



Vlaanderen
is wetenschap



22_036_1
WL rapporten

Dwarsstromingen Platen van Ossense

Deelrapport 1
Bepalen kans op voorkomen van hydrodynamische condities en
bijbehorende dwarsstroming

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Dwarsstromingen Platen van Ossenisse

Deelrapport 1 – Bepalen kans op voorkomen van hydrodynamische condities en bijbehorende dwarsstroming

Plancke, Y.; Stark, J.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022
D/2022/3241/206

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Stark, J. (2022). Dwarsstromingen Platen van Ossensisse: Deelrapport 1 – Bepalen kans op voorkomen van hydrodynamische condities en bijbehorende dwarsstroming. Versie 3.0. WL Rapporten, 22_036_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen



Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	RWS – Zee en Delta	Ref.:	WL2022R22_036_1
Trefwoorden (3-5):	Dwarsstroming, Schelde-estuarium, Platen van Ossensisse, kansberekening		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment – Hydrodynamica – Getij - Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	20	Bijlagen (p.):	7
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Plancke, Y.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Stark, J.	Getekend door: Jeroen Stark (Signature) Getekend op: 2023-01-03 14:35:47 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2023-01-24 16:58:31 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2023-01-03 11:40:58 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 
-----------------	---------------	---



Abstract

Ter hoogte van de Platen van Ossensisse treden bij sterke springtijden rond het moment van hoogwater dwarsstromingen op, die een potentieel risico kunnen vormen voor de scheepvaart. Door Rijkswaterstaat worden er daarom jaarlijks waarschuwingen gepubliceerd, waarin de momenten van “matige” en “sterke” dwarsstroming worden weergegeven. De dwarsstromingen kennen echter een gradueel verloop, vandaar dat binnen voorliggend rapport de kans op voorkomen van een bepaalde dwarsstroming ter hoogte van de oostrand van de Platen van Ossensisse is berekend. Aan de hand van de waterstandsparameters “verval tussen Terneuzen en Hansweert” en “stijgsnelheid te Hansweert” werd de sterkte van de dwarsstroming afgeleid voor elke getijd over de periode 2010-2021, en werd met behulp van een lineaire correlatie tussen deze waterstandsparameters en de sterkte van de dwarsstroming vervolgens de kans op voorkomen van een bepaalde dwarsstroming bepaald.

Tevens wordt in dit rapport een vergelijking gemaakt tussen de waterstandsparameters berekend uit de astronomisch voorspelde waterstanden en de gemeten waterstanden voor de jaren 2020 en 2021. Tenslotte wordt voor het eerste kwartaal van 2022 een vergelijking gemaakt tussen de astronomisch voorspelde momenten van dwarsstroming, de door middel van de operationele modellen voorspelde momenten van dwarsstroming en de uit de waterstandsmetingen afgeleide dwarsstromingen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de figuren	V
Lijst van de tabellen.....	VI
1 Introductie	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Doelstelling	1
2 Studiegebied.....	2
3 Dwarsstroming	3
3.1 Ontstaan van de neer	3
3.2 Voorspelling van dwarsstroming door RWS.....	3
3.3 Analyse van de ADCP-stroommetingen.....	4
4 Methodologie	5
4.1 Beschikbare gegevens	5
4.2 Afgeleide parameters	5
5 Resultaten – kans op voorkomen	7
5.1 Hoogwater Terneuzen en Hansweert.....	7
5.2 Verval Terneuzen-Hansweert.....	7
5.3 Stijgsnelheid Hansweert	7
5.4 Afgeleide dwarsstroming.....	9
5.5 Kans op voorkomen.....	13
6 Resultaten – voorspelling vs. meting.....	14
6.1 Astronomische voorspellingen waterstanden.....	14
6.2 Vergelijking voorspelde vs. opgetreden waterstandsparameters	14
7 Resultaten – case Q1 2022	15
7.1 Astronomische voorspelling	15
7.2 Operationele voorspelling	15
7.3 Evaluatie van de vastgestelde momenten	15
8 Conclusies en aanbevelingen	17
8.1 Conclusies.....	17
8.2 Aanbevelingen	18
9 Referenties	19
Bijlage A Kans op voorkomen per jaar	B1
Bijlage B Vergelijking meting-astro	B7

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied.....	2
Figuur 2 – Ligging gevaren ADCP-transecten.....	4
Figuur 3 – Ligging getijstations	5
Figuur 4 – Relatie tussen gemeten dwarsstroming en vervalcriterium (links) en stijgsnelheid (rechts) o.b.v. gemeten waterstanden	6
Figuur 5 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en afgeleide waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor de periode 2010-2021	8
Figuur 6 –Verschil in afgeleide dwarsstroming uit verval (x-as) en stijgsnelheid (y-as) voor verschillende jaar in periode 2010-2021	10
Figuur 7 –Verschil in afgeleide dwarsstroming uit verval (x-as) en stijgsnelheid (y-as) voor verschillende jaar in periode 2010-2021 [detail van sterkste dwarsstromingen waarbij verschil tussen beide componenten > 1,5 m/s]	10
Figuur 8 –Afgeleide sterkte van dwarsstroming (verschil tussen beide componenten met tegengestelde richting) o.b.v. maximaal verval (boven) en maximale stijgsnelheid (onder) over de periode 2010-2021	11
Figuur 9 –Variatie van het aantal voorkomens (4/jaar en 12/jaar) over de periode 2010-2021	12
Figuur 10 –Relatie tussen sterkte van dwarsstroming (obv. verval) en bijbehorende kans op voorkomen over de periode 2010-2021	13
Figuur 11 –Relatie tussen de gemeten (x-as) en astronomisch voorspelde (y-as) maximale stijgsnelheid (links) en het maximale verval (rechts) voor de periode 2020-2021.....	14
Figuur 12 – Ingeschatte dwarsstroming o.b.v. verval (boven) en stijgsnelheid (onder) en momenten van door HMC voorspelde dwarsstroming.....	16
Figuur 13 – Kans op voorkomen voor momenten van door HMC voorspelde dwarsstroming	16
Figuur 14 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011	1
Figuur 15 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011	2
Figuur 16 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011	3
Figuur 17 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011	4
Figuur 18 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011	5
Figuur 19 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011	6
Figuur 20 –Relatie tussen de gemeten (x-as) en astronomisch voorspelde (y-as) maximale stijgsnelheid (links) en het maximale verval (rechts) voor de jaren 2020 (boven) en 2021 (onder)	7

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht verschillende “kans op voorkomen” met bijbehorende dwarsstroming 8

1 Introductie

1.1 Situering

In navolging van de stranding van de Fowairet ter hoogte van de Platen van Ossensisse in 2005 werden verschillende onderzoeken opgestart om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van dit ongeval. Er werden zowel stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat (RWS) als numerieke modellen opgezet (Decrop *et al.*, 2009b) om de lokale stroompatronen nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse in beeld te brengen. Dit onderzoek toonde aan dat bij sterke springtijden (ook “giertij” genoemd) er ter hoogte van de rand van de vaargeul aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse een aanzienlijke stromingscomponent dwars op de vaargeul aanwezig kan zijn. De dwarsstroming wordt veroorzaakt door een grote neer die bij hoge (spring)tijden aanwezig is in dit gebied. In de afgelopen jaren werden verschillende onderzoeken naar morfologische ingrepen uitgevoerd om deze dwarsstroming in sterkte te reduceren (Deltares *et al.*, 2013 en Stark *et al.*, 2020). Echter, de verschillende oplossingen bleken maar een beperkte invloed te hebben op de dwarsstroming, waarbij ook de veranderende topo-bathymetrie het potentieel effect van de verschillende maatregelen beïnvloedt.

Om de veilige scheepvaart te garanderen wordt jaarlijks door Rijkswaterstaat een voormelding gemaakt (Rijkswaterstaat, 2020), waarbij op basis van de astronomisch voorspelde waterstanden en het vervalcriterium een inschatting wordt gemaakt van de momenten wanneer zich “matige” en “sterke” dwarsstromingen kunnen voordoen. Door meteorologische omstandigheden kunnen de werkelijke condities afwijken van de astronomische voorspelde situatie, waardoor momenten in de voormelding kunnen wijzigen (zowel toename als afname in sterkte van de voorspelde dwarsstroming), alsook niet in de voormelding aanwezige momenten kunnen optreden met “matige” of “sterke” dwarsstroming. In eerder onderzoek (Plancke *et al.*, 2021) werd aangetoond dat de tijdshorizon waarop de waarschuwing aangepast kan worden, met voldoende zekerheid kon opgetrokken worden van 3u naar 24u. Dit werd in het laatste kwartaal van 2021 door RWS geïmplementeerd in hun waarschuwingsmethodiek en na de testfase in 2021 opgenomen in de reguliere methodiek vanaf 2022.

Naast de voorspelhorizon, vormt de aard van de waarschuwing een belangrijk aandachtspunt: momenteel hanteert RWS 3 niveaus: geen – matige – sterke dwarsstroming. Uit eerder onderzoek (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) is echter gebleken dat de dwarsstroming gradueel variërend optreedt afhankelijk van getij, meteo en morfologische condities. Om dit aspect verder te verbeteren, kan een benadering gebaseerd op “kans van voorkomen” een genuanceerder en beter beeld geven.

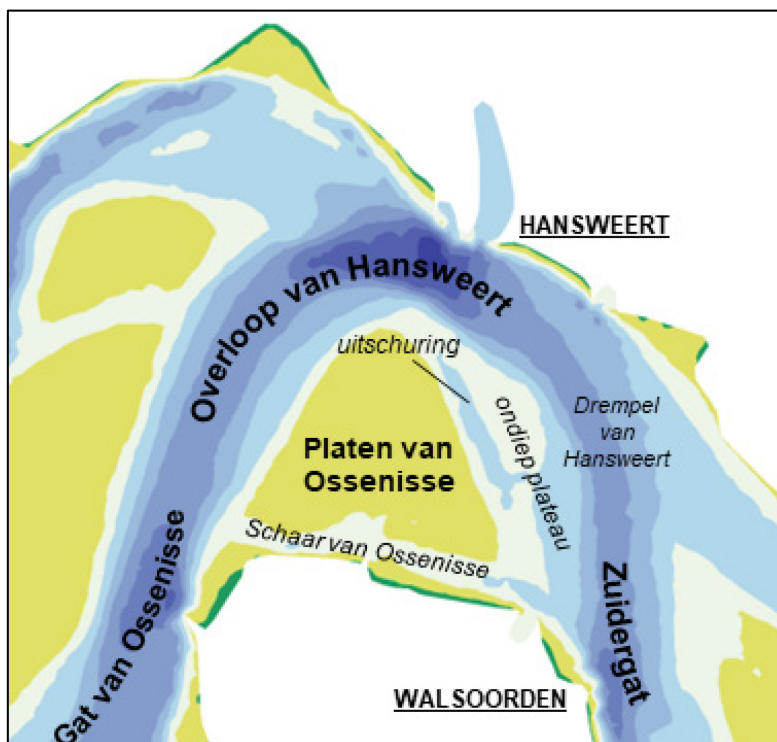
1.2 Doelstelling

Dit rapport heeft als doel om op basis van de opgetreden waterstandscondities over de periode 2010-2021 een kans op voorkomen af te leiden van de dwarsstroming nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse. De waterstandsparameters (verval, stijgsnelheid) zullen hierbij afzonderlijk geanalyseerd worden, maar ook hun doorvertaling naar dwarsstroming zal onderzocht worden. Tenslotte zal er voor het jaar 2021 een verkennende vergelijking gemaakt worden tussen de voorspelde waterstanden en de gemeten waterstanden. Dit is van belang aangezien de waarschuwingen uitgegeven worden op basis van de voorspellingen.

2 Studiegebied

De dwarsstroming doet zich voor ter hoogte van de vaargeul nabij de drempel van Hansweert, grenzend aan de oostrand van de Platen van Ossensisse. Vanuit de Overloop van Hansweert plant de getijgolf zich in noordoostelijke richting voort naar Hansweert waar ze afbuigt in zuidoostelijke richting naar Walsoorden en het Zuidergat. Gedurende een groot deel van de getijcyclus vormen de Platen van Ossensisse een barrière waar het water rond moet stromen, slechts in de periode rond hoogwater worden deze platen overstroomd en kan het water vanuit de Overloop van Hansweert naar het Zuidergat stromen over de platen (Figuur 1).

Ten oosten van de Platen van Ossensisse bevindt zich een ondiepte die zich over de laatste decennia heeft ontwikkeld. Dit plateau heeft op basis van recente bathymetrische gegevens (i.e., vaklodingen) uit 2018 een hoogteligging van om en nabij -7 m NAP in het zuidoostelijk deel van de ondiepte tot -4 m NAP op het noordelijk deel. In het meest noordelijk deel manifesteert zich een nieuwe plaat, waarbij een geul ('uitschuring' op Figuur 1) zich vormt tussen deze plaat en de Platen van Ossensisse. Ten zuiden van de plaat bevindt zich een ondiepe geul (Schaar van Ossensisse). Het is op dit ondiepe plateau dat een depressie ontstaat die de aanleiding vormt voor de vorming van de neer die dwarsstromingen in de vaargeul kan veroorzaken (Plancke *et al.*, 2020).



Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied.

