

Versuchsanstalt für Binnen-
schiffbau e.V., Duisburg

Name der Forschungsstelle(n)

11552 N / 4

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.06.1998 bis 31.08.2000

Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum: 01.06.1998 bis 31.08.2000

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Verminderung des Antriebsleistungsbedarfs eines
Koppelverbandes, bestehend aus schiebendem
Motorschiff und Leichter, durch Auffüllen der
Koppelstelle mit flexiblen Elementen

Duisburg, 15.08.2000

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters
(Dipl.-Ing. J. Zöllner)

Verminderung des Antriebsleistungsbedarfs eines Koppelverbandes, bestehend aus schiebendem Motorschiff und Schubleichter, durch Auffüllen der Koppelstelle mit flexiblen Elementen

AiF-Vorhaben Nr. 11552 N

Zusammenfassung

Bei der Umströmung eines Koppelverbandes tritt zwischen dem Leichter und dem schiebenden Gütermotorschiff eine Unstetigkeitsstelle auf, die zu einer Strömungsablösung (Totwasser, Wirbelbildung) und zusätzlicher Bildung freier Oberflächenwellen führt. Zur Reduzierung der Wellen- und Wirbelbildung an der Koppelstelle und gleichzeitiger Verbesserung des Antriebswirkungsgrades wurden im Modellversuch unterschiedliche Volumenkörper im Übergangsbereich Leichterheck - Motorschiffsbug angebracht. Die durch die verschiedenartigen Volumenkörper erreichbaren Leistungsverbesserungen wurden durch Propulsionsversuche in zwei Kanalprofilen ermittelt.

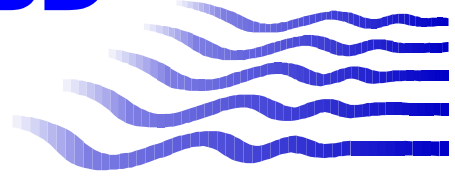
Mit numerischen Verfahren (CFX-5) konnten die Strömungsverhältnisse im Bereich der Koppelstelle erfaßt werden. Zur Validierung der Ergebnisse der numerischen Berechnungen wurde die Strömung im Bereich der Koppelstelle mittels LDV aufgemessen.

Mit den optimierten Volumenkörpern wurden vergleichende Messungen im Großversuch angeschlossen, um die quantitative Übertragbarkeit der Modellversuchsergebnisse sicherzustellen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

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

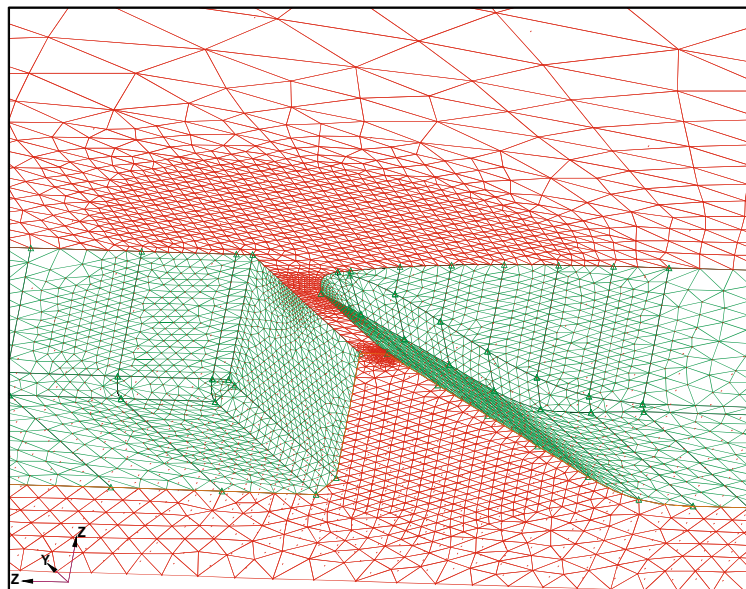
VBD



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

**Verminderung des Antriebsleistungsbedarfs eines Koppelverbandes,
bestehend aus schiebendem Motorschiff und Schubleichter,
durch Auffüllen der Koppelstelle mit flexiblen Elementen**

**Bericht 1533
August 2000**



Auftraggeber:

**Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V., Köln**

**Verminderung des Antriebsleistungsbedarfs eines Koppelverbandes,
bestehend aus schiebendem Motorschiff und Schubleichter,
durch Auffüllen der Koppelstelle mit flexiblen Elementen**

Duisburg, 15. August 2000

Lo/ti

Bearbeiter:

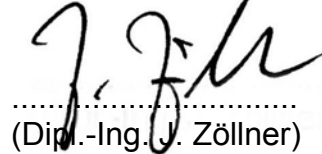


(Dipl.-Ing. H. Lochte-Holtgreven)



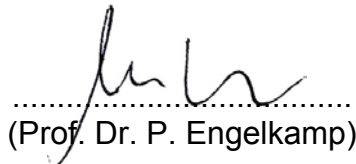
(Dipl.-Ing. H. Broß)

Fachbereichsleiter:



(Dipl.-Ing. J. Zöllner)

Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V.



(Prof. Dr. P. Engelkamp)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Summary

1. Vorwort
2. Aufgabenstellung
3. Modellversuche mit Typ I
 - 3.1 Versuchsplanung, -vorbereitung und -durchführung
 - 3.2 Auswertung der Propulsionsversuche
 - 3.3 Ergebnisse der Propulsionsversuche
 - 3.4 LDV-Messungen an der Koppelstelle
4. Modellversuche mit Typ II
 - 4.1 Versuchsplanung, -vorbereitung und -durchführung
 - 4.2 Auswertung der Propulsionsversuche
 - 4.3 Ergebnisse der Propulsionsversuche
5. EDV-Berechnungen
6. Großversuche
7. Ergebnisse
8. Symbolverzeichnis
9. Anlagen

Zusammenfassung

Bei der Umströmung eines Koppelverbandes tritt zwischen dem Leichter und dem schiebenden Gütermotorschiff eine Unstetigkeitsstelle auf, die zu einer Strömungsablösung (Totwasser, Wirbelbildung) und zusätzlicher Bildung freier Oberflächenwellen führt. Zur Reduzierung der Wellen- und Wirbelbildung an der Koppelstelle und gleichzeitiger Verbesserung des Antriebswirkungsgrades wurden im Modellversuch unterschiedliche Volumenkörper im Übergangsbereich Leichterheck - Motorschiffsbug angebracht. Die durch die verschiedenartigen Volumenkörper erreichbaren Leistungsverbesserungen wurden durch Propulsionsversuche in zwei Kanalprofilen ermittelt.

Mit numerischen Verfahren (CFX-5) konnten die Strömungsverhältnisse im Bereich der Koppelstelle erfaßt werden. Zur Validierung der Ergebnisse der numerischen Berechnungen wurde die Strömung im Bereich der Koppelstelle mittels LDV aufgemessen.

Mit den optimierten Volumenkörpern wurden vergleichende Messungen im Großversuch angeschlossen, um die quantitative Übertragbarkeit der Modellversuchsergebnisse sicherzustellen.

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

Summary

In the flow around a push tow unit there is a discontinuity between the barge and the pushing motor vessel. That leads to a flow separation (deadwater, vortex motions) and additional free surface waves. For reducing the generation of waves and vortices combined with an optimisation of the propulsion efficiency there were tested different volume bodies in the range between the stern of the barge and the bow of the motorship. Propulsion tests at two canal profiles were carried out to improve the performance efficiencies of different volume bodies.

With numerical methods (CFX-5) the flow between the stern of the barge and the bow of the pushing vessel was calculated. For the validation of the numerical results the flow phenomena were measured by means of LDV.

With the optimized volume bodies large scale measurements were added to verify the scale effect of the model results.

1. Vorwort

Im Verkehr auf den Binnenwasserstraßen werden zunehmend Koppelverbände eingesetzt, die aus einem schiebendem Gütermotorschiff und einem davor gekoppelten Standardschubleichter bestehen. Gegenüber einzeln fahrenden Motorschiffen kann ein Koppelverband bei geringfügig höherem Personaleinsatz größere Ladungsmengen transportieren und ist damit wirtschaftlicher.

Beim Schubverband löst sich während der Fahrt an der Koppelstelle von Schubleichterheck und Motorschiffsbug aufgrund der örtlichen Unstetigkeit der Schiffsgeometrie die Strömung ab. Hier bilden sich Turbulenzen und Wellen (s. Anl. 1), die einen großen Teil der Antriebsleistung aufzehren.

Mit der Installation verschieden geformter Volumenelemente soll eine Lösung gefunden werden, um die Wirbelbildung an der Koppelstelle zu vermindern und, unter Beibehaltung der bisherigen Flexibilität der einzelnen Koppelverbandsteile, den Treibstoffverbrauch zu reduzieren.

Bei der Durchführung dieses Vorhabens war geplant, zunächst einen Schubverband ausfindig zu machen, an dem die propulsionsverbessernden Maßnahmen erprobt werden sollten, um für diese Schiffsform die zugehörigen Modellversuche durchzuführen. Aus Schifffahrtskreisen erhielt die VBD eine Zusage, die Messungen an einem Koppelverband durchführen zu können. Daraufhin wurde mit den Modellversuchen begonnen.

Zwischenzeitlich stellte sich aber heraus, daß das ursprünglich ausgesuchte Motorschiff für die geplanten Messungen doch nicht zur Verfügung gestellt werden konnte und ein anderer Koppelverband ausfindig machen mußte. Für diese zweite Schiffsform wurden die Modellversuche fortgesetzt, um eine Vergleichsbasis für die Großversuche zu haben.

Mit der Untersuchung zweier Schiffsformen lassen sich die Aussagen zur Effektivität des Einsatzes von Volumenkörpern insofern verallgemeinern, als sich die untersuchten Schiffstypen durch verschiedene Bugformen auszeichnen.

2. Aufgabenstellung

Als Selbstfahrer sind die schiebenden Motorschiffe im Bugbereich mit Steven ausgestattet, die für die Alleinfahrt optimiert sind. Diese Bugformen sind nicht unbedingt auch die besten Formen für einen Schubbetrieb. Umgekehrt stellt eine für den Schubbetrieb optimierte Bugform des Triebfahrzeugs nicht gleichzeitig das Optimum bei der Alleinfahrt dar.

Das zunächst gewählte Gütermotorschiff (GMS) hat einen sog. Stevenbug, das später ausgewählte GMS besitzt einen Pontonbug, wie er in ähnlicher Form auch bei den ausgewählten Typ-Leichtern zu finden ist. Die Schubleichter (SL) besitzen ein kastenförmiges Heck, das vor dem Bug des schiebenden Motorschiffes mit mechanischen Einrichtungen fixiert wird.

In Fahrt entstehen an der Koppelstelle zwischen dem Bug des schiebenden Motorschiffes und dem Heck des Leichters aufgrund der Unstetigkeit in der Schiffssilhouette ein Wirbel, der einen beträchtlichen Teil der Antriebsleistung aufzehrt. Wird diese Wirbelbildung vermieden oder mindestens verringert, kann Antriebsleistung eingespart werden oder die dann überschüssige Antriebsleistung zur Geschwindigkeitssteigerung verwendet werden.

Mit einer flexiblen Auffüllung der Koppelstelle, z.B. durch Ballone oder Volumenelemente aus Hartschaum, ist es möglich, die Wirbelbildung zu vermindern, ohne den Einsatz des schiebenden Motorschiffes oder des Schubleichters einzuschränken. Die Volumenelemente werden so an das Vorschiff des Motorschiffes angepaßt, daß die äußere Silhouette des Koppelverbandes in der Draufsicht, Seitenansicht und im Querschnitt nicht überschritten wird.

Mit dem Modell-Koppelverband werden Propulsionsversuche mit und ohne Koppelvolumen in zwei Kanalprofilen durchgeführt, um den quantitativen Einfluß der Zusatzkörper zu bestimmen.

Bei höheren Geschwindigkeiten wird die Strömung an der Koppelstelle mittels eines Laser-Doppler-Velocimeters (LDV) aufgemessen. Die Strömungsmessungen dienen der Validierung der parallel durchzuführenden CFD-Berechnungen.

Nach der Konstruktion und dem Bau von Volumenkörpern in der Großausführung für die Backbord- und die Steuerbordseite werden vergleichende Messungen im Großversuch durchgeführt, und zwar mit konventioneller und mit aufgefüllter Koppelstelle. Die Versuche werden auf dem Rhein oder den angrenzenden Gewässern durchgeführt.

3. Modellversuche mit Typ Stevenbug

3.1 Versuchsplanung, -vorbereitung und -durchführung

Der zu erst untersuchte Koppelverband besteht aus dem Motorschiff, dessen Spantriß in Anlage 2 enthalten ist, und einem Standard-Schubleichter Typ E II b (s. Anl. 3). Die Hauptabmessungen dieses Verbandes und der Modellausführung im Maßstab 1 : 11 sind in Anl. 4 zusammengestellt.

Propulsionsversuche wurden mit dem Verband im großen Schlepptank der VBD durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe war die Koppelstelle frei, in der zweiten Versuchsreihe wurde die Koppelstelle mit Ballonen aufgefüllt. Das Vorschiff des schiebenden Motorschiffes mit den Ballonen ist in Anl. 5 zu erkennen.

Für die Umrechnung der Ergebnisse der Propulsionsmessungen auf die Großausführung muß bereits im Versuch der Reibungsabzug berücksichtigt werden. Bei Voraussetzung Froudescher Ähnlichkeit wird das nicht gleichzeitig erfüllbare Zähigkeitsgesetz im Modellversuch durch den rechnerisch zu ermittelnden Reibungsabzug berücksichtigt. Dazu werden die Reibungsbeiwerte C_{FM} des Modells bzw. C_{FS} der Großausführung nach der ITTC 57-Linie berechnet:

$$C_F = \frac{0,075}{(\lg R_n - 2)^2}$$

Mit der Differenz der Reibungsbeiwerte für das Modell und die Großausführung wird der Reibungsabzug F_D bestimmt:

$$F_D = \frac{\rho_M}{2} V_M^2 S [C_{FM} - (C_{FS} + C_A)]$$

S bezeichnet dabei die benetzte Oberfläche des Modells. Für die Umrechnung wird der Rauheitszuschlag $C_A = 0,0002$ zugrunde gelegt.

Die Reibungsabzüge sind für das Gütermotorschiff und den Leichter separat ermittelt und für den Schubverband addiert worden.

3.2 Auswertung der Propulsionsversuche

In Anlage 6 sind die auf die Großausführung umgerechneten Versuchsergebnisse tabellarisch enthalten. Für jede Geschwindigkeit V [km/h] sind die zugehörige Drehzahl n [1/min] und der Propellerschub T [kN] angegeben.

Mit der im Versuch gemessenen Propellerdrehzahl n_M und dem Propellerdrehmoment Q läßt sich die Antriebsleistung der Großausführung bestimmen:

$$P_D = Q \cdot 2\pi \cdot n_M \cdot m_P \cdot m_D \cdot \lambda^{3,5}$$

Da bei diesen Untersuchungen die Leistungsverbesserung infolge des Auffüllens der Koppelstelle interessiert, ist für die Umrechnung auf die Großausführung mit den Maßstabseffekten des Propellers $m_P = 1,0$ und der Düse $m_D = 1,0$ gerechnet worden.

Die Verbindung zwischen dem schiebenden Motorschiff und dem Schubleichter ist frei beweglich gestaltet worden. Bei den Messungen am Schubverband wurden die in den Tabellen und Diagrammen angegebenen Werte für Trimm und Absenkung am schiebenden Motorschiff gemessen. Positive Trimmwinkel θ bezeichnen einen kopflastigen Trimm, und mit Z_v wird die parallele Tiefertauchung angegeben.

Eine Korrektur der Geschwindigkeiten durch den wassertiefenabhängigen Einfluß der Übergeschwindigkeiten erfolgte nicht.

In den Tabellen sind die im Versuch eingestellten Reibungsabzüge zusätzlich mit aufgenommen worden.

3.3 Ergebnisse der Propulsionsversuche

Die auf die Großausführung umgerechneten Ergebnisse der Propulsionsversuche sind in Anl. 7 dargestellt. Über der Geschwindigkeit V [km/h] sind die erforderlichen Propellerdrehleistungen P_D [kW] sowie der Trimm Θ [°] und die überlagerte Parallelabsenkung Z_v [cm] aufgetragen. Die prozentuale Leistungsverminderung durch das Auffüllen der Koppelstelle mit zwei Ballonen ist in der folgenden Tabelle enthalten:

V [km/ h]	12,5	14,5
Koppelstelle mit 2 Ballonen	23,9	19,9

Abb. 1: Leistungsverminderung [%] für GMS+SL, Typ Stevenbug, GMS mit Düse, $b_K = 110$ m, $h = 4$ m, $T = 2,50$ m

Das Auffüllen der Koppelstelle mit Ballonen läßt eine Leistungsverbesserung von ca. 20 % erwarten. Die bei $V \triangleq 14$ km/h aufgenommenen Fotos (s. Anl. 8) zeigen den Bereich der Koppelstelle mit der durch die Ballone reduzierten Wellenbildung.

3.4 LDV-Messungen

Zusätzlich zu den Leistungsmessungen ist die Strömung im Bereich der Koppelstelle mittels Laser-Doppler-Velocimeter (LDV) genauer untersucht werden. Die Messungen wurden an den Modellen des ursprünglich vorgesehenen Koppelverbandes durchgeführt.

Die Wassertiefe im großen Schlepptank der VBD wurde auf einen korrespondierenden Wert von $h \triangleq 4,0$ m eingestellt. Der Versuchstiefgang entsprach $T = 2,50$ m. Anlage 9 zeigt das Raster mit den Meßpositionen an der Koppelstelle. Gemessen wurden die dreidimensionale Strömung bei der konstanten Fahrgeschwindigkeit von $V = 0,94$ m/s $\triangleq 11,22$ km/h bzw. der Froudeschen Tiefenzahl $F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = 0,50$.

Die Anlagen 10 - 15 zeigen die Vektoren der Strömung auf den Längsschnitten S 1 im Bereich der Bordwand bis S 6 in der Mittellängsebene. Von der Bb.-Seite aus gemessen, liegen die Schnitte bei dem Modell in den Abständen von 100 mm, 205 mm, 310 mm und 415 mm.

In der Ebene der Bordwand, S1 (s. Anl. 10), wird die von der Leichterseite kommende Parallelströmung auf der WL 180 im Bereich Spt. B leicht, und kurz danach, auf Spt. C, stark nach unten hin abgelenkt. Auf den tiefer liegenden Wasserlinien WL 160 und WL 120 tritt diese Richtungsänderung jeweils weiter vorn auf. Auf der untersten Wasserlinie WL 80 ist eine eher gleichförmige, aber nicht mehr so starke Ablenkung nach unten zu erkennen. Auf dem weiter innen liegenden Schnitt S 2 (s. Anl. 11) sind vollkommen andere Geschwindigkeitsvektoren gemessen worden. In der Spantebene A zeigen alle Strömungsvektoren nach unten, wobei im oberen Bereich eine Komponente in Richtung zum Leichterheck auftritt, die sich zur Tiefe hin dreht und auf WL 80 fast schon in die parallele Bodenströmung übergeht. Die teilweise umgekehrte, nach oben gerichtete Strömungsrichtung auf Spt. B läßt auf einen Wirbel schließen. Weiter hinten, im Bereich Spt. C, sind die Strömungskomponenten nach hinten und, zur Wasseroberfläche hin immer stärker, nach oben gerichtet. Die weiter innen, auf dem Längsschnitt S 3 (Anl. 12) gemessenen Geschwindigkeiten lassen den Wirbel sehr deutlich erkennen. Die Geschwindigkeiten hinter dem Wirbel, auf Spt. C, sind relativ groß und weisen eine starke Komponente nach oben auf. Im Schnitt S 4 (Anl. 13) ist dieser Wirbel nicht mehr zu erkennen. In der WL 80 wird die Strömung fast gleichbleibend nach oben hin abgelenkt. Darüber, in der WL 120, zeigen die Messungen nur eine nach oben gerichtete Strömungskomponente. In den oberhalb gelegenen Ebenen, in der ersten Spantebene hinter dem Leichterheck, zeigen die gemessenen Strömungskomponenten alle nach oben und in Richtung zum Leichterheck. Auf Schnitt 5 (Anl. 14) ist nur noch die Spantebene A vollständig mit Meßpunkten belegt. Während in der untersten Ebene die Strömung schräg nach hinten oben gerichtet ist, zeigen die Messungen weiter oben eine nach vorn gerichtete Aufwärtskomponente an. Auf der Mittellängsebene, Längsschnitt S 6 (Anl. 15) ist nur noch ein Meßpunkt vorhanden. Die hier registrierte Strömung zeigt nach hinten und steil nach oben.

Die Diagrammanlagen 16 bis 19 zeigen die Komponenten der Strömungsgeschwindigkeiten als Vektoren in Längs- und Quer-Richtung in den Ebenen der WL 80, WL 120, WL 160 und WL 180, entsprechend 80 mm, 120 mm, 160 mm und 180 mm über der Basis des Modells bzw. 0,88 m, 1,32 m, 1,76 m und 1,98 m in der Großausführung.

Auf WL 80, in der untersten Meßebe (s. Anl. 16), dominiert der Einfluß der bodennahen Strömung. Nur direkt vor der Schiffskontur ist zu erkennen, daß sich die Strömung der Außenhaut anpaßt. In der Ebene darüber (s. Anl. 17) sind direkt hinter dem Leichterheck in der Ebene von Spt. A keine ausgeprägten Strömungskomponenten erkennbar. Erst in der hintersten Spantebene (auf Spt. C) ist eine Komponente nach hinten gemessen worden. In der Ebene WL 160 (s. Anl. 18) ist findet sich ein klareres Strömungsbild. In der Spant-Ebene A sind Geschwindigkeiten nach vorn und zur Seite zu beobachten, nur direkt an der Schiffskontur ist ein großer Vektor zur Mitte hin und leicht nach vorn zu erkennen. In der Spt.-Ebene B sind die Geschwindigkeiten nach außen gerichtet, in Schiffsnähe leicht nach vorn und im Außengebiet nach hinten gerichtet. Auf Spt. C zeigen die Geschwindigkeitsvektoren nach außen und hinten. Auf WL 180 (s. Anl. 19) sind die Geschwindigkeitskomponenten im Bereich der Koppelstelle alle nach außen gerichtet, in Nähe des Leichterhecks mit einem Anteil nach vorn und im hinteren Bereich nach hinten. Auffällig ist, daß in Verlängerung der Bordwand des Leichters starke nach außen gerichtete Geschwindigkeitskomponenten registriert wurden.

In den Anlagen 20 bis 22 sind Geschwindigkeitsvektoren auf den Spanten A, B und C aufgetragen, d.h. in den Abständen 75 mm, 190 mm und 305 mm hinter dem Spiegel des Leichtermodells bzw. 0,825 m, 2,09 m und 3,36 m hinter dem Spiegel bei der Großausführung des Leichters.

In der Ebene A (s. Anl. 20) ist ein allgemeiner Strömungsverlauf zu erkennen. In Nähe der Schiffsmittle ist eine aufwärts gerichtete Strömung zu verzeichnen, die weiter oben nach außen gelenkt wird und zur Schiffsseite hin leicht nach unten gerichtet ist. In der Mitte dieses Feldes ist ein Wirbel zu erkennen. In der Ebene von Spt. B kommt die Strömung von unten und wird weiter oben, der Spantkontur folgend, zu Seite hin abgelenkt. Im Bereich der Schiffsseite sind die Geschwindigkeiten nach unten gerichtet. Der zuvor in der Spt. A-Ebene beobachtete Wirbel hat sich zur Seite hin verlagert und ist hier deutlich zu erkennen. Im Bereich des Spants C (s. Anl. 22) ist wieder zu beobachten, daß sich die Strömung der Spantkontur anpaßt und nach oben und außen gerichtet ist. Der zuvor ausgemachte Wirbel tritt hier noch deutlicher in Erscheinung.

4. Modellversuche mit Typ Pontonbug

4.1 Versuchsplanung, -vorbereitung und -durchführung

Der zweite der beiden untersuchten Koppelverbände besteht aus dem Motorschiff, dessen Spantriß in Anlage 23 enthalten ist, und einem Schubleichter (s. Anl. 24). Die Hauptabmessungen dieses Verbandes und der Modellausführung im Maßstab 1 : 14 sind für die Tiefgänge $T_1 = 2,50$ m und $T_2 = 1,90$ m in Anl. 25 zusammengestellt. Die Anrißpläne für das GMS-Modell und den Leichter sind in den Anlagen 26 und 27 enthalten. Das Modell des Gütermotorschiffes war mit einem rechtsdrehenden Propeller (s. Anl. 28), dessen Freifahrtdiagramm in Anl. 29 enthalten ist, einer Düse (s. Anl. 30) und einem Ruder (s. Anl. 31) ausgerüstet. Die Einbauzeichnung ist in Anl. 32 enthalten, Anl. 33 zeigt das Modell des GMS.

Die einzelnen durchgeführten Propulsions- und Trossenzugversuche sind in Anl. 34 zusammengestellt. Neben den Versuchen mit freier Koppelstelle wurden Keile am Vorschiff montiert. Diese Keile und eine zusätzliche Folie zur Auffüllung des Zwischenraumes sind in Anl. 35 zu erkennen. Anl. 36 zeigt den Einbau der verkürzten Keile, deren Unterkante 16 mm = 220 mm oberhalb der Basis des Motorschiffes liegt. In weiteren Variationen wurde die Koppelstelle mit 2 Ballonen aufgefüllt. Anl. 37 zeigt diesen Einbau am Modell. Auf dem Foto ist zu erkennen, daß die Ballone bis unter die Kiellinie reichen. Im Tank dagegen werden die Ballone durch den Wasserdruck leicht deformiert, so daß sie nicht mehr unter der Bodenlinie herausragen, wie Anl. 38 erkennen läßt. Anl. 39 zeigt die Ausrüstung mit 3 Ballonen.

Die Reibungsabzüge sind für das Gütermotorschiff und den Leichter separat ermittelt und für den Schubverband addiert worden. Der Rauheitszuschlag wurde, wie auch bei Typ I, mit $C_A = 0,0002$ zugrunde gelegt. Die Übersicht über die in den Versuchen verwendeten Reibungsabzüge ist in der folgenden Tabelle enthalten:

V_S [km/h]	V_M [m/s]	GMS h ► 2,50 m	GMS h ► 1,90 m	GMS+SL h ► 2,50 m	GMS+SL h ► 1,90 m
6	0,445	1,10	1,21	2,11	2,32
8	0,594	1,81	1,65	3,49	3,18
10	0,742	2,68	2,42	5,16	4,70
11	0,817	3,19	2,88	6,13	5,58
12	0,891	3,69	3,34	7,10	6,46
13	0,965	4,25	3,84	8,17	7,43
14	1,039	4,83	4,38	9,31	8,47

Abb. 2: Tabelle der Reibungsabzüge F_D [N] für Typ Pontonbug

Ergänzend zu den Propulsionsversuchen wurden Pfahlzugversuche durchgeführt, bei denen in Abhängigkeit von der Drehzahl der Schub gemessen wird.

Versuch	Kanalbreite	W'tiefe	Formation	T	Düse	Koppelstelle
Nr.	[m]	[m]		[m]		
106	137,2	4,0	GMS	1,90	ohne	–
107	137,2	4,0	GMS	1,90	mit	–
146	42,0	4,0	GMS+SL	2,50	ohne	frei
142	42,0	4,0	GMS+SL	1,90	mit	2 Keile
148	42,0	∞	GMS+SL	2,50	ohne	frei
149	42,0	∞	GMS+SL	2,50	mit	frei

Abb. 3: Übersicht über Pfahlzugversuche mit Typ Pontonbug

4.2 Auswertung der Propulsionsversuche

In den Anlagen 40 - 45 sind die auf die Großausführung umgerechneten Versuchsgrößen tabellarisch enthalten. Für jede Geschwindigkeit V [km/h] sind die zugehörige Drehzahl n [1/min] und der Propellerschub T [kN] angegeben.

Für die Umrechnung der Antriebsleistungen auf die Großausführung ist mit den Maßstabeffekten des Propellers $m_P = 0,899$ und der Düse $m_D = 0,956$ gerechnet worden.

Eine Korrektur der Geschwindigkeiten durch den wassertiefenabhängigen Einfluß der Übergeschwindigkeiten erfolgte nicht.

4.3 Ergebnisse der Propulsionsversuche

Die Ergebnisse der Basisversuche mit dem Gütermotorschiff im breiten Kanal ($b_K \blacktriangleright 137,2$ m, $h \blacktriangleright 4$ m) sind in Anl. 46 enthalten. Klar zu erkennen ist der erwartete, größere Leistungsbedarf bei der mit $T = 2,50$ m tieferen Abladung gegenüber $T \blacktriangleright 1,90$ m. Im gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich und bei beiden Tiefgängen zeigt die Düse eine Verbesserung der Propulsionseigenschaften.

In Anl. 47 sind die entsprechenden Ergebnisse für den Koppelverband aufgetragen. Die Leistungskurven zeigen die gleichen Tendenzen wie bei dem GMS ohne Leichter. Bei dem großen Tiefgang ($T \blacktriangleright 2,50$ m) zeigt sich eine relativ große Leistungssparnis bei Einsatz der Düse. Das hängt mit dem erhöhten Schubbelastungsgrad des Propellers zusammen, bei dem sich die leistungssenkende Wirkung von Düsen

stärker auswirkt. Anl. 48 enthält Fotos von dem Modellversuch des mit $V \blacktriangleright 14 \text{ km/h}$ fahrenden und auf $T \blacktriangleright 2,50 \text{ m}$ abgeladenen Koppelverbandes. Das Seitenfoto läßt eine erneute Bugwellenbildung am Vorschiff des Leichters erkennen und damit auf eine Vergrößerung des Gesamtwiderstandes durch die freie Koppelstelle schließen. Die in der Unterwasseraufnahme erkennbaren Wollfäden deuten auf eine starke Wirbelbildung hin. Abgesehen von dem bodennahen Bereich zeigen die Fäden in Wandnähe eine der Schiffsanströmung entgegengesetzte Strömung an.

Die Ergebnisse der Propulsionsversuche mit dem auf $T \blacktriangleright 2,50 \text{ m}$ abgeladenen Schubverband sind in Anl. 49 enthalten. Die Anbringung von Keilen an der Koppelstelle des Verbandes führt in jedem Fall zu einer Leistungersparnis. Der größte Effekt wird hier von den Keilen mit Mittelstück erzielt, bei der nahezu die Schiffsform eines um den Leichter verlängerten Gütermotorschiffes erreicht wird. Die Verbesserungen führen hierbei zu einer Leistungseinsparung von bis zu 13 %. Von den Versuchen sind für jeweils $V \blacktriangleright 14 \text{ km/h}$ Fotos bei den verschiedenen, untersuchten Keilvarianten gemacht und in den Anl. 50 - 53 zusammengestellt worden. Bei Einsatz von zwei Keilen (s. Anl. 50) ist am Leichterbug zwischen den Keilen wieder eine Rückströmung zu erkennen. Bei zusätzlicher Anbringung einer Folie (s. Anl. 51) bzw. eines Mittelstücks (s. Anl. 52) liegt die Strömung am Boden an. Bei dem Einsatz verkürzter Keile (s. Anl. 53) zeigt sich neben der Rückströmung zwischen den Keilen auch eine Wirbelbildung an der Unterseite der Keile.

In Anl. 54 sind die Versuchsergebnisse bei verschiedenen Keilformen im Koppelstellenbereich für den auf $T \blacktriangleright 1,90 \text{ m}$ abgeladenen Schubverband zusammengestellt. Die Keile und auch die gekürzten Keile führen zu einer fast gleich guten Verbesserung der Propulsionseigenschaften. Die zusätzliche Anbringung eines Mittelstücks führt, wie auch bei den Versuchen mit $T \blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, zu den besten Resultaten. Die Fotos der Versuche sind in den Anl. 55 - 57 enthalten. Bei Einsatz von zwei Keilen (s. Anl. 55) ist am Leichtervorschiff keine eindeutige wandnahe Rückströmung, sondern ein weiterer Wirbel mit Querströmungen zu erkennen. Die Beobachtungen bei zusätzlichem Einsatz eines Mittelstücks (s. Anl. 56) und bei verkürzten Keilen (s. Anl. 57) entsprechen den Beobachtungen bei dem tiefer abgeladenen Modell (vergl. Anl. 53 und 52).

Weiterhin wurde der Einsatz von Ballonen an der Koppelstelle untersucht. Die Resultate des auf $T \blacktriangleright 2,50 \text{ m}$ abgeladenen Koppelverbandes sind in Anl. 58 dargestellt. Die Ergebnisse der Propulsionsmessungen ergeben bei Anbringung von 2 Ballonen eine – verglichen mit dem Einsatz von Keilen – nur geringe Verbesserung des Leistungsbedarfs. Fotos der Versuche bei $V \blacktriangleright 14 \text{ km/h}$ mit 2 und 3 Ballonen sind in den Anl. 59 und 60 enthalten. In den Unterwasseraufnahmen zeigen sich zwischen den Ballonen auch wieder Rückströmungen bzw. Wirbel.

Die Untersuchungen mit 2 Ballonen wurden auch für $T \blacktriangleright 1,90 \text{ m}$ durchgeführt und sind in Anl. 61 dokumentiert. Die Ballone führen zu einer Verbesserung. In Anl. 54 zeigt sich aber, daß der Einsatz von Keilen effektiver ist. Anl. 62 enthält die Fotos beim Einsatz von 2 Ballonen bei $V \blacktriangleright 14 \text{ km/h}$. Die Verwirbelung der Strömung zwischen den Ballonen ist auch hier deutlich zu erkennen.

Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf die Messungen im kleineren Kanalprofil ($b_K \triangleright 42 \text{ m}$, $h \triangleright 4 \text{ m}$). In Anl. 63 sind die Versuchsergebnisse für den Verband mit freier Koppelstelle dargestellt. Wegen des kleineren Kanalprofils ist bei größerer Abladung mit einem relativ größeren Leistungsbedarf zu rechnen als bei geringerem Tiefgang. Die Messungen auf $T \triangleright 2,50 \text{ m}$ mit und ohne Düse zeigen keine Verbesserung durch den Einsatz einer Düse. Es muß angenommen werden, daß die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Versuche nicht sorgfältig genug betrachtet wurden. Bei der reduzierten Querschnittsfläche des Kanalprofils ist mit einer weitergehenden instationären Umströmung des Schubverbandes zu rechnen. Weiterhin ist anzunehmen, daß die zur Verfügung stehende Meßstrecke nicht ausreichend lang gewählt worden war.

Anl. 64 stellt die Meßergebnisse des auf $T \triangleright 2,50 \text{ m}$ abgeladenen Verbandes dar, wobei die Koppelstelle frei und mit Keilen bzw. mit 2 Ballonen aufgefüllt war. Eindeutig erkennbar ist die Verbesserung durch Anbringung von Keilen. Die Einsparungen liegen bei bis zu 30 %. Gegenüber den Ergebnissen im breiteren Kanal (s. Anl. 49) zeigt sich die Zunahme der Verbesserungen mit Abnahme des Querschnittsprofils des Kanals.

In Anl. 65 sind die Versuchsergebnisse mit dem Koppelverband bei der geringeren Abladung ($T \triangleright 1,90 \text{ m}$) dargestellt. Die Verbesserungen durch Einsatz von Keilen sind wieder zu beobachten, wegen der geringeren Querschnittsverengung aber nicht so ausgeprägt wie bei dem größeren Tiefgang. Die Verbesserungen liegen in der gleichen Größenordnung wie bei der Fahrt im breiteren Kanal (vergl. Anl. 54).

Um eine Übersicht über die Versuchsergebnisse zu bekommen, sind die prozentualen Leistungsverminderungen für den Schubverband in den folgenden Tabellen (Abbn. 4 - 7) zusammengestellt. Das GMS war in jedem dieser Fälle mit Düse ausgerüstet, die Wassertiefe betrug $h \triangleright 4,0 \text{ m}$.

V [km/ h]	10	12	13	14
Koppelstelle mit Keilen	11,5	8,5	8,9	7,0
Koppelstelle mit Keilen + Folie	18,0	13,7	12,4	5,9
Koppelstelle mit Keilen + Mittelstück	8,4	14,3	13,0	10,2
Koppelstelle mit gekürzten Keilen	- 0,3	5,9	4,6	2,3
Koppelstelle mit 2 Ballonen	7,8	13,9	2,1	0,9
Koppelstelle mit 3 Ballonen	-	-	1,7	- 1,8

Abb. 4: Leistungsverminderung [%] für GMS+SL, $b_K = 137,2 \text{ m}$, $T = 2,50 \text{ m}$

V [km/ h]	10	12	13	14
Koppelstelle mit Keilen	6,1	10,0	9,1	11,4
Koppelstelle mit Keilen + Mittelstück	16,2	17,8	15,7	15,1

Koppelstelle mit Keilen + Mittelstück	4,8	8,0	9,4	11,4
Koppelstelle mit 2 Ballonen	-	2,5	9,7	6,6

Abb. 5: Leistungsverminderung [%] für GMS+SL, $b_K = 137,2$ m, $T = 1,90$ m

V [km/ h]	6	8	10	12
Koppelstelle mit 3 Keilen	29,9	14,4	20,8	29,9
Koppelstelle mit 2 Ballonen		13,8	19,0	

Abb. 6: Leistungsverminderung [%] für GMS+SL, $b_K = 42$ m, $T = 2,50$ m

V [km/ h]	6	8	10	11	12
Koppelstelle mit Keilen	42,4	40,3	13,5	13,0	22,2

Abb. 7: Leistungsverminderung [%] für GMS+SL, $b_K = 42$ m, $T = 1,90$ m

Zusätzlich zu den Propulsionsmessungen wurden auch Pfahlzugversuche durchgeführt. Die auf die Großausführung umgerechneten Ergebnisse sind tabellarisch in den Anl. 66 und 67 enthalten. Bei den Pfahlzugversuchen mit dem GMS im breiten Kanal ist für $T \blacktriangleright 1,90$ m der Einfluß der Düse mit max. 4,6 % Verbesserung gemessen worden (s. Anl. 68). Die Vergleichsmessungen mit dem Schubverband, zwar bei der geringeren Kanalbreite ($b_K \blacktriangleright 42$ m), aber großer Wassertiefe, lassen Verbesserungen bei Einsatz der Düse von bis zu 10 % erkennen (s. Anl. 69).

In Anl. 70 erfolgt eine Gegenüberstellung der Pfahlzugversuche mit dem Schubverband. Die Messungen erfolgten für das GMS bei $T \blacktriangleright 2,50$ m und freier Koppelstelle, andererseits für das GMS mit Düse und $T \blacktriangleright 1,90$, wobei die Koppelstelle mit Keilen aufgefüllt war.

5. EDV-Berechnungen

Mit dem Programm CFX 5 wurden Berechnungen für den Koppelverband in der Großausführung durchgeführt. Um Vergleiche mit den Versuchsergebnissen herstellen zu können, wurde der Fall des größten Tiefgangs ($T = 2,50$ m) im kleinen Kanal ($b_K \triangleright 42$ m, $h \triangleright 4$ m) bei $V = 2,78$ m/s $\triangleright 10$ km/h ausgewählt. Die Berechnungen erfolgten zunächst ohne Berücksichtigung der parallelen Tiefertauchung. Die Vernetzung des Rechenmodells erfolgte mit Tetraedern. Die Belegung der Schiffsoberfläche ist für den Bereich der Koppelstelle in Anl. 71 dargestellt. Insgesamt wurde für den Fall der freien Koppelstelle mit ca. 570.000 und für die aufgefüllte Koppelstelle mit ca. 660.000 Tetraederelementen gerechnet. Die Berechnungen führten zu folgenden Ergebnissen:

	Koppelstelle	Normalkraft	Tangentialkraft	ΣF_x
		[kN]	[kN]	[kN]
Motorschiff	-	5,440	9,184	14,624
Schubleichter	-	18,296	9,412	27,708
Schubverband	frei	23,736	18,596	42,332
Schubverband	aufgefüllt	11,732	19,148	30,880

Abb. 8: Berechnung der Kraftkomponenten in X-Richtung, $h = 4$ m

Die im Programm berechnete, zähigkeitsbedingte X-Komponente der Normalkraft entspricht dem zähigkeitsbedingten Druck- bzw. Ablösungswiderstand, die zähigkeitsbedingte X-Komponente der Tangentialkraft entspricht dem Reibungswiderstand. Die Summe F_x ergibt den berechneten Gesamtwiderstand R_T .

Die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte für den im Versuch gemessenen und auf die Großausführung übertragenen Schub gelten für den Verband, wobei das Motorschiff mit einer Düse ausgerüstet war. Zur Beurteilung der numerischen Ergebnisse wird auch der Reibungswiderstand R_F angegeben, wie er sich nach der ITTC 57-Formel mit $L = 161,35$ m für $V = 10$ km/h $= 2,78$ m/s bzw. $R_n = 4,73 \cdot 10^8$ ergibt. Zusätzlich ist der Wert R_F^* angegeben, der sich bei Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit nach Lackenby ergibt. Die korrigierte Anströmgeschwindigkeit liegt bei $V + \Delta V = 3,34$ m/s.

	T	R_F	R_F^*
Koppelstelle	[kN]	[kN]	[kN]
frei	58,7	17,976	25,332
Aufgefüllt	50,4	17,976	25,332

Abb. 9: Schub und Reibungswiderstände nach ITTC 57

Aus der Gegenüberstellung der berechneten Widerstände ergibt sich durch das Auffüllen der Koppelstelle eine Widerstandsreduktion von 27,1 %, aus der Gegenüberstellung der im Versuch gemessenen Schübe ergibt sich eine Verbesserung von 14,1 %.

Die Versuche ergeben eine parallele Tiefertauchung von ca. 30 cm bei $V = 10$ km/h. Da der dadurch verminderte Querschnitt zu höheren Übergeschwindigkeiten führt, wurden die Berechnungen für den Schubverband mit freier Koppelstelle bei einem um die Absenkung reduzierten Wasserstand zusätzlich durchgeführt und in Abb. 10 dokumentiert.

	Koppelstelle	Normalkraft	Tangentialkraft	ΣF_x
		[kN]	[kN]	[kN]
Motorschiff	-	3,574	10,460	14,624
Schubleichter	-	23,302	11,208	27,708
Schubverband	frei	26,876	21,668	48,544

Abb. 10: Berechnung der Kraftkomponenten in X-Richtung, $h = 3,7$ m

Durch die sich bei der Fahrt im Kanalprofil einstellende Absenkung des Schubverbandes ergibt sich rechnerisch eine Erhöhung des Widerstandes um 14,7 %.

Für den Schubverband mit freier Koppelstelle wurden die Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen bei $V = 2,78$ m/s und $h = 4$ m berechnet. Die folgende Tabelle enthält die Übersicht über die Vektordiagramme der Geschwindigkeiten für die Schnitte parallel zur Mittellängsebene des Verbandes (Y- Z- Ebene, $X = 0$), die Schnitte parallel zum Schiffsboden (X- Y- Ebene, $Z = 0$) und die Spantebenen (Y- Z- Ebene, $X = 85$ m am Leichterheck):

Anlage	Ebene
72	Y = 4,25 m
73	Y = 4,0 m
74	Y = 3,5 m
75	Y = 3,0 m
76	Y = 2,0 m
77	Y = 0,5 m
78	Y = 0,1 m

Anlage	Ebene
79	Z = 2,0 m
80	Z = 1,5 m
81	Z = 1,0 m
82	Z = 0,5 m
83	Z = 0,4 m
84	Z = 0,35 m
85	Z = 0,3 m
86	Z = 0,2 m
87	Z = 0,1 m
88	Z = -0,1 m

Anlage	Ebene
89	X = 85,0 m
90	X = 84,5 m
91	X = 84,0 m
92	X = 83,5 m
93	X = 83,0 m
94	X = 82,5 m
95	X = 82,0 m
96	X = 81,5 m
97	X = 81,0 m
98	X = 80,5 m
99	X = 80,0 m

				100	X = 79,5 m
--	--	--	--	-----	------------

Abb. 11: Vektordiagramme der Geschwindigkeiten in den verschiedenen Ebenen

Anl. 72 gibt die Geschwindigkeitsverteilung für den Schnitt parallel zur Mittellängsebene bei $Y = 4,25$ m an. Diese Ebene liegt, von der Schiffsseite aus gesehen, 25 cm innerhalb der Koppelstelle. Im Bereich unterhalb des Schiffsbodens zeigt sich eine Parallelströmung mit einer leichten Übergeschwindigkeit. Am Kanalboden ist infolge der Grenzschicht eine verminderte Anströmung zu erkennen. Im Bereich vom Schiffsboden bis zur Wasseroberfläche nimmt die Strömungsgeschwindigkeit kontinuierlich ab. Direkt hinter dem Leichterheck ist ein schmaler Bereich abnehmender Geschwindigkeitskomponenten, der am Heck nahezu Null wird.

Anl. 73 zeigt die Strömungsverhältnisse auf der Ebene 25 cm weiter zur Schiffsmitte hin. Zur besseren Anschauung sind die Vektoren größer dargestellt als in Anl. 72. Im Bereich der Koppelstelle wird die Strömung unterhalb des Kiels leicht nach oben hin abgelenkt. Vom Kiel bis etwa 50 cm oberhalb ist die Strömung nahezu parallel, die Strömungsgeschwindigkeit verringert sich bis auf die Hälfte. Oberhalb davon bis zur Wasseroberfläche bleibt die Geschwindigkeit annähernd konstant (nahezu gleiche Farbe der Vektoren). Die unterschiedliche Länge der Vektoren zeigt, daß die Strömungskomponenten in der X- Z- Ebene zum Teil geringer sind, d.h. daß Querströmungen vorliegen. Dicht unterhalb der Wasseroberfläche hat sich am Leichterheck bereits ein Wirbel aufgebaut.

Die Strömungsverhältnisse weiter innen, auf $Y = 3,5$ m, sind in Anl. 74 dargestellt. Der Wirbel hinter dem Leichterheck ist größer geworden und läßt erkennen, daß in der Mitte des Wirbels, ebenso wie am Leichterheck, eine Querströmung überlagert ist. An der Stevenkontur des Motorschiffes hat sich die Strömungsrichtung gegenüber Anl. 73 umgekehrt.

In Anl. 75, bei $Y = 3$ m, zeigt sich der Wirbel im gesamten Bereich der Koppelstelle. Bei den weiteren Schnitten in Richtung zur Schiffsmitte (Anl. 76 - 78) ist zu beobachten, daß der Mittelpunkt des Wirbels sich nach hinten und unten verlagert.

In der Ebene parallel zur Wasseroberfläche, 2 m und 1,5 m oberhalb der Basis (Anl. 79 und 80) ist ein Wirbel zu erkennen, der im seitlichen Bereich der Koppelstelle liegt. Am Leichterheck ist die Drehrichtung nach außen gerichtet. Vor dem Steven des Motorschiffes teilt sich die Strömung, der innere Teil des Wirbels dreht sich weiter nach innen und oben (vergl. Anl. 75 - 78), der äußere Teil fließt nach hinten und unten (vergl. Anl. 73) ab.

Bei der Verfolgung des Wirbels in die tiefer gelegenen Ebenen, $Z = 1,0 - 0,35$ m (s. Anl. 81 - 84), zeigt sich, daß der Wirbel sich zur Mitte und nach unten in Richtung zur Vorschiffskontur verlagert. In den Ebenen darunter (Anl. 85 - 87) geht der äußere Bereich des Wirbels in die Bodenströmung über.

In der Schicht $Z = -0,1$ m unterhalb der Basis (Anl. 88) ist die Unterbodenströmung nahezu parallel und geringer als die Schiffsgeschwindigkeit. Im seitlichen Bereich außerhalb des Schiffsbodens ist die Übergeschwindigkeit erkennbar.

In der Schnittebene am Leichterheck ($X = 85$ m, s. Anl. 89) ist eine nach innen gerichtete Strömungskomponente erkennbar, die zu der in den anderen Darstellungen beobachteten Aufweitung der Parallelströmung im Berteich der Koppelstelle führt. Bei $X = 84,5$ m (Anl. 90) sind Querströmungen zu erkennen, die im weiteren Verlauf in Wirbel übergehen. Ein Wirbel ist im mittleren Bereich der Spanthälfte in Anl. 91 zu beobachten. Auf dem Weg nach hinten verlagert er sich weiter nach unten und zur Schiffsmittle hin (s. Anl. 92 - 94). Weiter hinten ist eine nach oben gerichtete Strömungskomponente zu beobachten (s. Anl. 96), die ihre Richtung nach unten ändert (s. Anl. 98).

Ein zweiter Wirbel baut sich im Bereich der Kimm auf (s. Anl. 91). Auf dem Weg nach hinten verlagert er sich nach innen (s. Anl. 95 - 97). Weiter hinten ist er nicht mehr nachweisbar, dort dominiert die Strömung in Richtung zum Boden des MGS-Vorschiffs.

Die Anlagen 101 und 102 zeigen zwei verschiedene Ansichten einer Stromlinie im Bereich der Koppelstelle. Bei dieser Berechnung wurde die sich durch den Einfluß begrenzter Wassertiefe ergebende Absenkung des Schubverbandes durch Vorgabe einer verringerten Wassertiefe berücksichtigt. Die Abbildungen lassen deutlich einen Wirbel im Bereich der Koppelstelle erkennen. Ergänzend zu den Darstellungen in den einzelnen Schnittebenen kann festgestellt werden, daß sich der quer zur Fahrtrichtung aufbauende Wirbel zu den Schiffsseiten hin nach oben fortsetzt und näherungsweise eine U-Form annimmt.

Ergänzend zu den bisherigen Ergebnissen werden in den Anlagen 103 - 105 die berechneten Druckverteilungen dargestellt. Am Vorschiff des Verbandes bzw. Leichters (Anl. 103) ist an der Wasseroberfläche in Schiffsmittle der größte Überdruck ermittelt worden. Hinter dem Seiteneinlauf und kurz nach dem Bodeneinlauf zeigen sich die größten Unterdruckgebiete. – Am Vorschiff des schiebenden Motorschiffes (Anl. 104) ist ein Überdruckgebiet etwa $\frac{1}{4}$ des Tiefgangs oberhalb der Basis auszumachen. In diesem Bereich trifft die Strömung senkrecht auf den Steven auf (s. Anl. 74 - 78). Das größte Unterdruckgebiet liegt am Leichterheck. – Bei der Druckverteilung am Boden ist der Bereich der Koppelstelle auch deutlich zu erkennen. Die Druckunterschiede im Bereich der Koppelstelle sind aber deutlich geringer als am Bug und Heck des gesamten Verbandes.

6. Großversuche

Für den Großversuch wurde auf der Meidericher Schiffswerft in Duisburg ein Volumenkörper hergestellt. Dabei wurde die Bugnegativform des Motorschiffes MS „Niedersachsen 1“ auf der Oberseite des Verdrängungskörpers realisiert. Um Beschädigungen des Volumenkörpers vorzubeugen, wurde die Unterseite des Körpers auf 220 mm oberhalb der Basislinie des Motorschiffes gelegt (s. Anl. 106). Dieser Körper entspricht damit genau den in den Versuchen eingesetzten, gekürzten Keilen (s. Anl. 36) mit einem passenden Mittelstück.

In der Anlage 107 wird die Konstruktion des Verdrängungskörpers und in Anl. 108 die Verdrängung des Körpers abhängig vom Tiefgang dargestellt. Der Verdrängungskörper hat ein Eigengewicht von ca. 4 t und eine Verdrängung von ca. 55 m³ bei einem Schiffstiefgang von $T = 2,40$ m. In Anl. 109 ist der fertige Volumenkörper zu sehen, Anl. 110 zeigt den am Vorschiff montierten Körper.

Zur Verifizierung der Modellversuchsergebnisse des Schubverbandes, bestehend aus einem Motorschiff und einem Leichter bei Fahrt in einem Kanal wurden naturgroße Messungen durchgeführt. Zum Einsatz kam der Schubverband mit dem Motorschiff „Niedersachsen 1“ und dem Schubleichter „Hannover 1“ mit den Abmessungen Länge x Breite = 162 m x 9,00 m. Die Hauptabmessungen und die Schiffsgeometrie entsprechen denen der Modelle des Typs Pontonbug. Der Schubverband verkehrt hauptsächlich zwischen dem Ruhrgebiet und Hannover, so daß sich eine Versuchsstrecke mit den zum Modellversuch korrespondierenden Abmessungen im Dortmund-Ems-Kanal (DEK) zwischen Ladbergen und Dörenthe anbot. Das Kanalprofil im Bereich zwischen Ladbergen (DEK-km 92) und Dörenthe (DEK-km 99) entspricht einem Rechteckprofil mit einer Breite von $b_K = 42$ m und einer Wassertiefe von $h = 4,0$ m. Die Versuchsstrecke hat einen geraden Streckenverlauf.

