

# Energievoorziening voor een zeewaardige replica van het poolexpeditieschip Belgica

Kris Verstuyft

Promotoren: prof. dr. ir. Marc Vantorre, prof. dr. ir. Alex Van den Bossche  
Begeleider: ir. Evert Lataire

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Civiele techniek  
Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck

Vakgroep Elektrische energie, systemen en automatisering  
Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek

Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Academiejaar 2009-2010



## Voorwoord

De overwintering van de *Belgica* en zijn bemanning spreekt tot de verbeelding: de ijver en het doorzettingsvermogen van Adrien de Gerlache de Gommery wanneer hij beslist een wetenschappelijke expeditie op touw te zetten, de getrotseerde ontberingen tijdens de poolwinter in Antarctica en de reusachtige schat aan informatie waarmee deze expeditie 2 jaar later terug in Antwerpen arriveerde. Het plan om een replica te bouwen van dit legendarische schip doet de herinneringen aan zijn heroïsche verleden eer aan. Het was dan ook met veel plezier dat ik met mijn masterproef kon bijdragen aan de verwezenlijking van dit ambitieuze project.

Graag maak ik van deze gelegenheid gebruik om enkele mensen te bedanken: vooreerst professor Vantorre en Evert Lataire voor de begeleiding en het reeds gepresteerde werk waarover ik kon beschikken. Daarnaast wens ik de leden van de Technische Werkgroep van de *New Belgica* vzw te bedanken en in het bijzonder de voorzitter: Wim Pandelaers. Tenslotte nog een woord van dank aan mijn ouders en familie voor hun oprechte interesse en steun, alsook aan mijn collega-studenten voor de fijne tijd die ik met hen beleefde.

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van het afstudeerwerk te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van de resultaten van deze masterproef.

Datum en handtekening:

# Energievoorziening voor een zeewaardige replica van het poolexpeditieschip *Belgica*

Kris Verstuyft

Promotoren: prof. dr. ir. Marc Vantorre, prof. dr. ir. Alex Van den Bossche

Begeleider: ir. Evert Lataire

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Civiele techniek

Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck

Vakgroep Elektrische energie, systemen en automatisering

Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Melkebeek

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2009-2010

Universiteit Gent

## **Samenvatting:**

Deze masterproef heeft als doel na te gaan in hoeverre de huidige en eventueel toekomstige technieken qua energievoorziening toepasbaar zijn bij de bouw van een zeewaardige replica van de *Belgica*. Hiervoor werd de energiebehoefte voor propulsie en ander verbruik in kaart gebracht, welke respectievelijk in grootteorde 500 kW en 70 kVA bedragen. Verder werd de stand der technologie en het potentieel van bestaande mechanische en elektrische aandrijfconfiguraties onderzocht, alsook van de componenten waaruit deze opgebouwd zijn. Aangezien de *Belgica* vooral een zeilschip is en er zich diverse complicaties voordoen bij een implementatie van moderne varianten van energievoorziening, is de keuze hiervoor niet vanzelfsprekend. In het kader van de groene missie van deze replica, werd het potentieel van schroefregeneratie onderzocht. Het onttrekken van energie aan de volgstroom lijkt betrekkelijk eenvoudig te verwezenlijken en een acceptabele hoeveelheid energie op te leveren. In een laatste deel werd een poging gedaan om het elektrisch verbruik in kaart te brengen, met de geldende regelgeving als leidraad werden de eisen aan de energievoorziening van enkele grote verbruikers opgemaakt.

## **Trefwoorden:**

zeegaande replica, *Belgica*, energievoorziening, schroefregeneratie

# Energy supply for a seagoing replica of the arctic exploration ship Belgica

Kris Verstuyft

Supervisors: Marc Vantorre, Alex Van den Bossche, Evert Lataire

**Abstract** – This article summarizes a thesis that investigates the possibilities regarding the energy supply onboard a replica of the arctic exploration ship Belgica. Therefore, all present available ways of supplying energy to propulsion and hotel loads were examined. Similar work was done on the key components occurring in these plants. Since this replica is a sailing vessel, there was done a study on the characteristics of propeller regeneration.

**Keywords** – seagoing replica, Belgica, energy supply, propeller regeneration

## I. INTRODUCTION

When the decision to build a replica of the Belgica was made, it was clear there would be a lot of different aspects about this project than just building a wooden ship. Above all, this is not a commercial project: De Steenschuit [1] is a social non-profit organization that trains long-term unemployed persons in carpentry by building wooden ships. This way they try to coach their course members into an occupation on the regular labor market.

Besides this social aspect, there is also an environmental aspect in the construction of this replica – which will be unofficially referred to as New Belgica in this article. When operational, the New Belgica will sail the seas with a mission to make attention to climatic issues [2]. So the building of the New Belgica will be a durable process, but this aspect also concerns the operation of the actual replica. The New Belgica will be fitted with durable means of energy supply and a plan for rational use of energy.

Of course there is the historic value of the Belgica for Belgian maritime heritage as well, the new building will bring reminders of the legendary trip to Antarctica back to life and offers opportunities to boost traditional sailing in Belgium. At least one time the memorable journey of Adrien de Gerlache de Gomery (Figure 1) will be repeated.

## II. THE ANTARCTIC EXPEDITION

On August 16, 1897 the Belgica left Antwerp (Belgium) for an expedition to the Antarctic regions. An international crew of 15 under the command of Baron Adrien de Gerlache sets sail for a scientific exploration of the Arctic waters on the southern hemisphere. Driven by their research, the Belgica got trapped in the ice and is forced to spend a winter on Antarctica. The year after, just before the start of the next winter, the Belgica and its crew manage to escape the ice. More than 2 years after leaving, the expedition arrives in Antwerp on November 5, 1899.



Figure 1 Portrait of Baron Adrien de Gerlache (© VLIZ fotogallery-Belgica Society) [3].

## III. THE BELGICA

The ship, originally named Patria, was built in 1884 in Norway. She is rigged as three mast barque and designed for operating in Arctic waters. The sailplan is shown in Figure 2. With a length of 34,6 m, a beam of 7,54 m and a draught of 3,96 m her displacement was 605 tonnes.

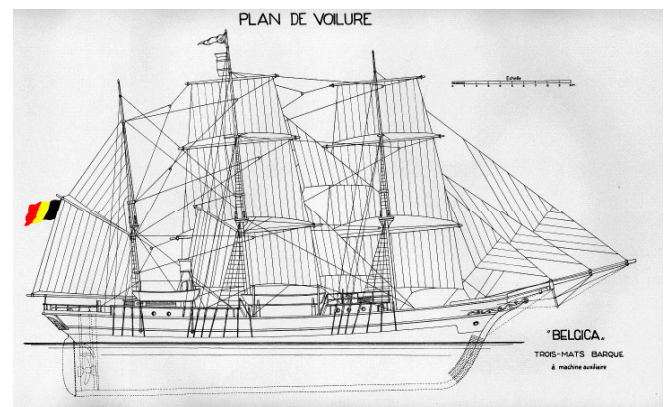


Figure 2 Sailplan of the original Belgica [4].

## IV. ENERGY SUPPLY FOR THE NEW BELGICA

In present ships the energy needs for propulsion and hotel loads are often provided by diesel engines. With the predicted decrease in availability of fossil fuels and the growing understanding of the role of human-induced emissions in global warming, alternatives have reached the market.

In marine propulsion systems classic mechanical drives get replaced or supplemented with electrical components. These

technologies offer the opportunity to remove or reduce the use and/or emissions of a conventional diesel engine. One makes a distinction between pure electric drives, diesel-electric and hybrid drives. The latter further divided in serial, parallel and combined layouts, especially a parallel hybrid drive seems appropriate in marine environments.

#### A. Parallel hybrid drive

In this drive the propeller is connected to a power split, which means propulsion energy could be provided by the diesel engine, an electric motor or both. Figure 3 shows a simplified layout of the parallel hybrid drive.

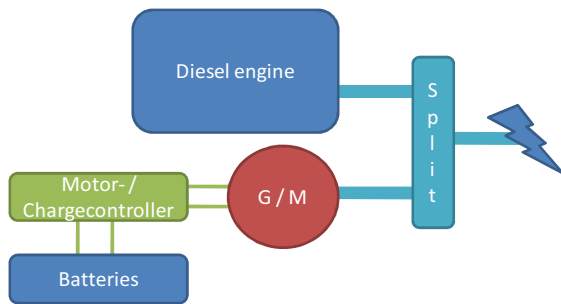


Figure 3 Parallel hybrid drive.

By using this drive type in the replica, several advantages over conventional drives can be obtained. At low speeds and fully-charged batteries, the ship could be propelled purely electrically. At normal speeds the diesel engine provides the necessary power, but additionally the generator could be used to maintain a 100 % PTO (Power Take Off) this way keeping the SFC (Specific Fuel Consumption) at the lowest possible level. At top speed both diesel engine and motor provide power, if running at exactly the same speed.

In a more realistic situation, the electric motor is connected to a central power bus – so, when generating, providing power to the hotel load. In modern drives, the separation between energy supply for propulsion and hotel load disappears.

#### B. Batteries

Being a crucial component in electrical drives and also used for buffering energy onboard, the efficiency of the batteries onboard is an important factor. Recent developments improve the (dis-)charge-characteristics that are the main drawback today while using lead-acid batteries. These TPPL (Thin Plate Pure Lead) technology makes the conventional lead-acid battery even more competitive compared to other (and very expensive) types like NiMH or Li-ion.

#### C. Fuel cells

Fuel cells have found application in marine energy supply, but always in very specific environments: for instance submarines, ferries and riverboats. In civil applications fuel cells are mostly found in coastal or inland shipping due to the need of pure hydrogen or other fuels to make it by reforming. Considering the seagoing intentions and the high capital expenses, fuel cells are not likely to be installed on the New Belgica. The option of adding them in the future still remains.

## PROPELLER REGENERATION

Since the Belgica was a sailing vessel (three mast barque), there should be possibilities in regenerating energy by the propeller rotating in the wake of the ship. On this scale, very little is known about the potential and even fewer data on existing installations are available. Regeneration requires the coupling of the propeller to an electric generator, with the introduction of electrical drives this becomes possible without great difficulty. On small sailboats (without electrical drive) other ways are known to extract energy from the wake: towed impellers or outboard leg generators. These devices still are no option for the Belgica as it is a replica.

In the event that the New Belgica will be equipped with an electrical drive, propeller generation should be possible. An attempt was made to estimate the possible achievements. Therefore a Wageningen B-Series propeller was assumed since detailed characteristics for these propellers are generally available [5].

According to Betz' law [6], possible extracted power from a flow is limited: with strong simplifications (propeller as actuator disk) and in ideal conditions, maximum  $16/27^{\text{th}}$  or almost 60 % could be derived. Calculations based on the available data indicated a maximum efficiency of generating at approx. 52 % of free wheeling speed ( $n_T=0$ ), see Figure 4.

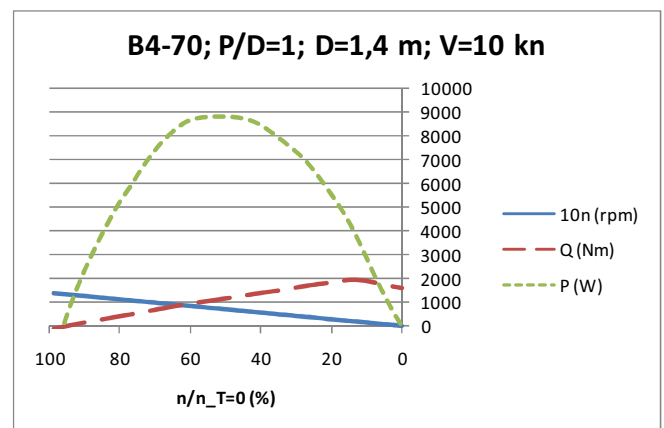


Figure 4 Regeneration characteristics.

A propeller diameter of 1,4 m causes, while sailing at 10 kn, a power transfer of approx. 9 kW from flow to shaft, which is 42 % of the absolute maximum according to Betz. This ratio remains at the same level for all vessel speeds. The slowing down of the vessel is very limited (tenths of a knot). Pitch-diameter ratio influences the achieved rotational speed at a given vessel speed, not the amount of regenerated power.

## REFERENCES

- [1] [www.steenschuit.be](http://www.steenschuit.be)
- [2] [www.newbelgica.org](http://www.newbelgica.org)
- [3] [www.belgica-genootschap.be](http://www.belgica-genootschap.be)
- [4] DE GERLACHE, A. et al, 'Résultats du voyage de la Belgica en 1897-1899' Imprimerie J.-E. Buschmann, Antwerp, 1938
- [5] MARIN PSP (Propeller Series Package), v2003\_1
- [6] BETZ, A. (1966) 'Introduction to the Theory of Flow Machines' (D. G. Randall, Trans.) Oxford: Pergamon Press

# Inhoudsopgave

VOORWOORD .....	I
SAMENVATTING.....	II
EXTENDED ABSTRACT.....	III
INHOUDSOPGAVE .....	V
LIJST AFKORTINGEN & SYMBOLEN .....	VII
<b>I. INLEIDING .....</b>	<b>1</b>
<b>II. GESCHIEDENIS VAN DE BELGICA.....</b>	<b>3</b>
1. DE BELGICA VAN DE GERLACHE .....	3
2. DE OVERWINTERING IN ANTARCTICA .....	4
3. OVERGELEVERDE DOCUMENTEN .....	6
<b>III. ENERGIEVOORZIENING OP DE NEW BELGICA .....</b>	<b>7</b>
4. OORSPRONKELIJKE SITUATIE .....	7
5. ENERGIEBEHOEFTE OP SCHEPEN .....	8
6. ENERGIEVOORZIENING OP TALL SHIPS .....	9
7. REGELGEVING.....	10
7.1. SPS .....	10
7.2. Poolwateren .....	11
8. ENERGIEBEHOEFTE NEW BELGICA.....	13
8.1. Propulsion load.....	13
8.1.1. Romp- en dienstsnelheid .....	13
8.1.2. Vaartweerstand .....	13
8.1.3. Schroefparameters .....	15
8.2. Hotel load .....	17
8.2.1. Gelijkaardige schepen.....	17
8.2.2. Inventarisatie verbruikers.....	18
<b>IV. CONFIGURATIES &amp; COMPONENTEN .....</b>	<b>20</b>
9. CONVENTIONELE AANDRIJVINGEN (MECHANICAL DRIVES) .....	21
9.1. Eigenschappen en beperkingen.....	21
9.2. Schroefuitvoering .....	27
10. ELEKTRISCHE AANDRIJVINGEN (ELECTRICAL DRIVES).....	30
10.1. Elektrische aandrijving (Electric drive).....	31
10.1.1. Beschrijving.....	31
10.1.2. Toepassing in de scheepvaart .....	31
10.1.3. Besluit <i>New Belgica</i> .....	31
10.2. Deselelektrische aandrijving (Diesel-electric drive) .....	32
10.2.1. Beschrijving .....	32
10.2.2. Winst tegenover mechanische aandrijvingen.....	33
10.3. Hybride aandrijving (Hybrid drive) .....	35
10.3.1. Seriehybride .....	35
10.3.2. Parallelhybride .....	36
10.4. Besluit <i>New Belgica</i> .....	37
11. ALTERNATIEVE BRANDSTOFFEN BIJ DIESELMOTOREN .....	40
11.1.1. Biobrandstoffen .....	41

11.1.2.	Aardgas .....	41
11.1.3.	Waterstof .....	43
11.1.4.	Besluit <i>New Belgica</i> .....	43
12.	ELEKTRISCHE MACHINES EN STURINGEN .....	44
13.	BATTERIJEN .....	46
13.1.	<i>Technologie en types</i> .....	46
13.2.	<i>Beperkingen gebruik &amp; eigenschappen loodaccu's</i> .....	48
13.3.	<i>Recente ontwikkelingen en besluit New Belgica</i> .....	50
14.	BRANDSTOFCELLEN .....	52
14.1.	<i>Technologie</i> .....	52
14.1.1.	Productie en opslag van zuivere waterstof .....	52
14.1.2.	Types .....	53
14.2.	<i>Brandstofcellen in de scheepvaart</i> .....	54
14.3.	<i>Besluit New Belgica</i> .....	56
15.	ZONNEPANELEN .....	57
15.1.	<i>Technologie</i> .....	57
15.2.	<i>Zonnepanelen in de scheepvaart</i> .....	57
15.3.	<i>Besluit New Belgica</i> .....	58
<b>V.</b>	<b>SCHROEFREGENERATIE .....</b>	<b>59</b>
16.	WET VAN BETZ .....	59
16.1.	<i>Theorie</i> .....	59
16.2.	<i>Validering</i> .....	61
16.3.	<i>Conclusie Belgica</i> .....	62
17.	SCHROEFKARAKTERISTIEKEN .....	63
18.	VERGELIJKING RESULTATEN .....	66
<b>VI.</b>	<b>INVENTARISATIE VERBRUIKERS .....</b>	<b>68</b>
19.	OVERZICHT .....	68
20.	ENKELE BELANGRIJKE VERBRUIKERS .....	70
20.1.	<i>Boegschroef</i> .....	70
20.2.	<i>HVAC en de-icing</i> .....	71
20.3.	<i>Zoetwatermaker</i> .....	72
20.4.	<i>Lieren</i> .....	73
20.4.1.	Ankerlier .....	74
20.4.2.	Midscheepse lier .....	76
<b>VII.</b>	<b>BESLUIT .....</b>	<b>77</b>
<b>BIJLAGEN .....</b>	<b>78</b>	
BIJLAGE A	DE PLANNEN VAN DE BELGICA VOLGENS VERHOFSTADT .....	78
BIJLAGE B	PLANNEN NEW BELGICA .....	82
BIJLAGE C	DATA GELIJKAARDIGE SCHEPEN .....	84
BIJLAGE D	VOORSPELLINGSMETHODEN NAVCAD .....	90
BIJLAGE E	WEERSTAND EN PROPULSIEVERMOGEN NEW BELGICA .....	95
BIJLAGE F	PATENT ZONNEZEILEN .....	100
BIJLAGE G	INVLOED VAN DE SPOED OP SCHROEFREGENERATIE .....	101
BIJLAGE H	INVENTARISATIE VERBRUIKERS .....	104
BIJLAGE I	BEREKENING EN .....	107
<b>REFERENTIES .....</b>	<b>109</b>	

## Lijst afkortingen & symbolen

SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974	
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973	
COLREG	Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972	
IMO	International Maritime Organization	
SPS	Special Purpose Ship	
TWG	Technische Werkgroep	
FPP	Fixed Pitch Propeller	
CPP	Controllable Pitch Propeller	
AGM	Absorbed Glass Material	
VLRA	Valve Regulated Lead Acid	
DOD	Depth Of Discharge	
CAR	Charge Acceptancy Rate	
TPPL	Thin Plate Pure Lead	
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	
AFC	Alkaline Fuel Cell	
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	
$C_b$	blokcoëfficiënt	[-]
R	weerstandskracht	[N]
V	snelheid	[kn], [km/u],[m/s]
w	volgstroomgetal	[-]
$V_a$	volgstroomsnelheid	[kn], [km/u],[m/s]
P	vermogen	[W]
n	toerental	[rpm]
P	spoed	[m]
D	diameter	[m]
P/D	spoed-diameterverhouding	[-]
PTO	Power Take Off	[%]
SFC	Specific Fuel Consumption	[g/kWh]
T	stuwkracht	[N]
Q	koppel	[Nm]
J	snelheidsgraad	[-]
$\beta$	invalshoek	[°]
$K_T, C_T^*$	stuwkrachtcoëfficiënt	[-]
$K_Q, C_Q^*$	askoppelcoëfficiënt	[-]



## I. Inleiding

De *Belgica* zal voor eeuwig in de geschiedenisboeken staan als het eerste schip dat overwinterde op Antarctica. Hoewel deze heroïsche daad niet gepland was en meer het gevolg was van de wetenschappelijke ijver van gezagvoerder Adrien de Gerlache de Gommery, kwam het schip en haar bemanning in maart 1898 vast te zitten in het pakijns op 70° zuiderbreedte in de Bellinghousen Zee. De *Belgica* was op 16 augustus 1987 vanuit Antwerpen met een internationale bemanning vertrokken voor een expeditie naar Antarctica. In maart 1899 kon de *Belgica* zich – net voor het inzetten van de volgende winter – vrijmaken uit het ijs en naar Antwerpen terugkeren.



Figuur 1: De *Belgica* tijdens de overwintering

Toen in 2007 het internationale pooljaar samenviel met de 110<sup>e</sup> verjaardag van het vertrek van de poolexpeditie, ontstond het idee om de *Belgica* opnieuw te bouwen. Verschillende vzw's zetten hun schouders onder dit grootse project en het was de Steenschuit te Boom die de zeewaardige replica<sup>1</sup> zou bouwen. De Steenschuit [1] is een tewerkstellingsproject dat tracht langdurig werklozen terug richting arbeidsmarkt te begeleiden – door het aanleren van houtbewerkings- en scheepsbouwtechnieken en het verwerven van tal van andere (sociale) vaardigheden worden de cursisten voorbereid op een reguliere baan. Heden is men reeds gestart met de bouw van de eerste spanten van de *New Belgica*, de kiellegging vond plaats op 9 september 2007 op de *Belgicawerf* te Noeveren, gelegen aan de Rupel tussen Niel en Boom.

---

<sup>1</sup> Voor de duidelijkheid in deze masterproef aangeduid als “*New Belgica*”, dit zonder te willen stellen dat dit ook de echte naam voor deze replica zou worden.

Naast de bouw van de *New Belgica* is het *Belgica* Genootschap [2] actief met als doel het wrak van *Belgica* te bergen. De *Belgica* zonk op 19 mei 1940 voor de kust van Noorwegen na een Duits bombardement, in 1990 ontdekten duikers van een lokale duikersclub het wrak van de *Belgica* op 22 m diepte.

De *New Belgica* vzw [3], met als grote bezieler dhr. Eddy Steur, wil van de bouw van deze replica een sociaal, groen en duurzaam project maken. De bouw staat onder de Hoge Bescherming van H.K.H. koningin Paola, erevoorzitter is Vlaams minister-president Kris Peeters. Bedoeling is dat de replica minstens één keer de legendarische expeditie van Adrien de Gerlache de Gommery zal overdoen – exclusief de overwintering – en later met een klimaatmissie de wereldzeeën kan bevaren.

Gezien de hedendaagse regelgeving, de technologische vooruitgang en de toegenomen eisen aan comfort op een schip, kan de *Belgica* niet exact nagebouwd worden. Een punt waarop geen toegevingen worden gedaan is de zeewaardigheid van het vaartuig, waardoor een aantal ingrepen noodzakelijk zijn die het authentieke karakter van de replica aantasten. Het project wordt daarom wellicht correcter omschreven als de bouw van een “lookalike”.

Voorafgaand aan deze masterproef werd reeds een haalbaarheidsstudie uitgevoerd voor de bouw van een zeegaande replica van de *Belgica* die vooral hydrostatica, stabiliteit en sterkte van de scheepsconstructie behandelde [4].

## II. Geschiedenis van de *Belgica*

### 1. *De Belgica van de Gerlache*

In 1884 wordt in Svelvik (Noorwegen) gestart met de bouw van de *Patria*, een driemaster bark uitgerust als walvisvaarder. De bouwtoezichter, Johan Christian Jakobsen, is op dat moment een vermaard ontwerper van poolschepen. Zoals gebruikelijk voorziet hij de *Patria* van een dubbele huidbeplanking in hardhout ter hoogte van de waterlijn en laat hij een gietijzeren platen op de boeg aanbrengen. Ook de vorm van het voorschip is speciaal gewelfd om het schip op het ijs te laten glijden, waarna het gewicht en de beweging van het schip het ijs doen breken. De *Patria* wordt in haar jonge jaren ingezet bij de walvisvangst en heeft daarvoor vier typerende, kleine walvisjagers aan boord, welke in davits aan boord zijn opgehangen. In de grote mast van de *Patria* bevindt zich het traditionele kraaiennest als observatiepost.



Figuur 2: De *Patria* (©VLIZ fotogalerij – *Belgica* Genootschap)

In 1896 kan Adrien de Gerlache de *Patria* kopen en herdoopt hij het schip tot de *Belgica*. Na een grondige opknopbeurt onder leiding van diezelfde Johan Christian Jakobsen, vaart het naar Antwerpen om van daaruit op poolexpeditie te vertrekken (zie hoofdstuk 2). Na haar legendarische overwintering wordt het schip gedurende enkel jaren opnieuw ingezet bij de walvis- en robbenvangst. Vanaf 1904 wordt de *Belgica* opnieuw ingezet voor wetenschappelijke expedities, ditmaal in de noordelijke zeeën, met onder andere expedities naar Groenland en Spitsbergen.

In 1919, tijdens de Eerste Wereldoorlog, werd het schip verkocht aan een Noors syndicaat en herdoopt tot *Isenfjord*. Het voormalige poolexpeditieschip doet vanaf dan dienst als vrachtschip voor kolenvervoer langs de Noorse kusten, twee jaar later wordt de *Isfjord* verkocht. Omdat de eisen voor het varen in ijswateren ondertussen verstrengd waren, werd het schip ontmanteld en omgebouwd tot drijvende raffinaderij voor leverolie van kabeljauw en visverwerkend bedrijf.

Het schip werd later terug *Belgica* gedoopt, maar ook ontmast en van alle machines ontdaan. Eind jaren '30 was er enkel nog een kleine motor aan boord die de lieren en het anker bediende, zelfstandig varen kon de *Belgica* niet meer.



Figuur 3: De *Belgica* als drijvend visverwerkend bedrijf  
(©VLIZ fotogalerij – *Belgica* Genootschap)

Na de invasie van Noorwegen door de Duitsers in 1940 wordt het zuidelijke deel van het land terug bevrijd door een verenigd leger van Britten, Noren, Finnen en Fransen. De Britten leggen beslag op de *Belgica* en exploiteren haar als munitiedepot voor het nabijgelegen front. In de lente van 1940 zinkt de *Belgica* na een Duits bombardement op Harstad. De *Belgica* wordt naar verluid niet rechtstreeks getroffen, maar slaat lek door de grote schokgolf van de explosie van nabijgelegen munitieschepen die wel getroffen werden.

## **2. De overwintering in Antarctica**

Wanneer Adrien de Gerlache de Gommery, op dat moment officier bij de Koninklijke Belgische Marine, in 1881 hoort dat de Zweed Adolf Nordenskjöld een expeditie naar Antarctica voorbereidt, biedt de hij onmiddellijk zijn diensten aan. De Gerlache krijgt echter nooit antwoord en besluit enige tijd later dan maar zelf een wetenschappelijke expeditie op poten te zetten. Hij legt contacten in vooraanstaande wetenschappelijke kringen en zoekt sponsors voor wat een expeditie moet worden die de, dan nog nagenoeg onbekende, Antarctische wateren in kaart moet brengen. De zoektocht naar geldschietters verloopt moeizaam: het ziet er al snel naar uit dat de bouw van een nieuw schip niet mogelijk zal zijn, de Gerlache moet dus op zoek naar een schip dat te koop staat. In 1896 kan de Gerlache, na een mislukt bod op een andere walvisvaarder, de *Patria* aankopen. Op 5 juni 1896 wordt de *Patria* omgedoopt tot *Belgica* en onmiddellijk hierna laat de Gerlache aanpassingen uitvoeren om de *Belgica* gereed te maken voor zijn reis naar de Zuidpool, deze werken zijn omvangrijk en zullen ongeveer een jaar duren.



Figuur 4: Baron Adrien de Gerlache de Gommery  
(©VLIZ fotogalerij – Belgica Genootschap)

Op 16 augustus 1897 vertrekt de *Belgica* vanuit de Antwerpse haven naar Antarctica met aan boord een team wetenschappers van diverse disciplines en onder andere ook Roald Amundsen, die later (in 1911) als eerste man de geografische Zuidpool zal bereiken. Begin februari 1898 bereikt de *Belgica* het Antarctisch schiereiland, verschillende zee-engtes en eilanden werden ontdekt en de wetenschappers gingen regelmatig van boord om metingen en onderzoek aan land uit te voeren. De hele streek werd in kaart gebracht en verschillende eilanden dragen vandaag nog namen van Vlaamse provincies, de zee-engte zelf staat nu bekend als de Gerlache-sstraat. In de hoop nieuw land te ontdekken vaart de *Belgica* steeds verder zuidwaarts langs het pakijs, op 6 maart werd het schip ingesloten en kon het geen kant meer uit. Later in maart wordt de stoomketel stilgelegd, de oplopende druk van het omringende pakijs riskeert het schip te vernielen.

Sommige bronnen stellen dat de Gerlache, in tegenstelling tot de overige bemanningsleden, weinig onder de indruk leek van de gang van zaken. De eerste overwintering zou in ieder geval van zeer grote wetenschappelijke waarde blijken, de Gerlache zei later: *“Dankzij onze overwintering beschikt de wetenschap ten minste over meteorologische waarnemingen die uur na uur werden gedaan, een heel jaar lang, dus gedurende een volledige cyclus van 365 dagen”*. Of de insluiting in het poolijs opzettelijk gebeurde of niet, feit is dat de expeditie er niet op voorbereid was en het mag een wonder genoemd worden dat de *Belgica* het jaar erna met een bijna voltallige bemanning terug in Antwerpen arriveerde.

Na de poolnacht, waarin geofysicus Emile Danco het leven liet, probeerde de bemanning het schip met alle mogelijke middelen weer vrij te krijgen. Met zagen en springladingen trachtte men een kanaal te maken, dat telkens snel weer dichtvroor. Op 15 februari 1899 konden ze dan toch ontsnappen aan een tweede overwintering. Bij hun aankomst in Antwerpen op 5 november van dat jaar is de expeditie meer dan 2 jaar weggeweest, hebben 2 bemanningsleden het leven gelaten en is er een schat aan wetenschappelijke informatie opgedaan.

### 3. Overgeleverde documenten

Toen de Gerlache de Patria kocht en het schip tot de *Belgica* omdoopte, werden hem slechts enkele plannen en schetsen overhandigd. In de tijd van de bouw van de Patria werden schepen gebouwd met een minimum aan plannen, niet in het minst door het vakmanschap van ontwerper en scheepsbouwer. Bij de voorbereiding van de *Belgica* voor de expeditie naar Antarctica werden reeds enkele zaken op papier gezet, maar echte plannen werden nooit mee gemaakt. Het is pas later, lang na de legendarische overwintering, dat de opmetingen in tekeningen werden omgezet.

In 1938 stelt de Gerlache samen met G. Verhofstadt, scheepsingenieur aan de Cockerill scheepswerf te Hoboken, op basis van de verzamelde gegevens verschillende plannen op van de *Belgica* ten tijde van de expeditie naar Antarctica. Het schip was op dat moment niet meer in het bezit van de Gerlache, vele zaken zijn dan ook uit herinneringen gereconstrueerd. De plannen zullen vrijwel klaar zijn wanneer de Gerlache overlijdt in 1934. De gereconstrueerde plannen werden van commentaar voorzien, waarbij onder andere de aanpassingen voor vertrek en de uitrusting aan boord voor de poolexpeditie worden besproken.

De hoofdafmetingen van de oorspronkelijke *Belgica* zijn samengevat in Tabel 1:

<b>Lengte</b>	34,6 m
<b>Breedte op de spanten</b>	7,158 m
<b>Breedte op de huid</b>	7,540 m
<b>Holte</b>	4,09 m
<b>Diepgang (ballast/maximaal)</b>	2,743 m / 3,962 m
<b>Displacement (ballast/maximaal)</b>	338 m <sup>3</sup> / 590 m <sup>3</sup>
<b>Netto laadvermogen</b>	172 ton

Tabel 1: Hoofdafmetingen *Belgica*

De plannen van de *Belgica*, gereconstrueerd door Verhofstadt, zijn opgenomen in Bijlage A.

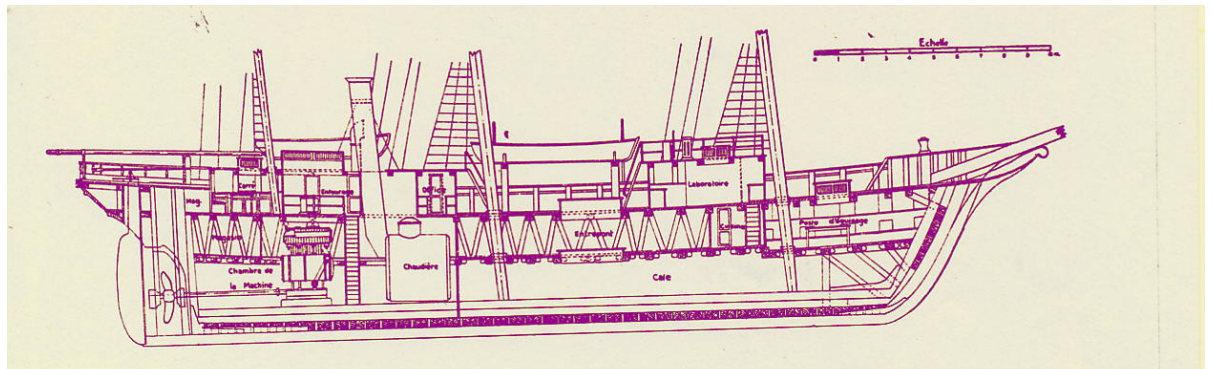
In voorbereiding van de bouw van de *New Belgica* werden de plannen van Verhofstadt gedigitaliseerd en licht aangepast waar nodig, zo zal de koker voor het optrekken van de schroef niet worden ingewerkt op de replica en zal de schroefinrichting onder de waterlijn ook niet exact worden nagebouwd. De plannen van de *New Belgica*, opgesteld door ir. Evert Lataire, en een rapport met de hydrostatische parameters van de replica zijn opgenomen in Bijlage B.

De tekst in dit deel is gebaseerd op diverse bronnen: [5]-[9]. In het bijzonder wordt het boek van de Gerlache vermeld waarin de resultaten van de expeditie zijn neergeschreven en waar de beschrijving van de oorspronkelijke *Belgica* (een hoofdstuk van de hand van Verhofstadt) deel van uitmaakt [5].

### III. Energievoorziening op de *New Belgica*

#### 4. Oorspronkelijke situatie

Nadat de *Belgica* (voorheen *Patria*) in 1896 door Adrien de Gerlache de Gommery werd aangekocht en omgedoopt, werd het schip in het Noorse havenstadje Sandefjord opgetuigd en uitgerust voor haar expeditie naar Antarctica. De kolengestookte stoomketel werd vervangen en achter de hoofdmast werd een laboratorium geïnstalleerd (zie Figuur 5). Verder werd de *Belgica* uitgerust met een tweebladige schroef die boven de waterlijn kon worden opgetrokken – dit om de weerstand tijdens het zeilen te verminderen, maar ook om te verhinderen dat ijsgang de schroef zou beschadigen. De driemaster bark was al van bij de bouw uitgerust met verstevigingen aan boeg en hek.



Figuur 5: Langse snede van de *Belgica* [5]

Met betrekking tot de energievoorziening was de *Belgica* een zeilschip pur sang: zij stond letterlijk ingeschreven als “Trois-mats barque à machine auxiliaire”. De voortstuwing gebeurde voornamelijk met zeilen, deze driemastbark bezat – vol opgetuigd – bijna 600 m<sup>2</sup> aan zeiloppervlakte. Verder was er een kolengestookte stoomketel aan boord die een stoommachine aandreef met een nettovermogen van van 26 kW. Deze stond in voor propulsie wanneer zeilen niet mogelijk was en voorzag schip en bemanning in haar warmtebehoefte tijdens de expeditie. Buiten een stoomaangedreven lier op het dek werden alle werktuigen met mankracht aangedreven, van enige elektriciteit aan boord was geen sprake.

## **5. Energiebehoefte op schepen**

De energiebehoefte op schepen kan opgedeeld worden in verschillende categoriën, traditioneel maakt men onderscheid tussen:

- Propulsion load: de energie die nodig is voor de voortstuwing van het schip.
- Hotel load: de energie die nodig is voor alle andere, veelal elektrische, verbruikers. Deze categorie kan verder opgedeeld worden in apparatuur die noodzakelijk is voor de goede werking van het schip of toestellen die het welzijn en comfort van de bemanning moeten verzekeren.

Eens de behoeften gekend zijn, kunnen deze gecatalogeerd worden met als parameters:

- grootte;
- moment en duur;
- karakter (continu of intermitterend).

Energie kan onder verscheidene gedaanten voorkomen. Voor distributie van energie voor de hotel load is elektrische energie het meest aangewezen, deze kan dan door het toestel in kwestie naar de benodigde vorm geconverteerd worden. Sommige apparaten met een uitgesproken zware of continue belasting (boegschroef, lieren, stuurinrichting) worden meestal hydraulisch uitgevoerd, ook hier wordt de benodigde energie eerst elektrisch toegeleverd. Daarnaast is er aan boord van schepen ook vraag en aanbod van thermische energie. Warmte van machines die anders niet benut wordt, kan via warmtewisselaars onttrokken worden of via een (organische) Rankine cyclus in mechanische of elektrische energie worden omgezet. Een beperkte inschakelduur van de grootste warmteproducenten (propulsiemotor) op zeilschepen maakt dat de laatstgenoemde optie meestal niet economisch haalbaar wordt geacht.

Wanneer de energiebehoefte afhankelijk van de omstandigheden een karakteristiek gedrag vertoont, kan men bedrijfsmodi omschrijven. Op schepen is de energiebehoefte tijdens manoeuvreren bijvoorbeeld heel anders dan noden wanneer het schip afgemeerd is en de bemanning enkel een beperkte bemanning aanwezig is. Door het oplijsten van het veronderstelde energieverbruik in verschillende modi, kan tot een optimalisatie van de energievoorziening worden overgegaan. In deel VI wordt dieper op deze materie ingegaan.



## **6. Energievoorziening op tall ships**

Vierkant (en klassiek) getuigde, zeegaande zeilschepen worden vandaag de dag ook wel aangeduid met de term “tall ships”. Strikt gezien behoort de *New Belgica* – door zijn vrij beperkte lengte – binnen de tall ships tot klasse B, maar de meeste vierkantgetuigde zeilschepen (en barken in het bijzonder) vindt men terug in klasse A [10]. Hedendaagse tall ships zijn soms opgeknapt erfgoed, maar doorgaans zijn het replica’s, lookalikes of nieuw ontworpen schepen. In een eerste fase werd informatie ingewonnen over de energievoorziening aan boord van bestaande tall ships, meer bepaald over de lay-out van het systeem en de specificaties van de samenstellende onderdelen.

Een overzicht van deze informatie, die later zal gebruikt worden bij een schatting van de hotel load is opgenomen in Bijlage C. De energiebehoefte op tall ships wordt niet zeer afhankelijk van de zeilvoering verondersteld, waardoor ook gegevens van andere types vierkantgetuigde zeilschepen (brik, barkentijn en volschip) bruikbaar zijn. Dimensies, deplacement, dienstsnelheid en aantal opvarenden worden geacht de belangrijkste invloeden te zijn op de energievoorziening aan boord.

Zoals reeds eerder vermeld, en niet alleen van toepassing op tall ships, maakt men klassiek een opdeling tussen de generatie van energie benodigd voor propulsie enerzijds (propulsion load) en de voorziening in alle andere behoeften anderzijds (hotel load). Er is daarbij geen fysieke interactie tussen beide systemen, een typische configuratie qua energievoorziening is de volgende:

- dieselmotor(-en) voor propulsie;
- aggregaten maken elektriciteit voor de hotel load;
- batterijbanken voorzien een buffer van energie.

Alternatieve energievoorzieningen op tall ships, uitbreiding met of implementatie van nieuwe technologieën zijn uiterst zeldzaam, niet in het minst omdat bijvoorbeeld de propulsiemotor per definitie al als hulpvoortstuwing te boek staat. Een uitzondering is de *Amerigo Vespucci*: een Italiaans driemast volschip dat uitgerust is met een dieselelektrische voortstuwing.

## 7. Regelgeving

### 7.1.SPS

De keuze inzake klassebureau en klasse werd reeds in het verleden gemaakt: Bureau Veritas zal als classificatiebureau optreden en de *New Belgica* zal gebouwd worden als “Special Purpose Ship” (SPS). Dit laatste betekent een maximale vrijheid in ontwerp en constructie, maar ook dat er ten hoogste 12 passagiers aan boord mogen verblijven. In praktijk zullen er wel meer dan 12 opvarenden (alle personen aan boord, uitgezonderd vaste bemanning) aan boord kunnen zijn – hiervoor maakt men gebruik van het statuut “special personnel”, wat inhoudt dat men niet als passagier beschouwd wordt indien men aan boord is met een speciaal doel (waaronder bijvoorbeeld onderzoek, zeil- en navigatietrainingen). Schepen met meer dan 60 personen aan boord, beschouwt men wel opnieuw als passagiersschip.

De meest recente regelgeving aangaande Special Purpose Ships werd in 2008 [11] aangenomen en is een grondige herziening van de tot dan geldende resolutie die stamt uit 1983 [12]. In de huidige resolutie worden een aantal specifieke regels gesteld, maar wordt vooral verwezen naar de geldende SOLAS-reglementering [13]. De SPS-code werd ontwikkeld voor schepen met een brutolaadvermogen van ten minste 500 ton, maar een classificatiebureau kan toelaten dat ook kleinere schepen onder deze notatie geklasseerd worden. Door het beperkt aantal passagiers mag in een aantal gevallen worden afgeweken van de vereisten voor passagiersschepen en de regelgeving voor vrachtschepen worden gevolgd, welke op vele domeinen minder streng is. Naar energievoorziening toe zijn vooral de eisen in noodsituaties sterk gereduceerd.

De vrijheden horend bij de gekozen klasse hebben tot gevolg dat er weinig regels zijn inzake ontwerp, zo ook qua energievoorziening. Als algemene regel wordt gesteld dat men de certificerende instantie met voldoende bewijsmateriaal moet overtuigen van de genomen beslissingen. Gewoonlijk maakt men daarbij gebruik van regelgeving voor andere klassen en worden afwijkingen op deze regels geval per geval bekeken. De klasse die voor de *New Belgica* best als leidraad kan dienen is de “Charter Yacht”-klasse, de regels voor deze klasse [14] zijn op vlak van energievoorziening vrij compleet, maar zeer algemeen en minder bestemd voor klassieke, houten schepen. Voor de meer bijzondere aspecten aan zeegaande, houten zeilschepen werden de voorschriften van Register Holland<sup>2</sup> [15] (ter vergelijking) geraadpleegd.

