



Vlaanderen
is wetenschap

20_032_1
WL rapporten

Slim stuwen – fase 3

Sturing stuwen, vispassages en turbines Bovenschelde

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Slim stuwen – fase 3

Sturing stuwen, vispassages en turbines Bovenschelde

Vanderkimpen, P.; Pereira, F.; Visser, K.P.; Viaene, P.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2023
D/2023/3241/070

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vanderkimpfen, P.; Pereira, F.; Visser, K.P.; Viaene, P. (2023). Slim stuwen – fase 3: Sturing stuwen, vispassages en turbines Bovenschelde. Versie 4.0. WL Rapporten, 20_032_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

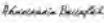
Opdrachtgever:	DVW-aRW	Ref.:	WL2023R20_032_1
Trefwoorden (3-5):	Bovenschelde, stuwen, vispassages, waterkrachtcentrales		
Kennisdomeinen:	Waterbeheer > hydraulica > hydrodynamische modellen > numerieke modellering Waterbouwkundige constructies > stuwen > hydraulisch ontwerp > numerieke modellering Waterbouwkundige constructies > vispassages > vispasseerbaarheid > numerieke modellering		
Tekst (p.):	110	Bijlagen (p.):	36
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Vanderkimpfen, P.; Pereira, F.; Visser K.P.; Viaene, P.
------------	---

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Pereira, F.	Getekend door: Fernando Pereira (Signat) Getekend op: 2023-03-23 08:47:44 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 
	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2023-03-07 14:26:57 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 
	Viaene, P.	Getekend door: Peter Viaene (Signature) Getekend op: 2023-03-07 13:43:48 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 
Projectleider:	Vanderkimpfen, P.	Getekend door: Paul Vanderkimpfen (Sign) Getekend op: 2023-03-07 13:35:03 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2023-03-07 13:49:58 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed 
-----------------	---------------	---



Abstract

Het voorliggende rapport maakt deel uit van de derde fase van het project “slim stuwen”. In deze deelstudie wordt onderzocht hoe de bestaande, geplande en eventueel aanvullende kunstwerken langsheen de Bovenschelde zich zouden gedragen in het geval van een lokale sturing. De kunstwerken op elke site worden daarbij gestuurd op basis van algoritmes die enkel gebruik maken van metingen op of nabij de eigen site.

De studie werd uitgevoerd in drie stappen. In een eerste stap werd het gedrag van de vispassages en de eventuele turbines geanalyseerd. De stuwen werden daarbij voorzien van een zeer eenvoudig sturingsalgoritme. In een tweede stap werd het gedrag van de stuwen onderzocht. De overige kunstwerken werden daarbij buiten beschouwing gelaten. In de derde en laatste stap werden alle kunstwerken opnieuw geactiveerd en werd de onderlinge interactie bestudeerd. Doorheen de volledige studie wordt enkel gekeken naar het gedrag bij lage en middelhoge afvoeren, waarbij geen overstromingen optreden.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	IX
1 Inleiding	1
2 Studiegebied	2
3 Gegevens	3
3.1 Hydrometrie	3
3.2 Stuwen.....	3
3.3 Sluizen.....	4
3.4 Vispassages.....	5
3.5 Vijzels.....	6
4 Model.....	7
4.1 Software	7
4.2 Opbouw	7
4.3 Randvoorwaarden	8
5 Vispassages en turbines.....	9
5.1 Methodologie	9
5.1.1 Modelvariant	9
5.1.2 Scenario's.....	9
5.1.3 Sturing.....	9
5.1.4 Controleberekening.....	11
5.1.5 Analyse.....	11
5.2 Resultaten.....	11
5.2.1 Kengetallen.....	11
5.2.2 Kerkhove.....	12
5.2.3 Oudenaarde.....	15
5.2.4 Asper.....	18
5.2.5 Bespreking	21
5.3 Conclusies en aanbevelingen	21
6 Stuwen.....	22

6.1	Methodologie	22
6.1.1	Modelvariant	22
6.1.2	Scenario's.....	22
6.1.3	Sturing.....	22
6.1.4	Stabiliteit lokale sturing op waterpeil.....	23
6.1.5	Toetsing lokale sturing op waterpeil	24
6.1.6	Gevoeligheidsanalyse	25
6.2	Resultaten.....	26
6.2.1	Stabiliteit lokale sturing op waterpeil.....	26
6.2.2	Toetsing lokale sturing op waterpeil	27
6.2.3	Gevoeligheidsanalyse	65
6.3	Conclusies en aanbevelingen	76
7	Interactie	77
7.1	Methodologie	77
7.1.1	Modelvariant	77
7.1.2	Scenario's.....	77
7.1.3	Sturing.....	77
7.1.4	Analyse.....	77
7.2	Resultaten.....	78
7.2.1	Figuren	78
7.2.2	Synthetische gebeurtenissen.....	78
7.2.3	Historische gebeurtenissen	91
7.3	Conclusies en aanbevelingen	107
8	Samenvatting conclusies en aanbevelingen.....	108
8.1	Vispassages en turbines.....	108
8.2	Stuwen.....	108
8.3	Interactie	109
9	Referenties	110
Bijlage 1	Interactie – figuren reeks 1.....	B1
Bijlage 2	Interactie – figuren reeks 2.....	B19

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Hydrometrische gegevens	3
Tabel 2 – Afmetingen stuwen.....	4
Tabel 3 – Afmetingen sluizen	4
Tabel 4 – Schutverliezen en lekverliezen.....	5
Tabel 5 – Vispassages	6
Tabel 6 – Vijzels	6
Tabel 7 – Kerkhove – 2015	12
Tabel 8 – Kerkhove – 2016	12
Tabel 9 – Kerkhove – 2017	12
Tabel 10 – Kerkhove – zomer 2015	12
Tabel 11 – Kerkhove – zomer 2016	13
Tabel 12 – Kerkhove – zomer 2017	13
Tabel 13 – Kerkhove – 2015 (controle)	13
Tabel 14 – Kerkhove – 2016 (controle)	13
Tabel 15 – Kerkhove – 2017 (controle)	14
Tabel 16 – Kerkhove – zomer 2015 (controle)	14
Tabel 17 – Kerkhove – zomer 2016 (controle)	14
Tabel 18 – Kerkhove – zomer 2017 (controle)	14
Tabel 19 – Oudenaarde – 2015	15
Tabel 20 – Oudenaarde – 2016	15
Tabel 21 – Oudenaarde – 2017	15
Tabel 22 – Oudenaarde – zomer 2015	15
Tabel 23 – Oudenaarde – zomer 2016	16
Tabel 24 – Oudenaarde – zomer 2017	16
Tabel 25 – Oudenaarde – 2015 (controle)	16
Tabel 26 – Oudenaarde – 2016 (controle)	16
Tabel 27 – Oudenaarde – 2017 (controle)	17
Tabel 28 – Oudenaarde – zomer 2015 (controle)	17
Tabel 29 – Oudenaarde – zomer 2016 (controle)	17
Tabel 30 – Oudenaarde – zomer 2017 (controle)	17
Tabel 31 – Asper – 2015	18
Tabel 32 – Asper – 2016	18

Tabel 33 – Asper – 2017	18
Tabel 34 – Asper – zomer 2015	18
Tabel 35 – Asper – zomer 2016	19
Tabel 36 – Asper – zomer 2017	19
Tabel 37 – Asper – 2015 (controle)	19
Tabel 38 – Asper – 2016 (controle)	19
Tabel 39 – Asper – 2017 (controle)	20
Tabel 40 – Asper – zomer 2015 (controle)	20
Tabel 41 – Asper – zomer 2016 (controle)	20
Tabel 42 – Asper – zomer 2017 (controle)	20
Tabel 43 – Parametersets	25

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Studiegebied	2
Figuur 2 – Hydrodynamisch model.....	7
Figuur 3 – Lengteprofielen bij constante afvoer	26
Figuur 4 – Looptijd en retentietijd.....	27
Figuur 5 – Trapvormige debietvariatie van 10 naar 20 m ³ /s.....	29
Figuur 6 – Trapvormige debietvariatie van 20 naar 10 m ³ /s.....	29
Figuur 7 – Trapvormige debietvariatie van 20 naar 30 m ³ /s.....	30
Figuur 8 – Trapvormige debietvariatie van 30 naar 20 m ³ /s.....	30
Figuur 9 – Trapvormige debietvariatie van 30 naar 50 m ³ /s.....	31
Figuur 10 – Trapvormige debietvariatie van 50 naar 30 m ³ /s.....	31
Figuur 11 – Trapvormige debietvariatie van 50 naar 100 m ³ /s.....	32
Figuur 12 – Trapvormige debietvariatie van 100 naar 50 m ³ /s.....	32
Figuur 13 – Trapvormige debietvariatie van 100 naar 150 m ³ /s.....	33
Figuur 14 – Trapvormige debietvariatie van 150 naar 100 m ³ /s.....	33
Figuur 15 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur	34
Figuur 16 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur	34
Figuur 17 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur	35
Figuur 18 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur	35
Figuur 19 – Debiet tijdens was van maart 2018.....	36
Figuur 20 – Waterpeil tijdens was van maart 2018.....	36
Figuur 21 – Klepstand tijdens was van maart 2018.....	37
Figuur 22 – Debiet tijdens droogweeperiode van april 2018	37
Figuur 23 – Waterpeil tijdens droogweeperiode van april 2018	38
Figuur 24 – Klepstand tijdens droogweeperiode van april 2018	38
Figuur 25 – Januari 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk.....	40
Figuur 26 – Januari 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	40
Figuur 27 – Februari 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk.....	41
Figuur 28 – Februari 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	41
Figuur 29 – Maart 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	42
Figuur 30 – Maart 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen.....	42
Figuur 31 – April 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk.....	43
Figuur 32 – April 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	43
Figuur 33 – Mei 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	44
Figuur 34 – Mei 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	44

Figuur 35 – Juni 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	45
Figuur 36 – Juni 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	45
Figuur 37 – Juli 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	46
Figuur 38 – Juli 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	46
Figuur 39 – Augustus 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	47
Figuur 40 – Augustus 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen.....	47
Figuur 41 – September 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	48
Figuur 42 – September 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen.....	48
Figuur 43 – Oktober 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk.....	49
Figuur 44 – Oktober 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	49
Figuur 45 – November 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk	50
Figuur 46 – November 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen	50
Figuur 47 – December 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk.....	51
Figuur 48 – December 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen.....	51
Figuur 49 – Januari 2019 – zonder zijlopen – daggemiddeld debiet Frankrijk.....	52
Figuur 50 – Januari 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	53
Figuur 51 – Januari 2019 – met zijlopen – debiet stuwen.....	53
Figuur 52 – Februari 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	54
Figuur 53 – Februari 2019 – met zijlopen – debiet stuwen.....	54
Figuur 54 – Maart 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	55
Figuur 55 – Maart 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	55
Figuur 56 – April 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	56
Figuur 57 – April 2019 – met zijlopen – debiet stuwen.....	56
Figuur 58 – Mei 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk.....	57
Figuur 59 – Mei 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	57
Figuur 60 – Juni 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk.....	58
Figuur 61 – Juni 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	58
Figuur 62 – Juli 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk.....	59
Figuur 63 – Juli 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	59
Figuur 64 – Augustus 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	60
Figuur 65 – Augustus 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	60
Figuur 66 – September 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	61
Figuur 67 – September 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	61
Figuur 68 – Oktober 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk.....	62
Figuur 69 – Oktober 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	62
Figuur 70 – November 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk.....	63
Figuur 71 – November 2019 – met zijlopen – debiet stuwen	63
Figuur 72 – December 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk	64

Figuur 73 – December 2019 – met zijlopen – debiet stuwen.....	64
Figuur 74 – Parameterset 0 (referentie) – synthetisch hydrogram.....	65
Figuur 75 – Parameterset 1 (met trend) – synthetisch hydrogram.....	66
Figuur 76 – Parameterset 2 (zonder rusttijd) - synthetisch hydrogram.....	66
Figuur 77 – Parameterset 3 (met langere rusttijd) - synthetisch hydrogram	67
Figuur 78 – Parameterset 4 (met kortere werktijd) - synthetisch hydrogram	67
Figuur 79 – Parameterset 5 (met kortere werktijd en zonder rusttijd) – synthetisch hydrogram.....	68
Figuur 80 – Parameterset 6 (met ruimere tolerantie voor waterpeil) - synthetisch hydrogram.....	68
Figuur 81 – Parameterset 0 (referentie) – maart 2018	69
Figuur 82 – Parameterset 1 (met trend) – maart 2018	69
Figuur 83 – Parameterset 2 (zonder rusttijd) – maart 2018.....	70
Figuur 84 – Parameterset 3 (met langere rusttijd) – maart 2018	70
Figuur 85 – Parameterset 4 (met kortere werktijd) – maart 2018.....	71
Figuur 86 – Parameterset 5 (met kortere werktijd en zonder rusttijd) – maart 2018	71
Figuur 87 – Parameterset 6 (met ruimere tolerantie voor waterpeil) – maart 2018.....	72
Figuur 88 – Parameterset 0 (referentie) – april 2018.....	72
Figuur 89 – Parameterset 1 (met trend) – april 2018.....	73
Figuur 90 – Parameterset 2 (zonder rusttijd) – april 2018	73
Figuur 91 – Parameterset 3 (met langere rusttijd) – april 2018.....	74
Figuur 92 – Parameterset 4 (met kortere werktijd) – april 2018	74
Figuur 93 – Parameterset 5 (met kortere werktijd en zonder rusttijd) – april 2018.....	75
Figuur 94 – Parameterset 6 (met ruimere tolerantie voor waterpeil) – april 2018	75
Figuur 95 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur - Kerkhove (reeks 1).....	79
Figuur 96 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Oudenaarde (reeks 1)	79
Figuur 97 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Asper (reeks 1).....	80
Figuur 98 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Kerkhove (reeks 1).....	80
Figuur 99 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Oudenaarde (reeks 1).....	81
Figuur 100 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Asper (reeks 1).....	81
Figuur 101 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Kerkhove (reeks 1)	82
Figuur 102 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Oudenaarde (reeks 1)	82
Figuur 103 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Asper (reeks 1).....	83
Figuur 104 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Kerkhove (reeks 1)	83
Figuur 105 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Oudenaarde (reeks 1)	84
Figuur 106 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Asper (reeks 1).....	84
Figuur 107 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Kerkhove (reeks 2).....	85
Figuur 108 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Oudenaarde (reeks 2).....	85
Figuur 109 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Asper (reeks 2).....	86
Figuur 110 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Kerkhove (reeks 2).....	86

Figuur 111 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Oudenaarde (reeks 2).....	87
Figuur 112 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Asper (reeks 2).....	87
Figuur 113 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Kerkhove (reeks 2).....	88
Figuur 114 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Oudenaarde (reeks 2).....	88
Figuur 115 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Asper (reeks 2).....	89
Figuur 116 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Kerkhove (reeks 2).....	89
Figuur 117 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Oudenaarde (reeks 2).....	90
Figuur 118 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Asper (reeks 2).....	90
Figuur 119 – Maart 2018 – Kerkhove (reeks 1).....	92
Figuur 120 – Maart 2018 – Oudenaarde (reeks 1).....	92
Figuur 121 – Maart 2018 – Asper (reeks 1).....	93
Figuur 122 – April 2018 – Kerkhove (reeks 1).....	93
Figuur 123 – April 2018 – Oudenaarde (reeks 1).....	94
Figuur 124 – April 2018 – Asper (reeks 1).....	94
Figuur 125 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	95
Figuur 126 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	95
Figuur 127 – Maart 2019 – Asper (reeks 1).....	96
Figuur 128 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	96
Figuur 129 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	97
Figuur 130 – Augustus 2019 – Asper (reeks 1).....	97
Figuur 131 – Maart 2018 – Kerkhove (reeks 2).....	98
Figuur 132 – Maart 2018 – Oudenaarde (reeks 2).....	98
Figuur 133 – Maart 2018 – Asper (reeks 2).....	99
Figuur 134 – April 2018 – Kerkhove (reeks 2).....	99
Figuur 135 – April 2018 – Oudenaarde (reeks 2).....	100
Figuur 136 – April 2018 – Asper (reeks 2).....	100
Figuur 137 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	101
Figuur 138 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	101
Figuur 139 – Maart 2019 – Asper (reeks 2).....	102
Figuur 140 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	102
Figuur 141 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	103
Figuur 142 – Augustus 2019 – Asper (reeks 2).....	103
Figuur 143 – Juli 2019 – Kerkhove (reeks 3).....	104
Figuur 144 – Juli 2019 – Oudenaarde (reeks 3).....	104
Figuur 145 – Juli 2019 – Asper (reeks 3).....	105
Figuur 146 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 3).....	105
Figuur 147 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 3).....	106
Figuur 148 – Augustus 2019 – Asper (reeks 3).....	106

Figuur 149 – Januari 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	B1
Figuur 150 – Januari 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B1
Figuur 151 – Januari 2019 – Asper (reeks 1)	B2
Figuur 152 – Februari 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B2
Figuur 153 – Februari 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B3
Figuur 154 – Februari 2019 – Asper (reeks 1)	B3
Figuur 155 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B4
Figuur 156 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 1)	B4
Figuur 157 – Maart 2019 – Asper (reeks 1)	B5
Figuur 158 – April 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B5
Figuur 159 – April 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B6
Figuur 160 – April 2019 – Asper (reeks 1)	B6
Figuur 161 – Mei 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	B7
Figuur 162 – Mei 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B7
Figuur 163 – Mei 2019 – Asper (reeks 1).....	B8
Figuur 164 – Juni 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	B8
Figuur 165 – Juni 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B9
Figuur 166 – Juni 2019 – Asper (reeks 1).....	B9
Figuur 167 – Juli 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	B10
Figuur 168 – Juli 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B10
Figuur 169 – Juli 2019 – Asper (reeks 1).....	B11
Figuur 170 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B11
Figuur 171 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 1)	B12
Figuur 172 – Augustus 2019 – Asper (reeks 1)	B12
Figuur 173 – September 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B13
Figuur 174 – September 2019 – Oudenaarde (reeks 1)	B13
Figuur 175 – September 2019 – Asper (reeks 1)	B14
Figuur 176 – Oktober 2019 – Kerkhove (reeks 1).....	B14
Figuur 177 – Oktober 2019 – Oudenaarde (reeks 1).....	B15
Figuur 178 – Oktober 2019 – Asper (reeks 1).....	B15
Figuur 179 – November 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B16
Figuur 180 – November 2019 – Oudenaarde (reeks 1)	B16
Figuur 181 – November 2019 – Asper (reeks 1).....	B17
Figuur 182 – December 2019 – Kerkhove (reeks 1)	B17
Figuur 183 – December 2019 – Oudenaarde (reeks 1)	B18
Figuur 184 – December 2019 – Asper (reeks 1)	B18
Figuur 185 – Januari 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	B19
Figuur 186 – Januari 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B19

Figuur 187 – Januari 2019 – Asper (reeks 2)	B20
Figuur 188 – Februari 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B20
Figuur 189 – Februari 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B21
Figuur 190 – Februari 2019 – Asper (reeks 2)	B21
Figuur 191 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B22
Figuur 192 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 2)	B22
Figuur 193 – Maart 2019 – Asper (reeks 2)	B23
Figuur 194 – April 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B23
Figuur 195 – April 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B24
Figuur 196 – April 2019 – Asper (reeks 2)	B24
Figuur 197 – Mei 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	B25
Figuur 198 – Mei 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B25
Figuur 199 – Mei 2019 – Asper (reeks 2).....	B26
Figuur 200 – Juni 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	B26
Figuur 201 – Juni 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B27
Figuur 202 – Juni 2019 – Asper (reeks 2).....	B27
Figuur 203 – Juli 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	B28
Figuur 204 – Juli 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B28
Figuur 205 – Juli 2019 – Asper (reeks 2).....	B29
Figuur 206 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B29
Figuur 207 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 2)	B30
Figuur 208 – Augustus 2019 – Asper (reeks 2)	B30
Figuur 209 – September 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B31
Figuur 210 – September 2019 – Oudenaarde (reeks 2)	B31
Figuur 211 – September 2019 – Asper (reeks 2)	B32
Figuur 212 – Oktober 2019 – Kerkhove (reeks 2).....	B32
Figuur 213 – Oktober 2019 – Oudenaarde (reeks 2).....	B33
Figuur 214 – Oktober 2019 – Asper (reeks 2).....	B33
Figuur 215 – November 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B34
Figuur 216 – November 2019 – Oudenaarde (reeks 2)	B34
Figuur 217 – November 2019 – Asper (reeks 2).....	B35
Figuur 218 – December 2019 – Kerkhove (reeks 2)	B35
Figuur 219 – December 2019 – Oudenaarde (reeks 2)	B36
Figuur 220 – December 2019 – Asper (reeks 2)	B36

1 Inleiding

Het voorliggende rapport maakt deel uit van de derde fase van het project “slim stuwen”. In deze derde fase wordt onderzocht hoe de kunstwerken langsheen een waterloop zich gedragen in het geval van een lokale sturing. De kunstwerken op elke site worden daarbij gestuurd op basis van algoritmes die enkel gebruik maken van metingen op of nabij de eigen site.

Dit rapport is het derde van drie rapporten en behandelt de kunstwerken langsheen de Bovenschelde. De kunstwerken langsheen de Dender en de Leie worden besproken in het eerste en het tweede rapport.

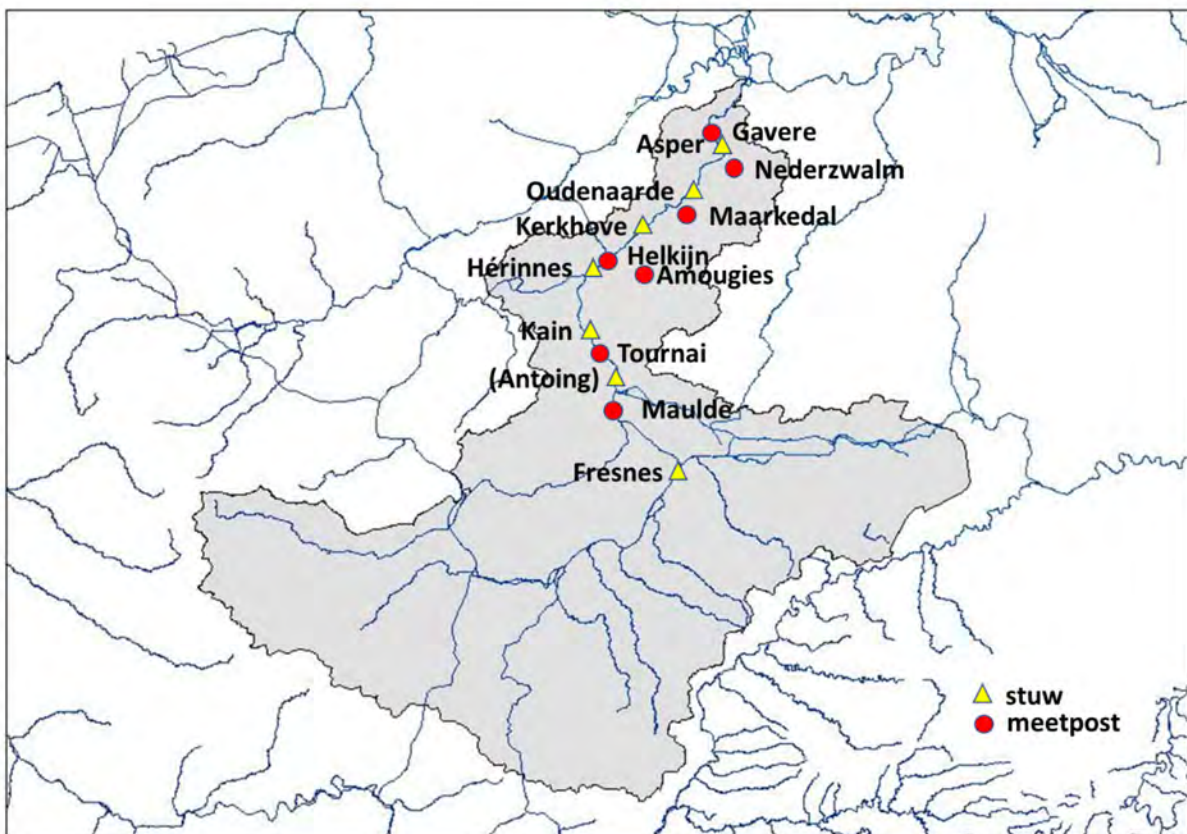
De studie werd uitgevoerd in drie stappen. In een eerste stap werd het gedrag van de vispassages en de eventuele turbines geanalyseerd. De stuwen werden daarbij voorzien van een zeer eenvoudig sturingsalgoritme. In een tweede stap werd het gedrag van de stuwen onderzocht. De overige kunstwerken werden daarbij buiten beschouwing gelaten. In de derde en laatste stap werden alle kunstwerken opnieuw geactiveerd en werd de onderlinge interactie bestudeerd. Doorheen de volledige studie wordt enkel gekeken naar het gedrag bij lage en middelhoge afvoeren, waarbij geen overstromingen optreden.

Tijdens de uitvoering van de studie werden de resultaten gerapporteerd in een vijftal tussentijdse memo's. Dit rapport werd samengesteld door het samenvoegen van delen van deze tussentijdse memo's. De grotendeels gemeenschappelijke delen worden behandeld in hoofdstukken 2 (studiegebied), 3 (gegevens) en 4 (model). De analyses en resultaten van de memo “sturing vispassages en turbines Bovenschelde” worden behandeld in hoofdstuk 5 (vispassages en turbines). De analyses en resultaten van de memo's “sturing stuwen Bovenschelde”, “sturing stuwen Bovenschelde – aanvulling 1” en “sturing stuwen Bovenschelde – aanvulling 2” werden gebundeld in hoofdstuk 6 (stuwen). De analyses en resultaten van de memo “interactie stuwen, vispassages en turbines Bovenschelde” worden beschreven in hoofdstuk 7 (interactie). Hoofdstukken 5, 6 en 7 eindigen met conclusies en aanbevelingen. Deze worden nog eens samengevat in hoofdstuk 8 (samenvatting conclusies en aanbevelingen).

2 Studiegebied

Het studiegebied wordt getoond in Figuur 1. Het omvat de Haut-Escaut en Bovenschelde vanaf het stuw-sluiscomplex in Fresnes-sur-Escaut (Frankrijk) tot aan de debietmeter in Gavere. In dit gebied bevinden zich de stuw-sluiscomplexen van Kain, Hérinnes, Kerkhove, Oudenaarde en Asper. Het voormalige stuw-sluiscomplex van Antoing is buiten gebruik.

Figuur 1 – Studiegebied



3 Gegevens

3.1 Hydrometrie

De gebruikte hydrometrische gegevens worden samengevat in Tabel 1. Aangezien er geen recente gegevens voor de debietmeter in Maulde beschikbaar waren, werd gebruik gemaakt van de gegevens van de debietmeter in Tournai.

Tabel 1 – Hydrometrische gegevens

Station	Waterloop	Locatie	Beheerder	Variabele
3282	Haut-Escaut	Tournai	SPW-DGO2	Q
bos05m	Bovenschelde	Helkijn	HIC	Q
L5412	Rhosnes	Amougies	SPW-DGO3	Q
LS06_347	Molenbeek	Etikhove	VMM	Q
L06_342	Zwalmbeek	Nederzwalm	VMM	Q
bos02a	Bovenschelde	Gavere	HIC	Q en H

3.2 Stuwen

De nieuwe stuwen in Kain en Hérinnes bestaan uit twee kleppen. De nieuwe stuwen in Kerkhove, Oudenaarde en Asper bestaan uit twee segmenten met een regelklep bovenaan. De afmetingen van de nieuwe stuwen in Kain en Hérinnes werden afgeleid uit ontwerpplannen, ter beschikking gesteld door SPW-DGO2. De afmetingen van de nieuwe stuwen in Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden afgeleid uit ontwerpplannen, ter beschikking gesteld door DVW. De oude stuwen in Kerkhove, Oudenaarde en Asper bestaan nog, maar zullen op termijn afgebroken worden. Daarom werden ze niet meer in de analyse betrokken. De minimale en maximale standen van de beweegbare onderdelen van de stuwen werden geschat op basis van de beschikbare plannen. De gebruikte eigenschappen worden samengevat in Tabel 2.

Tabel 2 – Afmetingen stuwen

Stuw	Streefpeil (mTAW)	Breedte (m)	Min (mTAW)	Max (mTAW)
Kain	15,00	2 x 12,0	11,30	15,30
Hérinnes	13,40	2 x 12,0	9,42	13,70
Kerkhove	11,46	segment: 2 x 12,5 klep: 2 x 10,3	segment: 6,96 klep: 10,46	segment: 12,36 klep: 11,66
Oudenaarde	10,11	segment: 2 x 12,5 klep: 2 x 10,3	segment: 5,61 klep: 9,11	segment: 11,02 klep: 10,31
Asper	8,25	segment: 2 x 12,5 klep: 2 x 10,3	segment: 3,75 klep: 7,25	segment: 8,82 klep: 8,45

3.3 Sluizen

De afmetingen van de geplande nieuwe sluizen in Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden overgenomen uit het project MER (Antea, 2011). Over de afmetingen van de nieuwe sluizen in Kain en Hérinnes was nog geen informatie beschikbaar. De afmetingen van de nieuwe sluizen in Wallonië werden gelijk verondersteld aan de afmetingen van de sluizen in Vlaanderen. De gebruikte afmetingen worden samengevat in Tabel 3.

Tabel 3 – Afmetingen sluizen

Sluis	Lengte (m)	Breedte (m)	Verval (m)
Kain	106 + 140 = 246	12,5	1,70
Hérinnes	106 + 140 = 246	12,5	1,84
Kerkhove	106 + 140 = 246	12,5	1,35
Oudenaarde	106 + 140 = 246	12,5	1,86
Asper	106 + 140 = 246	12,5	2,64

De huidige schutverliezen voor de sluizen van Kain en Hérinnes werden geschat op basis van trafiekgegevens voor de periode 2009 t.e.m. 2019, ter beschikking gesteld door SPW-DGO2. De beschikbare cijfers hebben enkel betrekking op de beroepsvaart.

De huidige schutverliezen voor de sluizen van Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden geschat op basis van trafiekgegevens, ter beschikking gesteld door DVW. De pleziervaart werd geraamd op basis van de “Overzichten pleziervaart” voor de periode 2010 t.e.m. 2019. De beroepsvaart werd geraamd op basis van de jaarboeken met de “Statistiek van het vervoer op de waterwegen beheerd door Waterwegen en Zeekanaal” voor de periode 2010 t.e.m. 2016 en gegevens van RIS Evergem voor de periode 2017 t.e.m. 2019.

De toekomstige schutverliezen voor de beroepsvaart door de nieuwe sluizen in Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden geraamd op basis van de trafiekprognose (projectalternatief 1, basisscenario) uit de MKBA (Tritel, 2010). De toekomstige schutverliezen voor de nieuwe sluizen in Kain en Hérinnes werden ruw geschat door te veronderstellen dat de toekomstige trafiek op beide locaties ongeveer gelijk zal zijn aan de toekomstige trafiek in Kerkhove. Voor de pleziervaart werden de cijfers voor de bestaande toestand behouden.

Voor de berekening van de schutverliezen door de pleziervaart (tijdens de zomermaanden) werd gebruik gemaakt van de trafiek tijdens de maanden juli en augustus en de afmetingen van de kleinste deelkolk. Voor de beroepsvaart (gedurende het volledige jaar) werd gebruik gemaakt van de trafiek gedurende het volledige jaar en de afmetingen van de volledige sluis. De resultaten worden samengevat in Tabel 4.

De lekverliezen werden geschat op basis van observaties op de nieuwe sluis op de Leie in Harelbeke. Daar bedragen ze slechts 0,06 m³/s. Aangezien de lekverliezen klein zijn in vergelijking met de schutverliezen, werden geen uitgebreide ramingen gemaakt voor de overige sluizen. In de plaats daarvan werden de lekverliezen voor alle sluizen gelijk gesteld aan die voor Harelbeke.

Tabel 4 – Schutverliezen en lekverliezen

Sluis	Pleziervaart (aantal/jul-aug)	Beroepsvaart (aantal/jaar)	Schutverlies (m ³ /s)	Lekverlies (m ³ /s)
Kain	269	13079	2,3	0,06
Hérinnes	269	13079	2,5	0,06
Kerkhove	269	13079	1,8	0,06
Oudenaarde	391	13079	2,6	0,06
Asper	418	13079	3,6	0,06

3.4 Vispassages

In Kain en Hérinnes werden telkens twee vispassages aangelegd één naast de nieuwe stuw en één naast de nieuwe waterkrachtcentrale. Het gaat overall om vertical slot passages met een constant toegevoegd debiet.

In Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden ook reeds vispassages aangelegd. In Oudenaarde en Asper werden nevengeulen aangelegd en in Kerkhove een V-vormige bekkentrap. Op geen van deze locaties werd een toegevoegd debiet toegepast. De eigenschappen werden overgenomen uit de ontwerpdocumenten.

Tabel 5 geeft een overzicht van de vispassages en hun eigenschappen.

Tabel 5 – Vispassages

Vispassage	Type	Debiet vispassage (m ³ /s)	Toegevoegd debiet (m ³ /s)
Kain 1	Vertical slot	0,7	2,5
Kain 2	Vertical slot	0,6	2,5
Hérinnes 1	Vertical slot	0,7	2,5
Hérinnes 2	Vertical slot	0,6	2,5
Kerkhove	Bekkentrap	2,3	nvt
Oudenaarde	Nevengeul	2,5	nvt
Asper	Nevengeul	2,5	nvt

3.5 Vijzels

In Kain en Hérinnes werden waterkrachtcentrales gebouwd, die bestaan uit drie vijzels. Elke vijzel verbruikt een debiet van 5 m³/s.

In Kerkhove, Oudenaarde en Asper zijn momenteel geen waterkrachtcentrales, maar men overweegt wel om deze hier alsnog te installeren. Een mogelijk type voor deze toekomstige centrales zouden vijzelturbines kunnen zijn, zoals al gerealiseerd op de Leie in Harelbeke. De centrale in Harelbeke bestaat uit twee vijzels en wordt momenteel getest. De vijzels kunnen als turbine (stroming van opwaarts naar afwaarts) en als pomp (stroming van afwaarts naar opwaarts) ingezet worden. De eigenschappen werden overgenomen uit de ontwerpdocumenten.

Indien één vijzel ingezet wordt als turbine, dan verbruikt hij een debiet van 2,31 m³/s. Indien beide vijzels ingezet worden als turbine, dan verbruiken ze samen 4,5 m³/s. Indien de vijzels gebruikt worden als pomp, dan worden ze alternerend ingezet. Het pompdebiet van één vijzel (circa 2 m³/s) volstaat immers om de schutverliezen (in Harelbeke) te compenseren. In deze studie wordt enkel de turbinewerking beschouwd aangezien pompwerking alleen uitzonderlijk zal optreden bij extreme droogte. In dat geval zijn zowel de stuwen als de vispassage gesloten.

In één van de scenario's werd onderzocht of de installatie in Kerkhove, Oudenaarde en Asper van vijzels van hetzelfde type als in Harelbeke zinvol is. Tabel 6 geeft een overzicht van de eigenschappen van de vijzels.

Tabel 6 – Vijzels

Vijzel	Type	Debiet vijzel 1 (m ³ /s)	Debiet vijzel 2 (m ³ /s)	Debiet vijzel 3 (m ³ /s)
Kain	turbine	5,00	5,00	5,00
Hérinnes	turbine	5,00	5,00	5,00
Kerkhove	turbine / pomp	2,31	2,19	nvt
Oudenaarde	turbine / pomp	2,31	2,19	nvt
Asper	turbine / pomp	2,31	2,19	nvt

4 Model

4.1 Software

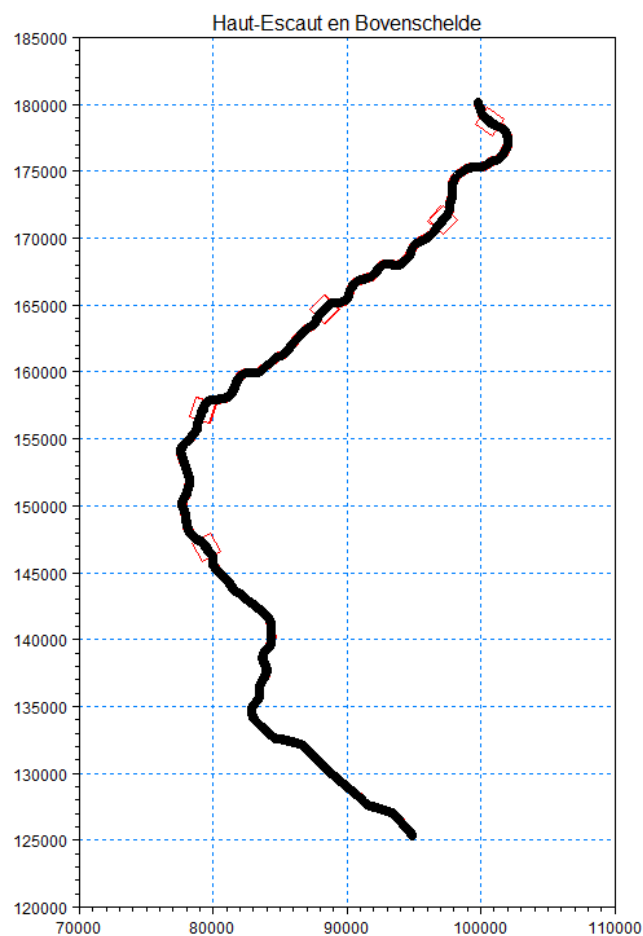
Het numerieke model werd opgebouwd met het softwarepakket Mike11 (versie 2017, SP2), ontwikkeld en verdeeld door het Danish Hydraulic Institute (DHI).

4.2 Opbouw

Het model van de Bovenschelde werd opgebouwd door het aanpassen en samenvoegen van bestaande modellen voor de Bovenschelde in Vlaanderen (Vanderkimpfen et al., 2019a) en de Haut-Escaut in Wallonië (Vanderkimpfen et al., 2020). Het gedeelte van de Haut-Escaut op Frans grondgebied werd sterk vereenvoudigd toegevoegd op basis van typeprofielen. Het nieuwe model bevat enkel de hoofdloop van de Haut-Escaut en de Bovenschelde. Zijlopen en overstromingsgebieden zijn niet opgenomen.

Figuur 2 toont de ruimtelijke uitgestrektheid van het gebruikte hydrodynamische model.

Figuur 2 – Hydrodynamisch model



4.3 Randvoorwaarden

De opwaartse en zijdelingse randvoorwaarden bestaan uit de gemeten debieten op de Bovenschelde en haar zijlopen (zie Tabel 1). De instroming vanuit onbemeten deelbekkens werd geschat door het herschalen van de meetreeksen van bemeten deelbekkens, op basis van de verhouding van de oppervlakte van de bemeten en de onbemeten deelbekkens.

De afwaartse randvoorwaarde bestaat uit de gemeten waterpeilen op de Bovenschelde te Gavere.

5 Vispassages en turbines

5.1 Methodologie

5.1.1 Modelvariant

De basisanalyses werden uitgevoerd met het model beschreven in hoofdstuk 4. Alle kunstwerken waren actief, schut- en lekverliezen werden toegepast en zowel opwaartse als zijdelingse instroming werd in rekening gebracht.

De controleberekening (zie paragraaf 5.1.4) werd uitgevoerd met een kleiner model dat geknipt werd net afwaarts van het stuw-sluiscomplex van Hérinnes.

5.1.2 Scenario's

Er werden twee scenario's bestudeerd. Deze verschillen van elkaar door de aan- of afwezigheid van turbines in Kerkhove, Oudenaarde en Asper.

Scenario S1:

- bestaande vispassages

Scenario S2:

- bestaande vispassages
- turbines in Kerkhove, Oudenaarde en Asper

Voor de sites van Kerkhove, Oudenaarde en Asper werd verondersteld dat de turbines op de plaats van de oude stuwen gebouwd zullen worden (zoals in Kain en Hérinnes). Het zou ook kunnen dat de oude stuwen eerst vervangen worden door nieuwe sluizen en dat de turbines in de oude sluizen ingebouwd worden. Er werd momenteel geen tweede vispassage naast de turbines opgenomen in het model. Afhankelijk van de situering van de nieuwe turbines kan dit wel nodig zijn.

