

Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas

Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017



Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas

Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017

Houcine Chbab

1220082-002

Titel

Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas

Opdrachtgever

RWS-WVL

Project

1220082-002

Kenmerk

1220082-002-HYE-0002

Pagina's

83

Trefwoorden

WTI-2017, faalmechanismen, Bovenrivieren, waterstandsverlopen

Samenvatting

In het kader van het wettelijke toetsinstrumentarium WTI-2017 worden voor verscheidene watersystemen nieuwe Hydraulische Randvoorwaarden (waterstanden en golfparameters) bepaald. Onderdeel van deze HR betreft het tijdsverloop van de waterstand bij de normfrequentie. Het waterstandsverloop wordt gebruikt bij het toetsen op faalmechanismen van zowel een dijk als een kunstwerk waarvoor langdurig aanhoudende hoge waterstanden van belang zijn, zoals macro-instabiliteit binnenwaarts en piping. Bij kustwerken gaat het voornamelijk om faalmechanismen waarbij kombergend vermogen relevant is.

Een van de watersystemen waarvoor waterstandsverlopen moeten worden afgeleid is het bovenrivierengebied bestaande uit de Rijntakken en de Maas. Dit betreft het rivierengebied dat onder invloed staat van afvoeren; getij en/of stormopzet vanuit de zee of het IJsselmeer spelen hier geen rol. Onderhavig rapport gaat over waterstandsverlopen voor de Rijntakken en de Maas.

Voor 120 locaties langs de Rijntakken en de Maas zijn de resultaten van de productieberekeningen voor WTI-2017 die afkomstig zijn van de GRADE afvoergolven geanalyseerd. Uit de uitgevoerde analyses blijkt dat de vorm van het tijdsverloop niet afhangt van de piekwaarde van de afvoergolf. Verder geldt dat de afvoergolfvorm van de Rijn bij Lobith die uit GRADE volgt enigszins breder is dan de vigerende afvoergolfvorm, vooral rond de top. Dit kan leiden tot relatief bredere waterstandsverlopen. Voor de Maas is het verschil in de afvoergolfvormen van WTI-2011 en WTI-2017 klein.

Op basis van de resultaten van de productieberekeningen zijn daarom waterstandsverlopen afgeleid voor de Maas en alle riviertakken van de Rijn. Met uitzondering van benedenstroomse deel van de Lek en het bovenstroomse deel van de Maas is hierbij gebruik gemaakt van standaard trapezia met basis- en topduren die afhangen van de riviertak of delen daarvan. De eigenschappen van de gebruikte trapezia zijn te vinden in hoofdstuk 7. Voor het benedenstroomse deel van de Lek en het bovenstroomse deel van de Maas is geadviseerd om het waterstandsverloop uit de productieberekeningen WTI-2017 te gebruiken.

Referenties

WTI-2017, projectplan waterstandsverlopen WTI-2017

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2015	Houcine Chbab		Nienke Kramer		Marcel van Gent	
	Jan. 2016	Houcine Chbab		Nienke Kramer		Marcel van Gent	
	Feb. 2016	Houcine Chbab		Nienke Kramer		Marcel van Gent	

Status

definitief

Inhoud

Lijst van tabellen en figuren	iii
English summary	ix
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel	3
1.3 Afbakening en uitgangspunten	3
1.4 Leeswijzer	4
2 Achtergrondinformatie	5
2.1 Gebiedsbeschrijving, regio's in Hydra-Ring en normering bovenrivieren	5
2.2 Beschrijving faalmechanismen	9
2.3 Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas in HR-2006	11
3 Analyse productieberekeningen Rijntakken	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Statistiek en afvoergolfvorm GRADE	15
3.3 Productieberekeningen Rijntakken	17
3.4 Analyse resultaten productieberekeningen Rijntakken	18
3.4.1 Bovenrijn	18
3.4.2 Pannerdense Kop	22
3.4.3 Waal	24
3.4.4 Lek	31
3.4.5 Neder-Rijn	37
3.4.6 IJssel	42
4 Analyse productieberekeningen Maas	49
4.1 Inleiding	49
4.2 Statistiek en afvoergolfvorm GRADE	49
4.3 Productieberekeningen Maas	51
4.4 Analyse resultaten productieberekeningen Maas	51
5 Vaststellen waterstandsverlopen Rijntakken	61
5.1 Inleiding	61
5.2 Uitgangspunten en keuze criteria	61
5.3 Waterstandsverloop Rijntakken	61
5.3.1 Bovenrijn	61
5.3.2 Pannerdense Kop	62
5.3.3 Waal	63
5.3.4 Lek	64
5.3.5 Neder-Rijn	66
5.3.6 IJssel	68
6 Vaststellen waterstandsverlopen Maas	71
6.1 Inleiding	71
6.2 Waterstandsverloop Maas	71

6.2.1	Waterstandsverloop deelgebied 1	71
6.2.2	Waterstandsverloop deelgebied 2	72
6.2.3	Waterstandsverloop deelgebied 3	73
6.2.4	Waterstandsverloop deelgebied 4	73
6.2.5	Waterstandsverloop deelgebied 5	74
6.2.6	Waterstandsverloop deelgebied 6	75
7	Samenvatting en conclusies	77
	Referenties	81
	Bijlage(n)	
A	Dijktrajecten en normen Limburgse Maas	A-1

Lijst van tabellen en figuren

Tabel 2.1	Regio's Hydra-Ring (Diermanse et al, 2013)	5
Tabel 2.2	Dijkringgebieden langs het bovenrivierengebied van de Rijn en de Maas.....	7
Tabel 2.3	Dijktrajecten en (nieuwe) veiligheidsnormen bovenrivieren.....	8
Tabel 3.1	Extreme hoge afvoeren volgens GRADE voor de Rijn bij Lobith voor enkele relevante herhalingstijden.	16
Tabel 4.1	Extreme afvoeren voor de Maas bij Borgharen berekend met GRADE voor enkele relevante herhalingstijden.....	50
Tabel 6.1	Deelgebieden Maas.....	71
Tabel 7.1	Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Rijntakken.	78
Tabel 7.2	Indeling Maas in 6 deelgebieden	78
Tabel 7.3	Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Maas.....	79
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 (nog formeel 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 en duinen).	6
Figuur 2.2	Grafische weergave van de ligging van de Rijntakken en de Maas. De gebogen rode lijnen zijn indicaties voor de begrenzing met het Benedenrivieren en de IJsseldelta respectievelijk.....	6
Figuur 2.3	Faalmechanismen dijken VTV-2006 (RWS, 2006).	9
Figuur 2.4	Illustratie watervoerende zandlaag bij faalmechanisme opbarsten.	10
Figuur 2.5	Standaard afvoerloop Rijn bij Lobith HR-2006 (RWS-2006)	12
Figuur 2.6	Standaard afvoerloop Maas bij Borgharen HR-2006 (RWS, 2006).....	12
Figuur 2.7	Vergelijking afvoerlopen HR-2006 en TMR-2006 van de Rijn bij Lobith	13
Figuur 2.8	Vergelijking afvoerlopen HR2006 en TMR-2006 van de Maas bij Borgharen.	13
Figuur 3.1	Werklijn van GRADE voor de Rijn bij Lobith.	16
Figuur 3.2	Afvoergolfvorm bij Lobith berekend met GRADE samen met afvoergolfvormen uit HR-2006/TMR-2006.	17
Figuur 3.3	Geselecteerde as-locaties langs verschillende riviertakken in het bovenrivierengebied.	18
Figuur 3.4	Tijdsverloop waterstand langs de Bovenrijn voor Q = 13.000, 16.000 en 17.000 m ³ /s.....	19

Figuur 3.5	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor gekozen locaties langs de Bovenrijn; $Q = 13.000, 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	19
Figuur 3.6	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locatie 854.00_BR langs de Bovenrijn	20
Figuur 3.7	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor locatie 854_BR voor $Q = 13.000, 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	20
Figuur 3.8	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locatie 864.00_BR langs de Bovenrijn	21
Figuur 3.9	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor locatie 864_BR voor $Q = 13.000, 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	22
Figuur 3.10	Tijdsverloop van de waterstand langs de Pannerdense Kop; locatie 871.00_PK en locatie 876.00_PK voor de afvoergolf met hoogte $Q = 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	22
Figuur 3.11	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor de locaties 871.00_PK en 876.00_PK langs de Pannerdense Kop voor de afvoergolven met hoogtes 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	23
Figuur 3.12	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor de onderzochte locaties langs de Pannerdense Kop voor afvoergolven met hoogtes 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	23
Figuur 3.13	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Waal voor een afvoer met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$	24
Figuur 3.14	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locaties langs de Waal en afvoer met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$	25
Figuur 3.15	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Waal voor een afvoer met topwaarde van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$	25
Figuur 3.16	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locaties langs de Waal en afvoer met topwaarde van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$	26
Figuur 3.17	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Waal voor een afvoer met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	26
Figuur 3.18	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locaties langs de Waal en afvoer met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	27
Figuur 3.19	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor bovenstroomse (6) locaties langs de Waal, afvoergolf met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	28
Figuur 3.20	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor bovenstroomse locaties van de Waal voor een afvoergolf van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	28
Figuur 3.21	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Waal, afvoergolf met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	29
Figuur 3.22	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor benedenstroomse locaties van de Waal voor een afvoergolf van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	29
Figuur 3.23	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor benedenstroomse locaties van de Waal met uitzondering van de locatie 959.00_WA voor een afvoergolf van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$	30

Figuur 3.24	Tijdsverloop waterstand meest boven- respectievelijk benedenstroomse locatie langs de Waal voor 3 afvoergolven: 13.000, 16.000 en 17.000 m ³ /s.	30
Figuur 3.25	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	31
Figuur 3.26	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	32
Figuur 3.27	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor bovenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	32
Figuur 3.28	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	33
Figuur 3.29	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 16.000 m ³ /s.	33
Figuur 3.30	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van 16.000 m ³ /s.	34
Figuur 3.31	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	34
Figuur 3.32	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van 16.000 m ³ /s.	35
Figuur 3.33	Tijdsverloop waterstand hoogte 0, bovenstrooms Lek voor afvoergolven 13.000, 16.000 en 17.000 m ³ /s.	35
Figuur 3.34	Tijdsverloop waterstand hoogte 0, Benedenstrooms Lek voor afvoergolven 13.000, 16.000 en 17.000 m ³ /s.	36
Figuur 3.35	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor bovenstroomse locaties van de Lek; afvoergolf 17.000 m ³ /s.	36
Figuur 3.36	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	37
Figuur 3.37	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van 13.000 m ³ /s.	38
Figuur 3.38	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 16.000 m ³ /s.	38
Figuur 3.39	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van 16.000 m ³ /s.	39
Figuur 3.40	Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 17.000 m ³ /s.	39
Figuur 3.41	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van 17.000 m ³ /s.	40
Figuur 3.42	Waterstandsverloop meest benedenstroomse respectievelijk meest bovenstroomse locatie op de Neder-Rijn voor 2 afvoergolven: 16.000 en 17.000 m ³ /s.	40
Figuur 3.43	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop door trapezium voor de locatie 926.00_NR voor afvoergolven met topwaardes 16.000 en 17.000 m ³ /s.	41

Figuur 3.44	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop door trapezium voor de locatie 881.00_NR voor afvoergolven met topwaardes 16.000 en 17.000 m ³ /s.	42
Figuur 3.45	Tijdsverloop waterstand locaties langs de IJssel voor een afvoer met topwaarde van 13.000 m ³ /s	43
Figuur 3.46	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 13.000 m ³ /s.....	43
Figuur 3.47	Tijdsverloop waterstand locaties langs de IJssel voor een afvoer met topwaarde van 16.000 m ³ /s.	44
Figuur 3.48	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 16.000 m ³ /s.....	44
Figuur 3.49	Tijdsverloop waterstand locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 17.000 m ³ /s.	45
Figuur 3.50	Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 17.000 m ³ /s.....	45
Figuur 3.51	Tijdsverloop waterstand locatie 882.00_IJ voor afvoergolven met maxima 13.000, 16.000 en 17.000 m ³ /s.....	46
Figuur 3.52	Tijdsverloop waterstand locatie 980.00_IJ voor afvoergolven met topwaardes 13.000, 16.000 en 17.000 m ³ /s.....	46
Figuur 3.53	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop waterstand voor de locatie 882.00_IJ	47
Figuur 3.54	Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop waterstand voor de locatie 980.00_IJ	48
Figuur 4.1	Werklijn van de Maas bij Borgharen op basis van GRADE.	50
Figuur 4.2	Afvoergolfvorm van de Maas bij Borgharen berekend met GRADE, samen met afvoergolfvormen uit HR-2006/TMR-2006	51
Figuur 4.3	Tijdsverloop waterstand voor locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.394 m ³ /s.....	52
Figuur 4.4	Tijdsverloop waterstand voor locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.394 m ³ /s.....	53
Figuur 4.5	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.394 m ³ /s.	53
Figuur 4.6	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.394 m ³ /s.	54
Figuur 4.7	Tijdsverloop waterstand voor locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.950 m ³ /s.....	54
Figuur 4.8	Tijdsverloop waterstand voor locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.950 m ³ /s.....	55
Figuur 4.9	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.950 m ³ /s.	55

Figuur 4.10	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 3.950 m ³ /s.	56
Figuur 4.11	Tijdsverloop waterstand voor locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 4.600 m ³ /s.	56
Figuur 4.12	Tijdsverloop waterstand voor locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 4.600 m ³ /s.	57
Figuur 4.13	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 4.600 m ³ /s.	57
Figuur 4.14	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van 4.600 m ³ /s.	58
Figuur 4.15	Tijdsverloop waterstand van afvoergolven 3394, 3950 en 4600 m ³ /s voor 3 locaties: 4.00_MA (bovenstrooms Maas), 119.00_MA (midden Maas) en 230.00_MA (benedenstrooms Maas: grens met benedenrivieren).	58
Figuur 4.16	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor 4 locaties bovenstrooms van de Maas: 4.00_MA, 19.00_MA, 24.00_MA en 39.00_MA.	59
Figuur 4.17	Waterstandsverloop locaties Maas waar topvervlakking een rol speelt.	59
Figuur 4.18	Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor de benedenstroomse locaties 185.00_MA t/m 220.00_MA.	60
Figuur 5.1	Geschematiseerd waterstandsverloop voor locaties langs de Bovenrijn.	62
Figuur 5.2	Geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor het riviertak Pannerdense Kop.	63
Figuur 5.3	Standaard waterstandsverloop locaties de Waal.	64
Figuur 5.4	Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop in bovenstrooms deel van de Lek.	64
Figuur 5.5	Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop in benedenstrooms deel van de Lek.	65
Figuur 5.6	Waterstandsverloop met hoogte 0 m voor de locatie 987.00_LE; de meest benedenstroomse locatie van de Lek.	66
Figuur 5.7	Voorbeeld waterstandsverloop voor fictieve twaterstand van 8 m; locatie 987.00_LE.	66
Figuur 5.8	Geschematiseerd trapeziumverloop voor de waterstandsverlopen bij locaties van de Neder-Rijn bovenstrooms van de locatie 901.00_NR.	67
Figuur 5.9	Geschematiseerd trapeziumverloop voor de waterstandsverlopen bij locaties van de Neder-Rijn benedenstrooms van de locatie 901.00_NR.	67
Figuur 5.10	Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop voor de locatie 882.00_IJ langs de IJssel.	68
Figuur 5.11	Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop voor de locatie 980.00_IJ langs de IJssel.	69

Figuur 5.12	Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop voor de locatie 940.00_IJ langs de IJssel.	69
Figuur 6.1	Voorbeeld waterstandsverloop locatie 4.00_WA voor een fictieve waterstand van 16 m+NAP. Blauwe lijn is waterstand hoogte 0 m en rode lijn is waterstandsverloop met hoogte gelijk aan waterstand van 16 m+NAP.	72
Figuur 6.2	Geschematiseerd waterstandsverloop deelgebied 2 van de Maas door trapeziumverloop met basisduur op niveau -6 m van 445 uur (ca. 18,5 dag) en topduur van 50 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 170 uur en van de achterflank 275 uur. De waterstand stijgt van het niveau van -0,2 m tot het niveau van 0 m (piekwaarde) in 25 uur en daalt daarna in eveneens 25 uur tot het niveau van -0,2 m.	72
Figuur 6.3	Geschematiseerd waterstandsverloop deelgebied 3. Trapeziumverloop heeft basisduur op niveau -4 m van 450 uur. De totale duur van de voorflank is 170 uur en van de achterflank 280 uur. De duur van het niveau van -0,3 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 40 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 35 uur. De totale duur van de voorflank is 170 uur en van de achterflank is 280 uur.	73
Figuur 6.4	Geschematiseerd waterstandsverloop deelgebied 4. Het trapeziumverloop heeft een basisduur van 395 uur op het niveau -4 m en een topduur van 75 uur. De duur van het niveau van -0,3 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 50 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 25 uur. De totale duur van de voorflank is 150 uur en van de achterflank is 245 uur.	74
Figuur 6.5	Geschematiseerd waterstandsverloop voor deelgebied 5. Trapeziumverloop met duur op het niveau -3 van 315 uur en topduur van 90 uur. De duur van het niveau van -0,5 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 60 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 30 uur. De totale duur van de voorflank is 115 uur en van de achterflank is 200 uur.	74
Figuur 6.6	Geschematiseerd waterstandsverloop voor deelgebied 6. Trapeziumverloop met duur op het niveau -3 van 345 uur en topduur van 80 uur. De duur van het niveau van -0,3 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 65 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 30 uur. De totale duur van de voorflank is 115 uur en van de achterflank is 230 uur.	75
Figuur 7.1	Standaard trapeziumverloop voor het schematiseren van waterstandsverlopen.	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 high water level corresponding to safety standards. 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.

This report describes the time evolution of water levels for the upstream parts of the rivers Rhine and Meuse. These are the non-tidal areas of the rivers. Water levels in these upstream parts of the rivers are not affected by storm surges and sea- or lake water levels.

For 120 selected river locations, the time evolution of water levels is analyzed using the WAQUA production calculations. These calculations have used the discharge waves from the Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) as upstream boundary conditions. From the analyses it was concluded that the shape of the time evolution of water levels does not depend on the peak values of the discharge waves. Therefore, the production calculations provide sufficient information to derive the time evolution of water levels along the upstream parts of the rivers Rhine and Meuse. So, apart from the downstream part of the river branch Lek and the upstream part of the river Meuse, time evolutions of water levels have been determined. These time evolutions are trapezium-shaped, with characteristics depending on location or set of locations. The properties of the trapezoids used are summarized in chapter 7.

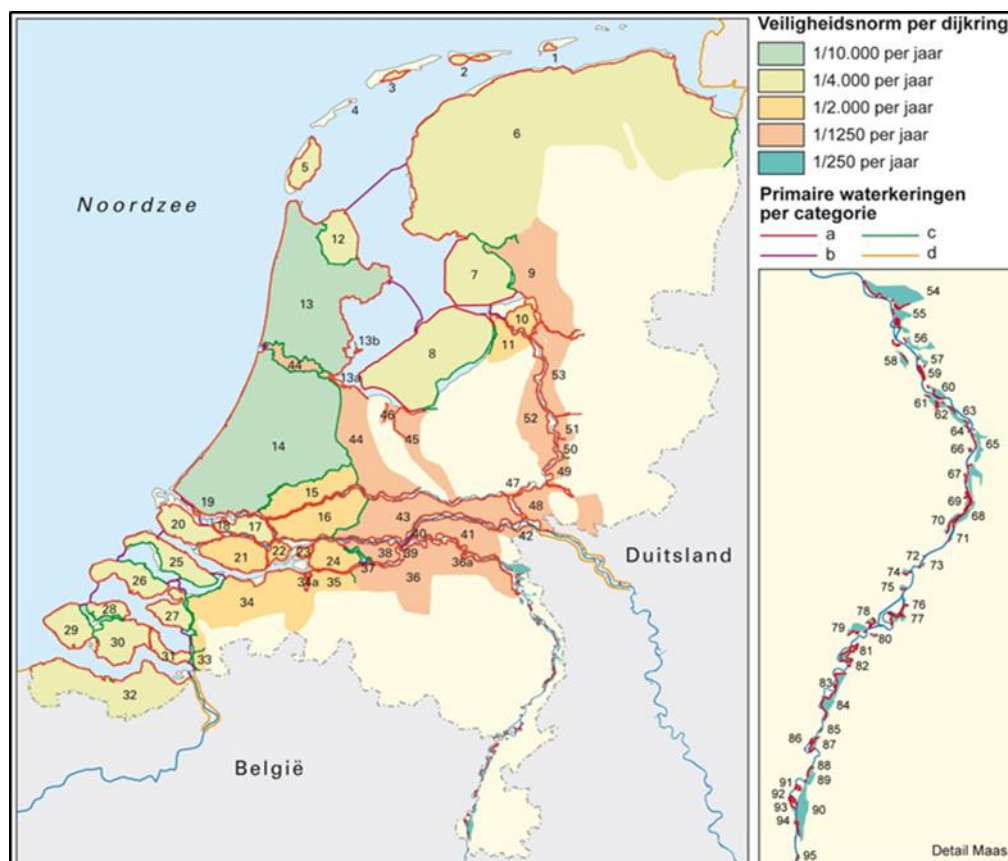
The time evolution of water levels at locations along the downstream part of the river Lek and the most upstream part of the Meuse varies too much. Therefore, it cannot be estimated by a well-shaped trapezoid. So, for these parts of the rivers Rhine and Meuse, it is advised to use the time evolution resulting from the production calculations.

It has to be noted that the time evolutions of water levels from this report still need to be coupled to water levels corresponding to safety standards.

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 herhalingstijden. Deze variëren voor de huidige situatie van 250 tot 10.000 jaar, afhankelijk van het watersysteem en het beschermde gebied, zie 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 huidige normen en de vigerende HR (HR-2006) gaan 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 dijkkringtraject (bestaande uit meerdere dijksecties), rekening houdend met meerdere faalmechanismen en hun bijdrage aan de totale faalkans. Daarnaast zal in WTI-2017 overgestapt op de nieuwe veiligheidsnormen. Een (voorlopig) overzicht van deze normen is afgebeeld in Figuur 1.2. De overstap op de nieuwe veiligheidsnormen in combinatie de

overstromingskansbenadering is aanleiding om binnen WTI verbetering door te voeren op het punt van omgaan met onzekerheden. In WTI-2017 zal daarom naast inherente onzekerheid, ook bekend als de natuurlijke variabiliteit, ook de kennisonzekerheid in beschouwing worden genomen. Dit laatste type onzekerheid is het gevolg van gebrek aan fysische kennis van het watersysteem met name onder extreme omstandigheden en gebrek aan metingen. In WTI-2017 zullen 2 typen van kennisonzekerheid meegenomen: modelonzekerheid in WAQUA en SWAN/Bretschneider en statistische onzekerheid in de basisstochasten, zie (Chbab en Eilander, 2015) en (Chbab en Groeneweg, 2015)



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

De komende toetsronde wordt uitgevoerd aan de hand van het Wettelijk Toets-Instrumentarium 2017 (WTI-2017). Dit instrumentarium 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 geeft per locatie waar zich een primaire kering bevindt de maatgevende hydraulische belastingen. Hierin staan bijvoorbeeld maatgevende waterstanden en golfparameters als significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting.

Om de maatgevende waterstanden en golfcondities vast te stellen wordt gebruik gemaakt van het probabilistische model Hydra-Ring. Dit model levert de toetspeilen en golf Randvoorwaarden bij de teen van de dijk en in de as van de rivier (in geval van rivieren).

Waterstanden bij de normfrequenties en golfrandvoorwaarden zijn nodig voor de toetsing op hoogte (faalmechanisme overloop/overslag) of stabiliteit van bekledingen. Voor sommige faalmechanismen vormen langdurig aanhoudende hoge waterstanden een bedreiging (gedetailleerde toets macro-stabiliteit binnenwaarts, geavanceerde toets piping en heave en instabiliteit door golfoverslag). Voor het toetsen van dijken op deze faalmechanismen is naast de hoogte van de waterstand bij de normfrequentie, extra informatie nodig; deze betreft o.a. het tijdsverloop van de waterstand waarbij de piek gelijk is aan de waterstand bij de normfrequentie.

De belastingen op de waterkeringen worden in principe veroorzaakt door drie fenomenen, rivierafvoeren, getijden en wind. De bedreiging door rivierafvoeren en getij manifesteert zich in hoge waterstanden. De bedreiging door wind kan leiden tot hoge waterstanden (de windopzet) en golven, en in specifieke gevallen tot seiches, buistoten, bui-oscillaties en slingeringen. Meren (IJsselmeer en Markermeer) zijn wind-gedreven watersystemen. Het meerpeil en windopzet zijn daar de bepalende factoren, voor zowel de waterstand bij de normfrequentie als het tijdsverloop ervan. Windopzet is afhankelijk van de storm (duur en kracht). Voor de meren zijn in het kader van WTI-2011 waterstandsverlopen afgeleid (Chbab, 2012); deze worden in WTI-2017 aangehouden, met dien verstaande dat er aanpassing nodig is om aan te sluiten bij de nieuwe vast te stellen waterstand bij de normfrequentie. Voor de kustgebieden zijn astronomisch getij, wind en daarmee samenhangende windopzet, de drijvende krachten. Bij het bepalen van het tijdsverloop behorende bij de waterstand bij de normfrequentie langs de kust dient dan ook rekening te worden gehouden met deze krachten en hun onderlinge samenhang. In (Chbab, 2015) is een methodiek ontwikkeld om voor een willekeurige locatie langs de kust het bijbehorende waterstandsverloop te construeren. Het verloop bestaat uit een combinatie van astronomisch getij, stormopzet en faseverschil tussen deze twee grootheden. Bovenstrooms op de rivieren bepaalt de rivierafvoer de maatgevende waterstanden; het tijdsverloop dat hierbij hoort wordt dan ook volledig bepaald door het tijdsverloop van de afvoer. Dit is het onderwerp van het onderhavige rapport.

1.2 Doel

Het doel van de onderhavige studie is het afleiden van het waterstandsverloop behorende bij de waterstand bij de normfrequentie voor alle locatie langs de Rijnakken en de Maas. De in dit rapport afgeleide waterstandsverlopen zullen, nadat die gekoppeld zijn aan de nog vast te stellen waterstanden bij de normfrequentie, als invoer gelden voor de reeds bestaande tool om waterstandsverlopen te visualiseren.

1.3 Afbakening en uitgangspunten

De afgeleide waterstandsverlopen in onderhavig rapport hebben betrekking op de bovenstroomse delen van de Rijn en de Maas waar opzet vanuit het IJsselmeer of de Noordzee, al dan niet in combinatie met getij, geen rol speelt. De Benedenrivieren en Vecht- en IJsseldelta vallen dus buiten de scope van dit rapport.

De waterstandsverlopen in dit rapport horen in principe bij de waterstand behorende bij de normfrequentie; ze kunnen niet rücksichtslos worden gebruikt voor andere waterstandsniveaus. De waterstandsverlopen zijn uitsluitend bedoeld voor de toetsing van geotechnische faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende hoge waterstanden bedreigend zijn. Binnen de vierde toetsronde met behulp van de HR-2006 zijn 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 de normfrequentie 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 hoge 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. Meer informatie met betrekking tot waterstanden bij snelle val, evenals hoe deze beschreven kunnen worden, is te vinden in hoofdstuk 7 van (ENW, 2007).

In WTI-2017 zullen onzekerheden, model- en statistische onzekerheid, meegenomen worden bij de bepaling van de waterstanden bij de normfrequenties. Deze waren tijdens onderhavige studie nog niet beschikbaar. De resultaten in dit rapport zijn daarom enkel gebaseerd op de productieberekeningen. Onzekerheden zijn daardoor hierbij niet beschouwd.

In WTI-2017 zal rekening worden gehouden met kennisonzekerheden (model- en statistische onzekerheden). De afvoergolfvorm geldt niet als basisstochast (Smale, 2014). In de productieberekeningen is dan ook niet gevarieerd in de vorm van de afvoergolf; er is enkel gebruik gemaakt van de gemiddelde waarde van de afvoergolfvorm (ook standaard afvoergolfvorm genoemd). Bij de bepaling van de waterstandsverlopen voor de bovenrivieren zal derhalve geen rekening worden gehouden met onzekerheden in de vorm van de afvoergolf. Kennisonzekerheden zullen enkel verwerkt worden in de (piekwaarde van de) waterstanden bij de normfrequentie.

1.4 Leeswijzer

Het rapport is ingedeeld als volgt ingedeeld: in hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving gegeven van het watersysteem van de Rijntakken en de Maas, evenals een overzicht van de faalmechanismen waarbij langdurige aanhouden waterstanden relevant zijn, en de vigerende waterstandsverlopen uit HR-2006. Hoofdstuk 3 behandelt de analyse van de resultaten uit de productieberekeningen van de Rijntakken. Het hoofdstuk besteedt enige aandacht aan de statistiek van GRADE (werklijn en golfvorm). De analyse van de resultaten van de productieberekeningen van de Maas volgt is onderwerp van hoofdstuk 4. De waterstandsverlopen voor de Rijntakken komen aan de orde in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 behelst de waterstandsverlopen voor de Maas. Het rapport eindigt met een samenvatting en conclusies in hoofdstuk 7.

2 Achtergrondinformatie

In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van het watersysteem van de Rijntakken en de Maas (paragraaf 2.1), evenals een overzicht van de faalmechanismen waarbij langdurige aanhouden waterstanden relevant zijn (paragraaf 2.2) en de vigerende waterstandsverlopen uit HR-2006 (paragraaf 2.3).

2.1 Gebiedsbeschrijving, regio's in Hydra-Ring en normering bovenrivieren

De belastingen op de waterkeringen worden in principe veroorzaakt door drie fenomenen, rivierafvoeren, getijden en wind. De bedreiging door rivierafvoeren en getij manifesteert zich in hoge waterstanden. De bedreiging door wind kan leiden tot hoge waterstanden (de windopzet) en golven, en in specifieke gevallen tot seiches, buistoten, bui-oscillaties en slingeringen. Waterstanden, golven, seiches, buistoten, bui-oscillaties en slingeringen zijn de verschillende typen randvoorwaarden. De krachten (via het water) op de waterkering die hieruit voortkomen worden de hydraulische belastingen genoemd.

Hydra-Ring onderscheidt 18 regio's, zie Tabel 2.1. Per regio geldt een set basisstochasten, variabelen die de (variatie in) hydraulische belasting bepalen. Daarnaast heeft elke regio een wijze van vertaling van de basisstochasten naar hydraulische belasting op de waterkering. Regio 17 (Europoort) betreft het gebied aan de buitenzijde van de Europoortkering. Feitelijk maakt de Europoort onderdeel uit van regio 3 en regio 4, maar vanwege de rol van deining en seiches is dit gebied als een afzonderlijke regio gedefinieerd. Regio 18 heeft betrekking op de Limburgse Maas. Dit gedeelte van de Maas is als een aparte regio gedefinieerd vanwege de kades die overstromen. Merk ten slotte op dat de duinen geen regio zijn maar in Hydra-Ring wel als zodanig zijn aangemerkt: regio 16. Deze regio omvat de duinen langs het hele kustgebied, zie voor details (Chbab en Eilander, 2015).

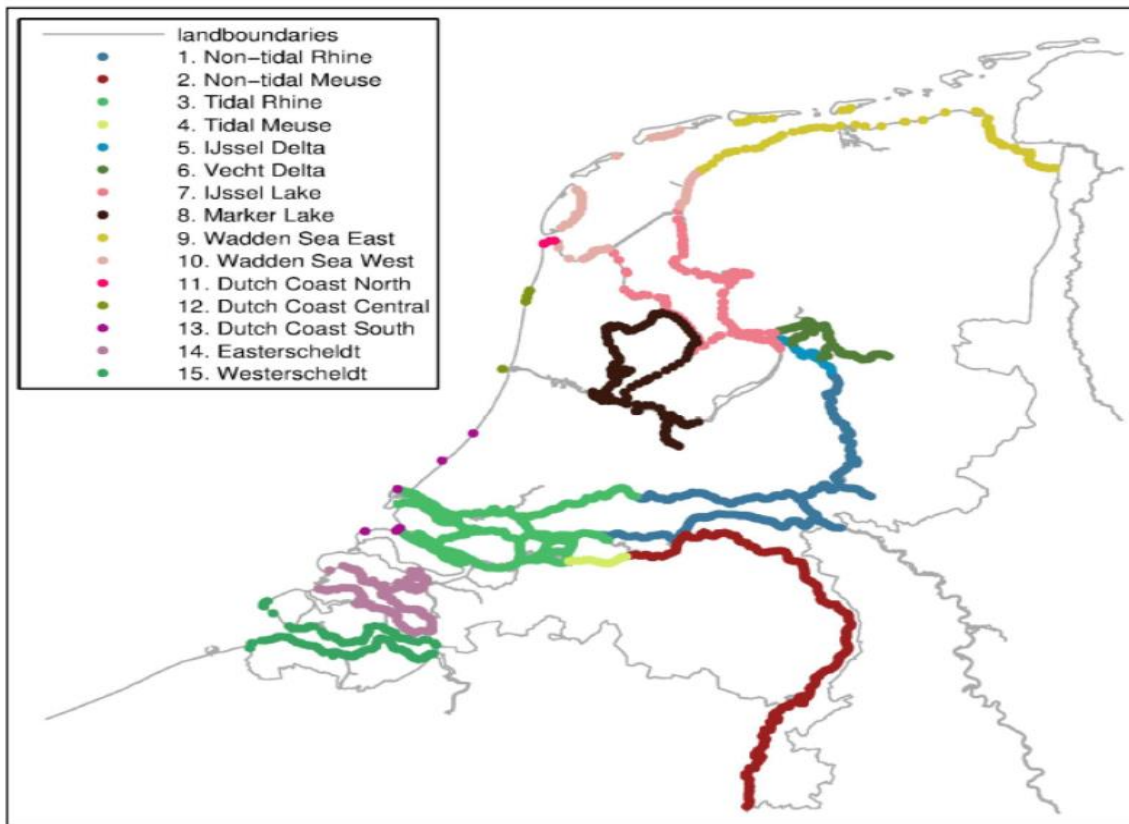
Onderdeel van het bovenrivierengebied is de regio 1 Rijn, Regio 2 Maas en Regio 18 Limburgse Maas. De blauwe en donkerrode stippen in Figuur 2.1 geven de ligging van regio 1 en 2 en 18 weer.

Tabel 2.1 Regio's Hydra-Ring (Diermanse et al, 2013)

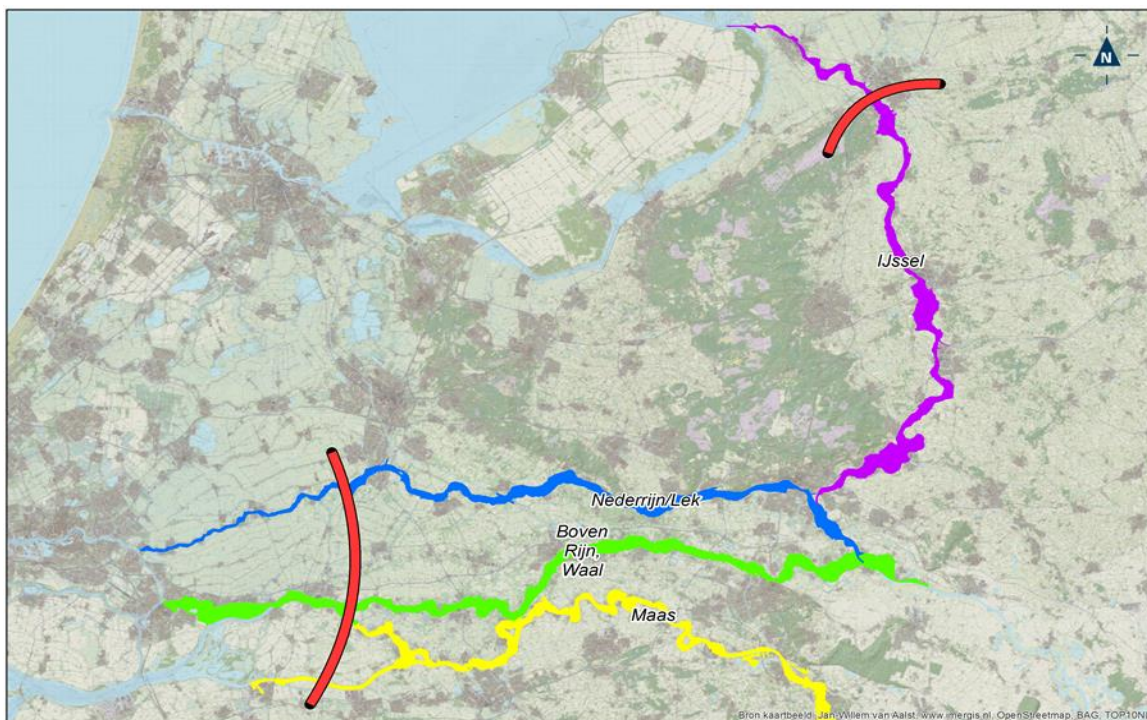
1. Bovenrivieren (Rijn)	7. IJsselmeer	13. Hollandse Kust Zuid
2. Bovenrivieren (Maas)	8. Markermeer	14. Oosterschelde
3. Benedenrivieren (Rijn)	9. Waddenzee Oost	15. Westerschelde
4. Benedenrivieren (Maas)	10. Waddenzee West	16. Duinen
5. IJsseldelta	11. Hollandse Kust Noord	17. Europoort
6. Vechtdelta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

Het systeem van de bovenrivieren (

Figuur 2.2) omvat volgens de vigerende indeling in dijkkringgebieden en bijbehorende normen de dijkkringgebieden uit Tabel 2.2. Daarnaast omvat het bovenrivieren alle dijkkringgebieden langs het gebied van de Limburgse Maas, ook wel bekend als "Maaskades". Het gaat om de dijkkringgebieden 54 t/m 95 uit de Wet op de Waterkering (HR-2006). Het bovenrivierengebied bestaat uit de volgende riviertakken van de Rijn: Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Waal, Lek, IJssel. De Maas bestaat uit de Maas en Bergsche Maas.



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



Figuur 2.2 Grafische weergave van de ligging van de Rijntakken en de Maas. De gebogen rode lijnen zijn indicaties voor de begrenzing met het Benedenrivieren en de IJsseldelta respectievelijk.

Het fysische gedrag van het watersysteem kent geen scherpe grenzen met de watersystemen Benedenrivieren en IJsseldelta. Vooralsnog worden in WTI-2017 de begrenzings uit HR2006 aangehouden; deze zijn (zie ook Figuur 2.2):

- Lek km 943
- Boven Merwede km 953
- IJssel km 974
- Bergsche Maas km 231

Afhankelijk van de resultaten van de waterstanden bij de normfrequenties en bijbehorende illustratiepunten¹ zullen de grenzen tussen verschillende watersystemen worden vastgesteld.

Tabel 2.2 Dijkkringgebieden langs het bovenrivierengebied van de Rijn en de Maas

Dijkkring-gebied	Norm-frequentie	Naam dijkkring	Riviertak
36	1/1250	Land van Heusden / de Maaskant	Maas
36a	1/1250	Keent	Maas
37	1/1250	Nederhemert	Bergsche Maas
38	1/1250	Bommelerwaard	Waal, Maas
39	1/1250	Alem	Maas
40	1/500 ²	Heerewaarden	Maas, Waal
41	1/1250	Land van Maas en Waal	Waal, Maas
42	1/1250	Ooij en Millingen	Boven-Rijn, Waal
43	1/1250	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Lek, Waal, Boven Merwede
44	1/1250 ³	Kromme Rijn	Neder-Rijn, Lek
45	1/1250	Gelderse Vallei	Neder-Rijn
47	1/1250	Arnhemse- en Velpsebroek	IJssel, Neder-Rijn
48	1/1250	Rijn en IJssel	Boven-Rijn, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, IJssel
49	1/1250	IJsselland	IJssel
50	1/1250	Zutphen	IJssel
51	1/1250	Gorssel	IJssel
52	1/1250	Oost-Veluwe	IJssel
53	1/1250	Salland	IJssel

In WTI-2017 zal worden uitgegaan van de nieuwe veiligheidsnormen zoals afgebeeld in Figuur 1.2. Deze zijn gebaseerd op overstromingsrisico's in plaats van overschrijdingskansen. In de nieuwe normering is het gebied van de Rijntakken en de Maas, evenals de rest van de primaire keringen in Nederland, ingedeeld in verschillende dijktrajecten. Elk dijktraject heeft een eigen veiligheidsnorm. De dijktrajecten in het bovenrivierengebied zijn, inclusief de bijbehorende veiligheidsnorm, weergegeven in onderstaande Tabel 2.3. De Limburgse Maas, de dijkkringgebieden 54 t/m 95 worden volgens

¹ Illustratiepunt is het punt op de faalgrens (faalgebied) met de grootste kans-bijdrage aan de waterstand bij de normfrequentie.

