0.321 \leq F_{nh} \leq 3.032$.

Das Aufzeichnen der Wellenprofile an der Außenhaut des Feuerlöschbootes erfolgte mittels 9 elektrischer Sonden, angeordnet an den Konstruktionsspanen 0 (HL), 2, 6, 10 (MS), 14, 17.5, 18.5 sowie entlang des Vorstevens und am Spiegel in der Mittellängsebene des Modells.

Der Wahl der Wassertiefen für die Versuchsreihen der einzelnen Schiffstypen lag die Überlegung zugrunde, die Untersuchungen über einen Einsatzbereich von extremer Flachwasserfahrt für das Feuerlöschboot bis hin zu Fahrt unter Tiefwasserbe-



dingungen durchzuführen. Die Wassertiefe $h = 5 \text{ m}$ ist als repräsentative Wassertiefe sowohl für Kanalfahrt als auch für Flußfahrt in die Untersuchungsreihe aufgenommen worden.

4.2 Versuchsauswertung

Die im Versuch gemessenen Gesamtwiderstände R_{TM} der Modelle sind in Schleppleistungswerte P_E für die Großausführung umgerechnet worden. Der dabei zu verwendende Reibungsabzug F_D , eine Korrekturgröße für den zu hohen Modell-Zähigkeitswiderstandsanteil am Gesamtwiderstand im Vergleich zum großen Schiff, wurde nach der ITTC-57 Methode ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit (infolge des begrenzten Fahrwassers) bestimmt.

$$P_E = (R_{TM} - F_D) * V_M * \lambda^{3.5} \quad \text{mit}$$

$$F_D = 0.5 * \rho * V_M^2 * S_M * (C_{FM} - C_{FS} - C_A)$$

$$C_{FM} = 0.075 / (\log R_{nM} - 2)^2 \quad C_{FS} = 0.075 / (\log R_{nS} - 2)^2$$

$$R_{nM} = V_M * L_{WLM} / v_M \quad R_{nS} = V_S * L_{WLS} / v_S$$

$$C_A = 0.0002$$

Der Index M steht für Modellwerte, Index S für Schiffswerte.

In den analog zu den gemessenen Spannungsänderungen der Wellensonden an der Außenhaut bestimmten Wellenordinaten-Werten sind die Weganteile infolge Trimm- und paralleler Tauchungsänderung enthalten. Um diese bei der Versuchsserie ebenfalls aufgenommenen Größen wurden die Wellenhöhen aus Meßwerten vorzeichen-gerecht korrigiert, so daß die Ergebnisse die Wellenhöhe bezogen auf die ungestörte Wasseroberfläche darstellen. Somit sind die in den Diagrammen wiedergegebenen Wellenprofile an der Außenhaut direkt den Wasseroberflächen-Verformungen neben dem Schiff zuzuordnen.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Widerstandsversuche

4.3.1.1 Fahrgastschiff; Ausgangsform und Modifikation

Die für die Ausgangsversion des Fahrgastschiffes ermittelten Schleppleistungen P_E , Trimmwinkel Θ und parallelen Tauchungsänderungen z_V sind in der Anl. 5, über der Geschwindigkeit V aufgetragen. In der Anl. 6 sind die Gesamtwiderstands-Beiwerte C_T über der Froude'schen Tiefenzahl F_{nh} dargestellt. Parameter ist jeweils die Wassertiefe h .



Für die Ausgangsversion des Fahrgastschiffes ist auf einer Wassertiefe von $h = 9.0$ m das Maximum der Schleppleistung P_E aufgrund der Steilheit des Gradienten $\Delta P_E / \Delta V$ im oberen Geschwindigkeitsbereich mit $P_E = 700$ kW anzusetzen (Anl. 5). Die korrespondierende Geschwindigkeit zu dieser Schleppleistung beträgt $V = 28.6$ km/h. Bei den in diesem Fall vorliegenden Werten für $h/T = 7.5$, $F_n = 0.405$ und $F_{nh} = 0.845$ ist davon auszugehen, daß auch im hohen, noch unterkritischen Geschwindigkeitsbereich auf $h = 9.0$ m nur ein geringer Flachwassereinfluß wirksam wird.

Mit geringer werdender Wassertiefe werden auch die maximal realisierbaren Geschwindigkeiten im unterkritischen Bereich und die dabei auftretenden Schleppleistungen P_E deutlich niedriger. Aus der Anl. 6 ist zu ersehen, daß für die Grundversion des Fahrgastschiffes die maximalen Geschwindigkeit-Schleppleistungs-Verhältnisse im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich etwa bei $0.81 \leq F_{nh} \leq 0.85$ anzunehmen sind (mit den kleineren F_{nh} -Werten für geringere Wassertiefe). Geschwindigkeitserhöhungen bis zu diesen F_{nh} -Werten, als Grenzkriterien zum transkritischen Geschwindigkeitsbereich, bedingen eine zunehmende Eintauchung z_V des Schiffes mit der Tendenz zu größer werdenden Gradienten $\Delta z_V / \Delta V$. Der Trimm ist bis zu den o.g. F_{nh} -Grenzwerten gering kopflastig und wechselt im höheren F_{nh} -Bereich zur Hecklastigkeit mit deutlich zunehmender Tendenz, besonders auffallend bei $h = 9.0$ m.

Der Wechsel der parallelen Absenkung von Eintauchung zu Austauchung sowie die stark zunehmende Hecklastigkeit sind Anzeichen für den beginnenden transkritischen Geschwindigkeitsbereich.

Bei den o.g. F_{nh} -Grenzwerten ergaben sich für die Grundversion des Fahrgastschiffes auf den einzelnen Wassertiefen Geschwindigkeiten und Schleppleistungen gemäß Tab. 5.

h [m]	V [km/h]	F_{nh}	P_E [kW]
2.5	14.4	0.808	106
3.3	17.0	0.830	143
5.0	21.4	0.849	266
9.0	28.6	0.845	700

Tab. 5 : Grenzwerte im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich.

Generell gilt im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich, daß bei gleichbleibender Geschwindigkeit mit niedriger werdender Wassertiefe die Schleppleistung zunimmt.

Durch die Modifikation der Grundform des Fahrgastschiffes konnte hinsichtlich des Geschwindigkeit-Schleppleistungs-Verhältnisses keine erwähnenswerte Verbesserung erreicht werden. Daher wurde auf eine Wiedergabe der Ergebnisse für die modifizierte Version verzichtet.



4.3.1.2 Feuerlöschboot; Ausgangsform und Modifikation

Die Ergebnisse der Widerstandsversuche mit dem Feuerlöschboot sind in Anl. 7 über der Geschwindigkeit V , in Anl. 8 über der Froude'schen Tiefenzahl F_{nh} aufgetragen. Wie aus der Anl. 7 zu ersehen ist, kann als obere Schleppleistungsgrenze $P_E = 250$ kW angesetzt werden, da dieser Leistungswert auf allen hier untersuchten Wassertiefen erst bei Geschwindigkeiten von $41.0 \text{ km/h} \leq V \leq 42.5 \text{ km/h}$ erreicht wird, also oberhalb der Dienstgeschwindigkeit des Feuerlöschbootes mit $V = 37 \text{ km/h}$ liegt. Aus den genannten Geschwindigkeiten ergeben sich Froude'sche Tiefenzahlen bei Wassertiefen $1.5 \text{ m} \leq h \leq 1.872 \text{ m}$ von $2.7 \leq F_{nh} \leq 3.1$, bei $2.5 \text{ m} \leq h \leq 6 \text{ m}$ von $1.5 \leq F_{nh} \leq 2.4$.

Aufgrund der Entwicklung des Gradienten $\Delta P_E / \Delta V$ im oberen Geschwindigkeitsbereich ließe sich eine Heraufsetzung der Schleppleistungsgrenze ($P_E > 250$ kW) und damit eine höhere Geschwindigkeit vertreten.

Bei Fahrt mit überkritischer Geschwindigkeit nimmt die Schleppleistung bei gleicher Geschwindigkeit mit geringer werdender Wassertiefe ab. Diese Staffelung der Schleppleistung P_E in Abhängigkeit von der Wassertiefe h bei $V = \text{konst.}$ steht also im Gegensatz zu der im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich. Eine Ursache hierfür ist u.a. die unterschiedliche Trimm- und Tauchungsänderung des Schiffes auf den einzelnen Wassertiefen. Es zeigt sich nämlich, daß mit kleiner werdender Wassertiefe sowohl der hecklastige Trimm als auch die Absenkung geringer werden.

Bezüglich der Schwimmlage führt bei diesem Schiff eine Geschwindigkeitsänderung im überkritischen Bereich bei $h = \text{konst.}$ lediglich zu einer anderen Trimmung, während die Austauschung gleich bleibt (Anl. 7). Aus der Anl. 8 ist zu ersehen, daß bei $F_{nh} > 1.6$ auch unterschiedliche Wassertiefen unter der Voraussetzung $F_{nh} = \text{konst.}$ nahezu gleiche Austauschungen des Schiffes bewirken.

Der transkritische Geschwindigkeitsbereich deutet sich auf allen untersuchten Wassertiefen nahezu einheitlich bei $F_{nh} = 0.8$ an (Anl. 8). Kennzeichnend hierfür sind merkliche Änderungen der Schwimmlage des Schiffes bei relativ kleinen Geschwindigkeitsänderungen, wobei in diesem Bereich mit zunehmendem F_{nh} die parallele Tauchung vom Absenken zum Austauschen wechselt. Der Trimm, der sich bei diesem Schiff generell hecklastig einstellt, erreicht je nach Wassertiefe ein Maximum im Bereich $0.87 \leq F_{nh} \leq 1.1$ (niedrigere F_{nh} -Werte bei höheren Wassertiefen). Im Kurvenverlauf $P_E = f(V)$ (Anl. 7) tritt der transkritische Geschwindigkeitsbereich in Form eines „Buckels“ aufgrund einer Abnahme der Steigung $\Delta P_E / \Delta V$ in Erscheinung. Dieser ist bei diesem Schiff nahezu ausnahmslos auf allen vorliegenden Wassertiefen nur insoweit ausgeprägt, daß lediglich eine Verringerung der Steigung $\Delta P_E / \Delta V$, nicht aber eine negative Steigung auftritt, was eine Abnahme der Schleppleistung mit zunehmender Geschwindigkeit bedeuten würde.



Der transkritische Geschwindigkeitsbereich erstreckt sich bei Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnissen $h/T \leq 2$ bis etwa $F_{nh} = 1.1$, bei $h/T \geq 2.67$ bis etwa $F_{nh} = 1.3$ (Anl. 8).

Im rein unterkritischen Geschwindigkeitsbereich ($F_{nh} \leq 0.8$) wird bei konstant bleibender Geschwindigkeit mit zunehmender Wassertiefe die Schleppleistung, wie erwartet, kleiner.

In den Anln. 9 - 12 sind die aus Messungen bestimmten Schleppleistungen, Trimmwinkel und parallelen Tauchungsänderungen der Ausgangsvariante und der modifizierten Form gegenübergestellt.

Die Schleppleistung der modifizierten Version ist im überkritischen Geschwindigkeitsbereich nahezu ausnahmslos um 8 – 11% niedriger als die der Grundform, wobei die Leistungsdifferenzen um so höher werden, je größer die Wassertiefe ist. Lediglich bei der Wassertiefe $h = 1.5$ m (Anl. 9) ergeben sich nennenswerte Differenzen zwischen den Schleppleistungen beider Formen des Feuerlöschbootes erst bei Geschwindigkeiten $V \geq 35$ km/h ($F_{nh} \geq 2.53$).

Im transkritischen Geschwindigkeitsbereich differieren die Schleppleistungen beider Einheiten des Feuerlöschbootes merkbar erst bei Wassertiefen $h \geq 5.0$ m, mit den niedrigeren P_E -Werten für die Modifikation. Dies gilt weitgehend auch für die parallele Tauchungsänderung z_v und die Trimmlage Θ .

Dagegen ergeben sich im überkritischen Geschwindigkeitsbereich mehr oder weniger große Unterschiede in den Schiffslagen beider Versionen des Feuerlöschbootes. So stellen sich bei der modifizierten Einheit generell die größeren hecklastigen Trimmwinkel ein, wobei mit größer werdender Wassertiefe die Unterschiede zu den Θ -Werten der Ausgangsform geringer werden.

4.3.2 Wellenprofil an der Außenhaut

4.3.2.1 Fahrgastschiff; Ausgangsform und Modifikation

In den Anln. 13 - 16 werden jeweils für $h = \text{konst.}$ die Wellenprofile an der Außenhaut über der Schiffslänge L_{PP} in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wiedergegeben.

Der im Bugbereich entstehende Wellenberg erreicht nahezu ausnahmslos bereits bei Spt. 19.5 seine maximale Höhe. Lediglich auf der Wassertiefe $h = 9.0$ m bei Geschwindigkeiten $V > 22$ km/h ($F_n > 0.311$, $F_{nh} > 0.65$) bildet sich das Wellenhöhenmaximum an Spt. 18.5 aus (Anl. 16). Die Maximalwerte im Bereich des Vorschiffes stellen die im Absolutbetrag größten Wellenordinaten des gesamten Wellenprofils entlang der Außenhaut dar. Allenfalls bei Fahrten auf Wassertiefen $2.5 \text{ m} \leq h \leq 3.3 \text{ m}$ mit $F_{nh} \geq 0.8$ können sich im Schiffslängenbereich $0.25 L_{PP}$ vor $HL = 9.8$ m in dem sich dort ausbildenden überaus tiefen Wellental größere absolute Wellenordinatenwerte ergeben.



Die Ordinaten des Wellenberges im Bereich des Bugs werden mit zunehmender Geschwindigkeit höher, womit aber nicht unbedingt auch eine Ausdehnung des Wellenberges nach hinten verbunden ist, d.h. die Wellensteilheit nimmt zu. Erst ab Froude'scher Tiefenzahl von etwa $F_{nh} = 0.85$ auf den Wassertiefen $2.5 \text{ m} \leq h \leq 5.0 \text{ m}$ (Anln. 13 - 15), bei Tiefwasser mit $h = 9.0 \text{ m}$ (Anl. 16) bereits schon ab $F_{nh} = 0.7$, ist eine Ausdehnung des Bugwellenberges nach hinten gegeben.

Überwiegend werden bei gleicher Wassertiefe mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit die Ordinaten des Wellenberges im Vorschiffbereich wie auch die des ausgehenden Wellentalles entlang des Schiffes größer.

4.3.2.2 Feuerlöschboot; Ausgangsform und Modifikation

In den Anln. 17 – 21 werden jeweils für $h = \text{konst.}$ die Wellenprofile an der Außenhaut über der Schiffslänge L_{PP} in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wiedergegeben.

Die Charakteristik der Wellenprofile entlang der Außenhaut der Ausgangsform des Feuerlöschbootes läßt sich weitgehend den Geschwindigkeitsbereichen „unterkritisch“, „transkritisch“ und „überkritisch“ zuordnen.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Übergänge zu den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen nicht auf jeder Wassertiefe bei gleichen Froude'schen Tiefenzahlen erfolgen. Wie aus der Anl. 8 (C_T über F_{nh}) zu ersehen ist, liegen bei niedriger Wassertiefe die Bereichsgrenzen bei größeren F_{nh} -Zahlen als bei höheren Wassertiefen.

Im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich bilden sich die absolut größten Ordinaten-Werte des gesamten Wellenprofils ($V = \text{konst.}$) im Bugbereich aus. Je höher die Geschwindigkeit um so größer werden dort die maximalen Wellenordinaten. Als Maximum ergaben sich im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich bei Wassertiefen $1.5 \text{ m} \leq h \leq 2.5 \text{ m}$ $\xi_{\max} = 0.57 \text{ m} - 0.66 \text{ m}$, bei $h \geq 5.0 \text{ m}$ $\xi_{\max} = 0.81 \text{ m} - 0.84 \text{ m}$.

Die größten negativen Wellenordinaten (Wellental) ergaben sich ausnahmslos im Bereich hinter dem Hauptspant. Sie traten angenähert bei $F_{nh} = 0.9$ auf. Höhere negative Maximalordinaten entstehen auch im trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich nicht mehr.

Mit Überschreiten der Grenze zum transkritischen Geschwindigkeitsbereich verringern sich die Wellenordinaten. Gleichzeitig setzt eine deutliche Ausdehnung, d.h. eine Verlängerung des Wellenberges ein.

Bei Geschwindigkeiten im überkritischen Bereich bauen sich an der Außenhaut der Ausgangsform des Feuerlöschbootes ausgedehntere (längere und höhere) Wellenberge auf als im trans- und unterkritischen Bereich. Je höher die Schiffsgeschwindigkeit um so größer ist die vom Wellenberg überdeckte Außenhautfläche. Das Wasser liegt auch bei hohen Geschwindigkeiten an der Außenhaut an. Die maximale Wellenordinate verschiebt sich zunehmend nach hinten und tritt bei einer Ge-



schwindigkeit von $V = 39.7$ km/h etwa bei $0.5 L_{pp}$ auf. Hierbei betragen auf allen untersuchten Wassertiefen die maximalen Wellenordinaten $\xi_{\max} = 1.0$ m – 1.1 m. Der Wellenberg erstreckt sich vom Bug bis ca. $0.75 L_{pp}$ nach hinten. Dennoch werden weder im Bugbereich mit positiven Wellenordinaten noch im Heckbereich mit negativen Ordinaten im Absolutbetrag größere Koordinatenwerte erreicht als im trans- oder unterkritischen Geschwindigkeitsbereich.

Insgesamt sind die im überkritischen Geschwindigkeitsbereich an der Außenhaut der Ausgangsform des Feuerlöschbootes entstehenden Wellenberge als äußerst ungünstig einzustufen. Durch die Anbringung einer Spritzleiste wäre zwar ein Ablösen der Welle von der Außenhaut zu erreichen. Angestrebt wurde aber eine Verringerung der Wellenhöhe ausschließlich durch eine Änderung der Schiffslinien zu erzielen.

In den Anln. 22 - 34 werden die aus Messungen bestimmten Wellenordinaten-Werte an der Außenhaut der Ausgangsform und der Modifikation des Feuerlöschbootes für jeweils konst. Wassertiefe und Geschwindigkeit gegenübergestellt.

Durch die Formmodifikation des Feuerlöschbootes konnten die Wellenordinaten des Wellenberges entlang der Außenhaut erheblich verringert werden. Nicht nur die Ordinaten des Wellenberges im Bereich vor dem Hauptspant fallen kleiner aus als die der Ausgangsform. Auch das im hinteren Schiffsbereich der modifizierten Form des Feuerlöschbootes sich ausbildende Wellental wird wesentlich flacher als bei der Ausgangsform. Vereinzelt entsteht bei der Modifikation in dem hinteren Schiffsbereich sogar eine geringe Wellenerhebung, bezogen auf die ungestörte Wasseroberfläche ($V = 0$ km/h).

Den Änderungen im Wellenprofil entlang der Außenhaut infolge der Formmodifikation können tendenzmäßig keine allgemein zutreffenden Wassertiefen- oder Geschwindigkeits-Abhängigkeiten zugeordnet werden. Die bemerkenswertesten Verminderungen der Wellenordinaten entlang der Außenhaut ergaben sich auf allen untersuchten Wassertiefen bei einer Geschwindigkeit von $V = 39.7$ km/h. Verbunden mit den erheblich niedriger ausfallenden Wellenordinaten bei der modifizierten Form ist eine deutliche Verkürzung der Länge des Wellenberges. Die im Vergleich zur Ausgangsform des Feuerlöschbootes kleiner ausfallenden Ordinatenhöhen und kürzere Länge des Wellenberges bedingen eine deutliche Verringerung der benetzten Oberfläche des Modells.

4.3.3 Aufgemessene Wasseroberflächenverformungen

4.3.3.1 Fahrgastschiff; Ausgangsform und Modifikation

Die durch die Ausgangsform und die Modifikation des Fahrgastschiffes verursachten Wasseroberflächenverformungen werden in Form von Wellen-Längsschnitten in den Anln. 35 - 47 gegenübergestellt. Zusätzlich ist die Lage des Schiffes (Schiffsdurchgang) relativ zu den Wellenprofilen angegeben, in den Bildern als Schiffsdurchgang (durch die Tankquerebene der Wellensonden) bezeichnet.

Im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich werden bei gleichbleibender Wassertiefe ($h = \text{konst.}$) mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit sowohl die maximalen Wellenberg- wie auch maximalen Wellentalordinaten, jeweils bez. auf die ungestörte Wasseroberfläche, in den von diesem Schiffstyp hervorgerufenen Wellenfeldern größer. Bei konstant bleibender Schiffsgeschwindigkeit werden mit zunehmender Fahrwassertiefe die maximal auftretenden Wellenhöhen eines Wellenfeldes kleiner.

Auffallend ist bei beiden Versionen dieses Schiffstyps das sich jeweils neben dem Schiffskörper ausbildende ausgeprägte Wellental im Anschluß an den vom Bug bewirkten, vergleichsweise geringen Wellenberg. Mit zunehmender Entfernung vom Schiff wird das Wellental flacher, d.h. die Wellental-Ordinaten werden kleiner. Der größte Ordinatenwert dieses Wellentales, gleichzeitig auch das Betragsmaximum der Wellenordinaten des gesamten Wellenfeldes, liegt im Wellenlängsprofil $y = 6.0 \text{ m}$ aus MS, d.h. in Schiffsnähe, vor. Der Länge nach ergibt sich das Ordinaten-Maximum im Bereich hinter dem Hauptspant. Lediglich auf einer Wassertiefe von $h = 9.0 \text{ m}$ und Geschwindigkeiten $V \leq 26.0 \text{ km/h}$ liegt der Ort vor dem Hauptspant. Je höher die Schiffsgeschwindigkeit, um so mehr verschiebt sich die maximale Wellental-Ordinate zum hinteren Lot (HL) hin. Bei allen Wassertiefen erstreckt sich im oberen, jedoch noch unterkritischen Geschwindigkeitsbereich das Wellental bis über das hintere Lot hinaus.

In der Mehrzahl der Untersuchungsfälle liegen die maximalen Wellental-Ordinaten bei der Modifikation des Fahrgastschiffes niedriger als bei der Ausgangsversion. Den Differenzen lassen sich aber keine Abhängigkeiten von der Wassertiefe oder den Geschwindigkeiten zuordnen.

Die Wellenberge mit den größten Ordinatenwerten entstehen im nachlaufenden Wellenfeld. Bei hohen Geschwindigkeiten liegen die maximalen Wellenberg-Ordinaten im Wellenlängsprofil in der Nähe der Fahrwasserbegrenzung ($y = 45 \text{ m}$ aus MS) vor. Diese sollen jedoch hier nicht berücksichtigt werden, da die Wellenbildung in diesem Bereich wesentlich vom Wandeinfluß mitbestimmt wird. Eine eindeutige Aussage, bei welcher Version dieses Schiffstyps die kleineren Ordinaten auftreten, ist nicht möglich. Eine Abhängigkeit von der Wassertiefe oder der Schiffsgeschwindigkeit ist nicht zu erkennen.

Die maximale Wellenhöhe ζ_w (Höhe der Welle von Tal zu Berg) eines durch eine der beiden Einheiten erzeugten Wellenfeldes zeigt, wie es auch bei den Wellenberg- und Wellental-Ordinaten zutrifft, eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Wassertiefe. Je größer die Geschwindigkeit ($h = \text{konst.}$) oder je niedriger die Wassertiefe ($V = \text{konst.}$) um so höher fällt das Wellenmaximum aus. Es entsteht, aufgrund des ausgeprägten Wellentales, unmittelbar neben dem Schiff. Das Wellenhöhen-Maximum im Nachlaufeld ist nahezu ausnahmslos niedriger als das im Nahbereich des Schiffes. Je höher jedoch die Schiffsgeschwindigkeit ist, um so geringer werden diese Unterschiede.

Erwähnenswerte Unterschiede zwischen den maximalen Wellenhöhen in den durch die Ausgangsversion und der Modifikation erzeugten Wellenfeldern zeigen sich nur



bei den hohen Geschwindigkeiten einer jeden Wassertiefe, mit den niedrigeren Wellenhöhen bei der modifizierten Form des Fahrgastschiffes.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß durch die Modifizierung der Form des Fahrgastschiffes keine wesentlichen Veränderungen des Wellenfeldes neben dem Schiff erzielt worden sind. Insgesamt können die einzelnen Wellenprofile beider Versionen des Fahrgastschiffes als gleich angesehen werden.

4.3.3.2 Feuerlöschboot; Ausgangsform und Modifikation

Die durch die Ausgangsversion und die Modifikation des Feuerlöschbootes hervorgerufenen Wasseroberflächenverformungen bei Geschwindigkeiten im überkritischen Bereich werden in Form von Wellen-Längsschnitten in den Anln. 48 - 59 gegenübergestellt.

Die Wellen-Längsprofile beider Schiffsformen weisen keine nennenswerten Unterschiede auf, weder in den dominanten Wellenhöhen noch in den Wellenfrequenzen. Eine Abhängigkeit der in einem Wellenfeld auftretenden größten Wellenhöhen von der Schiffsgeschwindigkeit ist bei beiden Versionen dieses Schiffstyps im überkritischen Geschwindigkeitsbereich nicht mit Sicherheit feststellbar. Dieses gilt sowohl für die Höhe der direkt neben dem Schiffskörper entstehenden Welle, als auch für die im Nachlauf Feld auftretende größte Wellenhöhe. Die größten dominanten Wellenhöhen treten auf allen hier untersuchten Wassertiefen überwiegend bei den niedrigen Geschwindigkeiten auf, mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit werden sie kleiner.

Eine Abhängigkeit der Wellenhöhe von der Wassertiefe hat allenfalls für die dominanten Wellenhöhen im Nachstromfeld Gültigkeit. Mit zunehmender Wassertiefe kann in diesem Fall bis $h = 5.0$ m von einer Erhöhung der Wellen ausgegangen werden. Eine solche Tendenz ist für die Wellen in unmittelbarer Schiffsnähe nicht unbedingt anzunehmen, vereinzelt liegt eine gegenläufige Tendenz vor.

4.4 Schlußfolgerung zu den experimentellen Untersuchungen

Durch die an den beiden Schiffstypen vorgenommenen Modifikationen konnte lediglich bei dem Feuerlöschboot ein Erfolg in Form einer Reduzierung der Wellen an der Außenhaut und im Zusammenhang damit des Geschwindigkeit-Leistungs-Verhältnisses erzielt werden. Aufgrund der experimentellen Untersuchung ist zusammenfassend zu folgern, daß nennenswerte Verringerungen der deutlich ausgeprägten (dominanten) Wellen in den von den Einheiten erzeugten Wellenfeldern bereits durch relativ geringe lokale Formänderungen an kritischen Stellen des Schiffrumpfes erheblichen Einfluß auf das Oberflächen-Wellensystem und damit auch auf das Geschwindigkeit-Leistungs-Verhältnis haben können.

5. Numerische Berechnungen

Für die Berechnungen wurden das potentialtheoretische nichtlineare Panel-Verfahren **SHALLO** nach Jensen [Jensen, 1988, 1989] und das auf der nichtlinearen Flachwassertheorie basierende Verfahren **SWBQISD** nach Jiang [Jiang, 1998] eingesetzt. Das letztgenannte Programm ist im ISD der Universität Duisburg entwickelt worden, das auch die Durchführung der Berechnungen mit dem Programm **SWBQISD** übernahm. Die Anwendung des Programms **SHALLO** erfolgte in der VBD.

5.1 SHALLO - Berechnungen

5.1.1 Vorbemerkungen

Bei der Anwendung des potentialtheoretischen CFD-Programms SHALLO steht beim derzeitigen, relativ jungen Entwicklungsstand des Verfahrens der Validierungsgedanke zwangsläufig im Vordergrund. Dabei ist zu betonen, daß bei der Komplexität des Problems der Schiffskörperumströmung der Begriff der Validierung mehrere Aspekte umfaßt, die zu differenzieren sind.

Die übliche Form der Validierung beinhaltet den zahlenmäßigen Vergleich zwischen Rechnung und Experiment und stellt, verallgemeinert ausgedrückt, die Güte des - physikalisch - idealisierten Rechenmodells in Abhängigkeit von den Variationsparametern heraus.

Ein zweiter, wesentlich schwieriger zu behandelnder Aspekt betrifft die Grenzen der Anwendbarkeit. Diese Problemstellung ist insofern komplex, weil die Ursache des möglichen Versagens eines Rechenverfahrens einerseits in dem physikalisch-mathematischen Modellansatz, andererseits in dem numerischen Lösungsalgorithmus (Modellierung des finiten Problems) begründet sein kann.

Es soll bereits an dieser Stelle vorweggenommen werden, daß die beiden untersuchten Schiffstypen des Fahrgastschiffes und des Feuerlöschbootes bezogen auf das potentialtheoretische Strömungsmodell zwei extreme Schiffsformen darstellen, die den letztgenannten Aspekt der Validierung unmittelbar berührten.

Das Programm wurde ursprünglich für schlanke Seeschiffsformen entwickelt und wird hier auf flachgehende gedrungene Formen mit ausgeprägten Knicklinien auf flachem Wasser angewendet.

Während die Rechnung bei dem ersten Typ für die unterkritische Geschwindigkeit zu einem Teilerfolg führte, versagte sie beim zweiten für den überkritischen Fall vollständig.

Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich mit den Teilergebnissen, wobei versucht wird, zusammen mit diesen in Verbindung mit allgemeinen theoretisch orientierten Überlegungen die Ursache für das Versagen des Verfahrens zu klären.



5.1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieses theoretisch-numerischen Teils des vorliegenden FE-Vorhabens war es, die Verformung der Wasseroberfläche für beide Schiffe unter Betriebsbedingungen auf unterschiedlichen Wassertiefen zu ermitteln. Dabei sollten die Ergebnisse der Basis- und der modifizierten Form gegenübergestellt werden. Durch den Vergleich mit Messungen sollte geprüft werden, ob sich aus den Berechnungsergebnissen folgerichtige Beurteilungskriterien hinsichtlich der Wellenbildung ableiten lassen.

Die Berechnungsparameter wurden den Ausführungen in den Abschnitten 4.3.1.1 und 4.3.1.2 entsprechend für das Fahrgastschiff F_{nh} -Zahl-orientiert und für das Feuerlöschboot F_n -Zahl-orientiert festgelegt und sind in den nachfolgenden Tabellen wiedergegeben.

h [m]	L/h	V [km/h]	F_n	F_{nh}
2,5	15,72	15,1	0,2136	0,8469
3,3	11,91	17,3	0,2448	0,8447
5,0	7,86	22,0	0,3113	0,8728
9,0	4,37	28,6	0,4039	0,8441

Tab. 6 : Berechnungsparameter Fahrgastschiff, Kanalbreite $w = 98,1$ m

h [m]	L/h	V [km/h]	F_n	F_{nh}
1,5	9,13	39,7	0,9513	2,8748
2,5	5,48			2,2268
5,0	2,74			1,5746
6,0	2,283			1,4374

Tab. 7 : Berechnungsparameter Feuerlöschboot, Kanalbreite $w = 58,86$ m

Die in den Tabellen 6 und 7 enthaltenen Daten repräsentieren Geschwindigkeitspunkte aus den gefahrenen Versuchsreihen und weisen deshalb geringe Unterschiede zu den Zahlenangaben in den oben genannten Textabschnitten auf.

5.1.3 Charakterisierung der Schiffsformen

Fahrgastschiff

Der Spantenriß (Anlagen 1, 2) charakterisiert ein extrem flachgehendes Fahrzeug, dessen Spanten bei sehr starker Aufkimmung ($> 20^\circ$) und schwach angedeuteter runder Kimm stark ausfallen, um dann über einen scharfen Knick in die senkrechte Bordwand überzugehen. Der Freibord bis zum Knick beträgt nur etwa die Hälfte des



geringen Tiefgangs von $T = 1.2$ m. Der Zweischrauber besitzt schwach ausgebildete Propellertunnel, die in Knicklinienbauweise ausgeführt sind, und einen leicht eintauchenden Spiegel. Die niedrige Knicklinie im Überwasserschiff fungiert als Wellenabweiser. Bei hoher Fahrt entsteht eine Bugwelle, die sich an der Kante ablöst und in Form einer brechenden Schleierwelle seitlich auf die Wasseroberfläche niedergeht.

Feuerlöschboot

Das Feuerlöschboot (Anlagen 3, 4) zeigt die typische Form eines als Knickspanter konzipierten Gleiters in Doppelschrauberausführung mit ausgeprägtem einfallendem Spiegel und angedeuteten Propellertunneln. Das mit einem Kielfall ausgestattete Boot besitzt im Vorschiff einen integrierten Kiel, der im Hinterschiff in einem gebauten Totholz endet. Die Spanten weisen im Unterwasserschiff die typische konkave Form auf. Diese endet in einem scharfen Knick, der relativ niedrig oberhalb der Wasserlinie angeordnet ist. Ausgehend vom höchsten Punkt am Vorsteven fällt die Knicklinie nach hinten stetig ab, um in der unteren seitlichen Ecke des Spiegels dicht oberhalb der Wasseroberfläche zu enden. Oberhalb des Knicks, der als Wellenabweiser dient, verlaufen die Spanten im Vorschiff ausfallend, während sie im Hinterschiff eingezogen sind. An dem Boot entsteht bei hoher, überkritischer Fahrt eine massive Schleierwelle im Vorschiffsbereich, die beim Originalfahrzeug durch eine zusätzliche Spritzleiste auf eine akzeptable Größe reduziert wird.

Es kann davon ausgegangen werden, daß die Wellenabweiserkanten, die sowohl Fahrgastschiff als auch Feuerlöschboot aufweisen, letztendlich als Ursache für die Berechnungsschwierigkeiten anzusehen sind, die schließlich zum Versagen des Berechnungsverfahrens führten.

5.1.4 Grundlagen des Berechnungsverfahrens, numerische Probleme

Das Programm SHALLO ist ein nichtlineares Panelverfahren und somit ein finites Randelementeverfahren, das Rankine-Quellen verwendet, die in den Kollokationspunkten des Körpernetzes und oberhalb der Kollokationspunkte des Netzes auf der Wasseroberfläche angeordnet sind. Seitliche und tiefenmäßige Begrenzungen des Flüssigkeitsraums werden, wenn sie orthogonal angeordnet sind, durch einen Spiegelungsalgorithmus berücksichtigt, können aber bei anderen geometrischen Verhältnissen (schiefwinklige Anordnung) auch durch zusätzliche Quellbelegungen berücksichtigt werden.

Zur Gestaltung des Körpernetzes können Polygone beliebiger Eckenzahl verwendet werden. Bevorzugt verwendet werden sollten jedoch Rechtecke, die hauptsächlich spant- und längslinienorientiert angeordnet sind.

Die analytischen Ansätze des potentialtheoretischen Verfahrens setzen voraus, daß die verwendeten Funktionen stetig und n -fach stetig differenzierbar sind. Dies kann bei finiter Anwendung zwangsläufig nur näherungsweise erfüllt werden. Eine Empfehlung besagt deshalb, daß der Komplementärwinkel zwischen zwei aneinander-



grenzenden Flächenelementen 30° nicht überschreiten sollte. Diese Bedingung führt bei Schiffsformen, die - wie im vorliegenden Fall - Knicklinien aufweisen, zu der Notwendigkeit, die auftretenden Kanten durch „Anfasen“ zu entschärfen.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen vermuten, daß diese Voraussetzung im „pseudomathematischen“ Sinne zwar notwendig, aber durchaus nicht hinreichend ist, um das Berechnungsproblem lösbar zu machen.

Das semi-orthogonale Netz auf der Wasseroberfläche wird per Programm halbautomatisch erstellt, wobei die Querlinien rechtwinklig zur Schiffslängsachse verlaufen. Die Längslinien sind vor und hinter dem Schiff parallel zur Längsachse angeordnet, weichen aber im Bereich des Körpers in der Art von Stromlinien diesem aus. Die innerste Linie, die hier die Form der Deckslinie aufweist, ist in einem definierten Abstand von der Bordwand angeordnet. Der dadurch abgegrenzte Streifen der Wasseroberfläche, der rings um das Schiff verläuft, stellt eine „tote“ Zone dar, die nicht mit Quellen belegt wird und damit auch nicht in das Berechnungsproblem einbezogen wird (s.u.). Es ist offensichtlich, daß die Breite dieser Zone so klein wie möglich gehalten werden muß, weil die schiffsnahen Bereiche der verformten Wasseroberfläche die stärksten Auswirkungen auf das Strömungsproblem haben.

Die Besonderheit des Verfahrens beruht darauf, daß die nichtlineare kombinierte Oberflächenbedingung, eine nichtlineare Differential-Gleichung höherer Ordnung, iterativ gelöst wird. Sie beinhaltet die kinematische und die dynamische Oberflächenrandbedingung. Erstere beschreibt die Bewegung eines Flüssigkeitsteilchens an der verformten Oberfläche, die der Orbitalbewegung in der vorausgesetzten idealen Flüssigkeit entspricht, letztere die Druckverhältnisse (Bernoulli-Gleichung) in der Grenzstromfläche, als die sich die verformte Wasseroberfläche darstellt.

Das Verfahren läuft auf die Lösung eines linearen Gleichungssystems hinaus, worin die Ergiebigkeiten der eingangs definierten diskreten Punktquellen als Unbekannte auftreten. Der Einstieg in die Berechnung (Bestimmung der Anfangswerte) ergibt sich aus dem linearisierten Berechnungsansatz, der geschlossen gelöst werden kann. Es schließt sich die iterative Berechnung der vollständigen Oberflächenrandbedingung an, die als gelöst betrachtet wird, wenn eine vorgegebene Anzahl von Iterationsschritten erfolgreich abgearbeitet worden ist.

Die Zahl der Iterationsschritte wird von dem Anwender des Programms vorgegeben. Das Konvergenzverhalten der verschiedenen Zwischenlösungen wird zu Kontrollzwecken von dem Programm vollständig ausgegeben.

Eine neuralgische Zone, die den Verlauf der Rechnung maßgeblich beeinflusst, ist der bereits oben erwähnte quellenfreie Streifen auf der Wasseroberfläche rings um das Schiff. Wird er zu schmal gewählt, treten je nach Eigenschaften der benachbarten Flächenelemente auf dem Körpernetz mehr oder weniger starke Interferenzerscheinungen auf.

nungen zwischen den diskretisierten Ergiebigkeiten auf, die zu einem Versagen des Lösungsalgorithmus führen können¹.

Unter diesem Aspekt erscheint es plausibel, daß Kanten im Bereich der Wasseroberfläche diesen Effekt noch verstärken können, sobald sie von Flüssigkeit benetzt werden, denn die Umströmung führt sehr schnell zu hohen, spitzenartigen örtlichen Übergeschwindigkeiten und damit auch zu entsprechenden Quellergiebigkeiten. Extreme Schwankungen dieser Zielgröße können dann in dem Lösungsalgorithmus infolge der begrenzten Mantissenlänge eines Rechners zu Rundungsfehlern und schließlich zum Abbruch der Berechnung führen.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, daß das Versagen des Berechnungsverfahrens im vorliegenden Fall auf numerische Detailprobleme zurückzuführen ist und nicht auf Unzulänglichkeiten der Potentialtheorie beruht. Prinzipiell ist das Programm SHALLO in der Lage, bei entsprechender Anpassung des Körpernetzes auch Kantenumströmungen nachzubilden, wie die Erprobung am Beispiel eines flachgehenden, getunnelten Binnenschiffes gezeigt hat [Grollius, 1998]. Allerdings ergeben sich bei dieser potentialtheoretischen Behandlung Strömungsbilder, die sich wesentlich von den in der realen Flüssigkeit experimentell nachgewiesenen unterscheiden.

5.1.5 Ergebnisse

In den Anlagen 60 und 61 sind die verwendeten Körpernetze für die Basisformen des Fahrgastschiffes und des Feuerlöschbootes dargestellt, deren Knicklinien durch Einfügen von zusätzlichen Flächenelementen („Anfasen“) entschärft wurden. Die nach dem gleichen Schema entwickelten Netze für die modifizierten Schiffsformen sind hier nicht wiedergegeben.

Für die beiden Varianten des Fahrgastschiffes konnten die Berechnungen für die Fälle

$$h = 2.5 ; 3.3 \text{ und } 5.0 \text{ m}$$

gemäß Abschn. 5.1.2, Tabelle 6 erfolgreich durchgeführt werden. Für den Fall $h = 9.0 \text{ m}$ und für sämtliche Berechnungsvarianten des Feuerlöschbootes entsprechend Abschn. 5.1.2, Tabelle 7 versagte die Rechnung.

Wie man aus der Tabelle 6 ersehen kann, ist das Phänomen F_n -Zahl-abhängig. Dies erklärt sich daraus, daß die Amplitude der Oberflächenverformung annähernd mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst. Mithin übersteigt ab einer gewissen Ge-

¹ Die tiefere Ursache liegt mit großer Wahrscheinlichkeit darin, daß in diesem Bereich zwei Grenzflächen (die Schiffs- und die Wasseroberfläche) zusammenstoßen, wodurch längs der Durchdringungslinie das Berechnungsproblem mathematisch nicht eindeutig bestimmt ist. Die Schwierigkeiten werden numerisch durch die Einführung der oben charakterisierten „quellenfreien Zone“ umgangen.



schwindigkeit der Flüssigkeitspegel an der Bordwand die erwähnten „Abweiserkanten“. Dies führt zu den in Abschn. 5.1.4 beschriebenen Problemen, die schließlich zum Abbruch der Rechnung führten.

Die Ergebnisse der erfolgreich abgeschlossenen Berechnungen für das Fahrgastschiff sind in den Anlagen 62 bis 76 in grafischer Form wiedergegeben. In den Anlagen 62 bis 64 sind die primär interessierenden Oberflächenverformungen für die Basisvariante, in den Anlagen 65 und 66 für die modifizierte Schiffsform als Vergleich zwischen Rechnung und Experiment dargestellt. Die Variante $h = 5.0$ m für die modifizierte Form wird nicht gezeigt, weil die Berechnungsergebnisse hier bereits ein unrealistisches Erscheinungsbild aufweisen.

Generell liefert die Rechnung keine besonders gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Dies ist offensichtlich dadurch zu erklären, daß die untersuchten Geschwindigkeiten im hohen unterkritischen Bereich ($F_{nh} > 0.8$) angesiedelt sind, was bei den Messungen in dem bereits vergrößerten Öffnungswinkel der divergierenden Wellen im Nachlaufgebiet und der damit verbundenen weiten Rücklage der „Mittschiffsmulde“ zum Ausdruck kommt. Demgegenüber zeigen die Rechenergebnisse das typische unterkritische Wellenbild mit Kelvin-Winkel und typischer „Mittschiffsmulde“.

Hinsichtlich der Intensität der Verformung zeigen sich bei der Rechnung geringere Wellenamplituden als bei der Messung.

Aufgrund dieser Abweichungen scheint eine Prognose der Wellenbildung für unterschiedliche Entwurfsvarianten unter absoluten Vergleichsbedingungen im betrachteten F_{nh} -Bereich wenig sinnvoll zu sein. Anders verhält es sich jedoch, wenn man zum relativen Vergleich übergeht, d.h. die Modifikation der Ausgangsform gegenüberstellt. Hierüber geben die Anlagen 67 bis 72 nähere Auskunft.

In den Anlagen 67 bis 70 sind die Wellenaufmessungen für die Basisform und für die Modifikation gegenübergestellt. Die Darstellungen bestätigen den bereits in Abschn. 4.3.3.1 diskutierten Vergleich, wonach die geringe Modifikation der Bugform nahezu keine Auswirkungen auf die Wellenbildung hat.

Zu derselben Aussage kommt man auch, wenn man die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse in den Anlagen 71 und 72 betrachtet.

Dies ist sicherlich ein bemerkenswertes Ergebnis, das jedoch aufgrund der nur geringen Formänderung nicht überbewertet werden darf.

Das Phänomen sollte aber in zukünftigen Untersuchungen noch eingehender geprüft werden, zumal die Beurteilung der Wellenbildung bisher nur mit Hilfe aufwendiger Modellversuche möglich war.

Eine Abrundung der Ergebnisse stellen die Anlagen 73 bis 75 dar, worin die normierten dynamischen Druckänderungen an der Außenhaut für beide Formvarianten gegenübergestellt sind. Obwohl nur mäßige Formänderungen durchgeführt wurden, die sich zudem nur auf den Bugbereich beschränkten, werden Auswirkungen sichtbar,



die sich über den gesamten Schiffskörper erstrecken. Dabei zeigt die Modifikation sowohl eine Zunahme der Überdrücke im Vorschiff als auch der Unterdrücke im Mittschiffsbereich. Insbesondere die Unterdruckbereiche nehmen mit wachsender Wassertiefe an Intensität und Ausdehnung in Richtung Heck zu.

Das Ergebnis bestätigt die lange bekannte Erkenntnis aus der Widerstandstheorie, daß kleine lokale Formänderungen die Strömungsverhältnisse auf der Körperoberfläche global verändern können.

Anlage 76 schließlich vermittelt einen Eindruck von den Strömungsverhältnissen an der Außenhaut des Schiffes für einen Grenzfall der Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens. Für die dargestellte Fallvariante (Modifizierte Form, $h = 5.0$ m) liefert das Programm SHALLO nur noch die linearisierte Lösung. Deutlich zu erkennen sind in der vektoriellen Darstellung die hohen Geschwindigkeiten, mit denen die Abweiserkante im Bugbereich von unten her nahezu senkrecht umströmt wird. Die Größe der Geschwindigkeiten übersteigt offensichtlich die Grenzen der Zulässigkeit, so daß der Berechnungsvorgang abgebrochen wird.

5.2 SWBQISD-Berechnungen

Bei dem diesem Programm zugrunde liegenden Verfahren wird die Schiffsumströmung durch modifizierte Boussinesq-Gleichungen beschrieben. Der Schiffseinfluß auf das umgebende Wasser wird durch eine dem lokalen Tiefgang proportionale zweidimensionale Druckverteilung approximiert. Dies erlaubt die direkte Berücksichtigung der Schiffsförm in den Boussinesq-Gleichungen. Diese nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen werden für vorgegebene Anfangs- und Randbedingungen numerisch gelöst. Ausführliche Erläuterungen sind der Veröffentlichung von Jiang [Jiang, 1998] zu entnehmen, die als Anlage diesem Bericht beigelegt ist.

5.2.1 Widerstand

Das Fahrgastschiff ist durch das ausgeprägt große Verhältnis der Breite zum Tiefgang gekennzeichnet. Deshalb wurde die Wirkung der Unterwasserschiffsform auf das umgebende Wasser zunächst durch eine Druckverteilung proportional dem lokalen Tiefgang approximiert. Für die Wassertiefe $h = 2.5$ m in der Großausführung sind Berechnungen im Geschwindigkeitsbereich $F_{nh} = 0.5$ bis 1.5 durchgeführt worden. Der spezifische Wellenwiderstand R_W/W mit W = Schiffsgewicht (nach Gleichung (36), Jiang, 1998) ist in Anl. 77 gegen die Froude-Tiefenzahl F_{nh} aufgetragen. Die Wellenwiderstandskurve ist besonders durch den starken Anstieg beim Übergang von unter- zu transkritischer Geschwindigkeit gekennzeichnet: (Verzweigung von stationärer Lösung im unterkritischen Bereich in instationäre Lösung im transkritischen Bereich), ein flaches Plateau im transkritischen Bereich und eine Abnahme nach dem Übergang von trans- zu überkritischer Geschwindigkeit (Verzweigung von instationärer Lösung im transkritischen Bereich in stationäre Lösung im überkritischen Bereich). Die Oszillation der Wellenwiderstände im transkritischen Geschwindig-

keitsbereich wurde durch die schneller als das Schiff fortlaufenden Solitonwellen verursacht.

In Anl. 78 sind die gemessenen spezifischen Gesamtwiderstände den berechneten gegenübergestellt. Die Umrechnung vom Modell auf die Großausführung erfolgte nach der Standard-Hughes-Prohaska-Methode. Dabei wird der Formfaktor aus den gemessenen Widerständen bei niedrigen Geschwindigkeiten identifiziert und als konstant im ganzen untersuchten Geschwindigkeitsbereich angenommen. Der Reibungsbeiwert wurde nach der ITTC-1957-Formel berechnet. Die benetzte Schiffsoberfläche ist bei der Umrechnung ebenfalls konstant belassen worden. Die allgemeine Beobachtung bei diesem Vergleich ist zuerst die gute Übereinstimmung für die Mittelwerte im transkritischen Bereich und im unterkritischen Bereich sowie für die Oszillationsamplitude in der Nähe der kritischen Geschwindigkeit. Im überkritischen Bereich fehlen die Versuchsergebnisse für den Fall Fahrgastschiff. Wenig zufriedenstellend ist dagegen der Vergleich in den Übergangsbereichen, insbesondere beim Übergang von trans- zu überkritischer Geschwindigkeit. Ursachen hierfür könnten zum einen die für den asymptotischen Zustand der Wellenbildung unzureichende Tanklänge bei Messungen und zum anderen die Empfindlichkeit der numerischen Lösungen gegen das Zeitintervall in der Nähe der Übergangspunkte sein. Der Ausreißer im gemessenen Mittelwert bei der Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.3$ ist ein Hinweis darauf, denn der entsprechende Zeitverlauf zeigte, daß der asymptotische Zustand bis zum Ende der Messung noch nicht ganz erreicht wurde.

5.2.2 Wellenbilder

Drei repräsentative Wellenbilder für das Fahrgastschiff im unter-, trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich sind in Anl. 79 zusammengefaßt. Bei der unterkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.8$ im Bild (a) ist das stationäre Wellensystem einem linearen Havelock-Wellenbild ähnlich. Bei der kritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.0$ im Bild (b) ist das Wellensystem relativ zum Schiff durch die in Fahrtrichtung vor dem Schiff fortlaufenden Solitons instationär. Durch die überhöhte lokale Strömungsgeschwindigkeit ungefähr ab Hauptspantebene ist ein ausgeprägtes divergentes Wellensystem hinter dem Schiff zu beobachten. Das Wellenbild weit hinter dem Schiff ist durch die transversalen Wellen bestimmt. Bei der überkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.3$ im Bild (c) besteht das Wellensystem aus rein divergenten, stationären Wellen, die sich innerhalb eines Winkels von $\pm \arcsin F_{nh}^{-1}$ ausbreiten. Dieser Winkel entspricht dem Mach-Winkel einer Überschallströmung in der Gasdynamik.

5.2.3 Wellenprofile

Zur Validierung der berechneten Wellenbilder wurden Wellenerhebungen an den im VBD-Schlepptank ortsfest installierten Wellensonden gemessen. Aus diesen Zeit-schrieben entstanden dann die zugehörigen Wellenprofile relativ zum Schiff. Wegen des instationären Verhaltens der Wellenbilder relativ zum Schiff im transkritischen Geschwindigkeitsbereich entsprechen die momentanen Längsschnitte nicht diesen



Wellenprofilen. Hier wurden die relativen Koordinaten der Wellensonden zum Schiff durch $\chi_{WG} = \chi_{WG}(n_M \Delta t) - (n - n_M) \Delta t V$ simuliert, wobei $n_M \Delta t$ dem Meßbeginn an den Wellensonden entspricht. Allerdings konnte wegen der unterschiedlichen Beschleunigung der im Versuch protokollierte Anfang $n_M \Delta t$ für die numerischen Berechnungen nicht benutzt werden. Statt dessen wurde ein markantes Ereignis, z.B. der Zeitpunkt beim Erreichen der Solitonspitze an den Wellensonden, zur Rekonstruktion der entsprechenden Zeit-Raum-Transformation benutzt. Wegen der starken Spiegeltauchung wurden bei den Berechnungen nach der Schlank-Körper-Theorie nur die klassische Formulierung herangezogen (nach Gleichung (28), Jiang, 1998).

In Anl. 80, 81 und 82 sind Wellenprofile für das Fahrgastschiff jeweils bei der Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.873, 1.0$ und 1.3 zusammengefaßt. Gegenübergestellt sind die Ergebnisse der Messung mit denen der Rechnung sowohl nach der Schlank-Körper-Theorie als auch nach der Druckapproximation [Jiang, 1998]. Im allgemeinen ist festzustellen, daß die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wellenprofilen zufriedenstellend ist. Die bemerkenswerte Übereinstimmung im Schiffsbereich und vor dem Schiff zeigt die Güte der beiden Rechenverfahren zur Approximation des Wellenwiderstands und der Solitonwellen. Die in den vorliegenden Rechenverfahren noch nicht berücksichtigte dynamische Eintauchung des Spiegelhecks verursacht vermutlich die deutliche Diskrepanz unmittelbar hinter dem Heck und weit hinter dem Schiff. Die erfolgreiche Implementierung der Randbedingungen an der Tankwand wurde durch die sehr gute Übereinstimmung der reflektierten Wellen in den Wellenprofilen an $y = 35$ und 45 m in Anl. 80 bestätigt. Der Vorteil der Druckapproximation gegenüber der Schlank-Körper-Theorie ist besonders bei der überkritischen Geschwindigkeit in Anl. 82 erkennbar.

In Anl. 83 und 84 sind Wellenprofile für das Feuerlöschboot jeweils bei den Geschwindigkeiten $F_{nh} = 0.993$ und 2.227 zusammengestellt. Auch für das Feuerlöschboot ist die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wellenprofilen zufriedenstellend. Allerdings macht sich die Diskrepanz hinter dem Heck wegen der starken Spiegeltauchung des Feuerlöschboots noch bemerkbar. Auch für das Feuerlöschboot ist der Vorteil der Druckapproximation gegenüber der Schlank-Körper-Theorie bei der überkritischen Geschwindigkeit in Anl. 84 gut erkennbar, und zwar sowohl in der Amplitude als auch in der Phasenlage.

5.2.4 Schlußfolgerungen

Ein implizites Finite-Differenzen-Verfahren nach dem Crank-Nicholson-Schema wurde erfolgreich zur Lösung der Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ im unter-, trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich implementiert. Die Schiffswirkung auf das unmittelbar umgebende Wasser wurde zum einen durch die Schlank-Körper-Theorie und zum anderen durch eine dem lokalen Tiefgang proportionale Druckverteilung approximiert. Es wurde eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Modellmessungen und Berechnungen sowohl für den Wellenwiderstand als auch für die Wellenprofile erzielt. Im Vergleich zur Schlank-Körper-Theorie lieferte die Druckapproximation für die untersuchten flachen Binnenschiffe gleich gute Er-

gebnisse im transkritischen Bereich und bessere Ergebnisse im überkritischen Bereich.