Am 10. Mai 2000 wurde die Drehmomenten- und Drehzahlmeßeinrichtung auf dem Motorschiff „Niedersachsen 1“ installiert. Dazu wurden auf der Propellerwelle zwischen dem Getriebe der Hauptmaschine und dem Wellenaustritt zum Propeller Dehnungsmeßstreifen angebracht. Damit wird die Torsion der Propellerwelle als Funktion des Drehmomentes erfaßt. Die Wellenleistung ergibt sich aus dem Drehmoment Q und der Drehzahl n zu

$$P_D = Q \cdot 2 \pi n.$$

Die Propellerdrehzahl wird mittels Lichtschranken bestimmt. Bei den Versuchsfahrten wird die Geschwindigkeit über Grund mit einem Differential Global Positioning System (DGPS) und zusätzlich über Weg-Zeit-Messungen bestimmt. Als Wegmarken werden die Kilometersteine der Kanalkilometrierung genutzt.

Ziel des Großversuchs ist die Ermittlung der benötigten Antriebsleistungen des Schubverbandes mit und ohne Verdrängungskörper an der Koppelstelle. Die erste Versuchsfahrt mit dem Schubverband MS „Niedersachsen 1“ und SL „Hannover 1“ ohne Verdrängungskörper an der Koppelstelle wurden am 11. Mai 2000 durchgeführt. Das schiebende Motorschiff hatte einen Tiefgang von $T_{GMS} = 2,40$ m und der Schubleichter $T_{SL} = 2,50$ m. Während der Messungen erfolgten keine Begegnungen oder Überholungen, so daß Geschwindigkeitsbeeinflussungen infolge von Überlagerungen der Strömungsfelder ausgeschlossen wurden. Es wurden 4 Propulsionspunkte mit unterschiedlichen Drehzahlen ermittelt:

Geschwindigkeit	Propellerdrehzahl	Wellenleistung
V [km/h]	n [1/min]	P_D [kW]
7,35	243	178
8,87	284	282
9,52	316	393
9,6	317	405

Abb. 12: Messungen am Schubverband mit freier Koppelstelle

Am 17./18. Mai 2000 wurde in Duisburg an der Meidericher Schiffswerft der Verdrängungskörper übernommen, am Bug des Motorschiffes angepaßt und mittels einer Spannvorrichtung fixiert. Dabei war das Motorschiff unbeladen. Am 25. Mai wurde innerhalb der gleichen Versuchsstrecke entsprechend der Versuchsfahrt ohne Verdrängungskörper die zweite Meßreihe mit dem Verdrängungskörper durchgeführt. Das schiebende Motorschiff hatte wieder einen Tiefgang von $T_{GMS} = 2,40$ m und der Schubleichter von $T_{SL} = 2,50$ m. Gegenüber den ersten Meßfahrten mit freier Koppelstelle hatte das Motorschiff eine größere Zuladung von ca. 50 t, um den zusätzlichen Auftrieb des Verdrängungskörpers zu kompensieren. Es wurden wieder 4 Propulsionspunkte mit unterschiedlichen Drehzahlen ermittelt:

Geschwindigkeit	Propellerdrehzahl	Wellenleistung
V [km/h]	n [1/min]	P_D [kW]
7,35	238	181
8,91	274	263
9,84	309	382
10,00	315	408

Abb. 13: Messungen am Schubverband mit Volumenkörper

Die Gegenüberstellung der Meßwerte (Abbn. 12 und 13) läßt erkennen, daß bei der größten Wellenleistung ($P_D \approx 400$ kW und gleicher Propellerdrehzahl $n = 316 \text{ min}^{-1}$) die Geschwindigkeit des Verbandes durch das Auffüllen der Koppelstelle mit einem Volumenelement um $\Delta V = 0,4$ km/h erhöht wird.

7. Ergebnisse

Im Bereich der Koppelstelle eines Schubverbandes entstehen Wirbel, die sich bei den durchgeführten CFD-Berechnungen zeigten und durch Modellversuche mittels LDV verifiziert werden konnten.

Der Einsatz verschiedener Körperformen im Bereich der Koppelstelle wurde in Propulsionsversuchen getestet. Im Vergleich zu Ballonen führte der Einsatz von Keilen zu den besten Resultaten.

Entsprechend der optimierten Keilform wurde ein Volumenkörper für den Einsatz im Großversuch gebaut und untersucht. Die Gegenüberstellung der Propulsionsdaten für den Koppelverband mit und ohne Volumenelement an der Koppelstelle ist für die Modellversuche und die Messungen an der Großausführung durchgeführt worden. Bei gleichbleibender Schiffsgeschwindigkeit sind dabei die folgenden Leistungseinsparungen erzielt worden:

V [km/h]	aus Modellversuch		Großversuch	
	[kW]	[%]	[kW]	[%]
9,0	33	17,6	30	10,0
9,6	50	19,7	60	14,8

Abb. 14: Leistungsreduktion bei konstanter Geschwindigkeit

Unter Beibehaltung gleicher Leistung lassen sich die Verbesserungen durch den Einsatz eines Volumenkörpers an der Koppelstelle des Schubverbandes auch durch die erreichbare Geschwindigkeitserhöhungen ausdrücken:

P _D [kW]	aus Modellversuch		Großversuch	
	[km/h]	[%]	[km/h]	[%]
300	0,67	6,7	0,27	3,0
400	1,20	11,2	0,40	4,2

Abb. 15: Geschwindigkeitserhöhung ΔV bei konstanter Leistung

Bei der Beurteilung dieser Verbesserungen muß weiterhin berücksichtigt werden, daß das Motorschiff unter Beibehaltung des Tiefgangs bei Einsatz des Volumenelementes zusätzlich ca. 50 t Ladung transportieren kann.

Abschließend kann festgestellt werden, daß das Auffüllen der Koppelstelle eines Schubverbandes durch ein Volumenelement zu einer deutlichen Geschwindigkeitssteigerung führt und eine gleichzeitige Erhöhung der Ladungskapazität bewirkt.

8. Symbolverzeichnis

A_E/A_0	Propeller-Flächenverhältnis
B	Breite
b_K	Kanalbreite
C_A	Rauhigkeitszuschlag
C_B	Blockkoeffizient
C_F	Reibungsbeiwert
$c_{0.7R}$	Profillänge auf 0,7 R
D	Propellerdurchmesser
F_D	Reibungsabzug
h	Wassertiefe
K_Q	Momentenbeiwert
K_T	Schubbeiwert
$L_{üA}$	Länge über Alles
L_{WL}	Länge in der Wasserlinie
m_D	Düsen-Maßstabseffekt
m_P	Propeller-Maßstabseffekt
n	Drehzahl
P_D	Propellerdrehleistung
P	Propellersteigung
P/D	Steigungsverhältnis
Q	Drehmoment
R_n	Reynoldszahl
R_T	Gesamtwiderstand
S	benetzte Oberfläche
T	Tiefgang
T	Schub
V	Geschwindigkeit
Ψ	Verdrängung
Z	Anzahl Propellerflügel
Z_v	parallele Tiefertauchung

η	Propellerwirkungsgrad
λ	Maßstabszahl
θ	Trimm

Index	L	für Leichter
	M	für Modell
	S	für Schiff

2 für 2. Tiefgang

9. Anlagen

Typ Stevenbug

- Anl. 1 Wirbelbildung an der Koppelstelle
- Anl. 2 Spantriß Motorschiff
- Anl. 3 Spantriß Leichter
- Anl. 4 Hauptabmessungen GMS + SL
- Anl. 5 Vorschiff GMS mit Ballonen
- Anl. 6 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche

Versuche mit Typ Stevenbug im breiten Kanal, $b_K \blacktriangleright 110\text{ m}$, $h \blacktriangleright 4\text{ m}$

- Anl. 7 Propulsionsversuche GMS + SL, Koppelstelle frei/mit Ballonen
- Anl. 8 Fotos Propulsionsversuch $T = 2,5\text{ m}$, Koppelstelle mit Ballonen

LDV-Messungen mit Typ Stevenbug

- Anl. 9 LDV-Raster an der Koppelstelle
- Anl. 10 LDV-Messung an der Koppelstelle – Längsschnitt S 1
- Anl. 11 LDV-Messung an der Koppelstelle – Längsschnitt S 2
- Anl. 12 LDV-Messung an der Koppelstelle – Längsschnitt S 3
- Anl. 13 LDV-Messung an der Koppelstelle – Längsschnitt S 4
- Anl. 14 LDV-Messung an der Koppelstelle – Längsschnitt S 5
- Anl. 15 LDV-Messung an der Koppelstelle – Längsschnitt S 6
- Anl. 16 LDV-Messung an der Koppelstelle – WL 8
- Anl. 17 LDV-Messung an der Koppelstelle – WL 12
- Anl. 18 LDV-Messung an der Koppelstelle – WL 16
- Anl. 19 LDV-Messung an der Koppelstelle – WL 18
- Anl. 20 LDV-Messung an der Koppelstelle – Spant A
- Anl. 21 LDV-Messung an der Koppelstelle – Spant B
- Anl. 22 LDV-Messung an der Koppelstelle – Spant C

Typ Pontonbug

- Anl. 23 Spantriß Gütermotorschiff
- Anl. 24 Spantriß Leichter
- Anl. 25 Hauptabmessungen GMS + SL
- Anl. 26 Anrißplan Gütermotorschiff
- Anl. 27 Anrißplan Leichter
- Anl. 28 Propellerzeichnung
- Anl. 29 Freifahrtdiagramm
- Anl. 30 Düsenzeichnung
- Anl. 31 Ruderzeichnung
- Anl. 32 Einbauzeichnung
- Anl. 33 Ansicht Hinterschiff GMS mit Düse und Ruder
- Anl. 34 Übersicht Modellversuche mit Typ II

- Anl. 35 Vorschiff GMS mit Keilen und Plane
- Anl. 36 Vorschiff GMS mit gekürzten Keilen
- Anl. 37 Vorschiff GMS mit 2 Ballonen
- Anl. 38 Koppelstelle mit 2 Ballonen, Ansicht von Bb.
- Anl. 39 Vorschiff GMS mit 3 Ballonen, Ansicht von Stb. vorn

- Anl. 40 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche
- Anl. 41 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche
- Anl. 42 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche
- Anl. 43 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche
- Anl. 44 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche
- Anl. 45 Tabellen der umgerechneten Propulsionsversuche

Versuche mit Typ Pontonbug im breiten Kanal, $b_K \blacktriangleright 137,2 \text{ m}$, $h \blacktriangleright 4$

m

- Anl. 46 Propulsionsversuche GMS ohne/mit Düse auf 2 Tiefgängen
- Anl. 47 Propulsionsversuche GMS + SL ohne/mit Düse auf 2 Tiefgängen
- Anl. 48 Fotos Vers. 110-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelstelle frei
- Anl. 49 Propulsionsvers. GMS + SL, mit Düse, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit Keilen
- Anl. 50 Fotos Vers. 113-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 Keilen
- Anl. 51 Fotos Vers. 112-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 Keilen + Folie
- Anl. 52 Fotos Vers. 116-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit 3 Keilen
- Anl. 53 Fotos Vers. 118-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 gekürzten Keilen
- Anl. 54 Propulsionsvers. GMS + SL, mit Düse, Tg. $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, Koppelst. mit Keilen
- Anl. 55 Fotos Vers. 114-99-04, T $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 Keilen
- Anl. 56 Fotos Vers. 115-99-04, T $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, Koppelst. mit 3 Keilen
- Anl. 57 Fotos Vers. 119-99-04, T $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 gekürzten Keilen
- Anl. 58 Propulsionsvers. GMS + SL, mit Düse, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit Ballonen
- Anl. 59 Fotos Vers. 121-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 Ballonen
- Anl. 60 Fotos Vers. 122-99-04, T $\blacktriangleright 2,50 \text{ m}$, Koppelst. mit 3 Ballonen
- Anl. 61 Propulsionsvers. GMS + SL m. Düse, T $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 Ballonen
- Anl. 62 Fotos Vers. 120-99-04, T $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, Koppelst. mit 2 Ballonen

Versuche mit Typ Pontonbug im schmalen Kanal, $b_K \blacktriangleright 42 \text{ m}$, $h \blacktriangleright 4$

m

- Anl. 63 Propulsionsversuche GMS+SL, ohne und mit Düse, Tiefgangsvariation
- Anl. 64 Propulsionsversuche GMS+SL, mit Düse, T $\blacktriangleright 2,50$, Koppelstelle mit Keilen
- Anl. 65 Propulsionsversuche GMS+SL, mit Düse, T $\blacktriangleright 1,90$, Koppelstelle mit Keilen
- Anl. 66 Tabellen der umgerechneten Pfahlzugversuche
- Anl. 67 Tabellen der umgerechneten Pfahlzugversuche
- Anl. 68 Pfahlzugversuche GMS ohne/mit Düse, T $\blacktriangleright 1,90 \text{ m}$, im großen Tank
- Anl. 69 Pfahlzugversuche GMS+SL, ohne Düse, 2 Tg, im kleinen Tank auf Tiefw.

Anl. 70 Pfahlzugversuche GMS+SL, ohne Düse, 2 Tg, im kleinen Tank, $h \geq 4$ m

CFD-Berechnungen

Anl. 71 Vernetzung der Oberflächen im Bereich der Koppelstelle

Anl. 72 Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle, $h = 4$ m, $V = 2,78$ m/s

$Y = 4,25$ m

Anl. 73 “ $Y = 4$ m

Anl. 74 “ $Y = 3,5$ m

Anl. 75 “ $Y = 3$ m

Anl. 76 “ $Y = 2$ m

Anl. 77 “ $Y = 0,5$ m

Anl. 78 “ $Y = 0,1$ m

Anl. 79 Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle, $h = 4$ m, $V = 2,78$ m/s

$Z = 2,0$ m Faktor = 0,5

Anl. 80 “ $Z = 1,5$ m

Anl. 81 “ $Z = 1,0$ m

Anl. 82 “ $Z = 0,5$ m

Anl. 83 “ $Z = 0,4$ m

Anl. 84 “ $Z = 0,35$ m

Anl. 85 “ $Z = 0,3$ m

Anl. 86 “ $Z = 0,2$ m

Anl. 87 “ $Z = 0,1$ m

Anl. 88 “ $Z = -0,1$ m

Anl. 89 Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle, $h = 4$ m, $V = 2,78$ m/s

$X = 85$ m

Anl. 90 “ $X = 84,5$ m

Anl. 91 “ $X = 84$ m

Anl. 92 “ $X = 83,5$ m

Anl. 93 “ $X = 83$ m

Anl. 94 “ $X = 82,5$ m

Anl. 95 “ $X = 82$ m

Anl. 96 “ $X = 81,5$ m

Anl. 97 “ $X = 81$ m

Anl. 98 “ $X = 80,5$ m

Anl. 99 “ $X = 80$ m

Anl. 100 “ $X = 79,5$ m

Anl. 101 Darstellung der Wirbelbildung durch einen Stromfaden

Anl. 102 “

Anl. 103 Druckverteilung am Vorschiff des GMS

Anl. 104 Druckverteilung an der Koppelstelle

Anl. 105 Druckverteilung am Tankboden

Großversuche

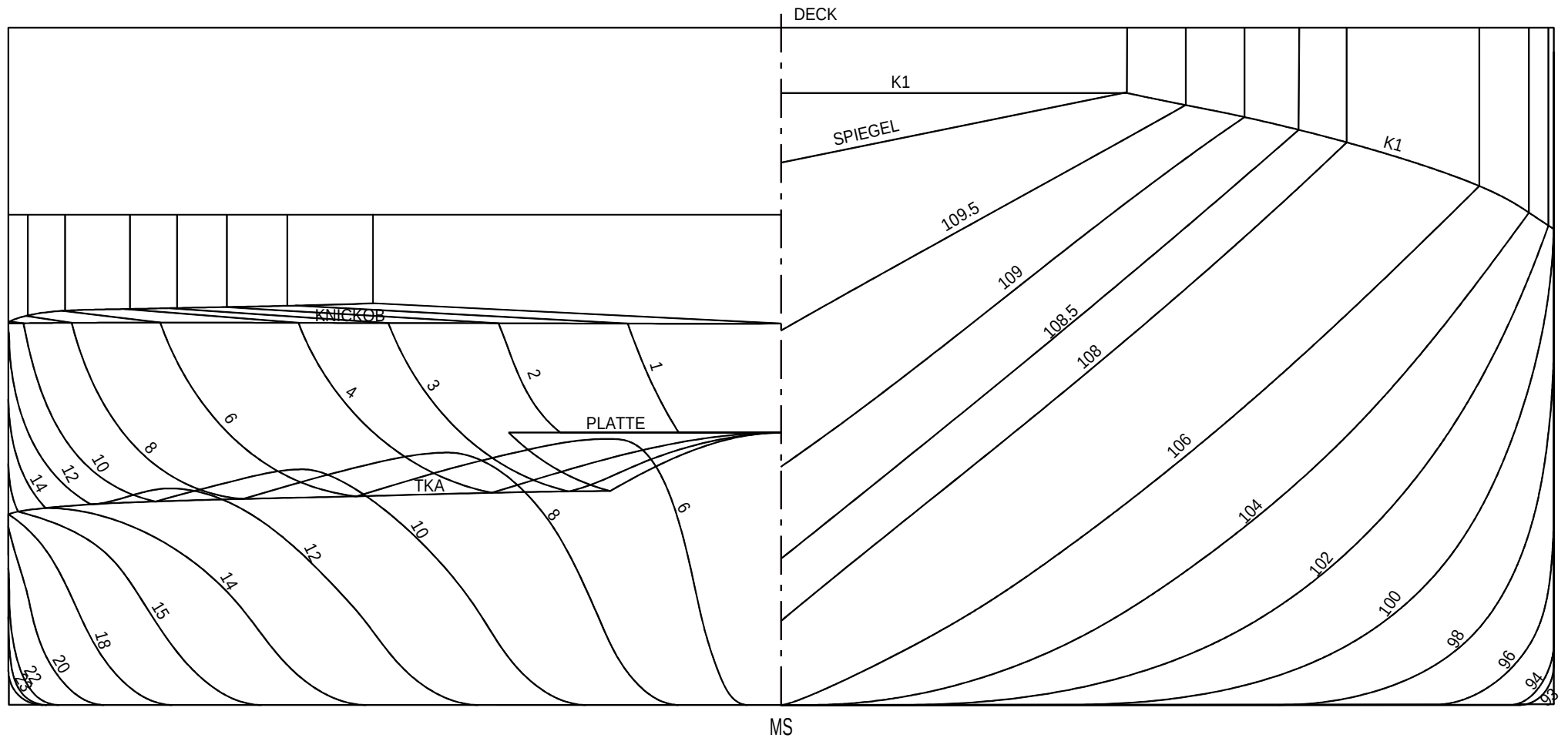
Anl. 106 Vorschiff GMS „Niedersachsen 1“

- Anl. 107 Konstruktion des Volumenkörpers
- Anl. 108 Verdrängungskurve des Volumenkörpers
- Anl. 109 Foto des Volumenkörpers
- Anl. 110 Foto Volumenkörper am Vorschiff
- Anl. 111 Propulsionsversuch, Auftragung über V
- Anl. 112 Propulsionsversuch, Auftragung über n
- Anl. 113 Wellenbildung an der Koppelstelle ohne Volumenkörper
- Anl. 114 Wellenbildung an der Koppelstelle mit Volumenkörper

Wirbelbildung an der Koppelstelle eines Schubverbandes



SPANTENRISS



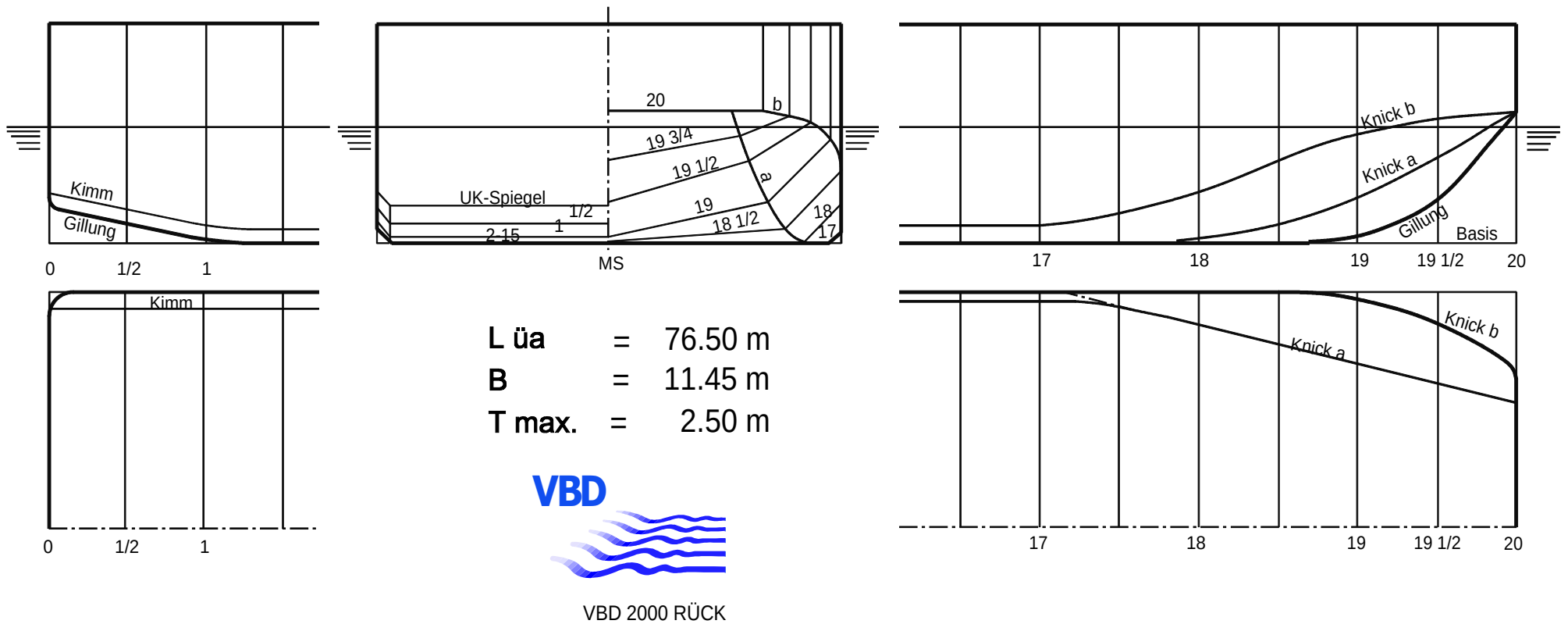
MODELL - M1523

$\lambda = 11$



VBD 2000 RÜCK

SCHUBLEICHTER



Gütermotorschiff mit Schubleichter - Typ Stevenbug

Hauptabmessungen

Abmessungen Gütermotorschiff (M 1523)

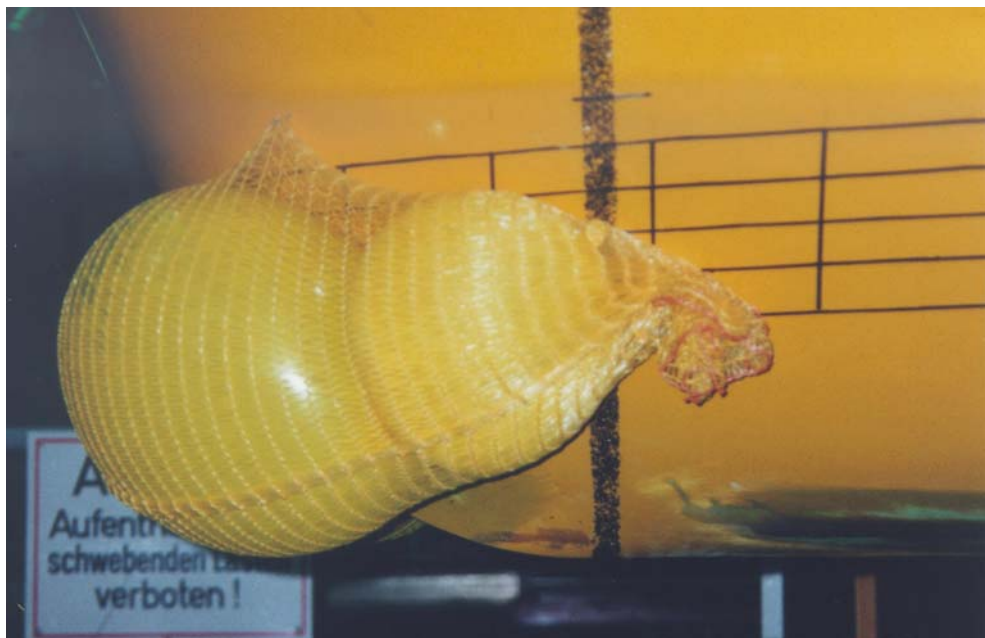
Maßstabszahl	λ		1	11
Länge über Alles	$L_{\text{ÜA}}$	[m]	110,00	10,000
Länge in der Wasserlinie	L_{WL}	[m]	109,25	9,932
Breite	B	[m]	11,45	1,041
Tiefgang	T	[m]	2,50	0,227
Verdrängung	∇	[m ³]	2717	2,041
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,862	
benetzte Oberfläche	S	[m ²]	1666	13,769

Abmessungen Schubleichter E II b (M 1535)

Maßstabszahl	λ		1	11
Länge über Alles	$L_{\text{ÜA L}}$	[m]	76,50	6,955
Länge in der Wasserlinie	$L_{\text{WL L}}$	[m]	76,12	6,920
Breite	B_L	[m]	11,45	1,041
Tiefgang	T_L	[m]	2,50	0,227
Verdrängung	∇_L	[m ³]	2060	1,548
Blockkoeffizient	$C_{B L}$	[-]	0,945	
benetzte Oberfläche	S_L	[m ²]	1185,7	9,799

Gütermotorschiff Typ Stevenbug

Koppelstelle mit Ballonen



Zusammenstellung der auf die Großausführung umgerechneten Werte der Propulsionsversuche mit Typ Stevenbug

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 311, $b_K = 110$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	F_D^* [N]	T [kN]	P_D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z_v [cm]
5,96	114,0	3,17	14,80	68,28	-1,4	0,3
7,99	154,9	5,28	27,88	171,63	-1,2	0,5
8,96	174,4	6,41	35,48	243,90	-1,4	0,9
10,52	203,0	8,43	47,92	383,04	-1,4	1,2
11,73	225,6	10,16	59,18	530,46	-1,7	1,5
12,54	245,9	11,44	70,57	683,78	-2,3	1,6
13,47	260,7	12,88	79,61	823,82	-3,7	2,5
14,47	347,0	14,60	96,95	1302,38	-4,6	3,1

*) F_D ist der im Versuch eingestellte Reibungsabzug

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle mit Ballonen

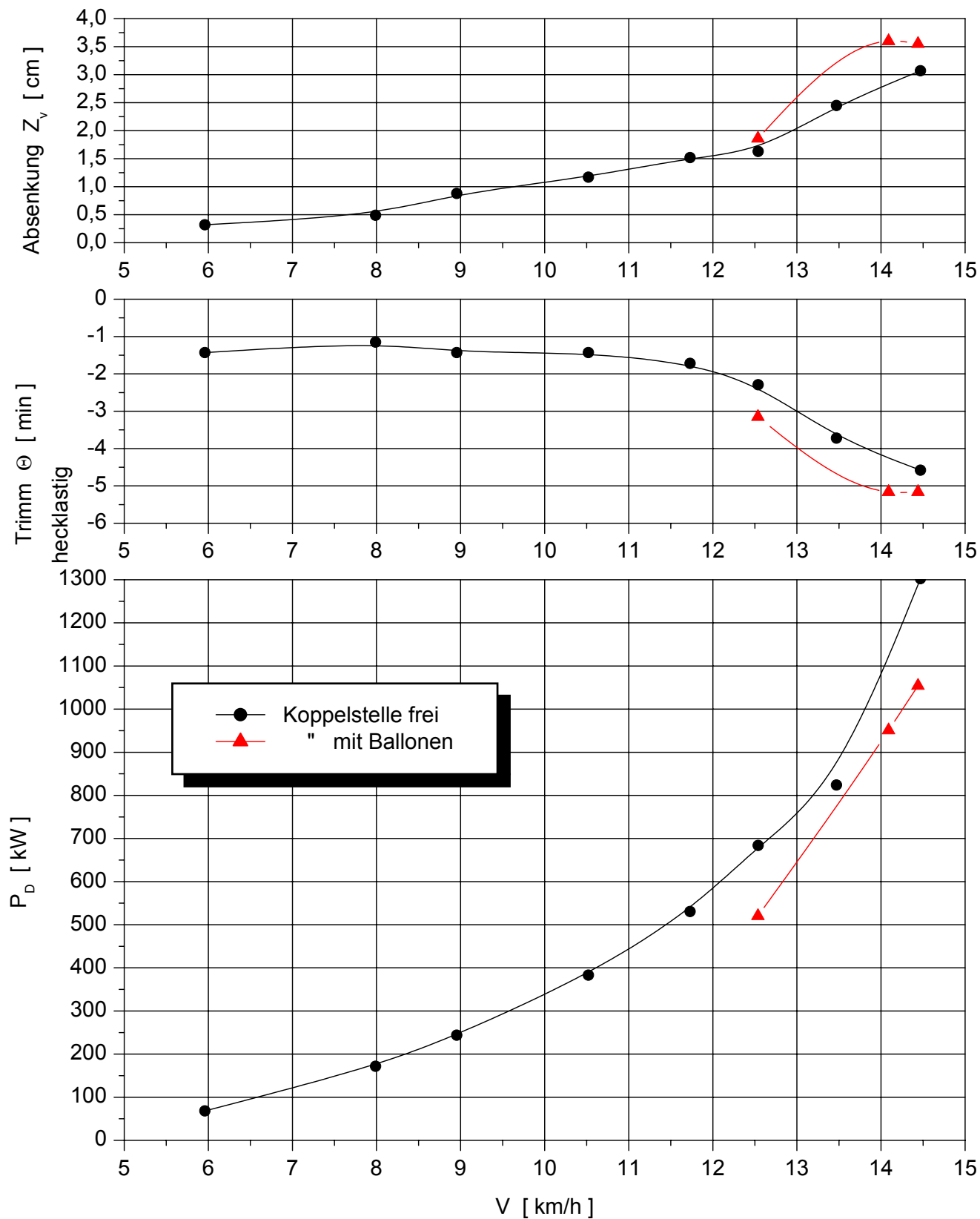
Versuch Nr. 312, $b_K = 110$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	F_D^* [N]	T [kN]	P_D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z_v [cm]
12,54	225,6	11,44	59,24	520,32	-3,2	1,9
14,09	273,7	13,98	88,245	951,07	-5,2	3,6
14,44	283,9	14,60	95,047	1054,29	-5,2	3,6

GMS mit Düse - T = 2,50 m

$b_K = 110$ m, $h = 4$ m

311
312



Propulsionsversuch mit Typ Stevenbug

Gütermotorschiff + Leichter, Koppelstelle mit Ballonen

$b_K = 110 \text{ m}$ - $h = 4 \text{ m}$ - $T = 2,5 \text{ m}$

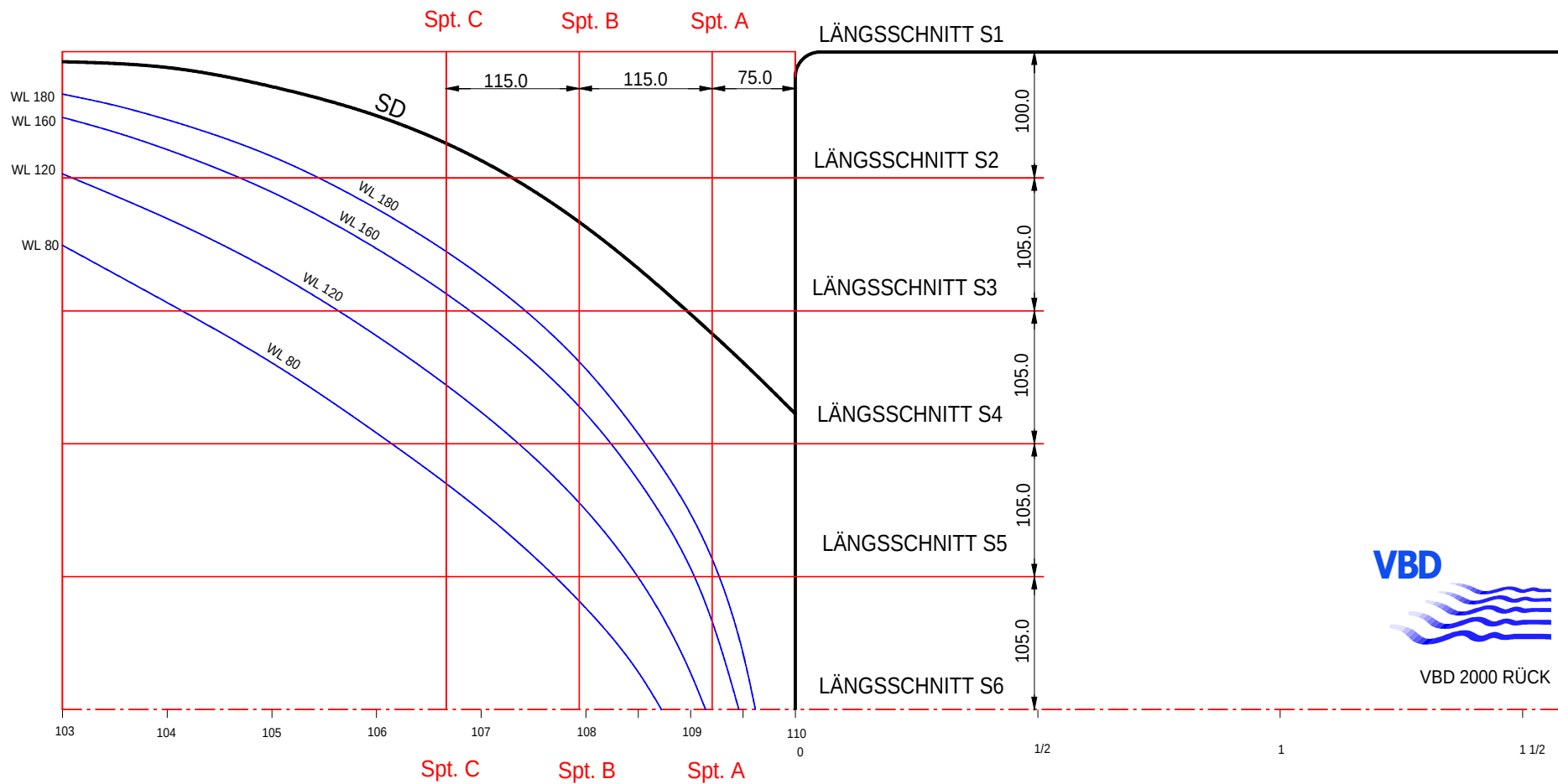


VERSUCHSRASTER AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

DRAUFSICHT

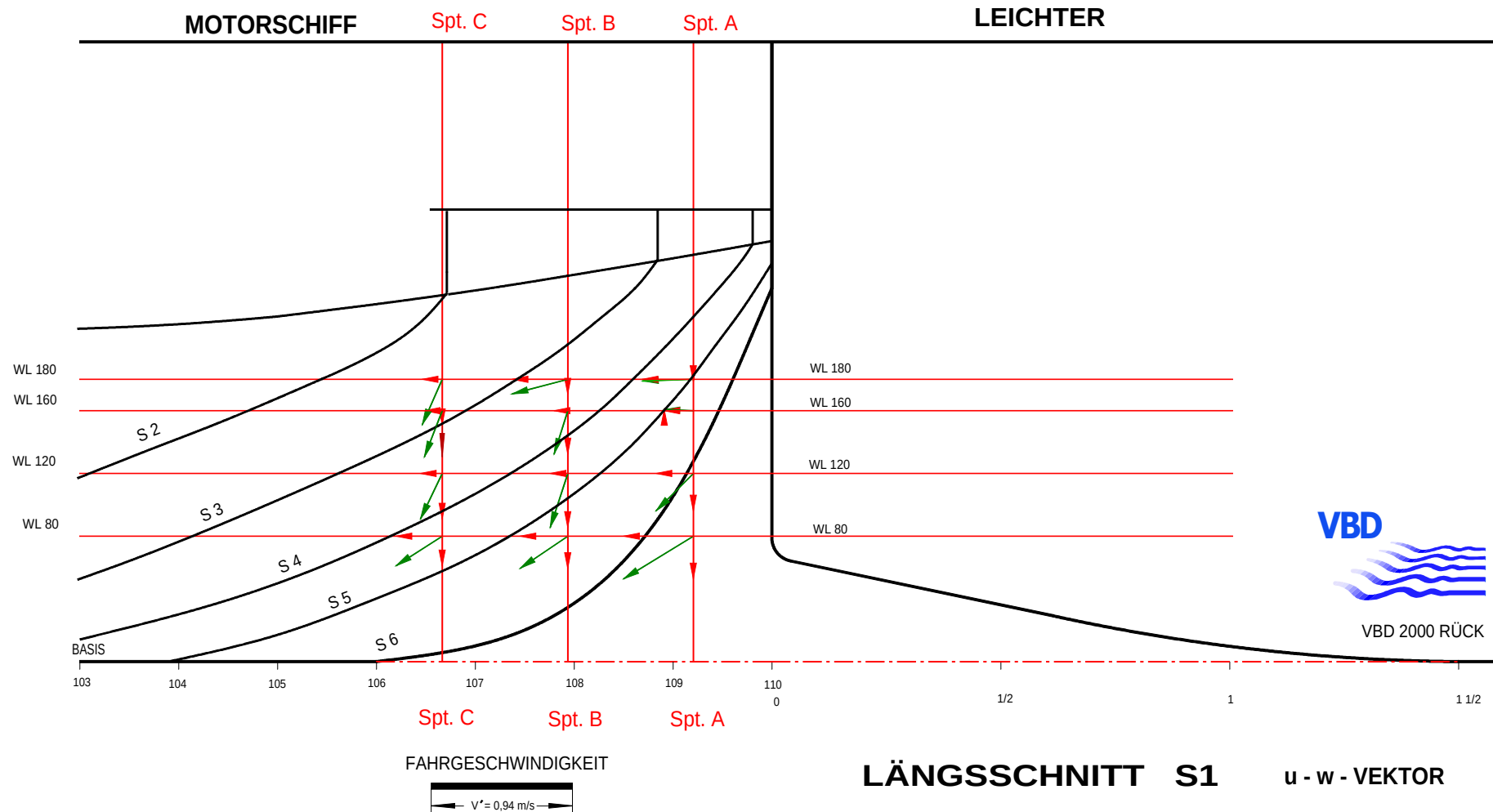
MOTORSCHIFF

LEICHTER



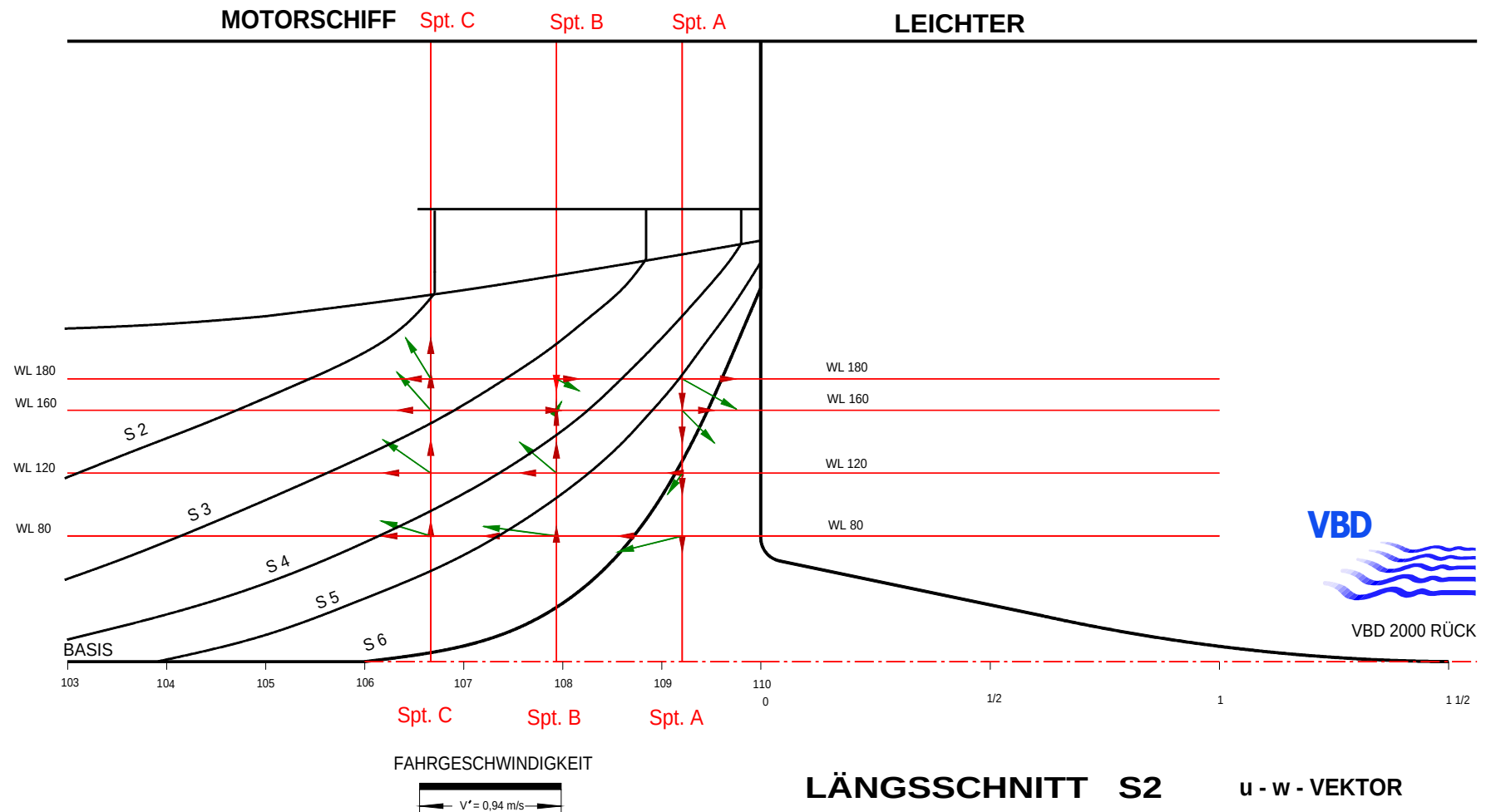
NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$
 $T = 2,5 \text{ m}$
 $V = 11,2 \text{ km/h}$



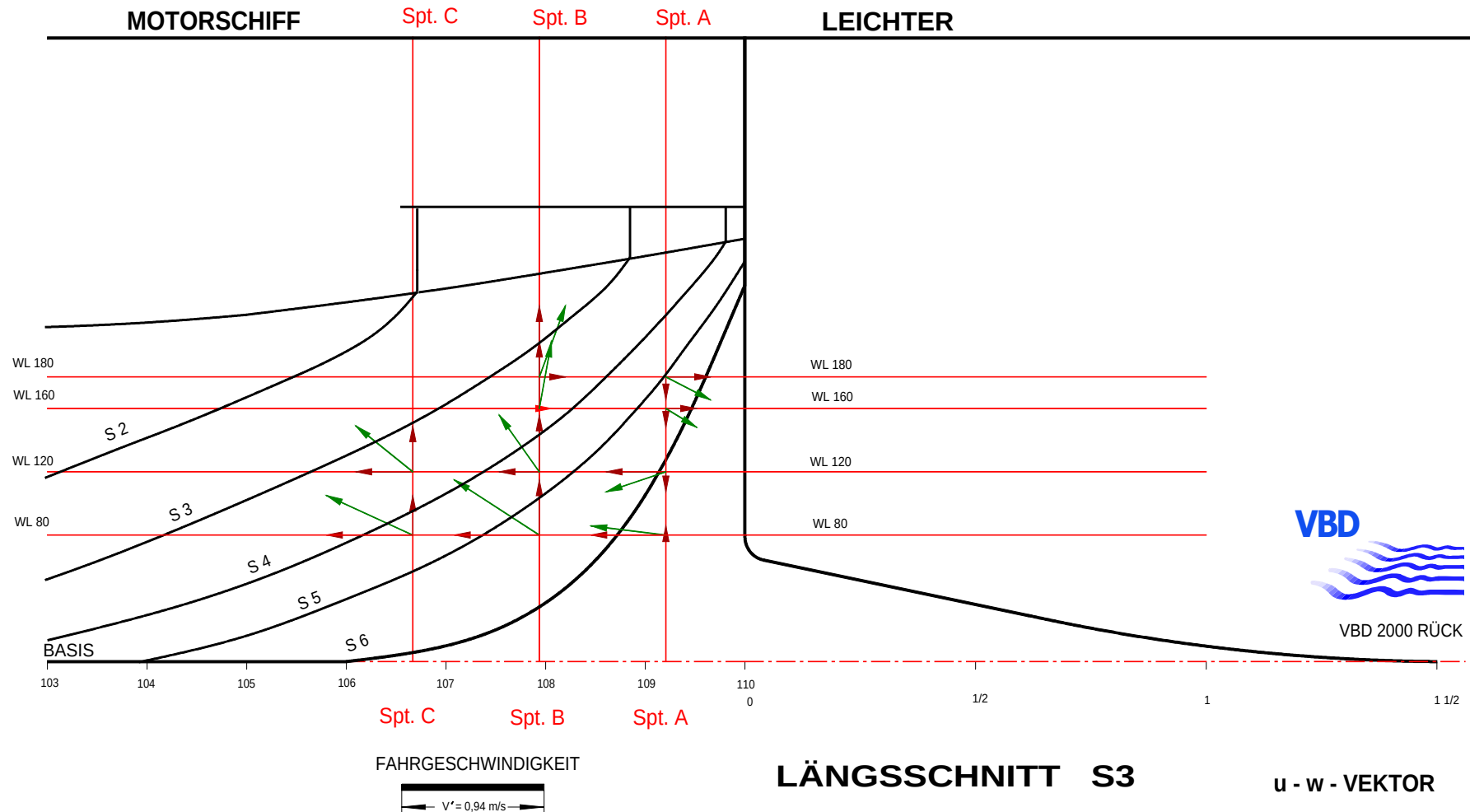
NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$
 $T = 2,5 \text{ m}$
 $V = 11,2 \text{ km/h}$



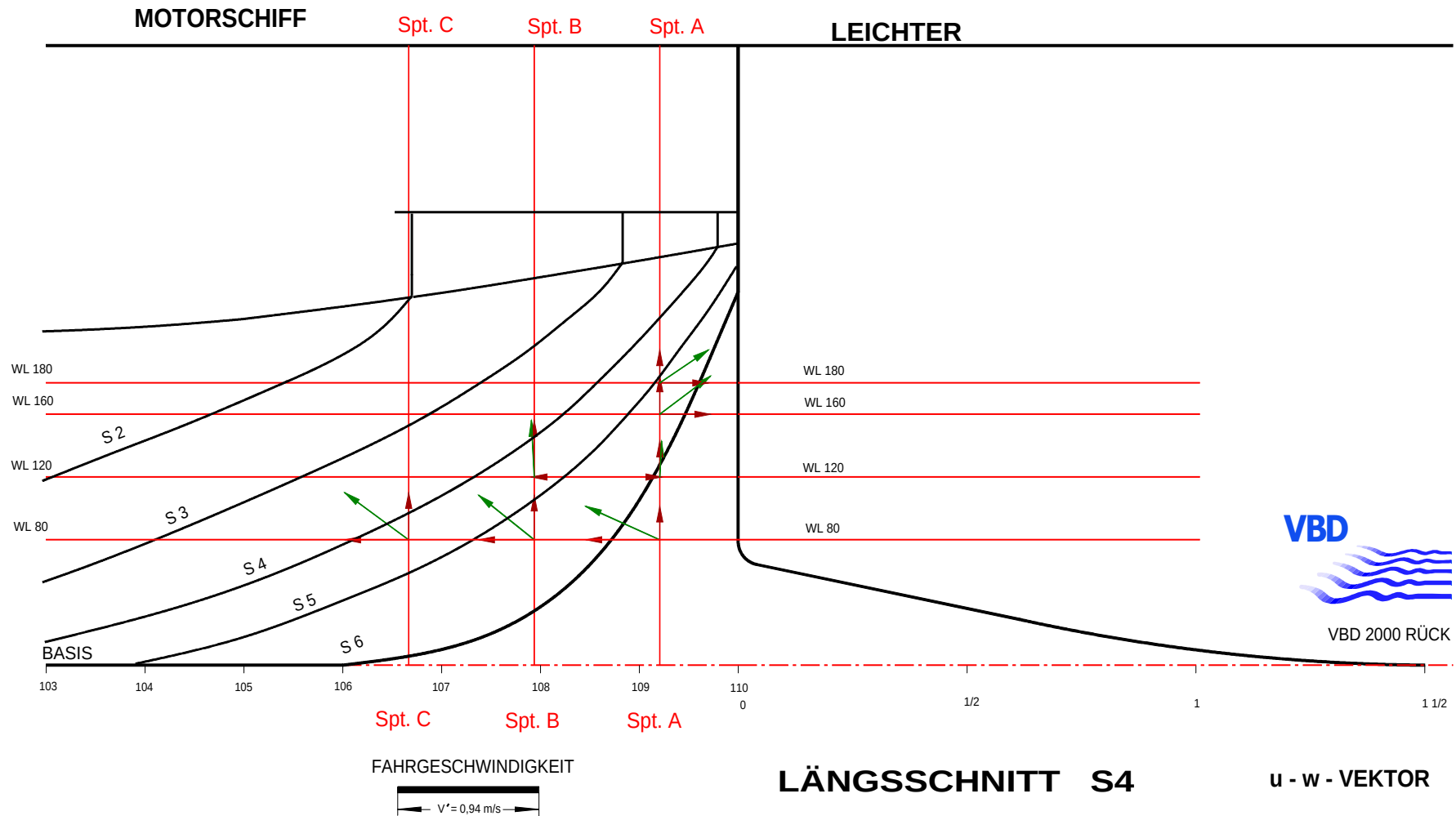
NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$
 $T = 2,5 \text{ m}$
 $V = 11,2 \text{ km/h}$



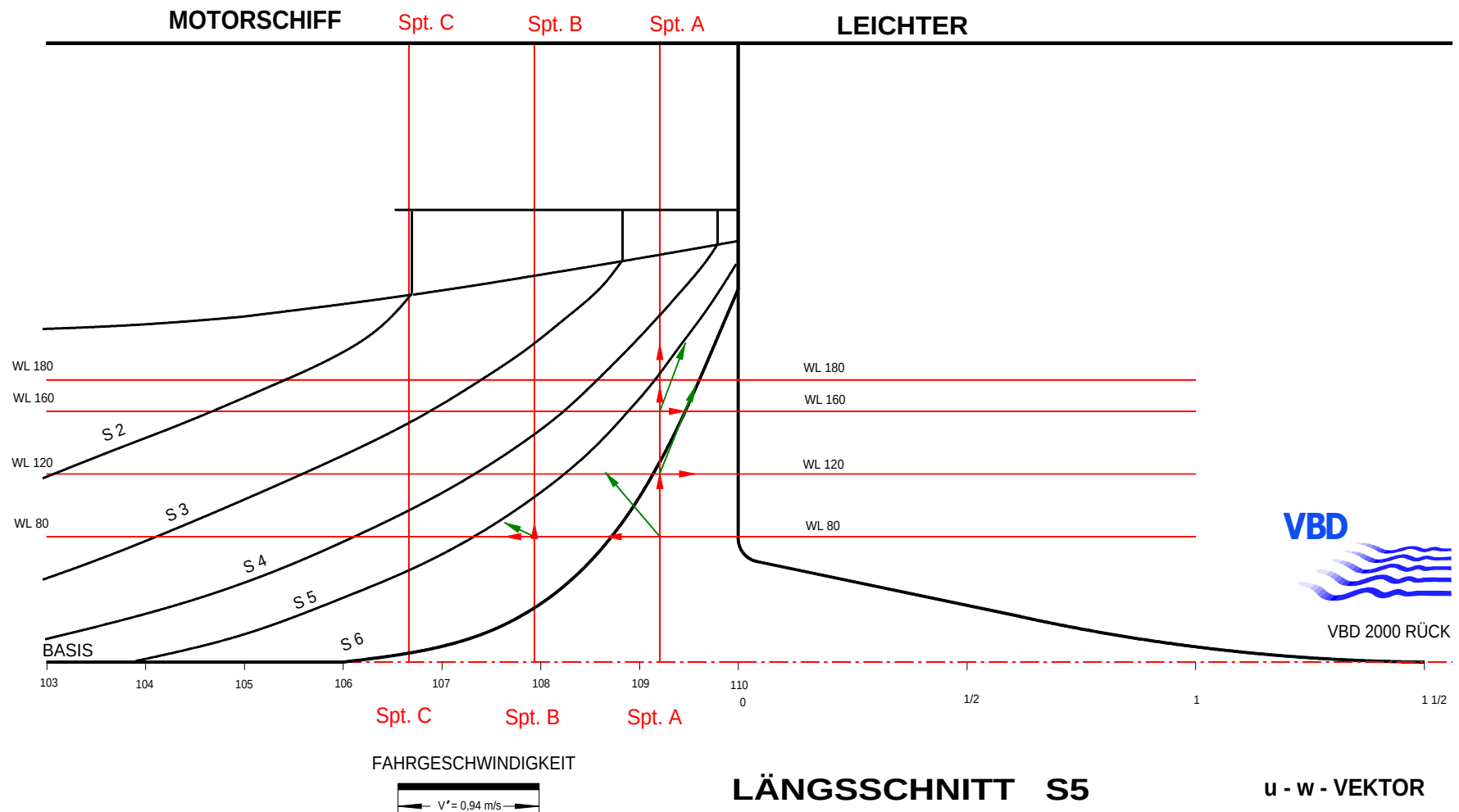
NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$
 $T = 2,5 \text{ m}$
 $V = 11,2 \text{ km/h}$



