

## **Waterstandsverlopen kust**

**Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017**





# **Waterstandsverlopen kust**

**Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017**

Houcine Chbab

1220082-002



## Titel

Waterstandsverlopen kust

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
RWS-WVL	1220082-002	1220082-002-HYE-0003	81

## Trefwoorden

WTI-2017; waterstandsverlopen, stormopzet, astronomisch getij, faseverschuiving tussen stormopzet en astronomisch getij.

## Samenvatting

In het kader van het wettelijke instrumentarium WTI-2017 worden voor verscheidene watersystemen nieuwe hydraulische randvoorwaarden bepaald. Onderdeel daarvan is het tijdsverloop van de waterstanden bij het toetspeil. De waterstandsverlopen worden gebruikt bij het toetsen op faalmechanismen waarvoor langdurig aanhoudende hoge waterstanden van belang zijn, zoals macro-instabiliteit binnenwaarts en piping.

Bij de vaststelling van de waterstandsverlopen voor locaties langs de kust is in dit rapport gebruik gemaakt van het tijdsverloop van de stormopzet, het gemiddelde astronomische getij en de faseverschuiving tussen de maxima van de opzet en het getij. Voor 7 basisstations langs de kust zijn analyses gemaakt van deze aspecten en daaruit blijkt dat:


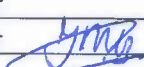

1. het tijdsverloop van de stormopzet gemodelleerd kan worden door een trapeziumvorm met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur voor locaties langs de Zeeuwse en Hollandse kust met uitzondering van Hoek van Holland; voor locaties langs de Waddenzee geldt een geknikt trapezium van 45 uur in de basis en 2 uur in de top,
2. het tijdsverloop van de stormopzet bij Hoek van Holland blijft vanwege consistentieoverweging onveranderd t.o.v. WTI-2011,
3. het faseverschil tussen de maxima van de stormopzet en het astronomische getij in principe locatieafhankelijk is; locaties langs de Zeeuwse en Hollandse kust vertonen echter veel overeenkomsten; hetzelfde geldt voor locaties langs kust van de Waddenzee. Een faseverschuiving van +2,5 uur is representatief voor de Zeeuwse en Hollandse kust; voor de Waddenzeekust geldt een faseverschuiving van +5,5 uur.

Op basis van deze bevindingen is een recept ontwikkeld voor het bepalen van het tijdsverloop van de waterstand langs de kustgebieden. Het waterstandsverloop bij locaties langs de Zeeuwse en Hollandse kust wordt bepaald door de trapeziumvorm voor de stormopzet te superponeren op het gemiddelde astronomische getij, waarbij rekening wordt gehouden met een faseverschuiving van +2,5 uur tussen de maxima van de stormopzet en astronomische getij. Voor de Waddenzee geldt een geknikte trapeziumvorm en een faseverschuiving van +5,5 uur.

Dit recept is geschikt om voor elk waterstandsniveau het bijbehorende tijdsverloop te bepalen.

## Referenties

WTI-2017, projectplan waterstandsverlopen WTI-2017.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2015	E.H. Chbab		J.M. IJmker		M. van Gent	
2	dec. 2015	E.H. Chbab		J.M. IJmker		M. van Gent	

## Status

definitief



## Inhoud

<b>Lijst van figuren en tabellen</b>	<b>iii</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel	3
<b>2 Faalmechanismen en waterstandsverloop HR2001/HR2006</b>	<b>5</b>
2.1 Kustgebied	5
2.2 Faalmechanismen	6
2.3 Vigerend waterstandsverloop kust (HR-2001/HR-2006)	8
<b>3 Analyse stormopzet</b>	<b>11</b>
3.1 Inleiding	11
3.2 Keuze stations	11
3.3 Begrippen en kenmerken stormopzet	11
3.3.1 Begrippen	11
3.3.2 Kenmerken stormopzet	12
3.4 Beschikbare gegevens	14
3.4.1 Ruwe data stormopzet	14
3.4.2 Selectiemethode pieken stormopzet	14
3.5 Opschalingsmethode	16
3.6 Analyse tijdsverloop stormopzet gekozen stations	18
3.6.1 Tijdsverloop stormopzet Hoek van Holland	18
3.6.2 Analyse tijdsverloop stormopzet Vlissingen	21
3.6.3 Analyse tijdsverloop stormopzet IJmuiden	23
3.6.4 Analyse tijdsverloop stormopzet Den Helder	25
3.6.5 Analyse tijdsverloop stormopzet Harlingen	27
3.6.6 Analyse tijdsverloop stormopzet Lauwersoog	29
3.6.7 Analyse stormopzet Delfzijl	31
3.7 Nadere analyse, samenvatting en (voorlopige) conclusies	33
<b>4 Analyse faseverschil astronomisch getij en opzet</b>	<b>39</b>
4.1 Faseverschil stormopzet en getij Hoek van Holland	39
4.2 Faseverschil astronomisch getij en stormopzet overige stations	40
<b>5 Gevoeligheid drempelwaarde en zichtduur</b>	<b>45</b>
5.1 Selectie cases gevoeligheidsanalyse	45
5.2 Gevoeligheidsanalyse tijdsverloop stormopzet	46
5.3 Gevoeligheidsanalyse faseverschil opzet en getij	51
5.4 Samenvatting en conclusies	60
<b>6 Waterstandsverloop kust</b>	<b>61</b>
6.1 Inleiding	61
6.2 Astronomisch getij	61
6.3 Gemiddeld astronomisch getij	62
6.4 Waterstandsverloop Hoek van Holland	63
6.5 Waterstandsverloop kuststations	65

<b>7 Recept waterstandsverloop kust</b>	<b>73</b>
7.1 Inleiding	73
7.2 Recept waterstandsverloop meren	73
7.3 Recept waterstandsverloop kust	74
<b>8 Samenvatting en conclusies</b>	<b>77</b>
<b>Referenties</b>	<b>81</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Gemiddeld getij</b>	<b>A-1</b>
<b>B Toetspeilen</b>	<b>B-1</b>



## Lijst van figuren en tabellen

Figuur 1.1	Wettelijke normfrequenties voor de primaire keringen in Nederland. In WTI-2017 zullen nieuwe normen worden gehanteerd. Bij gereedkomen van dit rapport waren deze echter nog niet formeel beschikbaar.....	1
Figuur 1.2	Overzicht van de voorgestelde (nog vast te stellen) veiligheidsnormen. ....	2
Figuur 2.1	Geografische weergave van de regio's, zoals deze in Hydra-Ring zijn opgenomen, met uitzondering van Europoort, duinen en Limburgse Maas (kades).....	6
Figuur 2.2	Faalmechanismen dijken (VTV-2006).....	6
Figuur 2.3	Illustratie watervoerende zandlaag bij faalmechanisme opbarsten. ....	7
Figuur 2.4	Standaard waterstandsverlooptlijn als gevolg van stormopzet (VTV-2006). ....	8
Figuur 3.1	Banen van enige depressies bij bekende stormvloed (uit (RWS/KNMI, 1961)). .....	13
Figuur 3.2	Voorbeeld van zichtduur (24 uur) voor Hoek van Holland. ....	15
Figuur 3.3	Geselecteerde stormopzetten voor Hoek van Hoek van Holland uit de 1971-2006 met een zichtduur van 24 uur en een drempelwaarde van 1.5 m (deze selectie komt overeen met die gebruikt in Tijssen (2009)).....	16
Figuur 3.4	Gemiddeld tijdsverloop (genormaliseerd) bij Hoek van Holland resulterend uit opschalen van verlopen stormopzetten uit Figuur 3.3. ....	17
Figuur 3.5	Afgeleid (paars) en geschematiseerd (blauw), door middel van trapezium, tijdsverloop voor Hoek van Holland.....	18
Figuur 3.6	Standaard tijdsverloop stormopzet uit HR-2006. ....	18
Figuur 3.7	Standaard verloop stormopzet uit WTI-2011. ....	19
Figuur 3.8	Stormopzetverloop afgeleid met opschalingsmethode (Tijssen, 2009). ....	20
Figuur 3.9	Standaard opzetverloop voor Hoek van Holland op basis van geselecteerde opzetpieken uit 1971-2006. Standaard verloop opschalingsmethode (paars) en schematisatie met trapezium met topduur 2 uur (blauw). ....	20
Figuur 3.10	Standaard tijdsverloop stormopzet bij Hoek van Holland op basis van geselecteerde opzetpieken uit 1971-2006. Standaard verloop opschalingsmethode (paars) en schematisatie met trapezium met topduur 4 uur (blauw). ....	21
Figuur 3.11	Geselecteerde stormopzetten voor de station Vlissingen voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur.....	21
Figuur 3.12	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) bij station Vlissingen op basis op geselecteerde opzetpieken uit 1971-2013. ....	22
Figuur 3.13	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Vlissingen: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (blauw) en trapezium met topduur van 4 uur (rood). ....	22
Figuur 3.14	Modellering van de stormopzet bij Vlissingen door een afgeknot trapezium op het niveau van 0,6 m; basisduur = 41 uur. ....	23

Figuur 3.15	Geselecteerde stormopzetten voor het station IJmuiden voor een drempelwaarde van 1,5 m en zichtduur 24 uur. ....	23
Figuur 3.16	Standaard opzetverloop station IJmuiden (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.15).....	24
Figuur 3.17	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor IJmuiden: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (blauw).....	24
Figuur 3.18	Standaard tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met geknikt trapezium voor locatie IJmuiden. Knik op het niveau van 0.6 m. ....	25
Figuur 3.19	Geselecteerde stormopzetten voor het station Den Helder voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur. ....	25
Figuur 3.20	Standaard opzetverloop station Den Helder (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.19). ....	26
Figuur 3.21	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Den Helder: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (blauw) en trapezium met topduur van 4 uur (rood). ....	26
Figuur 3.22	Geselecteerde stormopzetten voor het station Harlingen voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur. ....	27
Figuur 3.23	Standaard opzetverloop station Harlingen (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.22). ....	28
Figuur 3.24	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Harlingen: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (blauw).....	28
Figuur 3.25	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met geknikt trapezium (rood) voor locatie Harlingen. Knik ligt op het niveau van 0.6 m. ....	29
Figuur 3.26	Geselecteerde stormopzetten voor het station Lauwersoog voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur. ....	29
Figuur 3.27	Standaard opzetverloop station Lauwersoog (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.26). ....	30
Figuur 3.28	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Lauwersoog: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (blauw).....	30
Figuur 3.29	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met geknikt trapezium (blauw) voor locatie Lauwersoog. Knik ligt op het niveau van 0.6 m. ....	31
Figuur 3.30	Geselecteerde stormopzetten voor het station Delfzijl voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur. ....	31
Figuur 3.31	Standaard opzetverloop station Delfzijl (genormaliseerd) gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.30.....	32
Figuur 3.32	Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Delfzijl: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (paars). ....	32

Figuur 3.33	Standaard tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met trapezium (rood) en geknikt trapezium (blauw) voor locatie Delfzijl met een knik ligt op het niveau van 0.6. ....	33
Figuur 3.34	Afgeleide tijdsverlopen stormopzet bij alle 7 beschouwde stations: Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. ....	33
Figuur 3.35	Afgeleide tijdsverlopen voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust: Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden en Den Helder. ....	34
Figuur 3.36	Afgeleide tijdsverlopen voor de stations langs de Waddenzee: Harlingen, Lauwersoog en Delfzijl. ....	34
Figuur 3.37	Tijdsverlopen stormopzet stations Zeeuwse en Hollandse kust, inclusief schematisatie met trapezium met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur. ....	36
Figuur 3.38	Tijdsverlopen stormopzet stations Waddenzee, inclusief schematisatie met geknikt trapezium met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur. De knik ligt op het niveau van 0.75 van het genormaliseerde stormopzet. ....	36
Figuur 4.1	Frequentieverdeling faseverschil tussen top stormopzet en top astronomisch getij bij Hoek van Holland. ....	39
Figuur 4.2	Frequentieverdeling positief en negatief faseverschil voor Hoek van Holland. ....	40
Figuur 4.3	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Vlissingen: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur. ....	42
Figuur 4.4	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Hoek van Holland: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling klassen van 1 uur. ....	42
Figuur 4.5	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij IJmuiden: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur. ....	42
Figuur 4.6	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Den Helder: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur. ....	43
Figuur 4.7	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Harlingen: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur. ....	43
Figuur 4.8	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Lauwersoog: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur. ....	43
Figuur 4.9	Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij station Delfzijl: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur. ....	44
Figuur 5.1	Afgeleide tijdsverlopen van de opzet bij Vlissingen voor de zichtduur van 24 uur en 3 drempelwaardes. ....	46
Figuur 5.2	Afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet bij Vlissingen voor de drempelwaarde van 1,5 m en zichtduren van 24, 36 en 48 uur. ....	47

Figuur 5.3	Afgeleide tijdsverlopen van de opzet bij Vlissingen voor de drempelwaarde 1,5 m (zichtduren van 24, 36 en 48 uur) en geschematiseerde tijdsverlopen met trapezia .....	47
Figuur 5.4	Afgeleide tijdsverlopen van de opzet bij Vlissingen voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,2 en 1,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).....	48
Figuur 5.5	Standaard berekende stormopzetverlopen voor IJmuiden voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,2 en 1,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).....	49
Figuur 5.6	Standaard berekende stormopzetverlopen voor Harlingen voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,5 en 2,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).....	49
Figuur 5.7	Standaard berekende stormopzetverlopen voor Delfzijl voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,5 en 2,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).....	50
Figuur 5.8	Illustratie dubbelpieken, station Harlingen.....	50
Figuur 5.9	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Vlissingen. Drempelwaarde 1.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur .....	51
Figuur 5.10	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Vlissingen. Drempelwaarde 1.2 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur .....	52
Figuur 5.11	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Vlissingen. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur .....	52
Figuur 5.12	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij, zichtduur 24 uur; station Vlissingen.....	53
Figuur 5.13	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station IJmuiden. Drempelwaarde 1.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	54
Figuur 5.14	Frequentieverdeling faseverschil tussen stormopzet en getij; station IJmuiden. Drempelwaarde 1.2 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	54
Figuur 5.15	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station IJmuiden. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	55
Figuur 5.16	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij, zichtduur 24 uur; station IJmuiden.....	55
Figuur 5.17	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Harlingen. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	56
Figuur 5.18	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Harlingen. Drempelwaarde 2.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	56
Figuur 5.19	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Harlingen. Drempelwaarde 2.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	57
Figuur 5.20	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij, zichtduur 24 uur; station Harlingen.....	57
Figuur 5.21	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur .....	58
Figuur 5.22	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Drempelwaarde 2.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	58
Figuur 5.23	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Drempelwaarde 2.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur. ....	59

Figuur 5.24	Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Zichtduur 24 uur.....	59
Figuur 6.1	Illustratie verschillen in astronomisch getij langs de Nederlandse kust (periode 14 en 15 februari 1998). .....	62
Figuur 6.2	Astronomisch en gemiddeld astronomisch getij bij Delfzijl, periode 1 januari-10 januari 2000.....	63
Figuur 6.3	Tijdsverloop en duur van de stormopzet bij Hoek van Holland uit WTI-2011 ....	64
Figuur 6.4	Waterstandsverloop Hoek van Holland behorende bij een waterstand van 5.0 m (bron (Chbab, 2012)).....	65
Figuur 6.5	Waterstandsverloop Vlissingen op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +5,5 uur.....	66
Figuur 6.6	Waterstandsverloop Vlissingen op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +2,5 uur.....	66
Figuur 6.7	Waterstandsverloop Vlissingen voor faseverschuiving van 2,5 uur (blauw) en 5,5 uur (groen).....	67
Figuur 6.8	Waterstandsverloop Den Helder op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +2,5 uur.....	67
Figuur 6.9	Waterstandsverloop Den Helder op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +4,5 uur.....	68
Figuur 6.10	Waterstandsverloop Den Helder voor faseverschuiving 2,5 uur en 4,5 uur. ....	68
Figuur 6.11	Waterstandsverloop opgeschaald naar eenzelfde hoogte voor Den Helder voor faseverschuivingen 4,5 en 2,5 uur. ....	69
Figuur 6.12	Waterstandsverloop Harlingen op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt 5,5 uur.....	69
Figuur 6.13	Waterstandsverloop Harlingen op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt -5,5 uur.....	70
Figuur 6.14	Waterstandsverloop Harlingen voor faseverschuiving -5,5 uur en +5,5 uur.....	70
Figuur 6.15	Waterstandsverloop Lauwersoog op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt -5,5 uur.....	71
Figuur 6.16	Waterstandsverloop Lauwersoog op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +5,5 uur.....	71
Figuur 6.17	Waterstandsverloop Lauwersoog voor faseverschuiving +5,5 en -5,5 uur.....	72
Figuur 7.1	Voorbeeld waterstandsverloop meren .....	73

Tabel 2.1	Regio's Hydra-Ring.....	5
Tabel 3.1	Beschikbare data (zeewaterstand en astronomisch getij) en stapgrootte van de gekozen stations. ....	14
Tabel 3.2	Selectiecriteria en aantal geselecteerde stormopzetpieken.....	15
Tabel 3.3	Basisduur trapezia beschouwde stations .....	35
Tabel 4.1	Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij. ....	41
Tabel 5.1	Beschouwde stations en gekozen drempelwaardes en zichtduren voor de gevoeligheidsanalyse.....	45
Tabel 5.2	Aantal geselecteerde opzetpieken per set drempelwaarde en zichtduur .....	45
Tabel 5.3	Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station Vlissingen.....	53
Tabel 5.4	Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station IJmuiden.....	55
Tabel 5.5	Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station Harlingen.....	57
Tabel 5.6	Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station Delfzijl.....	59
Tabel 7.1	Parameters Trapezia tijdsverloop stormopzet en faseverschuiving kustgebieden .....	74
Tabel 8.1	Meetgegevens en selectie pieken stormopzet .....	77
Tabel 8.2	Parameters Trapezia tijdsverloop stormopzet en faseverschuiving kustgebieden .....	78

## English summary

In the framework of WTI-2017, for the periodic assessment of the Dutch water defences, new hydraulic boundary conditions will be determined for various water systems in the Netherlands. Part of WTI-2017 is the determination of the time evolution of water levels corresponding to a certain design water level. The water level evolution will be used in the assessment of failure mechanisms, for which prolonged high water levels are of importance, like (inward) slope instability and piping.

In this report, the evolution of the storm surge, the mean astronomic tide and the phase shift between surge maxima and tide have been used in the determination of the water level evolution at various locations along the Dutch coast. Analyses of these aspects, made for 7 base stations along the coast, reveal that:

1. the time evolution of the storm surge can be modelled as a trapezoidal shape with a basis duration of 44 hours and a top duration of 2 hours along the Zeeland and Holland coasts; for locations along the Dutch Wadden Sea a bent trapezoidal shape with a basis duration of 45 hours and a top duration of 2 hours can be used,
2. for consistency reasons the time evolution of storm surge at Hoek van Holland remains unchanged with respect to WTI-2011,
3. the phase lag between the storm surge maxima and the astronomic tide is in principle location dependent; however, the phase lags for locations along the Zeeland and Holland coast are very similar; the same can be stated for locations along the Wadden Sea coast. A phase shift of +2.5 hours is representative for the Zeeland and Holland coast; for the Wadden Sea coast a phase shift of +5.5 is used.

Based on these findings, a method has been developed for the determination of the water level time evolution for the Dutch coastal areas. The water level evolution of the locations along the Zeeland and Holland coasts will be determined by superimposing a trapezoidal shape for the storm surge onto the mean astronomic tide, taking into account a phase shift of +2.5 hours between the storm surge maxima and the astronomic tide. For the Wadden Sea a bent trapezoidal shape has been used and a phase shift of +5.5 hours.

This method makes it possible to determine for every water level the corresponding time evolution.

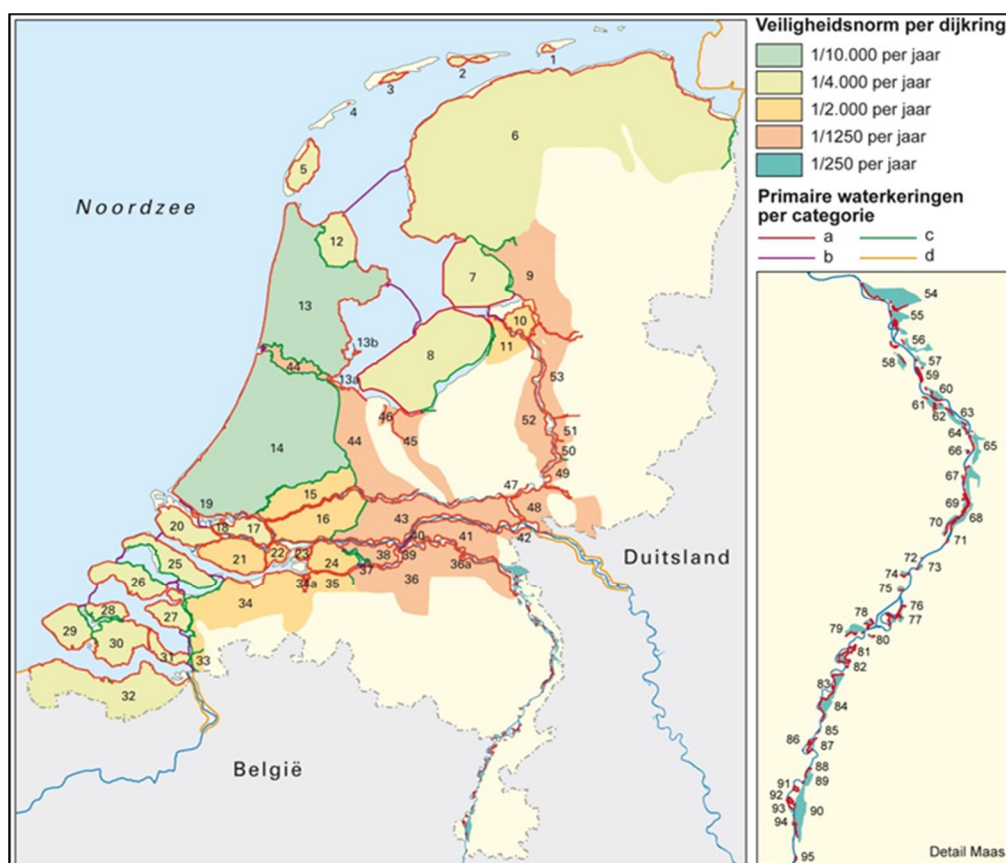




# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De Waterwet (2009) schijft voor dat de primaire waterkeringen getoetst moeten worden aan de gestelde veiligheidsnormen. In deze wet is voor de beheerder van een primaire waterkering de verplichting neergelegd iedere twaalf jaar aan de Minister van Infrastructuur en Milieu (I&M) verslag uit te brengen over de algemene waterstaatkundige toestand van de primaire waterkeringen. De veiligheidsnormen waaraan de primaire waterkeringen moeten voldoen, worden uitgedrukt in normfrequenties of herhalingsjaren. Deze variëren voor de huidige situatie van 250 tot 10.000 jaar, afhankelijk van het watersysteem en het beschermde gebied (Figuur 1.1).



Figuur 1.1 Wettelijke normfrequenties voor de primaire keringen in Nederland. In WTI-2017 zullen nieuwe normen worden gehanteerd. Bij gereedkomen van dit rapport waren deze echter nog niet formeel beschikbaar.

De toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van het Wettelijk Toets-Instrumentarium (WTI). Dit WTI bestaat uit twee onderdelen: de Hydraulische Randvoorwaarden (HR) en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV). De HR zijn een weergave van de maatgevende hydraulische belasting op een waterkering bij de wettelijke normfrequentie. Het VTV schrijft voor hoe een waterkering getoetst moet worden voor verschillende faalmechanismen. De HR vormen de getalsmatige verzameling van de maatgevende hydraulische belastingen. Hierin staan bijvoorbeeld maatgevende waterstanden en golfparameters als significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting, voor alle locaties waar zich primaire waterkeringen bevinden.

De huidige HR-2006 gaat uit van de overschrijdingskansbenadering. Deze benadering kijkt naar de kans op overschrijden van een kritieke belasting voor een tevoren vastgesteld faalmechanisme en (eigenschappen van een) waterkeringssectie. In WTI-2017 wordt een overstap gemaakt naar een andere benadering: de overstromingskansbenadering. Dit houdt in dat gekeken wordt naar de kans op falen van een dijkkring of dijkkringtraject (bestaande uit meerdere waterkeringssecties), rekening houdend met meerdere faalmechanismen en hun bijdrage aan de totale faalkans. Daarnaast wordt in WTI-2017 overgestapt op de nieuwe veiligheidsnormen. Een (voorlopig) overzicht van deze normen is afgebeeld in Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Overzicht van de voorgestelde (nog vast te stellen) veiligheidsnormen.

Om de maatgevende waterstanden en golfcondities vast te stellen wordt gebruik gemaakt van het probabilistische model Hydra-Ring. Voor sommige faalmechanismen vormen langdurig aanhoudende hoge waterstanden een bedreiging (gedetailleerde toets macrostabiliteit binnenwaarts, geavanceerde toets piping en heave en instabiliteit door golfoverslag). Voor het toetsen van deze dijken is naast de hoogte van de waterstand (toetspeil), extra informatie nodig; deze betreft o.a. het tijdsverloop behorende bij het toetspeil.

De hydraulische belastingen op de waterkeringen worden, afhankelijk van het watersysteem, veroorzaakt door een aantal fenomenen. Bovenstrooms op de rivieren bijvoorbeeld bepaalt de rivierafvoer de maatgevende waterstanden; het tijdsverloop dat hierbij hoort wordt dan ook volledig bepaald door het tijdsverloop van de afvoer. Meren (IJsselmeer en Markermeer) zijn

wind-gedreven systemen. Het meerpeil en windopzet zijn daar de bepalende factoren, voor zowel het toetspeil als het tijdsverloop ervan. Windopzet is afhankelijk van de storm (duur en kracht). Voor de kustgebieden zijn wind en daarmee samenhangende windopzet zijn, naast astronomische getij, de drijvende krachten. Bij het bepalen van het tijdsverloop behorende bij het toetspeil langs de kust dient dan ook rekening te worden gehouden met deze krachten en hun onderlinge samenhang.

## 1.2 Doel

Het doel van de onderhavige studie is het bepalen van het waterstandsverloop behorende bij het toetspeil voor het kustgebied. Het kustgebied omvat de volgende watersystemen: Noordzee, Westerschelde en Waddenzee.

## 1.3 Beperkingen

De in rapport afgeleide tijdsverlopen van de waterstand behoren in principe bij het toetspeil; ze zijn echter zo generiek afgeleid dat ze ook gebruikt kunnen worden voor andere waterstandsniveaus. De waterstandsverlopen zijn uitsluitend bedoeld voor de toetsing van geotechnische faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende hoge waterstanden bedreigend zijn. Binnen de vigerende (HR-2006) toetsing worden de waterstandsverlopen gebruikt bij de gedetailleerde toets voor macrostabiliteit binnenwaarts en de geavanceerde toets voor piping en heave en instabiliteit door golfoverslag.

De waterstandsverlopen zijn niet bedoeld voor ontwerp en ook niet voor het toetsen op de volgende faalmechanismen:

- Stabiliteit bekledingen (de situatie waarin de golfaanval op het bekledingsdeel het grootst is, is maatgevend voor het toetsen van bekledingen. De waterstand bij toetspeil geeft geen representatief verloop voor de maatgevende belasting bij het toetsen van bekleding, beter is om een belastingduur per niveau aan te geven).
- Macrostabiliteit buitenwaarts, waarbij een snelle val van de waterstand de maatgevende situatie is. Dit faalmechanisme wordt niet beschouwd in de huidige studie, omdat daarbij een hoge freatische lijn in de dijk en een lage buitenwaterstand maatgevend is.

De Oosterschelde valt buiten de scope van dit rapport. Door de aanwezigheid van de Oosterscheldekering zijn de in dit rapport afgeleide waterstandsverlopen niet geschikt voor dat gebied.

## 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving gegeven van enerzijds het watersysteem kust en anderzijds de relevante faalmechanismen. Hoofdstuk 3 behandelt de analyse van de stormopzet. In dit hoofdstuk wordt aanvankelijk kort ingegaan op de beschikbare metingen, keuze van stations, selectiemethode van opzetpieken en opschalingsmethode. De analyse van het faseverschil tussen de top van de opzet en de top van het astronomische getij komt aan de orde in hoofdstuk 4. De gevoeligheid van bepaalde keuzes is onderwerp van hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 behandelt de waterstandsverlopen voor de gekozen stations. Het recept om het waterstandsverloop op een willekeurige locatie langs de kust vast te stellen is onderwerp van hoofdstuk 7. Samenvatting en conclusies komen aan de orde in hoofdstuk 8.



## 2 Faalmechanismen en waterstandsverloop HR2001/HR2006

### 2.1 Kustgebied

De hele kust wordt ingedeeld in 7 regio's en is ook als zodanig geïmplementeerd in het probabilistisch model Hydra-Ring: regio 9 t/m regio 15, zie ook Tabel 2.1 (Diermanse et al, 2013). Deze indeling is onder ander nodig vanwege verschil in belastingmodel en statistische invoer; elke regio vereist namelijk een eigen statistische invoer. Per regio geldt in Hydra-Ring dus een apart belastingmodel. Dit bestaat onder ander uit een aantal random grootheden, ook basisstochasten genoemd. De stochastwaarden bepalen samen met de bijbehorende statistiek de maatgevende waterstanden. Het tijdsverloop de maatgevende waterstanden wordt bepaald door de tijdsverlopen van de basisstochasten en onderlinge samenhang. Meer details over de belastingmodellen in Hydra-Ring zijn te vinden in (Diermanse et al, 2013) en over de basisstochasten en bijbehorende statistiek in (Chbab, 2015) De tabel bevat verder voor de volledigheid ook de zoete regio's; deze zijn grijs weergegeven.

Tabel 2.1 Regio's Hydra-Ring

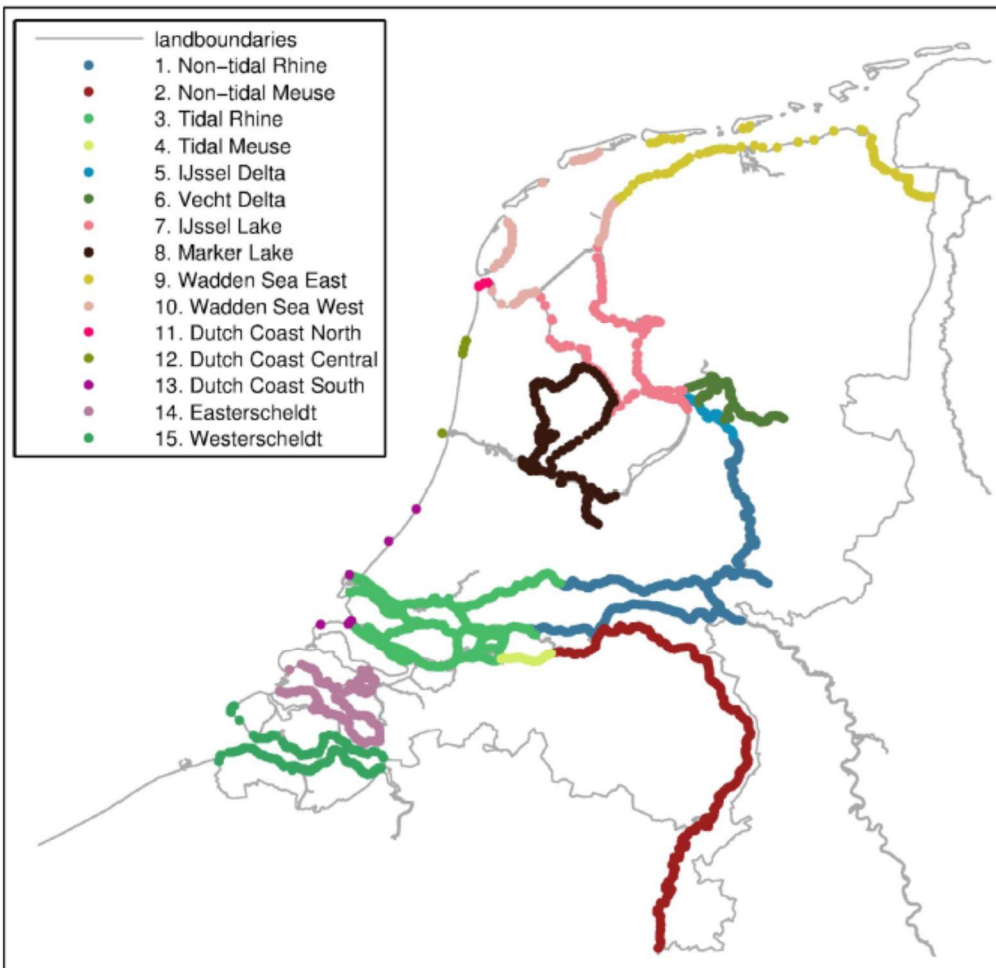
1. <i>Bovenrivieren (Rijn)</i>	7. <i>IJsselmeer</i>	13. Hollandse Kust Zuid
2. <i>Bovenrivieren (Maas)</i>	8. <i>Markermeer</i>	14. Oosterschelde
3. <i>Benedenrivieren (Rijn)</i>	9. Waddenzee Oost	15. Westerschelde
4. <i>Benedenrivieren (Maas)</i>	10. Waddenzee West	16. <i>Duinen</i>
5. <i>IJsseldelta</i>	11. Hollandse Kust Noord	17. <i>Europoort</i>
6. <i>Vechtdelta</i>	12. Hollandse Kust Midden	18. <i>Limburgse Maas</i>

Tot de zee en estuaria worden gerekend de Hollandse kust, de Westerschelde, de Oosterschelde en de Waddenzee.

Regio 9/10: De Waddenzee is het gebied dat wordt omsloten door de Nederlandse Waddeneilanden, de Noord-Hollandse kust van Den Helder tot den Oever, de Afsluitdijk en de Friese en Groningse kust tot de Duitse grens nabij Statenzijl. De Waddenzee wordt ingedeeld in 2 regio's: Waddenzee West en Waddenzee Oost (Diermanse et al, 2013).

Regio 11/12/13: De Hollandse kust bestaat uit 3 regio's: Hollandse Kust Zuid, Hollandse Kust Midden en Hollandse Kust Noord.

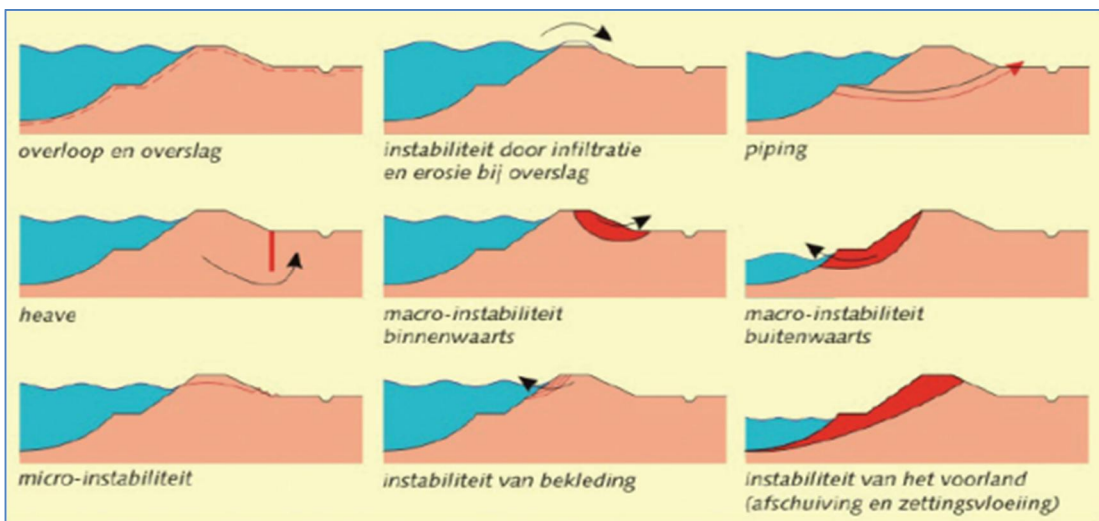
Regio 14/15 betreft de Ooster- en Westerschelde: De Westerschelde is het estuarium dat in rechtstreekse verbinding staat met de Noordzee en wordt begrensd door Zeeuws Vlaanderen, Walcheren, Zuid-Beveland en de grens met België in de Schelde. De Oosterschelde is de zeearm die zeewaarts wordt begrensd door de stormvloedkering Oosterschelde en landwaarts wordt begrensd door Noord- en Zuid-Beveland, Schouwen-Duiveland, Tholen, Sint Philipsland en de Oesterdam.



Figuur 2.1 Geografische weergave van de regio's, zoals deze in Hydra-Ring zijn opgenomen, met uitzondering van Europoort, duinen en Limburgse Maas (kades).

## 2.2 Faalmechanismen

Figuur 2.2 toont de belangrijkste faalmechanismen van een dijk of dam.



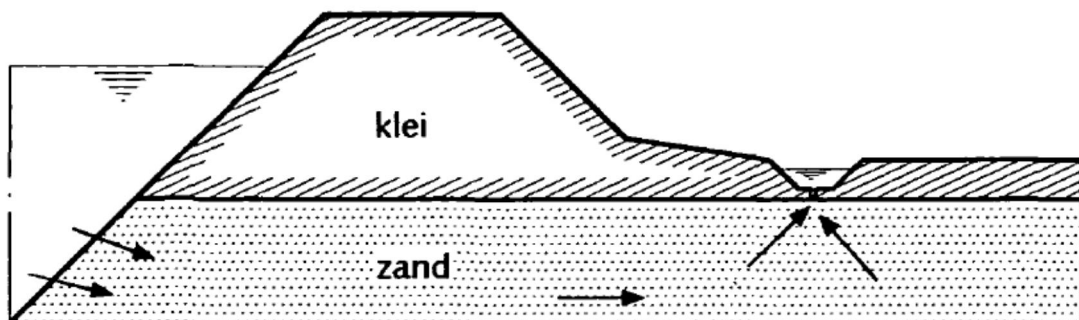
Figuur 2.2 Faalmechanismen dijken (VTV-2006)

Waterstandsverlopen zijn uitsluitend bedoeld voor de toetsing van geotechnische faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende hoge waterstanden bedreigend zijn. Het betreft voornamelijk de faalmechanismen macro-instabiliteit binnenwaarts en de geavanceerde toets voor piping/heave en instabiliteit door golfoverslag. Hieronder volgt een korte beschrijving van de genoemde faalmechanismen; voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar (VTV-2006).

Overloop en overslag: de hoogte van de kruin moet in de eerste plaats voldoende zijn om het faalmechanisme *overloop* te voorkomen. Dit mechanisme doet zich voor in situaties dat de som van het toetspeil en eventuele toeslagen hoger is dan de kruinhoogte. In de tweede plaats is het faalmechanisme *overslag* van belang; daarbij faalt de waterkering doordat de golven een te groot debiet over de kruin veroorzaken. Bij ontwerpen en toetsen zal vrijwel steeds de eis van beperking van het overslagdebiet maatgevend zijn. Dit overslagdebiet kan op twee manieren leiden tot falen van de waterkering: ten eerste door falen van de bekleding op de kruin en het binnentalud en ten tweede, als gevolg hiervan, dijkdoorbraak doordat de situatie onbeheersbaar wordt.

