

# Abschlussbericht

zum Verbundforschungsvorhaben

Einfluss der Formgebung von Schiffen auf die  
Propulsionseffizienz und die Propeller-Eis-Belastung  
- ProEis -

...

Teilvorhaben

**Entwicklung eisbrechender Schiffe unter  
spezieller Berücksichtigung von Propeller-Eis  
Interaktion**



**Förderkennzeichen:**  
**Projektlaufzeit:**

03SX391D  
01.07.2015 – 30.06.2018

<b>Organisation, Anschrift</b>	<b>Ansprechpartner, E-Mail</b>
MV Werften Wismar GmbH Wendorfer Weg 5 D-23966 Wismar , Germany	Dr. Ralf Tschullik Ralf.Tschullik@mv-werften.com  Dipl.-Ing. Nils Naudorf Nils.Naudorf@mv-werften.com

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurzdarstellung des TeilVorhabens .....</b>	<b>1</b>
1. Aufgabenstellung .....	1
2. Voraussetzungen des Vorhabens .....	1
3. Planung und Ablauf .....	1
4. Wissenschaftlich-Technischer Stand vor Projektbeginn .....	3
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	3
<b>II. Ausführliche Darstellung des Forschungsvorhabens .....</b>	<b>3</b>
1. Erzielte Ergebnisse .....	3
II.1.1.1 AP 1 – Schiffsentwurf .....	3
II.1.1.2 Marktanalyse .....	4
II.1.1.3 Hauptabmessungen & Anforderungsprofil .....	5
II.1.1.4 Gewicht .....	6
II.1.1.5 Schiffsform .....	8
II.1.1.6 Leistungsprognose .....	10
II.1.1.7 Generalplan .....	11
II.1.1.8 Stabilität .....	13
1.2 AP 2 – Maßnahmen zur Reduzierung der Propeller-Eis-Interaktion .....	24
II.1.2.1 Konzepte für den Flachwasserbereich .....	24
II.1.2.2 Entwicklung passiver Räumkeile .....	25
II.1.2.3 Propulsionskonzept .....	26
II.1.2.4 Linienentwicklung .....	27
II.1.2.5 Anordnung Ruderpropeller & Anhänge .....	28
II.1.2.6 Eisbrech- & Leistungsprognose (im Eis) .....	30
II.1.2.7 Modellversuche .....	32
II.1.2.8 Auswertung Modellversuche .....	33
2. Verwendung der Zuwendung und wichtigste Kostenpositionen .....	41
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten .....	41
4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	41
5. Wissenschaftlich-technischer Fortschritt bei anderen Stellen .....	41
6. Veröffentlichungen .....	41



## Abschlussbericht

### I. KURZDARSTELLUNG DES TEILVORHABENS

#### 1. Aufgabenstellung

Innerhalb des geplanten Forschungsvorhabens wurde eine ganzheitliche experimentelle sowie numerische Betrachtung des Eisbrechprozesses entlang des Schiffsrumpfes verfolgt. Im Mittelpunkt des Vorhabens standen die Erarbeitung effizienter softwarebasierter Entwurfs- und Berechnungsverfahren, die Optimierung der Schiff/Propeller/Maschinen-Wechselwirkung sowie die realistische Prognose der Schiffs- und Propellerumströmung im Eis und die damit verbundenen Lasten. Nordic Yards bzw. MV Werften beteiligen sich an 3 verschiedenen Arbeitspaketen welche die folgenden Kernziele verfolgten:

- Entwicklung konstruktiver Zusatzmaßnahmen zur Reduzierung von Propeller-Eis Interaktion
- Entwicklung eines abgeleiteten innovativen, eisbrechenden Schiffskonzeptentwurfs
- Modellversuche zur Verifikation für das entwickelte Konzept
- Entwicklung propulsionsverbessernder Maßnahmen für Flachwassereisbrecher durch Reduzierung von Propeller-Eis Interaktion
- Erfassung von zusätzlichen Aufwänden im Schiffsentwurf durch Propeller-Eis Interaktion im frühen Entwurfsstadium

#### 2. Voraussetzungen des Vorhabens

Durch den Bau zahlreicher eisbrechender Schiffe (insgesamt 116 Schiffe mit signifikanter Eisklasse), wie die vier eisbrechenden Container- & Cargo-Schiffe und ein eisbrechender Spezialtanker für Norilsk Nickel, fünf eisbrechende Spezialtanker für Lukoil, die bekannte POLAR und Kristall Serie, die ULESC Serie und viele eisgehende Forschungsschiffe hat Nordic Yards umfangreiche Erfahrungen im Entwurf und Bau solcher Schiffe gesammelt. Die verwendete Schiffsförmung wurde als Modell bei der HSVA gefertigt und umfassend auf seine eisbrecherischen und hydrodynamischen Eigenschaften untersucht. MV Werften wiederum sind spezialisiert auf den Bau von Kreuzfahrtschiffen. Im Portfolio sind dabei auch Kreuzfahrtschiffe für Polarregionen. Diese Expertise als Systemintegrator bringen Nordic Yards und dann auch MV Werften in das Projekt ein.

Mit dem Partner HSVA und den weiteren Verbundpartnern TUHH, Voith, MMG, DNV GL und develogic war die Basis für die erfolgreiche Voraussetzung für die Bearbeitung des Vorhabens gelegt.

#### 3. Planung und Ablauf

Das Verbundvorhaben Pro-Eis hatte eine Projektlaufzeit von 3 Jahren (01.07.2015 – 30.06.2018). Nordic Yards war als Partner der Werftindustrie im Verbund tätig. Mitte 2016 hat die Genting-Hong-Kong-Gruppe die drei Standorte von Nordic Yards übernommen und gründete aus diesen heraus die MV Werften mit Hauptsitz in Wismar. In der Folge kam es zu einem Wechsel des Bearbeiters von Nordic Yards zu MV Werften. Wichtige Bestandteile des Teilvorhabens konnten weiter verfolgt werden. Dennoch mussten in Bezug auf die Zielsetzung aus Werftsicht neue Schwerpunkte gesetzt werden. Dies hatte auch Auswirkungen auf die Bearbeitung der Arbeitspakete. So war seitens Nordic Yards die Beteiligung an drei Arbeitspaketen geplant. Die geplante Messfahrt in AP 4 konnte aber nicht realisiert werden. MV Werften hat sich an den Arbeitspaketen eins und zwei beteiligt. Das ursprüngliche Ziel des Aufbaus von weiterem

## Abschlussbericht

Knowhow in Bezug auf eisbrechende Schiffe, wurde auch von MV Werften getragen. Allerdings fokussieren die MV Werften ganz klar den Kreuzschiffahrtbereich, so dass auch dieser Bereich aus Sicht des Systemintegrators Werft primäres Ziel der Betrachtungen ist.

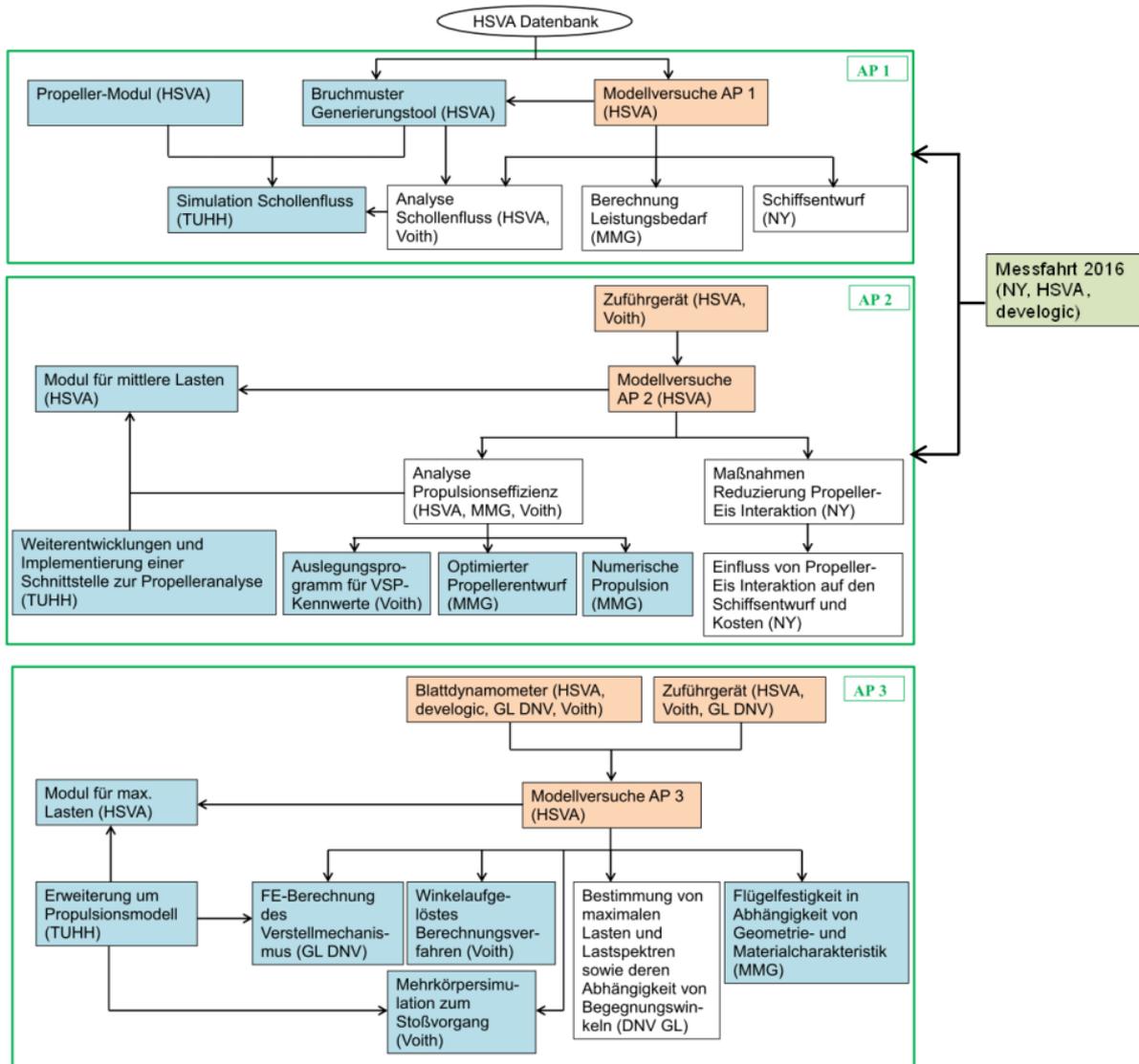


Abbildung 1: Übersicht über die AP des Verbundvorhabens

Fachlich haben Nordic Yards / MV Werften innerhalb dieser Arbeitspakete den Schiffsform-einfluss auf das Bruchbild und den Schollenfluss untersucht.

Dieser Schiffsentwurf wurde innerhalb des Verbundvorhabens als Validierungsfall genutzt. Dadurch konnten innerhalb aller entwickelten Werkzeuge und für die Modellversuche auf ein und dasselbe Schiffsmodell zurückgegriffen werden. Zusätzlich können dadurch spezielle Sonderfälle, welche in Zukunft bei Eisbrechen von Interesse sind, gezielt untersucht werden.

MV Werften sind zeitlich im Verlauf von AP 1 eingestiegen. Dadurch war es möglich bereits für dieses Arbeitspaket den Fokus im von MV Werften wichtigen Bereich der Kreuzschiffahrt zu legen. Ergebnis von AP 1 im Teilprojekt war somit ein ausgereifter Konzeptentwurf für ein eisbrechendes Schiff welches für die Forderungen der Zukunft gerüstet ist und dabei sämtliche

## Abschlussbericht

neuen Erkenntnisse aus dem Verbundforschungsvorhaben integriert. Diese entwickelte Schiffsform konnte zugleich als Validierungsschiff (Partner MMG, Voith) innerhalb des Forschungsprojekts zur Verfügung stehen, sowohl als Modell für messtechnische Versuche (Partner HSVA) als auch zur Berechnung innerhalb der entwickelten Softwaretools (Partner TUHH).

Ziel der Aktivitäten in AP 2 war die konzeptionelle Entwicklung von Zusatzmaßnahmen zur Reduzierung von Propeller-Eis-Interaktion durch neuartige Mechanismen zur Schollenumlenkung und deren Einfluss auf den gesamten Schiffsentwurf. Für Flachwassereisbrecher, welche einerseits im Fokus von Nordic Yards und andererseits auch besonders von der Problematik der Propeller-Eis Interaktion betroffen waren, wurden unter Berücksichtigung der Randbedingungen geeignete Lösungskonzepte entwickelt, untersucht und ausgewertet. Partner dieses Arbeitspaketes waren damit insbesondere die HSVA und die TUHH.

### 4. Wissenschaftlich-Technischer Stand vor Projektbeginn

Für den generellen Schiffsentwurf unter Berücksichtigung von eisbrechenden Eigenschaften existieren nur vereinzelt Hinweise. Über Kaj Riska hinausgehende umfangreiche wissenschaftliche Empfehlungen für den Entwurf eisbrechender Schiffe unter konkreter Berücksichtigung von Propeller-Eis-Interaktion sind nicht bekannt. Speziell im Bereich der Vermeidung von Propeller-Eis Interaktion stehen derzeit keine wirkungsvollen Empfehlungen für den Schiffsentwurf zur Verfügung.

Der Einfluss von Schubverlust und von Propeller-Eis Interaktion in Verbindung mit dem daraus resultierenden Overtorque und der Propulsionseffizienz auf den Schiffsentwurf war zum Zeitpunkt des Projektbeginns nicht hinreichend untersucht. Einhergehende Risiken konnten nicht wirkungsvoll abgeschätzt werden.

Flachwassereisbrecher, wie sie bei Nordic Yards im Fokus stehen, sind aufgrund ihrer stark limitierten Freiheitsgrade beim Entwurf besonders stark von der Problematik der Propeller-Eis-Interaktion betroffen. Vor Projektbeginn existierten für diesen sehr speziellen Anwendungsfall keine hinreichend wirkungsvollen Lösungskonzepte.

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In Kooperation mit der TUHH und der HSVA wurden die Arbeitspakete des Verbundvorhabens gemeinsam bearbeitet. Da diese Projektpartner über die zur Bearbeitung der Arbeitspakete erforderlichen wissenschaftlichen, technischen, räumlichen und natürlich auch personellen Kompetenzen verfügten, konnte auf Mithilfe von dritter Stelle außerhalb des Verbundes verzichtet werden.

## II. AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### II.1.1.1 AP 1 – Schiffsentwurf

Innerhalb von AP1 wird ein innovatives eisbrechendes Schiff der neuesten Generation entwickelt. Dafür wurden alle relevanten Schritte des klassischen Schiffsentwurfs vollzogen, um ein wirkungsfähiges Konzept für die Zukunft zu entwickeln.

## Abschlussbericht

### II.1.1.2 Marktanalyse

Zu Beginn des Projekts wurde eine Marktanalyse durchgeführt, um das Potential für eine Neuentwicklung abschätzen zu können, welches zum Design eines innovativen Schiffs für den Markt der Zukunft führen sollte. Alle relevanten Bereiche für eisbrechende Schiffe wurden gezielt untersucht.