6. Symbolverzeichnis

B_{KWL}	Breite in der Konstruktionswasserlinie
$B_{üA}$	Breite über Alles
C_A	Zusatzwiderstandsbeiwert
C_B	Blockkoeffizient
C_{FM}	Reibungswiderstandsbeiwert Modell
C_{FS}	Reibungswiderstandsbeiwert Großausführung
C_M	Völligkeitskoeffizient des Hauptspantes
C_p	Beiwert der dynamischen Druckänderung in der Flüssigkeit
F_D	Reibungsabzug
F_n	Froude-Längenzahl
F_{nh}	Froude-Tiefenzahl
h	Wassertiefe
L	Schiffslänge allgemein
LCB	Lage des Verdrängungsschwerpunktes bez. auf HL
L_{WL}	Länge in der Wasserlinie
L_{PP}	Länge zwischen den Loten
P_E	Schleppleistung
R_{nM}	Reynoldszahl Modell
R_{nS}	Reynoldszahl Großausführung
R_{TM}	Modell-Gesamtwiderstand
S	benetzte Oberfläche
S_M	benetzte Oberfläche Modell
T	Tiefgang
V	Schiffsgeschwindigkeit
V_M	Schleppgeschwindigkeit
W	Schiffsgewicht
w	Kanalbreite, hier maßstäblich umgerechnete Tankbreite
x, y, z	ortsfestes Koordinatensystem
z_V	parallele Tauchungsänderung
λ	Maßstabszahl
Θ	Trimmwinkel
ν	kinematische Zähigkeit
ρ	spezifische Masse
ζ	Ordinate der örtlichen Wasseroberflächenverformung
ξ_W	Wellenhöhe
$\forall$	Verdrängung



8. Literatur

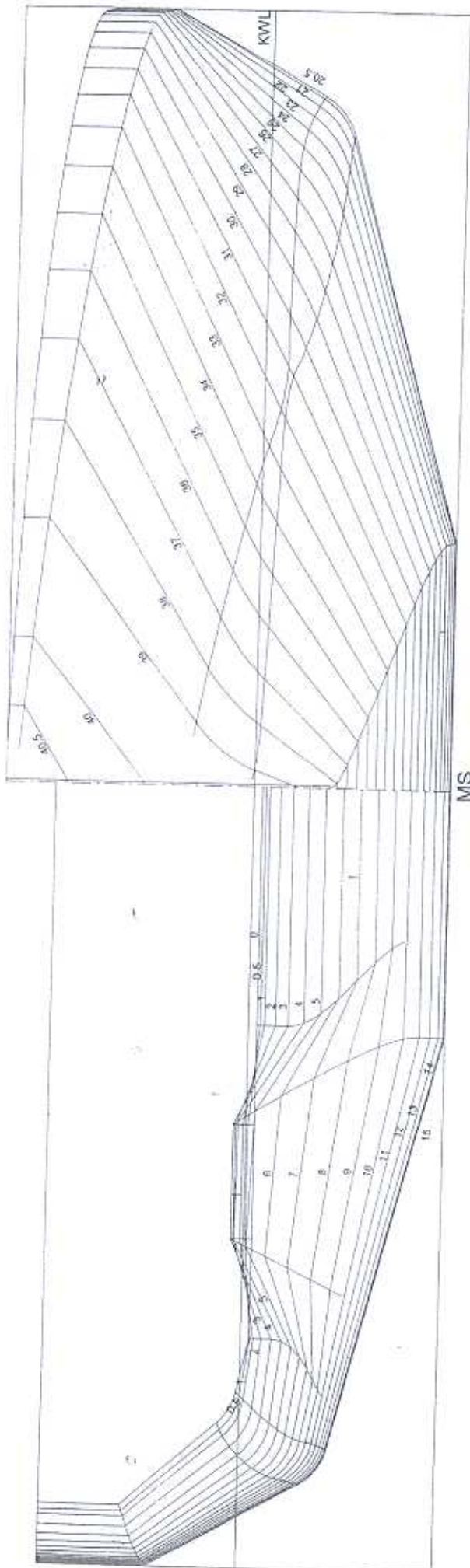
- Helm, K. (1940): Tiefen- und Breiteneinflüsse von Kanälen auf den Schiffswiderstand. Hydrodynamische Probleme des Schiffsantriebs, Teil 2
- Graff, W.; Kracht, A.; Weinblum, G. (1964): Some Extensions of D. W. Taylor's Standard Series. SNAME, New York
- Ertekin, R. C.; Webster, W. C.; Wehausen, J. V. (1985): Ship Generated Solitons 15th Symposium of Naval Hydrodynamics, Proc.
- Nordström, H. F. (1951): Some Tests with Models of Small Vessels. 65. Mitt. SSPA, Göteborg
- Helm, G. (1964): Systematische Widerstands-Untersuchung von Kleinschiffen. 325. Mitt. HSVA, Schiff und Hafen
- Rader, H. P. (1980): Wasserfahrzeuge für hohe Geschwindigkeiten. Jahrbuch der STG, Bd. 74
- Langenberg, H. (1988): Einschrauber mit hoher Nachstromausnutzung bei Froude-Zahlen bis 0.75. STG - Sprechtag, März 1988
- Müller - Graf, B. (1988): Das LSBK - Boot und seine hydrodynamischen Eigenschaften. STG - Sprechtag, März 1988
- Müller - Graf, B. (1998): Zur Hydrodynamik des Verdrängens und Gleitens. 19. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik, Mai 1998 an der Gerhard-Mercator-Universität – GH Duisburg
- Grollius, W., Heuser, H. H. (1992): Der Semikatamaran - ein modernes Fahrzeugkonzept für den Containertransport auf Binnenwasserstraßen. 256. Mitt. VBD, Binnenschifffahrt, Nr. 10
- Grollius, W. (1998): Untersuchung der Umströmung eines flachgehenden, getunnelten Binnenschiffes einschließlich des Nachstromfeldes. VBD-Bericht Nr. 1495, Oktober 1998
- Jensen, G. (1988): 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
- Jensen, G. (1989): Ship Wave-Resistance Computation. 5th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Proc.



Jiang, T., Sharma, S.D., Chen, X.N. (1985): On the Wavemaking, Resistance and Squat of a Catamaran moving at High Speed in a Shallow Water Channel. Proceedings of the Third International Conference on Fast Sea Transportation, Lübeck-Travemünde, September 1985

Jiang, T., (1998) : Investigation of Waves Generated by Ships in Shallow Water. Proc. of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington DC

Jiang, T., Sharma, S.D. (1998): Wellenbildung von flachen Schiffen bei transkritischer Fahrt. Institut für Schiffstechnik, Gerhard-Mercator-Universität, Tagungsband des 19. Duisburger Kolloquiums „Schiffstechnik, Meerestechnik“



SPANTENRISS
Ausgangsform

Fahrgastschiff

$\lambda = 10.00$

Spt.-Abst. = 0.1 m

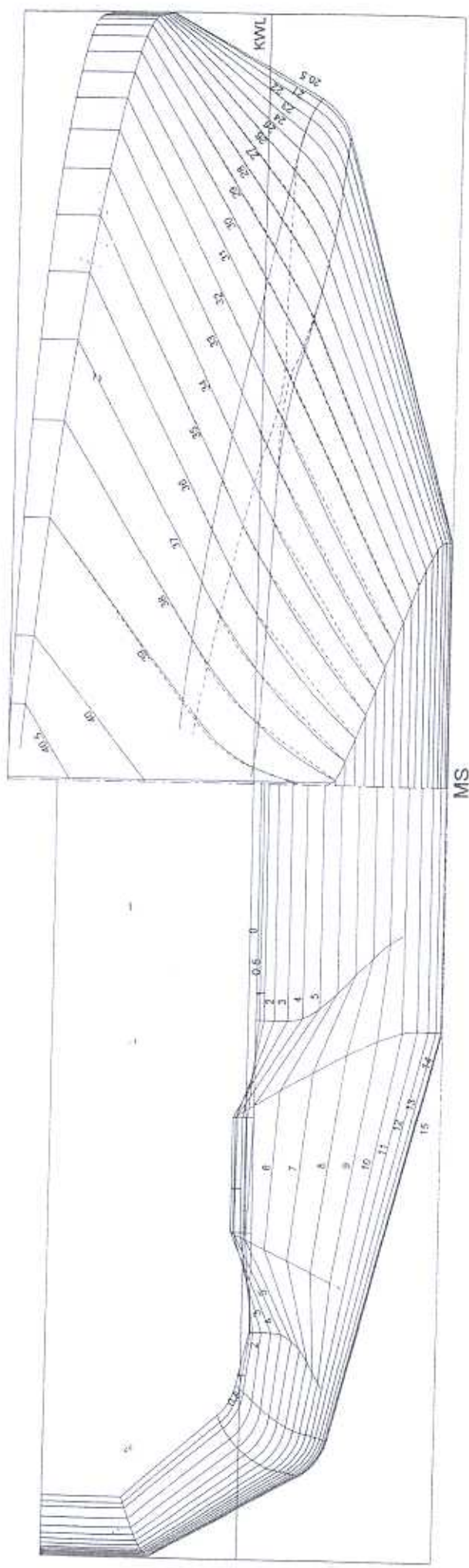
$L_{pp} = 3.929 \text{ m}$

$B = 0.943 \text{ m}$

$T = 0.120 \text{ m}$

VBD





Fahrgastschiff

$\lambda = 10.00$

Spt.-Abst. = 0.1 m

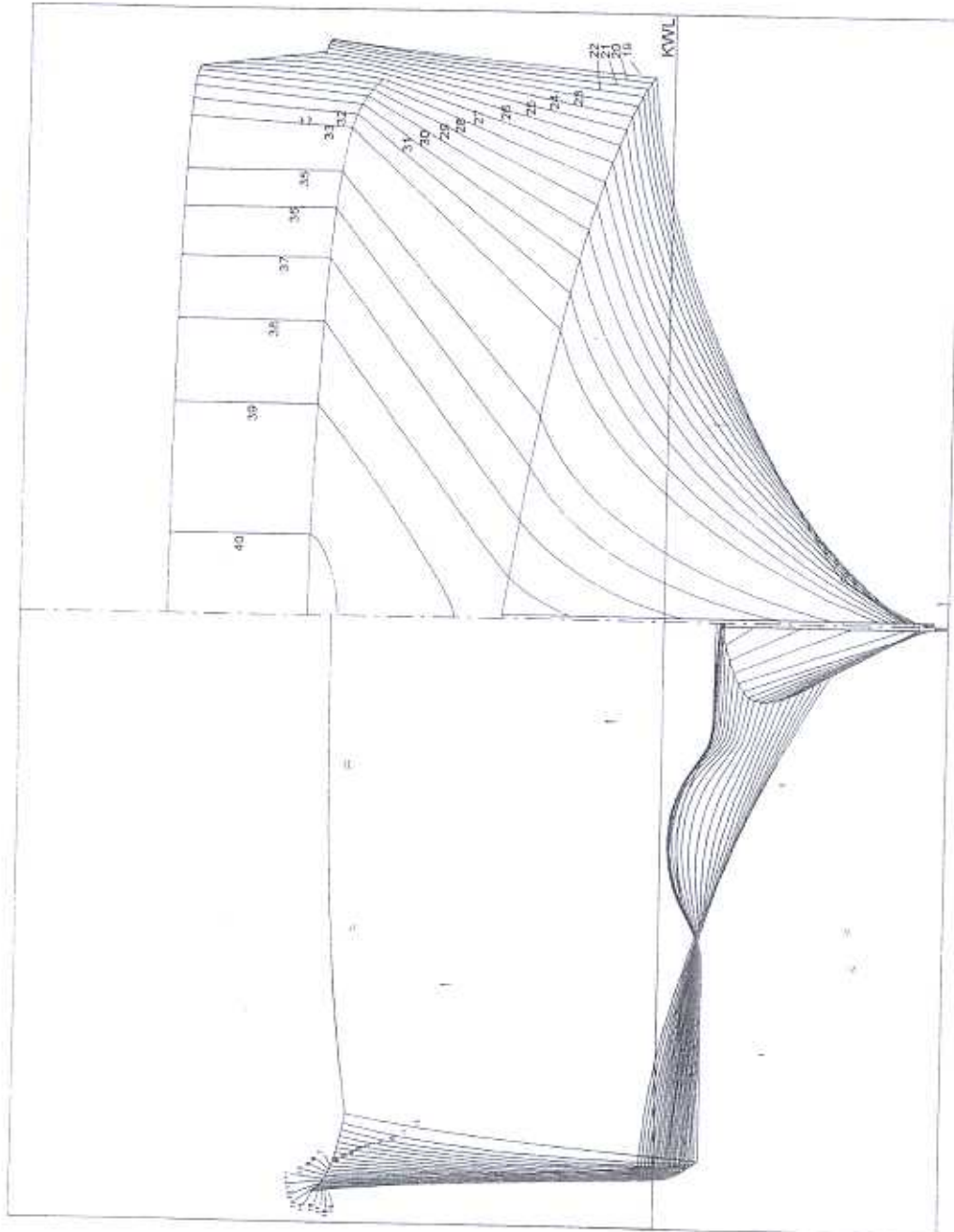
$L_{pp} = 3.929 \text{ m}$
 $B = 0.943 \text{ m}$
 $T = 0.120 \text{ m}$

SPANTENRISS Ausgangsform

SPANTENRISS modifizierte Form

VBD





MS

Feuerlöschboot

$\lambda = 6.0$

Spl.-Abst. = 0.055 m

$L_{pp} = 2.065$ m

$B = 0.645$ m

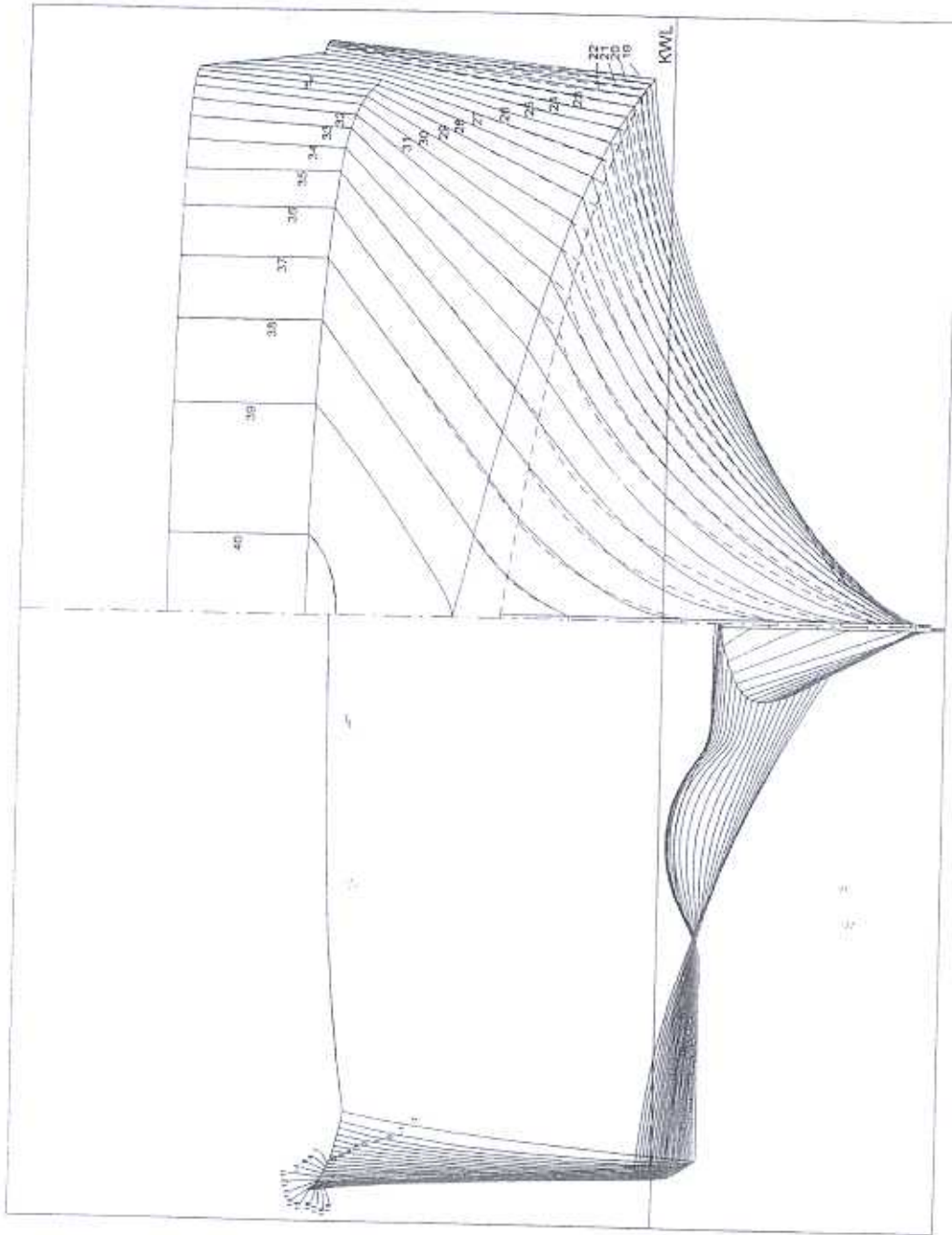
$T = 0.156$ m

VBD



SPANTENRISS

Ausgangsform



Feuerlöschboot

$$\lambda = 6.0$$

$$\text{Spt.-Abst.} = 0.055 \text{ m}$$

$$L_{pp} = 2.065 \text{ m}$$

$$B = 0.645 \text{ m}$$

$$T = 0.156 \text{ m}$$

VBD



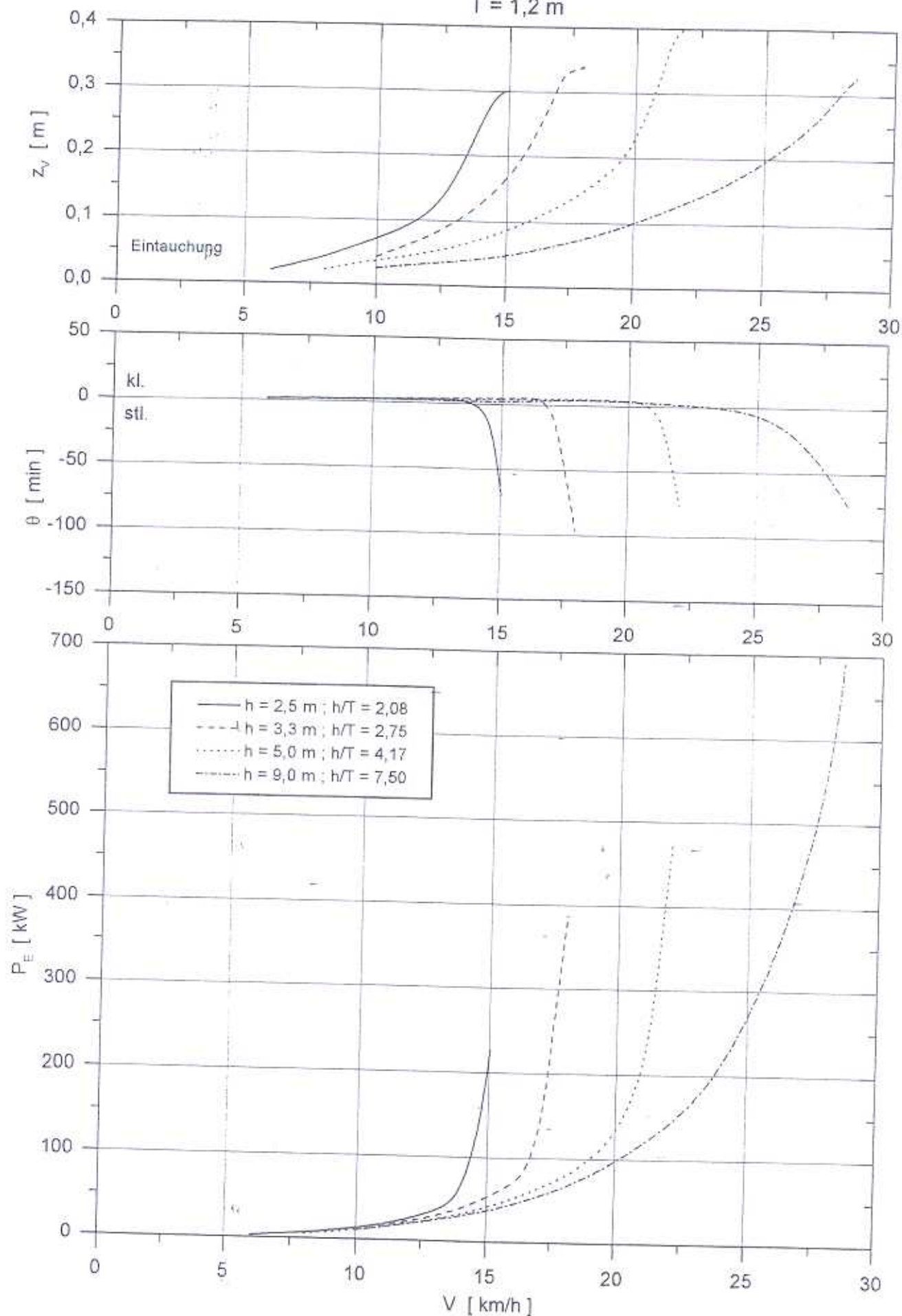
MS

SPANTENRISS Ausgangsform

SPANTENRISS modifizierte Form

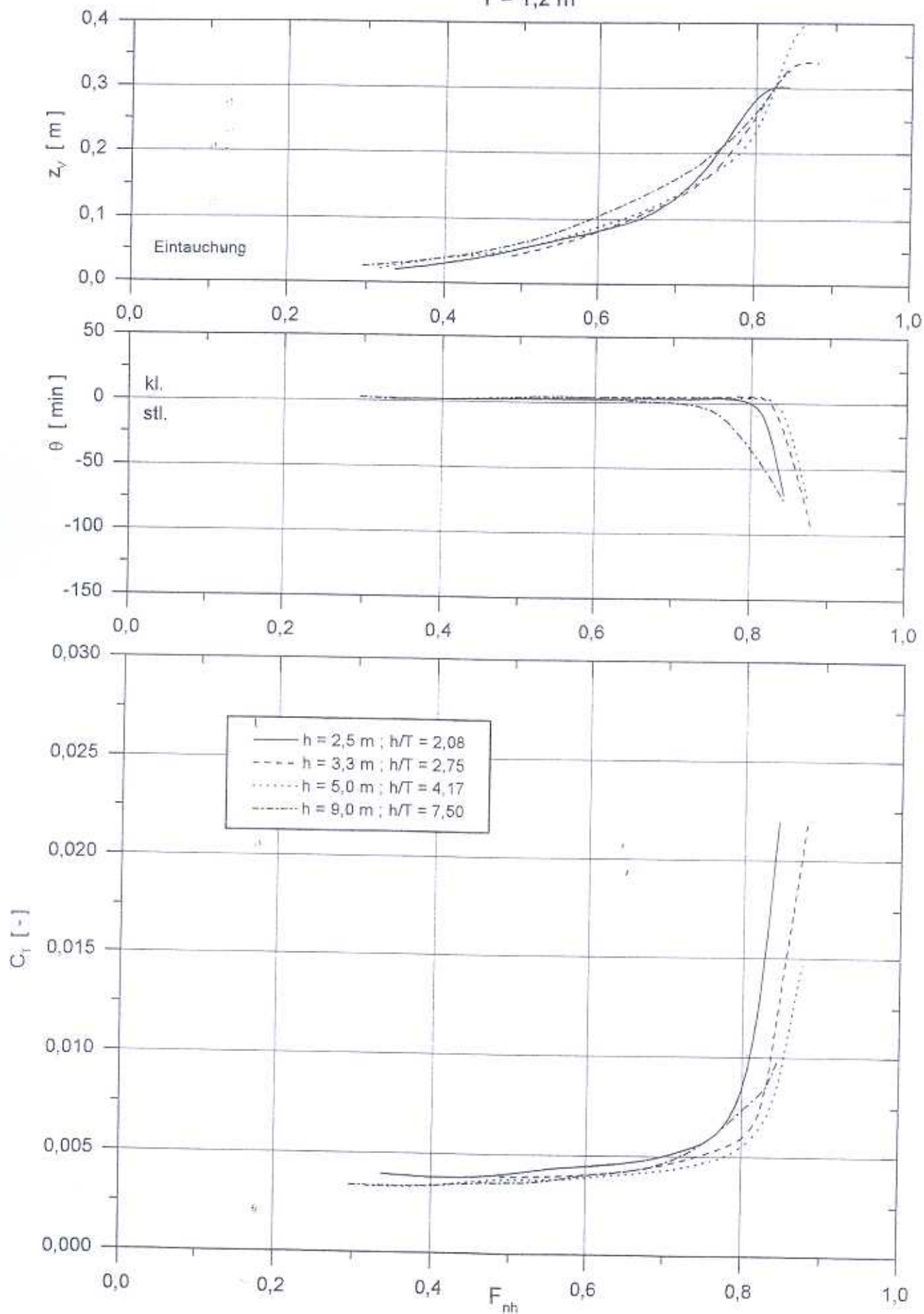
Absenkung, Trimm, Schleppleistung
Fahrgastschiff (Ausgangsversion)

$T = 1,2 \text{ m}$



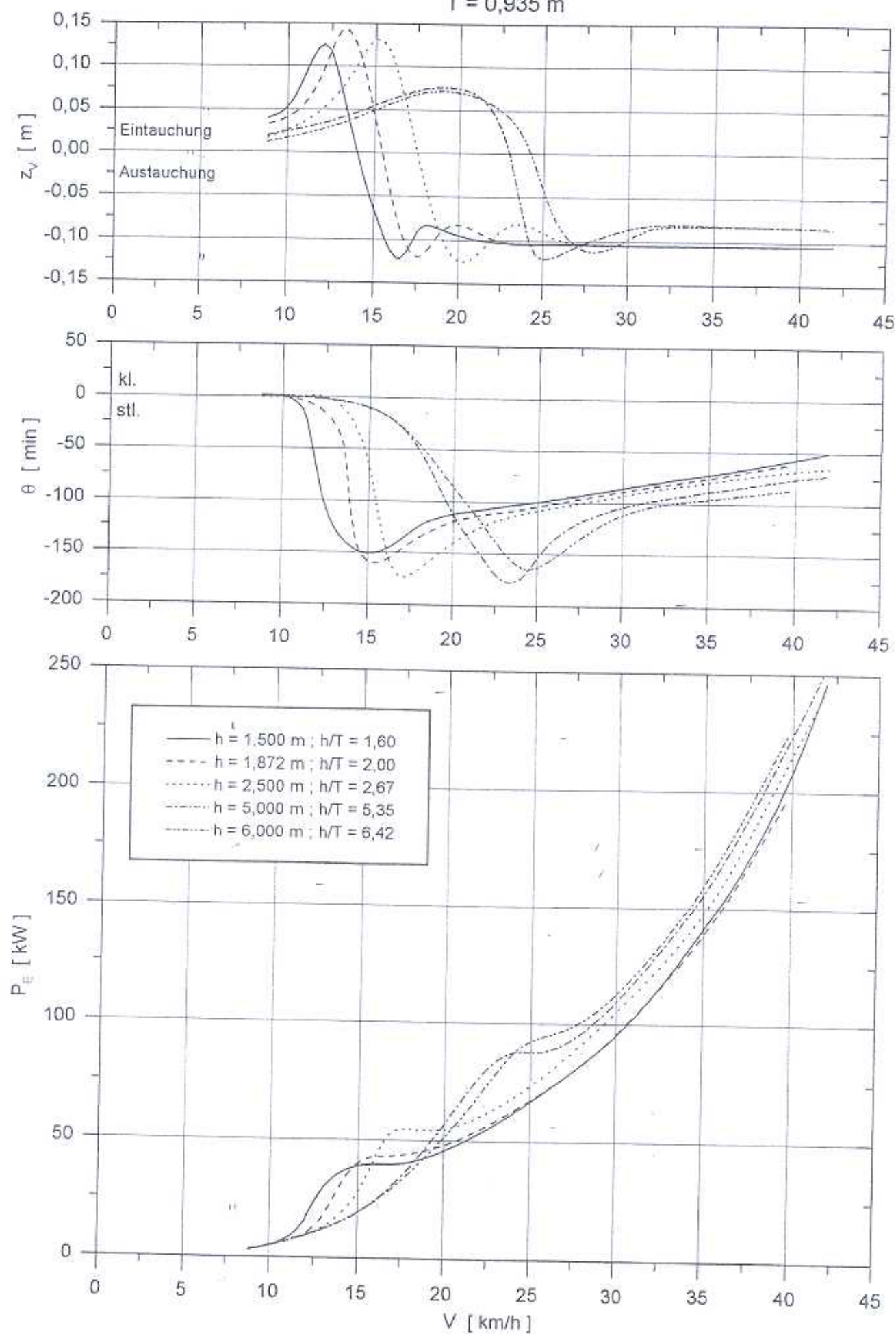
Absenkung, Trimm, Gesamtwiderstandsbeiwert
Fahrgastschiff (Ausgangsversion)

$T = 1,2 \text{ m}$



Absenkung, Trimm, Schleppleistung Feuerlöschboot (Ausgangsversion)

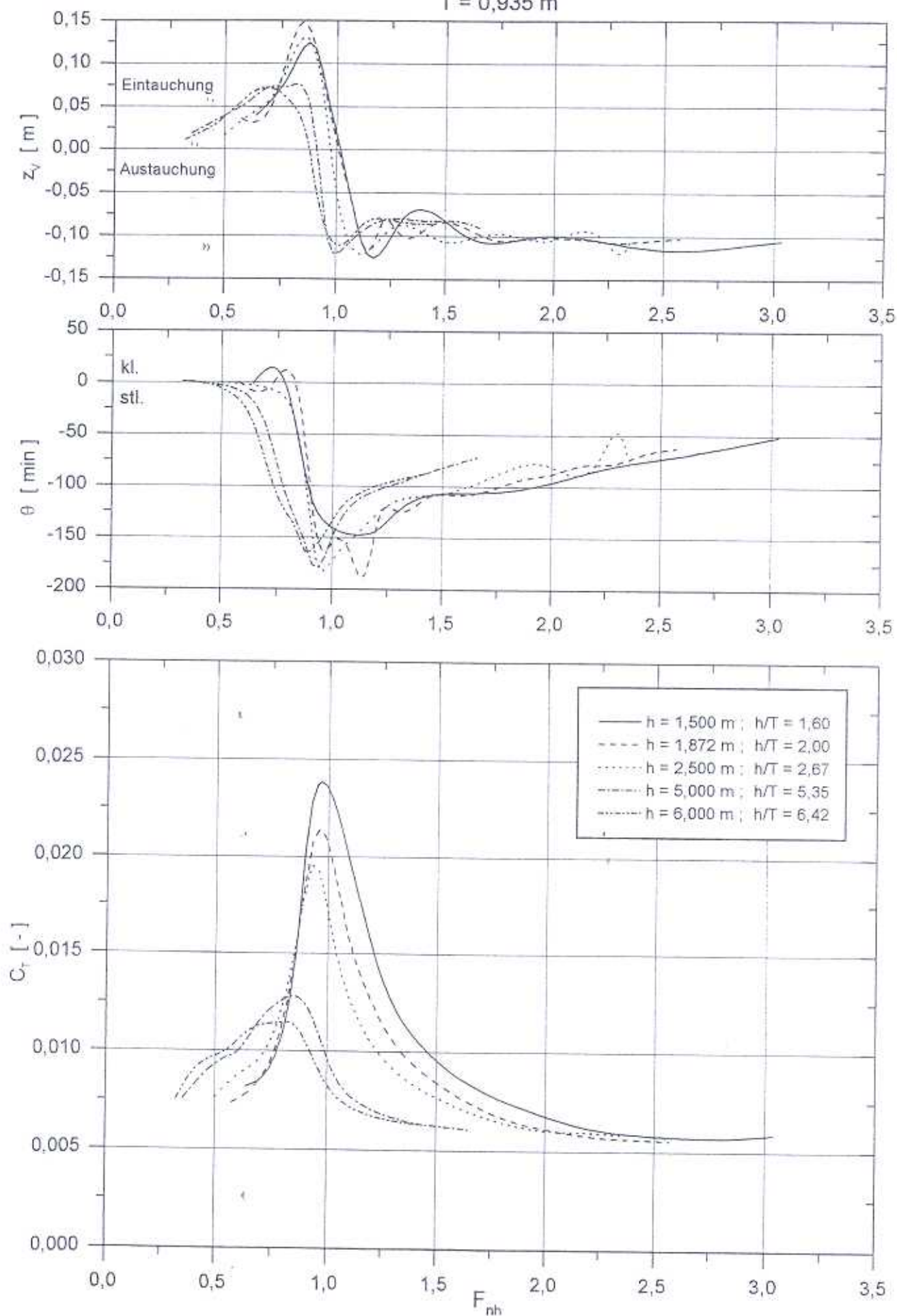
$T = 0,935 \text{ m}$



Absenkung, Trimm, Gesamtwiderstandsbeiwert

Feuerlöschboot (Ausgangsversion)

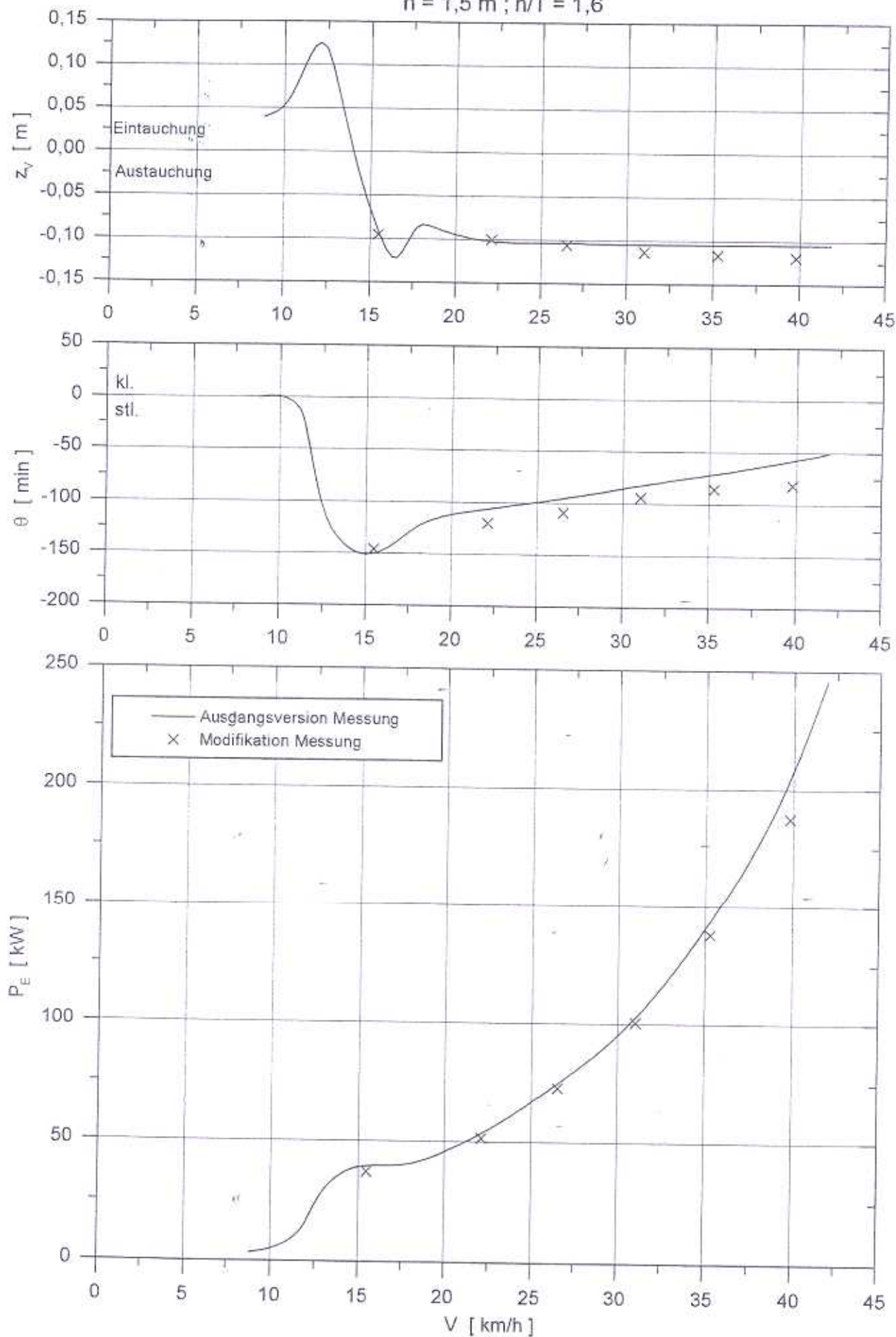
$T = 0,935 \text{ m}$



Gegenüberstellung Absenkung, Trimm und Schleppleistung

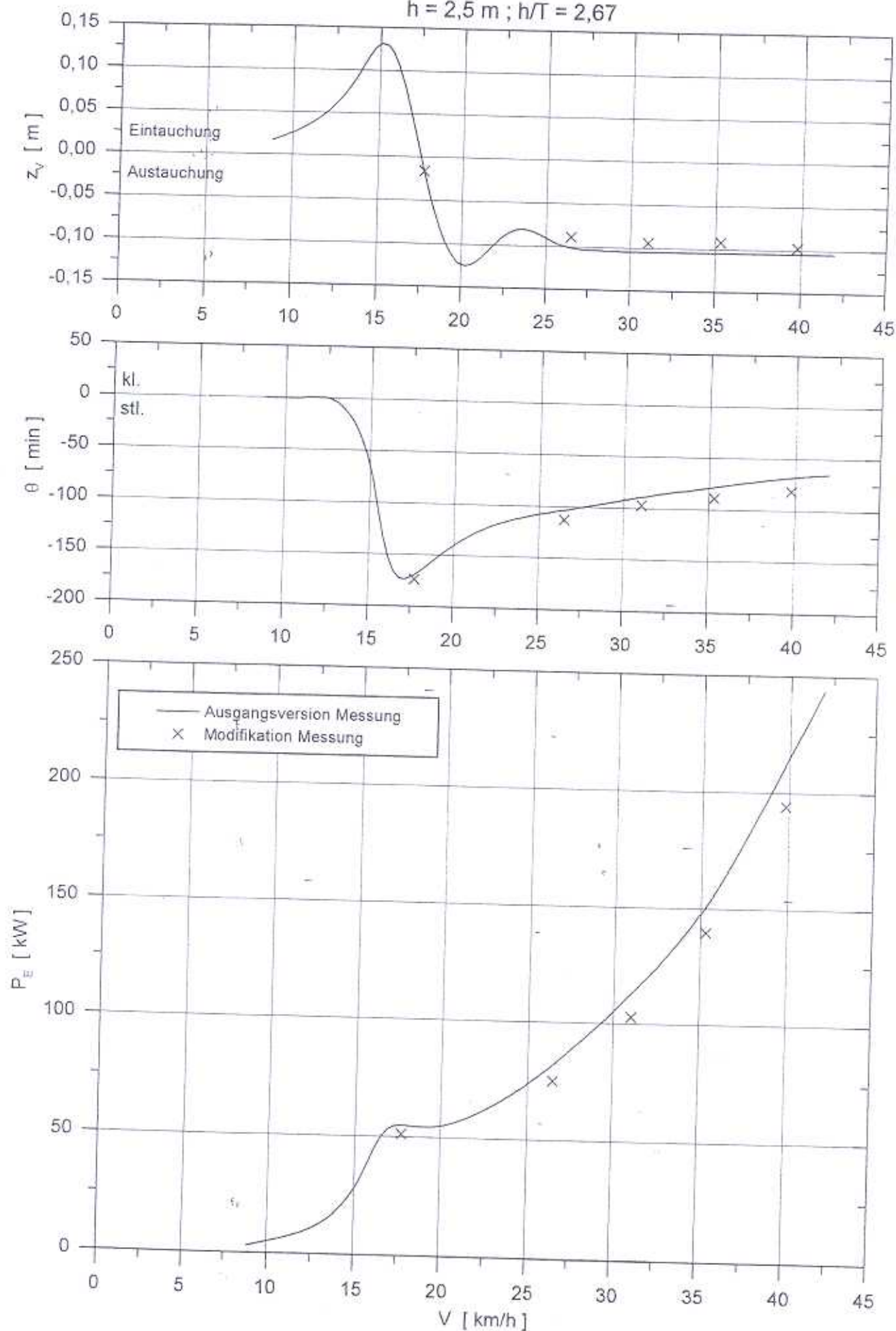
Ausgangsversion und Modifikation des Feuerlöschbootes

$h = 1,5 \text{ m} ; h/T = 1,6$



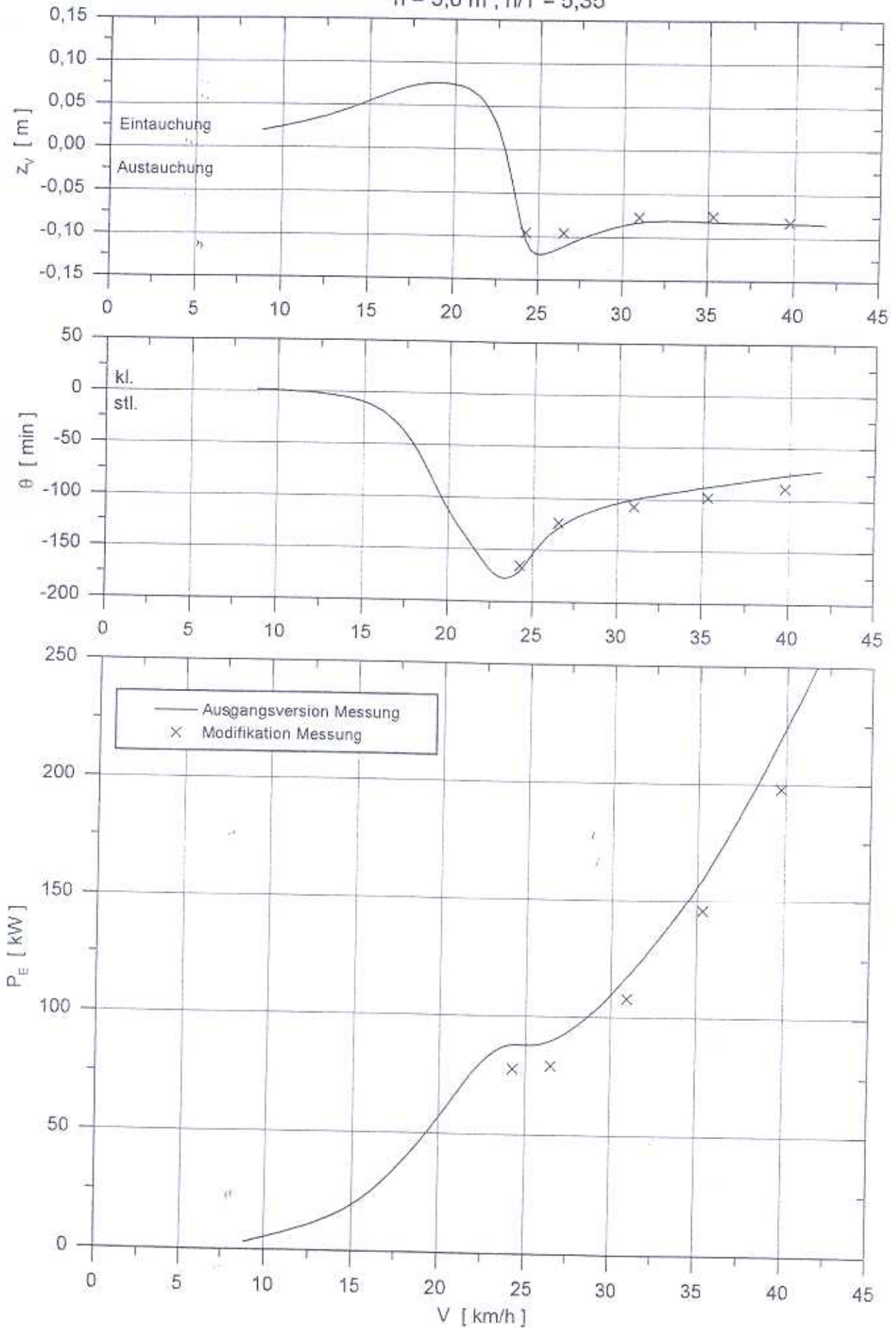
Gegenüberstellung Absenkung, Trimm und Schleppleistung Ausgangsversion und Modifikation des Feuerlöschbootes

$h = 2,5 \text{ m} ; h/T = 2,67$



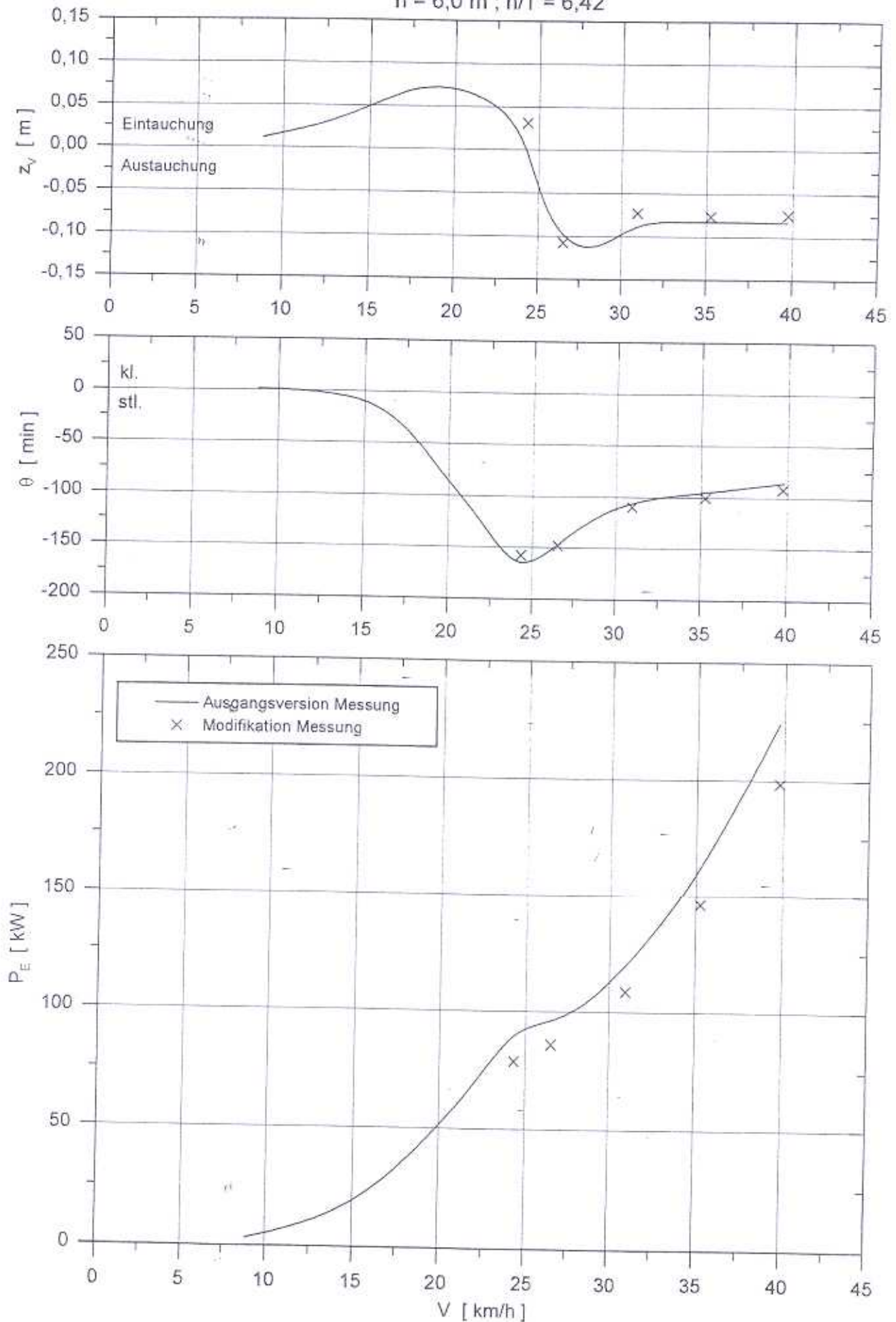
Gegenüberstellung Absenkung, Trimm und Schleppleistung
Ausgangsversion und Modifikation des Feuerlöschbootes

$h = 5,0 \text{ m} ; h/T = 5,35$



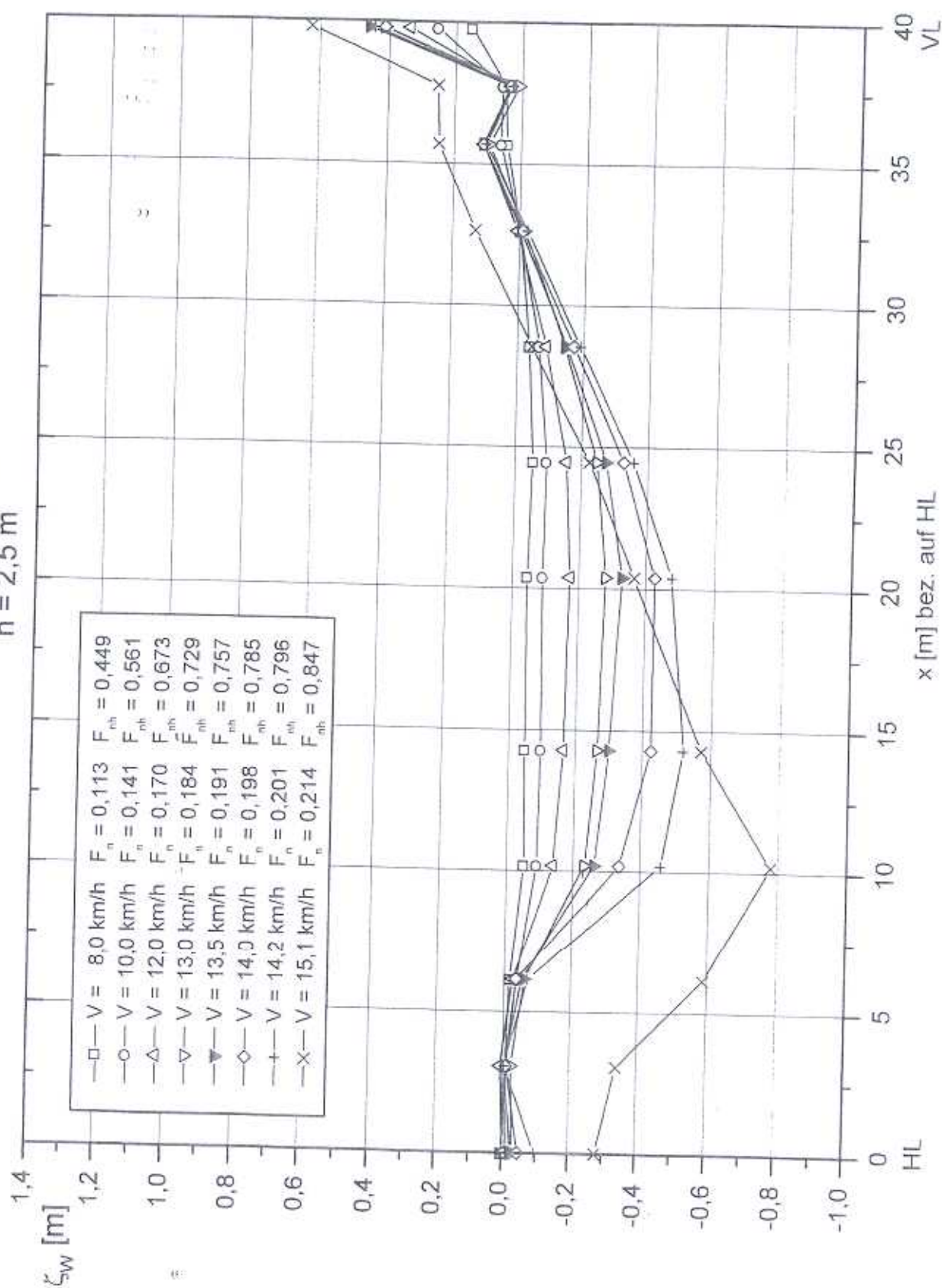
Gegenüberstellung Absenkung, Trimm und Schleppleistung Ausgangsversion und Modifikation des Feuerlöschbootes

$h = 6,0 \text{ m}$; $h/T = 6,42$

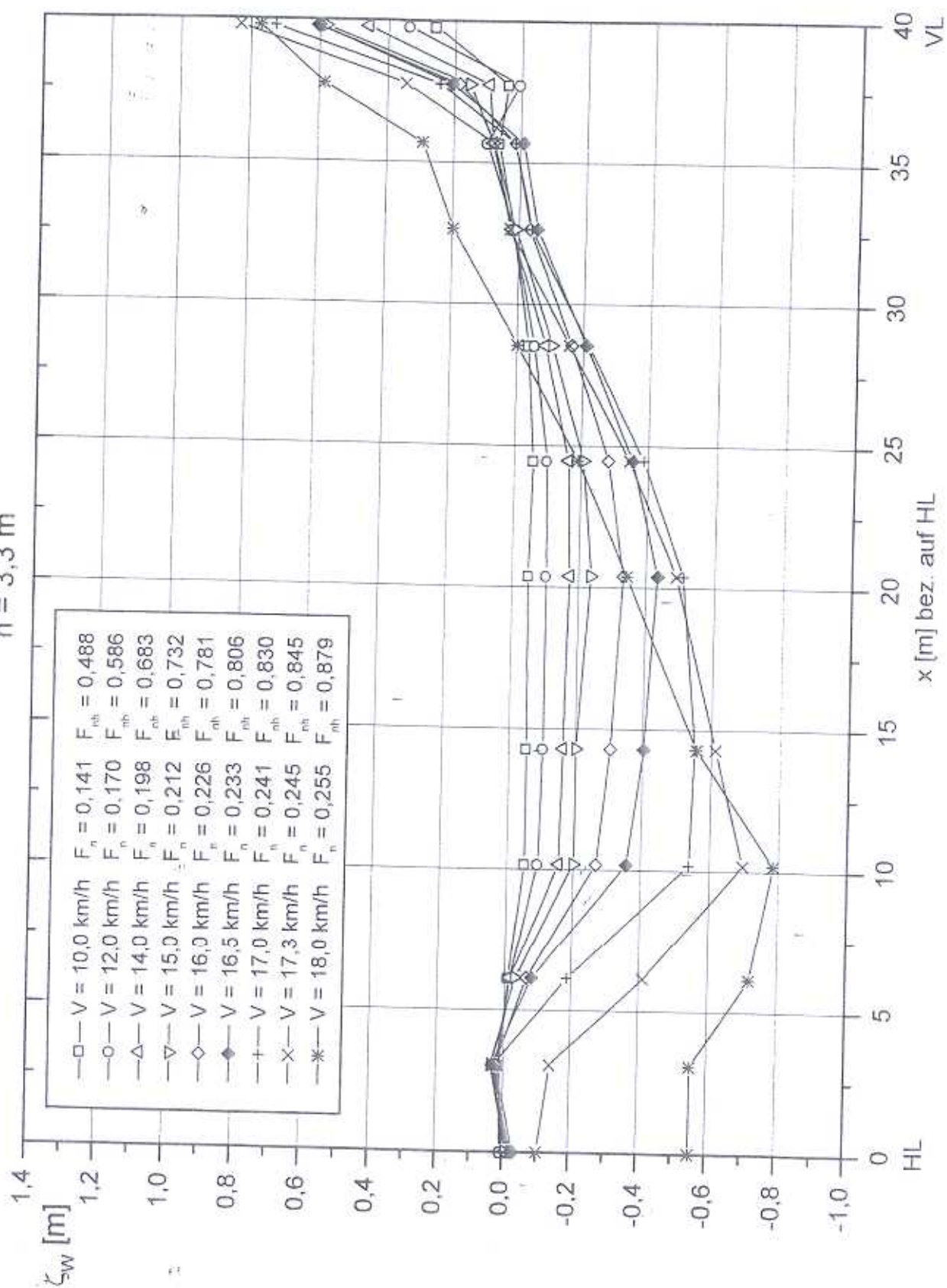


Wellenhöhe an der Außenhaut
Fahrgastschiff (Ausgangsversion)

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

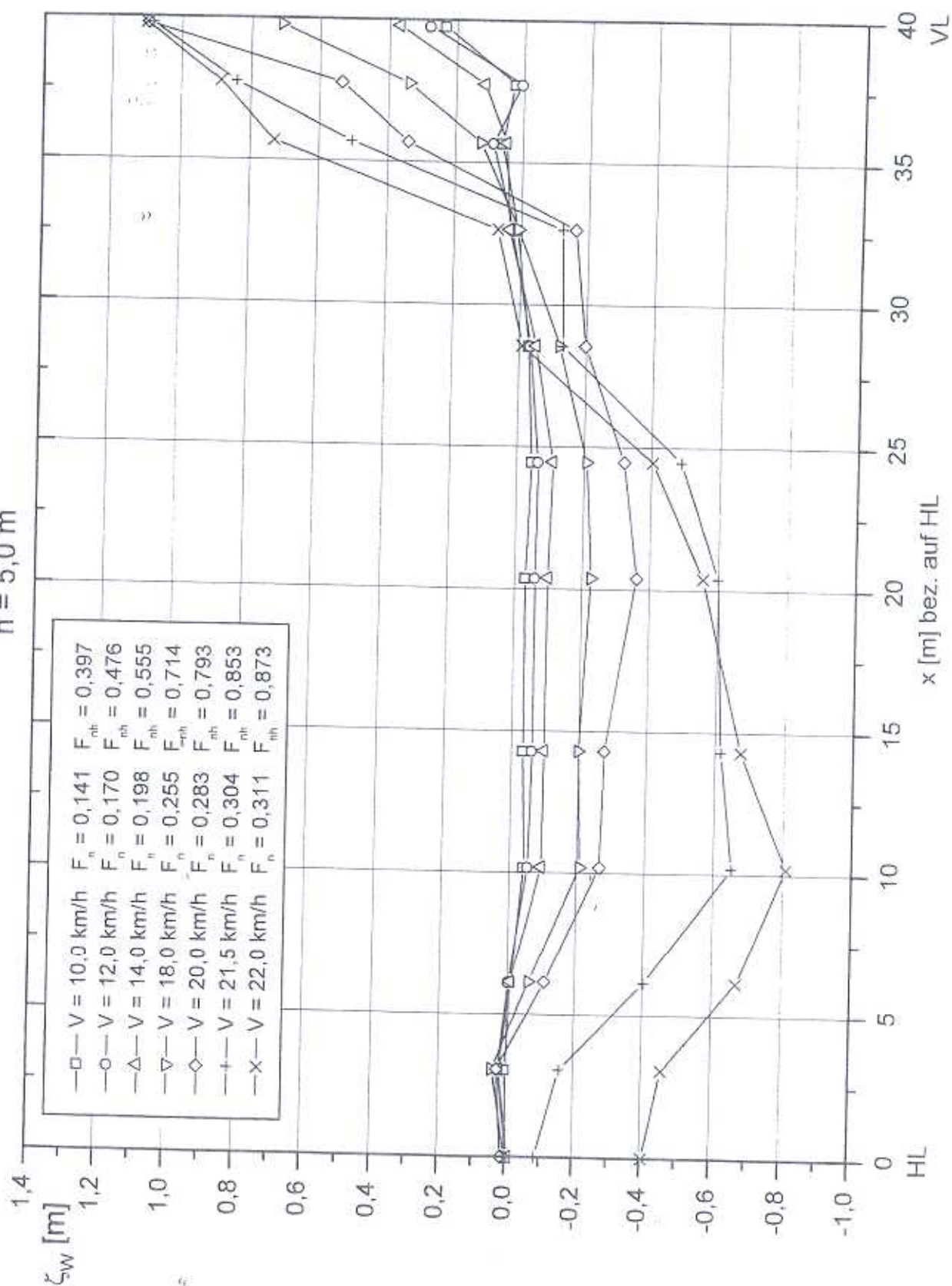


Wellenhöhe an der Außenhaut
Fahrgastschiff (Ausgangsversion)
 $h = 3,3 \text{ m}$