Opbarsten en piping: hierbij gaat feitelijk om een combinatie van mechanismen, namelijk opbarsten van de deklaag binnendijs en door grondwaterstroming geïnduceerde migratie van zand uit de watervoerende zandlaag. Wanneer door voortgaande migratie van zanddeeltjes uit de zandvoerende zandlaag onder de dijk door een open verbinding (pipe) ontstaat tussen buitenwater en het maaiveld binnen is sprake van piping of onderloopsheid. Omdat de verbinding open is neemt de stroomsnelheid toe, waardoor verdere erosie optreedt, die ervoor zorgt dat de stroomsnelheid verder toe kan nemen. Dit is een praktisch onstuitbaar proces en volgens de huidige opvattingen leidt dat binnen relatief korte tijd tot progressieve erosie van de zandlaag onder de dijk en uiteindelijk tot het verzakken ervan. Piping treedt hoofdzakelijk op in matig tot goed doorlatende lagen, met name in homogeen fijn zand.

Het opbarstmechanisme is een noodzakelijke voorwaarde voor het ontstaan van piping. Opbarsten ontstaat wanneer de omhoog gerichte kracht op de onderkant van de deklaag door de waterspanning in de watervoerende zandlaag gelijk wordt aan het gewicht van de deklaag en het potentiaal verhang over de deklaag groter is dan het een bepaald toelaatbaar kritiek verhang. Voor opbarsten en voor overschrijden van het kritieke verhang over de deklaag geldt dat optreden afhankelijk is van de mate waarin waterspanningen in de watervoerende zandlaag zich kunnen ontwikkelen, afhankelijk van de duur (en verloop) van de buitenwaterstand, zie Figuur 2.3 voor een illustratie.



Figuur 2.3 Illustratie watervoerende zandlaag bij faalmechanisme opbarsten.

Instabiliteit door infiltratie en erosie bij overslag: bij overslag zal water infiltreren in de toplaag op het binnentalud van de dijk. Hierdoor zal een verzadigde infiltratiezone ontstaan waarin de korrelspanningen laag zijn en daarmee ook de weerstand tegen afschuiven; tegelijkertijd zijn

het volumegewicht en daarmee de aandrijvende kracht hoog. Beide effecten hebben een negatieve invloed op de stabiliteit van de top laag.

Macro-instabiliteit binnenwaarts: hiermee wordt het afschuiven van grote delen van een grondlichaam bedoeld. Dit afschuiven treedt op langs rechte of gebogen glijvlakken of door plastische zones, waarin door overbelasting geen krachterevenwicht meer aanwezig is. De sterkte eigenschappen en de waterspanningen in en onder de grondconstructie bepalen de weerstand tegen afschuiven. Een hoge buitenwaterstand leidt tot een verhoging van het freatisch vlak in het grondlichaam en een verhoging van de waterspanningen in de ondergrond, waardoor de weerstand tegen afschuiven reduceert.

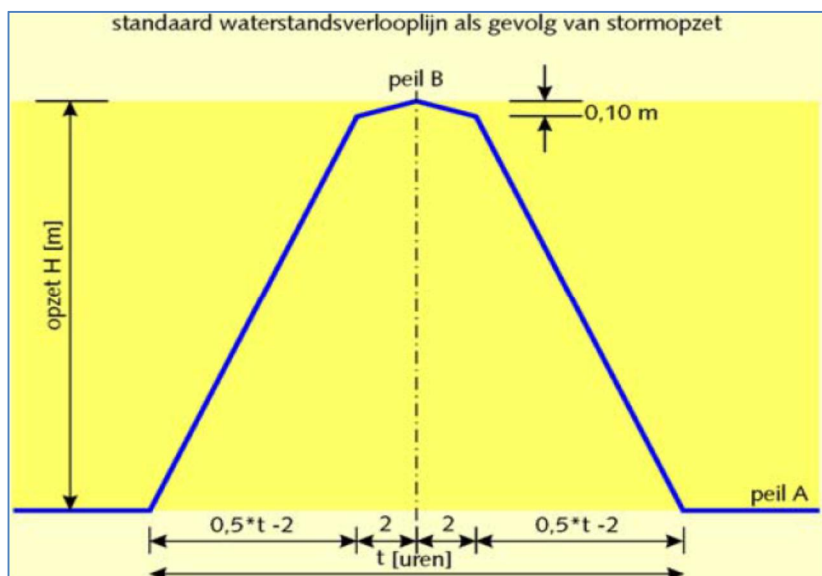
Samenvattend zijn de voor langdurig hoge waterstanden de volgende faalmechanismen gevoelig:

1. Overloop en overslag
2. Opbarsten en piping
3. Instabiliteit door infiltratie en erosie bij overslag
4. Macro-instabiliteit binnenwaarts

### 2.3 Vigerend waterstandsverloop kust (HR-2001/HR-2006)

De vigerende waterstandsverlopen stammen uit HR-2006. Als basis hiervoor geldt het tijdsverloop van de stormopzet zoals afgebeeld in Figuur 2.4. Het tijdsverloop heeft een trapezium met parameters A, B en t. Op een willekeurige locatie is de parameter A gelijk aan de gemiddelde waterstand op die locatie en parameter B gelijk aan het toetspeil minus de gemiddelde getij-amplitude. De parameter t is de basisduur van het trapezium op het niveau A en bedraagt 35 uur. Deze duur geldt voor de Hollandse Kust en Westerschelde (regio 11 t/m 13 en 15), zie voor regio's Tabel 2.1. Op dit verloop wordt vervolgens het verloop van het astronomische getij van de betreffende locatie gesuperponeerd, zodanig dat het tijdstip van de top van het astronomische getij samenvalt met dat van de top van de stormopzet. Hierbij wordt dus geen rekening gehouden met mogelijke faseverschuiving tussen de top van de stormopzet en van het astronomische getij. Er wordt dus uitgegaan van het ongunstigste scenario.

Voor locaties in de Waddenzee is er geen tijdsverloop vastgesteld.



Figuur 2.4 Standaard waterstandsverlooptlijn als gevolg van stormopzet (VTV-2006).



Voor de Oosterschelde geldt in verband met de Oosterscheldekering een ander standaard verloop, zie (RWS 2006); de Oosterschelde valt echter buiten de scope van dit rapport.



## 3 Analyse stormopzet

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de stormopzet op een aantal representatieve stations langs de Nederlandse kust geanalyseerd. Na een korte beschrijving van de te onderzoeken locaties worden in paragraaf 3.3 enkele begrippen gedefinieerd en kenmerken van de stormopzet beschreven. Daarna wordt in paragraaf 3.4 de beschikbare data en dataselectie voor de gekozen stations kort behandeld. De analyse van het tijdsverloop van stormopzetten geschiedt in dit rapport middels de zogenoemde opschalingsmethode; deze methode wordt kort behandeld in paragraaf 3.5. Paragraaf 3.6 beschrijft de resultaten van de analyse van de stormopzet.

### 3.2 Keuze stations

Voor de analyse van het tijdsverloop van de stormopzet zijn de zogenoemde basisstations beschouwd. Het betreft de stations die worden gebruikt voor het definiëren van het belastingmodel en waarvoor bovendien basisstatistiek beschikbaar is (Chbab, 2015). Beschouwd in dit rapport zijn de volgende stations:

- Vlissingen
- Hoek van Holland
- IJmuiden
- Den Helder
- Harlingen
- Lauwersoog
- Delfzijl

Het station OS11 is ook een basisstation maar wordt hier niet beschouwd; dit station wordt namelijk gebruikt voor de Oosterschelde. Dit watersysteem valt buiten de scope van dit rapport.

Bovengenoemde kuststations zijn verspreid over de hele kust; verwacht wordt dat deze voldoende representatief zijn voor de analyse van de stormopzet en faseverschil met astronomisch getij.

### 3.3 Begrippen en kenmerken stormopzet

#### 3.3.1 Begrippen

Astronomisch getij of waterstand is het regelmatig heen en weer gaan (rijzen en dalen) van het zeewater veroorzaakt door de aantrekkingskracht van de zon en de maan op het water. Astronomisch getij is locatieafhankelijk. Bij windstilte is de zeewaterstand gelijk aan het astronomische getij.

Stormopzet is kortgezegd het verschil tussen de werkelijk gemeten zeewaterstand en de zeewaterstand die zou zijn opgetreden als er geen wind zou zijn geweest. In windstille condities wordt het verloop van de zeewaterstand bepaald enkel door het astronomische getij. Stormopzet is dus de toename van de waterstand als gevolg van opstuwing door de wind ten opzichte van de situatie zonder wind. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen rechte en scheve opzet.

Rechte opzet is op een bepaald tijdstip het verschil tussen de gemeten waterstand en de op dat tijdstip berekende astronomische waarde. Scheve opzet is het verschil tussen de

gemeten hoogwater**piek** of laagwater**dal** en de berekende astronomische waarden voor dezelfde getijdenfase. Scheve opzet wordt berekend door het verschil te nemen tussen de maximale waterstand en de bijbehorende maximale hoogte van het astronomisch getij. Die maxima van de waterstand en het astronomisch getij hoeven uiteraard niet op hetzelfde tijdstip plaats te vinden. De rechte opzet is gekoppeld aan een bepaald tijdstip en wordt afgeleid door het verschil te nemen tussen de waterstand en het astronomisch getij op dat betreffende tijdstip. Hierdoor is de rechte opzet een grootheid die uit te drukken is als een functie van de tijd. Wanneer er vanaf hier in dit rapport gesproken wordt over opzet, wordt daarmee voortaan dan ook rechte opzet bedoeld, tenzij anders vermeld.

Opzetduur is de periode waarbinnen er sprake is van niet onderbroken verhoging van de waterstand ten opzichte van de astronomische waterstand. Het gaat er om een periode te definiëren waarbij de opzet als één fenomeen beschouwd kan worden, dat niet gecorreleerd is aan andere opzetpieken.

Stormduur. Voor de term stormduur is geen vast omschreven definitie beschikbaar. In dit rapport wordt de methode die Rijkswaterstaat en de KNMI gehanteerd hebben in het Hydra project als leidend genomen. De definitie van stormduur wordt dan de periode waarbinnen de windsnelheid een vooraf bepaalde drempelwaarde overschrijdt en waarbij deze windsnelheid in de periode voor en na deze overschrijdingsperiode (stormperiode) minimaal 48 uur lager geweest is dan deze drempelwaarde.

#### Faseverschil opzet en astronomisch getij

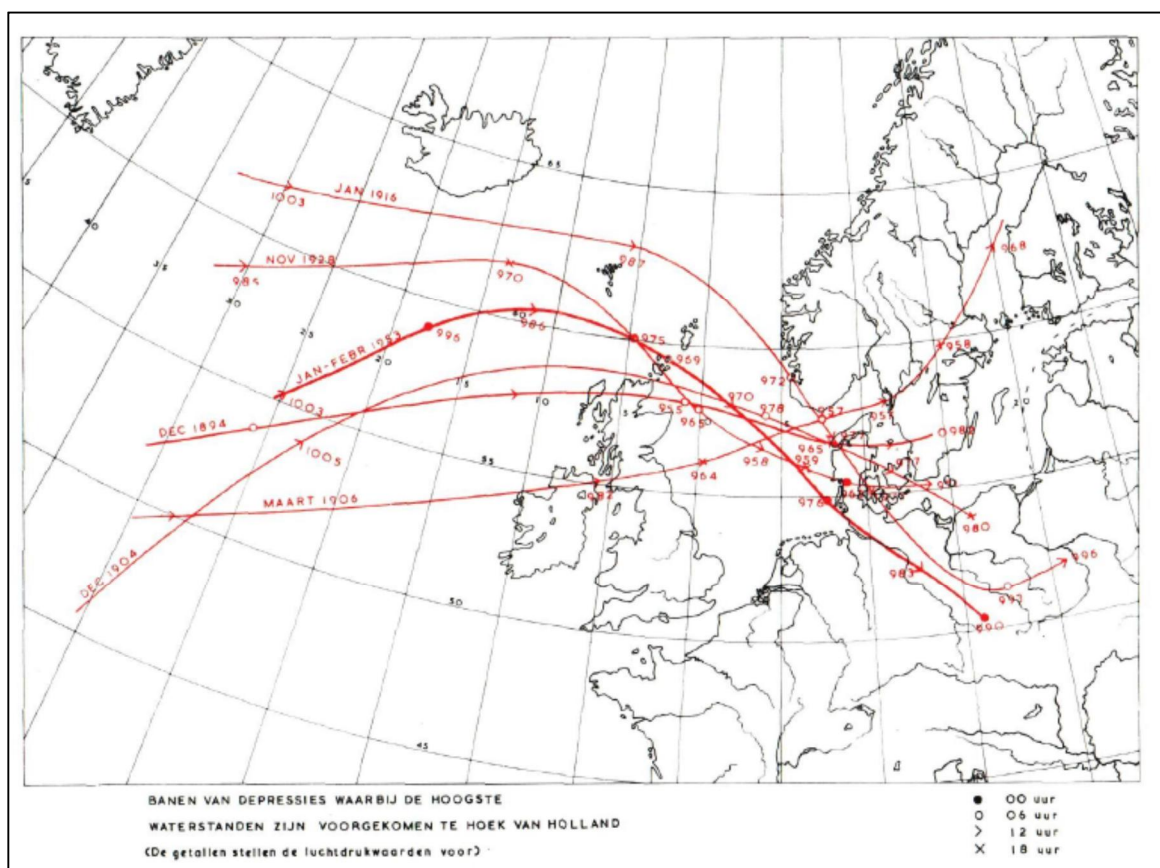
Het faseverschil is de duur tussen het tijdstip van de maximale opzet en het astronomische getij.

### 3.3.2 Kenmerken stormopzet

In Tijssen (2009) komen de belangrijke kenmerken uitvoering aan de orde. In dit rapport volstaan we met een korte beschrijving van deze kenmerken. Onderstaande tekst komt dan ook grotendeels uit (Tijssen, 2009).

Stormopzet wordt vaak verklaard met de volgende, eenvoudige, en kernachtige zin: “Stormopzetten langs de Nederlandse kust zijn het gevolg van windopstuwung tijdens stormen” (Tijssen, 2009). Hoewel deze zin de essentie van het optreden van stormopzetten inderdaad weergeeft, is het verschijnsel in de praktijk toch erg complex. We zien dat al aan de verschijningsvormen van de stormopzetten. Bij een zelfde storm is het verloop van de opzetkromme en daarmee de opzetduur per station sterk verschillend. Ook de piekwaardes van de opzet verschillen, en het tijdstip van de piek verschilt eveneens. De vorm van de kromme, de opzetduur, en waarde en tijdstip van de maximumopzet zullen voor een andere storm vaak heel anders zijn. De stormramp van 1953 heeft bijvoorbeeld aanleiding gegeven tot de hoogste hoogwaterstanden in Vlissingen, Hoek van Holland en Den Helder na 1900, maar in Delfzijl komt hij niet in de lijst met 50 hoogste waterstanden sinds 1900 voor (RIKZ, 2007). De beruchte “Hamburg-storm” van 16 februari 1962 heeft top 12 waterstanden in alle hoofdstations langs de noordelijke kust (Den Helder, Harlingen, Delfzijl), maar komt in de rijtjes van hoogste 50 waterstanden in de westelijke hoofdstations niet voor. De piekwaterstand van de storm van 9 november 2007 staat bij Vlissingen op plaats 16, bij Hoek van Holland op de tweede plaats, terwijl hij bij de drie noordelijke hoofdstations tot resp. de zevende, achtste en negende hoogste waterstand geleid heeft. De piekwaterstand van de storm van 3-4 januari 1976 zit echter bij alle 5 hoofdstations in de top 6. Dit is niet eenvoudig het gevolg van de geometrie van de Noordzee, maar heeft direct te maken met de fysica van het ontstaan en gedrag van deze windopzetten. De weerdepressie en het daarmee samenhangende windveld (intensiteit en koers) spelen ook een rol.

Om de eigenschappen van windopzet beter te begrijpen is het essentieel om het opwekkend mechanisme zelf te beschouwen. Dat betekent teruggaan naar de grootschalige atmosferische processen. Het begint met een stormveld (windveld) met centraal een kenmerkende luchtdrukdepressie die over de Noordelijke Atlantische Oceaan naar Europa trekt. Zo'n stormveld wordt gebruikelijk beschreven door de zich verplaatsende luchtdrukverdeling aan zeeoppervlak, met als hoofdkentallen de veranderende plaats en waarde van het lokale luchtdrukminimum (depressiekern), meestal uitgedrukt als het verschil met de achtergrondwaarde van de luchtdruk. Voor de Noordzee wordt als langjarige gemiddelde achtergrondwaarde vaak 1012 hPa genomen. Op de oceaan leidt een luchtdrukvermindering van x hPa tot een lokale waterstandverhoging van x cm. Met de depressie beweegt dus een waterstandverhoging mee. Opvolgende posities van de depressiekern geven de baan van de depressie en de piek van de waterstandverhoging aan. De voor Nederland relevante depressies komen via en ten noorden van Schotland de Noordzee binnen, waar ze gebruikelijk naar rechts afbuigen, dieper de Noordzee in. Figuur 3.1 geeft een voorbeeld van de banen voor de stormen van 1894, 1904, 1906, 1916, 1928, en 1953 (Rijkswaterstaat en KNMI, 1961). Vooral de stormen van 1894, 1906, 1916 en 1953 hebben in Nederland tot flinke overstromingen geleid.



Figuur 3.1 Banen van enige depressies bij bekende stormvloed (uit (RWS/KNMI, 1961)).

Merk tot slot op dat bij windstilte er geen opzet is en bestaat de zeewaterstand enkel uit de getijschommelingen. In situaties waar de wind een rol speelt bestaat de zeewaterstand uit beide: opzet en getij. Deze twee componenten kunnen elkaar beïnvloeden.

### 3.4 Beschikbare gegevens

#### 3.4.1 Ruwe data stormopzet

Voor de afleiding van de waterstandsverlopen is gebruik gemaakt van een aanzienlijke hoeveelheid data van de gekozen locaties. Deze data is beschikbaar gesteld door de Helpdesk Water van Rijkswaterstaat ([www.HelpdeskWater.nl/](http://www.HelpdeskWater.nl/)). Tabel 3.1 bevat een overzicht van de beschikbare data (zeewaterstand en astronomisch getij) van de beschouwde stations. Van alle beschouwde stations zijn data beschikbaar vanaf 1979; van sommige stations ook data beschikbaar van enkele jaren eerder, vanaf 1971. Hoek van Holland vormt hier een uitzondering; van dit stations is data beschikbaar vanaf 1939. Van de meetperiodes zijn zowel hoogwaters (HW) als laagwaters (LW) beschikbaar. Vanaf 1987 zijn er van alle beschouwde stations datareeksen beschikbaar met meer frequentere metingen, namelijk 10 min waarden. Van voor 1987 betreft het voor alle stations uurlijkse waarden.

Tabel 3.1 Beschikbare data (zeewaterstand en astronomisch getij) en stapgrootte van de gekozen stations.

Locatie	Zeewaterstand	Astronomisch getij
Vlissingen	1971-1986: 60 min 1987-2013: 10 min	1971-2013: 10 min
Hoek van Holland <sup>1</sup>	1939-2006, 10 min	1939-1970: 60 min 1971-2006: 10 min
IJmuiden	1976-1986: 60 min 1987-2013: 10 min	1976-2013: 10 min
Den Helder	1976-1986: 60 min 1987-2013: 10 min	1971-2013: 10 min
Harlingen	1975-1986: 60 min 1987-2013: 10 min	1975-2013: 10 min
Lauwersoog	1979-1986: 60 min 1987-2013: 10 min	1979-2013: 10 min
Delfzijl	1971-1986: 60 min 1987-2013: 10 min	1971-2013: 10 min

Uit de beschikbare zeewaterstandsmetingen zijn rechte opzetten afgeleid als het verschil tussen zeewaterstand en astronomisch getij.

#### 3.4.2 Selectiemethode pieken stormopzet

Om het standaardverloop van de opzet te bepalen worden uit de opzetreksen uit Tabel 3.1 stormopzetten geselecteerd door middel van de Peaks-Over-Threshold methode (POT). Deze methode is gebruikelijk voor het selecteren van onafhankelijke pieken uit meetreeksen. Deze paragraaf beschrijft bondig de methode en de geselecteerde reeks opzetpieken.

Zoals gezegd worden er opzetten geselecteerd uit de opzetreksen door middel van de POT-methode. Voor deze POT-methode zijn een drempelwaarde en een zichtduur nodig. Deze zijn als volgt gedefinieerd.

Drempelwaarde is een ondergrens voor een gebeurtenis om als stormgebeurtenis geselecteerd te worden. De keuze van de drempelwaarde ligt vrij, maar van belang is om bij de keuze twee punten in gedachte te hebben:

1. Bij een erg hoge drempelwaarde zullen slechts weinig opzetten uit de datareeks geselecteerd worden waardoor geen representatief gemiddelde berekend kan worden.
2. Bij een erg lage drempelwaarde zullen relatief veel lage opzetten geselecteerd worden, die dan veel invloed hebben op de resulterende standaard vorm. Deze lage opzetten

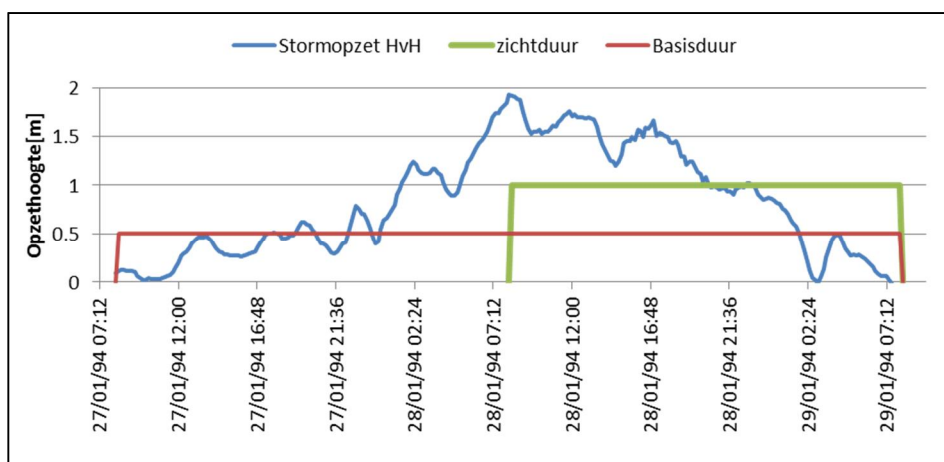
<sup>1</sup> Dit zijn dezelfde gegevens als gebruikt in Tijssen (2009).

hebben mogelijk een afwijkend fysisch gedrag van de meer relevante hoge opzetten, in welk geval ze ongewenst zijn in de analyse.

2. Bij een erg lage drempelwaarde zullen relatief veel lage golven geselecteerd worden, die dan veel invloed hebben op de resulterende standaardvorm. Deze lage golven hebben mogelijk een afwijkend fysisch gedrag van de meer relevante hoge golven, in welk geval ze ongewenst zijn in de analyse.

Zichtduur bepaalt ruwweg hoeveel tijd minimaal tussen twee toppen moet zitten voordat echt twee individuele toppen worden onderscheiden. De zichtduur is nodig om onafhankelijkheid te garanderen van opeenvolgende gebeurtenissen. De keuze van de zichtduur is vrij, maar daarbij gelden de volgende overwegingen:

1. Bij een zeer lange zichtduur resulteren slechts weinig golven voor de analyse.
2. Wordt de zichtduur te klein gekozen, dan kan een bepaalde top als individuele golf bestempeld worden, terwijl het plausibeler is deze te zien als onderdeel van een bredere golf. Het resultaat is een groot aantal korte golven die (ook statistisch gezien) feitelijk met elkaar samen hangen.



Figuur 3.2 Voorbeeld van zichtduur (24 uur) voor Hoek van Holland.

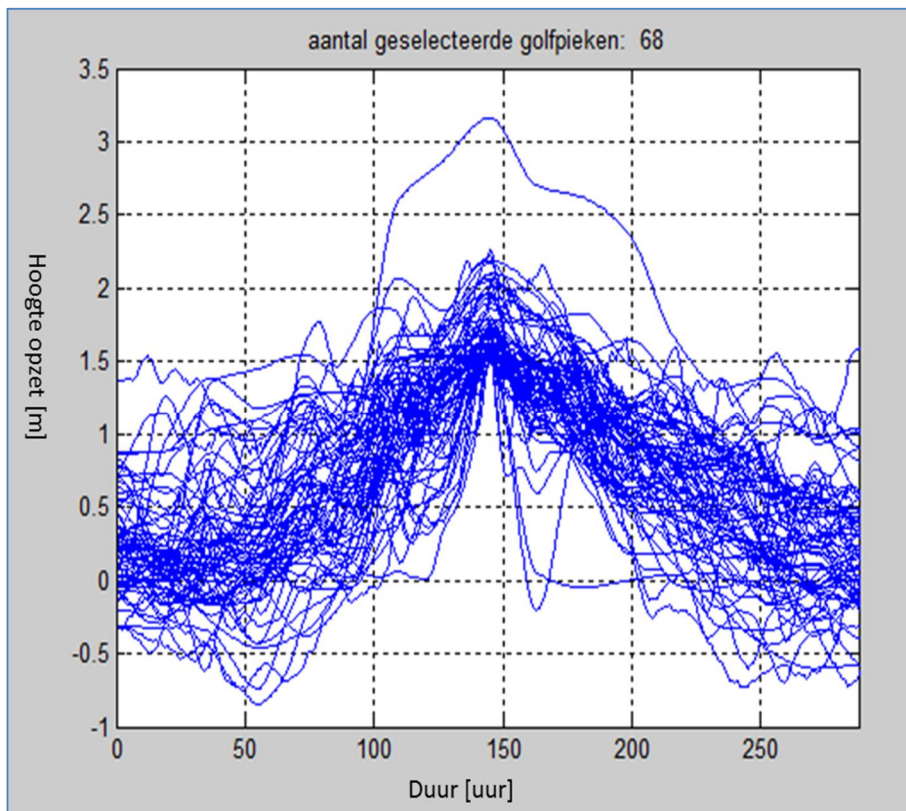
Tabel 3.2 Selectiecriteria en aantal geselecteerde stormopzetpieken

Locatie	Meetperiode	Drempelwaarde/ Zichtduur	Aantal geselecteerde opzetten
Vlissingen	1971 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	66
Hoek van Holland <sup>2</sup>	1939 t/m 2006	1,5 m / 24 uur	68
IJmuiden	1976 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	61
Den Helder	1971 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	62
Harlingen	1975 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	184
Lauwersoog	1979 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	124
Delfzijl	1971 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	222

Als voorbeeld geeft Figuur 3.3 de geselecteerde stormopzetten voor Hoek van Holland weer. Voor een drempelwaarde van 1,5 m en zichtduur van 24 uur zijn 68 stormopzetten geselecteerd. Het aantal geselecteerde pieken is vergelijkbaar voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust. De drempelwaarde van 1,5 m en de zichtduur van 24 uur resulteren voor de stations in de Waddenzee (Harlingen, Lauwersoog en Delfzijl) in relatief

<sup>2</sup> Dit zijn dezelfde gegevens als gebruikt in (Tijssen, 2009).

meer opzetpieken. Het aantal geselecteerde opzetpieken voor deze stations is ca. 3 keer hoger. Dit wordt verklaard door het feit dat in het noordelijke gedeelte relatief hogere zeewaterstanden optreden. Een gevoeligheid van drempelwaarde en zichtduur volgt in hoofdstuk 5.



Figuur 3.3 Geselecteerde stormopzetten voor Hoek van Hoek van Holland uit de 1971-2006 met een zichtduur van 24 uur en een drempelwaarde van 1.5 m (deze selectie komt overeen met die gebruikt in Tijssen (2009).

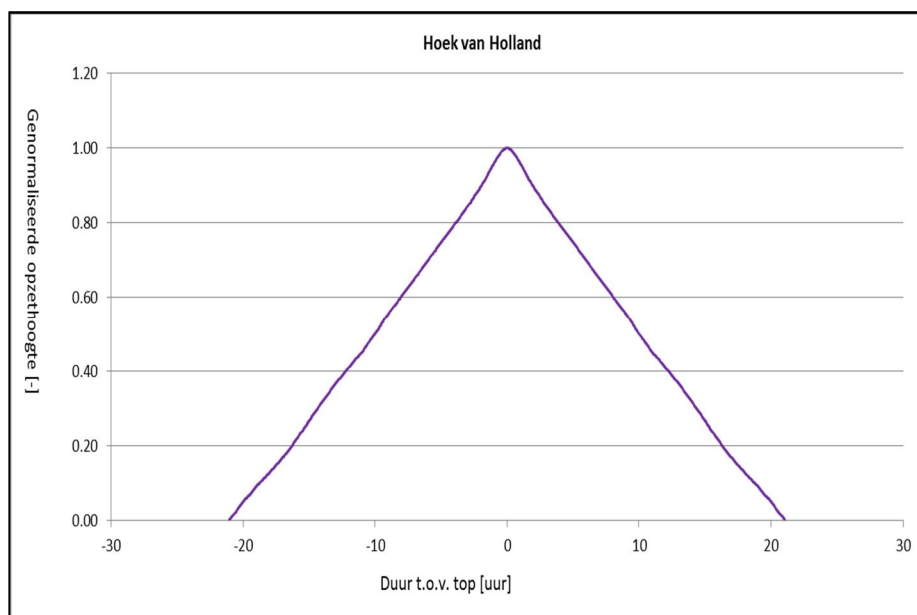
### 3.5 Opschalingsmethode

De opschalingsmethode kan worden gebruikt om op basis van verschillende tijdsverlopen, van de stormopzet bijvoorbeeld, een bijbehorende gemiddeld tijdsverloop te bepalen. De methode is ontwikkeld door RWS-RIZA en is onder ander toegepast in HR-2006 (RWS-RIZA, 2003) voor het bepalen van de standaardgolfvorm van de stormduur. Ook is de methode gebruikt voor de analyse van het tijdsverloop van de stormopzet bij Hoek van Holland (Tijssen, 2009). Een gedetailleerde beschrijving van de opschalingsmethode is te vinden in het rapport "Opschaling van afvoergolven en stormen" door Beijck en Geerse (2003) en "Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta" door Geerse (2004). In deze paragraaf geven we alleen een korte beschrijving van de methode en hoe die toegepast moet worden bij het analyseren en bepalen van tijdsverlopen van de stormopzet.

De opschalingsmethode kent een aantal stappen. De eerste stap van is het normaliseren van alle beschikbare en geselecteerde pieken van de stormopzet. Elke stormopzet krijgt door deze transformatie een piekwaarde van 1, inclusief bijbehorende tijdsverloop en dat maakt dat de stormopzetten direct onderling vergeleken kunnen worden. Het resultaat is derhalve een dimensieloze stormopzet gebeurtenis. Voor elke (herschaalde/genormaliseerde) storm kan nu op elk opzetniveau (tussen 0 en 1) de verschrijdingsduur bepaald worden. Middeling van deze overschrijdingsduren resulteert in een gemiddelde stormvorm, ook wel de



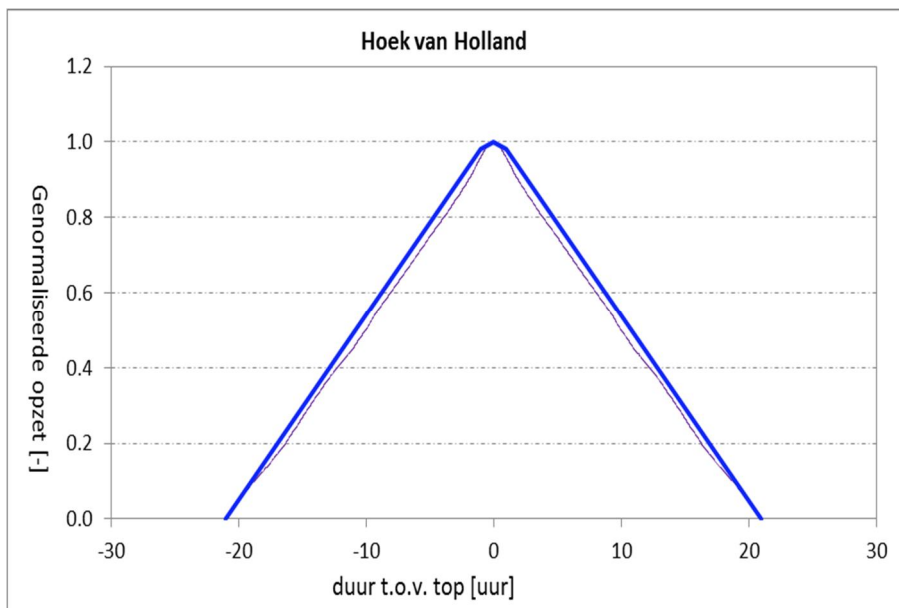
standaardvorm genoemd.. Ter illustratie: toepassen van de methode op de geselecteerde stormopzetten voor station Hoek van Holland, afgebeeld in Figuur 3.3, leidt tot een gemiddeld tijdsverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Gemiddeld tijdsverloop (genormaliseerd) bij Hoek van Holland resulterend uit opschalen van verlopen stormopzetten uit Figuur 3.3.

Naast de vorm kan op basis van het bepaalde tijdsverloop ook de basisduur afgelezen worden. Voor Hoek van Hoek van Holland resulteert de opschalingsmethode in een opzetduur van 42 uur in de basis. Dit getal komt overeen met de opzetduur uit Tijssen (2009). Naast de duur op de basis kan op basis van de opschalingsmethode de opzetduur op elk niveau worden bepaald. Het tijdsverloop uit Figuur 3.4 kan verder, afhankelijk van het beoogde doel en indien gewenst, nog vereenvoudigd worden door het tijdsverloop te benaderen door een gestandaardiseerde of geschematiseerd tijdsverloop, een trapezium bijvoorbeeld zoals afgebeeld in Figuur 3.5. De figuur laat zien dat het afgeleide tijdsverloop voor station Hoek van Holland vrij nauwkeurig benaderd kan worden een door trapeziumvorm van dezelfde basisduur als het afgeleide tijdsverloop. Een geschematiseerd tijdsverloop maakt het mogelijk om voor een willekeurige locatie het tijdsverloop te bepalen.

Opgemerkt wordt dat voor Hoek van Holland een beperkte analyse is uitgevoerd in onderhavige studie. De analyse en verkregen resultaten gelden enkel voor de vergelijking en check op reproduceerbaarheid van de resultaten uit WTI-2011.

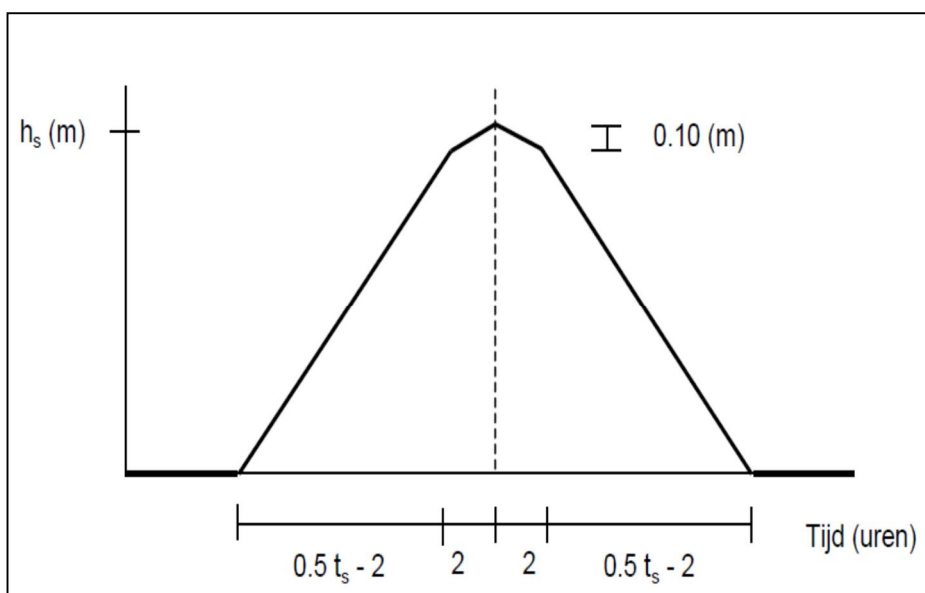


Figuur 3.5 Afgeleid (paars) en geschematiseerd (blauw), door middel van trapezium, tijdsverloop voor Hoek van Holland.

### 3.6 Analyse tijdsverloop stormopzet gekozen stations

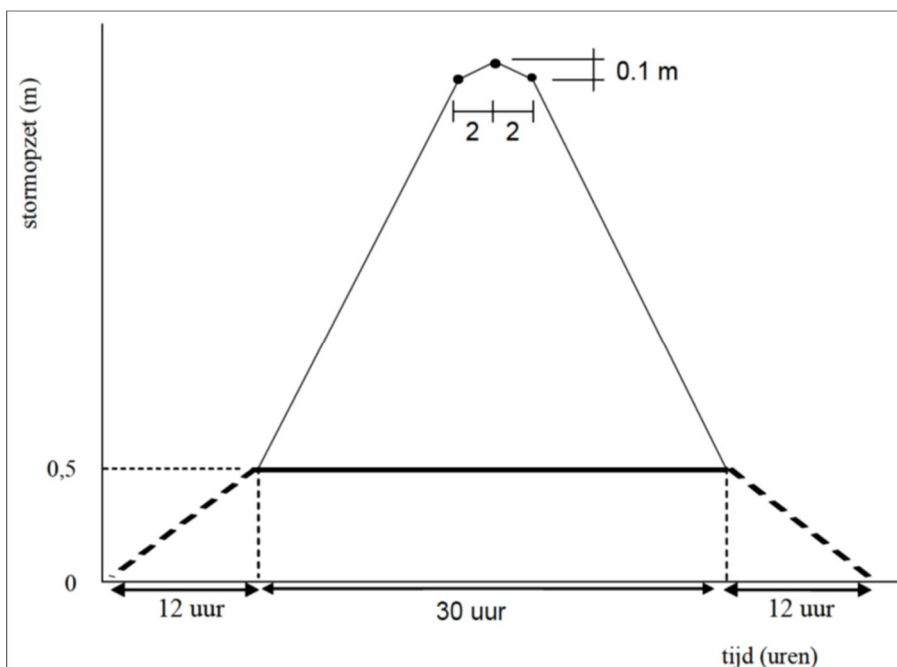
#### 3.6.1 Tijdsverloop stormopzet Hoek van Holland

Voor de productieberekeningen in het Benedenrivierengebied is een benedenrand bij Hoek van Holland nodig. Deze rand bestaat uit een stormopzet, het astronomisch getij en het faseverschil tussen deze twee grootheden (RWS, 2007). Het tijdsverloop van de stormopzet uit HR-2006 is trapeziumvormig en is afgebeeld in Figuur 3.6. Dit standaard verloop wordt gekarakteriseerd door twee parameters,  $h_s$  en  $t_s$ . Hierbij geeft  $h_s$  de hoogte van de stormopzet en  $t_s$  de basisduur ervan op het nulniveau. De basisduur bedraagt 29 uur en de topduur 4 uur. De stormopzet stijgt tijdens de topduur met 0,1 m, zie Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Standaard tijdsverloop stormopzet uit HR-2006.