Abbildung 2: Marktanalyse eisgängiger Schiffstypen

Die sehr aussichtsreiche Position nehmen dabei Kreuzfahrtschiffe ein. Der Markt ist konstant und solide am Wachsen. Die Statistiken zeigen einen weiter wachsenden Trend. Hausintern kann dieser Trend durch die Vertriebsabteilung und interne Studien belegt werden.

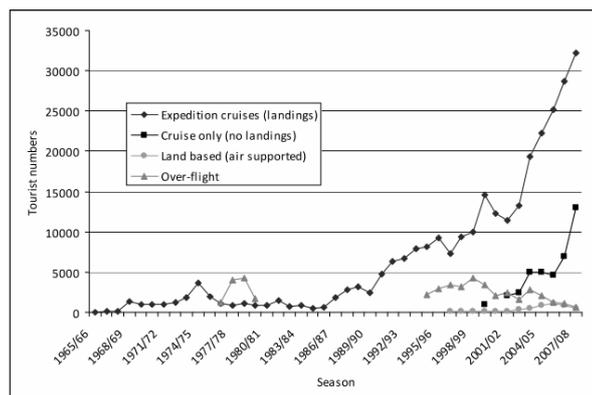


Abbildung 3: Entwicklung des Passagieraufkommens 1965 - 2008

Eine weitere Betrachtung der eingesetzten Schiffe über die vergangenen Jahre in den arktischen Regionen bestätigt darüber hinaus den erkennbaren Trend und festigt die Entscheidungsfindung.

## Abschlussbericht

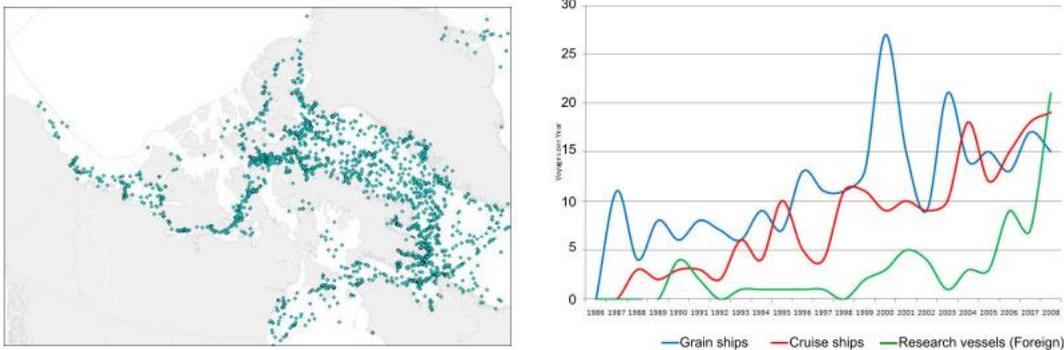


Abbildung 4: Seeverkehrsaufkommen qualitativ und zeitlich in arktischen Gebieten

Basierend auf der umfangreichen Marktanalyse wurden die Kernparameter des Konzeptentwurfs definiert, welche wie folgt festgelegt wurden:

- Eisbedingungen:
  - Ebenes Eis max. 1.00 m (geschlossene Eisdecke)
  - Schneebedeckung: 0.20 m
- Temperaturbedingungen
  - Luft: -20 °C ... +40 °C
  - Wasser: -2 °C ... +32 °C
- Raue Wetterbedingungen (Wind & Welle)
  - Windgeschwindigkeit bis Bft 10
  - Wellenhöhe bis 7.00 m

Im weiteren Projektverlauf wurde festgestellt, dass die Forderungen an die Eisbrechfähigkeit überbewertet wurden und in dem Rahmen nicht zielführend waren. Andere Schiffseigenschaften, besonders das Seegangsverhalten sowie die Treibstoffbilanz wären maßgeblich in den Hintergrund gedrängt worden, wodurch ein nicht mehr zielorientiertes und erfolgsversprechendes Schiff umgesetzt worden wäre. Aufgrund dessen wurde die Eisbrechfähigkeit auf 0,80 m reduziert, welches den besten Kompromiss aller Zielfunktionen darstellt.

### II.1.1.3 Hauptabmessungen & Anforderungsprofil

Für den Konzeptentwurf wurde ein Basis-Anforderungsprofil entwickelt. Die folgenden Eigenschaften sollten umgesetzt werden:

- Winterisierung
- Eisklasse  $\geq$  PC5
- Hohe Manövrierforderung & hohe Komfortklasse
  - Diesel-Elektrisches Antriebskonzept
  - Antrieb durch Ruderpropeller
- Geringer Tiefgang (ca. 6.00 m)
  - Aufkimmung wird als Notwendigkeit erwartet
- Reichweite  $\geq$  7000 sm
- Auslastung auf Tran
- sitfahrt

## Abschlussbericht

- Weltweite Fahrt

Nach weiteren Iterationsschleifen kamen noch die folgenden Primärzielstellungen hinzu:

- Tragfähigkeit ca. 2300 t
- Maximale Geschwindigkeit 18,0 kn
- Eisbrechfähigkeit 2,5 kn bei 0,80 m Eisdicke

Nach mehreren Iterationsschleifen wurden die folgenden finalen Hauptabmessungen definiert:

**Tabelle 1: Main Dimensions**

Länge über alles	164,40	m
Länge zwischen den Loten	148,22	m
Breite Wasserlinie	24,00	m
Design Tiefgang	6,00	m
Verdrängung	13.175	t

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die genaue Definition von Passagieren und Crew. Für das Konzept wurde die folgende Zielstellung definiert:

- Passagiere: 280
- Crew: 110

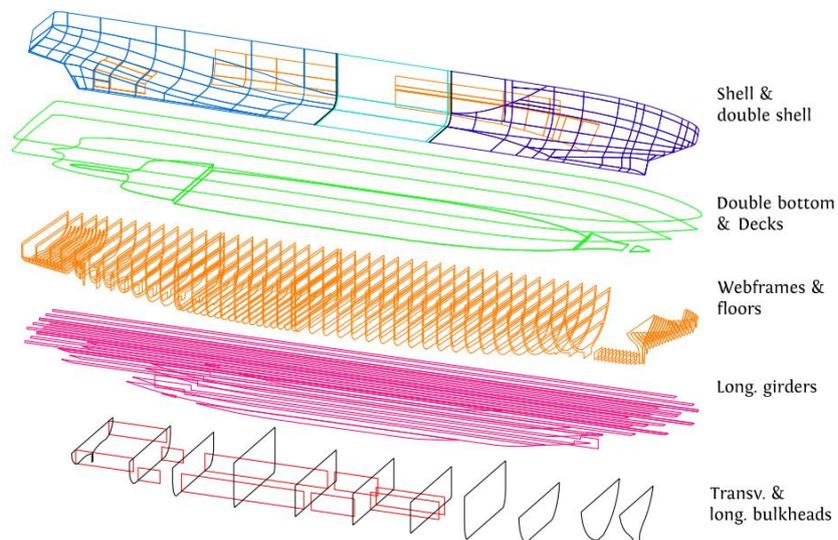
Das Verhältnis zeigt welche Wertstellung das Komfortkriterium an Bord hat. Kreuzfahrten in arktische Region sind sehr kostenintensiv. Die Zielklientel legt somit gesteigerten Wert auf den Komfort und Service. Um diesem Anspruch gerecht werden zu können wurde ein hohes Verhältnis von Crew zu Passagieren gewählt.

### II.1.1.4 Gewicht

Einer der wichtigsten Parameter im Schiffsdesign stellen die Schiffsmasse und der dazugehörige Schwerpunkt dar. Sie legen gemeinsam eine der Grundlage für den Formwurf, wodurch unmittelbar auch die maßgeblichen Parameter der Leistungsprognose definiert sind.

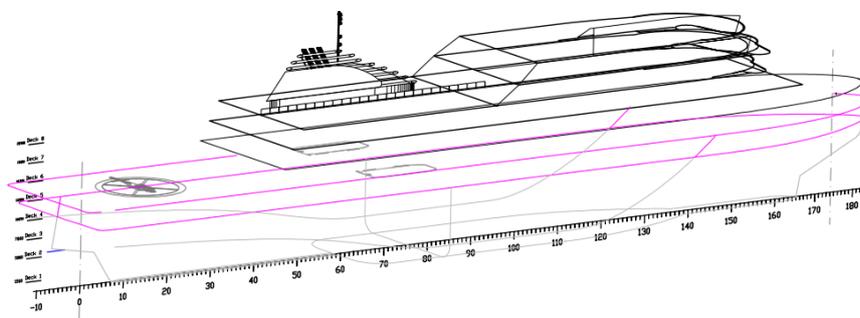
Zur Ermittlung der Schiffsmasse wurde eine umfangreiche Analyse erstellt. Dafür wurde das Schiff in zahlreiche Einzelkomponenten unterteilt und die dazugehörigen Massen ermittelt. Die Stahlstruktur wurde entsprechend der folgenden Abbildung in die verschiedenen Anteile zerlegt und die dazugehörigen Massen ermittelt.

## Abschlussbericht



**Abbildung 5: Gewichtskategorisierung Schiffskomponenten**

Darüber hinaus wurde das Schiff in zwei Hauptgruppen gegliedert. Der Rumpf und die Aufbauten. Für die Aufbauten wurden zusätzlich basierend auf Volumen und Flächenkennzahlen die Massen und Schwerpunkte ermittelt. Die folgende Abbildung zeigt die gewählte Unterteilung:



**Abbildung 6: Unterteilung Schiffmodell**

Zur Verifizierung und Absicherung aller ermittelten Massen sowie Schwerpunkte wurden die Ergebnisse mit Vergleichsschiffen abgeglichen. Dafür wurden bekannte Daten aus der werfteigenen Schiffsdatenbank gebauter Schiffe verwendet. Die Tabelle zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse:

## Abschlussbericht

**Tabelle 2: Vergleich Schwerpunkte**

	Design	VCG	Ship 1	Ship 2	Ship 3
Steel:	4905 t	9.83 m	3680 t	4700 t	7115 t
Outfitting:	2700 t	12.83 m	2523 t	3050 t	2700 t
Machinery:	910 t	4.79 m	531 t	835 t	1300 t
Margin:	685 t (8%)	0.01 m	336 t	100 t	250 t
Lightweight:	9200 t	10.32 m	7071 t	8685 t	11365 t

Zur Festlegung der Verdrängung muss zusätzlich zur Schiffsmasse eine geeignete Tragfähigkeit definiert werden. Hierfür werden besonders Kapazitätsrechnungen aller Verbrauchsstoffe als Basis genommen. Zum Abgleich wurden darüber hinaus erneut Vergleichsschiffe genutzt. Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der Tragfähigkeit.

**Tabelle 3: Aufteilung der Tragfähigkeit**

Vessel:	Design	Ship 1	Ship 2	Ship 3
Pax+lug:	29 t	25 t	25 t	25 t
Crew+eff:	22 t	15 t	25 t	20 t
Prov.+stores:	70 t	50 t	50 t	100 t
Fresh water:	400 t	350 t	450 t	280 t
Grey water:	80 t	90 t	- t	80 t
Heeling+trim w.:	150 t	150 t	- t	90 t
Fuel (MDO):	1400 t	780 t	2300 t	550 t
Lubricants:	40 t	25 t	50 t	35 t
Swimming p.:	50 t	50 t	10 t	50 t
Misc:	40 t	40 t	25 t	50 t
Owner's supplies:	20 t	25 t	15 t	30 t
Correction:	14 t	- t	- t	40 t
Sum:	2315 t	1600 t	2850 t	1350 t

Im späteren Verlauf wurden die Anforderungen und die Schiffsförm überarbeitet um eine höhere Tragfähigkeit zu realisieren. Dafür wurde besonders der Tiefgang erhöht. Diese Erhöhung hatte auch eine Erhöhung der Tragfähigkeitskapazität zur Folge, welches dem Konzept zu Gute kam.

### II.1.1.5 Schiffsförm

Die Schiffsförm stellt eine der komplexesten Teilaufgaben des Projekts dar. Die gleichzeitige Erfüllung von gegensätzlichen Zielstellungen führte zu Iterationschleifen und einem deutlich abweichenden finalen Design im Vergleich zur initialen Schiffsförm. Die Kernziele für eine geeignete Schiffslinie stellten folgende Punkte dar:

- Maximale Eisbrechfähigkeit
- Minimaler Widerstand / minimaler Treibstoffverbrauch beim Eisbrechen
- Minimaler Widerstand / minimaler Treibstoffverbrauch im offenen Wasser

## Abschlussbericht

- Hervorragendes Seegangsverhalten für maximalen Komfort an Bord für die Passagiere

Ein Schiff, welches ein sehr gutes Eisbrechverhalten aufweist, widerspricht in der Regel massiv den Forderungen einer guten Performance im offenen Wasser. Das Ganze zusätzlich mit dem Seegangsverhalten in Übereinstimmung zu bekommen, ist eine grenzwertige Aufgabe. Die finale Konzeptform stellt den bestmöglichen Kompromiss zur Erfüllung aller Eigenschaften dar.

Die folgende Abbildung zeigt den Linienriss eines fortgeschrittenen Konzeptentwurfs auf dessen Basis ein Großteil der Berechnungen basieren.

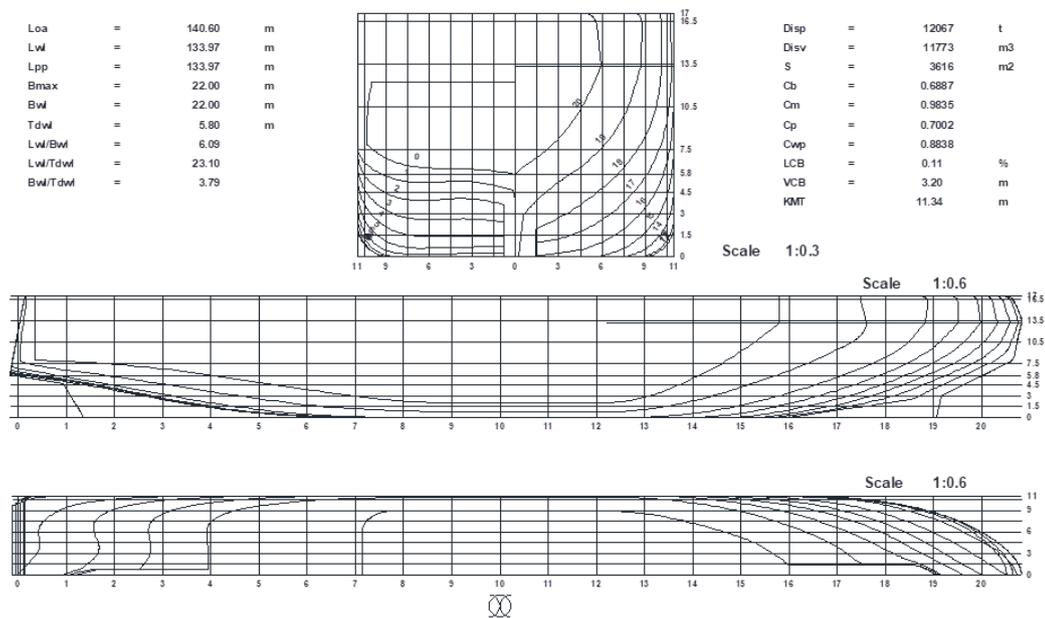
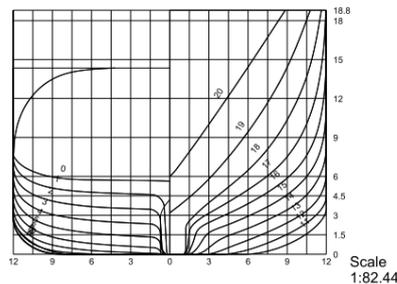


Abbildung 7: Linienriss Konzeptentwurf

Im finalen Konzeptentwurf wurden auf Grund von Anpassungen der Forderungen und einer geänderten Marktlage Korrekturen an der Schiffsform vorgenommen um für den Markt der Zukunft optimal ausgerichtet zu sein. Die folgende Abbildung zeigt den finalen Linienentwurf.