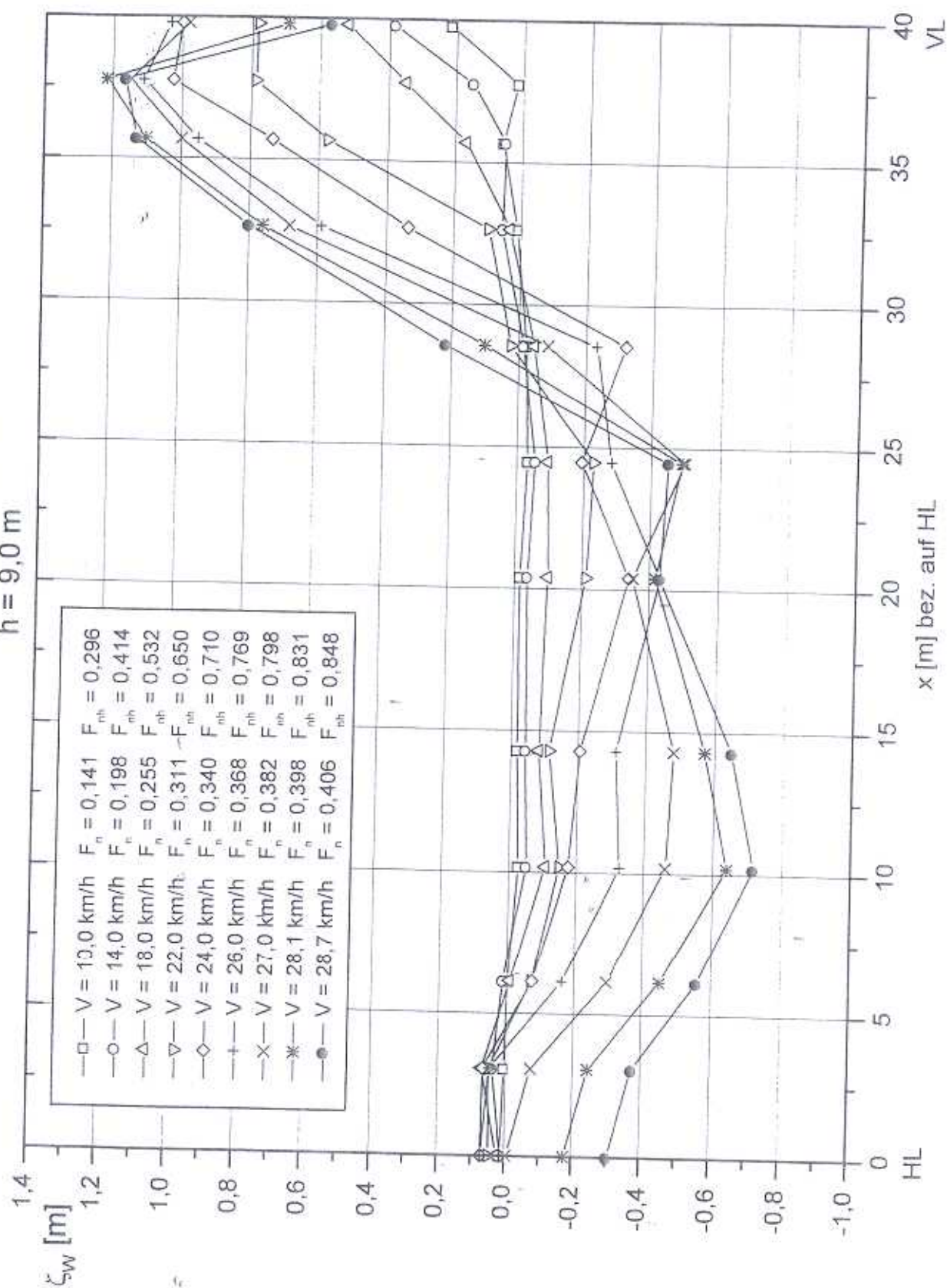
Wellenhöhe an der Außenhaut Fahrgastschiff (Ausgangsversion)

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

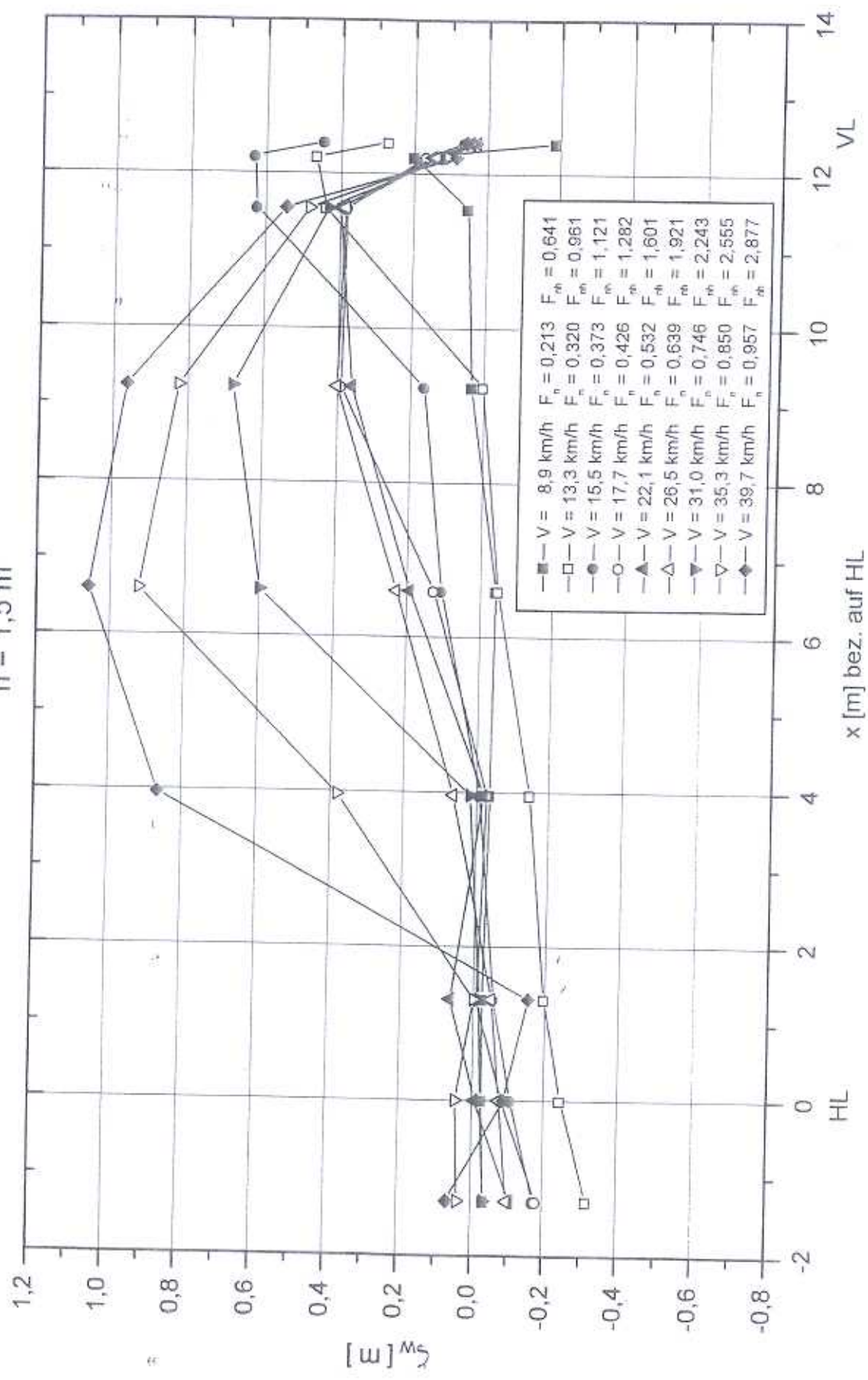


Wellenhöhe an der Außenhaut
Fahrgastschiff (Ausgangsversion)

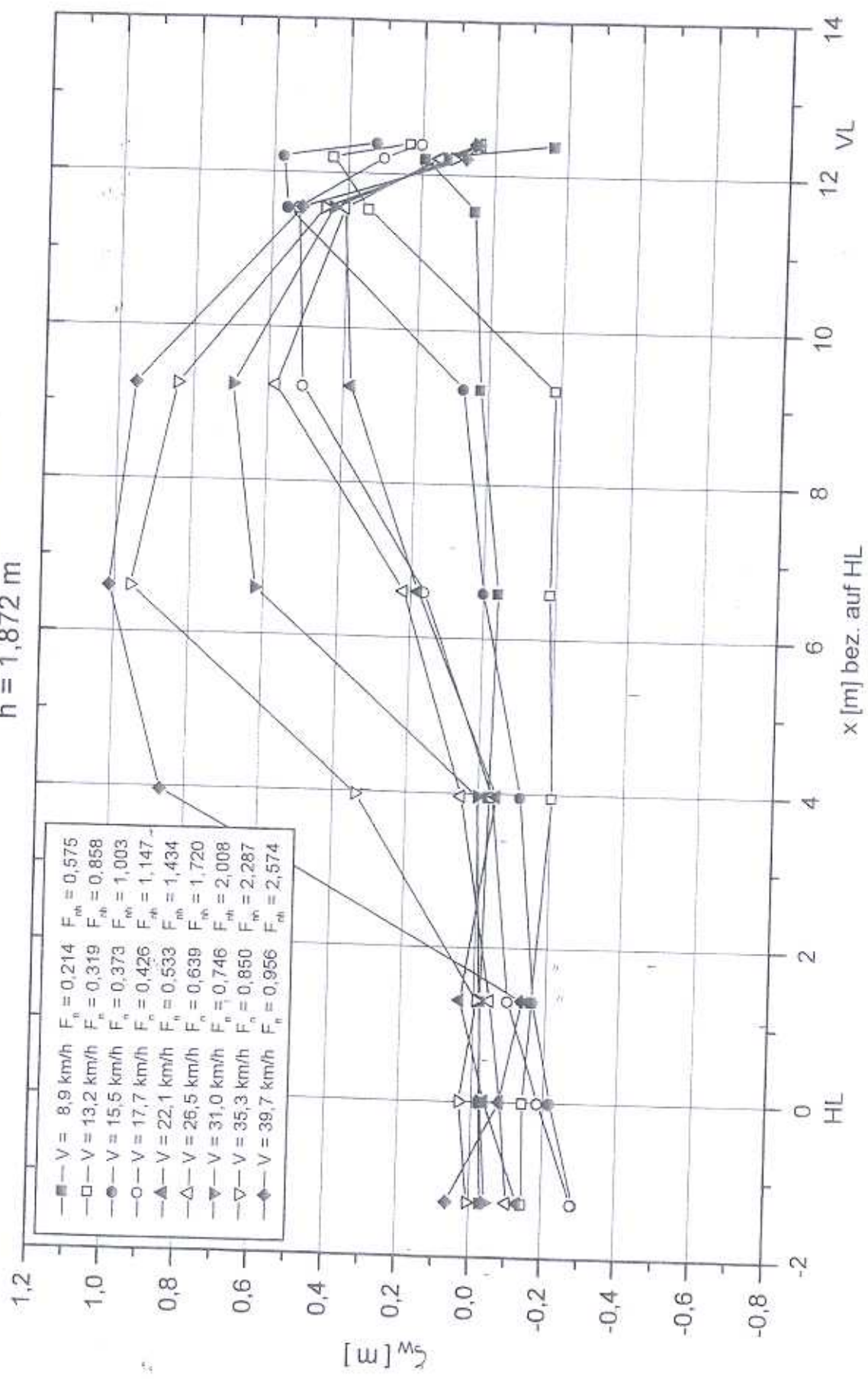
$h = 9,0 \text{ m}$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot (Ausgangsversion)
 $h = 1,5 \text{ m}$

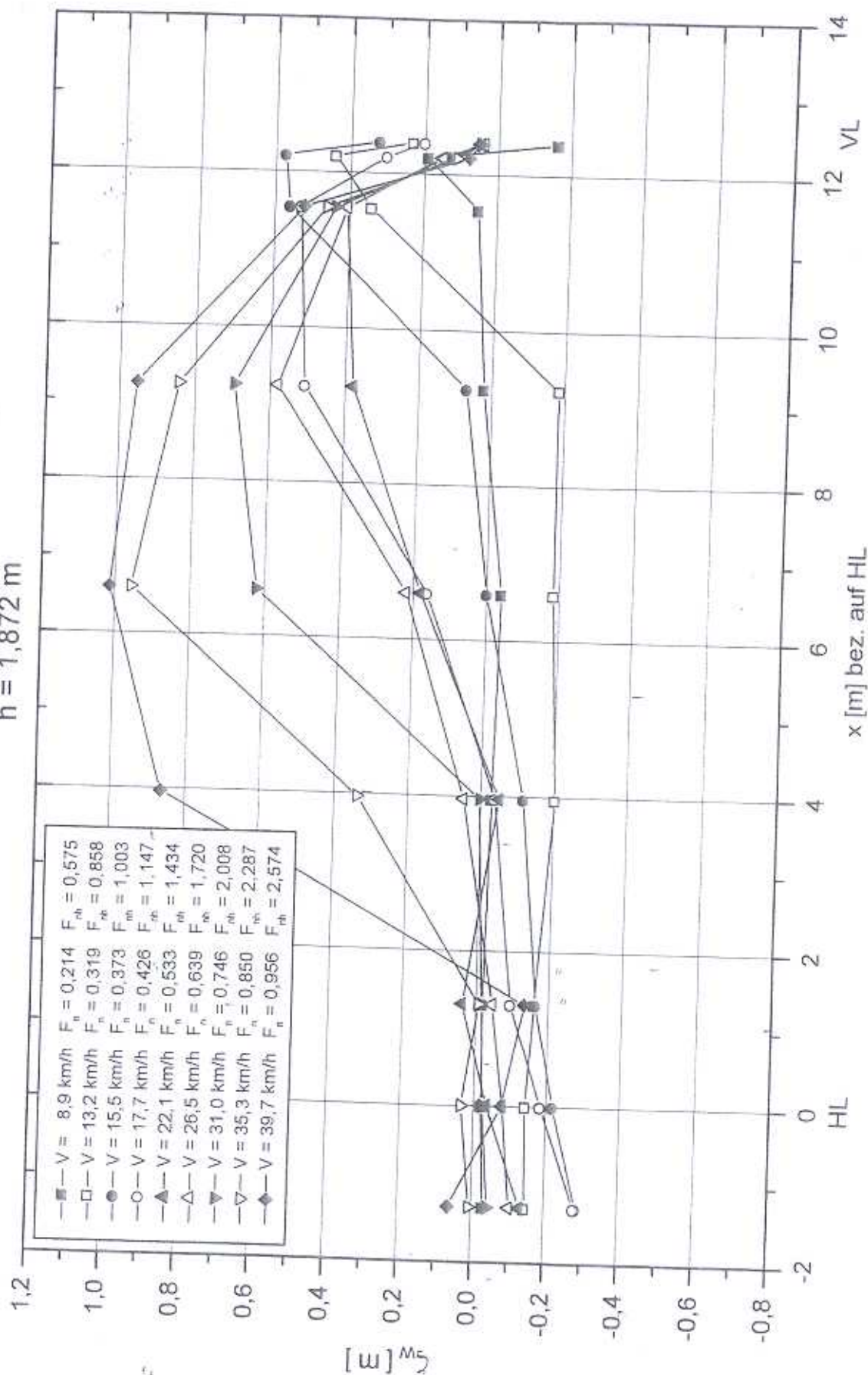


Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot (Ausgangsversion)
 $h = 1,872 \text{ m}$

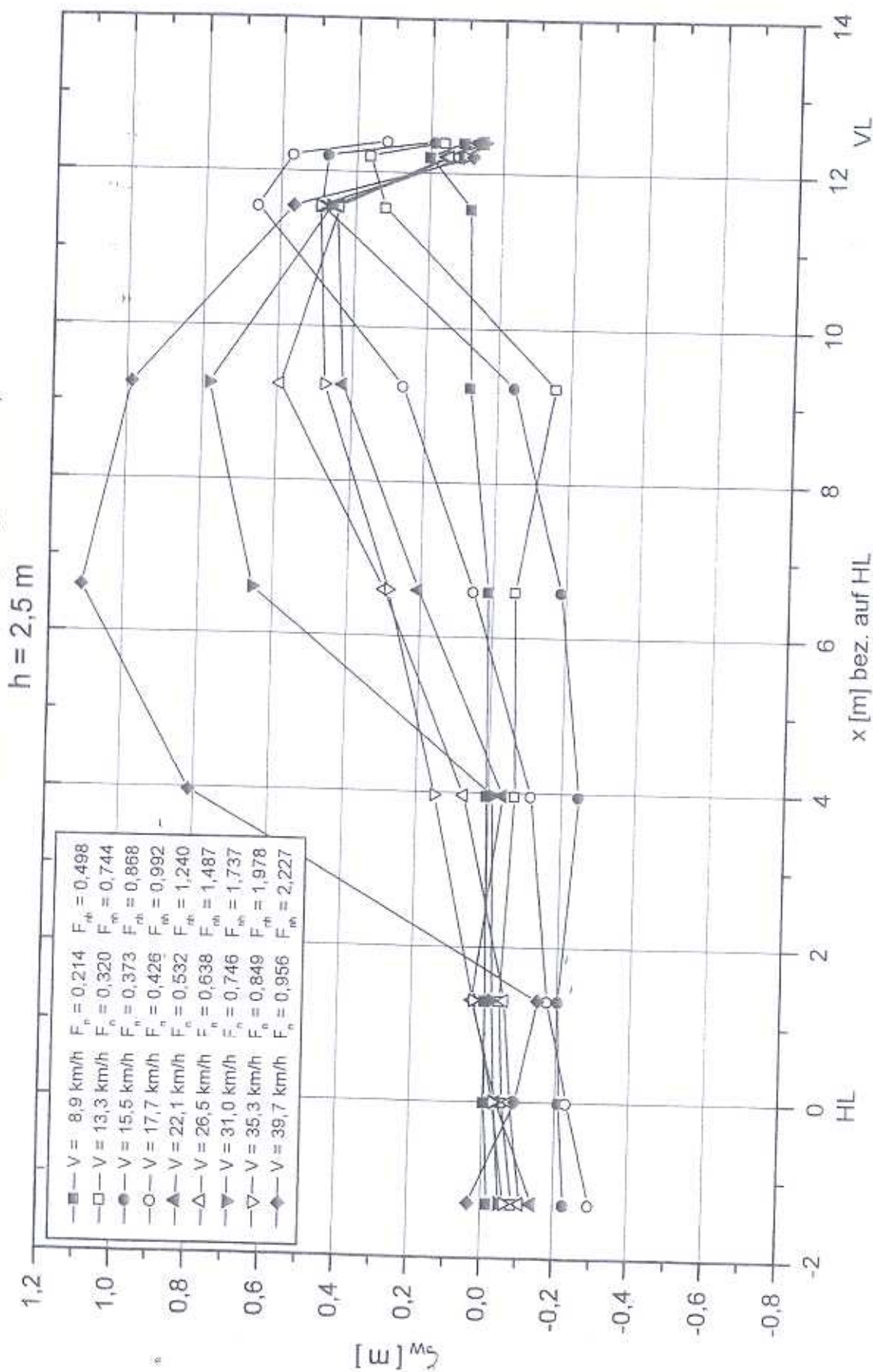


Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot (Ausgangsversion)

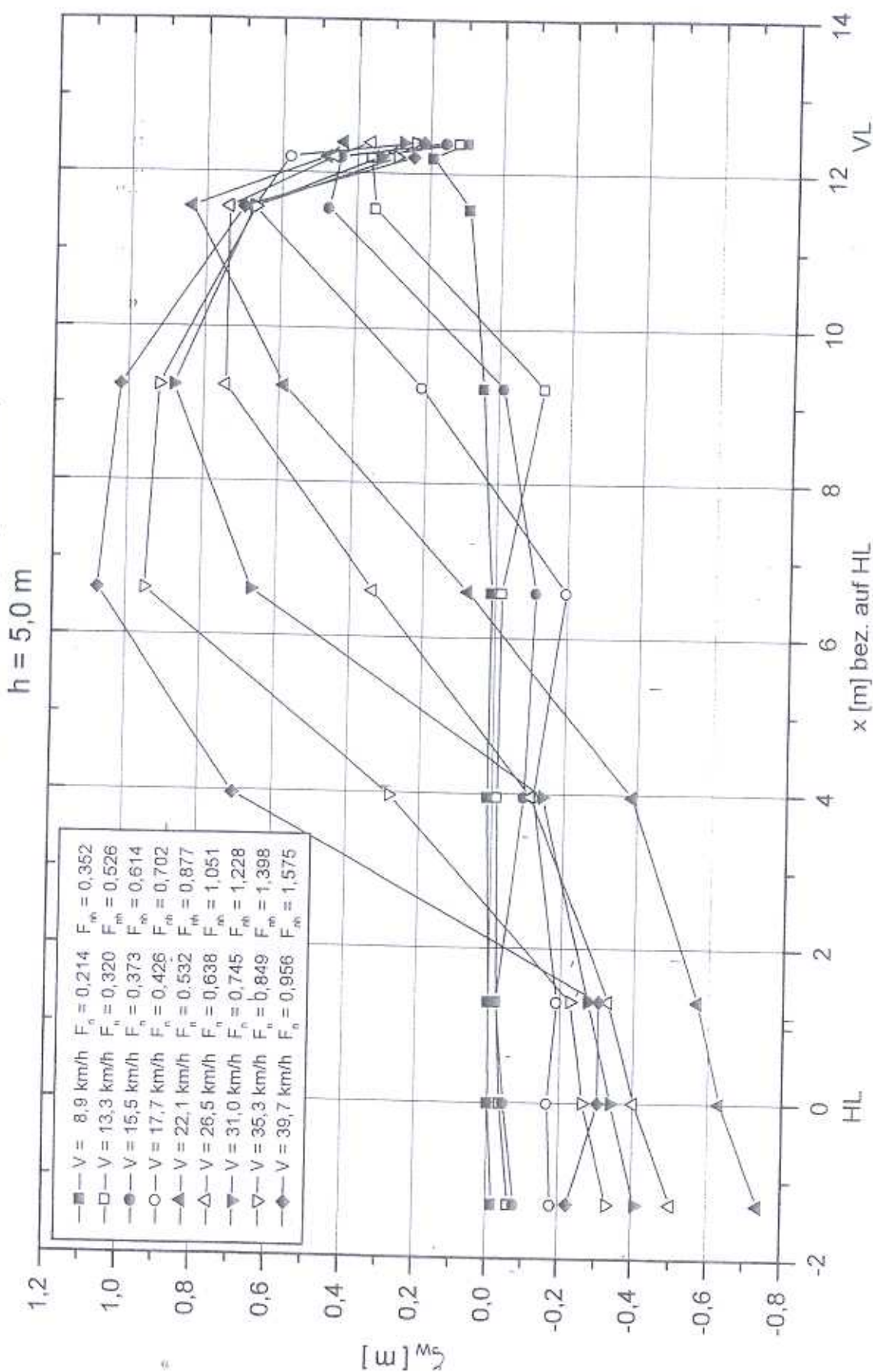
$h = 1,872 \text{ m}$



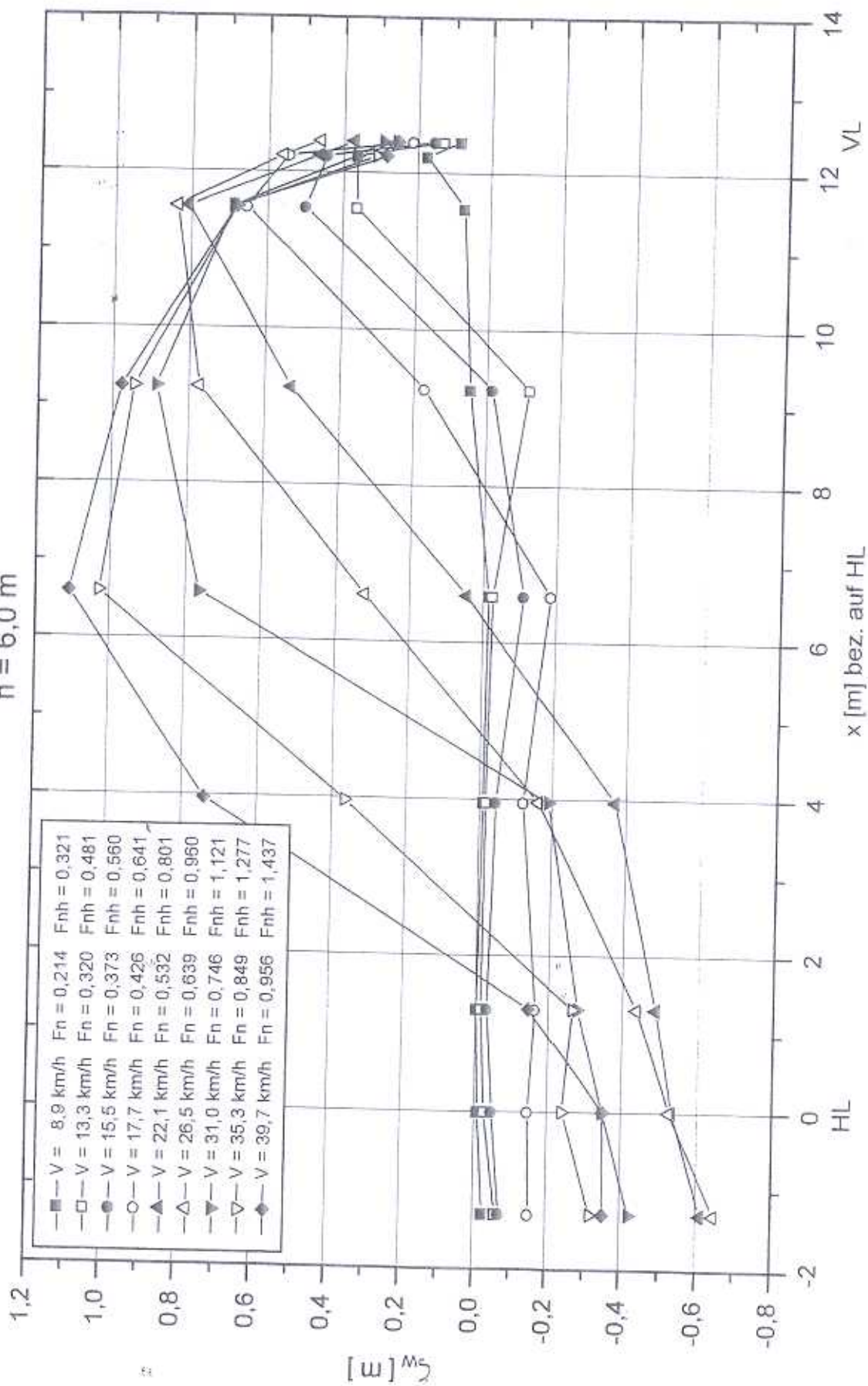
Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot (Ausgangsversion)
 $h = 2,5 \text{ m}$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot (Ausgangsversion)
 $h = 5,0 \text{ m}$



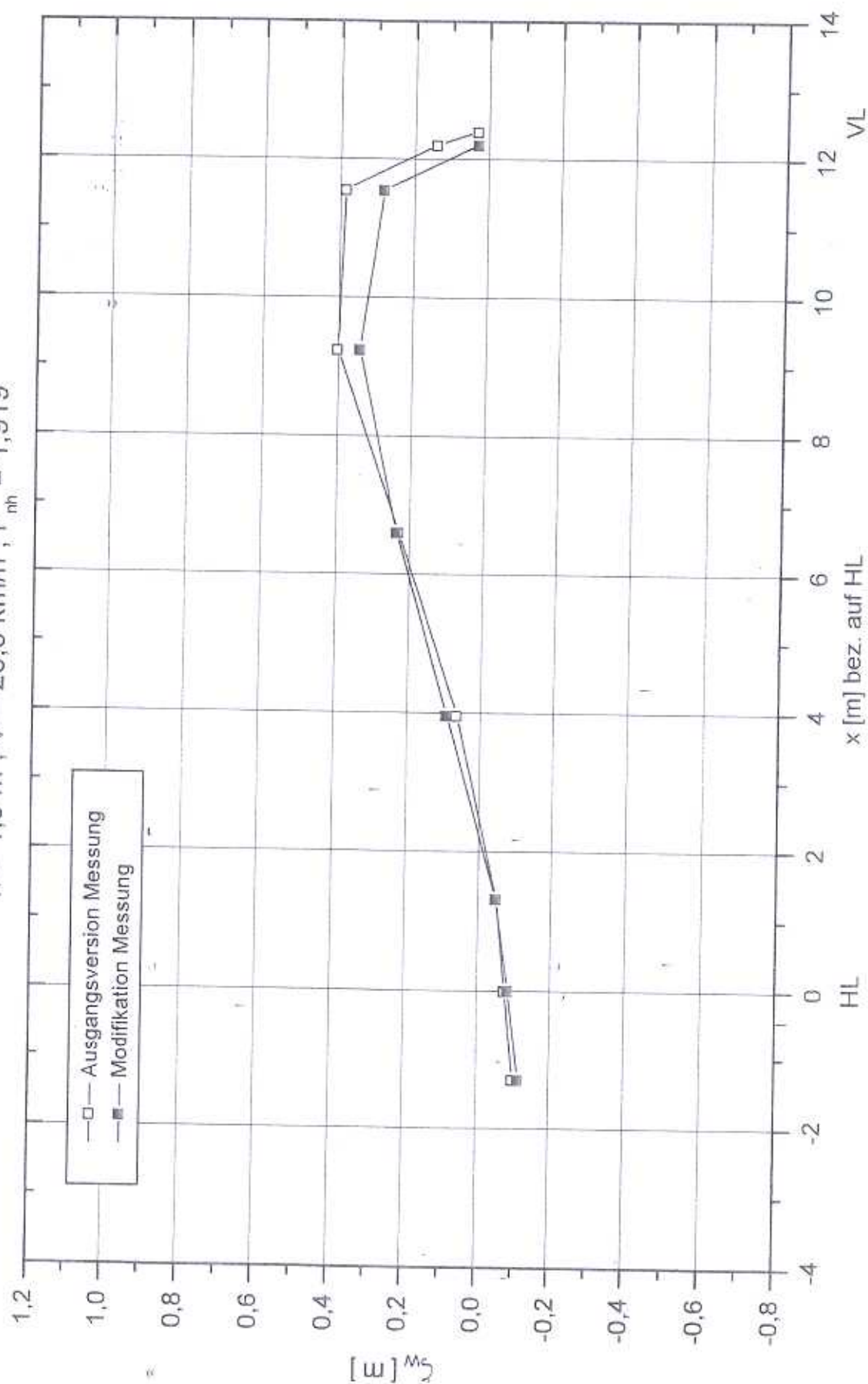
Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot (Ausgangsversion)
 $h = 6,0 \text{ m}$



Wellennordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

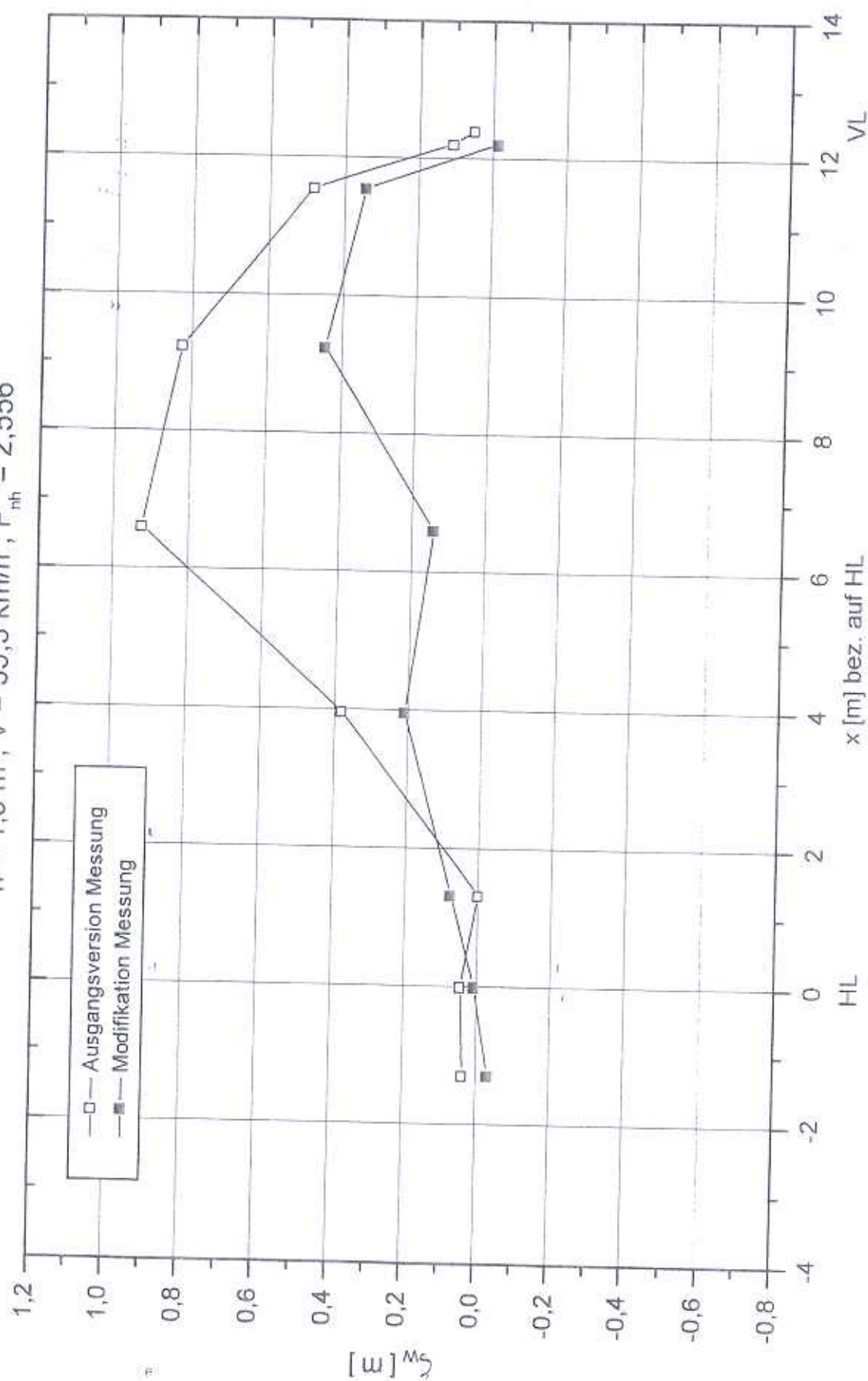
$h = 1,5 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,919$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

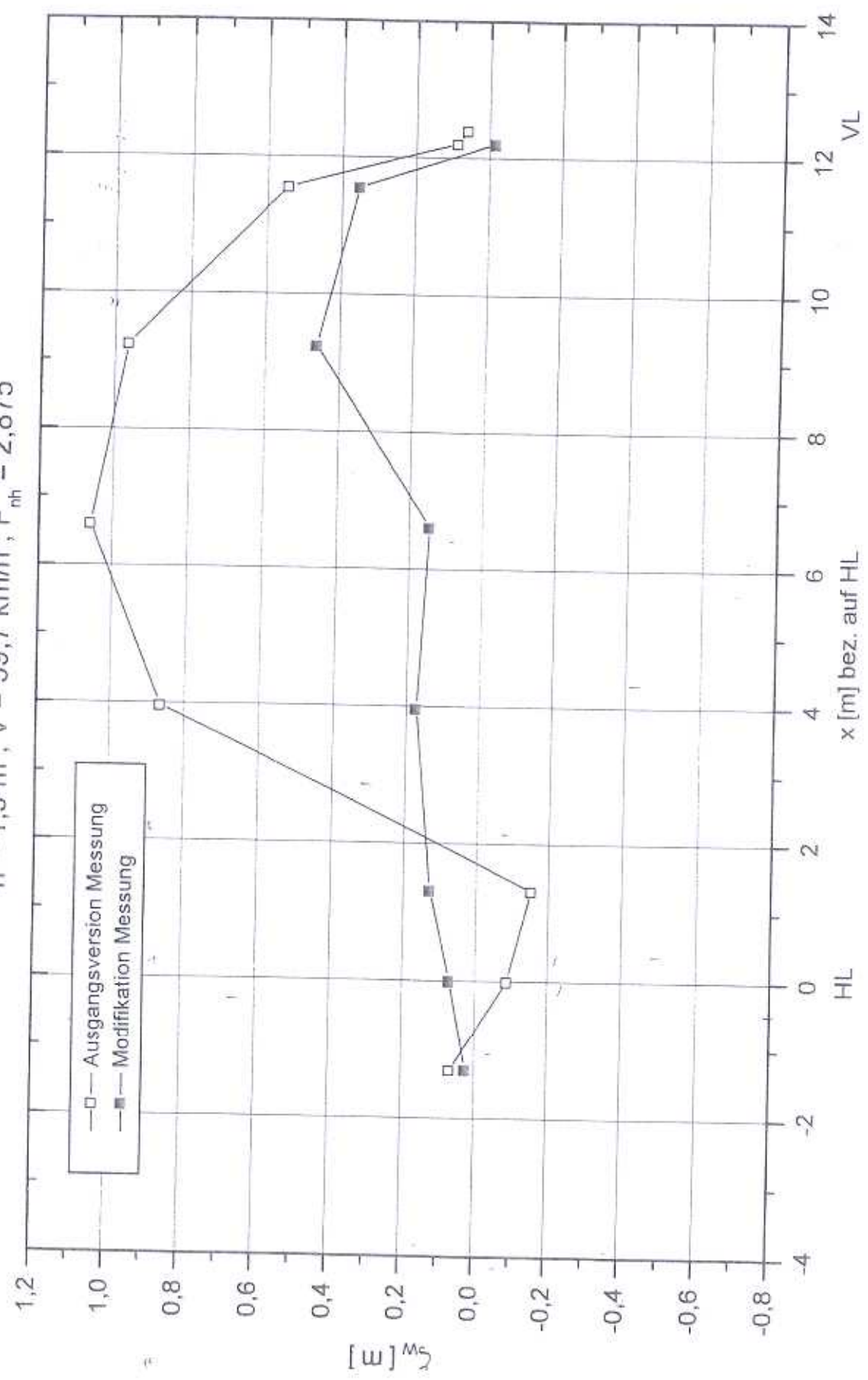
Feuerlöschboot

$h = 1,5 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{rh} = 2,556$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)
Feuerlöschboot

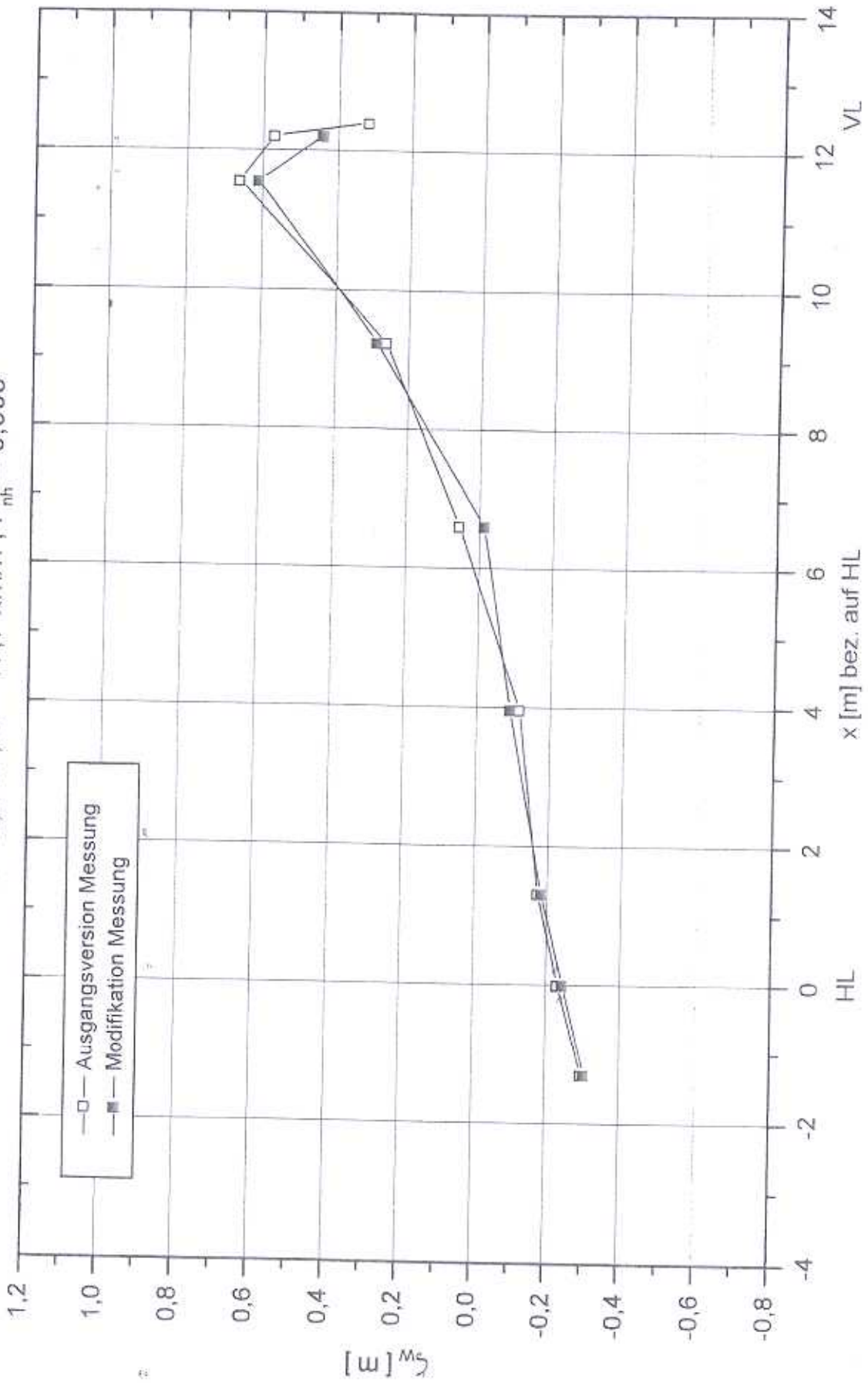
$h = 1,5 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 2,875$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

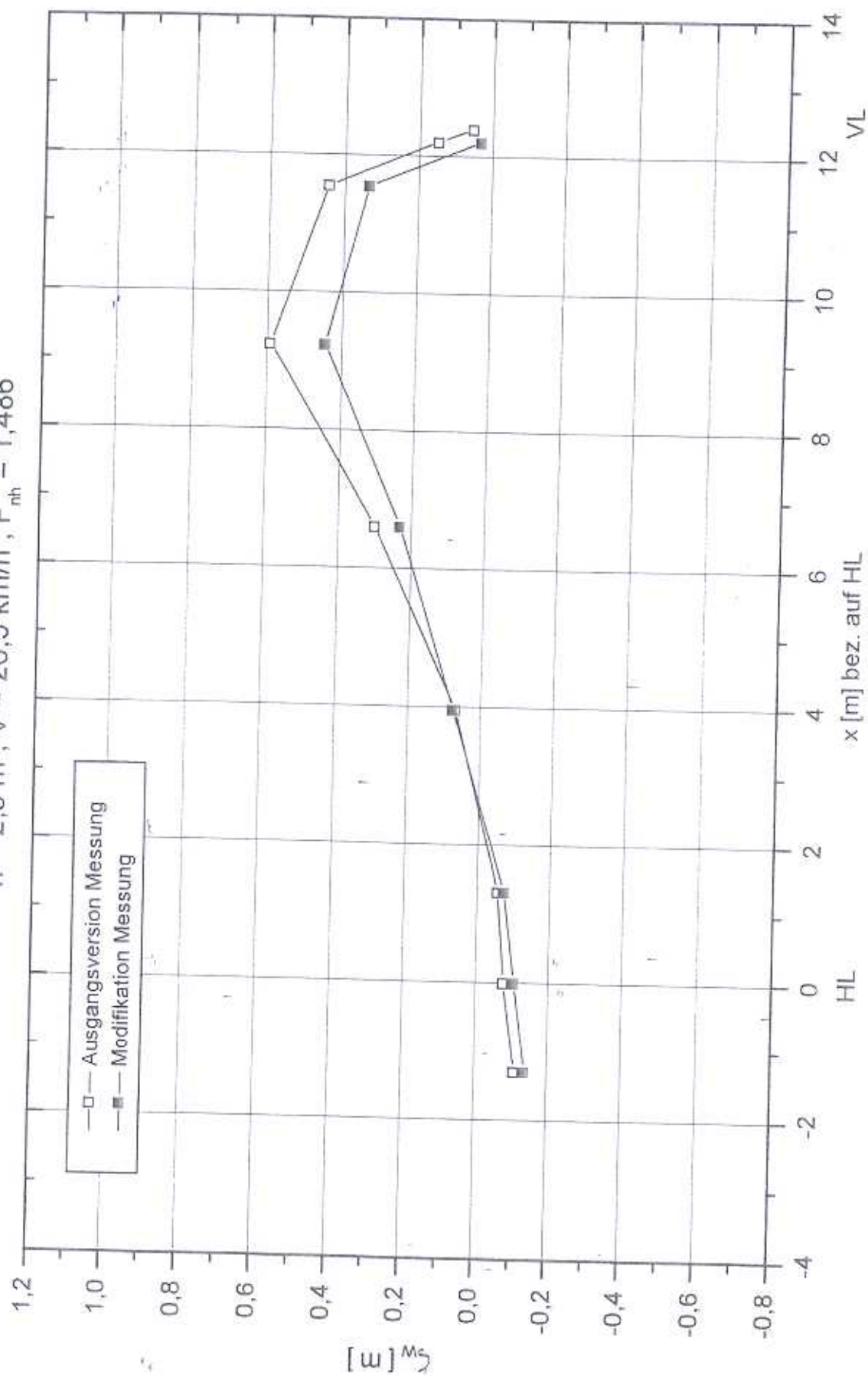
$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 17,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,993$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

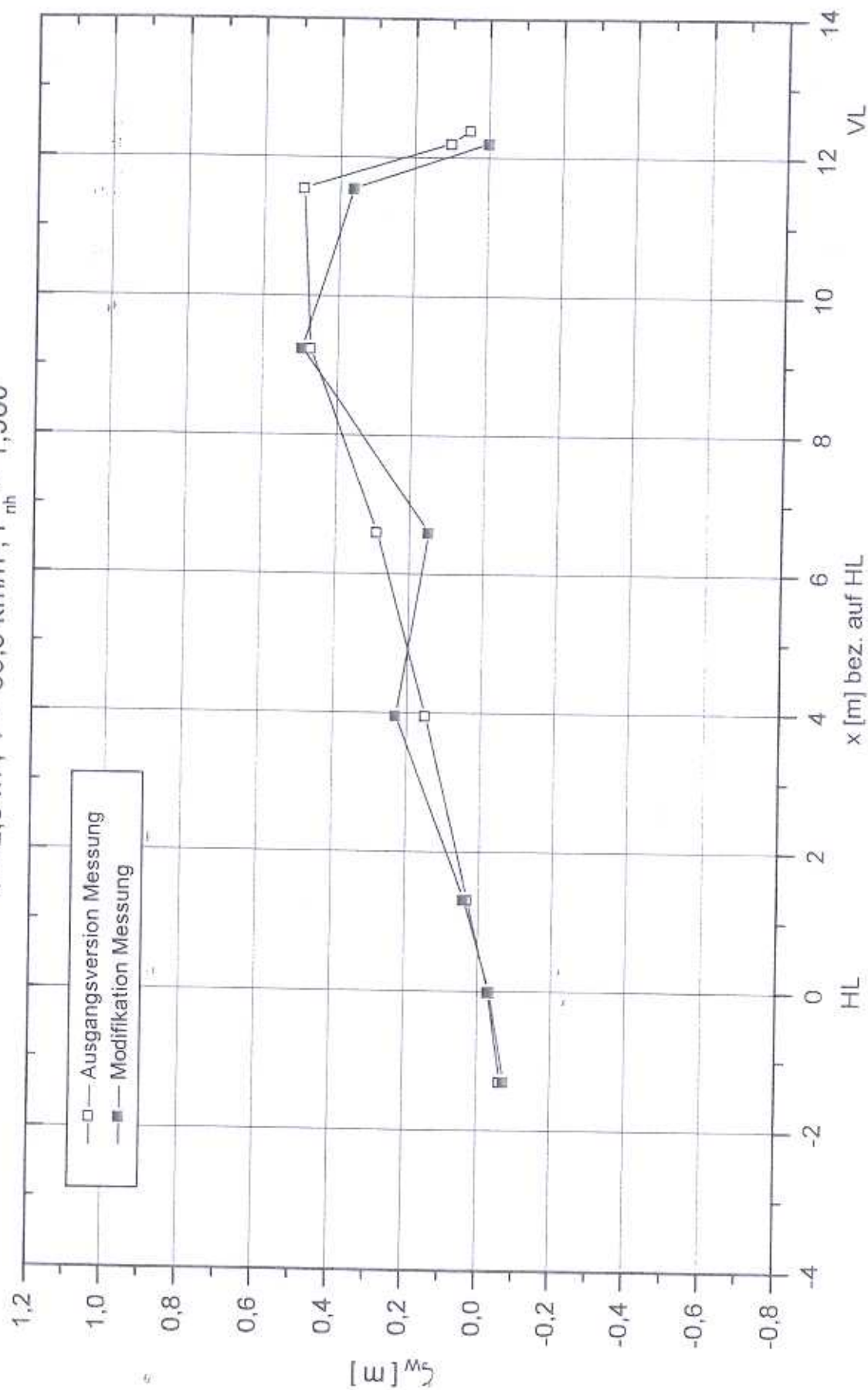
$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,486$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

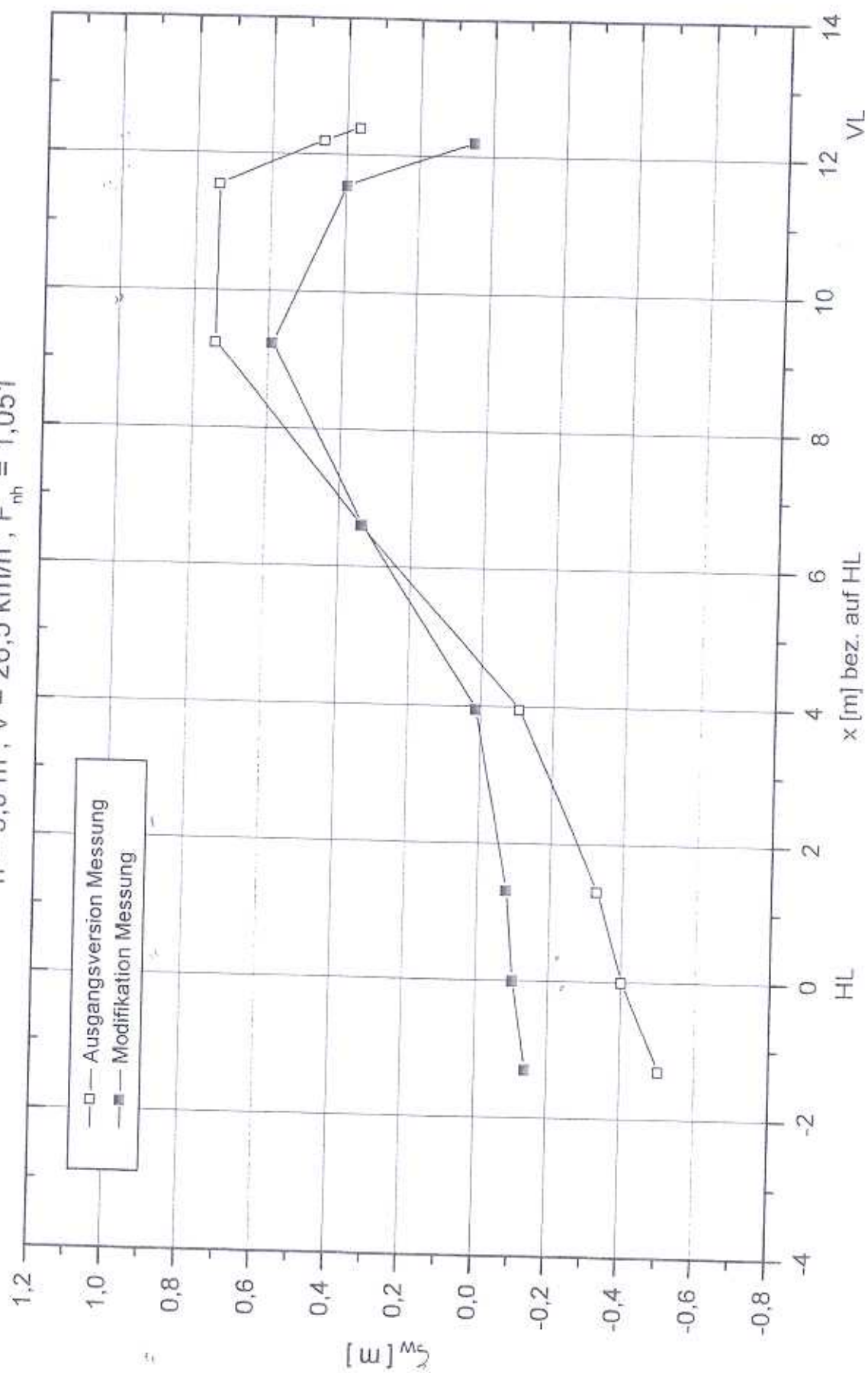
$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,980$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

