

Weer-routing-systemen in de koopvaardij en in de zeilwereld

Toon Van Caneghem

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen
aan de Hogere Zeevaartschool
Academiejaar: 2023-2024

Promotor: Anne-Pascale Mornard

Voorwoord

Allereerst zou ik mijn promotor mevr. Anne-Pascale Mornard willen bedanken voor de steun bij mijn gekozen onderwerp. Het schrijven over een onderwerp waar ik sinds begin van mijn carrière op de hogere zeevaartschool geïnteresseerd in ben was al een tijd mijn ambitie en zodoende was ik erg tevreden bij de goedkeuring van dit onderwerp.

Ook zou ik graag mijn vrienden en familie willen bedanken voor de nodige tips en ontspanningen tussen het schrijven in. Mijn ouders hebben me altijd gesteund en gemotiveerd in mijn studiekeuze ook tijdens het schrijven over weer-routing-systemen.

Het gekozen onderwerp 'weer-routing-systemen in de koopvaardij en in de zeilwereld' is iets waar ik al enkele jaren gepassioneerd en gemotiveerd over kan spreken. Het schrijven van een master thesis is hiervoor de perfecte opportuniteit. Tijdens het schrijven ben ik veel te weten gekomen over de achtergrond van de systemen alsook de werkingen ervan.

Het gebruik van weer-routing-systemen is voor mij als offshore wedstrijdzeiler in het zeilwedstrijd-seizoen een wekelijks en soms zelf dagelijks gebeuren. Het offshore zeilen heeft een grote stap vooruit gezet sinds het ontstaan van weer-routing-systeem. De veiligheid is hierdoor enorm verbeterd en er is een nieuw soort tactisch aspect bijgekomen.

Omwille van de verhoogde veiligheid kunnen wij als zeilers met veel snellere en extremere boten offshore races winnen of verliezen. In deze uitdagende sport heb ik mijn passie en interesse gevonden. Het schrijven van deze scriptie is dus het logisch product van mijn ambitie.

Samenvatting

Deze thesis onderzoekt weerroutering-systemen en hun toepassing in zowel de commerciële scheepvaart als de zeilwereld. Het doel is om inzicht te bieden in hoe deze complexe systemen werken, welke methodes en algoritmes ze gebruiken, en welke meteorologische factoren van invloed zijn.

Weerroutering-systemen zijn ontworpen om de optimale route voor schepen te bepalen op basis van weersvoorspellingen en scheepskenmerken. Er zijn twee hoofdmethoden: de deterministische methode, die wiskundige modellen gebruikt om specifieke weersomstandigheden te voorspellen, en de probabilistische methode, die statistische technieken toepast om de waarschijnlijkheid van verschillende weeromstandigheden te berekenen. De thesis bespreekt verschillende algoritmes zoals de isochrone/ isopone methode en dynamic programming methode, elk met unieke voordelen en toepassingen.

Daarnaast worden belangrijke meteorologische elementen zoals wind, neerslag, getijden en stromingen uitvoerig behandeld. De invloed van deze factoren op de prestaties en veiligheid van schepen wordt belicht, bijvoorbeeld hoe windrichting en -snelheid de vaartijd en het brandstofverbruik beïnvloeden, en hoe neerslag de zichtbaarheid en stabiliteit van een schip kan verminderen.

De thesis bespreekt ook verschillende weermodellen, zoals globaal als regionaal. Globale weermodellen zoals ECMWF en GFS bieden brede weersvoorspellingen, terwijl regionale modellen zoals HIRLAM en ALADIN specifiek en gedetailleerder zijn voor bepaalde gebieden.

Weerroutering-systemen zijn essentieel voor de moderne scheepvaart en zeilsport ze verbeteren de veiligheid en efficiëntie door optimale routes te bepalen op basis van actuele en voorspelde omstandigheden. Dankzij technologische vooruitgang, zoals nauwkeurige weermodellen en geavanceerde algoritmes, worden deze systemen betrouwbaarder en effectiever.

ABSTRACT

This thesis explores weather routing systems and their application in both commercial shipping and the sailing world. The aim is to provide insight into how these complex systems operate, what methods and algorithms they use, and which meteorological factors influence them.

Weather routing systems are designed to determine the optimal route for ships based on weather forecasts and ship characteristics. There are two main methods: the deterministic method, which uses mathematical models to predict specific weather conditions, and the probabilistic method, which applies statistical techniques to calculate the probability of various weather conditions. The thesis discusses different algorithms such as the isochrone/isopone method and dynamic programming method, each with unique advantages and applications.

In addition, important meteorological elements such as wind, precipitation, tides, and currents are covered in detail. The influence of these factors on ship performance and safety is highlighted, for example, how wind direction and speed affect sailing time and fuel consumption, and how precipitation can reduce a ship's visibility and stability.

The thesis also discusses various weather models, such as global and regional. Global weather models such as ECMWF and GFS provide broad weather forecasts, while regional models such as HIRLAM and ALADIN are more specific and detailed for areas.

Weather routing systems are essential to modern shipping and yachting they improve safety and efficiency by determining optimal routes based on current and forecast conditions. Thanks to technological advances such as accurate weather models and advanced algorithms, these systems are becoming more reliable and effective.

1. INHOUDSOPGAVE

<i>Voorwoord</i>	<i>iii</i>
<i>Samenvatting</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>viii</i>
<i>Lijst met figuren</i>	<i>xii</i>
<i>Lijst met afkortingen</i>	<i>xiii</i>
1. <i>Evolutie van de maritieme weerroutering</i>	1
2. <i>het concept weerrouteringsysteem</i>	12
2.1. <i>Wat is een weer-routing-systeem</i>	12
2.2. <i>Weerroutering-systemen in de koopvaardij VS in de zeil wereldwereld</i>	13
2.2.1. <i>Weerroutering bij Koopvaardij schepen</i>	13
2.2.1.1. <i>Besparing op brandstof</i>	14
2.2.1.2. <i>Het verzekeren van de veiligheid van het schip, zijn bemanning en de lading.</i>	16
2.2.1.3. <i>Voldoen aan decarbonisatie doeleinden en wettelijke verplichtingen</i>	17
2.2.1.4. <i>Andere voordelen van weerroutering</i>	19
2.2.2. <i>Weerroutering in de zeilwereld</i>	19
2.3. <i>Conclusie:</i>	21
3. <i>Werking van een weerroutering systeem</i>	22
3.1. <i>Weerroutering methodes</i>	22
3.2. <i>Configuratie van een weerroutering-systeem</i>	23
3.2.1. <i>Het weersvoorspellingsmodel</i>	23
3.2.2. <i>Het scheepsprestatie model</i>	24
3.2.3. <i>Het optimale algoritme</i>	25
3.3. <i>Type algoritme's</i>	25
3.3.1. <i>Voor- en nadelen van bepaalde algoritmes</i>	29
3.4. <i>Conclusie:</i>	29
4. <i>Weerkundige aspecten van een weer-routing-systeem</i>	31
4.1. <i>Wind</i>	31
4.1.1. <i>Hoe ontstaat de wind</i>	31
4.1.1.1. <i>Convectie</i>	32
4.1.2. <i>Het corioliseffect</i>	34
4.1.3. <i>Effect van wind op een weerroutering-systeem</i>	36

4.1.3.1.	<i>Effect voor koopvaardij schepen</i>	36
4.1.3.2.	<i>Effect voor zeilschepen</i>	37
4.2.	<i>Neerslag</i>	38
4.3.	<i>Getijden en stromingen</i>	39
4.3.1.	<i>Wat is thermohaliene circulatie?</i>	43
4.4.	<i>Golven</i>	44
4.4.1.	<i>Hoe ontstaan golven?</i>	45
4.4.2.	<i>Invloed van golven op de snelheid van het schip</i>	47
4.5.	<i>Besluit hoofdstuk</i>	47
5.	<i>Weermodellen</i>	49
5.1.	<i>Globale weermodellen</i>	49
5.1.1.	<i>ECMWF</i>	51
5.1.2.	<i>GFS</i>	53
5.2.	<i>Regionale weermodellen</i>	55
5.2.1.	<i>HIRLAM</i>	56
5.2.2.	<i>ALADIN</i>	57
5.2.3.	<i>HARMONIE</i>	59
5.2.4.	<i>AROME</i>	61
5.3.	<i>Besluit hoofdstuk</i>	63
6.	<i>Vergelijking tussen koopvaardij en zeilwerend</i>	64
6.1.	<i>Weerroutering bij koopvaardij schepen</i>	64
6.2.	<i>Weerrouteringen in de zeilwereld</i>	64
7.	<i>Onderzoek</i>	70
7.1.	<i>Methodiek</i>	71
7.2.	<i>Resultaten</i>	75
7.2.1.	<i>Onderzoek</i>	75
7.2.2.	<i>Interview ocean globe zeiler</i>	83
7.3.	<i>Besluit</i>	87
8.	<i>Conclusie</i>	89
9.	<i>List of content</i>	91

Lijst met figuren

Figuur 1 synoptische weerkaart.....	3
Figuur 2 Grib file	8
<i>Figuur 3 Weerroutering systeem koopvaardijschip</i>	<i>14</i>
Figuur 4 ongevallen in zwaar weer per scheepstype	17
Figuur 5 weerroutering van zeilschepen.....	20
Figuur 6. waypoints isochrone methode.....	26
Figuur 7 Dynamic programming grid.....	27
Figuur 8 Dijkstra algoritme	28
Figuur 9 trade winds door convectie.....	34
Figuur 10 coriolis effect	35
Figuur 11 wind+frictie+coriolis=0	40
Figuur 12 hoe dieper hoe groter de hoek	41
Figuur 13 geostrofische stroming.....	42
Figuur 14 de golfstroom	44
Figuur 15 afbuiging van golven	46
Figuur 16 Gausisch rooster.....	50
Figuur 17 sailing area's	77

Lijst met afkortingen

AROME Application of Research to Operations at Mesoscale

AMOC Atlantic meridional overturning circulation

ECMWF = European Centrum for Medium Range Forecast

GFS = Global Forecast system

HARMONIE =HIRLAM ALADIN Research on Mesoscale Operational

HILAM = high resolution limited area model

NCEP = National Centers for Environmental Prediction

NOAA = Nationale Oceanic and Atmospheric Administration

NWS = National Weather Service

1. Evolutie van de maritieme weerroutering

De scheepvaart en weersvoorspellingen zijn al sinds het prille begin van de scheepvaart nauw met elkaar verbonden. Ten tijde van zeilschepen werd aan weerroutering gedaan met uitgebreide kennis en vaardigheid die praktisch uitsluitend voortvloeiden uit de ervaring en persoonlijke observaties van de kapitein en diens officieren.

In het verre verleden werd weerroutering zwaar beperkt door het gebrek aan weersvoorspellingen op langere termijn en door het afwezig zijn van communicatiemiddelen om informatie door te spelen naar andere schepen in de nabijheid.

In deze tijden terugkomende fenomenen van groot belang, een van deze fenomenen was de golf stroom. De golfstroom werd ontdekt in 1513 tijdens een expeditie van Juan Ponce de Leon. Daarna werd hij veel gebruikt door Spaanse zeilschepen die van de caraïben naar spanje teugkeerden. In 1786 bestudeerde Benjamin Franklin, de toenmalige postmeester-generaal van de britse koloniën in Noord- Amerika, de stroming en bracht ze in kaart. Hij adviseerde postschepen om naar Europa te varen via de noordelijke route en terug te keren via de zuidelijke route. Deze ruwe vorm van weerroutering bevorderde de postdienst tussen het Verenigd Koninkrijk en de Britse koloniën door gebruik te maken van de Golfstroom, overgaande in de Noord-Atlantische stroom, op de terugreis en van de canarische stroom, overgaande in de noordequatoriale stroom, op de heenreis. Op sommige oversteken werd de vaartijd wel 2 weken verkort ten aanzien van voorgaande reizen. (National imagery and mapping agency, 2002)

De ontwikkeling van wetenschappelijke meteorologie in de 18 de eeuw bracht een grote revolutie teweeg in de maritieme navigatie. Meteorologen begonnen gedetailleerde weerkaarten te maken die atmosferische druk, temperatuur, wind en andere parameters visualiseerden. Deze kaarten en observaties werden gebruikt om de wetten van stormen te identificeren en zo hun nadering te voorspellen, ook werden de observaties gebruikt voor

het klimatologische gemiddelde te bepalen waarmee de economische routes konden worden gepland.

In het midden van de 19 de eeuw verzamelde Matthew Fontaine Maury, een Amerikaanse meteoroloog en oceanograaf, grote hoeveelheid atmosferische en oceanografische data uit scheepslogboeken voor de ontwikkeling van kaarten met seizoensgebonden aangeraden routes voor schepen. Ook heeft hij de eerste bodem kaart van de Noord-Atlantische oceaan uitgebracht, hij maakte ook aantekeningen over zeestromen en weersomstandigheden en legde hiermee de basis voor weerrouteringen.

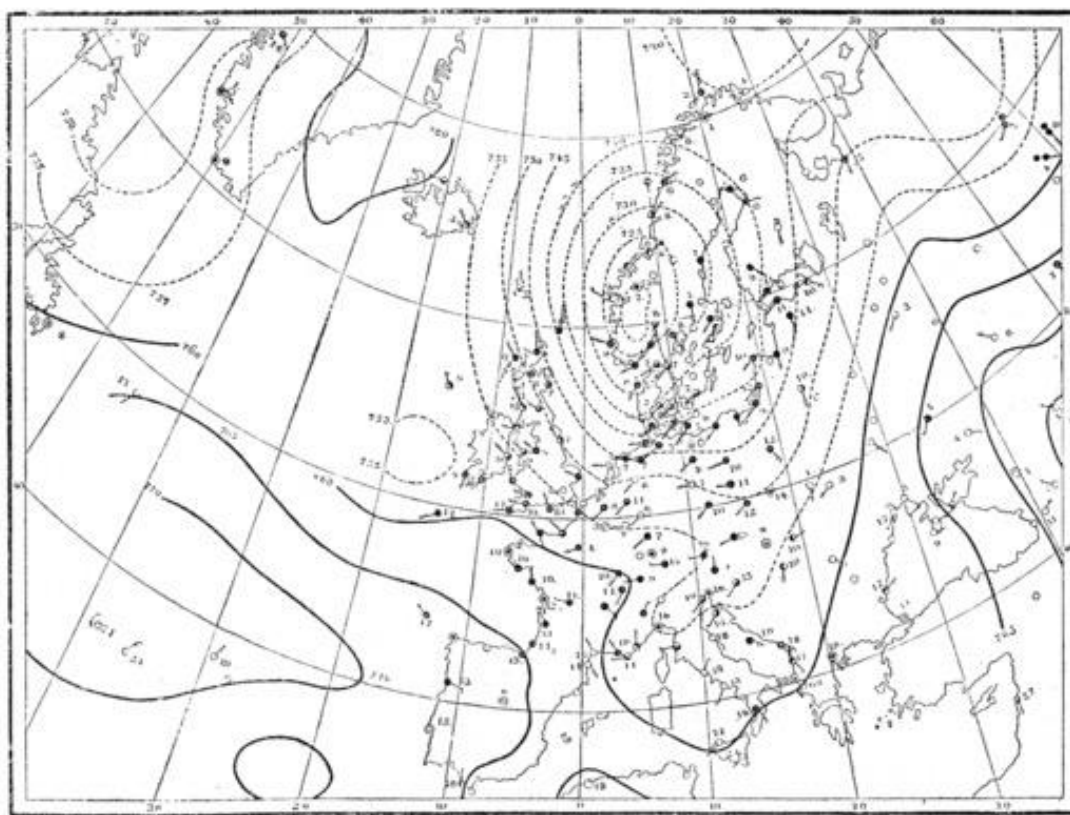
Maury's kaarten staan tegenwoordig bekend als de maandelijkse "pilot charts" die zeevarenden informatie verschaft omtrent de snelheid en richting van de gemiddelde wind en stromingen voor de desbetreffende maand, in samenspraak met de aangeraden routes tussen belangrijke havens wereldwijd. De "pilot charts" bewezen hun waarde door een reductie van de gemiddelde overzettijd op de New York – Californië lijn rond kaap Horn met 44 dagen.

De eerste generatie hulpmiddelen die zeevarenden ter beschikking hadden voor de toepassing van weerrouteringen waren de "pilot charts" atlassen, "sailing directions" en andere bronnen van klimatologische informatie zoals de "Admiralty chart of oceanic currents". Voorts beschikte men over historische weerdata tabellen en persoonlijke navigatieaantekeningen van kapiteins omtrent de handelsroutes waar deze het meeste mee vertrouwd waren. (National imagery and mapping agency, 2002). Op basis van de informatie uit deze bronnen werd de seizoensgebonden, klimatologische atlas "Ocean Passages for the world" samengesteld. Deze publicatie heeft lang tijd een sleutelrol gespeeld voor de routing van zeilschepen op het einde van de 19 de eeuw en het begin van de 20 ste eeuw. De routes weergegeven in deze publicatie zijn de klimatologische routes. De aangeraden routes variëren van winter tot zomer vanwege de seizoensgebonden fluctuaties van de meteorologische verschijnselen.

Tegenwoordig werkt men op basis van maanden in plaats van seizoenen van het jaar.

De klimatologische gemiddelden uit deze publicaties benaderen echter zelden of nooit de actuele meteorologische situatie op een gegeven moment, in een zeker onderdeel van een oceaangebied. De jaarlijkse variaties van de ijslimieten en de afwijking van de centra van lagedrukgebieden en tropische stormen ten opzichte van het gemiddelde, de maandelijkse tracks kunnen zodanig verschillen van het klimatologische gemiddelde dat zelf op deze klimatologische routes extremen van wind en golven worden ervaren. (Zis, Psarftis, & Ding, 2020)

Het tijdperk van de moderne weersverwachtingen werd mogelijk gemaakt door de commercialisatie van de telegrafie in het midden van de 19 de eeuw. Dankzij de uitvinding van de telegrafie konden weerdata sneller worden verzameld, samengevoegd en verwerkt door het opstellen van synoptische kaarten.



Väderlekskarta på morgonen den 22 oktober 1874.

Figuur 1 synoptische weerkaart

Bron: ('Synoptische weerkaart', 2022)

De synoptische weerkaart is een momentopnamen van het weer, verkregen door gelijktijdige waarnemingen in een groot gebied. Het belangrijkste wat op dergelijke weerkaarten te zien is, zijn doorgaans de isobaren. Soms worden ook windvanen of temperaturen getoond. De temperaturen worden of wel in graden Celcius gemeld of in kleurschakeringen. De isobaren laten zien hoe de luchtdrukverdeling is en de meteoroloog kan daaruit andere weerfactoren afleiden. Synoptisch wil zeggen dat het op het algemene overzicht gaat, niet om lokale details. ('Synoptische weerkaart', 2022)

In 1882 zette de 'Meteorological council of the royal society', gevestigd te Engeland, een groots project op touwen met een looptijd van 13 maand om een set van dagelijkse weerkaarten te produceren voor het Noord-Atlantische Oceaangebied.

The 'International Meteorological Organisation' (IMO) herkende in het begin van de 20 ste eeuw het potentieel van de draadloze telegrafie, dit werd gebruikt als middel om weerberichten van schepen op zee door te sturen naar kuststations en om schepen te voorzien van stormwaarschuwingen verzonden vanaf de kuststations.

Elke kaart hebben ze samengesteld aan de hand van weerdata verzameld door 3000 schepen, die gezamenlijk een gemiddelde van 700 observaties per dag voorzagen. Deze kaarten lagen ten grondslag aan vele van de hedendaagse weerprincipes.

De eeuwwisseling veranderde veel in de commerciële scheepvaart, dit allemaal door het intreden van de stoomschepen, de stoomschepen vervingen de traditionele zeilschepen. Waar zeilschepen voorheen afhankelijk waren van een grondige kennis en begrip van de wind voor hun voortstuwing, hadden stoomschepen voldoende voortstuwingsvermogen om de elementen te overwinnen in plaats van ze te beheersen. Er ontwikkelde zich een algemene mentaliteit van passieve aanvaarding van de weersomstandigheden en weerroutering werd nog enkel toegepast om extreme weersomstandigheden, zoals tropische stormen, te gaan omzeilen. ('Uitvinding en ontwikkeling van de stoomboot', z.d.)

Na de eerste wereldoorlog werd de methode van de orthodromie de steunpilaar van de scheepvaart. Orthodromie bleef decennia lang de voornaamste routingstechniek, ondanks de publicatie van de aangepaste versie van “ocean passages for the world” voor stoomschepen in 1923, vanwege het gebrek aan een voldoende accuraat routeringsalternatief.

De periode na de eerste wereldoorlog markeerde tevens de introductie van radio weerbulletins (soort Navtex bericht van het weer) in de scheepvaart. Zeevarenden ontvingen gecodeerde boodschappen aan boord met elementaire weerinformatie zoals de locaties van depressies, hogedrukgebieden, ruggen, troggen en de coördinaten van fronten en isobaren. De informatie moest vervolgens geplot worden op een analysekaart ter interpretatie door de officieren aan boord. Het gebruik van radio weerbulletins voor weerrouteringsdoeleinden was verre van optimaal. Het grote tijdsinterval tussen het verzamelen en versturen van de gecodeerde bulletins en het decoderen, en ook de constructie en interpretatie van de analysekaarten aan boord beperkten ernstig de geldigheid van een reeds oppervlakkige weergave van de meteorologische situatie. Bovendien vereiste de constructie van de analysekaarten en de interpretatie ervan een grote mate aan ervaring en kennis van de officieren. (Zis e.a., 2020)

De opkomst van de computer na de tweede wereldoorlog kenmerkten een grote doorbraak in de snelheid waarmee de wiskundige en natuurkundige berekeningen van de meteorologische data konden worden verwerkt om weersverwachtingen samen te stellen. Een andere grote doorbraak die heeft geleid tot een verhoogde accuraatheid en termijn van weersverwachtingen was de lancering van de eerste weersatellieten in 1960. De eerste weersatellieten leveren niet alleen wolkenbeelden maar ook gegevens over infraroodstraling waaruit temperatuur en vochtigheid wordt afgeleid maar ook voor gegevens zoals straling, wind, golfhoogtes, golfpatronen, zeestromingen, ijskappen en nog veel meer. (‘KNMI - Satellieten’, z.d.)

In het begin van de jaren '50 van de vorige eeuw werd een routeringsdienst voor schepen ontwikkeld in de Verenigde Staten. Het "Naval Hydrographic Office" introduceerde in 1956 de "Optimum Track Ship Routing" (O.T.S.R.) als een service om de technieken en operationele procedures van militaire bevoorradingschepen te evalueren. Deze dienst werd vervolgens in 1958 uitgebreid naar koopvaardischepen.

Het succes van deze routeringsdienst zorgde wereldwijd voor een opkomst in de private weersector. In 1960 ontwikkelde het meteorologische instituut in Nederland een weerdienst specifiek voor koopvaardischepen, geïnspireerd door de routingstechnieken uit de Verenigde Staten. Gelijkaardige diensten werden in die tijd ook opgezet in andere landen, zoals Duitsland, Japan, Rusland en het Verenigd Koninkrijk. Aanvankelijk concentreerden deze diensten zich vooral op de oceaangebieden in hun directe omgeving. Maar naarmate de technologie vorderde en de populariteit van de routeringsdiensten toenam, breidde het bereik van hun services zich uit.

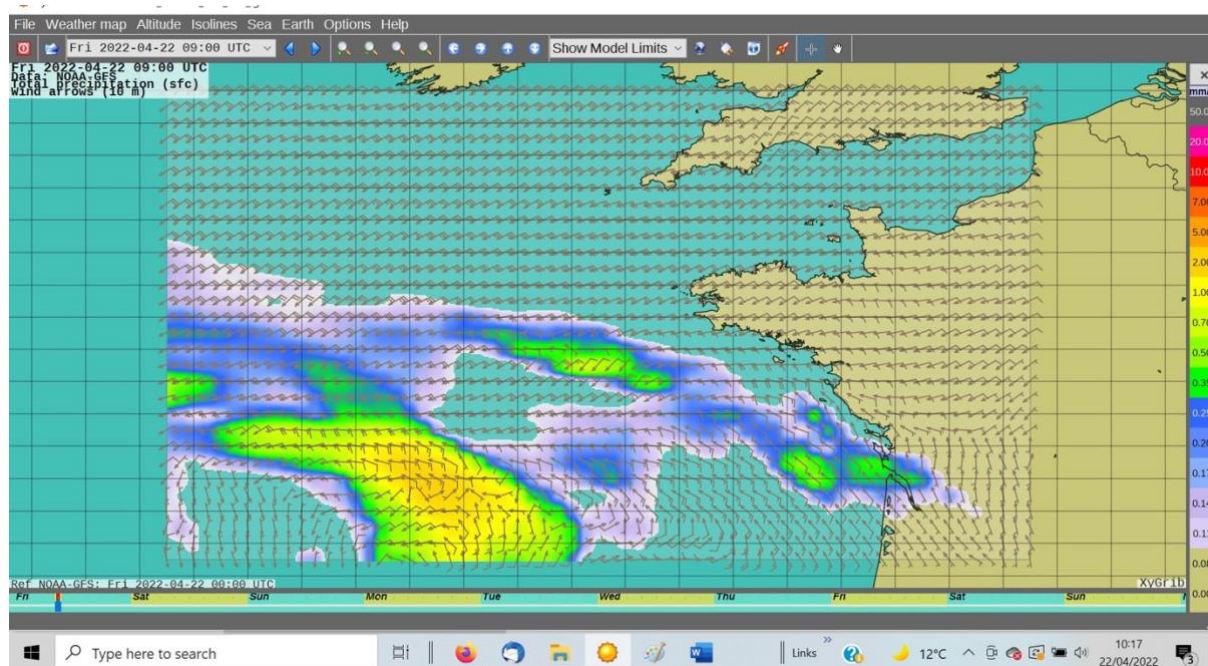
De routeringsbedrijven kwamen tot het besef dat ze hun diensten konden verfijnen door hun interne meteorologische expertise aan te vullen met de ervaring en kennis van ex-zeelieden die bekend zijn met de operationele procedures aan boord. Dit leidde tot een verschuiving van de kennis en vaardigheden voor het routeren van schepen. (Zis e.a., 2020)

Met de opkomst van satellietcommunicatie in de jaren '70 werd het mogelijk om meteorologische databestanden vanaf de wal te ontvangen. Een belangrijk onderdeel hiervan is de internationale Navtex (Navigational Telex) dienst, die heel uitmaakt van het 'Global Maritime Distress and Safety System' (GMDSS). Dit systeem maakt het mogelijk om maritieme veiligheidsberichten in tekstvorm te versturen en ontvangen. De dekking van Navtex strekt zich uit over een straal van 300 tot 400 nautische mijl rond de kuststations, die op vaste frequenties en tijdstippen verschillende berichten uitzenden, waaronder stormwaarschuwingen en weerberichten. De ontvangen informatie kan worden afgedrukt of

bekeken worden op het display van de ontvanger aan boord. Een beperking van Navtex is natuurlijk het beperkte bereik van het systeem, evenals het feit dat het meteorologische situaties beschrijft in plaats van ze grafisch op kaarten weer te geven. (Yao, Liu, & Zhang, 2017)

In de moderne tijd maken veel meteorologische diensten gebruik van het internet om hun services aan te bieden, aangezien bijna alle hedendaagse schepen zijn uitgerust met computers die toegang hebben tot het internet. Om de overdracht van databestanden te vergemakkelijken, heeft de World Meteorological Organisation (WMO) een aantal standaarden ontwikkeld. Een voorbeeld hiervan zijn Grib-bestanden, ook wel bekend als GRIB (GRIdded Binary) of Gridded information in Binaryformaat, zijn een gestandaardiseerd formaat voor het opslaan en uitwisselen van meteorologische en oceanografische gegevens. Ze worden veel gebruikt in weer- en klimaatmodellering, zowel voor operationele voorspellingen als voor wetenschappelijke onderzoeken.