5.1.3 Sturing

De precieze sturing van de nieuwe stuwen in Kain en Hérinnes kon nog niet achterhaald worden. De definitieve sturingsparameters voor de nieuwe stuw van Kerkhove zijn nog niet bekend en de hybride sturing van de stuw van Oudenaarde valt moeilijk modelmatig te reproduceren. Daarom werden alle stuwen uitgerust met een zeer eenvoudige voorlopige regeling:

- als waterpeil hoger dan streefpeil + 5 cm, verlaag kleppen met 5 cm
als kleppen reeds omlaag, verhoog segmenten (indien aanwezig) met 5 cm
- als waterpeil lager dan streefpeil - 5 cm, verlaag segmenten (indien aanwezig) met 5 cm
als segmenten (indien aanwezig) reeds omlaag, verhoog kleppen met 5 cm

De vispassages in Kain en Hérinnes werden uitgerust met volgende regels:

- debiet = constant = 0,6 of 0,7 m³/s
- als waterpeil lager dan streefpeil - 20 cm, sluit schuif volledig
- als debiet over stuwen groter dan 0,6 of 0,7 m³/s, open schuif volledig

Deze regels zijn eigen inschattingen. De precieze sturingsregels konden nog niet achterhaald worden.

De vispassages in Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden voorzien van iets complexere regels:

- debiet = 1 – 2,3/2,5 – 4 (lineaire variatie i.f.v. waterpeil, range = 40 cm = streefpeil ± 20 cm)
- als waterpeil hoger dan streefpeil + 20 cm, sluit schuif volledig (beveiliging tegen uitspoeling)
- als waterpeil lager dan streefpeil - 20 cm, sluit schuif volledig
- als debiet over stuwen groter dan 3 m³/s, open schuif volledig

De schuiven van de vispassages hebben slechts 2 standen: volledig open of volledig dicht.

Het toegevoegd debiet in Kain en Hérinnes wordt als volgt aangestuurd:

- debiet = constant = 2,5 m³/s
- als debiet over stuwen groter dan 2,5 m³/s en vispassage open, open schuif volledig
- als waterpeil lager dan streefpeil - 18 cm, sluit schuif volledig

Deze regels zijn eveneens eigen inschattingen. De schuiven van het toegevoegd debiet hebben ook slechts 2 standen: volledig open of volledig dicht.

Voor de vijzels wordt enkel de turbinewerking beschouwd. De vijzels in Kain en Hérinnes kunnen niet als pomp gebruikt worden. De vijzels in Kerkhove, Oudenaarde en Asper zullen pas als pomp ingezet worden nadat de stuwen en de vispassages reeds gesloten zijn.

De bestaande turbines in Kain en Hérinnes werden uitgerust met volgende regels:

- als debiet over stuwen meer dan 5 m³/s en vispassage en toegevoegd debiet open, start turbine 1
- als debiet over stuwen meer dan 5 m³/s en vispassage, toegevoegd debiet en turbine 1 open, start turbine 2
- als debiet over stuwen meer dan 5 m³/s en vispassage, toegevoegd debiet en turbines 1 en 2 open, start turbine 3
- als waterpeil lager dan streefpeil - 12 cm, stop turbine 3
- als waterpeil lager dan streefpeil - 14 cm, stop turbine 2
- als waterpeil lager dan streefpeil - 16 cm, stop turbine 1

Deze regels zijn opnieuw eigen inschattingen.

De eventuele nieuwe turbines in Kerkhove, Oudenaarde en Asper werken op basis van volgende regels:

- als debiet over stuwen meer dan 3 m³/s en vispassage open, start turbine 1
- als debiet over stuwen meer dan 3 m³/s en vispassage en turbine 1 open, start turbine 2
- als waterpeil lager dan streefpeil - 10 cm, stop turbine 2
- als waterpeil lager dan streefpeil - 15 cm, stop turbine 1

In werkelijkheid zullen de turbines ook stopgezet worden wanneer het verval te klein geworden is, bv. als gevolg van opstuwing aan de afwaartse zijde tijdens wassen. In Harelbeke wordt momenteel onderzocht of de werking van de turbines verbeterd kan worden door bij lage afvoeren niet één turbine aan een hoog toerental, maar twee turbines aan een laag toerental in te zetten. Deze variant werd nog niet bestudeerd.

De simulaties werden uitgevoerd met een tijdstap van 1 minuut. De bovenstaande regels worden dan ook elke minuut geëvalueerd. Voor de vispassages en de turbines werd verondersteld dat ze op 1 minuut tijd volledig kunnen openen of sluiten.

5.1.4 Controleberekening

De berekeningen beschreven in de voorgaande paragrafen maken gebruik van opwaartse randvoorwaarden die in Wallonië (Tournai) gemeten werden. Deze worden opgelegd aan het opwaartse einde van het pand Fresnes-Kain. De metingen in Tournai worden met een uurlijkse frequentie gerapporteerd en bevatten heel wat minder schommelingen dan de metingen in Vlaanderen (Helkijn). Bovendien is de precieze bedrijfsvoering van de stuwen, turbines en vispassages in Kain en Hérinnes niet bekend. Door de panden Fresnes-Kain en Kain-Hérinnes in rekening te brengen en de turbines en vispassages in Kain en Hérinnes gebruik te laten maken van de buffercapaciteit in deze panden, wordt ook in droge perioden een constante stroom van water naar de afwaartse panden in Vlaanderen verzekerd. Om na te gaan of deze aannames geen al te rooskleurig beeld van de toekomstige situatie in Vlaanderen opleveren, werd ook nog een controleberekening met een aangepast model en aangepaste randvoorwaarden doorgevoerd. Het model beschreven in hoofdstuk 4 werd geknipt net afwaarts van de stuw van Hérinnes. Vervolgens werd de meetreeks van Helkijn opgelegd als opwaartse randvoorwaarde. Hierdoor worden de bestaande debietschommelingen beter weergegeven in de opwaartse randvoorwaarde. Tegelijkertijd vervalt ook de aanvoer van water door de vispassages en turbines in Wallonië tijdens droge perioden.

5.1.5 Analyse

Alle scenario's werden doorgerekend voor een jaar met een gemiddelde afvoer (2015), een nat jaar (2016) en een droog jaar (2017). De resultaten werden vergeleken aan de hand van een aantal kengetallen.

5.2 Resultaten

5.2.1 Kengetallen

De resultaten van de berekeningen worden samengevat in tabellen met kengetallen. De betekenis van deze kengetallen is als volgt:

- % NP = tijd (in %) dat het opwaarts waterpeil minder dan 5 cm afwijkt van het streefpeil
- % LW = tijd (in %) dat het opwaarts waterpeil lager is dan het laagwateralarmpeil
- % 1 = tijd (in %) dat een vispassage, toegevoegd debiet of turbine open staat
- # +/- = aantal keren dat een klep, segment of schuif van stand verandert
- # 1/0 = aantal keren dat een vispassage of turbine open of dicht gaat

Alle kengetallen werden berekend voor het volledige jaar en voor de zomer. De zomer werd gedefinieerd als de periode van 1 april tot 1 oktober.

De berekeningen werden uitgevoerd met een tijdstap van 1 minuut, maar de resultaten werden slechts om de 5 minuten opgeslagen. Het absolute aantal bewegingen van kleppen en schuiven is dus waarschijnlijk onderschat.

De percentages werden afgerond tot op een geheel getal. Een openingsgraad van "0" % omvat dus alle waarden tussen 0 en 0,49 % en een openingsgraad van "100" % slaat op de range van 99,50 tot 100 %.

5.2.2 Kerkhove

De resultaten van de basisberekening voor Kerkhove worden getoond in Tabel 7 t.e.m. Tabel 12. De resultaten van de controleberekening worden getoond in Tabel 13 t.e.m. Tabel 18.

Tabel 7 – Kerkhove – 2015

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	1590	3820	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	97	0	1113	4153	100	0	0	0	100	2	99	30

Tabel 8 – Kerkhove – 2016

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	1259	3014	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	100	0	875	3247	100	0	0	0	100	0	100	4

Tabel 9 – Kerkhove – 2017

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	99	0	1061	3627	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	92	0	647	3914	100	0	0	0	99	8	92	66

Tabel 10 – Kerkhove – zomer 2015

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	642	2036	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	99	0	356	2220	100	0	0	0	100	0	99	8

Tabel 11 – Kerkhove – zomer 2016

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	642	2036	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	99	0	356	2220	100	0	0	0	100	0	99	8

Tabel 12 – Kerkhove – zomer 2017

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	99	0	524	2280	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	87	0	267	2475	100	0	0	0	99	6	87	46

Tabel 13 – Kerkhove – 2015 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	96	0	8494	1603	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	94	0	7151	1619	100	4	0	0	99	46	95	194

Tabel 14 – Kerkhove – 2016 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	97	0	6929	1742	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	93	0	5528	1656	100	0	0	0	100	20	96	178

Tabel 15 – Kerkhove – 2017 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	92	0	2439	1415	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	83	0	1735	1222	100	2	0	0	96	78	83	399

Tabel 16 – Kerkhove – zomer 2015 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	97	0	3900	9282	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	93	0	2993	9300	100	0	0	0	99	22	95	102

Tabel 17 – Kerkhove – zomer 2016 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	97	0	3647	9323	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	94	0	2785	8971	100	0	0	0	100	4	97	79

Tabel 18 – Kerkhove – zomer 2017 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	89	0	491	7796	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	75	0	211	6095	100	2	0	0	95	58	77	284

5.2.3 Oudenaarde

De resultaten van de basisberekening voor Oudenaarde worden getoond in Tabel 19 t.e.m. Tabel 24. De resultaten van de controleberekening worden getoond in Tabel 25 t.e.m. Tabel 30.

Tabel 19 – Oudenaarde – 2015

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	99	0	2111	5233	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	94	0	1603	5531	100	0	0	0	100	2	99	32

Tabel 20 – Oudenaarde – 2016

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	1722	4179	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	97	0	1250	4448	100	0	0	0	100	0	100	8

Tabel 21 – Oudenaarde – 2017

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	98	0	1574	5689	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	74	0	1138	5056	100	2	0	0	99	16	84	108

Tabel 22 – Oudenaarde – zomer 2015

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	984	2964	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	96	0	680	3218	100	0	0	0	100	0	99	8

Tabel 23 – Oudenaarde – zomer 2016

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	100	0	842	2019	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	98	0	584	2150	100	0	0	0	100	0	100	4

Tabel 24 – Oudenaarde – zomer 2017

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	97	0	883	3742	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	60	0	630	3196	100	2	0	0	98	14	79	80

Tabel 25 – Oudenaarde – 2015 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	91	0	9340	1882	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	87	0	7757	1884	100	4	0	0	99	42	92	370

Tabel 26 – Oudenaarde – 2016 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	88	0	8087	2007	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	85	0	6316	1900	100	0	0	0	100	10	90	462

Tabel 27 – Oudenaarde – 2017 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	79	0	3557	1752	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	69	0	2243	1486	100	2	0	0	96	76	77	547

Tabel 28 – Oudenaarde – zomer 2015 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	89	0	4773	1141	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	84	0	3704	1136	100	0	0	0	99	16	90	249

Tabel 29 – Oudenaarde – zomer 2016 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	89	0	4385	1095	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	86	0	3344	1058	100	0	0	0	100	2	92	242

Tabel 30 – Oudenaarde – zomer 2017 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	70	0	1097	9718	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	58	0	491	7437	100	2	0	0	95	58	67	354

5.2.4 Asper

De resultaten van de basisberekening voor Asper worden getoond in Tabel 31 t.e.m. Tabel 36. De resultaten van de controleberekening worden getoond in Tabel 37 t.e.m. Tabel 42.

Tabel 31 – Asper – 2015

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	96	0	2634	6856	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	91	0	2226	6598	100	0	0	0	100	0	98	76

Tabel 32 – Asper – 2016

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	98	0	2262	5605	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	95	0	1898	5535	100	0	0	0	100	0	99	38

Tabel 33 – Asper – 2017

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	91	0	2047	6495	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	76	0	1660	5387	100	2	0	0	97	28	68	204

Tabel 34 – Asper – zomer 2015

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	97	0	1278	3994	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	92	0	1071	3871	100	0	0	0	100	0	98	38

Tabel 35 – Asper – zomer 2016

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	98	0	1110	2690	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	96	0	915	2733	100	0	0	0	100	0	99	14

Tabel 36 – Asper – zomer 2017

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	86	0	1151	4147	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	63	0	927	3262	100	2	0	0	95	26	55	158

Tabel 37 – Asper – 2015 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	84	0	1114	2018	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	80	0	9596	1954	100	0	0	0	99	46	86	612

Tabel 38 – Asper – 2016 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	80	0	1041	2048	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	77	0	8257	1906	100	0	0	0	100	8	84	682

Tabel 39 – Asper – 2017 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	68	0	5576	1733	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	62	0	3703	1403	100	2	0	0	96	72	71	593

Tabel 40 – Asper – zomer 2015 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	78	0	5983	1207	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	74	0	4869	1155	100	0	0	0	99	24	82	437

Tabel 41 – Asper – zomer 2016 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	79	0	5654	1133	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	77	0	4432	1066	100	0	0	0	100	2	84	374

Tabel 42 – Asper – zomer 2017 (controle)

	peil		stuwen (hef/wip)		vispassage		toegev. debiet		turbine 1		turbine 2	
	% NP	% LW	# +/-	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# +/-	% 1	# 1/0	% 1	# 1/0
S1	57	0	2110	9089	100	0	0	0	0	0	0	0
S2	50	0	1015	6545	100	2	0	0	94	54	61	331

5.2.5 Bespreking

Vispassages

Bij de basisberekening is de openingsgraad voor de vispassages in Kerkhove, Oudenaarde en Asper zeer hoog. Zelfs tijdens het droge jaar 2017 blijven alle vispassages bijna altijd open.

Bij de controleberekening blijft de openingsgraad van alle vispassages zeer hoog. De schommelingen in de debietreeks van Helkijn leiden vooral tot een sterke toename van het aantal stuwbewegingen.

Turbines

Bij de basisberekening is de werkingsgraad van beide turbines in Kerkhove, Oudenaarde en Asper zeer hoog. In het droge jaar 2017 zakt de werkingsgraad van de tweede turbine tot 84% in Oudenaarde en 68% in Asper. In de andere jaren en op de andere sites ligt de werkingsgraad steeds ruim boven de 90%.

Uit de controleberekening blijkt dat de werkingsgraad van de turbines op alle sites afneemt en dat de aan- en uitschakelfrequentie van beide turbines toeneemt. De werkingsgraad van de eerste turbine daalt licht met enkele procenten en die van de tweede turbine kan tot 15 procent verminderen. De schakelfrequentie van de eerste turbine neemt lichtjes toe en die van de tweede turbine veel sterker.

De impact van het hydrologische regime op de turbines is groter dan de impact op de vispassages omdat de turbines pas inschakelen nadat de vispassages reeds geopend zijn en ook weer uitschakelen voor de vispassages gesloten worden. Bij watertekort zullen de turbines dus harder getroffen worden dan de vispassages. Om dezelfde reden wordt turbine 2 harder getroffen dan turbine 1.

Zoals reeds eerder vermeld, zijn de ramingen van de bedrijfstijd van de turbines iets te hoog, omdat geen rekening gehouden werd met het uitschakelen van de turbines bij een te laag verval.

5.3 Conclusies en aanbevelingen

De bestaande vispassages in Kerkhove, Oudenaarde en Asper kennen een zeer hoog openingspercentage bij alle scenario's ongeacht het hydrologische regime.

De werkingsgraad van eventuele turbines is gevoeliger aan het hydrologische regime, omdat bij watertekort steeds voorrang gegeven wordt aan het openhouden van de vispassages. De werkingsgraad van de eerste turbine blijft evenwel hoog en ook de werkingsgraad van de tweede turbine is nog steeds aanvaardbaar.

In een eerdere studie (Vanderkimpfen et al., 2023) werd reeds onderzocht welke voor- of nadelen er verbonden zijn aan het criterium voor het openen van een vispassage (waterpeil of debiet). Uit deze studie bleek dat opening op basis van debiet en sluiting op basis van waterpeil over het algemeen de meest optimale regeling lijkt. Om de impact van de keuze van het openingsmechanisme te minimaliseren kan men opteren voor een flexibel algoritme, waarbij de vispassage geopend wordt op basis van een combinatie van waterpeil en debiet. De beheerder kan dan zelf beslissen om de vispassage te openen op basis van waterpeil en/of debiet. Op basis van ervaring, weersomstandigheden en beheerprioriteiten, kan hij dan steeds het meest geschikte mechanisme instellen. Een dergelijk algoritme werd reeds uitgewerkt voor de vispassage van Kerkhove (Vanderkimpfen et al., 2019b) en wordt ook aanbevolen voor de vispassages van Oudenaarde en Asper.

Indien in Kerkhove, Oudenaarde of Asper waterkrachtcentrales gebouwd zouden worden, dan dient tijdens het ontwerp onderzocht te worden of de toevoeging van een tweede vispassage noodzakelijk is. De behoefte aan een bijkomende vispassage zal afhangen van de precieze inplanting van de turbines.

6 Stuwen

6.1 Methodologie

6.1.1 Modelvariant

Opdat de analyse van de stuwen niet bemoeilijkt zou worden door de werking van andere kunstwerken, werden de vispassages, de turbines, de schutverliezen en de lekverliezen uitgeschakeld.

In principe moet het model gevoed worden met een opwaarts debiet vanuit de Haut-Escaut in Frankrijk en zijdelingse debieten vanuit de zijlopen in Frankrijk, Wallonië en Vlaanderen. Indien zijdelingse debieten opgelegd worden, is het moeilijk om een onderscheid te maken tussen een toename van de afvoer veroorzaakt door zijdelingse instroming en een toename van de afvoer veroorzaakt door de werking van de stuwen. Daarom werden de initiële berekeningen uitgevoerd met een modelversie waaraan enkel een opwaarts debiet in Fresnes-sur-Escaut opgelegd werd. In latere aanvullingen werd de zijdelingse instroming terug toegevoegd.

6.1.2 Scenario's

Er werd slechts één scenario bestudeerd. Dit scenario stemt overeen met een toekomstige situatie waarbij de oude stuwen in Kerkhove, Oudenaarde en Asper afgebroken zijn.

6.1.3 Sturing

De stuwen van Kain, Hérinnes, Kerkhove, Oudenaarde en Asper werden allemaal uitgerust met eenzelfde sturing op waterpeil. Het algoritme is gebaseerd op het algoritme dat reeds geïmplementeerd werd in Kerkhove en Asper. Dit algoritme wordt beschreven in Engie Fabricom (2019).

De ingestelde parameters verschillen van stuw tot stuw en ook de snelheden waarmee de onderdelen (klep en segment of hefdeur) bewegen zijn niet voor alle sites identiek. De onderstaande analyse is grotendeels gebaseerd op de huidige instellingen voor de nieuwe stuw van Kerkhove. De hybride sturing van Oudenaarde zal in de toekomst waarschijnlijk nog vervangen worden.

Voor deze analyse werden de volgende parameters gebruikt:

- Continu openen als het opwaarts waterpeil meer dan 5 cm boven het streefpeil staat
- Discontinu openen als het opwaarts waterpeil meer dan 3 cm boven het streefpeil staat
- Discontinu sluiten als het opwaarts waterpeil meer dan 3 cm onder het streefpeil staat
- Continu sluiten als het opwaarts waterpeil meer dan 5 cm onder het streefpeil staat
- Werktijd = 30 seconden (klep) en 10 seconden (segment of hefdeur)
- Rusttijd = 120 seconden
- Tendens: geen

De nieuwe kleppen en segmenten in Kerkhove kunnen volledig openen of sluiten in een tijdspanne van 15 minuten. De kleppen bewegen dus aan een gemiddelde snelheid van $1,2 \text{ m} / 15 \text{ min} \approx 2 \text{ mm/s}$ en de segmenten aan een gemiddelde snelheid van $5,3 \text{ m} / 15 \text{ min} \approx 6 \text{ mm/s}$. Wanneer de kleppen volledig geopend zijn en passief meegevoerd worden door de segmenten, dan bewegen ze aan dezelfde snelheid als de segmenten. Een verticale beweging over een hoogte van 5 cm vereist dus een werktijd van ongeveer 30 seconden voor een klep en ongeveer 10 seconden voor een segment.

De stuwen van Kerkhove, Oudenaarde en Asper hebben meerdere onderdelen. Bij stijgende waterpeilen opent eerst de klep en daarna pas het segment. Bij dalende waterpeilen sluit eerst het segment en daarna pas de klep.

6.1.4 Stabiliteit lokale sturing op waterpeil

In eerste instantie werd nagegaan welk stuwgedrag verwacht kan worden op basis van de eigenschappen van de opeenvolgende rivierpanden. Daarbij werd gebruik gemaakt van de verhouding van de looptijd en de retentietijd, zoals beschreven in Neumüller en Bernhauer (1969 en 1976).

De looptijd T_L is de tijd die een verstoring nodig heeft om zich te verplaatsen van het opwaartse einde van een gestuwd pand tot aan de stuw aan het afwaartse einde:

$$T_L = L / w \quad (1)$$

met T_L = looptijd (s)

L = lengte van het rivierpand (m)

w = snelheid van de verstoring (m/s)

De snelheid van de verstoring is gelijk aan:

$$w = v + \sqrt{g y} \quad (2)$$

met v = gemiddelde stroomsnelheid (m/s)

g = versnelling zwaartekracht (m/s²)

y = gemiddelde diepte (m)

De retentietijd T_R is de tijd die nodig is om na de verstoring van een evenwichtsprofiel in een gestuwd pand een nieuw evenwichtsprofiel te bereiken:

$$T_R = \Delta V / \Delta Q \quad (3)$$

met ΔV = wijziging van het volume in het rivierpand (m³)

ΔQ = wijziging van het debiet in het rivierpand (m³/s)

Als de looptijd kleiner is dan de retentietijd dan zal de stuw snel reageren op een verstoring van het evenwicht en zal het bestaande evenwicht geleidelijk evolueren naar een nieuw evenwicht. Indien de looptijd groter is dan de retentietijd, dan zal de stuw te laat reageren op een verstoring van het evenwicht en zal de verstoring versterkt worden.

De voorwaarde voor het vermijden van een versterking van een verstoring door een stuw die gestuurd wordt op basis van het waterpeil net opwaarts van de stuw is dus:

$$T_L / T_R < 1 \quad (4)$$

De verhouding van de looptijd en de retentietijd werd berekend aan de hand van de resultaten van simulaties met een constante afvoer van 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 250 en 300 m³/s. Voor de berekening van volumes en stroomsnelheden werd aangenomen dat de Haut-Escaut en Bovenschelde een breedte hebben van 40 m opwaarts Kain, 42.5 m tussen Kain en Hérinnes, 45 m tussen Hérinnes en Kerkhove, 47.5 m tussen Kerkhove en Oudenaarde en 65 m afwaarts Oudenaarde.

6.1.5 Toetsing lokale sturing op waterpeil

De betrouwbaarheid van het criterium beschreven in de vorige paragraaf (vergelijking 4) werd getoetst aan de hand van een aantal simulaties met synthetische en historische gebeurtenissen.

In eerste instantie werd de toetsing uitgevoerd met het volledige model. Dit leidde echter tot een sterke demping van de gebeurtenissen in het zeer grote pand opwaarts Kain. Bij een latere herberekening werd het model dan ook geknipt ter hoogte van de Franse grens (Maulde).

Synthetische gebeurtenissen

In een eerste fase werd de reactie van de keten van stuwen op een trapsgewijze debietwijziging onderzocht. Daarbij werden de volgende combinaties van debieten getest: 10-20, 20-30, 30-50, 50-100 en 100-150. Zowel snelle toenames als snelle afnames werden onderzocht. Uit een analyse van de historische meetreeks van Bossuit-Helkijn bleek dat de historische debietvariaties kunnen oplopen tot bijna 2 (m³/s)/min. Bij de opmaak van de synthetische randvoorwaarden werd dan ook een variatie van 2 (m³/s)/min toegepast. De hiervoor opgesomde debietvariaties vinden dan plaats in 5, 10 of 25 minuten.

De tweede reeks synthetische gebeurtenissen bestaat uit sinusoidale hydrogrammen. Deze hebben een basisafvoer van 30 m³/s en een piekafvoer van 150 m³/s. De duur varieert van 3 uur tot 24 uur.

Historische gebeurtenissen

In een derde stap werden ook nog twee historische gebeurtenissen doorgerekend: de was van maart 2018 (piekafvoer 80 m³/s) en de droogweerperiode in april 2018.

In een latere aanvulling werd het volledige jaar 2019 doorgerekend. Het gebruik van een recent jaar verzekert dat eventuele recente aanpassingen aan de sturing van de stuwen in Frankrijk in de meetreeksen vervat zitten.

Voor de opmaak van een opwaartse debietrandvoorwaarde voor de Haut-Escaut te Maulde werd noodgedwongen gebruik gemaakt van de meetreeksen op de Haut-Escaut te Tournai (SPW-DGO2). De meetreeks voor Maulde (VNF) voor 2019 is immers zeer onvolledig en nog niet gevalideerd. De zijdelingse instroming in Vlaanderen werd geraamd op basis van de metingen voor de Rhosnes te Amougies (SPW-DGO3), de Molenbeek te Etikhove (VMM) en de Zwalm te Nederzwalm (VMM).

De meetreeksen voor de Haut-Escaut te Tournai en de Rhosnes te Amougies bestaan uit gevalideerde uurlijkse gegevens. De meetreeksen voor de Molenbeek in Etikhove en de Zwalm in Nederzwalm hebben een frequentie van 15 minuten. Ze zijn vermoedelijk ook reeds gevalideerd.

Om de output beheersbaar te houden, werd het jaar 2019 opgedeeld in 12 deelperiodes, elk met een duur van 1 maand. De eerste 2 dagen van elke maand werden gebruikt als initialisatieperiode en werden achteraf niet mee geanalyseerd.

Elke maand werd tweemaal doorgerekend. Bij de eerste berekening werd geen rekening gehouden met de afvoer van de zijlopen. Bij de tweede berekening werd wel rekening gehouden met de afvoer van de zijlopen. Voor de bemeten deelbekkens werd gebruik gemaakt van de meetreeksen van de meetposten van SPW-DGO3 en VMM. Voor de onbemeten deelbekkens werd de meetreeks van een naburig bemeten deelbekken herschaald op basis van de oppervlakte van het deelbekken.

6.1.6 Gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de analyses beschreven in paragraaf 6.1.5. zijn enkel geldig voor de gebruikte combinatie van sturingsparameters voor de nieuwe stuwen in Vlaanderen. Een gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd om na te gaan hoe deze resultaten wijzigen bij andere combinaties van sturingsparameters.

De onderzochte parametersets worden opgesomd in Tabel 43. De eerste set (0) is de referentieset die in eerdere analyses (zie paragraaf 6.1.3) gebruikt werd. De sturingsparameters zijn: de afwijking van het waterpeil t.o.v. het streefpeil waarbij de stuw discontinu of continu gaat werken (beiden uitgedrukt in cm), de werktijd en de rusttijd (beiden uitgedrukt in s) en de trend van het opwaartse waterpeil waarbij de stuw niet meer in beweging komt (uitgedrukt in cm/min).

Tabel 43 – Parametersets

Scenario	Discontinuu (cm)	Continu (cm)	Werktijd (s)	Rusttijd (s)	Trend (cm/min)
0	3	5	30	120	-
1	3	5	30	120	2
2	3	5	30	0	-
3	3	5	30	300	-
4	3	5	6	120	-
5	3	5	6	0	-
6	5	10	30	120	-

Voor de gevoeligheidsanalyse werd gebruik gemaakt van synthetische hydrogrammen, de was van maart 2018 en de droogweelperiode van april 2018.

6.2 Resultaten

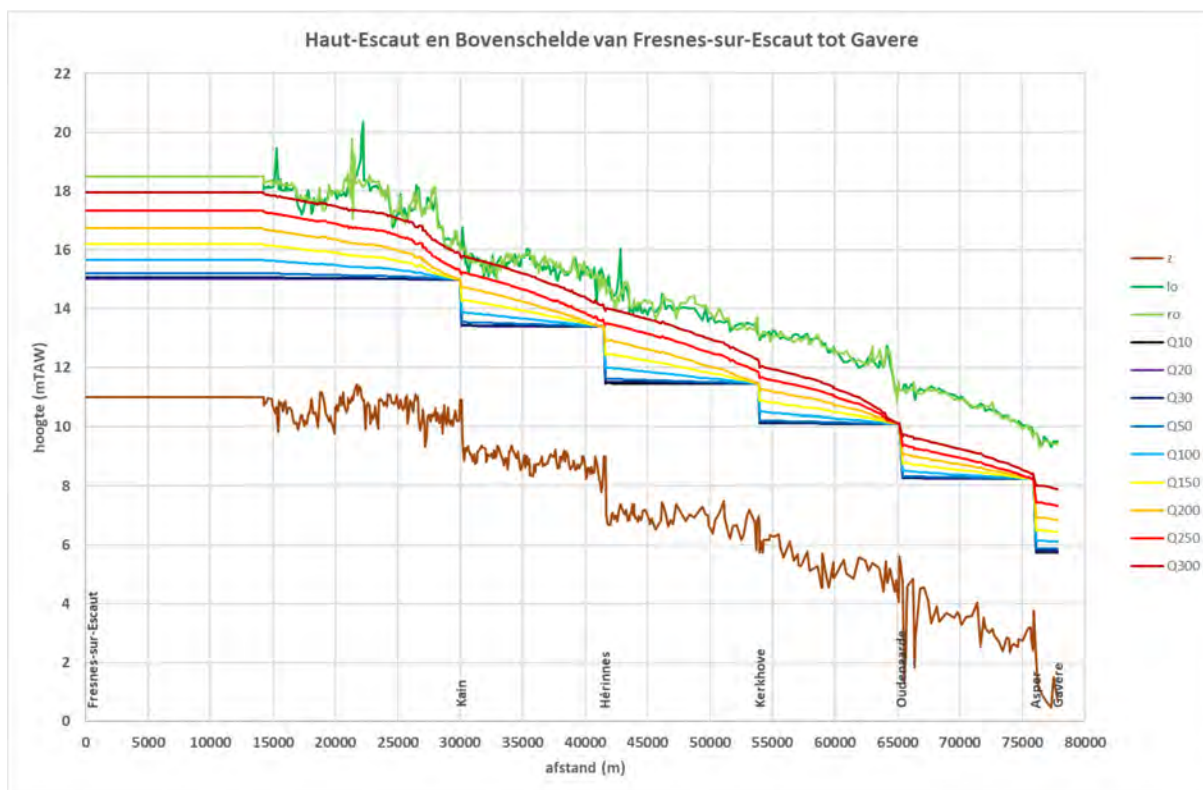
6.2.1 Stabiliteit lokale sturing op waterpeil

De resultaten van de simulaties met constante afvoeren van 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 250 en 300 m³/s worden getoond in Figuur 3. De figuur toont het bodempeil ("z", bruin), de oeverhoogte ("lo" en "ro", groen) en het waterpeil overeenstemmend met de hiervoor vermelde afvoeren.

In de figuur is duidelijk zichtbaar dat het pand tussen Fresnes-sur-Escaut en Kain ongeveer drie maal langer is dan de overige panden. Aangezien de eigenschappen van het gedeelte op Frans grondgebied ruw geschat werden, moeten de resultaten voor dit pand met de nodige voorzichtigheid behandeld worden.

Uit de figuur blijkt dat er bij een afvoer van 250 m³/s nog net geen overstromingen optreden. Op alle locaties is er bij een afvoer van 200 m³/s nog vrije overstorting over de stuwen. Bij een afvoer van 250 m³/s treedt er op sommige locaties verdronken stroming op.

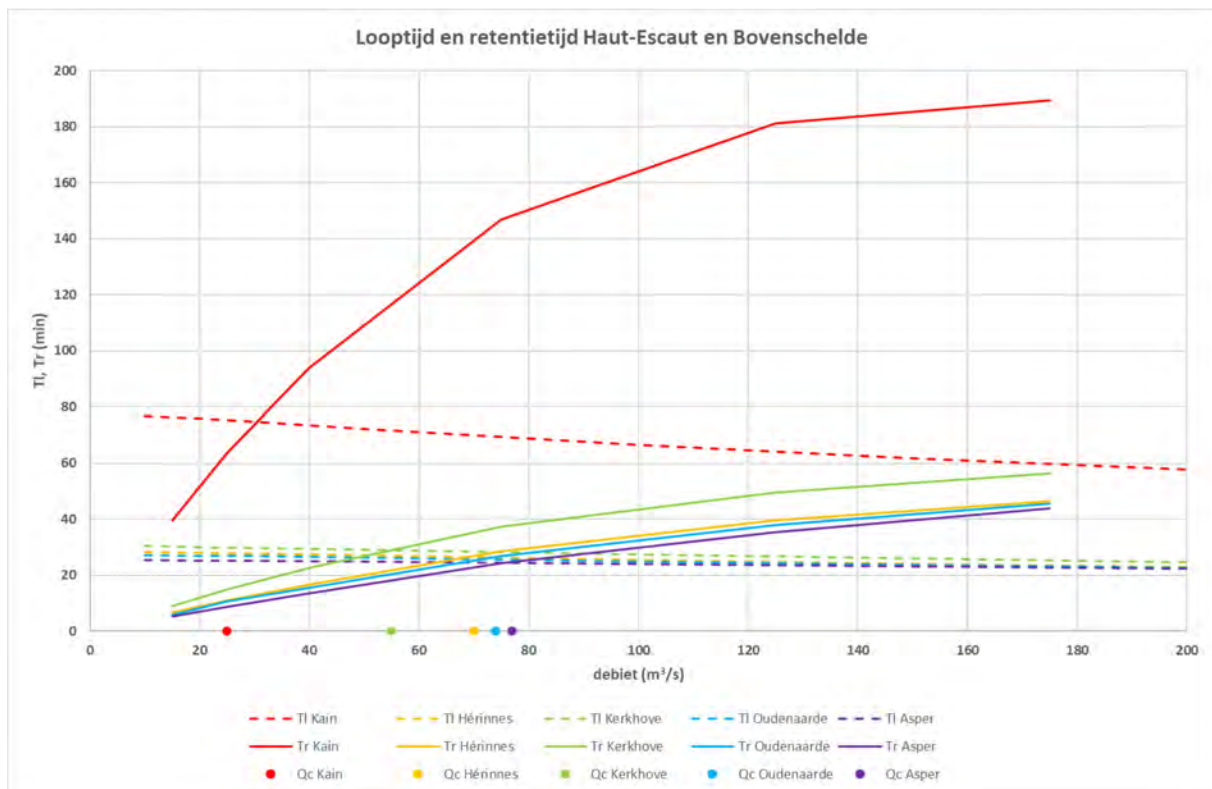
Figuur 3 – Lengteprofielen bij constante afvoer



De resultaten van de simulaties met constante afvoeren werden gebruikt voor het bepalen van de looptijd en de retentietijd, zoals beschreven in paragraaf 6.1.4. De berekende waarden worden getoond in Figuur 4.

Uit de figuur blijkt dat voor hoge afvoeren (> 80 m³/s) de looptijd in alle panden korter is dan de retentietijd. Bij hoge afvoeren zal een lokale sturing op waterpeil dus geen versterking van afvoergolven veroorzaken. Bij lage afvoeren (< 20 m³/s) is de looptijd in alle panden langer dan de retentietijd. Bij lage afvoeren zal een lokale sturing op waterpeil dus wel een versterking van afvoergolven veroorzaken. Bij tussenliggende afvoeren zullen sommige stuwen geen en andere stuwen wel een versterking veroorzaken.

Figuur 4 – Looptijd en retentietijd



6.2.2 Toetsing lokale sturing op waterpeil

Figuren

Het gedrag van de stuwen werd getoetst aan de hand van figuren die het verloop van het debiet over de stuwen, het waterpeil opwaarts van de stuwen en de stand van de stuwkleppen weergeven.

De figuren met het debiet tonen het hydrogram dat opgelegd werd in Maulde en het debiet over de opeenvolgende stuwen. Uit deze figuren kan snel afgeleid worden of er eventueel een versterking van de afvoergolven optreedt.

Om een eenvoudige vergelijking van de evolutie van het waterpeil opwaarts van alle stuwen mogelijk te maken, werd het waterpeil niet uitgedrukt als een absoluut peil (in mTAW), maar als een afwijking t.o.v. het streefpeil (in m). Op de figuren werden ook de afwijkingen aangegeven waarbij de stuwen beginnen te werken (3 cm). Uit deze figuren kan afgeleid worden of het waterpeil binnen de vooropgestelde grenzen blijft.

Om de vergelijking van de standen van de beweegbare delen van alle stuwen te vergemakkelijken, werden de standen van de kleppen uitgedrukt als een relatieve hoogte t.o.v. het streefpeil (in m) en de standen van de segmenten als een relatieve hoogte t.o.v. het drempelpeil (in m). Uit deze figuren kan afgeleid worden op welke wijze de stuwen openen of sluiten.

In de volgende paragrafen wordt voor de verschillende types randvoorwaarden een beperkte selectie van deze figuren getoond.

Synthetische randvoorwaarde met trapvormige debietvariatie

De impact van een trapvormige variatie van het opwaartse debiet wordt geïllustreerd in Figuur 5 t.e.m. Figuur 14. De resultaten bevestigen de resultaten van de analyse op basis van looptijd en retentietijd. Variaties bij lage afvoeren worden versterkt en variaties bij hoge afvoeren niet. Alhoewel de variaties bij lage afvoeren leiden tot een tijdelijke versterking, treedt er na verloop van tijd wel een nieuw evenwicht op.

Synthetische randvoorwaarde met sinusoïdaal hydrogram

Het gedrag van sinusoïdale hydrogrammen met variabele duur wordt getoond in Figuur 15 t.e.m. Figuur 18.

Bij de hydrogrammen met een korte duur wordt het piekdebiet gedempt bij het doorlopen van het traject tussen de Franse grens (Maulde) en de eerste stuw (Kain). Bij de hydrogrammen met een lange duur blijft het piekdebiet bijna ongewijzigd.

Bij het begin van het hydrogram is er een neiging tot versterking van de debietstoeiname. Doordat het instromend debiet zelf ook toeneemt, wordt deze neiging onderdrukt en komt ze bijna niet tot uiting in het uiteindelijke piekdebiet.

Op het einde van het hydrogram is er opnieuw een neiging tot versterking van de debietsafname. Doordat het instromende debiet afneemt wordt deze neiging steeds groter. Dit resulteert in een progressief toenemende onderschrijding van de basisafvoer. Hoe korter de duur van het hydrogram, d.w.z. hoe steiler de dalende flank, hoe sterker de onderschrijding van de basisafvoer na afloop van het hydrogram.