3 Dwarsstroming

Naar aanleiding van de stranding van de Fowairret ter hoogte van de Platen van Ossensisse in 2005, werden specifieke onderzoeken opgestart om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van dit ongeval. Er werden zowel stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd (RWS) als numerieke modellen opgezet (e.g. Decrop *et al.*, 2009a; Stark *et al.*, 2020b) om meer inzicht te krijgen in de lokale stroompatronen nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse. Door Deltares (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) werd een uitgebreide analyse uitgevoerd van de beschikbare ADCP-metingen van RWS. Daarnaast wordt door RWS op basis van de voorspelde waterstanden, een voorspelling gemaakt voor de optredende dwarsstromingen.

3.1 Ontstaan van de neer

In bovengenoemde studies werd de vorming van de neer bij de Platen van Ossensisse al uitvoerig beschreven. De grote neer op de Platen van Ossensisse ontstaat in de late vloedfase van hoge (spring)tijden. De Platen van Ossensisse (en het ondiepe plateau ten oosten van de plaat) bevinden zich in de binnenbocht van de vaargeul (Figuur 1) en kennen door verschillen in waterdiepte en bodemwrijving een langzamere waterstandsstijging dan de vaargeul. De waterstanden stijgen het langzaamst op het noordelijk deel van het ondiepe plateau, welke in de luwte ligt van het hoogste deel van de plaat. De waterstandsgradiënt die dientengevolge ontstaat tussen het zuidelijk deel van de plaat (i.e., inclusief de Schaar van Ossensisse) en het noordelijk deel van het ondiep plateau zorgt voor een noordwaartse tegenstroom over het ondiepe plateau. Daarnaast zorgt het verschil in traagheid tussen de vloedstroom in de vaargeul en de vloedstroom over de ondiepte ervoor dat de kentering eerder optreedt op het ondiepe plateau en er hier dus eerder zeewaarts gerichte stroming (eb) plaatsvindt dan in de vaargeul zelf. Als de twee tegengestelde stromingen (i.e., zuidwaarts in de vaargeul en noordwaarts op het ondiep plateau) de waterstandsdepressie op het plateau omsluiten zorgen drukgradiënten voor een afbuiging van de twee stromingen en ontstaat er een neer. Deze wordt gekenmerkt door een lokale waterstandsdepressie en een circulair stromingsveld (i.e., met de klok mee) rondom deze depressie. Nadat de neer boven de ondiepte is gevormd kan deze zich onder invloed van de vloedstroming in de vaargeul nog enkele kilometers richting de vaargeul en landinwaarts verplaatsen. Als de stroomrichting in de vaargeul tijdens eb omkeert beweegt de neer zich juist stroomafwaarts. Vervolgens neemt de neer snel in intensiteit af omdat er geen sprake meer is van tegengestelde stroomrichtingen.

3.2 Voorspelling van dwarsstroming door RWS

Rijkswaterstaat gebruikt het vervalcriterium waarbij op basis van astronomische voorspellingen een inschatting wordt gemaakt van het voorkomen van “matige” en “sterke” dwarsstromingen. Het criterium dat RWS hanteert is gebaseerd op het voorspelde maximale verval tussen Terneuzen en Hansweert tijdens de vloedfase voorafgaand aan het hoogwater te Hansweert (Rijkswaterstaat, 2020). Als dit verval groter is dan 0,80 m wordt een waarschuwing voor een “sterke” dwarsstroming van > 3,5 mph in het Zuidergat gegeven. Als het maximale verval tussen Terneuzen en Hansweert tussen 0,75 m en 0,80 m blijft, wordt een waarschuwing gegeven voor een “matige” dwarsstroom van < 3,5 mph in het Zuidergat.

Naast de waarschuwing op basis van de astronomische voorspelling, wordt deze “herzien” op basis van de waterstandsvoorspellingen (HMC). Hierbij wordt enkele (2 à 3) uren voorafgaand aan het optredende hoogwater een bijgestelde waarschuwing opgemaakt. Sinds mei 2012 wordt een maximaal verval tussen Terneuzen en Hansweert tussen 90 en 95 cm als ‘matig’ beoordeeld, een verval groter dan 95 cm als ‘sterk’. Tevens wordt ook een hoogwatercriterium gehanteerd (andere grenswaarden wanneer HW Hansweert > 335 cm NAP, zie (van Weerdenburg & van der Werf, 2019)). Merk hierbij op dat de grenswaarden van de modelvoorspellingen afwijken van de grenswaarden bij de astronomische voorspellingen.

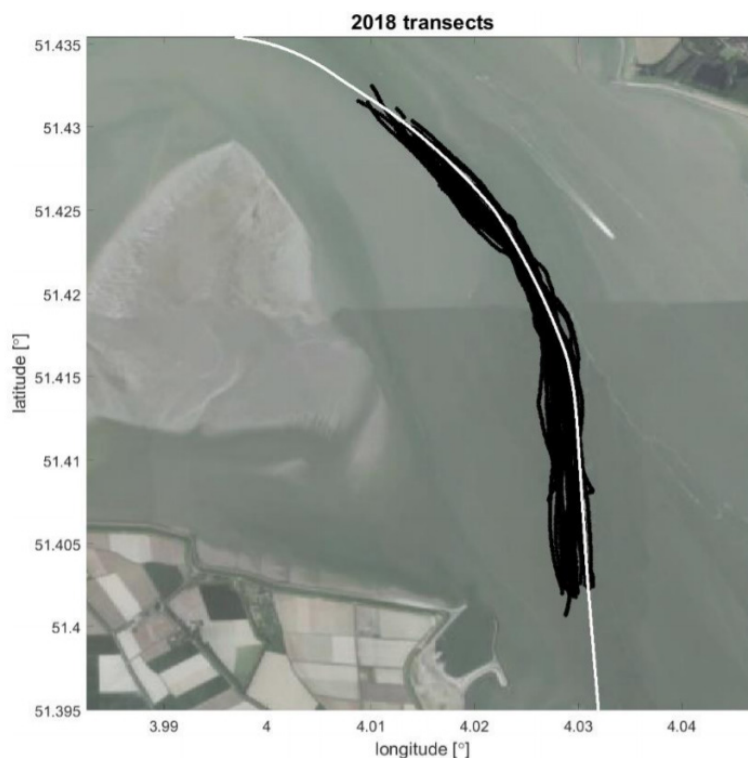
3.3 Analyse van de ADCP-stroommetingen

Deltares (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) voerde een uitgebreide analyse uit van de beschikbare stroommetingen in het studiegebied. Sinds 2005 worden er door Rijkswaterstaat varende stroommetingen (Figuur 2) uitgevoerd wanneer een sterke dwarsstroming voorspeld wordt op basis van het gehanteerde voorspelcriterium. Tot en met 2019 zijn er 160 meetcampagnes uitgevoerd waarbij de stroming gemeten werd met behulp van ADCP. Telkens wordt een raai langs de groene boeienzijde van de vaargeul nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse meerdere keren gevaren en wordt een snelheidsprofiel onder het vaartuig gemeten. De stromingsdata verkregen tijdens de meetcampagnes werden door Deltares geanalyseerd. De studie had tot doel enerzijds het voorspelcriterium te evalueren en anderzijds om de fysica rondom het ontstaan en de ontwikkeling van de neer beter te begrijpen.

In de studie wordt de gemeten dwarsstroming vergeleken met enkele criteria op basis van de waterstanden (zowel gemeten als voorspeld):

- Vervalcriterium: maximale verval tussen de stations Terneuzen en Hansweert, vooraf aan het hoogwater te Hansweert
- Stijgsnelheid: maximale stijgsnelheid van de waterstand te Hansweert
- Criterium Decrop *et al.* (2010): $cr = (1 + k_a(HWL - k_b)) \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \geq 4 \text{ cm/min}$
waarin HWL het hoogwaterniveau bij Hansweert voorstelt, $dhd t^{-1}$ is de maximale stijgsnelheid bij Hansweert en k_a [m^{-1}] en k_b [m] zijn kalibratieparameters die door Decrop *et al.* (2010) op 1,0 en 0,55 bepaald werden (i.e., mits waterstanden in m NAP worden uitgedrukt).

Uit de analyse blijkt dat de stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert een redelijke indicator is voor de sterkte van de neer. Voor de beschikbare dataset functioneert de maximale stijgsnelheid beter als indicator dan het vervalcriterium. Er moet echter ook rekening gehouden worden met de beperkte nauwkeurigheid van voorspellingen voor deze twee indicatoren met het huidige modelinstrumentarium. Bovendien bestaat de dataset van de meetcampagnes voornamelijk uit (zeer) hoge springtijden, waardoor de voorspellende waarde van de indicatoren voor andere getijcondities (i.e. doortij en gemiddeld getij) niet kon worden onderzocht.



Figuur 2 – Ligging gevaren ADCP-transecten [bron: (van Weerdenburg & van der Werf, 2019)]

4 Methodologie

4.1 Beschikbare gegevens

In voorliggende analyse wordt gebruik gemaakt van de gemeten waterstanden ter hoogte van volgende getijstations (Figuur 3):

- Terneuzen (TERN)
- Hansweert (HANS)

De waterstanden werden beschikbaar gesteld door RWS met een tijdsinterval van 10 minuten. Naast de tijdreeksen werden ook de hoogwaterstanden ter hoogte van Hansweert gebruikt, eveneens beschikbaar gemaakt door RWS.



Figuur 3 – Ligging getijstations [bron: <https://waterberichtgeving.rws.nl>]

4.2 Afgeleide parameters

In haar analyse (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) onderzocht Deltares de relatie tussen bepaalde gemeten en gemodelleerde waterstandsparameters en de gemeten dwarsstroming uit diverse stroommetingen. Er werd geconcludeerd dat volgende parameters de beste voorspellende waarde voor de dwarsstroming hebben:

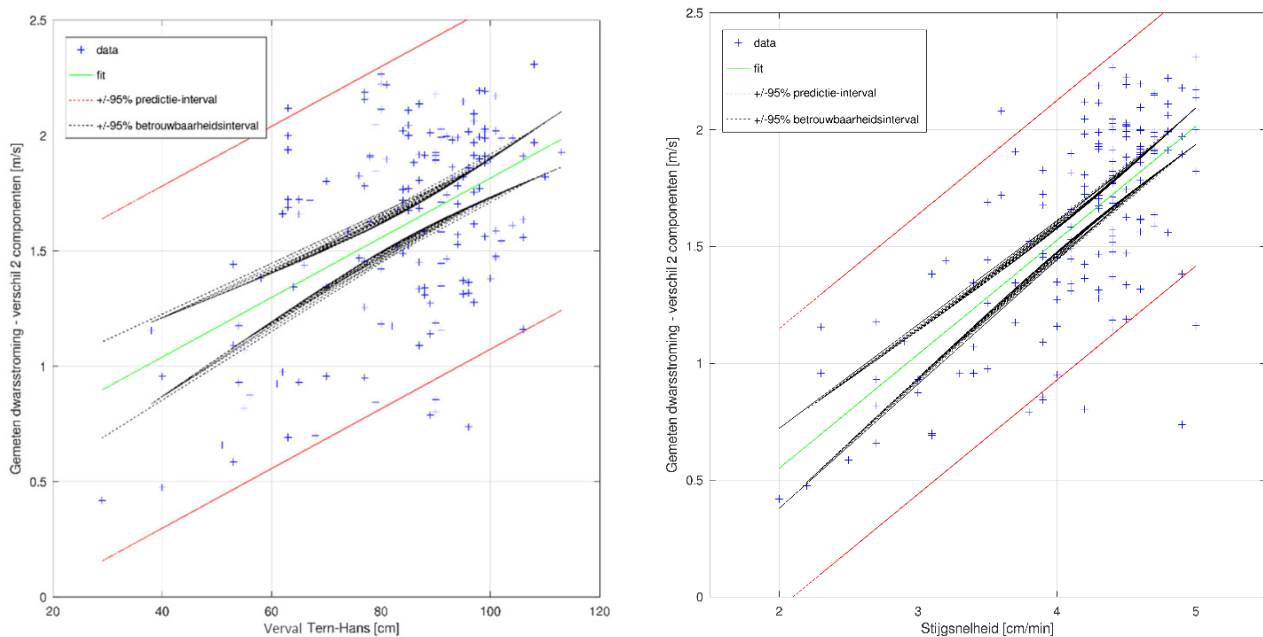
- Maximale stijgsnelheid van de waterstand in Hansweert (dh/dt)
- Maximaal verval¹ tussen Terneuzen en Hansweert (dh)

In Figuur 4 wordt de relatie getoond (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) tussen het uit metingen afgeleide verval en de stijgsnelheid, en de gemeten dwarsstroming (verschil tussen de 2 componenten,

¹ Het “verval” is het verschil in waterstand tussen 2 stations in [m]. Vaak wordt ook het “verhang” gebruikt, waarbij het verval gedeeld wordt door de afstand tussen de 2 stations en dus dimensieloos is. Aangezien de afstand tussen de stations vast is, is het patroon van beide parameters identiek.

oost-west en west-oost vector). Deze relaties zullen verder in voorliggend onderzoek gebruikt worden om de waterstandsparameters om te rekenen naar dwarsstroming en deze also onderling vergelijkbaar te maken.

Uit deze figuur blijkt de grote spreiding die aanwezig is in beide relaties. Dit wordt ook weergegeven aan de hand van de 95%-predictie-intervallen: voor een bepaalde waarde van het verval/stijgsnelheid zal met 95% zekerheid de bijbehorende dwarsstroming binnen de rode lijnen liggen. Hieruit blijkt dat bij een verval van 80 cm de bijbehorende dwarsstroming (verschil tussen beide componenten) $1,55 \text{ m/s} \pm 0,75 \text{ m/s}$ kan bedragen, wat de onzekerheid illustreert.