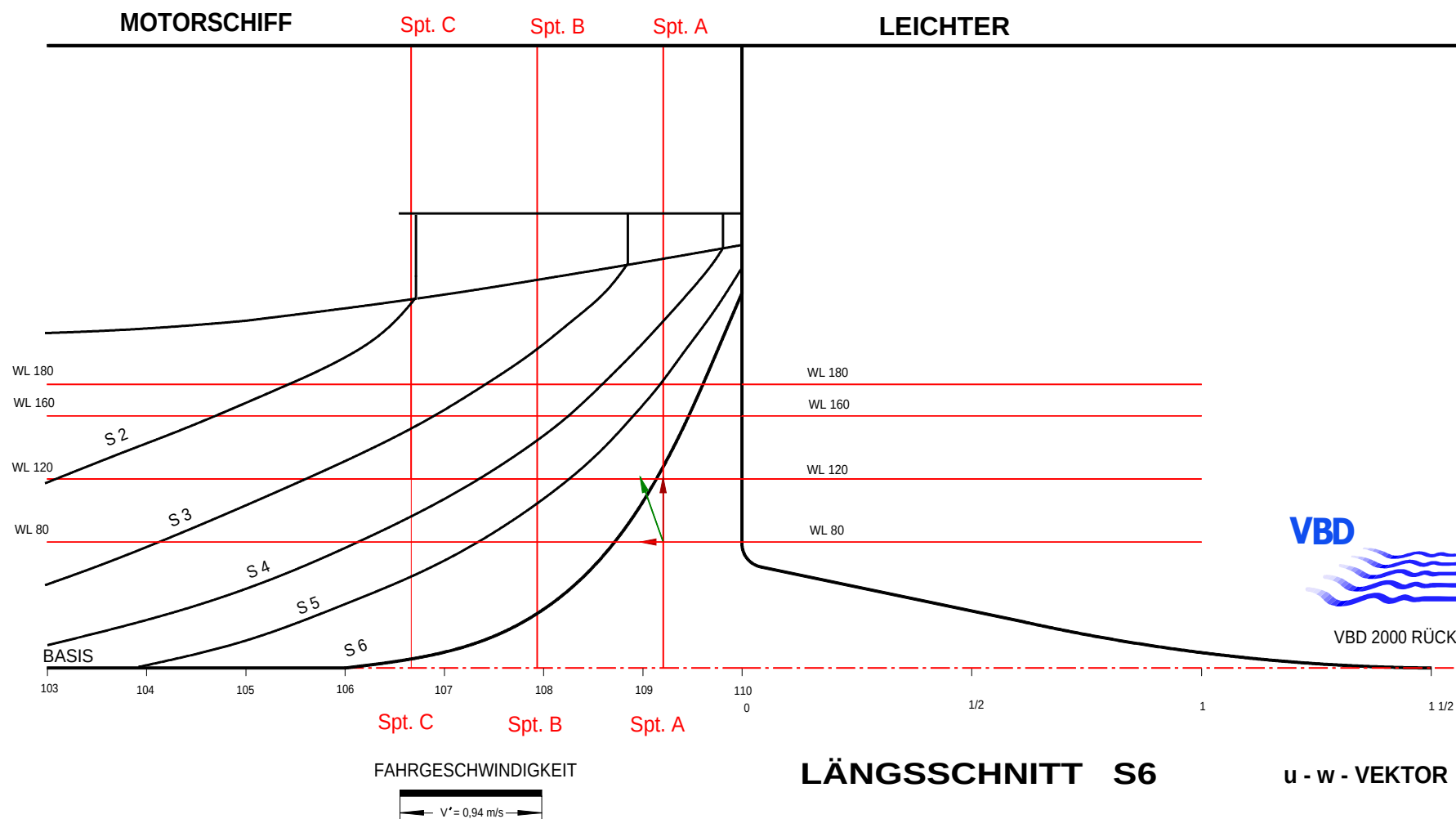
NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$
 $T = 2,5 \text{ m}$
 $V = 11,2 \text{ km/h}$



NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$
 $T = 2,5 \text{ m}$
 $V = 11,2 \text{ km/h}$

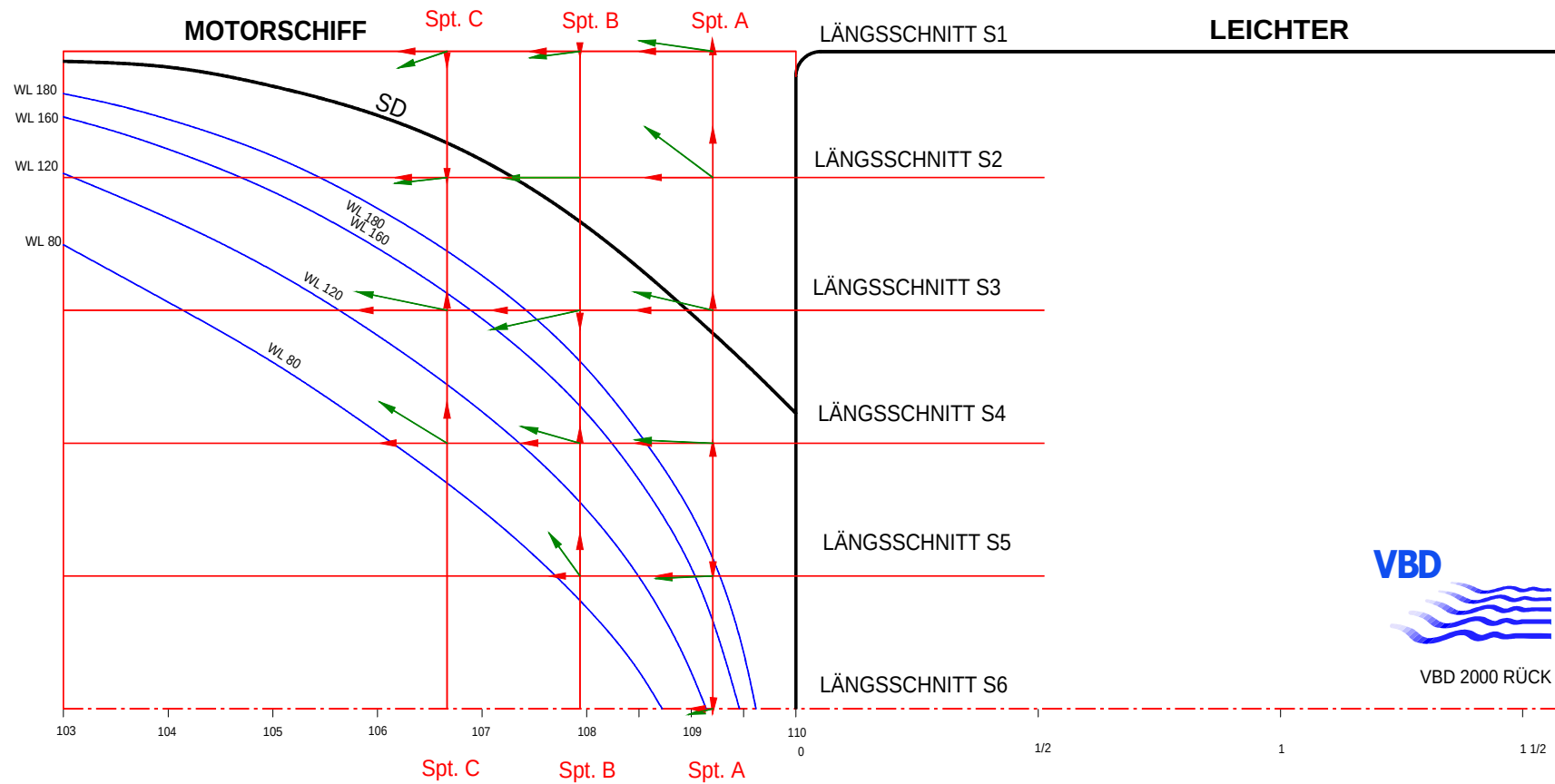


NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$

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

$V = 11,2 \text{ km/h}$



VBD
VBD 2000 RÜCK

FAHRGESCHWINDIGKEIT

$V' = 0,94 \text{ m/s}$

WL 80

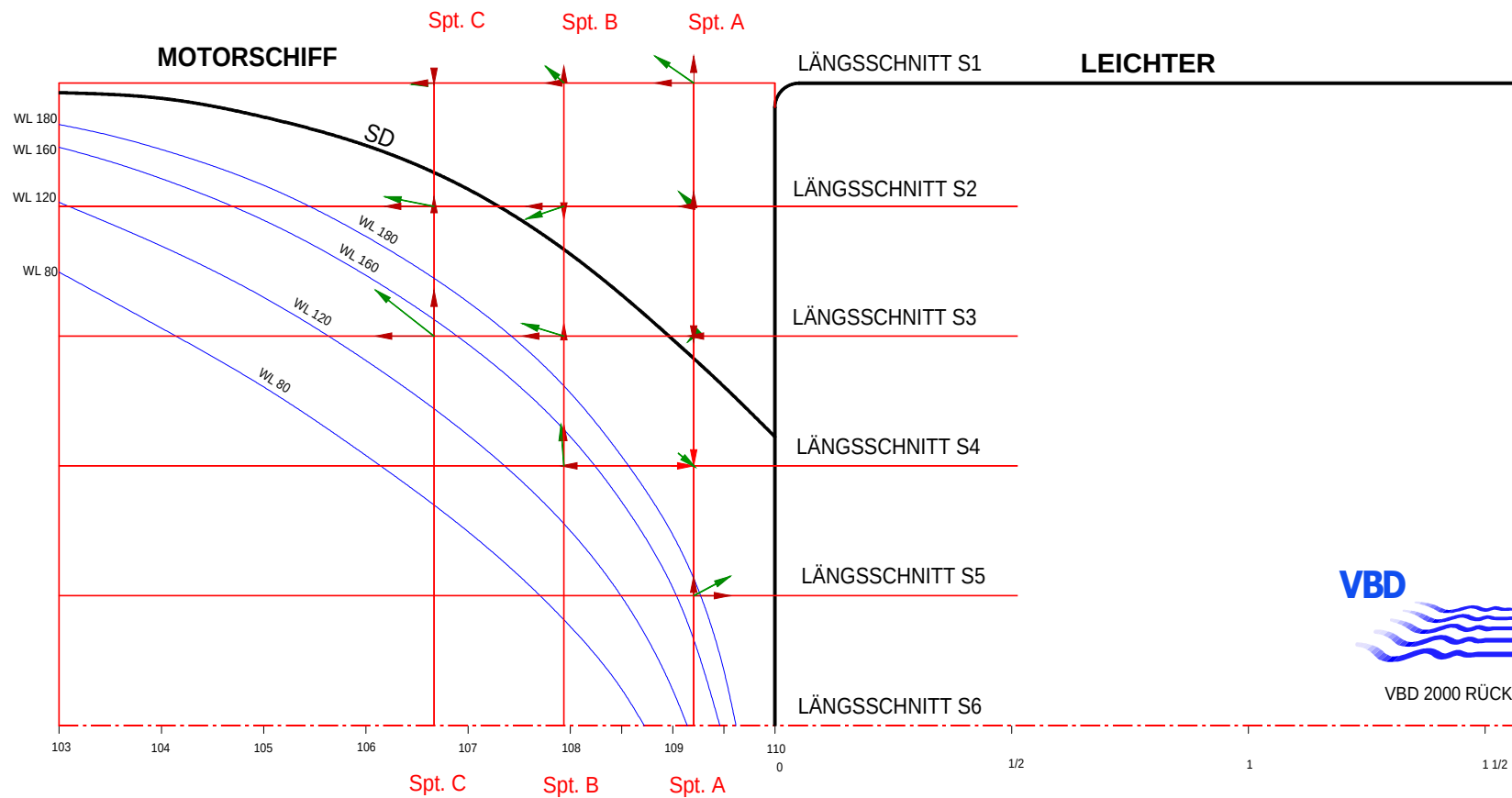
u - v - VEKTOR

NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$

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

$V = 11,2 \text{ km/h}$



VBD
VBD 2000 RÜCK

FAHRGESCHWINDIGKEIT

$V^* = 0,94 \text{ m/s}$

WL 120

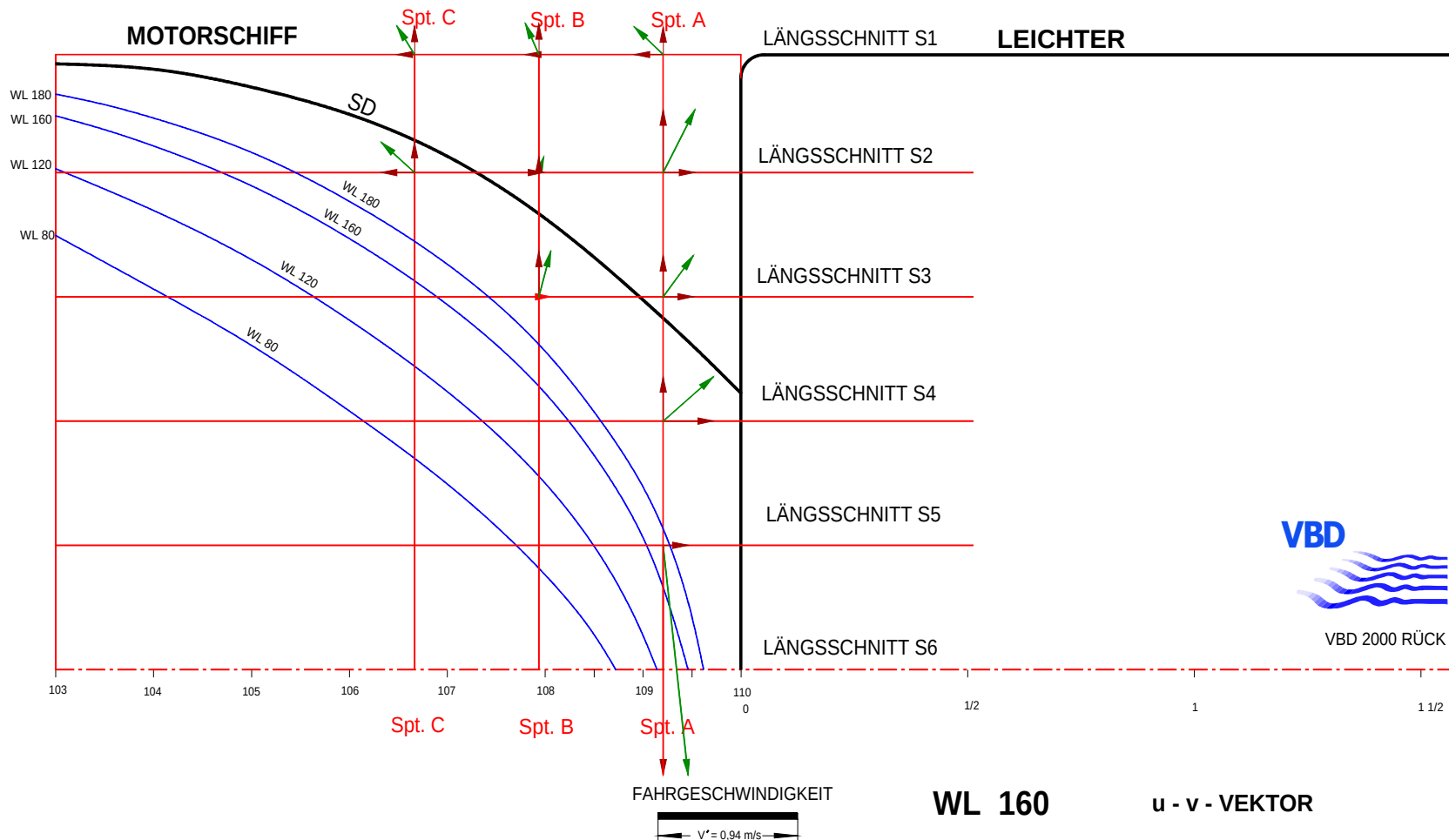
u - v - VEKTOR

NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$

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

$V = 11,2 \text{ km/h}$

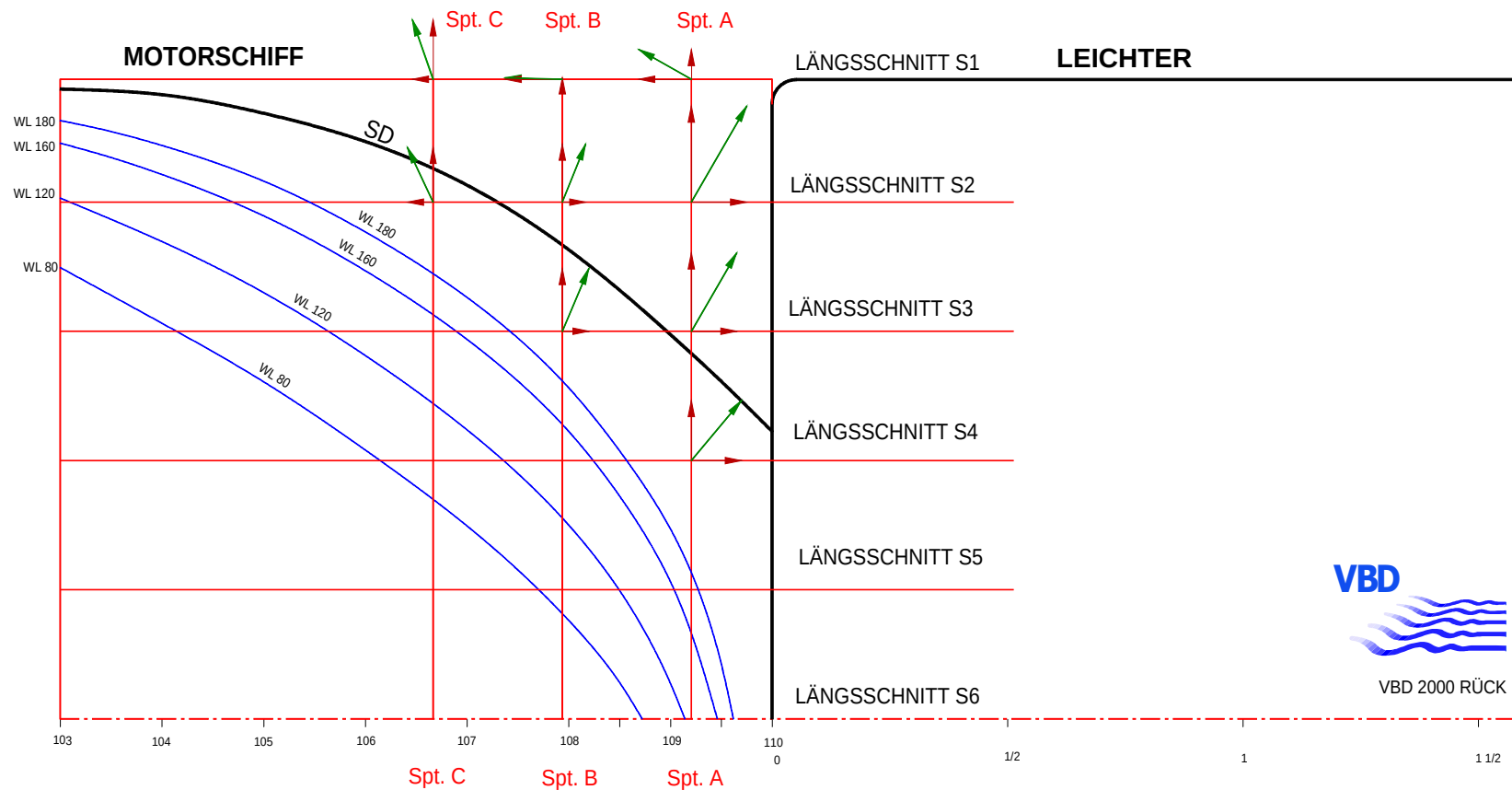


NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$

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

$V = 11,2 \text{ km/h}$



FAHRGESCHWINDIGKEIT

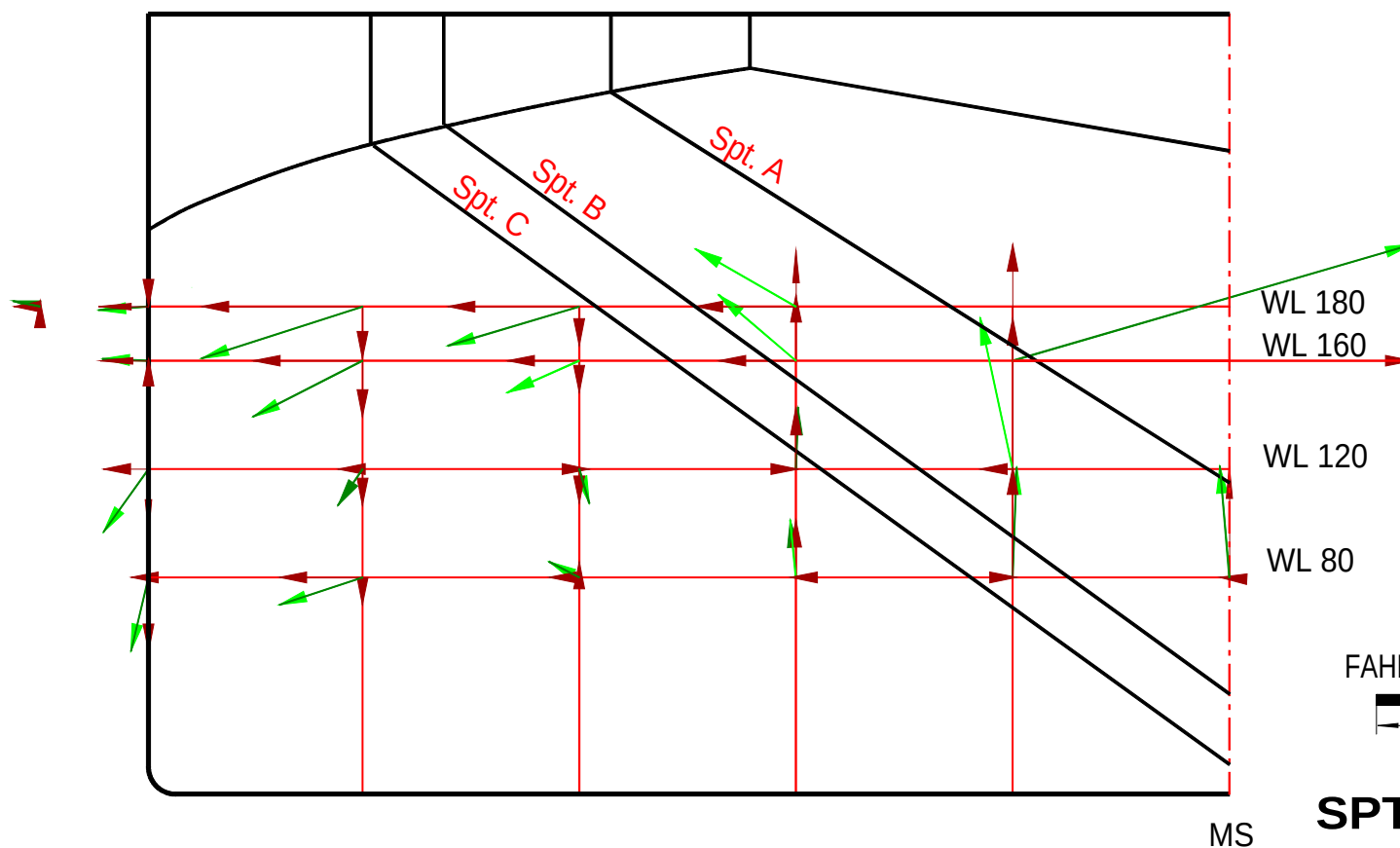
$V' = 0,94 \text{ m/s}$

WL 180

u - v - VEKTOR

NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,5 \text{ m}$; $V = 11,2 \text{ km/h}$

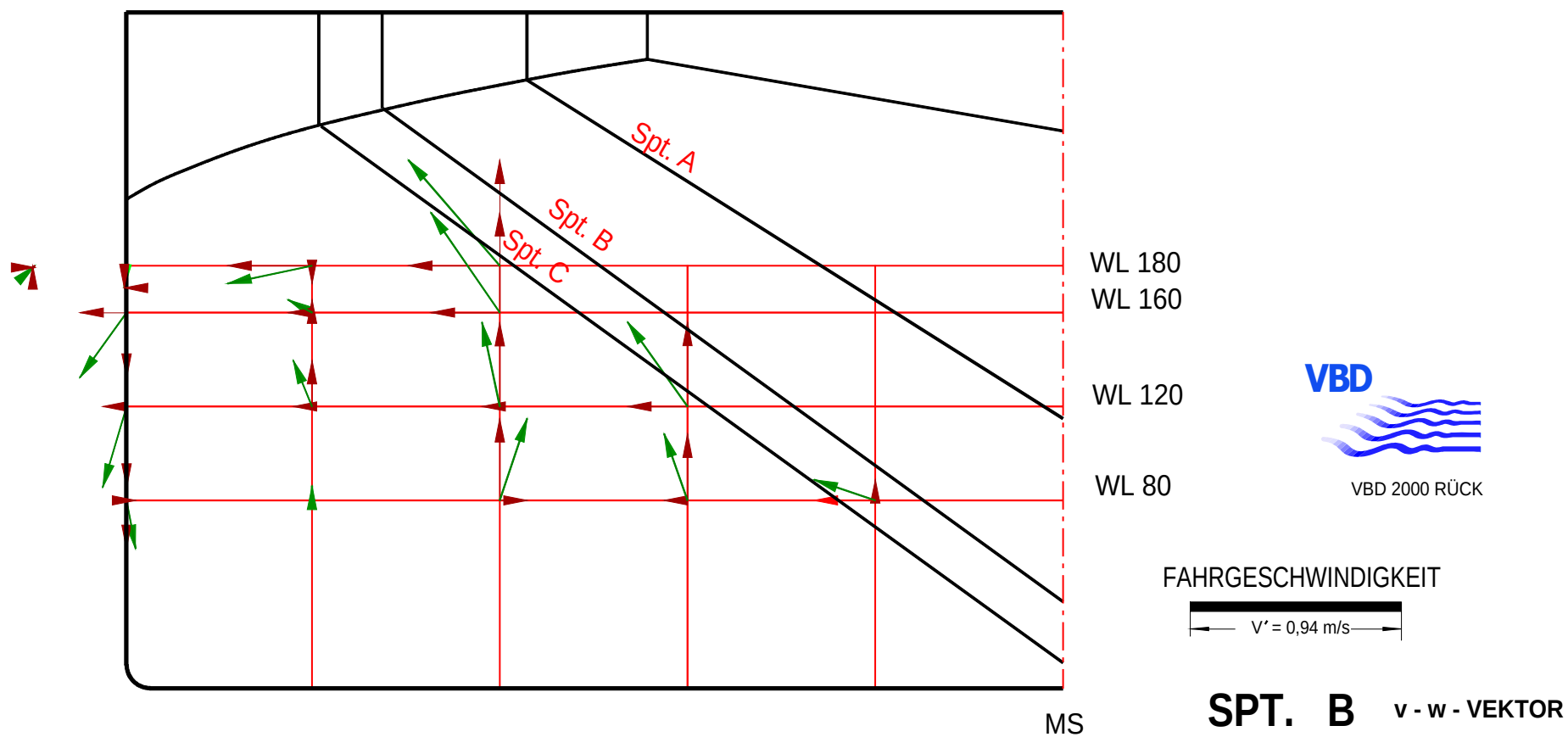


VBD 2000 RÜCK

SPT. A v - w - VEKTOR

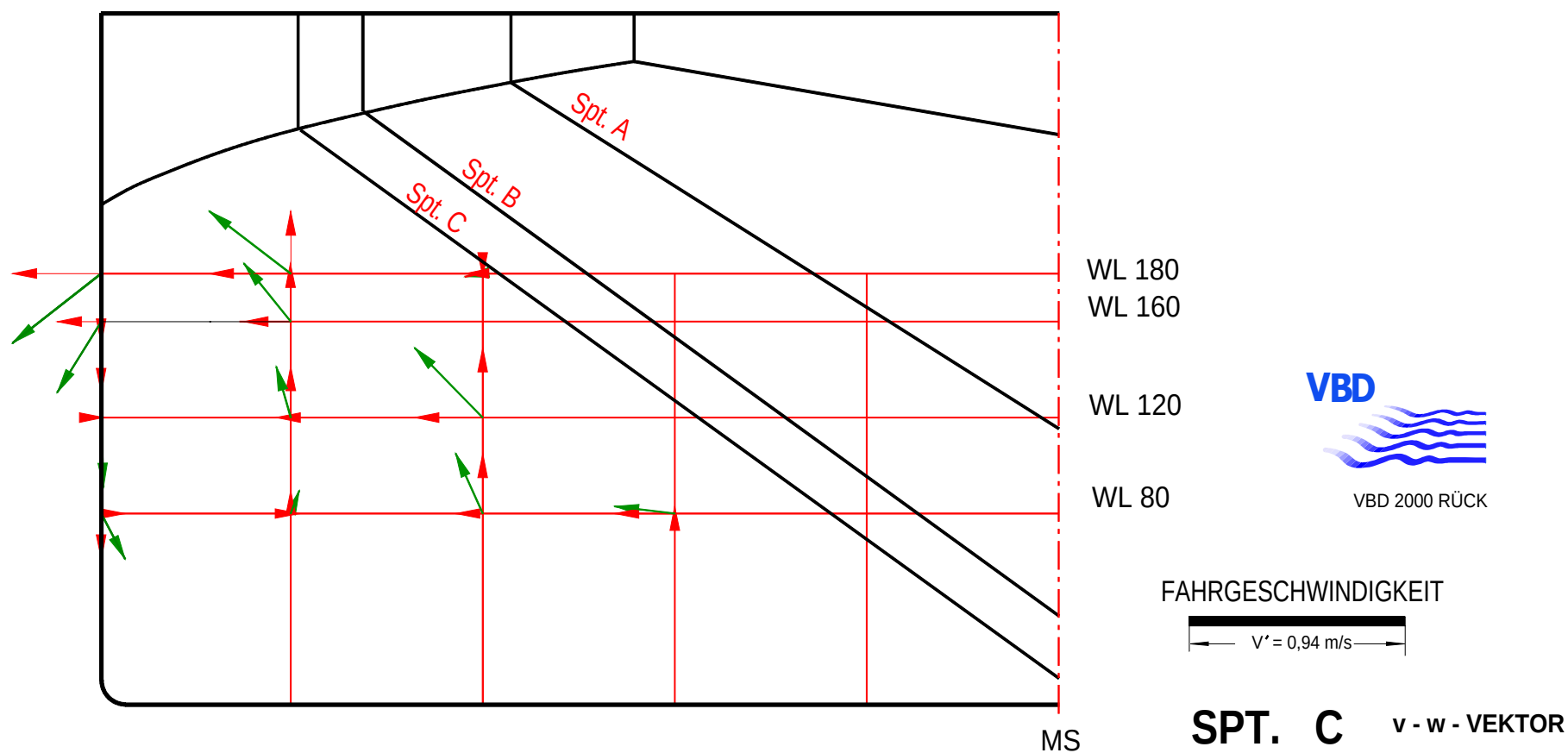
NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,5 \text{ m}$; $V = 11,2 \text{ km/h}$

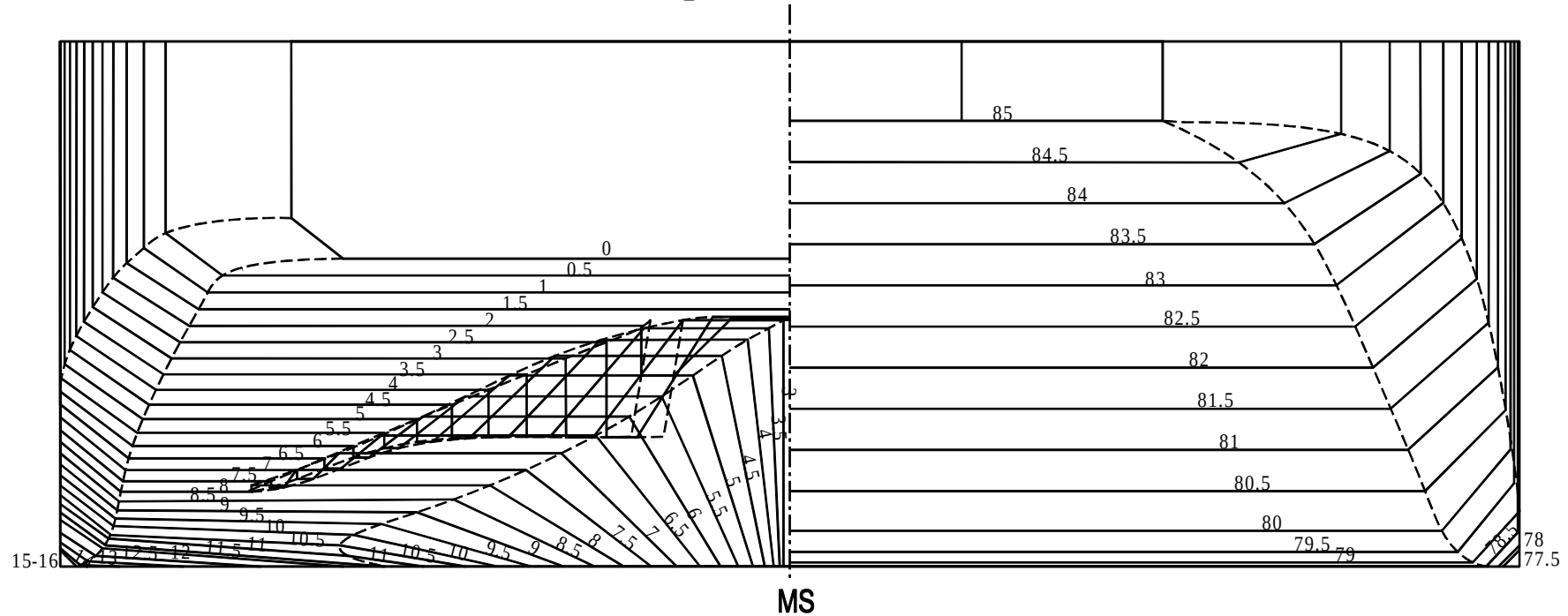


NACHSTROMMESSUNGEN AN DER KOPPELSTELLE EINES MOTORSCHIFFES MIT EINEM LEICHTER

$h = 4,0 \text{ m}$; $T = 2,5 \text{ m}$; $V = 11,2 \text{ km/h}$



Spantenriß



M 1631
 $\lambda = 14.0$

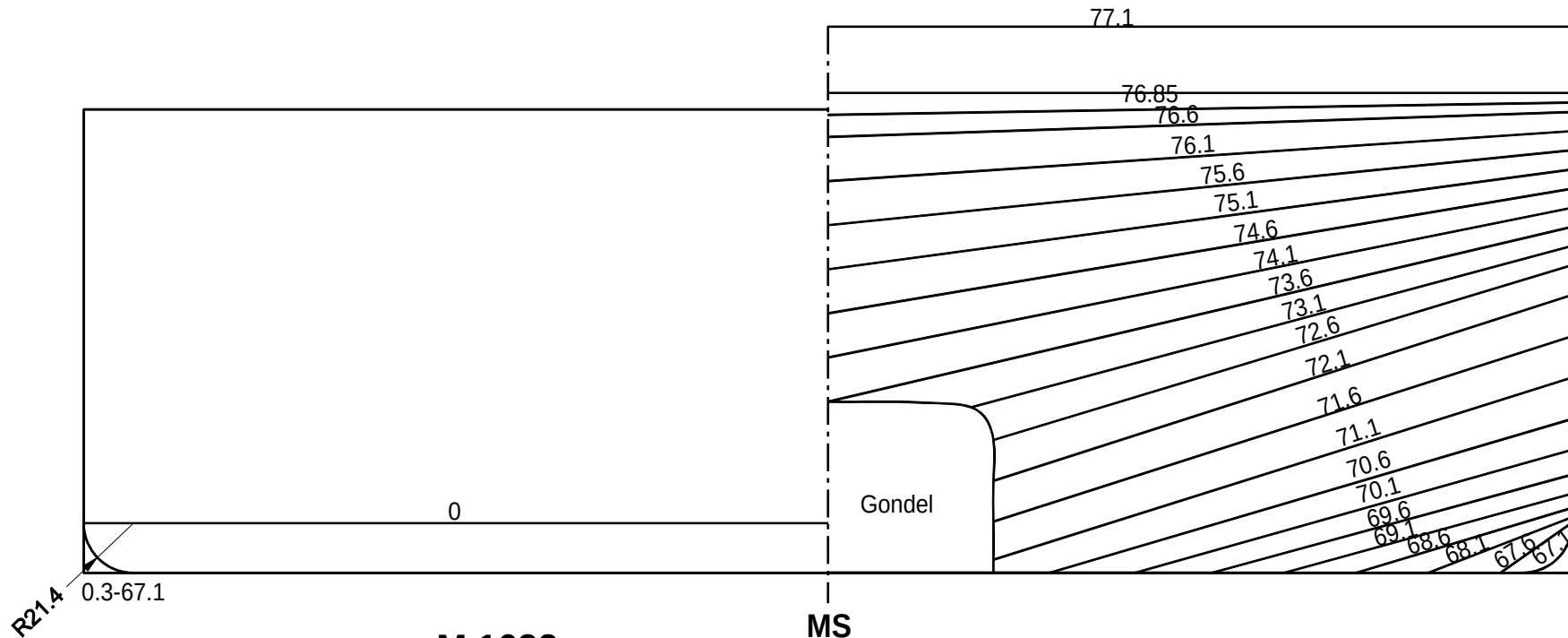
L_{üa} = 6071.4 mm

B = 642.8 mm

Spt.-Abstand = 35.7 mm



Spantenriß



M 1632

$\lambda = 14$

L_{üa} = 5507.1 mm

B = 1140 mm

Spt.-Abstand = 35.7 mm

Hinterschiff = 4792.9 mm

Vorschiff = 714.2 mm

Gütermotorschiff mit Schubleichter

Hauptabmessungen

Abmessungen Gütermotorschiff (M 1631)

Maßstabszahl	λ		1	14
Länge über Alles	$L_{\text{ÜA}}$	[m]	85	6,071
Länge in der Wasserlinie	L_{WL}	[m]	84,51	6,037
Breite	B	[m]	9,00	0,643
Tiefgang	T	[m]	2,50	0,179
Verdrängung	$\forall$	[m ³]	1753	0,639
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,917	
benetzte Oberfläche	S	[m ²]	1166	5,949

2. Tiefgang

Maßstabszahl	λ		1	14
Länge in der Wasserlinie	$L_{\text{WL } 2}$	[m]	83,31	5,951
Tiefgang	T_2	[m]	1,90	0,136
Verdrängung	$\forall_2$	[m ³]	1304	0,475
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,897	
benetzte Oberfläche	S_2	[m ²]	1052	5,370

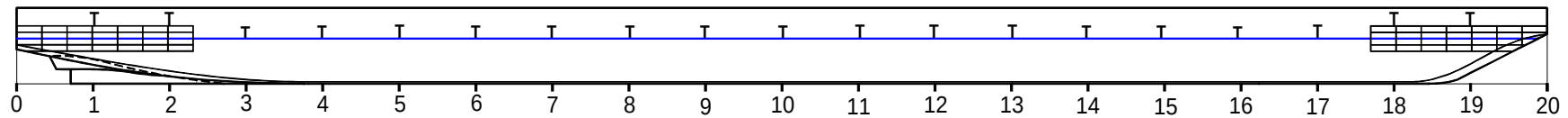
Abmessungen Schubleichter (M 1632)

Maßstabszahl	λ		1	14
Länge über Alles	$L_{\text{ÜA L}}$	[m]	77,1	5,507
Länge in der Wasserlinie	$L_{\text{WL L}}$	[m]	76,35	5,454
Breite	B_L	[m]	9,00	0,643
Tiefgang	T_L	[m]	2,50	0,179
Verdrängung	$\forall_L$	[m ³]	1634	0,598
Blockkoeffizient	$C_{B L}$	[-]	0,942	
benetzte Oberfläche	S_L	[m ²]	1532	7,817

2. Tiefgang

Maßstabszahl	λ		1	14
Länge in der Wasserlinie	$L_{\text{WL L } 2}$	[m]	75,22	5,373
Tiefgang	$T_{L 2}$	[m]	1,90	0,136
Verdrängung	$\forall_{L 2}$	[m ³]	1229	0,448
Blockkoeffizient	$C_{B L 2}$	[-]	0,932	
benetzte Oberfläche	$S_{L 2}$	[m ²]	1423	7,260

SKIZZE : WL - ANRISSPLAN FÜR M1631

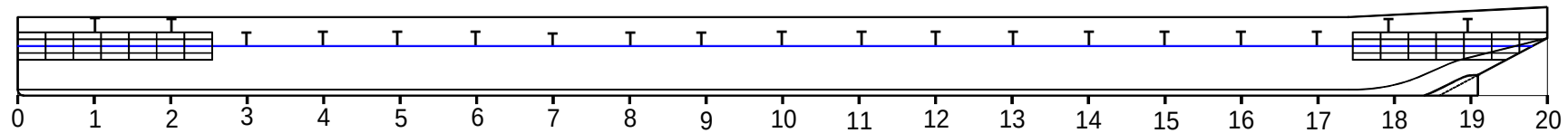


Lüa = 6071.4 mm
Spt.-Abst. = 303.6 mm
T = 178.5 mm LWL = 6036.6 mm
T₁ = 135.7 mm LWL = 5951.0 mm
WL-Abst. = 25.0 mm
Fotonetz = 7 x 100 mm

Tubulenzerzeuger
Art : Sandstreifen
Lage : Spt. 17 und 19



SKIZZE : WL - ANRISSPLAN FÜR M1632

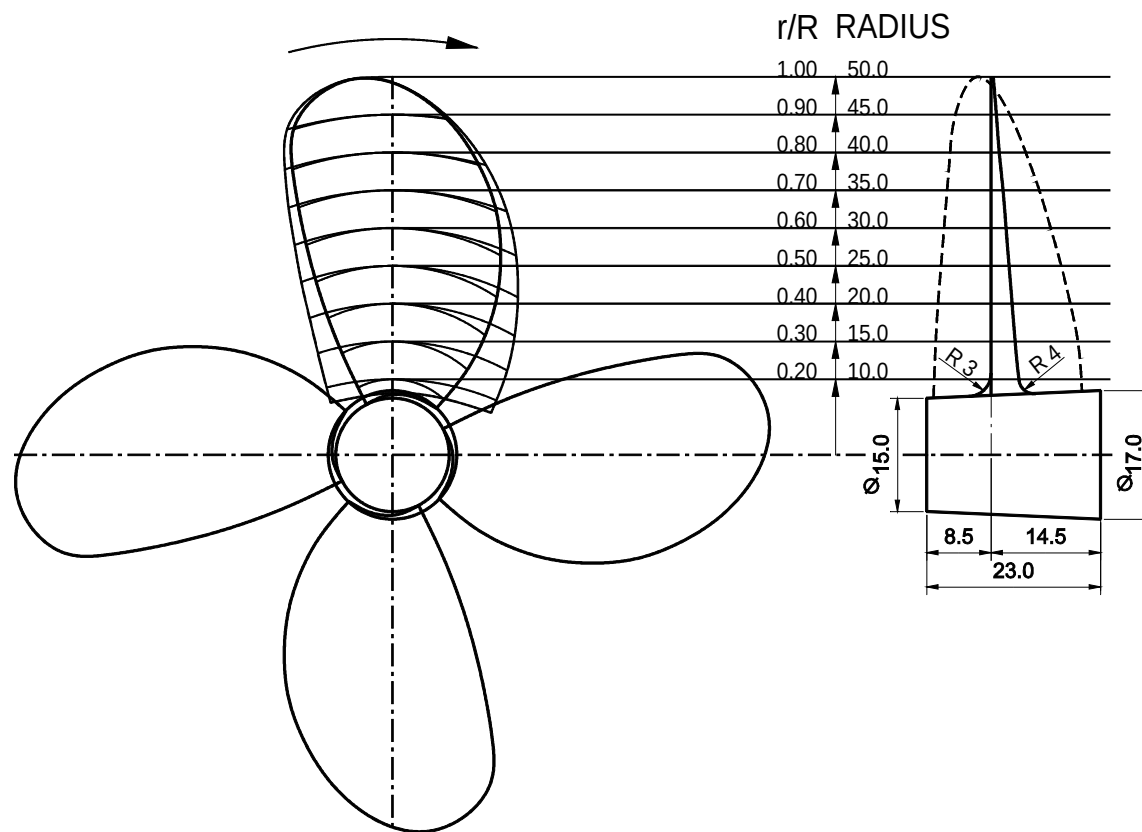


L_{üa} = 5507.1 mm
 Spt.-Abst. = 275.4 mm
 T = 178.6 mm LWL = 5453.6 mm
 T₁ = 135.7 mm LWL = 5373.2 mm

WL-Abst. = 25.0 mm
 Fotonetz = 7 x 100 mm

Tubulenzerzeuger
 Art : Sandstreifen
 Lage : Spt. 17 und 19





Propellertyp : Wag. B 4.55

D = 100.00 mm

P/D = 1.000

$A_E/A_0 = 0.55$

Z = 4

$C'_{0,70} R = 29,5 \text{ mm}$

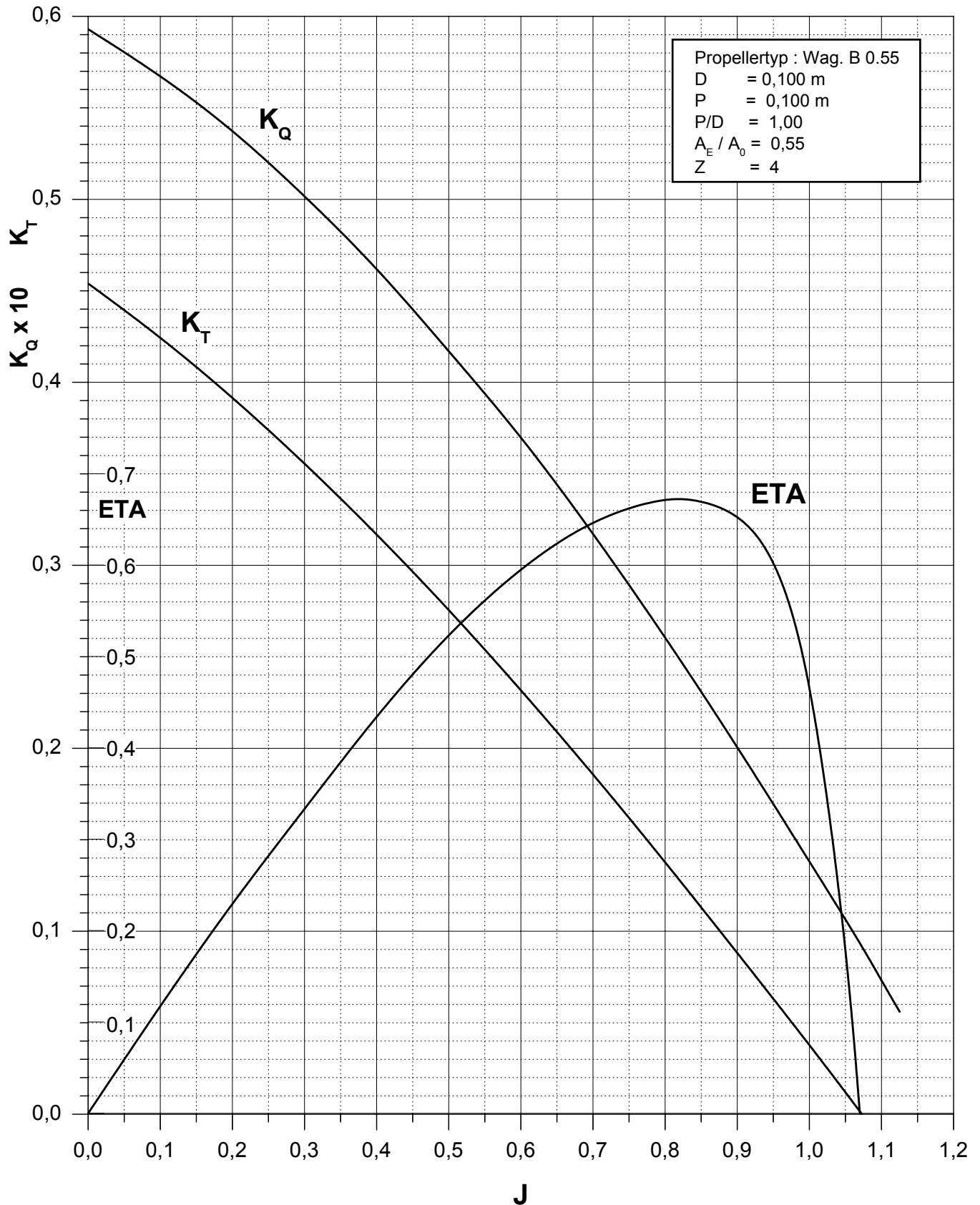
P 115 r

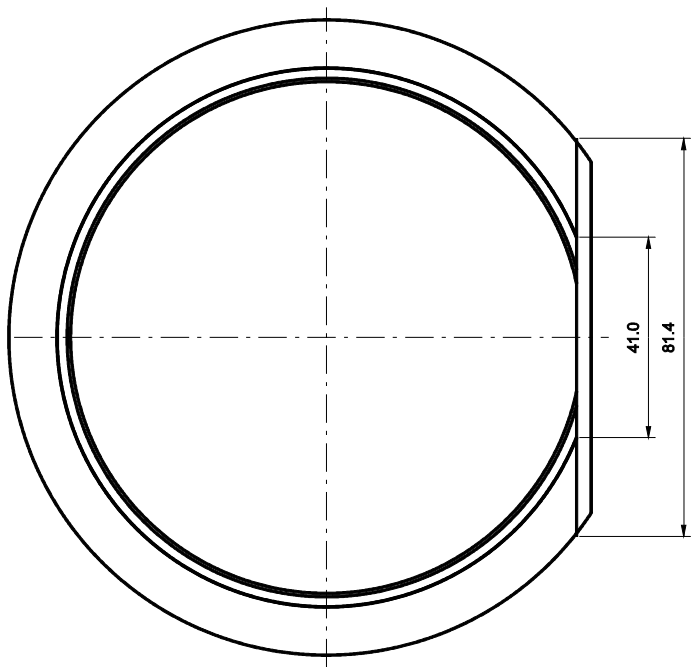


VBD 2000 RÜCK

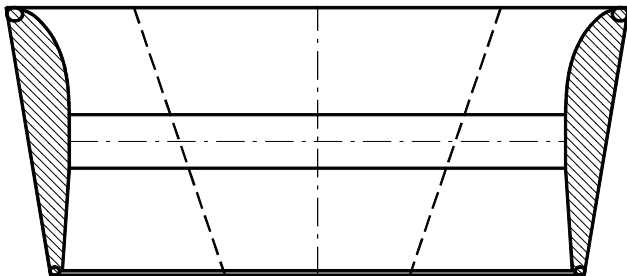
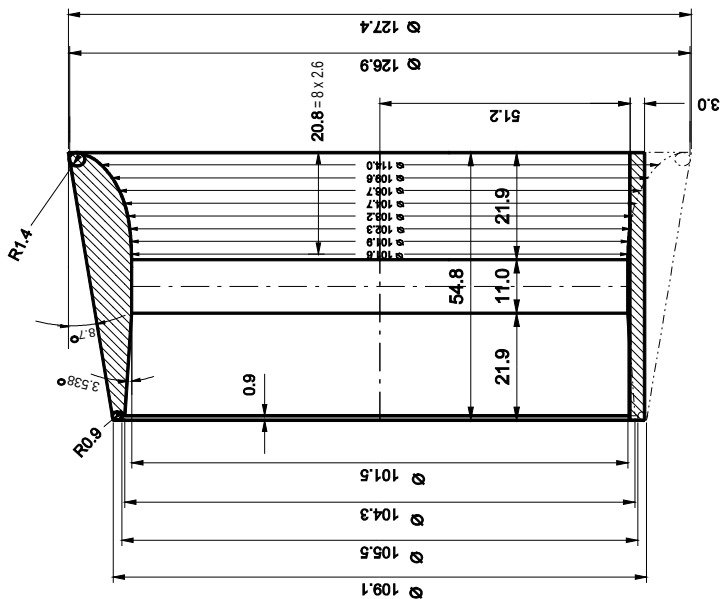
Propellerfreifahrt