Historische was van maart 2018

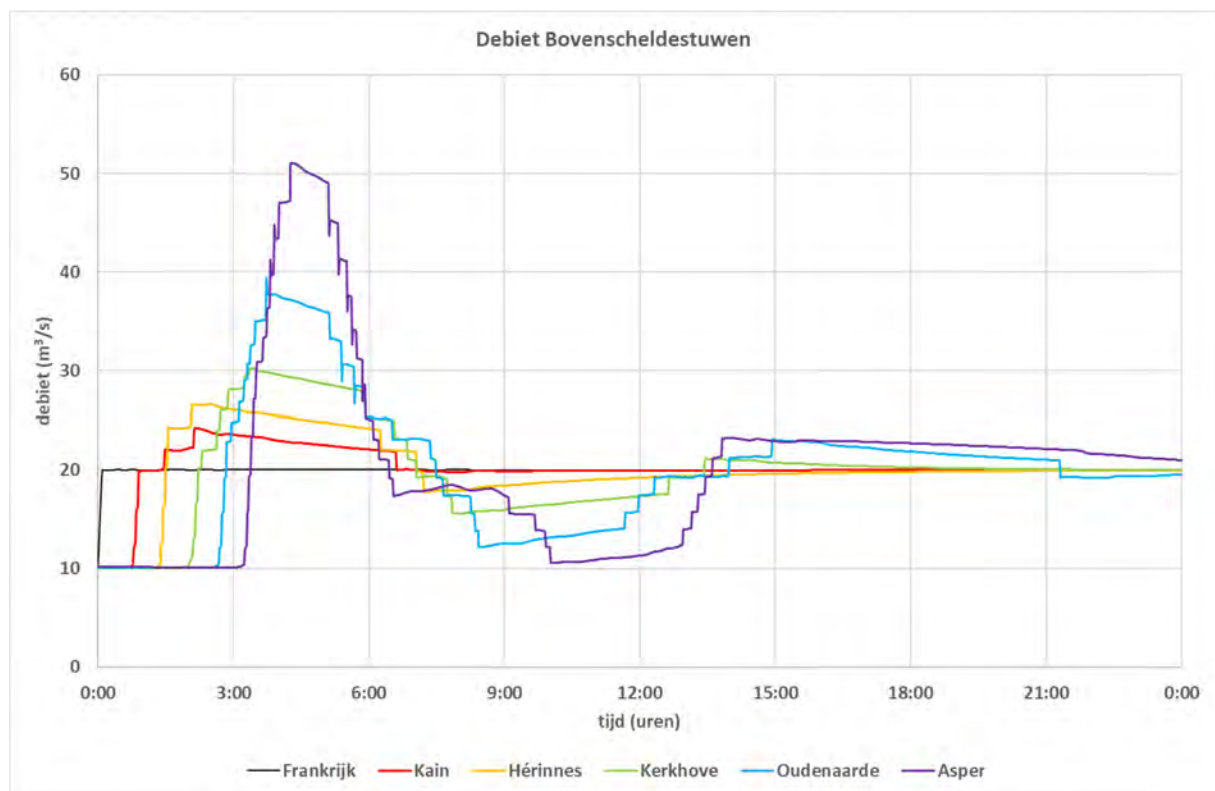
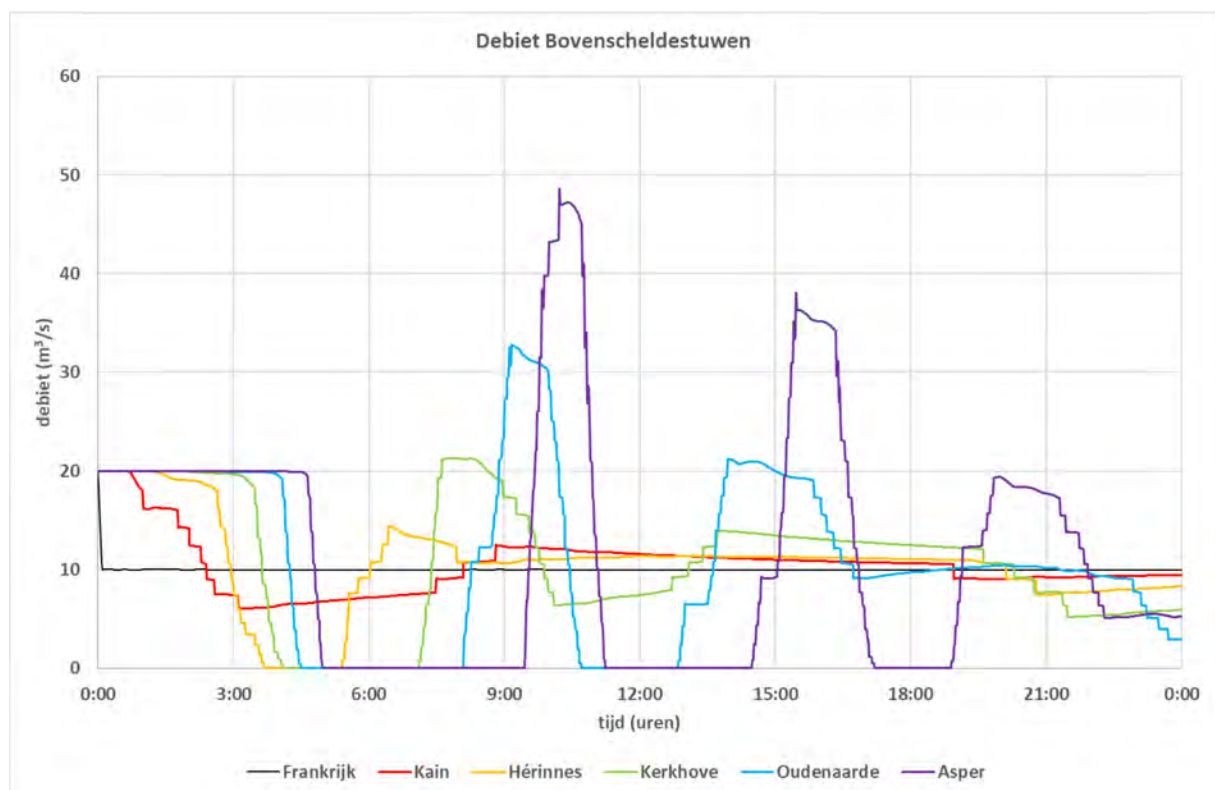
Figuur 19 t.e.m. Figuur 21 tonen het gedrag van de nieuwe stuwen bij een eventuele herhaling van de was van maart 2018.

Tijdens de was zijn er geen opvallende versterkingen zichtbaar. In de droogweerperiodes voor en na de was is dit wel het geval. Tijdens perioden met een plotse afname van het debiet sluiten sommige stuwen en zakt het waterpeil tot onder het streefpeil.

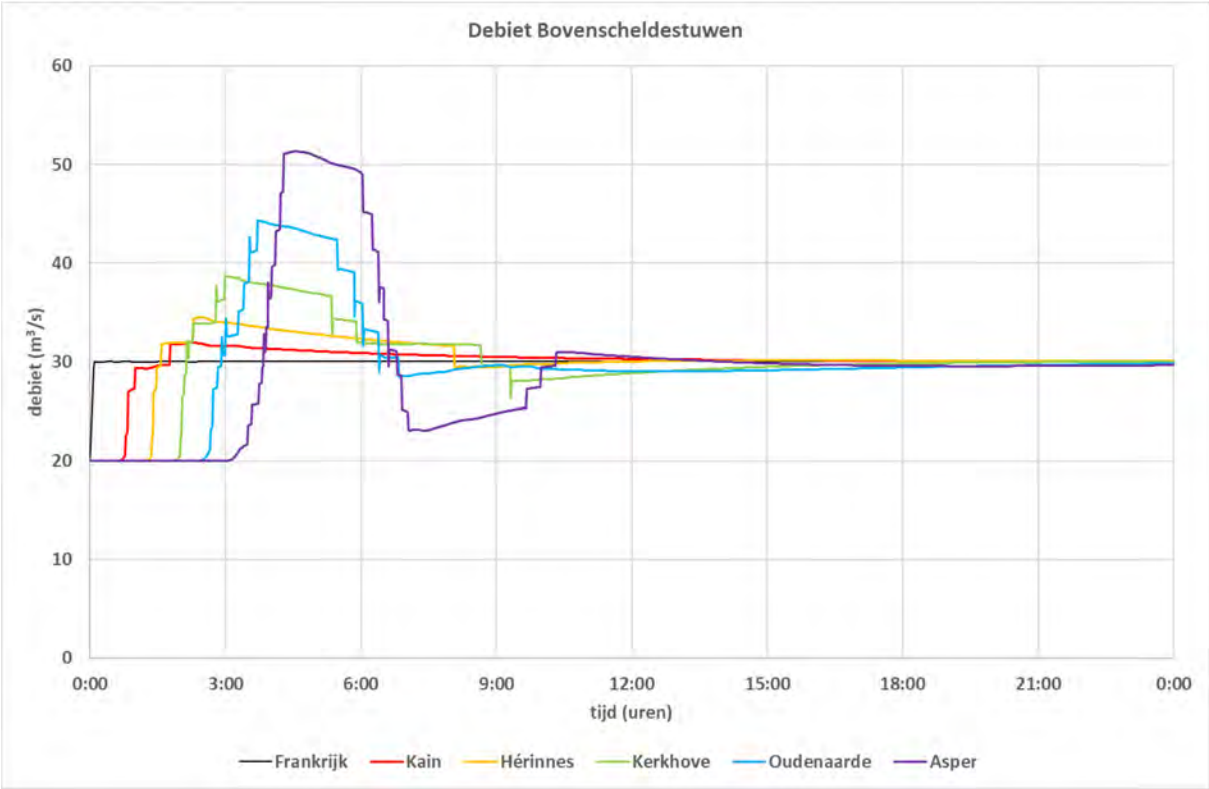
Droogweerperiode van april 2018

Figuur 22 t.e.m. Figuur 24 tonen de reactie van de nieuwe stuwen tijdens de droogweerperiode van april 2018.

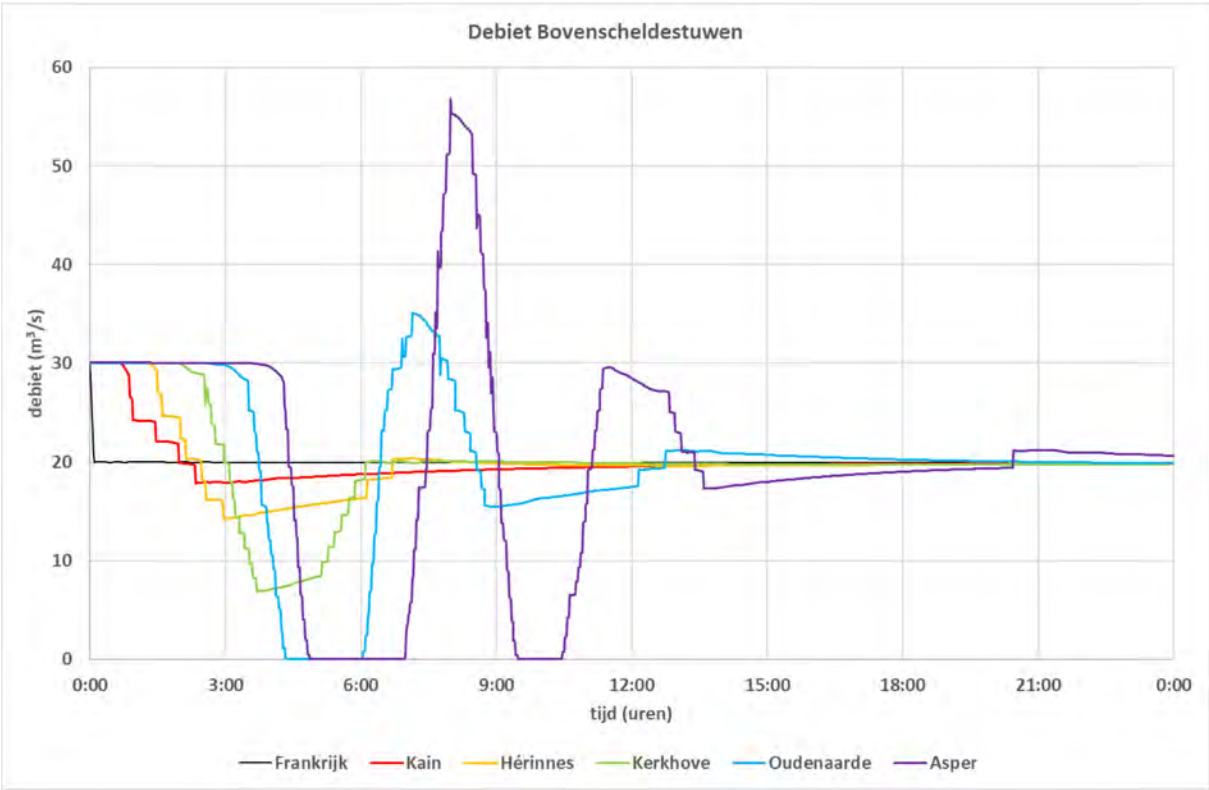
Tijdens de droogweerperiode treedt in Kain slechts een zeer kleine versterking op. Dit is consistent met de theoretische analyse. Dankzij de grote lengte heeft dit pand een zeer hoge retentietijd. Dit resulteert in een stabiel gedrag. Ter hoogte van de overige stuwen treedt er wel een grote berekende versterking op.

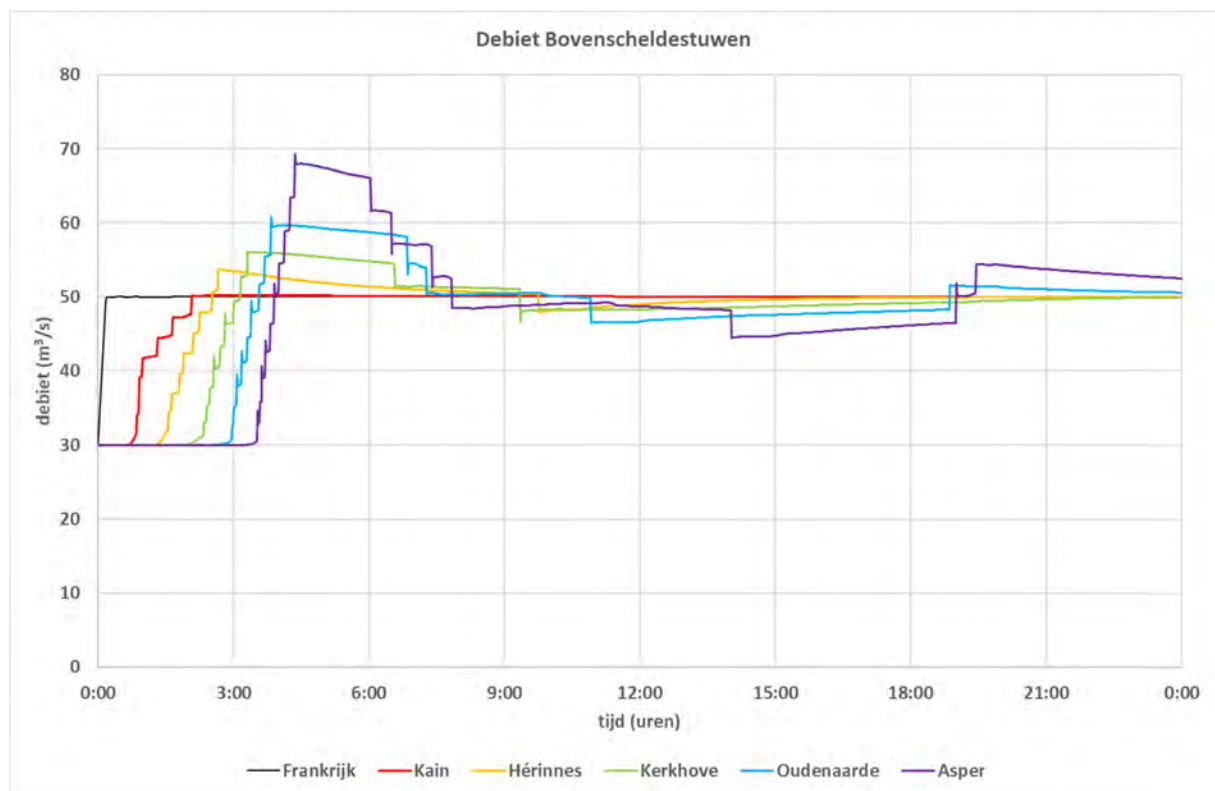
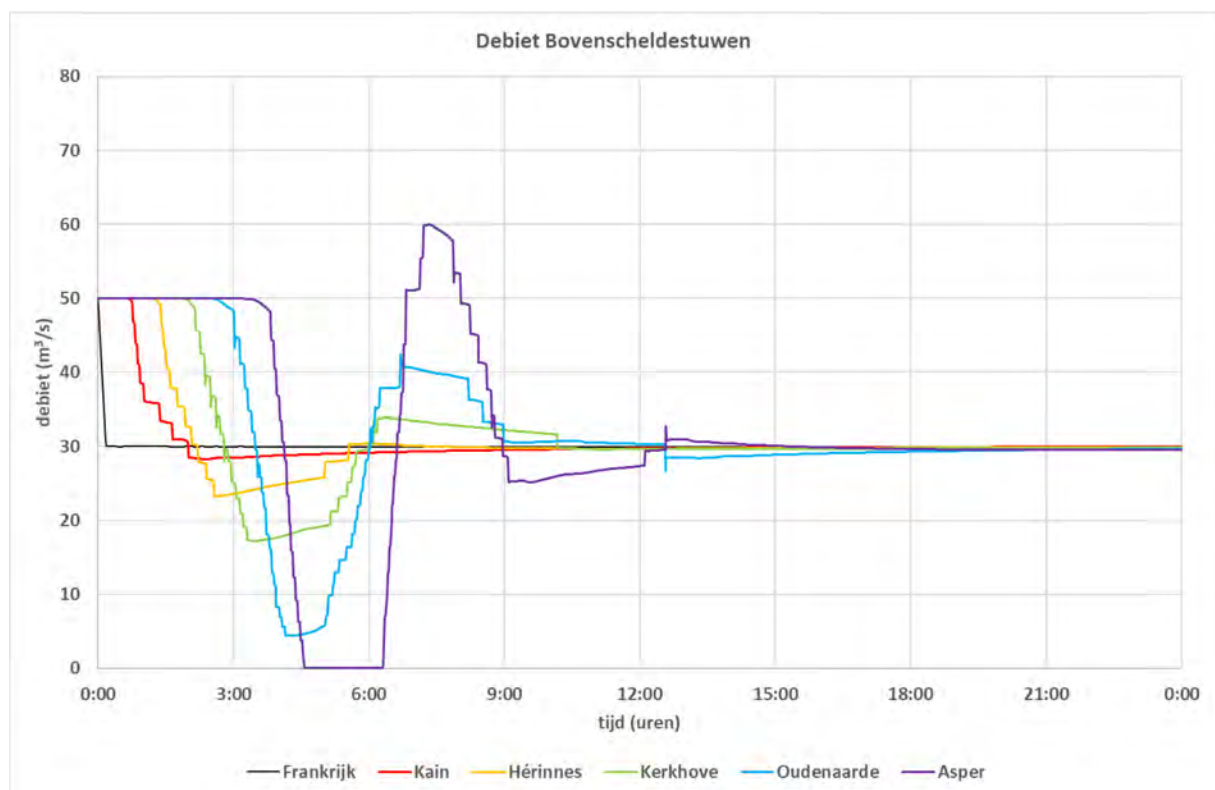
Figuur 5 – Trapvormige debietvariatie van 10 naar 20 m³/sFiguur 6 – Trapvormige debietvariatie van 20 naar 10 m³/s

Figuur 7 – Trapvormige debietvariatie van 20 naar 30 m³/s

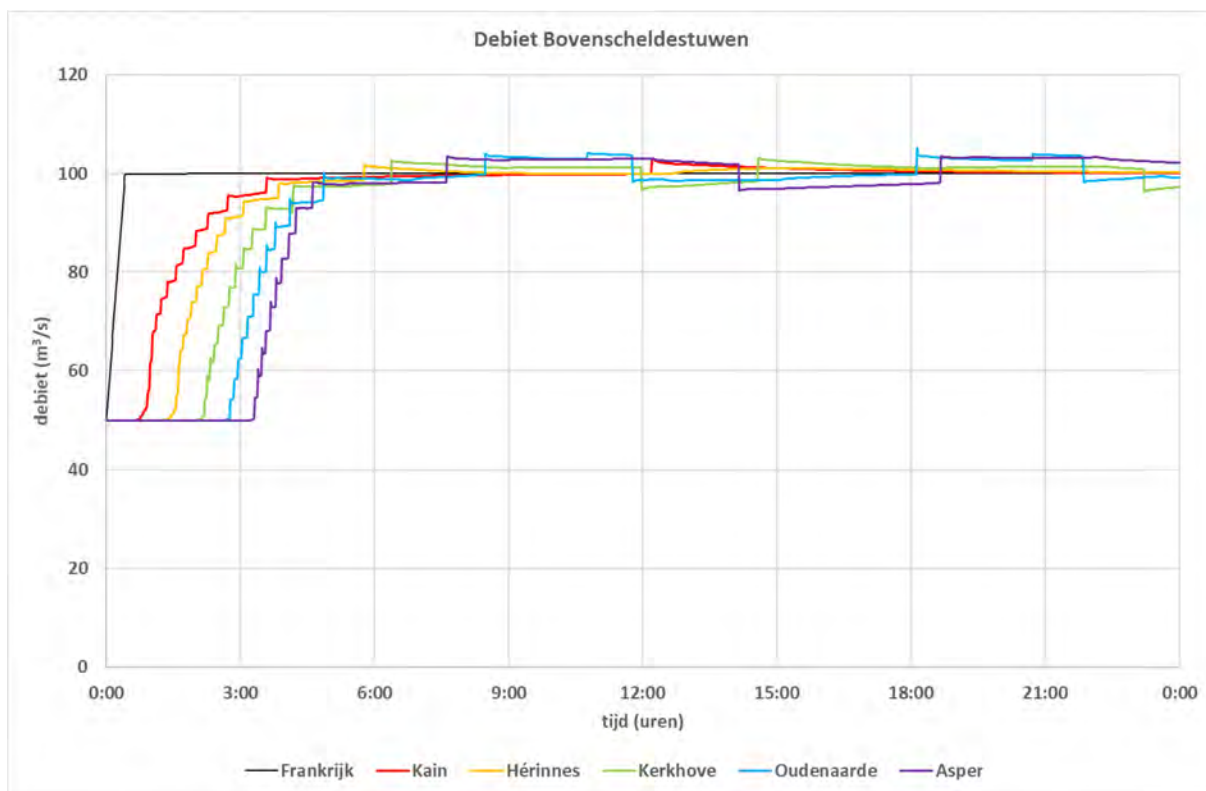


Figuur 8 – Trapvormige debietvariatie van 30 naar 20 m³/s

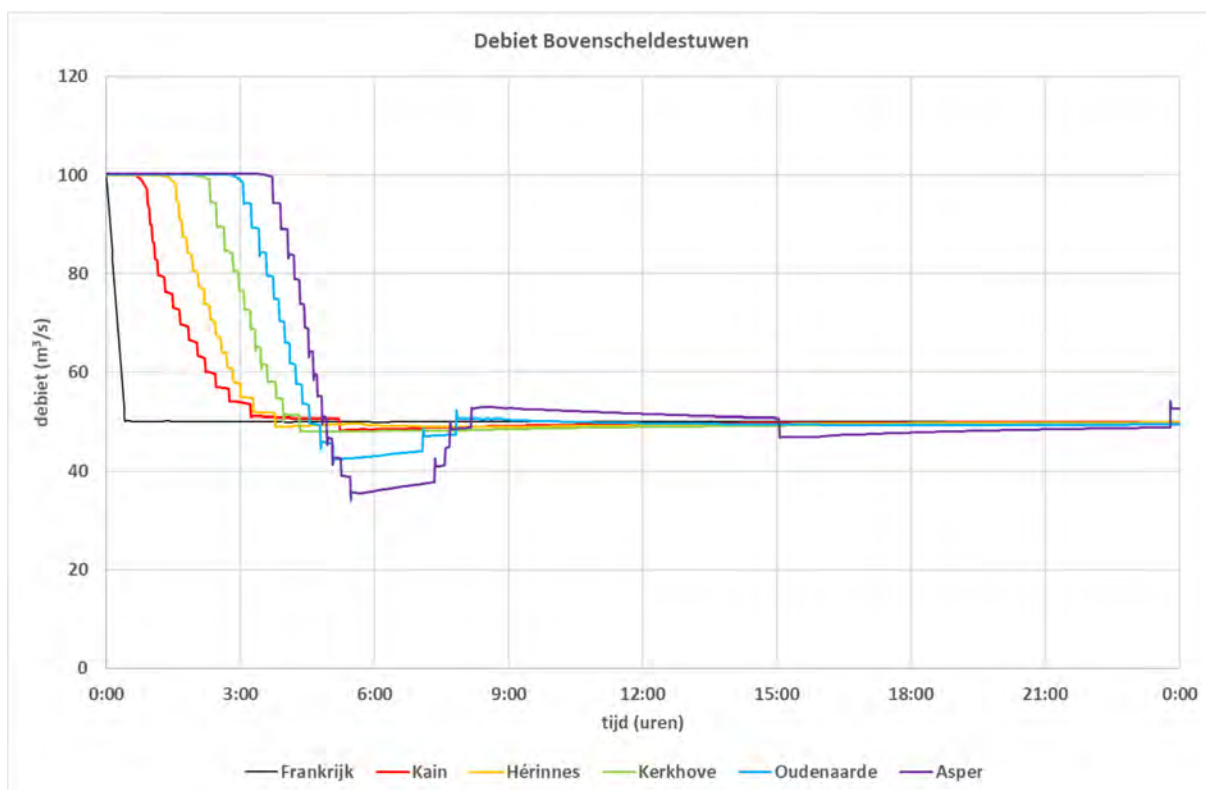


Figuur 9 – Trapvormige debietvariatie van 30 naar 50 m³/sFiguur 10 – Trapvormige debietvariatie van 50 naar 30 m³/s

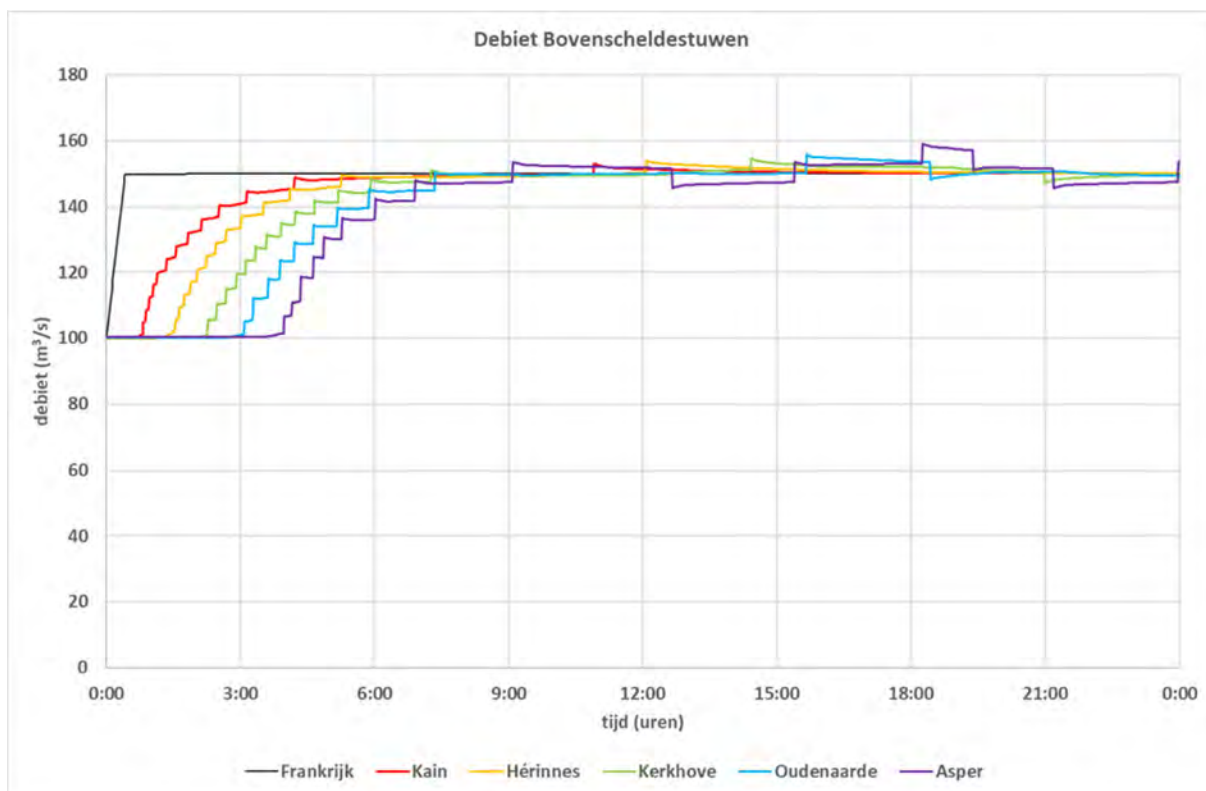
Figuur 11 – Trapvormige debietvariatie van 50 naar 100 m³/s



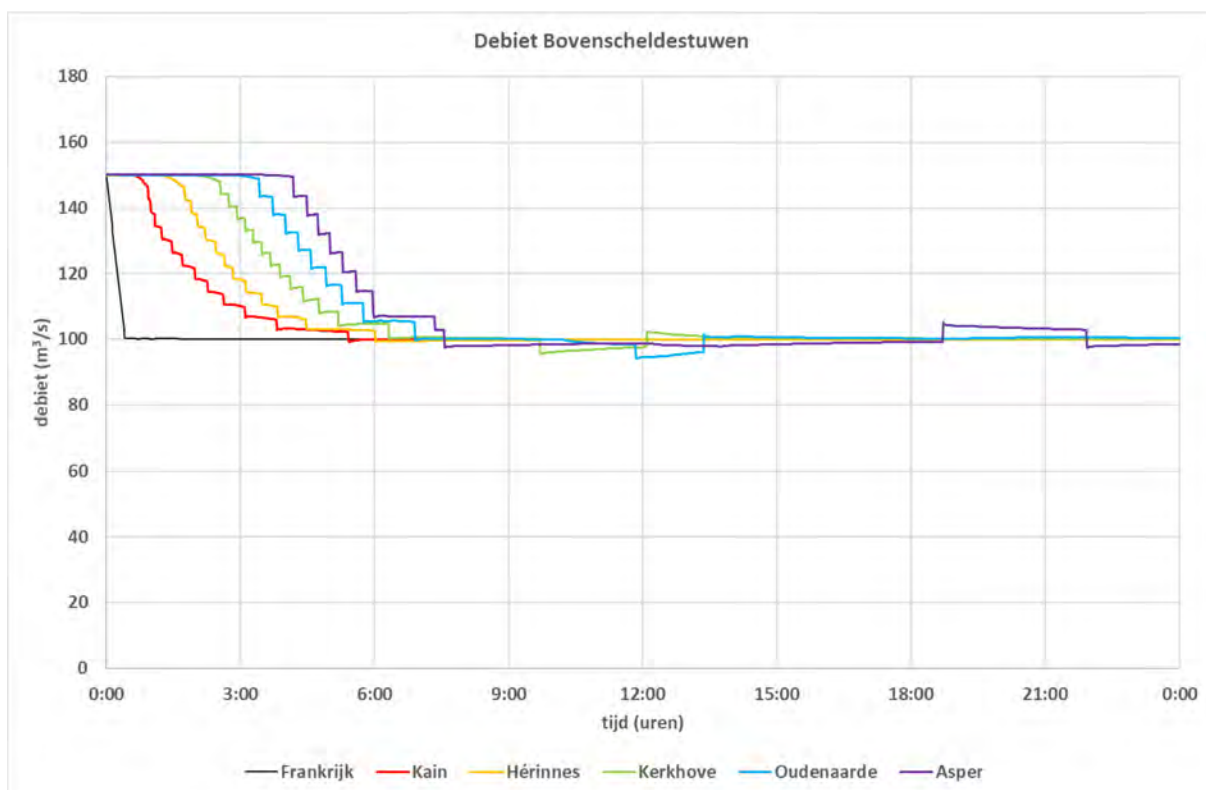
Figuur 12 – Trapvormige debietvariatie van 100 naar 50 m³/s



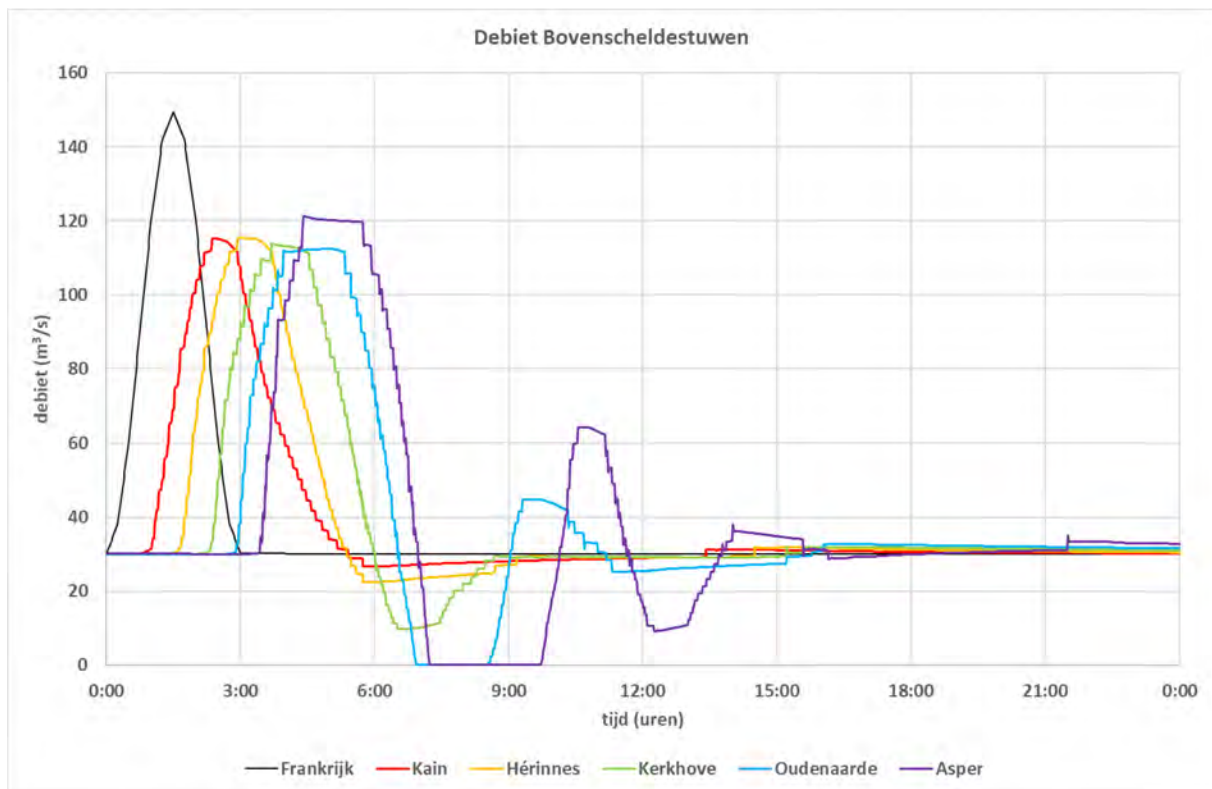
Figuur 13 – Trapvormige debietvariatie van 100 naar 150 m³/s



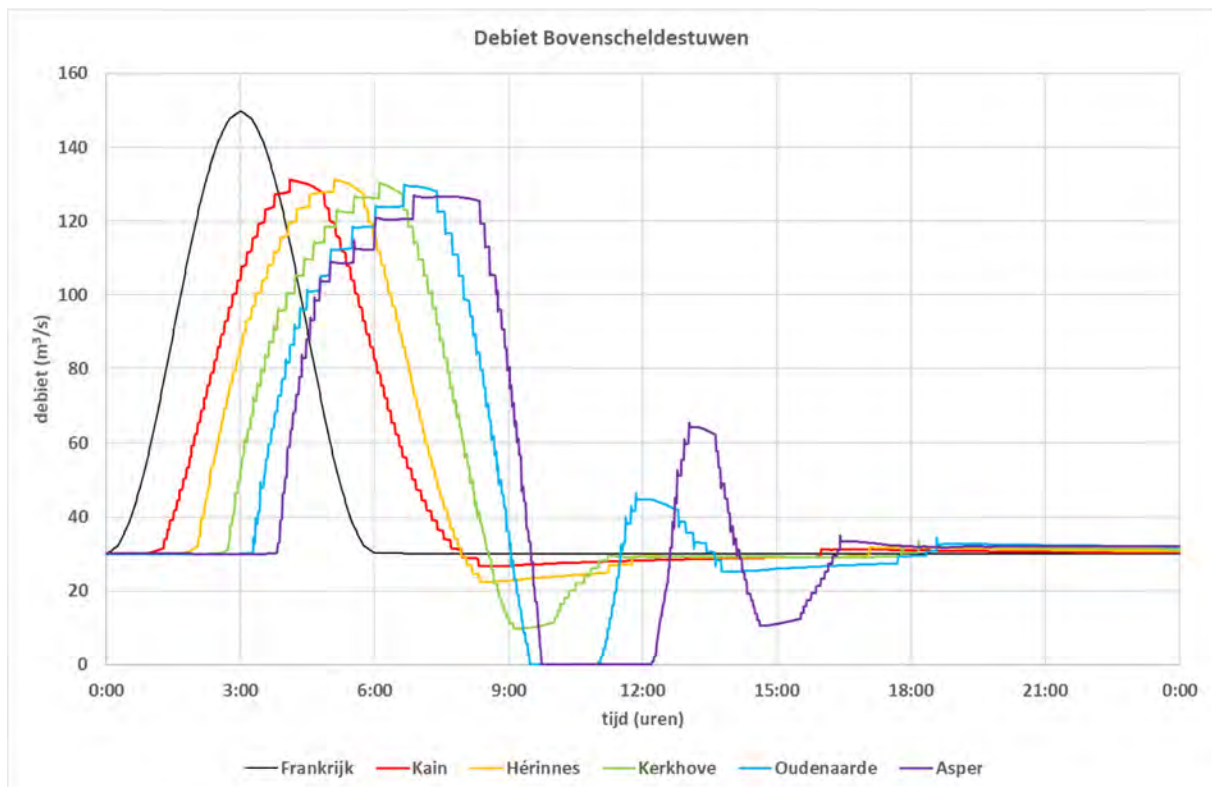
Figuur 14 – Trapvormige debietvariatie van 150 naar 100 m³/s



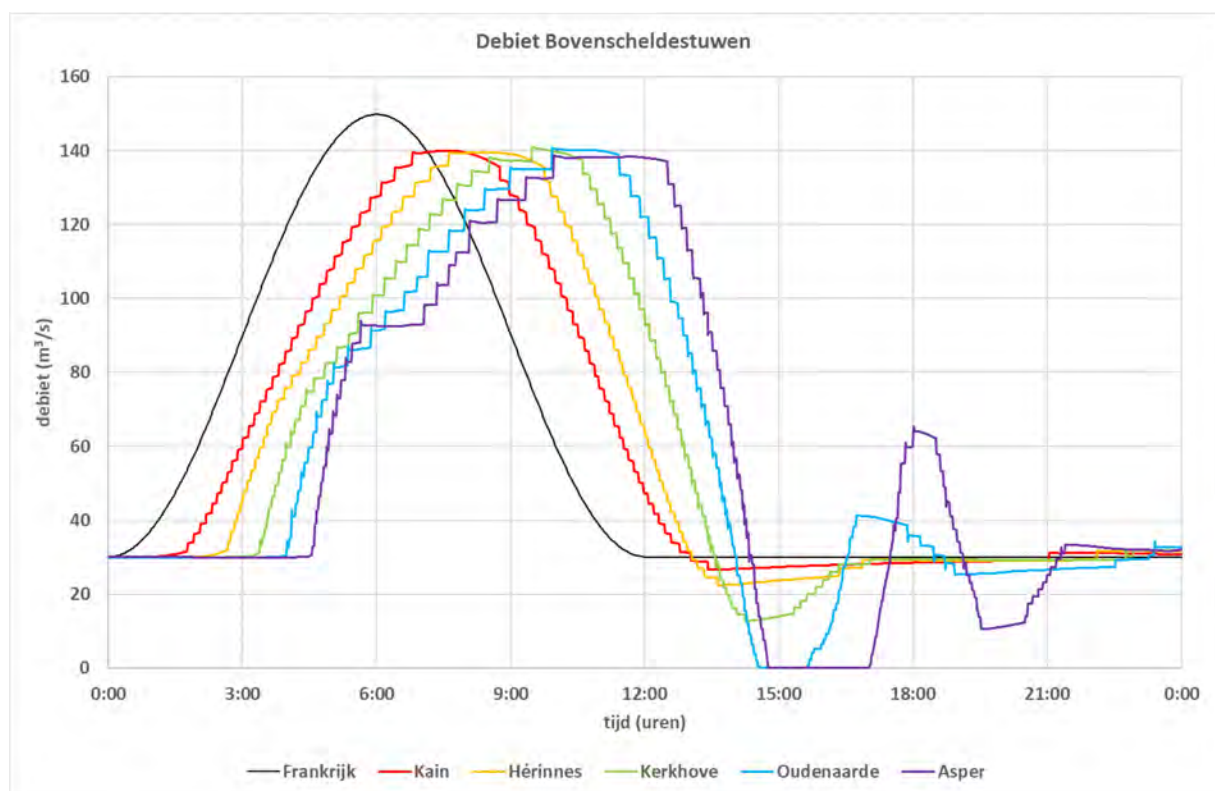
Figuur 15 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur



