

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

**Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur Übertragung des
Stoppmanövers in Stillwasser auf den Fall
"Stoppen zu Tal"**

**Bericht 1594
Januar 2001**

von

Dr.-Ing. Walter Grollius

Projektleiter: Dipl.-Ing. Joachim Zöllner

Direktor:

Prof. Dr. P. Engelkamp

**Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
,Otto von Guericke' e.V., Köln**

**Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur Übertragung des
Stoppmanövers in Stillwasser auf den Fall "Stoppen zu Tal"**


Duisburg, 31. Januar 2001
Dr.Grs/ti

Fachbereich Forschung


Der Bearbeiter:


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

Der Fachbereichsleiter:


.....
(Dipl.-Ing. J. Zöllner)

VBD – Europäisches Entwicklungszentrum
für Binnen- und Küstenschifffahrt


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

Dieses Vorhaben wurde in dankenswerter Weise von der Arbeitsgemeinschaft der industriellen Forschungsvereinigungen (AiF) mit Mitteln des BMWi gefördert.

Kurzfassung

Laut Rheinschiffsuntersuchungsordnung ist im Rahmen der behördlichen Abnahmeuntersuchung eines Schiffsneubaus eine ausreichende Stoppfähigkeit auf der Gefällestrecke in der Talfahrt nachzuweisen.

Das Ziel der Untersuchung war, die modelltechnischen Methoden und Umrechnungsverfahren zur Ermittlung des Stoppweges auf der Gefällestrecke zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern.

Insbesondere sollte festgestellt werden, ob eine sichere Übertragung des Stillwasseranmanövers auf das Manöver in Strömung möglich ist und welche Korrekturen notwendig sind, um den Basisansatz der kinematischen Transformation zu verbessern.

Untersucht wurden im einzelnen:

- 1.) der Gefälleeffekt (Gewichtskomponente in Verbindung mit dem zähigkeitsbedingten Widerstand aus scherender Grundströmung)
- 2.) die Veränderung des Wellenwiderstands bei scherender Grundströmung nach Kolberg
- 3.) die Auswirkungen des Reibungsabzugs auf den Stoppweg (aus unvollständiger Ähnlichkeit des Modellversuchs).

Es konnte theoretisch und experimentell gezeigt werden, daß sich die Einzelkomponenten des Gefälleeffekts gegenseitig aufheben. Weiterhin kann der zusätzliche Wellenwiderstand bei unterkritisch fahrenden Frachtschiffen bei Geschwindigkeiten bis $F_{nh} = 0,6 \div 0,7$ vernachlässigt werden.

Mit diesen Ergebnissen reduziert sich die Übertragung des Stillwasseranmanövers auf die kinematische Transformation, wobei die Identifikation der effektiven Strömungsgeschwindigkeit das wesentliche Problem darstellt.

Hierzu werden verschiedene Methoden zur Ermittlung vorgeschlagen.

Der Einfluß des Reibungsabzugs wird in den Ergebnissen gezeigt. Er wirkt sich stoppwegvergrößernd aus und besitzt eine nicht vernachlässigbare Größenordnung. Für eine quantitative Überprüfung müssen jedoch Großversuche durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das angestrebte Untersuchungsziel der vorliegenden Untersuchung in vollem Maße erreicht wurde.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Stand der Erkenntnisse
3. Zielsetzung
4. Theoretische Grundlagen, Definitionen
 - 4.1 Koordinatensysteme, Definitionsgrößen
 - 4.2 Gefälleströmung
 - 4.2.1 Natürliches Gefälle
 - 4.2.2 Wehrströmung
 - 4.3 Gefälleeffekt
 - 4.4 Einfluß der Grundströmung auf den Wellenwiderstand
 - 4.5 Ansatz zur Übertragung des Stillwassermanövers auf den Strömungsfall
 - 4.6 Reibungsabzug
5. Modelle, Randbedingungen und Versuche
6. Ergebnisse
7. Symbolverzeichnis
8. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Die für alle Rheinanliegerstaaten gültige Rheinschiffsuntersuchungsordnung [1] schreibt für Neubauten den Nachweis ausreichender Fahr- und Manövriereigenschaften vor. § 5.07 besagt bezüglich der Stoppfähigkeit, daß Fahrzeuge und Verbände über 86,0 m Länge in der Lage sein müssen, rechtzeitig Bug zu Tal anzuhalten und dabei ausreichend manövrierfähig zu bleiben.

In der Richtlinie Nr. 2 für die Untersuchungskommissionen [2] werden die Mindestanforderungen für die Stoppeigenschaften quantifiziert. Im Rahmen der künftigen EU-Vereinbarungen soll diese Regelung auch für alle anderen Mitgliedsländer Anwendung finden. Vom heutigen Standpunkt aus werden Anpassungen und Ergänzungen der bisherigen Empfehlungen als notwendig angesehen.

Diese Darstellung unterstreicht die Bedeutung, die - sicherlich zu Recht - dem Stoppmanöver auf strömenden Gewässern von behördlicher Seite beigemessen wird, denn die Gefahr, die von Schiffskollisionen insbesondere bei Gefahrguttransporten ausgeht, stellt wegen der Größe der beteiligten Massen eine erhebliche Bedrohung für das beteiligte Umfeld dar.

Aufgrund der gesetzlichen Auflagen werden im Binnenschiffsversuchswesen im Rahmen von Modellversuchen zu Neubauprojekten neben Widerstands- und Propulsionsmessungen auch regelmäßig Untersuchungen der Stoppfähigkeit durchgeführt. Obwohl in den Versuchsanlagen der VBD (Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg) Messungen auf strömendem Wasser prinzipiell möglich sind, werden projektgebundene Stoppversuche in der Regel in Stillwasser ausgeführt, weil der Betrieb der Strömungsanlage mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Die Übertragung der Stillwasserergebnisse auf den Strömungsfall erfolgt dann rechnerisch nach einfachen kinematischen Regeln, wie sie allgemein bekannt sind. Obwohl sich nach dieser Methode die Stoppfähigkeit eines projektierten Binnenschiffes in gewissen Grenzen recht gut abschätzen läßt, reicht sie für eine sichere Beurteilung nicht aus. Insbesondere für die geplante Überarbeitung der Abnahmebedingungen auf EU-Basis erscheint es notwendig, die physikalischen Einflüsse der Strömung auf den Stoppvorgang eingehender zu untersuchen, um die Umrechnung von Modellversuchsergebnissen zielsicherer und objektiver durchführen zu können.

Das vorliegende Untersuchungsvorhaben verfolgt diesen Gedanken mit der Absicht, bekannte Strömungseinflüsse, wie die Effekte der scherenden Grundströmung, des Gefälles und des Reibungsabzugs, d.h. des im Modellversuch zwangsläufig vernachlässigten Zähigkeitseinflusses, auf den Stoppvorgang quantitativ zu erfassen. Das daraus abzuleitende Korrekturverfahren stellt dann bezogen auf das Manöver eine Qualitätsverbesserung der Modelltechnik dar und hebt die Übertragung der Ergebnisse auf eine Stufe, wie sie bei Propulsions- und Widerstandsmessungen bereits Stand der Technik ist.

2. Stand der Erkenntnisse

Wegen der besonderen Bedeutung des Stoppmanövers für die Rheinschifffahrt wurde der Vorgang des Stoppens seit Anfang der 70er Jahre in der VBD in zahlreichen Forschungsvorhaben systematisch untersucht, wobei der Schwerpunkt auf das quasistationäre Bewegungsmodell gelegt wurde ([3], [4], [6]). In diesem halbempirischen Berechnungsmodell werden die ursächlichen Kräfte in der Form eines Taylorschen Ansatzes als Funktion der Geschwindigkeit und ihrer höheren Ableitungen nach der Zeit aufgefaßt. Dieses Verfahren liefert für mäßig beschleunigte Bewegungen, wie sie bei kommerziellen Binnenfrachtschiffen auftreten, bezüglich Geschwindigkeits- und Wegverlauf recht genaue Ergebnisse. Grundlage ist eine stationäre 4-Quadrantenmessung der aktiven Beschleunigungskräfte als Funktion von Geschwindigkeit und Propellerdrehzahl. Die Vorzüge des Verfahrens bestehen darin, daß die Manöverrandbedingungen wie die Anfangsgeschwindigkeit und die - dem natürlichen Vorgang folgend - konstant anzusetzende negative Propellerdrehzahl frei gewählt werden können. Ein gewisser Nachteil ist, daß die sog. hydrodynamische Masse, die sich als Funktion der Geschwindigkeit darstellt, aus ergänzenden freien Stoppmanövern auf der Basis statistischer Verfahren bestimmt werden muß [4].

Eine Reihe weiterer abgeschlossener Untersuchungen beinhaltet die Darstellung von Kenngrößen für Stoppmanöver, womit es möglich ist, die Stoppeigenschaften eines projektierten Schiffes im Vergleich mit anderen Fahrzeugen zu bewerten ([5], [6], [7]) (statistischer Vergleich). Es sollte darauf hingewiesen werden, daß die Grundlagen dieser Darstellung auf dem vorher beschriebenen quasistationären Modell beruhen.

Eine rein theoretische Arbeit [8] beinhaltet die Berechnung des instationären Widerstandes analytischer Schiffsförmungen bei konstant beschleunigter Bewegung, die Versuchsergebnissen gegenübergestellt wird. Aus dieser Darstellung wird erkennbar, daß instationäre Vorgänge der beschriebenen Art selbst unter einfachsten Randbedingungen nur mit großem mathematisch-numerischem Aufwand erfolgreich behandelt werden können. Dies verdeutlicht, daß instationäre Modellversuche wie das Stoppmanöver auch in absehbarer Zukunft ihren angestammten Platz im Versuchswesen behalten werden.

Weitere Arbeiten beschäftigen sich u.a. mit den Grundlagen des Manövers in Verbindung mit der in Abschn. 1 erwähnten Richtlinie Nr.2 zum Nachweis der Stoppfähigkeit ([9], [10]).

3. Zielsetzung

Prinzipiell bestand die Absicht, von der Grundlage der bekannten kinematischen Geschwindigkeitstransformation, wie sie bisher bei der Übertragung des Stillwassermanövers auf den Strömungsfall verwendet wird, auszugehen und durch strömungsinduzierte Kraftwirkungen -soweit bekannt - in der Form von Impulsintegralen zu ergänzen.

Dieses Verfahren kann im erweiterten Sinne auch auf Korrekturen angewendet werden, die sich aus der unvollständigen Ähnlichkeit des Modellversuchs ableiten.

Zur ersten Gruppe gehören

1) der Gefälleeffekt

Er resultiert aus der Gefällekraft (schiefe Ebene) in Verbindung mit dem Einfluß der scherenden Grundströmung auf den Zähigkeitswiderstand

2) der Kollberg-Effekt [11]

Hierbei handelt es sich um die Auswirkungen der scherenden Grundströmung auf den Wellenwiderstand.

Zur zweiten Gruppe gehört der Reibungsabzug, der die unterschiedliche Zähigkeitswirkung auf den Reibungswiderstand von Modell und Großausführung beschreibt.

Die dargestellten Kraftwirkungen basieren - soweit sie sich formelmäßig darstellen lassen - ausschließlich auf stationären Bewegungsvorgängen. Eine Anwendung auf das vorliegende instationäre Problem erscheint jedoch insofern statthaft, weil es sich um einen relativ langsam veränderliche Vorgang handelt und die Korrekturgrößen relativ klein sind.

Um die Auswirkungen der Korrekturmaßnahmen prüfen zu können, waren außer den umzurechnenden Stillwassermanövern auch Manöver in Strömung vorgesehen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß die vorgesehene Reibungskorrektur nur gezeigt wird, um ihre Wirkung größenordnungsmäßig zu demonstrieren. Zur quantitativen Überprüfung sind vergleichende Großversuche erforderlich.

Ergänzend wurden Aufmessungen der Strömung sowie Propulsions- und Widerstandsversuche vorgesehen. Die beiden ersten Versuchsarten dienen u.a. zur Identifikation der sog. effektiven oder wirksamen Strömungsgeschwindigkeit, die bei der Übertragung der Stillwassermanöver eine zentrale Rolle spielt, die letzte dient als Grundlage zur Darstellung des Kolberg-Effektes.

4. Theoretische Grundlagen, Definitionen

4.1 Koordinatensysteme, Definitionsgrößen

Es werden zwei mathematisch positiv orientierte Koordinatensysteme verwendet, die beide mit der Geometrie des Schlepptanks und mit der verwendeten Versuchsanordnung in Zusammenhang stehen.

Das x_S - y_S - z_S -System ist Schleppwagen-orientiert. Sein Ursprung liegt fixiert am Tankanfang, die x_S -Achse weist in Richtung Tankende, die z_S -Achse nach oben. Die x_S -Koordinate beschreibt den Wagenweg.

Das x - y - z -System ist Manöver-orientiert. Sein Ursprung ist nicht ortsfest und liegt im Bereich des Anfangs der Strömungstrecke nahe dem Tankende. Die x -Achse weist mit der Strömung in Richtung des Tankanfangs, die z -Achse ebenfalls nach oben. Die x -Koordinate beschreibt den Weg, den das Modell während des Stoppmanövers zurücklegt. Der Nullpunkt kennzeichnet die Einleitung des Stoppmanövers durch Hochfahren des negativ drehenden Propellers aus dem Stand, wobei gleichzeitig das mit der Geschwindigkeit V_A angeschleppte Modell freigegeben wird.

Beide Koordinatensysteme sind durch folgende Beziehungen ineinander zu überführen:

$$\begin{aligned} x &= x_S - x_{S0} \\ y &= -y_S \\ z &= z_S \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

Darin stellt x_{S0} den Startpunkt des Stoppmanövers im ortsfesten x_S - y_S - z_S -Koordinatensystem dar.

Strömungsgeschwindigkeit

Aus dem zugrunde gelegten Profil der scherenden Grundströmung in der Fahrspur des Schiffes leiten sich folgende Definitionen ab:

V_{Str_m} = mittlere Strömungsgeschwindigkeit auf $z = h/2$, vergleichbar mit den Angaben der Wasser- und Schifffahrtsämter zur Durchflußmengenbestimmung in einem Flußquerschnitt

V_{Str_e} = Strömungsgeschwindigkeit in Höhe der Wirkungslinie der auf den Schiffskörper wirkenden Kraftresultierenden, für angetriebenes Schiff auf Mitte Propellerwelle angenommen

V_{Str_h} = theoretisch mögliche maximale Strömungsgeschwindigkeit bei $z = h$ (Verlängerung der gemittelten Profilkontur)

und außerhalb der Fahrspur

V_{Str_Ziel} = Zielvorgabe der Strömungseinstellung im Versuch, gemessen bei $z = 0,8 h$, $y = 1,4 B$ (zu Reproduktionszwecken)

4.2 Gefälleströmung

4.2.1 Natürliches Gefälle

Gegeben sei ein Kanal mit unveränderlichem Querschnitt und geneigtem Boden. Die Wände sollen eine natürliche Rauigkeit aufweisen. Entsprechend Anl. 1, Abb. a stellt sich die Neigung oder das Gefälle darstellen als

$$\tan \mathbf{a} = \frac{Dh}{Dx} \quad [-] \quad (4.2.1.1)$$

oder in Form der Gefällezahl

$$i = \frac{\tan \mathbf{a}}{1000} \quad [\text{‰}] \quad (4.2.1.2)$$

Betrachtet werden soll ein Längsschnitt-Element mit der Länge Dx , der Höhe h und der Breite 1. Wird der Kanal von Wasser durchströmt, folgt aus der Bernoulligleichung wegen unveränderlicher Druckverhältnisse längs x , daß die Geschwindigkeitsprofile der turbulenten Strömung in den Begrenzungsquerschnitten identisch sind, d.h. das Wasser fließt mit unveränderlicher mittlerer Strömungsgeschwindigkeit

$$\bar{V} = \bar{V}_1 = \bar{V}_2 \quad (4.2.1.3)$$

durch den Kanal. Aufgrund der Kontinuitätsbedingung nimmt die Wasseroberfläche dieselbe Neigung an wie die des Kanalbodens. Ursache der Strömung ist die Gewichtskomponente des Wassers parallel zur x -Achse. Dieser steht die am Bodenrand wirkende Reibungskraft $F(R_n)$ entgegen. Nach dem Impulssatz ergibt die Summe aller Kräfte

$$- G_x + F(R_n) = 0 \quad (4.2.1.4)$$

darin ist

$$G_x = \sin \mathbf{a} \times r \times g \times DVol \gg \tan \mathbf{a} \times r \times g \times DVol = i \times 10^3 \times Dx \times h \quad (4.2.1.5)$$

da die Impulse der Flüssigkeit durch die beiden Begrenzungsquerschnitte sich gegenseitig aufheben. Dieses Ergebnis kennzeichnet, daß es sich um eine stationäre Strömung handelt. Gewichts- und Reibungskraft stehen miteinander im Gleichgewicht.

Demgegenüber würde in einem theoretischen Modell ohne Reibungswirkung die Fließgeschwindigkeit über alle Grenzen wachsen.

Eine Analogie zu dem betrachteten Vorgang stellt der freie Fall unter Einwirkung der Luftreibung bzw. im luftleeren Raum dar.

4.2.2 Wehrströmung

Gegeben sei ein Kanal mit unveränderlichem Querschnitt und ebenem Boden. Die Wandung besitze eine natürliche Rauigkeit. Die Strömungstrecke sei am Ende mit einem höhenverstellbaren Überfallwehr ausgestattet.

Bei ausreichender Wassereinspeisung bildet sich eine Strömung aus, die der natürlichen Gefälleströmung sehr ähnlich ist und insbesondere auch ein Gefälle hat.

Wegen der Querschnittsverengung in Richtung des Wehres (Anl.1, Abb. b) stellt sich aufgrund der Kontinuitätsbedingung eine örtlich veränderliche Strömungsgeschwindigkeit ein. Aus der Bernoulligleichung folgt, daß das Quadrat der Zusatzgeschwindigkeit der Niveauabsenkung näherungsweise, - d.h. unter Vernachlässigung des angenommenen Rauigkeitseinflusses - proportional ist:

$$(\overline{DV}(x))^2 \sim Dh \quad (4.2.2.1)$$

In finiter Betrachtungsweise kann man auch hier wie beim Modell der natürlichen Gefälleströmung den Impulssatz anwenden. Danach stehen Gewichtskomponente G_x und Reibungskraft $F(R_n)$ nicht mehr im Gleichgewicht, sondern liefern als Summe den Impuls der Zusatzgeschwindigkeit $\overline{DV}(x)$:

$$- G_x + F(R_n) = r \times (\overline{DV}(x))^2 \times Dx \quad (4.2.2.2)$$

Dieses Ergebnis kennzeichnet, daß es sich um eine beschleunigte Strömung handelt. Für sehr kleine Gefällewerte kann der Impuls vernachlässigt werden, so daß auch für die Wehrströmung näherungsweise gilt

$$- G_x + F(R_n) \gg 0 \quad \text{für } i \ll 1 \quad (4.2.2.3)$$

Die Strömungsanlage der VBD entspricht in Aufbau und Wirkungsweise dem hier behandelten Modell einer Wehrströmung.

4.3 Gefälleeffekt

Nach Abschn. 4.2.1 und Abschn. 4.2.2 stehen Gewichtskomponente G_x und die kompensierende Reibungskraft $F(R_n)$, die als äußere Kräfte auf das betrachtete Flüssigkeitsvolumen wirken, in engem Zusammenhang. Dies gilt auch für ihre Wirkung auf darin schwimmende Körper, die sich talwärts bewegen (treibendes Schiff). Diese entsteht durch Druckübertragung (Gewichtskraft) und Übertragung von Schubspannungen (Reibungskraft). Betrachtet man das eingetauchte Volumen des Schiffskörpers als äquivalentes Flüssigkeitsvolumen (Archimedessches Prinzip), so wirkt auf den Schiffskörper die gleiche Gewichtskomponente wie auf das umgebende Wasser. Der Reibungswiderstand wird jedoch durch seine Form und die örtliche Größe der wirksamen Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt (Funktion der z -Koordinate). Je nach Tiefgang und Schiffsförmung kann die Wirkungslinie des resultierenden Widerstandes unterschiedliche Höhenlagen einnehmen, so daß die

effektive Strömungsgeschwindigkeit V_{Str_e} größer, aber auch kleiner sein kann als die mittlere Strömungsgeschwindigkeit V_{Str_m} . Keinesfalls kann sie aber größer sein als die theoretisch - maximal mögliche Geschwindigkeit V_{Str_h} .

Die allgemein bekannte Meinung, daß die nachweisbare Steuerwirkung bei einem treibenden Schiff oder Floß dadurch entsteht, daß sich die Fahrzeuge schneller zu Tal bewegen als das umgebende Wasser, kann aufgrund der obigen Betrachtung nicht uneingeschränkt unterstützt werden¹. Wohl kann man aber davon ausgehen, daß - bedingt durch die Form des Strömungsprofils - durch die tiefe Lage des Ruders zwischen diesem und dem Schiffskörper eine Relativgeschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung auftritt, die diese Steuerwirkung bewirkt.

Bezogen auf das Untersuchungsproblem wird es als ausreichend angesehen, evtl. vorhandene Differenzen zwischen Gefällekraft und Reibungswiderstand als vernachlässigbar anzusehen, so daß sich beide Größen entsprechend Gl. (4.2.1.4) näherungsweise gegenseitig aufheben.

Für die Entscheidung, den Gefälleeffekt als Größe höherer Ordnung zu vernachlässigen, spricht auch die Tatsache, daß in der vorhandenen Strömungsanlage der Fall der natürlichen Gefälleströmung nur angenähert nachgebildet werden kann. Insofern ist davon auszugehen, daß evtl. vorhandene kleine Wirkungen wegen der zwangsläufig zu erwartenden Unschärfe der Meßergebnisse gar nicht dargestellt werden können.

4.4 Einfluß der Grundströmung auf den Wellenwiderstand

In einer theoretischen Arbeit aus dem Jahre 1958 zeigt Kolberg [11], daß der Effekt der scherenden Grundströmung auf flachem Wasser zu einer Veränderung des Wellenwiderstandes führt, die sich in Tal-/Bergfahrt in einer Verstärkung/Ab schwächung des vergleichbaren Stillwasser-Widerstandsanteils ausdrückt. Der Effekt läßt sich vereinfacht dadurch erklären, daß - relativ betrachtet - die homogene Anströmung und das Geschwindigkeitsprofil der Grundströmung vektoriell zu addieren sind, wodurch sich die mittlere Anströmungsgeschwindigkeit in der Talfahrt erhöht, in der Bergfahrt aber verringert.

Aus einem Vergleich der "äquivalenten" Widerstandsintegrale leitet er eine Näherungsbeziehung ab, woraus sich für eine gegebene Kurve des Restwiderstandes in Stillwasser $R_R = f(V)$ punktweise eine Vergleichsgeschwindigkeit V^* errechnen läßt, der der betrachtete Widerstand für den untersuchten Strömungsfall zuzuordnen ist (Verschiebung der Kurve in V -Richtung).

¹ Diese Meinung wird möglicherweise durch die Beobachtung unterstützt, daß auf der Wasseroberfläche treibende Gegenstände langsamer zu Tal treiben als das Fahrzeug selbst. Hierzu ist aber festzustellen, daß die Treibgeschwindigkeit keine Ergänzung der Strömungsaufmessung im Innern der Flüssigkeit darstellt. Sie liegt generell niedriger als die extrapolierte Maximalgeschwindigkeit V_{Str_h} . Es handelt sich um einen Effekt, der möglicherweise auf Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Wassers an der Grenze zur Luft beruht (2-Phasen-Strömung). Denkbar ist z.B. als Ursache eine Erhöhung der Zähigkeit durch Verdunstungskälte.