Verder bestaan er Europese normen die eisen stelt aan de kwaliteit van (de componenten van) de installatie voor energievoorziening op schepen. Een voorbeeld hiervan is “Richtlijn 2008/67/EG” inzake uitrusting van zeeschepen, welke de (beproeving-)normen voor diverse scheepsuitrusting omschrijft. Deze richtlijn is per koninklijk besluit [16] opgenomen in de Belgische nationale wetgeving.

Verder dient de *New Belgica* aan alle andere internationale wetgeving te voldoen (MARPOL, COLREG enz.) en kan door het gekozen uitbatingprofiel nog extra regelgeving van toepassing worden, bijvoorbeeld pool- of ijsklasse (zie volgend hoofdstuk).

---

<sup>2</sup> Register Holland is een Nederlands classificatiebureau dat specifieke voorschriften heeft voor zeegaande zeilschepen (Witte Rules), het is evenwel niet erkend door de Belgische Scheepvaartinspectie.

Als zeer algemene basis voor het ontwerp dient dus de SOLAS-reglementering, de generale gedachte aangaande energievoorziening hierin is de volgende:

- In normale en te verwachten gebruikstoestanden moet de energievoorziening kunnen gebeuren zonder overschakeling op noodvoorzieningen.
- Apparatuur die instaat voor veiligheid moet bij begeven van de hoofdvoorziening, door een veelheid aan oorzaken, kunnen werken op een noodvoorziening.
- Het risico van gevaren ten overstaan van passagier, bemanning en schip moet minimaal zijn.

Concreet moeten schepen dus voorzien worden van 2 afzonderlijke hoofdvoorzieningen (meestal aggregaten), welke – bij defect van de andere – een zodanig vermogen moeten kunnen leveren dat normale propulsie en veiligheid gegarandeerd zijn. Eventueel kunnen in deze situatie wel geminimaliseerde comfortcondities aanvaard worden.

Grote delen van de regelgeving van Bureau Veritas zijn online beschikbaar [17], deze regels dienen samen met de SPS-code als basis bij het ontwerp van de *New Belgica*.

## 7.2.Poolwateren

De wens om met de *New Belgica* de reis van haar voorganger – of op zijn minst de route te volgen – leidt tot hogere eisen aan het ontwerp. Het traject in Antarctica zou wel enkel in zeer gunstige weersomstandigheden aangevat worden: 's zomers en in een opportuun tijdsvenster. Heden worden er nu en dan cruises georganiseerd met houten of stalen tall ships in het zuidpoolgebied, er bestaat dan ook reeds regelgeving die op deze wens inspeelt.

De *New Belgica* is noch een ijsbreker, noch een commercieel schip dat door ijs moet kunnen varen, de "ICE CLASS" is hier om deze reden niet van toepassing. De laagste berekenbare vorm van deze bijkomende klassenotatie (ICE CLASS IC) is voorzien voor schepen die kunnen navigeren in lichte ijscondities (concreet tot 0,4 m dikte) en daarbij eventueel assistentie van ijsbrekers<sup>3</sup> kunnen krijgen. Deze notatie stelt zware structurele eisen aan het (stalen) schip en legt bijvoorbeeld een minimum propulsievermogen van 1000 kW op. Ook ICE CLASS ID – die geen specifieke regels stelt, maar in de lijn van de zwaardere notaties door Bureau Veritas als gevalstudie wordt bekeken – is geen realistische notatie voor de *New Belgica*.

Naast deze klassenotatie, bestaan er nog 2 die betrekking hebben tot het varen in pool- of ijs wateren: "COLD" en "POLAR CLASS". De eerste is voorbehouden voor schepen die in koude weersomstandigheden opereren en hiervoor van de-icingapparatuur voorzien zijn, wat op de *New Belgica* niet wenselijk is (zie 20.2). De POLAR CLASS is van toepassing op schepen die in poolwateren navigeren, deze regelgeving maakt onderscheid tussen de verblijfperiode en de staat van het ijs dat in de poolwateren aangetroffen wordt:

- POLAR CLASS 1 for year-round operations in all polar waters;
- POLAR CLASS 2 for year-round operations in moderate multi-year ice conditions;
- POLAR CLASS 3 for year-round operations in second-year ice which may include multi-year ice conditions;

---

<sup>3</sup> Ijsbrekers zelf vallen niet onder ICE CLASS.

- POLAR CLASS 4 for year-round operations in thick first-year ice which may include old ice inclusions;
- POLAR CLASS 5 for year-round operations in medium first-year ice which may include old ice inclusions;
- POLAR CLASS 6 for summer/autumn operations in medium first-year ice which may include old ice inclusions;
- POLAR CLASS 7 for summer/autumn operations in thin first-year ice which may include old ice inclusions.

Hoewel hierin tot op heden nog geen beslissing genomen werd, wordt verondersteld dat de *New Belgica* onder POLAR CLASS 6 of 7 genoteerd zal worden om de (eenmalige) poolreis mogelijk te maken. De regelgeving voor deze klassenotatie is opgenomen in [18], maar kon wegens tijdsgebrek niet in deze masterproef betrokken worden.

## **8. Energiebehoefte New Belgica**

### **8.1. Propulsion load**

Bij de bepaling van het benodigde propulsievermogen van de *New Belgica* worden een aantal stappen doorlopen. Allereerst wordt een dienstsnelheid vooropgesteld, welke men moet kunnen halen bij het varen op motor. Daarna kan de vaartweerstand bij deze dienstsnelheid bepaald worden. Tenslotte worden de schroefkarakteristieken en enkele marges in rekening gebracht, waarna het te installeren propulsievermogen gekend is.

Zoals in vele transporttoepassingen is de dienstsnelheid van zeer grote invloed op het vereiste propulsievermogen. De vaartweerstand daarentegen is een parameter die nagenoeg vastligt aangezien het in dit geval een replica – of lookalike – betreft: rompvorm en aanhangsels zullen grotendeels volgens het oorspronkelijke ontwerp nagebouwd worden en ook de huidbekleding zal uit hout bestaan. Een andere factor die het benodigde propulsievermogen wel nog kan beïnvloeden is de schroef, en meer bepaald de uitvoering ervan: een vaste schroef (FPP: “Fixed Pitch Propeller”) of een schroef met verstelbare spoed (CPP: “Controllable Pitch Propeller”).

#### **8.1.1. Romp- en dienstsnelheid**

Een schip bereikt zijn rompsnelheid als de golflengte van het golfpatroon rond de romp overeenstemt met de lengte van het schip op de waterlijn (LWL). Deze toestand komt overeen met een Froudegetal van 0,4 – dit betekent dat de rompsnelheid van de *Belgica* ongeveer 14 kn bedraagt. Varen aan snelheden hoger dan de rompsnelheid vereist een exuberant hoog vermogen, zelfs bij varen onder zeil – en voldoende wind uit de juiste richting – bereikt men zelden de rompsnelheid van een schip. Bij tragere vaart dan rompsnelheid wordt het benodigde propulsievermogen sterk beïnvloed door de vaarsnelheid, meer bepaald tot een macht 2,5 à 3.

Bij het ontwerp van schepen maakt men een economische afweging – installatiekosten van de propulsiemachine en brandstofverbruik tegenover de verkregen reistijden – en neemt men een (maximale) dienstsnelheid aan die lager is dan de rompsnelheid. Deze dienstsnelheid moet op motor gehaald kunnen worden en ligt meestal rond een Froudegetal van 0,3 (zie Bijlage C), wat voor de *New Belgica* een dienstsnelheid van 8,5 kn betekent. In praktijk varen schepen vrijwel altijd op een meer economische snelheid waarbij het brandstofverbruik het gunstigst is. Deze kruissnelheid ligt voor de meeste tall ships op 7 kn.

#### **8.1.2. Vaartweerstand**

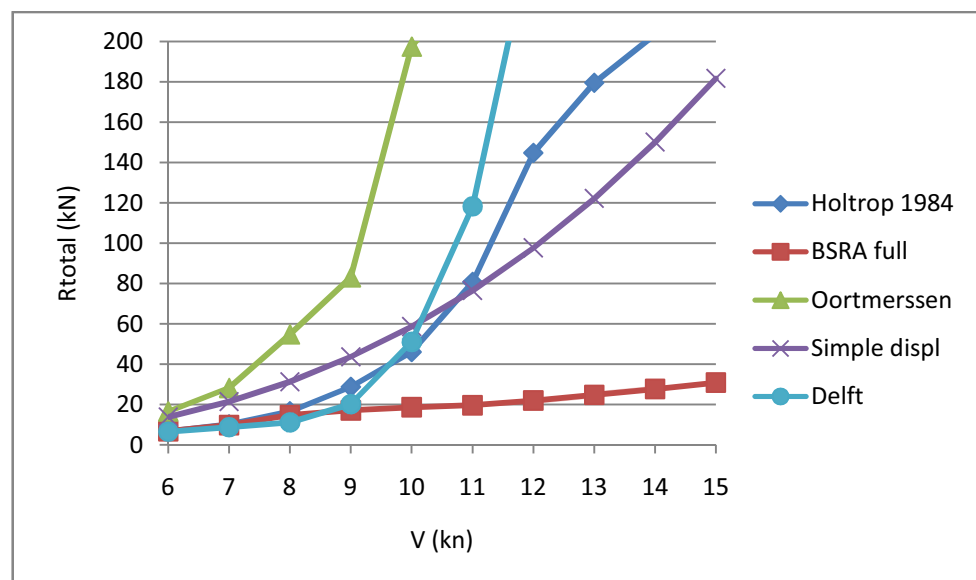
De vaartweerstand ( $R_T$ ) en het sleepvermogen ( $P_E$ ) werden voor verscheidene snelheden berekend met het computerprogramma NavCad [19]. Na het ingeven van de dimensies van de romp, stelt deze software een lijst op van geschikte methodes om de scheepsweerstand mee te bepalen. Daarbij wordt aangegeven of de ingevoerde gegevens binnen de grenzen van het gekozen berekeningsmodel liggen (zie Tabel 2).

	Method ranking	Speed	Hull	Details	Notes
Simple displ/semi	Good	OK	OK	OK	Average hull prediction
BSRA Full	Good	Check	OK	OK	Use for design or feasibility
Oortmerssen	Good	OK	Check	OK	Widely used
Delft	Good	OK	Check	OK	For general use
Holtrop 1984	Poor	Check	Fail	OK	Unreliable for these parameters

Tabel 2: Voorgestelde voorspellingsmethodes NavCad [17]

De door NavCad aangeleverde informatie over deze voorspellingsmethodes is en een vergelijking van de geometrische parameters van de *New Belgica* ten opzichte van de gestelde grenzen, is opgenomen in Bijlage D.

Omdat geen enkele methode zonder meer geschikt is om de scheepsweerstand van de *Belgica* in te schatten, werden de weerstandsberekening met elke methode uitgevoerd en nadien vergeleken. Het verloop van de scheepsweerstand in functie van de vaartsnelheid is weergegeven in Figuur 6:



Figuur 6: Vaartweerstand *New Belgica*

Hieruit blijkt dat:

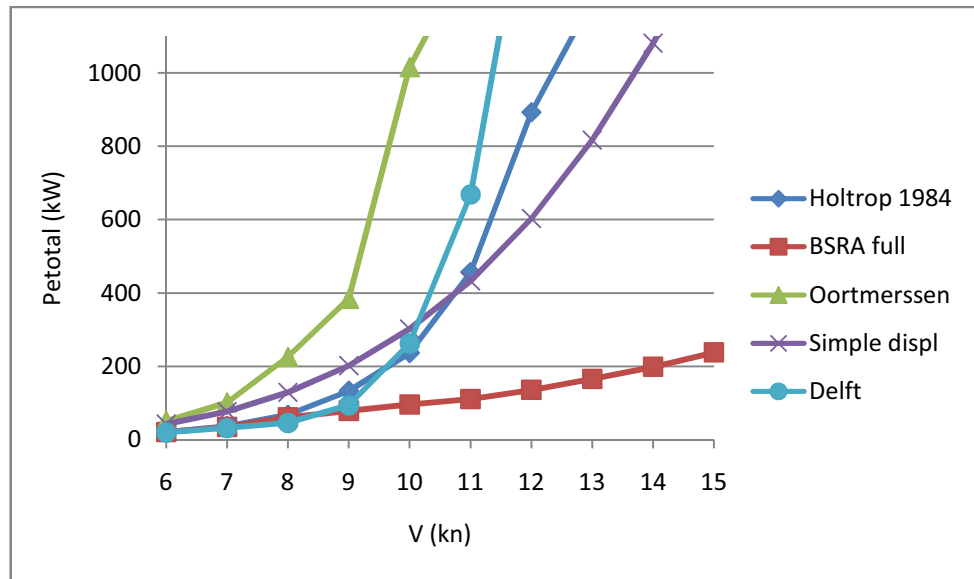
- de methode van Oortmerssen systematisch een veelvoud van de weerstand van de andere methodes aangeeft;
- de BSRA-full-methode een onrealistisch vlakke curve oplevert;
- de weerstand bij de Simple displ/semi-methode volgens een eenvoudige tweedegraadskromme verloopt;
- Delft en Holtrop 1984 tot snelheden van 10 kn relatief gelijke weerstandswaarden leveren.

Delft is een voorspellingsmethode gebaseerd op rompvormen van (kleine) zeilschepen die reeds in 1981 ontwikkeld werd. In de loop der tijd werd deze methode steeds bijgewerkt met gegevens van de op dat moment gebruikelijke rompvormen, waardoor er verschillende versies van deze methode

bestaan. Alle versies leveren nagenoeg gelijke weerstandswaarden op, wat hier wordt aangeduid als “Delft” is in feite “Delft 1”, de oudste versie die gebaseerd is op de meest klassieke rompvormen.

NavCad waarschuwt voor mogelijke onbetrouwbaarheden bij het gebruik van Holtrop 1984: de lambda-factor<sup>4</sup> bedraagt 1,04 en ligt hiermee boven het betrouwbaarheidsmaximum dat 0,8 bedraagt. Gezien de overeenkomst tussen Holtrop 1984 en Delft, wordt ervan uitgegaan dat de voorspelde waarden bruikbaar zijn.

Het sleepvermogen wordt bekomen door vermenigvuldiging van de vaartweerstand met overeenkomstige vaarsnelheid, zie Figuur 7:



Figuur 7: Sleepvermogen New Belgica

### 8.1.3. Schroefparameters

Het vereiste machinevermogen bij ontwerpvoorwaarden is, naast de scheepsweerstand bij dienstsnelheid, ook afhankelijk van schroefkarakteristieken en het totaalrendement van de aandrijflijn. De oorspronkelijke *Belgica* was uitgerust met een tweebladige schroef (diameter 2,2 m), bij hedendaagse tall ships wordt meestal geopteerd voor een drie- of vierbladige versie.

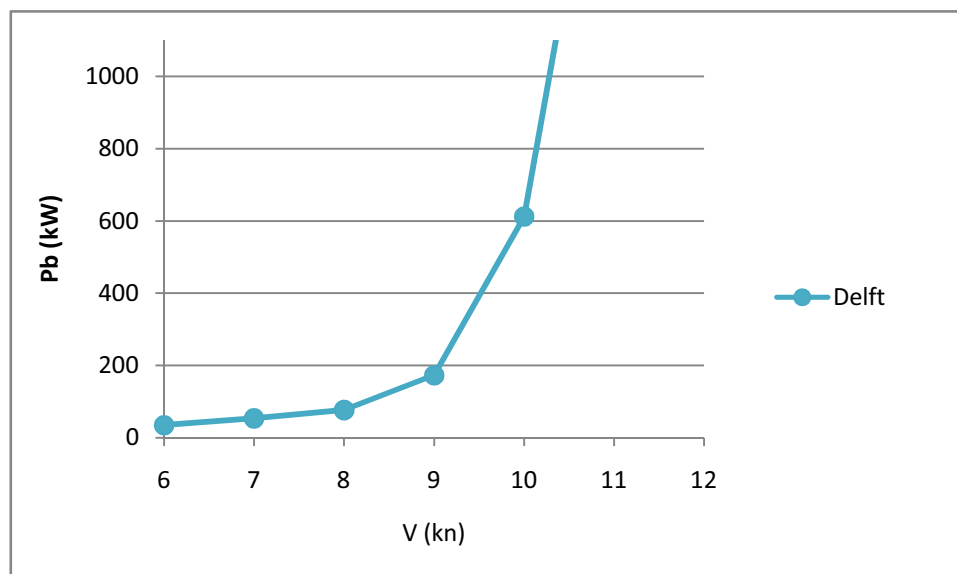
Ondanks het feit dat de keuze van de schroefuitvoering (FPP of CPP) dient te gebeuren vanuit de karakteristieken van de aandrijflijn (zie hoofdstuk 9.2), wordt voor een eerste schatting van het propulsievermogen uitgegaan van een snellopende dieselmotor en een schroef met vaste spoed. Gezien de beschikbaarheid van gegevens – ook in verband met de gewenste schroefregeneratie (zie deel V) – wordt voorlopig geopteerd voor een schroef type Wageningen B-Series, meer bepaald één uit de reeks B4-70.

<sup>4</sup> De lambda-factor werd door Hydrocomp zelf ontwikkeld uit ervaring en testen, wanneer deze factor binnen bepaalde grenzen ligt is de kans op foute voorspelling zeer gering. Meer informatie in Bijlage D.

Het vastleggen van de geometrische eigenschappen van de schroef is een iteratief proces waarbij de prestaties geoptimaliseerd worden, hierbij kunnen ook de eisen aan de propulsiemachine wijzigen. Uitgaande van een snellopende dieselmotor die vol vermogen ontwikkelt bij een toerental van 2000 rpm en een reductie 4:1, kwam een optimalisatie van de aandrijving tot volgende een schroef met volgende parameters:

- Diameter (D): 1,4 m
- Spoed-diameterverhouding (P/D): 1

Het verloop van het propulsievermogen voor den *New Belgica* met een geoptimaliseerde schroef is voorgesteld in Figuur 8, de vaartweerstand werd hierbij aangenomen als deze voorspeld door de Delft- methode.



Figuur 8: Propulsievermogen *New Belgica*

Voor een dienstsnelheid van 8,5 kn is met deze schroef een propulsievermogen nodig van ongeveer 125 kW. Toch wordt voorgesteld een propulsievermogen van ongeveer 500 kW in de *New Belgica* voorop te stellen, dit om 3 redenen:

1. In de gedane berekening werd het effect van zeegang, tegenstroom en -wind niet opgenomen, de dienstsnelheid moet evenwel ook in deze situaties gehaald kunnen worden. Hiervoor kan men een fictieve dienstsnelheid 1 à 2 kn hoger kiezen en het vereiste vermogen voor deze snelheid installeren.
2. Aangezien men met de *New Belgica* minstens één maal de reis van de Gerlache naar Antarctica wil overdoen, moet het schip voorzien zijn om in pool- en/of ijswateren te varen. Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 7.2) kunnen hierdoor de eisen aan schroef, aandrijflijn en propulsiemachine zeer sterk toenemen. Heden is evenwel nog geen bijkomende klassenotatie voor de *New Belgica* gekozen en zijn de gevolgen hiervan onduidelijk.



3. Register Holland stelt in zijn Witte Rules [15] een minimumvermogen aan de hulpvoortstuwning van zeegaande zeilschepen:

$$P_{\min} = 3,31(O_{\text{tuig}} + 0,1D) \quad [\text{kW}]$$

met  $O_{\text{tuig}}$  de totale tuigageoppervlakte in  $\text{m}^2$  en  $D$  het maximale displacement in tonnen van 1000 kg. Voor de *New Belgica* komt dit neer op een minimaal geïnstalleerd propulsievermogen van 460 kW.

Alle data en grafieken omtrent weerstand, sleep- en propulsievermogen zijn, wat betreft de voorspellingsmethode Delft 1, opgenomen in Bijlage E.

## 8.2. Hotel load

### 8.2.1. Gelijkaardige schepen

Om een beeld te krijgen van de grootte-orde van de hotel load op de *New Belgica*, werden zoveel mogelijk details verzameld van de energievoorziening op gelijkaardige schepen. Daar waar de propulsion load vooral afhankelijk is van rompvorm, dienstsnelheid en schroefkeuze, verhoudt de hotel load zich meer tot het aantal opvarenden, het gewenste comfort en de voorziene uitrusting. De verzamelde gegevens van gelijkaardige tall ship is ondergebracht in Bijlage C.

Op de *New Belgica* wordt accommodatie voorzien voor 28 opvarenden, het is dus mee van de kleinere schepen binnen zijn klasse. Gezien het duurzame aspect en de geplande klimaatmissie van de replica, wil men het energieverbruik aan boord zoveel mogelijk beperken en/of rationaliseren<sup>5</sup>. Deze houding is niet vanzelfsprekend door de principiële eis tot betrouwbaarheid en redundantie op zeegaande (zeil-)schepen, maar laat toe te stellen dat de energievoorziening op de *New Belgica* in vergelijking met gelijkaardige schepen aan de zuinige kant zal liggen.

Aangezien op de meeste zeilschepen van deze omvang de energievoorziening voor de hotel load door middel van aggregaten (dieselmotoren die rechtstreeks aan een generator zijn gekoppeld) gebeurt, wordt het geïnstalleerde generatorvermogen als maatstaf voor de hotel load gebruikt. Volgens deze werkwijze zou de hotel load op de *New Belgica* kunnen gedragen worden met een totaal generatorvermogen van ongeveer 70 kVA. In de gevonden data zitten geen duidelijke trends met betrekking tot het aantal opvarenden of de dimensies van de schepen, de vooropgestelde waarde voor de *New Belgica* is dan ook een ruwe schatting.

De meeste tall ships zijn voorzien van 2 generatoren (zie hoofdstuk 7.1), meestal van gelijk of licht verschillend vermogen. Een verschillend vermogen wordt geacht te zijn geplaatst om één generator in vollast te laten werken gedurende een groot deel van de tijd, het bijspringen of overnemen door de tweede generator vindt enkel plaats in omstandigheden wanneer grote vermogen vereist zijn (manoeuvreren, koken enz.). Het plaatsen van twee gelijke generatoren is interessant naar eenvoud van de totale installatie en stockage van wisselstukken toe.

---

<sup>5</sup> Dit kan zowel door te verhinderen dat grote verbruikers (o.a. boegschroef, lieren, kook- en wasfaciliteiten) tegelijkertijd gebruikt kunnen worden, maar ook door het comfortniveau te verlagen (bescheiden verwarmen en koeltemperaturen, douchetijden enz.).

Terzijde wordt reeds opgemerkt dat het displacement van de *Belgica* groot is tegenover de hoofdafmetingen en in vergelijking met gelijkaardige schepen (grote blokcoëfficiënt, zie Bijlage C).

### 8.2.2. Inventarisatie verbruikers

Een andere werkwijze om de hotel load van de *New Belgica* te bepalen bestaat erin alle verbruikers aan boord in kaart te brengen. Wel is het benodigde generatorvermogen geen algebraïsche som van alle afzonderlijke vermogens, sterker nog: zoals reeds aangehaald is het voor deze replica zelfs een optie om het gelijktijdig gebruik van bepaalde toepassingen te verhinderen.

Bij het opstellen van vermogensbalansen in de civiele bouw [20] wordt een gelijkaardige werkwijze gevolgd, men gebruikt dan correctiefactoren op de individuele vermogens om daarna wel een algebraïsche som te kunnen toepassen. Deze correctiefactoren zijn:

- Gebruiksfactor ( $K_U$ ): geeft aan in welke mate een toestel zijn nominale vermogen verbruikt. Veelvuldige werking bij deellast of een overdimensionering van de energietoevoer ten behoeve van inschakelverschijnselen kunnen oorzaak zijn dat deze factor kleiner is dan de eenheid. De gebruiksfactor wordt vooral bepaald door de karakteristieken van het verbruikend toestel.
- Gelijktijdigheidfactor ( $K_S$ ): houdt rekening met het feit dat nooit alle toestellen gezamenlijk in werking zijn. Het bepalen van deze factor vergt een grondige kennis van de installatie en een ervaring in de uitbatingsvoorwaarden. Deze factor neemt steeds af naarmate het aantal elektrische kringen toeneemt.

Het is vooral deze laatste factor die het opstellen van een bruikbare vermogensbalans voor de *New Belgica* nagenoeg onmogelijk maakt voor mensen die onervaren zijn in dit vak. Informatie over de bepaling van de gelijktijdigheidfactor bij de dimensionering van scheepsboordnetten werd niet gevonden.

Na inventarisatie en toepassing van de genoemde correctiefactoren, kan de generatieplant dan gedimensioneerd worden op het maximale vermogen dat in een bepaald situatie gevraagd kan worden. Een eventuele optimalisatie van meerdere aggregaten kan overwogen worden wanneer de gemiddelde vraag naar energie sterk lager is dan het maximum dat moet kunnen geleverd worden.

Een typische opdeling voor de inventarisatie van de hotel load op grote vrachtschepen is de volgende:

1. Machinery equipment
2. Deck equipment
3. Air conditioning, ventilation & refrigeration (summer vs. winter)
4. Galley equipment
5. Pantry equipment
6. Laundry equipment
7. Other room's equipment
8. Electrical equipment (summer vs. winter)

Bij de inventarisatie van de verbruikers van de *New Belgica* zal een gelijkaardige indeling aangehouden worden (zie Bijlage H), deze oplisting zou ook als basis gaan dienen voor het lastenboek. Van enkele grote en karakteristieke verbruikers worden de specificaties in detail besproken in deel VI.

Er moet opgemerkt worden dat voor beide werkwijzen (vergelijking van de hotel load met bestaande tall ships en inventarisatie van de gewenste verbruikers) voorlopig is uitgegaan van een traditioneel gescheiden energievoorziening van propulsion en hotel load. Zoals in volgende hoofdstukken zal blijken, is het in moderne configuraties mogelijk om alle energie via een centrale bus te verdelen. Hierbij ontstaan nieuwe opportuniteiten om generatie van elektriciteit en de behoefte qua hotel load op elkaar af te stemmen.

## IV. Configuraties & componenten

De laatste jaren is het duurzame aspect van een product steeds belangrijker geworden, zo ook voor aandrijvingen in transporttoepassingen. Hierdoor zijn opvallende trends waarneembaar in alle industrieën waarbij men ernaar streeft de duurzaamheid van een product op te drijven door de negatieve weerslag op mens en milieu te reduceren.

Algemeen zijn brandstofverbruik en emissie de karakteriserende parameters voor onduurzaamheid in transporttoepassingen. Ook de reductie van trillingen en geluid worden regelmatig in dezelfde aanpak verwerkt, al zijn dit meer comfortparameters.

Efficiënter brandstofverbruik is typisch een kostgedreven aandachtspunt, emissienormen worden veelal door regulerende organen opgelegd. Traditioneel wordt in de transportsector veelvuldig gebruik gemaakt van interne verbrandingsmotoren, voorgenoemde parameters zijn dan ook typische zwaktes van deze systemen. Door ontwikkelingen op diverse terreinen dienen zich heden verscheidene alternatieven aan om deze pijnpunten te omzeilen.

Aangezien er bepaalde randvoorwaarden gelden (onder andere een minimum dienstsnelheid), betekent een verlaging van brandstofverbruik en emissie in feite een wens tot efficiënter brandstofverbruik. Voor een schip kan dit bekomen worden door ingrepen op verschillende terreinen:

- vaartweerstand;
- schroefrendement;
- efficiëntie van de aandrijflijn.

De vaartweerstand is voor de *New Belgica* feitelijk een gegeven: de rompvorm kan niet gewijzigd worden daar het hier een replica/lookalike betreft. Men kan een optimalisatie overwegen van de vorm van de carene, maar daar is in dit geval niet voor gekozen. Ook het rompmateriaal – en de eventuele behandeling ervan tegen aangroei – is een gegeven, al zou dit de vaartweerstand maar beperkt kunnen reduceren.

Het schroefrendement is reeds in grootteorde gekend: de optrekbare, tweebladige schroef van het origineel wordt vervangen door een hedendaagse schroef die economisch en technisch best past. Een voorstel voor een schroef werd reeds besproken in hoofdstuk 8.1.3, enkel de uitvoering (vaste of verstelbare spoed) is nog een vrije parameter.

De brandstofefficiëntie van de propulsie-installatie is – zoals reeds aangehaald – de laatste jaren onderwerp van onderzoek, waarbij men door aanpassingen aan de traditionele dieselmotor of introductie van nieuwe componenten en configuraties het (diesel-) verbruik probeert te minimaliseren.

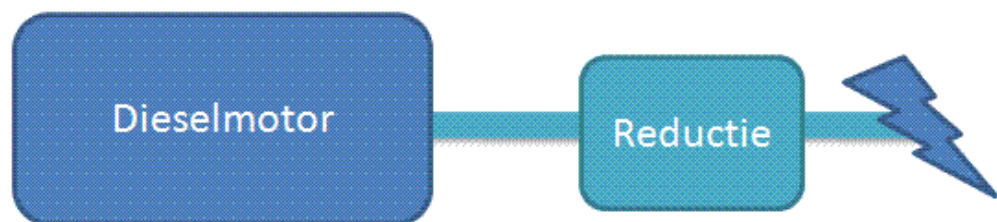
In hoofdstuk 9 wordt de traditionele oplossing qua energievoorziening voor de *New Belgica* geschetst, inclusief de daarbij horende complicaties inzake duurzaamheid. In hoofdstuk 10 komen hedendaagse alternatieven aan bod.

## 9. Conventionele aandrijvingen (mechanical drives)

### 9.1. Eigenschappen en beperkingen

Schepen van deze omvang worden traditioneel uitgerust met een snellopende dieselmotor die via een reductie aan de schroef gekoppeld wordt, zie Figuur 9. Voor elektriciteitsproductie worden afzonderlijke motoren geïnstalleerd waarvan de uitgaande as rechtstreeks op een generator gekoppeld werd, zogenaamde aggregaten of gensets. Op grotere schepen zijn er meerdere dieselaggregaten die men afhankelijk van de elektriciteitsbehoefte kan starten of stilleggen. Verder wordt deze installatie aangevuld met verscheidene batterijbanken, welke van elkaar kunnen verschillen in omvang en doel. Zo onderscheidt men startbatterijen voor het starten van de dieselmotoren en servicebatterijen die het gelijkspanningsboordnet voeden en gebruikt worden om energie te stockeren (om te vermijden dat men continu gensets moet op- of afschakelen).

Typisch voor deze systemen is een fysieke opdeling in productie van energie voor propulsie en deze voor alle andere (elektrische) verbruikers. De distributie van elektrische energie geschiedt over het algemeen via verschillende boordnetten: meestal een gelijkspanningsboordnet op lage spanning (klassiek 12 of 24 V, soms ook 48 V) voor bepaalde (basis-)boordapparatuur en een wisselspanningsboordnet op hogere spanning (al dan niet meerfasig) voor alle andere verbruikers.



Figuur 9: Schema traditionele aandrijving

Het is vooral op vlak van energievoorziening voor propulsiedoeleinden dat er heden valabele alternatieven op de markt beschikbaar zijn. In de scheepvaart zijn gelijkaardige trends als bij automobieltoepassingen merkbaar, het is een fenomeen dat zich in de hele op-dieselmotoren-gebaseerde transportsector voordoet. In wat volgt zullen de typische pijnpunten van een klassieke mechanische aandrijving aangehaald worden, waaruit ook de mogelijke drijfveren om over te stappen op elektrische aandrijvingen zullen blijken.

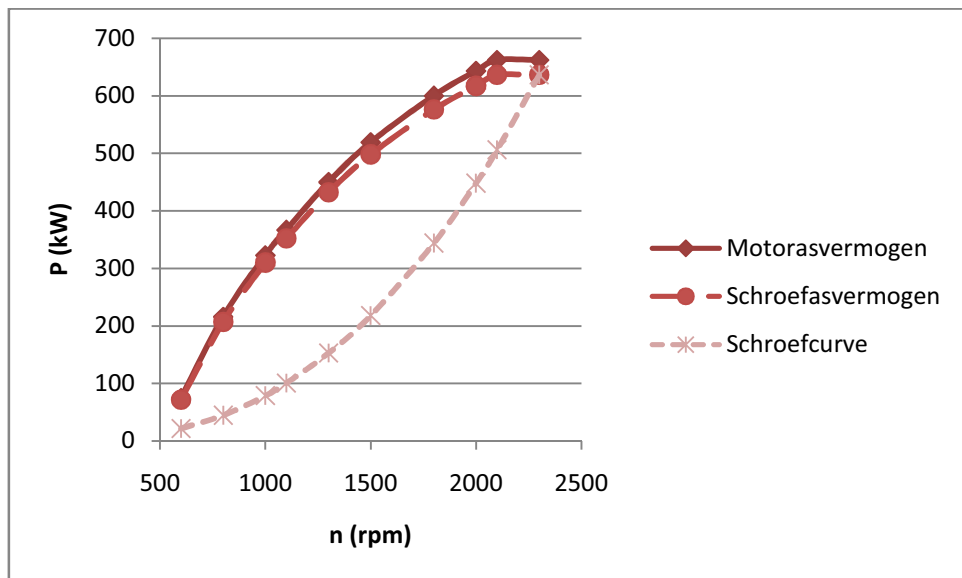
De weerstandscurve van de *New Belgica* werd reeds besproken, na het vastleggen van de gewenste dienstsnelheid en de schroefparameters kon dan het te leveren propulsievermogen bepaald worden. Op basis van dit vermogen kan dan een dieselmotor geselecteerd worden. In wat volgt wordt een Volvo Penta D13-900 dieselmotor aangenomen, met volgende eigenschappen [21]:

- asvermogen: 662 kW;
- cilinderinhoud: 12,8 l (6 cilinders);
- nominaal toerental: 2300 rpm (vrijloop: 550-700 rpm);
- gewicht: 1560 kg.

Dieselmotorfabrikanten publiceren meestal het vermogensverloop in functie van het motortoerental, ook moeten zij voor kleinere scheepsmotoren, naast het asvermogen, volgende curves in hun diagram opnemen<sup>6</sup>:

- het beschikbare vermogen na een vast verbonden reductiekast (schroefasvermogen);
- een schroefbelastingscurve, meestal een kromme met exponent 2 tot 3 (hier 2,5).

Het prestatiediagram van de Volvo Penta D13-900 is weergegeven in Figuur 10:

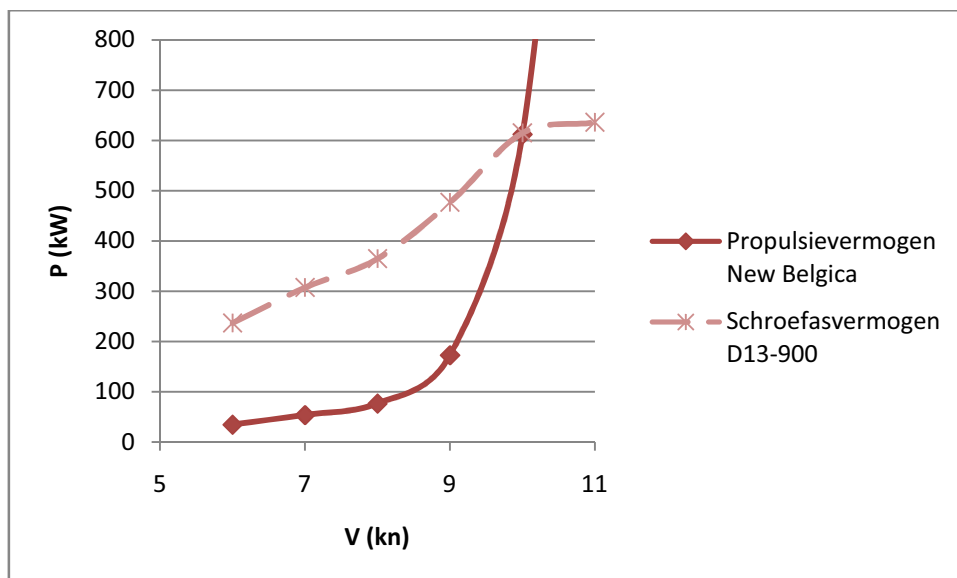


Figuur 10: Prestatiediagram Volvo Penta D13-900

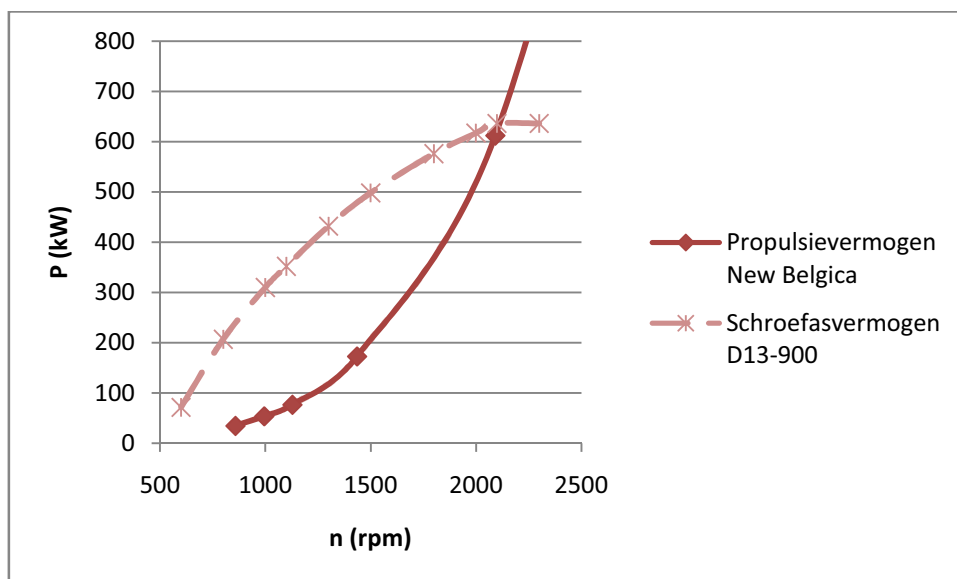
Om het vermogenverloop van schip en motor in één diagram te samenbrengen, wordt het motorvermogen meestal uitgedrukt in functie van de vaarsnelheid: bij een gekozen schroef ligt het schroeftoerental bij de verschillende vaarsnelheden vast (zie Bijlage E). Na verrekening van de reductie kan het motorvermogen bij deze vaarsnelheden dan via het prestatiediagram bepaald worden. Het vermogenverloop van schip en motor in functie van de vaarsnelheid is afgebeeld in Figuur 11.

Aangezien NavCad ook toelaat om het propulsievermogen uit te zetten tegenover het motortoerental, werd hiervoor geopteerd. Deze grafiek is in deze vorm eenvoudiger samen te stellen met de beschikbare motorgegevens en is voor de *New Belgica* – aangevuld met het vermogenverloop de dieselmotor – afgebeeld in Figuur 12.

<sup>6</sup> ISO 8665 (versie 2006): norm met als titel "Small craft -- Marine propulsion reciprocating internal combustion engines -- Power measurements and declarations"



Figuur 11: Vermogenverloop i.f.v. vaarsnelheid

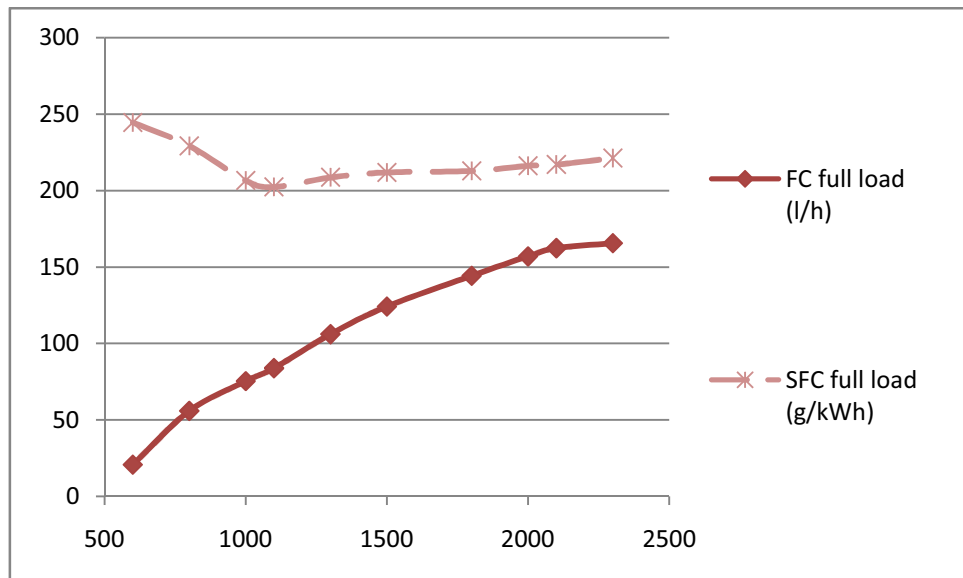


Figuur 12: Vermogenverloop i.f.v. toerental

Het beschikbare en het benodigde vermogen komen overeen bij dienstsnelheid, bij lagere snelheid is de motor in staat meer vermogen te leveren dan datgene dat voor propulsie vereist is. Dit fenomeen stelt zich in nagenoeg alle transporttoepassingen en volgt uit een verschillend verloop van de vermogenscurves voor motor en schroef (of last in het algemeen). Het verschil tussen beide vermogens wordt relatief uitgedrukt door de PTO (“Power Take Off”, [%]). Bij ontwerpsnelheid is er 100 % PTO, bij elke lagere vaarsnelheid – bijvoorbeeld 7 kn, voor heel wat zeilschepen een “economische” snelheid – is de PTO altijd lager, in dit geval nog geen 20 %.

Een andere parameter die elke motorfabrikant publiceert, is het specifieke brandstofverbruik: SFC (“Specific Fuel Consumption”, [g/kWh]). Ook hier wordt het verloop uitgezet in functie van het motortoerental. Voor automobiel-dieselmotoren in het optimale werkingpunt bedraagt de SFC typisch 250 à 350 g/kWh [22]. Deze waarden blijven geldig voor een groot vermogensbereik aan dieselmotoren, al zijn krachtigere motoren (grotere cilinderinhoud) over het algemeen efficiënter

en ligt het specifiek brandstofverbruik hier dus meestal onder de genoemde waarden. Maximumefficiëntie wordt per definitie bereikt in het optimale werkpunt, waarvan het toerental nagenoeg overeenkomt met het toerental bij het maximum in de koppelcurve – voor de Volvo Penta D13-900 bedraagt de SFC volgens de fabrikant 191 g/kWh<sup>7</sup>. Bij maximum toerental ligt het specifiek brandstofverbruik reeds 10 % hoger, maar het specifiek brandstofverbruik stijgt sterk bij laag of stationair toerental (zie Figuur 13).