Figuur 4 – Relatie tussen gemeten dwarsstroming en vervalcriterium (links) en stijgsnelheid (rechts) o.b.v. gemeten waterstanden [bron: (van Weerdenburg & van der Werf, 2019)]

Voor de inschatting van de dwarsstroming op momenten waarop geen metingen beschikbaar zijn, werden de waterstandsparameters berekend uit de gemeten waterstanden. Hierbij werd telkens het maximum voor zowel het verval als de stijgsnelheid bepaald in een zoekvenster van 360' voor tot 20' na het hoogwater te Hansweert (proxy voor de vloedfase). Vervolgens werd op basis van bovenstaande lineaire relaties een doorvertaling gemaakt naar de verwachte sterkte van de dwarsstroming. Er dient opgemerkt te worden dat de parameters voor bepaalde getijden niet konden worden bepaald door het ontbreken van waterstandsmetingen (Hansweert en/of Terneuzen).

5 Resultaten – kans op voorkomen

Per getij werd het hoogwater bepaald voor de stations Hansweert en Terneuzen, alsook de maximale stijgsnelheid van de waterstand in Hansweert en het maximale verval tussen de stations Terneuzen en Hansweert. Theoretisch zijn er ca. 705 getijcycli per jaar, doch door hiaten in tijdreeksen van de metingen, kan het effectieve aantal lager liggen dan 705. In de volgende paragrafen worden de histogrammen voor de verschillende waterstandsparameters gepresenteerd. Deze worden tevens gebruikt om de “kans op voorkomen” te bepalen.

5.1 Hoogwater Terneuzen en Hansweert

Figuur 5 (boven) toont het histogram van het hoogwater te Terneuzen en te Hansweert over de periode 2010-2021. De histogrammen voor de jaarlijkse subsets zijn terug te vinden in Bijlage A – kans op voorkomen per jaar.

De mediane (P50) waarde van de hoogwaters bedraagt respectievelijk +235 cm NAP en +250 cm NAP voor Terneuzen en Hansweert. De minimale waarde van het hoogwater bedraagt respectievelijk +73 cm NAP en +88 cm NAP voor Terneuzen en Hansweert, terwijl de maximale waarde respectievelijk +431 cm NAP en +443 cm NAP bedraagt.

5.2 Verval Terneuzen-Hansweert

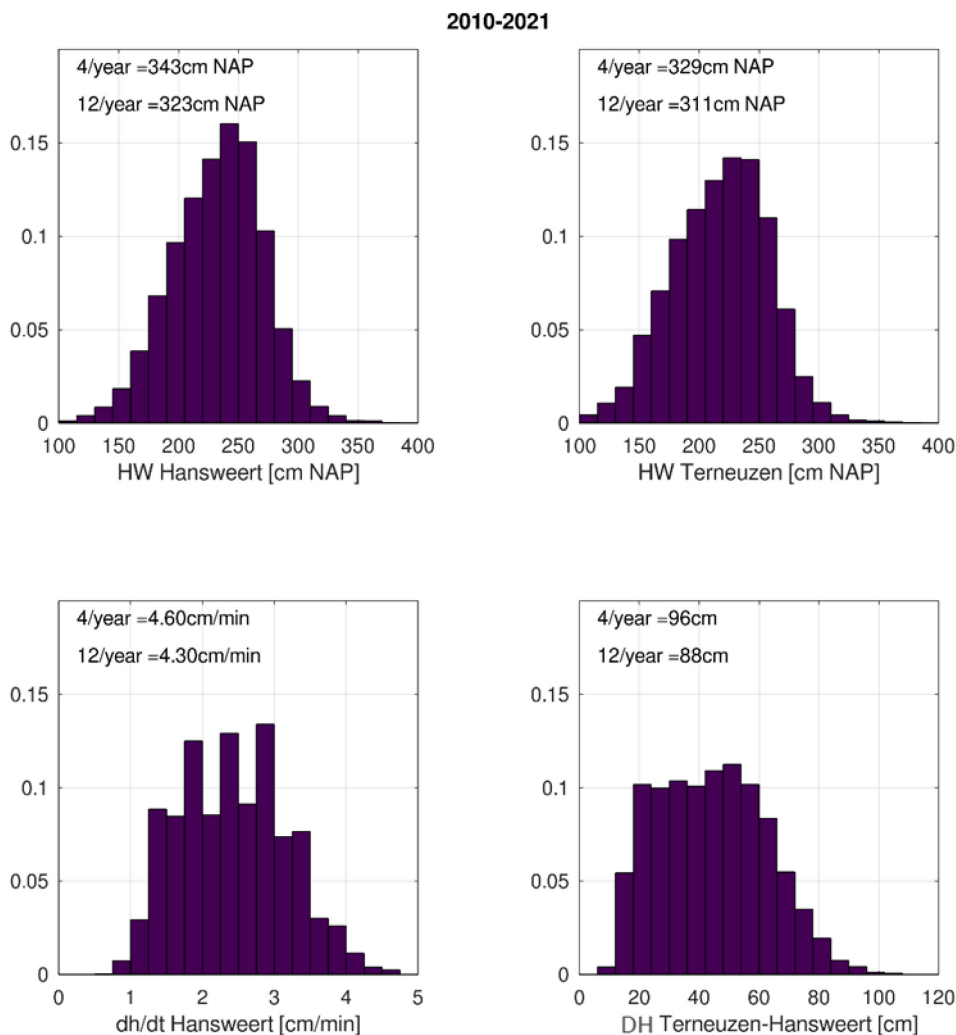
Figuur 5 (onder-rechts) toont het histogram van het maximale verval tussen de stations van Terneuzen en te Hansweert over de periode 2010-2021. De histogrammen voor de jaarlijkse subsets zijn terug te vinden in Bijlage A – kans op voorkomen per jaar.

De mediane (P50) waarde van het maximale verval bedraagt 50 cm. De minimale waarde is gelijk aan 16 cm, terwijl de maximale waarde 113 cm bedraagt. Tabel 1 geeft een overzicht van de waarde van het maximale verval bij een bepaalde kans op voorkomen (1, 4, 12, 52 keer per jaar). Hieruit blijkt dat een verval van 88 cm 12 keer per jaar kan voorkomen, terwijl een verval van 104 cm slechts 1 keer per jaar kan voorkomen. Echter, er moet opgemerkt worden dat het daadwerkelijk voorkomen van deze waarden onderhevig is aan variatie doorheen de jaren, onder meer omwille van variatie in de getijden (e.g. 18,6 jarige nodale cyclus) en meteorologische condities.

5.3 Stijgsnelheid Hansweert

Figuur 5 (onder-links) toont het histogram van de maximale stijgsnelheid van de waterstand te Hansweert over de periode 2010-2021. De histogrammen voor de jaarlijkse subsets zijn terug te vinden in Bijlage A – kans op voorkomen per jaar.

De mediane (P50) waarde van de maximale stijgsnelheid bedraagt 2,6 cm/min. De minimale waarde is gelijk aan 0,8 cm/min, terwijl de maximale waarde 5,1 cm/min bedraagt. Tabel 1 geeft een overzicht van de waarde van de maximale stijgsnelheid bij een bepaalde kans op voorkomen. Hieruit blijkt dat een stijgsnelheid van 4,3 cm/min 12 keer per jaar kan voorkomen, terwijl een stijgsnelheid van 4,9 cm/min slechts 1 keer per jaar kan voorkomen. Echter, ook hierbij moet opgemerkt worden dat het daadwerkelijk voorkomen van deze waarden onderhevig is aan variatie doorheen de jaren.



Figuur 5 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en afgeleide waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor de periode 2010-2021

Tabel 1 – Overzicht verschillende “kans op voorkomen” met bijbehorende dwarsstroming

Kans op voorkomen (periode 2010-2021)	Maximaal verval		Maximale stijgsnelheid	
	Verval [cm]	Dwarsstroming [m/s]	Stijgsnelheid [cm/min]	Dwarsstroming [m/s]
1/jaar	104	1,87	4,9	1,97
4/jaar	96	1,76	4,6	1,82
12/jaar	88	1,66	4,3	1,67
1/ST-DT-cyclus	83	1,60	4,0	1,53
1/week	77	1,52	3,8	1,43

5.4 Afgeleide dwarsstroming

In vorige paragrafen werd ingegaan op de kans van voorkomen van bepaalde waterstandskarakteristieken. Beide parameters werden gekozen omwille van hun relevante relatie met de sterkte van de dwarsstroming. Op basis van eerder vermelde relaties (§ 4.2), zijn beide waterstandsparameters om te rekenen naar een dwarsstroming (verschil tussen beide componenten in dwarse stroming). Dit maakt een vergelijking tussen beide methodes ook mogelijk aangezien beide waterstandsparameters doorvertaald worden naar dwarsstroming.

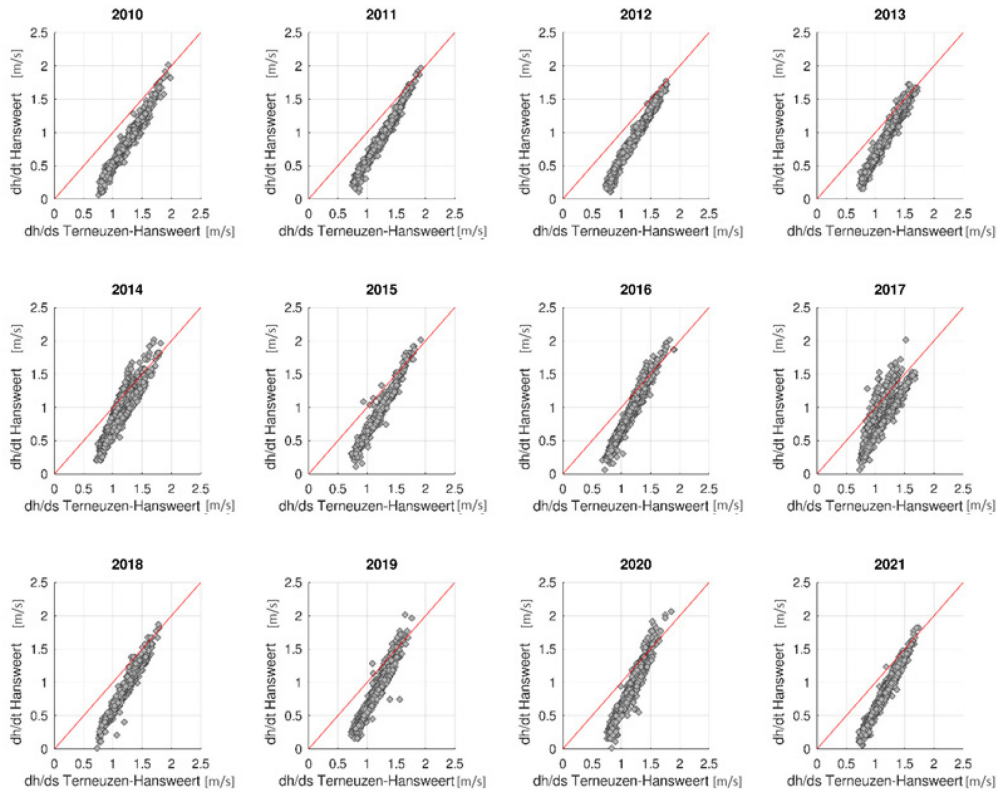
Figuur 6 toont de relatie tussen de uit het maximale verval en uit de maximale stijgsnelheid afgeleide dwarsstroming. Hieruit blijkt dat, over de volledige range van opgetreden getijden, de range in afgeleide dwarsstroming groter is voor de stijgsnelheid (0 tot 2 m/s) dan voor het verval (0,75 tot 2 m/s). Echter, het grootste verschil zit langs de onderzijde van de range, wat (1) minder relevant is voor de nautische aspecten en (2) minder betrouwbaar is door het ontbreken van metingen bij deze condities.

Daarom wordt in Figuur 7 gefocust op de dwarsstroming groter dan 1,5 m/s. Ook hier is de spreiding groter voor de waarden afgeleid uit de stijgsnelheid. Voor de sterkste dwarsstroming (> 1,75 m/s) ligt de afgeleide waarde op basis van de stijgsnelheid in de meeste jaren hoger (e.g. 2014, 2016, 2019, 2020), terwijl dit bij de minder sterke dwarsstroming (1,5 – 1,75 m/s) meestal omgekeerd is. Een potentiële oorzaak van deze verschillen is de aanwezige spreiding in de relatie tussen de waterstandsparameter en de dwarsstroming. Hierdoor is het combineren van de afgeleide dwarsstroming uit verschillende waterstandsparameters niet mogelijk, en dient steeds uitgegaan worden van eenzelfde waterstandsparameter (oftewel verval, oftewel stijgsnelheid).