In het kader van WTI-2011 is het verloop en duur van de stormopzet geactualiseerd, zie Tijssen (2010). Het geactualiseerde verloop bij Hoek van Holland is afgebeeld in Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Standaard verloop stormopzet uit WTI-2011.

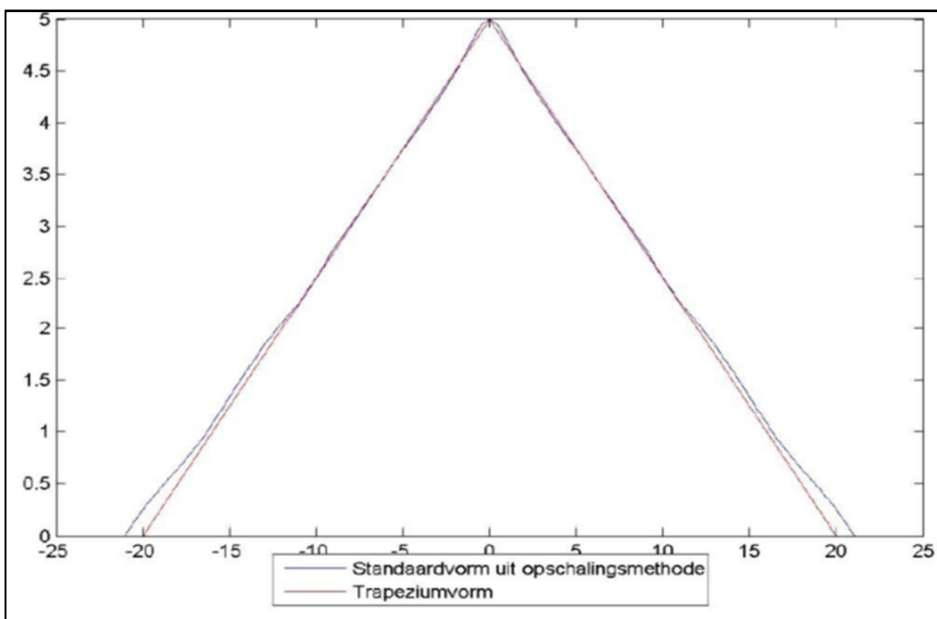
Op het 0,5 m niveau heeft de opzet een duur van 30 uur; de vorm van de opzet heeft vanaf dat niveau flanken van 12 uur naar het nul niveau. Opgemerkt wordt dat de vorm van het laagste gedeelte van de stormopzet minder relevant is dan het hoogste gedeelte. Dit is dan ook een van de redenen waarom de duur van de stormopzet op het half meter niveau is vastgesteld. De mogelijke effecten op de toetspeilen in het Benedenrivieren van de modellering van de aanloop van het nulniveau naar het 0,5 meter niveau zijn onderzocht in (Tijssen, 2010); deze blijken marginaal te zijn. Mede hierom is in WTI-2011 gekozen om de benedenrand te modelleren door een trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.7. Het tijdsverloop en de duur van de stormopzet uit Figuur 3.7 zijn afgeleid met de vertaalslagmethode<sup>3</sup>. Er is in het kader van WTI-2011 ook een opzetduur afgeleid met opschalingsmethode; het hiermee verkregen tijdsverloop is weergegeven in Figuur 3.8. Op basis van de geselecteerde stormopzet pieken gegeven in Tabel 3.2 is een analyse met opschalingsmethode opnieuw gemaakt voor Hoek van Holland. Het resultaat van deze analyse is reeds hierboven weergegeven, zie Figuur 3.4. Voor de overzichtelijkheid wordt dit tijdsverloop, samen met de schematisatie door middel van een trapezium met overeenkomstige basisduur, wederom gepresenteerd in Figuur 3.9.

Het tijdsverloop van de stormopzet zoals afgebeeld in Figuur 3.9 is, op normalisatie na, identiek aan het tijdsverloop in Figuur 3.8. Dit betekent dat het berekeningsresultaat met opschalingsmethode uit Tijssen (2009) volledig reproduceerbaar is. Zoals hierboven al gemeld laat Figuur 3.9 verder zien dat het afgeleide tijdsverloop voor Hoek van Holland vrij nauwkeurig beschreven kan worden door een trapezium met basisduur gelijk aan de duur

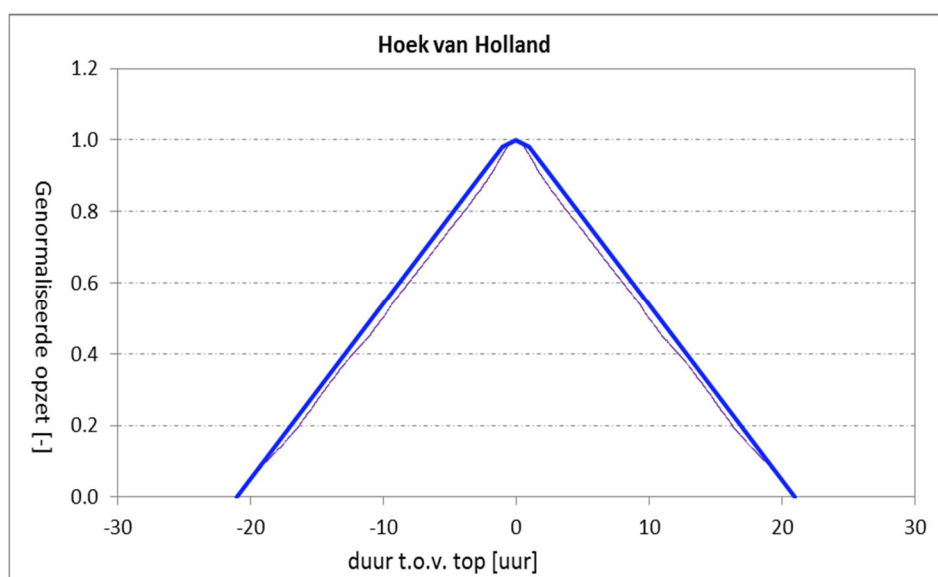
<sup>3</sup> De vertaalslagmethode is een methode waarbij voor elke storm de opzetduur op het niveau van 0,5 m opzet wordt bepaald. Vervolgens wordt de stormopzetduur op het nulniveau afgeleid door middel van extrapolatie van de opzetduur op het niveau van 0,5 m opzet en de (vooraf) aangenomen opzetvorm, een trapezium in dit geval; details zijn te vinden in Tijssen (2009).

van het verkregen tijdsverloop. De totale topduur van het trapezium is gelijk aan 2 uur en heeft dezelfde vorm als afgebeeld in Figuur 3.7. Figuur 3.10 laat zien dat een trapezium met topduur van 4 uur het afgeleide tijdsverloop van de stormopzet minder nauwkeurig beschrijft dan een trapezium met topduur van 2 uur. Vooral het gedeelte rondom de top van de opzet wordt overschat.

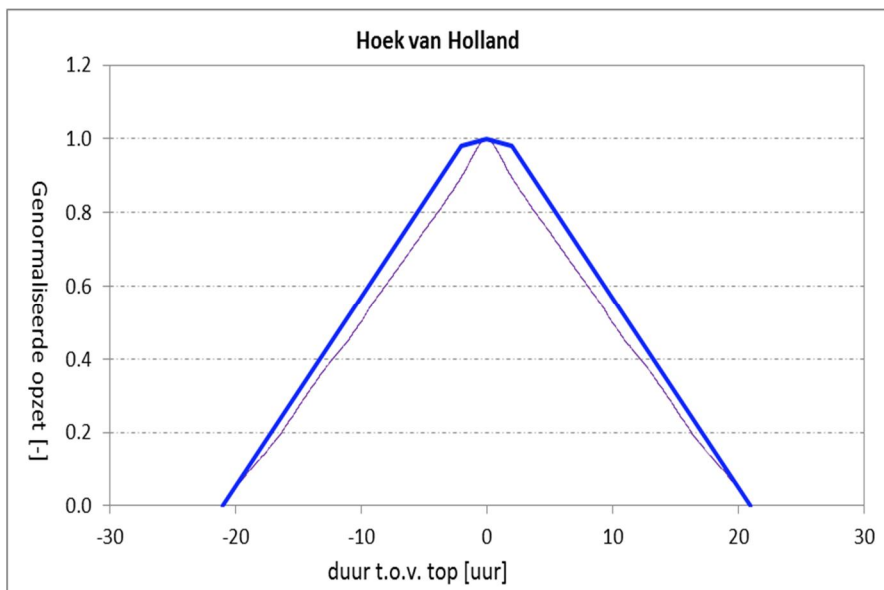
De basisduur van het toegepaste trapezium bedraagt 42 uur en deze komt goed overeen met het resultaat uit (Tijssen, 2009).



Figuur 3.8 Stormopzetverloop afgeleid met opschalingsmethode (Tijssen, 2009).



Figuur 3.9 Standaard opzetverloop voor Hoek van Holland op basis van geselecteerde opzetpieken uit 1971-2006. Standaard verloop opschalingsmethode (paars) en schematisatie met trapezium met topduur 2 uur (blauw).

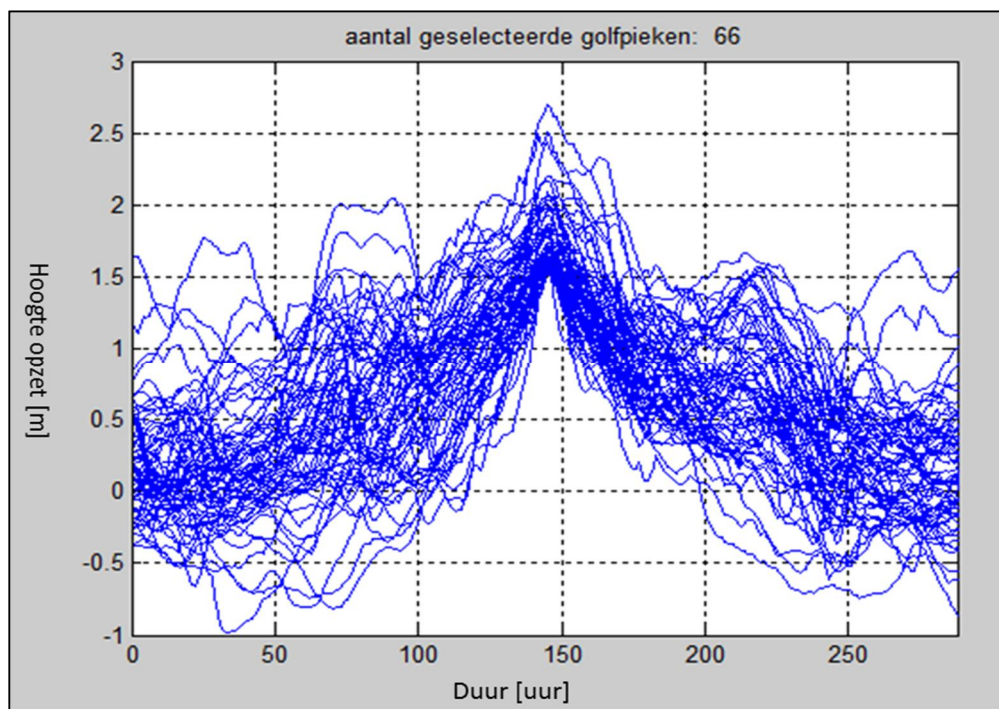


Figuur 3.10 Standaard tijdsverloop stormopzet bij Hoek van Holland op basis van geselecteerde opzetpieken uit 1971-2006. Standaard verloop opschalingsmethode (paars) en schematisatie met trapezium met topduur 4 uur (blauw).

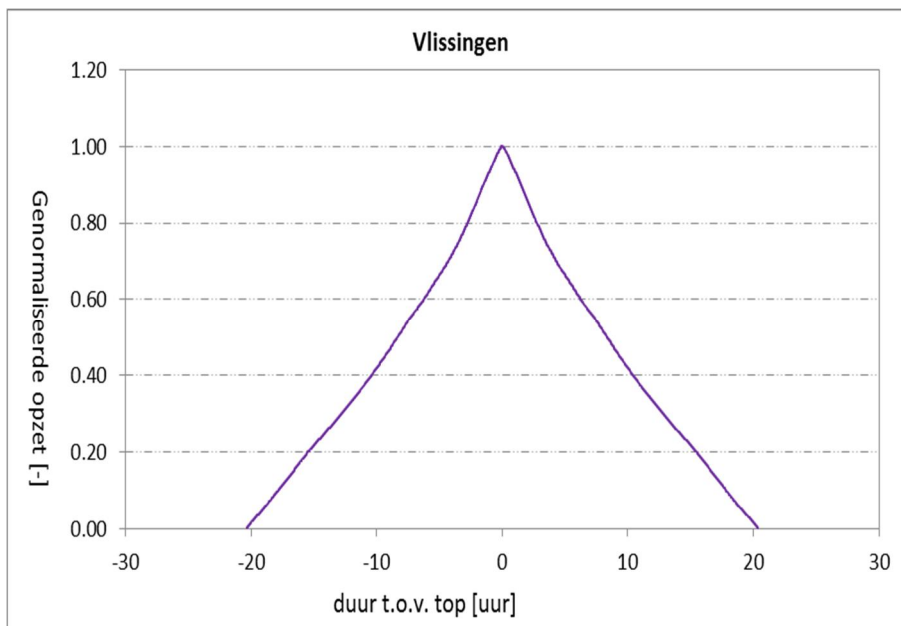
### 3.6.2 Analyse tijdsverloop stormopzet Vlissingen

Op basis van geselecteerde stormopzetten bij Vlissingen zoals beschreven in

Tabel 3.2 en analoog aan de analyse voor Hoek van Holland is het standaard tijdsverloop bepaald. De geselecteerde stormopzetten, 66 in totaal, zijn weergegeven in Figuur 3.11. Het verkregen tijdsverloop na normalisatie is weergegeven in Figuur 3.12. De basisduur van het afgeleide tijdsverloop is 41 uur.

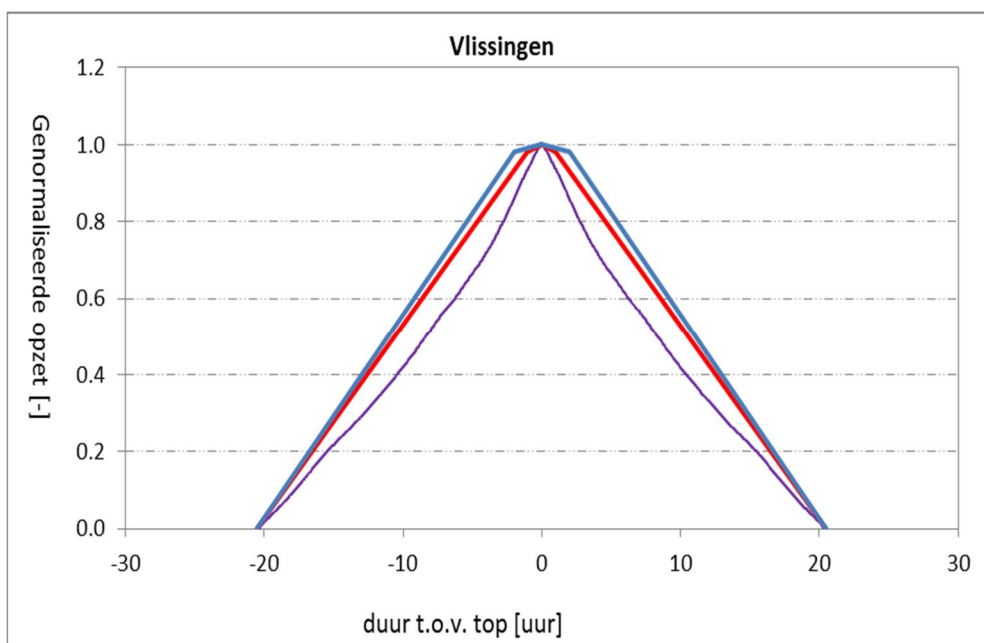


Figuur 3.11 Geselecteerde stormopzetten voor de station Vlissingen voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur.



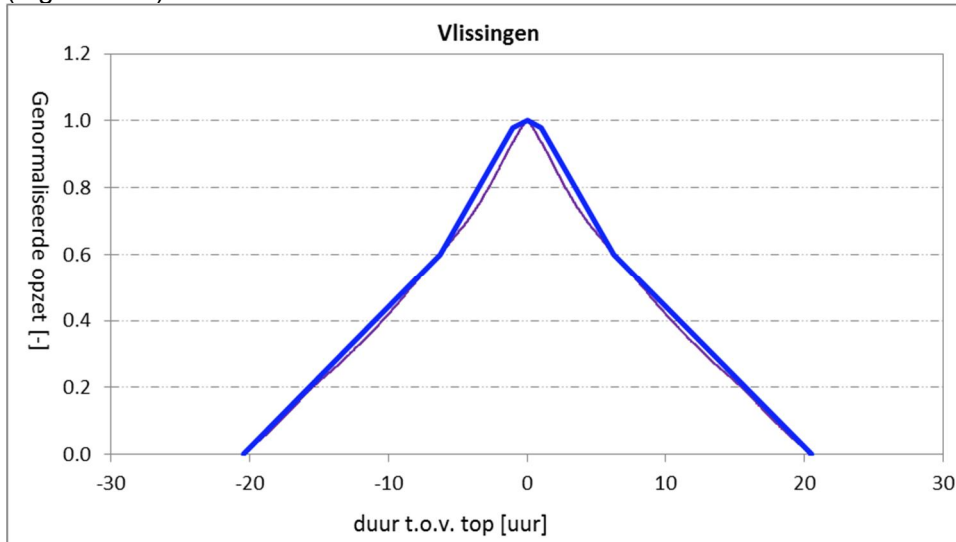
Figuur 3.12 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) bij station Vlissingen op basis op geselecteerde opzetpieken uit 1971-2013.

Het waterstandsverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.12 kan benaderd worden door een trapeziumvorm met basisduur gelijk aan de basisduur van het afgeleide standaardverloop. De topduur heeft dezelfde vorm als afgebeeld in Figuur 3.7. Hierbij zijn 2 topduren gebruikt: een topduur van 2 uur (blauwe schematisatie) en een topduur van 4 uur (rode schematisatie). De figuur laat zien dat beide schematisaties het standaard tijdsverloop overschatten. Vooral het bovenste gedeelte van de schematisaties is te breed ten opzichte van het afgeleide verloop.



Figuur 3.13 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Vlissingen: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (blauw) en trapezium met topduur van 4 uur (rood).

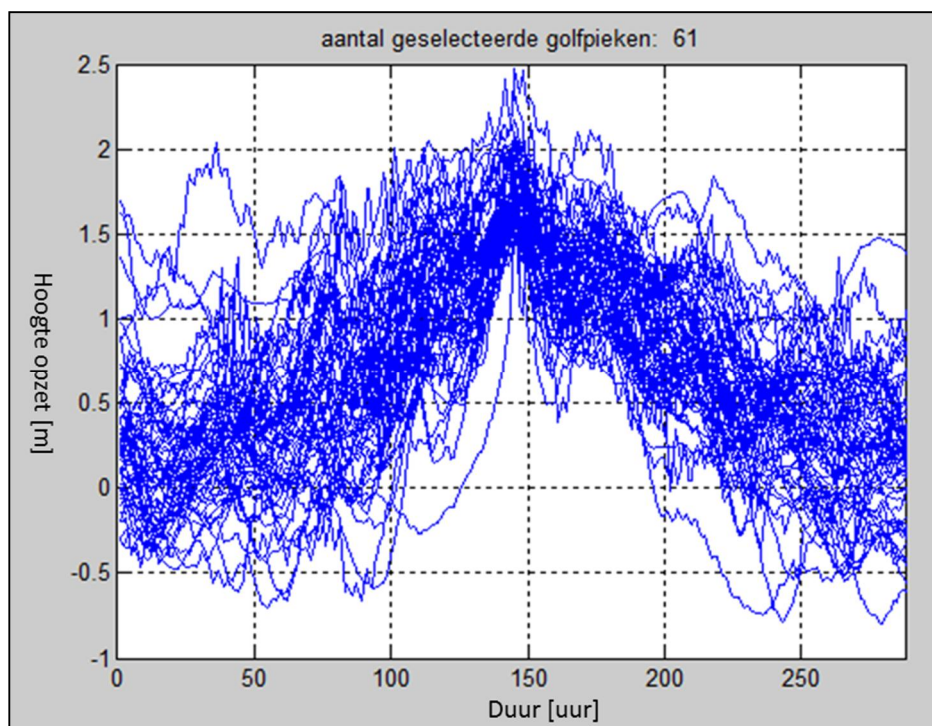
Om die reden is een extra schematisatie uitgevoerd die het afgeleide verloop beter benadert (Figuur 3.13).



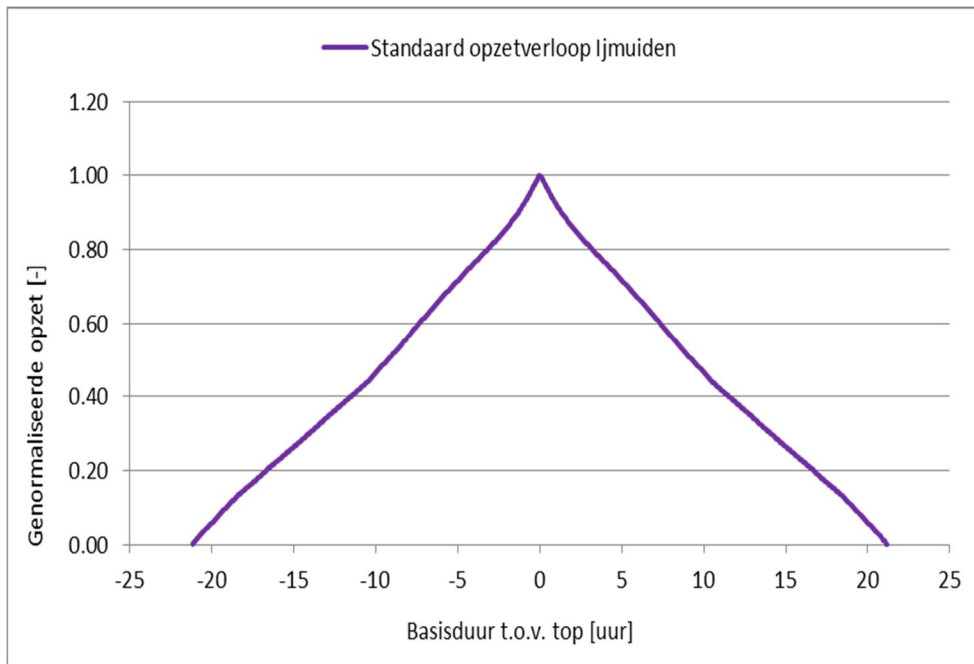
Figuur 3.14 Modellerings van de stormopzet bij Vlissingen door een afgeknotten trapezium op het niveau van 0,6 m; basisduur = 41 uur.

### 3.6.3 Analyse tijdsverloop stormopzet IJmuiden

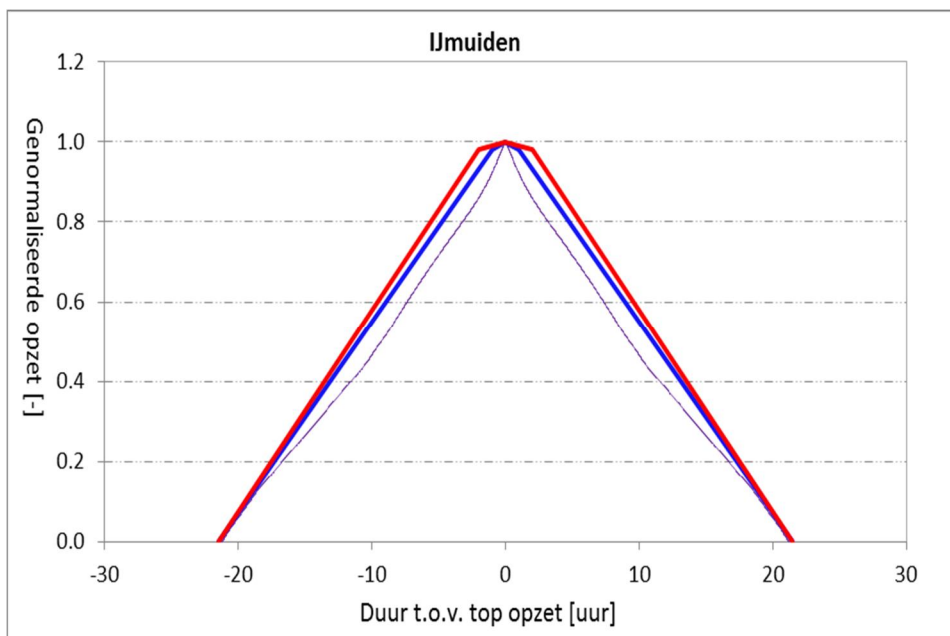
Analoog aan Vlissingen is op basis van geselecteerde stormopzetten voor de locatie IJmuiden, zoals beschreven in Tabel 3.2, een analyse uitgevoerd en het tijdsverloop van de opzet bepaald. De geselecteerde stormopzetten, 61 in totaal, zijn weergegeven in Figuur 3.15. Het standaard/gemiddelde verloop na normalisatie is weergegeven in Figuur 3.16. De basisduur van het afgeleide tijdsverloop is 43 uur.



Figuur 3.15 Geselecteerde stormopzetten voor het station IJmuiden voor een drempelwaarde van 1,5 m en zichtduur 24 uur.



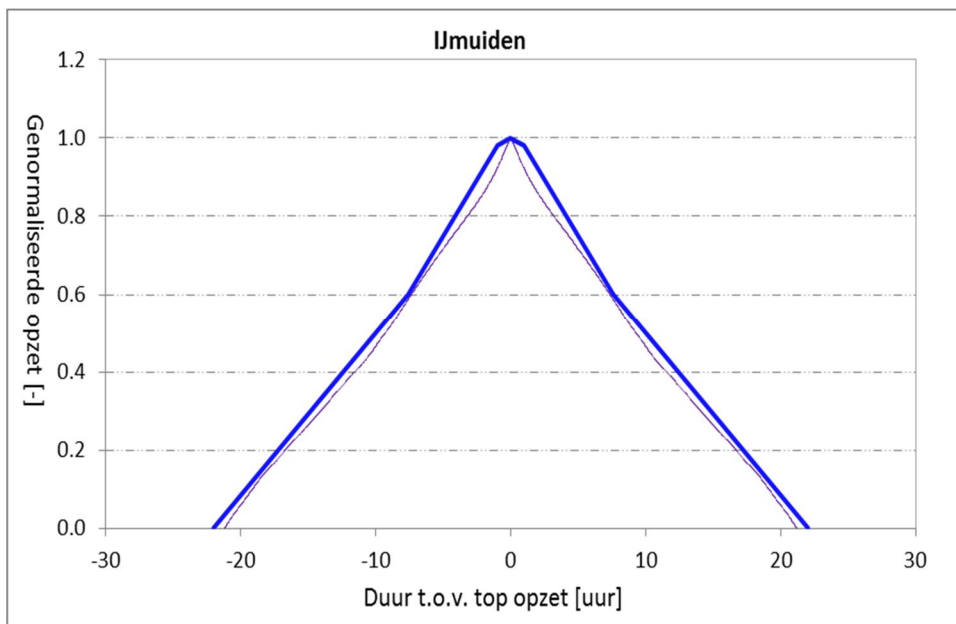
Figuur 3.16 Standaard opzetverloop station IJmuiden (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.15).



Figuur 3.17 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor IJmuiden: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (blauw).

Ook voor IJmuiden is een aangepast (geknipt) trapezium gebruikt voor een betere schematisatie van de stormopzet (Figuur 3.17).

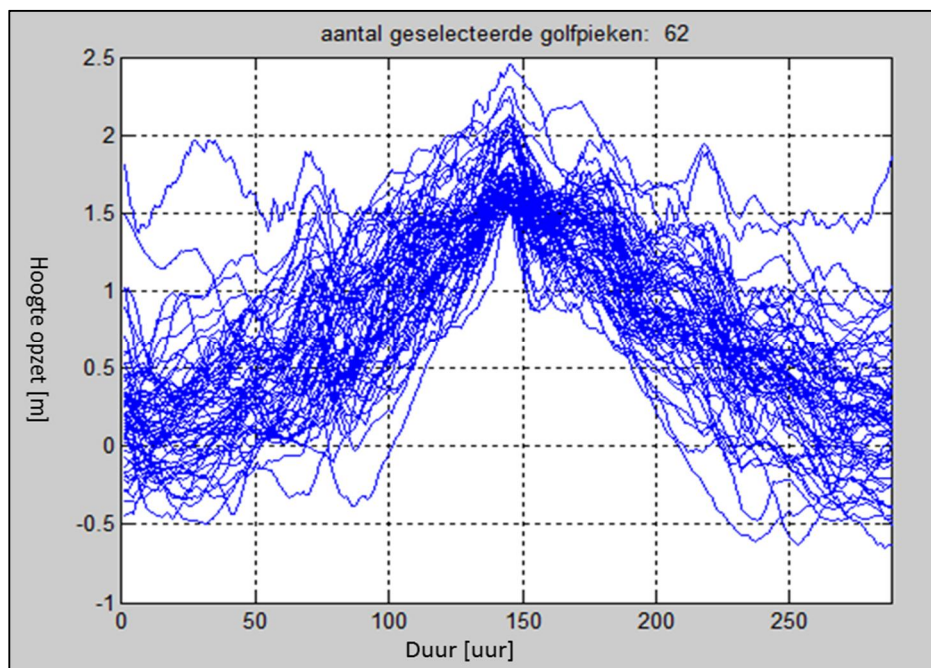




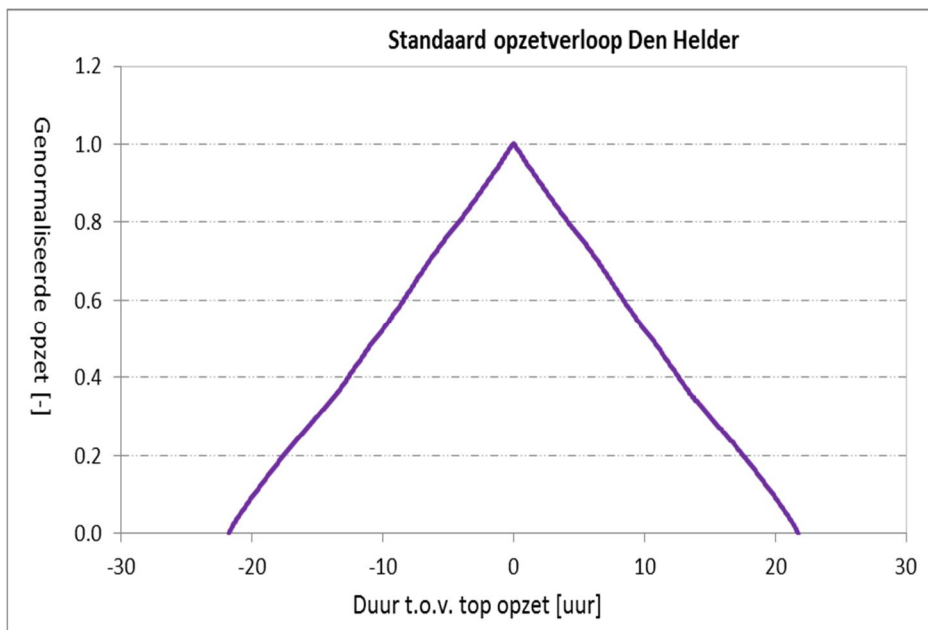
Figuur 3.18 Standaard tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met geknikt trapezium voor locatie Ijmuiden. Knik op het niveau van 0.6 m.

#### 3.6.4 Analyse tijdsverloop stormopzet Den Helder

Analoog aan Vlissingen is op basis van de geselecteerde stormopzetten voor de locatie den Helder zoals beschreven in Figuur 3.19 een analyse uitgevoerd en het standaardverloop van de opzet bepaald. De geselecteerde stormopzetten, 62 in totaal, zijn weergegeven in Figuur 3.19. Het standaard/gemiddelde verloop na normalisatie is weergegeven in Figuur 3.20. De basisduur van het afgeleide tijdsverloop is 44 uur.

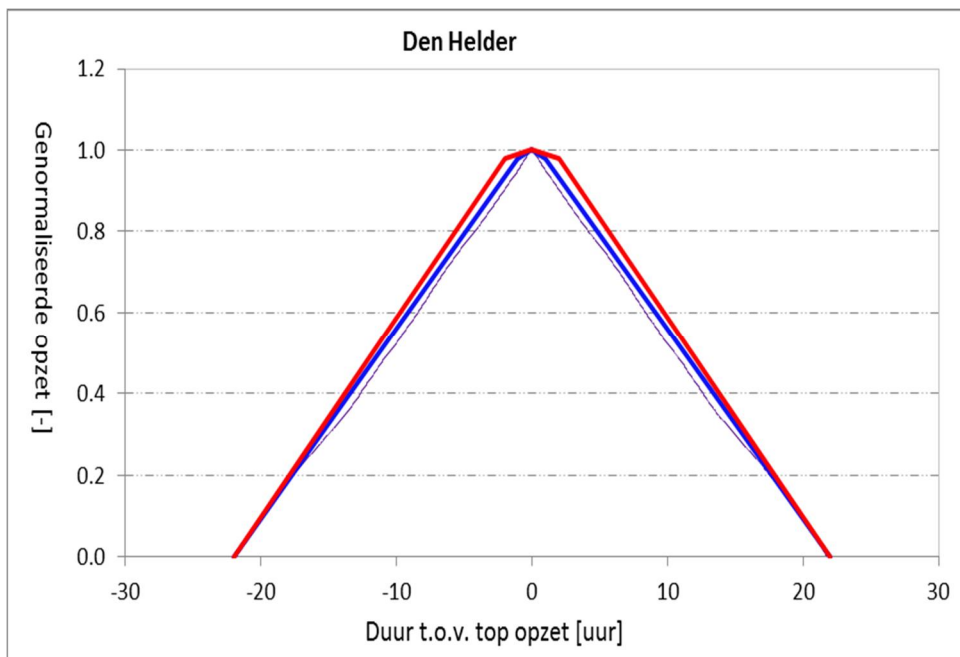


Figuur 3.19 Geselecteerde stormopzetten voor het station Den Helder voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur.



Figuur 3.20 Standaard opzetverloop station Den Helder (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.19).

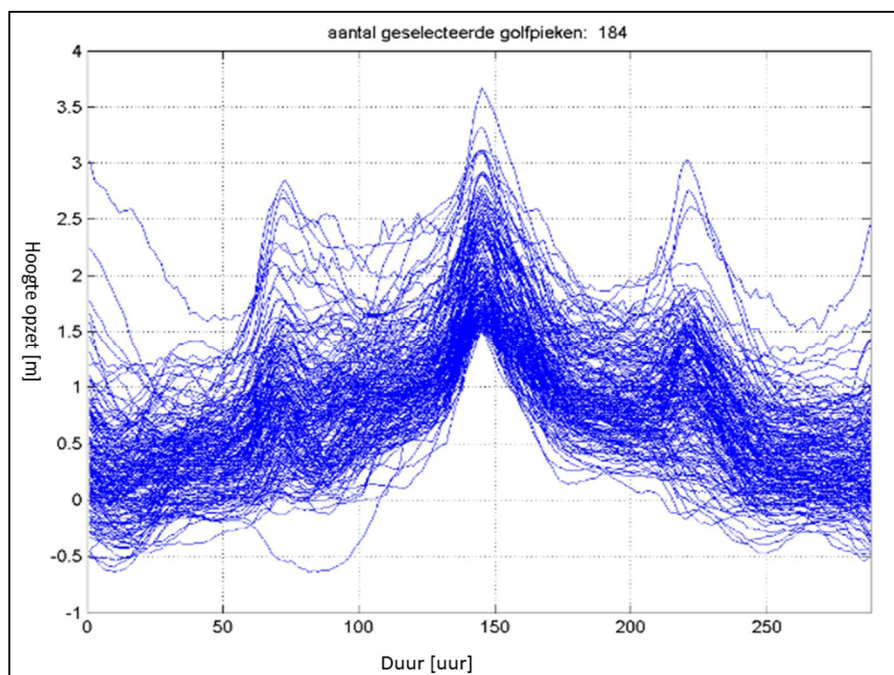
Het afgeleide tijdsverloop voor Den helder, afgebeeld in Figuur 3.20, kan zoals Figuur 3.21 laat zien goed benaderd worden door een trapeziumvorm van een gelijke duur van 44 uur in de basis en 2 uur in de top. De figuur laat ook zien dat een trapeziumvorm met topduur van 4 uur minder goed overeenkomt.



Figuur 3.21 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Den Helder: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (blauw) en trapezium met topduur van 4 uur (rood).

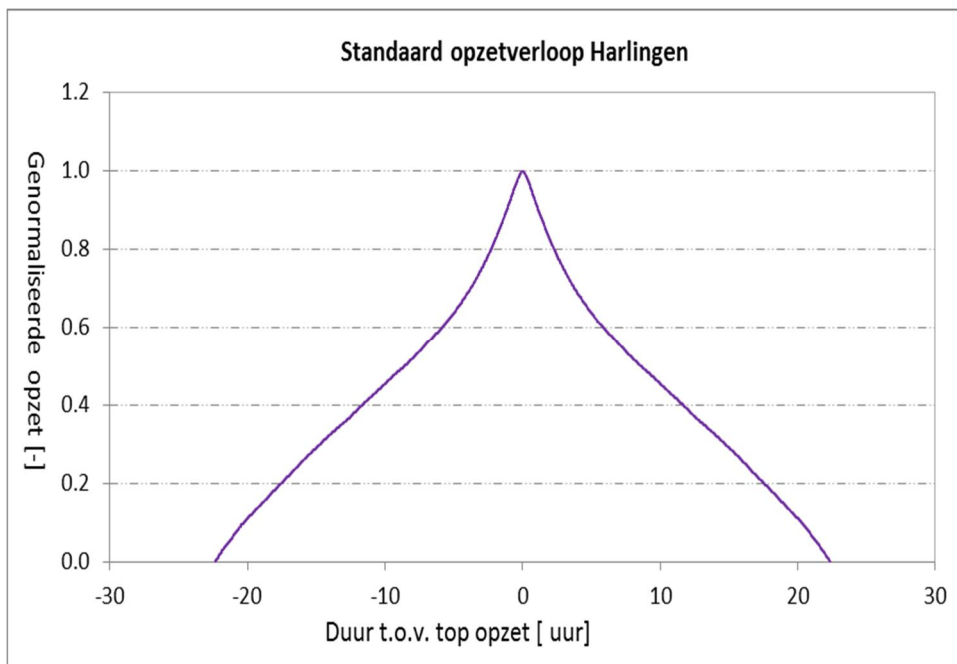
### 3.6.5 Analyse tijdsverloop stormopzet Harlingen

De geselecteerde stormopzetten voor de locatie Harlingen, 184 in totaal, zijn weergegeven in Figuur 3.22. Deze opzetopverlopen zijn verder geanalyseerd met de opschalingsmethode; het hiermee verkregen genormaliseerde opzetverloop is weergegeven in Figuur 3.23.