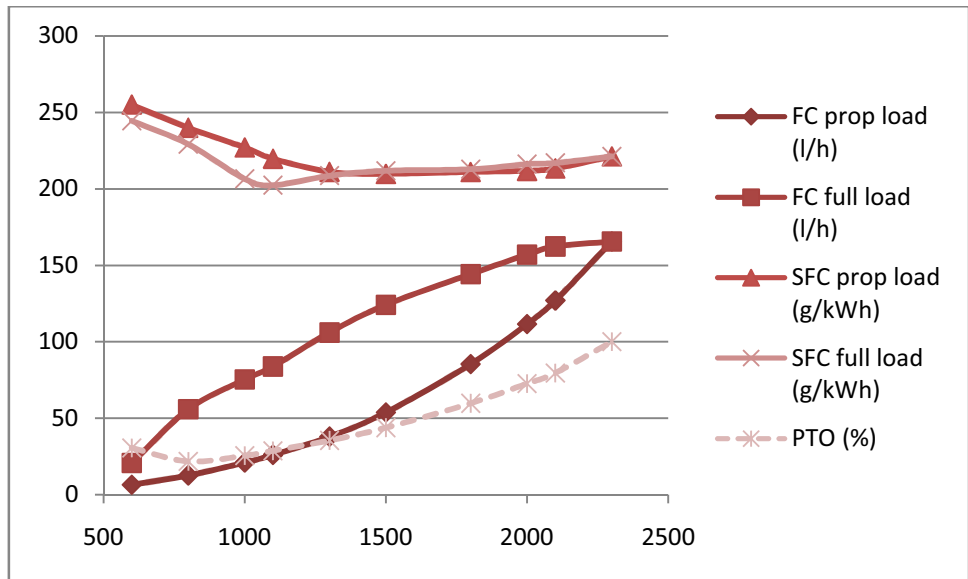


Figuur 13: Verloop SFC Volvo Penta D13-900 bij vollast

Belangrijk is op te merken dat dit brandstofverbruik geldt bij 100% PTO en niet voor het werkelijke, aan de schroef te leveren, propulsievermogen. Over het algemeen geven fabrikanten weinig informatie vrij over de prestaties bij deellast, maar met de beschikbare gegevens werd het diagram in Figuur 14 opgesteld. De prestaties bij deellast zijn hier niet dramatisch: hoewel de PTO bij 1000 rpm slechts 25 % bedraagt, ligt het specifiek brandstofverbruik hier slechts 10 % hoger. Bij deellast wordt er bij de Volvo Penta dus aanzienlijk minder dieselbrandstof ingespoten, waardoor het specifiek brandstofverbruik amper toeneemt.

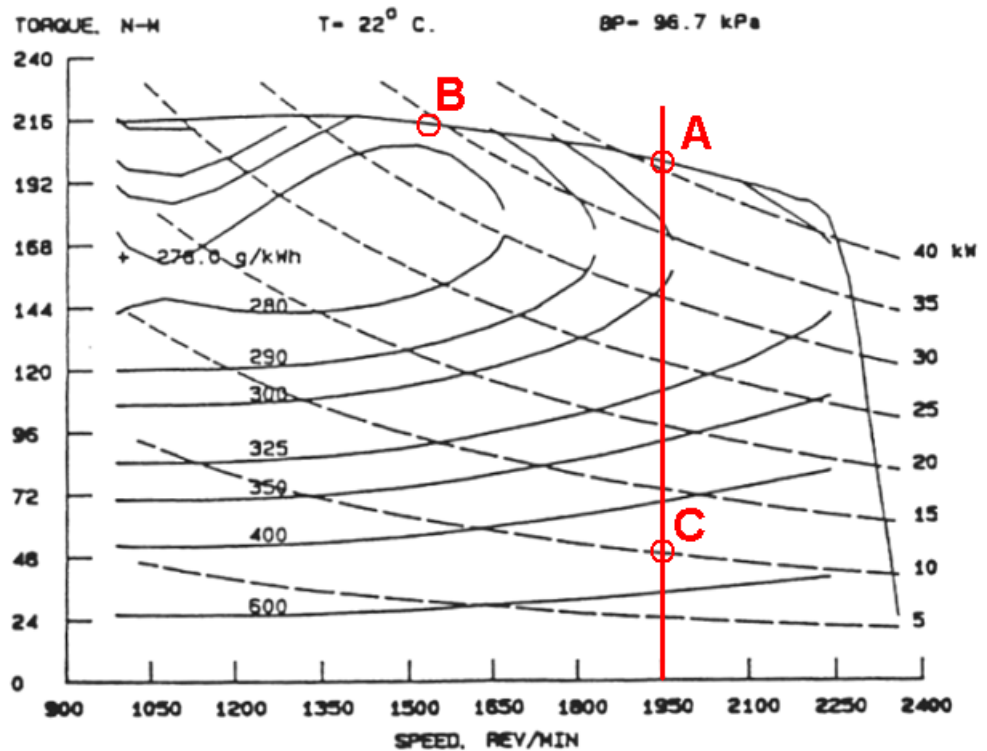
<sup>7</sup> Deze SFC werd bekomen onder gunstige testcondities volgens ISO 8665 en ISO 3064, waarbij o.a. de brandstoftemperatuur 40 °C bedraagt. Eigen rekenwerk met de beschikbare gegevens levert bij 15 °C en werking in het optimaal werkpunt een SFC van iets meer dan 200 g/kWh op.





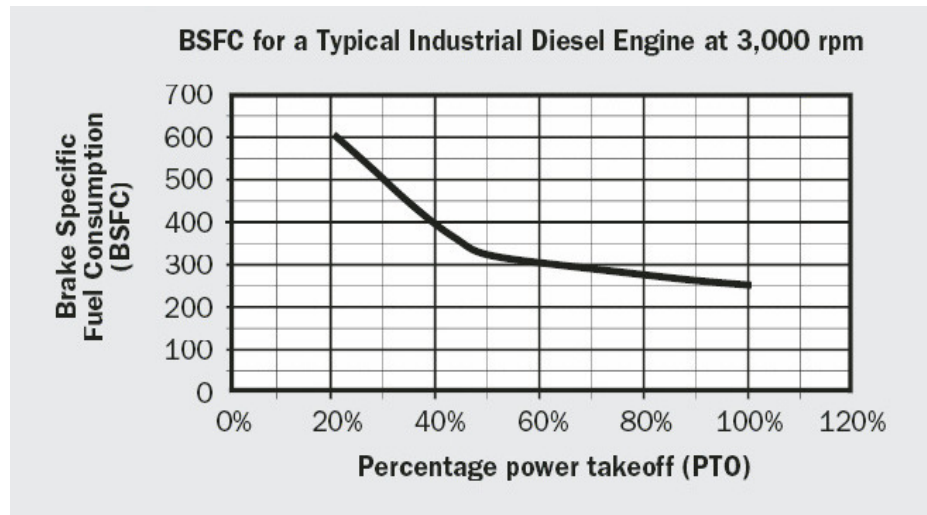
Figuur 14: Verloop SFC Volvo Penta D13-900 bij deellast

In literatuur waar men de voordelen verbonden aan de overgang naar elektrische aandrijving in de verf zet, komt een dieselmotor over het algemeen slechter uit de test. Om dit te illustreren, is in Figuur 15 een “fuel map” weergegeven van een kleine automobieldieselmotor (40 kW), het specifiek brandstofverbruik ligt nu – door de grootte van motor, zoals reeds vermeld – een stuk hoger.



Figuur 15: Fuel map kleine dieselmotor

Bij een toerental van 1950 rpm en bij vollast bedraagt de SFC ongeveer 310 g/kWh (punt A), op zich al 12 % meer dan in het optimale werkingpunt: 278 g/kWh (punt B). Wanneer de motorbelasting daalt tot bijvoorbeeld 25 %, loopt het specifiek brandstofverbruik op tot ongeveer 450 g/kWh (punt C) – of een toename van bijna 50 %. Ook bij meer realistische deellasten neemt het brandstofverbruik toe, voor kleine dieselmotoren neemt men een verloop aan zoals weergegeven in Figuur 16:



Figuur 16: Verloop SFC bij deellast voor kleine dieselmotoren [22]

Algemeen kan men stellen dat bij deellasten kleiner dan 50 % PTO, het specifiek brandstofverbruik drastisch toeneemt – al lijkt het effect zich bij grotere motoren beperkter te manifesteren.

Aangezien het propulsievermogen berekend is op een dienstsnelheid die in alle weerscondities gehaald moet kunnen worden en schepen doorgaans aan een meer “economische” snelheid varen, wordt de motor zelden op vol vermogen belast. Deze “economische” snelheid is voor schepen zoals de *New Belgica* in de regel 7 kn, wat bij gebruik van de Volvo Penta D13-900 een motortoerental van 1000 rpm betekent – dit toerental komt nagenoeg overeenkomt met het maximum in de koppelcurve (1300 rpm) en dus maximumefficiëntie bij volle motorbelasting. De PTO bedraagt in deze situatie niet meer dan 20 %, het specifiek brandstofverbruik ligt – volgens de gegevens van de fabrikant – minstens 10 % hoger dan bij vollast, wat aantoont dat de Volvo Penta D13-900 treffelijke prestaties neerzet in vergelijking met de kleinere varianten.

In het verleden werden reeds verscheidene pogingen gedaan om – uitgaande van de traditionele aandrijving met dieselmotor – een meer milieuvriendelijke en efficiëntere aandrijving te bekomen., concreet is men steeds op zoek naar een manier om de dieselmotor het specifiek brandstofverbruik te minimaliseren. Hierbij is het belangrijk te weten dat er een optimaal toerental bestaat (ongeveer bij maximum koppel), maar dat ook de eigenlijke belasting van de motor een (grote) impact heeft. Volgende opties kunnen overwogen worden:

- Ingrepen op de aandrijflijn: bv. plaatsing van een (traploze) versnellingsbak.
- Ingreep op de schroefuitvoering: bv. schroef met verstelbare speed.
- Overgang naar andere configuraties met elektrische tussenkring (electrical drives).

Versnellingsbakken worden op schepen nauwelijks toegepast: naast de introductie van een zeer storingsgevoelige component, is de wens om snel en regelmatig te accelereren niet aanwezig zoals bij automobieltoepassingen. De scheepssnelheid is meestal voldoende regelbaar door regeling van het motortoerental, enkel bij zeer lage snelheden stellen zich problemen. Wanneer deze situatie zich regelmatig voordoet of er een goede regeling bij lage snelheden gewenst is, kan het gebruik van een schroef met verstelbare spoed aangewezen zijn.

De meer bruikbare alternatieven om de SFC te drukken: schroeven met verstelbare spoed en electrical drives, worden in de volgende hoofdstukken besproken.

## 9.2.Schroefuitvoering

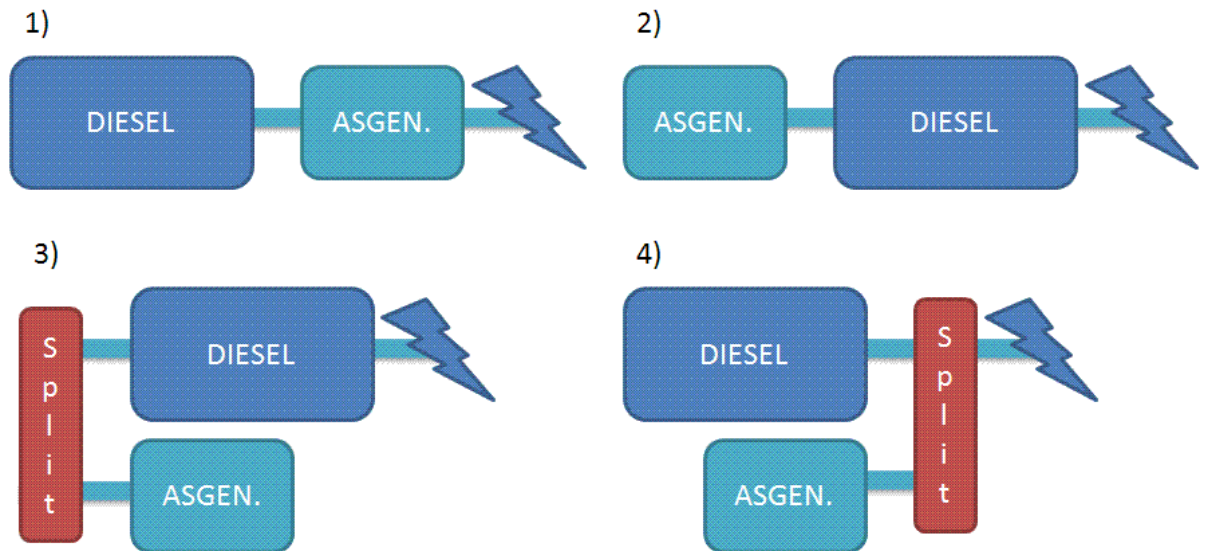
In klassieke dieselaandrijvingen wordt het vermogen aan de uitgaande as van de (snellopende) dieselmotor via een reductiekast en keerkoppeling op de schroefas overgebracht. De schroef kan uitgevoerd zijn met vaste schroefbladen ("fixed pitch propeller", FP of FPP) of met schroefbladen waarvan men de stand kan aanpassen ("controllable pitch propeller", CP of CPP). Een belangrijke beperking van een schroef met vaste bladen is dat deze haar maximumrendement slechts bij één enkele toerental-belastingscombinatie kan bereiken, in alle andere gevallen is de spoed ofwel te groot, ofwel te klein. Schroeven met verstelbare spoed bieden de mogelijkheid om het maximum haalbaar rendement over het hele toerental-belastingsbereik te realiseren door instelling van de optimale spoed. Het al dan niet plaatsen van een CPP hangt af van volgende beschouwingen:

- De dieselmotor kan in zijn optimaal werkingspunt werken: een veranderde voortstuwingskracht wordt door een veranderde spoed verkregen, waarbij het toerental ongewijzigd blijft. Men kan hierdoor het hoogst mogelijke propulsierendement verkrijgen bij een gegeven ladingsconditie en vaarsnelheid. Ook qua emissies scoort deze aanpak beter.
- Het maximaal bereikbare rendement ligt lager dan voor een schroef met vastgezette schroefbladen, de winst wordt hoofdzakelijk gehaald bij varen bij lage snelheid of belasting waarbij de motor anders in toerental – en dus rendement – moet zakken.
- Een keerkoppeling wordt overbodig, omkeren van propulsierichting kan door aanpassing van de spoed.
- De naaf moet dikker uitgevoerd worden om het spoedmechanisme te kunnen herbergen, hierdoor neemt het rendement tegenover dezelfde schroef met vaste bladen iets af. Het geheel schroef-spoedsturing wordt complexer en bijgevolg duurder en storingsgevoeliger.
- Eventueel kan het motortoerental aangepast worden bij storende trillingen of geluid zonder al te zware afname van stuwkracht.
- Specifiek voor zeilschepen kan de schroef in een vaanstand gezet worden, de schroef draait hierbij rond in het zog van het zeilende schip met een minimale weerstandsbijdrage.

Wanneer een aandrijflijn op een CPP gekoppeld wordt, kan de stuwkrachtregeling geschieden d.m.v. spoedregeling en dit bij constant toerental. Dit biedt de mogelijkheid om de dieselmotor aan optimaal rendement te laten draaien bij alle vaarsnelheden of belastingen. Een rendementsdaling door deellast kan in principe worden opgevangen door een asgenerator te plaatsen met een regeling die de dieselmotor continu op vol vermogen, d.i. in het optimale werkingspunt, belast. Het constante toerental is hier ook vanuit het oogpunt van de asgenerator een gunstige situatie.

Een asgenerator kan in verschillende vormen en op verschillende plaatsten ten opzichte van de dieselmotor geplaatst worden (zie ook Figuur 17):

- tussen dieselmotor en schroef (de elektrische machine heeft twee aseinden);
- aan de andere zijde van de dieselmotor (de dieselmotor heeft twee aseinden);
- via een tandwielkast op het tweede aseinde van de dieselmotor;
- via een tandwielkast ("power split") op de schroefas.



Figuur 17: Plaatsingsmogelijkheden asgenerator

Dieselmotoren met twee aseinden komen weinig voor en zijn niet opgenomen in het standaardgamma van de meeste motorfabrikanten, deze opties zijn hierdoor minder evident. Een asgenerator tussen motor en schroef stelt hoge eisen aan de elektrische machine in verband met lagering en trillingen, uitlijning en dynamisch gedrag (eigenfrequenties) worden hier belangrijk. Interessanter is het laatste voorstel, deze configuratie wordt dan ook vaak toegepast in parallel hybride aandrijvingen (zie hoofdstuk 10.3.2). In deze opstelling doet de geplaatste generator in principe geen afbreuk aan de redundantie van de reeds bestaande installatie.

Schroeven met verstelbare spoed zijn zeer interessant voor schepen met sterk wisselende belastingscondities en/of vaarsnelheden en –richtingen (manoeuvreren). Voor schepen met relatief constante belading en vaarsnelheid zoals de *New Belgica* is de keuze minder vanzelfsprekend. Hier kan de ontkoppeling van motortoerental en stuwkracht bij lage toerentallen een drijfveer zijn: het rendement van een dieselmotor bij lage toerentallen is laag, door spoedregeling kan toch een efficiënter motortoerental aangehouden worden. Deze situatie komt helaas wel overeen met een zeer lage PTO en is zonder extra voorzieningen (zoals een schroefasgenerator) in feite minder efficiënt dan een traditionele aandrijving bij laag toerental.

Op kleine zeiljachten wordt dikwijls een klapschroef geplaatst: dit is een schroef die wanneer ze niet door de motor aangedreven wordt, inklappt en dan een vorm van minimale weerstand aanneemt, met stilgezette as tot 85 % minder weerstand dan een FPP [23]. Er zijn klapschroeven op de markt

tot propulsievermogens van meer dan 200 kW en tegenwoordig zijn er ook klapschroeven verkrijgbaar die automatisch de optimale spoed aannemen bij het beschikbare schroefastoeental. Sommige fabrikanten verklaren dat met hun klapschroeven – in het geval van elektrische of hybride propulsie – ook regeneratie mogelijk is, de beschikbare modellen zijn evenwel bedoeld voor kleine pleziervaartuigen en bevinden zich niet in de vermogenscategorie van de *New Belgica*.

Als conclusie kan men stellen dat een plaatsing van een CPP voor de *New Belgica* niet evident is. Ten eerste zal er zoveel mogelijk onder zeil gevaren worden en wanneer er op motor gevaren wordt zijn de belastings- en snelheidsvariaties niet van die aard dat de kosten, complexiteit en kwetsbaarheid van een spoedregeling te verantwoorden zijn. Verder is de mogelijkheid tot regeneratie gewenst, waardoor zich hoe dan ook een koppeling met een elektrische machine opdringt. Motorwerking van deze machine (gevoed uit batterijen) kan de rol van een spoedregeling overnemen: het toerental van moderne elektromotoren – voorzien van een sturing – kan eenvoudiger en aan hoger rendement geregeld worden.

## 10. Elektrische aandrijvingen (*electrical drives*)

Elektrische aandrijvingen werden reeds lange tijd geleden ontwikkeld: anno 1886 werd door het toenmalige Siemens een boot van een elektrische aandrijving. De stand van de technologie voorzag in zeer moeilijke regelingen, waardoor elektrische propulsie van het toneel verdween met de intrede van eenvoudig handelbare dieselmotoren. Op het moment dat de regelingen voor gelijk- en wisselstroommotoren een sterke vooruitgang kenden, kwam deze aandrijving terug ter sprake. Sinds de jaren '80 en vooral '90 kende het gebruik van elektrische aandrijvingen een sterke groei.

Vandaag zijn er andere, bijkomende drijfveren om aandrijvingen van een elektrische (tussen-)kring te voorzien: de uitputting van de reserves aan fossiele brandstoffen, de verwachte prijsevolutie en de uitstoot gerelateerd aan het gebruik ervan, doen de vraag rijzen of de afhankelijkheid van diesel niet zou moeten worden afgebouwd. Afhankelijk van de toepassing, zijn er reeds waardige vervangers beschikbaar, al is het in sommige gevallen vooral afwachten hoe de technologie en houding ten overstaan van waterstof en brandstofcellen zal evolueren. In de andere gevallen houdt men zich eraan om het dieselverbruik zoveel mogelijk te minimaliseren en het rendement van gegeven installaties op te drijven.

Bij gebruik van een elektrische tussen- of nevenkring voor energieoverdracht van producent (generator) naar verbruiker (elektromotor) spreekt men van electrical drives. Er bestaat een strikte terminologie die volgende configuraties onderscheidt:

- Elektrische aandrijving: configuratie zonder verbrandingsmotor, alle energie is afkomstig van een chemische reactie (galvanische cel of brandstofcel).
- Dieselelektrische aandrijving: een aggregaat levert via een motorregelaar elektrische energie aan een elektromotor voor propulsie, deze configuratie wordt gekenmerkt door de afwezigheid van batterijen.
- Hybride aandrijvingen, verder onderscheid tussen:
  - Seriehybride aandrijving: de elektrische keten onderbreekt de mechanische, in wezen dus een dieselelektrische configuratie aangevuld met batterijen.
  - Parallelhybride aandrijving: de elektrische keten staat los van de mechanische, beide vermogens worden via een tandwielkast bijeengevoegd.

Elk van deze configuraties wordt in de volgende hoofdstukken diepgaand besproken<sup>8</sup>, enkele artikels bespreken het hele gamma aan elektrische aandrijvingen of specifieke types: [22], [24]-[32].

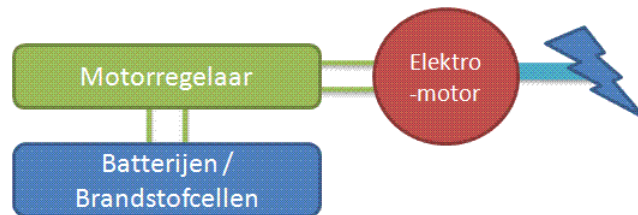
---

<sup>8</sup> Enkele specifieke vormen van elektrische aandrijving zoals "podded propulsion" worden niet besproken. Het is duidelijk dat deze systemen geen realistische optie zijn voor de *New Belgica*.

## 10.1. Elektrische aandrijving (Electric drive)

### 10.1.1. Beschrijving

Bij elektrische scheepsaandrijving is de schroef – al dan niet via een reductie – mechanisch verbonden met een elektromotor, zie Figuur 18. De elektrische energie, die via een regelaar aan de motor geleverd wordt, is afkomstig van een chemische reactie en dit zonder tussentijdse omzetting naar mechanische energie. Concreet komen dus galvanische cellen (batterijen of accu's), brandstofcellen en eventueel zonnepanelen als energieleverancier in aanmerking.



Figuur 18: Schema elektrische aandrijving

Zuiver elektrische aandrijvingen zijn uitermate stil, de uitstoot van schadelijke stoffen tijdens gebruik is nihil en het rendement van de installatie is zeer hoog. Bepalende factor voor de toepasbaarheid van deze aandrijving is meestal de opslagcapaciteit van energie – voor brandstofcellen meer bepaald de opslag van waterstof of van een brandstof waaruit waterstof kan gewonnen worden (d.m.v. reforming, zie hoofdstuk 14).

### 10.1.2. Toepassing in de scheepvaart

Elektrische aandrijving wordt heden op schepen toegepast, maar telkens in zeer specifieke markten. Batterijgevoede aandrijvingen worden gekarakteriseerd door een beperkt vermogen en/of actieradius, typisch voorbeeld is een rivierboot voor toeristische rondvaarten – gezien hun zomers karakter worden deze systemen ook regelmatig aangevuld met zonnepanelen. Bij brandstofcelgevoede systemen zijn ferries en onderzeeërs de meest noemenswaardige, bij deze laatste is vooral de “zuurstofonafhankelijkheid” een voordelig aspect aan elektrische aandrijvingen<sup>9</sup> (zie hoofdstuk 14).

### 10.1.3. Besluit *New Belgica*

De zuiver elektrische configuratie is voor de *Belgica* niet geschikt als aandrijving: voor wereldreizen zou de opslagcapaciteit van energie buitensporige proporties aannemen, zowel qua batterijen als qua opslag van waterstof. Deze aandrijving is in wezen ook weinig redundant, wat voor zeegaande schepen een belangrijke vereiste is.

<sup>9</sup> Onderzeeërs worden soms ook nucleair aangedreven. Hoewel de eigenlijke propulsie via een elektromotor kan geschieden, spreekt men niet van “elektrische aandrijving” wegens de stoomcyclus, die aan de keten een gedeelte met energie onder mechanische vorm toevoegt.

## 10.2. Dieselelektrische aandrijving (Diesel-electric drive)

### 10.2.1. Beschrijving

Een dieselelektrische aandrijving is zeer gelijkend op de elektrische aandrijving, al is de elektrische energie nu afkomstig van een – door een dieselmotor aangedreven – aggregaat, deze configuratie kan ook gezien worden als een klassieke mechanische aandrijving met een tussengeschakelde elektrische kring. Deze aandrijving is in vereenvoudigde vorm voorgesteld in Figuur 19:



Figuur 19: Schema diesel-elektrische aandrijving

Dieselelektrische aandrijvingen werden ontwikkeld om het toerental van de schroef te ontkoppelen van het motortoerental en onafhankelijk van de dieselmotor te kunnen regelen. Hierdoor kan een specifiek nadeel van klassieke aandrijvingen omzeild worden: met name het rendement van een dieselmotor bij laag toerental. Bijkomend kunnen nu ook meerdere aggregaten op een gecentraliseerde voedingsbus (“power bus”) gekoppeld worden om variërende belastingen op te vangen. Als daarbij ook alle verbruikers op de bus aangesloten worden, valt de traditionele scheiding tussen propulsie en andere verbruikers weg en kan vraag en aanbod qua energievoorziening optimaal op elkaar worden afgesteld.

Volgens de definitie zijn dieselelektrische aandrijvingen niet voorzien van batterijen, deze configuratie komt daarom zelden in deze vorm voor. Wanneer een aggregaat werkzaam is in het optimale werkingpunt, kan het voorkomen dat de machine meer vermogen kan genereren dan de hoeveelheid die op dat moment gevraagd wordt. Om de dieselmotor toch aan 100 % PTO te belasten of om een buffer in te bouwen bij variërende vraag, sluit men batterijbanken aan op de elektrische tussenkring (waardoor men strikt gezien al over een seriehybride aandrijving spreekt).

In sommige gevallen is het niet wenselijk om over te stappen op hybride systemen: de winst van gestockeerde energie moet opwegen tegen het gewicht, de kost en de complexiteit van deze uitbreiding [24]. Op zeer grote schepen is stockage van energie in batterijen soms niet verantwoord en wordt lastvariatie opgevangen door aggregaten op de “power bus” aan of af te koppelen, hier spreekt men dus wel van zuivere dieselelektrische voortstuwing. Voorbeelden hiervan zijn de eerste generatie elektrisch aangedreven cruiseschepen, al moet algemeen worden opgemerkt dat een zuiver dieselelektrische aandrijving (dus zonder batterijen) zeldzaam is.

Deze configuratie wordt – volgens haar definitie – meer en meer verdrongen door hybride aandrijvingen, welke in feite een uitbreiding zijn de zuiver dieselelektrische varianten.



### 10.2.2. Winst tegenover mechanische aandrijvingen

Een verlaging van het (specifiek) brandstofverbruik is geen zuiver gevolg van het gebruik van een elektrische tussenkring, sterker nog: elke energieconversie en de daarbij horende nieuwe componenten introduceren nieuwe verliezen. Een dieselelektrische aandrijving kan dus efficiënter zijn dan zijn mechanische tegenhanger, maar dit vereist kundigheid in ontwerp en gebruik. Allereerst moeten alle nieuwe componenten (aggregaat, motorsturing en elektromotor) een hoog rendement bezitten, het totaalrendement van de elektrische keten bepaalt of een dieselelektrische aandrijving per definitie efficiënter kan zijn dan een klassieke versie. Typische onder- en bovengrenzen van rendementen van elektrische componenten zijn opgesomd in Tabel 3:

Component	Rendement	
	Typ. ondergrens	Typ. bovengrens
<b>Generator</b>	72 %	98 %
<b>Convertoren</b>	95 %	98 %
<b>Elektromotor</b>	84 %	97 %
<b>Totaalrendement</b>	57 %	93 %

Tabel 3: Rendementen elektrische componenten [25]

Bij gebruik van kwalitatieve componenten kan het totaalrendement van een dieselelektrische aandrijving dus concurreren met de typische transmissieverliezen (3 à 5 %) in een conventionele installatie, wel kunnen niet alle elektromotoren rechtstreeks met de schroefas verbonden worden en moet in dat geval de transmissie wel in rekening gebracht worden. In sommige simulaties onderstelt men het volledige verlies in de aandrijflijn tussen motor en schroef op 20 % [26].

Concreet moet de inbreng van nieuwe verliezen overtroffen worden door een grotere efficiëntie van de andere componenten van de installatie: de dieselmotor en in sommige gevallen ook de schroef. Een mogelijkheid hiertoe is de mechanische ontkoppeling van dieselmotor en schroef.

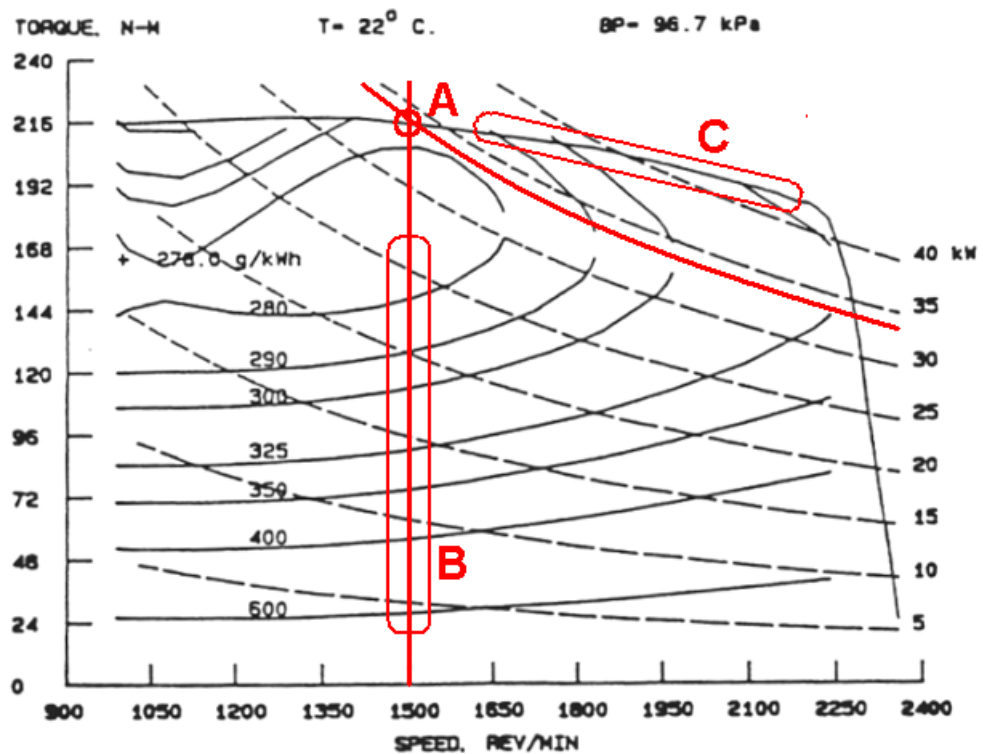
Over de te volgen strategie bestaat verdeeldheid, alles lijkt afhankelijk van op welke “fuel map” men zich baseert: sommige bronnen [27] stellen dat de winst gehaald wordt door de dieselmotor op zijn optimaal toerental te laten werken, andere stellen dat het aanhouden van 100 % PTO (door het toerental te laten variëren) de juiste werkwijze is [25].

Het aanhouden van een constant toerental lijkt een aannemelijke strategie: het aggregaat kan zo in het optimale werkingspunt werken terwijl het schroeftoerental afhankelijk van de gewenste vaarsnelheid door de elektromotor wordt opgelegd. Deze aanpak is evenwel beperkt in winst qua specifiek brandstofverbruik om volgende redenen (zie ook Figuur 20):

- Deze situatie kan enkel aangehouden worden bij belastingen lager dan het beschikbare vermogen in het optimale werkingspunt. Hoe lager de reële belasting, hoe lager de PTO en hoe hoger het specifiek brandstofverbruik.
- Bij hogere belastingen kan de dieselmotor niet meer in zijn optimaal werkingspunt blijven werken en vertoont het dezelfde eigenschappen als bij een mechanische aandrijving.

Voorgaande redenering wordt duidelijk gemaakt in Figuur 20, als voorbeeld dient de “fuel map” van een 40 kW dieselmotor:

- Optimaal toerental is ongeveer 1500 rpm: bij vollast is het specifiek brandstofverbruik het laagst en bedraagt 278 g/kWh (punt A). Het maximaal beschikbare vermogen is in dit punt ongeveer 33 kW of 83 % van het totale motorvermogen.
- Onvolledige belasting bij optimaal toerental (zone B) resulteert vanaf 70 % PTO, in dit geval 23 kW, in een sterke stijging van het specifiek brandstofverbruik.
- Wordt het afgenomen vermogen groter dan 33 kW (zone C), dan moet de motor in toerental stijgen waardoor ook hier de SFC toeneemt.



Figuur 20: Werking aggregaat bij constant toerental

De ander strategie die stelt dat een verlaging van het specifiek brandstofverbruik wordt bekomen door enkel dat vermogen te produceren dat benodigd is (100 % PTO), het toerental van het aggregaat zal hierbij variëren. Uit Figuur 20 blijkt dat wanneer het gevraagde vermogen lager is dan 33 kW ook hier de SFC zal stijgen. Bij stationair toerental (hier 800 rpm) kan ongeveer 22 kW geleverd worden, het specifiek brandstofverbruik bereikt nu echter een licht hogere dan bij de voorgaande aanpak (constant toerental en deellast).

Een elektrische tussenkring wordt pas echt interessant als er op grotere schaal gedacht wordt: door meerdere aggregaten aan- en af te schakelen of door een schroef te kiezen die geoptimaliseerd werd op de karakteristieken van een elektromotor in plaats van een dieselmotor.

Snelheidsregeling kan in dieselelektrische aandrijvingen eenvoudigweg door toerentalregeling en dit zonder al te grote penaliserende op het dieselmotorrendement: de dieselmotor blijft bij optimaal toerental werken, hierdoor is geen schroef met verstelbare spoed vereist.

Andere voordelen van een dieselelektrische configuratie zijn:

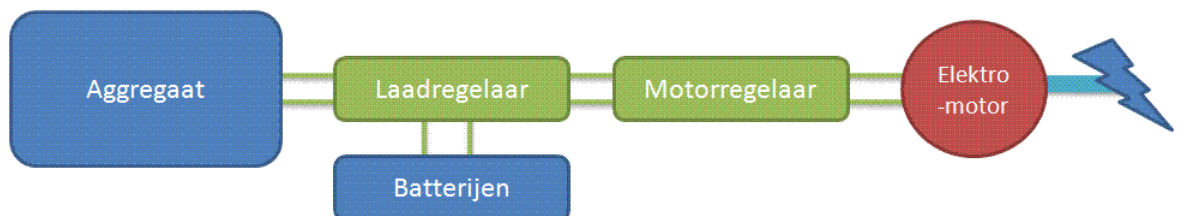
- Flexibele plaatsing van het aggregaat: enkel de elektromotor moet op de schroefas uitgelijnd worden. De totale schroefaslengte wordt ook kleiner, wat voordelig is naar kosten, sterkte en trillingen toe.
- Commerciële aggregaten kunnen zeer goed geïsoleerd worden, de hele aandrijving is stiller en er worden door de elektromotor ook minder trillingen via de schroefas aan het schip overgedragen.

### 10.3. Hybride aandrijving (Hybrid drive)

Bij hybride aandrijvingen kan er per definitie vermogen geleverd worden uit 2 verschillende energiebronnen, deze bronnen kunnen serieel of parallel ten opzichte van elkaar zijn opgesteld. De energiebronnen zijn een dieselmotor enerzijds en een medium voor opslag van elektrische energie anderzijds. Deze opslag kan gebeuren door conversie naar elektrochemische, elektrostatische of mechanische energie (respectievelijke opslag in accu's, condensatoren en vliegwielen). In de automobiellindustrie opteert men over het algemeen voor tijdelijke opslag in elektrochemische vorm, meer bepaald in accu's (zie hoofdstuk 13).

#### 10.3.1. Seriehybride

Bij een serieel hybride uitvoering is de schroef vast verbonden met een elektromotor, het is zoals gezegd een dieselelektrisch systeem voorzien van batterijen (buffer) in de elektrische tussenkring (zie Figuur 21). Bij dieselelektrische systemen werkt het aggregaat continu aan optimaal toerental en moet het enkel dat vermogen leveren dat de schroef op dat moment nodig heeft. De belasting van het aggregaat is hierdoor variabel en bij lage belasting stijgt het specifiek brandstofverbruik. In een seriehybride aandrijving kan het aggregaat continu op vol vermogen belast worden (optimaal werkpunt) door de overvloedige energie – ten gevolge van overproductie t.o.v. de energie benodigd voor propulsie – naar batterijen of andere verbruikers te voeren.



Figuur 21: Schema seriehybride aandrijving

In een hybride systeem ontstaan verscheidene werkingsmodi:

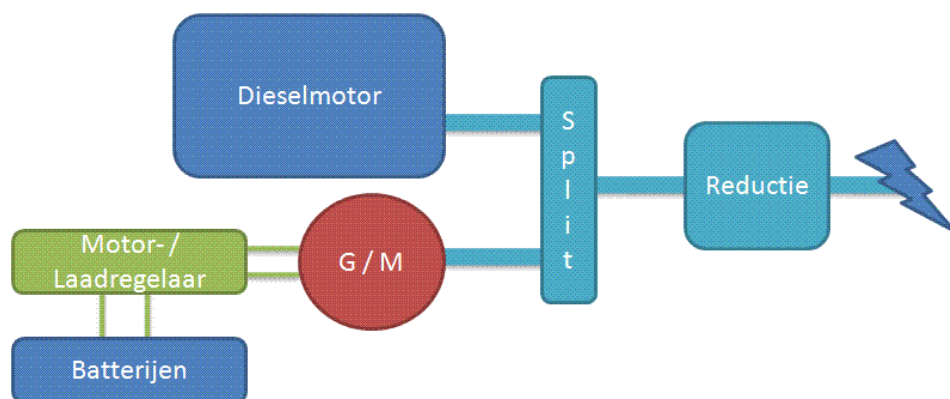
- elektrische aandrijving: enkel energie uit batterijen, typisch bij lage snelheden;
- dieselelektrische aandrijving: enkel energie uit het aggregaat, typisch voor economische vaarsnelheden;
- hybride aandrijving: zowel het aggregaat als de batterijen leveren energie, enkel nodig op topsnelheid te halen. In feite een elektrische hulpaandrijving uit batterijen;
- regeneratie: onder zeil kan er kinetische energie uit de volgstroom onttrokken worden en via de elektromotor – die nu als generator functioneert – omgezet worden in elektrische energie.

Zwak punt van een serieel hybride systeem is dat de elektromotor minstens gedimensioneerd moet zijn om het volledige motorvermogen te kunnen overdragen, het is door zijn lay-out ook weinig redundant. Het totaal geïnstalleerd vermogen van alle componenten (dieselmotor, generator, sturingen en elektrische machine) is zeer hoog, wat zich laat gevoelen in kosten en gewicht van de installatie.

In wagens wordt deze configuratie gebruikt als “range extender” voor elektrische voertuigen [33], in deze configuratie kan het aggregaat zeer klein worden uitgevoerd aangezien het slechts uitzonderlijk zal worden aangesproken: de batterijen zijn de hoofdbron van energie voor aandrijving.

### 10.3.2. Parallelhybride

In een parallel hybride systeem kan de schroef door zowel een traditionele dieselmotor als door een elektromotor aangedreven worden, via een tandwielkast (“power split”) worden beide vermogens samengevoegd en naar de schroef geleid, zie Figuur 22:



Figuur 22: Schema parallelhybride aandrijving

De werkingsmodi zijn gelijkaardig aan de reeds genoemde van een serieel hybride aandrijving, al wordt de dieselektrische modus vervangen door een gewone dieselmodus en kan er principieel nog een modus worden toegevoegd:

- elektrische aandrijving: idem serieelhybride;
- dieselaandrijving: zoals een klassieke mechanische aandrijving, typisch voor economische vaarsnelheden;
- hybride aandrijving: zowel de dieselmotor als de batterijen leveren energie, enkel nodig op topsnelheid te halen. In feite een elektrische hulpaandrijving uit batterijen;
- regeneratie: onder zeil kan er kinetische energie uit de volgstroom onttrokken worden en via de elektromotor – die nu als generator functioneert – omgezet worden in elektrische energie;
- generatie: als de schroef onder zeil losgekoppeld kan worden van de aandrijflijn, dan kan het overige deel functioneren als een aggregaat.

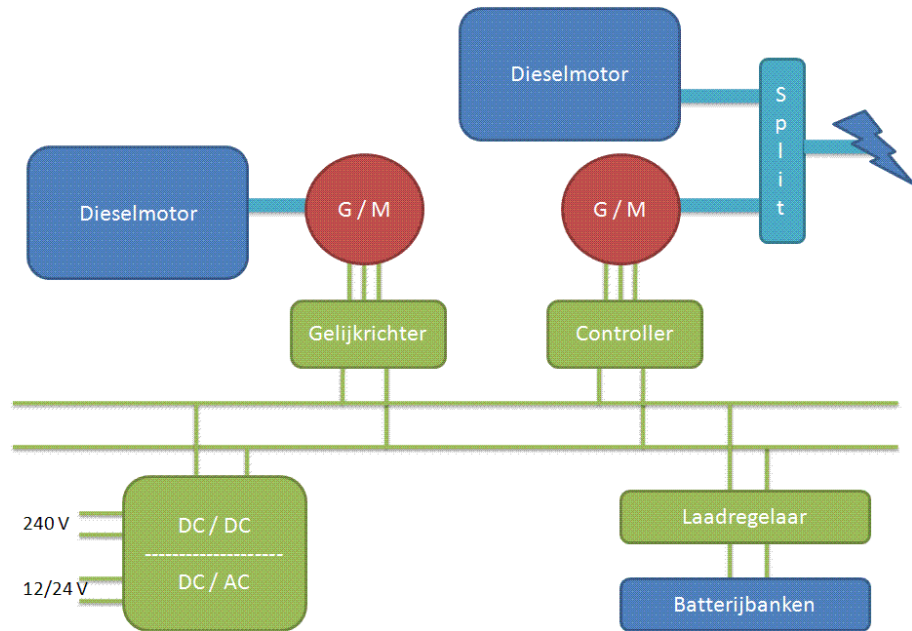
Door de 2 mogelijke mechanische verbindingen met de schroef is dit systeem inherent redundant, ook kan de elektrische kring hier afzonderlijk van de dieselmotor gedimensioneerd worden. De elektrische machine en sturing kunnen bijvoorbeeld begroot worden om een bepaald regeneratievermogen te kunnen verwerken of net genoeg vermogen te leveren om een zeer lage snelheid aan te houden. Ander voordeel aan deze configuratie is dat, door de aanwezigheid van een transmissie (met ingebouwde reductie voor de dieselmotor), een hoogtoerige elektromotor gebruikt kan worden. De extra kosten bij deze uitbreiding van een mechanische aandrijving is dus vrij beperkt.

