

DST, Duisburg
Name der Forschungsstelle(n)

15175 N / 4

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.03.2007 - 28.02.2009

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01.03.2007 - 28.02.2009

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

☒ Normalverfahren

☐ Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Entwicklung eines Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

☐ ist beigelegt

☐ liegt bereits vor

☐ wird fristgerecht nachgereicht

Duisburg, 15.06.2009

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

DST - Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

**Entwicklung eines Koppelverbandes
für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr**

**Bericht 1879
Juni 2009**

1. Zusammenfassung.....	3
2. Einleitung und Aufgabenstellung	4
3. Ermittlung der Rahmenbedingungen	6
3.1 Abschätzung der zu erwartenden Ladungsmengen.....	6
3.2 Ermittlung der Infrastrukturbedingungen.....	7
3.3 Seegangsbedingungen im Jade-Gebiet.....	10
3.4 Technische Vorschriften und Bestimmungen.....	12
3.5 Beitrag des projektbegleitenden Ausschusses.....	12
4. Entwurf des Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr	13
4.1 Hauptdaten	13
4.2 Schiffsform.....	14
4.3 Tragfähigkeit	17
4.4 Entwurf der Vorrichtungen für eine seefähige Koppelvorrichtung	18
4.5 Vorversuche zur Erprobung der Vorrichtung.....	24
5. Berechnung des Verhaltens im Seegang	26
5.1 Berechnungsmethoden.....	26
5.2 Rahmenbedingungen der Berechnungen	27
5.3 Auswertung der Seegangs-Statistik	28
5.4 Berechnungen.....	34
5.5 Ergebnisse	36
6. Modellversuche	38
6.1 Widerstands- und Propulsionsversuche.....	39
6.2 Manövierversuche	40
6.3 Seegangsversuche mit dem frei fahrenden Modell	42
6.4 Konstruktive Gestaltung der seefähigen Koppelvorrichtung	48
6.5 Schleppverkehr als Alternative zur seefähigen Koppelvorrichtung	48
7. Wirtschaftliche Beurteilung.....	49
7.1 Einleitung	49
7.2 Einsatz des FSKV - Vergleich der Transportkosten mit anderen Verkehrsträgern	50
7.3 Zusammenfassende Bewertung der Wirtschaftlichkeit des FSKV	58

1. Zusammenfassung

Die im Rahmen des Vorhabens „Entwicklung eines Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr“ durchgeführten Arbeiten beschreiben mehrere technische Lösungen für die Kopplung von Binnenschiffen zu einem eingeschränkt seefähigen Koppelverband. Für diesen Fluss-See-Koppelverband (**abgekürzt FSKV**) kann am Beispiel der relevanten Relationen zwischen dem Seehafen Wilhelmshaven und seinem Hinterland ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz dargestellt werden. Von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen her ist es erforderlich, die Transportleistung des Koppelverbandes im Wettbewerb zu dem Transport per LKW bzw. Bahn anzubieten.

Der neu entwickelte Fluss-See-Koppelverband macht dies möglich, weil der Verband eine im Vergleich zu anderen Binnenschiffen wesentlich höhere Ladekapazität aufweist. Die schwierigste technische Problemstellung bei der Entwicklung des Koppelverbandes war der Entwurf einer Verbindung zwischen dem Motorschiff und dem Schubleichter, mit der ein Betrieb des Koppelverbandes im Seegang in Küstengewässern möglich ist. Eine eingehende Analyse der Seebedingungen im relevanten Seegebiet ergab, dass für den Koppelverband eine Einsatzfähigkeit im Seegang von bis zu 1,75 m Höhe gefordert werden muss, um eine Einsatzbereitschaft von über 80 % sicherstellen zu können.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei unterschiedliche Konzepte dieser seefähigen Koppelvorrichtung entwickelt. Beide Konzepte verwenden bereits gebräuchliche Elemente von konventionellen Koppelvorrichtungen und ermöglichen drei Freiheitsgrade zwischen den gekoppelten Schiffen: unterschiedlicher Trimm, unterschiedliche Eintauchung und unterschiedliche Krängung.

Diese seefähigen Koppelvorrichtungen wurden unter den relevanten Einsatzbedingungen erfolgreich im Modellversuch getestet. Eine eingehende Untersuchung der Wirtschaftlichkeit zeigte zusätzlich die Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz des Fluss-See-Koppelverbandes auf.

„Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht“

Das Forschungsvorhaben 15175 N mit dem Titel „Entwicklung eines Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr“ wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die AiF gefördert.

2. Einleitung und Aufgabenstellung

Nach seiner Fertigstellung ca. 2012 wird der Jade-Weser-Port Wilhelmshaven der östlichste Container-Tiefseehafen der europäischen Nordrange zwischen Le Havre und Hamburg sein. Seine prognostizierte Jahresumschlagskapazität liegt bei ca. 2,7 Mio. TEU.

Die dort geplanten Infrastrukturmaßnahmen zur Sicherstellung der Hinterlandanbindung betreffen Ausbauvorhaben für den Straßen- und Schienenverkehr. Der Bau eines Stichkanals zwischen der Jadebucht und der Weser wurde wegen zu hoher Realisierungskosten verworfen, so dass keine direkte Anbindung der Jadebucht an das Netz der Binnenwasserstraßen existiert. Durchgehende Schiffstransporte ins Hinterland sind deshalb nur möglich, wenn wettbewerbsfähige Schiffseinheiten zur Verfügung stehen, die sowohl für die Seestrecke als auch für die Binnenfahrt geeignet sind.

Die üblichen Fluss-See-Schiffe, die zum Beispiel im Rhein-See-Verkehr mit Großbritannien oder Skandinavien eingesetzt werden, kommen für die Hinterlandverkehre Wilhelmshavens aufgrund ihres hohen Leergewichtes und der damit verbundenen geringen Ladekapazität in flachen Gewässern zunächst nicht in Frage. Weiterführende Verkehre ins Binnenland werden hier nur dann zustande kommen, wenn Schiffseinheiten verfügbar sind, die auch unter Beachtung der relevanten Schleusenabmessungen und Tiefgangsbeschränkungen zu kostenmäßig wettbewerbsfähigen Angeboten führen. Damit die Unternehmen der Binnen- und Küstenschifffahrt an diesem aufkommensstarken Marktsegment partizipieren können, werden also wettbewerbsfähige Schiffseinheiten benötigt, die

- sowohl für den Einsatz auf See als auch auf Binnenwasserstraßen geeignet sind
- und
- insbesondere auf der Mittelweser und dem Mittellandkanal gegebenen Restriktionen genügen.

Da die Wettbewerbsfähigkeit entscheidend von der Größe der eingesetzten Schiffseinheiten abhängt, bietet es sich an, das in der Binnenschifffahrt bewährte Konzept eines Koppelverbandes auch für die Fluss-See-Schifffahrt nutzbar zu machen. Damit könnte eine Steigerung der Ladekapazität ohne Abmessungsprobleme erreicht werden, da das schiebende Motorgüterschiff und der Leichter bei Bedarf für Schleusungen getrennt werden können, so dass gegenüber herkömmlichen Fluss-See-Schiffen eine erheblich höhere Transportkapazität erreicht wird. Auch würde eine solche Kapazitätssteigerung nicht durch eine Erhöhung des Tiefgangs erkaufte. Weitere Vorteile, die ein solches Konzept mit sich bringt und damit seine Umsetzung erleichtert, betreffen vor allem relativ geringere Personalkosten sowie eine erhöhte Einsatzflexibilität.

Allerdings gibt es bisher keine geeignete Koppelvorrichtung, mit der ein Betrieb des Koppelverbandes im Seegang der Küstengewässer möglich wäre. Auch fehlt eine hydrodynamische Optimierung der Schiffskörper für den durchgehenden Fluss-See-Verkehr. Diese Entwicklungsarbeiten, verbunden mit dem Nachweis der Wettbewerbsfähigkeit dieses Konzepts, bilden den Kern dieses Forschungsvorhabens.

Eine solche Entwicklung kann nicht nur die eingangs erwähnte Chance für die Unternehmen der Binnen- und Küstenschifffahrt im Seehafenhinterlandverkehr von Wilhelmshaven deutlich verbessern, sondern auch neue Perspektiven in anderen Einsatzbereichen eröffnen. Dies gilt insbesondere für Einsatzgebiete mit relativ kurzen, im Küstenbereich liegenden Seestrecken und relativ langen Fluss- beziehungsweise Kanalstrecken. Als Beispiel genannt seien Feeder-Verkehre zwischen den deutschen Nordseehäfen. Aber auch Verkehre zwischen den deutschen Nord- und Ostseehäfen über den Nord-Ostsee-Kanal kommen hier in Betracht.

Zu diesem Zweck soll ein Fluss-See-Koppelverband entwickelt werden, der sowohl in den relevanten Seegebieten als auch auf den Binnenwasserstraßen wirtschaftlich und sicher verkehren kann. Dabei soll sowohl die Möglichkeit eines Neubaus als auch – im Hinblick auf eine schnelle und kostengünstige Umsetzung – die Möglichkeit der Nachrüstung eines vorhandenen Fluss-See-Schiffes in Betracht gezogen werden. Die Kostenvorteile dieses Schiffstyps sollen es den Unternehmen der Binnen- und Küstenschifffahrt ermöglichen, Marktpotentiale im Seehafenhinterlandverkehr sowie im innereuropäischen Verkehr zu erschließen, die mit den heute im Einsatz befindlichen Schiffseinheiten nicht erreicht werden können.

Mit Hilfe der geplanten Untersuchung soll den Unternehmen der Binnen- und Küstenschifffahrt aber nicht nur ein technisches Konzept zur Verfügung gestellt werden, vielmehr geht es zugleich darum, im Rahmen exemplarisch durchzuführender Kosten- und Zeitanalysen aufzuzeigen, wann und unter welchen Randbedingungen ein Einsatz der neu entwickelten Fahrzeuge auch unter wirtschaftlichen Aspekten Erfolg verspricht. Denn entscheidend für die Umsetzung des Konzepts ist nicht die technische Machbarkeit, sondern die Wettbewerbsfähigkeit am Markt.

3. Ermittlung der Rahmenbedingungen

3.1 Abschätzung der zu erwartenden Ladungsmengen

In Wilhelmshaven wurden im Jahr 2007 insgesamt 42.738.136 t Güter umgeschlagen. Davon entfielen 40.040.825 t auf Mineralöle und Mineralölerzeugnisse sowie 1.534.278 t auf Kohle und 1.163.033 t auf sonstige Güter.

3.1.1 Rohöl

Wilhelmshaven ist der größte deutsche Rohölhafen. Per Pipeline werden die Mineralölerzeugnisse hauptsächlich in Richtung Hamburg und nach Wesseling (Köln) transportiert. Ein nennenswerter Binnenschifftransport findet nicht statt, aber von Seiten der Raffinerie wurde der Bau einer wasserseitigen Verbindung an das westdeutsche Kanalsystem unterstützt, um Kraftwerke im Hinterland mit Rohöl oder sonstigen Mineralölerzeugnisse per Binnenschiff zu versorgen.

3.1.2 Kohle

Ein Anteil der importierten Kohle wird per Bahn ins Hinterland transportiert. Entsprechend der Nachfrage wurde in die Niedersachsenbrücke investiert, so dass eine prognostizierte Umschlagssteigerung der importierten Kohle auf etwa 4 bis 6 Millionen Tonnen realisiert werden kann. Hier könnte ein großer Anteil der zusätzlichen Kohlemenge auf dem Wasserweg transportiert werden.

3.1.3 Container

Der geplante Containerhafen in Wilhelmshaven, der Jade-Weser-Port, ist ausgelegt für einen Containerumschlag im ersten Bauabschnitt von 2.700.000 TEU. Zu 60 bis 70 %¹ soll er ein Transshipment-Hafen für die Containerladung von und nach Skandinavien und den Ostseeraum mit den Regionen Russland und Baltikum sein. Die verbleibenden 30 bis 40 % der Container sollen jeweils zur Hälfte per Straße und Bahn ins Hinterland transportiert werden. Von dieser Menge könnte ein Transportanteil auf der Wasserstraße erfolgen. Öffentliche Studien über den möglichen Anteil der Container die per Binnenschiff von und nach Wilhelmshaven transportiert werden können, liegen nicht vor.

¹ Quelle: Strategische Ansätze für ein Regionales Standortmanagement Jade-Weser-Raum, NORD/LB und NIW

3.2 Ermittlung der Infrastrukturbedingungen

3.2.1 Auswahl der Fahrtgebiete

Wilhelmshaven mit der Seehafenzufahrt Jade ist der östlichste Tiefseehafen Europas. Die Bundeswasserstraße Jade (siehe Abbildung 1) hat eine Wassertiefe von 18,5 m unter Seekartennull (SKN) und ermöglicht ein tideunabhängiges Ein- und Auslaufen von Seeschiffen mit einem Tiefgang von 16,5 m.



Abbildung 1: Lage des Hafens Wilhelmshaven

Der Seehafen hat einen Bahn- und Straßenanschluss. Ein direkter Anschluss zum westdeutschen Wasserstraßensystem ist von Wilhelmshaven für Binnenschiffe nicht vorhanden. Der Jade-Ems-Kanal ist aufgrund seiner sehr kleinen Abmessungen² keine leistungsfähige Verbindung. Deshalb müssen die Schiffe über See fahren, um über die Weser oder die Elbe zum westdeutschen Kanalsystem zu gelangen. Abbildung 1 zeigt zwei Fahrtrouten über See, um die Weser und das Kanalnetz von Wilhelmshaven aus zu erreichen.

² Kanal der Klasse I, nur für Schiffe bis zu 33 m Länge, 6,2 m Breite und 1,7 m Tiefgang befahrbar

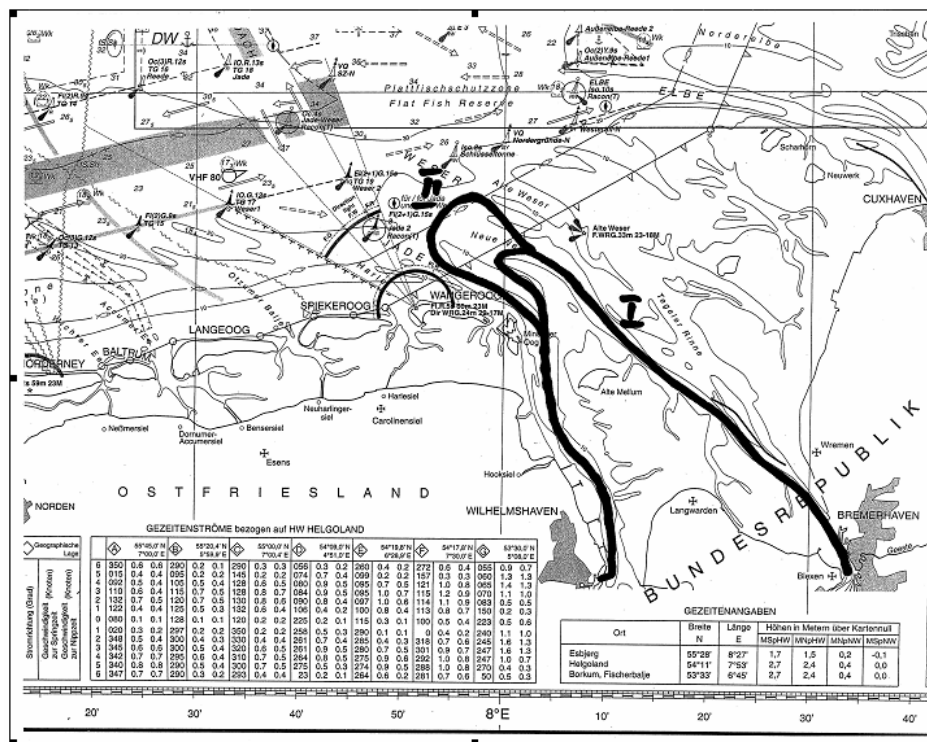


Abbildung 2: Verbindung zwischen Wilhelmshaven und Bremerhaven

Abbildung 2 zeigt zwei Fahrtrouten über See, um die Weser von Wilhelmshaven aus zu erreichen. Die Fahrtstrecke II zwischen Wilhelmshaven und Bremerhaven beträgt ca. 70 km (40 Seemeilen). Das Wattgebiet darf nicht gekreuzt werden. Bei hohem Wasserstand kann die Strecke etwas abgekürzt werden, siehe Route I. In jedem Fall wird das Schiff über einige Stunden dem Seegang ausgesetzt, spätestens im Bereich nördlich der Alten Mellum. Die Fahrzeit zwischen Wilhelmshaven und Bremerhaven wird dabei ca. 4 Stunden betragen.

Eine Fahrt in Richtung auf die Elbmündung Richtung Hamburg ist von Mellum aus möglich, allerdings ist das Schiff dann deutlich länger dem Seegang ausgesetzt.

3.2.2 Weser

Die Unterweser kann von Binnenschiffen von Weser-km 1,38 bis zur Küstenlinie (der Verbindungslinie zwischen den Kirchtürmen Langwarden und Kappel mit den Nebenarmen Westergate, Rekumer Loch, Rechter Nebenarm und Schweiburg) befahren werden. Die Fahrzeuge können 12,0 m breit sein und die Länge wird strompolizeilich nicht eingeschränkt.

Zwischen dem Fuldahafen auf der Mittelweser und Weser-km 1,38 (insgesamt 7,4 km) sind Fahrzeuge mit einer Breite von 11,45 m und einer Länge von 110 m zugelassen. Schubverbände dürfen 11,45 m breit sein und eine Länge von 172 m nicht überschreiten. Die Fahrrinntiefe beträgt mindestens 2,50 m.

Auf der Mittelweser zwischen Weser-km 204,5 (Ortslage Minden) und Weser-km 360,7 dürfen Fahrzeuge oder Schubverbände eine Breite von 11,45 m und eine Länge von 85 m haben. Die Fahrrinntiefe beträgt mindestens 2,50 m.

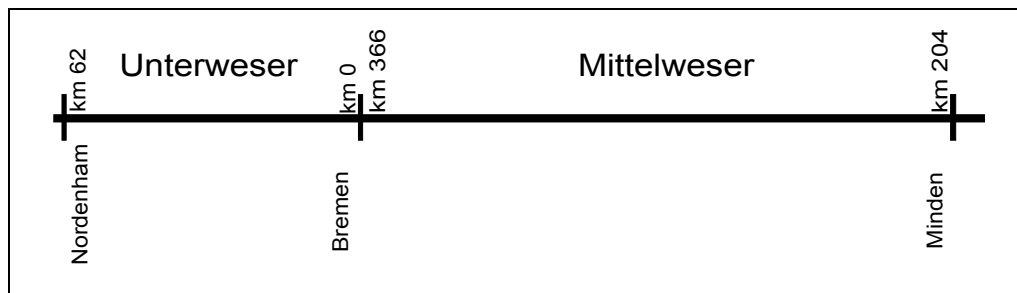


Abbildung 3: Einteilung Unter- und Mittelweser

Zurzeit wird die Mittelweser für den Verkehr von Großmotorschiffen mit den Abmessungen Länge x Breite = 110 m x 11,45 m angepasst. Dazu wird die Schleuse Minden neu gebaut, mit der die Verbindung der Weser mit dem Mittellandkanal hergestellt wird. Weiterhin ist eine Schleuse in Dörverden mit den Abmessungen 140 m x 12,5 m im Bau. Die Flusssohle wird auf 3,00 m unter NNW vertieft, d.h. das Europaschiff kann voll abgeladen verkehren, das Großmotorgüterschiff erhält eine Abladebeschränkung auf 2,50 m. Die Länge eines zulässigen Schubverbandes wird auf 135 m oder 139 m eingeschränkt. Die Fertigstellung wird ca. 2012 erwartet.

Die lichte Brückenhöhe auf der Mittelweser beträgt mit Ausnahme von zwei Bogenbrücken 4,39 m über dem höchst schiffbaren Wasserstand (HSW). Die zwei Bogenbrücken können annähernd mittig durchfahren werden, so dass sie die Durchfahrts Höhe von 4,39 m nicht weiter einschränken.

3.2.3 Westdeutsches Kanalsystem

Der Mittellandkanal (MLK) und der Elbeseitenkanal (ESK) sind für die zu untersuchenden Fahrtrelationen interessant. Der MLK zwischen Minden und der Einmündung des ESK ist für Großmotorschiffen mit den Abmessungen Länge x Breite = 110 m x 11,45 m und für Schubverbände mit den Abmessungen Länge x Breite = 185 m x 11,45 m zugelassen. Es kann ein Tiefgang von derzeit 2,5 m (nach Ausbau 2,80 m) genutzt werden. Die lichte Brückenhöhe beträgt mindestens 5,25 m.

3.3 Seegangsbedingungen im Jade-Gebiet

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BGH) veröffentlicht u. a. im Internet die statistisch ausgewerteten Messergebnisse der Nordsee. Dabei werden aus den regelmäßigen Messungen die Parameter signifikante Wellenhöhe, Periode und bei entsprechend ausgerüsteten Bojen auch die Richtung, aus der die Wellen kommen, angegeben. Für die östliche Nordsee werden in der Abbildung 4 die Messstationen des BSH gezeigt.

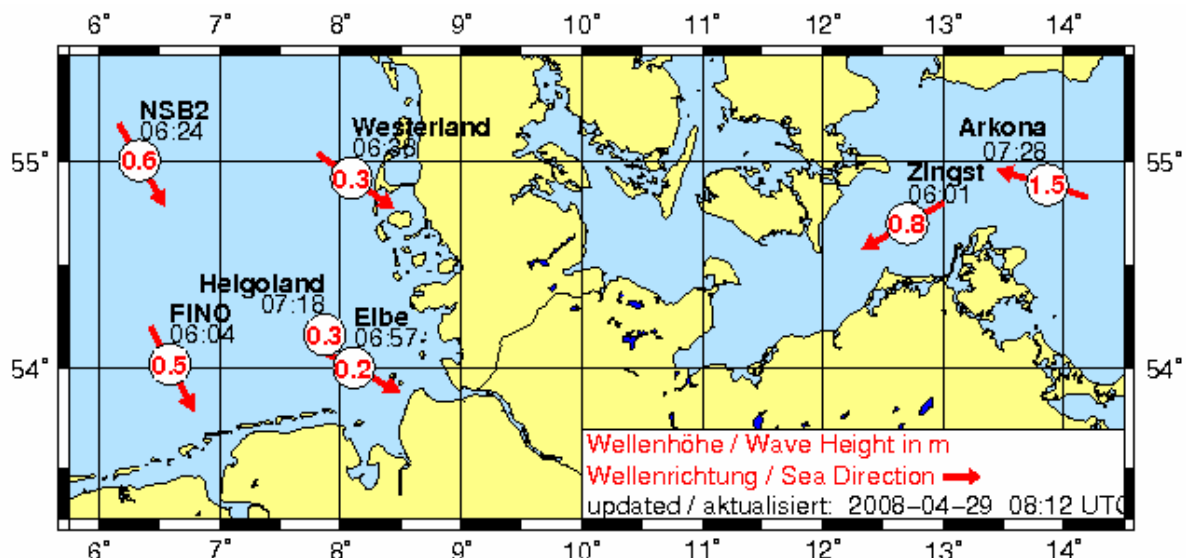


Abbildung 4: Messstationen des BSH

Interessant für das Projekt sind die Messungen der Stationen FINO und Elbe (auch CUX in den Statistiken genannt). Eine Auswertung der Seegangs-Statistik der Stationen FINO und Elbe ergibt folgende Abhängigkeiten, siehe Abbildungen 5 und 6.

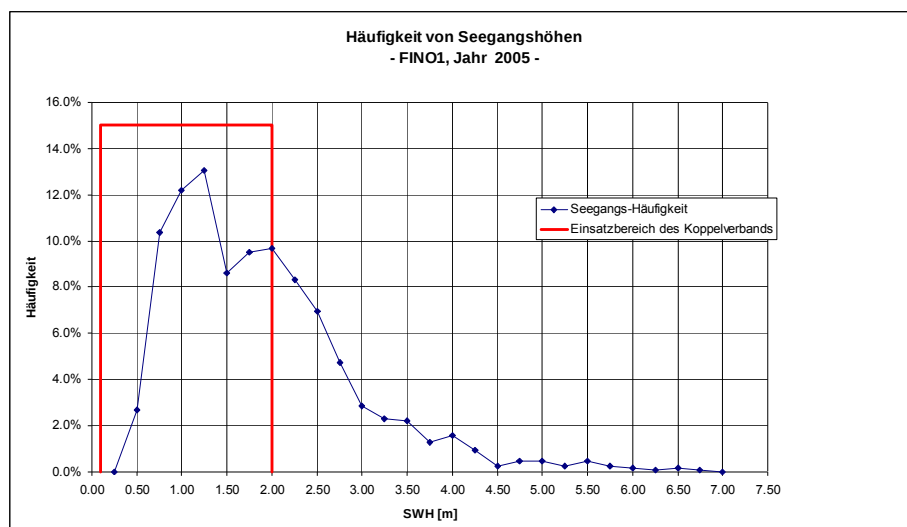


Abbildung 5: Häufigkeit von Seegangshöhen - FINO gesamtes Jahr 2005

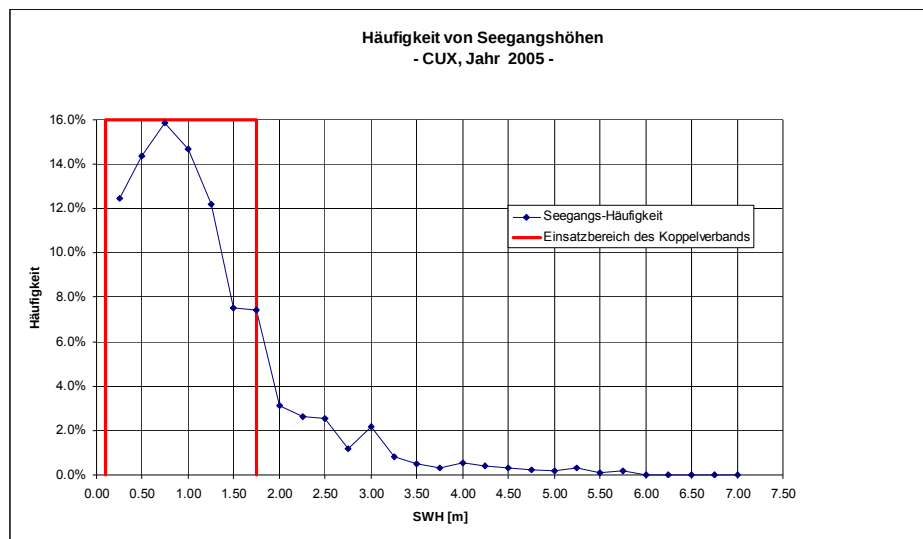


Abbildung 6: Häufigkeit von Seegangshöhen - CUX gesamtes Jahr 2005

Aus der Häufigkeit der Seegangshöhen können für FINO und CUX folgende Relationen ermittelt werden:

Wellenhöhe		FINO	CUX
Beobachtungen kleiner als	2,25 m	74 %	90 %
Beobachtungen kleiner als	2,00 m	66 %	88 %
Beobachtungen kleiner als	1,75 m	56 %	84 %
Beobachtungen kleiner als	1,50 m	47 %	77 %

Tabelle 1: Häufigkeit von Seegangshöhen in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Die Auswertung nach Jahreszeit zeigt einen typischen Anstieg der Seegangshöhen in den Monaten November bis März.

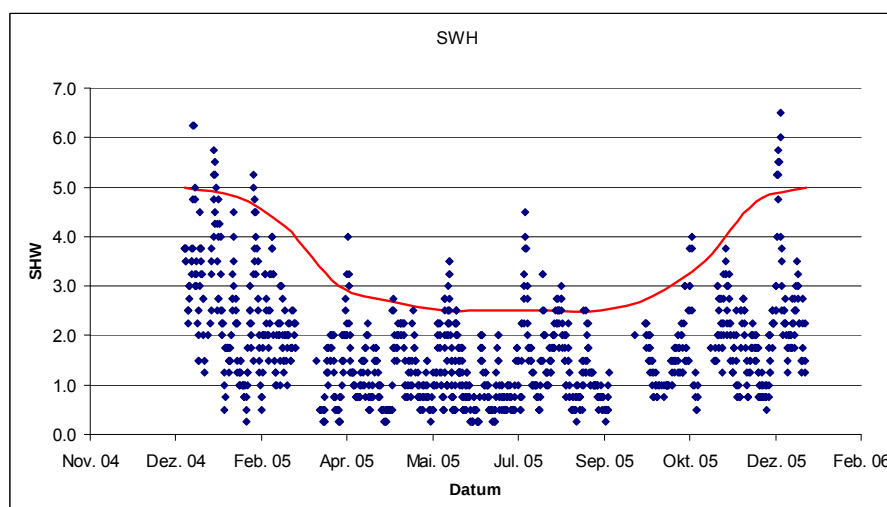


Abbildung 7: Häufigkeit von Seegangshöhen in Abhängigkeit von der Jahreszeit

3.4 Technische Vorschriften und Bestimmungen

Der Koppelverband sollte in Bezug auf die technischen Vorschriften und Bestimmungen als Binnenschiff behandelt werden. Für die eingeschränkte Fahrt in der direkten Nähe der Küste und bei schneller Erreichbarkeit von Häfen sollten dabei nicht die für Seeschiffe gültigen Vorschriften eingehalten werden. Diese Anwendung von Bestimmungen wird bereits für die eingeschränkte Küstenfahrt in den Ländern Belgien und Niederlande praktiziert. Aus diesem Grund werden die in Anlage F aufgelisteten technischen Vorschriften nur in dem Umfang angewendet, wie sie für Binnenschiffe maßgeblich sind.

3.5 Beitrag des projektbegleitenden Ausschusses

In der ganzen Laufzeit des Projektes bestand eine kontinuierliche Beratung durch die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses. Insbesondere bei der Formulierung der Rahmenbedingungen und bei den Überlegungen zur Praxistauglichkeit wurden hier wichtige Beiträge geleistet.

4. Entwurf des Koppelverbandes für den durchgängigen Fluss-Seeverkehr

Seeschiffe können mit kostendeckender Zuladung aufgrund ihrer Hauptabmessungen nicht über die Weser oder die Elbe in das anschließende Kanalnetz fahren. Vor diesem Hintergrund wird für den wasserseitigen Hinterlandverkehr ein seefähiges Binnenschiff oder ein Binnenschiffsverband notwendig. Die im Kapitel 3 beschriebenen Rahmenbedingungen führten zu dem nachfolgend beschriebenen Entwurf des FSKV. Im Experiment sollte gezeigt werden, ob die geforderte Wirtschaftlichkeit und die Seegangs-Festigkeit bis hin zu einer Wellenhöhe von 2,0 m erreicht werden kann.

4.1 Hauptdaten

- Tauglichkeit zur Fahrt über offene See, eingeschränkt auf 25 SM
- Transport von 4 Containern nebeneinander, in 2 Lagen
- Fixpunkthöhen der Kanalfahrt
- Wetterdichtes Lukendach zur Abdeckung der Laderäume

Schiffstyp	Schubverband
Einsatzgebiet	Jade bis Wilhelmshaven, Weser, Kanalfahrt
Gesamtlänge	135 m
Länge Motorschiff	Nach Erfordernis der Containerlängen
Länge Schubleichter	Nach Erfordernis der Containerlängen
Breite auf Spant	11,45 m
Tiefgang	max. 2,80 m
Seitenhöhe	unter Beachtung von Freibord und Seetauglichkeit
Propulsion	2 x 600 kW, $D_P = 1,60$ m mit Düsen
Manövrierantrieb	350 kW im Vorschiff des Leichters

Tabelle 2: Wichtige Vorgaben für den Entwurf des Koppelverbands

Nach einigen Iterationen stellt sich heraus, dass die Laderäume jeweils 8 TEU (Raster 6,15 m) in Längsrichtung fassen können. Die gesamte Containerkapazität beträgt

$$2 \times 8 \text{ Längen} \times 4 \text{ Breiten} \times 2 \text{ Höhen} = 128 \text{ TEU}$$

Dies führt unter Berücksichtigung der erforderlichen Längen für Vor- und Hinterschiff und dem Platzbedarf der Koppelstelle zu folgenden Abmessungen:

- Länge Motorschiff $L_{MS} = 70,8 \text{ m}$
- Länge Schubleichter $L_{SL} = 64,2 \text{ m}$
- Gesamtlänge des Koppelverbands $L = 135,0 \text{ m}$

4.2 Schiffsform

Der Entwurf wurde mit der Schiffbau-CAD-Software NAPA³ erstellt. Bei dem Entwurf des Hinterschiffes wurden berücksichtigt:

- eine kompakte Bauform mit einem relativ kurzen Hinterschiff
- Antrieb mit zwei Propellern
- kleinster Tiefgang mit einsatzfähiger Propulsion, $T_{\min} = 1,60 \text{ m}$
- Schiffsform in Anlehnung an bewährte Ausführungen der Binnenschifffahrt

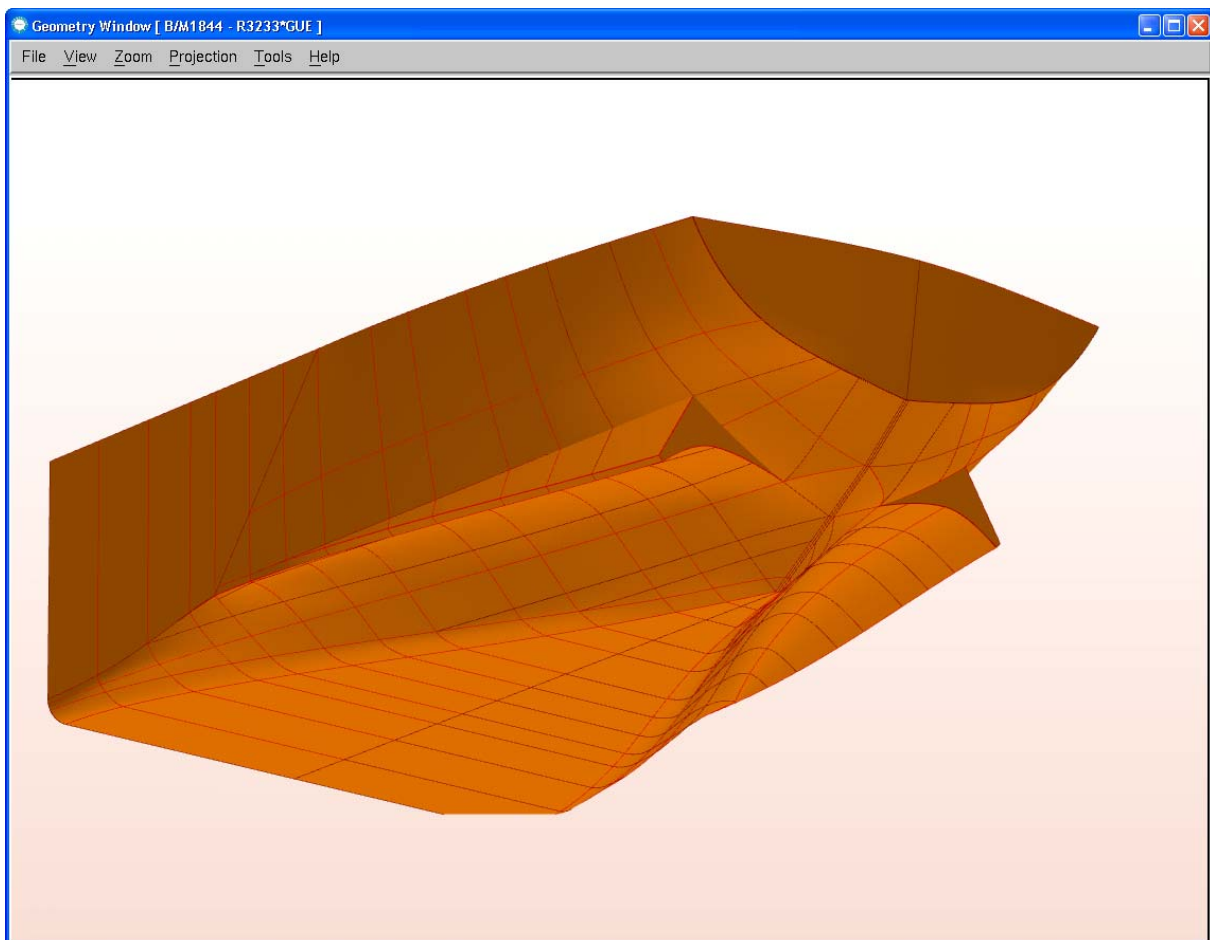


Abbildung 8: Hinterschiff des Koppelverbandes

³ Napa Group, PO Box 470, FI-00181 Helsinki, Finland; <http://www.napa.fi>

Bei dem Vorschiff wurde darauf geachtet, dass relativ steile Spantformen verwendet werden, um die Beeinträchtigung durch Seeschlag zu reduzieren.

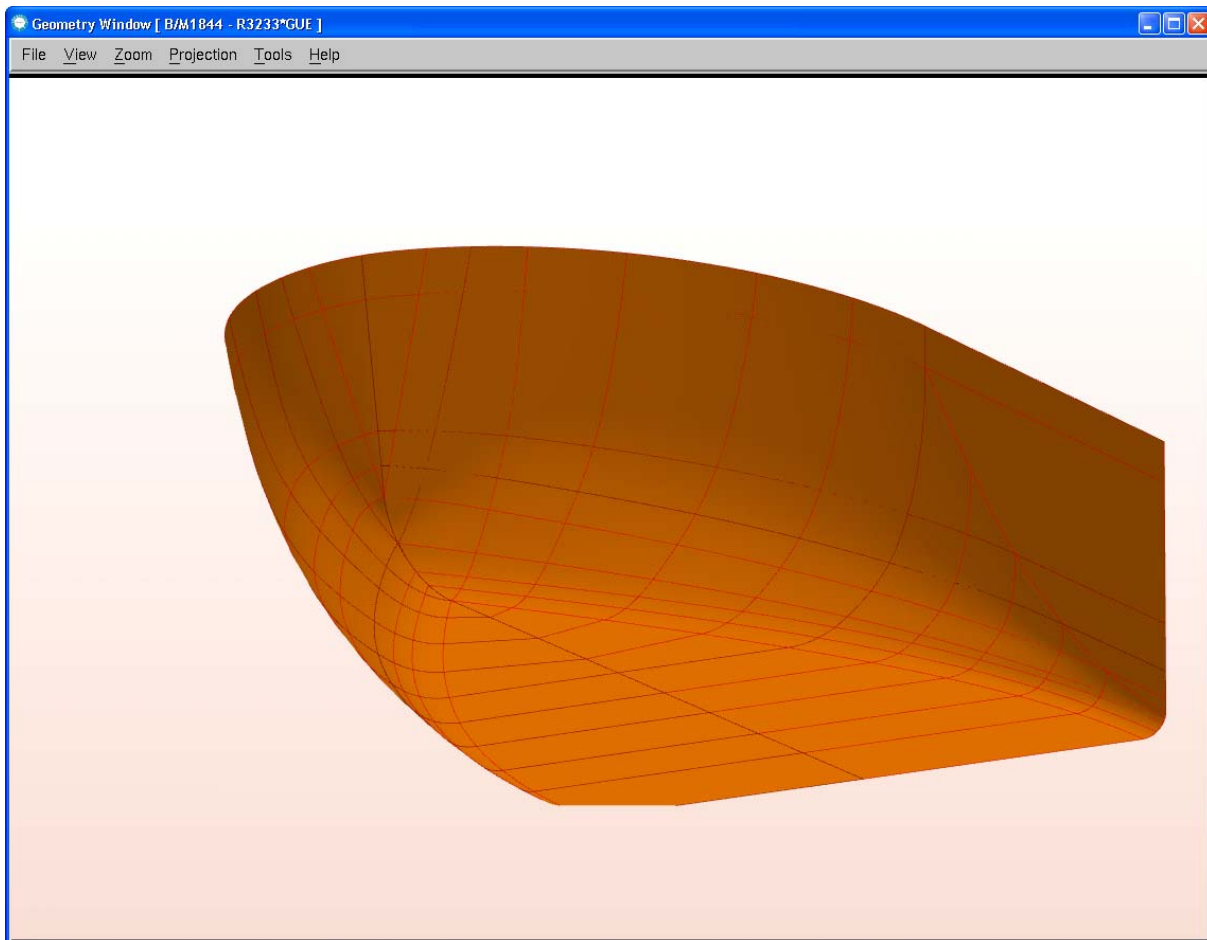


Abbildung 9: Vorschiff des Koppelverbandes

Das Vorschiff des Motorschiffes und das Heck des Schubleichters bilden die Koppelstelle des Koppelverbandes. Wenn das Motorschiff und der Schubleichter einen Koppelverband bilden, ergibt sich bei der dargestellten Formgebung ein gleichmäßiger Übergang zwischen beiden Schiffsteilen.