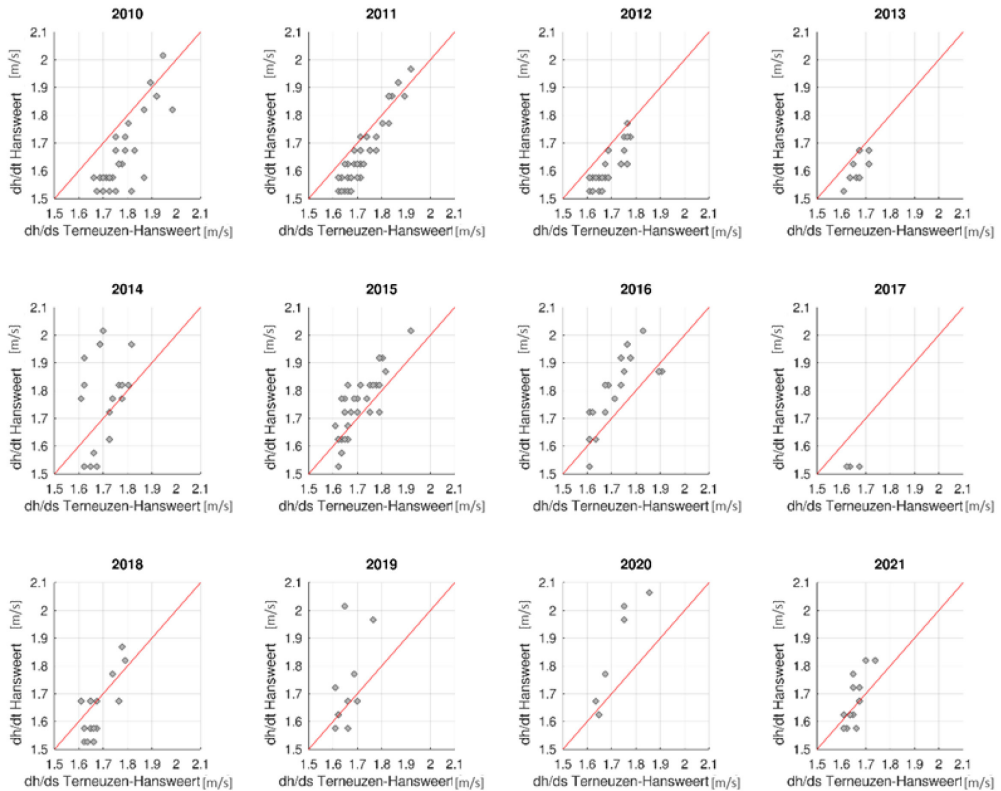
Tabel 1 geeft een overzicht van de waarden van de afgeleide dwarsstroming bij een bepaalde kans op voorkomen. Hieruit blijkt dat een dwarsstroming (verschil tussen beide componenten met tegengestelde richting) van respectievelijk (verval, stijgsnelheid) 1,66 en 1,67 m/s 12 keer per jaar kan voorkomen. Het verschil tussen beide waterstandsparameters is hierbij minimaal. Een dwarsstroming van respectievelijk (verval, stijgsnelheid) 1,87 en 1,97 m/s kan slechts 1 keer per jaar voorkomen, waarbij het verschil tussen beide waterstandsparameters groter is. Echter, wanneer de onzekerheid in beide relaties beschouwd wordt (Figuur 4), blijkt dat de spreiding aanzienlijk groter is dan het hier vastgesteld verschil. Het is dan ook belangrijk om hiervan bewust te zijn.

Figuur 8 geeft de sterkte van de dwarsstroming (verschil tussen beide componenten met tegengestelde richting) weer per getijcyclus over de periode 2010-2021. Tevens is de kans op voorkomen (12 en 4 keer per jaar) op beide figuren weergegeven.

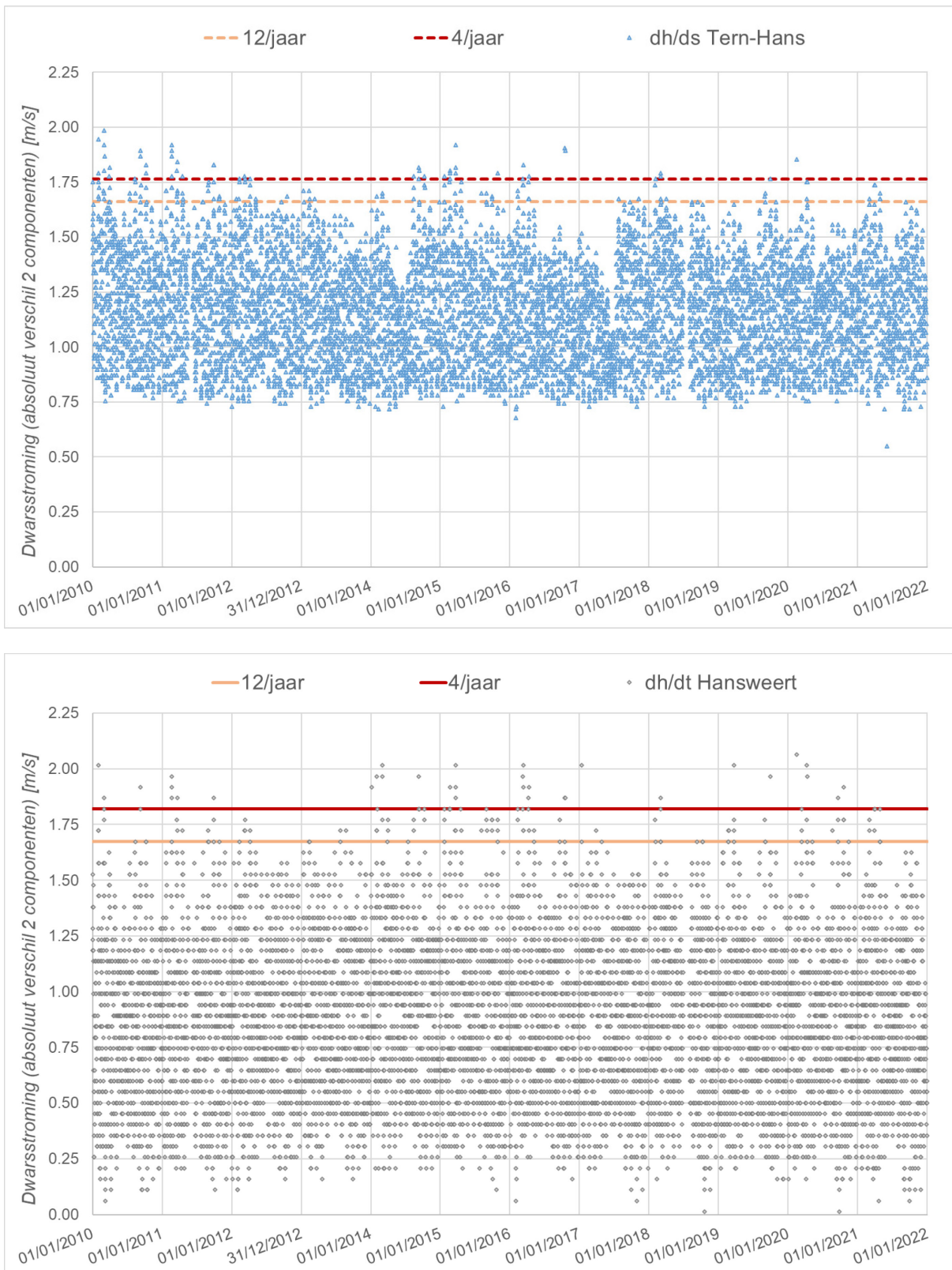
Zoals reeds eerder aangehaald, varieert het daadwerkelijk voorkomen van deze waarden doorheen de jaren. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 9. Hierbij is berekend hoeveel keer een dwarsstroming sterker dan de grenswaarde van een bepaald aantal voorkomens per jaar (in het voorbeeld 12 en 4 keer per jaar), zal optreden. De afgeleide dwarsstroming uit het verval (stippellijn) vertoont voor de grenswaarde van 12 voorkomens per jaar hogere (> 20 voorkomens per jaar) waarden in 2010, 2011 en 2015, terwijl de jaren 2013, 2017, 2019 en 2020 gekenmerkt worden door lagere (< 6 voorkomens per jaar) waarden. Het patroon voor de grenswaarde van 4 voorkomens per jaar is gelijkaardig. De afgeleide dwarsstroming uit de stijgsnelheid (volle lijn) vertoont voor de grenswaarde van 12 voorkomens per jaar hogere (> 18 voorkomens per jaar) waarden in 2014, 2015 en 2016, terwijl de jaren 2012, 2013 en 2017 gekenmerkt worden door lagere (< 6 voorkomens per jaar) waarden. Het patroon voor de grenswaarde van 4 voorkomens per jaar is gelijkaardig. De 2 methodes vertonen gelijkenissen (2013-2018) inzake het temporeel patroon, maar kennen ook verschillen in bepaalde periodes (2010, 2011 en 2019, 2020)



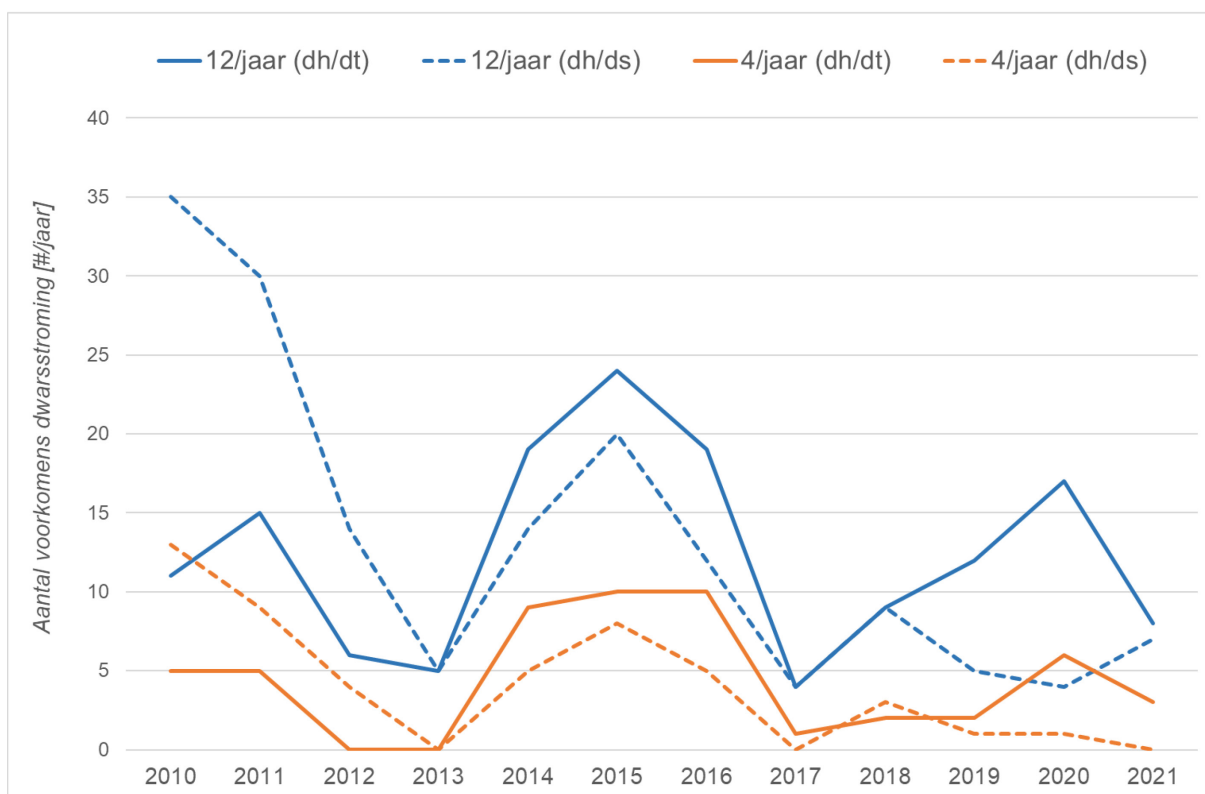
Figuur 6 –Verschil in afgeleide dwarsstroming uit verval (x-as) en stijgsnelheid (y-as) voor verschillende jaar in periode 2010-2021



Figuur 7 –Verschil in afgeleide dwarsstroming uit verval (x-as) en stijgsnelheid (y-as) voor verschillende jaar in periode 2010-2021 [detail van sterkste dwarsstromingen waarbij verschil tussen beide componenten > 1,5 m/s]



Figuur 8 – Afgeleide sterkte van dwarsstroming (verschil tussen beide componenten met tegengestelde richting) o.b.v. maximaal verval (boven) en maximale stijgsnelheid (onder) over de periode 2010-2021
Oranje lijn geeft kans op voorkomen van 12/jaar, **rode** lijn 4/jaar