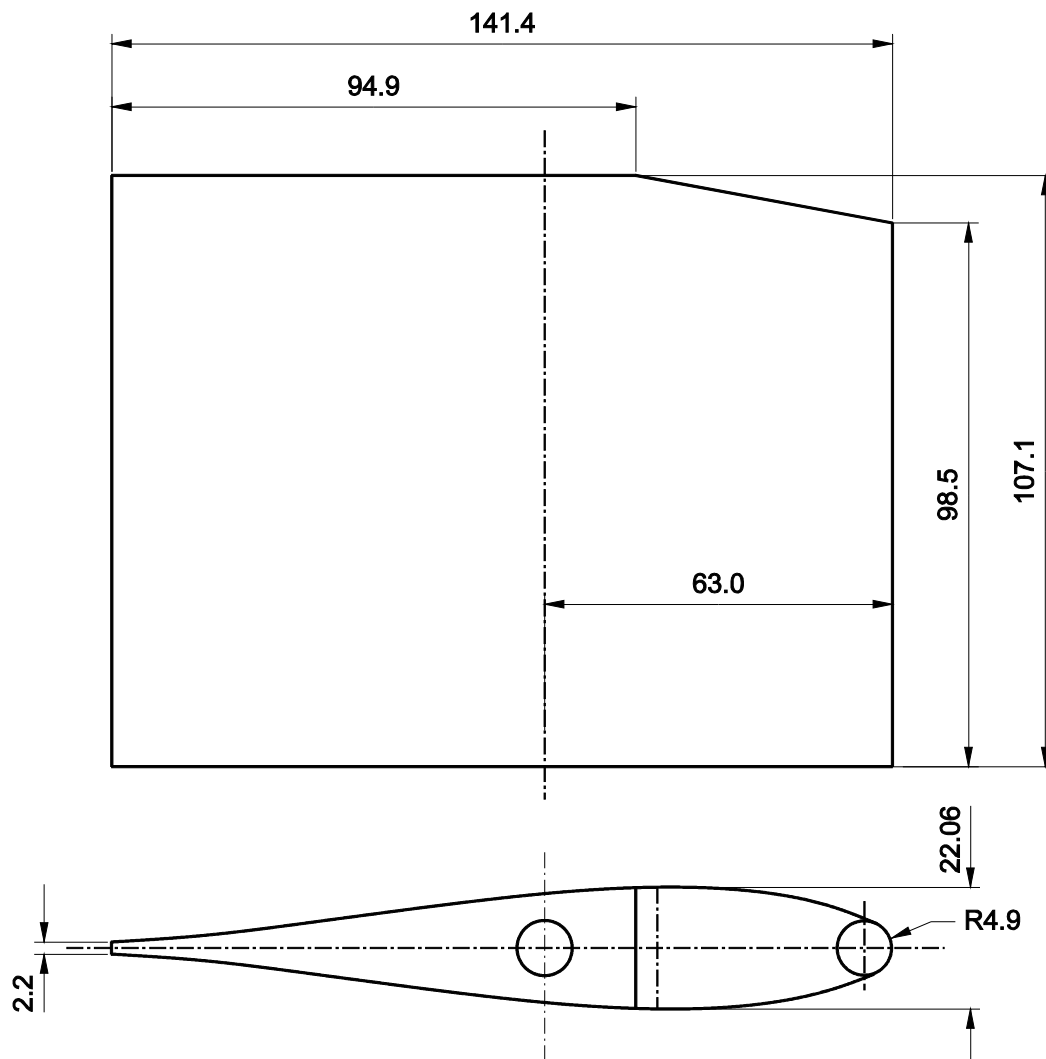
P 115



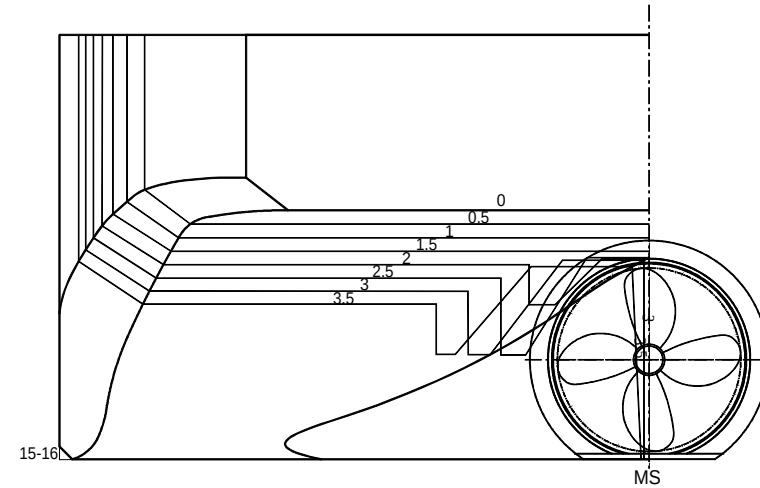
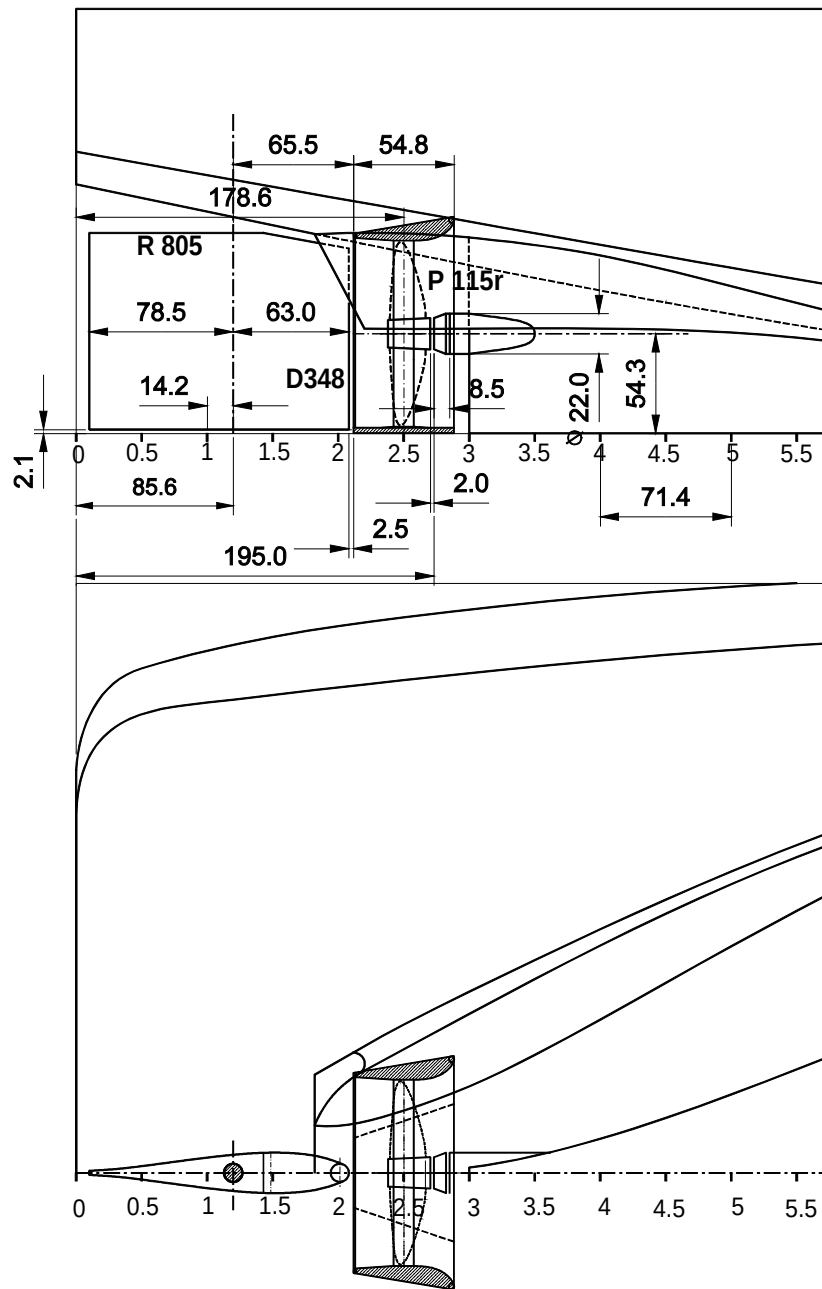


DÜSE FÜR M 1631
D 348





M 1631
R 805



ANORDNUNGSZEICHNUNG M1631

$\lambda = 14.0$

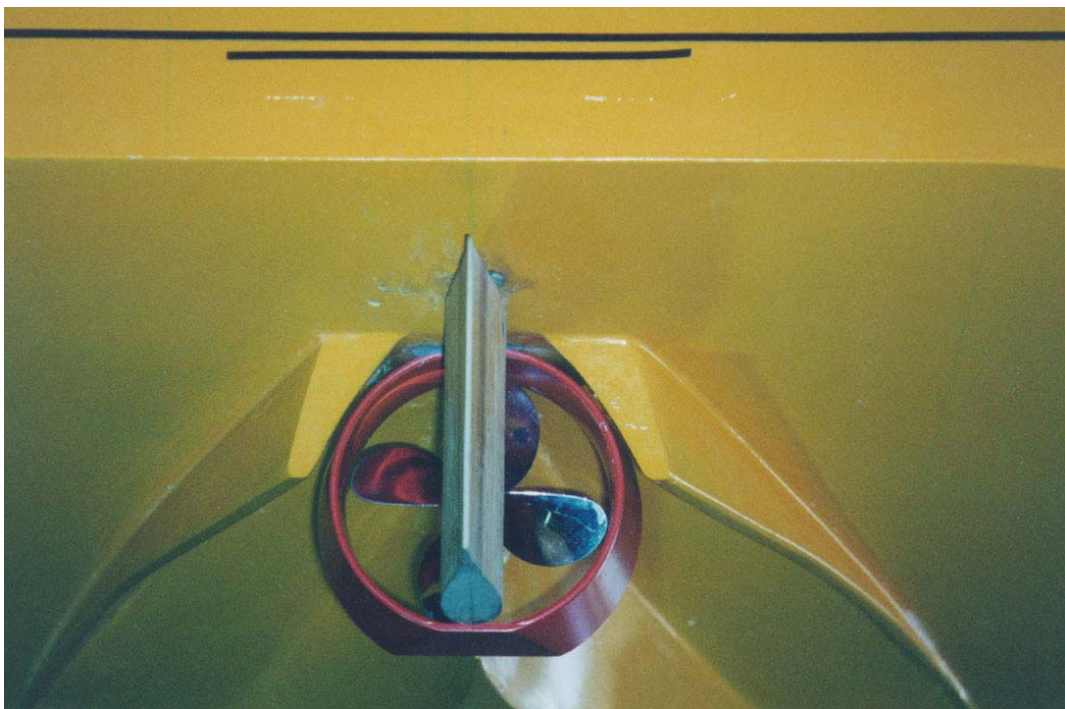
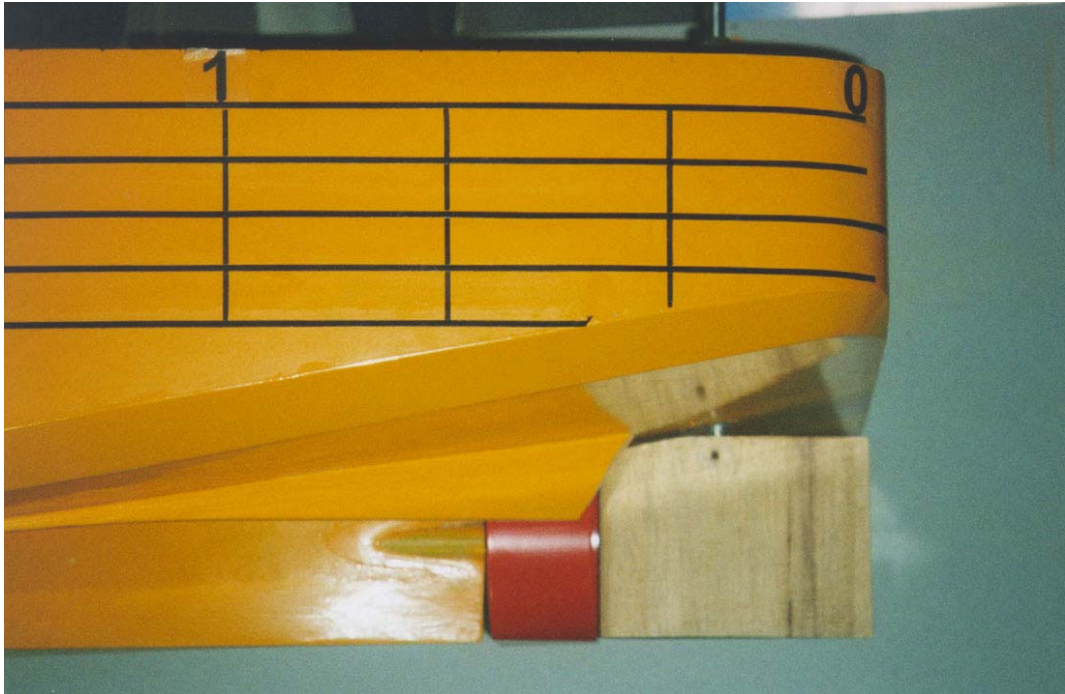
Lüa = 6071.4 mm

B = 642.8 mm

Spt.-Abstand = 71.4 mm



Hinterschiff Gütermotorschiff mit Ruder und Düse



Übersicht Propulsionsversuche

Versuche im großen Tank der VBD, $b_K = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

Versuch Nr.	Versuchsart	Schiffstyp	Tiefgang [m]	Düse	Koppelstelle
102	Propulsion	GMS	2,5	ohne	-
111	Propulsion	GMS	2,5	mit	-
105	Propulsion	GMS	1,9	ohne	-
108	Propulsion	GMS	1,9	mit	-
106	Pfahlzug	GMS	1,9	ohne	-
107	Pfahlzug	GMS	1,9	mit	-
103	Propulsion	GMS+SL	2,5	ohne	frei
117	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	frei
104	Propulsion	GMS+SL	1,9	ohne	frei
109	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	frei
113	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	Keile
112	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	Keile+Folie
116	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	Keile+Mittelstück
118	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	gekürzte Keile
114	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	Keile
115	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	Keile+Mittelstück
119	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	gekürzte Keile
121	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	2 Ballone
122	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	3 Ballone
120	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	2 Ballone

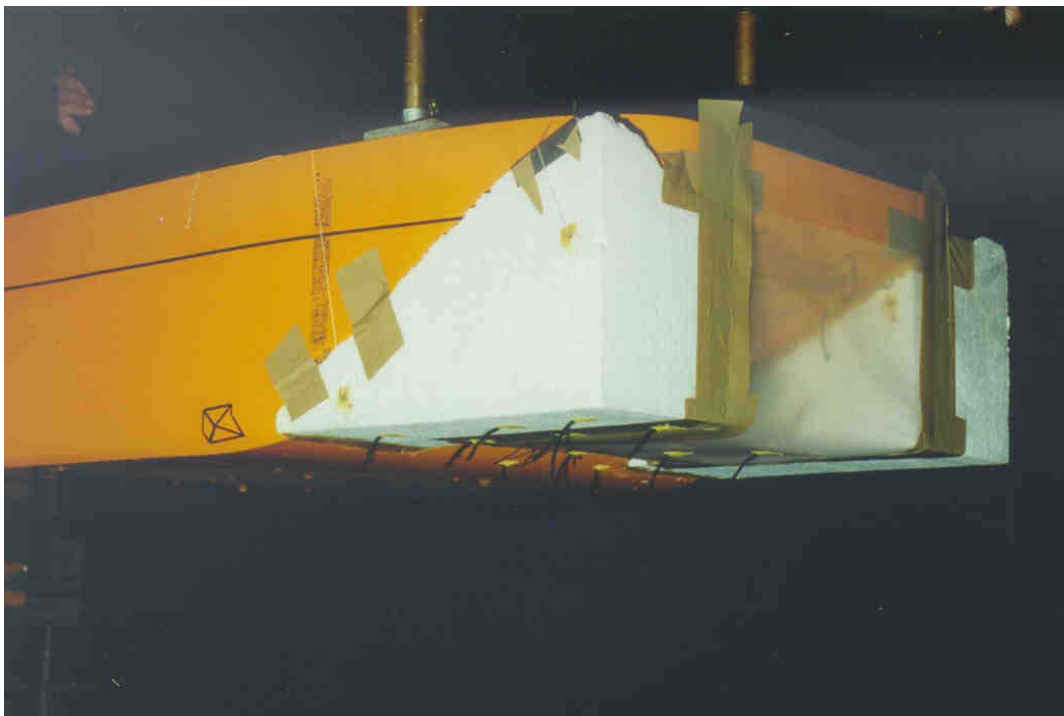
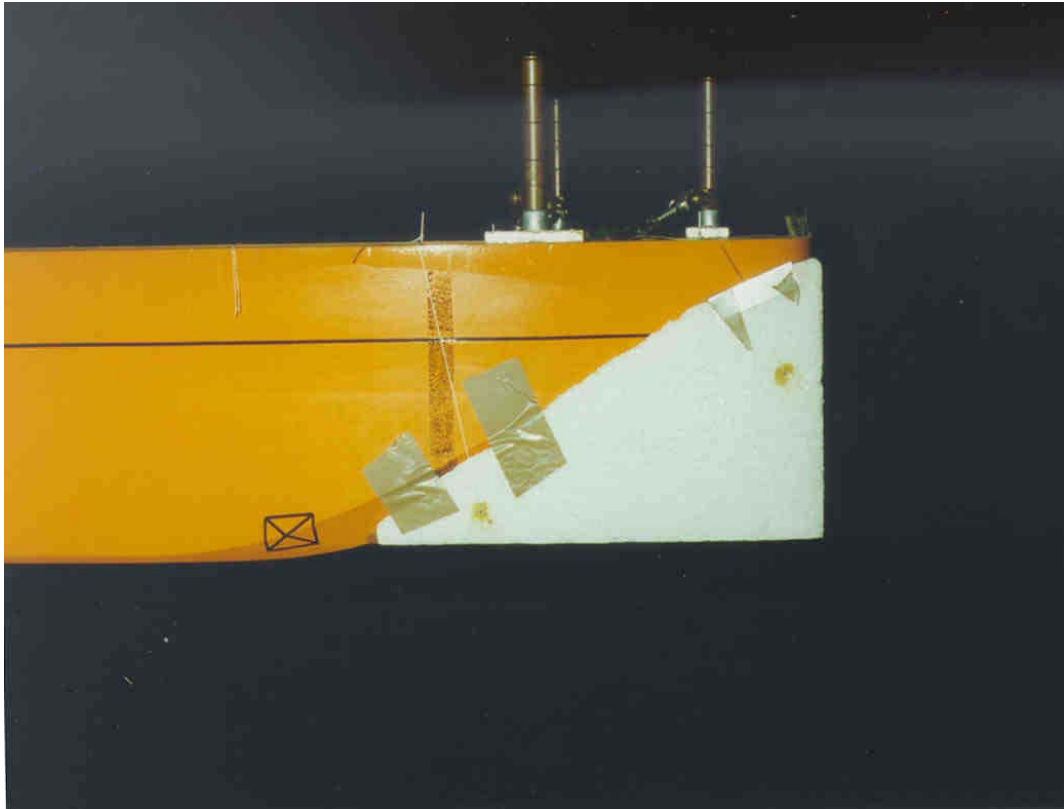
Versuche im kleinen Tank der VBD, $b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

Versuch Nr.	Versuchsart	Schiffstyp	Tiefgang [m]	Düse	Koppelstelle
147	Propulsion	GMS+SL	2,5	ohne	frei
140	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	frei
141	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	frei
144	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	Keile
145	Propulsion	GMS+SL	2,5	mit	2 Ballone
143	Propulsion	GMS+SL	1,9	mit	Keile
146	Pfahlzug	GMS+SL	2,5	ohne	frei
142	Pfahlzug	GMS+SL	1,9	mit	Keile
148	Pfahlzug*	GMS+SL	2,5	ohne	frei
149	Pfahlzug*	GMS+SL	2,5	mit	frei

*) auf Tiefwasser

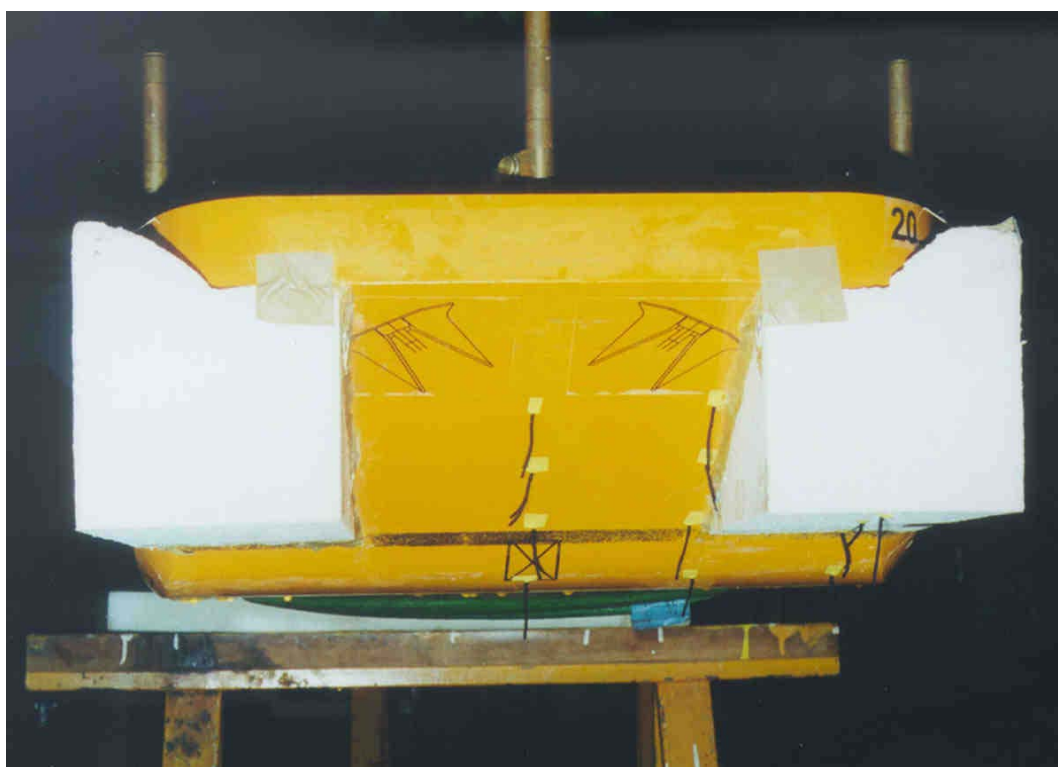
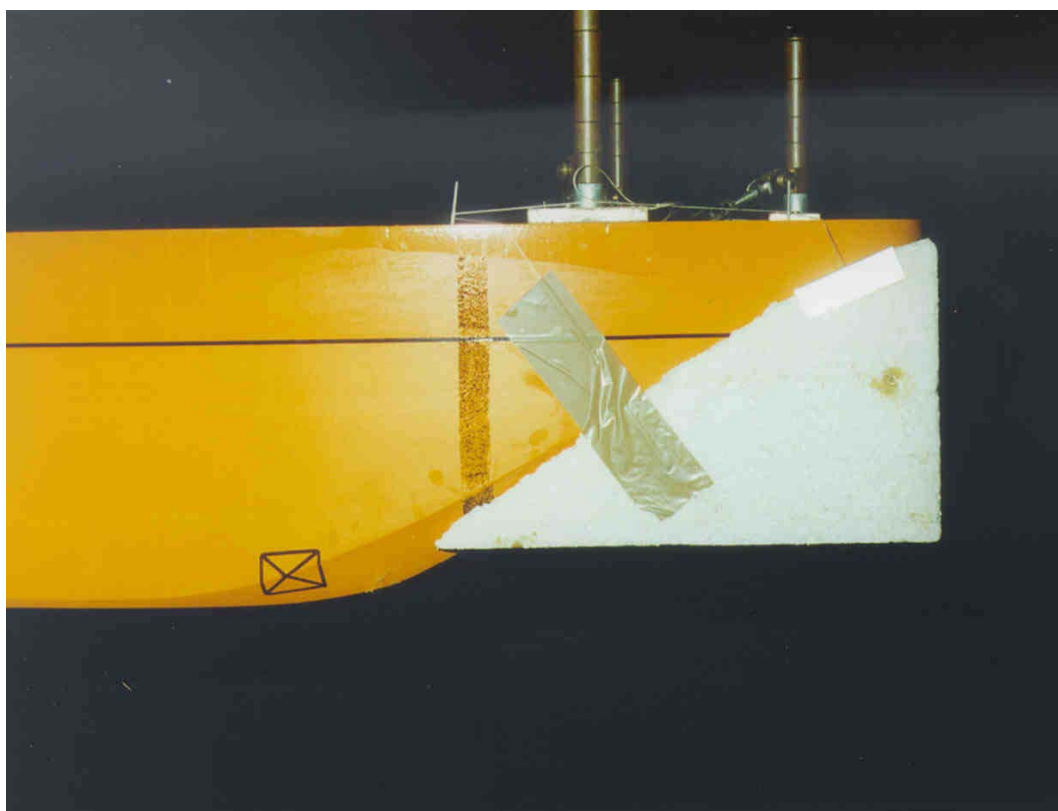
Vorschiff Gütermotorschiff

Koppelstelle mit Keilen und Plane



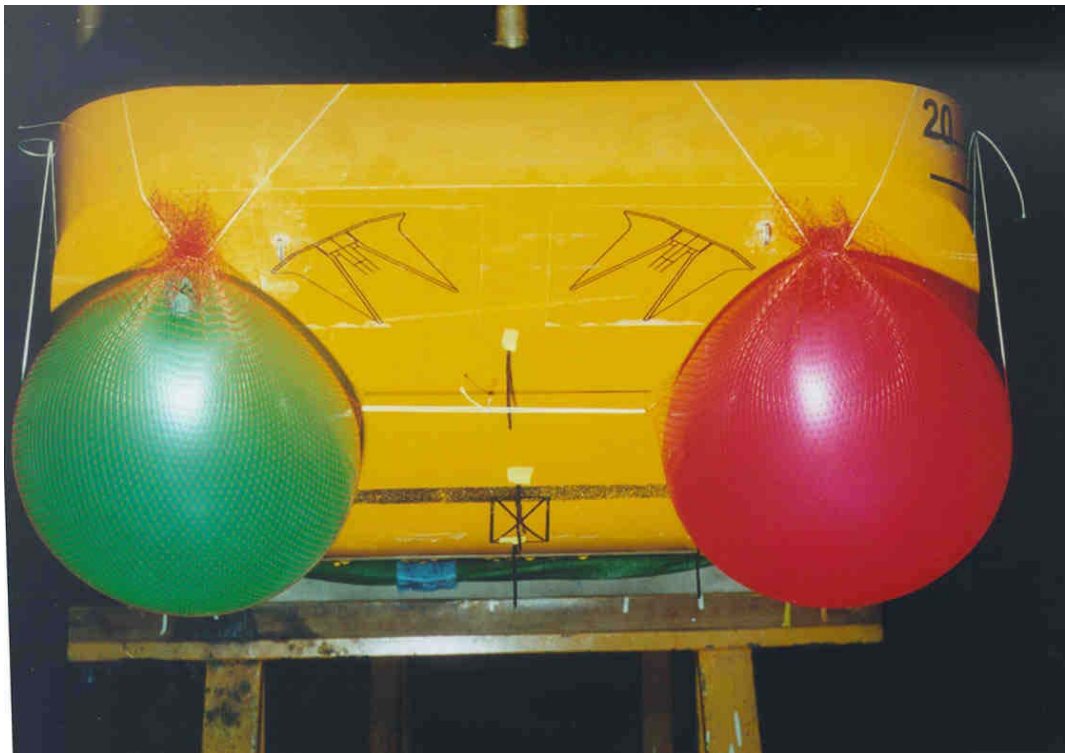
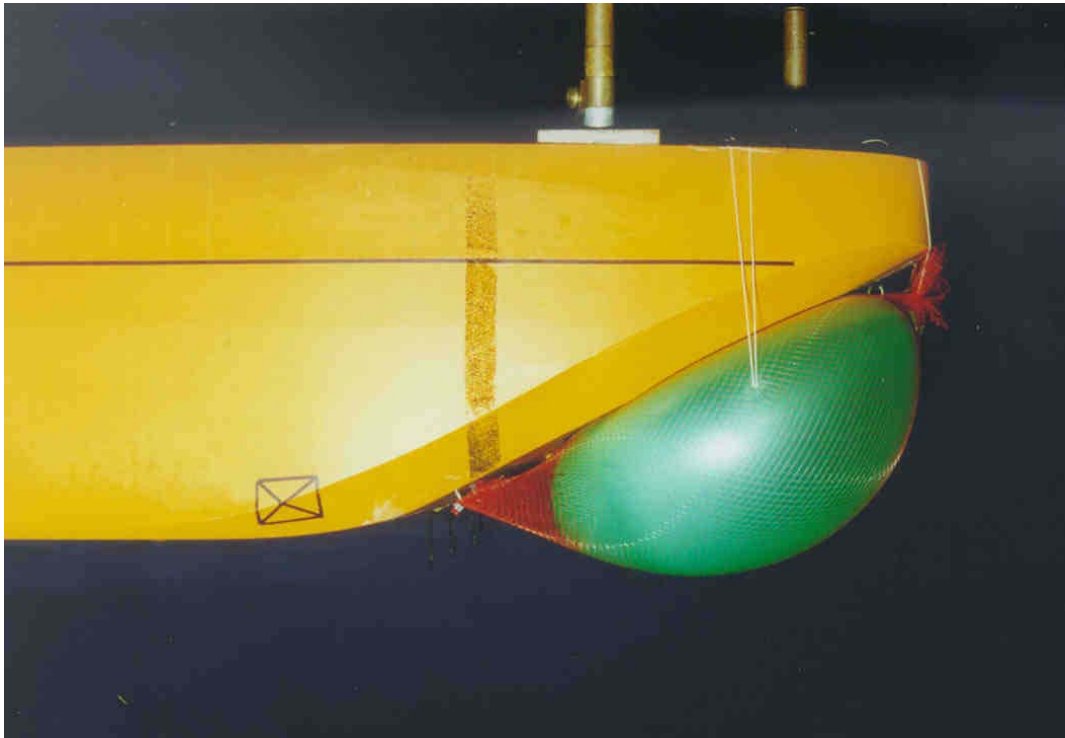
Vorschiff Gütermotorschiff

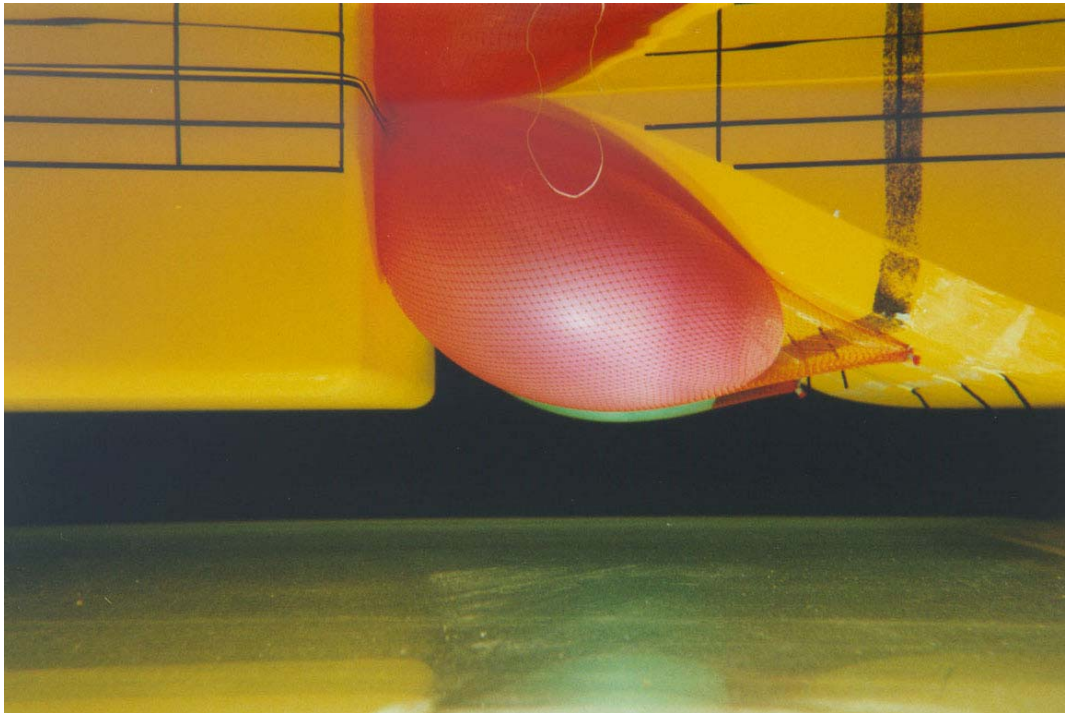
Koppelstelle mit 2 gekürzten Keilen



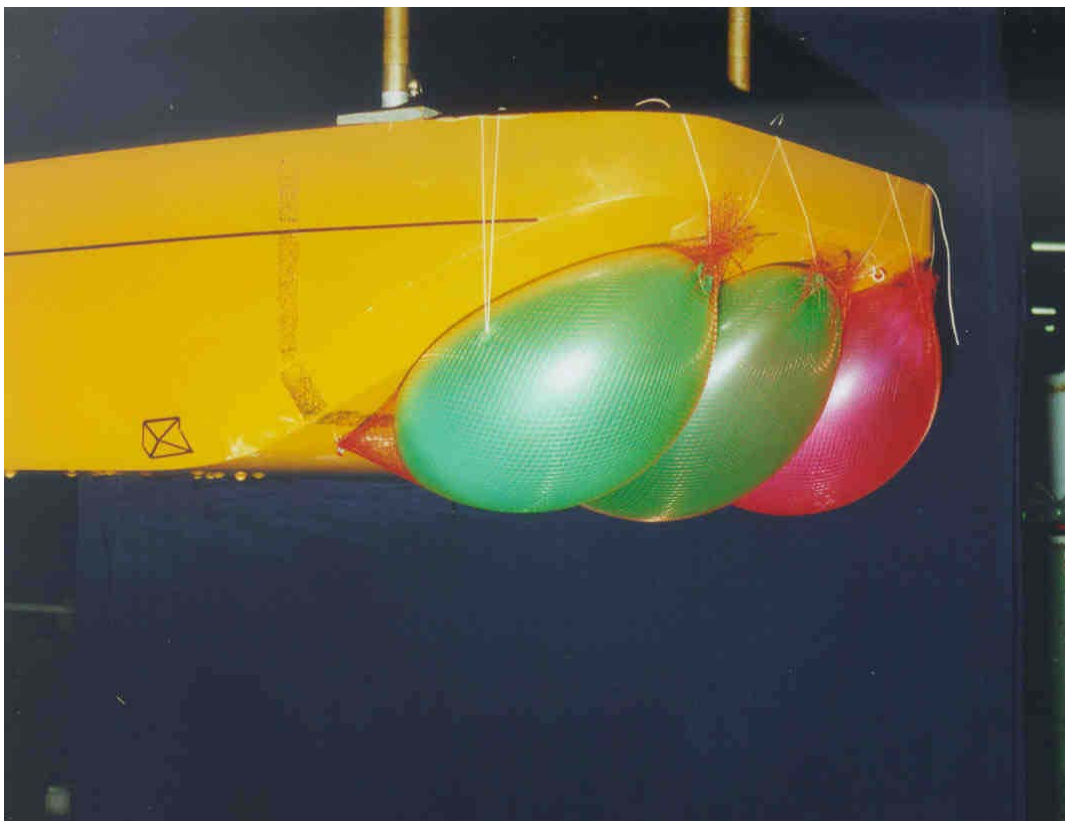
Vorschiff Gütermotorschiff

Koppelstelle mit 2 Ballonen





Anl. 38: Gütermotorschiff mit Schubleichter
Koppelstelle mit 2 Ballonen



Anl. 39: Vorschiff Gütermotorschiff
Koppelstelle mit 3 Ballonen

Zusammenstellung der auf die Großausführung umgerechneten Werte der Propulsionsversuche mit Typ Pontonbug

GMS ohne Düse, T = 2,50 m

Versuch Nr. 102-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
10,00	247,1	21,3	125,6	-0,12	7,7
11,99	303,5	34,2	235,6	-0,26	13,0
13,00	337,2	42,6	320,7	-0,48	17,5
14,00	370,3	53,0	431,0	-0,84	22,7

GMS mit Düse, T = 2,50 m

Versuch Nr. 111-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	237,3	15,8	104,9	0,85	8,6
12,00	299,6	25,0	187,9	1,31	13,1
13,00	332,4	31,2	258,7	1,77	18,4
13,99	370,1	38,8	360,9	2,36	24,5

GMS ohne Düse, T = 1,90 m

Versuch Nr. 105-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	206,2	16,1	73,6	-0,97	5,5
12,00	252,9	23,5	135,8	-1,54	7,7
12,99	280,5	29,1	184,0	-1,95	11,9
13,99	314,3	37,0	260,2	-2,23	15,3

GMS mit Düse, T = 1,90 m

Versuch Nr. 108-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	208,0	11,2	61,5	1,30	5,9
12,00	257,1	18,2	115,2	1,83	9,5
12,99	283,2	21,8	152,2	2,56	11,8
13,99	313,9	27,4	215,5	2,86	15,7

GMS+SL, ohne Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 103-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	314,3	38,6	266,9	0	5,6
12,01	388,9	61,0	516,8	1,28	10,8
13,00	422,7	72,0	677,0	2,57	14,2
13,98	465,0	89,4	910,3	4,54	18,9

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 117-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	311,1	27,7	217,5	0	7,0
12,01	381,4	42,1	398,2	-0,51	11,3
12,99	413,3	50,4	513,8	-1,70	13,9
13,99	449,9	61,9	674,4	-3,39	17,9

GMS+SL, ohne Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 104-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
10,00	280,7	30,1	192,0	0	4,1
12,02	339,7	44,3	326,8	0	6,3
13,00	374,4	55,3	448,3	0,07	11,1
14,00	409,3	66,2	590,4	0,95	11,6

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 109-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	280,9	22,0	156,9	0	3,7
12,00	344,4	33,0	285,0	0	7,7
12,98	374,6	39,6	365,7	0	10,1
14,00	407,4	48,5	488,5	-0,21	13,5

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle mit Keilen

Versuch Nr. 113-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	301,7	26,1	192,4	0	5,1
11,99	371,2	39,6	364,2	-0,43	10,2
12,99	406,8	48,1	486,0	-1,91	15,0
13,99	441,1	57,8	627,4	-3,03	18,0

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle mit Keilen + Folie

Versuch Nr. 112-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	292,1	25,3	178,4	0	4,8
12,00	365,2	37,9	343,6	-0,84	10,5
13,00	396,8	46,1	450,1	-1,14	13,4
13,98	437,0	56,3	634,8	-2,79	18,1

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle: Keile + Mittelstück

Versuch Nr. 116-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	298,8	27,2	199,2	0	5,7
12,00	363,8	38	341,4	-0,42	9,7
13,00	395,4	45,8	447,1	-1,65	12,3
13,99	435,9	56,6	605,5	-3,65	17,3

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle mit gekürzten Keilen

Versuch Nr. 118-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
10,00	306,1	27,0	218,2	0	5,5
12,00	375,8	41,2	374,7	-0,65	10,5
13,00	405,9	50,2	490,1	-5,75	15,0
14,00	446,2	60,8	659,2	-7,59	19,8

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle mit Keilen

Versuch Nr. 114-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	268,5	20	147,4	-0,49	3,1
11,99	330,3	29,9	256,5	-0,46	7,1
12,99	360,3	37	332,3	-0,43	8,9
13,99	393,7	44,1	432,6	-0,56	12,2

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle: Keile + Mittelstück

Versuch Nr. 115-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	265,6	20,4	131,5	0	4,8
12,00	321,7	30,1	234,2	0	6,9
13,00	352,2	35	308,3	-0,06	9,6
13,99	385,2	41,6	414,7	-0,32	12,6

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle mit gekürzten Keilen

Versuch Nr. 119-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
10,00	269,2	21,0	149,4	-1,41	5,7
12,01	332,4	32,5	262,2	-2,51	10,7
13,00	358,4	38,0	331,5	-3,16	10,6
14,00	391,7	45,4	432,6	-4,05	12,9

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle: 2 Ballone

Versuch Nr. 121-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
9,99	304,7	26,5	200,6	-2,65	5,5
12,01	362,4	39,6	343,0	-4,07	11,4
13,00	410,5	50,2	503,2	-5,83	15,5
13,50	434,0	57,6	596,9	-6,83	19,7
13,98	449,6	61,7	668,4	-7,42	20,0

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle: 3 Ballone

Versuch Nr. 122-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
13,00	410,9	52,0	505,1	-6,16	15,0
13,99	449,6	62,0	686,4	-7,97	20,0

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle: 2 Ballone

Versuch Nr. 120-99, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
12,01	340,1	33,7	277,9	-2,60	10,1
12,99	358,6	38,3	330,4	-3,10	10,3
13,98	397,1	47,2	456,1	-4,22	14,2

GMS+SL, ohne Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 147-99, $b_K = 42$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
5,99	228,1	22,9	51,1	1,00	4,9
8,01	280,5	32,5	98,4	1,00	16,5
9,99	409,8	73,2	312,2	3,00	27,2
10,99	461,7	92,4	442,2	5,90	33,9
12,01	479,2	99,6	498,8	3,30	52,7

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 140-99, $b_K = 42$ m, $h = 4$ m

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
5,99	212,0	13,7	32,1	0,60	6,0
8,01	305,1	28,4	100,4	1,21	13,2
9,99	435,4	58,7	304,9	4,45	34,8
12,02	536,7	88,8	577,9	3,79	44,9

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle frei

Versuch Nr. 141-99, $b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
5,99	177,5	10,0	25,0	0,93	3,3
8,00	267,4	21,4	69,5	1,20	9,2
9,99	363,1	39,1	172,7	3,57	19,3
11,02	413,3	51,4	259,6	4,31	23,4
12,00	438,7	57,8	305,7	1,92	28,0

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle mit Keilen

Versuch Nr. 144-99, $b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
5,99	176,4	9,5	22,5	0,23	4,0
8,00	286,7	24,4	85,9	1,15	15,8
9,99	408,2	50,4	241,5	4,05	29,9
11,01	444,8	62,3	333,1	3,55	40,3
12,00	481,1	70,6	405,3	2,37	43,4

GMS+SL, mit Düse, T = 2,50 m, Koppelstelle mit 2 Ballonen

Versuch Nr. 145-99, $b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
5,99	242,1	20,2	54,9	0,94	10,8
8,01	298,1	27,5	86,5	1,31	14,2
9,99	403,0	50,5	247,0	3,16	29,5
11,00	481,6	71,0	414,2	2,46	27,7
12,01	510,0	79,4	485,8	0,19	51,0

GMS+SL, mit Düse, T = 1,90 m, Koppelstelle mit Keilen

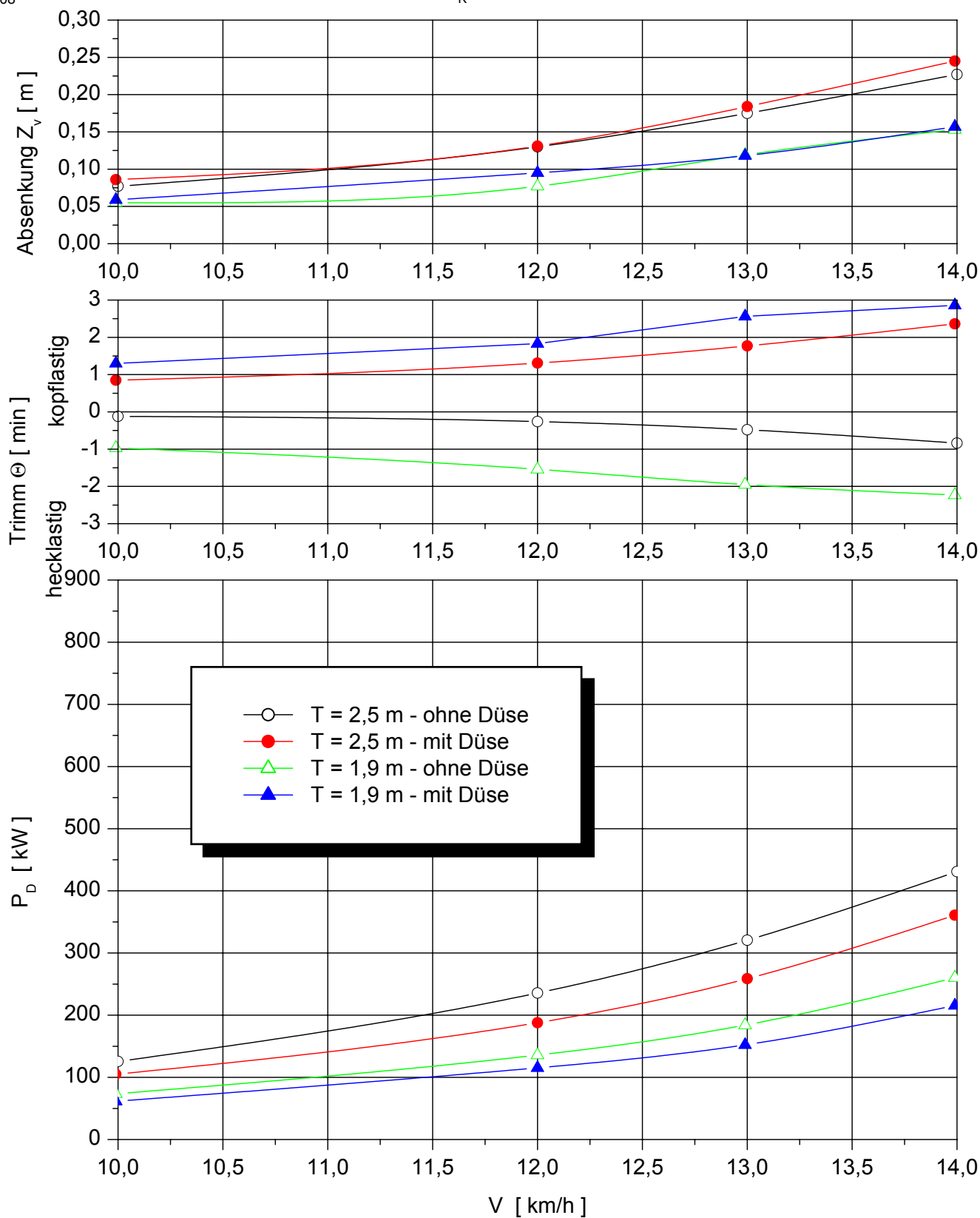
Versuch Nr. 143-99, $b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

V [km/h]	n [1/min]	T [kN]	P _D [kW]	Trimm Θ [min]	Absenkung Z _v [cm]
5,99	167,1	9,1	14,4	0,09	5,2
8,00	234,1	16,6	41,5	0,46	13,4
10,00	345,5	35,3	149,3	2,60	21,3
11,01	395,7	47,5	225,9	2,49	25,7
12,00	407,9	49,2	237,7	2,56	23,9

Tiefgangsvariation, GMS ohne und mit Düse

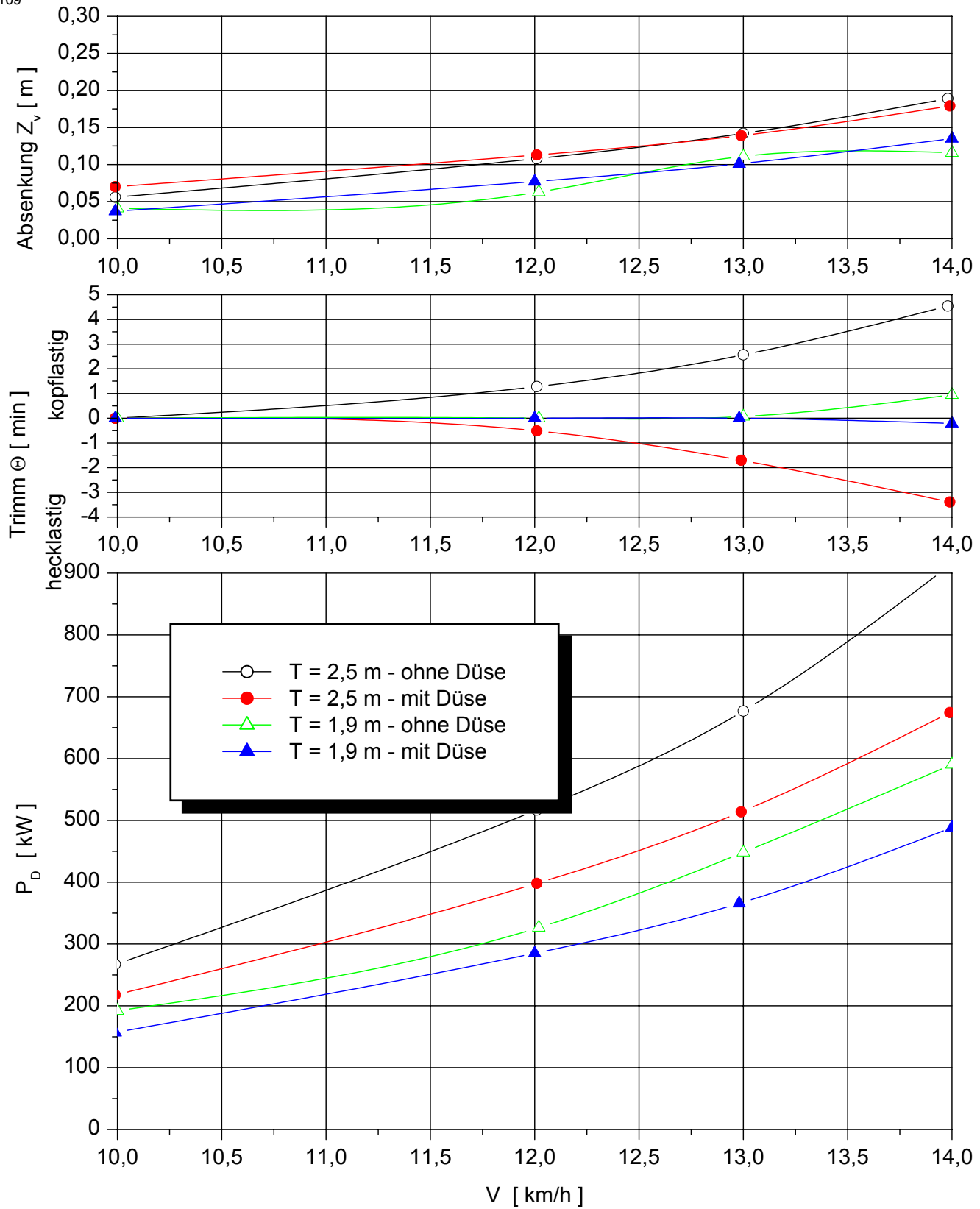
102
111
105
108

$b_K = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$



Tiefgangvariation, GMS ohne und mit Düse, Koppelstelle frei

$b_k = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

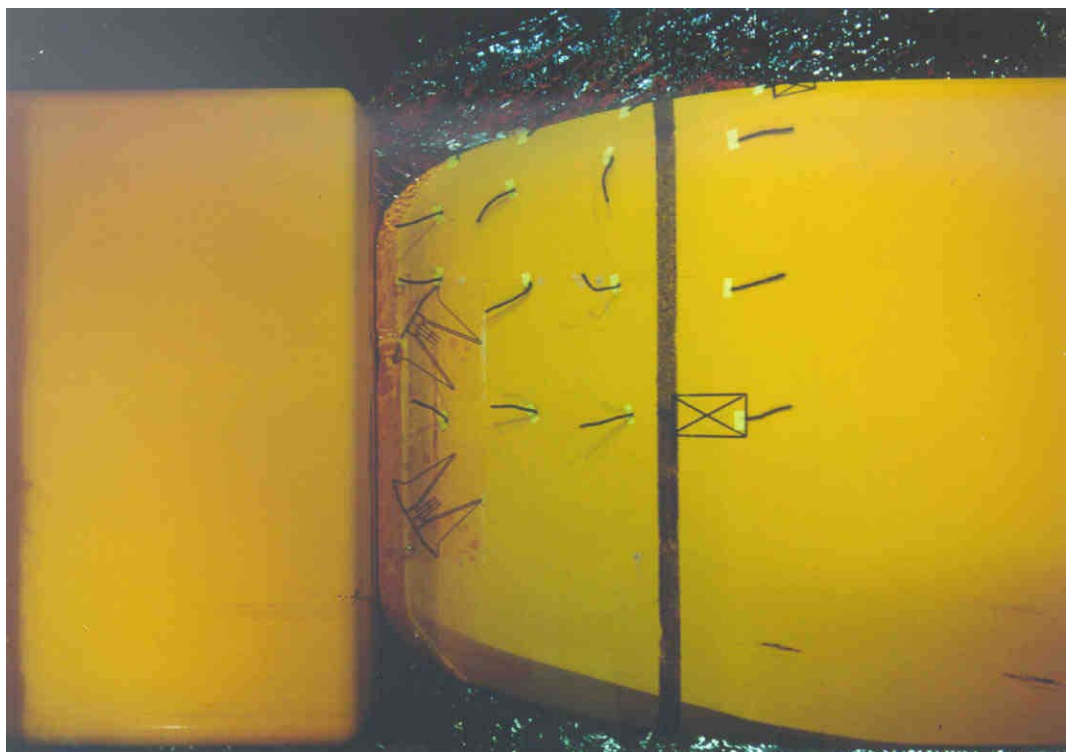


110-99

Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle frei – $V = 14 \text{ km/h}$