De oorspronkelijke Grib-bestanden bleken te groot voor praktisch gebruik, dus er werd overgeschakeld naar Grib-bestanden die een kleiner gebied besloegen en minder weerinformatie bevatten, met een beperkte prognose van slechts enkele dagen in de toekomst. Tegenwoordig bevatten Grib-bestanden meestal alleen isobaren en de resulterende windrichting en -snelheid. Andere parameters, met uitzondering van fronten, kunnen ook aan de bestanden worden toegevoegd. Hierdoor zijn Grib-bestanden slechts een fractie van de omvang van weerkaarten met vergelijkbare dekking.



Figuur 2 Grib file

Bron: ('What are GRIB files? - Franks-Weather—The Weather Window', z.d.)

Een van de meest opvallende voordelen van GRIB-bestanden is hun efficiënte opslagcapaciteit. Door gebruik te maken van een compact binair formaat, minimaliseren ze de benodigde opslagruimte, waardoor grote hoeveelheden gegevens efficiënt kunnen worden beheerd zonder kostbare middelen te verspillen.

Deze compactheid gaat hand in hand met snelle gegevenstoegang. Grib-bestanden zijn gestructureerd in een rasterformaat, waardoor gebruikers gemakkelijk specifieke gegevenspunten kunnen lokaliseren en ophalen zonder de volledige dataset te hoeven doorlopen. Dit maakt realtime toegang tot cruciale informatie mogelijk, essentieel voor operationele besluitvorming in sectoren zoals luchtvaart, maritiem en landbouw.

Een ander voordeel van grib-bestanden is hun flexibiliteit. Ze ondersteunen een breed scala aan meteorologische en oceanografische gegevens, waardoor ze geschikt zijn voor verschillende toepassingen, variërend van weermodellering en klimaatstudies tot maritieme

navigatie en luchtvaartvoorspellingen. Dit maakt ze onmisbaar in diverse industrieën en onderzoeksgebieden.

Daarnaast genieten grib-bestanden compatibiliteit met een breed scala aan softwaretoepassingen en modellen voor weer-en klimaatvoorspelling. Als internationale standaard vergemakkelijken ze de uitwisseling van gegevens tussen verschillende systemen en organisaties, waardoor samenwerking en interoperabiliteit worden bevorderd.

Tot slot bieden grib-bestanden gegevenscompressie, wat de overdracht van gegevens over netwerken versnelt en optimaliseert. Deze functie is van onschatbare waarde bij het versturen van grote hoeveelheden gegevens, zoals weer-en klimaatvoorspellingen, naar verschillende gebruikers en locaties over de hele wereld (Weintrit, 2013)

Ondanks de vele voordelen die Grib-bestanden bieden voor gegevensopslag en -uitwisseling in de meteorologie en oceanografie, zijn er ook enkele nadelen die moeten worden overwogen. Een van de meest opvallende uitdagingen is de complexiteit die gepaard gaat met het begrijpen en verwerken van grib-bestanden. Voor gebruikers die niet bekend zijn met dit specifieke formaat kan het interpreteren en gebruiken van de gegevens een uitdaging zijn die specifieke kennis en ervaring vereist.

Een ander nadeel van grib-bestanden is het mogelijke verlies van gegevensnauwkeurigheid als gevolg van gegevenscompressie. Hoewel dit meestal minimaal is, kan zelfs een klein verlies van precisie van invloed zijn op de nauwkeurigheid van analyses of voorspellingen die gebaseerd zijn op deze gegevens.

Daarnaast kunnen grib-bestanden beperkingen hebben in de representatie van gegevens. Het formaat is gestructureerd als rastergegevens, wat betekent dat het mogelijk niet ideaal is voor het opslaan van gegevens die een meer complexe geometrische representatie vereisen. Dit kan een uitdaging vormen voor bepaalde toepassingen waarbij een gedetailleerdere geometrische representatie nodig is.

Compatibiliteitsproblemen zijn ook een punt van zorg bij het gebruik van grib-bestanden. Ondanks het feit dat grib een internationale standaard is, kunnen er nog steeds problemen optreden bij het uitwisselen van gegevens tussen verschillende systemen of softwaretoepassingen, wat extra complexiteit met zich meebrengt voor gebruikers die met verschillende platforms werken. ('What are GRIB files and how can I read them—Copernicus Knowledge Base—ECMWF Confluence Wiki', z.d.)

Aan het einde van de jaren '70 van de vorige eeuw, bij de opkomst van computers aan boord, begon men met de ontwikkeling van begeleidingssystemen voor gebruik op schepen. De U.S. Coast Guard en Det Norske Veritas (DNV) leverden baanbrekend werk door kennis van "seakeeping" te introduceren in de navigatie van schepen. Er werden verschillende pogingen ondernomen om commerciële systemen te ontwikkelen voor het routeren van schepen. Echter slaagde de eerste generatie routeringssystemen er niet in om door te breken in de scheepvaart vanwege de hoge kosten van computers en bijhorende instrumenten, het ontbreken van effectieve communicatiesystemen, en de beperk nauwkeurigheid van wind- en golfvoorspellingen destijds. Pas in het begin van de jaren '90 werd een volledig uitgerust weerroutering- en "seakeeping" begeleidinssysteem, in combinatie met een apart bewegingssensor ensemble, beschikbaar gesteld voor koopvaardischepen.

Sindsdien hebben weerrouteringssystemen een enorme evolutie doorgemaakt, van eenvoudige weerroutering door weersvoorspellingen om te zetten in routeringsadviezen zonder rekening te houden met scheepskarakteristieken, tot complexe beslissingsondersteunende systemen die wel rekening houden met het gedrag van schepen in zware weercondities.

Om te concluderen kunnen we duidelijk zien hoeveel vooruitgang er is geboekt in de wetenschap van weerroutering voor schepen gedurende de vorige eeuwen. Eeuwenlang vertrouwden zeevarenden op de uitgebreide kennis en vaardigheden van de kapitein en officieren om de te verwachten weersomstandigheden in te schatten. Hierbij was het doel om zeilschepen zo te routeren dat ze optimaal konden profiteren van de windkracht voor voortstuwing.

In de eerste helft van de 19 de eeuw begon men met het verzamelen van weerobservaties door schepen om nautische publicaties te ontwikkelen die klimatologische gemiddelden voor de seizoenen van het jaar weergaven. Deze publicaties boden waardevolle informatie, maar de weersituatie op een gegeven moment kwam zelden overeen met het klimatologische gemiddelde, waardoor er nog ruimte was voor verbetering. Het verstrekken van effectief weerrouteringsadvies aan schepen werd bemoeilijkt door de afwezigheid van langeafstand communicatiesystemen en door de beperkte termijn en nauwkeurigheid van de toenmalige weersverwachtingen.

Door de opkomst van de stoomschepen in de 19 de eeuw ontstond een nieuwe mentaliteit van passieve aanvaarding van de weersomstandigheden. Orthodromie, waarbij de kortste afstand tussen twee punten op een boloppervlak wordt gevolgd, werd de voornaamste routingstechniek in de scheepvaart. De commercialisatie van telegrafie in de 19 de eeuw en de opkomst van radiocommunicatie in de 20 ste eeuw waren de eerste grote doorbraken op het gebied van langeafstand communicatie.

De introductie van computers na de tweede wereldoorlog betekende een grote sprong voorwaarts in de snelheid waarmee meteorologische gegevens konden worden verwerkt. Weersverwachtingen konden worden samengesteld. Dit leidde tot een verschuiving van het weerrouteringsproces van schip naar de wal, dankzij de beschikbaarheid van de enorme rekenkracht van computers.

Met de opkomst van satellietcommunicatie in de jaren '70 en krachtigere computers met internet aan boord, kunnen moderne schepen tegenwoordig steeds nauwkeuriger wordende weersverwachtingen ontvangen. Deze kunnen vervolgens worden verwerkt door complexe routingssystemen om de prestaties van het schip op verschillende routes te vergelijken.

2. het concept weerrouteringsysteem

2.1. Wat is een weer-routing-systeem

Weerrouting is de methodologie van het voorspellen van de gunstigste route voor een welbepaalde oversteek van een schip op basis van de meteorologische en oceanografische verwachtingen en de individuele karakteristieken van het schip. (National imagery and mapping agency, 2002)

Het geloof dat men een voldoende accurate voorspelling kan maken over de toekomstige ontwikkelingen van de weersomstandigheden op basis van de actuele en gekende

omstandigheden om een route te voorspellen die gunstiger is dan de “klimatologische routes” ligt ten grondslag aan het ontstaan van weer-routing.

De weer-routing van schepen resulteert in de ontwikkeling van een “optimale route”. In de strikte zin van het woord betekent de optimale route de “least time track” tussen de vertrek- en aankomsthaven rekening houdend met het minimale brandstof verbruik, minimale reisduur en het beste crew comfort of elke gewenste combinatie van deze factoren. (National imagery and mapping agency, 2002)

2.2. Weerrouting-systemen in de koopvaardij VS in de zeil wereldwereld

Weer-routing-systemen zijn in beide werelden van toepassing. Het hoofddoel om de “least time track” te verkrijgen blijft voor beide hetzelfde maar in de zeilwereld zal de focus meer op de veiligheid en op de snelste en efficientste koers t.o.v de wind liggen en minder op het verbruik terwijl er in de koopvaardijwereld meer naar het verbruik zal worden gekeken.

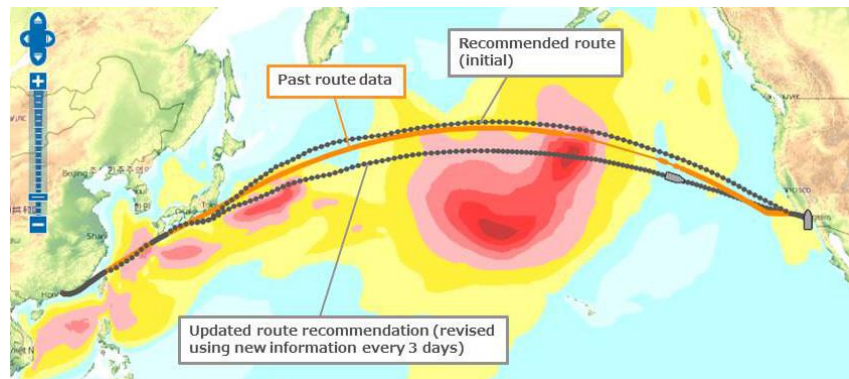
2.2.1. Weerrouting bij Koopvaardij schepen

Weer-routing klinkt zeer “straightforward”, maar in de realiteit is dit zeker niet het geval. Het is een zeer complexe berekening. Een weerrouting systeem zoekt naar de “beste route” gebaseerd op de weervoorspellingen, scheepskarakteristieken alsook met het type cargo. Dit betekent met name niet altijd het vinden van de kortste reistijd; weerrouting probeert reizen te optimaliseren door het risico van slecht weer te vermijden, bemanning te beschermen en tegelijkertijd brandstofverbruik te optimaliseren. (‘Important Benefits of Weather Routing for Optimal Voyages’, z.d.)

Hier zijn de grote voordelen van weerrouting systemen bij koopvaardij schepen.

- Verminderd de “operating costs”
- Verzekert de veiligheid van het schip en zijn lading
- Voldoet zo aan de decarbonisatie doeleinden

- Bespaard brandstof
- Vertragingen beperken



Figuur 3 Weerroutering systeem koopvaardijship

Bron: (Simulated ship-route optimization support system display, z.d.)

Statistieken van commerciële weerroutering systemen hebben een merkbaar verschil opgemerkt tussen schepen die gebruik maken van weerroutering systemen en schepen die hier geen gebruik van maken. Er is een vermindering van 80% op de uren vertraging, structurele schade aan de schepen is verminderd met 73% en cargo damage claims door stormachtig weer is verminderd met 87%. (Vettor & Guedes Soares, 2016)

2.2.1.1. Besparing op brandstof

Internationale scheepvaartvervoer faciliteert ongeveer 80% van de mondiale handel in waarde en blijft de meest brandstof- en kostenefficiënte transportmodus. Tegelijkertijd neemt de regelgevende druk toe om groenere maritieme transporten te realiseren, in combinatie met de volatiliteit van brandstofprijzen, wat resulteert in een streven naar het minimaliseren van operationele kosten. Vanwege schaalvoordelen kan zelfs een kleine procentuele daling in operationele kosten leiden tot aanzienlijke besparingen voor scheepsexploitanten. Eenmaal een reis is gepland van haven A naar haven B, zijn de snelheid

en route die het schip volgt cruciale bepalende factoren voor de operationele efficiëntie in maritiem transport. Voor alle soorten scheepvaart, hetzij in de lijnmarkt, hetzij kustvaart of diepzeevaart, zijn er aanzienlijk economische drijfveren om elke reis te optimaliseren, gezien het feit dat de bunkerbrandstofkosten voor bepaalde scheepssectoren meer dan 50% van de kosten van een vervoerder kunnen uitmaken bij hoge vaarsnelheid en brandstofprijzen. (Zis e.a., 2020)

Wellicht een van de oudste problemen in het maritiem transport is de selectie van een route van punt A naar punt B, rekening houdend met informatie over het weer, de zeetoestand, de stromingen, evenals de diepte van de zee op elk punt. Het weergegerelateerd routeren heeft verschillende definities gekregen in de literatuur, afhankelijk van welke criteria de routeplanner wil vervullen. We beschouwen weergegerelateerde routeringen als het vinden van de optimale route met betrekking tot de verwachte aankomsttijd (ETA), het passeren van waypoints, vaarsnelheid, vermogensafgifte, voor een bepaalde reis op basis van weerprognosegegevens en de technische kenmerken van een gegeven schip. (Zis e.a., 2020) De optimaliteit van de geselecteerde route hangt af van de geselecteerde doelstellingen, die kunnen variëren van het minimaliseren van kosten, reistijd of emissies tot het verminderen van mogelijke vertragingen en het verlagen van het risico door gebieden met ongunstig weer te vermijden. (Simonsen, Larsson, Mao, & Ringsberg, 2015)

De situatie is vandaag de dag niet veel anders. De totale operationele kosten van een schip worden voor 50 tot 60% bepaald door de brandstofkosten, afhankelijk van het type schip en de diensten. Op lange termijn zullen brandstofkosten verder stijgen als gevolg van de schaarste van s'werelds fossiele brandstofreserves. Op korte termijn worden deze kosten ook beïnvloed door wettelijke verplichtingen om over te stappen van zware stookoliën naar minder vervuilende alternatieven. De verbranding van zware stookoliën resulteert namelijk in de uitstoot van broeikasgassen, zoals koolstofdioxide (CO₂), zwaveloxiden (SO_x), stikstofoxiden (NO_x), vluchtige organische stoffen (VOC's) en fijnstof.

2.2.1.2. Het verzekeren van de veiligheid van het schip, zijn bemanning en de lading.

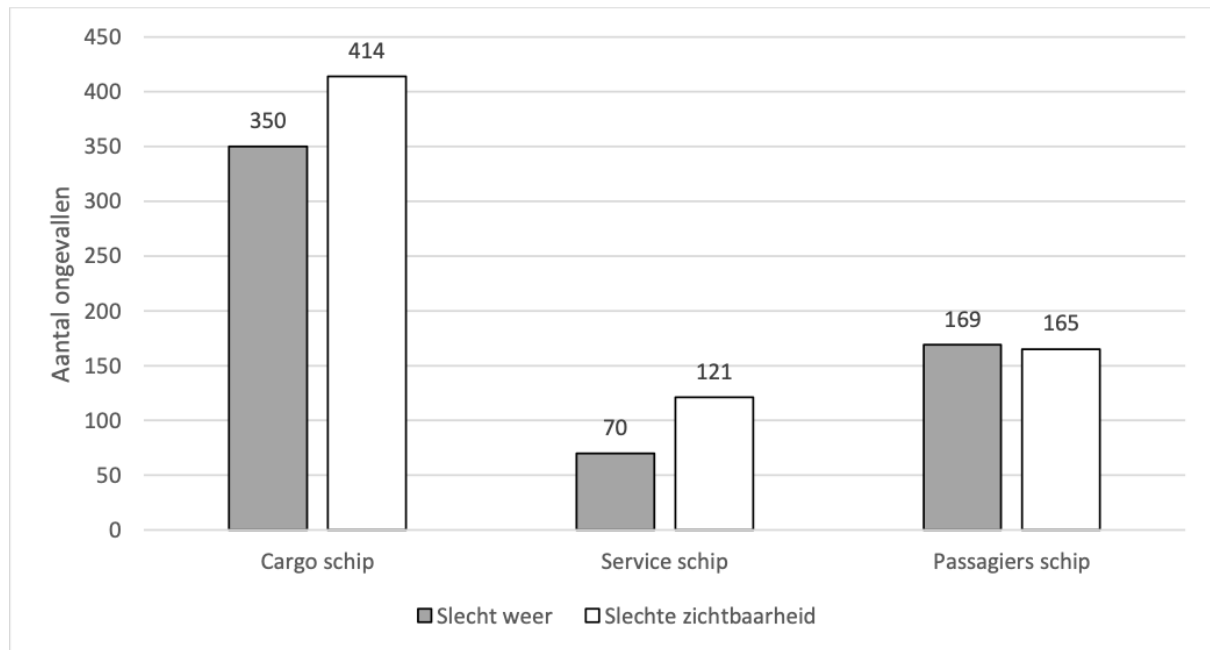
Weerroutering draagt aanzienlijk bij aan de veiligheid aan boord door het risico op schade aan het schip en verwondingen aan bemanningsleden te verminderen. Schade aan het schip kan variëren van structurele schade aan de scheepsromp tot schade aan de machinerie en/of uitrusting aan boord. Daarnaast draaft het vermijden van zware weersomstandigheden bij aan de efficiëntie en het welzijn van de bemanning. (National imagery and mapping agency, 2002)

In de maritieme sector is vermoeiingsfalen een van de meest cruciale faalmodi voor scheepsstructuren. De vermoeiingsschade in deze structuren wordt voornamelijk veroorzaakt door de variatie van golfbelastingen die op schepen worden uitgeoefend, wat resulteert in variabele structurele spanningen. Er zijn verschillende statische golfmodellen in een weerroutering systeem ontwikkeld om golfomgevingen langs willekeurige scheepsroutes te modelleren. Deze modellen kunnen gedetailleerdere golfomstandigheden bieden voor specifieke vaarroutes van individuele schepen. Ze hebben het potentiaal voor diverse praktische toepassingen, zoals het conceptueel ontwerp van de vermoeiing van schepen, voorspellingen van de resterende vermoeiingslevensduur wanneer een schip van plan is zijn oorspronkelijke handelsgebied te wijzigen, etc. (Mao, Prasetyo, Ringsberg, & Osawa, 2013)

Schade aan de lading is ook een veel voorkomend element bij het niet ontwijken van slechte weercondities. De schade aan de lading betreft hoofdzakelijk fysieke schade, maar ook in mindere mate waterschade door lekkage in de luikhoofden (vooral aan boord van bulkcarriers) of een verlies van de lading overboord aan boord van schepen met deklading.

Slecht weer op zee kan ook leiden tot diverse vormen van schade aan de bemanning van het schip. Fysieke verwondingen zoals kneuzingen, snijwonden en botbreuken zijn mogelijk door de krachtige golven en hevige winden. Daarnaast kan het slechte weer mentale stress en

angst veroorzaken, wat de alertheid en effectiviteit van de bemanning kan verminderen.
(Carotenuto, Molino, Fasanaro, & Amenta, 2012)



Figuur 4 ongevallen in zwaar weer per scheepstype

Bron: (de Pauw, z.d.)

2.2.1.3. Voldoen aan decarbonisatie doeleinden en wettelijke verplichtingen

Het gebruik van weerroutering in de maritieme sector draagt bij aan een vermindering van het brandstofverbruik en daarmee ook aan de vermindering van milieuvervuiling door de uitstoot van broeikasgassen. Als reactie op de tweede “greenhouse gas” (GHG) onderzoek, uitgevoerd door de International Maritime Organisation (IMO) in 2009, werd een nieuw hoofdstuk toegevoegd aan het “International Convention for the Prevention of Pollution from Ships” (MARPOL). Dit hoofdstuk genaamd MARPOL Annex VI (“Prevention of air

Pollution from ships”), werd aangenomen door de IMO in 2011 om de uitstoot van broeikasgassen door de scheepvaartindustrie te reguleren. (‘Sustainability | Free Full-Text | Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel’, z.d.)

Door amendementen aan MARPOL Annex VI werden verschillende energie-efficiëntiemaatregelen verplicht gesteld voor de scheepvaart in 2013, met als doel de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. De belangrijkste maatregelen die zijn ingevoerd door de amendementen zijn: de “Energy Efficiency Design Index” (EEDI) voor alle nieuwbouwschepen, de “Energy Efficiency Operational Indicator” (EEOI) en het “Ship Energy Efficiency Management Plan” (SEEMP) voor alle schepen. Deze maatregelen zijn bedoeld om de energie-efficiëntie van schepen te verbeteren door de bevordering van nieuwe technologische innovaties. (Polakis, Zachariadis, & de Kat, 2019)

Een “Ship Energy Management Plan” (SEEMP) is een operationele maatregel die scheepvaartbedrijven ondersteunt bij het implementeren van een mechanisme om de energie-efficiëntie van hun vloot te evalueren. Het SEEMP is een verplichte maatregel voor alle schepen en heeft tot doel de operationele werking van hun reizen te optimaliseren en nieuwe energie-efficiënte technologieën te implementeren.

Om een grondige evaluatie van de efficiëntie van alle energieverbruikende componenten aan boord mogelijk te maken, is de “Energy Efficiency Operational Indicator” (EEOI) een wettelijk verplicht onderdeel geworden van de SEEMP. De EEOI meet het energieverbruik van een schip (of de hele vloot) over een bepaalde periode. Weerrouteringen en snelheidsoptimalisatie worden erkend door het SEEMP als haalbare benaderingen om de energie-efficiënte werking van schepen te verbeteren.

2.2.1.4. Andere voordelen van weerrotering

Afhankelijk van welk van de eerder besproken voordelen de hoogste prioriteit krijgt, zal weerrotering aan boord op verschillende manieren worden uitgevoerd. In de lijnvaart, zoals bijvoorbeeld de containervaart, is de betrouwbaarheid van het vaarschema van groot belang, waardoor het behoud van de scheepssnelheid een hoge prioriteit heeft.

In de pleziervaart, zoals bijvoorbeeld de cruisevaart, ligt de nadruk eerder op het confort van de passagiers, waarbij het vermijden van weersomstandigheden die oncomfortabele scheepsbewegingen kunnen veroorzaken van groot belang is. Maar ook de veiligheid van de passagiers en het schip speelt hier van groot belang.