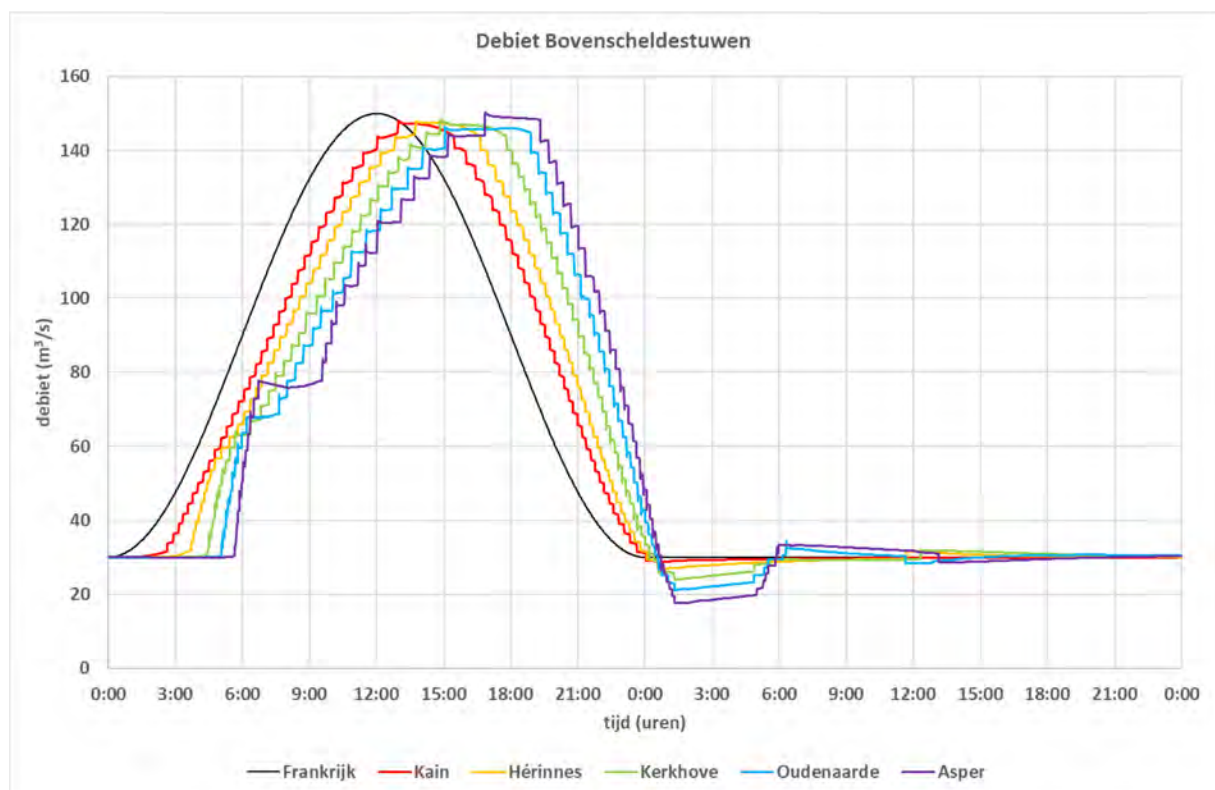
Figuur 16 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur



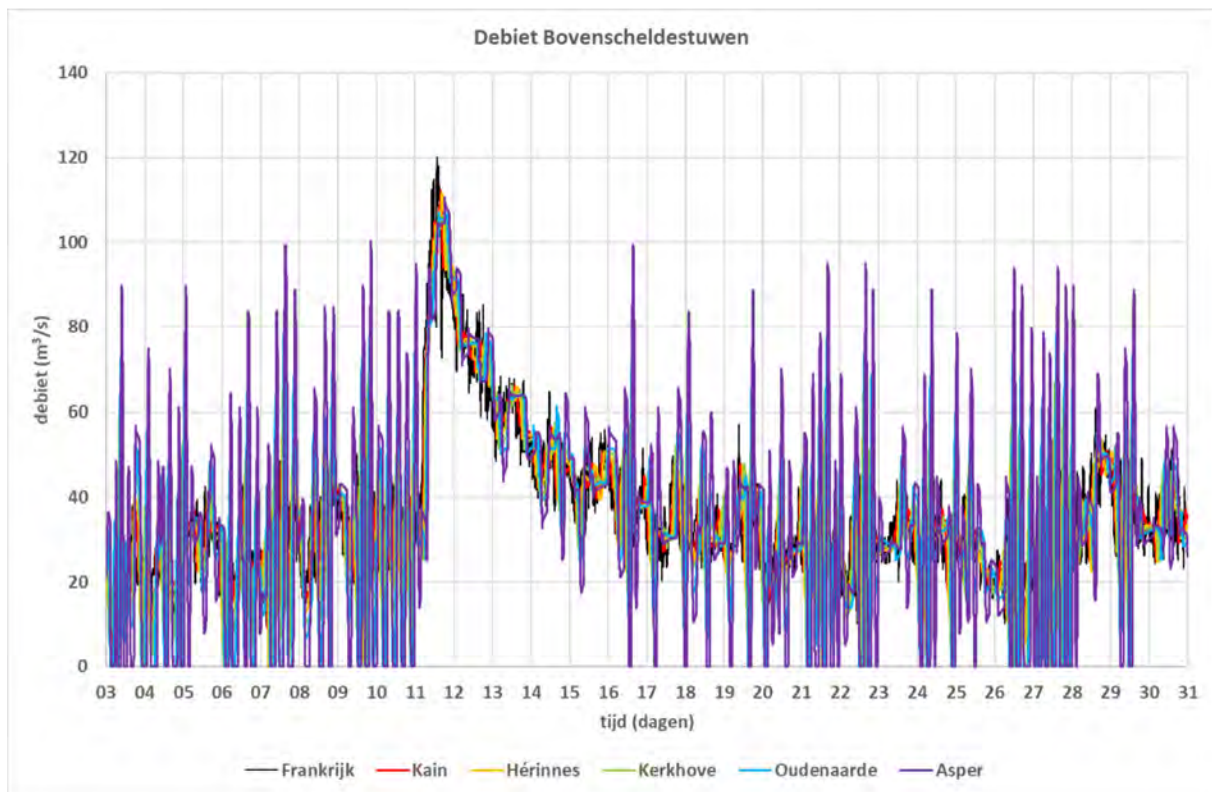
Figuur 17 – Sinusoidaal hydrogram met een duur van 12 uur



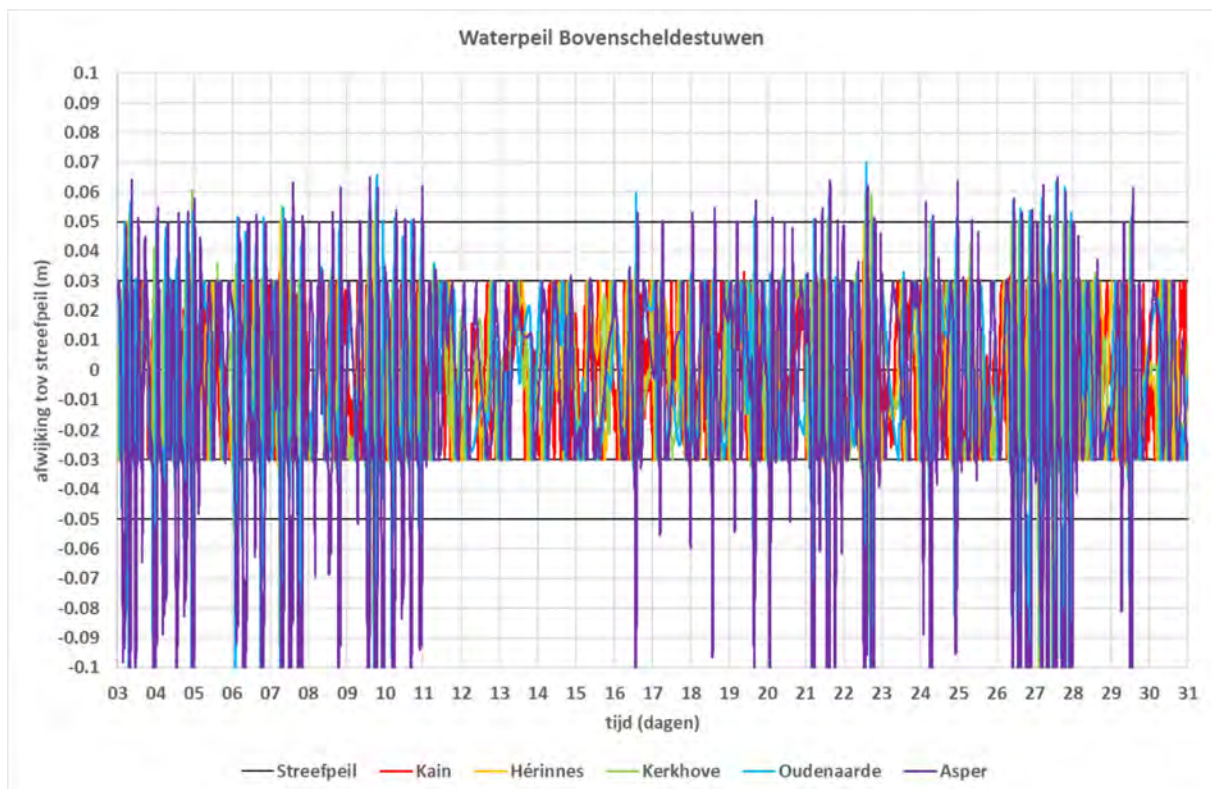
Figuur 18 – Sinusoidaal hydrogram met een duur van 24 uur



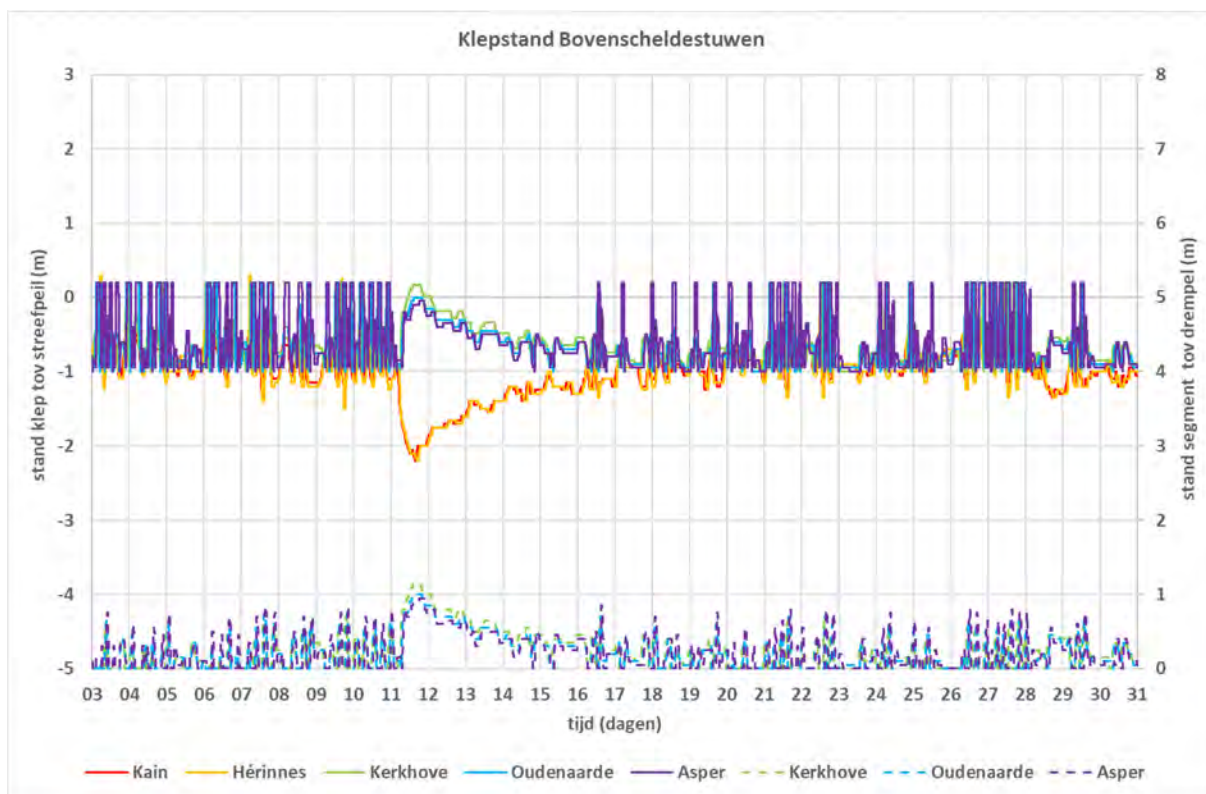
Figuur 19 – Debiet tijdens was van maart 2018



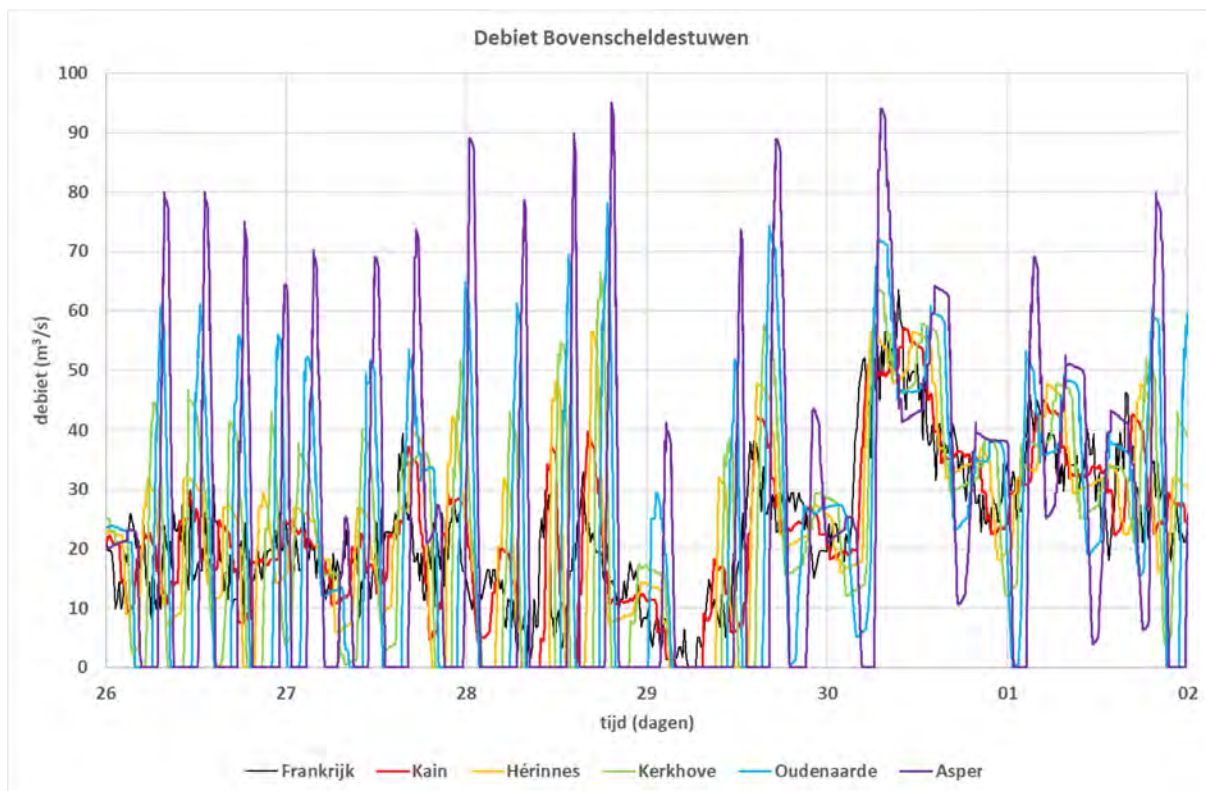
Figuur 20 – Waterpeil tijdens was van maart 2018



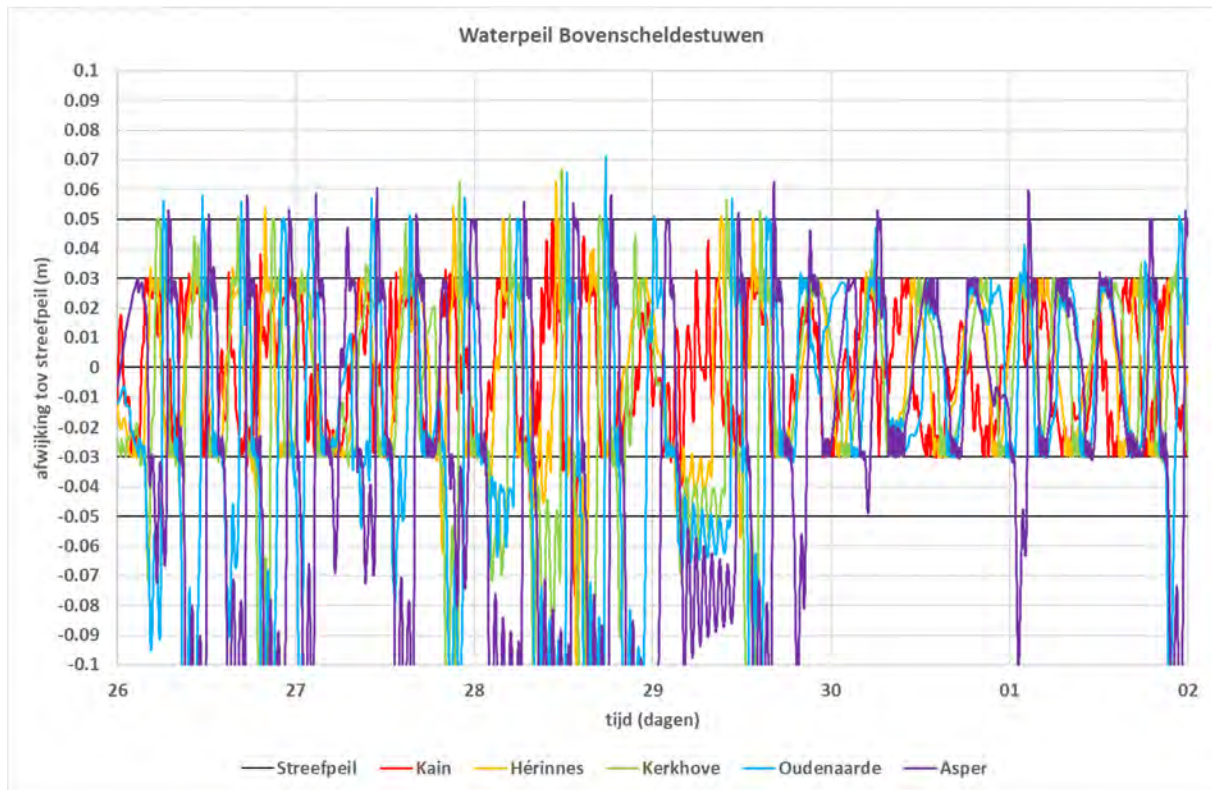
Figuur 21 – Klepstand tijdens was van maart 2018



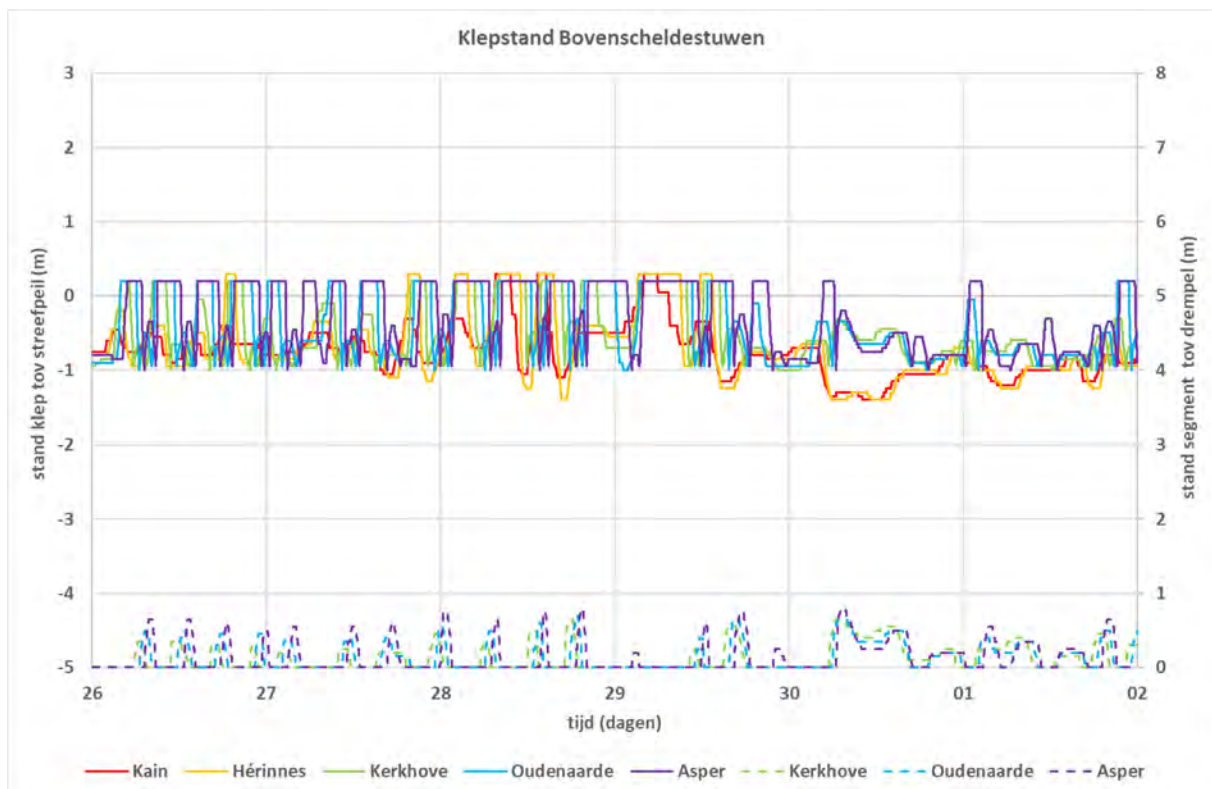
Figuur 22 – Debiet tijdens droogweeperperiode van april 2018



Figuur 23 – Waterpeil tijdens droogweeperiode van april 2018



Figuur 24 – Klepstand tijdens droogweeperiode van april 2018



Volledige jaar 2019 zonder zijdelingse instroming

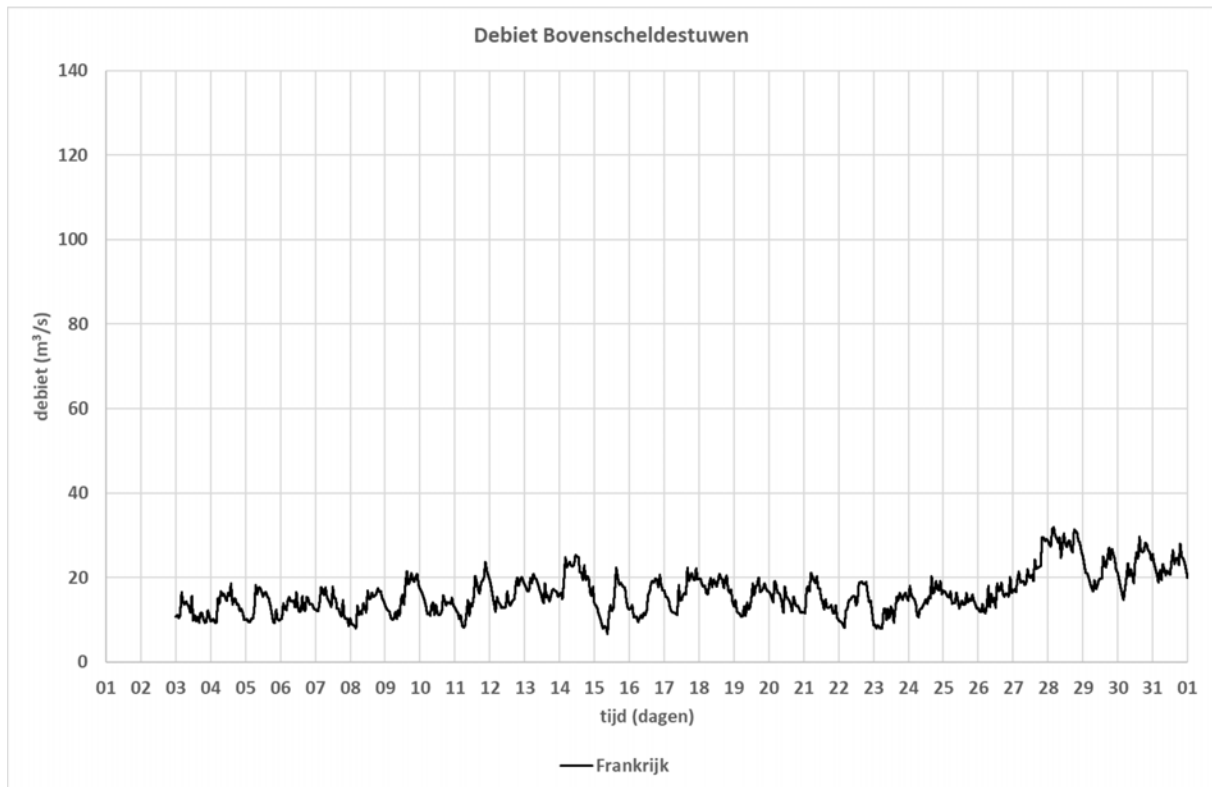
De resultaten van de simulaties zonder zijdelingse instroming worden getoond in Figuur 25 t.e.m. Figuur 48. Voor elke simulatie werden twee figuren opgemaakt: één met de instroming vanuit Frankrijk en één met de debieten over de stuwen in Wallonië en Vlaanderen.

De figuren met de debieten aan de modelrand tonen aan dat er reeds kleine debietschommelingen aanwezig zijn in de meetreeks van Tournai. Aangezien de meetpost van Tournai net opwaarts van de stuw van Kain gelegen is, worden deze kleine schommelingen mogelijk veroorzaakt door de bewegingen van de stuw van Kain.

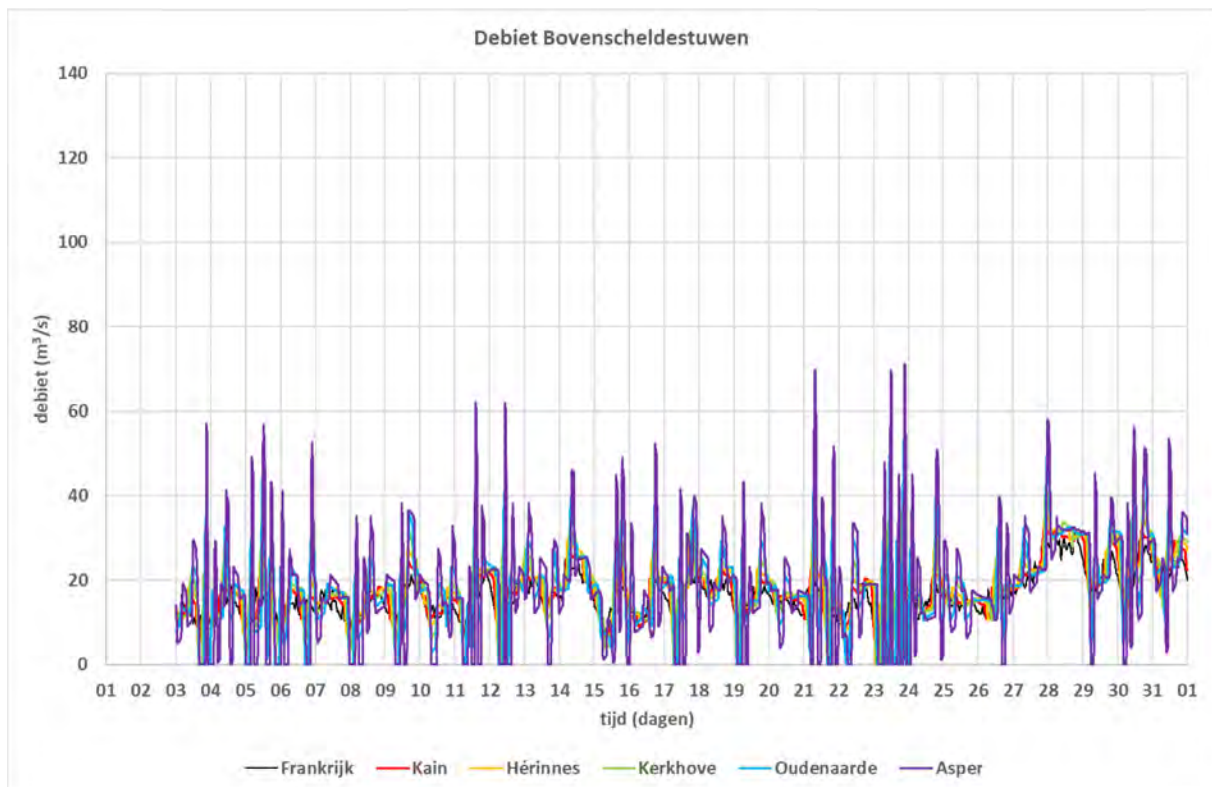
Uit de figuren met berekende debieten voor de stuwen in Wallonië en Vlaanderen blijkt dat de kleine debietschommelingen afkomstig uit Frankrijk of Wallonië versterkt worden tot veel grotere debietschommelingen in Vlaanderen. Dit gebeurt vooral bij lage afvoeren.

In het model hebben alle stuwen hetzelfde sturingsalgoritme en dezelfde sturingsparameters. Aangezien de verschillende panden allemaal ongeveer even lang zijn, dragen de stuwen van Kerkhove, Oudenaarde en Asper dan ook allemaal in ongeveer dezelfde mate bij tot de versterking van de afvoergolven. In werkelijkheid heeft de stuw van Oudenaarde een ander sturingsalgoritme en hebben de stuwen van Kerkhove en Asper wel hetzelfde sturingsalgoritme, maar niet dezelfde sturingsparameters.

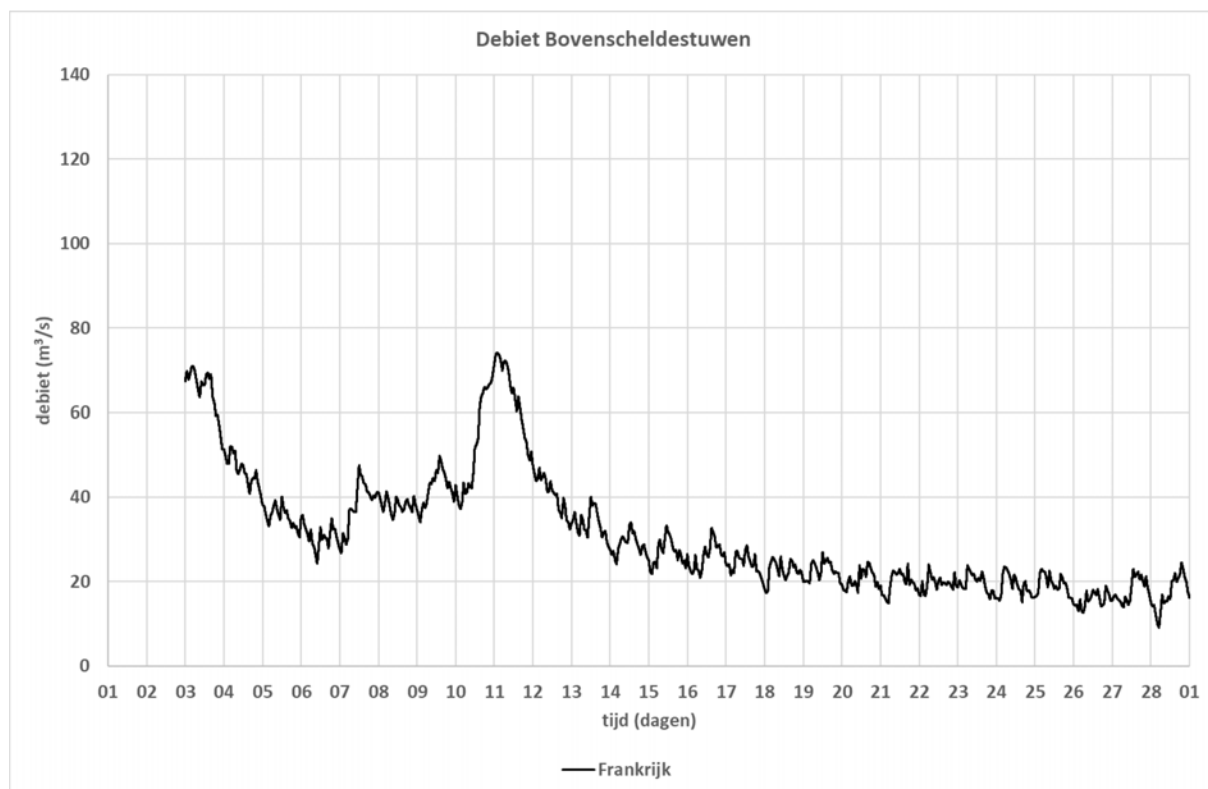
Figuur 25 – Januari 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



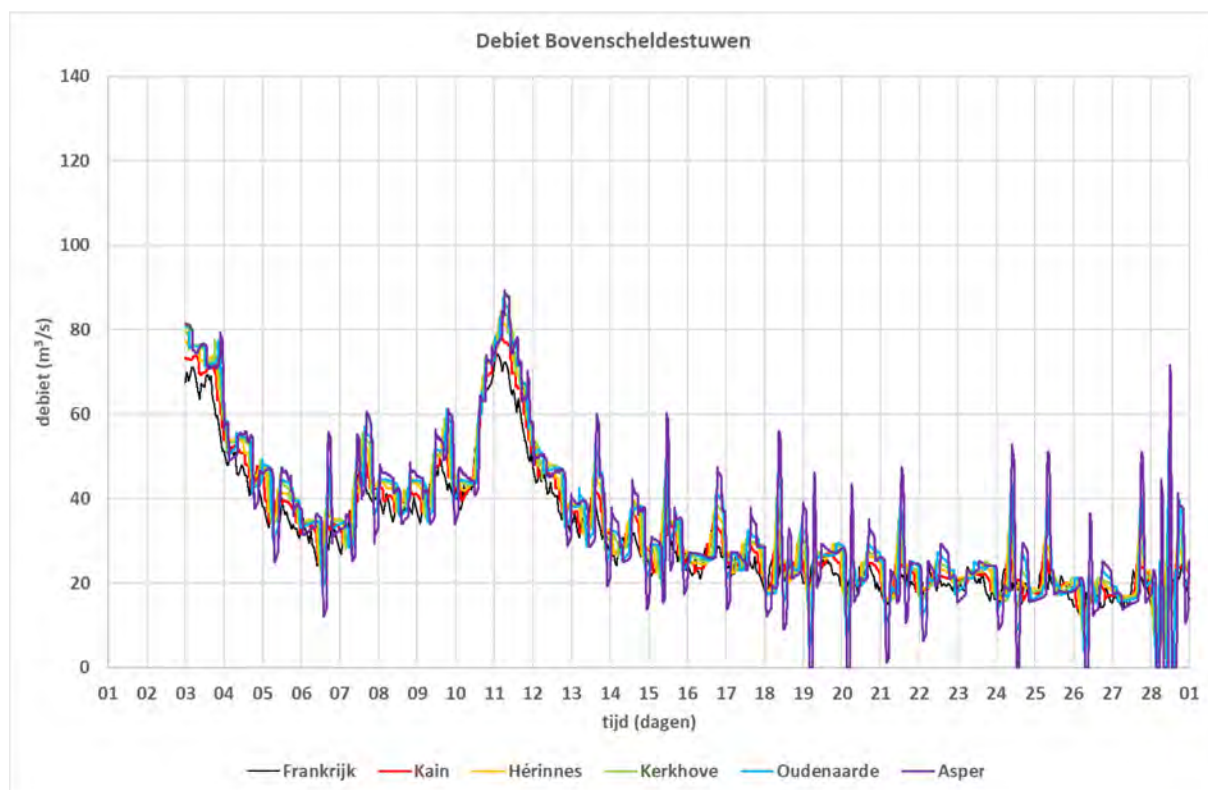
Figuur 26 – Januari 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



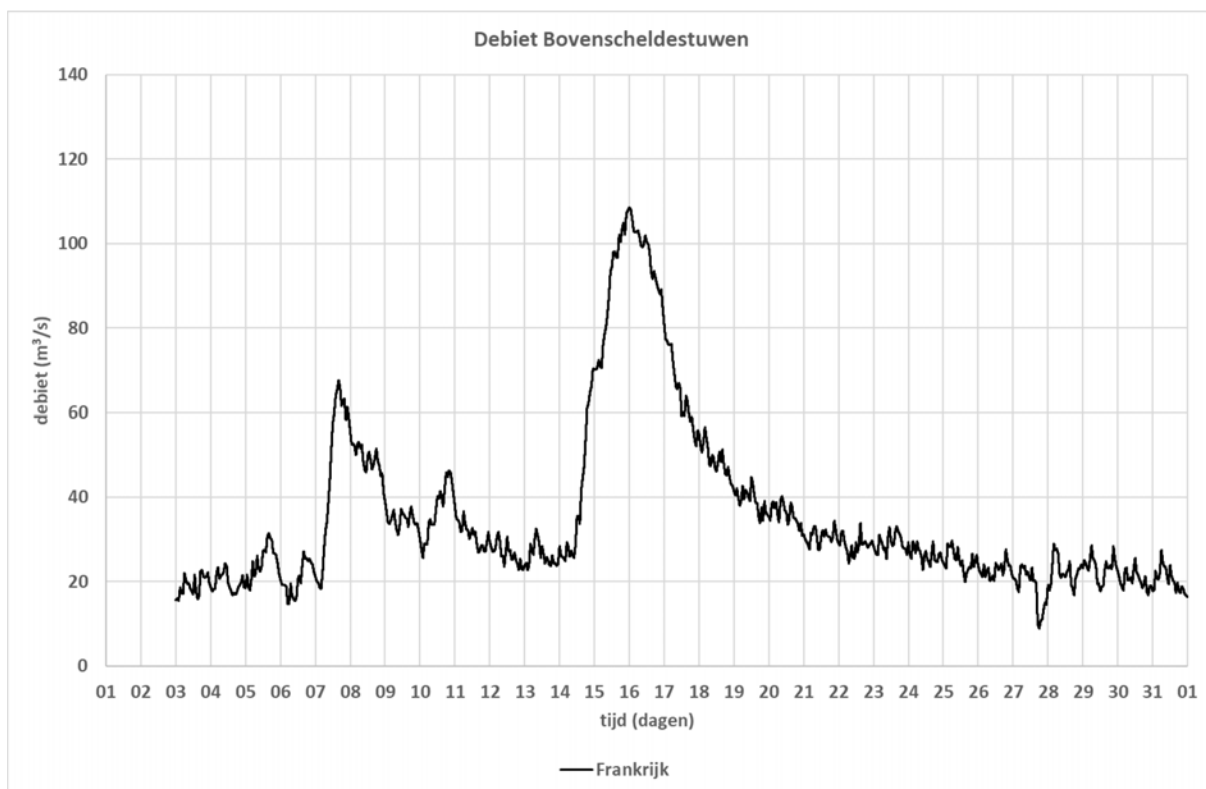
Figuur 27 – Februari 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



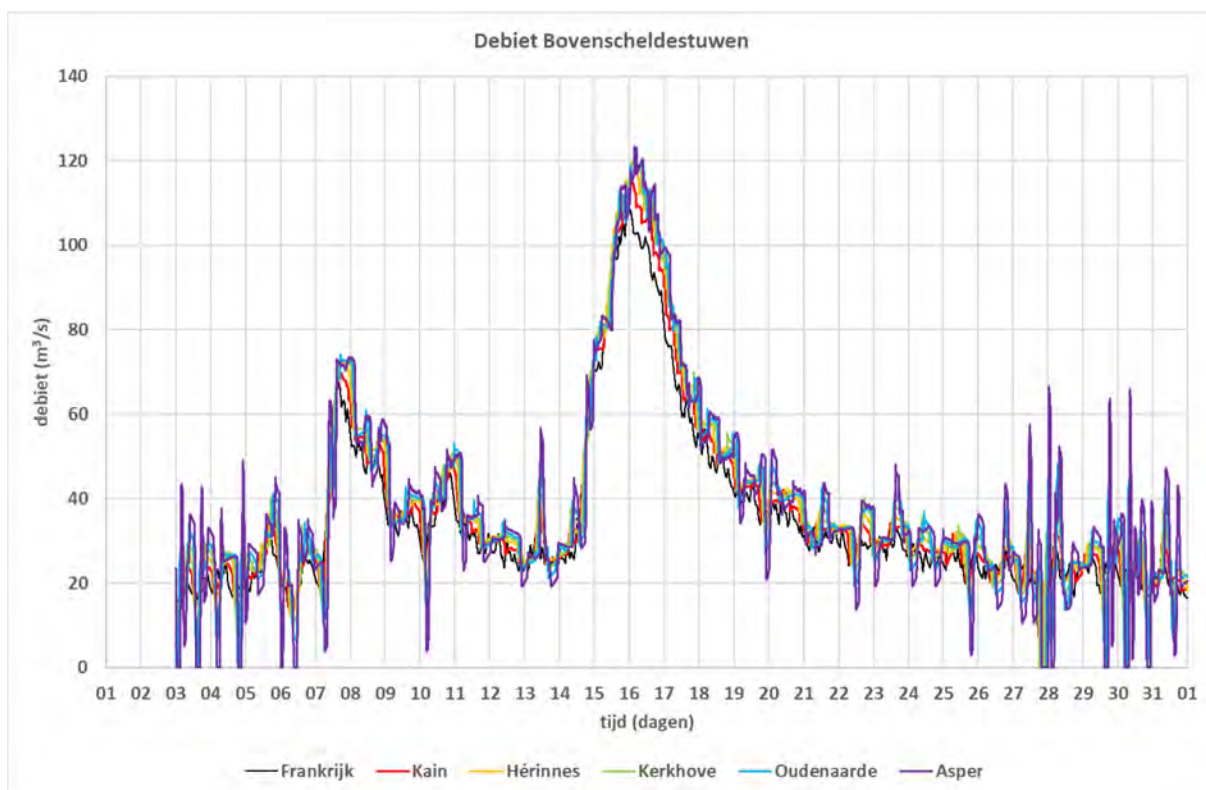
Figuur 28 – Februari 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



