



Hogere Zeevaartschool

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

Het corioliseffect in de zeevaart

Ruben Van Hirtum

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen

Promotor: Deirdre Luyckx

Academiejaar: 2020 – 2021

Woord vooraf

Vanaf de start van mijn opleiding aan de Hogere Zeevaartschool Antwerpen was ik voornamelijk geïnteresseerd in het fysische aspect in de zeevaart. Het was voor mij dan ook geen moeilijke keuze om mijn onderwerp in de richting van de corioliskracht te laten gaan toen mijn promotor, mevrouw Luyckx, dit voorstelde. Omdat dit onderwerp vaak aan bod kwam in verschillende vakken, hebben we als doel gesteld de verschillende aspecten waar de corioliskracht aan bod kwam dichterbij elkaar te brengen. Alsook om studenten te helpen om inzicht te krijgen in hoe het corioliseffect juist werkt en een verband te leggen tussen de cursussen dynamica en meteorologie.

Voor mij was mijn thesis schrijven een periode, veel langer dan voorzien, van vallen en opstaan. Maar dankzij de hulp van velen, heb ik toch het laatste punt van mijn scriptie kunnen zetten wat misschien ook wel een spreekwoordelijk punt is achter deze lastige periode. Daarom wil ik niet enkel de mensen bedanken die mij hebben geholpen maar ook de mensen die anders geholpen hebben en mij opnieuw de moed hebben gegeven om verder te gaan.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor, mevrouw Luyckx, bedanken. U heeft enorm veel geduld gehad en mij enorm veel kansen gegeven en toch steeds met veel enthousiasme mijn werk nagelezen en me geholpen wanneer ik vast zat. Ik hoop dat u en de studenten toch een klein deel van mijn werk kunnen gebruiken binnen de lessen dynamica.

Ik wil ook graag iedereen van JF-Quarter Horses bedanken alsook alle viervoeters! Bij jullie kon ik altijd terecht wanneer ik nood had aan wat ontspanning en nieuwe moed. Wanneer de ontspanning iets te lang duurden, waren jullie er zeker op tijd bij om mij eraan te doen herinneren dat ik nog een scriptie te schrijven had.

Mijn broers en mijn zussen wil ik bedanken omdat ze steeds klaarstonden om mij te ondersteunen op welk gebied ik het ook nodig had. Of het nu ging over fysica, over de grammatica van het Nederlands of over iets helemaal anders, ze stonden paraat. Tenslotte wil ik mijn dankwoord afsluiten met mijn ouders te bedanken. Dankzij de wetenschappelijke discussies, de taalverbeteringen, de soep en de steun, heb ik mijn scriptie toch nog kunnen afronden.

Samenvatting

Doorheen de opleiding Nautische Wetenschappen aan de Hogere Zeevaartschool komt het begrip *het corioliseffect* in verschillende vakken aan bod. Het doel van de scriptie is om al deze aspecten van het corioliseffect te bundelen en een link te leggen tussen de verschillende vakken en waarom het belangrijk is voor de student om een goed inzicht hier in te krijgen.

Een groot deel van de scriptie zal het fysische aspect van de corioliskracht behandelen en welke invloed dit heeft op een varend schip. Om de corioliskracht en al zijn componenten duidelijk weer te geven zijn er parallel met deze scriptie een aantal drie-dimensionale Geogebra-applicaties gemaakt die interactief gebruikt kunnen worden. Deze figuren zijn opgesteld als educatief hulpmiddel voor zowel de student als de docent.

Het tweede deel van de scriptie zal het effect van de corioliskracht op de meteorologie behandelen en hoe deze invloed zal hebben op ons weerbeeld.

De corioliskracht zal eerder een indirecte invloed hebben op de zeevaart. Hoewel schepen geen directe correctie moeten toepassen voor de corioliskracht, kan het begrijpen van de corioliskracht de student helpen om een beter inzicht te krijgen in andere elementen waar de corioliskracht invloed op heeft. De geogebra-applicaties kunnen helpen dit visueel voor te stellen.

Abstract

The concept of the Coriolis effect is featured in different courses during the educational program of Nautical Sciences at Antwerp Maritime Academy. The goal of this thesis is to assemble all the different aspects of the Coriolis force in those different courses with the purpose of creating a better insight for students into the Coriolis effect.

The main part of the thesis describes the physical aspects of the Coriolis force and how it is acting on a vessel. To get a better view of the entire picture, three dimensional interactive Geogebra-models are developed. Those models are intended as an educational tool for both the students and the lecturer.

The second part of the thesis handles the role of the Coriolis force in meteorology and how the force impacts the weather.

Although the Coriolis force rather has an indirect influence for seafarers, it has one. A vessel will not need to compensate for the Coriolis force, but it will act as a force on the vessel. It can be very useful for students to get a good insight on how the Coriolis force works to get a better understanding of its interaction of the Coriolis force with other aspects of nautical science. This insight can be visualized by the Geogebra-models.

Inhoudstafel

Lijst van Figuren.....	xi
Lijst van Tabellen	xiii
Lijst van Afkorting.....	xv
Lijst van symbolen	xvii
Inleiding.....	1
1 Het corioliseffect door de jaren heen	3
1.1 Giovanni Battista Riccioli	3
1.2 Giovanni Alfonso Borelli	4
1.3 Gustave Coriolis	7
2 Fysische aspect van het corioliseffect.....	9
2.1 Inleiding in het corioliseffect in 2D.....	9
2.2 Corioliseffect in 3D	11
2.2.1 Baansnelheid en hoeksnelheid	11
2.3 Corioliseffect op de aardbol	13
2.3.1 De coriolisversnelling	14
2.3.2 Verplaatsing richting noorden/zuiden	16
2.3.3 Verplaatsing richting oosten/westen	18
2.4 Grootte van het corioliseffect	19
2.4.1 Hoek θ in functie van de koers en de breedteligging	19
2.5 Corioliskracht ontbonden in componenten	21
2.5.1 Schijnbare verandering van het gewicht.....	25
2.5.1.1 Het Eötvös effect.....	27
2.5.1.2 Grootte van de schijnbare verandering van het gewicht	28
2.5.1.3 De grootte en de richting van de afbuiging	29
2.6 Praktisch voorbeeld: MV coriolis.....	33

2.6.1	Schip	34
2.6.2	Andere voorwerpen	40
3	Visuele voorstelling van de corioliskracht.....	43
3.1	Geogebra applicatie.....	43
3.1.1	Opbouw van de Geogebra applicatie	44
3.1.1.1	De relatieve snelheid	45
3.1.1.2	De corioliskracht	45
3.1.1.3	De variabelen	46
3.1.1.4	De componenten van de corioliskracht.....	46
3.1.1.5	De hoeken	48
3.1.2	Het gebruik van de Geogebra-applicatie	48
3.1.2.1	Positie en koers.....	48
3.1.2.2	De schuifknoppen	49
3.1.2.3	Aanvinkvakjes voor vectoren, vlakken en hoeken.....	50
3.1.2.4	Voordelen van de Geogebra-applicatie	52
3.1.2.5	Beperkingen van de Geogebra-applicatie.....	52
3.2	Rekenblad corioliskracht	54
3.2.1	De berekeningen in het rekenblad.....	54
3.2.1.1	De opbouw van het rekenblad.....	54
3.2.1.2	Het gebruik van het rekenblad	56
3.2.2	Grafieken in het rekenblad.....	56
3.2.2.1	Verandering van het schijnbaar gewicht	56
3.2.2.2	Grootte van de corioliskracht	58
3.2.3	Voordelen en beperkingen van het rekenblad	59
3.3	Formularium corioliskracht	59
4	Corioliseffect binnen de meteorologie	61

4.1	Tropische cyclonen	61
4.1.1	Ontstaansfactoren van een cycloon.....	62
4.1.2	Ontstaan van een cycloon	64
4.1.3	De rol van de corioliskracht bij het vormen van een cycloon.....	65
4.1.3.1	Plaats van ontstaan van cyclonen.....	65
4.1.3.2	De draairichting van de cycloon.....	66
4.1.3.3	Voortbeweging van de cycloon.....	67
4.2	Algemene luchtcirculatie	68
4.2.1	De Hadley cel.....	68
4.2.2	De polaire cele.....	70
4.2.3	De Ferrel cel.....	70
4.2.4	De rol van de corioliskracht op luchtcirculaties	71
4.2.4.1	Geostropische wind	72
4.3	Oceaanstromingen	73
4.3.1	Wind gedreven oceaanstromingen	73
4.3.2	Ekmanspiraal	74
4.3.3	Diepzeestromingen	75
4.3.4	De rol van de corioliskracht op de oceaanstromingen	78
4.3.4.1	Geostrofische stromingen.....	78
4.3.4.2	Algemeen beeld van de oppervlakte oceaanstromingen.....	79
4.4	Het getal van Rossby.....	80
4.5	Draairichting van het afvoerputje	81
5	De coriolis-massadebietmeter	83
5.1	Het principe van de coriolis-massadebietmeter	83
5.2	Voordelen van de coriolis-massadebietmeter	87
5.3	Nadelen van de coriolis-massadebietmeter.....	88

Conclusie	91
Bibliografie	95
Bijlage I: Afleiding van de corioliskracht	101
Bijlage II: Elektronische bijlage.....	105
Bijlage III: Coriolis formularium.....	109

Lijst van Figuren

Figuur 1 Booglente op andere straal.....	5
Figuur 2 Vallend object van een toren	6
Figuur 3 Gustave Coriolis	8
Figuur 4 Vaste schijf	9
Figuur 5 Verplaatsing op roterende schijf.....	9
Figuur 6 Verplaatsing in roterend referentiestelsel.....	10
Figuur 7 Baansnelheid en hoeksnelheid	11
Figuur 8 Tangentiële en normale versnelling.....	12
Figuur 9 Kromtestraal.....	13
Figuur 10 Corioliseffect op de aardbol.....	16
Figuur 11 Noordelijke koers	17
Figuur 12 Links: minimale grootte θ op de evenaar, rechts: maximale grootte θ op de noordpool.....	17
Figuur 13 Verplaatsing richting oosten	18
Figuur 14 De hoek θ in functie van α en φ	20
Figuur 15 Corioliskracht ontbonden in tangentiële en centrifugale component	21
Figuur 16 De hoek β in functie van α en φ	22
Figuur 17 Schijnbare verandering van het gewicht.....	25
Figuur 18 Componenten van v in het raakvlak	27
Figuur 19 Projectie centrifugale component op raakvlak.....	30
Figuur 20 Horizontale component van de corioliskracht.....	31
Figuur 21 Vereenvoudigde weergave van de kromtestraal.....	33
Figuur 22 Voyage planning Antwerpen – Kaapstad.....	35
Figuur 23 Standaardvorm van de Geogebra-applicatie	49
Figuur 24 Schijnbare verandering van gewicht in functie van koers en breedteligging	57
Figuur 25 Grootte van de corioliskracht in functie van koers en breedteligging	58
Figuur 26 Tropische cycloon.....	62
Figuur 27 Ligging van de intertropische convergentiezone	63
Figuur 28 Vorming van een cycloon.....	64
Figuur 29 Plaats van ontstaan van cyclonen.....	66
Figuur 30 Draairichting van de cycloon. Links noordelijk halfrond. Rechts zuidelijk halfrond.....	66

Figuur 31 Voortbeweging van cyclonen.....	67
Figuur 32 Vorming van de Hadley-cel	69
Figuur 33 Algemene luchtcirculatie op aarde	71
Figuur 34 Geostrofische wind op het noordelijk halfrond.....	72
Figuur 35 Geostrofische wind met wrijving.	73
Figuur 36 De Ekmanspiraal voor het noordelijk halfrond. 1. De wind 2. De inwerkende kracht op de stroming 3. De stroming 4. De corioliskracht.....	75
Figuur 37 Thermohaliene circulatie blauwe lijnen koude stroom, rode lijnen warme stroom.	77
Figuur 38 Convergentie van het zeewater.	78
Figuur 39 Oppervlaktestromingen op aarde.....	79
Figuur 40 Binnenkant coriolis-flow-meter	83
Figuur 41 Systematische voorstelling van de coriolis-flow-meter	84
Figuur 42 Systematische voorstelling van de coriolis-flow-meter in het terug bewegen van de buis.	86
Figuur 43 Een geïnstalereerde coriolis-massadebietmeter.	88

Lijst van Tabellen

Tabel 1 Voyage planning Antwerpen – Kaapstad, lijst waypoints	35
Tabel 2 Voorbeeld MV coriolis situatie 1	36
Tabel 3 Voorbeeld MV coriolis, situatie 1 tot 2.....	36
Tabel 4 Voorbeeld MV coriolis, vergelijking situatie 1 met 3	37
Tabel 5 Voorbeeld MV coriolis, vergelijking situatie 3 met 4	37
Tabel 6 Voorbeeld MV coriolis, Situatie 4 met5	38
Tabel 7 Voorbeeld MV coriolis, vergelijking ituatie 5 met 6.....	38
Tabel 8 Voorbeeld MV coriolis volledig.....	39
Tabel 9 Voorbeeld MV coriolis, omgekeerde route	39
Tabel 10 Vergelijking voorwerpen grootte corioliskracht	40
Tabel 11 Versleepbare punten van het rekenblad.....	49
Tabel 12 schuifknoppen van het rekenblad	50
Tabel 13 Aanvinkvakjes van het rekenblad	51

Lijst van Afkorting

Afkorting	Betekenis
Np	Noordpool
Zp	Zuidpool
N	Noorderbreedte
Z	Zuiderbreedte
O	Oosterlengte
W	Westerlengte
ITCZ	Intertropische convergentiezone

Lijst van symbolen

Symbol	Betekenis	Eenheid
Δs	Booglengte	m
g	Gravatieversnelling	9,81 m/s ²
ω	Hoeksnelheid	Rad/s
f	Frequentie	Hz = 1/s
T	periode	s
t	tijd	s
a_t	Tangentiele versnelling	m/s ²
a_n	Normaal versnelling	m/s ²
a_{rel}	Relatieve versnelling	m/s ²
a_{abs}	Absolute versnelling	m/s ²
a_c	Coriolisversnelling	m/s ²
a_s	Centrifugale versnelling	m/s ²
r	Straal	m
v	Snelheid ten op zichte van de aarde	m/s
Δv	Vershil in snelheid	m/s
F_c	Corioliskracht	N
F_{ct}	Tangentiele component van de corioliskracht	N
F_{cs}	Centrifugale component van de corioliskracht	N
F_{cv} of F_{cg}	Verticale component van de corioliskracht	N
F_{ch}	Horizontale component van de corioliskracht	N
α	Breedteligging	°
φ	Koers	°
θ	Hoek tussen \vec{v} en $\vec{\omega}$	°
β	Hoek tussen \vec{F}_c en \vec{F}_{cs}	°
\vec{n}	Eenheidsvector gericht naar het noorden	
v_x	x-coördinaat van v	
v_y	y-coördinaat van v	
M	Schijnbaar gewicht	T
ΔM	Verandering in schijnbaar gewicht	T
a_{cv}	Verticale component van de corioliskracht	m/s ²
a_{ch}	Horizontale component van de corioliskracht	m/s ²
Ro	Getal van Rossby	
ρ	Dichtheid	Kg/m ³

Inleiding

Het corioliseffect wordt beschreven als de afbuiging van de baan van een voorwerp in beweging in een roterend referentiestelsel. De grootte en de richting van deze kracht zijn afhankelijk van de richting van het voorwerp in beweging en de afstand ten opzichte van de rotatieas van het stelsel.

Het corioliseffect is een principe dat binnen de opleiding aan de Hogere Zeevaartschool Antwerpen aan bod komt in verschillende vakken, maar veeleer wordt aangenomen zonder erbij stil te staan wat het effect juist inhoudt. Daarom lijkt het interessant om na te gaan, of het de student kan helpen om een beter inzicht te krijgen in de toepassingen van de corioliskracht wanneer we de student helpen om de kracht zelf beter te begrijpen. Na een korte inleiding in de geschiedenis van hoe de benaming van de corioliskracht tot stand is gekomen, gaan we in het eerste deel van de scriptie dieper in op het fysische aspect van de coriolis kracht en worden alle componenten van de corioliskracht besproken. Daarna wordt er bekeken hoe de corioliskracht zal inwerken op een varend schip en van welke factoren de corioliskracht afhankelijk zal zijn.

Het corioliseffect zal zich afspelen in een drie-dimensioneel assenstelsel. Dit kan problemen veroorzaken bij de student om het begrip te proberen begrijpen aan de hand van cursussen, die slechts tweedimensionaal zijn. Om dit de probleem op te lossen, is er parallel met deze scriptie een interactieve driedimensionale Geogebra-figuur ontwikkeld om de student te helpen met het creëren van een inzicht in de corioliskracht. Het tweede deel van de scriptie legt uitgebreid uit hoe dit educatief hulpmiddel ontworpen is en hoe het kan gebruikt worden. Naast de applicatie behandelen we nog twee ontworpen hulpmiddelen.

In het derde deel van de scriptie bekijken we de invloeden van de corioliskracht op de vorming van het weerbeeld op aarde. Er wordt een opsomming gemaakt van de verschillende aspecten waar de corioliskracht aan bod komt en hoe deze kracht het weer zal beïnvloeden en bekijken we waarom het voor de student belangrijk is om te weten hoe en waar de corioliskracht aan bod komt in de meteorologie.

Ten slotte wordt er in het laatste deel van de scriptie gekeken of de corioliskracht ook in praktische toepassingen gebruikt kan worden binnen de zeevaart.

1 Het corioliseffect door de jaren heen

Doorheen de geschiedenis van de wetenschap werd het corioliseffect vaak aangehaald. De theorie achter het corioliseffect is niet altijd hetzelfde geweest. In dit hoofdstuk zetten we de belangrijkste mijlpalen van het effect op een rij en wordt er beschreven hoe ze vroeger dachten over dit effect, dat later pas de naam het corioliseffect zal krijgen.

1.1 Giovanni Battista Riccioli

Het corioliseffect kwam voor het eerst aan het bod in het begin van de 17^{de} eeuw door de Italiaanse astronoom en katholieke priester Giovanni Battista Riccioli (1598-1671) (O'Connor & Robertson E.F., 2012). In deze tijd was er volop discussie tussen het geocentrisme¹ en het heliocentrisme² (Gerkema & Gostiaux, 2012). Hoewel het pure geocentrische beeld reeds ontkracht was door de uitvinding van de telescoop, was Riccioli eerder aanhanger van het wereldbeeld van Tycho Brahe³, waarin de aarde wel nog het centrum is van het zonnestelsel en de zon rond de aarde draait, maar wel de planeten rond de zon draaien.

Riccioli's meesterwerk verscheen in 1651, *Almagestum Novum* (nieuwe almagest). Het omvat verschillende onderwerpen zoals: de versnelling van vallende lichamen, hemellichamen en hun bewegingen, sterren, planeten en hun bewegingen, zons- en maansverduisteringen,... (Campbell, 2011)

Boek 9 van zijn almagest stelt 126 argumenten over de beweging van de aarde, waarvan 49 voor en 77 tegen. Voor Giovanni was het niet zo zeer belangrijk of de zon of de aarde het centrum waren van het zonnestelsel maar eerder of de aarde beweegt of immobiel is. Eén van de argumenten tegen, bevat het effect dat nu bekend is als het corioliseffect en stelt het volgende:

¹ Het geocentrisme stelt de aarde als het centrum van het zonnestelsel (of in die tijd universum) en dat de zon en andere hemellichamen om de aarde heen draaien. Dit wereldbeeld werd beschreven door onder andere Ptolemaeus en Aristoteles en werd aangehouden tot de 16^{de} eeuw. (Michael Allaby, 2008)

² Het heliocentrisme stelt de zon als middelpunt van het zonnestelsel (of universum) met grondleggers Copernicus en Galileo Galilei. (Michael Allaby, 2008)

³ Tycho Brahe is een Deense astronoom die leefde van 1546 tot 1601. (Astrolabium.be, z.d.)

‘wanneer een kanonsbal op een meridiaan richting op een van de polen wordt afgevuurd zal deze afbuigen. Dit omdat de grond trager gaat bewegen op parallellen richting de polen dan op parallellen richting de evenaar (Graney, 2011).’

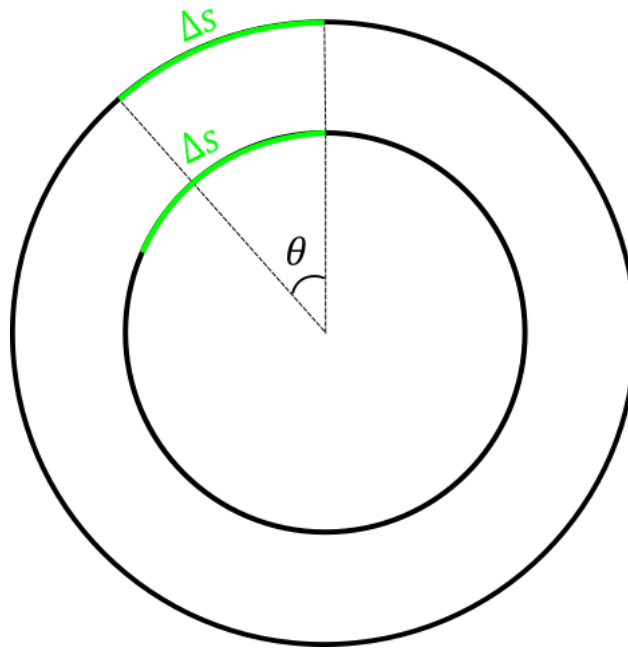
Hierdoor zou een kanonsbal afgevuurd richting het noorden afbuigen naar het oosten, terwijl wanneer de bal afgevuurd wordt richting het oosten niet zal afbuigen. Moest de aarde ronddraaien zou er dus een verschil moeten waargenomen worden tussen het kanonsschot richting noorden en het schot naar het oosten (Gerkema & Gostiaux, 2012). Omdat dit niet het geval was argumenteerde Giovanni dat de aarde dus niet ronddraait. Hoewel de afbuiging er wel was maar eerder te klein was voor een waarneming in deze tijd.

1.2 Giovanni Alfonso Borelli

Giovanni Alfonso Borelli was een Italiaanse fysioloog, wiskundige en natuurkundige (1608-1679). In zijn werk *De vi percussiois* was hij de eerste om de afbuiging van vallende objecten, door de aardrotatie te onderzoeken (Graney, 2011).

Borelli stelt dat tijdens een val het object steeds dezelfde *spatia*⁴ in dezelfde tijd zal afleggen. Door de val zal de afstand tot het middelpunt, oftewel de straal, verkleinen. Zo gaat voor een kleinere straal de afgelegde booglengte (Δs) groter zijn voor dezelfde hoek (θ).

⁴ *Spatia*: booglengte

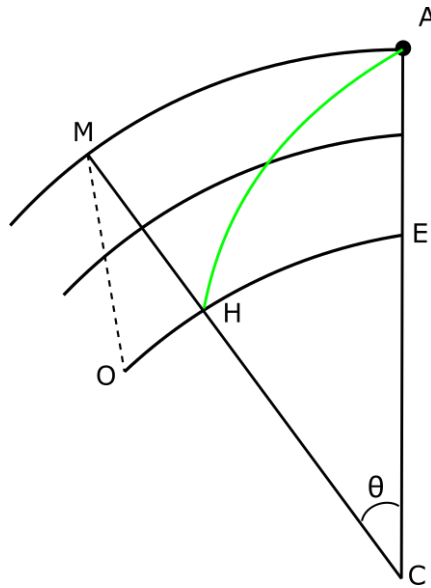


Figuur 1 Booglente op andere straal
Bron: eigen werk

In de formule voor booglengte (Δs) vinden we terug dat deze dus afhankelijk is van de straal,

$$\Delta s = 2\pi r \frac{\theta}{360^\circ} \text{ (met } \theta \text{ in graden).} \quad (1.2)$$

Met andere woorden, door behoud van baansnelheid van het object zal het object door dichter te komen bij de grond en zo dus de straal zal verkleinen, terecht komen op een cirkel met een kleinere baansnelheid. Dit zal resulteren in een afbuigen. Borelli berekende ook de grootte van deze afbuiging als volgt. We maken de berekeningen met nauwkeuriger gegevens dan gekend in Borelli zijn tijd. We gaan er vanuit dat de aarde een perfecte bol is met straal 6378,137 km waarvan één aardrotatie 23 uur, 56 minuten en 4 seconden duurt (= 86 164,091 seconden of 23,934 uur) (Williams, z.d.).



Figuur 2 Vallend object van een toren
Bron: eigen werk

Op Figuur 2 Vallend object van een toren wordt een doorsnede van de aarde weergegeven met C het middelpunt van de aarde en waarvan EO een deel van de evenaar voorstelt en EC de straal van de aarde. Voor de eenvoud van de berekeningen nemen we voor de hoek θ een grootte van $1'$, zo heeft de aarde 4 sec nodig om deze hoek af te leggen.

$$360^\circ = 21\,600'$$

$$\frac{86164\text{ s}}{21600'} = 3,99\text{ s}/1'$$

Om te weten hoe hoog we de toren (AE) mogen nemen, nemen we de plaatsvergelijking van een eenparige veranderlijke rechtlijnige beweging

$$x_{(t)} = \frac{1}{2} a_x t^2 + v_0 t + x_0$$

met $x_{(t)} = 0$, $a_x = g (-9,81\text{ m}/\text{s}^2)$ de valversnelling, $v_0 = 0$ en $t = 3,99\text{ sec}$.

Zo krijgen we voor $x_0 = 78,05\text{ m}$. Dit wordt op Figuur 2 afgebeeld door AE.

Zoals reeds besproken ging Borelli van de volgende vergelijking uit

$$AM = EO$$

waarin

$$EO = EH + HO$$

zodat

$$HO = AM - EH.$$

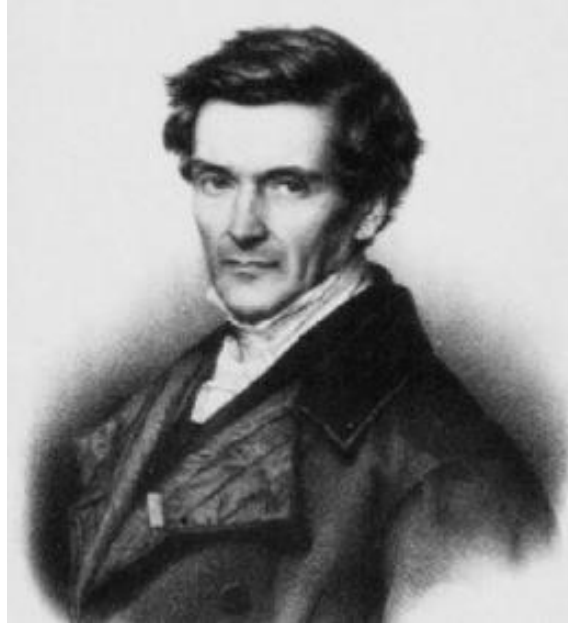
Met vergelijking (1.2) kunnen we de bogen AM en EH berekenen met $r_{EH} = 6378,137 \text{ km}$, de gemiddelde straal van de aarde en $r_{AM} = r_{EH} + 78,05 \text{ m} = 6378,215 \text{ km}$. Zo bekomen we voor EH een waarden van $1855,325 \text{ m}$ en voor AM een waarde van $1855,348 \text{ m}$. Als we deze twee waarden van elkaar aftrekken verkrijgen we dat $OH = 0,023 \text{ m}$. De richting van de afbuiging zal oostelijk zijn met een grootte van 2 cm . Afgeleid uit (Gerkema, 2009).

Deze waarde is echter te groot omdat Borelli van een uniforme transversale impuls uitging in plaats van behoud van impulsmoment (Borelli, 2014).

Dit experiment werd meermaals uitgevoerd in de praktijk. De bekendste poging in van Ferdinand Reich die in 1831 106 keer een object liet vallen in een put van $158,5 \text{ m}$. Als resultaat bekwam hij een gemiddelde waarde van een oostelijk afwijking van $2,8 \text{ cm}$. Hoewel er maatregelen genomen waren om externe invloeden op het experiment zo klein mogelijk te houden, lagen de resultaten zeer gevarieerd, waar zelfs sommige objecten een westelijke afbuiging hadden (Gerkema & Gostiaux, 2012).

1.3 Gustave Coriolis

Gustave-Gaspar Coriolis (1792 – 1843) was een Fransman, een ingenieur, wiskundige en natuurkundige (Linacre & Geerts, z.d.). Hoewel hij niet de eerste wetenschapper was die dit effect besprak, werd het corioliseffect later wel naar hem vernoemd.



Figuur 3 Gustave Coriolis
Bron: SABIX (z.d.)

Wanneer hij in 1816 begon te werken als assistent professor in de analyse aan de Ecole Polytechnique te Parijs introduceerde hij de begrippen arbeid en kinetische energie. Dit publiceerde hij in zijn eerste grote uitgave in *Du calcul de l'effet des machines* (1829; "De berekeningen van het effect van machines") (SABIX, z.d.).

Tijdens zijn periode als docent deed Gustave Coriolis onderzoek naar draaibewegingen en andere bewegingen van objecten op een draaiend oppervlak. Hiermee toonde hij aan dat op een draaiend vlak, bovenop de normale krachten op een bewegend lichaam, ook nog traagheidskrachten op een lichaam werken die loodrecht op de richting van de beweging staan. Een van deze traagheidskrachten is de toen reeds bekende centrifugale kracht of middelpuntvliedende kracht. Een toen nog onbekende andere component, die we nu kennen als de corioliskracht, was een traagheidskracht die resulteerde in een gebogen pad voor een object dat normaal in een rechte lijn zou moeten bewegen (Persson, z.d.).

Voor Gustave Coriolis was de corioliskracht niet meer dan de reactiekracht van de centrifugale kracht volgens de derde wet van Newton⁵.

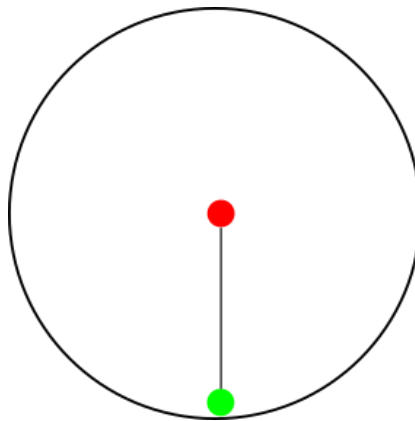
⁵ De derde wet van Newton stelt dat voor elke puntmassa A die een kracht \vec{F}_{AB} uitoefent op puntmassa B, er een tegengestelde kracht \vec{F}_{BA} uitgeoefend wordt door puntmassa B op puntmassa A. Deze krachten zijn even groot maar tegengesteld gericht (Britannica, z.d.-a).

2 Fysische aspect van het corioliseffect

2.1 Inleiding in het corioliseffect in 2D

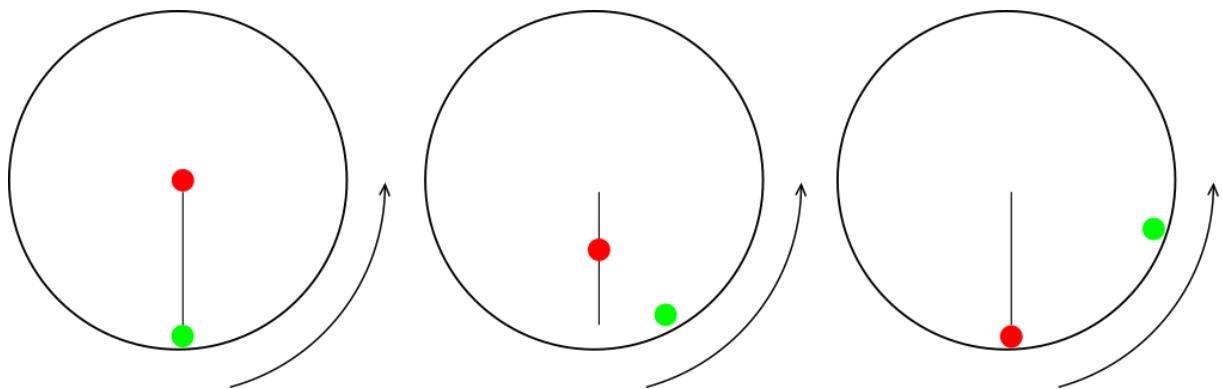
Het corioliseffect is een schijnbare afbuiging van een voorwerp in beweging in een roterend assenstelsel. We spreken van een schijnbare afbuiging omdat de afbuiging waargenomen wordt ten opzichte van het roterend assenstelsel (Persson, 1998).

Om een eenvoudig inzicht te krijgen in wat het corioliseffect juist is, zullen we eerst het effect beschrijven in een tweedimensionaal assenstelsel. Hier nemen we een schijf met in het middelpunt een voorwerp, rode stip, dat zich zal verplaatsen naar de buitenrand van de schijf. Wanneer de schijf niet roteert zullen we zien dat het voorwerp zich op een rechte lijn zal verplaatsen en uitkomt in het verwachte punt, groene stip.



Figuur 4 Vaste schijf
Bron: eigen werk

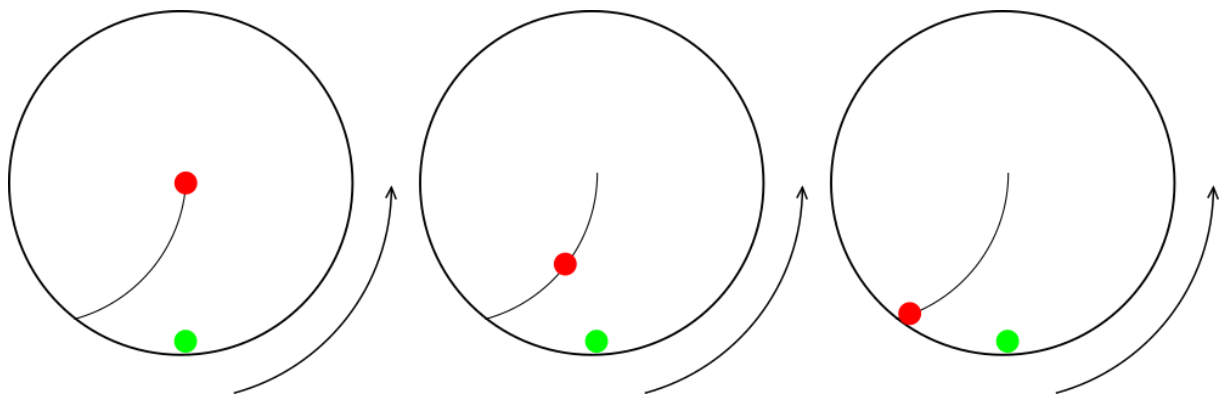
Vervolgens laten we de schijf roteren tegen de wijzers van de klok in.