De belangrijkste voordelen van weerrotering, zoals eerder besproken, omvatten een besparing van de vaartijd en de operationele kosten, evenals een verhoging van de veiligheid. (National imagery and mapping agency, 2002)

Het ontwijken van zwaar weer levert bovendien verdere kostenbesparingen op door:

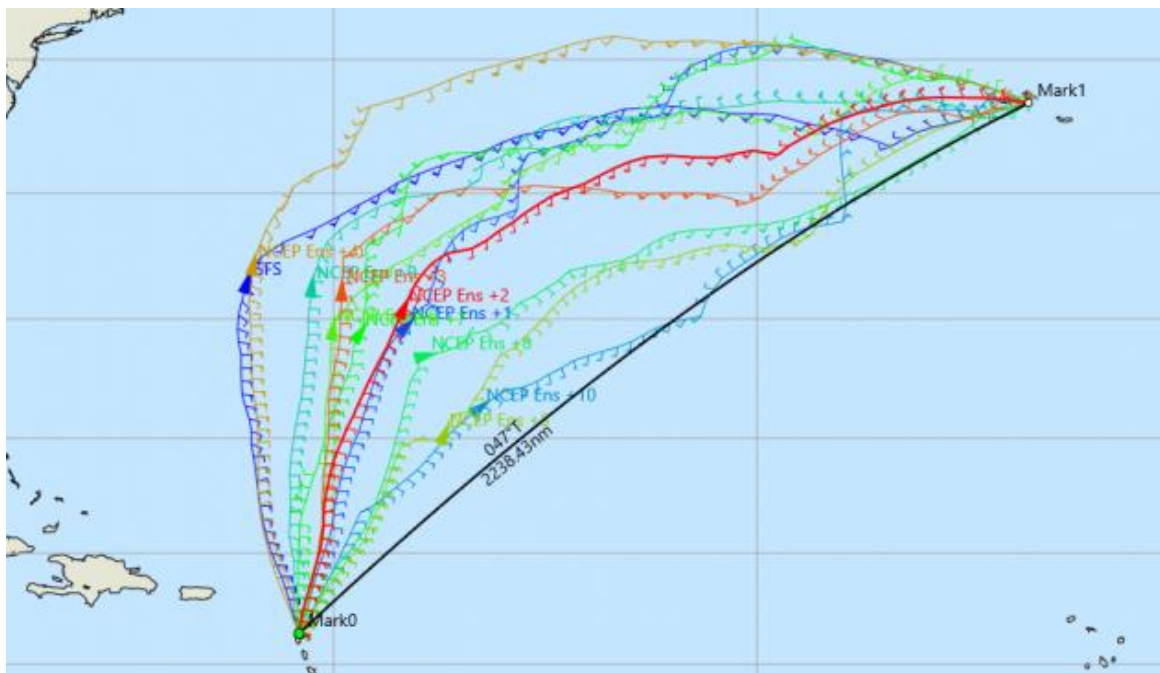
- Een verminderd aantal noodreparaties
- Een efficiënter gebruik van het personeel aan boord
- Een verbetering van de werkomstandigheden op dek (confort van de opvarende)
- Lagere verzekeringspremies vanwege het geringer risico op schade
- Een verlenging van de rendabele levensduur van het schip

2.2.2. Weerrotering in de zeilwereld

Het Weerrotering-systeem in de zeilwereld omvat tal van activiteiten zoals routeplanningsoftware, racemodellering met analyse van het historische weer en de toestand van de zee voor jacht- en zeilontwerp, voor afstandraces en recordpogingen, etc.

Het wordt routinematig gebruikt in races zoals de Volvo Ocean Race, America's Cup en olympische klassenregatta's. De Volvo Ocean Race is de moderne versie van de Whitebread Race waar weerrouteringsystemen toegelaten zijn, terwijl de Ocean Globe Race een kopie is van de Whitebread Race zonder moderne navigatie en weerrouteringsystemen.

Weerrouteringen in de zeilwereld zijn voornamelijk gebaseerd op de verspreiding van meteorologische gegevens, meestal in GRIB-formaat in combinatie met de polars (jachtkarakteristieken) van het zeilschip; ook de historische weer en zeetoestanden worden in rekening gebracht bij het samenstellen van de optimale route. ('Weather routing', 2022)



Figuur 5 weerroutering van zeilschepen

Bron: (Weer routing van zeilschip, 2023)

Uit voorgaande foto's kunnen we concluderen dat een weerroutering voor koopvaardij meer de loxodroom zal volgen dan een weerroutering bij zeilschepen. Een weerroutering bij zeilschepen zal zich meer baseren op de optimale snelheid en koers tegenover de wind en de golven (optimale polar speed) en zal daardoor meer afhankelijk zijn van een plaatselijk of

nabij weersysteem. Ook kunnen we in bovenstaande figuur verschillende kleuren zien, deze kleuren geven verschillende weermodellen weer en de resoluties die gebruikt worden.

2.3. Conclusie:

Weerroutering is een methodologie om de meest gunstige route voor een specifieke oversteek van een ship te voorspellen, gebaseerd op meteorologische en oceanografische verwachtingen, samen met de individuele kenmerken van het schip. Het optimalisatieprobleem van weerroutering omvat het bepalen van een route die voldoet aan vooraf vastgestelde doelstellingen. Het proces moet rekening houden met verschillende beperkingen, zoals de maximale vaartijd of veiligheidslimieten van het schip, om een route te creëren die één of meer doelstellingen bereikt, zoals minimale vaartijd en/of brandstofverbruik.

De voordelen van weerroutering bestaat voornamelijk uit besparing in vaartijd, brandstof en een vermindering van het risico op schade aan het schip en de lading. Dit zijn dan ook de meest voorkomende doelstellingen waarvoor routes worden geoptimaliseerd. Het minimaliseren van brandstofverbruik resulteert bovendien in een lagere uitstoot van broeikasgassen en fijnstof door schepen. Dit heeft niet alleen een positieve invloed op het milieu, maar helpt schepen ook om te voldoen aan de wettelijk voorgeschreven uitstootlimieten zoals beschreven in MARPOL Annex VI.

Het vermogen om zware weersomstandigheden te voorspellen en te vermijden biedt ook tal van andere voordelen. Het vermindert de variabiliteit van een scheepsreis, waardoor nauwkeurigere schattingen kunnen worden gemaakt van de scheepsprestaties en de bijbehorende aankomsttijden. Dit leidt tot een verbeterde betrouwbaarheid van vaarschema's.

In de zeilwereld ligt het balans minder bij het reduceren van de operationele kosten van het schip maar meer bij de veiligheid van het schip en zijn bemanning. Door gebruik te maken van weerrouteringsystemen kunnen zeilers potentiële gevaren zoals slecht weer, sterke

stromingen en stormen beter vermijden, terwijl het ook de efficiëntie van de reis verbetert door gunstige winden en stromingen te benutten.

Bovendien stellen deze systemen zeilers in staat om strategische beslissingen te nemen op basis van gedetailleerde analyses van weerpatronen en zeilcondities. Dit kan resulteren in een verbeterde prestatie tijdens races of langeafstandstochten, waarbij optimale routes worden gekozen om snelheid en stabiliteit te maximaliseren.

3. Werking van een weerroutering systeem

De belangrijkste voorwaarde van het ontwikkelen van een efficiënt weerrouterings-systeem zijn de beschikbaarheid van betrouwbare weersvoorspellingen tot de verwachte aankomsttijd, het vermogen om het gedrag van het schip te modelleren onder alle omstandigheden die het op zijn route kan tegenkomen, de oceanografische data, de beweging, haar snelheid, brandstofverbruik en emissies. De informatie over het verwachte weer en de reacties van het schip moeten uiteindelijk met elkaar in verband worden gebracht in een software die gericht is op het analyseren van alle parameters om zo de ideale route te vinden. (Vettor & Guedes Soares, 2016)

3.1. Weerroutering methodes

Weerroutering methodes kunnen opgedeeld worden in twee types: de deterministische methode en de probabilistische methode.

Deterministische weerroutering-systemen gebruiken wiskundige modellen en simulaties om de weersomstandigheden te voorspellen langs de gehele route die het schip zal afleggen. Dit systeem houdt rekening met verschillende factoren waaronder windsnelheid en -richting, golfhoogte en de richting van de golven tegenover het schip en stromingen. Aan de hand van deze factoren zal er een gedetailleerde weersvoorspelling kunnen opgesteld worden alsook

het opstellen van het “dijkstra algoritme” die de optimale route voor het schip bepaalt, rekening houdend met factoren zoals brandstofverbruik, snelheid en veiligheid. (Życzkowski, Krata, & Szłapczyński, 2018)

Probabilistische of nondeterministic weerroutering-systemen gebruiken statistische technieken om de waarschijnlijkheid te voorspellen van het tegenkomen van verschillende weeromstandigheden langs de geplande route. Deze systemen houden voornamelijk rekening met historische gegevens en andere factoren zoals oceaan temperatuur en atmosferische druk. Aan de hand van deze gegevens kan de probabilistische voorspelling van de weersomstandigheden weergegeven worden. Via deze informatie zal het systeem in staat zijn om de meest waarschijnlijke weersscenario's te identificeren die zich op de route mogelijk kunnen plaatsvinden. (Życzkowski e.a., 2018)

3.2. Configuratie van een weerroutering-systeem

De configuratie van een weerroutering-systeem omvat drie componenten: een weersvoorspellingsmodel, een scheepsprestatie model en een optimalisatie algoritme. Het weersvoorspellings model haalt zijn gegevens uit satellietbeelden, meetboeien in de oceaan en weerkundige meetstations. Op deze manier kunnen we een weersvoorspelling samenstellen langs de route die we zullen afleggen. Het scheepsprestatie model houdt rekening met de karakteristieke kenmerken van het schip waaronder motorvermogen, grote en vorm van het schip... Het optimalisatie algoritme gebruikt deze informatie om de meest efficiënte route voor het schip te bekijken. (Yang, Wu, & Zheng, 2022)

3.2.1. Het weersvoorspellingsmodel

Het weersvoorspellingsmodel is de basis van het weerrouteringsysteem. De weersvoorspelling geeft het systeem de basisinformatie om zijn optimale route te bepalen. De nauwkeurigheid van de meteorologische informatie zal rechtevenredig zijn met de nauwkeurigheid van de route bepaald door het systeem. Deze modellen maken gebruik van

verschillende bronnen van meteorologische informatie, waaronder satellietbeelden, weerstations, boeien op zee en atmosferische modellen.

Atmosferische modellen zijn wiskundige berekeningen die de fysica van de atmosfeer nabootsen op het gedrag van het weer in de toekomst te voorspellen. Deze modellen verdelen de atmosfeer in driedimensionale roosters en simuleren de interacties tussen verschillende atmosferische variabelen zoals temperatuur, luchtdruk, vochtigheid, windrichting en windsnelheid. ('Datasets tagged atmosphere in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog', z.d.)

Het voorspellingsproces begint met het verzamelen van actuele meteorologische gegevens van verschillende bronnen. Deze gegevens worden vervolgens gebruikt als invoer van het weermodel, dat complexe wiskundige berekeningen uitvoert om de evolutie van het weer in de komende uren tot dagen te voorspellen.

Weerrouterings systemen combineren de output van deze modellen met informatie over de specifieke kenmerken van het vaartuig, zoals grootte, snelheid en zeilconfiguratie, om optimale routes te berekenen. Deze routes worden gepland op basis van criteria zoals veiligheid, snelheid en brandstofefficiëntie.

3.2.2. Het scheepsprestatie-model

Het scheepsprestatie-model is ook cruciaal voor het succes van het systeem. Het moet nauwkeurig aangeven hoe het schip zal presteren onder verschillende weersomstandigheden. Er zijn verschillende factoren die de snelheid en het verbruik aanzienlijk kunnen verminderen zoals wind, golven en oceaancirculatie. Hierdoor zal het scheepsprestatie-model rekening houden met deze factoren en een zo nauwkeurig mogelijk traject samenstellen. (National imagery and mapping agency, 2002)

Het doel van het scheepsprestatie-model is om te voorspellen hoe het schip zal reageren op verschillende weersomstandigheden en zeilinstellingen. Hierbij wordt onder andere gekeken naar de snelheid van het schip, de koers die het kan aanhouden onder verschillende windrichtingen en sterktes, en de optimale zeiltrim om de prestaties te maximaliseren.

Dit model maakt gebruik van empirische gegevens en theoretische berekeningen om een nauwkeurige voorspelling te maken. Het kan bijvoorbeeld rekening houden met de invloed van golven op de snelheid en stabiliteit van het schip, de weerstand die wordt ondervonden bij verschillende zeilstanden, en de impact van veranderingen in de windrichting en -snelheid.

Door de integratie van het scheepsprestatie-model in een weerrouteringssysteem kan een schip zijn eigen prestaties nauwkeuriger voorspellen, kan de reistijd geminimaliseerd worden en kan er bespaard worden op brandstof.

3.2.3. Het optimale algoritme

Het optimale algoritme is de laatste component van het weerroutering-systeem. Het algoritme is gebaseerd op wiskundige modellen die een analyse gaan maken van de weersvoorspellingen en de beweging van het schip. Op basis hiervan zal hij de optimale route bepalen. Er zijn verschillende algoritmes die kunnen worden gebruikt voor weerrouting waaronder de great circle methode, de isochronous methode en de dynamic programming methode. ('Routeringsalgoritme', 2021)

3.3. Type algoritme's

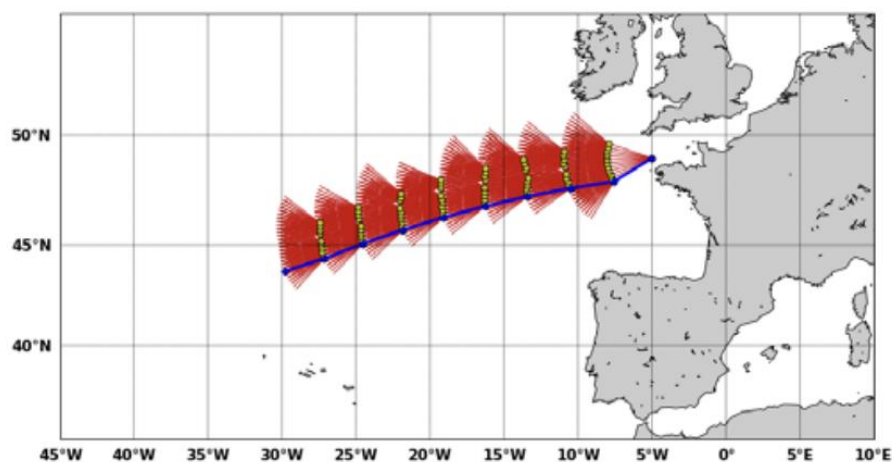
In weerroutering-systemen zijn er tal van types algoritmes die aanbod komen. De meest bekende types zijn de great circle methode, de isochronous/ isopone methode en de dynamic programming methode.

De great circle methode is gebaseerd op de kortste afstand tussen twee punten op een bolvormig oppervlak, zoals de aarde. Dit algoritme zal de optimale route tussen twee punten gaan bepalen door gebruik te maken van sferische trigonometrie. Dit is een relatief eenvoudige methode, maar de methode houdt geen rekening met de veranderende weersomstandigheden. Deze methode is het meest effectief als we een grote verandering in

longitude hebben, ons dichterbij de polen toe bevinden en een klein latitude verschil hebben. (Wang, Mao, & Eriksson, 2017)

De isochrone/ Isopone methode is gebaseerd op isochrone kaarten, waarbij elk punt op de kaart aangeeft hoe lang het zal duren om daar te komen vanuit een bepaald vertrekpunt. Dit algoritme berekent de optimale route door de isochrone kaart te combineren met weersinformatie. Deze methode houdt rekening met up to date weersvoorspellingen. Hierdoor bekomen we een meer geavanceerde methode dan de great circle methode.

Er is een klein verschil tussen de isochrone en isopone methode. De basis van beide methoden zijn gelijkaardig, maar terwijl de isochrone methode de afstand neemt die een schip in bepaalde tijd kan bereiken als tijdperiode zal de isopone methode rekening houden met de afstand die een schip kan afleggen bij gelijk brandstofverbruik. Hieruit kunnen we besluiten dat de isopone methode meer voor economische aspecten zal gebruikt worden (in de koopvaardij wereld) terwijl de isochrone methode meer in de zeilwereld van toepassing zal zijn. (Wang e.a., 2017)

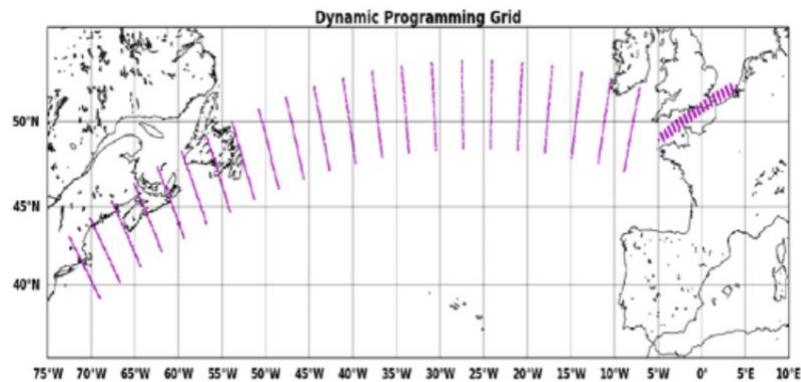


Figuur 6. waypoints isochrone methode

Bron: (Wang e.a., 2017)

De Dynamic Programming methode is gebaseerd op een wiskundige optimalisatie-techniek, waarbij het probleem wordt opgedeeld in kleinere deelproblemen op basis van het “great circle referentie pad”. Oplossingen worden opgebouwd op basis van de oplossingen van de

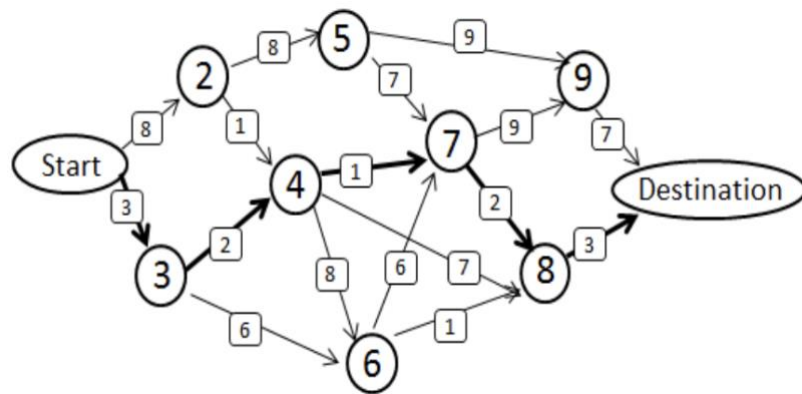
deelproblemen. Dit algoritme berekent de optimale route door de optimale oplossing van de deelproblemen te combineren. Het is een zeer geavanceerde methode die rekening houdt met meerdere variabelen, zoals windsnelheid en -richting, golfhoogte en -richting, oceaanstromingen en de prestaties van het schip. (Wang e.a., 2017)



Figuur 7 Dynamic programming grid

Bron: (Wang e.a., 2017)

Het Dijkstra algoritme is uitgebeeld in onderstaande fig 7. Er zijn meerdere mogelijke routes om van de start naar de bestemming te varen. Het Dijkstra algoritme zal eerst een ganse route gaan verdelen in allemaal sub-routes. Het startpunt is geconnecteerd met alle andere punten door enkele paden die we kunnen associëren met bepaalde factoren die een rol spelen in het routerings-proces, zoals de kost, de veiligheid en weerkundige factoren. In dit algoritme is het eerste principe dat de optimale sub-routes bepaald gaan worden door de laagste kost om van punt A naar punt B te varen. Dit eerste pad wordt als referentie beschouwd. Als een punt is bereikt en alle overeenkomstige paden zijn al getest dan wordt er vergeleken met haar vorige sub-paden. Als de nieuw geteste route kleiner is dan de referentie, de nieuwe kostenwaarde en het bijbehorende pad worden aan dat punt toegewezen. Bijgevolg wordt het vorige referentiep pad verworpen en het nieuwe pad zal als referentie worden genomen. Door deze procedure te volgen zullen de paden evolueren tot aan de eindbestemming en uiteindelijk zal er één optimale route overblijven. We kunnen hier een voorbeeld van zien in Figuur 5. De vetgedrukte lijnen markeren de optimale route met de kleinste waarde/afstand vanaf het start punt naar het bestemmingspunt. Dit algoritme wordt zowel toegepast in de koopvaardij en in de wedstrijdzeilwereld. (Shin e.a., 2020)



Figuur 8 Dijkstra algoritme

De gebruikte algoritmes tussen de zeilwereld en de koopvaardij wereld lopen vrijwel gelijk. Algoritmes zoals isochrone en dynamic programming worden ook in de zeilwereld gebruikt, maar ook Polars en Neural networks worden gebruikt in de zeilwereld. (Życzkowski e.a., 2018)

Polars is eigenlijk een algoritme dat gebruik maakt van polaire diagrammen die de prestaties van de boot onder verschillende omstandigheden weergeven. Het algoritme zal de optimale route berekenen op basis van deze polaire diagrammen en de voorspelde weersomstandigheden.

In feite zoekt het polars algoritme naar de beste combinatie van zeilstand, koers en snelheid om het schip zo snel mogelijk naar zijn bestemming te brengen, rekening houdend met de heersende weersomstandigheden en de kenmerken van het zeilschip. Het houdt rekening met variabelen zoals de weerstand van het schip, de impact van de golven en stromingen, en de mogelijkheid om de ideale koers te behouden onder verschillende windomstandigheden.

Het polars algoritme is vooral nuttig voor zeilboten, waarbij de optimale zeiltrim en koers cruciaal zijn voor het maximaliseren van de snelheid en het vermijden van tegenwind door gebruik te maken van polaire diagrammen en geavanceerde wiskundige berekeningen.

Neural Networks is een algoritme dat meer gebuikt maakt dan kunstmatige intelligentie en machine learning technieken. Dit algoritme leert de historische gegevens van een schip in een bepaalde conditie en kan zo met de huidige omstandigheden een route gaan berekenen.

3.3.1. Voor- en nadelen van bepaalde algoritmes

Elk algoritme heeft zijn eigen voor en nadelen en zal meer in aanmerking komen voor een specifiek type van routing dan een ander. Bijvoorbeeld, sommige schepen zijn sterk afhankelijk van een specifieke aankomsttijd terwijl andere een sterk belang moeten hechten aan de beweging van het schip om een goede bescherming voor de lading te bieden. In sommige gevallen is het zeker ook interessant om een combinatie van beide te verkrijgen, dit noemen we een hybride routing. (Wang e.a., 2017)

Als we meer kijken naar de besproken algoritmes kunnen we zien dat de Isochrone methode vooral gebruikt wordt voor een route-planningen die sterk gebaseerd zijn op de ETA van het schip.

Het Dijkstra en Dynamic programming algoritme zal de meest optimale route baseren op het grid bestand. Dit maakt de accuraatheid van de routing zeer sterk afhankelijk van de accuraatheid van het grid bestand. Het is ook een algoritme dat zeer snel en zeer goed de route kan bepalen tussen eilanden en in nauwer vaarwater waar veel weerverschillen kunnen optreden. Dijkstra is een routing systeem dat vooral gebruikt wordt bij coastal navigation. (Wang e.a., 2017)

3.4. Conclusie:

Een efficiënt weerroutingssysteem vereist betrouwbare weersvoorspellingen tot de verwachte aankomsttijd, het vermogen om het gedrag van het schip onder diverse omstandigheden te modelleren, en de integratie van oceanografische data. Deze systemen combineren weersvoorspellingen met specifieke kenmerken van het schip, waaronder snelheid, brandstofverbruik en emissies, om de ideale route te bepalen.

Er zijn twee primaire methoden voor weerrotering: de deterministische methode en de probabilistische methode. Deterministische systemen maken gebruik van wiskundige modellen en simulaties om nauwkeurige weersvoorspellingen langs de gehele route van het schip te genereren. Probabilistische systemen daarentegen gebruiken statistische technieken om de waarschijnlijkheid van verschillende weersomstandigheden te voorspellen, gebaseerd op historische gegevens en andere factoren zoals oceaantemperatuur en atmosferische druk.

De configuratie van een weerroteringssysteem bestaat uit drie componenten: een weersvoorspelingsmodel, een scheepsprestatie-model en een optimalisatie-algoritme. Het weersvoorspelingsmodel vormt de basis, met gegevens afkomstig van satellietbeelden, meetboeien en weerstations. Het scheepsprestatie-model is cruciaal voor het nauwkeurig voorspellen van de prestaties van het schip onder verschillende omstandigheden, terwijl het optimalisatie-algoritme de meest efficiënte route bepaalt.

Diverse algoritmes worden gebruikt in weerroteringssystemen, waaronder de great circle methode, de isochrone/isopone methode, en de dynamic programming methode. Elk algoritme heeft zijn eigen voor- en nadelen, en de keuze hangt af van specifieke routingvereisten zoals aankomsttijd of ladingbescherming. De isochrone methode is bijvoorbeeld nuttig voor routeplanning die sterk afhankelijk is van de ETA, terwijl het dijkstra en dynamic programming algoritme meer geschikt zijn voor nauwkeurige routebepaling in veranderlijke weersomstandigheden.

Ten slotte, de integratie van algoritmes zoals Polars en Neural Networks, vooral in de zeilwereld, benadrukt de complexiteit en verfijning van moderne weerroteringssystemen. Deze algoritmes helpen bij het vinden van de optimale combinatie van zeilstand, koers en snelheid, rekening houdend met de weersomstandigheden en scheepskenmerken wat resulteert in verbeterde prestatie en efficiëntie.

4. Weerkundige aspecten van een weer-routing-systeem

Om de optimale route te vinden moet een weer-routing-systeem gebruik maken van de correcte informatie over de verschillende weersomstandigheden. Hiervoor zal een weer-routing-systeem de informatie uit verschillende weermodellen halen. De weerkundige aspecten die hiervoor geraadpleegd worden zijn: de windrichting en windsnelheid, neerslag, temperatuur, bewolking, atmosferische druk, golfhoogte.

4.1. Wind

De windrichting en windsnelheid is één van de hoofdzakelijke aspecten die geraadpleegd zullen worden. De invloed op schepen van windrichting en windkracht op schepen is enorm en kan er voor zorgen dat we trager of sneller op onze bestemming zullen zijn maar geeft ook een evenredig verband weer met de veiligheid waarin een schip zich kan bevinden. Zowel voor koopvaardij schepen als voor zeilschepen is dit van groot belang. (Manderbacka, 2019)

4.1.1. Hoe ontstaat de wind

Wind is het resultaat van horizontale luchtbewegingen in de atmosfeer, die worden veroorzaakt door verschillen in luchtdruk. Het ontstaan van wind kan worden verklaard door een combinatie van verschillende processen, waaronder convectie, luchtdrukverschillen en de draaiing van de aarde (corioliseffect).

Convectie is een belangrijk mechanisme voor het opwekken van wind. Wanneer de zon de aarde verwarmt, wordt de lucht aan het aardoppervlak ook opgewarmd. Warme lucht stijgt omdat het minder dicht is dan koude lucht. Dit creëert verticale luchtbewegingen die bekend staan als thermiek. Thermiek kan lokale winden veroorzaken, zoals zeewind en landwind, afhankelijk van of het water of het land sneller opwarmt.

Wind ontstaat ook als gevolg van verschillen in luchtdruk tussen verschillende gebieden. Luchtdruk wordt veroorzaakt door de massa van de lucht die boven een bepaald gebied drukt. Gebieden met hoge luchtdruk hebben een hogere dichtheid van luchtdeeltjes en dus een hogere luchtdruk, terwijl gebieden met lage luchtdruk minder dicht zijn en lage druk hebben. Wind beweegt van gebieden met hoge luchtdruk naar gebieden met lage luchtdruk om het drukverschil te egaliseren. Deze wind wordt ook wel gradientwind genoemd. ('KMI - Wat veroorzaakt de (stroming van de) wind?', z.d.)