^{1,2} Delen van de waterkeringen van de dijkkringgebieden Heerewaarden en Kromme Rijn worden ook als verbindende waterkering beschouwd (HR-2006)

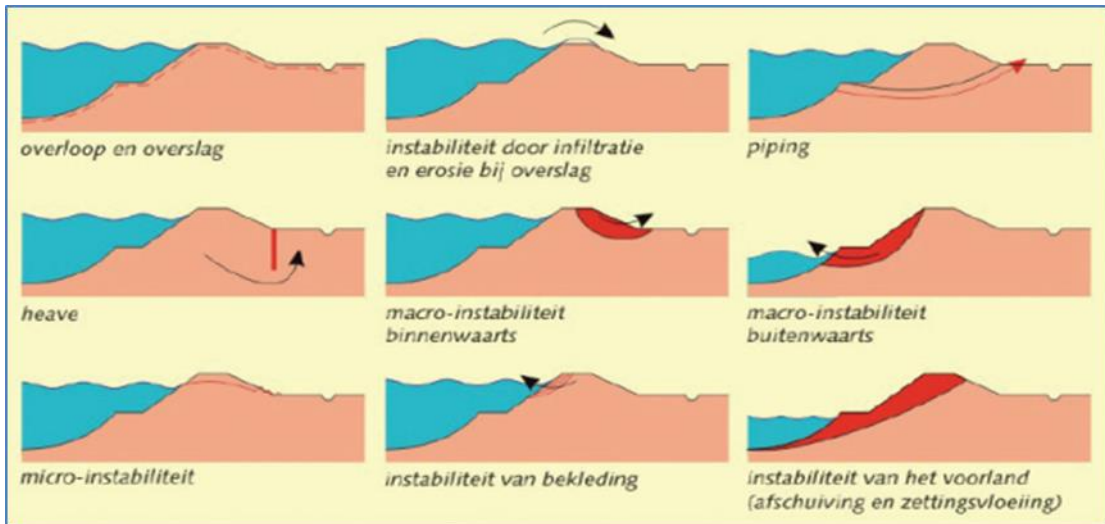
de nieuwe veiligheidsnormen ingedeeld in 43 dijktrajecten. De veiligheidsnormen voor deze dijktrajecten zijn 1:300 of 1:1000 per jaar en zijn opgenomen in Bijlage A.

Tabel 2.3 Dijktrajecten en (nieuwe) veiligheidsnormen bovenrivieren

Dijkkring	Dijktraject	Lengte dijktraject	Veiligheidsnorm
34	34-1	24383.44	1:1000
34	34-2	23024.68	1:1000
34	34a-1	9937.05	1:3000
45	45-2	28352.78	1:300
52	52-1	19915.35	1:3000
52	52-2	24361.20	1:3000
52	52-3	9291.82	1:3000
52	52-4	4487.74	1:3000
52	52a-1	17852.45	1:3000
36	36-1	17678.37	1:10000
36	36-2	21020.33	1:30000
36	36-3	26552.41	1:30000
36	36-5	17001.38	1:10000
36a	36a-1	4383.31	1:3000
38	38-1	29586.50	1:30000
38	38-2	20212.34	1:10000
39	39-1	4701.87	1:3000
40	40-1	5283.91	1:30000
40	40-2	6375.17	1:10000
41	41-1	12635.15	1:30000
41	41-2	27598.19	1:10000
41	41-3	26989.14	1:3000
41	41-4	20063.67	1:10000
42	42-1	17398.78	1:10000
43	43-1	15877.79	1:30000
43	43-2	33950.04	1:10000
43	43-3	25362.57	1:30000
43	43-4	26415.33	1:30000
43	43-5	22526.38	1:30000
43	43-6	46859.32	1:30000
44	44-2	26212.62	1:300
47	47-1	15430.28	1:3000
48	48-1	26967.84	1:30000
48	48-2	12663.20	1:10000
48	48-3	13176.27	1:10000
49	49-1	12234.77	1:300
49	49-2	20823.59	1:10000
50	50-1	5321.92	1:30000
50	50-2	7722.08	1:3000
51	51-1	23673.77	1:1000
53	53-1	17722.58	1:3000
53	53-2	28880.42	1:10000
53	53-3	36674.66	1:10000
54	54-1	12209.04	1:1000
45	45-1	5353.90	1:100000

2.2 Beschrijving faalmechanismen

Figuur 2.3 toont de belangrijke faalmechanismen van een dijk of dam.



Figuur 2.3 Faalmechanismen dijken VTV-2006 (RWS, 2006).

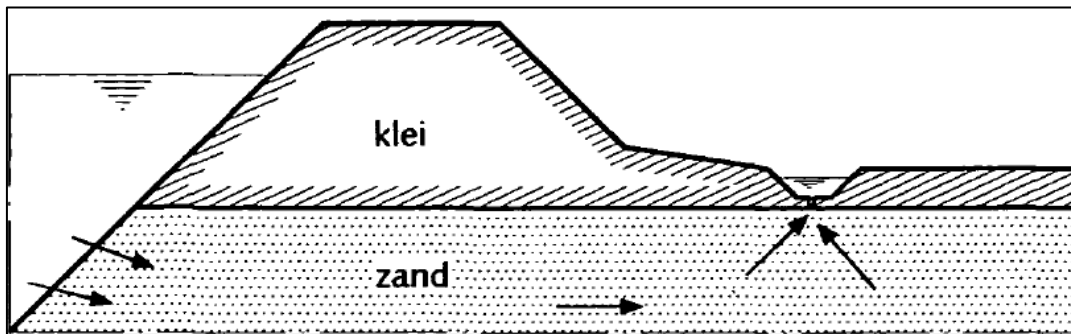
Waterstandsverlopen zijn uitsluitend bedoeld voor de toetsing van geotechnische faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende hoge waterstanden bedreigend zijn. Het betreft voornamelijk de faalmechanismen instabiliteit door golfoverslag en de geavanceerde toets voor piping/heave, instabiliteit door infiltratie en erosie bij overslag en instabiliteit binnenwaarts. Hieronder volgt een korte beschrijving van de genoemde faalmechanismen; voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar VTV-2006 (RWS, 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 de waterstand bij de normfrequentie 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 2.4 voor een illustratie.

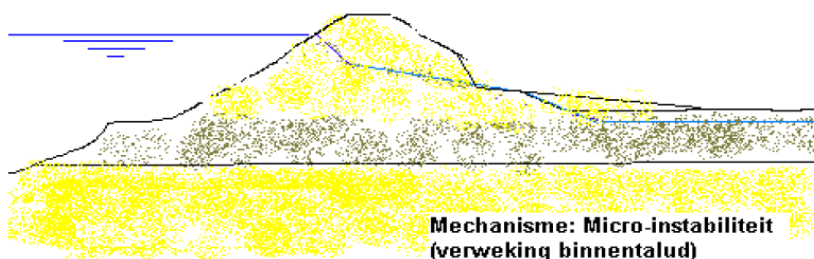


Figuur 2.4 Illustratie watervoerende zandlaag bij faalmechanisme opbarsten.

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 toplaag.

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.

Micro-instabiliteit: Micro-instabiliteit betreft het verlies van stabiliteit van grondlagen met zeer beperkte dikte aan het oppervlak van het binnentalud onder invloed van door een grondlichaam stromend grondwater. Bij micro-instabiliteit komt de bedreiging van binnen uit: eventuele problemen worden veroorzaakt door een hoge freatische lijn in het grondlichaam, die kan ontstaan na een (langdurige) hoge buitenwaterstand. Bij micro-instabiliteit door stromend grondwater kan worden gedacht aan het uitspoelen van materiaal uit de kern van de dijk: het kernmateriaal nabij de teen van het binnentalud kan dan verweken en wegvloeien, waardoor het binnentalud afkalft (Figuur 2.5). Ook kan bij micro-instabiliteit worden gedacht aan instabiliteit van de toplaag door een hoge freatische lijn in het grondlichaam. Als het binnentalud wordt beschermd door een ondoorlatende kleilaag kan deze door het grote potentiaalverschil over de toplaag worden afgedrukt van de dijk.



Figuur 2.5 Mechanisme micro-instabiliteit van het binnentalud.

De oorzaak voor het eventuele optreden van micro-instabiliteit is stijging van de freatische lijn in de dijk. Stijging van de freatische lijn als gevolg van een hoge buitenwaterstand is een sterk tijdafhankelijk proces. In principe is daarom het waterstandsverloop bij toetsing op veiligheid een relevante factor

Naast faalmechanismen van een dijk zijn er faalmechanismen van een kunstwerk; voor een overzicht van de faalmechanismen van een kunstwerk wordt verwezen naar (VTV, 2006). Relevant hier is het kombergend vermogen bij kustwerken. Een langdurige aanhoudende hoge waterstand⁴ speelt hierbij een belangrijk rol.

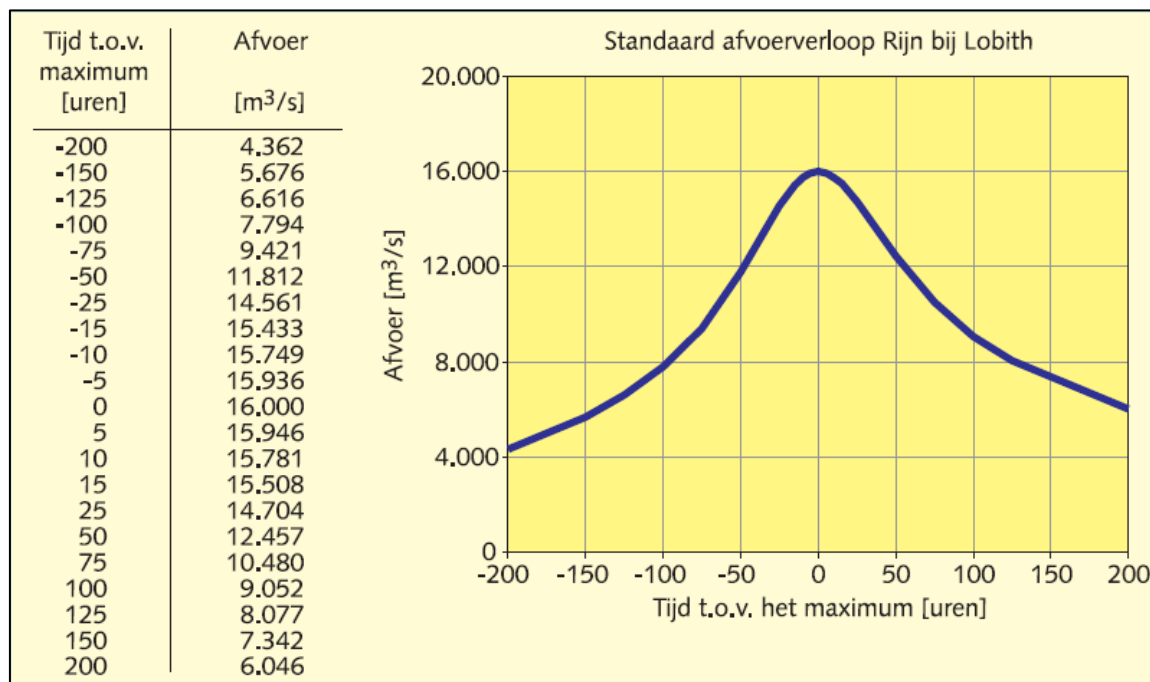
Samenvattend zijn de voor langdurig hoge waterstanden de volgende faalmechanismen gevoelig:

1. Instabiliteit bij overloop en overslag
2. Opbarsten en piping
3. Instabiliteit door infiltratie en erosie bij overslag
4. Macro-instabiliteit binnenwaarts
5. Micro-instabiliteit binnentalud
6. kombergend vermogen bij kustwerken

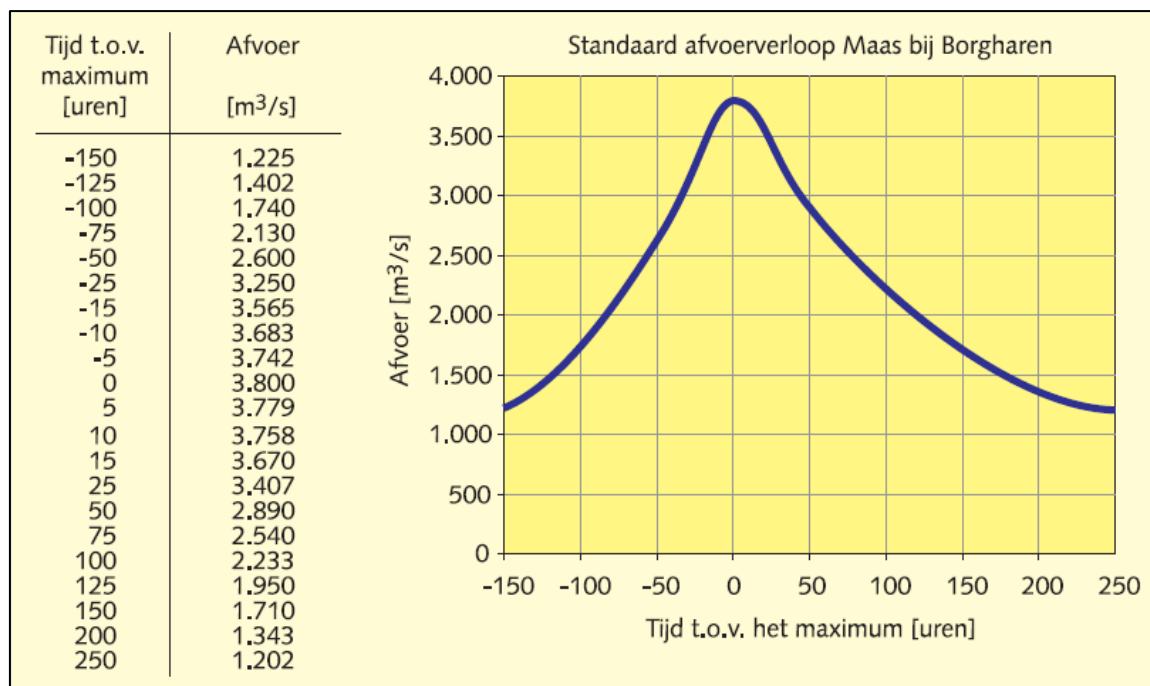
2.3 Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas in HR-2006

Op de Rijntakken en de Maas bepaalt de rivierafvoer de maatgevende waterstanden op de as van de rivier; het tijdsverloop dat hierbij hoort wordt dan ook volledig bepaald door het tijdsverloop van de rivierafvoer. De vigerende waterstandsverlopen HR-2006 op de as van de rivier zijn dan ook afgeleid met behulp van de vigerende afvoerverlopen op de bovenranden van de riviertakken. Voor de Rijn is dat station Lobith en voor de Maas Brogharen. Uitgaande van de vigerende norm van 1/1250 per jaar bedraagt de maatgevende afvoer van de Rijn bij Lobith 16.000 m³/s en van de Maas bij Borgharen 3.800 m³/s. Het hierbij behorende afvoerverlopen zijn afgebeeld Figuur 2.6 en Figuur 2.7. Beide zijn overgenomen uit het Randvoorwaardenboek HR-2006 (RWS, 2006). Door middel van een WAQUA berekening met als bovenrand deze afvoerverlopen kan het waterstandsverloop op elke willekeurige locatie op de Rijntakken of de Maas worden afgeleid.

⁴ De duur van de waterstand bij het faalmechanisme 'overloop bij dijken' wordt niet meegenomen. Bij overloop bij kunstwerken is dit wel het geval wanneer het achterliggende kombergend vermogen wordt gebruikt om zo aan een relatief lagere hoogte te mogen voldoen.

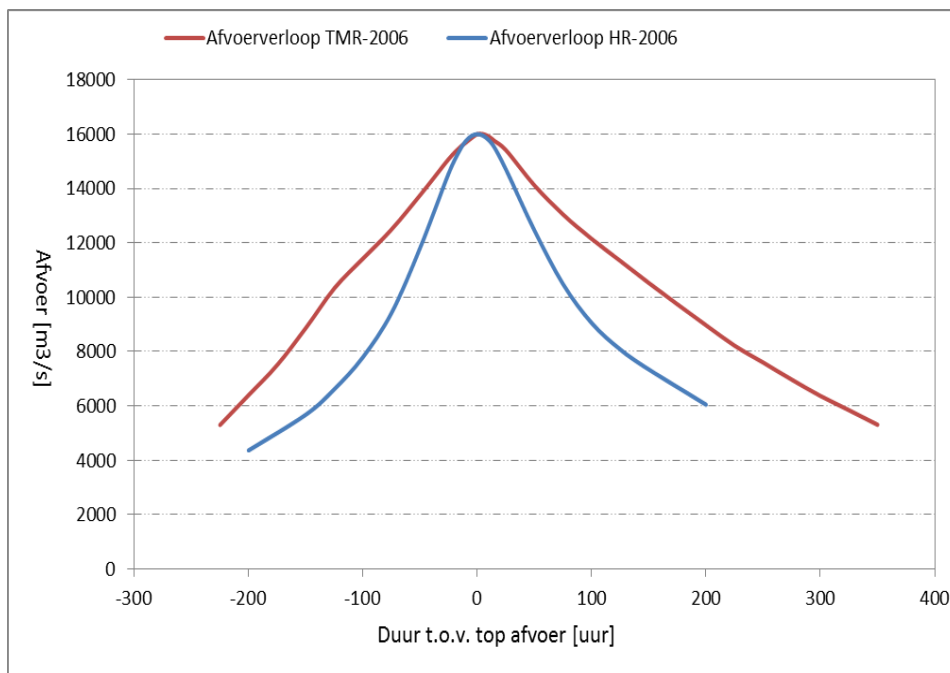


Figuur 2.6 Standaard afvoerverloop Rijn bij Lobith HR-2006 (RWS-2006)

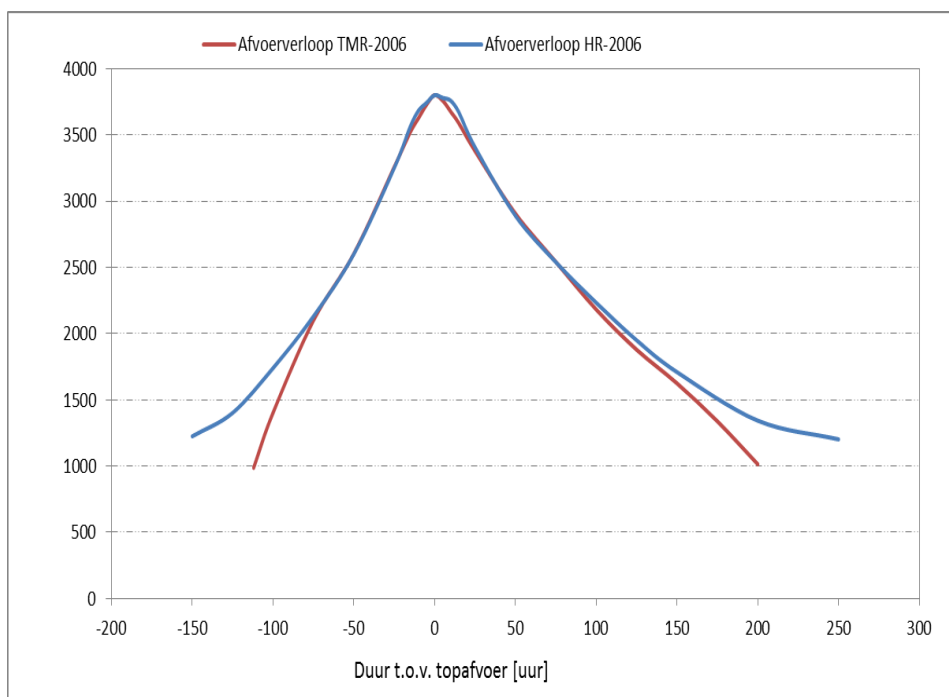


Figuur 2.7 Standaard afvoerverloop Maas bij Borgharen HR-2006 (RWS, 2006)

N.B. voor TMR-2006 gelden andere afvoerverlopen bij Lobith en Borgharen dan voor HR-2006. Ten einde het verschil te duiden zijn beide verlopen, uit HR-2006 en TMR-2006, afgebeeld in Figuur 2.8 en Figuur 2.9. Duidelijk is te zien dat vooral het afvoerverloop van de Rijn bij Lobith uit de TMR-2006 veel breder is dan het afvoerverloop HR-2006. Het verschil in afvoerverlopen van de Maas is klein.



Figuur 2.8 Vergelijking afvoerverlopen HR-2006 en TMR-2006 van de Rijn bij Lobith



Figuur 2.9 Vergelijking afvoerverlopen HR2006 en TMR-2006 van de Maas bij Borgharen.

In het kader van WTI-2011 is onderzoek gedaan naar de statistiek (golfvorm en werklijn) van zowel de Rijn als de Maas. Hierbij is expliciet onderzocht of verlenging van de meetreeksen met de laatste 5 meetjaren aanleiding zouden kunnen geven voor aanpassing van de destijds bestaande statistiek. Het blijkt niet het geval te zijn, waardoor de vigerende statistiek van HR-2006 was aangehouden.

3 Analyse productieberekeningen Rijntakken

3.1 Inleiding

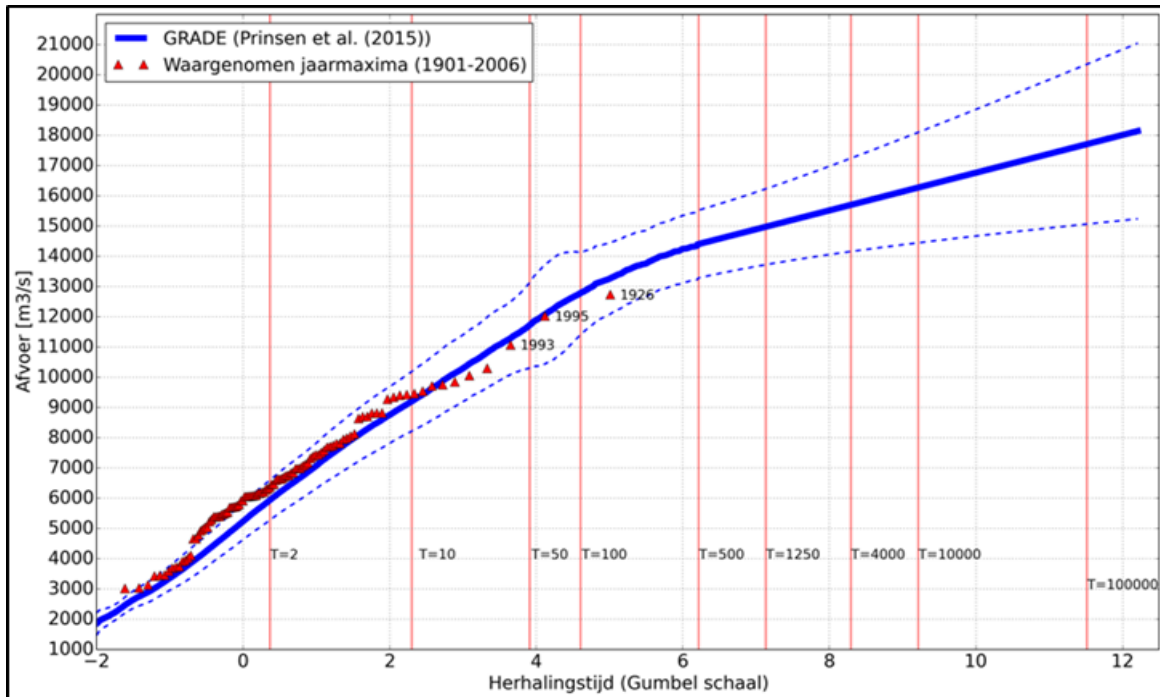
Op de Rijntakken worden de maatgevende waterstanden hoofdzakelijk bepaald door hoge rivierafvoer. Rivierafvoer is een trage stochast en verandert langzaam in de tijd. Het tijdsverloop van de afvoer, ook de afvoergolfvorm, bepaalt hoofdzakelijk het tijdsverloop van de waterstand benedenstrooms van de bovenrand, Lobith in dit geval. De rol van de wind en de daarmee samenhangende windopzet is van ondergeschikte rol. Opstuwung vanuit de Noordzee of het IJsselmeer speelt geen rol. Voor WTI-2017 geldt een nieuwe afvoerstatistiek en afvoergolfvorm voor de Rijn bij Lobith en deze verschillen van de vigerende afvoerstatistiek en afvoergolfvorm.

3.2 Statistiek en afvoergolfvorm GRADE

De vigerende afvoerstatistiek van HR-2006/WTI-2011 en bijbehorende afvoergolfvorm volgen uit statistische extrapolatie van afvoermetingen en golfvormgenerator respectievelijk; zie (RWS-RIZA, 2001) en (HKV, 1999). In WTI-2017 is de afvoerstatistiek geactualiseerd. Hierbij is gebruik gemaakt van the Generator of Rainfall And Discharge Extremes, GRADE (Passchier et al, 2014), (Hegnauer et al, 2014) en (Prinsen et al, 2015). Met het GRADE-instrumentarium kunnen verschillende varianten worden doorgerekend: de situatie waarbij wel/geen overstromingen in de bovenstroomse delen van het stroomgebied worden beschouwd al dan niet in combinatie met noodmaatregelen om die overstromingen te beperken. De variant waarbij geen rekening wordt gehouden met noodmaatregelen in Duitsland zou resulteren in lagere waterstanden bij Lobith omdat verwacht wordt dat bij extreem hoogwater op de Rijn veel water verloren gaat door overstromingen in Duitsland o. Deze variant wordt als onvoldoende conservatief beoordeeld. Voor toepassing binnen WTI-2017 is daarom, na overleg met Rijkswaterstaat en ENW, gekozen voor de variant met overstromingen en eventuele inzet van noodmaatregelen. Deze variant wordt als voldoende conservatief beschouwd (door ENW). Bij de berekeningen met GRADE voor deze variant is daarnaast rekening gehouden met onzekerheden in klimaat, hydrologie en hydraulica (SOBEK). Onzekerheden in het SOBEK-model omvatten het al dan niet treffen van noodmaatregelen om overstromingen in Duitsland tegen te gaan, de dijkhoogtes, het bergend volume achter de dijken, het al dan niet bezwijken van de dijken en de bodemfrictie. De statistiek van GRADE voor het hele bereik van afvoeren is uitvoerig beschreven in (Prinsen et al, 2015).

Vergeleken met de HR-2006 statistiek (met behulp van de huidige extrapolatiemethode), berekent GRADE voor herhalingstijden kleiner dan 10 jaar relatief hogere afvoeren, ook is de onzekerheid van GRADE voor het lage bereik (1 – 10 jaar) relatief groot. Voor een herhalingstijd van 2 jaar bijvoorbeeld bedraagt het verschil tussen de extrapolatie en GRADE ruim $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. 15%). In gebieden waar relatief lage afvoeren (in combinatie met andere basisstochasten) de maatgevende hydraulische belasting bepalen, kan dit verschil een verhogend effect hebben. In het middenbereik (herhalingstijden tussen 25 en 250 jaar) berekent GRADE hogere afvoeren. Voor het hoge en extreme bereik (herhalingstijd > 250 jaar) komt GRADE juist beduidend lager uit dan de huidige extrapolatiemethode. Het verschil loopt voor $T = 10.000$ jaar op tot bijna $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor herhalingstijden groter dan 10.000 jaar loopt het verschil nog gestaag op.

De werklijn van GRADE voor de situatie met overstromingen in combinatie met noodmaatregelen om die overstromingen in Duitsland tegen te gaan, is afgebeeld in Figuur 3.1.



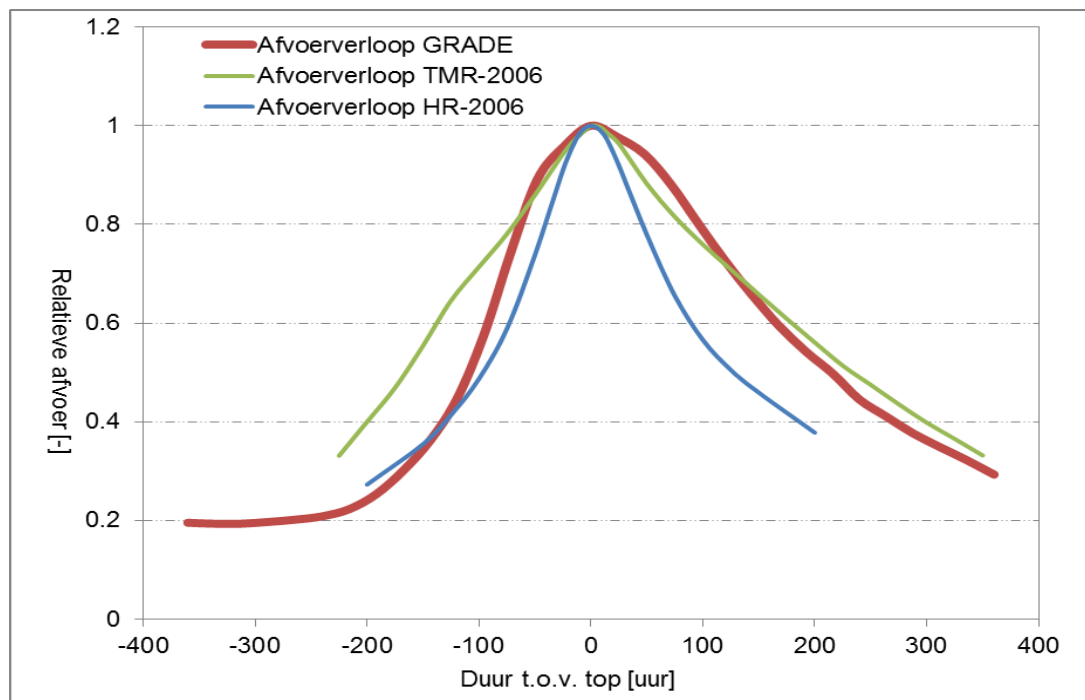
Figuur 3.1 Werklijn van GRADE voor de Rijn bij Lobith.

Tabel 3.1 bevat voor een aantal herhalingsjijden de bijbehorende afvoeren zoals berekend met GRADE. Zoals in paragraaf 2.1 al vermeld gelden er voor de dijktrajecten langs de Rijntakken 6 veiligheidsnormen, deze variëren tussen 1:300 en 1:100000 per jaar.

Tabel 3.1 Extreme hoge afvoeren volgens GRADE voor de Rijn bij Lobith voor enkele relevante herhalingsjijden.

Herhalingsjijd [jaar]	Afvoer [m^3/s]
300	14.000
1.000	14.840
3.000	15.520
10.000	16.270
30.000	16.960
100.000	17.710

Ook de afvoergolfvorm bij Lobith is geactualiseerd gebruik makend van GRADE. Zowel de (nieuwe) afvoerstatistiek van GRADE als de bijbehorende afvoergolfvorm verschillen van de vigerende en in HR-2006/WTI-2011 gehanteerde statistiek en golfvorm. De golfvorm van GRADE voor de Rijn bij Lobith is afgebeeld in Figuur 3.2. De figuur omvat ter vergelijking ook de golfvorm van HR-2006/TMR2006. De afvoergolfvorm volgend uit GRADE voor de Rijn bij Lobith is breder dan de vigerende golfvorm uit HR-2006, vooral rondom de top is afvoergolfvorm beduidend breder. Dit komt vooral door de keuze om rekening te houden met overstromingen in Duitsland.



Figuur 3.2 Afvoergolfvorm bij Lobith berekend met GRADE samen met afvoergolfvormen uit HR-2006/TMR-2006.

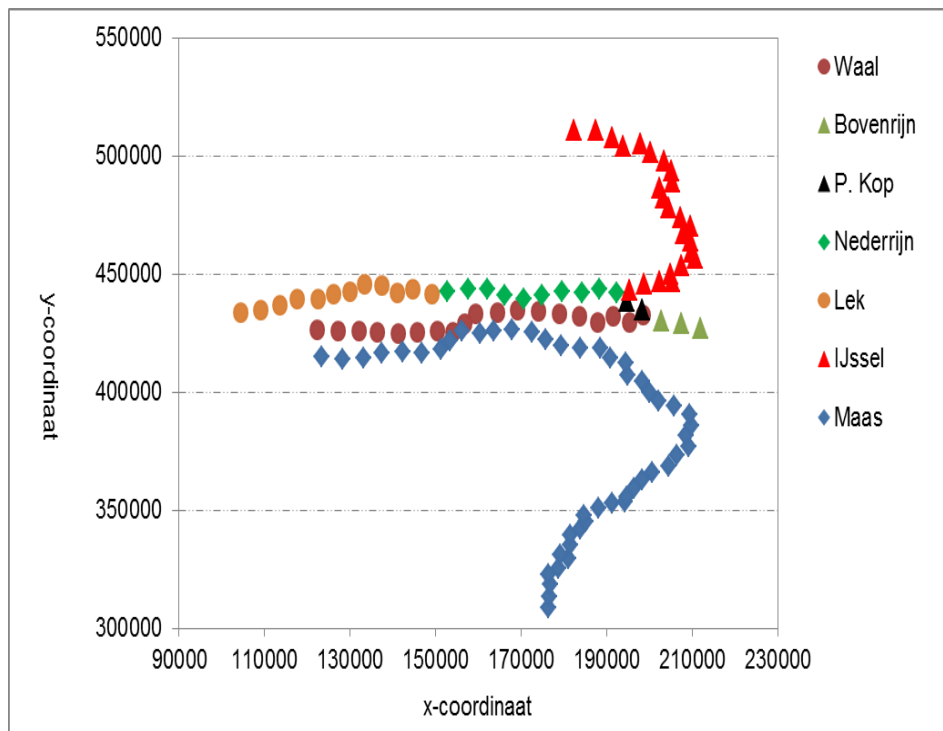
Het verschil in golfvormen tussen HR-2006 en TMR-2006 wordt veroorzaakt door de manier waarop eventuele dubbelpieken worden beschouwd. In het ene geval zijn deze als onafhankelijke pieken beschouwd en in het andere geval niet; deze zijn dan als het ware aangeplakt tegen de hoofdpijk met als gevolg een breder verloop van de afvoer. Zie voor details (HKV, 2011).

3.3 Productieberekeningen Rijntakken

Voor de Rijntakken zijn in het kader van WTI-2017 productieberekeningen uitgevoerd met het waterbewegingsmodel WAQUA Rijntakken. Voor nadere informatie met betrekking tot WAQUA schematisatie voor de Rijntakken en gebruikte invoer wordt verwezen naar (Alfons, 2015). In de productieberekeningen zijn 11 afvoergolven bij Lobith doorgerekend; deze doorberekening resulteert voor elke willekeurige locatie in de bijbehorende waterstand inclusief het tijdsverloop ervan. De afvoermaxima van de beschouwde afvoergolven bij Lobith voor de productieberekeningen zijn: 6.000, 8.000, 10.000, 13.000, 16.000, 16.500, 17.000, 18.000, 20.000, 22.000 en 24.000 m³/s.

Zoals hierboven vermeld, bepaalt de rivierafvoer de (maatgevende) waterstanden in het algemeen (en de toetspeilen in het bijzonder). Gelet op de veiligheidsnormen uit Tabel 3.1 en de doorgerekende afvoerengolven, zijn in dit rapport de resultaten van de afvoergolven behorende bij 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s beschouwd en geanalyseerd. Maxima van deze afvoergolven hebben gemiddelde herhalingstijden die overeenkomen of dicht bij de nieuwe normen liggen. N.B. een afvoergolf met hoogte 13.000 m³/s treedt op met een gemiddelde frequentie van slechts ca. 150 jaar. Desalniettemin, om een goed beeld te krijgen van het effect van de hoogte van de afvoergolf op het tijdsverloop van de waterstand en de mate van topvervlakking is deze (afvoergolf) ook meegenomen in de analyse.

De analyse is uitgevoerd voor een selectie van as-locaties langs de Rijntakken. Er zijn in totaal 70 as-locaties geselecteerd, met een onderlinge afstand van ca. 5 km (zie Figuur 3.3 voor een overzicht van de geselecteerde locaties⁵). De geselecteerde set locaties is zo verspreid over alle riviertakken dat deze representatief wordt beschouwd voor het bovenrivierengebied.



Figuur 3.3 Geselecteerde as-locaties langs verschillende riviertakken in het bovenrivierengebied.

3.4 Analyse resultaten productieberekeningen Rijntakken

3.4.1 Bovenrijn

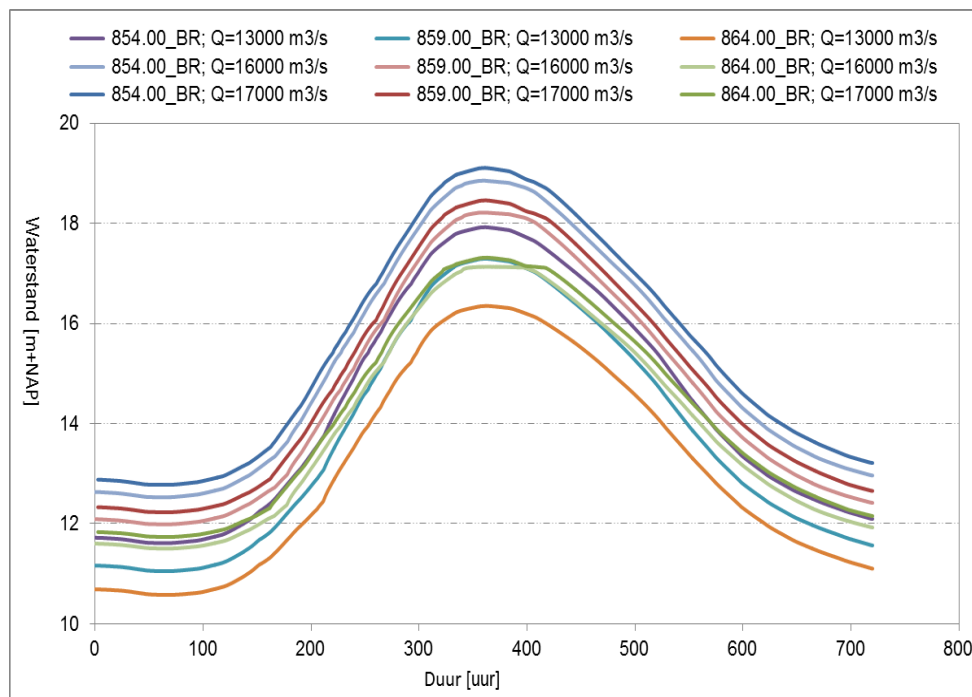
Langs de Bovenrijn zijn 3 locaties geselecteerd: 854.00_BR, 859.00_BR en 864.00_BR. Het tijdsverloop van de waterstand op deze 3 locaties bij een afvoergolf met hoogtes 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s is afgebeeld in Figuur 3.4. Figuur 3.5 bevat dezelfde waterstandsverlopen, echter nadat de waterstand bij elke beschouwde locatie op elk niveau verminderd is met de maximale waarde. Op deze manier ontstaan voor alle locaties waterstandsverlopen met hoogte nul, die goed met elkaar vergeleken kunnen worden.

Figuur 3.5 laat zien dat het verschil in tijdsverloop behorend bij de beschouwde locaties langs de Bovenrijn in principe klein is. Het tijdsverloop bij de benedenstroomse locatie, locatie 864.00_BR, is relatief breder. Vooral de achterflank is aan de brede kant. Rondom de top is het verschil klein; dit geldt tot een niveau van ca. 3 onder de topwaarde van 0 m. Het verschil in tijdsverloop voor de 2 bovenstroomse locatie 854.00_BR en 859.00_BR, is marginaal.