#### **10.4. Besluit *New Belgica***

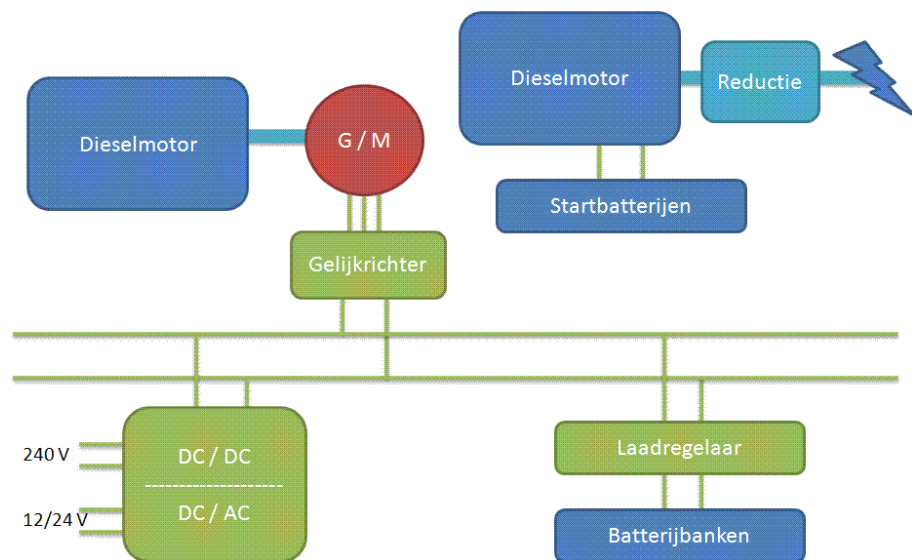
Bij de overstap van mechanische aandrijvingen naar varianten met een elektrische (tussen-)kring is het niet vanzelfsprekend dat deze ook betere prestaties inzake brandstofverbruik en emissies neerzetten. Ten eerste moeten de geïntroduceerde componenten een zeer hoge efficiëntie bezitten – en dit in het gehele werkingsgebied – om per definitie concurrentieel te kunnen zijn met een conventionele aandrijving. Het idee om de dieselmotor zoveel mogelijk in zijn optimaal werkingspunt te gebruiken wordt bemoeilijkt door het verschil dat kan bestaan tussen het aanbod van vermogen door de motor enerzijds en het vermogen dat benodigd is voor propulsie anderzijds. Werking bij deellast of ander dan optimaal toerental kan vermeden worden door steeds het volledig beschikbare vermogen af te nemen. Deze aanpak levert goede resultaten wanneer het overtollige vermogen ook verbruikt kan worden, de opslag in batterijen brengt per conversie (elektrische energie naar chemische energie en vice versa) algemeen een verlies van ongeveer 25 % met zich mee.

Omdat in wegvoertuigen grote lastvariaties optreden en bij het accelereren of remmen kortstondig zeer hoge vermogens moeten worden overgedragen, loont de opslag in accu's: remenergie wordt anders toch maar gedissipeerd. Deze karakteristieken in gebruik treft men zelden aan op schepen: de lasten zijn stabiel gedurende lange periodes, waardoor men beter enkel die energie kan produceren die op dat moment benodigd is. Langdurige opslag in batterijen is enkel interessant wanneer men rustige perioden wenst zonder draaiende generatoren.

Een configuratie die voor de *New Belgica* kan afgewogen worden is afgebeeld in Figuur 23. Het betreft een parallelhybride systeem, waarbij ook andere aggregaten op een “power bus” kunnen worden aangesloten. De scheiding tussen energievoorziening voor propulsion load en hotel load – zoals bij traditionele energievoorziening, zie Figuur 24 – is hier verdwenen.



Figuur 23: Parallelhybride energievoorziening



Figuur 24: Conventionele energievoorziening

Gezien het groene aspect aan de bouw en uitbating van de *New Belgica* leek er bereidheid te zijn om te investeren in nieuwe technologie die potentieel heeft om duurzamer te zijn dan de traditionele energievoorzieningen. Los van de meerkost bij installatie en de nood aan geschoolde mensen in bedrijf en bij onderhoud, moet opgemerkt worden dat wanneer de *New Belgica* gebruikt wordt waarvoor zij echt ontworpen is – met name zeilen – de propulsiemotor slechts sporadisch zal worden aangesproken. Een parallelhybride configuratie laat principieel wel toe om onder zeil de propulsiemotor aan de elektrische machine te koppelen (en zo samen een aggregaat te vormen), door het grote verschil in geïnstalleerd propulsievermogen (grootteorde 500 kW) en het verwachte verbruik (geschat op maximaal 70 kVA) zou het geheel evenwel niet efficiënter kunnen presteren dan een afzonderlijk aggregaat van aangepast vermogen.

De motieven om toch voor een parallelhybride aandrijving te kiezen, bevinden zich op andere terreinen: de wens tot regeneratie is hierbij zeer belangrijk en ook de mogelijkheid om bij lage vaarsnelheden volledig elektrisch te varen, kan een drijfveer zijn.

## **11. Alternatieve brandstoffen bij dieselmotoren**

In alle configuraties – uitgezonderd de zuiver elektrische aandrijving – is een dieselmotor aanwezig: in de klassieke mechanische aandrijving is het de enige component van de installatie die propulsievermogen kan leveren en in de andere aandrijvingen zit de combinatie dieselmotor-generator verwerkt in minstens één aggregaat. In de scheepvaart bestaat een sterke traditie in dieselmotoren, het is daardoor technologie die welgekend is door zowel ontwerper als gebruiker. Belangrijkste nadelen verbonden aan dieselmotoren zijn het rendement bij deellast, het verbruik van fossiele brandstof en – niet in het minst – de uitstoot. Deze nadelen kunnen worden aangepakt door optimalisatie van, of aanpassingen aan, de dieselmotor of door over te stappen op andere configuraties. In de vermogenscategorie van de *Belgica* worden over het algemeen snellopende viertaktmotoren gebruikt, welke nogal eens aangepaste vrachtwagenmotoren durven zijn. Bekende merken zijn onder andere Volvo Penta, MAN, Yanmar, Doosan en Daihatsu.

De mogelijkheid om de prestaties van een dieselmotor te verbeteren door ingrepen op de schroef en de aandrijflijn tussen motor en schroef werden reeds besproken, respectievelijk in hoofdstuk 9.2 en hoofdstuk 10.2.2. Gezien de maturiteit van hedendaagse dieselmotoren, verwacht men geen grote vooruitgangen meer te realiseren op de technologie als dusdanig.

In een poging de uitstoot van schadelijke gassen en partikels te verminderen, werden dieselmotoren aangepast en/of ontwikkeld die op andere – of meerdere – brandstoffen kunnen werken. Sommige van deze motoren opereren niet meer volgens de dieselcyclus (zelfontbranding van het lucht-brandstofmengsel), maar zijn voorzien van een gloeikaars om de ontsteking op het juiste moment op gang te brengen. Bijkomend verschijnsel is dat door gebruik van alternatieve brandstoffen de afhankelijkheid van diesel als fossiele brandstof daalt.

Daarnaast worden natuurlijk ook technieken ontwikkeld om diesel op zich milieuvriendelijker te maken: ontzwaveling en reductie van de aanwezige aromatische koolwaterstoffen, men spreekt dan over “designed fuels”. Deze zuiveringstechnieken worden toegepast na het klassieke kraken van ruwe aardolie en hebben dragen bij tot een verminderde uitstoot van schadelijke gassen.

Als alternatieve brandstof voor dieselmotoren onderscheidt men:

- biobrandstoffen;
- aardgas (LNG of CNG);
- waterstof.

Onderzoek naar de bruikbaarheid van deze alternatieve brandstoffen is hoofdzakelijk gericht op de ecologische aspecten ervan: de uitstoot van onder andere CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, benzeen en fijn stof moet beter zijn dan die van de huidige – op diesel werkende – dieselmotoren en ook de uitstoot van CO<sub>2</sub> moet lager zijn met het oog op het broeikaseffect en de bijhorende opwarming van de aarde.

De tekst in dit hoofdstuk is gebaseerd op diverse algemene werken: [33]-[35]. Bij de paragrafen over aardgas werd daarbij gebruik gemaakt van een studie over het gebruik van aardgas in de boomkorvisserij [36]



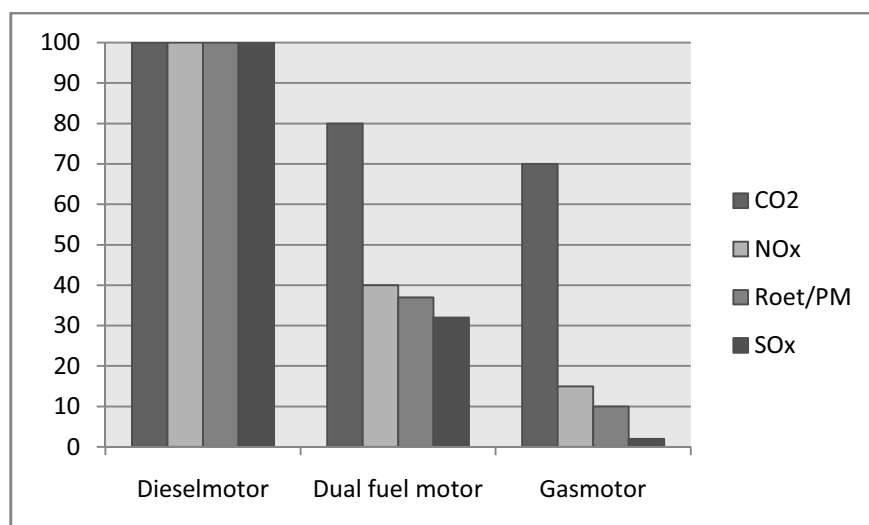
### 11.1.1. Biobrandstoffen

Verscheidene plantaardige oliën zijn geschikt om – na beperkte chemische behandeling – te worden toegepast als brandstof (PPO, “Puur Plantaardige Olie”) in dieselmotoren, de belangrijkste zijn koolzaadolie in Europa en eventueel palmolie in tropische gebieden. Qua emissies verschillen biobrandstoffen niet veel van gewone diesel; enkel wanneer men de totale productieketens met elkaar vergelijkt, wordt de gereduceerde CO<sub>2</sub>-uitstoot van alternatieve brandstoffen merkbaar. De totale kost voor productie en transport van biobrandstoffen is op dit ogenblik nog hoger dan voor conventionele dieselproducten, biobrandstoffen zijn hierdoor geen aanvaard alternatief voor fossiele brandstof.

Ethanol en methanol zijn beide alcoholen die als brandstof kunnen worden aangewend – ethanol hoofdzakelijk in benzinemotoren (met ontstekingskaars) – en kunnen zowel uit fossiele brandstoffen als uit biomassa verkregen worden: bio-ethanol kan bijvoorbeeld uit fermentatie van suikers gewonnen worden, bio-methanol kan bekomen worden uit glycerine (een bijproduct bij de productie van biodiesel). De biologische varianten kunnen als enige brandstof of als bijmenging dienen om bijvoorbeeld de viscositeit van plantaardige oliën gunstig te beïnvloeden. Deze alcoholen wordt een groot potentieel toegeschreven: zij kunnen zonder al te grote aanpassingen in bestaande motoren worden aangewend, scoren beter qua emissies en concurreren niet met voedselgewassen.

### 11.1.2. Aardgas

Aardgas als brandstof: Aardgas staat bekend als de meest milieuvriendelijke fossiele brandstof – dit omdat het grotendeels uit methaan (CH<sub>4</sub>) bestaat, wat van alle koolwaterstoffen het hoogste waterstofgehalte bezit. Het koolstofgehalte is dus relatief het laagst, waardoor ook alle koolstofgerelateerde emissies (CO, CO<sub>2</sub> en koolwaterstoffen) minimaal zijn (zie Figuur 25). Daarnaast is aardgas gemakkelijker ontginbaar dan ruwe aardolie, wat het geschikt maakt om de afhankelijkheid van diesel te doen afnemen. Naargelang de plaats van ontginning moet het gas eventueel gezuiverd worden, maar daarna kan het zonder verdere behandeling in verbrandingsmotoren worden aangewend.



Figuur 25: Relatieve uitstoot van motoren op aardgas [36]

Belangrijkste nadelen van aardgas zijn de beperkte energiedichtheid, opslag en eventuele beschikbaarheid. De toegang tot commercieel aardgas is zeer afhankelijk van de plaats van opereren, algemeen mag wel aangenomen worden dat dit in de nabije toekomst geen probleem zal vormen in ontwikkelde regionen. De lage energiedichtheid van aardgas heeft tot gevolg dat, ten opzichte van diesel, grotere opslagruimtes moeten worden voorzien: bij vloeibare opslag ongeveer 2 maal grotere volumes dan voor diesel, bij opslag onder druk wordt de benodigde opslagruimte 5 maal groter (zie Tabel 4).

Brandstof	LHV (MJ/kg)	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	LHV (MJ/l)
CH <sub>4</sub>	50,10	0,70	0,04
Diesel	43,00	850,00	36,55
CNG 200	49,38	160,00	7,90
LNG	49,51	425,00	21,04

Tabel 4: Brandstofeigenschappen methaan, diesel en aardgas

Opslag, alsook transport van aardgas kan op 2 manieren geschieden: als LNG (Liquefied Natural Gas) op een temperatuur van -162 °C of als CNG (Compressed Natural Gas) onder hoge druk, typisch 200 bar. De volumevermindering is het grootst bij opslag in vloeibare fase, maar is zeer duur door de benodigde isolatie en koeling. Bij wegtransport wordt daarom altijd voor opslag onder druk gekozen, bij schepen overweegt veelal de ruimtebeperking en opteert men voor cryogene opslag.

Aardgasmotoren: Aangezien aardgas niet uit zichzelf ontbrandt bij hoge druk en temperatuur, moet men aardgasmotoren voorzien van een ontstekingskaars. Deze motoren werken volgens de Otto-cyclus en noemt men gasmotoren of “gas diesels”. Andere optie is het inspuiten van een zeer kleine hoeveelheid diesel (“pilot fuel”, tot enkele procenten van het oorspronkelijke dieselvebruik) die dan de ontsteking verzorgt; deze motoren noemt men “dual fuel engines” en werken volgens de Diesel-cyclus. Door regeling de verhouding gas-diesel kan men een constant koppelverloop in functie van het toerental bekomen, wat de dual fuel motor zeer geschikt maakt als propulsiemotor. Een gasmotor daarentegen heeft een uitgesproken piek in het koppelverloop en wordt bij voorkeur toegepast als aandrijfmotor in generatorsets alsook in dieselelektrische of hybride aandrijvingen.

Een gewone dieselmotor kan zonder al te grote ingrepen omgebouwd worden naar een dual-fuelmotor. Bij vol vermogen werkt de motor nog steeds zuiver op diesel, bij lagere vermogens daalt de ingespoten hoeveelheid diesel en dus ook de emissies. Er ontstaat dus een brandstofflexibiliteit, maar er moeten wel 2 brandstofsysteemen geplaatst en onderhouden worden. Tegenover een conventionele dieselmotor nemen de totale onderhoudskosten wel af, wat bijvoorbeeld niet het geval is voor een gasmotor.

Aargas in de scheepvaart: Afgezien van LNG-carriers<sup>10</sup>, wordt aardgas heden nog weinig als brandstof aangewend in de scheepvaart. Door de beperkte ingrepen bij ombouw van diesel naar dual fuel-motor, worden stilaan pogingen ondernomen om dit type motor te gebruiken en daarbij vooral emissies terug te schroeven. Voorbeeld hiervan is een studie over boomkorvisserij op aardgas [36], deze brandstofverslindende vistechiek lijkt – mits de nodige subsidies – vrij geschikt

<sup>10</sup> De boil-off van het vloeibare aardgas aan boord wordt hier gebruikt om stoomturbines mee aan te drijven.

om aardgas als brandstof te gebruiken. Naast het veiligheidsaspect, is het ruimtegebruik bij opslag van gas een belemmerende factor – om deze reden werd het gebruik van CNG bijvoorbeeld verworpen, aardgas zou in 20 voet cryogene containers aan boord gestockeerd worden. De motortechnologie bevindt zich eigenlijk nog in een ontwikkelingsstadium en ook de bevoorrading van aardgas is niet zonder meer mogelijk. Ook de LNG-prijs kan de haalbaarheid van zulke installaties sterk beïnvloeden.

Besluit *New Belgica*: Hoewel de ombouw van klassieke dieselmotor naar dual fuel-motor vrij eenvoudig is, is varen op aardgas voor de *New Belgica* geen optie. De opslag van aardgas heeft, in welke vorm dan ook, zware gevolgen op de veiligheid en het ruimtegebruik aan boord. Daarnaast is de meerkost van dergelijke installatie enkel te verantwoorden bij intensief brandstofverbruik. Verder is de beschikbaarheid van aardgas bij wereldreizen niet gegarandeerd en verbruiken cryogene units aanzienlijke hoeveelheden energie om aardgas vloeibaar te houden.

### **11.1.3. Waterstof**

Waterstof als alternatieve brandstof heeft grote gelijkenissen met aardgas: zeer lage uitstoot (bij gebruik van zuivere waterstof zijn er géén koolstofgerelateerde emissies) en opslag in vloeibare fase (LH<sub>2</sub>, op -253 °C) of onder druk (CH<sub>2</sub>, op 200-700 bar). Allerlei zaken bemoeilijken de doorbraak van waterstofmotoren in transporttoepassingen, als daar zijn: productie van waterstof, opslag bij zéér lage temperatuur en moeilijkheden bij insputting en ontbranding van het waterstof-luchtmengsel. Er is ook een niet te verwaarlozen veiligheidsaspect bij het gebruik van waterstof.

Daar waar dual fuel motoren al in verschillende omgevingen worden toegepast, houden waterstofmotoren het voorlopig enkel bij labo- of demonstratieprojecten. Het potentieel van de technologie van de waterstofmotor staat niet los van de bijhorende problemen en risico's. Het is voorlopig onduidelijk of de waterstofmotor – voor zeeschepen – een meerwaarde biedt t.o.v. de (bijna-) bestaande technologieën. Demonstratieprojecten zoals de *Clothilde II*<sup>11</sup> zijn bedoeld om hierover uitsluitsel te geven.

### **11.1.4. Besluit *New Belgica***

De recente ontwikkelingen op vlak van alternatieve brandstoffen bij dieselmotoren moeten eigenlijk allemaal hun nut nog bewijzen. Zowel aardgas en waterstof zijn voor de *New Belgica* geen optie wegens de opslag- en veiligheidsproblematiek. Biobrandstoffen kunnen wel, maar geven vandaag de dag geen meerwaarde in prestaties. Als biobrandstoffen op basis van (bio-)methanol doorbreken, zal de vraag zijn of deze kunnen concurreren met de verkrijgbaarheid van diesel. Conventionele dieselmotoren op dieselbrandstof bieden zich op dit moment als meest haalbare technologie aan voor de *New Belgica*.

---

<sup>11</sup> Plannen bestaan om door De Steenschuit een replica te laten bouwen van een steenschuit, een binnenschip dat vroeger in de Rupelstreek werd gebouwd. Op deze replica zou een waterstofmotor geïnstalleerd worden.

## 12. Elektrische machines en sturingen

Nagenoeg alle types elektromotoren zijn geschikt om – in een mariene uitvoering – te dienen als aandrijving van de schroef. Naast het type en de wijze van aansturing is ook het nominaal toerental bepalend voor de karakteristieken van de installatie.

Elektromotoren met een laag toerental kunnen rechtstreeks op de schroef gekoppeld worden. Verder zijn deze motoren over het algemeen stiller en efficiënter, maar zijn ze duurder in aanschaf. Voor grotere vermogens (méér dan enkele kW's) adviseert men hoogtoerige motoren en een reductiekast. Naast de kost van een reductiekast (die in een parallelhybride toch al aanwezig was) wordt de motor nu goedkoper en is deze ook compacter dan de laagtoerige versie. Het totaalrendement kan eventueel lager zijn door de reductiekast en het geheel produceert ook meer lawaai.

In mariene aandrijvingen kunnen verscheidene types elektromotoren toegepast worden, enkele typische eigenschappen van kleine elektromotoren zijn weergegeven in Tabel 5, zwaarder motoren zetten over het algemeen betere rendementen neer dan hier beschreven.

	Type	Rendement	Prijs	Opmerking
DC	Seriemotor	Laag (55 à 75 %)	Laag	Onderhoud, lawaaierig & volumineus
	PM DC	Hoog (80 à 93 %)	Hoog	
AC	Asynchroon	Middelmatig (75 à 85 %)	Laag	Zwaar
	PM AC (BLDC)	Hoog (+90 %)	Hoog	Complexe regelaar

Tabel 5: Eigenschappen elektromotoren [30]

Op kleinere schepen gebruikt men traditioneel gelijkstroommotoren, installaties van deze omvang zijn in wezen overgenomen vorkheftruckaandrijvingen. Hierbij gebruikt men de – voor tractie uitermate geschikte – seriemotor welke een zeer hoog koppel kan ontwikkelen bij stilstand. Seriemotoren zijn relatief goedkoop, het rendement is echter laag. Door ontwikkeling van betere magneetmaterialen is de populairste gelijkstroommotor momenteel de permanentmagneet motor: deze motoren zijn compacter en duurder, maar leveren een aanzienlijk hoger rendement. Nadeel van alle types gelijkstroommotoren is het onderhoud en in het bijzonder het verslijten van de koolborstels.

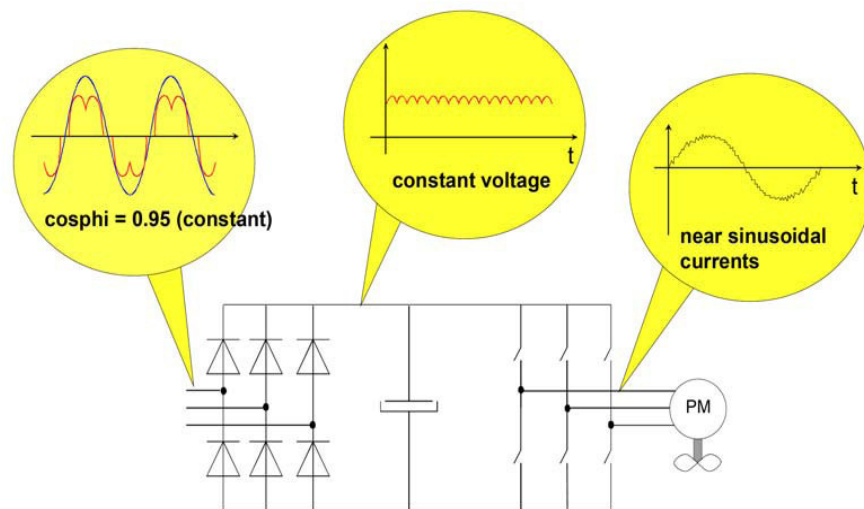
Naast gelijkstroommotoren kunnen ook verscheidene types wisselstroommotoren als aandrijving worden aangewend. Deze motoren behoeven geen onderhoud, zijn stil en compact, maar moeten worden voorzien van een regelaar wat het geheel complexer en duurder maakt. De inductiemotor wordt in de industrie veelvuldig toegepast, maar heeft een lager rendement dan synchrone machines. Permanentmagneet synchrone motoren leveren het hoogste rendement, maar is door de gebruikte magneetmaterialen en complexe sturing een stuk duurder.

Met het oog op efficiëntie en de mogelijkheid tot regeneratie zijn permanentmagneet synchrone machines aangewezen: door hun bouw zijn deze inherent geschikt om als motor en generator te functioneren. Deze machines worden ook wel “brushless DC-motoren” (BLDC) genoemd omwille van hun met permanentmagneet gelijkstroommotoren vergelijkbare karakteristieken, maar waarbij nu koolborstels ontbreken.

Voor elk type elektromotor bestaan er één of meerdere mogelijke sturingen (“motor drives”), waarvan de meeste ook in staat zijn om de machine in generatorwerking te regelen. De meest voorkomende mariene motorsturingen zijn [37]-[39]:

- DC convertoren (of SCR: “Silicon Controlled Rectifier”) voor gelijkstroommotoren.
- Cycloconvertoren voor wisselstroommotoren (normaal synchrone machines)
- Stroominvertoren (of CSI: “Current Source Inverter”) voor wisselstroommotoren (bijna uitsluitend synchrone machines)
- Spanningsinvertoren (of VSI: “Voltage Source Inverter”) voor alle types wisselstroommotoren (waaronder ook BLDC-motoren)

Gezien de voorkeur voor een permanentmagneet synchrone machine (PMSM) op de *New Belgica* is het logisch om deze te voorzien van VSI-sturing. Deze kan een sinusvormige spanning aan de machine opdringen, waarbij de frequentie het toerental bepaalt, zie Figuur 26. Het opwekken van de spanning gebeurt door pulsbreedtemodulatie (PWM of “Pulse Width Modulation”), wat leidt tot een zeer constant motorkoppel. De sturing op het wisselspanningsnet (bij dieselektrische aandrijving) zijn zeer beperkt, waardoor er weinig extra maatregelen moeten genomen worden om andere verbruikers te beschermen.



**Figuur 26: VSI-PWM sturing (zonder antiparallelle diodes) [37]**

Bij deze sturing hoort een gelijkspanningstussenkring (“DC-link”) die kan aangesloten worden op batterijbanken, hierdoor is het mogelijk om in een elektrische modus de benodigde energie rechtstreeks uit de batterijen te halen. Bij een driefasig 230 V gekoppeld systeem staan deze batterijbanken dan typisch op een spanning van 250 à 350 V.

De elektromotoren ingewerkt in de aggregaten behoeven natuurlijk geen motorsturing.

## **13. Batterijen**

### **13.1. Technologie en types**

Herlaadbare batterijen of accu's zijn een vaste waarde op hedendaagse schepen van om het even welke omvang. Op kleine (zeil-)schepen worden batterijen gebruikt voor het starten van dieselmotoren of doen de accu's dienst als nood- en/of servicebatterij (energievoorziening voor de hotel load, vooral op kleine zeiljachten). Op grotere schepen vindt men batterijen vooral terug in noodvoedingen (UPS of "Uninterruptible Power Supply") om in de elektriciteitsbehoefte te voorzien tijdens de opstart van noodaggregaten.

Algemeen worden volgende types onderscheiden:

- Loodaccu's
- Nikkel-cadmium batterijen (NiCd)
- Nikkel-metaalhydride batterijen (NiMH)
- Lithium-ion batterijen (Li-ion)

Loodaccu's zijn alomtegenwoordig: de prestaties zijn gemiddeld, maar deze technologie laat zich aan een lage prijs en met een beperkt aantal toebehoren inzetten. Loodaccu's zijn opgebouwd uit galvanische cellen van 2 Volt per cel waarvan er per accu meestal 6 in serie worden geschakeld. De werking berust op de uitwisseling van elektronen uit een zure oplossing (elektrolyt, meestal een zwavelzuuroplossing) met twee plaatvormige elektroden (één in zuiver lood, de andere van loodoxide). Deze accu's zijn goedkoop en hebben een redelijke energiedichtheid, maar vooral de beperkte levensduur bij intensief gebruik, de zelfontlading en (ont-) laadkarakteristieken spelen in het nadeel.

In een poging om aan de zwakke (ont-)laadkarakteristieken van loodaccu's te ontkomen, werden nikkel-ijzer en nikkel-cadmium batterijen ontwikkeld. Cadmium is giftig en samen met het "geheugeneffect" (verlies aan capaciteit bij het laden van niet-geheel-ontladen batterijen) van dit type batterij zijn de toepassingen heden beperkt. De energiedichtheid is laag (45 Wh/kg), maar de vermogensdichtheid is hier vrij groot (tot 200 W/kg) wat deze batterijen wel geschikt maakt om – gedurende beperkte tijd – zware belastingen te voeden. De nikkel-ijzer batterij is robuust en qua eigenschappen gelijkaardig aan de nikkel-cadmium variant, maar door de hoge kostprijs wordt ook dit type nog zelden toegepast.

Door de opmars van elektrisch aangedreven voertuigen is de vraag naar batterijen met een hoge energie- en vermogensdichtheid sterk toegenomen. Hierdoor zijn een groot aantal nieuwe batterijsystemen ontwikkeld, waarvan de meeste waarschijnlijk nooit commercieel zullen worden ingezet. Uitzondering hierop zijn nikkel-metaalhydride en lithium-ion batterijen.

Nikkel-metaalhydride batterijen bezitten geen geheugeneffect noch giftige materialen, voor tractietoepassingen is dit type evenwel minder geschikt. Deze batterij wordt wel nog gebruikt omdat ze, tegen een aanzienlijk lagere kost, vergelijkbare prestaties neerzet als een lithium-ion batterij.

De lithium-ion batterij is een relatief nieuwe en veelbelovende technologie met een zeer hoog rendement, de energie- en vermogensdichtheden zijn een veelvoud van de waarden bij loodaccu's: bij eenzelfde gewicht aan batterijen kan de capaciteit tot 5 maal groter zijn. Door de hoge kosten (de technologie zit nog in een vroeg ontwikkelingsstadium) is hun toepassing op schepen of andere transportmiddelen heden nog uitzonderlijk. Een variant – de lithium-polymeer accu – zet nog betere prestaties naar aan een zo mogelijk nog hogere prijs. Verwacht wordt dat door serieproductie de prijs in de toekomst zal dalen en dat dit type batterij zijn weg ook zal kunnen worden ingezet ter vervanging van klassieke loodaccu's.

Tabel 6 bevat een overzicht van de eigenschappen van de besproken batterijtypes; gebaseerd op diverse bronnen. Belangrijk is op te merken dat de levensduur van batterijen in het algemeen zeer afhankelijk is van het gebruik ervan (zie 13.2 voor de invloed van het gebruik op de levensduur van loodaccu's), verder zijn de gegevens van NiMH en Li-ion afkomstig uit een beperkt aantal specifieke (labo-)toepassingen en dus minder representatief voor de bruikbaarheid van deze technologie als dusdanig.

	Loodaccu	NiCd	NiMH	Li-ion
<b>Energiedichtheid (Wh/kg)</b>	30-50	45-80	60-120	110-160
<b>Vermogendichtheid (W/kg)</b>	180	150	250-1000	190-1200
<b>Cycluserendement (%)</b>	75	62	66	92
<b>Zelfontlading (%/maand)</b>	5	20	30	<10
<b>Levensduur (cycli)</b>	300-600	1500-2000	300-600	tot 1200
<b>Investering capaciteit (€/kWh)</b>	225	1000	/	1600
<b>Investering vermogen (€/kW)</b>	250	250	/	2500

Tabel 6: Overzicht eigenschappen batterijen [30], [40]-[42]

Door de opkomst van elektrische en hybride aandrijvingen vinden laatstgenoemde types hun weg naar de scheepvaart, vooral in systemen van beperkt vermogen of wanneer er zeer hoge eisen gesteld worden aan de opslag van energie (militaire toepassingen). Afgezien van deze nichetoeepassingen, wordt in de scheepvaart hoofdzakelijk gebruik gemaakt van loodaccu's. Dit type batterijen is goed gekend, robuust en heeft zijn sporen verdiend in maritieme installaties, alles wijst erop dat dit type ook in de toekomst de markt zal blijven domineren.

Loodaccu's kunnen op verschillende wijzen worden ingedeeld:

- fase van het elektrolyt: "natte of droge" accu's;
- aard van de toepassing: startaccu (cranking engine) of "deep cycle accu".

Natte accu's worden veelvuldig toegepast in de automobiellindustrie, het elektrolyt is vloeibaar en de batterij is niet afgesloten. Tijdens de eindfase van het laadproces, wanneer de batterij bijna 100 % geladen is, kan dissociatie van water optreden waarbij een explosief mengsel van water- en

zuurstofgas wordt gevormd. Dit type batterijen vergt controle, onderhoud (bijvullen van gedestilleerd water) en een deugdelijke ventilatie van de accu's. Bij droge, gesloten accu's kan het elektrolyt gelvormig zijn (gel-accu's) of geabsorbeerd in een microporeus materiaal (AGM-accu's, "Absorbed Glass Material"). Deze accu's hebben bij normaal gebruik geen last van gasvorming, moeten niet bijgevoerd worden en zijn daarom hermetisch afgesloten. Omdat zich bij accidentele hoge stromen toch waterstof kan vormen, zijn deze batterijen voorzien van een overdrukventiel. Droge batterijen worden algemeen aangeduid met de term VRLA-accu ("Valve Regulated Lead Acid").

De fase van het elektrolyt bepaalt dus het onderhoud, de eisen aan de laadinrichting en de prestaties. Door het mogelijke lekken van elektrolyt en de hogere eisen qua ventilatie bij natte uitvoering, worden in de scheepvaart hoofdzakelijk VRLA-accu's gebruikt. Deze laatste zijn duurder, maar nagenoeg vrij van onderhoud, waardoor ze ook op minder bereikbare plaatsen – en in elke mogelijke positie – kunnen worden geïnstalleerd.

Loodaccu's kunnen ook nog worden opgedeeld naargelang hun toepassing:

- Startaccu's zijn zo gebouwd dat ze kortstondig zeer hoge stromen verdragen, bij diepe ontladingen kunnen de platen onherstelbaar kromtrekken. Dit type wordt vooral voor het starten van dieselmotoren aangewend.
- Tractie-accu's ("deep-cycle" accu's) vervullen precies de omgekeerde noden: ze kunnen diep ontladen worden, maar takelen af door hoge stromen. Om het vervormen van de platen bij diepe ontlading tegen te gaan, zijn deze platen relatief dik uitgevoerd.

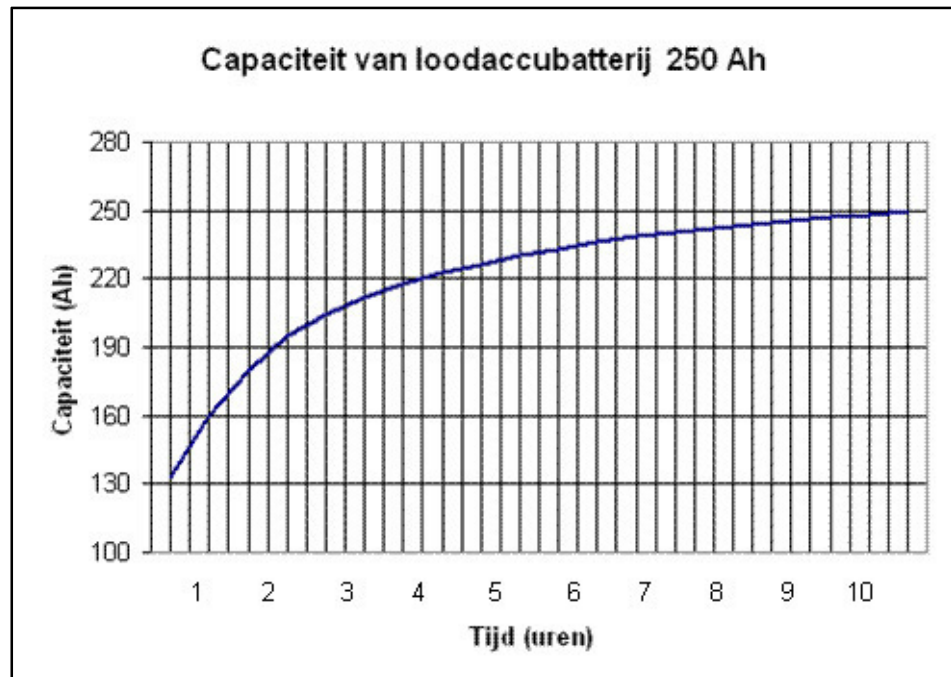
### **13.2. Beperkingen gebruik & eigenschappen loodaccu's**

De levensduur – of het aantal laad/ontlaadcycli – van een loodaccu is in grote mate afhankelijk van het gebruik ervan, algemeen neemt men aan dat een batterij aan vervanging toe is wanneer ze minder dan 80 % van haar oorspronkelijke capaciteit haalt. Om de veroudering van een batterij aanvaardbaar te houden, zijn er verschillende grenzen aan het gebruik ervan [43]:

- Laad-/ontlaadkarakteristieken: de levensduur van een loodaccu daalt drastisch met de ontlaaddiepte (DOD of "Depth Of Discharge"), dit onder andere door de reeds vernoemde vervormingen bij diepe ontlading. Om toch een bruikbare stockage van energie te bekomen stelt men dat een batterij (frequent) tot maximaal 50 à 60 % van haar capaciteit ontladen mag worden, ook het karakter en de hoogte van de ontlaadstroom heeft een belangrijke invloed. Bij continue belasting adviseert men zelfs om de ontlaadstroom te beperken tot 25 % van de capaciteit.  
Om vroegtijdige veroudering tegen te gaan moet de laadstroom aangepast worden aan de ladingstoestand van de batterij: de laadsnelheid bedraagt typisch 30 à 40 % van de capaciteit (CAR of "Charge Acceptancy Rate"), maar neemt sterk af wanneer de batterij bijna 100 % geladen is.



Bij beperkte laadtijden is het maar zinnig om een loodaccu tot ongeveer 80 % van zijn volledige capaciteit te laden (zie Figuur 27: Typische laadcurve loodaccu). Om beschadiging door sulfurisatie te voorkomen dient een loodaccu op geregeld tijdstippen wel volledig geladen te worden.



Figuur 27: Typische laadcurve loodaccu

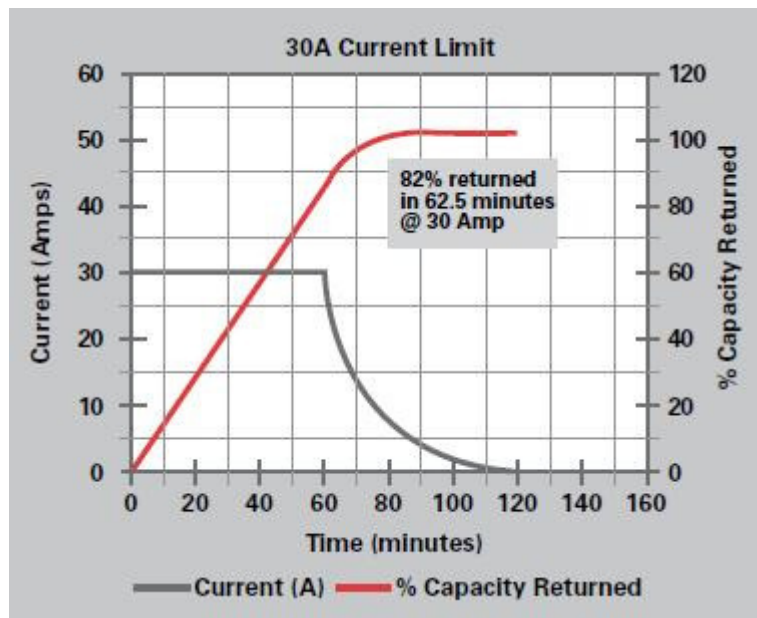
Door dit beperkte gebruiksvenster moet de capaciteit van een batterijbank gemiddeld 3 à 4 keer groter gedimensioneerd worden dan wanneer de capaciteit van de accu's volledig benut zou kunnen worden. Gezien de beperkte CAR van loodaccu's moet de lader niet heel zwaar worden uitgevoerd, de karakteristieken van de batterijen zijn hier een limiterende factor.

- **Temperatuur:** naast de omgevingstemperatuur beïnvloedt ook de intensiteit van de interne chemische reactie de temperatuur van een batterij. De capaciteit stijgt bij toenemende temperatuur, de levensduur daalt echter sterk omdat de chemische afbraakprocessen versnellen bij hogere temperatuur. De levensduur van een batterij wordt door de fabrikant opgegeven bij een omgevingstemperatuur van 20 °C, algemeen wordt aangenomen dat de levensduur halveert per 10 °C temperatuurstijging [40].
- **Zelfontlading:** de zelfontlading van loodaccu's is beperkt ten opzichte van de andere types herlaadbare batterijen, maar de levensduur daalt sterk bij diepe ontladingen. Daarom moeten loodaccu's eigenlijk continu of regelmatig bijgeladen worden. Dit probleem stelt zich wanneer schepen voor lange tijd onbemand in havens liggen en geen gebruik (kunnen) maken van walstroom, eventueel moeten de batterijen dan losgekoppeld worden van de elektrische installatie om versnelde zelfontlading te voorkomen.
- **Gewicht:** loodaccu's worden gekarakteriseerd door een lage energie- en vermogensdichtheid (zie Tabel 6), voor eenzelfde capaciteit neemt het gewicht toe: een capaciteit van 2000 Ah resulteert bij 24 V (48 kWh) in een installatie van 1000 kg.

### 13.3. Recente ontwikkelingen en besluit *New Belgica*

Recent (2006) werden loodaccu's ontwikkeld met sterk verbeterde laad- en ontlad-karakteristieken, deze batterijen zijn een verfijning van het AGM-type en maken gebruik van zuiver lood en geponste ipv gegoten platen (TPPL of "Thin Plate Pure Lead")[43]. De fabrikant<sup>12</sup> geeft aan dat de TPPL-technologie hogere laad- en ontladstromen en bovendien diepere ontladingen toelaat: door het gebruik van zuivere materialen en zeer dun uitgevoerde platen, wordt een compacte cel verkregen waarbij de spanningen (eigen aan hoge stromen en diepe ontladingen) beperkt worden.

Het laden van TPPL-batterijen kan met stromen die tot 600 % van de capaciteit bedragen, tegenover 40 % bij traditionele loodaccu's, waardoor de laadtijden ook ongeveer vijftien keer korter kunnen. Met een laadinrichting die krachtig genoeg is, kan een TPPL-accu van 0 tot 100 % worden geladen in 30 minuten. In deze situatie wordt het vermogen van de alternator dan ook de limiterend factor. Een laadcurve van een 40 Ah TPPL-batterij is weergegeven in Figuur 28, de laadstroom is hier evenwel beperkt tot 30 A (75 % van de capaciteit).