Figuur 5 Verplaatsing op roterende schijf
Bron: eigen werk

Terwijl het voorwerp zich verplaatst met dezelfde baan zal de schijf roteren. Met als gevolg dat het initiële eindpunt op de schijf ook mee roteert. We zien dus dat het voorwerp op een andere plaats van de schijf terechtkomt dan in het eerste geval waar de schijf niet roteerde.

Tenslotte bekijken we de schijf als referentiestelsel zodanig dat de waarnemer mee roteert. We spreken hier over een roterend referentiestelsel.



Figuur 6 Verplaatsing in roterend referentiestelsel
Bron: eigen werk

We plaatsen de waarnemer op de groene stip. In dit geval merken we dat de waarnemer niet verplaatst. Het voorwerp zal wel nog steeds zijn oorspronkelijke baan volgen. Dit zal worden waargenomen als een schijnbare afbuiging van het voorwerp. Ook al weten we nu dat het hier gaat over een schijnbare afbuiging spreken we verder over de afbuiging voor het leesgemak.

Hoe harder we de schijf doen ronddraaien, hoe groter de afstand, op de rand van schijf, zal zijn tussen de groene stip en de plaats waar het voorwerp de schijf zal verlaten. Ook zien we dat de afbuiging zal variëren naarmate we de straal van de schijf variëren. Bij een grotere straal zal het voorwerp langer onderweg zijn waardoor de groene stip ook meer tijd heeft om zich te verplaatsen en de afbuiging van het voorwerp groter zal zijn. Met dezelfde redenering kunnen we dus ook zien dat de snelheid effect zal hebben op de grootte van de afbuiging. Wanneer de schijf met de wijzers van de klok in draait zal de afbuiging dan ook naar de andere kant zijn.

We kunnen besluiten dat de afbuiging afhankelijk is van de schijf: de straal, rotatiesnelheid en richting, maar even goed ook van het voorwerp zijn snelheid en richting. Wanneer we dit later in functie van de aardbol zullen beschrijven zullen we merken dat de variabelen van ons

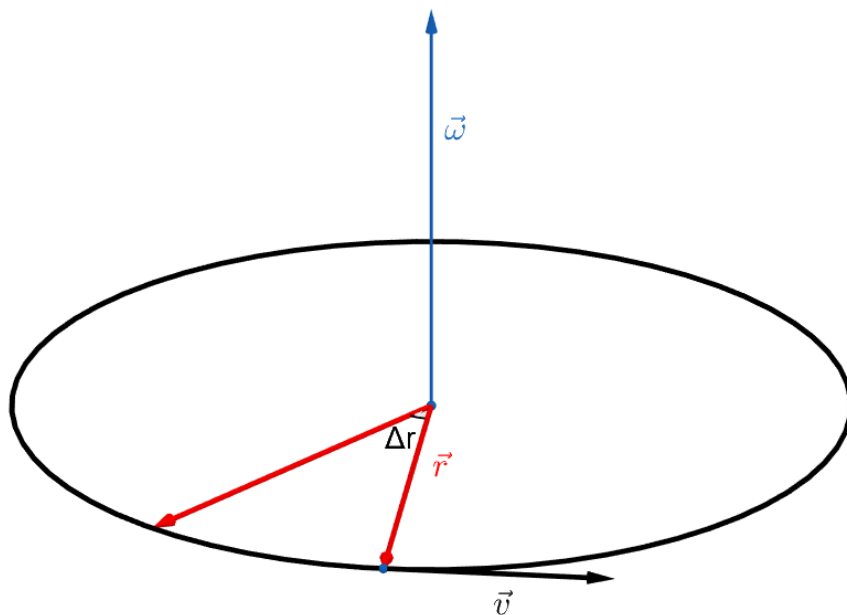
referentiestelsel vaste waarden zijn en de afbuiging dus enkel afhankelijk zal zijn van de variabelen van het voorwerp.

2.2 Corioliseffect in 3D

We werken vervolgens met het zelfde principe verder maar we vervangen de schijf door een bol. Waar we op een schijf steeds een constante straal hebben zal afstand tot de rotatieas op de bol variëren in functie van we de afstand tot de polen. Hiervoor is het belangrijk om een inzicht te krijgen naar het verschil tussen baansnelheid en hoeksnelheid.

2.2.1 Baansnelheid en hoeksnelheid

Wanneer we een schijf of een bol laten draaien met een constante hoeksnelheid, moeten we onderscheid maken tussen 2 verschillende snelheden, de baansnelheid \vec{v} en de hoeksnelheid $\vec{\omega}$.



Figuur 7 Baansnelheid en hoeksnelheid
Bron: eigen werk met Geogebra

De baansnelheid \vec{v} geeft de verandering van de positie per tijdseenheid. De verplaatsing zal verlopen langsheen de omtrek van de cirkel over een afstand van *booglengte* s , $s = R\varepsilon$, hierbij is R constant binnen dezelfde cirkel en ε de hoek in radialen. De grootte van de vector \vec{v} schrijven we als

$$|\vec{v}| = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\varepsilon}{dt}$$

en wordt uitgedrukt in m/s.

De hoeksnelheid of rotatiesnelheid $\vec{\omega}$ is daarentegen de verandering van de hoek per tijdseenheid. Als deze, zoals op aarde, constant is, kan deze vereenvoudigd worden weergegeven in functie van de periode T die nodig is om een volledige omwenteling te maken. Een volledige omwenteling komt overeen met 360° of 2π radialen, zo vinden we voor de grootte van de hoeksnelheid

$$|\vec{\omega}| = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2\pi}{T}$$

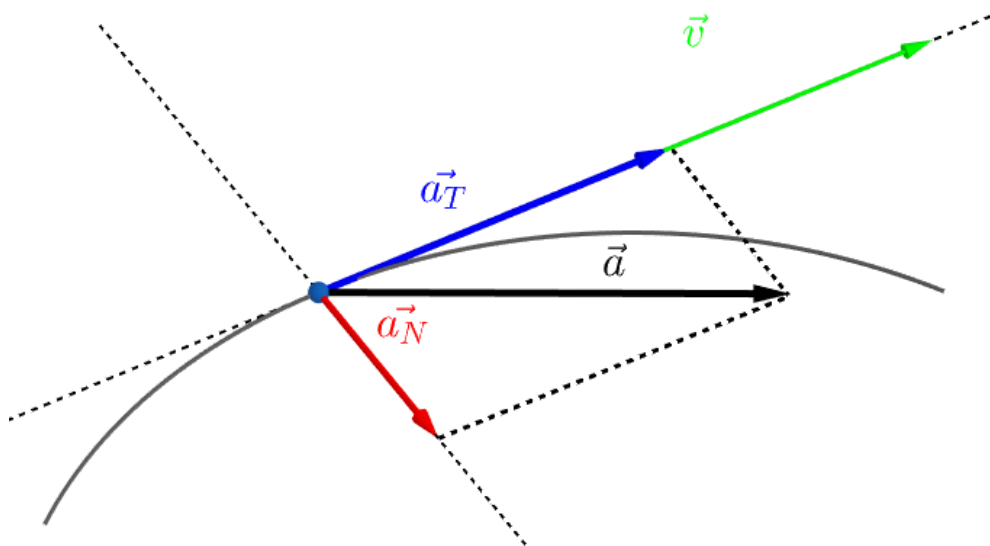
met $|\vec{\omega}|$ uitgedrukt in rad/s.

De vector $\vec{\omega}$ heeft als aangrijpingspunt het middelpunt van de schijf en staat loodrecht op het vlak in voortgaande richting van een rechtse schroef draaiend in dezelfde richting als de draairichting van de bol. Zo vinden we een verband tussen de groottes van de hoeksnelheid en de baansnelheid:

$$v = \omega R.$$

Voor de vectoren wordt het verband tussen \vec{v} en $\vec{\omega}$ gegeven door het uitwendig vectorproduct

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}.$$



Figuur 8 Tangentiële en normale versnelling
Bron: eigen werk met Geogebra

Voorwerpen die een kromlijnige baan beschrijven, zullen op elk tijdstip t een snelheid \vec{v} en een versnelling \vec{a} hebben. Deze vector \vec{a} kunnen we ontbinden in een tangentiële component \vec{a}_T en een normale component \vec{a}_N . De tangentiële versnelling \vec{a}_T heeft dezelfde richting als de raaklijn langs de baan en zal de toename of afname van de *grootte van de snelheid* weergeven. Terwijl \vec{a}_N de richting

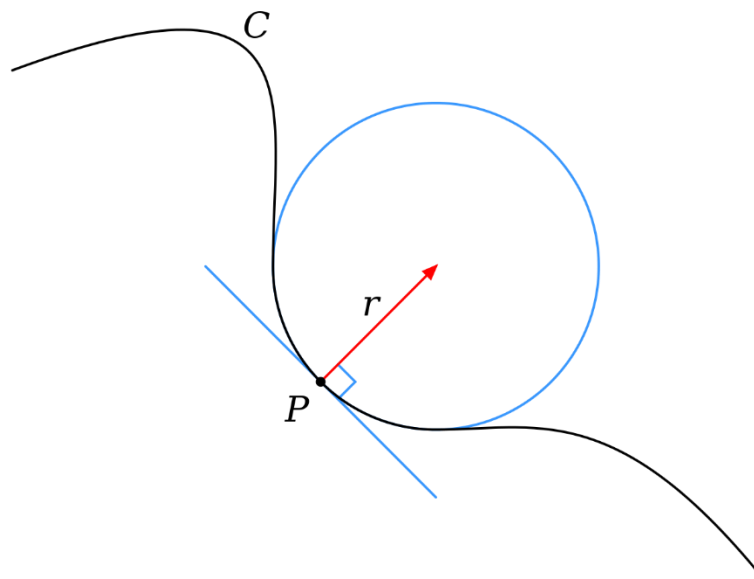
volgt van de normaal, loodrecht op de raaklijn. Deze normale component \vec{a}_N geeft de mate van *verandering van richting* weer. De groottes van de ontbonden componenten worden gegeven door

$$a_T = \frac{dv}{dt}$$

en

$$a_N = \frac{v^2}{\rho}.$$

Hierbij is ρ de kromtestraal van de baan. De kromtestraal is de maat voor de kromming in een punt.



Figuur 9 Kromtestraal
bron: Wikipedia (2021a)

In Figuur 9 zien we de kromme C. In het punt P zal de kromtestraal bepaald worden door de cirkel rakend aan de kromme C in het punt P. De kromtestraal ρ zal dan gelijk zijn aan de straal r van de deze cirkel. De kromtestraal is omgekeerd aan de grootte van de kromming. Hoe groter de kromtestraal, hoe minder groot de kromming zal zijn. Omdat er in een rechte beweging geen verandering van richting zal zijn, zal de normale component van de versnelling gelijk zijn aan nul en de bijhorende kromtestraal oneindig groot.

2.3 Corioliseffect op de aardbol

Omdat we grotendeels de corioliskracht boven het water zullen bespreken, vereenvoudigen we binnen deze scriptie de aardbol naar een perfecte bol, zonder uitsteeksels of putten. Alsook houden we in deze scriptie geen rekening met het feit dat de aardbol op zijn beurt ook nog

eens rond de zon draait. De aardbol draait met een vaste snelheid tegen de wijzers rond zijn rotatieas is die loopt van de zuidpool naar de noordpool, met een rotatiesnelheid van $15^\circ/\text{uur}$. Berekend met een gemiddelde straal van de aarde van 6371 km (Williams, z.d.) en een periode van 23 uur, 56 minuten en 4 seconden oftewel een siderische dag, de tijd die de aarde nodig heeft voor een volledige rotatie van 360° . We beschouwen daarom $\vec{\omega}$ als een constante.

Op de aardbol zal enkel een verplaatsing op het aardoppervlak mogelijk zijn alsook een verticale verplaatsing omhoog, maar nooit binnen de aardbol.

Zoals aangetoond in 2.2.1 weten we dat de baansnelheid afhankelijk is van de afstand tot het draaipunt in een schijf, of de rotatieas in de bol. Dit wordt op de aardbol bepaald door de breedteligging van het voorwerp. We gaan dus een onderscheid moeten maken tussen een verplaatsing waar de breedteligging wel verandert en een verplaatsing waar de breedteligging niet verandert. Deze laatste verplaatsing komt overeen met oostelijke en westelijke koersen.

2.3.1 De coriolisversnelling

Het corioliseffect zal zorgen voor een schijnbare afbuiging, deze afbuiging kunnen we beschrijven als een gevolg van een schijnbare kracht, oftewel de corioliskracht. Deze kracht zal op zijn beurt ook een schijnbare versnelling hebben, de coriolisversnelling. We spreken van een schijnbare afbuiging omdat de afbuiging waargenomen wordt in een roterend assenstelsel. We beschouwen hiernaast een ander vast assenstelsel met beide de zelfde oorsprong. Zo kunnen we een verband zoeken tussen de absolute versnelling \vec{a}_{abs} oftewel de versnelling in het vast assenstelsel en de relatieve versnelling \vec{a}_{rel} oftewel de versnelling in het roterend assenstelsel. Dit verband wordt gegeven door

$$\vec{a}_{rel} = \vec{a}_{abs} - 2\vec{\omega} \times \vec{v} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}).^6$$

Waarin \vec{a}_{abs} de absolute versnelling weergeeft, de versnelling die wordt waargenomen ten opzichte van het vast referentiestelsel. De versnelling \vec{a}_{rel} geeft de relatieve versnelling weer oftewel de versnelling die wordt waargenomen in het roterend referentie stelsel. De factor \vec{v} beschrijft de snelheid van een voorwerp ten opzichte van het roterend referentiestelsel.

⁶ Afleiding terug te vinden in Bijlage I (Luyckx, 2010) en (Alonso & Finn, 1973).

Hier vinden we de term $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$, die de centrifugale versnelling⁷ (\vec{a}_s) weergeeft. Deze is enkel afhankelijk van de grootte van de straal, die op zijn beurt afhankelijk is van de positie op aarde, specifiek de breedteligging. De tweede term $-2\vec{\omega} \times \vec{v}$ geeft de coriolisversnelling (\vec{a}_c) weer. Deze term is afhankelijk van \vec{v} oftewel de relatieve snelheid van een voorwerp ten opzichte van het roterend assenstelsel.

Zo kunnen we deze formule herschrijven als

$$\vec{a}_{abs} = \vec{a}_{rel} + \vec{a}_c + \vec{a}_s$$

We definiëren coriolisversnelling gegeven is door $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$, weten we dus dat volgens de tweede wet van Newton⁸, de corioliskracht gegeven wordt door

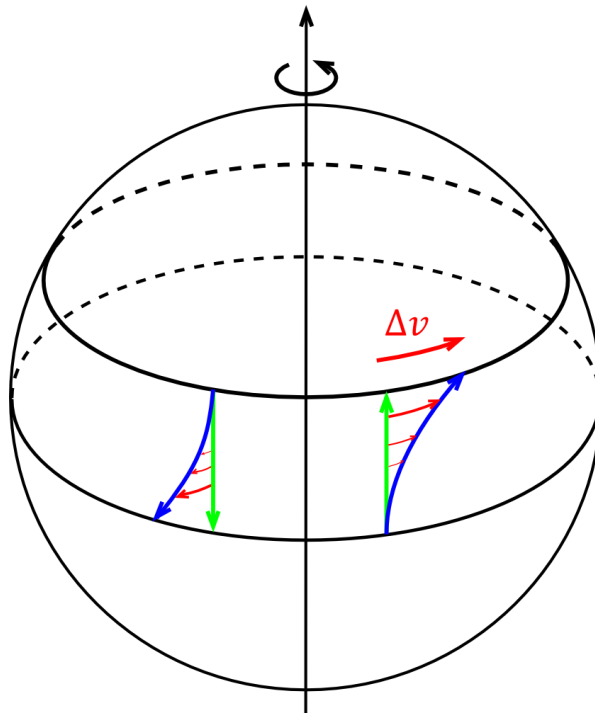
$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} \quad (2.1)$$

Omdat de corioliskracht gegeven wordt door het vectorieel product van de rotatiesnelheid en de richting van de beweging van het voorwerp, zal deze vector steeds loodrecht gericht zijn op het vlak gegeven door de vectoren $\vec{\omega}$ en \vec{v} .

⁷ Centrifugale kracht of de middelpuntvliedende kracht is een schijnkracht die ontstaat wanneer het voorwerp zich in een roterend stelsel bevindt. Wanneer deze kracht een positieve waarde heeft zal deze weg van het middelpunt van de rotatie gericht zijn. De grootte van deze kracht is gegeven door $F = m \frac{v^2}{r}$.

⁸ De tweede wet van Newton geeft dat de verandering van de impuls recht evenredig is met de resulterende kracht. Stelt in symbolen $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$, indien de massa constant is.

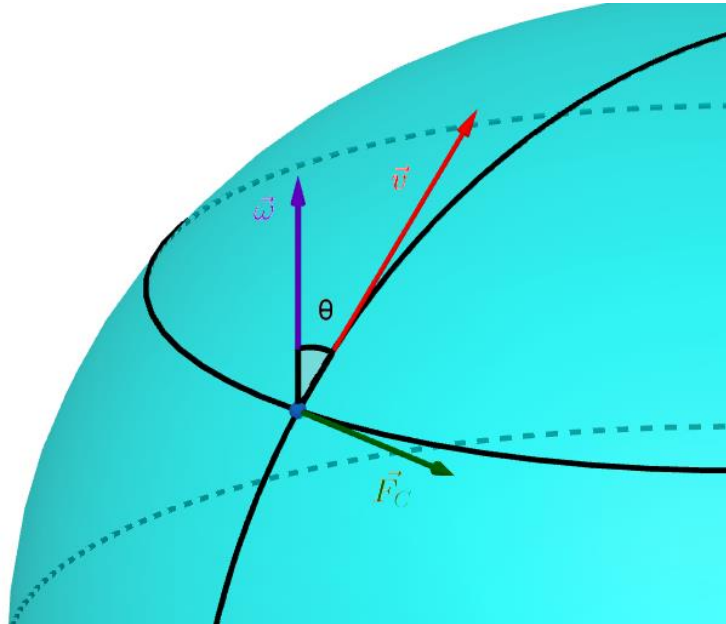
2.3.2 Verplaatsing richting noorden/zuiden



Figuur 10 Corioliseffect op de aardbol
Bron: eigen werk

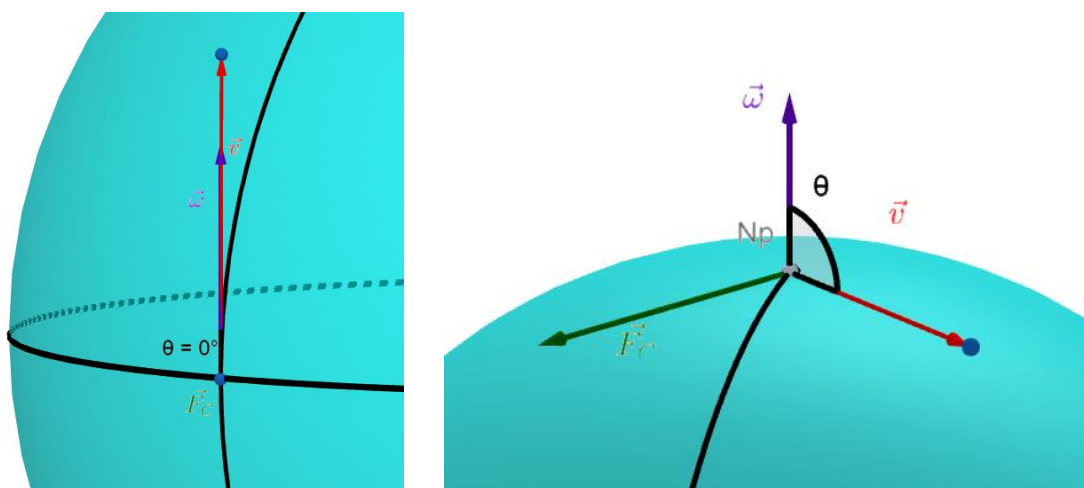
In Figuur 10 Corioliseffect op de aardbol bekijken we de verplaatsing richting het noorden of het zuiden, waarbij de breedtegraden wel veranderen. We bekijken eerst het noordelijk halfrond. Een voorwerp dat zich oorspronkelijk bevindt op de evenaar heeft een baan richting het noorden. Door deze verplaatsing komt het voorwerp dichterbij de rotatieas waardoor deze terecht komt in een baan met een kleinere baansnelheid. Door behoud van impuls ten opzichte van het absolute assenstelsel gaat het voorwerp zijn oorspronkelijke baansnelheid behouden die dus groter is dan de voorziene baansnelheid. We kunnen dit bekijken alsof het voorwerp 'voorloopt' op de aardbol, waardoor er dus een afbuiging naar rechts zichtbaar zal zijn. Wanneer het voorwerp vanuit een punt in het noordelijk halfrond richting de evenaar zal verplaatsen zal de oorspronkelijke baansnelheid dan kleiner zijn dan de voorziene baansnelheid op de evenaar waardoor het lijkt alsof het voorwerp 'achterblijft'. Dit zullen wij als waarnemen vanaf het roterend assenstelsel, de aarde, waarnemen als een afbuiging.

Voorwerpen die zich verplaatsen in het *noordelijke halfrond* zullen dus altijd afbuigen naar *rechts*. Op het *zuidelijk halfrond* vinden we met dezelfde redenering dat deze afbuiging hier steeds naar *links* zal zijn.



Figuur 11 Noordelijke koers
Bron: eigen werk met Geogebra

Om de grootte van de corioliskracht die werkt op het voorwerp in beweging te bepalen, nemen we formule 2.1 erbij. De richting van \vec{F}_c zal afhankelijk zijn van de hoek θ tussen $\vec{\omega}$ en \vec{v} , waarin $\vec{\omega}$ constante grootte en richting heeft op aarde.

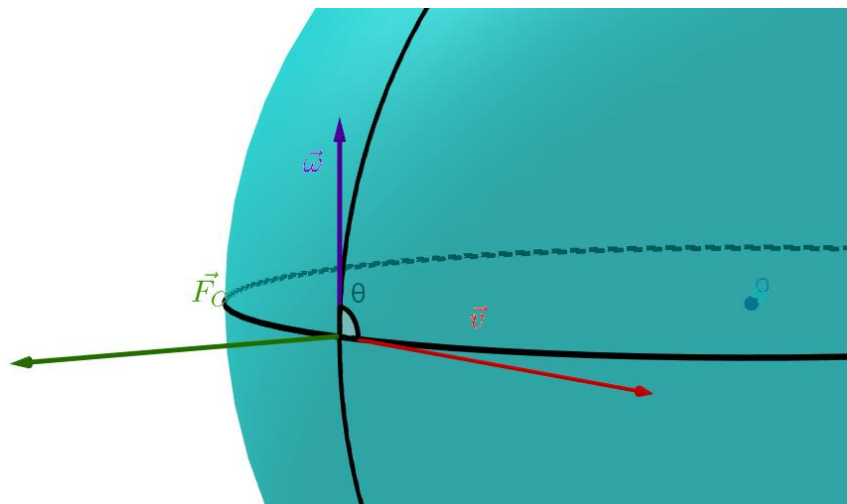


Figuur 12 Links: minimale grootte θ op de evenaar, rechts: maximale grootte θ op de noordpool
Bron: eigen werk met Geogebra

Zo zien we eenvoudig dat wanneer het voorwerp zich op de evenaar bevindt en het voorwerp verplaatst richting de noordpool, de hoek θ gelijk is aan nul, dus de grootte van \vec{F}_c zal ook nul zijn en dus minimaal. In tegenstelling tot wanneer het voorwerp zich op de noordpool bevindt, waar de hoek θ maximaal en dus ook \vec{F}_c een maximale grootte zal bereiken. Deze kracht zal te zien zijn op de aardbol door een afbuiging in de richting van \vec{F}_c . Voor het noordelijk halfrond zal dit dus naar rechts zijn en op het zuidelijk halfrond naar links ten opzichte van de relatieve snelheid.

2.3.3 Verplaatsing richting oosten/westen

Vervolgens bekijken we de verplaatsing richting het oosten of het westen. Hier zal de breedtegraad van het voorwerp gedurende de verplaatsing niet veranderen. Aangezien deze constant zal blijven, zal dus ook de afstand tot de rotatieas constant blijven en zouden we verwachten dat er hier geen sprake is van een corioliskracht. Wanneer we echter *formule (2.1)* bekijken, zullen we in dit geval merken we dat er wel effectief sprake is van een corioliskracht.



Figuur 13 Verplaatsing richting oosten
Bron: eigen werk met Geogebra

De hoek θ zal dus gedurende de gehele verplaatsing maximaal blijven en gelijk aan 90° met als gevolg dat de grootte van \vec{F}_c constant zal blijven. We zien dat de richting van deze kracht in het parallelvlak ligt loodrecht op de raaklijn van het aangrijpingspunt staat weg van het middelpunt van de aarde. Het parallelvlak wordt beschreven door de het vlak van de parallel van het aangrijpingspunt. Dit heeft als gevolg dat we geen afbuiging krijgen maar wel dat de corioliskracht het voorwerp omhoog zal tillen.

Wanneer we een westelijke koers bekijken zal \vec{F}_c gericht naar het middelpunt van de parallel van het aangrijpingspunt. Dit zal voor een inzinking van het voorwerp zorgen.

2.4 Grootte van het corioliseffect

Volgens formule (2.1) is de corioliskracht gegeven door

$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} = 2 \cdot m \cdot \vec{v} \times \vec{\omega}.$$

De grootte van de corioliskracht is dan

$$|\vec{F}_c| = 2 \cdot m \cdot |\vec{\omega} \times \vec{v}|$$

$$|\vec{F}_c| = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot v \cdot \sin(\theta) \quad (2.4.1)$$

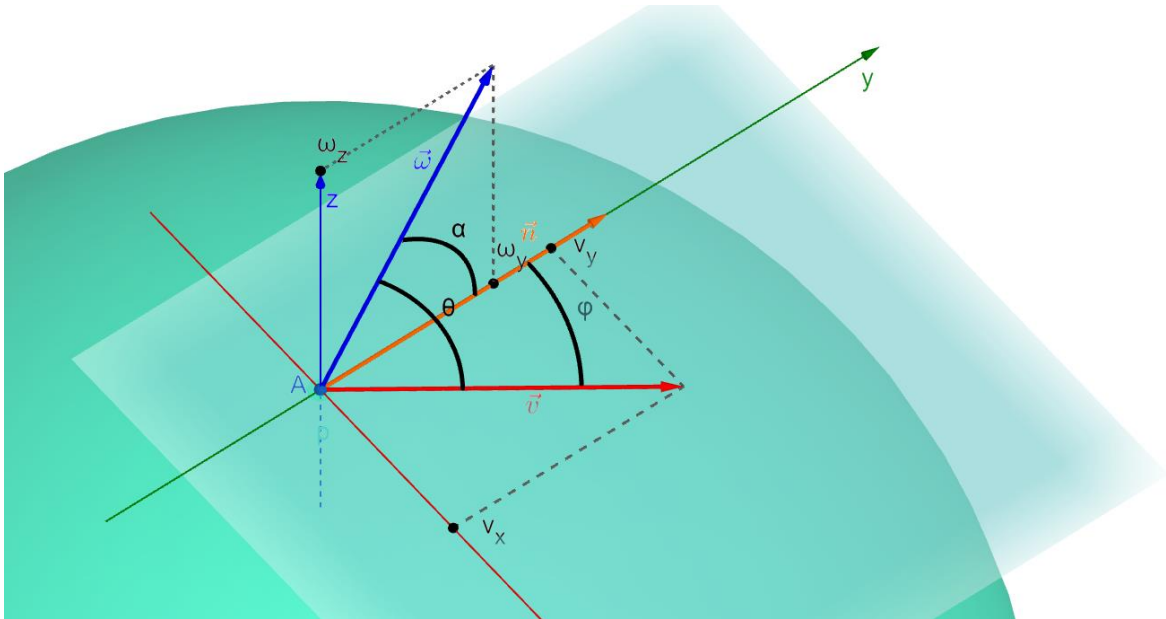
Waarin θ de hoek tussen $\vec{\omega}$ en \vec{v} weergeeft.

Wanneer we dan het corioliseffect op een schip bespreken gaan we ervan uit dat we de volgende scheepskarakteristieken weten: de koers, de snelheid en de massa van het schip alsook de positie (aangrijpingspunt A), waarin enkel de breedteligging een invloed zal hebben op het corioliseffect.

2.4.1 Hoek θ in functie van de koers en de breedteligging

We merken op dat om de grootte van de corioliskracht te berekenen we de hoek θ , hoek tussen $\vec{\omega}$ en \vec{v} , nodig is. Deze hoek θ is afhankelijk van de koers (φ) en de breedteligging (α). De koers wordt weergegeven door de hoek φ , de hoek tussen de relatieve snelheid en de vector \vec{n} , deze vector volgt de raaklijn aan de meridiaan in het aangrijpingspunt en is gericht naar het noorden.

Om de hoek θ te berekenen bekijken we het loodvlak in aangrijpingspunt A. Waarin de x-as overeenkomt met de raaklijn aan de parallel in het aangrijpingspunt A, zo zal de positieve x-as overeenkomen met een koers richting het oosten. De y-as zal worden genomen volgens de vector \vec{n} die overeen komt met een koers richting noorden en de z-as het verlengde is van de vector \vec{OA} , met OA de rechte door het middelpunt van de aarde en het aangrijpingspunt A.



Figuur 14 De hoek θ in functie van α en φ
Bron: eigen werk met Geogebra

Voor de vectoren $\vec{\omega}$ en \vec{v} vinden we dat

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \cdot \sin \varphi \\ v \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \text{ en } \vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \cdot \cos \alpha \\ \omega \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}. \quad (2.4.2)$$

De hoek θ is gegeven door de hoek tussen $\vec{\omega}$ en \vec{v} , waardoor

$$\cos \theta = \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{v}}{\omega \cdot v}.$$

Wanneer we hier het inproduct $\vec{\omega} \cdot \vec{v}$ berekenen met de vectoren gegeven in (2.4.2), vinden we dat

$$\cos \theta = \frac{(v \cdot \cos \varphi) \cdot (\omega \cdot \cos \alpha)}{\omega \cdot v}.$$

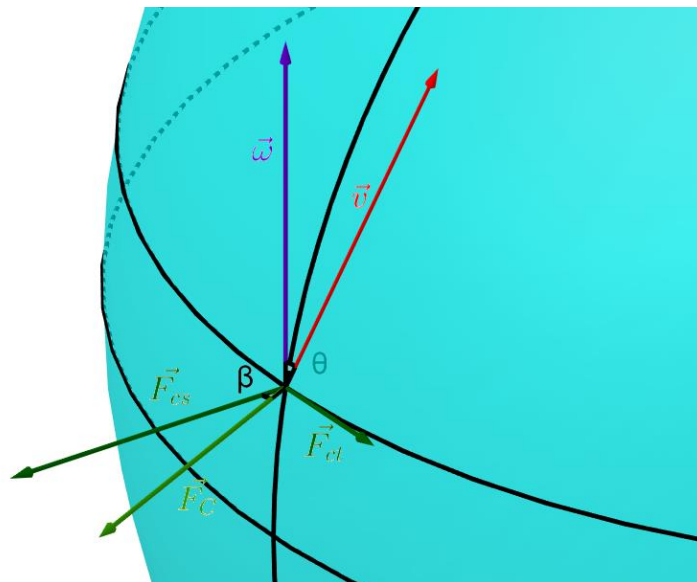
Met

$$\theta = \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \alpha). \quad (2.4.3)$$

Nu we de hoek θ kunnen berekenen in functie van φ en α , kunnen we met formule (2.4.1) de grootte van de corioliskracht berekenen.

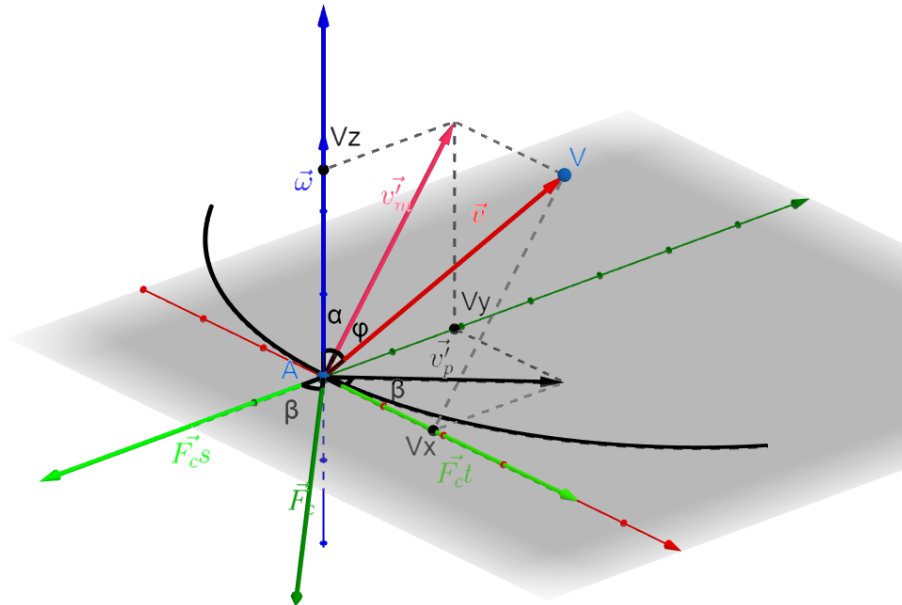
2.5 Corioliskracht ontbonden in componenten

Wanneer we koersen beschouwen die niet enkel noord/zuid of west/oost gericht zijn, zullen we de vector \vec{F}_C moeten gaan ontbinden in een tangentiële component \vec{F}_{ct} en een centrifugale component \vec{F}_{cs} . Dit zal meer vertellen dan de grootte en de richting van \vec{F}_C . De tangentiële component volgt de raaklijn in het aangrijpingspunt. Deze zal de grootte en de richting van de afbuiging weergeven. De centrifugale component staat loodrecht op $\vec{\omega}$ en op de raaklijn in het aangrijpingspunt en geeft weer of het voorwerp zal worden opgetild of inzinkt. Omdat de optilling of inzinking van het voorwerp richting de vector \vec{OA} verloopt, zal de centrifugale component \vec{F}_{cs} niet direct de grootte hiervan weergeven. Hier komen we later op terug.