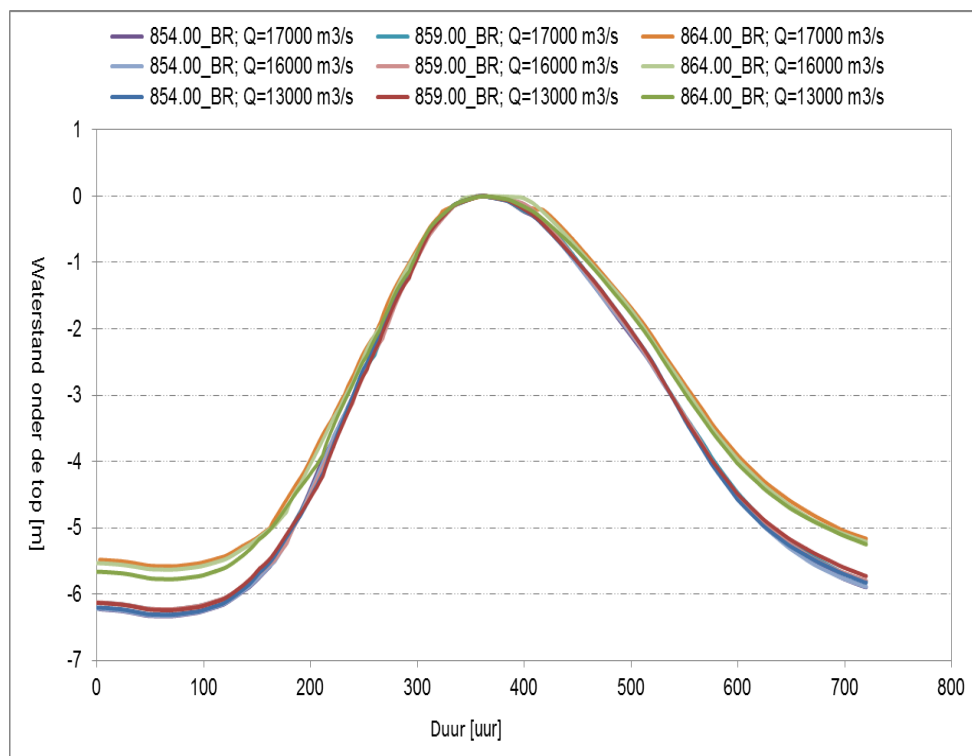
Van de 3 beschouwde afvoergolven met hoogtes 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s respectievelijk, is in Figuur 3.6 en Figuur 3.8 het tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m afgebeeld voor 2 locaties: de meest benedenstroomse respectievelijk meest

⁵ Figuur 3.3 omvat naast de gekozen locaties langs de Rijntakken ook de gekozen locaties langs de Maas.

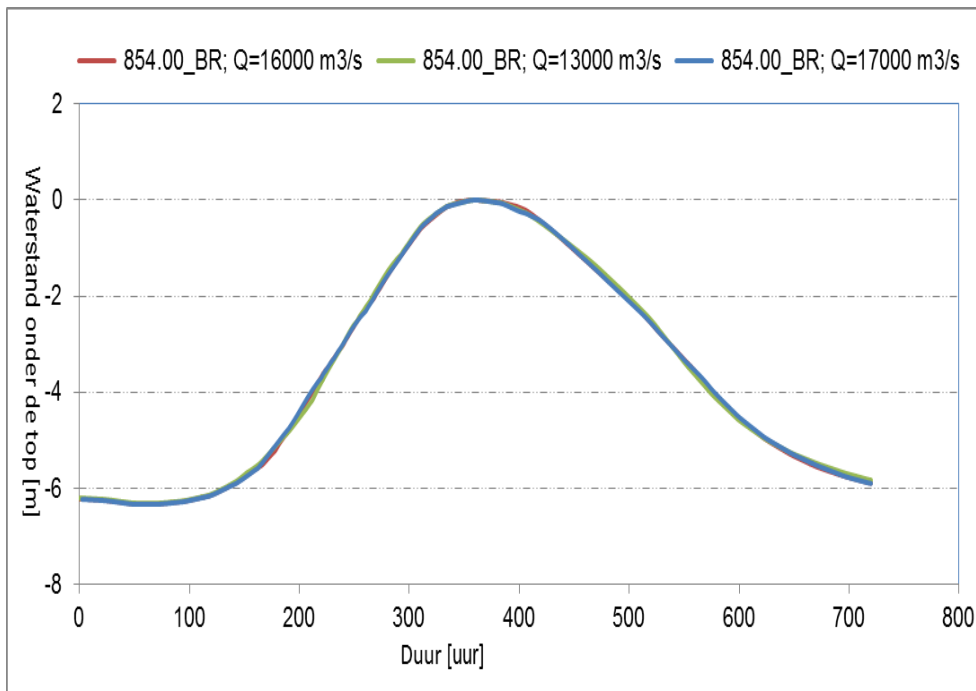
bovenstroomse locatie. Duidelijk is te zien dat voor beide locaties, de vorm van het tijdsverloop van de waterstand niet afhangt van de hoogte van de afvoer.



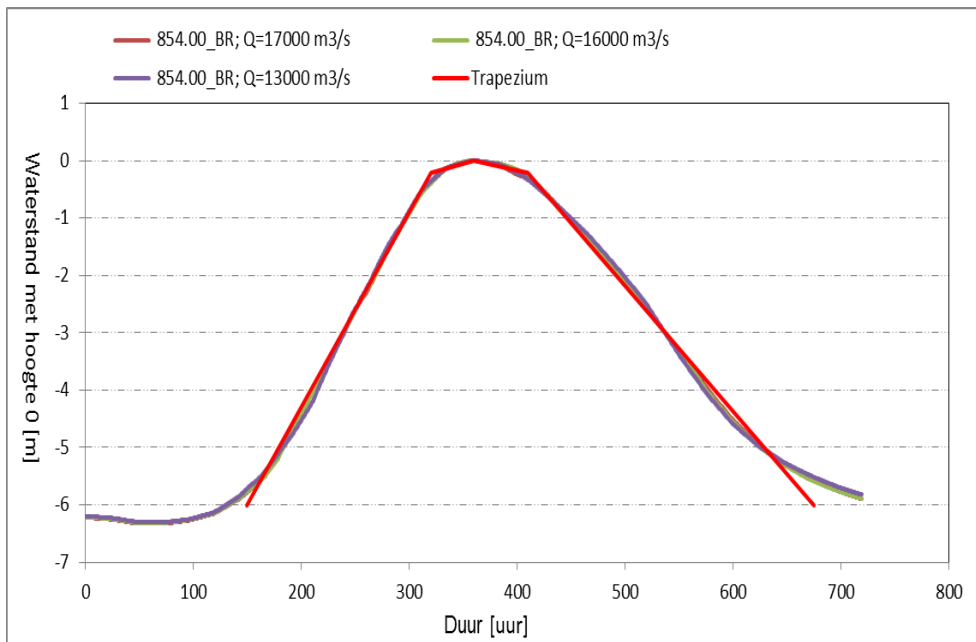
Figuur 3.4 Tijdsverloop waterstand langs de Bovenrijn voor $Q = 13.000, 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 3.5 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor gekozen locaties langs de Bovenrijn; $Q = 13.000, 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 3.6 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locatie 854.00_BR langs de Bovenrijn

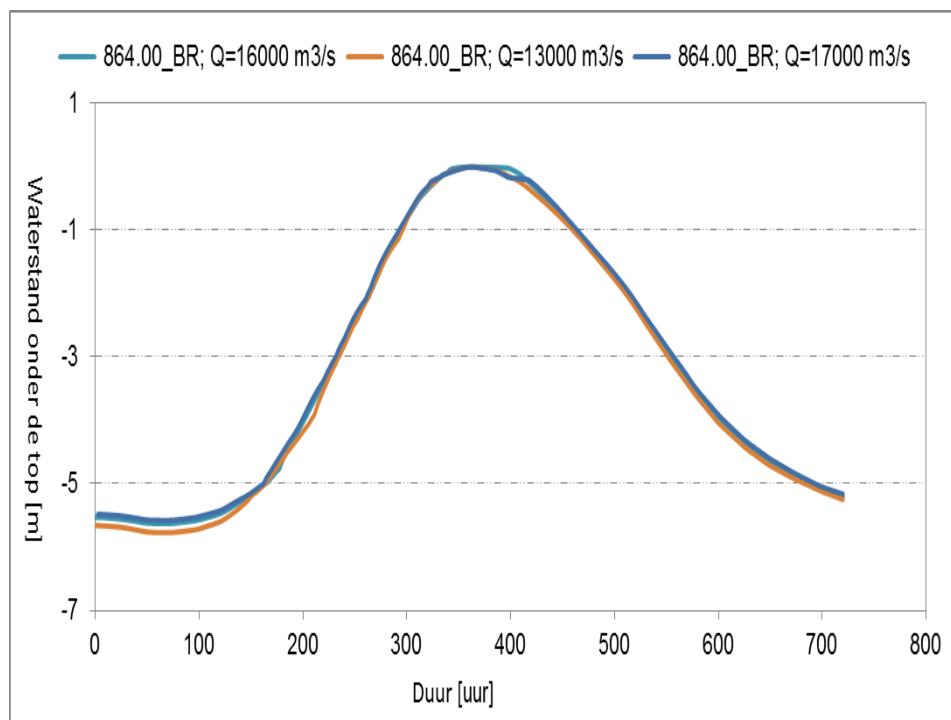


Figuur 3.7 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor locatie 854_BR voor $Q = 13.000$, 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

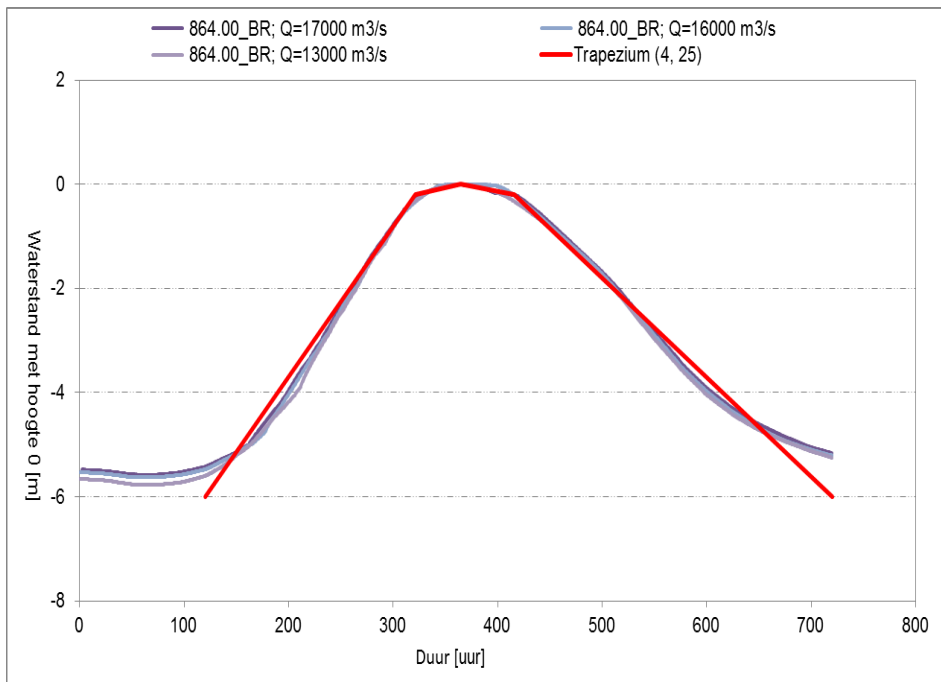
Samenvattend kan geconcludeerd worden dat het tijdsverloop niet afhangt van de hoogte van de afvoergolf. Een afvoergolf met verschillende hoogtes, te weten 13.000 , 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$, leidt namelijk tot eenzelfde tijdsverloop van de waterstand. De ruimtelijke variabiliteit van het waterstandsverloop is klein. Voor bovenstroomse locaties is het tijdsverloop relatief smaler dan voor de Benedenstroomse locaties, zie ook Figuur 3.5; het verschil is echter klein en heeft met name betrekking op de achterflank.

Het tijdsverloop van de waterstand voor de locatie de locatie 854_BR laat zich goed schematiseren door een trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.7. De basisduur van het trapezium op het niveau van -6 m bedraagt 528 uur (22 dagen) en een topduur van 90 uur. In die 90 uur van de top is de waterstand niet constant. Dit geldt ook voor het trapeziumverloop. Rondom de top van het trapeziumverloop stijgt de waterstand in 40 uur met 0,2 m en daalt daarna in 50 uur met wederom 0,2 m. De schematisatie blijkt het tijdsverloop van de waterstand rond de top goed te benaderen. Deze schematisatiekeuze is weliswaar arbitrair en enkel gebaseerd op een visuele beoordeling, maar is wel gebruikelijk voor het benaderen van tijdsverlopen. Voor de stormopzet bij Hoek van Holland maar ook andere kuststations geldt bijvoorbeeld een soortgelijk geschematiseerd verloop rondom de top; zie (Tijssen, 2009) en (Chbab, 2015). Het trapeziumverloop uit Figuur 3.7 is tot slot niet-symmetrisch: de totale duur van de voorflank bedraagt 212 uur en van de achterflank 316 uur.

Ook de benedenstroomse locatie 864_BR laat zich goed benaderen door een trapezium; het trapezium is enigszins breder, zowel in de basis als rondom de top. De basisduur bedraagt op het niveau van -6 m 600 uur (25 dagen) en de duur rondom de top 96 uur (4 dagen). De totale duren van de voorflank en achterflank bedraagt 245 uur en 355 uur respectievelijk.



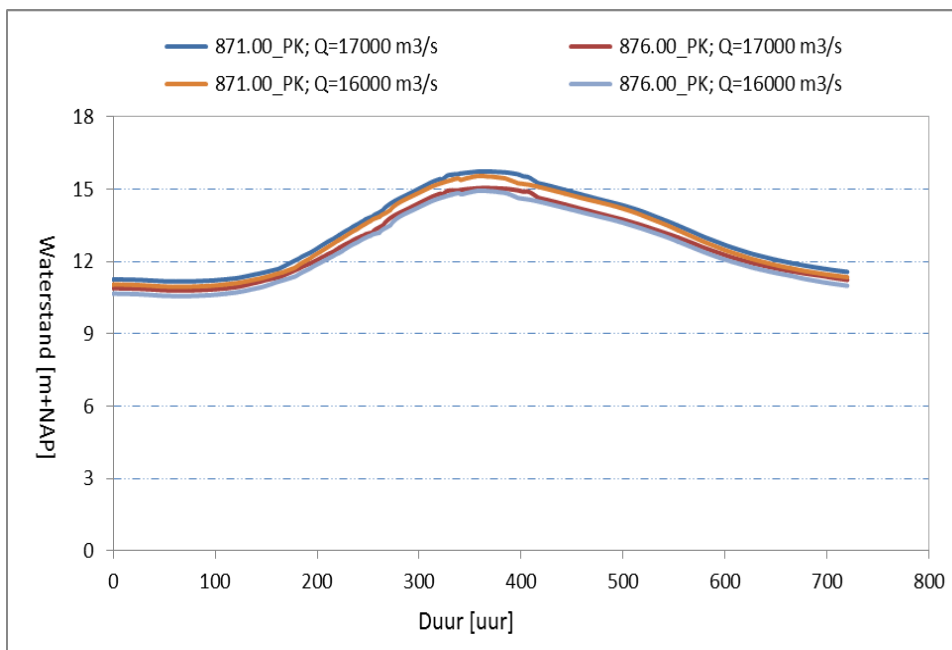
Figuur 3.8 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locatie 864.00_BR langs de Bovenrijn



Figuur 3.9 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor locatie 864_BR voor $Q = 13.000$, 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

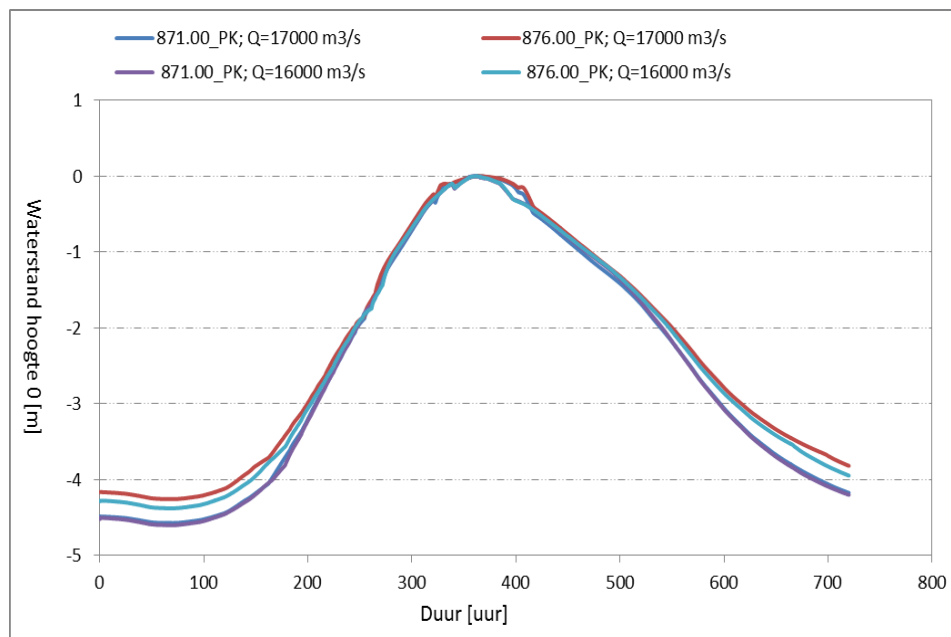
3.4.2 Pannerdense Kop

Pannerdense Kop is een kort traject van de Rijn; er zijn langs dit traject 2 locaties onderzocht: locatie 871.00_PK en locatie 876.00_PK. Het tijdsverloop van de waterstand op deze 2 locaties bij een afvoergolf met hoogte 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is afgebeeld in Figuur 3.10. Figuur 3.11 omvat de tijdsverlopen voor dezelfde locaties nadat de waterstand op elk niveau verminderd is met het opgetreden maximum.

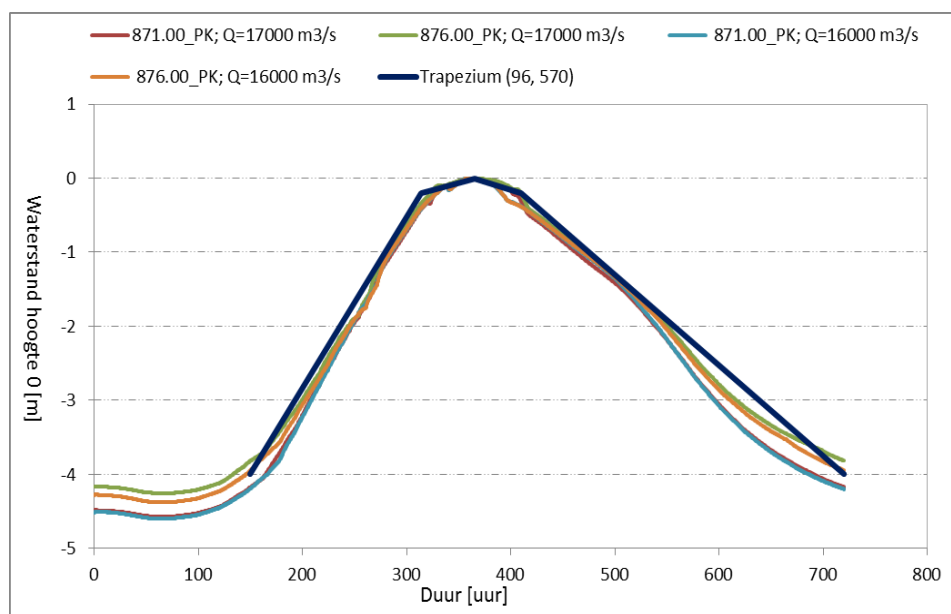


Figuur 3.10 Tijdsverloop van de waterstand langs de Pannerdense Kop; locatie 871.00_PK en locatie 876.00_PK voor de afvoergolf met hoogte $Q = 16.000$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figuur 3.10 laat zien dat het waterstandsverloop bij de beschouwde locaties langs de Pennerdense Kop regelmatig is. De vorm van het waterstandsverloop van de waterstand blijkt verder nauwelijks af te hangen van de hoogte van de afvoergolf. Alleen in de basis is een klein verschil te constateren voor de benedenstroomse locatie 876.00_PK. De ruimtelijke variabiliteit is ook zeer beperkt; er treedt enige topvervlakking langs de Pannerdense Kop; het effect op het waterstandsverloop is echter zeer beperkt en is alleen merkbaar aan de basis.



Figuur 3.11 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor de locaties 871.00_PK en 876.00_PK langs de Pennerdense Kop voor de afvoergolven met hoogtes 16.000 en 17.000 m³/s.

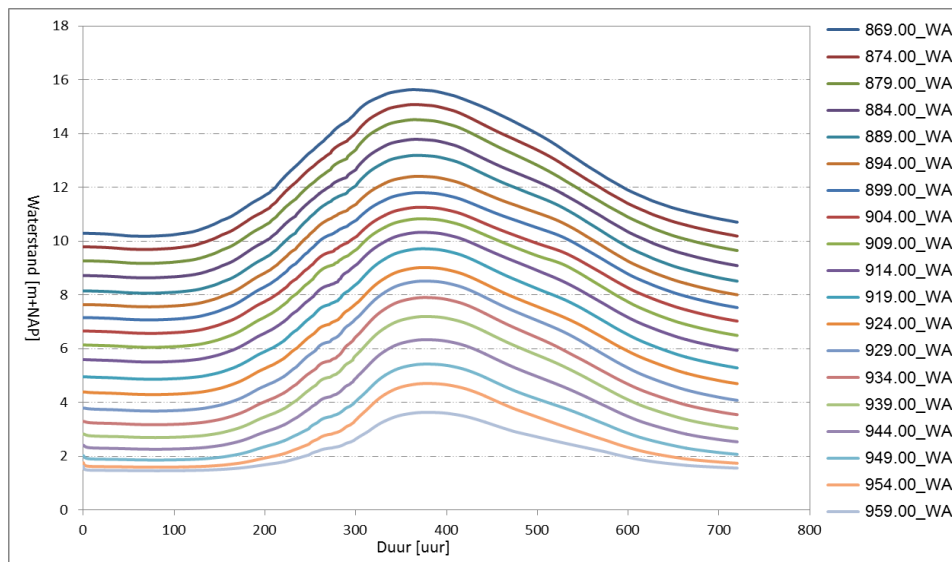


Figuur 3.12 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor de onderzochte locaties langs de Pannerdense Kop voor afvoergolven met hoogtes 16.000 en 17.000 m³/s.

Het tijdsverloop van de waterstand op de 2 beschouwde locaties langs de Pannerdense Kop laat zich goed benaderen door een trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.12. Het trapezium heeft op het niveau van -4 m een basisduur van 570 uur (23,75 dagen) en een topduur van 96 uur (4 dagen). De waterstand stijgt 164 uur van -4 naar -0,2 m en in 48 uur van -0,2 naar 0 m; daarna daalt de waterstand van 0 naar -0,2 m, eveneens in 48 uur en in 310 uur van -0,2 m naar -4 m.

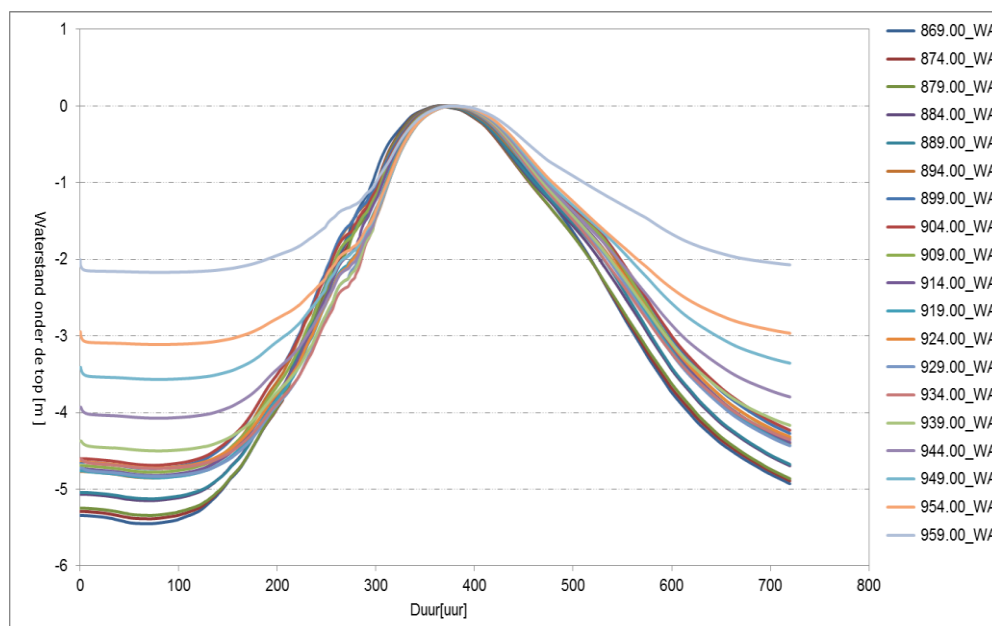
3.4.3 Waal

Langs de Waal zijn in totaal 19 locaties beschouwd. De locaties zijn verspreid over het hele gebied van de Waal en liggen op een onderlinge afstand van ca. 5 km. Het tijdsverloop van de waterstand op de geselecteerde locaties langs de Waal voor de 3 beschouwde afvoergolven (met hoogtes van 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s) zijn afgebeeld in Figuur 3.13, Figuur 3.15 en Figuur 3.17. Het bijbehorende tijdsverloop van de waterstand met hoogte nul is afgebeeld in Figuur 3.14, Figuur 3.16 en Figuur 3.18.

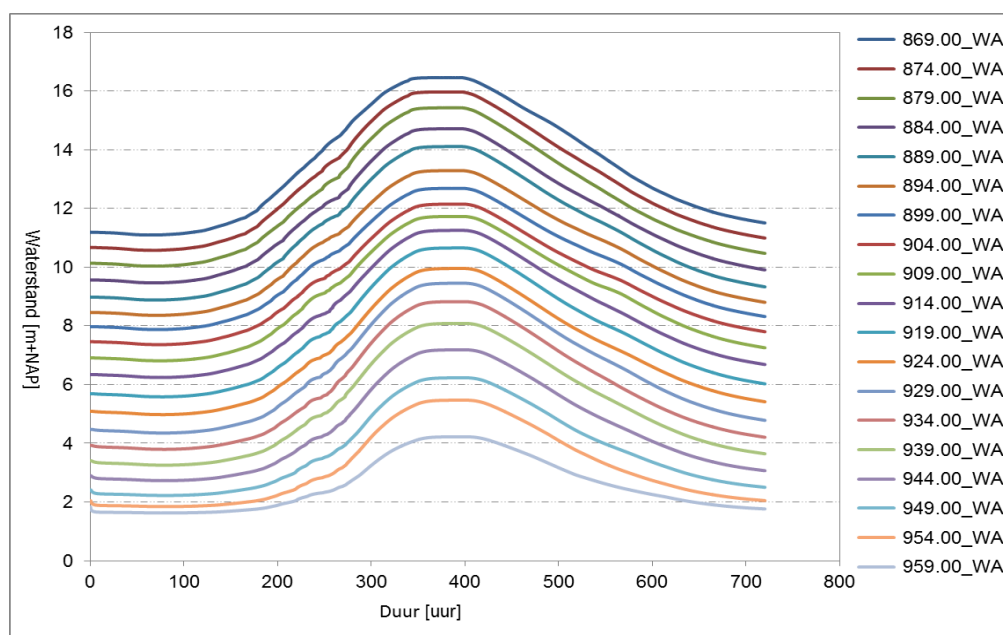


Figuur 3.13 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Waal voor een afvoer met topwaarde van 13.000 m³/s.

Met uitzondering van 4 benedenstroomse locaties, 944.00_WA t/m 959.00_WA, is het tijdsverloop van de waterstand redelijk uniform voor alle beschouwde afvoergolven; zie Figuur 3.14 en Figuur 3.16 en Figuur 3.18.

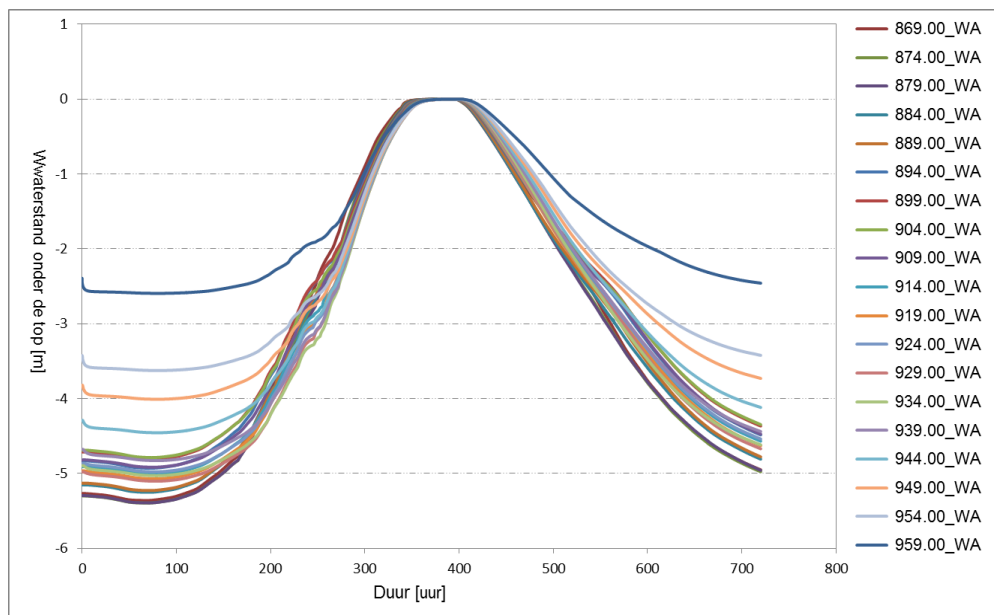


Figuur 3.14 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locaties langs de Waal en afvoer met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

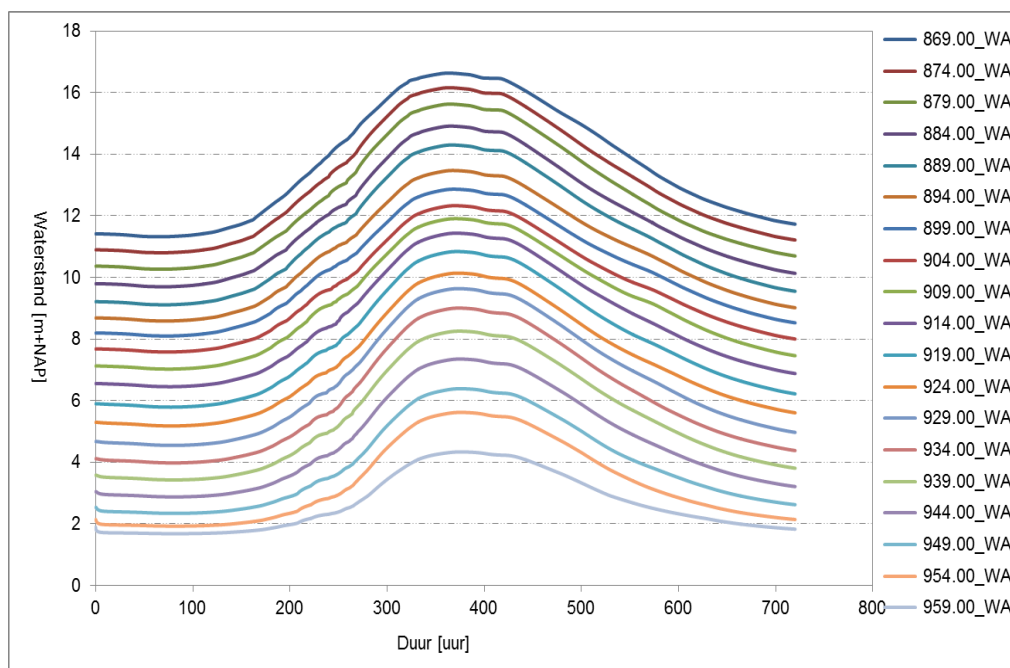


Figuur 3.15 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Waal voor een afvoer met topwaarde van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

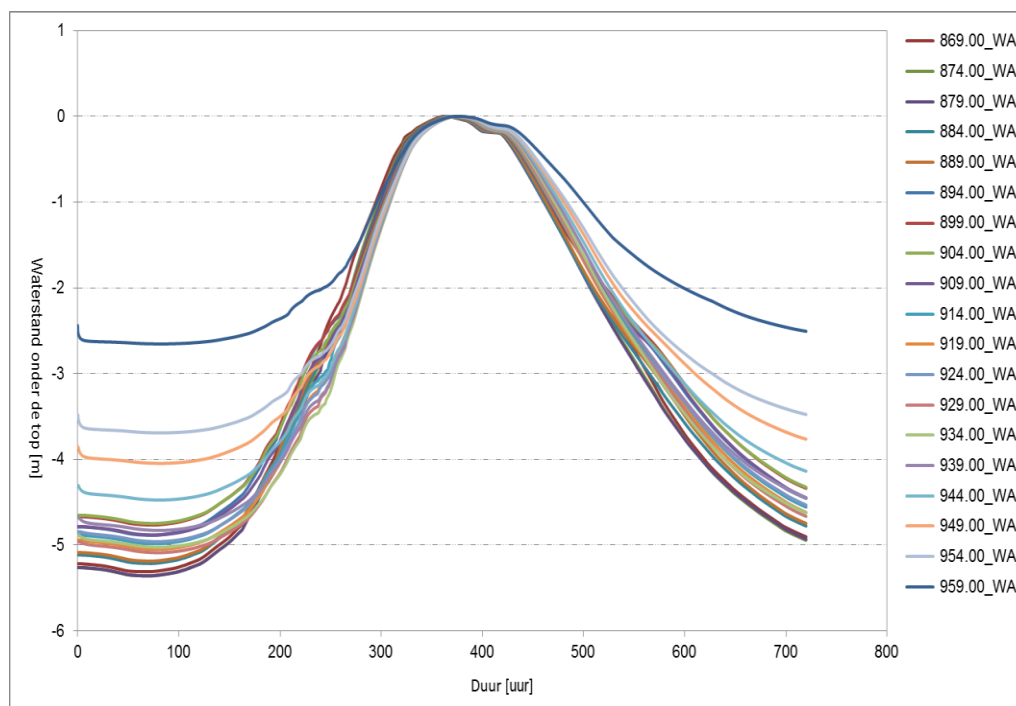
Uit Figuur 3.13, Figuur 3.15 en Figuur 3.17 kan worden geconcludeerd dat de waterstand een regelmatig tijdsverloop heeft voor alle beschouwde locaties en afvoergolven. Dit blijkt ook uit Figuur 3.14, Figuur 3.16 en Figuur 3.18 waarin de waterstand op alle locaties eenzelfde hoogte heeft gekregen, namelijk 0 m. Met uitzondering van de 4 meest benedenstroomse locatie (locaties 959.00_WA, 954.00_WA, 949.00_WA en 944.00_WA) heeft de waterstand een redelijk uniform tijdsverloop, vooral rondom de top tot een niveau van 3 m daaronder. Voor lagere niveaus zijn er enige verschillen te constateren. De meest benedenstroomse locatie, 959.00_WA, heeft een relatief breder tijdsverloop, dit geldt vooral voor de achterflank. Deze conclusies gelden voor alle de drie beschouwde afvoergolven.



Figuur 3.16 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locaties langs de Waal en afvoer met topwaarde van 16.000 m³/s.

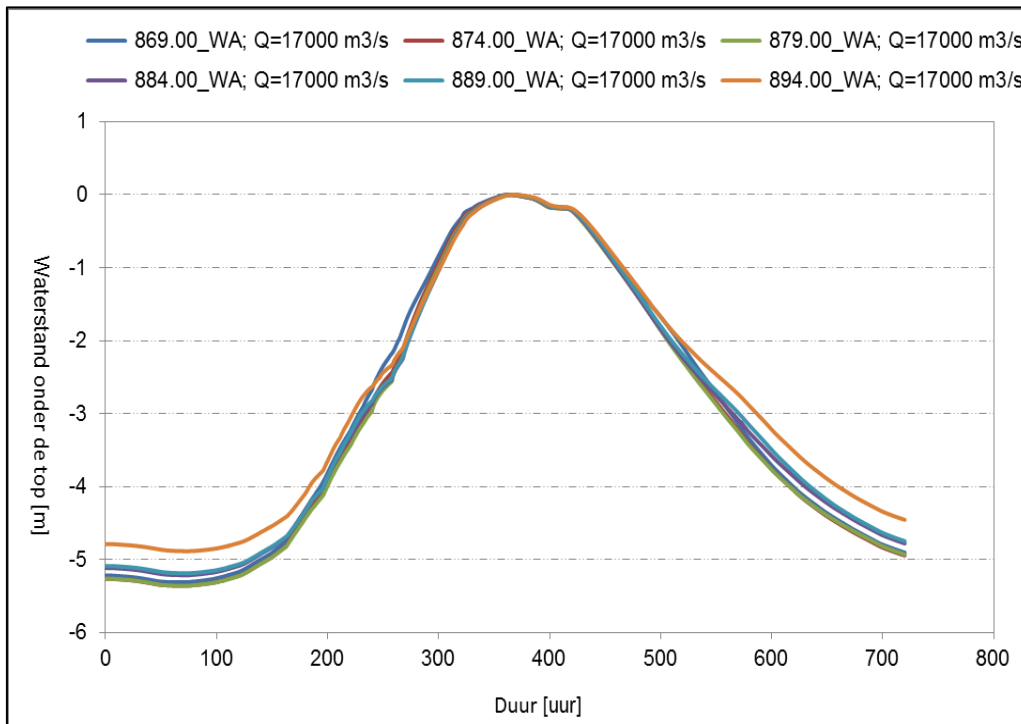


Figuur 3.17 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Waal voor een afvoer met topwaarde van 17.000 m³/s.

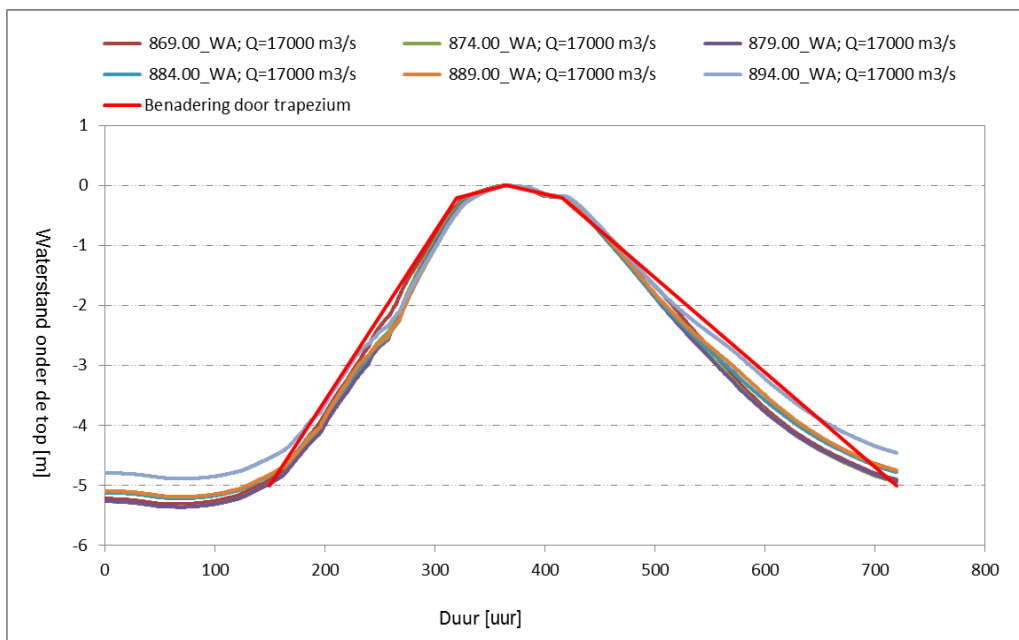


Figuur 3.18 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 m voor locaties langs de Waal en afvoer met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figuur 3.19 en Figuur 3.21 illustreren het verschil in tijdsverloop tussen de locaties die bovenstrooms respectievelijk benedenstrooms van de Waal liggen. Het tijdsverloop behorende bij de locaties bovenstrooms is relatief regelmatig/uniformer dan het tijdsverloop benedenstrooms. Zoals Figuur 3.20 kunnen de tijdsverlopen op de bovenstroomse locaties goed worden benaderd door één standaard tijdsverloop. Een trapezium met basisduur van 570 uur (ca. 24 dagen) op het niveau van -5 m en topduur van 96 uur (4 dagen) geeft een goede schatting.