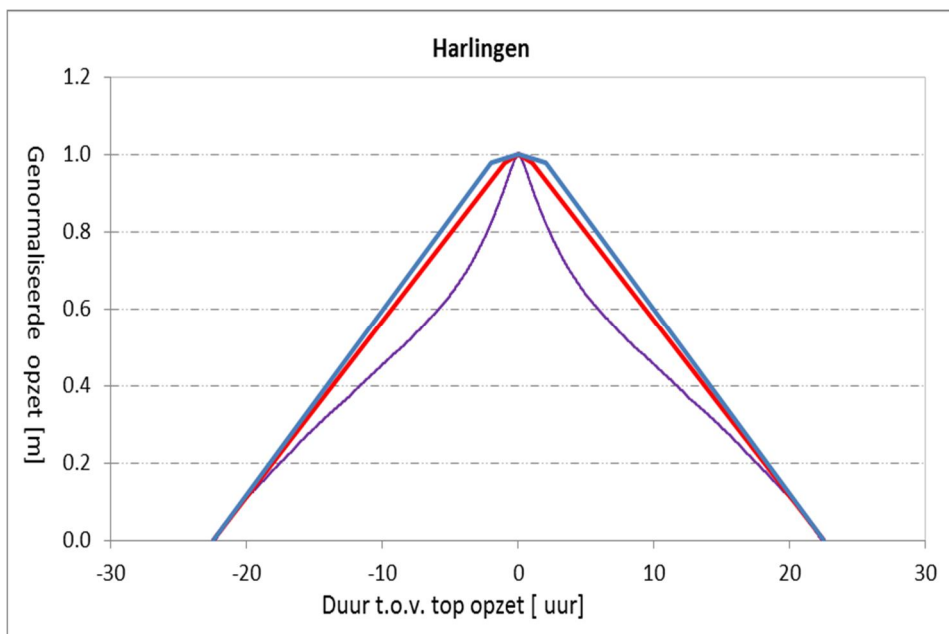


Figuur 3.22 Geselecteerde stormopzetten voor het station Harlingen voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur.

Figuur 3.23 laat zien dat het tijdsverloop van de stormopzet niet uniform is; het bovenste gedeelte van de stormopzet is relatief smal en spits dan het onderste, dat veel breder is. Het afgeleide tijdsverloop voor Harlingen heeft een basisduur van 45 uur. Een geschematiseerd trapezium met gelijke basisduur en verschillende topduur, van 4 uur en 2 uur, is samen met afgeleid tijdsverloop weergegeven Figuur 3.24. De figuur laat zien dat de beschouwde trapezia het bovenste gedeelte van het afgeleide tijdsverloop minder goed benaderen. Er is sprake van een overschatting.

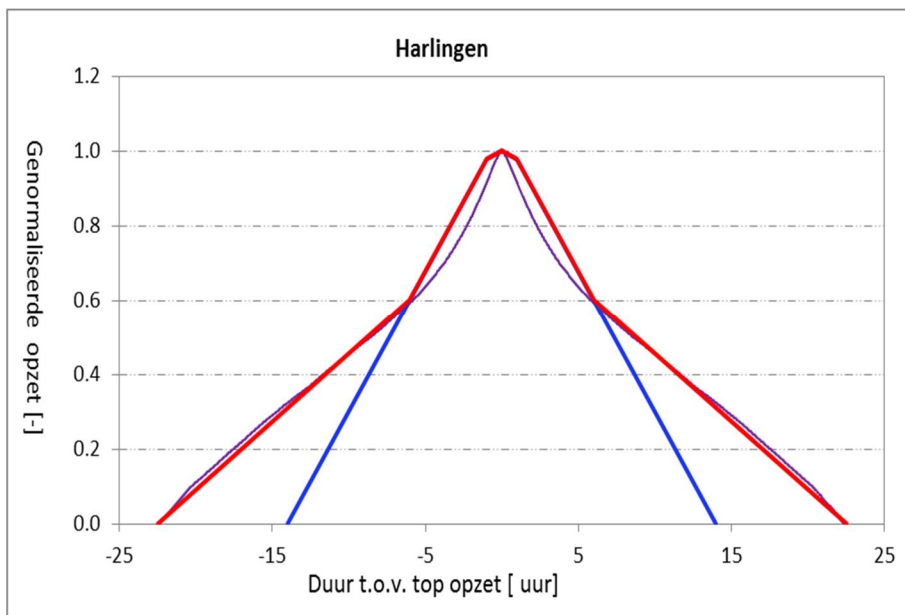


Figuur 3.23 Standaard opzetverloop station Harlingen (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.22).



Figuur 3.24 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Harlingen: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (blauw).

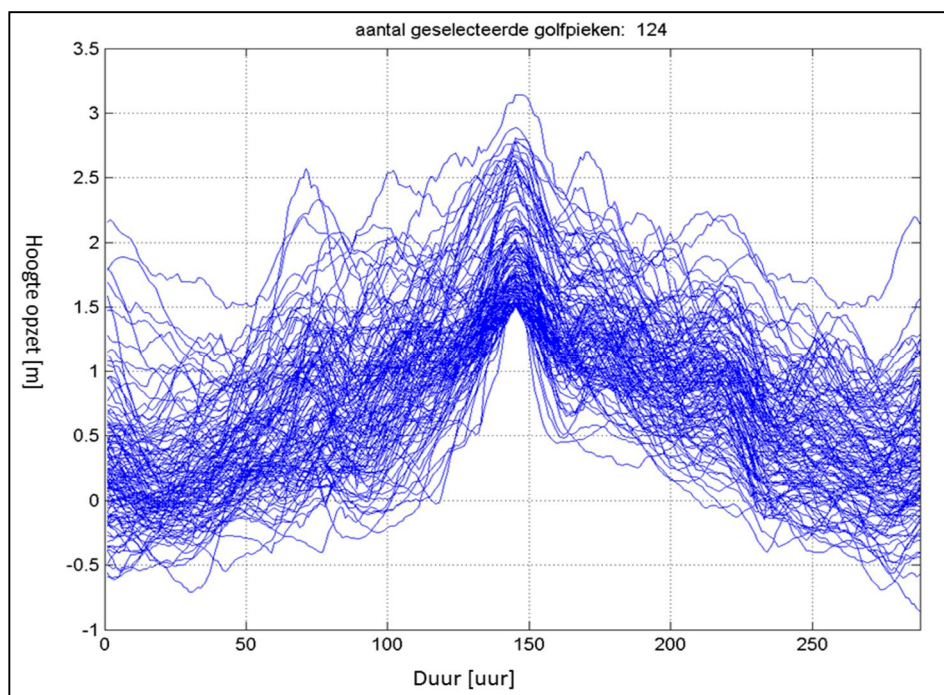
Het afgeleide tijdsverloop van de stormopzet bij Harlingen laat zich beter benaderen door een geknikt trapezium (Figuur 3.25). Het bovenste gedeelte van het tijdsverloop kan goed benaderd worden door een standaard trapezium met 24 uur in de basis. Dit trapezium onderschat echter het lage gedeelte behoorlijk.



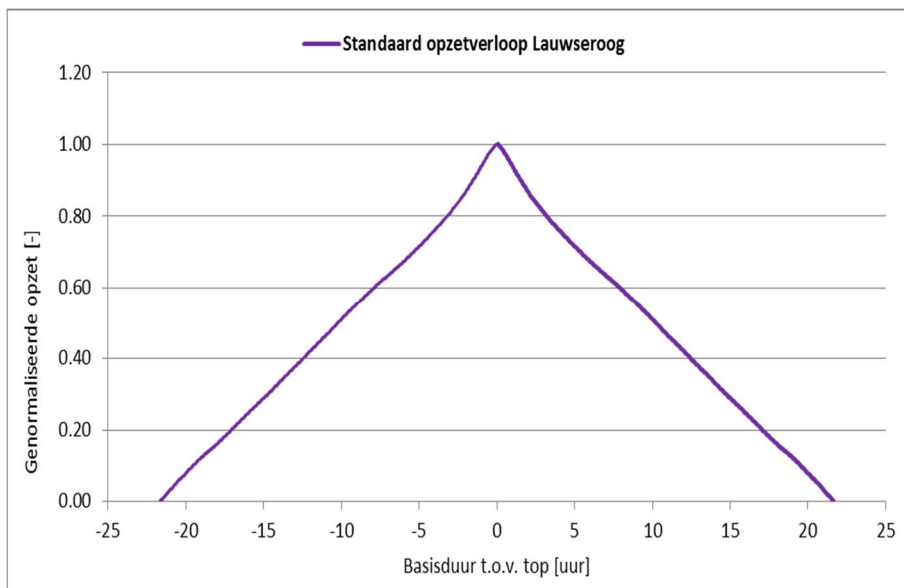
Figuur 3.25 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met geknikt trapezium (rood) voor locatie Harlingen. Knik ligt op het niveau van 0.6 m.

### 3.6.6 Analyse tijdsverloop stormopzet Lauwersoog

Het aantal geselecteerde stormopzetten voor station Lauwersoog voor een zichtduur van 24 uur en drempelwaarde van 1,5 m bedraagt 122. De bijbehorende opzetverlopen zijn weergegeven in Figuur 3.26. Het hieruit voortvloeiende gemiddelde tijdsverloop, na normalisatie, is weergegeven in Figuur 3.27. De basisduur van het afgeleide tijdsverloop is 44 uur.

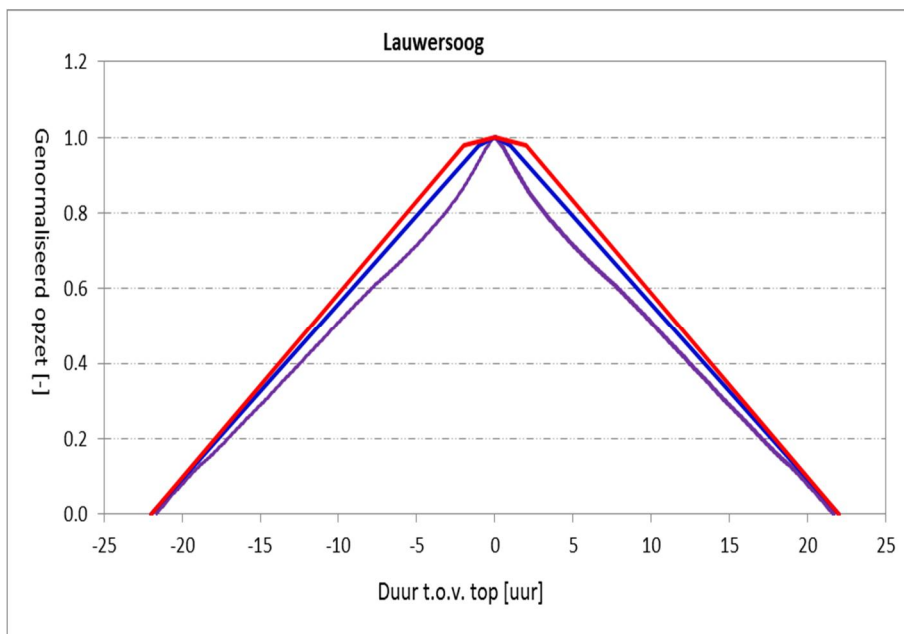


Figuur 3.26 Geselecteerde stormopzetten voor het station Lauwersoog voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur.

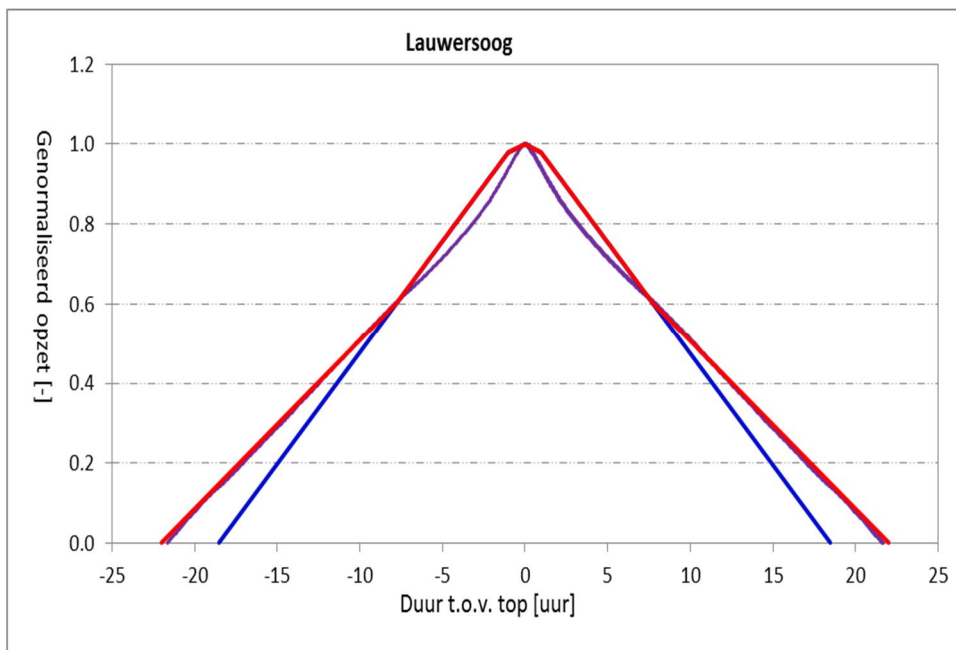


Figuur 3.27 Standaard opzetverloop station Lauwersoog (genormaliseerd gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.26).

Een benadering door een trapezium met topduur van 2 uur dan wel 4 uur is afgebeeld in Figuur 3.28. Een trapezium met topduur van 2 uur fit beter dan dat van 4 uur. Figuur 3.29 laat verder zien dat een geknikt trapezium in een enigszins betere benadering resulteert. Ook een trapezium met een basisduur van 36 uur benadert het bovenste gedeelte goed; het onderste gedeelte wordt echter hierdoor onderschat, zie Figuur 3.29.



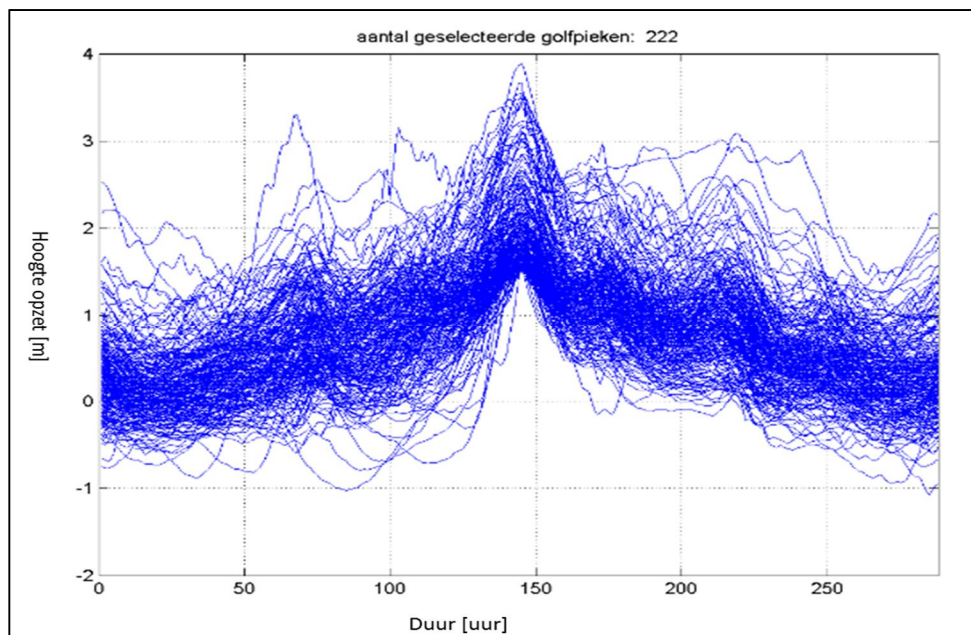
Figuur 3.28 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Lauwersoog: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (blauw).



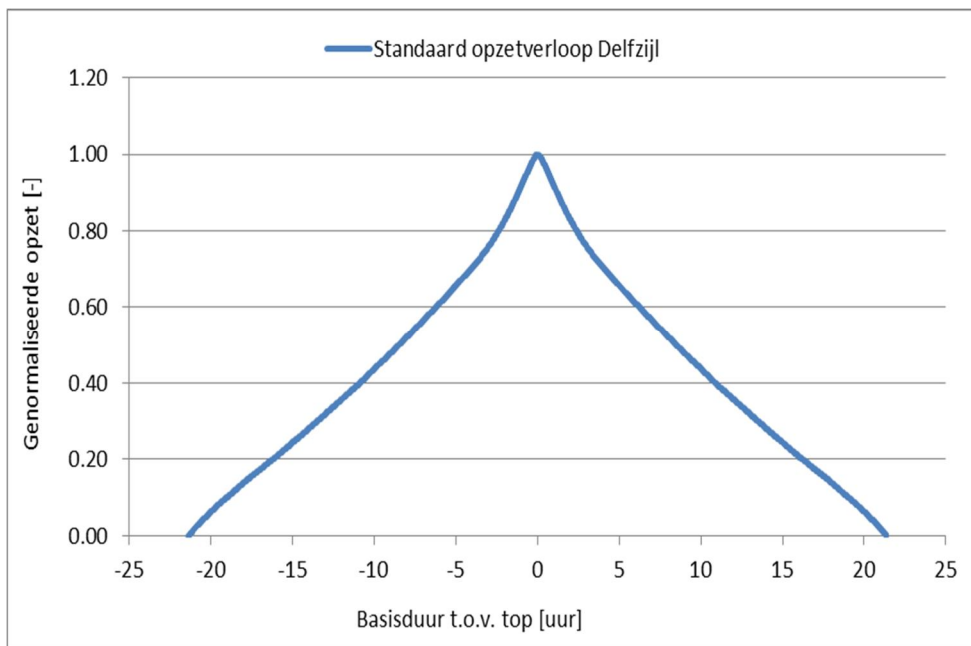
Figuur 3.29 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met geknikt trapezium (blauw) voor locatie Lauwersoog. Knik ligt op het niveau van 0.6 m.

### 3.6.7 Analyse stormopzet Delfzijl

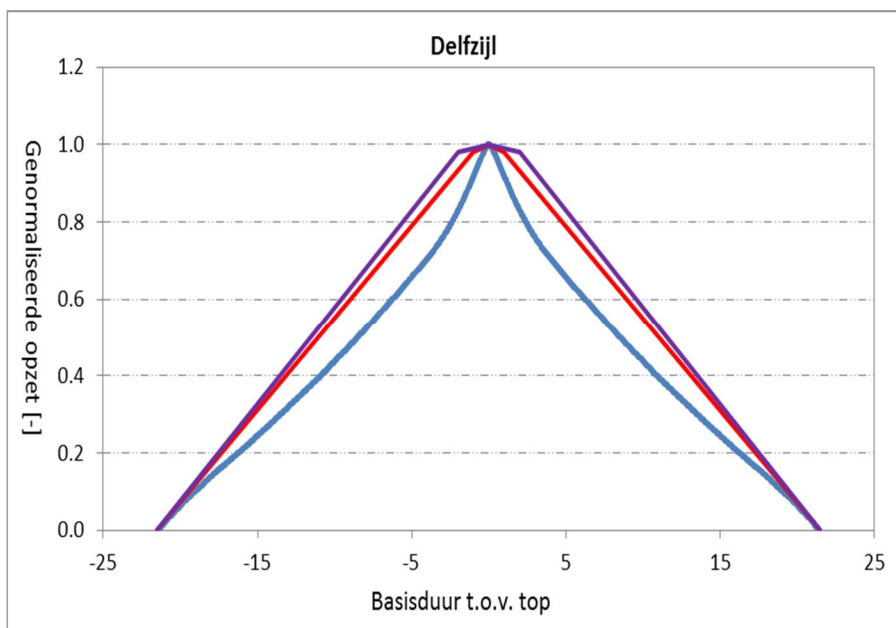
Figuur 3.30 beschrijft de geselecteerde stormopzetten voor het station Delfzijl. De POT-methode resulteert voor een zichtduur van 24 uur en een drempelwaarde van 1.5 m in 222 stormopzetpieken; deze zijn weergegeven in Figuur 3.30. Het standaard tijdsverloop van de stormopzet dat hieruit volgt is afgebeeld in Figuur 3.31. De basisduur van het afgeleide tijdsverloop van de stormopzet is 43 uur.



Figuur 3.30 Geselecteerde stormopzetten voor het station Delfzijl voor een drempelwaarde van 1.5 m en zichtduur 24 uur.



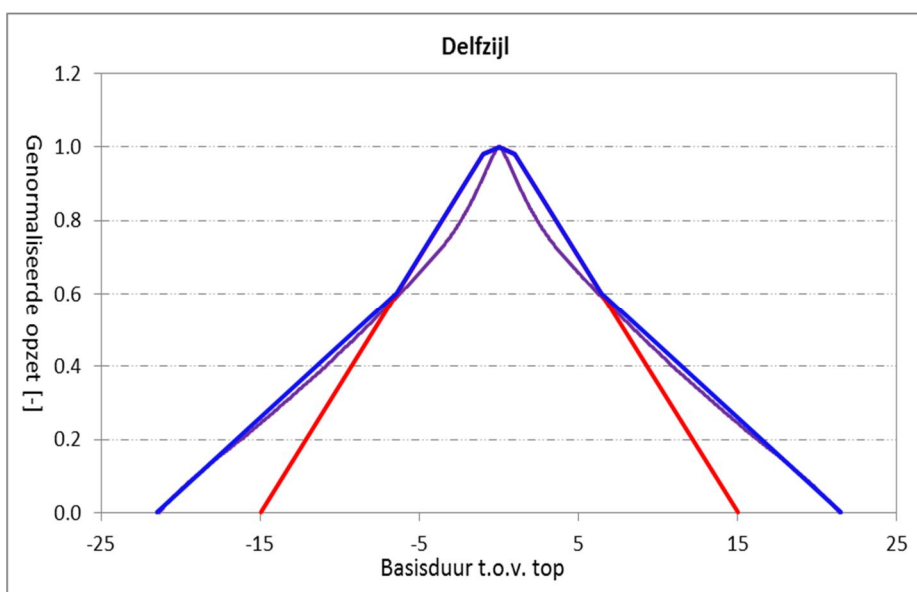
Figuur 3.31 Standaard opzetverloop station Delfzijl (genormaliseerd) gemiddeld verloop op basis van geselecteerde opzetten in Figuur 3.30.



Figuur 3.32 Standaard opzetverloop (genormaliseerd) en geschematiseerd verloop voor Delfzijl: Trapezium met topduur gelijk aan 2 uur (rood) en trapezium met topduur van 4 uur (paars).

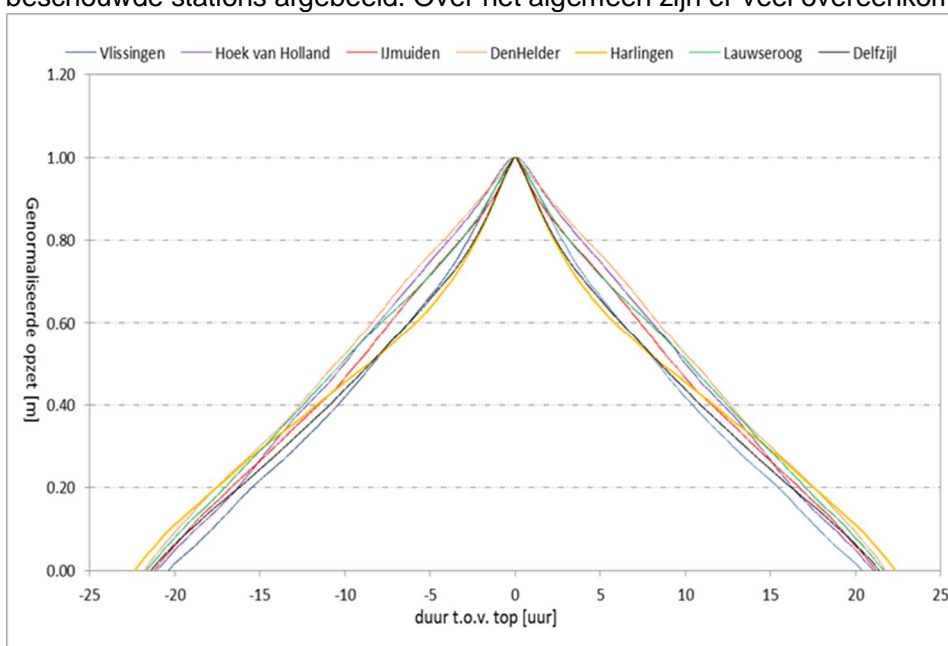
Een benadering door een trapezium met topduur van 2 uur c.q. topduur van 4 uur is afgebeeld in Figuur 3.32. Een trapezium met topduur van 2 uur fit beter dan dat van 4 uur. Figuur 3.33 laat verder zien dat een geknikt trapezium tot een duidelijk betere benadering leidt. Ook een trapezium zonder knik (met een basisduur van 36 uur) benadert het bovenste gedeelte vrij goed.





Figuur 3.33 Standaard tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop met trapezium (rood) en geknikt trapezium (blauw) voor locatie Delfzijl met eenknik ligt op het niveau van 0.6.

Als samenvatting zijn in Figuur 3.34 de afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet voor alle beschouwde stations afgebeeld. Over het algemeen zijn er veel overeenkomsten.

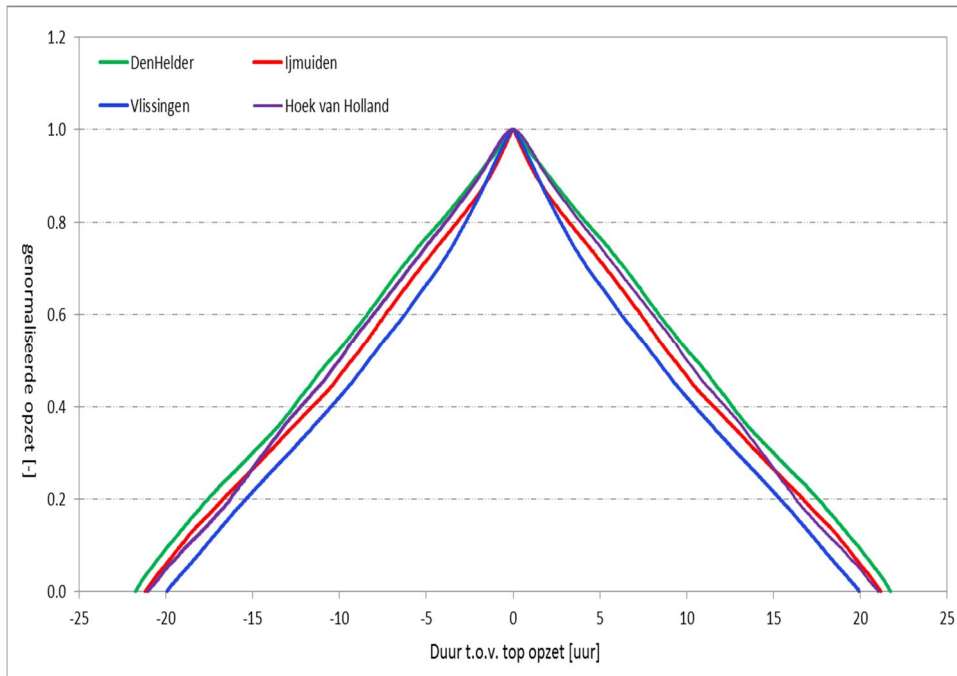


Figuur 3.34 Afgeleide tijdsverlopen stormopzet bij alle 7 beschouwde stations: Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl.

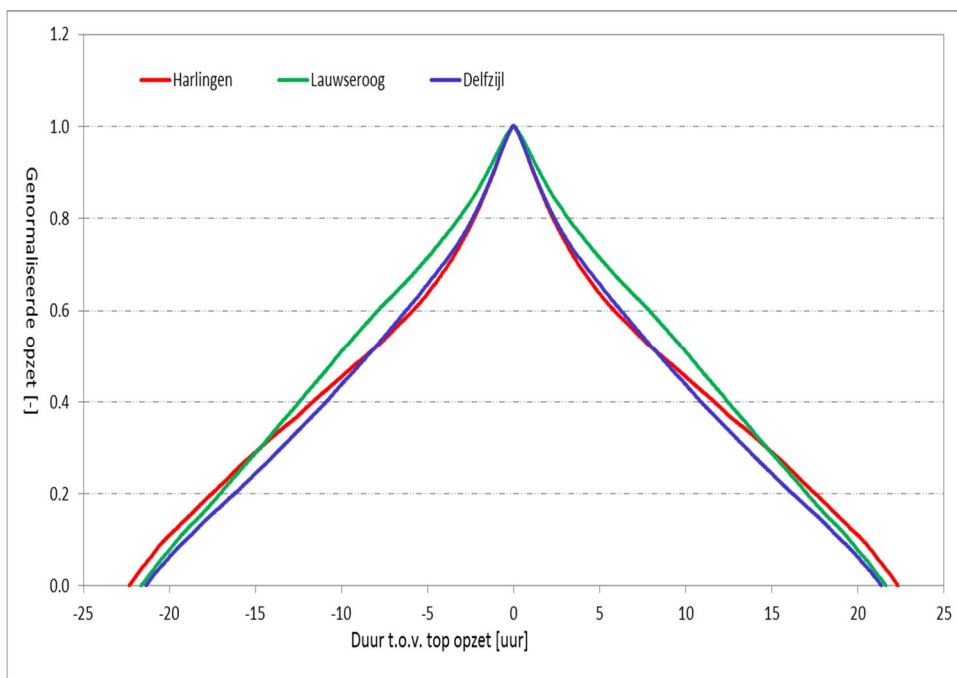
### 3.7 Nadere analyse, samenvatting en (voorlopige) conclusies

De afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust (Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden en Den Helder) zijn afgebeeld in Figuur 3.35. Duidelijk is te zien dat het tijdsverloop bij Vlissingen (blauw) smaller is dan het tijdsverloop bij Den Helder (groen). Het tijdsverloop bij Hoek van Holland en IJmuiden ligt tussenin. Langs de as zuid-noord wordt de stormopzet dus breder. Het is onbekend wat de

oorzaak hiervan is, maar het vermoeden bestaat dat de interactie tussen enerzijds getij en opzet en anderzijds de Noordzee en de Waddenzee een rol speelt, zie ook paragraaf 6.2.



Figuur 3.35 Afgeleide tijdsverlopen voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust: Vlissingen, Hoek van Holland, Ijmuiden en Den Helder.



Figuur 3.36 Afgeleide tijdsverlopen voor de stations langs de Waddenzee: Harlingen, Lauwersoog en Delfzijl.

In Figuur 3.36 zijn de tijdsverlopen voor de stations langs de Waddenzee afgebeeld. De stations Harlingen en Delfzijl laten veel overeenkomsten zien wat het tijdsverloop van de stormopzet betreft, het tijdsverloop bij Lauwersoog is duidelijk breder. In de spits wel, maar aan de basis is Harlingen breder.

Op basis van bovenstaande analyses van de geselecteerde pieken van de stormopzet behorende bij een zichtduur van 24 uur en een drempelwaarde van 1,5 m kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust resulteren de drempelwaarde van 1,5 m en de zichtduur van 24 uur in relatief meer opzetpieken in de POT series dan voor de zuidelijke stations,
- De opschalingsmethode kan met succes worden toegepast om de tijdsverlopen behorende bij de stormopzet te bepalen. Opschalen van de geselecteerde opzetpieken leidt voor alle beschouwde stations tot tijdsverlopen die er fysisch realistisch uitzien,
- Het afgeleide tijdsverloop voor stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust is in principe breder dan het tijdsverloop voor de stations langs de Waddenzee; vooral rondom de top van de opzet is het tijdsverloop bij deze stations spits,
- Het verschil in de basisduur van de afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet op de beschouwde stations is klein; de basisduur voor alle stations varieert tussen 41 uur (voor Vlissingen) tot 45 uur voor Harlingen, zie ook Tabel 3.3,
- Het tijdsverloop rond de top van de stormopzet kan goed worden weergegeven door een trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.6. Een trapeziumverloop met topduur van 2 uur geeft een betere benadering dan een trapezium met topduur van 4 uur. Vooral bij de stations langs de Waddenzee resulteert een trapeziumverloop met een topduur van 4 uur in een relatief te breed tijdsverloop rond de top,
- De afgeleide tijdsverlopen voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust kunnen goed worden benaderd door een trapeziumvormig tijdsverloop met een topduur van 2 uur,
- Een trapeziumvorm met topduur van 2 uur resulteert voor de stations langs de Waddenzee in een te brede schatting van de tijdsverlopen; deze worden beter benaderd door geknikte trapezia; de knik ligt op ca. 40% onder de top.

Tabel 3.3 Basisduur trapezia beschouwde stations

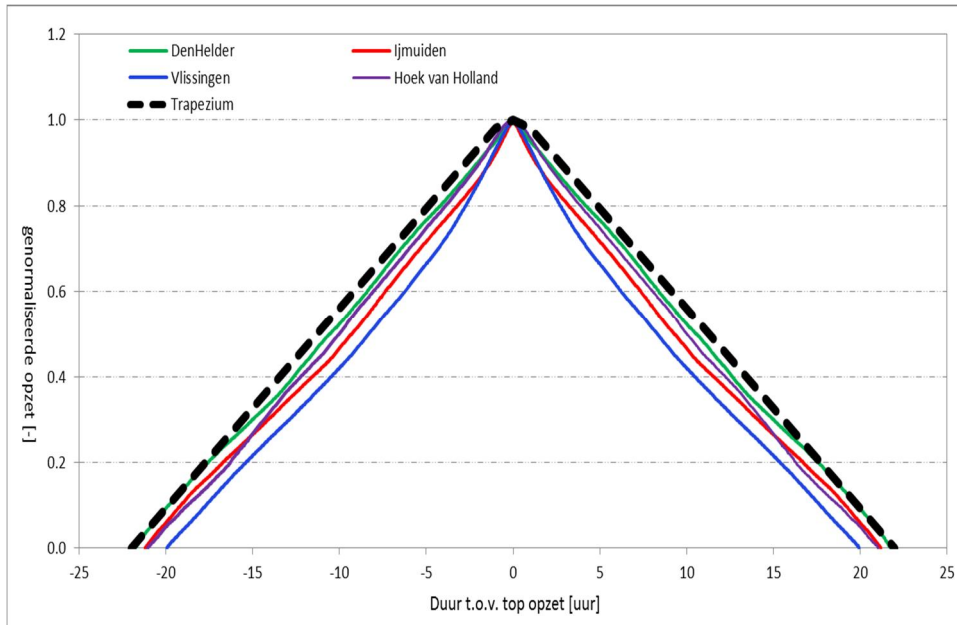
Locatie	Basisduur trapezium [uur]
Vlissingen	41
Hoek van Holland <sup>4</sup>	42
IJmuiden	43
Den Helder	44
Harlingen	45
Lauwersoog	44
Delfzijl	43

Op basis van bovenvermelde resultaten stellen we voor om:

1. de afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet bij alle beschouwde stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust, met uitzondering van de station Hoek van Holland, te schematiseren door een (zelfde) trapezium met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur; de top heeft een dezelfde vorm als afgebeeld in Figuur 3.37. De vorm rond de top van het trapezium is gelijk aan de vorm uit Figuur 3.6. Dit houdt in de stormopzet gedurende 1 uur geleidelijk met 0.1 m toeneemt om de maximale waarde te bereiken en vervolgens, wederom, gedurende 1 uur met 0.1 m te dalen,
2. voor de station Hoek van Holland, vanwege consistentieoverwegingen, het vigerende tijdsverloop zoals afgeleid in het kader van WTI-2011 en toegepast in WTI-2017 voor de productieberekeningen voor het Benedenrivieren aan te houden,
3. de afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet bij de stations langs de Waddenzee te schematiseren door een geknikt trapezium met basisduur van 45 uur en topduur van 2 uur zoals afgebeeld in Figuur 3.38. De vorm rond de top van het trapezium is gelijk aan

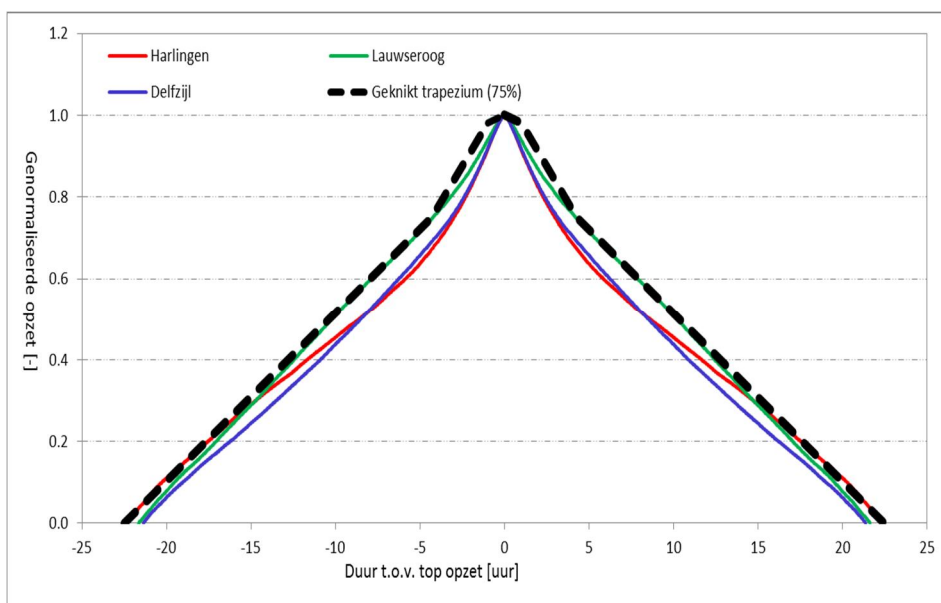
<sup>4</sup> Dit zijn dezelfde gegevens als gebruikt in (Tijssen, 2009).

de vorm uit Figuur 3.5. Het trapezium heeft een knik op het niveau van 75% onder de top van de stormopzet. Op deze manier wordt recht gedaan aan het gespitste tijdsverloop van de stormopzet in het Waddengebied.



Figuur 3.37 Tijdsverlopen stormopzet stations Zeeuwse en Hollandse kust, inclusief schematisatie met trapezium met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur.

Het trapezium van 44 uur in de basis en 2 uur in de top zoals Figuur 3.37 (gestreepte lijn) geldt als bovengrens voor de tijdsverlopen van de stormopzet van alle beschouwde stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust. Hetzelfde geldt voor het geknikte trapezium voor de stations in de Waddenzee. Dit is een goede en acceptabele benadering vanwege enerzijds het belang van een 'veilige' toetsing en anderzijds om schijnnaauwkeurigheid te voorkomen.



Figuur 3.38 Tijdsverlopen stormopzet stations Waddenzee, inclusief schematisatie met geknikt trapezium met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur. De knik ligt op het niveau van 0.75 van het genormaliseerde stormopzet

Langs de Zeeuwse en Hollandse kust zijn weliswaar slechts 4 stations onderzocht, maar ze zijn zo verspreid over het gebied dat ze representatief kunnen worden beschouwd voor het hele gebied. Op basis van de resultaten van de analyse van de stormopzet concluderen we dat differentiatie of indeling in deelgebieden van de Zeeuwse en Hollandse kust niet nodig is en dat een standaard tijdsverloop (in de vorm van een trapezium) volstaat om de stormopzet te kunnen schematiseren voor elke willekeurige locatie in het betreffende gebied.