Die dimensionslose Darstellung der Überschlagsformel für den hier relevanten unterkritischen Geschwindigkeitsbereich lautet (s.a. [11], S. 39, 42):

$$\left(\frac{F_{nh}^*}{F_{nh}}\right)^2 = 1 \pm k \times F_{nh_{Str.}} \times F_{nh}^* \left\{ \begin{array}{l} \text{Bergfahrt, } F_{nh} > 0 \\ \text{Talfahrt, } F_{nh} > 0 \end{array} \right\}, \text{sign} F_{nh} = \text{sign} F_{nh}^* \quad (4.4.1)$$

Darin sind

F_{nh} = Froudesche Tiefenzahl für Stillwasser

F_{nh}^* = Froudesche Tiefenzahl der Vergleichsgeschwindigkeit

F_{nh_h} = Froudesche Tiefenzahl der max. theoretischen Strömungsgeschw.
 V_{Str_h}

$k \times F_{nh_h}$ = Achsenabschnitt der Funktion der $V_{Str}(z)$ bei $z = h$ (Kennz. der Funktionssteigung)

k = Verhältniszahl

Für den betrachteten Fall der Talfahrt ergibt sich als Bestimmungsgleichung für F_{nh}^* aus Gl. (4.4.1) eine quadratische Gleichung in der Normalform

$$F_{nh}^{*2} + k \times F_{nh_{Str.}} \times F_{nh}^* - F_{nh}^2 = 0 \quad (4.4.2)$$

mit den gültigen Lösungen

$$F_{nh}^* = F_{nh}^2 \times \frac{1}{2} \times \left[\frac{k \times F_{nh_{Str.}}}{F_{nh}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{k \times F_{nh_{Str.}}}{F_{nh}^2}\right)^2 + 4} \right] \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{relative Talfahrt} \\ \text{relative Bergfahrt} \end{array} \right. \quad (4.4.3)$$

die in dimensionsbehafteter Form lauten

$$V^* = V^2 \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{k \times V_{Str.}}{h} \pm \sqrt{\left(\frac{k \times V_{Str.}}{h}\right)^2 + \frac{1}{V^2}} \right] \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{relative Talfahrt} \\ \text{relative Bergfahrt} \end{array} \right. \quad (4.4.4)$$

Unter relativer Berg-/Talfahrt sind hier die Phasen des Stillwassermanövers, nämlich "Stoppen aus Vorausfahrt" und "Beschleunigen rückwärts" zu verstehen.

Kolberg zeigt durch Modellversuche, daß die von ihm aufgestellte Beziehung (4.4.1) eine recht gute Übereinstimmung mit Meßergebnissen liefert. Quantitativ ergeben sich im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich relativ kleine Unterschiede zwischen Stillwasser- und Strömungswiderstand, die erst mit Einsetzen des Flachwassereffektes ab $F_{nh} = 0,5$ bis $F_{nh} = 0,7$ eine signifikante Größenordnung annehmen.

4.5 Ansatz zur Übertragung des Stillwassermanövers auf den Strömungsfall

Die Umrechnung und Korrektur des aufgemessenen Geschwindigkeitsverlaufs $V'_{Stw} = f(t')$ für das Stoppmanöver in Stillwasser erfolgt nach der erweiterten kinematischen Beziehung

$$V'(t') = V'_{Stw}(t') + \int_0^{t'} \frac{F'_i(t'(V'_{Stw}))}{m'} \times dt' + V'_{Str_e} \quad (4.5.1)$$

woraus sich nach nochmaliger Integration in der Form

$$s'(t') = \int_0^{t'} V'(t') \times dt' \quad (4.5.2)$$

der korrigierte Stoppweg ergibt.

Darin sind

V' = Modellgeschwindigkeit

s' = Modellweg

t' = Modellzeit

F'_i = Korrekturkräfte

m' = Modellmasse

V'_{Str_e} = effektive Strömungsgeschwindigkeit

V'_{Stw} = Stillwassergeschwindigkeit

τ' = Zeit als Integrationsvariable

Im Anschluß werden die errechneten Funktionen nach dem Froudeschen Modellgesetz auf die Großausführung übertragen.

4.6 Reibungsabzug

Für die Reibungskorrektur wird der Ansatz nach ITTC 57 in Ansatz gebracht, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Geschwindigkeit des umzurechnenden Stillwasser- manövers beim Phasenwechsel von „Stoppen aus Vorausfahrt“ nach „Beschleunigen rückwärts“ einen Vorzeichenwechsel erfährt. Demnach gilt

$$\begin{aligned}
 DF_f(V'(t)) &= \text{sign}(V'(t)) \times DC_f(V'(t)) \times \frac{R}{2} \times S \times V'^2(t) \\
 \text{sign } V'(t) &= \pm 1 \text{ für } \begin{cases} V'_A \approx V'(t) > 0 \\ 0 > V'(t) \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{4.6.1}$$

darin ist

DC_f = Differenz der Reibungsbeiwerte nach ITTC 57.

5. Modelle, Randbedingungen und Versuche

Als Untersuchungsobjekte wurden zwei Fahrzeugvarianten gewählt, nämlich der Typ eines modernen Binnenschiffes (VBD-Modell M1600), mit dem sowohl alleinfahrend als auch gekoppelt mit einem Leichter (VBD-Modell M1610) als sog. Motorgüterschiff-Koppelverband Stoppmanöver gefahren werden sollten. Die Modelle, die aus dem Stock der VBD entnommen wurden, wiesen einen Maßstab von $\lambda = 12,078$ auf. Das 1-Schrauben-Motorgüterschiff besaß eine Düse. Als Antrieb wurde ein 3-flügeliger Stockpropeller verwendet. Schiffslinien, Propellergeometrie und –charakteristik sowie die Konstruktion der Anhänge sind in den Anlagen 2 bis 9 wiedergegeben. Die wichtigsten Schiffs- und Propellerdaten sind in Anl. 37 zusammengestellt.

Hinsichtlich der Versuchsparameter wurde entschieden, im Sinne des Untersuchungsziels den Schwerpunkt auf die Variation der Strömungsgeschwindigkeit zu legen und Wassertiefe und Tiefgang mit

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

$$T = 2,8 \text{ m}$$

als Auswahl besonders häufig vorkommender Werte konstant zu halten.

Bei Vorversuchen mit der VBD-eigenen Strömungsanlage wurden die Grenzen der Anlage getestet und dementsprechend eine Zielwertvorgabe für die einzustellende Strömungsgeschwindigkeit in der Staffelung

$$V_{Str_Ziel} = 0,375; 0,340; 0,300; 0,260 \text{ m/s}$$

entsprechend

$$V_{Str_Ziel} = 4,25; 3,86; 3,40; 2,95 \text{ km/h}$$

festgelegt.

Darin kennzeichnet der erste Wert die höchste erreichbare Strömungsgeschwindigkeit, der letzte die Geschwindigkeit, bei der die eingestellte Strömung noch als gleichförmig turbulent bezeichnet werden konnte.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde mit Pitot-Rohren durchgeführt, die in der Form eines „Rechens“ zu mehreren Exemplaren auf einer Halterung angeordnet waren. Sie wurden vor dem Versuch mit Hilfe der Schleppwagengeschwindigkeit geeicht.

Bei den Hauptversuchen konnte die Messung aus technischen Gründen nicht wiederholt werden. Statt dessen wurde die Strömungseinstellung über einen Referenzmeßpunkt außerhalb der Modellfahrspur überprüft (s.a. Abschn. 4.1). Ergänzt wurden die Vorversuche durch einen „Treibversuch“, bei dem die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche durch Verfolgen einer treibenden Holzscheibe ($\phi = 100 \text{ mm}$) mit dem Schleppwagen bestimmt wurde. Außerdem wurde das Gefälle gemessen,

wobei im Vorversuch eine US-Sonde (Ultraschall-Sonde) verwendet wurde. Beide Messungen wurden im Hauptversuch wiederholt (Reproduktionsmessung). Das Gefälle konnte in diesem Fall aus der kontinuierlich aufgezeichneten Absenkung des sehr langsam geschleppten Modells bestimmt werden.

Hinsichtlich der Stoppmanöver wurden Stillwasser- und Strömungsversuche vorgesehen, wobei letztere als Referenz zu den umgerechneten Stillwassermanövern dienen sollten.

Die charakteristischen Randbedingungen des Stoppmanövers sind die Anfangsgeschwindigkeit V_A und die negative Propellerdrehzahl n_E , die während des Stoppvorgangs konstant ist (Idealisierung). Beim „Crash-Stop“ wird die höchste Rückwärtsdrehzahl gefahren, die im Sinne einer angenommenen Drehzahlbegrenzung mit dem Betrag der maximalen Vorwärtsdrehzahl identisch ist und der Auslegung der Antriebsanlage zugrunde gelegt wird. Da der „Crash-Stop“ dem Testfall bei der Neubaubauabnahme entspricht, wurde entschieden, für die Manöverdrehzahl n_E durchgehend den Maximalwert zu wählen, die Anfangsgeschwindigkeit V_A dagegen ausgehend von der Höchstgeschwindigkeit in systematischen Stufen zu variieren.

Zur Ermittlung der „Auslegungs-drehzahl“ wurden Propulsionsversuche in Voraus- und Rückwärtsfahrt durchgeführt, wobei neben der Hauptwassertiefe für den Koppelverband auch ein Versuch auf der höheren Standardwassertiefe $h = 7,5$ m erfolgte.

Die Versuche zeigten, daß die Drehzahl des relativ hochdrehenden 3-flügeligen Propellers aus mechanischen Gründen auf einen Wert von $n'_{max} = 26,0$ $1/s$ (entsprechend $n_{max} = 450$ $1/min$) begrenzt werden mußte. Mit diesem Wert kann die Leistung auf $h = 5,0$ m voll ausgefahren werden, während der Koppelverband auf $h = 7,5$ m Wassertiefe in die angenommene Drehzahlbegrenzung fährt. Die Auswertung der in Anl. 10 und 11 dargestellten Meßergebnisse in bezug auf Grenzgeschwindigkeiten und -leistungen ist tabellarisch in Anl. 38 wiedergegeben.

Zur Darstellung des Kolberg-Effektes war es außerdem notwendig, Widerstandsversuche auf der Hauptwassertiefe zu fahren, die ebenfalls auf die Rückwärtsfahrt ausgedehnt wurden.

6. Ergebnisse

Strömungsaufmessungen

Die Ergebnisse der Strömungsaufmessung sind in den Anlagen 14 bis 21 dokumentiert. Die Anlage 14, 16, 18 und 20 zeigen die Strömungsprofile für verschiedene Tanklängsschnitte aufgenommen im Hauptmeßquerschnitt des Schlepptanks ($x_s = 79,2$ m). Die Diagramme geben eine leichte Modifikation der Profile in Richtung Tankwand wieder. Die stark ausgezogene Kurve stellt das Profil in Mitte Tank dar, das für die weitere Auswertung als Referenz verwendet wurde. Die Bilder kennzeichnen eine typische turbulente Strömung, die jedoch bei den Fällen $V'_{Str_Ziel} = 0,3$ und $0,26$ m/s (Anlagen 18 u. 20) als noch nicht voll ausgebildet bezeichnet werden muß.

Den Profilabbildungen zugeordnet sind die Ergebnisse des Treibversuchs und der Gefällemessung (Anlagen 15, 17, 19 und 21). Hierbei handelt es sich um die Darstellung der Reproduktionsmessung während der Hauptversuche. Die Darstellungen charakterisieren die Eigenschaften der Wehrströmung, bei der in Wehrrichtung Geschwindigkeiten und Wasserspiegelabsenkung zunehmen (s.a. Abschn. 4.2.2).

Auffällig ist, daß bei dem ersten der oben hervorgehobenen Fälle (Anl. 19) die Strömungsgeschwindigkeiten in Wehrrichtung sogar abnehmen, während bei dem zweiten (Anl. 21) sehr starke Schwankungen festzustellen sind. Dies ist wohl der stärkste Ausdruck einer nicht voll ausgebildeten turbulenten Strömung. Die in den Profildarstellungen eingetragenen Ergebnisse der Treibversuche zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Strömungseinstellung für den Maximalwert (Anl. 14), die in Richtung schwächerer Einstellungen zunehmend schlechter wird.

Der Kolberg-Effekt

Aus den Ergebnissen der Widerstandsmessungen (Anlagen 12 und 13) sind die Restwiderstände berechnet worden, die allgemein mit dem Potential- oder Wellenwiderstand als vergleichbar angesehen werden.

In den Anlagen 22 und 23 sind die nichtkorrigierten Modellwerte in der Form der Gleitzahl

$$e'_R = \frac{R'_R}{r \times g \times Vol'} \quad (6.1)$$

über der Modellgeschwindigkeit V' aufgetragen. Eine zweite Auftragung zeigt dieselben Größen als Funktion der nach Kolberg berechneten Vergleichsgeschwindigkeit V'^* (s.a. Gl. (4.4.4)). Die Differenzen zwischen beiden Kurven bei gleichen V' -Werten kennzeichnen die Widerstandszunahme/-abnahme für die Fahrt in strömendem Wasser zu Tal bzw. zu Berg, die zumindest qualitativ zu erkennen ist.

Ansonsten sind sie derartig klein, daß eine Berücksichtigung des Kolberg-Effektes für die vorliegende Fallstudie nicht erforderlich ist.

Die ebenfalls angegebene Skala der F_{nh} -Zahl zeigt, daß sich Motorgüterschiff und Koppelverband in einem Geschwindigkeitsbereich bewegen, dessen obere Grenze zwischen $F_{nh} = 0,4$ und $F_{nh} = 0,5$ liegt. Der festgestellte Effekt bestätigt die Aussage Kolbergs, daß die Wellenwiderstandsdifferenzen erst ab $F_{nh} = 0,5$ bis $F_{nh} = 0,7$ spürbare Werte annehmen (s.a. Abschn. 4.4).

Stoppmanöver

Nach den vorhergehenden Betrachtungen sind der Gefälleeffekt und der Kolberg-Effekt als vernachlässigbar anzusehen, so daß in einer stark vereinfachten Form für die Übertragung des Stillwassermanövers nur noch die kinematische Transformation zu berücksichtigen ist. In diesem Zusammenhang spielt die Identifikation der sog. effektiven Strömungsgeschwindigkeit V_{Str_e} eine maßgebliche Rolle.

Darüber hinaus ist für die Übertragung der Ergebnisse auf die Großausführung der Reibungseffekt zu berücksichtigen.

In den Anlagen 24 bis 27 bzw. 28 – 31 sind die Ergebnisse der Umrechnungen für den Motorgüterschiff-Koppelverband bzw. für das alleinfahrende Motorgüterschiff dargestellt.

Aufgetragen über der Anfangsgeschwindigkeit V_A sind (von unten nach oben) der Stoppweg s , die Stoppzeit t und die mittlere Geschwindigkeit bei Manöverende V_E (asymptotischer Wert). Die Diagramme enthalten sowohl das umgerechnete Stillwassermanöver, als auch das Referenzmanöver in Strömung zu Tal. Für die effektive Strömungsgeschwindigkeit V_{Str_e} wurde in der Umrechnung ein Wert eingesetzt, der dem in Höhe der Propellerwelle ermittelten Geschwindigkeitswert aus der Strömungsaufmessung entspricht. Die Annahme erscheint insofern gerechtfertigt, weil der Propellerschub als einzige Aktionskraft auf dieser Wirkungslinie am Schiffskörper angreift. Die entsprechende z -Koordinate ist neben anderen in die aufgemessenen Strömungsprofile eingetragen worden.

Ergänzend sind in die Darstellung die Ergebnisse der Maßstabskorrektur für beide Manöverarten aufgenommen worden.

Betrachtet man die Ergebnisse für den Koppelverband (Anlagen 24 bis 27) so stellt man fest, daß die Umrechnung des Stillwassermanövers recht gut mit den Ergebnissen des Gefällemanövers übereinstimmt. Allerdings weisen die entsprechenden Kurven des Stillwassermanövers größere Unregelmäßigkeiten auf, die mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit geringer werden. Diese Tendenz weist darauf hin, daß offensichtlich die Koppelstelle zwischen Motorschiff und Leichter zusätzliche Turbulenzen in das Fahrwasser einbringt, die besonders in der Phase der „Rückwärtsbeschleunigung“ den Manöververlauf beeinflussen. Der „Vorgeschichtseffekt“ tritt beim Gefällemanöver nicht auf, weil alle Störungen durch die Strömung abtransportiert werden.

Relativ größere Abweichungen zeigen sich in der Auftragung der Stoppzeiten. Ursache hierfür ist die Tatsache, daß die ermittelten Wege die Maximalwerte der Wegkurve darstellen, die im Bereich ihres Maximums vergleichsweise flach verläuft. Die Stoppzeiten ergeben sich dagegen aus der Geschwindigkeitskurve, als Nulldurchgang. In diesem Bereich verläuft die Kurve relativ steil.

Erwartungsgemäß weisen die Ergebnisse für das Motorgüterschiff (Anlagen 28 bis 31) eine erheblich bessere Qualität auf. Die zu vergleichenden Kurven sind bis auf die Endbereiche mit hoher Manöveranfangsgeschwindigkeit nahezu deckungsgleich.

Der Einfluß der Reibungskorrektur bewegt sich bei den Ergebnissen in einer Größenordnung von ca. 10 % zur ungünstigen Seite, d.h. zu größeren Stoppwegen und -zeiten hin.

Dies ist eine Größenordnung, die nicht mehr zu vernachlässigen ist. Die Gültigkeit kann allerdings nur durch Vergleiche mit Großversuchen festgestellt werden.

Um die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Fahrzeugtypen zu zeigen, insbesondere auch im Hinblick auf den herausgestellten „Vorgeschichtseffekt“ beim Stillwassermanöver ist in den Anlagen 32 und 33 sowie 34 und 35 eine Auswahl der vollständigen Manöver in der Zeitdarstellung für Koppelverband und alleinfahrendes Motorgüterschiff wiedergegeben.

Dabei sind jeweils Gefällemanöver und umgerechnetes Stillwassermanöver gegenübergestellt.

Man erkennt deutlich die Störungen im Bereich der Rückwärtsfahrt, des Stillwassermanövers, die beim Koppelverband (Anl. 33) ausgeprägter sind als beim Motorgüterschiff (Anl. 35), beim Gefällemanöver aber gar nicht auftreten (Anlagen 32 und 34).

Effektive Strömungsgeschwindigkeit

Wegen der Bedeutung der effektiven Strömungsgeschwindigkeit V_{Str_e} für die kinematische Transformation ist versucht worden, diesen Wert zusätzlich auf eine andere Weise als über die direkte Messung zu bestimmen.

Offensichtlich gilt für vergleichbare Propulsionszustände (identische Propellerdrehzahlen) in Stillwasser und in strömendem Wasser ebenfalls die kinematische Transformationsbeziehung

$$V_{Gef} = V_{Stw} + V_{Str_e}, \text{ für } n = \text{konst.} \quad (6.2)$$

mit V_{Gef} = Geschwindigkeit auf der Gefällestrecke zu Tal

V_{Stw} = Stillwassergeschwindigkeit

V_{Str_e} = effektive Strömungsgeschwindigkeit

Die Beziehung (6.2) ist für den Propulsionspunkt der konstanten Rückwärts-
geschwindigkeit ausgewertet worden, der für die Propulsion in Stillwasser direkt ge-
messen worden war (Anl. 38), während für die Rückwärts-
geschwindigkeit des Gefäl-
lemanövers näherungsweise der asymptotische Wert der Endgeschwindigkeit V_E ein-
gesetzt werden konnte, so daß die modifizierte Bestimmungsgleichung für die Strö-
mungsgeschwindigkeit V_{Str_e} entsprechend Gl. (6.2) lautet: _

$$V_{Str_e} = V_E - V_{Stw} ; n = n_E \quad (6.3)$$

darin ist V_{Str_e} = effektive Strömungsgeschwindigkeit

V_E = Propulsionsgeschwindigkeit für Rückwärtsfahrt
in Strömung (ermittelt aus dem Gefällemanöver)

V_{Stw} = Propulsionsgeschwindigkeit für Rückwärtsfahrt
in Stillwasser (aus Propulsionsversuch)

Anl. 35 zeigt die Auftragung der effektiven Strömungsgeschwindigkeit als Funktion
des variierten Gefälles für Koppelverband und Motorgüterschiff. Den Auftragungen
sind Ergebnisse aus der direkten Strömungsmessung gegenübergestellt. Die unter-
schiedlich ermittelten Auftragungen zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung
(Kurvencharakteristik). Schwachpunkte der vergleichenden Darstellung liegen jedoch
in der Tatsache begründet, daß bei der Wehrströmung die Strömungsgeschwindig-
keit wegabhängig ist, so daß insbesondere die Manöverendgeschwindigkeit V_E in
gewissen Grenzen zufallsbedingte Werte annehmen kann, je nachdem wo das Ma-
növer auf der Meßstrecke eingeleitet worden ist. Insofern müssen die Differenzen
zwischen den beiden Kurvenarten in erster Linie als Streubreite gewertet werden.
Die Darstellung zeigt jedoch, daß es mit verfeinerten Meßmethoden möglich sein
müßte, die effektive Strömungsgeschwindigkeit objektiv zu ermitteln.

7. Symbolverzeichnis

A_0	Propellerdiskfläche
A_E	Fläche der abgewickelten, gestreckten Propellerflügel
B	Schiffsbreite
C_f	Reibungskoeffizient nach ITTC 57
D	Propellerdurchmesser
F	Kraft allgemein, hier Reibungskraft
F_i	Korrekturkräfte (allgemein)
F_{nh}	Froudesche Tiefenzahl
F_{nh}^*	Froudesche Tiefenzahl der Vergleichsgeschwindigkeit (nach Kolberg)
g	Gravitationskonstante
G_x	Gewichtskomponente in Gefällerichtung
h	Wassertiefe
i	Gefällezahl, Gefälle
k	Verhältniszahl (nach Kolberg), beschreibt den Achsenabschnitt der Strömungsgeschwindigkeit bei $z = h$
L_{oa}	Länge über Alles
L_{WL}	Länge in der Wasserlinie
m	Masse
n	Propellerdrehzahl
n_E	Propellerdrehzahl im Manöver
P	Propellersteigung
P_D	Wellenleistung
P_E	Effektivleistung
R_R	Restwiderstand
s	Weg, hier Stoppweg
S	benetzte Oberfläche
t	Zeit
T	Tiefgang
V	Geschwindigkeit (allgemein)
\bar{V}	mittlere Geschwindigkeit (allgemein)
V_A	Manöveranfangsgeschwindigkeit
V^*	Vergleichsgeschwindigkeit (nach Kolberg)
V_{Gef}	Geschwindigkeit auf der Gefällestrecke
V_{Str}	Strömungsgeschwindigkeit (allgemein)
V_{Str_e}	effektive Strömungsgeschwindigkeit (bezogen auf den Schiffskörper)
V_{Str_m}	Strömungsgeschwindigkeit auf $z = h/2$
V_{Str_h}	theoretische Strömungsgeschwindigkeit auf $z = h$
V_{Str_Ziel}	Zielvorgabe der Strömungsgeschwindigkeit (Referenzgröße für die Einstellung der Strömungsanlage)
Vol	Volumen
V_{Stw}	Stillwassergeschwindigkeit
$x; y; z$	versuchsorientiertes Koordinatensystem
$x_s; y_s; z_s$	Schlepptank-bezogenes Koordinatensystem
z_v	Absenkung
Z	Propellerflügelzahl
α	Neigungswinkel der Oberfläche des strömenden Wassers
I	Maßstabszahl

Q	Trimmwinkel
e_R	Restwiderstandsbeiwert (nach Kolberg)
DC_f	Differenz der Reibungsbeiwerte (für Reibungsabzug)
Dh	Wasserspiegeländerung in Vertikalrichtung
DF_f	Reibungsabzug nach ITTC 57
r	Dichte des Wassers

Anm.: Der Hochindex ' kennzeichnet Modellwerte

8. Literaturverzeichnis

- [1] N. N.:
Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO).
Deutscher Bundesverlag GmbH, Bonn, 1. Januar 1995
- [2] Richtlinie Nr. 2 für die Schiffsuntersuchungskommission.
Nach § 1.07 der RheinSchUO
- [3] Reaktionen des Schiffes auf Maschinenmanöver bei begrenzter Wassertiefe.
Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Nr. 1, 1973
- [4] Grollius, W.: Analyse der beschleunigten Bewegung eines Schiffes auf be-
grenzter Wassertiefe nach der quasistationären Methode.
Schiff & Hafen, Nr. 12, 1989
- [5] Grollius, W.:
Stoppmanöver mit Motorgüterschiff – Koppelverbänden.
Schiff & Hafen, Dezember 1992 und Januar 1993
- [6] Grollius, W.: Kenngrößen von Stoppmanövern - Darstellung am Beispiel eines
Motorgüterschiff-Koppelverbandes auf flachem Wasser.
Kolloquium1992/93, Institut für Schiffbau, Universität Hamburg
- [7] Grollius, W.:
Kenngrößen für Stoppmanöver in strömenden Gewässern.
VBD-Bericht Nr. 1334, Januar 1993
- [8] Grollius, W.: Der instationäre Widerstand eines Schiffes bei beschleunigter Be-
wegung.
Jahrb. Der STG 1991, 85. Bd.
- [9] Heuser, H.: Ausarbeitung von Abnahmebedingungen für Motorgüterschiffe und
Schubboote, die auf dem Rhein eingesetzt werden.
VBD-Ber. Nr. 743, 1975
- [10] Zöllner, A.: Grundlegende Erarbeitung von Abnahmebedingungen für Binnen-
schiffe sowie Fahrzeugzusammenstellungen in Hinblick auf das Stoppvermögen
+ Ergänzungen:
VBD-Ber. Nr. 1275, 1990
- [11] Kolberg, F.: Untersuchung des Wellenwiderstandes von Schiffen auf flachem
Wasser bei gleichförmig scherender Grundströmung.
VBD-Ber. Nr. 140, 1958