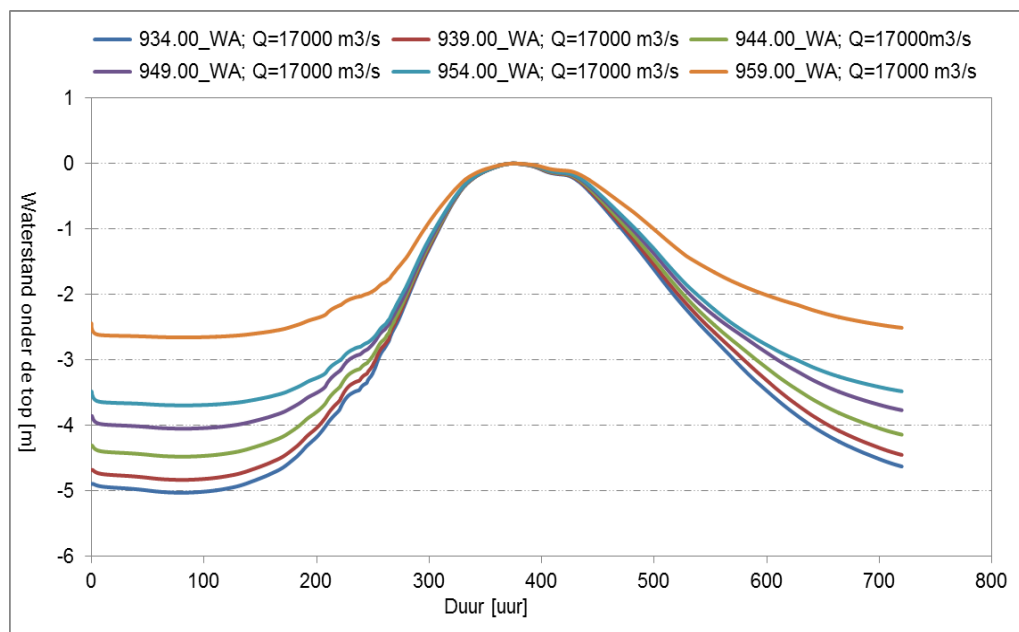
Figuur 3.19 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor bovenstroomse (6) locaties langs de Waal, afvoergolf met topwaarde van 17.000 m³/s.



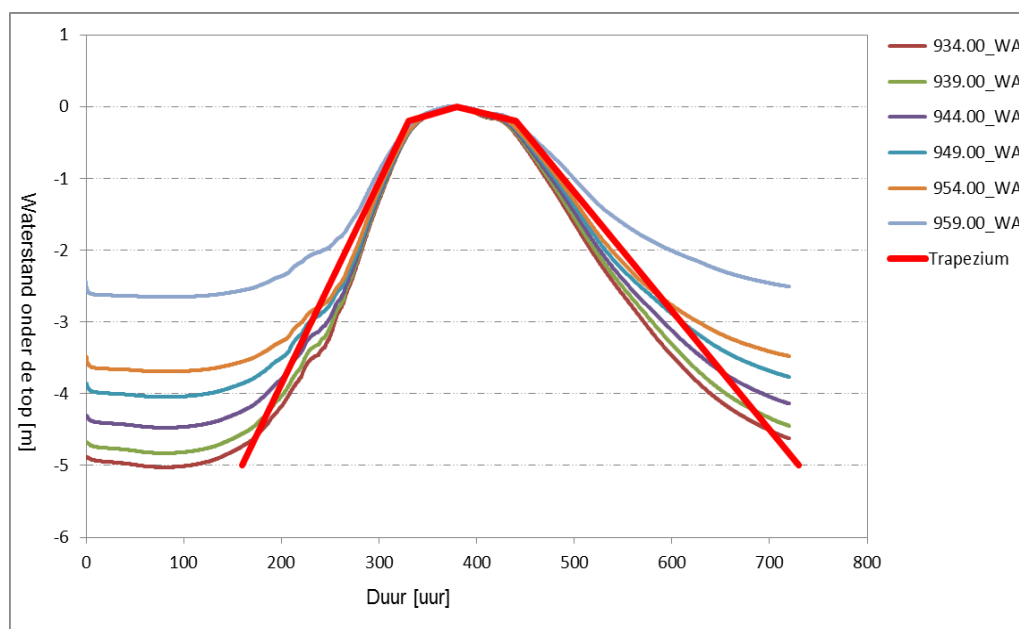
Figuur 3.20 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor bovenstroomse locaties van de Waal voor een afvoergolf van 17.000 m³/s.

De locaties die benedenstrooms van de locatie 894.00_WA laten een enigszins onregelmatig tijdsverloop zien, zie Figuur 3.21. Vooral de meest benedenstroomse locatie, locatie 959.00_WA, laat een afwijkend tijdsverloop zien, ook rondom de top. Met uitzondering van deze locatie, is het tijdsverloop bij de andere locaties tot een niveau van -3 m redelijk uniform. Het tijdsverloop kan dan ook goed worden benaderd door een trapezium zoals afgebeeld in

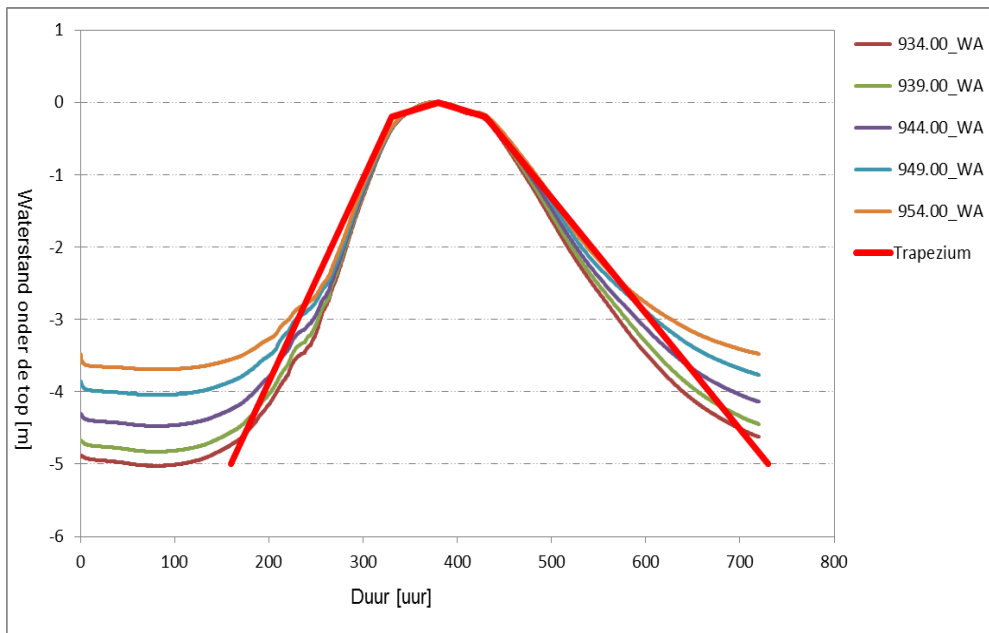
Figuur 3.22. Het trapezium heeft een topduur van 100 uur (4 dagen en 4 uur) en een basisduur van 570 uur (ca. 24 dagen). Behalve rondom de top is dit trapezium gelijk aan het trapezium uit Figuur 3.20.



Figuur 3.21 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Waal, afvoergolf met topwaarde van 17.000 m³/s.

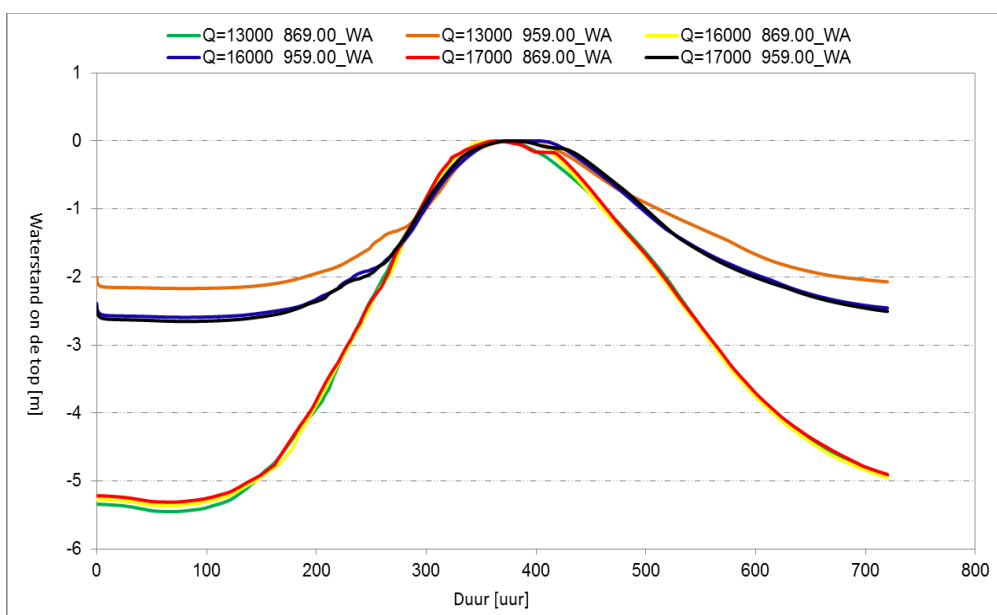


Figuur 3.22 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor benedenstroomse locaties van de Waal voor een afvoergolf van 17.000 m³/s.



Figuur 3.23 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor benedenstroomse locaties van de Waal met uitzondering van de locatie 959.00_WA voor een afvoergolf van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Om het verschil in tijdsverloop tussen de boven- en benedenstroomse locaties nog nader te illustreren zijn de tijdsverlopen van de meest benedenstroomse en meest bovenstroomse locatie afgeleid en afgebeeld voor alle de drie afvoergolven, zie Figuur 3.24. Alle de drie afvoergolven resulteren voor de benedenstroomse locatie, locatie 869.00_WA, in eenzelfde tijdsverloop; vergelijk groene, gele en rode lijnen in Figuur 3.24. Het tijdsverloop van de waterstand bij de benedenstroomse locatie laat wel enige verschillen zien tussen een afvoergolf van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ enerzijds en 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ anderzijds. Verder laat Figuur 3.24 zien dat het tijdsverloop op de locatie 959.00_WA breder is dan het tijdsverloop voor locatie 869.00_WA (de bovenstroomse locatie), vooral de achterflank verloopt minder steil.



Figuur 3.24 Tijdsverloop waterstand meest boven- respectievelijk benedenstroomse locatie langs de Waal voor 3 afvoergolven: 13.000 , 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

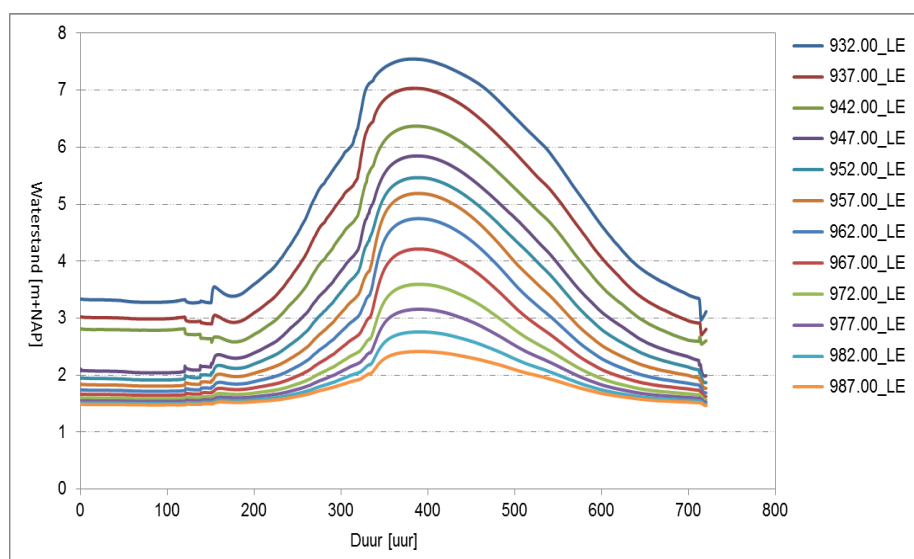
Dat relatief lage afvoeren resulteren in bredere tijdsverlopen wordt vermoedelijk veroorzaakt door topvervlakking/retentie. Bij relatief lage afvoeren is de topvervlakking relatief groot. Het verschil is echter klein. Van de afvoeren $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is er nauwelijks verschil in bijbehorende tijdsverlopen van de waterstand, zie Figuur 3.24.

Ten aanzien van de Waal kan op basis van het bovenstaande geconcludeerd worden dat:

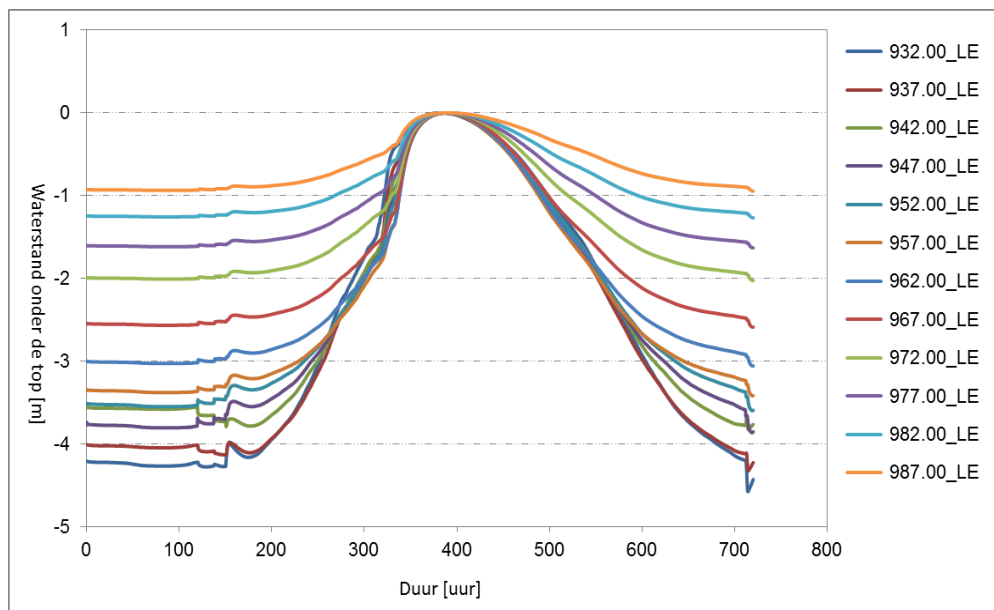
- het tijdsverloop van de waterstand redelijk ruimtelijk uniform is. De variatie in het tijdsverloop van de waterstand is over het algemeen klein; de variatie in tijdsverloop is voor het benedenstroomse gedeelte echter relatief groter dan voor het bovenstroomse gedeelte.
- de hoogte van de afvoergolf nauwelijks invloed heeft op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand. Lage afvoeren resulteren in principe in enigszins bredere tijdsverlopen dan de hoge afvoeren. De lage afvoeren zijn echter minder relevant omdat de normen voor de dijktrajecten langs de Waal streng zijn ($T=10.000$ en 30.000 per jaar).
- met uitzondering van de meest benedenstroomse locatie, het tijdsverloop van de waterstand goed benaderd kan worden door een trapezium. De topduur van het trapezium hangt af van de ligging van de locatie.

3.4.4 Lek

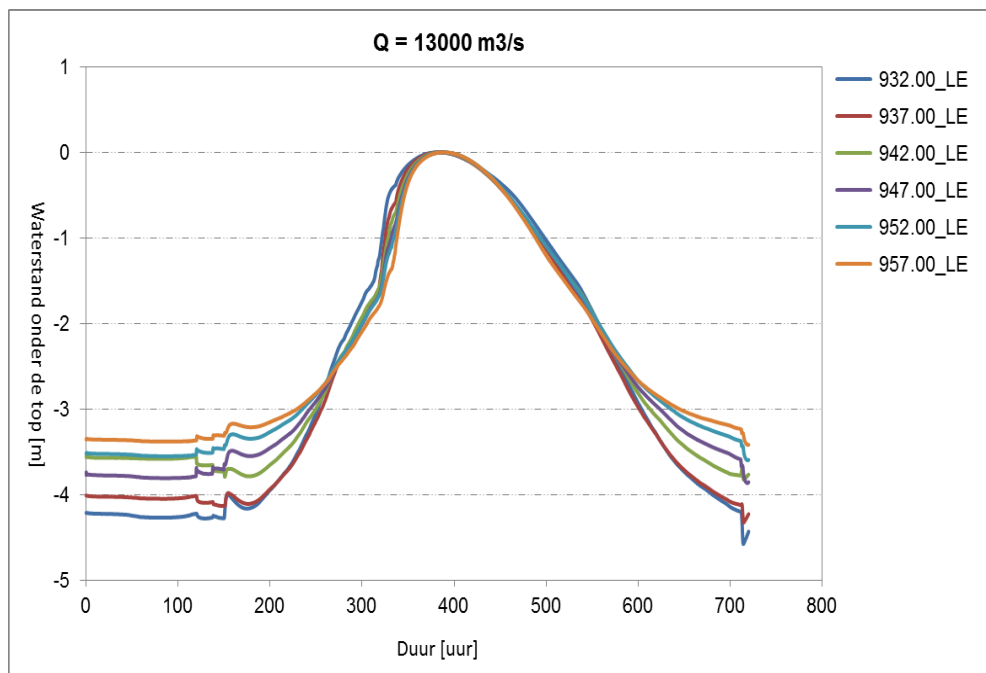
Analoog aan andere riviertakken van Rijn zijn langs de Lek locaties geselecteerd en bijbehorende tijdsverlopen uit de productieberekeningen geanalyseerd. Er zijn 12 locaties beschouwd, de onderlinge afstand bedraagt ca. 5 km. Het tijdsverloop van de waterstand op de geselecteerde locaties voor 2 afvoergolven (13.000 en $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$) zijn afgebeeld Figuur 3.25 en Figuur 3.29. Hieruit valt te concluderen dat in vergelijking met andere riviertakken, de waterstand langs de Lek een relatief steilere voorflank heeft dan de achterflank. Het verloop van de waterstand hangt af van de locatie. De locaties langs het bovenstroomse gedeelte van de Lek hebben een regelmatig en uniform tijdsverloop. Het tijdsverloop bij de locaties benedenstrooms laat echter enige diversiteit zien; zie Figuur 3.26 t/m Figuur 3.28 en Figuur 3.30 t/m Figuur 3.31. De diversiteit is relatief groter voor lage afvoeren. Het vermoeden bestaat dat dit veroorzaakt wordt door topvervlakking en aanwezigheid van stuwen die in onder bepaalde omstandigheden in werking treden. Het verhang is echter ook groot. De topvervlakking is relatief kleiner voor hoge afvoeren.



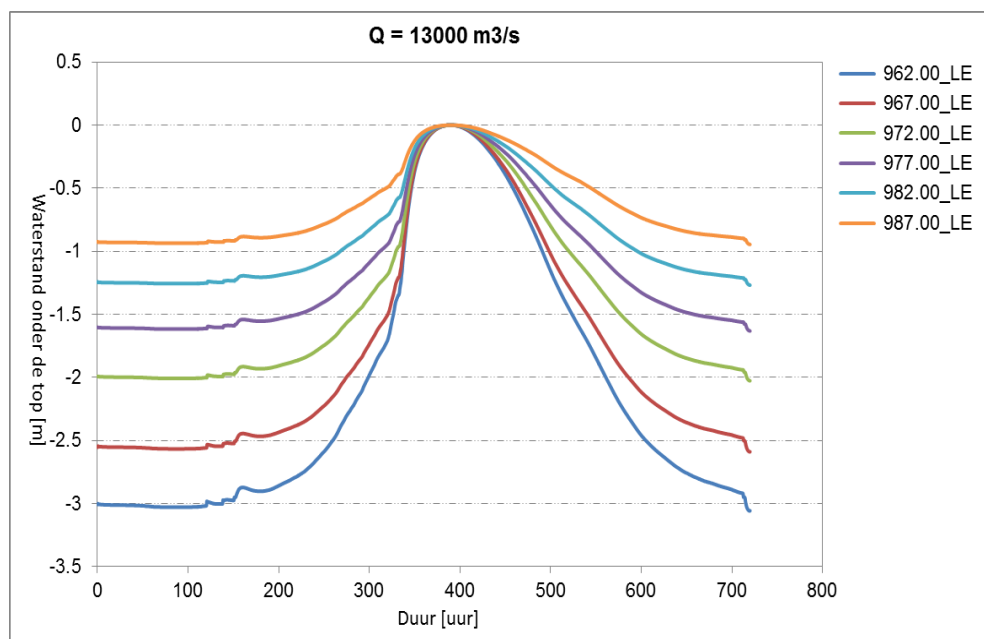
Figuur 3.25 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$



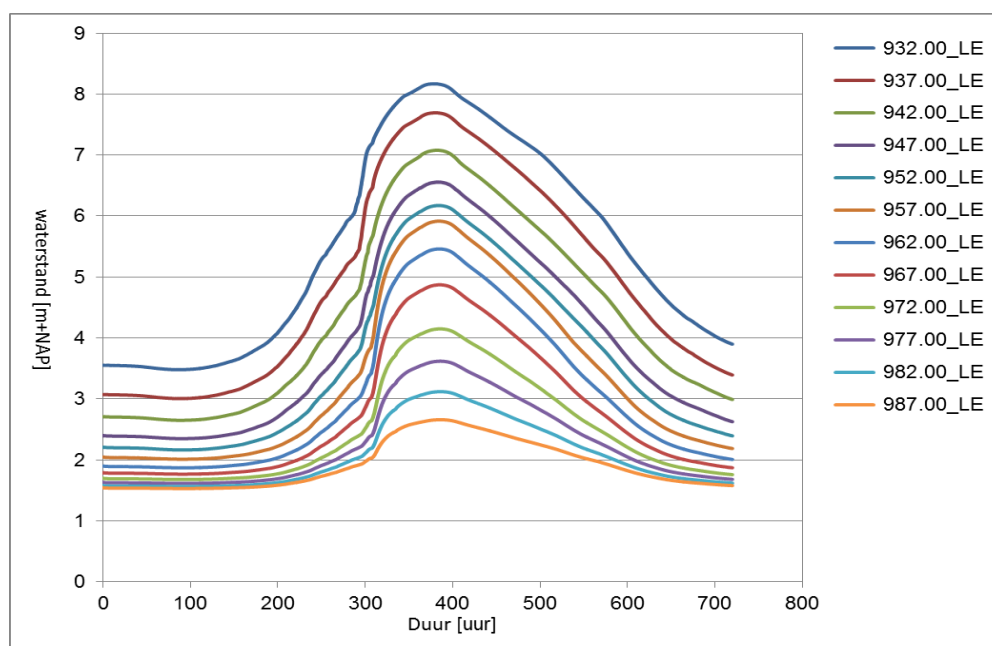
Figuur 3.26 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



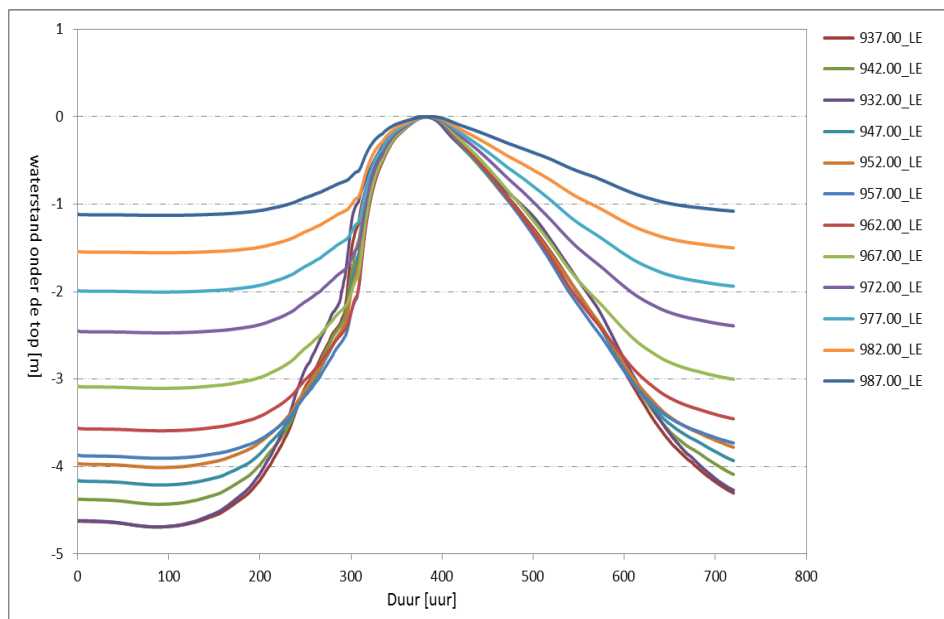
Figuur 3.27 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor bovenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$



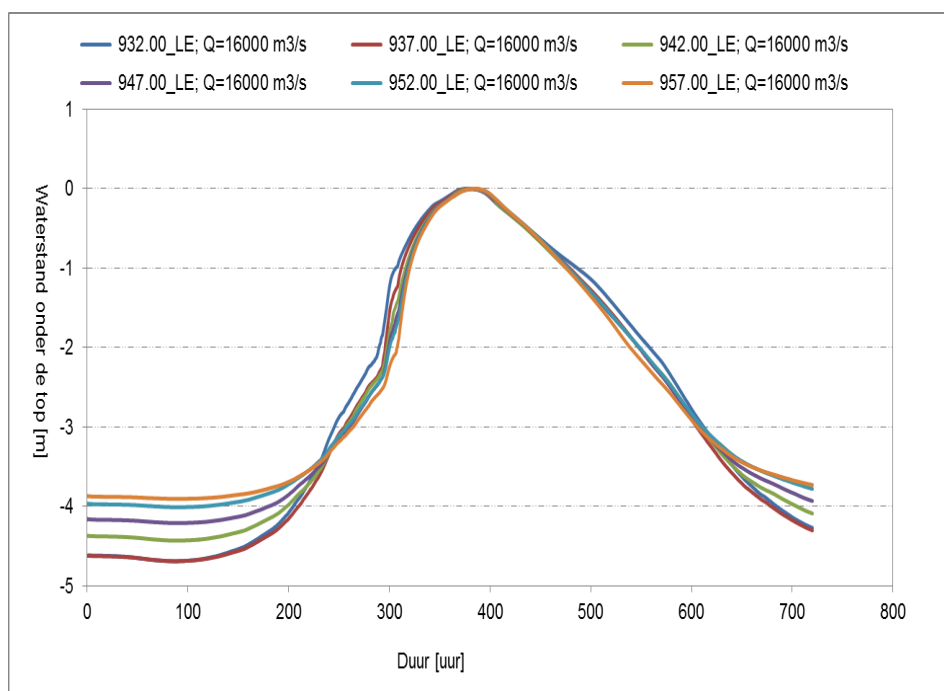
Figuur 3.28 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van 13.000 m³/s



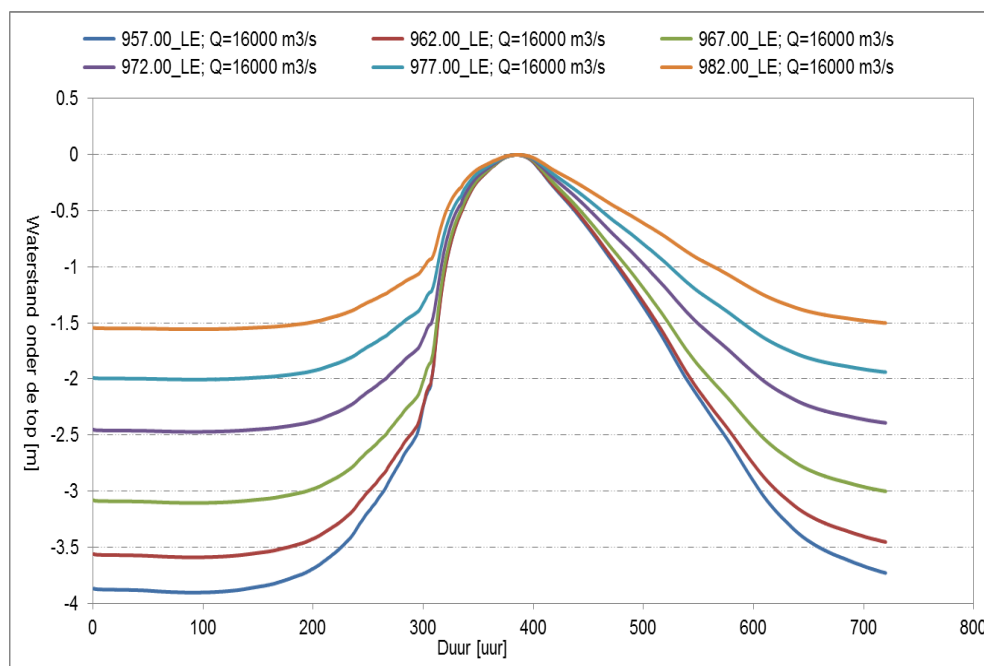
Figuur 3.29 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 16.000 m³/s



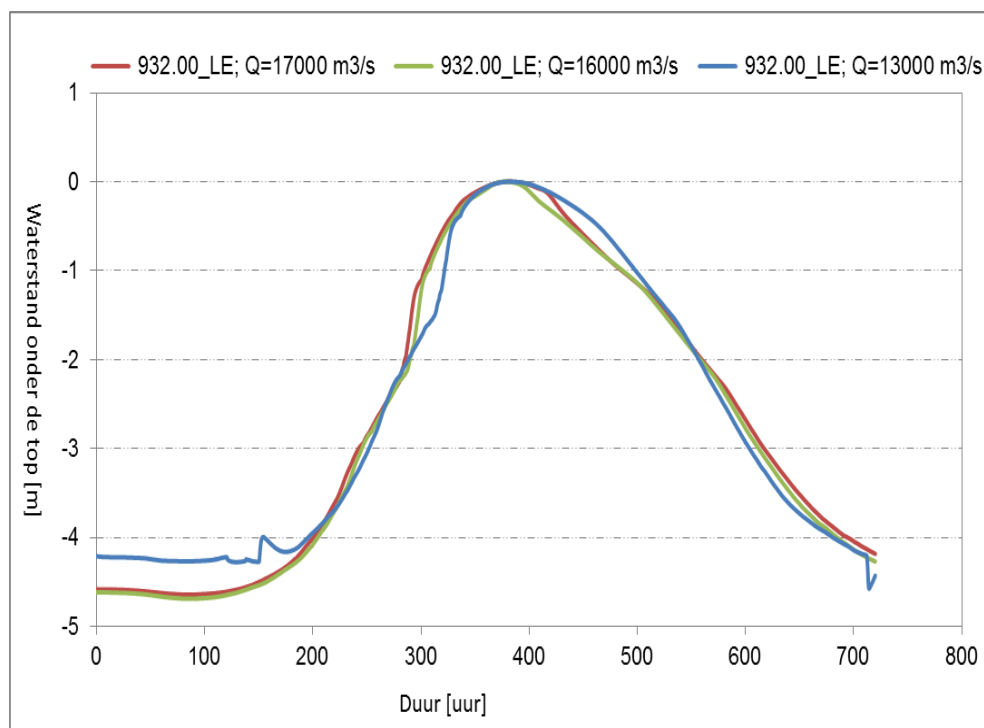
Figuur 3.30 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



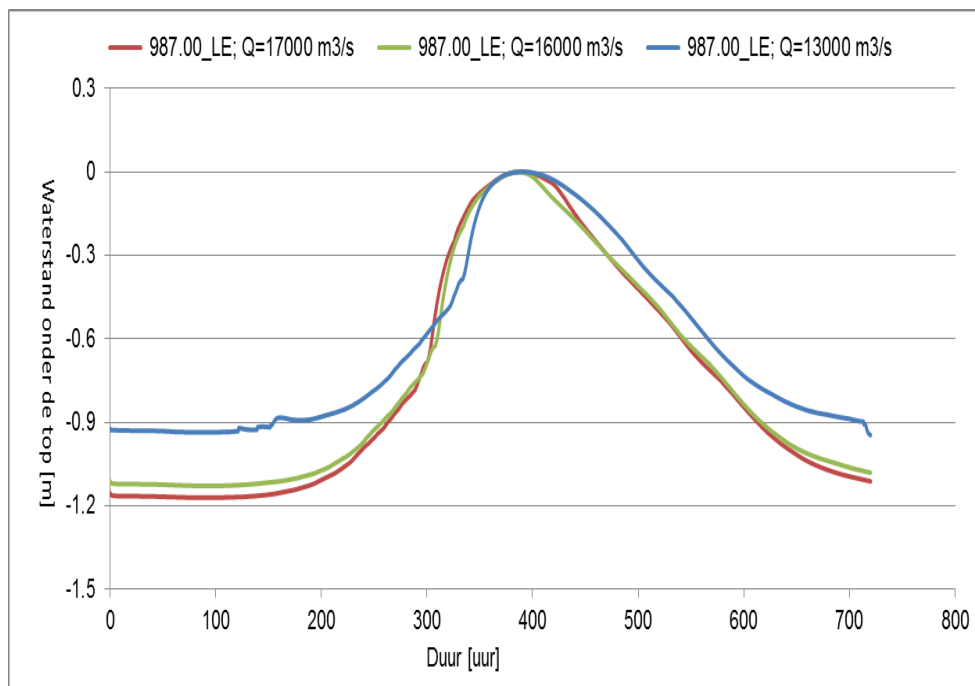
Figuur 3.31 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 3.32 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 voor benedenstroomse (6) locaties langs de Lek, afvoergolf met topwaarde van 16.000 m³/s.

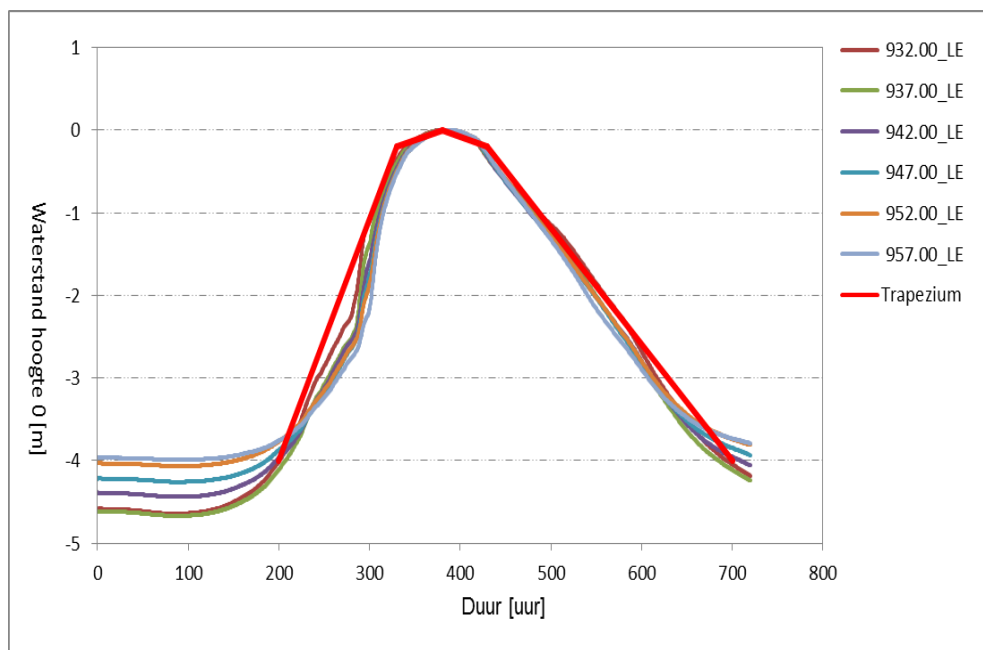


Figuur 3.33 Tijdsverloop waterstand hoogte 0, bovenstrooms Lek voor afvoergolven 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s.



Figuur 3.34 Tijdsverloop waterstand hoogte 0, Benedenstrooms Lek voor afvoergolven 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s.

Figuur 3.33 en Figuur 3.34 laten zien dat de tijdsverlopen behorende bij de afvoergolven met topwaarden van 16.000 en 17.000 m³/s nauwelijks verschillen vertonen. De afvoergolf van 13.000 m³/s resulteert in een enigszins afwijkend tijdsverloop, dit geldt voornamelijk voor de benedenstroomse locatie 987.00_LE.



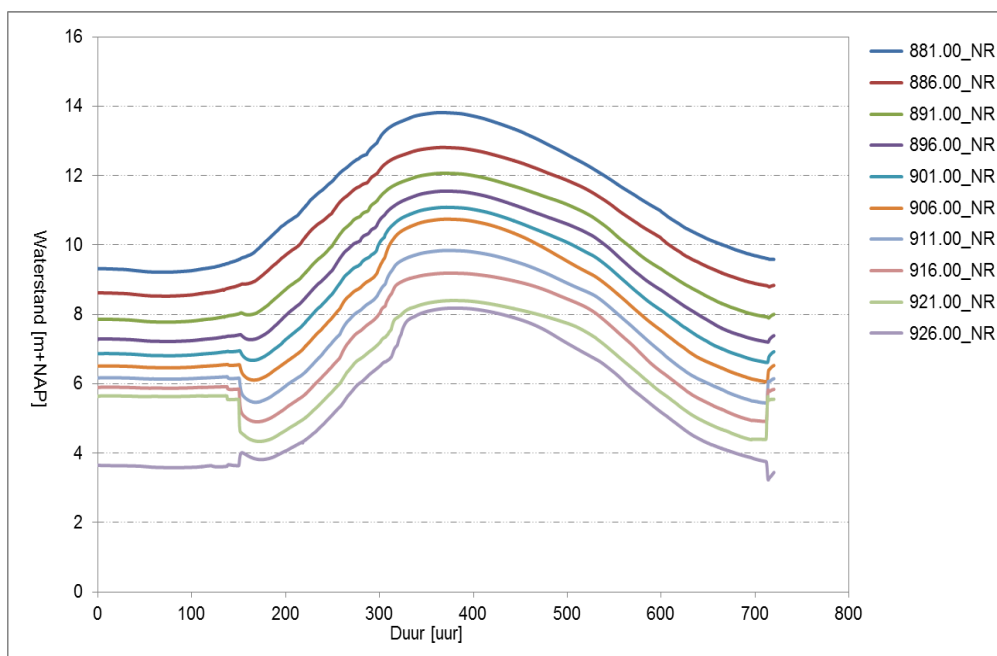
Figuur 3.35 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor bovenstroomse locaties van de Lek; afvoergolf 17.000 m³/s.

Analoog aan de Waal kan op basis van bovengenoemde resultaten worden geconcludeerd dat met uitzondering van afvoergolven met relatief lage topwaardes, de topwaardes van de afvoergolven geen invloed hebben op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand langs de Lek. Benedenstrooms van de Lek is er relatief meer diversiteit te zien in het tijdsverloop van de waterstand dan bovenstrooms; vergelijk Figuur 3.31 en Figuur 3.32. Het tijdsverloop van de waterstand voor bovenstroomse locaties kan goed worden benaderd door een trapezium, zie Figuur 3.35. Het trapezium heeft op het niveau van -4 m een basisduur van 500 uur (ca. 21 dagen) en een topduur van 100 uur (4 dagen en 4 uur). Dit trapezium geeft een goede schatting van de het tijdsverloop voor alle locaties die bovenstrooms van de locatie 957.00_LE liggen.

De tijdsverlopen van de locaties die benedenstrooms liggen van de locatie 957.00_LE zijn zodanig verschillend dat zij niet door eenzelfde trapeziumverloop benaderd kunnen worden; dit geldt vooral voor de achterflank van het tijdsverloop. Het waterstandsverloop in dit gebied is locatieafhankelijk; de verschillen tussen de locaties zijn echter niet groot.

3.4.5 Neder-Rijn

Langs de Neder-Rijn zijn 10 locaties beschouwd. Het tijdsverloop van de waterstand op deze locaties voor afvoergolven met topwaardes 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s zijn afgebeeld in Figuur 3.36, Figuur 3.38 en Figuur 3.40. Duidelijk is te zien dat voor een aantal locaties knikken optreden in waterstand. Vóór de passage van de hoogwatergolf gaat de waterstand namelijk eerst abrupt omlaag; zie Figuur 3.36. Dit fenomeen treedt vooral bij relatief lage afvoeren. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door regelwerken en Ruimte voor de River maatregelen.