Figuur 15 Corioliskracht ontbonden in tangentiële en centrifugale component
Bron: eigen werk met Geogebra

Omdat we de grootte van \vec{F}_C weten, ontbreekt enkel nog de hoek tussen \vec{F}_C en de componenten. We definiëren de hoek β als de hoek tussen \vec{F}_C en de centrifugale component \vec{F}_{cs} . Om deze hoek te berekenen, volgen we een soortgelijke redenering als in 2.4.1, maar zullen hiervoor met een ander assenstelsel werken. We nemen de vlakken die beschreven worden door de parallel in punt A en het vlak dat beschreven wordt door de meridiaan in punt A. Zo verkrijgen we een assenstelsel met x-as volgens de tangentiële component van \vec{F}_C oftewel de oost-west richting, met de richting oost positief en een y-as volgens de centrifugale component van \vec{F}_C en een z-as volgens $\vec{\omega}$.



Figuur 16 De hoek β in functie van α en φ
 Bron: eigen werk met Geogebra

We zoeken de coördinaten van de vector \vec{v} . De x-coördinaat v_x van \vec{v} , kunnen we eenvoudig berekenen omdat de hoek die \vec{v} maakt met de x-as gelijk is aan $90^\circ - \varphi$. Zo krijgen we

$$\cos(90^\circ - \varphi) = \frac{v_x}{v}$$

oftewel

$$v_x = v \cdot \sin \varphi.$$

Voor de y- en z-coördinaat zullen we eerst de vector \vec{v} projecteren in het meridiaanvlak, het yz-vlak bepaald door de meridiaan in A en loodrecht staat op de x-as. Zo bekomen we de vector \vec{v}_m . De grootte hiervan wordt gegeven door

$$v_m = v \cdot \cos \varphi.$$

Met behulp van deze vector, kunnen we de y- en z-coördinaat verder bepalen. Zo krijgen we dan

$$v_y = -v_m \cdot \sin \alpha$$

en

$$v_z = v_m \cdot \cos \alpha.$$

Nu is het mogelijk om \vec{v} te schrijven in coördinaten volgens het gegeven assenstelsel

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \cdot \sin \varphi \\ -v_m \cdot \sin \alpha \\ v_m \cdot \cos \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cdot \sin \varphi \\ -v \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha \\ v \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

De vector \vec{v}_p is de projectie van \vec{v} in het parallelvlak, het vlak dat beschreven wordt door de parallel in punt A, oftewel het xy-vlak. Hierdoor zal \vec{v}_p gegeven worden door

$$\vec{v}_p = \begin{pmatrix} v \cdot \sin \varphi \\ -v \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Omdat we weten dat \vec{F}_c loodrecht staat op ω , staat \vec{F}_c ook loodrecht op het vlak bepaald door \vec{v} en $\vec{\omega}$. Bijgevolg staat \vec{F}_c ook loodrecht op \vec{v}_p . Omdat de componenten van \vec{F}_c eveneens loodrecht op elkaar staan vinden we dat de hoek β , $\angle \vec{F}_{cs} \vec{F}_c$, gelijk is aan de hoek $\angle \vec{F}_{ct} \vec{v}_p$. Zo kunnen we met behulp van de vector \vec{v}_p de hoek β berekenen door

$$\tan \beta = \left| \frac{v_y}{v_x} \right| = \frac{\varphi \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha}{\varphi \cdot \sin \varphi}$$

met als gevolg

$$\beta = \arctan(\cot \varphi \cdot \sin \alpha). \quad (2.5.1)$$

Nu de hoek β gekend is, zal het mogelijk zijn om de grootte van de tangentiële en de centrifugale componenten van \vec{F}_c te berekenen als volgt

$$F_{ct} = F_c \cdot \sin \beta \quad (2.5.2)$$

en

$$F_{cs} = F_c \cdot \cos \beta. \quad (2.5.3)$$

Met behulp van deze formules kunnen we zowel de grootte van de corioliskracht alsook de groottes van de factoren van \vec{F}_c berekenen in functie van de koers φ , de breedteligging α , de snelheid v en de massa van het schip.

Echter deze componenten van \vec{F}_c zullen ons geen direct beeld geven welk effect de corioliskracht zal hebben op een schip. Daarom zoeken we een algemeen notatie voor de coriolisversnelling om op een eenvoudige manier de componenten te berekenen die ons wel een direct beeld zal geven over de inzinking of opstijging en de afbuiging van een schip.

De inzinking of optijging zal verlopen volgens de vector \overrightarrow{OA} , en de vector die de afbuiging zal weergeven staat loodrecht op \vec{v} en ligt in het raakvlak aan de bol in punt A. Daarom maken we gebruik van het volgende assenstelsel: de x-as volgens de vector \vec{F}_{ct} , oftewel de oost-west richting, de y-as volgens de vector \vec{n} , oftewel de noord-zuid richting en de z-as loodrecht op het vlak p , oftewel volgens de vector \overrightarrow{OA} .

In dit assenstelsel weten we volgens formule (2.4.2) dat

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \cdot \sin \varphi \\ v \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \text{ en } \vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \cdot \cos \alpha \\ \omega \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}.$$

We krijgen dan

$$\vec{a}_c = 2 \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} = 2 \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \omega \cdot \cos \alpha & \omega \cdot \sin \alpha \\ v \cdot \sin \varphi & v \cdot \cos \varphi & 0 \end{vmatrix}.$$

$$\vec{a}_c = 2\omega v(-\sin \alpha \cos \varphi \vec{i} + \sin \alpha \sin \varphi \vec{j} - \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}). \quad (2.5.4)$$

Deze uitdrukking geeft de coriolisversnelling weer ten opzichte van het gegeven assenstelsel. Op basis van uitdrukking (2.5.4) kunnen we de grootte van de corioliskracht op een alternatieve manier als volgt berekenen.

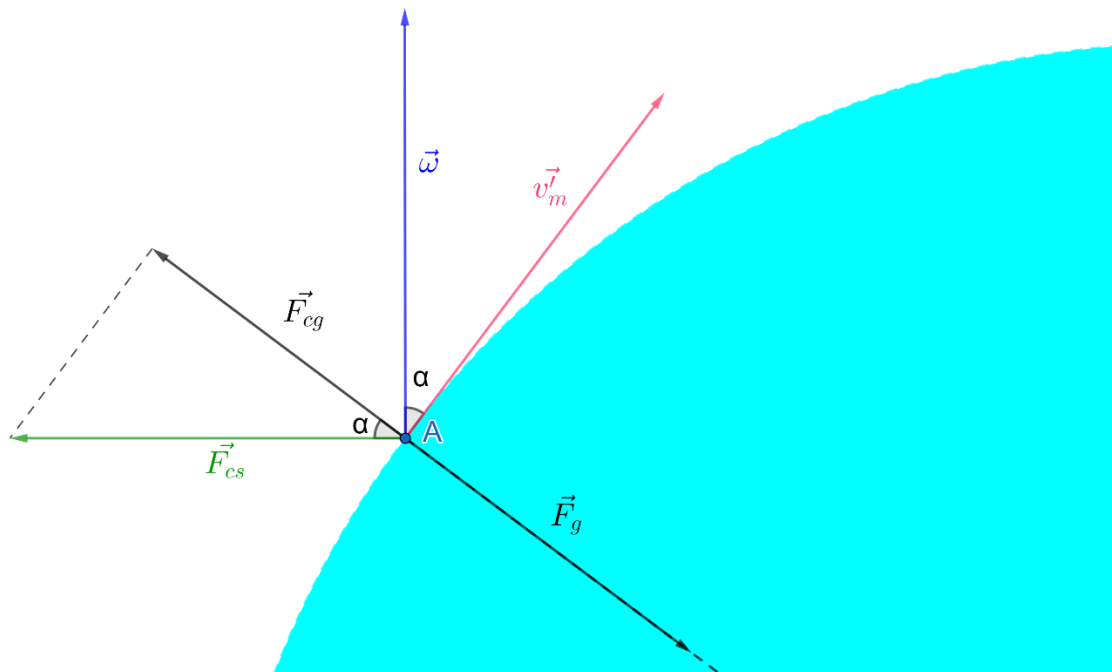
$$\vec{F}_c = 2m\omega v(-\sin \alpha \cos \varphi \vec{i} + \sin \alpha \sin \varphi \vec{j} - \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}).$$

$$F_c = 2m\omega v \sqrt{\sin^2 \alpha \cos^2 \varphi + \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi + \cos^2 \alpha \sin^2 \varphi},$$

$$F_c = 2m\omega v \sqrt{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \sin^2 \varphi}. \quad (2.5.5)$$

Door F_c op deze manier te berekenen zullen we een absolute waarde voor F_c verkrijgen. Daarom moeten we bij deze formule steeds bij vermelden dat \vec{F}_c een richting heeft weg van de rotatieas van de aarde bij een koers tussen 0° en 180° en \vec{F}_c naar de rotatieas van de aarde gericht is bij een koers tussen 180° en 360° . Terwijl we bij de eerste methode telkens een teken bij F_c zullen verkrijgen die de richting aangeeft. Een positieve waarde voor F_c komt overeen met een richting voor \vec{F}_c weg van de rotatieas terwijl een negatieve waarde voor F_c zal overeen komen met een richting voor \vec{F}_c naar de rotatieas toe.

2.5.1 Schijnbare verandering van het gewicht



Figuur 17 Schijnbare verandering van het gewicht
Bron: eigen werk met Geogebra

Door de centrifugale component \vec{F}_{cs} zal het gewicht van het schip schijnbaar veranderen. Omdat gewicht op aarde altijd bepaald wordt door de zwaartekracht \vec{F}_g zal deze schijnbare verandering echter niet lopen volgens de centrifugale component van \vec{F}_c maar wel in dezelfde richting als de zwaartekracht. We projecteren \vec{F}_{cs} daarom op de rechte vanuit het middelpunt van de aarde door het aangrijpingspunt A. Deze component van \vec{F}_{cs} noemen we de schijnbare verandering van het gewicht \vec{F}_{cg} . De grootte van deze verandering \vec{F}_{cg} wordt gegeven door

$$F_{cg} = F_{cs} \cdot \cos \alpha.$$

Wanneer we dit invullen in formule (2.5.3) krijgen we dat

$$F_{cg} = F_c \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha.$$

Deze methode geeft ons een goed beeld van de richting van \vec{F}_{cg} . Om de grootte van deze component te berekenen kunnen we op een eenvoudige manier gebruik maken van de formule (2.5.4) waar

$$\vec{a}_c = 2\omega v(-\sin \alpha \cos \varphi \vec{i} + \sin \alpha \sin \varphi \vec{j} - \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}).$$

\vec{F}_{cg} zal in dit assenstelsel volgens de z-as lopen, oftewel volgens de richting van \vec{k} . Zo kunnen we voor de verticale component \vec{a}_{cg} , de component met richting volgens de zwaartekracht stellen dat

$$\vec{a}_{cg} = -2\omega v \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}.$$

Met gevolg dat

$$\vec{F}_{cg} = 2\omega v m \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}. \quad (2.5.6)$$

Deze vector \vec{F}_{cg} zal echter wel de schijnbare verandering van het gewicht weergeven. Ook nu zal deze methode van berekenen een absolute waarde voor \vec{F}_{cg} geven. Het teken van F_{cg} zal afhangen van de koers van het schip. Bij een koers van 0° tot 180° zal \vec{F}_{cg} opwaarts gericht zijn ($\sin \varphi > 0$), in dezelfde zin als \vec{k} . De zin van \vec{F}_{cg} is dus tegengesteld zijn aan de zin van \vec{F}_g , waardoor het schip schijnbaar lichter zal zijn. Dit wordt waargenomen als een opstijging van het schip oftewel een vermindering van diepgang. Bij een koers φ van 180° tot 360° zal \vec{F}_{cg} neerwaarts gericht zijn ($\sin \varphi < 0$), tegengesteld aan de zin van \vec{k} . De verticale component \vec{F}_{cg} zal dezelfde zin hebben als \vec{F}_g , waardoor het schip schijnbaar zwaarder zal worden. Dit wordt waargenomen als een inzinking van het schip, een vergroting van de diepgang.

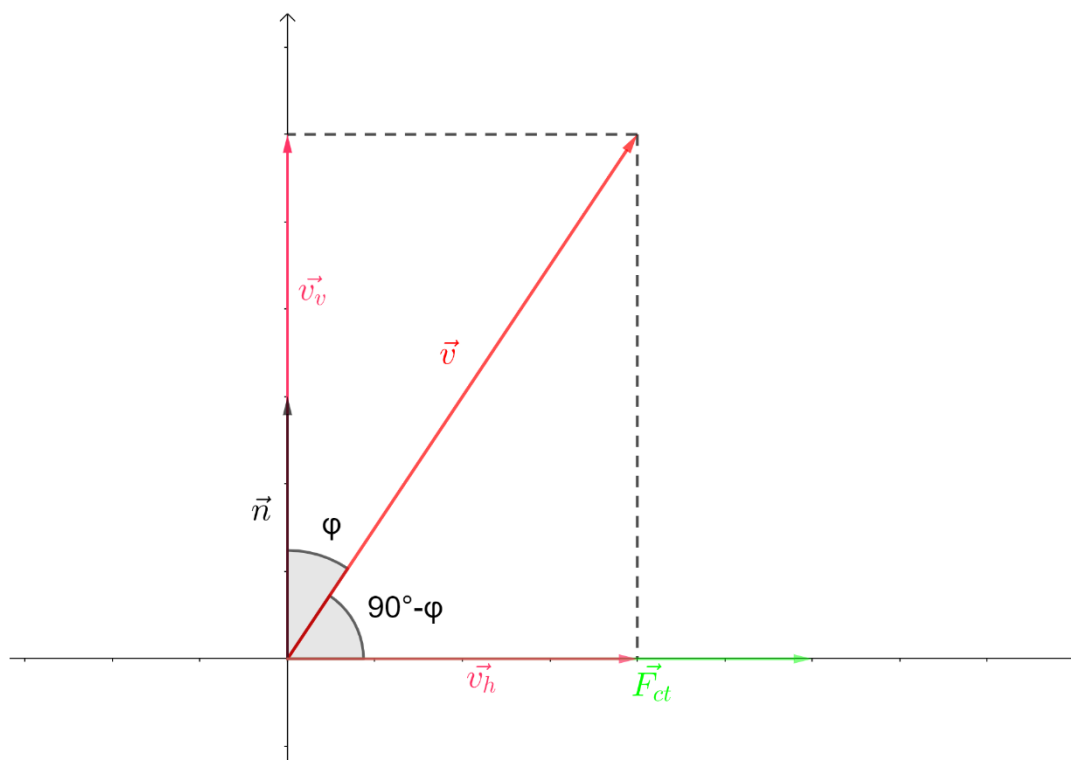
2.5.1.1 Het Eötvös effect

Wanneer er rond 1900 zwaartekrachtmetingen werden uitgevoerd aan boord van schepen, viel het de Hongaarse fysicus Lorand Eötvös (1848 – 1919) op dat er verschil zat op metingen van schepen met een oostelijke richting en schepen met een westelijke richting. Voor schepen met een richting naar het oosten waren de metingen lager dan de schepen richting het westen. Dit was volgens Eötvös te wijten aan het feit dat de aarde rond zijn as draait. Om deze afwijking te berekenen werd er een algemene formule opgesteld voor de correctie bij beweging ten opzichte van de aarde a_r

$$a_r = 2\omega v_h \cos \alpha + \frac{v_h^2 + v_v^2}{R}. \quad (2.5.7)$$

Hier stelt \vec{v}_h de horizontale component van de snelheid \vec{v} voor volgens de richting oost – west en \vec{v}_v de verticale component van de snelheid \vec{v} volgens de richting van de vector \vec{n} oftewel richting noord – zuid.

We bekijken het raakvlak in het aangrijpingspunt A.



Figuur 18 Componenten van v in het raakvlak
Bron: eigen werk met Geogebra

Met behulp van Figuur 18 kunnen we de componenten van \vec{v} berekenen. Zo krijgen we

$$v_h = v \sin \varphi,$$

$$v_v = v \cos \varphi.$$

Als we dit invullen in formule (2.5.7) krijgen we

$$a_r = 2\omega v \sin \varphi \cos \alpha + v^2 \frac{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi}{R}$$

$$a_r = 2\omega v \sin \varphi \cos \alpha + \frac{v^2}{R}.$$

De eerste term komt overeen met wat we in hoofdstuk 2.5.1 bekomen zijn voor de verticale component van de corioliskracht. De tweede term vinden we terug in hoofdstuk 2.3.1 als de centrifugale versnelling. De schijnbare verandering van het gewicht is dus een gevolg de corioliskracht, de verticale component, maar ook van de centrifugale kracht. We kunnen dus deze correctie noteren als

$$\vec{a}_r = \vec{a}_{cg} + \vec{a}_s.$$

Bij schepen zal de tweede term \vec{a}_s niet benoemswaardig zijn omdat de snelheid van schepen relatief laag ligt. Afleiding gebaseerd op (Luyckx, 2010) en (Alonso & Finn, 1973).

2.5.1.2 Grootte van de schijnbare verandering van het gewicht

Massa op aarde gaat gepaard met zwaartekracht, daarom zullen we om effectief te weten hoe groot deze schijnbare verandering Δm zal zijn, zullen we de correctie a_r moeten vergelijken met de gravitatie versnelling a_g (9,84 m/s²). Het schijnbaar gewicht M wordt berekend door

$$M = m \frac{a_g \pm a_r}{a_g}. \quad (2.5.8)$$

Bij een koers van 0° tot 180° zal de richting van \vec{a}_r tegengesteld zijn aan de richting van \vec{a}_g , Hier nemen we dan het verschil van de versnellingen en zal het schip schijnbaar minder wegen. Wanneer er een koers is van 180° tot 360° zal de richting van \vec{a}_r dezelfde zijn aan de richting van \vec{a}_g , daarom nemen we bij deze koers de som van de versnellingen. Het schip zal dan schijnbaar meer wegen.

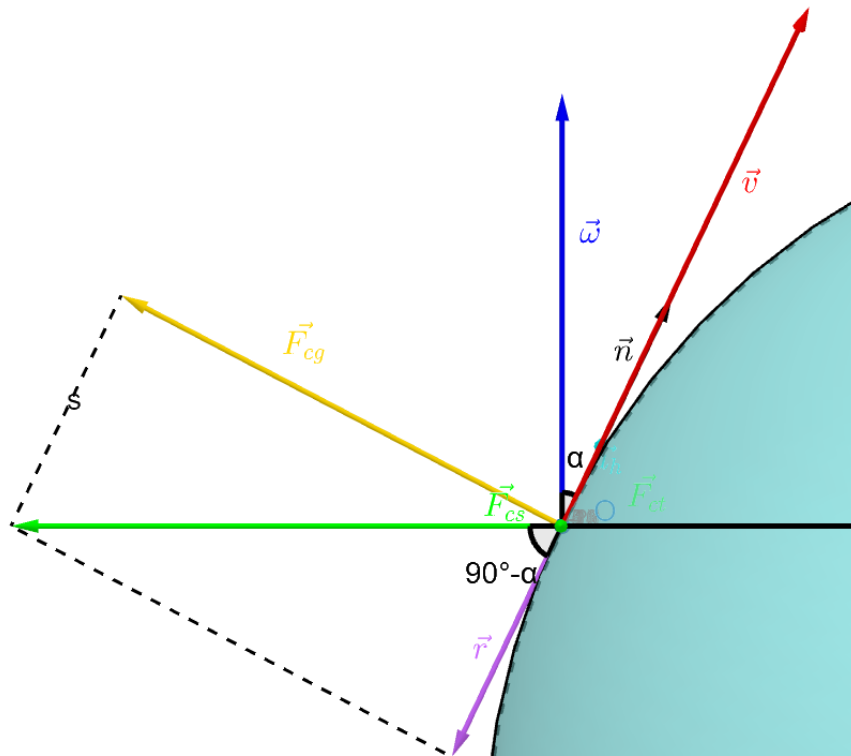
Welke effect dit gaat hebben op de diepgang zal afhankelijk zijn van de TPC⁹. Deze berekenen vallen onder stabiliteit en zijn vrij complex. Omdat de verandering van het schijnbaar gewicht verwaarloosbaar klein is en het te complex is om ook list en trim door externe factoren in rekening te brengen zullen we voor de rest van de scriptie elk schip beschouwen als een puntmassa. Alle krachten die op dit punt inwerken en de diepgang van het schip zullen recht evenredig zijn met de massa. Op deze manier wordt het duidelijker hoe de coriliskracht inwerkt op het schip.

2.5.1.3 De grootte en de richting van de afbuiging

Een schip met een snelheid volgens \vec{v} zal afbuigen op een cirkel met een kromtestraal ρ . Deze cirkel ligt in het raakvlak aan de aarde in het aangrijpingspunt A. Dit vlak definiëren we als vlak p . Zo zal dus ook de afbuiging zich in dit vlak bevinden.

De richting van de afbuiging zal volgens de horizontale component van \vec{F}_c lopen. Dit is de component van \vec{F}_c die geprojecteerd is in het raakvlak en op dit vlak loodrecht staat op \vec{v} . Deze component definiëren we als \vec{F}_{ch} en wordt gegeven door de som van transversale component \vec{F}_{ct} en de projectie \vec{r} , van \vec{F}_{cs} op het vlak p .

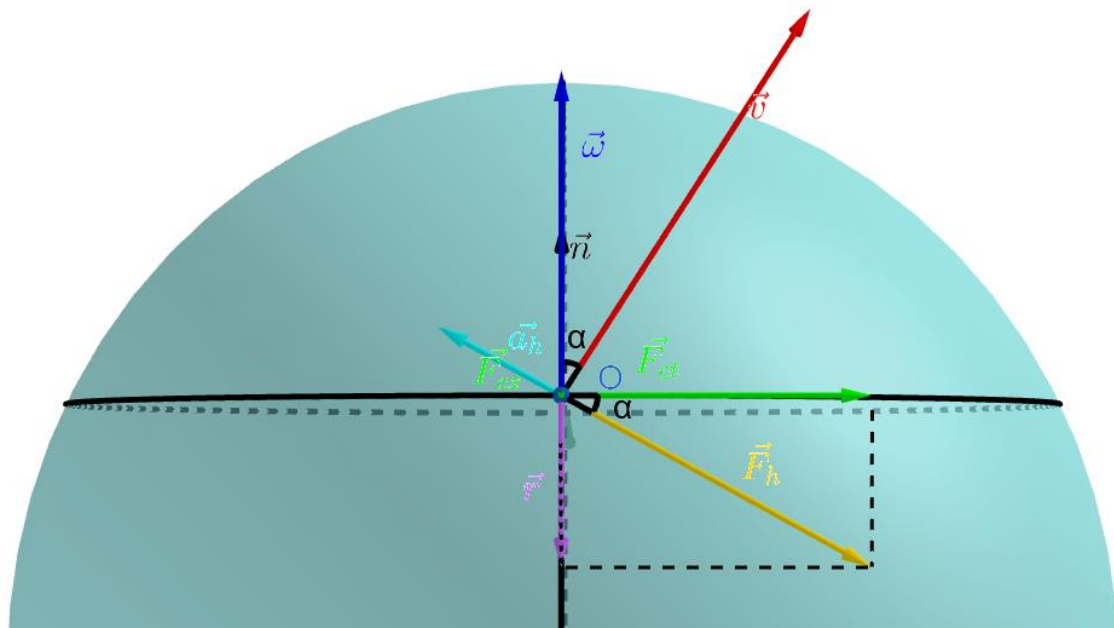
⁹ TPC (of tonnage per centimeter) voor elke gegeven diepgang is de massa die geladen of gelost moet worden om de gemiddelde diepgang van het schip te veranderen met 1 cm. Bron: (Kumar Singh, z.d.)



Figuur 19 Projectie centrifugale component op raakvlak
Bron: eigen werk met Geogebra

De projectie \vec{r} zal dan gegeven worden door

$$\vec{r} = F_{cs} \sin \alpha.$$



Figuur 20 Horizontale component van de corioliskracht
Bron: eigen werk met Geogebra

In Figuur 20 zien we dat \vec{F}_{ch} gegeven wordt door de som van de vectoren \vec{r} en \vec{F}_{ct} .

$$\vec{F}_{ch} = \vec{r} + \vec{F}_{ct}. \quad 2.5.8$$

Om de grootte van de kromtestraal te berekenen, gebruiken we de formule voor de normale versnelling a_n die eerder aan bod kwam in hoofdstuk 2.2.1.

$$a_n = \frac{v^2}{\rho}.$$

De afbuiging van het schip zal waargenomen worden in het raakvlak aan de aarde, ρ , het zelfde vlak waarin ook de vector \vec{v} zich bevindt. Daarom wordt de kromtestraal berekend op basis van de component van de versnelling in dit zelfde vlak. We definiëren de horizontale component van de versnelling in het vlak ρ als \vec{a}_{ch} . Omdat \vec{a}_{ch} loodrecht staat op \vec{v} , mogen we stellen dat

$$\rho = \frac{v^2}{a_{ch}}. \quad 2.5.9$$

Volgens dezelfde redenering als formule (2.5.8) zien we \vec{a}_{ch} gegeven wordt als

$$\vec{a}_{ch} = \frac{\vec{r}}{m} + \vec{a}_{ct}.$$

Volgens het assenstelsel gedefinieerd in hoofdstuk 2.5, zal de coriolisversnelling gegeven worden door

$$\vec{a}_c = 2\omega v(-\sin \alpha \cos \varphi \vec{i} + \sin \alpha \sin \varphi \vec{j} - \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}).$$

Omdat \vec{a}_{ch} de projectie in het vlak p is zal volgens dit assenstel, de horizontale component van de versnelling \vec{a}_{ch} zich in het XY-vlak bevinden en is gegeven door

$$\vec{a}_{ch} = 2\omega v(-\sin \alpha \cdot \cos \varphi)\vec{i} + (\sin \alpha \cdot \sin \varphi)\vec{j}.$$

De grootte van \vec{a}_{ch} wordt dus gegeven door

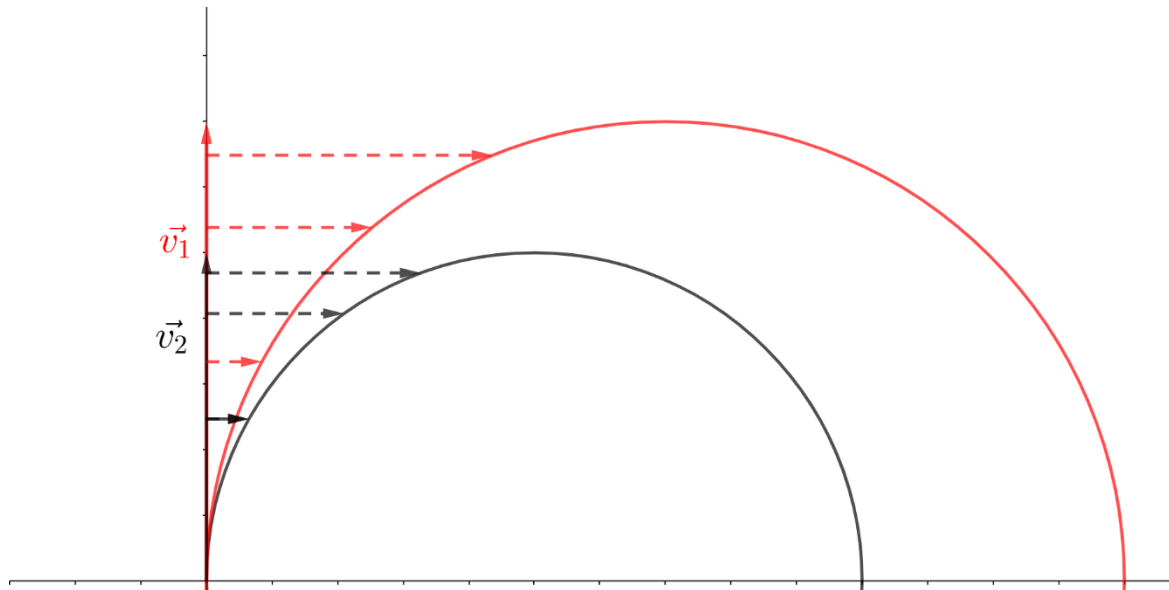
$$|\vec{a}_{ch}| = 2\omega v \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}$$

$$|\vec{a}_{ch}| = 2\omega v \sin \alpha.$$

Als we dit invullen in formule 2.5.9 krijgen we een uitdrukking voor de kromtestraal

$$\rho = \frac{v^2}{a_{ch}} = \frac{v}{2\omega \sin \alpha}.$$

De grootte van de kromtestraal ρ zal de baan waarin het schip afbuigt beschrijven. Hoe groter de waarde van ρ , hoe minder gekromd de kromme zal zijn die wordt beschreven als een stuk van een cirkel met straal ρ .



Figuur 21 Vereenvoudigde weergave van de kromtestraal
 Bron: eigen werk met Geogebra

De kromtestraal is evenredig met de snelheid van het schip. Hoe groter de snelheid van het schip hoe groter de kromtestraal zal zijn, hoe rechter de kromme (Bourne, 2019). Het schip zal dus initieel minder sterk afbuigen maar wel over een grotere afstand. Omgekeerd stellen we dat hoe trager het schip vaart, hoe kleiner de kromtestraal, hoe minder recht de kromme. Het schip zal dus sterker afbuigen maar over een minder grote afstand.

Ook zal de kromtestraal omgekeerd evenredig zijn met de breedteligging van het schip. Zo zien we dat op de evenaar α gelijk is aan nul, dus de kromtestraal oneindig groot is. Dit heeft als gevolg dat er op de evenaar geen afbuiging zal waargenomen worden. Naarmate het schip dichterbij de polen vaart, zal de breedteligging toenemen, waardoor de kromtestraal zal toenemen.

2.6 Praktisch voorbeeld: MV coriolis

Nu we weten hoe we de corioliskracht kunnen berekenen en wat alle componenten van deze kracht ons vertellen, kunnen we dit praktisch gaan berekenen om een beeld te krijgen van de groottes van de waarden die bekomen worden. Voor het eerste voorbeeld nemen we een schip dat een reis maakt van Antwerpen naar Kaapstad om nadien een schip te vergelijken met andere voorwerpen die op hun beurt ook zullen beïnvloed worden door het corioliseffect.

2.6.1 Schip

Voor dit voorbeeld nemen we een fictief schip MV Coriolis. Dit schip weegt in geladen toestand 400 000 T en heeft een maximale snelheid van 14 knopen. MV coriolis vertrekt uit de haven van Antwerpen met eindbestemming Kaapstad.

De voyage planning is gemaakt met behulp van de online tool via www.marinetraffic.com (MarineTraffic, z.d.). Er is gekozen voor dit traject om verschillende situaties te bekomen. Het schip zal met verschillende snelheden varen, de evenaar en de *Greenwich meridian* passeren en zal een koers van zowel groter als kleiner dan 180° hebben op een bepaald moment. Het gaat hier om een vereenvoudigde voyage planning die enkel de informatie bevat die betrekking heeft op de berekeningen van de corioliskracht. Er zijn enkele waypoints geselecteerd om een zo variabel mogelijk beeld te geven van de betekenis van de betreffende uitkomsten van de berekeningen.

Om een beter beeld te krijgen van het corioliseffect en de verandering van het schijnbaar gewicht gaan we ervan uit dat de dichtheid van het water constant zal blijven gedurende de hele reis. We nemen de gemiddelde waarde voor de dichtheid van de oceaan (1036 kg/m^3) (The Nature education, z.d.).



Figuur 22 Voyage planning Antwerpen – Kaapstad
Bron: bewerkt van Marine Traffic (z.d.)

Tabel 1 Voyage planning Antwerpen – Kaapstad, lijst waypoints
Bron: eigen werk uitgewerkt met (MarineTraffic, z.d.)

#	WP	l (latitude)	g (longitude)	Koers (°)	Snelheid (kn)
1	Antwerpen	51°17'17"	004°23'14"	Variabel	Variabel
2	Duinkerke (BEL)	51°25'10" N	002°01'36" E	246	6
3	Cherbourg (FRA)	50°07'19" N	002°15'44" W	243	6
4	Brest (FRA)	48°53'59" N	005°46'02" W	213	10
5	Compostella (ESP)	43°30'45" N	010°33'24" W	213	10
6	Can. Eilanden (ESP)	27°50'53" N	015°07'30" W	209	10
7	W. Sahara (MAR)	22°31'37" N	018°15'19" W	181	10
8	Dakar (SEN)	15°29'50" N	018°20'15" W	157	10
9	Monrovia (LBR)	8°55'09" N	015°41'31" W	143	10
10	Evenaar	0°00'00"	009°29'28" W	145	10
11	Kaapstad (ZAF)	33°52'06" S	018°18'09" E		10

1. Het schip MV Coriolis verlaat Antwerpen richting de Noordzee. Nadat de zeeloods het schip heeft verlaten in waypoint 2 vaart MV Coriolis een koers van 213° , met een snelheid van $6'$, om het schip goed te positioneren in de vaarstrook van het kanaal.