De draaiing van de aarde heeft ook invloed op de windpatronen. Het corioliseffect wordt veroorzaakt door de rotatie van de aarde en buigt winden af naar rechts op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond. Dit effect beïnvloedt de richting van de wind en kan bijdragen aan de vorming van grote windstromen zoals passaatwinden en westenwinden. . ('KMI - Wat veroorzaakt de (stroming van de) wind?', z.d.) Ook kunnen we besluiten dat de wind rond een lagedrukgebied anti-clockwise beweegt en rond een hogedrukgebied clockwise in het noordelijk halfrond. De luchtstroom is ongeveer evenwijdig met de isobaren. (Gastblog, 2012)

4.1.1.1. Convectie

Convectie in de atmosfeer betekent het opstijgen van luchtballen doordat de lucht in de hoogte kouder is dan aan de grond. Een typische situatie waarbij convectie optreedt, is wanneer de zon in de loop van de dag het aardoppervlak en zo ook de onderste luchtlagen verwarmt. Warmere lucht zal een kleinere dichtheid hebben dan koudere lucht, zodat ze de neiging heeft om op te stijgen. Het is ook mogelijk dat een koude luchtmassa over een warmere ondergrond stroomt en zo convectie veroorzaakt. Dit gebeurt bijvoorbeeld achter een koudfront of wanneer van oorsprong arctische lucht over veel warmer zeewater stroomt. ('KMI - Convectie', z.d.)

Door de stijgende bewegingen is het mogelijk dat er bewolking ontstaat. Hierdoor moet de lucht wel voldoende vochtig zijn. Anders zijn er enkel verticale verplaatsingen zonder wolkenvorming en spreken we van droge convectie. Convectieve wolken worden ook

stapelwolken of sumuliforme wolken genoemd. De luchtbellens kunnen enkel blijven stijgen zolang de atmosfeer onstabiel is. De convectie kan verticaal gezien kilometers ver doorgaan, zelfs tot aan de tropopauze. In dat geval spreken we van diepe convectie met vorming van grote cumuluswolken of cumulonimbus waaruit veelal buien vallen. ('KMI - Convectie', z.d.)

In sommige gevallen kan de atmosfeer slechts over een beperkte laag onstabiel zijn, wat resulteert in het snel botsen van stijgende luchtbellens tegen een stabiele laag of inversie. In dergelijke situaties is de convectie oppervlakkig en leidt dit niet tot het vormen van wolken of slechts tot het vormen van bescheiden cumuluswolken, die vaak worden aanzien als "mooiweerwolken".

Deze convectiestromen kunnen op lokaal niveau kleine luchtbewegingen veroorzaken, zoals een briesje dat ontstaat boven een warm oppervlak. Op grotere schaal dragen convectiestromen bij aan de vorming van luchtmassa's met verschillende temperaturen en drukken, wat op zijn beurt de windpatronen in de atmosfeer beïnvloedt.

Bijvoorbeeld, in de tropen wordt de lucht rond de evenaar sterk opgewarmd, waardoor deze opstijgt en een lagedrukgebied creëert. De lucht stijgt vervolgens naar de hogere breedtegraden, waar het afkoelt en daalt. Dit veroorzaakt een luchtstroming van de tropen naar de polen, die we kennen als de passaatwinden.



Figuur 9 trade winds door convectie

Bron: ('Natuurkunde.nl—Convectie', z.d.)

4.1.2. Het corioliseffect

Het corioliseffect heeft te maken met het draaien van de aarde om haar eigen as. De corioliskracht veroorzaakt een richtingsverandering van de wind. Deze verandering is alleen zichtbaar voor iemand die meebeweegt met de aarde.

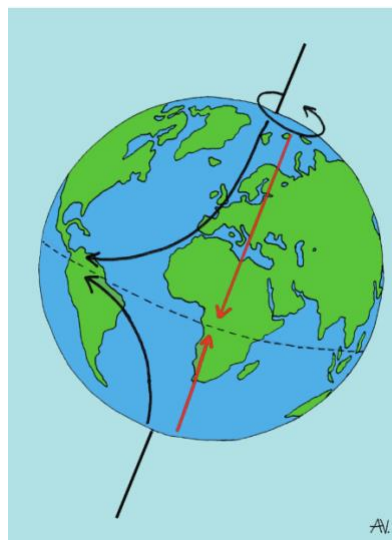
Wanneer lucht beweegt in de atmosfeer, bijvoorbeeld vanwege drukverschillen die wind veroorzaken, lijkt het vanuit het perspectief van een waarnemer op aarde af te wijken van zijn oorspronkelijke pad. Op het noordelijk halfrond wordt de beweging van de lucht naar rechts afgebogen, terwijl op het zuidelijk halfrond de afbuiging naar links plaatsvindt.

Deze afwijking wordt veroorzaakt doordat de rotatiesnelheid van de aarde groter is aan de evenaar dan aan de polen. Wanneer lucht van de evenaar naar de polen beweegt (noordwaarts op het noordelijk halfrond), behoudt het zijn oorspronkelijke oostelijke snelheid vanwege de rotatie van de aarde. Omdat het punt op de aarde waar de lucht naartoe beweegt een kleinere rotatiesnelheid heeft dan het punt van waaruit het afkomstig

is, lijkt de lucht naar rechts af te wijken op het noordelijk halfrond, wat resulteert in een draaiing met de klok mee. ('The Coriolis Effect', z.d.)

Wanneer lucht van de polen naar de evenaar beweegt (zuidwaarts op het noordelijk halfrond), heeft het een grotere rotatiesnelheid dan het punt waar het naartoe beweegt. Dit veroorzaakt een afwijking naar links, waardoor de wind tegen de klok in lijkt te draaien.

Het belangrijkste gevolg van de corioliskracht is dat de wind op grote schaal niet in een rechte lijn stroomt van een hogedrukgebied naar een lagedrukgebied. In werkelijkheid kunnen we zien dat de wind ongeveer parallel met de isobaren stroomt. ('Wat is het corioliseffect?', z.d.) Dit is enkel het geval als we spreken over wind op hogere hoogtes. Omwille van de wrijving tussen wind en het aardoppervlak zal de windvector in de onderste luchtlagen de isobaren snijden met een hoek van ongeveer 30° graden op land en op zee ongeveer 10° graden. ('KMI - Corioliseffect', z.d.)



Figuur 10 coriolis effect

Bron: ('Wat is het corioliseffect?', z.d.)

Het corioliseffect heeft ook een zeer grote invloed op de ontwikkeling van weerpatronen en op de passaatwinden.

Cyclonen zijn lagedruksystemen die lucht naar hun centrum, of “oog”, zuigen. In het noordelijk halfrond passeren hoge druksystemen lagedruksystemen aan hun rechterkant. Omdat luchtmassa’s vanuit alle richtingen in cyclonen worden getrokken, worden ze afgebogen, en het stormsysteem – een orkaan – lijkt tegen de klok in te draaien. In het zuidelijk halfrond worden stromingen naar links afgebogen. Als gevolg lijken stromsystemen met de klok mee te draaien.

Maar ook windpatronen over de hele wereld voelen een invloed van het corioliseffect. Als warme lucht opstijgt nabij de evenaar, stroomt het naar de polen. In het noordelijk halfrond worden deze warme luchtstromen naar rechts (oost) afgebogen als ze naar het noorden bewegen. De stromingen dalen terug naar de grond op ongeveer 30° noorderbreedte. Terwijl de stroming daalt, beweegt deze geleidelijk van het noordoosten naar het zuidwesten, terug naar de evenaar. De consistentie circulerende patronen van deze luchtmassa’s staan bekend als de passaatwinden. (‘The Coriolis Effect’, z.d.)

4.1.3. Effect van wind op een weerroutering-systeem

4.1.3.1. Effect voor koopvaardij schepen

In de koopvaardijwereld zal de windkracht en windrichting een aanzienlijk maar voordehand liggend effect hebben op het schip. Met de wind mee zal dit ons schip gaan versnellen of een neutraal effect hebben. Met wind tegen zal dit ons schip vertragen. Dit zal er natuurlijk ook voor zorgen dat het brandstofverbruik zal wijzigen. Ook heeft de windsterkte een invloed op de stabiliteit van het schip. Dit kan zowel de bemanning als de lading in gevaar brengen. (Szymonski, 2019)

Op koopvaardij schepen is de scheepsprestatie van het schip naargelang de wind niet evident te bepalen. Het aandeel van de “toegevoegde weerstand” door de wind varieert

naargelang de scheepssnelheid, van 2% bij lage snelheid schepen tot 10% bij hoge snelheid schepen.

Het effect van de wind wordt ook bepaald door de windoppervlak (het aantal vierkante meter boven de waterlijn blootgesteld aan de wind) van het schip, waarbij schepen met een grotere windoppervlak een grotere invloed ondervinden van de wind en omgekeerd. Een groot containerschip of roroschip in ballast ondervindt bijvoorbeeld een veel grotere “toegevoegde weerstand” door de wind dan een volledige beladen tanker van dezelfde lengte, omdat de tanker een veel kleiner windoppervlak zal hebben. (National imagery and mapping agency, 2002)

Naast de scheepssnelheid en het windoppervlak, wordt de “toegevoegde weerstand” door de wind ook bepaald door de windsnelheid en de hoek waaronder de wind het schip tegemoetkomt. bij lichte wind van minder dan 20 knopen zal de snelheid van schepen die met de wind meevaren toenemen, terwijl de snelheid van schepen die tegen de wind in varen zal afnemen.

Indien de windsnelheid echter toeneemt tot meer dan 20 knopen, zal de scheepssnelheid afnemen voor zowel schepen die tegen de wind in varen als voor schepen die met de wind mee varen. Dit fenomeen kan worden verklaard door het feit dat de hogere windsnelheid leidt tot de ontwikkeling en vergroting van windgolven. Zelfds bij achter- of inkomende zeeën zorgen deze golven voor een toename van de weerstand, omdat ze stuurcorrecties vereisen om afwijkingen van de scheepskoers te compenseren. Dit benadrukt het belang van de zeecondities bij het bepalen van de scheepsprestaties. (National imagery and mapping agency, 2002)

4.1.3.2. Effect voor zeilschepen

In de zeilwereld hebben we een andere kijk over windkracht en windrichting. De wind kan ons hier sneller laten gaan maar kan ook resulteren in een langere afstand; bij voorbeeld als de wind komt van op onze neus dan moeten we opkruisen en varen we een derde meer mijl

dan dat we zouden moeten doen indien we wind mee hebben. De windsterkte is hier van veel groter belang dan in de koopvaardijwereld, alsook op vlak van veiligheid voor bemanning en het schip zelf.

Ook zal op basis van de windsterkte de zeil keuzes aangegeven worden. Aangezien een weerroutering beschikt over de polars van het schip en de zeilgarderobe zal het zo kunnen aangeven wat de ideale zeilkeuze zal zijn op een bepaalde koers.

4.2. Neerslag

Neerslag is een factor die we zeker niet achterwege mogen laten en wordt zeker in rekening gebracht in een weerroutering-systeem. De meest gekende eigenschap van neerslag is de vermindering van het zicht, maar ook de stabiliteitsvermindering de eventuele impact op de lading en de verandering van de zeestromingen mogen niet vergeten worden.

Neerslag zoals regen, mist of sneeuw brengt een aanzienlijk grote zichtsvermindering met zich mee. Een zichtsvermindering bemoeilijkt de navigatie, vooral in drukker vaargebieden. Hierdoor zullen we de snelheid van ons schip verminderen om zo op een veilige manier op onze eindbestemming aan te komen.

De stabiliteit van het schip is ook een factor die sterk beïnvloedbaar is door neerslag, vooral in combinatie met een sterke wind en/of hagel. Het extra gewicht op het dek omwille van het regenwater/ ijsvorming kan het stabiliteits-koppel doen verkleinen en het schip onstabiel maken; hierdoor kan het schip vatbaar worden voor rollen en slingeren met eventueel gevaar voor lading en bemanning. ('2017_05_Guide_stab_nl.pdf', z.d.)

De relatieve luchtvochtigheid van de laadruimten in schepen is voor ladingen zoals graan, papier, textiel, etc.. van zeer groot belang. Neerslag kan zowel voor condensatie als voor contaminatie zorgen op de lading van een schip. Regenwater dat een schip binnendringt kan leiden tot vochtige omstandigheden en als de temperatuur in het ruim lager is dan het dauwpunt kan dit resulteren in condensatie op de lading en scheepsconstructie. Dit kan

vochtproblemen veroorzaken en eventuele schimmels. Maar ook contaminatie is een zeer gevaarlijk iets dat de lading kan beïnvloeden. Regenwater kan verontreinigingen, zoals vuil, zout en chemische stoffen bevatten afkomstig van het dek en de scheepsconstructie. Deze verontreinigingen kunnen de lading aantasten en ongewenste chemische reacties veroorzaken en zo veranderingen in de lading-eigenschappen aanbrengen. ('Extra info over vervuiling.pdf', z.d.)

4.3. Getijden en stromingen

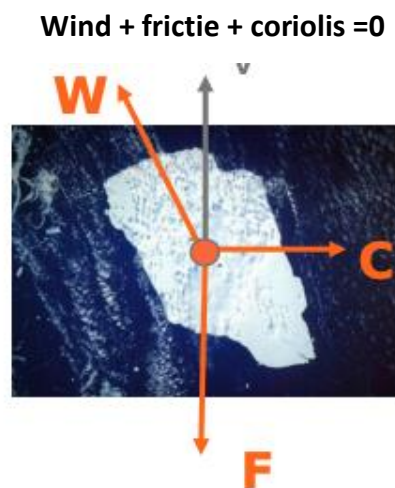
Oceaanstromingen zijn langdurige, voortdurende bewegingen van water in de oceanen. Ze worden veroorzaakt door verschillende factoren, waaronder windpatronen, temperatuurverschillen, rotatie van de aarde (coriolis-effect) en de zwaartekracht.

Wind is een van de belangrijkste stuwkrachten achter oceaanstromingen. De wind oefent een druk uit op het wateroppervlak waardoor water in beweging komt. Aangezien er in de oceanen aanhoudende windpatronen zijn zullen hierdoor ook stromingen gevormd worden. Aanhoudende winden kunnen oppervlaktestromingen in beweging brengen en zo ook invloed hebben op diepzeestromingen. Deze diepzeestromingen komen hierdoor ook in beweging.

Het Coriolis-effect, veroorzaakt door de rotatie van de aarde is een welgekend effect op winden en oceaanstromingen. Het coriolis-effect zorgt ervoor dat bewegende objecten, inclusief winden en oceaanstromingen afwijken van hun oorspronkelijke koers, op het noordelijkhalfrond is dit een afwijking naar rechts en op het zuidelijkhalfrond is dit een afwijking naar links. Het coriolis-effect speelt een zeer belangrijke rol bij de vormgeving van de oceaanstromingen en dit vooral op grote schaal.

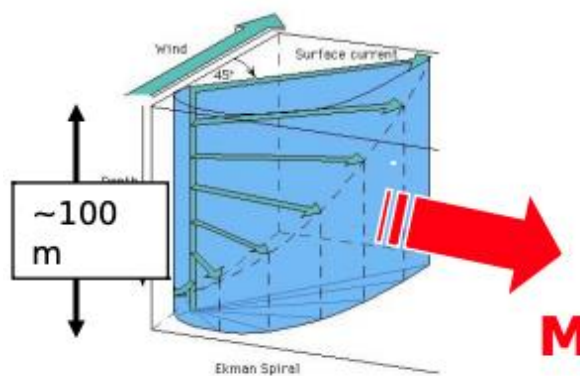
Er zijn twee hoofdtypen windgedreven stromingen die we kunnen onderscheiden:

- Ekman-transport: de Ekman-transport is een proces waarbij de wind het wateroppervlak in beweging brengt, waardoor een oppervlaktestroming ontstaat die iets schuiner staat ten opzichte van de windrichting. Deze afwijking wordt veroorzaakt door de corioliskracht, die de beweging van het water afbuigt als gevolg van de rotatie van de aarde. De Ekman-transport resulteert in een netto waterverplaatsing onder het oppervlak, dieper in de oceaan. Dit veroorzaakt een spiraalvormige beweging van het water, bekend als de Ekman-spiraal.
Bv: een ijsberg drijft niet mee met de wind, de stroming aan de oppervlakte maakt een hoek van 45° met de wind; hoe dieper hoe groter de hoek (Sterl, z.d.)



Figuur 11 wind+frictie+coriolis=0

Bron: (Sterl, z.d.)

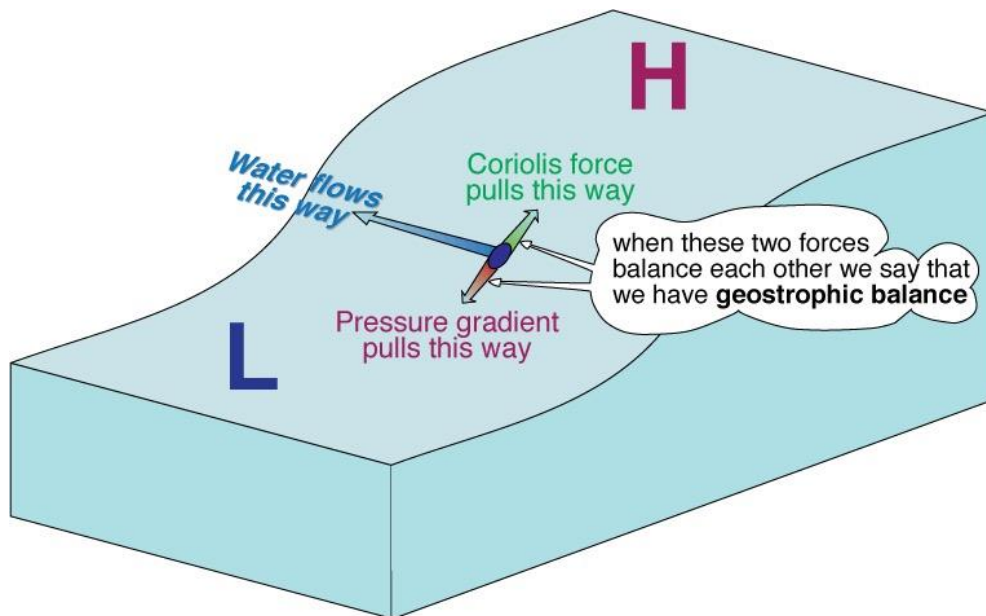


Figuur 12 hoe dieper, hoe groter de hoek

Bron: (Sterl, z.d.)

In bovenstaande afbeelding kunnen we zien hoe de afwijkings hoek varieert met de diepgang.

- Geostrofische stromingen: deze stromingen ontstaan als gevolg van de Ekman-transport en worden beïnvloed door de corioliskracht en het drukgradiëntkracht. De corioliskracht buigt de stroming af naar rechts op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond, terwijl de drukgradiëntkracht de stroming van hogere naar latere drukgebieden drijft. Het resultaat is een evenwichtsstroom, bekend als de geostrofische stroming, die zich parallel aan de isobaren beweegt, waarbij de effecten van de corioliskracht en de drukgradiëntkracht in balans zijn.



Figuur 13 geostrofische stroming

Bron:('Oceaanstromen', z.d.)

Verschillen in temperatuur en zoutgehalte van het water hebben een grote invloed op de dichtheid van het zeewater. Hierdoor heeft dit ook een invloed op de stroming van het water. Wanneer water afkoelt of het zoutgehalte toeneemt, neemt de dichtheid toe en zinkt het water naar diepere lagen. Dit proces bekend als thermohaliene circulatie, speelt een belangrijke rol bij het aandrijven van de diepzeestromingen. (Sterl, z.d.)

Zwaartekracht speelt een grote rol bij het creëren van oceaanstromingen op regionale schaal. Verschillen in zeeniveau veroorzaakt door variaties in temperatuur, zoutgehalte en winddruk, creëren hellingen in het zeeniveau. Deze hellingen veroorzaken een horizontale drukgradiënt, wat resulteert in waterstromen van hoge naar lagedrukgebieden.

De vorm en topografie van de oceanen en de nabijheid van continenten hebben invloed op de stromingspatronen. Smalle doorgangen tussen continenten kunnen bijvoorbeeld de stroming van water beïnvloeden en sterke zeestromingen creëren, zoals de golfstroom in de Atlantische Oceaan.

4.3.1. Wat is thermohaliene circulatie?

De thermohaliene circulatie is het mondiale patroon van stromingen in de oceanen, dat veroorzaakt wordt door verschillen in temperatuur en zoutgehalte. Het globale stromingspatroon van de oceanen wordt behalve door verschillen in dichtheid ook beïnvloed door andere factoren zoals de wind, de ligging van continenten en de geometrie van de zeebodem. We noemen dit fenomeen de thermohaliene circulatie of ook wel de “oceanische transportband” genoemd, ook omdat alle factoren die meespelen niet altijd goed te onderscheiden zijn. (‘Thermohaliene circulatie’, z.d.)

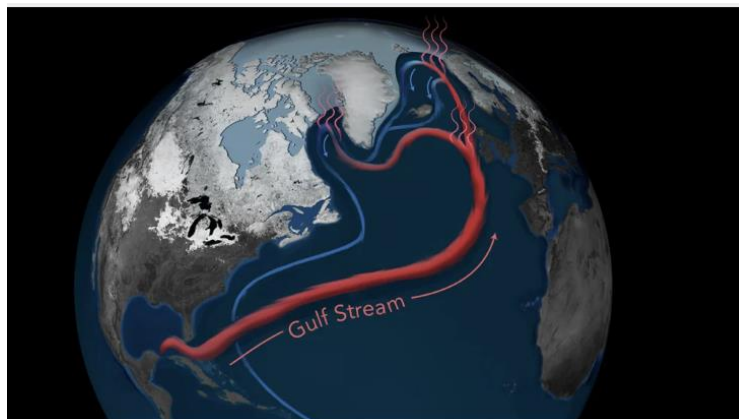
Het proces van thermohaliene circulatie begint met de vorming van diep water in de noordelijk Atlantische Oceaan, voornamelijk in de regio rond groenland en de Noord-Atlantische oceaan. Hier koelt oppervlaktewater af door contact met koude lucht uit de poolgebieden en wordt zwaarder vanwege het hoge zoutgehalte dat afkomstig is van de verdamping van water in de subtropische gebieden. Dit zware, koude en zoute water zinkt naar diepere lagen van de oceaan, waardoor een diepe oceaanstroom ontstaat die naar het zuiden stroomt, en soms zelfs de evenaar bereikt.

Naarmate dit diepere water naar het zuiden stroomt, wordt het geleidelijk opgewarmd door de warmere omringende wateren en neemt het geleidelijk aan opgeloste gassen en voedingsstoffen op. Uiteindelijk stijgt dit opgewarmde water weer naar het oppervlak in de oceanen van de Zuidelijke Oceaan en verspreidt zich over de wereldwijde oceanen als oppervlaktewaterstroming. (‘Ocean Conveyor Belt’, z.d.)

Dit proces van diepwaterformatie, transport en opwelling speelt een essentiële rol in het wereldwijde klimaatsysteem. Het zorgt voor de transportatie van warmte van de equatoriale gebieden naar de polen en draagt bij aan de regulatie van het klimaat op regionale en mondiale schaal. Thermohaliene circulatie beïnvloedt ook de mariene ecosystemen door het transport van voedingsstoffen en bepaalt de klimatologische en ecologische omstandigheden in verschillende delen van de wereldwijde oceanen.

Koud water dat rond Groenland naar de diepe oceaan zakt is een van de belangrijkste drijvende krachten van de thermohaliene circulatie. Indien er in dit gebied veranderingen optreden zal dit een invloed hebben op de hele wereld. Anderzijds betekent dit ook dat dit het gebied is waar eventuele veranderingen makkelijk gedetecteerd kunnen worden. ('Thermohaliene circulatie', z.d.) Wetenschappers houden daarom het noordelijk deel van de AMOC dan ook goed in de gaten. ('KNMI - Transportband van de oceaan', z.d.) De twee belangrijkste componenten van de noordelijke AMOC zijn:

- De golfstroom: het warme water aan het oceanoppervlak dat vanuit de golf van Mexico richting West-Europa en Groenland stroomt;
- De deep western western boundary current: het koude water dat in de diepte langs de Amerikaanse oostkust zuidwaarts stroomt.



Figuur 14 de golfstroom

Bron: ('Thermohaliene circulatie', z.d.)

4.4. Golven

De snelheid van schepen is een cruciale factor in de scheepvaartindustrie maar ook in de zeilwereld. Het beïnvloed niet alleen de efficiëntie van het transport in de koopvaardij wereld maar het heeft ook invloed op de operationele kosten en de veiligheid van het schip en de bemanning. In de zeilwereld is dit iets minder kosten gerelateerd en gaat het meer op een

winnen of verliezen. Een belangrijke factor die de snelheid van schepen zal beïnvloeden is de golfslag. Golven hebben een aanzienlijk effect op de voortstuwing van schepen en kunnen zowel positieve als negatieve gevolgen hebben.

4.4.1. Hoe ontstaan golven?

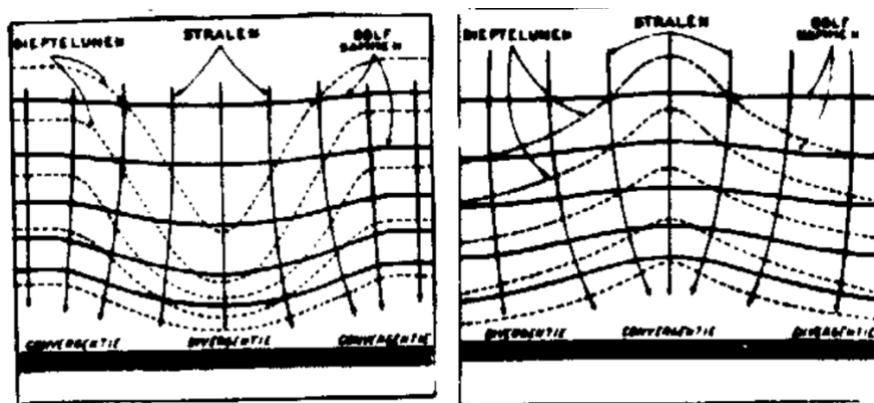
Golven zijn sterk afhankelijk van de windkracht, windduur, fetch en de diepte van het water maar ook van de temperatuurverschil tussen lucht en het water.