Figuur 28: Laadcurve TPPL-batterij [45]

Naast de hogere stromen zijn deze batterijen ook in staat dieper ontladen te worden (de batterij overleeft 400 cycli tot 80 % DOD) en heeft een accidentele volledige ontlading minder nefaste gevolgen voor de levensduur.

TPPL-batterijen als vervanging van loodaccu's in een conventionele installatie kunnen een aanzienlijk langere levensduur presenteren. Past men ook de laadinstallatie aan, dan kan een deel van de hogere levensduur omgezet in betere algemene prestaties en gereduceerde laadtijden.

<sup>12</sup> EnerSys [44]. De TPPL-batterijen worden aangeboden onder de merknaam "Odyssey".

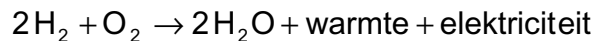
Opvallend is dat deze batterijen tegenover klassieke loodaccu's te koop zijn aan beperkt hogere kosten: voor eenzelfde capaciteit ligt de prijs heden 20 à 30 % hoger.

Gezien de sterk verbeterde prestaties aan een gelijkaardige kost lijken TPPL-batterijen een evidente keuze aan boord van de *New Belgica*. De batterijen zijn wereldwijd beschikbaar en zitten niet meer in hun ontwikkelingsfase, zoals Li-ion en andere hoogwaardige types.

## **14. Brandstofcellen**

### **14.1. Technologie**

Brandstofcellen zijn, net als batterijen, elektrochemische energieomzetters: de chemische (redox-) reactie van waterstof en zuurstof/lucht resulteert in water en warmte, waarbij tussen anode en kathode een potentiaalverschil ontstaat. Beide elektroden zijn, zoals bij een accu, van elkaar gescheiden door een elektrolyt. De werking verschilt van een batterij of accu in die zin dat een brandstofcel een open thermodynamisch systeem is: de reagentia worden continu aangevoerd en zitten niet opgesloten in de cel. De basisreactie luidt als volgt:



Omdat chemische energie hier rechtstreeks wordt omgezet in elektrische energie is het rendement van een brandstofcel vrij hoog, veel hoger dan klassieke generatie via de Carnotcyclus (hierbij wordt de energie eerst omgezet in thermische energie, wat tot aanzienlijke verliezen leidt).

Totaalrendementen van installaties op basis van brandstofcellen zijn typisch 50 %, wanneer ook de vrijgekomen warmte nuttig wordt aangewend (CHP, "Combined Heat and Power), kunnen de rendementen oplopen tot 90 % [46]. Naast de hoge efficiëntie komen er ook geen schadelijke gassen vrij: water is het enige restproduct.

Brandstofcellen zijn momenteel in volle ontwikkeling en worden door sommigen als de elektriciteitsbron van de toekomst aanzien. Het gebruik van brandstofcellen is ook een manier om de afhankelijkheid van diesel te verlagen: de benodigde waterstof kan ook – via een reformer – bekomen worden uit hernieuwbare energiebronnen zoals bijvoorbeeld bio-methanol (een afgeleide van glycerine, op zijn beurt een restproduct bij de productie van biodiesel).

Grootste remmende factor op de introductie van brandstofcellen is momenteel de installatiekost, al moet wel opgemerkt worden dat de onderhoudskosten nagenoeg nihil zijn en de meeste installaties geen uitval kennen. Daarnaast zorgt de eventuele nood aan zuivere waterstof tot een uitbreiding van de installatie met productie- en/of opslageenheden voor aangezien het transport van waterstof niet evident en heden zeer beperkt is.

#### **14.1.1. Productie en opslag van zuivere waterstof**

De productie van zuivere waterstof via elektrolyse van water is energie-intensief en doet het hoge rendement en het ontbreken van schadelijke uitstoot (tenzij de elektriciteit afkomstig was van een hernieuwbare energiebron) grotendeels teniet. In praktijk wordt elektrolyse maar voor 5% van de mondiale waterstofproductie aangewend, en dan slechts daar waar kleine hoeveelheden zéér zuivere waterstof nodig zijn.

Het overgrote deel van de zuivere waterstof wordt heden geproduceerd via stoomreforming van een fossiele brandstof (meestal aardgas/methaan): bij grote druk en temperatuur ontstaat onder inwerking van een katalysator een waterstofrijk gasmengsel dat geschikt is om aan een brandstofcel aan te leveren. Bij het gebruik van gereformeerde brandstof in plaats van zuivere waterstof ontstaat er een lokale CO<sub>2</sub>-productie, de emissie van andere schadelijke gassen, zoals SO<sub>x</sub> en NO<sub>x</sub> is evenwel nihil.

Door haar karakteristieken is de opslag en distributie van de bekomen waterstof niet eenvoudig of zonder gevaar en moet het totaalrendement van het gebruik van een brandstofcelinstallatie (nuttige energie tegenover de som van inherent aanwezige en geïnvesteerde energie) naar beneden bijgesteld worden.

### 14.1.2. Types

De meest gangbare opdeling van de bestaande brandstofcellen is één op basis van het medium tussen anode en kathode: het gebruikte elektrolyt bepaalt de typische gebruikstemperatuur en het haalbare vermogen (zie Tabel 7, [46]-[48]).

Fuel cell type	Elektrolyte	Temperature	Power output
<b>Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)</b>	Solid polymer	50 – 100 °C	<1 kW – 250 kW
<b>Alkaline fuel cell (AFC)</b>	Aqueous solution of potassium hydroxide	90 – 100 °C	10 kW – 100 kW
<b>Phosphoric acid fuel cell (PAFC)</b>	Liquid phosphoric acid	150 – 200 °C	50 kW – 1 MW (typ. 250 kW)
<b>Molten carbonate fuel cell (MCFC)</b>	Molten mixture of lithium, sodium and potassium carbonates	600 – 700 °C	<1 kW – 1 MW (typ. 250 kW)
<b>Solid oxide fuel cell (SOFC)</b>	Special ceramics (dry)	600 – 1000 °C	<1 kW – 3 MW (prop. to temp.)
<b>Direct methanol fuel cell (DMFC)</b>	<i>idem</i> PEMFC	60-130 °C	<i>kW's</i>

Tabel 7: Types brandstofcellen

Brandstofcellen van hoog vermogen die werken bij hoge temperaturen (MCFC en SOFC) worden typisch gebruikt voor grootschalige (residentiële) elektriciteitsproductie op afgelegen plaatsen of in industriële omgevingen. Door de hoge werkingstemperatuur van deze types moeten zij niet gevoed worden met zuivere waterstof: normale brandstoffen dissociëren in de brandstofcel en leveren zo de nodige waterstof, men spreekt van interne reforming. Door de hoge werkingstemperaturen zijn er beperkingen op het dynamisch gedrag van deze systemen. De lagere vermogens die werken bij lage temperaturen (PEMFC, AFC en PAFC) vindt men vooral in mobiele toepassingen, dus ook in de transportsector.

De Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) is afgeleid van de PEMFC en gebruikt net zoals deze laatste een polymeer-elektrolyt. Daar waar de PEMFC waterstof maakt door (stoom-)reformatie van methanol, wordt er bij de DMFC een mengsel van methanol en water rechtstreeks aan de anode van de brandstofcel aangeboden. Hier is dus sprake van interne reforming, maar bij lage temperaturen.

Het gebruik van (interne of externe) reforming is in vele opzichten te prefereren boven het aanbieden van zuivere waterstof aan een brandstofcel. Vooreerst bestaan er verschillende werkingsprincipes en kan reforming op basis van zeer diverse primaire brandstoffen, in praktijk wordt vooral stoomreforming van aardas of methanol toegepast. Door reforming is geen (of slechts een beperkte) opslag van waterstofgas nodig wat de veiligheid en de omvang van de installatie gevoelig beïnvloedt, de benodigde waterstof wordt hier meer “on demand” geproduceerd. Naast de eenvoudigere opslag is ook de beschikbaarheid van de genoemde brandstoffen beter.

## **14.2. Brandstofcellen in de scheepvaart**

Brandstofcellen werden met succes geïmplementeerd op diverse types vaartuigen. Het potentieel is zeer groot bij militaire toepassingen en bij duikboten in het bijzonder. Voor onderwatervaartuigen is men steeds op zoek geweest naar een luchtonafhankelijk voortstuwing (AIP of “Air Independent Propulsion”). Dieselmotoren vereisen onmogelijk grote luchthoeveelheden, de eerste experimenten met brandstof en zuurstof stammen dan ook al van tijdens de Tweede Wereldoorlog. Deze installaties bewezen hun inherent gevaar door regelmatig te exploderen, vandaag is de technologie veiliger en worden waterstof en oxiderend reagens in een dubbele wand rond de druktank opgeslagen. Bijkomend voordeel is hier dat de trillingen van de aandrijvende elektromotor nagenoeg nihil zijn en dat deze duikboten daardoor virtueel onzichtbaar worden, ook de warmteontwikkeling is zeer beperkt.

Een meer civiele toepassing van brandstofcellen vindt men bij vaartuigen die opereren in kustwateren, zowel op passagiers- als op vrachtschepen. Kleine systemen kunnen rond een DMFC zijn opgebouwd, grotere systemen (alook duikboten) zijn voorzien van een PEMFC. Op vrachtschepen of toepassingen waar hoge temperaturen geen probleem vormen, worden soms van een SOFC voorzien, hierbij wordt de benodigde waterstof meestal ter plaatse geproduceerd door middel van reforming (bijvoorbeeld uit methanol). De warmte die vrijkomt in de brandstofcel kan aangewend worden als voorverwarming bij de stoomreforming.

Onderzoek<sup>13</sup> werd uitgevoerd naar de geschiktheid van brandstofcellen als vervanging voor aggregaten, meer bepaald voor generatie van elektriciteit wanneer schepen in havengebied vertoeven. Dit omdat sommige landen en havens strenge eisen stellen op vlak van uitstoot en deze trend zich in de toekomst hoogstwaarschijnlijk zal voortzetten. Als belangrijkste parameters werden onderzocht: rendement, afmetingen en uitstoot van de installatie. Hierbij werd verder ook rekening gehouden met veiligheid, wetgeving en beschikbaarheid van brandstof.

De te vervangen dieselgenerator had een nominaal vermogen van 125 kW en die vervangende brandstofcel moest ook qua afmetingen en gewicht gelijkwaardig zijn aan de bestaande combinatie. In deze vermogenscategorie bieden brandstofcellen van het type PEMFC en SOFC – vermogens van enkele kW's tot 1 MW – zich aan. Het PEMFC-systeem werkt met stoomrefractie van methanol en een nageschakelde CO-zuivering omdat dit de brandstofcel vervuult. Het SOFC-systeem is gelijkaardig, maar behoeft geen CO-zuivering. Dit systeem werkt wel op zeer hoge temperatuur

---

<sup>13</sup> Onderzoek door het ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) en Ecofys, met als subject een multipurpose droge ladingschip met een laadcapaciteit van 7300 ton [49].

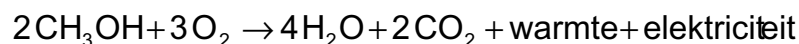
waardoor het dynamisch gedrag van de installatie trager is. In beide gevallen kan de warmte van de brandstofcel en van het reactieproduct benut worden als voorverwarming in de stoomreformer.

In deze studie ging de voorkeur uit naar het PEMFC-systeem: de levensduur van het PEMFC-systeem (20000 h) is 20 keer langer dan die van het SOFC-systeem. Ook kan hier het voedingswater van de stoomreformer herbruikt worden en is er dus geen constante aanvoer van vers, zuiver water nodig.

Beide systemen werken op methanol: een kleurloze vloeistof met welbekende eigenschappen die frequent wordt toegepast in diverse industrieën. De opslag van methanol is in vele opzichten te verkiezen boven de opslag van waterstof in drukvaten. Enige nadelen zijn de toxiciteit en het lage vlampunt<sup>14</sup>: 11 °C (brandstoffen met een vlampunt lager dan 60 °C zijn in principe niet toegelaten voor elektriciteitsproductie aan boord, een veiligheidsstudie dringt zich per installatie op). Verder is methanol biologisch afbreekbaar, in alle verhoudingen mengbaar met water en heeft het dus een lage milieubelasting. In het algemeen is de opslag van methanol (voor deze systemen 0,55 l/kWh) bepalend voor de systeemgrootte. Beide systemen halen een totaal elektrisch rendement van ongeveer 42 %, met nuttig gebruik van de vrijgekomen warmte kan het CHP-rendement bij het SOFC-systeem bijna 70 % bedragen.

De aanvoer van waterstof (reforming) kan ook uit andere brandstoffen geschieden dan methanol, de Noorse ferry Glutra heeft een PEMFC-installatie aan boord van 50 kW waarbij waterstof uit aardgas gewonnen wordt [50]. De moeilijkheden bij de opslag van vloeibaar aardgas (LNG) aan boord wogen in dit geval niet door omdat er al opslagfaciliteiten aanwezig waren voor de propulsie-gasmotoren en omdat aardgas in Noorwegen overvloedig verkrijgbaar is. Er zijn ook PEMFC op de markt verkrijgbaar van nog lager vermogen (minder dan 10 kW) [47].

Voor lagere vermogens, typisch kleine (zeil-)jachten of rivierboten, kan een DMFC geïnstalleerd worden: deze eenheden kunnen bijvoorbeeld continu de servicebatterijen laden van een schip onder zeil, zonder hiervoor een aggregaat te moeten aanspreken. De elektrische spanning aan de klemmen van een DMFC is veeleer gering (bij spanningen vanaf 20 V kan er nagenoeg geen vermogen meer geleverd worden), maar kan gedurende een zeer lange tijd worden aangehouden. De redoxreactie luidt:



De DMFC stoot dus lokaal CO<sub>2</sub> uit. De hoeveelheden zijn wel zeer beperkt en tot dit niveau grotendeels oplosbaar in het restwater. Er worden marine modellen van dit type aangeboden met vermogens tot ongeveer 70 W, welke dus ongeveer 1,5 kWh per dag kunnen leveren. Deze toestellen verbruiken 1,1 l methanol per kWh, voor methanol wordt ongeveer € 10/l gerekend. Totaalprijs voor een brandstofcel van dit vermogen bedraagt € 5000 [51].

---

<sup>14</sup> Laagste temperatuur waarbij een stof nog voldoende damp vrijgeeft om met een vonk of gloeiend voorwerp tot ontsteking te worden gebracht.

### **14.3. Besluit *New Belgica***

Gezien de stand van de technologie en de beperkte ervaring in met brandstofcellen op schepen zoals de *New Belgica* is het onwaarschijnlijk dat deze replica hiermee uitgerust zal worden, al is vooral de hoge installatiekost de belangrijkste remmende factor in dit project. De beschikbare brandstofcellen in de vermogenscategorie van meerdere kW's (Siemens: 34 kW, PEMFC; Wärtsilä: 20 kW, SOFC) zijn geen serieproducten en worden hoofdzakelijk in demonstratie- of militaire projecten toegepast. Om een opslag van waterstof te vermijden, zou een reforming-eenheid geïnstalleerd moeten worden. Methanol kan in beide gevallen als brandstof dienen, wat naar opslag vrij weinig complicaties schept. DMFC-systemen zijn heden van een te laag vermogen om zinvol te zijn op de *New Belgica*.

Wanneer deze technologie in de toekomst betaalbaar zou worden en beter zou aansluiten op de noden van de *New Belgica*, blijft de optie bestaan om een FC-systeem (als aanvulling) te installeren en het gebruik van dieselmotoren om elektriciteit op te wekken verder te beperken. De reeds vernoemde voordelen tegenover klassieke aggregaten zijn legio: een brandstofcel is uiterst stil en compact, ook het onderhoud is uiterst beperkt. Voor elektriciteitsproductie hebben zij een hoog rendement gecombineerd met een afwezige/minimale uitstoot en deze systemen hebben reeds bewezen bedrijfszeker te zijn. Keerzijde is de installatiekost en de eventueel problematische opslag van waterstof of een andere primaire brandstof naar veiligheid en kosten toe. Een reformer maakt het systeem complexer en dus kwetsbaarder.

Zoals reeds vermeld bij de elektrische aandrijvingen is het overproduceren van energie om deze daarna in batterijen te stockeren geen optimale strategie. Beter is het een dynamische productie-installatie afhankelijk van de noden te laten produceren. Met brandstofcellen is de elektriciteitsproductie moeilijk aan te passen aan variërende lasten, deze presteren namelijk het best wanneer zij gedurende langere tijd een constant vermogen moeten leveren (cfr. het dynamisch gedrag van hoge temperatuursbrandstofcellen). Deze eigenschap speelt in het nadeel bij een eventuele plaatsing op de *New Belgica*, het uitbatingprofiel zal niet gelijkend zijn op dat van meer commerciële vaartuigen en zelfs het benodigd vermogen op een wereldreis kan gevoelig schommelen. Hierdoor moet de capaciteit van een energiebuffer (batterijen) vergroot worden en zal het FC-systeem vrij klein gedimensioneerd moeten worden om een continue werking te garanderen (op een basislast). De kosten van een installatie lijken evenwel niet evenredig af te nemen met de grootte ervan.



## 15. Zonnepanelen

### 15.1. Technologie

Zonnepanelen zijn de laatste jaren sterk in opmars in de civiele en woningbouw: geplaatst op daken van gebouwen en dan vooral als lokale energievoorziening, veelal aanvullend op een bestaande installatie. Een matig rendement, beperkte levensduur en hoge installatiekost maakt dat de plaatsing in de meerderheid van de gevallen slechts rendabel wordt door subsidiëring en een eventueel belastingsvoordeel toegekend door een overheidsinstantie.

Het vermogen van zonnepanelen wordt uitgedrukt in kWp (kilowattpiek), dit is het vermogen bij "Standard Test Conditions":

- zonnestraling: 1000 W/m<sup>2</sup>;
- AM ("Air Mass"<sup>15</sup>) 1,5;
- celtemperatuur: 25 °C.

De benodigde oppervlakte voor een bepaald vermogen is betrekkelijk hoog: voor 1kWp moet men typisch 8 m<sup>2</sup> aan zonnepanelen installeren, hiervoor krijgt men in de Benelux op jaarbasis ongeveer 800 kWh elektriciteit. Als algemene richtwaarde wordt 50 à 170 W/m<sup>2</sup> aangenomen.

De karakteristieken van een zonnepaneel zijn vooral afhankelijk van het gebruikte materiaal:

- mono- en polykristallijn silicium: harde, traditionele zonnepanelen met glasplaat;
- amorf silicium: flexibele zonnepanelen (dunne film).

Kristallijne zonnepanelen zijn het duurst, hebben een hoog rendement (vermogens tot 170 Wp/m<sup>2</sup>) en een lange levensduur (+25 j). De flexibele variant is goedkoper, maar zowel rendement (vanaf 50 Wp/m<sup>2</sup> [52]) als levensduur (15 – 25 j) liggen lager. Zonnepanelen worden in het algemeen gekarakteriseerd door een laag vermogen per m<sup>2</sup> en een aanvaardbare levensduur, maar vooral een zeer hoge kost voor de behaalde efficiëntie.

### 15.2. Zonnepanelen in de scheepvaart

Zonnepanelen worden altijd toegepast als hulpenergievoorziening en overwegend op vaartuigen met een relatief klein energieverbruik, vaak in combinatie met zuiver elektrische aandrijvingen (bijvoorbeeld rivierboten). Op zeil- en motorjachten worden veelal flexibele zonnepanelen gebruikt die aanluit op de vorm van dek of opbouw. In zonovergoten regio's experimenteert men met zogenaamde "solar sails": rigide vleugelprofielen voorzien van zonnecellen. Deze vaartuigen kunnen bij goed weer zeilen en zonne-energie aanwenden of opslaan in batterijen zodat de geïnstalleerde aandrijving minimaal moet worden aangesproken. Een energievoorziening die enkel uit zonnepanelen bestaat, treft men uitsluitend aan in zonnebootraces.

---

<sup>15</sup> Air Mass drukt de relatieve dikte van de luchtmassa bij een bepaalde zonnestand uit t.o.v. de dikte van de luchtmassa bij loodrechte zoninstraling (AM 1). Bij AM 1,5 heeft het zonlicht deze afstand 1,5 keer afgelegd.

Ondanks het beperkte vermogen, zijn zonnepanelen zeer geschikt om de ontlading van loodaccu's tegen te gaan: door een continue, lage laadstroom kunnen de batterijen nooit volledig ontladen worden, wat nefast zou zijn voor de levensduur (zie hoofdstuk 13.2).

### **15.3. Besluit *New Belgica***

Het gebruik van zonnepanelen op de *New Belgica* is nagenoeg onmogelijk. Ten eerste zou er voor een redelijk vermogen een grote oppervlakte aan zonnepanelen geïnstalleerd moeten worden terwijl de beschikbare oppervlakte zeer gering is: alle dekken en daken van dekhuisen moeten beloopbaar zijn. Daarenboven is de rechtstreekse lichtinval op een (dwarsgetuigd) zeilschip over het algemeen beperkt. Niet in het minst het feit dat zonnepanelen afbreuk doen aan de authenticiteit van deze replica, maakt dat zonnepanelen zelfs niet als aanvullende energievoorziening zullen worden voorzien.

Een variant van deze technologie verdient vermelding en zou wel kunnen worden toegepast op de *New Belgica*: zeilen uit fotovoltaïsch materiaal. Reeds in de jaren '90 werden hierrond (voor zowel langs- als dwarsgetuigde zeilschepen) patenten aangevraagd, maar tot op heden zijn deze zeilen niet commercieel beschikbaar. Het idee bestaat erin een film te bedrukken met een nano-inkt die bij lichtinval een spanningsval genereert – door deze film te lamineren met lagen die onder andere voor de sterkte en vormvastheid van het zeil moeten zorgen, zou een zeildoek bekomen worden dat aan de geldende normen voldoet. Het ontbreken van informatie over de mogelijke ontwikkeling van deze zeilen doet vermoeden dat het concept met de huidige stand van de technologie niet realiseerbaar is.

Het titelblad van het patent op fotovoltaïsche zeilen (voor vierkantgetuigde schepen) is opgenomen in Bijlage F.

## V. Schroefregeneratie

Over schroefregeneratie op deze schaal (en in deze vorm<sup>16</sup>) is nagenoeg niets bekend, dit onder andere door de beperkte toepasbaarheid (zeilschepen die voldoende onder zeil varen) en het bestaan van andere technieken (generatie door middel van zonne- en/of windenergie) die in staat zijn een beperkt verbruik op te vangen. Bovenal is schroefregeneratie enkel mogelijk op schepen die uitgerust zijn met een electrical drive ((diesel-)elektrisch of hybride), doet recuperatie de scheepssnelheid een weinig afnemen en zijn de verwachtingen inzake energierecuperatie beperkt.

Heden experimenteert men wel op kleinere schaal met schroefregeneratie: kleine plezierzeilvaartuigen die meestal omgebouwd worden van klassieke dieselaandrijving naar een hybride configuratie. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid in om tijdens het zeilen de elektrische machine als generator te gebruiken en batterijen op te laden of verbruikers van energie te voorzien. Helaas zijn ook hier zéér weinig gegevens beschikbaar en ontbreekt het aan gestandaardiseerde testmethodes. De weinige informatie kan wel aangewend worden om een ruw idee te krijgen van de limieten van schroefregeneratie.

Een absolute bovengrens aan de regeneratie wordt gevonden middels de wet van Betz, die van een groot aantal vereenvoudigingen uitgaat. Daarnaast werd via de schroefkarakteristieken van een courant schroeftype (Wageningen B-Series) een inschatting gemaakt van het te regenereren vermogen.

### 16. *Wet van Betz*

#### 16.1. **Theorie**

De wet van Betz [53] stelt dat er een maximum bestaat aan de energie die via een rotor kan onttrokken worden aan een stromend fluïdum. Deze theorie is oorspronkelijk ontwikkeld voor windmolens en dus met lucht als fluïdum, maar kan principieel ook worden toegepast op schroeven in water. Het model gaat uit van een “actuator disk”, waardoor dezelfde vereenvoudigingen gelden als bij de impuls-theorie voor schroefwerking. De werkelijke schroefgeometrie wordt dus verwaarloosd in de wet van Betz en moet later via een correctie verrekend worden.

De wet van Betz luidt:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A_0 V^3$$

---

<sup>16</sup> Voor plezierzeiljachten bestaan er andere systemen die energie uit de volgstroom regenereren. Zo zijn er gesleepte impellers (eventueel kleine windgenerators die omgebouwd kunnen worden) die achter het schip door het zog getrokken worden en sleepkoorden voorzien van een schroefblad, het draaiend touw is hier verbonden met de generator.

In een ideëel geval kan bijgevolg maximaal  $16/27^e$  (of bijna 60 %) van de kinetische energie aanwezig in de stroming onttrokken worden, door de rotorvorm en andere niet-ideale omstandigheden wordt dit maximum niet gehaald<sup>17</sup>. Belangrijk voor schroefregeneratie is de stroming ter plaatste van de schroef tijdens het zeilen: door de volgstroom en de niet-uniforme aanstroming is de werkelijke (axiale) stroming ter plaatse van de schroef lager dan de scheepssnelheid, deze fenomenen wegen met een derde macht zwaar door in de wet van Betz. Via het volgstroomgetal ( $w$ ) – dat voor de *Belgica* 0,31 bedraagt – vindt men de werkelijke axiale aanstroming ( $V_a$ ) van de schroef.

Als correctie voor de rotorvorm werd het rendement van de schroef aangenomen, hier in een eerste fase 50 % verondersteld (in een latere fase werd de werkelijke correctie bepaald, welke nog een weinig strenger is: 42,3 %, zie hoofdstuk 17).

In wat volgt wordt verder uitgegaan van:

- zout water:  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ;
- schroefdiameter:  $D = 1,4 \text{ m}$ .

De maximale vermogens volgens Betz en na rotorcorrectie, uitgerekend bij verschillende vaarsnelheden, zijn samengevat in Tabel 8:

V (kn)	V (m/s)	V <sub>a</sub> (m/s)	P <sub>max</sub> (kW), Betz	P <sub>max</sub> (kW), na correctie rotor
6	3,09	2,13	4,52	2,26
7	3,60	2,48	7,17	3,59
8	4,12	2,84	10,71	5,35
9	4,63	3,19	15,24	7,62
10	5,14	3,55	20,91	10,46
11	5,66	3,90	27,83	13,92
12	6,17	4,26	36,13	18,07
13	6,69	4,61	45,94	22,97
14	7,20	4,97	57,38	28,69

Tabel 8: Vermogens volgens Betz en rotorcorrectie

De energie die daadwerkelijk door de schroef aan de volgstroom onttrokken wordt, moet vervolgens omgezet worden in elektrische en/of chemische energie om te kunnen dienen als energievoorziening aan boord. Hiervoor moeten de rendementen van as, transmissie en elektrische machine + regelaar in rekening worden gebracht, het totaalrendement van 80 à 85 % lijkt hier aannemelijk, zie Tabel 9. Na een eventuele stockage in loodaccu's blijft slechts een twintigtal percent van de aanwezige kinetische energie in de volgstroom als bruikbare energie over.

V (kn)	V (m/s)	V <sub>a</sub> (m/s)	P <sub>max</sub> (kW), Betz	P (kW), klemmen generator
--------	---------	----------------------	-----------------------------	---------------------------

<sup>17</sup> Met moderne windmolens is men in staat 70 à 80 % van het maximum dat volgens Betz te capteren is op te vangen.

6	3,09	2,13	4,52	1,95
7	3,60	2,48	7,17	3,10
8	4,12	2,84	10,71	4,63
9	4,63	3,19	15,24	6,59
10	5,14	3,55	20,91	9,04
11	5,66	3,90	27,83	12,03
12	6,17	4,26	36,13	15,62
13	6,69	4,61	45,94	19,85
14	7,20	4,97	57,38	24,80

Tabel 9: Vermogens volgens Betz en totale correctie (rotor en aandrijflijn)

Bij varen onder zeil en voldoende wind wordt de *New Belgica* verondersteld 12 kn kunnen halen, in dit geval komt er (met de gestelde rendementen) aan de klemmen van de generator een vermogen van ongeveer 15 kW beschikbaar. De geregenereerde energie daalt logischerwijs bij vermindering van snelheid, bij 8 kn kan toch nog ongeveer 5 kW geregenereerd worden.

## 16.2. Validering

Uit contacten met een fabrikant van elektrische aandrijfsystemen voor plezierzeiljachten<sup>18</sup> werden enige gegevens bekomen over de prestaties van deze kleine systemen. Gezien de schaarste aan resultaten van reeds toegepaste schroefregeneratie, worden deze gegevens gebruikt om onder andere de vooropgestelde rotorcorrectie te valideren. De verkregen gegevens zijn opgelijst in Tabel 10, het volgroomgetal werd verondersteld op 0,36 (klein plezierzeiljacht):

scheeps lengte	L (m)	12,2
vaarsnelheid	V (kn)	8,5
	V (m/s)	4,37
volgroomgetal	w (-)	0,36
schroef diameter	D (m)	0,43
propulsievermogen	P (kW)	7

Tabel 10: Gegevens regeneratie Asmo Marine

In de gegeven omstandigheden was men in staat 10 A bij 48 V op te wekken – of dus 480 W. Het opgewekte vermogen vertegenwoordigt hier 6,86 % van het geïnstalleerde propulsievermogen. Een uitwerking van de wet van Betz met deze gegevens, levert gelijkaardige resultaten bij aanname dat de correctie op de rotorvorm 0,5 bedraagt (zie Tabel 11).

V (kn)	V (m/s)	V <sub>a</sub> (m/s)	P <sub>max</sub> (W), Betz	P (W), na correctie rotor
--------	---------	----------------------	----------------------------	---------------------------

<sup>18</sup> Asmo Marine, Denemarken [54].

4	2,06	1,32	101,59	50,79
5	2,57	1,65	198,41	99,21
6	3,09	1,98	342,86	171,43
7	3,60	2,30	544,45	272,22
8	4,12	2,63	812,70	406,35
8,5	4,37	2,80	974,80	487,40
9	4,63	2,96	1157,15	578,57

Tabel 11: Validering wet van Betz met gegevens Asmo Marine

Een vermogen van 480 W kan inderdaad geregenereerd worden bij een vaarsnelheid van ongeveer 8,5 kn. Wel werden de rendementen van aslijn, transmissie en machine + regelaar nog buiten beschouwing gelaten, door deze bijkomende correctie zou het te regenereren vermogen bij 8,5 kn lager uitvallen dan de waarde in de tabel. Vermoed wordt dat de rotorcorrectie juist is ingeschat (of eventueel een weinig zwaarder moet zijn: rotorcorrectie kleiner dan 0,5), maar vooral dat het veronderstelde volgstroomgetal te streng is: een afname van de volgstroom levert een hogere aanstroomsnelheid – en dus kinetische energie – ter plaatse van de schroef op. Beide aanpassingen worden aangenomen in die mate gebeuren zodat het vermogen na totale correctie (rotor en totaalrendement aandrijflijn) bij 8,5 kn opnieuw 480 W bedraagt.

### 16.3. Conclusie Belgica

Als men bij varen onder zeil enkele tot een tiental kilowatts kan regenereren, kan hiermee een gedeelte van de basislast mee opgevangen worden. Wel mag niet vergeten worden dat de bekomen waarden per definitie maxima zijn en dat de schatting van de rotorcorrectie moeilijk te valideren is: door het ontbreken van informatie over de rompvorm van het zeiljacht waarmee Asmo Marine zijn data verkreeg, moest het volgstroomgetal hier ingeschat worden en fouten op deze schatting wegen met een derde macht zwaar door op het resultaat.

Verder kon met deze aanpak niet bepaald worden in welke mate schroefregeneratie de vaarsnelheid doet afnemen. In een volgend hoofdstuk wordt een poging gedaan deze onvolkomenheden weg te werken, meer bepaald door redenering vanuit de schroefkarakteristieken.

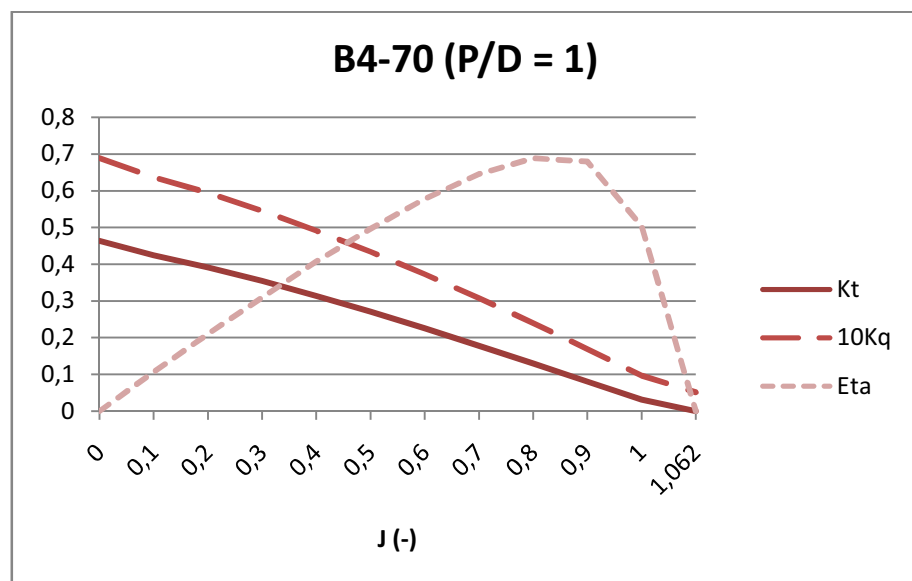
## 17. Schroefkarakteristieken

In wat volgt wordt uitgegaan van een Wageningen B-Series B4-70 schroef, gekenmerkt door volgende geometrische parameters:

- aantal bladen (Z): 4;
- bladoppervlakteverhouding ( $A_E/A_0$ ): 0,7;
- diameter (D): 1,4 m.

In een eerste fase wordt een spoed-diameterverhouding (P/D) gelijk aan de eenheid aangenomen (dit is de schroef zoals ze voor propulsie geoptimaliseerd werd, zie hoofdstuk 8.1.3), later wordt het effect van een andere verhoudingen onderzocht.

Regeneratie vindt plaats in het eerste kwadrant: aanstroomsnelheid ( $V_a$ ) en toerental (n) zijn positief zoals in bij normale schroefwerking.  $\beta$ , de hoek tussen de aanstroomsnelheid en het vlak loodrecht op de schroefas, is bijgevolg kleiner dan  $90^\circ$ . Bij normale schroefwerking kan men het werkingspunt aanduiden op een  $K_T$ - $K_Q$ -diagram (afgebeeld in Figuur 29), wat in feite slecht een gedeelte van het eerste kwadrant afbeeldt – met name het deel waarin de gebruikelijk schroefwerking plaatsvindt.



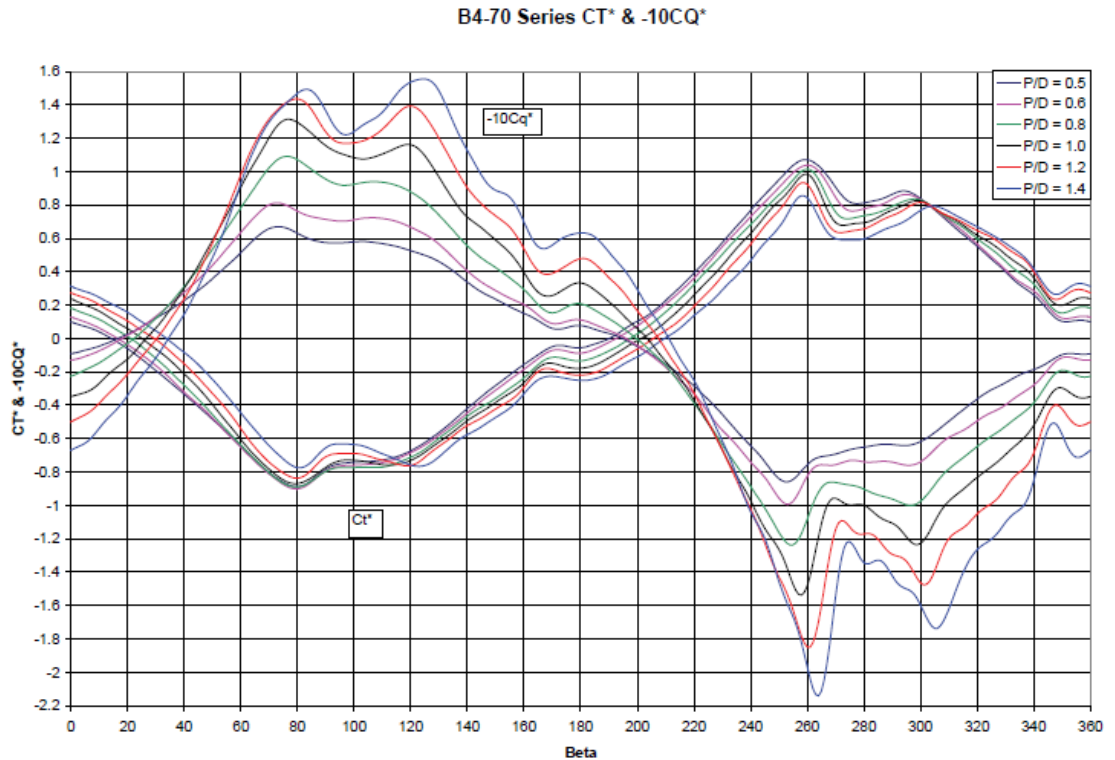
Figuur 29:  $K_T$ - $K_Q$ -diagram [55]

Bij normale schroefwerking en ontwerpvoorwaarden ligt de snelheidsgraad (J) in de buurt van maximum in de rendementscurve ( $\eta$ ). De uiterste waarden van de snelheidsgraad in dit diagram komen overeen met 2 specifieke toestanden:

- J is minimaal (0): paaltrek, geen vaarsnelheid ( $V_a = 0$  en  $\beta = 0^\circ$ ).
- J is maximaal (hier 1,062): gedwongen vaarbeweging (door bv. slepen of windvoortstuwning) met vrijdraaiende schroef zonder voortstuwende of afremmende werking ( $K_t = 0$ ).

De overgang tussen voortstuwende en afremmende schroefwerking gebeurt op het moment dat  $K_T$  nul wordt. Aangezien deze werking bij normale schroefwerking niet gewenst is, zijn de schroefkarakteristieken bij afremmende werking niet afgebeeld in het  $K_T$ - $K_Q$ -diagram.

Voor vierkwadrantenwerking van een schroef maakt men gebruik van een  $C_T^*-C_Q^*$ -diagram, welk is uitgezet in functie van  $\beta$  (zie Figuur 30). Het gedeelte dat voor schroefregeneratie van belang is, is het eerste kwadrant:  $\beta$  tussen 0 en  $90^\circ$ . Op de grens tussen eerste en tweede kwadrant is de hydrodynamische spoedhoek ( $\beta$ ) gelijk aan  $90^\circ$ , wat overeenstemt met een axiale aanstroming van het schroefblad – of dus een geblokkeerde schroef.



Figuur 30:  $C_T^*-C_Q^*$ -diagram [56]

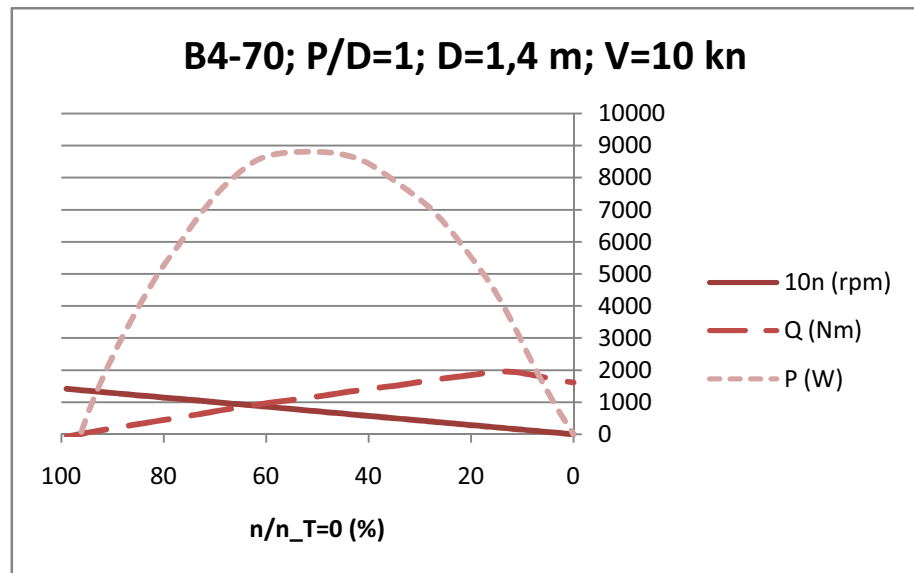
Zoals gezegd vindt in het eerste kwadrant de overgang tussen voortstuwende en afremmende werking plaats wanneer  $K_T$  gelijk wordt aan nul, voor deze schroef bij een snelheidsgraad van 1,062. Bij een gekozen diameter ( $D = 1,4$  m) moet vrijdraaiende schroef (die geen voortstuwende of remmende invloed wil uitoefenen), afhankelijk van de vaarsnelheid, aan een welbepaald toerental (vrijlooptoerental) draaien, ook  $\beta$  ligt in deze situatie vast:

$$J \approx 1,062 = \frac{V_a}{nD} = \frac{(1-0,31)V}{n \cdot 1,4} \Rightarrow n = \frac{(1-0,31)V}{1,062 \cdot 1,4}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{J}{0,7\pi}\right) \approx 26^\circ$$



Tijdens regeneratie zal de schroef aangedreven worden door het omstromende water en zal het schroeftoerental dus lager zijn dan bij  $K_T = 0$ . Uit de vierkwadrantenkarakteristiek kan het beschikbare koppel en bijhorende afremkracht bepaald worden. Het beschikbare koppel levert na vermenigvuldiging met het schroeftoerental het voor-regeneratie-beschikbare vermogen op, voor deze schroef blijkt dit vermogen maximaal te worden bij een toerental dat ongeveer de helft (exact: 52 %) is van het vrijlooptoerental, zie Figuur 31:



Figuur 31: Vermogenverloop in functie van het schroeftoerental

Als het schroeftoerental – door een juiste instelling van de generator – op 52 % van het vrijlooptoerental (dat voor een gekozen schroef enkel afhankelijk is van de vaarsnelheid) kan gehouden worden, dan is maximale vermogensoverdracht mogelijk. De resultaten met deze instelling voor snelheden van 6 tot 14 kn zijn samengevat in Tabel 12:

V (kn)	V (m/s)	Va (m/s)	$n_{Kt=0}$ (rpm)	$n_{Pmax}$	$Q_{Pmax}$ (Nm)	$Pmax$ (kW)
4	2,06	1,42	57,30	29,80	181,44	0,57
5	2,57	1,77	71,62	37,24	283,50	1,11
6	3,09	2,13	85,95	44,69	408,24	1,91
7	3,60	2,48	100,27	52,14	555,66	3,03
8	4,12	2,84	114,60	59,59	725,76	4,53
9	4,63	3,19	128,92	67,04	918,55	6,45
10	5,14	3,55	143,25	74,49	1134,01	8,85
11	5,66	3,90	157,57	81,94	1372,15	11,77
12	6,17	4,26	171,90	89,39	1632,97	15,29
13	6,69	4,61	186,22	96,84	1916,47	19,43
14	7,20	4,97	200,55	104,28	2222,65	24,27

Tabel 12: Regeneratie bij half vrijlooptoerental

De maximale vermogens liggen ongeveer gelijk met de waarden die met de wet van Betz becijferd werden. Met gegevens over de (negatieve) stuwkrachtcoëfficiënt, kan de invloed van de afremmende kracht, veroorzaakt door regeneratie, op de vaarsnelheid in rekening gebracht worden (zie Tabel 13). Om de eindsnelheid te bepalen, werd lineair geëxtrapoleerd. Bij lage vaarsnelheden (trager dan 8 kn) is de invloed van regeneratie in de voorgestelde condities zo drastisch dat er zich een iteratie opdringt, welke niet werd doorgevoerd omdat deze toestand niet realistisch is (het schip wordt te hard afgeremd).