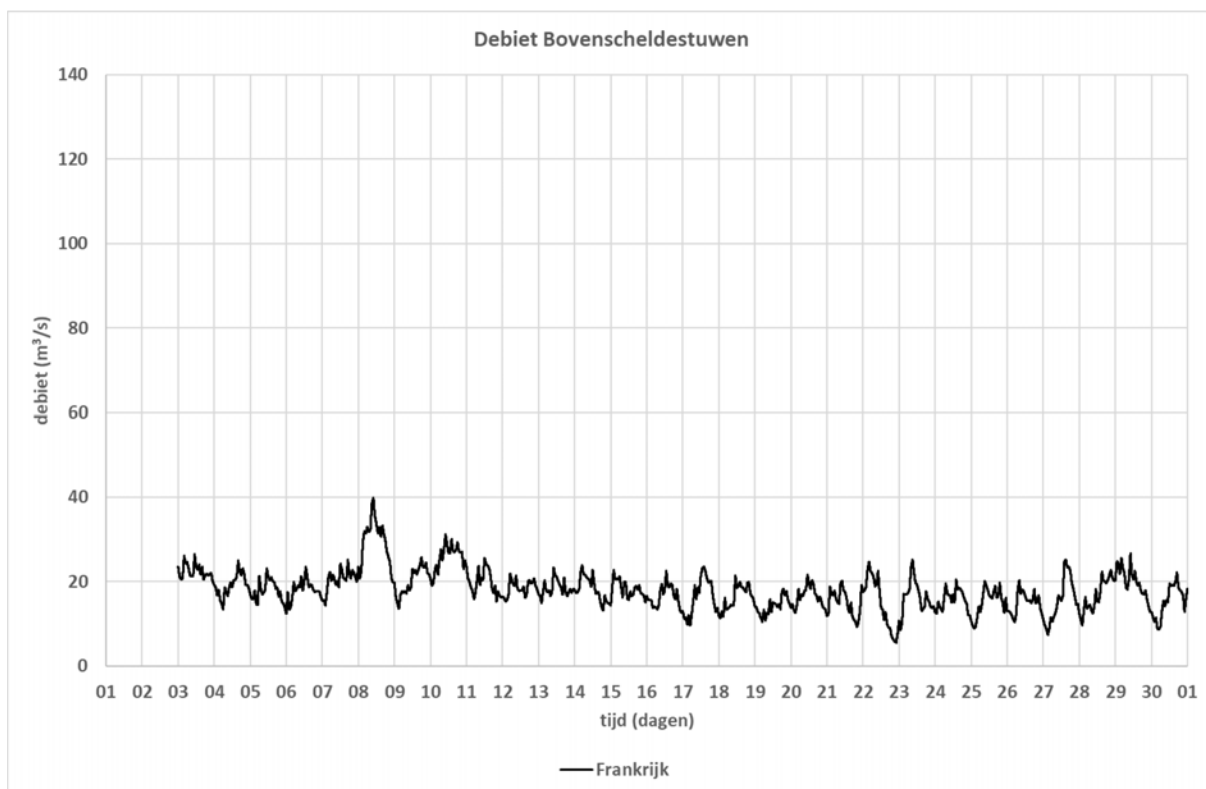
Figuur 29 – Maart 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



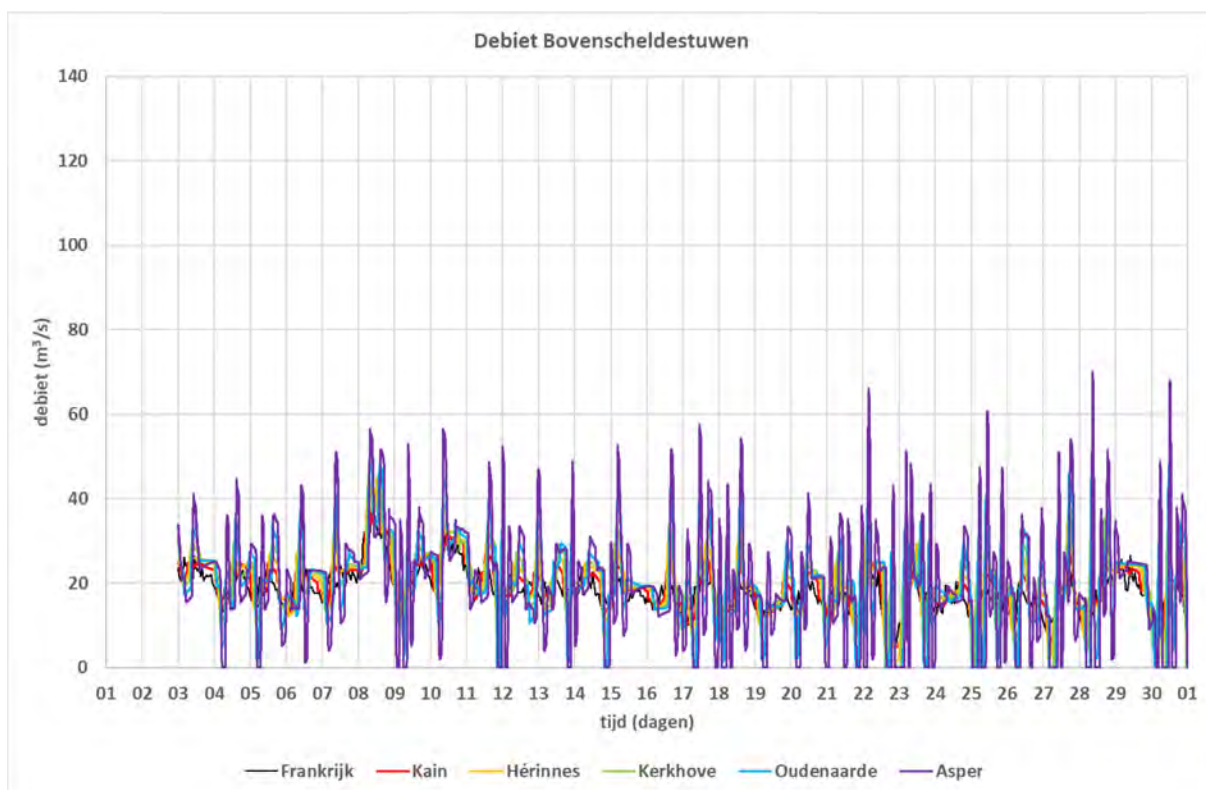
Figuur 30 – Maart 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



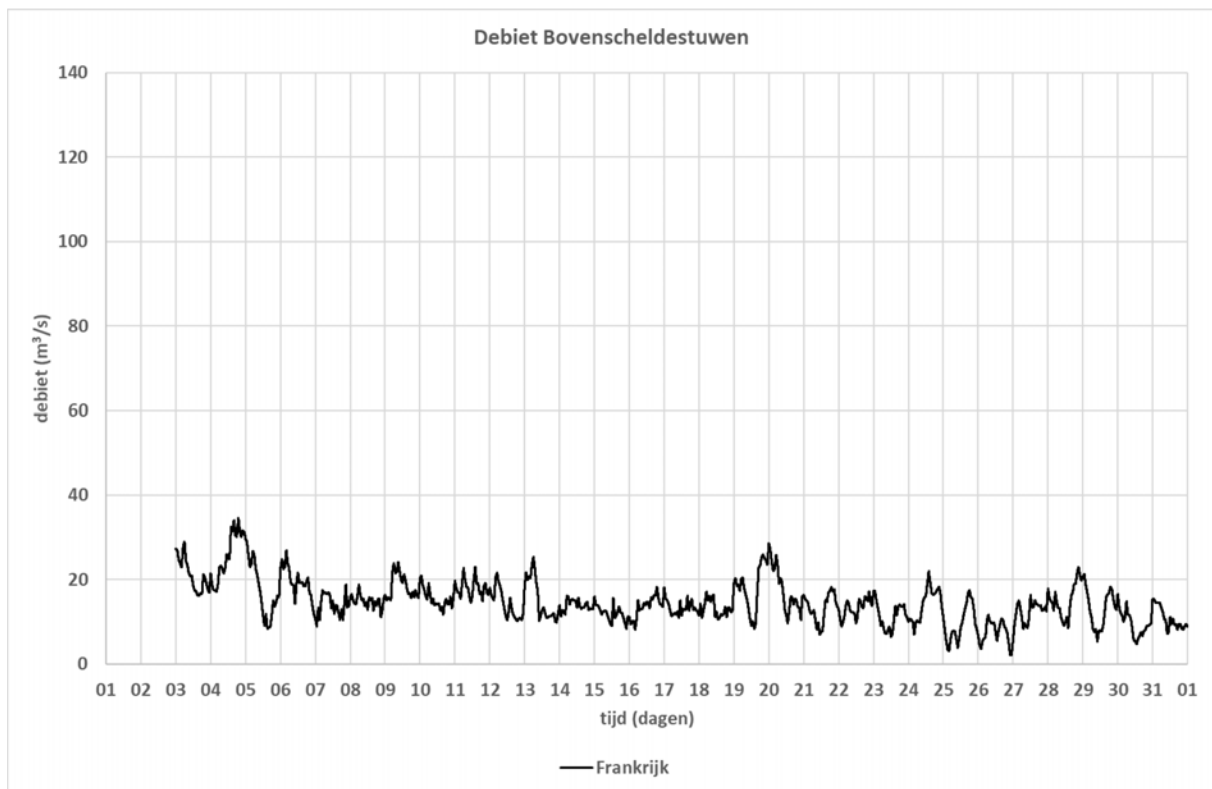
Figuur 31 – April 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



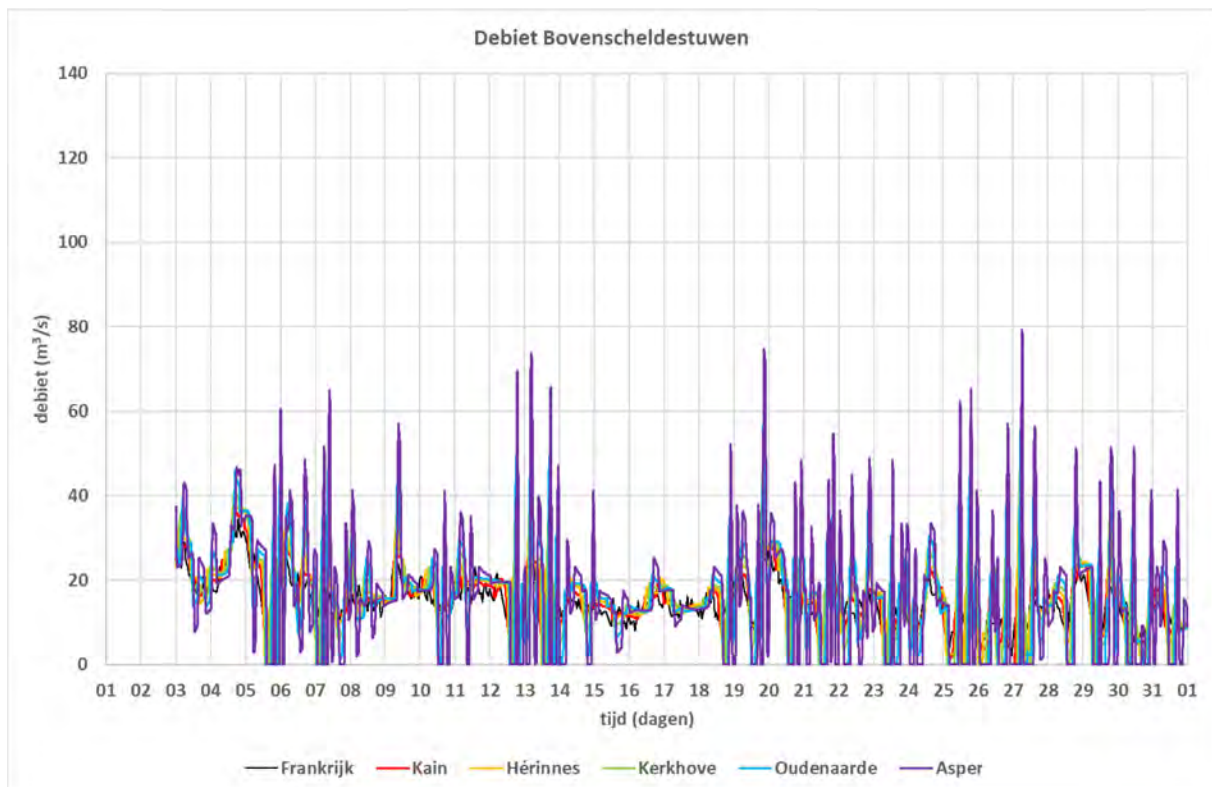
Figuur 32 – April 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



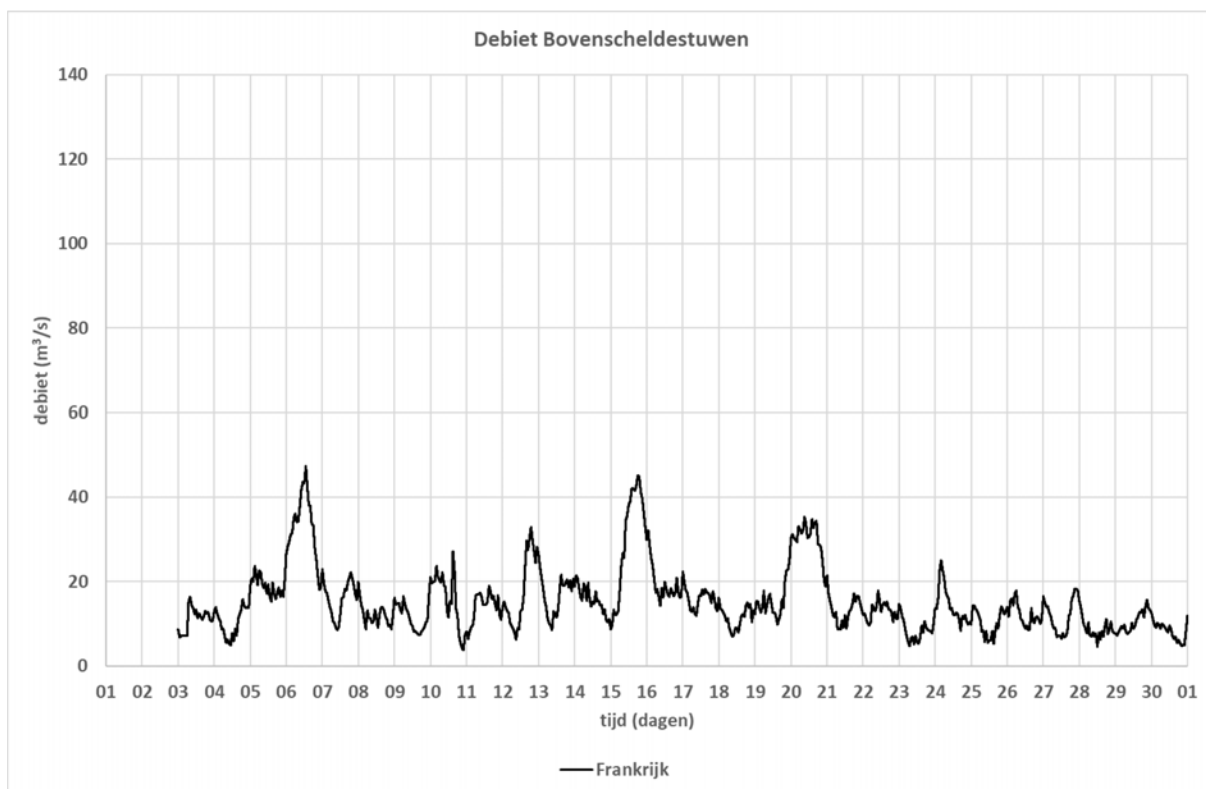
Figuur 33 – Mei 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



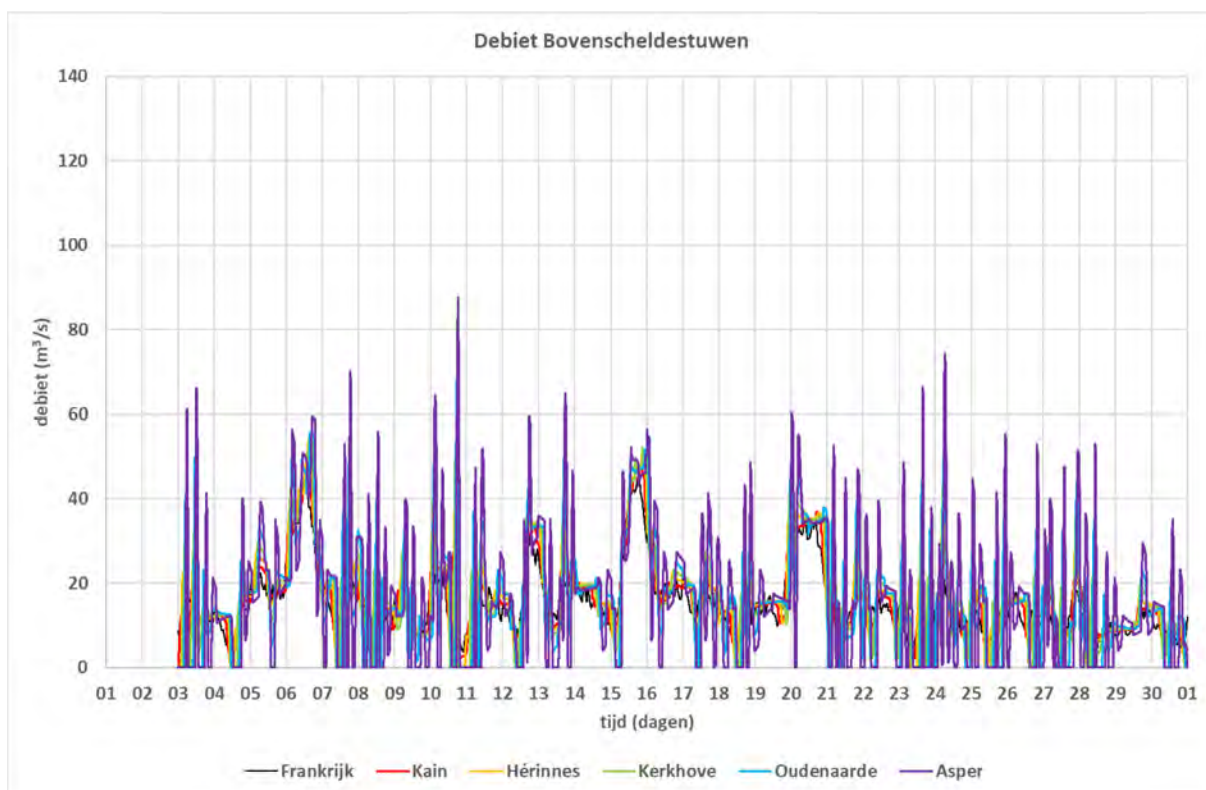
Figuur 34 – Mei 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



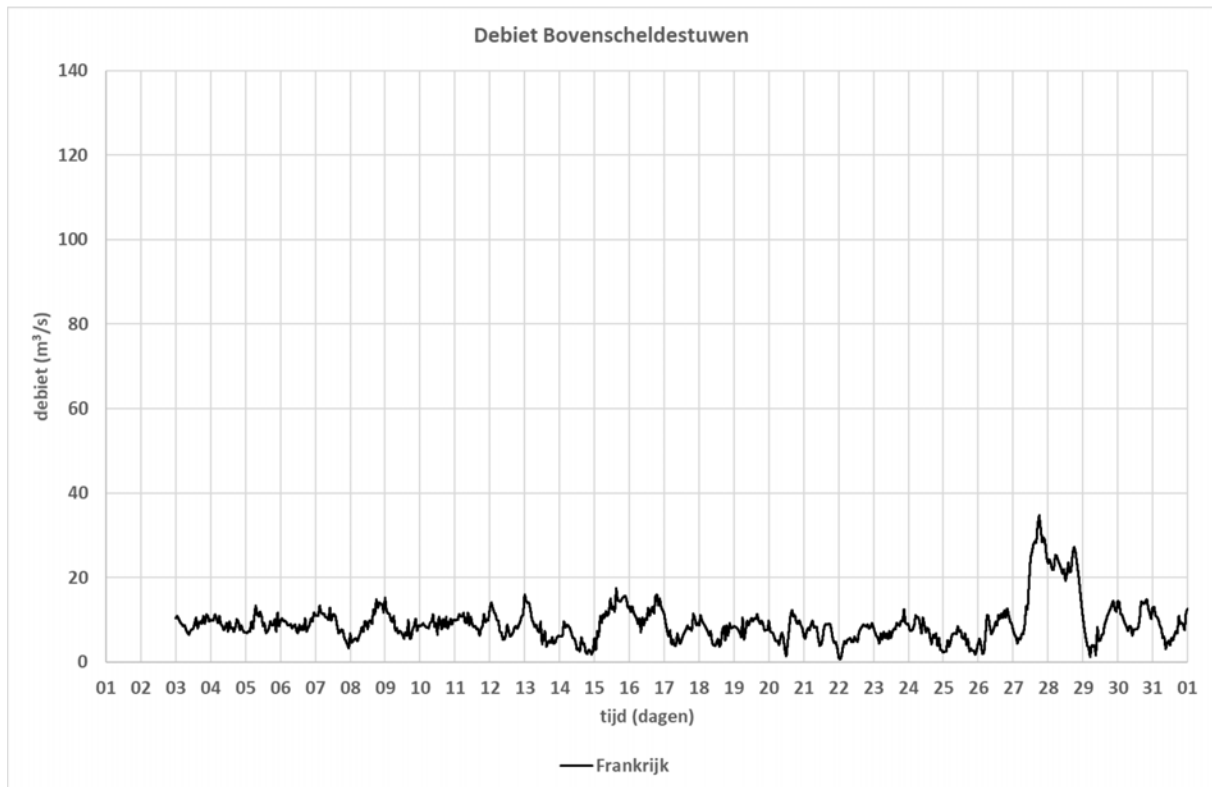
Figuur 35 – Juni 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



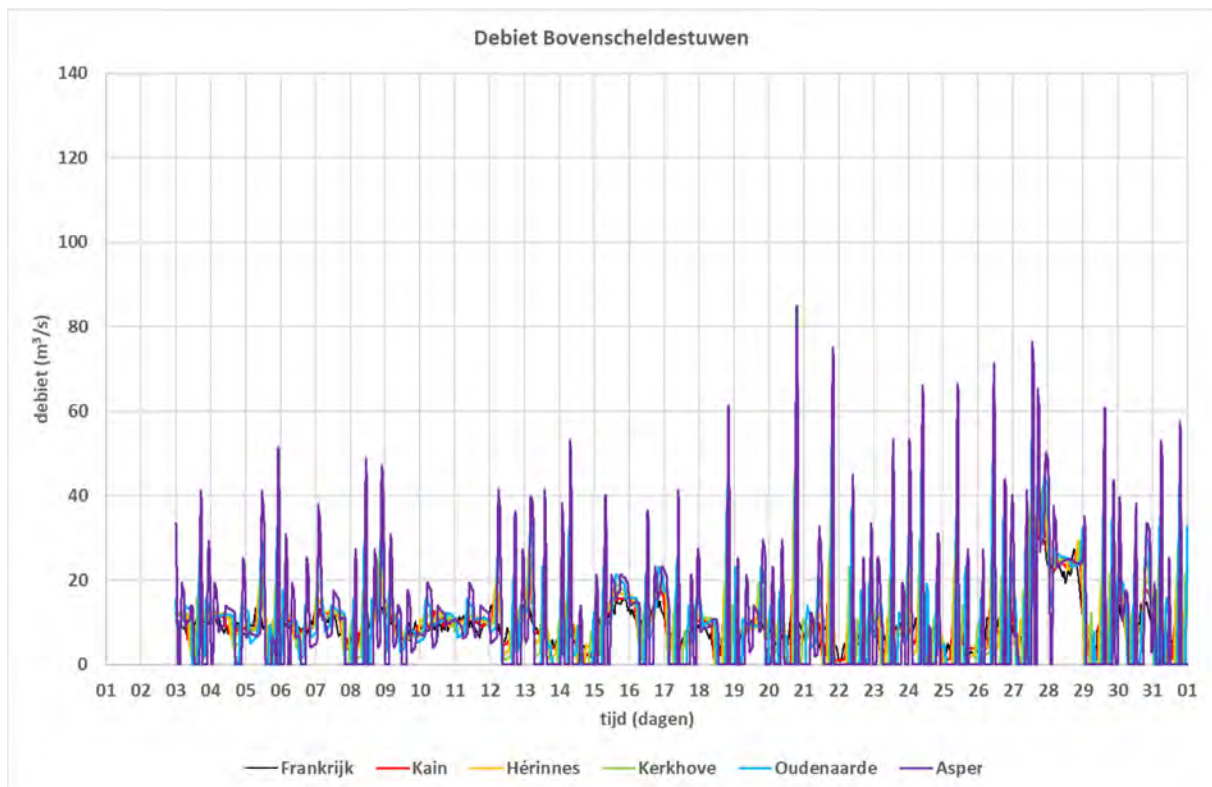
Figuur 36 – Juni 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



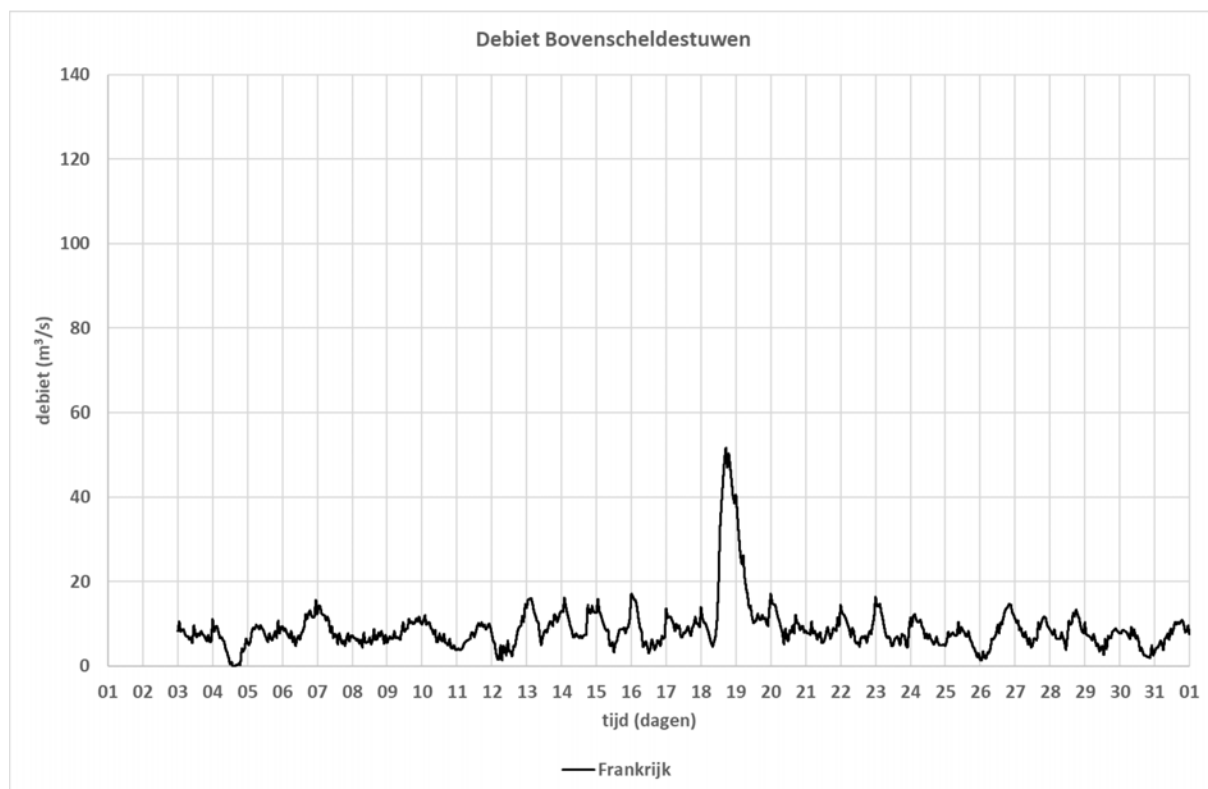
Figuur 37 – Juli 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



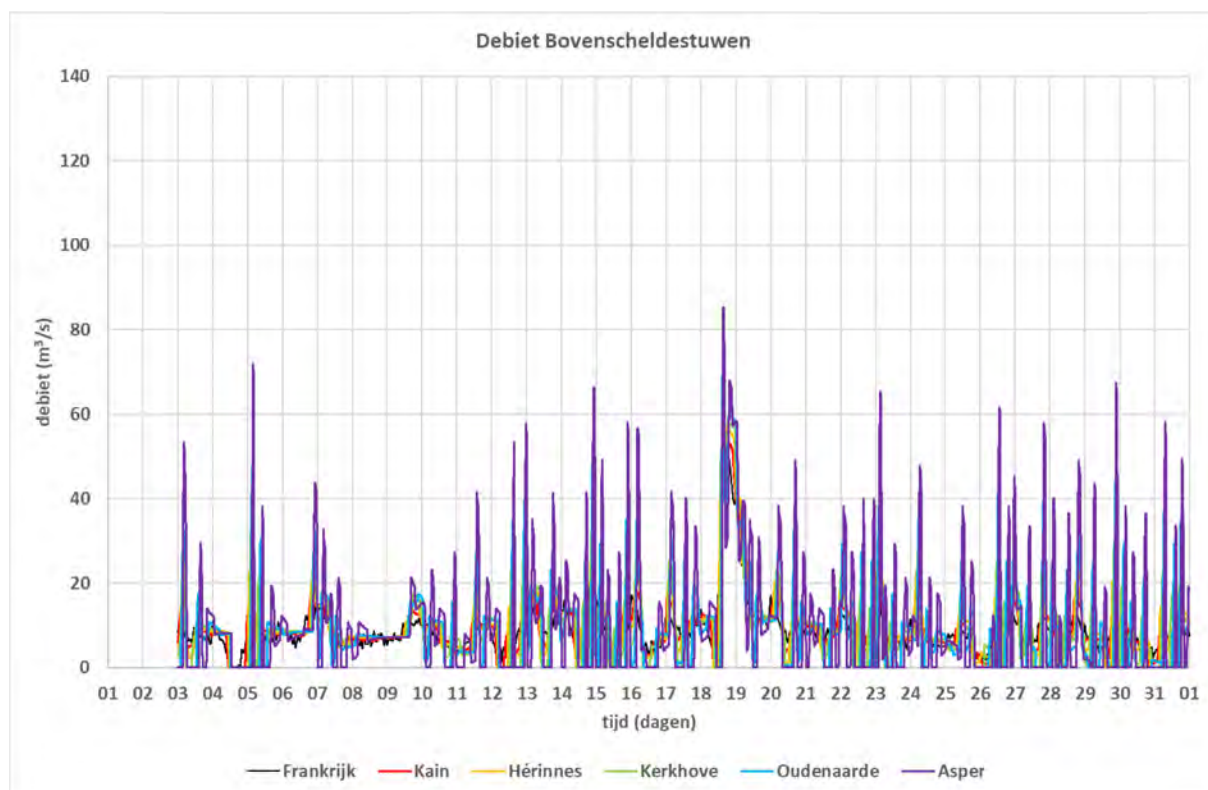
Figuur 38 – Juli 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



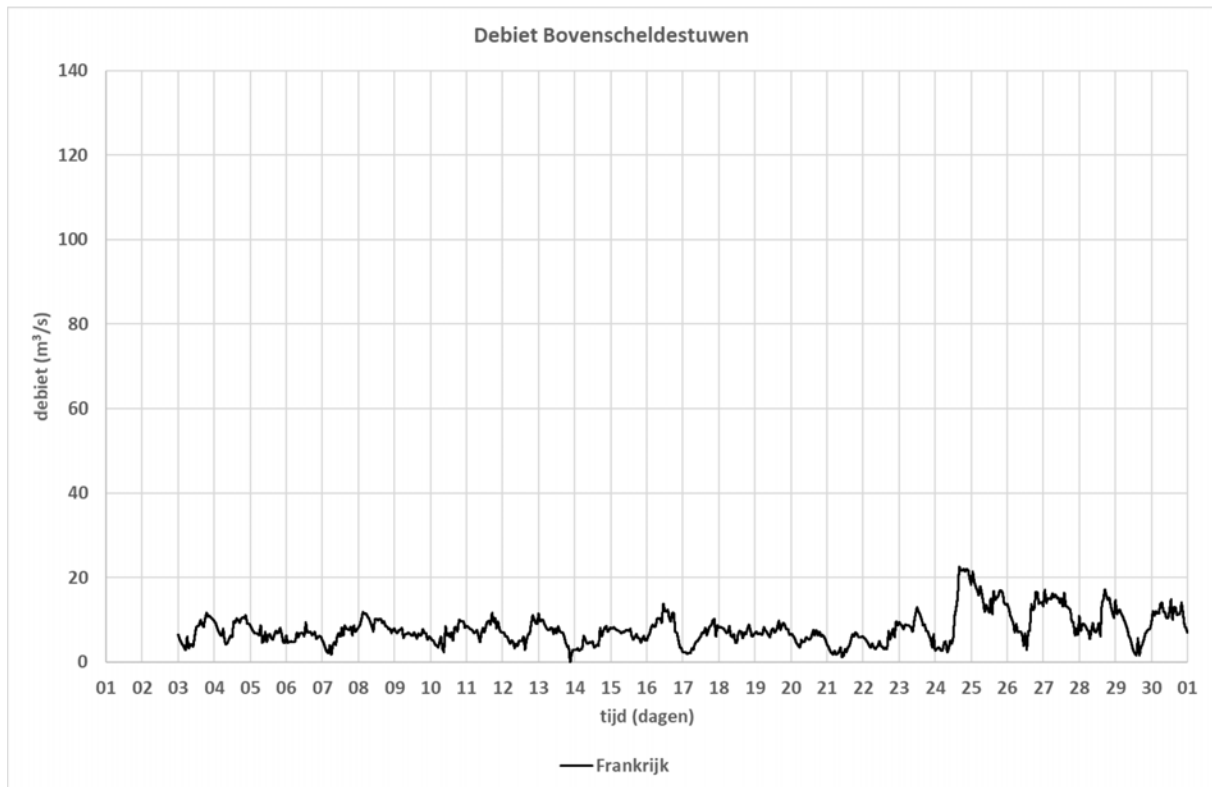
Figuur 39 – Augustus 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



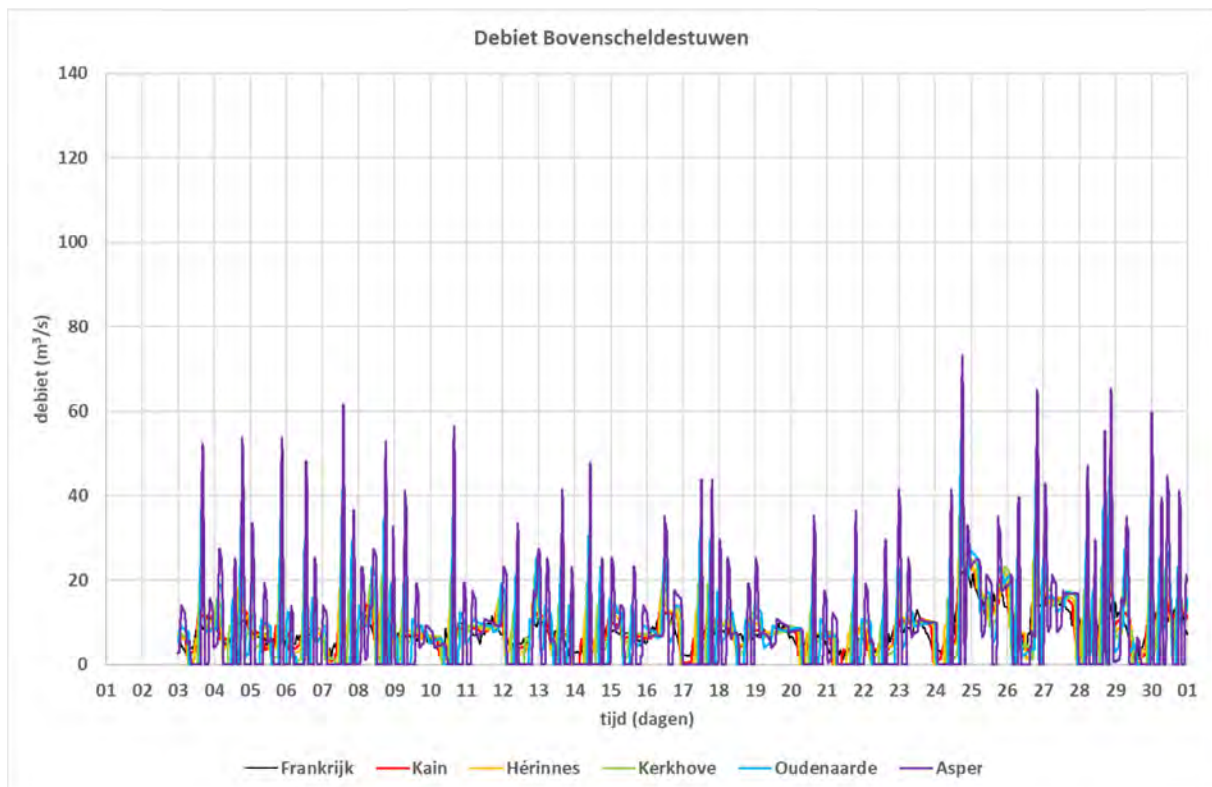
Figuur 40 – Augustus 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



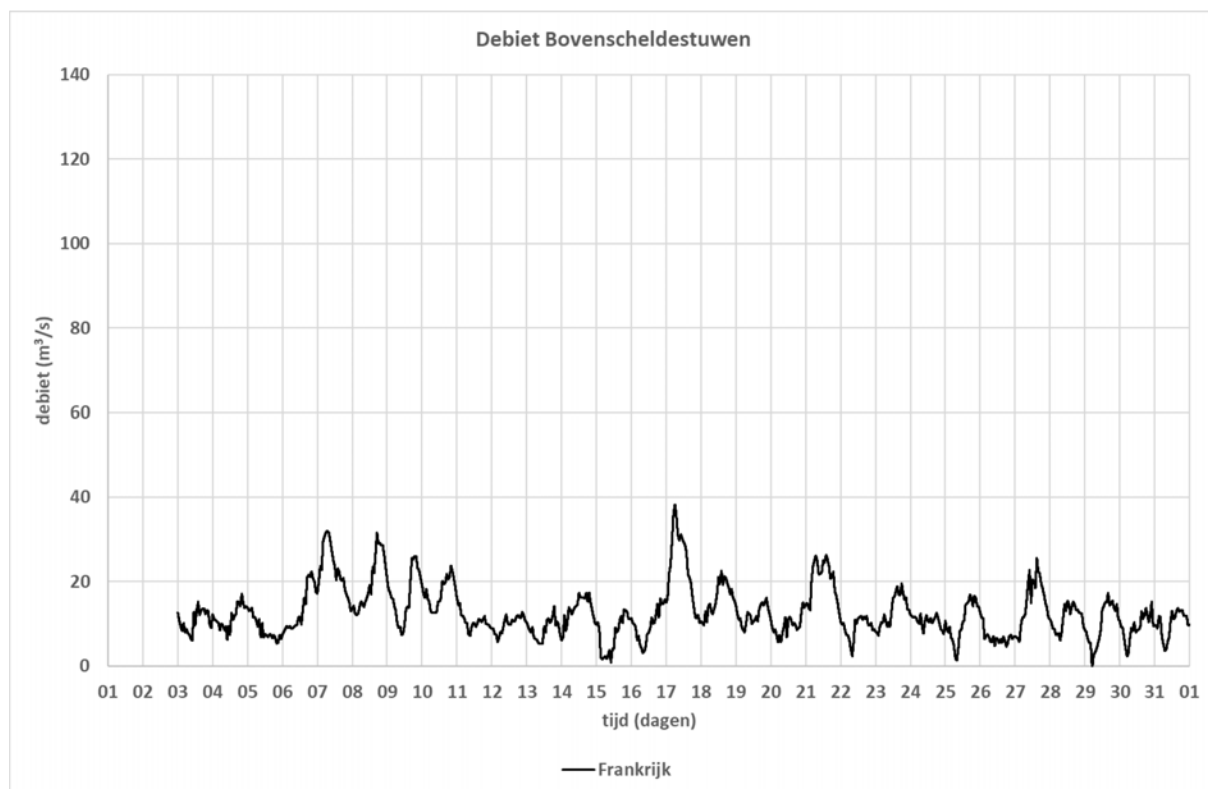
Figuur 41 – September 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