Strömung im Kanal



VBD.2001 RÜCK

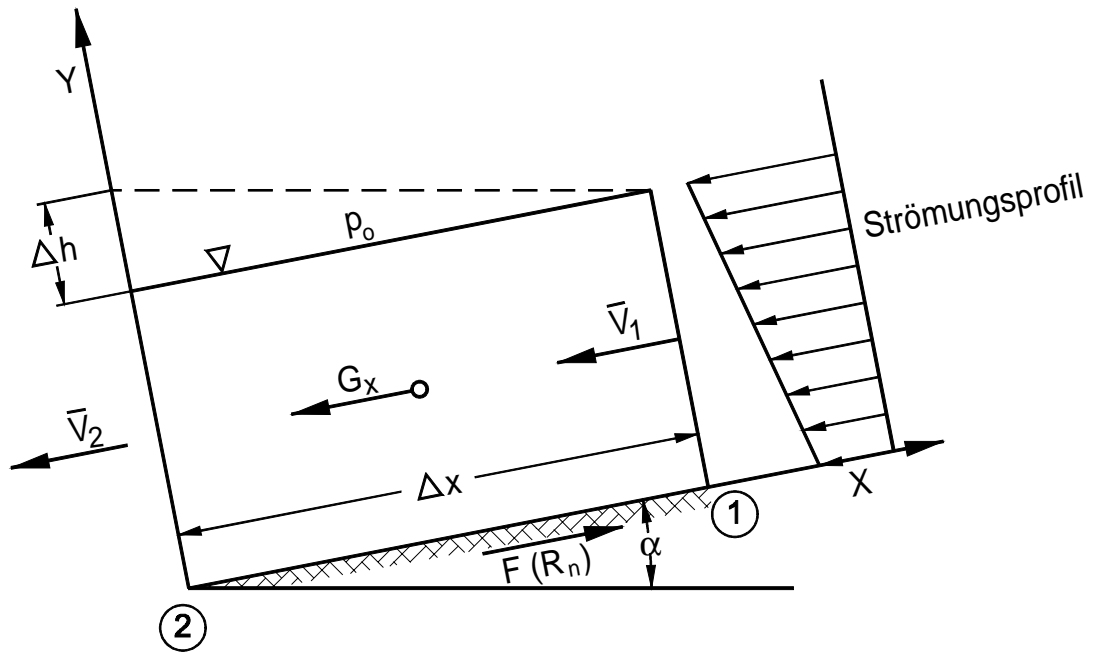


Abb a: Strömung bei natürlichem Gefälle

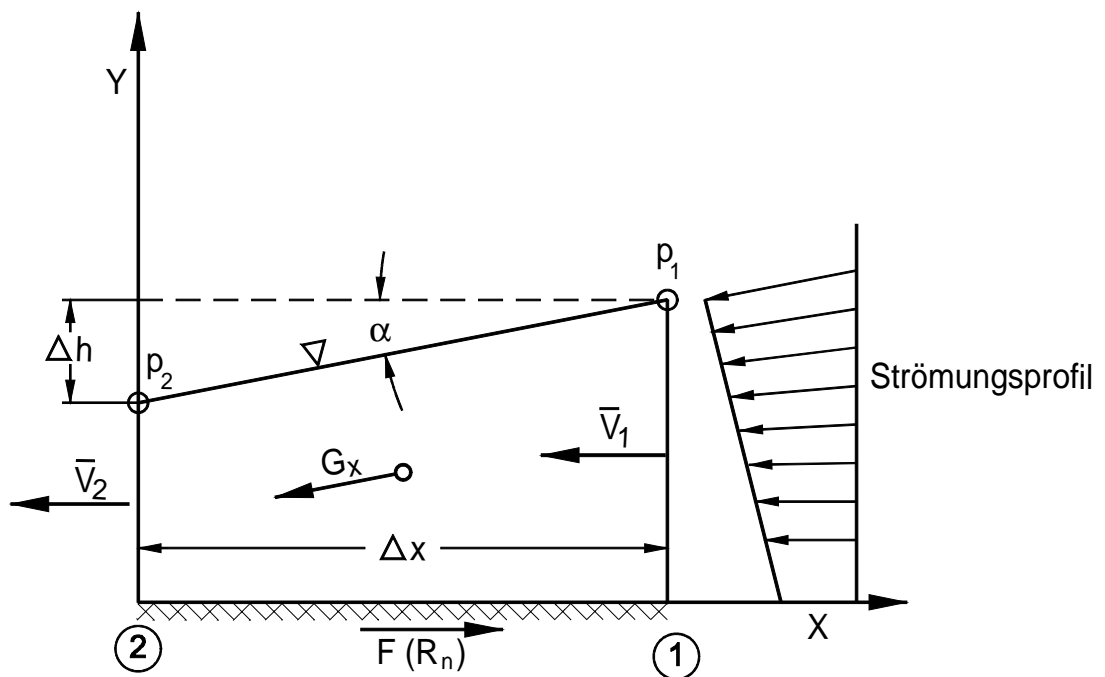
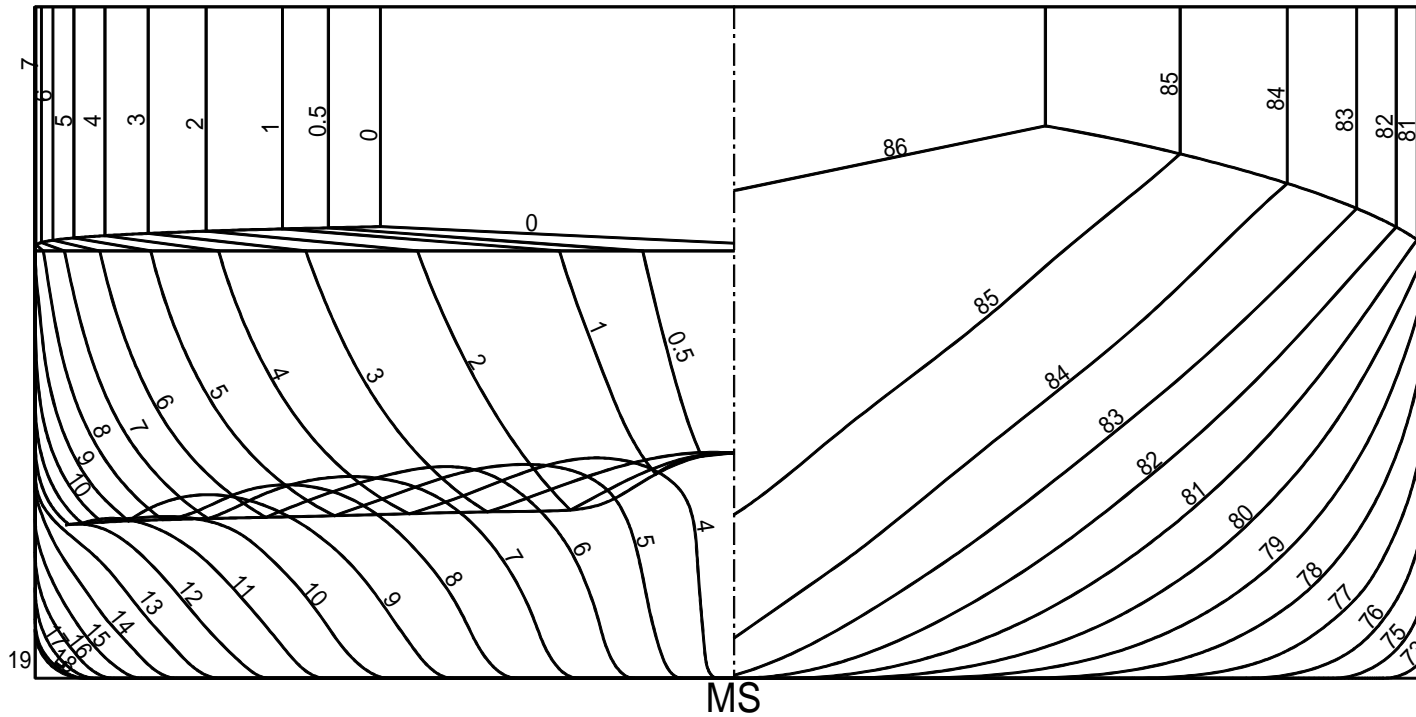


Abb b: Wehrströmung

Spantenriß



M 1600 (M1548)

$\lambda = 12.0781$

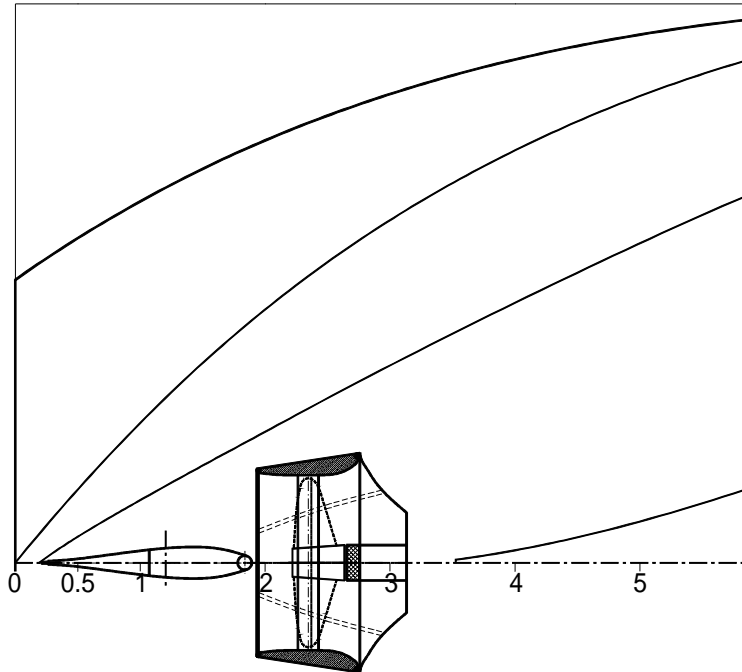
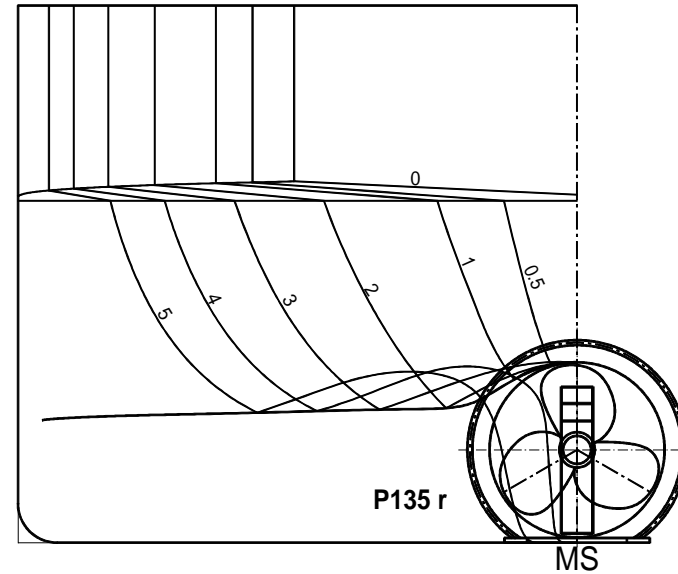
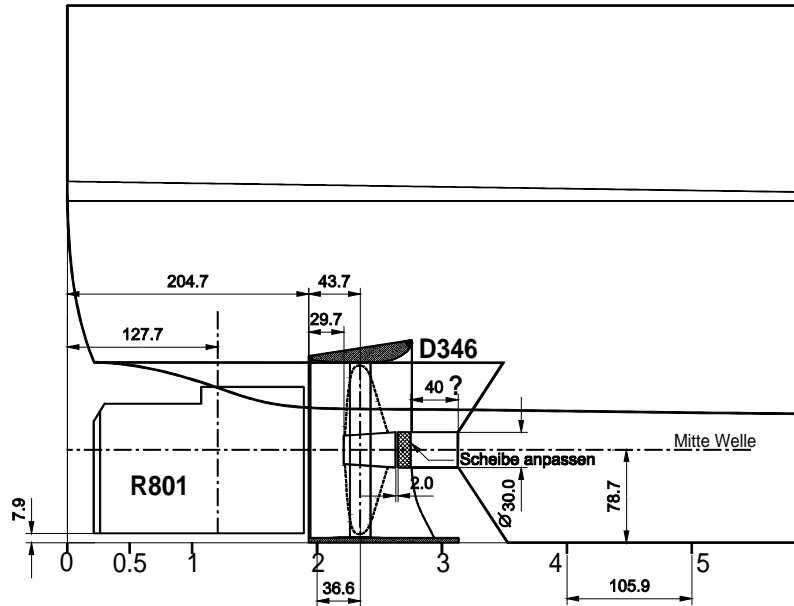
Lüa = 7120.3 mm

B = 948.0 mm

T = 207.0 mm

T1 = 231.0 mm



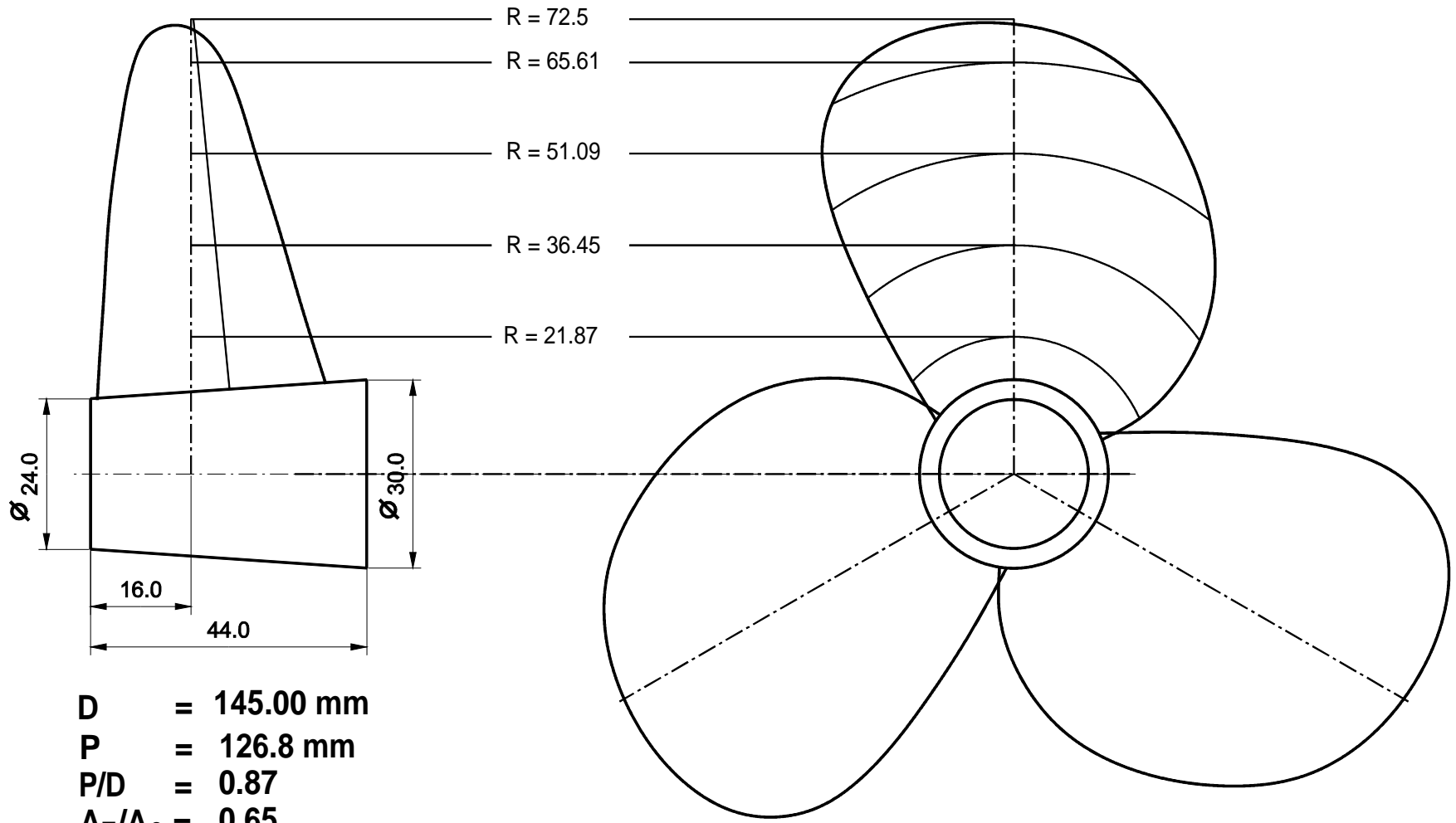


ANORDNUNGSZEICHNUNG

M 1600
 $\lambda = 12.0781$
 L = 7120.3 mm
 B = 948.0 mm



VBD.2001 RÜCK



D = 145.00 mm
P = 126.8 mm
P/D = 0.87
 $A_E/A_0 = 0.65$
Z = 3
C (0.7) = 69.5 mm
P 135 2r/l

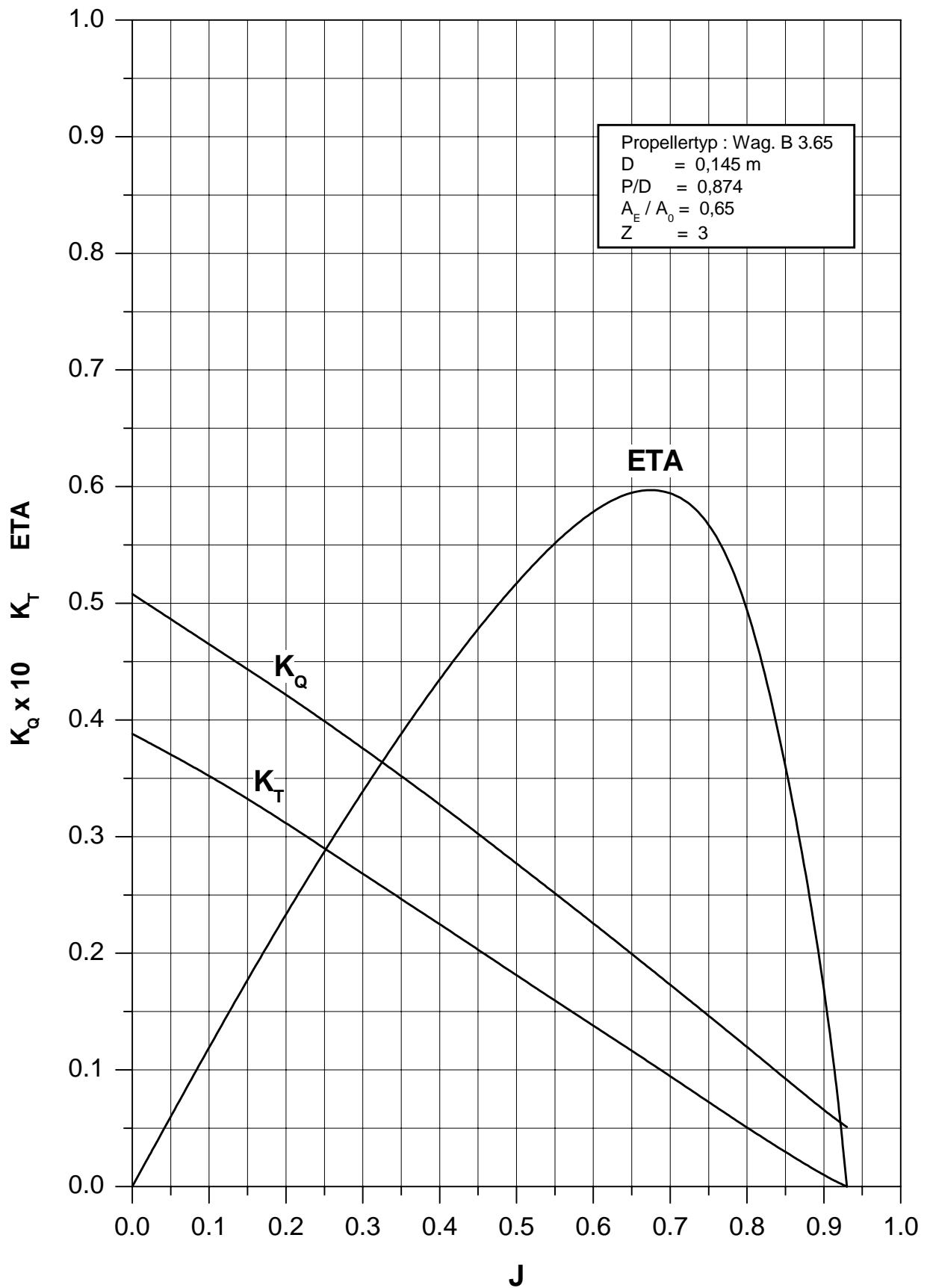


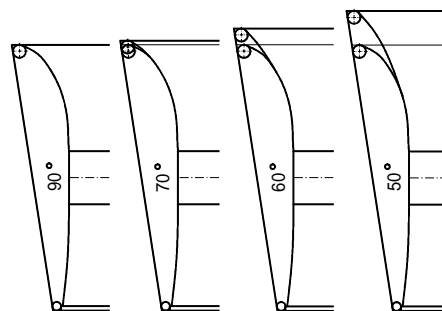
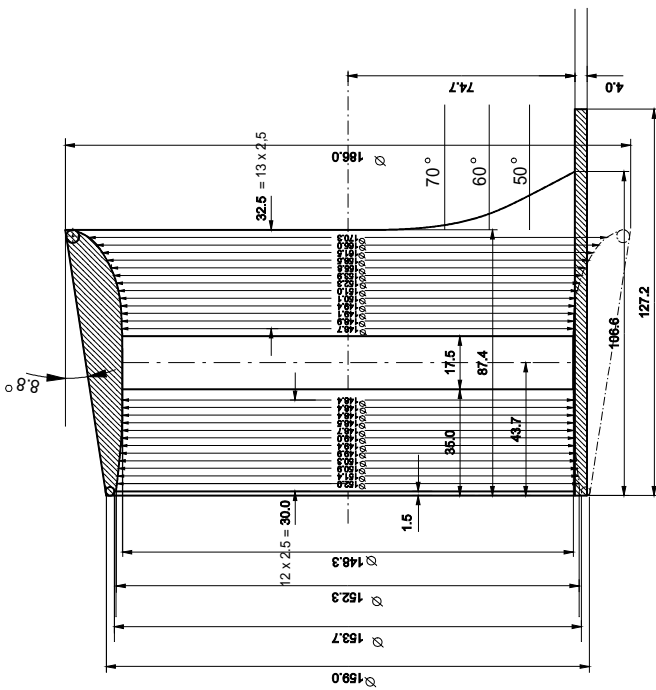
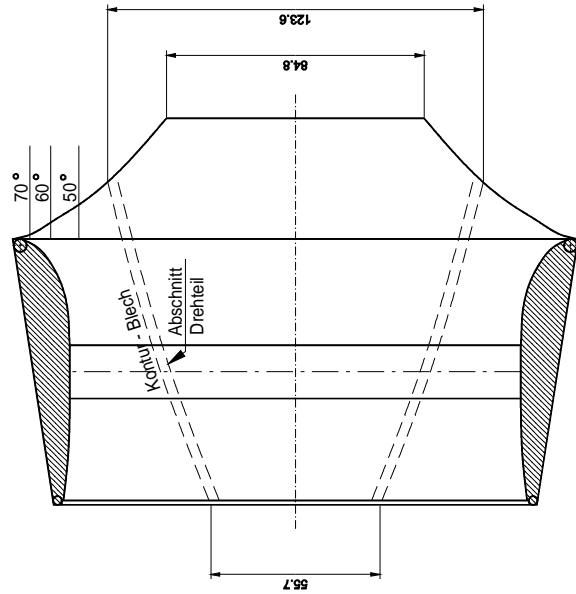
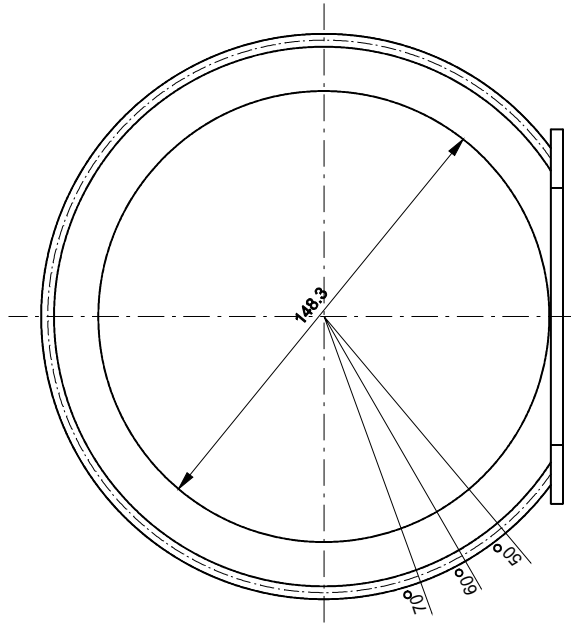
VBD.2001 RÜCK