Tabel 2 Voorbeeld MV coriolis situatie 1
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,4	213	-153,5	-61,2	6,23	400 006	Rechts

Het teken bij de grootte van F_c wijst erop dat de corioliskracht gericht zal zijn naar de binnenkant van de aarde, met een zin naar de rotatieas toe. Het teken bij de grootte van de horizontale component F_{ch} zal er op wijzen dat deze in dezelfde richting zal wijzen als de zwaartekracht. Het schip zal dus schijnbaar meer wegen en schijnbaar inzinken, de diepgang zal dus toenemen.

2. Eens in de vaarstrook zal het schip zijn snelheid van $6'$ behouden en met een koers van 246° richting waypoint 3 het kanaal doorvaren. In realiteit zal dit echter niet in een rechte koers lukken.

Tabel 3 Voorbeeld MV coriolis, situatie 1 tot 2
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,4	213	-153,5	-61,2	6,23	400 006	Rechts
2	6	51,	246	-174,2	-102,6	10,5	400 010	rechts

We zien dat de corioliskracht zal veranderen met een verandering van koers. De koers zal meer richting het westen, de grootte van de corioliskracht F_c stijgt en de verticale component neemt toe. Dit zal waargenomen worden door een grotere toename van het schijnbaar gewicht. Het oversteken van de nul-meridiaan zal geen effect hebben op de corioliskracht, omdat de lengtegraad geen invloed heeft op het corioliseffect.

3. De MV coriolis verlaat het kanaal en zal bij het passeren van waypoint 4 de snelheid verhogen naar $10'$ en een koers volgen van 213° .

Tabel 4 Voorbeeld MV coriolis, vergelijking situatie 1 met 3
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,4	213	-153,5	-61,2	8,3	400 008	Rechts
2	6	51,4	246	-174,2	-102,6	13,9	400 014	Rechts
3	10	48,9	213	-250,4	-107,5	11	400 011	Rechts

We vergelijken situatie 1 met situatie 3 en zien dat de snelheid van het schip verhoogt terwijl de koers hetzelfde blijft. We zien een forse stijging in de grootte van de corioliskracht. Hoewel de horizontale component wel zal stijgen zal deze veel minder fors stijgen dan bij de koersverandering van situatie 1. Het schip zal dus zwaarder onderheven worden aan de verticale component van de corioliskracht door de verhoging van de snelheid.

We vereenvoudigen de route zodat het schip niet de Afrikaanse kust volgt maar wel naar waypoint 8 voort in een recht lijn vanaf waypoint 5 en in waypoint 8 zijn koers verandert om zo in een rechte lijn naar waypoint 11 te varen met de koers die berekend is voor het stuk van waypoint 10 naar waypoint 11.

4. Vlak voor het schip aankomt in waypoint 8 zal het schip nog steeds varen met een snelheid van 10' en een koers van 213°.

Tabel 5 Voorbeeld MV coriolis, vergelijking situatie 3 met 4
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,4	213	-153,5	-61,2	8,3	400 008	Rechts
2	6	51,4	246	-174,2	-102,6	13,9	400 014	Rechts
3	10	48,9	213	-250,4	-107,5	11,0	400 011	Rechts
4	10	15,5	213	-176,8	-157,6	16,0	400 016	Rechts

Het schip heeft een hele afstand afgelegd waardoor de breedteligging afgenomen is. De corioliskracht is afgenomen ten opzichte van situatie 3, maar de verticale component is echter wel nog toegenomen. Dit komt omdat naarmate we de evenaar naderen de horizontale component zal toenemen en deze maximaal zal zijn op de evenaar.

5. Nadat het schip waypoint 8 is gepasseerd zal ze haar koers veranderen naar 147°, met nog steeds een snelheid van 10'.

Tabel 6 Voorbeeld MV coriolis, Situatie 4 met5
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,4	213	-153,5	-61,2	8,3	400 008	Rechts
2	6	51,4	246	-174,2	-102,6	13,9	400 014	Rechts
3	10	48,9	213	-250,4	-107,5	11,0	400 011	Rechts
4	10	15,5	213	-176,8	-157,6	16,0	400 016	Rechts
5	10	15,5	147	176,8	157,6	-16,0	399 984	Rechts

Het schip zal eerst een koers hebben die groter is dan 180° , na het passeren van waypoint 8, zal de koers veranderen en kleiner worden dan 180° . De koersen 213° en 147° zijn tegengestelde hoeken, we zien dus geen verandering in de grootte van zowel de corioliskracht als de horizontale component, maar enkel een verandering van het teken. De corioliskracht zal nu gericht zijn naar buiten de aardbol. De horizontale component zal nu een tegengestelde richting hebben als de zwaartekracht en het schip zal dus opstijgen, de diepgang zal afnemen.

6. Het schip MV Coriolis vaart verder aan de zelfde snelheid en met dezelfde koers. Op waypoint 10 zal het de evenaar bereiken.

Tabel 7 Voorbeeld MV coriolis, vergelijking situatie 5 met6
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,42	213	-153,5	-61,2	8,3	400 008	Rechts
2	6	51,42	246	-174,2	-102,6	13,9	400 014	Rechts
3	10	48,9	213	-250,4	-107,5	11,0	400 011	Rechts
4	10	15,5	213	-176,8	-157,6	16,0	400 016	Rechts
5	10	15,5	147	176,8	157,6	-16,0	399 984	Rechts
6	10	0	147	163,5	163,5	-16,7	399 983	Geen

Op de evenaar zien we dus wel nog steeds een waarde voor zowel de corioliskracht als voor de horizontale component hiervan. Wanneer het schip haar weg verder zet, zal vanaf dit punt de afbuiging naar links zijn in plaats van naar rechts, zoals in de voorgaande situaties.

7. Vlak voor het schip de haven bereikt, waypoint 11, zal het schip nog steeds met een snelheid van 10' varen en een koers van 147° .

Tabel 8 Voorbeeld MV coriolis volledig
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	M' (T)	afbuiging
1	6	51,42	213	-153,5	-61,2	8,3	400 008	Rechts
2	6	51,42	246	-174,2	-102,6	13,9	400 014	Rechts
3	10	48,9	213	-250,4	-107,5	11,0	400 011	Rechts
4	10	15,5	213	-176,8	-157,6	16,0	400 016	Rechts
5	10	15,5	147	176,8	157,6	-16,0	399 984	Rechts
6	10	0	147	163,5	163,5	-16,7	399 983	Geen
7	10	-33,9	147	215,7	135,5	-13,8	399 986	Links

Wanneer we deze situatie vergelijken met situatie 3 zien we ongeveer dezelfde resultaten, met enkel het teken van de corioliskracht en de horizontale component tegengesteld. Het schip zal dus in het zuidelijk halfrond naar links afbuigen en omdat de koers kleiner is dan 180° zullen we een opstijging krijgen in plaats van een inzinking.

- Het schip meert aan in Kaapstad en lost 50 000 ton van de cargo en vaart terug richting Antwerpen. Het schip zal dezelfde route terug volgen met dezelfde snelheden en met tegengestelde koersen.

Tabel 9 Voorbeeld MV coriolis, omgekeerde route
Bron: eigen werk

Situatie	v (kn)	α (°)	φ (°)	F_c (kN)	F_{cv} (kN)	M	ΔM (T)	M' (T)
7	10	-33,9	147	215,7	135,5	400 000	-13,8	399 986
8	10	-33,9	327	-188,7	-118,6	350 000	12,1	350 012

Omdat de koersen tegengesteld zijn houden we in deze vergelijking enkel rekening met de absolute waarde van de berekeningen. De massa van het schip is afgenomen en we zien dat alle berekende waarden evenredig zijn afgenomen.

De waarde van de corioliskracht en zijn verticale component zijn van aanzienlijke grootte. Deze orde van grootte zal niet terug gevonden worden in het schijnbaar verschil in gewicht. omdat de verandering in schijnbaar gewicht klein is in vergelijking met de massa van het schip. De grootte van het corioliseffect is bovendien evenredig met de snelheid van het schip, die relatief klein is in dit voorbeeld.

Doorheen het voorbeeld halen we maximaal een schijnbare verandering in massa van 16 ton. Zelfs een schip dat zich op de evenaar bevindt met een koers van 090° en snelheid van 16' kan

halen zal maar een verandering in massa van 50 ton ondervinden. Dit is niet noemenswaardig ten opzichte van consumptie van olie en andere vloeistoffen die verbruikt worden aan boord. Deze schijnbare verandering zal ook niet opgenomen worden bij de berekeningen voor de diepgang omdat de grootorde te klein is terwijl andere factoren zoals dichtheid van het zeewater, snelheid van het schip en andere wel een aanzienlijke rol spelen. Op vrachtschepen zal er dus geen rekening worden gehouden met de schijnbare verandering van het gewicht door het corioliseffect.

2.6.2 Andere voorwerpen

Om een volledig beeld te kunnen krijgen over de orde van grootte van de corioliskracht zullen we nog andere voorwerpen vergelijken met het schip MV Coriolis. We vergelijken het schip met een Boeing, een sportwagen en een kogel. Deze voorwerpen hebben allemaal een verschillende orde van grootte van massa en snelheid. Het vliegtuig is zwaar en snel, terwijl de kogel licht en heel snel is. Met deze voorwerpen krijgen we een geavieerd beeld.

Voor alle voorwerpen nemen we dezelfde koers van 045° en een breedteligging 51° N. In deze voorbeelden gaan we er wel vanuit dat het vliegtuig en de kogel vlak boven het aardoppervlak vliegen en geen enkel voorwerp onderheven wordt aan wrijving.

Tabel 10 Vergelijking voorwerpen grootte corioliskracht

Bron: samengevoegd uit (Modern Airlines, z.d.), (Bugatti, z.d.) en (Henderson & Henderson, 2003)

Voorwerp	v (m/s)	M (T)	F_c (kN)	F_{ch} (kN)	F_{cv} (kN)	ΔM (T)	% ΔM
MV Coriolis	7,2	400 000	376,3	230,815	186,9	-19,1	0,0048
Boeing 747 100 ¹⁰	275	333,4	11,96	7,348	5,943	-0,6	0,18
Bugatti Veyron ¹¹	119	1,880	29,2	0,019	14,5	-0,0015	0,79
Kogel .50 BMG ¹²	860	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	0,00273	$-3 \cdot 10^{-6}$	6,12

De corioliskracht die op het schip inwerkt zal wel nog steeds het grootste zijn, omdat de massa van het schip ongeveer 1000 keer groter is dan de massa van de Boeing. Maar omdat de snelheid van de Boeing zodanig groot is, is de corioliskracht van het vliegtuig maar 10 keer kleiner dan dat van het schip. Omdat bij de Boeing het initiele gewicht lager is dan bij het

¹⁰ (Modern Airlines, z.d.)

¹¹ (Bugatti, z.d.)

¹² (Henderson & Henderson, 2003)

schip, maar de snelheid veel hoger is zal de Boeing procentueel meer invloed ondervinden van schijnbare verandering van het gewicht. Bij vliegtuigen met een kleiner gewicht en nog hogere snelheden, zal het de schijnbare verandering in gewicht procentueel hoger liggen. Voor vliegtuigen zal er dus wel, in tegenstelling tot schepen, gecorrigeerd worden voor het corioliseffect (Bislin, 2020), bijvoorbeeld door landingsbanen oostelijk te richten zodat bij het opstijgen de corioliskracht het vliegtuig schijnbaar lichter zal maken.

Omdat het schip een grootte massa heeft, waardoor dat de wrijving groter zal zijn bij een constant en bovendien de wrijvingsconstante van water hoger ligt dan die van lucht, zal het schip amper moeten corrigeren voor de horizontale component van de corioliskracht. Terwijl een vliegtuig dit wel zal moeten doen. Het vliegtuig genereert een liftkracht die exact tegengesteld is aan de zwaartekracht waardoor de centrifugale kracht opgeheven wordt. Waardoor er dus enkel gecorrigeerd moet worden voor de corioliskracht (Bislin, 2020).

De sportwagen zal veel van koers veranderen waardoor beide componenten van de corioliskracht steeds zullen mee veranderen. Voor auto's zal er dus nooit een correctie moeten gebeuren voor de corioliskracht.

Bij de kogel zal de procentuele schijnbare verandering van het gewicht, 6%, wat zeker niet verwaarloosbaar is. Ook hier zal, bij het afvuren van een kogel, naast vele andere correcties, een correctie voor het corioliseffect moeten worden toegepast. Volgens hetzelfde principe zal de kogel net zoals het vliegtuig gecorrigeerd moeten worden voor de afbuiging door de corioliskracht. Hoewel dit bij de kogel vooralleer de kogel wordt afgevuurd moet gebeuren terwijl dit bij een vliegtuig tijdens het vliegen en geleidelijk aan kan gebeuren.

Hieruit kunnen we concluderen dat de grootte van de massa en de snelheid van het voorwerp in beweging belangrijk is voor de grootte van de corioliskracht. Maar dat de verhouding van de massa ten opzichte van de snelheid belangrijker is om de procentuele schijnbare verandering van het gewicht te bepalen. Deze waarde vertelt ons immers meer dan de grootte van de corioliskracht.

3 Visuele voorstelling van de corioliskracht

In hoofdstuk 2 kwamen alle fysische aspecten van de corioliskracht aan bod. Deze aspecten maakten het mogelijk om zowel de corioliskracht alsook al de componenten van deze kracht wiskundig te berekenen door het opstellen van formules. Op basis van formules kunnen getalwaarden berekend worden, maar deze waarden zullen niet altijd een duidelijk beeld geven van het effect van de corioliskracht. Ook de oriëntatie van de corioliskracht wordt pas duidelijk bij een visuele voorstelling. Er is dus nog wel enig inzicht en kennis over de corioliskracht nodig om te begrijpen welke effecten deze kracht zal hebben binnen de zeevaart. We kunnen dit wel opsommen en wiskundig uitleggen, maar de vectoren en hun componenten visueel voorstellen lijkt een belangrijke aanvulling om de effecten van de corioliskracht te begrijpen. Het doel van dit hoofdstuk is om visueel te laten zien wat we reeds hebben besproken.

Omdat het reeds duidelijk is dat het corioliseffect binnen de zeevaart een rol speelt willen we daarom een educatief hulpmiddel ontwikkelen om studenten een beter inzicht te geven bij de al dan niet eerste kennismaking van het corioliseffect.

3.1 Geogebra applicatie

Geogebra¹³ is een *open source software* die ontworpen is om het leren te ondersteunen binnen verschillende wetenschappelijke vakgebieden en is een samentrekking van geometrie en algebra. De software is ontworpen door Markus Hohenwarter in 2001 en wordt gebruikt op verschillende opleidingsniveaus en is beschikbaar via een webversie of een desktopversie.

Voor de visuele ondersteuning van deze scriptie is gebruik gemaakt van Geogebra. Er zijn figuren ontwikkeld om een beter inzicht te verkrijgen in verschillende berekeningen. Omdat er gewerkt wordt in een driedimensionaal assenstelsel is dit vaak handig om het geheel dan ook te kunnen bekijken in 3D. Doorheen de scriptie zijn er bepaalde schermafdrucken gebruikt om toch al een deel visualitatie te verkrijgen, voor de digitale lezer is het mogelijk om de 3D figuren tijdens het lezen waar te nemen.

¹³ <https://www.geogebra.org/> (Geogebra, z.d.)

Om dezelfde reden kan Geogebra ook gebruikt worden als educatief hulpmiddel. Daarom is parallel met deze scriptie een applicatie gemaakt die de student kan helpen een beter inzicht te krijgen in wat het corioliseffect is en hoe het tot stand komt. Alle vectoren zullen in 3D zichtbaar zijn, wat zo een beter beeld geeft dan een 2D-afbeelding. De student zal dan ook het vectorieel product tussen \vec{v} en $\vec{\omega}$ beter kunnen zien. De applicatie kan dus zowel de scriptie visueel ondersteunen als dienen als educatief hulpmiddel om studenten te helpen bij het ontwikkelen van inzicht in het corioliseffect.

Aangezien Geogebra een *open source* softwarepakket is, zal deze applicatie toegankelijk zijn voor iedereen. Het is bovendien niet noodzakelijk om extra software te downloaden wanneer men gebruik maakt van de web-versie. Het ontwikkelen van figuren via Geogebra kan wel wat uitdagend zijn, maar er is geen kennis van de software nodig om de applicatie te kunnen gebruiken. Een Geogebra-applicatie is dus een makkelijk toegankelijk hulpmiddel voor studenten.

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe men juist met de applicatie kan werken, wat de mogelijkheden zijn en wat er uit afgeleid kan worden. Dit wordt ondersteund met een woordje uitleg over de opbouw van het bestand en over de keuze van de werkwijze en het bepalen van de verschillende factoren.

3.1.1 Opbouw van de Geogebra applicatie

In dit onderdeel bespreken we hoe de Geogebra-applicatie is opgebouwd, die als hulpmiddel bij deze scriptie hoort. De applicatie laat toe om in één oogopslag de corioliskracht en al de bijhorende componenten hiervan te visualiseren, zowel de grootte als de richting.

De aarde wordt voorgesteld als een bol. We gaan nog steeds uit van de vereenvoudiging dat het aardoppervlak bolvormig is en we houden geen rekening met bergen of kraters omdat we onze redeneringen op het zeeniveau houden. Op de bol zien we de evenaar, de noordpool N_p en de zuidpool, Z_p . Omdat de lengtegraad van het schip uitmaakt voor het corioliseffect, hebben we gekozen om de nulmeridiaan niet op de figuur te zetten. Hierdoor komen andere wel noodzakelijke elementen beter tot hun recht.

Het middelpunt van de bol is het middelpunt van de figuur met als assenstelsel, de x-as en de y-as binnen het parallelvlak van de evenaar. Omdat de de lengtegraad van het voorwerp geen

rol speelt, definiëren we de richting van de x-en y-as niet verder. De z-as is gericht volgens de rotatieas van de aarde.

Op deze bol is er een punt A geplaatst. Dit punt A geeft het aangrijpingspunt weer en stelt de exacte positie van een voorwerp op het aardoppervlak weer. Het punt A kan verslept worden over de bol. De bijhorende meridiaan en parallel verschuiven automatisch mee.

Eerder kwam aan bod dat de corioliskracht afhankelijk is van een aantal factoren: de hoeksnelheid van de aarde, de relatieve snelheid van het schip ten opzichte van het aardoppervlak, de koers en de massa van het schip, alsook de breedteligging. Deze factoren kunnen niet ontbreken als variabele binnen de applicatie.

3.1.1.1 De relatieve snelheid

Vanuit het punt A wordt de relatieve snelheid visueel weergegeven door de rode vector \vec{v} . De lengte van deze vector geeft de snelheids grootte weer en de richting geeft de koers weer. Deze vector is opgebouwd als een vector vanuit het punt A naar het punt B. Punt B is een punt op een cirkel in het raakvlak p in het punt A aan het boloppervlak. De straal van deze cirkel is een variabele d , die de snelheids grootte zal weergeven. Men kan het punt B verslepen over de cirkel om de koers te veranderen. Om de snelheids grootte te veranderen kan men de variabele s met een schuiver aanpassen. Hierdoor kunnen we de koers met een vaste snelheids grootte soepel verschuiven en kan men de overgang van de corioliskracht mooi zien.

3.1.1.2 De corioliskracht

Omdat we weten dat $\vec{F}_c = -2m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}$ is het visueel beter om de hoeksnelheid $\vec{\omega}$ te verschuiven naar het punt A, aangezien $\vec{\omega}$ oorspronkelijk op de rotatie-as ligt. Hoewel de hoeksnelheid van de aarde constant is hebben we de grootte van de hoeksnelheid toch als een variabele ingevoerd. Zo kan visueel duidelijk worden dat de grootte van de corioliskracht effectief verandert wanneer de grootte van de hoeksnelheid $\vec{\omega}$ met behulp van een schuiver wordt aangepast.

Geogebra laat toe om met een bepaald commando het scalair product van twee vectoren te berekenen. De groene vector \vec{F}_c is dus niets meer dan $\vec{F}_c = -2m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}$ zoals gedefinieerd. Hierin is m een variabele die de massa voorstelt. Deze variabele kan aangepast worden met behulp van een schuiver.

3.1.1.3 De variabelen

De groottes van de vectoren \vec{v} en $\vec{\omega}$ alsook van de massa m en de snelheid s zijn niet in proportie met de realiteit. De bedoeling van de applicatie is om een beeld te geven over de richtingen van alle vectoren en ook om het relatieve effect van verandering van deze variabelen zichtbaar te maken. Een realistische relatieve snelheid van 10 m/s en een hoeksnelheid van $7,29 * 10^{-5}$ rad/s proportioneel weergegeven op een bol met een straal van 6378 km zou aanleiding geven tot vectoren die compleet verloren gaan in vergelijking met de bol. Deze applicatie geeft enkel informatie over de richtingen van alle vectoren, de hoeken tussen de betreffende vectoren en het onderlinge verband van de groottes. Zo zal er visueel wel nog gezien kunnen worden dat de vectoren van de corioliskracht en de componenten hiervan veranderen naargelang we de groottes van de variabelen variëren. Maar de applicatie zal ons geen informatie geven over de reële groottes van deze vectoren.

3.1.1.4 De componenten van de corioliskracht

Om de componenten van deze corioliskracht te definiëren zijn er twee verschillende methodes gebruikt, naargelang van de hulpmiddelen die voor het vervolg van de opbouw van de figuur nog nodig waren.

De eerste methode voor de constructie van de componenten maakt gebruik van snijpunten van raakvlakken en loodlijnen. Zo is bijvoorbeeld de centrifugale component van de corioliskracht \vec{F}_{cs} opgebouwd als volgt: de richting wordt bepaald door de snijlijn van het parallelvlak en het meridiaanvlak in A. De grootte wordt bepaald door de loodlijn op deze snijlijn en door het eindpunt van de vector \vec{F}_c . Deze methode zorgt ervoor dat de projectielijn van \vec{F}_c , de loodlijn op \vec{F}_{cs} door het eindpunt van de vector \vec{F}_c alreeds gedefinieerd is. Zo is ook al het eindpunt van elke vector benoemd.

Voor het bekomen van \vec{F}_{cs} via de eerste methode worden de volgende constructiestappen uitgevoerd. De rechte C wordt definieerd als de snijlijn tussen het parallelvlak q en het meridiaanvlak qh in A. Deze rechte C beschrijft de richting van \vec{F}_{cs} . Vervolgens tekenen we op deze rechte een loodlijn door het eindpunt van \vec{F}_c . De vector \vec{F}_{cs} zal dan beschreven worden vanuit het punt A naar het snijpunt tussen de rechte C en de loodlijn vanuit \vec{F}_c .

Deze methode zal meer tussenstappen vragen, waardoor er dus meer constructiestappen nodig zijn. Een voordeel van deze methode is dat de projectie visueel zichtbaar gemaakt kan worden dankzij de geconstrueerde lijnen. Aan de andere kant kan de methode meer kans op fouten geven en is ze minder overzichtelijk in het commandopaneel van Geogebra door de extra tussenstappen.

De tweede methode maakt gebruik van de wiskundige formule voor de projectie van een vector in een bepaalde richting. Zo zal de projectie van een vector \vec{a} op een rechte b gegeven worden door

$$\text{proj}_b(\vec{a}) = (\vec{a} \cdot \vec{b}) * \vec{b}$$

met \vec{b} de eenheidsvector volgens de richting van b .

Op deze manier kunnen we een projectie maken van een vector op een rechte. Geogebra laat het echter niet toe om via één commando deze projectie te maken. We zullen dus eerst de richting van de rechte moeten bepalen om er dan vervolgens een eenheidsvector te definiëren met dezelfde richting.

Om dezelfde vector \vec{F}_{CS} te construeren zullen we via de tweede methode de volgende stappen moeten uitvoeren. De rechte C blijft gedefinieerd als de snijlijn van het meridiaanvlak en het parallelvlak in A . Met behulp van het eenheidsvector-commando in Geogebra definiëren we \vec{f}_s de eenheidsvector op C . Voor de vector \vec{F}_{CS} gebruiken we dan de formule voor de projectie van een vector op een rechte

$$\vec{F}_{CS} = (\vec{F}_C \cdot \vec{f}_s) * \vec{f}_s.$$

Geogebra zal deze berekening maken in de oorsprong, het zal dus nog nodig zijn om de vector te verschuiven naar het punt A .

Deze methode zal ervoor zorgen dat het commandopaneel in Geogebra minder vol en bijgevolg dus ook overzichtelijker zal zijn. Maar geeft ons minder informatie hoe de vector tot stand komt en vergt enig wiskundig inzicht.

In deze applicatie wordt er gebruik gemaakt van beide methodes. Welke methode gebruikt wordt zal afhankelijk zijn of er al dan niet nog verder moet gerekend worden met de geconstrueerde vector en of de loodlijnen van belang zijn. Op deze manier kunnen we alle componenten van de corioliskracht in beeld brengen.

3.1.1.5 De hoeken

Eerder in deze scriptie zijn een paar belangrijke hoeken gedefinieerd en berekend. Deze hoeken kunnen dus zeker niet ontbreken in de applicatie. Geogebra laat het toe om hoeken te berekenen tussen twee vectoren of rechten met één commando. Op deze manier kunnen we de hoeken tonen en vergelijken met de formules in het vorige hoofdstuk om de constructie te projecteren.

3.1.2 Het gebruik van de Geogebra-applicatie


Het gebruik van de Geogebra-applicatie is niet ingewikkeld en vergt geen kennis van de Geogebra-software. Aangezien het toch niet evident is om de applicatie te gebruiken zonder enige uitleg, lichten we voor het gemak van de gebruiker alle mogelijkheden toe.

Men kan de applicatie openen via de webversie van Geogebra <https://www.geogebra.org/3d/fuzapaxg>. Voor gebruikers die liever met de desktop versie van geogebra werken kunnen via de link het .ggb bestand downloaden of het .ggb bestand via bijlage 2 downloaden.

Wanneer de pagina wordt geopend, zien we links het commandopaneel en rechts de figuur. We zien een bol, die de aarde voorstelt, waarop de evenaar, noord- en zuidpool staan afgebeeld. Door de linkermuisknop in te houden kan de figuur gedraaid worden naar wens. Om te figuur te verplaatsen moet men de shift-knop op het toetsenbord ingedrukt houden.

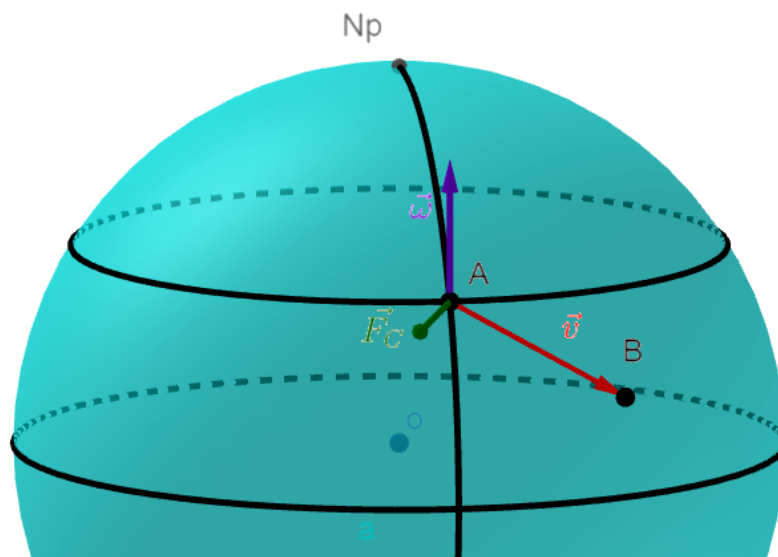
3.1.2.1 Positie en koers

De vectoren \vec{v} , $\vec{\omega}$ en \vec{F}_c worden standaard afgebeeld en kunnen niet verborgen worden. Deze drie vectoren lopen vanuit het punt A, dat de gebruiker vrij kan verslepen over het aardoppervlak. Door dit punt te verslepen zien we ook de bijhorende parallel en meridiaan. De vector \vec{v} loopt vanuit punt A naar punt B, ook punt B is verplaatsbaar enkel op een cirkel rond A. De straal van deze cirkel komt overeen met de snelheids grootte, s , die aangepast kan worden met een schuiver.

Om de positie van het schip te veranderen, versleept men het punt A over de bol. De positie zal weergegeven worden door hoek α . Deze waarde kan terug gevonden worden in het commandopaneel. De koers kan aangepast worden door het punt B te verslepen rond A. De koers zal worden weergegeven door middel van de hoek φ . Omdat punt B een punt is op een cirkel rond A kan dit punt ook bewegen als animatie. Door op de knop  rechts van B te klikken in het commandopaneel, kan de animatie gestart worden. De koers zal nu automatisch draaien, deze animatie blijft draaien tot ze wordt stopgezet.

Tabel 11 Versleepbare punten van het rekenblad
Bron: eigen werk

Voorwerp	Betekenis	Beschrijving
Punt A	Positie op aarde	Versleepbaar punt over het aardeoppervlak
Punt B	Bepaalt de koers van het schip	Versleepbaar punt op cirkel rond het punt A
Hoek α	Breedteligging	De hoek tussen OA en evenaarsvlak
Hoek φ	Koers van het schip	De hoek tussen de vector \vec{v} en de noord-zuid richting



Figuur 23 Standaardvorm van de Geogebra-applicatie
Bron: eigen werk met Geogebra

3.1.2.2 De schuifknoppen

De snelheid en de massa van het schip zullen de grootte van de corioliskracht bepalen. Voor beide variabelen is er een schuiver voorzien. De variabele s zal de snelheid weergeven en de

variabele m de massa van het schip. Deze waardes kunnen veranderd worden door de bijhorende schuiver te verslepen. Zoals eerder vermeld zijn deze waardes zelf betekennisloos en zullen enkel dienen om visueel het verband tussen deze waardes en de grootte van de corioliskracht weer te geven.

Zelfs al is de rotatiesnelheid van de aarde een vaste waarde, is het toch mogelijk om ook de grootte van deze vector te veranderen. Door middel van een schuifknop kan de waarde rot aangepast worden. Zo kan alsnog gezien worden dat ook de grootte van de rotatiesnelheid de grootte van de corioliskracht bepaalt. Men kan ook deze waarde aanpassen om alles ten opzichte van de wereldbol te vergroten of te verkleinen.

In het commandopaneel vinden we dus drie schuifknoppen. Deze schuifknoppen bepalen de waarde van de snelheids grootte, de massa van het schip en de rotatiesnelheid van de aarde. drie factoren die de grootte van de corioliskracht bepalen.

Tabel 12 schuifknoppen van het rekenblad
Bron: eigen werk

Voorwerp	Betekenis	Beschrijving
s	Snelheid van het schip	Variabele
m	Massa van het schip	Variabele
rot	Rotatiesnelheid van de aarde	Variabele

Ook deze variabelen kunnen door middel van animatie automatisch veranderd worden. Dit is echter niet aangeraden omdat de waardes met een ruime marge zijn genomen. Het afspelen van de animatie leidt tot erg grote waardes voor de grootte van de de corioliskracht. Het is zeker af te raden om verschillende animaties tegelijkertijd te laten spelen. Dit zal geen nuttige informatie geven omdat we willen zien hoe elke variabele afzonderlijk invloed heeft op de grootte van de corioliskracht.

3.1.2.3 Aanvinkvakjes voor vectoren, vlakken en hoeken

Voor het gemak van de gebruiker van de applicatie zijn er aanvinkvakjes voorzien voor alle informatie die enkel interressant is in bepaalde gevallen. Dit zorgt ervoor dat eenvoudig, snel en overzichtelijk bepaalde informatie zichtbaar of verborgen wordt op de figuur.

Er is een aanvinkvakje voorzien voor alle componenten van de corioliskracht en voor de projectie op de noord-zuid richting. Wanneer al deze componenten altijd zichtbaar zijn zal de figuur te veel vectoren vanuit het punt A bevatten en zal de gebruiker overspoeld worden door informatie. Op deze manier kan de gebruiker zelf kiezen welke componenten zichtbaar zullen zijn en welke niet.

Hetzelfde kan gezegd worden over het meridiaanvlak, parallelvlak en het raakvlak aan de bol in het punt A. Deze vlakken zijn in sommige gevallen handig om wat extra inzicht te krijgen. Het zichtbaar maken van een raakvlak kan duidelijk maken welke vectoren zich juist in welk vlak bevinden. Maar deze vlakken eisen wel een deel van de zichtbaarheid van de figuur op. Daarom is het ook voor deze onderdelen belangrijk dat ze snel zichtbaar of onzichtbaar gemaakt kunnen worden. We kunnen dezelfde redenering ook stellen voor de hoeken α , φ , θ en β . Ook deze zijn maar nuttig in bepaalde situaties, afhankelijk welk inzicht men wil verkrijgen bij het gebruik van de figuur.

Tabel 13 Aanvinkvakjes van het rekenblad
Bron: eigen werk

Onderdeel	Betekenis	Beschrijving
F_{ct}	Transversale component van F_c	Component van F_c in oost-west richting
F_{cs}	Centrifugale component van F_c	Component van F_c in parallelvlak, loodrecht op raaklijn van parallel door A
F_{cg}	Verticale component van F_c	Component van F_c met richting OA
F_{ch}	Horizontale component van F_c	Component van F_c loodrecht op F_{cg} , in raakvlak
vm	Projectie van de snelheid op NZ	Component van v in noord-zuid richting
p	Raakvlak in A	Raakvlak aan aardoppervlak in punt A
qh	Meridiaanvlak	Vlak beschreven door meridiaan van A
q	Parallelvlak	Vlak beschreven door parallel van A
Alfa, α	Breedteligging	De hoek tussen evenaarsvlak en
Beta, β	Hoek	De hoek tussen \vec{F}_c en \vec{F}_{cs}
Phi, φ	Koers	De hoek tussen \vec{v}_m en \vec{v}
Theta, θ	Hoek	De hoek tussen $\vec{\omega}$ en \vec{v}
Zeta, ζ	Hoek	De hoek tussen \vec{F}_{cg} en \vec{F}_{cs}

Enkel voor de meest relevante onderdelen zijn er aanvinkvakjes aanwezig. In het commandopaneel is het mogelijk om alle verschillende objecten afzonderlijk zichtbaar of onzichtbaar te maken. Dit vraagt echter wel enige kennis over Geogebra.