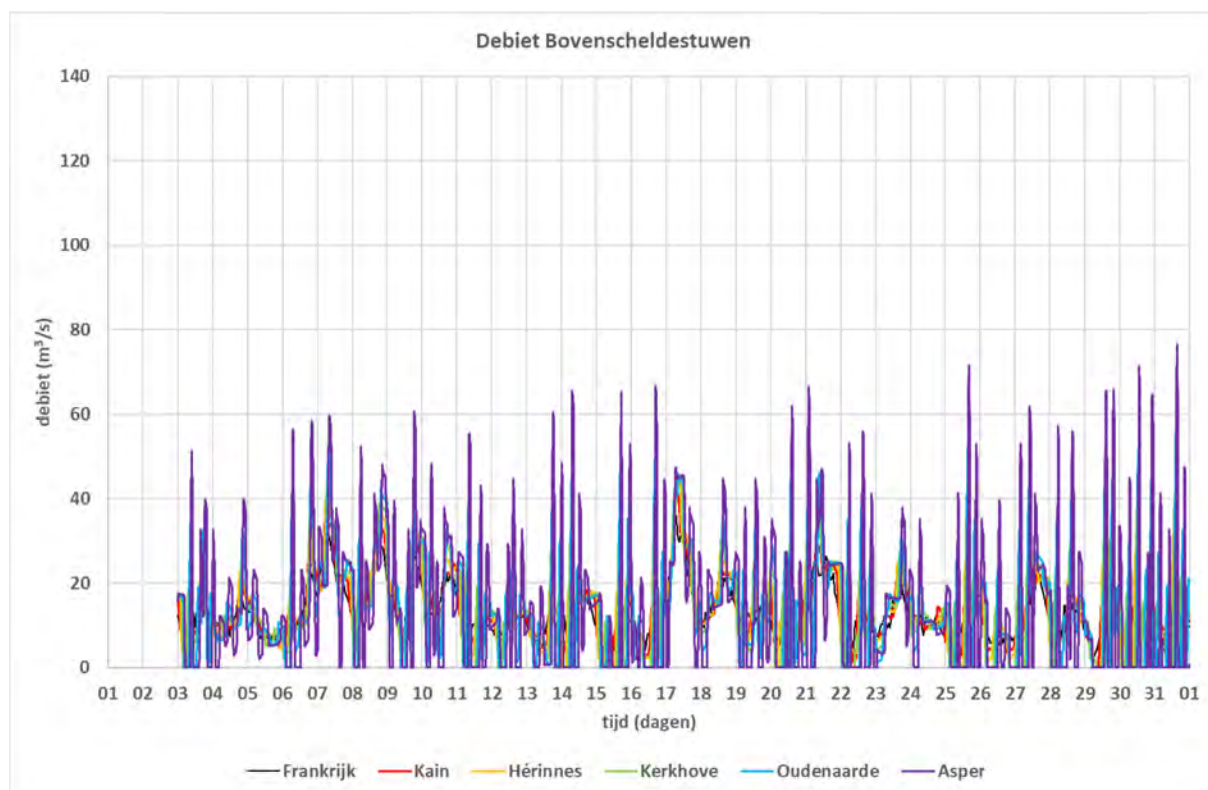
Figuur 42 – September 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



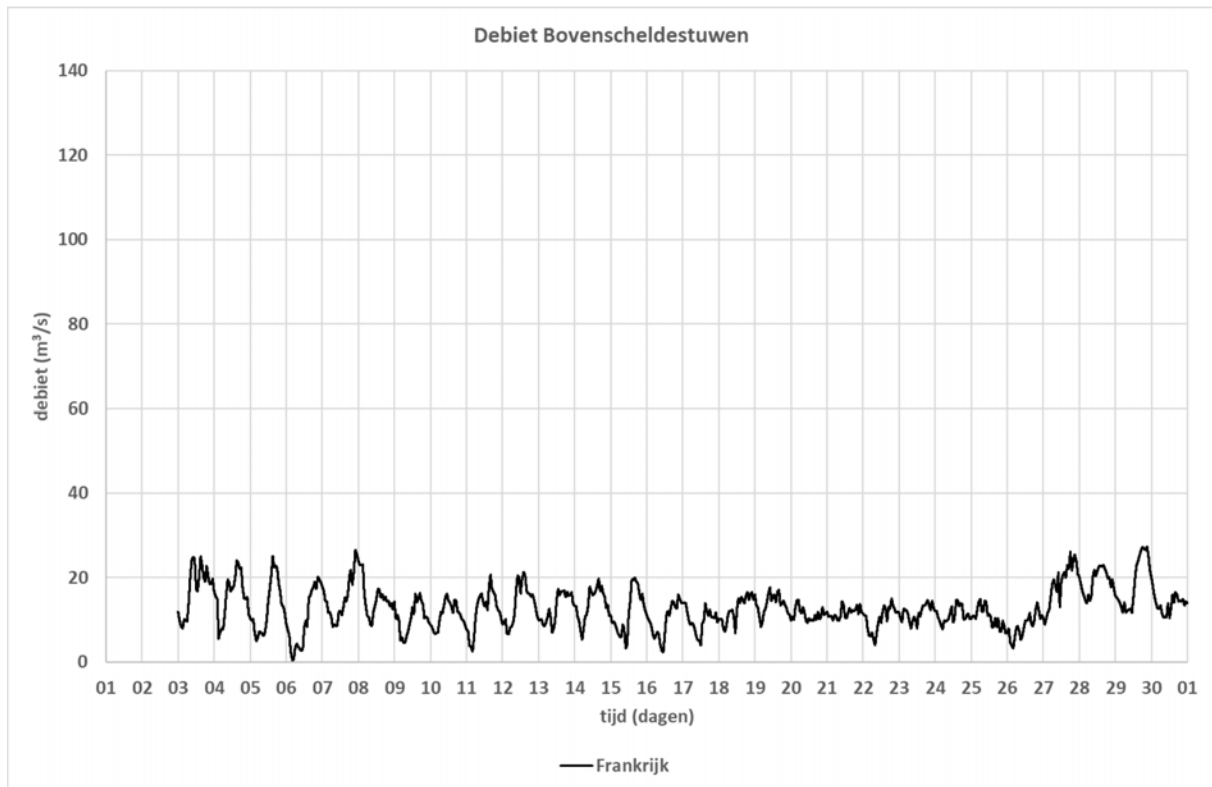
Figuur 43 – Oktober 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



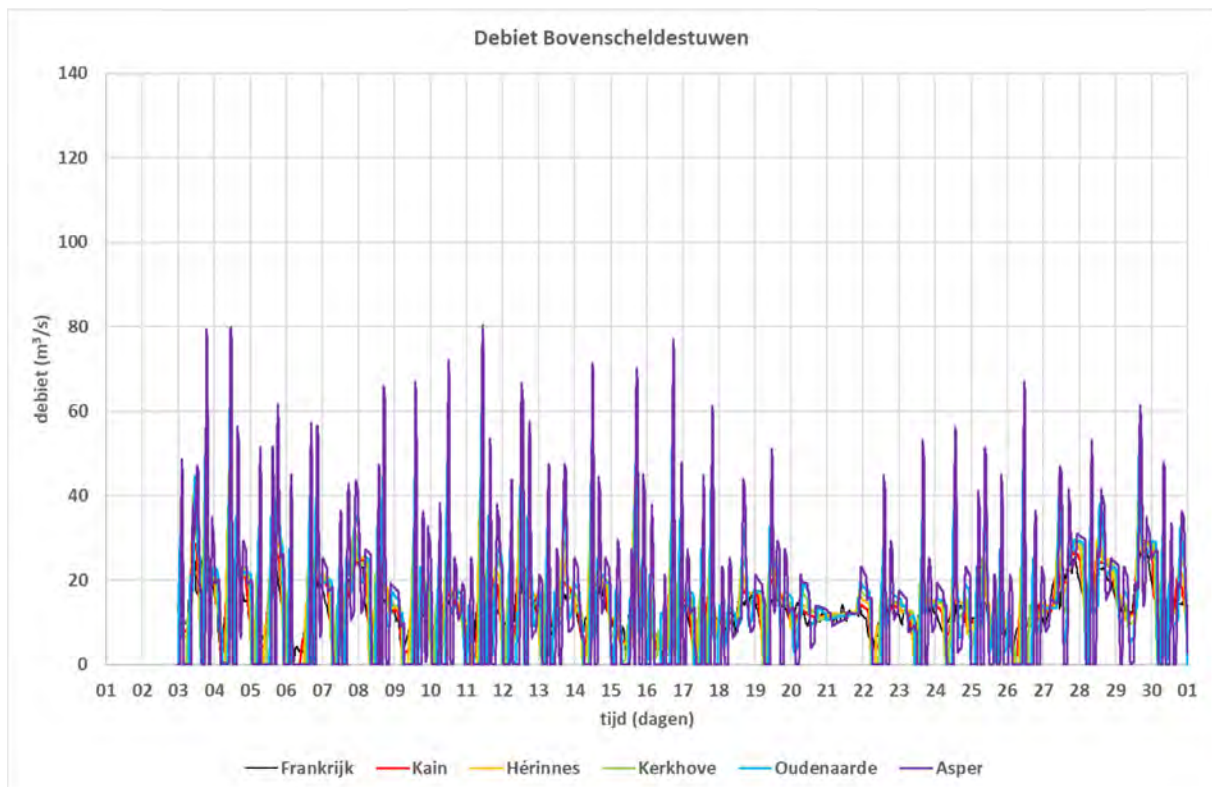
Figuur 44 – Oktober 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



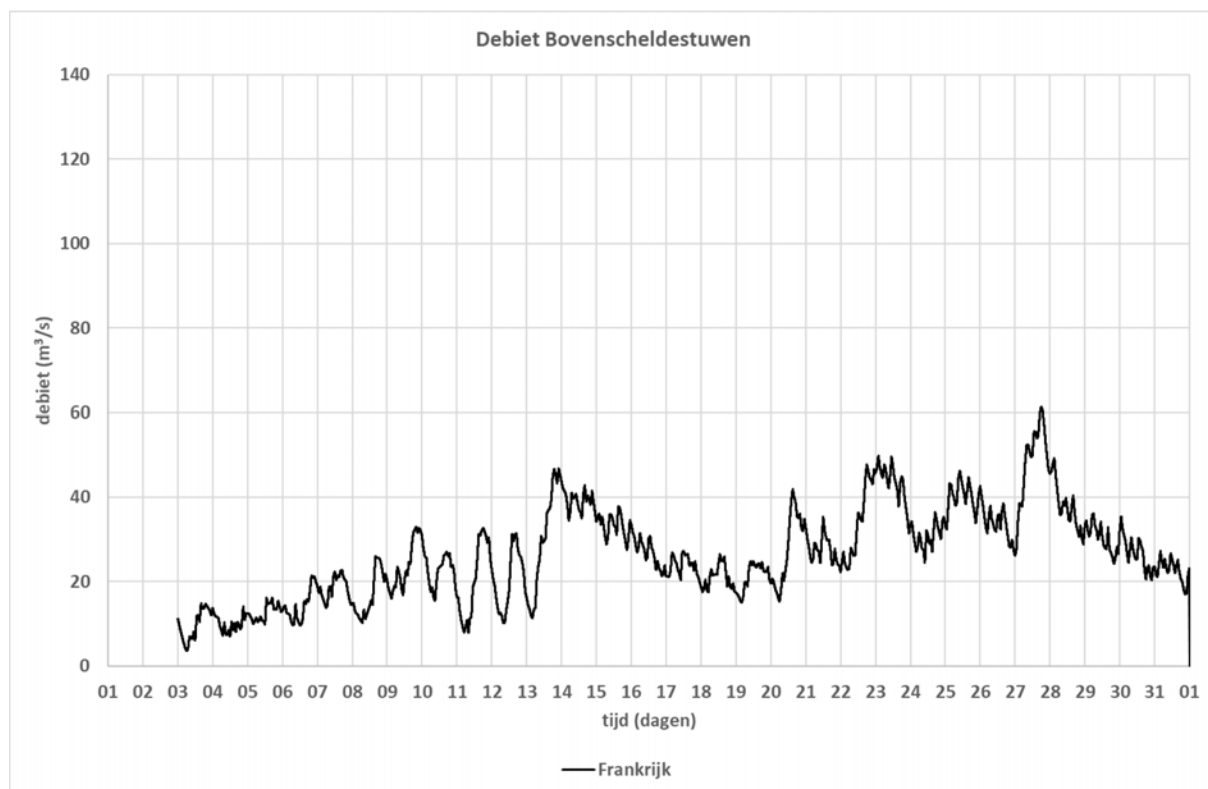
Figuur 45 – November 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk



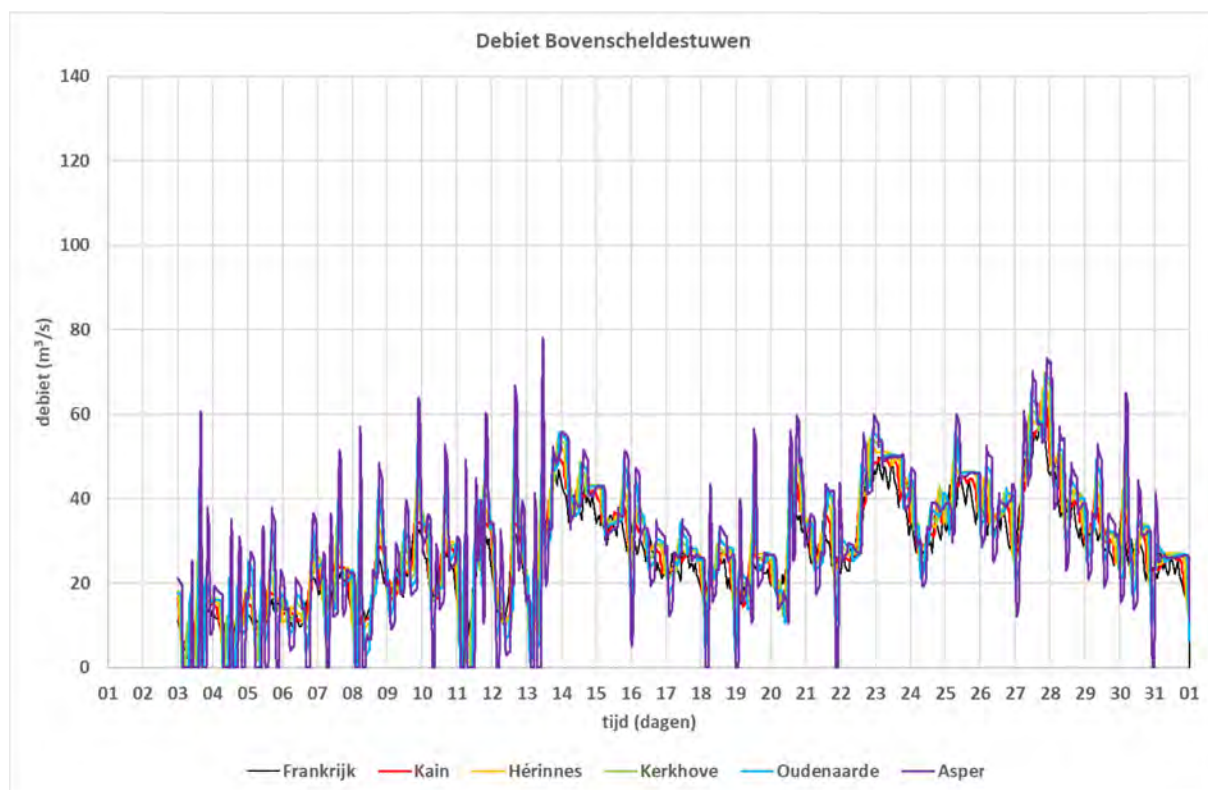
Figuur 46 – November 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



Figuur 47 – December 2019 – zonder zijlopen – debiet Frankrijk

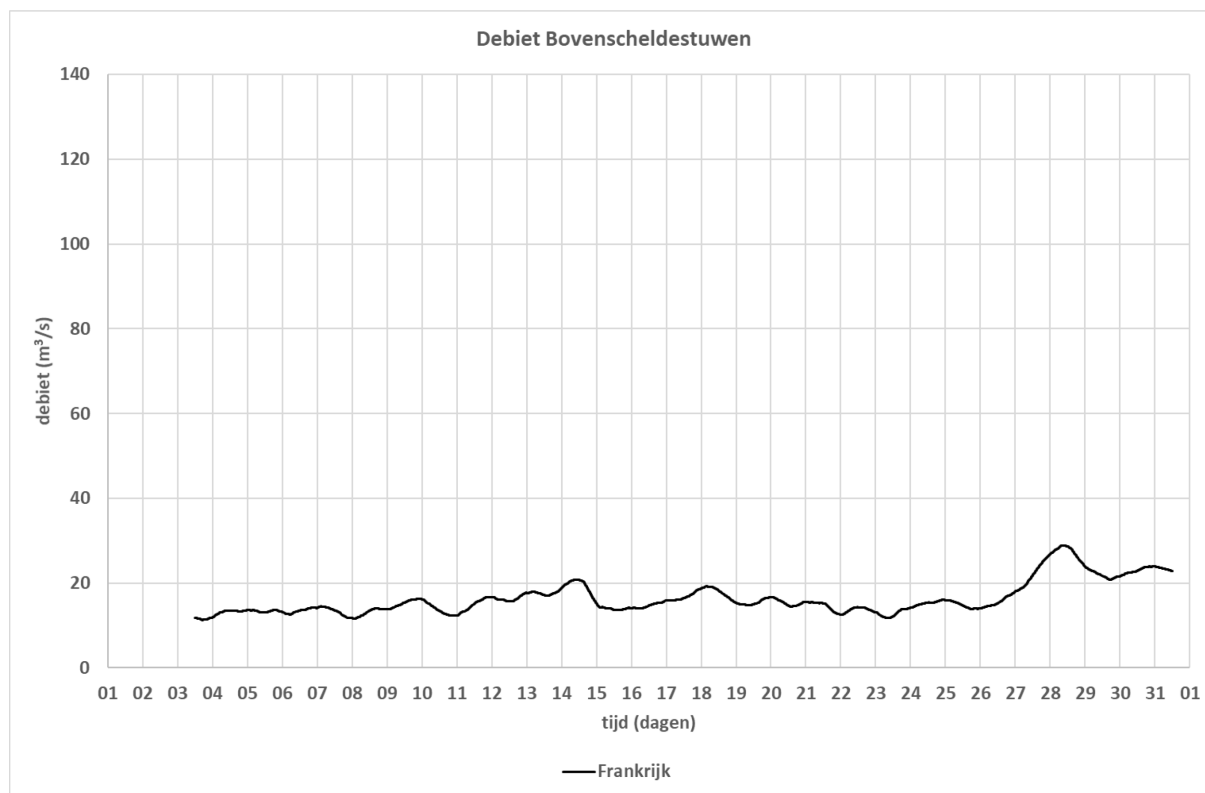


Figuur 48 – December 2019 – zonder zijlopen – debiet stuwen



Figuur 49 toont de daggemiddelde waarden voor het debiet in Maulde (eigenlijk meetreeks van Tournai) in januari 2019. Door het toepassen van een bewegend daggemiddelde verdwijnen de kleine fluctuaties. De korte duur van deze fluctuaties versterkt de hypothese dat ze geen hydrologische oorsprong hebben, maar veroorzaakt worden door de bediening van stuwen en/of sluizen in Frankrijk of Wallonië. Indien het niet mogelijk zou blijken om de versterking van deze schommelingen in Vlaanderen te voorkomen, dan dient men het ontstaan van deze schommelingen in Frankrijk of Wallonië te beperken.

Figuur 49 – Januari 2019 – zonder zijlopen – daggemiddeld debiet Frankrijk

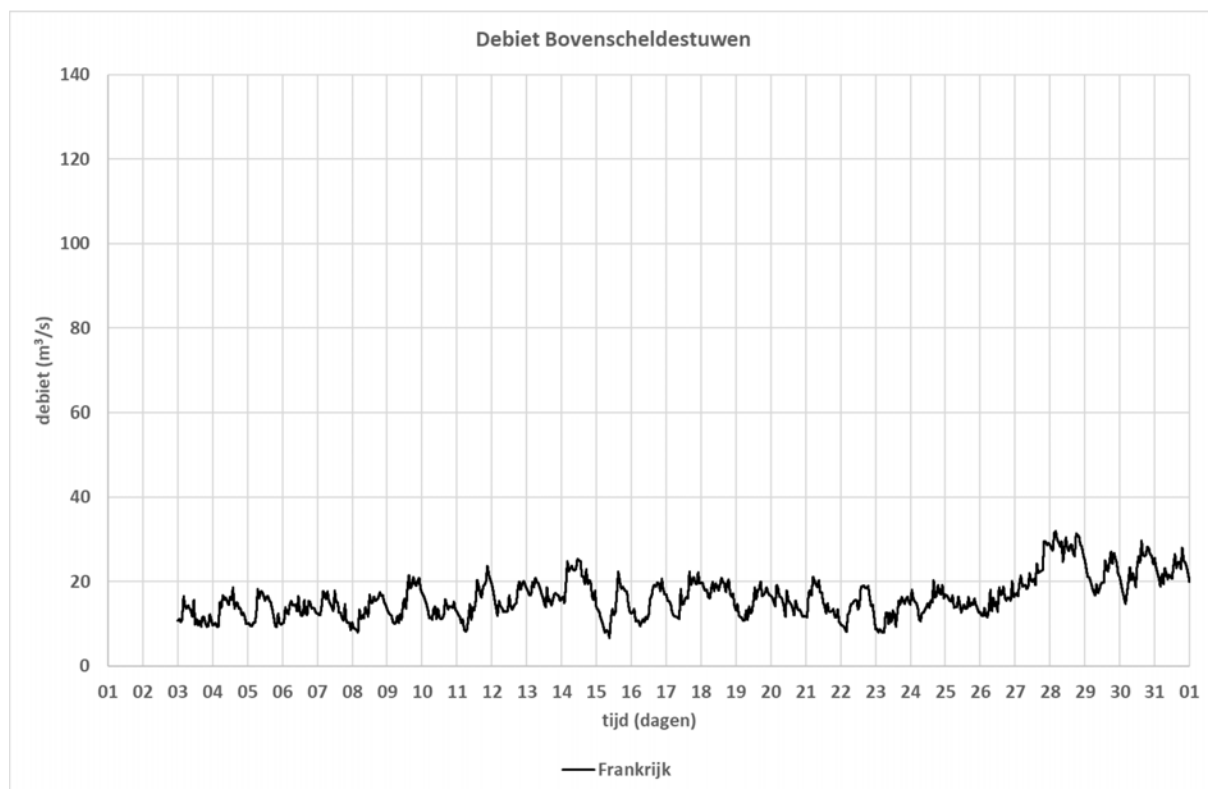


Volledige jaar 2019 met zijdelingse instroming

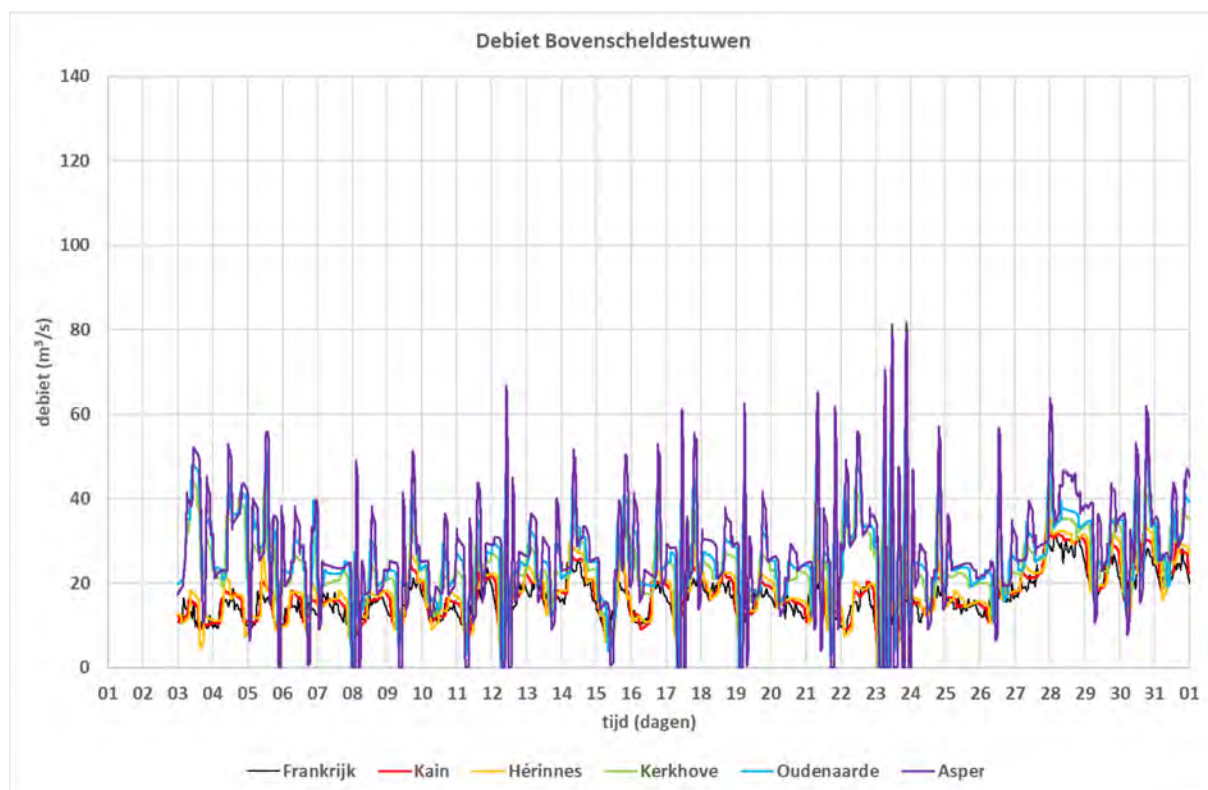
De resultaten van de simulaties met zijdelingse instroming worden getoond in Figuur 50 t.e.m. Figuur 73.

Uit de figuren blijkt dat de zijdelingse instroming vanuit de zijlopen leidt tot een beperkte toename van de afvoer in het Vlaamse deel van de Bovenschelde. De toevoeging van de zijdelingse instroming volstaat echter niet om te beletten dat de stuwen in Vlaanderen soms sluiten. Deze sluiting doet zich vooral voor aan het einde van de keten, in Asper.

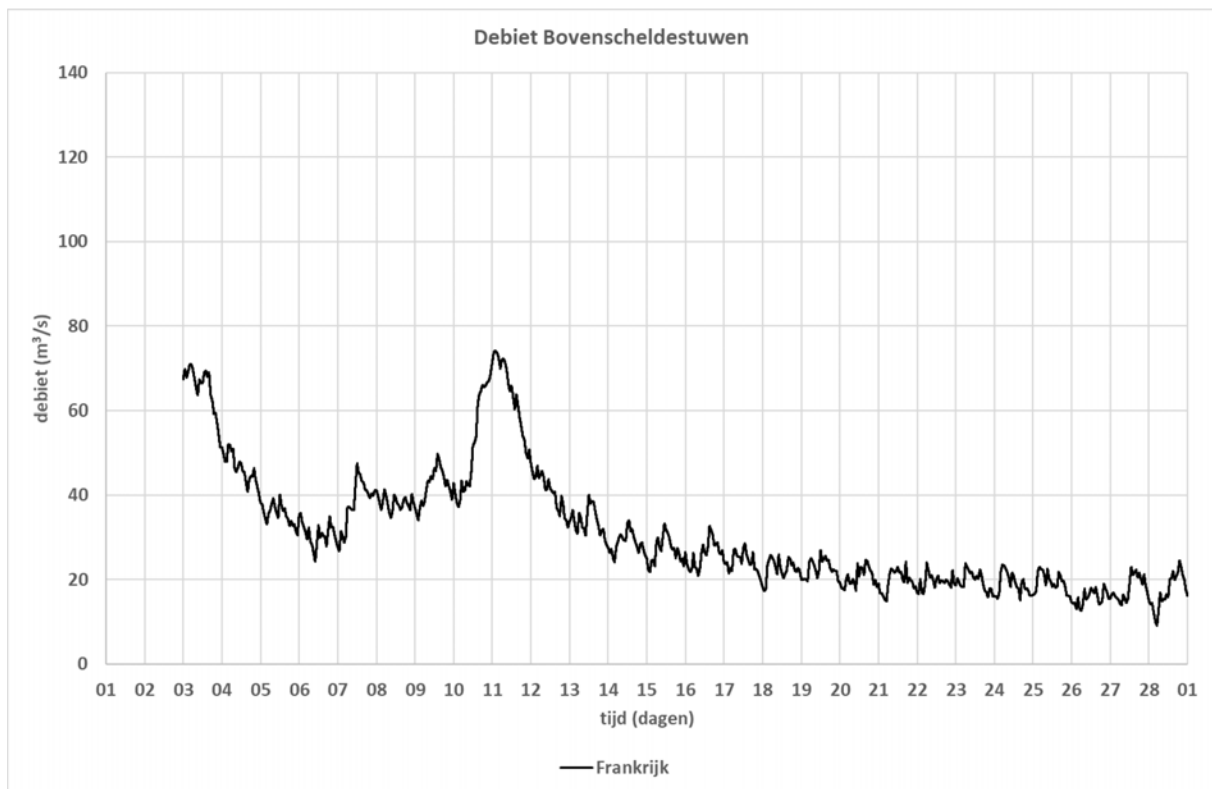
Figuur 50 – Januari 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



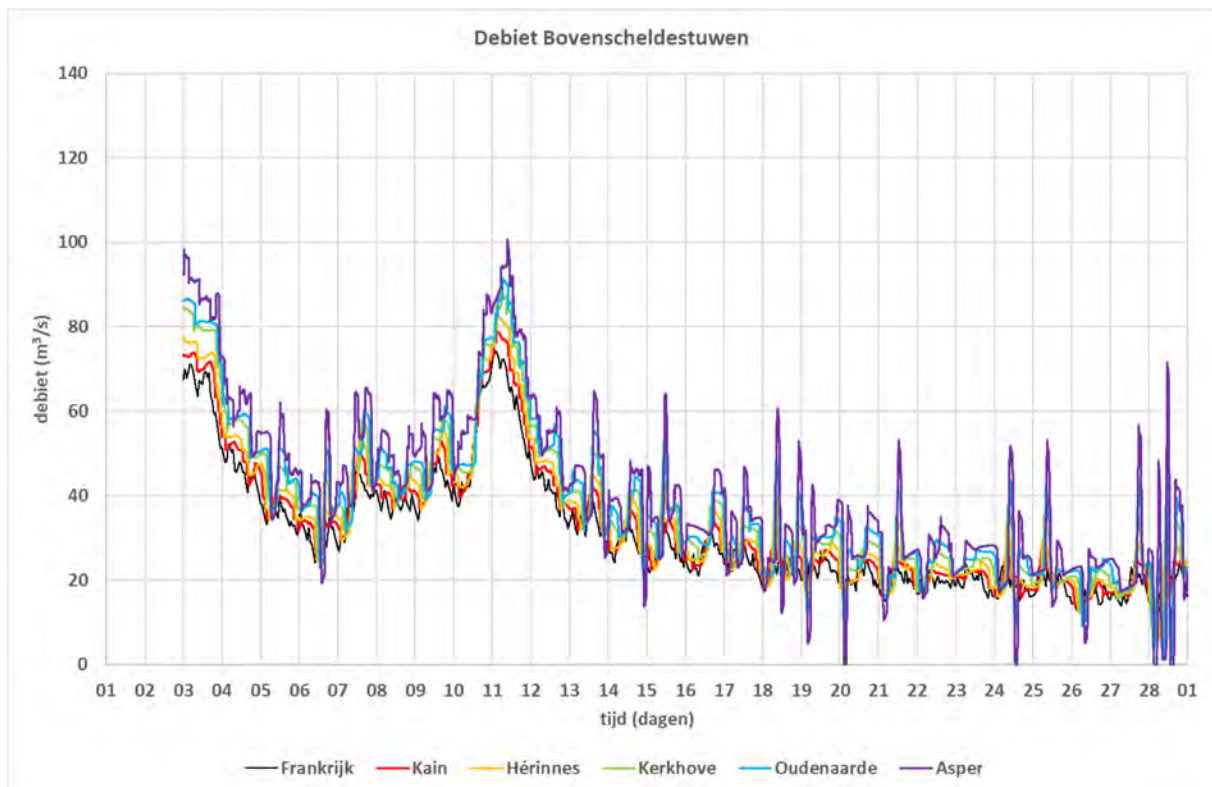
Figuur 51 – Januari 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



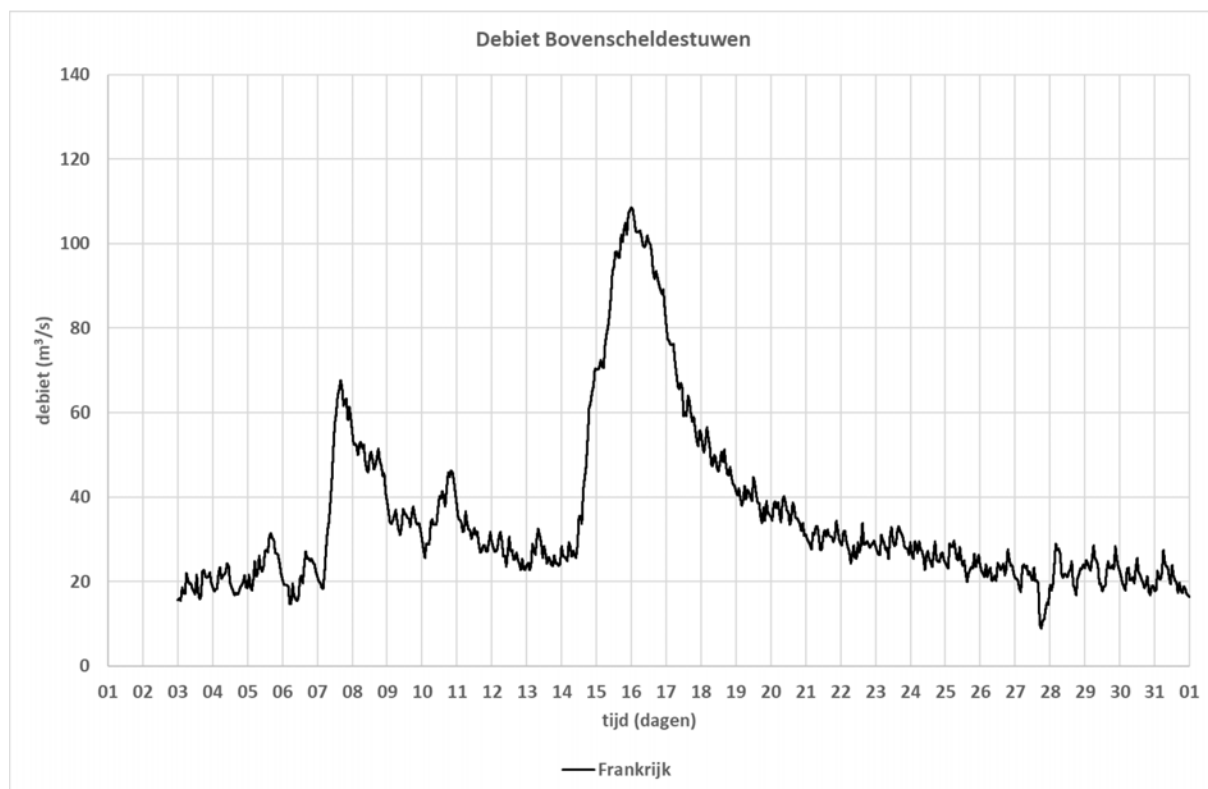
Figuur 52 – Februari 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



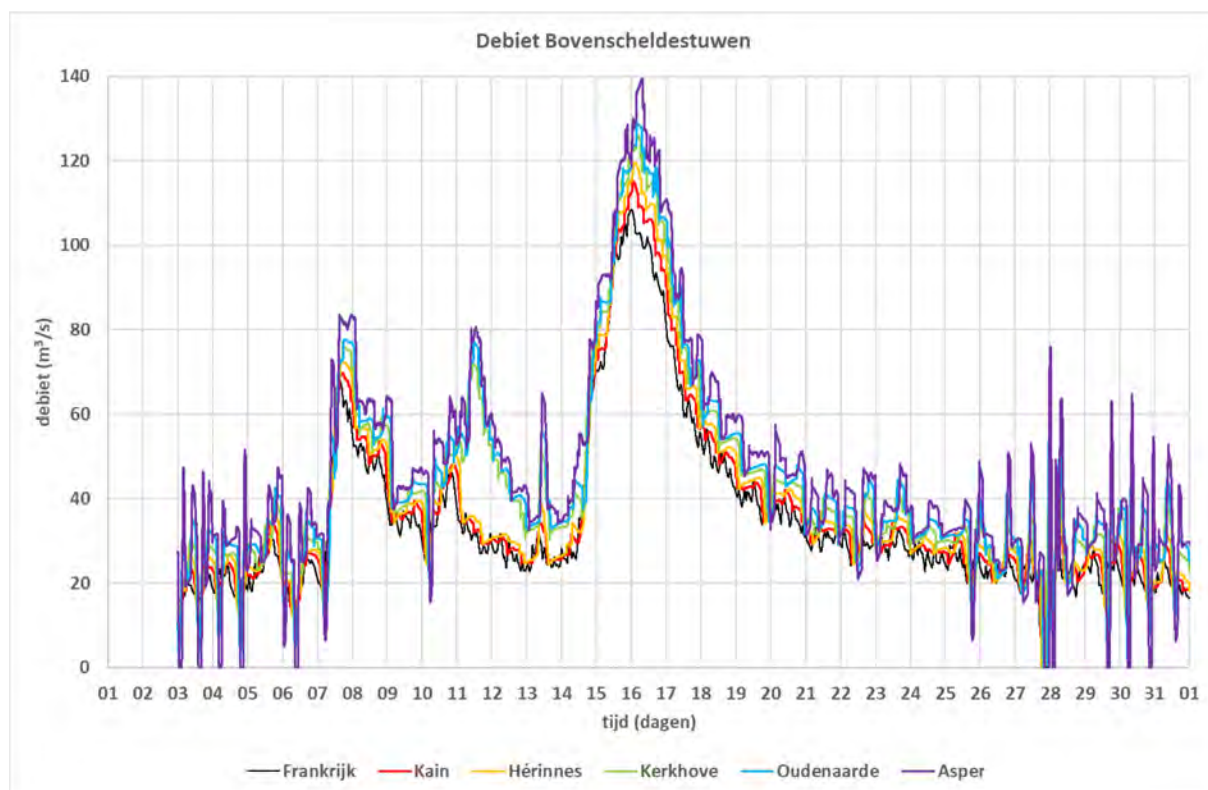
Figuur 53 – Februari 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