## Abschlussbericht

Loa:	164.39	m
Lwl:	151.62	m
Lpp:	148.22	m
Bmax:	24.00	m
Bwl:	24.00	m
Tdwl:	6.00	m
Lwl/Bwl:	6.32	
Lwl/Tdwl:	25.27	
Bwl/Tdwl:	4.00	



Disp:	13174	t
Disv:	12853	m <sup>3</sup>
S:	4081	m <sup>2</sup>
Cb:	0.6022	
Cm:	0.9557	
Cp:	0.6301	
Cwp:	0.8809	
LCB:	-4.19	%
VCB:	3.49	m
KMT:	13.80	m

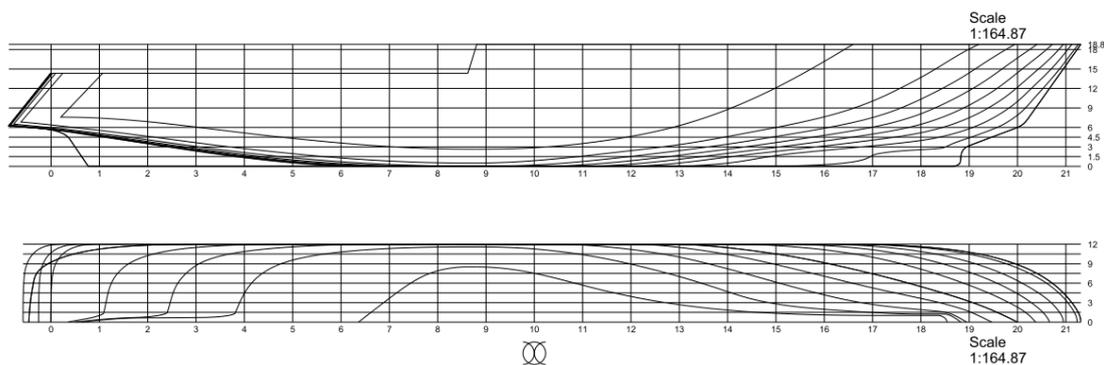


Abbildung 8: finaler Liniennriss

Die geeignete Schiffsform wurde für Modellversuche verwendet um die Eisbrecheigenschaften gezielt zu untersuchen und auszuwerten.

### II.1.1.6 Leistungsprognose

Die Basis für die gesamte Antriebsauslegung (Hauptmaschinen, E-Motoren und Pödeinheit) sowie die Reichweitenberechnung ist eine belastbare Leistungsprognose. Diese wird mit Hilfe von statischen Vorhersagemodellen erstellt. Die gängigen Verfahren verlieren bei eisbrechenden Schiffsformen jedoch schnell ihre Gültigkeit. Die Werft hat umfangreiche Erfahrungen mit eisbrechenden und eisgehenden Schiffen. Diese Erfahrungen (Modellversuche eisbrechender Schiffe) werden genutzt um die gängigen Verfahren an die Besonderheiten anzupassen und die Prognose zu eichen. Die verwendete Basis bildet das Vorhersageverfahren nach Hollenbach. Eine geeignete Propellerauslegung wurde anhand der Wageningen B-Serie durchgeführt. Hier muss jedoch ein besonderes Augenmerk auf den Offen-Wasser-Wirkungsgrad gelegt werden. Dieser kann keinesfalls direkt übernommen werden. Eisbrechende Propeller müssen gesteigerte Forderungen an die Festigkeit erfüllen. Dies führt zu einer deutlichen Aufdickung der Flügelprofile (ebenfalls Bestandteil dieses Gesamtprojekts), welches wiederum zu Verlusten im Wirkungsgrad führt. Dieser Umstand wurde bei der Prognose berücksichtigt und basiert auf Erfahrungen mit bereits getesteten Propellern der Werft. Das folgende Diagramm veranschaulicht die Prognose für das Konzeptschiff.

## Abschlussbericht

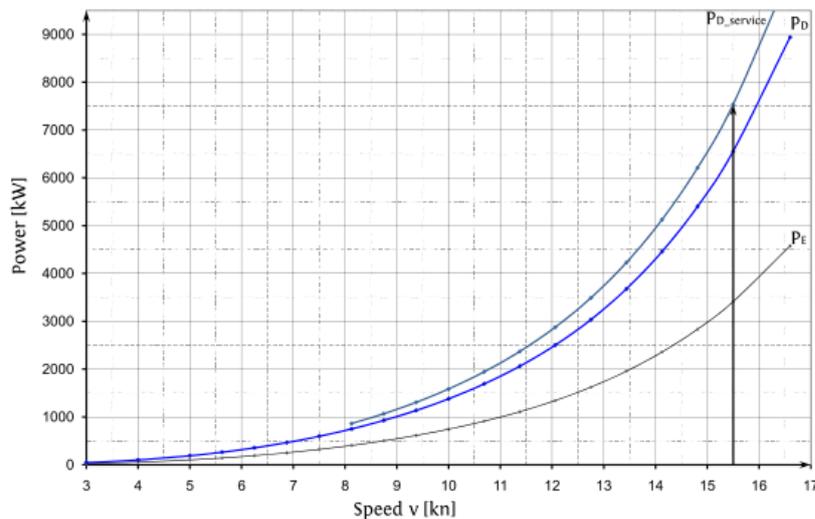


Abbildung 9: Leistungsprognose

### II.1.1.7 Generalplan

Ein komplexer Generalplan wurde für das eisbrechende Kreuzfahrtschiff entwickelt. Hierfür wurde ein generelles Konzept bezüglich öffentlicher Bereiche und Kabinen integriert. Die Rettungsmittel sowie das Mooringarrangement wurden integriert. Für alle technischen Räume wurde der Raumbedarf ermittelt und vereinfacht hinterlegt. Das Schiff wurde mit Flossenstabilisierungsanlagen ausgerüstet. Im Bugbereich wurde ein Querstrahler für bessere Manövrierbarkeit installiert. Die beiden Maschinenräume sind vollständig getrennt für die Gewährleistung der Redundanz im Leck- oder Brandfall. Gleiches gilt für den gesamten Antriebstrang (Pod-Units, Trafo, Konverter und Co). Die folgende Abbildung zeigt den Generalplan des Konzeptschiffes.

Abschlussbericht

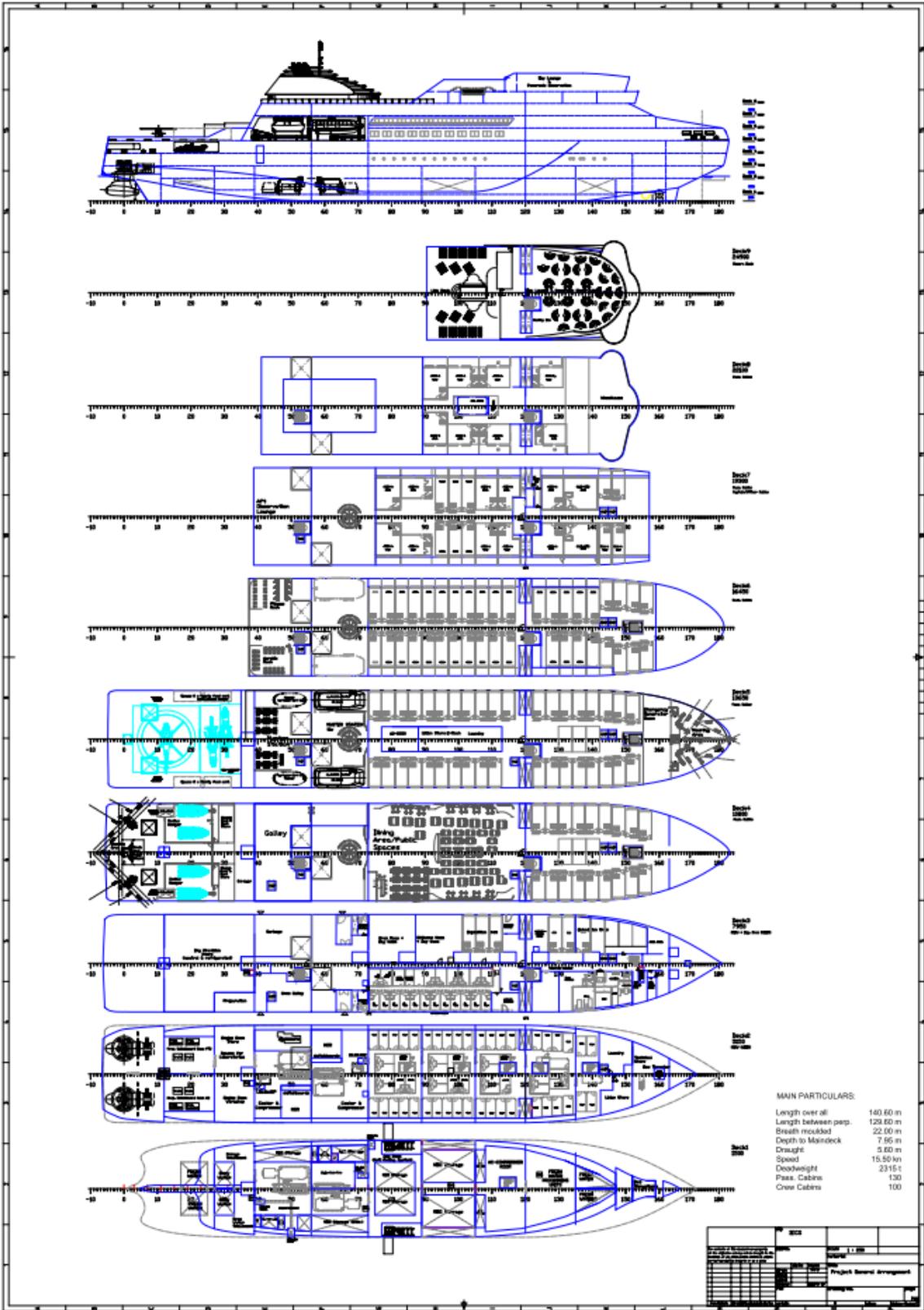


Abbildung 10: Generalplan Konzeptentwurf

## Abschlussbericht

### II.1.1.8 Stabilität

Ein Kernaspekt beim Entwurf eines Schiffes ist die Erfüllung aller Stabilitätsvorschriften. Diese sind sehr umfangreich und unterteilen sich in eine Vielzahl von Untersuchungen. Für das Konzept wurden alle relevanten Stabilitätsanalysen durchgeführt. Für Schiffe, welche Eisregionen befahren, gelten besondere Anforderungen und verschärfte bzw. zusätzliche Kriterien. Auch diese Forderungen wurden gezielt untersucht, damit sichergestellt werden kann, dass das Konzeptschiff seinen Einsatzzweck erfüllen kann.

#### II.1.1.8.1 Auftriebsmodell

Das folgend gezeigte Auftriebsvolumen liegt den Stabilitätsberechnungen zu Grunde. Es umfasst den Schiffsrumpf bis Deck 4 abzüglich Seekästen, Stabilisatoren und Bugstrahlruder. Es wurde sowohl für die Intakt- als auch die Leckstabilitätsuntersuchungen verwendet.

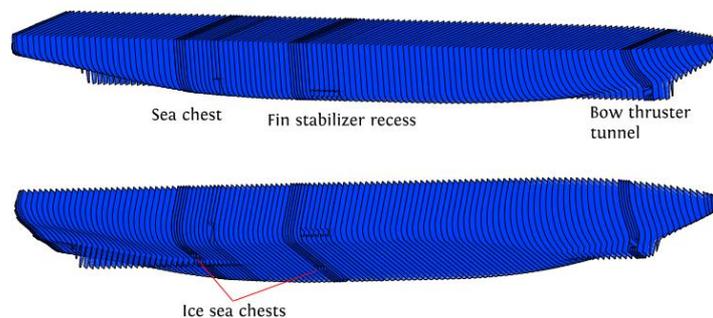


Abbildung 11: Schiffsrumpf

In der ersten Iteration wurde bis zum Backdeck gerechnet, um im Falle eines Schadens genügend Auftrieb zu bieten. Analysen haben gezeigt, dass dies nicht zwingend notwendig war. Eine Berücksichtigung bis zu Deck 4 ist für das Konzept ausreichend um die Vorschriften zu erfüllen.

#### II.1.1.8.2 Tankanordnung

Zwingend erforderlich für eine korrekte Stabilitätsanalyse ist die Umsetzung der Tankanordnung im Schiffsinnen. Innerhalb des Projekts wurden alle relevanten Tanks modelliert und für die Berechnungen erfasst. Die folgende Abbildung zeigt vereinfacht die modellierten Tanks in einer Übersicht. Einen detaillierten Blick auf die Tanks liefert der folgende Tankplan, welcher darüber hinaus alle Kapazitäten und Hauptabmessungen aufweist.

## Abschlussbericht

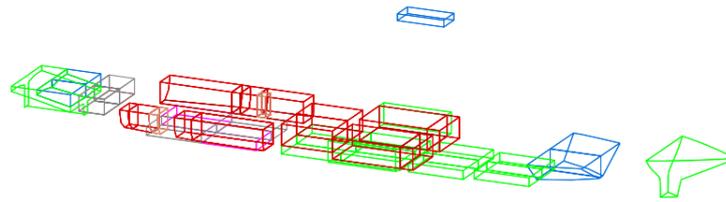


Abbildung 12: Tankanordnung (**Kraftstoff**, **Schmieröl**, **Ballastwasser**, **Trinkwasser**, **Grauwasser**)



## Abschlussbericht

### II.1.1.8.3 Freibord

Unerlässlich für die Schiffsentwicklung ist die Berechnung des Freibords. Der aktuelle Freibord des Schiffes beträgt ( $D_m - T_d = 2.2$  m). Dieser wurde entsprechend ILLC 66, Protokoll 1988 validiert:

**Tabelle 4: Freibordberechnung nach ILLC 66**

	Description	Resulting Fb
Reg. 29	$24 < L < 100$	not applicable
Reg. 30	$cb > 0,68$	1950
Reg. 31	Depth	1707
Reg. 32	D mark	not applicable
Reg. 37	Superstr.	637
Reg. 38	Sheer	730
Reg. 39		not applicable
Summer freeboard:		730 mm
Summer load line:		7070 mm
Design load line:		5600 mm
Reserve:		1470 mm

### II.1.1.8.4 Intaktstabilität

#### II.1.1.8.4.1 Intaktstabilitätskriterien entsprechend IMO IS Code 2008

Die folgend aufgelisteten Kriterien müssen eingehalten werden, um die Vorschriften zu erfüllen.