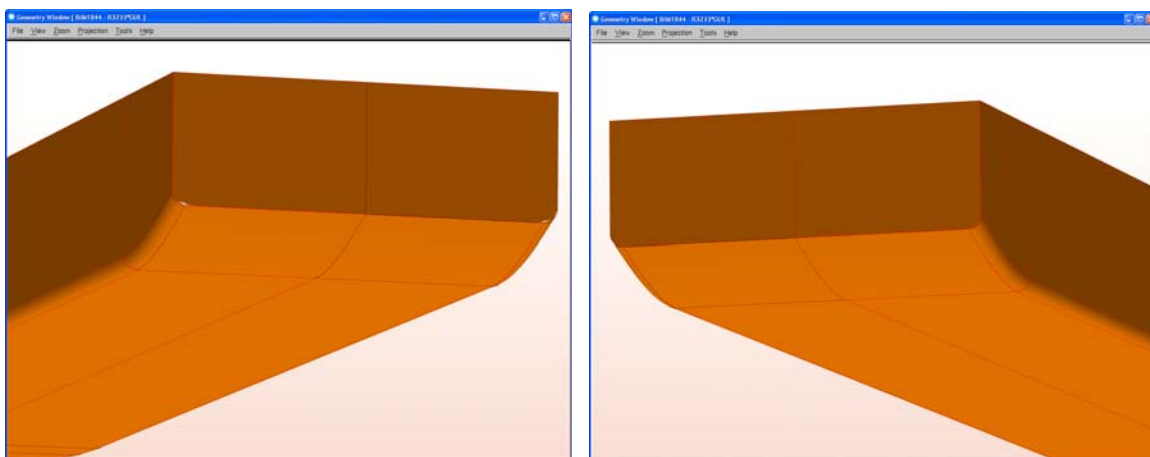


Abbildung 10: Ähnliche Geometrie für das Vorschiff des Motorschiffs (links) und das Heck des Schubleichters (rechts)

Dieser gleichmäßige Übergang bleibt auch erhalten, wenn sich ein Tauchungs- oder Trimmunterschied zwischen Motorschiff und Schubleichter einstellt. Es wird abgeschätzt, dass diese Differenz der Eintauchung an der Koppelstelle ohne nachteilige Folgen bis zu 0,80 m betragen kann.

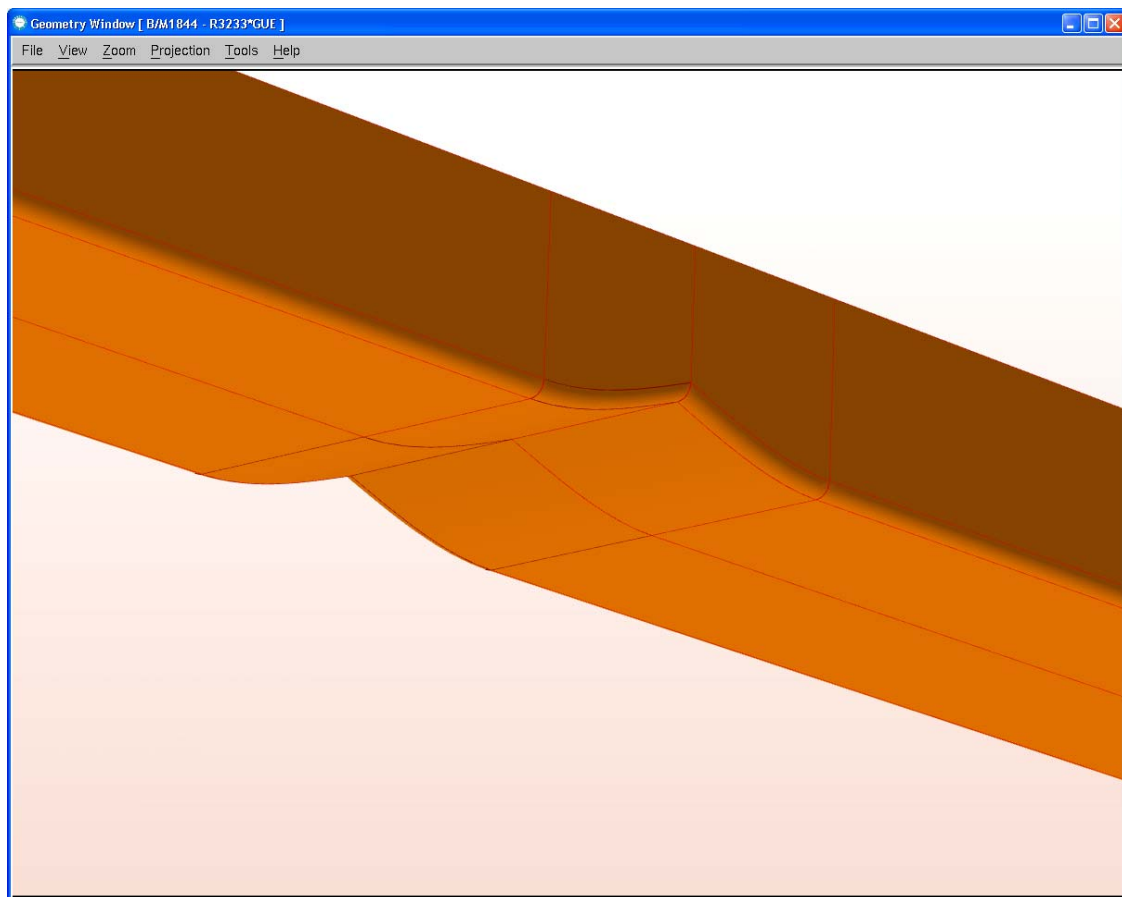


Abbildung 11: Koppelstelle zwischen beiden Schiffsteilen

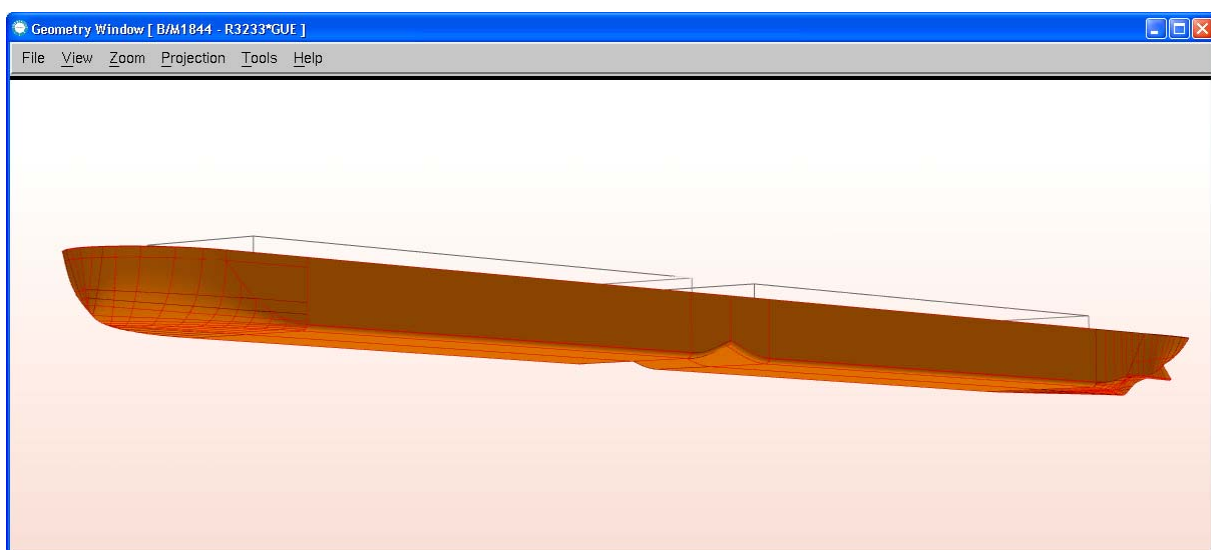


Abbildung 12: Gesamtansicht Koppelverband - Laderäume angedeutet

4.3 Tragfähigkeit

Eine erste Abschätzung des Schiffsgewichts ergibt:

- Leergewicht Motorschiff: 610 Tonnen
- Leergewicht Schubleichter: 400 Tonnen

Bei einer Beladung mit 128 TEU (13to/TEU) ergibt sich ein Tiefgang von ca. 2,0 m, die maximale Zuladung mit T = 2,80 m beträgt knapp 3000 Tonnen.

Verdrängung und Tragfähigkeit SCHUBLEICHTER					
T m	VOLM m3	DISP t	LCB m	CB	DW t
1.000	637.9	645.6	101.256	0.4145	35.6
1.600	1048.4	1056.8	101.137	0.4257	446.8
2.000	1325.2	1334.2	101.151	0.4305	724.2
2.400	1603.5	1613.0	101.188	0.4341	1003.0
2.800	1883.3	1893.3	101.237	0.4370	1283.3
Verdrängung und Tragfähigkeit MOTORSCHIFF					
T m	VOLM m3	DISP t	LCB m	CB	DW t
1.000	675.8	683.9	38.695	0.4391	73.9
1.600	1113.4	1122.7	38.660	0.4522	512.7
2.000	1418.4	1428.5	38.363	0.4608	818.5
2.400	1725.4	1736.1	38.136	0.4671	1126.1
2.800	2033.9	2045.1	37.952	0.4720	1435.1
Verdrängung und Tragfähigkeit KOPPELVERBAND FSKV					
T m	VOLM m3	DISP t	LCB m	CB	DW t
1.000	1309.7	1325.5	69.072	0.8510	315.5
1.600	2159.0	2176.9	68.927	0.8768	1166.9
2.000	2740.0	2759.2	68.678	0.8902	1749.2
2.400	3324.7	3345.0	68.498	0.9001	2335.0
2.800	3912.9	3934.2	68.365	0.9080	2924.2

Tabelle 3: Koppelverband, hydrostatische Daten

4.4 Entwurf der Vorrichtungen für eine seefähige Koppelvorrichtung

4.4.1 Grundsätzliche Überlegungen

Die Vorrichtungen der seefähigen Koppelvorrichtung unterscheiden sich, unabhängig von der verwendeten mechanischen Ausführung, durch die Anzahl der Freiheitsgrade in der Koppelvorrichtung. Dabei muss das seitliche Abknicken des Schubleichters immer verhindert werden.

I) 1 Freiheitsgrad:

- unterschiedlicher Trimm

II) 2 Freiheitsgrade:

- unterschiedlicher Trimm
- Differenz in der Eintauchung

III) 3 Freiheitsgrade:

- unterschiedlicher Trimm
- Differenz in der Eintauchung
- Differenz in der Krängung

Für die Fahrt ohne Seegangseinfluss wird eine Kopplung des Typs A mit einem Freiheitsgrad ausreichend sein, bei der Fahrt im Seegang müssen aber drei Freiheitsgrade möglich sein, um zu verhindern, dass hohe Kräfte in die Struktur der Schiffe eingeleitet werden.

4.4.2 Technische Lösungsmöglichkeiten

I) 1 Freiheitsgrad

Lösung: Koppelvorrichtungen mit einem Freiheitsgrad sind in der Binnenschifffahrt weit verbreitet. In der Praxis werden stählerne Zurrdrähte verwendet, auf die mit Zurrwinden eine hohe Vorspannkraft (typischerweise 80 kN) aufgebracht wird. Der Spiegel des Motorschiffs und des Leichters ist flach und stabil gebaut. Durch die Vorspannkraft der Zurrdrähte werden Motorschiff und Schubleichter zusammengezogen, so dass zwischen den Schiffen ein Reibschluss entsteht, der eine sichere Verbindung gewährleistet. Kleinere Änderungen im Trimm der Schiffe bleiben aber möglich. In der Praxis ist es auch so, dass kleinere Unterschiede im Tiefgang der Schiffe ausgeglichen werden können, da die entstehenden vertikalen Kräfte im Laufe der Fahrt einen Höhenausgleich zwischen den Schiffen bewirken.

Analog dazu gibt es auch Systeme, bei denen die Schiffe mit hydraulisch betätigten Zylindern verbunden werden.

II) 2 Freiheitsgrade

Eine technische Lösung mit nur zwei Freiheitsgraden ist in der Praxis nicht anzutreffen, weil eine freie vertikale Bewegung zwischen den Schiffen auch eine ungehinderte unterschiedliche Krängung zulassen würde.

III) 3 Freiheitsgrade

Für den Einsatz im Seegang wird eine Koppelvorrichtung mit drei Freiheitsgraden für notwendig gehalten. Ideal ist diese Kopplung in einer Schleppverbindung realisiert, bei der ein Leichter nur mit einem Draht mit dem Schlepper verbunden ist. Beide Schiffe können sich dann ungehindert im Seegang bewegen und die Schlepptrosse überträgt nur die zur Fortbewegung erforderliche Längskraft. Bezogen auf die konkrete Aufgabenstellung stellt diese einfache Technik jedoch keine Lösung dar.

4.4.3 Auswahl

Es ist anzunehmen, dass nur die Anordnungen nach I) mit einem Freiheitsgrad und nach III) mit drei Freiheitsgraden technisch zu realisieren sind, wobei für I) enge Grenzen für den möglichen Seegang zu erwarten sind. Für eine Lösung nach III) werden hier zwei technische Lösungen vorgestellt.

4.4.4 Seefähige Koppelvorrichtung unter Verwendung von Zurrdrähten

Bei dieser Variante B1 sind Motorsschiff und Schubleichter durch vorgespannte Zurrdrähte miteinander verbunden. Um eine Kopplung mit drei Freiheitsgraden zu ermöglichen, sind zwischen Motorsschiff und Schubleichter horizontal liegende Stahlrollen angeordnet, die eine vertikale Verschiebung erlauben, ohne dass dabei zusätzliche Kräfte auf die Schiffstruktur einwirken. Die Zurrseile werden durch eine entsprechende Vorrichtung auf konstante Zugkraft eingestellt. Eine vertikale Führung in der Schiffslängsachse soll eine Verschiebung der Schiffe in Querrichtung verhindern.

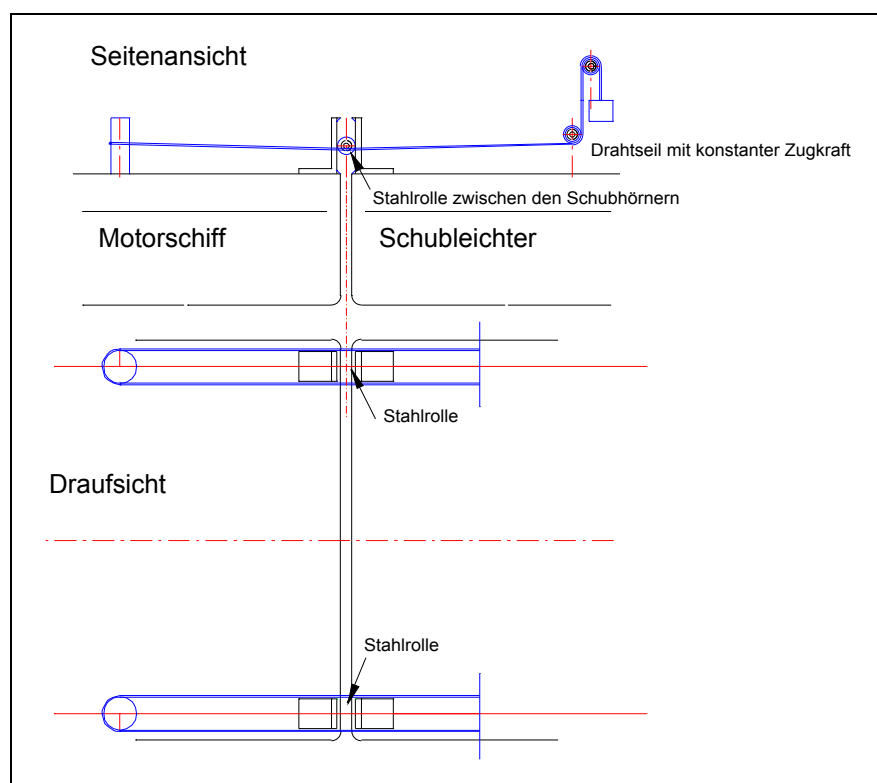


Abbildung 13: Schematische Darstellung Koppelvorrichtung B1

In den Manövrier- und Seegangversuchen wurde die in Abbildung 14 dargestellte Koppelvorrichtung in einer verbesserten Version verwendet.

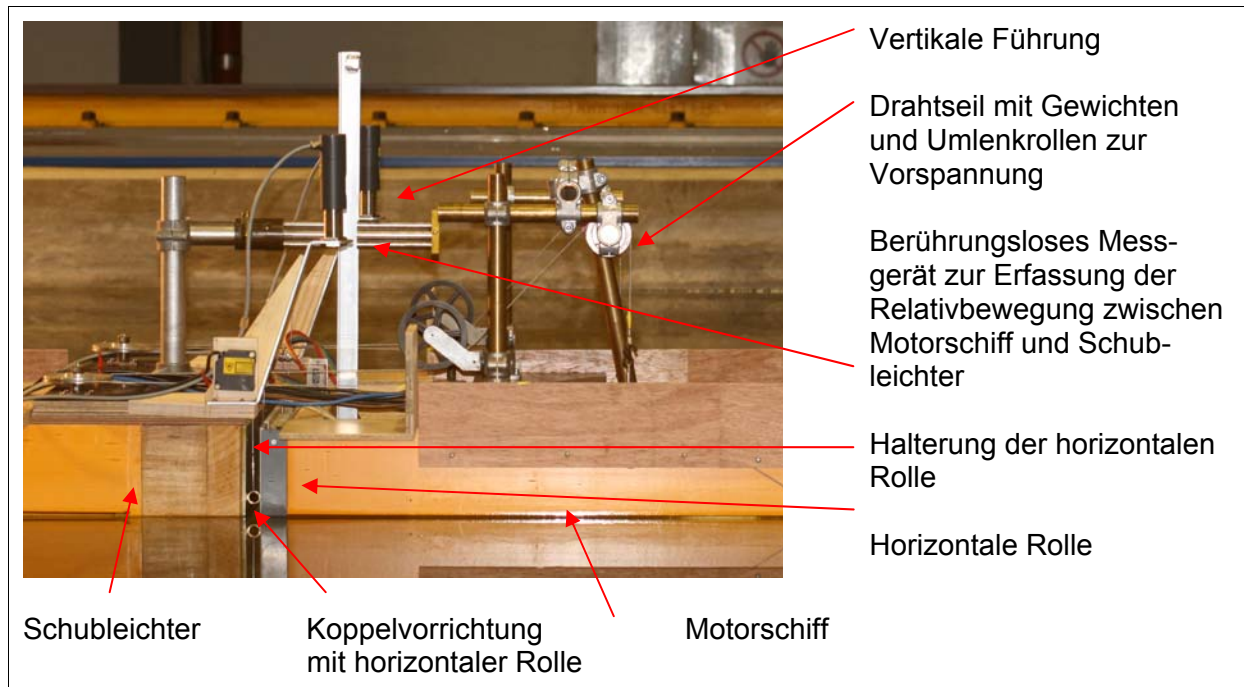


Abbildung 14: Koppelvorrichtung mit 3 Freiheitsgraden Variante B1

Dabei wurde die horizontale Rolle, die eine ungehinderte Bewegung zwischen Motorschiff und Schubleichter ermöglicht, durch eine Halterung mit dem vorgespannten Drahtseil verbunden. Diese Verbindung konnte verhindern, dass sich die Rolle im Laufe der Zeit aus ihrer normalen Lage heraus verschiebt und/oder eine schräge Lage einnimmt.

4.4.5 Seefähige Koppelvorrichtung mit hydraulisch betätigter Verbindung

Bei dieser Koppelvorrichtung ist es möglich, die im Seegang auftretenden Kräfte und die Bewegungen zu messen. Dazu wurde die Kupplungskonzeption der Firma Harbisch weitgehend übernommen und durch ein einstellbares Dämpfungssystem ergänzt, siehe Abbildung 15.

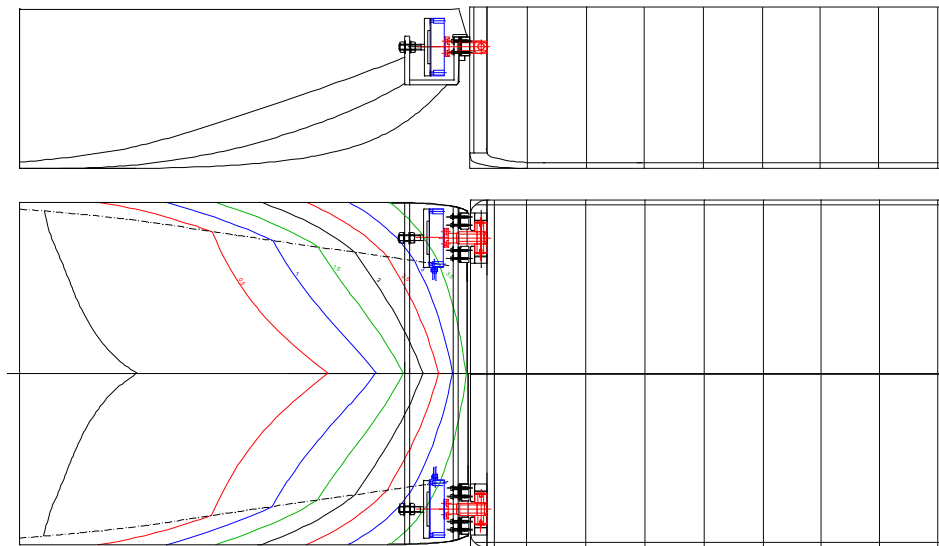


Abbildung 15: Koppelvorrichtung mit 3 Freiheitsgraden Variante C2

Die Koppelvorrichtung lässt eine vertikale Verschiebung von Motorschiff und Leichter zu. Dabei müssen nur die Reibungskräfte, die abhängig von der Vorspannung der Kupplung sind, an der Koppelstelle überwunden werden. Die Vorspannung und die Dämpfung sind einstellbar, so dass auch auf die Reibungskräfte Einfluss genommen werden kann. Mit diesem Kupplungsaufbau ist eine gegenseitige Vertrimmung von 14° und eine gegenseitige Krängung von 8° möglich, siehe Abbildung 16.

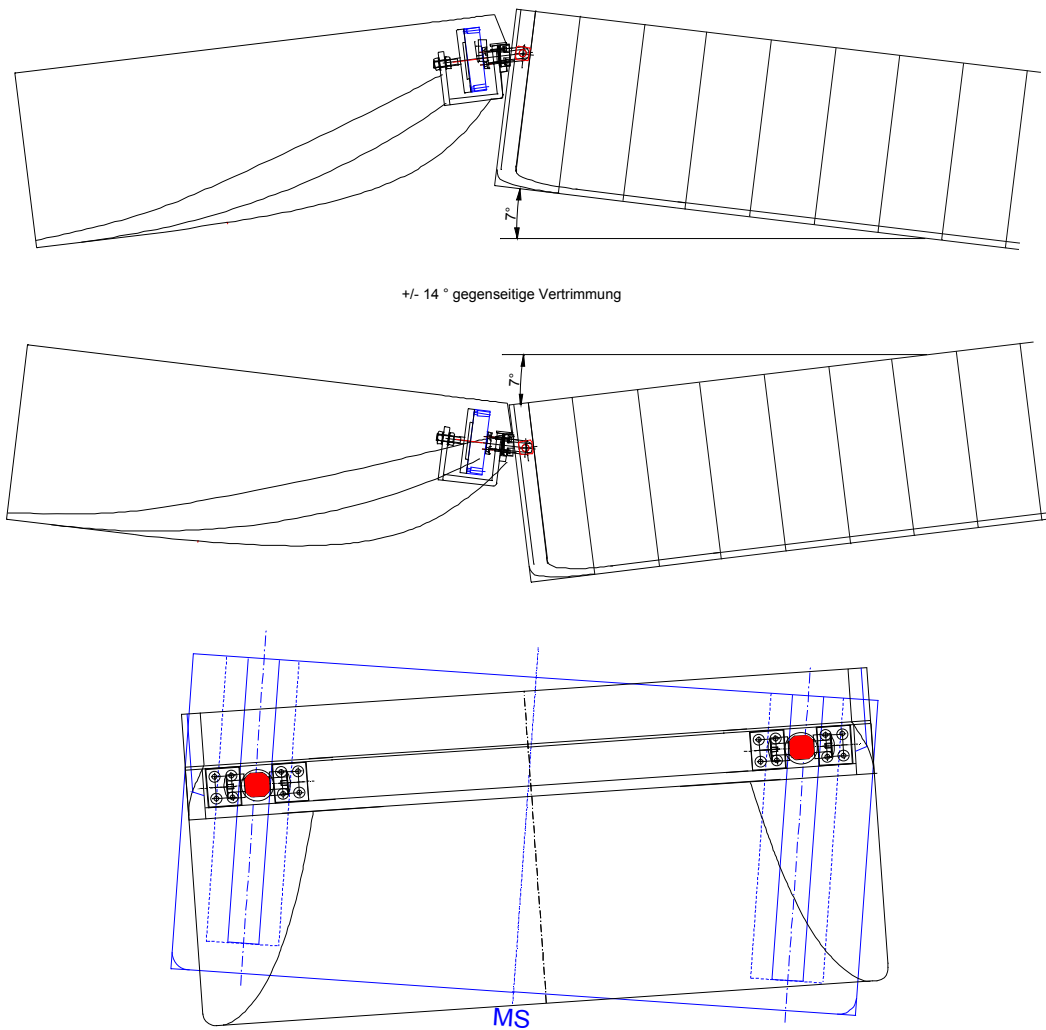


Abbildung 16: Gegenseitige Vertrimmung und Krängung

Eine weitere Kupplungsvariante stellt die Anordnung mittschiffs mit nur einem Kuppelungselement dar, siehe Abbildung 17.

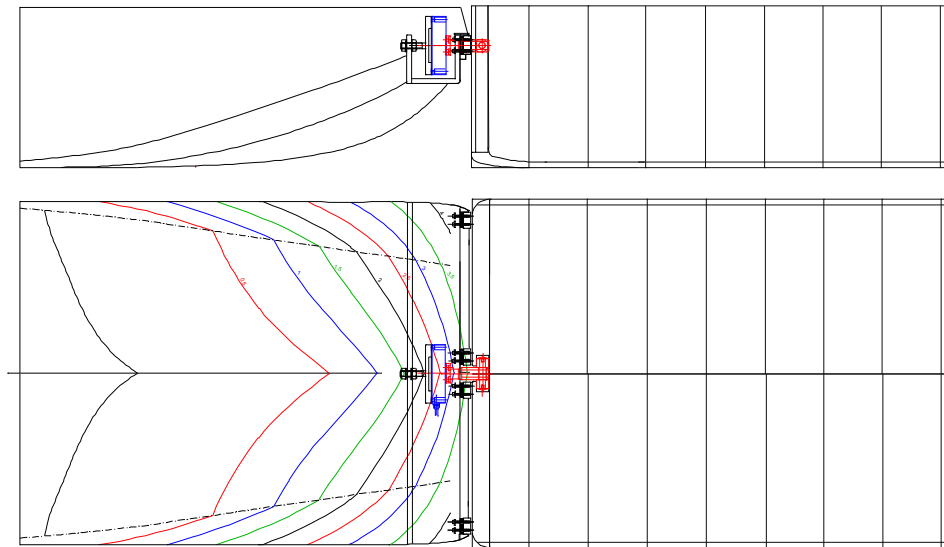


Abbildung 17: Koppelvorrichtung mit 3 Freiheitsgraden Variante C3

Die gegenseitige Krängung beträgt mit nur einem Kupplungselement 20° . Die anderen Kupplungseigenschaften, wie oben beschrieben, bleiben erhalten.

4.5 Vorversuche zur Erprobung der Vorrichtung

In einer frühen Phase des Projektes war es wichtig, die grundsätzliche Funktion der seefähigen Koppelvorrichtung im Experiment zu überprüfen. Dazu wurden zwei im DST vorhandene Modelle mit Modellen der seefähigen Koppelvorrichtungen ausgerüstet und unter Seegangseinfluss im großen Versuchstank des DST untersucht.

Die Versuche wurden mit dem stehenden Koppelverband im Seegang, aber ohne Vorausgeschwindigkeit, durchgeführt, mit dem Ziel, das Bewegungsverhalten und die Kräfte in der Koppelvorrichtung festzustellen. Dabei wurden Wellenhöhen zwischen 1,0 m und 3,5 m und Wellenlängen zwischen 22,5 m und 60,0 m eingestellt.

Bei den Versuchen ohne Vorausgeschwindigkeit traten die Bewegungen bzw. Koppelkräfte zwischen den Modellen in ganz ähnlicher Form auf wie bei fahrenden Modellen, allerdings konnte in einem kurzen Zeitraum ein großes Spektrum von Seegang und Kurswinkeln erfasst werden.

Versuchsaufbau

- Verwendung von vorhandenen Modellen in Maßstab 1 : 16 für Motorschiff und Leichter.
- Seegangsversuche, Modelle liegen ohne Vorausgeschwindigkeit im Tank. Der Kurswinkel wird unterschiedlich eingestellt.

Versuch A

- Motorschiff und Leichter sind konventionell mit einem Freiheitsgrad gekoppelt.
- Haftreibung „Metall auf Metall“ der Schub Bühnen
- Vorspannungskraft und Elastizität der Koppeldrähte sind korrekt modelliert.

V Versuchsergebnis:

- Ermittlung der Wellenhöhe, bei der die Modelle sich gegeneinander bewegen
- Schiffsbewegungen

Versuch B

- Motorschiff und Leichter sind entsprechend Varianten C2 und C3 gekoppelt.
- Kraftmessglieder zwischen den Modellen

V Versuchsergebnis:

- Koppelkräfte als Funktion des Seegangs.
- Schiffsbewegungen

Versuch C

- Motorschiff und Leichter sind entsprechend Variante B1 gekoppelt.
- Vorspannungskraft und Elastizität der Koppeldrähte sind korrekt modelliert.

V Versuchsergebnis:

- Funktion der Vorrichtung
- Einsatzgrenzen im Seegang
- Schiffsbewegungen

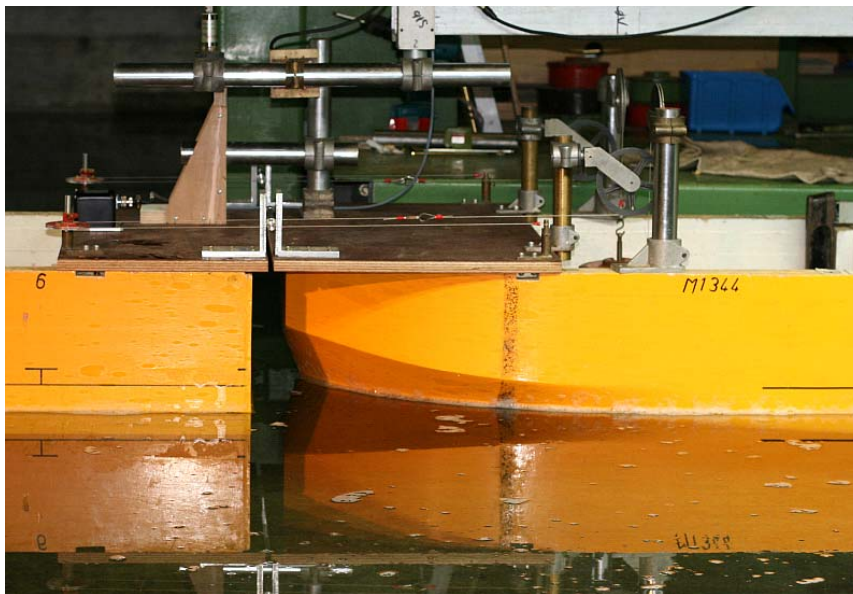


Abbildung 18: Koppelvorrichtung Variante B1 im Vorversuch

Als Ergebnis der Vorversuche war festzustellen, dass sowohl die Anordnung mit den Drahtseilen als auch die Anordnung mit dem mechanischen Kupplungssystem als seefähige Koppeleinrichtung geeignet ist.

- Für die Haltbarkeit der Drahtseilverbindung sind die Höhe des Seegangs und die Eigenschaften der Drahtseilwinden relevant.
- Bei der mechanischen Kupplung ist die Einsatzeingrenzung durch die Schwimmfähigkeit der Fahrzeugzusammenstellung bestimmend.

5. Berechnung des Verhaltens im Seegang

5.1 Berechnungsmethoden

Als Software für die Berechnungen des Seegang-Verhaltens wurde das Modul „Sea-keeping (SHS)“ aus dem Software-Paket NAPA⁴ verwendet.

Die Berechnungen erfolgen unter Anwendung der Streifentheorie⁵. Bei dieser Berechnungsmethode wird der Schiffskörper rechnerisch in zylindrische Sektionen aufgeteilt. Für jede zylindrische Sektion kann die hydrodynamische Masse und die Dämpfung berechnet werden und über eine Integration der Sektionen kann die Reaktion des Schiffskörpers auf die Anregung durch den Seegang bestimmt werden.

Als Berechnungsergebnisse stehen u. a. zur Verfügung:

- Berechnungen der Bewegung des Schiffes in regelmäßigen Wellen (als Funktion von z.B. Wellenhöhe)
- Berechnungen der Bewegung des Schiffes in definierten Seegangs-Spektren
- Bestimmung des kleinsten Freibords an definierten Punkten
- Definition von begrenzenden Kriterien (z.B. Freibord, Krängung, Beschleunigung)
- Berücksichtigung von statistisch ermittelten Seegangsdaten
- Ermittlung von statistischen Aussagen zu seegangsbedingten Ausfallzeiten

Unter Verwendung der für das Einsatzgebiet relevanten statistischen Daten zum Seegang wurden getrennt die Bewegungen von Leichter und Motorschiff ermittelt. Mit den spezifischen Grenz-Kriterien konnten dann die Ausfallzeiten ermittelt werden. Die ermittelten Relativbewegungen an der Koppelstelle konnten die Einsatzgrenzen von Koppelsystemen aufzeigen.

Die Auswertung hat es ermöglicht, die Seegangs-Fälle einzugrenzen, bei denen eine Untersuchung im Modellversuch besonders sinnvoll ist.

⁴ Napa Group, PO Box 470, FI-00181 Helsinki, Finland; <http://www.napa.fi>

⁵ Literatur zur Streifentheorie:

"Die Schwingungen von schwimmenden zweidimensionalen Körpern" by O. Grim, Hamburg Ship Model Basin, 1956/1957

"Hydrodynamic Force and Moment produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface" by Fukuzo Tasai, Kyushu Univ. Japan. Reports of Res. Inst. for Appl. Mechanics, Vol. IX, No 35, 1961

„The Representation of Ship Hulls by Conformal Mapping Function" by C. von Kerczek and E.O. Tuck, Journal of Ship Research, December 1969

5.2 Rahmenbedingungen der Berechnungen

Bei den Berechnungen des Verhaltens im Seegang sollten die im Fahrtgebiet vorherrschenden Bedingungen zu Grunde gelegt werden. Als Quelle für statistische Seegangsdaten des Reviers wurden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) statistische Auswertungen der Seegangsdaten zur Verfügung gestellt.

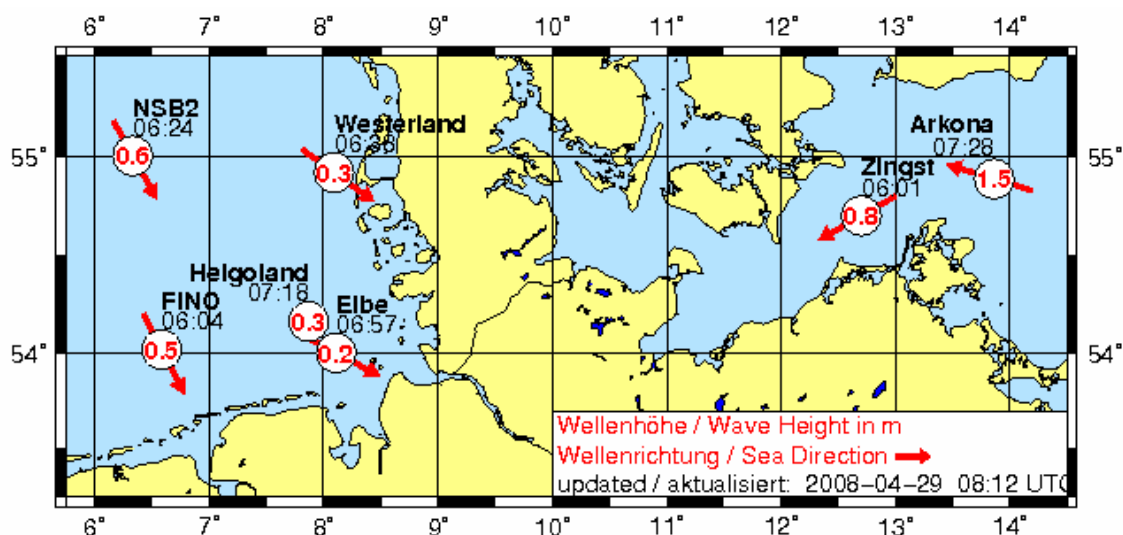


Abbildung 19: Lage der Stationen zur Messung des Seegangsdaten

Station	Bezeichnung in den Datensätzen	Position
Elbe	CUX	54° N-8°07' E
FINO	BOR	54° N-6°35' E

Tabelle 4: Stationen des BSH

Die für das Projekt relevanten Daten werden auf den Stationen „Elbe“ und „FINO“ registriert und umfassten alle Messungen des Jahres 2005.

Für den Koppelverband wurden zwei Beladungszustände als relevant angesehen:

- Beladung mit 100 % der Containerkapazität und ca. 2,10 m Tiefgang
- Beladung mit 50 % der Containerkapazität und ca. 1,45 m Tiefgang

5.3 Auswertung der Seegangs-Statistik

Die Seegangs-Statistiken liegen in Form von ASCII-Dateien vor, die zur Auswertung in EXCEL-Tabellen umgewandelt wurden.

In den Daten-Tabellen waren enthalten:

- | | | |
|-----|--------|--|
| 1. | Spalte | fortlaufende Nummer, 1. Zeile = Stationskennung |
| 2. | DATUM | |
| 3. | ZEIT | |
| 4. | SWH | signifikante Wellenhöhe [m] |
| 5. | DUEN | mittlere Höhe [m] der langen Wellen mit Perioden über 10 sec |
| 6. | DIR | Richtung [Grad] der energiereichsten Wellen ("Peak") |
| 7. | WLEN | Wellenlänge [m] der Peakperiode |
| 8. | PFR | Peakfrequenz [Hz] |
| 9. | MIP | mittlere Periode [sec] |
| 10. | ZCP | Nulldurchgangsperiode [sec] |
| 11. | EMAX | Energiemaximum [m ² x sec] |

Die signifikante Wellenhöhe H_s entspricht dem Mittelwert des Drittels der höchsten Wellen ($H_{1/3}$). Bei der Datenauswertung wird die signifikante Wellenhöhe nach der Gleichung:

$$H_s = 4\sqrt{\int E(f)df}$$

berechnet. $E(f)$ ist die Energie pro Frequenzband df . Die signifikante Wellenhöhe kann als Vergleichswert zu den auf visuellen Schätzungen basierenden Schiffsbeobachtungen betrachtet werden.

Die Nulldurchgangsperiode ZCP (zero crossing period) ist die mittlere Periode aller Auslenkungen der Wasseroberfläche, die die mittlere Wasserstandslinie schneiden. Sie ist geringfügig kürzer als die mittlere Periode MIP.

Die Peakperiode ist in der Regel die längste. Sie ist die Periode des absoluten spektralen Energiemaximums.

Für jede Stunde des Beobachtungszeitraums wurde jeder Wert als Mittelwert aufgezeichnet. Von der Station FINO1 liegen z.B. für das Jahr 2005 insgesamt 1261 Beobachtungen vor, die einen Zeitraum von 315 Tagen abdecken⁶. Für die Ermittlung einer Jahres-Statistik ist diese Datenbasis ausreichend.