Wind is de primaire energiebron die golven in de zee genereert. Wanneer de wind over het oppervlak van het water waait, oefent het druk uit en zorgt het voor verstoringen in de waterlaag. Deze verstoringen resulteren in het ontstaan van kleine golven, ook wel rimpelingen genoemd. We hebben twee belangrijke types, capillaire golven en gravitatiegolven:

- Capillaire golven zijn golven die zich relatief langzaam verplaatsen ten opzichte van de wind (wind van zo een 2-4 knopen). Als gevolg van de viscositeit zullen zij bij het wegvallen van de wind ook zeer snel verdwijnen. Deze golfjes hebben een sinusoidale vorm.
- Gravitatie golven zijn golven die optreden bij winden van ongeveer 10 knopen. De weerstand tussen lucht en water verhoogt hier vrij plots, hierdoor zal de hoogte van de golven vergroten en deze met de kortste golflengte zullen als eerste hun kritische hoogte bereiken. Deze zijn beïnvloed door de zwaartekracht.

De windduur en windsterkte bepalen de grootte en de intensiteit van de golven. Langdurige en krachtige winden kunnen leiden tot grotere golven met meer energie. Ook de afstand waarover de wind waait, bekend als fetch is belangrijk. Een lange fetch geeft de wind meer tijd en ruimte om energie het water over te dragen, wat resulteert in een grotere en krachtigere golf.

De waterdiepte heeft ook een aanzienlijk effect op de hoogte, snelheid en vorm van de golven. De snelheid van een golf hangt af van de waterdiepte. In diep water bewegen de golven sneller dan in ondiep water. Dit komt doordat de golven in diep water geen interactie hebben met de bodem en zich vrij kunnen voortplanten. In ondiep water daarentegen, waar de waterdiepte vergelijkbaar is met de golflengte, vertragen de golven omdat ze worden beïnvloed door de bodem. We kunnen besluiten dat de snelheid verminderd, de bewegingsrichting kan wijzigen en de hoogte neemt toe. ('Golfhoogtes.pdf', z.d.) We spreken van ondiep water van zodra de diepte kleiner is dan $L/2 > \text{diepte}$. Het feit dat de snelheid van een golf vermindert in ondiep water heeft voor gevolg dat de golven parallel aan het bodemprofiel de kust bereiken alvorens te breken. Dit fenomeen is zeer goed zichtbaar in baaien of rond een kaap. ('Meteo 3de bach 2023 nl AP.pdf', z.d.)



Figuur 15 afbuiging van golven

Bron: ('Meteo 3de bach 2023 nl AP.pdf', z.d.)

Het temperatuurverschil tussen de lucht en het zeewater is ook een eigenaardige eigenschap in de golfopbouw. We kunnen besluiten dat in het najaar en wintermaanden de temperatuurgradiënt tussen land en oceaan veel groter zal zijn, wat leidt tot intensere luchtdrukverschillen en krachtigere winden. Hierdoor kunnen we dus besluiten dat de aangevoerde lucht veel kouder is dan de oceaan, hierdoor groeien golven veel sneller aan dan normaal.

4.4.2. Invloed van golven op de snelheid van het schip

We kunnen de invloeden onderscheiden in 3 grote groepen. De golfweerstand, de golfassistentie en de impact op de stabiliteit en de veiligheid van het schip.

Golven creëren een weerstand die de voortstuwing van een schip beïnvloed, deze weerstand noemen we golfweerstand. Wanneer een schip door golven beweegt moet het op een onregelmatige basis meer of minder water verplaatsen. Dit vereist extra energie en beïnvloed de snelheid van een schip. Dit heeft natuurlijk ook een aanzienlijk effect op het verbruik van een schip. ('Golfweerstand', 2020)

Hoewel golven over het algemeen weerstand creëren, kunnen ze onder bepaalde omstandigheden ook de snelheid van een schip verhogen. Wanneer een schip de juiste hoek ten opzichte van de golven maakt, kan het profiteren van de golfassistentie. Dit fenomeen staat bekend als 'surfing' of 'wave riding'. In dit geval duwt de golf het schip vooruit, waardoor de snelheid toeneemt. Deze golfassistentie is vooral merkbaar voor schepen met een bepaald rompontwerp dat het surfen op golven vergemakkelijkt. Het vermogen op de juiste hoek en positie ten opzichte van de golven te behouden, is essentieel om optimaal te profiteren van de golfassistentie. (Rijck, z.d.)

Naast de directe invloed op de snelheid van een schip, hebben golven ook effect op de stabiliteit en veiligheid ervan. In ruwe zeeën en bij hoge golven kan een schip te maken krijgen met schommelingen, rollen en stampen, wat de stabiliteit negatief beïnvloedt. Dit kan zowel de snelheid als de manoeuvreerbaarheid van het schip negatief gaan beïnvloeden. Om de veiligheid te waarborgen, kan het noodzakelijk zijn om de snelheid te verminderen en zo het risico op schade te verminderen. ('Volume2_6stabilityinwave.pdf', z.d.)

4.5. Besluit hoofdstuk

De invloed van wind op de prestaties en veiligheid van schepen is aanzienlijk. Windrichting en -snelheid bepalen de snelheid en stabiliteit van schepen, en het begrijpen van de processen die wind veroorzaken, zoals convectie en het corioliseffect, is essentieel voor een effectief weerrouteringssysteem.

Neerslag beïnvloedt de zichtbaarheid, stabiliteit en conditie van de lading aan boord. Het is cruciaal om de impact van regen, mist, en sneeuw op de navigatie en stabiliteit van schepen te begrijpen en te interpreteren in het routeringssysteem om risico's te minimaliseren.

Getijden en stromingen, gedreven door windpatronen en thermohaliene circulatie, spelen een sleutelrol in het bepalen van de optimale route. Het corioliseffect en de interactie tussen verschillende oceaanstromingen moeten zorgvuldig worden geanalyseerd om de efficiëntie en veiligheid van scheepsreizen te waarborgen.

Golven hebben zowel positieve als negatieve effecten op de voorstuwung en stabiliteit van schepen. Deze hebben voornamelijk een nadelige functie, ze vertragen het schip en kunnen de bemanning en lading in gevaar brengen. In sommige gevallen als de golven van uit de rug komen en niet te groot zijn kunnen deze een voordeel bieden op vlak van snelheid van het schip.

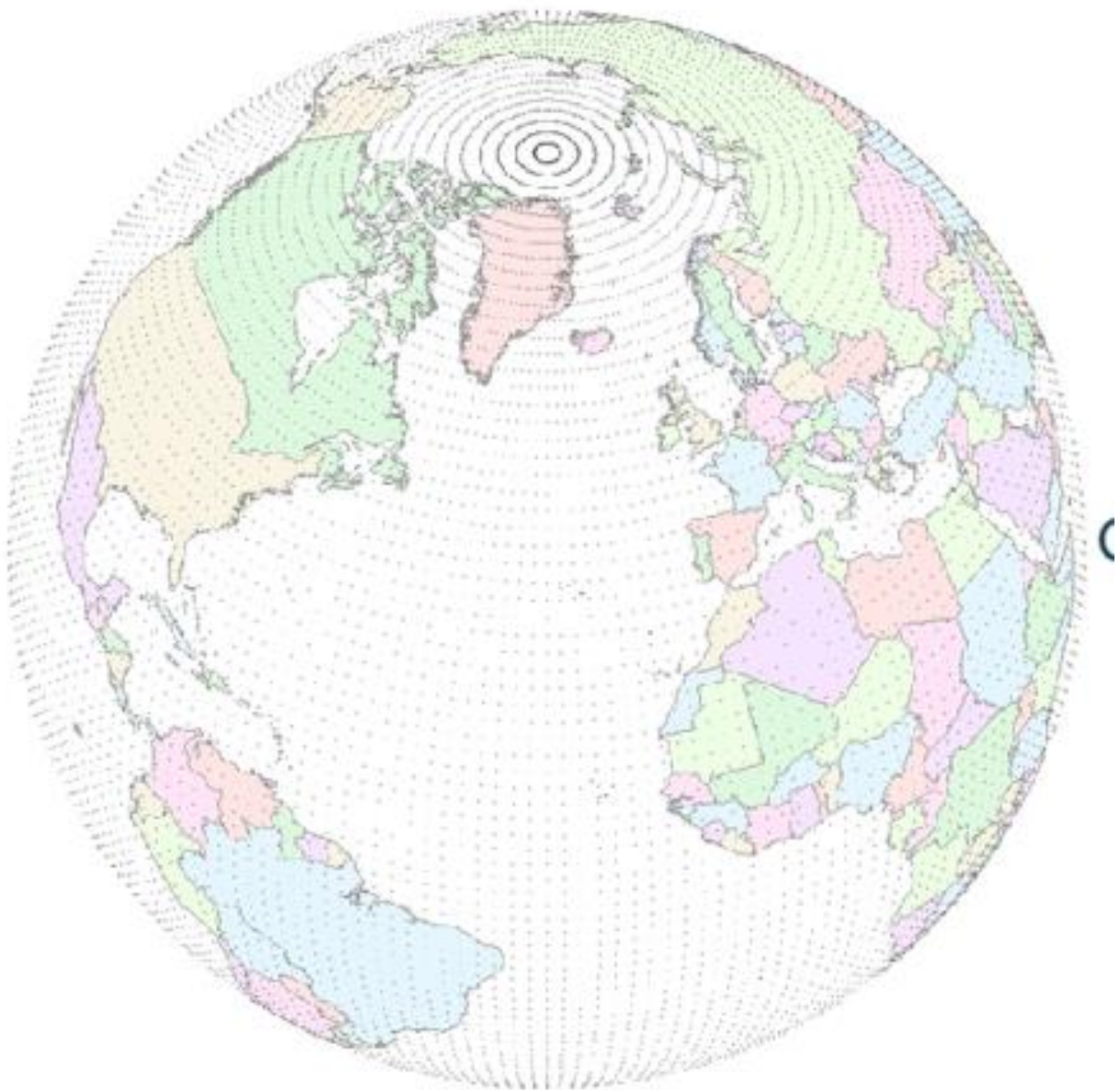
Een effectief weerrouteringssysteem vereist een integratie van gedetailleerde meteorologische gegevens, grondige kennis en atmosferische processen en een nauwkeurige modellering van de invloed van weerkundige factoren op de scheepsprestaties. Deze combinatie stelt schepen in staat om de veiligste, snelste en meest brandstofefficiënte route te kiezen, wat leidt tot aanzienlijke voordelen op het gebied van operationele kosten, veiligheid en duurzaamheid.

5. Weermodellen

Het voorspellen van weer is een zeer belangrijk aspect in de zeevaart-sector. Om nauwkeurige weersvoorspellingen te kunnen doen maken meteorologen gebruik van geavanceerde weermodellen. Deze modellen zijn wiskundige simulaties die de atmosferische omstandigheden nabootsen en helpen bij het begrijpen en voorspellen van het weer. We kunnen alvast een onderscheid maken tussen twee types weermodellen: de globale en de regionale weermodellen. De regionale modellen worden ook wel limited-area modellen genoemd, en geven voorspellingen voor een kleiner gebied weer maar met een hogere resolutie. De globale weermodellen geven dan weer voorspellingen weer voor een groter gebied maar met een niet minder grote resolutie.

5.1. Globale weermodellen

De twee belangrijkste globale weermodellen die de toekomstige toestand van de atmosfeer op de hele aarde uitrekenen zijn het GFS (globale forecast system) en het ECMWF (European Centre of Medium-range Weather Forecasting). Beide modellen zijn spectraal-gaussische, hydrostatische modellen.



Figuur 16 Gaussisch rooster

Bron: ('Modellen (algemeen)', z.d.)

Gaussisch is de benaming van het rooster dat gebruikt wordt om mee te rekenen. De meeste onderdelen van het model werken op dit rooster: berekening van convectie, straling, wolken, etc. Een gaussisch rooster zie Figuur 16 is een horizontaal coördinatenstelsel waarbij de afstand tussen lengtegraden gelijk is, maar tussen breedtegraden ongelijk. De afstand tussen de lengtegraden wordt bepaald door de kwadratuurformule van Gauss. Er zijn geen gridpunten op de polen. Het ECMWF (European Centrum for Medium Range

Forecast) en GFS (Global Forecast system) gebruiken een zogenaamde gereduceerd Gaussisch grid, dat wil zeggen dat het aantal roosterpunten richting de polen wordt verminderd omdat er anders heel veel roosterpunten bij elkaar komen, wat kan zorgen voor rekenfouten. ('Modellen (algemeen)', z.d.)

Spectraal wil zeggen dat er voor de elementaire berekeningen gebruik wordt gemaakt van een rekenmethode die golfbewegingen in de atmosfeer simuleert. Je kan de omtrek van de aarde optellen in een aantal golven, hoe hoger het aantal golven dat gesimuleerd kan worden, des te hoger de modelresolutie. ('Modellen (algemeen)', z.d.)

Voor het hydrostatische gedeelte betekent dit dat het model er altijd vanuit gaat dat de uitgeoefende zwaartekracht in evenwicht is met de kracht uitgeoefend door de drukgradiënten. Dit wordt ook wel het hydrostatisch evenwicht genoemd. We kunnen concluderen dat zwaartekracht golven het hydrostatisch evenwicht verstoren, wat de berekeningen van het model zeer complex maakt. ('Weerwoord | Over modellen (1)', z.d.)

Het ECMWF rekt voor de spectrale vergelijkingen met T799, GFS met T382. Dit betekent dat de kleinste golf een periode met afstand van 50 kilometer heeft voor ECMWF en bij GFS zo'n 105 km. De resolutie van het gaussisch rooster is, bij benadering, de helft van de kleinste golfperiode: bij ECMWF zo'n 25km en bij GFS circa 50km. Het spectrale deel van het model en het gaussische deel worden verenigd door de spectrale elementen bij elke tijdstap te vertalen naar puntwaarden op het gaussische rekenrooster. De verticale resolutie van het ECMSF is 91 lagen, met de top op circa 80 km. Het GFS rekt met 62 lagen en heeft zijn top rond 60 km.

5.1.1. ECMWF

ECMWF staat voor European Centrum for Medium Range Forecast. Dit is het meest betrouwbare weermodel dat vandaag de dag in de diverse Europese weerkamers wordt gebruikt. Het is een overkoepelend orgaan van inmiddels 22 (expansion, 2018) landen zoals

Nederland, België, Duitsland, Griekeland en Spanje. Verder zijn er ook nauwe samenwerkingen met andere Europese landen. Het ECMWF voorziet operationele weersverwachtingen voor de lidstaten en doet verder ook dienst als onderzoekcentrum. Ze zijn voortdurend op zoek naar verbeterde numerieke technieken, om de nauwkeurigheid van numerieke weermodellen te verhogen. Het instituut brengt twee maal per dag weersverwachtingen uit en monitort verschillende fysische processen in de atmosfeer. ('Het ECMWF weermodel', z.d.)

Het ECMWF ontwikkeld in samenwerking met Météo-France een globaal weermodel, Namelijk het IFS. Dit 'integrated forecasting system' is een numeriek weermodel opgesteld voor de middellange termijn, maar wordt als referentie voor vele weersvoorspellingen gebruikt. ('KMI - Weermodel', z.d.)

Het maakt gebruik van een 4D-var assimilatie systeem. Het produceert weersvoorspellingen die rijken tot tien dagen in de toekomst, waarbij ze twee keer per dag geüpdate worden.

Voordelen van ECMWF:

1. Globale dekking

- Het ECMWF biedt een wereldwijde weersvoorspelling, met hoge resolutie en uitgebreide gegevens voor zowel land als oceaan.

2. Multivariabele output

- Het model biedt een breed scala aan gegevens: temperatuur, neerslag, wind, luchtdruk, en meer. Dit maakt het nuttig voor verschillende toepassingen, zoals luchtvaart, landbouw en noodhulp.

3. Ensemblevoorspellingen

- Het ECMWF gebruikt een ensemble-systeem (meerdere modelruns met verschillende startcondities), wat helpt bij het inschatten van onzekerheden in weersvoorspellingen.

4. Hoge betrouwbaarheid

- Het ECMWF staat bekend als een van de meest accurate weersmodellen, vooral voor middellange-termijnvoorspellingen (3-10 dagen vooruit). Het scoort consequent hoog in internationale vergelijkingen.

Nadelen ECMWF:

1. Kosten en toegang

- De gedetailleerde data van het ECMWF is niet gratis toegankelijk voor het grote publiek. Veel informatie is alleen beschikbaar voor lidstaten en betalende gebruikers.

2. Minder geschikt voor korte termijn

- Hoewel het ECMWF goed presteert op middellange termijn, zijn andere modellen, zoals het HRRR of AROME, soms beter voor zeer korte termijnvoorspellingen (1-2 dagen), vooral bij complexe weersituaties.

3. Rekenintensief

- Door de hoge resolutie en complexiteit vergt het ECMWF enorme rekenkracht, wat resulteert in langere verwerkingstijden vergeleken met lichtere modellen.

5.1.2. GFS

GFS staat voor Global Forecast System. Het wordt door National Centers for Environmental Prediction (NCEP) en dat is een onderdeel van de NOAA (Nationale Oceanic and Atmospheric Administration), NWS (National Weather Service), VS.

Het GFS-model wordt zo een vier keer per dag 'gedraaid'. Voor de resolutie gebruiken ze 55 km voor 84 uur, 80 km voor 180 uur en voor de overigen tot 384 uur. De input die het GFS-model hier gebruikt zijn waarnemingen over de hele wereld. Het duurt een vijf tal uur om een run te vervolledigen en beschikbaar te stellen (de betrouwbaarste run's zijn meestal die van 00 en 12 uur te zijn omdat er meer input data beschikbaar is) ('Weermodel GFS', z.d.)

Sinds 2016 beschikt NWS (National Weather Service) over een nieuwe supercomputer, die tot drie kwadriljoen berekeningen kan uitvoeren per seconde, wat de nauwkeurigheid van de weersvoorspellingen aanzienlijk heeft verhoogd.

Voordelen GFS:

1. Gratis toegankelijk

- Het GFS-model is volledig gratis beschikbaar voor het publiek, inclusief gedetailleerde datasets. Dit maakt het breed toegankelijk voor meteorologen, bedrijven en hobbyisten.

2. Snelle updates

- Het GFS wordt vier keer per dag bijgewerkt (om de zes uur). Dit zorgt voor actuele voorspellingen die regelmatig worden aangepast aan nieuwe data.

3. Globale dekking

- Net als het ECMWF biedt het GFS wereldwijde weersvoorspellingen, wat handig is voor toepassingen in zowel stedelijke als afgelegen gebieden.

4. Geschikt voor langere termijn

- Het GFS biedt voorspellingen tot 16 dagen vooruit. Hoewel de nauwkeurigheid afneemt naarmate de termijn langer wordt, is het een nuttige indicatie voor trendanalyses.

Nadelen GFS:

1. Lagere resolutie

- Het GFS heeft een lagere ruimtelijke resolutie dan sommige andere modellen, zoals het ECMWF. Dit kan leiden tot minder nauwkeurige voorspellingen, vooral op lokale schaal.

2. Minder betrouwbare middellange termijn

- Voor voorspellingen van 3-10 dagen wordt het GFS vaak als minder accuraat beschouwd dan het ECMWF. Het scoort consequent iets lager in internationale vergelijkingen.

3. Minder accuraat bij lokale weersomstandigheden

- Het GFS kan moeite hebben met voorspellingen in complexe terreinen, zoals bergachtige gebieden of kustregio's. Hier presteren regionale modellen vaak beter.

5.2. Regionale weermodellen

Regionale weermodellen zijn modellen die het weer berekenen voor een kleiner regionaal gebied, zoals bijvoorbeeld West-Europa. Dit type van weermodellen heeft veelal resoluties kleiner dan 50 km.

Omwillen van het kleinere gebied dat deze modellen bestuderen, zijn ze in staat meer details weer te geven in hun weersverwachting, met vaak meer accurate voorspellingen op regionale schaal. Enkele populaire regionale weermodellen die we hieronder zullen bespreken zijn HiRLAM, ICON, ALADIN, HARMONIE, AROME, met zo een resolutie tussen 7 en 10 km. (Samuel, 2020)

5.2.1. HIRLAM

In samenwerking met Denemarken, Frankrijk, Finland, IJsland, Noorwegen, Spanje en Zweden heeft het KNMI voor een korte termijn weersverwachtingen het “High Resolution Limited Area Model” (HIRLAM) ontwikkeld. Met het HIRLAM is het mogelijk in te zoomen op kleine gebieden in vakjes van 22 x 22 kilometer. (‘Weermodel Hirlam’, z.d.)

Omdat deze berekeningen op een relatief kleine schaal gaan, is de inzameltijd van de gegevens ook tamelijk kort. De resultaten zijn sneller beschikbaar dan die van langetermijnverwachtingen.

Vanaf een bepaald moment werd HIRLAM opgedeeld in verschillende programma’s. Deze programma’s werden genummerd door een letter van het alfabet aan de naam ‘HIRLAM’ toe te voegen. De meest bekende is HIRLAM-C.

Voordelen HIRLAM:

1. Hoge resolutie
 - HIRLAM heeft een hoge ruimtelijke en temporele resolutie, waardoor het bijzonder geschikt is voor lokale weersvoorspellingen, zoals in stedelijke gebieden en complexe terreinen.
2. Geschikt voor korte termijn

- Het model presteert goed bij korte termijnvoorspellingen (tot 48 uur), met name bij situaties waarin details belangrijk zijn, zoals neerslagpatronen en windschattingen.

3. Aanpassing aan regionale omstandigheden

- Omdat het een regionaal model is, kan HIRLAM beter omgaan met lokale kenmerken zoals bergachtige gebieden, kustlijnen, en microklimaten dan globale modellen zoals ECMWF of GFS.

Nadelen HIRLAM:

1. Beperkte tijdshorizon

- HIRLAM is vooral ontworpen voor korte termijnvoorspellingen (maximaal 48-72 uur). Het is minder geschikt voor middellange tot lange termijnvoorspellingen.

2. Kleine geografische dekking

- Omdat het een regionaal model is, bestrijkt HIRLAM slechts een beperkt geografisch gebied. Dit maakt het minder bruikbaar voor toepassingen buiten de gefocuste regio.

3. Concurrentie van modernere modellen

- HIRLAM wordt in veel gevallen vervangen door nieuwere en geavanceerdere modellen, zoals HARMONIE (een afgeleide van HIRLAM), die betere prestaties leveren in vergelijkbare situaties.

5.2.2. ALADIN

Dit weermodel groepeerde de landen van Centraal- en Oost-Europa, en is bijgevolg maar toepasbaar op dit gebied van de wereld. Het is een samenwerking van de verschillende

ationale weerdiensten van 16 landen: Algerije, Bulgarije, Kroatië, Portugal, Roemenië, Tunesië, Turkije, Slovenië, Slowakije, België, Oostenrijk, Frankrijk, Marokko, Polen en Tsjechië. ALADIN is ontwikkeld vanuit de modellen ECMWF.

Voordelen ALADIN:

1. Hoge resolutie
 - Het ALADIN-model is ontwikkeld voor regio's en biedt een fijne ruimtelijke resolutie. Dit maakt het zeer geschikt voor het voorspellen van lokale weersomstandigheden, zoals neerslag, wind, en temperatuur.
2. Aanpassing aan regionale kenmerken
 - Het model houdt rekening met lokale terreinkenmerken, zoals bergen, valleien en kustlijnen, wat de nauwkeurigheid van voorspellingen in complexe landschappen verhoogt.

Nadelen ALADIN:

1. Beperkte tijdshorizon
 - Het model is minder geschikt voor voorspellingen op de middellange (4-10 dagen) of lange termijn. Hier presteren globale modellen zoals ECMWF of GFS doorgaans beter.
2. Regionale focus
 - Omdat ALADIN een regionaal model is, heeft het een beperkte geografische dekking. Het kan niet worden gebruikt voor wereldwijde weersvoorspellingen en moet worden aangevuld met globale modellen.
3. Minder nauwkeurig bij extreme gebeurtenissen

- Hoewel het model goed presteert in dagelijkse weersvoorspellingen, kan het bij extreme weersituaties soms minder nauwkeurig zijn dan gespecialiseerde modellen zoals HARMONIE of WRF (Weather Research and Forecasting Model).

5.2.3. HARMONIE

Het KNMI beschikt over een eigen weermodel HARMONIE (HIRLAM ALADIN Research on Mesoscale Operational NWP in Euromond) dat sinds 2012 beschikbaar is. Dit weermodel is speciaal voor de korte termijn weersverwachtingen ontwikkeld binnen grote Europese samenwerkingsprojecten. ('KNMI - Weermodellen', z.d.)

Dit model maakte zijn start in 2005 toen ALADIN en HIRLAM tot een overeenkomst kwamen om samen een nieuw *limited-area* model te ontwerpen waar de 26 lidstaten van beide systemen gebruik van kunnen maken. Het zou dienst doen als researchcentrum en weersverwachtingen produceren voor de korte en zeer korte termijnen. Het model maakt gebruik van ECMWF.

In 2014 maakt het deel uit van HIRLAM-C. het AROME-model werd ook volop bijgewerkt, zodat dit mee kan opgenomen worden in het numerieke model van ALADIN-HIRLAM.

Het systeem dat gebruikt werd om het AROME-model operationeel te maken in de lidstaten van HIRLAM, kreeg de naam HARMONIE. Dit is een acroniem voor 'HIRLAM-ALADIN Research on Mesoscale Operational NWP in Euromed'. Het AROME-model, aangepast door de HIRLAM-ALADIN consortia, wordt aangeduid met de naam HARMONIE-AROME. Ook de configuratie van het model, om het te onderscheiden van AROME, wordt HARMONIE genoemd.