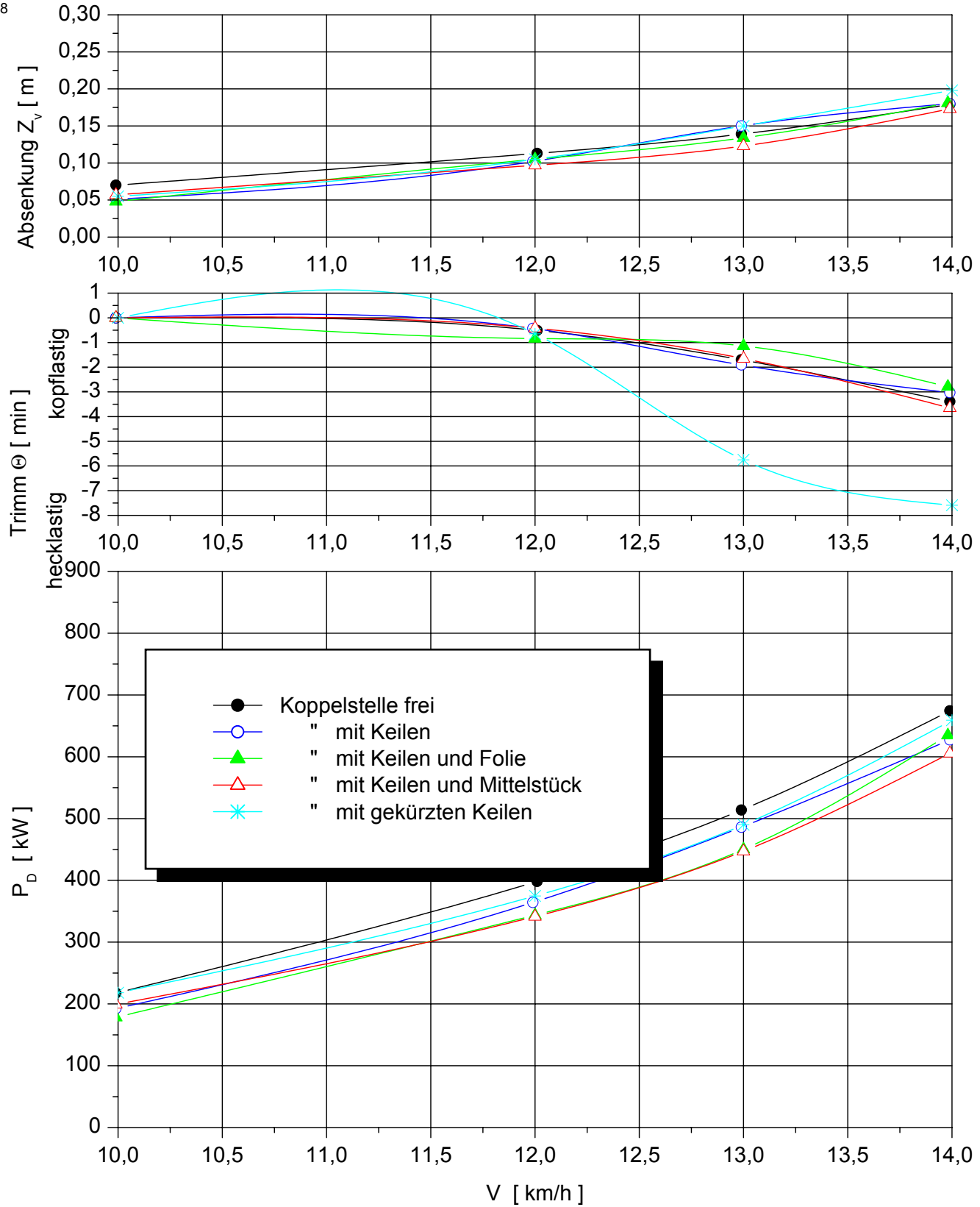
$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



GMS mit Düse - T = 2,50 m

$b_K = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

117
113
112
116
118



113-99

Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 Keilen – $V = 14 \text{ km/h}$

$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$

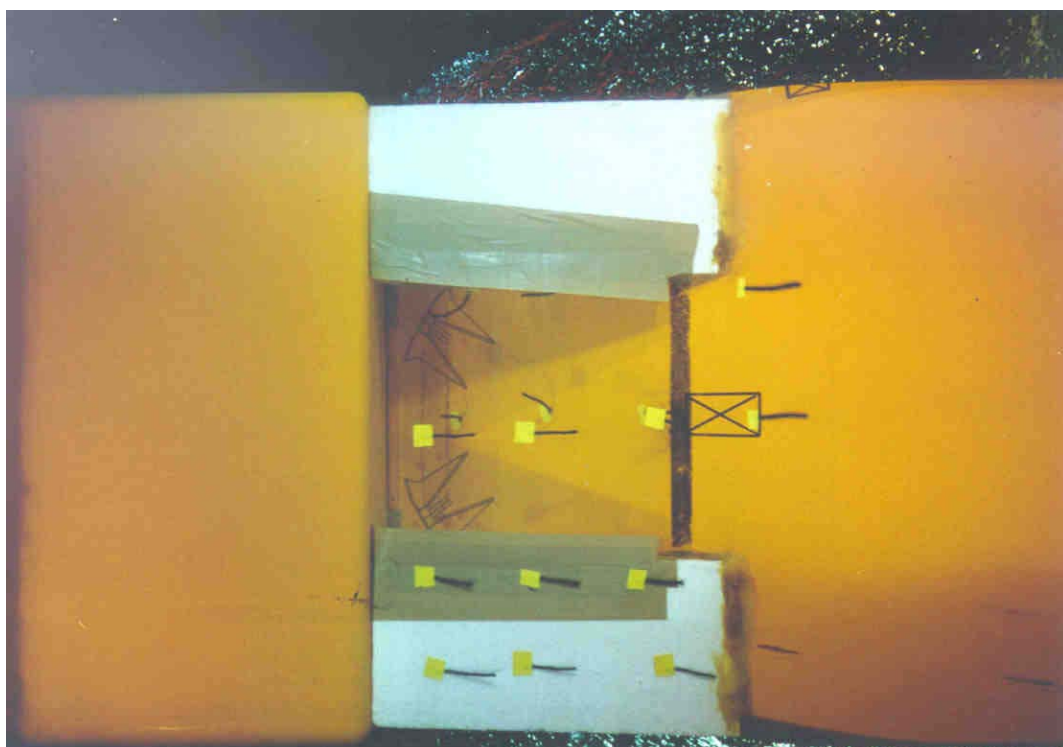


Gütermotorschiff mit Schubleichter

112-99

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 Keilen + Folie – $V = 14 \text{ km/h}$

$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$

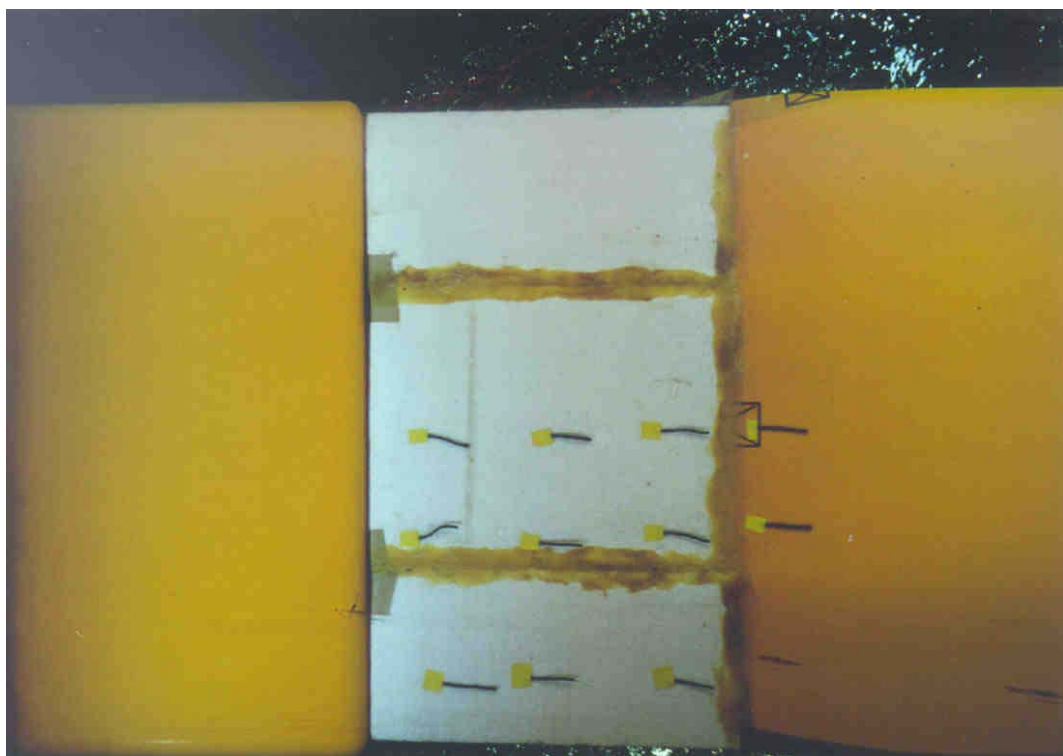


116-99

Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 3 Keilen – $V = 14 \text{ km/h}$

$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



Gütermotorschiff mit Schubleichter

118-99

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 gekürzten Keilen – $V = 14 \text{ km/h}$

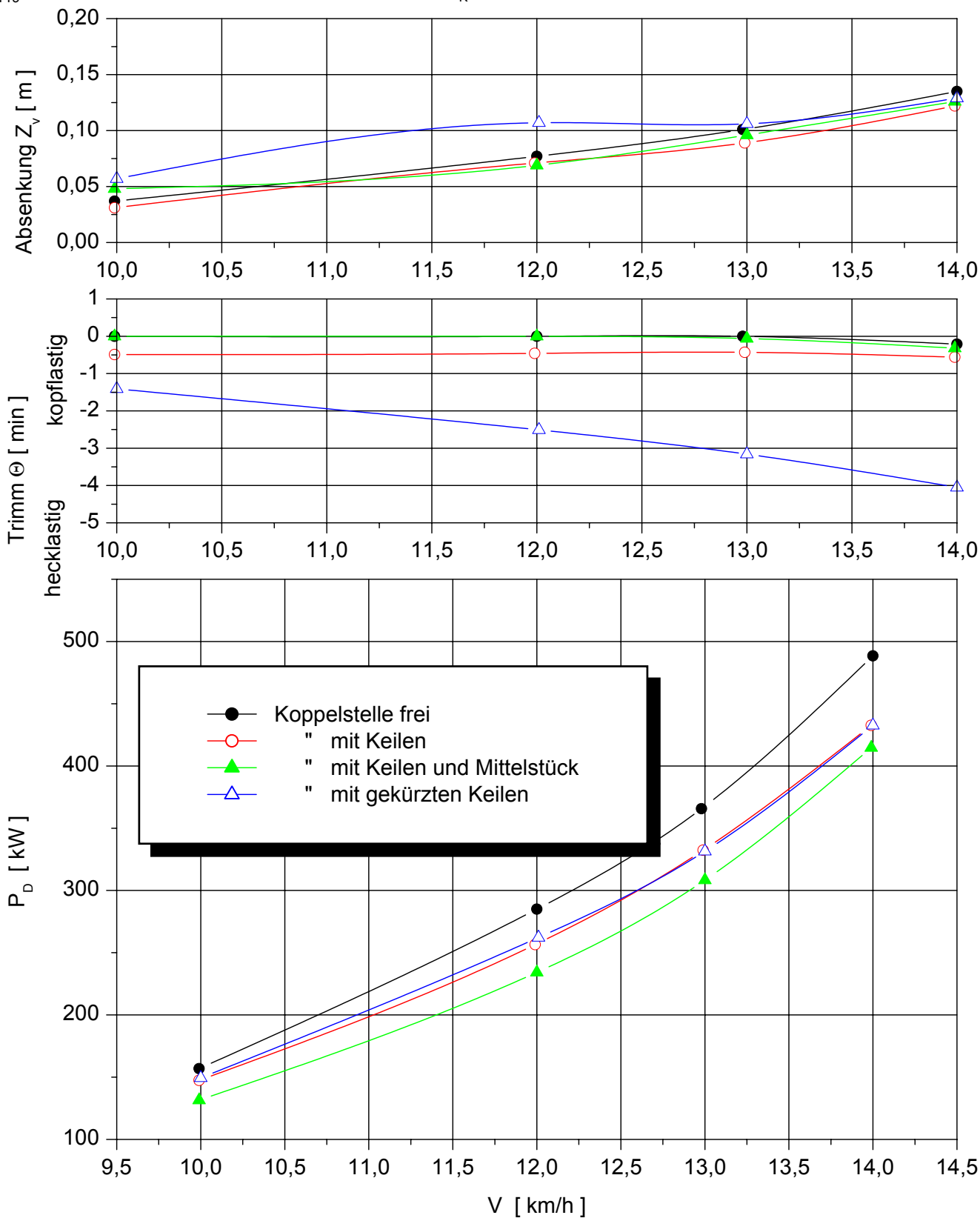
$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



GMS mit Düse - T = 1,90 m

$b_K = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

109
114
115
119



Gütermotorschiff mit Schubleichter

114-99

$T = 1,90 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 Keilen – $V = 14 \text{ km/h}$

$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$

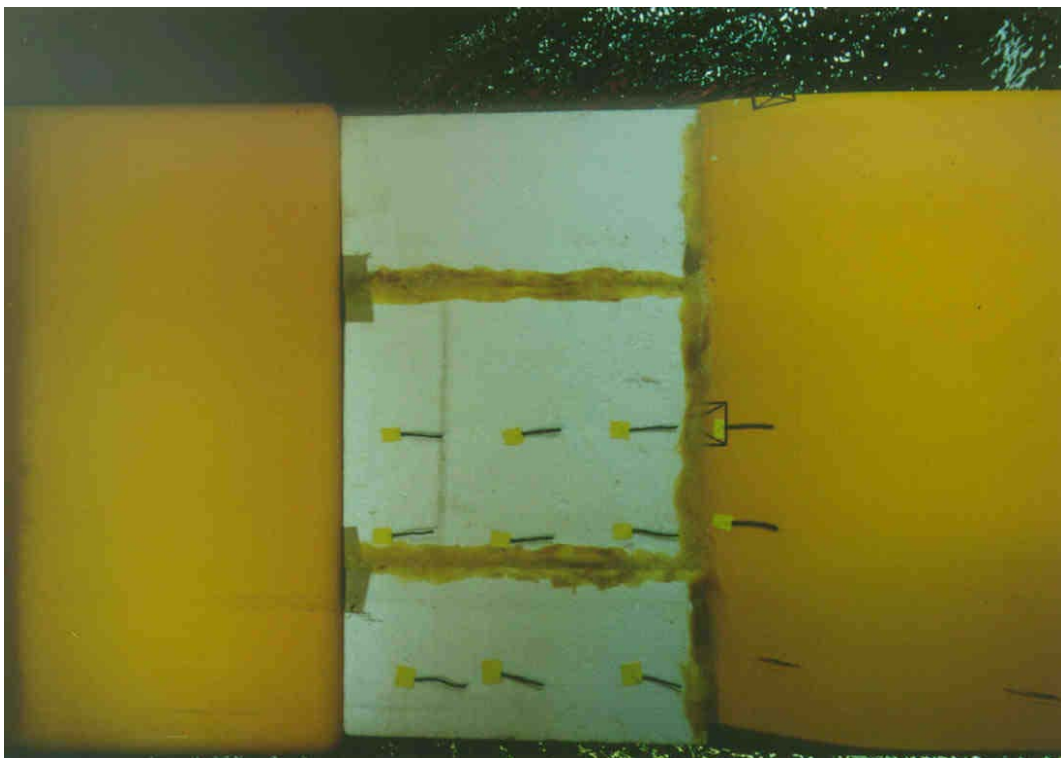
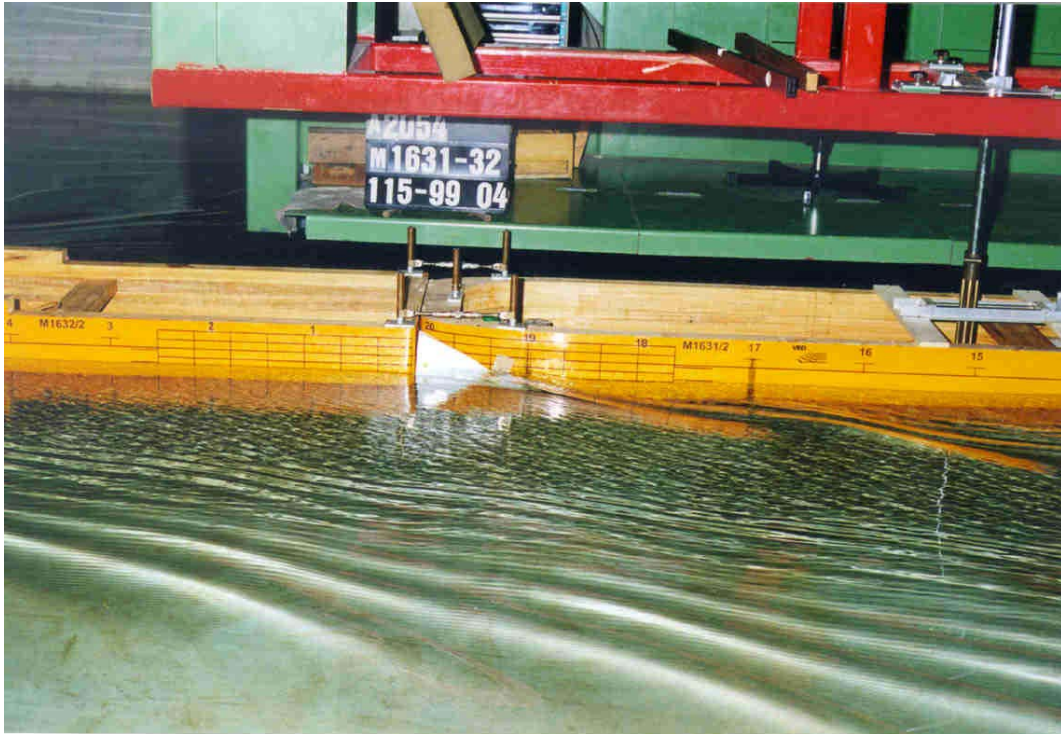


Gütermotorschiff mit Schubleichter

115-99

$T = 1,90 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 3 Keilen – $V = 14 \text{ km/h}$

$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



Gütermotorschiff mit Schubleichter

119-99

$T = 1,90 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 gekürzten Keilen – $V = 14 \text{ km/h}$

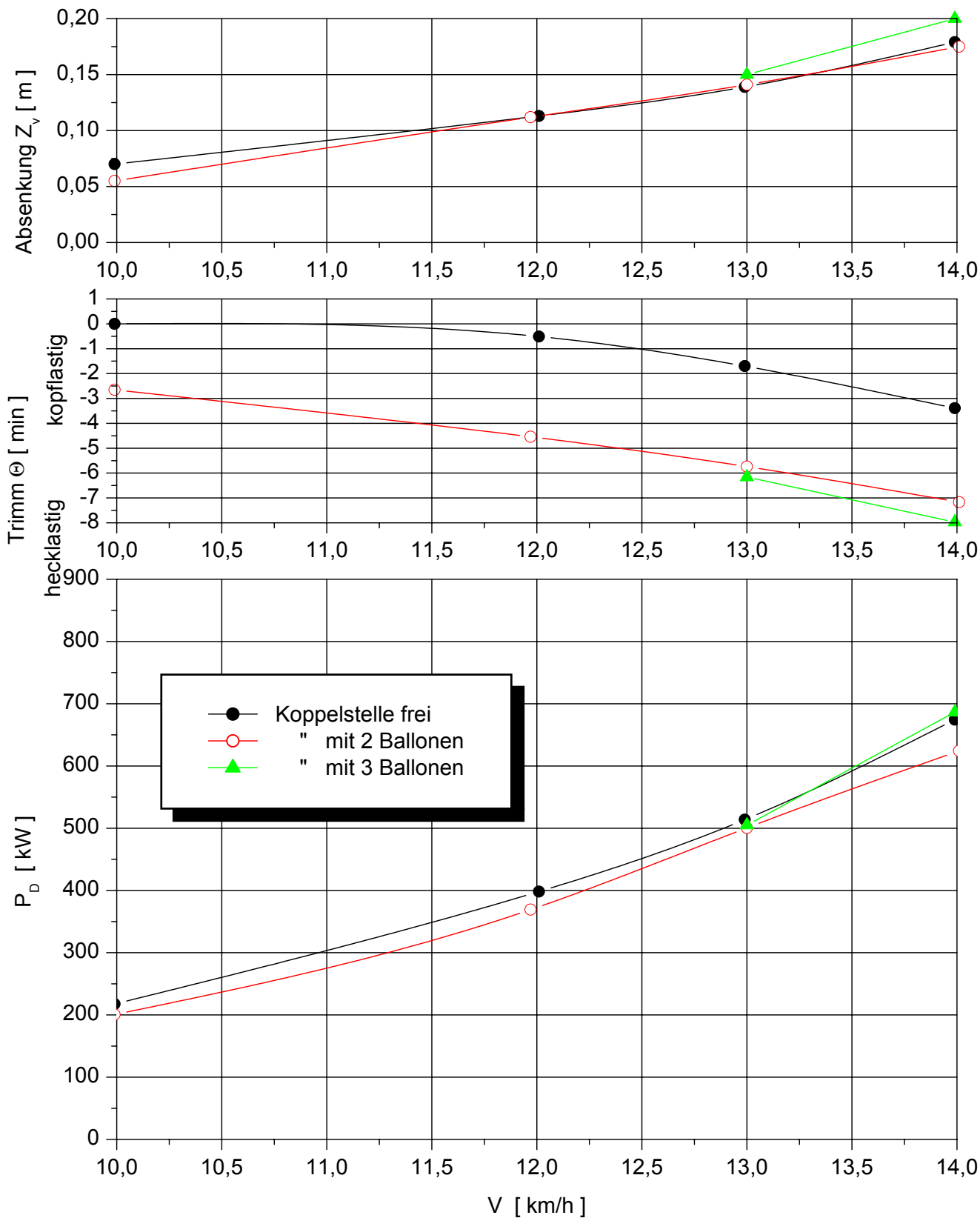
$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



GMS mit Düse - T = 2,50 m

$b_K = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

117
121
122

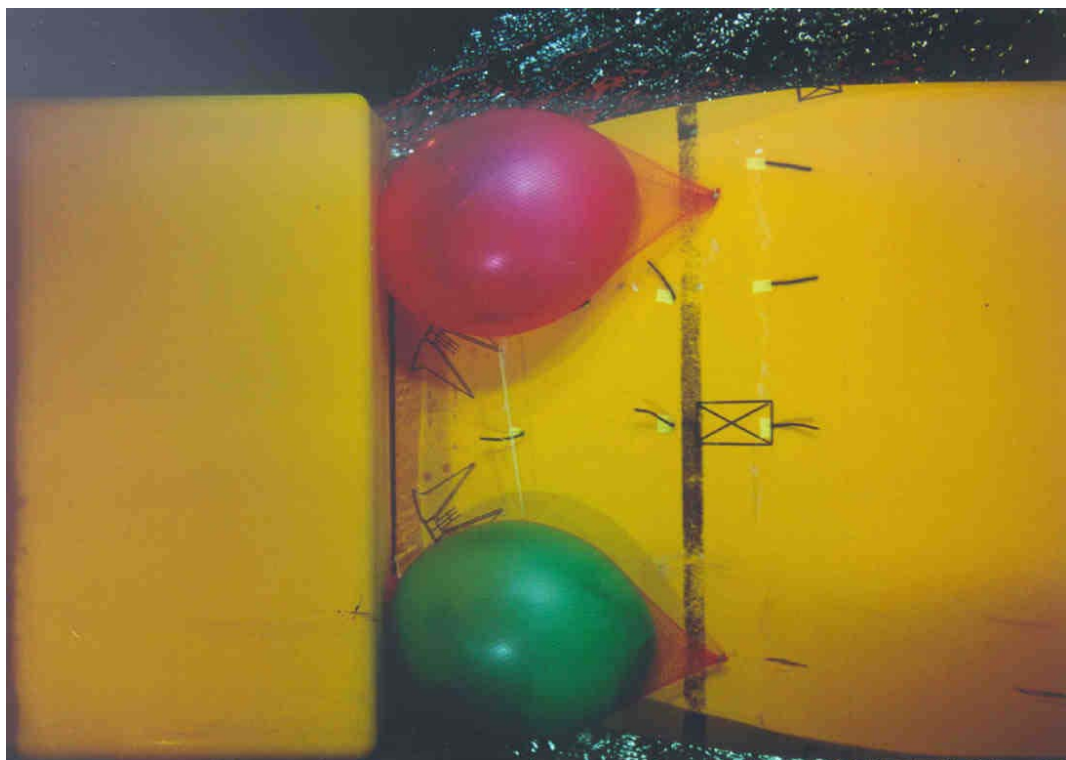


121-99

Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 Ballonen – $V = 14 \text{ km/h}$

$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$

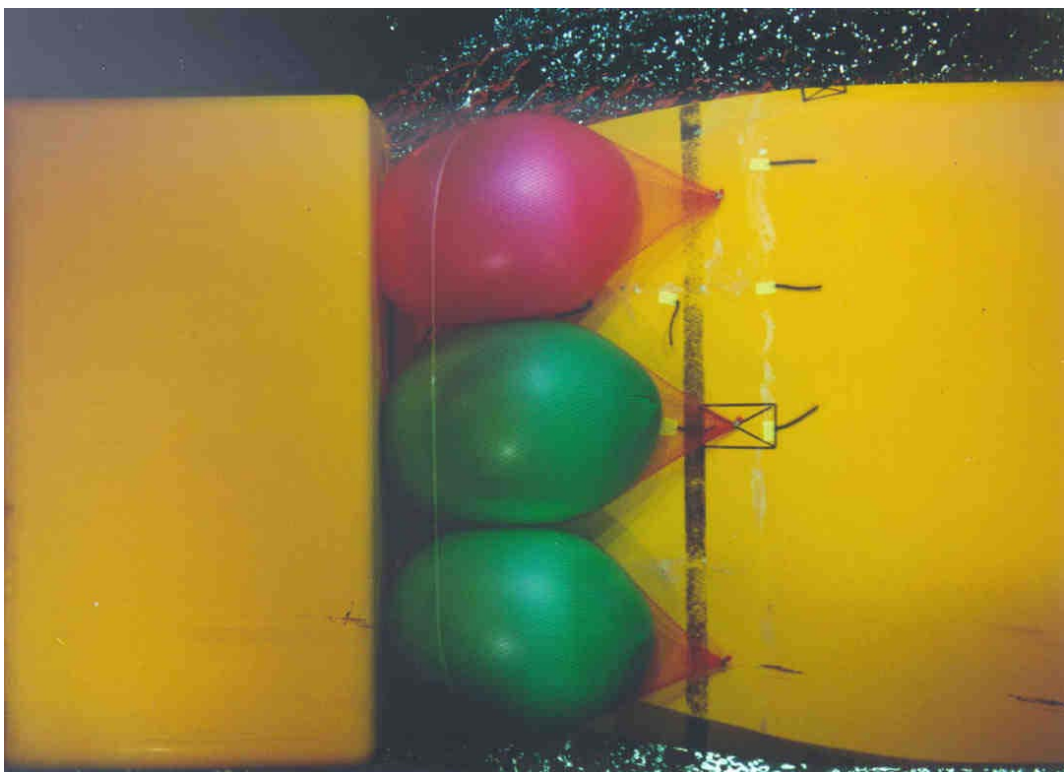


122-99

Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 2,50 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 3 Ballonen – $V = 14 \text{ km/h}$

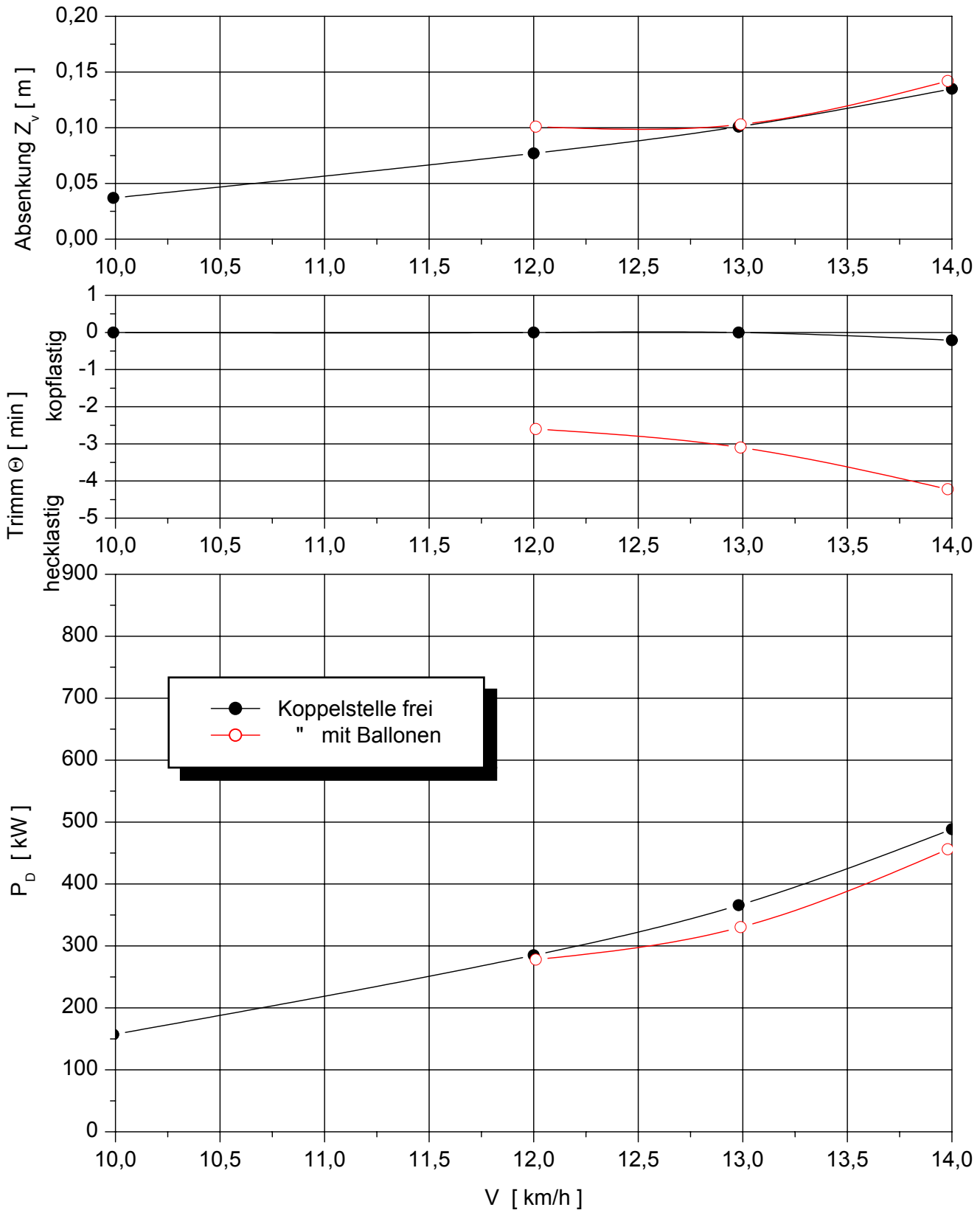
$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



GMS mit Düse - T = 1,90 m

$b_K = 137,2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

109
120

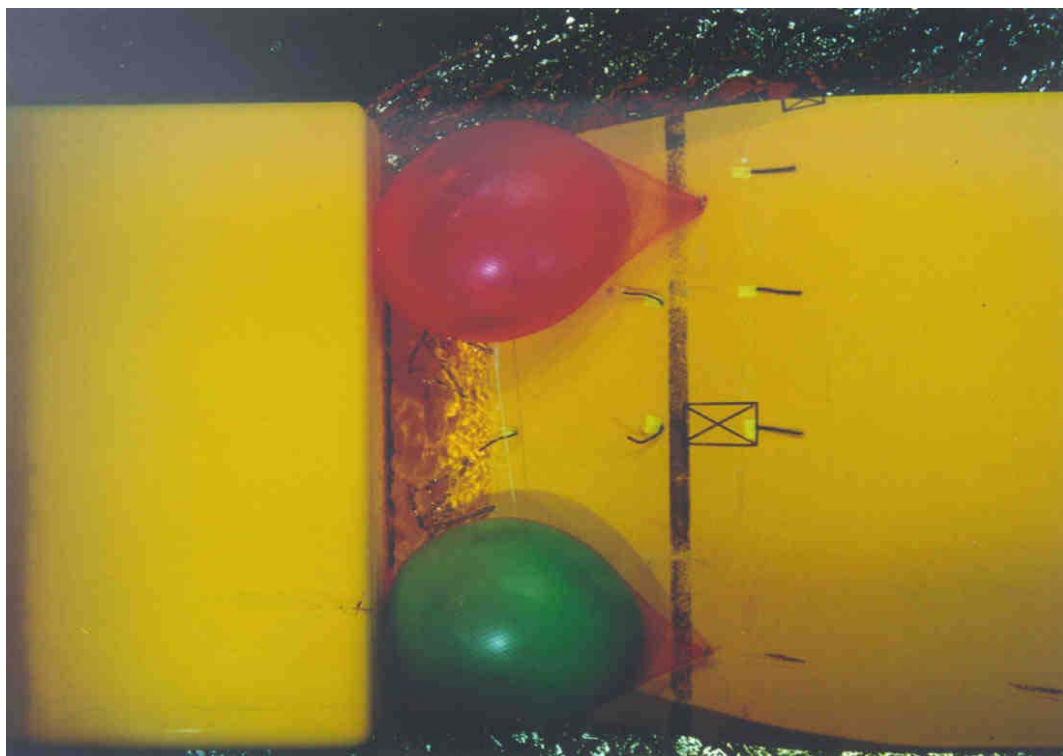


120-99

Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 1,90 \text{ m}$ – Koppelstelle mit 2 Ballonen – $V = 14 \text{ km/h}$

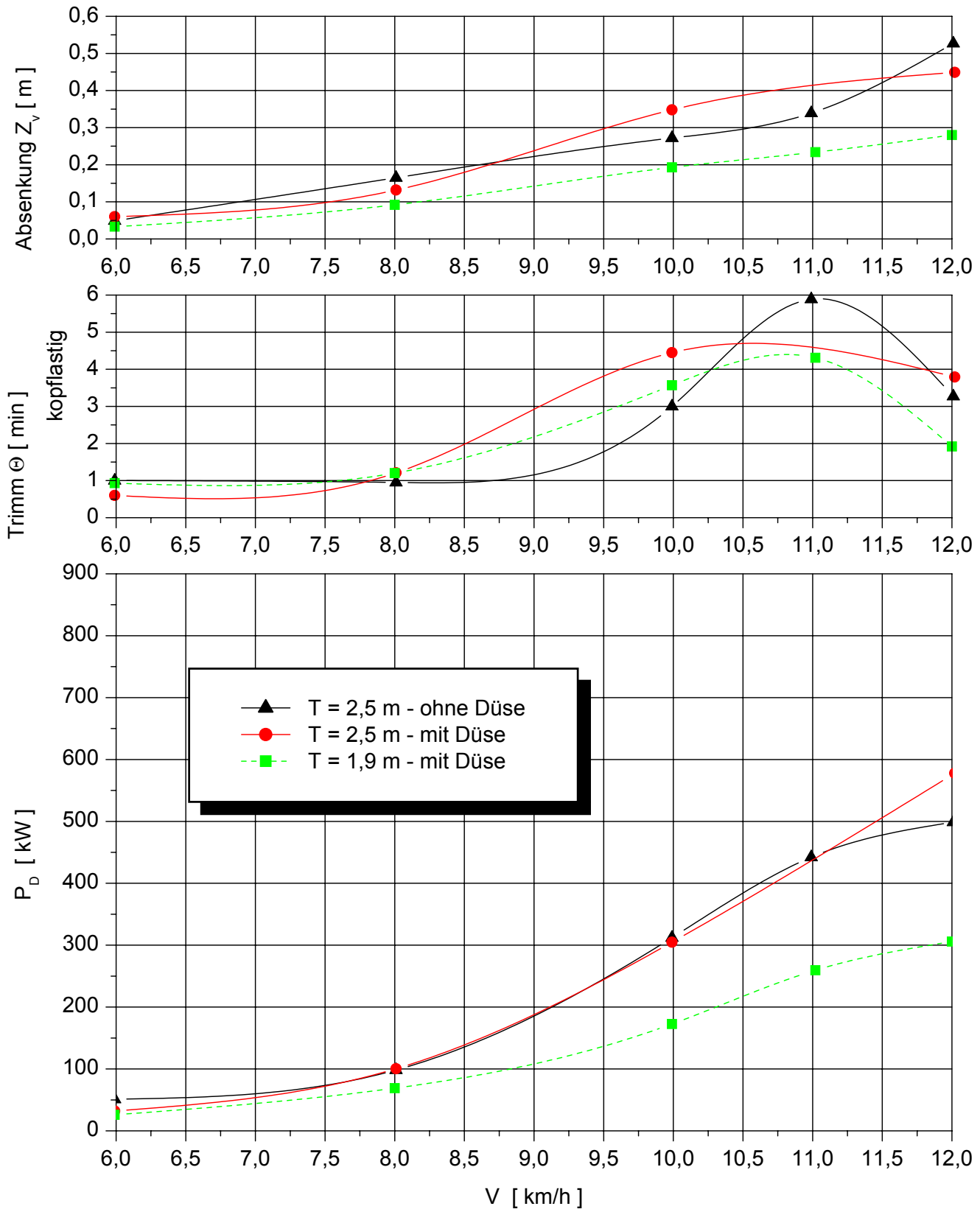
$b_K = 137,2 \text{ m}$ – $h = 4 \text{ m}$



Koppelstelle frei

$b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

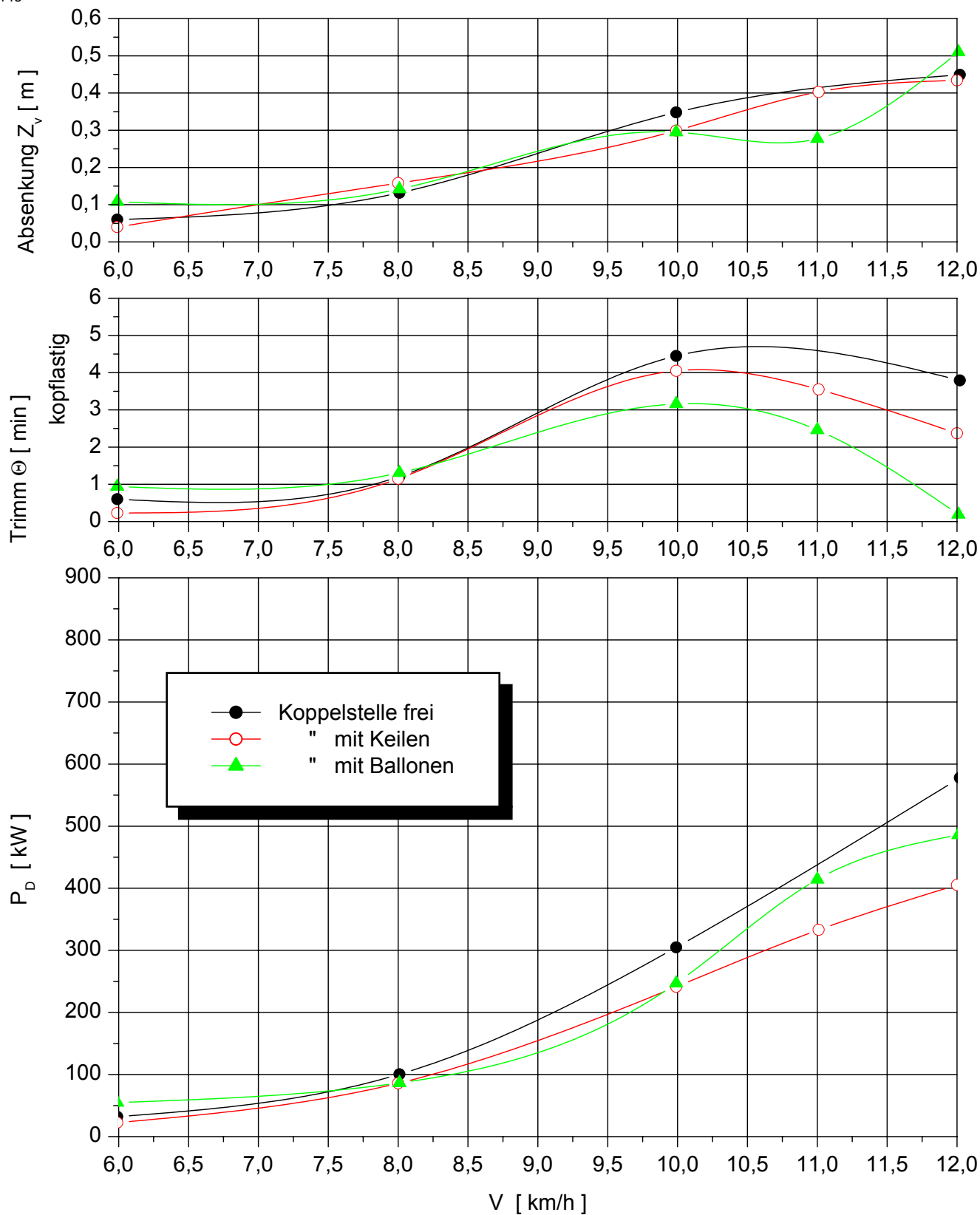
147
140
141



GMS mit Düse - T = 2,50 m

$b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

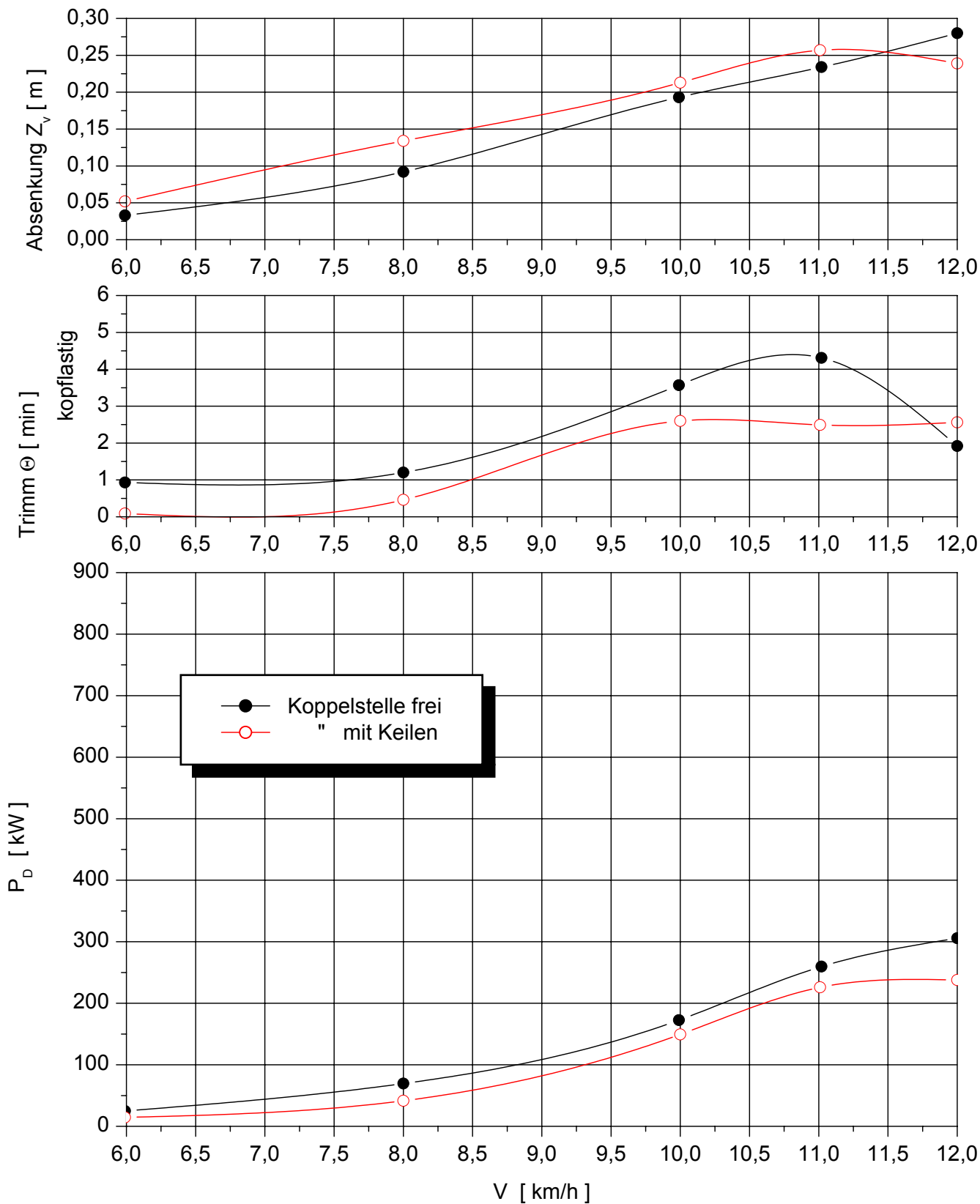
140
144
145



GMS mit Düse - T = 1,90 m

$b_K = 42 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

141
143



Pfahlzugversuche

Vers. Nr. 106-99: GMS ohne Düse, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m, $T = 1,90$ m

n_s	T
[min^{-1}]	[kN]
244,2	27,13
326,7	48,72
406,8	75,51
484,9	109,79

Vers. Nr. 107-99: GMS mit Düse, $b_K = 137,2$ m, $h = 4$ m, $T = 1,90$ m

n_s	T
[min^{-1}]	[kN]
245,1	28,49
326,6	50,82
408,8	78,85
484,3	114,80

Vers. Nr. 148-99: GMS+SL, ohne Düse, $b_K = 42$ m, $h = \infty$, $T = 2,50$ m, Koppelstelle frei

n_s	T
[min^{-1}]	[kN]
212,3	18,60
282,7	33,56
351,3	52,58
422,7	76,53

Vers. Nr. 149-99: GMS mit Düse, $b_K = 42$ m, $h = \infty$, $T = 2,50$ m, Koppelstelle frei

n_s	T
[min^{-1}]	[kN]
144,2	9,45
212,4	20,69
282,4	37,08
354,1	58,60
423,5	84,34

Pfahlzugversuche

Vers. Nr. 146-99: GMS+SL, ohne Düse, $b_K = 42$ m, $h = 4$ m, $T = 2,50$ m, Koppelstelle frei

n_s	T
[min^{-1}]	[kN]
212,4	23,91
281,6	38,96
352,2	58,18

Vers. Nr. 142-99: GMS+SL, mit Düse, $b_K = 42$ m, $h = 4$ m, $T = 1,90$ m, Koppelst.: 2 Keile