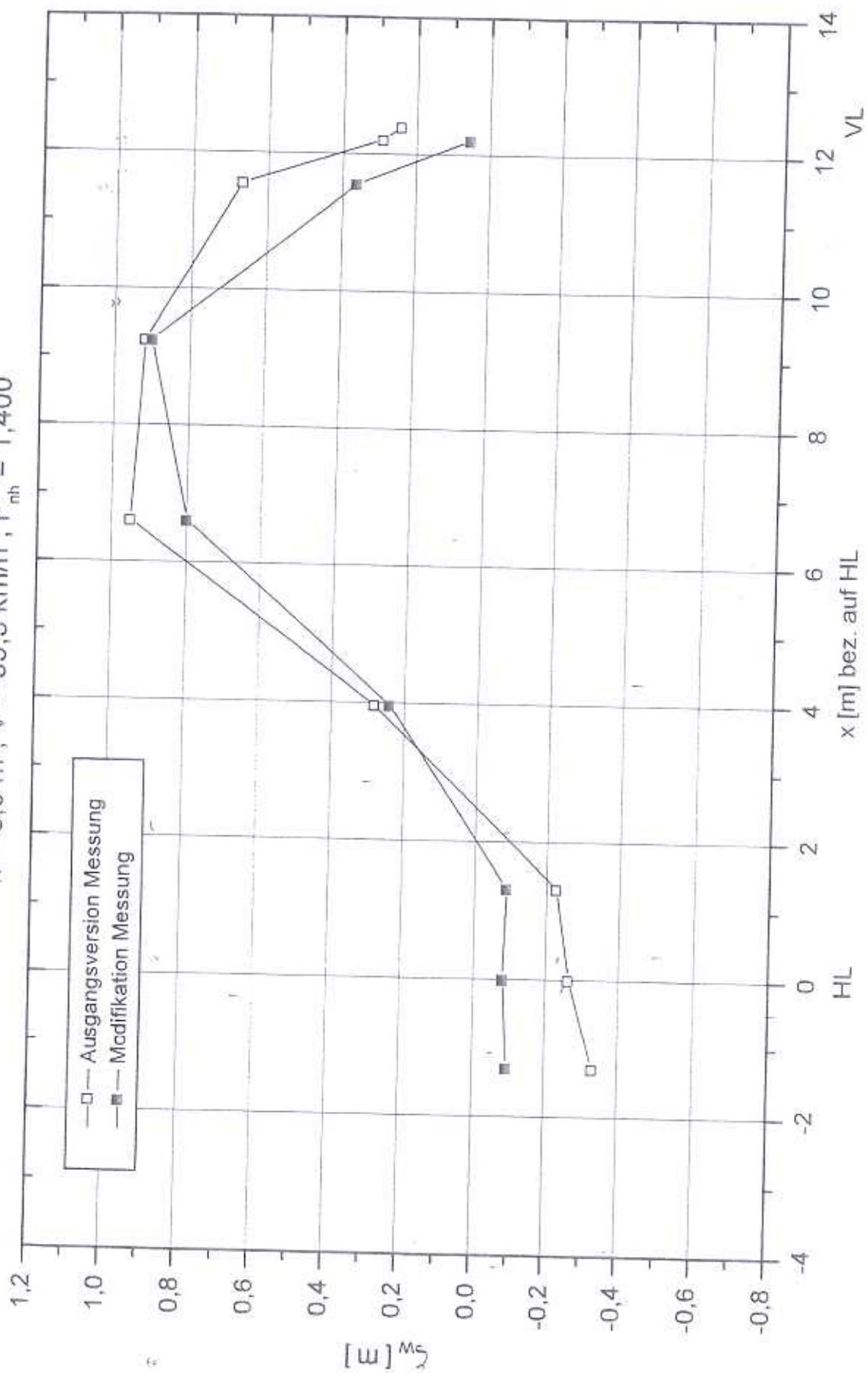
$h = 5,0 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,051$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

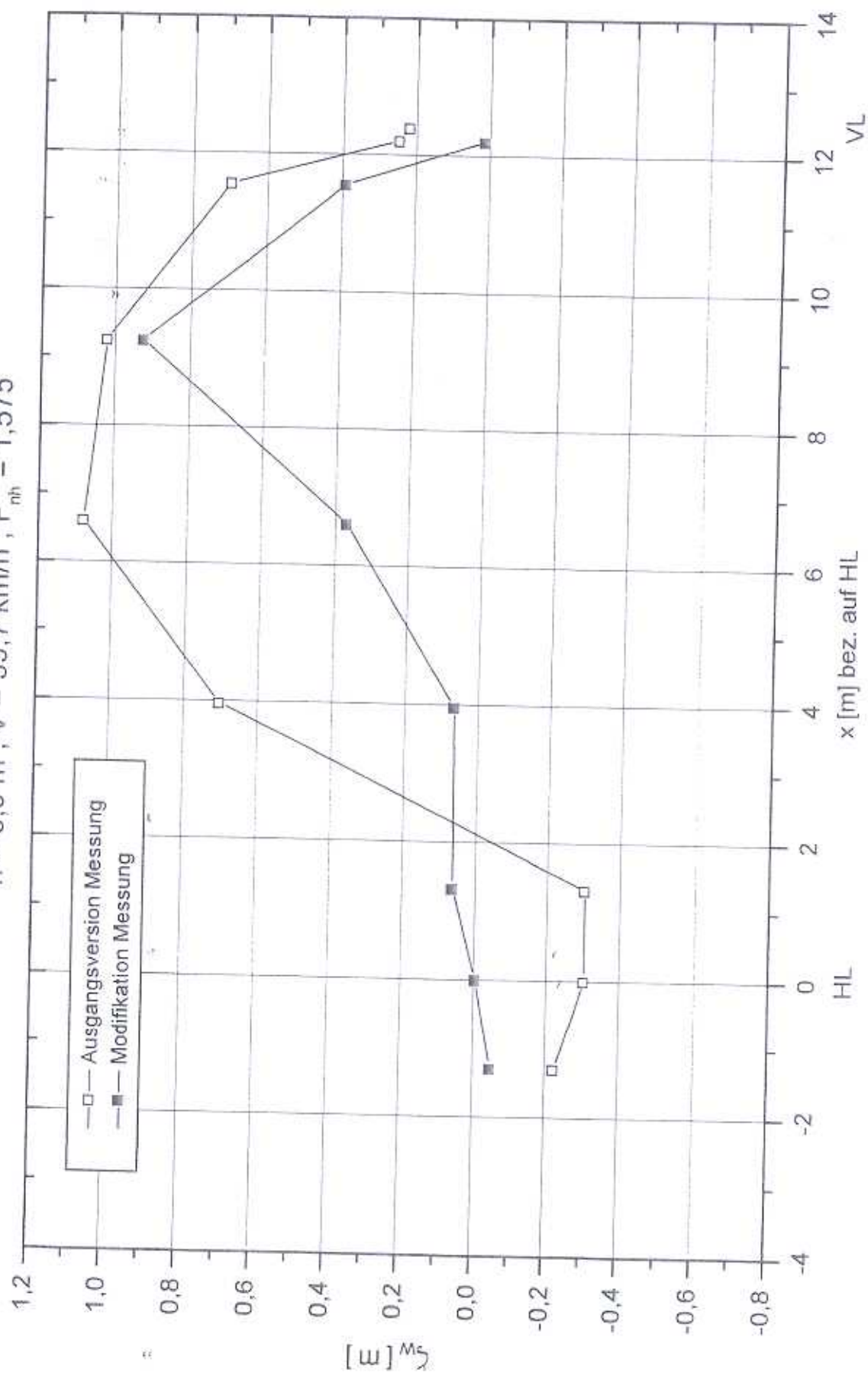
$h = 5,0 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,400$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

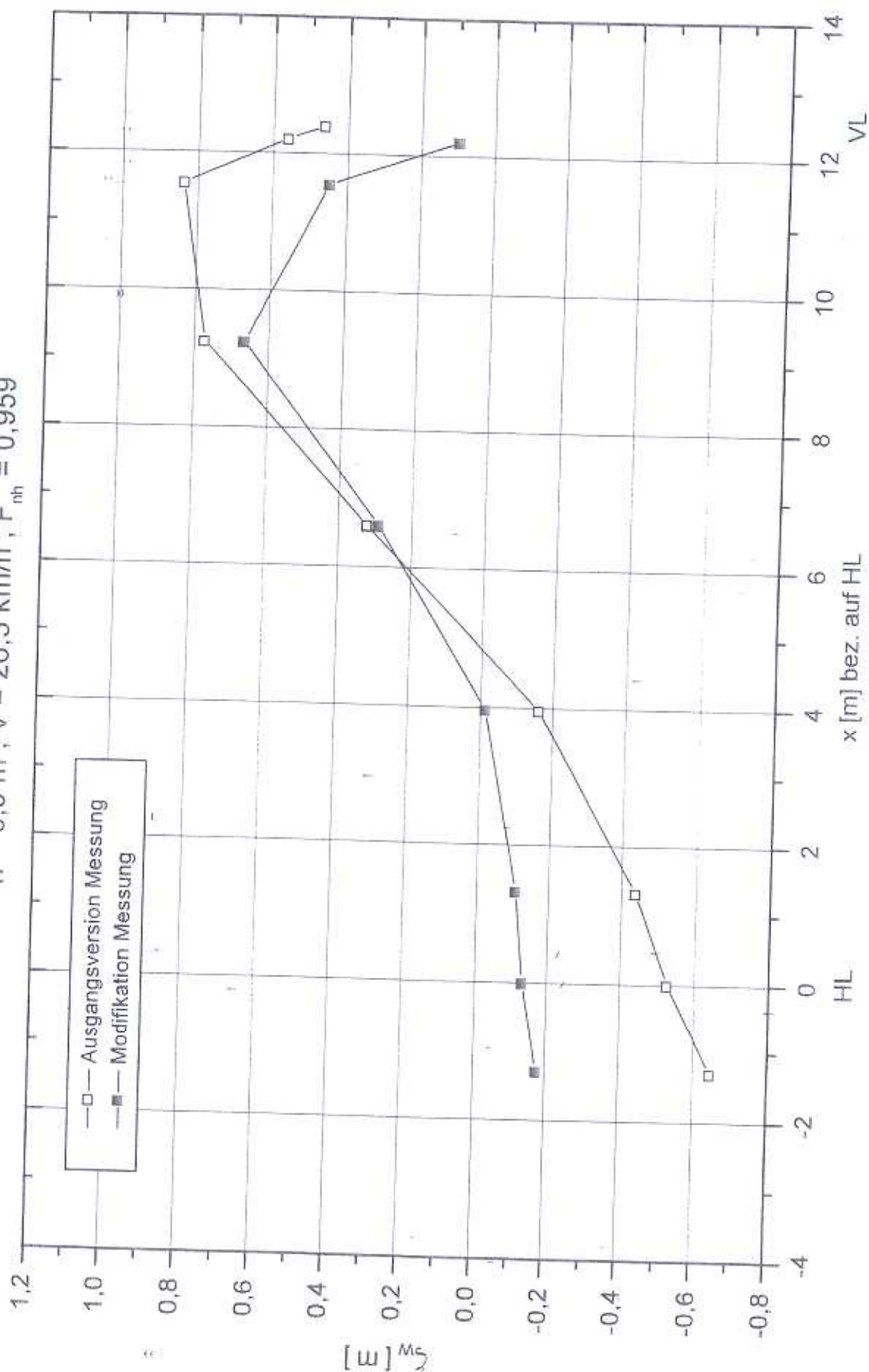
$h = 5,0 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,575$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

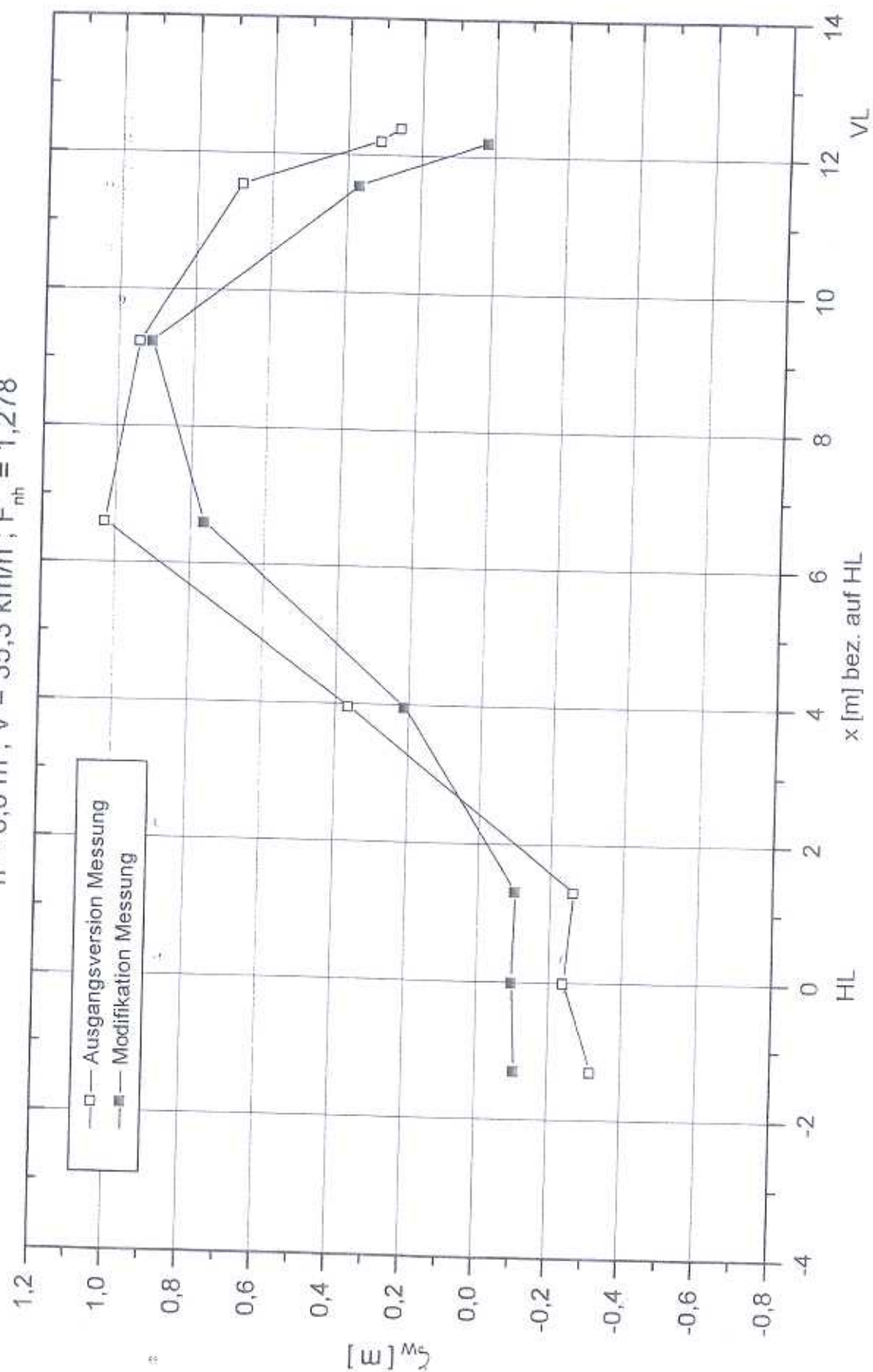
$h = 6,0 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,959$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

Feuerlöschboot

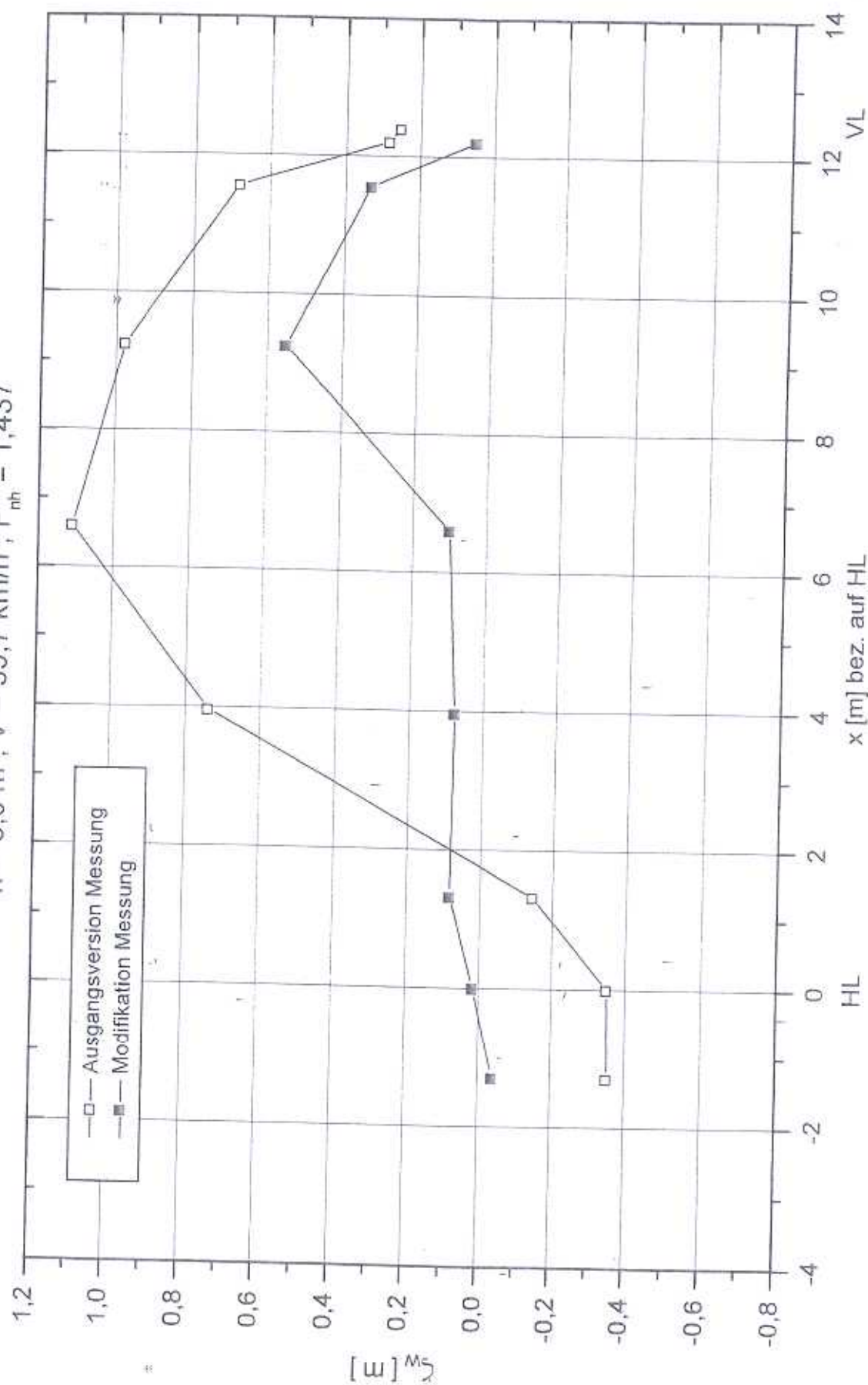
$h = 6,0 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,278$



Wellenordinaten an der Außenhaut (bez. auf Ruhewasserlinie)

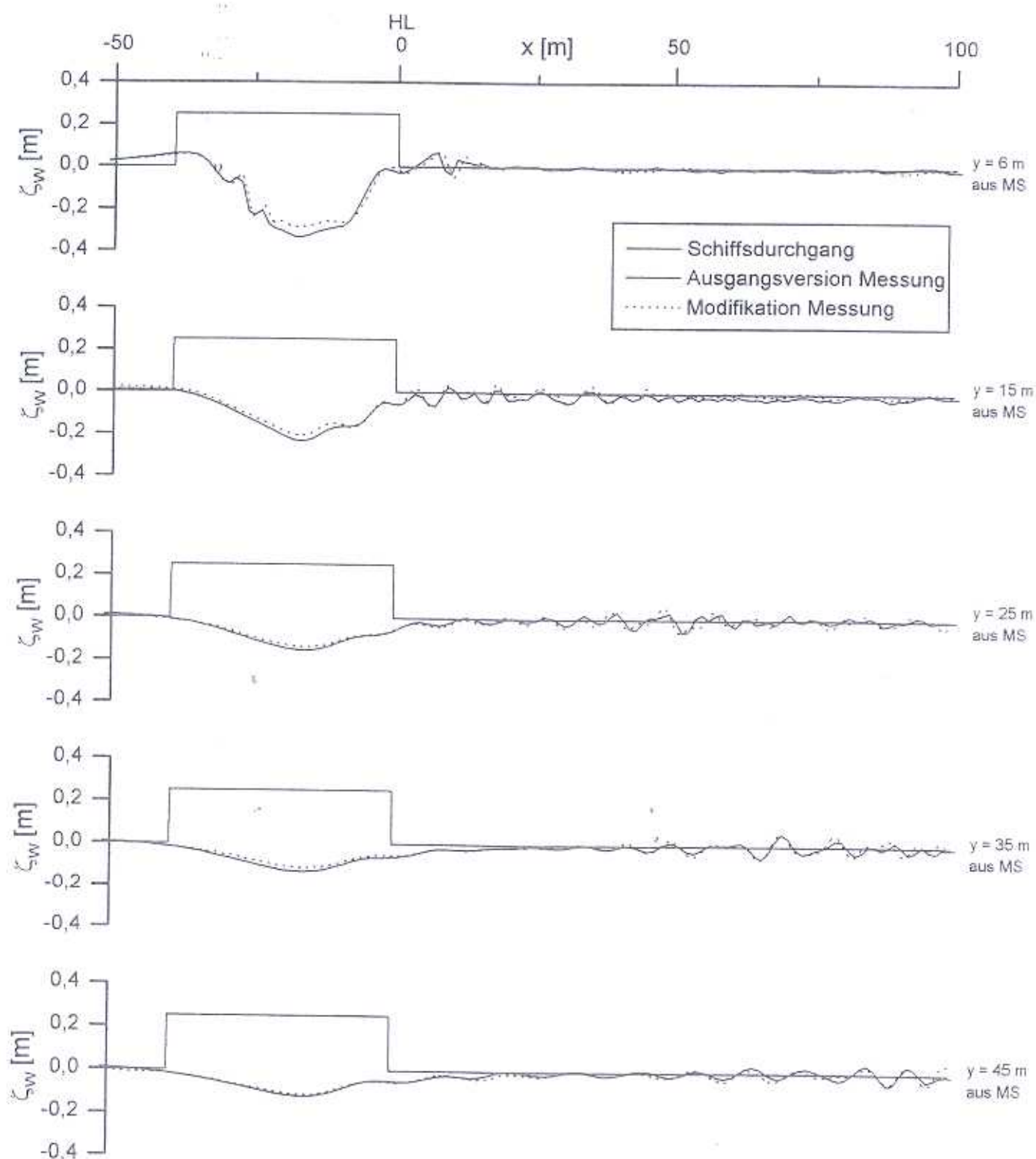
Feuerlöschboot

$h = 6,0 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,437$

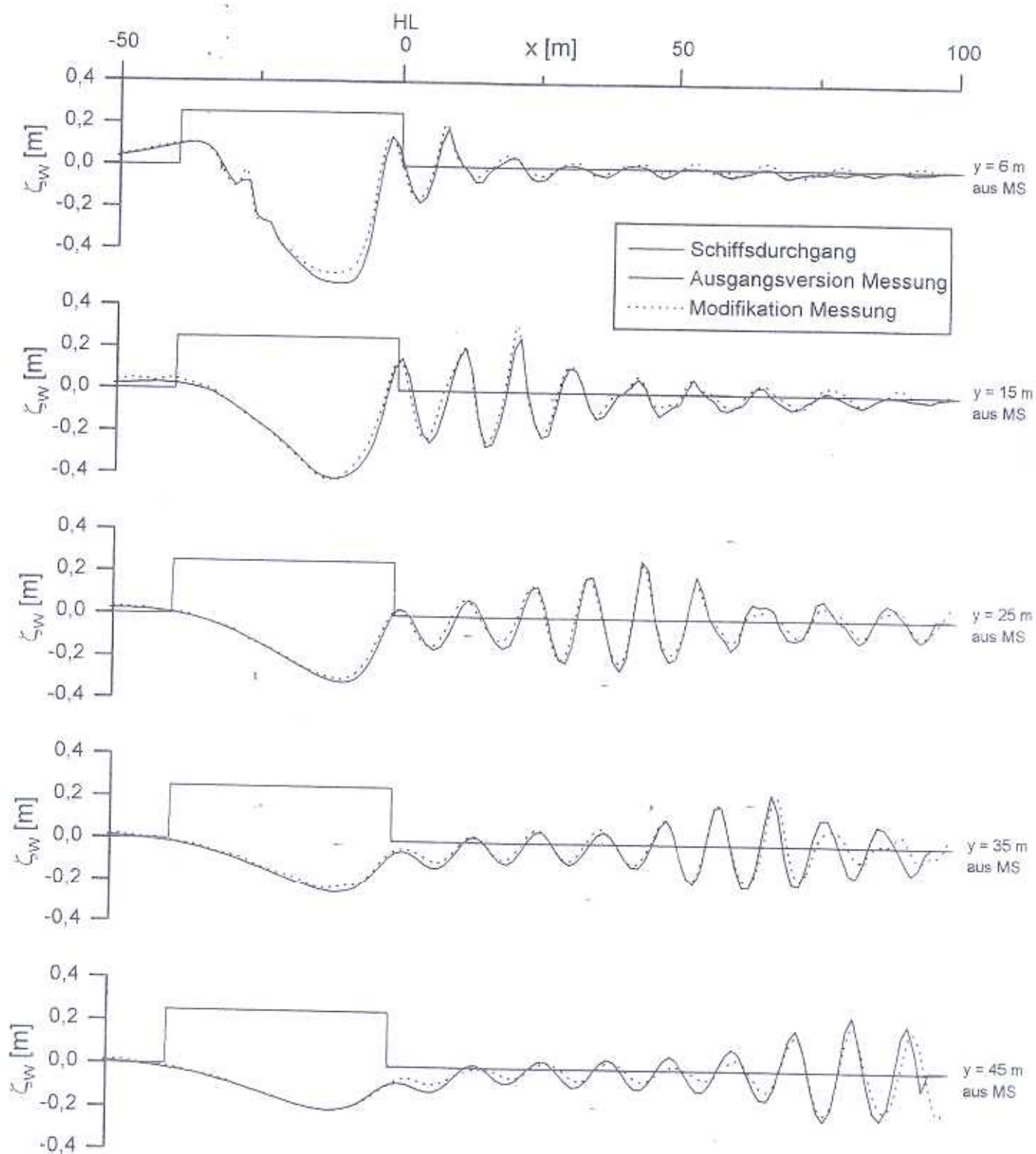


Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff

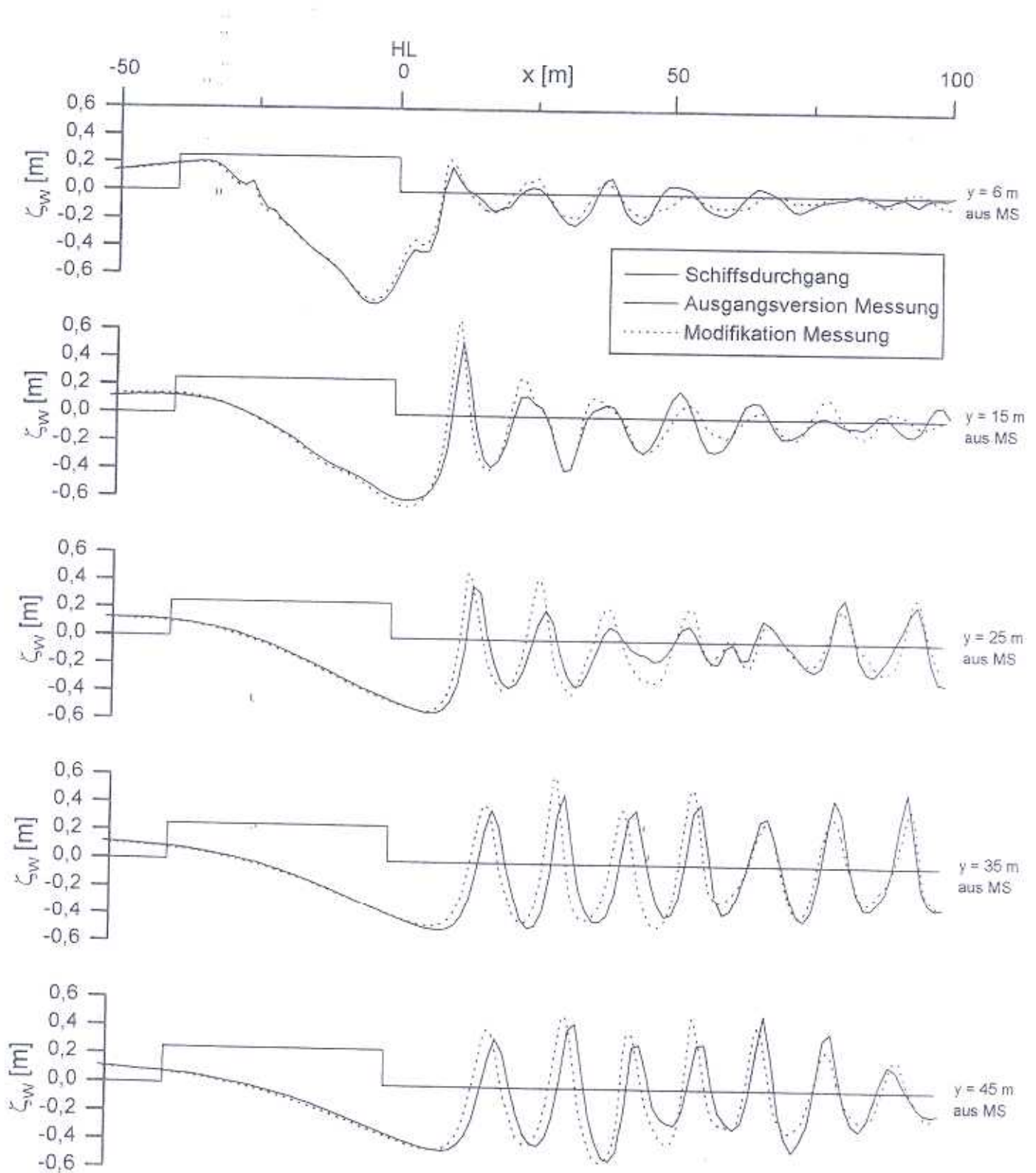
$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 13,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,757$



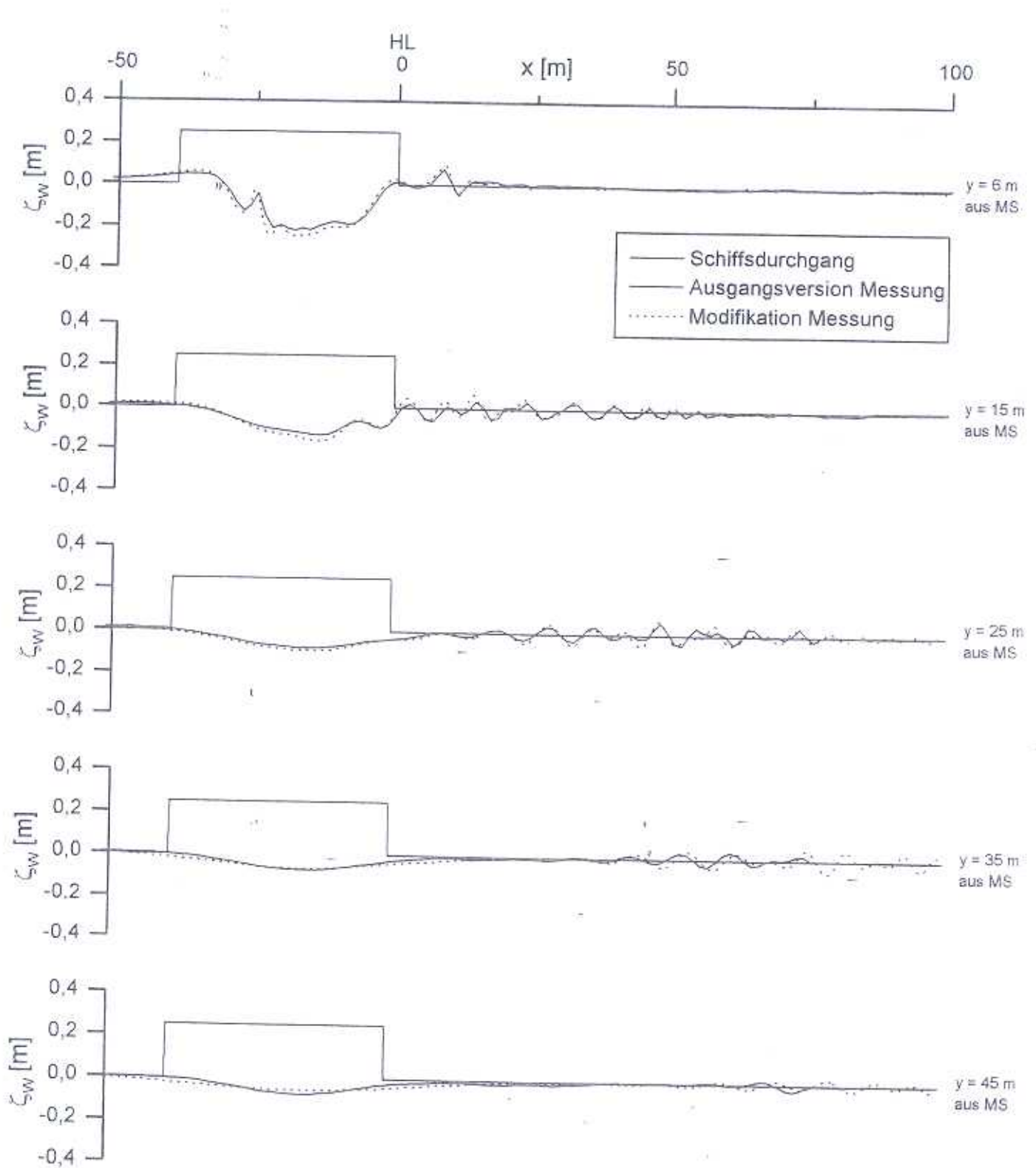
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff

 $h = 2,5 \text{ m}$; $V = 14,2 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,796$ 

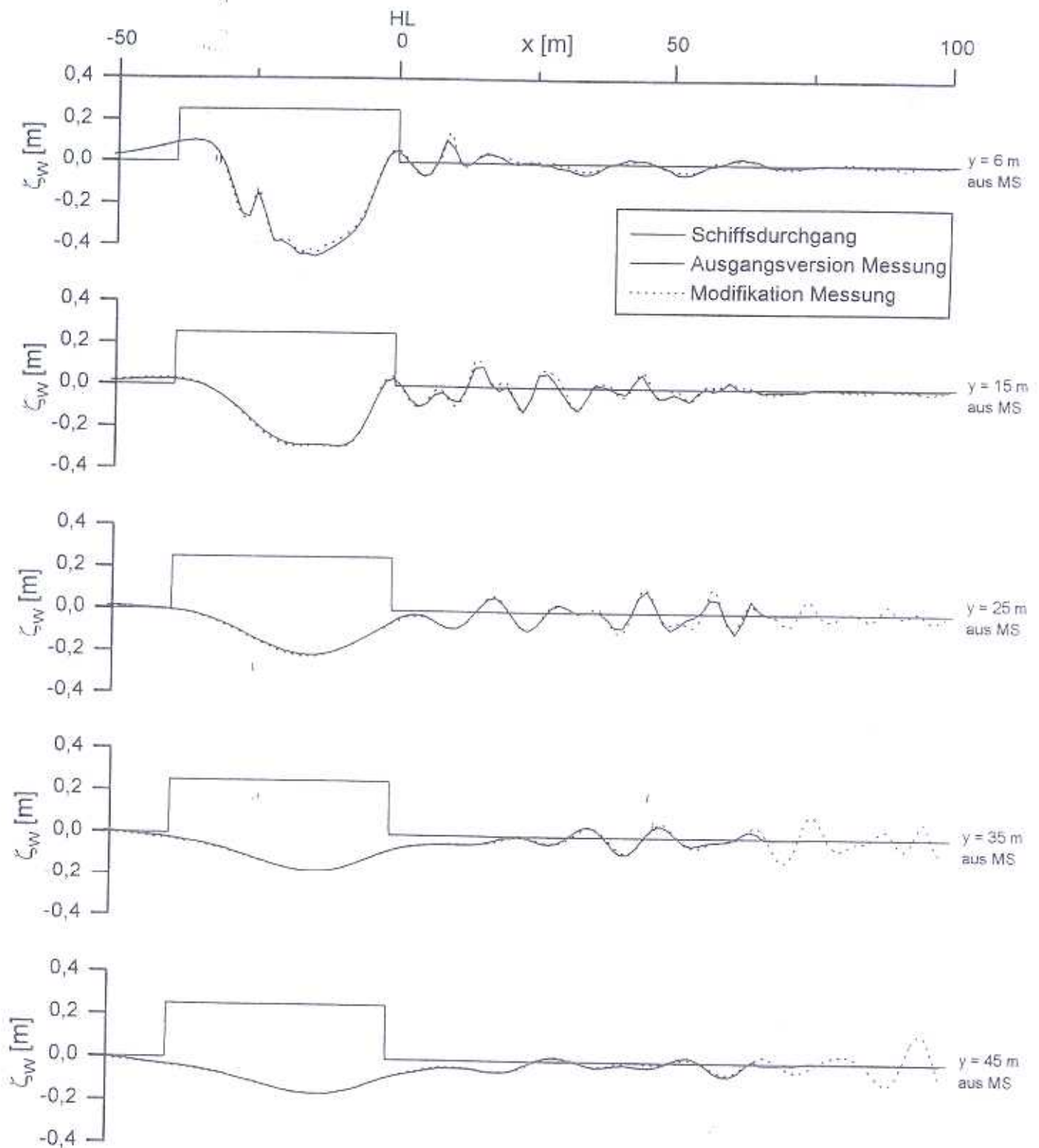
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 2,5 \text{ m}$; $V = 15,1 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,847$



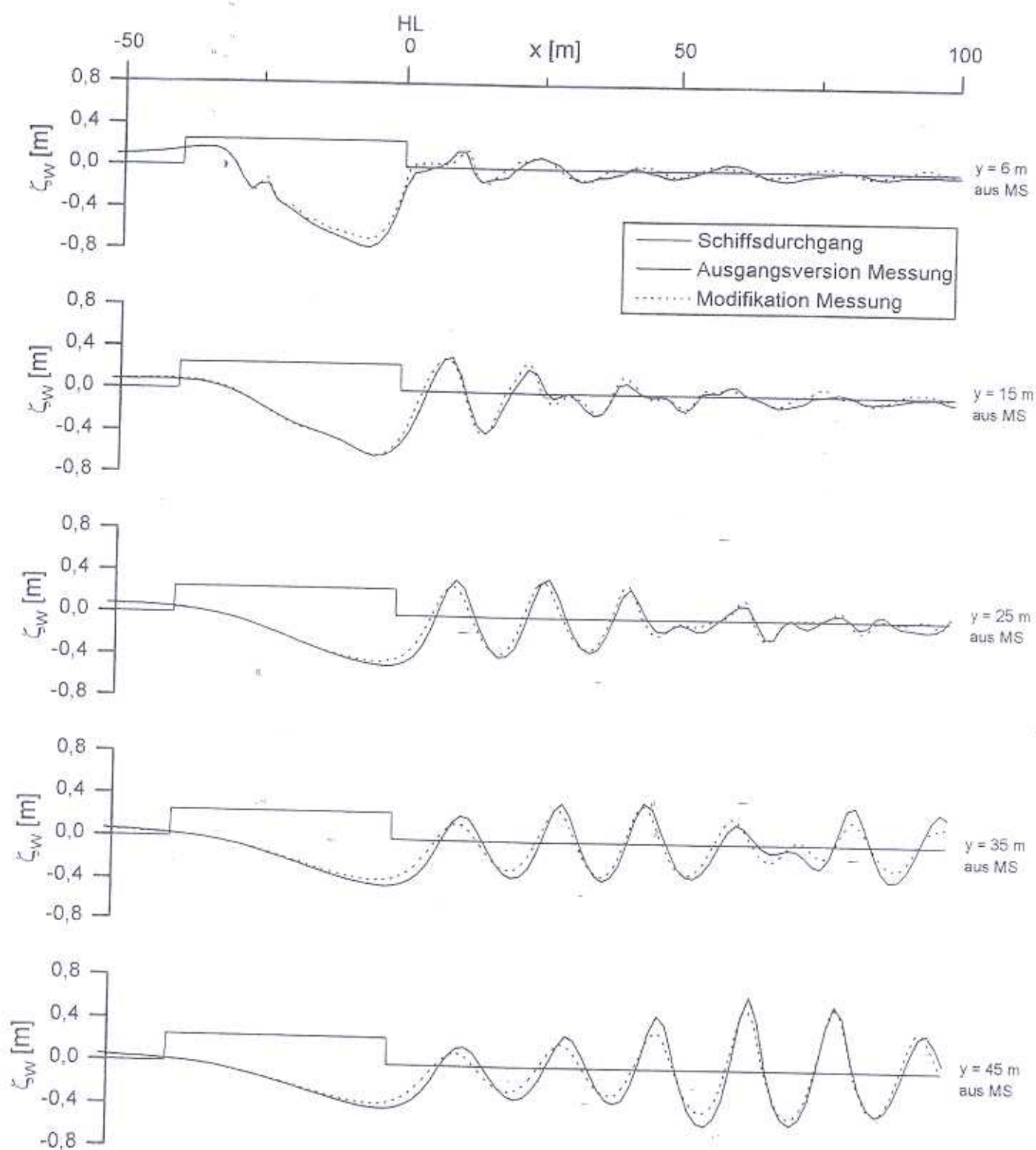
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 3,3 \text{ m}$; $V = 15,0 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,732$



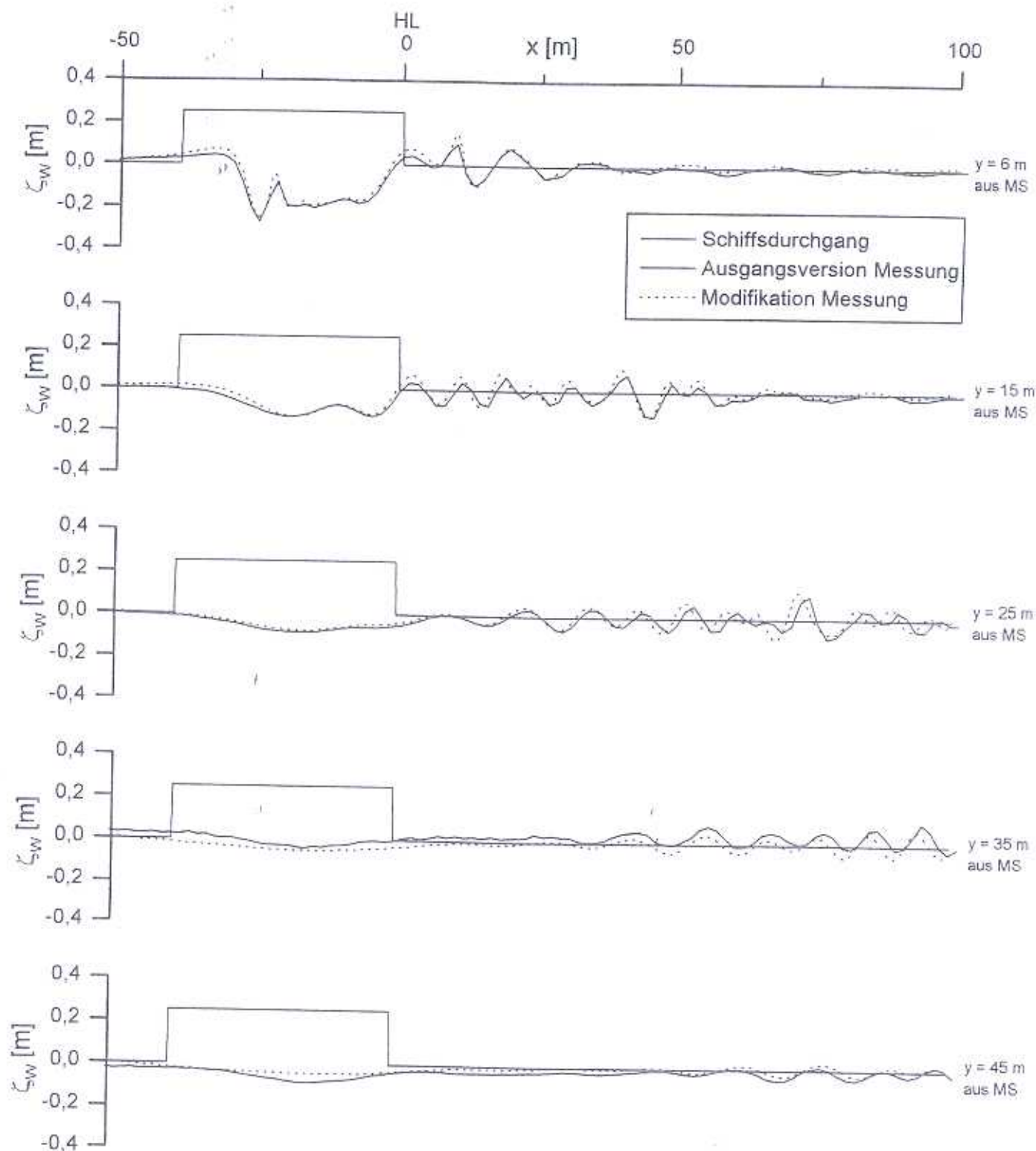
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 3,3 \text{ m}$; $V = 16,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,806$



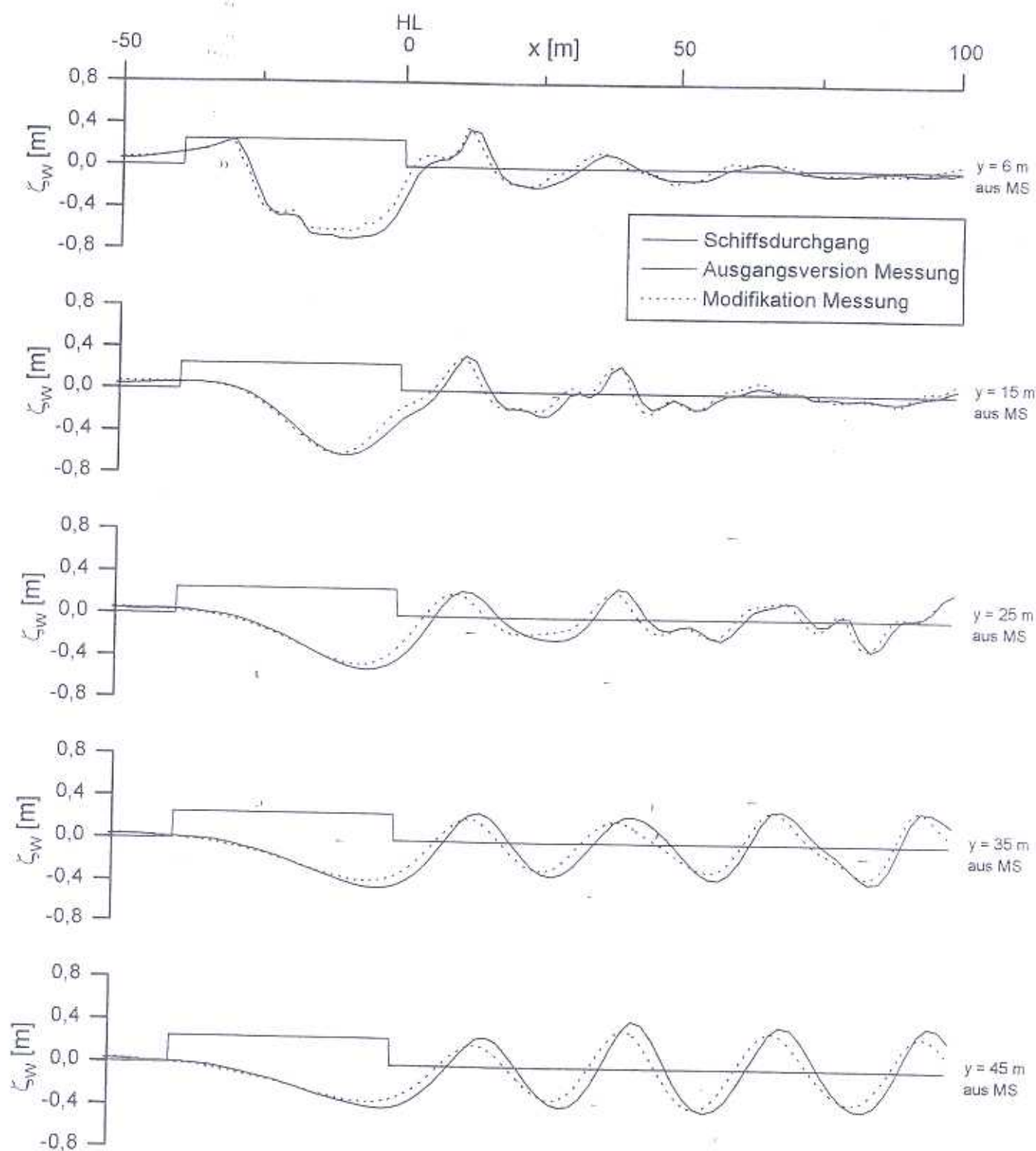
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 3,3 \text{ m}$; $V = 17,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,845$



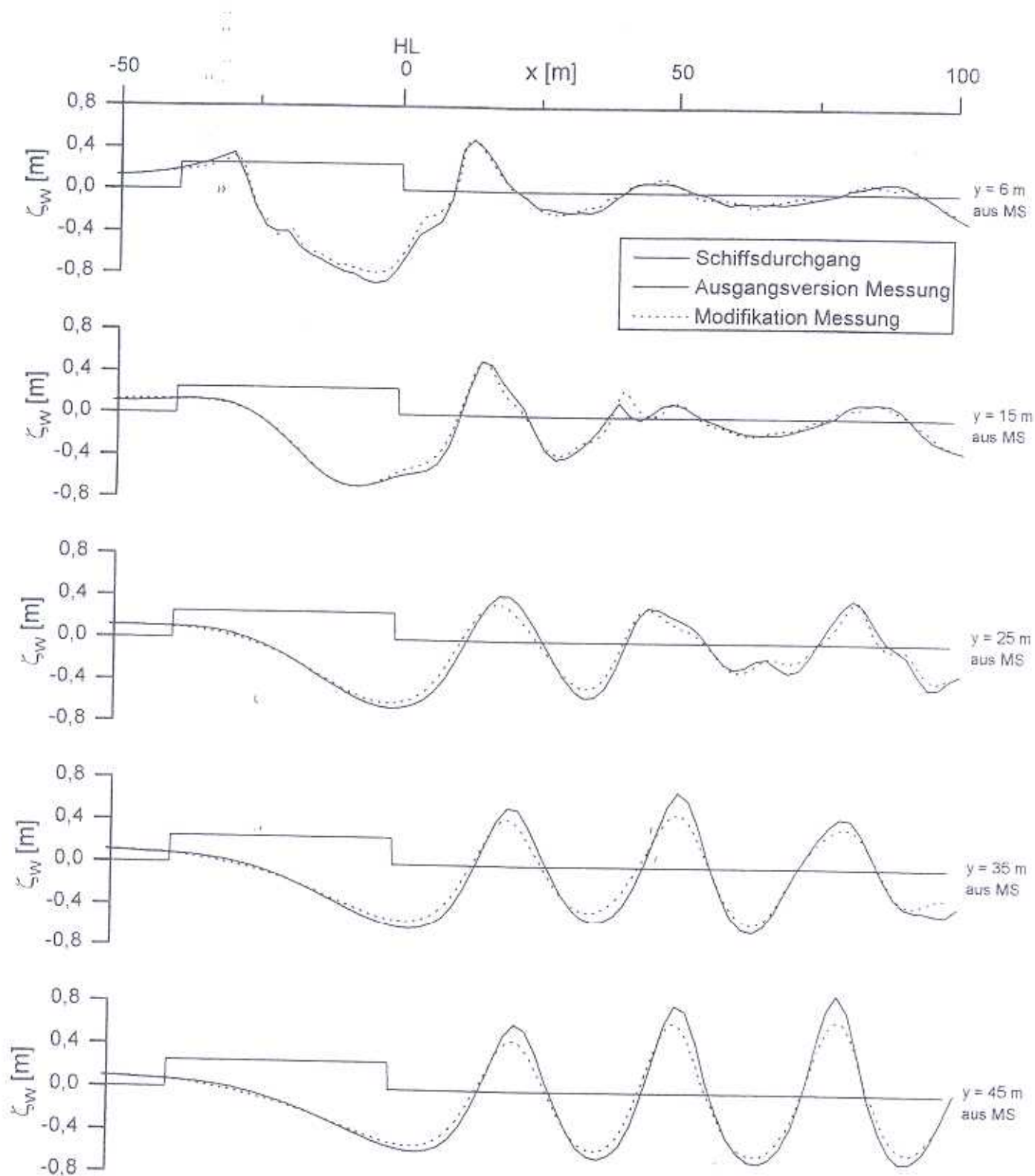
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff $h = 5,0 \text{ m}$; $V = 18,0 \text{ km/h}$; $F_{rh} = 0,714$



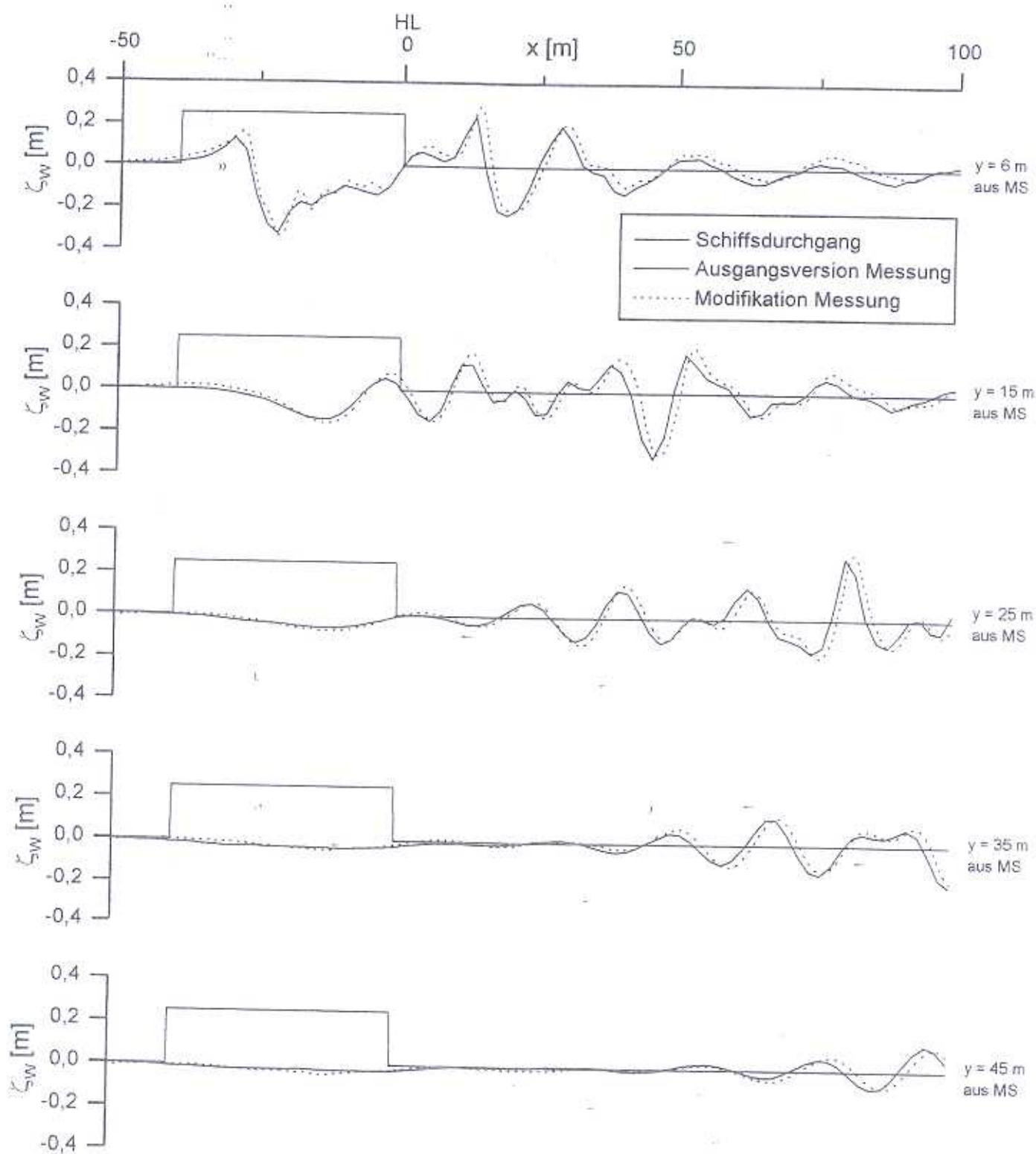
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 5,0 \text{ m}$; $V = 21,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,853$