Propellerfreifahrt

P 135 r/l





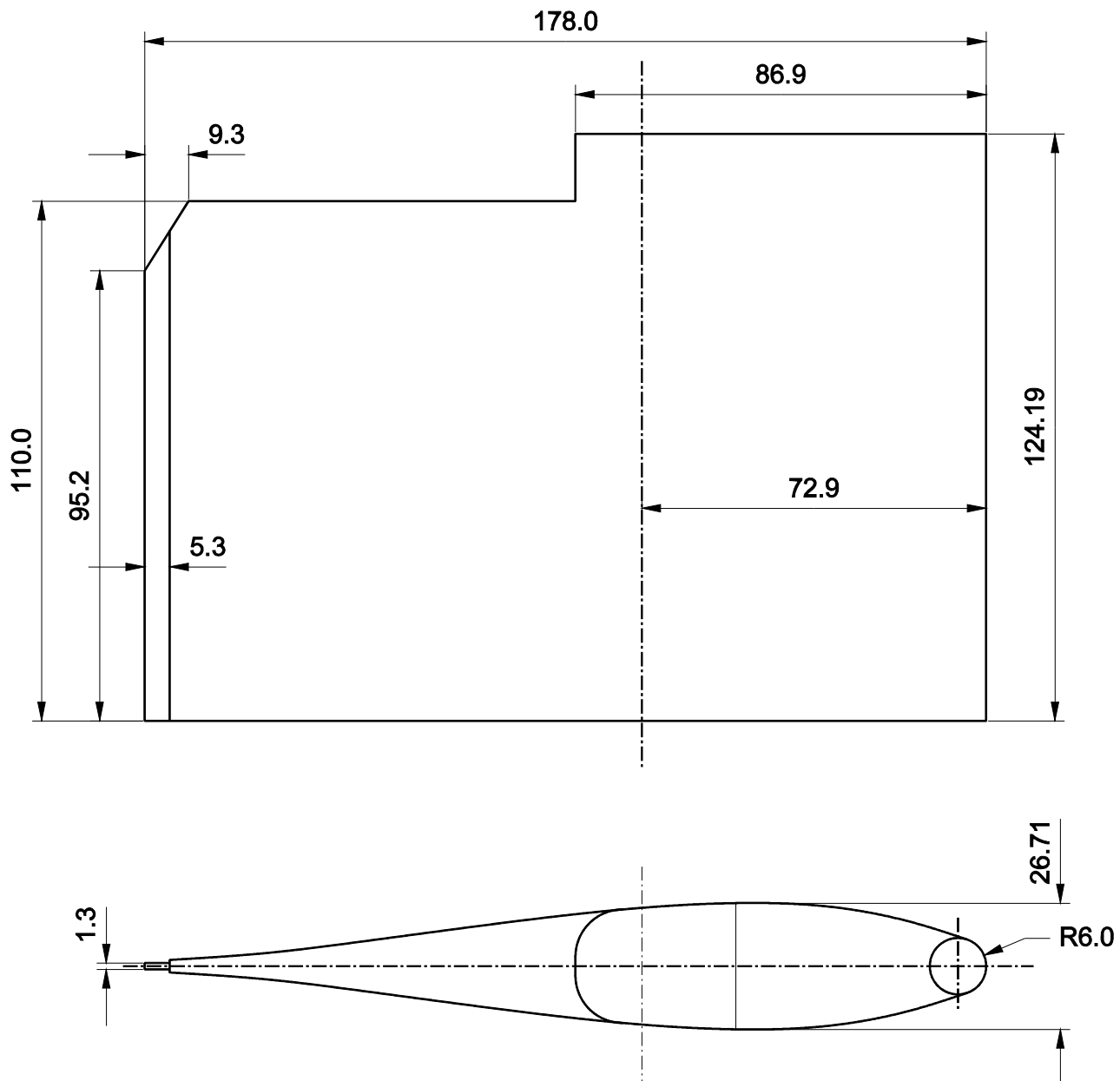
$\lambda = 12.0781$
 $L/Dp = 0.6$

D 346

VBD



VBD.2001 RÜCK



M 1600

R 801

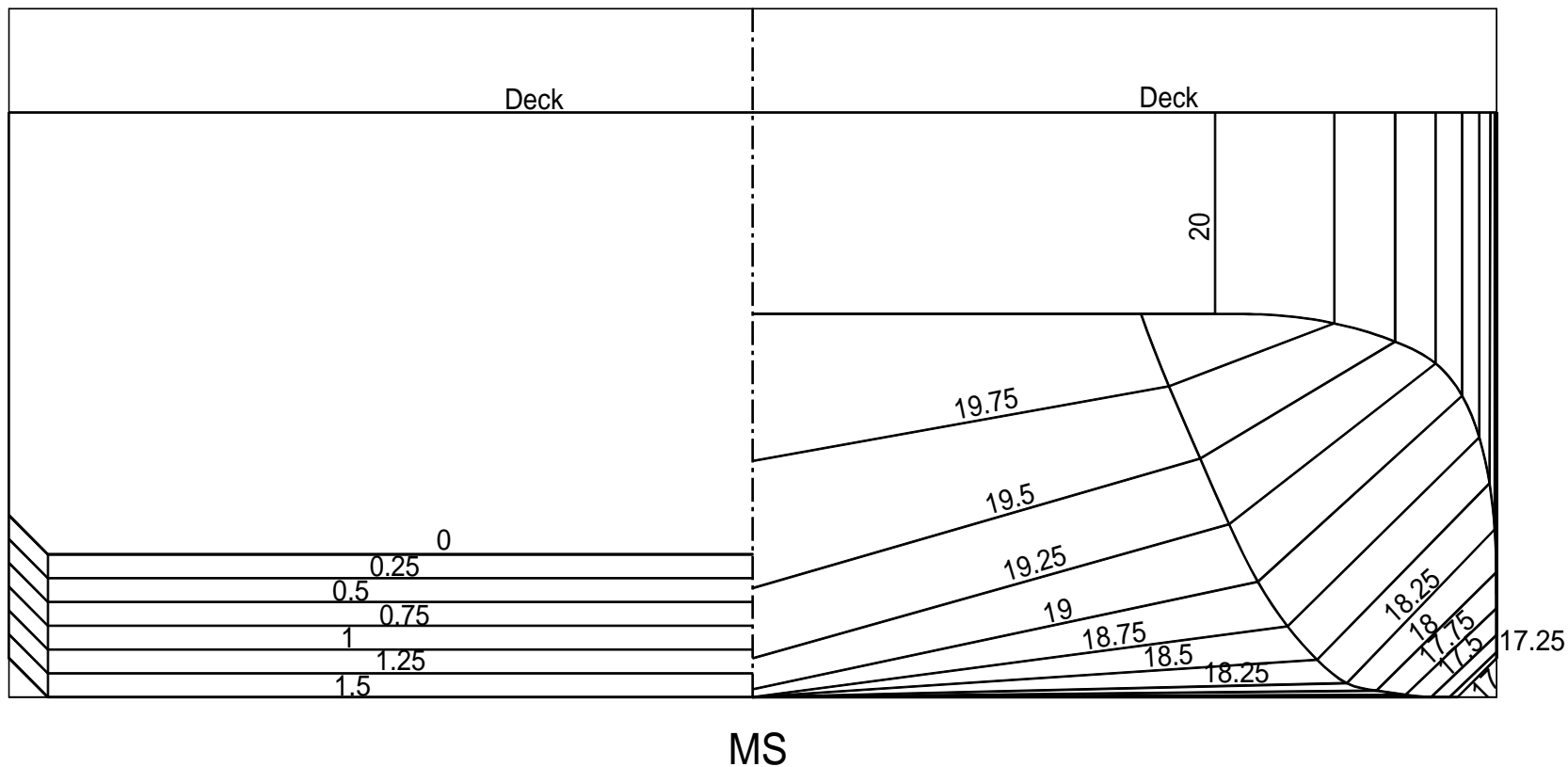
M 1 : 1

$\lambda = 12.0781$



VBD.2001 RÜCK

Spantenriß



M 1610

$\lambda = 12.0781$

L₀₋₂₀ = 6348.5 mm

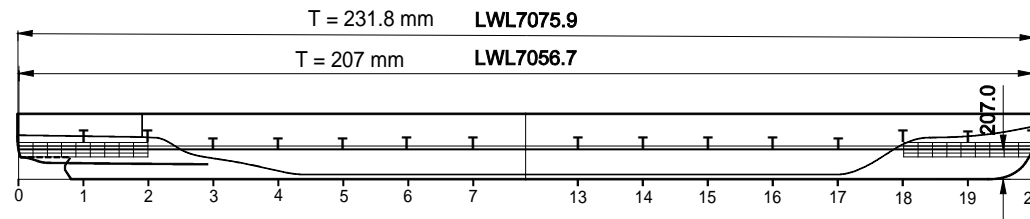
B = 950.2 mm

Spt.-Abstand = 317.4 mm

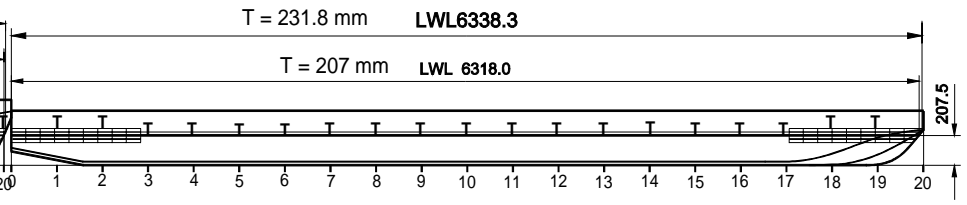


VBD.2001 RÜCK

SKIZZE : WL - ANRISSPLAN FÜR M1600 (M1548)



SKIZZE : WL - ANRISSPLAN FÜR M1610



M 1600
 $\lambda = 12.0781$
 L_{üa} = 7120.3 mm
 LWL = 7056.7 mm
 B = 948.0 mm
 T = 207.0 mm
 T1 = 231.8 mm
 Spt.-Abstand = 452.4 mm bei L = 110 m

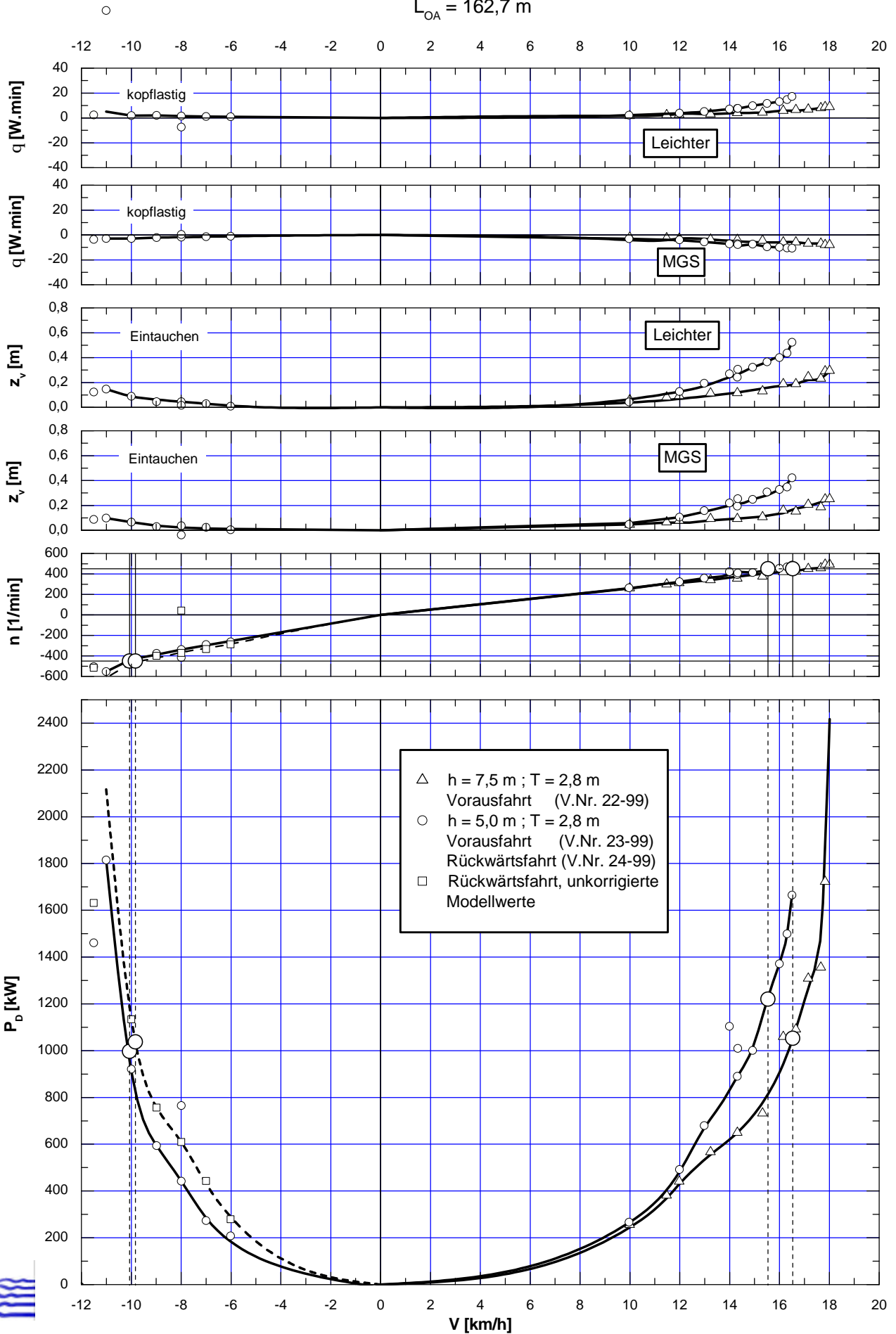
Tubulenzzeuger
 Art : Sandstreifen
 Lage : Spt. 17 und 19
 WL-Abst. = 25.0 mm
 Fotonetz = 8 x 100 mm

M 1610
 $\lambda = 12.0781$
 L₀₋₂₀ = 6348.5 mm
 LWL = 6318.0 mm
 B = 950.2 mm
 T = 207.5 mm
 T1 = 231.8 mm
 Spt.-Abstand = 317.4 mm

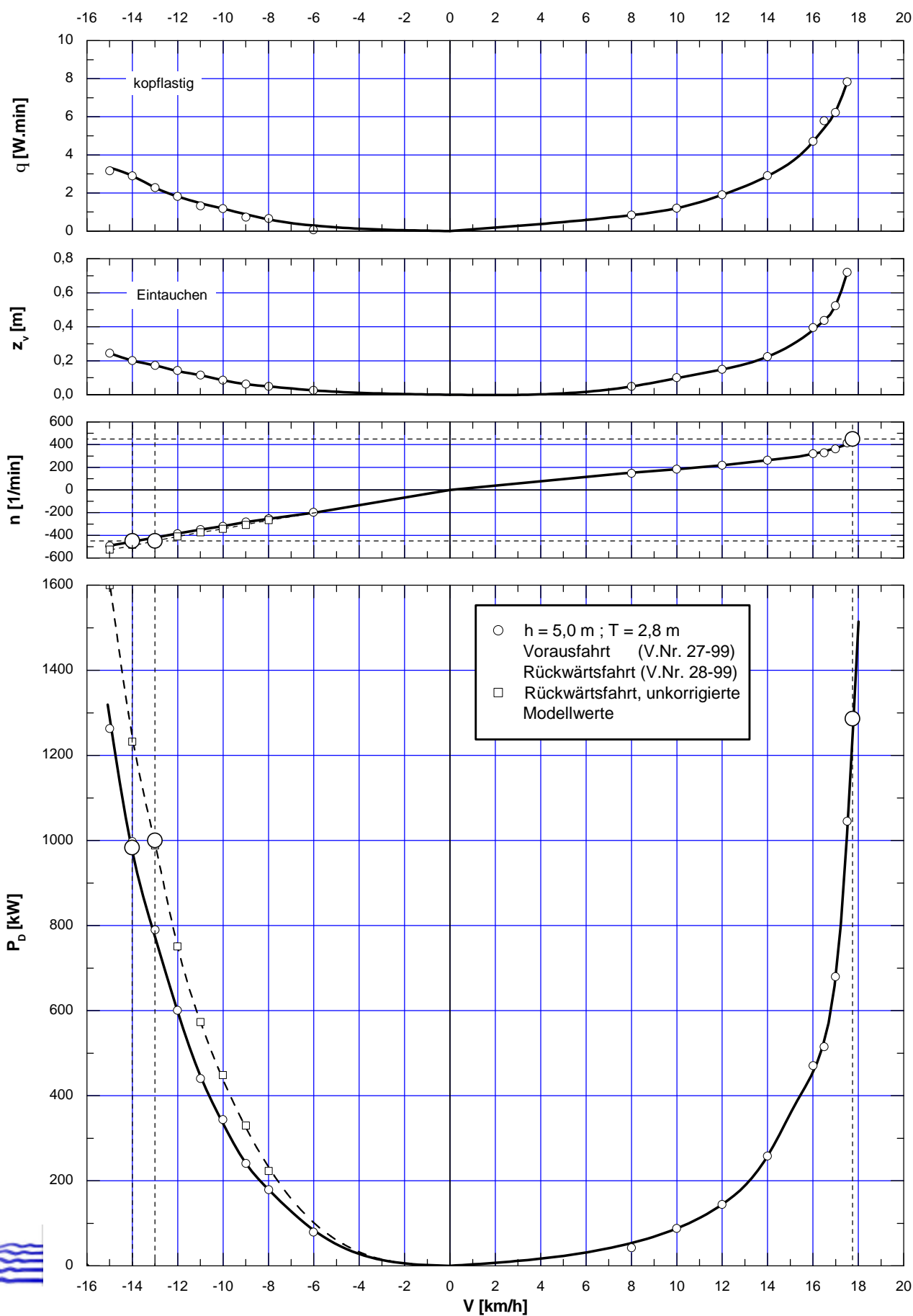
Tubulenzzeuger
 Art : Sandstreifen
 Lage : Spt. 17 und 19
 WL-Abst. = 25.0 mm
 Fotonetz = 8 x 100 mm



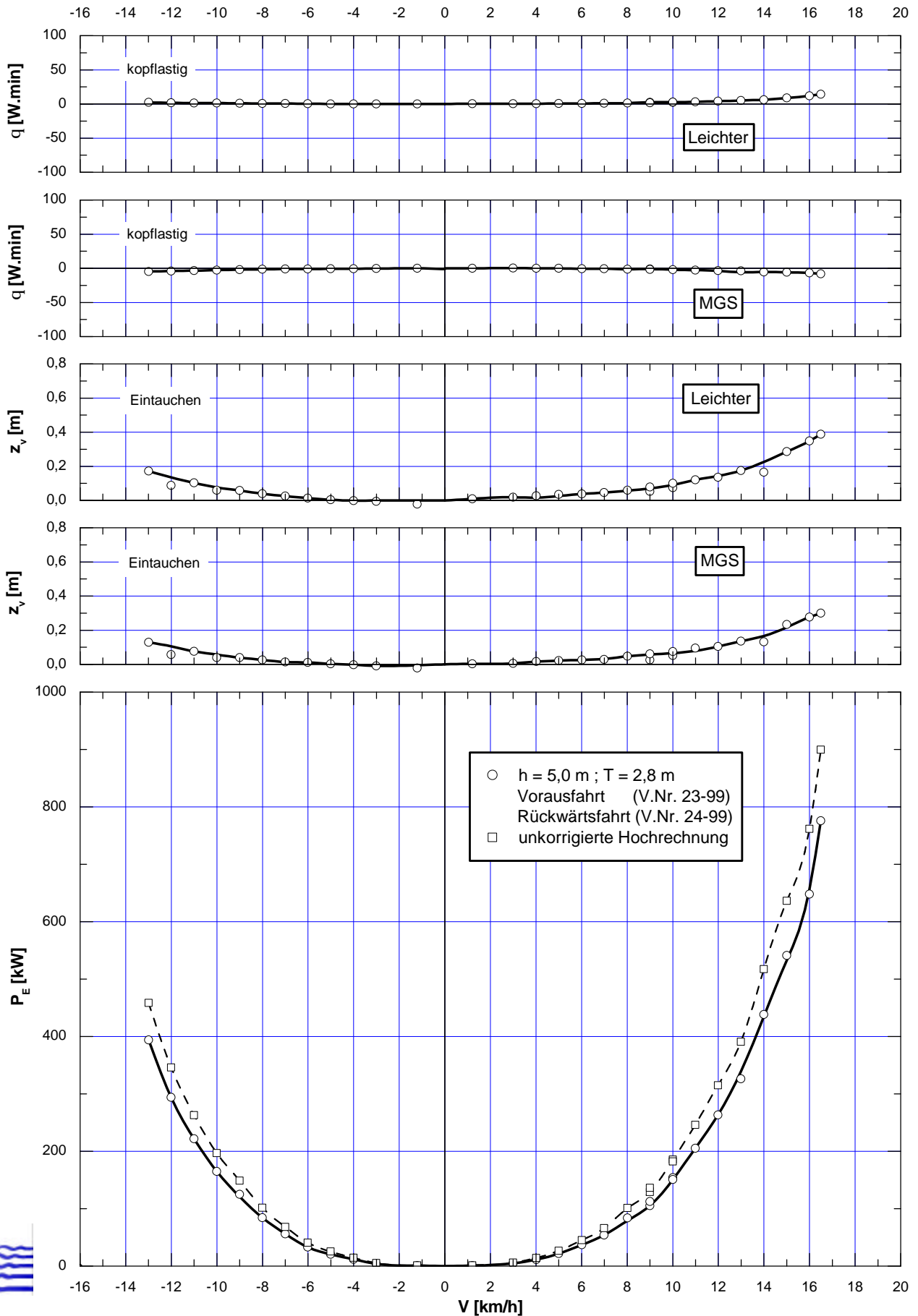
$L_{OA} = 162,7 \text{ m}$

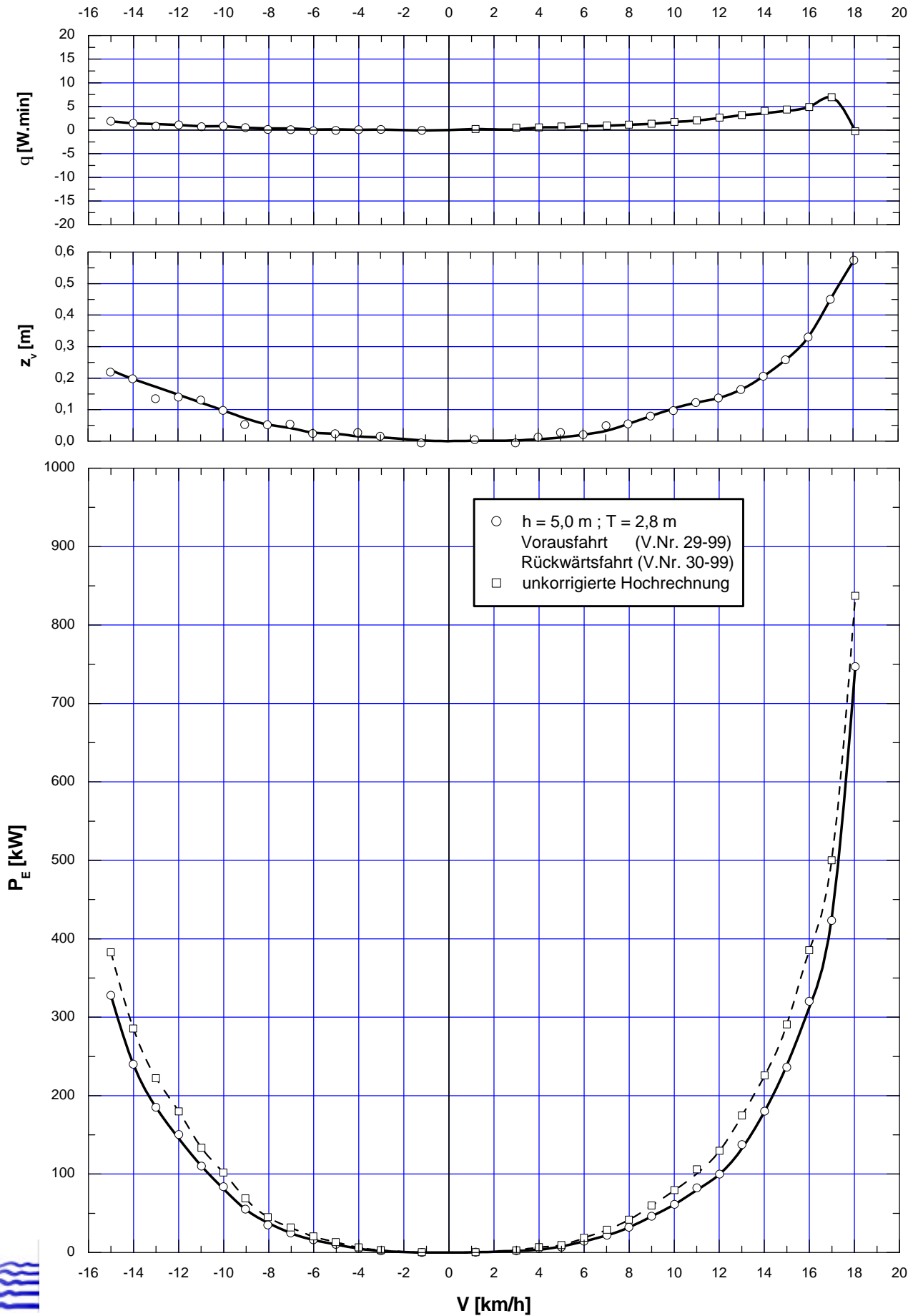


Propulsion voraus / rückwärts
MGS alleinfahrend, M1600
 $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$