Het doel van HARMONIE is dat het op lange termijn het HIRLAM-systeem zal vervangen.

Voordelen HARMONIE:

1. Zeer hoge resolutie

- HARMONIE biedt een ruimtelijke resolutie van ongeveer 1-2,5 kilometer, wat zorgt voor uiterst gedetailleerde weersvoorspellingen. Dit is vooral nuttig voor lokale fenomenen zoals stedelijke hitte-eilanden, windvelden, en buien.

2. Uitstekend in korte termijnvoorspellingen

- Het model presteert zeer goed voor korte termijnvoorspellingen (tot ongeveer 48 uur), vooral bij dynamische en snel veranderende weersomstandigheden.

3. Sterke focus op lokale processen

- Dankzij de hoge resolutie kan HARMONIE complexe lokale fenomenen, zoals zeewindcirculaties, valwinden, en microklimaten in bergachtige gebieden, nauwkeurig modelleren.

4. Gekoppeld aan ECMWF

- Het model gebruikt grensvoorwaarden van het ECMWF-model, wat zorgt voor een goede integratie met betrouwbare globale voorspellingen.

5. Nauwkeurig bij extreme weersomstandigheden

- HARMONIE presteert goed bij het voorspellen van extreme weersomstandigheden, zoals zware regenval, onweersbuien en stormachtige winden.

Nadelen Harmonie:

1. Beperkte tijdshorizon

- Het model is voornamelijk ontworpen voor korte termijnvoorspellingen (maximaal 48-72 uur). Voor langere termijnvoorspellingen zijn globale modellen zoals ECMWF of GFS nodig.

2. Kleine geografische dekking

- HARMONIE is een regionaal model en bestrijkt slechts een beperkt gebied. Het is niet bruikbaar voor wereldwijde voorspellingen en vereist invoer van globale modellen.

3. Complexiteit in interpretatie

- De output van HARMONIE is zeer gedetailleerd en vereist specialistische kennis om correct te interpreteren. Dit kan een uitdaging zijn voor niet-experts.

4. Overgangsproblemen aan de randen

- Zoals bij veel regionale modellen, kunnen er aan de randen van het modelgebied onnauwkeurigheden ontstaan vanwege afhankelijkheid van grensvoorwaarden uit andere modellen.

5. Minder geschikt voor grote trends

- Omdat het model zich richt op lokale weersverschijnselen, is het minder geschikt voor het analyseren van grootschalige atmosferische trends of lange-termijnontwikkelingen.

5.2.4. AROME

Météo-France beschikt over nog een ander type weermodel, welgekend als AROME. AROME “Application of Research to Operations at Mesoscale” werd operationeel in december 2008. AROME genereert weersverwachtingen voor de komende vijf dagen. AROME is een zeer gedetailleerd numeriek weermodel dat zich richt op het voorspellen van het weer op

mesoschaal. Mesometeorologie is het onderdeel van de meteorologie dat zich bezighoudt met middelgrote weersystemen. De tijdsduur van deze systemen is beperkt van ongeveer een half uur tot enkele dagen en afhankelijk van de definitie van enkele km tot enkele honderden km groot.

Het AROME-model maakt gebruik van een zeer fijne resolutie, tussen de 1 en 2,5 km. Deze hoge resolutie stelt het model in staat op gedetailleerde informatie te bieden over lokale weersverschijnselen en fenomenen op mesoschaal. Ook maakt het AROME-model gebruik van real-time waarnemingen van meteorologische variabelen die gecombineerd worden met modeloutput's om zo de meest nauwkeurige en up-to-date weersvoorspellingen te genereren. Deze gegevenssimulatie maakt gebruik van geavanceerde technieken, zoals variationaal data assimilation, op zo de onzekerheid in het initiële condities van het model te verminderen en de voorspellingsnauwkeurigheid te verbeteren. ('AROME weermodel.pdf', z.d.)

AROME maakt gebruik van geavanceerde fysische processen en parameterisaties om de atmosferische processen op mesoschaal nauwkeurig te simuleren. Het houdt rekening met factoren zoals straling, turbulentie, convectie en microfysica van wolken om zo een gedetailleerd beeld te krijgen van de atmosferische omstandigheden. ('AROME weermodel.pdf', z.d.)

AROME is een van de meest gebruikte weermodellen en heeft een tal van voordelen omwille van verschillende redenen:

- Omwille van zijn hoge resolutie en gegevensassimilatie kan het model gedetailleerd en nauwkeurige voorspellingen maken en zelfs zeer lokale weersveranderingen gaan voorspellen.
- AROME richt zich vooral op mesoschaalweerfenomenen, zoals lokale windstoten, zware neerslag en lokale weereffecten. Dit maakt het weermodel zeer geschikt voor lokale zeevaart zoals wedstrijd zeilers of eventuele baggeraars en offshore platformen.

- Het AROME platform is voortdurend bezig met verbetering en innovatie omwille van het feit dat het als onderzoeksplatform wordt gebruikt.

5.3. Besluit hoofdstuk

Weermodellen kunnen globaal of regionaal zijn. Globale weermodellen, zoals het GFS (Global Forecast System) en het ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasting), bieden weersvoorspellingen voor grote geografische gebieden. Deze modellen zijn gebaseerd op een spectraal-gaussisch hydrostatisch rooster, wat zorgt voor gedetailleerde simulaties van atmosferische processen. Het ECMWF wordt algemeen beschouwd als het meest betrouwbare weermodel, dankzij de continue verbetering van numerieke technieken en een breed samenwerkingsverband binnen Europa.

Regionale weermodellen richten zich op kleinere geografische gebieden met een hogere resolutie, wat resulteert in meer gedetailleerde en nauwkeurige voorspellingen. Modellen zoals HIRLAM, ALADIN, Harmonie en AROME bieden voorspellingen die specifiek zijn afgestemd op lokale weersomstandigheden. Deze modellen zijn bijzonder waardevol voor toepassingen zoals wedstrijdzeilen en offshore operaties, waar lokale weersverschijnselen en mesoschaalweerfenomenen een grote rol spelen.

Het gebruik van geavanceerde weermodellen is onmisbaar voor de maritieme industrie. Ze stellen schepen in staat om optimaal te navigeren door nauwkeurige en gedetailleerde weersvoorspellingen te integreren in hun routeplanning. Zowel globale als regionale weermodellen spelen een essentiële rol in het minimaliseren van risico's, optimaliseren van prestaties en verbeteren van de besluitvorming. De voortdurende technologische vooruitgang en innovatie binnen deze modellen zullen de maritieme sector in staat stellen om nog beter in te spelen op de uitdaging van de zee en de dynamische weersomstandigheden, wat leidt tot verbeterde veiligheid, efficiëntie en duurzaamheid in maritieme operaties.

6. Vergelijking tussen koopvaardij en zeilwerend

6.1. Weerroutering bij koopvaardij schepen

In de koopvaardijwereld ligt de nadruk op efficiënte en veilige navigatie van schepen. We kunnen besluiten dat hier een grote economische factor parte zal spelen en dat rederijen een zeer grote focus zullen leggen op de snelste en economische route.

Koopvaardij schepen die gebruik maken van weer-routing-systemen varen meestal op internationale routes en hebben hierdoor de behoefte om over weersinformatie op grotere schaal te beschikken, hierdoor zullen koopvaardij schepen vooral gebruik maken van globale weer-routing-systemen zoals GFS en ECMWF. Uit ervaringen kunnen we ook afleiden dat koopvaardij schepen ook meer gebruik zullen maken van officiële meteorologische bronnen, zoals nationale meteorologische diensten en internationale weerinstituten, die wereldwijde weersgegevens leveren.

6.2. Weerrouteringen in de zeilwereld

In de zeil wereld is het een ander verhaal, de basis blijft het zelfde en dat is de zogenaamde “least time track” zoeken, maar aangezien we in de zeil wereld veel afhankelijker zijn van wind en golven zal hier ook meer belang aan gehecht worden.

In de zeilwereld gaat een weerrouteringssysteem de ideale windkracht en de ideale wind hoeken ten opzichte van de wind gaan zoeken zodat we de optimale polars kunnen verkrijgen en zo op de snelst mogelijke manier van A naar B kunnen varen. De nadruk ligt hier meer op het optimaliseren van de zeilprestaties en het benutten van de windomstandigheden.

Aangezien er in de zeilwereld meer belang gehecht wordt aan locale weerfenomenen zullen we hier ook meer gaan kijken naar regionale weermodellen en minder naar de globale weermodellen, weermodellen zoals AROME en HARMONIE zijn veelgebruikte weermodellen.

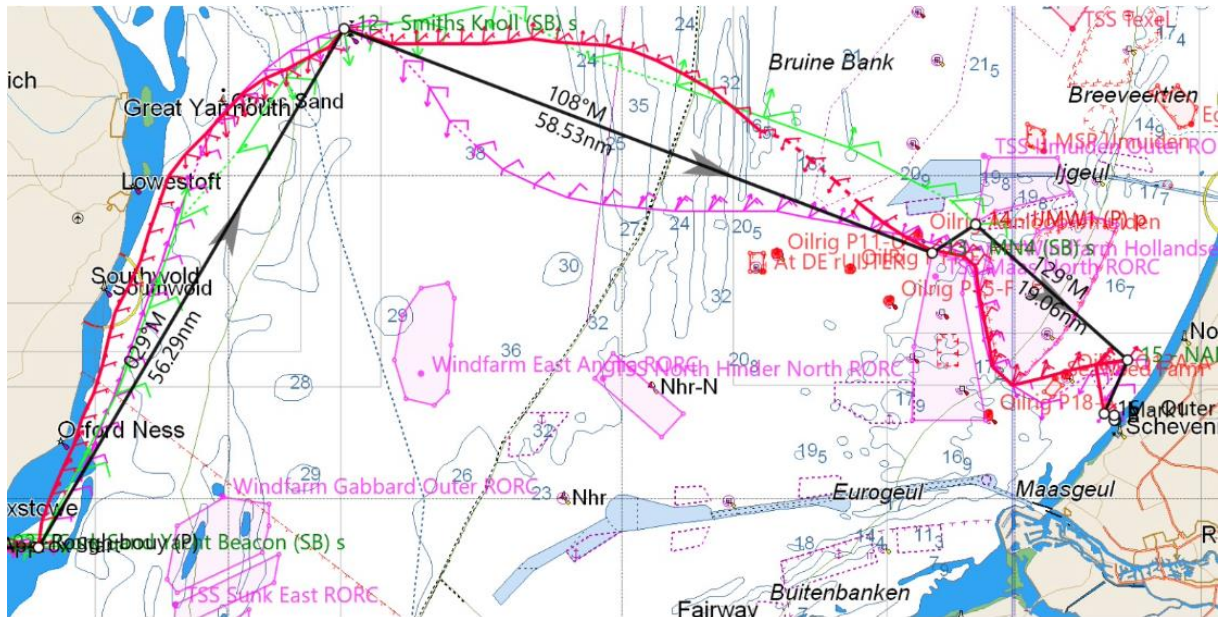
Zeil-weer-routerings-systemen maken daarentegen vaak gebruik van een combinatie van bronnen, waaronder satellietgegevens, weermodellen en real-time observaties meer van toepassing zullen zijn. In de zeilwereld beschikken we ook over andere types weerroutering systemen (bv. Adrena, predictwind, etc) dit is omwille van de kost en omwille van het feit dat er andere correcties worden toegepast op golfweerstand en wind weerstand, zo hebben we bijvoorbeeld voor de golfweerstand een VPP correctie die het snelheidsverlies die de golven die onder een bepaalde hoek op de boot binnen komen nauwkeuriger zal berekenen.

6.3. Voorbeeld wedstrijd North Sea regatta

De North Sea Regatta is een jaarlijkse zeilwedstrijd die een prominente plaats inneemt in de internationale zeilwereld. Het offshoregedeelte van deze regatta omvat langeafstandsraces over de Noordzee, waarbij de route in 2024 van scheveningen naar ipswich (Engeland) en terug voer. Deze uitdagende races vragen niet alleen om uitstekende technische en nautische vaardigheden, maar ook om strategisch inzicht en effectieve samenwerking binnen een team.

Tijdens deze editie speelde het toepassen van weerrouteringsystemen een cruciale rol. Deze technologieën werden ingezet om op basis van weersvoorspellingen en stromingsgegevens de optimale koers te bepalen. De offshorewedstrijd fungeert daarmee als een uitstekend voorbeeld van de toepassing van weerroutering in de zeilsport. Door gebruik te maken van meteorologische modellen en actuele data wordt het mogelijk om scenario's te simuleren en de snelste, meest efficiënte route te berekenen.

De combinatie van theoretische kennis van weerroutering en de praktijkervaring in de complexe en dynamische omgeving van de Noordzee maakt deze wedstrijd tot een waardevol leerproces. Het illustreert hoe technologie, besluitvorming en teamwork samenkomen in competitief zeilen.



Figuur 17: Weerroutering van de north sea regatta

Tijdens de voorbereiding van de offshorewedstrijd van de North Sea Regatta wordt gebruik gemaakt van weerrouteringsystemen om de meest efficiënte koers te bepalen. Hierbij worden meerdere modellen en scenario's gesimuleerd om inzicht te krijgen in de invloed van meteorologische factoren, zoals windrichting, windsnelheden en stromingen, op de optimale route.

De analyse toont hoe de verschillende modellen subtiel afwijkende routes voorstellen, afhankelijk van de nauwkeurigheid van de weersvoorspellingen en de wijze waarop stromingen worden meegenomen in de berekeningen. Deze variatie benadrukt de complexiteit van beslissingen tijdens offshore zeilwedstrijden en onderstreept de noodzaak van continue monitoring en aanpassing aan actuele omstandigheden.

Op de bovenstaand "figuur 17" kunnen we de route zien (in het zwart) en daarlangs de voorgestelde routes (in kleur). Deze voorgestelde routes zijn allemaal berekend aan de hand van een verschillend weermodel. Op deze manier kan je de routes met elkaar vergelijken en verwerken met eigen kennis om zo de beste en snelste route af te leggen.

Draw	Name	Colour	Route nm	Optimal nm	Elapsed time	Finish	Delta	Created
☒ G	onderlangs Arôme/Arpège High 17:17:22		155.32	163.67	1d 01h 29m 38s	11-May-2024 14:09:38	-08h 00m 47s	09-May-2024 17:17:22
☒ G	onderlangs GFS High 17:16:49		155.32	133.13				09-May-2024 17:16:49
☒ G	onderlangs ICON High 17:17:52		155.32	163.65	1d 08h 08m 25s	11-May-2024 20:48:25	-01h 22m 00s	09-May-2024 17:17:52
☐ G	bovenlangs Arôme/Arpège High 17:18:44		147.90	165.90	1d 01h 24m 56s	11-May-2024 14:04:56	-08h 05m 29s	09-May-2024 17:18:44
☐ G	bovenlangs GFS High 17:18:14		147.90	174.12	1d 05h 40m 24s	11-May-2024 18:20:24	-03h 50m 01s	09-May-2024 17:18:14
☐ G	bovenlangs ICON High 17:19:13		147.90	166.33	1d 09h 30m 25s	11-May-2024 22:10:25		09-May-2024 17:19:13

Figuur 18: routetijden van eenzelfde route berekent door verschillende weermodellen

Bron: eigen onderzoek

Op “figuur 18” zien we de gebruikte modellen (in de gebruikte kleur van de route). Hier zien we het aantal zeemijlen dat we eventueel extra afleggen om toch in een gunstiger weersysteem te komen. Ook de verwachte aankomst tijden worden hier weergegeven.

Het type weermodel is gecorreleerd aan de berekende routetijd. Veel variatie tussen de routetijden (en modellen) geeft een indicatie voor onzeker weer, wat het moeilijk maakt om een concreet tactisch plan uit te werken.

In onderstaande figuur, “figuur 19” hebben we een uitsnede van het weerrouteringsysteem tijdens de North Sea Regatta waar we een overzicht krijgen van de verwachte snelheden en dergelijke.

West-Europa (zomer) Mark	Sail	Twd°M	Tws	Twa	Targ	Bsp	Bsp%	Brg°M	Dist nm	Aws	Aws	Mode	Latitude	Longitude
07-May-2024 18:55	01 - start ?	J1	350 10.4		-42	41 6.2	95	32 1.39		-26 15.6	Sail	52 07.253n	004 16.013e	
07-May-2024 19:08		J1	350 10.4		-42	41 6.2	95	31 1.42		-26 15.6	Sail	52 08.405n	004 17.288e	
07-May-2024 19:22		J1	349 10.4		-43	41 6.3	95	32 1.50		-27 15.6	Sail	52 09.582n	004 18.571e	
07-May-2024 19:36		J1	349 10.3		-34	41 6.1	95	315 2.60		26 15.5	Sail	52 10.815n	004 19.955e	
07-May-2024 20:05	02 - Mark 1	A1	349 10.4		-88	41 7.5	95	77 0.38		-53 13.0	Sail	52 12.709n	004 17.070e	
07-May-2024 20:08		A1	349 10.3		-88	41 7.5	95	77 0.38		-53 12.9	Sail	52 12.779n	004 17.685e	
07-May-2024 20:11	03 - NAM 22 P	J1	349 10.2		-30	41 6.1	95	319 5.83		26 15.3	Sail	52 12.850n	004 18.300e	
07-May-2024 21:20		J1	348 9.8	(-32)		41 6.0	95	18 9.53		-26 14.8	Sail	52 17.368n	004 12.295e	
07-May-2024 22:59	04 - VM LD NE P	J1	334 10.2		59	41 7.0	95	276 1.64		35 15.1	Sail	52 26.285n	004 17.719e	
07-May-2024 23:13		J2	333 10.6		75	41 7.3	95	256 1.28		45 14.4	Sail	52 28.510n	004 15.065e	
07-May-2024 23:23	05 - VM LD N P	C0	333 11.0		76	41 7.4	95	255 7.94		48 14.5	Sail	52 26.300n	004 13.000e	
08-May-2024 00:27		C0	332 12.1		76	41 7.5	95	255 7.94		50 15.5	Sail	52 24.525n	004 00.331e	
08-May-2024 01:31	06 - **MN4 P ** OUTSIDE TSS	C0	333 12.3		81	41 7.6	95	251 8.22		52 15.4	Sail	52 22.728n	003 47.680e	
08-May-2024 02:35		C0	335 13.2		83	40 7.7	95	252 8.22		55 16.1	Sail	52 20.358n	003 34.825e	
08-May-2024 03:39		C0	342 13.1		90	40 7.8	95	252 8.22		59 15.3	Sail	52 18.046n	003 21.953e	
08-May-2024 04:42		C0	344 12.1		92	156 7.7	95	253 8.22		59 14.2	Sail	52 15.790n	003 09.065e	
08-May-2024 05:46		C0	340 11.3		92	152 7.6	95	248 8.21		57 13.4	Sail	52 13.593n	002 56.159e	
08-May-2024 06:50		C0	340 11.5		89	41 7.7	95	251 8.21		56 13.9	Sail	52 10.755n	002 43.607e	
08-May-2024 07:55		A1	350 10.9		95	151 7.6	95	255 8.23		59 12.7	Sail	52 08.334n	002 30.845e	
08-May-2024 09:01		A1	354 9.8		104	150 7.4	95	251 8.19		62 10.8	Sail	52 06.417n	002 17.835e	
08-May-2024 10:08		A1	355 9.7		99	150 7.4	95	256 8.20		58 11.2	Sail	52 03.904n	002 05.162e	
08-May-2024 11:15		A1	4 8.5		96	150 7.2	95	266 8.60		55 10.4	Sail	52 02.969n	001 52.209e	
08-May-2024 12:42	07 - North Shipwash P	A1	53 6.7		-169	147 4.7	95	244 1.99		104 3.8	Sail	52 01.730n	001 38.270e	
08-May-2024 13:13		A1	69 6.8		-147	147 4.7	95	216 2.19		-105 3.9	Sail	52 00.904n	001 35.320e	
08-May-2024 13:38	08 - Mid Bawdsey P	A1	81 7.3		-140	148 5.3	95	221 1.38		-93 4.7	Sail	51 59.179n	001 33.159e	
08-May-2024 13:53		A1	86 7.4		-136	148 5.6	95	222 1.29		-87 5.1	Sail	51 58.159n	001 31.661e	
08-May-2024 14:07	09 - South Bawdsey P	C0	90 7.3		-75	42 6.5	95	165 1.05		-40 11.0	Sail	51 57.230n	001 30.220e	
08-May-2024 14:17		C0	89 7.3		-76	42 6.5	95	165 1.05		-41 10.9	Sail	51 56.210n	001 30.610e	
08-May-2024 14:26	10 - Rough SB	A1	88 7.2		140	148 5.3	95	308 1.99		93 4.7	Sail	51 55.190n	001 31.000e	
08-May-2024 14:49		A1	92 7.2		-147	148 4.9	95	239 2.11		-107 4.1	Sail	51 56.441n	001 28.493e	
08-May-2024 15:14	11 - Cork sand (SB77)	A1	98 7.2		144	148 5.0	95	313 1.04		101 4.2	Sail	51 55.414n	001 25.519e	
08-May-2024 15:27		A1	100 7.5		138	148 5.5	95	322 0.21		91 5.0	Sail	51 56.141n	001 24.325e	
08-May-2024 15:29	12 - Cork sand Yacht Beacon P	A1	101 7.5		-147	148 5.1	95	248 1.32		-107 4.3	Sail	51 56.310n	001 24.122e	
08-May-2024 15:44		A1	106 7.7		-146	149 5.3	95	252 1.84		-104 4.5	Sail	51 55.844n	001 22.116e	
08-May-2024 16:04	13 - Dean SB	A1	114 7.8		146	149 5.3	95	328 0.19		105 4.5	Sail	51 55.306n	001 19.264e	
08-May-2024 16:06		A1	115 7.8		-148	149 5.2	95	263 0.17		-109 4.4	Sail	51 55.466n	001 19.111e	
08-May-2024 16:08	14 - Landguard SB	A1	116 7.8		140	149 5.6	95	336 0.15		94 5.0	Sail	51 55.450n	001 18.840e	
08-May-2024 16:09		A1	116 7.8		-164	149 5.2	95	312 0.17		111 4.3	Sail	51 55.591n	001 18.744e	
08-May-2024 16:13	15 - Clifffoot SB	A1	117 7.8		121	149 6.5	95	356 0.23		70 7.2	Sail	51 55.710n	001 18.540e	
08-May-2024 16:15		A1	117 7.8		121	149 6.5	95	356 0.23		70 7.1	Sail	51 55.935n	001 18.525e	
08-May-2024 16:17	16 - Finish South Shelf SB	A1	118 7.8		122	149 6.5	95			70 7.1	Sail	51 56.160n	001 18.510e	
Name	G High 22:44:18													
Route distance	136.43nm													
Optimal distance	145.57nm													
Optimal route time	21h 22m 21s													
Motoring time	00s													
Motoring fuel	0 litres													
Created	05-May-2024 22:44:18													
Sail chart	Sailchart_worlds 2019													
Polar	NED7935-ORC21													
PolarP														
PolarS														
Polar % day	95													

Figuur 19: parameters (true wind angle, apparent wind angle, true wind speed, boat speed, sails used, bearing to the waypoint, position) van eenzelfde route berekent door verschillende weermodellen

Bron: eigen onderzoek

In de bovenstaande figuur wordt onderaan de polar speed weergegeven, een cruciale parameter binnen de berekeningen. De polar speed geeft aan op welk percentage van zijn maximale capaciteit het schip zal varen. Vaak wordt aangenomen dat het schip op 95% van zijn capaciteit zal opereren, aangezien weersvoorspellingen enigzins kunnen afwijken van de verwachtingen. Deze benadering helpt om de routing beter te volgen en te voorkomen dat het schip te ver achterop raakt.

De gegevens bij 100% capaciteit worden theoretisch berekend door de scheepswerf. Als zeilers passen wij alleen aan hoeveel procent onder of boven deze 100% we varen. Bovendien kan de polar in de loop van de tijd worden aangepast en geoptimaliseerd op basis van nieuwe data, waardoor deze nauwkeurigheid van de routing verder verbetert.

In de bovenstaande figuur wordt tevens weergegeven welk type zeil optimaal zou zijn voor een specifieke koers onder de voorspelde weersomstandigheden. Vooraf worden de gebruiksbereiken van de verschillende typen zeilen ingevoerd in het systeem. Op basis hiervan kan het programma, rekening houdend met de windsnelheid, het meest geschikte zeil aanbevelen.

Deze aanpak stelt ons in staat om voorafgaand aan de start een selectie te maken van de zeilen die we meenemen en welke we achterlaten. Dit minimaliseert overbodig gewicht aan boord en verzekert tegelijkertijd een optimale zeilconfiguratie.

In het programma, zoals weergegeven in Figuur 19, kunnen we belangrijke windgegevens worden geanalyseerd, evenals de verwachte hoeken ten opzichte van de wind die het schip zal maken en de bijbehorende snelheid. Onder de weergegeven parameters bevinden zich de true wind speed en true wind angle, de bootsnelheid, de koers naar het volgende waypoint (bearing to the mark), de apparent wind angle, en de verwachte positie van het schip op een specifiek tijdstip.

Deze gegevens bieden een gedetailleerd overzicht van de omstandigheden en prestaties, wat essentieel is voor nauwkeurige plannen en route-optimalisatie.

Een weerrouteringssysteem vormt in de zeilwereld een uiterst waardevol en efficiënt hulpmiddel. Het stelt zeilers in staat om het maximale potentieel van de boot te benutten door nauwkeurigere beslissingen te ondersteunen op basis van gedetailleerde weersgegevens en prestatieberekeningen. Dit kan leiden tot een meer geoptimaliseerde koers en een hogere gemiddelde snelheid dan voorheen mogelijk was.

Het is echter belangrijk om te erkennen dat een weerrouteringssysteem niet onfeilbaar is en slechts dient als een hulpmiddel. Dat voorspellingen niet gebaseerd zijn op modellen die afhankelijk zijn van de kwaliteit en de nauwkeurigheid van de invoergegevens, zoals weersvoorspellingen, en kunnen daardoor niet altijd volledig worden vertrouwd.