Dezelfde conclusie kan getrokken worden voor de Waddenzee. De beschouwde stations worden representatief geacht en geven voldoende inzicht in het tijdsverloop van de stormopzet. Een geknikt trapezium zoals afgebeeld in Figuur 3.38 wordt voldoende nauwkeurig geacht om voor elke willekeurige locatie in de Waddenzee de stormopzet te benaderen. Differentiatie en/of indeling van het Waddengebied in deelgebieden is, evenals de Zeeuwse en Hollandse kust, niet nodig.

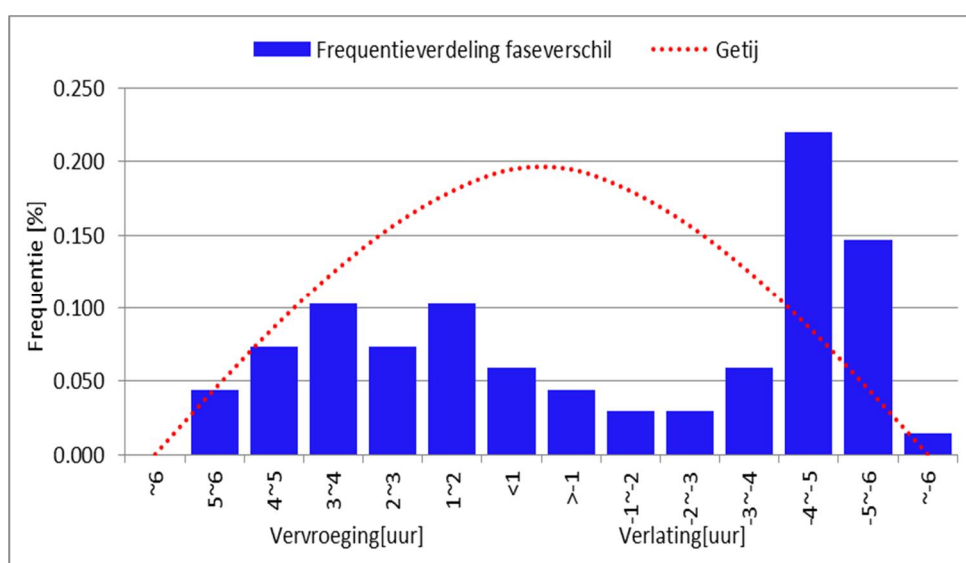


## 4 Analyse faseverschil astronomisch getij en opzet

### 4.1 Faseverschil stormopzet en getij Hoek van Holland

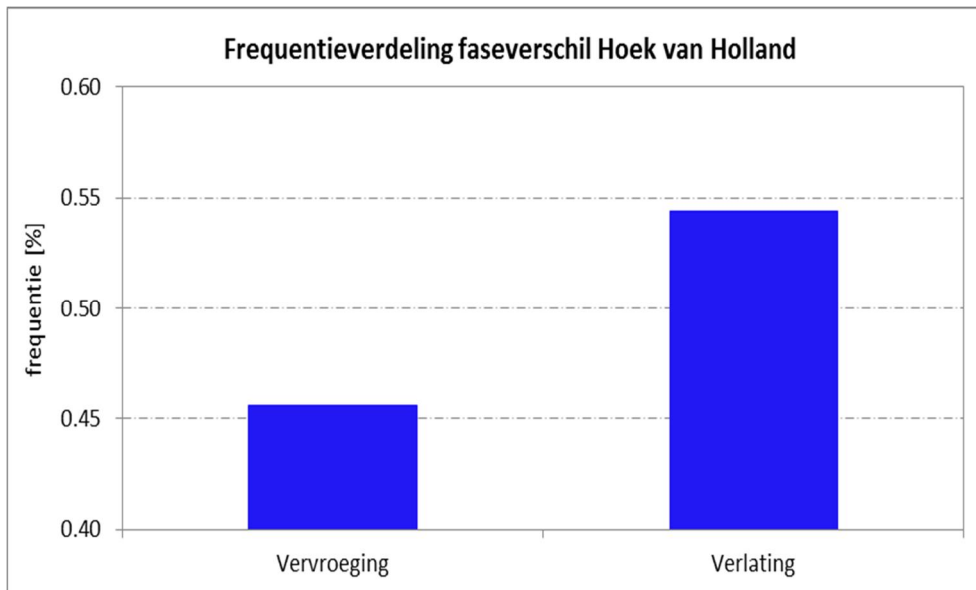
Als benedenrand voor het Benedenrivieren geldt de waterstand bij Hoek van Holland<sup>5</sup> inclusief het tijdsverloop. Het waterstandsverloop bij Hoek van Holland bestaat uit een combinatie van stormopzetverloop, verloop van het astronomische getij en faseverschil tussen deze twee grootheden (Chbab, 2012). Het verloop van de stormopzet bij Hoek van Holland is in het kader van WTI-2011 bepaald en is gerapporteerd (Tijssen, 2009). Het faseverschil tussen het tijdstip van de maximale opzet en astronomisch getij is eveneens in het kader van WTI-2011 onderzocht en is gerapporteerd in Chbab (2010). Het tijdsverloop van de stormopzet bij Hoek van Holland is afgebeeld in Figuur 3.7. Op het half meter niveau heeft de opzet een duur van 30 uur met flanken van 12 uur naar het nulniveau.

Figuur 4.1 beschrijft de frequentieverdeling van het faseverschil tussen getij en opzet voor Hoek van Holland. De analyse van de frequentieverdeling van het faseverschil in (Chbab, 2010) is gebaseerde op dezelfde gegevens als gebruikt in Tijssen (2009) voor de analyse van de stormopzet. Figuur 4.1 laat zien dat een negatief faseverschil, d.i. de top van het astronomische getij eerder optreedt dan de top van de opzet. Een negatief faseverschil wordt ook verlating genoemd. Een positief faseverschil, waarbij de top van het astronomische getij later optreedt dan de top van de opzet, wordt vervroeging genoemd. Van de onderzochte stormopzetten is er in 56% van de gevallen sprake van een negatief faseverschil (verlating) tussen stormopzet en astronomisch getij. Bij de meeste verlatingen loopt het astronomische getij 4 tot 5 uur voor op de top van de opzet. Bij de meeste vervroegingen loopt de stormopzet 3 uur voor op het astronomische getij. N.B. De faseverschuiving is principe random is (uniform) verdeeld, althans dit is de verwachting. Echter, door de interactie tussen opzet en astronomisch getij, treden er vermoedelijk faseverschuivingen op. De resultaten uit (Chbab, 2010) maar ook uit dit rapport bevestigen dit vermoeden: dat de interactie tussen opzet en getij een rol speelt bij het optreden van een faseverschil. Dit aspect vergt nader onderzoek en valt buiten de scope van de onderhavige studie.



Figuur 4.1 Frequentieverdeling faseverschil tussen top stormopzet en top astronomisch getij bij Hoek van Holland.

<sup>5</sup> Dit verloop wordt getransformeerd middels een vaste verschuiving naar een waterstandsverloop bij Maasmond.



Figuur 4.2 Frequentieverdeling positief en negatief faseverschil voor Hoek van Holland

In Chbab (2010) zijn de volgende conclusies getrokken voor station Hoek van Holland:

- een negatief faseverschil (verlating) tussen -5.0 en -4.0 uur komt het vaakst voor,
- een positief faseverschil (vervroeging) komt het meest voor tussen 2.0 en 4.0 uur,
- een negatief faseverschil komt vaker voor dan een positief faseverschil,
- het tijdstip van de maximale opzet kan ook samenvallen met het astronomische getij; de bijbehorende frequentie is echter relatief klein, vooral bij grote waarden van de opzethoogte (Chbab, 2010).
- de keuzes van het stormseizoen en drempelwaarde beïnvloeden de resultaten niet/nauwelijks. Bij lage drempelwaarden neemt echter de frequentie van het samenvallen van het tijdstip van de maximale opzet en astronomisch getij toe (Chbab, 2010)

Merk op dat de keuze voor een faseverschuiving van -4,5 uur is mede gebaseerd op het feit dat deze fase in een breder waterstandsverloop resulteert dan de fase van +3.0 uur wanneer de stormopzet gesuperponeerd wordt op het astronomische getij (RWS, 2007), zie ook hoofdstuk 7 van dit rapport.

#### 4.2 Faseverschil astronomisch getij en stormopzet overige stations

Van de geselecteerde stations is het faseverschil tussen het maximum van de stormopzet en het maximum van het astronomische getij geanalyseerd. Concreet is voor elke van de afgeleide stormopzetten zoals beschreven in Tabel 3.2 het faseverschil bepaald. Er zijn in totaal 13 klassen gedefinieerd met een gemiddelde duur van 1 uur. De frequentie van een fase is het aantal stormopzetten dat in een bepaalde klasse voorkomt, zie voor meer details over de werkwijze (Chbab, 2010). Conform deze werkwijze zijn van alle beschouwde 7 stations het faseverschil tussen opzet en getij bepaald. De resultaten van de analyse zijn samengevat in Tabel 4.1. Merk op dat bij de analyse het gemiddelde getij is beschouwd; springtij, doodtij en/of wantij zijn hierbij niet beschouwd.

Met uitzondering van de stations Hoek van Holland en Lauwersoog resulteert de analyse van het faseverschil in een positief faseverschil voor de onderzochte stations. Er zijn verder goede overeenkomsten tussen enerzijds de stations IJmuiden en Den Helder (beide



Hollandse kust) en anderzijds tussen Harlingen en Delfzijl (beide rand Waddengebied). Voor de stations Hoek van Holland en Lauwersoog geldt een negatief faseverschil; daar gaan we in de volgende paragraaf verder op in.

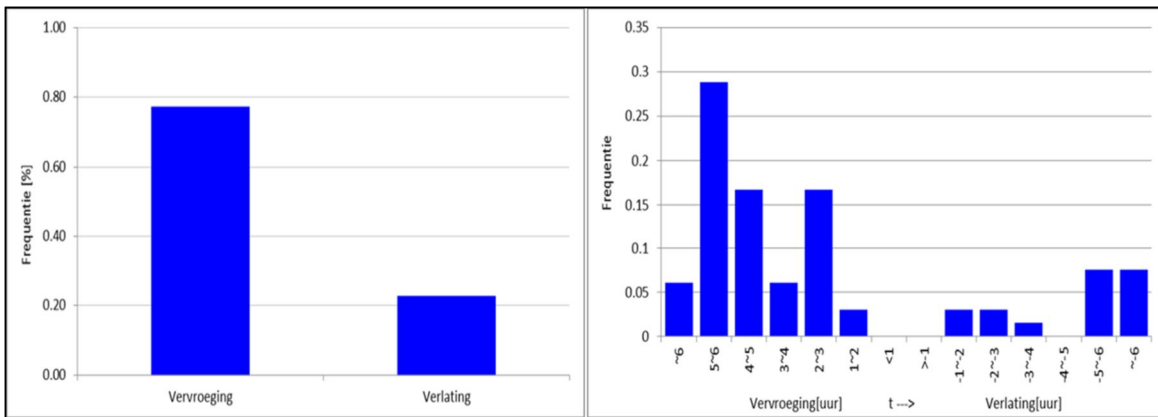
Hoek van Holland ligt in de monding van het Rijn/Maas estuarium; het station ligt in principe niet aan de kust maar in een rivierengebied. Mogelijk zijn de waterdiepte en de interactie tussen stormopzet en astronomisch getij in de monding van de rivier anders dan langs de kust. Daarnaast laat Tabel 4.1 zien dat naast positieve faseverschillen ook negatieve verschillen optreden. De verhouding is zelfs bijna gelijk: 44 % tegen 56 % respectievelijk. De meest vervroegingen treden op in de klassen [2.0, 4.0 uur]. Een uitgebreide analyse van het faseverschil bij Hoek van Holland in Chbab (2010) heeft laten zien dat een positief faseverschil het meest voorkomt tussen 2.5 en 3.5 uur, zie ook Figuur 4.4. Wanneer deze bevinding in beschouwing wordt genomen, kan worden geconcludeerd dat er met betrekking tot het faseverschil overeenkomsten zijn tussen alle de drie stations langs de Hollandse kust: Hoek van Holland, IJmuiden en Den Helder.

Figuur 4.8 laat de frequentieverdeling zien van het faseverschil tussen stormopzet en astronomisch getij bij station Lauwersoog. In tegenstelling tot de stations Harlingen en Delfzijl, beide locatie liggen in het Waddengebied, is het faseverschil tussen stormopzet en getij bij Lauwersoog positief. De verhouding tussen positief en negatief faseverschil bij Lauwersoog is net als bij Hoek van Holland, bijna gelijk: 43 % tegen 57 %. Een positief faseverschil komt het vaakst voor in de klasse [-6.0, -5.0 uur]. Deze klasse heeft de tweede (een na hoogste) frequentie bij de stations Harlingen en Delfzijl. Dit betekent dat er een zekere mate van overeenkomst is tussen enerzijds Lauwersoog en anderzijds Harlingen en Delfzijl.

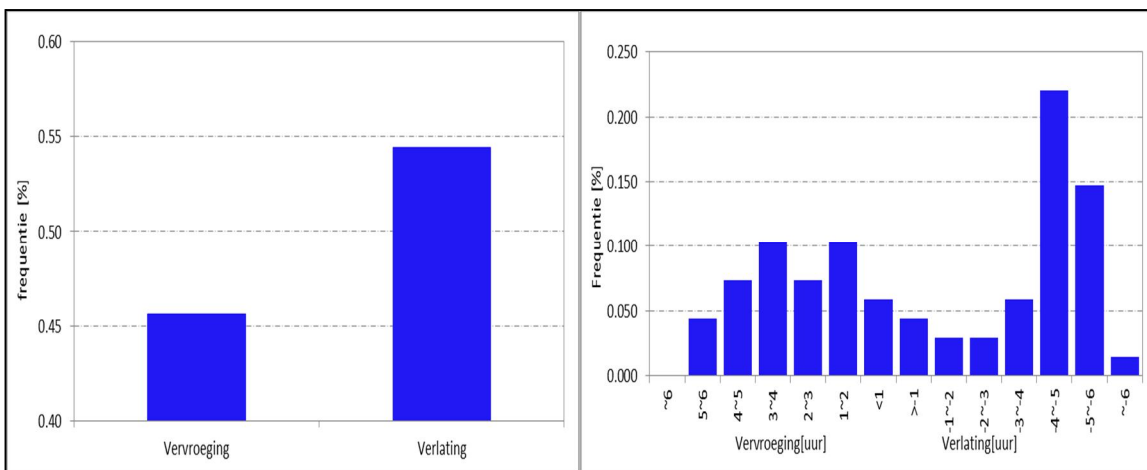
Tabel 4.1 Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij.

Locatie	Faseverschil [Positief/negatief]	Frequentieverdeling [%]		Klasse
		Positief	Negatief	
Vlissingen	Positief	77	23	[5.0, 6.0]
Hoek van Holland	Negatief	44	56	[-5.0, -4.0]
IJmuiden	Positief	62	38	[2.0, 3.0]
Den Helder	Positief	71	29	[2.0, 3.0]
Harlingen	Positief	58	42	[5.0, 6.0]
Lauwersoog	Negatief	43	57	[-6.0, -5.0]
Delfzijl	Positief	58	42	[5.0, 6.0]

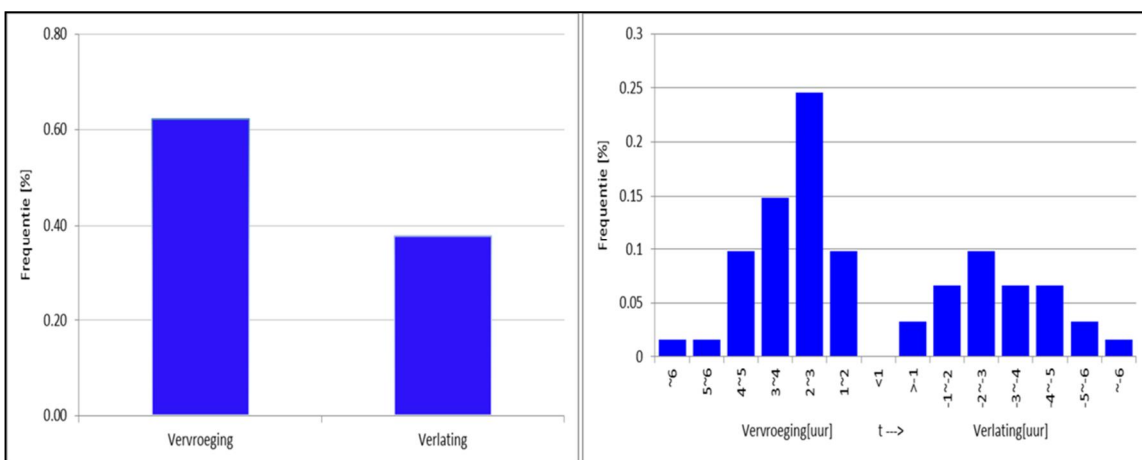
Tabel 4.1 laat verder zien dat positieve faseverschillen het vaakst voorkomen [2.0, 3.0] of [5.0, 6.0]. Negatieve faseverschillen komen het vaakst voor in de klassen van [-5.0, -4.0] en [-6.0, -5.0]. Een grafische weergave van alle resultaten van de uitgevoerde analyse van het faseverschil is te vinden in Figuur 4.3 t/m Figuur 4.9.



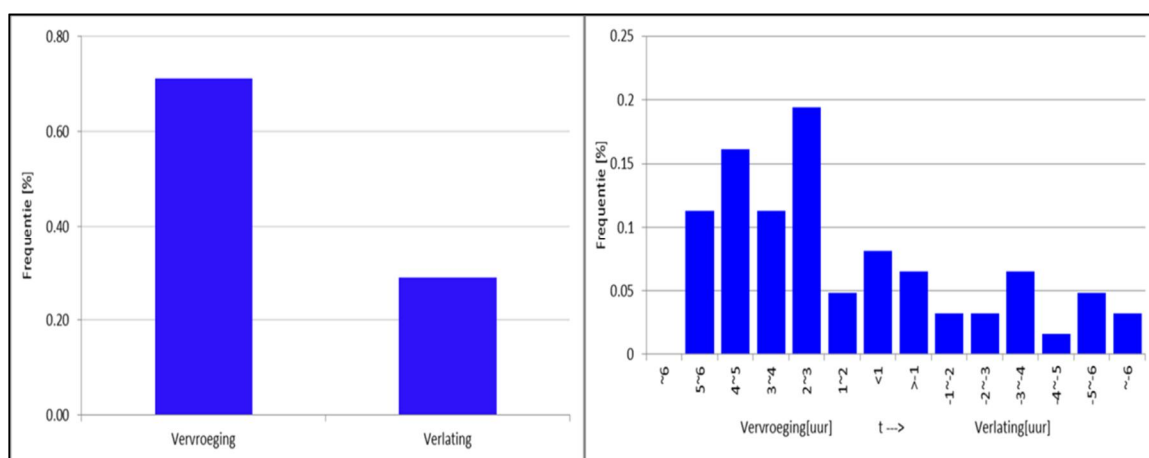
Figuur 4.3 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Vlissingen: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur.



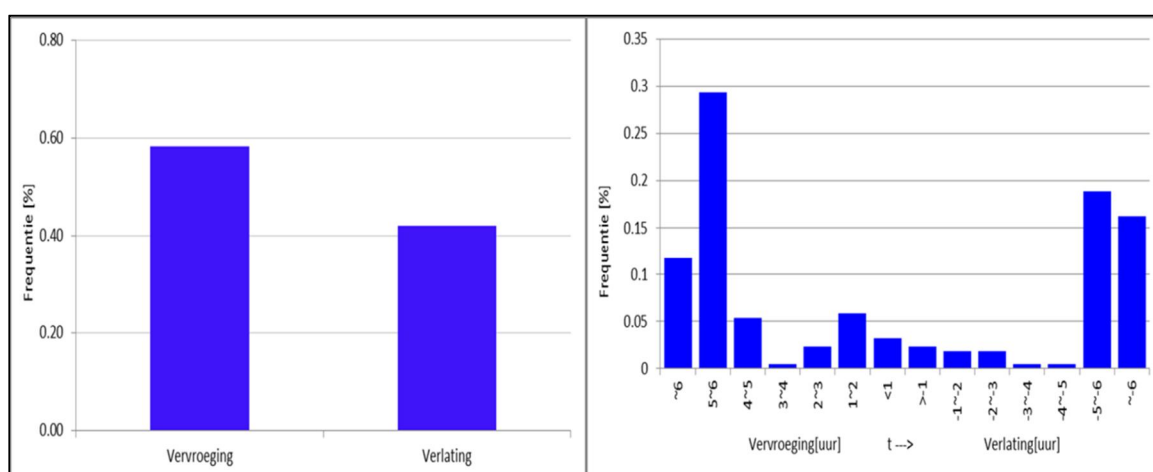
Figuur 4.4 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Hoek van Holland: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling klassen van 1 uur.



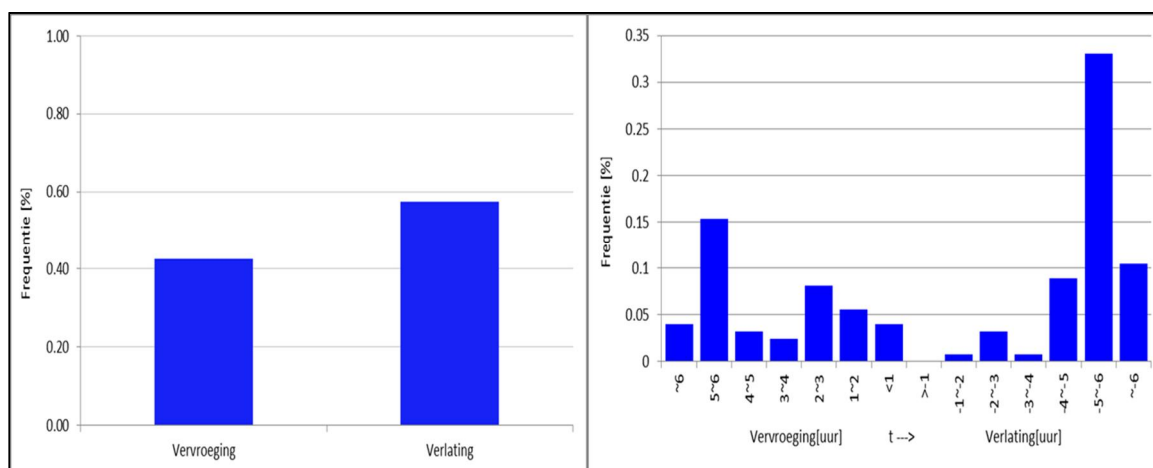
Figuur 4.5 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij IJmuiden: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur.



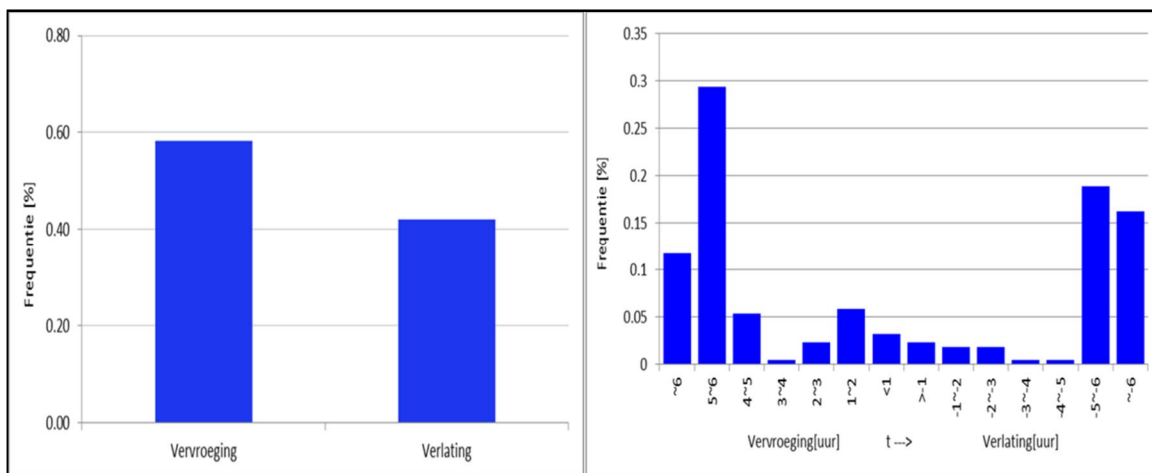
Figuur 4.6 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Den Helder: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur.



Figuur 4.7 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Harlingen: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur



Figuur 4.8 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij bij Lauwersoog: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur



Figuur 4.9 Frequentieverdeling faseverschil stormopzet en astronomisch getij station Delfzijl: frequentieverdeling positief en negatief faseverschil (links) en frequentieverdeling faseverschil klassen van 1 uur.

## 5 Gevoeligheid drempelwaarde en zichtduur

### 5.1 Selectie cases gevoeligheidsanalyse

De resultaten gepresenteerd in de vorige 2 hoofdstukken zijn allen gebaseerd op een drempelwaarde van 1,5 m en een zichtduur van 24 uur. In dit hoofdstuk is onderzocht of andere keuzes van drempelwaarde en zichtduur tot andere resultaten zouden kunnen leiden dan gepresenteerd in vorig hoofdstuk. Van vier van de zeven geselecteerde locaties uit hoofdstuk 3 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Alleen station Den Helder en Lauwersoog zijn hierbij niet beschouwd. De gevoeligheid voor een andere drempelwaarde en zichtduur is uitgevoerd voor vier stations. Voor elke regio in Hydra-Ring (zie ) is een station gekozen. Deze stations geven een goede en representatieve afspiegeling van de kustregio's. Tabel 5.1 bevat per station de beschouwde drempelwaardes en zichtduren. Er zijn in totaal 36 cases geanalyseerd.

Tabel 5.1 Beschouwde stations en gekozen drempelwaardes en zichtduren voor de gevoeligheidsanalyse

Station	Zichtduur	Drempelwaarde	Aantal combinaties
Vlissingen	24, 36 en 48 uur	0,75; 1,2 en 1,5 m	9
IJmuiden	24, 36 en 48 uur	1,0; 1,2 en 1,5 m	9
Harlingen	24, 36 en 48 uur	1,5; 2,0 en 2,5 m	9
Delfzijl	24, 36 en 48 uur	1,5; 2,0 en 2,5 m	9

Het aantal geselecteerde stormopzetpieken per beschouwd station en per set drempelwaarde en zichtduur is opgenomen in Tabel 5.2. Per station zijn 3 zichtduren beschouwd en 3 drempelwaardes. Er zijn in totaal 36 cases geanalyseerd. De zichtduren zijn identiek voor alle vier beschouwde stations; het zijn 24 uur; 36 uur en 48 uur. Per station zijn er 3 drempelwaardes beschouwd; de keuze van deze drempelwaardes hangt voor een deel af van het aantal stormopzetpieken in de series. De gekozen drempelwaardes zijn weergegeven in Tabel 5.2. Voor IJmuiden zijn er slechts 10 stormopzetten met een piekwaarde hoger dan de drempelwaarde van 2,0 m; dit geldt voor alle zichtduren. Het aantal stormopzetten is te klein om een zinnige analyse uit te voeren. Het hoogste beschouwde drempelwaarde voor IJmuiden bedraagt daarom 1,5 m. Ook voor Vlissingen blijkt een drempelwaarde van 2,0 m te resulteren in een te klein aantal pieken. Voor Vlissingen geldt 1,5 m als hoogste drempelwaarde.

Van de 36 beschouwde cases zijn analyses gemaakt van zowel het tijdsverloop van de stormopzet als van het faseverschil tussen stormopzet en astronomisch getij.

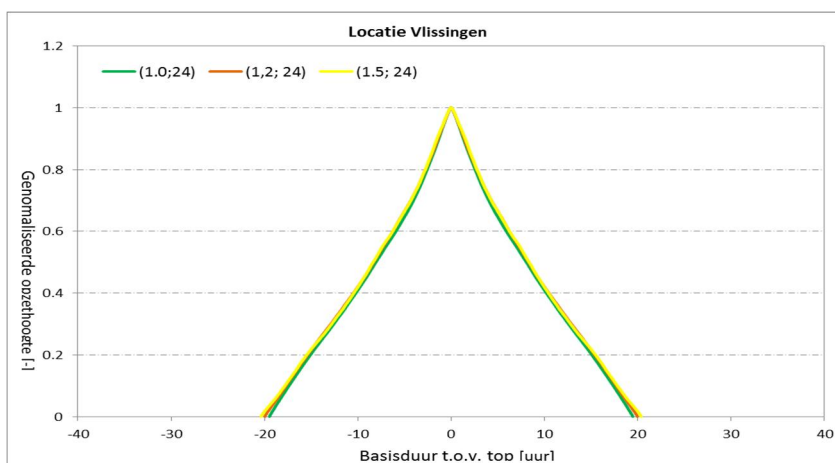
Tabel 5.2 Aantal geselecteerde opzetpieken per set drempelwaarde en zichtduur

Station	Combinatie drempelwaarde –zichtduur	Aantal stormen
Vlissingen	1,00 m – 24 uur	347
	1,00 m – 36 uur	332
	1,00 m – 48 uur	309
	1,20 m – 24 uur	178
	1,20 m – 36 uur	174
	1,20 m – 48 uur	163
	1,50 m – 24 uur	066
	1,50 m – 36 uur	065
	1,50 m – 48 uur	061
	IJmuiden	1,00 m – 24 uur

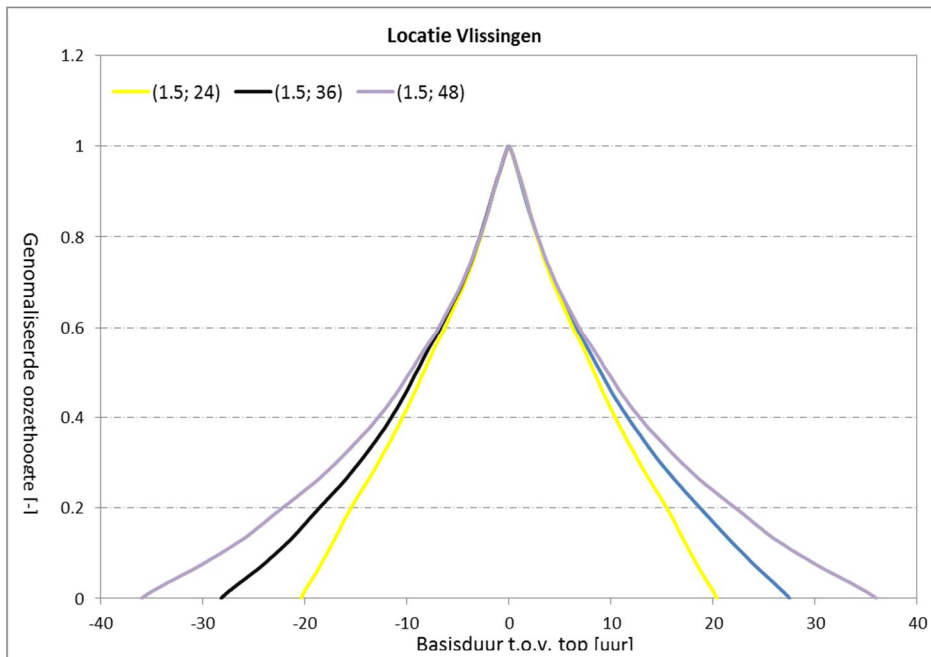
	1,00 m – 36 uur	308
	1,00 m – 48 uur	286
	1,20 m – 24 uur	171
	1,20 m – 36 uur	161
	1,20 m – 48 uur	153
	1,50 m – 24 uur	061
	1,50 m – 36 uur	058
	1,50 m – 48 uur	056
Harlingen	1,50 m – 24 uur	184
	1,50 m – 36 uur	176
	1,50 m – 48 uur	165
	2,00 m – 24 uur	067
	2,00 m – 36 uur	065
	2,00 m – 48 uur	064
	2,50 m – 24 uur	025
	2,50 m – 36 uur	024
	2,50 m – 48 uur	024
Delfzijl	1,50 m – 24 uur	222
	1,50 m – 36 uur	214
	1,50 m – 48 uur	207
	2,00 m – 24 uur	085
	2,00 m – 36 uur	081
	2,00 m – 48 uur	080
	2,50 m – 24 uur	035
	2,50 m – 36 uur	034
	2,50 m – 48 uur	034

## 5.2 Gevoeligheidsanalyse tijdsverloop stormopzet

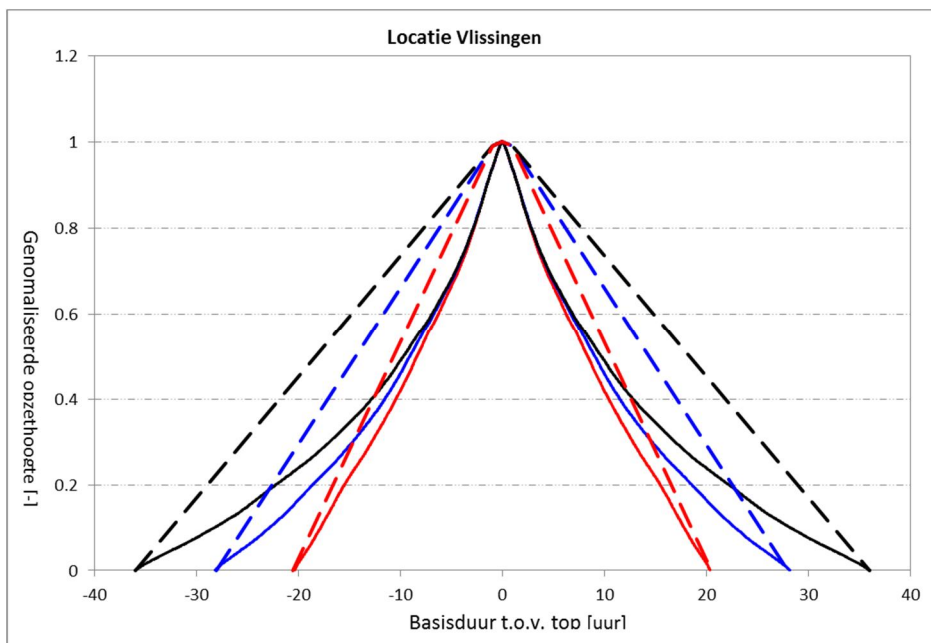
Conform Tabel 5.2 zijn voor station Vlissingen analyses gemaakt van het tijdsverloop van de stormopzet voor 3 drempelwaarden en 3 zichtduren. Het resultaat van de zichtduur van 24 uur en verschillende drempelwaarden is afgebeeld in Figuur 5.1. Zoals de figuur laat zien is er nauwelijks verschil tussen de afgeleide tijdsverlopen van de opzet. De keuze van de drempelwaarde heeft voor Vlissingen daarom geen effect op het tijdsverloop. Echter, zoals uit Figuur 5.2 valt te zien, heeft de keuze van de zichtduur wel impact op het tijdsverloop, vooral in de basis. De zichtduur heeft verder geen impact op het hoogte gedeelte van de stormopzet, zeg ca. 50% van de stormopzet.



Figuur 5.1 Afgeleide tijdsverlopen van de opzet bij Vlissingen voor de zichtduur van 24 uur en 3 drempelwaardes.



Figuur 5.2 Afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet bij Vlissingen voor de drempelwaarde van 1,5 m en zichtduren van 24, 36 en 48 uur.

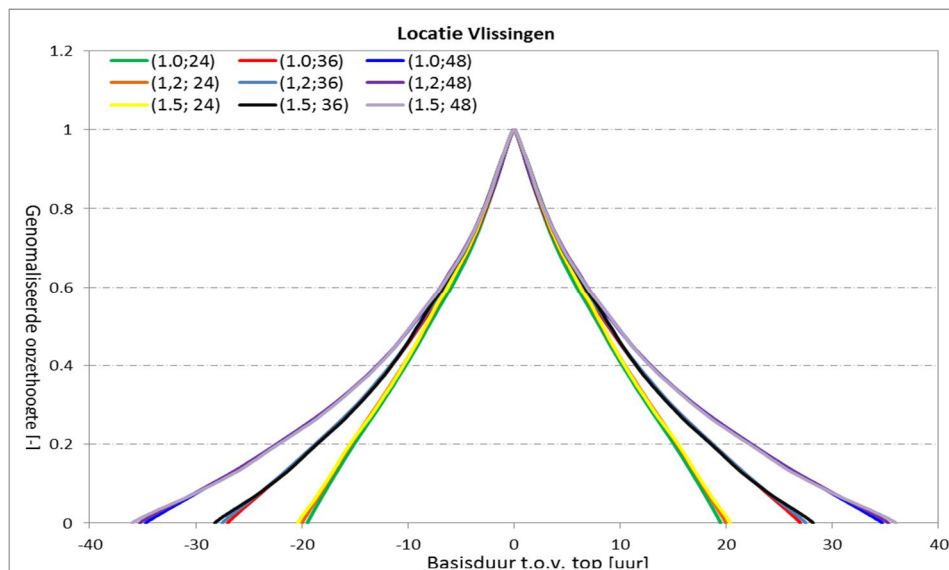


Figuur 5.3 Afgeleide tijdsverlopen van de opzet bij Vlissingen voor de drempelwaarde 1,5 m (zichtduren van 24, 36 en 48 uur) en geschematiseerde tijdsverlopen met trapezia

Figuur 5.3 laat zien dat hoe langer de zichtduur is hoe groter het verschil is tussen het afgeleide en het door middel van een trapezium (van gelijke basisduur) geschematiseerd tijdsverloop, vooral het gedeelte onder de topwaarde wordt behoorlijk overschat.

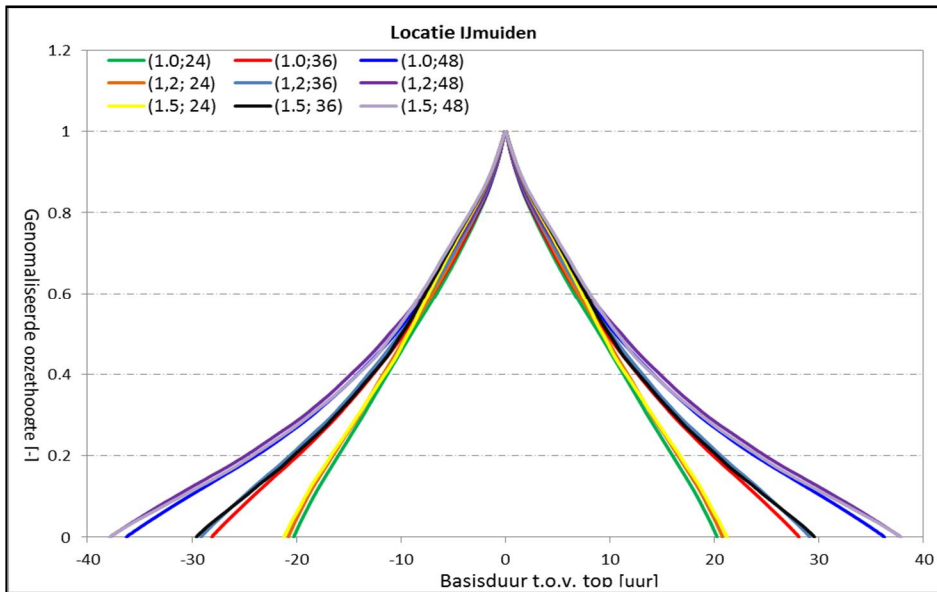
Om een helder beeld te geven voor station Vlissingen zijn in Figuur 5.4 de resultaten van alle beschouwde 9 combinaties van drempelwaardes en zichtduren afgebeeld. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse van de opzet bij de 3 beschouwde stations (IJmuiden, Harlingen en Delfzijl) zijn weergegeven in Figuur 5.5 t/m Figuur 5.7. Op basis van de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse kan geconcludeerd worden:

- Het tijdsverloop van het bovenste gedeelte van de stormopzet, ca. 50%, wordt nauwelijks beïnvloed door de keuze van zichtduur en drempelwaarde; dit geldt voor alle beschouwde stations,
- Een langere zichtduur leidt in principe tot een breder basisverloop (verloop op het nulniveau) van de stormopzet, ook dit geldt voor alle onderzochte stations,
- De keuze van de drempelwaarde heeft nauwelijks invloed op het tijdsverloop van de stormopzet boven  $\pm 0.5$  genormaliseerde opzethoogte; dit geldt voor het volledige verloop op alle onderzochte stations.