⁶ Weitere Details zur Erfassung der Seegangshöhen unter:
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Seegang/index.jsp>

Im Rahmen des Projekts werden die Daten zu SWH und MIP ausgewertet. Mit den Makros der Tabelle „Auswertung Seegangsdaten.xls“ wurden daraus die Tabellen des NAPA-Input-Formats erstellt. Dabei wurden für einen Zeitraum von je 6 Stunden ermittelt:

- a) das Maximum für SWH, gerundet auf $\frac{1}{4}$ Meter
- b) der Mittelwert von 100 x MIP, gerundet auf den Wert 50

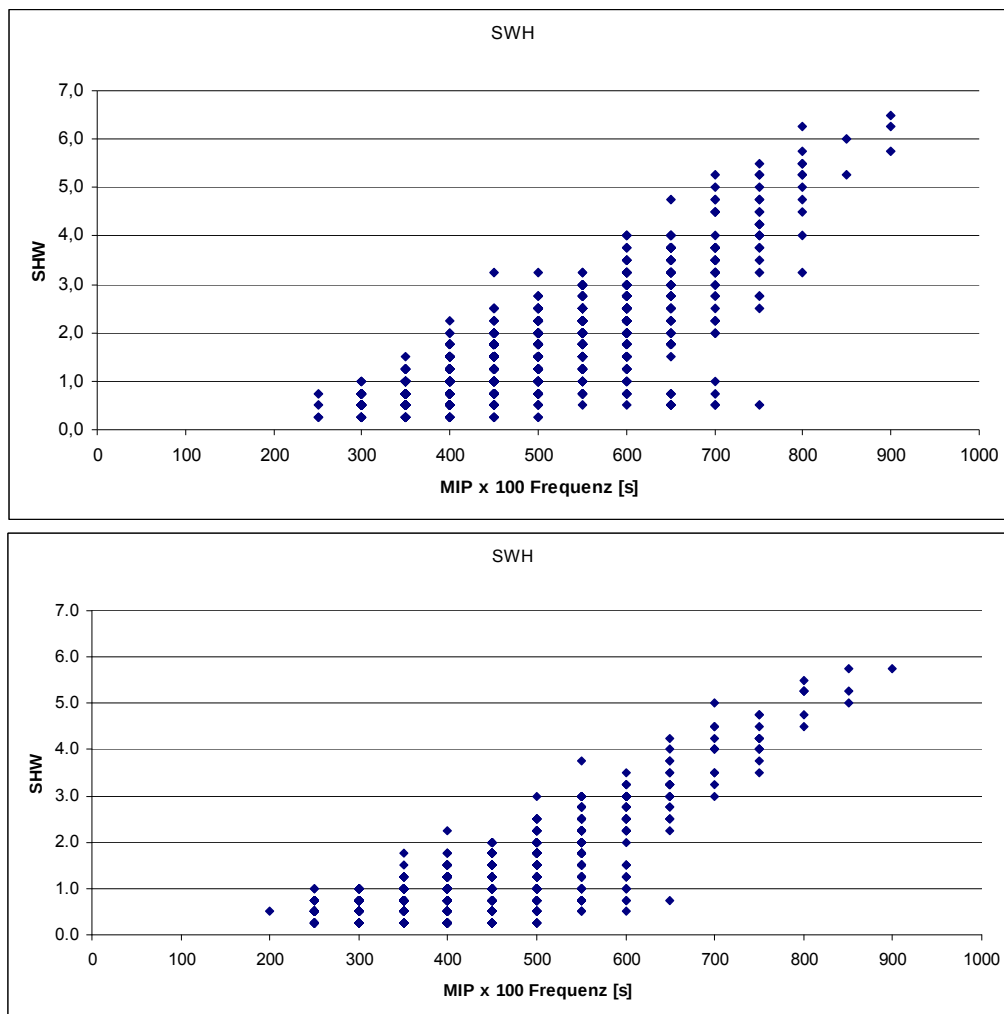


Abbildung 20: Grafische Auswertung der Seegangs-Daten: oben FINO, unten CUX

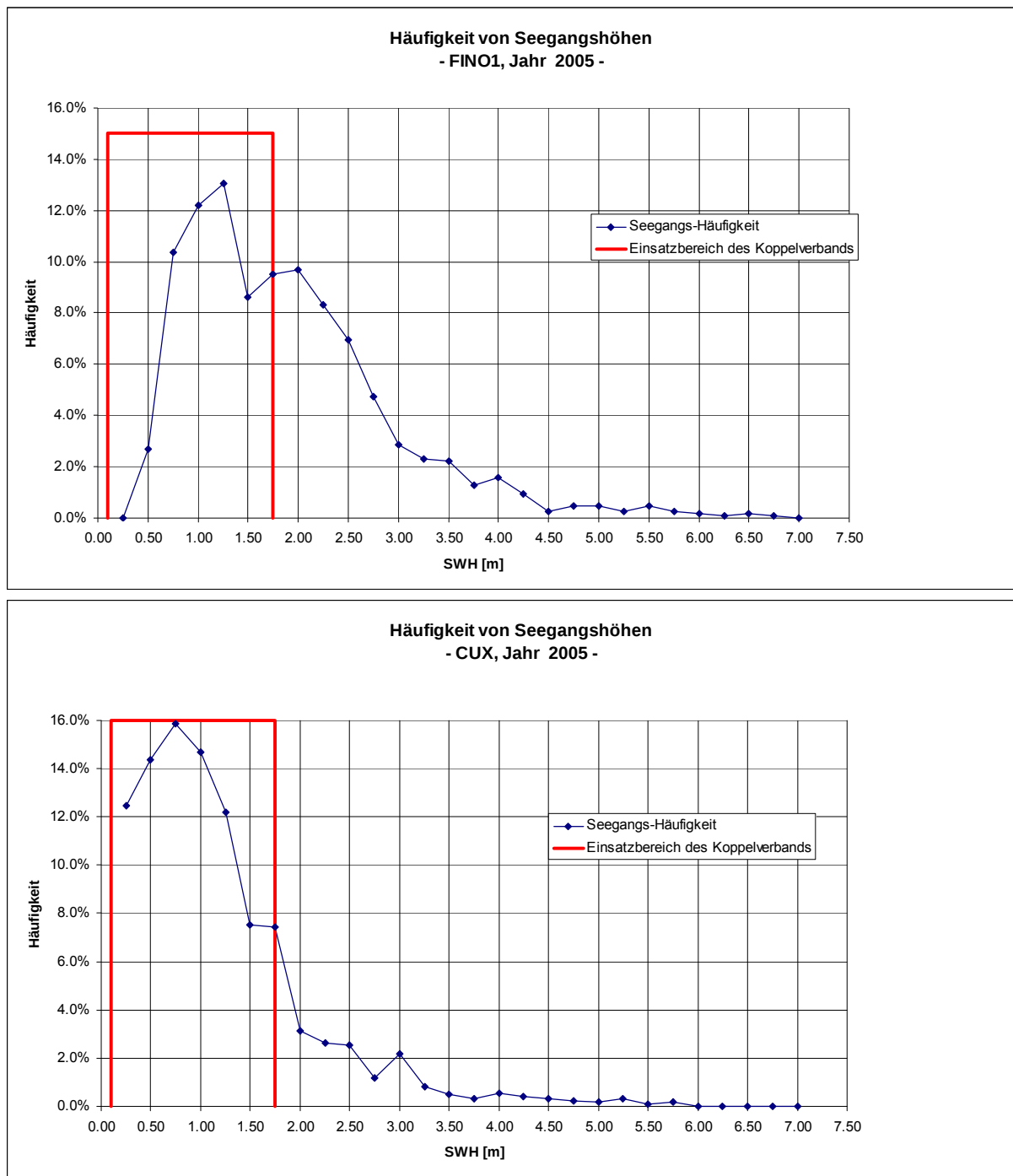


Abbildung 21: Häufigkeits-Verteilung der Seegangshöhen bei FINO und Elbe, für das gesamte Jahr 2005

Die Auswertung nach Jahreszeit zeigt einen typischen Anstieg der Seegangshöhen in den Monaten November bis März.

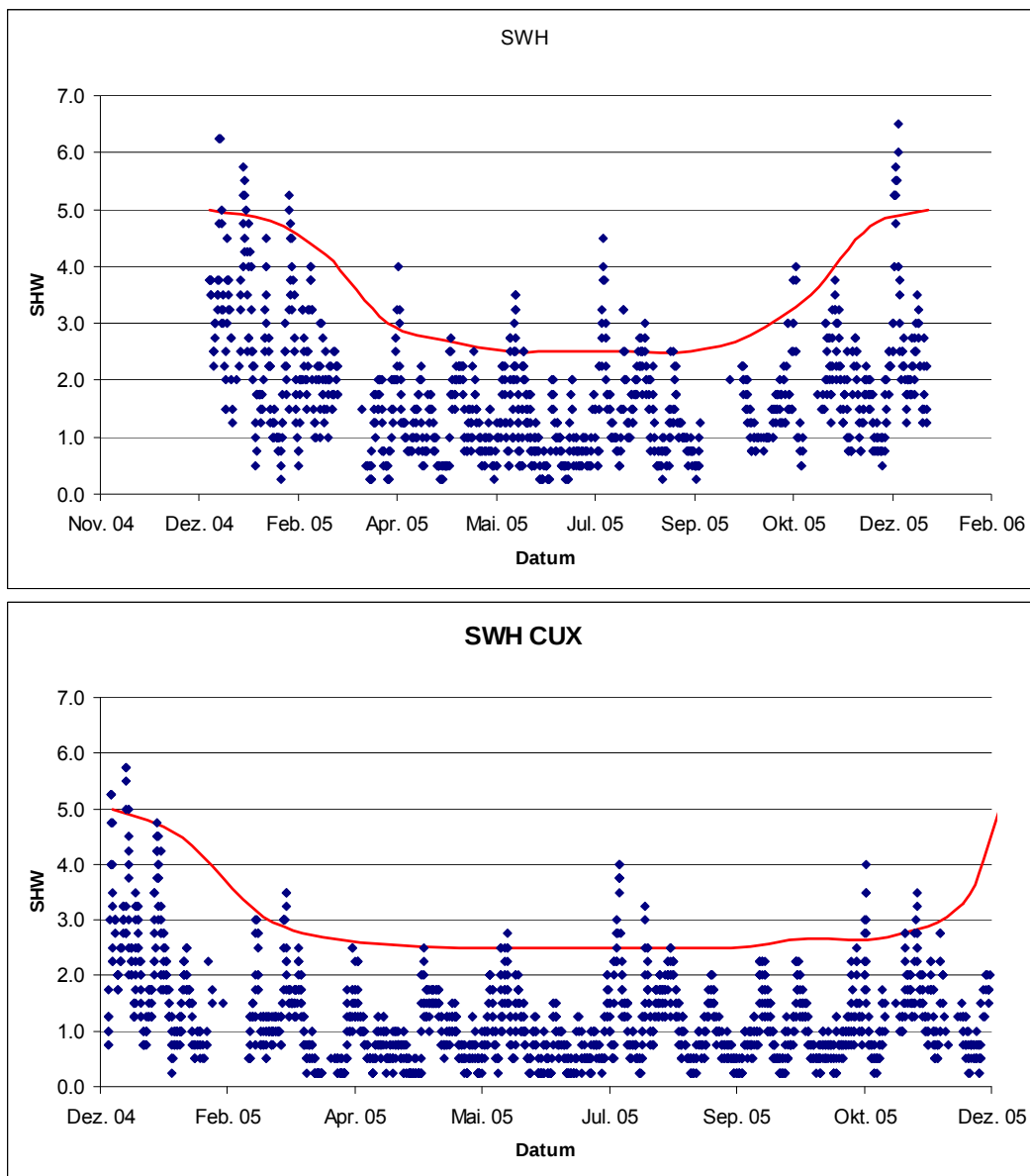


Abbildung 22: Häufigkeit von Seegangshöhen in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Die Auswertung nach Jahreszeit zeigt einen typischen Anstieg des Seegangs.

7,00																1
6,75																1
6,50																1
6,25																1
6,00																1
5,75																2
5,50																2
5,25																1
5,00																1
4,75																1
4,50																1
4,25																1
4,00																2
3,75																1
3,50																1
3,25																2
3,00																2
2,75																1
2,50																3
2,25																2
2,00																8
1,75																1
1,50																6
1,25																1
1,00																1
0,75																1
0,50																2
0,25																2
0,00	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950

Tabelle 5: Ergebnis-Tabelle – Station FINO, Jahr 2005

7,00																			
6,75																			
6,50																			
6,25																			
6,00																			
5,75																	1		1
5,50																	1		
5,25																	3	1	
5,00																		1	
4,75																		2	1
4,50																		2	1
4,25																		1	3
4,00																		1	3
3,75																		2	1
3,50																		1	2
3,25																		3	6
3,00																		1	15
2,75																		7	6
2,50																		8	11
2,25																		1	11
2,00																		1	18
1,75																		1	3
1,50																		1	16
1,25																		8	64
1,00																		2	14
0,75																		13	44
0,50																		1	27
0,25																		14	38
0,00	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000		

Tabelle 6: Ergebnis-Tabelle – Station CUX, Jahr 2005

In den Ergebnis-Tabellen sind jeweils 1260 Seegangsbeobachtungen dargestellt, jede Beobachtung steht dabei für einen Zeitraum von 6 Stunden.

Für die signifikanten Wellenhöhen kann für den gesamten Bereich eines Jahres ausgesagt werden:

Wellenhöhe		FINO	CUX
Beobachtungen kleiner als	2,25 m	74 %	90 %
Beobachtungen kleiner als	2,00 m	66 %	88 %
Beobachtungen kleiner als	1,75 m	56 %	84 %
Beobachtungen kleiner als	1,50 m	47 %	77 %

Tabelle 7: Beobachtungen im Jahr 2005

Mit Bezug auf die Seegangs-Statistiken kann man im Ergebnis formulieren, dass der Koppelverband mindestens zu 50 % des Jahres einsetzbar sein sollte. Dies bedeutet, eine „Seegangsfestigkeit“ bis hin zu einer Wellenhöhe von 1,75 m zu fordern. Wenn die Statistik der Station CUX maßgeblich ist, ergibt sich dabei eine mögliche Einsatzbereitschaft von über 80 %.

5.4 Berechnungen

5.4.1 Berechnungsparameter

Als Berechnungsparameter wurden folgende Eingangswerte verwendet:

- Schiff in der Konfigurationen „Motorschiff“, „Schubleichter“ und „Koppelverband“
- Beladung 100 % Container, Beladung 50 % Container
- Wellenlängen 2,25 m bis 12,25 m
- Schiffsgeschwindigkeit: 0, 6 und 8 Knoten bzw. 11 und 15 km/h
- Wassertiefe $h = 10$ m
- Wellenrichtung: 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 Grad

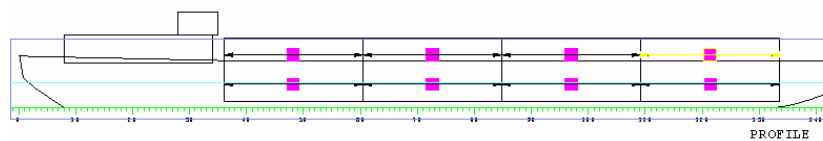


Abbildung 23: Konfiguration „Motorschiff“

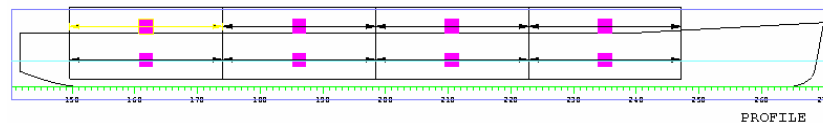


Abbildung 24: Konfiguration „Schubleichter“

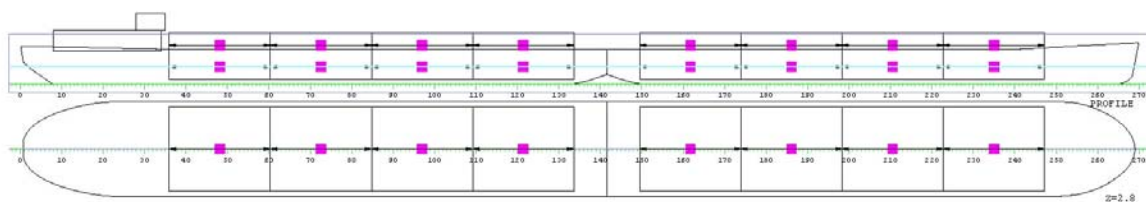


Abbildung 25: Konfiguration „Koppelverband“

Die Berechnungen wurden für alle Kombinationen der Parameter durchgeführt, so dass für jede Konfiguration und jeden Tiefgang jeweils 24 Ergebnistabellen berechnet wurden.

5.4.2 Kriterien der zur Beurteilung

Für die Beurteilung der Seefestigkeit wurden in diesem Fall 3 Kriterien verwendet:

- **Maximale Krängung:** Weil die Relativ-Bewegungen zwischen Motorschiff und Leichter beschränkt sein müssen, wurde das Kriterium einer maximalen Krängung von 1,0 m definiert.
- **Freibord:** Als Kriterium wurde definiert, dass der kleinste Freibord im Seegang mindestens 0 m betragen muss.
- **Vertikalbewegung an der Koppelstelle:** Aufgrund der beschränkten Relativ-Bewegungen zwischen Motorschiff und Leichter wurde das Kriterium einer maximalen Vertikal-Bewegung an der Koppelstelle von 1,0 m definiert.

5.5 Ergebnisse

Das wesentliche Ergebnis der Berechnungen ist die Bestimmung der Wellenhöhe, bei der ein bestimmtes Kriterium nicht mehr eingehalten werden kann. Dieser Wert, als „Wave Height to exceed the limit“ (HEXL) bezeichnet, ist von der Frequenz des Seegangs abhängig.

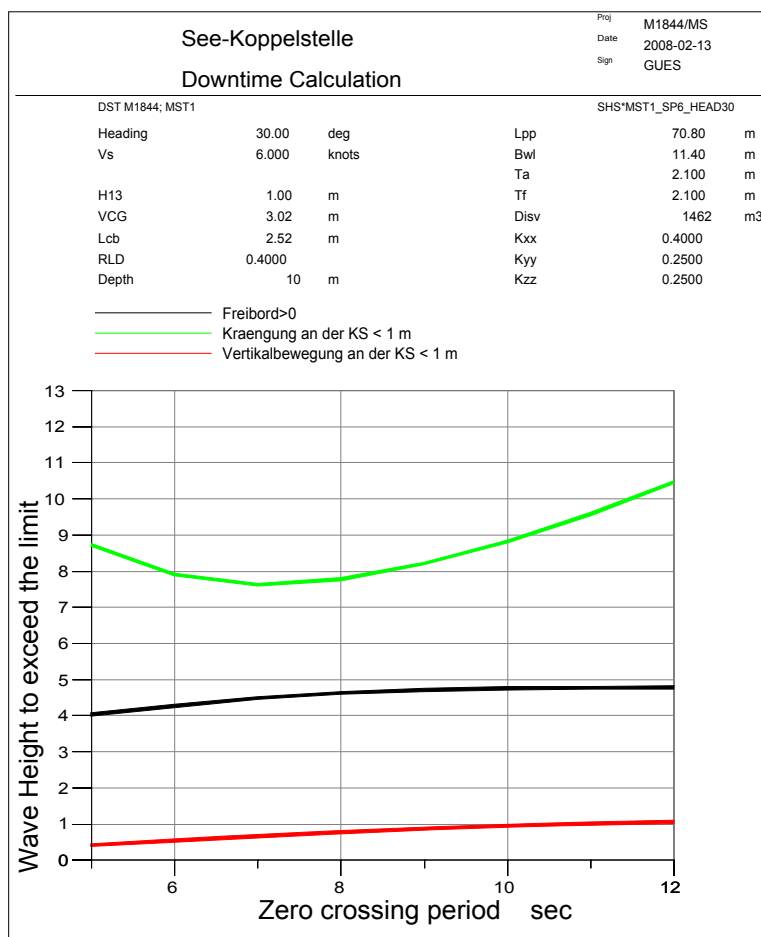


Abbildung 26: Grafische Darstellung eines typischen Berechnungsfalles

Case	MST1	Speed	6	Head	30
TZ	H10UT	H20UT	H30UT		
sec	m	m	m		
5.00	0.41	8.71	4.02		
6.00	0.53	7.90	4.26		
7.00	0.65	7.61	4.48		
8.00	0.77	7.76	4.62		
9.00	0.87	8.19	4.70		
10.00	0.95	8.81	4.74		
11.00	1.01	9.57	4.76		
12.00	1.05	10.44	4.77		

Tabelle 8: Tabelle mit den HEXL-Ergebnissen eines typischen Berechnungsfalles

Die Tabellen mit HEXL-Werten wurden für alle Berechnungsfälle erstellt und konnten spezifisch ausgewertet werden.

Bei der Analyse der Ergebnisse zeigte sich, dass die Kriterien „Maximale Krängung“ und „Freibord“ in den meisten Fällen auch bei Wellenhöhen größer als 2,0 m eingehalten werden können, während das Kriterium „Vertikalbewegung an der Koppelstelle $< 1,0 \text{ m}$ “ schon bei relativ kleinem Seegang überschritten werden könnte. Aus diesem Grund sollte die Relativbewegungen im Koppelverband bei den kommenden Modellversuchen genau beobachtet werden.

6. Modellversuche

Die Modellversuche im glatten Wasser wurden durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des Entwurfs im Vergleich zu modernen Binnenschiffen festzustellen und um genaue Daten zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit verwenden zu können. Anschließend dienten die Manövrierversuche und die Versuche im Seegang dazu, die Funktion der seefähigen Koppelvorrichtung und die Seefestigkeit des Koppelverbandes beurteilen zu können.

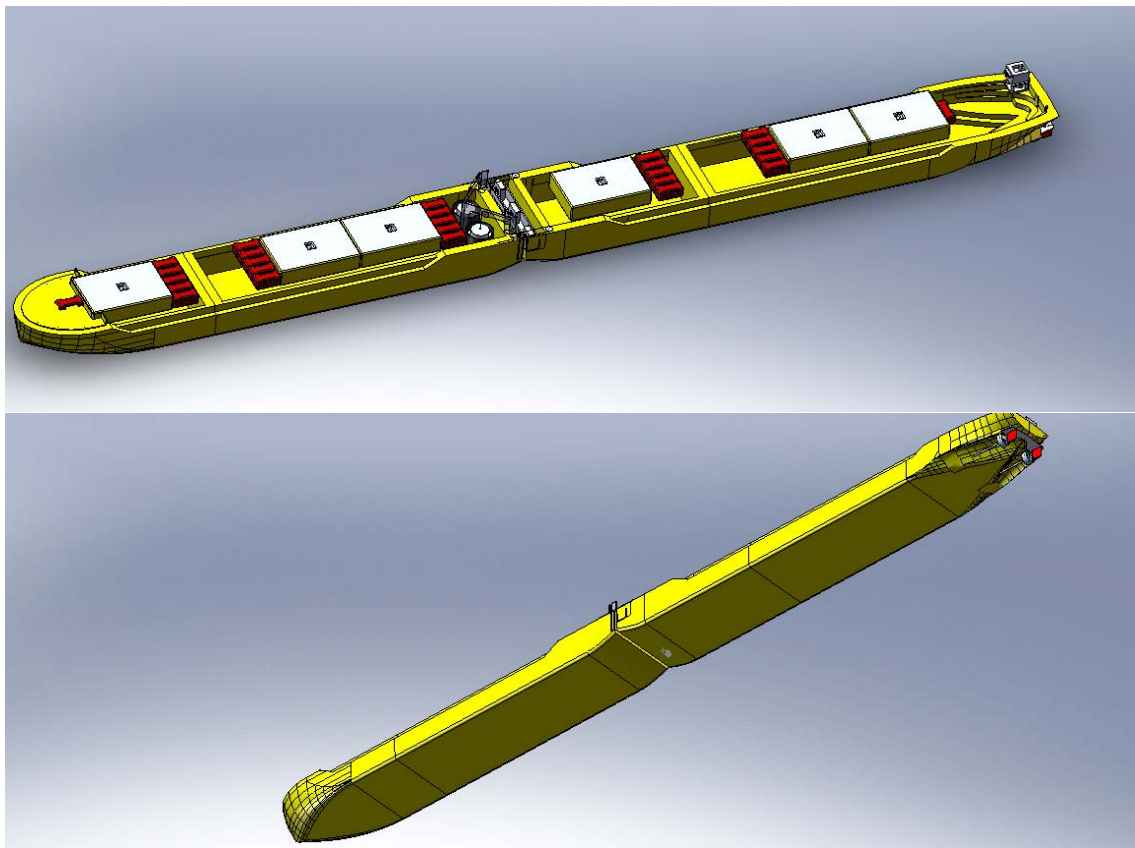


Abbildung 27: Modell M1844 für Versuche im glatten Wasser und im Seegang

6.1 Widerstands- und Propulsionsversuche

Die Widerstands- und Propulsionsversuche im glatten Wasser wurden in dem in Tabelle 9 dargestellten Umfang durchgeführt.

Wassertiefe [m]	Tiefgang [m]		
	2,80	2,10	1,60
3,0		PD	PD
4,0	PD		
5,0	PD	PD	PD
15,0	PD	PD	PD
15,0	RT	RT	RT
PD = Propulsionsversuch, RT = Widerstandsversuch			

Tabelle 9: Umfang der Widerstands- und Propulsionsversuche

Die Ergebnisse der Propulsionsversuche werden in den Anlagen B dargestellt.

6.1.1 Interpolation für unterschiedliche Einsatzbedingungen

Aus den Ergebnissen der Modellversuche für die in Tabelle 9 genannten Einsatzbedingungen wurde mit Methoden der Interpolation eine Prognose für die in Tabelle 10 genannten Bedingungen berechnet. Diese Daten wurden ebenfalls für die in Kapitel 7 dargestellten Wirtschaftlichkeits-Berechnungen verwendet.

Wassertiefe [m]	Tiefgang [m]				
	2,80	2,50	2,10	1,70	1,60
3,0		Int.	M	Int.	M
4,0	M	Int.	Int.	Int.	Int.
5,0	M	Int.	M	Int.	M
6,0	Int.	Int.	Int.	Int.	Int.
15,0	M	Int.	M	Int.	M
M = Versuchsdaten, Int.= Interpolierte Daten					

Tabelle 10: Aus den Propulsionsversuchen ermittelte Daten

6.2 Manövrierversuche

Die Manövrierversuche im glatten Wasser wurden mit einem frei fahrenden Modell durchgeführt, um die Funktion der seefähigen Koppelvorrichtung feststellen zu können und die dort auftretenden Kräfte zu messen.

Es wurden ohne Seegang die folgenden Manöver frei gefahren:

- R-Manöver (Ausweichmanöver nach Rheinschiffs-Untersuchungsordnung) mit einem Ruderwinkel von 45° und einer Drehgeschwindigkeitsabweichung von $18^\circ/\text{min}$
- Standardschlängelversuch mit einem Ruderwinkel von 45° und einer Kursabweichung von 5°
- Standardschlängelversuch mit einem Ruderwinkel von 45° und einer Kursabweichung von 10°

Bei den Schlängelversuchen mit 5° und 10° Kursabweichung wurden bei allen drei Tiefgängen annähernd gleiche Zugkräfte ermittelt, so dass es als ausreichend erachtet wurde, im Hinblick auf die eingeschränkte Tankbreite den Schlängelversuch mit 5° Kursabweichung durchzuführen. Weiterhin wird erwartet, dass der Platzbedarf des manövrierenden Verbandes im Seegang größer wird.

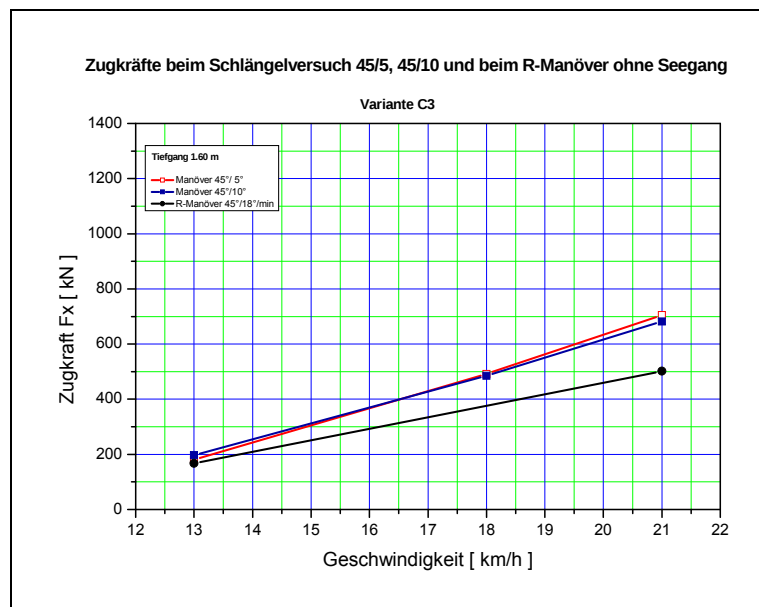


Abbildung 28: Zugkräfte mit $T = 1,60 \text{ m}$

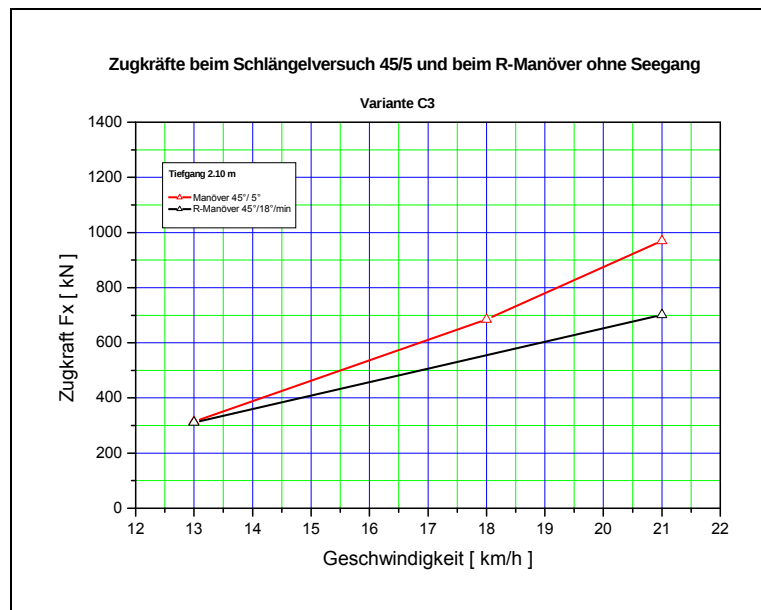


Abbildung 29: Zugkräfte mit T = 2,10 m

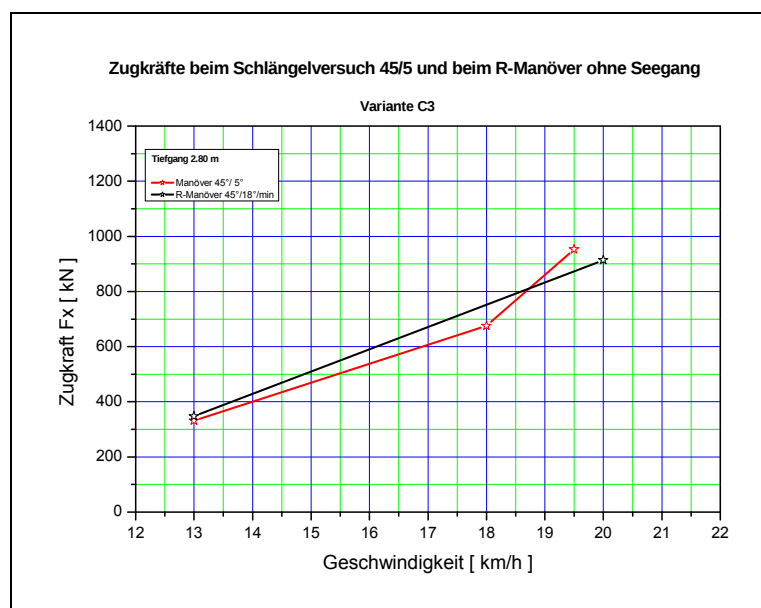


Abbildung 30: Zugkräfte mit T = 2,80 m

Die Auswertung der Zugkräfte ergab, dass für die Ermittlung der maximalen Zugkräfte im Seegang das Schlängelmanöver mit einem Ruderwinkel von 45° und einer 5° Kursabweichung bei Tiefgängen bis 2,80 m geeignet ist.

Die Manövrierversuche zeigten für alle drei Varianten der seefesten Koppelvorrichtung eine einwandfreie Funktion.

6.3 Seegangsversuche mit dem frei fahrenden Modell

Die Seegangsversuche wurden durchgeführt, um unter praxisähnlichen Bedingungen

- das Bewegungsverhalten des Verbandes zu beobachten und zu erfassen.
- die Seetauglichkeit des Koppelverbandes beurteilen zu können.
- bei den Varianten C2 und C3 die maximal auftretenden Koppelkräfte bzw. die erforderliche Haltekraft der Kupplung zu ermitteln.
- bei der Variante B1 die Funktion der Koppelvorrichtung zu überprüfen.

6.3.1 Versuchsaufbau

Für die Versuche im Seegang wurde das Modell des Koppelverbandes mit einer umfangreichen Messtechnik ausgestattet.

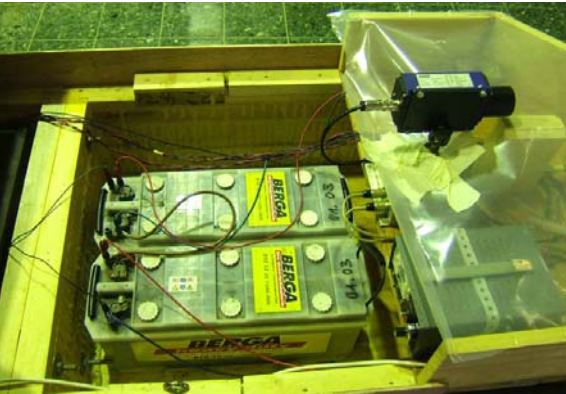
	Rudermaschine und Ruderlagenzeiger und Kreiselkompass im Hinterschiff
	Messwerterfassung und drahtlose Datenübertragung
	Messvorrichtung zur berührungslosen Erfassung der vertikalen Relativ- Bewegung und der Krängung zwischen Motorschiff und Schubleichter. Kraftmessglieder zur Messung der Kräfte in der Koppelvorrichtung Variante C2
	24 V-Stromversorgung und Wegmessung in Tanklängsrichtung

Abbildung 31: Ausrüstung Modell Koppelverband

6.3.2 Versuchsparmeter der Seegangsversuche

Es wurden drei unterschiedliche seefähige Koppelvorrichtungen untersucht:

- Variante C2 - Koppelvorrichtung mit einem Haltepunkt auf Mitte Schiff
- Variante C3 - Koppelvorrichtung mit zwei Haltepunkten jeweils an den Seiten
- Variante B1 - Koppelvorrichtung mit waagerechter Rolle zwischen den Schiffen

Der Koppelverband wurde auf drei Tiefgängen getestet:

- $T = 1,60$ m - kleinster Tiefgang, bei dem der Koppelverband manövrierfähig bleibt
- $T = 2,10$ m - typischer Tiefgang bei Containerladung und Ballast
- $T = 2,80$ m - Tiefgang bei Massengut

Die Wassertiefe wurde durchgehend auf $h = 15,0$ m im großen Versuchstank des DST eingestellt.

Der Wellenerzeuger im großen Versuchstank des DST wurde verwendet, um Wellen in Längsrichtung des Tanks zu erzeugen. Dabei wurden die Daten entsprechend der Tabelle 11 erreicht. Diese Daten entsprechen den in Kapitel 3.3 beschriebenen typischen Seegangsdaten, wie sie im Einsatzgebiet des Koppelverbands statistisch erfasst wurden.

Periode [sec]	Wellenhöhe [m]	Wellenlänge [m]
4,0	0,86	25,0
4,5	1,70	31,6
5,0	2,08	39,0

Tabelle 11: Daten des eingestellten Seegang

Die Anlagen D1 bis D6 enthalten die Versuchsübersicht 1 bis 6. Die einzelnen Versuchsparmeter können der Versuchsübersicht entnommen werden.

6.3.3 Ergebnisse für die Koppelvorrichtung Variante C2

Die Ergebnisse der Versuche mit der Variante C2 (Koppelvorrichtung mit einem Haltepunkt auf Mitte Schiff) im Seegang werden in den Anlagen D7 bis D9 grafisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Zugkräfte mit kleiner werdender Geschwindigkeit zunehmen. Die Manövrierversuche ohne Seegang ergaben erwartungsgemäß, dass die Zugkräfte mit größer werdendem Tiefgang zunehmen. Bei den Versuchen im Seegang bis zu einer Wellehöhe von 1,70 m zeigte sich die gleiche Tendenz. Bei einer Wellenhöhe von 2,08 m und bei kleineren Geschwindigkeiten ($V < 12$ km/h) wurden die Zugkräfte bei kleineren Tiefgängen größer. Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt die Zugkräfte in der Koppelvorrichtung bei Fahrt im Seegang. Die Grafik enthält die Messwerte der Geradeausfahrt und der Manövrierversuche bei der See von vorne und der Geradeausfahrt und der Stoppversuche bei der See von achtern.

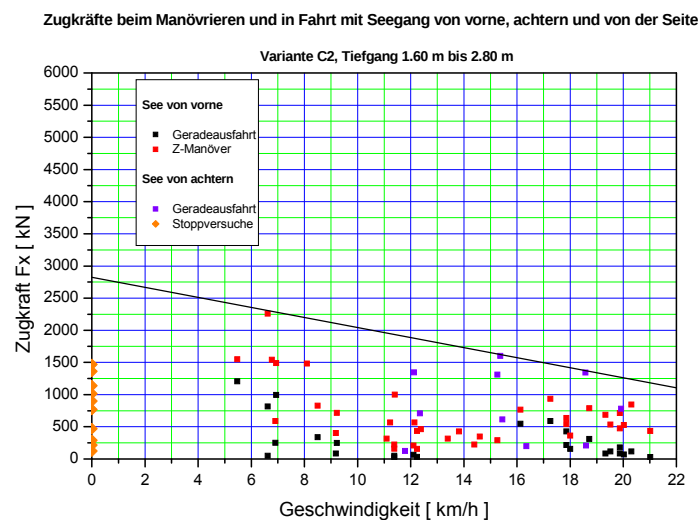


Abbildung 32: C2, Zugkräfte im Seegang, T = 1,60 m bis 2,80 m

Die Abbildung 32 zeigt eine eingrenzende Gerade. Alle gemessenen Zugkräfte liegen unterhalb dieser Grenzlinie. Damit wird die Aussage für die Zugkräfte abgeleitet, indem sich für die beiden Kupplungselemente eine vorhandene Zugkraft von jeweils 2700 kN (275 t) ergibt. Unter Berücksichtigung der Vorspannkraft von 177 kN (18 t) müssen die Kupplungselemente eine Haltekraft von 2877 kN (293 t) ohne Sicherheitsreserven in das Fahrzeug übertragen können.

6.3.4 Ergebnisse für die Koppelvorrichtung Variante C3

Die Ergebnisse der Versuche mit der Variante C3 (Koppelvorrichtung mit zwei Haltepunkten jeweils an den Seiten) im Seegang werden in den Anlagen D10 bis D12 grafisch dargestellt. Die unter 6.3.3 beschriebenen Tendenzen werden auch bei der Variante C3 festgestellt. Die Grafik der nachfolgenden Abbildung 33 zeigt die Zugkräfte in der Koppelvorrichtung bei Fahrt im Seegang. Die Grafik enthält die Messwerte der Geradeausfahrt, der Manövrierversuche und der Stoppversuche bei der See von vorne sowie bei der Fahrt mit geringer Geschwindigkeit quer zur See.

Die Abbildung zeigt die Zugkräfte in der Koppelvorrichtung bei Seegang.