Widerstand voraus / rückwärts
MGS + Leichter, M1600/1610
Formation: 1sp. - 2gl.
 $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$





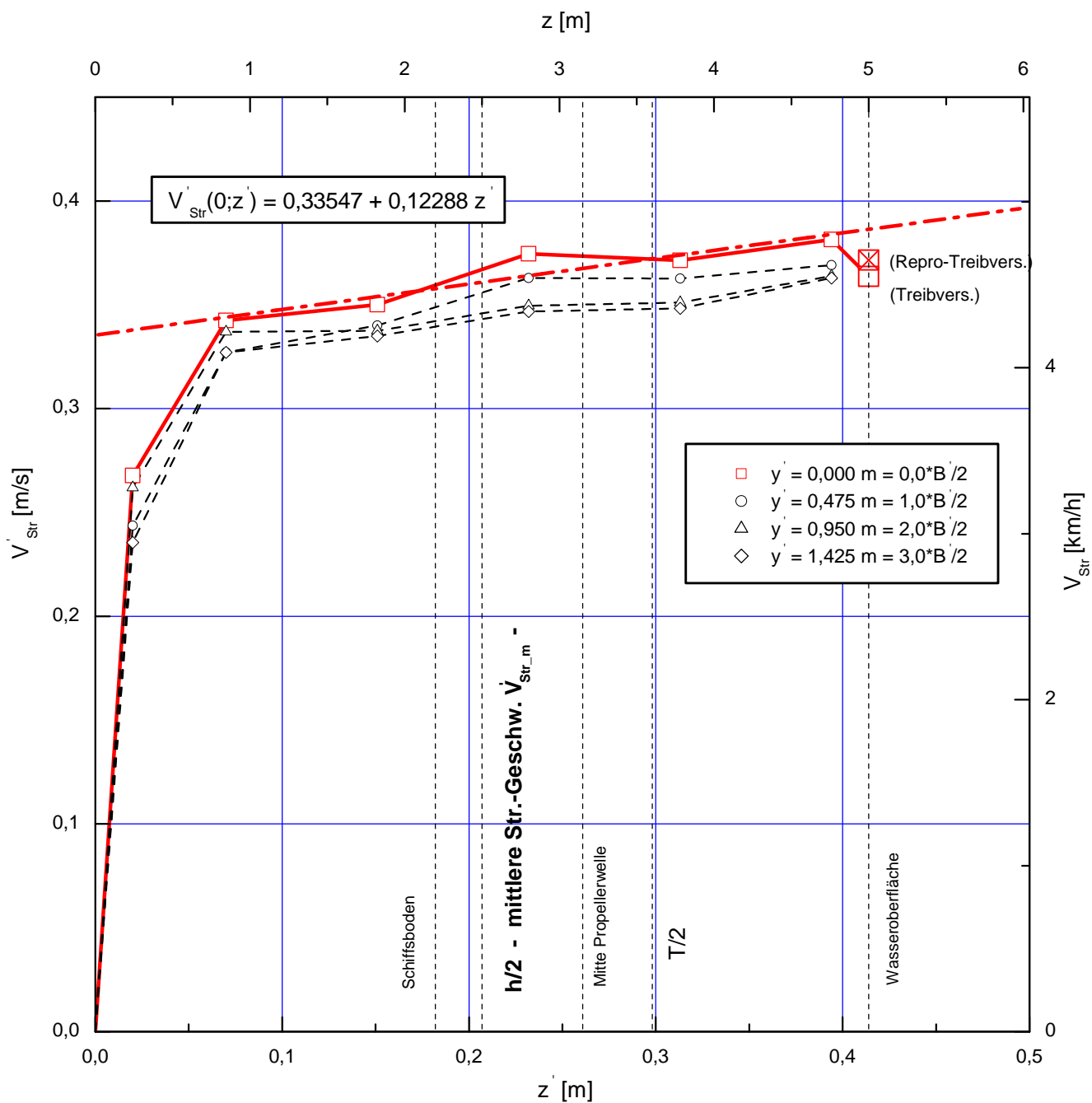
Strömungsprofil im VBD-Flachwasser-Tank (Meßquerschn., $x_s = 79,2$ m)

Einstellung nach Zielvorgabe $V_{Str} = 0,375$ m/s

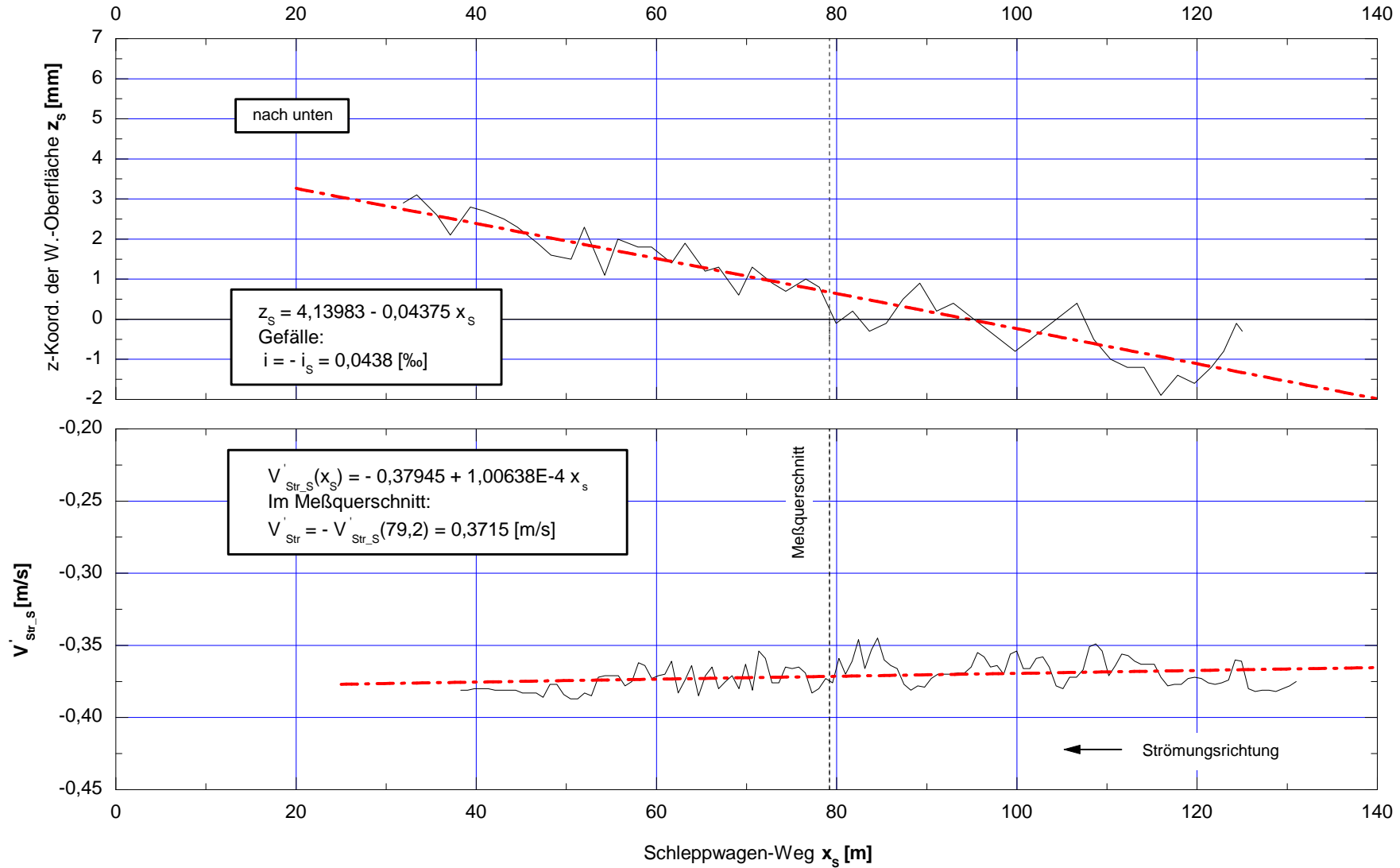
$V_{Str,m} = 4,515$ km/h ; $i = 0,0438$ ‰

$B = 0,950$ m ; $T = 0,232$ m

$h = 0,414$ m



Reproduktionsmessung von
 Strömungsgeschwindigkeit (Wasser-Oberfläche) und Gefälle
 aufgenommen in der Fahrspur des Modells
 jeweils vor Beginn einer Manöver-Serie
 Zielvorgabe: $V'_{Str} = 0,375$ [m/s]



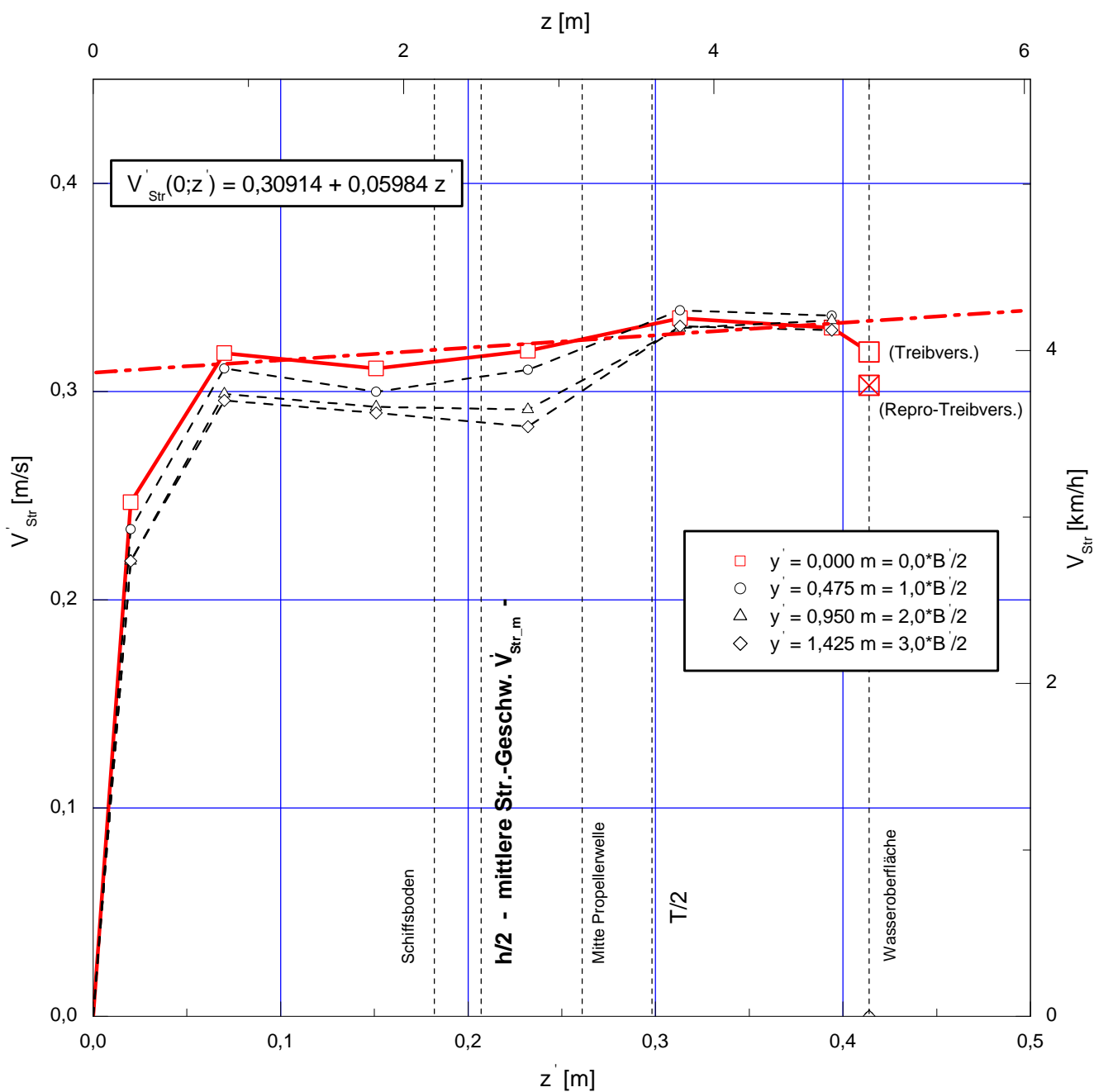
Strömungsprofil im VBD-Flachwasser-Tank (Meßquerschn., $x_s = 79,2$ m)

Einstellung nach Zielvorgabe $V_{Str} = 0,340$ m/s

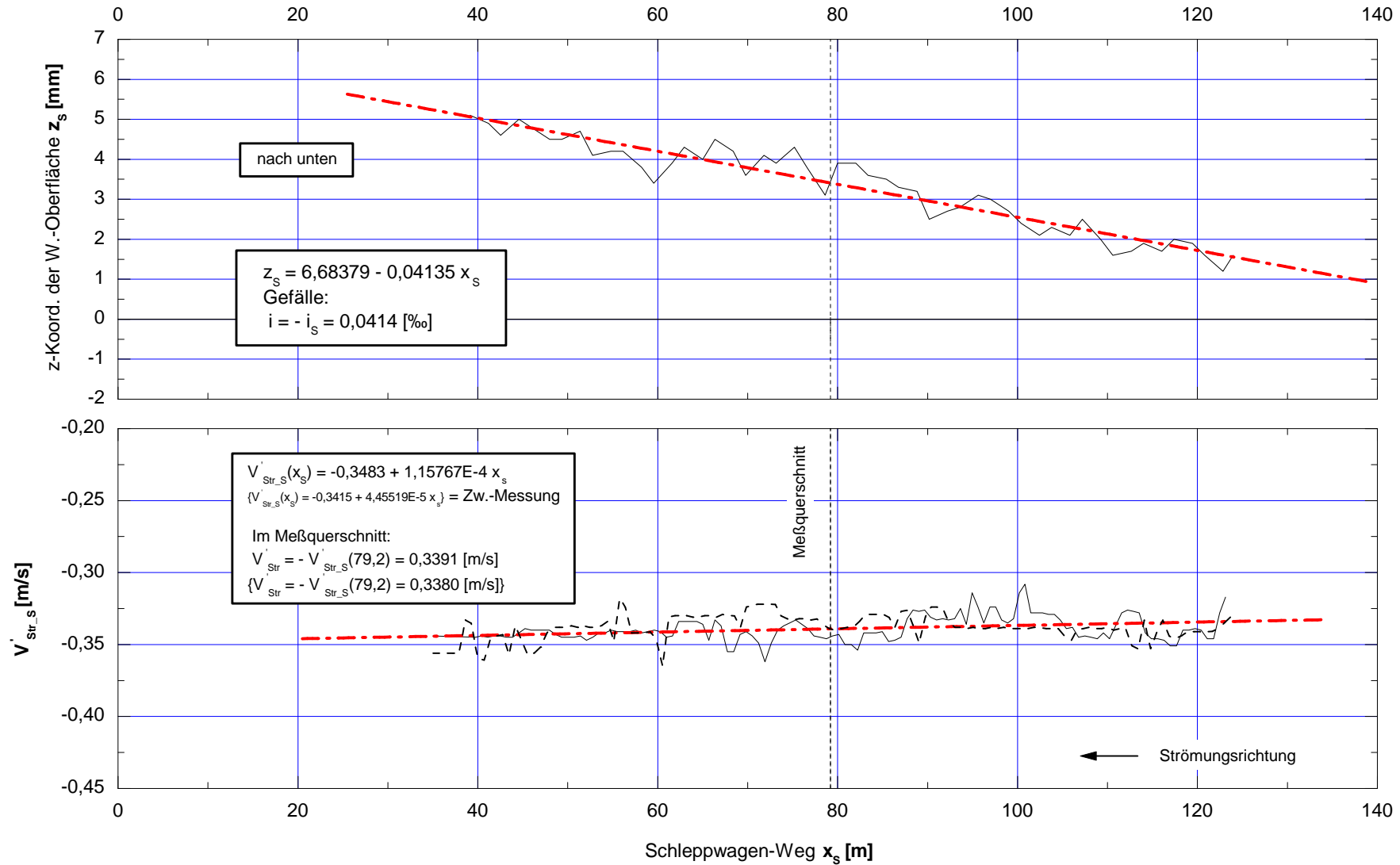
$V_{Str,m} = 4,023$ km/h ; $i = 0,0414$ ‰

$B = 0,950$ m ; $T = 0,232$ m

$h = 0,414$ m



Reproduktionsmessung von
 Strömungsgeschwindigkeit (Wasser-Oberfläche) und Gefälle
 aufgenommen in der Fahrspur des Modells
 jeweils vor Beginn einer Manöver-Serie
 Zielvorgabe: $V'_{Str} = 0,340$ [m/s]



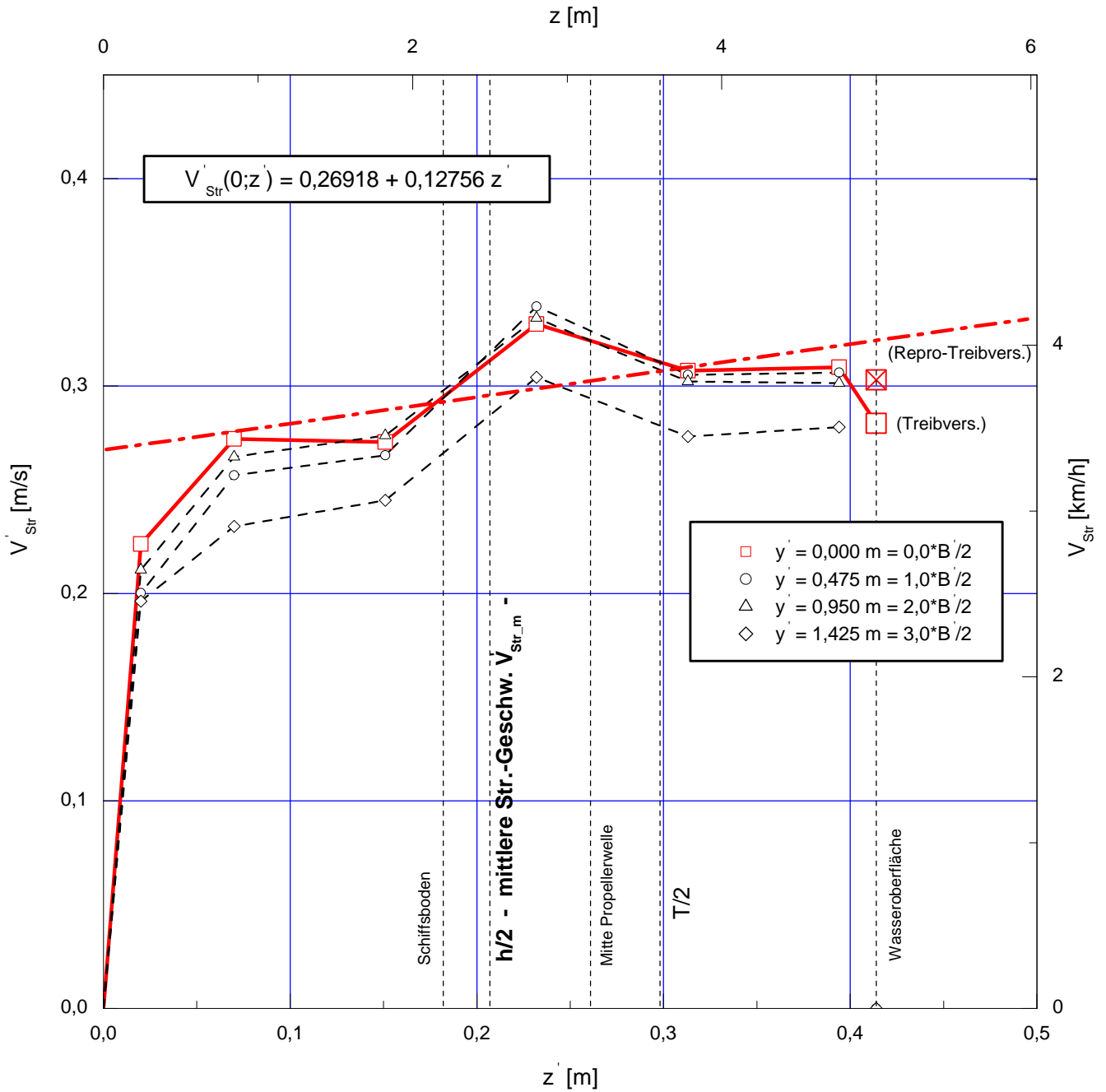
Strömungsprofil im VBD-Flachwassertank (Meßquerschn., $x_s = 79,2$ m)

Einstellung nach Zielvorgabe $V'_{Str} = 0,300$ m/s

$V_{Str,m} = 3,698$ km/h ; $i = 0,0310$ ‰

$B = 0,950$ m ; $T = 0,232$ m

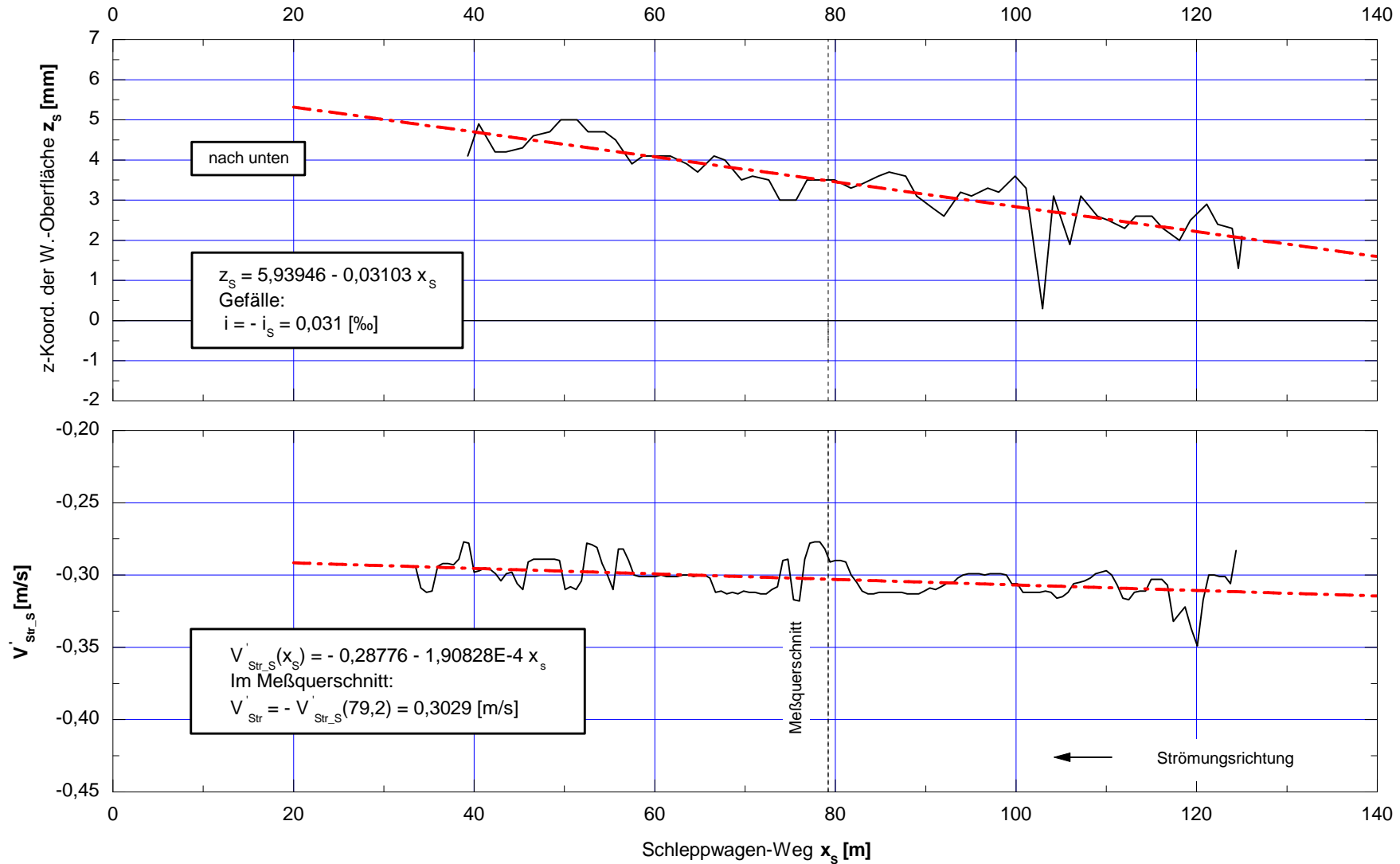
$h = 0,414$ m



Reproduktionsmessung von Strömungsgeschwindigkeit (Wasser-Oberfläche) und Gefälle

aufgenommen in der Fahrspur des Modells
jeweils vor Beginn einer Manöver-Serie

Zielvorgabe: $V'_{Str} = 0,300$ [m/s]