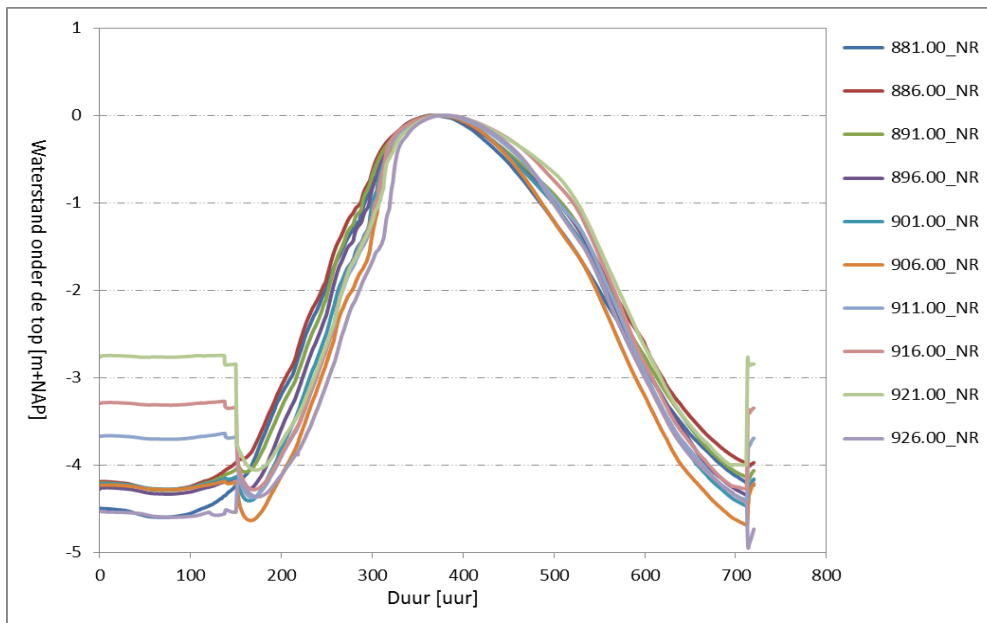


Figuur 3.36 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 13.000 m³/s

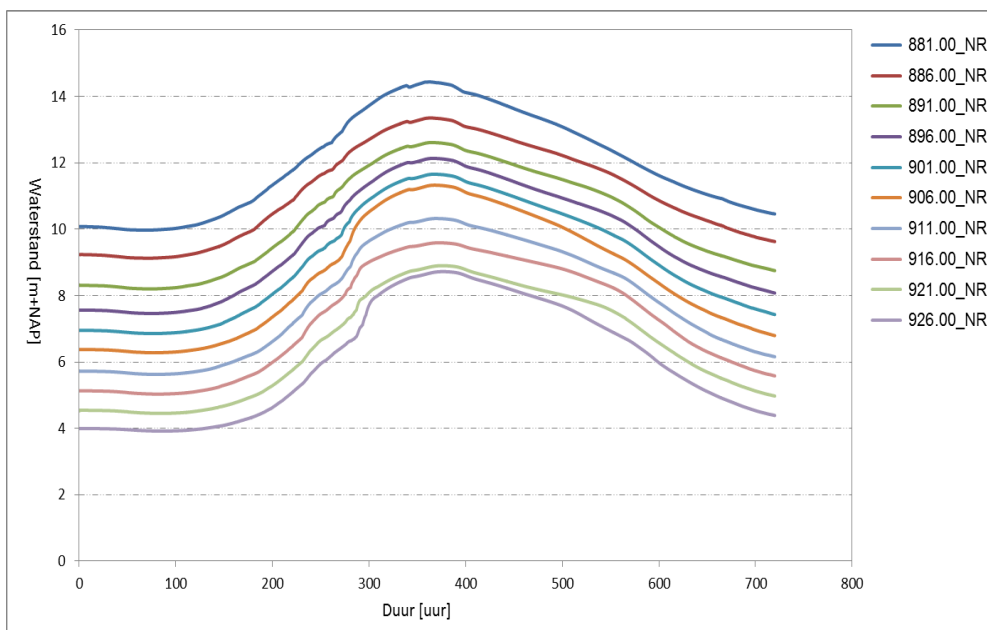
De verschoven tijdsverlopen van de waterstand met hoogte van 0 m behorende bij de afvoeren 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s op de locaties langs de Neder-Rijn zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 3.37, Figuur 3.39 en Figuur 3.41. De waterstand met hoogte 0 m laat een regelmatig tijdsverloop zien voor alle locaties en alle beschouwde afvoergolven. Het verschil in tijdsverloop van de waterstand is klein. Om dat verschil duidelijk

in beeld te brengen zijn voor 2 locaties, de meest benedenstroomse en de meest bovenstroomse locatie langs de Neder-Rijn, de bijbehorende tijdsverlopen voor de afvoeren van 16.000 en 17.000 m³/s in één figuur afgebeeld: Figuur 3.42. De figuur laat zien dat:

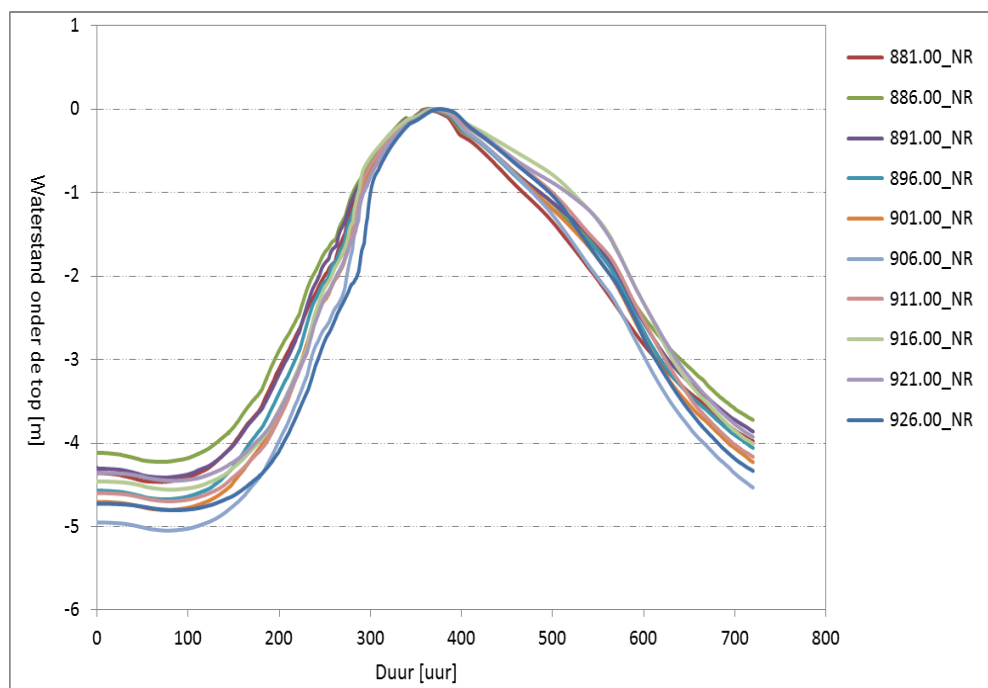
- de hoogte van de afvoergolf nauwelijks invloed heeft op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand en
- het tijdsverloop bij de locatie 881.00_NR is iets bredere dan het tijdsverloop bij de locatie 926.00_NR. Vooral de voorflank laat verschil zien. De conclusie is dat het tijdsverloop bovenstrooms breder is dan benedenstrooms.



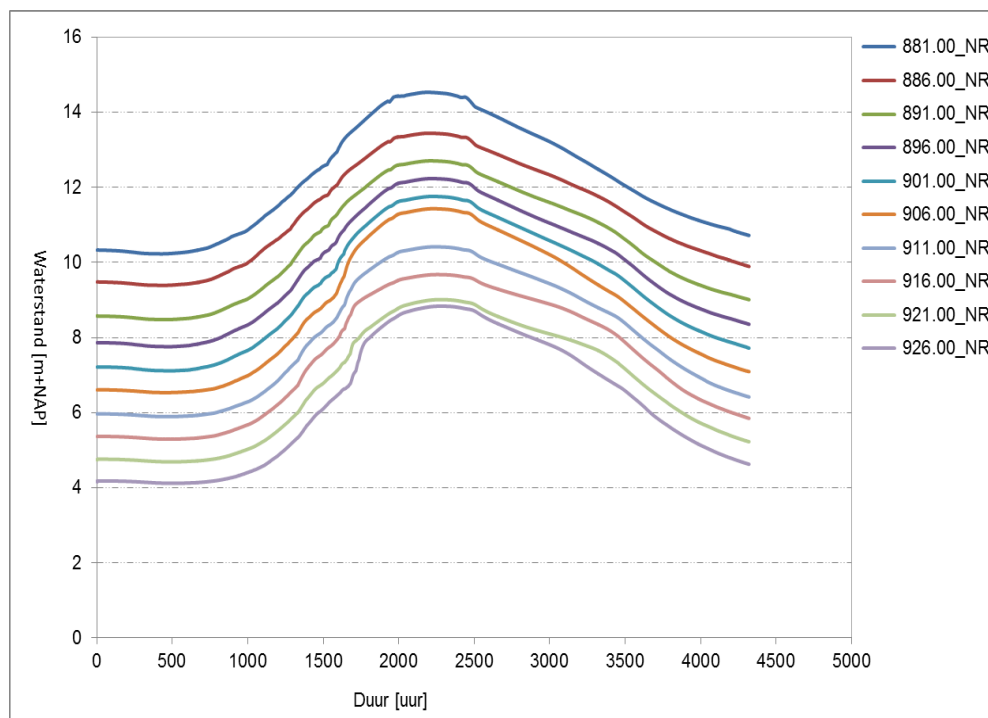
Figuur 3.37 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van 13.000 m³/s.



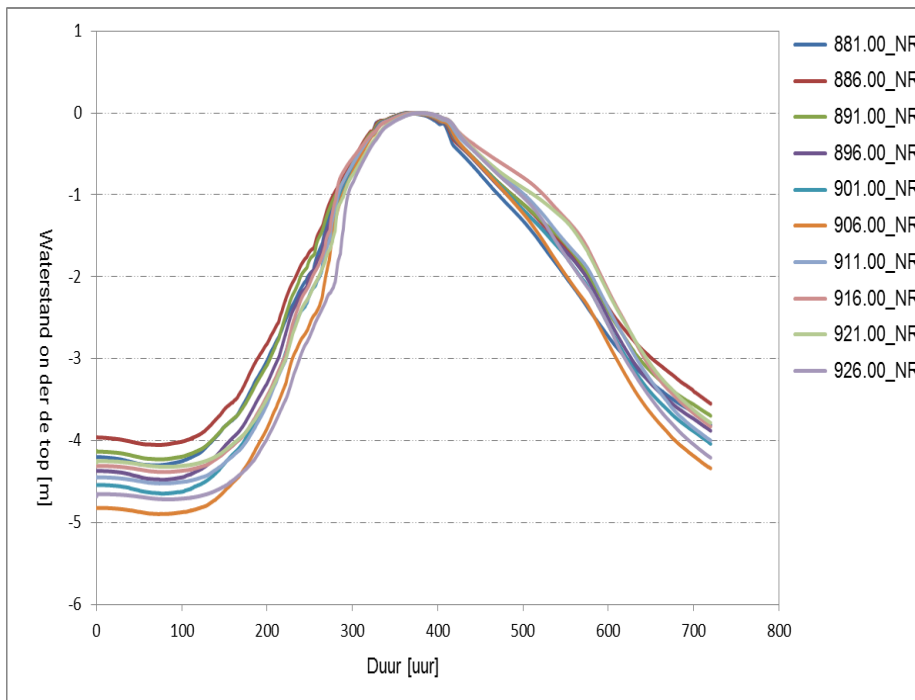
Figuur 3.38 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van 16.000 m³/s.



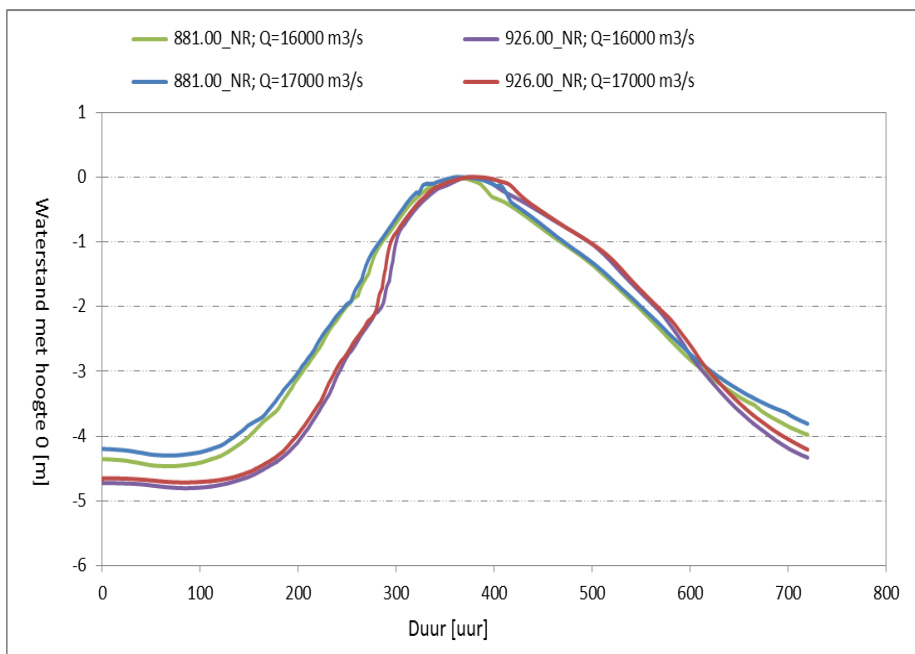
Figuur 3.39 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 3.40 Tijdsverloop waterstand locaties langs de Lek voor een afvoer met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$



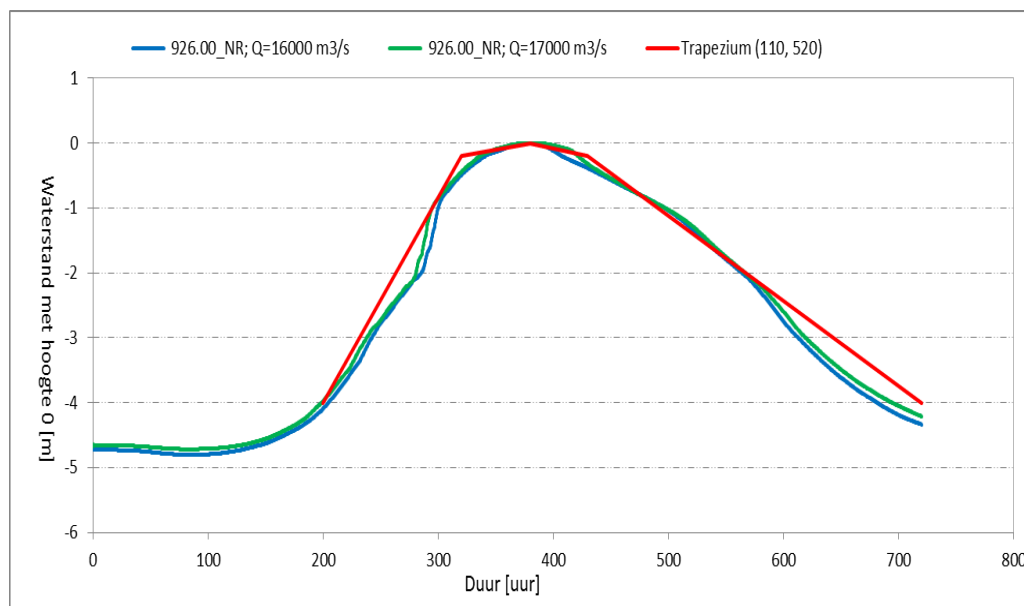
Figuur 3.41 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de Lek voor een afvoergolf met topwaarde van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



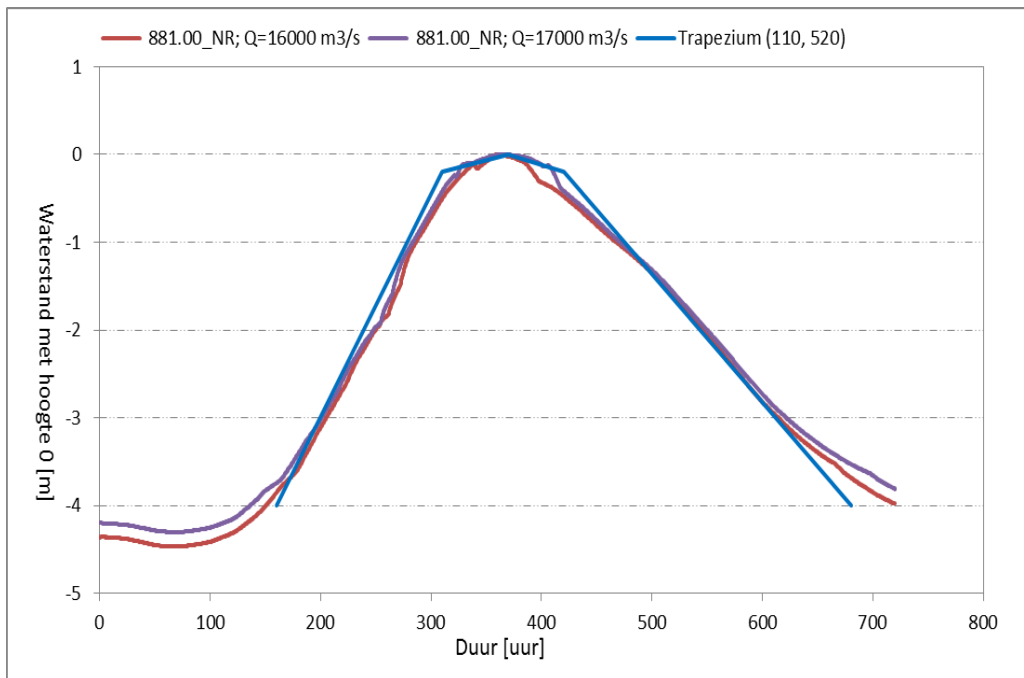
Figuur 3.42 Waterstandsverloop meest benedenstroomse respectievelijk meest bovenstroomse locatie op de Neder-Rijn voor 2 afvoergolven: 16.000 en $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Zoals hierboven vermeld, beïnvloedt de hoogte van de afvoer nauwelijks het tijdsverloop van de waterstand langs de Neder-Rijn. Dit geldt vooral voor extreme afvoeren. Gelet op de nieuwe normen die gelden voor de Neder-Rijn kan worden gesteld dat het tijdsverloop van de waterstand voor het hele gebied van de Neder-Rijn een standaard vorm volgt. Deze vorm hangt echter, zoals Figuur 3.42 illustreert, wel van de locatie. Verder valt te constateren dat

evenals de Lek, de waterstand langs de Neder-Rijn een steilere voorflank heeft dan de achterflank. Dit geldt vooral voor de benedenstroomse locaties, zie ook Figuur 3.42. De snelle stijging van de waterstand benedenstrooms van de Neder-Rijn, maar ook de Lek, wordt vermoedelijk veroorzaakt door RvR maatregelen en de aanwezigheid van stuwen. Deze stuwen gaan vanaf een bepaald waterstandsniveau open en zorgen voor een abrupte daling van de waterstand; zie ook Figuur 3.37. Voor de benedenstroomse locaties van de stuw betekent dit juist een snellestijging. Figuur 3.37 laat verder zien dat, waarschijnlijk als gevolg van dezelfde oorzaak, de achterflank van de waterstand benedenstrooms snel daalt vanaf een bepaalde niveau (het lage deel). Het tijdsverloop van de waterstand bij de meest benedenstroomse locatie, locatie 926.00_NR, laat zich goed benaderen door een trapezium zoals afgebeeld in Figuur 3.43. Het trapeziumverloop is scheef; de basisduur op het niveau van -4 m bedraagt 520 uur (afgerond 22 dagen) en de topduur 110 uur (ruim 4,5 dagen). De duur van de voorflank is korter dan die van de achterflank, zie Figuur 3.43.



Figuur 3.43 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop door trapezium voor de locatie 926.00_NR voor afvoergolven met topwaardes 16.000 en 17.000 m³/s.



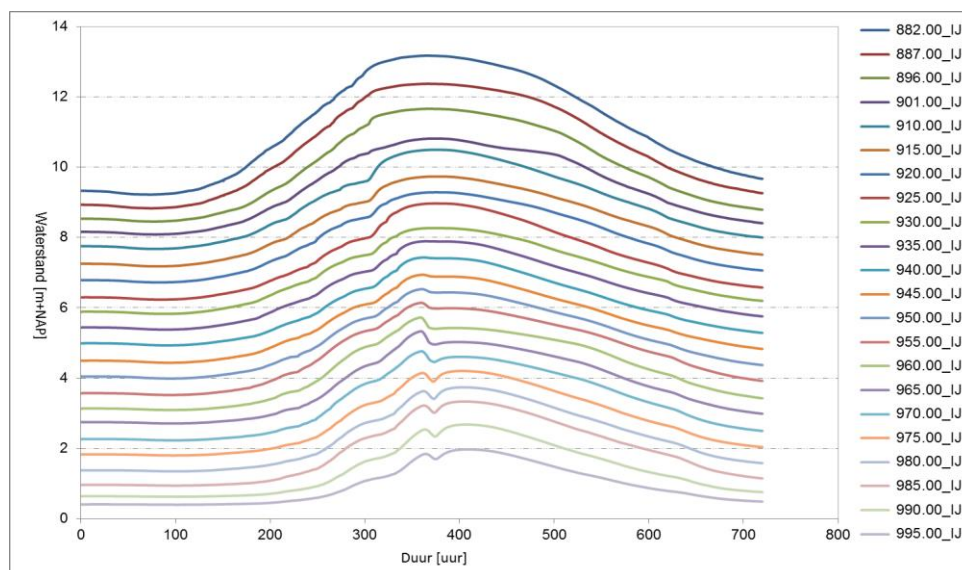
Figuur 3.44 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop door trapezium voor de locatie 881.00_NR voor afvoergolven met topwaardes 16.000 en 17.000 m³/s.

Ook locatie 881.00_NR, de meest bovenstroomse gelegen locatie op de Neder-Rijn, laat zich goed benaderen door een trapezium. Het trapezium heeft een basisduur van 550 uur (afgerond 23 dagen) op het niveau van -4 m. De topduur bedraagt 110 uur (ruim 4 en half dag).

Verder valt te concluderen dat het trapezium voor de bovenstroomse locatie zoals afgebeeld in Figuur 3.44 dezelfde top- en basisduur heeft als het trapezium uit Figuur 3.43. Het enige verschil is de (a)symmetrie. Het trapezium uit Figuur 3.43 heeft een sterk oplopende voorflank en de achterflank is minder steil. Een en ander betekent dat het tijdsverloop van de waterstand voor zowel de bovenstroomse als de benedenstroomse locatie benaderd kan worden door trapezia van dezelfde topduur en basisduur maar verschillende hellingen.

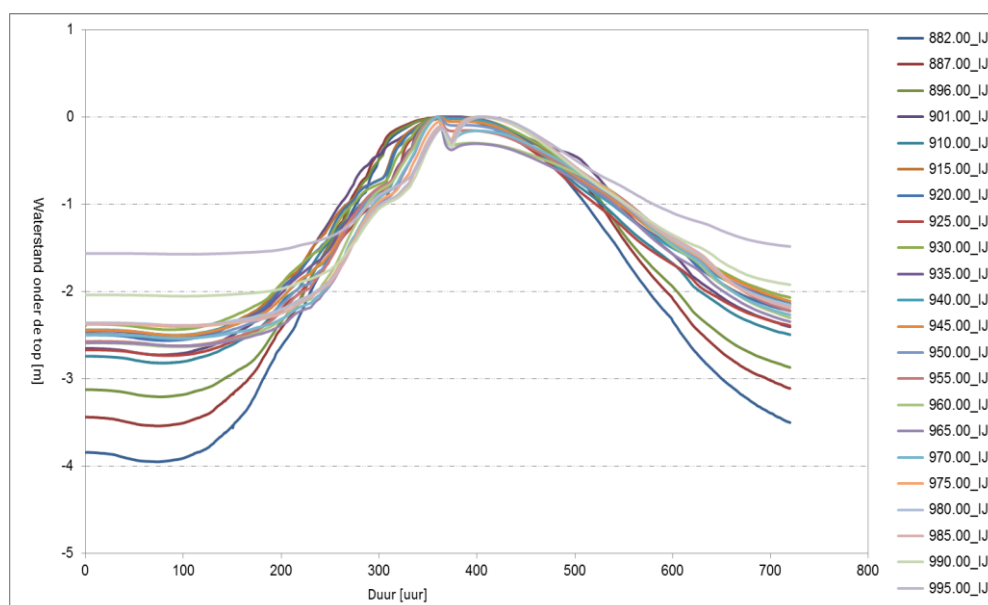
3.4.6 IJssel

Langs de riviertak de IJssel zijn 22 locaties gekozen en onderzocht. Het betreft de locatie 882.00_IJ t/m 995.00_IJ. De locaties 975.00_IJ t/m 995.00_IJ liggen feitelijk in het gebied van de IJsseldelta maar zijn hier ook betrokken in de analyse. In dit gebied speelt naast afvoer van de IJssel ook de wind en windopstuwung vanuit het IJsselmeer een rol. De waterstandsverlopen voor de IJsseldelta vallen buiten de scope van dit rapport. De definitieve vaststelling van de waterstandsverlopen voor dit gebied vindt dan ook plaats in het project "Waterstandsverlopen Vecht- en IJsseldelta" dat parallel aan de onderhavige studie loopt. De resultaten uit dit rapport voor de locatie 975.00_IJ t/m 995.00_IJ zullen worden gebruikt om grens tussen Rijntakken (IJssel) en IJsseldelta vast te stellen.

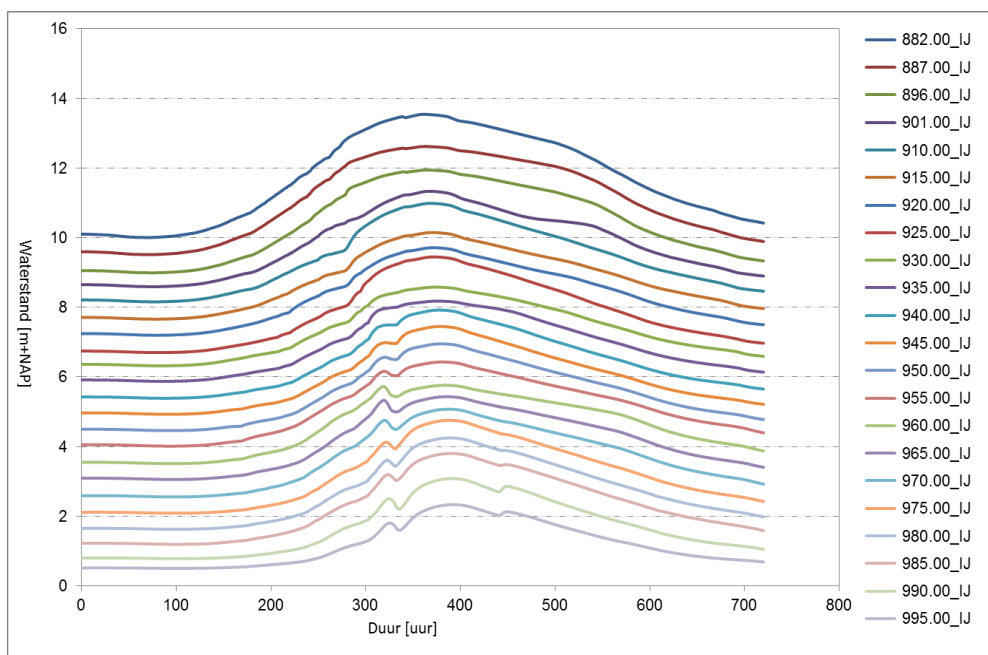


Figuur 3.45 Tijdsverloop waterstand locaties langs de IJssel voor een afvoer met topwaarde van 13.000 m³/s

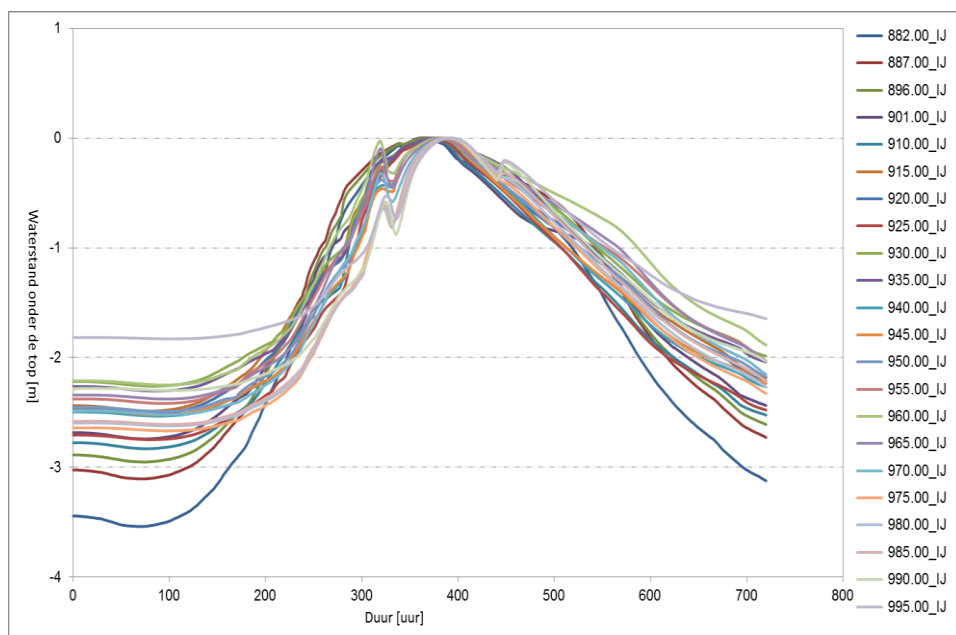
Het tijdsverloop van de waterstand voor de geselecteerde locaties langs de IJssel voor afvoergolven met maxima 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s zijn afgebeeld in Figuur 3.45, Figuur 3.47 en Figuur 3.49. Het tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor dezelfde locaties is afgebeeld in Figuur 3.46, Figuur 3.48 en Figuur 3.50. Net als de Neder-Rijn vertonen de waterstanden enige onregelmatigheden. Dit geldt vooral voor locaties benedenstrooms van locatie 945.00_IJ. Deze onregelmatigheden zijn aanwezig in de waterstandsverlopen behorende bij vooral extreme afvoeren, te weten 16.000 en 17.000 m³/s, vergelijk Figuur 3.51 en Figuur 3.53. Deze figuren bevatten de tijdsverlopen van de waterstanden bij de meest bovenstroomse locatie, locatie 882.00_IJ, en de locatie 980.00_IJ (deze ligt op de grens tussen IJssel en IJsseldelta). De onregelmatigheden in waterstandsverloop worden vermoedelijk veroorzaakt door regelwerken en/of Ruimte voor de Rivier maatregelen.



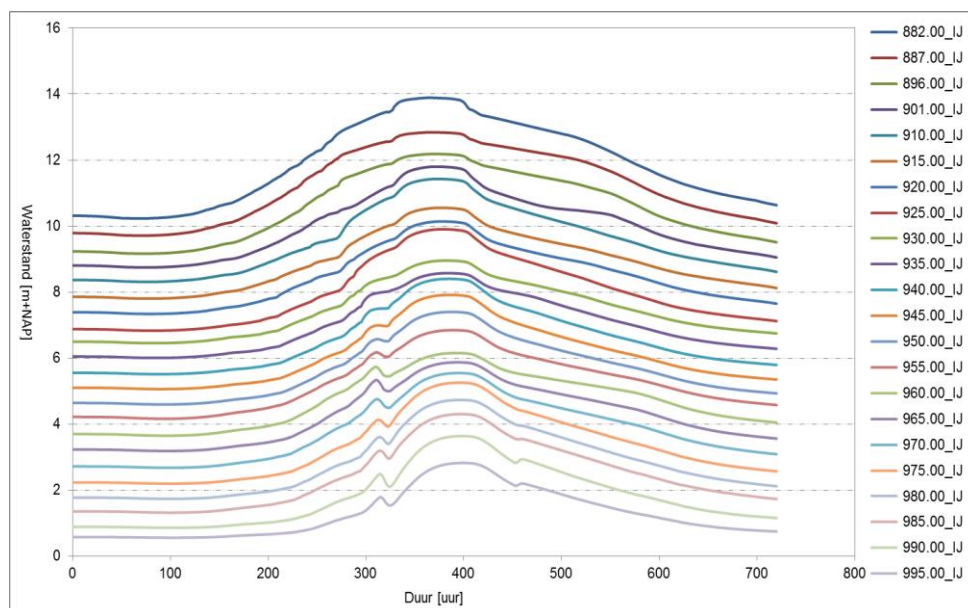
Figuur 3.46 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 13.000 m³/s.



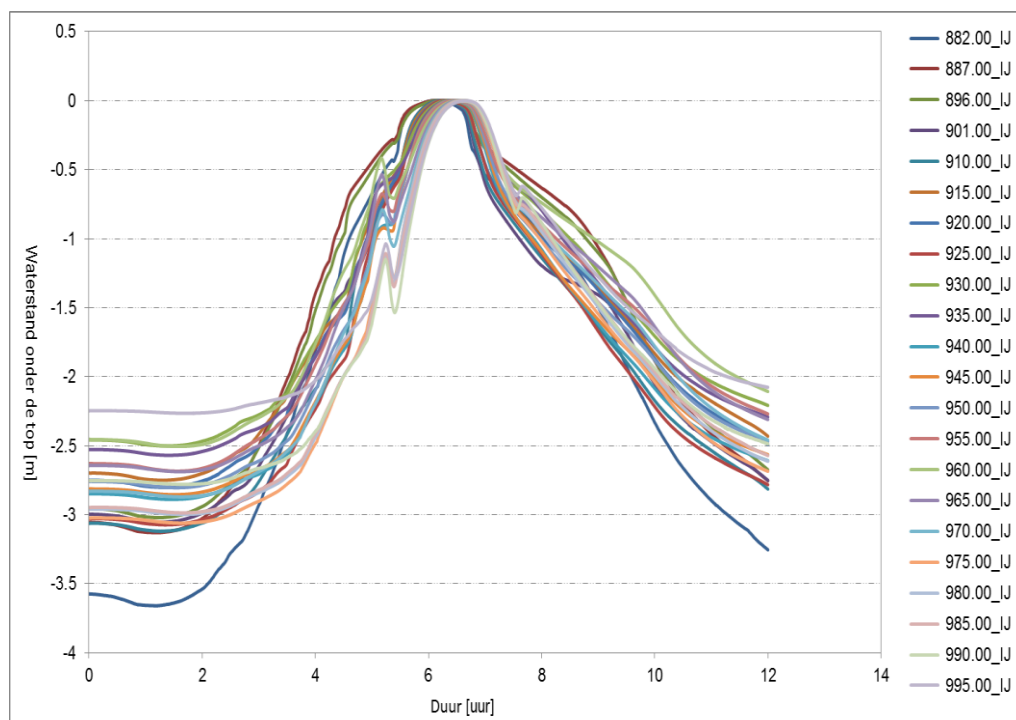
Figuur 3.47 Tijdsverloop waterstand locaties langs de IJssel voor een afvoer met topwaarde van 16.000 m³/s.



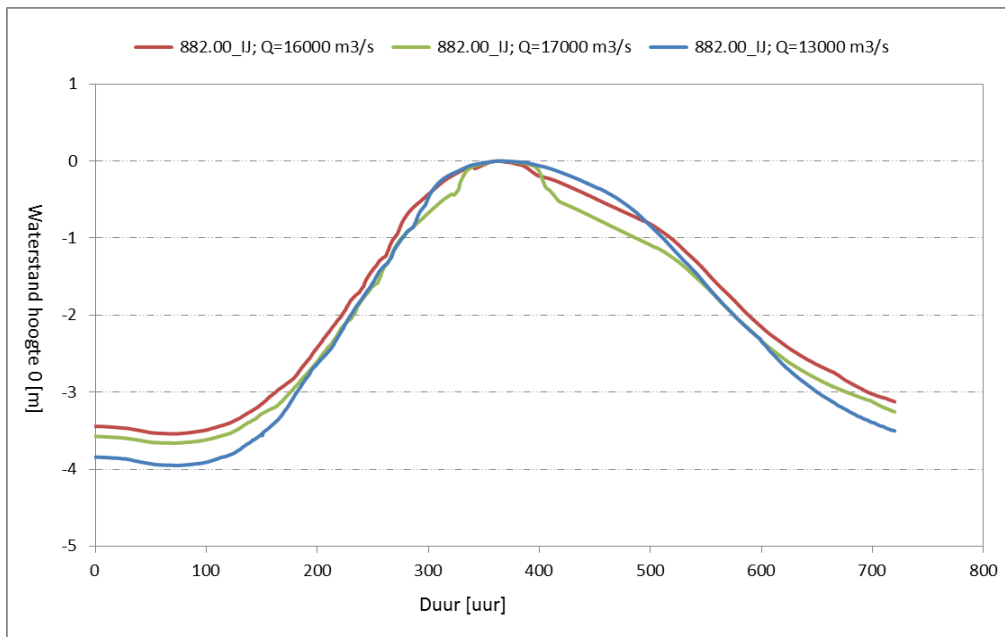
Figuur 3.48 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 16.000 m³/s.



Figuur 3.49 Tijdsverloop waterstand locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 17.000 m³/s.

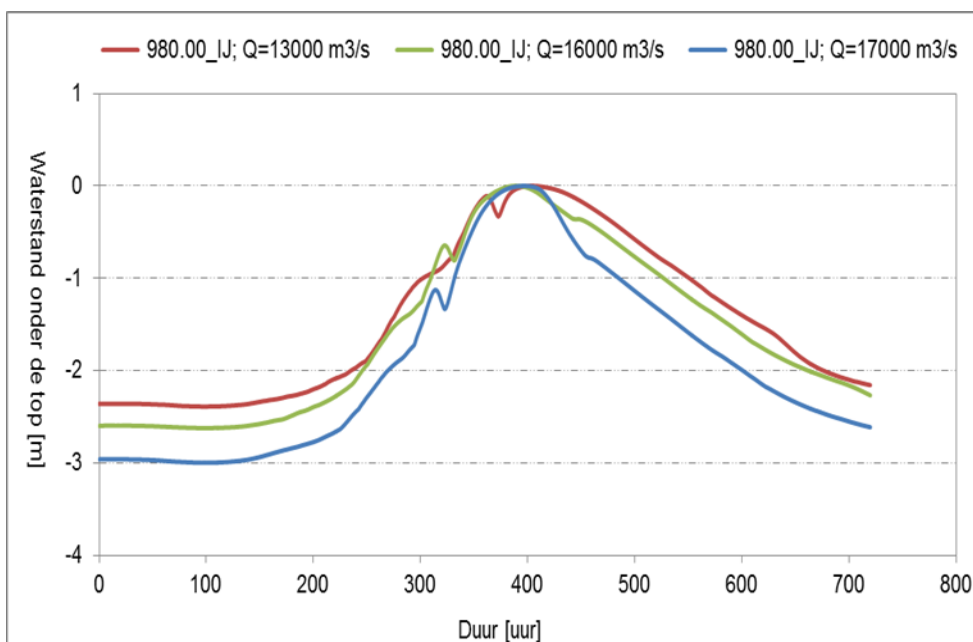


Figuur 3.50 Tijdsverloop waterstand met hoogte 0 bij locaties langs de IJssel voor een afvoergolf met topwaarde van 17.000 m³/s.