3.1.2.4 Voordelen van de Geogebra-applicatie

Enkele voordelen van de Geogebra-applicatie zijn algemene voordelen van de Geogebra-software. De software is *open source* en dus toegankelijk voor iedereen. Er bestaat zowel een webversie als ook een desktopversie die gebruikt kan worden wanneer er geen toegang is tot het internet. Ook is het mogelijk om gebruik te maken van Geogebra op een smartphone of tablet, zowel de webversie als via een app. Er bestaan verschillende app's van Geogebra, het is dus wel nodig om de juiste app, *3D rekenmachine*, te installeren om de Geogebra-applicatie te kunnen gebruiken.

De applicatie is toegankelijk voor iedereen via de link. Het is een openbaar bestand waar iedereen aan kan ook zonder de link. Op de figuur kan men zelf kiezen welke informatie zichtbaar wordt om zo overbodige informatie te verbergen met snelle aanvinkvakjes. Om de applicatie te gebruiken is geen kennis nodig van Geogebra.

Het is ook mogelijk om vanuit elk standpunt een afbeelding te exporteren. Het gaat hier dan wel over een 2D figuur. Deze kunnen gebruikt worden om cursussen of andere scripties visueel te ondersteunen.

De hoeken en de richtingen zullen direct mee berekend worden bij elke aanpassing van elke variabele of verschuiving van punt. Men hoeft dus niks extra te doen om waardes van hoeken te berekenen.

3.1.2.5 Beperkingen van de Geogebra-applicatie

Zoals eerder aangehaald weten we dat de waardes van de massa en de snelheids grootte weinig betekenis hebben en enkel dienen om een beeld te geven. De grootte van de corioliskracht zal wel berekend worden met deze waardes, deze uitkomst zal dus jammer genoeg geen betekenis hebben. Om betekenisvolle waardes voor de grootte van de corioliskracht te bekomen zullen er nog wel extra externe berekeningen moeten gebeuren.

Binnen deze applicatie hebben we ons enkel beperkt tot verplaatsingen op het aardoppervlak, oftewel horizontale verplaatsingen. Deze zullen een vector definiëren op het raakvlak in A. De verticale verplaatsingen, zoals een vuurpijl omhoog schieten of een voorwerp uit de mast of van een toren laten vallen zullen niet aan bod kunnen komen binnen deze applicatie. De applicatie is dan ook opgebouwd om het corioliseffect op een schip te visualiseren en andere

bewegingen zijn dan niet aan bod gekomen om de applicatie niet overbodig complex te maken.

De applicatie zal ons altijd maar één situatie per keer laten zien. Zo wordt het niet mogelijk om verschillende situaties met elkaar te vergelijken. Tenzij er van elke situatie een afbeelding wordt geëxporteerd. Hoewel verschillende situaties met elkaar te vergelijken niet het doel is van de applicatie is, zou het wel een beeld kunnen geven over de afhankelijkheid van de verschillende factoren.

Om sommige vectoren te bekomen, zijn er enkele tussenstappen gebruikt die geen meerwaarde bieden aan de figuur, hoewel er geprobeerd is om zoveel mogelijk van deze tussenstappen rechtstreeks in de commando's van de vectoren te steken. Voor sommige van deze vectoren hebben we dezelfde extra informatie nodig waardoor dit niet mogelijk was. Dit zorgt voor een hele lijst commando's in het commandopaneel die eigenlijk rechtstreeks geen meerwaarde geven aan de figuur. Dit kan voor verwarring zorgen bij gebruikers. Hierdoor is het wel aan te raden om enkel de schuivers en de aanvinkvakjes binnen het commandopaneel te gebruiken. Wanneer gebruikers extra informatie willen toevoegen zullen deze eerst grondig de opbouw van de figuur moeten bestuderen. Omdat deze figuur een persoonlijke aanpak is, kan dit eventueel voor verwarring zorgen.

Om de applicatie te kunnen gebruiken zal er wel altijd iets van media gebruikt moeten worden: computer, tablet, smartphone,... Dit gaat in deze moderne tijden echter niet echt een beperking geven. Wanneer er geen internet beschikbaar is zal zowel de applicatie als de desktopversie van Geogebra vooraf gedownload moeten worden. Het gebruik van Geogebra is ook mogelijk via een smartphone of tablet. Hiet moet men wel oppassen want alle aparte functies van Geogebra zijn beschikbaar als verschillende apps en dus niet als één geheel. Voor het gebruik van deze Geogebra-applicatie is het nodig om de *3D-rekenmachine*-app te installeren om de applicatie te kunnen gebruiken via een smartphone of tablet wanneer er geen internet beschikbaar is. Het is wel altijd mogelijk om de webversie te gebruiken indien er internet beschikbaar is.

We kunnen vaststellen dat naast alle voordelen van deze applicatie er enkele beperkingen zijn. Maar het doel van applicatie om de richting van de corioliskracht en zijn componenten te visualiseren blijft mogelijk. We moeten ons wel beperken tot de horizontale bewegingen en

de groottes van vectoren afzonderlijk berekenen. De visualisatie van richtingen van vectoren lijdt niet onder deze beperkingen.

3.2 Rekenblad corioliskracht

Om een aantal van de beperkingen van de Geogebra-applicatie op te vangen werd er naast de figuur ook een rekenblad opgesteld als ondersteuning van deze scriptie. Het rekenblad laat toe om voor specifieke waarden van de corioliskracht, de componenten hiervan, de verschillende hoeken tussen de vectoren en nog andere waarden die eerder aan bod kwamen te berekenen.

Dit werkblad kan bij studenten hulp bieden bij het maken van oefeningen op het corioliseffect. Het is niet de bedoeling dat de studenten dit rekenblad gebruiken om hun oefeningen op te lossen maar wel om hun uitkomst te controleren alsook eventuele fouten in tussenwaardes op te sporen.

Naast deze berekeningen zijn er ook twee grafieken opgesteld om het verloop van de grootte van de corioliskracht te visualiseren naarmate de koers en de breedteligging gaan veranderen. Met dit hulpmiddel zullen er al twee grote beperkingen van de Geogebra-applicatie opgelost worden.

3.2.1 De berekeningen in het rekenblad

Het uiteindelijk doel van het rekenblad is om waarden te berekenen die we kunnen gebruiken, reële waarden. De grootte van de corioliskracht is afhankelijk van enkele factoren. Er moet dus gezorgd worden dat deze factoren op een bepaalde manier ingevoerd kunnen worden in het rekenblad. Dit gebeurt in de kader linksboven in het rekenblad. In deze kader kunnen we de snelheids grootte, en zijn eenheid, de koers, de massa en de breedteligging van het schip invoeren. Met deze waarde voor de variabelen worden de berekeningen gedaan. De uitkomsten van de berekeningen kunnen worden waargenomen in de kader onder de invoerkader.

3.2.1.1 De opbouw van het rekenblad

De snelheid kan worden ingevoerd met een eenheid van kn , m/s of km/h en wordt automatisch omgezet in m/s voor de berekeningen. Binnen deze scriptie houden we het bij schepen, waar de snelheid in knopen wordt uitgedrukt, maar deze optie is ingevoerd om toch

te kunnen laten zien dat bij een vliegtuig met hoge snelheid en relatief kleine massa ten opzichte van een schip het Eötvös-effect wel in rekening moet gehouden worden.

Voor het gemak van de gebruiker houden we de invoer van de breedteligging zo reëel mogelijk. De invoer van de breedteligging kan gebeuren in graden, minuten en seconden, met achteraan het juiste halfmond, N voor het noordelijk halfmond en S voor het zuidelijk halfmond. De vakjes voor minuten en seconden kunnen ook zonder problemen open gelaten worden. Deze waarden worden automatisch omgezet naar één waarde waarmee verder gerekend zal worden.

Naast de variabele waarden zijn er ook enkele vaste waarden die we nodig gaan hebben om de grootte van de corioliskracht te gaan bepalen. Zo zijn ook de straal van de aarde als de hoeksnelheid van de aarde als de duur van één rotatie ingevoerd en omgezet naar de juiste waarden.

Het rekenblad zal steeds rekenen in radialen. Wanneer er gerekend moet worden in graden moet eerst de waarde omgezet worden in radialen om dan vervolgens de uitkomst om te zetten in graden. Hiervoor is er een aparte kader geïmporteerd. Het zou mogelijk zijn om dit allemaal in één berekening te plaatsen en de kader weg te laten. Maar door de kader toch te behouden, krijgt de student de mogelijkheid om zowel in radialen als in graden te rekenen of kan de student eenvoudig zien of er niet in de verkeerde of verschillende eenheden gerekend wordt.

We zien nog een aparte kader voor de schijnbare verandering van het gewicht. Hierin zullen de berekeningen gebeuren betreffende op de verandering van het gewicht. Hier kunnen we de correctieterm van het Eötvös effect waarnemen.

Voor berekeningen in dit rekenblad worden beide methodes die eerder besproken zijn gebruikt. Waar het mogelijk is worden de vereenvoudigde formules gebruikt omdat dit sneller en overzichtelijker werkt en het minst gebruik maakt van verschillende hoeken. Deze formules geven echter een absolute waarde van de uitkomsten en dus geen teken. Om dit probleem op te lossen zijn er af en toe als-functies ingevoerd om toch het nodige teken te geven aan de uitkomsten. Enkel formules die aanbod kwamen in deze scriptie zijn gebruikt bij het opmaken van dit rekenblad.

3.2.1.2 Het gebruik van het rekenblad

Doorheen het rekenblad geldt een kleurencode. Alles gemarkeerd in het groen, zijn velden waar de gebruiker zelf kan intypen en aanpassen. In deze velden zijn er geen formules maar waarden. In de velden gemarkeerd in het geel mag niet getypt worden. In deze velden zijn formules gedefinieerd of vaste waarden van de aarde.

De snelheid kan ingevoerd worden in *kn*, *m/s* of *km/h*. Het is nodig om de juiste eenheid aan te vinken, dit kan gekozen worden uit de lijst en hoeft dus niet getypt te worden. Deze keuzemogelijkheid is ingevoerd voor het gemak van de gebruiker maar ook omdat excel gevoelig is voor spaties. Wanneer er dan eventueel achter de eenheid een spatie wordt getypt, zal er geen berekeningen worden uitgevoerd.

De breedteligging kan ingevoerd worden als graden, minuten en seconden, elk in een aparte kader, achteraan wordt het juiste halffrond getypt. Het is mogelijk om in deze kaders decimalen in te voeren. Zo is het ook mogelijk om de breedteligging enkel in graden in te voeren, of in graden en minuten, door telkens de decimalen bij te voegen. het halffrond is een lijst met keuze N of S om dezelfde reden als hierboven. De koers wordt in graden ingevoerd en de massa in ton.

Het rekenblad zal met deze vier ingevoerde waarden alle berekeningen doen. De student moet dus enkel de waarden juist invoeren en kan simpelweg alle uitkomsten raadplegen. Zoals eerder vermeld is dit een hulpmiddel voor de student om enkel de uitkomsten te controleren of eventueel fouten in tussenstappen op te zoeken. Het is niet de bedoeling dat dit werkblad de kennis van de student gaat overnemen.

3.2.2 Grafieken in het rekenblad

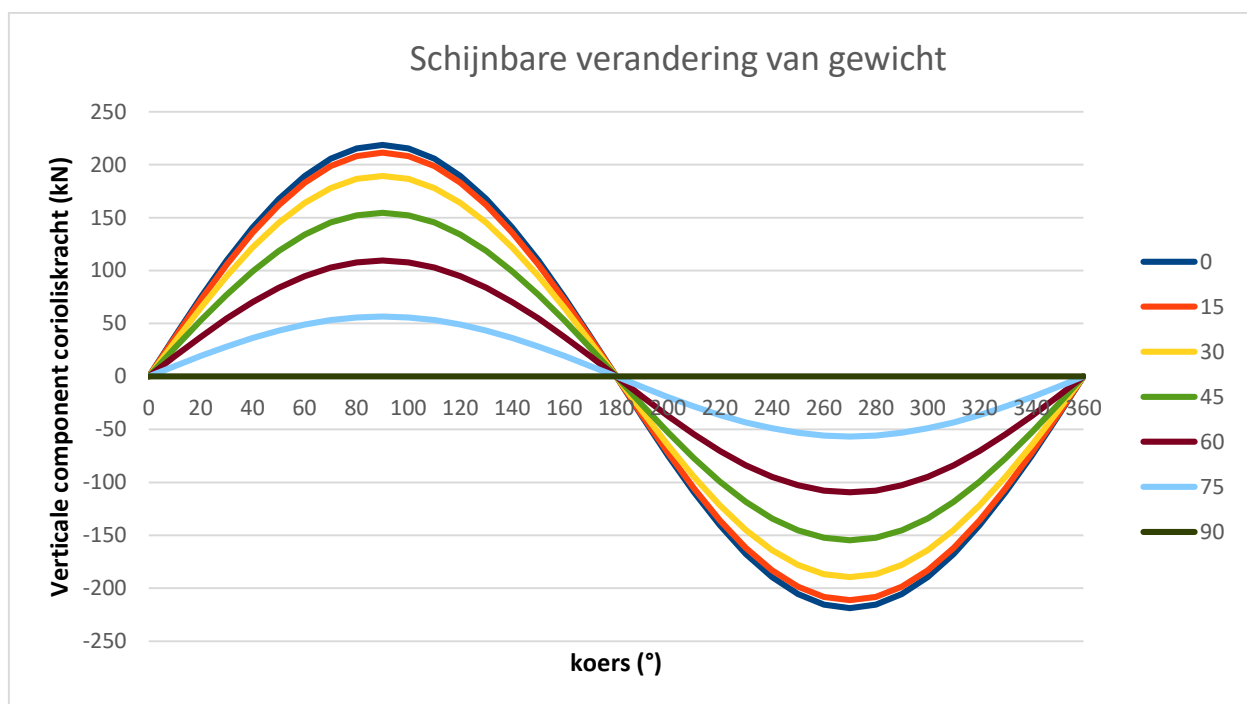
In de Geogebra-applicatie was het niet mogelijk om verschillende waarden met elkaar te vergelijken en kan dus enkel een beeldopname per situaties bekeken worden of het verloop door verandering van een bepaalde variabele. Om deze beperkingen op te lossen zijn er in het rekenblad twee grafieken ingevoerd.

3.2.2.1 Verandering van het schijnbaar gewicht

Op de rechtse grafiek zien we het verloop van de verticale component van de corioliskracht, \vec{F}_{cg} . Dit is de component die aangeeft of het schip gaat inzinken of opstijgen. De grafiek geeft

het verloop van \vec{F}_{cg} in functie van de breedte­ligging en koers weer. Op de x-as zien we de koers van 0° tot 360° en op de y-as de grootte van de corioliskracht in kN. De verschillende lijnen geven de verschillende breedte­liggingen weer. Wanneer we de massa of de snelheid veranderen, zal enkel de waarde van de y-as, de verandering van het gewicht groter of kleiner worden. Enkel de schaal van de y-as zal dus veranderen maar de vorm grafiek zelf niet.

De grafiek wordt gemaakt van een reeks opeenvolgende berekeningen in de tabel onder de grafieken. Deze berekeningen gebeuren automatisch en de gebruiker van het rekenblad moet hier niets in aanpassen.



Figuur 24 Schijnbare verandering van gewicht in functie van koers en breedte­ligging
Bron: eigen werk met excel rekenblad

De grafiek is opgemaakt met een snelheid van 15 kn en een massa van 100 000 T. De breedte­ligging in deze grafiek loop van 0° tot 90° en is geldig in het beide half­ron­den. De donkerblauwe lijn van 0° stelt de evenaar voor en de donker groene lijn, 90°, stelt de noord- en zuidpool voor. Zoals eerder aan bod kwam zal er dus geen schijnbare verandering van gewicht zijn op de noord en-zuidpool en een maximale verandering op de evenaar.

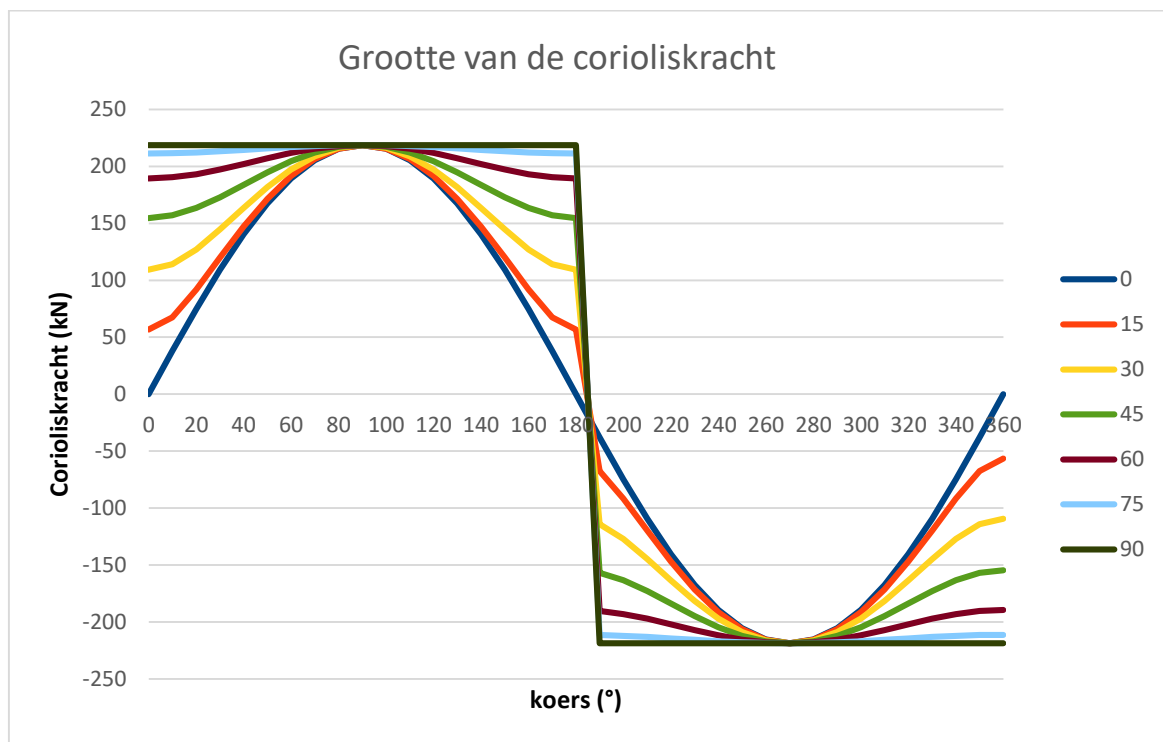
Bij een koers van 90° (oostelijke richting) of 270° (westelijke richting) zien we een maximale verandering van schijnbaar gewicht. Het kantelpunt van de grafiek zit op een koers van 180°, voor koersen kleiner dan 180° zal F_{cg} opwaarts gericht zijn, er zal er een opstijging zijn, wat

weergegeven wordt door positieve waarden in de grafiek. Voor een koers groter dan 180° , is F_{CG} neerwaarts gericht, dit wordt weergegeven door een negatieve waarde voor F_{CG} . In dit geval wordt een inzinking waargenomen.

Omdat de grafiek een verloop weergeeft van verschillende koersen en breedteliggingen is deze enkel afhankelijk van de massa en de snelheid. Deze variabele aanpassen geeft enkel een gevolg voor de schaal van de y-as en zal niets doen aan de vorm. De grafiek past automatisch aan, aan de gegeven waarden door de gebruiker. Wanneer men het rekenblad gebruikt hoeft de gebruiker niets te doen aan de grafiek.

3.2.2.2 Grootte van de corioliskracht

De linkse grafiek geeft de grootte van de corioliskracht weer in functie van de koers en breedteligging. De grafiek is op dezelfde methode opgemaakt als de vorige grafiek en alle berekeningen gebeuren dus ook automatisch.



Figuur 25 Grootte van de corioliskracht in functie van koers en breedteligging
Bron: eigen werk met excel rekenblad

Ook deze grafiek is zowel geldig als in het noordelijk halfrond als in het zuidelijk halfrond. We kunnen afleiden uit de grafiek dat hoe dichter we ons bevinden bij de polen, hoe minder de corioliskracht zal variëren naargelang de koers verandert. Dit komt omdat we ons dichter

bevinden bij de rotatie as van de aarde. Het kantelpunt bevindt zich ook hier bij een koers van 180° . Hoewel de grafiek een beeld geeft van een abrupte verandering, zal de verandering niet zo abrupt zijn. De corioliskracht verandert van richting en gaat van de ene kant van het raakvlak naar de andere kant. Omdat de grootte van de corioliskracht nooit nul zal zijn lijkt de verandering abrupter dan de geleidelijke verandering van het schijnbaar gewicht.

De grafieken hebben niet als doel om nieuwe informatie weer te geven maar om eerdere conclusies gemaakt in deze scriptie te ondersteunen en te visualiseren.

3.2.3 Voordelen en beperkingen van het rekenblad

Het rekenblad kan de student de mogelijkheid geven om oefeningen te controleren alsook tussenstappen te vergelijken. Het gevaar bestaat dat de student het rekenblad gaat gebruiken om de oefeningen te maken en de achterliggende theorie achterwege te laten.

Het rekenblad is eenvoudig om te gebruiken. De gebruiker moet enkel vier variabelen invullen en bekomt alle uitkomsten. Deze variabele moeten dan wel met de juiste eenheid ingevoerd worden, maar ook hier is zijn hulpmiddelen voorzien om de kans op fouten zo klein mogelijk te houden.

Omdat de grafieken opgemaakt zijn per snelheid en per massa zullen deze twee waarden steeds moeten aangepast worden per situatie om nuttige grafieken te bekomen. Een grafiek die het verschil in waarde van de massa, ΔM , zou geven, zou in praktijk meer info geven voor zeevarende. Maar omdat deze waarde niet benoemenswaardig is, wordt de grafiek opgemaakt voor F_{cg} en F_c . Daarboven is dit rekenblad opgemaakt als educatief hulpmiddel voor studenten en zijn deze waarden nuttiger voor de student.

3.3 Formularium corioliskracht

Het formularium is voornamelijk gemaakt om de scriptie zelf te ondersteunen. Doorheen de scriptie wordt verwezen naar formules van andere hoofdstukken. Zo kan het een hulpmiddel zijn om bij het lezen van de scriptie het formularium bij de hand te houden om een beter inzicht te krijgen naar de verwezen formules en de afleidingen.

Daarentegen kan het formularium ook gebruikt worden door studenten bij het maken van oefeningen. Hier moet echter wel rekening gehouden worden met twee aantekeningen. In

tegenstelling tot de eerste methode is het bij de tweede methode voor het berekenen van de corioliskracht is het wel nog steeds nodig om zelf het teken van \vec{F}_C te bepalen. Het teken zal afhankelijk zijn van de breedteligging uitgedrukt in hoek α .

Ook is het formularium vrij uitgebreid, omdat het in eerste instantie is opgemaakt als overzicht met alle formules binnen deze scriptie. Zonder enige voorkennis of uitleg achter het formularium kan de student overladen worden met overbodige informatie of werkwijzen en kan het een hele opgave worden om het formularium te gebruiken bij slechts een enkele berekening. Het formularium is terug te vinden als Bijlage 3.

4 Corioliseffect binnen de meteorologie

Over heel de aardbol vinden we temperatuursverschillen terug die de luchtlagen in beweging zetten. Net zoals elk voorwerp in beweging zal ook hier de corioliskracht een rol spelen bij het vormen van enkele weerfenomenen. In dit hoofdstuk halen we kort aan waar en hoe de corioliskracht een rol speelt binnen de meteorologie. Het is niet de bedoeling dat we elk weerfenomeen in detail gaan beschrijven, maar wel genoeg informatie meegeven om een totaalbeeld te kunnen creëren.

De corioliskracht heeft onder andere een rol in het ontstaan en de voortbeweging van tropische cyclonen en speelt mee in hoe we de algemene luchtcirculatie en oceaanstromingen nu kennen.

4.1 Tropische cyclonen

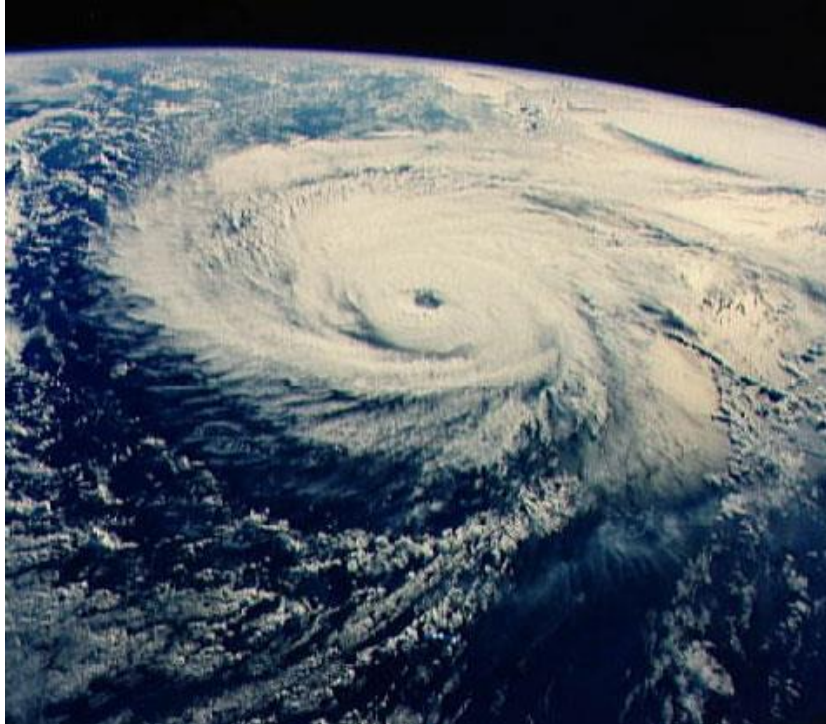
Een tropische cycloon is een krachtige roterende storm, ontstaan boven een warme tropische regio boven oceanen¹⁴. Afhankelijk van waar de storm ontstaat, gebruiken we ook wel de benamingen “orkaan” (Atlantische oceaan), “tyfoon” (Indische oceaan) of “hurricane” (Pacifische oceaan) (Jacobs, 2020).

Wanneer een tropische depressie een windkracht van 12 Beaufort¹⁵ behaalt, spreken we van een tropische cycloon (Britannica, z.d.-b). Deze depressies worden gevormd boven tropische oceanen. Wanneer de windkracht toeneemt tot meer dan 113 kn, spreken we over *supercyclonen* (Jacobs, 2020). De storm vormt zich rond een lagedrukgebied oftewel het oog van de storm, waar het steeds kalmer is, warmer en vrij van wolken. Het centrum is omringd door een hoge wolkenmuur gepaard met intense regenval.

Door de kracht van tropische cyclonen brengen deze stormen grote gevaren met zich mee en kans op grote schade en vernieling. Vooral voor de zeevaart en wanneer de cyclonen de kust bereiken, vormen ze het grootste gevaar.

¹⁴ Tropische regio: regio tussen de Kreeftskeerkring (23,5° N) en de Steenbokskeerkring (23,5° Z) (Deepnika, 2018)

¹⁵ 12 Beaufort = 117 km/h = 63 kn (Wikipedia, 2021)



Figuur 26 Tropische cycloon
Bron: Britannica (z.d.-b)

4.1.1 Ontstaansfactoren van een cycloon

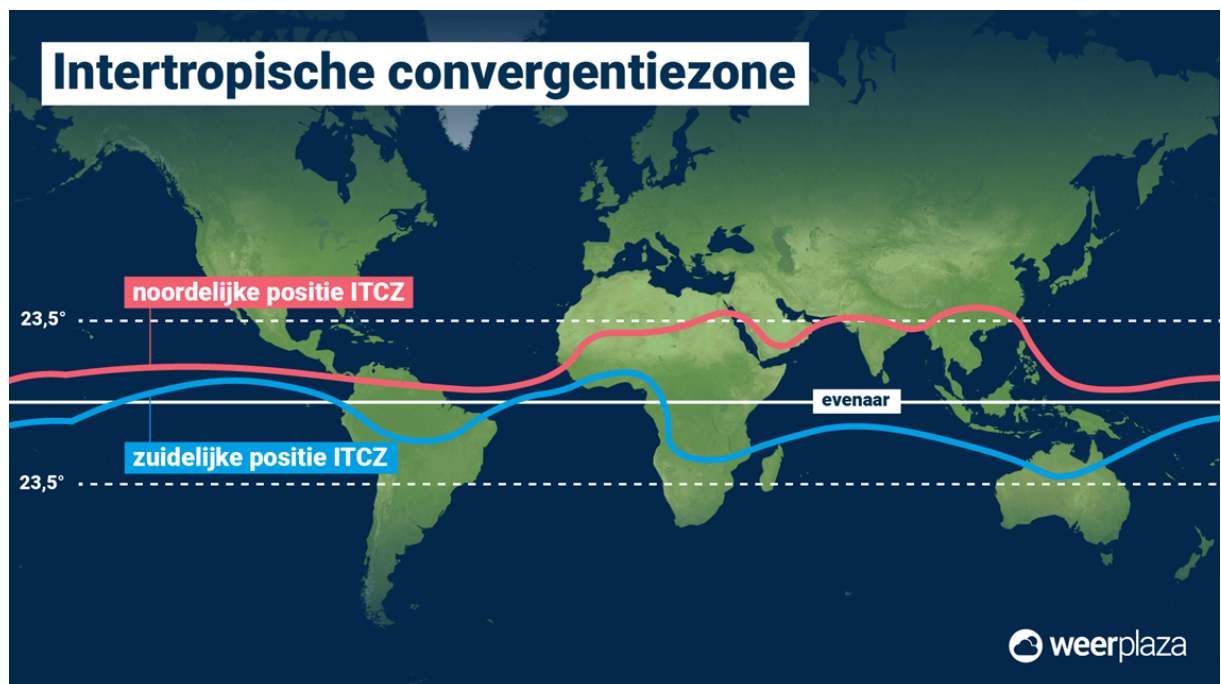
Een cycloon heeft verschillende elementen nodig om te kunnen ontstaan. Samengevoegd uit (Jacobs, 2020), (Britannica, z.d.-b) en (Samajho Learning, 2018).

1. De **temperatuur** van het **zeeoppervlak** moet minstens 26,5 °C bedragen tot een diepte van 50 m. Hoe warmer het water, hoe sneller de lucht boven het water zal opwarmen en hoe sneller de verdampingswarmte van de lucht bereikt is. Deze temperaturen zijn mogelijk tijdens de maanden juli tot en met november binnen de tropische regio.
2. Een hoge **vochtigheidsgraad** zal de stijging van de lucht versterken. De verwarmde lucht zal stijgen en afkoelen, dit leidt tot condensatie, waardoor er latente warmte vrijkomt. Die energie zal de lucht opnieuw opwarmen. Hoe hoger de vochtigheidsgraad is, hoe meer condensatie er zal plaatsvinden en hoe sneller de lucht kan stijgen. De condensatie van de lucht zorgt ervoor dat er wolken gevormd worden
3. Een **lage** hoeveelheid of afwezigheid van verticale **windschering**¹⁶, ook wel windgradiënt genoemd is nodig om een cycloon te laten ontstaan. Verticale windschering wordt beschreven als de verandering in windrichting en snelheid

¹⁶ Shear winds

naargelang de altitude verandert. Bij een te hoge aanwezigheid van verticale windschering zal de stijgende lucht onderbroken worden en kan er zich geen cycloon vormen.

4. Om een cycloon de aanstoot te geven om te vormen, moet er een bepaalde **storing** zijn. De tropische golf¹⁷ is een voorbeeld van een dergelijke storing. Deze golf is een langgerekte strook waar de luchtdruk lager ligt dan in de omgeving. De lagere luchtdruk zal de convectie stimuleren waardoor deze zone buien zal verzamelen met als gevolg een stijging van de vochtigheidsgraad. De tropische golf gaat vaak gepaard met het **ITCZ**, *intertropische convergentiezone*, oftewel de *doldrums* (Klaassen, 2021). In deze zone komen de noordoostelijke en de zuidoostelijke passaatwinden tezamen waardoor we een zone van warme stijgende lucht verkrijgen. De ITCZ bevindt zich rond de evenaar en verplaatst zich gedurende het hele jaar, afhankelijk van de stand van de zon. De ITCZ zal zich in het noordelijk halfrond bevinden tussen juni en december. We zien de meeste cyclonen dus ook in deze periode in de Atlantische oceaan verschijnen.