**Tabelle 5 Intaktstabilitätskriterien**

Paragraph 3.1.2.1 $A_{min}$ under the righting lever curve:	
	$0^\circ - 30^\circ$ : $A \geq 0,055$ mrad
	$0^\circ - 40^\circ$ or $\theta_f$ : $A \geq 0,090$ mrad
	$30^\circ - 40^\circ$ or $\theta_f$ : $A \geq 0,030$ mrad
Note: $\theta_f$ is an angle of heel at which openings in the hull, superstructures or deckhouses which cannot be closed weathertight submerge.	
3.1.2.2: Minimum righting lever:	$GZ_{min} = 0,20$ m at $\theta \geq 30^\circ$
3.1.2.3: Maximum righting lever:	At $\theta \geq 30^\circ$ but not less than $25^\circ$ .
Note: Righting lever curve with two maximums: The first is one to be located at a heel angle not less than $25^\circ$ .	
3.1.2.4: Initial metacentric height:	GM0 is not to be less than 0,15 m.
3.2.2: Severe wind and rolling criterion:	Area criterion under the influence of static and gusting wind ( $A_b \geq A_a$ ). Max. heel $16^\circ$ (static wind).
Note: No bilge keel was considered, due to its vulnerability to ice damages	
3.1.2.5: Passenger crowding:	Max. heel $10^\circ$
3.1.2.6: Turning:	Max. heel $10^\circ$

## Abschlussbericht

### II.1.1.8.4.2 Relevante Öffnungen

Für die adäquate Berechnung der Stabilitätskriterien spielen die relevanten Öffnungen eine maßgebliche Rolle. Sie müssen zwingend korrekt erfasst werden um ein Einhalten der Kriterien sicherstellen zu können. Die folgende Tabelle weist alle innerhalb des Projekts erfassten Öffnungen, welche in der Analyse erfasst wurden, aus.

**Tabelle 6: Auflistung der Öffnungen zum Intakt- und Leckstabilitätsversuch**

Name	WT	CONNECT	X m	Y m	Z m
OPE.ST..	UNPROTECTED	R120300, R120200	116.250	-0.500	7.960
OPE.PS..	UNPROTECTED	R05-080300, R090300	90.000	3.000	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R01-040300, R020202	18.000	-0.900	7.960
OPE.PS..	UNPROTECTED	R090300, R10-110300	101.250	2.400	7.960
OPE.PS..	UNPROTECTED	R02-40300, R05-080300	42.000	3.000	7.960
OPE.SB..	UNPROTECTED	R05-080300, R090300	90.000	-3.000	7.960
OPE.SB..	UNPROTECTED	R090300, R10-110300	101.250	-2.400	7.960
OPE.PS..	UNPROTECTED	R01-040300, R030200	25.500	-0.900	7.960
OPE.PS..	UNPROTECTED	R10-110300, R120300	114.000	1.500	7.960
OPE.ESC.	WEATHERTIGHT	R010102, SEA	7.500	-0.800	11.400
OPE.ESC.	WEATHERTIGHT	R020201, SEA	9.000	0.800	11.400
OPE.ST..	UNPROTECTED	R05-080300, R060200	64.500	-0.900	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R05-080300, R080200	87.750	-0.900	7.960
OPE.ESC.	WEATHERTIGHT	R010101, SEA	7.500	-0.800	11.400
OPE.ESC.	WEATHERTIGHT	R020202, SEA	9.000	0.800	11.400
OPE.ST..	UNPROTECTED	R10-110300, R110200	111.750	-0.500	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R01-040300, R040100	32.250	-2.100	7.960
OPE.PS..	UNPROTECTED	R010300, R02-40300	8.250	3.000	7.960
OPE.SB..	UNPROTECTED	R02-40300, R05-080300	42.000	-3.000	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R05-080300, R050100	51.750	1.800	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R10-110300, R100200	99.000	-0.500	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R05-080300, R070200	76.500	-0.900	7.960
OPE.SB..	UNPROTECTED	R10-110300, R120300	114.000	-1.500	7.960
OPE.SB..	UNPROTECTED	R010300, R02-40300	8.250	-3.000	7.960
OPE.ST..	UNPROTECTED	R090300, R090200	93.000	-0.900	7.960

Berücksichtigt wurden o.g. Öffnungen für die Intakt- und die Leckstabilität mit der Annahme, dass keine weiteren Öffnungen in ungünstigerer Position angeordnet werden, da dies die Berechnungsergebnisse negativ beeinflussen würde.

### II.1.1.8.4.3 Eislasten

Entsprechend der Regeln des IMO IS Code 2008 und des Polar Codes muss bei Schiffen, die in Polarregionen navigieren, in den Ladefällen der Ansatz von Eis am Schiffskörper und an Ausrüstungsteilen berücksichtigt werden.

Es gilt für:

- Horizontale Flächen der Wetterdecks und der Gangways: 30 kg/m<sup>2</sup>
- Vertikale Flächen des Schiffes: 15 kg/m<sup>2</sup>

## Abschlussbericht

Die folgende Abbildung identifiziert welche Bereiche mit den entsprechenden Eislasten beaufschlagt werden müssen.

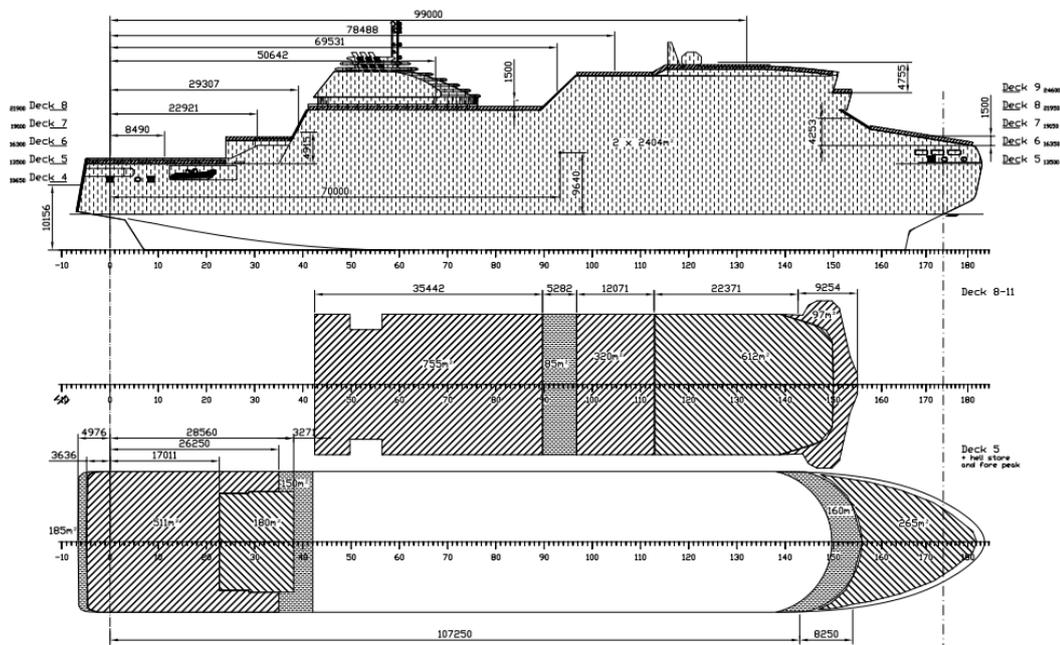


Abbildung 14: Flächenkennzeichnung zur Beaufschlagung der Eislasten

Unter Berücksichtigung der relevanten Richtlinien ergeben sich die folgend aufgelisteten Eislasten, welche zusätzlich in den Ladefällen und den Stabilitätsuntersuchungen analysiert wurden.

Tabelle 7: Eislasten

Description	Area [m <sup>2</sup> ]	Mass [t]	LCG [m]	VCG [m]	X1	X2
Mooring aft	43	1.29	-1.9	10.85	-3.5	4.7
Heli Deck aft	512	15.36	8.5	13.60	-3.5	12.0
Heli Store Top	143	4.29	21.8	17.45	17.0	26.2
Top Deck	755	22.65	50.65	23.95	31.5	67.0
Fwd. Top Deck	320	9.60	79.5	27.40	72.3	86.7
Fwd. Observation	612	18.36	99	29.30	89.3	114.4
Wheelhouse	100	3.00	112.3	24.70	111.3	120.5
Mooring fwd.	265	6.36	123.7	17.85	116.0	135.2
<i>Lateral areas</i>						
Windprofile x 2	5048	75.73	70	15.24	-5.0	135.6
Aft wall -d5	185	2.78	4.24	10.15	-5.0	-3.6
Aft wall d5-d8	150	2.25	29.3	18.40	28.3	31.6
Aft wall d8-d9	85	1.28	68.37	23.28	67.0	69.8
Fore wall	160	2.40	111.37	20.62	107.3	115.5
Total	8378	250	66.2	17.8		

Die projizierte seitliche Fläche der unterbrochenen Flächen von Schienen, verschiedener Ausleger, Holme und anderer kleiner Objekte werden berücksichtigt, indem die Gesamtprojektionsfläche um 5 % vergrößert wird (Windprofil) und das statische Moment dieser Fläche um 10 % (siehe IMO, 2008, Kap. 6.3.1.3). Die Stabilität des Schiffes unter den oben genannten Eislasten wird durch die Ladefälle berücksichtigt, die mit dem Buchstaben „i“

## Abschlussbericht

gekennzeichnet sind. Um die Eisansammlung zu minimieren, wird das Schiff außerdem mit einer Heizung ausgestattet sowie mit Enteisungsvorrichtungen.

### II.1.1.8.4.4 Ladefälle

Die folgenden Ladefälle wurden innerhalb des Projekts untersucht:

**Tabelle 8: Ladefälle**

LC00:	Light Ship (not a seagoing condition)
LC01:	Design Departure 100% Bunker+Stores, 390 persons
LC02:	25% Bunker+Stores, 75% GW, 390 Persons
LC03:	10% Bunker+Stores, 90% GW, 390 Persons
LC04:	Dry docking condition, 10% stores
LC05:	LC01 with 4 TEU a 24 t on aft deck
LC06:	LC03 with 4 TEU a 24 t on aft deck
LC01i:	LC01 with Ice Accretion
LC03i:	LC03 with Ice Accretion
LC06i:	LC06 with Ice Accretion

Die Tabelle listet die erreichten Ergebnisse für die untersuchten Ladefälle auf. Es ist zu erkennen, dass für alle Ladefälle die Vorschriften erfüllt werden und das minimal erforderliche GM erreicht wird.

**Tabelle 9: Ladefallresultate**

Loadcase	DW	Displ.	T	VCG	GM <sub>corr</sub>	GM <sub>min</sub>	VCG <sub>max</sub>
LC00	0	9200	4.66	10,34	1.93	1.74	10.53
LC01	2315	11515	5.59	9,16	2.21	1.43	9.94
LC02	1022	10221	5.08	9,80	1.92	1.56	10.15
LC03	803	10003	4.99	9,93	1.92	1.62	10.23
LC04	715	9915	4.96	10,03	1.80	1.59	10.23
LC05	2421	11621	5.62	9,21	2.16	1.42	9.95
LC06	1196	10395	5.15	9,85	1.83	1.52	10.15
LC01i	2490	11690	5.66	9,30	2.03	1.41	9.91
LC03i	967	10168	5.05	10,07	1.72	1.60	10.19
LC06i	1364	10563	5.22	9,99	1.64	1.52	10.10

Die folgende Abbildung zeigt die GM- und VCG-Grenzkurven unter Berücksichtigung der Intakstabilitätskriterien.



## Abschlussbericht

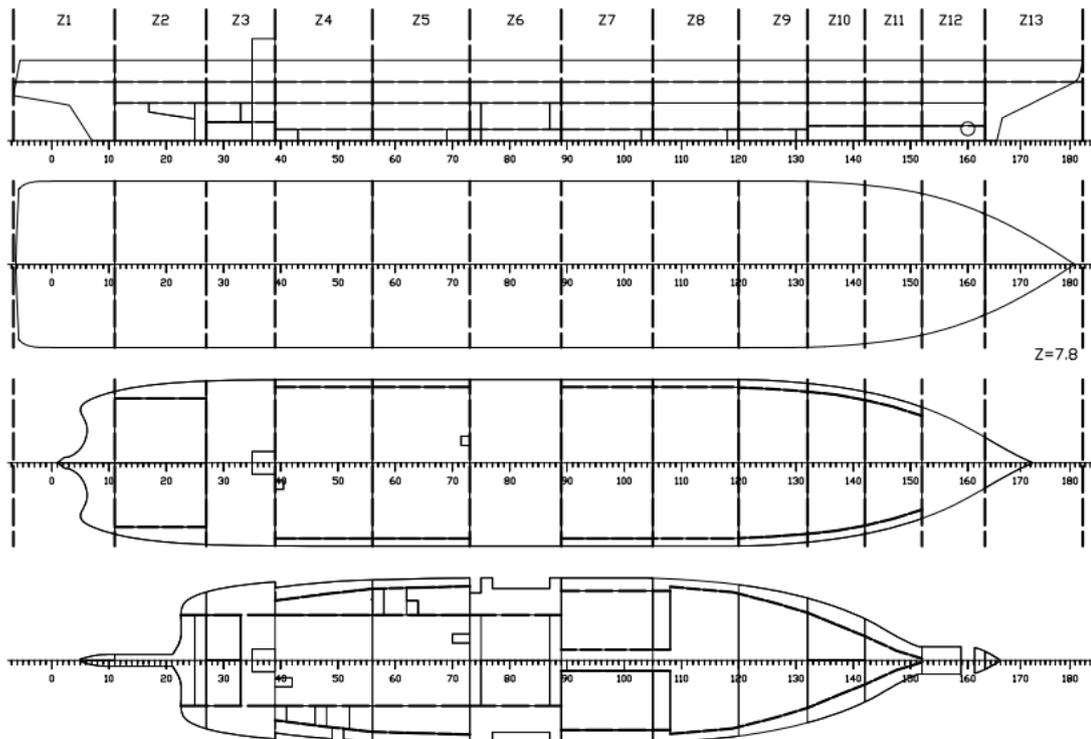


Abbildung 16: wasserdichte Unterteilung des Schiffs

### II.1.1.8.5.1 Probabilistische Leckstabilität / Unterteilungsindizes

Bei der probabilistischen Lecksicherheitsrechnung muss der berechnete A-Index mindestens den geforderten R-Wert erreichen um die Lecksicherheitsvorschriften zu erfüllen. Für das Konzeptschiff ergibt sich der folgende geforderte R-Wert.

$$R = 1 - \frac{5000}{L_S + 2.5 \cdot N + 15225} = 0.6942$$

Der A-Index wird hierbei wie folgt berechnet:

$$A_i = \sum p_i s_i v_i$$

$$A = 0.4 \cdot A_s + 0.4 \cdot A_p + 0.2 \cdot A_l$$

Für das analysierte Konzeptschiff ergab sich der folgende A-Index:

$$A = 0.740 > R (0.694)$$

Somit erfüllt das Schiff die Vorschriften.