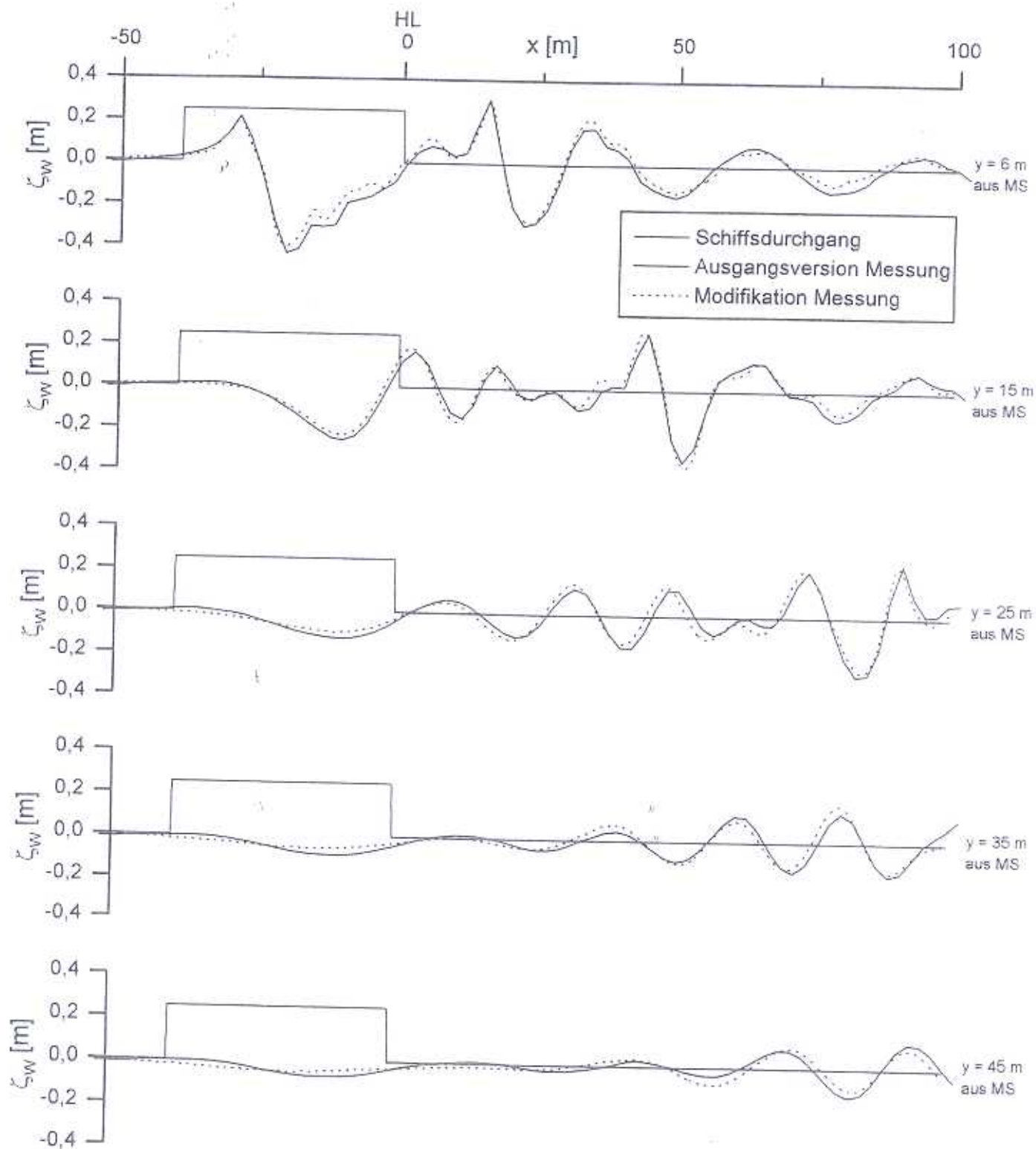
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 5,0 \text{ m}$; $V = 22,0 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,873$



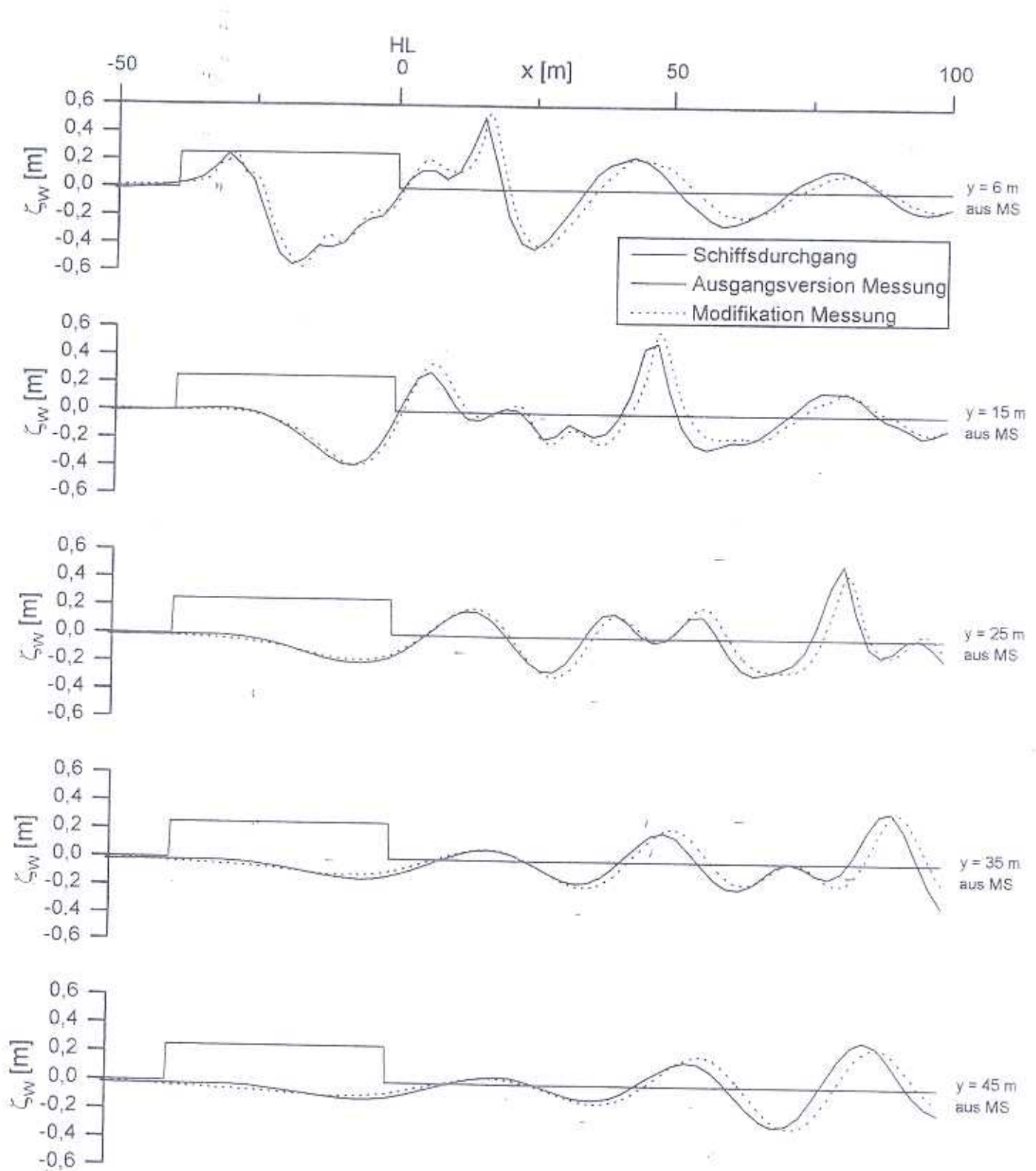
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 9,0 \text{ m}$; $V = 22,0 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,650$



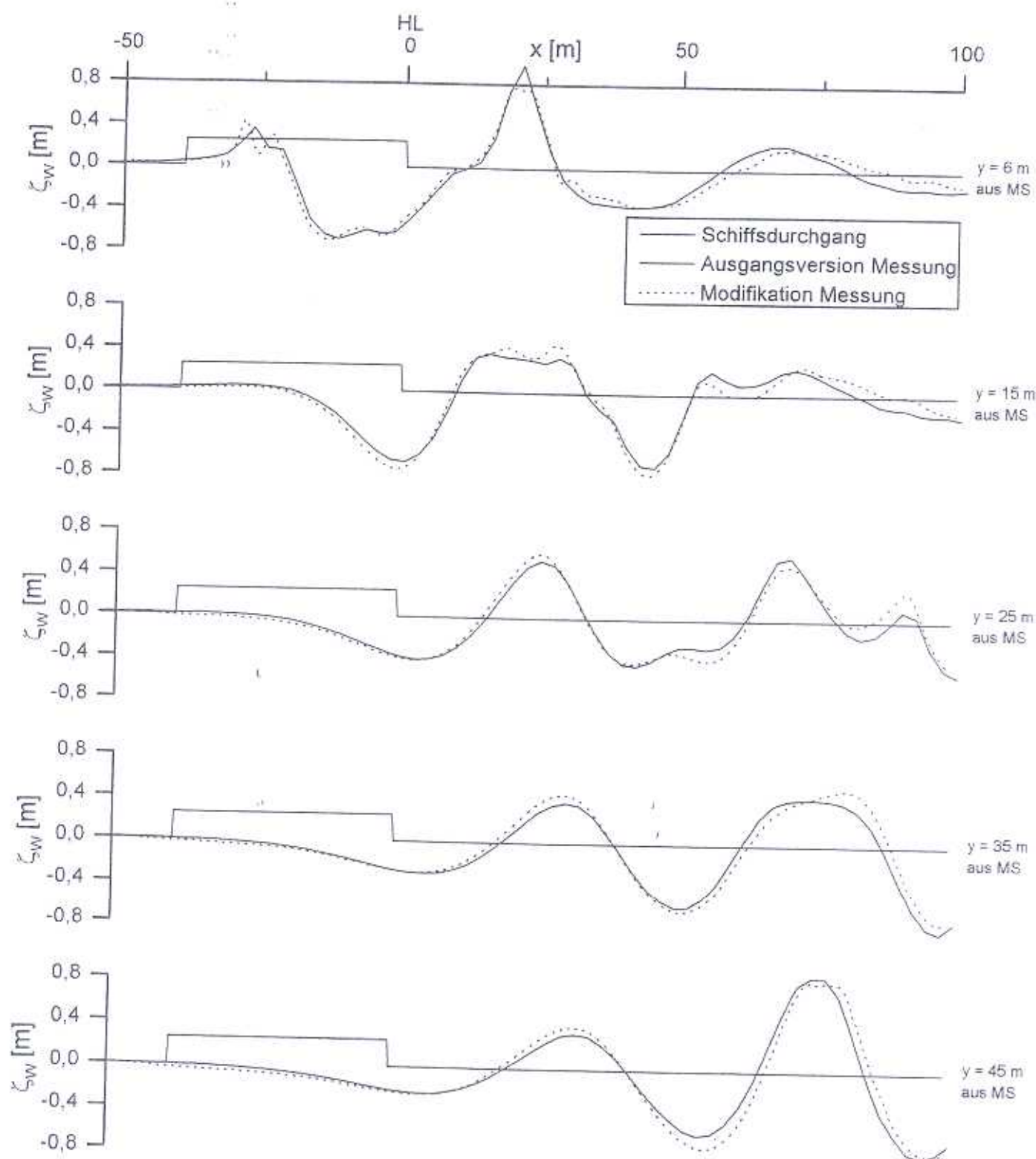
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 9,0 \text{ m}$; $V = 24,0 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,710$



Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 9,0 \text{ m}$; $V = 26,0 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,769$

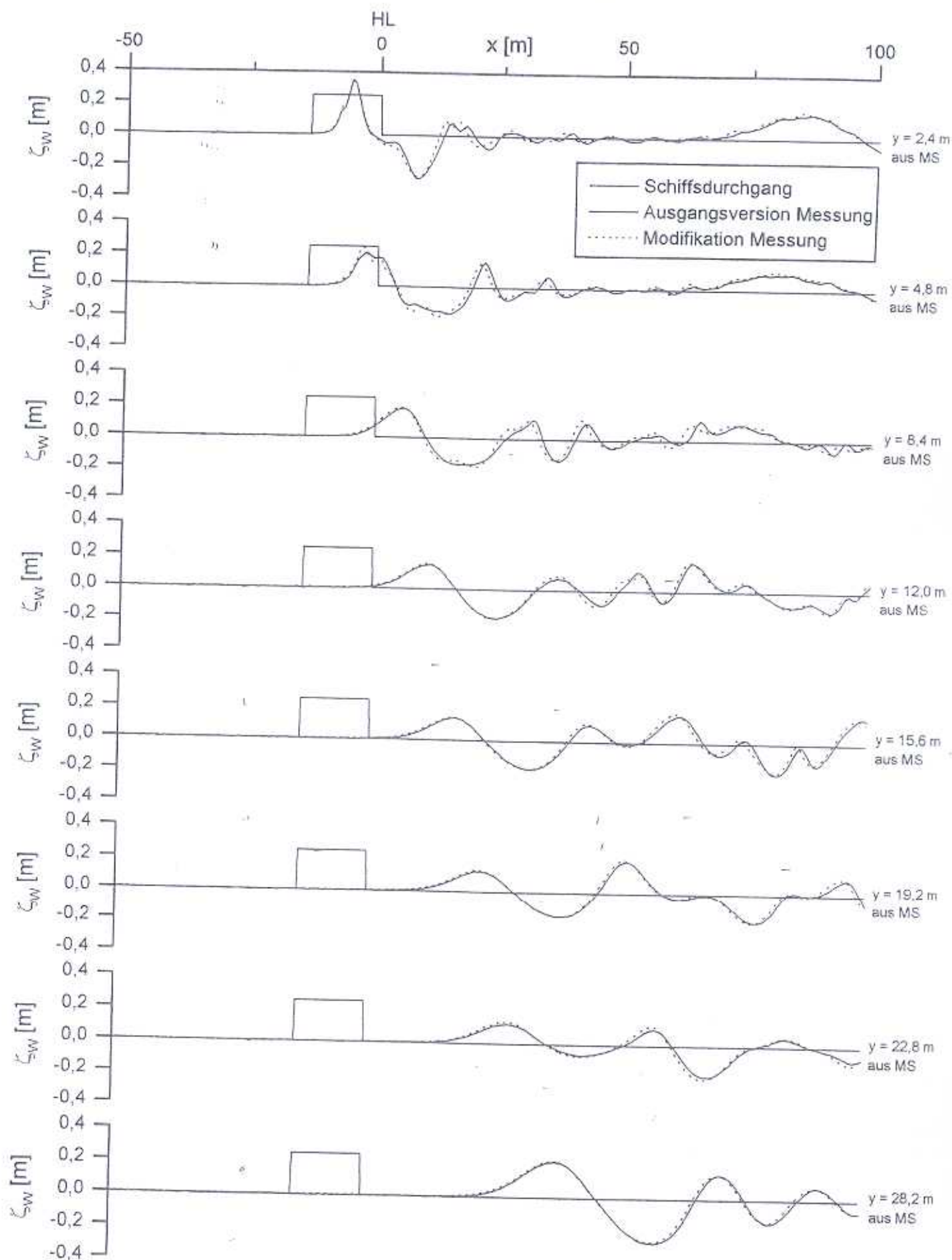


Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Fahrgastschiff
 $h = 9,0 \text{ m}$; $V = 28,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,848$



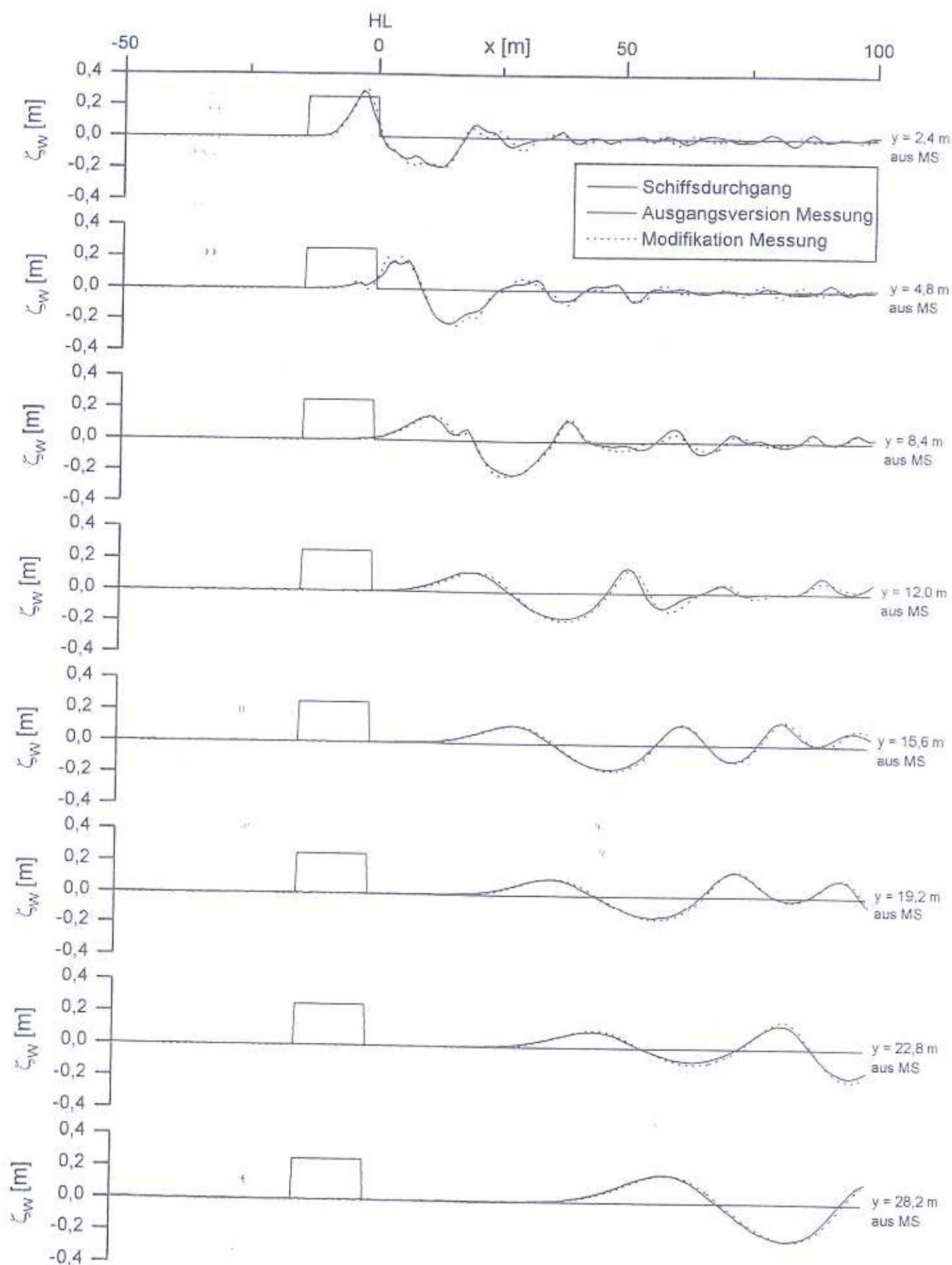
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 1,5 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,919$



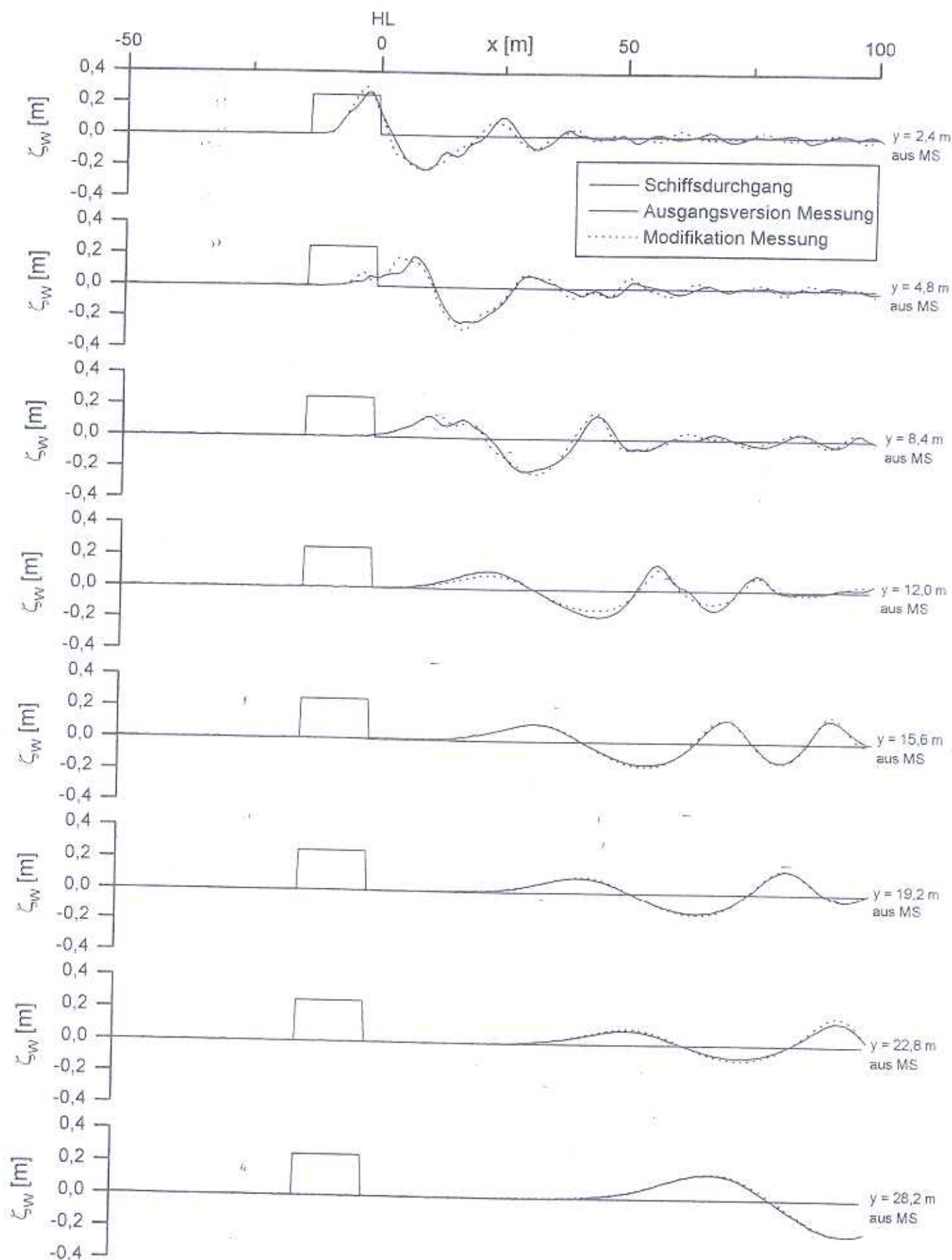
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 1,5 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 2,556$



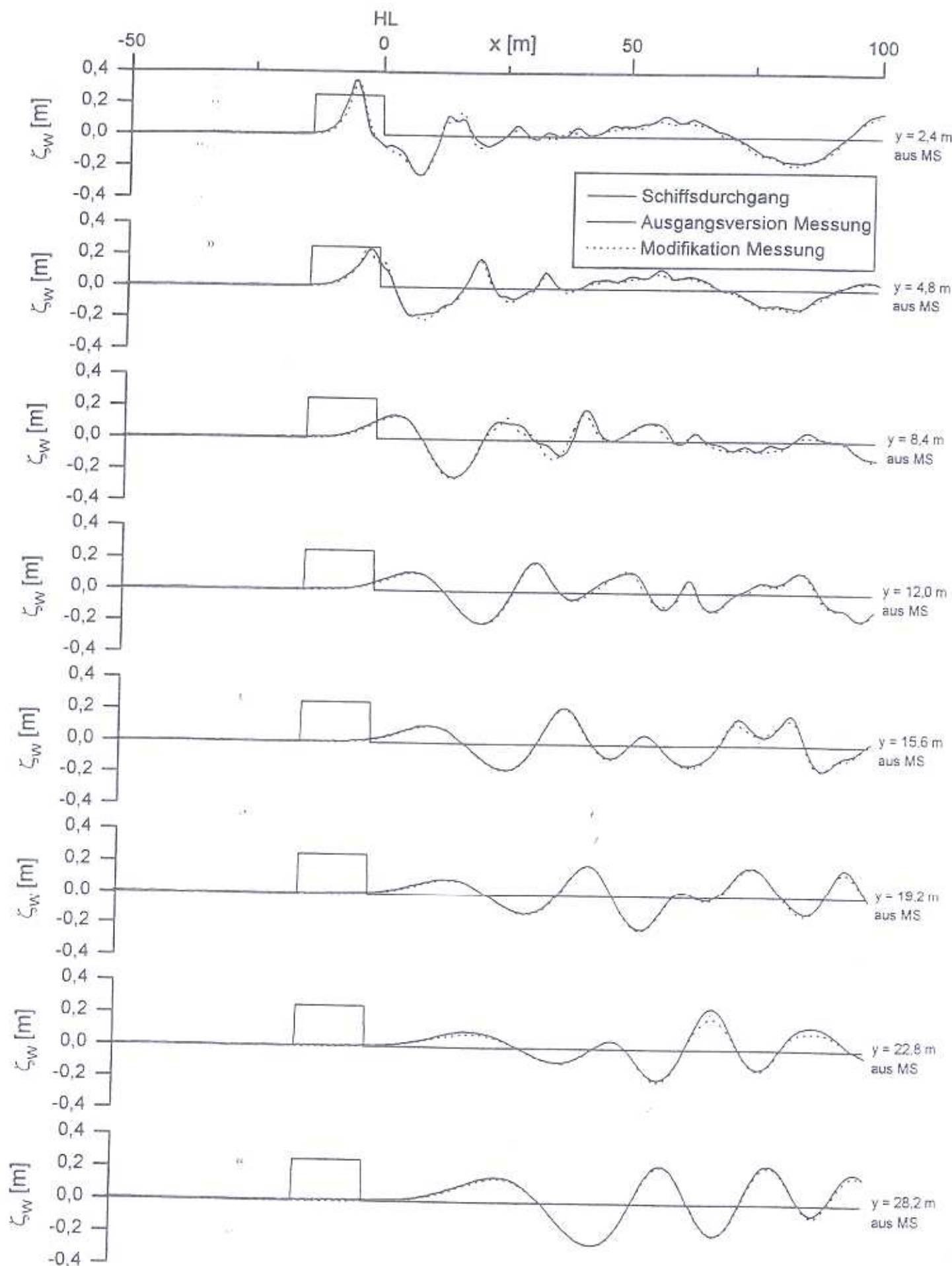
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 1,5 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 2,875$



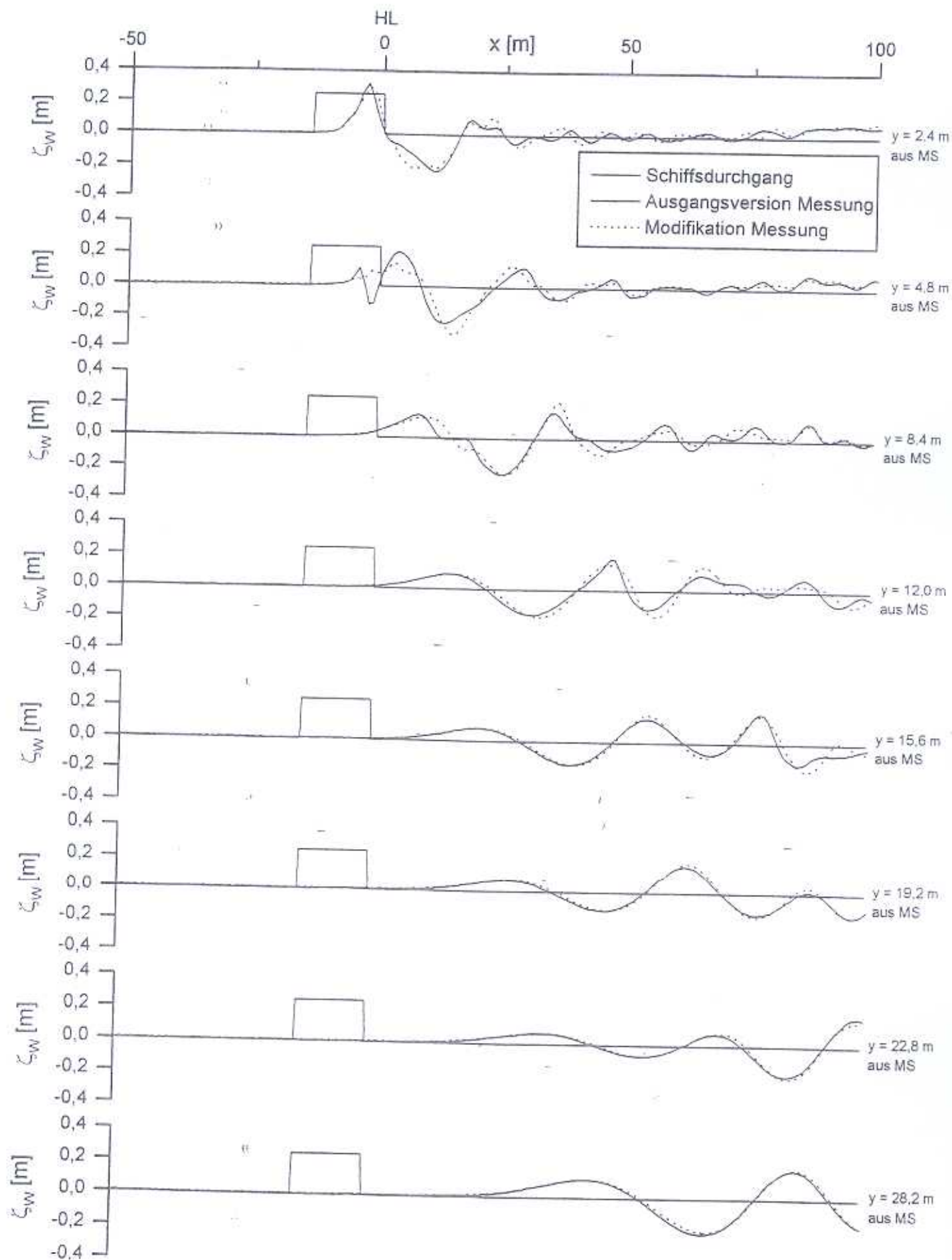
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,486$



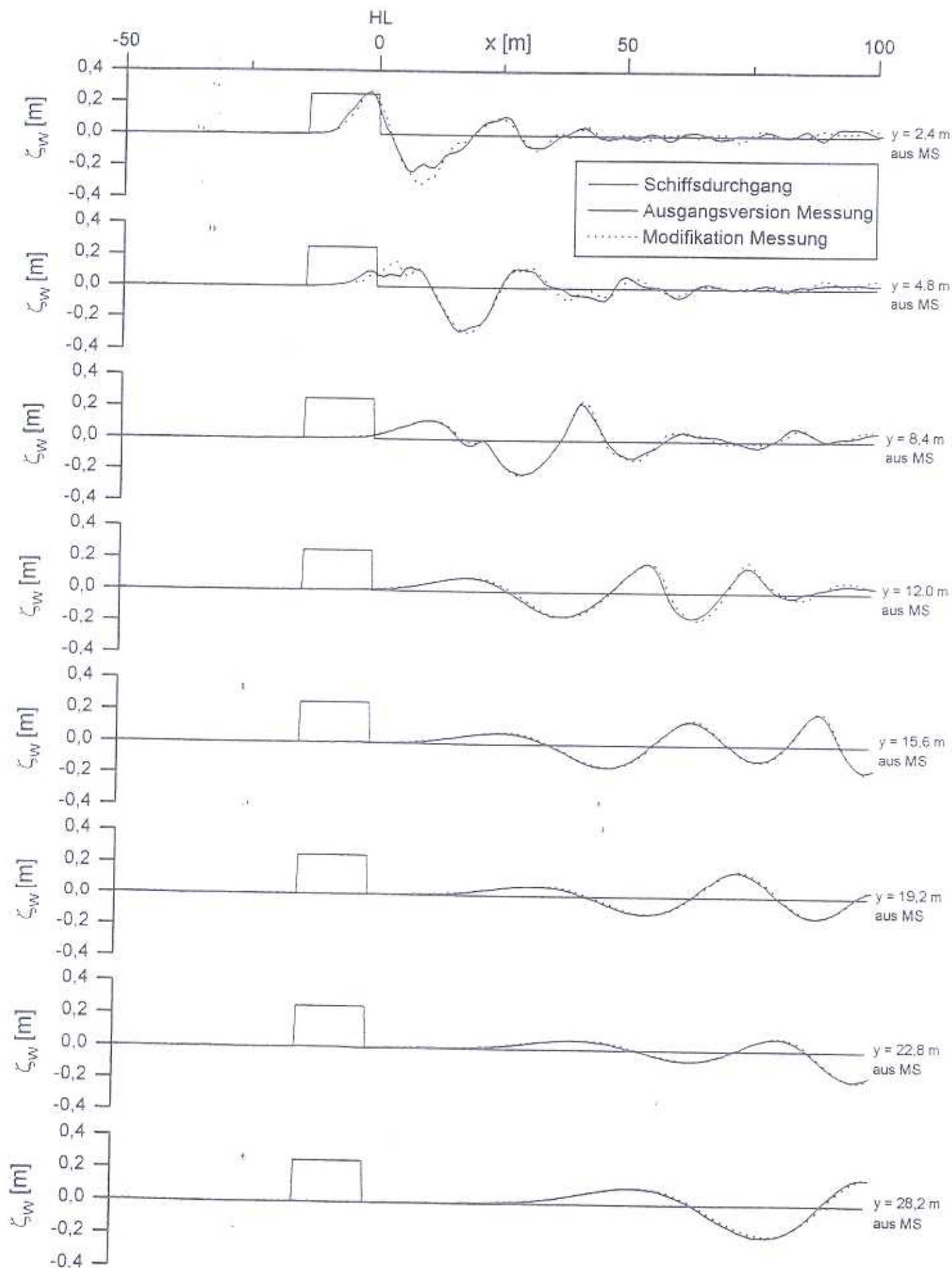
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,980$



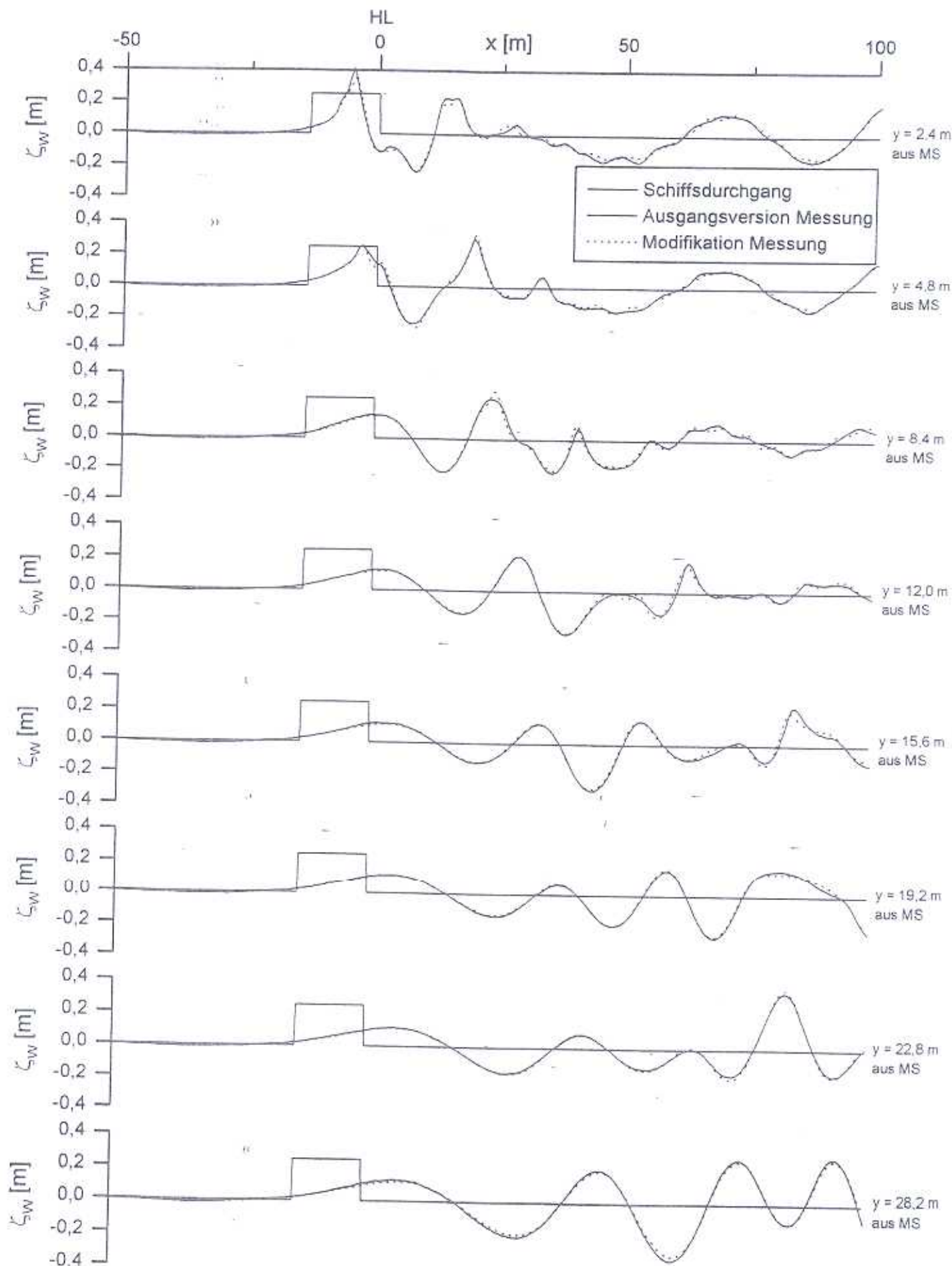
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 2,5 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 2,227$



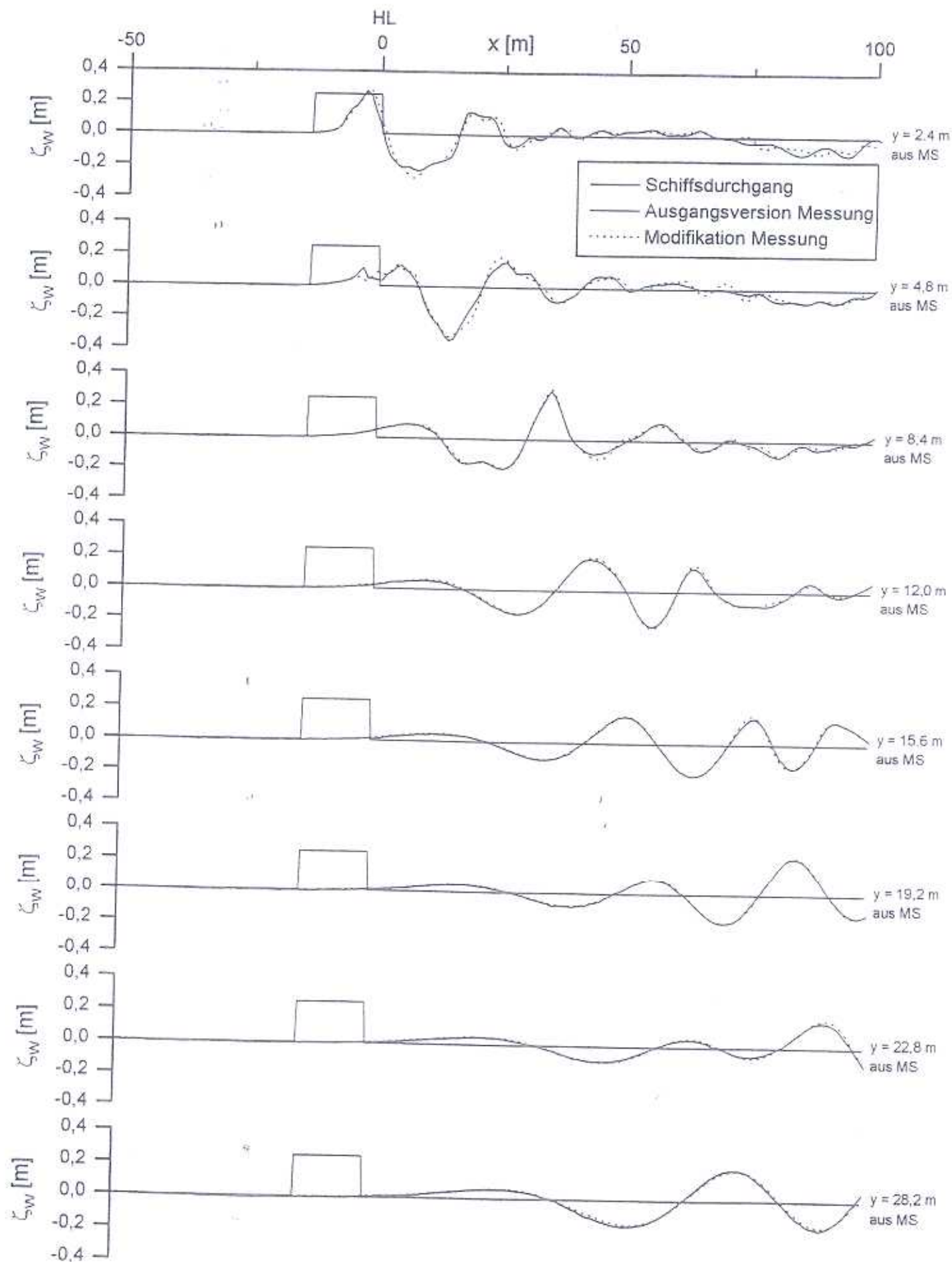
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 5,0 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,051$

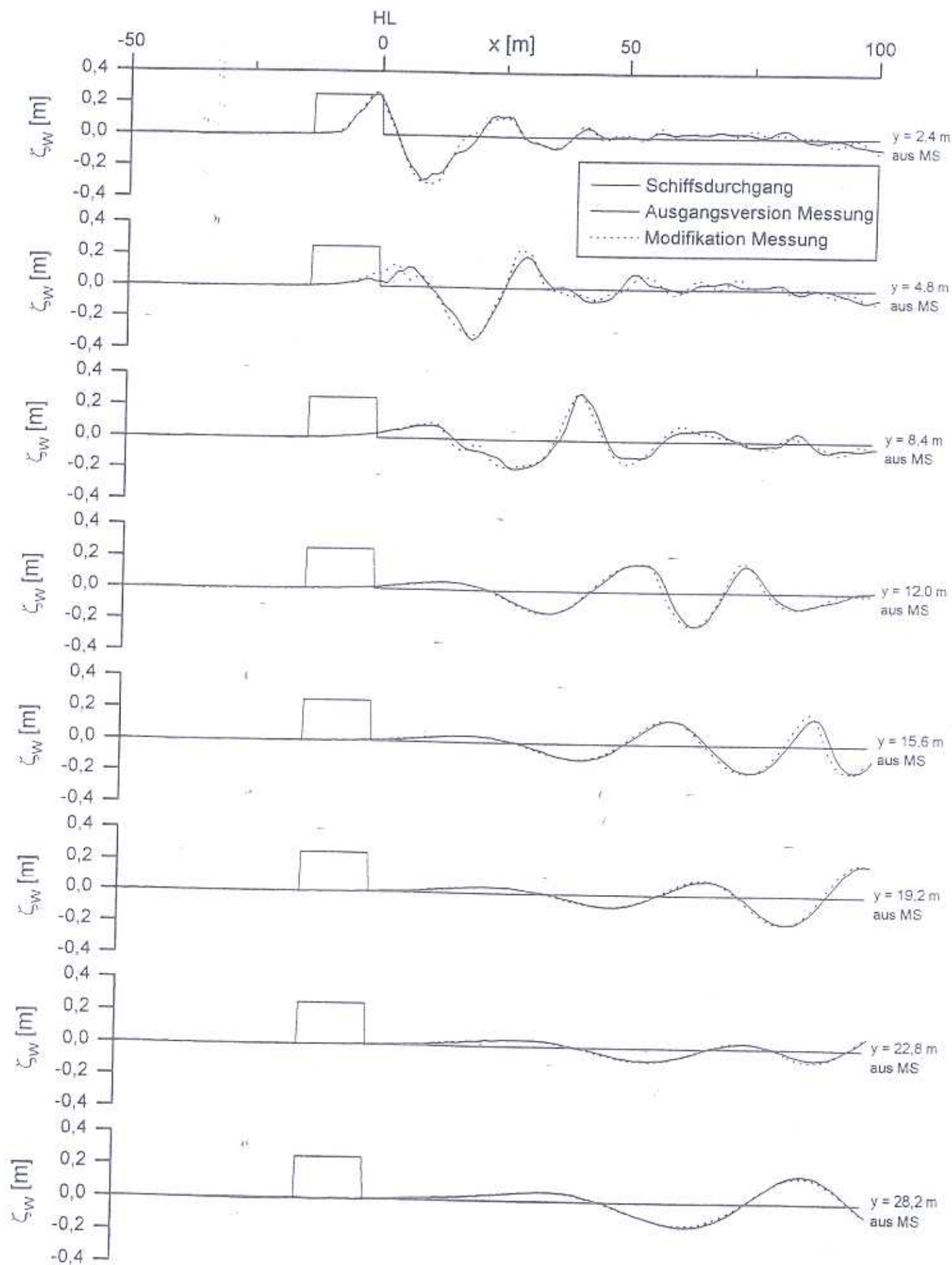


Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

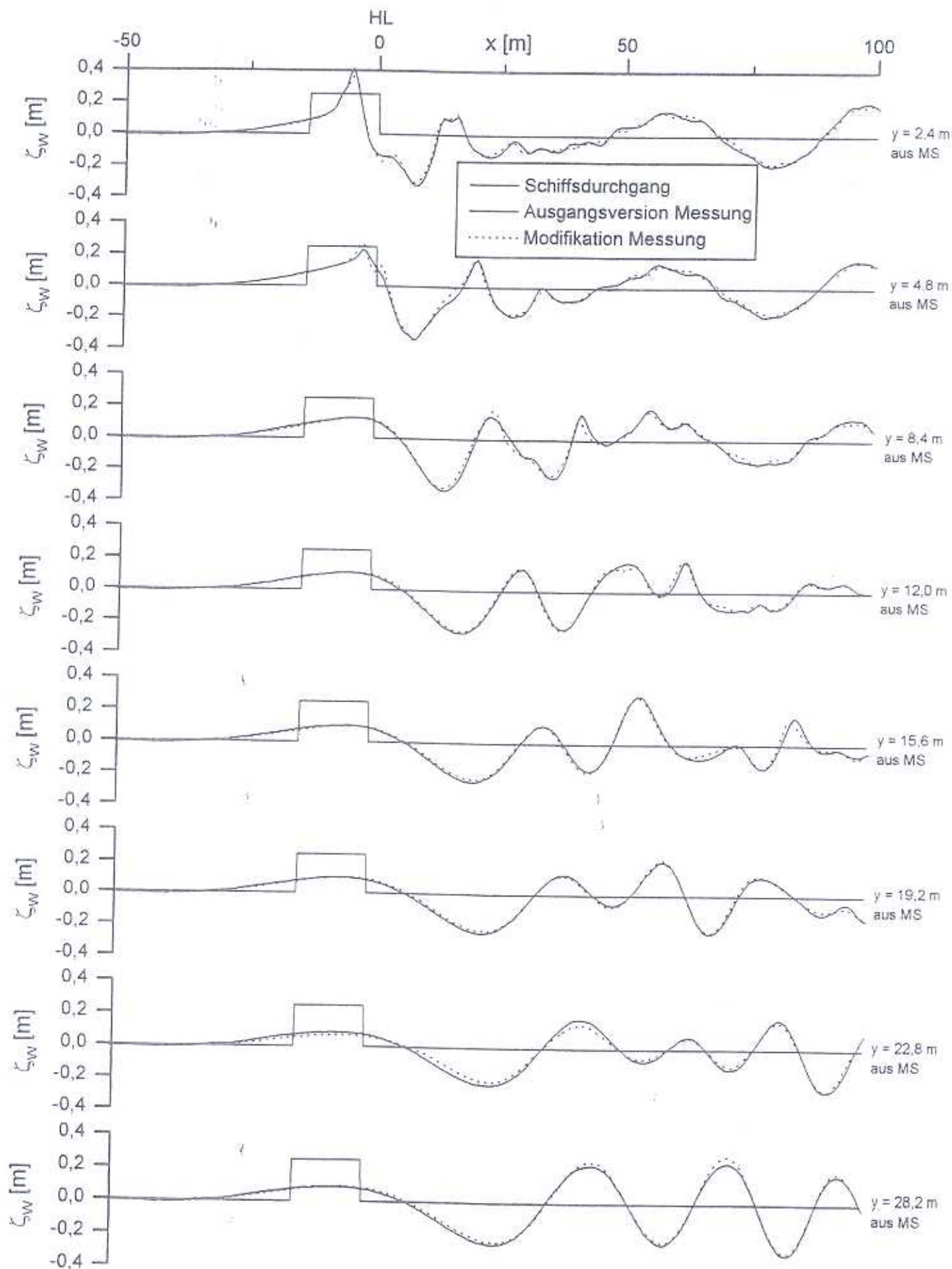
$h = 5,0 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,400$



Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

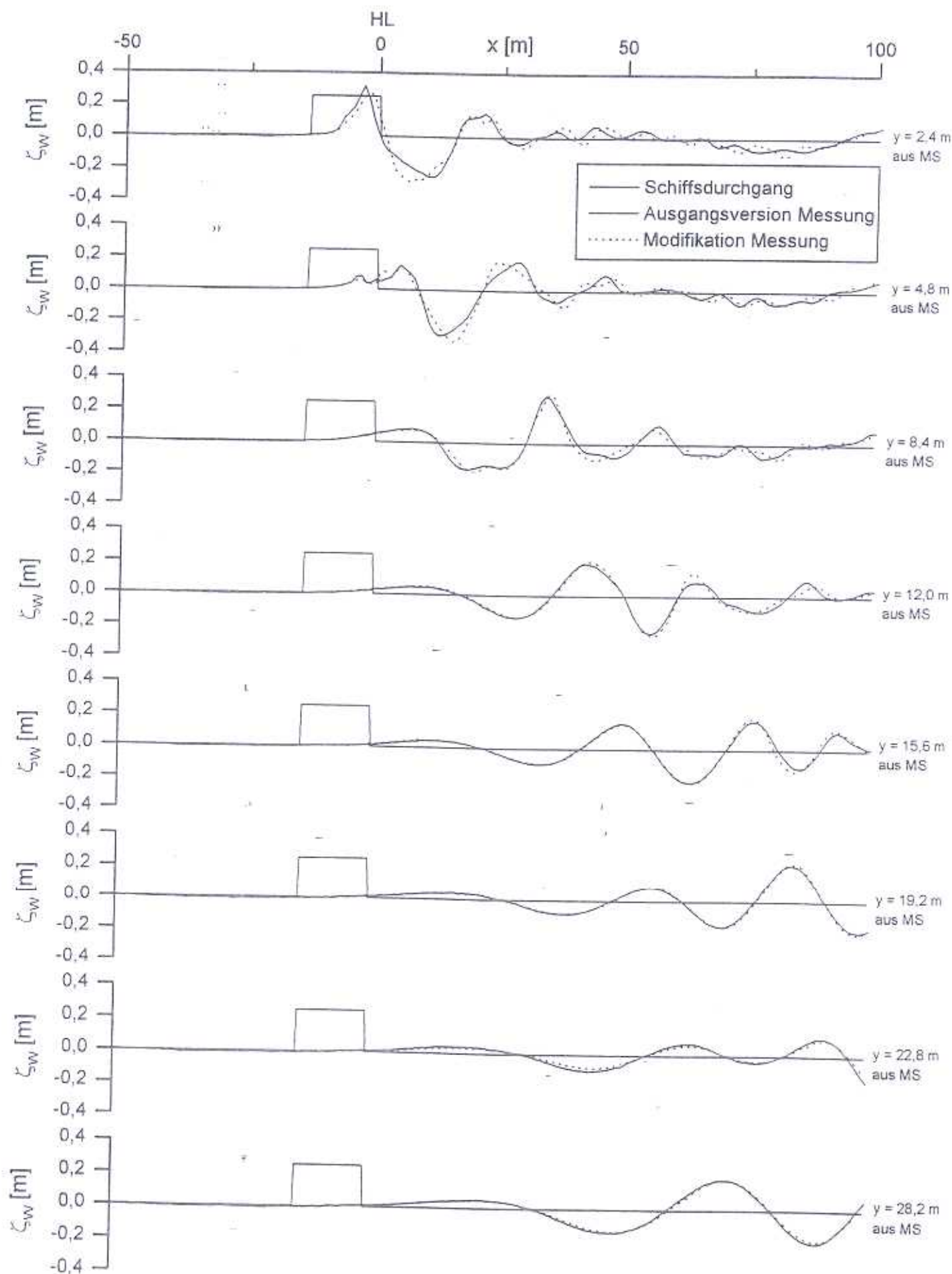
 $h = 5,0 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,575$


Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

 $h = 6,0 \text{ m}$; $V = 26,5 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 0,959$


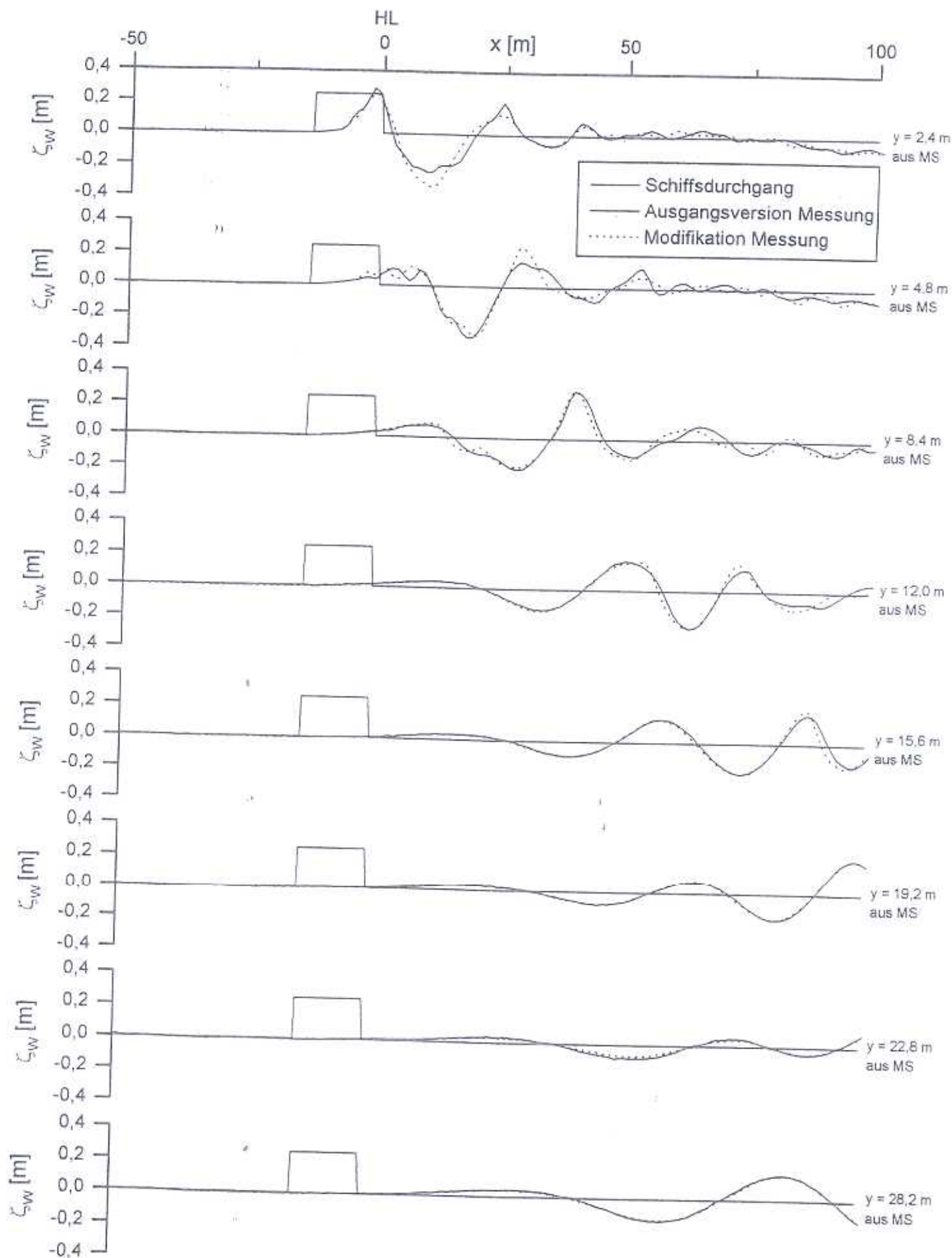
Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