V (kn)	R_hull (N)	T_Pmax (N)	Fwind_equiv (N)	Fwind_equiv (%)	V* (kn)	delta V (kn)
6	6578	-2008	4570	69,47	/	/
7	8771	-2733	6038	68,84	/	/
8	11175	-3570	7605	68,05	6,47	-1,53
9	20239	-4518	15721	77,68	8,50	-0,50
10	51090	-5578	45512	89,08	9,82	-0,18
11	118248	-6750	111498	94,29	10,90	-0,10
12	256718	-8033	248685	96,87	11,94	-0,06
13	331427	-9427	322000	97,16	12,87	-0,13
14	482637	-10933	471704	97,73	13,93	-0,07

Tabel 13: Invloed regeneratie (bij half vrijlooptoerental) op vaarsnelheid

Gesteld dat er een windkracht aanwezig is om het schip aan 8 kn voort te bewegen (d.i. 11175 N), dan ontstaat door regeneratie (met een toerental gelijk aan 52 % van het vrijlooptoerental bij 8 kn) een afremkracht van 3716 N. Lineaire extrapolatie<sup>19</sup> met de beschikbare gegevens leert dat de snelheid dan zou afnemen tot 6,4 kn. Uiteraard verandert nu, naast de aanstroomsnelheid, ook het (halve) vrijlooptoerental en zou de iteratie moeten doorgevoerd worden. Voor snelheden vanaf 10 kn (welke aan te nemen zeilsnelheden zijn) is de afname van vaarsnelheid beperkt en kan regeneratie op het voorgestelde toerental gebeuren.

## 18. Vergelijking resultaten

De bekomen resultaten via de schroefkarakteristieken liggen op hetzelfde niveau als de waarden bekomen via de wet van Betz met een rotorcorrectie van 0,5 – wat laat vermoeden dat de berekende waarden zinvol zijn, te meer omdat ook de verwerking van de verkregen experimentele resultaten goed aansluiten bij dit model. Opmerkelijk is vooral dat de verhouding tussen beide resultaten constant blijft over het hele snelheidsbereik (zie Tabel 14).

Verder bleek dat de spoed-diameterverhouding weinig invloed heeft op het te regenereren vermogen, enkel het vrijlooptoerental bij een bepaalde vaarsnelheid wijzigt. De verhouding tussen optimaal toerental voor generatie en vrijlooptoerental schommelt tussen 40 en 60 %, waardoor de spoed vooral bepaalt aan welk toerental de generator kan genereren. Aangezien elektrische machines over een vrij breed bereik aan toerentalen een acceptabel rendement aanhouden, lijkt het voor regeneratie niet noodzakelijk om een andere spoed-diameterverhouding te gebruiken. De schroef zoals voorgesteld in hoofdstuk 8.1.3 voldoet (zie Bijlage G).

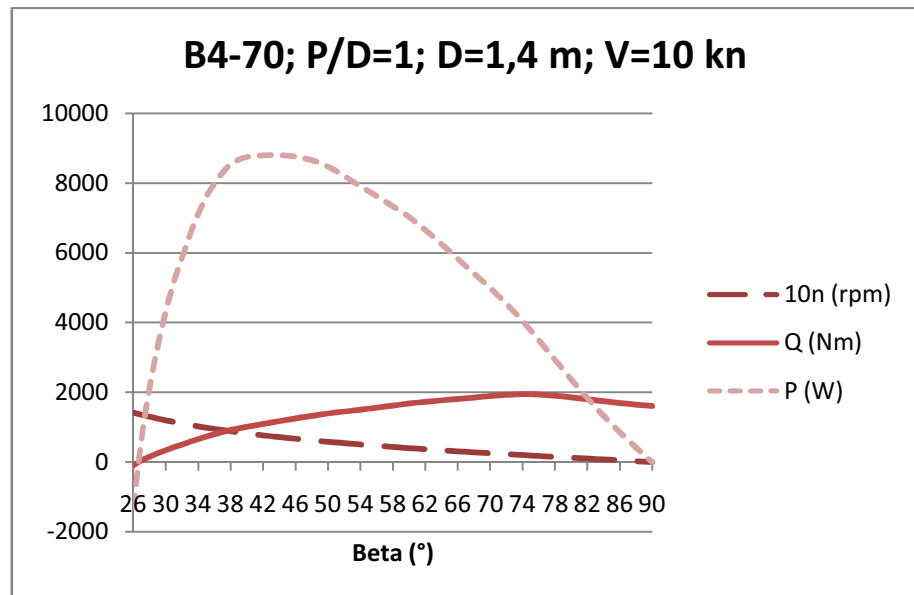
<sup>19</sup> Verantwoord: fout van 1 % in het snelheidsbereik 6 tot 8 kn.

Kleine spoed-diameterverhoudingen (bv. 0,5) resulteren bovendien in een grotere afremkracht (in dat geval tot 30 % meer bij 8 kn, zie Bijlage G), waardoor het maximaal te regenereren vermogen bij een bepaalde vaarsnelheid in principe afneemt.

V (kn)	V (m/s)	Va (m/s)	n_Pmax	Pmax (kW), schroefk.	Pmax (kW), Betz	%
6	3,09	2,13	44,69	1,91	4,52	42,30
7	3,60	2,48	52,14	3,03	7,17	42,30
8	4,12	2,84	59,59	4,53	10,71	42,30
9	4,63	3,19	67,04	6,45	15,24	42,30
10	5,14	3,55	74,49	8,85	20,91	42,30
11	5,66	3,90	81,94	11,77	27,83	42,30
12	6,17	4,26	89,39	15,29	36,13	42,30
13	6,69	4,61	96,84	19,43	45,94	42,30
14	7,20	4,97	104,28	24,27	57,38	42,30

Tabel 14: Vergelijking schroefkarakteristieken & Betz

Ter conclusie wordt opgemerkt dat het verloop van het regeneratievermogen opvallend stabiel is rond het maximum, zie Figuur 31 (i.f.v. toerental) en Figuur 32 (i.f.v.  $\beta$ ). Hierdoor kan het maximumvermogen vrij continu worden afgetapt bij fluctuaties in vaarsnelheid of schroeftoerental. Algemeen wordt meer dan 90 % van het maximaal vermogen in een bereik van 70 tot 130 % van het optimaal toerental, tussen 50 en 140 % van dit toerental blijft meer dan 75 % van het maximaal vermogen beschikbaar.



Figuur 32: Vermogenverloop in functie van Beta

## VI. Inventarisatie verbruikers

### 19. Overzicht

Zoals reeds aangehaald in hoofdstuk 5, wordt het elektrisch verbruik aan boord van een schip typisch in een aantal categorieën opgedeeld. Een poging tot inventarisatie voor de *New Belgica* is opgenomen in Bijlage H. Het in kaart brengen van alle verbruiker bleek een zeer omvangrijke opdracht, niet in het minst omdat het energieverbruik bij vele toestellen zeer afhankelijk is van het type en/of de eisen die aan het toestel gesteld worden. In praktijk gebeurt de inrichting en het opstellen van de vermogensbalans door studie bureaus die een zekere ervaring hebben opgebouwd, het is evenwel niet gelukt over dit thema een (voor schepen) bruikbare leidraad te vinden.

Gesteld dat een bruikbare inventaris van de (elektrische) verbruikers aan boord zou zijn opgesteld, kunnen verschillende bedrijfsmodi vastgelegd worden. De energievoorziening kan dan afgesteld worden op de energie die in een bepaalde modus vereist is. Bij conventionele energievoorzieningen is het aantal bedrijfsmodi meestal vrij beperkt en in feite vooral afhankelijk van het aantal generatoren. Voor een zeilschip met 2 aggregaten aan boord kunnen – in een algemeen geval – volgende modi onderscheiden worden:

Modus (1)	Modus (2)	Energievoorziening
Haven	Walstroom	Walstroom
	Geen/onvoldoende walstroom	Walstroom + generator A/B
Onder zeil	Zeer laag verbruik	Service batterijen
	Laag verbruik	Generator A/B
	Hoog verbruik	Generator A én B
Op motor	Zeer laag verbruik	Service batterijen
	Laag verbruik	Generator A/B
	Hoog verbruik	Generator A én B
Emergency		Noodgenerator of -batterijen

Tabel 15: Typische modi bij 2 aggregaten

Bij een groot verschil in behoefte tussen laag en hoog verbruik kunnen 2 generatoren van verschillend vermogen geplaatst worden, het tezamen laten werken van beide generatoren is dan evenwel moeilijk of zelfs onmogelijk. Meestal wordt geopteerd voor 2 identieke generatieplants.

In het voorgaande is enkel het wisselstroomboordnet in beschouwing genomen, het gelijkstroomboordnet (typisch 12, 24 of 48 V) wordt meestal via de alternatoren op propulsie motor en/of aggregaatmotoren geladen.

Bij elektrische aandrijvingen worden de mogelijkheden uitgebreid: de energievoorziening kan op tal van manieren worden afgesteld op het verbruik. Voor een parallelhybride systeem, zoals besproken in hoofdstuk 10.3.2, kunnen volgende bijkomende modi gedefinieerd worden (zie Tabel 16):

- Onder zeil kan in elke modus ook energie aangeleverd worden via schroefregeneratie.
- Op motor kan de elektrische machine als generator werken en, afhankelijk van het gewenste propulsievermogen, een bepaalde hoeveelheid energie leveren (100 % PTO van dieselmotor).

Modus (1)	Modus (2)	Nieuwe mogelijkheid qua energievoorziening
Onder zeil	Zeer laag verbruik	Schroefregeneratie (en opladen service batterijen)
	Laag verbruik	Schroefregeneratie (en evt. generator A/B)
	Hoog verbruik	Schroefregeneratie en generator A/B (of A én B)
Op motor	Zeer laag verbruik	PTO (en opladen service batterijen)
	Laag verbruik	PTO (en evt. generator A/B)
	Hoog verbruik	PTO en generator A/B (of A én B)

Tabel 16: Bedrijfsmodi parallelhybride

Uit de verwachtingen qua schroefregeneratie (zie hoofdstuk 18) kan voorgesteld worden om een permanent magneet synchrone machine van ongeveer 30 kW te installeren, welke dan bij hoge vaarsnelheden het maximaal te regenereren vermogen uit de volgstroom kan onttrekken en omzetten in elektriciteit. Uit het verloop van het propulsievermogen (zie hoofdstuk 8.1.3 en Bijlage E) blijkt dat voor een vaarsnelheid van 6 kn een vermogen van 35 kW vereist is, de voorgestelde elektromotor zou dus in principe ook dienst kunnen doen om aan lage snelheden (trager dan 6 kn) volledig elektrisch te varen. Deze situatie zou zich kunnen voordoen bij het wegvaren uit havengebied in veronderstelling dat de batterijen volledig opgeladen zijn, de benodigde capaciteit aan batterijbanken neemt wel sterk toe naarmate men het elektrisch van langer wil laten aanhouden. Daarnaast wordt vermoed dat het algemeen elektrisch verbruik aan boord bij afvaart veeleer middelmatig dan laag zal zijn, waardoor het aanschakelen van een aggregaat onvermijdelijk wordt en een volwaardige elektrische modus op de *New Belgica* niet realistisch lijkt.

Het optimaliseren van de verschillende modi bestaat erin groepen van verbruikers af te zonderen (bijvoorbeeld alle apparaten om te koken, te wassen, navigatie- en communicatieapparatuur enz., zie Bijlage H) om dan de gebruiksmodi af te stemmen op de bedrijfsmodi. Het bekomen inventaris is echter niet bruikbaar om deze oefening zinvol uit te voeren, ook het veronderstellen van de vermogens van allerlei apparatuur zoals lenspompen of hydraulische groepen voor de stuurinrichting is voor een ongevoefde ziel een onbegonnen opgave. Naarmate de bouw van de *New Belgica* zal vorderen en ook de inventaris/lastenboek meer vorm krijgt, kunnen de verschillende bedrijfs- en verbruiksmodi ten gronde bestudeerd worden. In het volgende hoofdstuk worden al enkele belangrijke verbruikers begroot.

## 20. Enkele belangrijke verbruikers

### 20.1. Boegschroef

In principe moet de kapitein van de *New Belgica* in staat zijn het schip onder zeil – of op motor, met behulp van de zeilen – te manoeuvreren. Om het schip gemakkelijk manoeuvreerbaar te houden en de zeilcapaciteiten van de kapitein niet zonder reden op de proef te stellen, zal de *Belgica* voorzien worden van een boegschroef. Om het vermogen van deze boegschroef te bepalen, moet men een weersconditie vastleggen tot dewelke het schip vlot moet kunnen gieren. De winddrukken horende bij de windsnelheden volgens de Beaufort-schaal zijn weergegeven Tabel 17:

Beaufort	Benaming	Windsnelheid			Winddruk
		km/u	m/s	kn	kg/m <sup>2</sup>
0	Stil	0 - 1	0,0 - 0,2	0 - 1	0,0 - 0,02
1	Lichte Bries	1 - 5	0,3 - 1,5	1 - 3	0,02 - 0,11
2		6 - 11	1,6 - 3,3	4 - 6	0,12 - 1,7
3	Matige wind	12 - 19	3,4 - 5,4	7 - 10	1,8 - 2,2
4		20 - 28	5,5 - 7,9	11 - 16	2,2 - 4,6
5	Vrij krachtige wind	29 - 38	8,0 - 10,7	17 - 21	4,6 - 8,5
6	Krachtige wind	39 - 49	10,8 - 13,8	22 - 27	8,6 - 13,7
7	Harde wind	50 - 61	13,9 - 17,1	28 - 33	13,8 - 21,5
8	Stormachtige wind	62 - 74	17,2 - 20,7	34 - 40	21,5 - 30
9	Storm	75 - 88	20,8 - 24,4	41 - 47	30 - 42
10	Zware storm	89 - 102	24,5 - 28,4	48 - 55	42 - 59
11	Zeer zware storm	103 - 117	28,5 - 32,6	56 - 63	59 - 78
12	Orkaan	117 -	32,6 -	63 -	78 -

Tabel 17: Winddrukken volgens Beaufort

Verder wordt de (laterale) oppervlakte, waarop deze winddruk in de slechtste condities inwerkt, bepaald: de lengte van het schip (36 m) vermenigvuldigd met de hoogte van de opbouw plus masten en tuigage (12 m, er wordt een beperkte zeilvoering verondersteld bij manoeuvreren). Een reductiecoëfficiënt van 0,9 wordt op deze oppervlakte toegepast omdat de laterale oppervlakte geen vlakke, dichte plaat is. De afstand tussen het inwerkingspunt van de windkracht (ongeveer midscheeps) en de boegschroef bedraagt benaderd 15 m, de afstand tussen boegschroef en het draaipunt ("pivot point") is 30 m.

Het benodigde draaimoment en stuwkracht kan dan berekend worden:

$$T = 9,81 \cdot p_w \cdot A_L \cdot L_B \cdot 0,9 \quad [\text{Nm}]$$

$$F = \frac{T}{L_p} \quad [\text{N}]$$

met :

- $p_w$ : de winddruk [ $\text{kg/m}^2$ ];
- $A_L$ : de laterale oppervlakte [ $\text{m}^2$ ];
- $L_B$ : de afstand tussen windkracht en boegschroef [m];
- $L_p$ : de afstand tussen boegschroef en draaipunt [m].

Draaimoment en stuwkracht zijn voor enkele windcondities opgesomd in Tabel 18:

Beaufort	$p_w$ ( $\text{kg/m}^2$ )	T (Nm)	F (N)
1	0,065	3719	124
3	2	114424	3814
4	3,4	194521	6484
5	6,55	374738	12491
6	11,15	637913	21264
7	17,65	1009790	33660

Tabel 18: T en F bij verschillende windcondities

De heersende windkracht bij 4 Beaufort vereist voor vlot gieren reeds een stuwkracht van bijna 6,5 kN van de boegschroef. Een boegschroef die deze stuwkracht kan leveren heeft een typisch vermogen van 30 à 35 kW. Navraag bij boegschroeffabrikanten [57]-[59] en vergelijking met gegevens van gelijkaardige schepen leert dat dit vermogen realistisch is. Deze boegschroeven hebben een tunneldiameter van ongeveer 400 mm.

Kleine boegschroeven worden klassiek door een elektromotor aangedreven, het berekende vermogen voor de *New Belgica* bevindt zich in het overgangsgebied naar hydraulisch aangedreven boegschroeven. Vanuit de TWG werd de wens geuit om de boegschroef, zo mogelijk, elektrisch uit te voeren: het onderhoud van hydraulische installaties is ongewenst. Hoewel er zich al hydraulische groepen aan boord zullen bevinden (onder andere voor de stuurinrichting), is een koppeling van deze systemen door de uiterste plaatsing tegenover elkaar niet gebruikelijk. Bij een hydraulische boegschroef wordt een afzonderlijke hydraulische groep in het vooronder geplaatst.

Elektrisch aangedreven boegschroeven worden regelmatig voorzien van een eigen of ondersteunend batterijpakket dat hoge stromen kan verdragen (zie startbatterijen in hoofdstuk 13.1), dit om het vermogensverlies door de spanningsval in de elektrische leiding op te vangen. De boegschroef is een grote elektrische belasting, maar wordt slechts zelden (bij manoeuvres) en normaal kortstondig aangesproken.

## 20.2. HVAC en de-icing

Het verwarmen van de binnenscheepse ruimten op tall ships geschiedt meestal centraal en met een dieselstookketel. Hoewel de eigenlijke verwarming dus niet elektrisch gebeurt, is er wel een (beperkt, maar continu) elektrisch verbruik voor de controle- en regelelektronica, dat bij opstart vrij hoog kan oplopen.

Een ruwe capaciteitsberekening van de verwarmingsinstallatie geeft voor de *New Belgica* een te installeren vermogen van 40 kW aan. Deze waarde stemt goed overeen met het verwarmingsvermogen op gelijkaardige tall ships. Sommige fabrikanten [60] leveren systemen die warm water voor zowel centrale verwarming als sanitaire doeleinden produceren en waarin ook warmtewisselaars opgenomen kunnen worden. Hierdoor kan de restwarmte van bijvoorbeeld aggregaten of propulsiemotor aangewend worden om water voor te verwarmen.

Het bepaalde verwarmingsvermogen wordt geacht een comforttemperatuur te kunnen leveren tot buitentemperaturen van -20 °C. Ook voor een reis naar Antarctica moet dit voldoende zijn: deze reis zou enkel plaatsvinden tijdens de zomer in het zuidelijk halfrond, wanneer de temperaturen in de kuststreken gemiddeld rond het vriespunt liggen. De gemiddelde temperatuur op jaarbasis in deze streken wordt op -15 à -10 °C aangenomen met uitersten van -50 °C in de winter en +9 °C in de zomer. Deze installatie zou dus moeten voldoen tijdens een poolreis.

Door het verblijf in Antarctica te laten plaatsvinden in de zomer, bij aanvaardbare weerscondities en een beperkt tijdsvenster te hanteren, wordt het risico op ijsafzetting geminimaliseerd. Voor een enkele poolreis lijkt het niet zinvol om (elektrische) anti- of de-icing-systemen te integreren. Mechanische en/of chemische hulpmiddelen zouden moeten volstaan om het schip ijsvrij te houden. Er kon geen informatie bekomen worden over de-icing-systemen op tall ships die in poolwateren opereren, wat doet vermoeden dat ook daar gebruik gemaakt wordt van mechanische en/of chemische hulpmiddelen. Qua stabiliteit werden ijsafzettingen wel al in rekening gebracht [4].

De benodigde vermogens voor koeling, of airconditioning in het algemeen, van een schip zijn sterk afhankelijk van het gewenste comfort. In tropische gebieden kan de temperatuur aan boord oplopen, maar lijkt een doordachte ventilatie veel energie te kunnen sparen. Men gaat ervan uit dat ventilatie voldoende moet zijn naar comfort toe. De eisen aan een luchtbehandelingsinstallatie volgen vooral uit de gebruiksgrenzen, qua temperatuur en vooral luchtvochtigheid, van de aanwezige (elektronische) apparatuur. Deze eisen zijn voorlopig erg onduidelijk, waardoor er geen gefundeerde schatting kan gemaakt worden van het benodigde koelvermogen.

### **20.3. Zoetwatermaker**

Zeilschepen zoals de *New Belgica* zijn meestal voorzien van meerdere zoetwatertanks en één of meerdere zoetwatermakers. Voor de *New Belgica* wordt uitgegaan van een totaalvolume aan zoetwatertanks van 30 m<sup>3</sup>, wat ongeveer een vergelijkbare opslagcapaciteit per persoon geeft als bij andere tall ships.

Het zoetwaterverbruik is grotendeels afhankelijk van het aantal opvarenden en kan als volgt worden opgedeeld:

- sanitair (wassen en douchen, toilet wordt gespoeld met zout water);
- drinken en koken;
- afwassen;
- wasmachine en schoonmaak.

Volgens fabrikanten van zoetwatermakers moet men aan boord rekenen op ongeveer 50 l per persoon per dag. Voor de *New Belgica* wordt een waterverbruik aan van 67 l per persoon per dag



aangenomen, voor maximaal 30 opvarenden (op meerdaagse reizen) resulteert dit in een dagelijks zoetwaterverbruik van 2000 l. Een zoetwatertank van 30 m<sup>3</sup> zou in dit geval voldoende zijn voor een reis van 15 dagen.

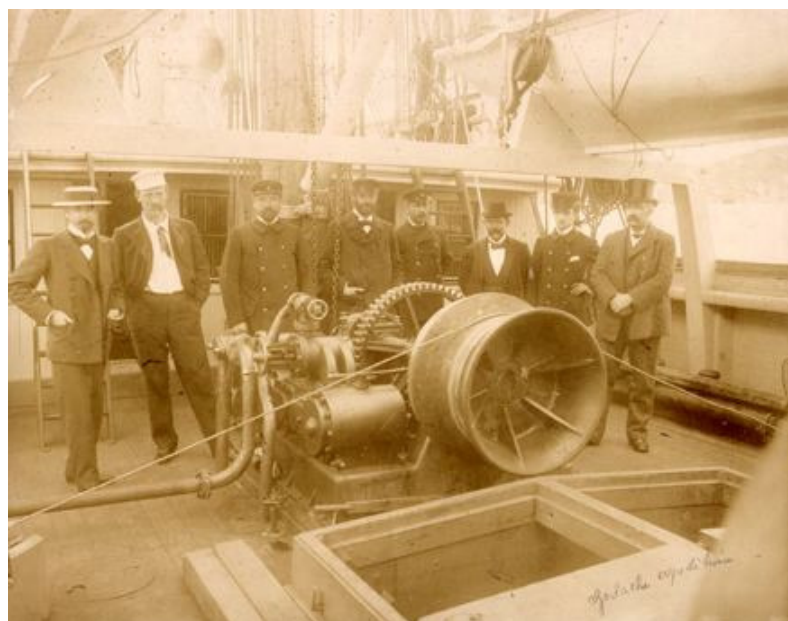
Het vermogen van de zoetwatermaker is afhankelijk van de capaciteit, of op welke tijd de gewenste hoeveelheid zoet water geproduceerd moet worden. Er wordt aangenomen dat het dagverbruik op 6 uur gegeneerd moet kunnen worden, dit vergt een zoetwatermaker met een capaciteit van 333 l per uur. Deze toestellen hebben een typisch vermogen van ongeveer 4 kW in regime.

Verwacht wordt dat de *New Belgica* met volle zoetwatertanks aan een wereldreis zal beginnen. Wanneer er bv. 3 tanks van 10 m<sup>3</sup> aan boord zijn, zal na 5 dagen 1 tank leeg zijn. Met de gekozen capaciteit duurt het ongeveer 30 uur om deze tank terug te vullen.

## 20.4. Lieren

Over de werktuigen aan boord van de oorspronkelijke *Belgica* zijn betrekkelijk weinig details beschikbaar, volgens het beschikbare archiefmateriaal was de *Belgica* slechts voorzien van twee lieren:

- Een verticale lier (kaapstander) op het bakdek: deze lier deed dienst als afmeerlier en werd vermoedelijk ook gebruikt om de schoten van de (stag-)zeilen op het voorschip aan te halen. Op de plannen is te zien dat er een werktuigelijk deel van deze kaapstander onder het bakdek zit, hier was rechtstreeks toegang tot de ankerkettingen, deze lier vervulde dus ook de taak van ankerlier.
- Een horizontale lier midscheeps op het dek (tussen de 2 dekhuisen, zie Figuur 33): ten tijde van de poolreis naar Antarctica was het een lier waarvan de as van de verhaalkop langsscheeps lag, op foto's van latere expedities is een lier met een dwarse verhaalkop te zien. Deze lier was polyvalent en werd voor alle (zeil-)handelingen aangewend die men niet met mankracht kon voltrekken (onder andere bij het vissen en het laden van de ruimen).



Figuur 33: Midscheepse lier *Belgica* (©VLIZ fotogalerij – *Belgica* Genootschap)

Voor de *New Belgica* bestaat de wens om het schip met een beperkte crew bezeilbaar te houden, de zeilmanoeuvres op een dwarsgetuigd schip vergen klassiek een grote en geschoolde bemanning<sup>20</sup>. Voor een schip van deze omvang zouden de krachten op het lopend niet te groot mogen zijn en, zoals op de authentieke *Belgica*, grotendeels beheersbaar met mankracht. Daarnaast kunnen de krachten door een gepaste keuze in blokkenstellen naar wens geschaald worden.

Inzake de dekuitrusting is er wel bereidheid om van de oorspronkelijke, en mager gedocumenteerde, uitvoering af te wijken. Zo werd het idee geopperd op de *New Belgica* te voorzien van Jarvislieren, welke de replica met een zeer beperkte minimumbemanning bezeilbaar zou maken. Na contact met de her-ontwerper van deze lieren bleek dat deze lieren geen zinvolle keuze zijn voor de *New Belgica*: de krachten zijn met eenvoudigere lieren hanteerbaar en het gebruik van de huidige Jarvislieren op hedendaagse tall ships is geen succes.

Concreet moeten volgende handelingen op de *New Belgica* door lieren worden uitgevoerd:

- Het anker en de ankerketting gecontroleerd neerlaten, blokkeren en lichten.
- De meertrossen aanhalen bij het afmeren.
- Een verscheidenheid aan zeilhandelingen (waaronder zeilen of ra's hijsen, brassen en schoten doorzetten).

Deze handelingen kunnen op een beperkt aantal lieren worden uitgevoerd, mede door de gelimiteerde dekruiimte zou een plaatsing zoals op de originele *Belgica* een logische keuze zijn. Wel moet nog bekeken worden of het mogelijk is om bij het afmeren achtertros op de midscheepse lier aan te halen.

De vermogens voor anker-, afmeer- en zeilhandelingslieren zijn afhankelijk van de te verwerken krachten en de wensen of eisen aan snelheid van deze lieracties. Voor de ankerlier op het bakdek is het gewicht van de ankers en de bijhorende kettingen samen met de vereiste hijsnelheid bepalend, voor de midscheepse lier moeten eerst de krachten in het lopend want uitgerekend worden.

#### **20.4.1. Ankerlier**

Het originele stokanker (zie Figuur 34) is één van de objecten die zijn bovengedaald uit het wrak van de *Belgica*, het wordt nu samen met het kraaiennest en de sierplaat gebruikt als pronkstuk bij voorstellingen van het *New Belgica* project. Het gewicht van het oorspronkelijke anker en de lengte van de bijhorende ankerkettingen kon niet verkregen worden.

---

<sup>20</sup> Onder andere door de hoge personeelskost werd de vrachtvarende zeilvaart eind 19<sup>e</sup> eeuw verdrongen door stoomschepen. Hoewel de toenmalige clippers hogere vaarsnelheden haalden, luidde de opening van het Suezkanaal – dat voor zeilschepen moeilijk bevaarbaar is – in 1896 het einde in van deze zeilreuzen.



Figuur 34: Het anker van de *Belgica* (©VLIZ fotogalerij – *Belgica* Genootschap)

De eisen omtrent het anker waarmee de *New Belgica* zal worden uitgerust, zijn terug te vinden in de eRules van Bureau Veritas. Het gewicht van ankers en ankerkettingen wordt bepaald d.m.v. het uitrustingsgetal (EN of “Equipment Number”) dat voor zeiljachten als volgt berekend wordt:

$$EN_S = EN + EN_E$$

In deze uitdrukking is EN het uitrustingsgetal alsof het schip een motorjacht zou zijn,  $EN_E$  brengt de invloed van masten en tuigage in rekening. De berekening van  $EN_S$  is opgenomen in 0, het uitrustingsgetal bedraagt volgens Bureau Veritas afgerond 220. Bij dit uitrustingsgetal moeten 2 HHP-boegankers van 400 kg per stuk voorzien worden, de totale kettinglengte is minstens 302,5 m. Daarnaast is ook de minimumdiameter van de schakels voorgeschreven: bij gebruik van hoogwaardige materialen (grade Q2 steel) bedraagt deze 22 mm, waardoor de totale massa van de ankerketting op 3,36 ton komt.

Ook de minimumprestaties van de ankerlier zijn voorgeschreven: voor de *New Belgica* moet de ankerlier in staat zijn gedurende 30 minuten een trekkracht van ongeveer 20 kN te leveren. De aandrijving van de lier (elektrisch of hydraulisch) moet natuurlijk ook de kortstondig hogere trekkracht – benodigd bij het uitbreken van het anker – kunnen leveren, welke volgens de rules minstens 50 % hoger ligt dan de continue trekkracht, en gedurende minstens 2 minuten moet kunnen worden aanhouden. Het anker moet aan minstens 0,15 m/s kunnen worden ingehaald. Met deze gegevens wordt het benodigde vermogen van de ankerlier op 5,5 kW geschat.

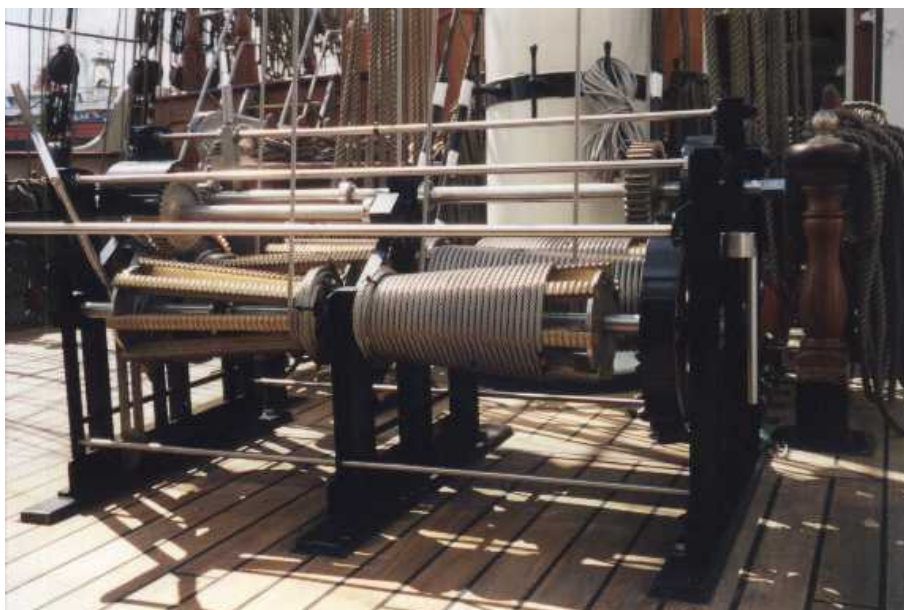
Bij de berekening van  $EN_S$  wordt uitgegaan van een occasioneel gebruik van het anker in haven of beschutte wateren, voor veelvuldig afmeren op open zee moet  $EN_S$  verhoogd worden.

Men gaat verder uit van moderne ankers die een hoge houdkracht bezitten<sup>21</sup>, afwijkende types moeten met Bureau Veritas besproken worden. Wanneer de *New Belgica* uitgerust zal worden met zijn historisch anker – een stokanker, dit type wordt heden enkel nog bij replica's gebruikt – dan zal het uitrustingsgetal vermoedelijk stijgen.

#### 20.4.2. Midscheepse lier

Om het vermogen van de midscheepse lier te bepalen, moeten eerst de krachten in het lopend want bepaald worden. Zoals reeds vermeld zijn de krachten, door een juiste keuze van katrollen, in principe altijd naar een hanteerbaar niveau te herleiden. Gezien het zeilplan van de *New Belgica* zou dit geen probleem mogen vormen en kan een vrij kleine lier voldoen. Er is op dit moment echter onvoldoende informatie om een gefundeerde keuze inzake type te maken, het vermogen wordt verwacht enkele kW's te zullen bedragen.

Er werd wel al geconcludeerd dat zogenaamde Jarvislieren (zie Figuur 35) geen goede keuze zouden zijn. Deze lieren werden rond 1890 door kapitein J.C.B Jarvis ontwikkeld om het werk op grote zeilschepen te verlichten. Deze lieren werden in de jaren '90 "heruitgevonden" omdat er geen authentieke lieren bewaard bleven [61]. Vandaag de dag zijn er enkele zeilschepen<sup>22</sup> uitgerust met deze lieren, maar op geen enkel schip worden ze nog actief gebruikt. Dit omdat deze schepen mankracht genoeg aan boord hebben om de zeilen manueel te handelen, waardoor ook steeds minder mensen deze lier zonder problemen kunnen gebruiken – het herontwerp van deze lier kan duidelijk beter.



Figuur 35: Jarvislier op de Stad Amsterdam [62]

---

<sup>21</sup> (V)HHP-ankers: "(Very) High Holding Power-ankers".

<sup>22</sup> Sedov & Krusenstern (Rusland), Cisne Branco (Brazilië) en Stad Amsterdam (Nederland).

## VII. Besluit

Bij de evaluatie van energievoorziening naar duurzaamheid toe, maakt men gebruik van een algemeen concept: de *Trias Energetica*<sup>23</sup>. Deze “wet” stelt, bij het streven naar een energiezuinige aanpak, een strikte volgorde van aanpak voorop:

1. reduceren van het energieverbruik;
2. gebruik van hernieuwbare energiebronnen;
3. het efficiënt aanwenden van fossiele brandstoffen.

Bij de energievoorziening van de *New Belgica* lijken op al deze niveau's de nodige maatregelen te worden genomen. Ingaand op het eerste punt, zal de *New Belgica* zal geen luxeschip zijn: onder andere het matigen van bijvoorbeeld douchetijden en omgevingstemperaturen, het gebruik van LED-verlichting en het goed isoleren van de koelruimtes moet de energiebehoefte beperken. Deze eerste stap is veruit de belangrijkste, maar mag – in het bijzonder op schepen – een betrouwbare energievoorziening niet in het gedrang brengen: de klassieke veiligheidsfactoren bij het bepalen van het werkelijk te voorzien propulsie- en generatievermogen maken dat een deel van de inspanning op vlak van reductie van energieverbruik teniet worden gedaan.

Belangrijk is nogmaals op te merken dat de *New Belgica* een zeilschip is, en zo dus per definitie al in ruime mate voldoet aan punt 2 van de *Trias Energetica*. Ook het planmatig inzetten van walstroom en schroefregeneratie bij energievoorziening, kan het verbruik van fossiele brandstoffen door de aggregaten terugdringen.

Door een efficiënte dieselmotor of parallelhybride aandrijving te plaatsen, wordt aan punt 3 beantwoord. Vele nieuwe technologieën lijken nog niet klaar om de energievoorziening aan boord van schepen zonder meer van de klassieke dieselmotor over te nemen. Het gebruik van hoogwaardige varianten van bestaande technologie (efficiënte dieselmotoren en elektromotoren, TPPL-batterijen enz.) lijken voor de *New Belgica* meest aangewezen. Demonstratieprojecten zoals de *Clothilde II* zullen moeten uitwijzen of spitstechnologie werkelijk in staat is de verwachtingen in te lossen. Op vlak van aandrijvingen lijkt de klassieke aandrijving dus het meest geschikt voor de *New Belgica*, er zijn nogal wat complicaties op vlak van installatie, onderhoud en het in bedrijf houden van de modernere alternatieven. De vraag is vooral of het uitbatingsprofiel van de *New Belgica* deze hogere investeringskosten zullen kunnen verantwoorden.

Regeneratie op de schroef tijdens het zeilen lijkt veelbelovend, praktijktesten zullen moeten uitwijzen in hoeverre de vooropgestelde vermogens ook opgemeten kunnen worden. Aangezien schroefregeneratie op deze schaal nog niet werd toegepast, kan de *New Belgica* hierin een pioniersrol vervullen: op grote (zeil-)evenementen zou het groene karakter van schroefregeneratie in de verf kunnen worden gezet. Op deze manier kan de *New Belgica* mogelijk evenveel bekijks krijgen als zijn voorganger pakweg 110 jaar geleden.

---

<sup>23</sup> [www.triasenergetica.com](http://www.triasenergetica.com)

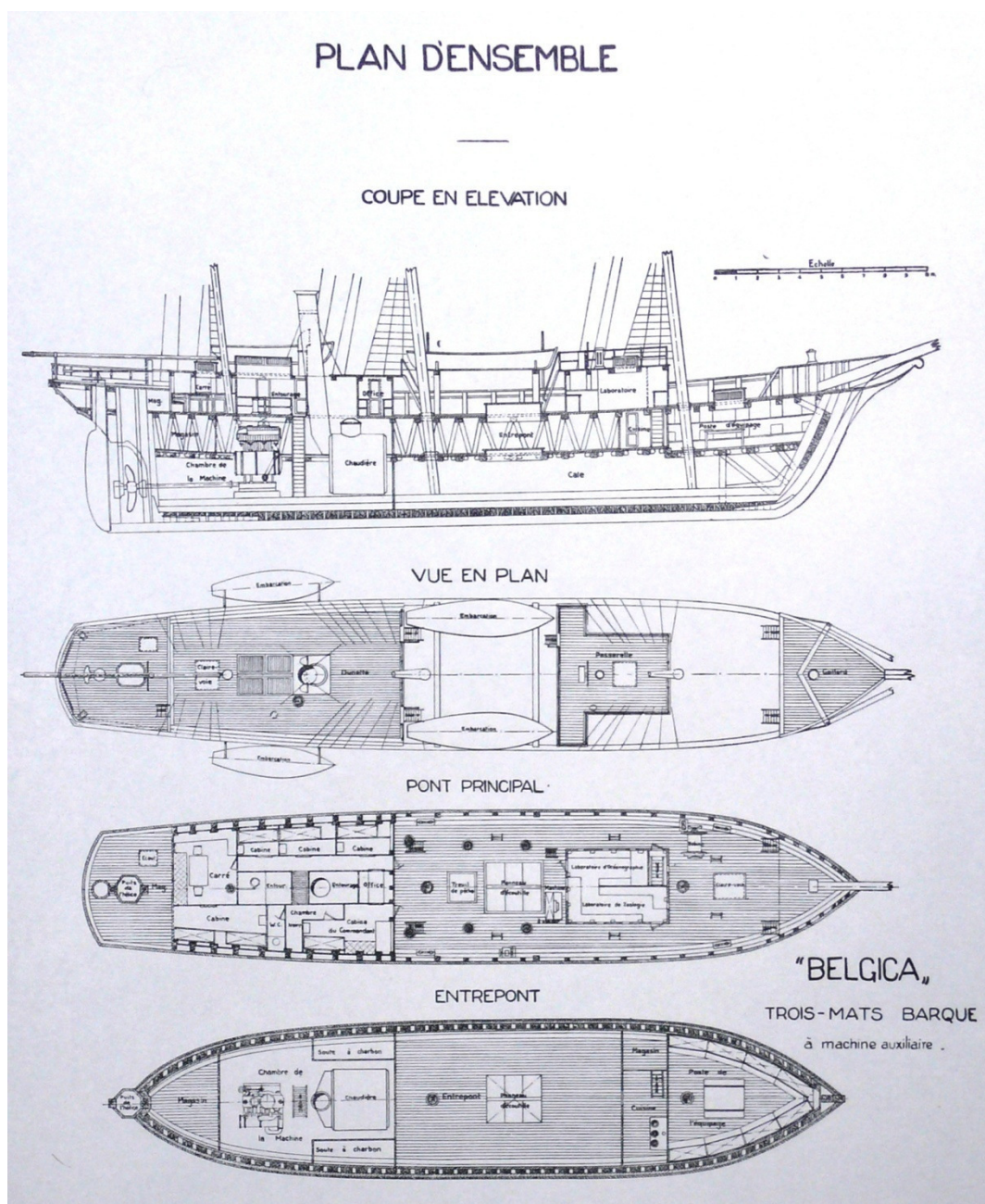
## Bijlagen

### *Bijlage A De plannen van de Belgica volgens Verhofstadt*

Volgende plannen zijn in deze bijlage opgenomen:

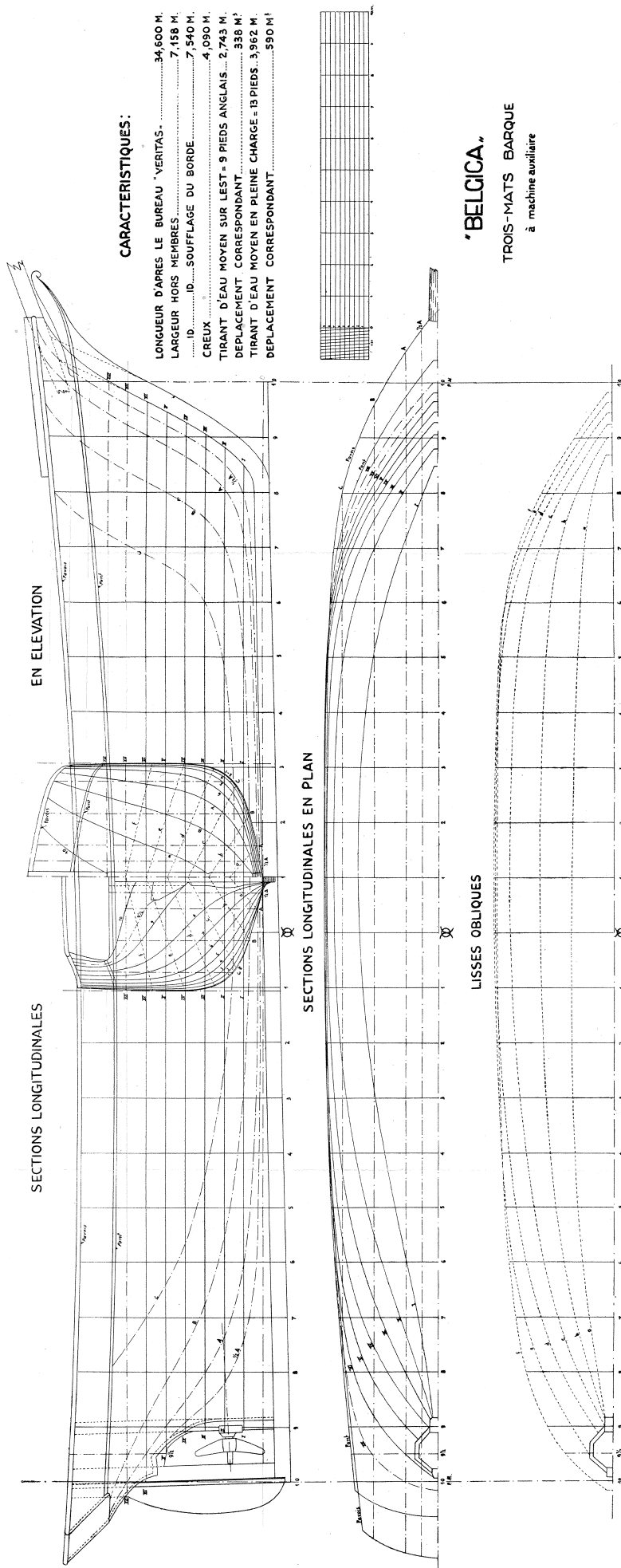
- het indelingsplan (plan d'ensemble);
- het lijnenplan (plan des formes);
- het zeilplan (plan de voile);
- het grootspant (coupe au maître).