n_s	T
[min^{-1}]	[kN]
212,5	21,71
283,2	38,41
353,0	57,53

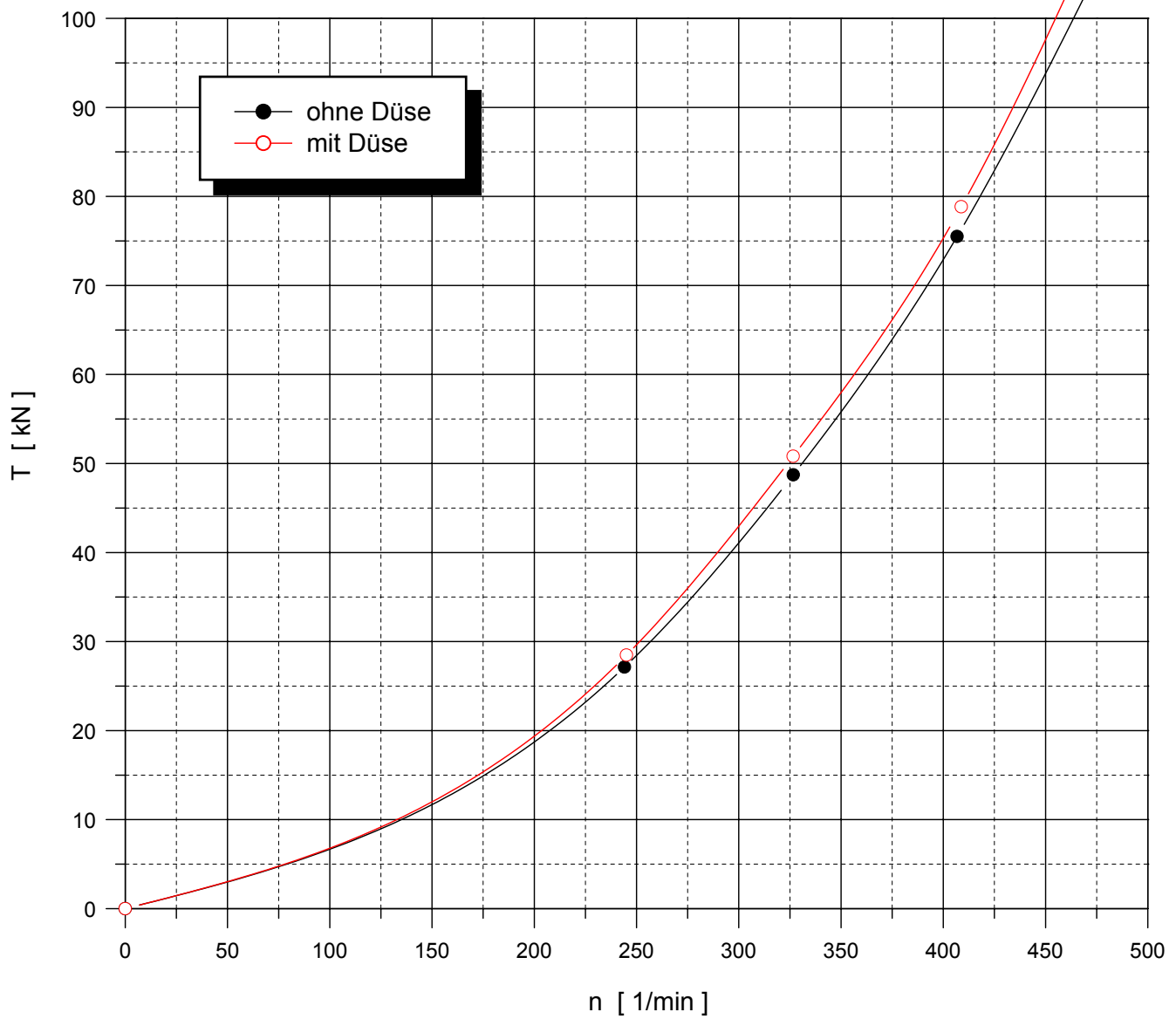
Pfahlzugversuche

Gütermotorschiff

$T = 1,90 \text{ m}$

$h = 4 \text{ m}$

Kanalbreite $b_k = 137,2 \text{ m}$



Pfahlzugversuche

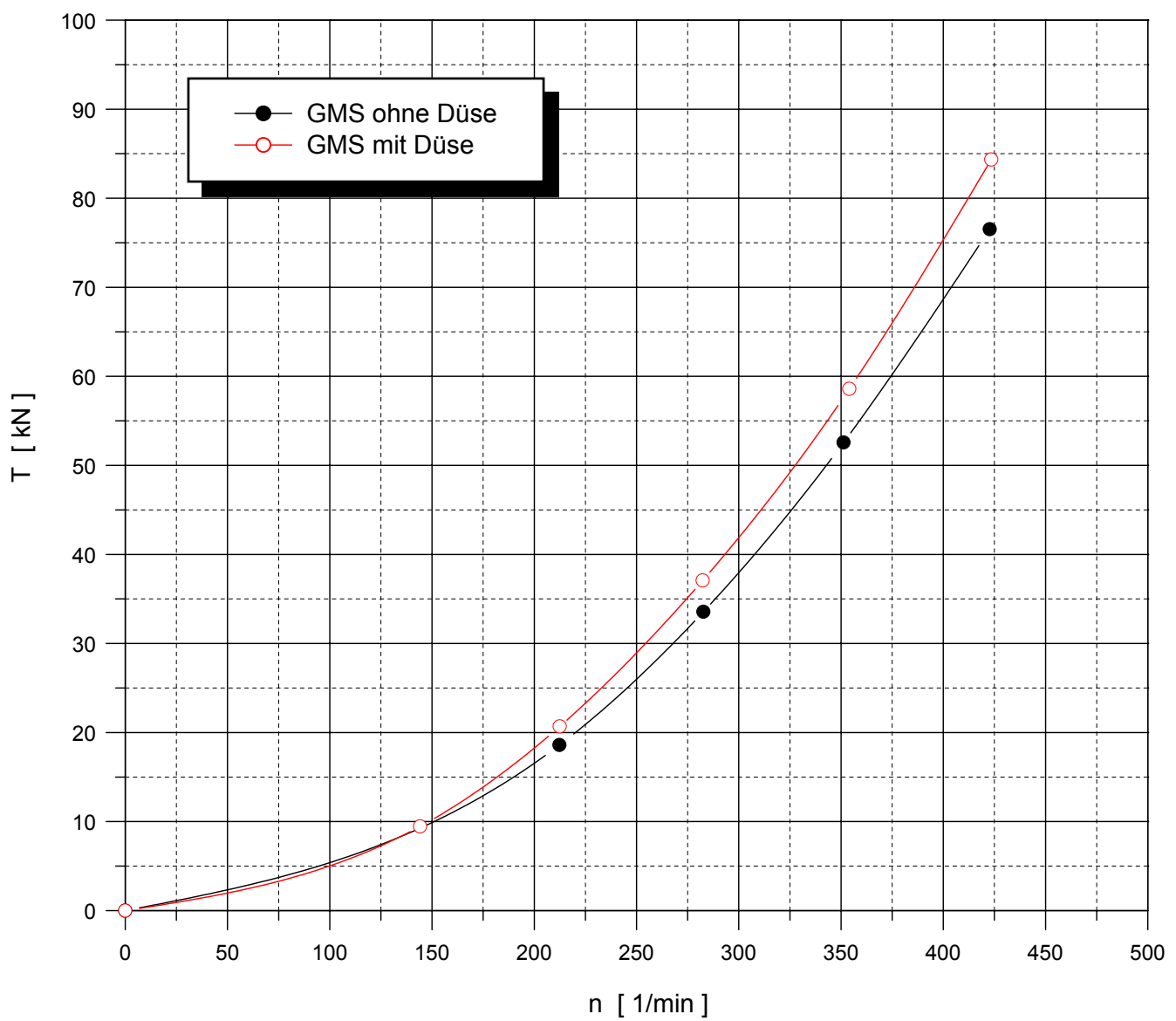
Gütermotorschiff mit Schubleichter

$T = 2,50 \text{ m}$

Koppelstelle frei

tiefes Wasser

Kanalbreite $b_K = 42 \text{ m}$



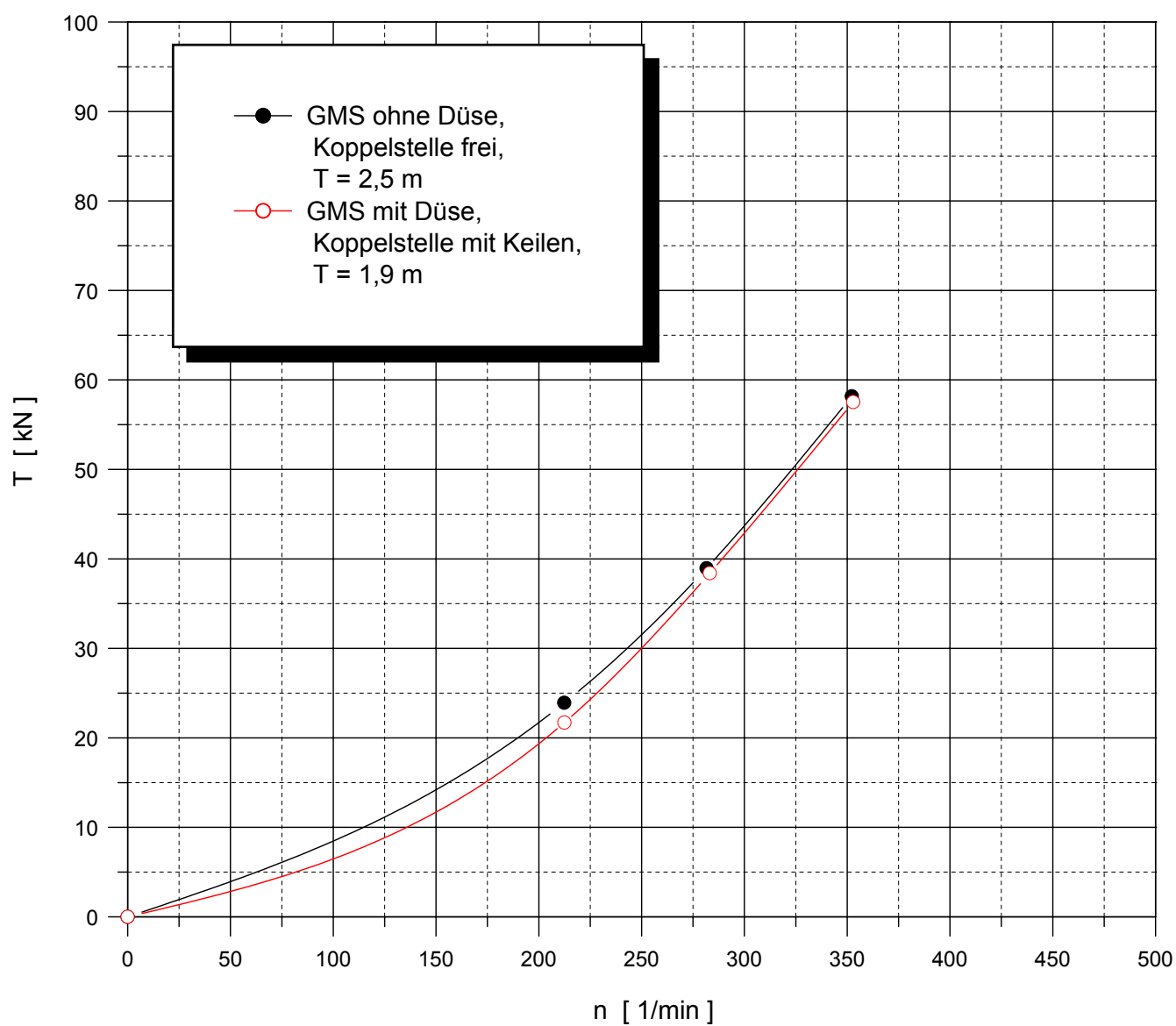
Pfahlzugversuche

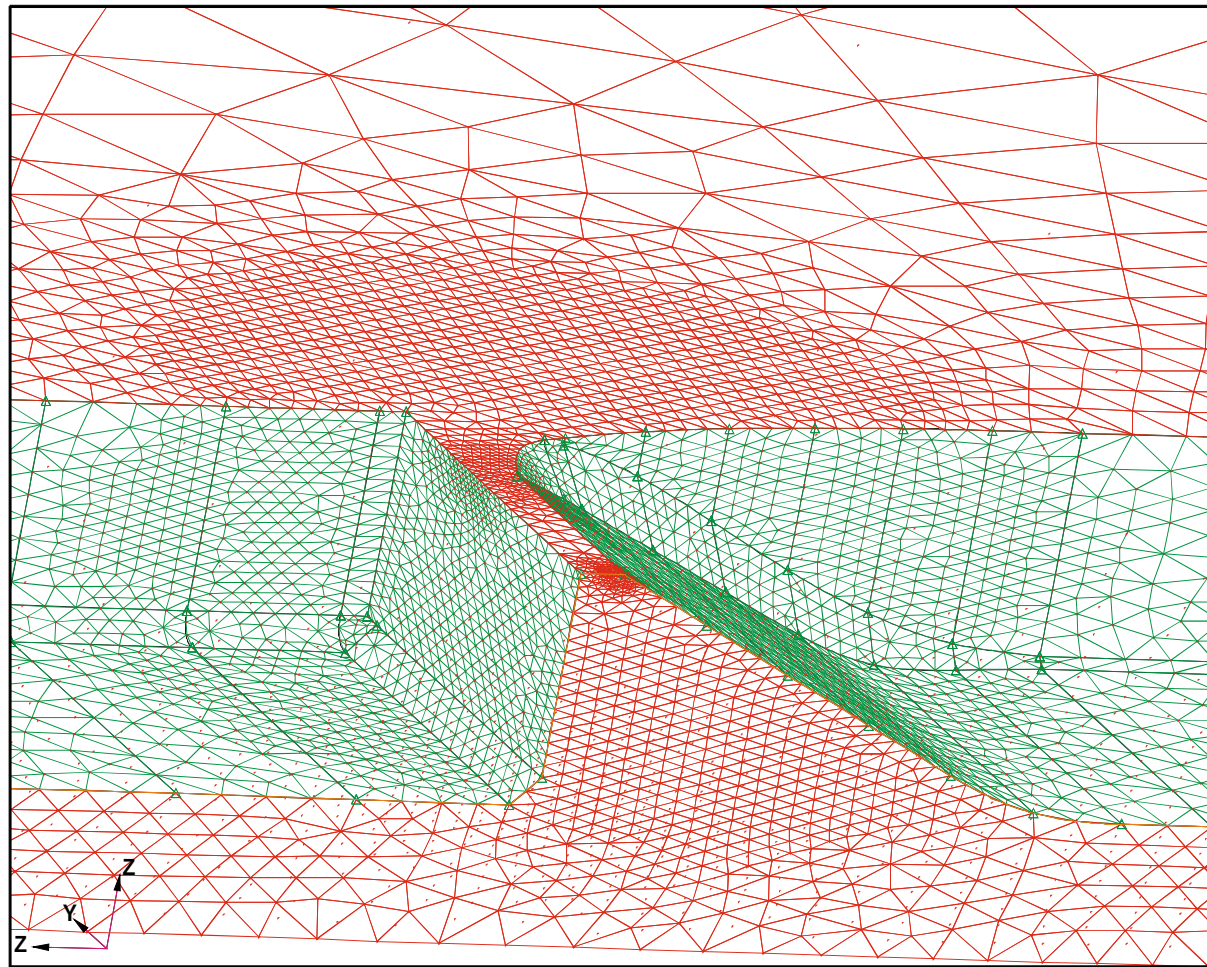
Gütermotorschiff mit Schubleichter

146
142

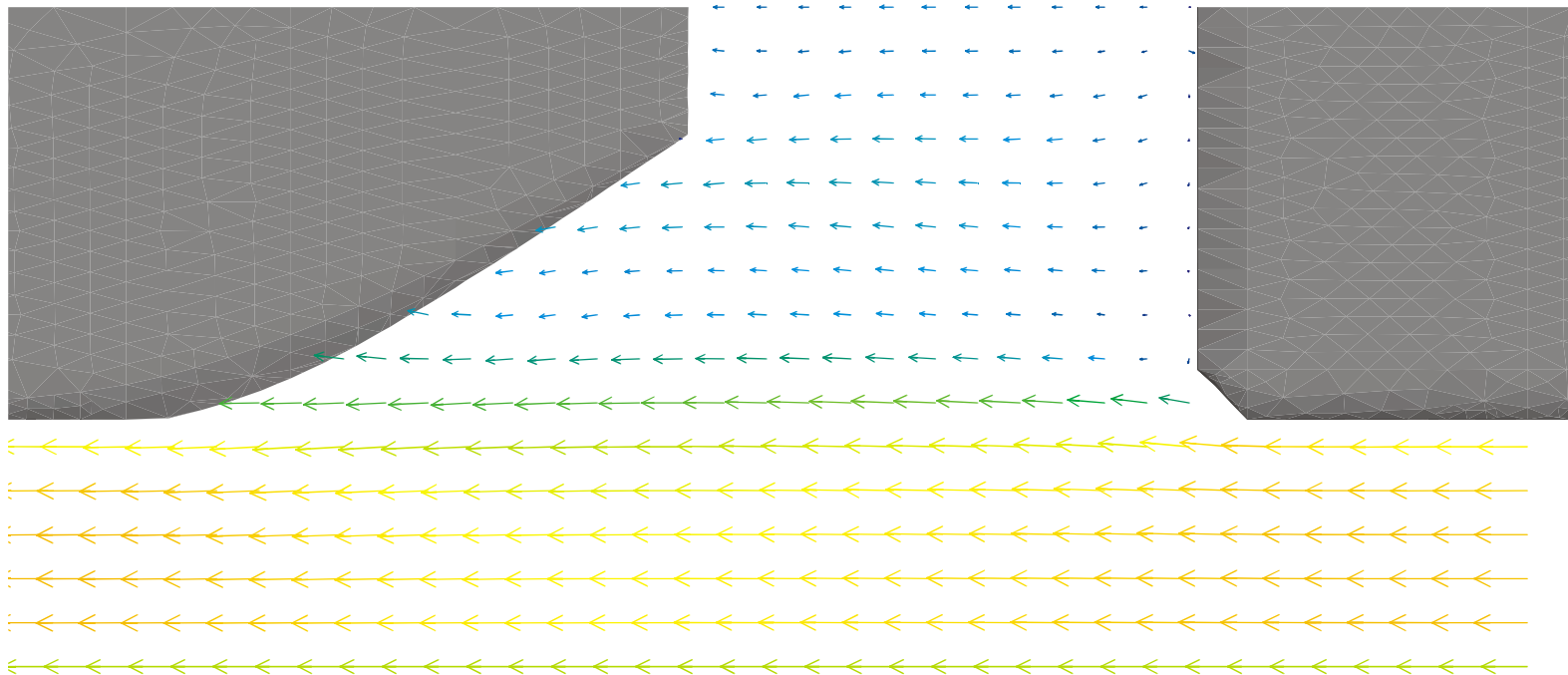
$h = 4 \text{ m}$

Kanalbreite $b_K = 42 \text{ m}$

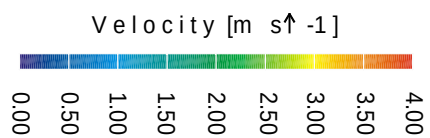




Oberflächengitter an der Koppelstelle



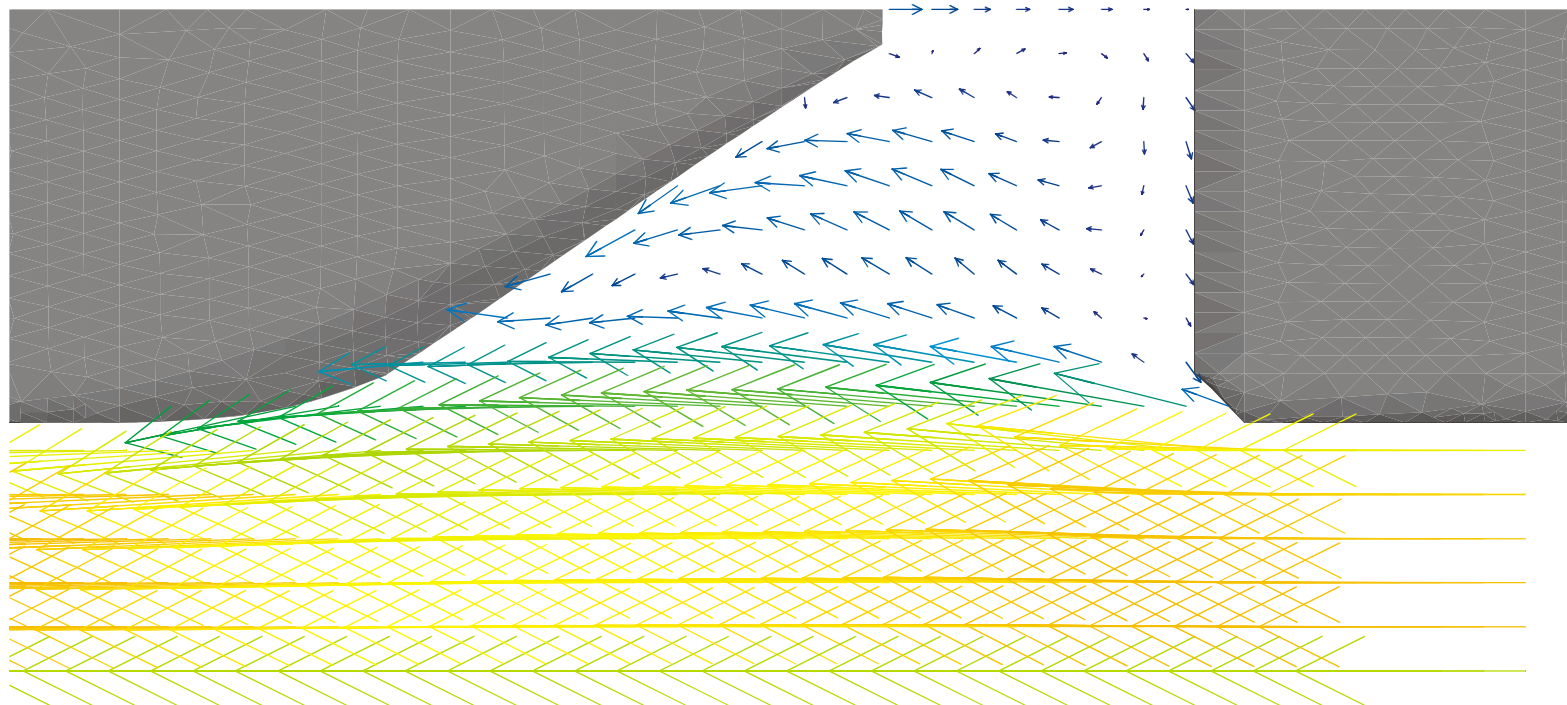
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



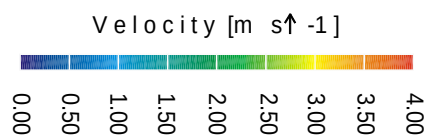
Koppelstelle y = 4.25 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.1

CFX 5.3





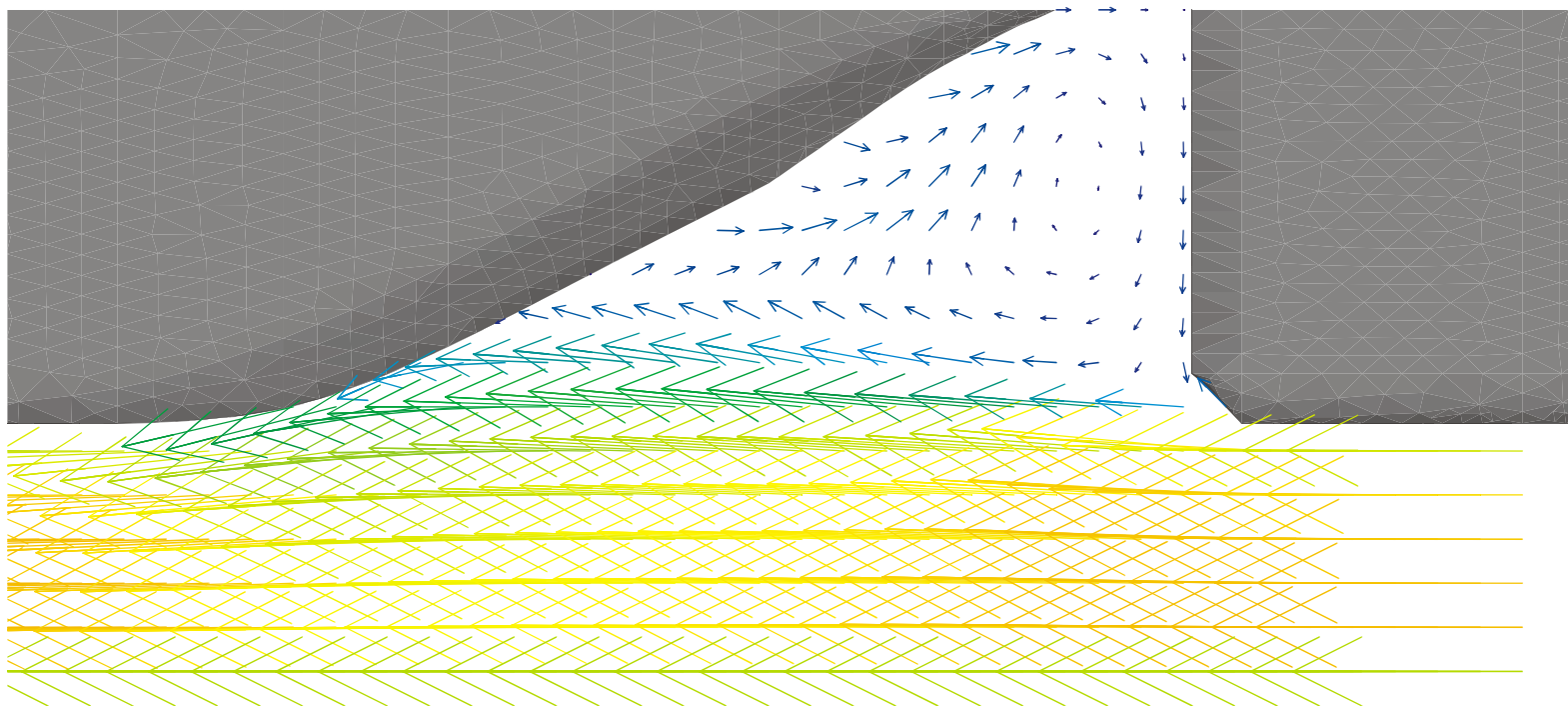
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



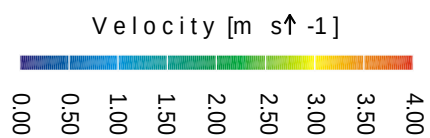
Koppelstelle $y = 4.0$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





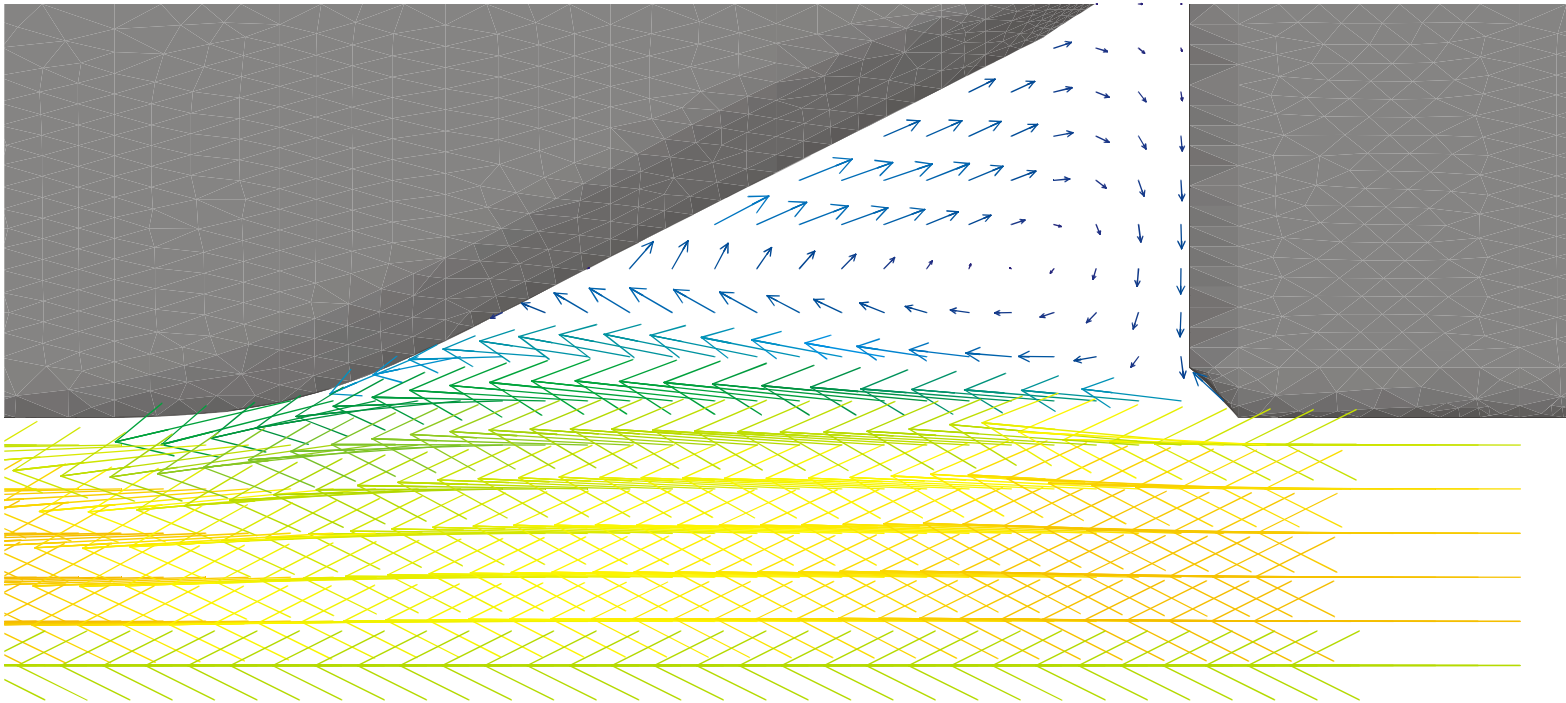
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



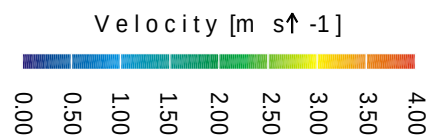
Koppelstelle y = 3.5 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





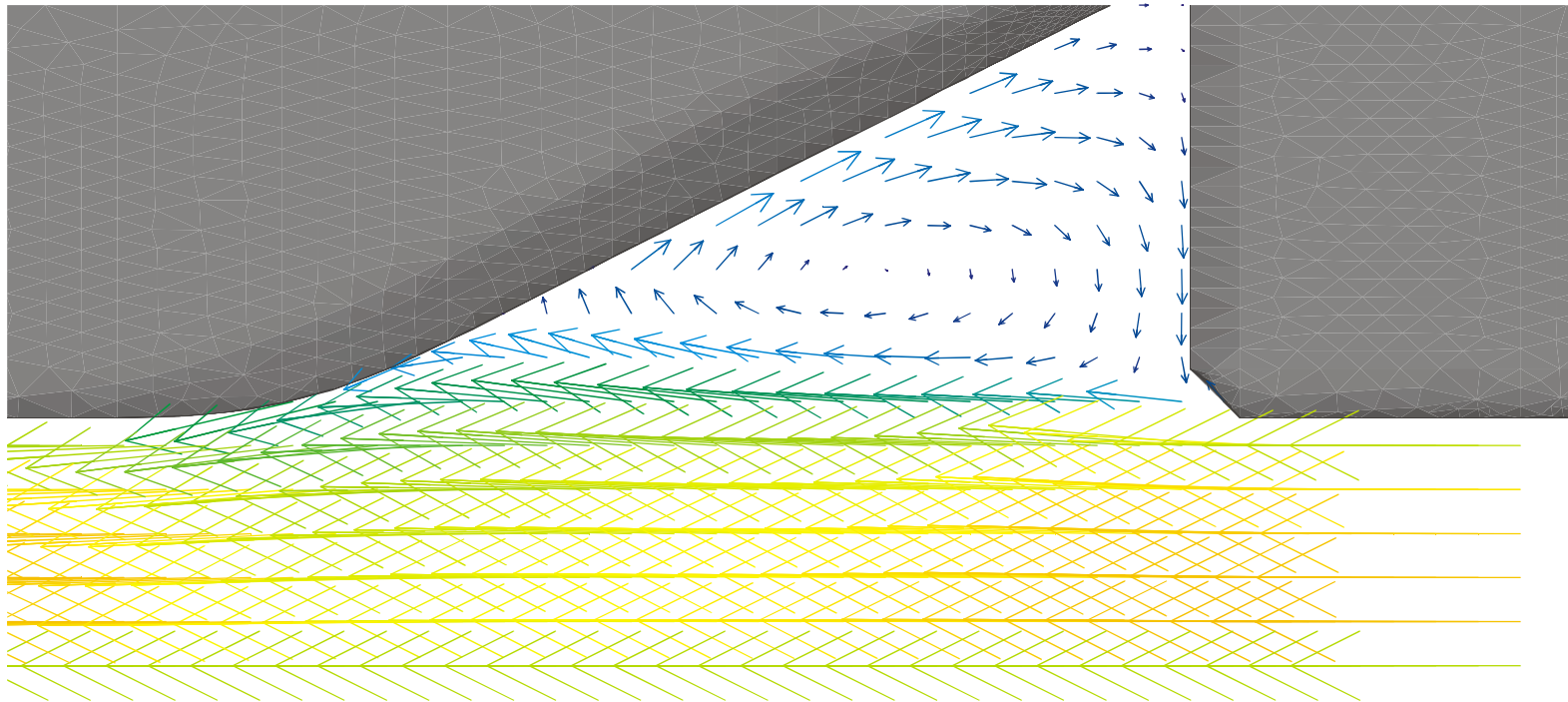
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



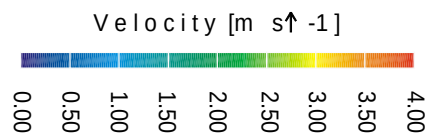
Koppelstelle y = 3.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





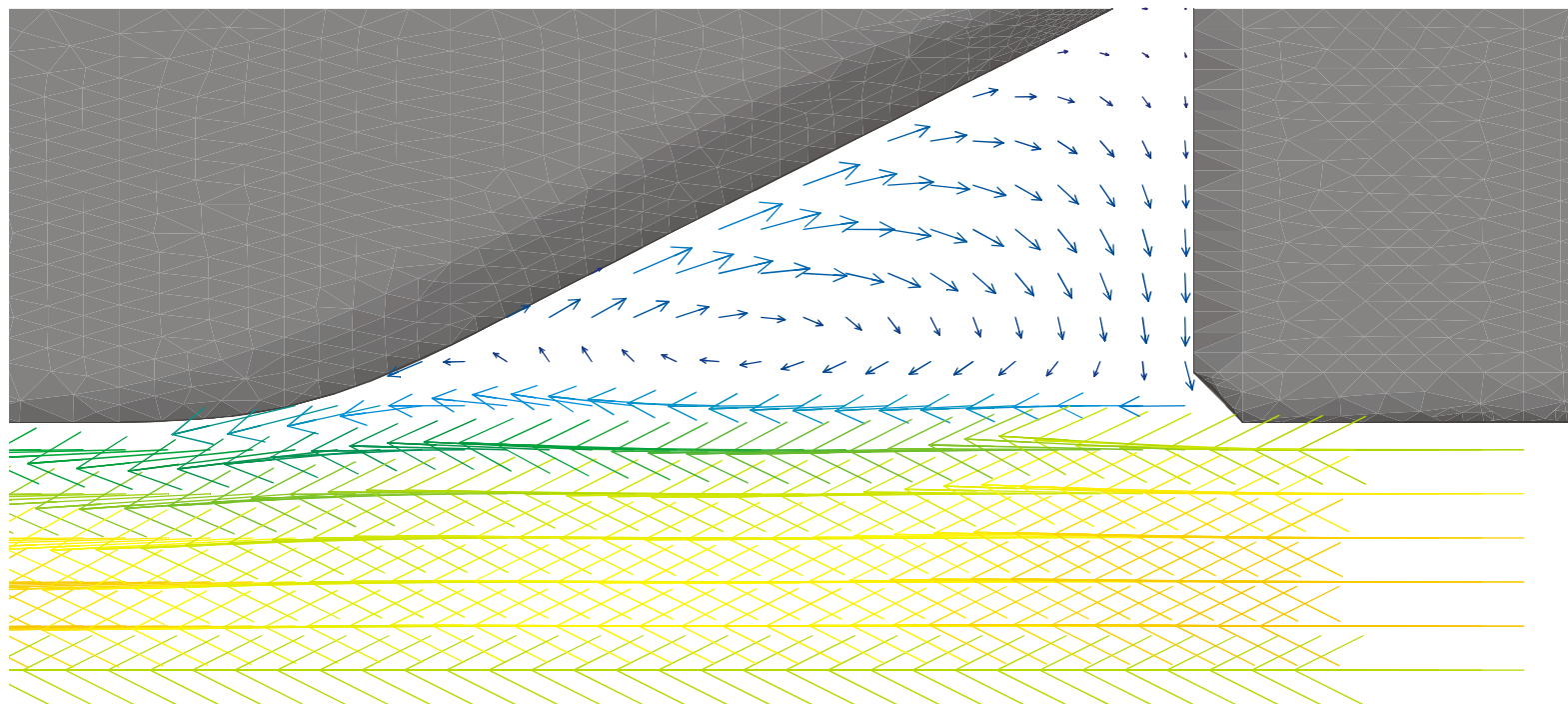
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



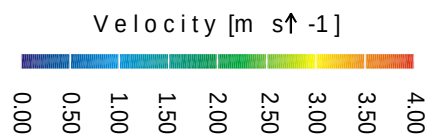
Koppelstelle $y = 2.0$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





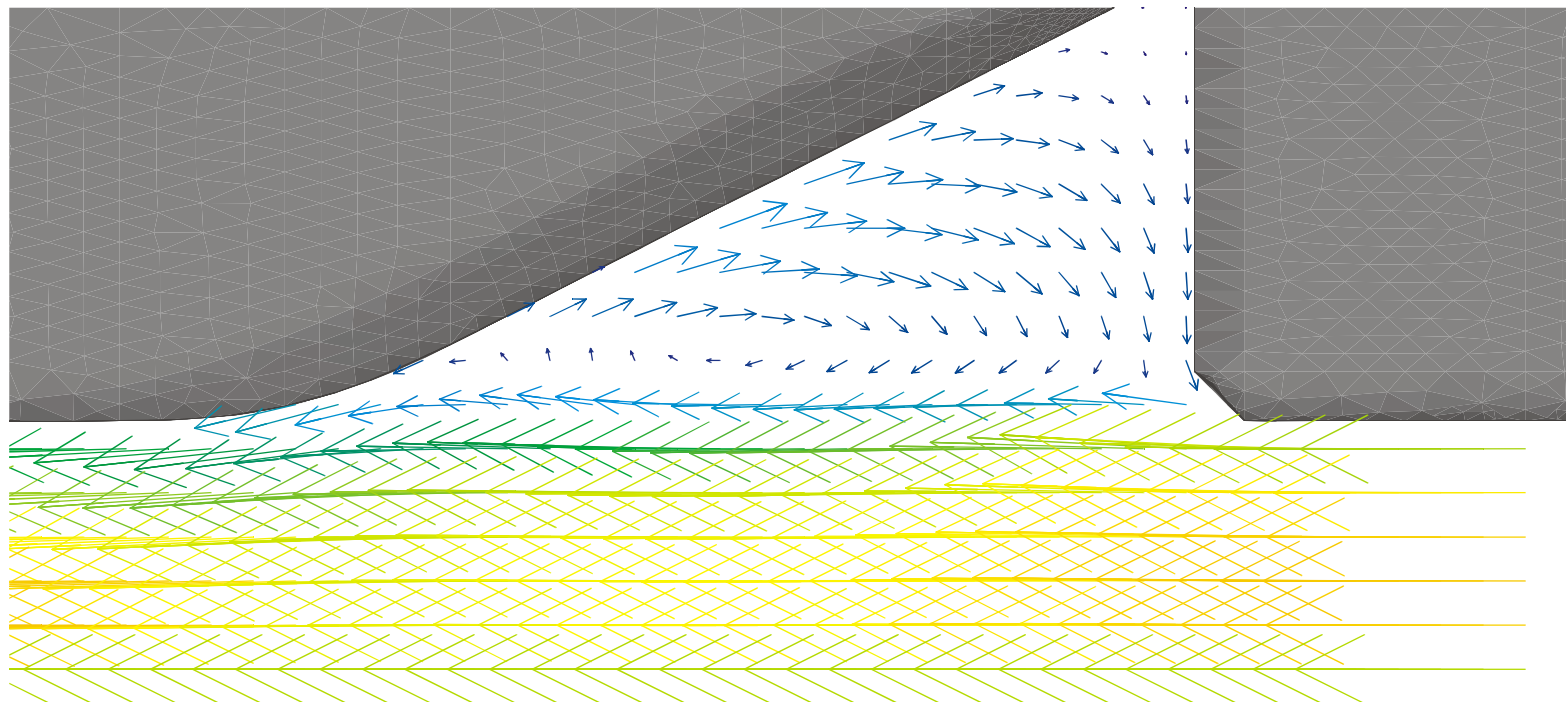
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



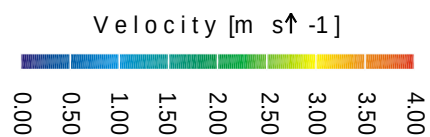
Koppelstelle $y = 0.5 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$ Faktor = 0.5

CFX 5.3





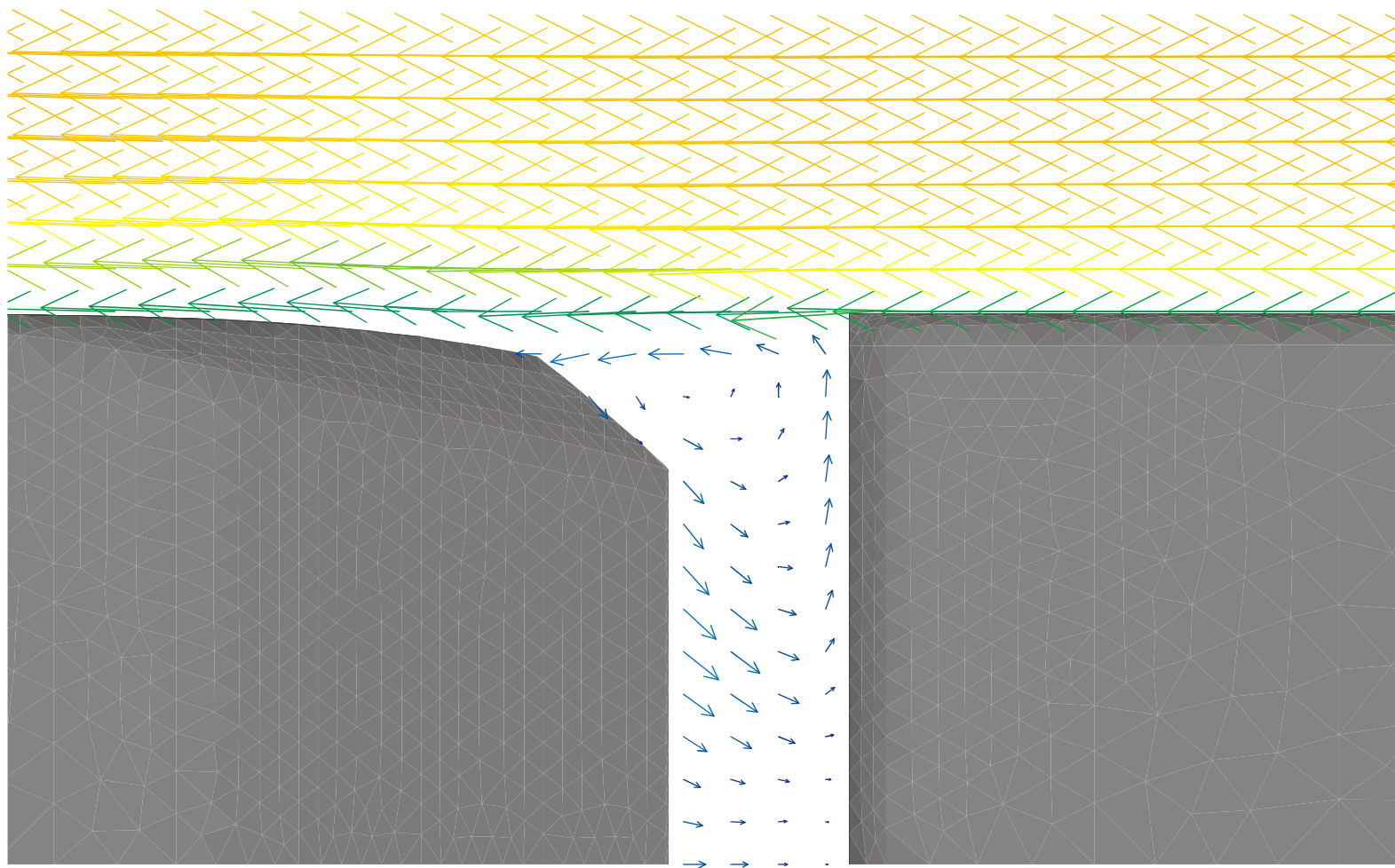
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



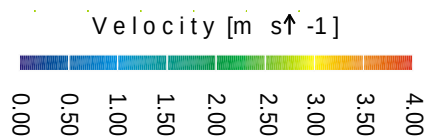
Koppelstelle $y = 0.1 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$ Faktor = 0.5

CFX 5.3





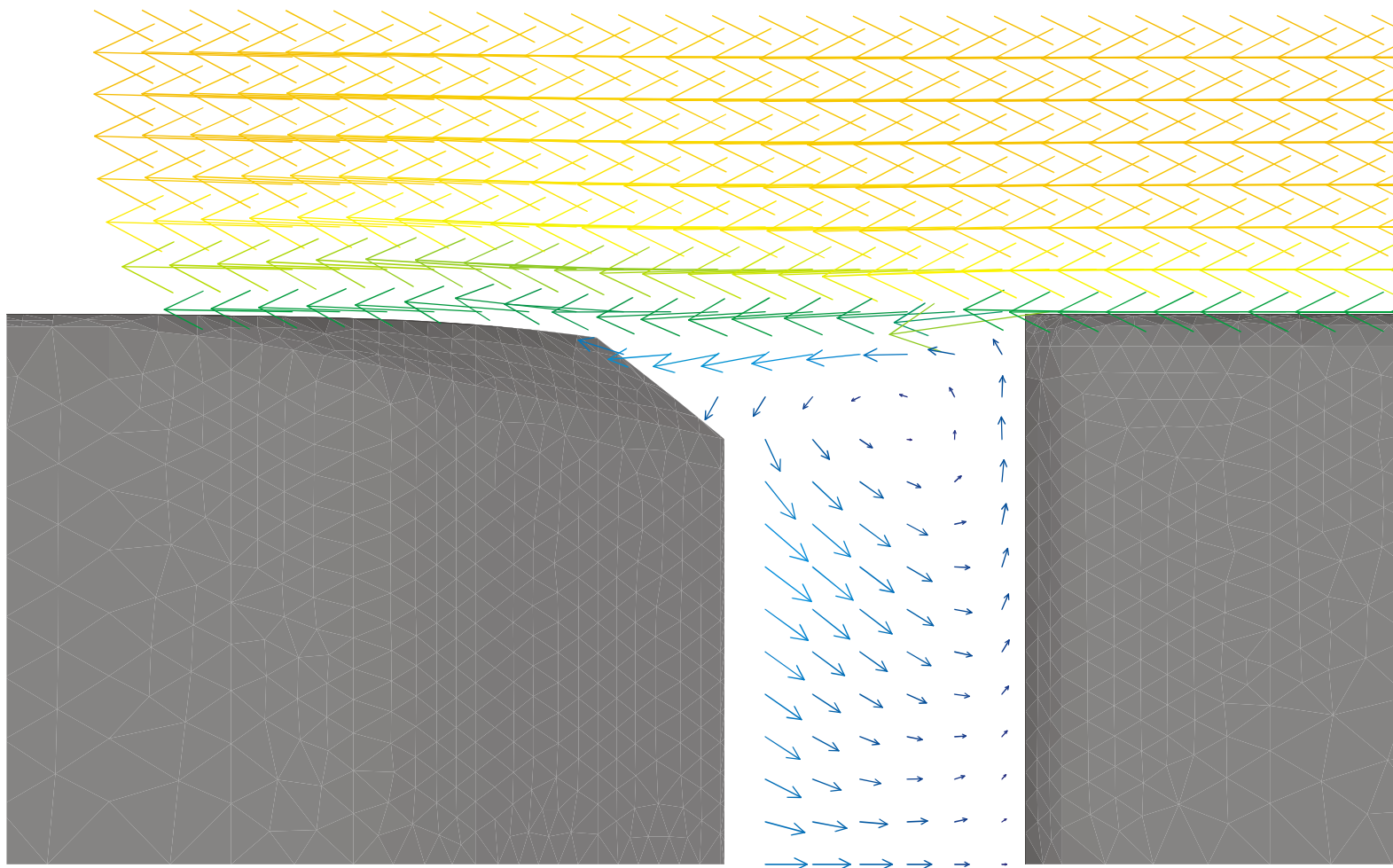
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



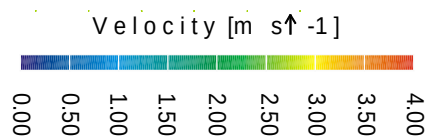
Koppelstelle $z = 2.0$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





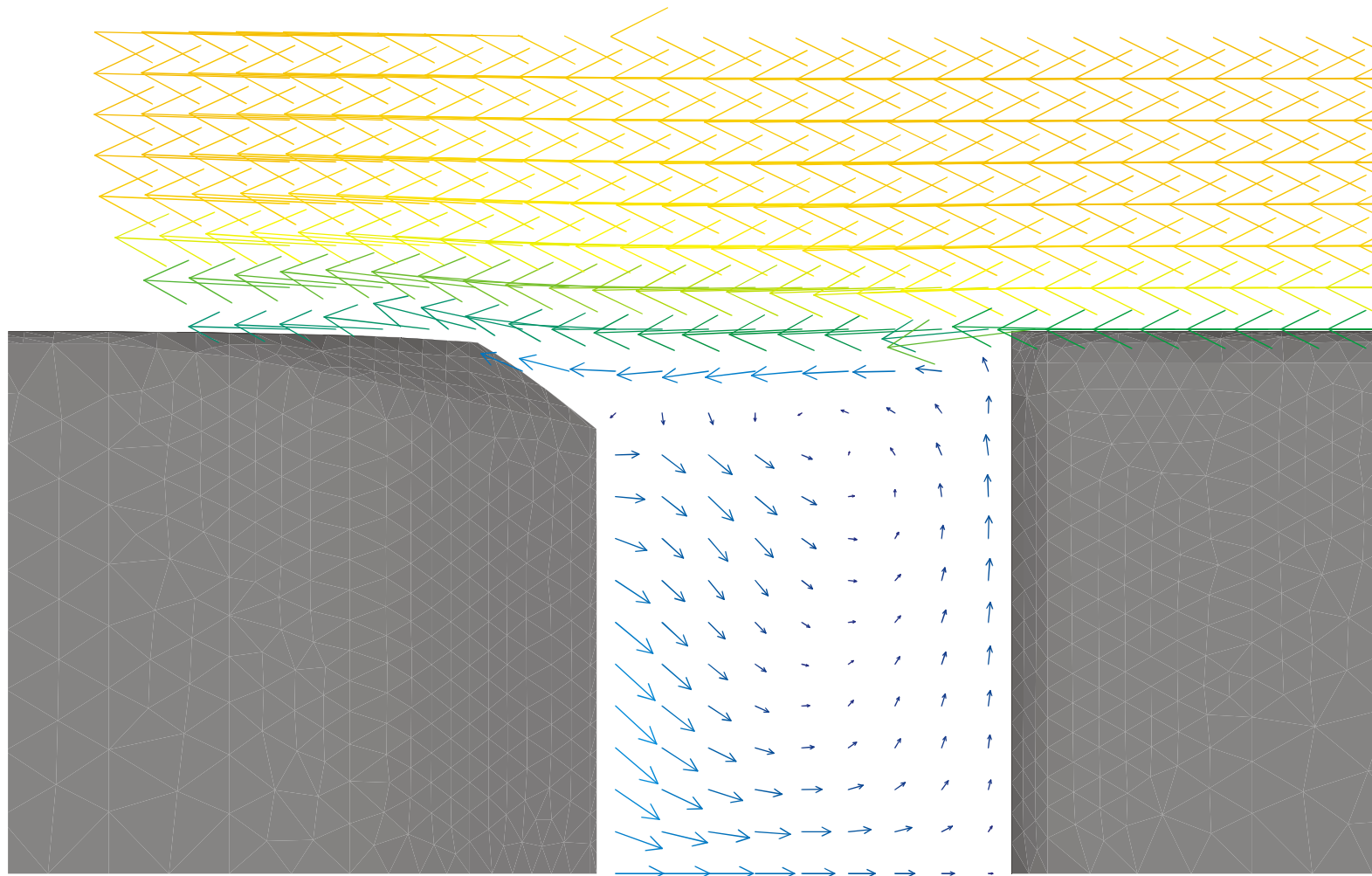
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



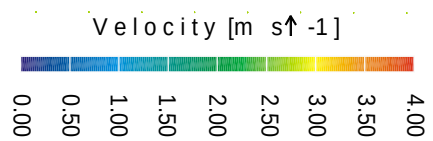
Koppelstelle $z = 1.5 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$ Faktor = 0.5