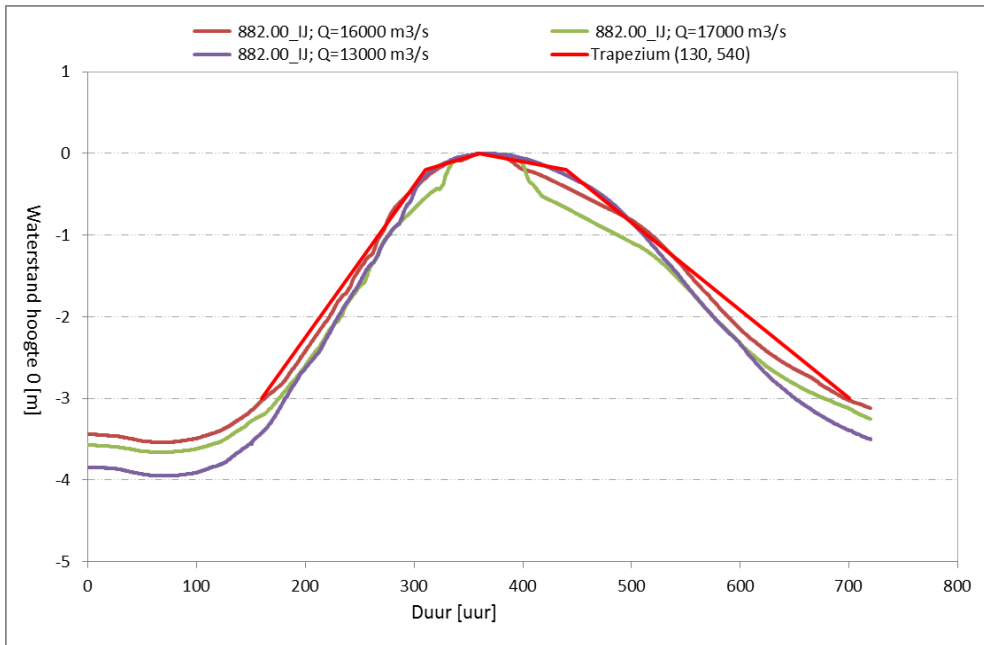
Figuur 3.51 Tijdsverloop waterstand locatie 882.00_IJ voor afvoergolven met maxima 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s.

Figuur 3.51 laat zien dat de basis van het tijdsverloop van de waterstand bovenstrooms van de IJssel, na standaardisatie, nauwelijks afhangt van de hoogte van de afvoergolf. Het tijdsverloop rondom de top hangt echter wel af van de hoogte van de afvoergolf. Lage afvoergolven resulteren namelijk in enigszins bredere tijdsverlopen rondom de top van de waterstand dan de extreme afvoergolven. Het verschil wordt relatief groter in de benedenstroomse richting. Het tijdsverloop behorende bij een afvoergolf van 17.000 m³/s is smaller dan het tijdsverloop van de afvoergolven met hoogtes 13.000 en 16.000 m³/s zoals Figuur 3.52 laat zien.



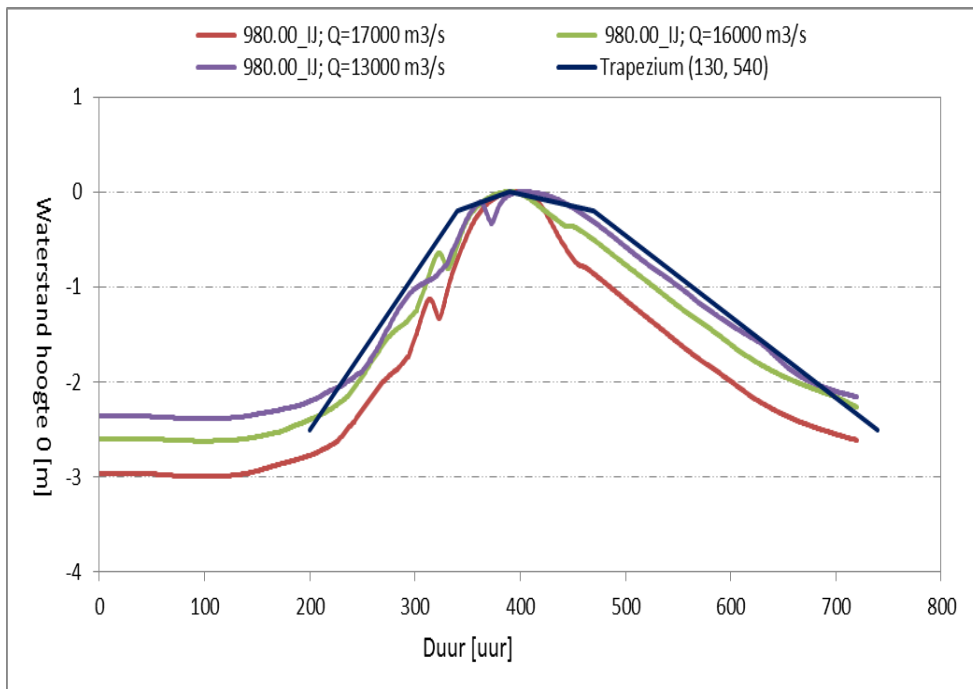
Figuur 3.52 Tijdsverloop waterstand locatie 980.00_IJ voor afvoergolven met topwaardes 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s

Het tijdsverloop van de waterstand voor de locatie 882.00_IJ kan goed worden benaderd door een trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.53. Het trapeziumverloop heeft op het niveau van -3 m een basisduur van 540 uur (22,5 dagen) en een topduur van 130 uur (ca. 5,5 dag).



Figuur 3.53 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop waterstand voor de locatie 882.00_IJ

Het tijdsverloop van de waterstand voor de locatie 882.00_IJ kan goed worden benaderd door een trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 3.53. Het trapeziumverloop heeft op het niveau van -3 m een basisduur van 540 uur (22,5 dagen) en een topduur van 130 uur (ca. 5,5 dag). Ook van de locatie 980.00_IJ kan het bijbehorende tijdsverloop van de waterstand benaderd worden door een trapezium met een basisduur van 540 uur (22,5 dagen) en een topduur van 130 uur (5,5 dag). Dit trapezium overschat echter wel het tijdsverloop resulterende uit extreme afvoergolven met maxima boven 16.000 m³/s, zie Figuur 3.54.



Figuur 3.54 Tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop waterstand voor de locatie 980.00_IJ

4 Analyse productieberekeningen Maas

4.1 Inleiding

Evenals op de Maas worden net als de Rijn de waterstanden hoofdzakelijk bepaald door hoge rivierafvoer. De Maasafvoer verandert langzaam in de tijd. Het tijdsverloop van de afvoer bepaalt hoofdzakelijk het tijdsverloop van de waterstand benedenstrooms van de bovenrand, Borgharen in dit geval. De rol van de wind en de daarmee samenhangende windopzet is van ondergeschikte rol. Opstuwing vanuit de Noordzee of het IJsselmeer speelt geen rol. Ten opzichte van HR-2006/WTI-2011 geldt voor WTI-2017 een nieuwe afvoerstatistiek en afvoergolfvorm voor de Maas bij Borgharen, deze verschillen van de vigerende afvoerstatistiek en afvoergolfvorm.

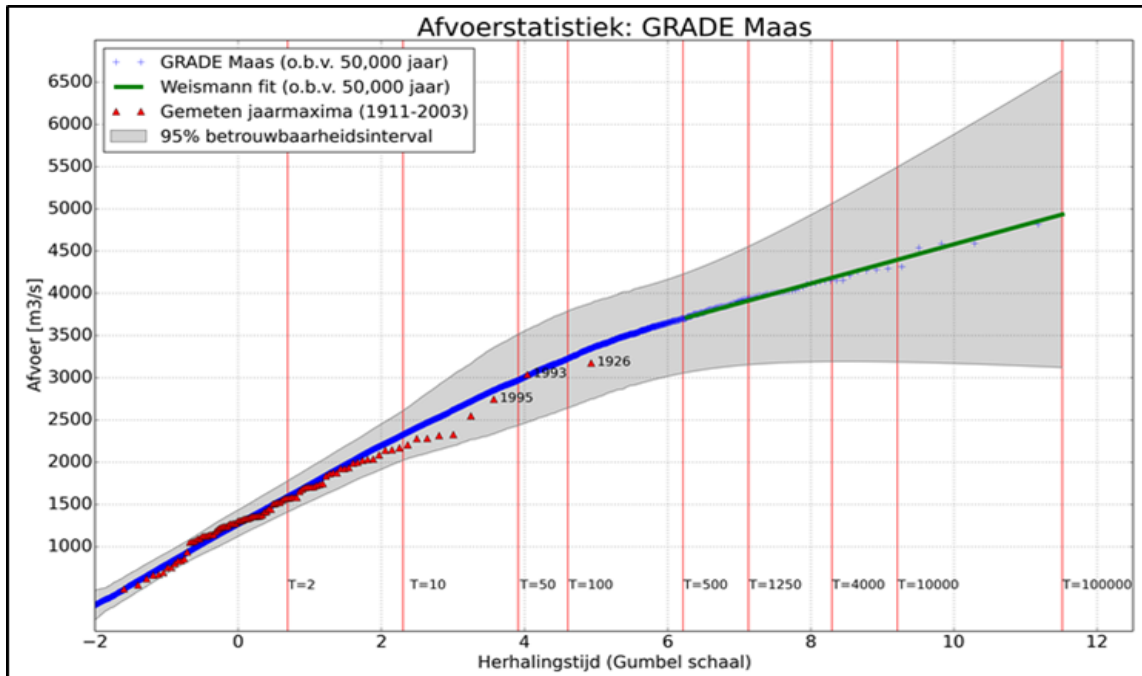
4.2 Statistiek en afvoergolfvorm GRADE

Net als voor de Rijn is de afvoerstatistiek van de Maas bij Borgharen geactualiseerd in WTI-2017. Deze is bepaald met GRADE in plaats van met extrapolatie van afvoermetingen. In tegenstelling tot de Rijn is voor de Maas alleen de optie zonder dijkdoorbraken in bovenstroomse gebieden in België beschouwd. Details met betrekking tot de GRADE statistiek voor de Maas bij Borgharen zijn te vinden in (Passchier, 2014) en (Hegnauer et al, 2014).

GRADE berekent voor de Maas bij Borgharen een afvoer van $3.910 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een gemiddelde terugkeertijd van 1.250 jaar. N.B. de huidige maatgevende⁶ afvoer van de Maas bij Borgharen bedraagt $3.850 \text{ m}^3/\text{s}$, met een 95% betrouwbaarheidsinterval van $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ (Van de Langemheen en Berger, 2002). Voor herhalingstijden tot ca. 2.500 jaar berekent GRADE hogere afvoeren; het verschil met afvoeren berekend met de statistische extrapolatiemethode loopt op van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 5$ jaar tot $220 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 100$ jaar en neemt daarna geleidelijk af tot $70 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 1.250$ jaar. GRADE berekent voor herhalingstijden boven 2.500 jaar lagere afvoeren. Voor herhalingstijden korter dan 5 jaar berekent GRADE lagere afvoeren dan de extrapolatiemethode. Voor $T = 2$ jaar geldt een verschil van $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Zonder nader in te gaan op details vermelden we dat voor herhalingstijden tot ca. 30 jaar het betrouwbaarheidsinterval van GRADE veel breder (ca. 2 keer zo breed) is als dat van de extrapolatiemethode. Dit betekent dat de onzekerheid van GRADE voor zulke lage herhalingstijden bijna twee keer zo groot is als die behorende bij de statistische extrapolatiemethode. N.B. De hogere afvoeren berekend met GRADE in combinatie met de daarbij behorende grote onzekerheid zal een verhogend effect hebben op de MHW's en mogelijk ook op het waterstandsverloop in gebieden waar dergelijke afvoeren relevant zijn. Dit geldt specifiek voor de bovenstroomse delen van de Maas en de onbedijkte Maas. Details met betrekking tot de GRADE statistiek van de Maas bij Borgharen en bijbehorende statistische onzekerheid zijn te vinden in (Chbab en Eilander, 2015). Een afbeelding van de op basis van GRADE verkregen werklijn voor de Maas bij Borgharen is weergegeven in Figuur 4.1.

Zoals in paragraaf 2.1 al vermeld gelden er voor de dijktrajecten langs de Maas 5 veiligheidsnormen, deze variëren tussen 1:300 en 1:30000 per jaar. Tabel 4.1 bevat voor deze veiligheidsnormen de bijbehorende afvoeren zoals berekend met GRADE.

⁶ De huidige maatgevende afvoer van de Maas bij Borgharen is beleidsmatig gekozen, en is niet identiek aan de afvoer die rechtstreeks volgt uit de extrapolatiemethode.

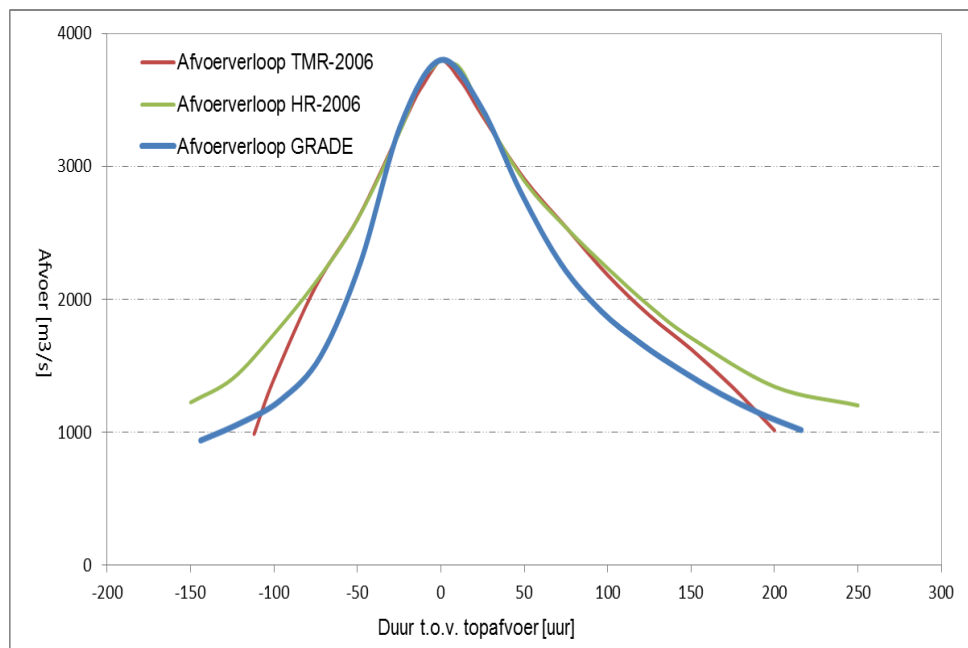


Figuur 4.1 Werklijn van de Maas bij Borgharen op basis van GRADE.

Ook de afvoergolfvorm bij Lobith is geactualiseerd gebruik makend van GRADE. Zowel de (nieuwe) afvoerstatistiek van GRADE als de bijbehorende afvoergolfvorm verschillen van de vigerende en in HR-2006/WTI-2011 gehanteerde statistiek en golfvorm. De golfvorm van GRADE voor de Maas bij Borgharen is afgebeeld in Figuur 4.2. De figuur omvat ter vergelijking ook de golfvormen van HR-2006 en TMR-2006. De afvoergolfvorm volgend uit GRADE voor de Maas bij Borgharen is enigszins smaller dan de vigerende golfvorm uit HR-2006, vooral in de basis is afvoergolfvorm beduidend smaller; rondom de top is het verschil marginaal.

Tabel 4.1 Extreme afvoeren voor de Maas bij Borgharen berekend met GRADE voor enkele relevante herhalingstijden.

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]
300	3.570
1000	3.860
3000	4.115
10000	4.400
30000	4.660



Figuur 4.2 Afvoergolfvorm van de Maas bij Borgharen berekend met GRADE, samen met afvoergolfvormen uit HR-2006/TMR-2006

4.3 Productieberekeningen Maas

Net als voor Rijn zijn voor de Maas bij Borgharen in het kader van WTI-2017 productieberekeningen uitgevoerd met het waterbewegingsmodel WAQUA-Maas. Voor nadere informatie met betrekking tot WAQUA schematisatie van de Maas en gebruikte invoer wordt verwezen naar (Alfons, 2015). In de productieberekeningen zijn 12 afvoergolven bij de Maas doorgerekend; deze doorberekening resulteert voor elke willekeurige locatie in 12 waterstandsverlopen. De afvoermaxima van de beschouwde afvoergolven bij Borgharen zijn: 1.300, 2.260, 3.275, 3.394, 3.800, 3.950, 4.000, 4.600, 5.000, 5.500, 6.000 en 6.500 m³/s.

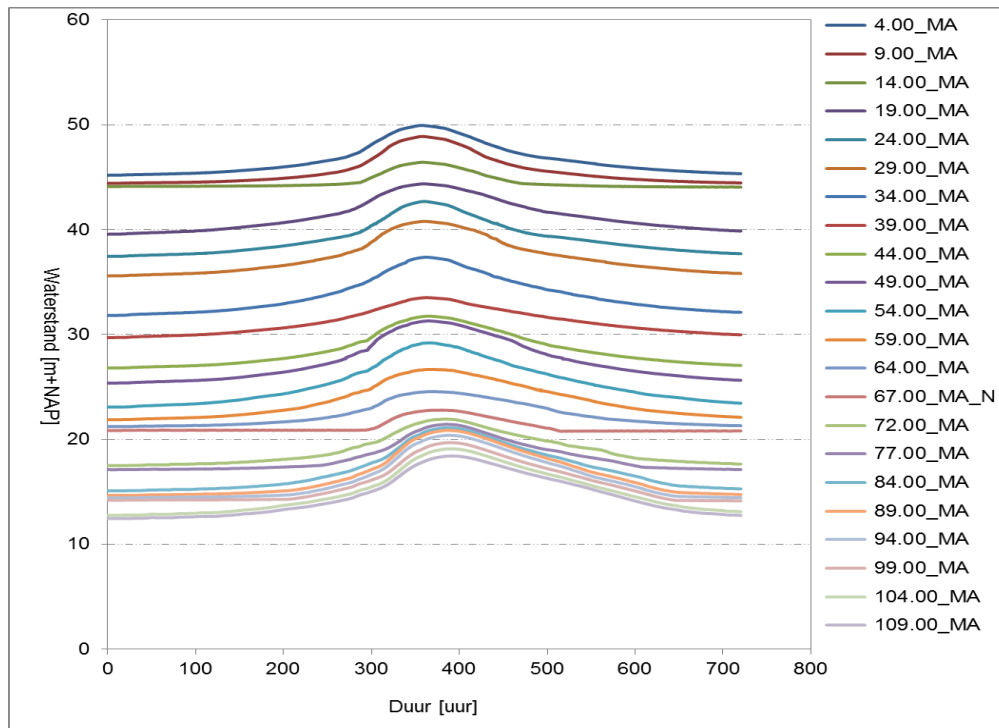
Zoals hierboven vermeld, bepaalt de rivierafvoer de maatgevende waterstand in het algemeen en de toetspeilen in het bijzonder langs de Maas. Uitgaande van de veiligheidsnormen uit Tabel 3.1 en doorgerekende afvoerengolven, zijn in dit rapport de resultaten van de afvoergolven behorende bij 3.495, 3.950 en 4.600 m³/s beschouwd en geanalyseerd. Deze afvoergolven hebben gemiddelde herhalingstijden die overeenkomen of dicht bij de nieuwe normen liggen; zie Tabel 4.1.

4.4 Analyse resultaten productieberekeningen Maas

De analyse is uitgevoerd voor een selectie as-locaties langs de Maas. Er zijn in totaal 50 as-locaties geselecteerd, met een onderlinge afstand van ca. 5 km. De geselecteerde set locaties is zo verspreid over de Maas dat deze representatief wordt beschouwd voor het hele gebied. Het aantal geselecteerde is groot om de bijbehorende tijdsverlopen in één figuur te plotten; de resultaten van de analyse zijn daarom telkens gepresenteerd in 2 figuren: de eerste figuur betreft de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA en de tweede figuur de locaties 114.00_MA t/m 230.00_MA en 235.00_BM t/m 245.00_MA. N.B. de locaties 235.00_BM t/m 245.00_Bm liggen in het gebied van de Bergsche Maas, ze liggen in principe in het Benedenrivierengebied.

Het aantal gekozen locaties is groot en de bijbehorende tijdsverlopen van de waterstand kunnen niet gevisualiseerd worden in één plaatje. Daarom zijn de locaties telkens in 2 plaatjes vertoond. De tijdsverlopen van de waterstand op de beschouwde locaties behorende

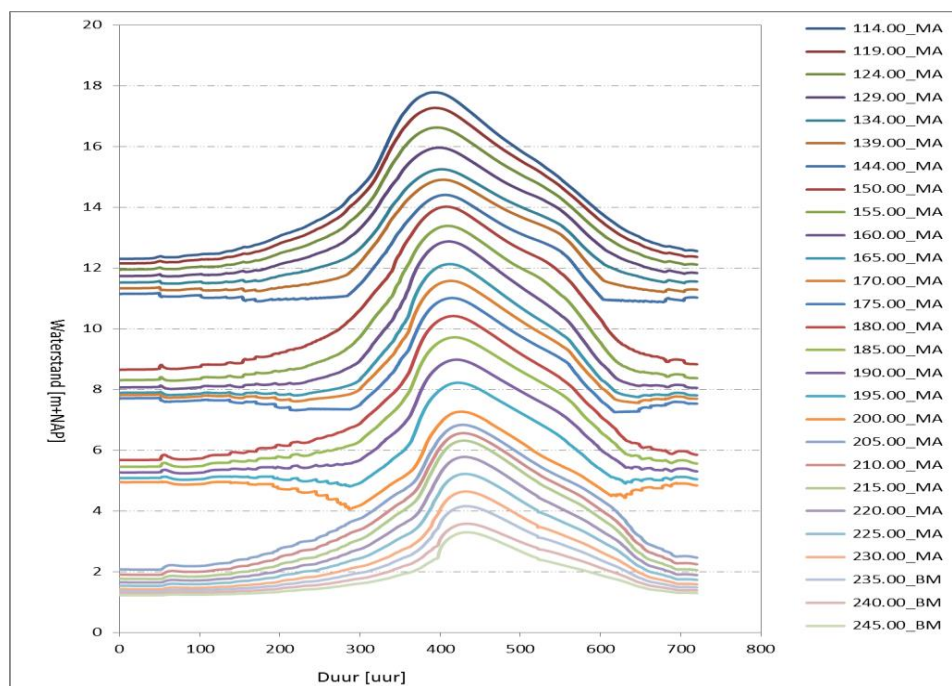
bij een afvoergolf met topafvoer $3.394 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn afgebeeld in Figuur 4.3 en Figuur 4.4. De tijdsverlopen behorende bij de afvoergolven met topafvoeren van $3.950 \text{ m}^3/\text{s}$ en $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn weergegeven in Figuur 4.7, Figuur 4.8, Figuur 4.11 en Figuur 4.12.



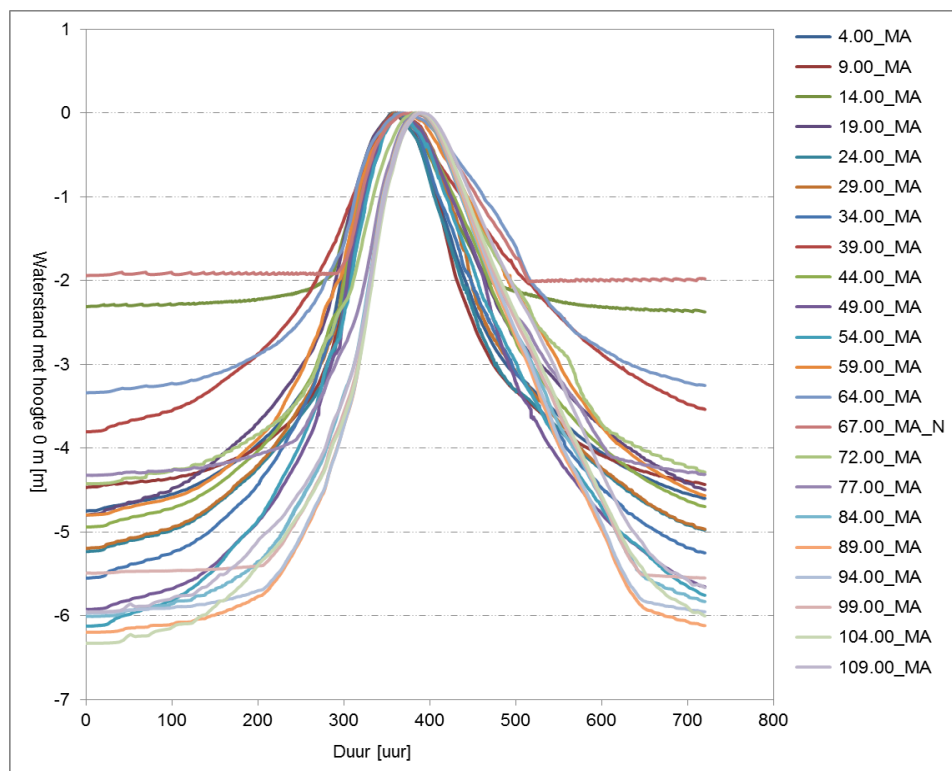
Figuur 4.3 Tijdsverloop waterstand voor locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.394 \text{ m}^3/\text{s}$.

De tijdsverlopen van de waterstand met hoogte 0 m zijn voor alle beschouwde afvoergolven (3.394 , 3.950 en $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$) weergegeven in Figuur 4.6, Figuur 4.7, Figuur 4.9, Figuur 4.10, Figuur 4.13 en Figuur 4.14.

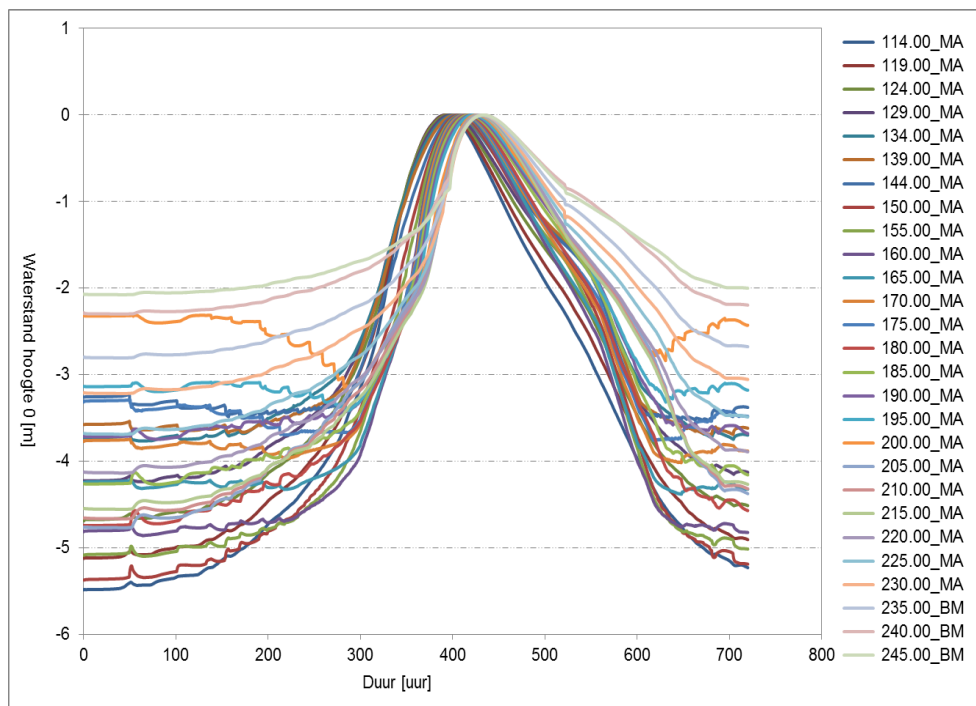
Uit Figuur 4.4 valt op merken dat voor de passage van de hoogwatergolf, de waterstand sprongen vertoont. Deze sprongen zijn groter voor de benedenstroomse locaties dan de bovenstroomse locaties. Vergelijk Figuur 4.3 en Figuur 4.4. Voor het benedenstroomse deel van Maas lijken er 4 sprongen te zijn; deze worden waarschijnlijk veroorzaakt door stuwen. De sprongen zijn relatief klein voor extreme afvoergolven; vergelijk Figuur 4.4 en Figuur 4.12.



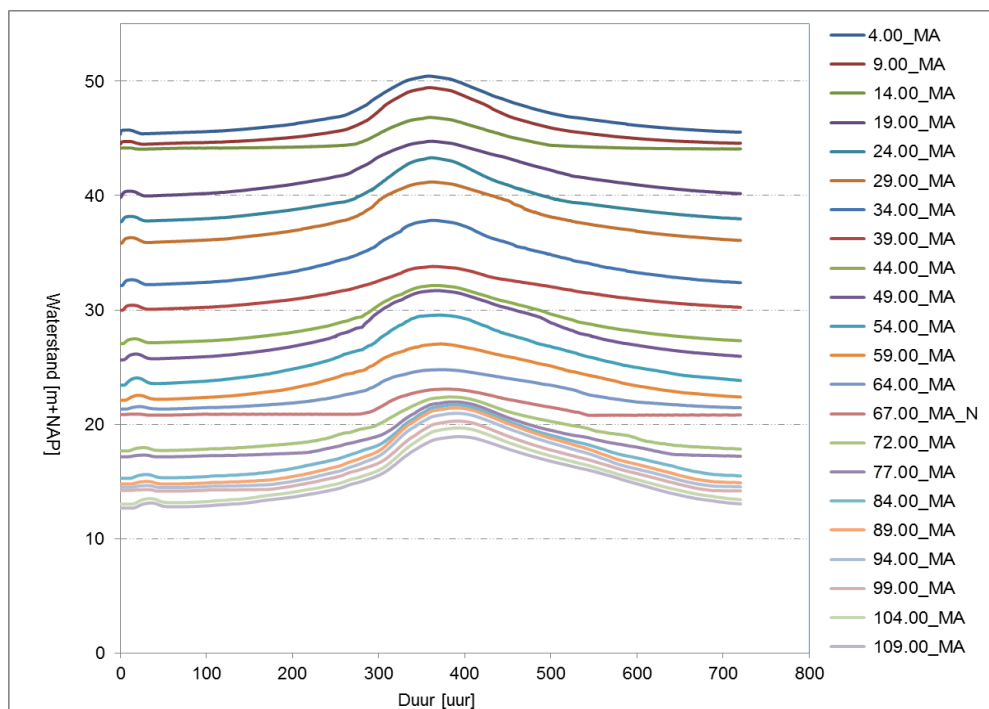
Figuur 4.4 Tijdsverloop waterstand voor locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.394 \text{ m}^3/\text{s}$.



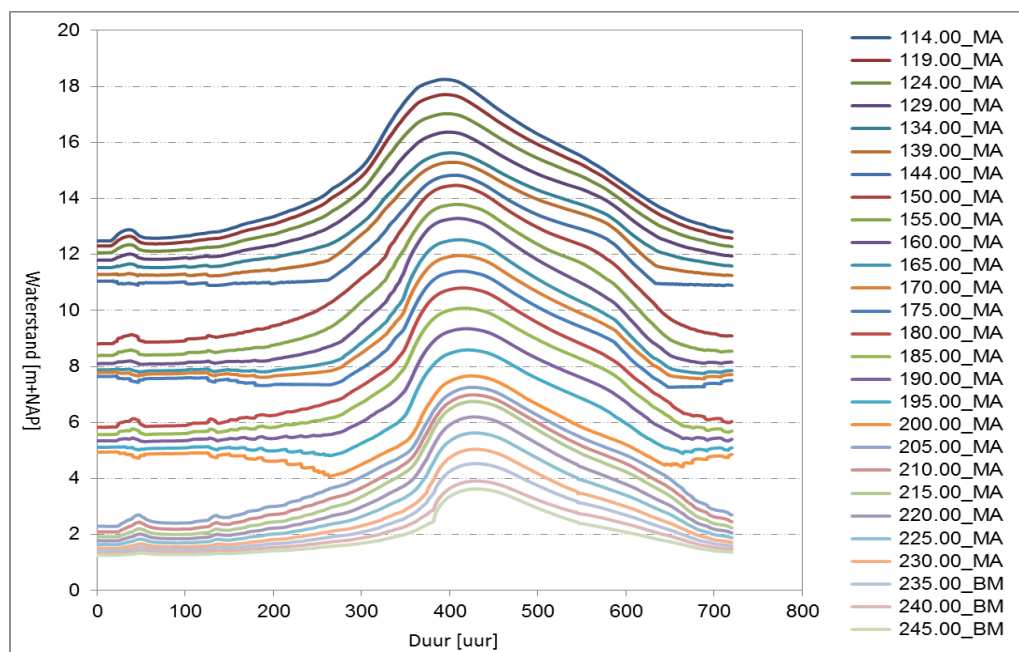
Figuur 4.5 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.394 \text{ m}^3/\text{s}$.



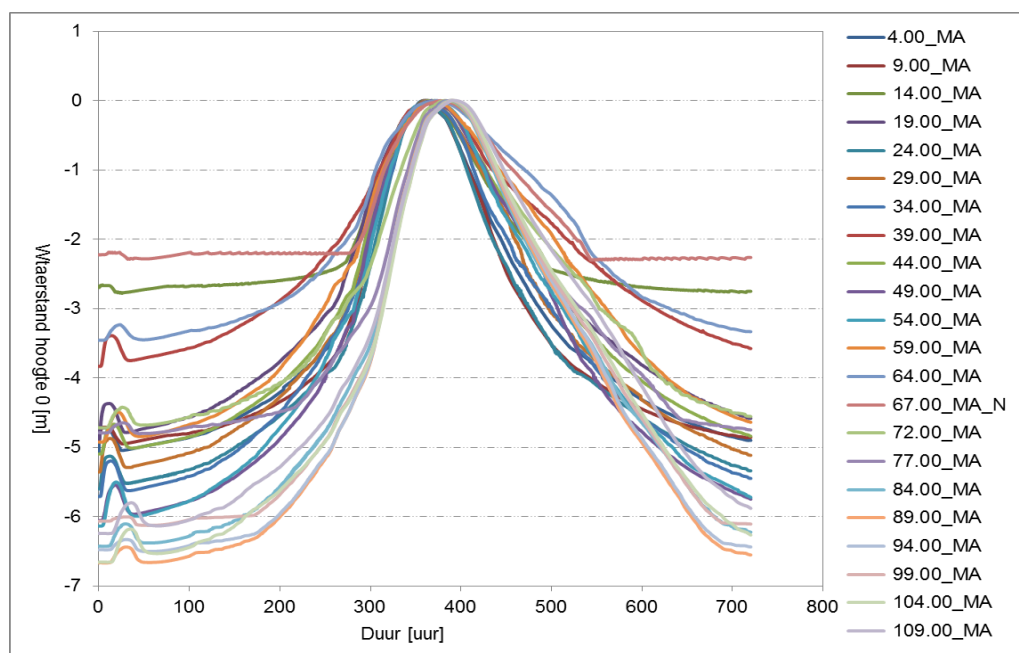
Figuur 4.6 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.394 \text{ m}^3/\text{s}$.



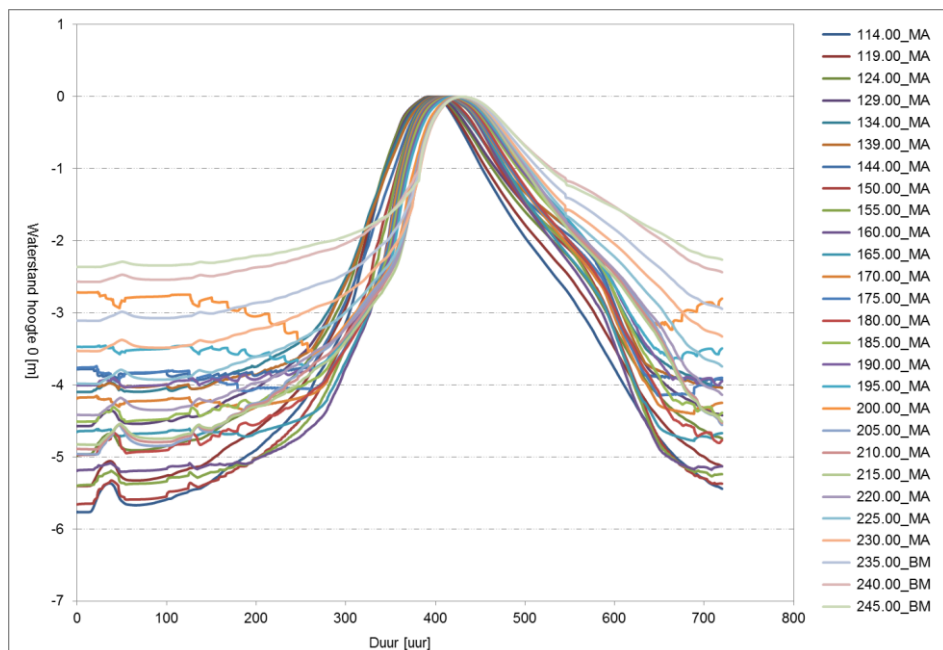
Figuur 4.7 Tijdsverloop waterstand voor locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.950 \text{ m}^3/\text{s}$.



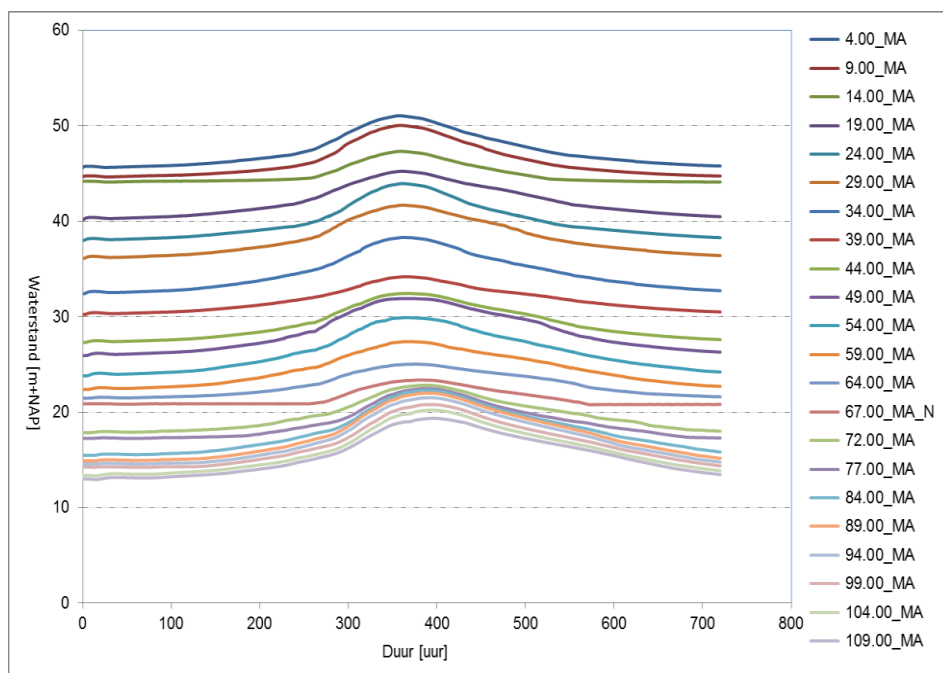
Figuur 4.8 Tijdsverloop waterstand voor locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.950 \text{ m}^3/\text{s}$.



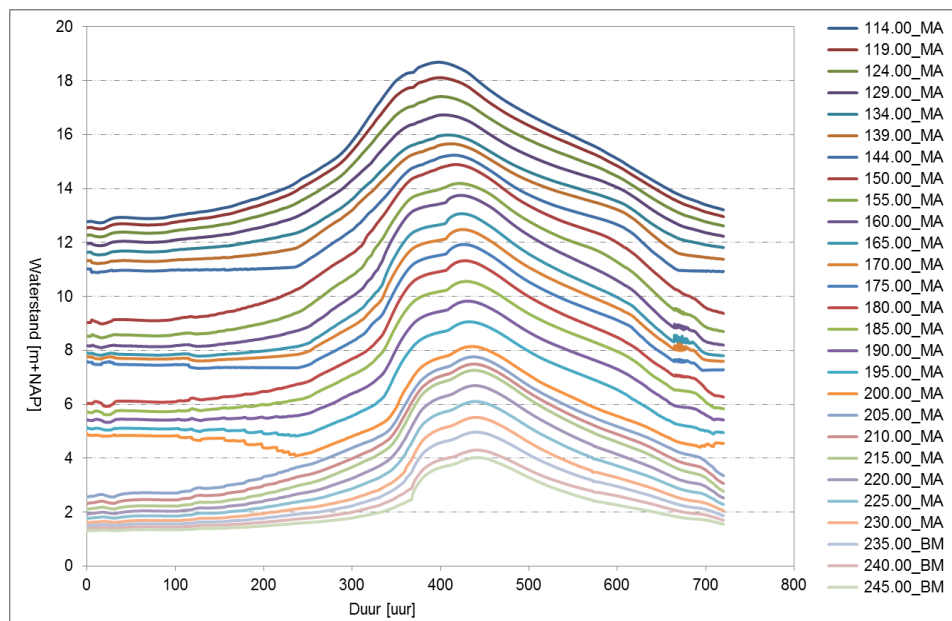
Figuur 4.9 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.950 \text{ m}^3/\text{s}$.