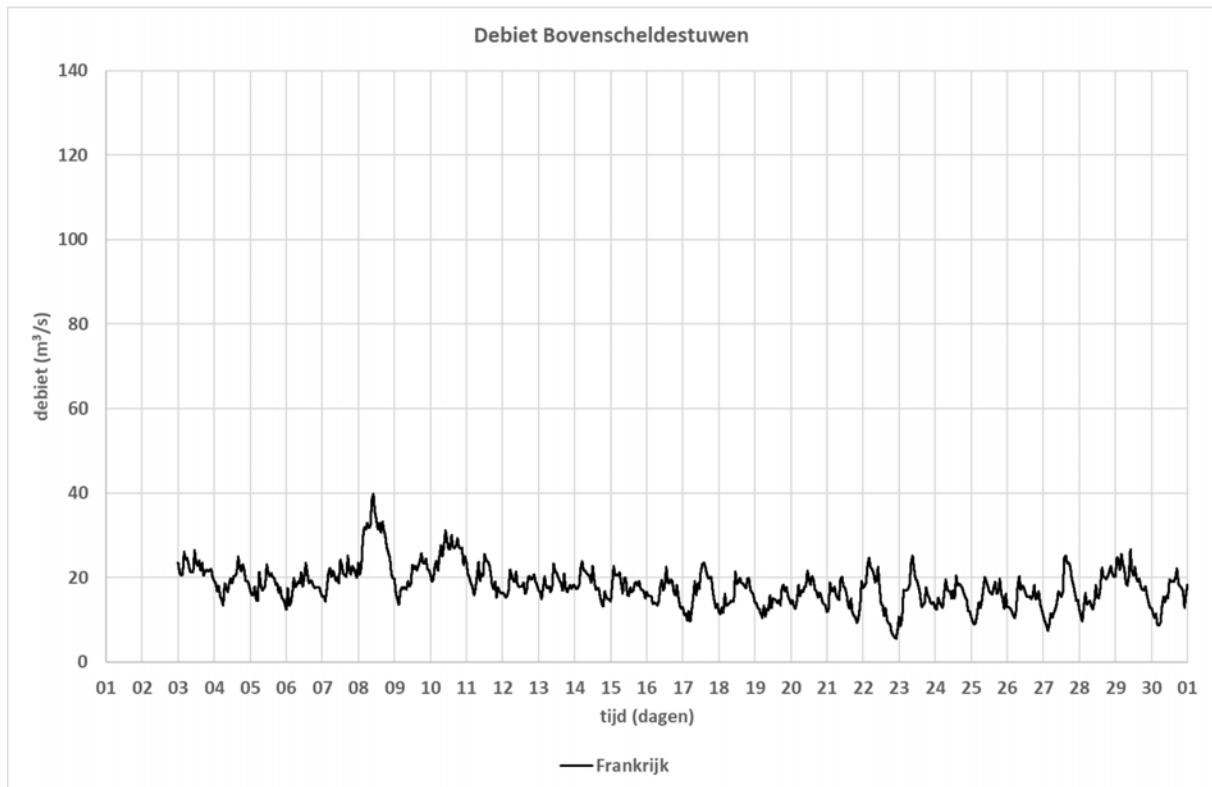
Figuur 54 – Maart 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



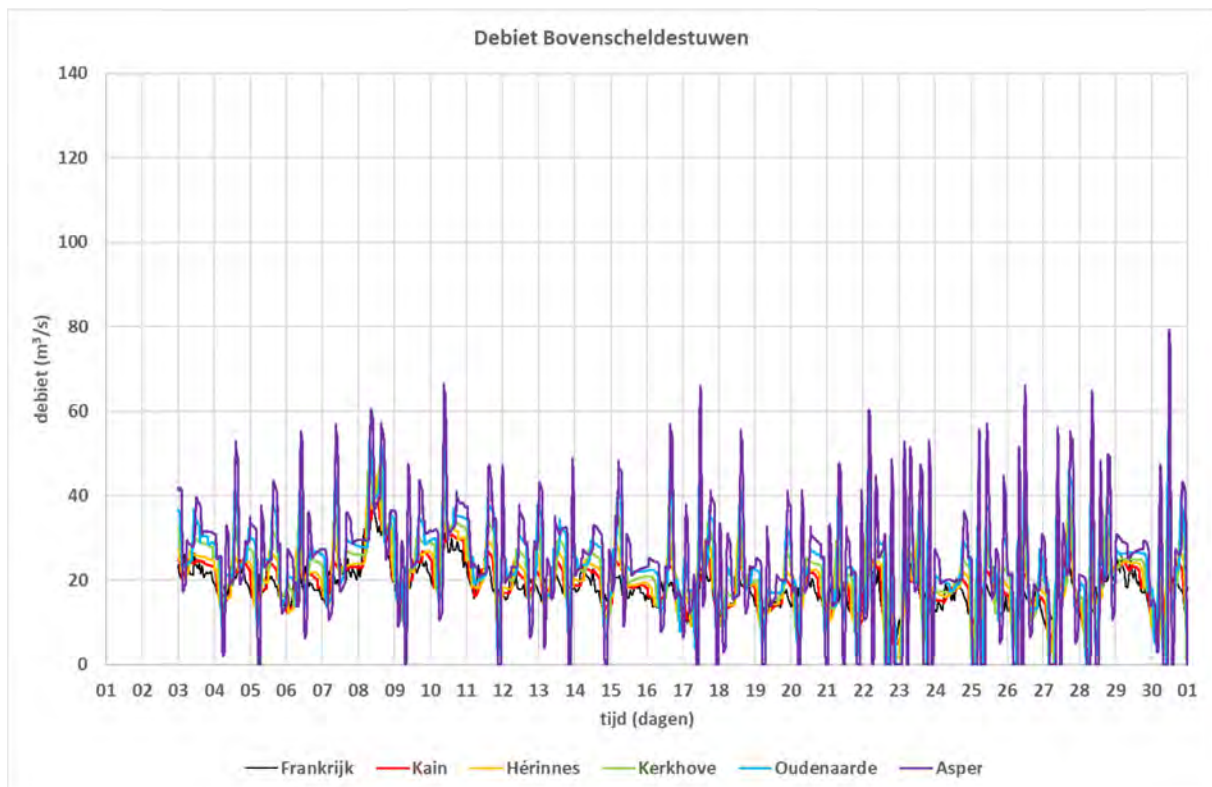
Figuur 55 – Maart 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



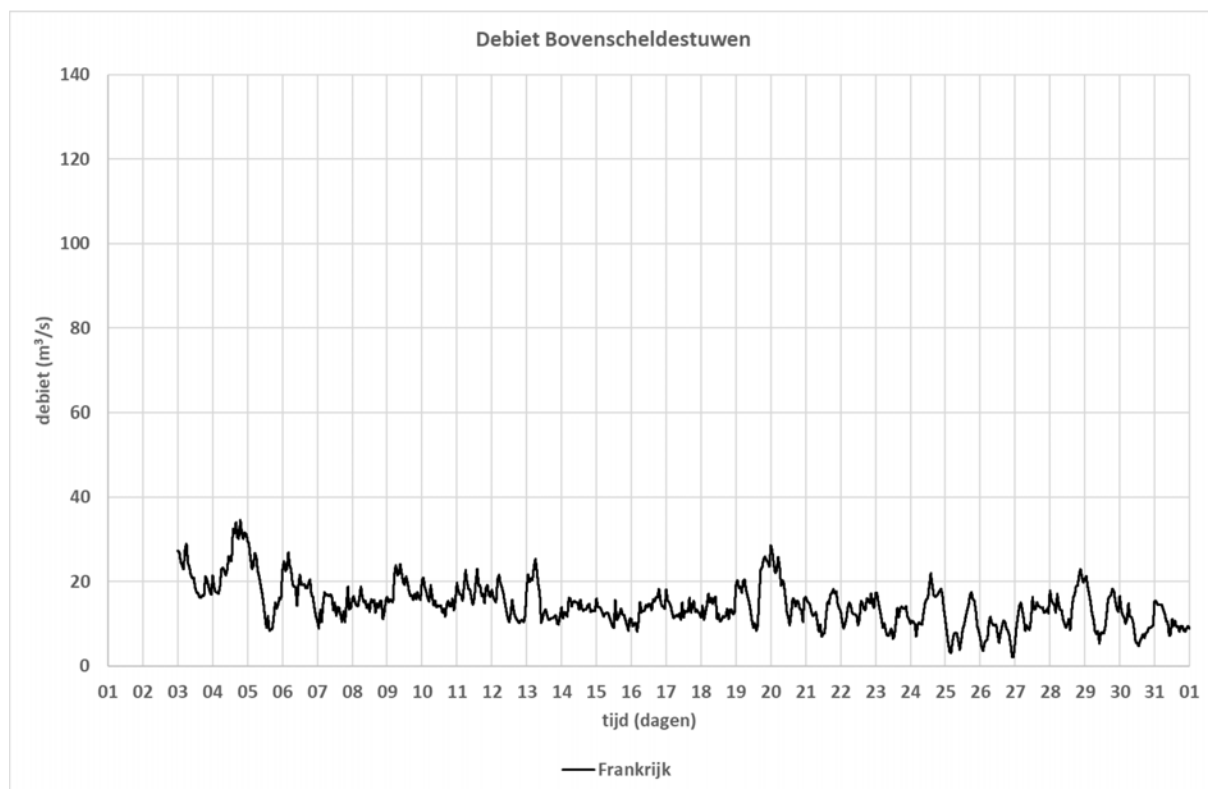
Figuur 56 – April 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



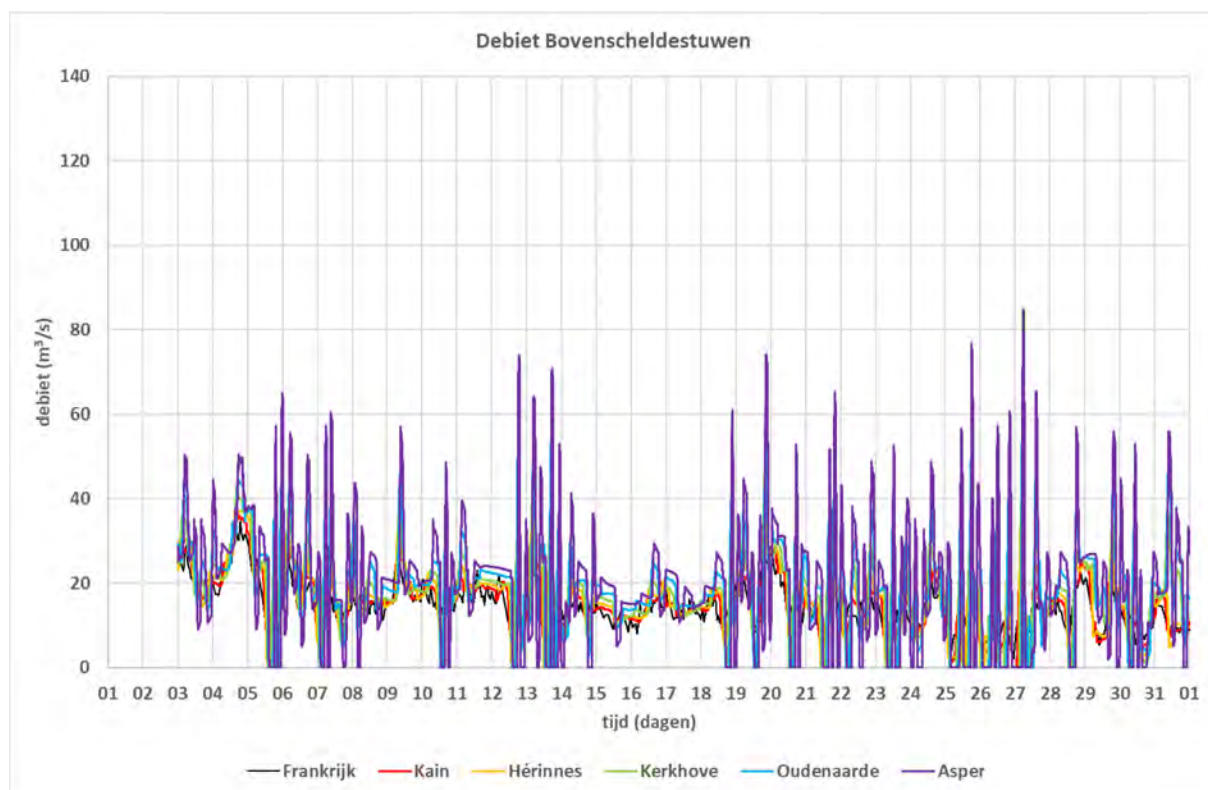
Figuur 57 – April 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



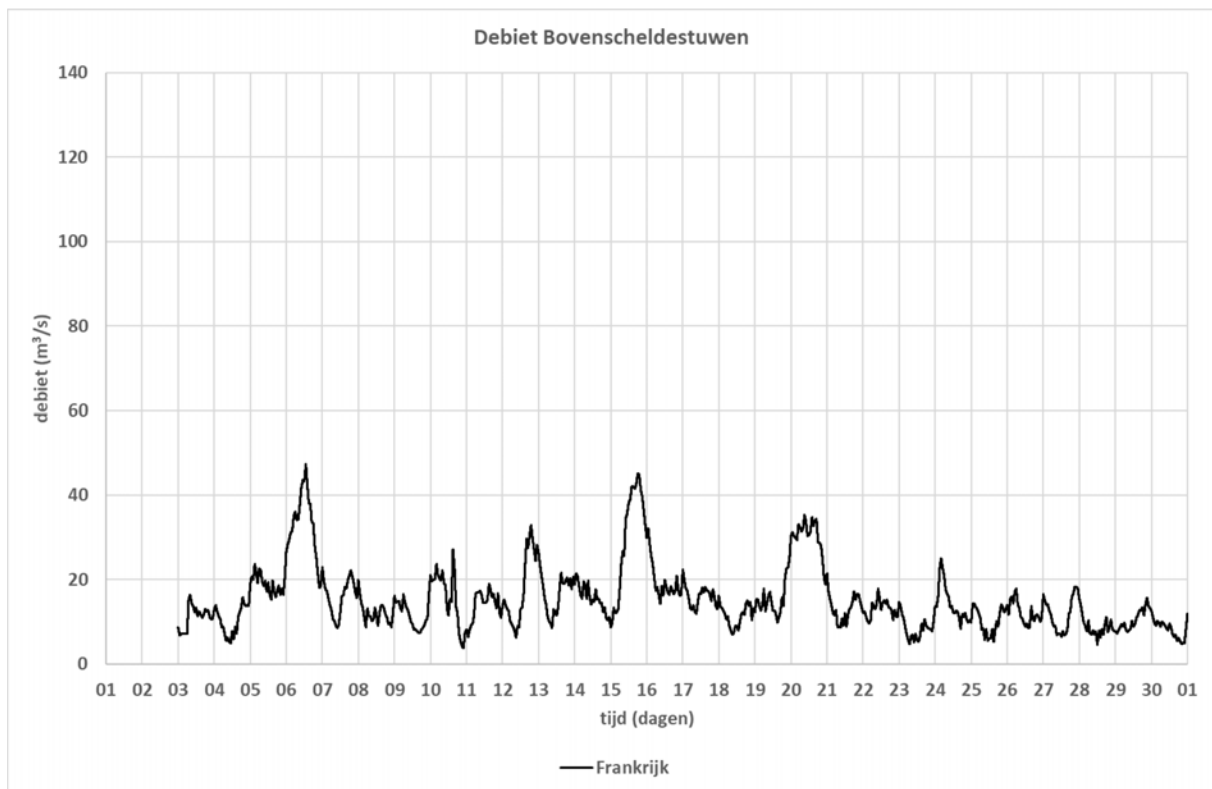
Figuur 58 – Mei 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



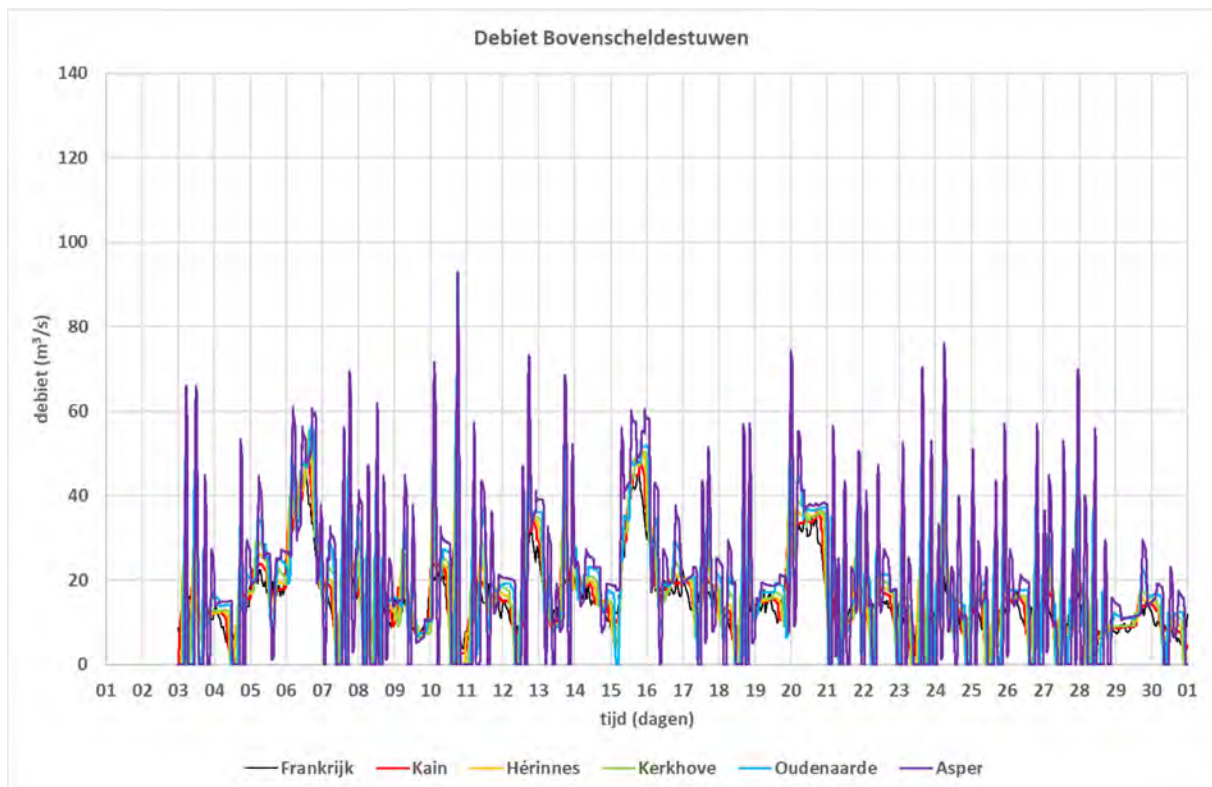
Figuur 59 – Mei 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



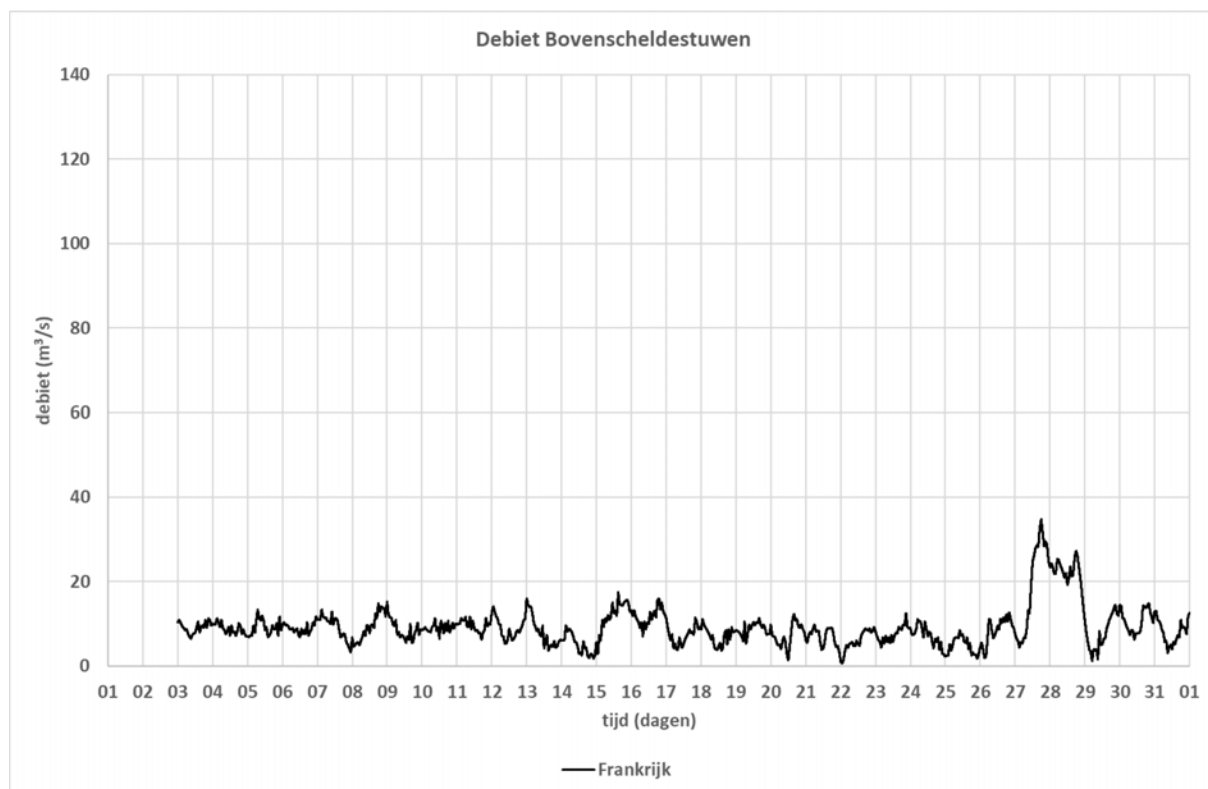
Figuur 60 – Juni 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



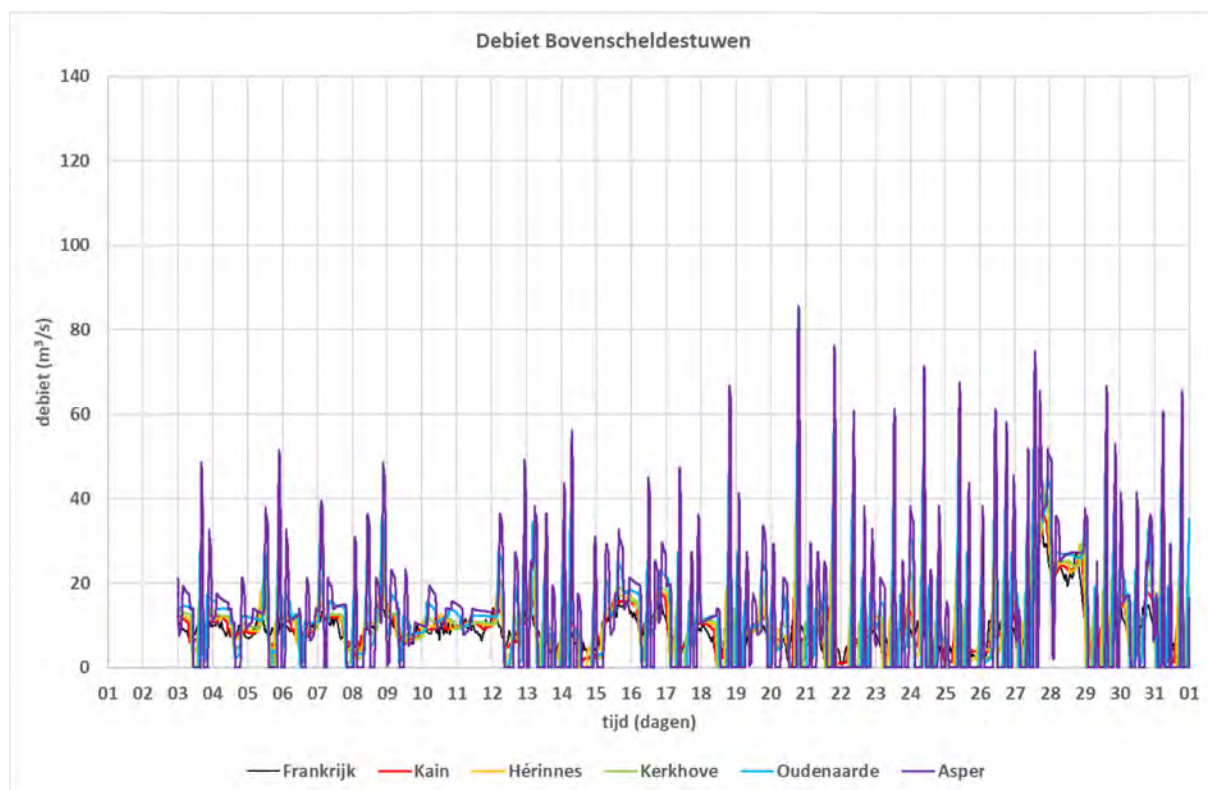
Figuur 61 – Juni 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



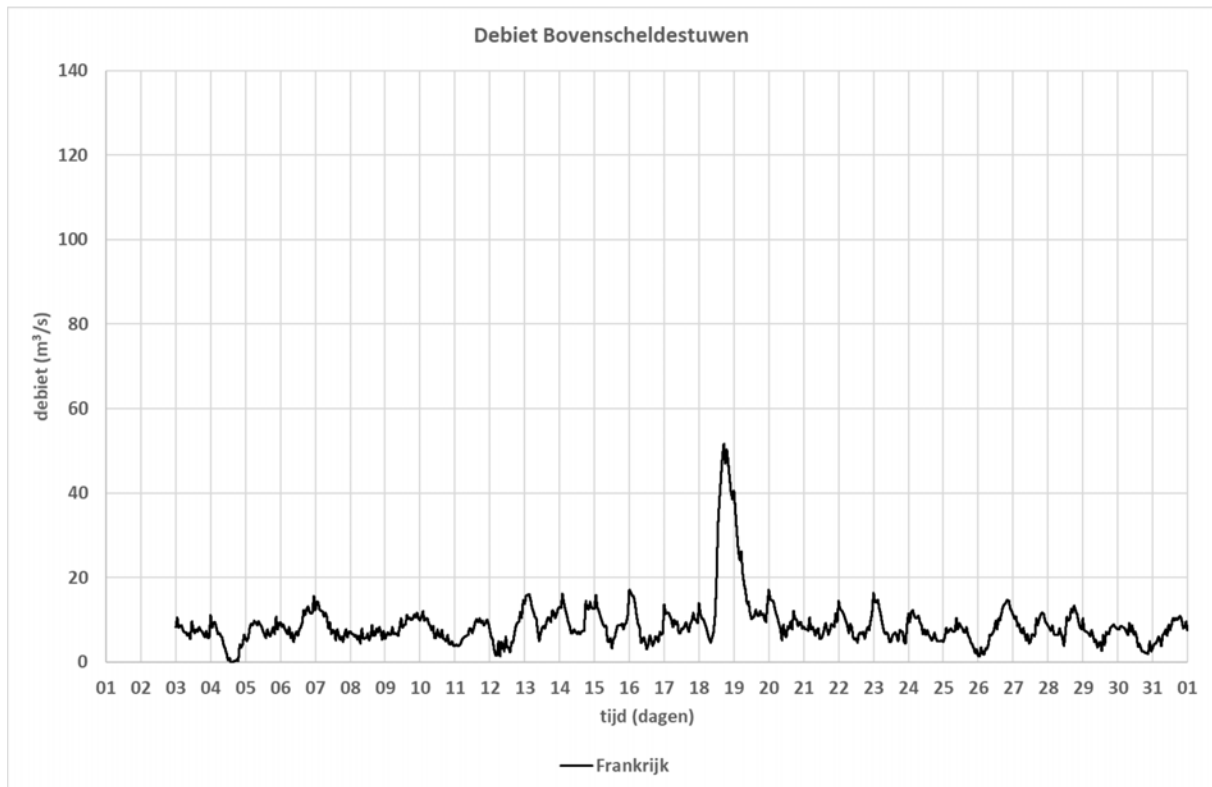
Figuur 62 – Juli 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



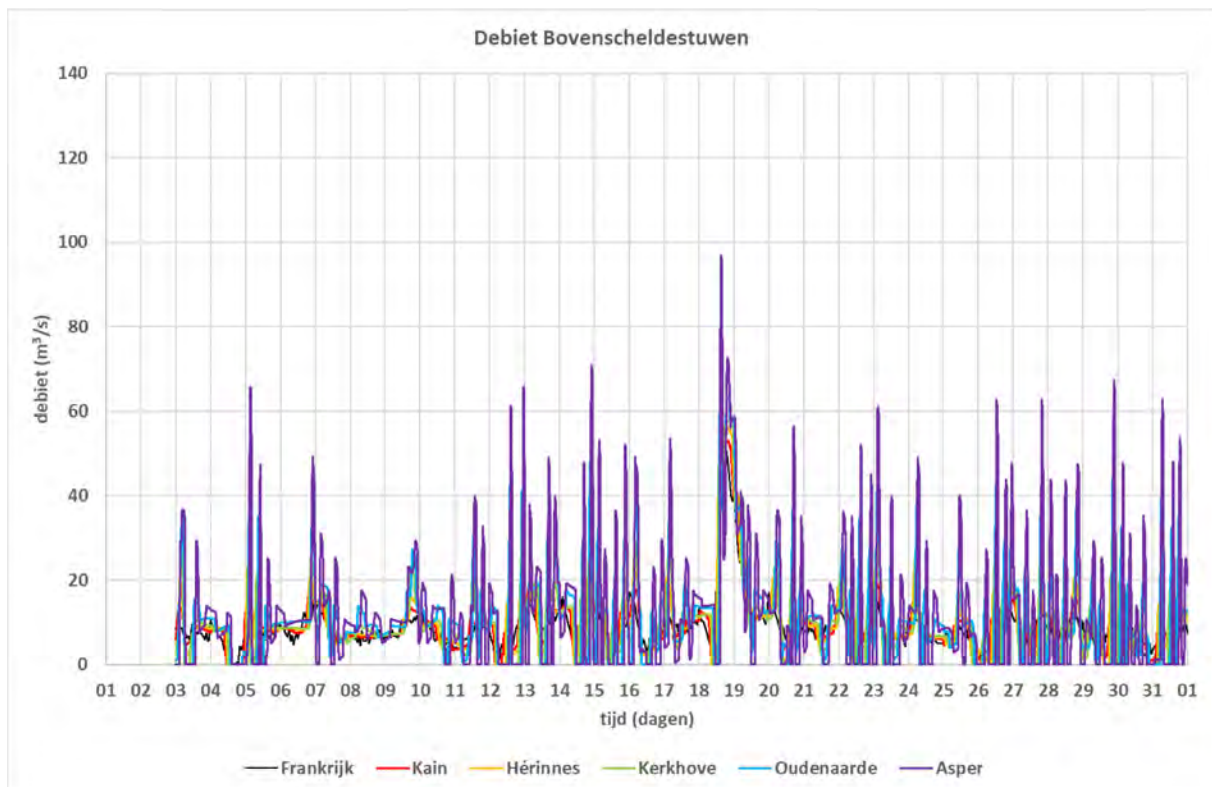
Figuur 63 – Juli 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



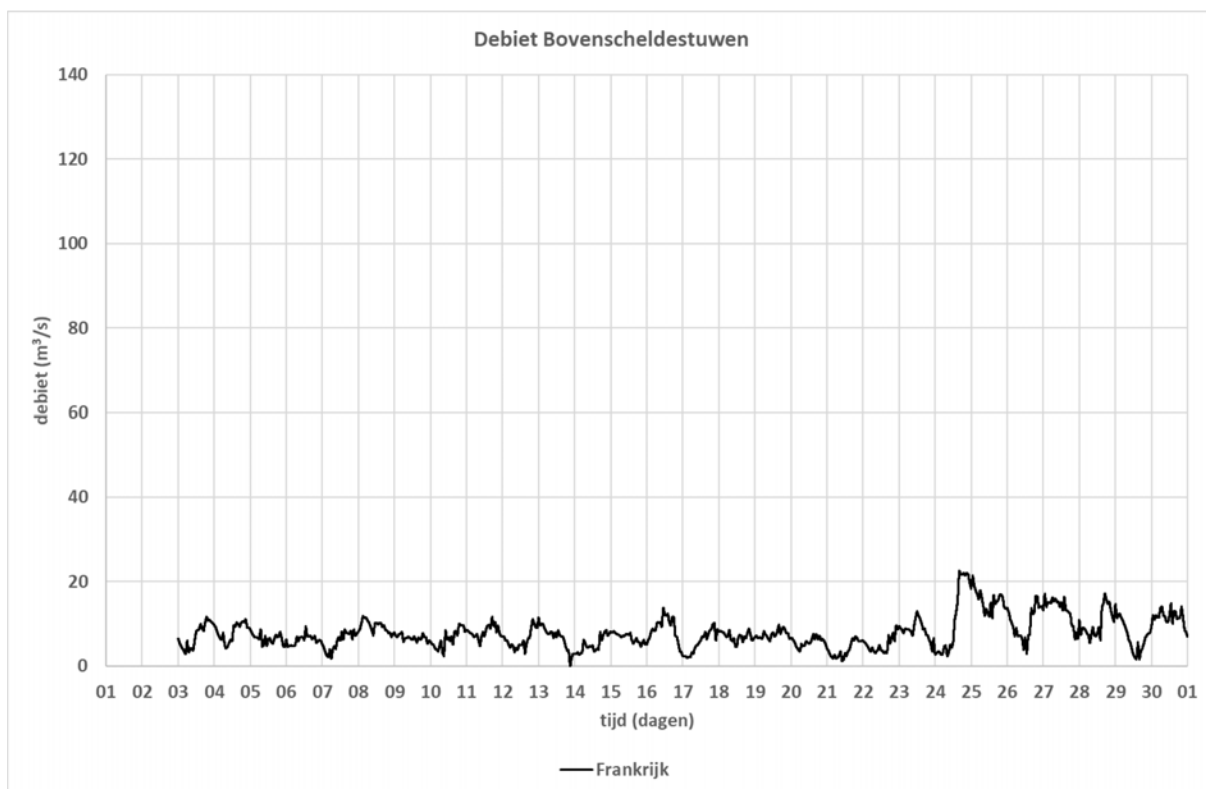
Figuur 64 – Augustus 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



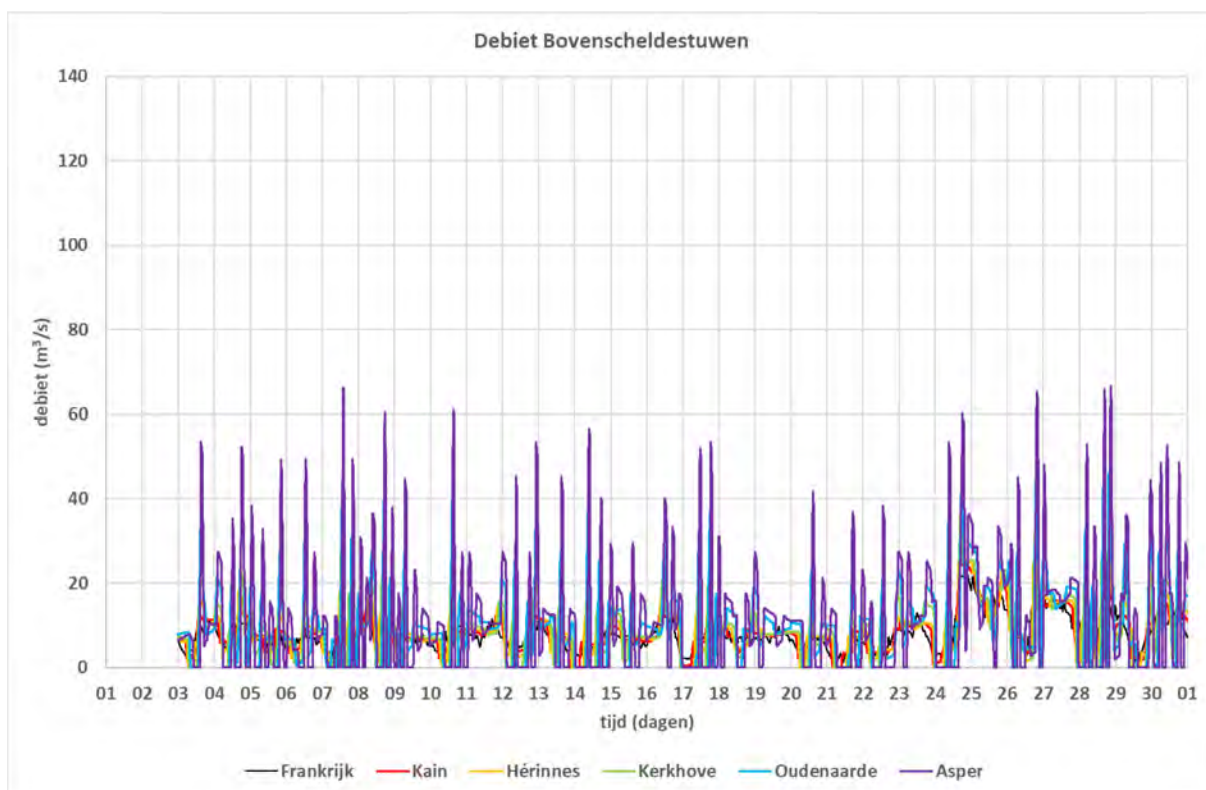
Figuur 65 – Augustus 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



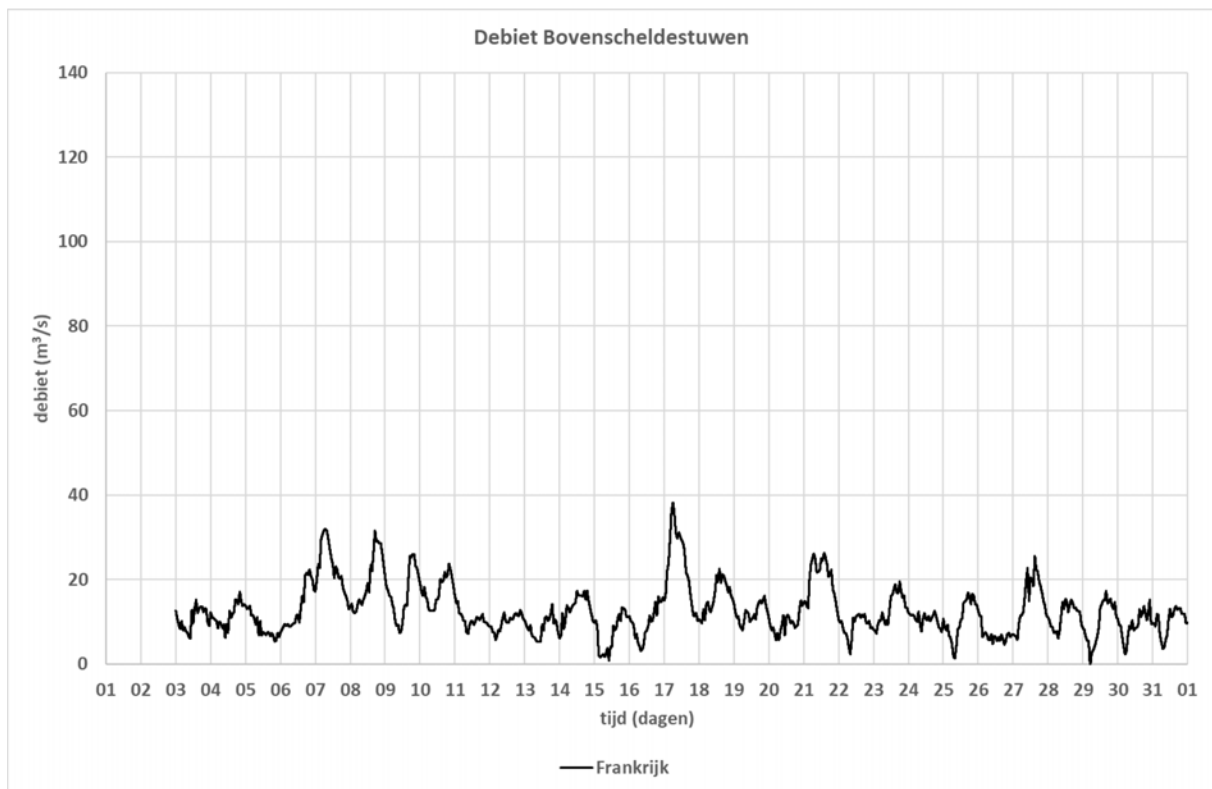
Figuur 66 – September 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