CFX 5.3





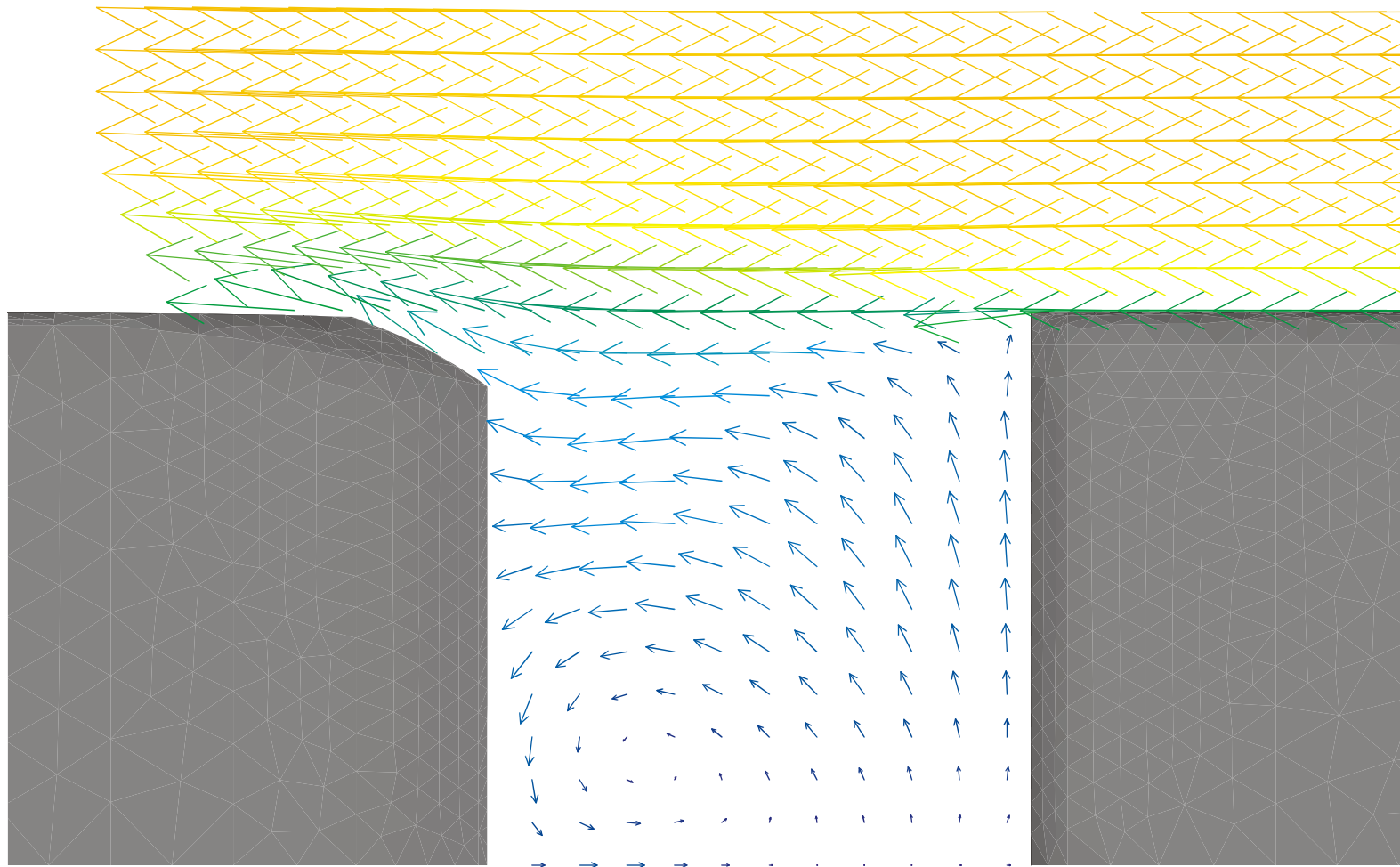
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



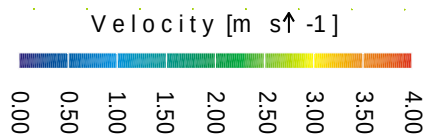
Koppelstelle $z = 1.0$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





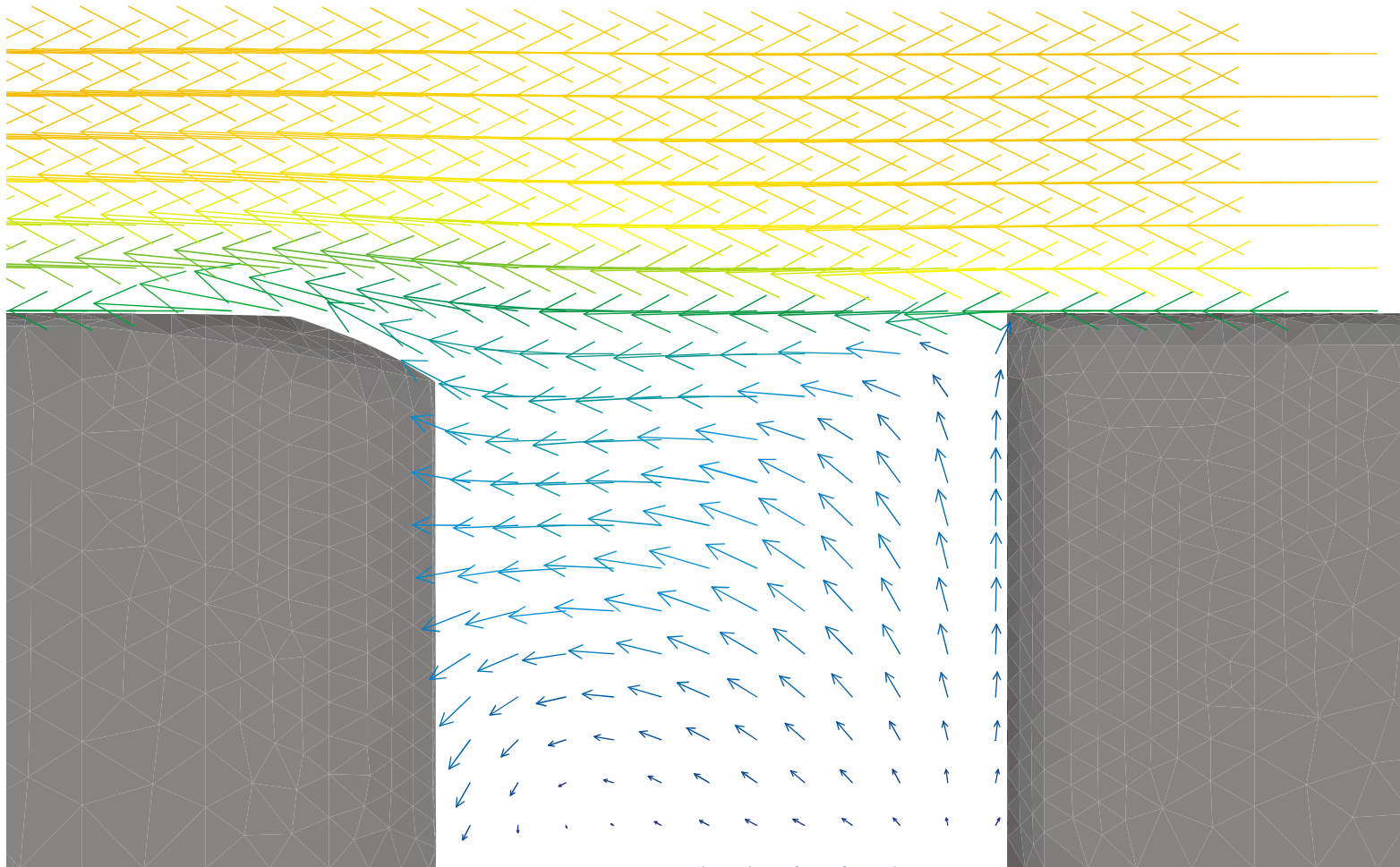
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



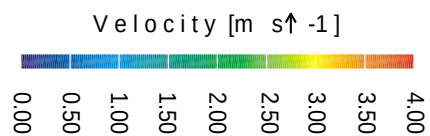
Koppelstelle $z = 0.5 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$ Faktor = 0.5

CFX 5.3





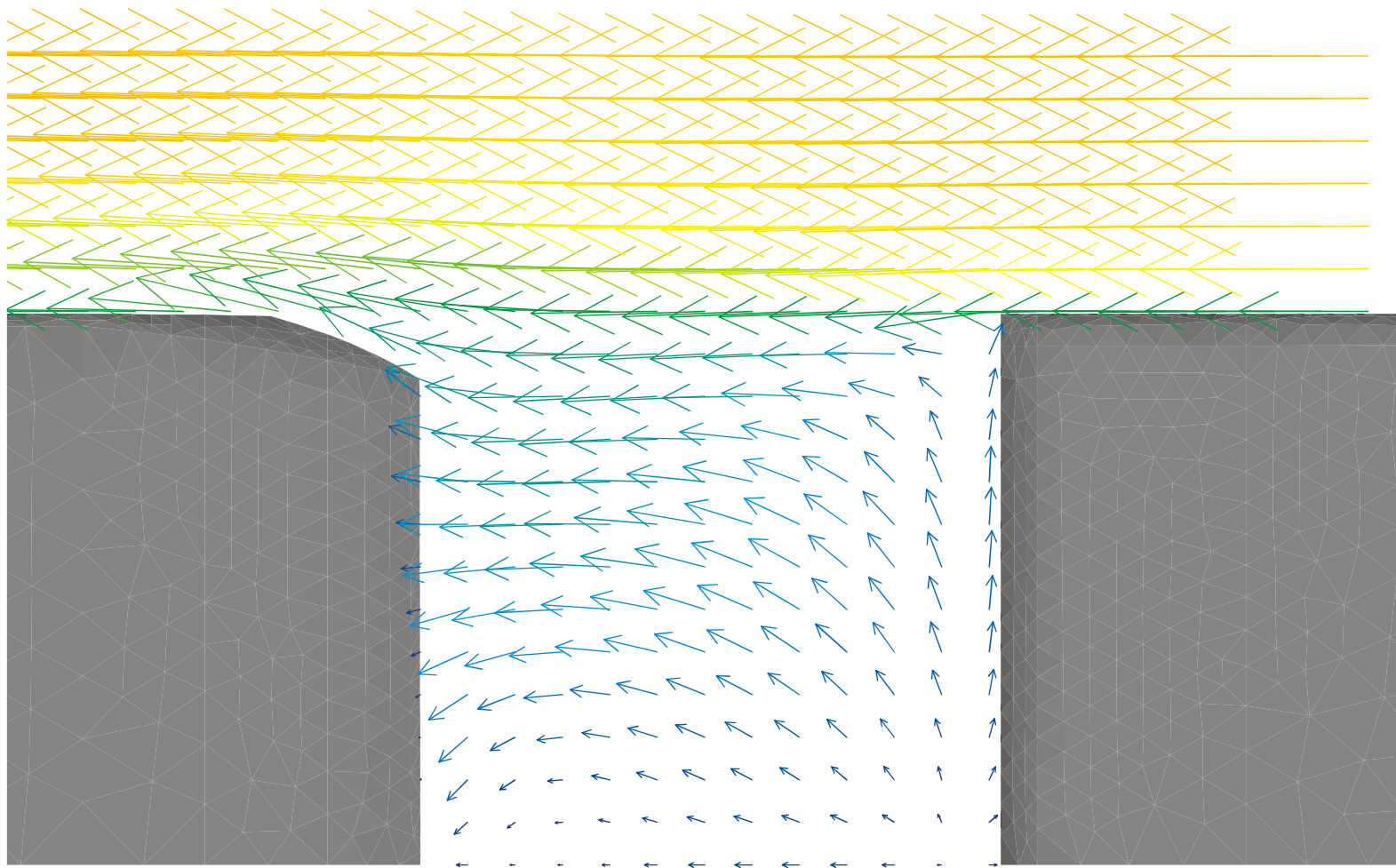
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



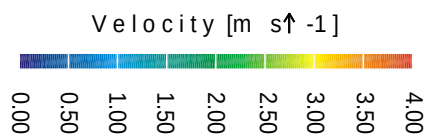
Koppelstelle $z = 0.4$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





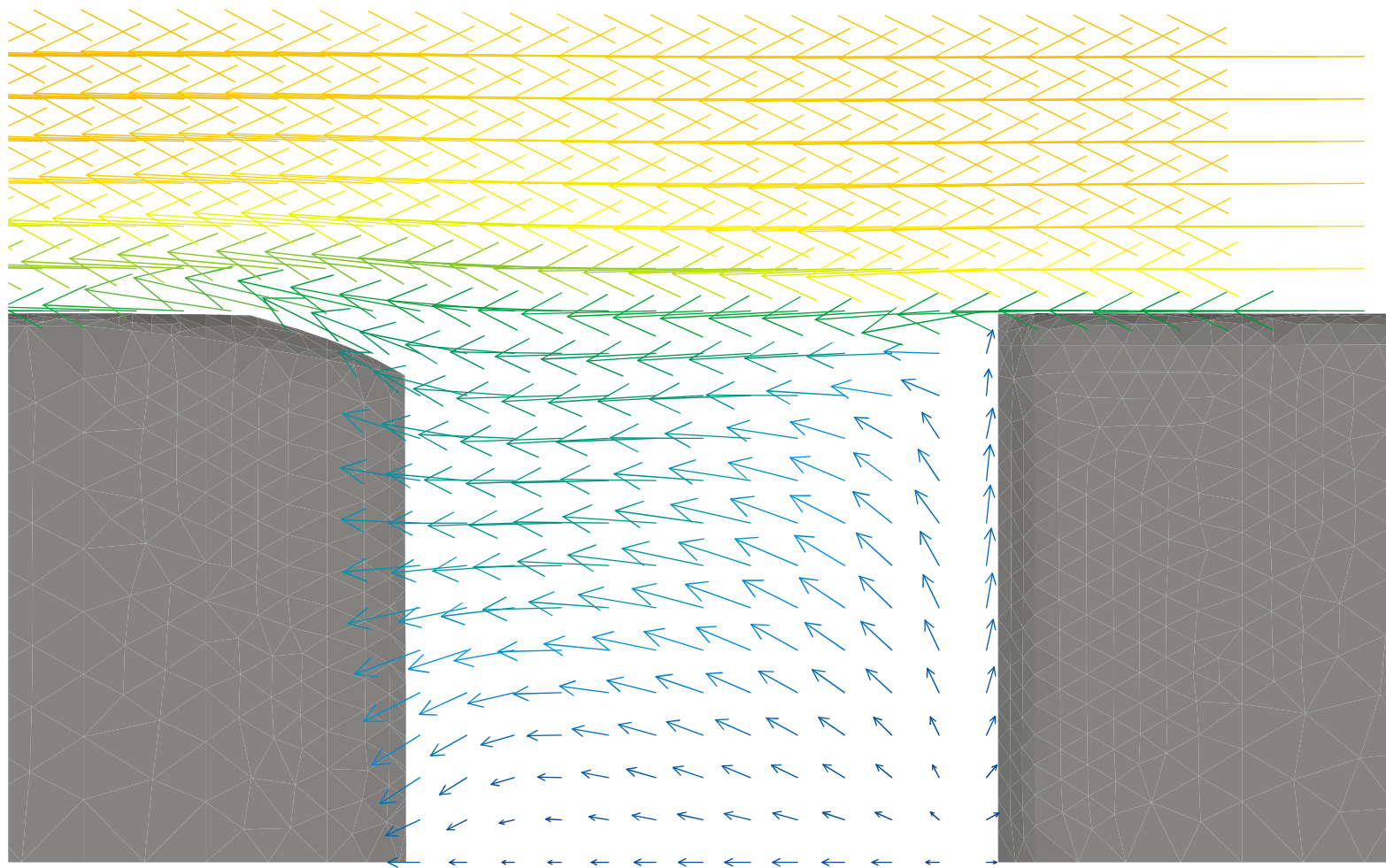
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



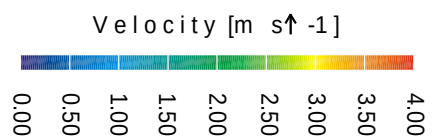
Koppelstelle $z = 0.35$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





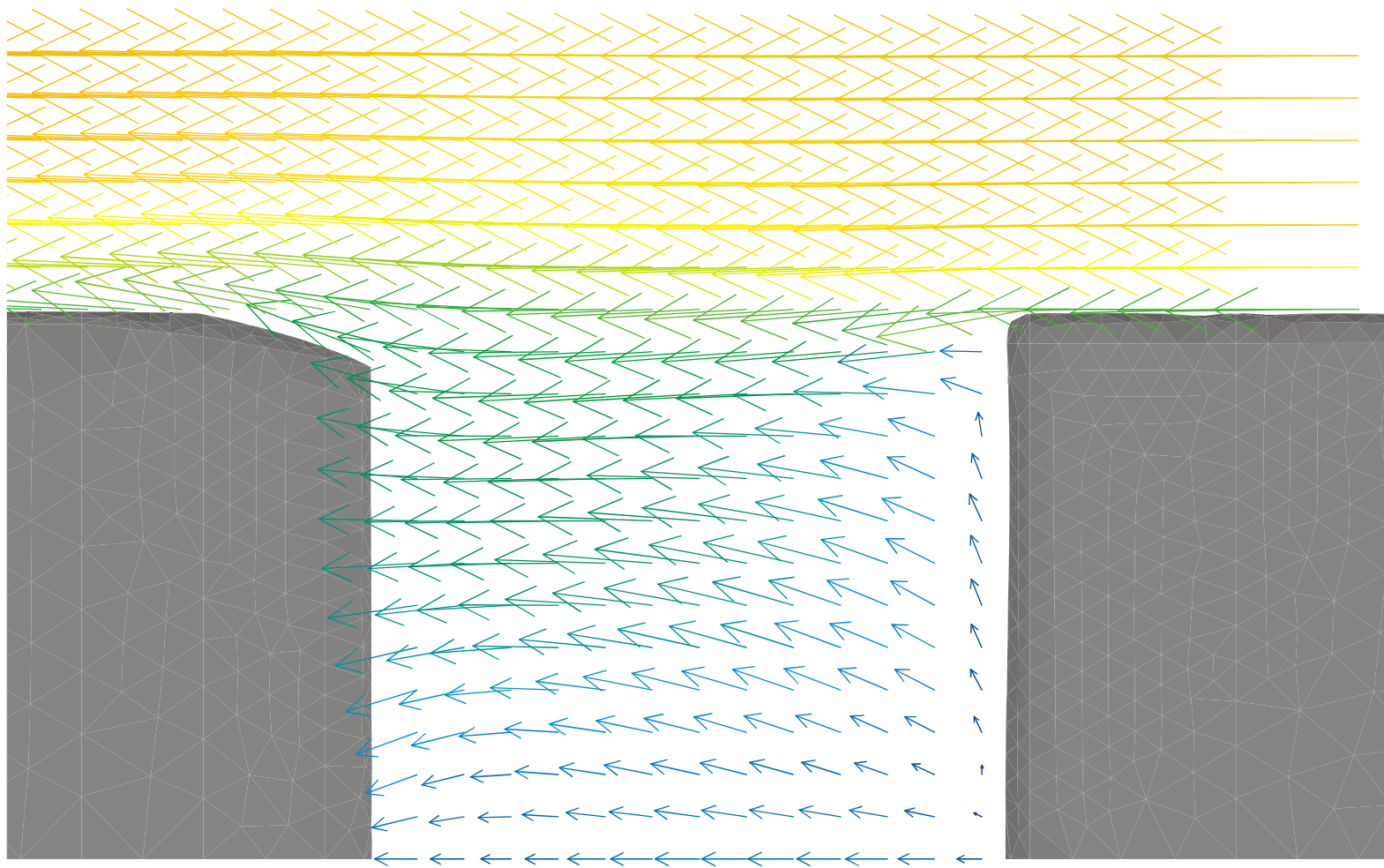
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



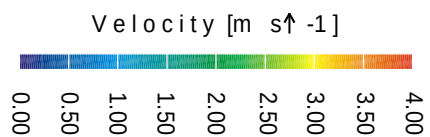
Koppelstelle $z = 0.3 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$ Faktor = 0.5

CFX 5.3





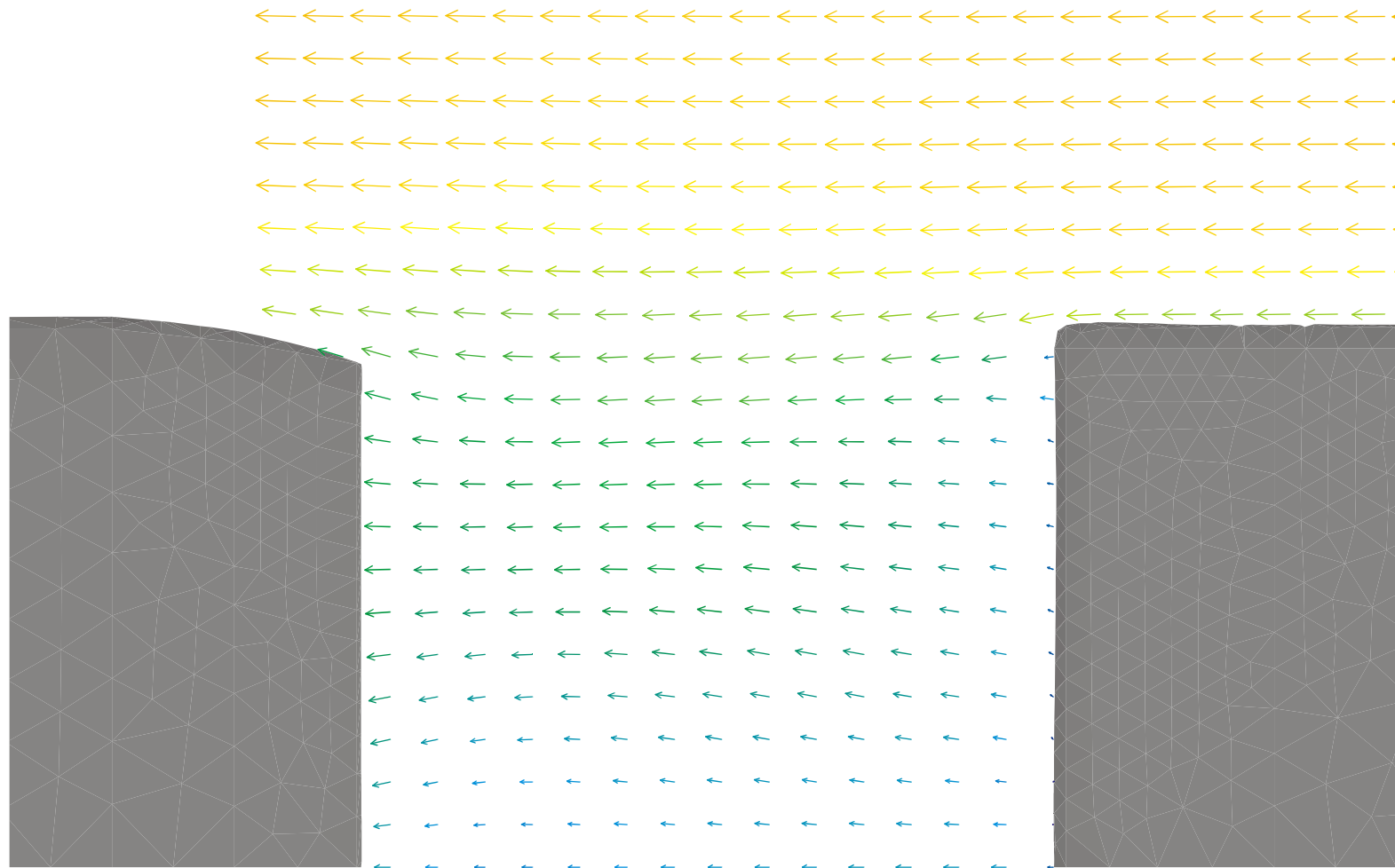
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



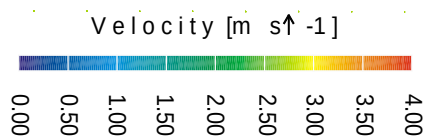
Koppelstelle $z = 0.2$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





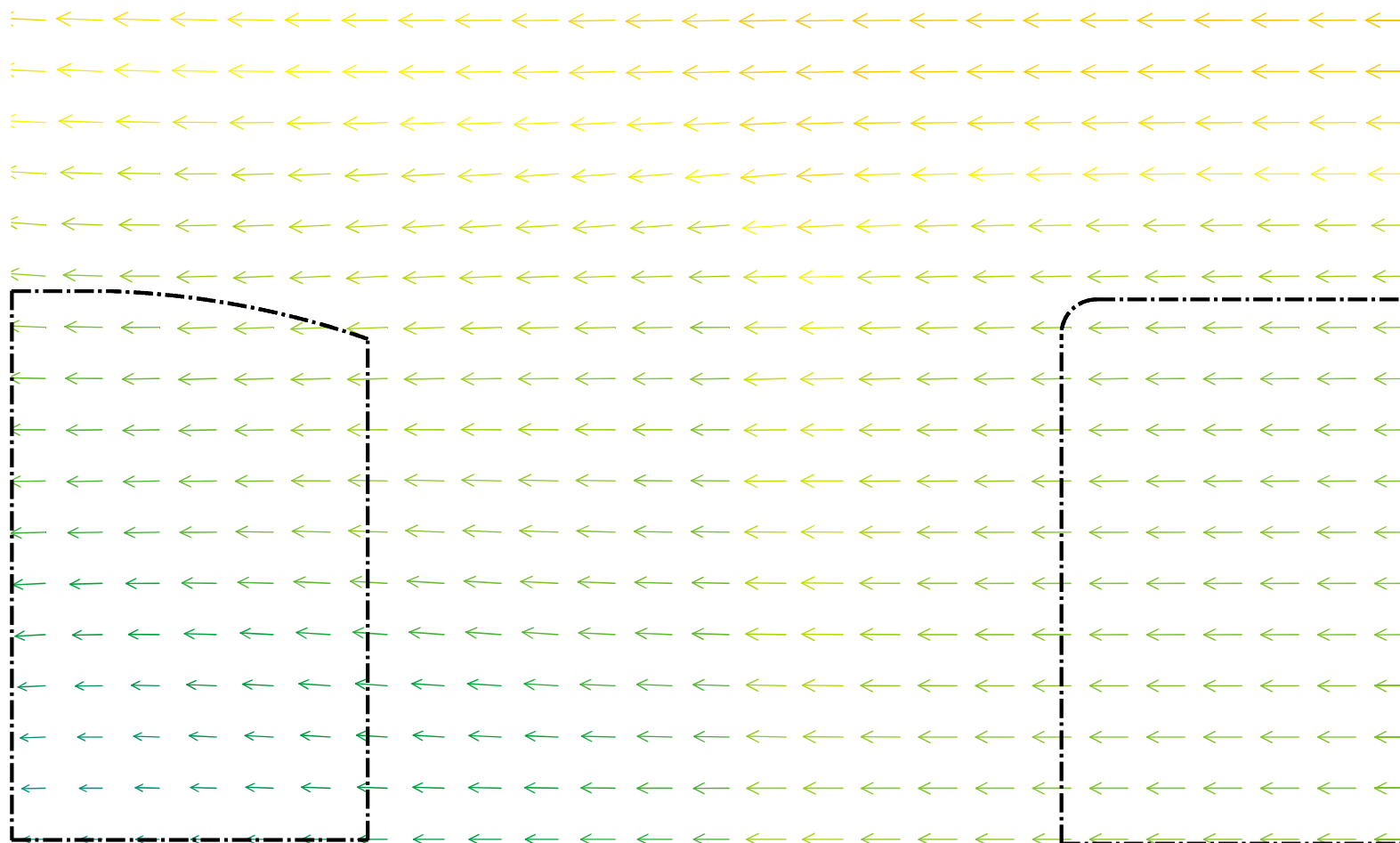
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



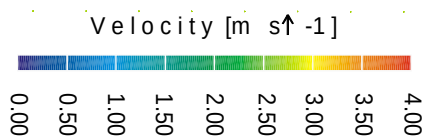
Koppelstelle $z = 0.1 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$ Faktor = 0.1

CFX 5.3





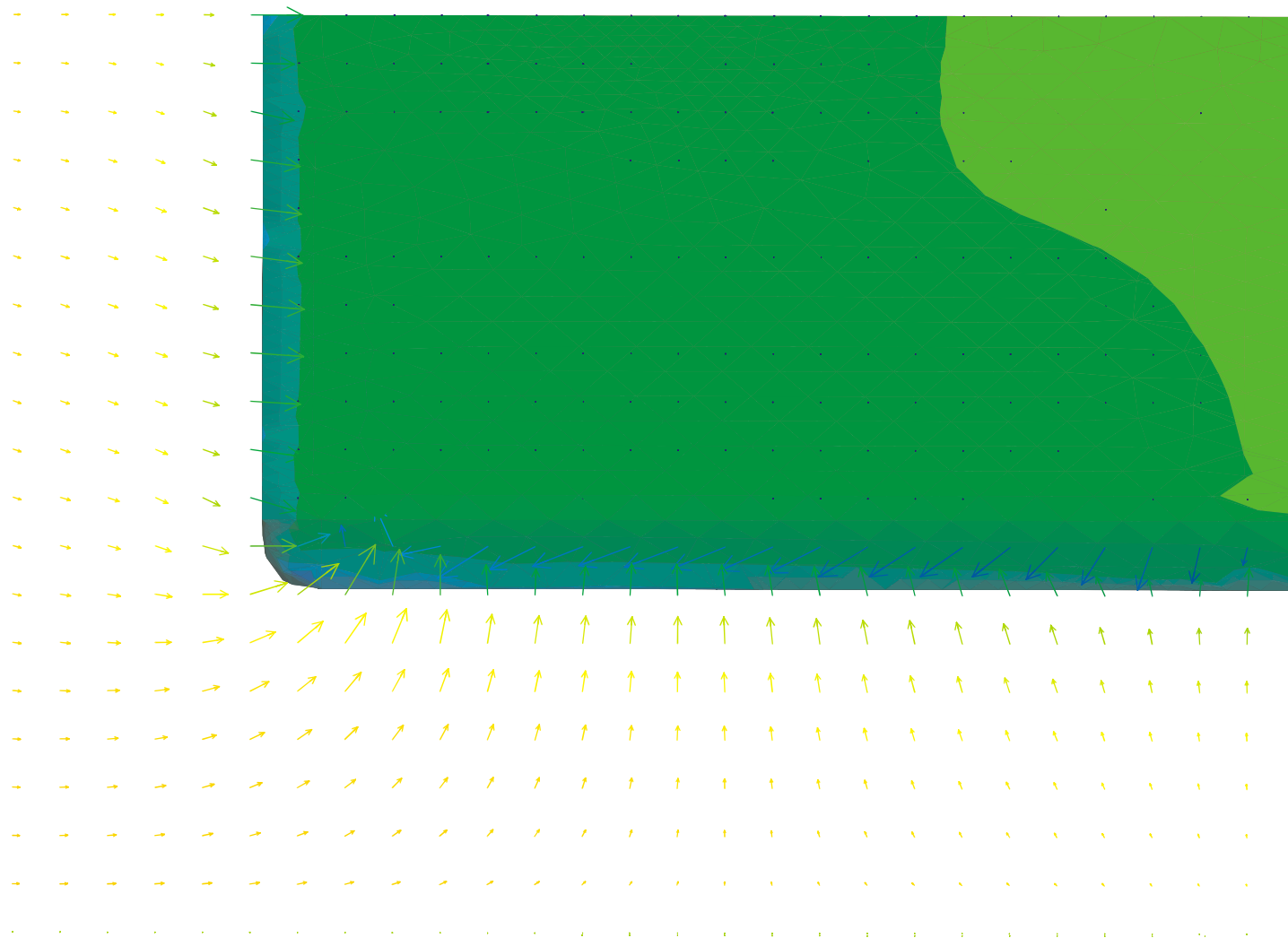
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



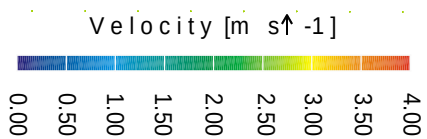
Koppelstelle $z = 0.1 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$ $h = 4.0 \text{ m}$

CFX 5.3





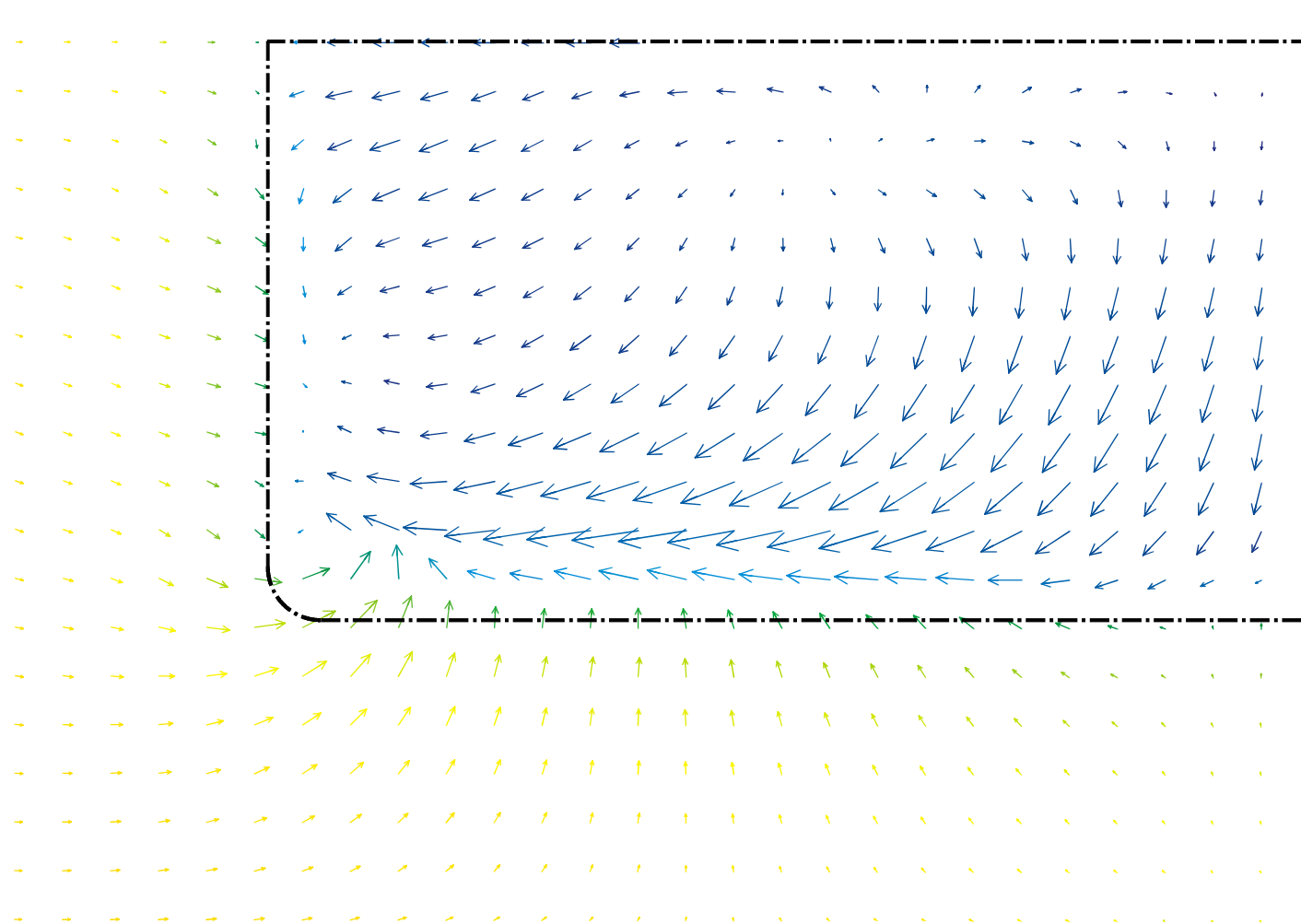
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



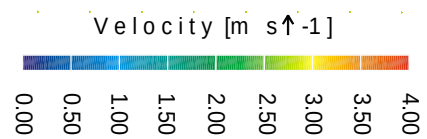
Koppelstelle y = 85.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





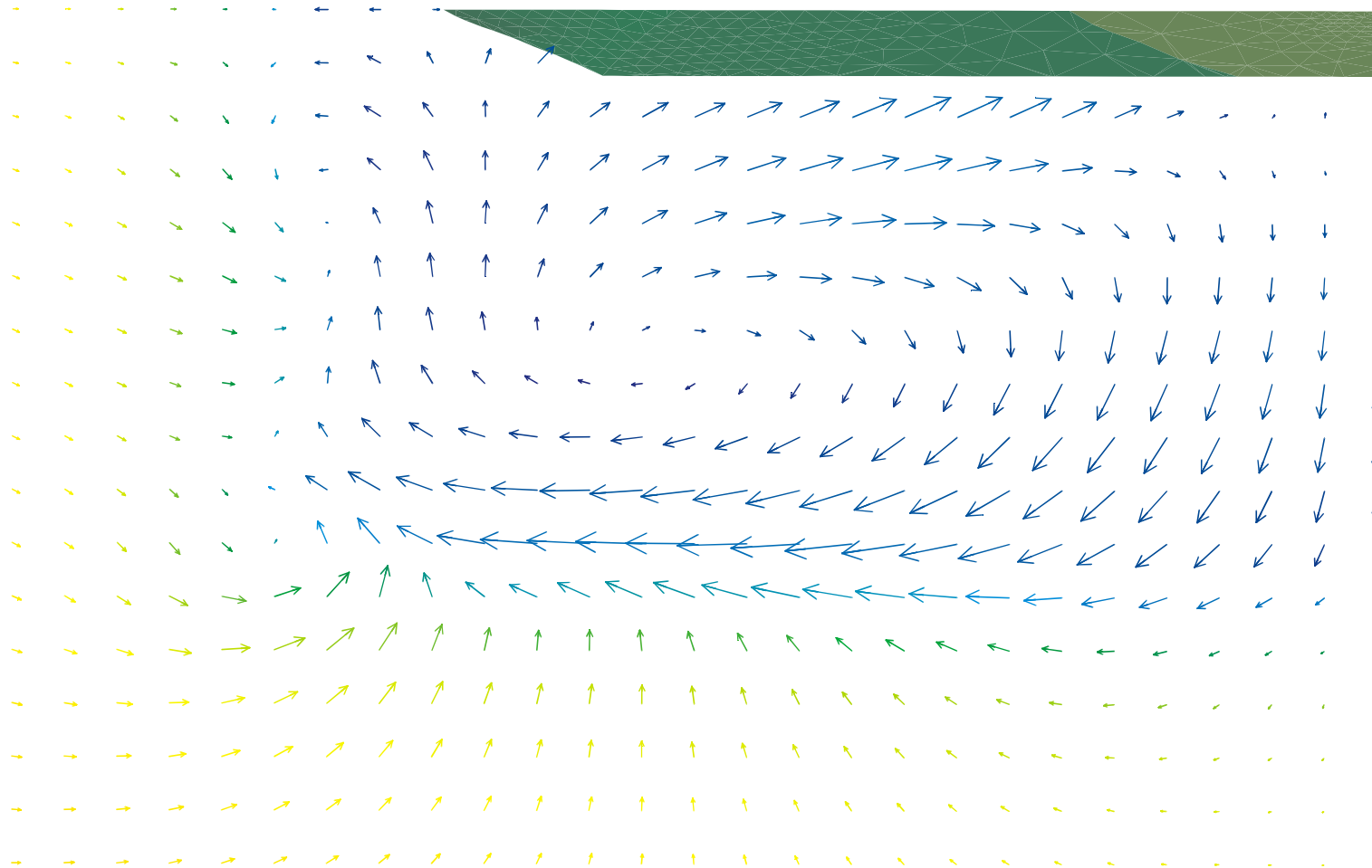
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



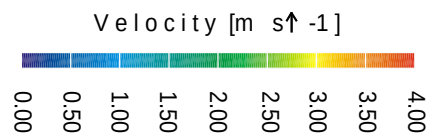
Koppelstelle $y = 84.5$ m $V = 2.78$ m/s $h = 4.0$ m Faktor = 0.5

CFX 5.3





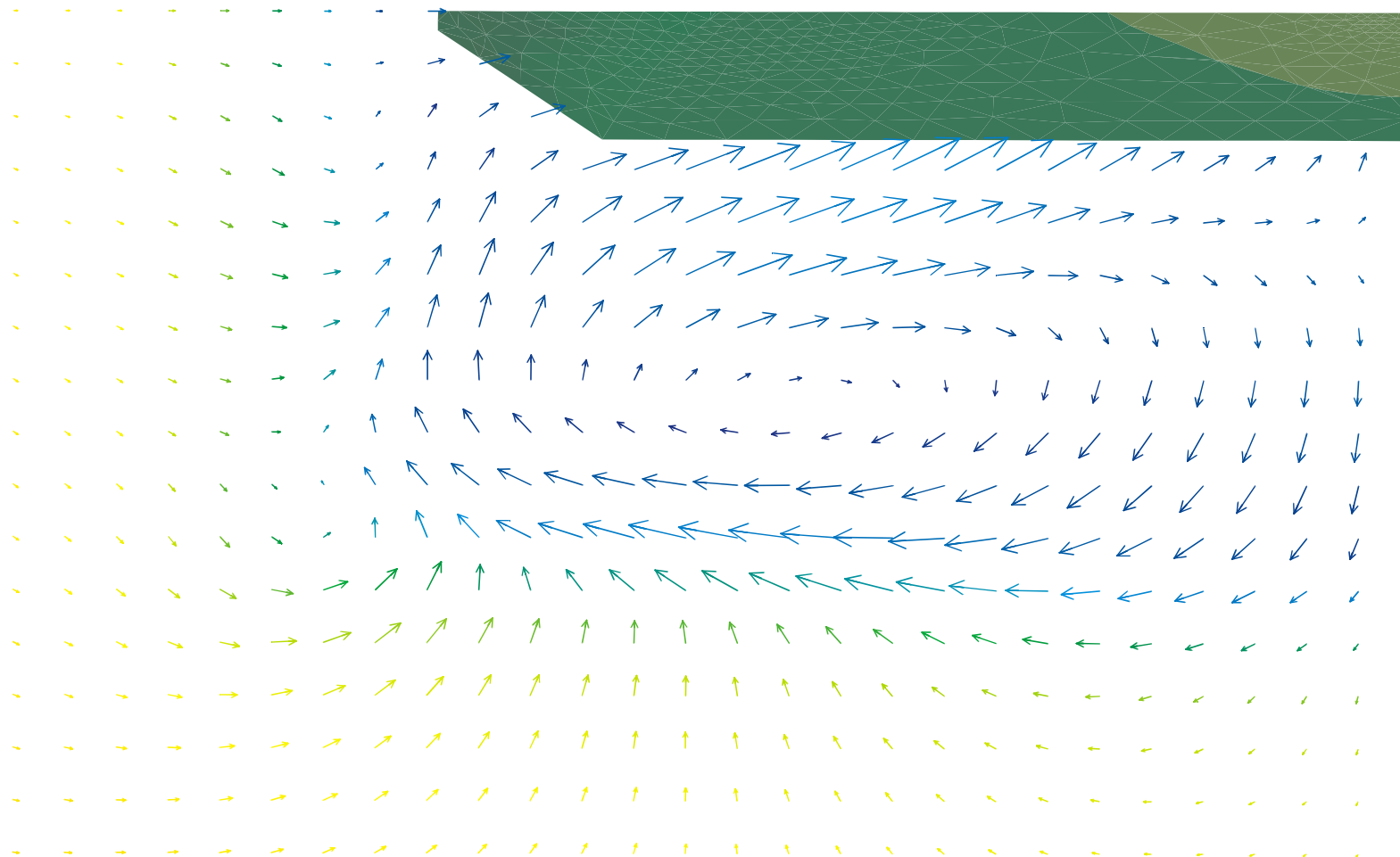
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



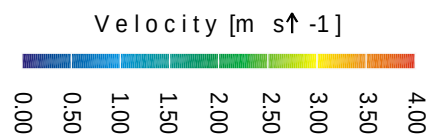
Koppelstelle x = 84.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





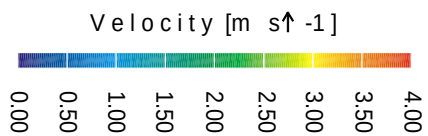
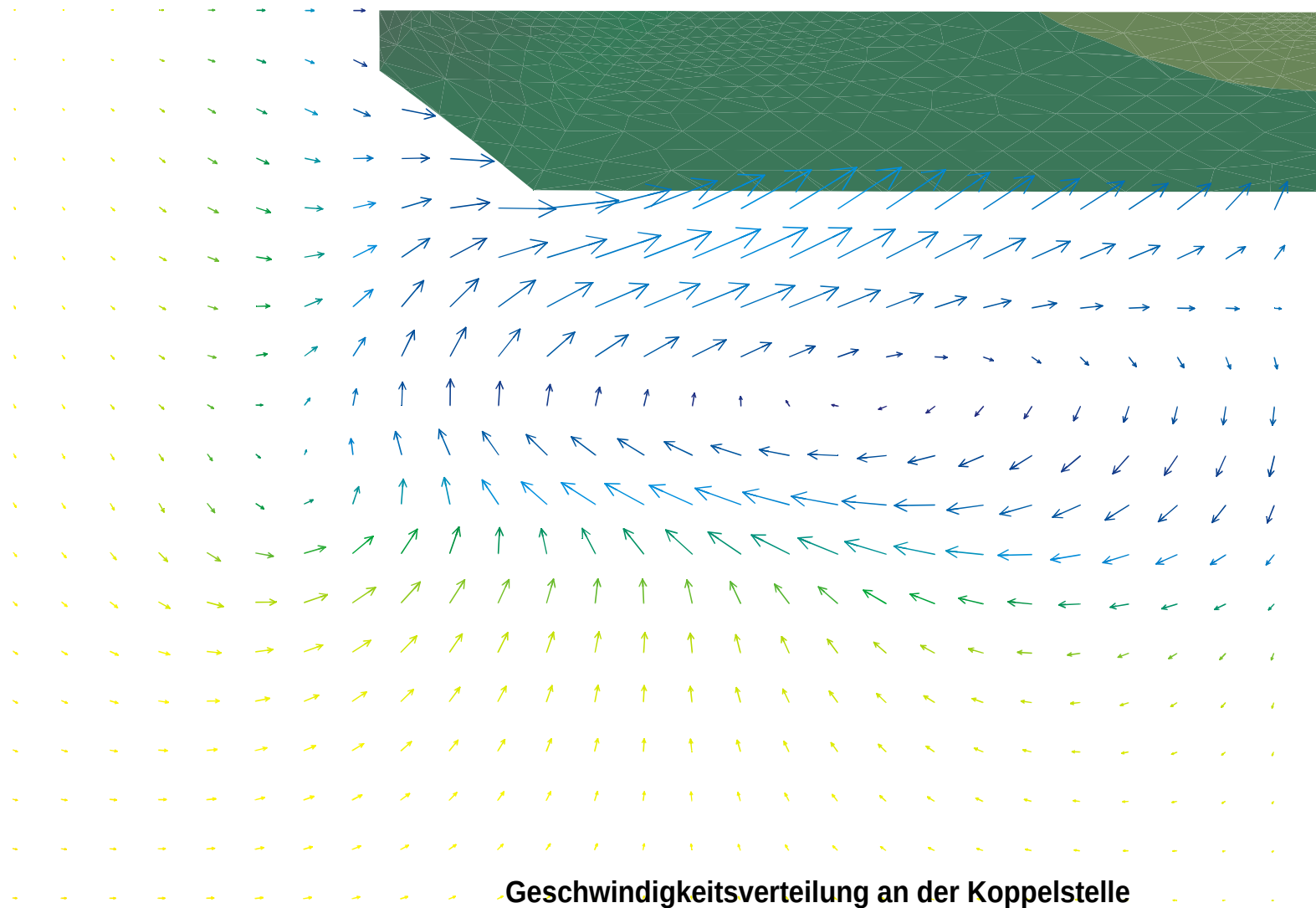
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



Koppelstelle x = 83.5 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3

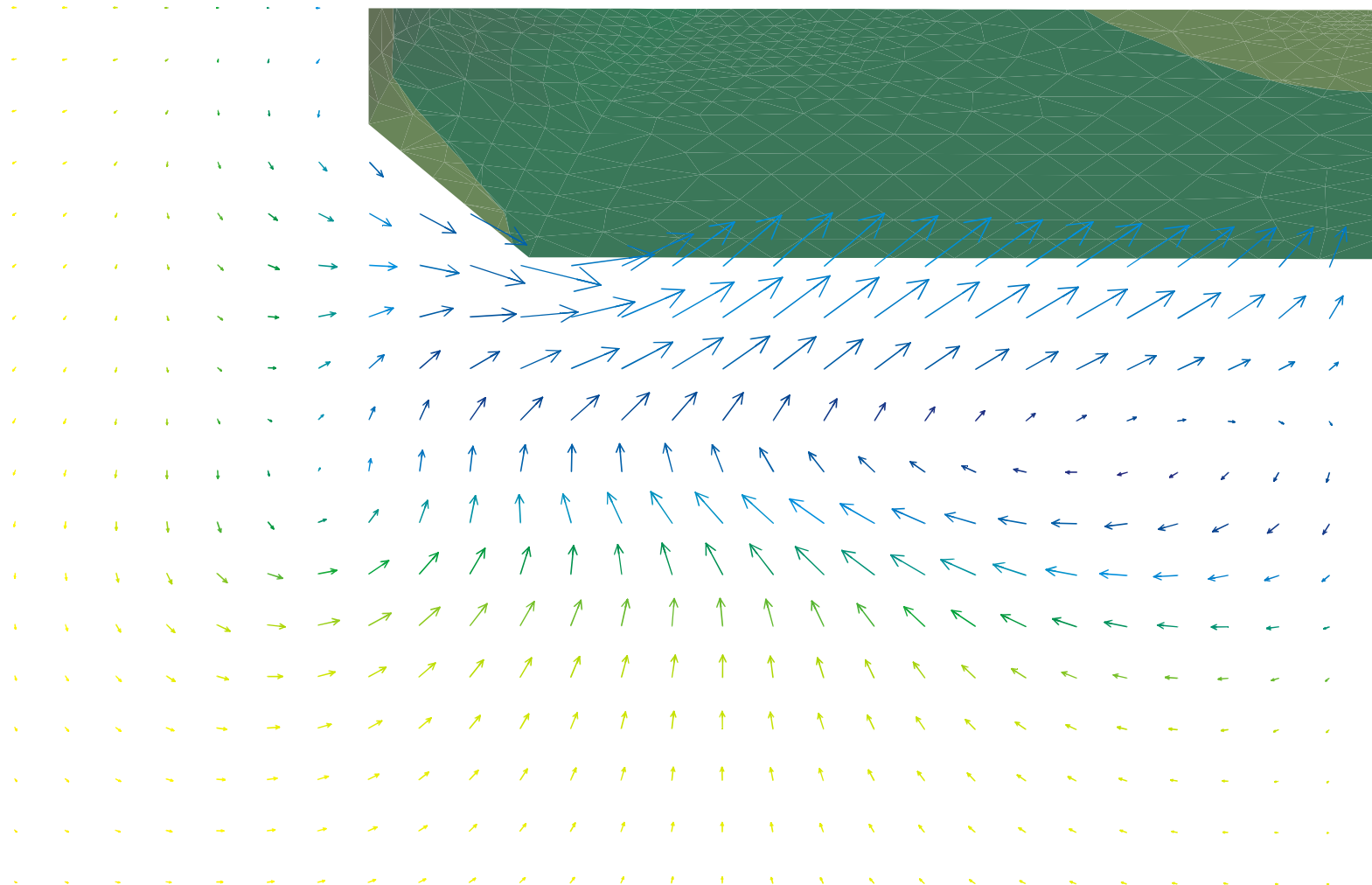




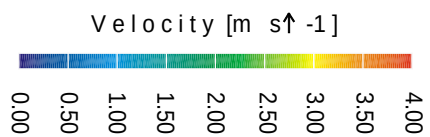
Koppelstelle x = 83.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





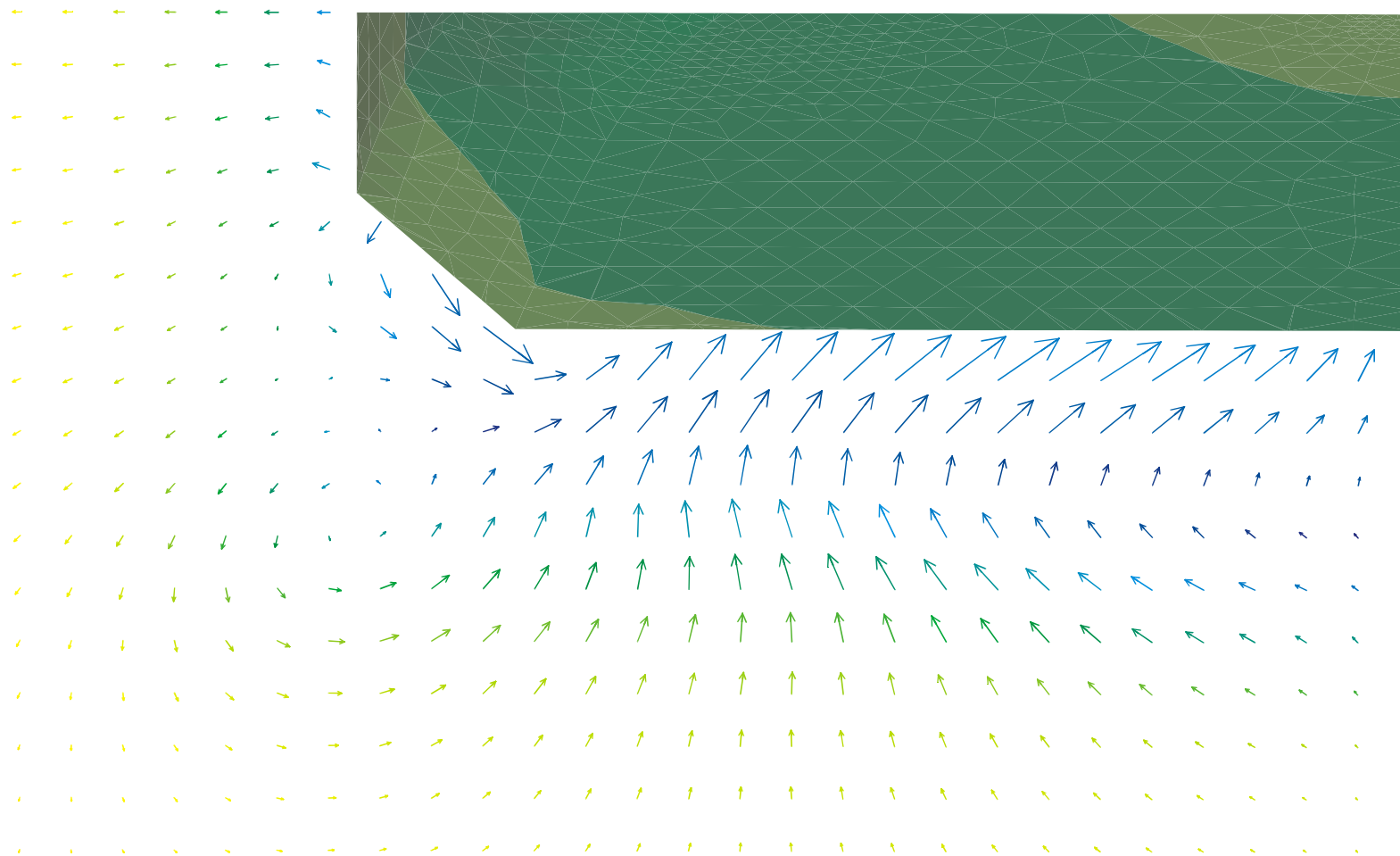
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