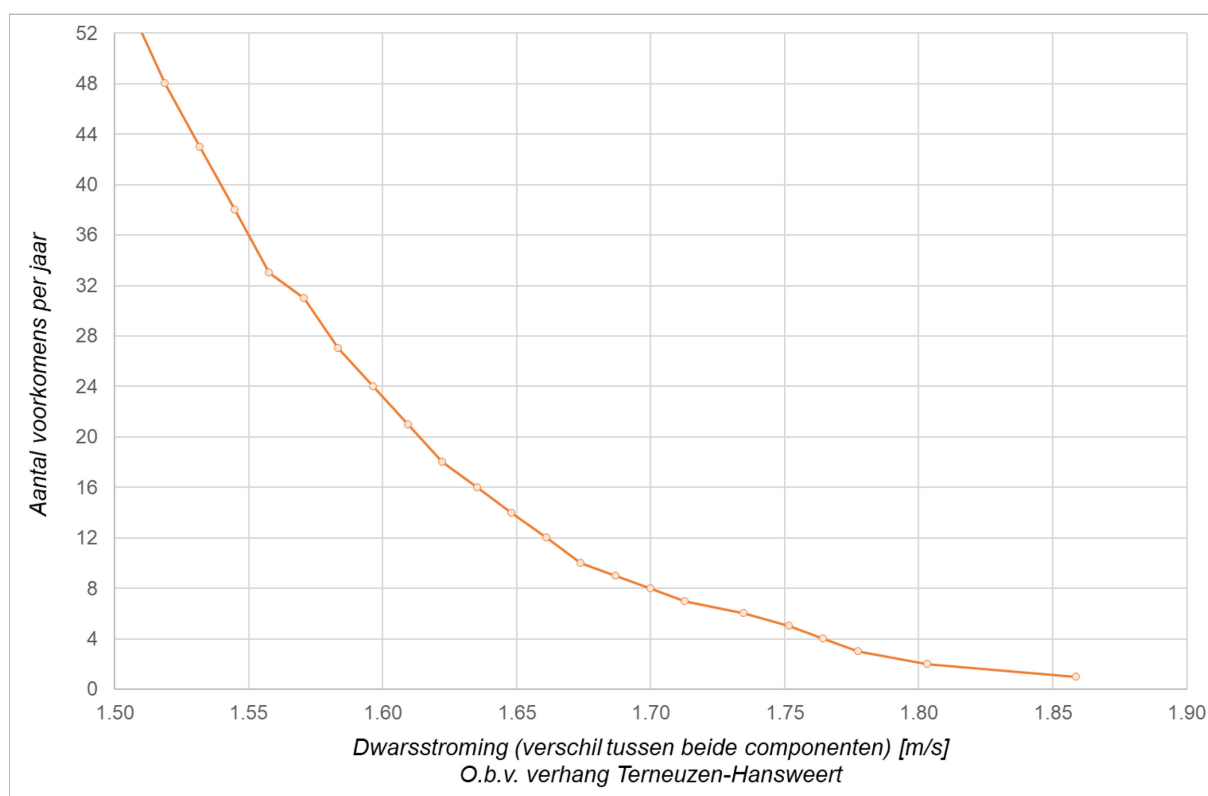


Figuur 9 – Variatie van het aantal voorkomens (4/jaar en 12/jaar) over de periode 2010-2021

5.5 Kans op voorkomen

Op basis van de afgeleide dwarsstroming, kan de kans op voorkomen berekend worden. Eerder werd reeds voor een aantal terugkeerperiodes de bijbehorende dwarsstroming gegeven, in Figuur 10 wordt de relatie weergegeven tussen de uit het verval tussen Terneuzen en Hansweert afgeleide dwarsstroming, en de bijbehorende kans op voorkomen (aantal keer per jaar). De figuur bevat zowel de volledig range (tot 300 keer per jaar), als een detail van de minder frequent (tot 52 keer per jaar) voorkomende dwarsstroming.

Dergelijke relatie zou kunnen ingezet worden voor het beschrijven van het belang van een bepaalde dwarsstroming bij elke getijcyclus. Er dient echter opgemerkt te worden dat de huidige analyse zich heeft gebaseerd op gemeten waterstanden, terwijl voor een predictie gebruik moet gemaakt worden van voorspelling, hetzij astronomisch (tijdshorizon van 1 jaar vooruit, doch met grotere onzekerheid), hetzij operationeel (tijdshorizon van één tot enkele dagen, doch met kleinere onzekerheid aangezien de meteorologische condities van het moment expliciet beschouwd worden). Hiervoor is verdere afstemming nodig met de bevoegde overheden.



Figuur 10 –Relatie tussen sterkte van dwarsstroming (obv. verval) en bijbehorende kans op voorkomen over de periode 2010-2021

6 Resultaten – voorspelling vs. meting

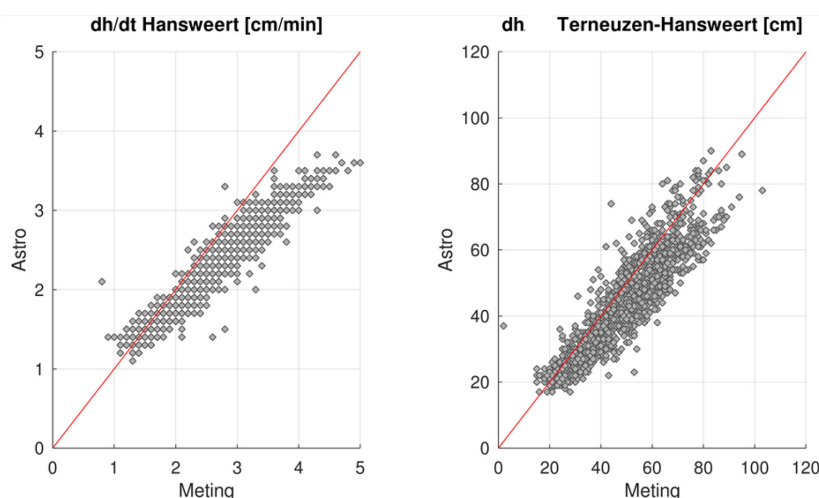
6.1 Astronomische voorspellingen waterstanden

Door Rijkswaterstaat worden jaarlijks astronomische voorspellingen van het getij gepubliceerd. Om deze voorspellingen te maken, wordt aan de hand van bijna 100 harmonische componenten een tijdreeks gegenereerd voor verschillende getijstations in de Westerschelde, waaronder Terneuzen en Hansweert. Deze voorspellingen worden vervolgens gebruikt om de jaarlijkse dwarsstroompredictie op te maken van de momenten waarop een matige of sterke dwarsstroming wordt verwacht ter hoogte van de oostrand van de Platen van Ossensisse. Meteorologische condities kunnen ervoor zorgen dat de opgetreden waterstanden afwijken van de astronomisch voorspelde waterstanden.

6.2 Vergelijking voorspelde vs. opgetreden waterstandsparameters

Aangezien de dwarsstroming ingeschat wordt aan de hand van het maximaal verval tussen Terneuzen en Hansweert, maar ook de maximale stijgsnelheid te Hansweert als parameter kan gebruikt worden, is een vergelijking gemaakt tussen beide astronomisch voorspelde en gemeten waterstandsparameters. Voor deze vergelijking is (omwille van snelle beschikbaarheid van astronomische voorspellingen) gebruik gemaakt van de gegevens uit de periode 2020-2021. Ook voor de astronomische voorspelde waterstanden werd op dezelfde manier de maximale stijgsnelheid en het maximaal verval bepaald zoals eerder beschreven in Hoofdstuk 4.

Figuur 11 toont de relatie tussen de gemeten en astronomisch voorspelde maximale stijgsnelheid en maximaal verval. Voor de stijgsnelheid kan worden vastgesteld dat voor hogere gemeten waarden, de astronomische voorspelling de maximale stijgsnelheid onderschat. Voor de maximale verval kan eveneens worden vastgesteld dat astronomische voorspelling de gemeten waarde onderschat, al is het verschil hier kleiner. Echter, wanneer beide jaren afzonderlijk worden bekeken (Bijlage B – vergelijking meting-astro), valt het op dat inzake het verval, in het jaar 2020 de overeenstemming zeer goed, terwijl in het jaar 2021 er een systematische onderschatting optreedt voor hogere waarden. Hierbij stelt zich de vraag of er tussen 2020 en 2021 een wijziging is gebeurd in de methodologie voor het bepalen van de astronomische waterstandsvoorspellingen.



Figuur 11 –Relatie tussen de gemeten (x-as) en astronomisch voorspelde (y-as) maximale stijgsnelheid (links) en het maximale verval (rechts) voor de periode 2020-2021

7 Resultaten – case Q1 2022

In maart 2022 werd vanuit de GNA een bericht ontvangen waarin aangehaald werd dat er voor het eerste kwartaal van 2022 een grote discrepantie zit tussen het aantal momenten waarvoor een waarschuwing gold op basis van de astronomische voorspellingen en de door RWS uitgegeven waarschuwing op de korte termijn op basis van de operationele modellen. Gelet op dit aspect, is specifiek gekeken naar de opgetreden waterstanden en de hiervan afgeleide dwarsstromingen voor momenten waarop één van beide waarschuwingen werden uitgegeven.

7.1 Astronomische voorspelling

Jaarlijks worden door RWS waarschuwingen uitgegeven van de momenten waarop ‘matige’ of ‘sterke’ dwarsstroming wordt voorspeld op basis van de astronomische voorspelling. Voor het eerste kwartaal van 2022 zijn er volgens de “Bekendmaking aan de Scheepvaart Scheldegebied” (BASS 2022-00005) in het eerste kwartaal van 2022 3 momenten waarop een melding van dwarsstroming mogelijk is. Dit BASS-bericht is een aanvulling aan een eerder bericht (“voormelding dwarsstroomwaarschuwing” – versie sept. 2021) waarin voor het eerste kwartaal van 2022 geen enkel moment was opgenomen.

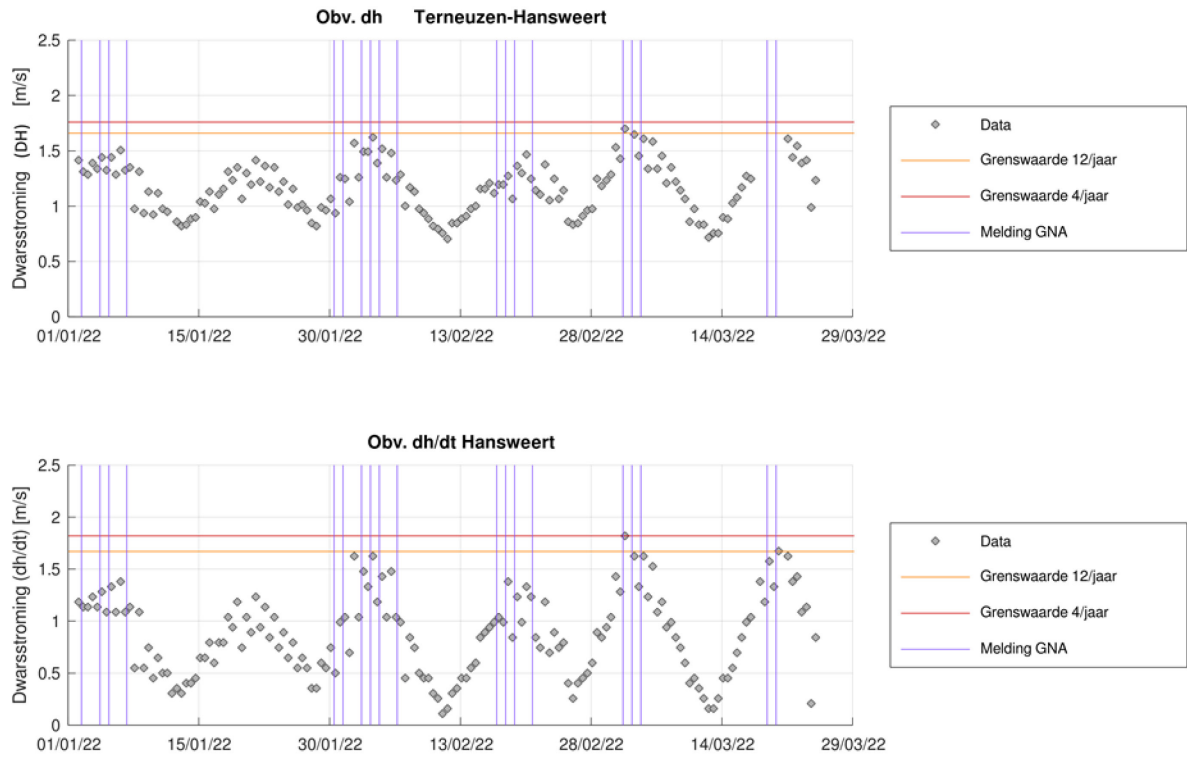
7.2 Operationele voorspelling

In een mail (dd. 24/3/2022) geeft de GNA aan dat in het eerste kwartaal van 2022 maar liefst 19 meldingen werden ontvangen van momenten van dwarsstroming langs de oostrand van de Platen van Ossensisse. Deze waarschuwingen betreffen berichten vanuit het HMC die gebaseerd zijn op de waterstandsvoorspellingen op basis van de operationele modellen, dit met een voorspelhorizon van 24u.