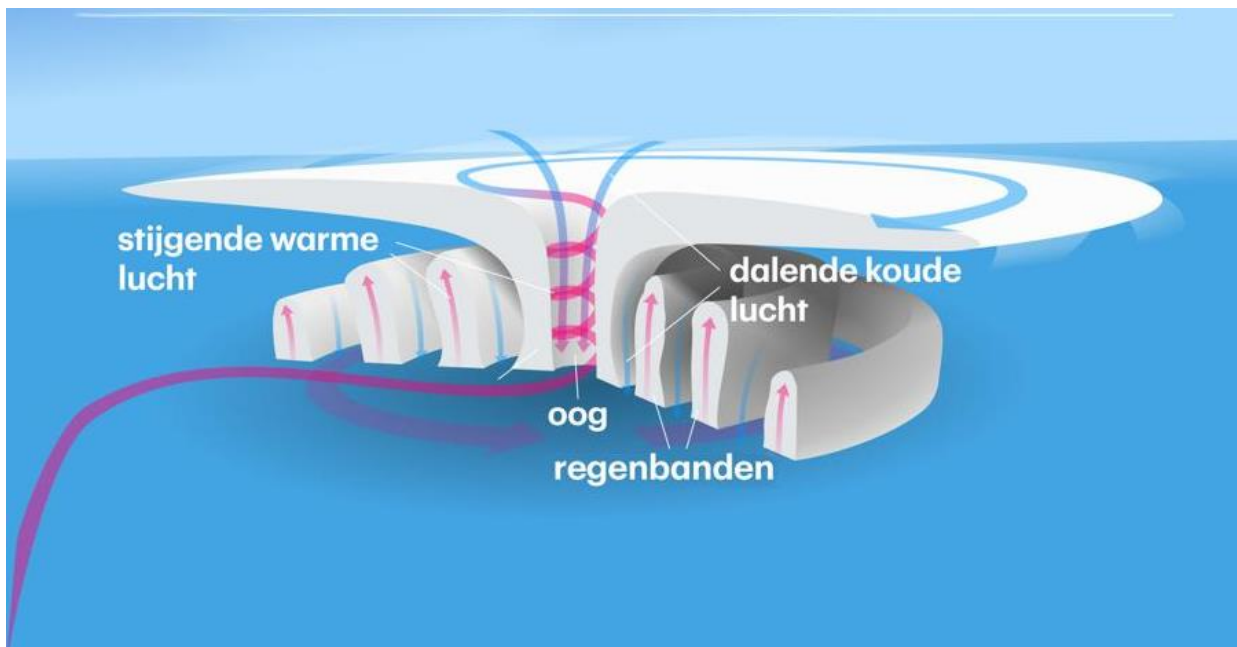
Figuur 27 Ligging van de intertropische convergentiezone
Bron: Klaassen (2021)

¹⁷ Easterly waves

De horizontale component van de **corioliskracht** zal de stijgende lucht doen afbuigen, wat voor de cyclonale beweging van de lucht zal zorgen. Meer bepaald zal de lucht afbuigen naar rechts op het noordelijk halfrond, waardoor de cyclonale beweging tegenwijzerzin zal zijn. Op het zuidelijk halfrond buigt de lucht af naar links, waardoor de cyclonale beweging op zijn beurt met de wijzers mee zal zijn.

4.1.2 Ontstaan van een cycloon

Wanneer alle factoren voor het ontstaan van cycloon aanwezig zijn, zal deze zich kunnen vormen. De vorming van de cycloon zal gebeuren in het oog, een lagedrukgebied, een plek waar het relatief kalm water is dat een temperatuur heeft van minstens 26,5°C.



Figuur 28 Vorming van een cycloon.
Bron: Internet Geography (z.d.)

Het warme water zal de lucht opwarmen waardoor deze verwarmde lucht zal stijgen. Omdat het oog van de cycloon een lagedrukgebied is en lucht steeds van een hogedrukgebied naar een lagedrukgebied zal waaien, zal er steeds een toevoer van nieuwe lucht zijn die op hun beurt weer verwarmd kan worden en zal stijgen.

Naarmate deze lucht stijgt zal deze afkoelen en omdat er een hoge vochtigheidsgraad aanwezig is zal de afgekoelde lucht condenseren waardoor er zich cumulonimbuswolken zullen vormen. De lucht die niet condenseert zal zodanig afkoelen dat deze weer zal dalen. We spreken hier van *convectie*. De afgekoelde lucht zal dan op zijn beurt zich terug richting de

lage druk in het oog van de cycloon begeven en zal opnieuw verwarmd worden. Dit kan zich tot meerdere keren toe herhalen, waardoor er zich steeds meer wolken vormen, met als resultaat een grote wolkenmuur rondom het oog van de cycloon. De cycloon wordt steeds gevormd binnen de troposfeer¹⁸. Wolken zullen deze nooit verlaten.

Gedurende heel dit proces zal de horizontale component van de corioliskracht inwerken op het geheel. Waardoor er een cyclonale beweging zal ontstaan.

Wanneer de cycloon de kust bereikt, zal de toevoer van vocht afnemen. De lucht zal weinig tot geen vocht meer bevatten. Hierdoor zal de vorming van de cycloon stoppen. Op deze plaatsen krijgen we wel hevige regenbuien, onweders en stormen. Als de cycloon zich snel genoeg terug boven water begeeft, kan het proces zich terug opstarten of voortzetten, anders zal de cycloon langzaam uitdeinen en verdwijnen.

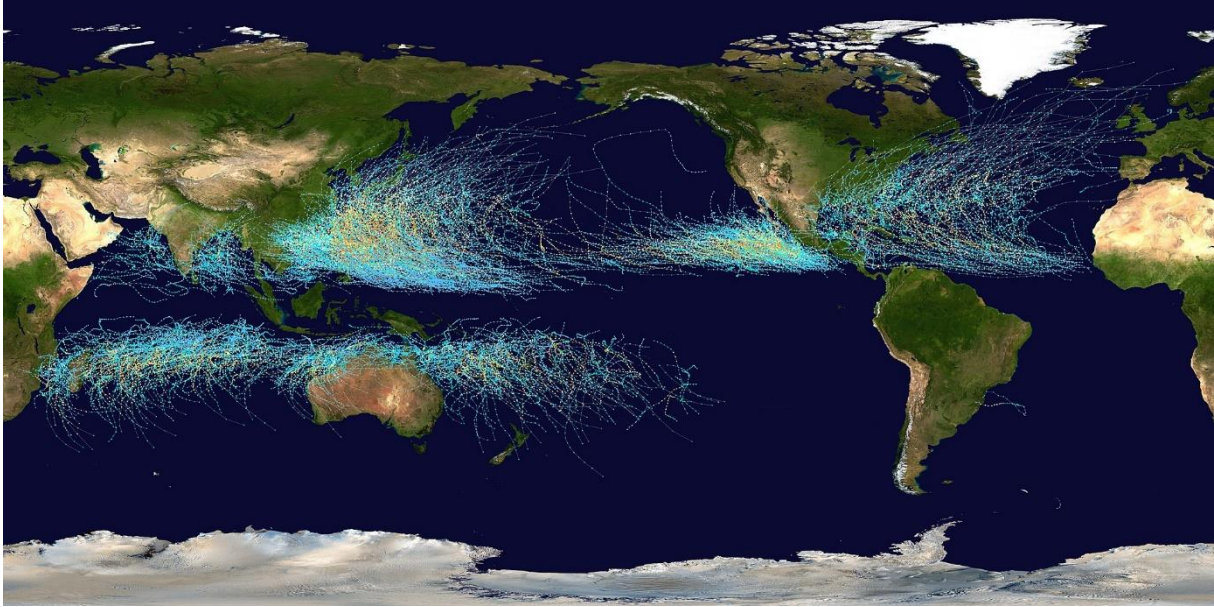
4.1.3 De rol van de corioliskracht bij het vormen van een cycloon

De corioliskracht speelt bij de vorming van de cycloon een cruciale rol. Zo zal de horizontale component van de corioliskracht ervoor zorgen dat de stijgende lucht een cyclonale beweging zal maken. Bij een te kleine grootte van deze component zal er dus geen cycloon kunnen ontstaan. Ook zal de verplaatsing van de gevormde cycloon beïnvloed worden door de corioliskracht.

4.1.3.1 Plaats van ontstaan van cyclonen

Wanneer de horizontale component van de corioliskracht te klein zal zijn om de stijgende lucht te doen roteren, zal er dus geen cycloon kunnen gevormd worden. We weten dat de horizontale component van de corioliskracht voor elke beweging op de evenaar gelijk aan nul is. De horizontale component zal pas sterk genoeg zijn bij een breedteligging van boven de 7°. Er ontstaat dus een gebied rond de evenaar tussen 7°N en 7°Z waar *geen* cyclonen gevormd zullen worden (Internet Geography, z.d.). De temperatuur van het zeewateroppervlak zal niet warm genoeg zijn wanneer de grens van ongeveer 30° breedteligging wordt overschreden. Cyclonen kunnen dus enkel gevormd worden in twee banden, van 7°N tot 30°N en van 7°Z tot 30°Z.

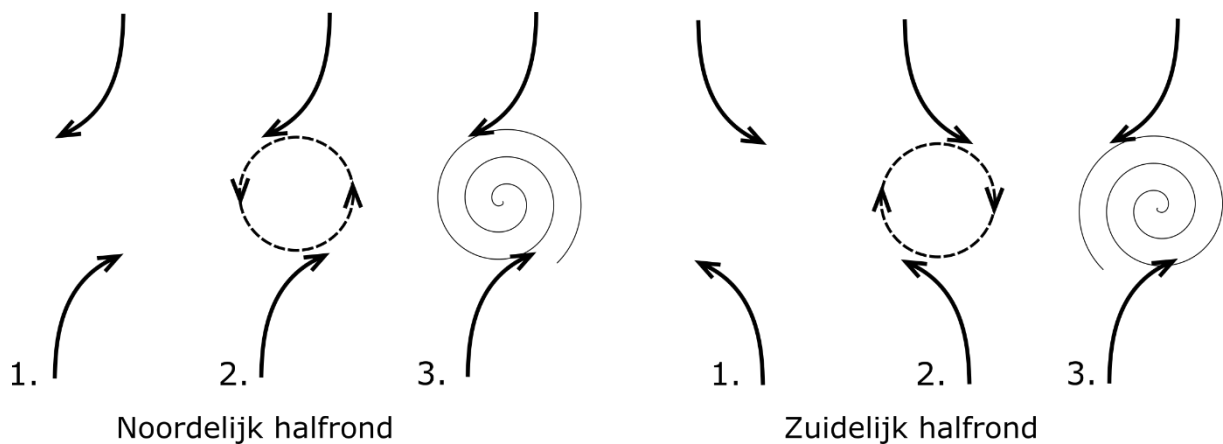
¹⁸ De troposfeer is de eerste en de laagste laag van de dampkring van de aarde. De hoogte varieert naar gelang de latitude op aarde en is gemiddeld 18 km hoog. Bron: (UCAR, z.d.)



Figuur 29 Plaats van ontstaan van cyclonen.
Bron: Wikipedia (2021c)

4.1.3.2 De draairichting van de cycloon

Ondertussen weten we dat voorwerpen in beweging op aarde in het noordelijk halfrond naar rechts zullen afbuigen. Dus ook de wind zal afbuigen.



Figuur 30 Draairichting van de cycloon.
Links noordelijk halfrond. Rechts zuidelijk halfrond.
Bron: eigen werk

In Figuur 30 bekijken we de vorming van een cycloon vanuit bovenaanzicht. Aan de linkerkant van de figuur zien de vorming in het noordelijk halfrond. Daar zal de wind afbuigen naar rechts. Vanuit de zuidelijke richting zal dit dus naar het oosten zijn en vanuit de noordelijke richting naar het westen. Als resultaat van deze twee afbuigingen krijgen we een cyclonale beweging tegenwijzerzin.

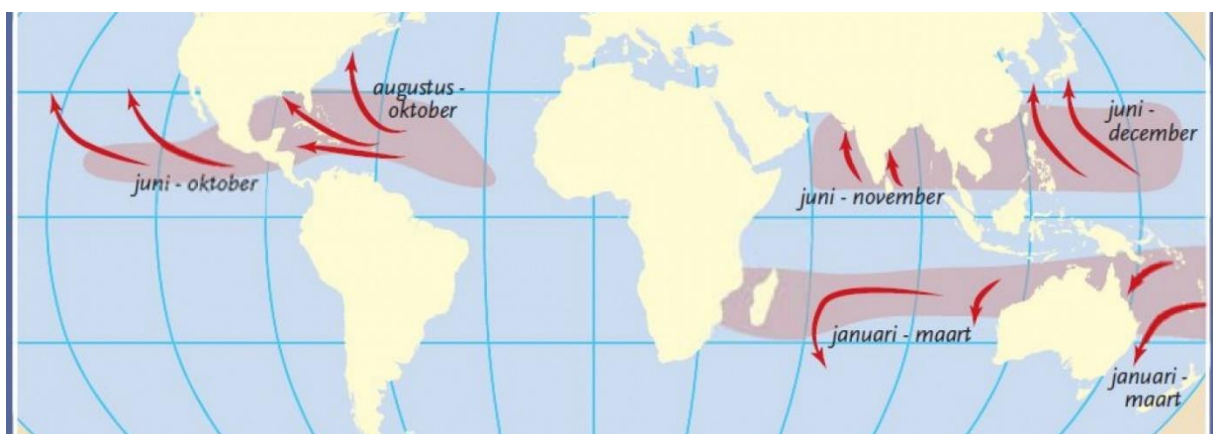
Het omgekeerde zal gebeuren in het zuidelijk halfrond, wat we zien aan de linkerkant van Figuur 30. De wind zal hier afbuigen naar links. Vanuit het zuiden zal dit dus naar het westen zijn en vanuit het noorden naar het oosten. Opnieuw krijgen we een cyclonale beweging als resultaat van deze afbuigingen maar deze keer met de wijzers mee.

De draairichting van de cycloon zal dus afhankelijk zijn van de plaats waar de cycloon ontstaat, als gevolg van de horizontale component van de corioliskracht. Cyclonen ontstaan op het *noordelijk halfrond* zullen in *tegenwijzerzin* roteren terwijl wanneer ze op het *zuidelijk halfrond* ontstaan, de cyclonen *met de wijzers* mee zullen roteren.

4.1.3.3 Voortbeweging van de cycloon

Niet enkel tijdens het ontstaan van de cycloon zal de corioliskracht een rol spelen, ook tijdens de voortbeweging van de cycloon zelf zal deze onderhevig zijn aan de horizontale component van de corioliskracht.

Cyclonen zullen in het algemeen steeds van het oosten naar het westen bewegen door de passaatwinden. Maar doordat de cycloon in beweging is zal deze ook effect ondervinden van de corioliskracht en zal de cycloon afbuigen. In het noordelijk halfrond zal de afbuiging naar rechts zijn, dus zal de cycloon naar het noorden afbuigen (Jacobs, 2020). Terwijl in het zuidelijk halfrond deze afbuiging naar links zal zijn, wat resulteert in een afbuiging richting het zuiden. Meestal gebeuren de voortbewegingen van een cycloon via dit patroon, maar niet altijd. Uitzonderingen door andere factoren zijn mogelijk en maken cyclonen nog gevaarlijker.



Figuur 31 Voortbeweging van cyclonen.
Bron: Britannica (z.d.-c)

4.2 Algemene luchtcirculatie

Hoewel de wind niet altijd vanuit dezelfde richting blaast, is er op aarde toch een algemeen windpatroon. Omdat de temperatuur van het aardoppervlak ongelijk is op verschillende plaatsen, zal er zich een algemene luchtcirculatie vormen op aarde. Deze luchtcirculatie zal op zijn beurt de motor zijn van de meeste grote oceaanstromingen.

Lucht zal steeds van hoge luchtdruk naar lage luchtdruk waaien. We weten dat druk een kracht is per oppervlakte en dat luchtdruk het gewicht van de luchtkolom boven een bepaalde oppervlakte is. Warme lucht zal uitzetten waardoor er zich minder moleculen in een bepaalde oppervlakte bevinden, we krijgen dan een lage luchtdruk. Het omgekeerde vinden we terug bij koude lucht die zal inkrimpen, hier krijgen we een hoge luchtdruk. De compositie van de lucht speelt ook een rol. Zo zal lucht met veel vocht een grotere massa hebben dan droge lucht. Plaatsen met warme droge lucht zullen dus de laagste luchtdruk hebben (Meteooffice.uk, z.d.).

Wanneer de warme lucht stijgt, zal deze afkoelen. Zodra de lucht genoeg is afgekoeld zal de lucht weer dalen. Dit fenomeen wordt *convectie* genoemd. De wind aan het oppervlakte wordt natuurlijk ook onderhevig aan de afbuiging door de corioliskracht. De algemene luchtcirculatie zal dus gevormd worden door een combinatie van convectie en de afbuiging van de corioliskracht (SciJinks, z.d.).

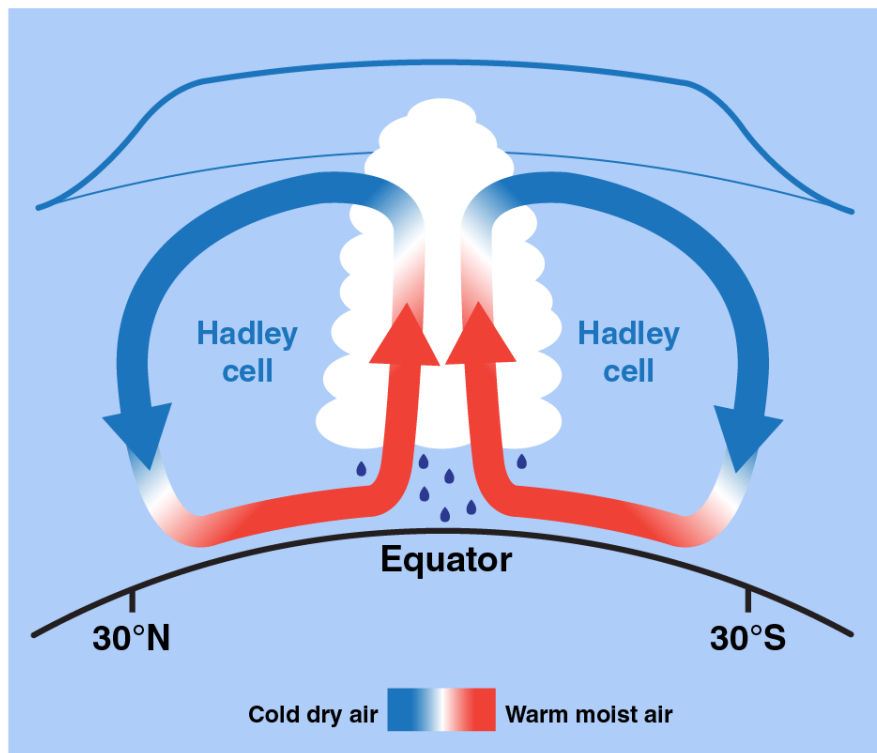
4.2.1 De Hadley cel

De passaatwinden zijn de algemene windstromingen rond de evenaar. We vinden deze terug tussen 30°N en 30°Z. Omdat deze regio volop geniet van directe zonnestrallen vinden we hier een warme regio terug. De lucht zal nabij de evenaar opgewarmd worden door het warme zeewater. De warme lucht zal stijgen en er zal zich een lagedrukgebied vormen. De lucht zal in de troposfeer blijven en naargelang ze stijgt, zal deze afkoelen.

Rond 30°N en Z, waar het zeewater aanzienlijk kouder is, zal de lucht zodanig zijn afgekoeld, dat ze daalt. Dit zorgt ervoor dat er zich een hogedrukgebied vormt rond 30°N en Z. Zoals eerder aangehaald, spreken we hier over *convectie*. De lucht waait dan weer van de hoge luchtdruk naar de lage luchtdruk om opnieuw opgewarmd te worden en te stijgen. Deze

convectiecirculatioenen we de Hadley cel, genoemd naar de meteoroloog George Hadley (Harvard, z.d.).

Dit proces gebeurt aan beide kanten van de evenaar. Er vormen zich dus twee gespiegelde Hadleycellen aan beide zijde van de evenaar. Omdat het vocht van de verwarmde lucht die stijgt zal verdampen en condenseren, kan er in de zone tussen de twee cellen wolkenvorming ontstaan. In deze zone van ongeveer 5°N tot 5°Z is het ook meestal windstil. Deze regio wordt de *doldrum* genoemd.



Figuur 32 Vorming van de Hadley-cel
Bron: SciJinks (z.d.)

Wanneer we dit op de aardbol bekijken, zouden we verwachten dat de windstroming van het noorden naar het zuiden zouden waaien aan het aardoppervlak in het noordelijk halfrond, of in tegengestelde richting in het zuidelijk halfrond. Dit is waar de corioliskracht zijn rol speelt. De oppervlaktewind zal onderhevig worden aan de corioliskracht. Omdat de wind een noordelijke of zuidelijke richting heeft, zal de horizontale component zorgen voor een maximale afbuiging. Op het noordelijk halfrond zal deze afbuiging dus naar rechts zijn, met als gevolg dat de passaatwinden vanuit het noordoosten komen. In het zuidelijk halfrond zal de afbuiging naar links zijn waardoor hier de passaatwinden vanuit het zuidoosten zullen komen.

4.2.2 De polaire cele

Hetzelfde fenomeen vinden we terug op de polen. Hier zal het zeewater koud zijn en naargelang de lucht weggaat van de polen zal de lucht opwarmen. Dus ook hier vinden we een convectiecirculatie terug. Met een hogedrukgebied op de polen en een lagere luchtdruk rond 60° N en Z. De wind aan het aardoppervlak zal dus weg van de polen waaien.

De wind zal ook op zijn beurt onderhevig worden aan de corioliskracht, die de winden op dezelfde manier beïnvloedt als de passaatwinden. Ook hier krijgen we noordoostenwind in het noordelijk halfrond en zuidoostenwind in het zuidelijk halfrond. Met als verschil, de grootte van de afbuiging. Omdat de horizontale component van de corioliskracht afneemt naar de polen toe, zal de afbuiging dus veel minder groot zijn nabij de polen (Meteooffice.uk, z.d.).

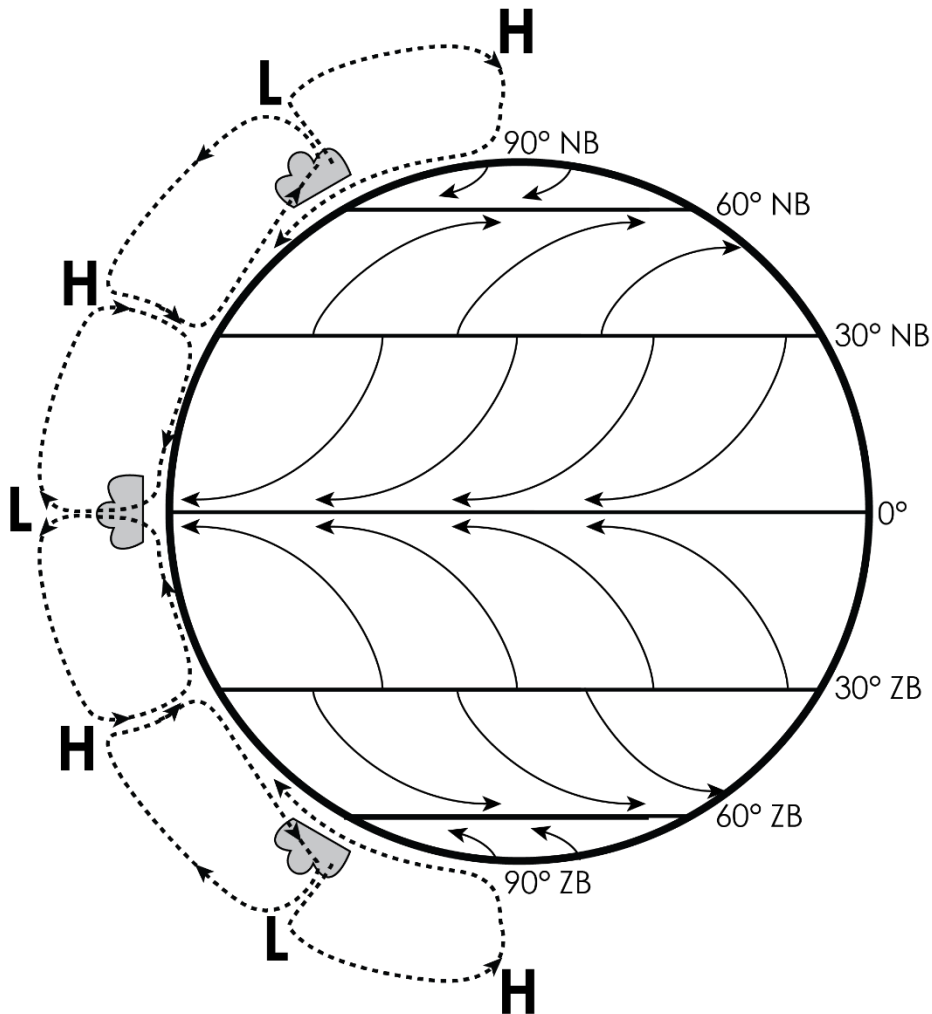
4.2.3 De Ferrel cel

Door het vormen van de Hadley cel en de polaire cel krijgen we op 30°N en Z een hogedrukgebied en op 60°N en Z een lagedrukgebied. Hier vormt zich ook een convectiecirculatie. Deze circulatie zal wel in tegengestelde richting gebeuren als de twee eerder vernoemde circulaties.

De lucht zal door de convectie naar het noorden verplaatst worden in het noordelijk halfrond en naar het zuiden in het zuidelijk halfrond en op zijn beurt worden afgebogen door de horizontale component van de corioliskracht. In het noordelijk halfrond zal de wind afbuigen naar rechts waardoor er een zuidwestelijke wind ontstaat terwijl in het zuidelijk halfrond de afbuiging naar links zal zijn en er een noordwestelijke wind zal ontstaan. Deze winden worden de *westerlies* genoemd (Britannica, z.d.-d).

De combinatie van deze drie convectiecirculaties, de Hadley cel, polaire cel en de Ferrel cel, die telkens een band rond de aarde vormen op beide halfronden, en de afbuiging door de corioliskracht, zorgen ervoor dat we op aarde een algemene luchtcirculatie verkrijgen. Omdat wind niet enkel afhankelijk is van deze factoren maar ook van vele andere factoren is dit een algemeen beeld van de luchtcirculatie op aarde en kunnen er zeker ook andere winden teruggevonden worden. Zo zal de landmassa ook een grote rol spelen bij het ontstaan van

winden. Boven de oceanen zijn er minder externe factoren en kunnen we meestal terugvallen op dit algemene beeld (Missler, z.d.).



Figuur 33 Algemene luchtcirculatie op aarde
Bron: Missler (z.d.)

4.2.4 De rol van de corioliskracht op luchtcirculaties

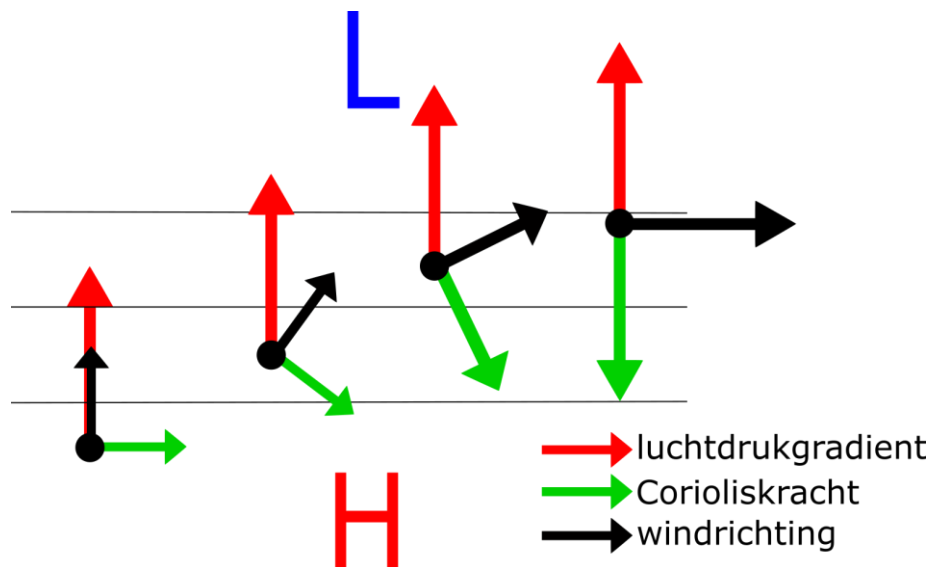
Bij het vormen van het algemene beeld van de luchtcirculaties op aarde speelt de corioliskracht een eenvoudige maar toch belangrijke rol. Het ontstaan van de winden zal enkel gebeuren door de temperatuurverschillen die convectiecirculaties veroorzaken. Op het ontstaan hiervan heeft de corioliskracht geen invloed. Eens de winden zijn ontstaan, zullen ze wel zullen onderhevig worden aan de corioliskracht, waardoor ze zullen afbuigen. Net zoals elk ander voorwerp in beweging zal de afbuiging naar rechts zijn op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond. We hanteren de vuistregel hoe dicht de wind bij de

evenaar hoe groter de afbuiging zal zijn. Zo zullen dus de passaatwinden het meest worden afgebogen terwijl de poolwinden het minst zullen worden afgebogen.

4.2.4.1 Geostropische wind

Op aarde ontstaat wind door temperatuur verschillen op verschillende plaatsen. Warme lucht zet uit waardoor er een verschil komt in dichtheid van de lucht. Dit drukverschil wordt de *drukgradiënt* genoemd. Hoe groter het verschil in dichtheid, hoe sterker de wind zal waaien (Leung, 2010).

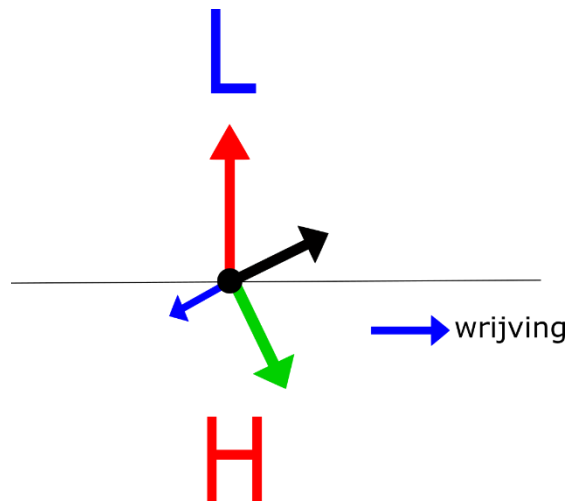
Over het algemeen zal de wind waaien van hoge luchtdruk naar lage luchtdruk en zal de wind loodrecht op de isobaren¹⁹ staan. Maar er zijn op aarde andere factoren die meespelen, zoals de corioliskracht en de wrijving.



Figuur 34 Geostrofische wind op het noordelijk halfrond.
Bron: eigen werk

Naargelang de wind in beweging is, zal de corioliskracht er beginnen inwerken, waardoor de wind zal afbuigen naar rechts op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond. De wind zal blijven afbuigen tot er een evenwicht ontstaat tussen de luchtdrukgradiënt en de corioliskracht. Wanneer deze twee krachten in evenwicht zijn spreken we over een geostrofische wind, een ideale situatie waar de wind parallel met de isobaren zal waaien.

¹⁹ Isobaren zijn lijnen die punten van gelijke druk met elkaar verbinden. Volgens: (KMI, z.d.)



Figuur 35 Geostrofische wind met wrijving.
Bron: eigen werk

In de praktijk zal er echter wrijving ontstaan tussen de wind en het wateroppervlakte. Door deze wrijving zal wind een kleine hoek maken richting het lagedrukgebied, zoals gezien kan worden in Figuur 35.

4.3 Oceaanstromingen

Oceaanstromingen zijn de continue bewegingen van het zeewater die ontstaan door verschillende krachten die inwerken op het water zoals de wind, het corioliseffect en de structuur van de zeebodem. Daarnaast zijn de temperatuur, het zoutgehalte en de dichtheid van het zeewater ook van belang. Oceaanstromingen strekken zich uit over grote afstanden en spelen een grote rol in het klimaat.

Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen stromingen aan de oppervlakte van zeewater, voornamelijk door de impact van de wind en van het corioliseffect, en stromingen in diep water, deze worden gevormd door een verschil in dichtheid (Society, 2019).

4.3.1 Wind gedreven oceaanstromingen

Wanneer de wind langdurig over een groot oppervlakte water waait, zal de wind beginnen inwerken op het water en dit in beweging zetten. De wind zal ten opzichte van het water een schuifspanning creëren, er komt energie vrij. Hoe groter de windsterkte is, hoe meer energie er zal vrij komen. Deze energie zal het water in beweging zetten en oppervlactestromingen doen ontstaan (The Nature education, z.d.). In hoofdstuk 4.2 hebben we de algemene

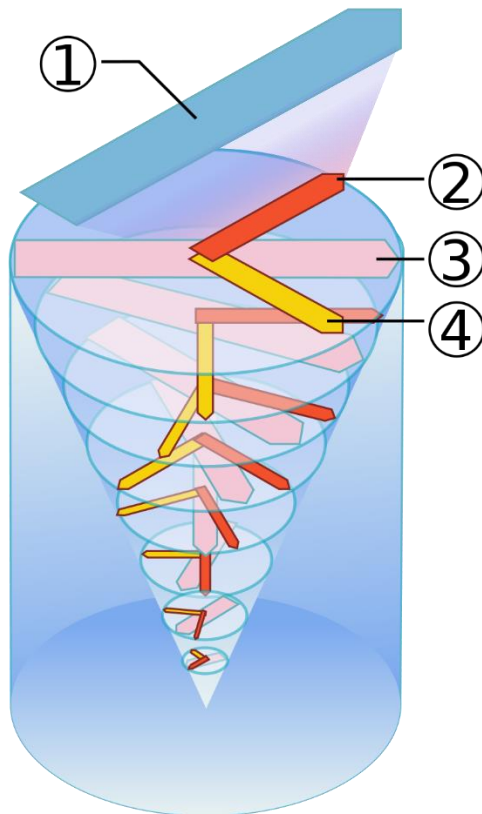
luchtcirculaties besproken. Deze circulaties krijgen de kans om langdurig in te werken op het water en zullen hierdoor een groot deel van de oceaanstromingen bepalen.

4.3.2 Ekmanspiraal

De Ekmanspiraal is een principe van richtingsafwijking van de stromingen nabij de wateroppervlakte. Hoewel de afwijking van oppervlaktestromingen ten opzichte van de windrichting eerst ontdekt werd door de Noorse oceanograaf Fridtjof Nansen, werd de theorie achter de spiraal genoemd naar de Zweedse oceanograaf Vagn Walfrid Ekman, die het fenomeen als eerste neerschreef.