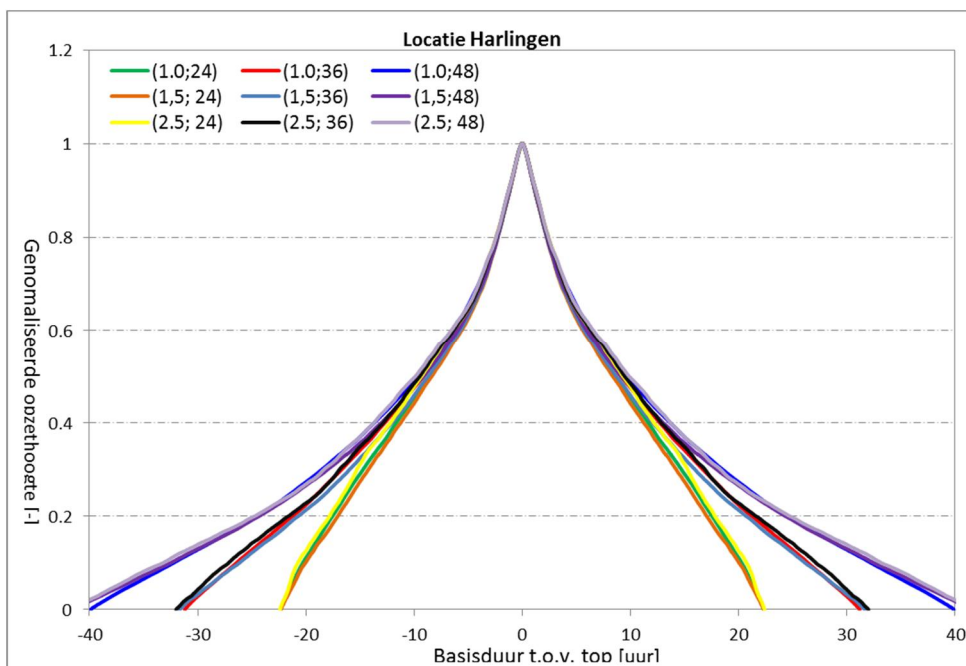


Figuur 5.4 Afgeleide tijdsverlopen van de opzet bij Vlissingen voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,2 en 1,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).

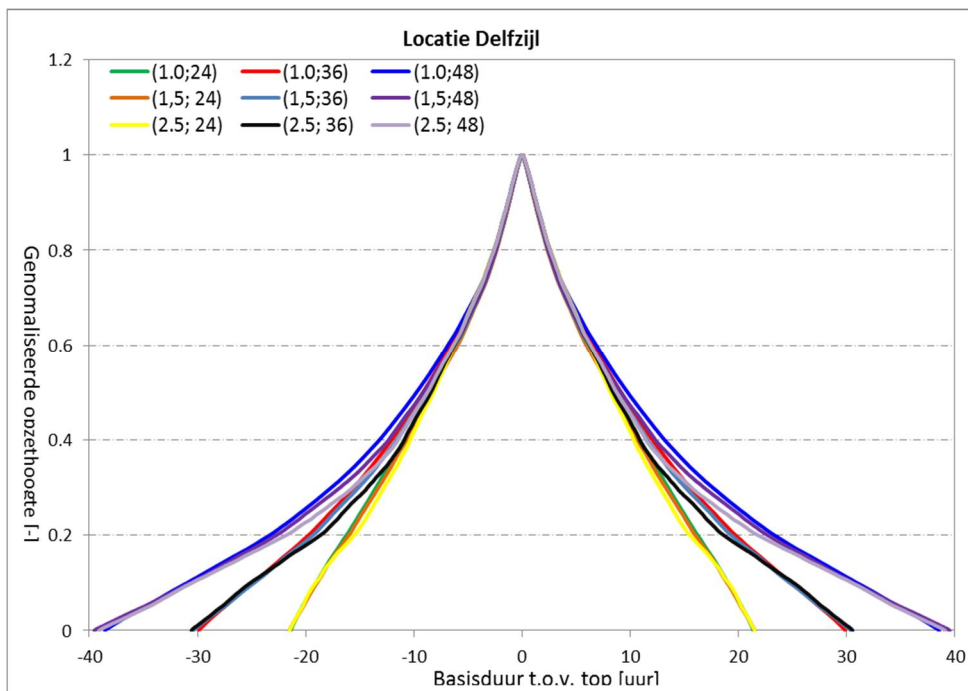




Figuur 5.5 Standaard berekende stormopzetverlopen voor IJmuiden voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,2 en 1,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).

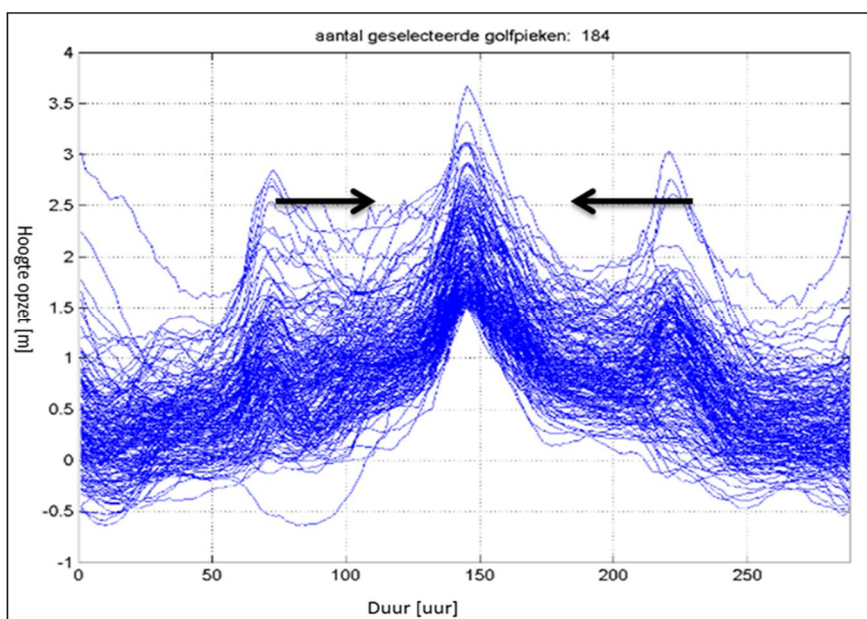


Figuur 5.6 Standaard berekende stormopzetverlopen voor Harlingen voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,5 en 2,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).



Figuur 5.7 Standaard berekende stormopzetverlopen voor Delfzijl voor 3 drempelwaardes (1,0; 1,5 en 2,5 m) en 3 zichtduren (24, 36 en 48 uur).

Zoals hierboven al gemeld, bepaalt de zichtduur de basisduur van de stormopzet. Dit geldt voor alle beschouwde stations. Het sterkte vermoeden bestaat dat dit wordt veroorzaakt door de selectiecriteria en de wijze waarop dubbele pieken worden verwerkt. Binnen een basisduur kunnen namelijk dubbele pieken optreden; in de opschalingsmethode worden deze als het ware tegen de hoofdpiek aangeplakt. Figuur 5.8 illustreert dubbele pieken voor station Harlingen. Zoals de figuur laat zien zijn de dubbele pieken lager dan de hoofdpiek en beïnvloeden ze daarom vooral het laagste gedeelte van de stormopzet.



Figuur 5.8 Illustratie dubbelpieken, station Harlingen.

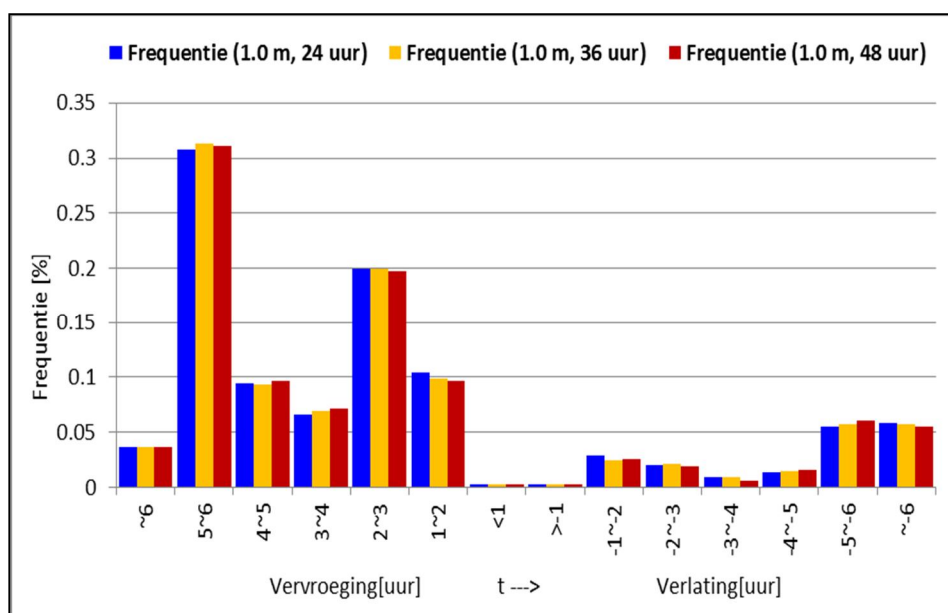
Het feit dat de zichtduur invloed heeft op het tijdsverloop van de stormopzet rechtvaardigt de vraag: welke zichtduur dient uiteindelijk gekozen te worden voor het vaststellen van de stormopzet? Het vaststellen van het tijdsverloop van de stormopzet bij alle stations wordt gebaseerd op de zichtduur van 24 uur om de volgende redenen:

- De drijvende kracht, de storm, heeft een duur<sup>6</sup> van 48 uur in de basis,
- De keuze van de zichtduur beïnvloedt slechts het laagste gedeelte van de stormopzet, het effect van de zichtduur heeft nauwelijks effect op het bovenste gedeelte.

### 5.3 Gevoeligheidsanalyse faseverschil opzet en getij

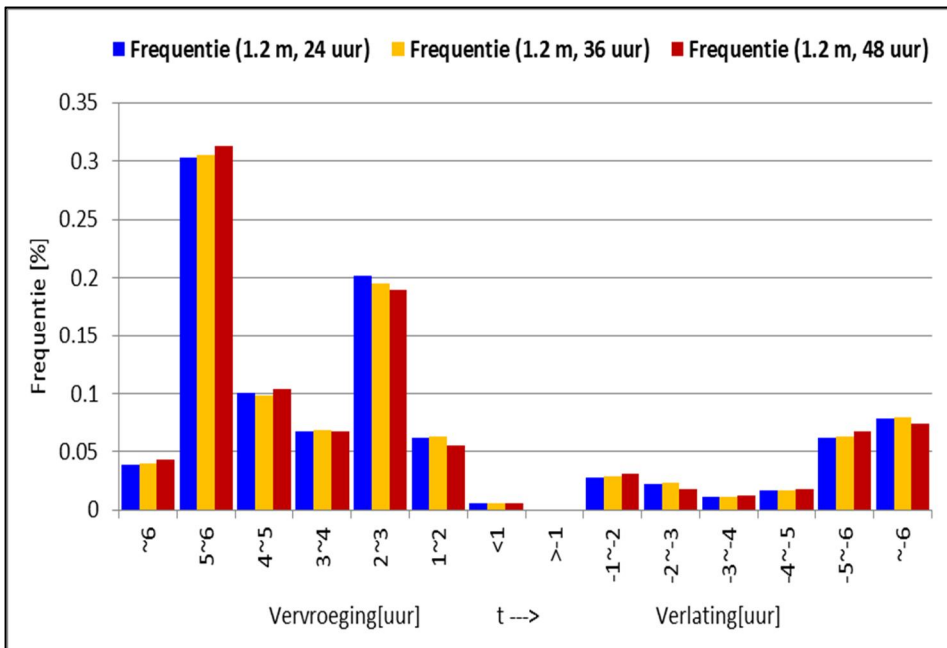
De frequentieverdeling van het faseverschil tussen astronomisch getij en stormopzet bij de 4 beschouwde stations (Vlissingen, IJmuiden, Harlingen en Delfzijl) zijn weergegeven in Figuur 5.9 t/m Figuur 5.23. Voor elke station zijn 4 figuren gepresenteerd: 3 figuren met de frequentieverdeling van het faseverschil voor verschillende drempelwaarden en 1 figuur met de frequentieverdeling voor de zichtduur van 24 uur.

Het resultaat voor station Vlissingen is grafisch weergegeven in Figuur 5.9 t/m Figuur 5.12 en in Tabel 5.3.

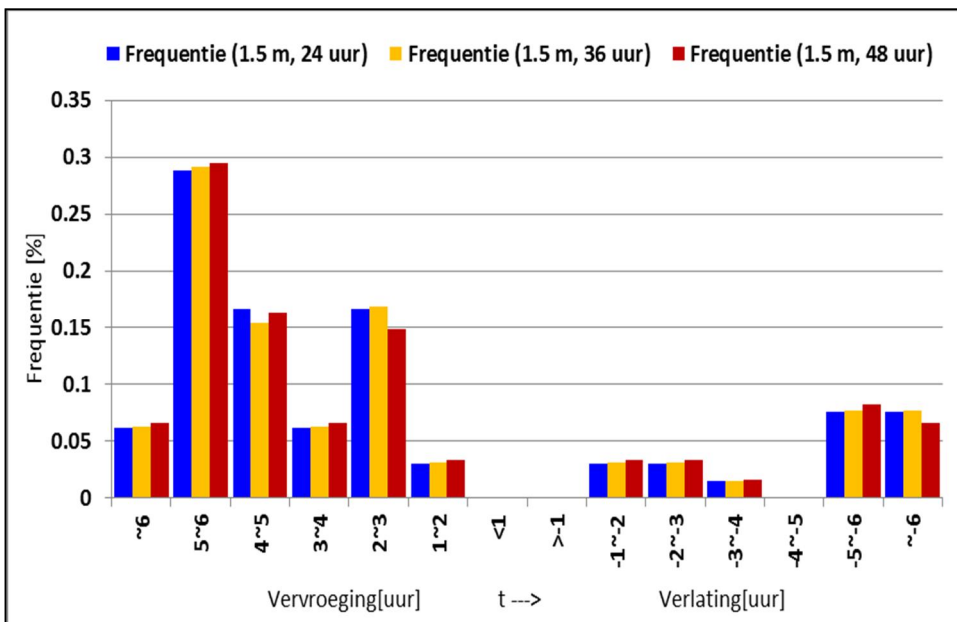


Figuur 5.9 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Vlissingen. Drempelwaarde 1.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur

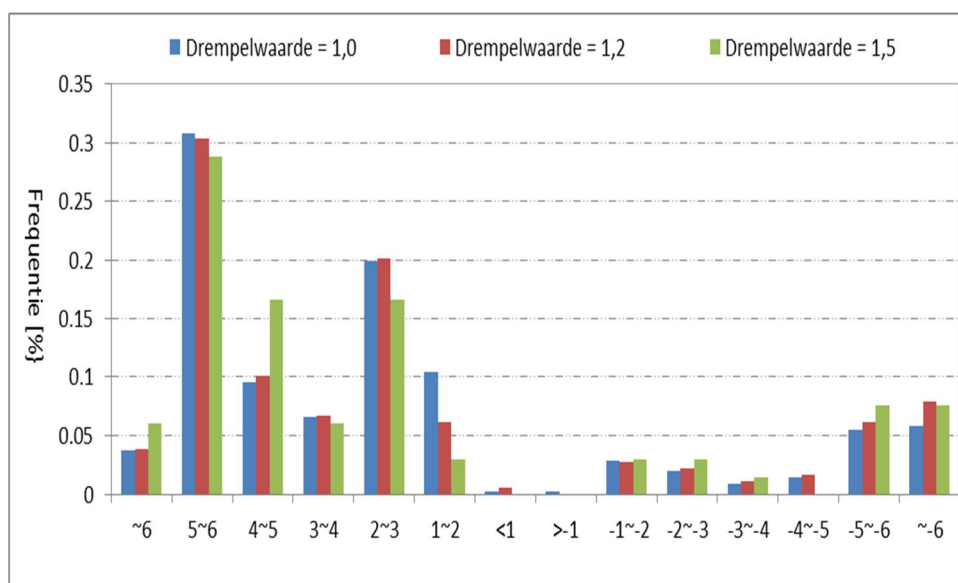
<sup>6</sup> De stormduur heeft een trapezium vorm met 48 uur in de basis en 2 uur in de top, zie (Geerse, 2006). Deze duur is in het kader van HR-2006 afgeleid voor de Vecht- en IJsseldelta. Deze duur in WTI-2011 inmiddels ook toegepast voor de meren, Benedenrivieren en Waddenzee



Figuur 5.10 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Vlissingen. Drempelwaarde 1.2 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur



Figuur 5.11 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Vlissingen. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur



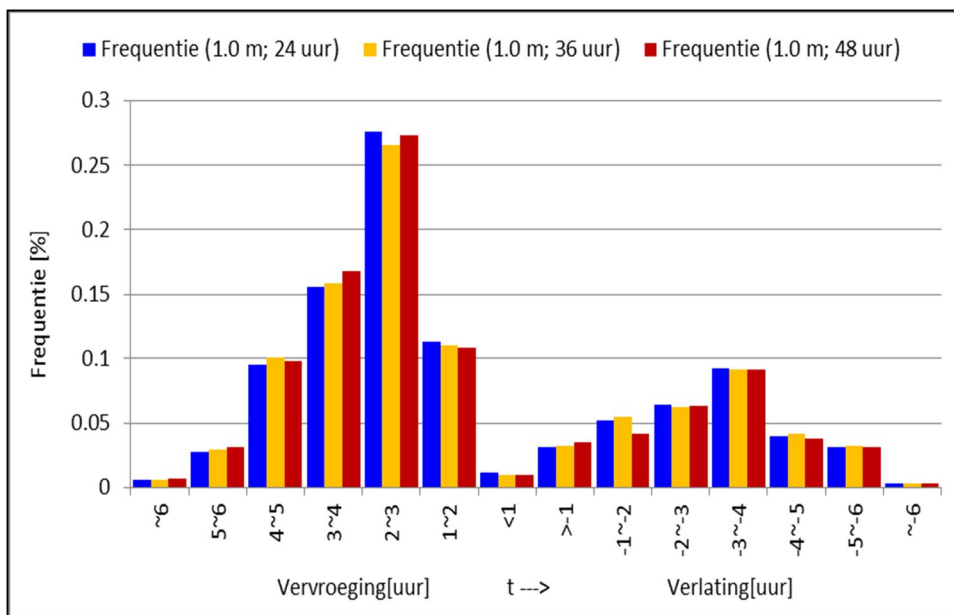
Figuur 5.12 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij, zichtduur 24 uur; station Vlissingen

Tabel 5.3 Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station Vlissingen

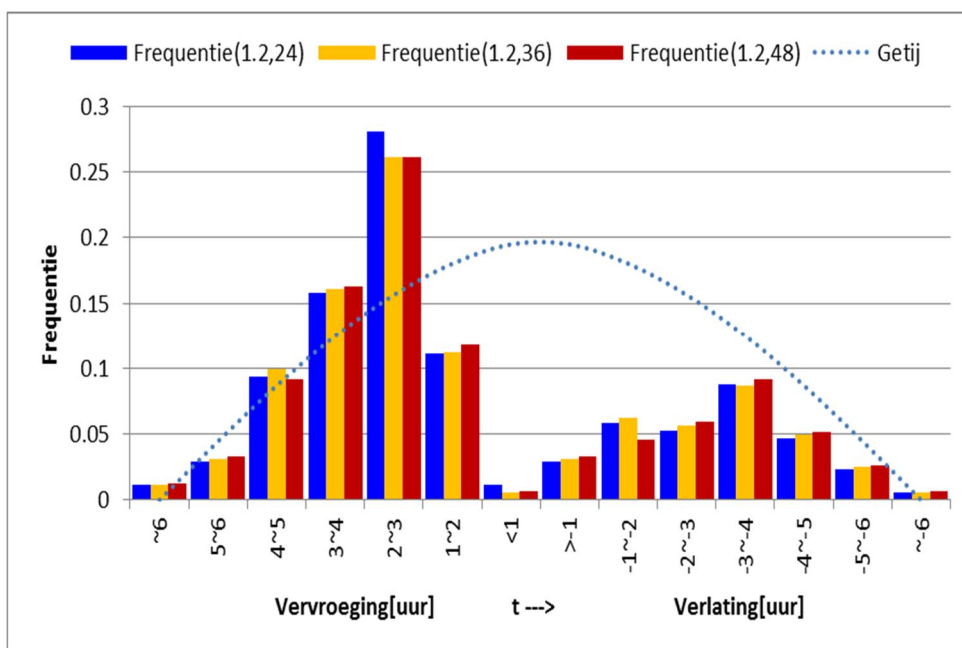
Locatie	Drempelwaarde	Frequentieverdeling [%]	
		Positief	Negatief
Vlissingen, zichtduur = 24 uur	1,0	81	19
	1,2	78	22
	1,5	77	23

Op basis van de resultaten in Figuur 5.9 t/m Figuur 5.12 en Tabel 5.3 kan geconcludeerd worden dat het effect van de drempelwaarde en zichtduur op het faseverschil klein tot marginaal is voor Vlissingen. Er is in ca. 80% van de beschouwde gevallen sprake van een positief faseverschil. Een faseverschil in de klasse [5.0, 6.0 uur] komt het vaakst voor gevolgd door de klasse [2.0, 3.0 uur].

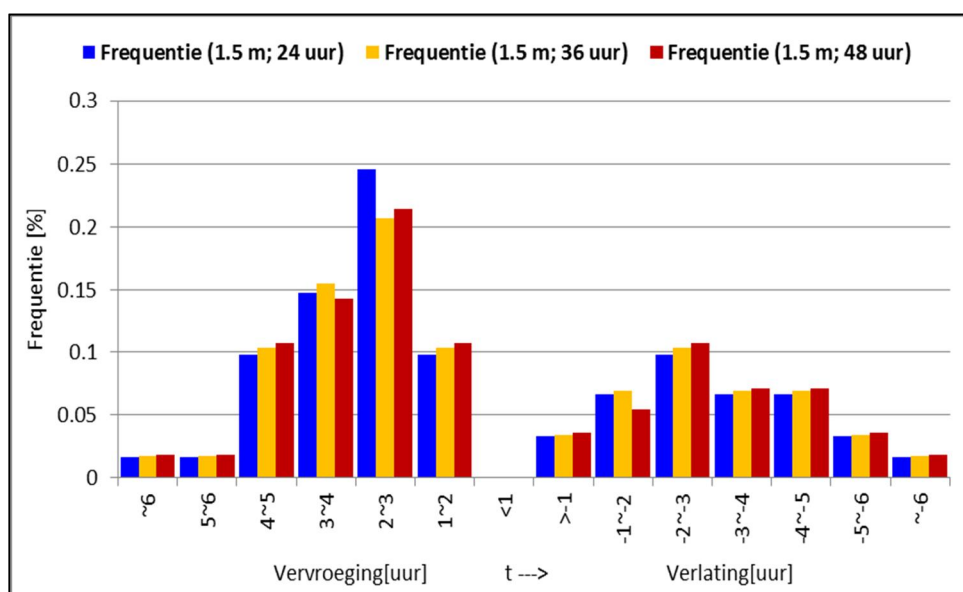
Een grafische weergave van de resultaten voor station IJmuiden is te vinden in Figuur 5.13 t/m/ Figuur 5.16. Tabel 5.4 de frequentieverdeling van het faseverschil voor de zichtduur van 24 uur.



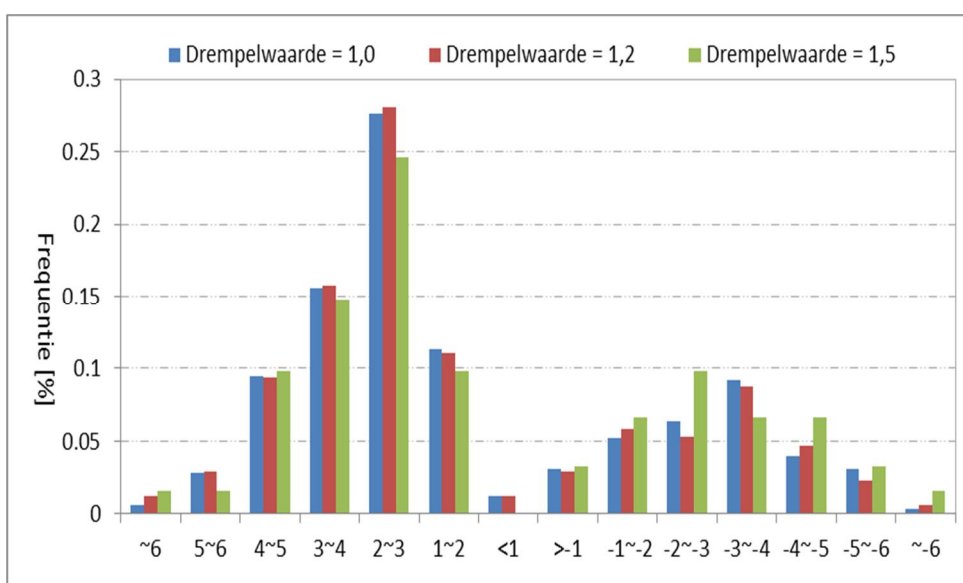
Figuur 5.13 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station IJmuiden. Drempelwaarde 1.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.



Figuur 5.14 Frequentieverdeling faseverschil tussen stormopzet en getij; station IJmuiden. Drempelwaarde 1.2 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.



Figuur 5.15 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station IJmuiden. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.



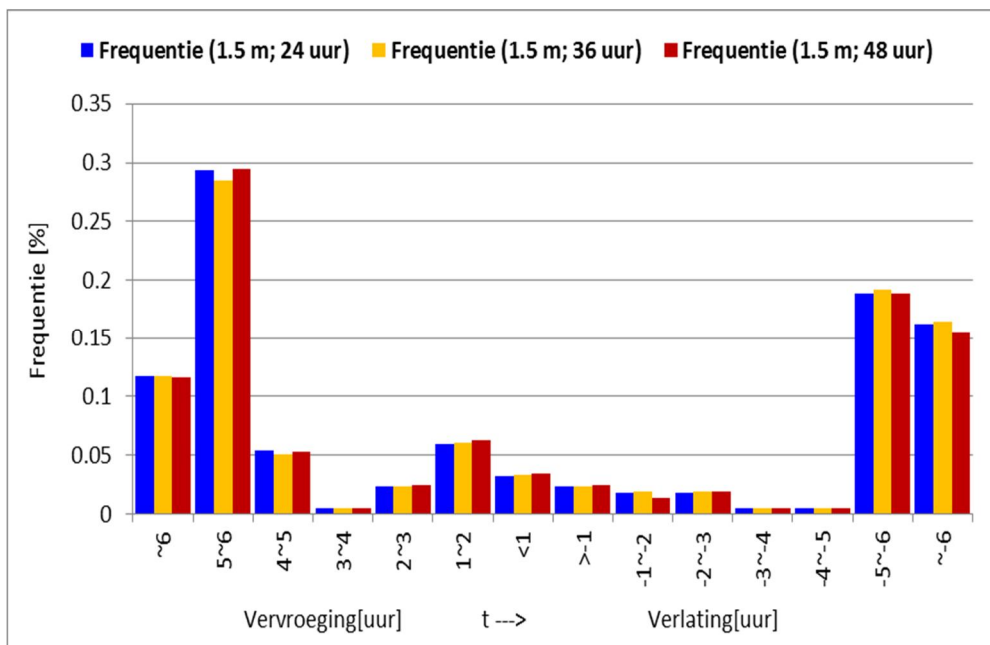
Figuur 5.16 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij, zichtduur 24 uur; station IJmuiden

Tabel 5.4 Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station IJmuiden

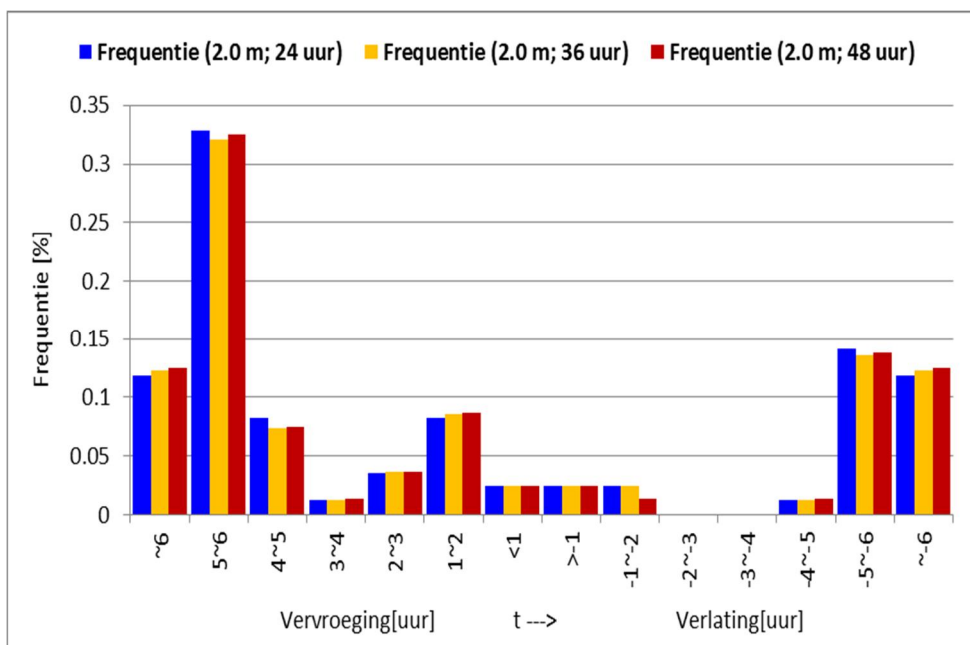
Locatie	Drempelwaarde	Frequentieverdeling [%]	
		Positief	Negatief
IJmuiden, zichtduur = 24 uur	1,0	69	31
	1,2	70	30
	1,5	62	38

Voor IJmuiden kan op basis van de resultaten in Figuur 5.13 t/m Figuur 5.16 en Tabel 5.4 geconcludeerd worden dat het effect van de drempelwaarde en zichtduur op het faseverschil

klein is voor IJmuiden. Een positief faseverschil komt voor met een frequentie van ca. 70%. De klasse [2.0, 3.0] heeft de hoogste frequentie.

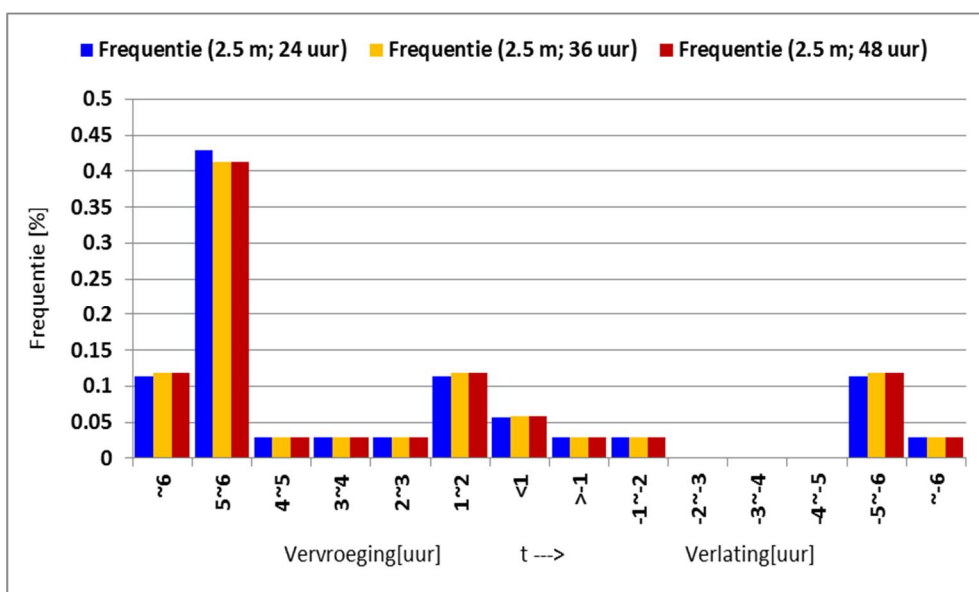


Figuur 5.17 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Harlingen. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.

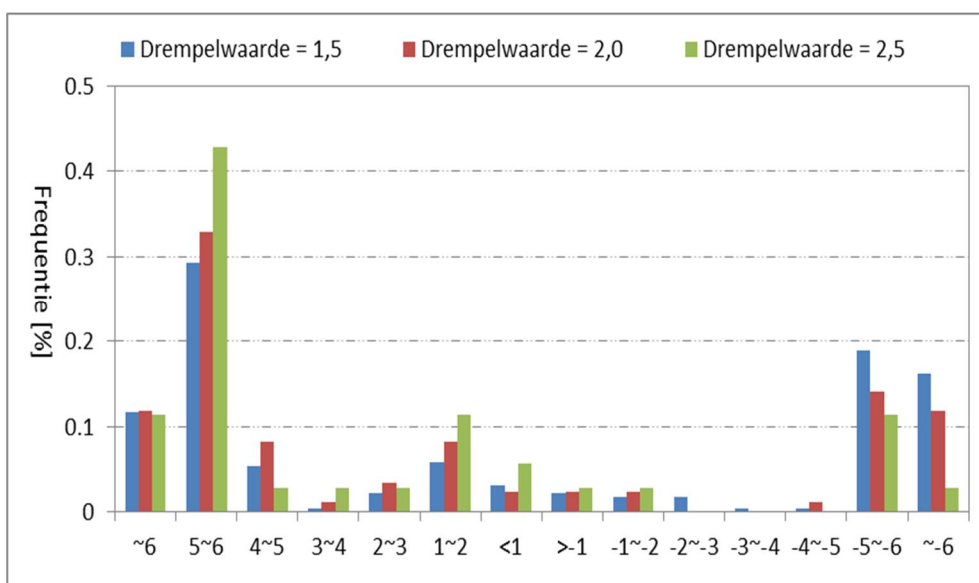


Figuur 5.18 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Harlingen. Drempelwaarde 2.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.





Figuur 5.19 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Harlingen. Drempelwaarde 2.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.

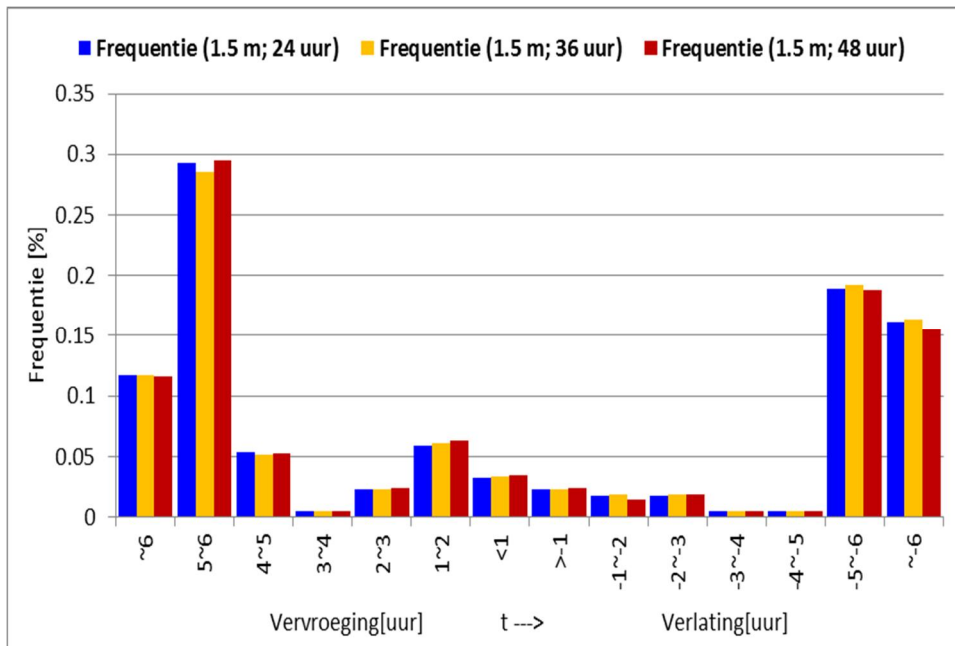


Figuur 5.20 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij, zichtduur 24 uur; station Harlingen

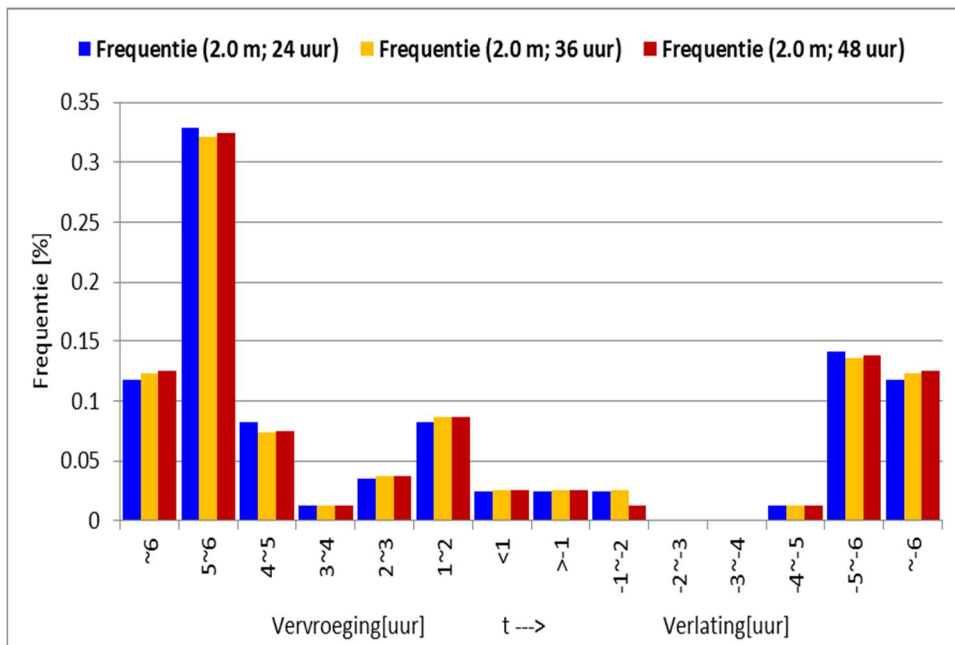
Tabel 5.5 Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station Harlingen

Locatie	Drempelwaarde	Frequentieverdeling [%]	
		Positief	Negatief
Harlingen, zichtduur = 24 uur	1,5	58	42
	2,0	68	32
	2,5	80	20

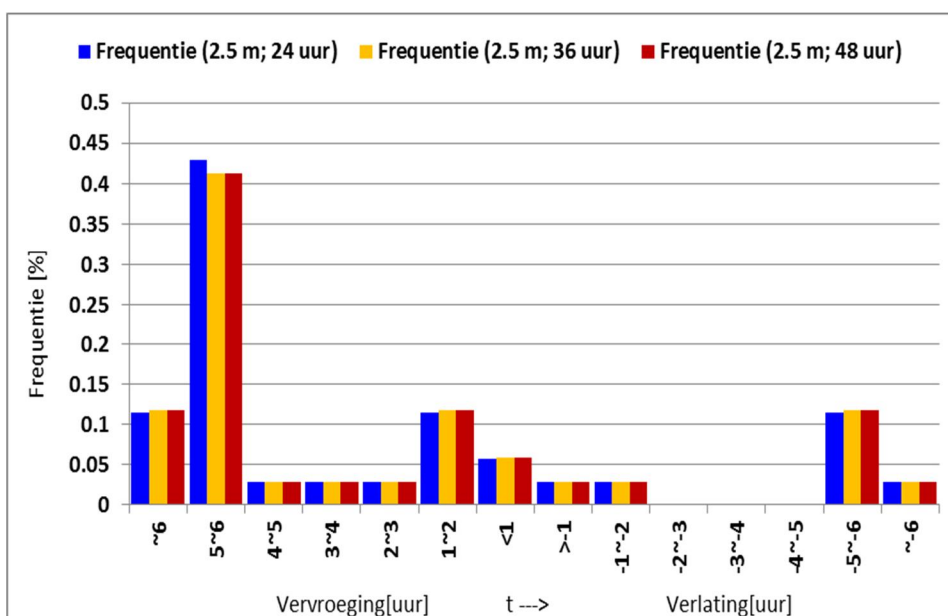
Op basis van de resultaten in Figuur 5.17 t/m Figuur 5.20 en Tabel 5.3 kan geconcludeerd worden dat het effect van de drempelwaarde en zichtduur op het faseverschil klein is voor Harlingen. We zien verder dat voor de zichtduur van 24 uur de frequentie van een positief faseverschil groter wordt voor hogere drempelwaardes.