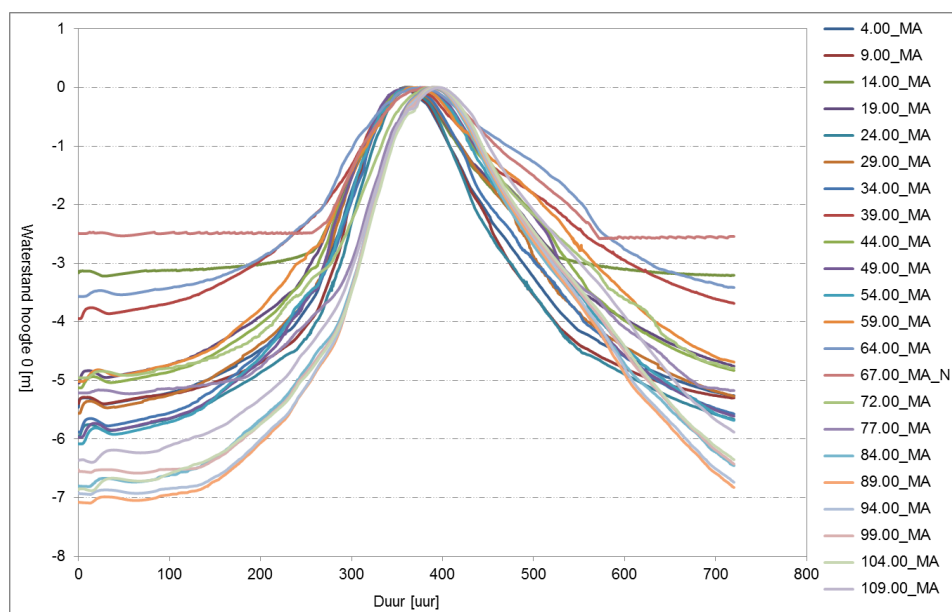
Figuur 4.10 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $3.950 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 4.11 Tijdsverloop waterstand voor locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$.



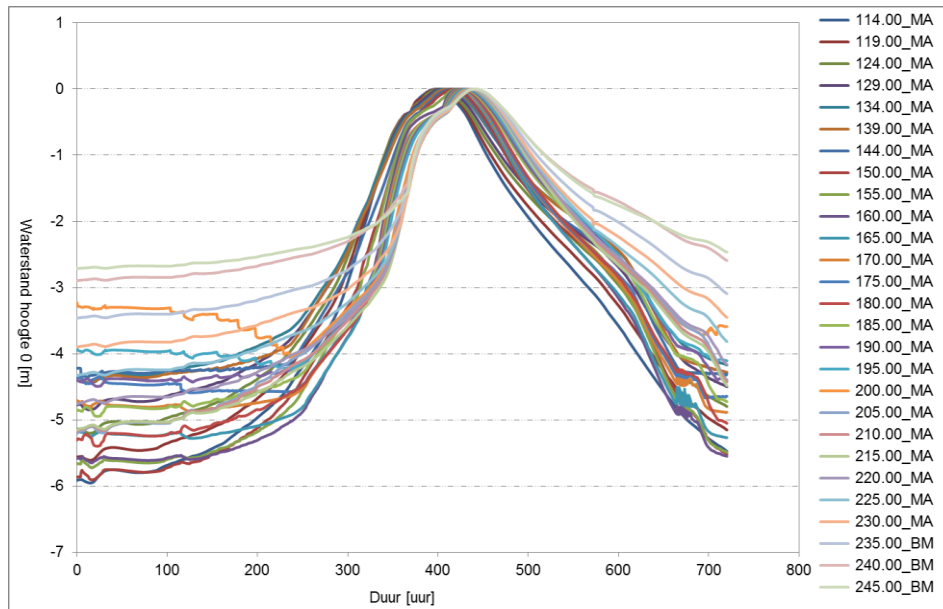
Figuur 4.12 Tijdsverloop waterstand voor locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA van de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$.



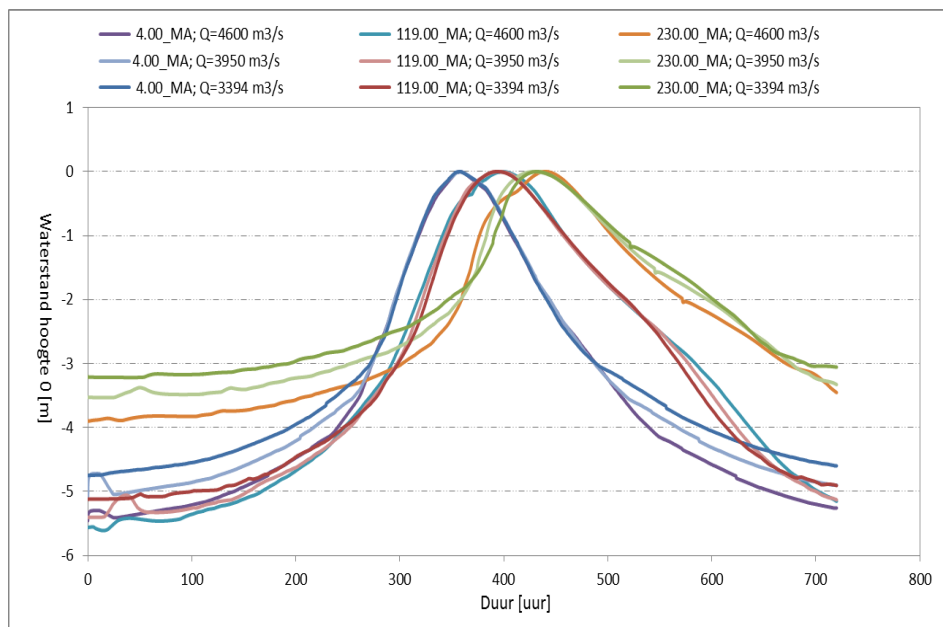
Figuur 4.13 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 4.00_MA t/m 109.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Om het effect van de hoogte van de afvoergolf op het tijdsverloop van de waterstand nader te onderzoeken zijn in Figuur 4.15 de waterstandsverlopen afgebeeld voor 3 locaties en 3 afvoergolven. Het betreft de meest bovenstroomse locatie langs de Maas (locatie 3.00_MA en), een locatie halverwege de Maas (locatie 119.00_MA) en een locatie benedenstrooms van de Maas (locatie 230.00_MA). De figuur laat duidelijk zien dat de piekwaarde van de afvoergolf nauwelijks of geen invloed heeft op het tijdsverloop van de waterstand. Dit geldt vooral voor locaties in het bovenstroomse deel van de Maas. De voorflank van het tijdsverloop van de waterstand voor de locatie 230.00_MA lijkt enigszins af te hangen van de

hoogte van de afvoergolf, maar de verschillen zijn erg klein. N.B. deze locatie vormt de grens met het benedenrivierengebied.



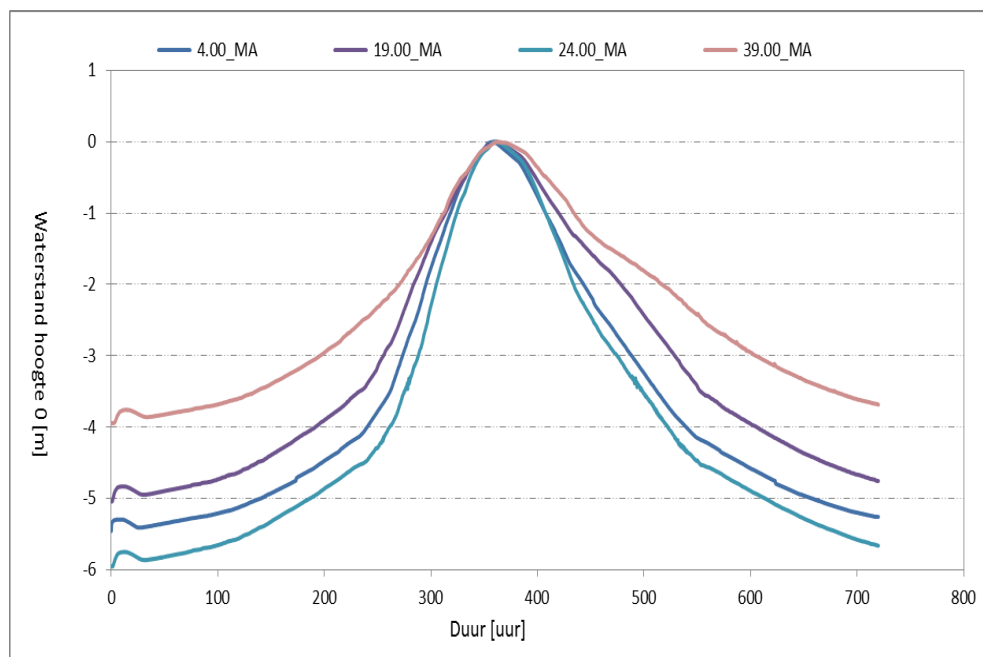
Figuur 4.14 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 bij de locaties 114.00_MA t/m 245.00_MA langs de Maas voor een afvoergolf met topwaarde van $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$.



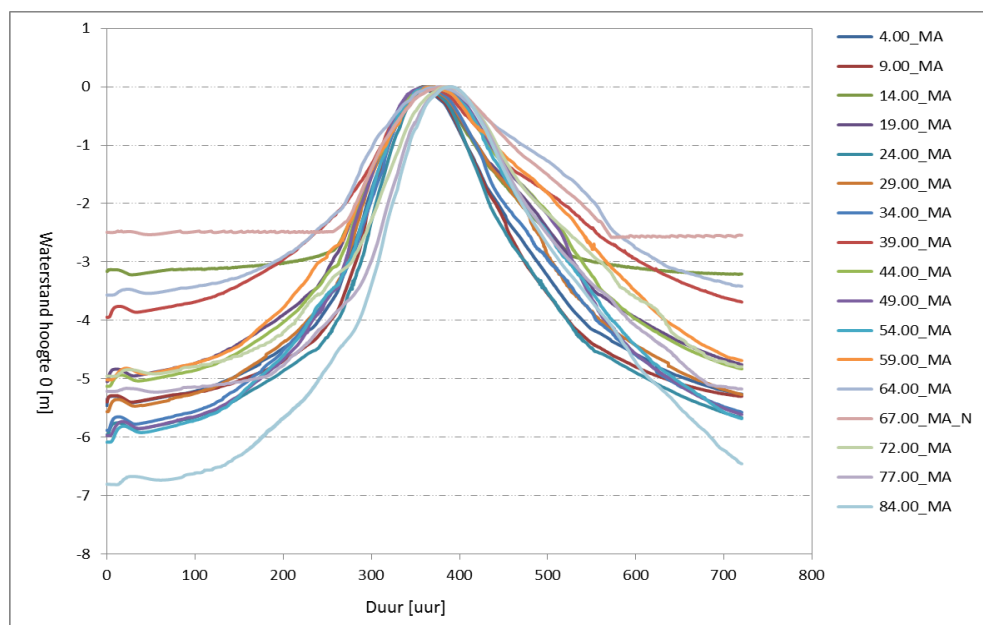
Figuur 4.15 Tijdsverloop waterstand van afvoergolven 3394 , 3950 en $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ voor 3 locaties: 4.00_MA (bovenstrooms Maas), 119.00_MA (midden Maas) en 230.00_MA (benedenstrooms Maas: grens met benedenrivieren).

Bovenstaande figuren laten zien dat de topvervlakking een rol speelt langs de Maas. Om het effect van de topvervlakking nader te beschouwen zijn voor de afvoergolf met hoogte $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$ de waterstandsverlopen voor een twee sets locaties afgeleid en afgebeeld in Figuur 4.16 en Figuur 4.18. Het gaat om een set locaties bovenstrooms van de Maas en een set locaties benedenstrooms. Hieruit kan geconcludeerd worden de topvervlakking het grootste is voor

het bovenstroomse deel van de Maas, zie Figuur 4.16. De figuur laat de waterstandsverlopen zien voor 4 locaties in het bovenstroomse deel van de Maas. De topvervlakking is tot de locatie 84.00_WA duidelijk merkbaar, zie Figuur 4.17.

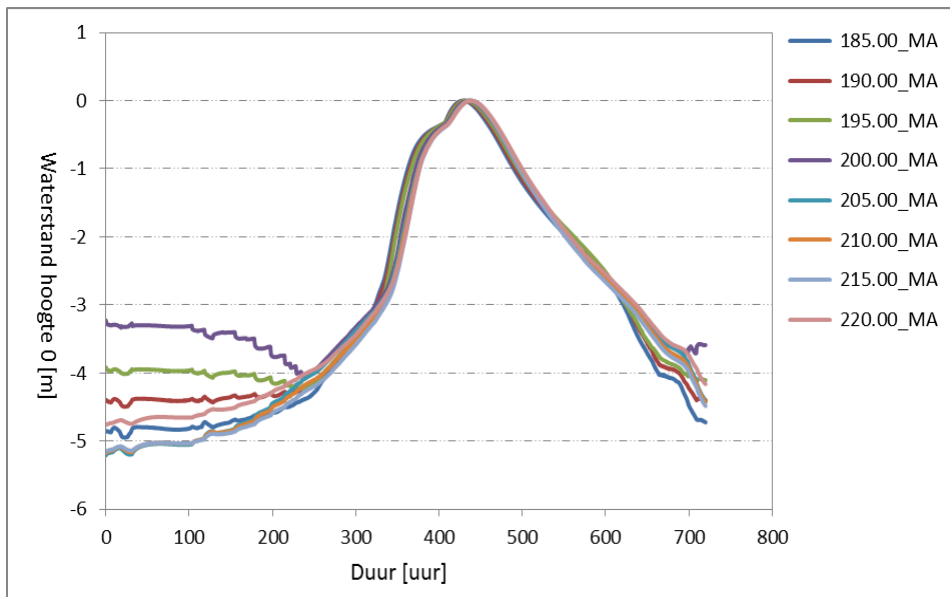


Figuur 4.16 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor 4 locaties bovenstrooms van de Maas: 4.00_MA, 19.00_MA, 24.00_MA en 39.00_MA.



Figuur 4.17 Waterstandsverloop locaties Maas waar topvervlakking een rol speelt.

Figuur 4.18 laat zien dat de topverlakking geen rol speelt in het Benedenstroomse deel van de Maas. Het waterstandsverloop bij de beschouwde locaties laat namelijk een eenduidig en uniform zien.



Figuur 4.18 Tijdsverloop van de waterstand met hoogte 0 m voor de benedenstroomse locaties 185.00_MA t/m 220.00_MA.

5 Vaststellen waterstandsverlopen Rijntakken

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van de productieberekeningen van WTI-2017 geanalyseerd voor alle riviertakken van de Rijn. Op basis van de resultaten uit dat hoofdstuk zijn in paragraaf 5.3 waterstandsverlopen afgeleid voor elke riviertak of delen van een riviertak. Hierbij zijn standaard trapezia gehanteerd; de keuze voor een bepaald trapeziumverloop is gebaseerd op de resultaten uit hoofdstuk 3.

Voor alle riviertakken van de Rijn blijkt uit de analyse in hoofdstuk 3 dat het tijdsverloop van de waterstand nauwelijks of niet afhangt van de piekwaarde van de afvoergolf. Om deze reden is in dit hoofdstuk voor de vaststelling en illustratie van de waterstandsverlopen in veel gevallen enkel de afvoergolf met hoogte 17.000 m³/s.

5.2 Uitgangspunten en keuze criteria

Voor het vaststellen van de waterstandsverlopen zijn de volgende uitgangspunten en criteria gebruikt:

1. Waterstandsverlopen zullen worden benaderd door standaard trapezia; deze aanpak is consistent met de wijze waarop stormopzettingen langs de kust zijn geschematiseerd, ook is dit consistent met wijze waarop afvoerlopen en meerpeilen (trage stochasten) worden geschematiseerd in de Hydra's,
2. Per riviertak zullen waterstandsverlopen worden afgeleid en geschematiseerd door een trapeziumverloop. Waar nodig en mogelijk zal een riviertak worden ingedeeld in deelgebieden; voor elk deelgebied zal één standaard trapeziumverloop worden afgeleid,
3. Het trapeziumverloop dient het waterstandsverloop goed te benaderen; vooral het bovenste gedeelte en het gedeelte rondom de top dient voldoende nauwkeurig te worden beschreven

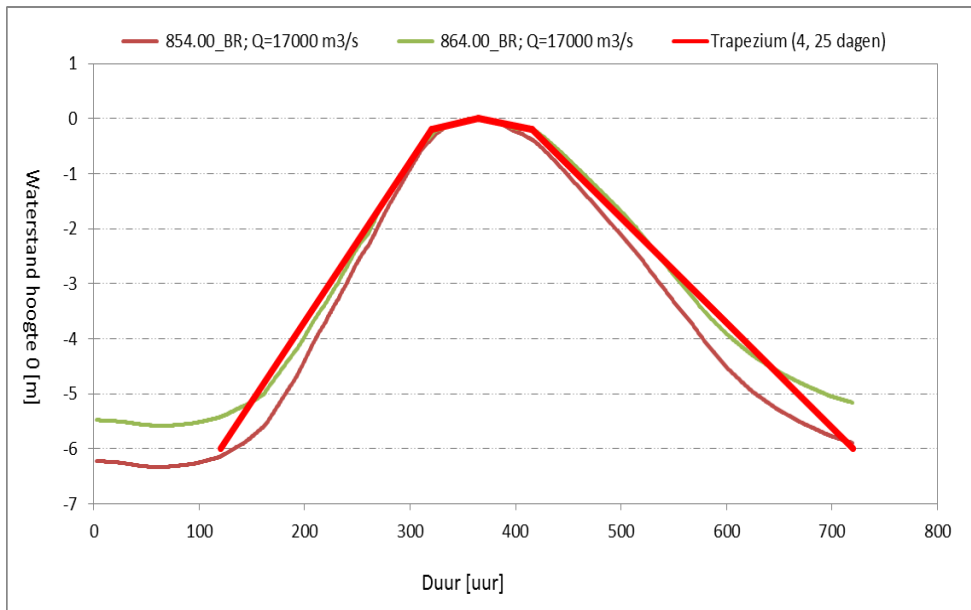
5.3 Waterstandsverloop Rijntakken

5.3.1 Bovenrijn

Uit de analyse van de tijdsverlopen langs de Bovenrijn uit hoofdstuk 3 blijkt dat de hoogte van de afvoer nauwelijks tot geen invloed heeft op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand. De topvervlakking is beperkt; de lengte van Bovenrijn is immers kort en de ruimtelijke variabiliteit van de uiterwaarden is relatief beperkt. Uit de analyse blijkt verder dat het tijdsverloop van de waterstand op alle onderzochte locaties benaderd kan worden door een trapeziumverloop. Het trapeziumverloop is in principe locatieafhankelijk; de ruimtelijke variabiliteit langs de Bovenrijn is echter klein.

Het tijdsverloop van de waterstand langs de Bovenrijn kan goed benaderd door een trapeziumverloop met een basisduur op het niveau van -6 m van 600 uur (25 dagen) en topduur van 96 uur (4 dagen). Dit geschematiseerde waterstandsverloop geldt voor alle locaties van langs de Bovenrijn. Het waterstandsverloop is afgebeeld in Figuur 5.1. Dit geschematiseerd waterstandsverloop benadert het werkelijke waterstandsverloop van de bovenstroomse locatie vrij goed; van de benedenstroomse locatie is er sprake van een lichte overschatting, vooral van het lage gedeelte van de waterstand maar dit is minder relevant.

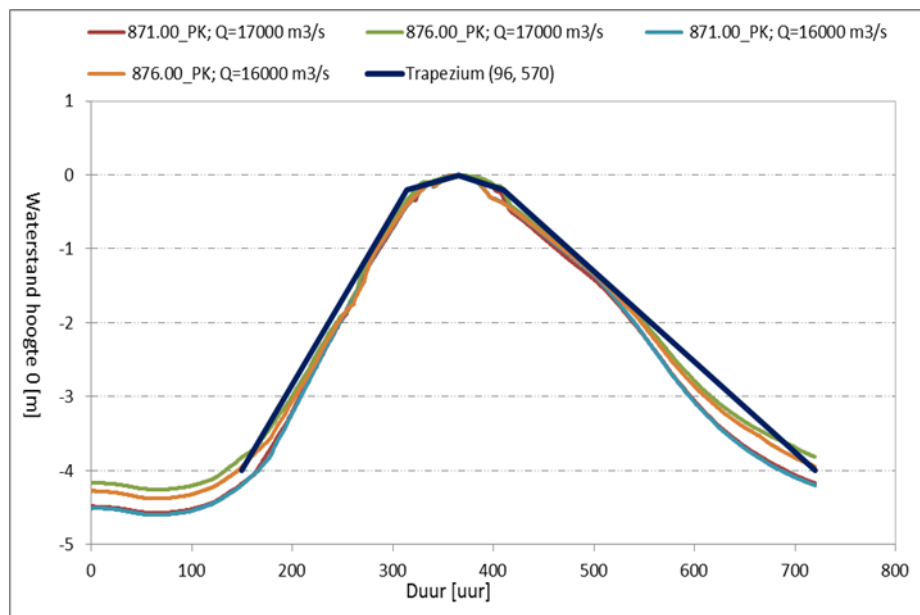
Het geschematiseerde tijdsverloop zoals afgebeeld in Figuur 5.1 heeft betrekking op de waterstanden met piekwaarde 0 m. Op basis van het waterstandverloop met piekwaarde 0 m kan voor elke waterstand bij de normfrequentie het bijbehorende waterstandsverloop geconstrueerd worden door elk niveau van het waterstandsverloop met piekwaarde 0 m te verhogen met de piepwaarde van die waterstand.



Figuur 5.1 Geschematiseerd waterstandsverloop voor locaties langs de Bovenrijn.

5.3.2 Pannerdense Kop

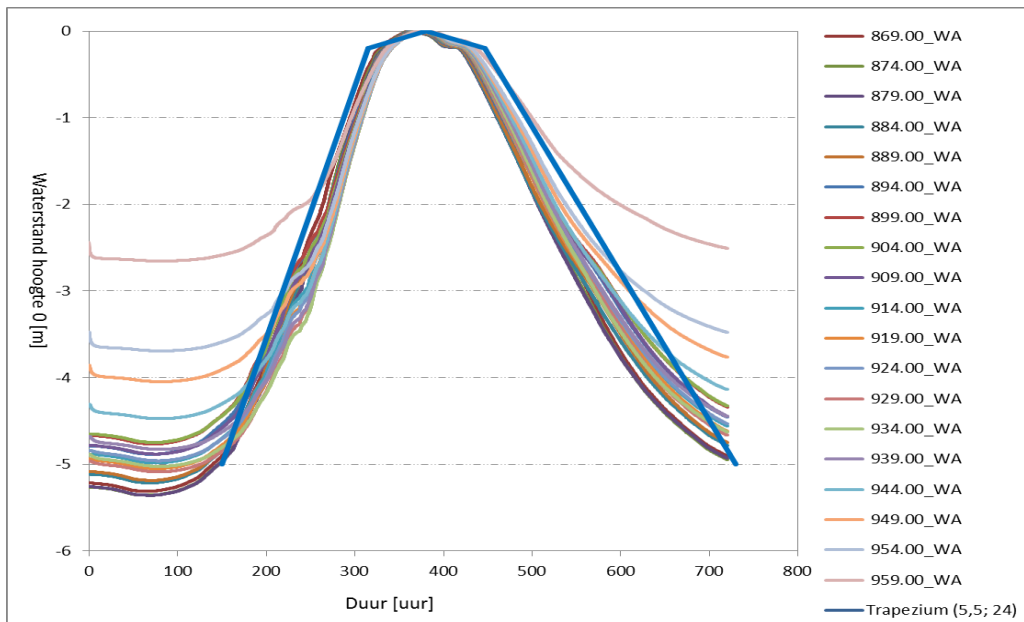
Pannerdense Kop is een kort riviertraject van de Rijn; uit de resultaten van hoofdstuk 3 is gebleken dat de tijdsverlopen van de waterstand behorende bij de onderzochte 2 locaties goed benaderd worden door een trapeziumverloop. Het trapezium heeft op het niveau van -4 m een basisduur van 570 uur (23,75 dagen) en een topduur van 96 uur (4 dagen). De waterstand stijgt 164 uur van -4 naar -0,2 m en in 48 uur van -0,2 naar 0 m; daarna daalt de waterstand van 0 naar -0,2 m, eveneens in 48 uur en in 310 uur van -0,2 m naar -4 m; zie Figuur 3.12. Voor de volledigheid wordt deze figuur hier nog eens herhaald.



Figuur 5.2 Geschematiseerd tijdsverloop van de waterstand voor het riviertak Pannerdense Kop.

5.3.3 Waal

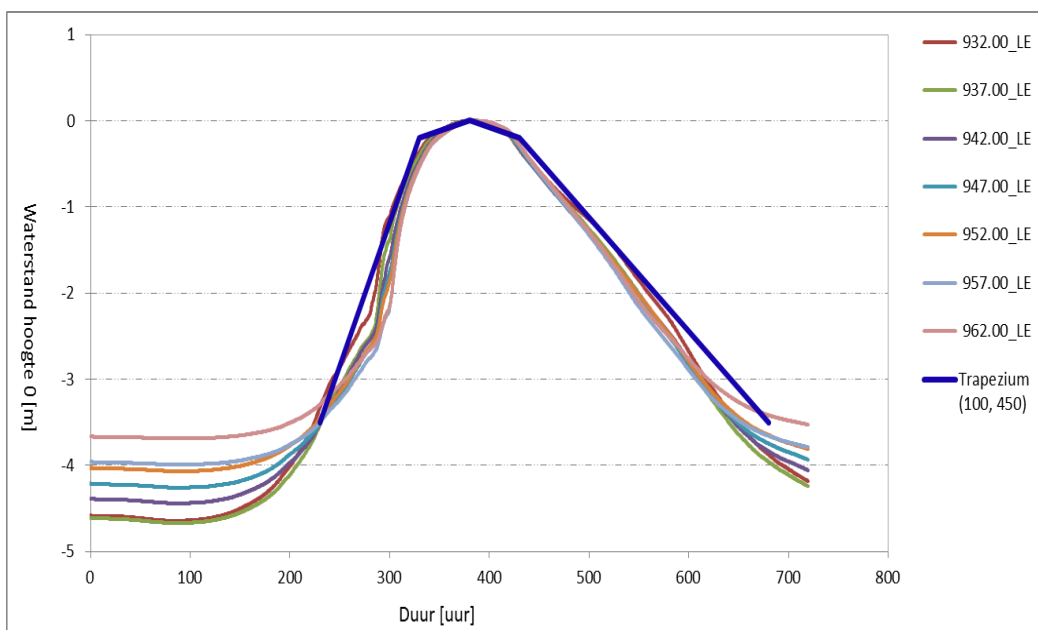
De waterstandsverlopen langs de Waal laten meer uniformiteit zien; de hoogte van de afvoer blijkt nauwelijks tot geen invloed te hebben op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand. Het verhang en de topvervlakking langs de Waal is relatief groter dan langs de Bovenrijn, maar het effect van beide aspecten blijft beperkt. Rondom de top en het bovenste gedeelte van de waterstand is het verschil in tijdsverlopen klein. Verder valt op dat er duidelijke grens aan te wijzen tussen bovenstroomse en benedenstroomse locaties. Voor het schematiseren van de waterstandsverlopen langs de Waal is daarom gekozen voor één standaard trapeziumverloop voor het hele gebied van de Waal; het trapeziumverloop is afgebeeld in Figuur 5.3. Het trapezium heeft op het niveau van -5 m een basisduur van 576 uur (24 dagen) en een topduur van 130 uur (ca. 5,5 dagen). De waterstand stijgt in 165 uur naar het niveau van -0,2 m; daarna stijgt die nog met 0,2 m om de maximale waarde te bereiken in 65 uren en daalt met dezelfde waarde (0,2 m) in wederom 65 uur. De waterstand daalt in 283 uren van het niveau van -0,2 m naar het niveau van -5 m. Dit trapeziumverloop overschat enigszins het tijdsverloop van de waterstand voor de bovenstroomse locaties langs de Waal.



Figuur 5.3 Standaard waterstandsverloop locaties de Waal

5.3.4 Lek

Uit hoofdstuk 3 blijkt dat de tijdsverloop van de waterstand afhangt van de locatie. De benedenstroomse locatie laten een ander tijdsverloop zien dan de bovenstroomse locaties. We onderscheiden 3 deelgebieden: het gebied bovenstrooms van 962.00_LE, het gebied benedenstrooms van deze locatie maar bovenstrooms van de locatie 982.00_LE en het gebied benedenstrooms van 982.00_LE. Het tijdsverloop van de waterstand rondom de top en tot een niveau van -2 m is vrij eenduidig in het bovenstroomse deel van de Lek; de waterstandsverlopen van de locaties in dit deel kunnen daarom goed worden benaderd door één standaard trapeziumverloop. Dit trapeziumverloop is samen met de waterstandsverlopen voor dit gebied afgebeeld in Figuur 5.4.

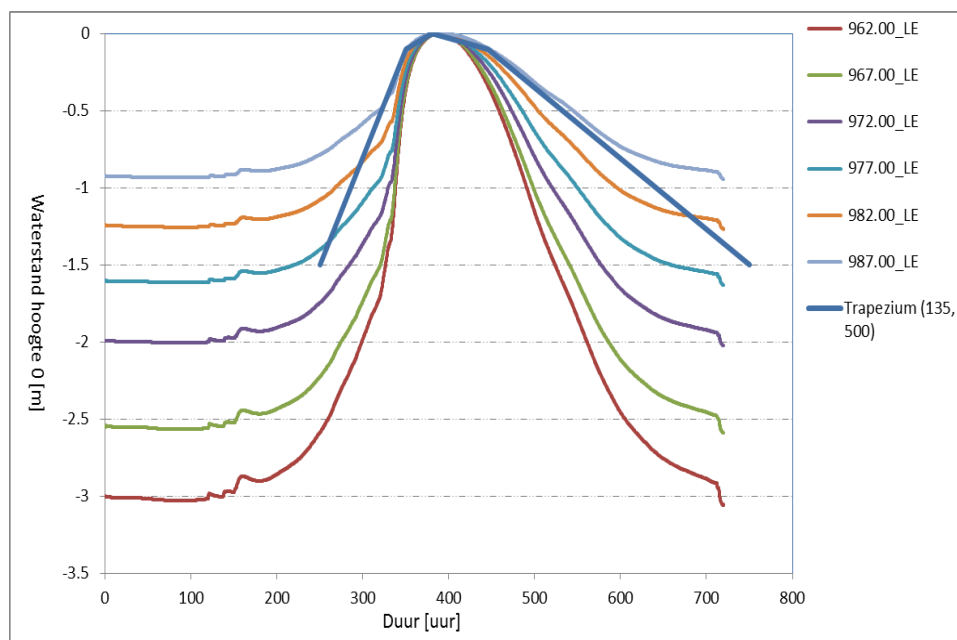


Figuur 5.4 Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop in bovenstrooms deel van de Lek.

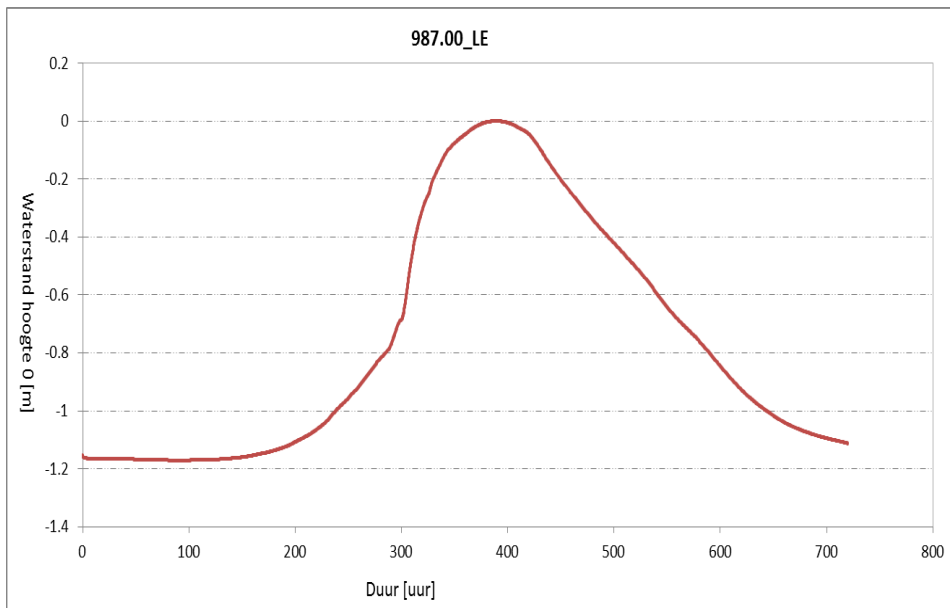
Het standaard trapeziumverloop heeft op het niveau van -3,5 m een basisduur van 450 uur (18,75 dagen) en een topduur van 100 uur (ruim 4 dagen: 50/50 uur). De totale duur van de achterflank is 2 keer langer als de totale duur van de voorflank: 300 uur versus 150 uur.

Het tijdsverloop van de waterstand voor het benedenstroomse deel van de Lek laat enige diversiteit zien; vooral de achterflank loopt steeds steiler in de benedenstroomse richting. Rondom de top is het verschil klein. De voorflank loopt steiler en het verschil is klein. Desondanks laat het tijdsverloop van de waterstand bij de benedenstroomse locaties zich niet goed worden benaderd door één standaard trapeziumverloop, zie Figuur 5.5. Een trapeziumverloop dat de benedenstroomse locatie goed kan benaderen, overschat het tijdsverloop voor de andere locaties in Figuur 5.5. Een trapeziumverloop dat de bovenstroomse locatie 962.00_LE goed kan benaderen, zal het tijdsverloop voor de locatie 987.00_LE behoorlijk onderschatten. Voor de locaties langs de Lek benedenstrooms van de locatie 962.00_LE is besloten om de waterstandsverlopen te baseren op de resultaten van de productieberekeningen. Dit is mogelijk omdat de piekwaarde van de afvoergolf geen invloed heeft op de vorm van het waterstandsverloop. Wanneer de waterstand bij de normfrequentie beschikbaar komt, kan het bijbehorende tijdsverloop worden geconstrueerd. Het waterstandsverloop met hoogte 0 m zal dan als het ware opgetild worden naar een verloop met piekwaarde gelijk aan de waterstand bij de normfrequentie.

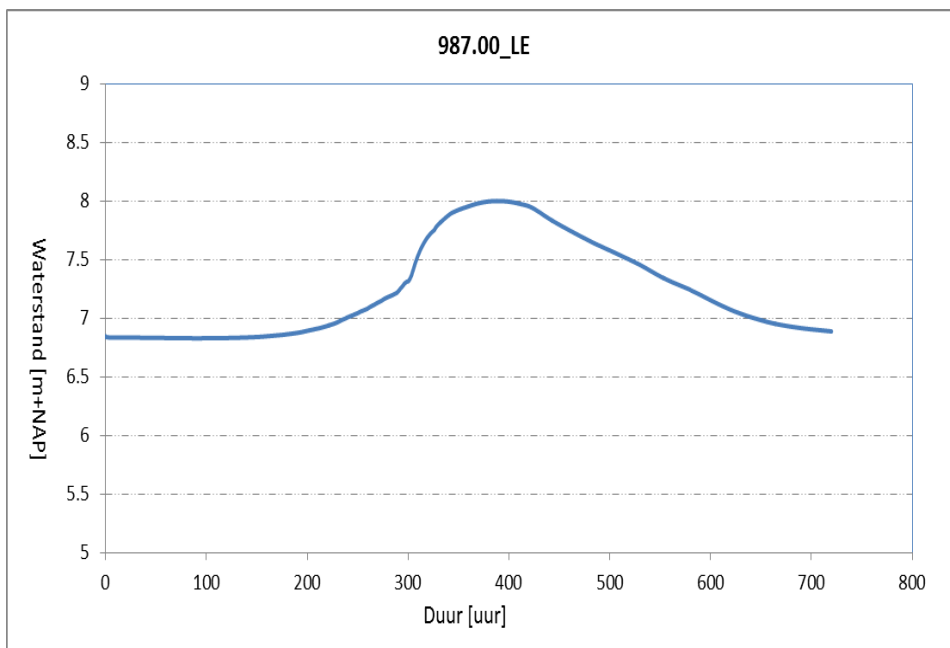
Figuur 5.6 illustreert een voorbeeld voor locatie 987.00_LE. Op basis van het waterstandverloop met hoogte 0 m kan voor een fictieve waterstand van 8 m+NAP het bijbehorende waterstandsverloop geconstrueerd door elk niveau van het waterstandsverloop met hoogte 0 m te verhogen met de fictieve waterstand. Voor dit voorbeeld ontstaat een waterstandsverloop zoals afgebeeld in Figuur 5.7.



Figuur 5.5 Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop in benedenstrooms deel van de Lek.



Figuur 5.6 Waterstandsverloop met hoogte 0 m voor de locatie 987.00_LE; de meest benedenstroomse locatie van de Lek.

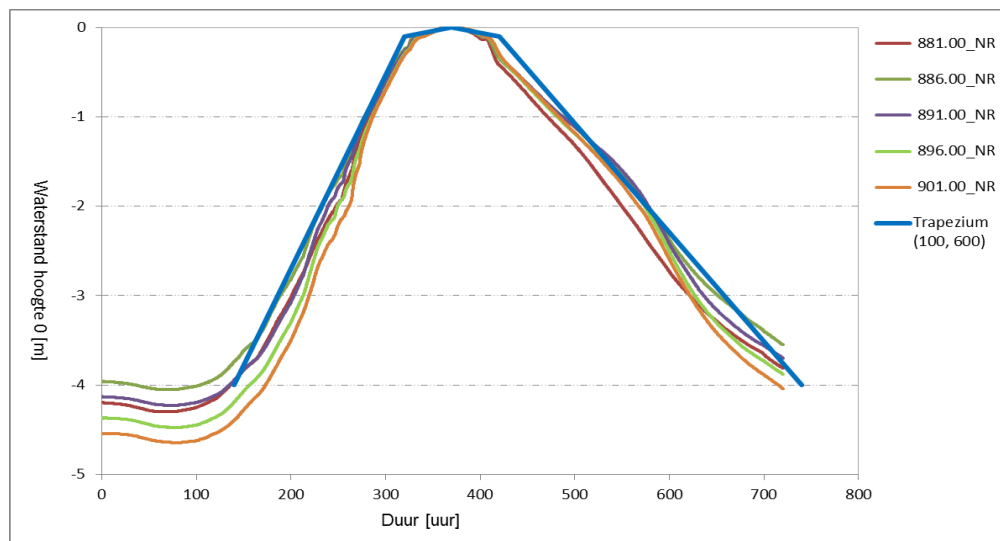


Figuur 5.7 Voorbeeld waterstandsverloop voor fictieve twaterstand van 8 m; locatie 987.00_LE.

5.3.5 Neder-Rijn

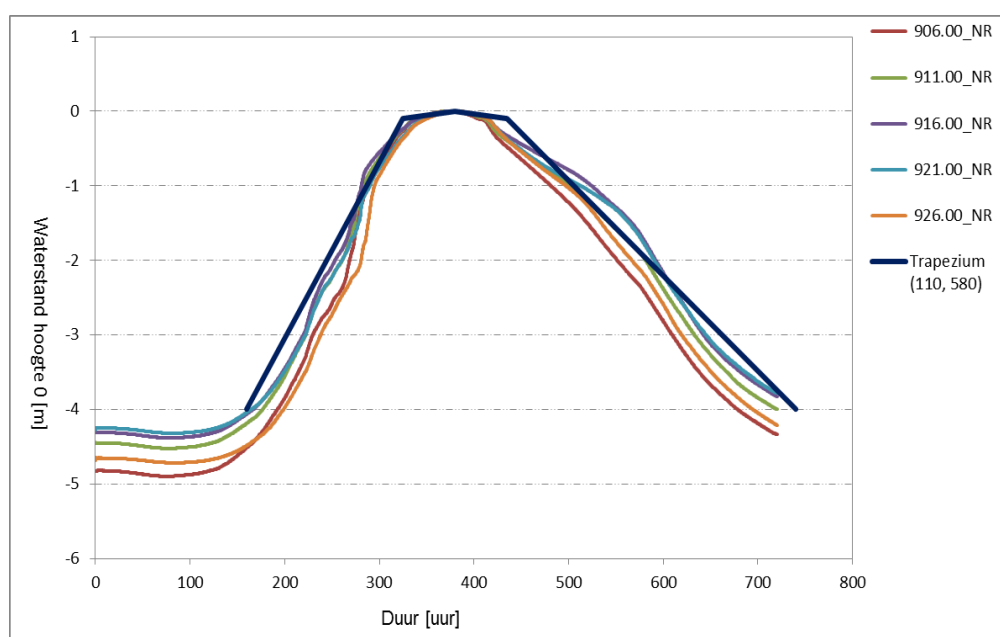
Op basis van de resultaten uit hoofdstuk 3 is de Neder-Rijn ingedeeld in 2 deelgebieden: een bovenstrooms en een benedenstrooms deelgebied. De grens ligt bij de locatie 901.00_NR. De totale duur op het niveau van -4 is voor alle onderzochte locaties bijna gelijk. De duur rondom de top, zeer relevant voor de faalmechanismen waarvoor het waterstandsverloop relevant is, is echter verschillend. Deze is voor de benedenstroomse locaties namelijk langer dan voor de bovenstroomse locaties. Dit is de belangrijkste reden om het gebied van de Neder-Rijn in te delen in 2 deelgebieden.