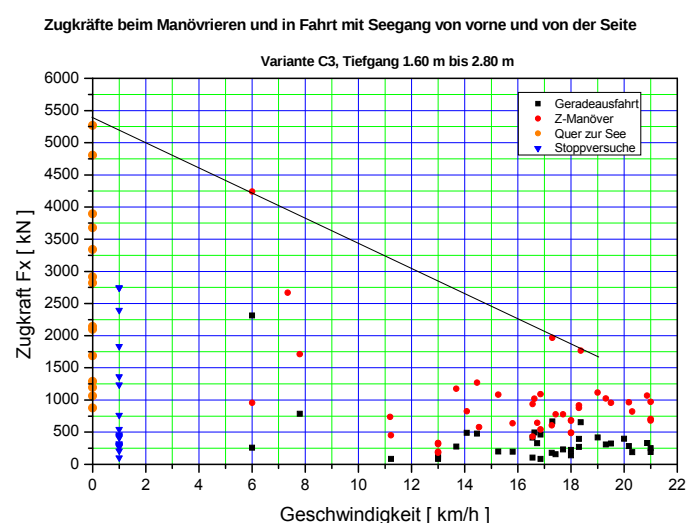


Abbildung 33: C3, Zugkräfte im Seegang, T = 1,60 m bis 2,80 m

Die Abbildung 33 zeigt auch eine eingrenzende Gerade, bei der unterhalb alle gemessenen Zugkräfte liegen. Für das Kupplungselement ergibt sich eine maximale vorhandene Zugkraft von 5300 kN (540 t). Unter Berücksichtigung der Vorspannkraft von 200kN (21 t) muss das Kupplungselemente eine Haltekraft von 5500 kN (561 t) ohne Sicherheitsreserven in das Fahrzeug übertragen können.

Bei beiden Varianten C2 und C3 werden die Haltekräfte bei Zunahme der Geschwindigkeit geringer. Beide Varianten sind für die Fahrt auf See mit einer mittleren Wellenhöhe von 2,08 m geeignet. Im Hinblick auf die Größe der Kräfte sollte jedoch die Variante C2 mit zwei Kupplungselementen bevorzugt werden.

6.3.5 Ergebnisse für die Koppelvorrichtung Variante B1

Damit die Variante B1 (Koppelvorrichtung mit waagerechter Rolle zwischen den Schiffen) in der Großausführung funktionieren kann, ist die Entwicklung eines Bauteils erforderlich, das unabhängig vom Weg für eine konstante Seilspannung sorgt. Im Modellversuch ist dies durch aufgelegte Gewichte simuliert.

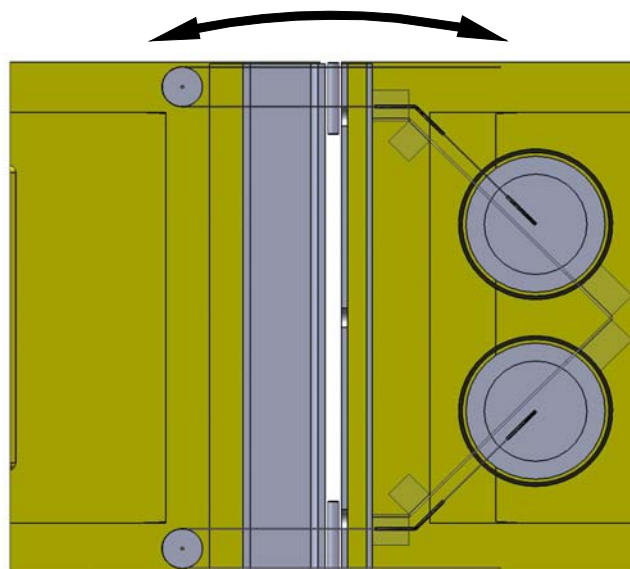


Abbildung 34: Koppelvorrichtung - Variante B1

Die im Versuch realisierte seefeste Koppelvorrichtung hat eine korrespondierende Zugkraft von 61 t pro Koppelseite und spannt die Verbandsteile an beiden Seiten mit 122 t vor. Wenn durch den Einfluss des Seegangs oder durch die Manöver höhere Kräfte auf die Koppelvorrichtung einwirken, kann kurzzeitig ein Abstand zwischen den Schubbühnen entstehen. Wenn diese Lücke wieder zusammenschlägt, entsteht ein relativ großer Stoßimpuls, der möglichst vermieden werden soll. Um diese Vorgänge nachvollziehen zu können, wurde im Versuch der waagrechte Abstand zwischen den Schubbühnen aufgezeichnet.

Während der Versuche konnte dieser Vorgang „Überschreitung der Vorspannung“ einige Male beobachtet bzw. durch die Auswertung der Messergebnisse aufgezeigt werden:

- In der Geradeausfahrt bei geringer Geschwindigkeit und einer Wellenhöhe von 2,08 m wurde bei den Tiefgängen von 1,60 m und 2,10 m ein Überschreiten der Vorspannkraft festgestellt. Bei höheren Geschwindigkeiten und bei einem Tiefgang von 2,80 m sowie bei den Fahrten mit geringeren Wellenhöhen wurde die Vorspannung nicht überschritten.
- Bei geringen Geschwindigkeiten, nahe $V_{\text{üG}} = 0$ wurde bei allen 3 Wellenhöhen eine Überschreitungen der Vorspannung registriert.

- Beim Z-Manöver mit geringer Geschwindigkeit quer zur See und einer Wellenhöhe von 1,70 m wird bei einem Tiefgang von 1,60 m und bei 2,08 m bei allen untersuchten Tiefgängen ein Überschreiten der Vorspannkraft festgestellt. Bei höher eingestellten Geschwindigkeiten wurde die Vorspannkraft nicht überschritten.

Mit den Video-Aufzeichnungen sollte ein Eindruck vom Seeverhalten des Koppelverbandes gegeben werden.

6.3.6 Ergebnisse mit dem schiebenden Motorschiff im Seegang

Mit dem schiebendem Motorschiff alleine sind zusätzliche Seegangsversuche durchgeführt worden, um festzustellen, ob das Motorschiff nach einem möglichen Versagen der Kupplungselemente auch bei einem Seegang mit höheren Wellenhöhen als 2,08 m eingesetzt werden kann. Die Versuche haben ergeben, dass die Grenze der Einsatzfähigkeit bis zu einer Wellenhöhe von ca. 2,50 m gewährleistet werden könnte.

6.4 Konstruktive Gestaltung der seefähigen Koppelvorrichtung

Die konstruktive Gestaltung der seefähigen Koppelvorrichtung in den getesteten Varianten wird im Rahmen dieses Berichts nicht im Detail dargestellt, da in diesem Zusammenhang und im Rahmen des Vorhabens internes Know-how erarbeitet worden ist. Das DST und auch die im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses mitarbeitenden Projektpartner behalten es sich vor, mit diesen Kenntnissen eine weitere Entwicklung voranzutreiben und die Umsetzung in die Praxis zu erreichen.

6.5 Schleppverkehr als Alternative zur seefähigen Koppelvorrichtung

Eine Alternative zu dem in diesem Vorhaben untersuchten FSKV besteht im Einsatz von Leichtern, die zwischen Bremerhaven und Wilhelmshaven von einem seefähigen Schlepper geschleppt werden. Die Leichter würden dann bei der Fahrt auf der Binnenwasserstraße von einem Binnen-Schubboot befördert. Diese Variante könnte unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit insbesondere für Massengüter von Interesse sein. Eine eingehende Untersuchung dieser Variante könnte in einem Anschlussvorhaben erfolgen.

7. Wirtschaftliche Beurteilung

7.1 Einleitung

Das Alleinstellungsmerkmal des Schiffstyps Fluss-See-Koppelverband (FSKV) liegt in der Möglichkeit, Güter auf dem Wasserweg durchgehend ohne Umschlag über eine Küstenstrecke bis tief ins Hinterland zu transportieren. Da dieser Schiffsverband in einzelne Fahrzeuge - Schubschiff und Schubleichter - getrennt werden kann, ist auch eine Fahrt durch die kürzeren Schleusenkammern und damit auf kleineren Wasserstraßen möglich. Die Konzeption des neuartigen Schiffsystems ist abgestellt auf Seehäfen wie Wilhelmshaven, die keinen direkten Anschluss an Binnenwasserstraßen haben.

Ob dieses neuartige Schiffssystem eine wettbewerbsfähige Alternative sein kann, soll nachstehend auf ausgewählten Transportrelationen im Hinterland des Seehafens „Wilhelmshaven“ untersucht werden. Ein Vergleich zu anderen Schiffen erübrigt sich, da Binnenschiffe den zwar kurzen, aber unumgehbaren küstennahen Seebereich nicht befahren dürfen und übliche Fluss-Seeschiffe für Strecken auf Elbe und Weser oberhalb von Bremen, respektive Hamburg nicht geeignet sind. Ferner kann auf einen Vergleich zu Transportkombinationen mit See-Feederschiffen verzichtet werden, da diese einen weiteren zusätzlichen Umschlag in benachbarten Seehäfen beinhalten und damit zwangsläufig den Vor- und Nachlauf extrem verteuern würden.

Deshalb wird nachstehend geprüft, ob der FSKV im Vergleich zu Transporten über Land per Bahn und per LKW eine wirtschaftliche Alternative sein kann.

Dabei wird abgestellt auf die Ladungssegmente Kohle und maritime Container, da diese für den Seehafen Wilhelmshaven von besonderer Bedeutung sind - bzw. in Zukunft sein werden:

- o Im Jahr 2008 gingen etwa 800 000 t Importkohle über Wilhelmshaven per Bahn ins Hinterland. Seitens der Hafenverwaltung wird mittel- und langfristig mit einer Mengenzunahme gerechnet.
- o Ab 2012 sollen in Wilhelmshaven jährlich etwa 800 000 TEU für das Hinterland, d.h. für den direkten landseitigen Vor- oder Nachlauf, umgeschlagen werden.

Bei dem Vergleich des FSKV zur Bahn und zum LKW werden Preise für den Bahntransport und den Transport per LKW den Kosten gegenüber gestellt, die für die Erbringung der Transportleistung durch den Einsatz des FSKV errechnet wurden. Die recherchierten Preise bei LKW und Bahn sind also Zielgrößen (Target Costs), an denen sich die Wettbewerbsfähigkeit des neuartigen Schiffsystems messen lässt.

7.2 Einsatz des FSKV - Vergleich der Transportkosten mit anderen Verkehrsträgern

Für den Vergleich der Transportkosten im Hinterland zum Seehafen Wilhelmshaven bietet es sich an, entlang der Weser, der Elbe und des Mittellandkanals Kohlekraftwerke und für den Containerumschlag wichtige Binnenhäfen in Betracht zu ziehen. Bei den Binnenhäfen werden vorrangig solche Standorte betrachtet, die über 100 km von Wilhelmshaven entfernt und nicht für den Seeverkehr, aber für den FSKV geeignet sind.

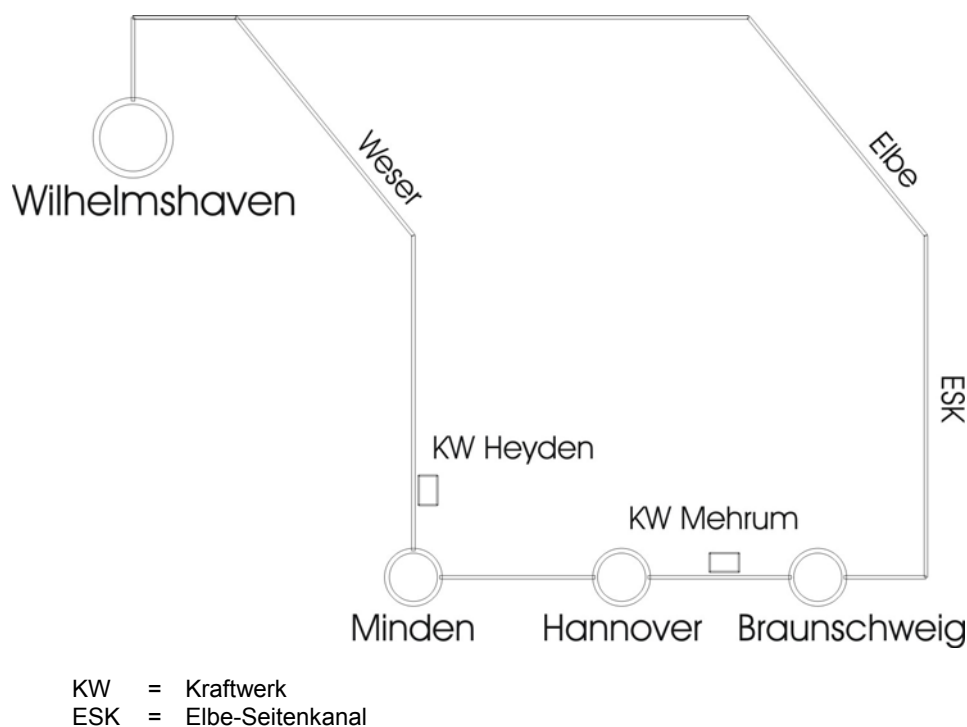


Abbildung 35: Referenzstrecken im Hinterland von Wilhelmshaven

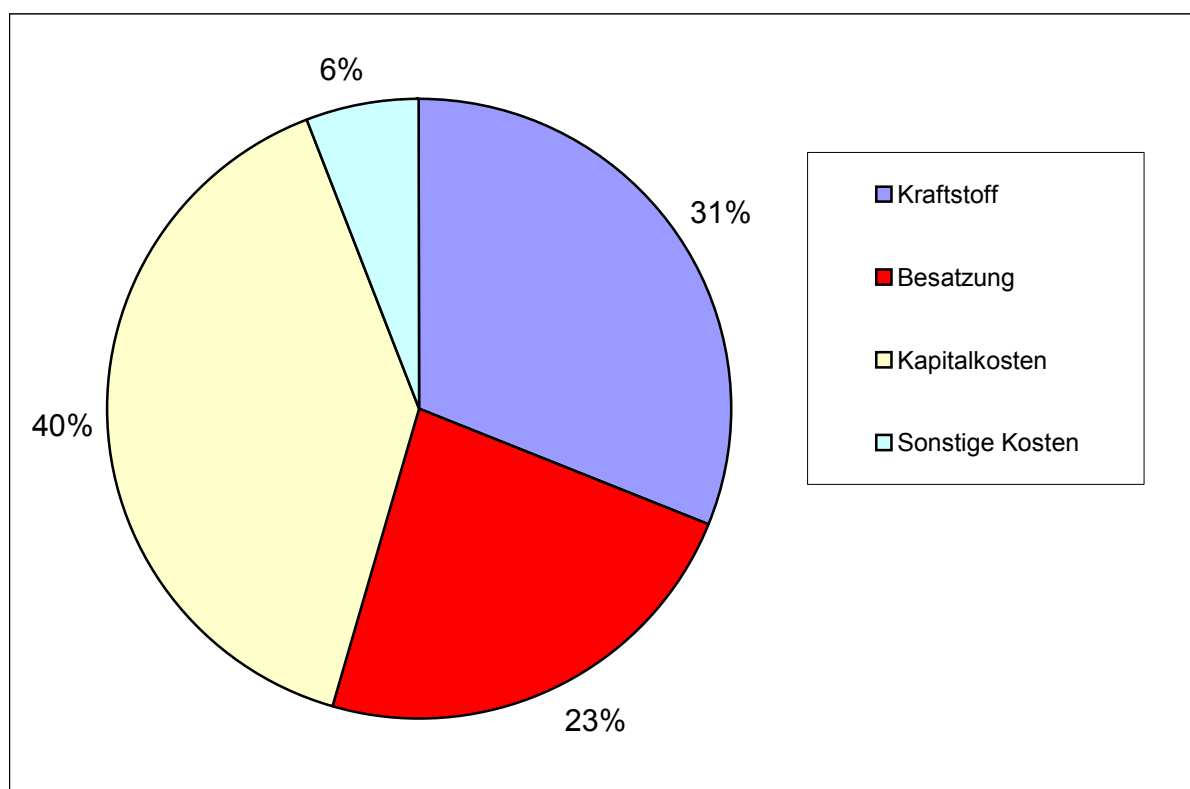
7.2.1 Berechnung der Einsatzkosten des FSKV-Schiffes

Zur Ermittlung der Transportkosten pro Schiff hat das DST ein Verfahren entwickelt, welches eine Berechnung unter Berücksichtigung der investiven, der betriebsbedingten sowie der streckenabhängigen Kosten ermöglicht (siehe Anhang, Anlage E.1).

In diesem Zusammenhang sind die investiven Kosten die geschätzten Baukosten, die bei dem FSKV etwa 10 % höher veranschlagt wurden als für einen vergleichbaren, in der Binnenschifffahrt üblichen, d.h. nicht seetüchtigen Koppelverband.

Die betriebsbedingten Kosten setzen sich zusammen aus Kosten, die sich einerseits aus der Vorhaltung des Schiffes in einem bemannten und einsatzfähigen „Stand-by-Zustand“ und andererseits durch die Fahrt des Schiffes ergeben. Bei den Kosten für den einsatzfähigen Zustand des FSKV wurden die eines vergleichbaren Binnen-Koppelverbandes zugrunde gelegt.

Der Brennstoffverbrauch ist ein Kostenpunkt, der darüber hinaus während der Fahrt des Schiffes entsteht. Dabei sind entscheidend die entsprechenden Eigenschaften des Schiffes, die Beladung des Schiffes, die Wasserstraßeninfrastrukturbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Wassertiefen, operative Einflüsse wie gefahrene Geschwindigkeit und der Brennstoffpreis, der nachstehend mit 900 €/t veranschlagt wurde.



**Abbildung 36: Kostenanteile des Koppelverbandes für den Containertransport
Wilhelmshaven - Hannover**

Bei den Transportstrecken sind Schleusen in Bezug auf die zulässigen Schiffsabmessungen und deren Anzahl im Hinblick auf den Zeitbedarf bei der Analyse der Transporteffizienz zu berücksichtigen. Bei den nachstehend durchgeführten Kalkulationen wurde hinsichtlich der Schleusen von einem Zustand ausgegangen, wie er mit Abschluss des Ausbaus der Mittelweser und deren verbessertem Anschluss an den Mittellandkanal im Jahr 2012 erreicht sein soll.

Die Wasserstandsverhältnisse sind in Verbindung mit Schiffsform / -größe, Tiefgang und Fahrtgeschwindigkeit sowie hinsichtlich der nutzbaren Transportkapazität als zentrale Größen zu berücksichtigen. Die Werte, die dafür in den nachstehenden Berechnungen für den Bereich der Binnenwasserstraßen zugrunde gelegt wurden, entsprechen derzeit üblichen Verhältnissen (siehe Anlage E.2).

Auswertungen der Seegangs-Statistik sowie der durchgeführten Versuche haben ergeben, dass übers Jahr gerechnet der FSKV in 84 von 100 Fällen ausreichende Seeverhältnisse vorfinden wird. Dies bedeutet eine Wahrscheinlichkeit, dass zumin-

dest während einiger Reisen sich die Fahrzeit des FSKV durch Warten auf bessere Seegangsverhältnisse verlängert. Diese Verlängerungen wurden bei der Kostenberechnung berücksichtigt.

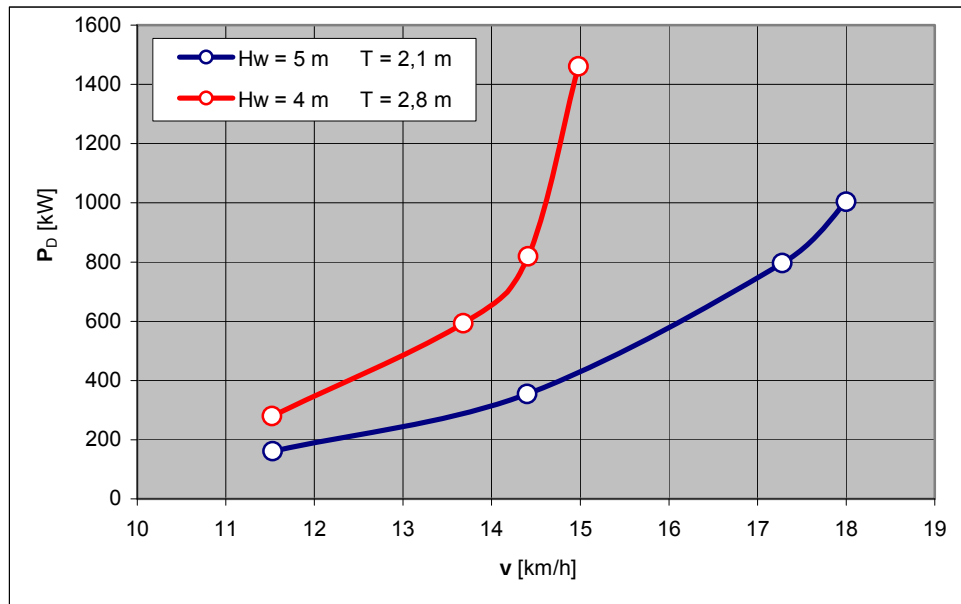


Abbildung 37: Beispiel für den Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Um eine Vergleichbarkeit zu den anderen Verkehrsträgern zu ermöglichen, werden die Gesamtkosten, die durch den Einsatz eines FSKV entstehen, umgelegt auf die Ladungseinheit, die üblicherweise in dem jeweiligen Ladungssegment bei den Transportpreisen zugrunde gelegt wird.

7.2.2 Berechnung der Transportkosten

Kohle

Bei Kohle gilt „EURO/Gewichtstonne“ als Preiseinheit. Die recherchierten Preise für Kohle per Bahn in den betrachteten Relationen sind Indikationen aus dem Markt. Da solche Geschäfte vertraulich getätigt werden, standen offizielle Preisinformationen nicht zur Verfügung.

In der Regel werden solche Bahntransporte als Pendelverkehre durchgeführt, d.h. Züge gehen von den Kraftwerken leer zurück in den Seehafen. Die Kosten für die Leerfahrten und die Stand-by-Zeiten sind in den Preisen enthalten.

Die Kraftwerke „Heyden“ an der Weser und „Mehrum“ am Mittellandkanal sind potenzielle Ziele für Importkohle über Wilhelmshaven. Für diese Standorte wurden die Vergleichszenarien gerechnet.

Recherchen ergaben, dass die Transportpreise für die Versorgung dieser Kraftwerke zwischen 3,50 und 4,00 €/t liegen dürften, wobei heute „Heyden“ vorrangig per Binnenschiff aus Nordenham und „Mehrum“ per Bahn und Binnenschiff aus Hamburg bedient werden. 3,50 €/t wären somit ein „target“ oder eine Grenze, unter der die

Kosten, die beim Transport von Kohle mit dem FSKV zwischen Wilhelmshaven und diesen Kraftwerken entstehen, liegen müssten.

Bei dem direkten Vergleich zwischen Bahn und Schiff für den Transport von Importkohle aus Wilhelmshaven zu den Kraftwerken „Heyden“ und „Mehrum“ werden die Umschlagkosten im Seehafen und am Kraftwerk bei beiden Verkehrsträgern vernachlässigt. Ferner wird die Annahme getroffen, dass das Kraftwerk „Mehrum“ über einen Bahnanschluss verfügt (derzeit nicht vorhanden).

Während „Kohlezüge“ vorwiegend im Pendelverkehr zwischen einem Seehafen und einem Kraftwerk eingesetzt bzw. leer in einen Seehafen zurückgeführt werden, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Binnenschiff Rückladung in Richtung Seehäfen findet, im Prinzip gegeben. In der nachstehenden Vergleichstabelle wird jedoch davon ausgegangen, dass der FSKV leer nach Wilhelmshaven zurückkehrt.

Kohletransport (Transport - ohne Umschlag)	Targetpreise				ab Wilhelmshaven	
	Bahn ab Hamburg	Binnenschiff* ab Hamburg	Binnenschiff* ab Nordenham	Bahn ab Wilhelmshaven	FSV-Schiff* Westroute	Ostroute
Kraftwerk Heyden						
Euro pro Tonne [€]			3,5	3,5	4,68	Entfällt
Fahrzeit - ohne Leerfahrt [Stunden]	Entfällt		49	8	61	
Abweichung FSV-Schiff						
Euro pro Tonne [%]	Entfällt		34	34	Entfällt	
Fahrzeit - ohne Leerfahrt [%]	Entfällt		24	663		
Kraftwerk Mehrum						
Euro pro Tonne [€]	3,5	3,5	Entfällt		6,37	4,63
Fahrzeit - ohne Leerfahrt [Stunden]	8	41	Entfällt		83	63
Abweichung FSV-Schiff						
Euro pro Tonne [%]	32	32	Entfällt		Entfällt	
Fahrzeit - ohne Leerfahrt [%]	55	54	Entfällt			

Tabelle 12: Kohle über Wilhelmshaven per FSKV zu den Kraftwerken „Heyden“ und „Mehrum“

Der in Tabelle 12 dargestellte Vergleich weist Mehrkosten gegenüber dem für alle Beispiele geltenden Targetpreis von 3,50 €/t aus. Ferner ergibt sich in allen Fällen eine längere Fahrzeit. Für das Kraftwerk „Mehrum“ ist die Ostroute (über Elbe und ESK) wegen einer Abladetiefe von 2,8 m (statt 2,5 m) günstiger.

Bei Kohle bedeutet wegen eines vergleichsweise geringen Warenwertes eine, bezogen auf die Gesamtstrecke ab Ladehafen in Übersee, nur geringfügige längere Transportdauer keinen großen Nachteil. Vielmehr kann eine längere Transportdauer z.B. dann von Vorteil sein, wenn die Warenabnahme im Seehafen wegen begrenzter Lagerkapazität im Seehafen oder aus anderen Gründen terminiert ist. Ferner gibt es Situationen, bei denen die Halde am Kraftwerk momentan voll belegt ist bzw. ein für den zu liefernden Kohletyp bestimmter Teilbereich der Halde erst innerhalb einiger Tage wieder frei wird. Auch hier wäre eine längere Transportzeit ein willkommener Zeitpuffer.

Ferner kann vermutet werden, dass, wie bei Binnenschiffen üblich, durch Rückladung zumindest auf einer Teilstrecke der FSKV Einnahmen generieren kann, um so die Kosten für die Leerfahrt zumindest zum Teil zu kompensieren. Dieser Möglichkeit wird der praktizierte Transportpreis für Kohle per Binnenschiff z.B. ab Nordenham nach Heyden bereits Rechnung tragen.

Im Hafenvergleich Wilhelmshaven zu Nordenham und Hamburg darf vermutet werden, dass der Seetransport nach Wilhelmshaven aufgrund der Tiefwasserverhältnisse und hierdurch möglicher größerer Schiffseinheiten Preisvorteile beinhaltet. Auch vor dem Hintergrund, dass bei einer recherchierten Preisspanne von 3,50 bis 4,00 €/t die untere Grenze als Zielgröße gesetzt wurde, lässt sich vermuten, dass der FSKV unter Einbeziehung des Seetransportes bezogen auf beide Kraftwerke eine Transportalternative sein kann.

Container

Bei Containern werden Preise im Vor- und Nachlauf zum Seetransport üblicherweise in EURO / 20'Box und EURO / 40'Box ausgewiesen. Dabei gilt für den durchgehenden LKW-Transport im Regelfall die Variante „Round Trip“, d.h. ein LKW nimmt im Export einen Leercontainer im Seehafen auf, welcher im Inland beladen und dann von demselben LKW zur Verschiffung im Seehafen angeliefert wird (Import entsprechend umgekehrt, d.h. der LKW bringt den Container leer in den Seehafen zurück). Für Entfernungen, die keine zweite Tour am gleichen Tag zulassen, gelten üblicherweise km-Preise pro Chassis (Auflieger), die bei etwa 1,00 € bis 1,30 € pro gefahrenen Kilometer liegen. Dabei sind im Prinzip die Transportpreise für 40' und 20'Container gleich.

Neben dem „Round Trip“ gibt es durchaus andere Fuhr-Varianten (siehe Anlage E. 3). Doch der „Round Trip“ ist die klassische Variante, die in den meisten Fällen zur Anwendung kommt. Was die Preisgestaltung bei Bahn und Binnenschiff in diesem Zusammenhang angeht, sind die Preise für den „LKW-Round Trip“ eine Messlatte. Bei schwankenden Brennstoffpreisen werden seit mindestens 1 Jahr im Entfernungsbereich von etwa 180 bis 300 km mindestens 2,00 € pro Entfernungskilometer gezahlt. Diese Größe wird nachstehend als Targetpreis angesetzt.

Im Vergleich zum „LKW-Round Trip“ ist der kombinierte Transport von „FSKV und LKW“ zu sehen (siehe Anlage E.3). Ein Importlauf erfolgt dabei per Schiff bis zu einem Binnenhafen in der Zustellregion. Vom Binnenhafen gelangt der Container per LKW zur Auslieferadresse und geht von dort aus leer zurück zum Binnenhafen. Dort steht er dem Seetransporteur wieder zur Verfügung. Vor und- Nachläufe zum Binnenschiff sind im Regelfall Regionalverkehre, die pro Tag und LKW durchschnittlich mindestens 2 Fahrten erlauben. Ob der Seetransporteur solche im Inland zurückgegebenen Leer-Container zwecks einer Export-Gestellung in der Region einsetzt oder auf seine Kosten in einen Seehafen zurückführt, hängt vom regionalen Bedarf an Containern ab. Insofern ist die allgemeine Gültigkeit eines direkten Vergleichs zwischen „Round Trip per LKW“ und „kombiniert FSKV/LKW“ eingeschränkt.

Um dennoch möglichst realitätsbezogene Aussagen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bzw. Konkurrenzfähigkeit des FSKV treffen zu können, wurden Szenarien durchgerechnet, die im Container-Hinterlandverkehr per Binnenschiff mit Vor- bzw. Nachlauf

per LKW als „typisch“ angesehen werden können. Dafür wurden für die Transportleistung des Schiffes wiederum die Betriebskosten des FSKV unter der Annahme ermittelt, dass der FSKV durchschnittlich zu 70 % seiner Stellplatzkapazität ausgelastet ist. Um jedoch die gesamte Transport- und Umschlagleistung bezogen auf Containertransporte zwischen Wilhelmshaven und den Kunden im Hinterland darzustellen, wurden Preise für regionale LKW-Fuhren sowie Preise für den Containerumschlag in Seehäfen und Binnenhäfen eingeholt. Für den Vor- bzw. Nachlauf per LKW wurden zwei übliche Entfernungsbereiche (20 km und 50 km) in zwei extremen Varianten angenommen.

Bei der Variante „A“ liegt - vom Binnenhafen aus gesehen - der Standort des Kunden in Richtung Wilhelmshaven („minus 20 km“ in Tabelle 13), während sich bei der Variante „B“ die Entfernung zu Wilhelmshaven um den Vor- bzw. Nachlauf vergrößert, da der Standort des Kunden in der entgegengesetzten Richtung liegt („plus 20 km“ in Tabelle 13).

Einzelheiten ergeben sich aus den nachstehenden Tabellen 13 bis 16 sowie aus der Anlage E.4.

Variante 20 Fuss Container	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße	<i>FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf</i>	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A</i>	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B</i>
70% Auslastung 20 km Vor-bzw. Nachlauf	km	km	€	€	[%]	€	[%]
Minden	186	20	321	332	-3,2	412	-22,0
Hannover	228	20	328	416	-21,2	496	-33,9
Braunschweig Westroute	263	20	338	486	-30,4	566	-40,2
Braunschweig Westroute	263	20	320	486	-34,3	566	-43,5

Tabelle 13: 20' Container mit 20 km Vor- bzw. Nachlauf

Variante 20 Fuss Container 70% Auslastung 50 km Vor-bzw. Nachlauf	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße km	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße km	<i>FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf</i> €	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km €	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A</i> [%]	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km €	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B</i> [%]
Minden	186	50	421	272	54,9	472	-10,7
Hannover	228	50	428	356	20,2	556	-23,0
Braunschweig Westroute	263	50	438	426	2,9	626	-30,0
Braunschweig Ostroute	263	50	420	426	-1,5	626	-33,0

Tabelle 14: 20' Container mit 50 km Vor- bzw. Nachlauf

Aus beiden Tabellen wird ersichtlich, dass die Kombination „FSKV/LKW“ mit zunehmender Entfernung zum Seehafen relativ zum LKW kostengünstiger wird. Nur bezogen auf den Binnenhafen Minden kann der LKW nicht unterboten werden, wenn der Standort des Kunden zwischen Minden und Wilhelmshaven liegt (Variante A).

Variante 40 Fuss Container 70% Auslastung 20 km Vor-bzw. Nachlauf	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße km	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße km	<i>FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf</i> €	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km €	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A</i> [%]	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km €	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B</i> [%]
Minden	186	20	393	332	18,3	412	-4,6
Hannover	228	20	406	416	-2,4	496	-18,2
Braunschweig Westroute	263	20	427	486	-12,2	566	-24,6
Braunschweig Ostroute	263	20	389	486	-19,9	566	-31,3

Tabelle 15: 40' Container mit 20 km Vor- bzw. Nachlauf

Variante 40 Fuss Container	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße	<i>FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf</i>	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A</i>	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km	<i>Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B</i>
70% Auslastung 50 km Vor-bzw. Nachlauf	km	km	€	€	[%]	€	[%]
Minden	186	50	493	272	81,2	472	4,4
Hannover	228	50	506	356	42,1	556	-9,0
Braunschweig Westroute	263	50	527	426	23,7	626	-15,8
Braunschweig Ostroute	263	50	489	426	14,8	626	-21,9

Tabelle 16: 40' Container mit 50 km Vor- bzw. Nachlauf

Die Tabellen 15 und 16 weisen ebenfalls aus, dass der kombinierte Transport „FSKV/LKW“ auf der Strecke Wilhelmshaven über den Binnenhafen Minden insbesondere dann nicht konkurrenzfähig sein kann, wenn der Standort des Kunden zwischen Minden und Wilhelmshaven liegt.

Aus den Tabellen 13 bis 16 werden die im Hinterlandverkehr der Seehäfen allgemein gültigen Tendenzen sichtbar, wonach

- eher 40' als 20' Container an LKW zum Transport vergeben werden. Das liegt daran, dass vorrangig LKW mit 40' Auflieger ausgerüstet sind, die zwar auch 2x20' aufnehmen können, beim Kunden jedoch nur 1 Container geöffnet werden kann.
- die Umschlagkosten, die im kombinierten Verkehr zusätzlich entstehen, erst auf längeren Strecken durch den gebündelten Transport per Schiff oder Bahn kompensiert werden können

Ferner kann angenommen werden, dass die deutlichen Kostenvorteile des kombinierten „FSKV-Transportes“ beim 20' Container genügend finanziellen Raum schaffen, um auch für 40' Container attraktive Preise gestalten zu können. Dabei werden als Randbedingungen gewisse, durch Seegang im Küstenbereich und Schwankungen der Wasserstände auf den Binnenwasserstrassen bedingte Unregelmäßigkeiten im Fahrplan, sowie längere Transportzeiten beim FSKV dem Fahrverbot an Wochenende beim LKW gegenüberstehen.

7.3 Zusammenfassende Bewertung der Wirtschaftlichkeit des FSKV

Der FSKV eröffnet dem Seehafen Wilhelmshaven eine erste praktikable Möglichkeit einer direkten Schiffsverbindung zum Netz der Binnenwasserstrassen im Hinterland.

Gegenüber den benachbarten Häfen hat Wilhelmshaven als Tiefwasserhafen gewisse Vorteile. Die fehlende direkte Anbindung an Binnenwasserstraßen ist jedoch vor dem Hintergrund einer bereits hohen und zu erwartenden sehr hohen Auslastung der Bahn- und Straßenverkehrswege ein Nachteil.

Auch wenn der FSKV wegen der Seegangssituation im Elbe-Weser Mündungsgebiet nur mit einer Einsatzfähigkeit von 84 % veranschlagt werden kann, haben die Berechnungen ergeben, dass dieses neuartige Schiffssystem selbst bei dieser Einschränkung wirtschaftlich für den Transport von Importkohle und maritimen Containern eingesetzt werden kann.

Die Umsetzung des geplanten Ausbaus der Mittelweser ist jedoch eine Voraussetzung für die Einsatzfähigkeit auf der Weser bis zum Übergang zum Mittellandkanal bei Minden.