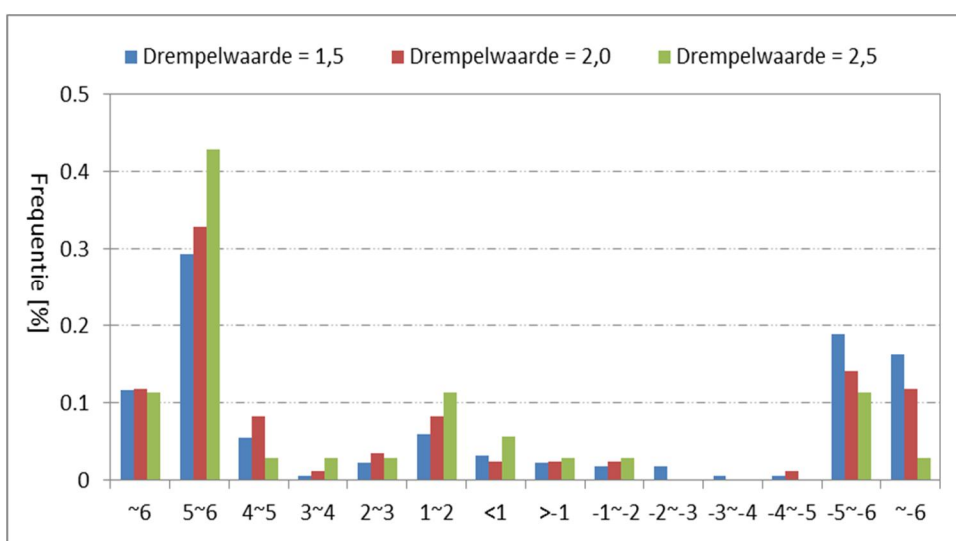
Figuur 5.21 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Drempelwaarde 1.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur



Figuur 5.22 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Drempelwaarde 2.0 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.



Figuur 5.23 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Drempelwaarde 2.5 m en zichtduren 24 uur, 36 uur en 48 uur.



Figuur 5.24 Frequentieverdeling faseverschil tussen opzet en getij; station Delfzijl. Zichtduur 24 uur.

Tabel 5.6 Resultaat analyse faseverschil tussen opzet en astronomisch getij, station Delfzijl

Locatie	Drempelwaarde	Frequentieverdeling [%]	
		Positief	Negatief
Delfzijl, zichtduur = 24 uur	1,0	58	42
	1,2	69	31
	1,5	80	20

Op basis van de resultaten in Figuur 5.21 t/m Figuur 5.24 en Tabel 5.3 kan geconcludeerd worden dat het effect van de drempelwaarde en zichtduur op het faseverschil klein is voor Delfzijl. We zien verder dat voor de zichtduur van 24 uur de frequentie van een positief

faseverschil groter wordt voor hogere drempelwaardes. Tussen Harlingen en Delfzijl zijn grote overeenkomsten te constateren.

Uitgaande van de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen in Figuur 5.9 t/m Figuur 5.24 kan geconcludeerd worden dat het faseverschil tussen stormopzet en getij nauwelijks wordt beïnvloed door de keuzes van zichtduur en drempelwaarde. Een hogere drempelwaarde dan de 1,5 m of een langere zichtduur dan 24 uur, beschouwd in hoofdstuk 4, resulteren niet een significant verschil van de frequentieverdeling van het faseverschil tussen stormopzet en astronomisch getij; dit geldt voor alle onderzochte stations.

## 5.4 Samenvatting en conclusies

In dit hoofdstuk is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de mogelijke effecten van de keuze van zichtduur en drempelwaarde op de resultaten uit de hoofdstukken 3 en 4. Er zijn 4 stations beschouwd en per station zijn 3 drempelwaardes en 3 zichtduren geanalyseerd. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De keuze van de drempelwaarde beïnvloedt nauwelijks het tijdsverloop van de stormopzet in het deel boven  $\pm 0.5$  genormaliseerde stormopzet, dit geldt voor alle onderzochte stations,
- De keuze van de zichtduur heeft weliswaar een grote impact op het laagste gedeelte van de duur van de stormopzet, maar het gedeelte rondom de top wordt nauwelijks beïnvloed door de keuze van de zichtduur. Dit geldt voor het gedeelte vanaf de top tot het niveau van 50% onder de top. Daar dit gedeelte het meest relevant is, concluderen we dat de keuze van de zichtduur van 24 uur in hoofdstuk 3 adequaat is,
- Het faseverschil tussen de stormopzet en het astronomische getij verschilt per station, maar wordt nauwelijks beïnvloed door de keuze van zichtduur en drempelwaarde.

## 6 Waterstandsverloop kust

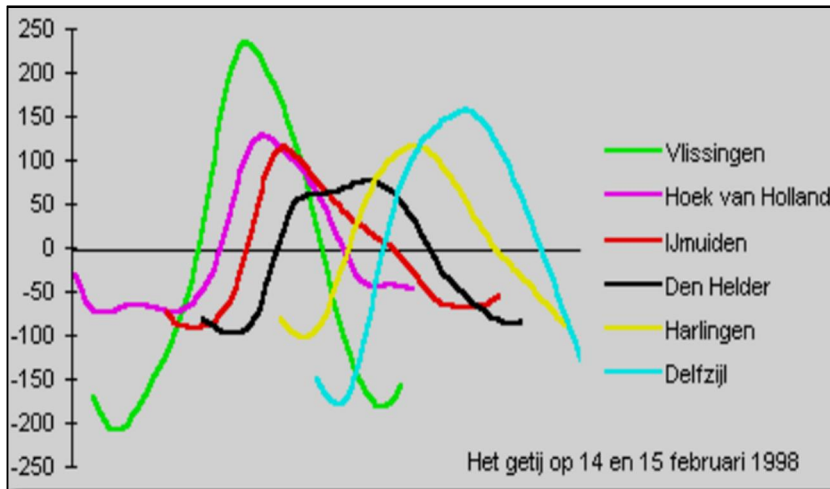
### 6.1 Inleiding

Zoals hierboven al vermeld zijn er in principe twee componenten die leiden tot hoge waterstanden in het algemeen en toetspeilen in het bijzonder. Deze componenten zijn: stormopzet veroorzaakt door storm (intensiteit en richting) en astronomisch getij. Het tijdsverloop van deze twee componenten zijn dan bepalend voor het tijdsverloop van de waterstand. Afhankelijk van locatie kan één van deze componenten in meer of mindere mate bijdragen aan hoge waterstanden. Het is mede daarom evident, en analoog aan de situatie in de zoete wateren, dat bij de vaststelling van het tijdsverloop van de waterstand rekening wordt gehouden met beide componenten, hun bijdrage aan het toetspeil en de onderlinge samenhang/interactie.

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe op basis van het geschematiseerde tijdsverloop van de stormopzet, het astronomische getij en het faseverschil tussen deze twee het tijdsverloop van de waterstand geconstrueerd kan worden. Ook wordt onderzocht of en welke effecten het faseverschil zou kunnen hebben op het waterstandsverloop van de waterstand. Dit heeft plaatsgevonden door voor een aantal stations niet alleen het faseverschil met de hoogste frequentie te beschouwen maar ook de fase met de ene na hoogste frequentie.

### 6.2 Astronomisch getij

De astronomische getijcyclus bedraagt voor de Nederlandse kust ca. 12 uur en 25 minuten. Astronomisch getij heeft weliswaar een regelmatig patroon maar er kunnen wel enige verschillen ontstaan in o.a de hoogte van de getijamplitude. Verder is het verloop van het astronomisch getij sterk afhankelijk van plaats omdat het getij bepaald wordt door veel factoren, waaronder waterdiepte en reflectie/buiging van golven. De tijden waarop hoogwater en laagwater vallen op verschillende plaatsen langs de Nederlandse kust verschillen dan ook sterk. Het getij plant zich in bijna twaalf uur voort van zuidwesten naar noordoosten van het land. Ook de getijamplitude verschilt per plaats. Het getijverschil (verschil tussen hoogwater en laagwater) is het grootst in Zeeland (Vlissingen). Vanaf dat punt neemt het in de noordelijke richting geleidelijk af, tot Den Helder; vanaf Den Helder neemt het in de oostelijke richting weer toe. Vergelijk groene (Vlissingen), zwarte (Den Helder) en blauwe (Delfzijl) lijnen in Figuur 6.1.



Figuur 6.1 Illustratie verschillen in astronomisch getij langs de Nederlandse kust (periode 14 en 15 februari 1998).

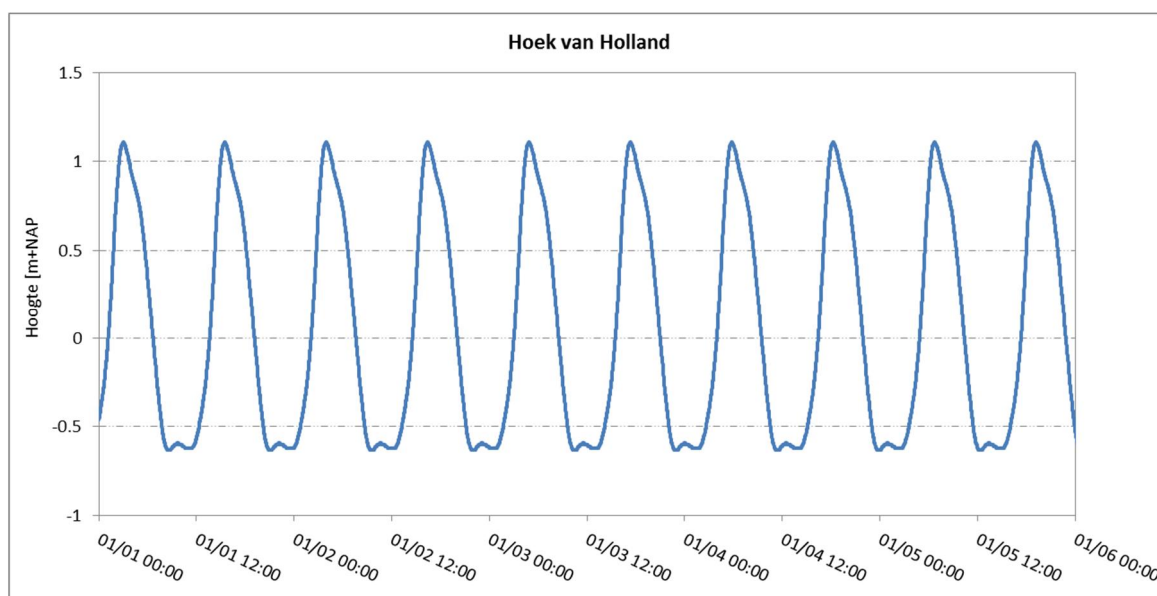
Waterdiepte, de vorm van de kust en de uitmonding van rivieren kunnen invloed hebben op het gedrag van het getij. De astronomische getijcyclus van 12 uur en 25 minuten blijft hetzelfde, maar op sommige plekken kan het door deze invloeden 2 keer zo lang eb of vloed zijn. Zo is er in Hoek van Holland sprake van een dubbel laagwater bij springtij en komen in Den Helder dubbele hoogwaters voor. laat Figuur 6.1 zien dat het astronomische getij spitser is voor de zuidelijke stations dan voor de noordelijke stations, vergelijk Vlissingen en Den Helder.

N.B. het getij heeft het kleinste verval in de buurt van Den Helder: één van de stations die het dichtst bij een amfidromisch<sup>7</sup> punt ligt. Dicht bij een amfidromisch punt heeft het getij namelijk een kleine amplitude. Mede door de interactie van de Noordzee met de Waddenzee ontstaat bij de grens een soort dubbel getijtop.

### 6.3 Gemiddeld astronomisch getij

Zoals in paragraaf 3.4 vermeld, zijn van alle beschouwde stations waterstandsreeksen beschikbaar gesteld door de HelpdeskWater, inclusief tijdreeksen van het astronomische getij. Ook zijn getijgegevens geleverd om de zogenoemde gemiddelde getijkrommen 1991.0 te construeren. In degelijke gemiddelde getijreeksen zijn onregelmatigheden gefilterd waardoor een relatief gladder en uniformer tijdverloop verkregen wordt. Dergelijke gemiddelde getijkrommen zijn representatief voor het gemiddelde astronomische getij. Op basis van de door de HelpdeskWater beschikbaar gestelde gegevens zijn voor alle geselecteerde zeven stations de gemiddelde getijkrommen 1991.0 afgeleid. Als illustratie is in Figuur 6.2 de afgeleide gemiddelde getijkromme 1991.0 voor Hoek van Holland is afgebeeld.

<sup>7</sup> Een amfidromisch punt is een punt in de zee waar er geen getij. Onder invloed van het coriolisteffect draait de getijgolf rond dit punt.



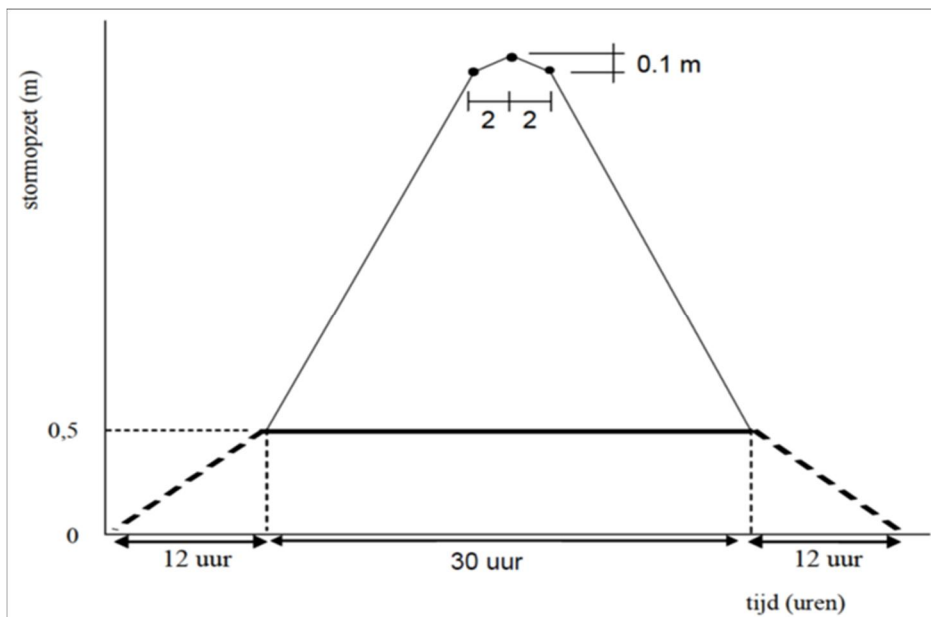
Figuur 6.2 Astronomisch en gemiddeld astronomisch getij bij Delfzijl, periode 1 januari-10 januari 2000.

Merk op dat de gemiddelde getijkromme 1991.0 voor Hoek van Holland geldt als basis voor het genereren van het waterstandsverloop bij Hoek van Holland; die vervolgens als benedenrand wordt gebruikt voor de productieberekeningen met WAQUA voor het Benedenrivierengebied; zie ook volgende paragraaf Figuur 6.3.

De afgeleide gemiddelde getijkrommen voor de overige stations zijn te vinden in Bijlage A.

#### 6.4 Waterstandsverloop Hoek van Holland

Het principe om waterstandsverlopen vast te stellen voor locaties in het merengebied is in principe ook toegepast om het waterstandsverloop bij Hoek van Holland te bepalen. De stormopzet als gevolg van (westelijke tot noordwestelijke) stormen bepaalt, samen met het astronomische getij, de maatgevende waterstanden langs de kust. Het faseverschil tussen de top van de stormopzet en de top van het astronomische getij speelt hierbij een rol en dient in beschouwing te worden genomen.

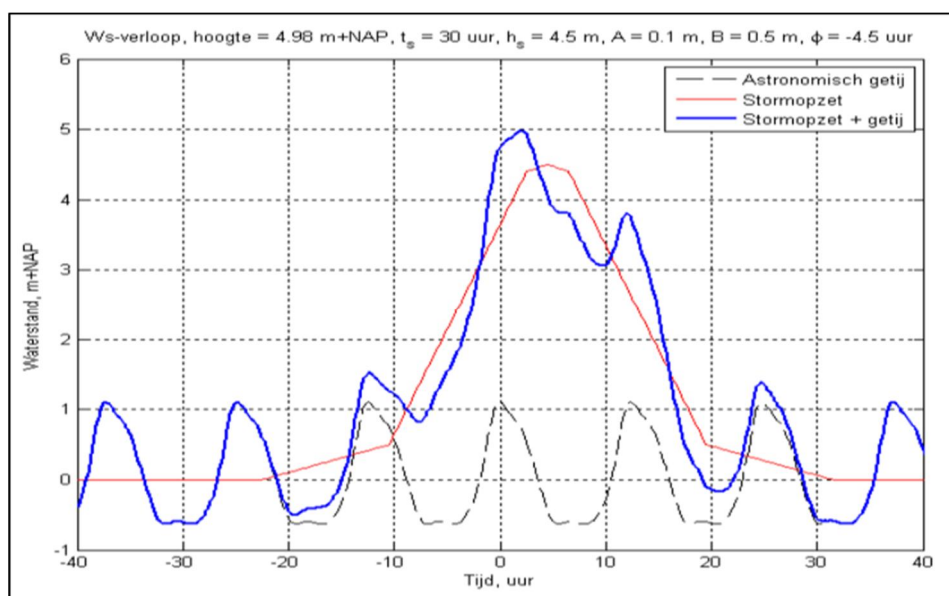


Figuur 6.3 Tijdsverloop en duur van de stormopzet bij Hoek van Holland uit WTI-2011

Het waterstandsverloop bij Hoek van Holland, nodig voor de productieberekeningen van waterstanden in het Benedenrivierengebied, is in het kader van WTI-2011 (opnieuw) vastgesteld en bestaat uit een combinatie van een stormopzetverloop, een tijdsverloop van het gemiddeld astronomische getij en een faseverschil tussen de toppen van beide, zie voor details Chbab (2012). Het tijdsverloop van de stormopzet bij Hoek van Holland is al hierboven afgebeeld in Figuur 3.7 van dit rapport en wordt voor de overzichtelijkheid opnieuw weergegeven in Figuur 6.3. Het faseverschil tussen het tijdstip van de maximale stormopzet en de maximale amplitude van de gemiddelde getijreeks bij Hoek van Holland is uitvoering onderzocht in WTI-2011 en is gerapporteerd in Chbab (2010).

Het faseverschil tussen stormopzet en getij voor station Hoek van Holland bedraagt -4,5 uur. Om het waterstandsverloop behorende bij het tijdsverloop van de stormopzet beschreven in Figuur 6.3 te vinden, wordt dit tijdsverloop gesuperponeerd op het gemiddelde getijverloop, waarbij bovendien rekening wordt gehouden de faseverschuiving van -4,5 uur. Deze verschuiving houdt zoals hierboven al gemeld in dat de top van het opzetpatroon over -4,5 uur is verschoven ten opzichte van de top van het astronomische getij. Er ontstaat een waterstandsverloop zoals afgebeeld in Figuur 6.4.





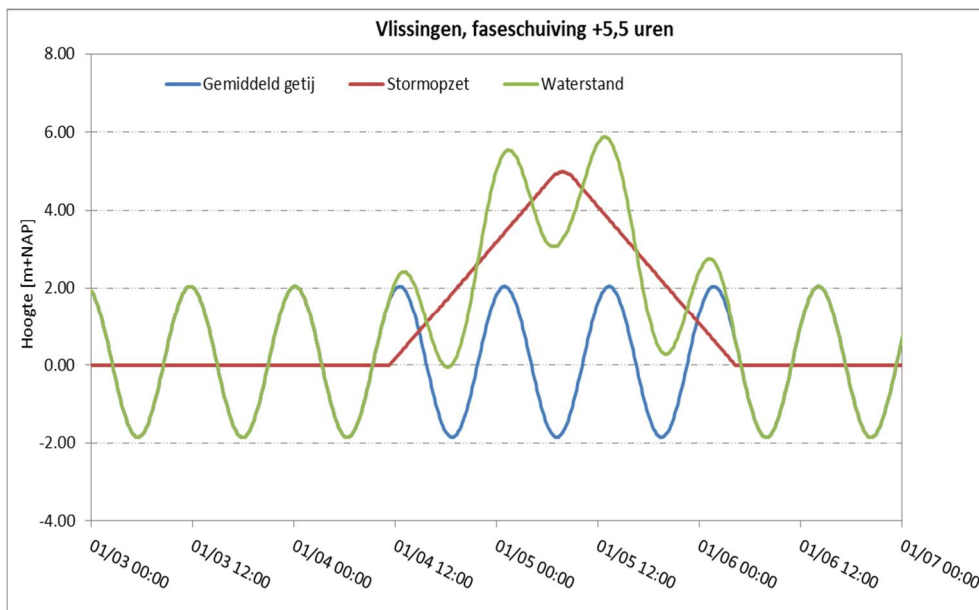
Figuur 6.4 Waterstandsverloop Hoek van Holland behorende bij een waterstand van 5.0 m (bron (Chbab, 2012)).

## 6.5 Waterstandsverloop kuststations

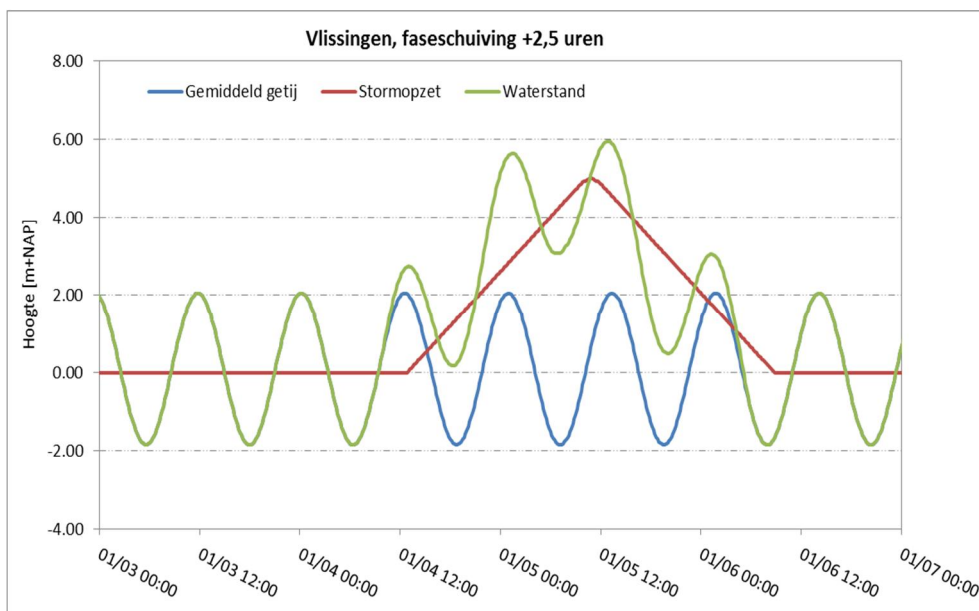
Analoog aan station Hoek van Holland worden voor de zes in dit rapport beschouwde stations waterstandsverlopen geconstrueerd. Hierbij zijn de tijdsverlopen van de stormopzet gebruikt in combinatie met het gemiddelde getijkromme 1991.0 en het faseverschil gebruikt.

Op basis van een geschematiseerd tijdsverloop voor de stormopzet en het gemiddelde astronomische getij<sup>8</sup> uit de periode 1 januari – 10 januari 2000 is een waterstandsverloop geconstrueerd voor Vlissingen. Voor het tijdsverloop van de stormopzet geldt een trapeziumvorm met basisduur van 44 uur en topduur van 2 uur, zie ook Figuur 3.6 voor de vorm rond de top. De stormopzet heeft een topwaarde van 5,0 m. Daarnaast is een faseverschuiving gehanteerd van +5,5 uur. Dit wil zeggen dat de top van het gemiddelde astronomische getij +5,5 uur eerder optreedt dan de top van de stormopzet. Een faseverschuiving van +5,5 uur heeft voor Vlissingen de hoogste frequentie van optreden, zie ook Figuur 4.3. Het aldus afgeleide waterstandsverloop voor Vlissingen is afgebeeld in Figuur 6.8. Daarnaast is een waterstandsverloop geconstrueerd met een faseverschil van +2,5 uur: de fase met de frequentie van optreden op de tweede plaats, na faseverschil 5,5 uur.

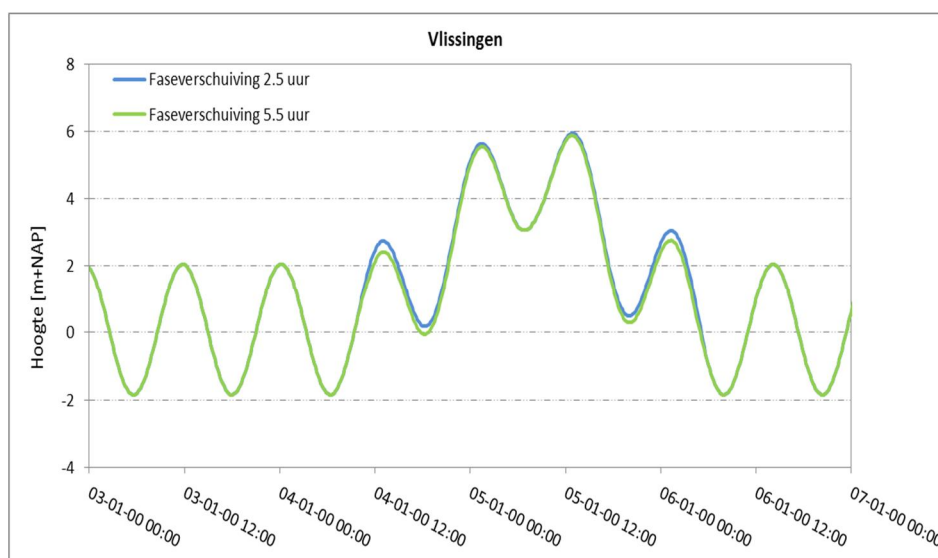
<sup>8</sup> Voor de definitieve waterstandsverlopen dient het gemiddelde astronomische getij uit de volledige meetperiode te worden beschouwd.



Figuur 6.5 Waterstandsverloop Vlissingen op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +5,5 uur.



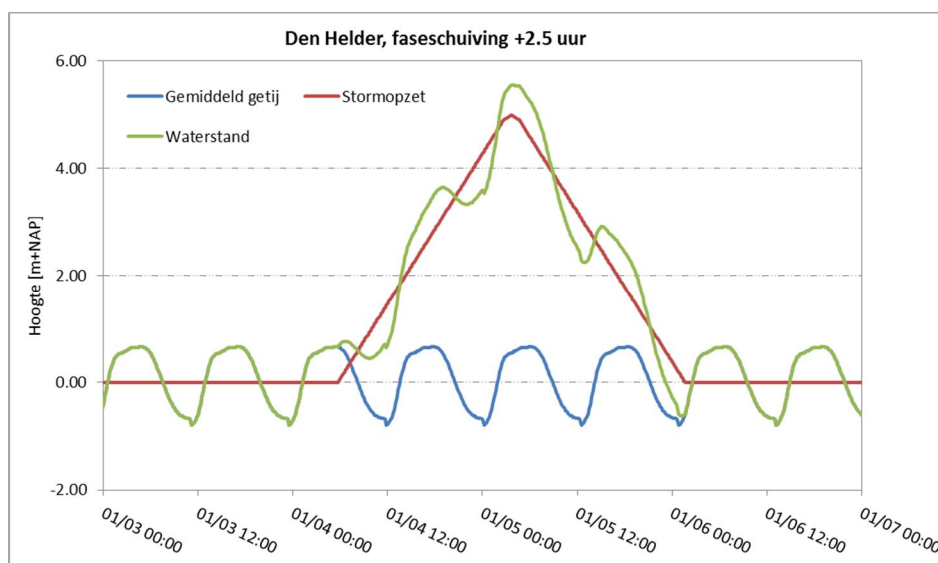
Figuur 6.6 Waterstandsverloop Vlissingen op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +2,5 uur.



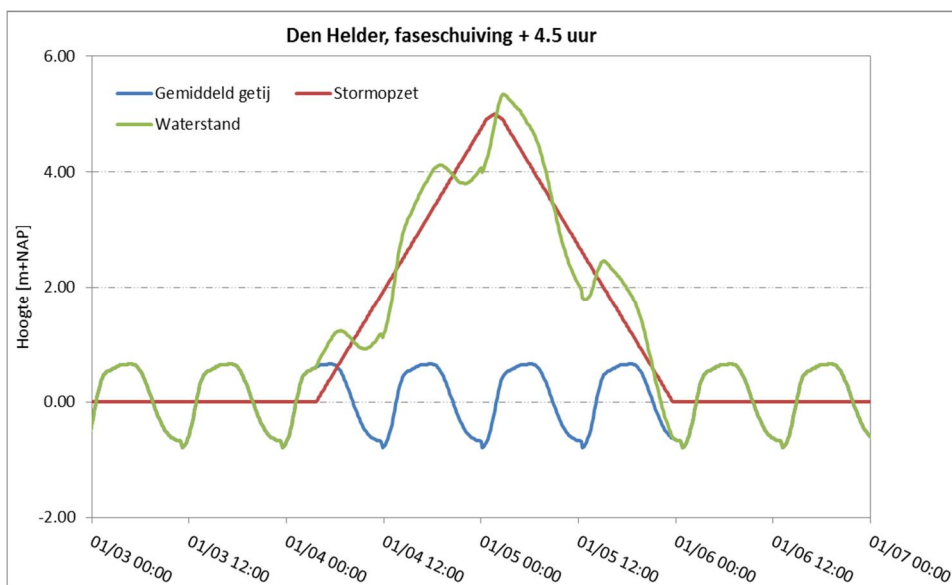
Figuur 6.7 Waterstandsverloop Vlissingen voor faseverschuiving van 2,5 uur (blauw) en 5,5 uur (groen).

In Figuur 6.7 is voor station Vlissingen het waterstandsverloop afgebeeld dat resulteert uit een faseverschil van +2,5 uur respectievelijk +5,5 uur; dit zijn de twee fases met de hoogste frequentie van optreden. De figuur laat zien dat deze twee fases nauwelijks impact heeft op het waterstandsverloop. De topwaarde van de waterstand is namelijk hetzelfde; ook het verloop van de waterstand rond de top verandert niet. Verder is duidelijk te zien dat de vorm van stormopzet in combinatie met het astronomische getij en faseverschil leidt tot een tweekoppig waterstandsverloop.

Analoog wordt voor station Den Helder een waterstandsverloop geconstrueerd op basis van eenzelfde geschematiseerd opzetverloop (trapezium met 44 uur in de basis en 2 uur in de top) en gemiddeld getij. Hierbij zijn evenals Vlissingen de twee fases met de hoogste frequentie van optreden beschouwd: +2,5 uur en +4,5 uur, zie ook Figuur 4.6. De hoogte van de stormopzet is 5,0 m. Het resultaat is afgebeeld in Figuur 6.8 en Figuur 6.9.

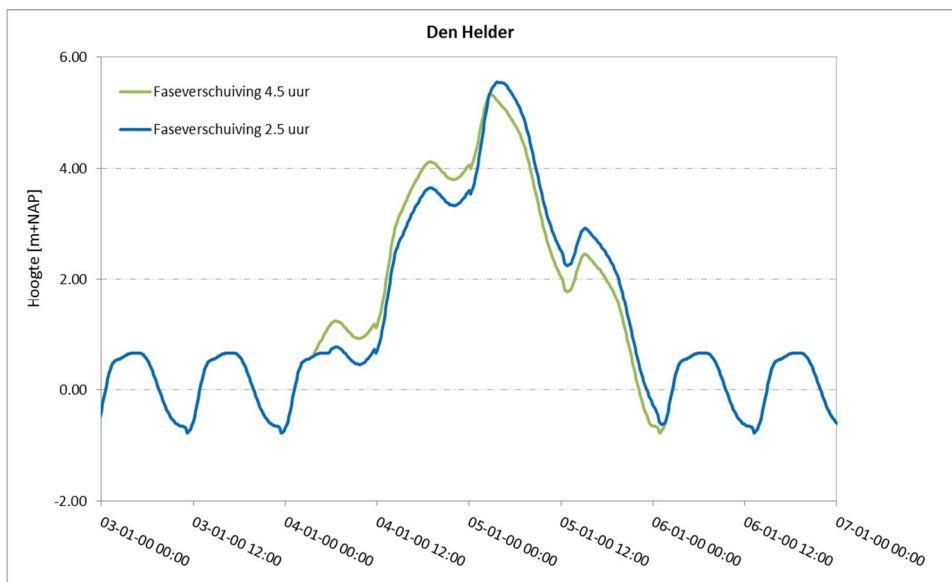


Figuur 6.8 Waterstandsverloop Den Helder op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +2,5 uur.



Figuur 6.9 Waterstandsverloop Den Helder op basis van standaard trapezium uit Figuur 3.37 (basisduur is 44 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +4,5 uur.

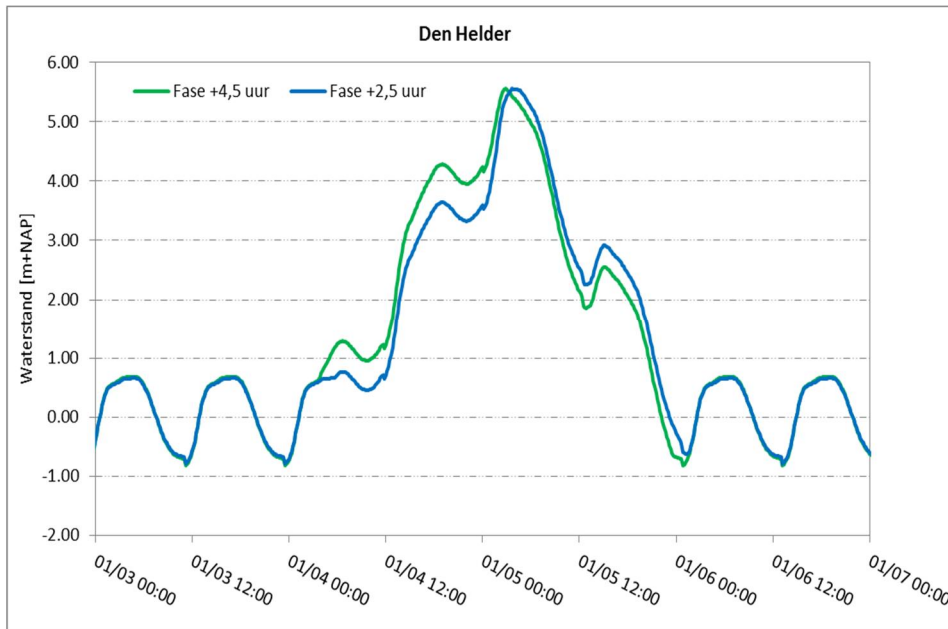
In vergelijking met Vlissingen leidt een trapeziumverloop van 44 uur en gemiddeld getij bij Den Helder tot een ander waterstandsverloop. Vooral het waterstandsverloop voor de fase van +2,5 uur (dezelfde fase voor zowel Vlissingen als Den Helder) is verschillend. Dit komt door de vorm van het getij. Het hoogwater is bij Vlissingen veel spits terwyl het verloop van het hoogwater bij Den Helder veel breder is, zie Figuur 6.1.



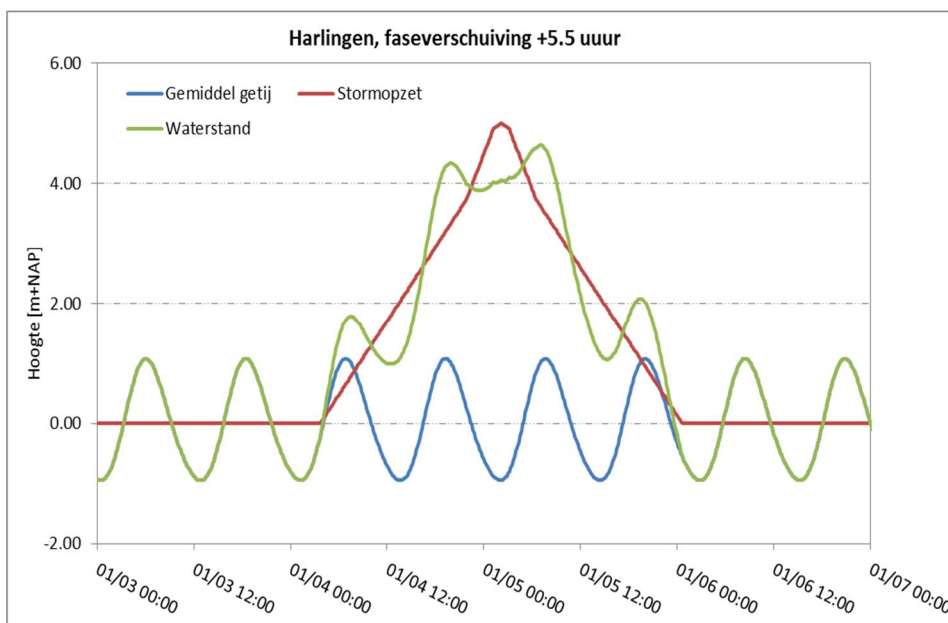
Figuur 6.10 Waterstandsverloop Den Helder voor faseverschuiving 2,5 uur en 4,5 uur.