Voor meer informatie over de totstandkoming van deze plannen wordt verwezen naar hoofdstuk 3.



# PLAN DES FORMES

SECTIONS TRANSVERSALES



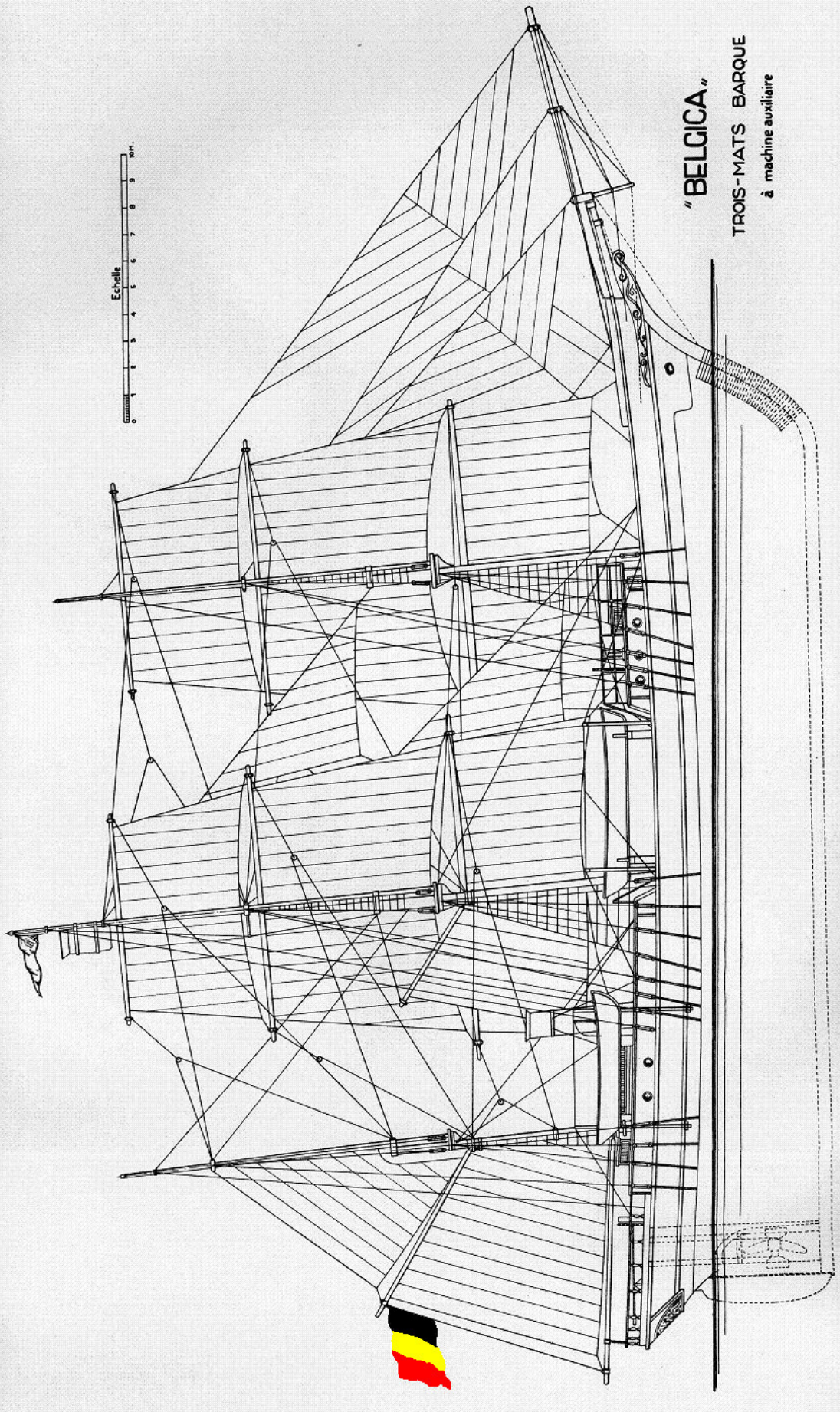
## CARACTERISTIQUES:

LONGUEUR D'APRES LE BUREAU "VERITAS".....34,600 M.  
 LARGEUR HORS MEMBRES.....7,158 M.  
 .....ID.....SOUFFLAGE DU BORDE.....7,540 M.  
 CREUX.....4,090 M.  
 TIRANT D'EAU MOYEN SUR LEST = 9 PIEDS ANGLAIS.....2,743 M.  
 DEPLACEMENT CORRESPONDANT.....338 M<sup>3</sup>  
 TIRANT D'EAU MOYEN EN PLEINE CHARGE = 13 PIEDS.....3,962 M.  
 DEPLACEMENT CORRESPONDANT.....590 M<sup>3</sup>

'BELGICA',

TROIS-MATS BARQUE  
 à machine auxiliaire

# PLAN DE VOILURE

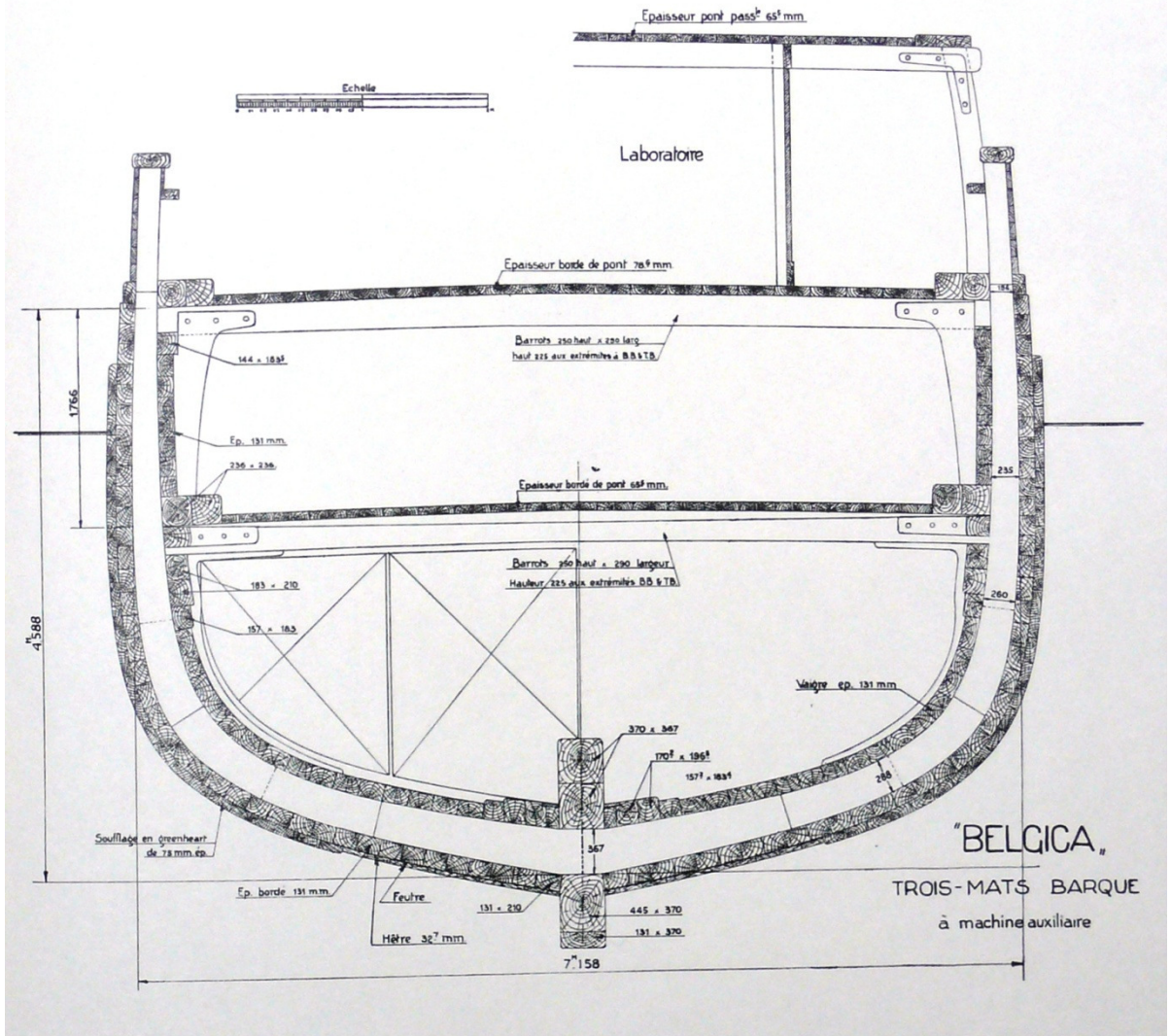


"BELGICA"

TROIS-MATS BARQUE  
à machine auxiliaire



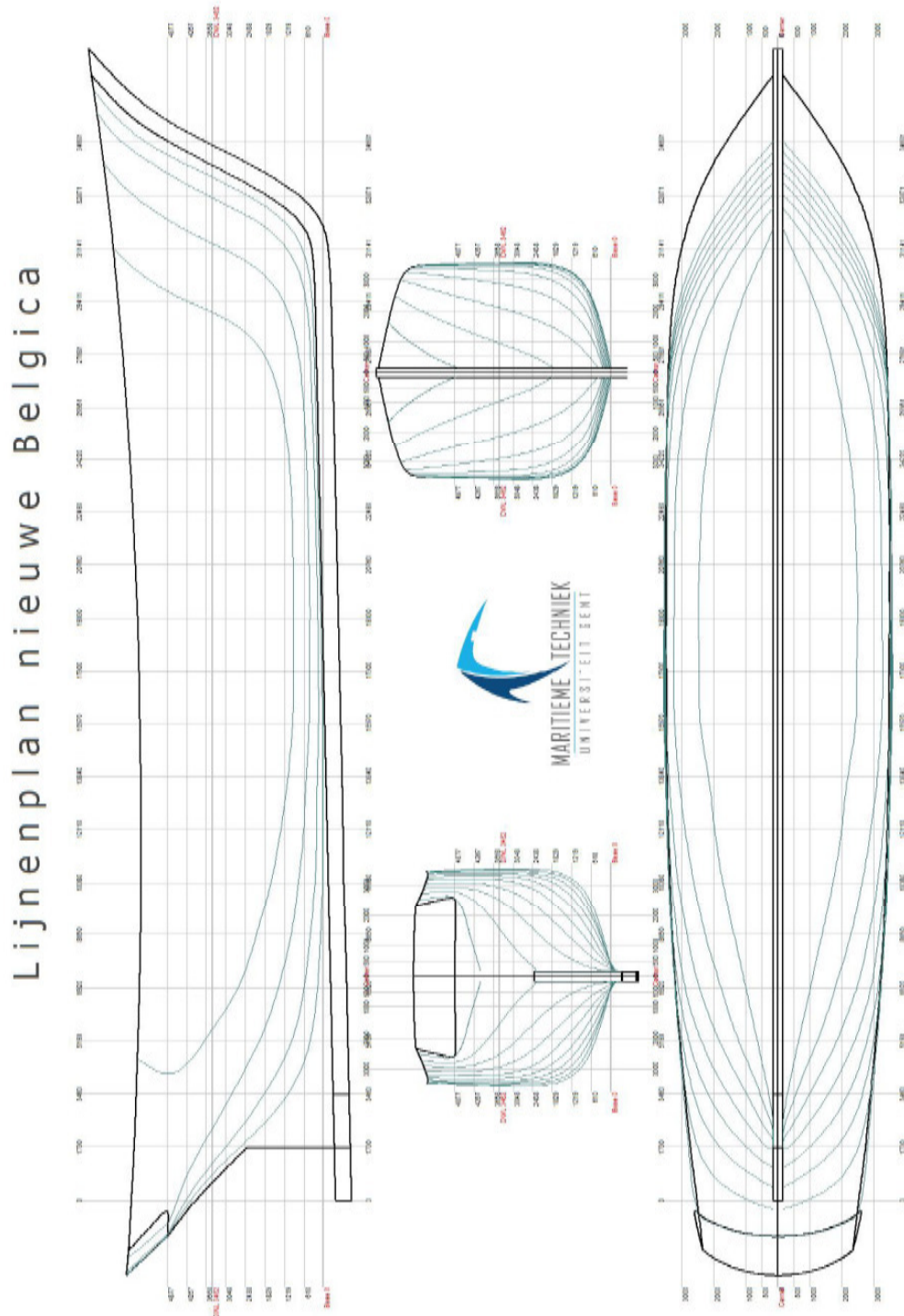
# COUPE AU MAITRE



## Bijlage B Plannen New Belgica

In deze bijlage zijn opgenomen:

- het lijnenplan van de nieuwe *Belgica*;
- een hydrostatisch rapport van de *New Belgica*.



# Design hydrostatics report.

## Nuova Belgica

Designer ?

Created by ELA

Comment Belgica

Filename I:\belgica41.fbm

<b>Design length</b>	34.600 <i>m</i>	<b>Midship location</b>	17.300 <i>m</i>
<b>Length over all</b>	40.050 <i>m</i>	<b>Relative water density</b>	1.025
<b>Design beam</b>	7.158 <i>m</i>	<b>Mean shell thickness</b>	0.1910 <i>m</i>
<b>Beam over all</b>	7.158 <i>m</i>	<b>Appendage coefficient</b>	1.0000
<b>Design draft</b>	3.462 <i>m</i>		

Volume properties		Waterplane properties	
Displaced volume	591.83 <i>m</i> <sup>3</sup>	Length on waterline	33.902 <i>m</i>
Displacement	606.63 <i>tonnes</i>	Beam on waterline	7.126 <i>m</i>
Block coefficient	0.6902	Waterplane coefficient	0.8067
Prismatic coefficient	0.8015	Waterplane center of floatation	17.112 <i>m</i>
Vert. prismatic coefficient	0.8557	Entrance angle	0.000 <i>Degr.</i>
Wetted surface area	377.78 <i>m</i> <sup>2</sup>	Transverse moment of inertia	710.11 <i>m</i> <sup>4</sup>
Longitudinal center of buoyancy	17.627 <i>m</i>	Longitudinal moment of inertia	14375 <i>m</i> <sup>4</sup>
Longitudinal center of buoyancy	0.965 %		
Vertical center of buoyancy	2.016 <i>m</i>		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	21.342 <i>m</i> <sup>2</sup>	Transverse metacentric height	3.216 <i>m</i>
Midship coefficient	0.8612	Longitudinal metacentric height	26.306 <i>m</i>

Lateral plane	
Lateral area	126.83 <i>m</i> <sup>2</sup>
Longitudinal center of effort	16.912 <i>m</i>
Vertical center of effort	1.492 <i>m</i>

The following layer properties are calculated for both sides of the ship

Layer	Area <i>m</i> <sup>2</sup>	Thickness	Weight <i>tonnes</i>	VCG <i>m</i>	LCG <i>m</i>	TCG <i>m</i>
hull1	479.22	0.000	0.000	2.606	19.099	0.000 (CL)
hull2	49.058	0.000	0.000	3.582	1.588	0.000 (CL)
kont	9.115	0.000	0.000	5.469	-1.514	0.000 (CL)
kiel	57.090	0.000	0.000	0.686	19.426	0.000 (CL)
<b>Total</b>	<b>594.49</b>		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000 (CL)</b>

Sectional areas									
Location <i>m</i>	Area <i>m</i> <sup>2</sup>	Location <i>m</i>	Area <i>m</i> <sup>2</sup>	Location <i>m</i>	Area <i>m</i> <sup>2</sup>	Location <i>m</i>	Area <i>m</i> <sup>2</sup>	Location <i>m</i>	Area <i>m</i> <sup>2</sup>
0.000	0.150	8.650	17.025	17.300	21.342	25.951	19.200	34.601	0.000
1.730	1.639	10.380	18.633	19.030	21.183	27.681	17.442		
3.460	7.741	12.110	19.727	20.760	20.976	29.411	14.105		
5.190	11.920	13.840	20.513	22.490	20.709	31.141	8.725		
6.920	14.955	15.570	21.230	24.220	20.143	32.871	2.263		

## ***Bijlage C Data gelijkaardige schepen***

In deze bijlage zijn opgenomen:

- een algemeen overzicht van de gegevens;
- een vergelijking van romp & dienstsnelheid;
- een vergelijking van het generatorvermogen t.o.v. het aantal opvarenden;
- een vergelijking van de blokcoëfficiënt ( $C_b$ ).

<i>Belgica</i>														
<i>3m barque</i>	<i>BE</i>		40,05	33,9	34,6	7,158	3,962		605	265		586,6	15	
<b>name</b>	<b>type</b>	<b>flag</b>	<b>Dimensions (m)</b>						<b>Weights (ton)</b>			<b>Sails</b>		
			<b>L_sparred</b>	<b>LOA</b>	<b>LWL</b>	<b>LPP</b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>rig height</b>	<b>displ</b>	<b>gross</b>	<b>nrt</b>	<b>area (m²)</b>	<b>#</b>
Tenacious	3m barque	UK	65	54			10,6	4,58		714	586		1217	21
Elissa	3m barque	US	62,5	46	43		8,5	3,2		620		430	1115	19
Belem	3m barque	FR	58	51	48		8,8	3,6	34	750	534		1000	22
Europa	3m barque	NL	56	40,5			7,4	3,9	33	303			1250	
Picton Castle	3m barque	US	55							300			1160	
Lord Nelson	3m barque	UK	54,7	42,8			9	4,12		491	368		1024	18
Tarangini	3m barque	IN	54				8,53	4,5	34,5	513			965	
Jeanie Johnston	3m barque	IE	47	37,5			7,9	4,6	28	510	300		645	18
Loa	3m barque	DK	40	30,5		24,6	6,3	2,2	25,5		95	28	536	16
Cisne Branco	3m full rigged	BR	76			55,84	10,5	4,79	45	1038	733	219	2350	
Oliver Hazard Perry	3m full rigged	US	63	40					39				1300	18
/ (for sale)	3m barquentine	/	80				10,6	5,7		769			2280	
Thalassa	3m barquentine	NL	47			38,7	8	3,9	35	430	282	116	800	14
Pelican of London	3m barquentine	UK	45	34,6		32	7,03	3,95	33	370	226	67	525	11
Stavros S Niarchos	2m brig	UK		59,4	40,6		9,9	4,5	45	635	493	198	1162	18
Mercedes	2m brig	NL		50			7,6	3,6	35	430	258		900	18
Fryderyk Chopin	2m brig	PL	55,5	44,5		38,78	8,5	3,8	37	400	306		1200	21
Astrid	2m brig	NL		42	30,87		6,48	2,8	26	252	140		400	15
Eye of the Wind	2m brig	GE		40,2			7	2,8			150		750	
Swan Fan Makkum	2m brigantine	NL	61	49,63	39,04	39,6	9,2	3,54	44,6	486			1300	
Soren Larsen	2m brigantine	NZ	44,2			32	7,8	3,4	30	290	125		650	12

<i>Belgica</i> <i>3m barque</i> <i>BE</i>									
name	type	flag	Speeds (kn)		Engine			Generator	
			sail	engine	#	P_total (kW)	rpm	#	P_total (kVA)
Tenacious	3m barque	UK	11	8	2	600		2	210
Elissa	3m barque	US			1	335			
Belem	3m barque	FR	12	9	2	450	1600	2	
Europa	3m barque	NL			2	550			
Picton Castle	3m barque	US			1	515		2	
Lord Nelson	3m barque	UK	10	8	2	390		2	140
Tarangini	3m barque	IN				480			
Jeanie Johnston	3m barque	IE			2	435	2200	2	210
Loa	3m barque	DK	8	8	1	240	2200		
Cisne Branco	3m full rigged	BR	17,5	11	1	750	1800	2	425
Oliver Hazard Perry	3m full rigged	US			2	525		2	
/ (for sale)	3m barquentine	/	13		1	1375		4	
Thalassa	3m barquentine	NL	13		1	530	1800	2	60
Pelican of London	3m barquentine	UK	10	7,5	1	215	1800	2	100
Stavros S Niarchos	2m brig	UK	13	10	2	660		4	320
Mercedes	2m brig	NL	16	12	1	600		2	180
Fryderyk Chopin	2m brig	PL	16	9	1	400			
Astrid	2m brig	NL	12	8	1	255		2	55
Eye of the Wind	2m brig	GE	8		1	450		2	90
Swan Fan Makkum	2m brigantine	NL	15	11	1	353	1200	2	90
Soren Larsen	2m brigantine	NZ			1	180		2	50



<i>Belgica</i>			<i>3m barque</i>			<i>BE</i>			28		
name	type	flag	Generator			Acco					
			#	P_total (kW)	P_total (kVA)	# pers	kWpp	kVApp			
Tenacious	3m barque	UK	2		210	50		4,20			
Elissa	3m barque	US									
Belem	3m barque	FR	2			64					
Europa	3m barque	NL				62					
Picton Castle	3m barque	US	2			52					
Lord Nelson	3m barque	UK	2		140	50		2,80			
Tarangini	3m barque	IN				50					
Jeanie Johnston	3m barque	IE	2		210	40		5,25			
Loa	3m barque	DK				32					
Cisne Branco	3m full rigged	BR	2	368	425	82	4,49	5,18			
Oliver Hazard Perry	3m full rigged	US	2								
/ (for sale)	3m barquentine	/	4								
Thalassa	3m barquentine	NL	2		60	40		1,50			
Pelican of London	3m barquentine	UK	2		100	36		2,78			
Stavros S Niarchos	2m brig	UK	4	320		67	4,78				
Mercedes	2m brig	NL	2	180		54	3,33				
Fryderyk Chopin	2m brig	PL				56					
Astrid	2m brig	NL	2	55		24	2,29				
Eye of the Wind	2m brig	GE	2		90	27		3,33			
Swan Fan Makkum	2m brigantine	NL	2		90	46		1,96			
Soren Larsen	2m brigantine	NZ	2		50	34		1,47			
							<b>gemiddelden</b>	3,72	3,16		
							<b>n.i.</b>	2,81	2,58		



<i>Belgica</i>	<i>3m barque</i>	<i>BE</i>		40,05	33,9	34,6	7,158	3,462		605	265		0,595	0,703	0,688	(*)
<i>Belgica</i>	<i>3m barque</i>	<i>BE</i>		40,05	33,9	34,6	7,158	2,243		346	265		0,525	0,620	0,608	(**)
<b>name</b>	<b>type</b>	<b>flag</b>	<b>Dimensions (m)</b>							<b>Weights (ton)</b>			<b>Block coefficient (-)</b>			
			<b>L_sparred</b>	<b>LOA</b>	<b>LWL</b>	<b>LPP</b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>rig height</b>	<b>displ</b>	<b>gross</b>	<b>nrt</b>	<b>Cb_loa</b>	<b>Cb_lwl</b>	<b>Cb_lpp</b>	
Tenacious	3m barque	UK	65	54			10,6	4,58		714	586		0,266			
Elissa	3m barque	US	62,5	46	43		8,5	3,2		620		430	0,483	0,517		
Belem	3m barque	FR	58	51	48		8,8	3,6	34	750	534		0,453	0,481		
Europa	3m barque	NL	56	40,5			7,4	3,9	33	303			0,253			
Picton Castle	3m barque	US	55							300						
Lord Nelson	3m barque	UK	54,7	42,8			9	4,12		491	368		0,302			
Tarangini	3m barque	US	54				8,53	4,5	34,5	513						
Jeanie Johnston	3m barque	IE	47	37,5			7,9	4,6	28	510	300		0,365			
Loa	3m barque	DK	40	30,5		24,6	6,3	2,2	25,5		95	28				
Cisne Branco	3m full rigged	BR	76			55,84	10,5	4,79	45	1038	733	219				0,361
Oliver Hazard Perry	3m full rigged	US	63	40					39							
/ (for sale)	3m barquentine	/	80				10,6	5,7		769						
Thalassa	3m barquentine	NL	47			38,7	8	3,9	35	430	282	116				0,347
Pelican of London	3m barquentine	UK	45	34,6		32	7,03	3,95	33	370	226	67	0,376			0,406
Stavros S Niarchos	2m brig	UK		59,4	40,6		9,9	4,5	45	635	493	198	0,234	0,343		
Mercedes	2m brig	NL		50			7,6	3,6	35	430	258		0,307			
Fryderyk Chopin	2m brig	PL	55,5	44,5		38,78	8,5	3,8	37	400	306		0,272			0,312
Astrid	2m brig	NL		42	30,87		6,48	2,8	26	252	140		0,323	0,439		
Eye of the Wind	2m brig	GE		40,2			7	2,8			150					
Swan Fan Makkum	2m brigantine	NL	61	49,63	39,04	39,6	9,2	3,54	44,6	486			0,293	0,373		0,368
Soren Larsen	2m brigantine	NZ	44,2			32	7,8	3,4	30	290	125					0,333
<b>gemiddelden:</b>													<b>0,327</b>	<b>0,431</b>	<b>0,354</b>	

(\*) maximaal deplacement

(\*\*) deplacement in ballast

## ***Bijlage D Voorspellingsmethoden NavCad***

In deze bijlage zijn de gegevens over de NavCad voorgestelde voorspellingsmethoden opgenomen, zijnde:

- H.a.02 – BSRA Full;
- H.a.08 – Delft 1;
- H.a.16 – Holtrop 1984;
- H.a.23 – Oortmerssen;
- H.a.29 – Simple Displ/Semi.

Deze informatie is afkomstig uit de helpfile van HydroComp NavCad (versie 2009).

### **H.a.02 – BSRA Full**

Sabit, A.S., "Regression Analysis of the Resistance Results of the BSRA Series", International Shipbuilding Progress, No. 197, 1971.

#### **Hull**

Single screw, cruiser stern cargo ships

#### **Parameters & speed range**

<b>Parameters:</b>	<b>BSRA full</b>	<i>New Belgica</i>	
<b>Fn(hLpp)</b>	0,149...0,238	0,17	
<b>Fn-high</b>	0,149...0,238	<b>0,42</b>	Limit
<b>Cvol(hLpp)</b>	4,23...6,36	<b>4,12</b>	Limit
<b>Bwl/T</b>	2,12...3,96	<b>2,06</b>	Limit
<b>LCB(hLpp)</b>	-2...3,54	0,95	
<b>Cb(hLpp)</b>	0,65...0,8	0,69	

#### **Formula error**

Not presented.

#### **Methodology**

2-D CR, ATTC CF, model test series

#### **Remarks**

A single parent series of model tests sponsored by the British Ship Research Association make up the data set. The regression is based on a standardized ship length of 400 feet at seven speed-length ratios.

### **H.a.08 – Delft 1**

Gerritsma, J., Onnink, R. and Versluis, A., "Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series", 7th HISWA, Amsterdam, 1981.

#### **Hull**

Deep keel sailing yachts

#### **Parameters & speed range**

<b>Parameters:</b>	<b>Delft 1</b>	<i>New Belgica</i>	
<b>Fn(Lwl)</b>	0,125...0,45	0,17	
<b>Fn-high</b>	0,125...0,45	0,42	
<b>Cvol (Lwl)</b>	4,34...5,14	<b>4,04</b>	Limit
<b>Lwl/Bwl</b>	2,73...3,64	<b>4,76</b>	Limit
<b>Bwl/T</b>	2,81...5,35	<b>2,06</b>	Limit
<b>Cp(Lwl)</b>	0,53...0,6	<b>0,82</b>	Limit
<b>LCB(Lwl)</b>	-5...0	-0,06	
<b>Cw</b>	0,65...0,73	<b>0,81</b>	Limit

#### **Formula error**

"Calculation agrees satisfactorily with the measured resistance"

#### **Methodology**

2-D CR, ITTC-57 CF, model series

#### **Remarks**

A single parent model test series of 22 models tested at the Delft Shiphidromechanics Laboratory make up the data set. The regression is based on a speed-independent analysis at 14 Froude numbers.

The models were tested with keel and rudder, and the original analysis calculated and deducted a frictional drag of the appendages to determine the resistance of the hull alone. Note: The models were tested with no immersed transom.

### **H.a.16 – Holtrop 1984**

Holtrop, J., "A Statistical Resistance Prediction Method With a Speed Dependent Form Factor", Proceedings SMSSH '88, Varna, Oct 1988.

Holtrop, J., "A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data", International Shipbuilding Progress, Vol. 31, No. 363 Nov 1984.

Holtrop, J. and Mennen, G.G.J., "An Approximate Power Prediction Method", International Shipbuilding Progress, Vol. 29, No. 335, Jul 1982.

### **Hull**

Commercial and naval vessels

### **Parameters & speed range**

<b>Parameters:</b>	<b>Holtrop 1984</b>	<i>New Belgica</i>	
<b>Fn(Lwl)</b>	0,1...0,243	0,17	
<b>Fn-high</b>	0,1...0,243	<b>0,42</b>	Limit
<b>Lwl/Bwl</b>	3,9...14,9	4,76	
<b>Bwl/T</b>	2,1...4	<b>2,06</b>	Limit
<b>Cp(Lwl)</b>	0,55...0,85	0,82	
<b>Lambda</b>	0...0,8	<b>1,04</b>	Limit

Lambda 0..max determined by Fn (see Remarks below)

Includes analysis for: Immersed transom and bulbous bow

### **Formula error**

Not presented.

### **Methodology**

3-D CW, ITTC-57 CF, random model tests and full scale trial data

### **Remarks**

A random collection of 334 models of tankers, bulk carriers, cargo ships, fishing vessels, tugs, container ships and military craft make up the data set. Widely regarded as a complete and reliable method for cruiser stern ships, it seems to underpredict resistance for transom stern craft. (Use of the speed-dependent form factor correction improves this tendency.)

The regression is derived with a speed-dependent relationship using the Havelock wave shape as its foundation. The basis for the use of the Havelock theory is currently out of favor, as a speed-dependent analysis like Havelock has trouble matching the typical CW/CR curve shape below Fn of about 0.3.

An additional parameter - lambda - has been added to the data check for this method. Anecdotal experience and testing by HydroComp have identified combinations of hull parameters that produce significant errors with the Holtrop method, and lambda has proven to be an indicator of these potential errors. Lambda is a parameter used within the Holtrop method and is equal to  $1.446 * CP - 0.03 * L/B$ . A recommended upper limit for lambda has been developed by HydroComp and is used in the data check and the Method Expert ranking.

### **H.a.23 – Oortmerssen**

Oortmerssen, G. van, "A Power Prediction Method and its Application to Small Ships", International Shipbuilding Progress, Vol. 18, No. 207, 1971.

#### **Hull**

Small ships, tugs, trawlers

#### **Parameters & speed range**

<b>Parameters:</b>	<b>Oortmerssen</b>	<i>New Belgica</i>	
<b>Fn(Ld)</b>	0,05...0,5	0,17	
<b>Fn-high</b>	0,05...0,5	0,42	
<b>Ld/Bwl</b>	3,4...6,2	4,81	
<b>Bwl/T</b>	1,9...3,4	2,06	
<b>Cp(Ld)</b>	0,52...0,7	<b>0,81</b>	Limit
<b>le</b>	10...38	35,1	
<b>LCB(Ld)</b>	-4,4...2,8	0,45	
<b>Cx</b>	0,73...0,97	0,87	

#### **Formula error**

RT < 12% (90% data)

#### **Methodology**

2-D CR, ITTC-57 CF, random model tests

#### **Remarks**

A random collection of 93 models of tugs and trawlers tested at NSMB make up the data set. The originally published equations had errors and were corrected by direct communication between HydroComp and Dr. G. van Oortmerssen.

The regression is derived with a speed-dependent relationship using the Havelock wave shape as its foundation. The basis for the use of the Havelock theory is currently out of favor, as a speed-dependent analysis like Havelock has trouble matching the typical CW/CR curve shape below Fn of about 0.3.

### **H.a.29 – Simple Displ/Semi**

HydroComp, Inc. in-house development, 1992.

#### **Hull**

Any displacement hull.

#### **Parameters & speed range**

<b>Parameters:</b>	<b>Simple displ/semi</b>	<i>New Belgica</i>	
<b>Fn(Lwl)</b>	0...0,4	0,17	
<b>Fn-high</b>	0...0,4	<b>0,42</b>	Limit
<b>Cvol(Lwl)</b>	4,15...11,26	<b>4,04</b>	Limit

#### **Formula error**

Not defined.

#### **Methodology**

2-D CR, ITTC-57 CF

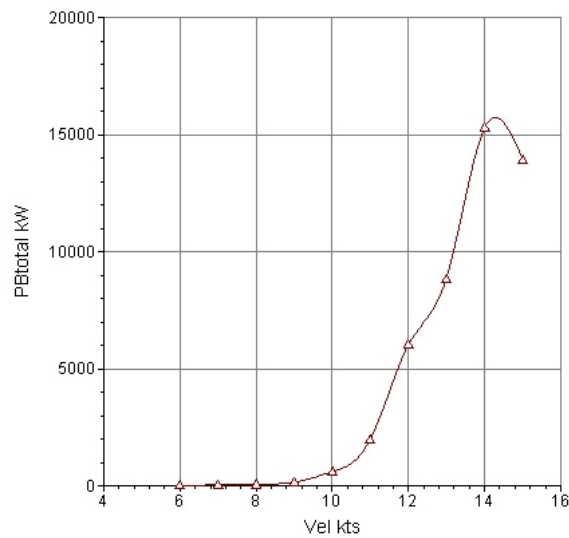
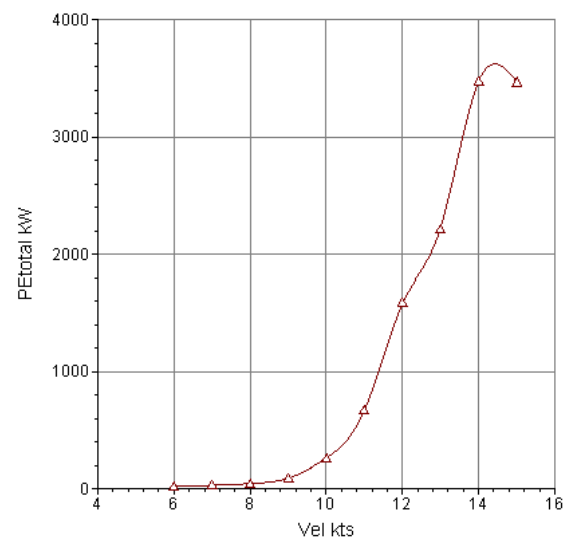
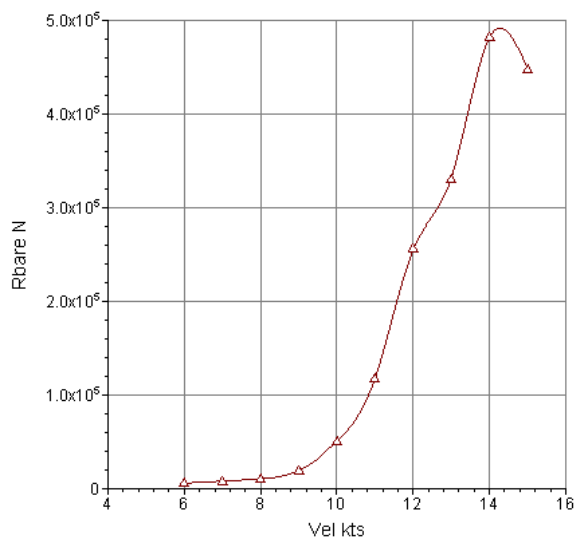
#### **Remarks**

Useful only for very early stage analysis. Derived from a basic power demand relationship with an estimated OPC of 0.55.

## Bijlage E Weerstand en propulsievermogen New Belgica

In deze bijlage zijn de resultaten van NavCad voor de *New Belgica* opgenomen, telkens met Delft 1 als voorspellingsmethode, en bevat volgende delen :

- De grafieken (i.f.v. vaarsnelheid) van:
  - vaartweerstand ( $R_{bare}$ );
  - sleepvermogen ( $P_{etotal}$ );
  - propulsievermogen ( $P_{btotal}$ ).
- De rapporten van:
  - vaartweerstand en sleepvermogen;
  - propulsievermogen.