Duisburg, Juni 2009

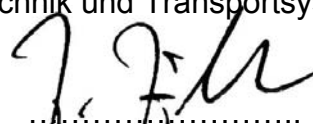
Projektbearbeiter:


.....
(Dipl.-Ing. H. Broß)


.....
(Dipl.-Ing. Th. Guesnet)


.....
(Dipl.-Ing. B. Zigic)

DST - Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


.....
(Dipl.-Ing. J. Zöllner)

Symbole und Abkürzungen

A_E	[m ²]	Gestreckte Flügelfläche des Propellers
A_0	[m ²]	Propellerkreisfläche
B_m	[m]	Breite auf Spanten
c	[m]	Profillänge eines Propellerflügels auf 0,7 R
C_A	[-]	Zusatzwiderstandsbeiwert
C_B	[-]	Blockkoeffizient, Def.: $C_B = V / (L_{WL} \cdot B_m \cdot T)$
D	[m]	Propellerdurchmesser
F_D	[kN]	Reibungsabzug
F_{nh}	[-]	Froude' sche Tiefenzahl, Def.: $\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$
h	[m]	Wassertiefe
J	[-]	Fortschrittsziffer
K_Q	[-]	Drehmomentenbeiwert
K_T	[-]	Schubbeiwert
L_{PP}	[m]	Länge zwischen den Loten
L_{WL}	[m]	Wasserlinienlänge
n	[1/min], [1/s]	Propellerdrehzahl
P	[m]	Propellersteigung
P_D	[kW]	Wellenleistung am Propeller. Def.: $2 \pi \cdot Q \cdot n$
P_E	[kW]	Schleppleistung
P_T	[kW]	Schubleistung
Q	[kNm]	Propellerdrehmoment
R_T	[kN]	Widerstand
S	[m ²]	Benetzte Oberfläche
T	[m]	Tiefgang
T	[kN]	Schub, hier immer der Systemschub des Ruderpropellers
T_P	[kN]	Propellerschub
t	[-]	Sogziffer
V	[km/h]	Schiffsgeschwindigkeit
V_A	[m · s ⁻¹]	Anströmgeschwindigkeit
V	[m ³]	Verdrängungsvolumen
w_T	[-]	Nachstromziffer aus Schubidentität
Z	[-]	Flügelzahl
z_V	[cm]	Absenkung
η_0	[-]	Propellerfreifahrtwirkungsgrad
η_B	[-]	Wirkungsgrad des Propellers hinter dem Schiff
η_D	[-]	Propulsionsgütegrad
η_H	[-]	Schiffseinflussgrad
η_R	[-]	Gütegrad der Anordnung
λ	[-]	Modellmaßstabsziffer
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Wassers, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ für Süßwasser
θ	[min]	Trimm

Anlagenverzeichnis

Schiffs- und Modelldaten

- A Anlagen zu den Modellversuchen
- B Ergebnisse der Modellversuche / Glattwasser
- C Anlagen zu den Seegangsberechnungen
- D Ergebnisse der Modellversuche / Seegang
- E Anlagen zu „Wirtschaftliche Beurteilung“
- F Technische Vorschriften für Binnen- und Seeschiffe

Schiffs- und Modelldaten

DST-Modell Nr. 1844 – Maßstab 1 : 16

Schiffsabmessungen:

			<u>Schiff</u>	<u>Modell 1839</u>
Länge über alles	$L_{\text{üa}}$	[m]	135,00	14,211
Breite auf Spant	B_{Spt}	[m]	11,45	1,205
Tiefgang	T	[m]	1,50	0,158
Verdrängung	∇	[m ³]	1894	2,209
Benetzte Oberfläche	S	[m ²]	1712	18,970

Propeller:

Typ			P 259 r/l Wageningen B 4,70
Durchmesser	D	[m]	0,110
Steigungsverhältnis	P/D	[-]	1,000
Flächenverhältnis	A_E/A_0	[-]	0,700
Flügelzahl	Z	[-]	4

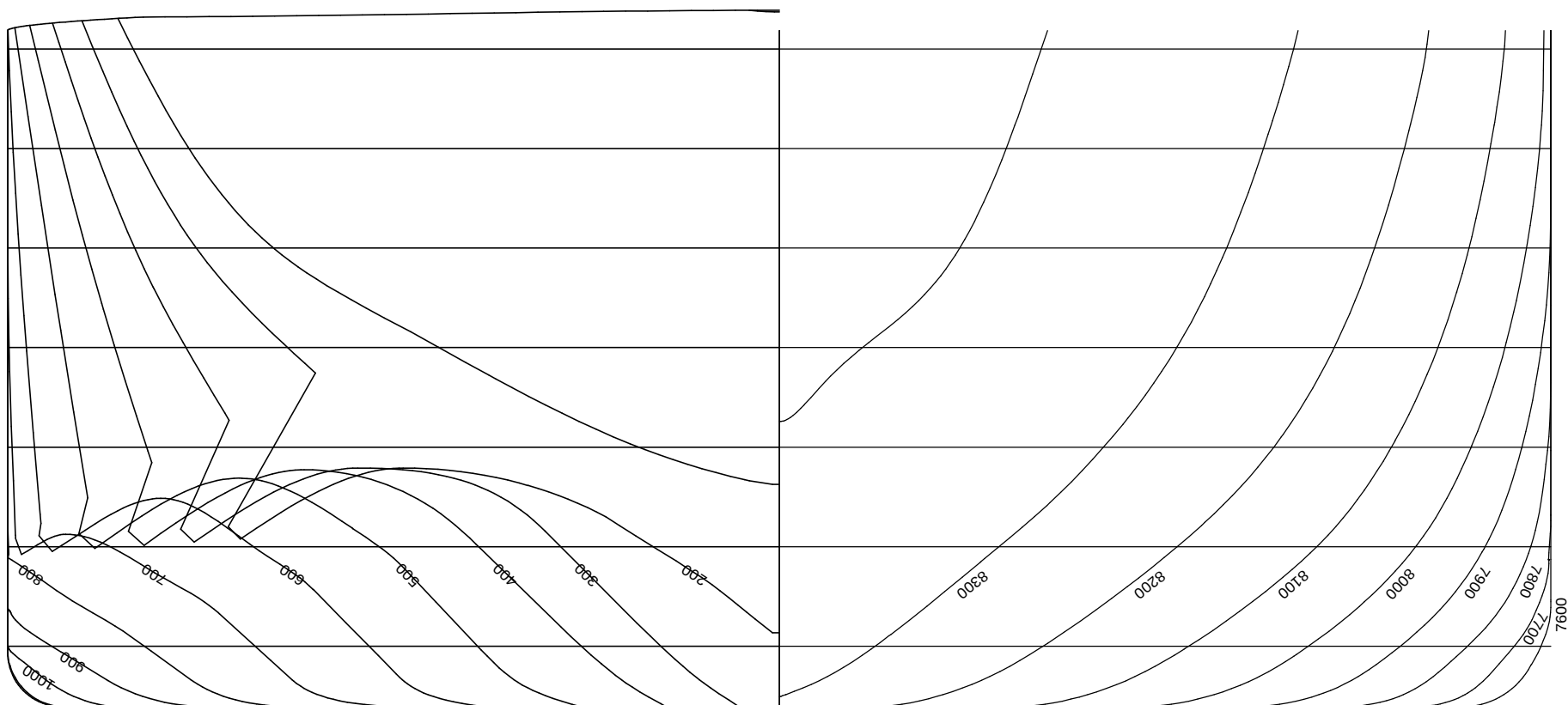


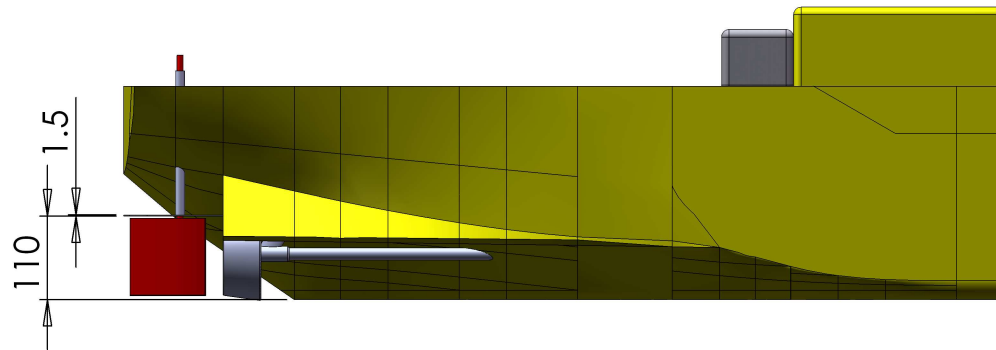
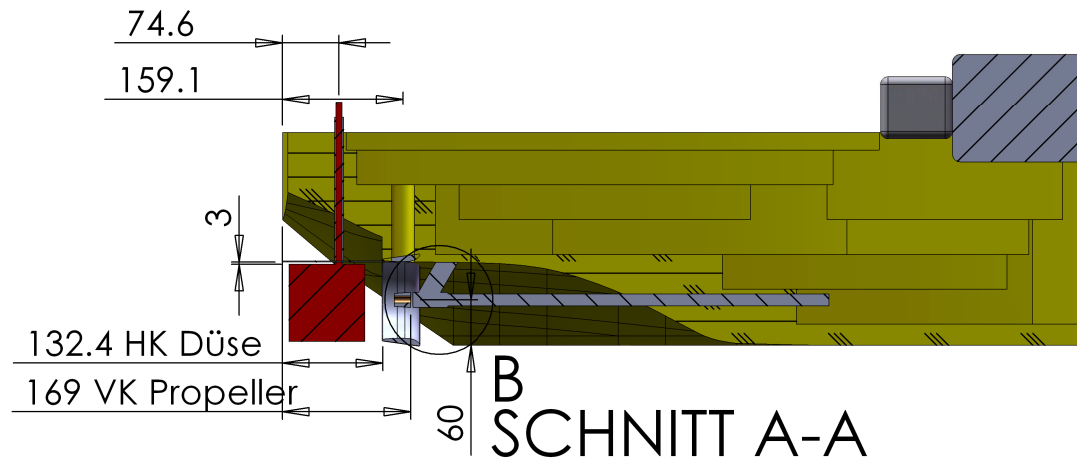
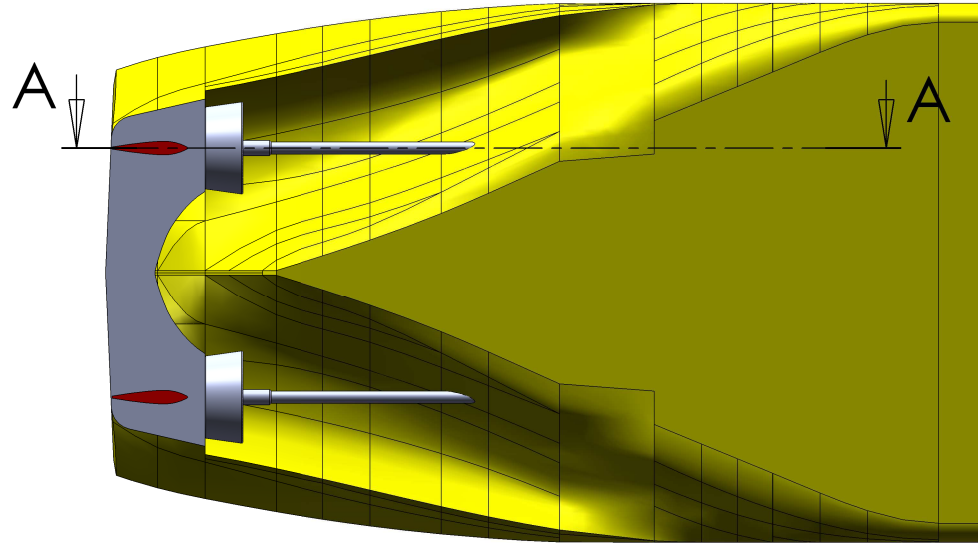
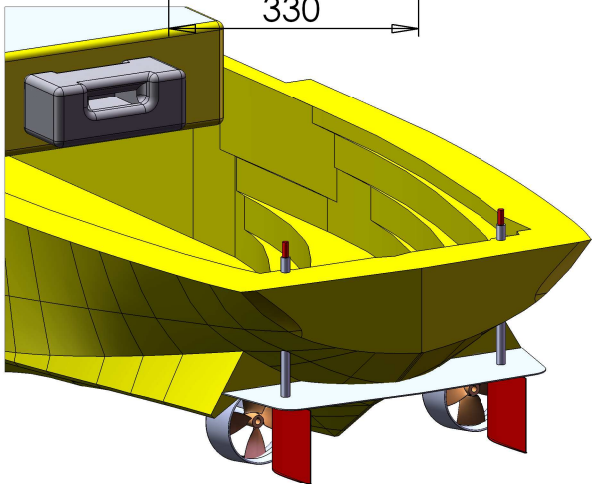
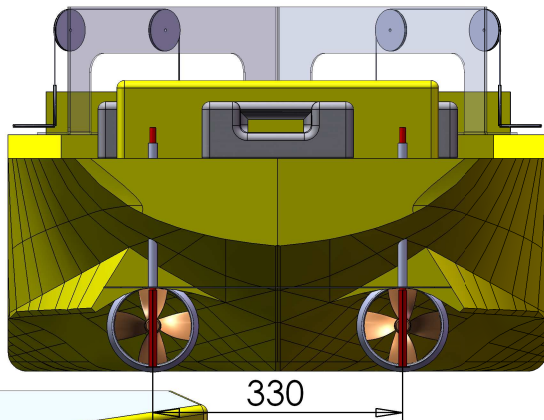
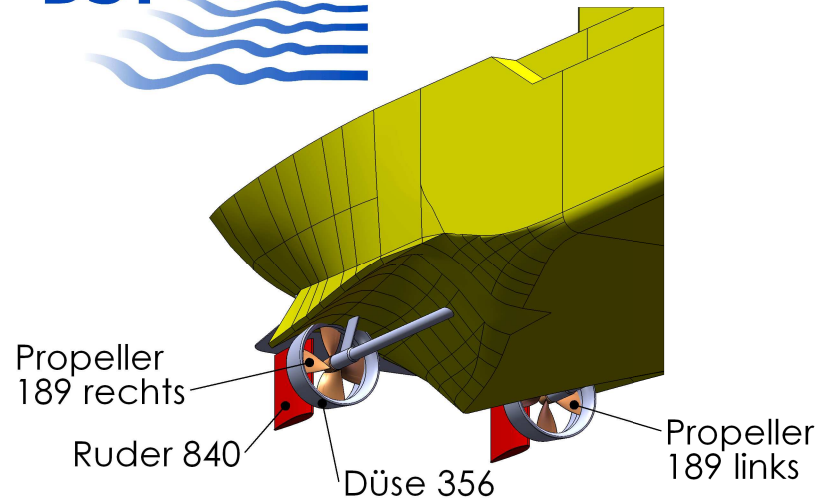
Modell 1844
Spantenrisse

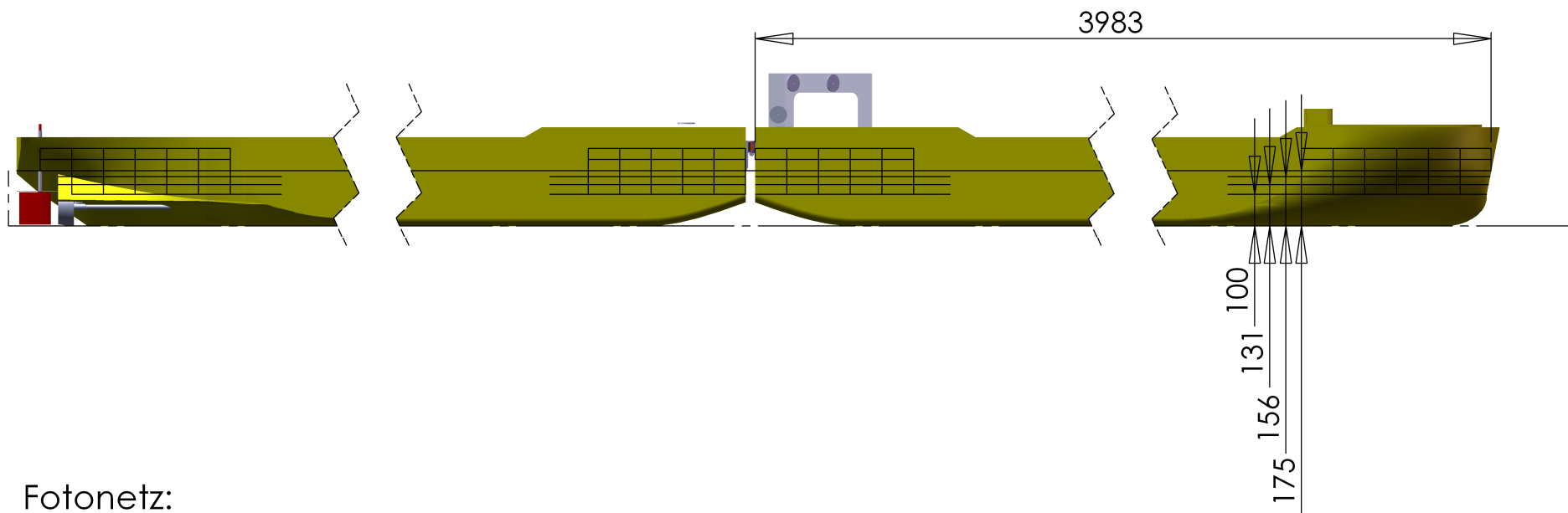
Maßstab 1/16
DST 15.06.09 - Bie

Heck Motorschiff

Bug Schubleichter







Fotonez:

Heck MS 7 x 100 mm vertikal
2 x 25 mm horizontal

Bug Leichter 7 x 100 mm vertikal
2 x 25 mm horizontal

Koppelstelle je 5 x 100 mm vertikal
2 x 25 mm horizontal

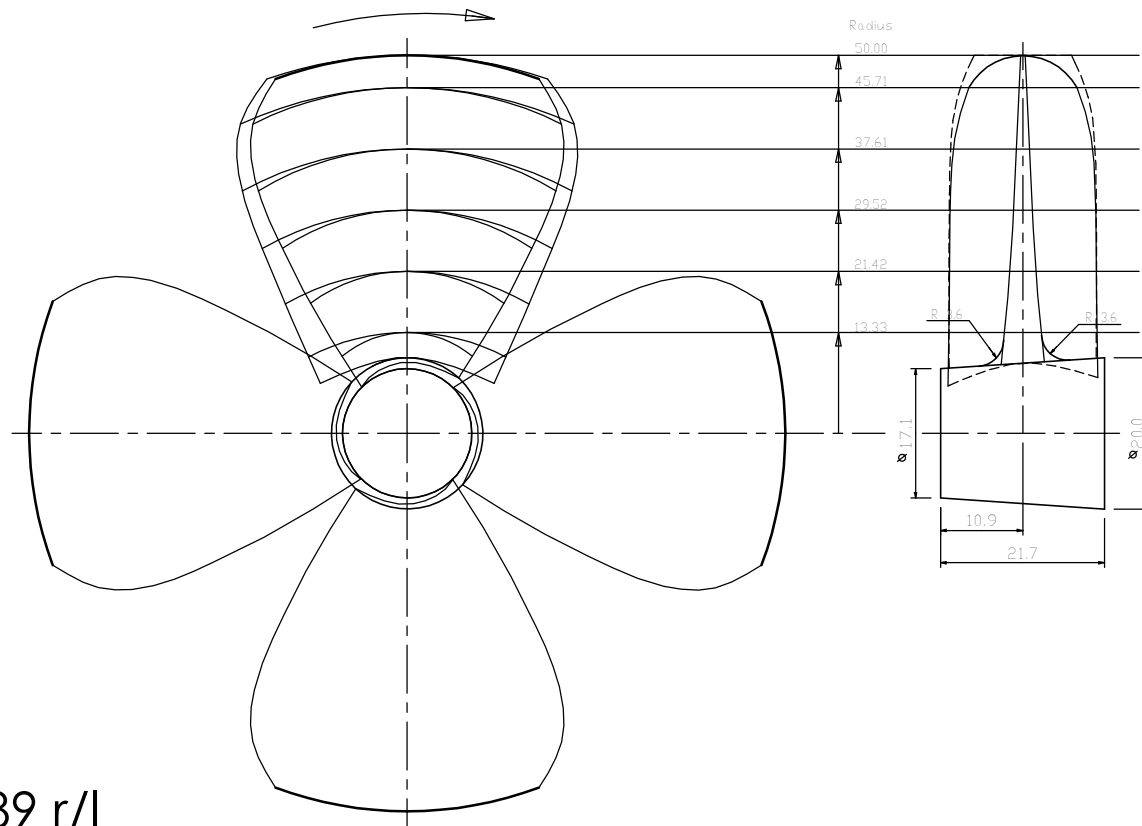
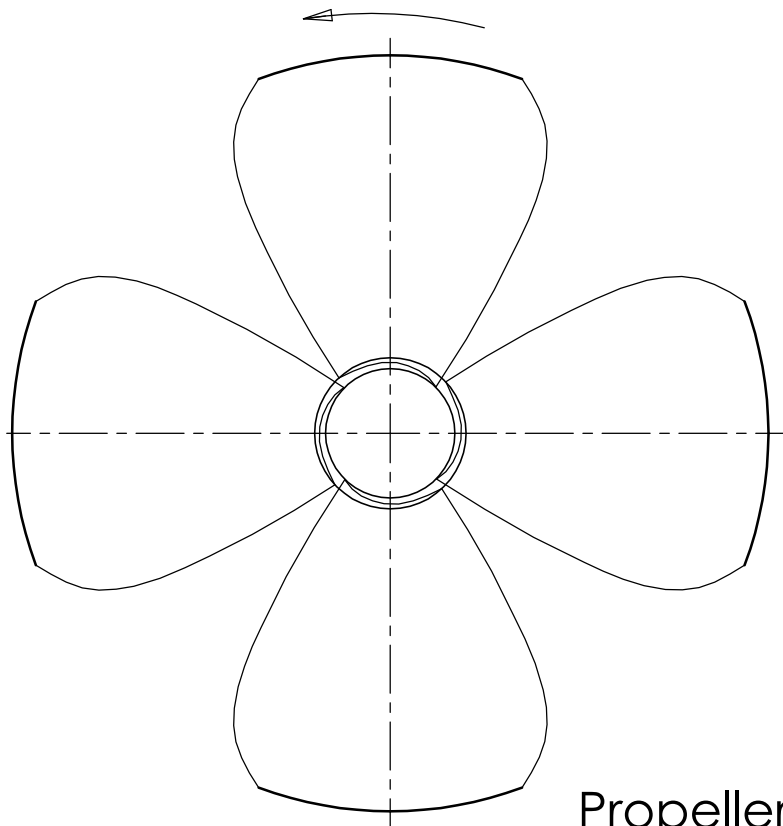
Tiefgänge 175 mm durchgezogen
100 mm, 131 mm, 156 mm markiert

Sandstreifen 3784 mm und 3386 mm von Hinterkante Leichter



Modell 1844
Anrissplan

Maßstab 1/16
DST 03.03.08 - Bie

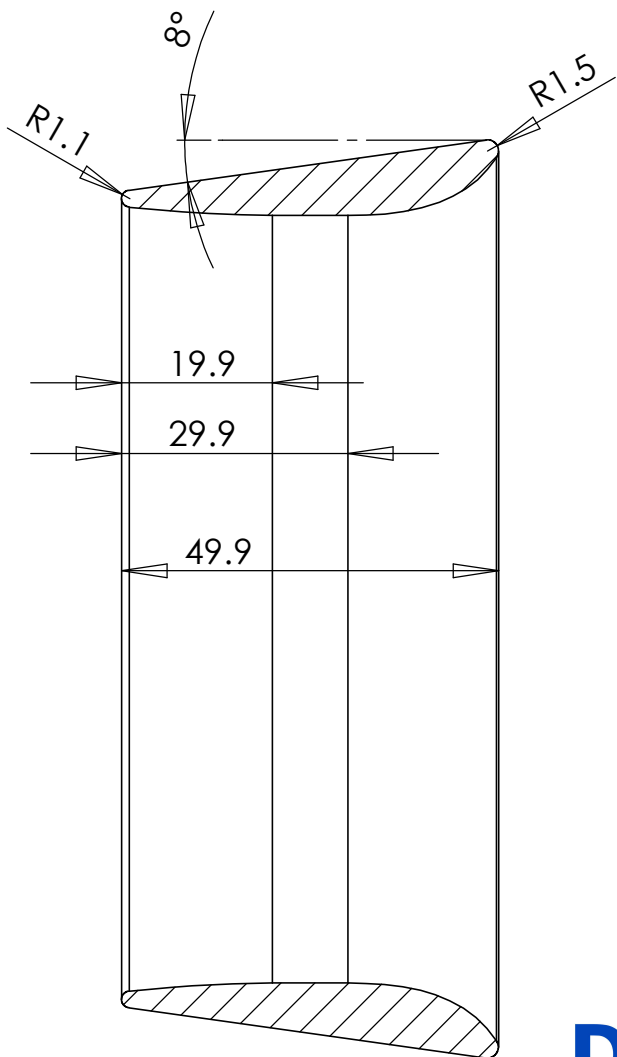
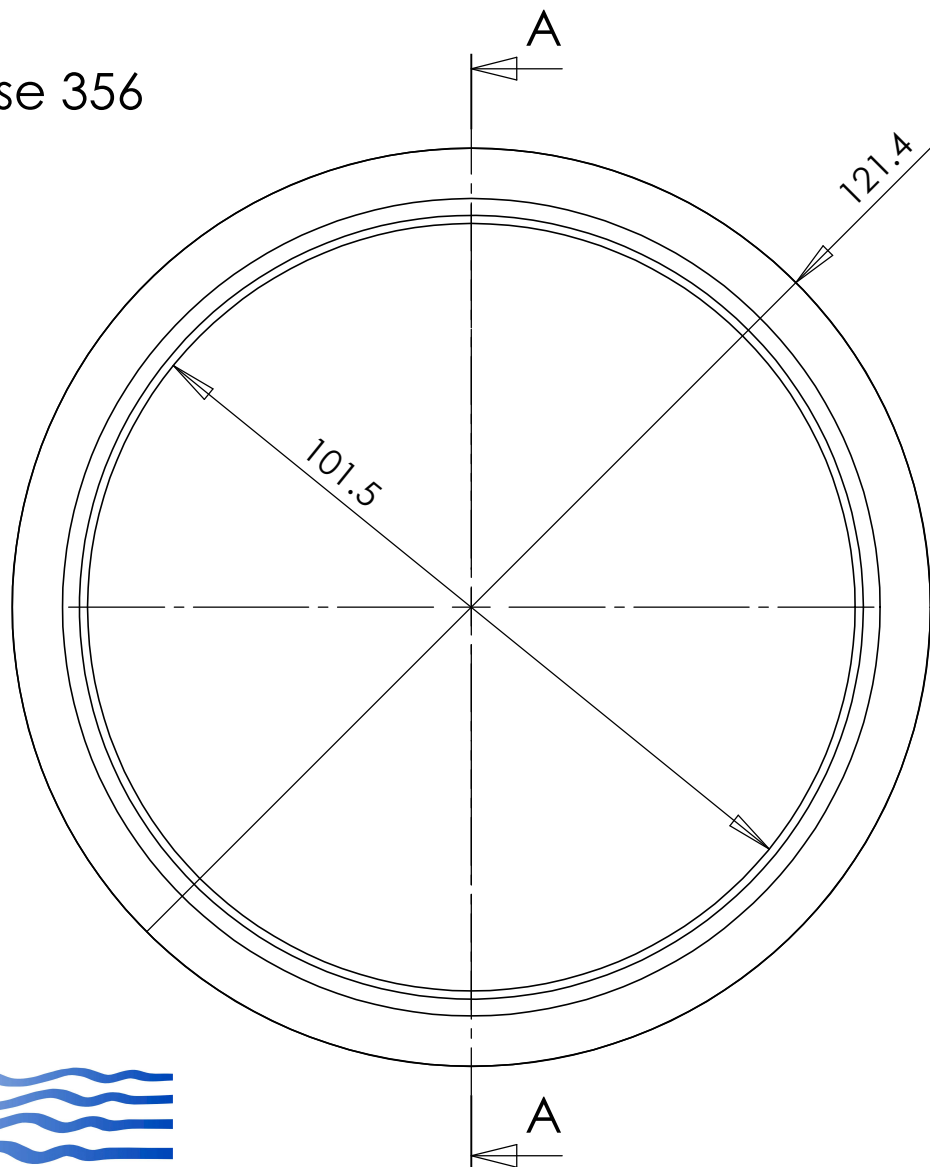


Propeller 189 r/l

D	=	100,00 mm
P	=	105,20 mm
P/D	=	1,052
A_E/A_0	=	0,710
Z	=	4
$C_{0,7R}$	=	42,10 mm

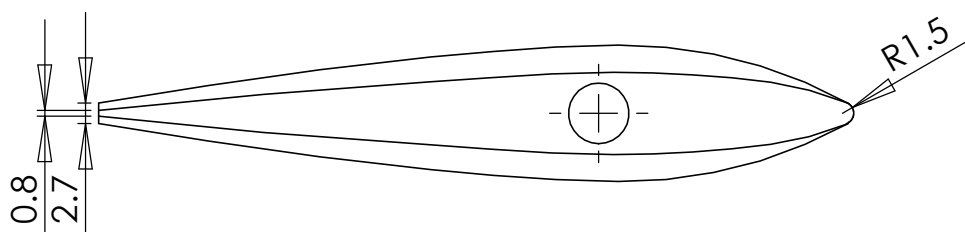
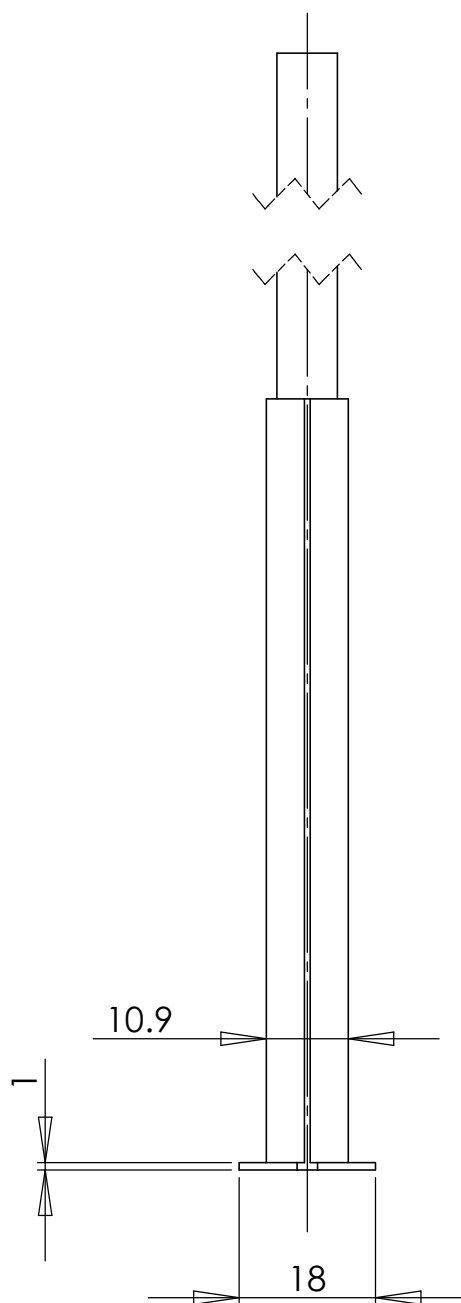
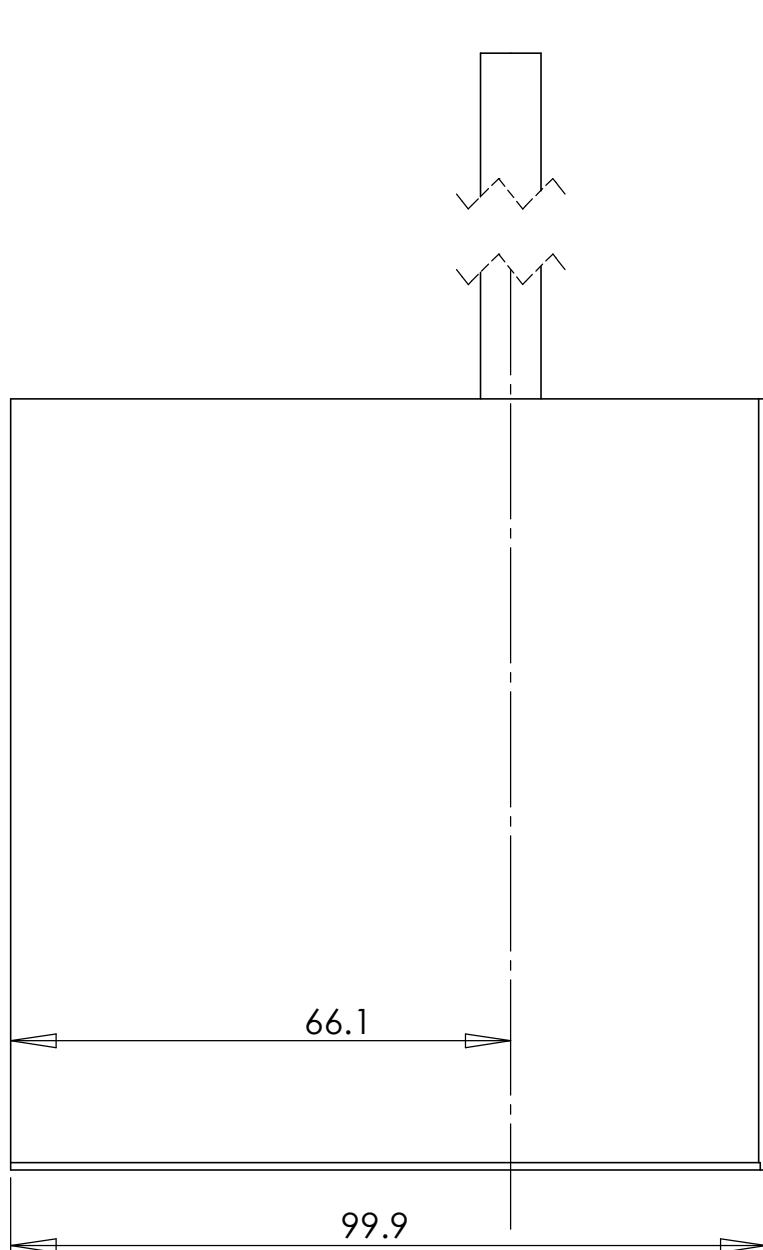


Düse 356



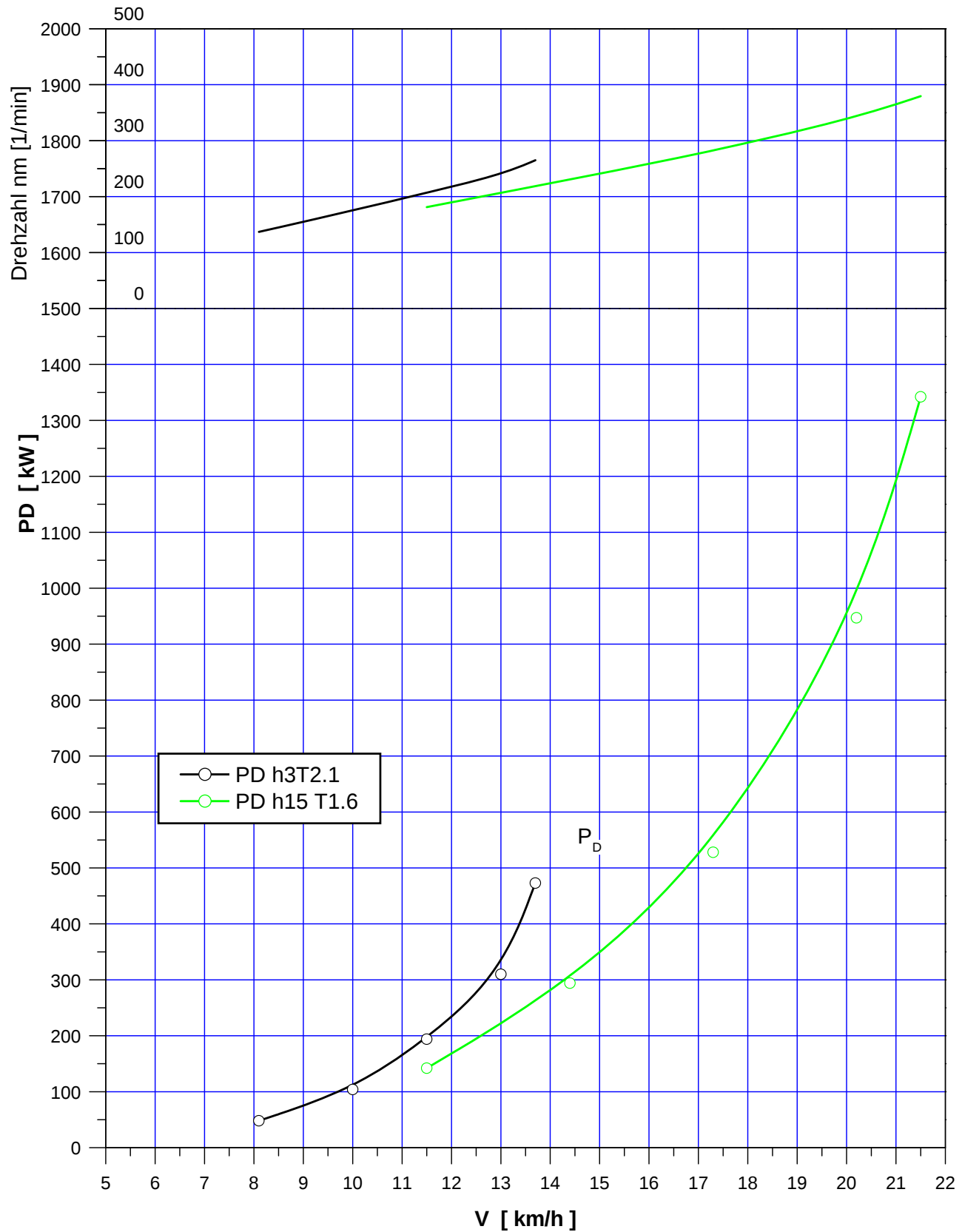
SCHNITT A-A





Propulsionsversuch

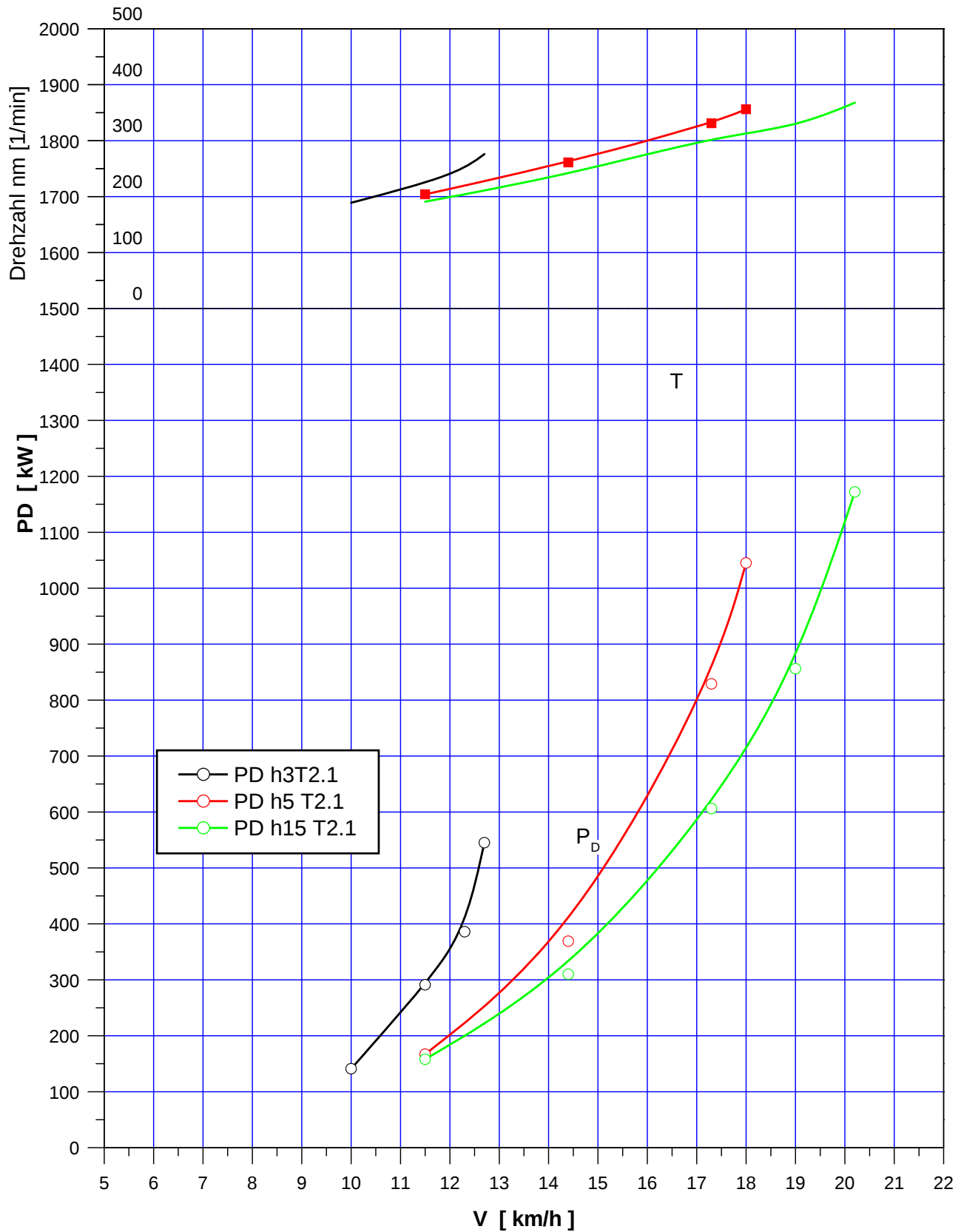
Model 1844, Schubverband

Tiefgang $T = 1,60$ m

Propulsionsversuch

Model 1844, Schubverband

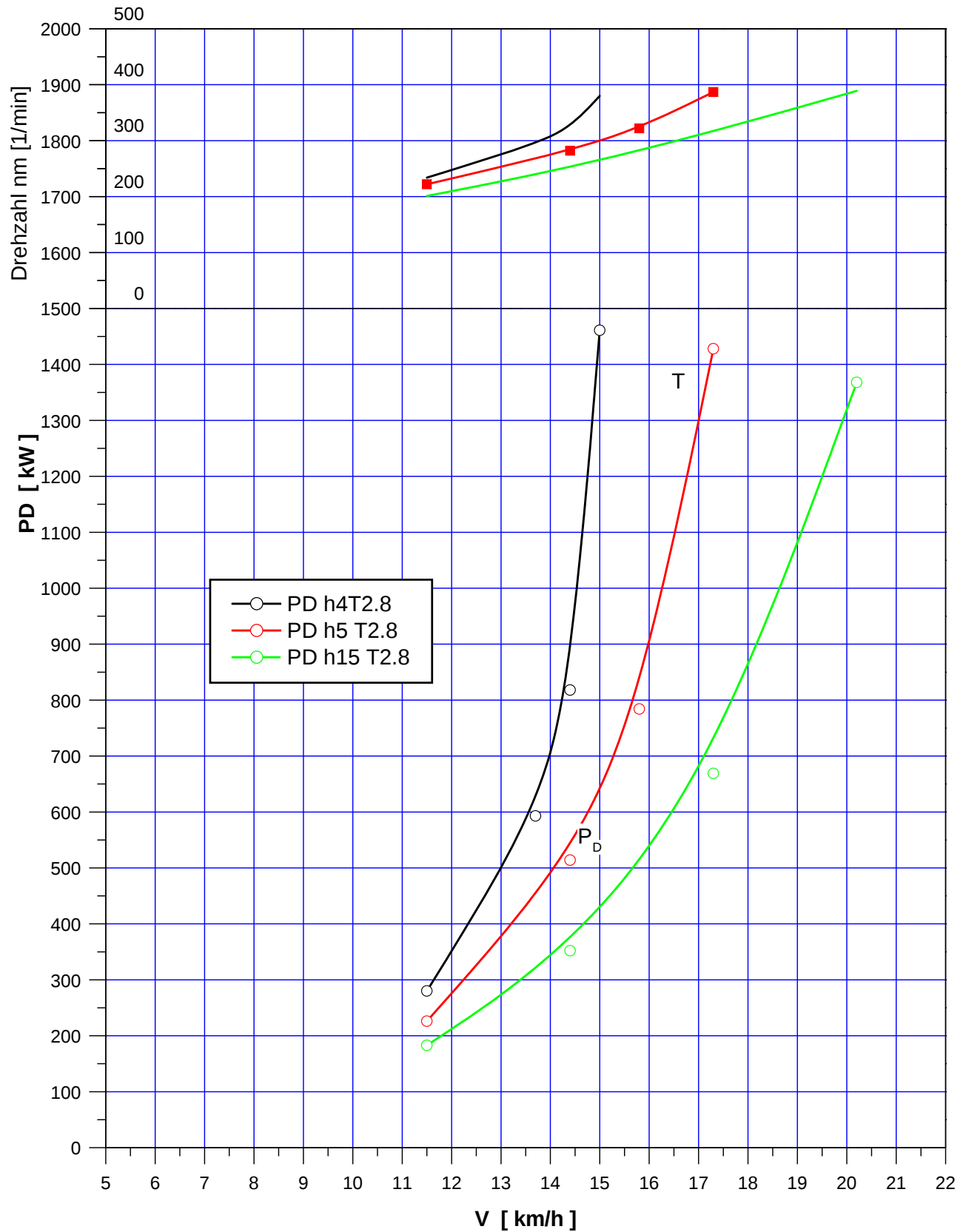
Tiefgang $T = 2,10 \text{ m}$



Propulsionsversuch

Model 1844, Schubverband

Tiefgang $T = 2,80 \text{ m}$

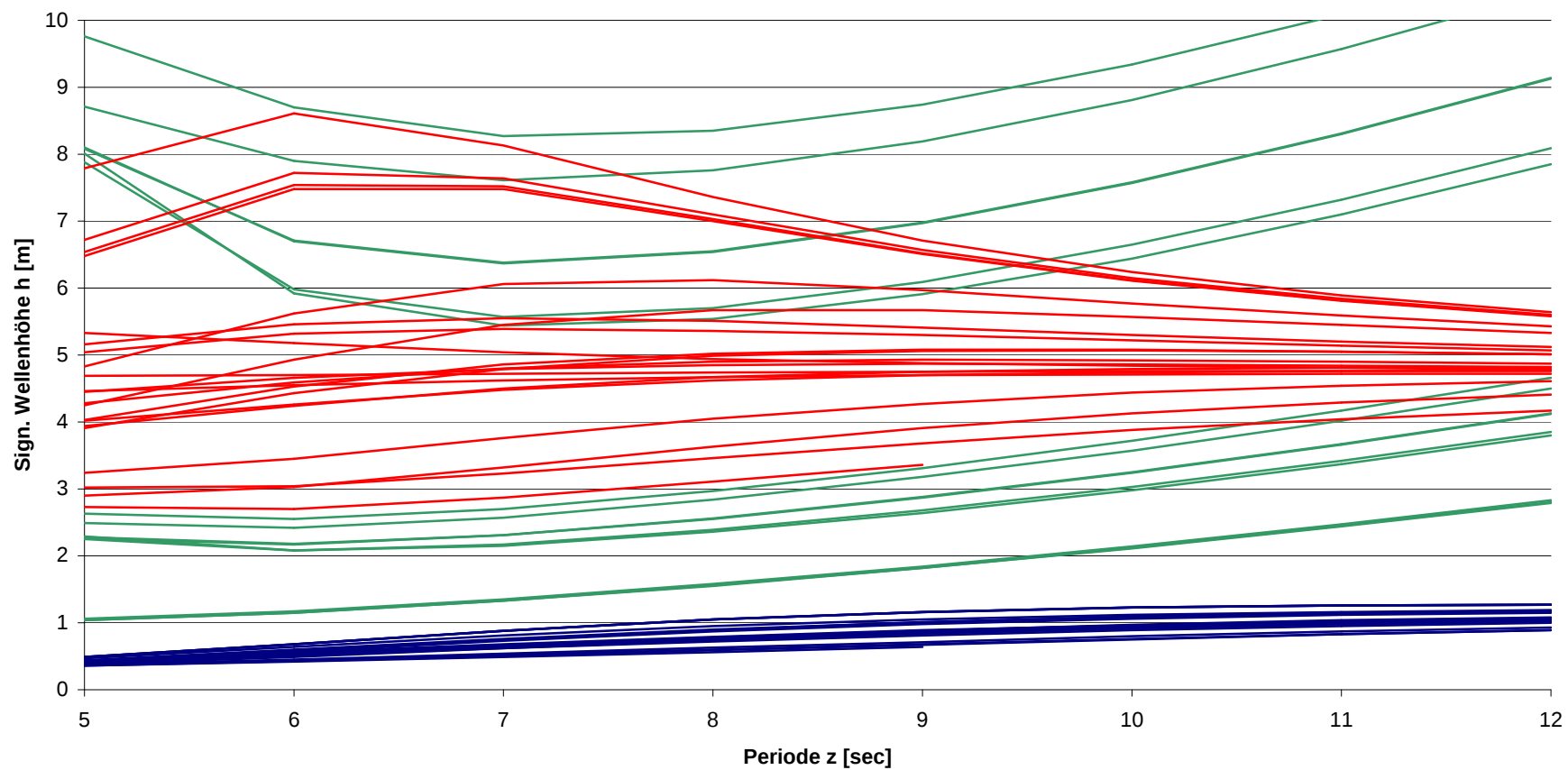


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- MST1
- Vert.Bew. Ko-St. < 1m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