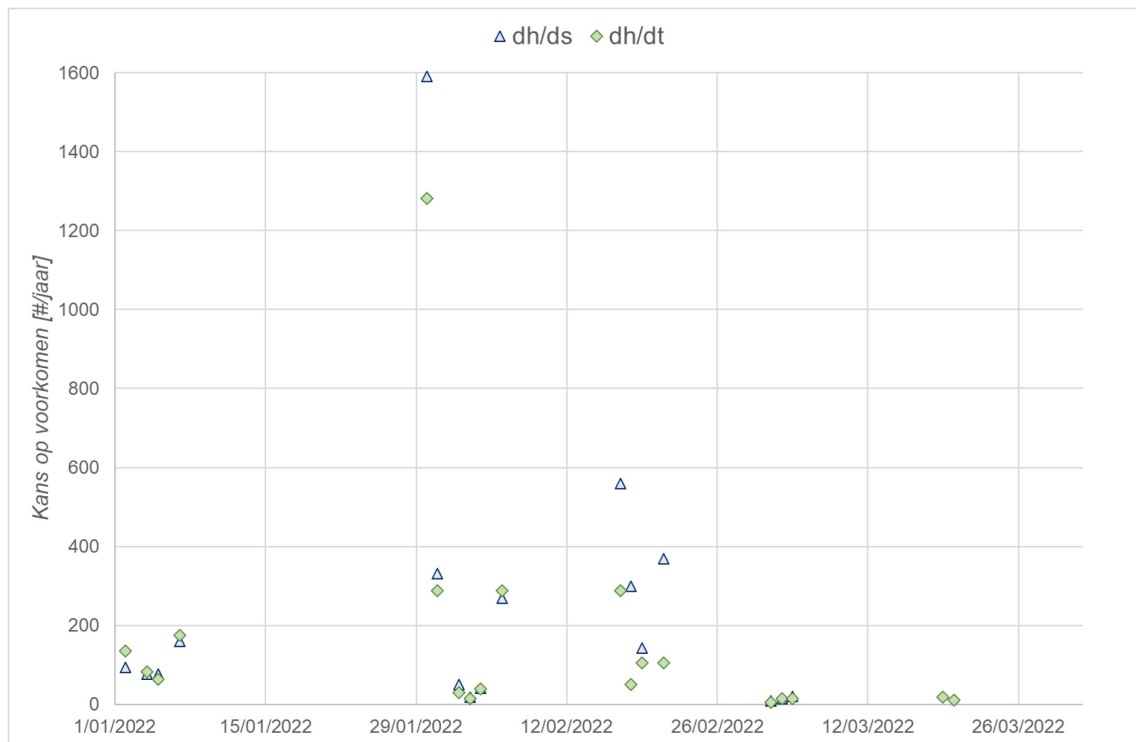
7.3 Evaluatie van de vastgestelde momenten

Figuur 12 geeft de afgeleide dwarsstroming weer berekend uit de gemeten waterstanden in het eerste kwartaal van 2022. Hierin is duidelijk een cyclisch patroon terug te zien, dat overeenstemt met de springtij-doodtij-cyclus. In het paars zijn de momenten weergegeven waarop GNA een melding van dwarsstroming heeft ontvangen van het HMC op basis van de operationele modellen. Uit deze figuur blijkt dat op bepaalde momenten (6) de dwarsstroming boven de grenswaarde van kans van voorkomen kleiner dan 12 keer per jaar ligt, maar in het merendeel (13/19) van de meldingen ligt de kans op voorkomen hoger. De 3 momenten die in de predictie van RWS opgenomen zijn, hebben allemaal een kans op voorkomen lager dan 12 keer per jaar.

Op basis van de relatie tussen de sterkte van de dwarsstroming en de kans op voorkomen, is voor de verschillende momenten waarop de GNA een melding heeft ontvangen van het HMC op basis van de operationele modellen, een inschatting gemaakt van de kans op voorkomen van deze dwarsstroming. Deze is weergegeven in Figuur 13, waarbij zowel de relatie op basis van het verval als de stijgsnelheid is gebruikt. Hoewel er enkele verschillen terug te vinden zijn afhankelijk van de waterstandsparameter die gekozen wordt, is het patroon grotendeels gelijkaardig. Hierbij valt het op dat een aantal (5) van de momenten waarop de GNA een melding van dwarsstroming heeft ontvangen, overeenkomen met een kans op voorkomen groter dan 200 keer per jaar, wat dus zeker niet als een uitzonderlijke situatie beschouwd kan worden. Hierbij dient een belangrijke opmerking geplaatst te worden: de ingeschatte sterkte van de dwarsstroming is gebeurd op basis van eerder beschreven relaties, waar een aanzienlijk spreiding op aanwezig is; de feitelijk opgetreden dwarsstroming kan dus weldegelijk sterker zijn geweest, al is dit door gebrek aan stroommetingen niet te valideren.



Figuur 12 – Ingeschatte dwarsstroming o.b.v. verval (boven) en stijgsnelheid (onder) en momenten van door HMC voorspelde dwarsstroming



Figuur 13 – Kans op voorkomen voor momenten van door HMC voorspelde dwarsstroming

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

In voorliggend rapport is een berekening gebeurd naar de kans op voorkomen van een bepaalde dwarsstroming ter hoogte van de oostrand van de Platen van Ossensisse. Op basis van de gemeten waterstanden werd zowel de waterstandsparameters “verval tussen Terneuzen en Hansweert” als “stijgsnelheid te Hansweert” berekend voor de periode 2010-2021. Op basis van lineaire relaties (uit eerder onderzoek door Deltares) tussen de waterstandsparameters en de gemeten sterkte van de dwarsstroming (verschil tussen beide componenten met verschillende richting), werd voor elk getij de sterkte van dwarsstroming ingeschat. Met deze gegevens werd vervolgens een kans op voorkomen bepaald.

Een eerste belangrijke opmerking die meegegeven wordt, is de grote onzekerheid die aanwezig is op de lineaire relatie. Uit de analyse blijkt dat de voorspelde waarde van de dwarsstroming op basis van zowel het verval als de stijgsnelheid, met een onzekerheid van ca. 50% is omgeven. Het verbeteren van deze relatie verdient dan ook de nodige aandacht in de toekomst.

Het gebruik van beide waterstandsparameters resulteert in een beperkte (< 10 cm/s) afwijking in de afgeleide dwarsstroming. De stijgsnelheid te Hansweert heeft echter de hoogste voorspellende waarde voor de sterkte van de dwarsstroming. Ondanks het beperkt verschil mogen beide methodes niet onderling gemengd worden gebruikt. Daarnaast vertoont de sterkte van de berekende dwarsstroming een aanzienlijke variatie doorheen de jaren. Wanneer gebruik gemaakt wordt van de grenswaarde overeenkomstig met een kans op voorkomen van 12 keer per jaar, kon worden vastgesteld dat deze grenswaarde in bepaalde jaren meer dan 20 keer werd overschreden, terwijl in andere jaar dit minder dan 5 keer bleek te zijn. De 18,6-jarige nodale cyclus van het getij, alsook meteorologische condities kunnen hiervoor een verklaring zijn.

Binnen dit rapport werd eveneens een vergelijking gemaakt tussen de waterstandsparameters berekend uit de astronomisch voorspelde waterstanden en de gemeten waterstanden voor de jaren 2020 en 2021. Hierbij blijkt dat de maximale stijgsnelheid systematisch onderschat wordt in de astronomische voorspellingen, vooral bij hogere waarden. Bij het maximale verval is dit verschil ook, doch minder, aanwezig. Opvallend is wel dat de onderschatting van het verval sterker aanwezig is in 2021 dan in 2020, wat de vraag doet rijzen of er methodologisch een verandering is gebeurd.

Tenslotte werd voor het eerste kwartaal van 2022 een vergelijking gemaakt tussen de door RWS astronomisch voorspelde momenten van dwarsstroming, de door het HMC aan de GNA gemelde momenten van dwarsstroming op basis van de operationele modellen en de uit de metingen afgeleide dwarsstromingen. Hieruit blijkt dat in het eerste kwartaal van 2022 6 momenten werden geïdentificeerd op basis van de uit gemeten waterstanden afgeleide dwarsstroming, waarvoor de kans op voorkomen kleiner was dan 12 keer per jaar. Dit is het dubbele van de momenten op basis de astronomische predicties, en is aanzienlijk lager dan de door het HMC met de operationele modellen voorspelde momenten van dwarsstroming (19).

8.2 Aanbevelingen

In voorliggend onderzoek werd de relatie tussen de kans op voorkomen en de sterkte van bijbehorende dwarsstroming opgesteld op basis van gemeten waterstanden. Het gebruik van de kans op voorkomen is een genuanceerdere manier om in de predicties op te nemen (nu “geen”, “matig” of “sterk”), en het verdient dan ook de aanbeveling deze werkwijze in de nabij toekomst mee in beschouwing te nemen. Indien deze aanbeveling gevolgd zou worden, zal bijkomend onderzoek nodig zijn om deze relatie op te maken op basis van voorspelde (astronomisch of operationeel numeriek model) waterstanden.

Daarnaast vormt de relatie tussen de waterstandsparameter en de dwarsstroming een onderwerp voor verder onderzoek. Op basis van de bestaande informatie blijkt er een grote spreiding aanwezig te zijn, zowel voor het verval als de stijgsnelheid. Een uitbreiding van de analyse voor kleinere getijverschillen kan de relatie robuuster maken. Tevens verdient het de aanbeveling na te gaan in welke mate de relatie doorheen de tijd varieert, waarbij de veranderingen in lokale morfologie aanleiding kunnen geven tot een verschil in waterstandsparameters en bijbehorende dwarsstroming.

Ook dient deze relatie tussen de voorspelde waterstandsparameters en de geobserveerde dwarsstroming up-to-date te worden gehouden en liefst worden verbeterd door toekomstige meetcampagnes te implementeren. De bouw van de HF-radar installatie nabij het studiegebied zal hierin zeker een cruciale rol vertolken, aangezien hiermee continue stromingsgegevens zullen ingewonnen worden die voor verder onderzoek kunnen worden ingezet. Naast informatie bij verschillende getijcondities (doodtij-gemiddeld getij-springtij), laat dit ook toe de relatie tussen de getijparameters en de dwarsstroming doorheen de tijd te analyseren, waarmee het belang van de lokale morfologische ontwikkelingen kan worden onderzocht.

Een andere aanbeveling is de noodzaak tot een gedegen onderbouwing van de waarschuwingsgrenzen. Uit eerder onderzoek is gebleken dat de voorspelde dwarsstroming een gradueel verloop kent. Het is dan ook uitermate belangrijk om de sterkte van de dwarsstroming te relateren aan de nautische moeilijkheid. Hiervoor zouden vaarsimulaties kunnen plaatsvinden (auto-pilot of verschillende loodsen om het subjectieve karakter te beperken) voor verschillende stromingscondities en waarbij het vereiste roer-schroef-gebruik op het vaartraject wordt geregistreerd. Op basis hiervan kan een onderbouwing plaatsvinden van de waarschuwingsgrenzen.

9 Referenties

Decrop, B.; De Clercq, B.; Vanlede, J.; Van Holland, G.; Ides, S.; Plancke, Y.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). Dwarsstromingen Ossensisse-Zuidergat - Rapport numeriek modelonderzoek: Antwerp, Belgium. 115 pp.

Decrop, B.; Vanlede, J.; De Clercq, B.; Sas, M. (2010). Eddy-induced cross currents in the Westerschelde estuary: numerical simulation, physical driving mechanisms and navigation assistance. *Bull. Perm. Int. Assoc. Navig. Congr.* 138: 29–44

Deltares (2011). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.

IMDC; Deltares; Svasek; Arcadis. (2013). Mitigatie dwarsstroming Zuidergat. LTV V&T - rapport B-25

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). LTV O&M thema Veiligheid - Deelproject 1: Verbetering hydrodynamisch NeVla model ten behoeve van scenario-analyse. WL Rapporten, 756_05. Flanders Hydraulics Research & Deltares: Antwerp, Belgium.

Plancke, Y.; Stark, J.; Meire, D.; Schrijver, M. (2020). Complex flow patterns in the Scheldt estuary: field measurements and validation of a hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001737

Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal Plan Bovenzeeschedde: Subreport 1 – Scaldis: a 3D Hydrodynamic Model for the Scheldt Estuary. Version 5.0. WL Rapporten, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.

Stark, J.; Meire, P.; Temmerman, S. (2017). Changing tidal hydrodynamics during different stages of eco-geomorphological development of a tidal marsh: A numerical modeling study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 188, 56–68. doi:10.1016/j.ecss.2017.02.014

Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2019). Morfologie mesoschaal: Deelrapport 7 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (in voorbereiding-a). Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 3 – Modelling van hydro- en morfodynamische processen in de Westerschelde met Telemac: Scenario's in het kader van gevoeligheidsanalyse numeriek model. Versie 1.0. WL Rapporten, 17_088_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (in voorbereiding-b). Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 8 – Additionele validatie complexe numerieke modellen: stroomsnelheidsmetingen Platen van Ossensisse maart 2018. Versie 1.0. WL Rapporten, 17_088_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