$h = 6,0 \text{ m}$; $V = 35,3 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,278$

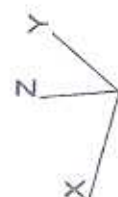


Gegenüberstellung der Wellenkontur neben dem Feuerlöschboot

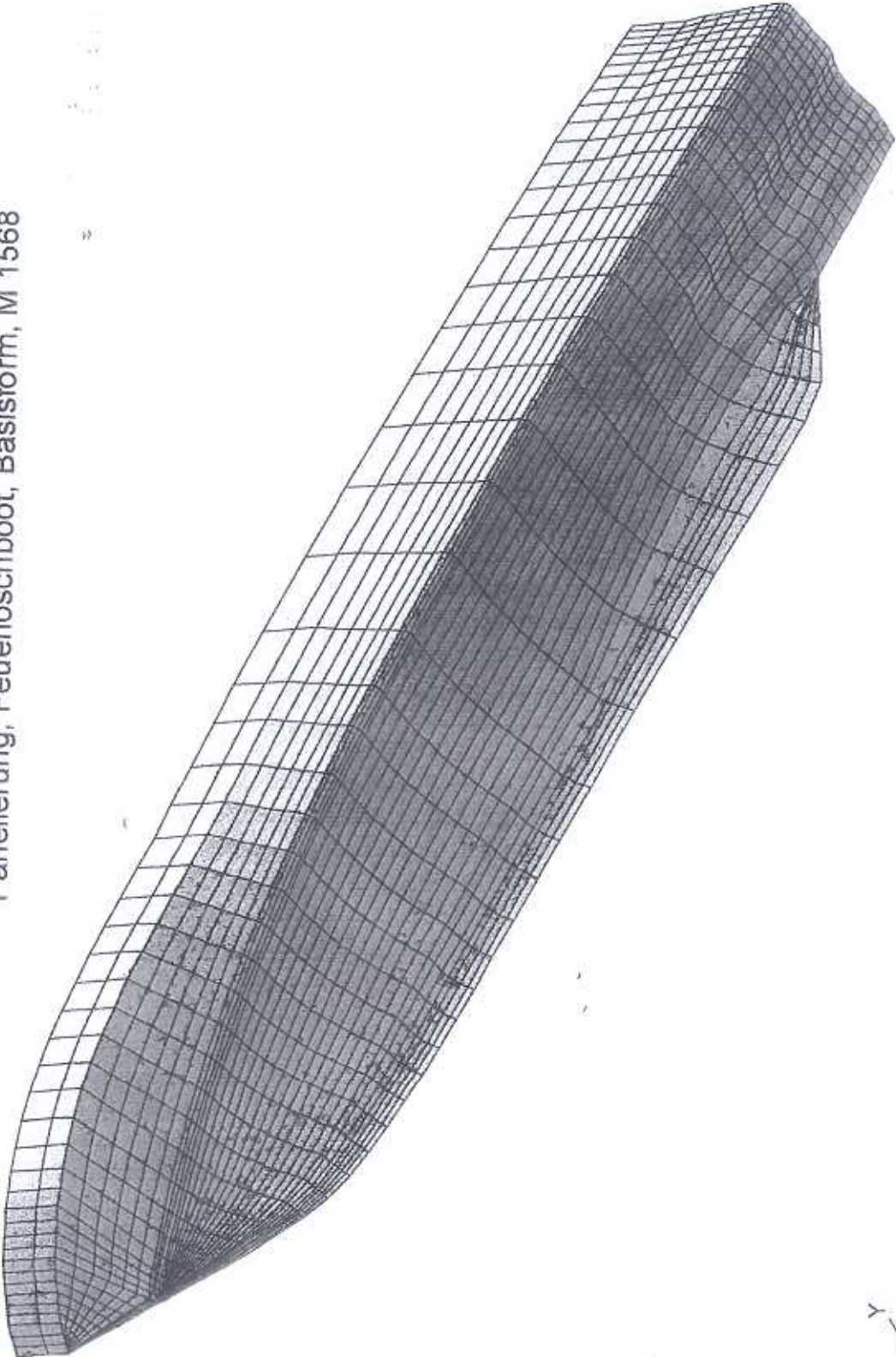
$h = 6,0 \text{ m}$; $V = 39,7 \text{ km/h}$; $F_{nh} = 1,437$



Panelierung, Fahrgastschiff, Basisform, M 1565



Panelierung, Feuerlöschboot, Basisform, M 1568

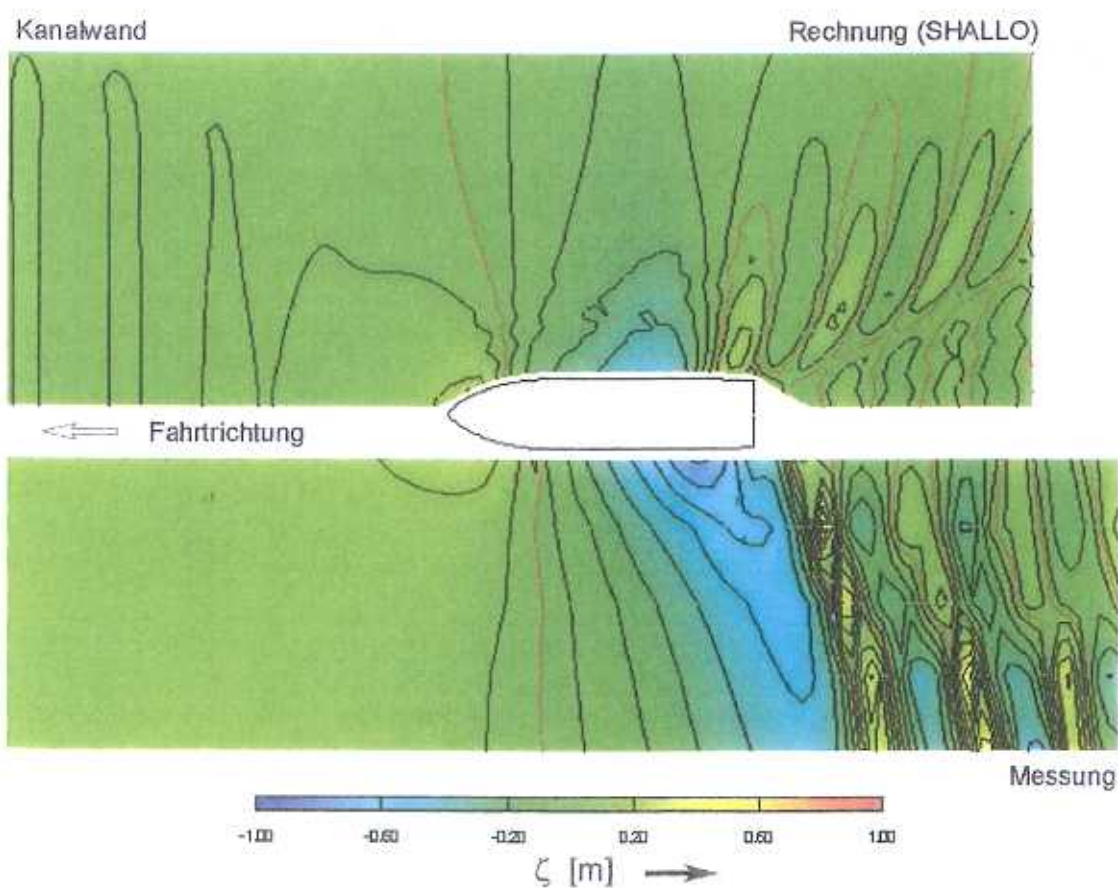


Verformung der Wasseroberfläche ζ
Fahrgastschiff, Basisform

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

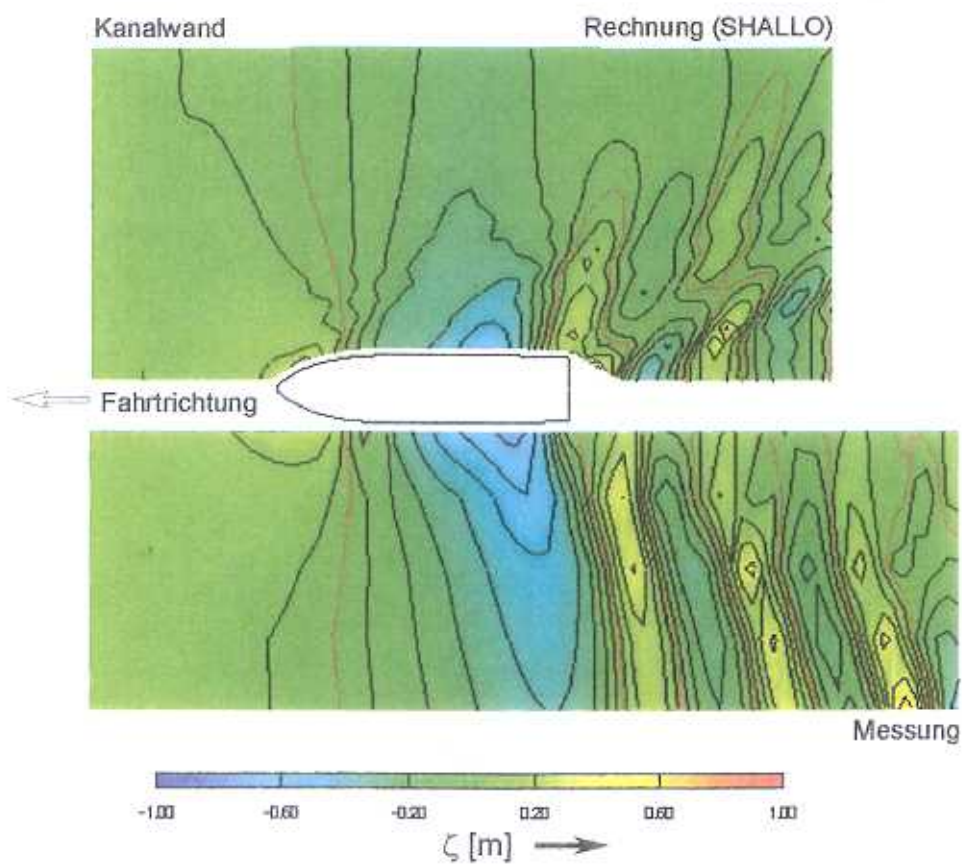
$$V = 15,1 \text{ km/h}$$

$$F_n = 0,2136 ; F_{nh} = 0,8469$$



Verformung der Wasseroberfläche ζ Fahrgastschiff, Basisform

$h = 3,3 \text{ m}$
 $V = 17,3 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2448$; $F_{nh} = 0,8447$

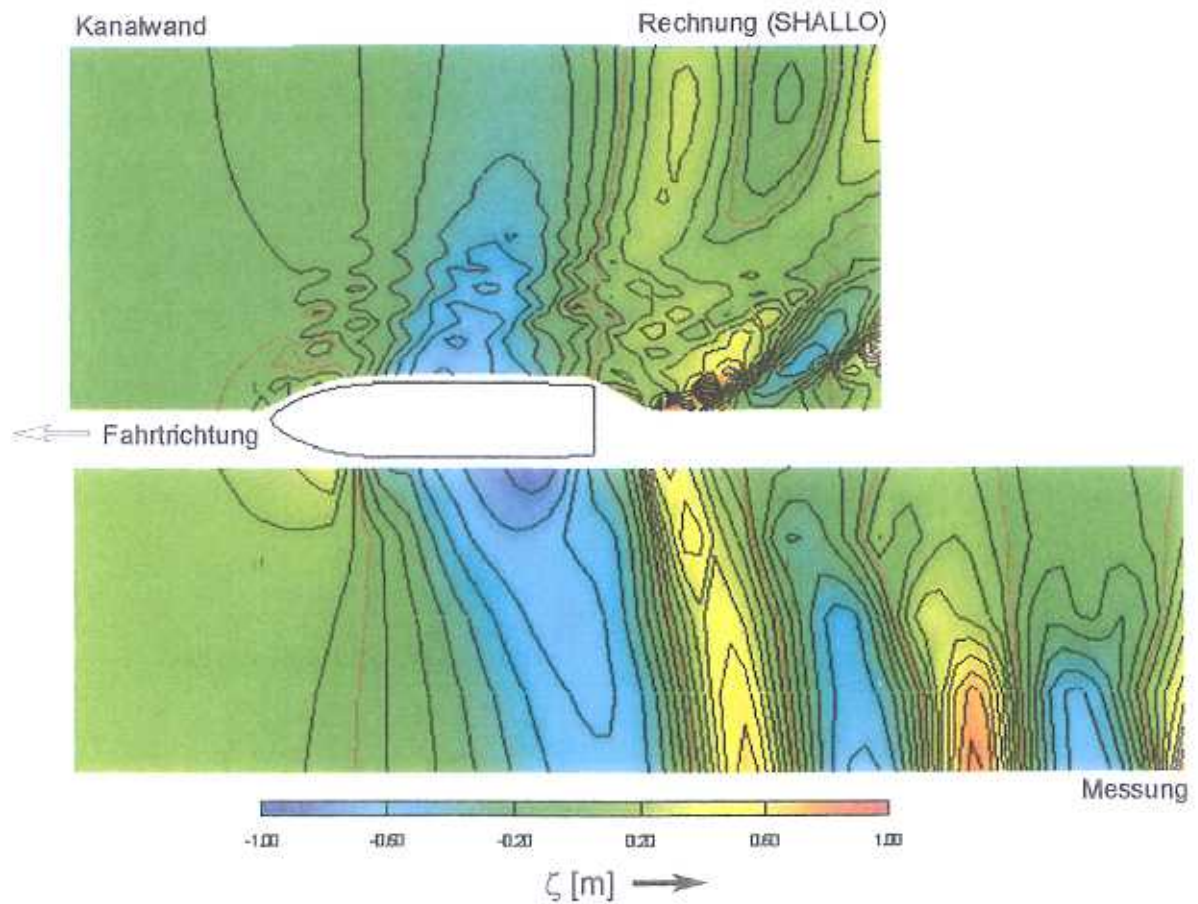


Verformung der Wasseroberfläche ζ
Fahrgastschiff, Basisform

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

$V = 22,0 \text{ km/h}$

$F_n = 0,3113$; $F_{nh} = 0,8728$

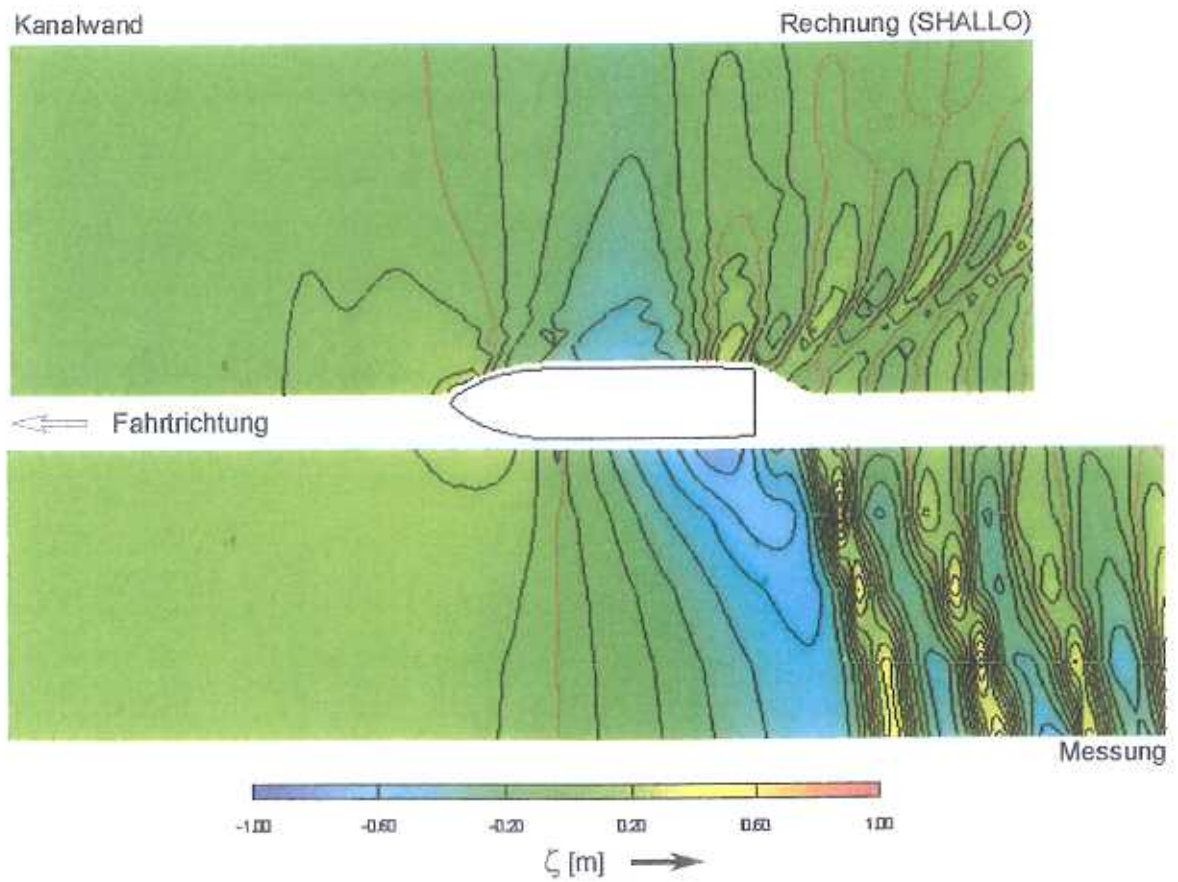


Verformung der Wasseroberfläche ζ
Fahrgastschiff, Modifikation

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

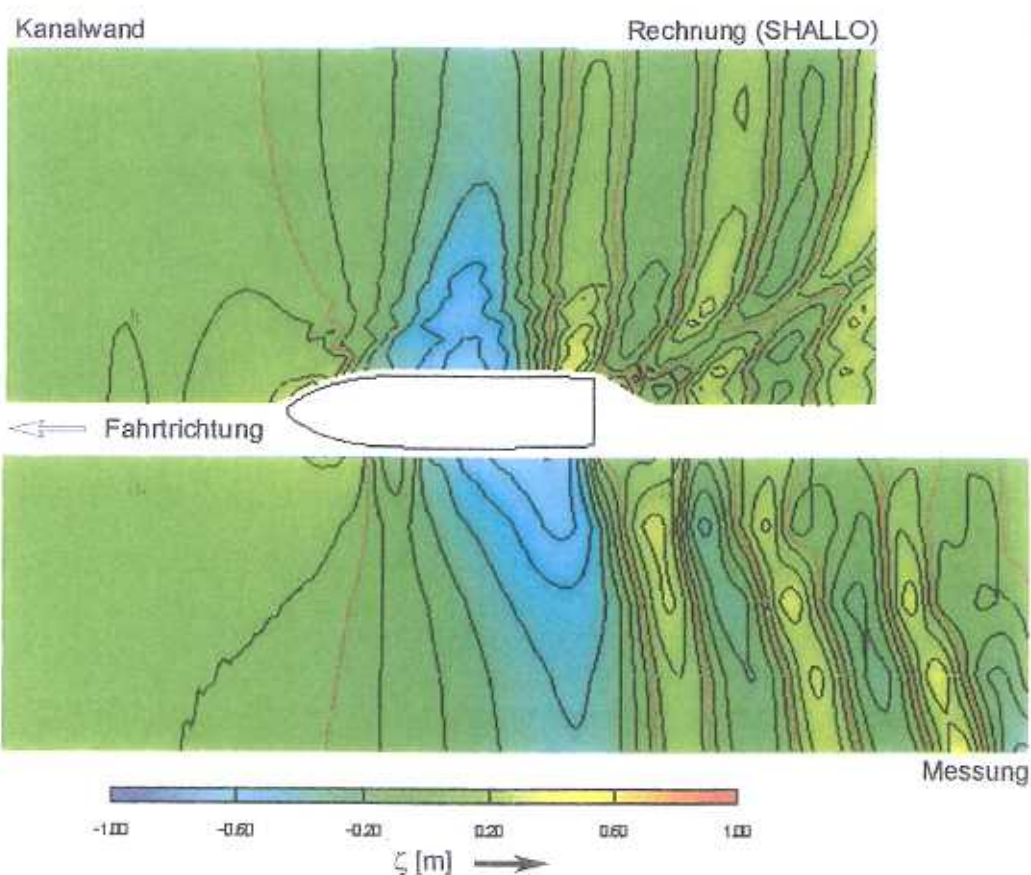
$$V = 15,1 \text{ km/h}$$

$$F_n = 0,2136 ; F_{nh} = 0,8469$$



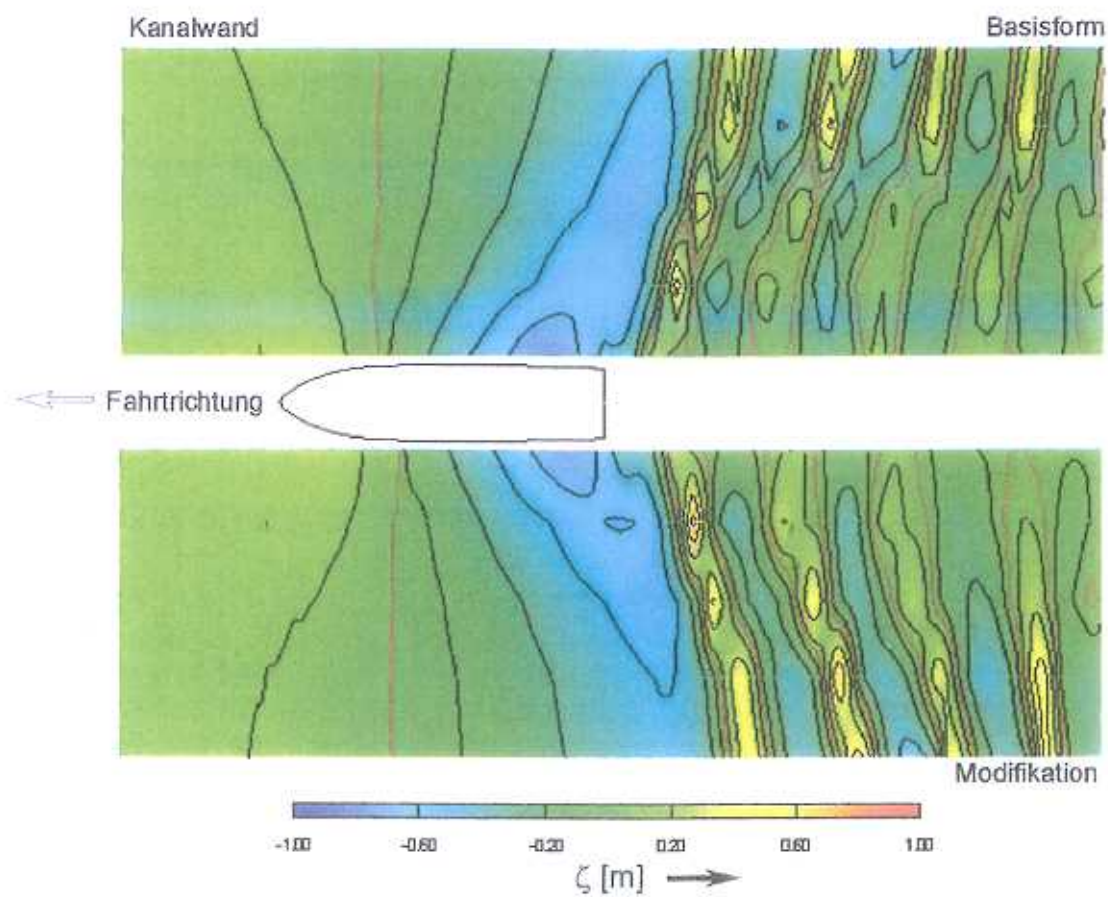
Verformung der Wasseroberfläche ζ
Fahrgastschiff, Modifikation

$h = 3,3 \text{ m}$
 $V = 17,3 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2448$; $F_{nh} = 0,8447$



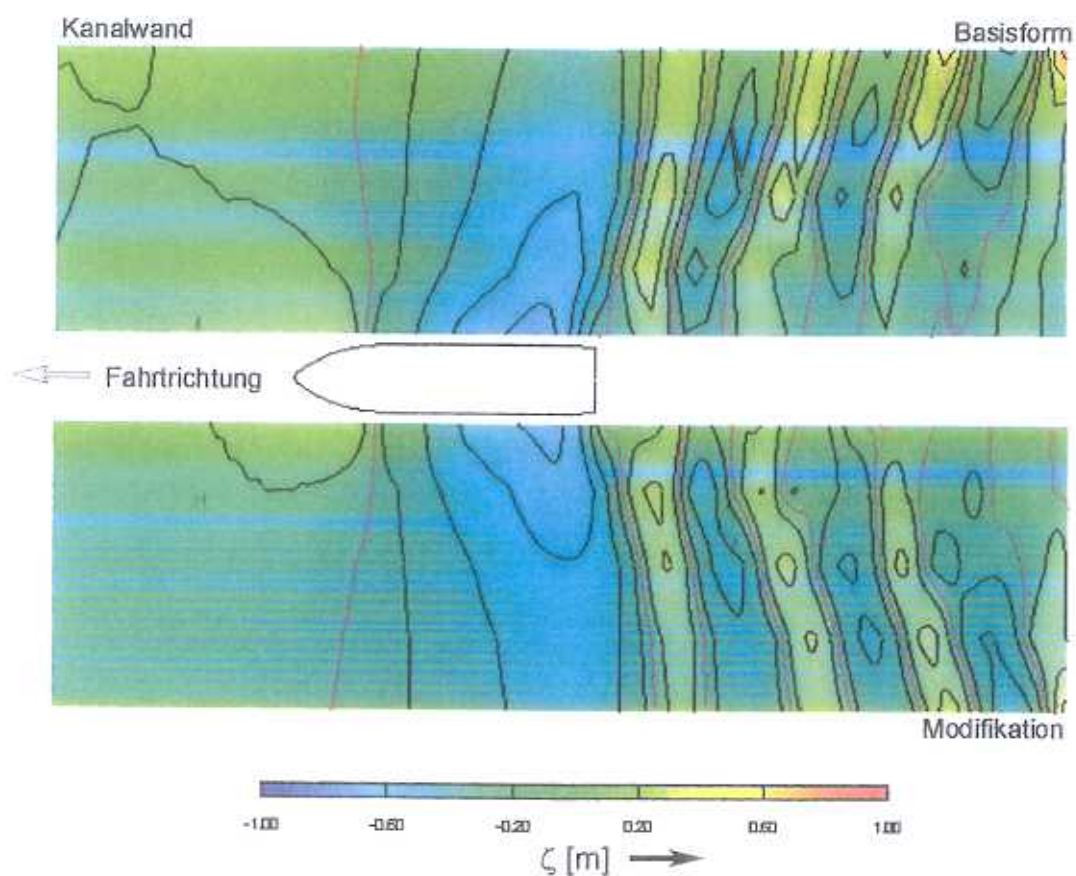
Verformung der Wasseroberfläche ζ (Messung)
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 2,5 \text{ m}$
 $V = 15,1 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2136$; $F_{nh} = 0,8469$



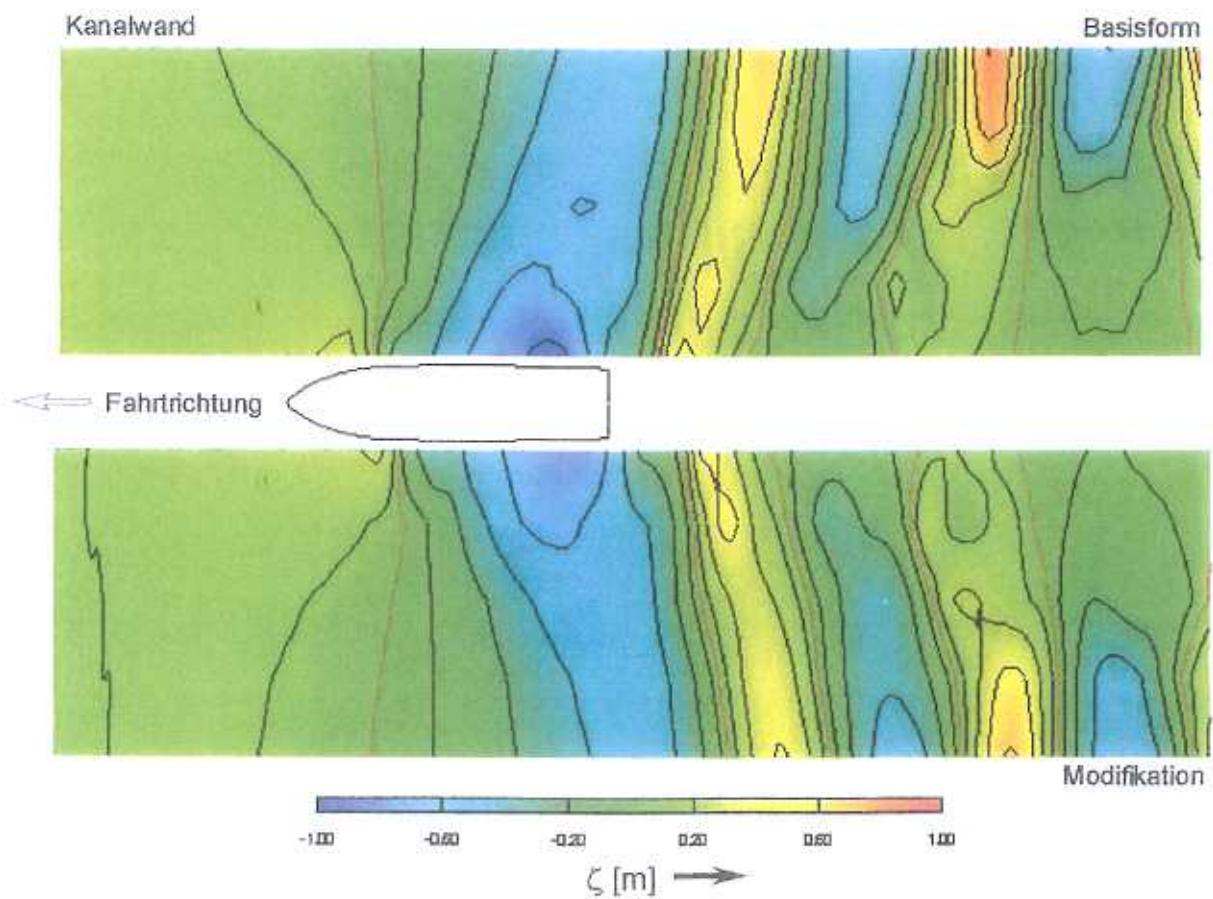
Verformung der Wasseroberfläche ζ (Messung)
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 3,3 \text{ m}$
 $V = 17,3 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2448$; $F_{nh} = 0,8447$



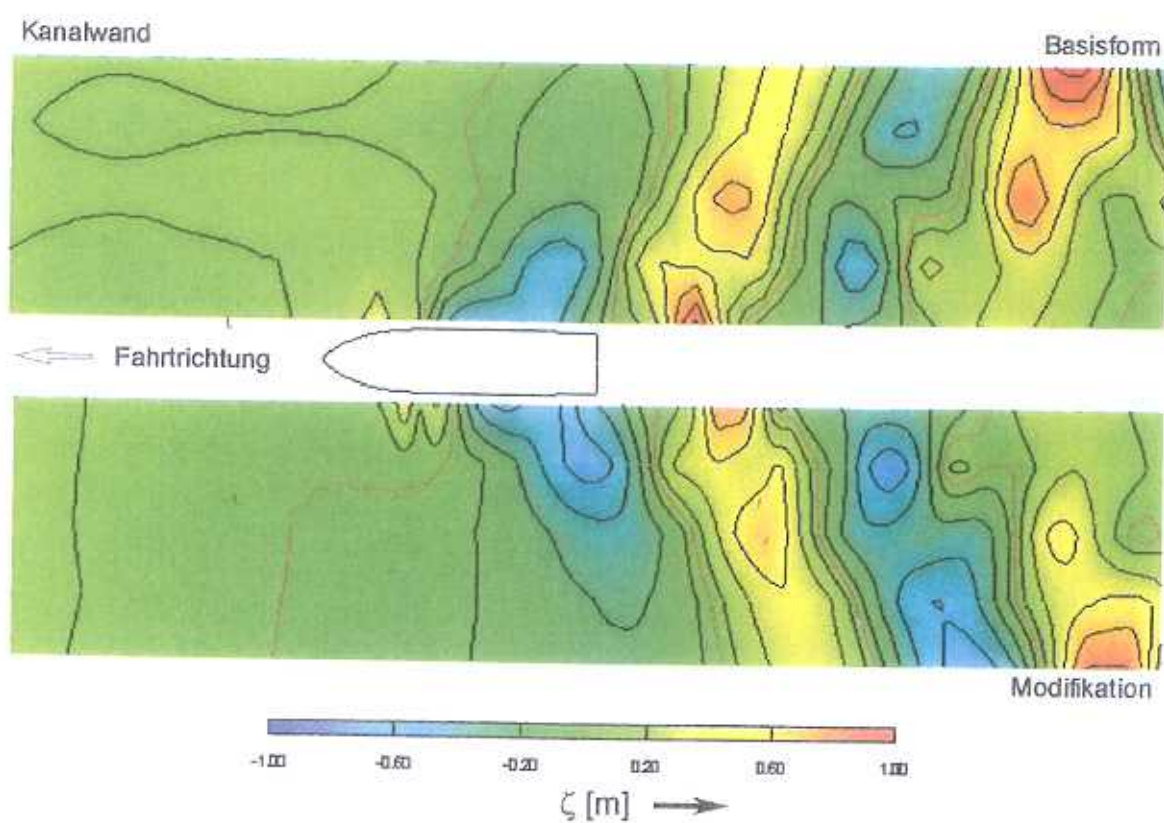
Verformung der Wasseroberfläche ζ (Messung)
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 5,0 \text{ m}$
 $V = 22,0 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,3113$; $F_{nh} = 0,8728$



Verformung der Wasseroberfläche ζ (Messung)
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 9,0 \text{ m}$
 $V = 28,6 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,4039$; $F_{nh} = 0,8455$

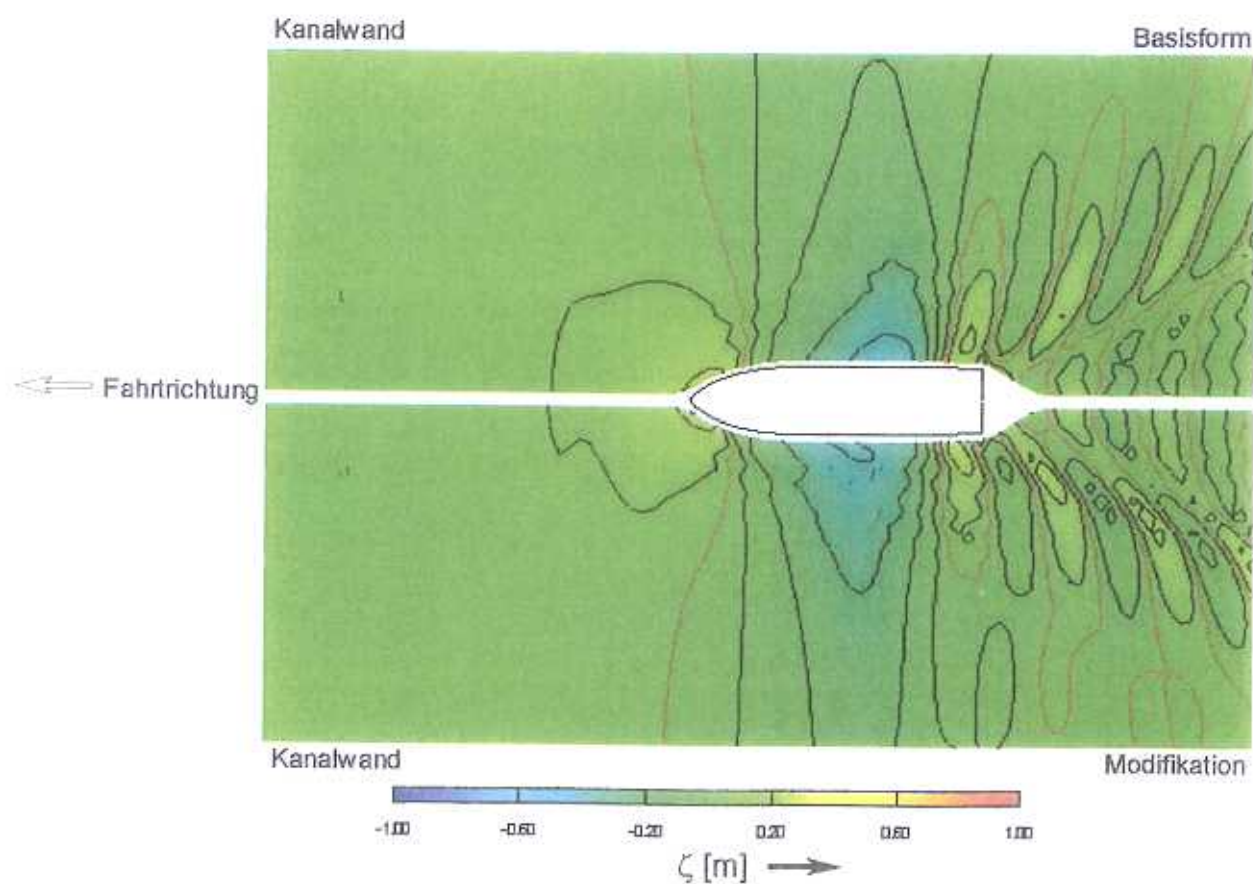


Verformung der Wasseroberfläche ζ (Rechnung SHALLO)
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h_0 = 2,5 \text{ m}$

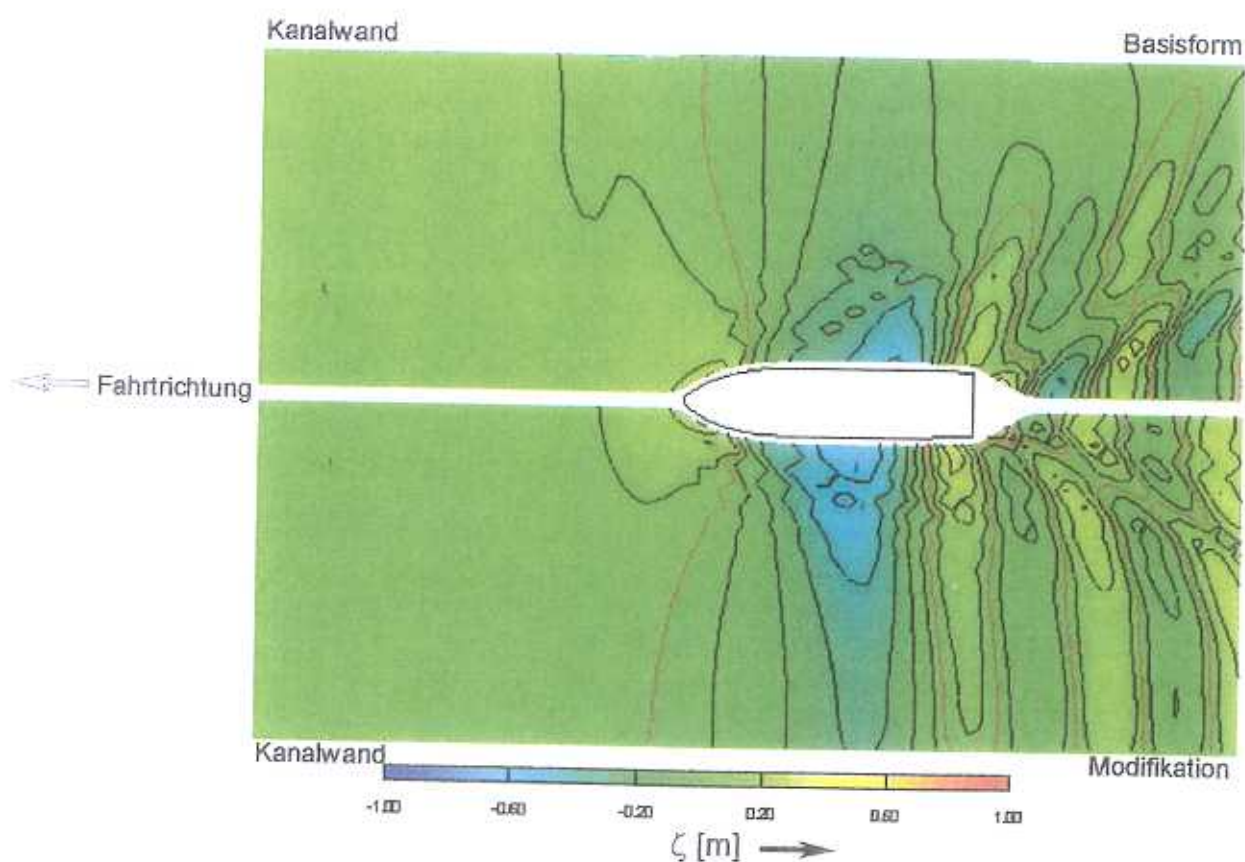
$V = 15,1 \text{ km/h}$

$F_n = 0,2136$; $F_{nh} = 0,8469$



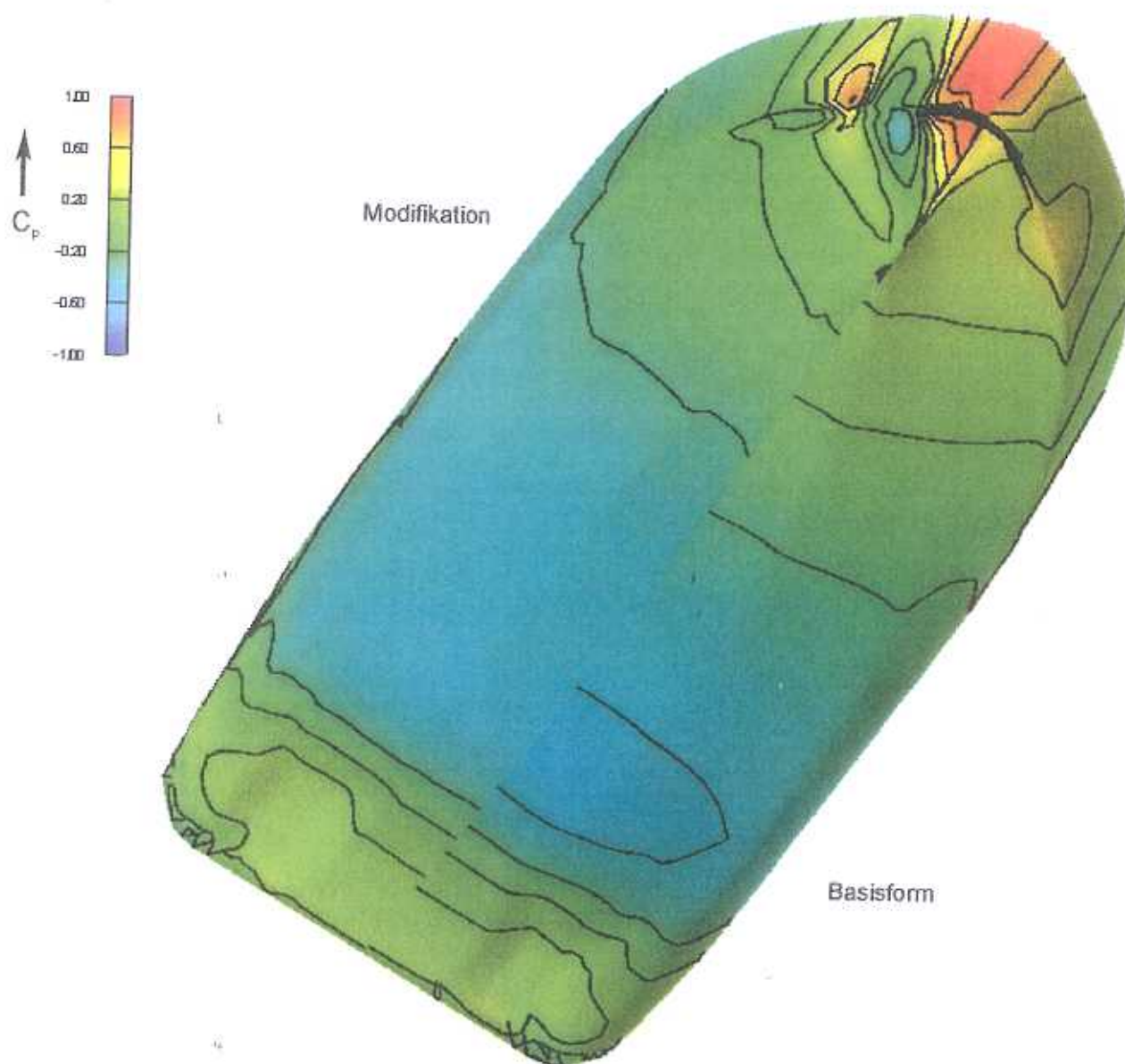
Verformung der Wasseroberfläche ζ (Rechnung SHALLO)
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 3,3 \text{ m}$
 $V = 17,3 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2448$; $F_{nh} = 0,8447$



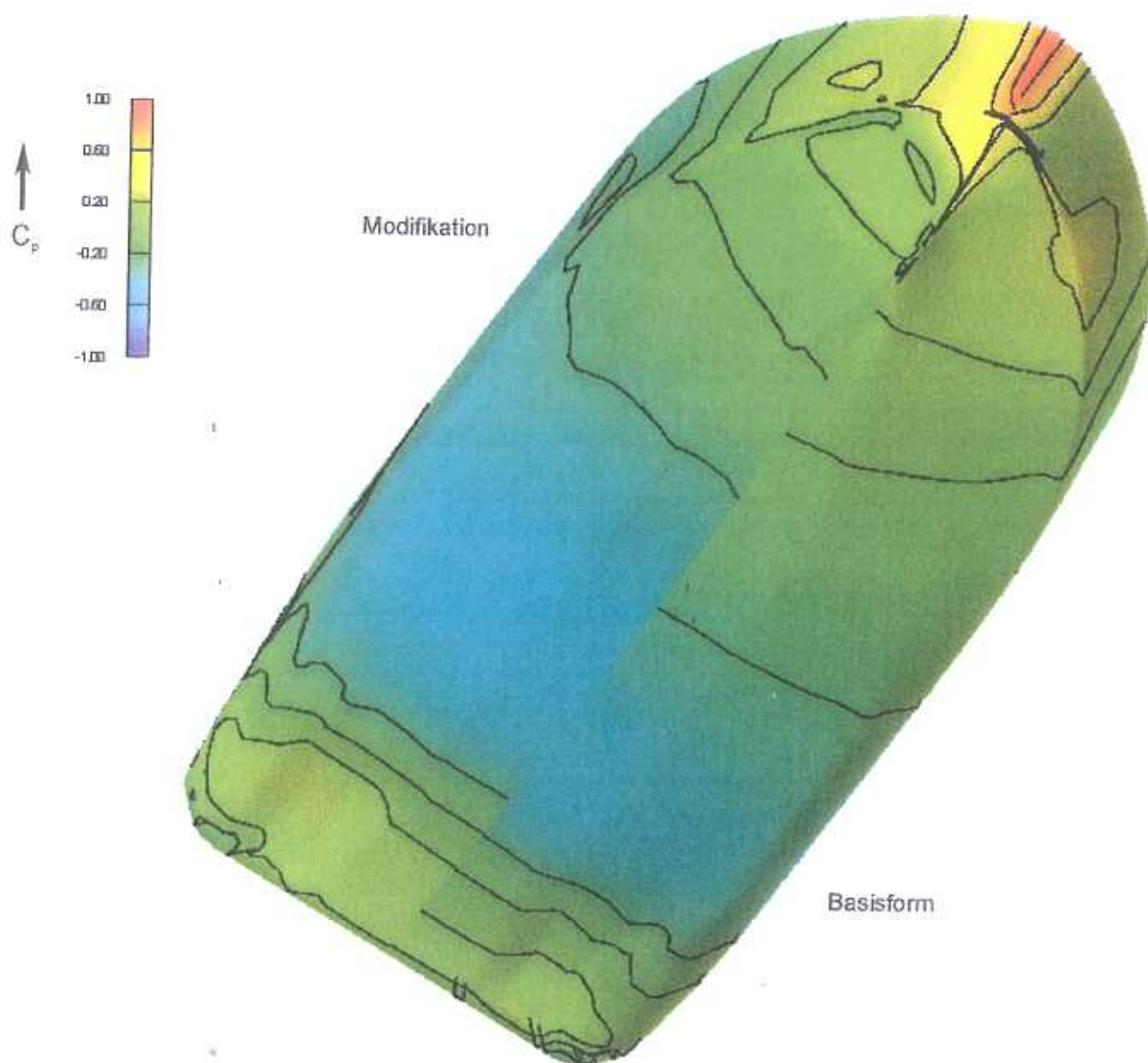
Druckverteilung C_p an der Außenhaut
Rechnung SHALLO
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 2,5 \text{ m}$
 $V = 15,1 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2136$; $F_{nh} = 0,8469$



Druckverteilung C_p an der Außenhaut
Rechnung SHALLO
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

$h = 3,3 \text{ m}$
 $V = 17,3 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,2448$; $F_{nh} = 0,8447$

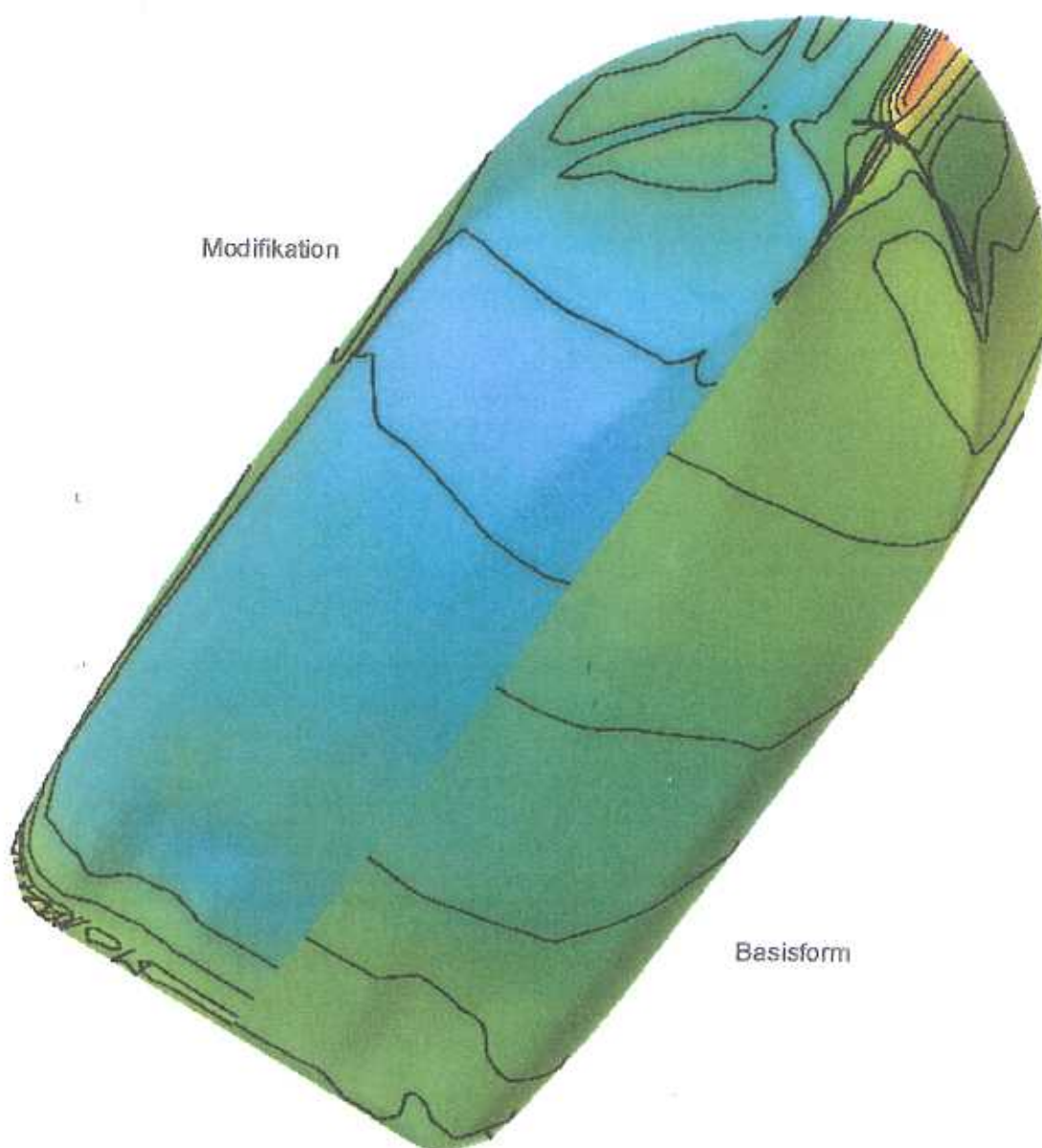
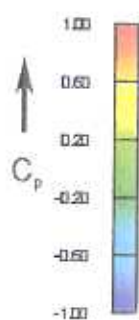


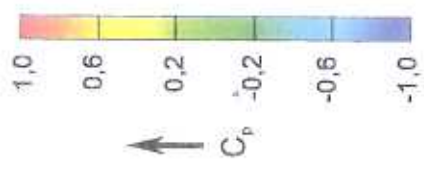
Druckverteilung C_p an der Außenhaut
Rechnung SHALLO
Fahrgastschiff
Vergleich Basisform und Modifikation

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

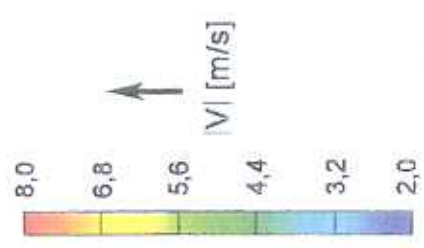
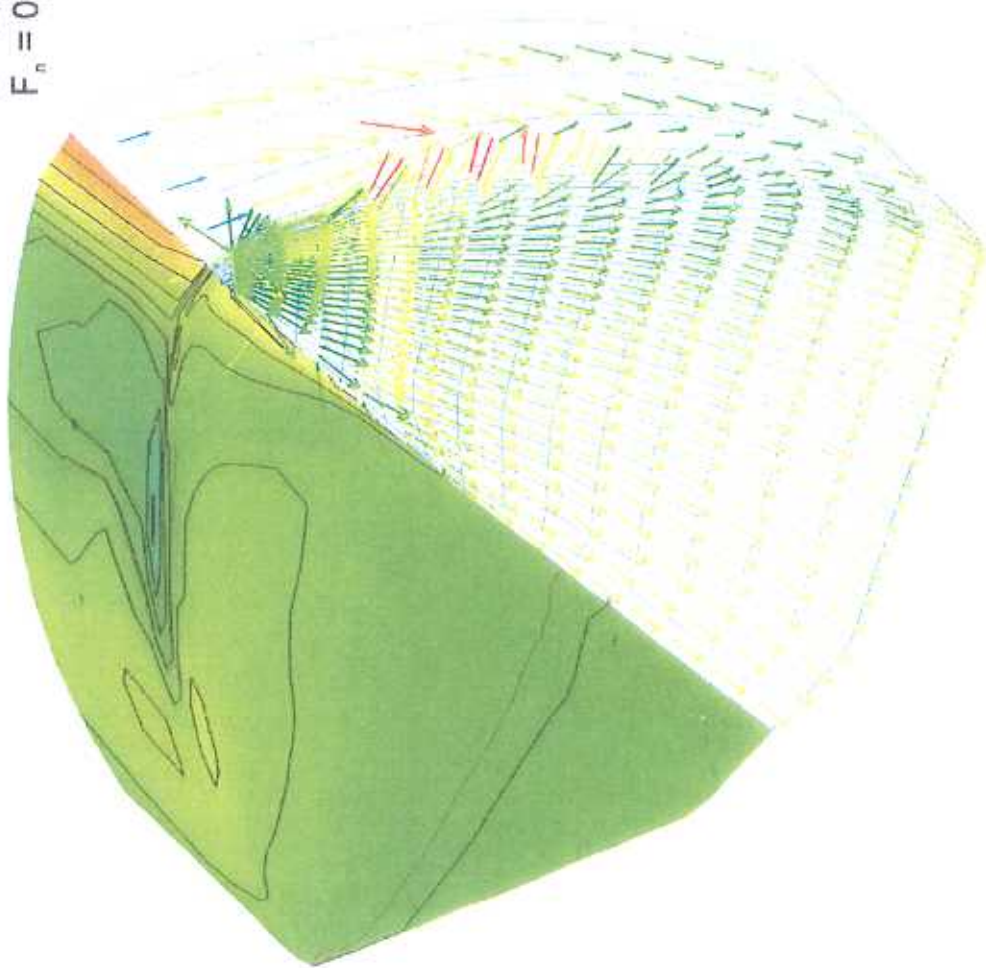
$V = 22,0 \text{ km/h}$