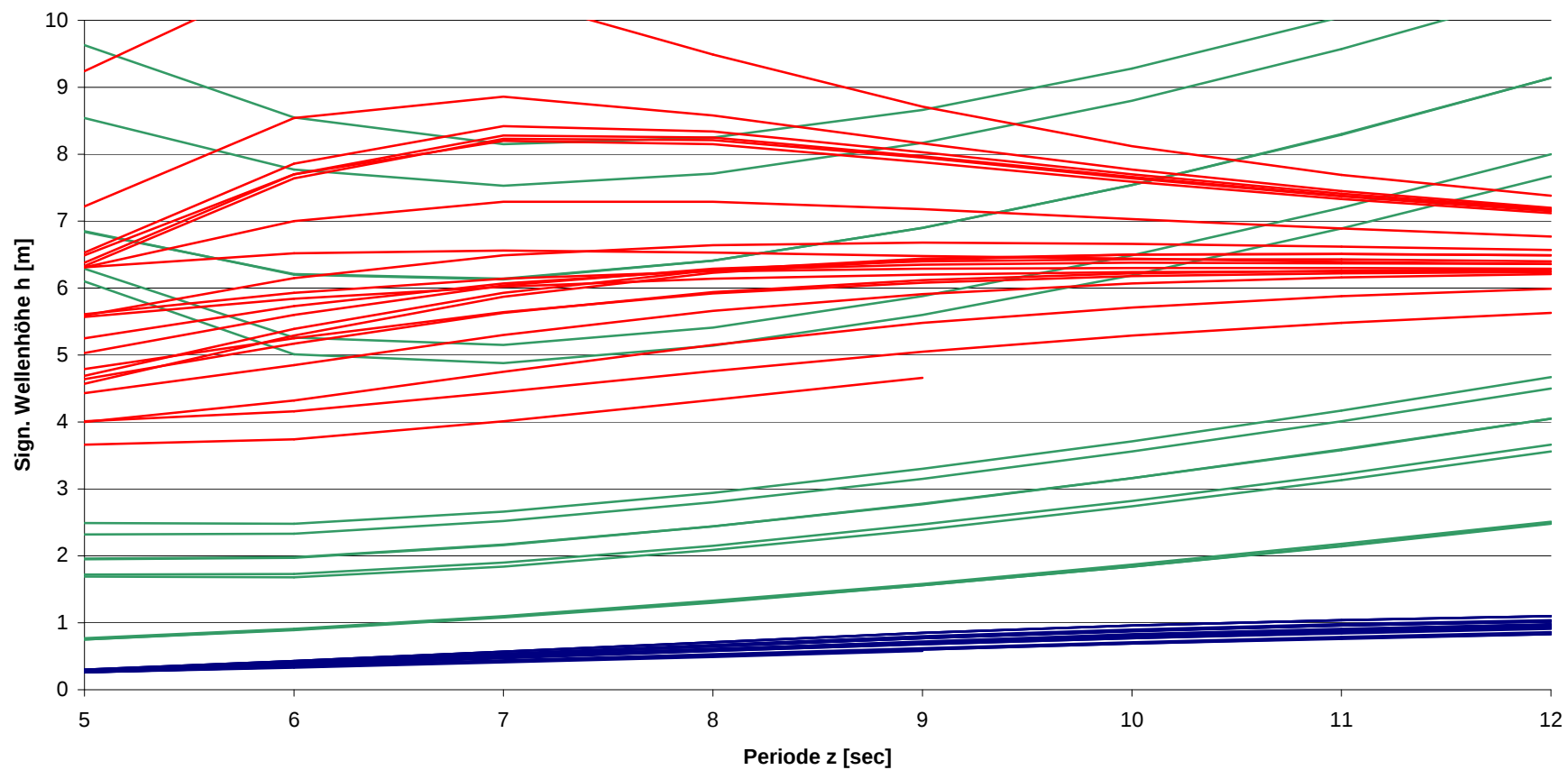


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- MST2
- Vert.Bew. Ko-St. < 1m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

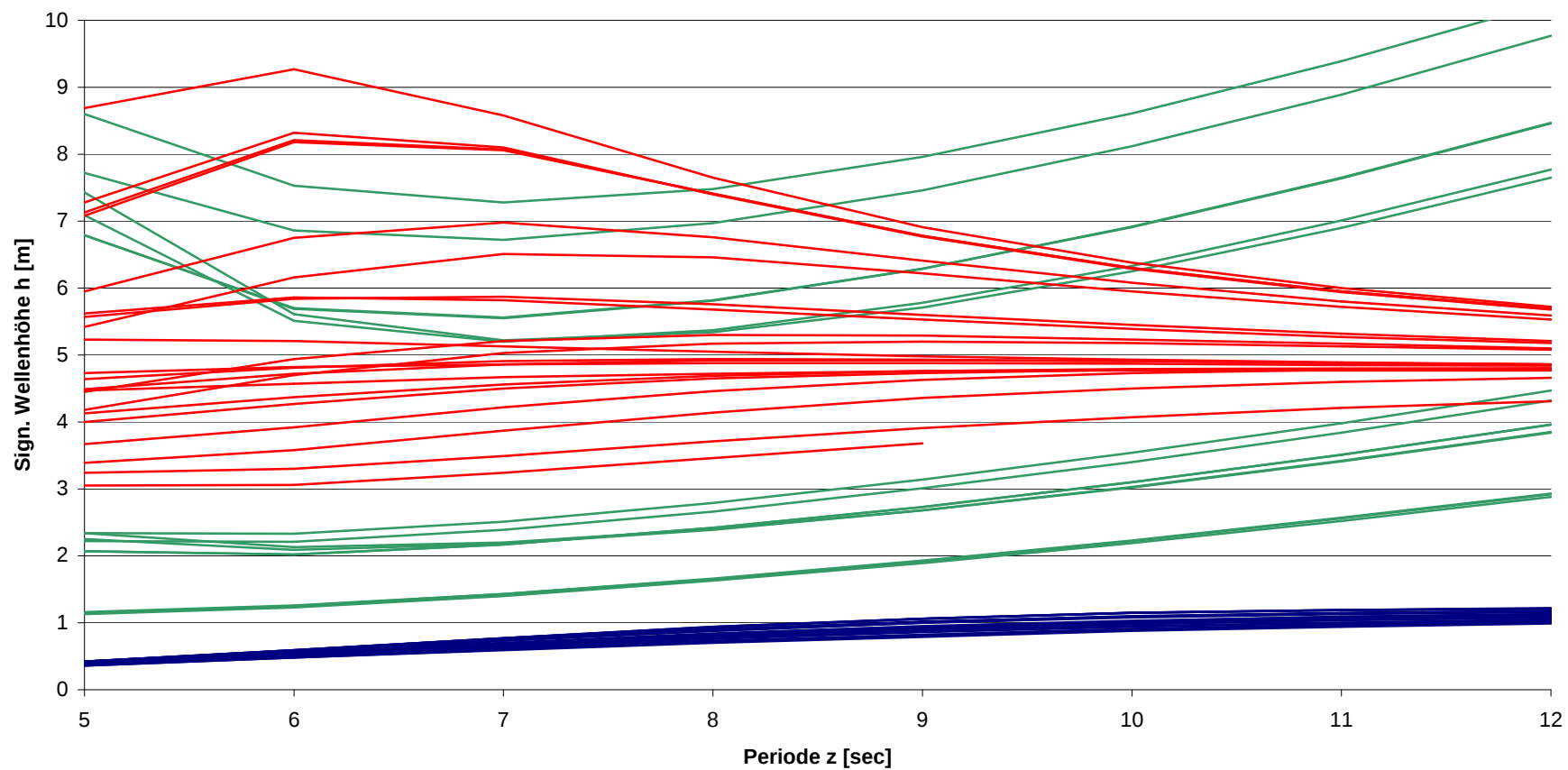


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- SLT1
- Vert.Bew. Ko-St. < 1m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

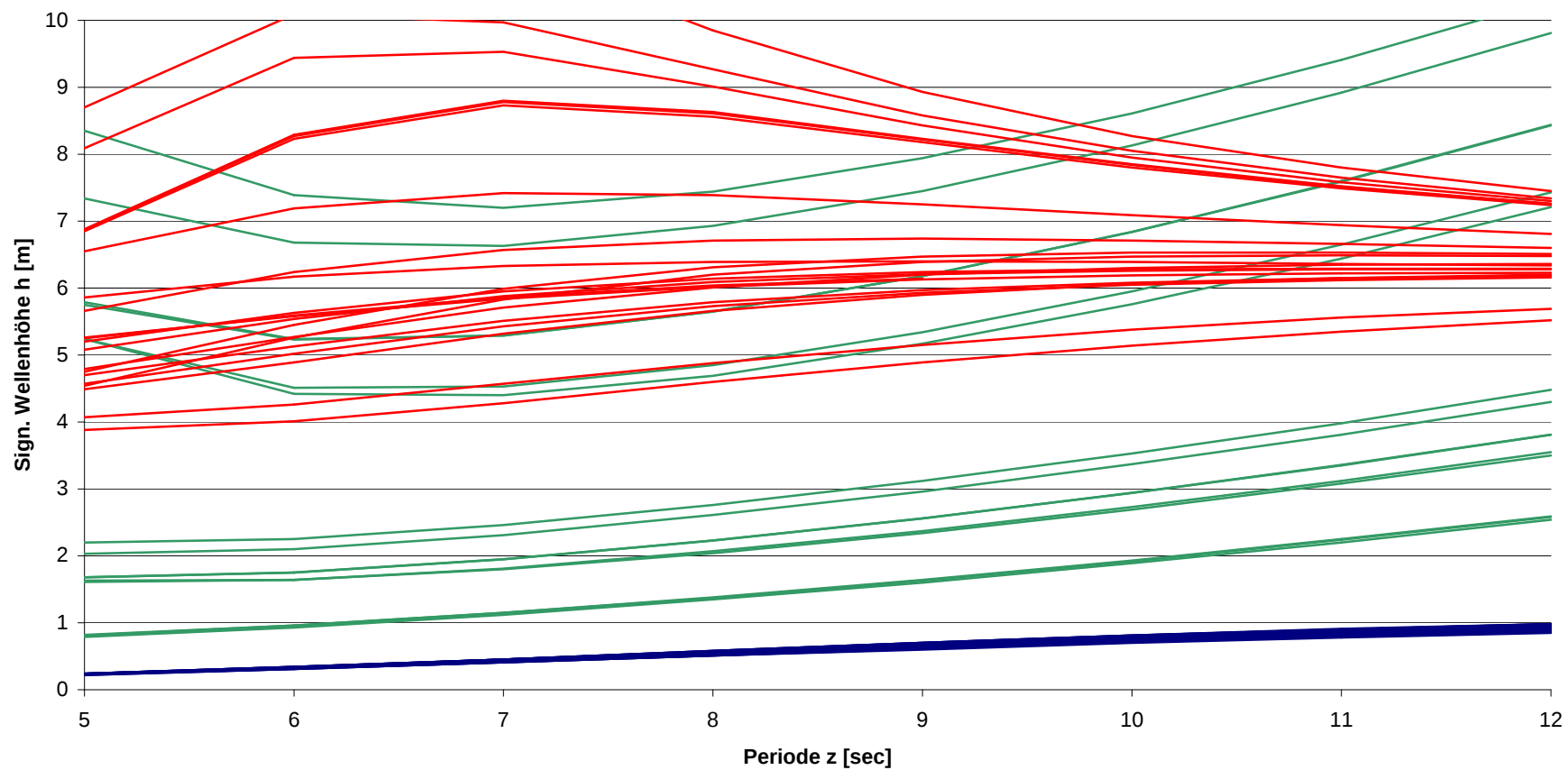


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- SLT2
- Vert.Bew. Ko-St. < 1m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

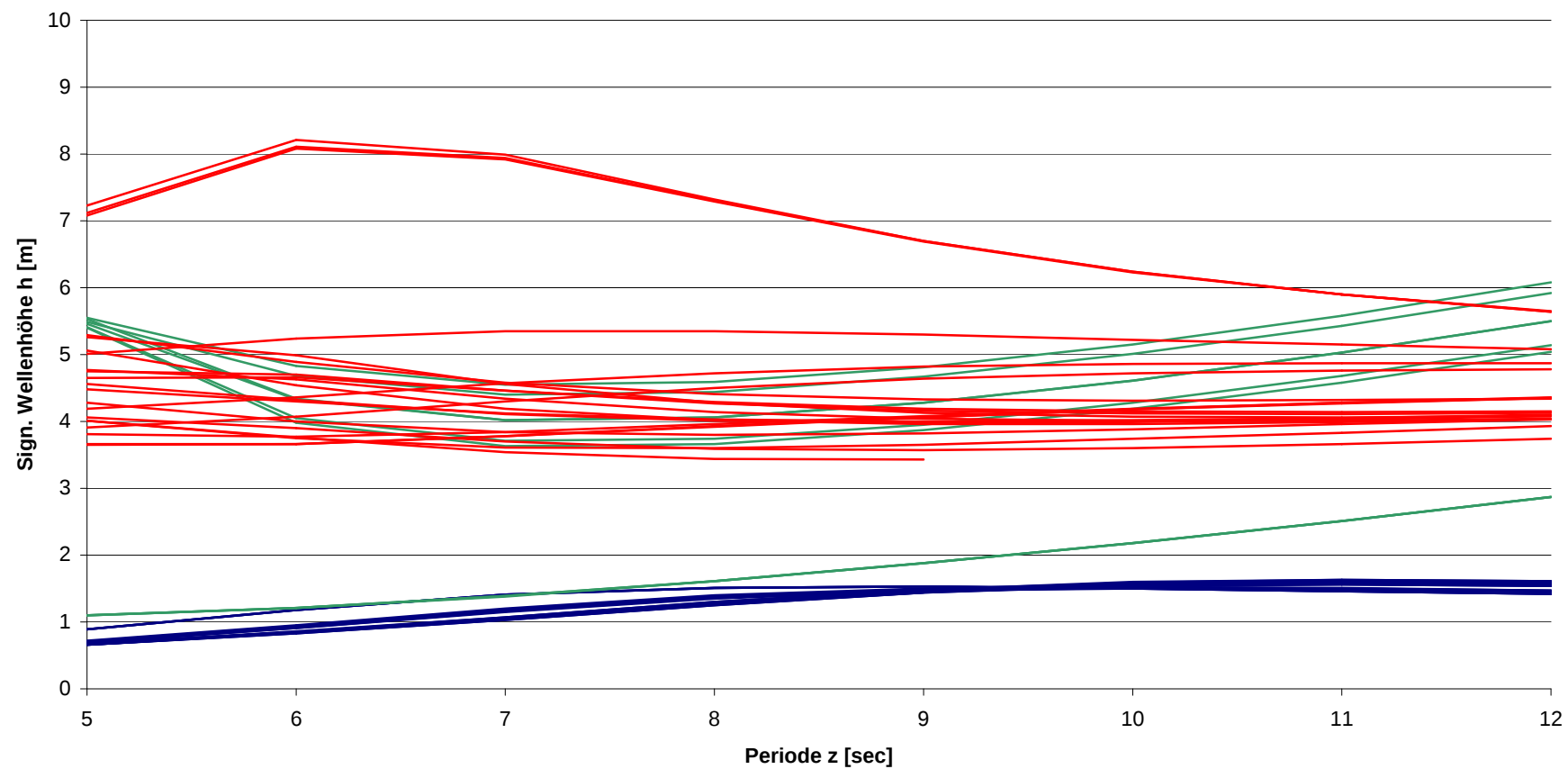


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- VT1
- Vert.Bew. Ko-St. < 1 m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

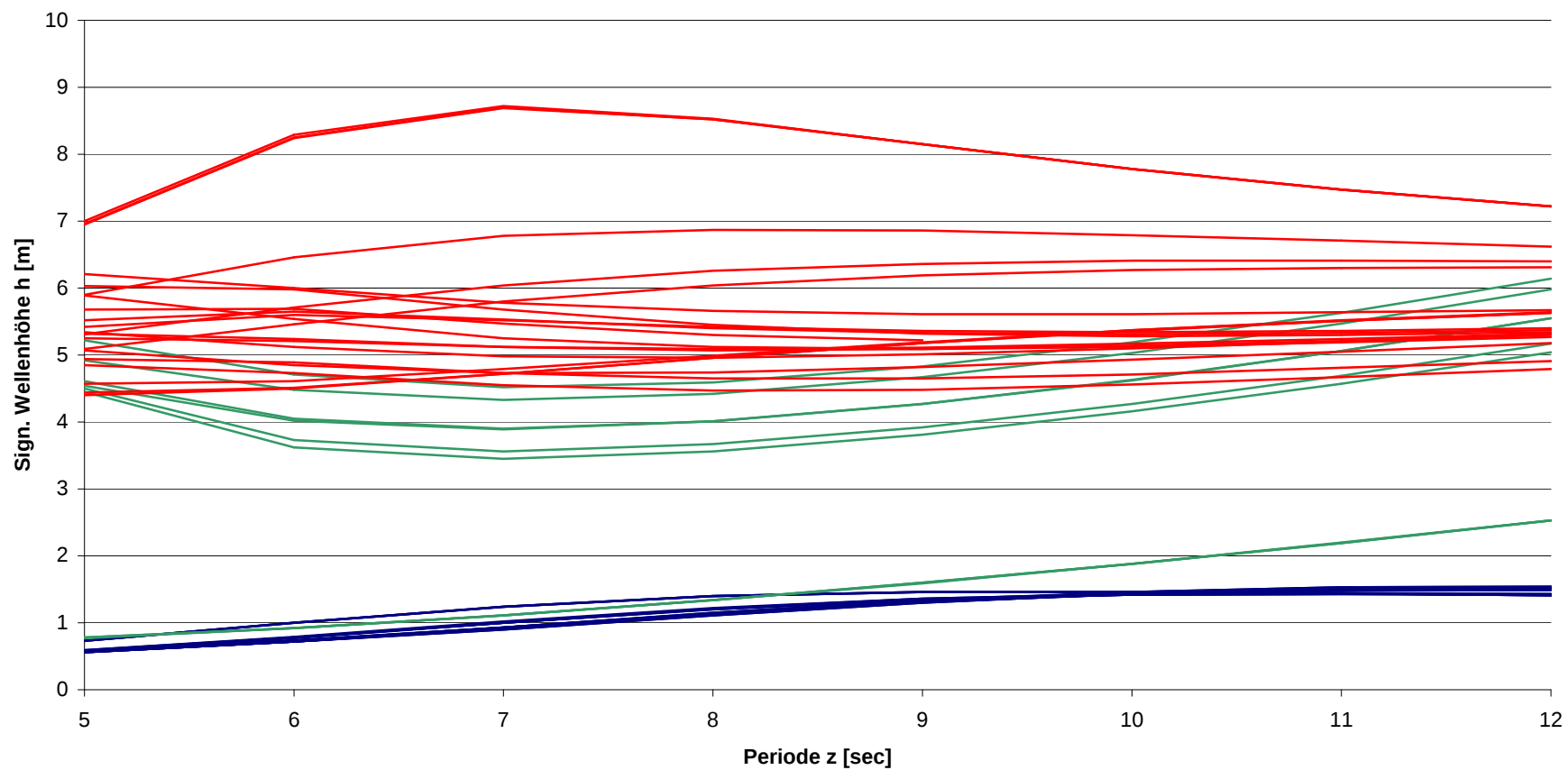


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- VT2
- Vert.Bew. Ko-St. < 1 m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

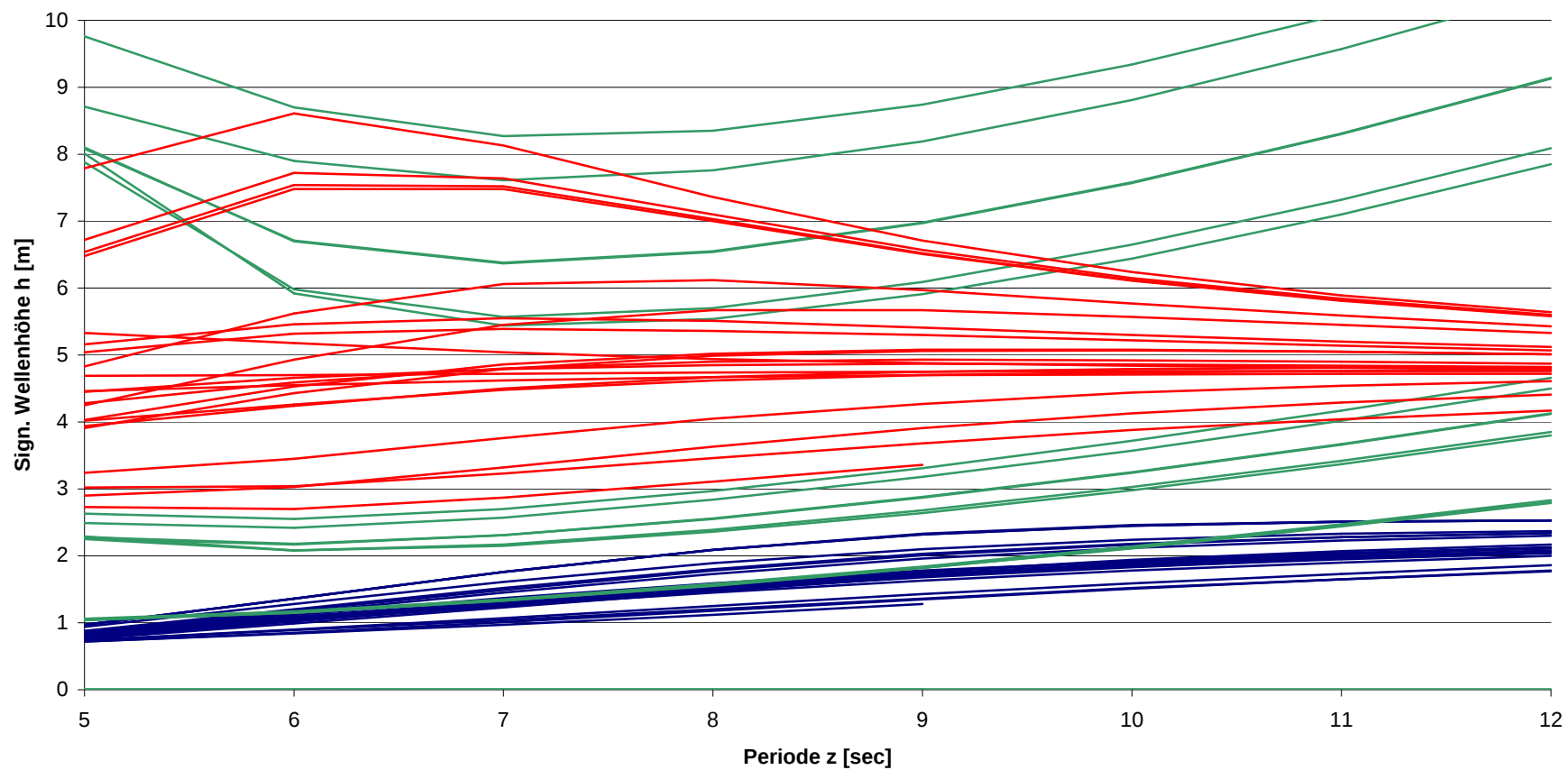


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- MST1
- Vert.Bew. Ko-St. < 2m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

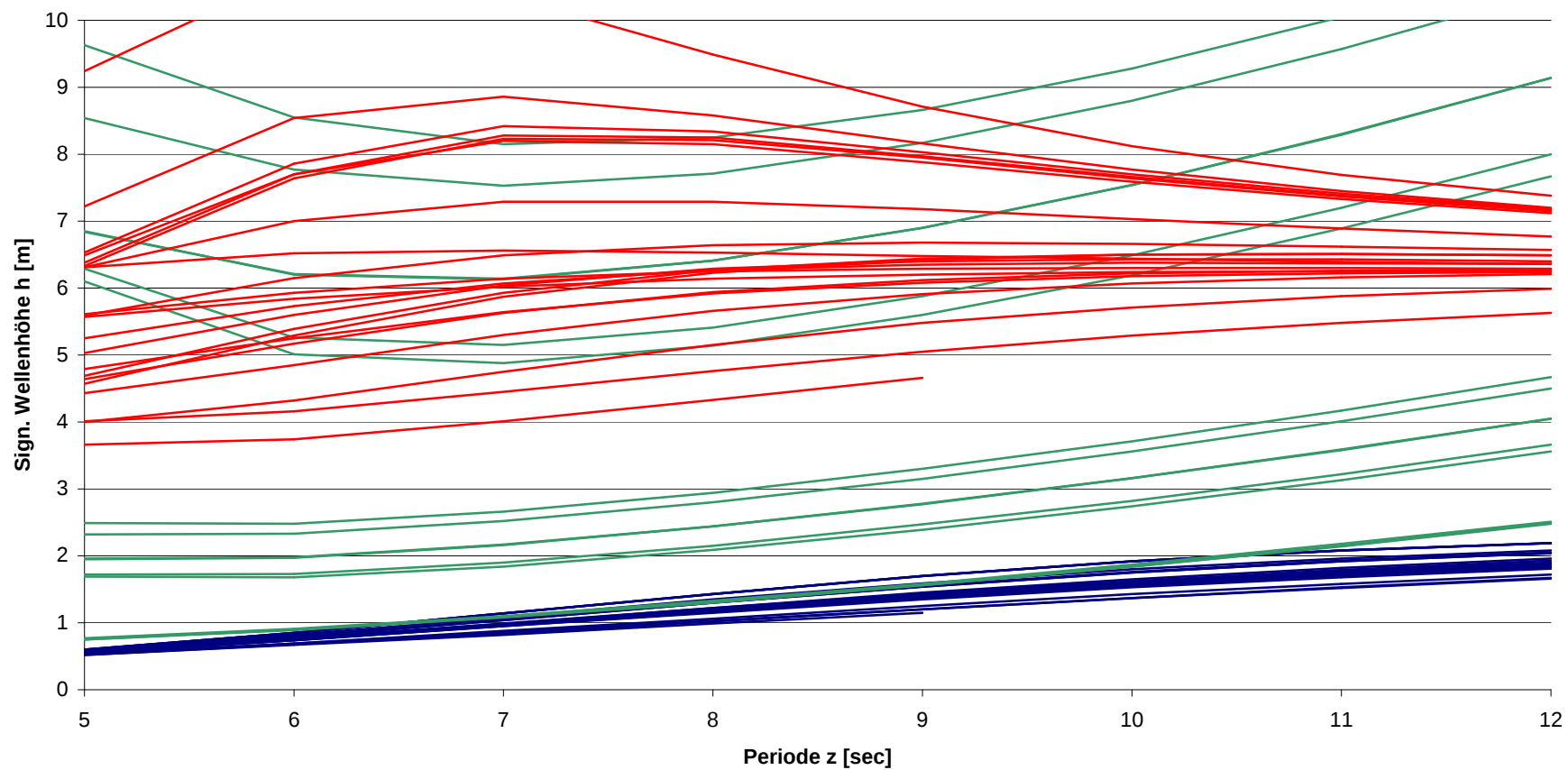


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- MST2
- Vert.Bew. Ko-St. < 2m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

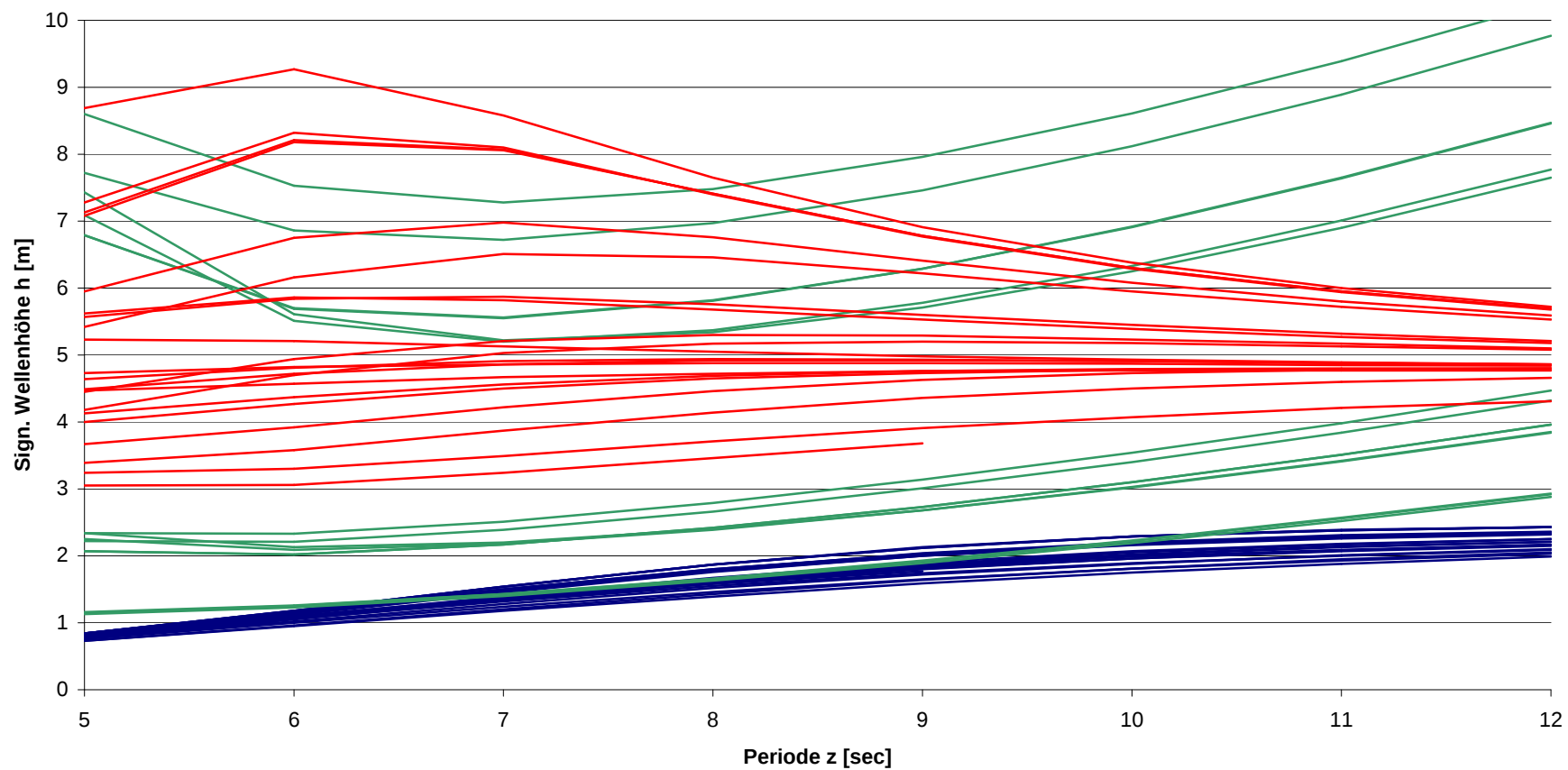


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- SLT1
- Vert.Bew. Ko-St. < 2m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

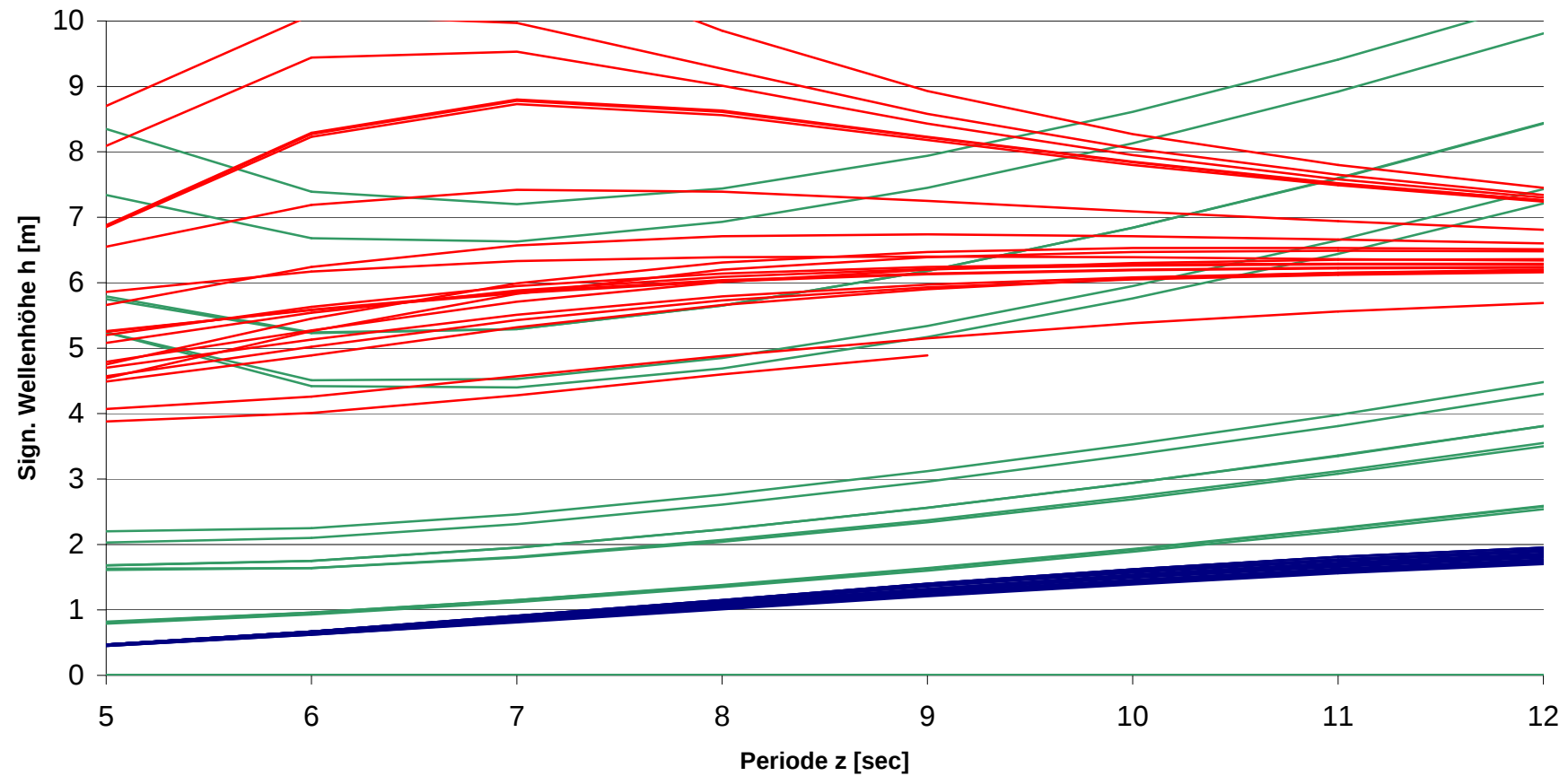


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- SLT2
- Vert.Bew. Ko-St. < 2m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