Zoals eerder aangehaald zal de wind het water in beweging zetten. Zo krijgt het zeewater een beweging ten opzichte van de aarde, een roterend assenstelsel. Het is niet meer dan normaal dat dus ook op deze beweging, in dit geval van het water, een corioliskracht zal op inwerken. Zo zal corioliskracht naar rechts gericht zal zijn loodrecht op de windrichting, in het noordelijk halfrond en naar links, loodrecht op de windrichting gericht zal zijn in het zuidelijk halfrond.

De richting en de snelheid van de oppervlaktestroming worden bepaald door het vectorproduct van de windvector hoeksnelheid $\vec{\omega}$. Dit vectorproduct zal de corioliskracht bepalen die op zijn beurt de richting en de snelheid van de oppervlaktestroming bepaald. Theoretisch gezien zal deze afwijking 45° zijn, maar in de praktijk zijn er nog andere factoren die meespelen waardoor de afwijking minder zal zijn dan de theoretische waarde. De afwijking in de praktijk zal tussen de 20° en de 45° zijn (US Department of Commerce, z.d.).



Figuur 36 De Ekmanspiraal voor het noordelijk halfrond.
 1. De wind 2. De inwerkende kracht op de stroming 3. De stroming 4. De corioliskracht
 Bron: Wikipedia (2021d)

In Figuur 36 zien we dat de oppervlaktestroming op zijn beurt een aanliggende lagere laag van het water in beweging zetten. Deze lagere laag zal op zijn beurt dan ook onderhevig worden aan het corioliseffect en dus ook gaan afbuigen. De energie die doorgegeven wordt naar de volgende laag is kleiner dan de initiële energie die de wrijving van de wind overdraagt aan het water. Zo wordt de stroming, die door de wind in beweging wordt gezet, afgebogen en gaat op zijn beurt de onderliggende laag in beweging zetten. Dit proces herhaalt zich opnieuw laag na laag, waardoor er zich een spiraal vormt van zeestroming. Op grote dieptes krijgen we dus een stroming die tegengesteld is aan de windrichting. De sterkte van de stroming zal afnemen naargelang de diepte van het water toeneemt, de effectieve stroming wordt weergegeven door de roze lijn in Figuur 36. De spiraal zal met de wijzers meedraaien in het noordelijk halfrond in het zuidelijk halfrond tegen de wijzers in.

4.3.3 Diepzeestromingen

Terwijl de stromingen nabij de oppervlakte van het water voornamelijk door de wind bepaald worden, zullen de stromingen dieper in de oceaan bepaald worden door de

dichtheidsgradiënt van het water, de verandering van de dichtheid van het water over een bepaald gebied. De dichtheid van het water is afhankelijk van de temperatuur en het zoutgehalte. Daarom worden diepzeestromingen ook wel *thermohaliene circulaties* genoemd (Staroscik, z.d.-a).

De dichtheid van het water is afhankelijk van de temperatuur en per definitie ook het gewicht. Omdat de temperatuur geen constante is op aarde zal de dichtheid van het water van een bepaald gebied variëren over heel de wereld. Het water van de oceanen zal verwarmd worden door de zon. Wanneer dit zeewater opwarmt zullen de moleculen van het water uitzetten en zal als gevolg hiervan de dichtheid dalen. Zo zal er zich een laag warm water bovenop een laag koud water bevinden. Enkel de opwarming van het zeewater is niet genoeg om de diepzeecirculatie in gang te brengen.

De opwarming van het water door de zon zal voor een gelaagdheid van de oceaan zorgen maar het verschil in zoutgehalte zorgt voor de uiteindelijke circulatie. Het zoutgehalte varieert over heel de wereld. Verdamping van het zeewater en neerslag zullen een invloed hebben op het zoutgehalte. Nabij de evenaar bevindt zich een lagedrukgebied, dit gaat gepaard met meer neerslag, met als gevolg een lager zoutgehalte. Nabij 30°N/Z krijgen we meer verdamping van het water waardoor het zoutgehalte hier zijn piek krijgt. Richting de polen zal het zoutgehalte meer dalen door het lagedrukgebied tussen de polaire cel en de Ferrel-cel. In het algemeen geldt: hoe hoger het zoutgehalte is, hoe groter de dichtheid van het zeewater (Society, 2019).

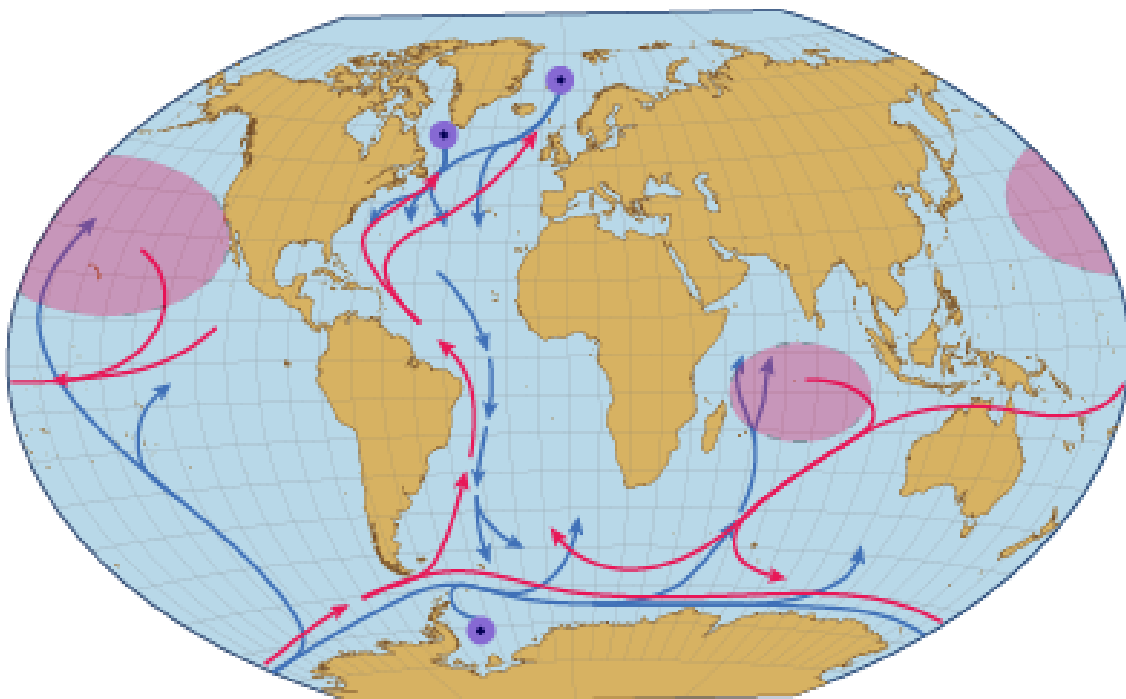
Nabij de polen zal er weinig tot geen verschil zijn tussen de temperatuur aan de oppervlakte en op grote diepties. Een andere factor zal hier de verschillen van het zoutgehalte veroorzaken. Deze factor is ijsvorming. Wanneer zeewater bevriest zal enkel het water bevroren en niet het zout. Het zoutgehalte van het omringende zeewater zal dus toenemen. Het zeewater zal een voldoende dichtheid krijgen om te zinken en een circulatie te veroorzaken.

Dit fenomeen is enkel terug te vinden nabij de polen, waar het water koud genoeg is. De koude diepe stroom vanuit de noordpool zal richting het zuiden zich verspreiden in de Noord-Atlantische Oceaan en vormt een grote koude massa water, de *Noord-Atlantische diepzeestroom*. De koude stroom die ontstaat in de zuidpool heeft meer plaats om zich te verspreiden en vormt zich rondom de zuidpool waar ze zich vanuit het zuiden over de andere

oceanen zal verspreiden, dit is de *antarctische diepzeestroom*. Deze stroom heeft de grootste dichtheid op aarde. Hoewel het water van de antarktische diepzeestroom een grotere dichtheid heeft zal de Noord-Atlantische diepzeestroom feller zijn omdat er hier meer stroming gevormd zal worden en de Noord-Atlantische diepzee stroom begrensd is door land aan beide kanten. Hierdoor zal de Noord-Atlantische diepzee stroom bijna tot aan de zuidpool geraken door de Atlantische Oceaan. De antarktische diepzeestroom zal zich verspreiden over de andere oceanen.

Op twee plaatsen zal het koude zeewater de oppervlakte bereiken en opwarmen: in de Noord-Pacifische Oceaan en in de Indische Oceaan. Het opgewarmde water zal terugstromen en de *thermohaliene circulatie* voltooien. Dit proces duurt ongeveer 1000 jaar om compleet voltooid te worden (Staroscik, z.d.-a).

Hoewel het corioliseffect geen directe rol speelt in het vormen van de thermohaliene circulatie, is het wel belangrijk om het totaalbeeld van de oceaanstromingen te verkrijgen en te begrijpen welke rol het corioliseffect uiteindelijk gaat spelen op de oceaanstromingen.



Figuur 37 Thermohaliene circulatie
blauwe lijnen koude stroom, rode lijnen warme stroom.
Bron: Staroscik (z.d.-a)

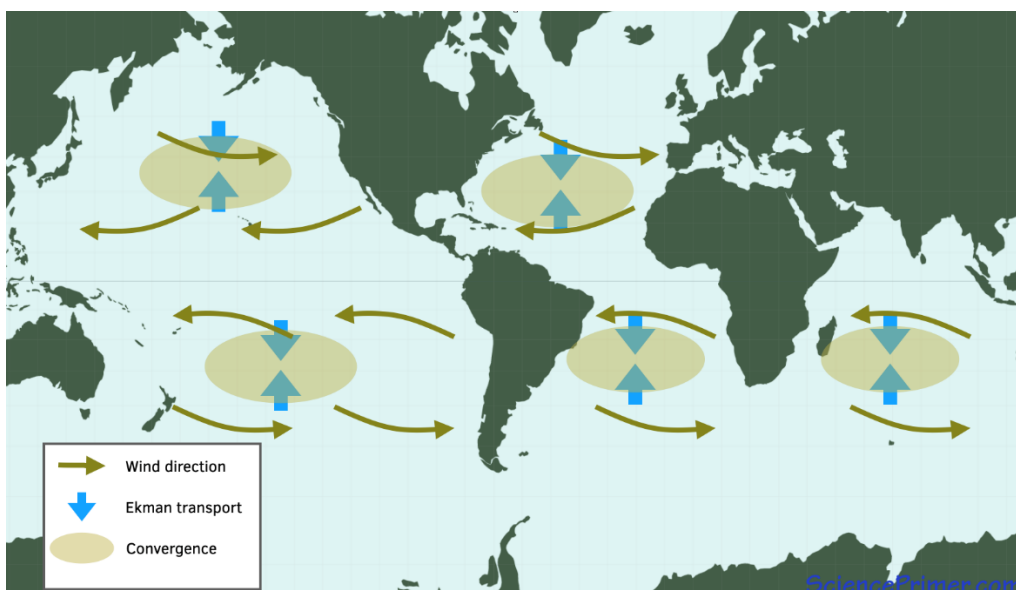
4.3.4 De rol van de corioliskracht op de oceaanstromingen

Bij de vorming van de oceaanstromingen zal het corioliseffect een grote rol spelen. De corioliskracht in samenwerking met convectie bepaalt de algemene windcirculatie op aarde. Deze wind zal inwerken op het zeewater en de oppervlaktestromingen aanzetten. Deze zullen afwijking volgens de Ekman spiraal. Op de oppervlaktestromingen heeft het corioliseffect zowel een direct als een indirect effect. Terwijl het corioliseffect maar een klein indirect effect zal hebben bij de vorming van diepzeestromingen.

Zoals we bij de luchtcirculatie een algemeen beeld op aarde hebben verkregen, kunnen we dit ook doen voor de oceaanstromingen. Ook hier zal de corioliskracht zijn bijdrage in leveren om tot een algemeen beeld van de oceaanstromingen te bekomen.

4.3.4.1 Geostrofische stromingen

Volgens hetzelfde principe als de vorming van geostrofische wind, uitgelegd in 4.2.4.1, zullen er ook geostrofische stromingen ontstaan. Omdat de oceaanstromingen afgebogen worden volgens de Ekman spiraal zullen stromingen opgewekt door passaatwinds, weg van de evenaarstromen en de oceaanstromingen opgewekt door de westerlies, richting evenaar stromen. Zo krijgen we rond 30° N en Z een ophoping van zeewater en ontstaat er een klein hoogteverschil van ongeveer één meter, dit fenomeen noemen we *convergentie* (Staroscik, z.d.-b).



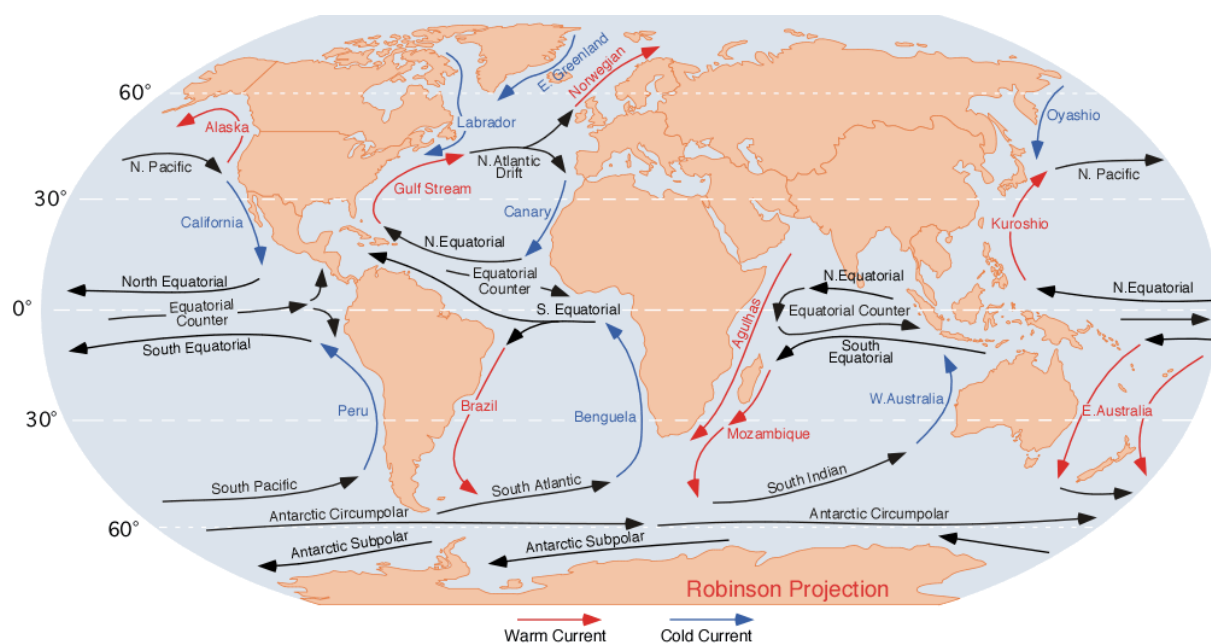
Figuur 38 Convergentie van het zeewater.
Bron: Staroscik (z.d.-b)

Deze convergentie of dit hoogteverschil lijkt verwaarloosbaar maar is voldoende om een verschil in druk te verkrijgen. Oorspronkelijk zal het water weg van de hoge druk stromen door de zwaartkracht, maar zodra het water in beweging is zal de corioliskracht hier op beginnen inwerken. Omdat het drukverschil minimaal is zal de corioliskracht die inwerkt op de stroming groter zijn dan de zwaartekracht die de stroming wegduwt. De stroming zal hierdoor uiteindelijk rond de hoge druk stromen, we spreken van een *geostrofische stroming*.

4.3.4.2 Algemeen beeld van de oppervlakte oceaanstromingen

Nu het begrip geostrofische stroming duidelijk is, kunnen we een algemeen beeld vormen van oppervlaktestromingen in de oceanen op aarde. Op plaatsen waar de wind lang kan inwerken op het zeewater, zal de wind stromingen veroorzaken. De stroming zal afbuigen ten opzichte van de wind volgens het Ekman spiraal. De passaatwinden zullen stromingen weg van de evenaar veroorzaken terwijl de westerlies stromingen veroorzaken naar de evenaar toe (Portillo, 2020).

Doordat de oceanen zowel links als rechts begrensd zijn door land, zullen de stromingen moeten afbuigen volgens de regel van de corioliskracht. In combinatie met de geostrofische stromingen die ontstaan krijgen we stroming circulatie, deze worden *gyres* genoemd en vormen een algemeen beeld van oppervlakteoceaanstromingen.



Figuur 39 Oppervlaktestromingen op aarde.
Bron: Portillo (2020)

4.4 Het getal van Rossby

Om uit te drukken welk systeem in welke mate onderhevig wordt aan de corioliskracht kan het getal van Rossby²⁰ gebruikt worden, een dimensieloos getal dat de verhouding tussen de traagheidskracht²¹ en de corioliskracht uitdrukt. Het getal van Rossby (Ro) wordt voornamelijk gebruikt in de beschrijving van vloeistofstromingen, alsook in de meteorologie bij het beschrijven van oceaanstromingen en luchtcirculaties (Encyclopaedia Britannica, 2021).

Het Rossby getal is gedefinieerd als

$$Ro = \frac{U}{Lf}$$

waarin U overeenkomt met wat eerder gedefinieerd is binnen deze scriptie als de snelheid ten opzichte van het aardoppervlakt, oftewel $U = |\vec{v}| = v$. L geeft de karakteristieke lengte weer van het fenomeen uitgedrukt in meter en $f = 2\omega \sin \alpha$, de coriolisfrequentie. In andere termen krijgen we dan

$$Ro = \frac{v}{L \cdot (2\omega \sin \alpha)}. \quad (4.1)$$

In formule (4.1) vinden we drie factoren terug die zullen bepalen van welke orde het getal Rossby zal zijn. Wanneer de corioliskracht \vec{F}_c en/of de lengte waarop de kracht zal inwerken groot zijn, krijgen we een kleine grootte-orde van het getal van Rossby. Terwijl een grote snelheid van het voorwerp ervoor zal zorgen voor een grote grootte-orde van het getal van Rossby. Wanneer het getal van Rossby klein is, zal voornamelijk de corioliskracht inwerken op de beweging van het voorwerp terwijl bij een groot getal van Rossby de traagheidskracht en de centrifugalekracht de beweging van het voorwerp zullen beïnvloeden.

Bij oceaanstromingen zal de lengte L waarop krachten kunnen inwerken aanzienlijk groot zijn en krijgen we een klein getal van Rossby. Dit vinden we terug bij geostrofische stromingen, L heeft een grote waarde waardoor de corioliskracht meer invloed heeft als de centrifugale

²⁰ Genaamd naar de Zweedts Amerikaanse meteoroloog Carl-Gustaf Arvid Rossby (Encyclopaedia Britannica, 2021).

²¹ De traagheidskracht is de weerstand van een voorwerp tegenover een verandering van snelheid en richting. Het voorwerp wil zich blijven voort verplaatsen met dezelfde snelheid en richting tenzij er een externe kracht op het voorwerp zal inwerken.

kracht. Bij systemen die zich dicht bij de evenaar bevinden zal de corioliskracht klein zijn en het getal van Rossby groot zijn.

Volgens de formule (4.1) zouden voorwerpen met een grotere snelheid minder invloed hebben van de corioliskracht terwijl we in hoofdstuk 2.6.2 hebben geconcludeerd dat snellere voorwerpen juist meer zullen afbuigen. We lichten deze tegenstelling even toe. Eerst en vooral is het belangrijk om te weten dat het Rossby getal een verhouding is, het is zo dat zowel de corioliskracht als de centrifugalekracht zullen inwerken op het voorwerp in beweging maar het Rossby getal een indicatie geeft welke kracht de grootste rol zal spelen. Voorwerpen met een grote snelheid zullen ook sneller een grote afstand afleggen, waardoor L groter wordt en de corioliskracht een langere tijd heeft om in te werken. Zo kunnen we concluderen dat bij voorwerpen met een grotere snelheid de afbuiging kleiner zal zijn maar omdat de karakteristieke lengte groter zal zijn voor dezelfde tijd, de uiteindelijk afbuiging wel groter zal zijn dan bij voorwerpen met een kleine snelheid. Het zal de initiële afbuiging groter zijn, maar over een kortere periode waardoor het voorwerp uiteindelijk minder zal afbuigen.

4.5 Draairichting van het afvoerputje

Als toeristische attractie nabij de evenaar wordt er vaak het experiment van de *draairichting van het afvoerputje* gedaan. Enkele meters over de evenaar op het noordelijk halfrond staat een gevuld bad. Dit bad zou in tegenwijzerzin leeglopen. Wanneer men hetzelfde bad zou laten leeglopen in het zuidelijk halfrond, het water wegloopt met wijzerzin. Omdat ik deze vraag een aantal keer heb gekregen tijdens het schrijven van mijn scriptie, licht ik dit toch nog even graag toe.

In theorie loopt een bad leeg in tegenwijzerzin in het noordelijk halfrond en in wijzerzin in het zuidelijk halfrond, indien de draairichting van het water enkel door de corioliskracht zou bepaald worden. In praktijk is dit zeker niet altijd het geval. Een badkuip is klein, wat er voor zorgt dat zowel de lengte waarin de corioliskracht kan inwerken enorm klein is alsook de tijd die de kracht krijgt heeft om in te werken, beperkt is. Het bad zal vrij snel leeg zijn. Hier zal het getal van Rossby groot zijn. Dit wijst erop dat andere krachten veel meer effect zullen hebben op de draairichting. Zo zal het afvoerputje misschien niet helemaal waterpas staan, zal er een oneffenheid in het bad obstructie kunnen geven, of de arm uit het water trekken

een beweging van het badwater veroorzaken, de wind die men veroorzaakt door het douchegordijn te openen,... Slechts in perfecte omstandigheden, wanneer het water voldoende tijd heeft gekregen om compleet tot stilstand te komen, het afvoerputje langs onder wordt opengedaan en de badkuip een aanzienlijke grootte heeft, zal de draairichting in de praktijk bepaald worden door de corioliskracht.

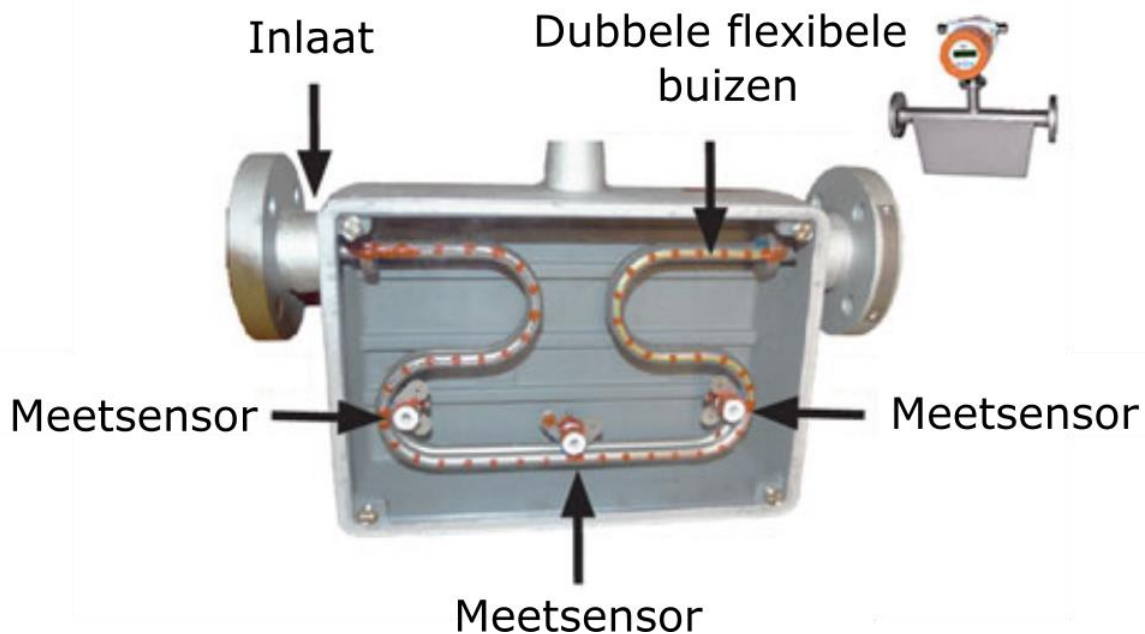
Zeker wanneer het bad zich slechts enkele meters van de evenaar bevindt, waar de breedteligging klein is en de horizontale component van de corioliskracht zo goed als nul is, zal de draairichting van het afvoerwater bepaald worden door andere externe factoren.

5 De coriolis-massadebietmeter

De coriolis-massadebietmeter, oftewel de *coriolis flow meter*, is een toepassing op het corioliseffect. Binnenin de meter zal het corioliseffect opgewekt worden, waardoor het apparaat het massadebiet van een doorstromend medium kan meten. Hoe het meettoestel eruit ziet hangt af van de producent. Er bestaan verschillende maten en soorten van, maar het principe blijft steeds hetzelfde.

5.1 Het principe van de coriolis-massadebietmeter

Het meettoestel bevat binnenin verschillende elementen. Er zijn één of twee flexibele buizen waar de vloeistof doorheen kan stromen (KOBOLD group, z.d.). De buizen zijn gekromd, verschillende vormen zijn mogelijk: een lus, een U-vorm, licht gekromd of de vorm in Figuur 40, ook andere vormen zijn mogelijk, zolang er maar een kromming in de buizen zit. Wanneer er twee buizen aanwezig zijn, liggen de buizen perfect naast elkaar met de zelfde kromming.

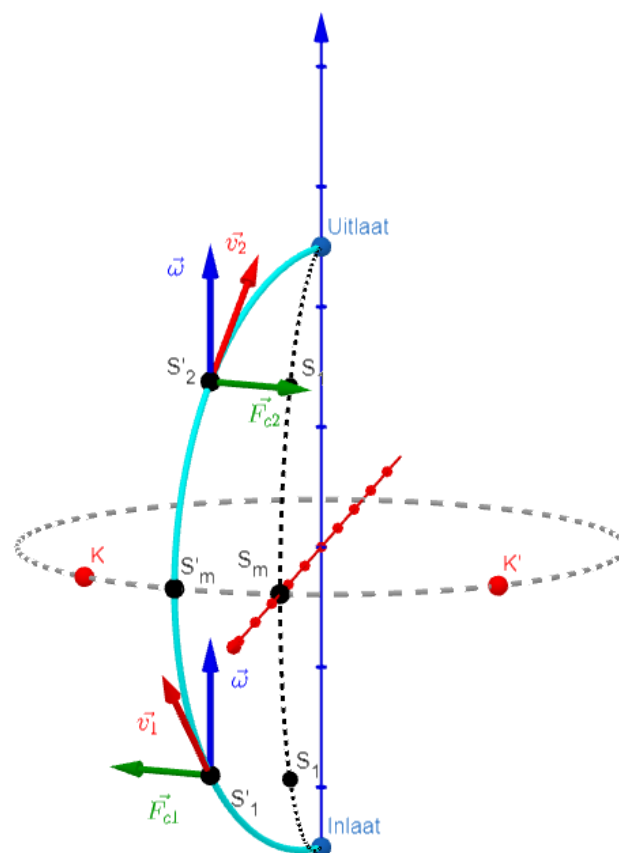


Figuur 40 Binnenkant coriolis-flow-meter
Bron: bewerkt van KOBOLD group (z.d.)

In Figuur 40 bekijken we de binnenkant van een meter met dubbele buizen. Links op de figuur zal de vloeistof binnenstromen. Deze vloeistof zal doorheen beide buizen stromen en het meettoestel weer verlaten via de uitlaat aan de rechterkant van de figuur.

Terwijl de vloeistof door de buizen stroomt zullen de buizen oscilleren, ze zullen heen en weer slingeren wat vergeleken kan worden met een stuk van een rotatie met als draaias de denkbeeldige lijn tussen de inlaat en de uitlaat van het toestel. Deze rotatie wordt steeds herhaald in tegengestelde richtingen. De buizen zullen dus heen en weer slingeren, dit gebeurt snel.

Omdat de slinger-beweging overeenkomt met een rotatiebeweging, zal de corioliskracht dus inwerken op de vloeistof wanneer deze een beweging heeft ten opzichte van de slingerende buizen.



Figuur 41 Systematische voorstelling van de coriolis-flow-meter
Bron: eigen werk met Geogebra

In Figuur 41 stellen we de coriolis-flow-meter systematisch voor met maar een enkele buis. De lichtblauwe lijn stelt de buis voor. De vloeistof zal vanuit de inlaat tot de uitlaat door stromen. De buis oscilleert van het punt K naar het punt K'. De zwarte bollen S1, Sm en S2 stellen de sensoren van het toestel voor en bevinden zich op een cirkelboog die de buis voorstelt in evenwichtstoestand. De systematische voorstelling komt niet overeen met de

kromming van de buis die men normaal terugvindt in het meettoestel, maar is op deze manier gekozen omdat het principe van de meter eenvoudiger duidelijk te maken, aangezien het effect van de corioliskracht op een bol alreeds verduidelijkt werd binnen deze scriptie.

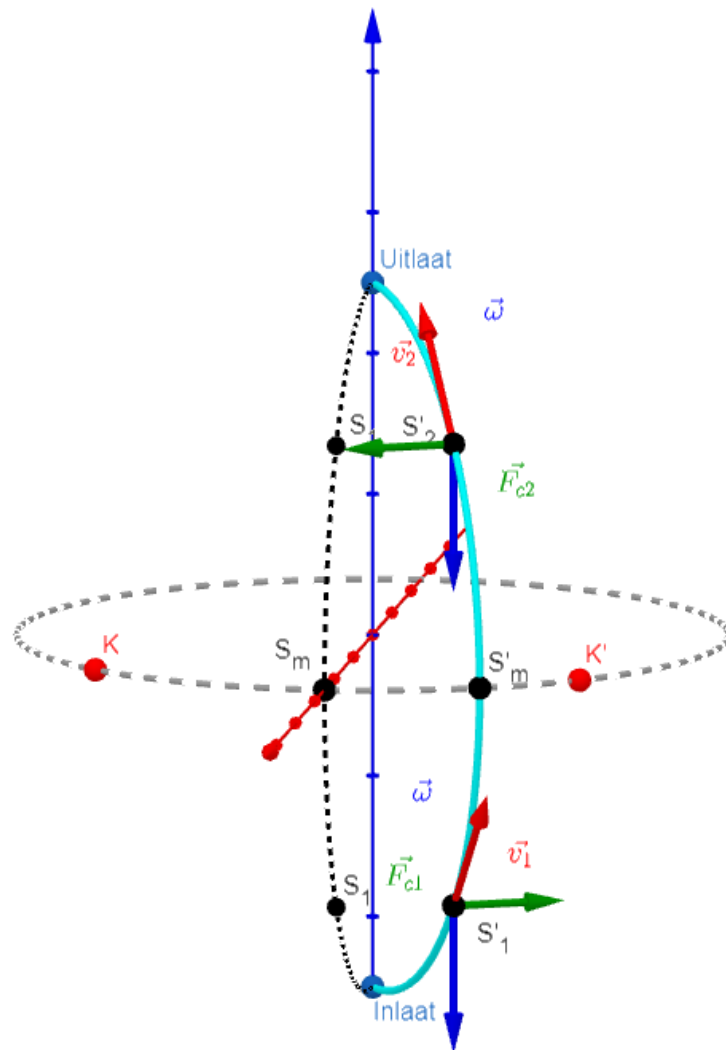
Op de beelopname in Figuur 41 heeft de buis net punt K verlaten en zal zich bewegen naar punt K'. Op dit moment zal het systeem in tegenwijzerzin roteren en krijgen we een hoeksnelheid die dezelfde richting heeft als de z-as. De vloeistof heeft een bepaalde snelheid, die op elk punt gericht is aan de raaklijn aan de gekromde buis in dat punt. Omdat de buis slingert en niet roteert zal de hoeksnelheid $\vec{\omega}$ dus noch een vaste grootte noch een vaste richting hebben, maar zal wel steeds op elk moment in elk punt dezelfde snelheid en richting hebben.

We bekijken twee punten, S'1 en S'2, de punten die tegen de twee sensoren zullen komen. In beide punten zal de snelheid van de vloeistof gericht zijn volgens de raaklijn aan de kromme in het punt. Zo krijgen we de vectoren \vec{v}_1 en \vec{v}_2 . In beide punten zal op hetzelfde moment de vector $\vec{\omega}$ hetzelfde zijn. Volgens formule (2.1) weten we dat

$$\vec{F}_c = 2 \cdot m \cdot \vec{v} \times \vec{\omega}.$$

Door deze formule toe te passen op beide punten verkrijgen we \vec{F}_{c1} als vector product van \vec{v}_1 en $\vec{\omega}$ en \vec{F}_{c2} als vector product van \vec{v}_2 en $\vec{\omega}$. Door de corioliskracht zal S'1 naar links afbuigen terwijl S'2 naar rechts zal afbuigen. Hierdoor zal S'2 eerder zijn evenwichtstoestand S2 bereiken dan voorzien en S'1 later het zijne bereiken. De buis zal dus op zijn oscillerende beweging ook nog een slingerbeweging maken. De sensoren S1 en S2 meten nauwkeurig het tijdsverschil tussen wanneer beide punten hun sensoren zullen raken, oftewel *het faseverschil*. De snelheid van de vloeistof bepaalt de grootte van de corioliskracht, die op zijn beurt voor een tijdsverschil zorgt tussen het tijdstip waarop beide punten hun respectievelijke sensor zullen raken. Het fase-verschil is recht evenredig met het massadebiet. Hoe groter het fase-verschil, hoe groter het massadebiet zal zijn.

Naarmate de buis het punt K' bereikt zal de grootte van de hoeksnelheid afnemen en gelijk zijn aan nul wanneer de buis zicht in punt K' bevindt. Wanneer de buis punt K' verlaat en terug richting punt K zal begeven, zal de hoeksnelheid dus van richting veranderen en draait het systeem zich om.