Hoewel het systeem helpt bij het maken van weloverwogen tactische keuzes, blijft het van cruciaal belang dat de zeiler alert blijft en eigen waarnemingen en ervaringen in de besluitvorming betreft. Het combineren van technologische hulpmiddelen met menselijke interpretatie en intuïtie is essentieel om succesvol en veilig te navigeren onder wisselende omstandigheden.

7. Onderzoek

7.1. Inleiding

De aanleiding van deze studie is het toenemende gebruik en de groeiende afhankelijkheid van weerrouteringsystemen in de maritieme sector. Deze systemen worden steeds belangrijker vanwege de druk om brandstofefficiëntie te verhogen en de impact op het milieu te verkleinen. De maritieme industrie bevindt zich op een kruispunt van technologische innovatie en milieuwetgeving. Enerzijds wordt de sector geconfronteerd met strengere emissienormen opgelegd door internationale organisaties zoals de IMO (International Maritime Organization). Anderzijds is er een economische drijfveer om operationele kosten te verminderen, wat heeft geleid tot een sterke focus op brandstofbesparing.

Reiskosten vormen een significant deel van de totale operationele uitvoering in de maritieme sector; naar schatting bedragen deze kosten maar liefst 40% van de totale normale kosten (Waterstaat, 2020). Een belangrijk deel van deze reiskosten wordt toegeschreven aan brandstofverbruik, met aanvullende kosten voor havengelden en logistieke operaties. De efficiëntie waarmee schepen brandstof gebruiken, heeft daarin niet alleen een direct invloed op de winstgevendheid van rederijen, maar ook op hun vermogen om concurrerend te blijven in een industrie die gekenmerkt wordt door strakke marges.

Weerrouteringsystemen spelen een cruciale rol in het verminderen van het brandstofverbruik door schepen te helpen de meest efficiënte routes te kiezen, rekening houdend met weersomstandigheden zoals wind, golven en stromingen. Door het optimaliseren van deze routes kunnen schepen niet alleen brandstof besparen, maar ook

havengelden en wachttijden verminderen, wat uiteindelijk bijdraagt aan aanzienlijke kostenbesparingen. Deze aanpak biedt niet alleen directe economische voordelen, maar draagt ook bij aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot, een belangrijke stap in het beperken van de wereldwijde klimaatcrisis.

De opkomst van weerrouteringsystemen is ook mogelijk gemaakt door technologische vooruitgang, zoals verbeterde satellietcommunicatie en voorspellende modellen. Deze tools maken het eenvoudiger en betrouwbaarder om real-time beslissingen te nemen die het brandstofverbruik optimaliseren en de impact van externe omstandigheden minimaliseren. Gezien de economische en ecologische uitdagingen, is het essentieel om te onderzoeken hoe zeevaardenden omgaan met deze systemen, welke obstakels ze ervaren bij de implementatie, en welke factoren bijdragen aan de effectiviteit van deze technologie in hun dagelijkse operatie.

7.2. Methodiek

7.2.1. Steekproefgrootte

Voor het bepalen van de steekproefgrootte is een betrouwbaarheidsniveau van 95% en een foutmarge van 5% gehanteerd. Daarnaast is een conservatieve schatting van 50% populatievariabiliteit aangehouden. De berekening zonder rekening te houden met het responspercentage resulteert in een vereiste steekproefgrootte van 385 respondenten. Omdat een responspercentage van 50% werd verwacht, is de steekproefgrootte aangepast naar 770 respondenten om uiteindelijk voldoende data te verkrijgen. Door de verwachte grootte van de doelgroep is er geen rekening gehouden met een eindige populatie.

De populatiegrootte van de doelgroep binnen het onderzoek is zeer groot omdat zeevaart op wereldniveau wordt uitgeoefend. Hedendaagse rederijen werken vaak met een internationale bemanning om kosten te drukken, waardoor het niet mogelijk is de populatie van mijn onderzoek te beperken tot één land.

De steekproefgrootte is aan de hand van de volgende standaardformule berekend:

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{E^2}$$

Invullen:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 0,5 \cdot (1-0,5)}{0,05^2} = \frac{3,8416 \cdot 0,25}{0,0025} = 384,16$$

Omdat we een responspercentage van 50% verwachten, moeten we de steekproefgrootte corrigeren:

$$n_{\text{adjusted}} = \frac{n}{\text{responspercentage}}$$

invullen:

$$n_{\text{adjusted}} = \frac{385}{0,5} = 770$$

Aan de hand van deze berekening kan uitgegaan worden van een minimale populatiegrootte van $n = 770$ om betrouwbare en significante conclusies te trekken.

7.2.2. Enquête

In de uitvoering van het onderzoek is er gekozen voor een digitale enquête vanwege de directe resultaten en de efficiënte verspreidings methode. Zowel multiple-choicevragen als open vragen zijn gebruikt:

- Multiple-choicevragen maken het mogelijk de gegevens duidelijker en efficiënter te analyseren.
- Open vragen laten unieke kenmerken van de respondenten naar voren komen.

De enquête is ontworpen en verzonden via het online platform “google forms”, vanwege de gebruiksvriendelijkheid voor de respondenten. De link naar de enquête is verspreid via LinkedIn, instagram, persoonlijke contacten en Facebook-groepen van oud studenten van de hogere zeevaartschool. Er werd aan de deelnemers gevraagd de enquête verder te verspreiden onder zeevarende met kennis over weerroteringssystemen.

Het bereiken van voldoende respondenten bleek een uitdaging te zijn. In het begin werd contact opgenomen met de alumni-afdeling van de AMA, maar deze groep bleek niet meer actief. Alternatieve verspreidingsmethoden, zoals het delen van posts via alumni-netwerken en sociale media, leverde beperkt resultaat op. Uiteindelijk werd een bericht gedeeld via het instagramaccount “Pilot River 101”, wat nog enkele extra reacties opleverde.

Uiteindelijk heeft het onderzoek slechts 17 antwoorden opgeleverd. Dit lage aantal kan worden toegeschreven aan:

- Het gebrek aan ervaring van respondenten met weerroteringssystemen.
- Tijdgebrek bij potentiële respondenten.

De enquête was opgesteld in het engels, aangezien dit de gangbare taal is onder zeevarenden. Het beantwoorden van open vragen kon in een taal naar keuze, maar er is uitsluitend in het engels geantwoord. Hierdoor is er geen vertekening van antwoorden opgetreden.

We kunnen concluderen over de steekproef dat met slechts 17 antwoorden de steekproef niet representatief is voor de volledige populatie. Dit aantal ligt ver onder de berekende vereisten van 770 respondenten. De resultaten moeten dan ook voorzichtig worden geïnterpreteerd en kunnen niet worden gegeneraliseerd naar de gehele populatie. Dit

onderzoek biedt echter wel een waardevolle eerste indicatie en basis voor verder onderzoek.

7.2.3. interview

In het tweede stadium van mijn onderzoek is een zeiler geïnterviewd om aanvullende inzichten te verkrijgen. Deze zeiler, 23 jaar oud, heeft deelgenomen aan een etappe van de prestigieuze Ocean Globe Race, een uitdagende zeilwedstrijd die bekendstaat om zijn nadruk op klassieke navigatietechnieken. Wat deze race bijzonder maakt is dat er geen gebruik wordt gemaakt van moderne hulpmiddelen zoals weerrouteringsystemen, GPS, of geavanceerde electronica. De deelnemers vertrouwen volledig op traditionele navigatiemethoden, zoals het aflezen van kaarten, het gebruik van sextanten en het interpreteren van natuurlijke aanwijzingen.

De Ocean Globe Race is geïnspireerd door de iconische whitebread Round the World Race, die in 1973 voor het eerst werd georganiseerd en sindsdien een legendarische status heeft verworven binnen de zeilwereld. De heropleving van deze klassieke zeilwedstrijd biedt een unieke kijk op de vaardigheden en uitdagingen waarmee zeilers werden geconfronteerd in een tijdperk voor de opkomst van geavanceerde technologieën.

De geïnterviewde zeiler heeft deelgenomen aan Leg 3 van de race. Deze etappe begon in Auckland Nieuw-Zeeland, en eindigde in Punta del Este, Brazilië. Deze route staat bekend om zijn ruige weersomstandigheden en lange overtochten over open zee, wat het één van de meest uitdagende wedstrijden maakt. Tijdens deze reis heeft de zeiler waardevolle ervaringen opgedaan in traditionele navigatie en de invloed van weer en zeecondities op besluitvorming en routeplanning zonder toegang tot moderne hulpmiddelen.

Het interview met deze jonge zeiler biedt niet alleen een persoonlijke kijk op de uitdagingen en vaardigheden die vereist zijn voor klassieke zeilwedstrijden, maar werkt ook licht op de manier waarop hedendaagse zeevarenden omgaan met de afwezigheid van technologieën

zoals weerroteringssystemen. Deze inzichten dragen bij aan een beter begrip van de rol en de waarde van dergelijke systemen in de hedendaagse maritieme sector.

7.2.4. Interpretatie van de resultaten

Parameters werden berekend op basis van gemiddeldes en weergegeven in percentages.

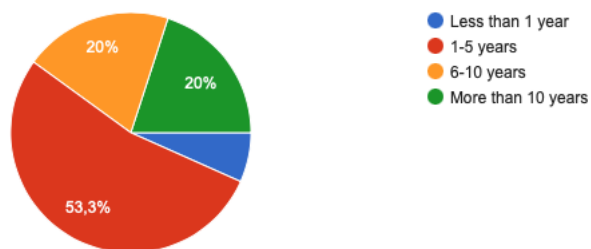
7.3. Resultaten

7.3.1. Onderzoek

Uit de analyse van de verzamelde antwoorden blijkt dat de respondenten voornamelijk afkomstig zijn uit een relatief jonge groep zeevarende. Van de deelnemers heeft 53,3% tussen de 1 en 5 jaar werkervaring aan boord, terwijl 20% tussen de 6 en 10 jaar ervaring heeft. Daarnaast heeft 20% meer dan 10 jaar werkervaring aan boord.

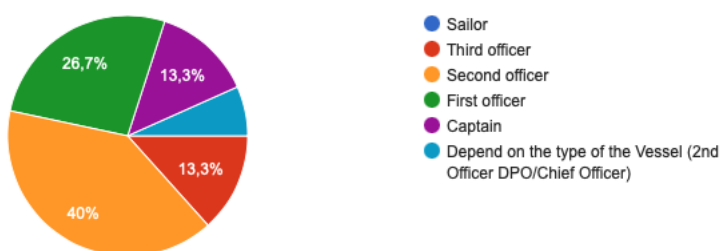
Wat betreft de functies van de respondenten, blijkt dat het grootste deel werkzaam is als second officer (40%) en first officer (26,7%). Deze functies impliceren een directe betrokkenheid bij operationele en navigatiegerelateerde taken, waaronder het gebruik van weerroteringsystemen op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat deze respondenten waarschijnlijk de meeste ervaring hebben met het gebruik van weerroteringsystemen en deze systemen ook het meeste actief toepassen in hun werkzaamheden.

Deze demografische en professionele kenmerken van de steekproef bieden waardevolle inzichten in de mate van bekendheid en het gebruik van weerroteringsystemen binnen verschillende ervaringsniveaus en functies aan boord.



Figuur 20: vaarervaring van de onderzoekspopulatie in jaren, uitgedrukt in percentages

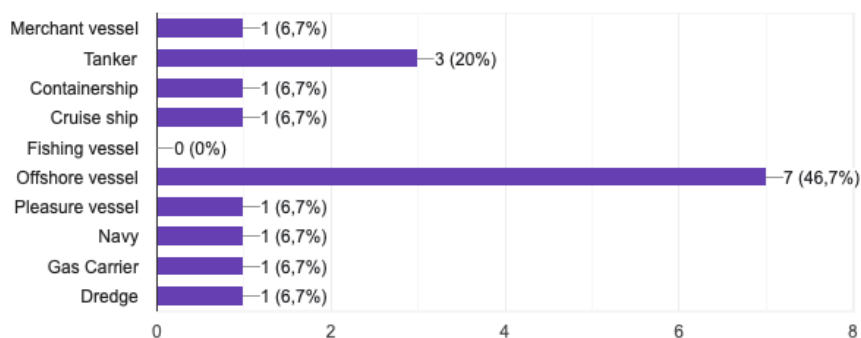
Bron: eigen onderzoek door enquête



Figuur 21 positie aan boord van de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

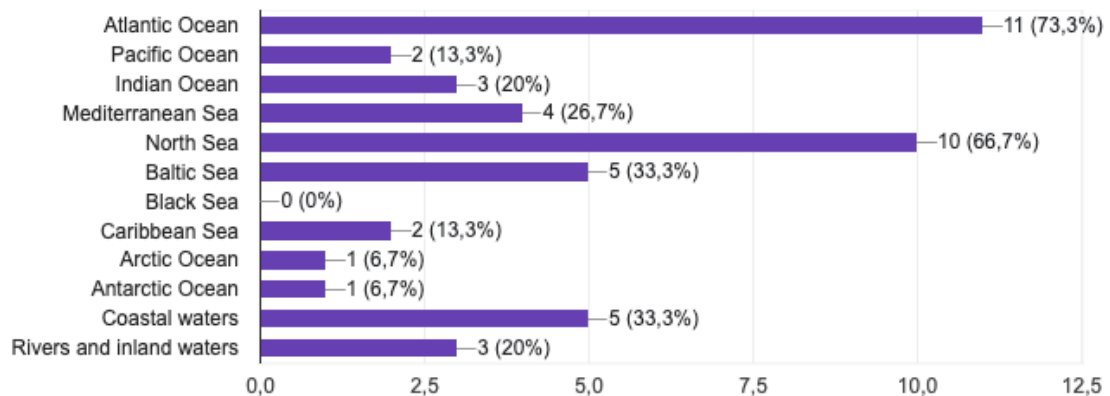
Uit de analyse van de antwoorden blijkt dat weerrouteringsystemen voornamelijk worden toegepast op offshore schepen, zoals aangegeven door 46,7% van de respondenten. Daarnaast wordt deze technologie ook significant gebruikt in de tankersector, zoals blijkt uit 20% van de gegeven antwoorden. Deze gegevens benadrukken dat weerrouteringsystemen met name populair zijn in sectoren waar optimale routeplanning cruciaal is voor zowel operationele efficiëntie als brandstofbesparing.



Figuur 22: Scheepstypes van de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

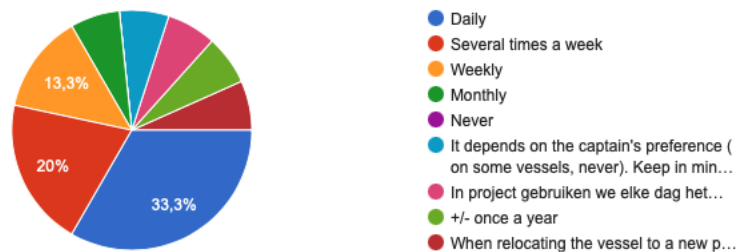
Uit het onderzoek blijkt dat weerrouteringsystemen voornamelijk worden ingezet tijdens langere reizen, zoals overtochten over de Atlantische Oceaan. Uit de antwoorden blijkt dat 73,3% van de respondenten aangeeft het systeem te gebruiken tijdens een Atlantische oversteek, terwijl 66,7% het toepast op de Noordzee. In de kustwateren daarentegen wordt het systeem minder frequent gebruikt, met slechts 33,3% van de respondenten die hier gebruik van maken. Deze resultaten suggereren dat weerrouteringsystemen vooral waardevol worden geacht bij langere trajecten, zoals oceaanoversteken, waar weersomstandigheden en route-optimalisatie een grote impact hebben op de vaarefficiëntie en veiligheid. Ook kunnen we concluderen dat op korte afstanden in kustwateren de afstanden minder groot zijn en hierdoor de tijdsverschillen in de aankomsthaven minder te beperken zijn.



Figuur 23: Primaire vaargebied van de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

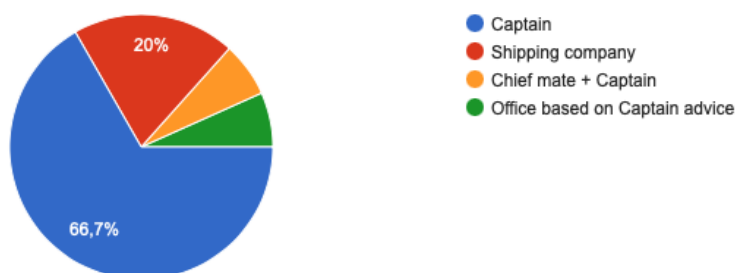
Uit analyse van de antwoorden blijkt dat weerrouteringsystemen frequent worden gebruikt tijdens zeereizen, variërend van wekelijks tot dagelijks gebruik. Zo geeft 13,3% van de respondenten aan het systeem wekelijks te gebruiken, terwijl 20% het meerdere keren per week inzet en 33,3% het dagelijks toepast.



Figuur 24: Gebruiksfrequentie van weerrouteringssystemen binnen de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

De verantwoordelijkheid voor de beslissing om een weerrouteringsysteem te gebruiken tijdens een reis ligt doorgaans bij de kapitein. Echter, de keuze voor het specifieke type weerrouteringsysteem dat wordt toegepast, wordt bepaald door de rederij. Deze resultaten onderstrepen de centrale rol van zowel operationele als strategische besluitvorming in het gebruik en de implementatie van weerrouteringsystemen binnen de maritieme sector.

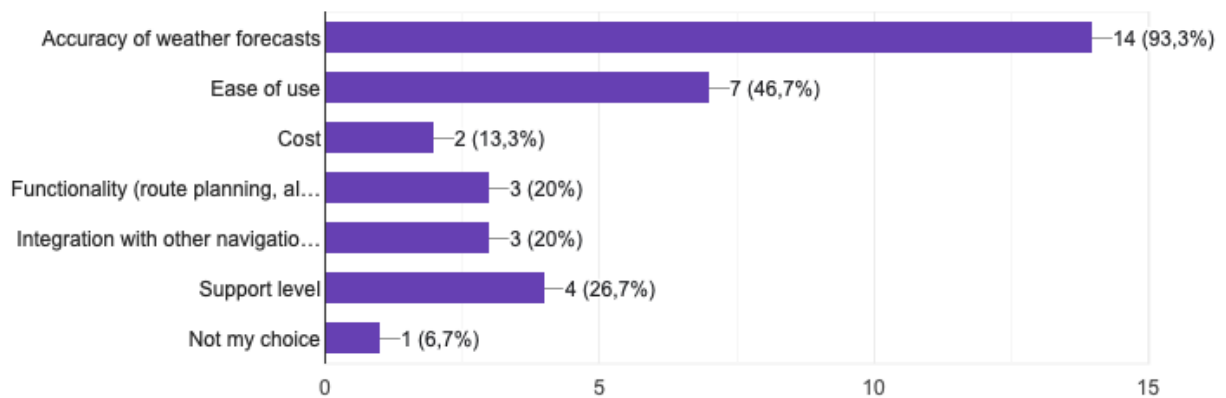


Figuur 25: Deciderende persoon/orgaan voor het gebruik van een weerrouteringssysteem, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

Uit de resultaten blijkt dat de keuze voor een weerrouteringssysteem door de meerderheid van de respondenten (93,3%) wordt bepaald op basis van de nauwkeurigheid van de weersvoorspellingen. Daarnaast geeft een aanzienlijk deel van de respondenten aan dat gebruiksvriendelijkheid en functionaliteit van het systeem ook belangrijke factoren zijn bij het maken van hun keuze. Deze bevindingen onderstrepen het belang van zowel technische

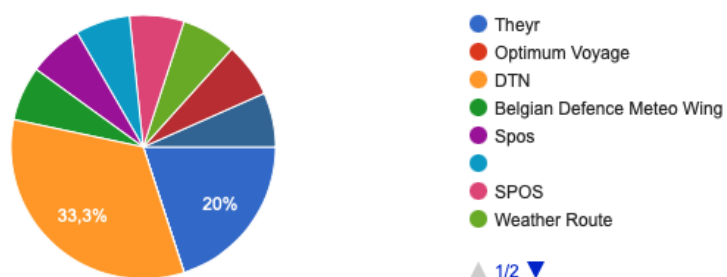
betrouwbaarheid als gebruiksgemak bij de implementatie en acceptatie van weerrouteringsystemen binnen de maritieme sector.



Figuur 26: Doorslaggevende factoren voor het gebruik van weerrouteringsystemen, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

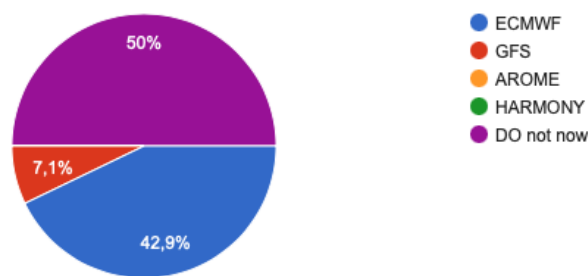
Uit de resultaten blijkt dat de meeste gebruikte weerrouteringsystemen onder de respondenten DTN zijn, met een gebruikpercentage van 33,3%, en Theyr, dat voor 20% van de respondenten wordt genoemd.



Figuur 27: Types van weerrouteringsystemen, gebruikt door de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

Wat betreft de gebruikte weermodellen blijkt dat globale weermodellen de voorkeur hebben. Het ECMWF-model (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) wordt het meest toegepast, zoals aangegeven door 42,9% van de respondenten, terwijl het GFS-model (Global Forecast System) door 7,1% wordt gebruikt.



Figuur 28: Types van weerrouteringsystemen, gebruikt door de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

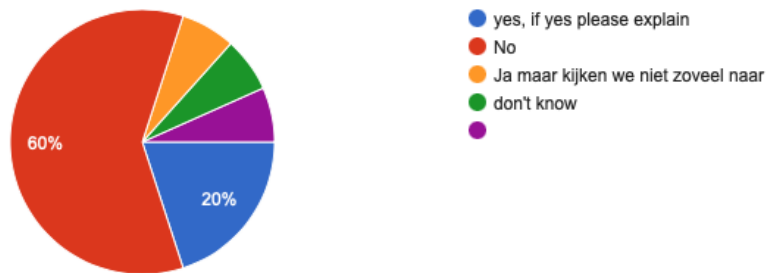
Bron: eigen onderzoek

Daarnaast geeft 50% van de respondenten aan niet te weten met welk specifiek weermodel het weerrouteringsstelsel dat zij gebruiken werkt. Dit wijst op een mogelijk gebrek aan bewustzijn of training met betrekking tot de technische specificaties van de systemen die worden gebruikt in de praktijk.

Ondanks de vooruitgang in meteorologische technologieën en modellen blijven inaccurate weersvoorspellingen een belangrijke oorzaak van afwijking in geplande tijdschema's. Uit het onderzoek blijkt dat 20% van de respondenten onjuiste voorspellingen heeft ervaren met betrekking tot mist en neerslag, terwijl 33,3% rapporteert te maken te hebben gehad met onnauwkeurige voorspellingen over stormen. Daarnaast heeft 13,3% te maken gehad met inaccurate voorspellingen omtrend tropische cyclonen.

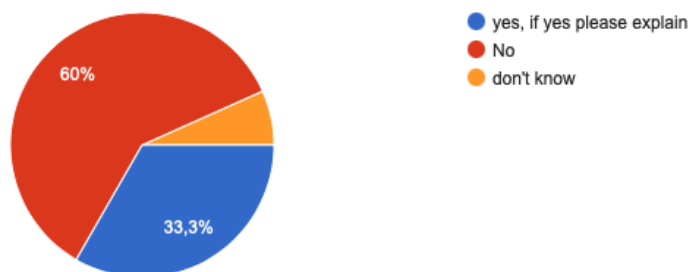
Deze bevindingen ondersteunen dat er nog steeds een aanzienlijke mate van onzekerheid bestaat in weersvoorspellingen, vooral bij complexe weersomstandigheden. Wanneer

weermodellen onderling tegenstrijdige resultaten leveren, is dit vaak een indicatie van een moeilijk voorspelbaar weerpatroon, wat een nauwkeurigheid van de voorspellingen verder bemoeilijkt. Dit benadrukt de noodzaak van voortdurende verbetering van meteorologische modellen en de integratie van diverse weermodellen in weerrouteringsystemen om deze onnauwkeurigheid te minimaliseren.



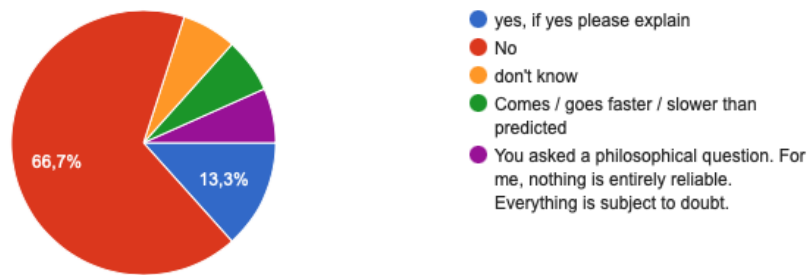
Figuur 29: Mate waarin unreliable fog warnings voorkomen binnen de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek



Figuur 30: Mate waarin unreliable storm warnings voorkomen binnen de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek



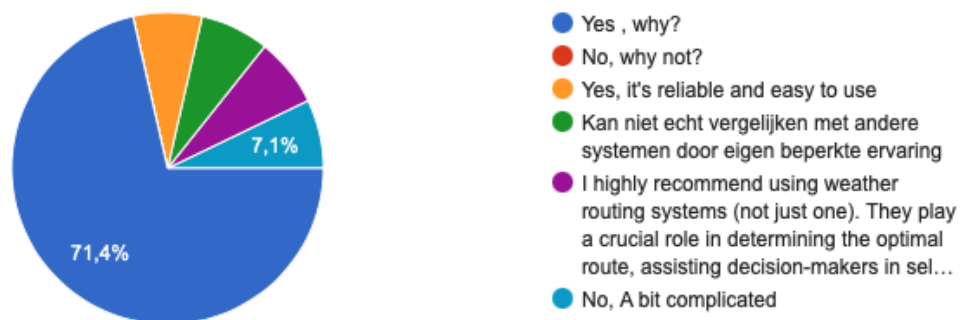
Figuur 31: Mate waarin unreliable warnings of tropical cyclones voorkomen binnen de onderzoekspopulatie, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

Vertragingen blijken vaak te worden veroorzaakt door onverwachte hoge of toenemende golfslag die niet accuraat zijn voorspeld en daardoor niet in de berekeningen van het weerrouteringssysteem zijn opgenomen. Deze afwijkingen resulteren in een discrepantie tussen de verwachte en daadwerkelijke scheepskarakteristieken, zoals snelheid en brandstofverbruik, wat negatieve gevolgen heeft voor de nauwkeurigheid van de routeplanning. Dit benadrukt het belang van verbeterende voorspellingen van zeetoestanden en de integratie van meer robuuste golfslagmodellen in weerrouteringssystemen om dergelijke verstoringen te beperken en operationele efficiëntie te waarborgen.