$F_n = 0,3113$; $F_{nh} = 0,8728$



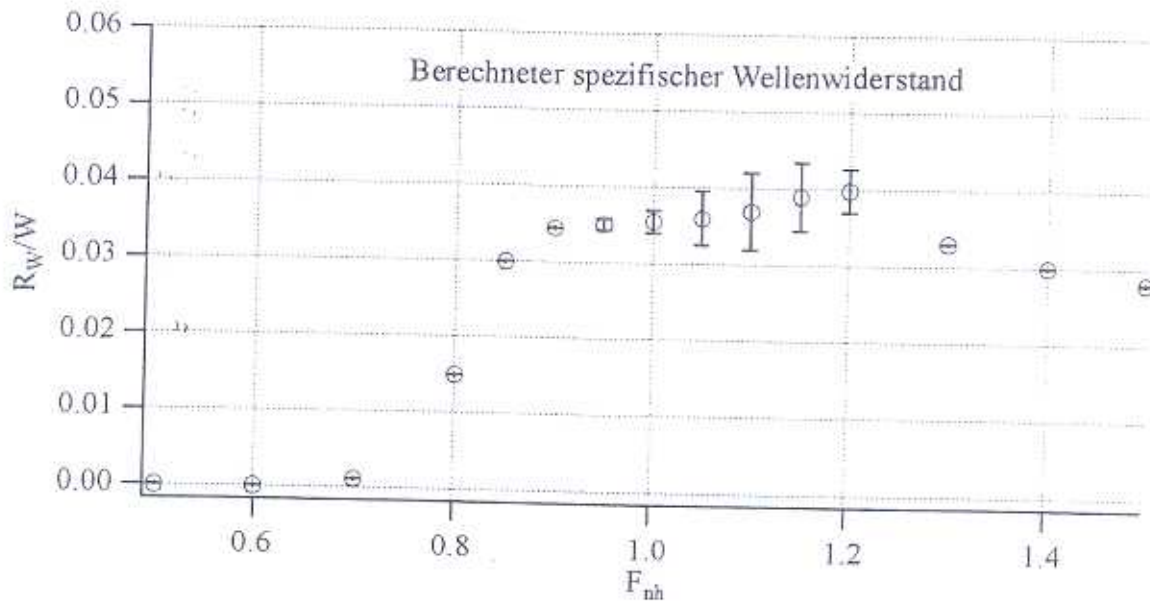


$h = 5,0 \text{ m}$
 $V = 22,0 \text{ km/h}$
 $F_n = 0,3113$; $F_{nh} = 0,8728$



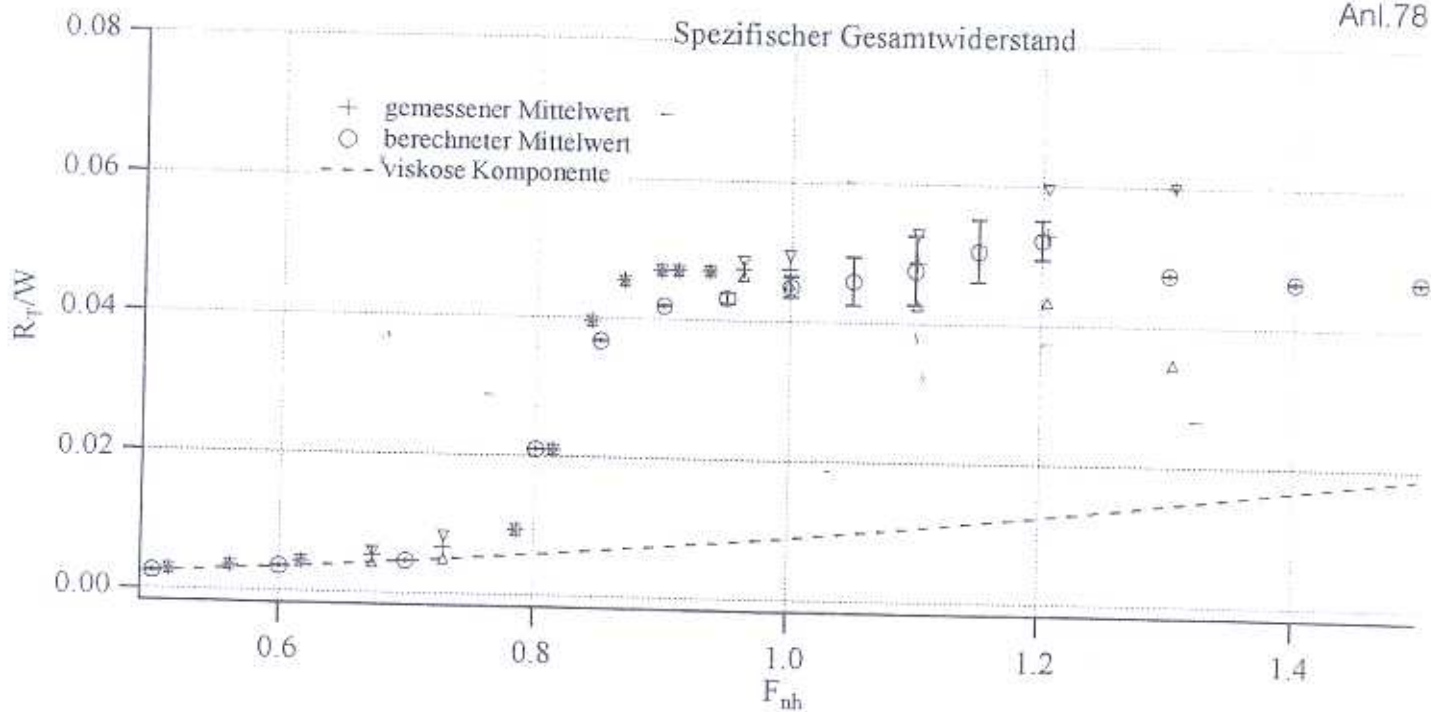
Vektoren

Anl.77

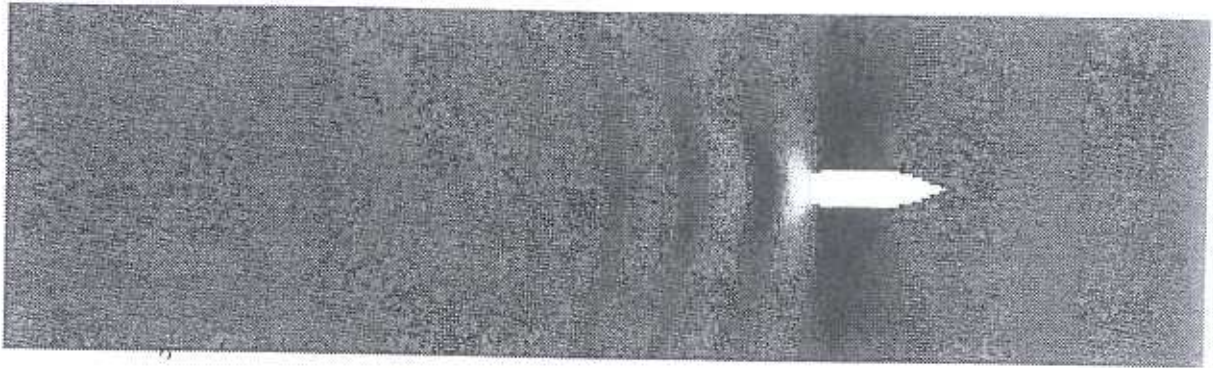


Berechnete Wellenwiderstände für das untersuchte Fahrgastschiff im Flachwasserkanal der Tiefe $h = 2.5 \text{ m} \approx 0.0637 L$ und Breite $w = 98.0 \text{ m} \approx 2.5 L$ (Rechnung SWBQISD)

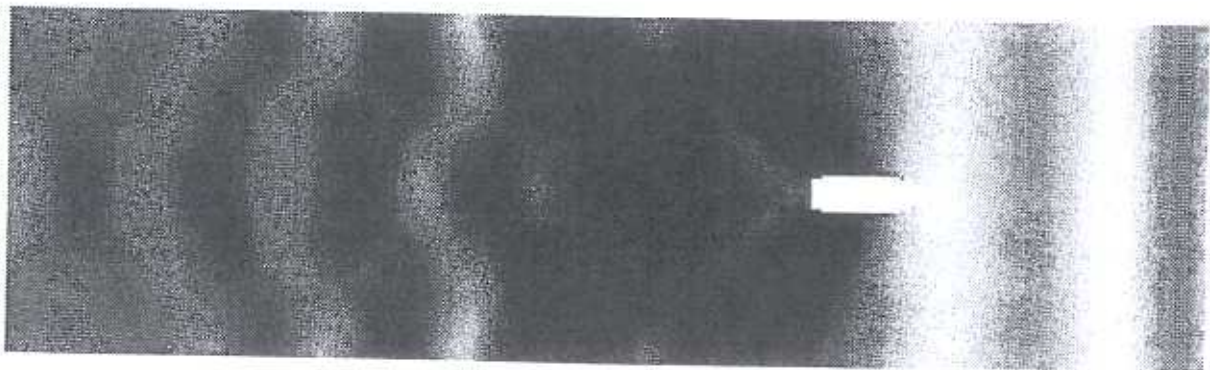
Anl.78



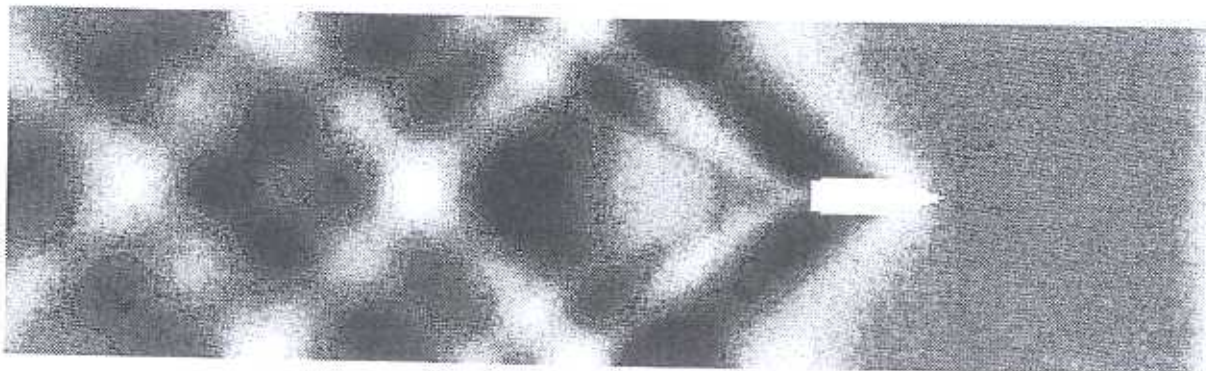
Vergleich der Gesamtwiderstände aus den Berechnungen nach der Druckapproximation und Modellversuchen für die Großausführung des untersuchten Fahrgastschiffes im Flachwasserkanal der Tiefe $h = 2.5 \text{ m} \approx 0.0637 L$ und Breite $w = 98.0 \text{ m} \approx 2.5 L$ (Rechnung SWBQISD)



(a) $F_{nh} = 0.8$

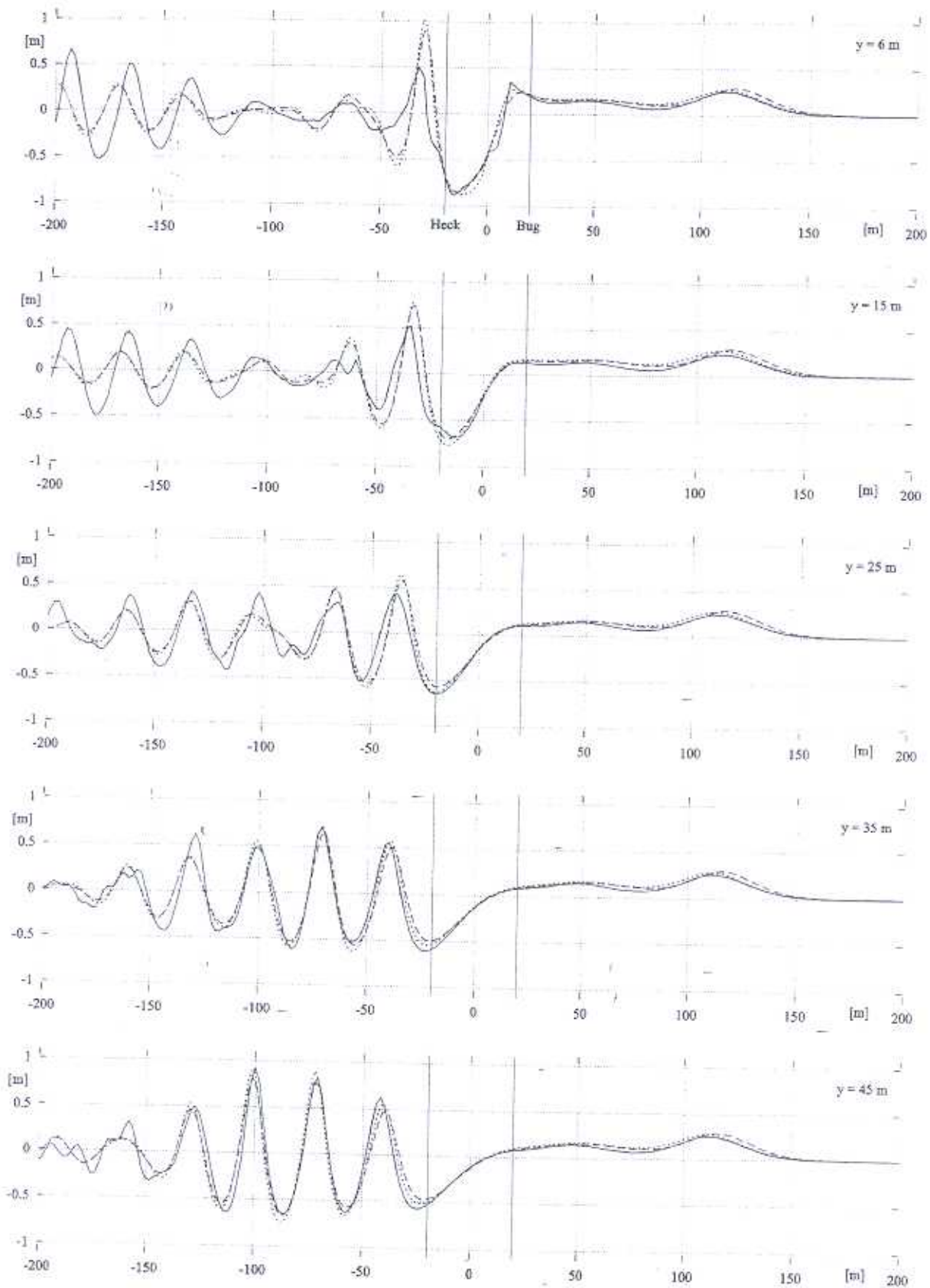


(b) $F_{nh} = 1.0$

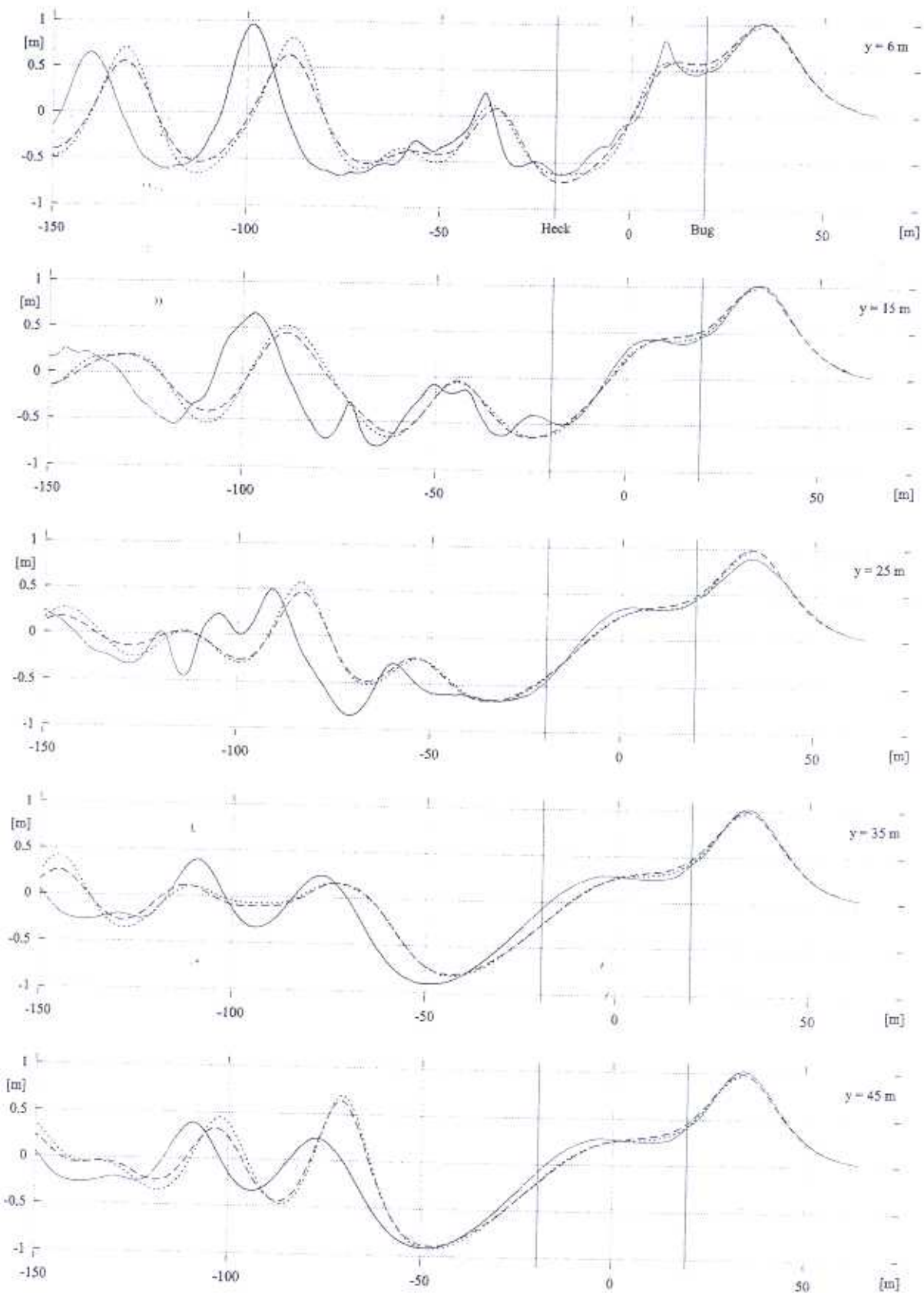


(c) $F_{nh} = 1.3$

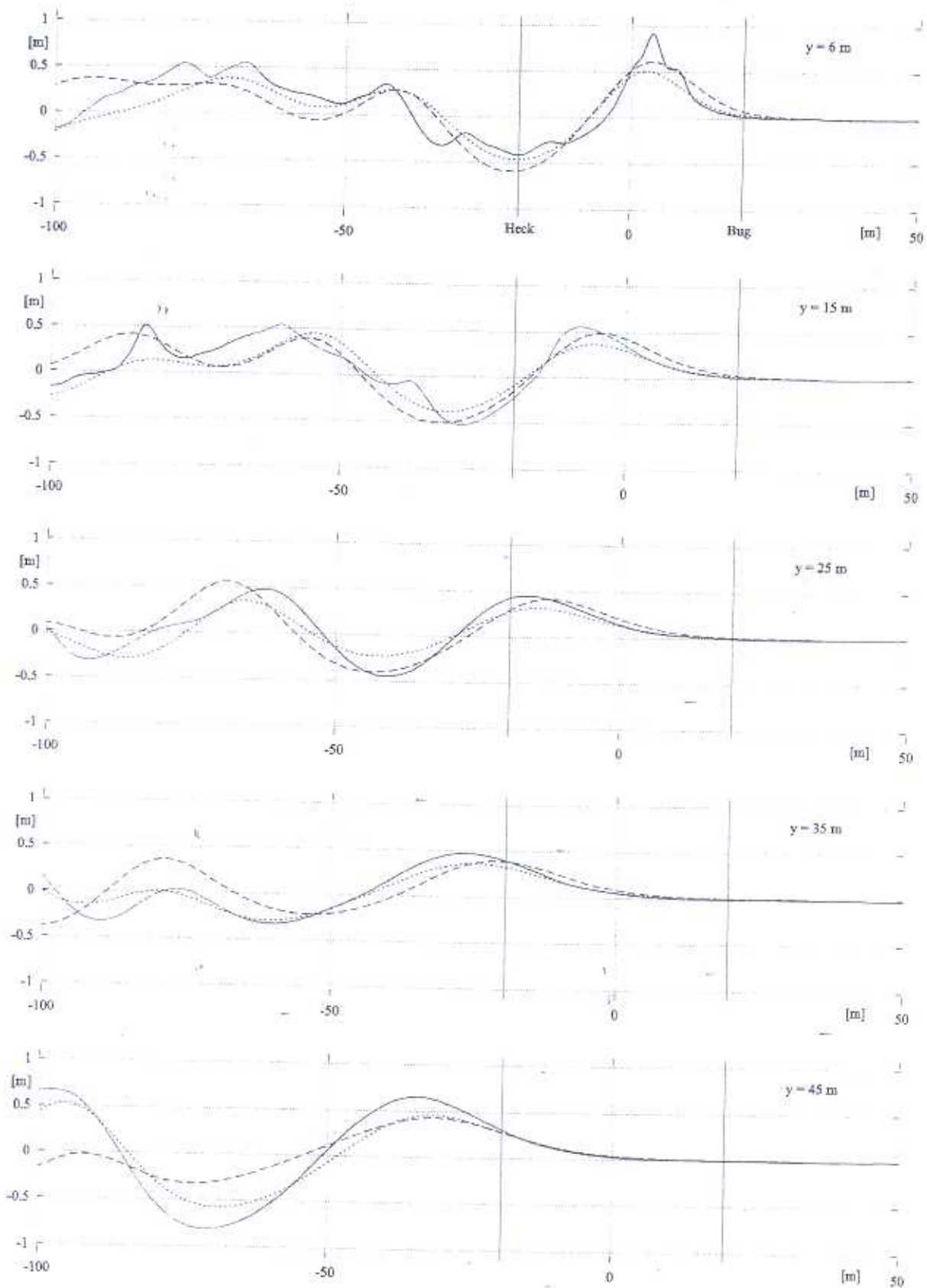
Berechnete Wellenbilder des untersuchten Fahrgastschiffes bei unter-, trans- und überkritischer Geschwindigkeit im Flachwasserkanal der Tiefe $h = 2.5 \text{ m} \hat{=} 0.0637 \text{ L}$ und Breite $w = 98.0 \text{ m} \hat{=} 2.5 \text{ L}$ (Rechnung SWBQISD)



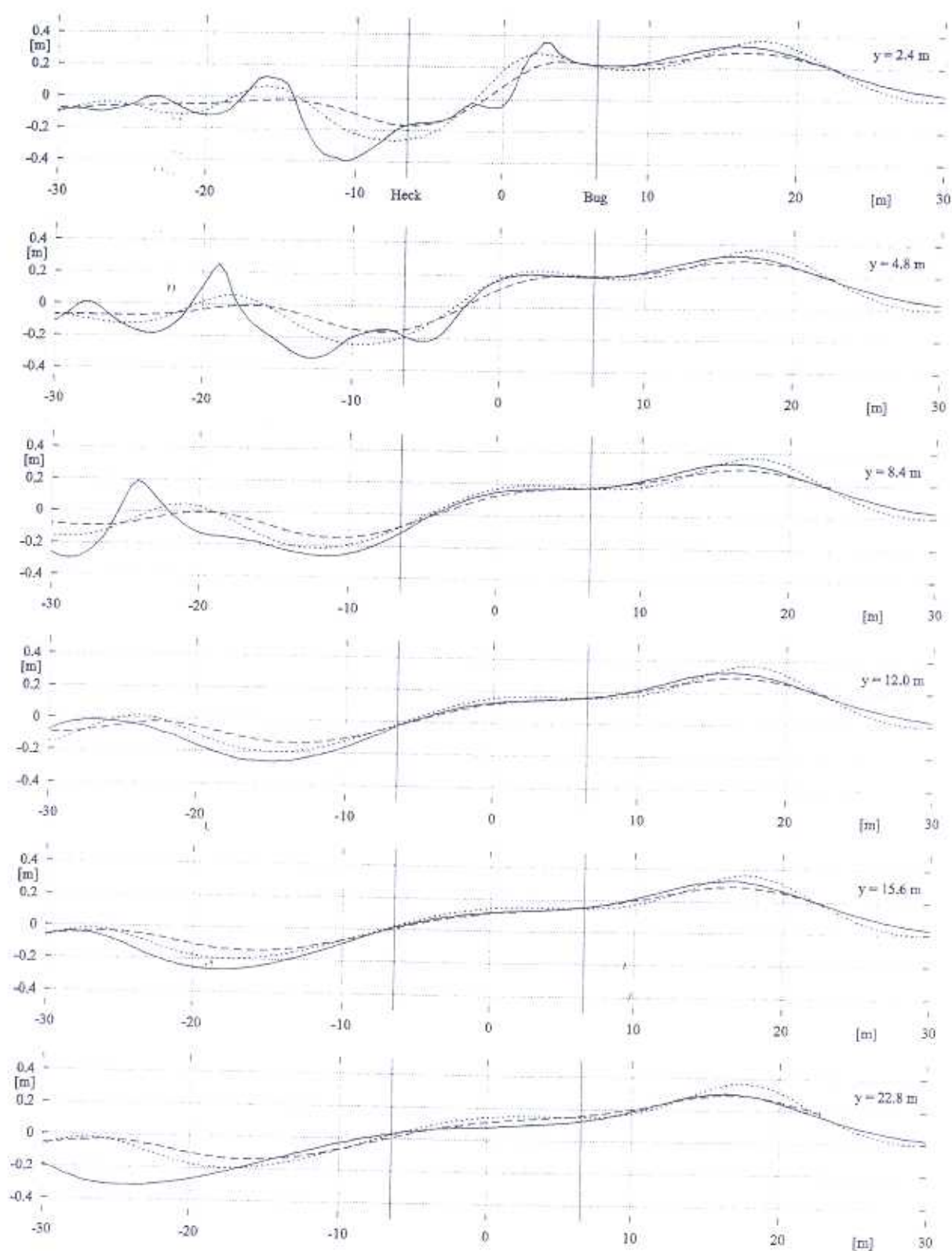
Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Fahrgastschiff bei einer unterkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.873$ für die Wassertiefe 5 m (— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation, SWBQISD)



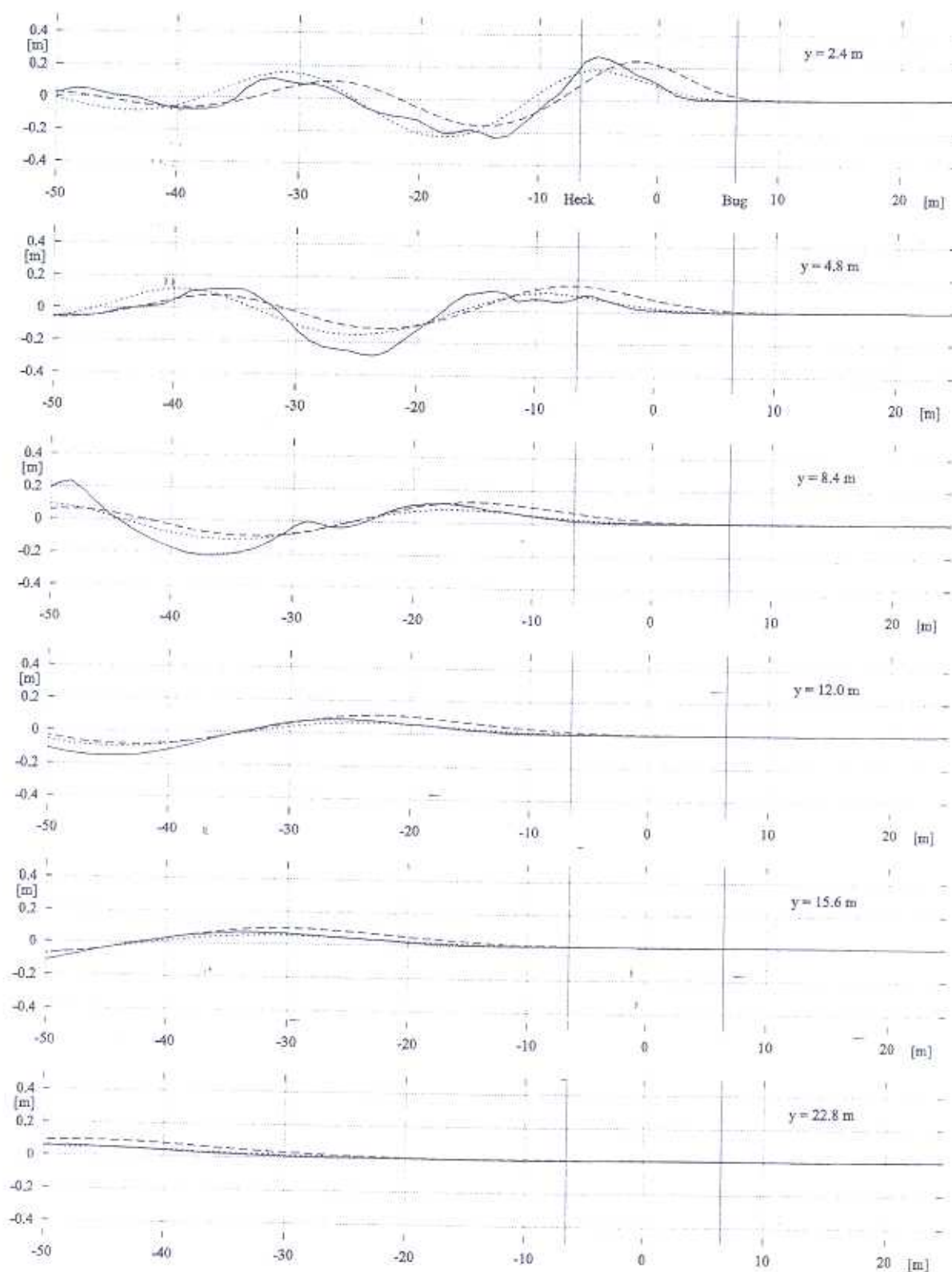
Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Fahrgastschiff bei der kritischen Geschwindigkeit $F_{rn} = 1.0$ für die Wassertiefe 5 m
(— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie;
..... berechnet nach der Druckapproximation, SWBQISD)



Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Fahrgastschiff bei einer überkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.3$ für die Wassertiefe 5 m (— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation, SWBQISD)



Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Feuerlöschboot bei der kritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.993$ für die Wassertiefe 2.5 m (— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation, SWBQISD)



Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Feuerlöschboot bei der überkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 2.227$ für die Wassertiefe 2.5 m (— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation, SWBQISD)

12
13

14
15

16

17

ANHANG

18

19

20

21

22

23

Teil II Berechnung mit dem Programm SWBQISD¹

Wellenbildung von flachen Schiffen bei transkritischer Fahrt Wavemaking of Flat Ships at Transcritical Speeds

Tao Jiang & Som Deo Sharma

Institut für Schiffstechnik

Gerhard-Mercator-Universität -GH Duisburg

Zusammenfassung

Wegen starker Begrenzung der Wassertiefe auf den Binnenwasserstraßen sind die meisten Binnenschiffe mit sehr kleinem Tiefgang im Vergleich zur Breite konstruiert, d.h. es sind flache Schiffe. In der vorliegenden Arbeit wird die Wellenbildung zweier solcher flachen Schiffe im Flachwasser numerisch untersucht. Dabei wird die Schiffsumströmung durch modifizierte Boussinesq-Gleichungen beschrieben. Der Schiffseinfluß auf das umgebende Wasser wird durch eine dem lokalen Tiefgang proportionale zweidimensionale Druckverteilung approximiert. Dies erlaubt die direkte Berücksichtigung der Schiffsförm in den Boussinesq-Gleichungen. Diese nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen werden für vorgegebene Anfangs- und Randbedingungen numerisch gelöst. Das hier implementierte, implizite Verfahren benutzt:

- Zeit- und Raumdiskretisierung nach dem Crank-Nicholson-Schema
- Approximation der Zustandsgrößen für die nichtlinearen Glieder mit Hilfe der Taylor-Entwicklung
- Iterative Lösung des linearen algebraischen Gleichungssystems
- Überrelaxation zur Beschleunigung der Konvergenz
- Lokale und globale Glättungen zur Überwindung der numerischen Schwingungen

Zur Validierung des daraus resultierenden Computerprogramms wird die Wellenbildung eines Binnenfahrgastschiffes und eines Feuerlöschbootes im unter-, trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich numerisch untersucht. Die berechneten Wellenprofile und Wellenwiderstände werden mit gemessenen Werten aus der VBD verglichen.

Summary

Due to the strong limitation of water depth in inland waterways most inland ships are constructed with very small draft relative to beam, i.e., they are flat ships. In this study the wavemaking of such flat ships in shallow water is numerically investigated. The flow around the ship is described by modified Boussinesq equations. The ship influence on the ambient water is approximated by a two dimensional pressure distribution proportional to the local draft. This treatment allows direct consideration of the ship form in the Boussinesq equations. The governing nonlinear partial differential equations are numerically solved for given initial and boundary conditions. The implicit method implemented here uses:

- Crank-Nicholson scheme for the time and space discretizations
- Approximation of the state variables for the nonlinear terms by means of Taylor expansion
- Iterative solution of the linear algebraic equation system
- Overrelaxation to accelerate the convergence process
- Local and global filtering to overcome numerical oscillations

To validate the resulting computer program the wavemaking of an inland passenger-ferry and a fire-fighting boat in the subcritical, transcritical, and supercritical speed range is numerically investigated. The calculated wave profiles and wave resistance are then compared with the values measured in the VBD.

¹Vorgetragen beim 19. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik / Meerestechnik vom 14. bis 16. Mai 1998

Einleitung

Schiffswellen in flachem Gewässer sind sowohl dispersiv als auch nichtlinear. Im Falle der transkritischen Kanalfahrt, d.h. in der Nähe der kritischen Geschwindigkeit bei der Tiefen-Froude-Zahl $F_{nh} = 1.0$, erzeugt das Schiff sog. Solitonwellen, die sich ein wenig schneller als das Schiff fortbewegen. Trotz konstanter Schiffsgeschwindigkeit führen diese Solitonwellen zu einem instationären Wellenbild relativ zum Schiff und verursachen auch die Oszillationen des Schiffswiderstandes sowie vertikale Schiffsbewegungen. Diese nichtlinearen und instationären Phänomene der Schiffswellen wurden seit langem experimentell im Flachwassertank beobachtet, siehe z.B. Thews and Landweber (1935), Helm (1940), und Graff et al. (1964). Für schlanke Schiffe wurden solche Phänomene in der letzten Zeit auch theoretisch erfolgreich untersucht, siehe z.B. Choi and Mei (1989), Chen and Sharma (1995) und Jiang et al. (1995). Dem theoretischen Verfahren liegt die Methode der angepaßten asymptotischen Entwicklungen zugrunde, wonach das Gesamtströmungsfeld in das Schiffsnah- und -fernfeld aufgeteilt ist. Zur Beschreibung der Strömung im Fernfeld wurde die partielle nichtlineare Flachwassergleichung vom Typ Kadomtsev-Petviashvili (KP) herangezogen. Zur Approximation der Strömung im Nahfeld wurde die Schlank-Körper-Theorie angewendet.

Wegen der Annahme langsamer Veränderung des Wellenbildes relativ zum Schiff ist die KP-Gleichung für die echt instationären Probleme, die sich z.B. aus veränderlicher Wassertiefe, Wechselwirkungen zwischen Schiffen bzw. zwischen Schiff und Seegang ergeben, nicht anwendbar. Deshalb wurde ein neues Rechenverfahren entwickelt, indem die allgemeiner gültigen Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ im Fernfeld eingesetzt wurden. Für einen Serie-60-Rumpf, d.h. ein schlankes Schiff, lieferte die neue Entwicklung eine gute Übereinstimmung mit Messungen im Schlepptank sowohl für die Integralgrößen (Wellenwiderstand, Absenkung und Vertrimmung) als auch für die Feldgrößen (Wellenprofile), siehe Jiang (1998).

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die numerische Untersuchung der Wellenbildung

von Binnenschiffen im Flachwasser. Wegen starker Begrenzung der Wassertiefe auf den Binnenwasserstraßen sind die meisten Binnenschiffe mit sehr kleinem Tiefgang im Verhältnis zur Breite konstruiert, d.h. es sind flache Schiffe. Um den Einfluß eines flachen Schiffes auf das umgebende Wasser zu approximieren, kann das Schiff durch eine dem lokalen Tiefgang proportionale, zweidimensionale Druckverteilung ersetzt werden, siehe Hogner (1932). Diese Approximation ermöglicht insbesondere die direkte Berücksichtigung der Schiffsförmigkeit in den Boussinesq-Gleichungen, ohne das Strömungsfeld in Nah- und Fernfeld aufteilen zu müssen. Um die praktische Anwendung dieser Approximation nachzuprüfen, werden systematische Berechnungen für zwei im Rahmen eines BMBF-Vorhabens in der VBD untersuchte Modelle durchgeführt. Die vorliegende Arbeit zeigt sowohl den Vergleich zwischen den Ergebnissen aus den beiden Rechenverfahren als auch den Vergleich zwischen Berechnungen und Modellmessungen.

Mathematische Formulierung

Allgemeine Darstellung

Zur Beschreibung der Strömung um das mit konstanter Geschwindigkeit V in x -Richtung fahrende Schiff im Flachwasser der Tiefe h_0 wird ein kartesisches Koordinatensystem $Oxyz$ verwendet, siehe Abb. 1. Um die vorhandene Symmetrie des zu untersuchenden Problems auszunutzen, liegt der Koordinatenursprung in der Mittellängsebene und die Oxy -Ebene auf der ungestörten Wasseroberfläche. Die z -Achse ist positiv nach oben definiert.

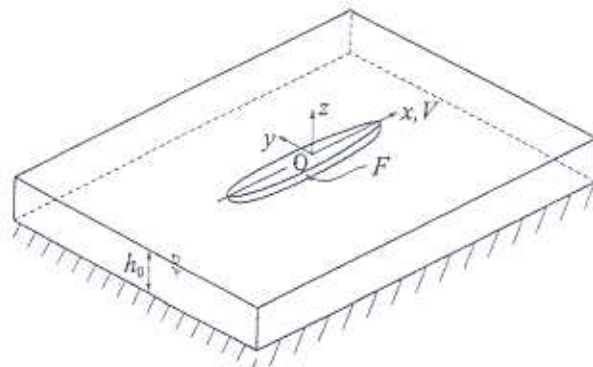


Abb. 1 Schematische Darstellung des Problems und das Koordinatensystem

Zur Approximation der Schiffswellen wird in

der vorliegenden Arbeit die Potentialtheorie verwendet. Grundlegende Annahmen hierfür sind: (i) das Fluid um das Schiff ist inkompressibel und reibungsfrei; (ii) die Strömung um das Schiff ist rotationsfrei. Es existiert dann eine Potentialfunktion Φ , die die Laplace-Gleichung im gesamten Strömungsfeld erfüllt:

$$\Phi_{xx} + \Phi_{yy} + \Phi_{zz} = 0. \quad (1)$$

Um die Lösung dieser Laplace-Gleichung zu bestimmen, muß das Potential folgenden Bedingungen noch genügen: (i) die kinematische und dynamische Randbedingung auf der freien Oberfläche $z = \zeta(x, y, t)$:

$$\zeta_t - V\zeta_x + \Phi_x\zeta_x + \Phi_y\zeta_y = \Phi_z, \quad (2)$$

$$\Phi_t - V\Phi_x + \frac{|\nabla\Phi|^2}{2} + gz = 0, \quad (3)$$

mit der Erdbeschleunigung g ; (ii) die Nulldurchfluß-Bedingung auf der Schiffsoberfläche $F(x, y, z, t) = 0$:

$$F_t - VF_x + \nabla F \cdot \nabla F = 0; \quad (4)$$

(iii) die Nulldurchfluß-Bedingung am Wasserboden $z = -h_0$ (hierkonstant):

$$\Phi_z = 0; \quad (5)$$

(iv) die Nulldurchfluß-Bedingung an der Kanalwand $y = \pm \frac{w}{2}$:

$$\Phi_y = 0, \quad (6)$$

mit der Kanalbreite w und (v) die Abklingbedingung in Unendlichen

$$\nabla\Phi|_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0. \quad (7)$$

Approximation der Flachwasserwellen

Betrachtet man die Schiffswellen in einem Gewässer mit relativ kleiner Wassertiefe, d.h. Wassertiefe h_0 sei klein im Verhältnis zu Wellenlänge λ , und setzt eine schwache Nichtlinearität der Schiffswellen, d.h. Wellenamplitude ζ_A ebenfalls klein im Verhältnis zu Wassertiefe h_0 , voraus, dann kann die bewährte Theorie der Flachwasserwellen herangezogen werden. Folglich wird das 3-D Potential Φ mit Hilfe vom über die lokale Wassertiefe $h_0 + \zeta$ gemittelten 2-D Potential φ

$$\varphi(x, y, t) = \frac{1}{h_0 + \zeta} \int_{-h_0}^{\zeta} \Phi(x, y, z, t) dz, \quad (8)$$

dargestellt. Nach einer Standard-Taylor-Entwicklung in z -Richtung und der Erfüllung der Randbedingung am Wasserboden ergibt sich bis zur Approximationsordnung $O(\mu^2)$ mit $\mu = 2\pi h_0/\lambda$ folgende Beziehung zwischen Φ und φ :

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z, t) = & \varphi(x, y, t) + \\ & \frac{1}{6}[h_0 + \zeta(x, y, t)]^2 \nabla^2 \varphi(x, y, t) \\ & - \frac{1}{2}(h_0 + z)^2 \nabla^2 \varphi(x, y, t). \end{aligned} \quad (9)$$

Hierbei hat der ∇ -Operator die 2-D Form, nämlich $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$.

Setzt man die obige Beziehung in die kinematische und dynamische Bedingung an der freien Oberfläche ein, erhält man die klassischen Boussinesq-Gleichungen für schwach nichtlineare, mäßig lange Wellen mit der Anpassung $\varepsilon = \frac{\zeta_A}{h_0} \approx \mu^2 < 1$ und Vernachlässigung höherer Ordnung $O(\varepsilon^2, \mu^4, \varepsilon\mu^2)$, siehe e.g. Mei (1989):

$$\begin{aligned} h_t - Vh_x + hu_x + uh_x + hv_y + vh_y \\ = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u_t - Vu_x + uu_x + vv_y + gh_x - \\ \frac{h_0^2}{3}[u_{xxt} + v_{xyt} - V(u_{xx} + v_{xy})] \\ = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} v_t - Vv_x + uv_x + vv_y + gh_y - \\ \frac{h_0^2}{3}[u_{xyt} + v_{yyt} - V(u_{xy} + v_{yy})] \\ = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

wobei u, v die über die lokale Wassertiefe $h = h_0 + \zeta(x, y, t)$ gemittelten horizontalen Geschwindigkeitskomponenten bezeichnen:

$$(u, v) = \frac{1}{h_0 + \zeta} \int_{-h_0}^{\zeta} \nabla\Phi(x, y, z, t) dz. \quad (13)$$

Für die nichtlinearen langen Wellen von $\mu \rightarrow 0$ und $\varepsilon = O(1)$ gelten dann die Airy-Gleichungen:

$$h_t - Vh_x + hu_x + uh_x + hv_y + vh_y = 0, \quad (14)$$

$$u_t - Vu_x + uu_x + vv_y + gh_x = 0, \quad (15)$$

$$v_t - Vv_x + uv_x + vv_y + gh_y = 0. \quad (16)$$

Die Airy-Gleichungen können auch direkt aus den 3-D Euler-Gleichungen unter der Annahme, daß der Druck proportional der lokalen Tauchtiefe ist, nämlich $p(x, y, z, t) = \rho g[\zeta(x, y, t) - z]$ abgeleitet werden, siehe z.B. Wehausen und Laitone (1960).

Die Anwendung der Boussinesq-Gleichungen auf die Schiffswellen im Flachwasser ist ein wenig durch die Annahme des kleinen Verhältnisses der Wassertiefe zu Wellenlänge eingeschränkt, denn in einem Schiffswellensystem sind alle möglichen Wellenlängen vorhanden. Für die Wellenkomponenten mit kleiner Wellenlänge bleibt diese Annahme nicht erfüllt. Dies führt zur Verfälschung des Dispersionsverhaltens für die kurzen Wellen. Zur Verbesserung des Dispersionsverhaltens der Boussinesq-Gleichungen wurden in der letzten Zeit verschiedene Wege angeschlagen, siehe z.B. Witting (1984), Madsen et al. (1991), Nwogu (1993), Schröter (1995), und Dingemans (1997). Der Hauptgedanke hierbei ist es, die Boussinesq-Gleichungen so zu modifizieren, daß sie das Dispersionsgesetz aus der linearen Wellentheorie für beliebige Wassertiefe gut annähern. Eine Möglichkeit hierfür ist die Addierung eines linearen Terms höherer Ordnung in die Gleichungen (15) und (16). Daraus ergeben sich die folgenden modifizierten Boussinesq-Gleichungen:

$$h_t - Vh_x + hu_x + uh_x + hv_y + vh_y = 0, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} u_t - Vu_x + uu_x + vu_y + gh_x - \\ \frac{h_o^2}{3}(1 - 3C_{BQ}) \\ [u_{xxt} + v_{xyt} - V(u_{xxx} + v_{xxy})] \\ + gh_o^2 C_{BQ}(h_{xxx} + h_{xyy}) = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} v_t - Vv_x + uv_x + vv_y + gh_y - \\ \frac{h_o^2}{3}(1 - 3C_{BQ}) \\ [u_{xyt} + v_{yyt} - V(u_{xyx} + v_{yyy})] \\ + gh_o^2 C_{BQ}(h_{xxy} + h_{yyy}) = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

mit einem zunächst noch unbekannten Koeffizienten C_{BQ} . Zur Bestimmung eines geeigneten Werts von C_{BQ} wird die Dispersionscharakteristik der modifizierten Boussinesq-Gleichungen mit dem Dispersionsgesetz aus

der linearen Wellentheorie verglichen. Das stationäre Kelvin-Schiffswellensystem aus den Boussinesq-Gleichungen ist durch folgende lineare stationäre Gleichungen

$$-Vh_x + h_o u_x + h_o v_y = 0, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} -Vu_x + gh_x - \\ \frac{Vh_o^2}{3}(1 - 3C_{BQ})(u_{xxx} + v_{xxy}) \\ + gh_o^2 C_{BQ}(h_{xxx} + h_{xyy}) = 0, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} -Vv_x + gh_y - \\ \frac{Vh_o^2}{3}(1 - 3C_{BQ})(u_{xxy} + v_{yyy}) \\ + gh_o^2 C_{BQ}(h_{xxy} + h_{yyy}) = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

beschrieben.

Setzt man die allgemeine Lösung

$$\begin{pmatrix} h - h_o \\ u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \zeta_A \\ u_A \\ v_A \end{pmatrix} e^{i(kx \cos \beta + ky \sin \beta)} \quad (23)$$

in die linearisierten stationären Boussinesq-Gleichungen ein, erhält man für die Fortpflanzungsrichtung β die Dispersionsbeziehung

$$\frac{(V \cos \beta)^2}{gh_o} = \frac{1 - C_{BQ}(kh_o)^2}{1 + (\frac{1}{3} - C_{BQ})(kh_o)^2} \quad (24)$$

mit der Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Um diese Dispersionscharakteristik mit dem Dispersionsgesetz aus der linearen Wellentheorie

$$\frac{(V \cos \beta)^2}{gh_o} = \frac{\tanh kh_o}{kh_o} \quad (25)$$

vergleichen zu können, werden die Beziehungen (24) und (25) mit Hilfe der Taylor-Entwicklungen

$$\begin{aligned} \frac{(V \cos \beta)^2}{gh_o} &= \frac{1 - C_{BQ}(kh_o)^2}{1 + (\frac{1}{3} - C_{BQ})(kh_o)^2} \\ &= 1 - \frac{1}{3}(kh_o)^2 + \frac{1}{3}(\frac{1}{3} - C_{BQ})(kh_o)^4 - \dots \end{aligned} \quad (26)$$

und

$$\begin{aligned} \frac{(V \cos \beta)^2}{gh_o} &= \frac{\tanh kh_o}{kh_o} \\ &= 1 - \frac{1}{3}(kh_o)^2 + \frac{2}{15}(kh_o)^4 - \dots, \end{aligned} \quad (27)$$

dargestellt. Eine Approximation bis zu $O[(kh_0)^4]$ führt dann zu einem geeigneten Wert $C_{BQ} = -\frac{1}{15}$. Der Einfluß des Koeffizienten C_{BQ} auf das Dispersionsverhalten der Boussinesq-Gleichungen ist in Abb. 2 veranschaulicht. Man stellt ohne weiteres fest, daß bei einem Koeffizientenwert von $C_{BQ} = -\frac{1}{15}$ die modifizierten Boussinesq-Gleichungen für eine Wellenlänge bis hinunter zu zweifacher Wassertiefe ohne nennenswerte Abweichung gelten.

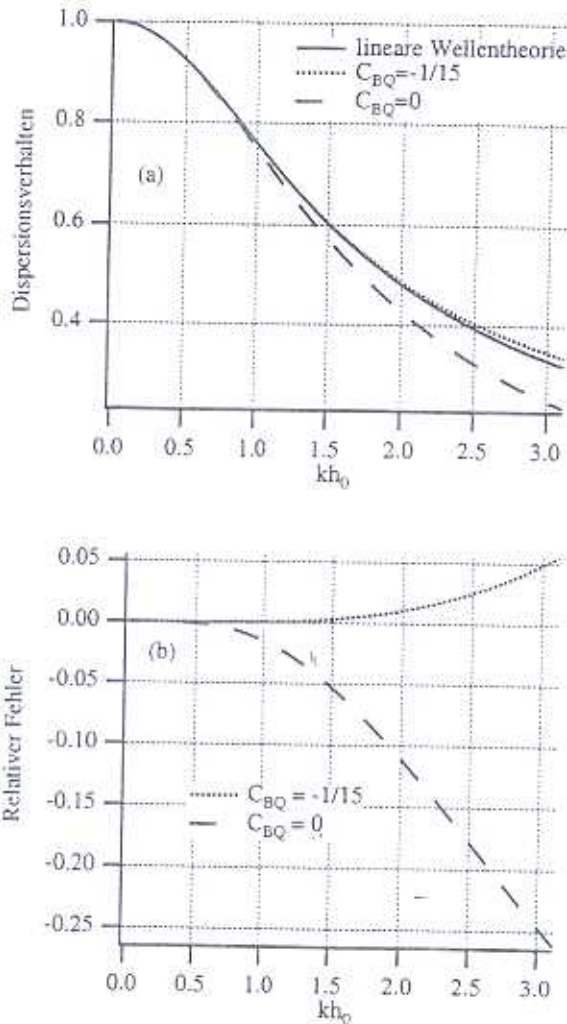


Abb. 2 Vergleich des Dispersionsverhaltens für lineare Schiffswellen

Schlank-Körper-Theorie für die Schiffsumströmung im Nahfeld

Zur Approximation der Schiffswellen im Flachwasser existiert ein bewährtes Verfahren, nämlich die Methode der asymptotischen angepassten Entwicklungen. Demnach wird das Gesamtströmungsfeld in das Schiffsnah- und -fernfeld aufgeteilt. Die Strömung im Fern-

feld wird durch die modifizierten Boussinesq-Gleichungen approximiert. Die Strömung im Nahfeld wird durch die Schlank-Körper-Theorie angenähert. Nach einer entsprechenden Skalierungsanalyse werden die beiden Felder asymptotisch verknüpft. So ergibt sich die mittlere transversale Geschwindigkeitskomponente aus der asymptotischen Außenentwicklung der Nahfeldlösung für das Fernfeld:

$$v|_{y \rightarrow 0^\pm} = \mp \frac{1}{2} \frac{V}{h_0} S_x(x), \quad (28)$$

siehe e.g. Mei and Choi (1986). Diese Beziehung wurde von Chen und Sharma (1995) wie folgt verbessert

$$v|_{y \rightarrow 0^\pm} = \mp \frac{1}{2} (h + \zeta_0)^{-1} [S(x, t)(V - u_0)]_x, \quad (29)$$

indem die dynamischen Effekte durch die Längsstörgeschwindigkeit $u_0 = \frac{1}{2}[u(x, 0^+, t) + u(x, 0^-, t)]$ und die Veränderung der Spantfläche $S(x, t)$ infolge Absenkung $s(t)$, Vertrimmung $\theta(t)$ sowie lokaler Wellenerhebung $\zeta_0 = \frac{1}{2}[\zeta(x, 0^+, t) + \zeta(x, 0^-, t)]$ mit berücksichtigt wurden.

Wird der Druck auf der Schiffsoberfläche $z = -T(x, y)$ durch den Airy-Druck

$$p_{\text{AIRY}} = \rho g [\zeta_0(x, t) + T(x, y)], \quad (30)$$

approximiert, erhält man für den Wellenwiderstand folgende Einfachintegrale

$$R_W = -\rho g \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \zeta_0(x, t) S_x(x) dx \quad (31)$$

mit der statischen Spantfläche $S(x)$ und

$$R_W = -\rho g \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \zeta_0(x, t) \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [S(x) + B(x)s(t) + B(x)x\theta(t)] + \frac{1}{2} \zeta_0(x, t) \frac{dB(x)}{dx} \right\} dx \quad (32)$$

mit der dynamischen Spantfläche $S(x) + B(x)[s(t) + x\theta(t) + \zeta_0(x, t)]$. Hierin ist $B(x)$ die lokale Schiffsbreite und $T(x, y)$ der lokale Tiefgang.

Für frei tauchendes und trimmendes Schiff müssen die resultierende Kraft in z -Richtung und das Moment um die y -Achse verschwinden.

Daraus ergeben sich dann zwei Bestimmungsgleichungen für die Absenkung und Vertrimmung:

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} [\zeta_0(x, t) + s(t) + x\theta(t)] B(x) dx = 0, \quad (33)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} [\zeta_0(x, t) + s(t) + x\theta(t)] B(x) x dx = 0, \quad (34)$$

wobei die klein anzusehende Trägheitswirkung der Einfachheit halber vernachlässigt wurde.

Druckapproximation für flache Schiffe

Um den Einfluß eines flachen Schiffs auf das umgebende Wasser zu approximieren, kann der Schiffsrumpf durch eine dem lokalen Tiefgang proportionale Druckverteilung ersetzt werden:

$$p_s = \rho g T(x, y), \quad (35)$$

siehe, z.B. Hogner (1932) und Pedersen (1988). Diese Behandlung erlaubt die direkte Berücksichtigung der Schiffsform in den Boussinesq-Gleichungen. Der Wellenwiderstand kann durch das Doppel-Integral berechnet werden:

$$R_W = \rho g \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B(x)}{2}}^{\frac{B(x)}{2}} \zeta_x(x, y, t) p_s(x, y) dx dy, \quad (36)$$

Für ein schmales Schiff kann angenommen werden, daß $\zeta_x(x, y, t)$ innerhalb der Schiffsbreite unabhängig von y ist. Danach geht diese Doppel-Integral-Form auf das Einfachintegral der Gleichung (31) zurück, denn es gelten $S(\frac{L}{2}) = S(-\frac{L}{2}) = 0$.