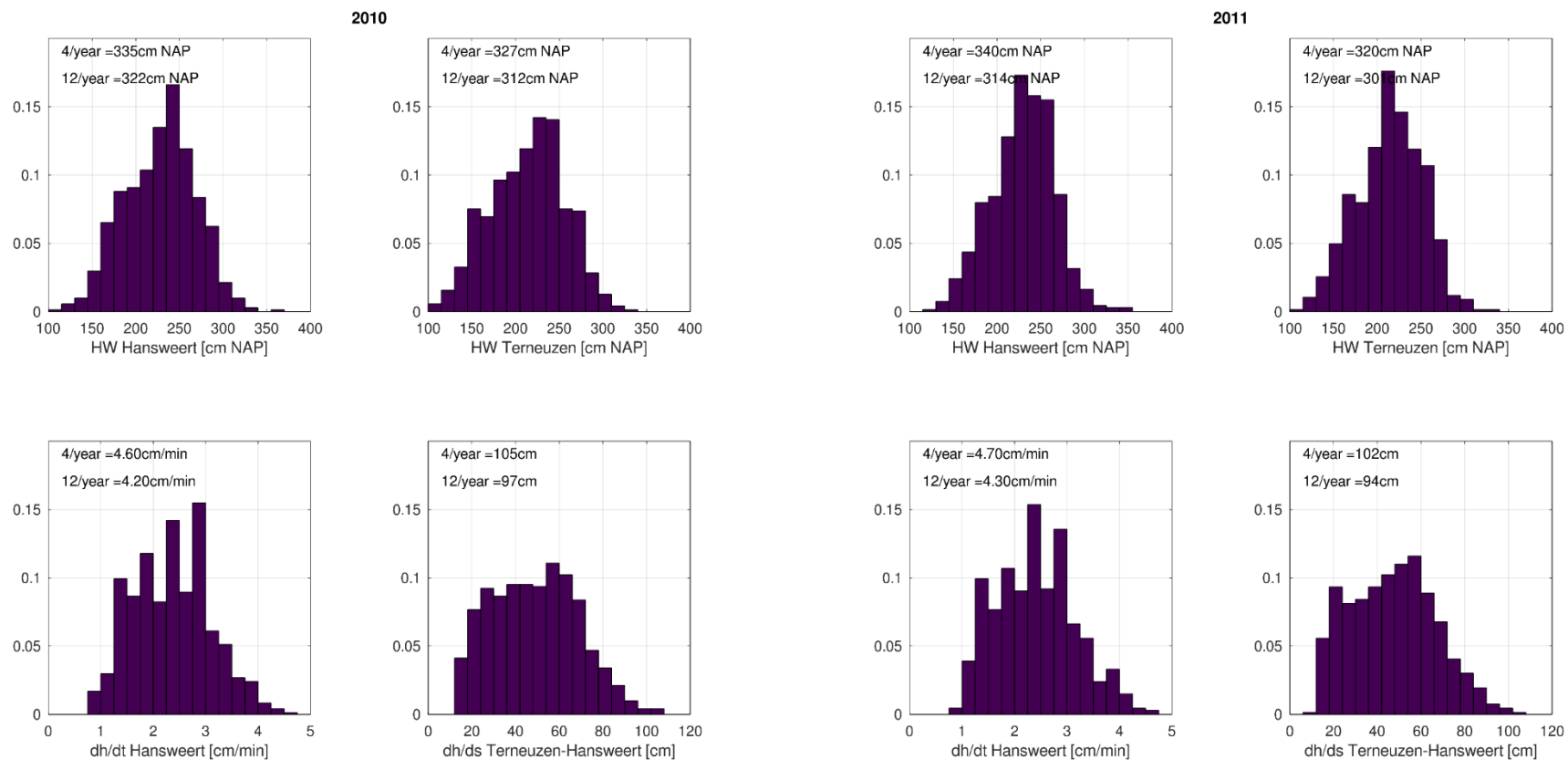
Stark, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (in voorbereiding-c). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 15 – Additionele validatie complexe numerieke modellen: stroomsnelheidsmetingen Put van Hansweert - December 2018. Versie 1.0. WL Rapporten, 17_088_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vanlede, J.; De Clercq, B.; Decrop, B.; Ides, S.; van Holland, G.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009) Permanente verbetering modelinstrumentarium. Verbetering Randvoorwaardenmodel. Deelrapport 2: Afregeling van het 2D Scheldemodel. Waterbouwkundig Laboratorium en IMDC (I/RA/11313/09.012/BOB), Antwerpen, België.

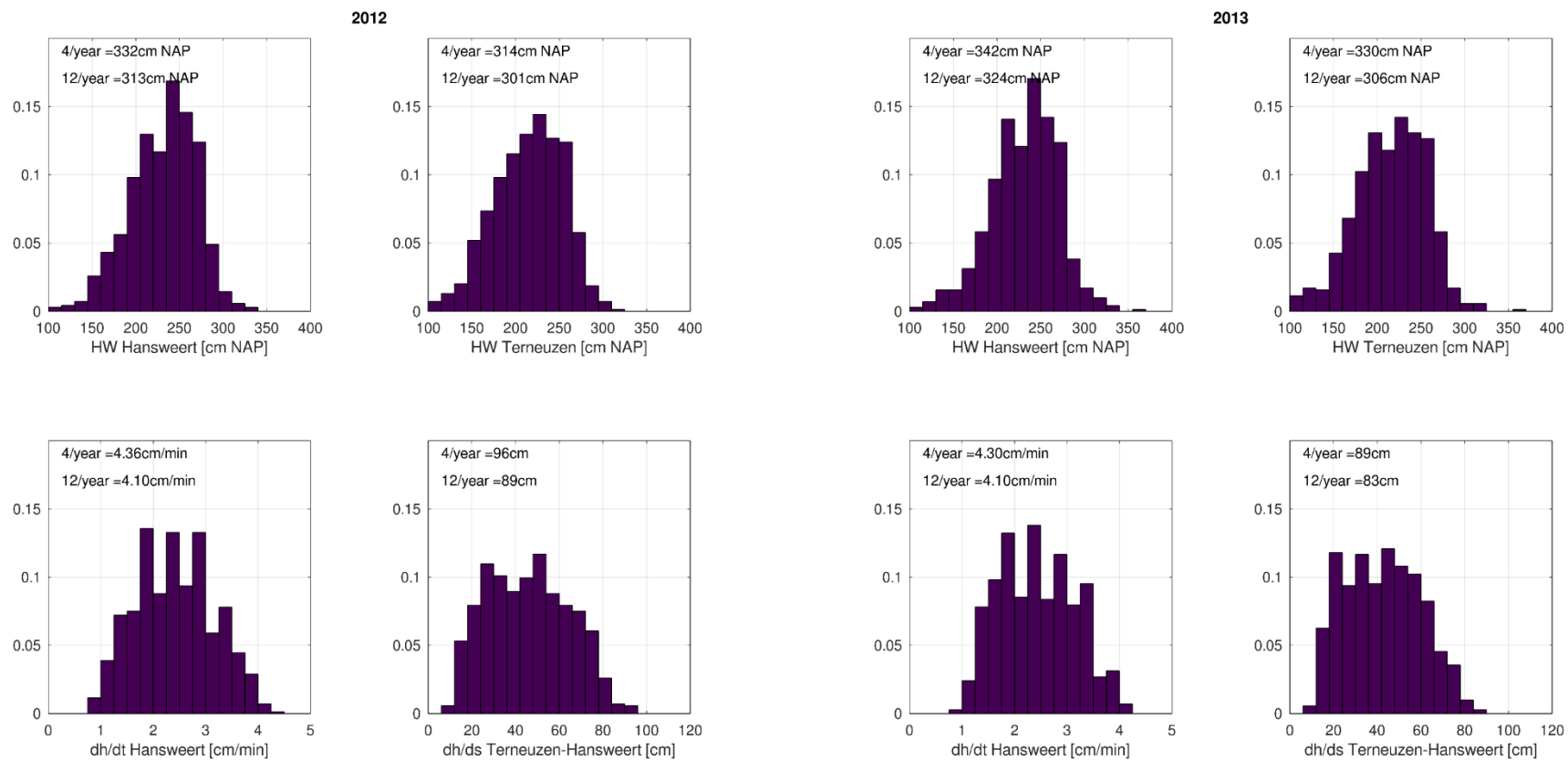
Vos, G.; Wouters, K.; Deleu, J.; Meire, D.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Agenda voor de toekomst – Strooming en sedimenttransport op de mesoschaal in het Schelde-estuarium: Deelrapport 1. Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van drempels. WL Rapporten, Antea Group, Antwerpen.

Bijlage A Kans op voorkomen per jaar

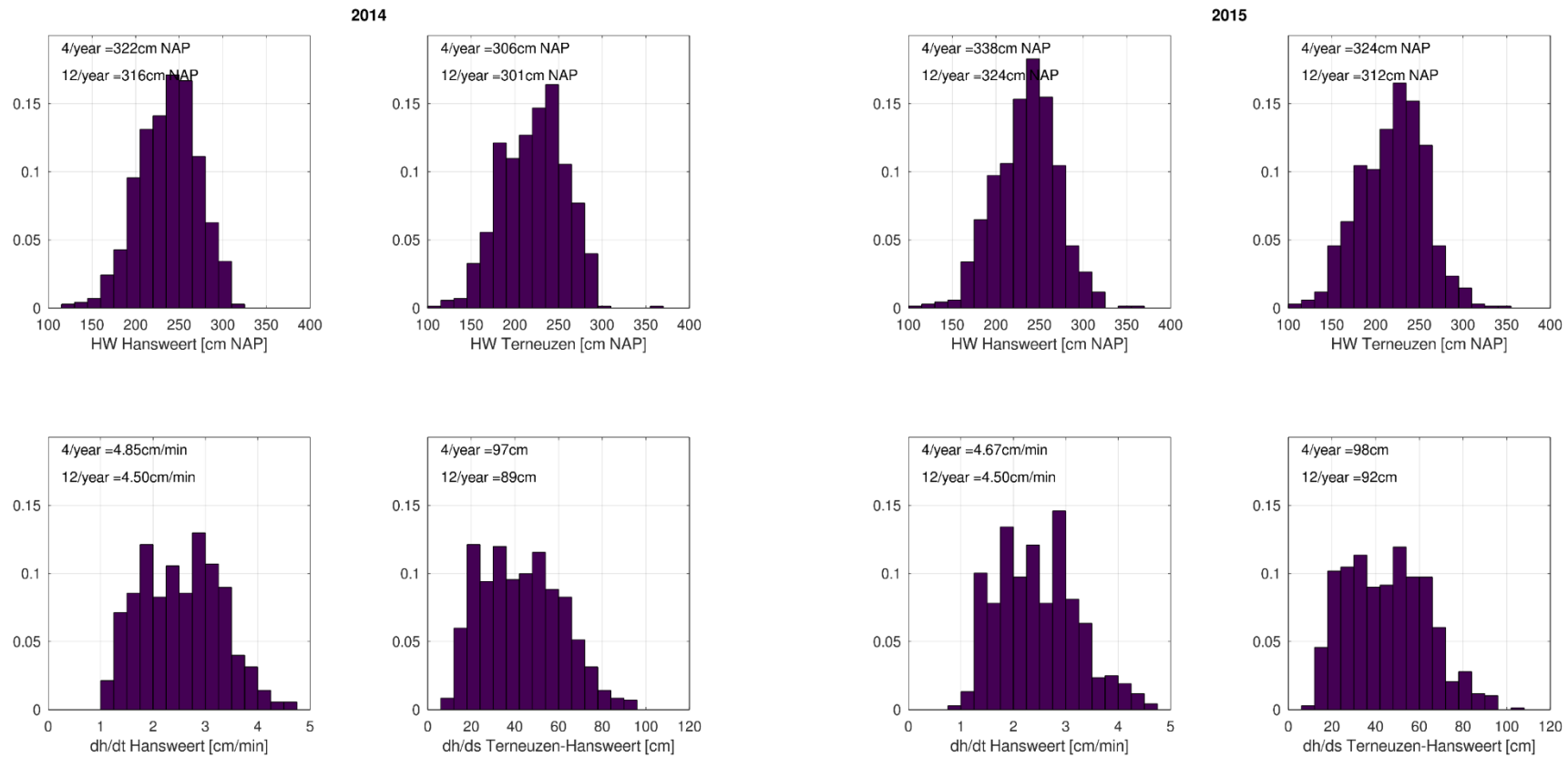
Opmerking: in volgende figuren betreft dh/ds feitelijk het verval (dh).



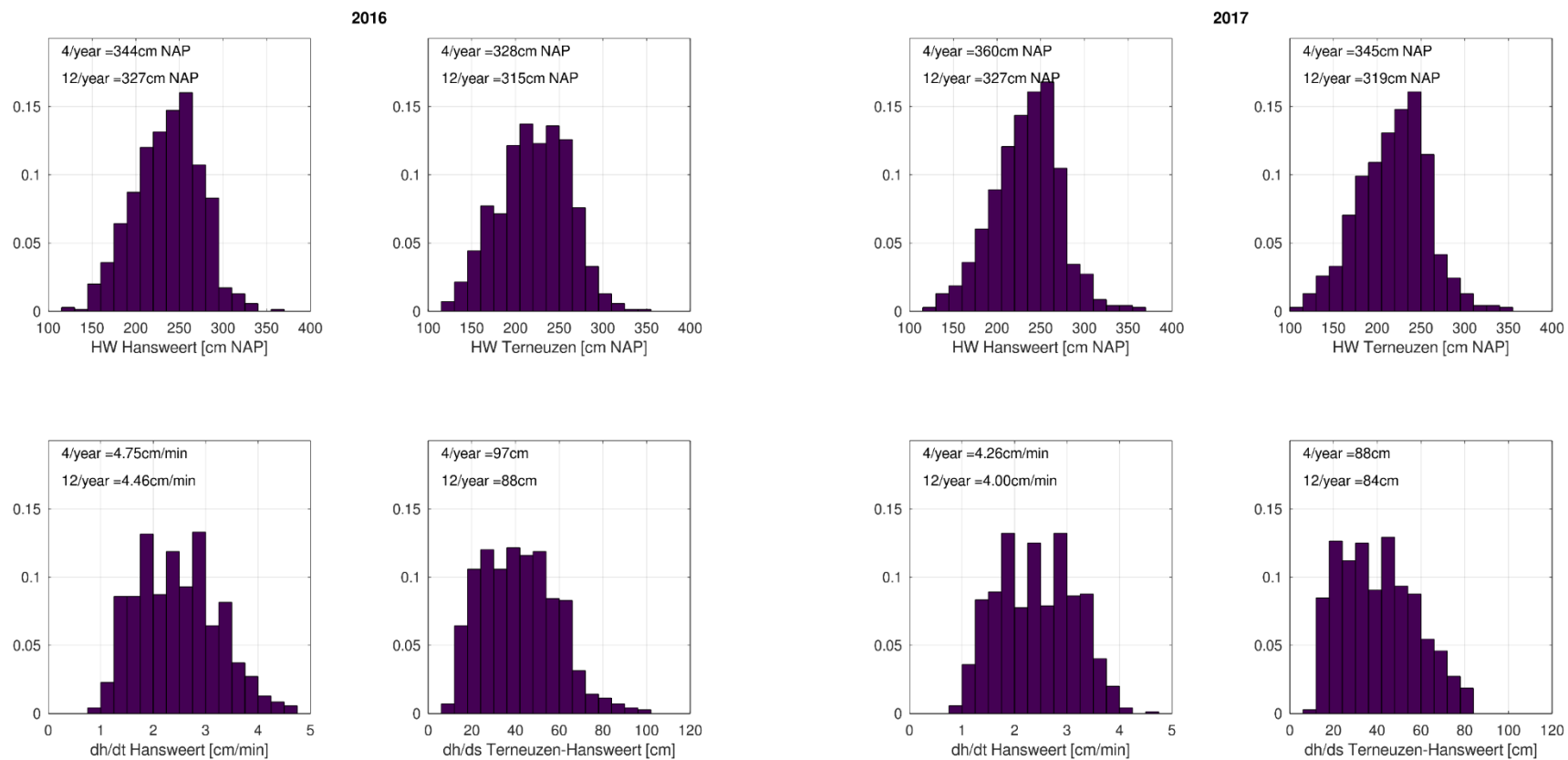
Figuur 14 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011