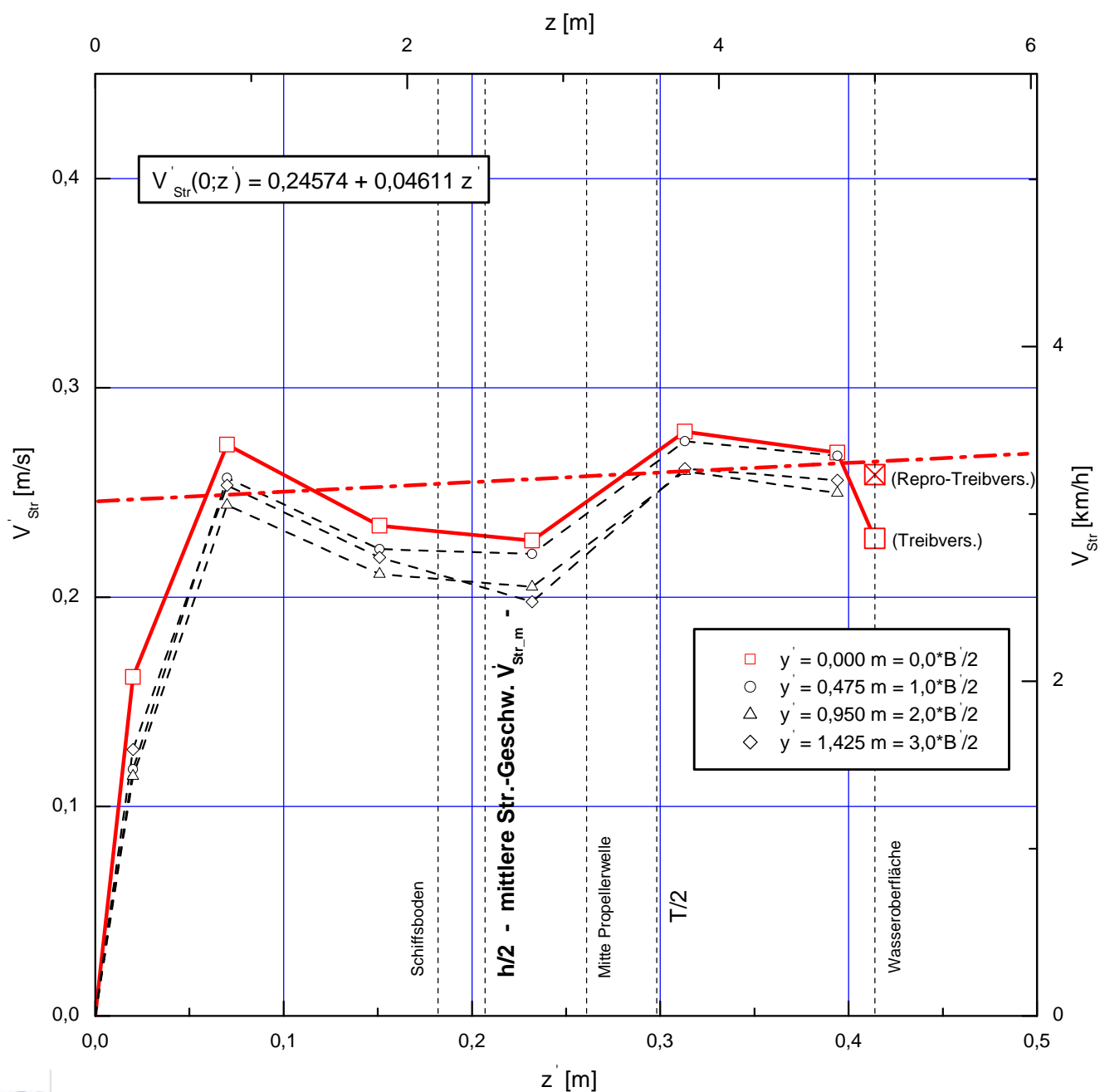
Strömungsprofil im VBD-Flachwasser-Tank (Meßquerschn., $x_s = 79,2$ m)

Einstellung nach Zielvorgabe $V_{Str} = 0,260$ m/s

$V_{Str,m} = 3,194$ km/h ; $i = 0,0180$ ‰

$B = 0,950$ m ; $T = 0,232$ m

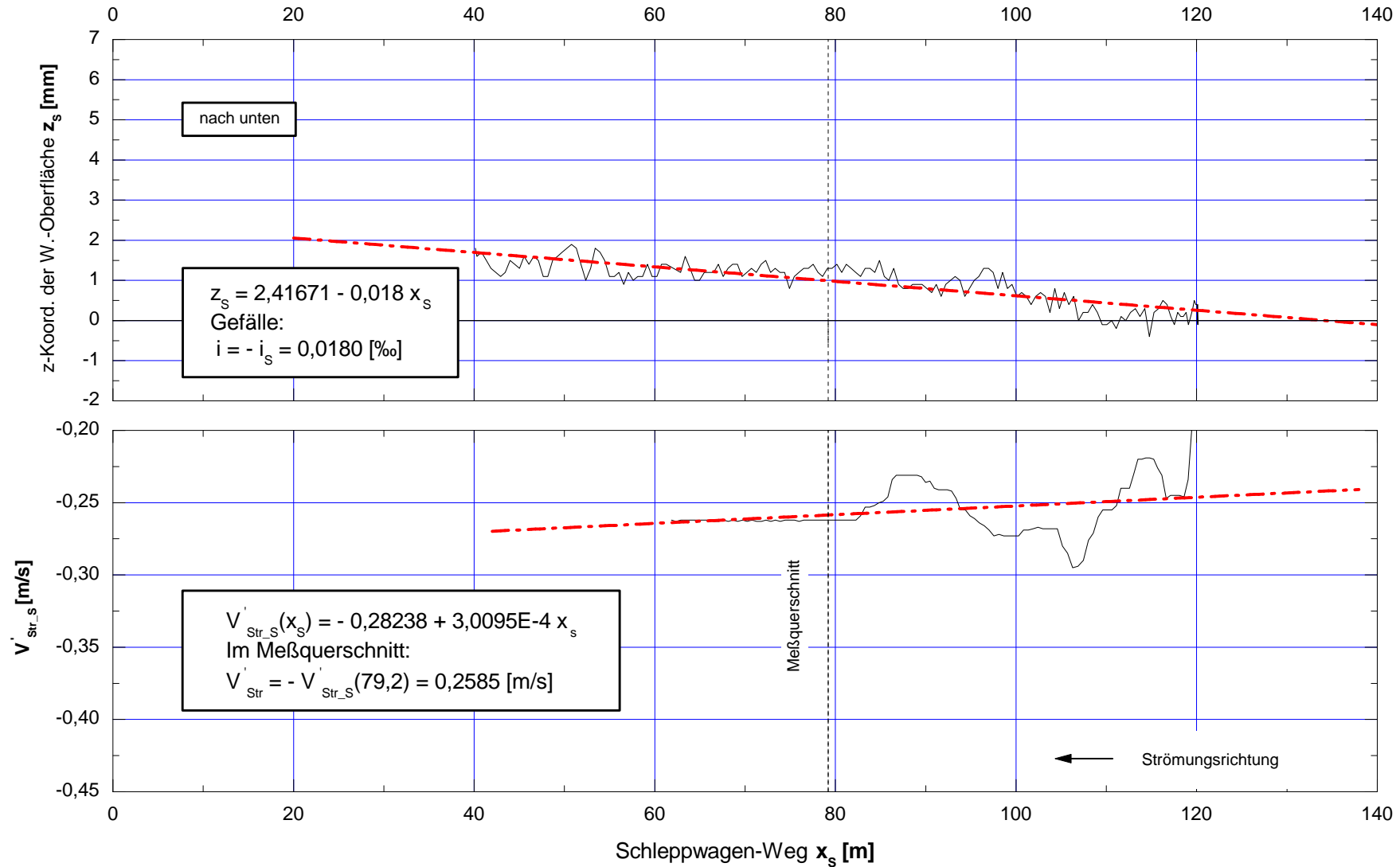
$h = 0,414$ m



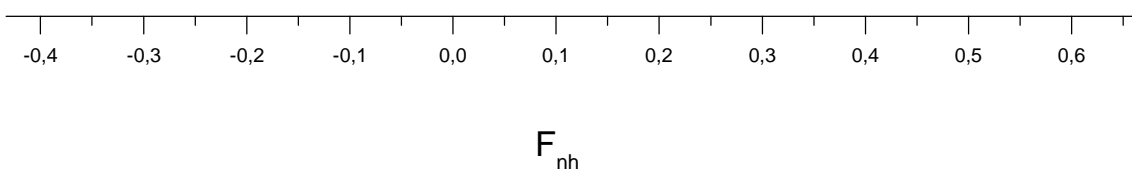
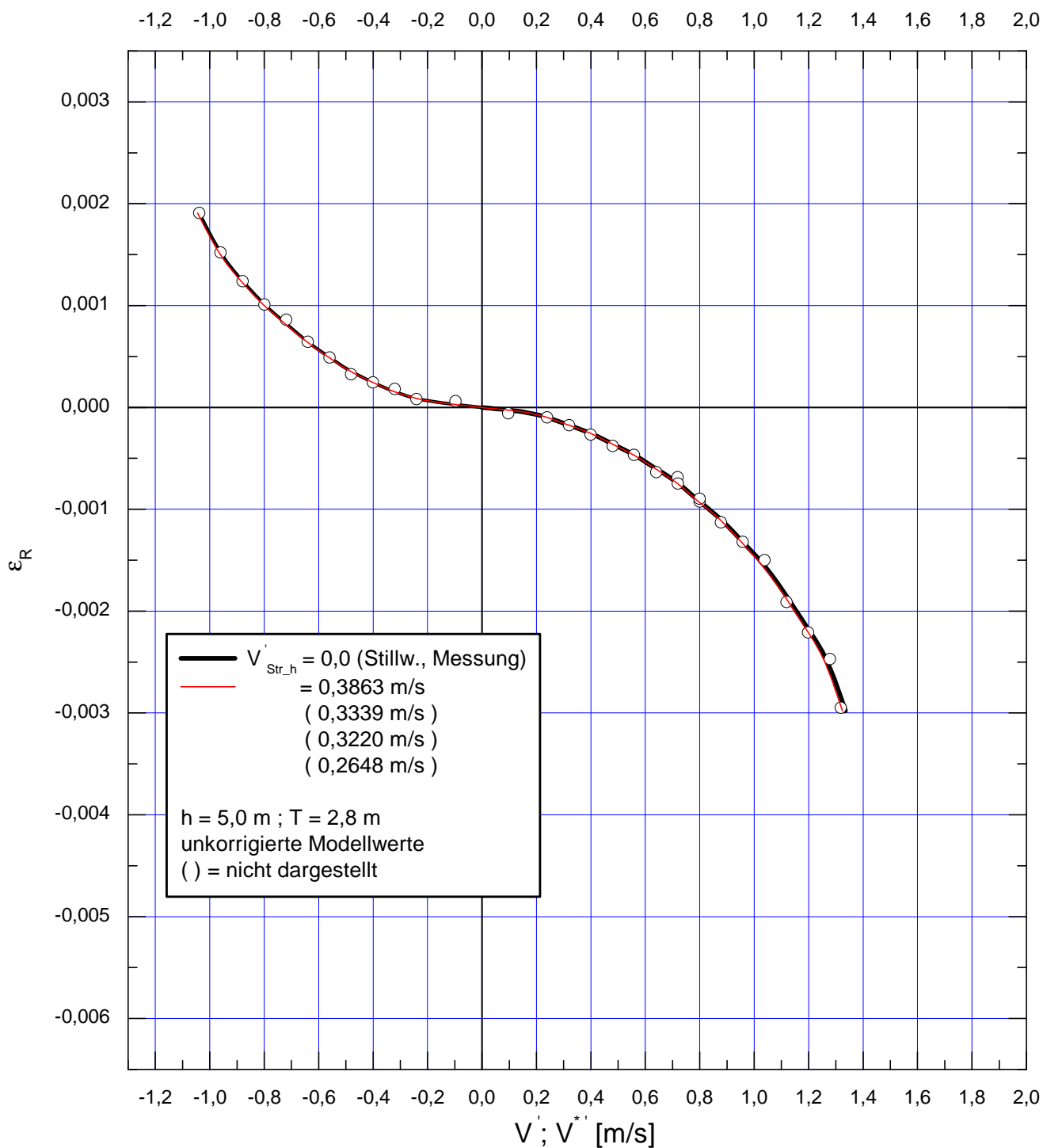
Reproduktionsmessung von Strömungsgeschwindigkeit (Wasser-Oberfläche) und Gefälle

aufgenommen in der Fahrspur des Modells
jeweils vor Beginn einer Manöver-Serie

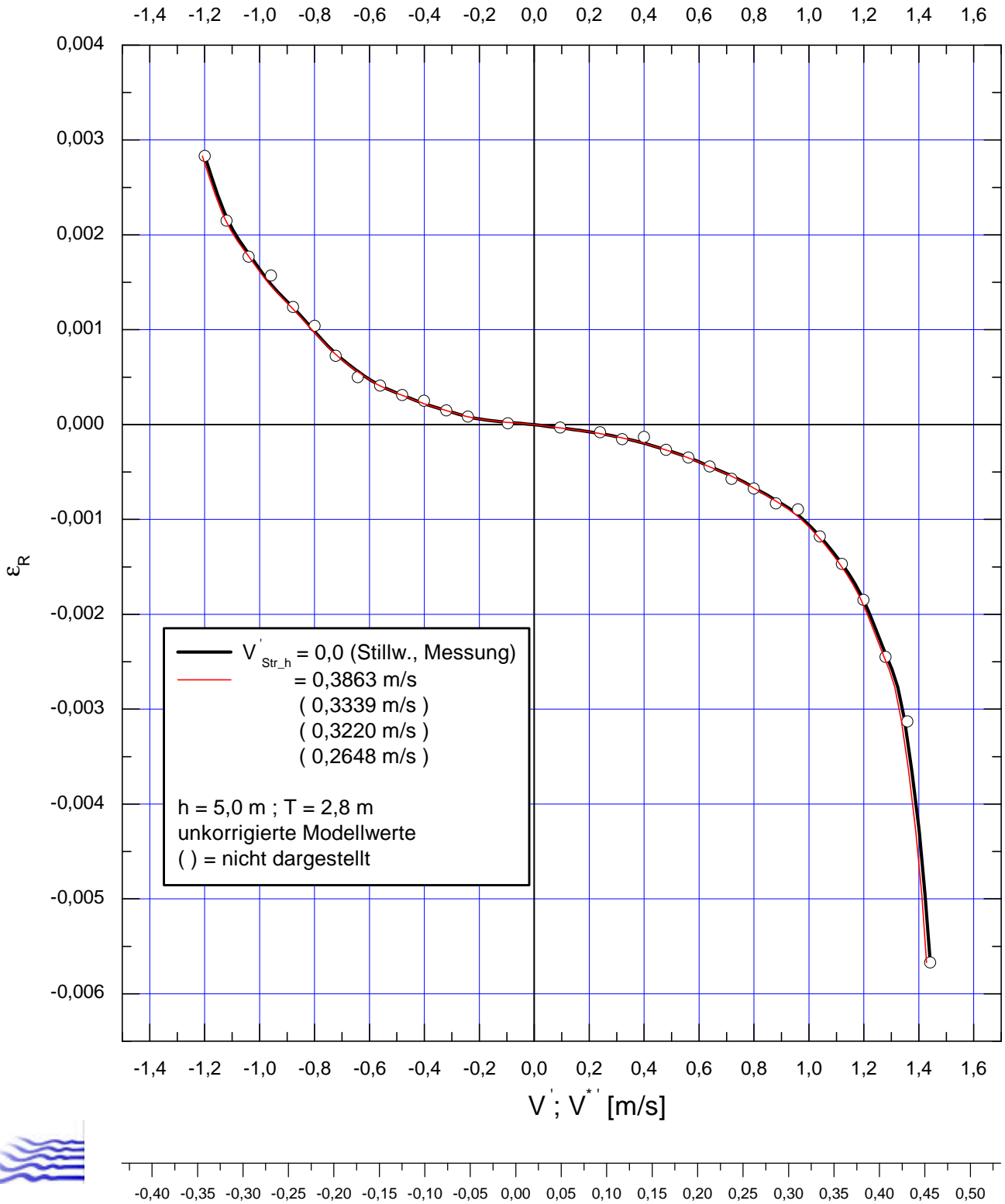
Zielvorgabe: $V'_{str} = 0,260$ [m/s]



Restwiderstandsbeiwert
bei Fahrt voraus / rückwärts
für Stillw. und Strömung (n. Kolberg [11])
MGS + Leichter, M1600/1610
Formation: 1sp. - 2gl.
 $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$



Restwiderstandsbeiwert
bei Fahrt voraus / rückwärts
für Stillw. und Strömung (n. Kolberg [11])
MGS alleinfahrend, M1600
 $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$



F_{nh}

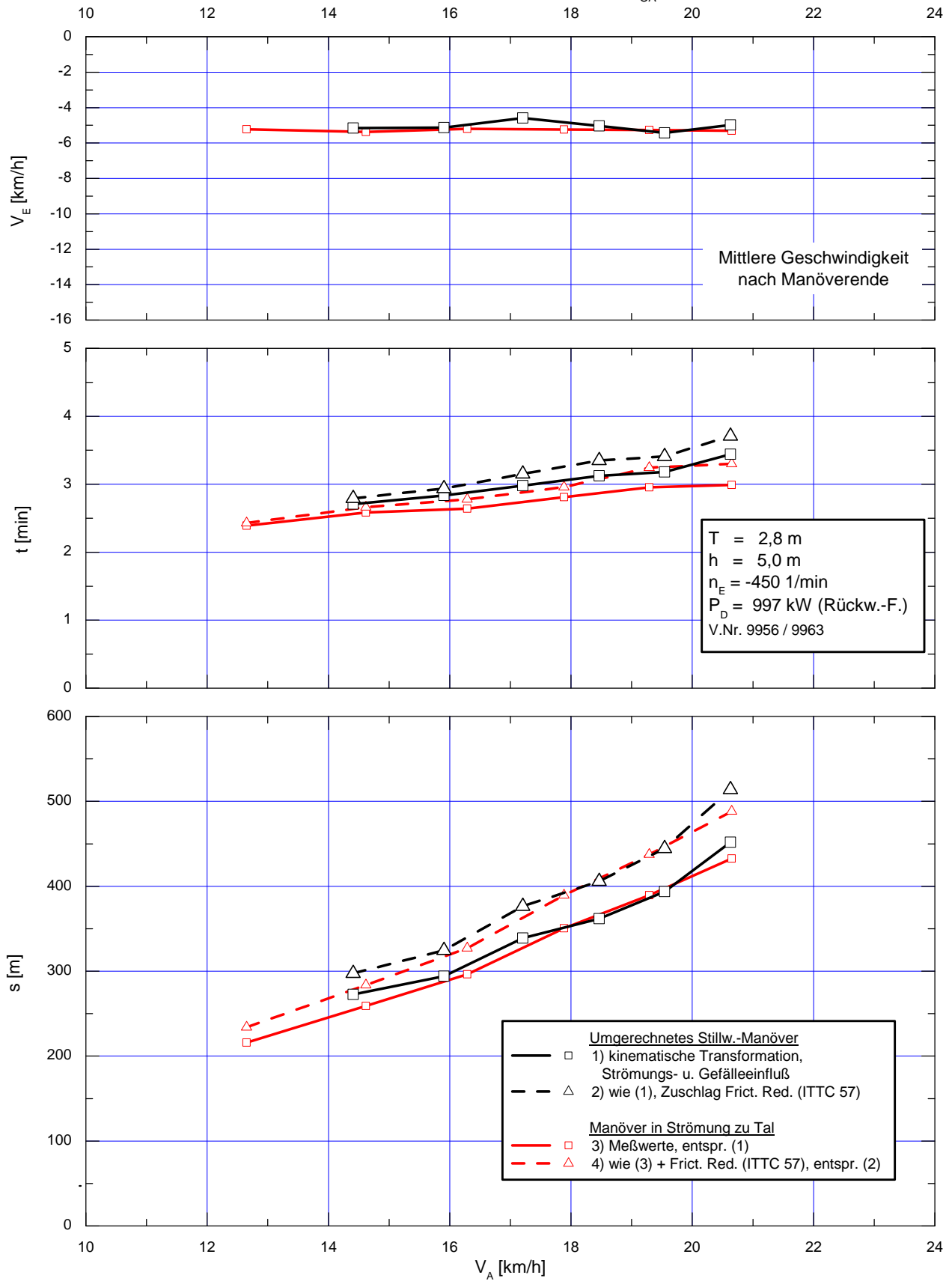
Stoppmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

Umgerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str_m} = 4,515 \text{ km/h} ; i = 0,044 \text{ ‰}$$

$$V_{Str_e} = 4,59 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
MGS 86,0 m + 1 x SL (M1600/1610), $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$