Numerische Lösung

Zeit- und Raumdiskretisierung

Wegen der Terme höherer Ordnung konnte das für die Airy-Gleichungen entwickelte explizite, schnelle Upwindverfahren mit hoher Auflösung, siehe Jiang (1996), für die Boussinesq-Gleichungen bislang nicht verwendet werden. Deshalb wurde ein implizites, numerisch robusteres Rechenverfahren für die Boussinesq-Gleichungen neu entwickelt, siehe Jiang (1998). Dieses implizite Rechenverfahren basiert auf dem Crank-Nicholson-Diskretisierungsschema, d.h. die zu lösenden partiellen Differentialgleichungen sind sowohl

in Zeit als auch in Raum um den Zwischenzeitpunkt $n + \frac{1}{2}$ diskretisiert. Verwendet man folgende Differentialoperatoren am Knoten (i, j) :

$$\bar{\delta}_t Q = \frac{1}{2}(Q^{n+1} + Q^n),$$

$$\delta_t Q = \frac{1}{\Delta t}(Q^{n+1} - Q^n),$$

$$\delta_x Q = \frac{1}{2\Delta x}(Q_{i+1} - Q_{i-1}),$$

$$\delta_y Q = \frac{1}{2\Delta y}(Q_{j+1} - Q_{j-1}),$$

$$\delta_{xx} Q = \frac{1}{\Delta x \Delta x}(Q_{i+1} - 2Q_i + Q_{i-1}),$$

$$\delta_{yy} Q = \frac{1}{\Delta y \Delta y}(Q_{j+1} - 2Q_j + Q_{j-1}),$$

mit dem verallgemeinerten Symbol Q für beliebige Zustandsgrößen von (h, u, v) , werden die Boussinesq-Gleichungen formal durch die Finit-Differenz-Formulierung

$$\begin{aligned} \delta_t h - V \delta_x \bar{\delta} h + h^{n+\frac{1}{2}} (\delta_x \bar{\delta} u + \delta_y \bar{\delta} v) \\ + u^{n+\frac{1}{2}} \delta_x \bar{\delta} h + v^{n+\frac{1}{2}} \delta_y \bar{\delta} h = 0, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \delta_t u - V \delta_x \bar{\delta} u + u^{n+\frac{1}{2}} \delta_x \bar{\delta} u + v^{n+\frac{1}{2}} \delta_y \bar{\delta} u + g \delta_x \bar{\delta} h - \\ \frac{h_0^2}{3} (1 - 3C_{BQ}) \\ [\delta_t (\delta_{xx} u + \delta_x \delta_y v) - V (\delta_x \delta_{xx} \bar{\delta} u + \delta_y \delta_{xx} \bar{\delta} v)] \\ + g h_0^2 C_{BQ} \delta_x (\delta_{xx} + \delta_{yy}) \bar{\delta} h = 0, \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \delta_t v - V \delta_x \bar{\delta} v + u^{n+\frac{1}{2}} \delta_x \bar{\delta} v + v^{n+\frac{1}{2}} \delta_y \bar{\delta} v + g \delta_y \bar{\delta} h - \\ \frac{h_0^2}{3} (1 - 3C_{BQ}) \\ [\delta_t (\delta_x \delta_y u + \delta_{yy} v) - V (\delta_y \delta_{xx} \bar{\delta} u + \delta_x \delta_{yy} \bar{\delta} v)] \\ + g h_0^2 C_{BQ} \delta_y (\delta_{xx} + \delta_{yy}) \bar{\delta} h = 0, \end{aligned} \quad (39)$$

diskretisiert.

Werden die Zustandsgrößen $h^{n+\frac{1}{2}}, u^{n+\frac{1}{2}}, v^{n+\frac{1}{2}}$ für die nichtlinearen Terme durch die Werte zum Zeitpunkt $n+1$ oder durch die Mittelwerte aus Zeitpunkten n und $n+1$ approximiert, entspricht die obige diskrete Formulierung einem nichtlinearen, algebraischen Gleichungssystem, das numerisch sehr schwierig zu lösen ist. Eine Umgehung ergibt sich, indem diese Zustandsgrößen durch die Werte zum Zeitpunkt n mit Hilfe der Taylor-Entwicklung approximiert werden. Für das dadurch entstandene lineare, algebraische Gleichungssystem existieren zahlreiche bewährte Standard-Lösungsmethoden.

Eine Besonderheit der Systemmatrix ist die schwache Besetzung, d.h. nur eine kleine Anzahl der Elemente der Systemmatrix ist von null verschieden. Um unnötige Speicherung zu vermeiden, wird die Koordinatenspeichertechnik (COO) angewendet, d. h. nur die Nicht-nullelemente und ihre Koordinaten werden gespeichert. Angesichts der großen Anzahl der Unbekannten für das hier zu diskretisierende große Rechengebiet wird ein iteratives Lösungsverfahren, z.B. Gauß-Seidel-Verfahren, in der vorliegenden Arbeit bevorzugt. Zur Beschleunigung der Konvergenz ist die Überrelaxation implementiert. Die numerischen Schwingungen infolge der Nichtlinearität und Randbedingungen werden durch Anwendung lokaler bzw. globaler numerischer Glättungen unterdrückt.

Randbedingungen

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Symmetrie um die vertikale Ebene $y = 0$ bestimmen die vier verschiedenartigen Randbedingungen die Lösung der Boussinesq-Gleichungen: (i) die Symmetrie-Bedingungen an der vertikalen Ebene $y = 0$; (ii) die Nulldurchfluß-Bedingung $v = 0$ an der Kanalwand $y = \frac{w}{2}$; (iii) die Ausflußbedingung an der Mittellängsebene durch die Gleichungen (28) und (29) aus der Schlank-Körper-Theorie; (iv) die Nullreflektion-Bedingungen an den offenen Rändern (hier Ein- und Ausströmrand). Während die numerischen Ableitungen an den Rändern (i-iii) durch die Zustandsgrößen aus dem Rechenfeld einfach einseitig gebildet werden können, muß an den offenen Rändern (iv) die durch die Charakteristiken definierte Flußrichtung berücksichtigt werden, denn nur die nach außen gerichteten Charakteristiken führen zu stabiler Lösung. Unter Betrachtung der Tatsache, daß die Veränderung der Zustandsgrößen in y -Richtung bei Kanalfahrt am Ein- und Ausströmrand weit vor und hinter dem Schiff vernachlässigbar klein ist, gilt folgende Nullreflektion-Bedingung am Ein- und Ausströmrand:

$$Q_t + \sigma Q_x = 0 \quad (40)$$

wobei σ die nach außen gerichtete Charakteristik bezeichnet. Vernachlässigt man den Einfluß höherer Ordnung in den Boussinesq-Gleichungen, erhält man dann die nach außen gerichtete Charakteristik $\sigma = u - V +$

$\sqrt{gh}$ am Einströmrand und $\sigma = u - V - \sqrt{gh}$ am Ausströmrand, siehe Jiang (1996). Diese Nullreflektion-Bedingung in Gleichung (40) entspricht der bekannten Sommerfeld-Bedingung und muß dann aus dem inneren Rechenfeld einseitig diskretisiert werden. Das resultierende lineare algebraische Gleichungssystem kann nun mit Hilfe des Standard-Gauß-Seidel-Verfahrens für die vorgegebenen Anfangsbedingungen, z.B. $h = h_0, u = 0, v = 0$, und einen passenden Schleppgeschwindigkeitsverlauf, z.B. V mal Beschleunigungsfaktor, iterativ gelöst werden.

Ergebnisse und Diskussion

Testrechnungen

Um geeignete Zeit- (Δt) und Raumrechen-schritte ($\Delta x, \Delta y$) für stabile und konvergente Berechnungen zu finden, wurden zahlreiche Testrechnungen durchgeführt. In den meisten Fällen führt das aus den linearisierten Boussinesq-Gleichungen abgeleitete Kriterium $\Delta t^2 < \frac{1}{V^2} (\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2})^{-1}$ zur stabilen Lösung. Bei einer Wahl $\Delta x \approx \Delta y$ in der vorliegenden Arbeit bedeutet dies $\Delta t < \frac{\Delta x}{\sqrt{2}V}$. Nach Testrechnungen für den hier zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereich wurde eine Beziehung $\Delta t = \frac{\Delta x}{4V}$ festgelegt. Δx hat den Wert von $\frac{L}{40}$. Die Gesamtlänge des Rechengebiets beträgt 10 Schiffslängen, und zwar $2\frac{1}{2}$ vor dem Schiff und $6\frac{1}{2}$ hinter dem Schiff. Für 2000 Zeitschritte läuft eine Berechnung ca. 3 CPU-Stunden an einem HP-Arbeitsplatz.

Modellversuche

Es handelt sich um zwei Schiffsmodelle, die im Rahmen des in der VBD durchgeführten Forschungsvorhabens "Mono-Schwell" untersucht wurden. Die Hauptdaten der beiden Schiffe sind in Tabelle 1 aufgelistet. Der Liniennriß für das Fahrgastschiff ist in Abb. 3 (a) graphisch dargestellt und für das Feuerlöschboot in Abb. 3(b). Die Modellversuche wurden im Großtank der VBD für unterschiedliche Wassertiefen im unter-, trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich durchgeführt. Die Einzelheiten der Modellversuche sind dem zugehörigen VBD-Bericht zu entnehmen.

Widerstand

Das Fahrgastschiff ist durch das ausgeprägt große Verhältnis der Breite zum Tiefgang gekennzeichnet. Deshalb wurde die Wirkung der Unterwasserschiffsform auf das umgehende Wasser zunächst durch eine Druckverteilung proportional dem lokalen Tiefgang approximiert. Für die Wassertiefe 2.5 m in der Großausführung wurden Berechnungen im Geschwindigkeitsbereich $F_{nh} = 0.5$ bis 1.5 durchgeführt. Der spezifische Wellenwiderstand nach Gleichung (35) wurde in Abb. 4 gegen die Tiefen-Froude-Zahl F_{nh} aufgetragen. Die Wellenwiderstandskurve ist besonders durch den starken Einstieg beim Übergang von unter- zu transkritischer Geschwindigkeit (Verzweigung von stationärer Lösung im unterkritischen Bereich in instationäre Lösung im transkritischen Bereich), ein flaches Plateau im transkritischen Bereich und eine Abnahme nach dem Übergang von trans- zu überkritischer Geschwindigkeit (Verzweigung von instationärer Lösung im transkritischen Bereich in stationäre Lösung im überkritischen Bereich) gekennzeichnet. Die Oszillation der Wellenwiderstände im transkritischen Geschwindigkeitsbereich wurde durch die schneller als das Schiff fortlaufenden Solitonwellen verursacht.

In Abb. 5 wurden die gemessenen spezifischen Gesamtwiderstände den berechneten gegenübergestellt. Die Umrechnung vom Modell auf die Großausführung erfolgt nach der Standard-Hughes-Prohaska-Methode. Dabei wird der Formfaktor aus den gemessenen Widerständen bei niedrigen Geschwindigkeiten identifiziert und als konstant im ganzen untersuchten Geschwindigkeitsbereich angenommen. Der Reibungsbeiwert wird nach der ITTC-1957-Formel berechnet. Die benetzte Schiffs-oberfläche wurde bei der Umrechnung ebenfalls konstant belassen. Die allgemeine Beobachtung bei diesem Vergleich ist zuerst die gute Übereinstimmung für die Mittelwerte im transkritischen Bereich und im unterkritischen Bereich sowie für die Oszillationsamplitude in der Nähe der kritischen Geschwindigkeit. Im überkritischen Bereich fehlen die Versuchsergebnisse. Wenig zufriedenstellend ist dagegen der Vergleich in den Übergangsbereichen, insbesondere beim Übergang von trans- zu überkritischer Geschwindigkeit. Ursachen hierfür könnten

zum einen die für den asymptotischen Zustand der Wellenbildung unzureichende Tanklänge bei Messungen und zum anderen die Empfindlichkeit der numerischen Lösungen gegen das Zeitintervall in der Nähe der Übergangspunkte sein. Der Ausreißer im gemessenen Mittelwert bei der Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.3$ ist ein Hinweis darauf, denn der entsprechende Zeitverlauf zeigte, daß der asymptotische Zustand bis zum Ende der Messung noch nicht ganz erreicht wurde.

Wellenbilder

Drei repräsentative Wellenbilder für das Fahrgastschiff im unter-, trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich sind in Abb. 6 zusammengefaßt. Bei der unterkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.8$ im Bild (a) ist das stationäre Wellensystem einem linearen Havelock-Wellenbild ähnlich. Bei der kritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.0$ im Bild (b) ist das Wellensystem relativ zum Schiff durch die in Fahrtrichtung vor dem Schiff fortlaufenden Solitons instationär. Durch die überhöhte lokale Strömungsgeschwindigkeit ungefähr ab Hauptspantebene ist ein ausgeprägtes divergentes Wellensystem hinter dem Schiff zu beobachten. Das Wellenbild weit hinter dem Schiff ist durch die transversalen Wellen bestimmt. Bei der überkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.3$ im Bild (c) besteht das Wellensystem aus rein divergenten, stationären Wellen, die sich innerhalb eines Winkels von $\pm \arcsin F_{nh}^{-1}$ ausbreiten. Dieser Winkel entspricht dem Mach-Winkel einer Überschallströmung in der Gasdynamik.

Wellenprofile

Zur Validierung der berechneten Wellenbilder wurden Wellenerhebungen an den im VBD-Schlepptank ortsfest installierten Wellensonden gemessen. Aus diesen Zeitschriften entstanden dann die zugehörigen Wellenprofile relativ zum Schiff. Wegen des instationären Verhaltens der Wellenbilder relativ zum Schiff im transkritischen Geschwindigkeitsbereich entsprechen die momentanen Längsschnitte nicht diesen Wellenprofilen. Hier wurden die relativen Koordinaten der Wellensonden zum Schiff durch $x_{WG} = x_{WG}(n_M \Delta t) - (n - n_M) \Delta t V$ simuliert, wobei $n_M \Delta t$ dem Meßbeginn an den Wellen-

sonden entspricht. Allerdings konnte wegen der unterschiedlichen Beschleunigung der im Versuch protokollierte Anfang $n_M \Delta t$ für die numerischen Berechnungen nicht benutzt werden. Stattdessen wurde ein markantes Ereignis, z.B. der Zeitpunkt beim Erreichen der Solitonspitze an den Wellensonden, zur Rekonstruktion der entsprechenden Zeit-Raum-Transformation benutzt. Wegen der starken Spiegeltauchung wurden bei den Berechnungen nach der Schlank-Körper-Theorie nur die klassische Formulierung in Gleichung (28) herangezogen.

In Abb. 7, 8 und 9 sind Wellenprofile für das Fahrgastschiff jeweils bei der Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.873, 1.0, \text{ und } 1.3$ zusammengefaßt. Im allgemeinen ist es festzustellen, daß die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wellenprofilen mehr als zufriedenstellend ist. Die bemerkenswerte Übereinstimmung im Schiffsbereich und vor dem Schiff zeigt die Güte der beiden Rechenverfahren zur Approximation des Wellenwiderstands und der Solitonwellen. Die in den vorliegenden Rechenverfahren noch nicht berücksichtigte dynamische Eintauchung des Spiegelhecks verursacht vermutlich die deutliche Diskrepanz unmittelbar hinter dem Heck und weit hinter dem Schiff. Die erfolgreiche Implementierung der Randbedingungen an der Tankwand wurde durch die sehr gute Übereinstimmung der reflektierten Wellen in den Wellenprofilen an $y = 35$ und 45 m in Abb. 7 bestätigt. Der Vorteil der Druckapproximation gegenüber der Schlank-Körper-Theorie ist besonders bei der überkritischen Geschwindigkeit in Abb. 9 erkennbar.

In Abb. 10 und 11 sind Wellenprofile für das Feuerlöschboot jeweils bei der Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.993$ und 2.227 zusammengestellt. Auch für das Feuerlöschboot ist die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wellenprofilen zufriedenstellend. Allerdings macht die Diskrepanz hinter dem Heck wegen der starken Spiegeltauchung des Feuerlöschboots noch bemerkbar. Auch für das Feuerlöschboot ist der Vorteil der Druckapproximation gegenüber der Schlank-Körper-Theorie bei der überkritischen Geschwindigkeit in Abb. 11 gut erkennbar, und zwar sowohl in der Amplitude als auch in der Phasenlage.

Schlußfolgerungen

Ein implizites Finit-Differenz-Verfahren nach dem Crank-Nicholson-Schema wurde erfolgreich zur Lösung der Flachwassergleichungen vom Boussinesq-Typ im unter-, trans- und überkritischen Geschwindigkeitsbereich implementiert. Die Schiffswirkung auf das unmittelbar umgebende Wasser wurde zum einen durch die Schlank-Körper-Theorie und zum anderen durch eine dem lokalen Tiefgang proportionale Druckverteilung approximiert. Es wurde eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Modellmessungen und Berechnungen sowohl für den Wellenwiderstand als auch für die Wellenprofile erzielt. Im Vergleich zur Schlank-Körper-Theorie lieferte die Druckapproximation für die untersuchten flachen Binnenschiffe gleich gute Ergebnisse im transkritischen Bereich und bessere Ergebnisse im überkritischen Bereich.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herren Dipl.-Ing. H. Nguyen Duc und cand. arch. nav. R. Henn für die Unterstützung bei der Computerprogrammierung sowie bei Herrn Dipl.-Ing. N. Stuntz für die Auswertung der Modellversuche in der VBD. Für die angenehme Zusammenarbeit mit der VBD bei der Durchführung der Modellversuche sind sie auch dankbar.

Schrifttum

- Chen, X.-N. and Sharma, S.D., "A Slender Ship Moving at a Near-critical Speed in a Shallow Channel," *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, Vol. 291, pp. 263-285.
- Choi, H.S. and Mei, C.C., "Wave Resistance and Squat of a Slender Ship Moving Near the Critical Speed in Restricted Water," *Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, 1989, pp. 439-454.
- Dingemans, M.W., "Water Wave Propagation over Uneven Bottoms," *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 13, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1997.
- Graff, W., Kracht, A. and Weinblum, G., "Some Extensions of D.W. Taylor's Standard Series," *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 72, 1964,

pp. 374-401.

Helm, K., "Effects of Channel Depth and Width on Ship Resistance (in German)," *Hydrodynamische Probleme des Schiffsantriebs*, Part 2, ed. G. Kempf, Verlag Oldenburg, Munich and Berlin, 1940, pp. 144-171.

Jiang, T., "Simulation of Shallow Water Waves Generated by Ships Using Boussinesq Equations Solved by a Flux-Difference-Splitting Method," *Proceedings of the 11th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Hamburg, 1996.

Jiang, T., "Investigation of Waves Generated by Ships in Shallow Water," *Proceedings of the 22th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington, DC, 1998.

Jiang, T., Sharma, S.D., and Chen, X.-N. 1995, "On the Wavemaking, Resistance and Squat of a Catamaran Moving at High Speed in a Shallow Water Channel," *Proceedings of the 3rd International Conference on Fast Sea Transportation FAST'95*, Lübeck, Travemünde, 1995, pp. 1313-1325.

Mei, C.C., "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves," *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 1, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1989.

Mei, C.C. and Choi, H.S., "Forces on a Slender Ship Advancing near Critical Speed in a Wide Canal," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 179, 1987, pp. 59-76.

Madsen, O.S. and Mei, C.C., "The Transformation of a Solitary Wave over an Uneven Bottom," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 39, 1969, pp. 781-791.

Madsen, P.A., Murray, R., and Sørensen, O.R., "A New Form of the Boussinesq Equations

with Improved Linear Dispersion Characteristics, Part 1," *Coastal Engineering*, Vol. 15, 1991, pp. 371-388.

Nwogu, O., "Alternative Form of Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation," *Journal of Waterway, Port, Coastal Engineering*, Vol. 119, No. 6, 1993, pp. 618-638.

Pedersen, G., "Three-Dimensional Wave Patterns Generated by Moving Disturbances at Transcritical Speeds," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 196, 1988, pp. 39-63.

Schröter, A., "Nichtlineare Zeitdiskrete Seegangssimulation im Flach- und Tieferen Wasser (in German)," *Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover*, Report No. 42, 1995.

Tuck, E.O., "Shallow Water Flows Past Slender Bodies," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 26, 1966, pp. 81-95.

Thews, J.G. and Landweber, L. 1935, "The Influence of Shallow Water on the Resistance of a Cruiser Model," *US Experimental Model Basin*, Navy Yard, Washington, DC, Report No. 408.

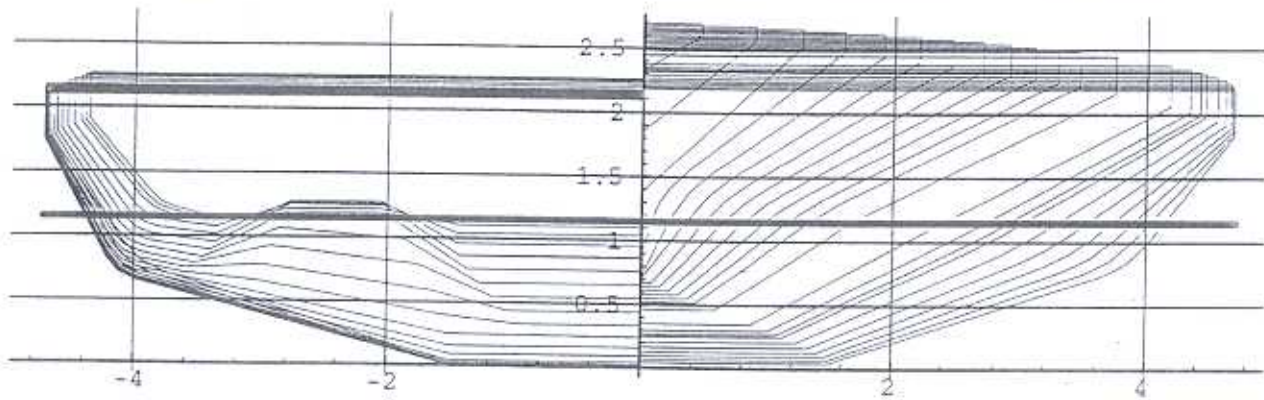
Wehausen, J.V. and Laitone, E.V., "Surface Waves," *Handbuch der Physik*, Springer, Vol. 9, 1960.

Witting, J.M., "A Unified Model for the Evolution of Nonlinear Water Waves," *Journal of Computational Physics*, Vol. 56, 1984, pp. 203-236.

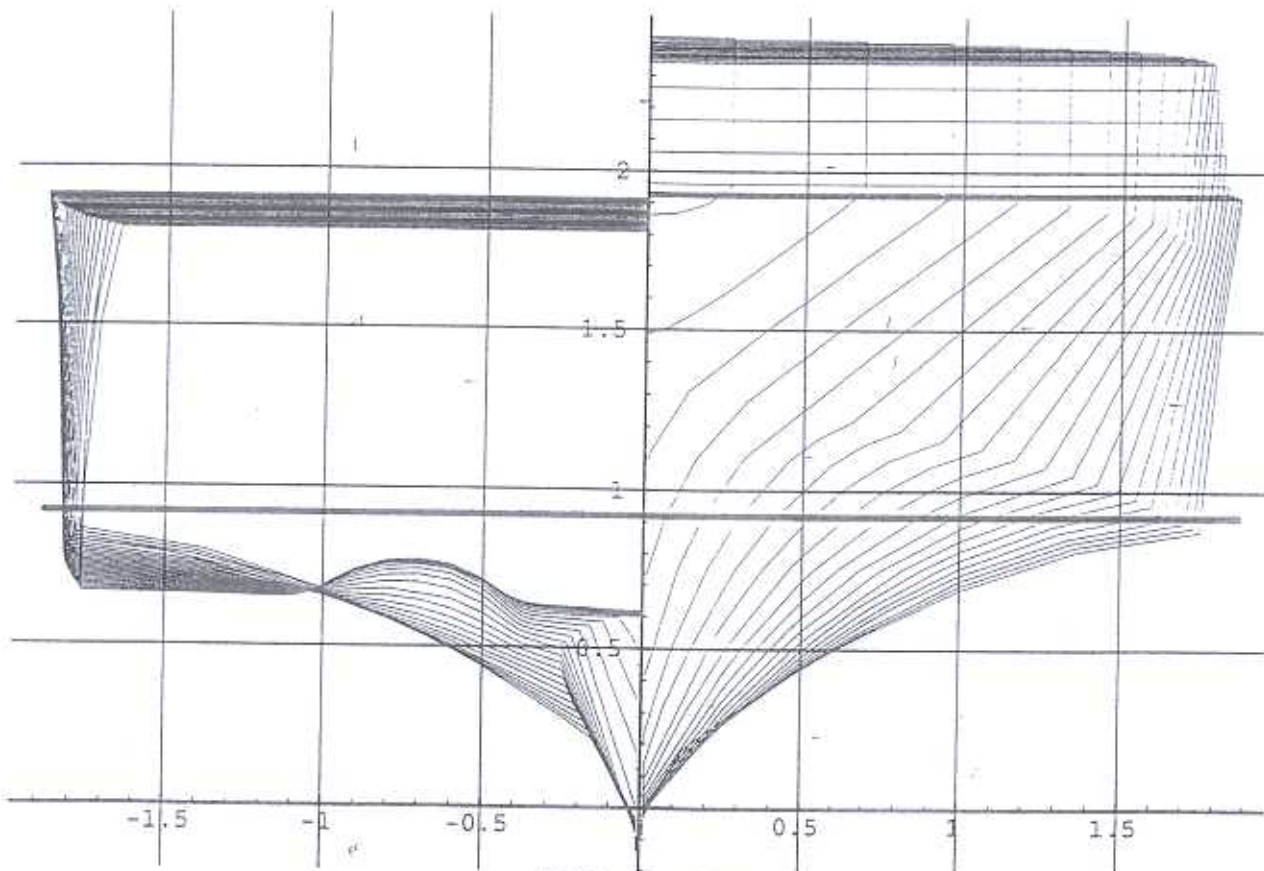
Wu, D.-M., and Wu, T.Y., "Three-Dimensional Nonlinear Long Waves Due to Moving Surface Pressure," *Proceedings of the 14th Symposium on the Naval Hydrodynamics*, Ann Arbor, 1982, pp. 103-129.

Tabelle 1: Hauptdaten der untersuchten Beispielschiffe

Beispielschiff		Fahrgastschiff	Feuerlöschboot
VBD-Modell-Nr.		M 1565	M 1568
Modellmaßstab		1:10	1:6
Länge an der Konstruktionswasserlinie	[m]	39.29	13.04
Breite an der Konstruktionswasserlinie	[m]	8.84	3.65
Tiefgang an der Konstruktionswasserlinie	[m]	1.20	0.935
Verdrängung	[m ³]	186.64	12.86
Schwerpunktslage	[m]	-1.68	-1.65
Hauptspantfläche	[m ²]	8.09	1.16
Benetzte Oberfläche	[m ²]	282.00	52.27



(a) Fahrgastschiff



(b) Feuerlöschboot

Abb. 3 Spantenrisse der Beispielschiffe

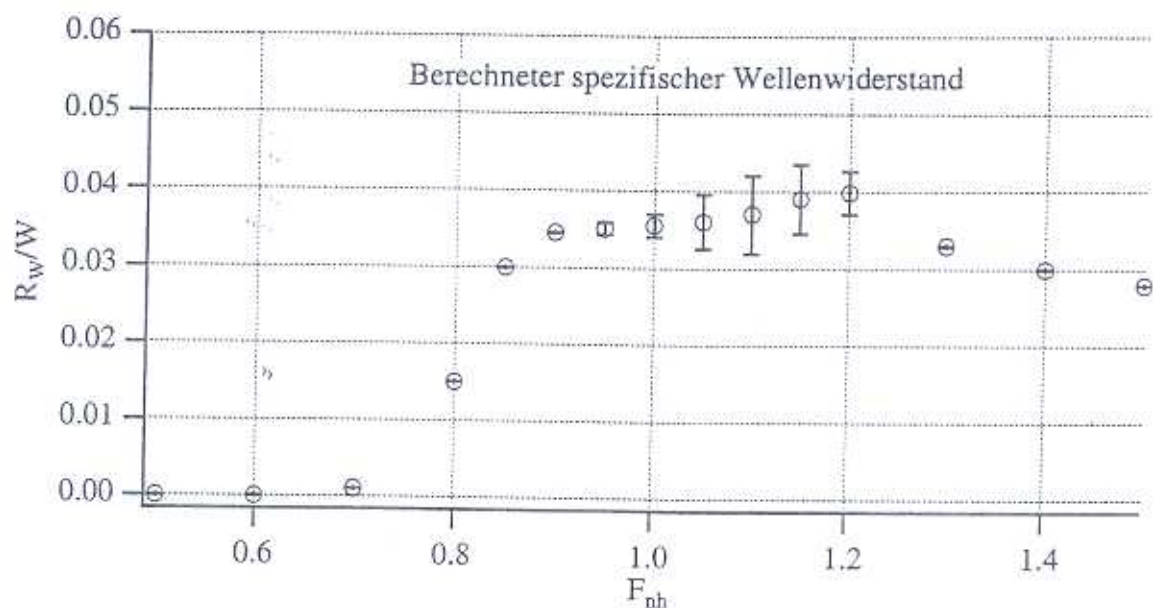


Abb. 4 Berechnete Wellenwiderstände für das untersuchte Fahrgastschiff im Flachwasserkanal der Tiefe $h_0 = 0.0637L$ und Breite $w = 2.5L$

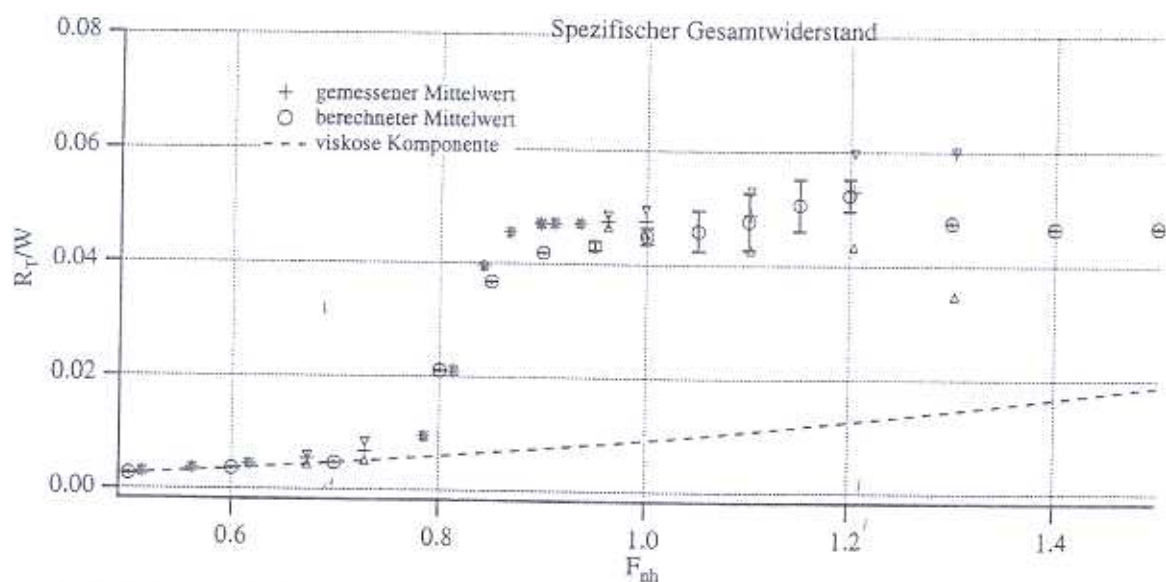
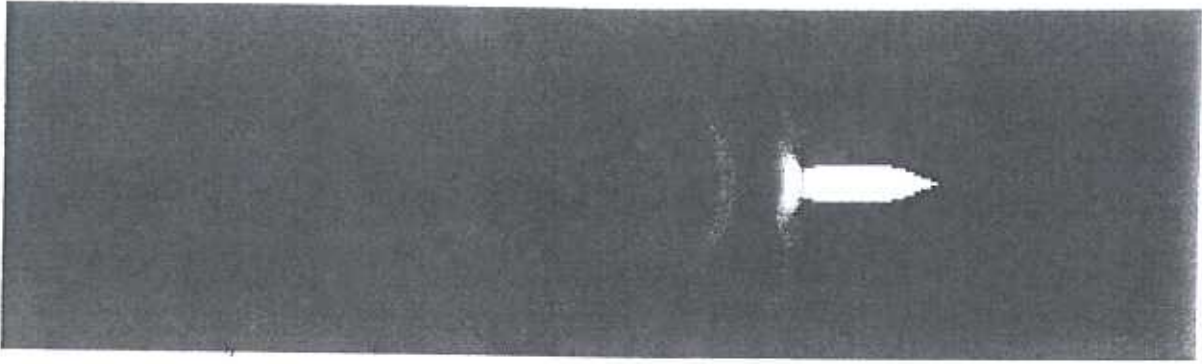
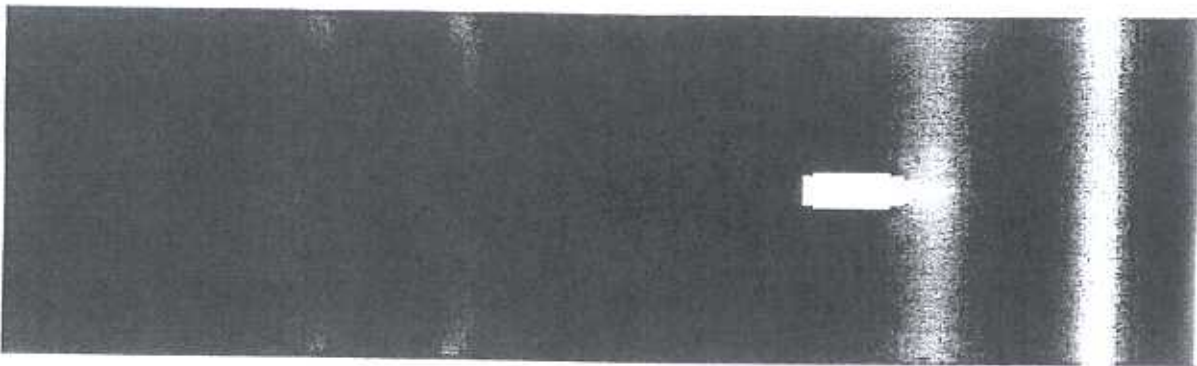


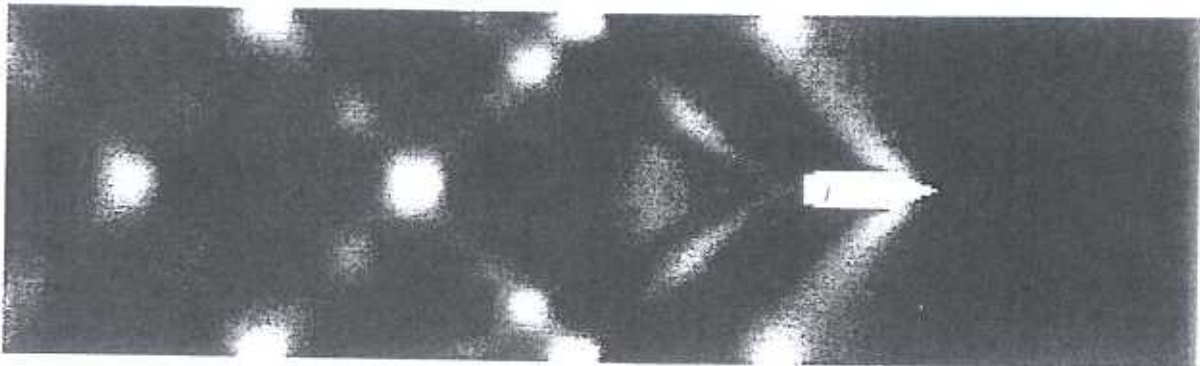
Abb. 5 Vergleich der Gesamtwiderstände aus den Berechnungen nach der Druckapproximation und Modellversuchen für die Großausführung des untersuchten Fahrgastschiffs im Flachwasserkanal der Tiefe $h_0 = 0.0637L$ und Breite $w = 2.5L$



(a) $F_{nh} = 0.8$



(b) $F_{nh} = 1.0$



(c) $F_{nh} = 1.3$

Abb. 6 Berechnete Wellenbilder des untersuchten Fahrgastschiffes bei unter-, trans- und überkritischer Geschwindigkeit im Flachwasserkanal der Tiefe $h_0 = 0.0637L$ und Breite $w = 2.5L$

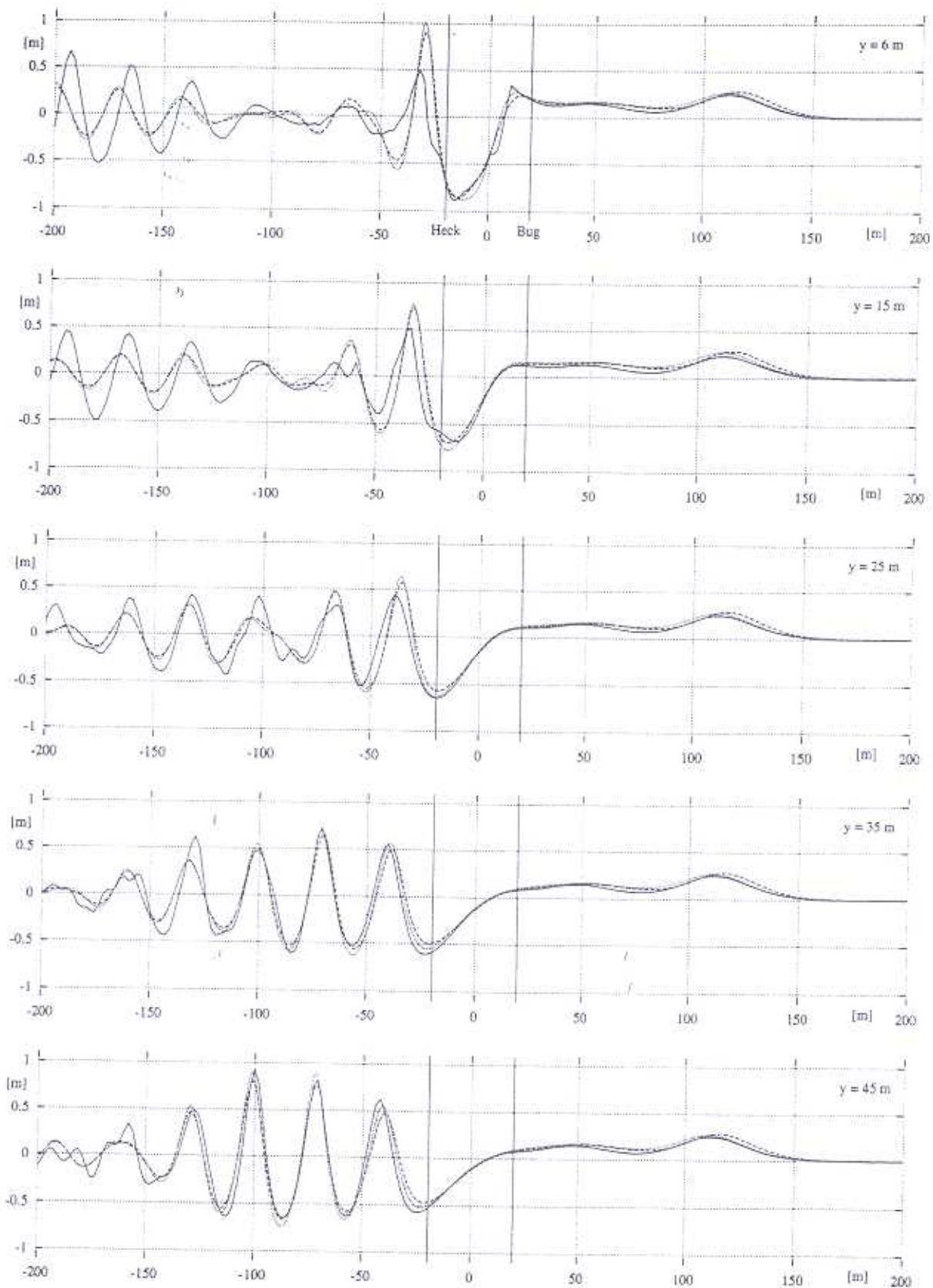


Abb. 7 Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Fahrgastschiff bei einer unterkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.873$ für die Wassertiefe 5 m (— gemessen; --- berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation)

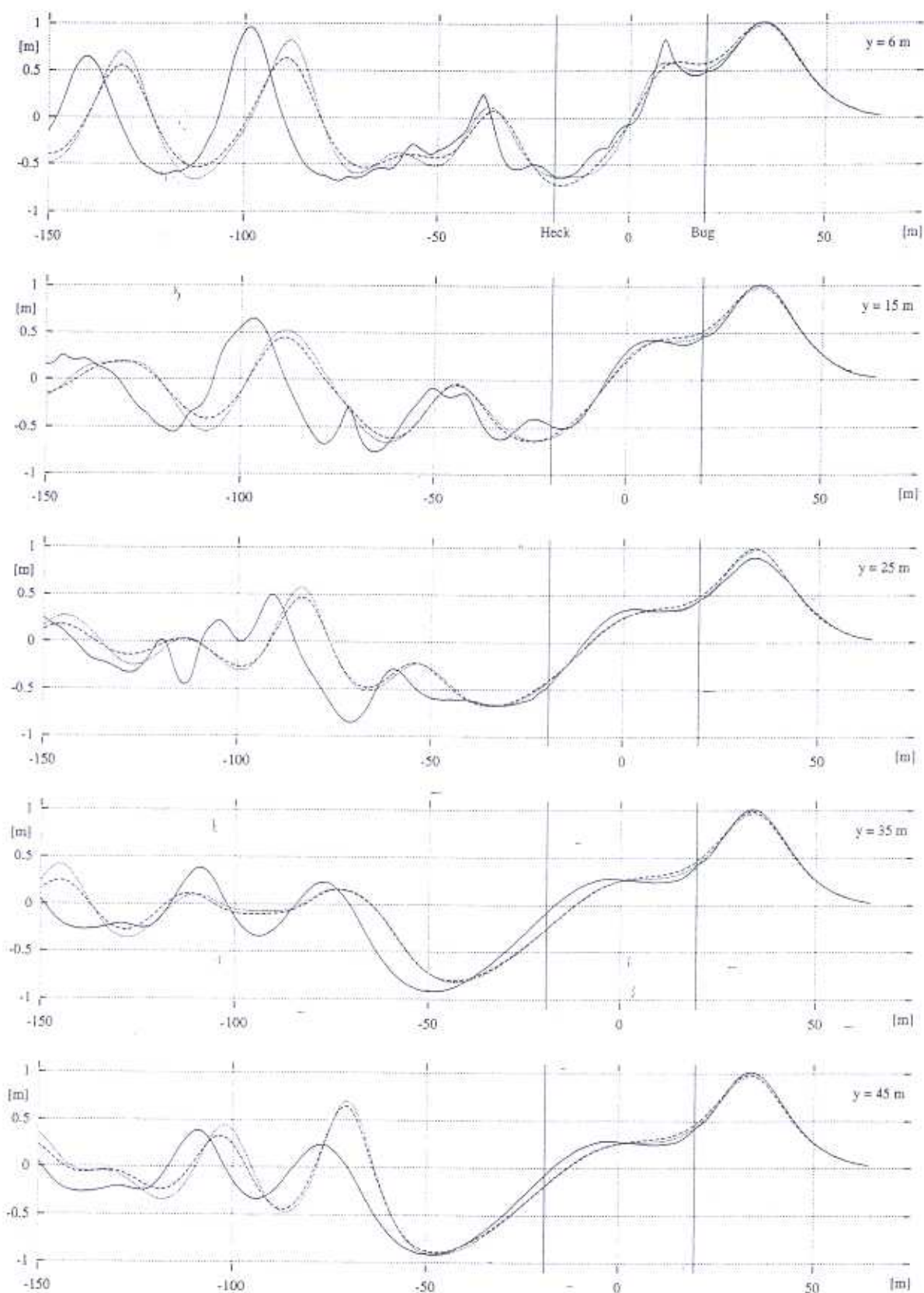


Abb. 8 Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Fahrgastschiff bei der kritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.0$ für die Wassertiefe 5 m (— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; ····· berechnet nach der Druckapproximation)

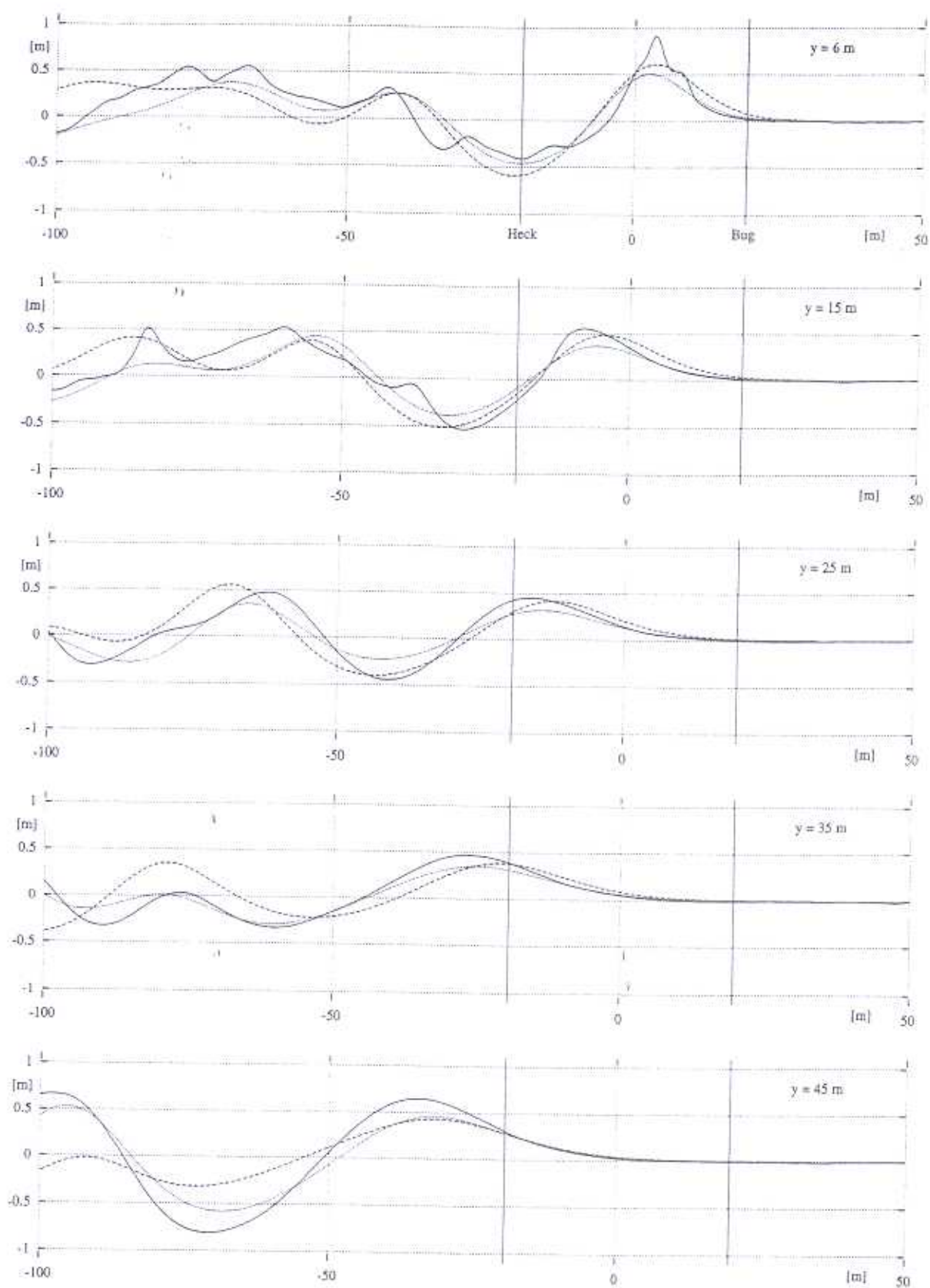


Abb. 9 Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Fahrgastschiff bei einer überkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 1.3$ für die Wassertiefe 5 m (— gemessen; --- berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation)

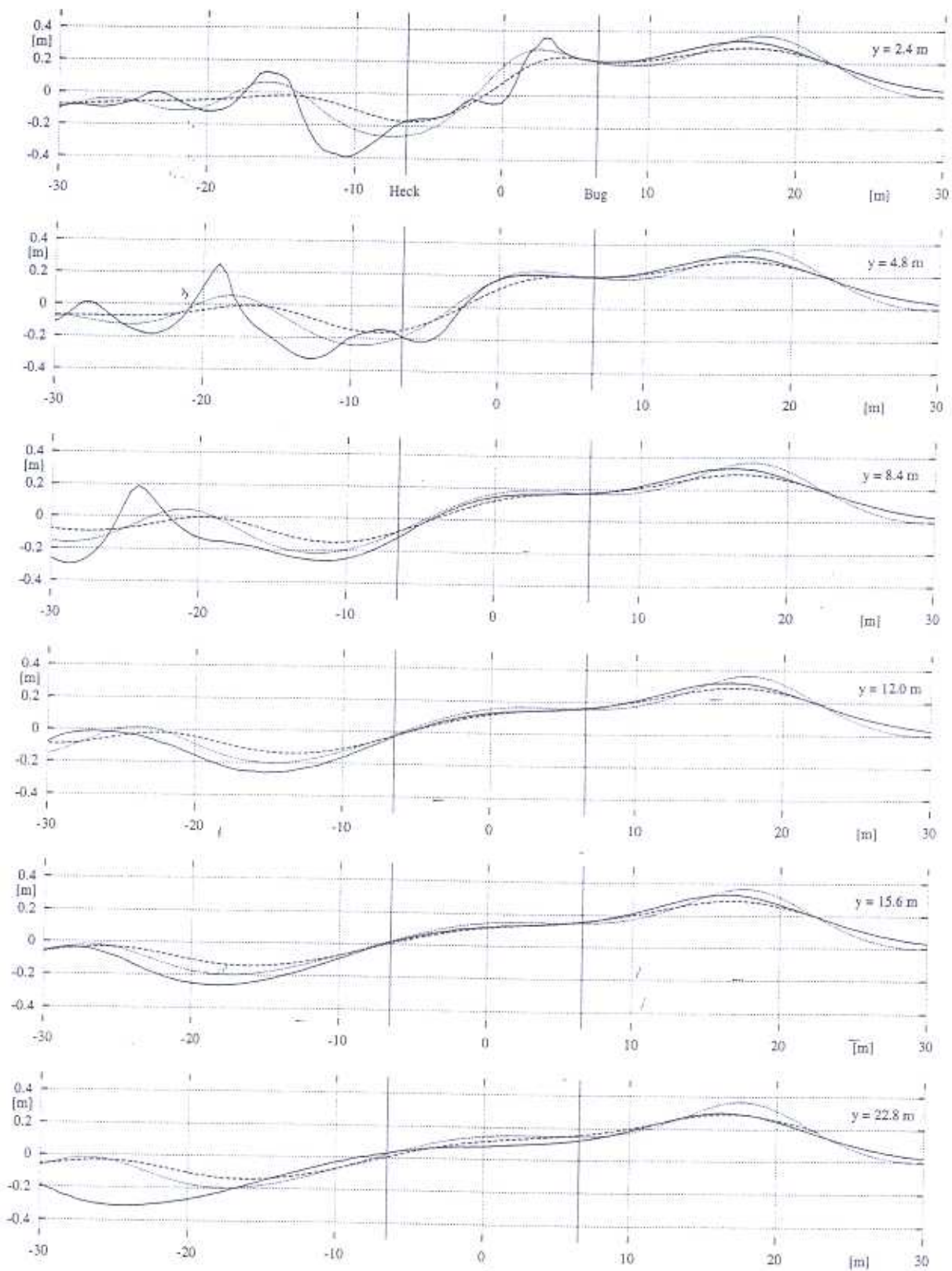


Abb. 10 Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Feuerlöschboot bei der kritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 0.993$ für die Wassertiefe 2.5 m
 (— gemessen; - - - berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation)

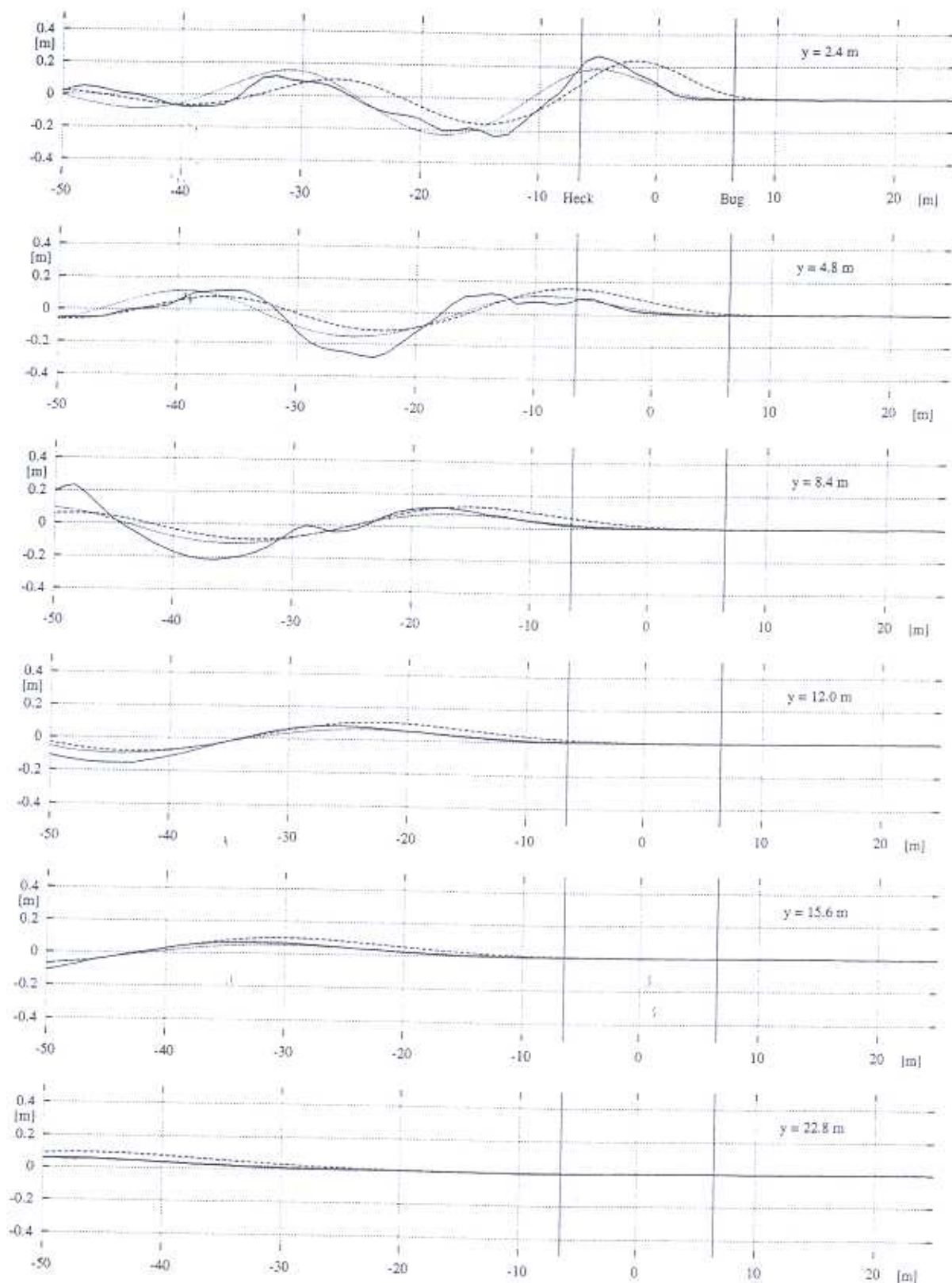


Abb. 11 Vergleich der Wellenprofile aus Berechnungen und Modellmessungen für das Feuerlöschboot bei der überkritischen Geschwindigkeit $F_{nh} = 2.227$ für die Wassertiefe von 2.5 m (— gemessen; --- berechnet nach der Schlank-Körper-Theorie; berechnet nach der Druckapproximation)