## Abschlussbericht

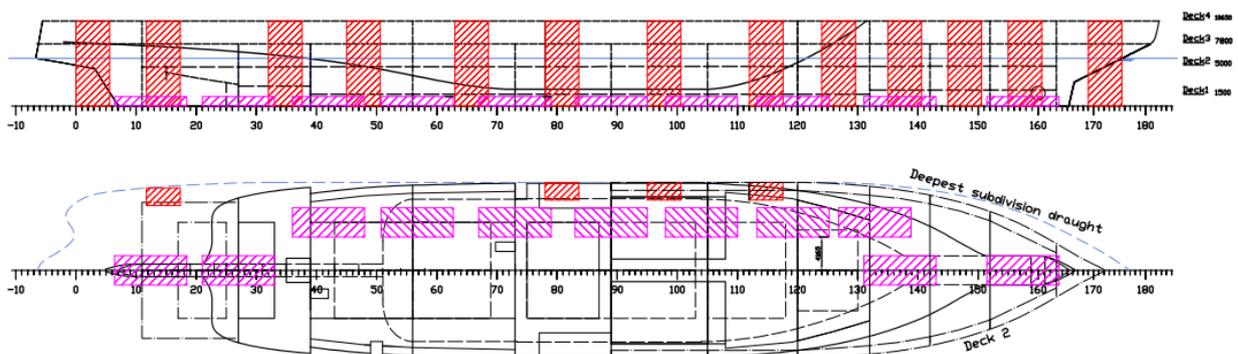
### II.1.1.8.5.2 Deterministische Leckstabilität

#### II.1.1.8.5.2.1 Leckausdehnungen entsprechend Reg. 8.2 und 9

Die folgende Tabelle und Abbildung veranschaulicht die verwendeten Leckausdehnungen für die Seiten- und Bodenverletzung, welche innerhalb der Stabilitätsuntersuchung berücksichtigt wurden.

**Tabelle 10: Leckausdehnung Seiten-, Bodenverletzung**

	Length	Height/Breath	Depth
Reg. 8.1	Not applicable		-
Reg. 8.3	4.17 m	Base till 18,5m a. b.	2.17 m
Reg. 9.8	8.99 m	3.67 m	1.1 m



**Abbildung 17: Position der Leckausdehnungen**

#### II.1.1.8.5.2.2 Leckausdehnung bei Eisverletzungen

Die folgende Tabelle und Abbildung veranschaulicht die verwendeten Leckausdehnungen für die Seiten- und Bodenverletzung, welche aufgrund der zusätzlichen Forderung innerhalb polarer Gewässer, berücksichtigt wurden.

**Tabelle 11: Leckausdehnung Eisverletzung**

	Length	Height/Breath	Depth
PC 	FP - $B_{max}$ : 6.15 m elsewhere: 2.05 m	1.2 m up to 7.2 m a. b.	760 mm
TC 	5.0 m	5.0 m	750 mm

Abschlussbericht

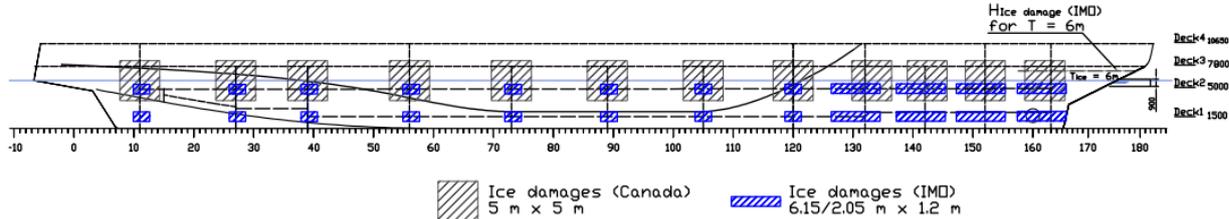


Abbildung 18: Skizze Leckausdehnung Eisverletzung

II.1.1.8.5.2.3 Ergebnisse der Leckrechnung

Das folgende Diagramm vereint die Ergebnisse der Intakstabilität und der Leckrechnung in Form von gemeinsamen GM- und VCG-Grenzkurven.

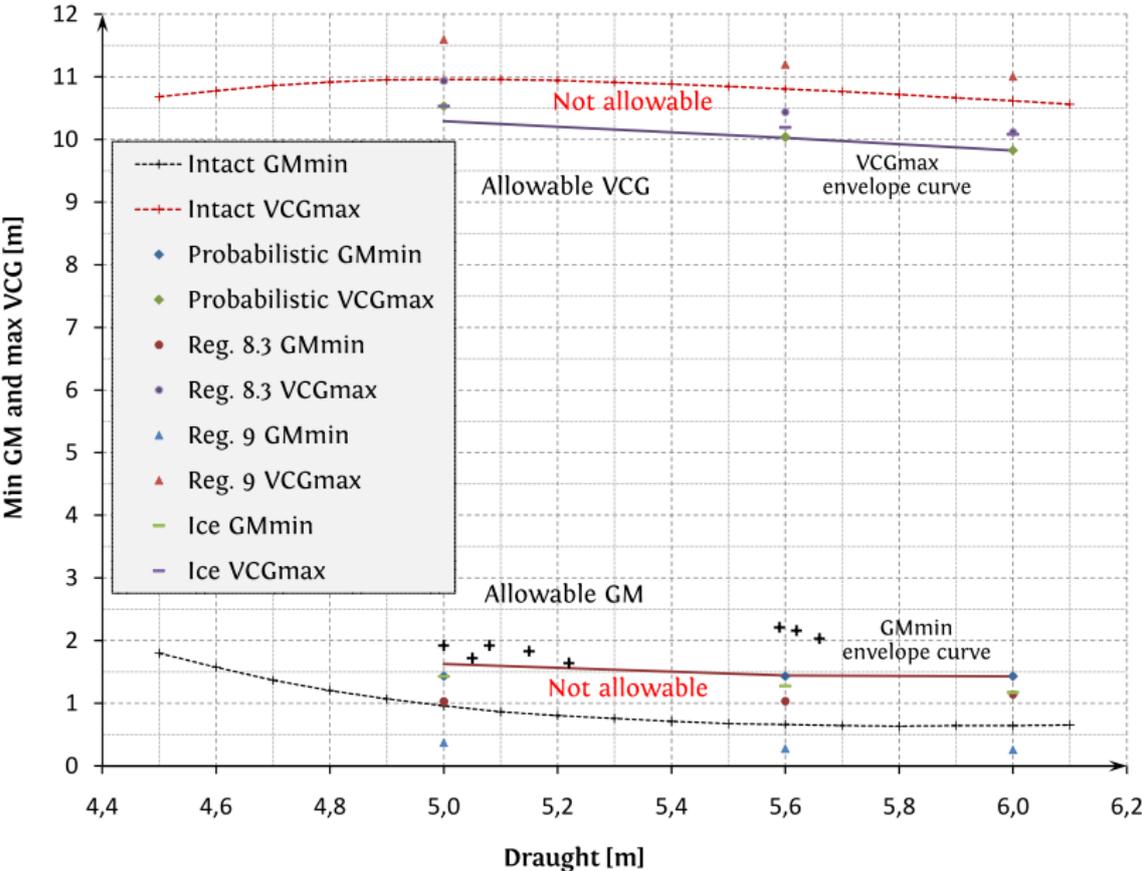


Abbildung 19: Gesamtzusammenstellung Leckstabilität und Kentersicherheit

## Abschlussbericht

### 1.2 AP 2 – Maßnahmen zur Reduzierung der Propeller-Eis-Interaktion

Unterschiedliche Maßnahmen zur Reduzierung der Propeller-Eis-Interaktion und einer damit verbundenen Erhöhung der Propulsionseffizienz wurden untersucht. Der Fokus lag auf Maßnahmen hinsichtlich einer optimierten Anordnung der Propulsionsorgane, einer gesicherten Auswahl von leistungsfähigen Antriebskonzepten und möglichen Verbesserungsmaßnahmen zur Reduzierung von Propeller-Eis-Interaktion.

#### II.1.2.1 Konzepte für den Flachwasserbereich

Eine umfangreiche Recherche wurde durchgeführt um mögliche Maßnahmen zu identifizieren und ein wirkungsvolles Konzept zu entwickeln. Zur Reduzierung der Propeller-Eis Interaktion bestehen zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze.

Darüber hinaus kann in zwei weitere Systeme unterschieden werden:

- Passive Systeme (Maßnahmen welche keine weiteren beweglichen Teile beinhaltet)
  - Systeme in unmittelbarer Nähe zum Propeller
    - Gitter, Sporn, etc. (nicht Gegenstand dieser Untersuchung)
  - Maßnahmen zur Beeinflussung des Schollenflusses durch die Formgebung des Schiffsrumpfes
    - Komplexe physikalische Vorgänge
    - Ganzheitliche Betrachtung der hydrodynamischen Eigenschaften des Schiffes erforderlich

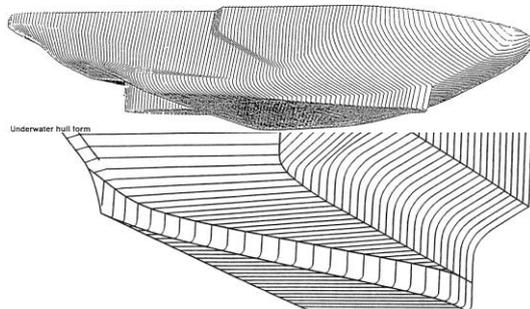


Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung von Keilen

- Aktive Systeme (beschreibt Systeme welche durch zusätzliche Technik das Eisbrechen, die Zerstörung der Schollen oder den Schollenfluss beeinflussen)
  - Pumpjet
  - Water lance

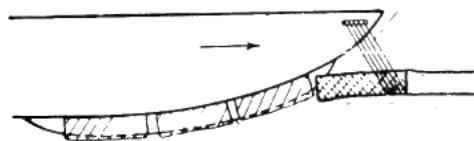


Abbildung 21: Skizze Waterjetsystem

- Mechanical saw

## Abschlussbericht

- Ice flushing

Es wurde eine Untersuchung hinsichtlich einer möglichen Eignung von passiven und aktiven Systemen innerhalb des Konzepts durchgeführt. Die folgende Tabelle zeigt die Gegenüberstellung.

**Tabelle 12: Anforderungsanalyse Verbesserungssysteme**

System	Pro	Contra
<b>Aktiv</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bedarfsgerechter Einsatz</li> <li>• Keine Zusatzkosten im Ruhefall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohes Ausfallrisiko</li> <li>• Sehr begrenzt einsatzfähig</li> <li>• Hoher Energieeinsatz</li> <li>• Hohe Investitionskosten</li> </ul>
<b>Passiv</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Mehrkosten</li> <li>• Jederzeit Einsatzbereit</li> <li>• Zuverlässig ergebnisorientiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permanenter Leistungsbedarf</li> </ul>

Auf Basis der Auswertung wurde das passive System als das umsatzfähigste bewertet

Darüber hinaus weisen verschiedene passive Systeme spezifische Vor- und Nachteile auf. Die folgende Tabelle bewertet diese Eigenschaften und die Tauglichkeit:

**Tabelle 13: Bewertungsmatrix Verbesserungssysteme**

System/ Maßnahme	Verringerung der Propeller-Eis Interaktion	Verbesserung der Eisbrech- leistung	Verbesserung der Manöviereigen- schaft im Eis	Einfluss auf Schiffs- widerstand
Bugstreamer	+/-	++	+	-
Taille	+/-	+/-	++	-
Balkon	+/-	+/-	++	+/-
Räumkeil	++	+	+/-	-
Linien / Tunnel Hinterschiffs- bereich	++	+/-	+/-	+/-
Anpassung Kimm	+	+/-	+/-	-

### II.1.2.2 Entwicklung passiver Räumkeile

Innerhalb des Projekts wurden aus der Bewertung heraus verschiedene passive Räumkeile entwickelt. Diese sollten mit Hilfe von Simulationen auf ihre Wirkungsfähigkeit untersucht werden. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die entworfenen Lösungsansätze. Ziel war

## Abschlussbericht

es mit Hilfe von innovativen Bodenräumkeilen gepaart mit einer geeigneten Achterschiffsgeometrie die Propulsionskennwerte zu verbessern.

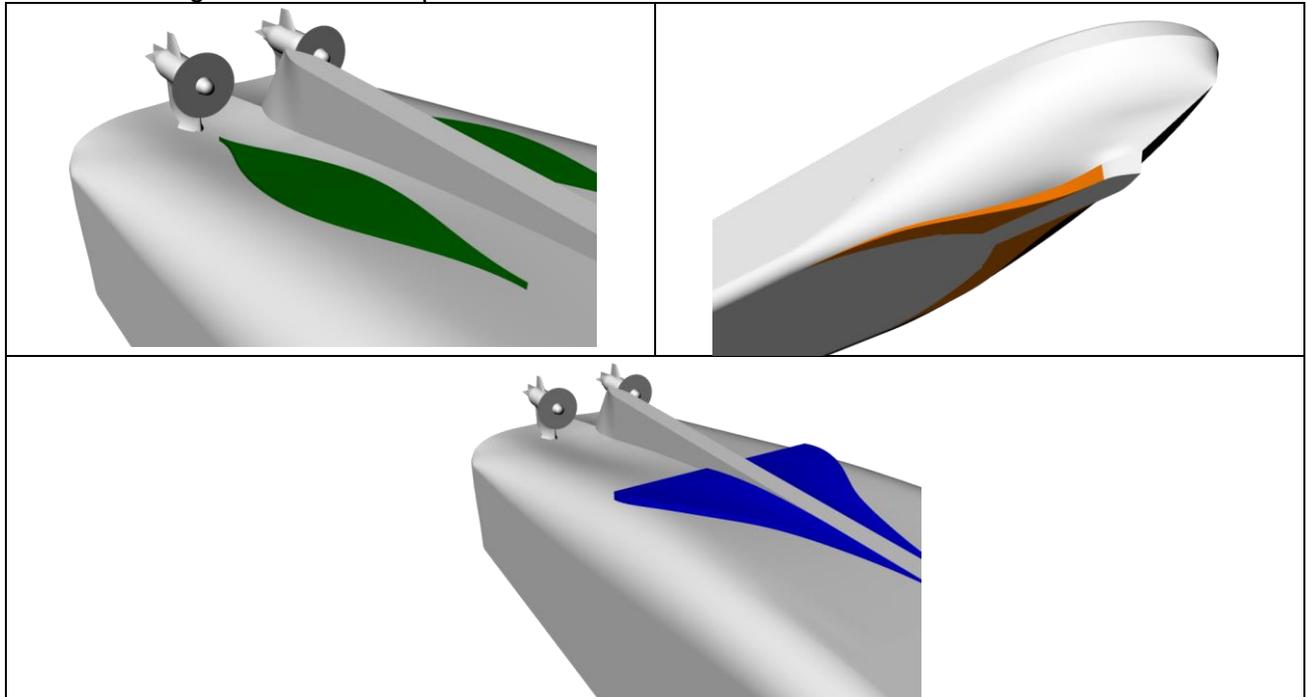


Abbildung 22: Veranschaulichung entwickelter passiver Räumkeile

Die entwickelten Räumkeile erfüllen die festgelegten Randbedingungen:

- Lokale Zusatzmaßnahmen beschränken
- Minimaler Gesamtwiderstand (sowohl offen Wasser wie bei Eisfahrt), geringer Zusatzwiderstand durch Anhänge
- Gute Manövrierereigenschaften

### II.1.2.3 Propulsionskonzept

Die Propulsionskonzepte Schubrunderpropeller mit Düse, konventioneller Antrieb über Wellenleitung mit Düse und Ruder sowie Zug-Ruderpropeller ohne Düse (s. Abbildung 23) wurden auf Tauglichkeit untersucht.