Figuur 42 Systematische voorstelling van de coriolis-flow-meter in het terug bewegen van de buis.
Bron: eigen werk met Geogebra

Een meter met twee buizen werkt volgens hetzelfde principe. Een buis zal dan van punt K naar S_m slingeren terwijl de tweede buis van punt K' naar S_m zal slingeren. De sensoren bevinden zich dan op de buizen zelf. Het gebruik van twee buizen zorgt ervoor dat het effect zal verdubbelen en er dus nauwkeuriger kan gemeten worden. Principe afgeleid uit (KOBOLD group, z.d.) en (Endress + Hauser, z.d.).

Zoals eerder aangegeven is dit een massadebietmeter. We kunnen dit ook terugvinden in formule (2.1), waaruit blijkt dat de massa invloed heeft op corioliskracht en dus ook op de

afbuiging. Dit meettoestel zal dus het massadebiet²² van de vloeistof meten. Terwijl de meeste debietmeters het volumedebiet²³ zullen meten.

De oscillatie van de buizen gebeurt door een motor die steeds dezelfde kracht zal leveren. Wanneer er door de buis een vloeistof stroomt met een grotere dichtheid zal de inhoud van de buizen meer massa hebben waardoor de buizen langzamer zullen slingeren. Daarom is er een derde sensor S_m in het toestel voorzien. Deze meet de snelheid van de oscillatie en die de dichtheid van de vloeistof zal bepalen.

Nabij de inlaat is ook een thermometer aangebracht om de temperatuur van de vloeistof te meten. De coriolis-massadebietmeter kan het massadebiet, de dichtheid alsook de temperatuur van de vloeistof bepalen en uit de eerste twee het volumedebiet berekenen.

5.2 Voordelen van de coriolis-massadebietmeter

De coriolis-massadebietmeter is een meettoestel dat direct de waarde van het massadebiet, de dichtheid en de temperatuur van de vloeistof meet. Tegenover andere meettoestellen die het volumedebiet berekenen is dit een groot voordeel. Omdat volume afhankelijk is van de temperatuur van de vloeistof, is massa dit niet, zo wordt het meetprincipe onafhankelijk van de fysische eigenschappen van de vloeistof. Massadebiet is dus nauwkeuriger dan volumedebiet. Omdat de meter ook de dichtheid van de vloeistof meet, kan het volumedebiet berekend worden. Het grootste voordeel hiervan, is dat alles tegelijkertijd gebeurt en geen aparte meting hoeft te gebeuren naargelang welke waarde men wilt verkrijgen.

Binnenin het toestel komt de vloeistof niet in aanraking met onderdelen. De vloeistof stroomt door de buis en komt dus enkel hiermee in contact. Dit brengt twee voordelen mee. Ten eerste gaat het toestel zo veel langer mee ten opzichte van andere debietmeters die werken met een molen of tandwiel waar de vloeistof constant in contact mee komt. Het onderhoud van de buizen is dan ook veel minder kostelijk omdat enkel de buizen zullen moeten vervangen worden en men het systeem niet helemaal moet openmaken om de molen of tandwielen te

²² Massadebiet Q_m is de hoeveelheid massa die op een bepaalde tijd door een oppervlakte zal stromen.

²³ Volumedebiet Q_v is de hoeveelheid volume die op een bepaalde tijd door een oppervlakte zal stromen.
Bron: (Volcanic, z.d.)

vervangen. Ten slotte is het hierdoor ook mogelijk om zowel vloeistoffen als gassen met dit meettoestel te meten alsook zuren.

Andere meettoestellen hebben lange in- en uitlooptengtes nodig terwijl de coriolis-massadebietmeter dit niet nodig heeft. De coriolis-flow-meter kan ook in beide richtingen werken. Wanneer men wil lossen of laden, dan hoeft men het meettoestel niet om te draaien of dergelijke. Daarboven op is de nauwkeurigheid groot, 0,1% voor de standaardmodellen en 0,05% voor de premium modellen. De flexibele buizen zorgen voor een betere weerstand tegen vibraties waardoor het mogelijk is om de coriolis-massadebietmeter aan boord van schepen te gebruiken. Samengevoegd uit (KOBOLD group, z.d.) en (Endress + Hauser, z.d.)

5.3 Nadelen van de coriolis-massadebietmeter

Het meettoestel zelf is vrij groot en zwaar: hoe groter het toestel is, hoe nauwkeuriger. Daarboven heeft het toestel ook niet zijn vorm mee. Daarom moet men toch wel aanzienlijk wat plaats voorzien voor het meettoestel te kunnen plaatsen. De initiële kost van een coriolis-massadebietmeter is aanzienlijk hoger dan die voor andere debietmeters. Hoewel er minder onderhoudskosten zijn, wordt de aankoopprijs toch niet gecompenseerd.



Figuur 43 Een geïnstalereerde coriolis-massadebietmeter.
Bron: KOBOLD group (z.d.)

De stroom van de vloeistof moet continu zijn, omdat luchtbellens zullen verstoren. Hoewel de flexibele buizen veel voordelen met zich meebrengen zijn er ook enkele nadelen. Het kan zijn dat door de vorm van de buizen er een deel van de vloeistof achterblijft in de buizen. Bij rechttere buizen zal dit minder het geval zijn dan bij de traditionele U-vorm, maar wanneer men rechttere buizen gebruikt voor een coriolis-massadebietmeter, zijn deze ook

meestal stijver en dan ook minder gevoelig voor trage stromingen. Vooraleer men een coriolis-massadebietmeter aanschaft moet er toch goed nagedacht worden over welk type van meter men nodig heeft. Maar in de meeste gevallen wegen de voordelen op tegenover de nadelen als men de installatieprijs niet meerekent. Samengevoegd uit (KOBOLD group, z.d.) en (Endress + Hauser, z.d.)

Conclusie

Elk voorwerp in beweging op aarde zal onderhevig zijn aan de corioliskracht. Dus wanneer een voorwerp een snelheid heeft ten opzicht van het aardoppervlak zal het afgebogen worden en een schijnbare verandering van gewicht ervaren door de corioliskracht.

De grootte en de richting hiervan zijn afhankelijk van de breedteligging, de snelheid, de massa en de koers van het voorwerp. De richting van de corioliskracht wordt bepaald door de koers, het vectorproduct van de snelheid van het voorwerp en de hoeksnelheid van de aarde en staat loodrecht gericht op het vlak dat gedefinieerd wordt door de snelheidsvector en de hoeksnelheid. De grootte van corioliskracht wordt bepaald door de snelheidgrootte en de massa van het voorwerp.

De corioliskracht kan ontbonden worden in een horizontale component, die voor de afbuiging van het voorwerp zorgt en een verticale component, die ervoor zal zorgen dat het voorwerp schijbaar inzinkt of opstijgt. We concluderen dat voorwerpen in beweging zullen afbuigen naar rechts op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond. Hoe dichterbij de polen komt, hoe groter de afbuiging zal zijn. Slechts wanneer het voorwerp zich op de evenaar voortbeweegt met een oostelijke of westelijke koers, zal het voorwerp niet afbuigen omdat de horizontale component gelijk is aan nul. Bij noordelijke of zuidelijke koersen zal de verticale component gelijk zijn aan nul waardoor het voorwerp geen schijnbare verandering van gewicht zal ervaren.

Een schip heeft een enorme massa terwijl de snelheid relatief klein is. Dit zal zorgen voor een grote waarde voor de corioliskracht. Hoewel de snelheid klein is zal de afbuiging vrij traag zijn, op die tijd zullen andere correcties nodig zijn voor een schip. Daarboven speelt de wrijving van het zeewater een grotere rol dan de corioliskracht, een schip in beweging heeft een groot getal van Rossby. Omdat de massa enorm groot is ten opzichte van de snelheid van een schip zal de procentuele schijnbare verandering van het gewicht zo klein zijn, dat die verwaarloosbaar is ten opzichte van andere massaverschillen tijdens een zeereis. Om deze redenen is het niet nodig om direct rekening te houden met de corioliskracht op een schip, tegenover andere voorwerpen waar dit wel gebeurt, zoals een vliegtuig of een kogel. Het blijft echter wel nog steeds interessant om te weten hoe de corioliskracht inwerkt op het schip.

Door de temperatuurverschillen op aarde zal er door convectie, lucht in beweging gezet worden. Deze luchtmassa zal een snelheid krijgen ten opzichte van de aarde waardoor het op zijn beurt onderhevig zal worden aan de corioliskracht. De lucht zal afbuigen naar rechts op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond, waardoor de passaatwinden, de westerlies en de poolwinden zich vormen en zorgen voor een algemene luchtcirculatie op aarde.

Wanneer de wind lang kan inwerken op een grote oppervlakte water, zoals oceanen, zal de wind het water in beweging zetten en oceaanstromingen vormen. Door de corioliskracht zal de stroming nog afbuigen waardoor deze niet in dezelfde richting zal gaan als de winden maar worden afgebogen, volgens de spiraal van Ekman. Door de combinatie van de passaatwinden die de stroming naar het westen duwen langs de evenaar en de westerlies die de stroming naar het oosten duwen, vormen er zich oceaancirculaties. Dit zorgt voor het algemeen beeld van de oceaanstromingen. Zowel winden als oceaanstromingen kunnen door andere factoren bepaald worden waardoor afwijkingen van het algemene beeld mogelijk zijn.

Binnen de tropische regio waardat het water een temperatuur heeft boven $26,5^{\circ}\text{C}$, zal lucht opgewarmd worden door het waarna het condenseert en afkoelt. Zo vormt er zich een luchtcirculatie waar de corioliskracht zal op inwerken en een rotatie eweging zal creëren en zullen er tropische cyclonen gevormd worden. Dit is niet het geval tussen 5°N en 5°Z waar de horizontale component van de corioliskracht te klein is. Op het noordelijk halfrond zal de luchtmassa naar rechts afbuigen, dus vanuit het zuiden naar het westen en vanuit het noorden naar het oosten waardoor de cycloon een draairichting krijgt in tegenwijzerzin. Op het zuidelijk halfrond zal het tegenovergestelde gebeuren en de cycloon een draairichting in wijzerzin hebben. De baan van de cycloon zal meestal afgebogen worden door de corioliskracht, waardoor het mogelijk wordt om te voorspellen hoe de cycloon zal voortbewegingen, al zijn ook hier uitzonderingen mogelijk.

Nu het duidelijk is hoe de corioliskracht inwerkt op voorwerpen op aarde kan het ook in verkleinde schaal ons helpen. Zo gebruikt de coriolis-massadebietmeter de corioliskracht om het massadebiet van een vloeistof of gas nauwkeurig te meten. Binnenin de meter wordt er een slingerende beweging gecreëerd. Wanneer de vloeistof erdoor stroomt zal deze een beweging hebben ten opzichte van de slingerende buis. De buis zal heen en weer zwalpen

door de corioliskracht. Hoe sneller de vloeistof stroomt, hoe meer de buis zal afwijken. De meter kan nauwkeurig het massadebiet, de dichtheid en de temperatuur van de vloeistof in één keer kunnen meten. Terwijl andere debietmeters het volumedebiet meten en minder nauwkeurig zijn omdat het volume van de vloeistof afhankelijk is van de temperatuur, terwijl massa dit niet is. Het enige verschil tussen de coriolis-massadebietmeter en de corioliskracht op aarde is dat de hoeksnelheid binnenin de meter niet constant is en heel de tijd van richting en van grootte verandert en de rotatiebeweging vervangen is door een slingerbeweging.

Naast deze scriptie zijn enkele interactieve driedimensionale figuren ontwikkeld om eenderzijds de scriptie te ondersteunen met duidelijke en specifieke figuren. Maar de figuren zijn voornamelijk ontwikkeld om de student te helpen met het begrijpen van de corioliskracht. Met een klein beetje oefening is de figuur vrij gebruiksvriendelijk met de hoop dat deze figuur toekomstige studenten kan ondersteunen bij een visueel inzicht te creëren van wat en hoe de corioliskracht werkt. Bovendien kunnen docenten hun leerstof met de figuren uit de applicatie ondersteunen.

Bibliografie

Alonso, M., & Finn, J. E. (1973). *Fundamentele natuurkunde:1 mechanica* (tweede herziene druk.). Amsterdam/brussel: Agon Elsevier.

Astrolabium.be. (z.d.). Tycho Brahe (1546-1601)—Hemel en Aarde meten. Geraadpleegd 13 februari 2021, van <http://www.astrolabium.be/mesurercieletterre/Tycho-Brahe-1546-1601?lang=nl>

Bislin, W. (2020, 2 oktober). How Airplanes correct for the Coriolis Effect. Geraadpleegd 4 april 2021, van <http://walter.bislins.ch/bloge/index.asp?page=How+Airplanes+correct+for+the+Coriolis+Effect>

Borelli, G. A. (2014). *Borelli's On the Movement of Animals—On the Force of Percussion*. Springer.

Bourne, M. (2019, 7 juli). 8. Radius of Curvature. Geraadpleegd 14 april 2021, van <https://www.intmath.com/applications-differentiation/8-radius-curvature.php>

Britannica. (z.d.-a). Newton's laws of motion | Definition, Examples, & History. *Encyclopedia Britannica*. Geraadpleegd 20 augustus 2021, a van <https://www.britannica.com/science/Newtons-laws-of-motion>

Britannica. (z.d.-b). Tropical cyclone | Definition, Causes, Formation, and Effects. *Encyclopedia Britannica*. Geraadpleegd 7 juli 2021, b van <https://www.britannica.com/science/tropical-cyclone>

Britannica. (z.d.-c). Storm track | meteorology. *Encyclopedia Britannica*. Geraadpleegd 19 juli 2021, c van <https://www.britannica.com/science/storm-track>

Britannica. (z.d.-d). Westerlies | meteorology. *Encyclopedia Britannica*. Geraadpleegd 20 augustus 2021, d van <https://www.britannica.com/science/westerlies>

Bugatti. (z.d.). Bugatti Veyron 16.4—Super Sport. Geraadpleegd 19 maart 2021, van <https://www.bugatti.com/models/veyron-models/veyron-164-super-sport/>

Campbell, M. (2011, 14 januari). Coriolis-like effect found 184 years before Coriolis. *New Scientist*. Geraadpleegd 5 februari 2021, van <https://www.newscientist.com/article/dn19979-coriolis-like-effect-found-184-years-before-coriolis/>

Deepnika, J. (2018, 6 april). Tropical Regions—Climates, Regions, Storms and Much More! *Toppr Bytes*. Geraadpleegd van <https://www.toppr.com/bytes/tropical-regions/>

Encyclopaedia Britannica. (2021, 15 augustus). Carl-Gustaf Arvid Rossby | American meteorologist. *Encyclopedia Britannica*. Geraadpleegd 9 augustus 2021, van <https://www.britannica.com/biography/Carl-Gustaf-Arvid-Rossby>

Endress + Hauser. (z.d.). Flow measuring technology for liquids, gases and steam.

Geogebra. (z.d.). GeoGebra—De wereldwijde favoriet, gratis wiskunde tools, gebruikt door meer dan 100 miljoen leerlingen en leerkrachten. *GeoGebra*. Geraadpleegd 19 februari 2021, van <https://www.geogebra.org/>

Gerkema, T. (2009). On Borelli's analysis concerning the deflection of falling bodies.

Gerkema, T., & Gostiaux, L. (2012, 20 februari). A brief history of the Coriolis force. NIOZ, Texel, Netherlands and LEGI, Grenoble, France. Geraadpleegd van <https://www.europhysicsnews.org/>

Graney, C. (2011). Coriolis effect, two centuries before Coriolis. *Physics Today—PHYS TODAY*, 64. doi:10.1063/PT.3.1195

Harvard. (z.d.). Hadley Cells. Geraadpleegd 22 juli 2021, van <https://groups.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html>

Henderson, C., & Henderson, Charles. (2003). *Silent Warrior* (2003ste dr., p. p. & nbsp;181). Berkley Books.

Internet Geography. (z.d.). How do tropical storms form? *Internet Geography*. Geraadpleegd van <https://www.internetgeography.net/topics/how-do-tropical-storms-form/>

Jacobs, W. (2020, 20 februari). *Cursus Meteorologie en Oceanografie*. Hogere zeevaartschool Antwerpen, België.

Klaassen, R. (2021, 11 mei). Wat is de intercontinentale convergentiezone (ITCZ). Geraadpleegd 17 juli 2021, van <https://www.weerplaza.nl/weerinhethetnieuws/weerweetjes/wat-is-de-intercontinentale-convergentiezone-itcz/7092/>

KMI. (z.d.). KMI - Isobaren. *KMI*. Geraadpleegd 29 juli 2021, van <https://www.meteo.be/nl/info/weerwoorden/isobaren>

KOBOLD group. (z.d.). The Coriolis Flow Meter: A Mystery No More—KOBOLD USA. Geraadpleegd 5 augustus 2021, van <https://koboldusa.com/blog/the-coriolis-flow-meter-a-mystery-no-more/>

Kumar Singh, A. (z.d.). What is TPC (Tonnes Per Centimeter)? – MarineGyaan. Geraadpleegd 4 april 2021, van <https://marinegyaan.com/what-is-tonnes-per-centimeter-tpc/>

Leung, W. (2010 december). Geostrophic Wind. Geraadpleegd 19 juli 2021, van <https://www.hko.gov.hk/en/education/weather/meteorology-basics/00010-geostrophic-wind.html>

Luyckx, D. (2010). Algemene Mechanica/dynamica (versie 1.1). Hogere zeevaartschool Antwerpen, België.

MarineTraffic. (z.d.). MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic. Geraadpleegd 16 april 2021, van <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-10.8/centery:28.5/zoom:5>

Meteooffice.uk. (z.d.). Global circulation patterns. *Met Office*. Geraadpleegd 22 juli 2021, van <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/atmosphere/global-circulation-patterns>

Michael Allaby. (2008). *Oxford Dictionary of Earth* (Third edition.). Oxford University press.

Missler, W. (z.d.). AK H3.2. Geraadpleegd 31 juli 2021, van <https://samenvattingen.woutermissler.nl/AK%20H3/summary2.html>

Modern Airlines. (z.d.). Boeing 747 Specs—Modern Airlines. Geraadpleegd 19 maart 2021, van <https://modernairliners.com/boeing-747-jumbo/boeing-747-specs/>

O'Connor, J. J., & Robertson E.F. (2012 juli). Giovanni Battista Riccioli—Biography. *Maths History*. Geraadpleegd 19 februari 2021, van <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Riccioli/>

Persson, A. (1998). How do we understand the coriolis force?

Persson, A. (z.d.). Gustave Coriolis, and the Coriolis effect. Geraadpleegd 5 februari 2021, van <http://www-das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap11/gustave.html>

Portillo, G. (2020, 4 juni). Zeestromingen: Kenmerken, typen en werking. *Meteorología en Red*. Geraadpleegd van <https://www.meteorologiaenred.com/nl/oceaanstromingen.html>

SABIX. (z.d.). GUSTAVE CORIOLIS (1792-1843). Geraadpleegd 5 februari 2021, van <http://www.sabix.org/bulletin/b5/coriolis.html>

Samajho Learning. (2018). *TROPICAL CYCLONES || Full Explanation || What, Where, When & How are they formed?* Geraadpleegd van https://www.youtube.com/watch?v=2e950AvNGMY&t=509s&ab_channel=SamajhoLearning

SciJinks. (z.d.). What Are Trade Winds? | NOAA SciJinks – All About Weather. Geraadpleegd 17 augustus 2021, van <https://scijinks.gov/trade-winds/>

Society, N. G. (2019, 1 juli). Ocean Currents. *National Geographic Society*. Geraadpleegd 27 juli 2021, van <http://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/ocean-currents/>

Staroscik, A. (z.d.-a). Thermohaline Circulation | Science Primer. Geraadpleegd 22 juli 2021, a van <https://scienceprimer.com/thermohaline-circulation>

Staroscik, A. (z.d.-b). Ocean Gyres and Geostrophic Flow | Science Primer. Geraadpleegd 27 juli 2021, b van <https://scienceprimer.com/ocean-gyres-and-geostrophic-flow>

The Nature education. (z.d.). Key Physical Variables in the Ocean: Temperature, Salinity, and Density | Learn Science at Scitable. Geraadpleegd 22 juli 2021, van

<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/key-physical-variables-in-the-ocean-temperature-102805293/>

UCAR. (z.d.). The Troposphere | UCAR Center for Science Education. Geraadpleegd 19 juli 2021, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/troposphere>

US Department of Commerce, N. O. and A. A. (z.d.). The Ekman Spiral - Currents: NOAA's National Ocean Service Education. Geraadpleegd 20 augustus 2021, van https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/04currents4.html

Volcanic. (z.d.). Chauffage d'un fluide en circulation. *Vulcanic*. Geraadpleegd 8 augustus 2021, van <https://www.vulcanic.com/nl/massadebiet-vloeistof-te-verwarmen/>

Wikipedia. (2021a, 30 juli). Osculating circle. *Wikipedia*. Geraadpleegd van https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Osculating_circle&oldid=1036265561

Wikipedia. (2021b, 28 juli). Beaufort scale. *Wikipedia*. Geraadpleegd van https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Beaufort_scale&oldid=1035942077

Wikipedia. (2021c, 12 augustus). Atlantic hurricane. *Wikipedia*. Geraadpleegd van https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Atlantic_hurricane&oldid=1038362390

Wikipedia. (2021d, 8 juli). Ekman spiral. *Wikipedia*. Geraadpleegd van https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ekman_spiral&oldid=1032593210

Williams, D. R. (z.d.). Earth Fact Sheet. Geraadpleegd 15 februari 2021, van <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>

Bijlage I: Afleiding van de corioliskracht

We beschouwen twee coördinatenstelsels: XYZ met een waarnemer O en $X'Y'Z'$ met een waarnemer O' . Beide stelsels hebben dezelfde oorsprong. Ze roteren ten opzichte van elkaar maar hebben geen relatieve translatiebeweging. We kunnen het stelsel XYZ beschouwen als een stelsel dat vast is ten opzichte van de sterren en het stelsel $X'Y'Z'$ roteert met een hoeksnelheid ω .

Gezien vanaf O roteert $X'Y'Z'$ met een hoeksnelheid ω . Uit het standpunt van O' is de situatie omgekeerd, hij gaat waarnemen dat XYZ met een hoeksnelheid $-\omega$ roteert. De plaatsvector \vec{r} van een deeltje A t.o.v. XYZ is

$$\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y + z\vec{e}_z$$

waarbij \vec{e}_x , \vec{e}_y en \vec{e}_z eenheidsvectoren voorstellen in de richting van de respectievelijke assen.

De snelheid van het deeltje A ten opzichte van O is dan

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{e}_x + \frac{dy}{dt}\vec{e}_y + \frac{dz}{dt}\vec{e}_z.$$

Op dezelfde manier is de plaatsvector \vec{r}' van het deeltje A ten opzichte van $X'Y'Z'$

$$\vec{r}' = x'\vec{e}'_x + y'\vec{e}'_y + z'\vec{e}'_z$$

met $\vec{r} = \vec{r}'$ omdat de oorsprong voor O en O' dezelfde is

en de snelheid van het deeltje A ten opzichte van O'

$$\vec{V}' = \frac{d\vec{r}'}{dt} = \frac{dx'}{dt}\vec{e}'_x + \frac{dy'}{dt}\vec{e}'_y + \frac{dz'}{dt}\vec{e}'_z.$$

Voor de waarnemer O' gaat het stelsel $X'Y'Z'$ niet roteren en hebben de eenheidsvectoren een constante richting. Maar voor de waarnemer O gaat het stelsel $X'Y'Z'$ echter wel roteren en hebben de eenheidsvectoren van de plaatsvector \vec{r} geen constante richting. Volgens O moeten we de afgeleide van \vec{r} schrijven als

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx'}{dt}\vec{e}_{x'} + \frac{dy'}{dt}\vec{e}_{y'} + \frac{dz'}{dt}\vec{e}_{z'} + x'\frac{d\vec{e}'_x}{dt} + y'\frac{d\vec{e}'_y}{dt} + z'\frac{d\vec{e}'_z}{dt}. \quad (3.3)$$

Het gaat hier over een eenparig cirkelvormige beweging met hoeksnelheid ω , dus volgens de vergelijking $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, we krijgen

$$\frac{d\vec{e}'_x}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{e}_x, \quad \frac{d\vec{e}'_y}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{e}_y, \quad \frac{d\vec{e}'_z}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{e}_z.$$

Hieruit volgt

$$\begin{aligned} x'\frac{d\vec{e}'_x}{dt} + y'\frac{d\vec{e}'_y}{dt} + z'\frac{d\vec{e}'_z}{dt} &= \vec{\omega} \times x'\vec{e}_x + \vec{\omega} \times y'\vec{e}_y + \vec{\omega} \times z'\vec{e}_z \\ &= \vec{\omega} \times (x'\vec{e}_x + y'\vec{e}_y + z'\vec{e}_z) = \vec{\omega} \times \vec{r}. \end{aligned}$$

Wanneer we substitueren in vergelijking (3.1), (3.2) en (3.3) vinden we

$$\vec{V} = \vec{V}' + \vec{\omega} \times \vec{r}. \quad (3.4)$$

We kunnen op een soortgelijke manier te werk gaan om de versnelling van het deeltje A te berekenen ten opzichte van XYZ , deze is

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{dV_x}{dt}\vec{e}_x + \frac{dV_y}{dt}\vec{e}_y + \frac{dV_z}{dt}\vec{e}_z$$

en t.o.v. $X'Y'Z'$

$$\vec{a}' = \frac{dV_{x'}}{dt}\vec{e}_{x'} + \frac{dV_{y'}}{dt}\vec{e}_{y'} + \frac{dV_{z'}}{dt}\vec{e}_{z'}.$$

Wanneer we het verband van de snelheden (3.4) hierin substitueren en ω als een constante beschouwen krijgen we

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d\vec{V}'}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{V}$$

en met $V' = V'_x e_{x'} + V'_y e_{y'} + V'_z e_{z'}$ vinden we

$$\frac{dV'}{dt} = \frac{dV'_{x'}}{dt}\vec{e}_{x'} + \frac{dV'_{y'}}{dt}\vec{e}_{y'} + \frac{dV'_{z'}}{dt}\vec{e}_{z'} + V_{x'}\frac{d\vec{e}_{x'}}{dt} + V_{y'}\frac{d\vec{e}_{y'}}{dt} + V_{z'}\frac{d\vec{e}_{z'}}{dt}$$

Hierin zien we dat de eerste drie termen \vec{a}' beschrijven en de laatste drie termen gelijk zijn aan $\vec{\omega} \times \vec{V}'$. Hieruit volgt dus dat

$$\frac{d\vec{V}'}{dt} = \vec{a}' + \vec{\omega} \times \vec{V}'.$$

Wanneer we in (3.5) de vergelijking (3.6) substitueren krijgen we

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{\omega} \times \vec{V}' + \vec{\omega} \times \vec{V}.$$

Vervolgens substitueren \vec{V} met vergelijking (3.4)

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{\omega} \times \vec{V}' + \vec{\omega} \times (\vec{V}' + \vec{\omega} \times \vec{r})$$

$$\vec{a} = \vec{a}' + 2\vec{\omega} \times \vec{V}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

en dus

$$\vec{a}' = \vec{a} - 2\vec{\omega} \times \vec{V}' - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}).$$

Waarin de tweede term de coriolisversnelling weergeeft.

$$\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{V}'.$$

Waarin \vec{V}' omschreven wordt in deze scriptie als \vec{v} , de relatieve snelheid van het voorwerp ten opzichte van het aardoppervlak. Zo krijgen we voor de corioliskracht

$$\vec{F}_c = 2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}. \quad (2.1)$$

Afgeleiding gebaseerd op2 (Alonso & Finn, 1973) en (Luyckx, 2010)

Bijlage II: Elektronische bijlage

In deze bijlage worden alle elektronische bijlage opgesomd. Onder elk elektronische lijst vind men een lijst terug met alle figuren die uit het bestand gehaald zijn.

1. **Hoeksnelheid en baansnelheid:** <https://www.geogebra.org/3d/vcvep9vg>
Geogebra bestand waarin het verschil tussen de hoeksnelheid en de baansnelheid van een roterende beweging gevisualiseerd wordt. Gebruikt in hoofdstuk 2.2.1.

Figuur 7 Baansnelheid en hoeksnelheid

2. **Tangentiële- en normaal versnelling:** <https://www.geogebra.org/3d/va4pxd7f>
Geogebra bestand waarin het verschil tussen de tangentiële- en de normaal versnelling gevisualiseerd wordt.

Figuur 8 Tangentiële en normale versnelling

3. **Corioliskracht geogebra-applicatie:** <https://www.geogebra.org/3d/uaxrwxec>
De geogebra-applicatie is ontwikkeld als educatief hulpmiddel voor de student om een beter inzicht in het corioliseffect te krijgen. De applicatie is uitgebreid terug te vinden in hoofdstuk 3.1.

Figuur 11 Noordelijke koers

Figuur 12 Links: minimale grootte θ op de evenaar, rechts: maximale grootte θ op de noordpool

Figuur 13 Verplaatsing richting oosten

Figuur 15 Corioliskracht ontbonden in tangentiële en centrifugale component

Figuur 19 Projectie centrifugale component op raakvlak

Figuur 20 Horizontale component van de corilioskracht

Figuur 23 Standaardvorm van de Geogebra-applicatie

4. **De hoek theta in functie van de breedte­ligging en de koers:**

<https://www.geogebra.org/3d/meysbf2u>

Geogebra bestand gemaakt als hulp voor het berekenen van de componenten van de corioliskracht en de bijhorende hoeken in functie van de breedte­ligging en de koers van een schip. Gebruikt als hulp voor de berekenen in hoofdstuk 2.4.1

Figuur 14 De hoek θ in functie van α en φ

5. **De hoek beta in functie van de breedte­ligging en de koers:**

<https://www.geogebra.org/3d/yt82saaj>

Geogebra bestand gemaakt als hulp voor het berekenen van de componenten van de corioliskracht en de bijhorende hoeken in functie van de breedte­ligging en de koers van een schip. Gebruikt als hulp voor de berekenen in hoofdstuk 2.4.1

Figuur 16 De hoek β in functie van α en φ

6. **Het Schijnbaar gewicht:** <https://www.geogebra.org/3d/yzsnaauc>

Geogebra bestand om het begrip schijnbare verandering van het gewicht te visualiseren ter ondersteuning van de berekeningen in hoofdstuk 2.5.1.

Figuur 17 Schijnbare verandering van het gewicht

7. **Vereenvoudigde weergave van de kromtestraal:**

<https://www.geogebra.org/3d/ttreg4g>

Geogebra bestand om vereenvoudigd de kromtestraal weer te geven bij verschillende snelheden. Gebruikt ter ondersteunen voor de uitleg van het Eotvos effect in hoofdstuk 2.5.1.1

Figuur 21 Vereenvoudigde weergave van de kromtestraal

8. **Systematische voorstelling van de coriolis-massadebietmeter:**

<https://www.geogebra.org/3d/cbwpa6ur>

Geogebra bestand waarin de coriolis-massadebietmeter systematisch en vereenvoudigd wordt weergegeven.

Figuur 41 Systematische voorstelling van de coriolis-flow-meter

Figuur 42 Systematische voorstelling van de coriolis-flow-meter in het terug bewegen van de buis.

9. **Calculator coriolis force.xlsx**

Rekenblad opgemaakt om berekenen met betrekking tot de corioliskracht te maken en om bijhorende grafieken ervan op te stellen. Het rekenblad is opgemaakt en hoe het rekenblad gebruikt moet worden is terug te vinden in hoofdstuk 3.2. De volgende grafieken zijn schermopnames uit het rekenblad:

Figuur 24 Schijnbare verandering van gewicht in functie van koers en breedteligging

Figuur 25 Grootte van de corioliskracht in functie van koers en breedteligging.

Bijlage III: Coriolis formularium

Corioliskracht methode 1

Coriolisversnelling	$\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$	
Corioliskracht	$\vec{F}_c = 2 \cdot m \cdot \vec{v} \times \vec{\omega}.$	2.1
	$ \vec{F}_c = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot v \cdot \sin(\theta)$	2.4.1
θ	$\theta = \cos^{-1}(\cos \varphi \cdot \cos \alpha)$	2.4.3

Corioliskracht methode 2

Snelheid en rotatievectoren	$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \cdot \sin \varphi \\ v \cdot \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix}$ en $\vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \cdot \cos \alpha \\ \omega \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$	2.4.2
Coriolisversnelling	$\vec{a}_c = -2\omega v(-\sin \alpha \cos \varphi \vec{i} + \sin \alpha \sin \varphi \vec{j} - \cos \alpha \sin \varphi \vec{k}).$	2.5.4
Corioliskracht	$F_c = 2m\omega v \sqrt{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \sin^2 \varphi}$	2.5.5
met	F_c positief voor $\alpha < 180^\circ$ F_c negatief voor $\alpha > 180^\circ$	

Componenten van de Corioliskracht

Centrifugale component	$F_{cs} = F_c \cdot \cos \beta$	2.5.2
Tangentiële component	$F_{ct} = F_c \cdot \sin \beta$	2.5.3
β	$\beta = \tan^{-1}(\cot \varphi \cdot \sin \alpha)$	2.5.1
Verticale component	$F_{cg} = F_{cs} \cdot \cos \alpha.$	
	$F_{cg} = F_c \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha$	2.5.6

Schijnbare verandering gewicht

Eötvös effect	$\vec{a}_r = \vec{a}_{cg} + \vec{a}_s.$	
	$a_r = 2\omega v \sin \varphi \cos \alpha + \frac{v^2}{R}$	2.5.6
Schijnbare verandering gewicht	$M = m \frac{a_g \pm a_r}{a_g}$	2.5.7

Kromtestraal afbuiging

$$\rho = \frac{v}{2 \cdot \omega \cdot \sin \beta}$$

Het getal van Rossby

$$Ro = \frac{U}{Lf}.$$
$$Ro = \frac{v}{L \cdot (2\omega \sin \alpha)}. \quad 4.1$$

Waarin

α – breedteligging

φ – koers

v' – snelheid

m – massa

ω – rotatiesnelheid van de aarde = 15°/uur