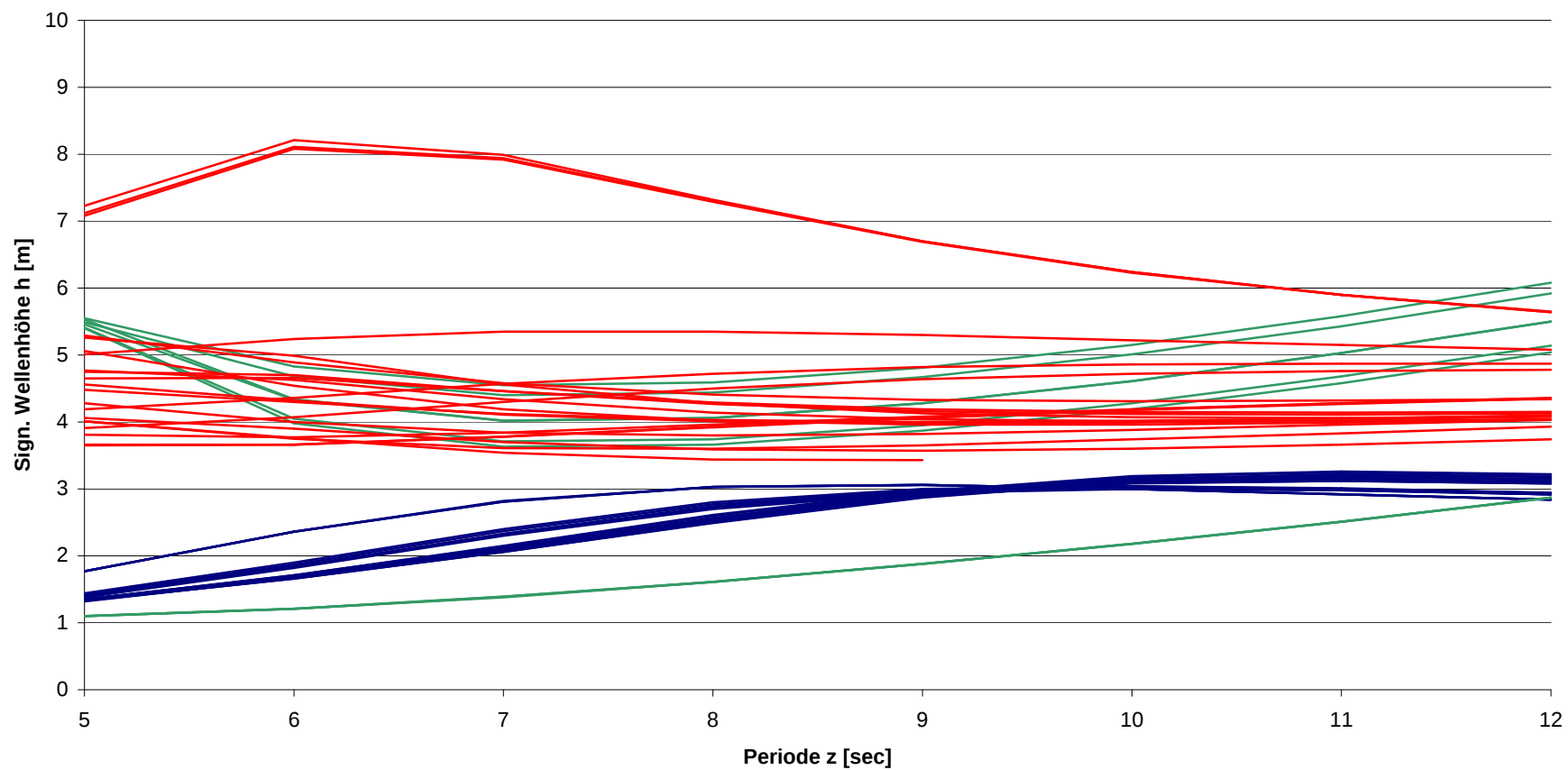


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- VT1
- Vert.Bew. Ko-St. < 2 m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m

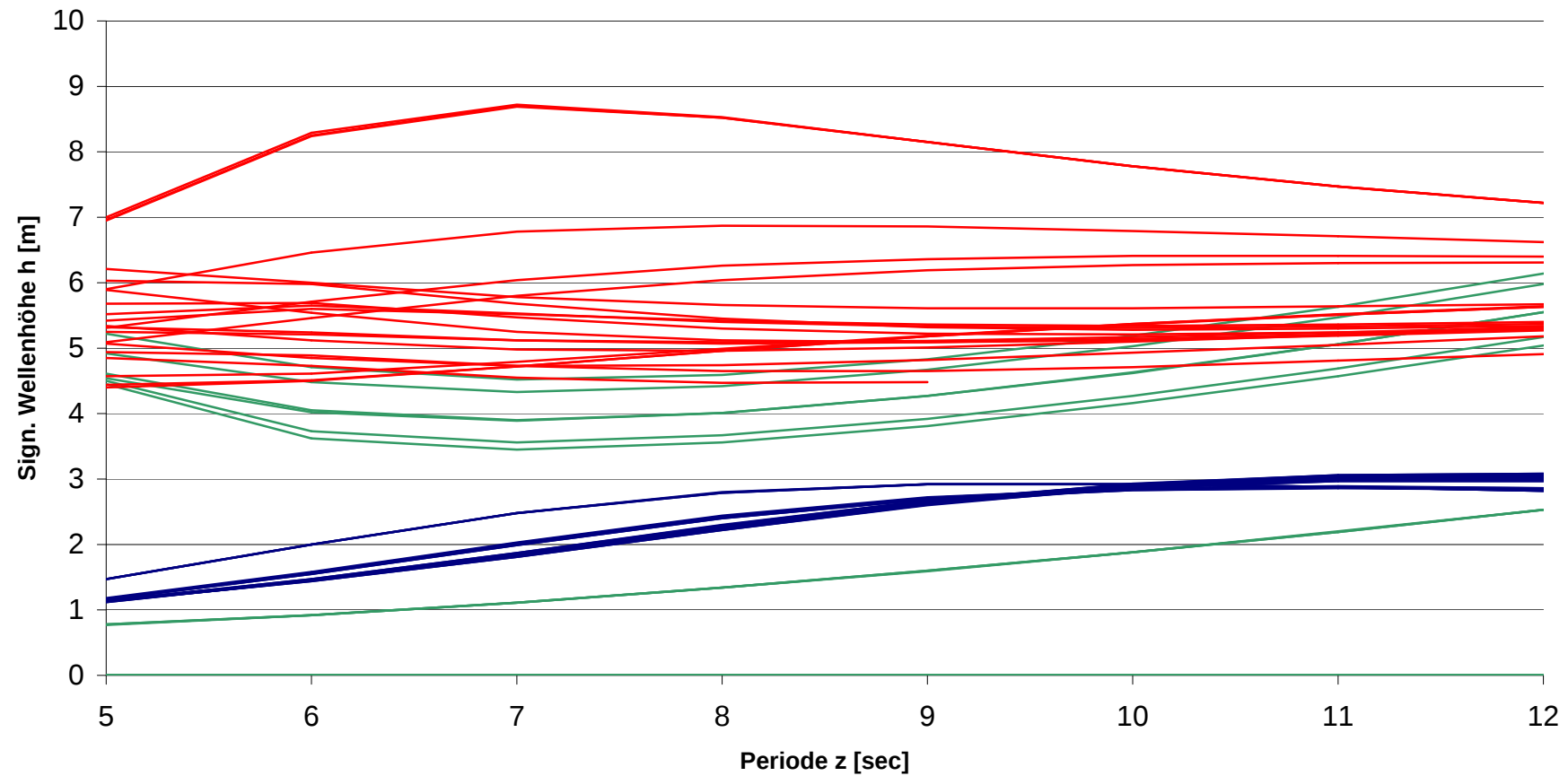


Wellenhöhe bei Überschreitung der Kriterien

Kurswinkel = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

Geschwindigkeit 0, 6 und 8 Knoten

- VT2
- Vert.Bew. Ko-St. < 2 m
- Krängung Ko-St. < 1m
- Freibord 0 > 0 m



Versuchsübersicht 1

Versuchs-Nr.	Versuchs-variante	Vor-span-nung	Versuchsart	Tief-gang	Wasser-tiefe	Ge-schwindig-keit	Wellen-richtung	Wellen-höhe	Wellen-länge	Stütz-kurs	Stützdreh-geschwin-digkeit	Ruder-winkel
		t		m	m	km/h	°	m	m	°	°/s	°
08.044.01	C3	21	Propulsion	1.60	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.044.02	C3	21	Propulsion	1.60	15	20.2	0	0.0	0.0			
08.044.03	C3	21	Propulsion	1.60	15	21.5	0	0.0	0.0			
08.044.04	C3	21	Propulsion	1.60	15	11.5	0	0.0	0.0			
08.044.05	C3	21	Propulsion	1.60	15	14.4	0	0.0	0.0			
08.045.01	C3	21	Widerstand	1.60	15	11.5	0	0.0	0.0			
08.045.01	C3	21	Widerstand	1.60	15	14.4	0	0.0	0.0			
08.045.01	C3	21	Widerstand	1.60	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.045.02	C3	21	Widerstand	1.60	15	20.2	0	0.0	0.0			
08.045.02	C3	21	Widerstand	1.60	15	21.5	0	0.0	0.0			
08.046.03	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	13.0	0	0.0	0.0	5		45
08.046.04	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	0.0	0.0	5		45
08.046.05	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0	5		45
08.046.06	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	0.0	0.0	10		45
08.046.07	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0	10		45
08.046.08	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	13.0	0	0.0	0.0	10		45
08.046.09.1	C3	21	R-Manöver	1.60	15	13.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.046.09.2	C3	21	R-Manöver	1.60	15	13.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.046.10.1	C3	21	R-Manöver	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.046.10.2	C3	21	R-Manöver	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.047.01.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	18.0	0	1.2	30.7			
08.047.01.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	1.2	30.7	5		45
08.047.02.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	18.0	0	1.2	34.3			
08.047.02.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	1.2	34.3	5		45
08.047.02.3	C3	21	Querfahrt	1.60	15	ca. 0	bis 90°	1.2	34.3			
08.047.03.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	21.0	0	1.0	38.4			
08.047.03.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	1.0	38.4	5		45
08.047.03.3	C3	21	Querfahrt	1.60	15	ca. 0	bis 90°	1.0	38.4			
08.047.04.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	18.0	0	1.6	43.3			
08.047.04.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	1.6	43.3	5		45
08.047.04.3	C3	21	Querfahrt	1.60	15	ca. 0	bis 90°	1.6	43.3			
08.047.05.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	21.0	0	1.6	48.9			
08.047.05.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	1.6	48.9	5		45
08.047.05.3	C3	21	Querfahrt	1.60	15	ca. 0	bis 90°	1.6	48.9			
08.047.06.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	18.0	0	0.8	25.0			
08.047.06.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	0.8	25.0	5		45
08.047.06.3	C3	21	Querfahrt	1.60	15	ca. 0	bis 90°	0.8	25.0			
08.047.07.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	18.0	0	1.4	25.0			
08.047.07.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	1.4	25.0	5		45
08.047.07.3	C3	21	Querfahrt	1.60	15	ca. 0	bis 90°	1.4	25.0			
08.048.03.1	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.048.03.2	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.048.03.3	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.048.03.4	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.048.03.5	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.048.03.6	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.048.06	C3	21	Propulsion	2.10	15	11.5	0	0.0	0.0			
08.048.08	C3	21	Propulsion	2.10	15	14.4	0	0.0	0.0			
08.048.09	C3	21	Propulsion	2.10	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.048.10	C3	21	Propulsion	2.10	15	20.2	0	0.0	0.0			
08.048.11	C3	21	Propulsion	2.10	15	21.5	0	0.0	0.0			
08.048.12	C3	21	Propulsion	2.10	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.049.01.1	C3	21	Widerstand	2.10	15	11.5	0	0.0	0.0			
08.049.01.2	C3	21	Widerstand	2.10	15	14.4	0	0.0	0.0			
08.049.01.3	C3	21	Widerstand	2.10	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.049.02.1	C3	21	Widerstand	2.10	15	20.2	0	0.0	0.0			
08.049.02.2	C3	21	Widerstand	2.10	15	21.5	0	0.0	0.0			
08.050.01.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.050.01.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	13.0	0	0.0	0.0	5		45
08.050.01.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.050.02.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	18.0	0	0.0	0.0			
08.050.02.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	18.0	0	0.0	0.0	5		45
08.050.02.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	18.0	0	0.0	0.0			
08.050.03.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	21.0	0	0.0	0.0			
08.050.03.1	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	21.0	0	0.0	0.0	5		45
08.050.03.2	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	21.0	0	0.0	0.0			
08.050.04.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.050.04.2	C3	21	R-Manöver	2.10	15	13.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.050.04.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.050.05.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	21.0	0	0.0	0.0			
08.050.05.2	C3	21	R-Manöver	2.10	15	21.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.050.05.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	21.0	0	0.0	0.0			

Versuchsübersicht 2

Versuchs-Nr.	Versuchs-variante	Vor-span-nung	Versuchsart	Tief-gang	Wasser-tiefe	Ge-schwindig-keit	Wellen-richtung	Wellen-höhe	Wellen-länge	Stütz-kurs	Stützdreh-geschwin-digkeit	Ruder-winkel
		t		m	m	km/h	°	m	m	°	°/s	°
08.051.01.1	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.051.01.2	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.051.01.3	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.051.01.4	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.051.01.5	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.051.01.6	C3	21	Pfahlzug	2.10	15	0.0	0	0.0	0.0			
08.051.02	C3	21	Propulsion	2.80	15	11.5	0	0.0	0.0			
08.051.03	C3	21	Propulsion	2.80	15	14.4	0	0.0	0.0			
08.051.04	C3	21	Propulsion	2.80	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.051.05	C3	21	Propulsion	2.80	15	20.2	0	0.0	0.0			
08.052.01.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.052.01.2	C3	21	R-Manöver	2.80	15	13.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.052.01.3	C3	21	Stoppsmanöver	2.80	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.052.02.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0			
08.052.02.2	C3	21	R-Manöver	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0		1.2	45
08.052.02.3	C3	21	Stoppsmanöver	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0			
08.052.03.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.052.03.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	13.0	0	0.0	0.0	5		45
08.052.03.3	C3	21	Stoppsmanöver	2.80	15	13.0	0	0.0	0.0			
08.052.04.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	18.0	0	0.0	0.0			
08.052.04.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	18.0	0	0.0	0.0	5		45
08.052.04.3	C3	21	Stoppsmanöver	2.80	15	18.0	0	0.0	0.0			
08.052.05.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0			
08.052.05.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0	5		45
08.052.05.3	C3	21	Stoppsmanöver	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0			
08.053.01.1	C3	21	Widerstand	2.80	15	11.5	0	0.0	0.0			
08.053.01.2	C3	21	Widerstand	2.80	15	14.4	0	0.0	0.0			
08.053.01.3	C3	21	Widerstand	2.80	15	17.3	0	0.0	0.0			
08.053.02.1	C3	21	Widerstand	2.80	15	20.2	0	0.0	0.0			
08.053.02.2	C3	21	Widerstand	2.80	15	21.5	0	0.0	0.0			
08.054.01	C3	21	Propulsion	2.80	5.0	11.5	0	0.0	0.0			
08.054.02	C3	21	Propulsion	2.80	5.0	14.4	0	0.0	0.0			
08.054.04	C3	21	Propulsion	2.80	5.0	15.8	0	0.0	0.0			
08.054.05	C3	21	Propulsion	2.80	5.0	17.3	0	0.0	0.0			
08.055.01	C3	21	Propulsion	2.10	5.0	11.5	0	0.0	0.0			
08.055.02	C3	21	Propulsion	2.10	5.0	17.3	0	0.0	0.0			
08.055.03	C3	21	Propulsion	2.10	5.0	14.4	0	0.0	0.0			
08.055.04	C3	21	Propulsion	2.10	5.0	18.0	0	0.0	0.0			
08.055.05.1	C3	21	Pfahlzug	2.10	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.055.05.2	C3	21	Pfahlzug	2.10	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.055.05.3	C3	21	Pfahlzug	2.10	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.055.05.4	C3	21	Pfahlzug	2.10	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.055.05.5	C3	21	Pfahlzug	2.10	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.056.03	C3	21	Propulsion	1.60	5.0	11.5	0	0.0	0.0			
08.056.04	C3	21	Propulsion	1.60	5.0	14.4	0	0.0	0.0			
08.056.05.1	C3	21	Pfahlzug	1.60	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.056.05.2	C3	21	Pfahlzug	1.60	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.056.05.3	C3	21	Pfahlzug	1.60	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.056.05.4	C3	21	Pfahlzug	1.60	5.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.056.06	C3	21	Propulsion	1.60	5.0	17.3	0	0.0	0.0			
08.056.07	C3	21	Propulsion	1.60	5.0	19.5	0	0.0	0.0			
08.057.01	C3	21	Propulsion	1.60	3.0	8.0	0	0.0	0.0			
08.057.02.1	C3	21	Pfahlzug	1.60	3.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.057.02.2	C3	21	Pfahlzug	1.60	3.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.057.02.3	C3	21	Pfahlzug	1.60	3.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.057.02.4	C3	21	Pfahlzug	1.60	3.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.057.02.5	C3	21	Pfahlzug	1.60	3.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.057.02.6	C3	21	Pfahlzug	1.60	3.0	0.0	0	0.0	0.0			
08.057.03	C3	21	Propulsion	1.60	3.0	10.0	0	0.0	0.0			
08.057.04	C3	21	Propulsion	1.60	3.0	11.5	0	0.0	0.0			
08.057.05	C3	21	Propulsion	1.60	3.0	13.0	0	0.0	0.0			
08.057.06	C3	21	Propulsion	1.60	3.0	14.4	0	0.0	0.0			
08.057.06	C3	21	Propulsion	1.60	3.0	13.7	0	0.0	0.0			
08.058.01	C3	21	Propulsion	2.10	3.0	10.0	0	0.0	0.0			
08.058.02	C3	21	Propulsion	2.10	3.0	11.5	0	0.0	0.0			
08.058.03	C3	21	Propulsion	2.10	3.0	12.2	0	0.0	0.0			
08.058.04	C3	21	Propulsion	2.10	3.0	12.7	0	0.0	0.0			
08.059.01	C3	21	Propulsion	2.80	4.00	11.5	0	0.0	0.0			
08.059.02	C3	21	Propulsion	2.80	4.00	13.7	0	0.0	0.0			
08.059.03	C3	21	Propulsion	2.80	4.00	14.4	0	0.0	0.0			
08.059.04	C3	21	Propulsion	2.80	4.00	15.0	0	0.0	0.0			

Versuchsübersicht 3

Versuchs-Nr.	Versuchs-variante	Vor-span-nung	Versuchsart	Tief-gang	Wasser-tiefe	Ge-schwindig-keit	Wellen-richtung	Wellen-höhe	Wellen-länge	Stütz-kurs	Stützdreh-geschwin-digkeit	Ruder-winkel
		t		m	m	km/h	°	m	m	°	°/s	°
08.060.04.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	18.0	0	0.9	24.8			
08.060.04.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	18.0	0	0.9	24.8	5		45
08.060.04.3	C3	21	Stoppmanöver	2.80	15	18.0	0	0.9	24.8			
08.060.05.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	0.9	24.8			
08.060.05.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	20.0	0	0.9	24.8	5		45
08.060.05.3	C3	21	Stoppmanöver	2.80	15	20.0	0	0.9	24.8			
08.060.06.1	C3	21	Quer 45	2.80	15	0.0	bis 45°	0.9	24.8	50° quer		
08.060.07.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	18.0	0	1.7	31.7			
08.060.07.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	18.0	0	1.7	31.7	5		45
08.060.07.3	C3	21	Sonstiges, Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	1.7	31.7			
08.060.08.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	18.0	0	1.7	31.7			
08.060.08.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	18.0	0	1.7	31.7	5		45
08.060.08.3	C3	21	Sonstiges, Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	1.7	31.7			
08.060.08.4	C3	21	Sonstiges, Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	2.1	31.7			
08.060.09.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	1.7	31.7			
08.060.09.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	20.0	0	1.7	31.7	5		45
08.060.09.3	C3	21	Stoppmanöver	2.80	15	20.0	0	1.7	31.7			
08.060.09.4	C3	21	Quer, zurück mit Ruder	2.80	15	20.0	bis 90°	1.7	31.7			
08.060.10.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	18.0	0	1.8	39.0			
08.060.10.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	18.0	0	1.8	39.0	5		45
08.060.10.3	C3	21	Stoppmanöver	2.80	15	18.0	0	1.8	39.0			
08.060.10.4	C3	21	Quer, zurück mit Ruder	2.80	15	18.0	bis 90°	1.8	39.0			
08.060.12.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	18.0	0	2.1	39.0			
08.060.12.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	18.0	0	2.1	39.0	5		45
08.060.12.3	C3	21	Stoppmanöver	2.80	15	18.0	0	2.1	39.0			
08.060.15.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	2.1	39.0			
08.060.15.2	C3	21	Z-Manöver	2.80	15	20.0	0	2.1	39.0	5		45
08.060.15.3	C3	21	Stoppmanöver	2.80	15	20.0	0	2.1	39.0			
08.060.16.1	C3	0	Geradeausfahrt	2.80	15	13.0	0	2.1	39.0			
08.060.16.2	C3	0	Z-Manöver	2.80	15	13.0	0	2.1	39.0	5		45
08.061.03.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	20.0	0	0.9	24.8			
08.061.03.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	20.0	0	0.9	24.8	5		45
08.061.03.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	20.0	0	0.9	24.8			
08.061.04.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	18.0	0	0.9	24.8			
08.061.04.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	18.0	0	0.9	24.8	5		45
08.061.04.3	C3	21	Quer	2.10	15	18.0	bis 90°	0.9	24.8			
08.061.05.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	20.0	0	1.7	31.7			
08.061.05.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	20.0	0	1.7	31.7	5		45
08.061.05.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	20.0	0	1.7	31.7			
08.061.06.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	18.0	0	1.7	31.7			
08.061.06.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	18.0	0	1.7	31.7	5		45
08.061.06.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	18.0	0	1.7	31.7			
08.061.07.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	20.0	0	2.1	39.0			
08.061.07.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	20.0	0	2.1	39.0	5		45
08.061.07.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	20.0	0	2.1	39.0			
08.061.08.1	C3	21	Geradeausfahrt	2.10	15	18.0	0	2.1	39.0			
08.061.08.2	C3	21	Z-Manöver	2.10	15	18.0	0	2.1	39.0	5		45
08.061.08.3	C3	21	Stoppmanöver	2.10	15	18.0	0	2.1	39.0			
08.062.02.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	21.0	0	2.1	39.0			
08.062.02.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	2.1	39.0	5		45
08.062.02.3	C3	21	Antrieb aus	1.60	15	21.0	0	2.1	39.0			
08.062.03.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	6.0	0	2.1	39.0			
08.062.03.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	6.0	0	2.1	39.0	5		45
08.062.03.3	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	11.2	0	2.1	39.0	5		45
08.062.04.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	13.7	0	2.1	39.0			
08.062.04.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	13.7	0	2.1	39.0	5		45
08.062.04.3	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	7.3	0	2.1	39.0	5		45
08.062.05.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	6.0	0	1.7	31.7			
08.062.05.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	6.0	0	1.7	31.7	5		45
08.062.05.3	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	11.2	0	1.7	31.7	5		45
08.062.06.1	C3	21	Geradeausfahrt	1.60	15	11.2	0	0.9	24.8			
08.062.06.2	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	11.2	0	0.9	24.8	5		45
08.062.06.3	C3	21	Z-Manöver	1.60	15	14.5	0	0.9	24.8	5		45
08.063.03.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	11.4	0	0.9	24.8			
08.063.03.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	11.4	0	0.9	24.8	5		45
08.063.03.3	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	13.4	0	0.9	24.8	5		45
08.063.04.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	20.3	0	0.9	24.8			
08.063.04.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	20.3	0	0.9	24.8	5		45
08.063.05.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	18.0	0	0.0	0.0			
08.063.05.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	18.0	0	0.0	0.0	5		45

Versuchsübersicht 4

Versuchs-Nr.	Versuchs-variante	Vor-span-nung	Versuchsart	Tief-gang	Wasser-tiefe	Ge-schwindig-keit	Wellen-richtung	Wellen-höhe	Wellen-länge	Stütz-kurs	Stützdreh-geschwin-digkeit	Ruder-winkel
		t		m	m	km/h	°	m	m	°	°/s	°
08.063.06.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	6.9	0	1.7	31.7			
08.063.06.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	6.9	0	1.7	31.7	5		45
08.063.06.3	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	11.2	0	1.7	31.7	5		45
08.063.07.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0			
08.063.07.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0	5		45
08.063.08.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	12.2	0	0.0	0.0			
08.063.08.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	12.2	0	0.0	0.0	5		45
08.063.08.3	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	14.4	0	0.0	0.0	5		45
08.063.09.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	19.5	0	1.7	31.7			
08.063.09.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	19.5	0	1.7	31.7	5		45
08.063.10.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	6.6	0	2.1	39.0			
08.063.10.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	6.6	0	2.1	39.0	5		45
08.063.10.3	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	8.1	0	2.1	39.0	5		45
08.063.11.1	C2	18	Geradeausfahrt	1.60	15	17.9	0	2.1	39.0			
08.063.11.2	C2	18	Z-Manöver	1.60	15	17.9	0	2.1	39.0	5		45
08.064.01.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	11.4	0	0.0	0.0			
08.064.01.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	11.4	0	0.0	0.0	5		45
08.064.01.3	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	15.3	0	0.0	0.0	5		45
08.064.02.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	19.9	0	0.0	0.0			
08.064.02.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	19.9	0	0.0	0.0	5		45
08.064.03.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	6.6	0	0.9	24.8			
08.064.03.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	11.1	0	0.9	24.8	5		45
08.064.03.3	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	13.8	0	0.9	24.8	5		45
08.064.04.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	19.9	0	0.9	24.8			
08.064.04.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	19.9	0	0.9	24.8	5		45
08.064.05.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	9.2	0	1.7	31.7			
08.064.05.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	9.2	0	1.7	31.7	5		45
08.064.05.3	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	12.4	0	1.7	31.7	5		45
08.064.06.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	17.9	0	1.7	31.7			
08.064.06.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	17.9	0	1.7	31.7	5		45
08.064.07.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	5.5	0	2.1	39.0			
08.064.07.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	5.5	0	2.1	39.0	5		45
08.064.07.3	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	6.8	0	2.1	39.0	5		45
08.064.08.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.10	15	16.1	0	2.1	39.0			
08.064.08.2	C2	18	Z-Manöver	2.10	15	16.1	0	2.1	39.0	5		45
08.065.01.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	12.1	0	0.0	0.0			
08.065.01.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	12.1	0	0.0	0.0	5		45
08.065.01.3	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	14.6	0	0.0	0.0	5		45
08.065.02.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0			
08.065.02.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0	5		45
08.065.03.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	9.2	0	0.9	24.8			
08.065.03.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	9.2	0	0.9	24.8	5		45
08.065.03.3	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	12.2	0	0.9	24.8	5		45
08.065.04.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	19.3	0	0.9	24.8			
08.065.04.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	19.3	0	0.9	24.8	5		45
08.065.05.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	8.5	0	1.7	31.7			
08.065.05.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	8.5	0	1.7	31.7	5		45
08.065.05.3	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	12.1	0	1.7	31.7	5		45
08.065.06.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	18.7	0	1.7	31.7			
08.065.06.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	18.7	0	1.7	31.7	5		45
08.065.07.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	17.3	0	2.1	39.0			
08.065.07.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	17.3	0	2.1	39.0	5		45
08.065.08.1	C2	18	Geradeausfahrt	2.80	15	6.9	0	2.1	39.0			
08.065.08.2	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	6.9	0	2.1	39.0	5		45
08.065.08.3	C2	18	Z-Manöver	2.80	15	11.4	0	2.1	39.0	5		45
08.066.01.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0			
08.066.01.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	20.0	0	0.0	0.0	5		45
08.066.02.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	12.1	0	0.0	0.0			
08.066.02.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	12.1	0	0.0	0.0	5		45
08.066.03.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	14.6	0	0.0	0.0			
08.066.03.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	14.6	0	0.0	0.0	5		45
08.066.04.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	8.6	0	0.9	24.8			
08.066.04.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	8.6	0	0.9	24.8	5		45
08.066.05.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	14.3	0	0.9	24.8			
08.066.05.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	14.3	0	0.9	24.8	5		45
08.066.05.3	B1	61	Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	0.9	24.8			
08.066.06.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	19.3	0	0.9	24.8			
08.066.06.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	19.3	0	0.9	24.8	5		45

Versuchsübersicht 5

Versuchs-Nr.	Versuchs-variante	Vor-span-nung	Versuchsart	Tief-gang	Wasser-tiefe	Ge-schwindig-keit	Wellen-richtung	Wellen-höhe	Wellen-länge	Stütz-kurs	Stützdreh-geschwin-digkeit	Ruder-winkel
		t		m	m	km/h	°	m	m	°	°/s	°
08.066.07.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	9.5	0	1.7	31.7			
08.066.07.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	9.5	0	1.7	31.7	5		45
08.066.07.3	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	11.2	0	1.7	31.7	5		45
08.066.07.4	B1	61	Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	1.7	31.7			
08.066.08.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	18.7	0	1.7	31.7			
08.066.08.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	18.7	0	1.7	31.7	5		45
08.066.08.3	B1	61	Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	1.7	31.7			
08.066.09.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	19.1	0	2.1	39.0			
08.066.09.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	19.1	0	2.1	39.0	5		45
08.066.09.3	B1	61	Quer	2.80	15	0.0	0	2.1	55.0			
08.066.10.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.80	15	6.9	0	2.1	39.0			
08.066.10.2	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	6.9	0	2.1	39.0	5		45
08.066.10.3	B1	61	Z-Manöver	2.80	15	9.8	0	2.1	39.0	5		45
08.067.01.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	11.4	0	0.0	0.0			
08.067.01.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	11.4	0	0.0	0.0	5		45
08.067.01.3	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	15.3	0	0.0	0.0	5		45
08.067.02.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	19.9	0	0.0	0.0			
08.067.02.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	19.9	0	0.0	0.0	5		45
08.067.03.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	6.6	0	0.9	24.8			
08.067.03.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	11.1	0	0.9	24.8	5		45
08.067.03.3	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	13.8	0	0.9	24.8	5		45
08.067.04.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	19.9	0	0.9	24.8			
08.067.04.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	19.9	0	0.9	24.8	5		45
08.067.04.3	B1	61	Quer	2.80	15	0.0	bis 90°	0.9	24.8			
08.067.05.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	9.2	0	1.7	31.7			
08.067.05.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	9.2	0	1.7	31.7	5		45
08.067.05.3	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	12.4	0	1.7	31.7	5		45
08.067.06.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	17.9	0	1.7	31.7			
08.067.06.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	17.9	0	1.7	31.7	5		45
08.067.06.3	B1	61	Quer	2.10	15	0.0	bis 90°	1.7	31.7			
08.067.07.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	5.5	0	2.1	39.0			
08.067.07.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	5.5	0	2.1	39.0	5		45
08.067.07.3	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	6.8	0	2.1	39.0	5		45
08.067.08.1	B1	61	Geradeausfahrt	2.10	15	16.1	0	2.1	39.0			
08.067.08.2	B1	61	Z-Manöver	2.10	15	16.1	0	2.1	39.0	5		45
08.068.01.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0			
08.068.01.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	21.0	0	0.0	0.0	5		45
08.068.02.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	12.2	0	0.0	0.0			
08.068.02.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	12.2	0	0.0	0.0	5		45
08.068.02.3	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	14.4	0	0.0	0.0	5		45
08.068.03.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	11.4	0	0.9	24.8			
08.068.03.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	11.4	0	0.9	24.8	5		45
08.068.05.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	13.4	0	0.9	24.8			
08.068.05.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	13.4	0	0.9	24.8	5		45
08.068.05.3	B1	61	Quer	1.60	15	0.0	bis 90°	0.9	24.8			
08.068.06.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	20.3	0	0.9	40.8			
08.068.06.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	20.3	0	0.9	24.8	5		45
08.068.07.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	6.6	0	1.7	31.7			
08.068.07.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	9.4	0	1.7	31.7	5		45
08.068.07.3	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	9.4	0	1.7	31.7	5		45
08.068.08.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	19.5	0	1.7	31.7			
08.068.08.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	19.5	0	1.7	31.7	5		45
08.068.08.3	B1	61	Quer	1.60	15	0.0	bis 90°	1.7	47.7			
08.068.09.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	6.6	0	2.1	39.0			
08.068.09.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	6.6	0	2.1	39.0	5		45
08.068.09.3	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	8.1	0	2.1	39.0	5		45
08.068.10.1	B1	61	Geradeausfahrt	1.60	15	17.9	0	2.1	39.0			
08.068.10.2	B1	61	Z-Manöver	1.60	15	17.9	0	2.1	39.0	5		45

Versuchsübersicht 6

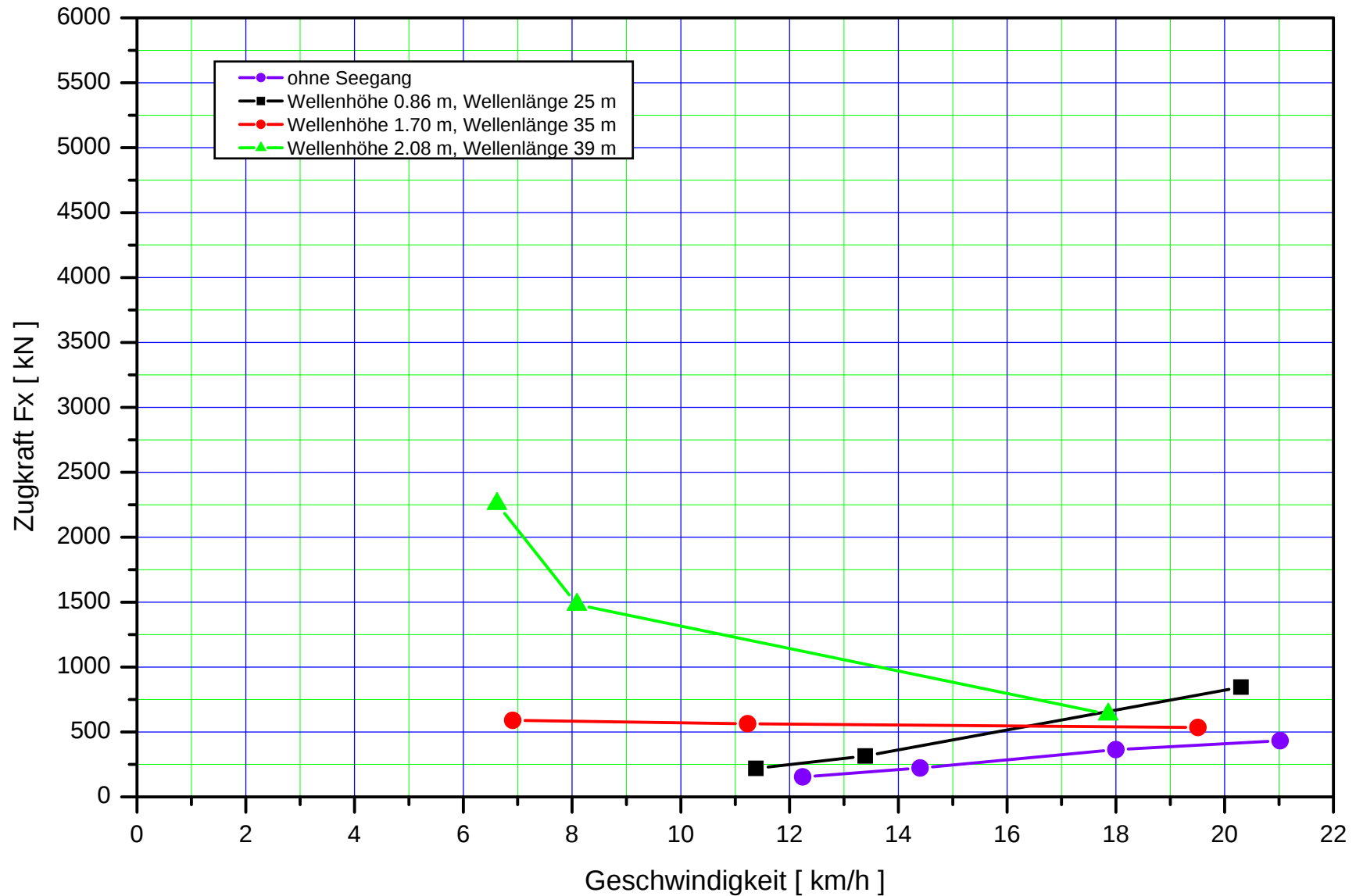
Versuchs-Nr.	Versuchs-variante	Vor-span-nung	Versuchsart	Tief-gang	Wasser-tiefe	Ge-schwindig-keit	Wellen-richtung	Wellen-höhe	Wellen-länge	Stütz-kurs	Stützdreh-geschwin-digkeit	Ruder-winkel
		t		m	m	km/h	°	m	m	°	°/s	°
08.135.04.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	11.8	achtern	0.54	26.0			
08.135.04.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	11.8	achtern	0.54	26.0	5		45
08.135.04.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	14.4	achtern	0.54	26.0			
08.135.05.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	16.4	achtern	0.90	26.0			
08.135.05.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	16.4	achtern	0.90	26.0	5		45
08.135.05.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	12.6	achtern	0.90	24.8			
08.135.06.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	20.4	achtern	0.90	23.6			
08.135.06.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	20.4	achtern	0.90	22.4	5		45
08.135.06.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	17.8	achtern	0.90	21.2			
08.135.07.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	12.3	achtern	1.63	31.7			
08.135.07.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	12.3	achtern	1.63	31.7	5		45
08.135.07.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	9.7	achtern	1.63	31.7			
08.135.08.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	15.4	achtern	1.63	31.7			
08.135.08.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	15.4	achtern	1.63	31.7	5		45
08.135.08.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	14.9	achtern	1.63	31.7			
08.135.09.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	19.9	achtern	1.63	31.7			
08.135.09.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	19.9	achtern	1.63	31.7	5		45
08.135.09.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	14.9	achtern	1.63	31.7			
08.135.10.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	15.3	achtern	1.76	31.7			
08.135.10.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	15.3	achtern	1.76	31.7	5		45
08.135.10.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	10.4	achtern	1.76	31.7			
08.135.11.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	12.1	achtern	2.13	39.0			
08.135.11.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	12.1	achtern	2.13	39.0	5		45
08.135.11.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	11.0	achtern	2.13	39.0			
08.135.12.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	15.4	achtern	2.13	39.0			
08.135.12.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	15.4	achtern	2.13	39.0	5		45
08.135.12.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	14.9	achtern	2.13	39.0			
08.135.13.1	C2	52	Geradeausfahrt	2.10	15	18.6	achtern	2.13	39.0			
08.135.13.2	C2	52	Z-Manöver	2.10	15	18.6	achtern	2.13	39.0	5		45
08.135.13.3	C2	52	Stoppmanöver	2.10	15	17.2	achtern	2.13	39.0			

08.136.01.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	11.8	0	1.9	34.0			
08.136.01.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	11.8	0	1.9	34.0			
08.136.01.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	14.4	0	1.9	34.0			
08.136.01.4	Einzelfahrer	Quer			15	16.4	bis 90°	1.9	34.0			
08.136.02.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	16.4	0	1.7	31.0			
08.136.02.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	12.6	0	1.7	31.0			
08.136.02.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	20.4	0	1.7	31.0			
08.136.02.4	Einzelfahrer	Quer			15	20.4	bis 90°	1.7	31.0			
08.136.03.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	17.8	0	1.7	31.0			
08.136.03.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	12.3	0	1.7	31.0			
08.136.03.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	12.3	0	1.7	31.0			
08.136.03.4	Einzelfahrer	Quer			15	9.7	bis 90°	1.7	31.0			
08.136.04.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	15.4	0	1.7	31.0			
08.136.04.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	15.4	0	1.7	31.0			
08.136.04.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	14.9	bis 30°	1.7	31.0			
08.136.05.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	19.9	0	2.2	39.0			
08.136.05.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	19.9	0	2.2	39.0			
08.136.05.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	14.9	bis 30°	2.2	39.0			
08.136.06.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	15.3	0	2.2	39.0			
08.136.06.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	15.3	0	2.2	39.0			
08.136.06.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	10.4	bis 30°	2.2	39.0			
08.136.07.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	12.1	0	2.2	39.0			
08.136.07.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	12.1	0	2.2	39.0			
08.136.07.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	11.0	bis 30°	2.2	39.0			
08.136.08.1	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	15.4	0	2.5	44.0			
08.136.08.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	15.4	0	2.5	44.0			
08.136.08.3	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	14.9	bis 30°	2.5	44.0			
08.136.09.1	Einzelfahrer	Kurs 30 ° nach BB u STB			15	18.6	bis 30°	3.2	55.0			
08.136.09.2	Einzelfahrer		Z-Manöver		15	18.6	0	3.2	55.0			
08.136.09.3	Einzelfahrer		Geradeausfahrt		15	17.2	0	1.9	34.0			