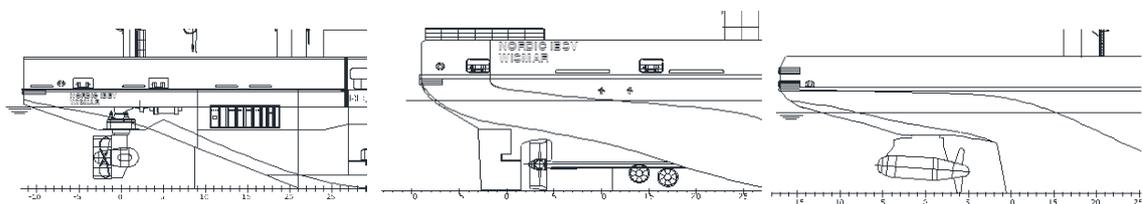


Abbildung 23: Schubrunderpropeller mit Düse (l) Konventioneller Antrieb mit Düse und Ruder (m) Zug-Ruderpropeller ohne Düse (r)

Das effektivste Propulsionskonzept ist der Ruderpropeller ohne Düse. Der Ruderpropeller besitzt den Vorteil hoher Manövrierfähigkeit in Verbindung mit einem verringerten Risiko eines durch Eis

## Abschlussbericht

blockierten Propellers. Das Konzept wurde als das wirkungsfähigste identifiziert und dient somit als Konzeptentwurf.

### II.1.2.4 Linienentwicklung

Von der ersten groben Schiffsform bis zum finalen Feinstrak wurden zahlreiche Iterationsschleifen durchlaufen. Eine Schiffsform zu entwickeln, welche alle Forderungen gleichermaßen erfüllt, hat sich als vereinbar ergeben. Der Startpunkt lag in einer Form, welche primär auf die Aufgaben im Eis zugeschnitten war. Diese Form wurde an die TUHH für Eissimulationen übergeben um die Wirksamkeit zu prüfen. An dieser Stelle wurden auch die Effekte von Räumkeilen untersucht. Die Ergebnisse hatten Einfluss auf die weitere Entwicklung der Schiffsform und auf eine mögliche optimierte Anordnung der Propulsionsorgane.

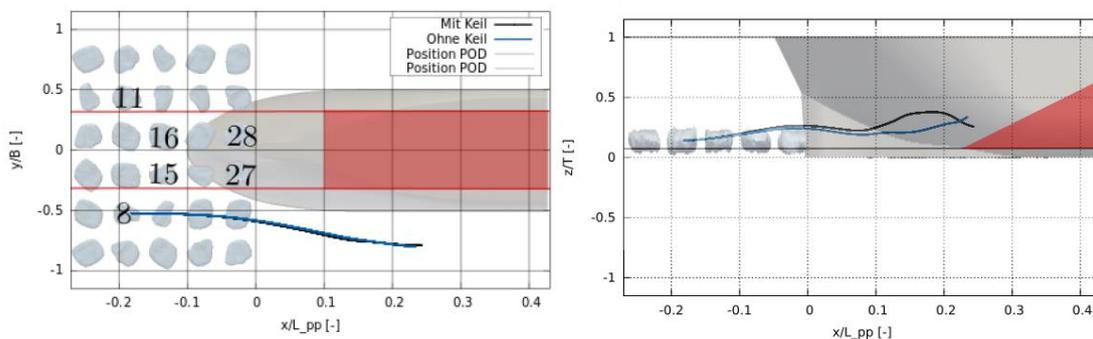


Abbildung 24: Effekte von Räumkeilen in der Eissimulation

Die folgende Abbildung zeigt die Schiffsform als 3D-veranschaulichung, welche für die ersten Untersuchungen verwendet wurde.



Abbildung 25: Isometrie Formentwurf

Im weiteren Entwicklungsverlauf haben sich die Schwerpunkte in der Linienentwicklung verschoben. Der Leistungsbedarf im offenen Wasser sowie das Seegangverhalten haben einen höheren Stellenwert erhalten. Die Auswertung des Operationsprofils hat eine prozentuale

## Abschlussbericht

Verteilung von Eisbrechzeit zu Zeit im offenen Wasser in einem Verhältnis von 15% - 85% ergeben. Auf Grund dessen wurden die Schiffslinien entsprechend angepasst und weiter entwickelt. Eine eisbrechende Schiffsform steht im starken Kontrast zu einem guten Verhalten im offenen Wasser. Dennoch sollte weiterhin eine maximal mögliche Eisbrechfähigkeit gewährleistet werden. Daraus folgt, dass der Bugbereich entsprechend der Eisbrechfähigkeit und zu Gunsten eines guten Seegangsverhaltens designt wurde. Das Heck wiederum wurde maximal auf einen optimierten Leistungsbedarf im offenen Wasser ausgelegt. Dieses Konzept stellt ein großes Risiko dar und ist im Detail nicht vollständig untersucht. Ein klassischer Entwurf für ein eisbrechendes Schiff würde besonders im Heck andere Schwerpunkte setzen. Jedoch würde dies zu einer sehr schlechten Wirtschaftlichkeit führen, welches das gesamte Konzept in Frage stellen würde. Modellversuche müssen zeigen, inwiefern die Konzeptidee in die Realität übertragbar ist. Die folgende Abbildung 26: Isometrie finales Schiffsrumpf veranschaulicht den finalen Formentwurf für weitere Untersuchungen.



Abbildung 26: Isometrie finales Schiffsrumpfkonzept

### II.1.2.5 Anordnung Ruderpropeller & Anhänge

Für das Konzept wurden ABB DO1600 Azipods vorgesehen mit einer maximalen Leistung von 5000 kW pro Azipod. Bei der Anordnung der Azipods wurden alle relevanten Erkenntnisse zur Minimierung der Propeller-Eis-Interaktion einbezogen. Das Hauptaugenmerk lag bei der Maximierung des Propellerfreischlags. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die Eisschollen welche unter dem Schiffsrumpf durchlaufen, ausreichend Platz haben, um über den Propellern durchzulassen. Somit kann die Propulsionsleistung bestmöglich ausgenutzt werden. Weiterer positiver Nebeneffekt ist, dass dadurch die Propellerdruckimpulse auf den Schiffsrumpf minimiert werden. Eisverstärkte Propeller weisen auf Grund der Flügelstärke (Eisverstärkung aus Festigkeitsgründen) deutlich erhöhte Druckimpulse im Vergleich zu herkömmlichen Propellern auf. Dies würde zu einer erhöhten Lärm- und Vibrationsbelastung im Schiffinneren führen, welches wiederum den Komfortlevel für die Passagiere reduziert. Besonders bei den sehr teuren arktischen Kreuzfahrten und dem damit verbundenen zahlungskräftigen Klientel wäre dies ein inakzeptables Ergebnis. Somit werden zwei positive Eigenschaften mit dieser Maßnahme erzielt.



## Abschlussbericht

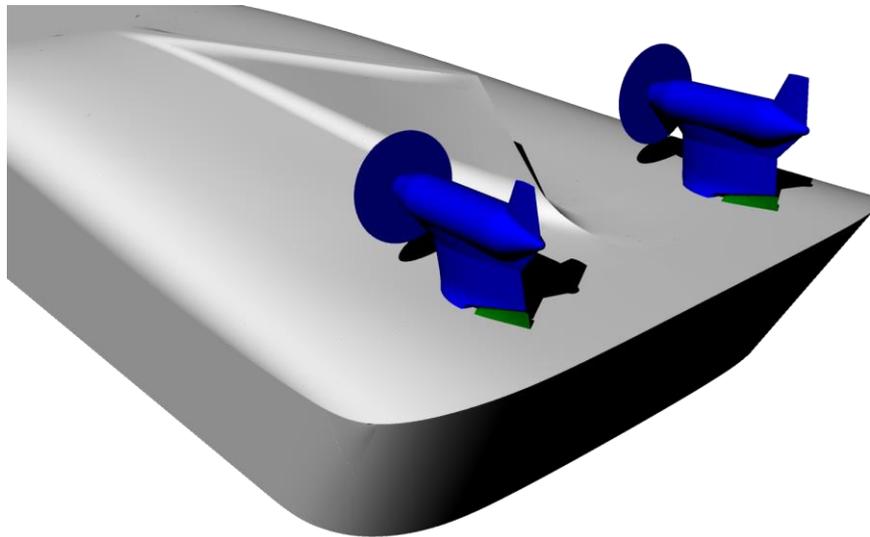
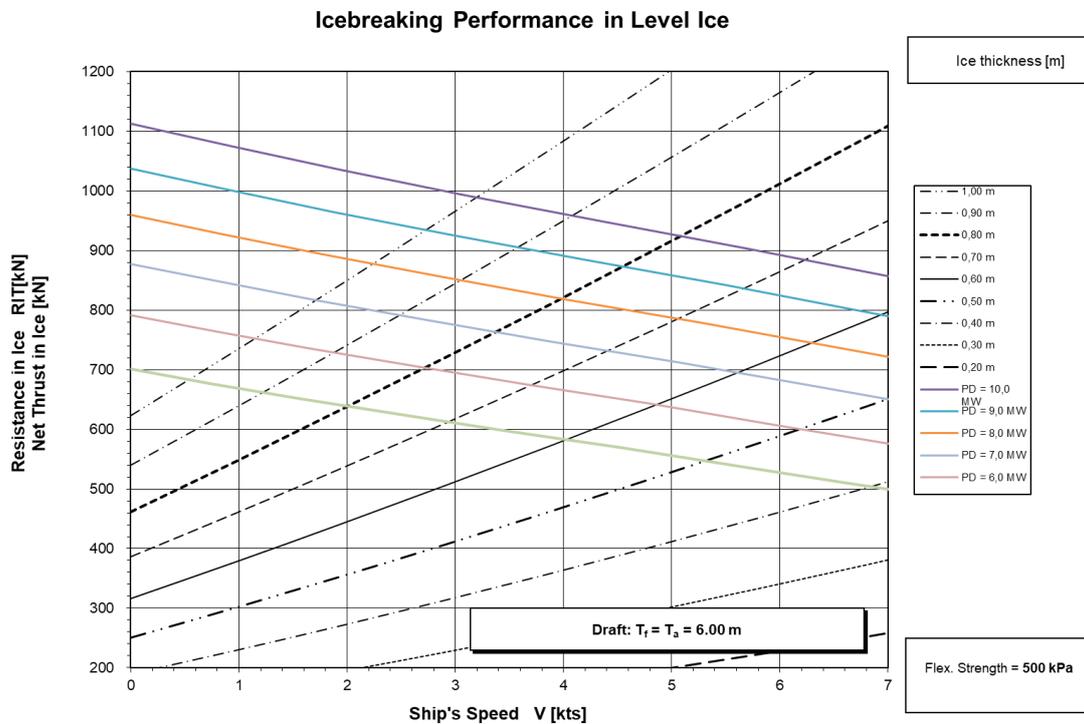


Abbildung 28: 3D-Modell Azipod-Antrieb

### II.1.2.6 Eisbrech- & Leistungsprognose (im Eis)

Zur Bestimmung der Eisbrechfähigkeit wurde im Entwicklungsprozess eine Prognose für die entwickelte Schiffsform erstellt. Die Prognose basiert auf dem Verfahren nach Lindquist. Es sind nur sehr begrenzte Vorhersagemodelle verfügbar. Im frühen Entwurf hat sich dieses Verfahren als belastbar und aussagekräftig erwiesen. Dennoch werden gleichzeitig viele mögliche Risikofaktoren nicht erfasst.

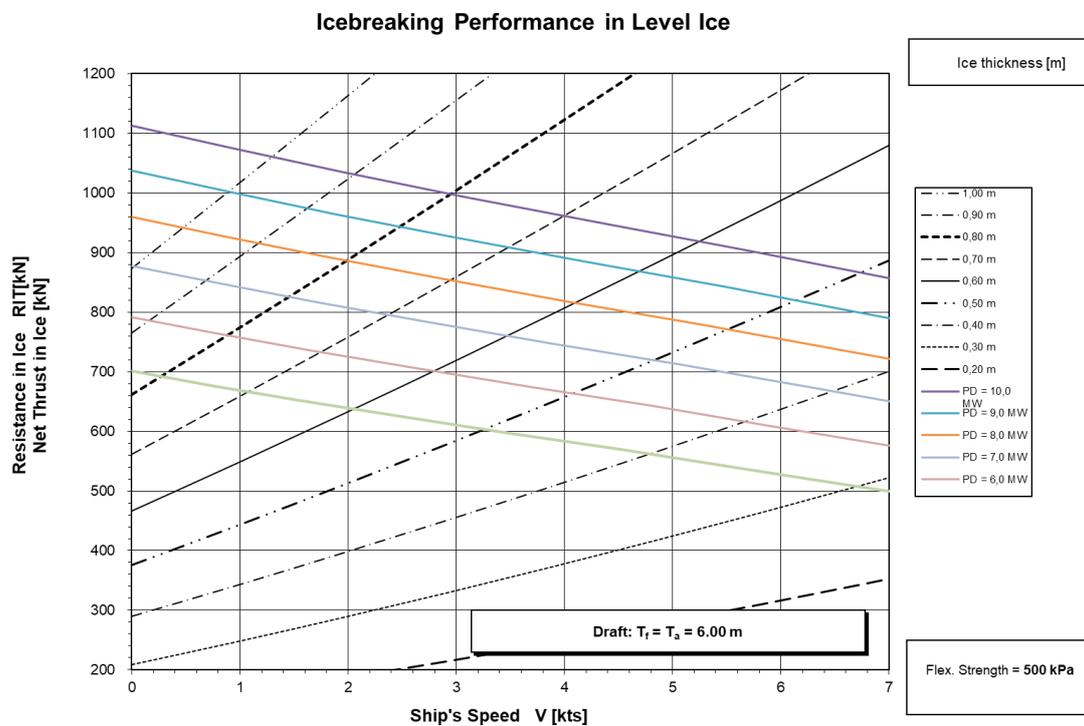


**Abbildung 29: Leistungsprognose in Abhängigkeit der Eisdicke**

Die Prognose zeigt, dass das Schiff bei maximaler Leistung und 1,00 m Eisdicke maximal 3,0 kn Geschwindigkeit erreicht. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde die Zielstellung für die Eisbrechfähigkeit auf maximal 0,80 m definiert. Bei einer Eisdecke von 0,80 m würde das Schiff maximal 5,0 kn Geschwindigkeit erreichen. Dies wäre für den Schiffsentwurf ein herausragendes Ergebnis.