In tegenstelling tot Vlissingen laat resulteren de fases Figuur 6.10 zien dat de fases +2,5 uur en 4,5 uur resulteren voor Den Helder in twee verschillende waterstanden. Het verschil betreft zowel de top van de waterstand als het tijdsverloop. Het faseverschil van +4,5 uur leidt tot een lagere waterstand dan een fase van +2,5 uur, hert verschil bedraagt 0,22 m. Het tijdsverloop na opschalen naar gelijke hoogte is afgebeeld in Figuur 6.11. Duidelijk is te zien

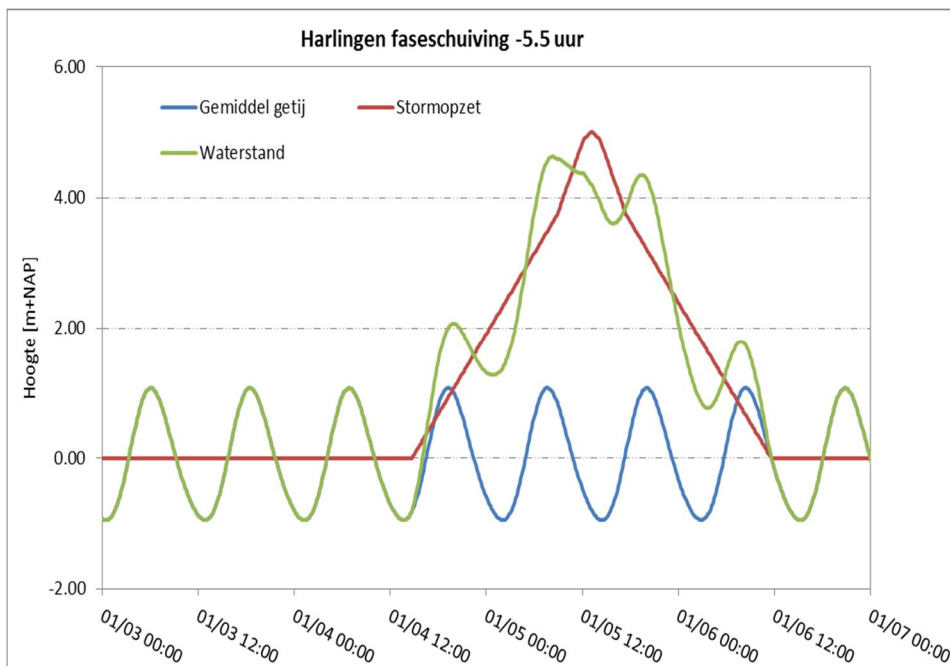
dat een faseverschuiving van 4,5 uur leidt tot een enigszins breder tijdsverloop van de waterstand.



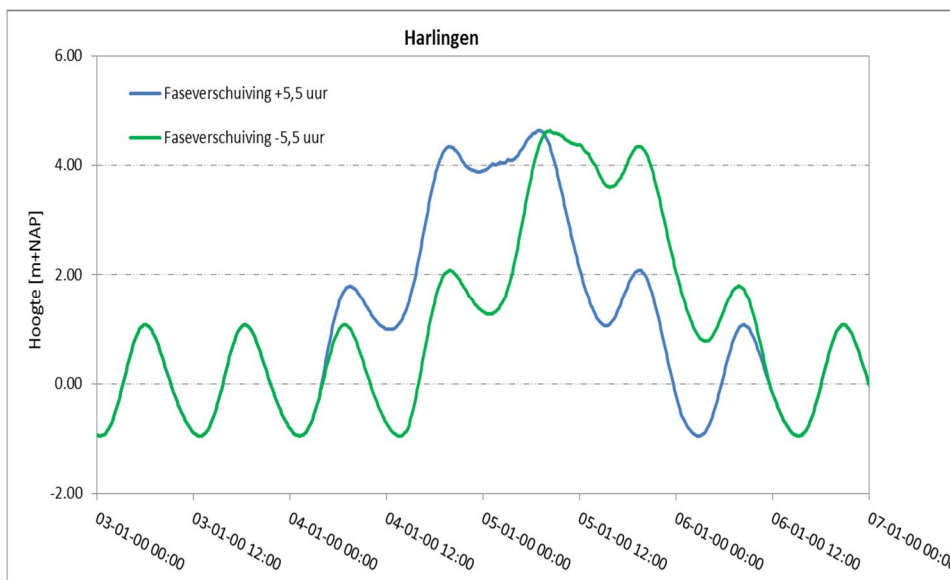
Figuur 6.11 Waterstandsverloop opgeschaald naar eenzelfde hoogte voor Den Helder voor faseverschuivingen 4,5 en 2,5 uur.



Figuur 6.12 Waterstandsverloop Harlingen op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38 (basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt 5,5 uur.

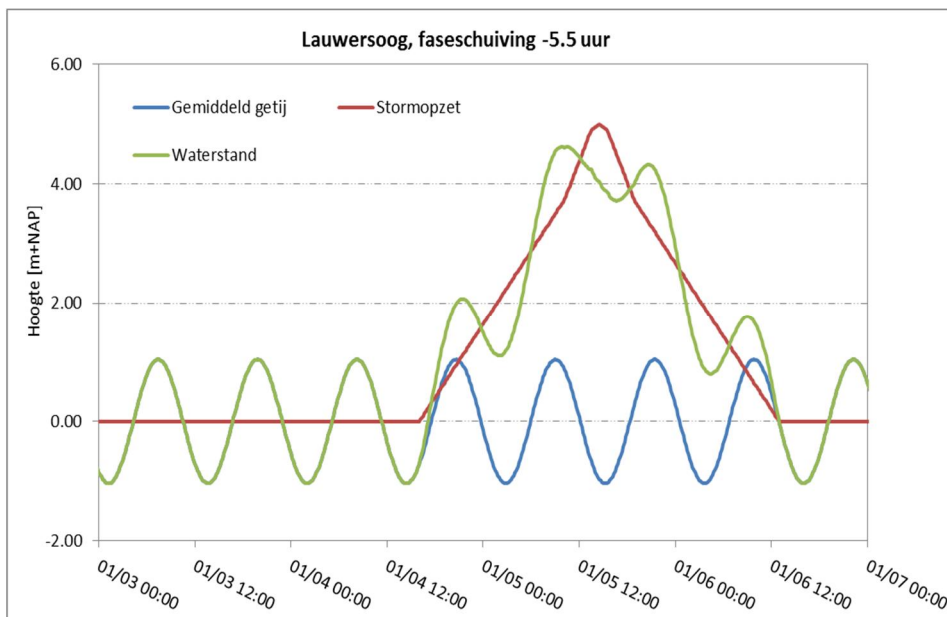


Figuur 6.13 Waterstandsverloop Harlingen op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt -5,5 uur.

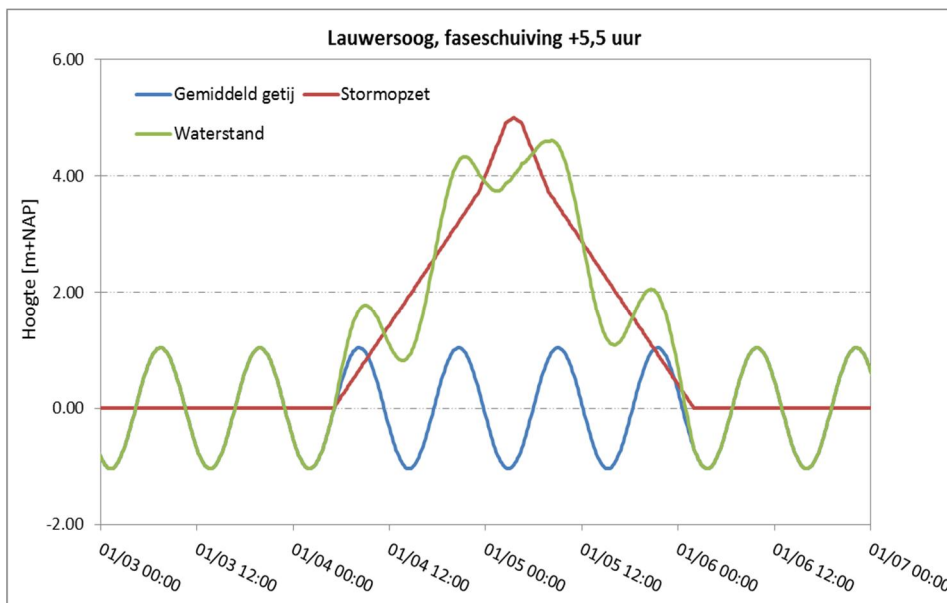


Figuur 6.14 Waterstandsverloop Harlingen voor faseverschuiving -5,5 uur en +5,5 uur.

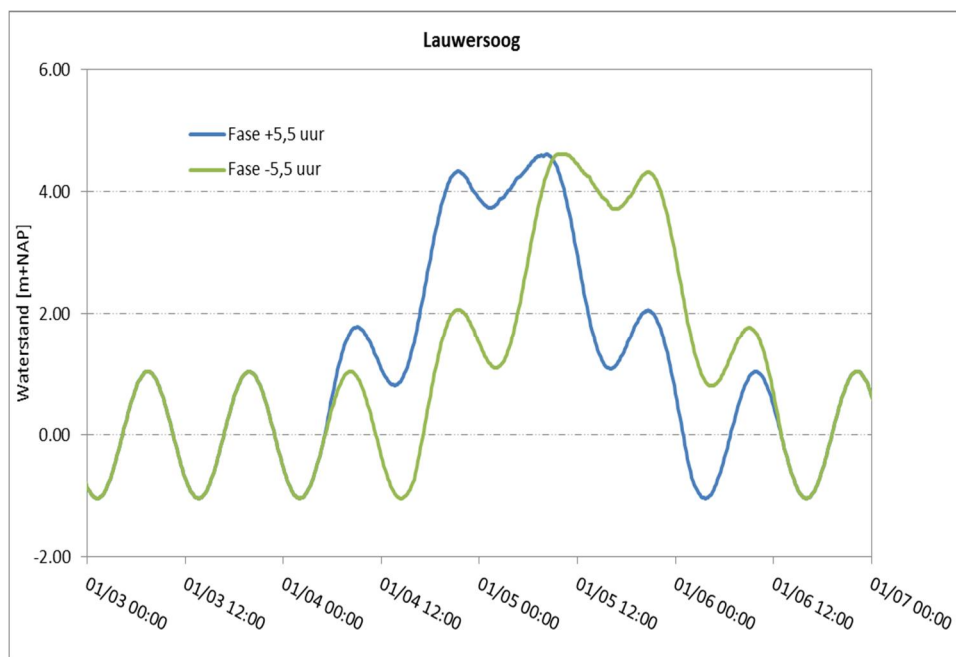
Figuur 6.14 laat zien dat de fases van -5,5 uur en + 5,5 uur leiden tot, op een verschuiving na, hetzelfde waterstandsverloop voor station Harlingen. Deze conclusie geldt ook voor Lauwersoog, zie Figuur 6.17.



Figuur 6.15 Waterstandsverloop Lauwersoog op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt -5,5 uur.



Figuur 6.16 Waterstandsverloop Lauwersoog op basis van geknikt trapezium uit Figuur 3.38(basisduur is 45 uur en topduur is 2 uur) en gemiddelde getijreeks uit periode 1 – 10 januari 2000. Het faseverschil bedraagt +5,5 uur.



Figuur 6.17 Waterstandsverloop Lauwersoog voor faseverschuiving +5,5 en -5,5 uur.



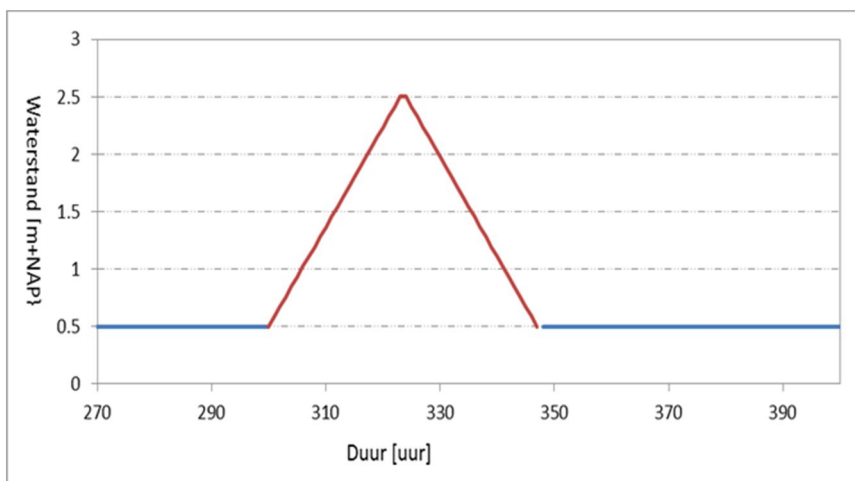
## 7 Recept waterstandsverloop kust

### 7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het recept voor de vaststelling van het waterstandsverloop behorende bij het toetspeil. Het recept is generiek en wordt toegepast voor elke willekeurige locatie langs de kustgebieden. Dit recept is vergelijkbaar met het generieke recept dat reeds is ontwikkeld en toegepast voor de meren. Alvorens we het recept voor de kust beschrijven in paragraaf 7.3, geven we eerst in paragraaf 7.2 een korte beschrijving van het recept voor de meren.

### 7.2 Recept waterstandsverloop meren

In Chbab (2011) is een generiek recept gegeven voor het bepalen van het waterstandsverloop voor de meren. Het waterstandsverloop op een willekeurige locatie wordt gegeven door een trapeziumvormig tijdsverloop voor de windopzet gesuperponeerd op een stationair tijdsverloop van het meerpeil. Hierbij wordt rekening gehouden met de (kans)bijdrage van de stochasten meerpeil en wind aan het toetspeil. Voor locaties waar de wind een dominante rol speelt, de zogenoemde wind-gedomineerde locaties, wordt het waterstandsverloop hoofdzakelijk bepaald door het verloop van de windopzet; op locaties waar de waterstand gedomineerd wordt door het meerpeil, wordt het waterstandsverloop dan ook hoofdzakelijk bepaald door het meerpeil, de bijdrage van windopzet aan het tijdsverloop is klein. Het meerpeil verandert langzaam in de tijd (trage stochast), en heeft een stationair tijdsverloop (Zie voor details, Chbab, 2011). Het tijdsverloop van de windopzet is trapeziumvormig met een basisduur van 40 uur en een constante topduur van 2 uur. Een fictief voorbeeld van een dergelijk waterstandsverloop is afgebeeld in Figuur 7.1. Het betreft een waterstandsverloop behorend bij een van toetspeil 2,5 m+NA; het tijdsverloop bestaat uit een stationair meerpeil van 0,5 m+NAP met daarop gesuperponeerd een trapeziumverloop als gevolg van windopzet met basisduur van 40 uur en topduur van 2 uur.



Figuur 7.1 Voorbeeld waterstandsverloop meren

Het recept voor de vaststelling van het waterstandsverloop voor een willekeurige locatie in het merengebied luidt (Chbab, 2012):

1. Bepaal met Hydra-Zoet voor de beschouwde locatie het toetspeil en de  $m_{90\%}$ -waarde<sup>9</sup> van het meerpeil,
2. Indien de  $m_{90\%}$ -waarde voor de betreffende locatie groter is of gelijk aan het toetspeil dan wordt een stationaire vorm op het niveau van het toetspeil aangehouden als tijdsverloop.
3. Indien de  $m_{90\%}$ -waarde voor de betreffende locatie kleiner is dan het toetspeil dan wordt het verloop in de tijd van het toetspeil gegeven door een combinatie van de  $m_{90\%}$ -waarde en van de stormopzet. De som van de  $m_{90\%}$ -waarde en de opzethoogte is gelijk aan het toetspeil en het tijdsverloop van de windopzet heeft een trapeziumvorm met een basisduur van 40 uur en topduur van 2 uur. De parameters van het trapezium zijn onafhankelijk van de ligging van de locatie.

Om het waterstandsverloop behorende bij een bepaalde HR-locatie in het IJsselmeer of het Markermeer te bepalen, zijn dus slechts twee gegevens nodig: het toetspeil en de  $m_{90\%}$ -waarde.

### 7.3 Recept waterstandsverloop kust

Analoog aan meren geven we in deze paragraaf het recept om tot een waterstandsverloop te komen op een willekeurige locatie langs de kustgebieden. Het recept luidt:

1. Bepaal met Hydra-Ring voor de beschouwde locatie het toetspeil behorende bij de geldende norm; hierbij dient uitgegaan te worden van de nieuwe normen,
2. Bepaal voor de beschouwde locatie het gemiddelde astronomische getij,
3. Kies voor de beschouwde locatie Tabel 7.1 het tijdsverloop voor de stormopzet en het faseverschil tussen de maxima van de stormopzet en het getij,
4. Bepaal het tijdsverloop van de waterstand voor de beschouwde locatie door het gekozen tijdsverloop voor de stormopzet te superponeren op het gemiddelde astronomische getij, rekening houdend met de faseverschuiving in Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Parameters Trapezia tijdsverloop stormopzet en faseverschuiving kustgebieden

Gebied/locatie	Tijdsverloop stormopzet	Faseverschil opzet en getij
Zeeuwse en Hollandse kust	Trapezium, basis duur = 44 uur en topduur = 2 uur	2,5 uur
Hoek van Holland	Trapezium, duur = 30 uur op half meter niveau en flanken van 12 uur naar nul meter niveau	-4,5 uur
Waddenzee	Geknikt trapezium, basis duur 45 uur en topduur = 2 uur. Knik ligt op niveau 20% onder de top	5,5 uur

Het hierboven gepresenteerde recept kan in principe toegepast worden om het waterstandsverloop te bepalen behorende bij elke topniveau van de waterstand en niet alleen het toetspeil.

<sup>9</sup> De 90%-waarde van het meerpeil,  $m_{90\%}$ , wordt gedefinieerd als de waarde waarbij het falen van de kering 90% kans is het meerpeilniveau lager is dan de betreffende waarde. Hier staat falen voor het overschrijden van het toetspeil. Dit betekent dat bij het overschrijden van het toetspeil er slechts 10% kans bestaat op een hoger meerpeil dan de 90%-waarde.

Het tijdsverloop van de stormopzet bij Hoek van Holland blijft vanwege consistentieoverweging onveranderd t.o.v. WTI-2011. Hetzelfde geldt voor de faseverschuiving.



## 8 Samenvatting en conclusies

In het kader van het wettelijke instrumentarium WTI-2017 worden voor verscheidene watersystemen nieuwe hydraulische randvoorwaarden bepaald. Onderdeel daarvan is het tijdsverloop van de waterstanden bij het toetspeil. De waterstandsverlopen worden gebruikt het toetsen op faalmechanismen waarbij langdurige aanhoudende hoge waterstanden van belang zijn, zoals macro-instabiliteit binnenwaarts en piping.

Op basis van meetgegevens op 7 basisstations langs de kust zijn analyses gemaakt van de stormopzet en het faseverschil tussen de maxima van deze twee grootheden. De analyse van de stormopzet is gebaseerd op alle stormopzet pieken boven een bepaalde drempelwaarde, waarbij bovendien een zichtduur van toepassing is, de zogenoemde POT selectiemethode. De gebruikte meetperiodes en selectiecriteria zijn gegeven in Tabel 8.1.

Tabel 8.1 Meetgegevens en selectie pieken stormopzet

Locatie	Meetperiode	Drempelwaarde/ Zichtduur	Aantal geselecteerde opzetten
Vlissingen	1971 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	66
Hoek Holland <sup>10</sup>	van 1939 t/m 2006	1,5 m / 24 uur	68
IJmuiden	1976 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	61
Den Helder	1971 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	62
Harlingen	1975 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	184
Lauwersoog	1979 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	124
Delfzijl	1971 t/m 2013	1,5 m / 24 uur	222

Van de geselecteerde pieken van de stormopzet is analyse gemaakt en zijn voor alle stations gemiddelde tijdsverlopen van de stormopzet bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de opschalingsmethode. Om de gevoeligheid van de gekozen drempelwaarde en zichtduur gegeven in Tabel 8.1 te onderzoeken, zijn in dit rapport voor elke station aanvullende berekeningen gemaakt waarbij zowel de drempelwaarde als de zichtduur zijn gevarieerd.

Naast de analyse van de stormopzet is van de geselecteerde stations de faseverschuiving tussen de maxima van de opzet en het getij bepaald en geanalyseerd. Er zijn in totaal 13 klassen van de faseverschuiving gedefinieerd met een gemiddelde duur van 1 uur. De frequentie van elke faseverschuiving is het aantal stormopzetten dat in een bepaalde klasse voorkomt. Deze werkwijze resulteert in de een frequentieverdeling voor de faseverschuiving.

Op basis van de uitgevoerde analyses van stormopzetverloop en faseverschuiving worden de volgende conclusies getrokken:

- Voor de stations langs de Waddenzee kust resulteren de drempelwaarde van 1,5 m en de zichtduur van 24 uur in relatief meer opzetpieken in de POT series dan voor de Zeeuwse en Hollandse kust,
- De opschalingsmethode kan met succes worden toegepast om de tijdsverlopen behorende bij de stormopzet te bepalen. Opschalen van de geselecteerde opzetpieken leidt voor alle beschouwde stations tot tijdsverlopen die fysisch realistisch uitzien,

<sup>10</sup> Dit zijn dezelfde gegevens als gebruikt in (Tijssen, 2009).

- De keuze van de drempelwaarde beïnvloedt nauwelijks het tijdsverloop van de stormopzet, dit geldt voor alle onderzochte stations,
- De keuze van de zichtduur heeft weliswaar een grote impact op het laagste gedeelte van de duur van de stormopzet, maar het gedeelte rondom de top wordt nauwelijks beïnvloedt door de keuze van de zichtduur. Dit geldt voor het gedeelte vanaf de top tot het niveau van ca. 40% onder de top. Daar dit gedeelte het meest relevant is, concluderen we dat de keuze van de zichtduur van 24 uur in hoofdstuk 3 adequaat is,
- Het faseverschil tussen de stormopzet en het astronomische getij verschilt per station, maar wordt nauwelijks beïnvloedt door de keuze van zichtduur en drempelwaarde
- Het afgeleide tijdsverloop voor stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust is in principe breder dan het tijdsverloop voor de stations langs de Waddenzee; vooral rondom de top van de opzet is het tijdsverloop bij deze stations spitsier,
- Het verschil in de basisduur van de afgeleide tijdsverlopen van de stormopzet op de beschouwde stations is klein; de basisduur voor alle stations varieert tussen 41 uur (voor Vlissingen) tot 45 uur voor Harlingen,
- De afgeleide tijdsverlopen voor de stations langs de Zeeuwse en Hollandse kust kunnen goed worden benaderd door een trapeziumvormig tijdsverloop met een topduur van 2 uur; een trapeziumverloop met een topduur van 4 uur in een relatief te breed tijdsverloop rond de top,
- Een trapeziumvorm met topduur van 2 uur resulteert voor de stations langs de Waddenzee in een te brede schatting van de tijdsverlopen; deze worden beter benaderd door geknikte trapezia; de kink ligt op ca. 40% onder de top,

Het tijdsverloop van de stormopzet bepaalt samen met het gemiddelde astronomische getij en faseverschuiving het tijdsverloop van de waterstand. Het recept om voor een willekeurige locatie het tijdsverloop van de waterstand te bepalen luidt:

1. Bepaal met Hydra-Ring voor de beschouwde locatie het toetspeil behorende bij de geldende norm; hierbij dient uitgegaan te worden van de nieuwe normen,
2. Bepaal voor de beschouwde locatie het gemiddelde astronomische getij,
3. Kies uit Tabel 8.2 voor de beschouwde locatie het tijdsverloop voor de stormopzet en het faseverschil tussen de maxima van de stormopzet en het getij,
4. Bepaal het tijdsverloop van de waterstand voor de beschouwde locatie door het gekozen tijdsverloop voor de stormopzet te superponeren op het gemiddelde astronomische getij, rekening houdend met de faseverschuiving in Tabel 8.2.

Tabel 8.2 Parameters Trapezia tijdsverloop stormopzet en faseverschuiving kustgebieden

Gebied	Tijdsverloop stormopzet	Faseverschil opzet en getij
Zeeuwse en Hollandse kust	Trapezium, basis duur = 44 uur en topduur = 2 uur	2,5 uur
Hoek van Holland	Trapezium, duur = 30 uur op half meter niveau en flanken van 12 uur naar nul meter niveau	-4,5 uur
Waddenzee	Geknikt trapezium, basis duur 45 uur en topduur = 2 uur. Knik ligt op niveau 20% onder de top	5,5 uur

Dit recept is geschikt om voor elke waterstandsniveau het bijbehorende tijdsverloop te bepalen.

Het tijdsverloop van de stormopzet bij station Hoek van Holland blijft vanwege consistentieoverweging onveranderd t.o.v. WTI-2011. Hetzelfde geldt voor de faseverschuiving.





## Referenties

Beijk, V. en Geerse, C.P.M. 2004. Opschaling van afvoergolven en stormen. Methode voor het genereren van golfvormen in extreme situaties. RIZA werkdocument 2004.075x. Lelystad 2004.

Chbab, E.H., 2010. Analyse faseverschil tussen opzet en getij bij Hoek van Holland. Deltares memo, 28 juli 2010.

Chbab, E.H., 2012a. Waterstandsverlopen Meren. IJsselmeer en Markermeer. Deltares rapport 1204143-003. Deltares 2012.

Chbab, E.H., 2012b. Achtergrondrapport WTI-2011 voor het Benedenrivierengebied; concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor de Benedenrivieren. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-0030, augustus 2012.

Chbab, E.H., 2015. Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-006. Delft 2015.

Diermanse et al, 2013. Hydra Ring Scientific Documentation. Deltares & TNO-Bouw. Deltares rapport 1206006-004. Deltares 2013

Geerse, C.P.M. 2003. Probabilistische model hydraulische randvoorwaarden IJssel- en Vechtdelta. RIZA werkdocument 2003.125x. Lelystad 2003

RWS, 2006. Voorschrift Toetsen op Veiligheid, VTV-2006

RWS, 2006. Hydraulische randvoorwaarden 2006.

RWS-RIZA, 2006. Waterloopkundige berekeningen TMR-2006 Benedenrivierengebied. RWS-RIZA rapport 2007.017.

RWS-RIKZ, 2007. Verslag van de stormvloed van 11 en 12 januari 2007.

Rijkswaterstaat & KNMI 1961. Verslagen van de stormvloed 1953.

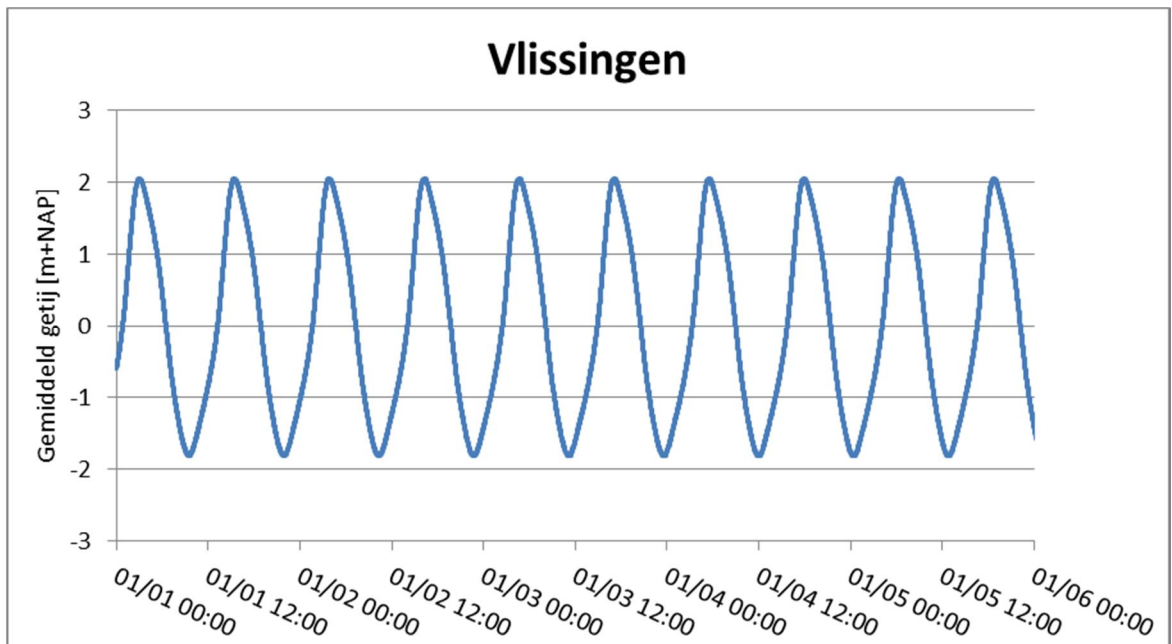
Tijssen A. 2009. Stormopzetduur en stormduur bij Hoek van Holland. Annex: gedetailleerde analyses en gevoeligheidsanalyse. Deltares 2009.

Tijssen, A. 2010. Memo Stormopzetduur bij Hoek van Holland - effecten op de toetspeilen. Deltares, 1202341-003-ZWS-0014, 15 april 2010.

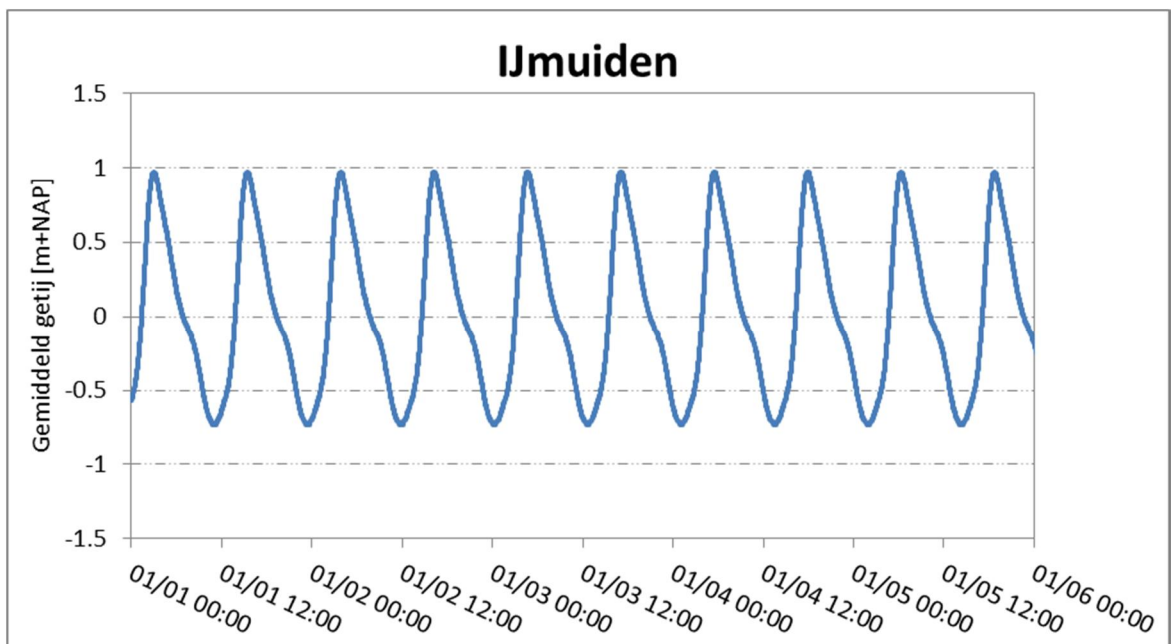


## A Gemiddeld getij

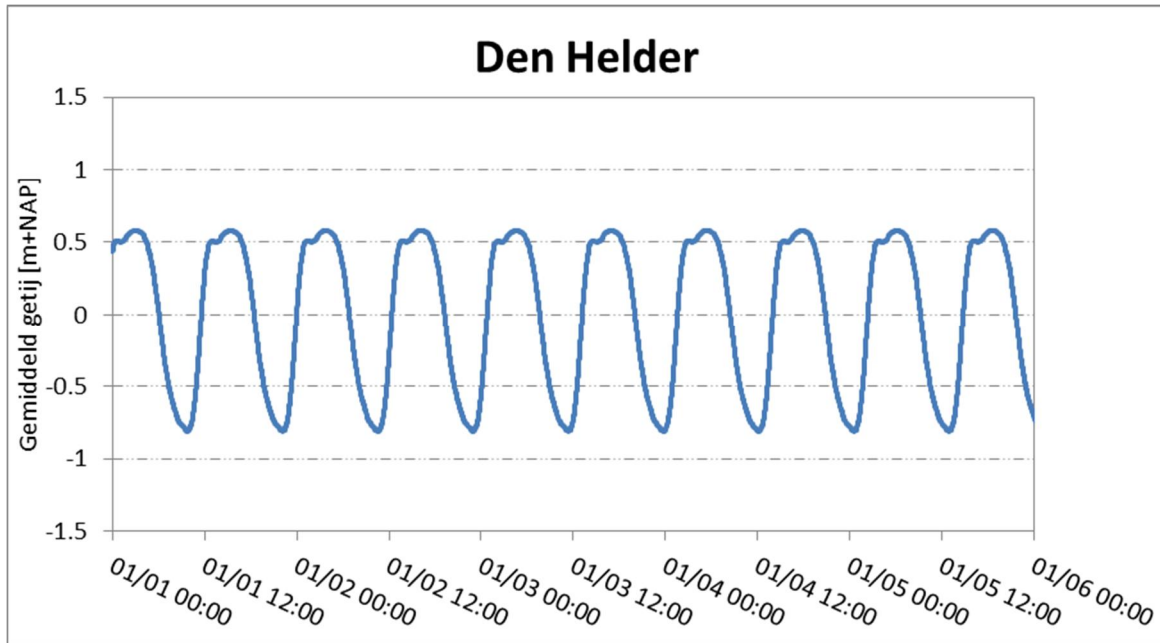
Locatie Vlissingen



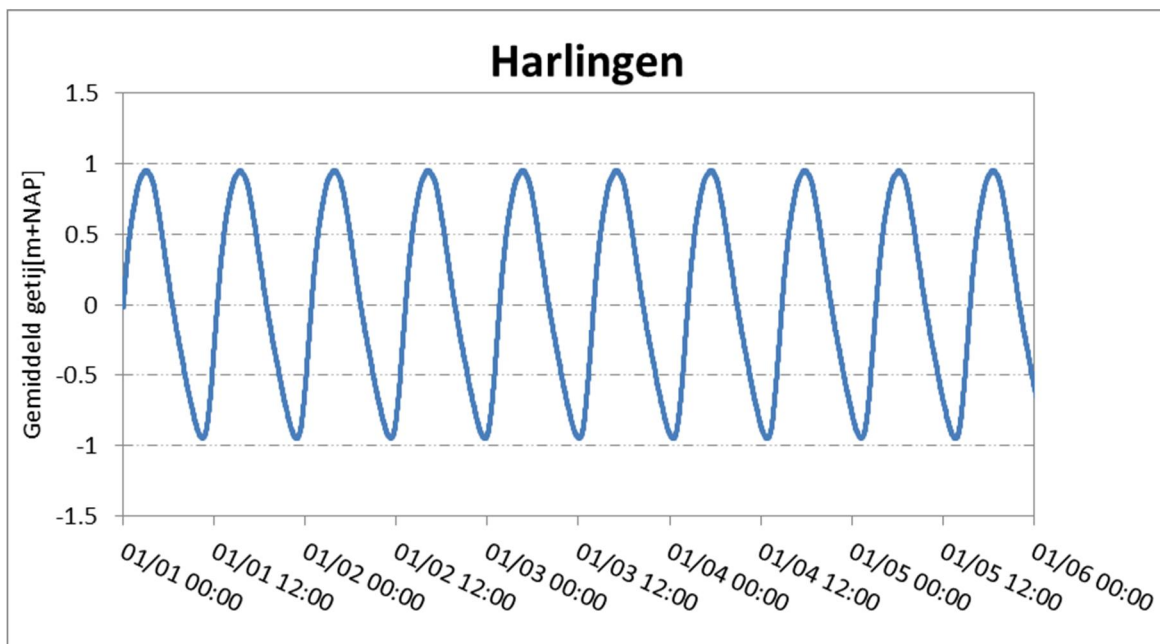
Locatie IJmuiden



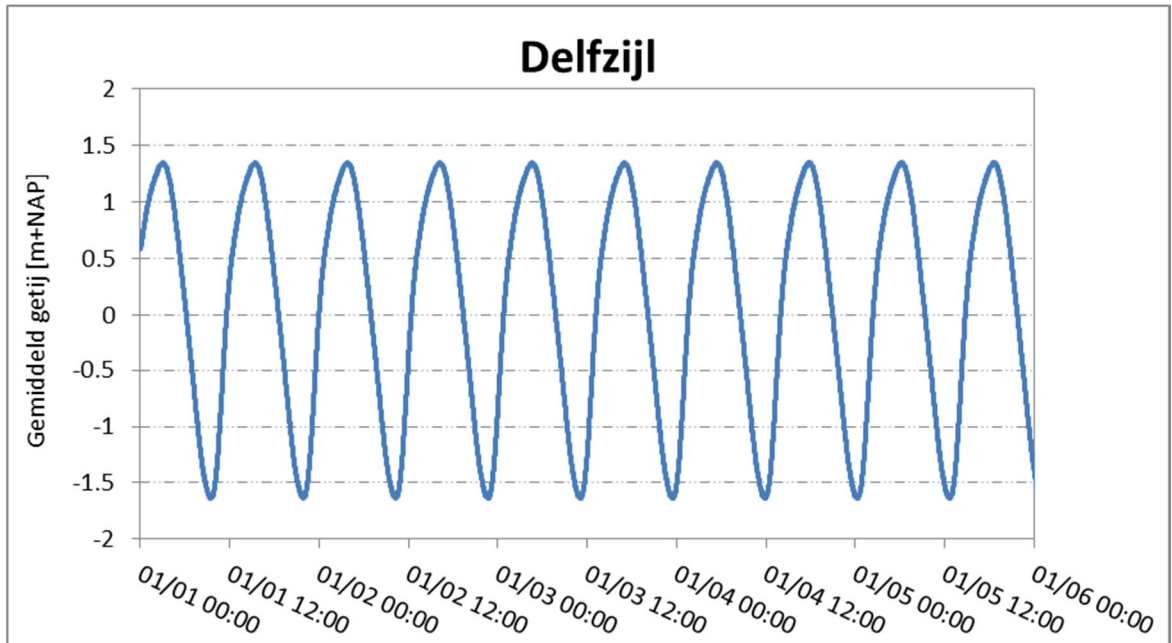
## Locatie Den Helder



## Locatie Harlingen



Locatie Delfzijl





## **B Toetspeilen**

Wordt toegevoegd zodra beschikbaar!