Zugkräfte beim Schlängelversuch 45/5 mit und ohne Seegang



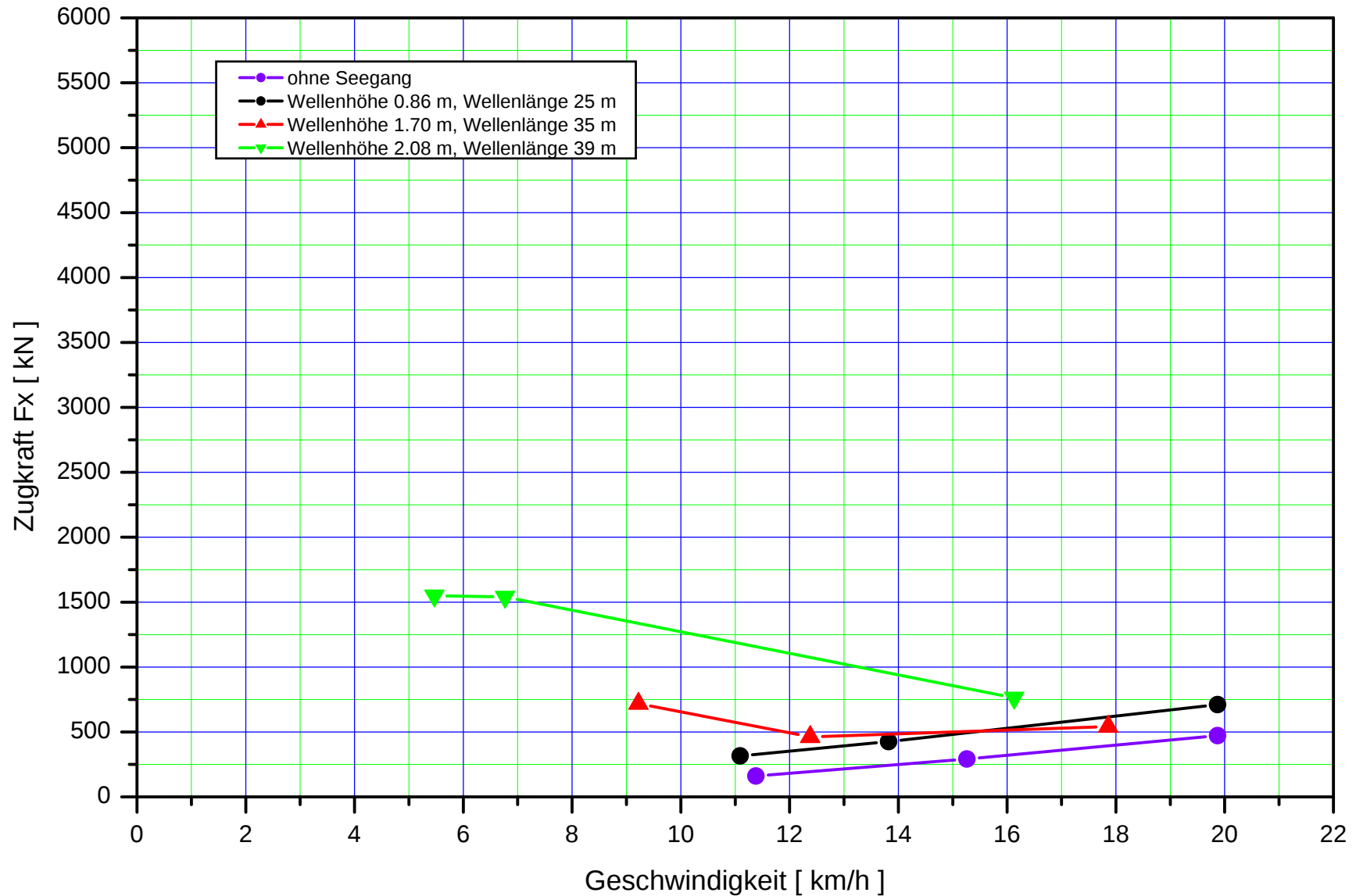
Variante C2, Tiefgang 1.60 m



Zugkräfte beim Schlängelversuch 45/5 mit und ohne Seegang



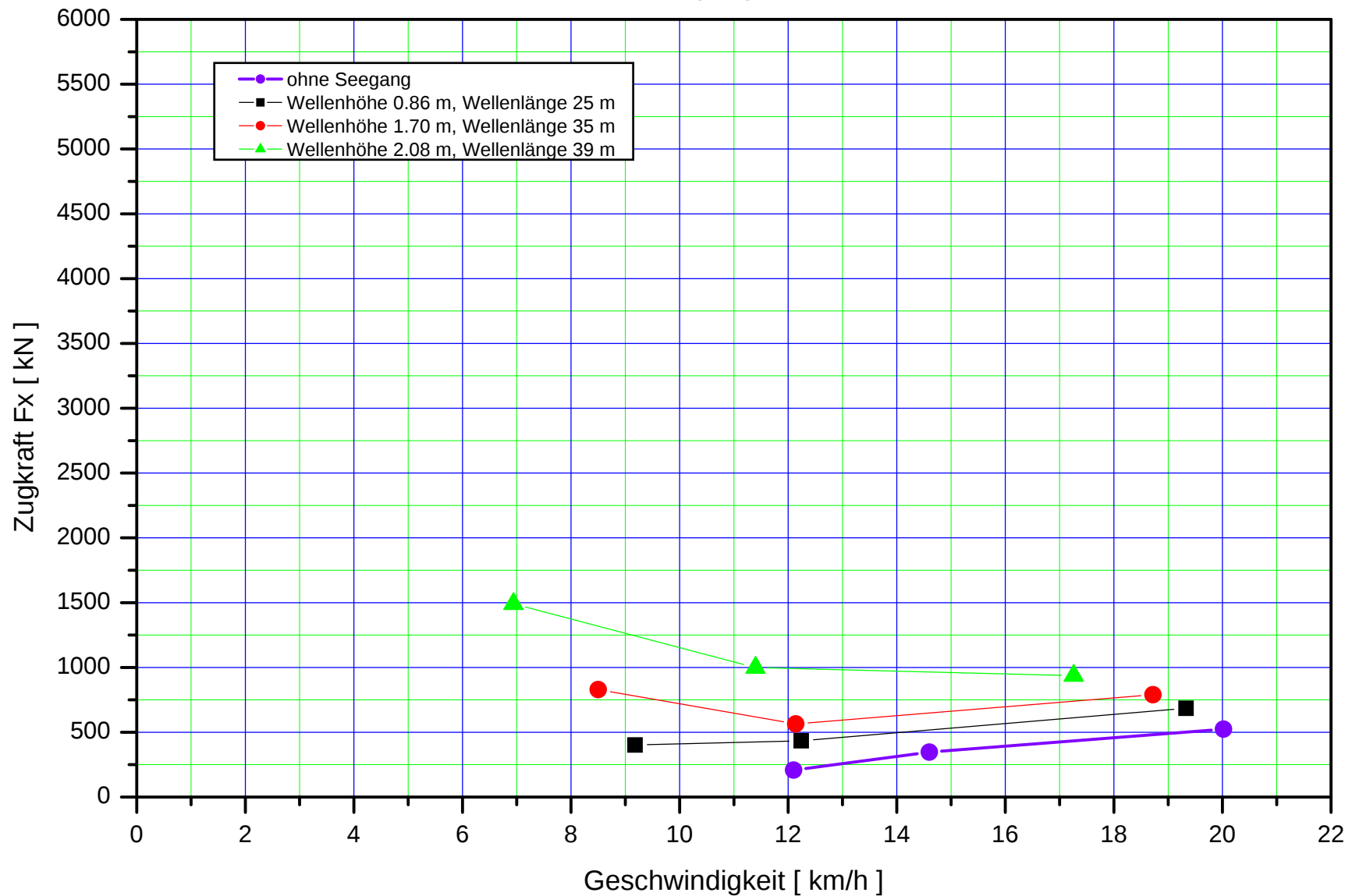
Variante C2, Tiefgang 2.10 m



Zugkräfte beim Schlängelversuch 45/5 mit und ohne Seegang



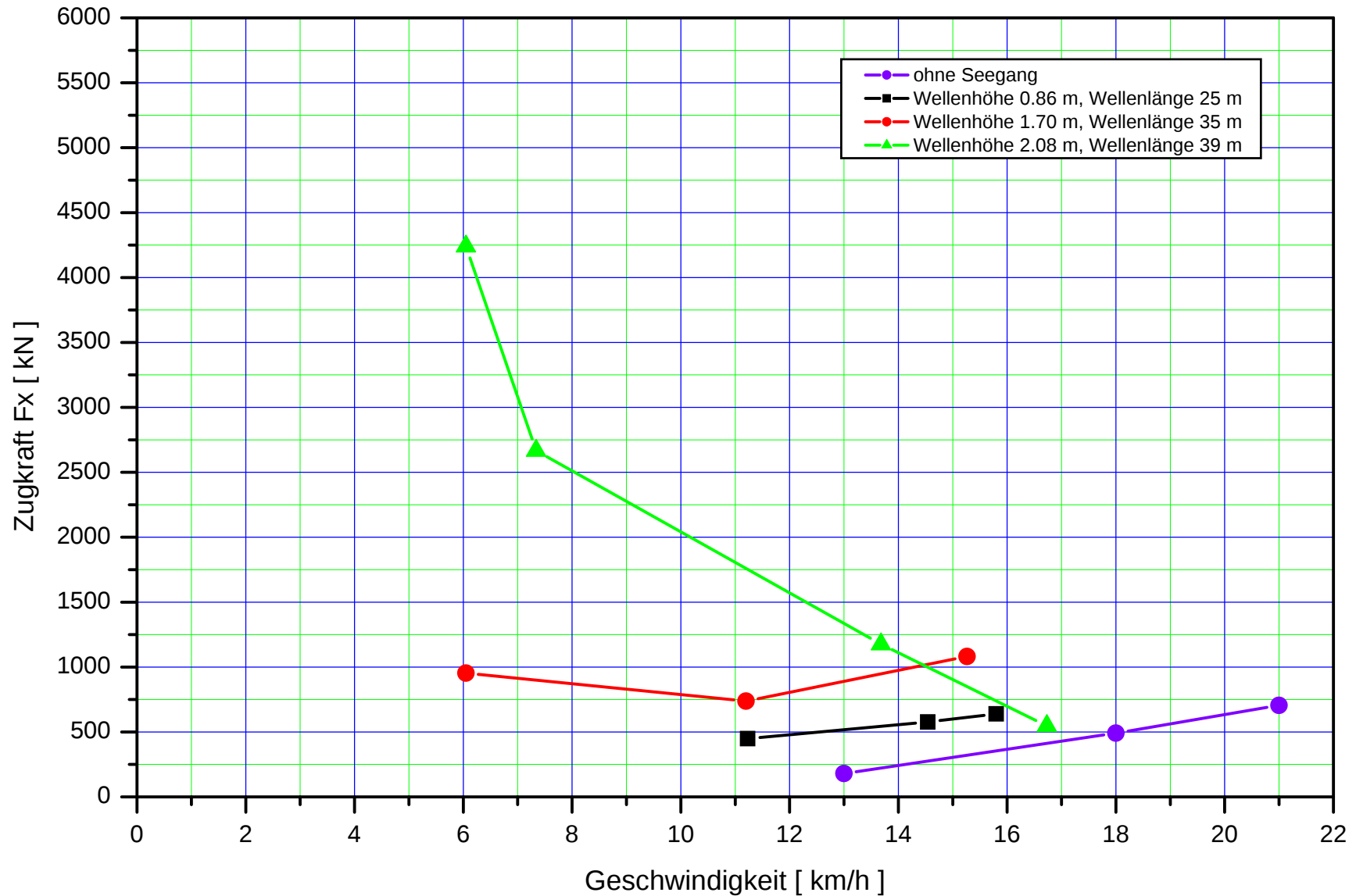
Variante C2, Tiefgang 2.80 m



Zugkräfte beim Schlängelversuch 45/5 mit und ohne Seegang



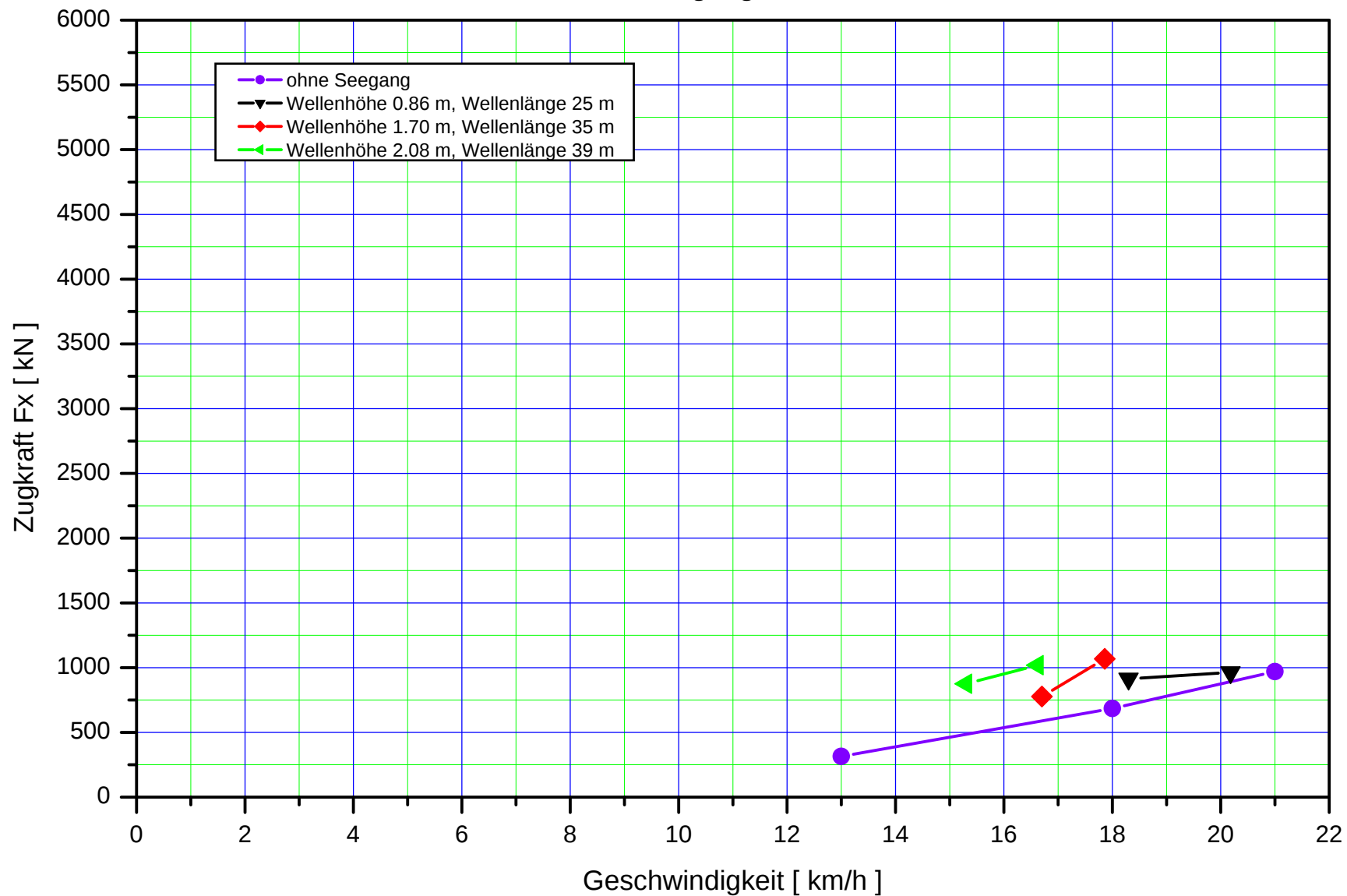
Variante C3, Tiefgang 1.60 m



Zugkräfte beim Schlängelversuch 45/5 mit und ohne Seegang



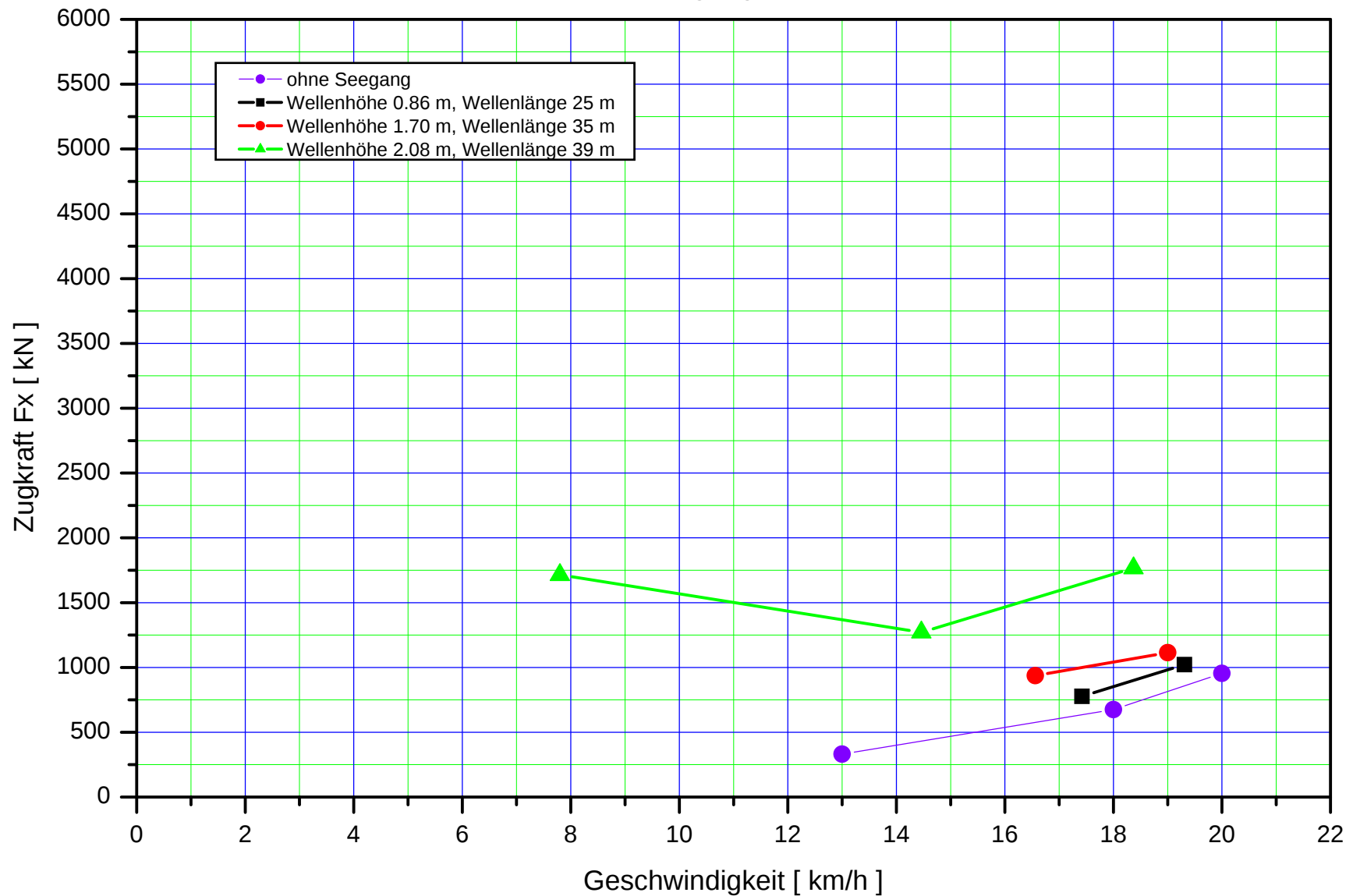
Variante C3, Tiefgang 2.10 m



Zugkräfte beim Schlängelversuch 45/5 mit und ohne Seegang



Variante C3, Tiefgang 2.80 m



Einzelheiten zur Berechnung der Transportkosten bezogen auf den FSKV

Die für die Betriebskostenberechnung notwendigen hydrostatischen, hydrodynamischen sowie schiffbaubezogenen Daten finden sich im technischen Teil der Studie. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Hauptabmessungen und das Leergewicht des Schubschiffes und des Leichters, die Ladekapazität in Tonnen und TEU, den Zusammenhang zwischen Tiefgang und Verdrängung bzw. Tragfähigkeit, die Leistungsprognosen als Funktion der Geschwindigkeit, die Verdrängung (Tiefgang) und die Wassertiefe und schließlich mit besonderer Bedeutung die geschätzten Baukosten.

Der Koppelverband fährt als gebundene „Spargelformation“ (außer bei langsamer Fahrt während der Hafen- und eventuell Schleusen-Manöver). Dabei wird zwischen zwei Längenvarianten der beiden Einheiten (Schubschiff und Leichter) unterschieden, vgl. Tab. 1. In beiden Fällen A und B sind die für die Wirtschaftlichkeit des Koppelverbands relevanten Werte identisch.

Variante	A		B	
SK-Verband (Schiff + Leichter)	Schiff	Leichter	Schiff	Leichter
Container Raster (TEU)	8 x 4	8 x 4	10 x 4	6 x 4
Länge [m]	71	64	83	52
Breite [m]	11,45	11,45	11,45	11,45
Max. Tiefgang [m]	3.00	3.00	3.00	3.00
mittlere Tiefgang [m] - leeres Schiff	0.95	0.65	0.95	0.65
Pmax [kW] - Nennleistung	2 x 600		2 x 600	
Leergewicht [t]	650	450	700	400
Max. Zuladung [t]	1354	1433	1687	1100
Max TEU	64	64	80	48
TEU/Lage	32	32	40	24
Max. Lagen	2	2	2	2
Neupreis [€]	3.800.000	1.700.000	3.850.000	1.650.000
Lebensdauer [a]	30	30	30	30

Tab. 1: Hauptdaten des Koppelverbandes – Varianten A und B

Auf Basis der oben genannten Daten und des Kurvenblattes lässt sich der Zusammenhang zwischen mittlerem Tiefgang und Ladung feststellen. Dies ist die Voraussetzung für die Bestimmung der Schwimmelage des Verbandes in den verschiedenen Transportszenarien und die anschließende Festlegung der entsprechend eingesetzten Leistung anhand der hydrodynamischen Daten.

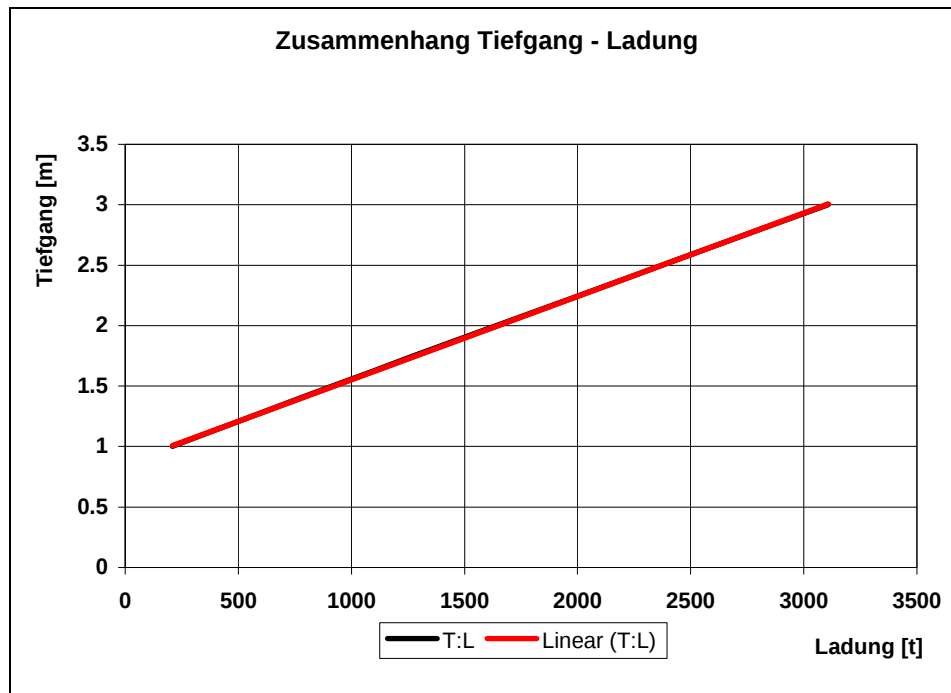


Abb. 1: Ladung als Funktion des mittleren Tiefgangs

Die Leistungsprognosen, die auf Basis der Modellversuche für die folgenden repräsentativen Tiefgänge und Wassertiefen ermittelt wurden, bilden die Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen des Koppelverbandes:

		T _m [m]				
		2.80	2.50	2.10	1.70	1.50
h _w [m]	3		I	M	I	M
	4	M	I	I	I	I
	5	M	I	M	I	M
	6	I	I	I	I	I
	15	M	I	M	I	M

M für EFD Ergebnis

I interpoliert aus EFD

EFD = Experimental Fluid Dynamics

Tab. 2: Matrix der Leistungsprognosen

Weitere notwendige Parameter für die Betriebskostenberechnungen sind:

• Lebensdauer des Koppelverbandes	30	Jahre
• Spezifischer Kraftstoffverbrauch	220	g/kWh
• Kraftstoffpreis	900	€/t
• Dispositionszeit Seehafen (Wilhelmshaven)	2	h
• Dispositionszeit Binnenhafen (Minden, usw.)	1	h
• Betriebsform	B	(24 h pro Tag)
• Eigentumsverhältnis		Partikulier
• Durchschnittliches Bruttogewicht eines Containers	13	t/TEU

Tab. 3: Wichtige Parameter für Berechnung der Betriebskosten

Der Kraftstoffpreis bezieht sich auf das Datum vom 30.06.2008.

Einzelheiten zur Wasserstraßeninfrastruktur auf den Referenzstrecken

Bei den Berechnungen wurden Wasserstände zugrunde gelegt, wie sie derzeit für 300 Tage im Jahr von den zuständigen Behörden als Referenzzustand angenommen werden.

Somit gilt auf der Westroute bis Braunschweig durchgehend eine befahrbare Wassertiefe von mindestens 2,5 m und mindestens 2,8 m auf der Ostroute.

Die Durchfahrtshöhen unter den Brücken sind auf den Referenzstrecken ausreichend für den zweilagigen Containertransport.

Zurzeit ist die Schachtschleusenkammer bei Minden, am Verbindungskanal Nord zwischen dem MLK und der Mittelweser, zu eng für die Durchfahrt des Koppelverbandes (die Kammerbreite beträgt nur 10 m). Außerdem kann zum jetzigen Zeitpunkt lediglich die kleinere Schleusenkammer an der Mittelweser bei Dörverden Schiffe mit einer Abladetiefe von 2,5 m aufnehmen, da die große Kammer nur eine Abladetiefe von 2,3 m zulässt¹. Die kleinere Schleusenkammer erfordert aber die Trennung des Koppelverbandes vor der Schleusung und das kostet zusätzliche Zeit. Dieses Trennungsverfahren muss auch bei der Fahrt durch den ESK durchgeführt werden, da das Hebewerk Lüneburg nur Schiffe mit bis zu 100 m Länge aufnehmen kann.

Die durch diese Maßnahmen anfallende zusätzliche Zeitanforderung von etwa einer halben bis zu einer Stunde für das getrennte Durchschleusen ist im Vergleich zur gesamten Reisezeit relativ kurz, sodass sie bei den Berechnungen vernachlässigt wird.

Bei der Berechnung der Kosten für den Transport per FSKV wurde davon ausgegangen, dass die geplanten Baumaßnahmen zur Behebung der Infrastrukturengpässe realisiert werden.

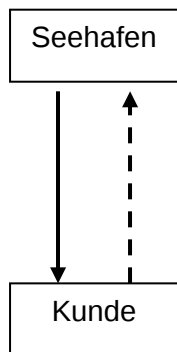
Weil der Leistungsbedarf von der Wassertiefe und dem Tiefgang des Schiffes abhängig ist, wurden die Fahrstrecken in Segmente gleicher Wassertiefen aufgeteilt und übliche Positionen im Fahrwasser auf den untersuchten Strecken angenommen.

¹ „Kapazitätsanalyse von Hinterlandverbindungen ausgewählter europäischer Seehäfen“ – Institut für Transportwirtschaft und Logistik, Wien, 2006

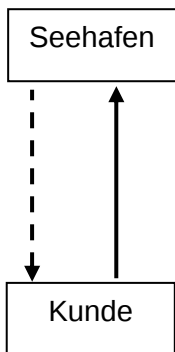
Typische LKW-Fuhren im Containerverkehr

Roundtrip

Import

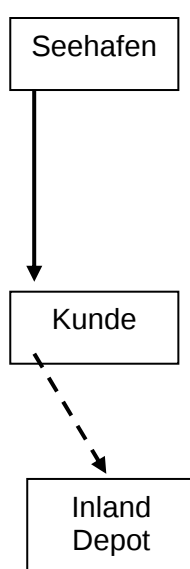


Export

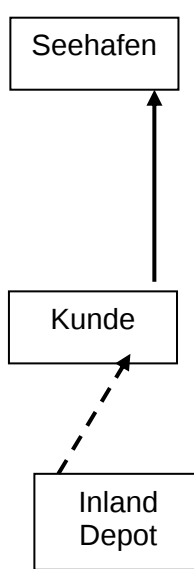


Oneway

Import

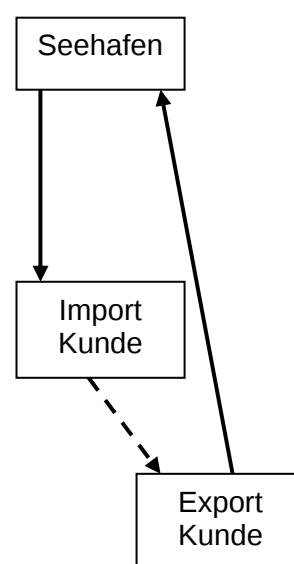


Export



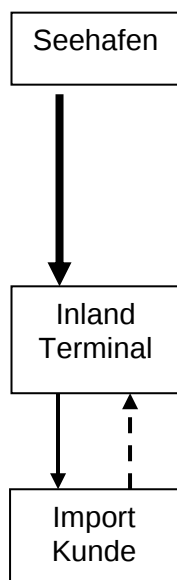
Triangle

Import / Export

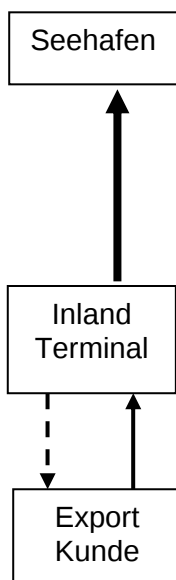


Typische KV – Transporte im Containerverkehr

Import



Export

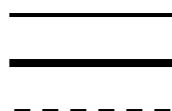


Bahn
oder
Schiff

LKW

Legende

LKW mit beladenem Container
Bahn / Schiff mit beladenen Containern
Leercontainer



Einzelberechnungen für 20 km Vor- bzw. Nachlauf

Variante 20 Fuss Container	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße	Vor- bzw Nachlauf zum Binnenschiff	Umschlag Binnenhafen 3 Moves	Transport FSKV Schiff 20' Box	FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf	RT LKW Preis pro km 2,00	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B
70% Auslastung 20 km Vor-bzw. Nachlauf	km	km	€	€	€	€	€	€	[%]	€	[%]
Minden	186	20	150	100	71	321	372	332,00	-3,2	412,00	-21,98
Hannover	228	20	150	100	78	328	456	416,00	-21,2	496,00	-33,89
Braunschweig Westroute	263	20	150	100	88	338	526	486,00	-30,4	566,00	-40,21
Braunschweig Westroute	263	20	150	100	70	320	526	486,00	-34,3	566,00	-43,54

Variante 40 Fuss Container	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße	Vor- bzw Nachlauf zum Binnenschiff	Umschlag Binnenhafen 3 Moves	Transport FSKV Schiff 20' Box	FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf	RT LKW Preis pro km 2,00	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B
70% Auslastung 20 km Vor-bzw. Nachlauf	km	km	€	€	€	€	€	€	[%]	€	[%]
Minden	186	20	150	100	143	393	372	332,00	18,3	412,00	-4,65
Hannover	228	20	150	100	156	406	456	416,00	-2,4	496,00	-18,18
Braunschweig Westroute	263	20	150	100	177	427	526	486,00	-12,2	566,00	-24,58
Braunschweig Ostroute	263	20	150	100	139	389	526	486,00	-19,9	566,00	-31,26

Einzelberechnungen für 50 km Vor- bzw. Nachlauf

Variante 20 Fuss Container	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße	Vor- bzw Nachlauf zum Binnenschiff	Umschlag Binnenhafen 3 Moves	Transport FSKV Schiff 20' Box	FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf	RT LKW Preis pro km 2,00	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B
70% Auslastung 50 km Vor-bzw. Nachlauf	km	km	€	€	€	€	€	€	[%]	€	[%]
Minden	186	50	250	100	71	421	372	272,00	54,9	472,00	-10,71
Hannover	228	50	250	100	78	428	456	356,00	20,2	556,00	-23,04
Braunschweig Westroute	263	50	250	100	88	438	526	426,00	2,9	626,00	-29,96
Braunschweig Ostroute	263	50	250	100	70	420	526	426,00	-1,5	626,00	-32,98

Variante 40 Fuss Container	Entfernung WHV zum Binnenhafen Straße	Entfernung Kunde zum Binnenhafen Straße	Vor- bzw Nachlauf zum Binnenschiff	Umschlag Binnenhafen 3 Moves	Transport FSKV Schiff 20' Box	FSKV kombiniert inkl. Vor- bzw. Nachlauf	RT LKW Preis pro km 2,00	Gesamt LKW zum Kunden minus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante A	Gesamt LKW zum Kunden plus 20 km	Differenz FSKV kombiniert versus LKW Variante B
70% Auslastung 50 km Vor-bzw. Nachlauf	km	km	€	€	€	€	€	€	[%]	€	[%]
Minden	186	50	250	100	143	493	372	272,00	81,2	472,00	4,42
Hannover	228	50	250	100	156	506	456	356,00	42,1	556,00	-9,03
Braunschweig Westroute	263	50	250	100	177	527	526	426,00	23,7	626,00	-15,83
Braunschweig Ostroute	263	50	250	100	139	489	526	426,00	14,8	626,00	-21,87

	Szenario		von	nach	Ladung	Route
Massengut	1	H	Wilhelmshaven	Kraftwerk Mehrum	Kohle	Weser/MLK
		R	Kraftwerk Mehrum	Wilhelmshaven	Bulk ^{*)}	
	2	H	Wilhelmshaven	Kraftwerk Mehrum	Kohle	
		R	Kraftwerk Mehrum	Wilhelmshaven	Ballast	
	3	H	Wilhelmshaven	Kraftwerk Heyden	Kohle	Weser
		R	Kraftwerk Heyden	Wilhelmshaven	Bulk	
	4	H	Wilhelmshaven	Kraftwerk Heyden	Kohle	
		R	Kraftwerk Heyden	Wilhelmshaven	Ballast	
	5	H	Wilhelmshaven	Kraftwerk Mehrum	Kohle	Elbe/ESK/MLK
		R	Kraftwerk Mehrum	Wilhelmshaven	Bulk	
	6	H	Wilhelmshaven	Kraftwerk Mehrum	Kohle	
		R	Kraftwerk Mehrum	Wilhelmshaven	Ballast	

^{*)} z.B. Getreide

Tab. 1: Reiseszenarien beim Massenguttransport

	Szenario		von	nach	Ladung	Route
Container 100%	7	H	Wilhelmshaven	Bremen	128 TEU	via Weser
		R	Bremen	Wilhelmshaven		
	8	H	Wilhelmshaven	Minden		
		R	Minden	Wilhelmshaven		
	9	H	Wilhelmshaven	Hannover		
		R	Hannover	Wilhelmshaven		
	10	H	Wilhelmshaven	Braunschweig		via Elbe
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		
Container 70%	13	H	Wilhelmshaven	Bremen	90 TEU	via Weser
		R	Bremen	Wilhelmshaven		
	14	H	Wilhelmshaven	Minden		
		R	Minden	Wilhelmshaven		
	15	H	Wilhelmshaven	Hannover		
		R	Hannover	Wilhelmshaven		
	16	H	Wilhelmshaven	Braunschweig		via Elbe
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		
Container 50%	17	H	Wilhelmshaven	Braunschweig	64 TEU	via Weser
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		
	19	H	Wilhelmshaven	Bremen		
		R	Bremen	Wilhelmshaven		
	20	H	Wilhelmshaven	Minden		
		R	Minden	Wilhelmshaven		
	21	H	Wilhelmshaven	Hannover		
		R	Hannover	Wilhelmshaven		
	22	H	Wilhelmshaven	Braunschweig	64 TEU	via Weser
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		
	23	H	Wilhelmshaven	Braunschweig		
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		
		H	Wilhelmshaven	Braunschweig		via Elbe
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		
		H	Wilhelmshaven	Braunschweig		via Elbe
		R	Braunschweig	Wilhelmshaven		

Tab. 2: Reiseszenarien beim Punkt-Punkt Containertransport

	Szenario		von	Zula- dung [TEU]	via	Entla- dung [TEU]	nach	Entladung [TEU]
Container	12	H	Wilhelmshaven	128	Bremen	32	Braunschweig	32
					Minden	32		
					Hannover	32		
		R	Braunschweig	128	Hannover	32*	Wilhelmshaven	32
					Minden	32*		
					Bremen	32*		
	18	H	Wilhelmshaven	192	Bremen	64	Minden	128
		R	Minden	128	Bremen	64*	Wilhelmshaven	192
	24	H	Wilhelmshaven	192	Bremen	64	Hannover	128
		R	Hannover	128	Bremen	64*	Wilhelmshaven	192

*) Zuladung

Tab. 3: Reiseszenarien beim Containerlinienverkehr

Technische Vorschriften

Beim Bau und Betrieb von deutschen Seeschiffen sind nachstehende Vorschriften zu beachten:

1. Unfallverhütungsvorschriften für Unternehmen der Seefahrt (UVV See)
2. Internationales Übereinkommen von 1974/88 zum Schutz des menschlichen Lebens auf See
3. Bekanntmachung des Internationalen Rettungsmittel-(LSA)
4. Schiffsausrüstungsrichtlinie 96/98/EG
5. Schiffssicherheitsgesetz (SchSG)
6. Schiffssicherheitsverordnung (SchSV)
7. Schiffsbesetzungsverordnung
8. Gesetz zum Internationalen Freibord
9. Verordnung über die Krankenfürsorge auf Kauffahrteischiffen
10. Verordnung über die Unterbringung der Besatzungsmitglieder an Bord von Kauffahrteischiffen
11. Technische Regeln für Bau und Ausrüstung von Unterkünftsräumen auf Seeschiffen
12. Gesetz zum Internationalen Übereinkommen von 1973 zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe und zum Protokoll von 1978 zu diesem Übereinkommen (MARPOL 73/78)
13. Richtlinien und Merkblätter der See-Berufsgenossenschaft
14. Vorschriften der jeweiligen Klassifikationsgesellschaft, die eine Schiffsbesichtigungsvereinbarung mit der See-BG haben
15. Vorschriften über die Baumusterprüfung von Kompassen, Ortungsfunkanlagen, Positionslaternen und Schallsignalgeräten sowie Bedingungen für die Aufstellung bzw. Anbringung der vorgenannten Geräte.
16. Handbuch "Schiffssicherheitsvorschriften" (mit Gefahrgutverordnung-See).
17. Internationaler Code für Brandsicherheitssysteme (FSS-Code)
18. Seeschiffverkehrsstraßen-Ordnung

Beim Bau und Betrieb von deutschen Binnenschiffen sind nachstehende Vorschriften zu beachten:

1. Binnenschiffs-Untersuchungs-Ordnung,
2. ggf. Rheinschiffs-Untersuchungs-Ordnung (RheinSchUO)
3. Vorschriften der jeweiligen Klassifikationsgesellschaft
4. Polizei-Verordnungen einzelner Flüsse
5. Binnenschifferpatentverordnung (BinSchPatentV)
6. Gefahrgutverordnung Binnenschifffahrt
7. ADNR, Verordnung über den Transport gefährlicher Güter
8. Binnenschifffahrt Abgas Verordnung
9. Binnenschifffahrt Kosten Verordnung
10. Verordnung über die Eichung von Binnenschiffen (BinSchEO)
11. Kostenverordnung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung auf dem Gebiet der Binnenschifffahrt (Binnenschifffahrtskostenverordnung - BinSchKostV)