Die folgende Graphik zeigt die Eisbrechprognose mit einer zusätzlichen Schneeeauflage von 20% auf dem Eis. Dies erhöht den Widerstand signifikant, wodurch geringere Geschwindigkeiten erreicht werden.

## Abschlussbericht



Das Ergebnis zeigt, dass das Schiff immer noch 3,0 kn Geschwindigkeit bei 0,80 m Eisdicke mit 0,16 m Schneeauflage erreichen würde. Auch dies wäre ein sehr gutes Ergebnis.

### II.1.2.7 Modellversuche

Für die Modellversuche wurden alle relevanten Parameter definiert. Die Schiffsgeometrie sowie die Propellerdaten wurden im Detail übermittelt und der Versuchsplan wurde in Zusammenarbeit mit der HSVA ausgearbeitet. Folgende Festlegungen wurden für die Versuche getroffen:

- Eisfestigkeit: 500 kPa
- Eisdicke: 0,80 m (ohne Schneeauflage)
- Tiefgang Schiff: 6,00 m
- Antriebsleistung: 5.000 kW pro Pod
- Versuchsprogramm:
  - Geschleppte Propulsion
    - Zwei Geschwindigkeiten 2,5 kn & 4,0 kn
    - Je drei Drehzahlstufen
  - Rückwärts durch die gebrochene Rinne, freie Propulsion
  - Ausbrechen aus der Rinne voraus, freie Propulsion

Während der Versuche werden alle relevanten Parameter aufgemessen. Die wichtigsten Parameter stellen Geschwindigkeit, Schleppkraft, Drehzahl pro Pod, Drehmoment pro Pod, Schub pro Pod und der Podwinkel dar. Entlang der gebrochenen Rinne wird die Eisdicke gemessen und die Festigkeit wird für das Eis ermittelt.

## Abschlussbericht

### II.1.2.8 Auswertung Modellversuche

Folgendes Modell wurde für die Modellversuche bei der HSVA verwendet:



Abbildung 31: Schiffmodell HSVA

#### II.1.2.8.1 Eisbrechverhalten

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen das Eisbrechverhalten und den Schollenfluss entlang des Schiffsrumpfs.



Abbildung 32: Überbruch

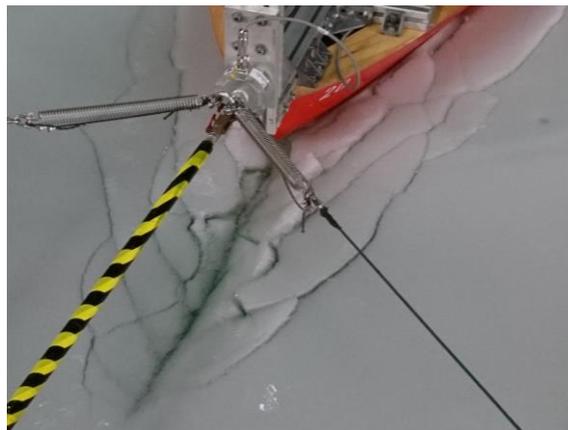
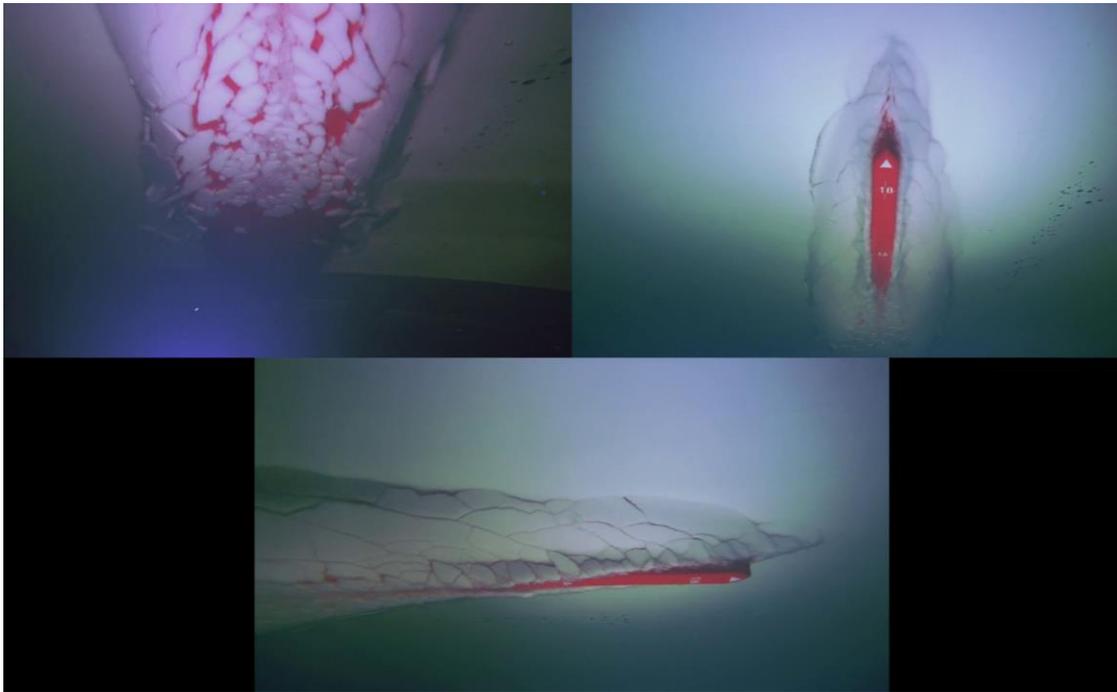
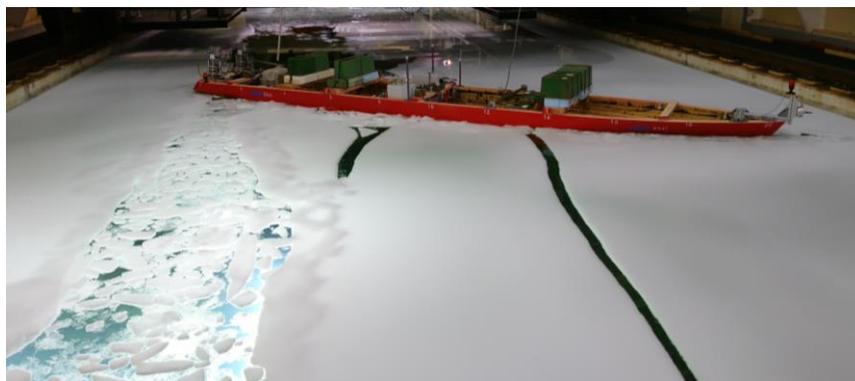


Abbildung 33: Bruchbild Bug

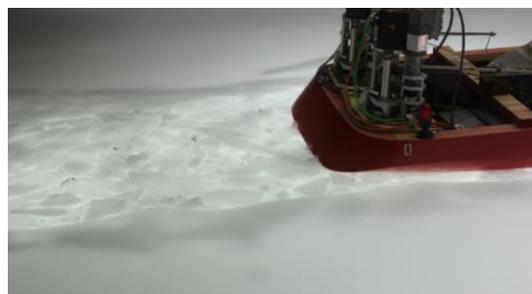
**Abschlussbericht**



**Abbildung 34: Schollenfluss Bruchmuster**



**Abbildung 35: Ausbrechmanöver**



**Abbildung 36: Rückwärtsfahrt in der Rinne**

## Abschlussbericht



Abbildung 37: Rinne nach dem Brechen

### II.1.2.8.2 Widerstand / Propulsion

Auf Basis der ermittelten Messgrößen wurden die Modellversuche ausgewertet. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Zeitschrieb für die Zugkraft als Veranschaulichung. Alle Messgrößen wurden auf ähnliche Weise aufgezeichnet.

## Abschlussbericht

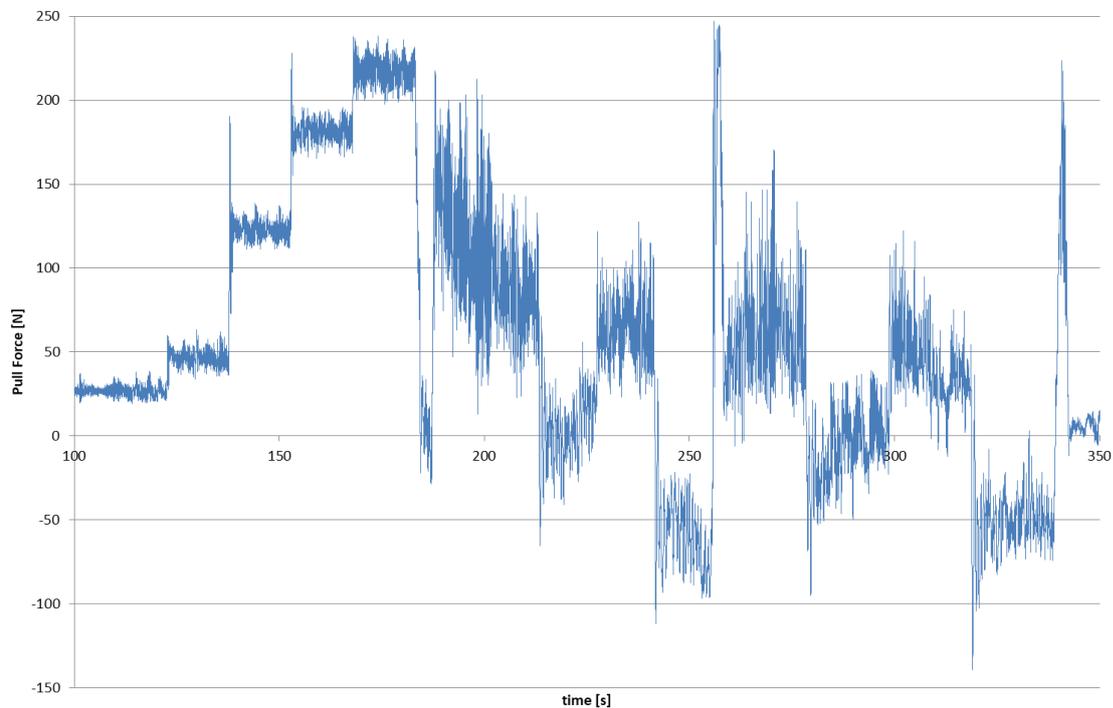


Abbildung 38: Zeit-Zugkraft-Diagramm

Für die Auswertung werden die Messwerte über einen definierten Zeitraum gemittelt. Dies geschieht mit allen relevanten Messgrößen. Die so gewonnenen Ergebnisse werden mit Hilfe von Modellgesetzen und Umrechnungsverfahren auf die Großausführung skaliert. Auf Basis des Auswertungsverfahrens ergeben sich die folgenden Ergebnisse für die getestete Schiffsform bei den definierten Randbedingungen.

Tabelle 14: Schiffstheoretisch relevante Ergebnisse der Schleppversuche

Geschwindigkeit <b>V</b> [kn]	Widerstand <b>R<sub>t</sub></b> [kN]	Propulsionsleistung <b>P<sub>d</sub></b> [kW]
2,49	541,2	7633,0
3,99	598,0	8670,6

## Abschlussbericht

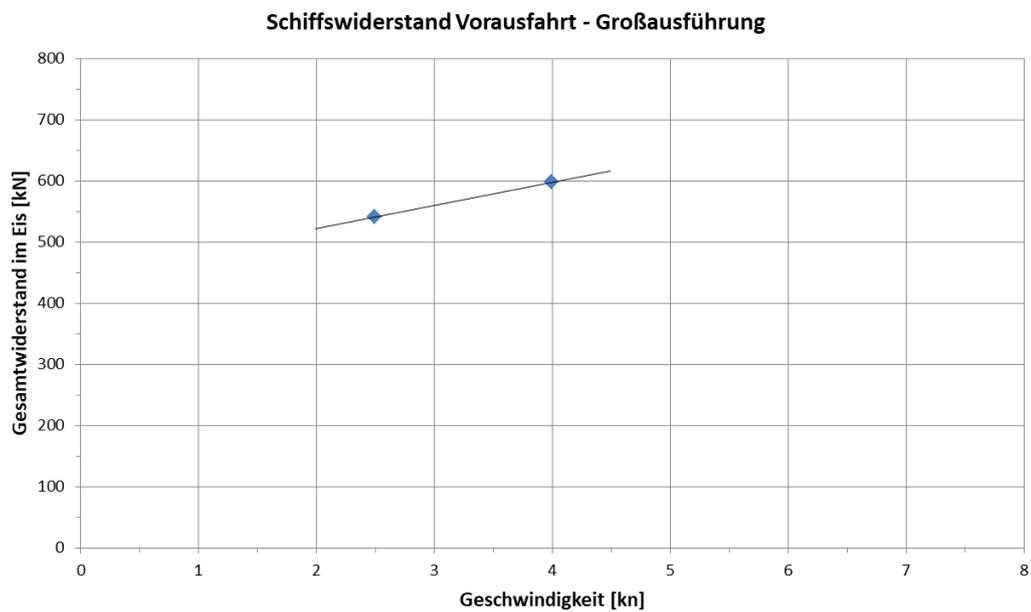


Abbildung 39: Schiffswiderstand

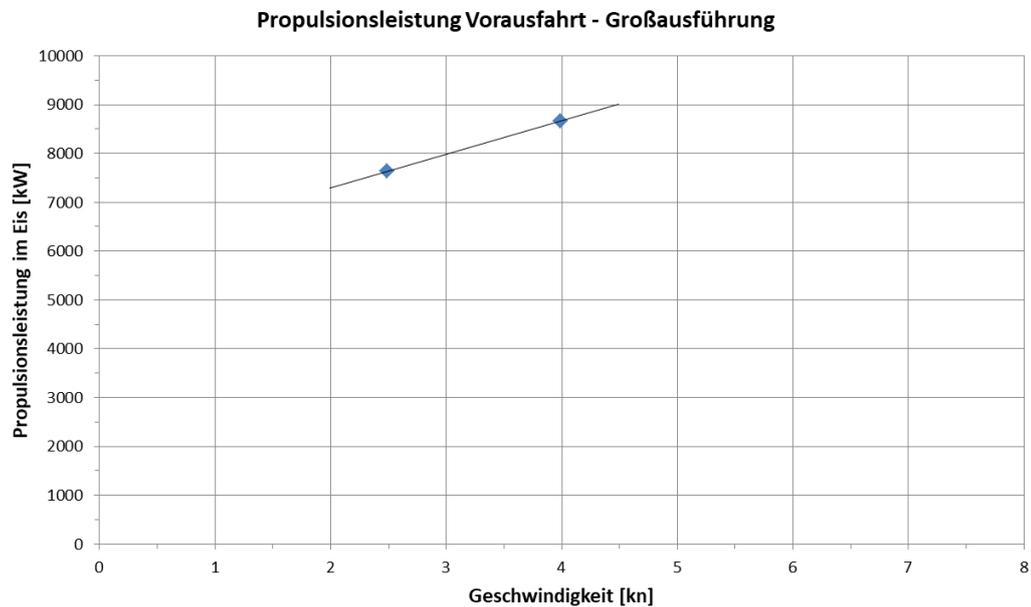


Abbildung 40: Propulsionsleistung

### II.1.2.8.3 Rückwärtsfahrt im gebrochenen Kanal

Die folgenden Diagramme stellen das Schiffsverhalten und die dazugehörigen Propulsionsparameter für die Rückwärtsfahrt in der gebrochenen Rinne bei freier Propulsion dar.