Uit analyse van de antwoorden blijkt dat de verwerking van scheepskarakteristieken over het algemeen goed is geoptimaliseerd binnen de huidige systemen. Desalniettemin wijzen twee respondenten erop dat verdere verbeteringen mogelijk zijn. Zij suggereren dat een nauwkeurigere toepassing van het wiskundige model van het schip, inclusief de correcte diepgangparameters, kan bijdragen aan een betere prestatie en nauwkeurigheid van het weerrouteringssysteem. Deze suggestie benadrukt het belang van een gedetailleerde en specifieke integratie van scheepskarakteristieken in de modellering en optimalisatieprocessen.

Over het algemeen kunnen we concluderen dat de respondenten content zijn over het weerrouteringssysteem. 71,4% van de respondenten raadt het gebruik van een weerrouteringssysteem aan aan zijn collega's, maar men geeft aan dat er zeker nog verbetering mogelijk is. Er zijn regelmatig nog verschillen in de weerkaarten en weersvoorspellingen tussen de weermodellen waardoor die een zeer moeilijke weersvoorspelling geeft.



Figuur 32: Mate waarin de onderzoekspopulatie het gebruik van weerrouteringssytemen aanraadt, verdeeld in 6 subcategorieën, uitgedrukt in percentages

Bron: eigen onderzoek

7.3.2. Interview ocean globe zeiler

Zoals eerder vermeld, is een interview afgenomen met een offshore zeiler die heeft deelgenomen aan de Ocean Globe Race als onderdeel van Team Translated. Deze prestigieuze zeilwedstrijd benadrukt het gebruik van klassieke navigatietechnieken en verloopt volledig zonder weerrouteringssytemen of moderne navigatiemiddelen.

De geïnterviewde zeiler, Emiel, heeft samen met zijn team deelgenomen aan Leg 3 van de race. deze etappe begon in Auckland, New-Zeeland, en eindigde in Punta del Este, Brazilië. tijdens deze uitdagende overtocht kreeg het team te maken met een zware storm nabij Kaap

Hoorn, wat resulteerde in aanzienlijke schade aan hun schip. Hierdoor was het team genoodzaakt de race voortijdig te verlaten, enkele mijlen na het passeren van Kaap Hoorn.

In het interview wordt dieper ingegaan op zijn ervaringen aan boord zonder de ondersteuning van moderne navigatie- en weerrouteringssystemen. Daarnaast wordt besproken of de schade en de daaropvolgende uitval voorkomen hadden kunnen worden met behulp van een weerrouteringssysteem, en welke lessen hieruit getrokken kunnen worden voor toekomstige zeilwedstrijden en navigatietechnieken.

a) Kan je mij eens uitleggen wat de Ocean Globe Race precies inhoudt?

De Ocean Globe Race is een zeilwedstrijd die teruggrijpt naar de beginjaren van de oceaandrives. Het is een eerbetoon aan de originele Whitbread Round the World Race en benadrukt traditionele navigatietechnieken zonder gebruik te maken van moderne technologieën zoals GPS. De nadruk ligt op het zeilen met klassieke navigatiemiddelen, zoals de sextant, en het beleven van de natuur zoals vroeger.

b) Hoe werkt het navigeren aan boord tijdens de Ocean Globe Race?

Alles gebeurt met de sextant. Elke middag wordt de zon geploteerd om de positie te bepalen. We waren met twee personen aan boord die dat konden. Bij mist of slecht weer is het natuurlijk moeilijker. Op open zee maakt dat niet zoveel uit, maar als je dichterbij land komt wordt het wel spannend als je zo 3 dagen je positie niet kan plotten. Zeker als je Cape Horn ziet of enkele eilanden van Cape Horn. En toen we in de storm zaten, zagen we door de hoge golven al niet ver voor ons. Met 50-60 knopen wind ga je niet even met de sextant de positie gaan bepalen.

c) Hebben jullie iets gebruikt van moderne weerrouteringssystemen voor de wedstrijd?

Voor de wedstrijd hebben we gebruik gemaakt van PredictWind en Windy. We hebben alles afgedrukt en zo een tactiek uitgedokterd voor de eerste week, ook hebben we voor de eerste week een navigator in gehuurd die ons de snelste route heeft getoond voor de eerste week. Translated heeft ook enorm veel AI-toepassingen gebruikt, via artificiële intelligentie bepaalde we welke zeilen we aan boord meenemen, welke zeilkeuzes we het meeste zouden moeten maken, maar ook de meest waarschijnlijke route afhankelijk van het weer van de afgelopen 20 jaar, en hoe lang we er ongeveer over zouden doen voor de hoeveelheid eten en drinken te bepalen.

d) Hebben jullie iets gebruikt van moderne weerroutering tijdens de wedstrijd? Of hoe hebben jullie hier een alternatief voor gevonden?

Tijdens de wedstrijd hebben we gebruik gemaakt van Weather faxes en Passage Guardian. Passage Guardian is een man mer een radio-installatie in zijn huis die weerberichten aan mensen geeft die op zee zitten, dit gebeurt op aanvraag. We hadden ook contact met andere zeilers die elke dag via de radio de dagelijkse nieuwsberichten, dit was elke dag 1 keer. Op dat moment moesten de zeilers hun positie doorgeven en koers en snelheid en gaven we vaak ook de huidige weeromstandigheden aan elkaar door. Aangezien we aan de leiding lagen en de wind voortdurend van achter ons kwam konden we ons zo een beetje voorbereiden op wat er op ons af zou komen.

e) Hebben jullie problemen ondervonden met die Weather faxes?

De weather faxes waren over het algemeen vrij goed. Ze kwamen via de radio of MF/HF binnen. Sommige van deze weather faxes waren wel zwart, waardoor we het weer niet op deze manier konden bekijken. In leg4 hadden ze een groter probleem met de weather faxes;

daar moesten ze door een zone waar een week lang geen weather faxes beschikbaar waren. Dat was wel een lastige situatie. Tegenwoordig zijn deze weather faxes wel niet meer op punt, 50 jaar geleden waren deze nog super up to date maar aangezien dit een verouderde methode is was het een pak moeilijker om altijd de correcte info te krijgen.

f) Denken jullie dat er beter resultaten zouden zijn geweest met weerroutering?

Ja, in het begin hadden we iets minder stabiel weer toen we vertrokken uit Nieuw-Zeeland. Met een weerroutering hadden we waarschijnlijk iets betere resultaten behaald. Maar voor de rest, eens we op de ice limit waren, hadden we zeer stabiel weer. Tijdens de wedstrijd zelf hadden we in het begin heel stabiel weer totdat we bij Cape Horn kwamen. Daar kregen we een storm van 50-60 knopen in de rug, wat schade heeft opgeleverd. En eenmaal we rond Cape Horn waren, kwamen we in een moeilijk stuk waar weerroutering echt van pas had kunnen komen. Op iets complexere stukken hebben we een weerroutering wel degelijk gemist maar gelukkig hadden we de artificiele intelegentie die ons toch een beetje op het pad heeft kunnen houden.

g) Wat was de schade die jullie hebben opgelopen aan boord waardoor jullie de race niet hebben kunnen uitvaren?

We hebben een grote scheur van 20 cm aan de achtersteven en een scheur van 20x20 cm aan de roerkoning waardoor we water binnen kregen. Hoogstwaarschijnlijk is dat ontstaan door het vel plat gaan tijdens de storm omdat we een te grote jib op hadden en er te veel druk op de roerkoning kwam, waardoor er een scheur is ontstaan. Ik denk ook hier dat we met een weerroutering de schade wel hadden kunnen beperken, met de moderne weerrouteringen bereken je via de polars de zeil setup die ideaal is op een bepaald moment. Aangezien wij nog steeds met de J2 (jib medium) aan het varen waren in extreme weerconditie, condities waar je normaal met een J3 of zelf een J4 zou moeten varen.

h) Hebben jullie gebruik gemaakt van bepaalde weerspatronen die jullie met het blote oog zagen, zoals bepaalde wolken?

In het begin hadden we een ander type weer dan normaal op de positie waar we zaten, en daar hebben we wel gebruik gemaakt en wat effecten van gevoeld. Maar hoe dichterbij de ice limit kwamen en hoe stabiel het weer werd, hoe minder invloed we daarvan merkten.

7.4. Besluit onderzoek

De resultaten van dit onderzoek bevestigen de essentiële rol van weerrouteringsystemen binnen de hedendaagse maritieme sector, met name bij langeafstandstrajecten zoals oceaanoversteken. Uit de analyses blijkt dat deze systemen voornamelijk worden gebruikt door bemanningsleden met functies die een directe betrokkenheid bij navigatie en operationele besluitvorming vereisen, waaronder second officers en first officers. Deze bevindingen wijzen op de cruciale bijdrage van deze beroepsgroepen aan de implementatie en het gebruik van dergelijke technologieën.

Demografische en functionele inzichten De onderzochte populatie bestaat uit een relatief jonge, ervaren groep zeevarenden, waarvan de meerderheid tussen de 1 en 10 jaar werkervaring heeft. Hun functies suggereren een sterke betrokkenheid bij navigatietaken. Het gebruik van weerrouteringsystemen is met name prominent in sectoren zoals offshore en de tankersector, wat het belang van deze technologie benadrukt in omgevingen waar geoptimaliseerde routeplanning essentieel is.

Effectiviteit en beperkingen van de systemen Weerrouteringsystemen worden hoofdzakelijk ingezet bij langeafstandstrajecten, zoals trans-Atlantische overtochten. De systemen dragen significant bij aan operationele efficiëntie en brandstofbesparing. Desondanks blijven bepaalde beperkingen bestaan, met name in de nauwkeurigheid van weersvoorspellingen onder complexe omstandigheden, zoals stormen en tropische

cyclonen. Deze beperkingen hebben substantiële invloed op de routeplanning en de operationele prestaties van schepen.

Gebruikerservaring en verbeterpunten Gebruikers erkennen over het algemeen de gebruiksvriendelijkheid en effectiviteit van weerrouteringssystemen. Tegelijkertijd signaleren de resultaten een dringende behoefte aan verbeteringen in meteorologische modellen en de integratie van geavanceerde golfslagmodellen om afwijkingen te minimaliseren. Het beperkte bewustzijn onder gebruikers met betrekking tot de technische specificaties van de systemen wijst daarnaast op een lacune in opleiding en training.

Bijdrage van alternatieve inzichten Het interview met de deelnemer aan de Ocean Globe Race biedt aanvullende inzichten in de beperkingen van traditionele navigatiemethoden en de voordelen van moderne weerrouteringstechnologieën. Hoewel klassieke methoden in bepaalde situaties van waarde kunnen zijn, tonen de bevindingen aan dat moderne systemen essentieel zijn om schade te beperken en prestaties te optimaliseren onder uitdagende omstandigheden.

Aanbevelingen Om de prestaties en betrouwbaarheid van weerrouteringssystemen verder te verbeteren, worden de volgende aanbevelingen voorgesteld:

- Verhoog de nauwkeurigheid van weersvoorspellingen door de integratie van geavanceerde modellen en algoritmes.
- Versterk de technische kennis en het bewustzijn van gebruikers door middel van gerichte trainingsprogramma's.
- Optimaliseer de integratie van scheepsspecifieke kenmerken in de modellering en operationele processen.
- Stimuleer technologische innovatie binnen weerrouteringssystemen, met bijzondere aandacht voor het aanpakken van onnauwkeurige voorspellingen en uitdagingen met betrekking tot zeetoestanden.

Concluderend benadrukt dit onderzoek het strategische belang van weerrouteringssystemen voor de maritieme sector. Ondanks de geïdentificeerde beperkingen blijven deze systemen

een cruciale rol spelen in het verbeteren van veiligheid, efficiëntie en operationele besluitvorming tijdens maritieme operaties.

8. Conclusie

Weer-routingssystemen spelen een essentiële rol in de maritieme industrie, zowel voor de koopvaardij als in de zeilwereld. Deze systemen stellen schepen en zeilers in staat om veilige, efficiënte en geoptimaliseerde routes te plannen en te navigeren, rekening houdend met de dynamische en vaak onvoorspelbare weersomstandigheden. Door gebruik te maken van geavanceerde weermodellen en gegevensassimilatietechnieken genereren weer-routingssystemen nauwkeurige voorspellingen en integreren ze meteorologische gegevens van verschillende bronnen zoals satellieten, weerstations en meteorologische diensten. Deze gegevens worden gecombineerd met de kenmerken van het vaartuig, zoals grootte, snelheid en brandstofverbruik, om optimale routes en timing aan te bevelen.

Een effectief weer-routingstelsel is gebruiksvriendelijk en biedt duidelijke visualisaties van de situatie, wat helpt om complexe weergegevens gemakkelijker interpreteerbaar te maken. Of het nu gaat om de koopvaardijwereld of de zeilwereld, een betrouwbaar weer-routingstelsel is van onschatbare waarde voor het minimaliseren van risico's, het optimaliseren van de prestaties en het nemen van weloverwogen beslissingen. Deze systemen stellen schepen en zeilers in staat om de impact van weersomstandigheden op hun route en operaties te begrijpen en te beheren, waardoor ze veilig en efficiënt kunnen varen.

Uit onderzoek blijkt dat weer-routingssystemen over het algemeen positief worden ontvangen en als nuttig worden beschouwd door zeevarenden. Respondenten geven aan dat er echter nog ruimte is voor verbetering, vooral wat betreft de nauwkeurigheid van weersvoorspellingen en de integratie van scheepskarakteristieken. Verbeteringen op deze gebieden kunnen de effectiviteit en het vertrouwen in deze systemen verder vergroten.

We kunnen concluderen dat een goed geïmplementeerd weer-routingssysteem waardevolle ondersteuning biedt aan de maritieme gemeenschap, waardoor de veiligheid, efficiëntie en besluitvorming worden verbeterd. Met voortdurende vooruitgang in technologie en data-analyse zullen weer-routingssystemen steeds geavanceerder worden en in staat zijn om nog nauwkeurigere voorspellingen te bieden. Hierdoor kan de maritieme sector nog beter inspelen op weersomstandigheden en de uitdagingen van de zee.

9. List of content

2017_05_Guide_stab_nl.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van https://www.ccr-zkr.org/files/documents/guidestabilite/2017_05_Guide_stab_nl.pdf

AROME weermodel.pdf. (z.d.).

Carotenuto, A., Molino, I., Fasanaro, A. M., & Amenta, F. (2012). Psychological stress in seafarers: A review. *International Maritime Health*, 63(4), 188-194.

Datasets tagged atmosphere in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog. (z.d.). *Google for Developers*. Geraadpleegd 5 mei 2024, van <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/atmosphere>

de Pauw, G. (z.d.). Onderzoek naar Europese scheepvaartongevallen waarbij het weer een belastende factor is.

expansion. (2018, 31 juli). ECMWF. *Belgian Platform on Earth Observation*. Text, . Geraadpleegd 20 mei 2023, van <https://eo.belspo.be/nl/ecmwf>

Extra info over vervuiling.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van <https://shuttle-storage.s3.amazonaws.com/filtertechnics/extra%20info%20over%20vervuiling.pdf?1600090875&w=0&h=0>

Gastblog. (2012, 25 december). Lagedrukgebieden en hogedrukgebieden. *NoodweerBenelux*. Geraadpleegd van <https://www.noodweer.be/lagedrukgebieden-en-hogedrukgebieden/Golfhoogtes.pdf>. (z.d.).

Golfweerstand. (2020, 13 januari). *Wikipedia*. Geraadpleegd van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Golfweerstand&oldid=55440973>

Het ECMWF weermodel. (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2023, van <http://www.meteodelfzijl.nl/jm3/index.php/archief/75-nieuwsflits/weerweetjes/965-het-ecmwf-weermodel>

Important Benefits of Weather Routing for Optimal Voyages. (z.d.). Geraadpleegd 4 april 2023, van <https://www.sofarocan.com/posts/important-benefits-of-weather-routing-for-optimal-voyages>

KMI - Convectie. (z.d.). *KMI*. Geraadpleegd 13 mei 2024, van <https://www.meteo.be/nl/info/weerwoorden/convectie>

KMI - Corioliseffect. (z.d.). *KMI*. Geraadpleegd 10 mei 2023, van <https://www.meteo.be/nl/info/weerwoorden/corioliseffect>

KMI - Wat veroorzaakt de (stroming van de) wind? (z.d.). *KMI*. Geraadpleegd 10 mei 2023, van <https://www.meteo.be/nl/info/veelgestelde-vragen/weersverschijnselen/wat-veroorzaakt-de-stroming-van-de-wind>

KMI - Weermodel. (z.d.). *KMI*. Geraadpleegd 20 mei 2023, van <https://www.meteo.be/nl/info/weerwoorden/weermodel>

KNMI - Satellieten. (z.d.). Geraadpleegd 15 april 2024, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/satellieten>

KNMI - Transportband van de oceaan. (z.d.). Geraadpleegd 15 mei 2023, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/transportband-van-de-oceaan>

KNMI - Weermodellen. (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2023, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/weermodellen>

Manderbacka, T. (2019). *On the uncertainties of the weather routing and support system against dangerous conditions*.

Mao, W., Prasetyo, F. A., Ringsberg, J. W., & Osawa, N. (2013). A Comparison of Two Wave Models and Their Influence on Fatigue Damage in Ship Structures. Gepresenteerd bij

ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. doi:10.1115/OMAE2013-10114

Meteo 3de bach 2023 nl AP.pdf. (z.d.).

Modellen (algemeen). (z.d.). *Alpenweerman*. Geraadpleegd van <https://www.alpenweerman.nl/wikipedia-weer-en-klimaat-bij-alpenweerman/modellen-algemeen/>

National imagery and mapping agency. (2002). *Bowditch Bicentennial edition*. No. 9. Geraadpleegd van [http://fer3.com/arc/imgx/Bowditch-American-Practical-Navigator-2002-\(2004\).pdf](http://fer3.com/arc/imgx/Bowditch-American-Practical-Navigator-2002-(2004).pdf)

Natuurkunde.nl—Convectie. (z.d.). Geraadpleegd 13 mei 2024, van <https://www.sciencespace.nl/aarde/artikelen/2490/convectie>

Oceaanstromen. (z.d.). Geraadpleegd 14 mei 2024, van <https://seos-project.eu/oceancurrents/oceancurrents-c06-s02-p01.nl.html>

Ocean Conveyor Belt. (z.d.). Geraadpleegd 17 mei 2024, van <https://education.nationalgeographic.org/resource/ocean-conveyor-belt>

Polakis, M., Zachariadis, P., & de Kat, J. O. (2019). The Energy Efficiency Design Index (EEDI). In H. N. Psaraftis (Red.), *Sustainable Shipping: A Cross-Disciplinary View* (pp. 93-135). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-04330-8_3

Rijck, T. D. (z.d.). Modelleren van het primaire golfsysteem bij binnenschepen. Routeringsalgoritme. (2021, 8 mei). *Wikipedia*. Geraadpleegd van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Routeringsalgoritme&oldid=58895493>

Samuel. (2020, 28 juni). Voordelen van fijnmazige weermodellen. *NoodweerBenelux*. Geraadpleegd van <https://www.noodweer.be/voordelen-van-fijnmazige-weermodellen/>

Shin, Y. W., Abebe, M., Noh, Y., Lee, S., Lee, I., Kim, D., Bae, J., e.a. (2020). Near-Optimal Weather Routing by Using Improved A* Algorithm. *Applied Sciences*, 10, 6010. doi:10.3390/app10176010

Simonsen, M. H., Larsson, E., Mao, W., & Ringsberg, J. W. (2015). State-of-the-Art Within Ship Weather Routing. Gepresenteerd bij ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. doi:10.1115/OMAE2015-41939

Simulated ship-route optimization support system display. (z.d.). Geraadpleegd 4 april 2023, van https://www.google.nl/search?q=route+with+weather+routing+system+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjot8b9upD-AhX3hP0HHcqABIIQ2-cCegQIABAA&oq=route+with+weather+routing+system+&gs_lcp=CgNpbWcQAzoHCAAQGBcABDoJCAAQGBcABBaKOGUIABCABDoKCAAQigUQsQMqQzoHCAAQigUQ QzoICAAQgAQsQM6CAgAELEDEIMBOgcIIxDqAhAnOgQIIxAnOgQIABAEogYIABAFEB46BggAEAgQHlCPB1j9mgFgyp0BaAFwAHgBgAGcAYgBtiiSAQQ2Mi42mAEAoAE BqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&scient=img&ei=WzcsZKieJfeJ9u8PyoGakAU&bih=733&biw=1440#imgsrc=V1BUF-oyJRnNbM

Sterl, A. (z.d.). Oceaancirculatie en klimaat.

Sustainability | Free Full-Text | Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel. (z.d.). Geraadpleegd 5 mei 2024, van <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8793>

Synoptische weerkaart. (2022, 25 mei). *Wikipedia*. Geraadpleegd van https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Synoptische_weerkaart&oldid=62112296

Szymonski, M. (2019). Some Effects of Wind on Ship's Manoeuvrability. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13, 623-626. doi:10.12716/1001.13.03.19

The Coriolis Effect: Earth's Rotation and Its Effect on Weather. (z.d.). Geraadpleegd 13 mei 2024, van <https://education.nationalgeographic.org/resource/coriolis-effect>

Thermohaliende circulatie. (z.d.). *Klimaatverandering*. Geraadpleegd 15 mei 2023, van <https://klimaatveranda.nl/tag/thermohaliende-circulatie/>

Uitvinding en ontwikkeling van de stoomboot. (z.d.). Geraadpleegd 12 april 2024, van <https://www.historamarond1900.nl/uitvindingen/vervoer/water>

Vettor, R., & Guedes Soares, C. (2016). Development of a ship weather routing system. *Ocean Engineering*, 123, 1-14. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.06.035

Volume2_6stabilityinwave.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van https://ittc.info/media/3495/volume2_6stabilityinwave.pdf

Wang, H., Mao, W., & Eriksson, L. (2017). Benchmark Study of Five Optimization Algorithms for Weather Routing. *Volume 7B: Ocean Engineering* (p. V07BT06A023). Gepresenteerd bij ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim, Norway: American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/OMAE2017-61022

Wat is het corioliseffect? (z.d.). *Alles over de plastic soep*. Geraadpleegd 10 mei 2023, van <https://plasticsoep.sites.uu.nl/het-corioliseffect/>

Waterstaat, M. van I. en. (2020, 21 april). Trends en de Nederlandse zeevaart—Document (onderzoekspublicatie)—Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid. rapport, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Geraadpleegd 23 november 2024, van <https://www.kimnet.nl/publicaties/rapporten/2020/04/21/trends-en-de-nederlandse-zeevaart>

Weather routing. (2022, 20 januari). *Wikipedia*. Geraadpleegd van https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Weather_routing&oldid=1066906611

Weer routing van zeilschip. (2023). Geraadpleegd 12 april 2023, van https://www.google.nl/search?q=weather+routing+system+for+sailing+vessels&tbm=isch&ved=2ahUKEwin4sWc0aT-AhWt57sIHbeIA2gQ2-cCegQIABAA&oq=w&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIIxAnMgoIABCKBRCxAxBDMggIABCABBCxAzIICAAQgAQQsQMyCAgAEIAEELEDmGgIABCABBCxAzIICAAQgAQQsQMyBQgAEIAEMggIABCABBCxAzIFCAAQgAQ6BwgjEOoCECdQzBLYmlNgnmFoAXAAeACAAU2IAZkBgEBMpgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nsAEKwAEB&sclient=img&ei=CMs2ZKe-Oq3P7_Upt5GOwAY&bih=735&biw=1032#imgsrc=tRHBQ9y_6MhBJM

Weermodel GFS. (z.d.). *Alpenweerman*. Geraadpleegd van <https://www.alpenweerman.nl/weermodel-gfs/>

Weermodel Hirlam. (z.d.). *Alpenweerman*. Geraadpleegd van <https://www.alpenweerman.nl/weermodel-hirlam/>

Weerwoord | Over modellen (1). (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2023, van <https://www.weerwoord.be/m/1074485>

Weintrit, A. (2013). *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: Navigational Problems*. CRC Press.

What are GRIB files? - Franks-Weather—The Weather Window. (z.d.). Geraadpleegd 17 april 2024, van <https://weather.mailasail.com/Franks-Weather/Grib-Files-Explained>

What are GRIB files and how can I read them—Copernicus Knowledge Base—ECMWF Confluence Wiki. (z.d.). Geraadpleegd 17 april 2024, van <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/What+are+GRIB+files+and+how+can+I+read+the+m>

Yang, J., Wu, L., & Zheng, J. (2022). Multi-Objective Weather Routing Algorithm for Ships: The Perspective of Shipping Company's Navigation Strategy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1212. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/jmse10091212

Yao, J., Liu, F., & Zhang, W. (2017). Design of the Exciter of Weather Fax Chart and

NAVTEX Message. *Procedia Computer Science*, Advances in Information and Communication Technology: Proceedings of 7th International Congress of Information and Communication Technology (ICICT2017), 107, 685-690. doi:10.1016/j.procs.2017.03.148

Zis, T., Psaraftis, H., & Ding, L. (2020). Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering*, 213. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.107697

Życzkowski, M., Krata, P., & Szłapczyński, R. (2018). Multi-Objective Weather Routing of Sailboats Considering Wave Resistance. *Polish Maritime Research*, 25(1), 4-12. doi:10.2478/pomr-2018-0001