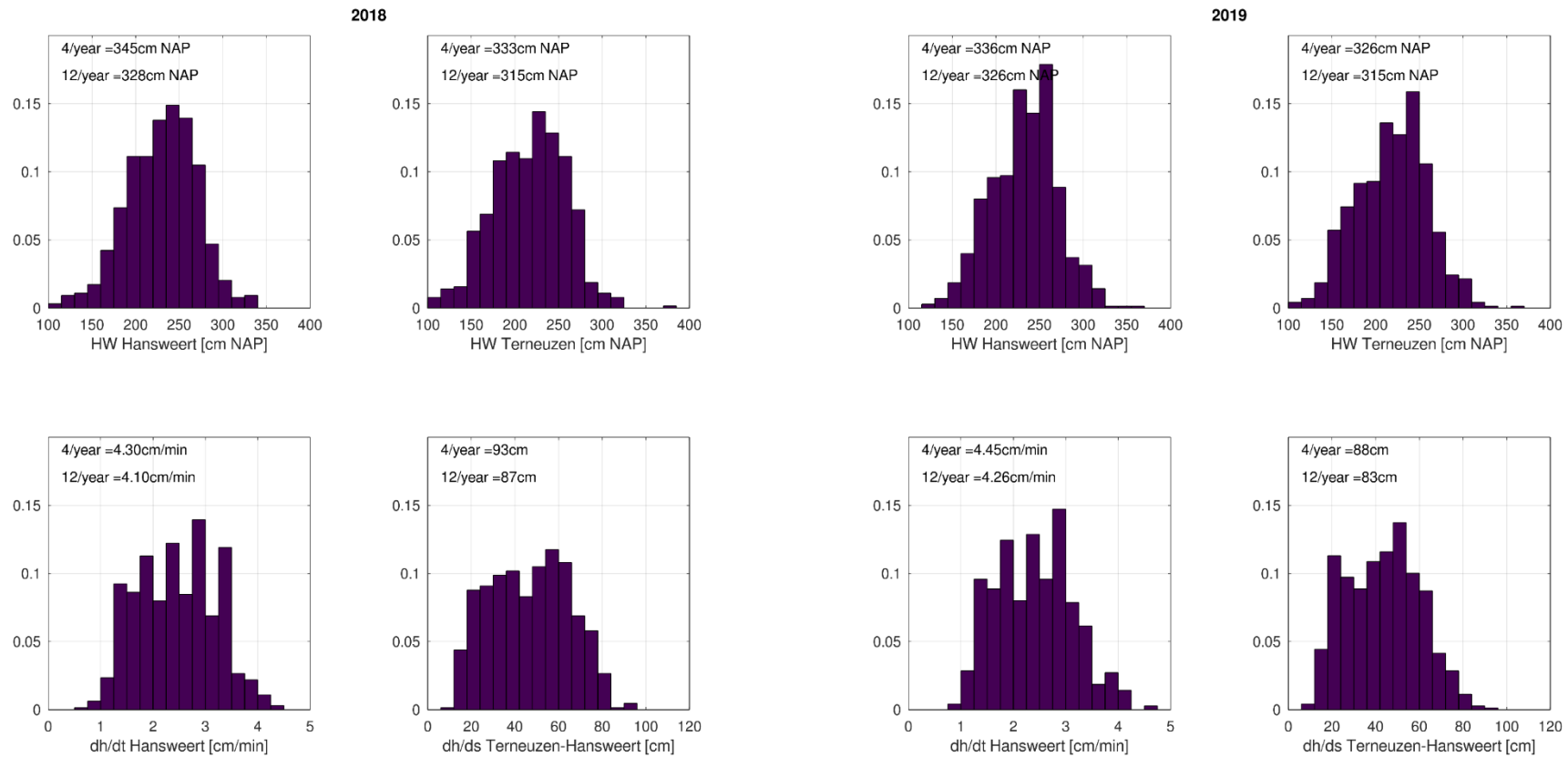
Figuur 15 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011



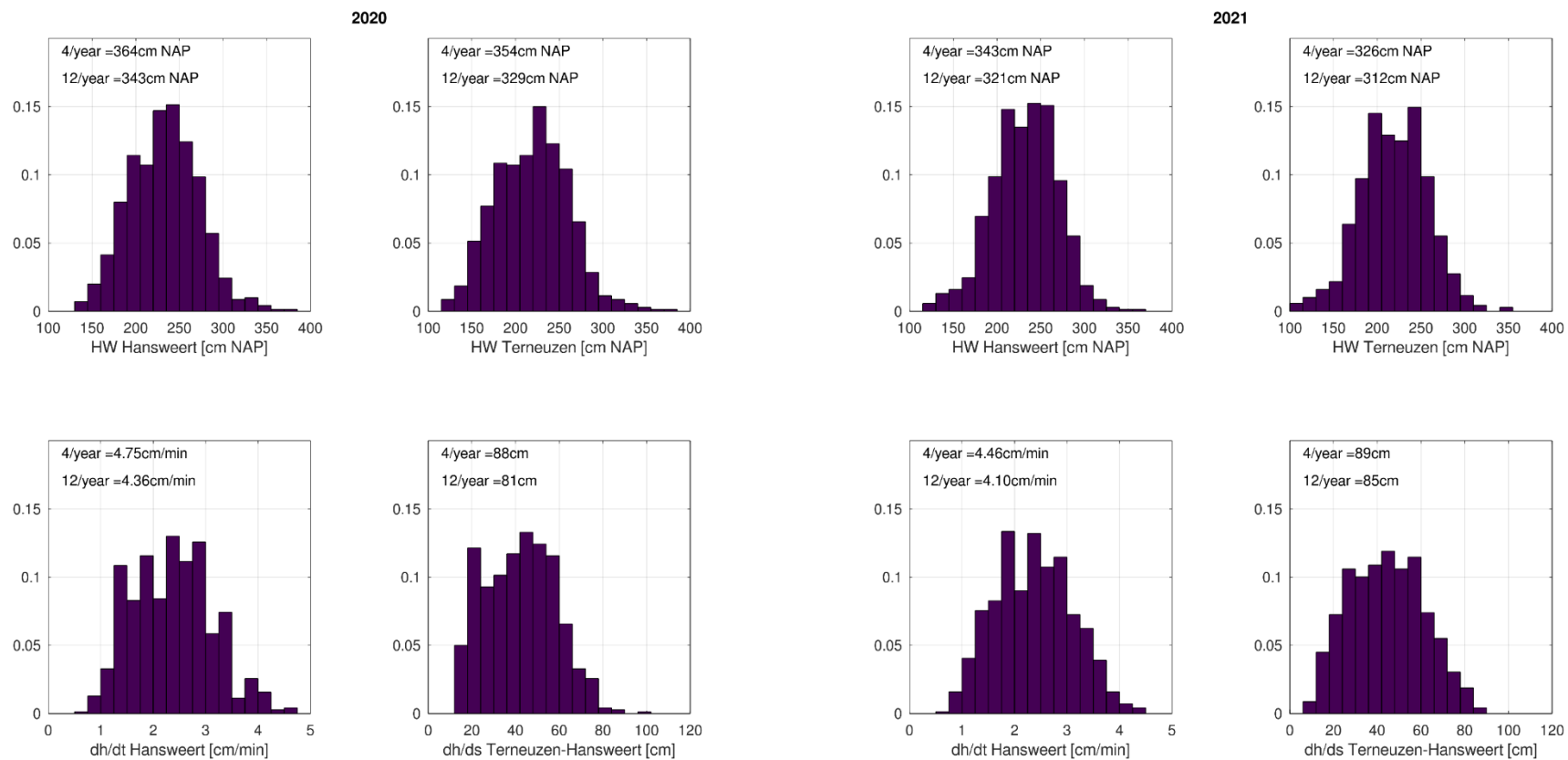
Figuur 16 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011



Figuur 17 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011



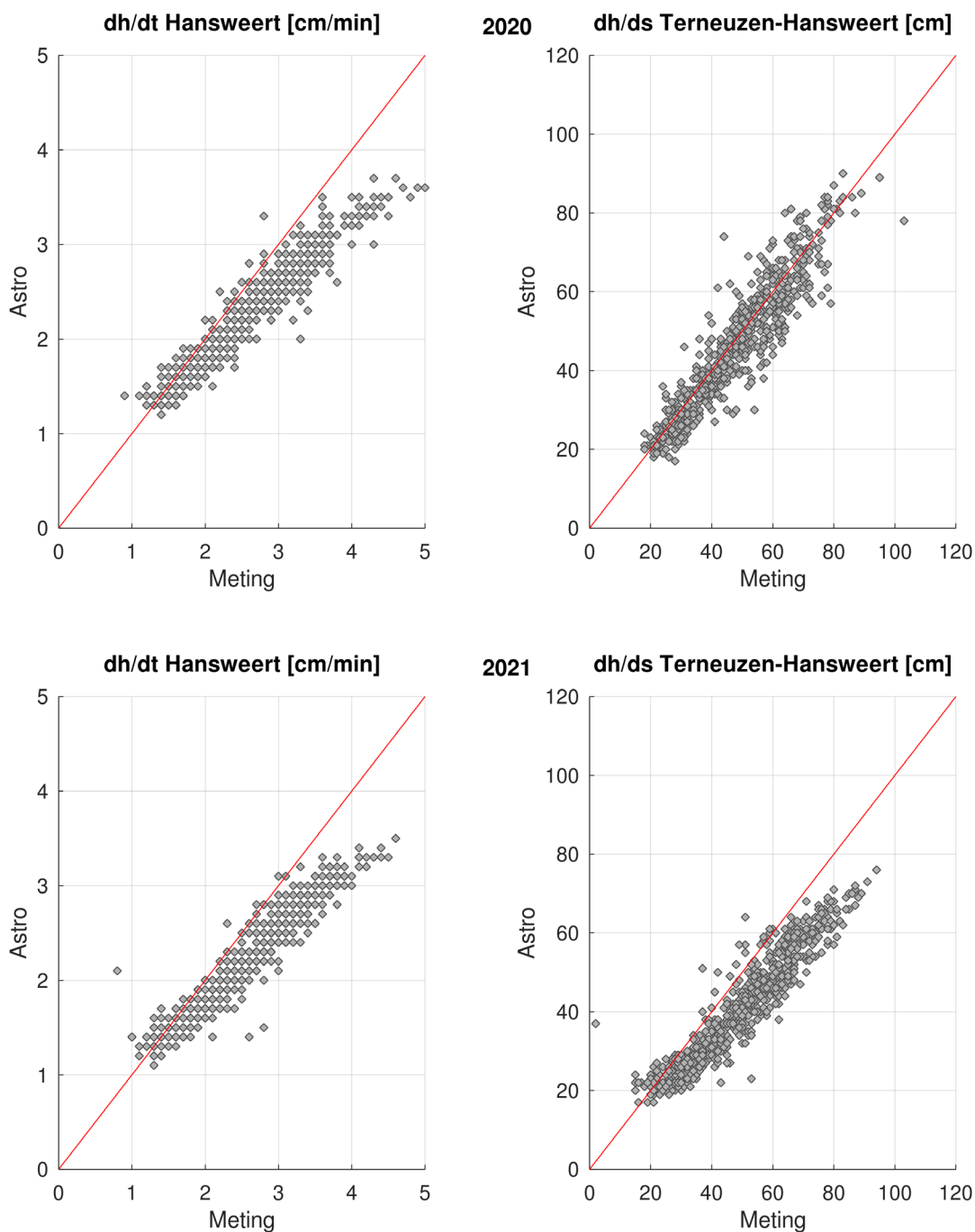
Figuur 18 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011



Figuur 19 –Histogram (relatief) van hoogwater (boven) te Hansweert (links) en Terneuzen (rechts) en waterstandsparameters (onder) stijgsnelheid (links) en verval (rechts) voor 2010 en 2011

Bijlage B Vergelijking meting-astro

Opmerking: in volgende figuren betreft dh/ds feitelijk het verval (dh).



Figuur 20 – Relatie tussen de gemeten (x-as) en astronomisch voorspelde (y-as) maximale stijgsnelheid (links) en het maximale verval (rechts) voor de jaren 2020 (boven) en 2021 (onder)

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be