## Abschlussbericht

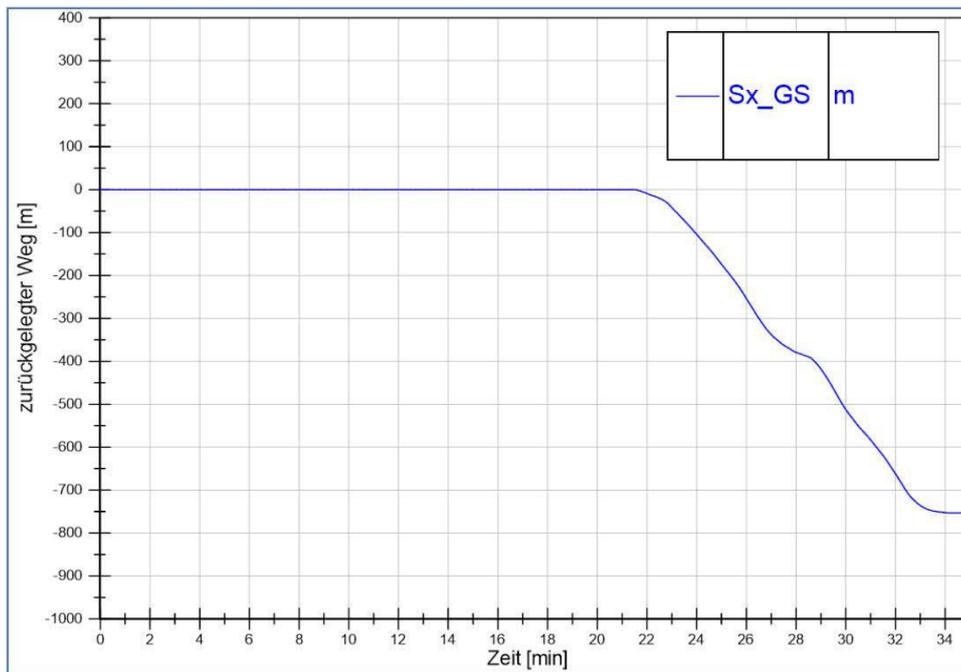


Abbildung 41: Zeit-Weg-Diagramm für die Rückwärtsfahrt

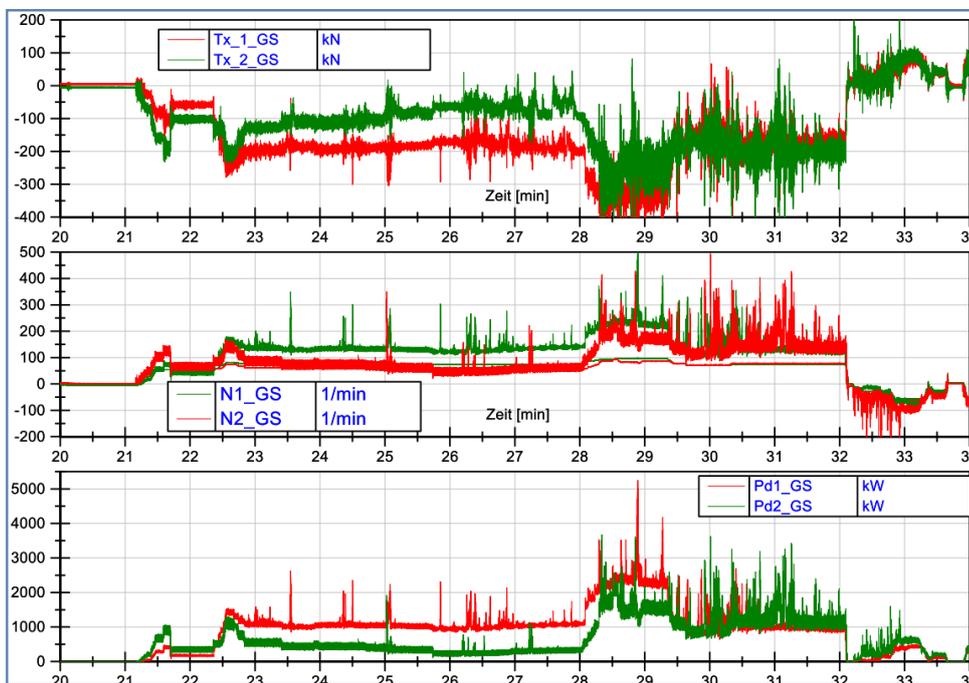


Abbildung 42: Zeit-Kraft (oben), Propellerumdrehung(Mitte) und Antriebsleistung (unten)-Diagramm für die Rückwärtsfahrt

### II.1.2.8.4 Ausbrechmanöver aus der Rinne

## Abschlussbericht

Die folgenden Diagramme stellen das Schiffsverhalten und die dazugehörigen Propulsionsparameter für das Ausbrechmanöver aus der Rinne in freier Propulsion dar.

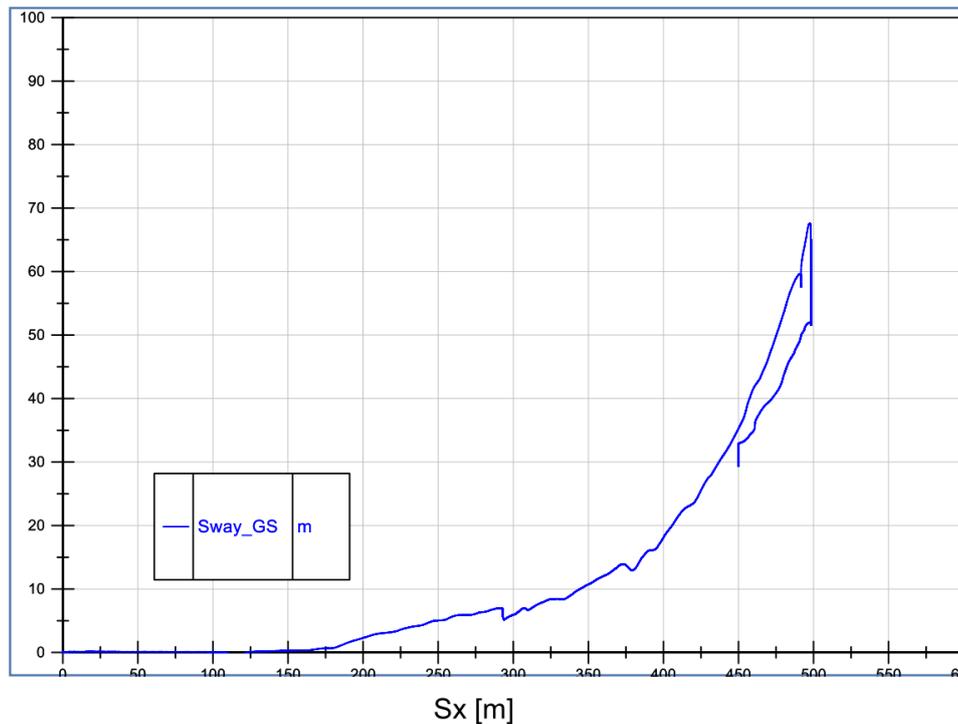


Abbildung 43: Zeit-Weg-Diagramm Ausbrechmanöver

## Abschlussbericht

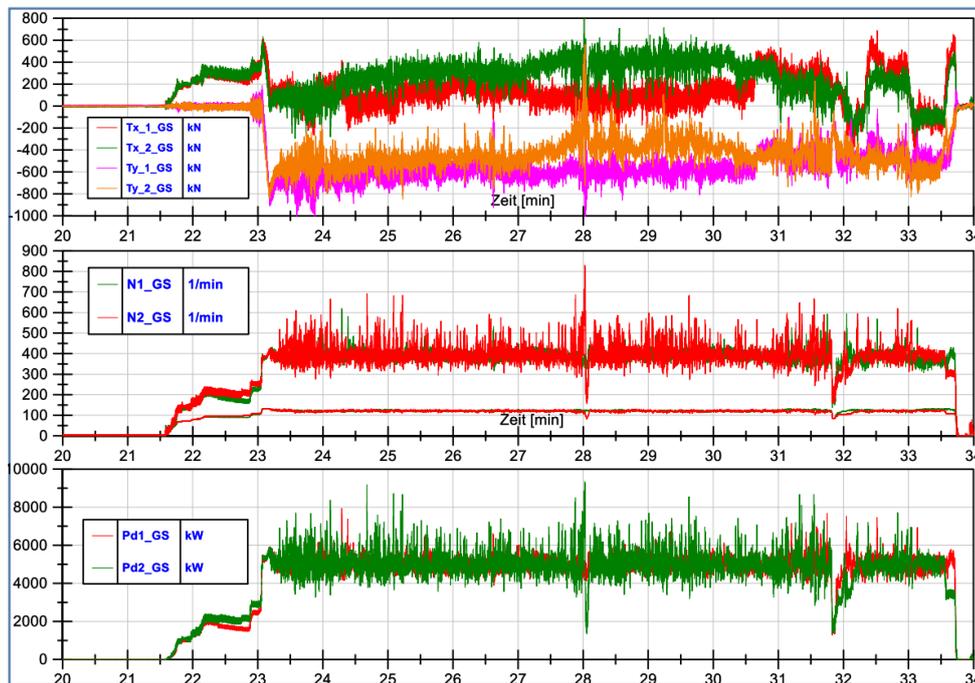


Abbildung 44: Zeit-Kraft(oben), Propellerumdrehung(Mitte) und Antriebsleistung (unten)-Diagramm für das Ausbrechmanöver

### II.1.2.8.5 Fazit

Laut Prognose aus den Modellversuchen benötigt der Entwurf eine Propellerdrehleistung von etwas über 7600 kW, um eine kontinuierliche Geschwindigkeit von 2,5 kn in einer Eisdicke von 0,80 m zu erreichen. Für eine Geschwindigkeit von 4,0 kn ist, in derselben Eisdicke, eine Leistung von ca. 8700 kW erforderlich.

Bei der genannten Leistung bleibt noch eine verfügbare Reserveleistung verfügbar um auch bei einer möglichen Schneeauflage die Eisbrechfähigkeit zu erreichen. Die Forderung von 2,50 kn bei 0,80 m Eisdicke wird somit sogar übertroffen. Darüber hinaus liegen die Versuchsergebnisse besser als die Prognoserechnung. Generell zeigen die Prognoserechnungen und die Versuchsergebnisse eine gute Übereinstimmung was für einen solch komplexen Vorgang wie das Eisbrechen außerordentlich herausragend ist.

In ebenem Eis erzeugt der Bug des Modells einen Mittelriss mit mittelgroßen Schollen, die allerdings vom Vorfuß noch in kleinere Eisstücke zermalmt werden. Das Modell zeigt eine erhebliche Eisbedeckung vom Bug bis zum Hinterschiff. Am Hinterschiff werden die Eisschollen letztendlich weitestgehend seitlich geräumt. Verbleibende Eisschollen rutschen überwiegend oberhalb der Propeller am Rumpf entlang, sodass es bei Vorfahrt in ebenem Eis trotz der insgesamt hohen Eisbedeckung nur sehr gelegentlich zu Propeller- Eis Interaktion kommt. Das Schiff kann ohne besondere Einschränkungen in der eigenen gebrochenen Rinne achteraus fahren und erreicht mit einer Leistung von 1500 – 2000 kW eine Geschwindigkeit deutlich über 2 kn.

Das Schiff bricht vorwärts in 0.8 m dickem Eis mit einem Versuch aus der eigenen Rinne aus und kann innerhalb von 10 Minuten ein komplettes Ausbrechmanöver abschließen.



## **Abschlussbericht**

Die Gesamtleistung des Konzeptschiffes im Eis kann als sehr überzeugend bewertet werden und ist ein Erfolg. Im Manövrierbereich können durch kleinere Modifikationen der Schiffsform weitere Verbesserungen erzielt werden.

### **2. Verwendung der Zuwendung und wichtigste Kostenpositionen**

Die Fördermittel wurden bei MV Werften zur Erarbeitung der beschriebenen Ergebnisse eingesetzt. Dabei handelte es sich nahezu ausschließlich um Personalkosten. Die tatsächlich angefallenen Kosten übersteigen die zunächst kalkulierten Kosten um circa neun Prozent. Zudem sind, bedingt durch den Wegfall eines Arbeitspaketes, etwas weniger Reisekosten als ursprünglich geplant angefallen.

### **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten**

MV Werften fungierte im Projekt als Systemintegrator. Die Arbeiten im Teilprojekt waren zur Lösung der geplanten Aufgabenstellungen notwendig. Vor dem Projekt verfügbarer Stand der Technik bot keine ausreichenden Lösungen. Die Art der Weiterentwicklungen hin zu einem befriedigenden Konzeptentwurf für ein eisbrechendes Schiff sind ausführlich in der oben genannten Darstellung des Projektverlaufs beschrieben. MV Werften halten daher die im Projekt geleisteten Arbeiten als angemessen

### **4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Dier Ergebnisse des Projektes werden genutzt die bestehenden Werkzeuge zum Entwurf für Propeller- und Schiffsdesign in der Konzeptphase zu verbessern. Momentan wichtig für die MV Werften ist der Bereich der Kreuzfahrtschiffe. Auch hier ist ein Trend in Richtung arktischer Gewässer zu beobachten. Daher werden die Ergebnisse für die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Leistungsprognose im frühen Designprozess, für die Minimierung des Risikos von Fehlentwicklungen, für die Beschleunigung des Entwurfsprozesses sowie nicht zuletzt für die Verbesserung der Umweltbilanz des Schiffes genutzt.

### **5. Wissenschaftlich-technischer Fortschritt bei anderen Stellen**

Es ist zu beobachten, dass auch andere Werften mittlerweile in dieses Marktsegment vordringen möchten. Über den Fortschritt der Bestrebungen ist den MV Werften nichts bekannt.

### **6. Veröffentlichungen**

Während der Projektlaufzeit sind im Teilprojekt von MV Werften keine Veröffentlichungen entstanden.