Het trapeziumverloop voor de schematisatie van de waterstandsverlopen in het bovenstroomse deel van de Neder-Rijn is weergegeven in Figuur 5.8. Het trapezium heeft op het niveau -4 m een totale duur van 600 uur (25 dagen); de totale topduur bedraagt 100 uur (4 dagen en 4 uur). In tegenstelling tot de Lek en de Waal is de variatie in de waterstand tijdens de topduur vrij klein. Tijdens de totale topduur stijgt de waterstand met slechts 0,1 m in plaats van 0,2 m. De totale duur van de voorflank is 230 uur en die van de achterflank 370 uur.



Figuur 5.8 Geschematiseerd trapeziumverloop voor de waterstandsverlopen bij locaties van de Neder-Rijn bovenstrooms van de locatie 901.00_NR

Voor het benedenstroomse deel van de Neder-Rijn geldt een standaard trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 5.9. Het trapezium heeft op het niveau van -4 m een totale duur van 580 uur (ruim 24 uur); de topduur bedraagt 110 uur.

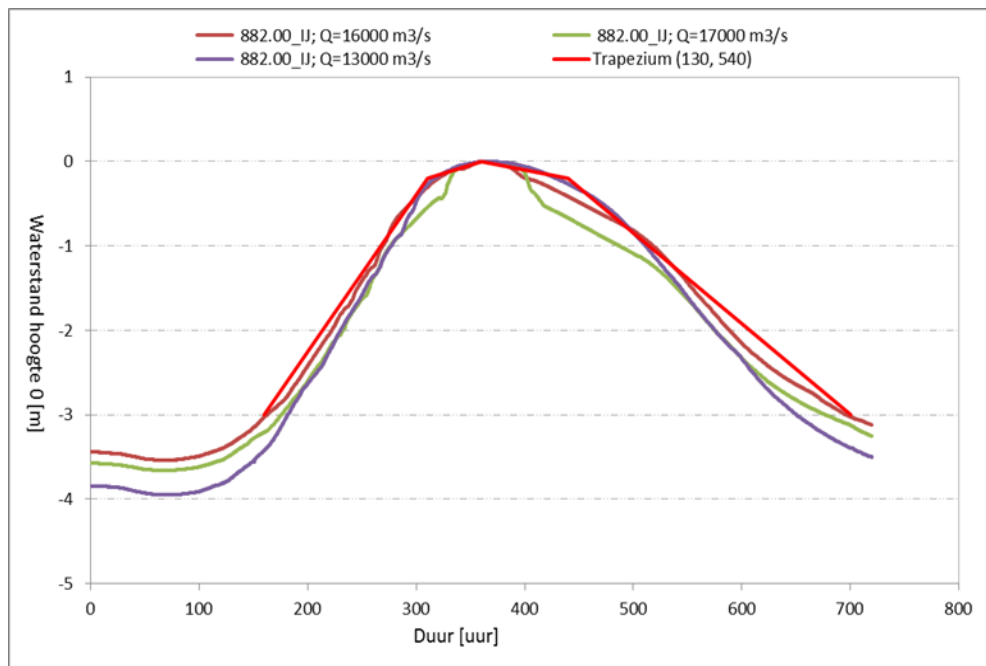


Figuur 5.9 Geschematiseerd trapeziumverloop voor de waterstandsverlopen bij locaties van de Neder-Rijn benedenstrooms van de locatie 901.00_NR.

5.3.6 IJssel

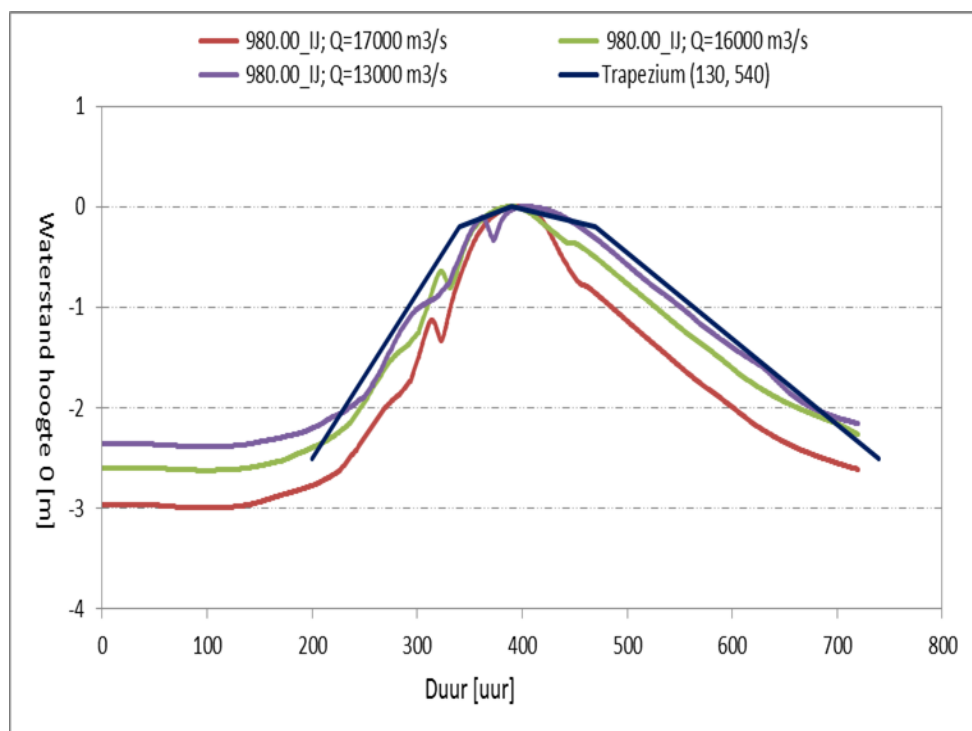
Het waterstandsverloop varieert van locatie tot locatie langs de IJssel; de locaties daar kunnen op basis van het bijbehorende tijdsverloop niet geclusterd worden, zo blijkt uit hoofdstuk 3. Uit de analyse blijkt verder dat de hoogte van de afvoer (een kleine) invloed heeft op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand. Een afvoergolf van $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ leidt namelijk tot smallere tijdsverlopen van de waterstand. Gelet hierop maar ook op de nieuwe veiligheidsnorm, zijn de waterstandsverlopen voor de IJssel gebaseerd op een afvoergolf⁷ van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$. N.B. het verschil met een afvoergolf van $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is marginaal. Om de waterstandsverlopen voor de IJssel te bepalen zijn 3 locaties beschouwd: de meest bovenstroomse respectievelijk benedenstroomse locatie en een locatie in het midden van de IJssel. Concreet gaat het om 882.00_IJ, 940.00_IJ en 980.00_IJ. N.B. de laatste locatie ligt formeel in de IJsseldelta. De waterstandsverlopen op deze 3 locaties zijn verder benaderd door een trapezia, zie Figuur 5.10 t/m Figuur 5.12.

Het blijkt dat de bovenstroomse locatie, locatie 882.00_IJ, goed benaderd kan worden door een trapeziumverloop. Dit trapezium heeft op het niveau van -3 m een totale duur van 540 uur (22,5 dagen) en een topduur van 130 uur. De totale duur van de voorflank is 200 uur en van de achterflank 340 uur. Voor de benedenstroomse locatie, locatie 980.00_IJ, geldt een trapeziumverloop van dezelfde topduur van 130 uur; de basisduur bedraagt weliswaar ook 540 uur maar deze heeft betrekking op een hogere niveau van de waterstand, namelijk -2,5 m. Verder blijkt dat beide trapezia het waterstandsverloop van de locatie 940.00_IJ (in het midden van de IJssel) goed weergegeven. Dit geldt vooral voor de voorflank en de duur rondom de top. Op basis hiervan en na overleg met de heer Schelfhout is besloten om het gebied van de IJssel in te delen in 2 gebieden: een gebied dat de locaties omvat die bovenstrooms liggen van de locatie 940.00_IJ en een gebied met locaties benedenstrooms van deze locatie.

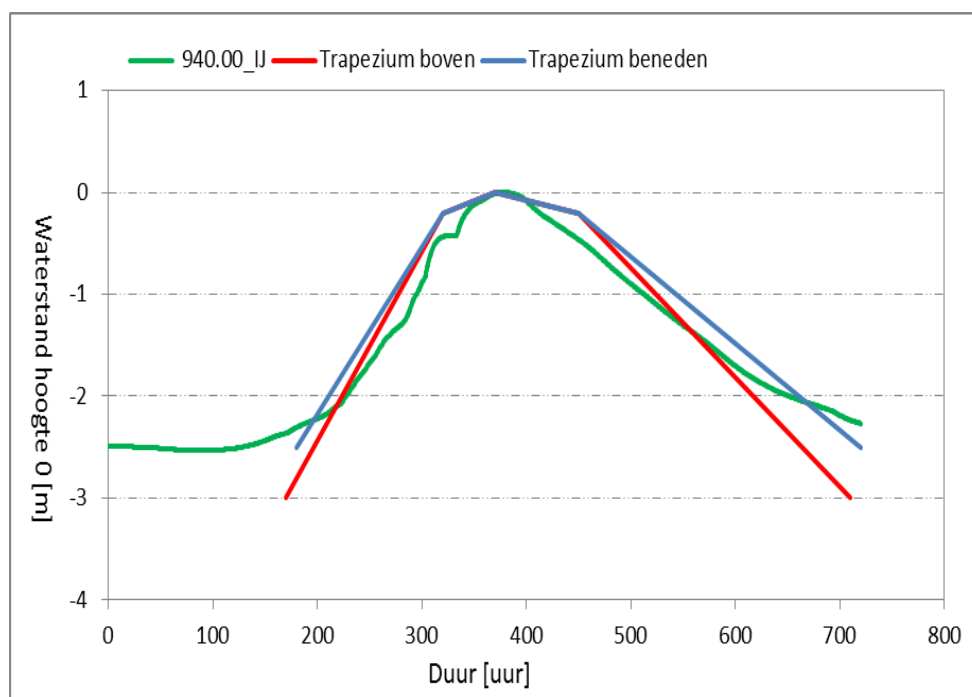


Figuur 5.10 Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop voor de locatie 882.00_IJ langs de IJssel.

⁷ Om een volledig beeld te krijgen zijn in de figuren alle de drie beschouwde afvoergoven beschouwd.



Figuur 5.11 Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop voor de locatie 980.00_IJ langs de IJssel.



Figuur 5.12 Geschematiseerd trapeziumverloop voor het waterstandsverloop voor de locatie 940.00_IJ langs de IJssel.

6 Vaststellen waterstandsverlopen Maas

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 zijn de resultaten van de productieberekeningen van WTI-2017 voor de Maas geanalyseerd. Op basis van de resultaten uit dat hoofdstuk zijn in de volgende paragraaf waterstandsverlopen voor de Maas vastgesteld. Analooq aan de Rijntakken zijn hierbij standaard trapezia; de keuze voor een bepaald trapeziumverloop is gebaseerd op de resultaten uit hoofdstuk 4 en op basis van het overleg met Harry Schelhout van Deltares.

6.2 Waterstandsverloop Maas

Uit de analyse van hoofdstuk 4 blijkt dat de hoogte van de afvoergolf nauwelijks tot geen invloed heeft op de vorm van het tijdsverloop van de waterstand. Dit betekent dat de resultaten van de productieberekeningen voldoende informatie bevatten om de waterstandsverlopen vast te stellen. Verder blijkt dat de topverlakking de waterstandsverlopen voor het bovenstroomse deel van de Maas sterk beïnvloedt. De locaties benedenstrooms van de locatie 84.00_WA laten zich, zoals Figuur 4.14 laat zien, clusteren.

Op basis van bovenvermelde bevindingen is het vaststellen van de waterstandsverlopen het gebied van de Maas ingedeeld in 6 deelgebieden, zie Tabel 6.1.

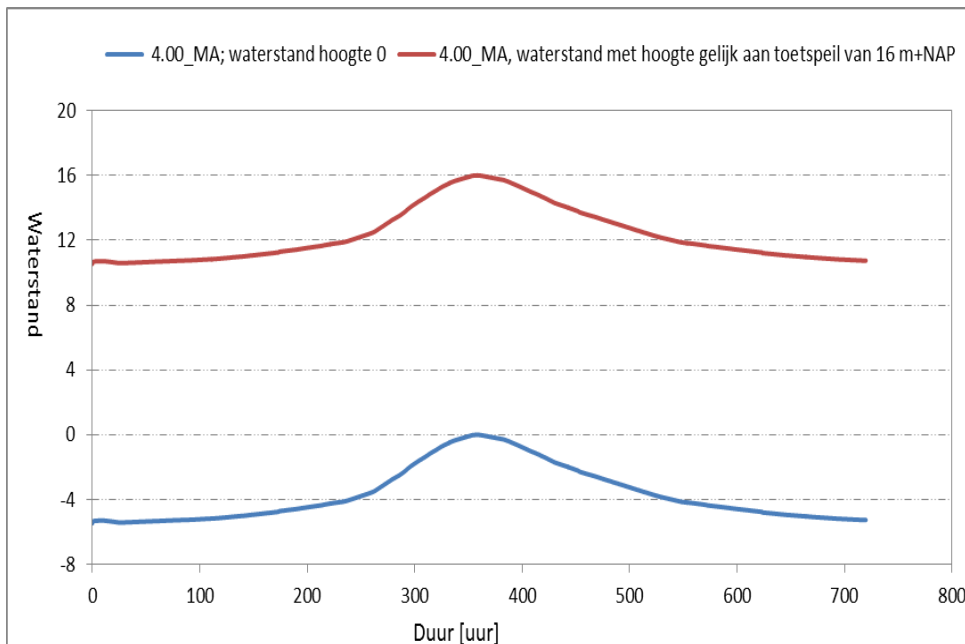
Tabel 6.1 Deelgebieden Maas

Deelgebied	Locaties
1	Alle locaties die bovenstrooms van locatie 84.00_WA liggen en tussen 104.00_WA t/m 119.00_WA
2	Locaties 84.00_WA t/m 104.00_WA
3	Locaties 120.00_WA t/m 144.00_WA
4	Locaties 150.00_WA t/m 180.00_WA
5	Locaties 180.00_WA t/m 220.00_WA
6	Locaties 220.00_WA t/m 235.00_WA

6.2.1 Waterstandsverloop deelgebied 1

Voor dit gebied bestaat het waterstandsverloop uit het werkelijke waterstandsverloop zoals volgt uit de productieberekeningen. Het waterstandsverloop zal pas vastgesteld worden zodra de waterstand bij de normfrequentie beschikbaar is. Het waterstandsverloop met hoogte 0 m zal dan opgetild worden naar een tijdsverloop met piekwaarde gelijk aan de waterstand bij de normfrequentie.

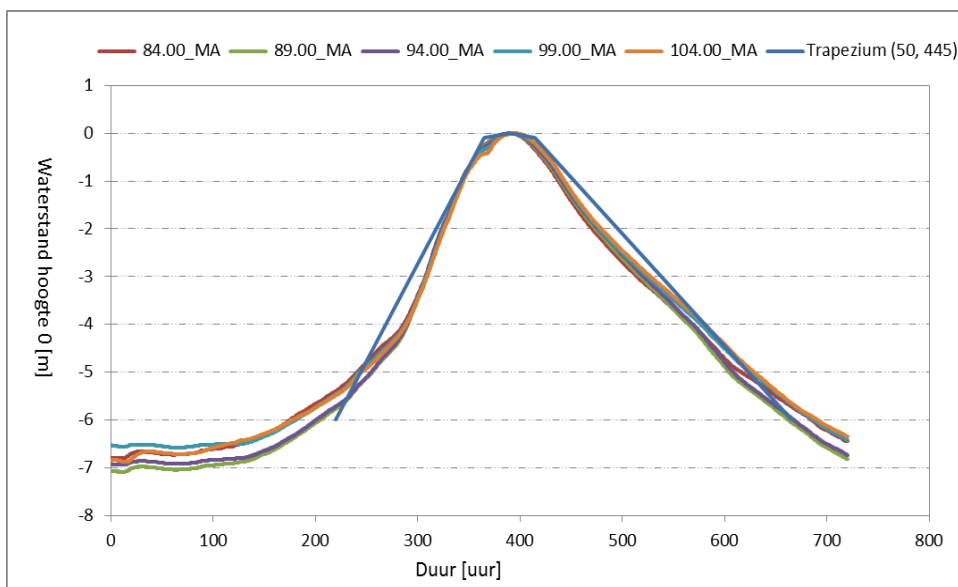
Figuur 6.1 illustreert een voorbeeld voor locatie 4.00_WA. Op basis van het waterstandsverloop met hoogte 0 m is voor een fictieve waterstand van 16 m+NAP het bijbehorende waterstandsverloop geconstrueerd. Dit kan omdat de hoogte van de afvoer geen effect heeft op de vorm van het waterstandsverloop.



Figuur 6.1 Voorbeeld waterstandsverloop locatie 4.00_WA voor een fictieve waterstand van 16 m+NAP. Blauwe lijn is waterstand hoogte 0 m en rode lijn is waterstandsverloop met hoogte gelijk aan waterstand van 16 m+NAP.

6.2.2 Waterstandsverloop deelgebied 2

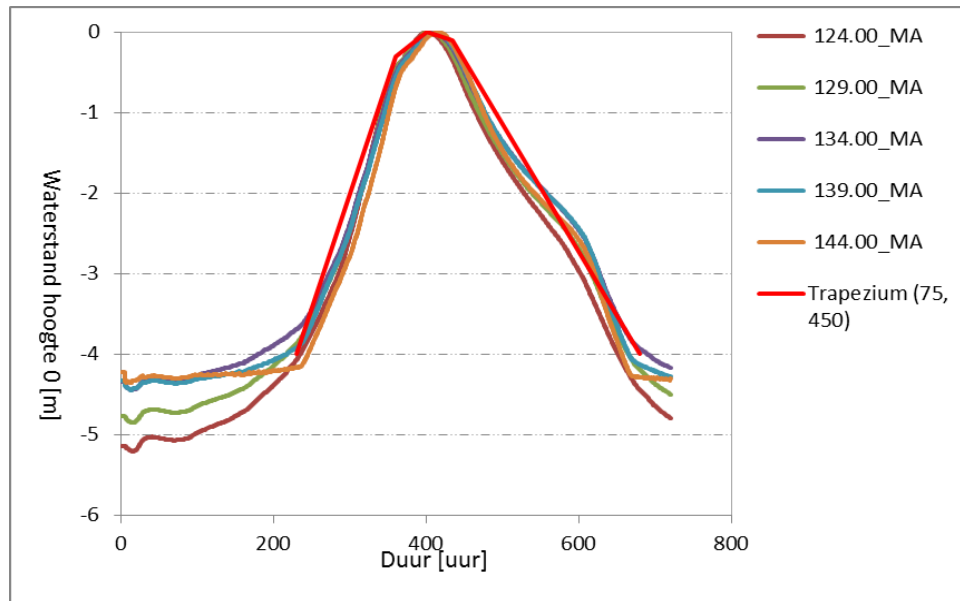
In deelgebied 2 is het waterstandsverloop uniform. Het waterstandsverloop in dit gebied laat zich goed benaderen door een geschematiseerd trapeziumverloop zoals afgebeeld in Figuur 6.2. Het trapezium heeft op het niveau van -6 m een basisduur van 445 uur (ca. 18,5 dagen) en een topduur van 50 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 170 uur en van de achterflank 275 uur. Rondom de top stijgt de waterstand gedurende 25 uur met 0,2 m en daarna eveneens gedurende 25 uur met 0,2 m.



Figuur 6.2 Geschematiseerd waterstandsverloop deelgebied 2 van de Maas door trapeziumverloop met basisduur op niveau -6 m van 445 uur (ca. 18,5 dag) en topduur van 50 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 170 uur en van de achterflank 275 uur. De waterstand stijgt van het niveau van -0,2 m tot het niveau van 0 m (piekwaarde) in 25 uur en daalt daarna in eveneens 25 uur tot het niveau van -0,2 m.

6.2.3 Waterstandsverloop deelgebied 3

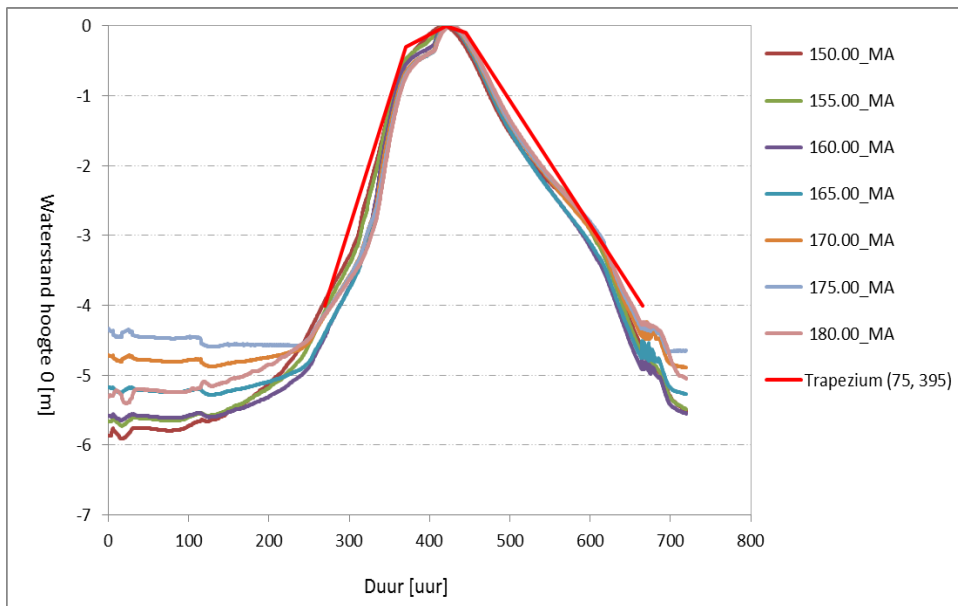
Analoog aan deelgebied 2, laat het waterstandsverloop in deelgebied 3 zich goed benaderen door een trapeziumverloop. Het trapeziumverloop is afgebeeld in Figuur 6.3, en heeft een basisduur op het niveau van -4 m van 450 uur en een topduur van 75 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 170 uur en van de achterflank 280 uur. Rondom de top stijgt de waterstand gedurende 40 uur met 0,3 m en daarna gedurende 35 uur met 0,1 m.



Figuur 6.3 Geschematiseerd waterstandsverloop deelgebied 3. Trapeziumverloop heeft basisduur op niveau -4 m van 450 uur. De totale duur van de voorflank is 170 uur en van de achterflank 280 uur. De duur van het niveau van -0,3 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 40 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 35 uur. De totale duur van de voorflank is 170 uur en van de achterflank is 280 uur.

6.2.4 Waterstandsverloop deelgebied 4

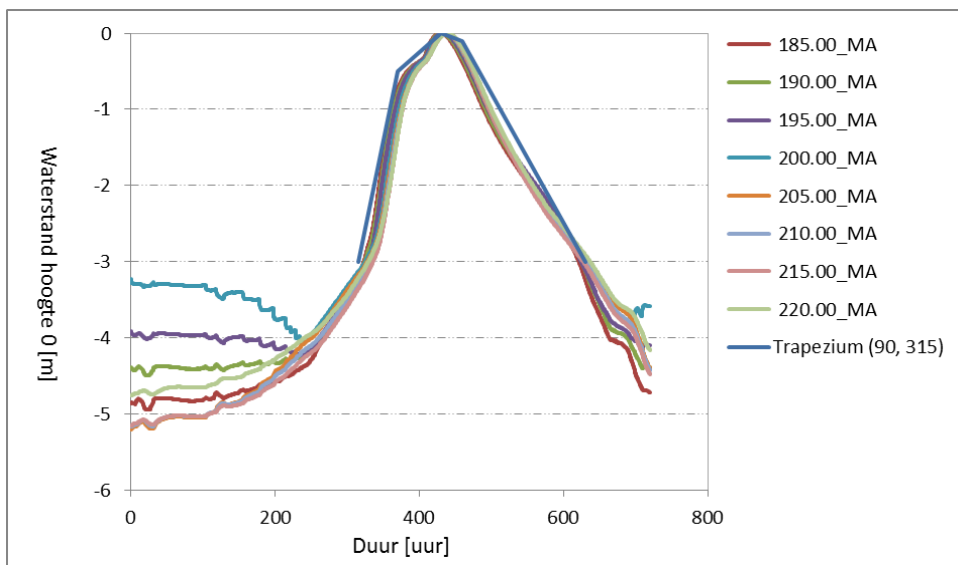
De schematisatie door een trapeziumverloop voor gebied 4 is weergegeven in Figuur 6.4. Het trapeziumverloop heeft een basisduur op het niveau van -4 m van 395 uur en een topduur van 75 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 150 uur en van de achterflank 245 uur. Rondom de top stijgt de waterstand van in 50 uur van het niveau -0,3 tot de piekwaarde van 0 m, en daalt daarna van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m in 25 uur.



Figuur 6.4 Geschematiseerd waterstandsverloop deelgebied 4. Het trapeziumverloop heeft een basisduur van 395 uur op het niveau -4 m en een topduur van 75 uur. De duur van het niveau van -0,3 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 50 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 25 uur. De totale duur van de voorflank is 150 uur en van de achterflank is 245 uur.

6.2.5 Waterstandsverloop deelgebied 5

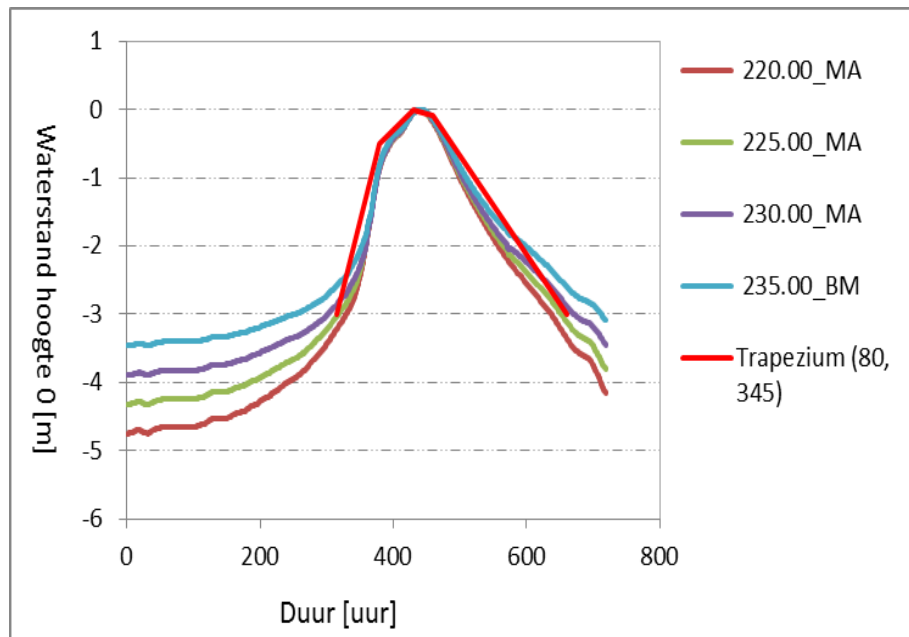
Het geschematiseerde tijdsverloop voor deelgebied 5 is afgebeeld in Figuur 6.5. Het trapeziumverloop heeft een basisduur op het niveau van -3 m van 315 uur en een topduur van 90 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 115 uur en van de achterflank 200 uur. Rondom de top stijgt de waterstand in 60 uur van het niveau -0,5 tot de piekwaarde van 0 m, en daalt daarna van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m in 30 uur.



Figuur 6.5 Geschematiseerd waterstandsverloop voor deelgebied 5. Trapeziumverloop met duur op het niveau -3 van 315 uur en topduur van 90 uur. De duur van het niveau van -0,5 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 60 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 30 uur. De totale duur van de voorflank is 115 uur en van de achterflank is 200 uur.

6.2.6 Waterstandsverloop deelgebied 6

Het waterstandsverloop in deelgebied 6 laat zich goed benaderen door een trapeziumverloop. Het trapezium is weergegeven in Figuur 6.6. Het trapeziumverloop heeft een basisduur op het niveau van -3 m van 345 uur en een topduur van 80 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 115 uur en van de achterflank 230 uur. Rondom de top stijgt de waterstand in 65 uur van het niveau -0,3 tot het niveau van 0 m (de piekwaarde), en daalt daarna tot het niveau van -0,1 m in 30 uur.



Figuur 6.6 Geschematiseerd waterstandsverloop voor deelgebied 6. Trapeziumverloop met duur op het niveau -3 van 345 uur en topduur van 80 uur. De duur van het niveau van -0,3 m tot de piekwaarde van 0 m bedraagt 65 uur en de duur van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m bedraagt 30 uur. De totale duur van de voorflank is 115 uur en van de achterflank is 230 uur.

7 Samenvatting en conclusies

In het kader van WTI-2017 worden voor verscheidene watersystemen nieuwe hydraulische randvoorwaarden bepaald. Onderdeel daarvan is het tijdsverloop van de waterstanden bij de waterstand bij de normfrequentie. De waterstandsverlopen worden gebruikt voor het toetsen op faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende hoge waterstanden van belang zijn, zoals macro-instabiliteit binnenwaarts en piping. Een van de watersystemen waarvoor waterstandsverlopen bepaald zijn, betreft het bovenrivierengebied: Rijntakken en Maas. Het doel van het onderhavige rapport is het vaststellen het waterstandsverloop behorende bij de waterstand bij de normfrequentie uit WTI-2017 voor alle locatie langs de Rijntakken en de Maas. De in dit rapport vastgestelde waterstandsverlopen zullen als invoer gelden voor de reeds bestaande tool om waterstandsverlopen te visualiseren.

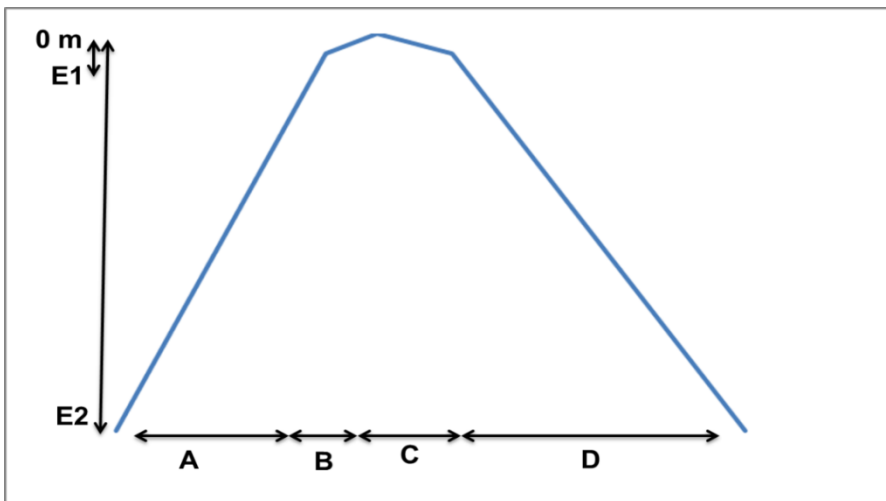
De tijdreeksen van de waterstand uit de productieberekeningen Rijntakken en Maas zijn geanalyseerd. De resultaten van 3 afvoergolven zijn hierbij beschouwd. Het gaat om afvoergolven met hoogtes die overeenkomen of dicht bij een van de (nieuwe) veiligheidsnormen liggen. Voor de Rijn zijn afvoergolven beschouwd met hoogtes 13.000, 16.000 en 17.000 m³/s. Voor de Maas betreft het de afvoergolven met hoogte 3.394, 3.950 en 4.600 m³/s. Er zijn in totaal 120 locaties in de as van de rivier onderzocht: 70 locaties langs de Rijntakken en 50 locaties langs de Maas. De onderlinge afstand bedraagt ca. 5 km.

Om de vorm van het waterstandsverloop en het effect van de ruimtelijke variabiliteit goed in beeld te krijgen zijn telkens waterstandsverlopen met werkelijke hoogtes en hoogte nul beschouwd. In dit laatste geval is de waterstand op elk niveau verminderd met het maximum van de waterstand; op deze manier ontstaat een waterstandverloop met hoogte 0 m zodat waterstandsverlopen voor verschillende locaties goed met elkaar kunnen worden vergeleken.

Uit de uitgevoerde analyse is gebleken dat de hoogte van de afvoergolf nauwelijks effect heeft op de vorm van het waterstandsverloop. Dit geldt voor zowel de Rijn als de Maas. In de benedenstroomse richting treedt topvervlakking op, waardoor het tijdsverloop breder wordt. Het grootste effect van topvervlakking treedt met name langs de IJssel en het bovenstroomse deel van de Maas. Verder blijkt dat het waterstandsverloop op alle riviertakken met uitzondering van het benedenstroomse deel van de Lek en het bovenstroomse deel van de Maas zich goed laat benaderen door een trapeziumverloop. Dit trapeziumverloop is afgebeeld in Figuur 7.1. De parameters van het trapeziumverloop hangen af van de riviertak.

Met uitzondering van het benedenstroomse deel van de Lek bevat Tabel 7.1 de parameters van het trapeziumverloop voor de waterstand langs de Rijntakken. Het waterstandsverloop voor benedenstroomse locaties van de Lek kan worden geconstrueerd uit het door het tijdsverloop met piekwaarde 0 m op te tillen naar de waterstand bij de normfrequentie.

De waterstandsverlopen in dit rapport zijn gebaseerd op de resultaten uit de productieberekeningen. Deze zijn gebaseerd op de gemiddelde golfvormen van de Rijn en de Maas die volgen uit GRADE. Onzekerheden in de vorm zijn hierbij niet beschouwd. Dit betekent dat bij de afleiding van de waterstandsverlopen in dit rapport de onzekerheid in de afvoergolfvormen niet is beschouwd. Onzekerheden (model- en statistische onzekerheid) worden in de waterstanden bij de normfrequenties verdisconteerd. De waterstandsverlopen worden aan deze waterstanden gekoppeld.



Figuur 7.1 Standaard trapeziumverloop voor het schematiseren van waterstandsverlopen.

Tabel 7.1 Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Rijntakken.

Riviertak Rijn	Niveau E1 [m]	Niveau E2 [m]	Duur [uur]			
			A	B	C	D
Bovenrijn	-0,2	-6	200	46	52	305
Pannerdense Kop	-0,2	-4	164	52	44	310
Waal	-0,2	-3,5	165	66	66	285
Lek bovenstrooms van locatie 962.00_LE	-0,2	-3,5	100	50	50	250
Lek benedenstrooms van locatie 962.00_LE	'Werkelijk' waterstandsverloop uit productieberekeningen					
Neder-Rijn bovenstrooms van locatie 901.00_NR	-0,2	-4	180	50	50	320
Neder-Rijn benedenstrooms van locatie 901.00_IJ	-0,2	-4	165	55	55	305
IJssel bovenstrooms van locatie 940.00_IJ	-0,2	-3	140	50	80	270
IJssel benedenstrooms van locatie 940.00_IJ	-0,2	-2,5	140	50	80	270

De Maas is ingedeeld in 6 deelgebieden; deze deelgebieden zijn weergegeven in Tabel 7.2. In deelgebied 1 beïnvloedt de topvervlakking de vorm van het waterstandsverloop. Het waterstandsverloop voor dit gebied wordt analoog aan het benedenstroomse deel van de Lek geconstrueerd uit het waterstandsverloop met hoogte 0 m.

Tabel 7.2 Indeling Maas in 6 deelgebieden

Deelgebied	Locaties
1	Alle locaties die bovenstrooms van locatie 84.00_WA liggen en tussen 104.00_WA t/m 119.00_WA
2	Locaties 84.00_WA t/m 104.00_WA
3	Locaties 120.00_WA t/m 144.00_WA
4	Locaties 150.00_WA t/m 180.00_WA
5	Locaties 180.00_WA t/m 220.00_WA
6	Locaties 220.00_WA t/m 235.00_WA

Tabel 7.3 Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Maas

Deelgebied Maas	Niveau E1 [m]	Niveau E2 [m]	Duur [uur]			
			A	B	C	D
1	'Werkelijk' waterstandsverloop uit productieberekeningen					
2	(-0,1; -0,1)	-6	145	25	25	250
3	(-0,3; -0,1)	-4	130	40	35	245
4	(-0,3; -0,1)	-3,5	100	50	25	220
5	(-0,5; -0,1)	-3	55	60	30	170
6	(-0,3; -0,1)	-3	65	50	30	200

Referenties

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

Chbab, E.H., 2015. Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Waterstandsverlopen kustgebieden. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0003. Delft 2015.

Chbab, E.H. en Eilander, D. 2015. Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-0007. Delft, 2015.

Chbab, E.H. en Groenweg, J. 2015. Modelonzekerheid belastingen. Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0007. Delft 2015.

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

ENW, 2007. Technisch Rapport ontwerpbelastingen voor het rivierengebied. Expertise Netwerk voor de waterkeringen (ENW), 2007.

HKV, 1999. Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Maas bij Borgharen. D. Klopstra, N. Vrisou van Eck. HKV Lijn in water, maart 1999.

HKV, 2009. Afvoergolven Rijn en Maas in het kader van WTI-2011. Rapport PR1699. M.T. Duits. HKV, 2009.

Hegnauer, M., Beersma, J.J., Van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A., Passchier, R.H., 2014. Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0. Deltares report 1209424-004-ZWS-0018, Delft, The Netherlands.

Passchier, R., Boogaard, H.J. van den, Buishand, A., Beersma, J. Hegnauer, M. 2014, GRADE final report, Deltares rapport, Delft Nederland (CONCEPT, binnenkort beschikbaar)

Prinsen, G., den Boogaard, H en Hegnauer, M. 2015. Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010-ZWS-0001. Delft

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

RWS, 2006. Hydraulische randvoorwaarden HR-2006

RWS-RIZA, 2001. Hydraulische randvoorwaarden 2001: maatgevende afvoeren Rijn en Maas. RIZA rapport 2002.014, oktober 2001

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

A Dijktrajecten en normen Limburgse Maas

DIJKRING	DIJKTRAJECT	LENGTE_TRJ	Norm
87	87-1	5473.40	1:300
54	54-1	12209.04	1:1000
55	55-1	7923.39	1:1000
56	56-1	2920.20	1:300
57	57-1	1831.49	1:300
58	58-1	1733.83	1:300
59	59-1	6220.47	1:300
60	60-1	5664.09	1:300
62	61-1	7104.83	1:300
63	63-1	4391.95	1:300
64	64-1	1787.91	1:300
65	65-1	5102.64	1:300
66	66-1	1261.22	1:300
67	67-1	692.90	1:300
68	68-1	10042.21	1:1000
68	68-2	4808.47	1:300
69	69-1	4567.47	1:1000
70	70-1	4789.30	1:300
71	71-1	964.46	1:300
72	72-1	146.57	1:300
73	73-1	1185.27	1:300
74	74-1	2170.36	1:300
75	75-1	1270.41	1:300
76	76-1	2740.63	1:300
76	76-2	1539.69	1:300
76a	76a-1	1741.14	1:300
77	77-1	8414.84	1:300
80	80-1	1387.00	1:300
81	81-1	13925.19	1:300
82	82-1	810.68	1:300
84	83-1	15921.30	1:300
85	85-1	270.52	1:300
86	86-1	1562.05	1:300
88	88-1	2688.53	1:300
89	89-1	692.92	1:300
90	90-1	6598.05	1:3000
91	91-1	3483.66	1:300
92	92-1	3381.44	1:300
93	93-1	2598.78	1:1000
94	94-1	888.06	1:300
95	95-1	1078.58	1:300
79	79-1	7875.67	1:300
78	78-1	9337.41	1:300