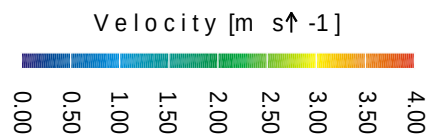
Koppelstelle x = 82.5 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





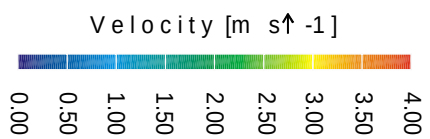
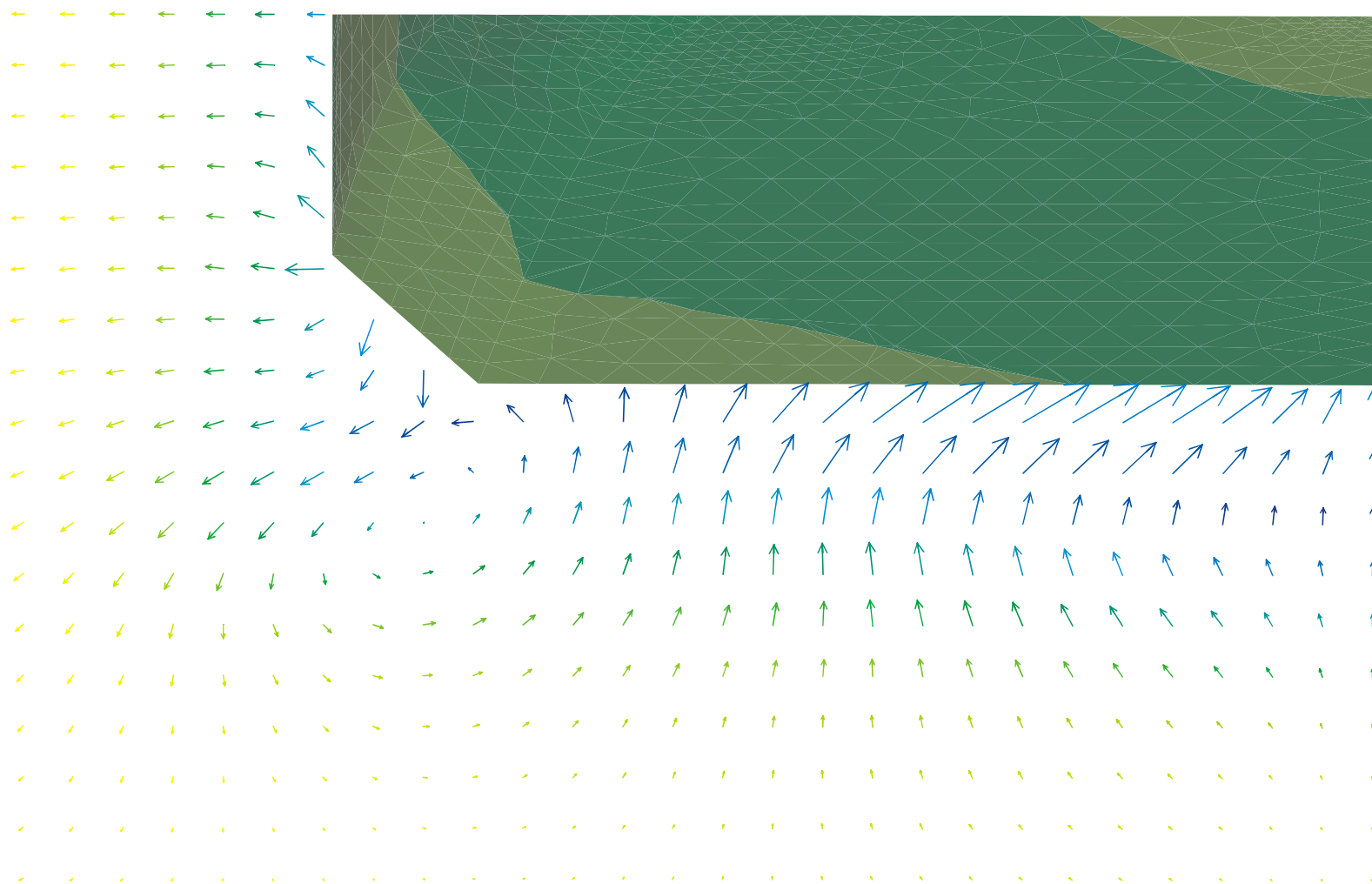
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



Koppelstelle y = 82.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3

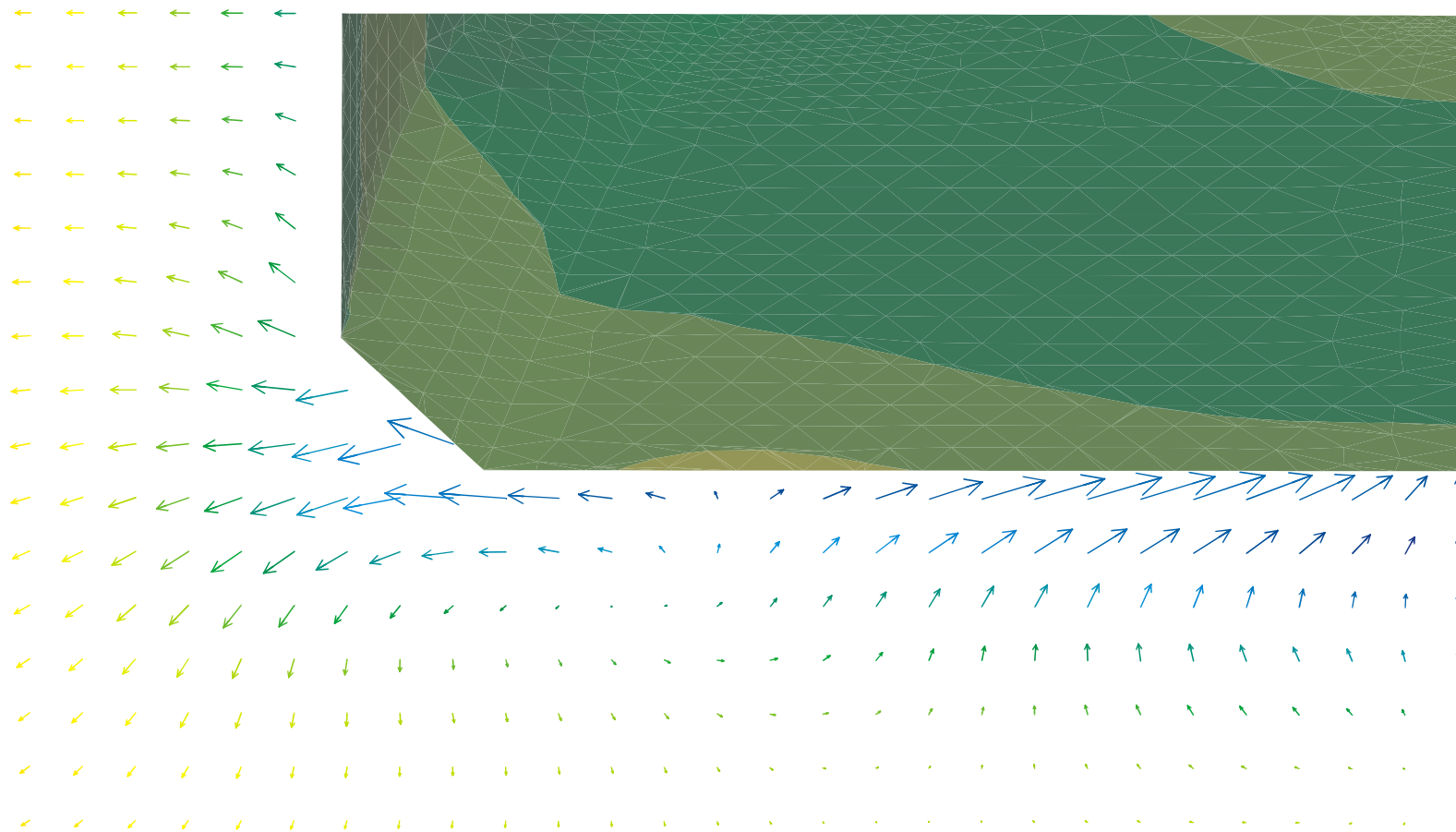




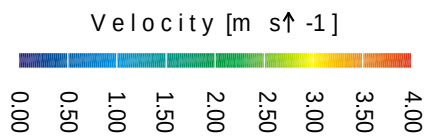
Koppelstelle x = 81.5 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





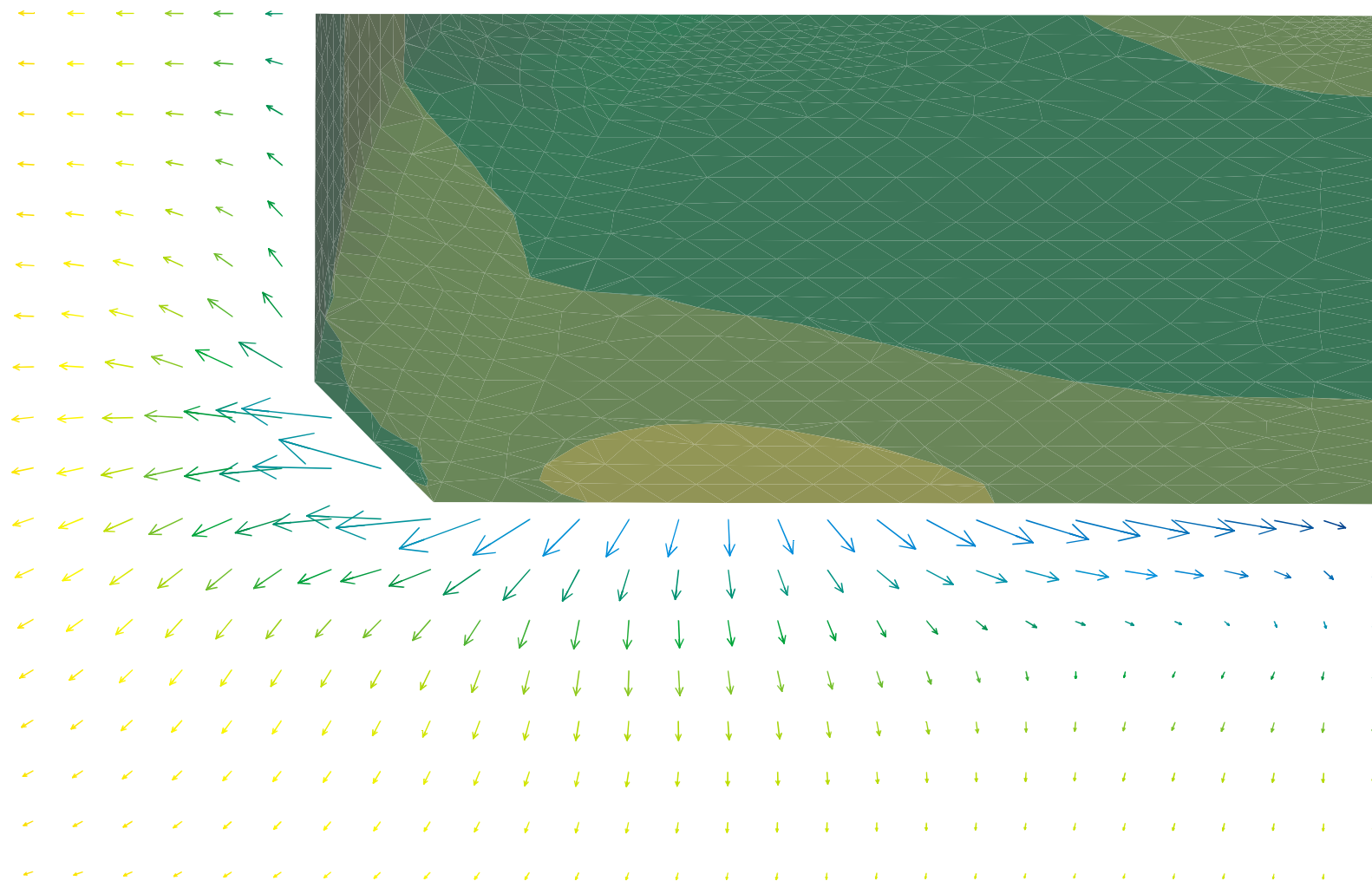
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



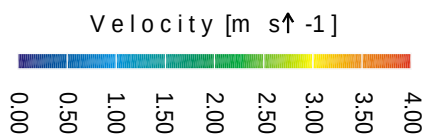
Koppelstelle x = 81.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





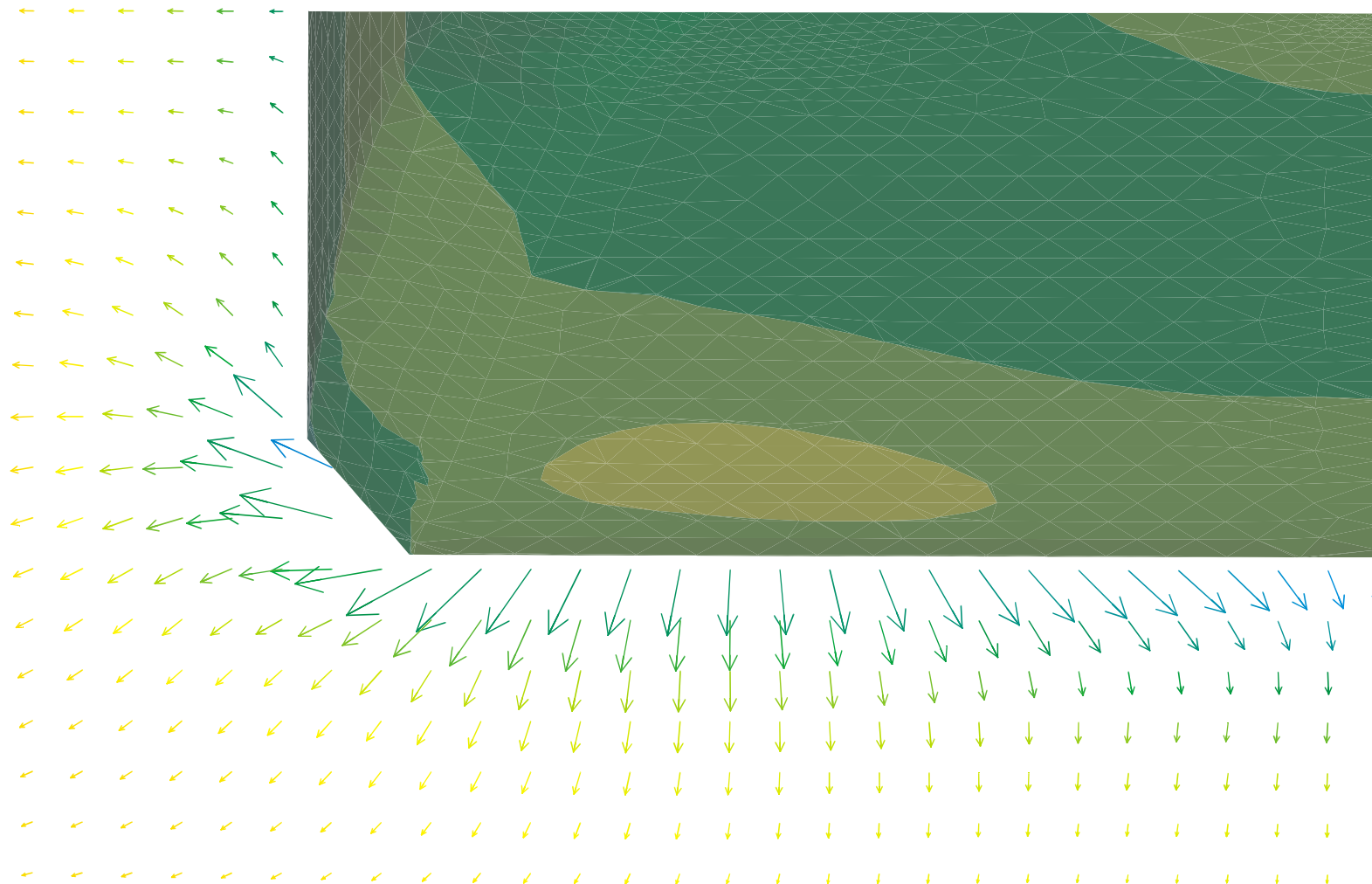
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



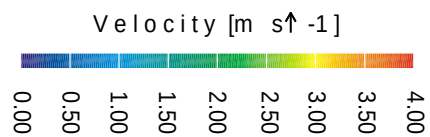
Koppelstelle x = 80.5 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





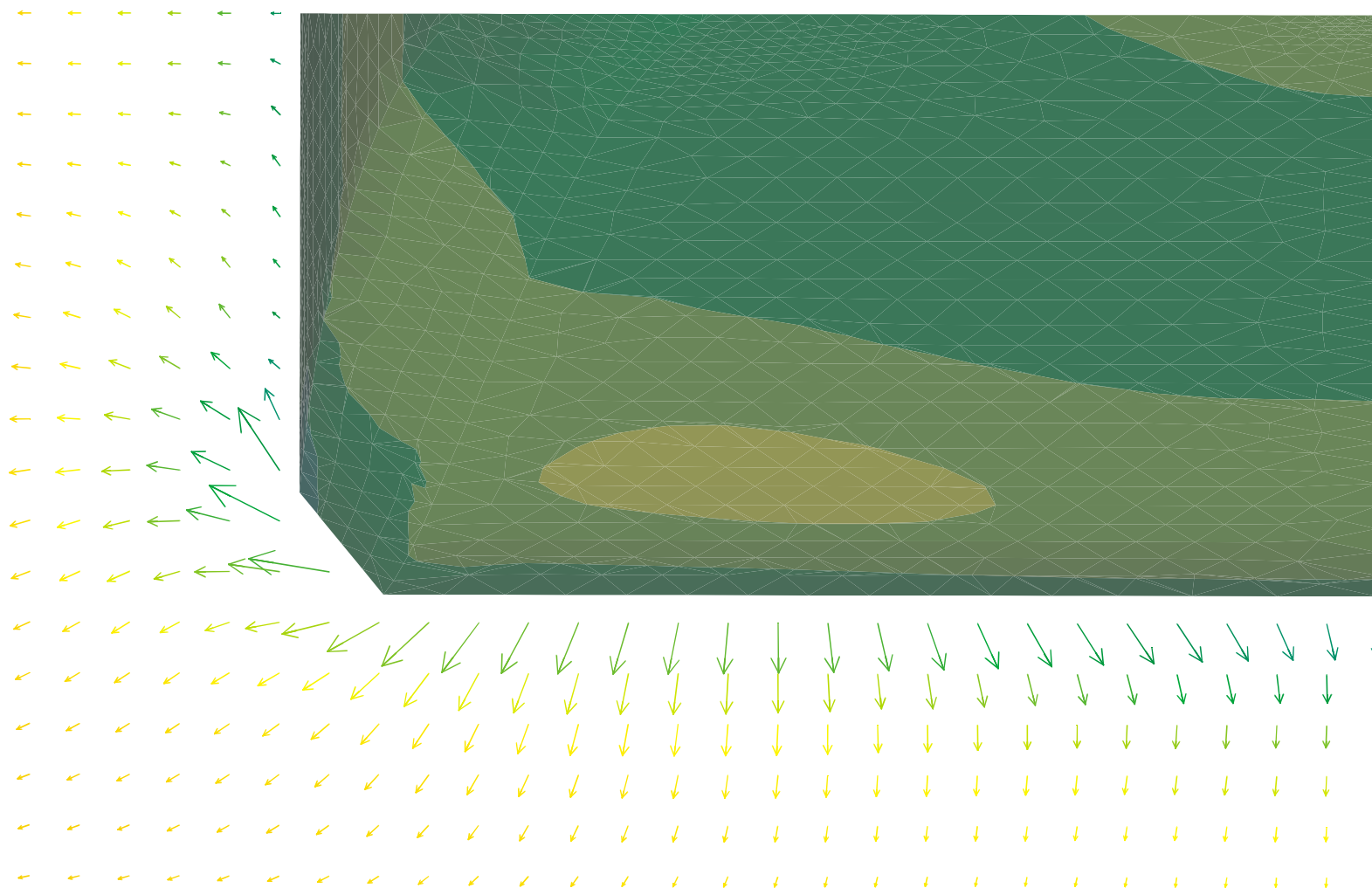
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



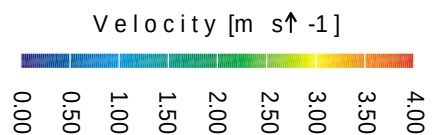
Koppelstelle x = 80.0 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3





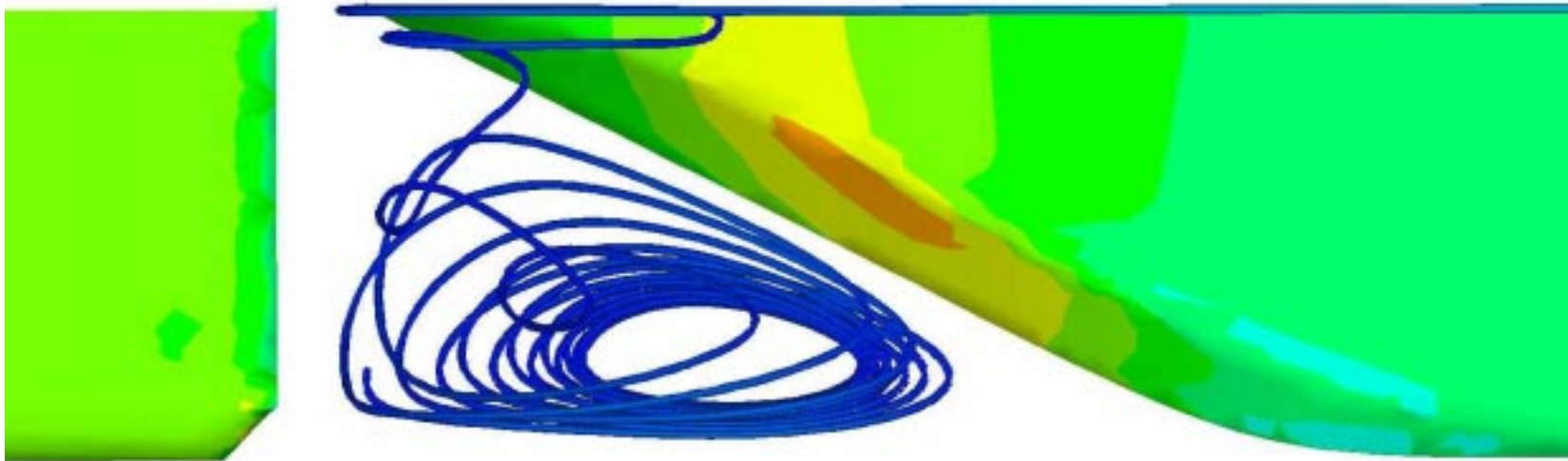
Geschwindigkeitsverteilung an der Koppelstelle



Koppelstelle x = 79.5 m V = 2.78 m/s h = 4.0 m Faktor = 0.5

CFX 5.3

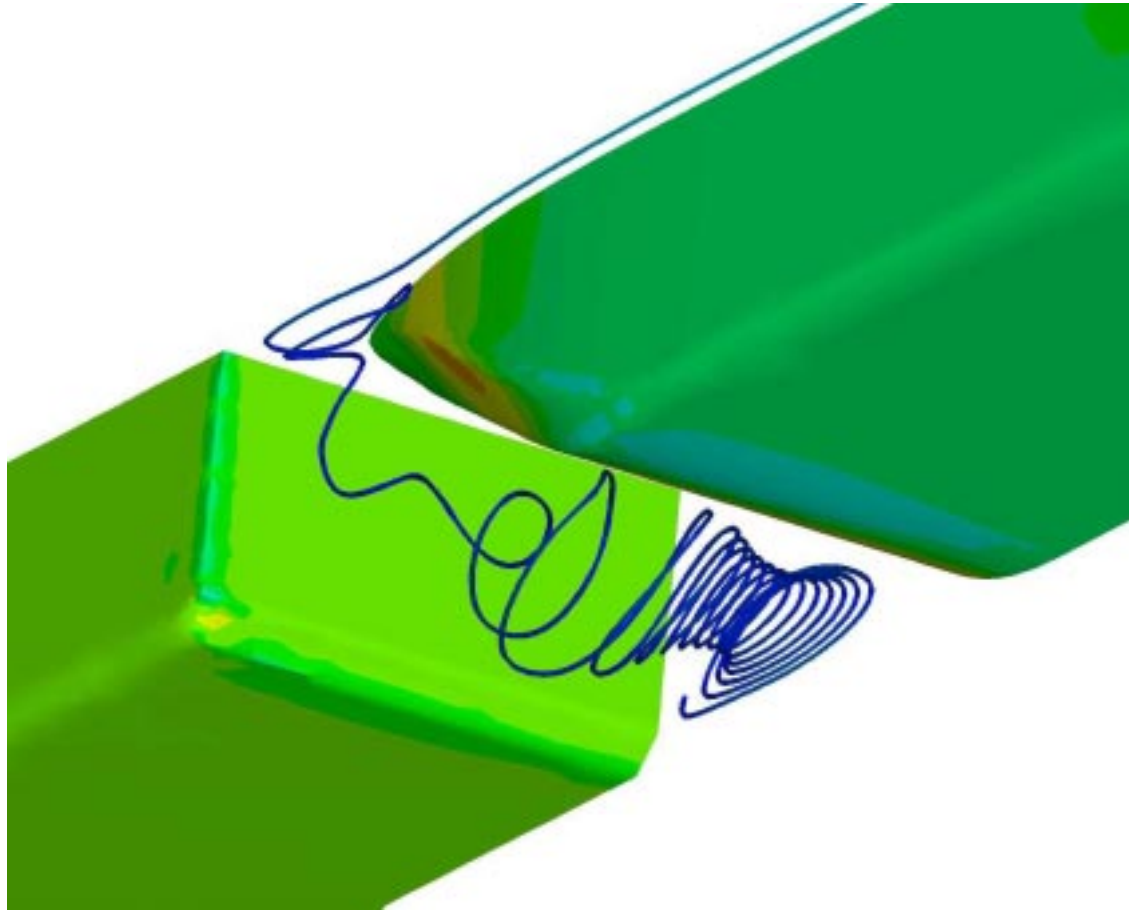




Stromlinie an der Koppelstelle

$h = 3.75 \text{ m}$ $T = 2.5 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$



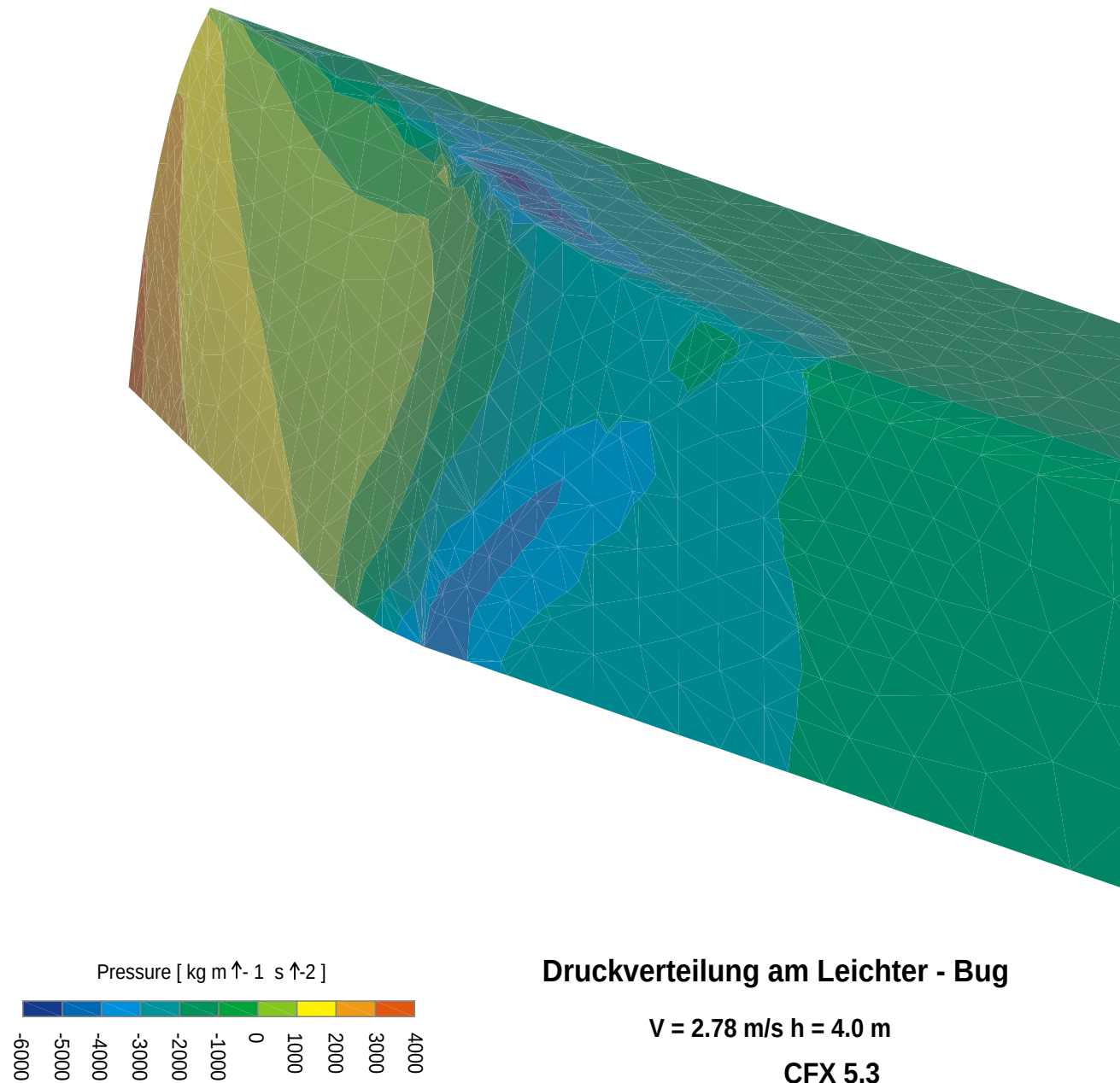


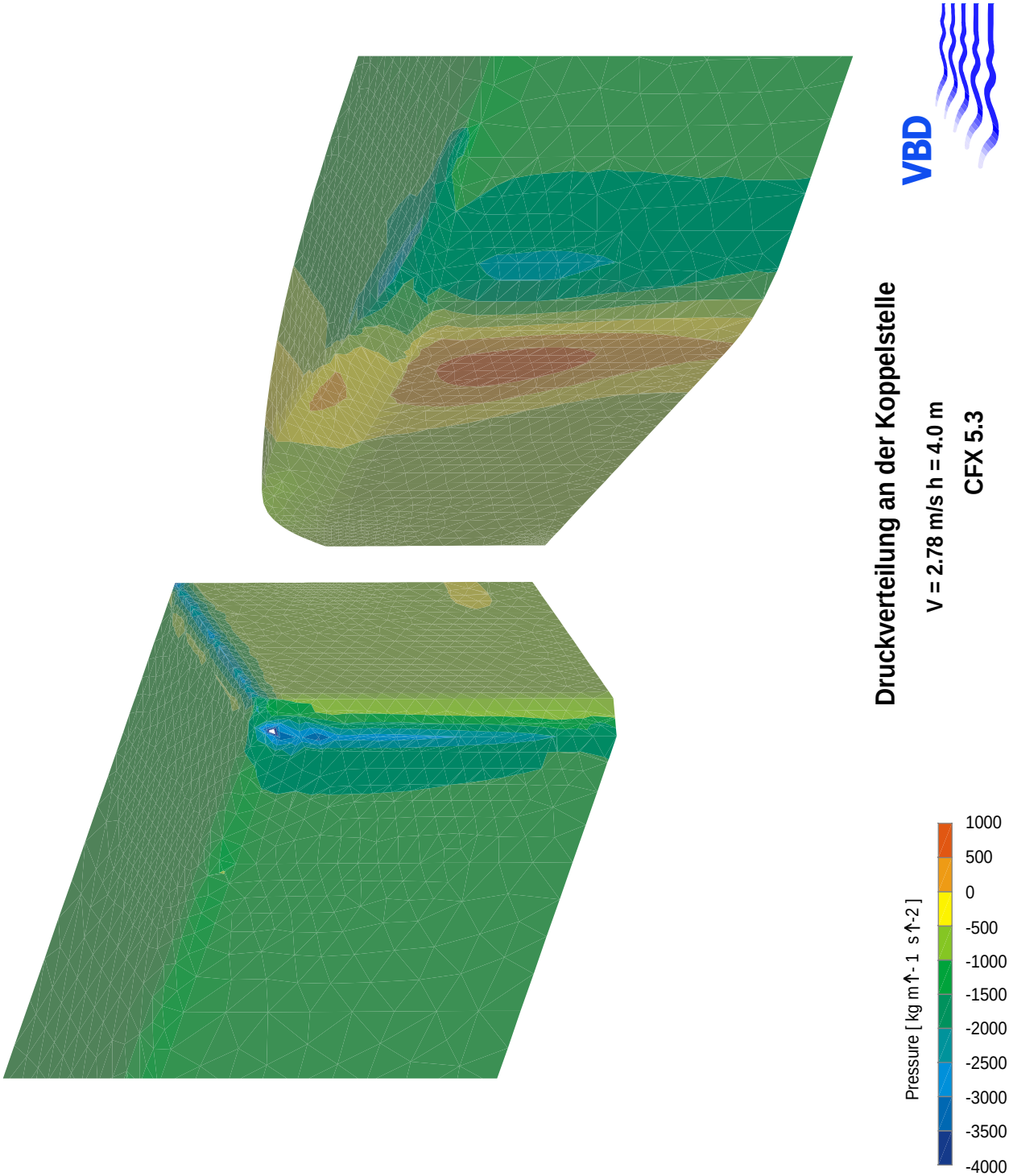
Stromlinie an der Koppelstelle

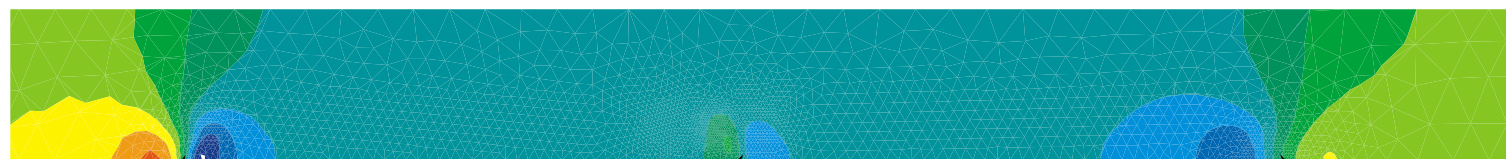
$h = 3.75 \text{ m}$ $T = 2.5 \text{ m}$ $V = 2.78 \text{ m/s}$

VBD









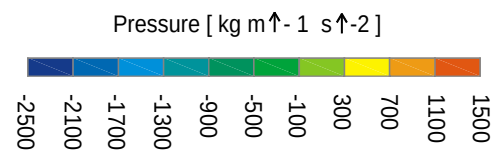
Bug

Heck/Bug

Heck

Leichter

Motorschiff



Druckverteilung am Boden

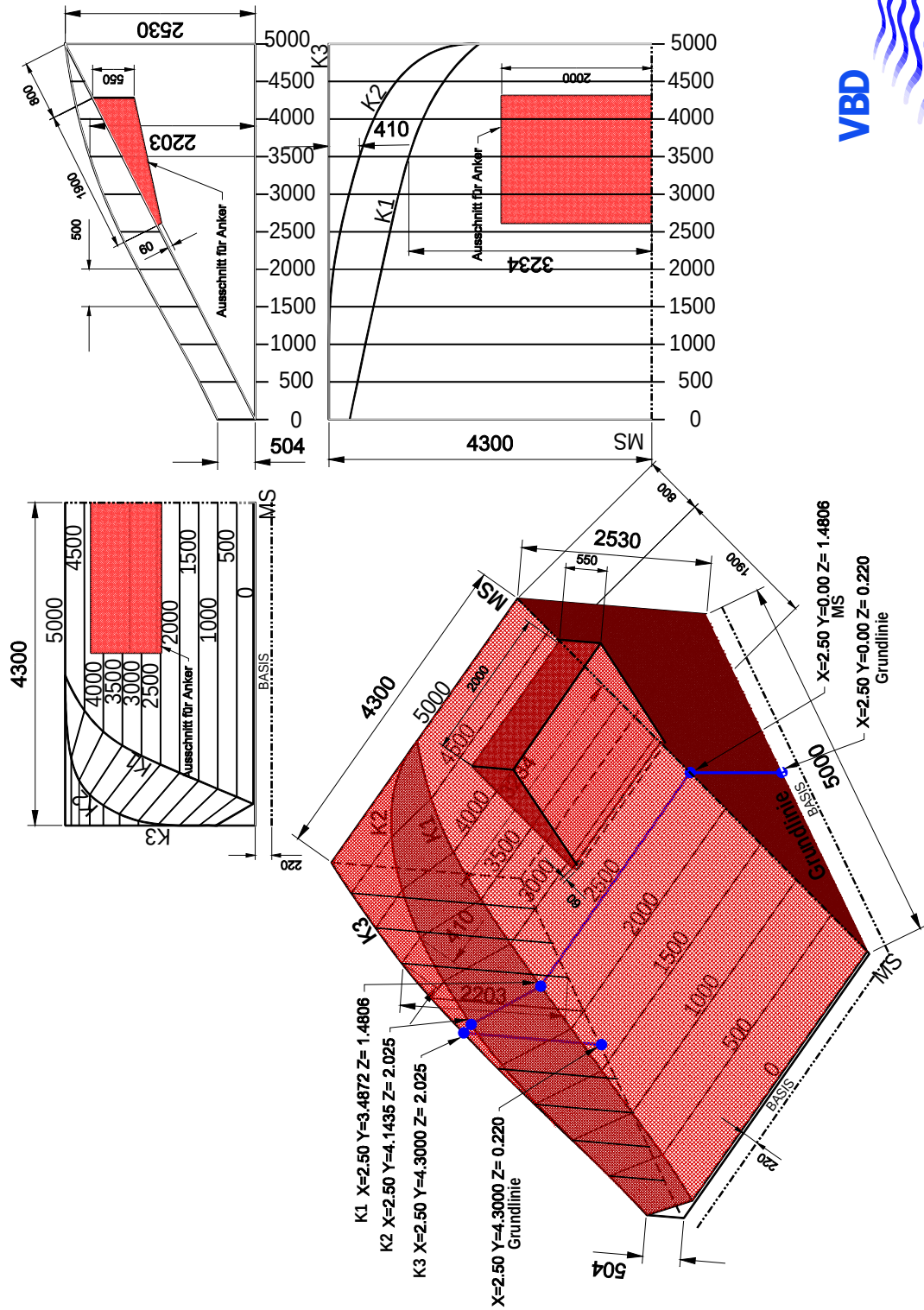
V = 2.78 m/s h = 4.0 m

CFX 5.3





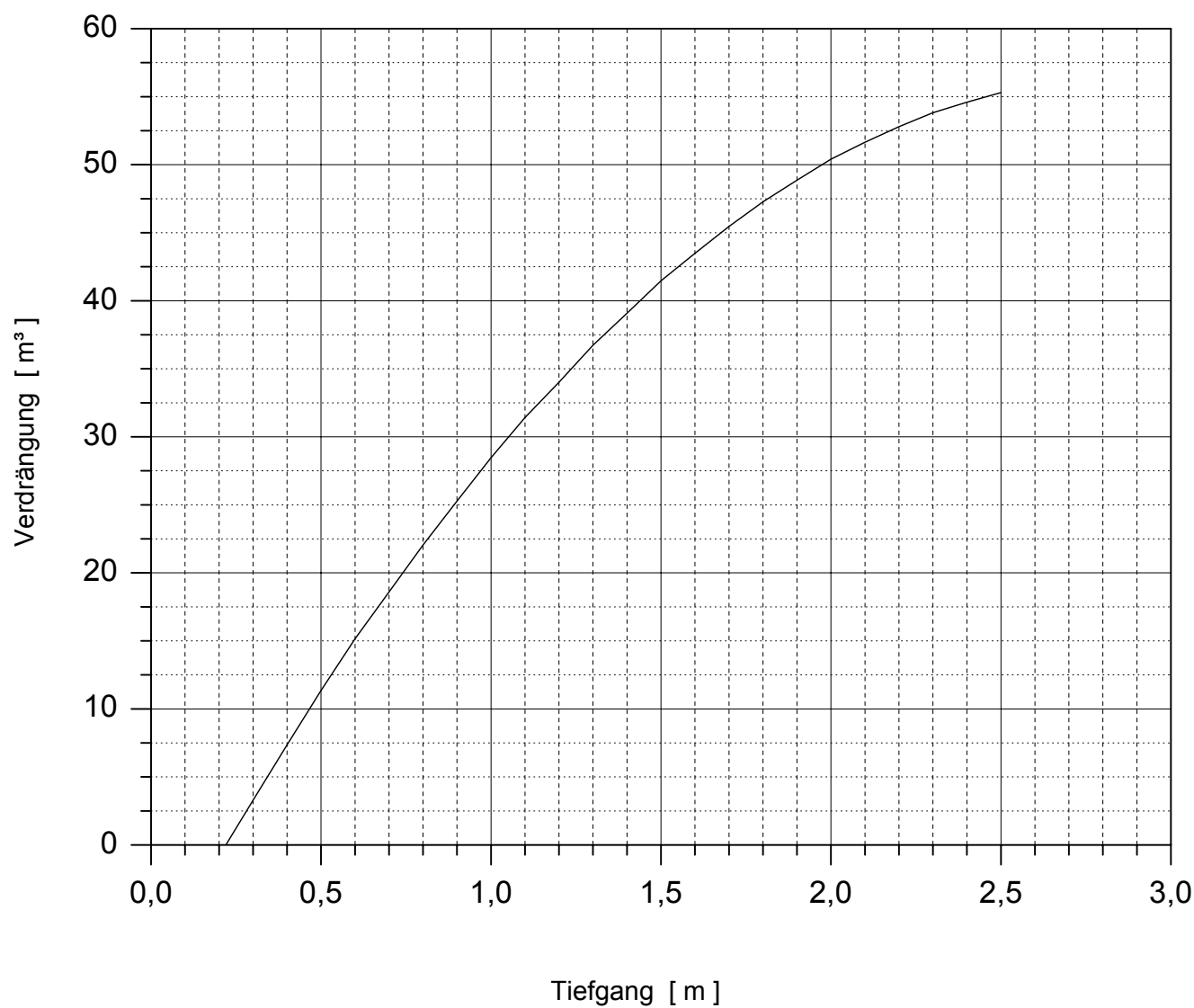
Formstück für MS "Niedersachsen 1"





Formstück Niedersachsen

Verdrängung



Anmerkung:

Die Basis des Volumenkörpers liegt bei dem Schiffstiefgang $T = 220 \text{ mm}$

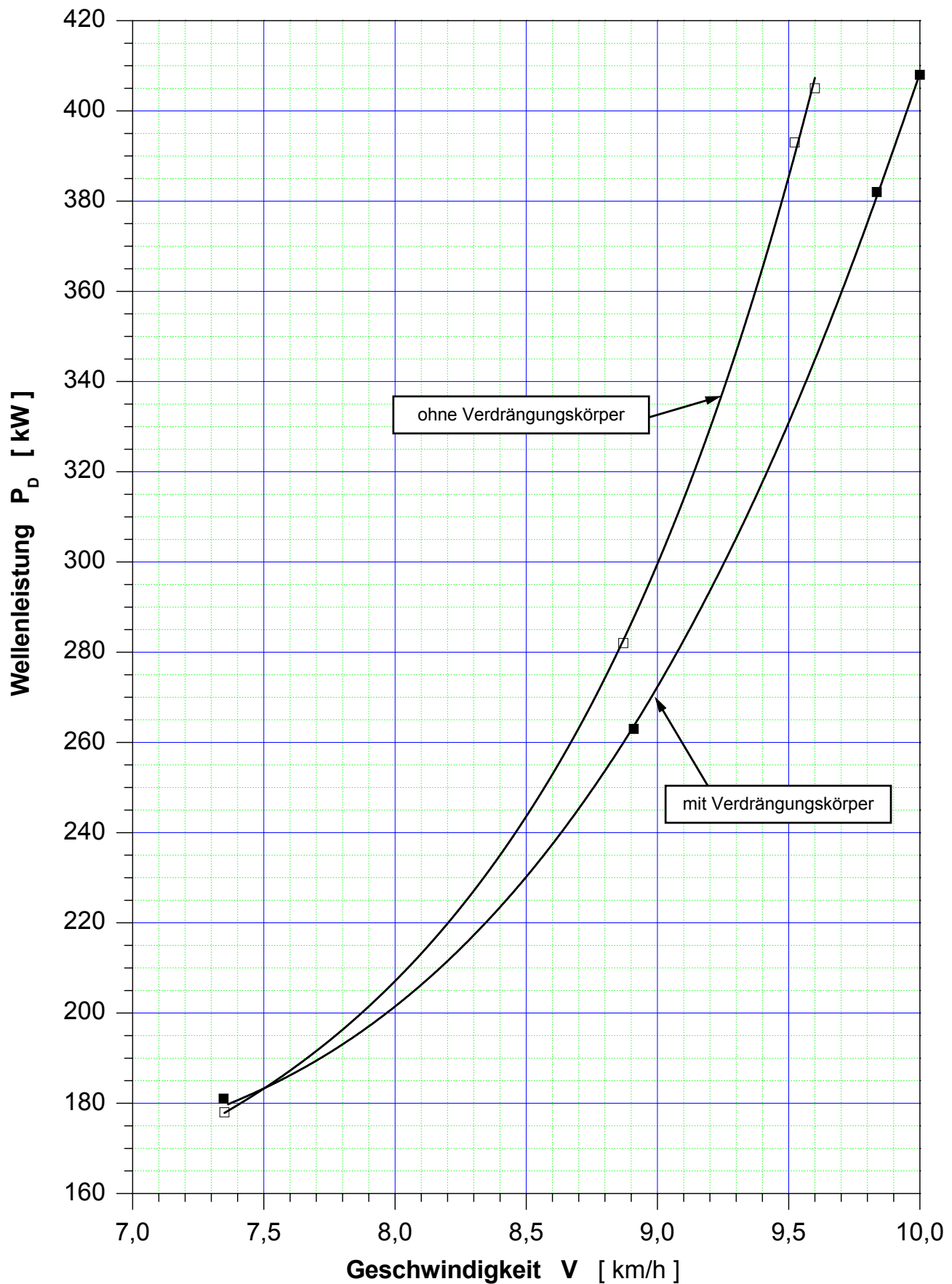


Anl. 109: Volumenkörper



Anl. 110: Volumenkörper am Vorschiff

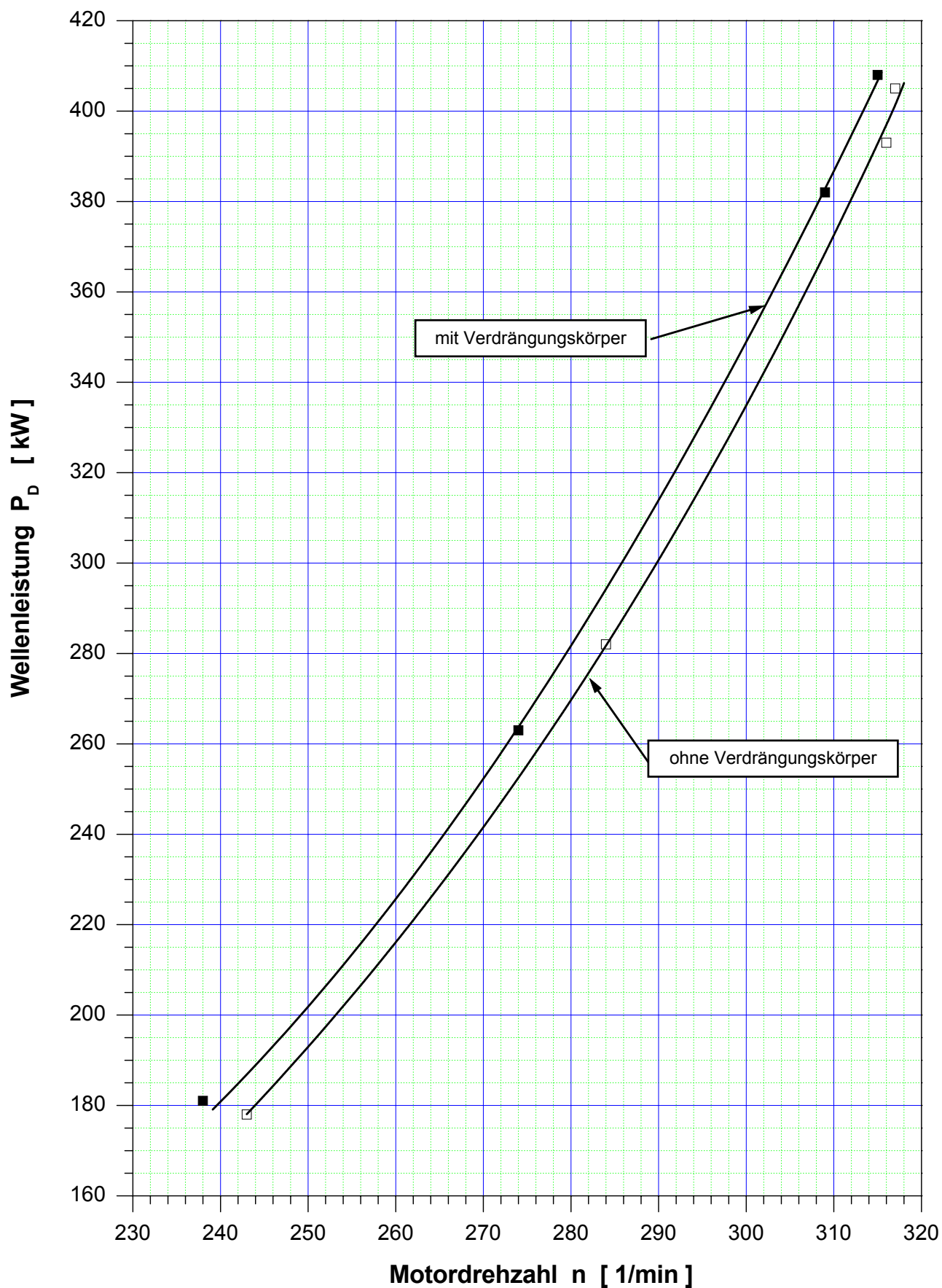
MS Niedersachsen 1 L x B x T = 85 x 9 x 2,4 m
 SL Hannover 1 L x B x T = 77 x 9 x 2,5 m
 Versuchsfahrten im Rechteck - Kanalprofil



MS Niedersachsen 1 L x B x T = 85 x 9 x 2,4 m

SL Hannover 1 L x B x T = 77 x 9 x 2,5 m

Versuchsfahrten im Rechteck - Kanalprofil



Wirbelbildung an der Koppelstelle



Abb. 113: Koppelstelle frei



Abb. 114: Koppelstelle mit Volumenkörper