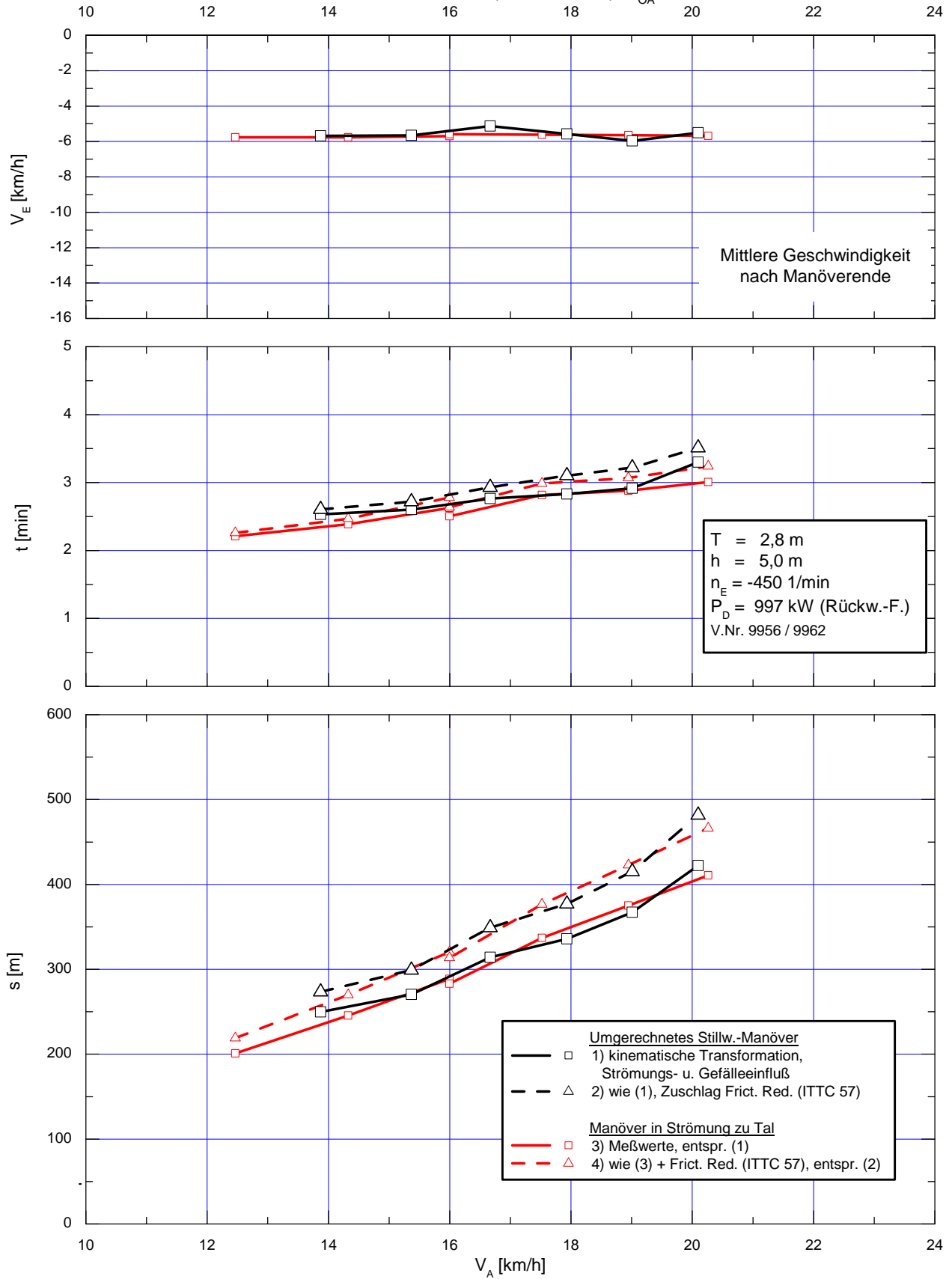
Stoppmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

Ungerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str,m} = 4,023 \text{ km/h ; } i = 0,0414 \text{ ‰}$$

$$V_{Str,e} = 4,062 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
MGS 86,0 m + 1 x SL (M1600/1610), $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$



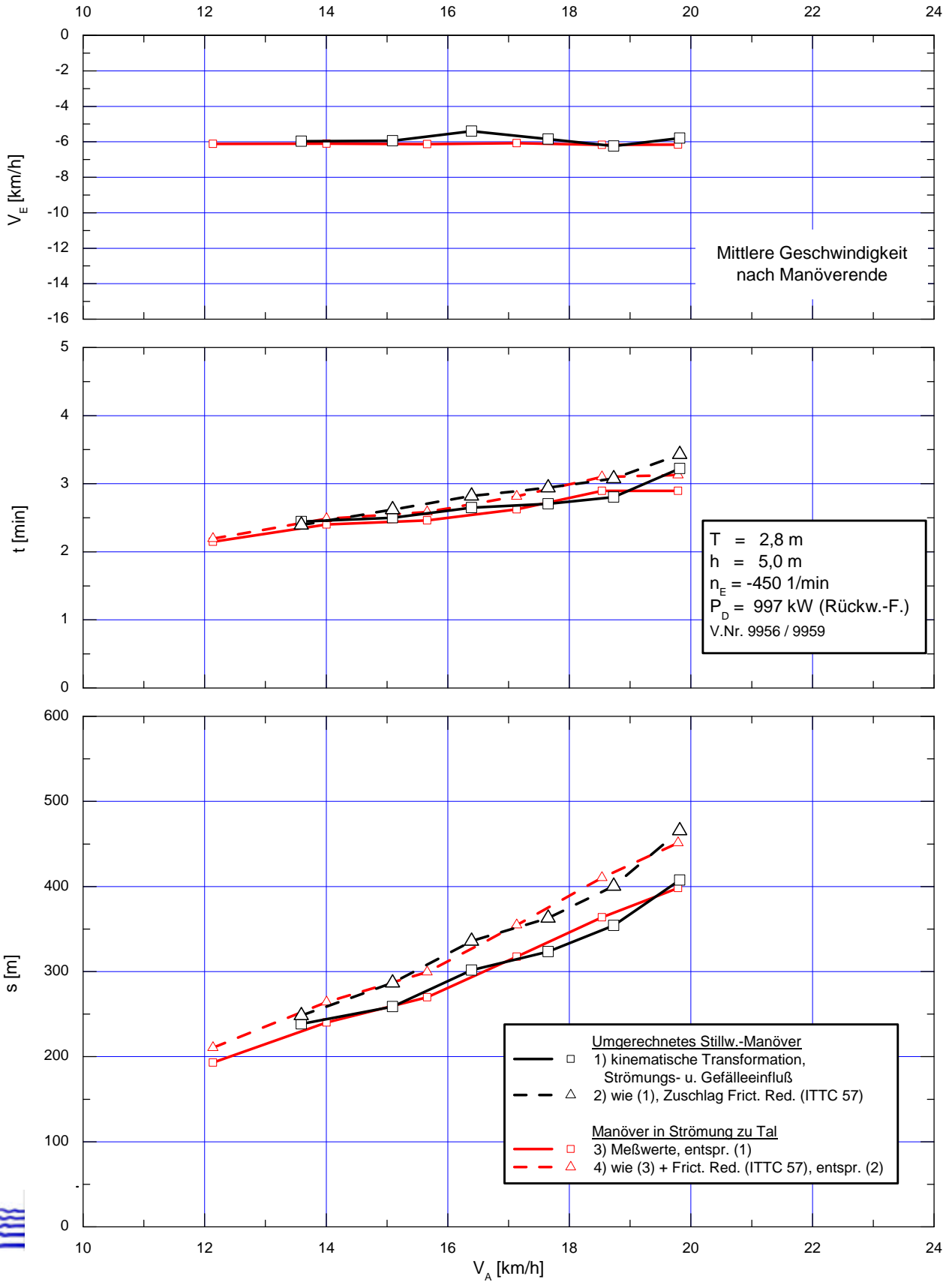
Stopmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

Umgerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str_m} = 3,698 \text{ km/h ; } i = 0,031 \text{ ‰}$$

$$V_{Str_e} = 3,784 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
 MGS 86,0 m + 1 x SL (M1600/1610), $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$



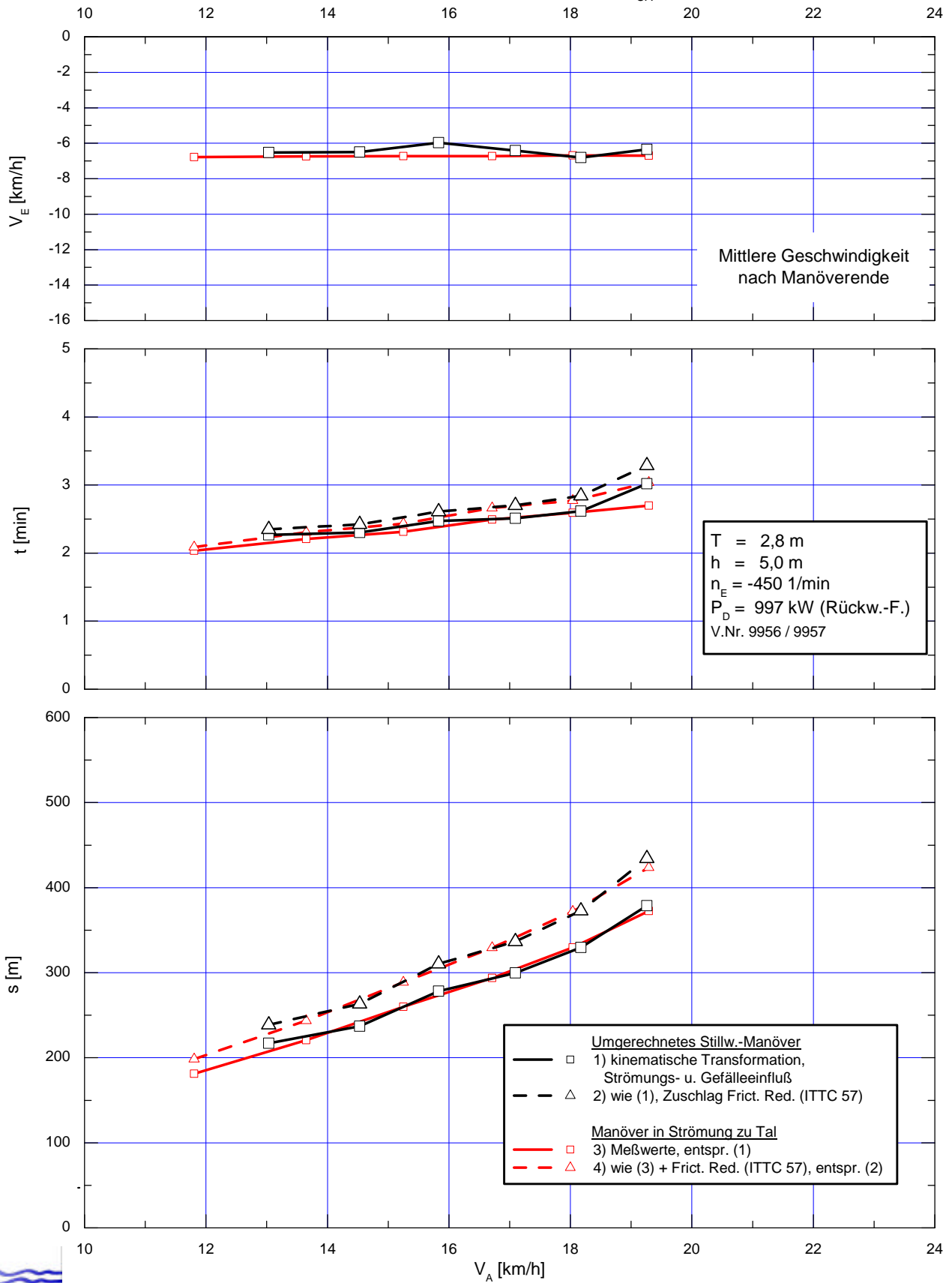
Stopmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

Umgerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str_m} = 3,194 \text{ km/h} ; i = 0,018 \text{ ‰}$$

$$V_{Str_e} = 3,225 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
 MGS 86,0 m + 1 x SL (M1600/1610), $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$



Stoppmanöver auf der Gefällestrcke zu Tal

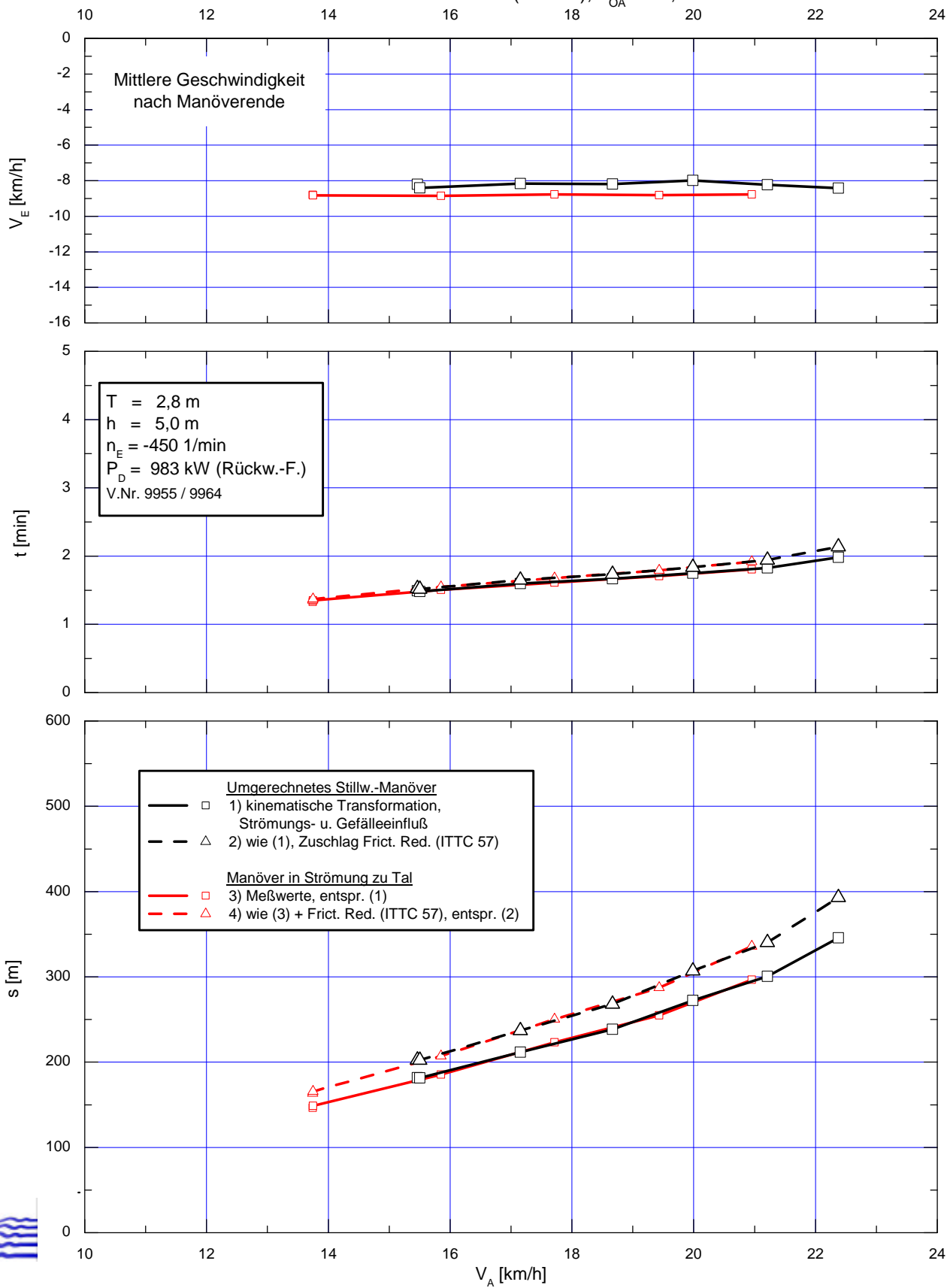
Umgerechnetes Stillwasseranöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str,m} = 4,515 \text{ km/h} ; i = 0,044 \text{ ‰}$$

$$V_{Str,e} = 4,59 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A

MGs alleinfahrend (M1600), $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$



Stoppmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

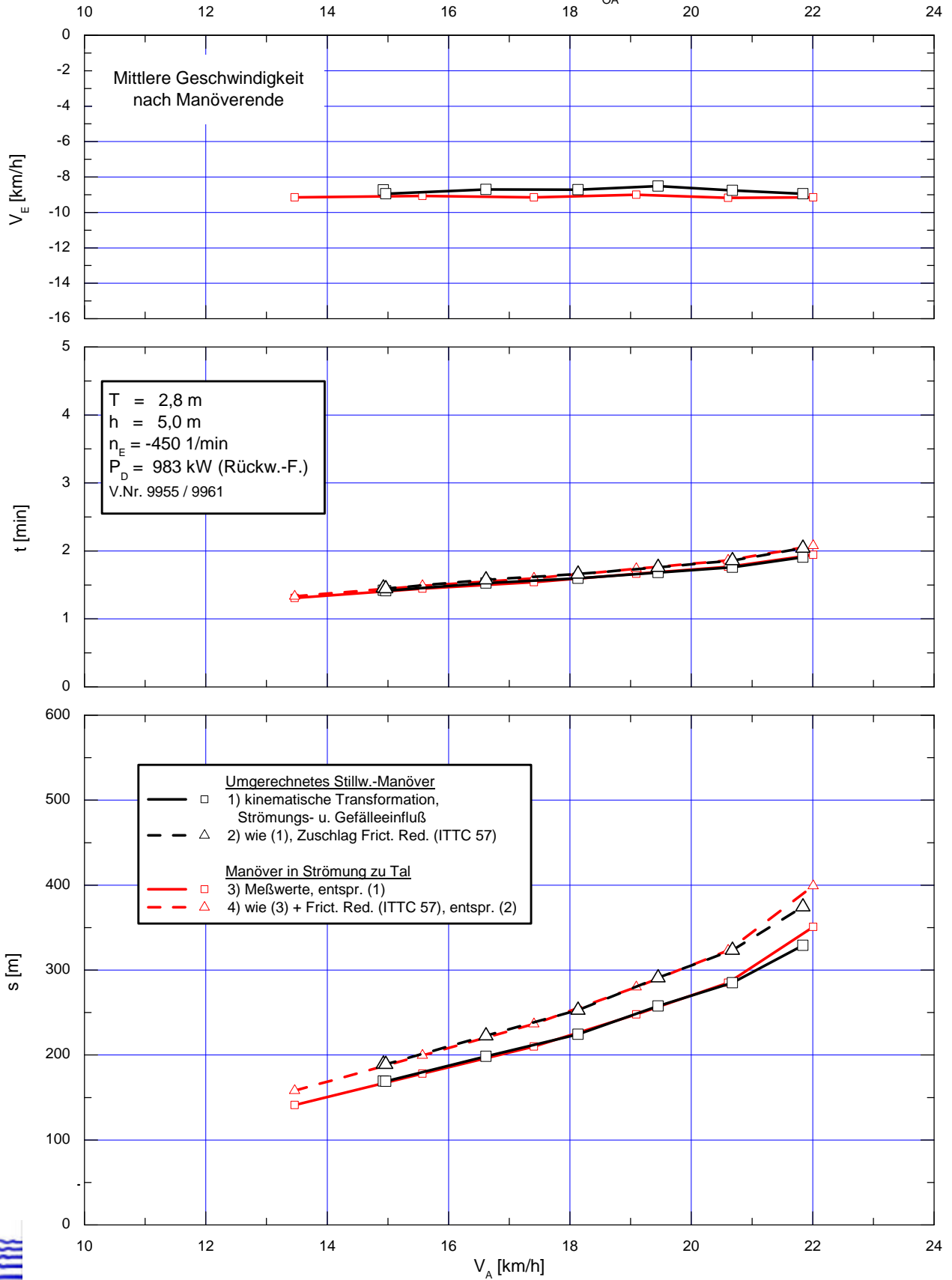
Umgerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str,m} = 4,023 \text{ km/h} ; i = 0,0414 \text{ ‰}$$

$$V_{Str,e} = 4,062 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A

MGS alleinfahrend (M1600), $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$



Stoppmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

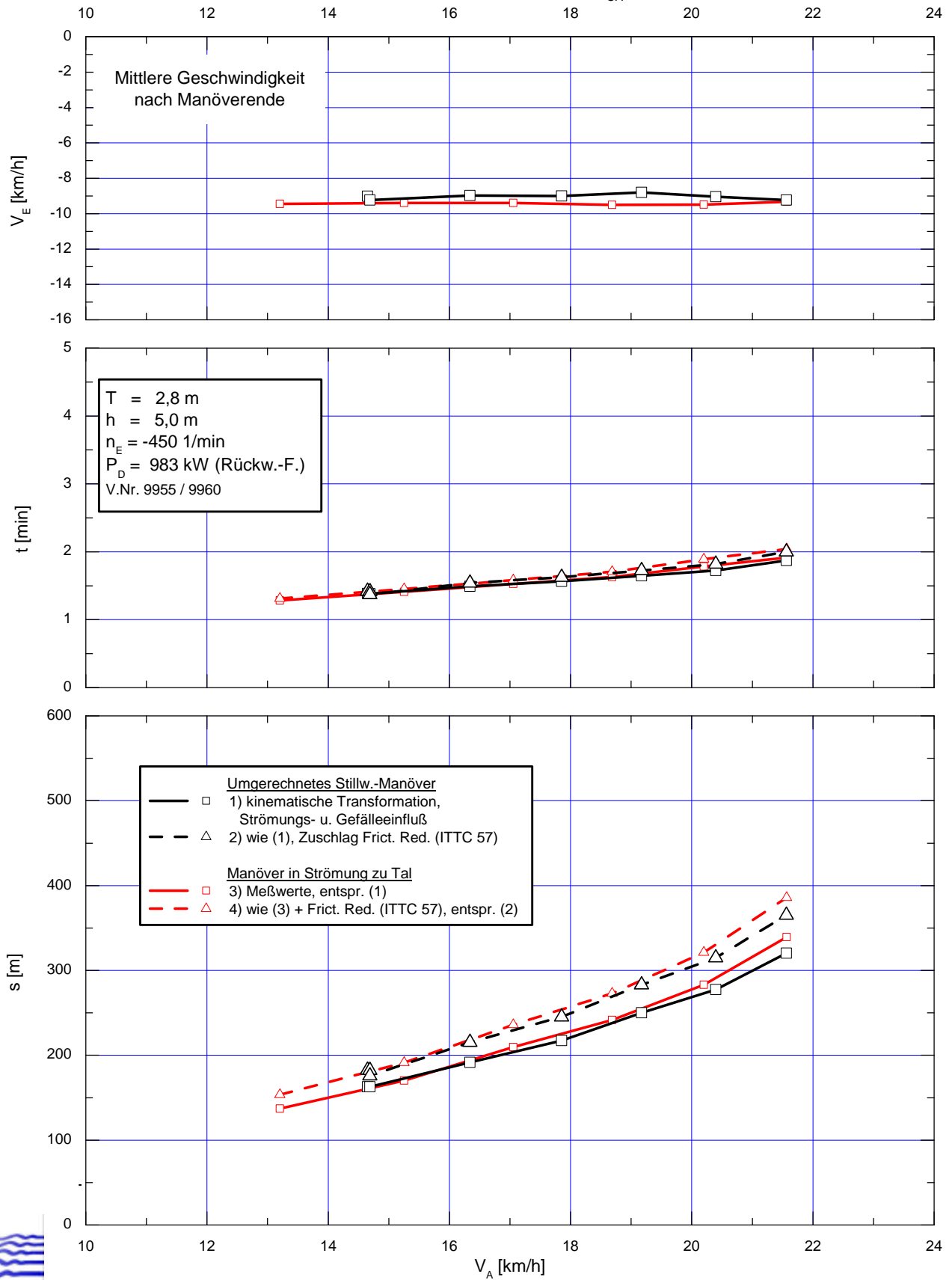
Umgerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

$$V_{Str,m} = 3,698 \text{ km/h} ; i = 0,0310 \text{ ‰}$$

$$V_{Str,e} = 3,784 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A

MGs alleinfahrend (M1600), $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$



Stoppmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

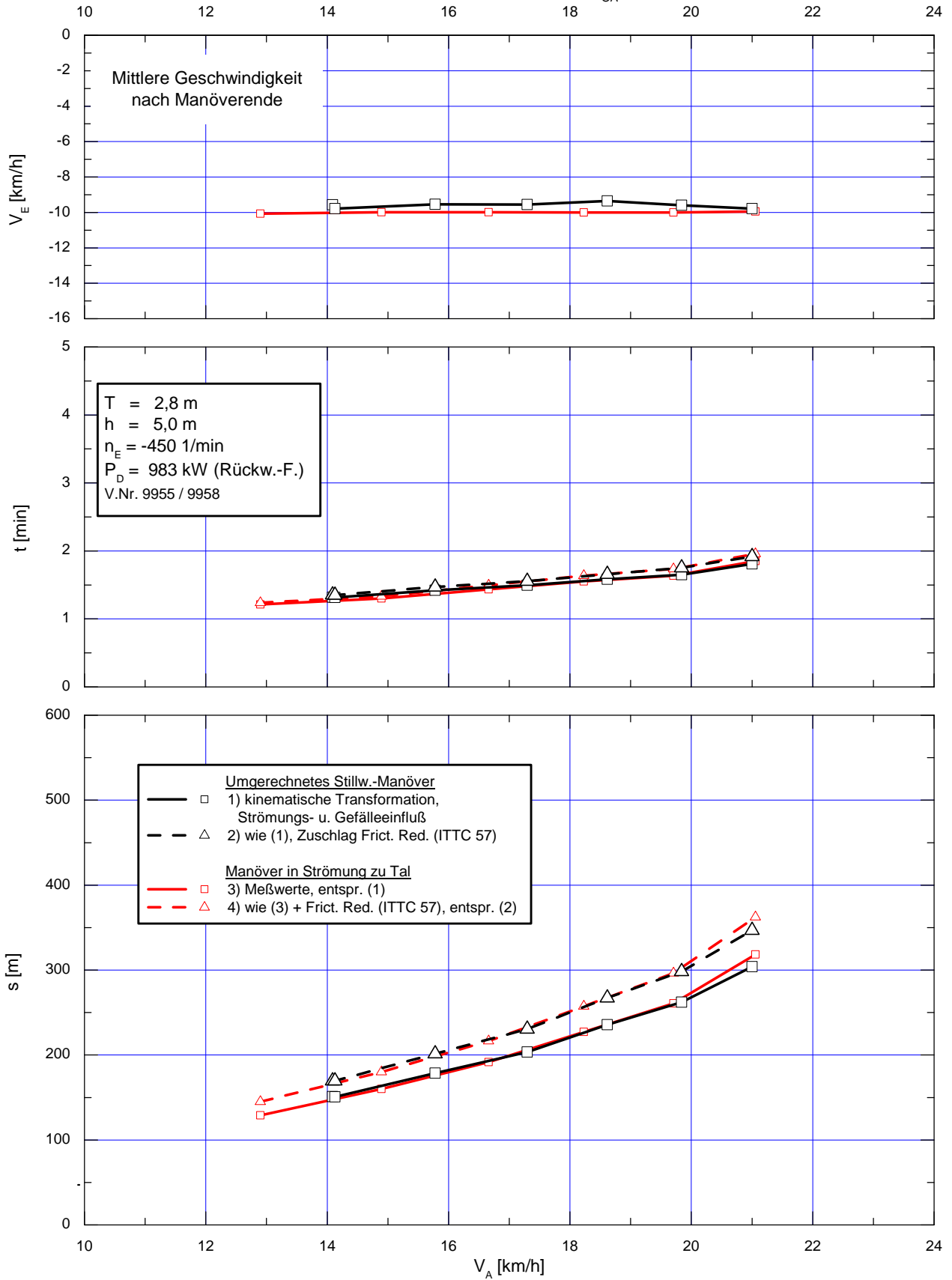
Umgerechnetes Stillwassermanöver und Manöver in Strömung

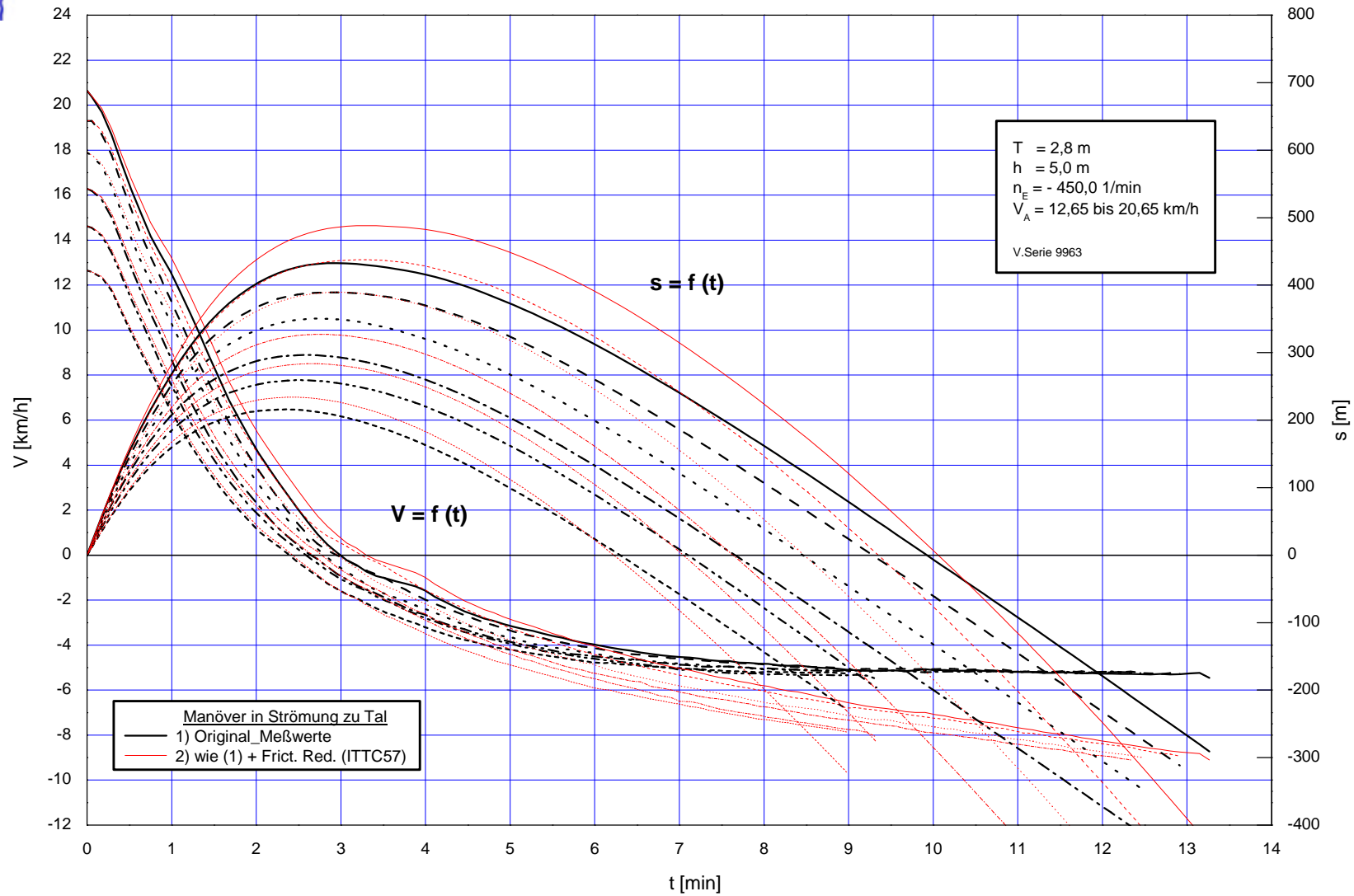
$$V_{Str,m} = 3,194 \text{ km/h} ; i = 0,0180 \text{ ‰}$$

$$V_{Str,e} = 3,225 \text{ km/h}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A

MGS alleinfahrend (M1600), $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$

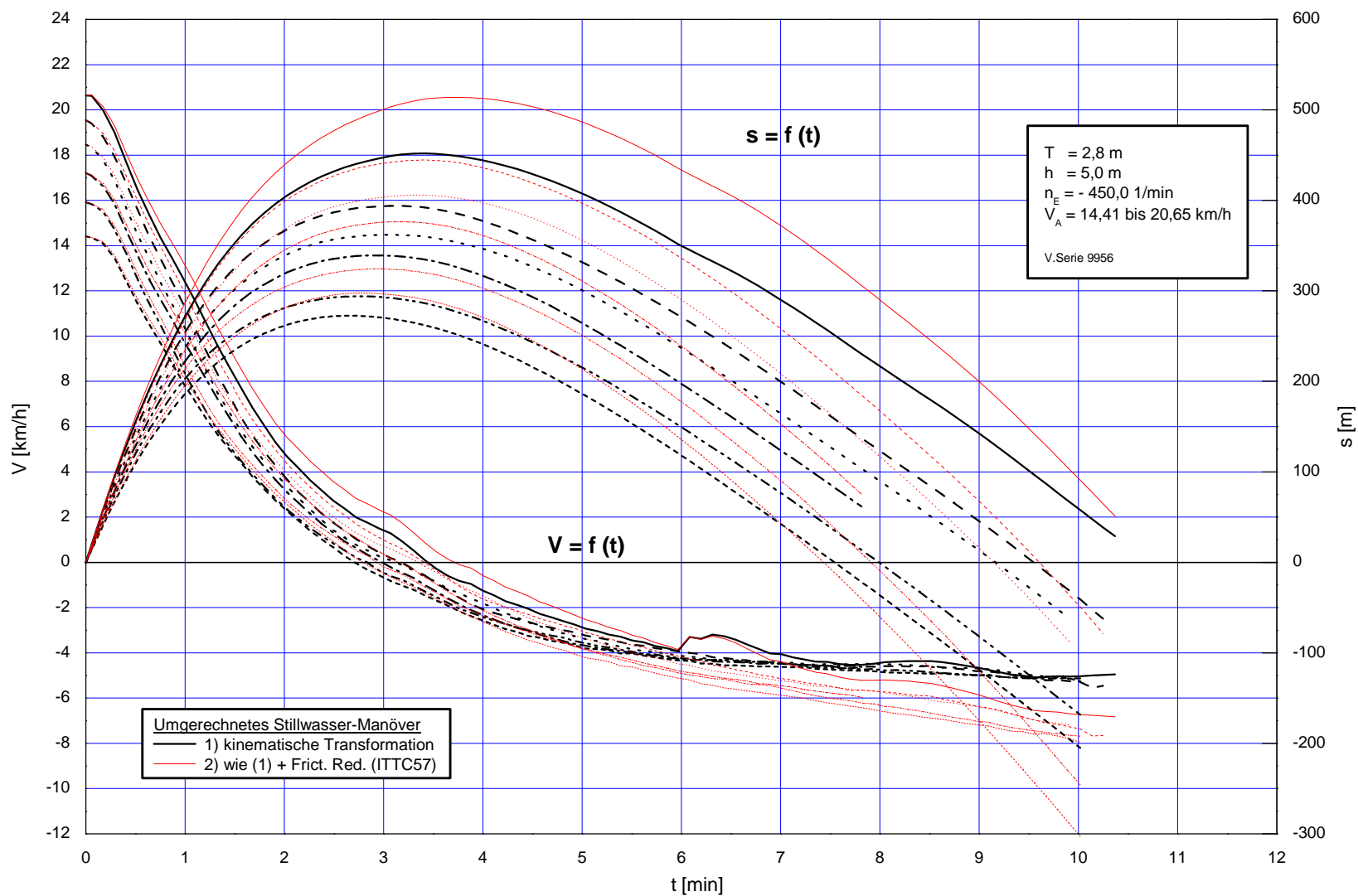




Stopmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

$$V_{\text{Str.m}} = 4,512 \text{ km/h ; } i = 0,044 \text{ ‰}$$

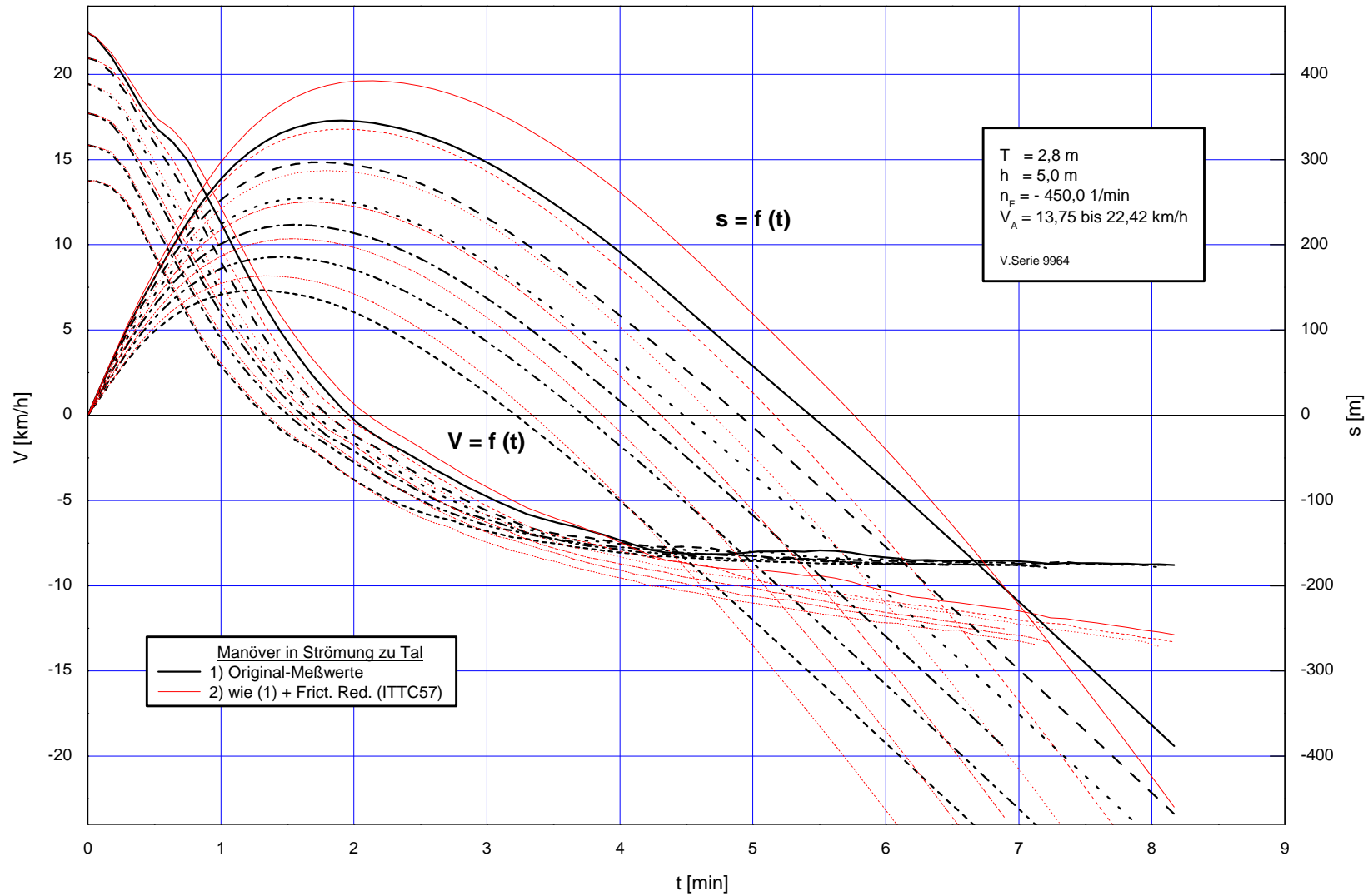
Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
 MGS + Leichter (M1600/1610), $L_{\text{OA}} = 162,7 \text{ m}$



Stoppmanöver in Stillwasser, umgerechnet auf den Fall "Stoppen in Strömung zu Tal"

$V_{Str,m} = 4,512 \text{ km/h}$; $i = 0,044 \text{ ‰}$

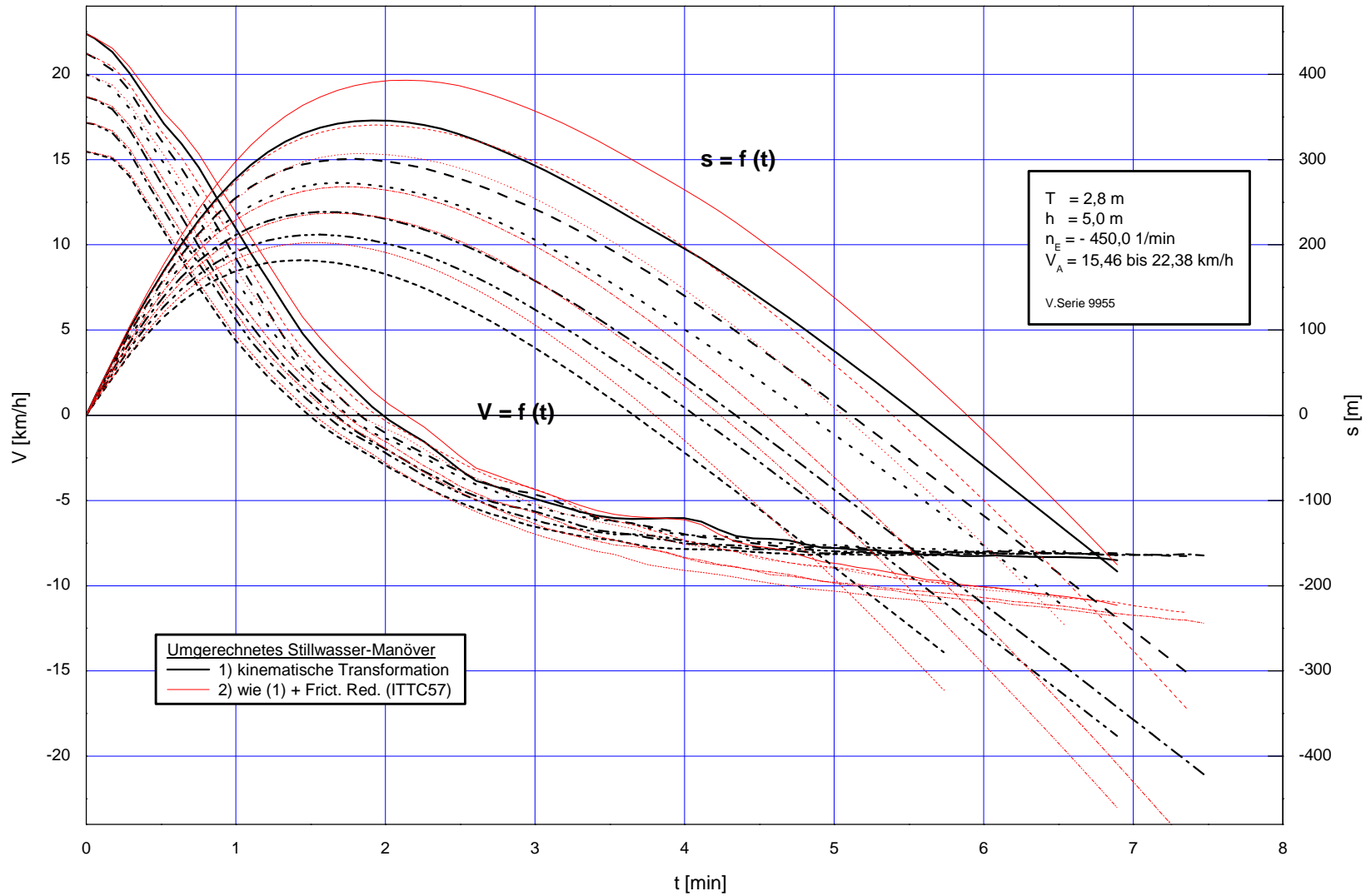
Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
 MGS + Leichter (M1600/1610), $L_{OA} = 162,7 \text{ m}$



Stopmanöver auf der Gefällestrecke zu Tal

$V_{Str,m} = 4,512 \text{ km/h ; } i = 0,044 \text{ ‰}$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
 MGS alleinfahrend (M1600), $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$



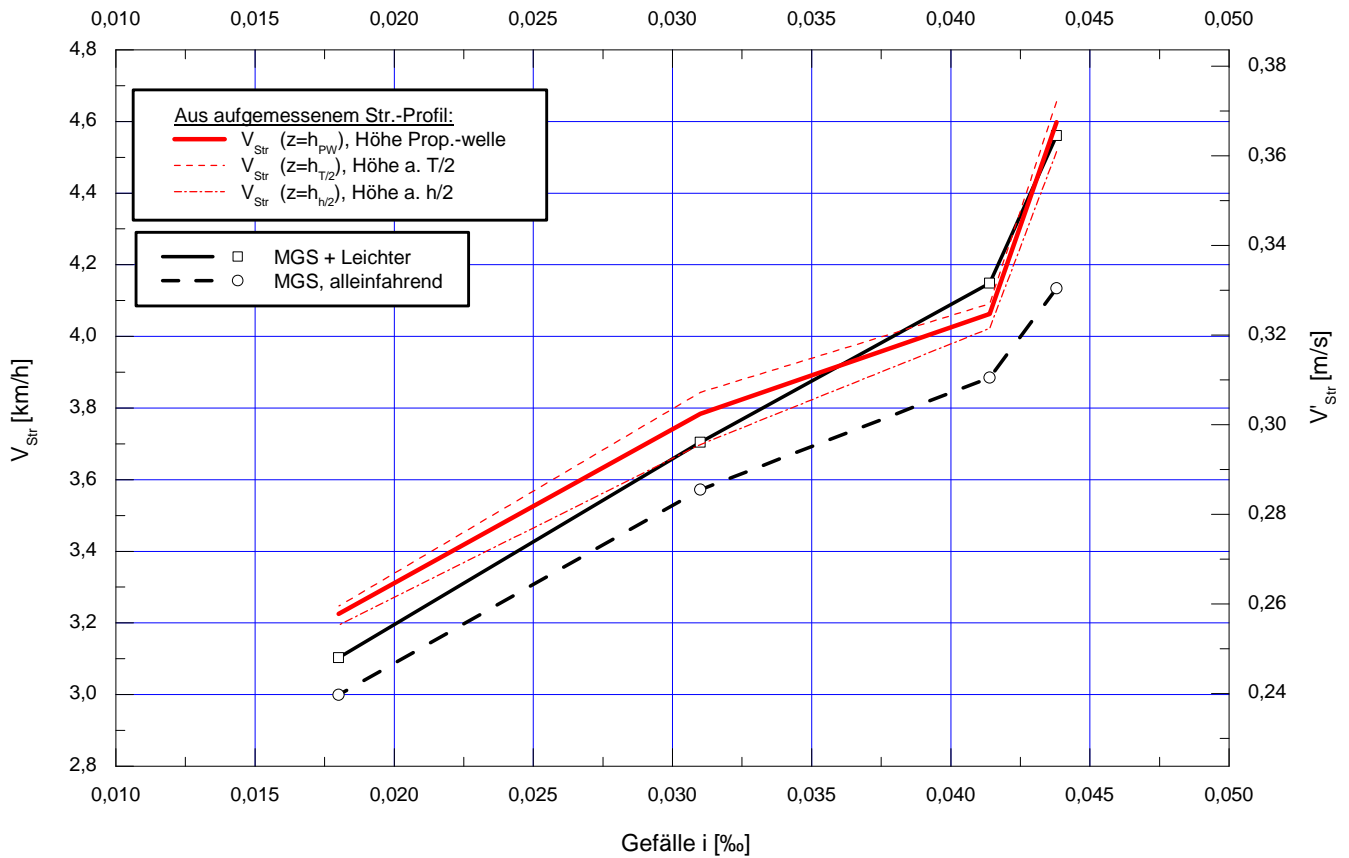
Stoppmanöver in Stillwasser, umgerechnet auf den Fall "Stoppen in Strömung zu Tal"

$$V_{Str,m} = 4,512 \text{ km/h ; } i = 0,044 \text{ ‰}$$

Variation der Manöveranfangsgeschwindigkeit V_A
 MGS alleinfahrend (M1600), $L_{OA} = 86,0 \text{ m}$

Identifikation der Strömungsgeschwindigkeit

Effektive Geschw. ermittelt aus Propulsionskennwerten
 verglichen mit Strömungsaufmessungen



Schiffs- und Propellerdaten

Bez.	Dim.	Großausf. $\lambda = 1$	Modell $\lambda = 12,078$
Motorgüterschiff (M 1600)			
L _{OA}	m	86,0	7,120
L _{WL}	m	85,463	7,076
B	m	11,45	0,948
T	m	2,8	0,232
Vol	m ³	2295	1,303
S	m ²	1279	8,770
Leichter (M 1610)			
L _{OA}	m	76,68	6,349
L _{WL}	m	76,55	6,338
B	m	11,48	0,950
T	m	2,8	0,232
Vol	m ³	2312	1,312
S	m ²	1382	9,476
Koppelverband (M 1600 / M 1610)			
L _{OA}	m	162,7	13,469
L _{WL}	m	162,5	13,459
B	m	11,48	0,950
T	m	2,8	0,232
Vol	m ³	4607	2,615
S	m ²	2662	18,246

Bez.	Dim.	Großausf. $\lambda = 1$	Modell $\lambda = 12,078$
Propeller P135R			
Typ	-	Wag. B3.65	Wag. B3.65
D	m	1,763	0,146
P/D	-	0,87	0,87
A _E /A ₀	-	0,65	0,65
Z	-	3	3
C _{0,7R}	m	0,839	0,0695

**Grenzgeschwindigkeiten und -leistungen
bei Maximaldrehzahl (Stillwasser, Großausführung)**

$n_{\max} = \pm 450 \text{ min}^{-1}$ (Drehzahlbegrenzung)

Bez.	Dim.	h = 5,0 m	h = 7,5 m	Maßstabs- korrektur
Motorgüterschiff (M 1600)				
Vorausfahrt				
P_D	kW	1286	-	ja
V	km/h	17,74	-	ja
Rückwärtsfahrt				
P_D	kW	983	-	ja
		1000	-	nein
V	km/h	-14,0	-	ja
		-13,0	-	nein

MGS - Koppelverband (M 1600 / M 1610)				
Vorausfahrt				
P_D	kW	1220	1052,7	ja
V	km/h	15,54	16,53	ja
Rückwärtsfahrt				
P_D	kW	997	-	ja
		1037	-	nein
V	km/h	-10,07	-	ja
		-9,83	-	nein