Prediction results							
Vel [kts]	Fn	Rn	Cf	[Clorm]	[Cw]	Cr	Ct
6,00	0,169	8,81e+7	0,002122	0,000891	0,000001	0,000892	0,003504
7,00	0,197	1,03e+8	0,002075	0,000866	0,000001	0,000867	0,003432
8,00	0,226	1,17e+8	0,002036	0,000820	0,000001	0,000821	0,003347
9,00	0,254	1,32e+8	0,002002	0,000760	0,001563	0,002323	0,004815
10,00	0,282	1,47e+8	0,001972	0,000693	0,006750	0,007443	0,009905
11,00	0,310	1,61e+8	0,001946	0,000610	0,015953	0,016563	0,018999
12,00	0,339	1,76e+8	0,001923	0,000513	0,031781	0,032294	0,034707
13,00	0,367	1,91e+8	0,001901	0,000413	0,035381	0,035793	0,038185
14,00	0,395	2,05e+8	0,001882	0,000326	0,045263	0,045589	0,047961
15,00	0,423	2,20e+8	0,001864	0,000267	0,036262	0,036529	0,038883
Vel [kts]	Rw/W	Rr/W	Rbare/W	Rw [N]	Rr [N]	Rbare [N]	PEbare [kW]
6,00	0,00000	0,00028	0,00109	2	1646	6469	20
7,00	0,00000	0,00037	0,00145	3	2178	8624	31
8,00	0,00000	0,00045	0,00185	3	2694	10984	45
9,00	0,00109	0,00162	0,00336	6491	9649	20000	93
10,00	0,00582	0,00642	0,00854	34617	38169	50796	261
11,00	0,01664	0,01728	0,01982	98992	102779	117896	667
12,00	0,03945	0,04009	0,04308	234697	238484	256301	1582
13,00	0,05154	0,05215	0,05563	306639	310215	330940	2213
14,00	0,07648	0,07703	0,08103	454960	458233	482075	3472
15,00	0,07033	0,07085	0,07542	418417	421496	448661	3462
Vel [kts]	Rapp [N]	Rwind [N]	Rseas [N]	Rchan [N]	Rmisc [N]	Rtotal [N]	PEtotal [kW]
6,00	110	0	0	0	0	6578	20
7,00	147	0	0	0	0	8771	32
8,00	191	0	0	0	0	11175	46
9,00	239	0	0	0	0	20239	94
10,00	293	0	0	0	0	51090	263
11,00	353	0	0	0	0	118248	669
12,00	417	0	0	0	0	256718	1585
13,00	487	0	0	0	0	331427	2217
14,00	562	0	0	0	0	482637	3476
15,00	642	0	0	0	0	449303	3467

Analysis parameters			
Bare-hull drag	[Calc] Delft 1	Appendage added drag	[Calc] Holtrop 1988
Friction line	ITTC-57	Wind added drag	[Off]
Technique	Prediction	Seas added drag	[Off]
Align to	[Off]	Channel added drag	[Off]
Align by	[Off]	Misc: Margin	[Off]
Correlation allowance	0,00049	Water type	Standard Salt
Roughness (mm)	[Off]	Mass density	1025,86 kg/m3
3D form factor	[On] 1,4383	Kinematic viscosity	1,1883e-06 m2/s
Speed dependent corr	[On]		
Hull data			
[General]		[Ct-based]	
Length between PP	34,600 m	Max section area	[0,866 Cx] 21,358 m2
WL bow pt aft FP	0,000 m	Waterplane area	[0,807 Cw] 195,032 m2
Length on WL	33,902 m	Trim by stem	0,000 m
Max beam on WL	7,126 m	LCB aft of FP	[0,491 Lpp] 16,973 m
Max molded draft	3,462 m	Bulb ext fwd FP	0,000 m
Displacement bare	606,63 t	Bulb area at FP	0,000 m2
Wetted surface	377,780 m2	Bulb ctr above BL	0,000 m
Chine type	Round bilge	Transom area	[0,000 of Ax] 0,000 m2
[Principal parameters]		Transom beam	[0,000 of B] 0,000 m
Lwl/B	4,7575	Transom draft	[0,000 of T] 0,000 m
B/T	2,0583	Half ent angle	35,11 deg
Cb	0,7070	Bow shape	[Normal] Average flow
Cws	2,6681	Stern shape	[V-shape]
Prediction method check			
Parameters:	Delft 1		
Fn(Lwl)	0,125...0,45	0,17	
Fn-high	0,125...0,45	0,42	
Cvol(Lwl)	4,34...5,14	4,04	Limit
Lwl/Bwl	2,73...3,64	4,76	Limit
Bwl/T	2,81...3,35	2,06	Limit
Cp(Lwl)	0,53...0,6	0,82	Limit
LCB(Lwl)	-5...0	-0,06	
Cw	0,65...0,73	0,81	Limit
Appendages			
Rudders	[Coef] 1,35	[Wetted value] 4,000 m2	Exposed shafts 0,00 0,000 m2
Shaft brackets	0,00	0,000 m2	Stabilizer fins 0,00 0,000 m2
Skeg	0,00	0,000 m2	Dome 0,00 0,000 m2
Strut bossing	0,00	0,000 m2	Bilge keel 0,00 0,000 m2
Hull bossing	0,00	0,000 m2	Bow thruster diam 0,01 0,420 m



Environment data			
<b>[Wind]</b>		<b>[Seas]</b>	
Wind speed	0,00 kts	Sig wave height	0,000 m
Angle off bow	0,00 deg	Modal wave period	0 sec
Transv hull area	0,000 m <sup>2</sup>	<b>[Channel]</b>	
VCE above WL	0,000 m	Channel width	0,000 m
LCE fwd transom	0,000 m	Channel depth	0,000 m
Transv superst area	0,000 m <sup>2</sup>	Side slope	0,00 deg
VCE above WL	0,000 m	Wetted hull girth	0,000 m
LCE fwd transom	0,000 m	Channel depth	
Total longl area	0,000 m <sup>2</sup>		
VCE above WL	0,000 m		
LCE fwd transom	0,000 m		
Wind location	Free stream		
Hull type	Cargo ship		
Symbols and values			
Fn = Length Froude number Rn = Reynolds number Cf = Frictional resistance coefficient [Cform] = Viscous form resistance coefficient [Cw] = Wave-making resistance coefficient Cr = Residuary resistance coefficient Ct = Total bare-hull resistance coefficient  Rw/W = Wave-making resistance-weight merit ratio Rr/W = Residuary resistance-weight merit ratio Rbare/W = Bare-hull resistance-weight merit ratio R <sub>w</sub> = Wave-making resistance component R <sub>r</sub> = Residuary resistance component Rbare = Bare-hull resistance PEbare = Bare-hull effective power  Rapp = Additional appendage resistance Rwind = Additional wind resistance Rseas = Additional sea-state resistance Rchan = Additional channel resistance Rmisc = Miscellaneous resistance Rtotal = Total vessel resistance PEdotal = Total effective power  * = Bare-hull drag prediction exceeds speed parameter			

Prediction results							
Vel [kts]	PEtotal [kW]	WakeFr	ThrDed	RelRot	EngRPM	PB/prop [kW]	
6,00	20	0,3412	0,2138	1,0116	858,6	35	
7,00	32	0,3396	0,2138	1,0116	995,2	54	
8,00	46	0,3382	0,2138	1,0116	1128,9	77	
9,00	94	0,3371	0,2138	1,0116	1435,9	173	
10,00	263	0,3361	0,2138	1,0116	2091,9	612	
11,00	669	0,3352	0,2138	1,0116	3017,3	1999	
12,00	1585	0,3344	0,2138	1,0116	4290,7	6067	
13,00	2217	0,3337	0,2138	1,0116	4856,2	8850	
14,00	3476	0,3331	0,2138	1,0116	5799,3	15292	
15,00	3467	0,3325	0,2138	1,0116	5650,5	13932	
Vel [kts]	PropRPM	J	Kt	Kq	PropEff	HullEff	OPC
6,00	214,6	0,4060	0,1661	0,0206	0,5203	1,1934	0,6093
7,00	248,8	0,4097	0,1646	0,0204	0,5257	1,1905	0,6140
8,00	282,2	0,4136	0,1629	0,0202	0,5310	1,1880	0,6190
9,00	359,0	0,3665	0,1826	0,0220	0,4842	1,1860	0,5635
10,00	523,0	0,2799	0,2169	0,0251	0,3845	1,1842	0,4468
11,00	754,3	0,2137	0,2416	0,0273	0,3007	1,1827	0,3489
12,00	1072,7	0,1642	0,2591	0,0289	0,2346	1,1813	0,2719
13,00	1214,1	0,1573	0,2614	0,0290	0,2254	1,1801	0,2611
14,00	1449,8	0,1420	0,2666	0,0295	0,2045	1,1790	0,2366
15,00	1412,6	0,1563	0,2618	0,0290	0,2244	1,1779	0,2594
Vel [kts]	Thrust [N]	Thr/prop [N]	DelThr [N]	PropTorq [Nm]	PD/prop [kW]	PS/prop [kW]	PBtotal [kW]
6,00	8376	8376	6586	1456	32	33	35
7,00	11152	11152	8768	1937	50	51	54
8,00	14208	14208	11170	2466	72	74	77
9,00	25754	25754	20249	4343	161	166	173
10,00	64952	64952	51067	10535	570	588	612
11,00	150495	150495	118324	23838	1861	1919	1999
12,00	326325	326325	256567	50879	5650	5825	6067
13,00	421805	421805	331637	65573	8241	8496	8850
14,00	613446	613446	482311	94876	14240	14680	15292
15,00	571848	571848	449606	88716	12973	13375	13932
Vel [kts]	Sigma	MinP/D	TipSpd [mps]	Press [kPa]	MinBAR	%CavAvg	%CavPeak
6,00	59,30	0,586	15,7	7,8	0,2849	2,0	2,0
7,00	43,35	0,588	18,2	10,3	0,3131	2,0	2,0
8,00	33,06	0,590	20,7	13,2	0,3441	2,0	2,0
9,00	26,03	0,570	26,3	23,9	0,4612	2,0	2,0
10,00	21,02	0,537	38,3	60,3 **	0,8586 **	8,0	8,0
11,00	17,33	0,513	55,3 **	139,7 **	1,7261 **	57,6 **	57,6
12,00	14,53	0,496	78,6 **	302,8 **	3,5090 **	100,0 **	100,0
13,00	12,35	0,494	89,0 **	391,4 **	4,4772 **	100,0 **	100,0
14,00	10,63	0,489	106,3 **	569,3 **	6,4205 **	100,0 **	100,0
15,00	9,24	0,494	103,6 **	530,7 **	5,9987 **	100,0 **	100,0
Vel [kts]	PropRn	Kt/J2	Kq/J3	Cth	Cp	Fuel/eng [lph]	
6,00	5,12e+6	1,007	0,308	2,57	0,0089	0,0	
7,00	5,93e+6	0,980	0,297	2,50	0,0085	0,0	
8,00	6,73e+6	0,953	0,285	2,43	0,0082	0,0	
9,00	8,54e+6	1,360	0,447	3,46	0,0129	0,0	
10,00	1,24e+7	2,769	1,146	7,05	0,0330	0,0	
11,00	1,78e+7	5,289	2,799	13,47	0,0805	0,0	
12,00	2,53e+7	9,614	6,522	24,48	0,1876	0,0	
13,00	2,86e+7	10,566	7,459	26,91	0,2145	0,0	
14,00	3,41e+7	13,225	10,290	33,68	0,2959	0,0	
15,00	3,33e+7	10,721	7,603	27,30	0,2186	0,0	

Propulsive coefficients			
Wake fraction	[Calc] Holtrop 1984	Wake fract scale correction	[Off] Free stream
Thrust deduction	[Calc] Holtrop 1984	Rudder loc	
Relative rotative efficiency	[Calc] Holtrop 1984	Wake fract duct correction	[Off]
Friction line	ITTC-57	Tunnel stern correction	[Off]
Correlation allowance	0,00049	Effective tunnel diam	0,000 m
3D form factor	1,4383	Tunnel depth	0,000 m
Hull data			
<b>[General]</b>		<b>[Ct-based]</b>	
Length between PP	34.600 m	Max section area	[0,866 Cx] 21,358 m2
WL bow pt aft FP	0,000 m	Waterplane area	[0,807 Cw] 195,032 m2
Length on WL	33,902 m	Trim by stem	0,000 m
Max beam on WL	7,126 m	LCB aft of FP	[0,491 Lpp] 16,973 m
Max molded draft	3,462 m	Bulb ext fwd FP	0,000 m
Displacement bare	606,63 t	Bulb area at FP	0,000 m2
Wetted surface	377,780 m2	Bulb ctr above BL	0,000 m
Chine type	Round bilge	Transom area	[0,000 of Ax] 0,000 m2
<b>[Principal parameters]</b>		Transom beam	[0,000 of B] 0,000 m
Lwl/B	4,7575	Transom draft	[0,000 of T] 0,000 m
B/T	2,0583	Half ent angle	35,11 deg
Cb	0,7070	Bow shape	[Normal] Average flow
Cws	2,6681	Stern shape	[V-shape]
Prediction method check			
Wake fract:	Holtrop 1984		
Fn(Lwl)	0,1...0,8	0,17	
Fn-high	0,1...0,8	0,42	
Lwl/Bwl	3,9...14,9	4,76	
Bwl/T	2,1...4	2,06	Limit
Cp(Lwl)	0,55...0,85	0,82	
Lambda	0...0,8	1,04	Limit
Thrust ded:	Holtrop 1984		
Fn(Lwl)	0,1...0,8	0,17	
Fn-high	0,1...0,8	0,42	
Lwl/Bwl	3,9...14,9	4,76	
Bwl/T	2,1...4	2,06	Limit
Cp(Lwl)	0,55...0,85	0,82	
Lambda	0...0,8	1,04	Limit
Rel rot eff:	Holtrop 1984		
Fn(Lwl)	0,1...0,8	0,17	
Fn-high	0,1...0,8	0,42	
Lwl/Bwl	3,9...14,9	4,76	
Bwl/T	2,1...4	2,06	Limit
Cp(Lwl)	0,55...0,85	0,82	
Lambda	0...0,8	1,04	Limit

System analysis			
Analysis type	Free run	Water type	Standard Salt
Cav criteria	Keller eqn	Mass density	1025,86 kg/m3
CPP analysis method	[Off]	Mass density	1,1883e-06 m2/s
Propulsor data			
Description		Blades	4
Propulsors	1	Exp area ratio	0,700
Propulsor type	Series	Diameter	1,400 m
Propeller series	B-series	Pitch	1,000 m
		Immersion	2,600 m
Propeller options			
Scale corr	B-series	Propeller cup	0,0 mm
K1 mult	[Std] 1,000	Pitch type	FPP
Kq mult	[Std] 1,000	Cav breakdown	[Off]
Blade t/c	[Std] 0,000	Shaft angle corr	[Off]
Roughness	[Std] 0,0 mm	Added angle of run	
Engine data			
Engine file		Gear ratio	4,000
Rated RPM	0	Gear efficiency	0,960
Rated power	0 kW	Shaft efficiency	0,970

Symbols and values
Vel = Ship speed
PEtotal = Total effective power
WakeFr = Taylor wake fraction coefficient
ThrDed = Thrust deduction coefficient
RelRot = Relative-rotative efficiency
EngRPM = Engine RPM
PB/prop = Brake power per propeller
PropRPM = Propeller RPM
J = Advance coefficient
Kt = Thrust coefficient
Kq = Torque coefficient
PropEff = Propeller open-water efficiency
HullEff = Hull efficiency = (1 - ThrDed) / (1 - WakeFr)
OPC = Overall propulsive coefficient
Thrust = Total open-water thrust
Thr/prop = Open-water thrust per propeller
DelThr = Total delivered thrust
PropTorq = Propeller open water torque
PD/prop = Delivered power per propeller
PS/prop = Shaft power per propeller
PBtotal = Total brake power
Sigma = Cavitation number based on advance velocity
MinP/D = Minimum P/D ratio to avoid face cavitation
TipSpd = Linear velocity of the propeller tips
Press = Average propeller blade pressure
MinBAR = Minimum recommended expanded blade area ratio
%CavAvg = Average percent back cavitation
%CavPeak = Peak percent back cavitation (from shaft angle effects)
PropRn = Propeller Reynolds number
Kt/J2 = Propeller thrust-speed ratio
Kq/J3 = Propeller torque-speed ratio
Cth = Propeller thrust loading coefficient
Cp = Propeller power loading coefficient
Fuel/eng = Fuel consumption per engine
* = Propulsive coefficient prediction exceeds speed parameter
** = Exceeds cavitation criteria
*** = Cavitation breakdown is indicated



US005131341A

**United States Patent** [19]  
Newman

[11] **Patent Number:** 5,131,341  
[45] **Date of Patent:** Jul. 21, 1992

- [54] **SOLAR POWERED ELECTRIC SHIP SYSTEM**
- [76] **Inventor:** Edwin Newman, 10331 Lindley Ave., #113, Northridge, Calif. 91326
- [21] **Appl. No.:** 621,747
- [22] **Filed:** Dec. 3, 1990
- [51] **Int. Cl.<sup>5</sup>** ..... B63H 9/04
- [52] **U.S. Cl.** ..... 114/39.1; 114/95; 114/102; 440/6
- [58] **Field of Search** ..... 440/6; 114/39.1, 95, 114/96, 97, 98, 102, 103, 104; 136/291

*Assistant Examiner*—Thomas J. Brahan  
*Attorney, Agent, or Firm*—Monty Koslover Assoc.

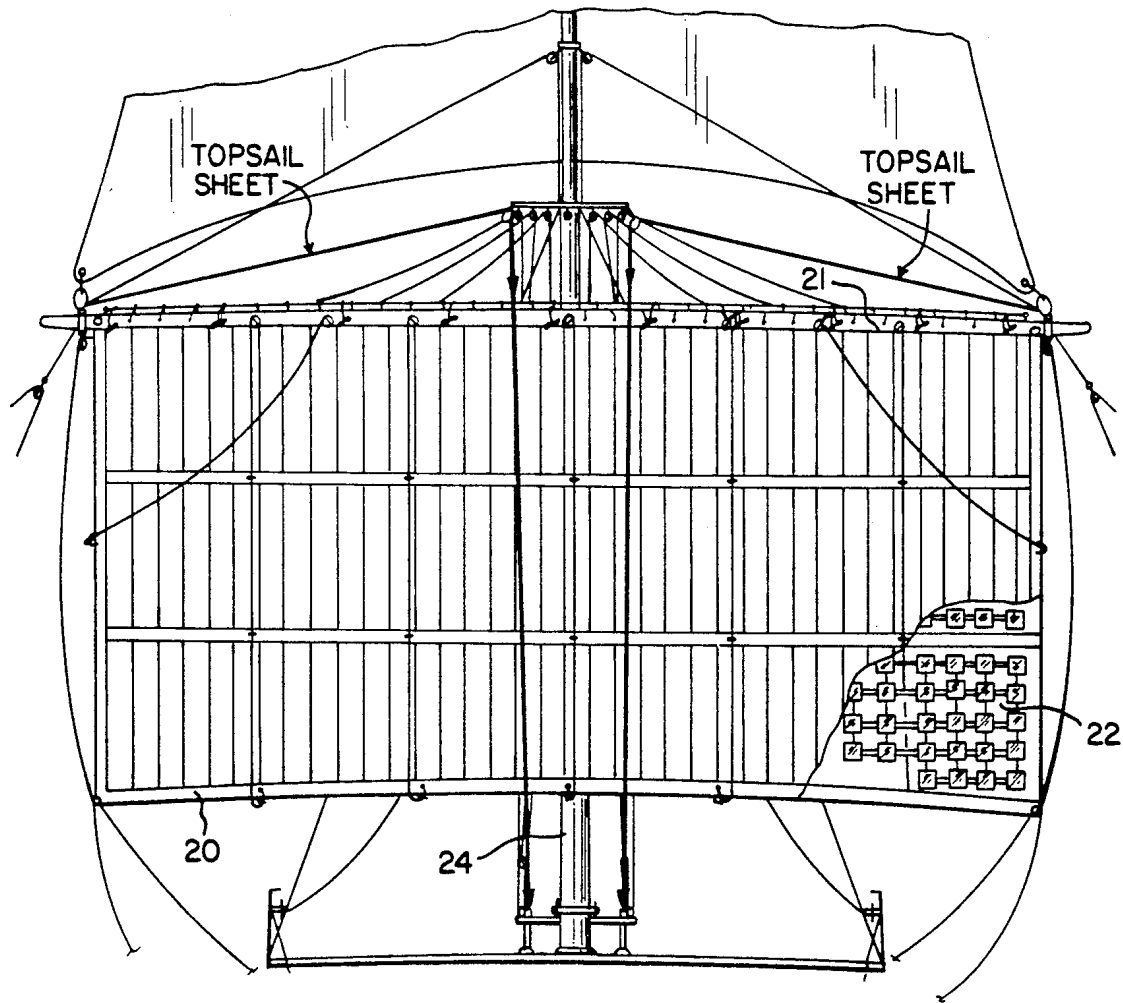
[57] **ABSTRACT**

A system for producing and distributing electric power on a sailing ship, using arrays of photovoltaic cells covering the ships sails and rigging to generate electric power during daylight for the purpose of driving a ships screw. The solar array electric power output is processed by a voltage regulator which charges a large capacity storage battery and energizes an electric motor to drive the ships screw. An AC inverter is also provided to convert the DC power for the AC loads. To increase the area normally available on sailing ships for solar arrays, wing-booms which extend the lengths of the yards, and rolling booms above the yards are proposed for addition to the ships superstructure. The invention should make it possible for sailing ships to resume transportation of cargo without the need for auxiliary gas or oil-burning engines and a fuel supply.

- [56] **References Cited**
- U.S. PATENT DOCUMENTS**
- 4,553,037 11/1985 Veazey ..... 136/291
- FOREIGN PATENT DOCUMENTS**
- 3836259 4/1990 Fed. Rep. of Germany ..... 114/103

*Primary Examiner*—Sherman Basinger

**4 Claims, 6 Drawing Sheets**



## Bijlage G Invloed van de spoed op schroefregeneratie

In wat volgt wordt uitgegaan van een Wageningen B-Series B4-70 schroef, gekenmerkt door volgende geometrische parameters:

- Aantal bladen (Z): 4.
- Bladoppervlakteverhouding ( $A_E/A_0$ ): 0,7.
- Diameter (D): 1,4 m.
- Spoed-diameterverhoudingen (P/D): 0,5 ; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4.

Voor schroeven van de Wageningen B-Series geldt algemeen:

$$Q = K_Q \rho n^2 D^5 = C_Q^* \frac{1}{2} \rho \{V_a^2 + (0,7\pi n D)^2\} \frac{\pi D^2}{4} \quad [Nm]$$

$$P = 2\pi Q n \quad [W]$$

Uit de KT-KQ-diagrammen van de schroeven met verschillende P/D kan de (maximale) snelheidsgraad bepaald worden waarbij  $K_T = 0$ , ofwel de overgang van schroefwerking naar regeneratie in het eertse kwadrant. Deze snelheidsgraden zijn weergegeven in Tabel 1:

P/D (-)	J <sub>Kt=0</sub> (-)
0,5	0,546
0,6	0,651
0,8	0,856
1	1,062
1,2	1,272
1,4	1,49

Tabel 1: J bij verschillende P/D

Het vrijlooptoerental, alsook de aanstromingshoek ( $\beta$ ) bij  $K_T = 0$  kunnen dan berekend worden via volgende formules:

$$J \approx 1,062 = \frac{V_a}{n D} = \frac{(1-0,31)V}{n \cdot 1,4} \Rightarrow n = \frac{(1-0,31)V}{J \cdot 1,4} \quad [rps]$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{J}{0,7\pi}\right) \quad [^\circ]$$

De resultaten voor verschillende P/D zijn weergegeven in Tabel 2. Een lagere P/D leidt tot hogere vrijlooptoerentalen bij eenzelfde vaarsnelheid. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat het optimale toerental voor regeneratie (maximale vermogensoverdracht, uitgedrukt als fractie van het vrijlooptoerental ook wijzigt bij veranderde P/D (zie Tabel 3). Deze fractie blijft per P/D wel constant voor verschillende vaarsnelheden.

n_Kt=0 (rpm)		P/D (-)					
		0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,4
V (kn)	6	325	273	207	167	139	119
	7	379	318	242	195	163	139
	8	433	363	276	223	186	159
	9	487	409	311	251	209	179
	10	542	454	345	278	232	198
	11	596	500	380	306	256	218
	12	650	545	415	334	279	238
	13	704	591	449	362	302	258
	14	758	636	484	390	325	278

Tabel 2: Vrijlooptoerental bij verschillende P/D

P/D (-)	n_opt/n_Kt=0 (%)
0,5	48,73
0,6	47,37
0,8	51,66
1	51,79
1,2	48,54
1,4	42,34

Tabel 3: Optimaal toerental bij verschillende P/D

De wet van Betz luidt:

$$P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} V_a^3 \quad [W]$$

Wanneer het overdraagbaar vermogen in optimale omstandigheden betrokken wordt tot de wet van Betz, volgt een constante verhouding tussen beide:

$$\frac{P_{opt}}{P_{Betz}} = 27 \frac{K_{Q,opt}}{J_{opt}^3} = 27 \frac{C_{Q,opt} \frac{\pi}{8} (J_{opt}^2 + (0,7\pi)^2)}{J_{opt}^3} \quad [-]$$

Aangezien  $J_{opt}$  en  $C_{Q,opt}$  via de schroefkarakteristieken gekend zijn voor elke P/D, kan deze verhouding voor elke P/D bepaald worden, zie Tabel 4:

P/D (-)	Jopt (-)	Cq*opt (-)	P_opt/P_Betz (%)
0,5	1,1205	0,0091	41,78
0,6	1,3742	0,0160	43,96
0,8	1,6572	0,0248	43,81
1	2,0507	0,0379	42,13
1,2	2,6208	0,0571	39,37
1,4	3,5193	0,0831	34,81

Tabel 4: Verhouding optimaal vermogen t.o.v. Betz

De prestaties zijn volgens de formule het best bij een snelheidsgraad van 0,6 – al zijn de verschillen in geregenereerd vermogen voor P/D tussen 0,5 en 1 slecht zeer beperkt afhankelijk van P/D (zie Tabel 5), het is pas bij grotere verhoudingen (1,2 en 1,4) dat het potentieel qua regeneratie afneemt.

P_max (kW)		P/D (-)					
		0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,4
V (kn)	6	1,89	1,99	1,98	1,90	1,78	1,57
	7	3,00	3,15	3,14	3,02	2,82	2,50
	8	4,47	4,71	4,69	4,51	4,21	3,73
	9	6,37	6,70	6,68	6,42	6,00	5,31
	10	8,74	9,19	9,16	8,81	8,23	7,28
	11	11,63	12,24	12,19	11,73	10,96	9,69
	12	15,10	15,89	15,83	15,22	14,22	12,58
	13	19,19	20,20	20,13	19,35	18,08	15,99
	14	23,97	25,22	25,14	24,17	22,59	19,97

Tabel 5: Geregenereerd vermogen bij verschillende P/D

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de afremmende kracht (negatieve stuwkracht) bij lage P/D relatief toeneemt (zie Tabel 6), een schroef met P/D =1 – zoals voorgesteld bij de optimalisatie voor propulsie – lijkt ook voor regeneratie de beste eigenschappen te bezitten.

T_Pmax (N)		P/D (-)					
		0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,4
V (kn)	6	-2622	-2421	-2273	-2008	-2006	-2005
	7	-3569	-3296	-3093	-2733	-2731	-2729
	8	-4661	-4305	-4040	-3570	-3567	-3565
	9	-5899	-5448	-5113	-4518	-4514	-4512
	10	-7283	-6726	-6313	-5578	-5573	-5570
	11	-8812	-8138	-7638	-6750	-6744	-6740
	12	-10487	-9685	-9090	-8033	-8025	-8021
	13	-12308	-11367	-10669	-9427	-9419	-9414
	14	-14274	-13183	-12373	-10933	-10923	-10918

Tabel 6: Afremmende kracht bij verschillende P/D

CATEGORIE	PLAATS	TOESTEL	#	VERMOGEN (W)		OPMERKING	SPECIFICATIES	REFERENTIE (legende onderaan)
				regime	start/peik			
<b>SCHIP</b>								
<b>navigatie</b>								
	brug	RADAR	1	6000				Furuno FR 7062 *
	brug	GPS	1	10				Furuno GP 150 *
	brug	echo sounder	1	600				Furuno FE 700 *
	brug	sattelietkompas	1	15				Furuno FC 502 *
	brug	speed log	1	20				Walker 4020 *
	brug	ECDIS	1	120	160			JRC JAN-2000
	brug	Facsimile receiver	1	130			met printer	JRC JAX-91
				12		ter vgl	enkel receiver	Furuno FAX 30
	brug	gyrokompas	1	45				Sperry Marine NAVIGAT 2100
		gyrokompas repeater	3	7				Sperry Marine NAVIGAT 2101
<b>communicatie</b>								
	brug	AIS transponder	1	87,6				Furuno FA 150 *
	brug	MF/HF satelliettelefoon	1	36 (stdby)	840 (TX)			Furuno FS 2570 *
	brug	GMDSS Navtex ontvanger		1,7				Furuno NX 300 *
	brug	Inmarsat C	1	160				Furuno Felcom 15 *
	brug	VHF radio	2	15 (stdby)	175 (TX)			Furuno FM 8800 D *
	brug	draagbare VHF	2			lader		
<b>roer</b>								
		autopilot electronica	1	5				Simrad AP 50 *
		autopilot actuatoren						
		autopilot sensoren						
<b>machinekamer</b>								
	machinekamer	compressor		2200			10 bar, 100 l	
<b>HVAC</b>								
		verwarming	1	240	750	+ warm water	40 kW dieselbrander	Kabola **
		ventilatie						
		koeling						
<b>pompen</b>								
	ruim	blus-/lenspomp	2	5500			10.. 30 m³/h	DESMI K&R SAEN 2100 *
	machinekamer	blus-/lenspomp	1					
	nood	bluspomp	1					
	nood	lenspomp	2					
		sprinklerpomp						
		hydrofoorpomp	2	250	370	zee- & zoetwater	1m³/h, tank 100 l	Speck PM 10/100 *
<b>dekuitrusting</b>								
	dek	voorschip	1	5500			EN 220	berekend
			1	8000		ter vgl	380 V	Ridderinkhof **
	dek	midscheeps	1					
	vooronder	boegschroef	1	36000			tot 4 bft	berekend



CATEGORIE	PLAATS	TOESTEL	#	VERMOGEN (W)		OPMERKING	SPECIFICATIES	REFERENTIE (legende onderaan)
				regime	start/peik			
navigatie- & signaalverlichting								
		SB	1		10			
		BB	1		10			
	bezaanmast	navigatielicht	1		10			
	bezaanmast	deklicht						
	grote mast	navigatielicht	1		10		rood boven groen	
	grote mast	deklicht						
	grote mast	deklicht						
	fokkemast	navigatielicht	1		10			
	fokkemast	deklicht						
		MOB zoeklicht	2		500			
		aldislamp						
verlichting								
	brug							
	mess							
	capt br							
	off br							
	off mess							
	gang off/capt							
	storage							
	cook br							
	sanitair off/pass							
	mess/multi							
	2pass br							
	2crew br							
	4crew br							
	4train br							
	8train br							
	atelier							
	gang pass/crew							
	gang train							
	sanitair women							
	sanitair train/crew							
	machinekamer							
interne communicatie, alarm & meting								
	branddetectie							
	intercom							
		horn (class III)						

CATEGORIE	PLAATS	TOESTEL	#	VERMOGEN (W)		OPMERKING	SPECIFICATIES	REFERENTIE (legende onderaan)
				regime	start/piek			
<b>BEMANNING</b>								
galley equipment								
	kombuis	combi steam oven	1	5300			5 x 1/1 GN	Unox XB403G *
	kombuis	range	1	10000			4 hot plates, oven	Edco Marine KB362-88-0
	kombuis	fat fryer	1	7200			7-9 l	Edco Marine V250MS
	kombuis	microwave	1	1490			1000 W	Panasonic NE-1027 *
	kombuis	dishwasher	1	7070	10100		50 baskets/h	Wexiödisk WD-7
	kombuis	coffee machine	2	2145			144 c/h	Bravilor Mondo 2 *
	kombuis			3460		ter vgl	224 c/h	Bravilor Mondo twin
	kombuis	refrigerator	3	545			600 l (0/+7°C)	Afinox ASX 700 TN/PC *
				810		ter vgl	600 l (-10/-20°C)	Afinox ASX 700 BT/PC
				830		ter vgl	1320 l (0/+7°C)	Afinox ASX 1400 TN/PC
				1070		ter vgl	1320 l (-10/-20°C)	Afinox ASX 1400 NT/PC
		mixer		1200			40 l	Smaky SM-40HI
		bread slicing machine		400			200 sl/h	
		rice cooker		1750			10 l	
		water boiler						
		food waste disposer		550			150 kg/h	Edco Marine 526
		waste compactor		370			75 % reductie	Tony Team TT100
	mess	beverage cooler	1	480			2x 11 l	
	mess	water cooler	1	440				
		toaster	1	1,6			300 sl/h	
		zoetwatermaker		3850	10500		6814 l/d 284 l/h	Sea Recovery Aqua Matic/Aqua Whisper DX
laundry equipment								
	laundry	wasmachine	1	4000			6,5 kg	Miele Professional
	laundry	droogkast	1	4300			6,5 kg	Miele Professional
	laundry	strijkijzer	1	3050			rotary ironer	Miele Professional
				2000		ter vgl	domestic type	Miele
extra								
medische apparatuur								
	hifi-installatie	mess						
<b>LEGENDE REFERENTIES</b>								
* : apparaten die op de Mercedes aanwezig zijn				<a href="http://www.jameslist.com/advert/50516/for-sale-custom-built-tall-ship">http://www.jameslist.com/advert/50516/for-sale-custom-built-tall-ship</a>				
** : apparaten die op de Thalassa aanwezig zijn				<a href="http://www.scheepsmakelaardij.nl/schepenlijst.php?ship_id=1019">http://www.scheepsmakelaardij.nl/schepenlijst.php?ship_id=1019</a>				

## Bijlage I Berekening EN

Voor zeiljachten wordt het uitrustingsgetal volgens Bureau Veritas met volgende formule berekend:

$$EN_S = EN + EN_E$$

EN is het uitrustingsgetal alsof het schip een motorjacht zou zijn,  $EN_E$  brengt de invloed van masten en tuigage in rekening. Voor enkelrompszeilschepen neemt de formule voor EN deze vorm aan:

$$EN = \sqrt[3]{\Delta^2} + 2 \left[ a \cdot B + \sum_i (b_i \cdot h_i \cdot \sin \Theta_i) \right] + 0,1A = 149,295$$

met:

$\Delta$ :	Maximum deplacement	605 ton;
A:	Afstand van midscheepse lastlijn tot het hoogste dek in de zij	1,05 m;
$h_i$ :	Midscheepse hoogte van elk dekhuis (met $b_i$ groter dan $B/4$ )	1,9 m (voor alle dekhuisen);
$\Theta_i$ :	Inclinatiehoek van het frontschot van een dekhuis	90° (voor alle dekhuisen);
A:	Frontale oppervlak (inclusief alle dekhuisen en opbouwen)	28,275 m <sup>2</sup> .

De term die masten en tuigage in rekening brengt kan op 2 manieren berekend worden: een directe (direct calculation) of een vereenvoudigde (gross calculation) berekening. De formule voor de directe berekening luidt:

$$EN_E = 2 \sum_{i=1}^n h_i \cdot b_{Yi} \cdot \frac{C_{TXi}}{1,22} + 0,1 \cdot \sum_{i=1}^n h_i \cdot b_{Xi} \cdot \frac{C_{TYi}}{1,22}$$

met:

$h_i$ :	Hoogte van de mast, gemeten vanaf het dek	[m];
$b_{Yi}$ :	Gemiddelde breedte van de mast in de Y-richting	[m];
$C_{TXi}$ :	Longitudinale weerstandscoefficient van de mast in de X-richting (zonder info gelijk aan 1 en $1 \leq C_{TXi} \leq 2,05$ )	[-];
$b_{Xi}$ :	Gemiddelde breedte van de mast in de X-richting	[m];
$C_{TYi}$ :	Longitudinale weerstandscoefficient van de mast in de Y-richting (zonder info gelijk aan 1 en $1 \leq C_{TYi} \leq 2,05$ )	[-];
i:	Nummer van de mast, geteld van boeg naar hek	[-].

Worden alle masten als cilinders met diameter 0,8 m beschouwd met een weerstandscoefficient van 1, dan levert dit een  $EN_E$  op van 67. Het uitrustingsgetal ( $EN_S$ ) van de *New Belgica* bedraagt dan afgerond 220.

Ter controle werd deze berekening herhaald volgens de regels van Register Holland, de formule voor EN is hier:

$$EN = \sqrt[3]{D^2} + 2O_{rd} + O_{tuig} + 0,1O_{rl} = 224$$

met:

D:	Displacement in tonnen van 1000 kg	605 ton;
O <sub>rd</sub> :	Dwarsscheeps rompoppervlak	28,275 m <sup>2</sup> ;
O <sub>tuig</sub> :	Totale windoppervlakte van de tuigage	19 m <sup>2</sup> ;
O <sub>rl</sub> :	Lateraal oppervlak van de romp boven water	171 m <sup>2</sup> .

Beide waarden komen goed overeen, voor een EN van 220 schrijft Bureau Veritas 2 ankers van elk 400 kg voor. De totale lengte van de ankerketting bedraagt minstens 302,5 m – de diameter van de schakels is 22 mm voor Q2 grade steel en 20,5 mm voor Q3 grade steel.

Ter vergelijking de waarden volgens Register Holland: 2 ankers van elk 660 kg, 302,5 m ketting en schakeldiameters van 26 (Q1) en 22 (Q2) mm. De ankerlengte geldt voor twee ankers en voor stokankers mag een gewichtsreductie van 10 % worden doorgevoerd (2 x 595 kg). Het grote verschil in ankergewicht valt te verklaren doordat de waarde volgens Bureau Veritas nog net in het bereik 202-222 valt, met een EN van 224 zouden de ankers elk 465 kg moeten wegen.

# Referenties

## Deel I

- [1] [www.steenschuit.be](http://www.steenschuit.be)
- [2] [www.Belgica-genootschap.be](http://www.Belgica-genootschap.be)
- [3] [www.new-Belgica.org](http://www.new-Belgica.org)
- [4] DE KETELAERE, B., 'Haalbaarheidsstudie voor de bouw van een zeewaardige replica van het poolexpeditieschip *Belgica*', Gent, 2009, 71 p.

## Deel II

- [5] DE GERLACHE, A. et al., 'Résultats du voyage de la *Belgica* en 1897-1899', *Imprimerie J.-E. Buschmann*, Antwerpen, 1938, 75 p.
- [6] DE GERLACHE, A., 'Quinze mois dans l'Antarctique; Le premier hivernage dans la banquise australe', *Le Tour du Monde (Journal des voyages et des voyageurs)*, *Hacette et Cie*, Paris, 1901, p. 313-408
- [7] KJAER, K.-G., '*Belgica* in the Arctic', *Polar Record* 41(218), 2005, p. 205-214
- [8] LATAIRE, E. et al., 'The contradictions between the original three master *Belgica* and the present regulations', Gent, 2009, 7 p.
- [9] [www.hetlaatstecontinent.be](http://www.hetlaatstecontinent.be)

## Deel III

- [10] [www.sailtraininginternational.org](http://www.sailtraininginternational.org)
- [11] IMO, Resolutie MSC.266(84), 2008 SPS Code – Code of Safety for Special Purpose Ships, 2008
- [12] IMO, Resolutie A.534(13), SPS Code – Code of Safety for Special Purpose Ships, 1983
- [13] IMO, International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974
- [14] Bureau Veritas, Rules for the Classification and the Certification of Yachts NR500 (<http://erules.veristar.com/>), 2008
- [15] Register Holland, Witte Rules, Enkhuizen, 2005
- [16] Koninklijk Besluit inzake uitrusting van zeeschepen en houdende zeevaartinspectiereglement, 11 Mei 2009 (verwijzend naar Richtlijn 2008/67/EG)
- [17] <http://erules.veristar.com/>
- [18] Bureau Veritas, NR 527 Rules for the Classification of Polar Class Ships, 2007
- [19] HydroComp NavCad 5.43.0123
- [20] Schneider Electric, 'Electrical installation guide; according to IEC international standards', 2008

## Deel IV

- [21] [www.volvopenta.com](http://www.volvopenta.com)

- [22] CALDER, N., HAWKSLEY, G., 'Hybrid Marine Power' *Professional Boatbuilder 107*, 2007, p. 82-93
- [23] LARSSON, L., ELIASSON, R.E., 'Principles of yacht design'(2<sup>nd</sup> edition), *Adlard Coles Nautical*, London, 2000
- [24] Ossa Powerlite, 'Diesel-Electric Marine Propulsion Systems and Accessoires', 3 p.
- [25] Glacier Bay Incorporated, 'How diesel-electric propulsion saves fuel', 9 p.
- [26] Hawksley Silicon Systems Ltd, 'Technology evaluation: Propulsion methods for a 32' auxiliary yacht', 2007, 8 p.
- [27] CALDER, N., HAWKSLEY, G., 'Hybrid Marine Power Part 2' *Professional Boatbuilder 108*, 2007, p. 82-99
- [28] CALDER, N., HAWKSLEY, G., 'Beyond Efficiency Criteria Alone' *Professional Boatbuilder 109*, 2007, p. 140-154
- [29] CALDER, N., 'The Real McCoy' *Professional Boatbuilder 118*, 2009, p. 40-51
- [30] KROEF, K., 'Elektrisch varen, zeilen zonder zeil', Bellman Drive Systems, 2006, 72 p.
- [31] VAN DEN BOSSCHE, A., 'Combined electric applications in transport', Gent, s.d., 14 p.
- [32] KLOS, H.S., 'Hele EU kijkt naar elektronen die van links naar rechts gaan; Jeroen van Tilborg van D&A Electric', *SWZ Maritime*, jaargang 130, november 2009, p. 14-17
- [33] Bosch Automotive Handbook (6<sup>th</sup> edition)
- [34] Diesel Engine Reference Book (2<sup>nd</sup> edition)
- [35] Handbook of Automotive Engineering
- [36] Haalbaarheidsstudie 'Boomkorvissen op aardgas', september 2009
- [37] RADAN, D., 'Power electronic converters for ship propulsion electric motors', 2004, 23 p.
- [38] DIETMAR, D., 'Principal aspects on thruster selection', Nautex, 1997, 74 p.
- [39] ÅDNANES, A.K., 'Maritime electrical installations and diesel electric propulsion', ABB Marine, 2003, 86 p.
- [40] VADER, R., 'Altijd Stroom; Elektriciteit aan boord', Victron Energy, 2007, 70 p.
- [41] ECN, 'Energietechnologieën in relatie tot transitiebeleid; Hoofdstuk 9: Energieopslag', 2004, p. 60-64
- [42] BUCHMANN, I., 'Batteries in a portable world', 2001 ([www.buchmann.ca](http://www.buchmann.ca))
- [43] CALDER, N., 'Breakthrough' *Professional Boatbuilder 111*, 2008, p. 104-108
- [44] EnerSys, 'Odyssey; the extreme battery', Marine product brochure, 2009, 6 p.
- [45] [www.enersys-emea.com](http://www.enersys-emea.com), [www.enersysreservepower.com](http://www.enersysreservepower.com)
- [46] U.S. Department of Energy Hydrogen Program, 'Comparison of Fuel Cell technologies', 2008
- [47] ADAMSON, K.-A., 'Fuel Cells and Marine Applications', *Fuel Cell Today*, 2005, 10 p.
- [48] Fuel Cell Handbook (7<sup>th</sup> edition), 2004
- [49] COUWENBERG, M., TJEERDSMA, A., VAN DEN OOSTERKAMP, P., 'Fuel Cells for Ships; CO<sub>2</sub> Neutral and Zero Emissions', *SWZ Maritime*, jaargang 130, november 2009, p. 18-23
- [50] MEEK-HANSEN, B., 'Fuel cell technology for ferries', *MARINTEK paper*, 2002, 12 p.
- [51] [www.marine-fuel-cell.com](http://www.marine-fuel-cell.com)
- [52] [www.flexcell.com](http://www.flexcell.com)

## Deel V

- [53] BETZ, A. (1966) 'Introduction to the Theory of Flow Machines' (D.G. Randall, Trans.), *Oxford: Pergamon Press*
- [54] [www.asmomarine.com](http://www.asmomarine.com)
- [55] MARIN PSP (Propeller Series Package), v2003\_1
- [56] RODDY, R.F., HESS, D.E., FALLER, W.E., 'Neural Network Prediction of the 4-Quadrant Wageningen B-Screw Series', *David Taylor Model Basin*, 2006, 20 p.

## Deel VI

- [57] [www.vetus.nl](http://www.vetus.nl)
- [58] [www.dutchthrustergroup.com](http://www.dutchthrustergroup.com)
- [59] [www.side-power.com](http://www.side-power.com)
- [60] [www.kabola.nl](http://www.kabola.nl)
- [61] [www.takel-ing.de](http://www.takel-ing.de)
- [62] [www.squarerigged.nl](http://www.squarerigged.nl)

## Communicatie per e-mail:

Asmo Marine (DK, Lars Dybro Frederiksen), elektrische scheepsaandrijvingen  
Bellmann (NL, Marien Schoonen), elektrische scheepsaandrijvingen  
Cadhead (NL, Marijke de Jong), dekuitrusting  
Dutch Thruster Group (NL, Edy Vos), boegschroef  
Energys Benelux (BE, Marc Van Goidsenhoven), TPPL-batterijen  
Glacier Bay (US, N. Bruce Nelson), elektrische scheepsaandrijvingen  
Kabola (NL, Piet Alles), verwarmingssystemen  
Takel-Ing. (DE, Jan Huerkamp), Jarvislieren  
Tall Ship Astrid (NL, capt. Pieter de Kam), boordapparatuur  
Technipower Systems (US, Alex Pesiridis), schroefregeneratie