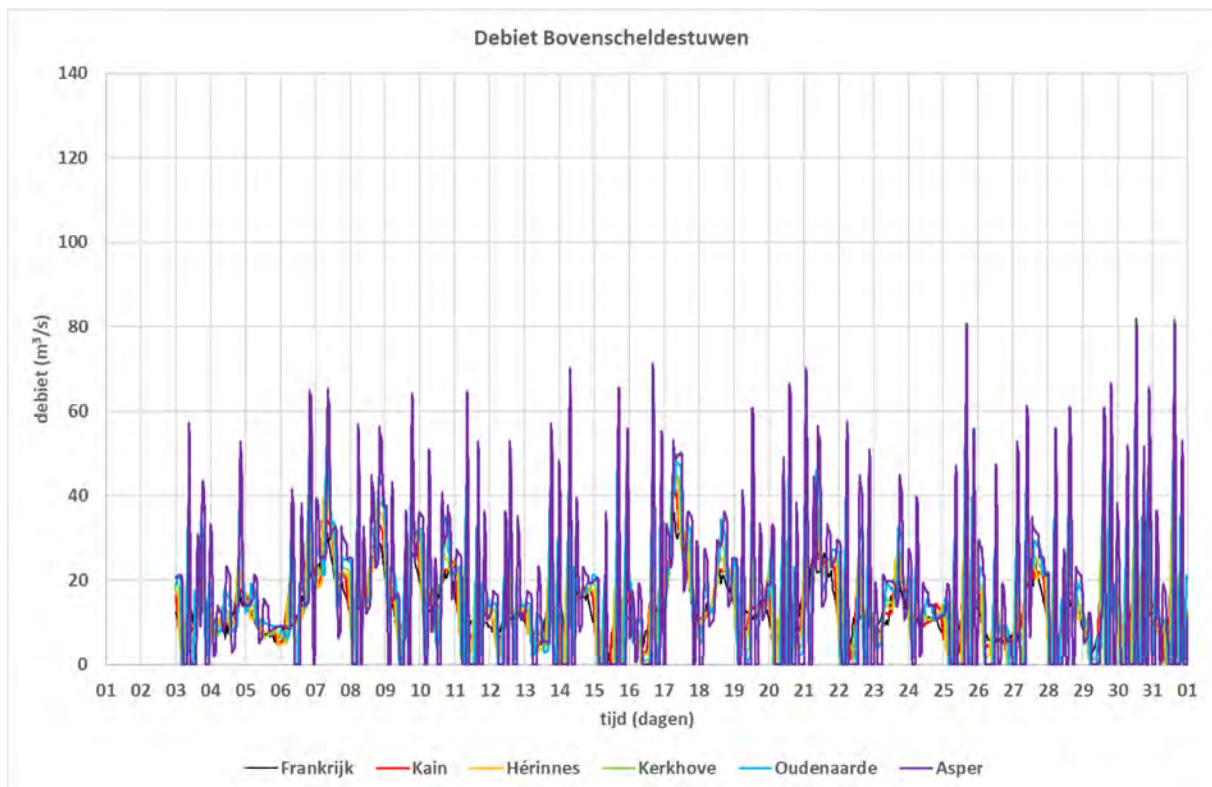
Figuur 67 – September 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



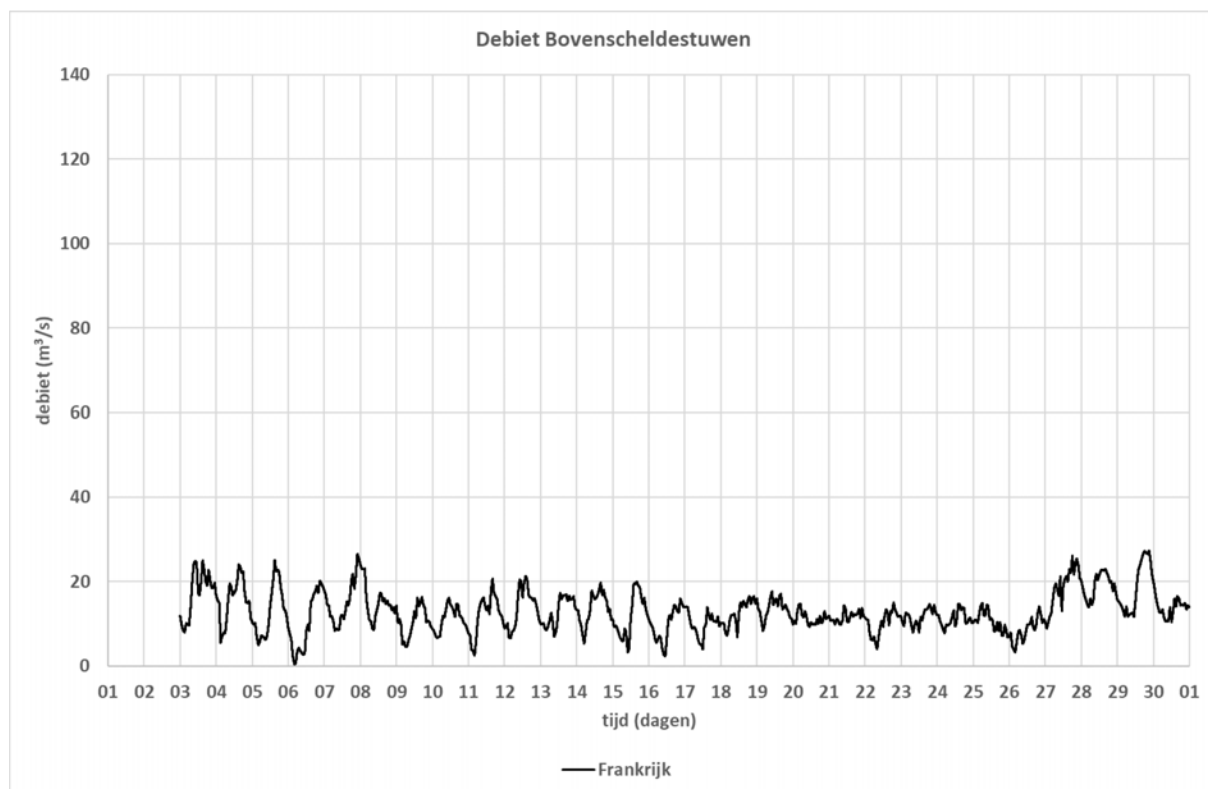
Figuur 68 – Oktober 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



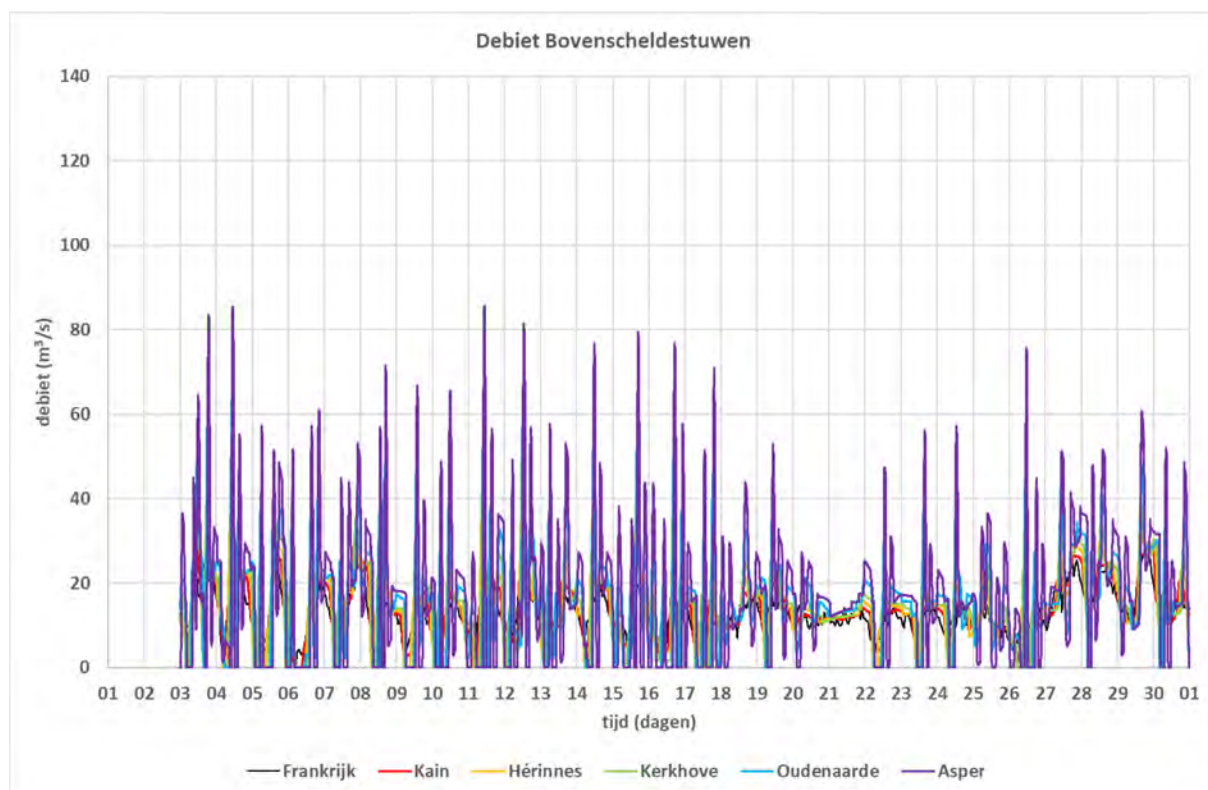
Figuur 69 – Oktober 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



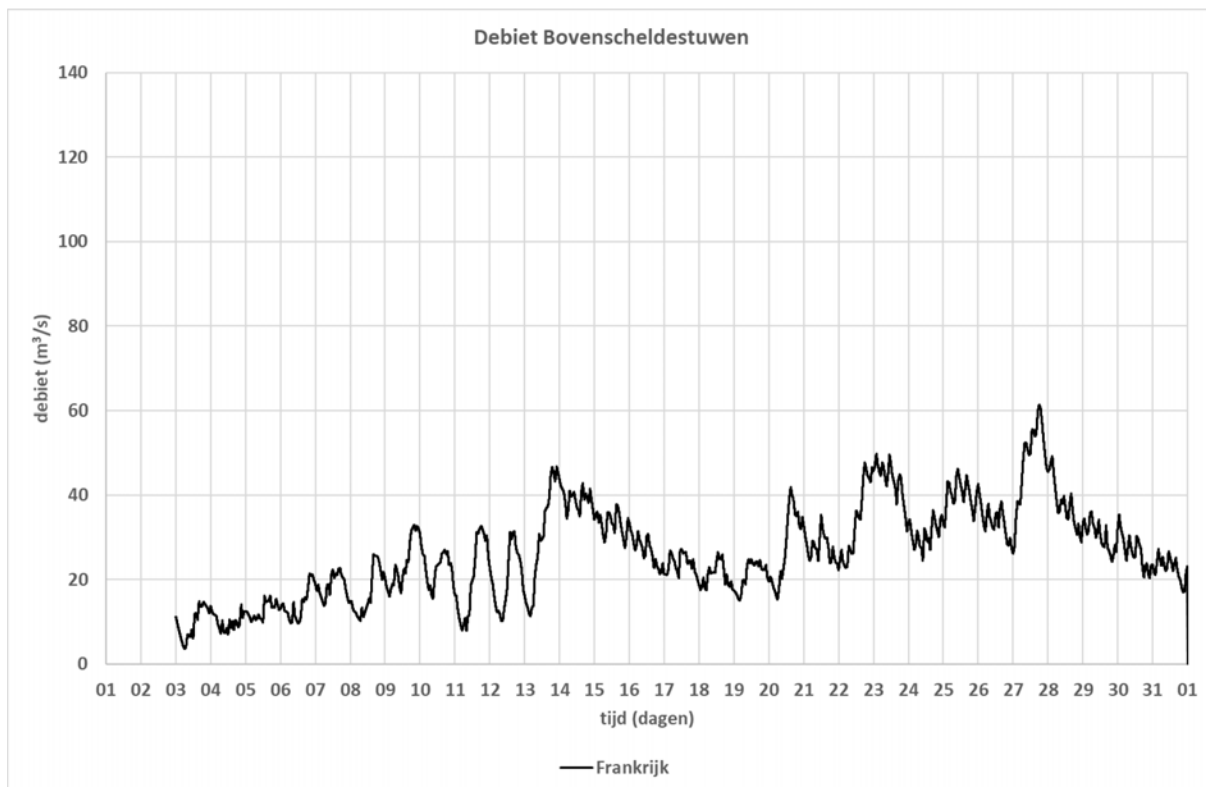
Figuur 70 – November 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



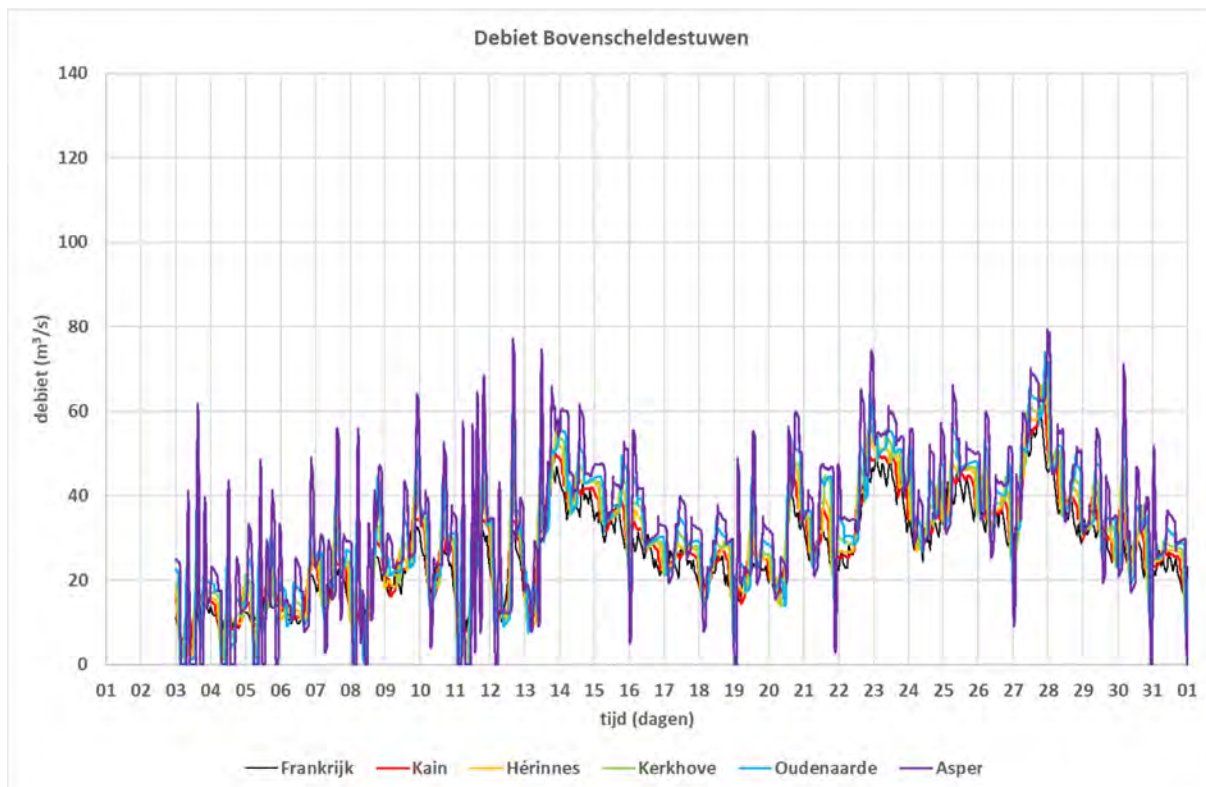
Figuur 71 – November 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



Figuur 72 – December 2019 – met zijlopen – debiet Frankrijk



Figuur 73 – December 2019 – met zijlopen – debiet stuwen



6.2.3 Gevoeligheidsanalyse

Figuren

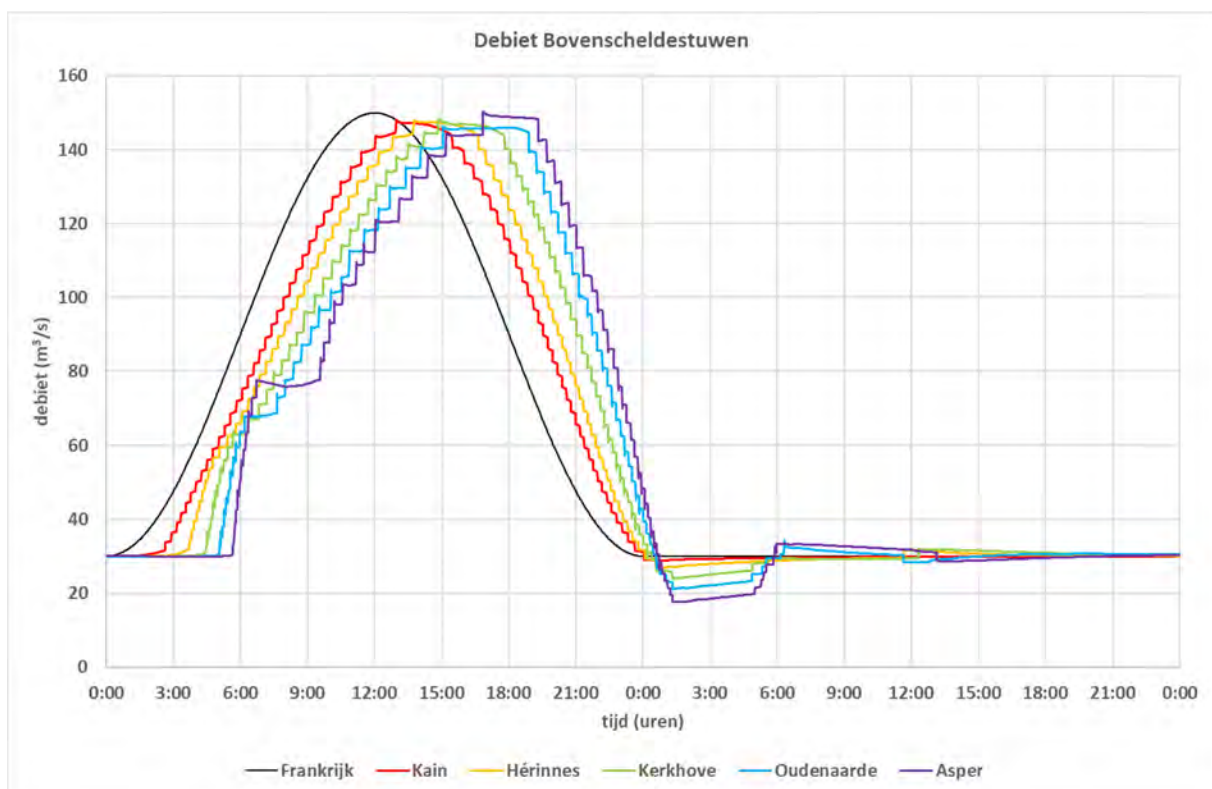
De resultaten van de simulaties met elke parameterset worden weergegeven door middel van een figuur met daarin het verloop van het debiet in Frankrijk (Maulde) en ter hoogte van de stuwen in Wallonië en Vlaanderen (Kain, Hérinnes, Kerkhove, Oudenaarde en Asper).

Synthetische en historische gebeurtenissen

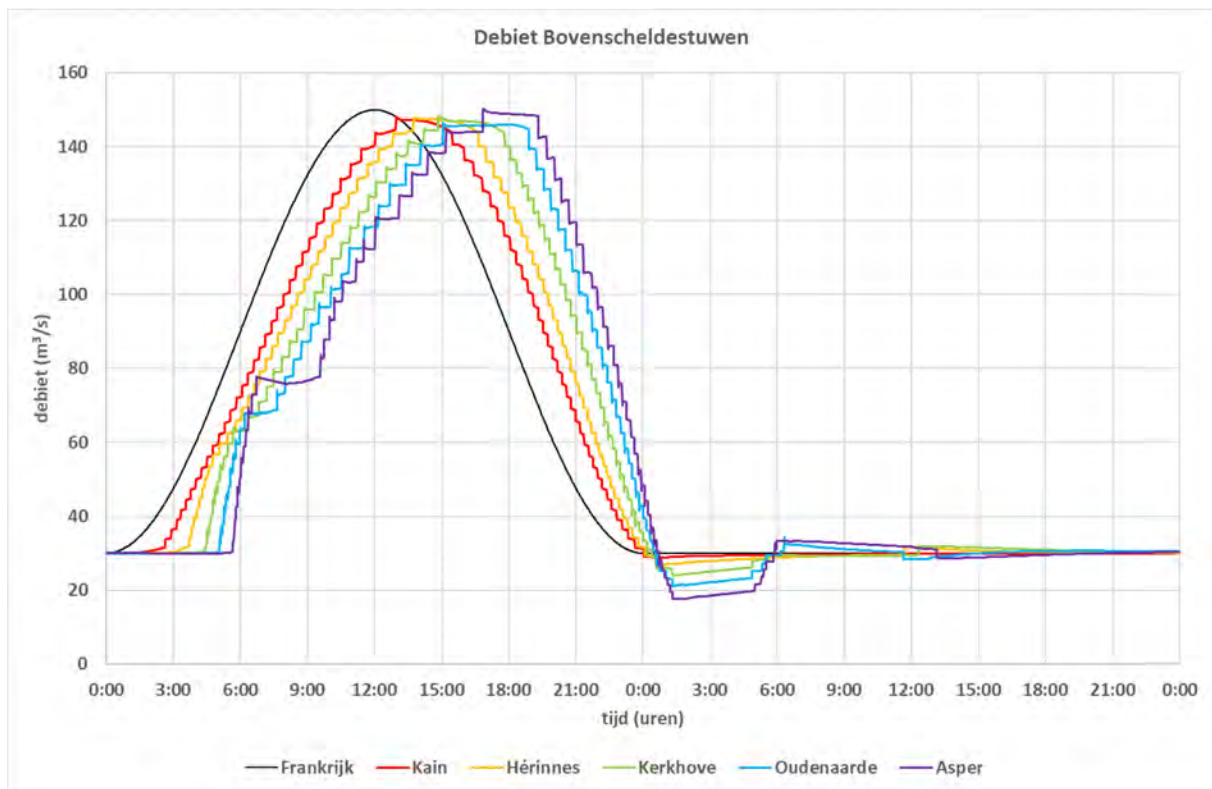
De resultaten worden getoond in Figuur 74 t.e.m. Figuur 80 (synthetisch hydrogram), Figuur 81 t.e.m. Figuur 87 (was van maart 2018) en Figuur 88 t.e.m. Figuur 94 (droogweeperperiode van april 2018).

Alhoewel er kleine verschillen zijn tussen de resultaten bekomen met de verschillende parametersets, blijft het globale gedrag van de stuwenketen ongewijzigd.

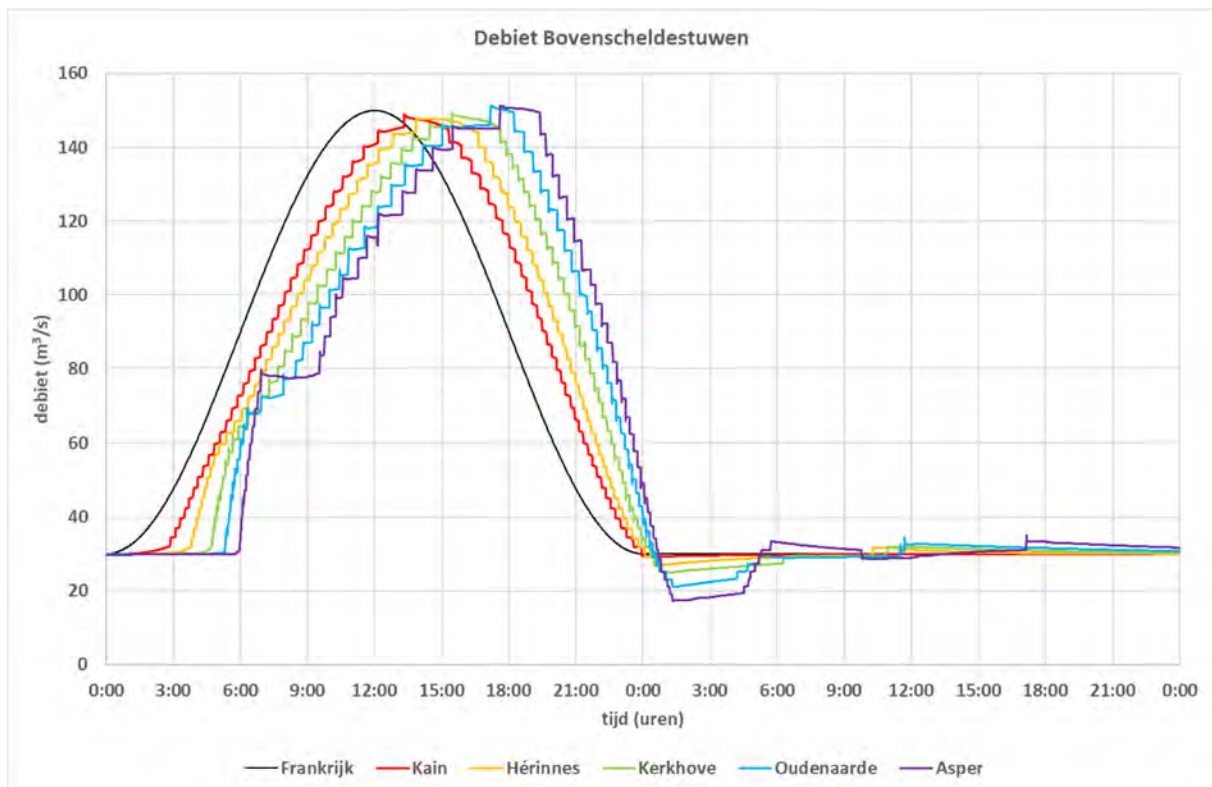
Figuur 74 – Parameterset 0 (referentie) – synthetisch hydrogram



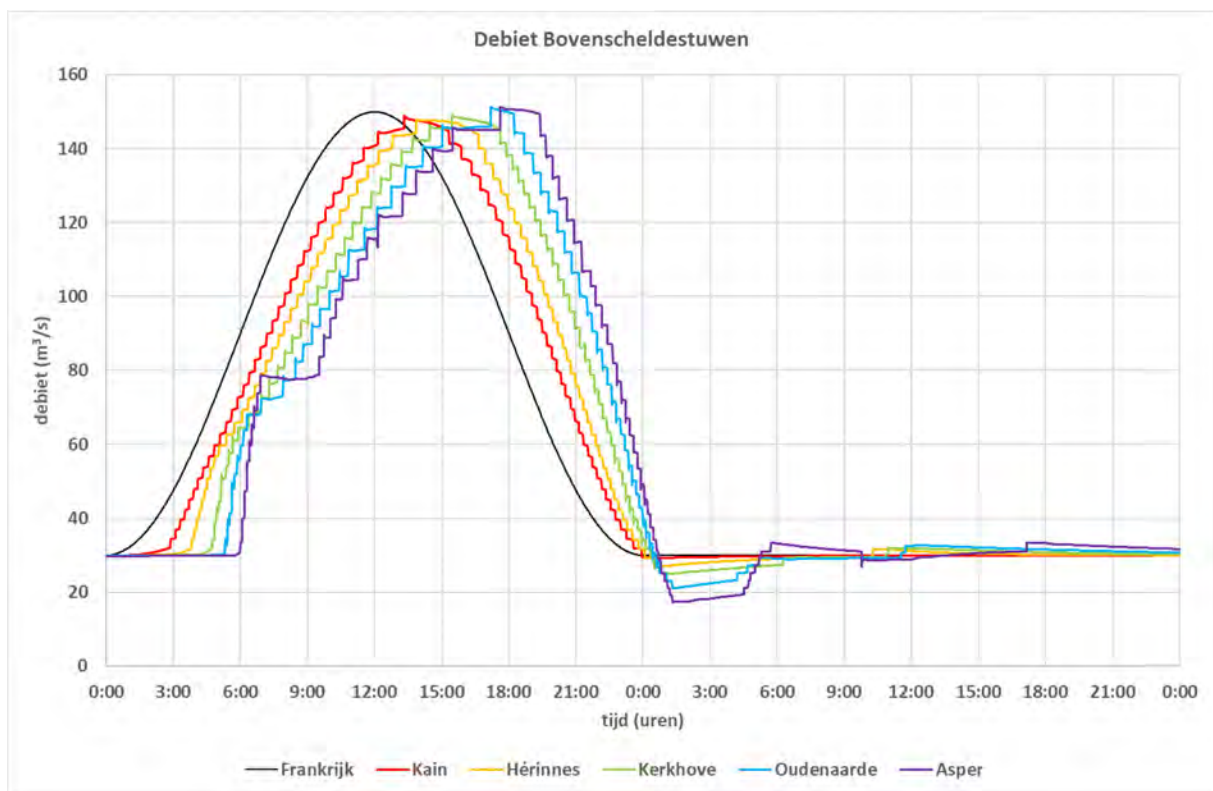
Figuur 75 – Parameterset 1 (met trend) – synthetisch hydrogram



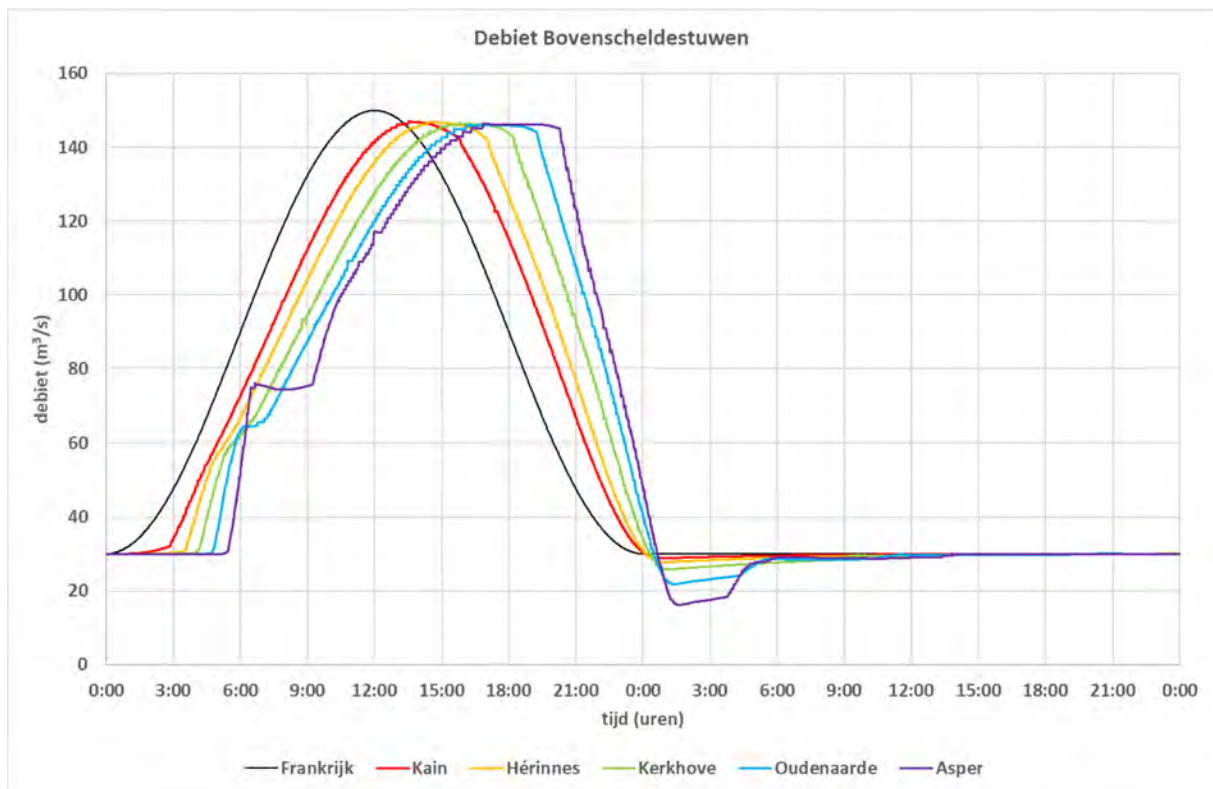
Figuur 76 – Parameterset 2 (zonder rusttijd) - synthetisch hydrogram



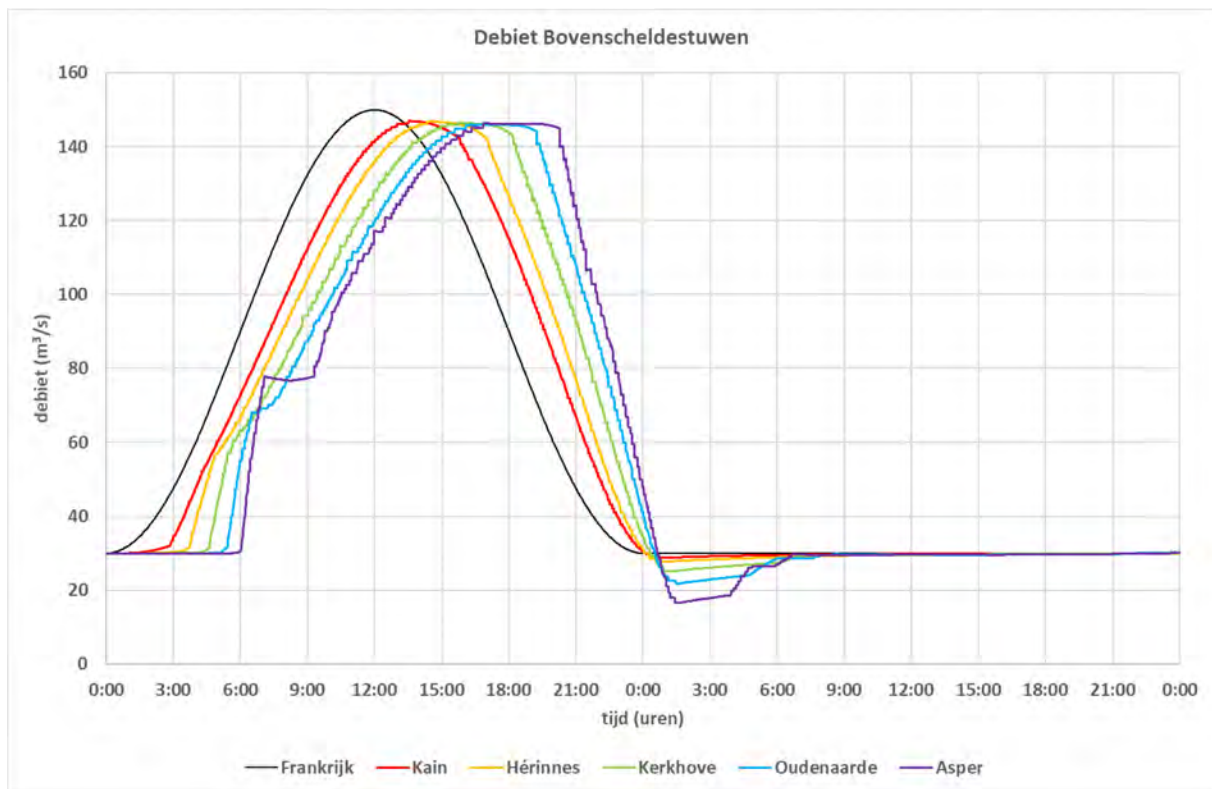
Figuur 77 – Parameterset 3 (met langere rusttijd) - synthetisch hydrogram



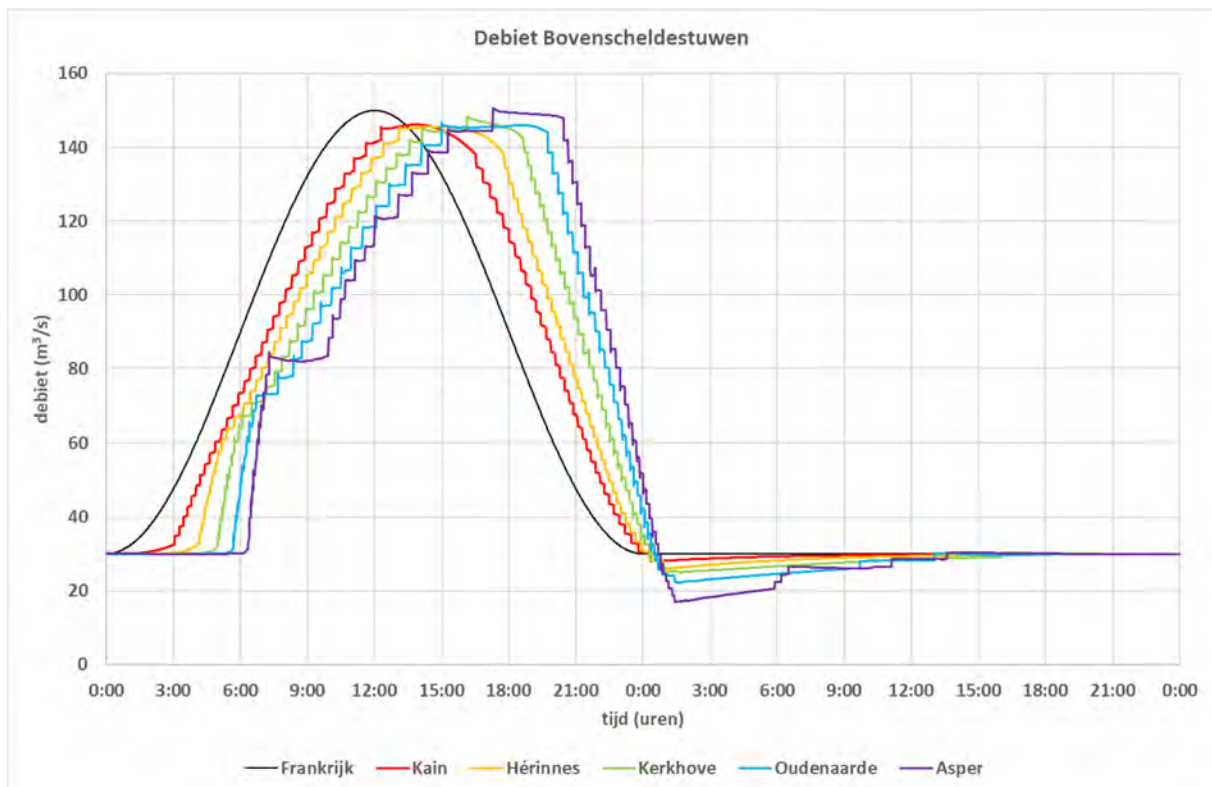
Figuur 78 – Parameterset 4 (met kortere werktijd) - synthetisch hydrogram



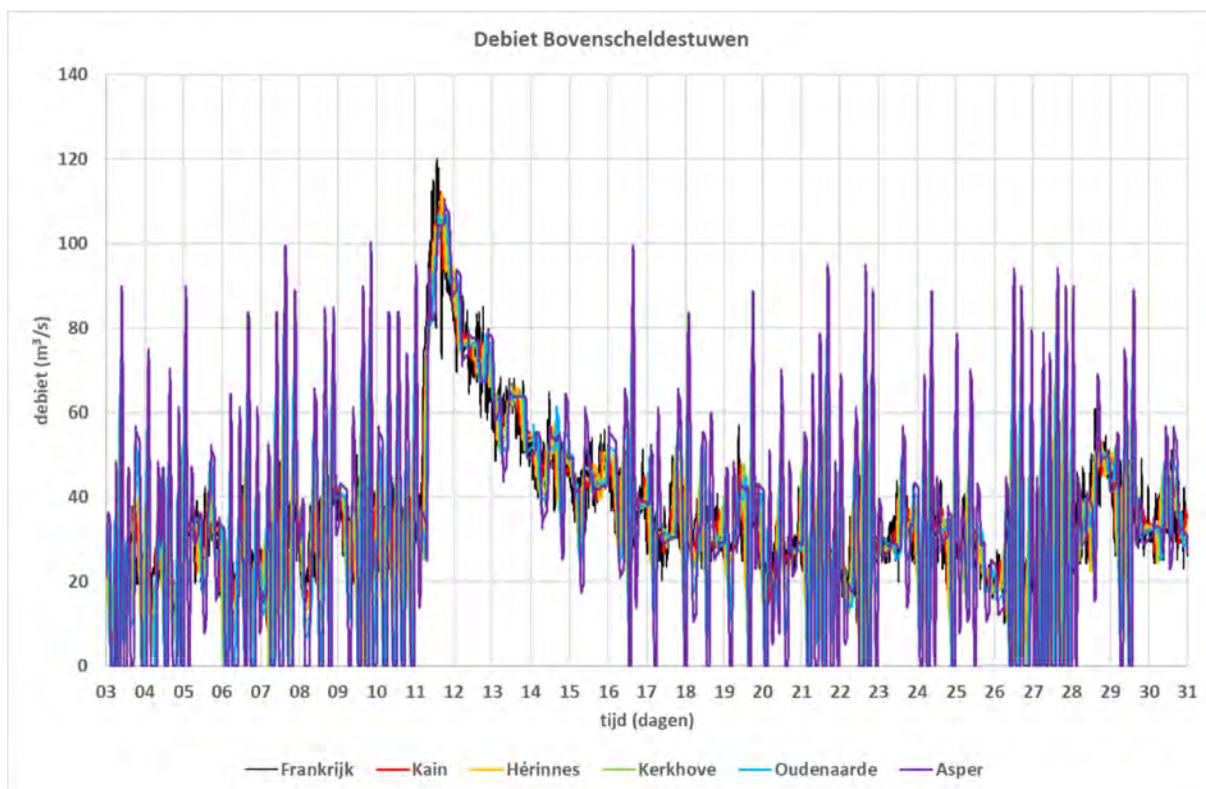
Figuur 79 – Parameterset 5 (met kortere werktijd en zonder rusttijd) – synthetisch hydrogram



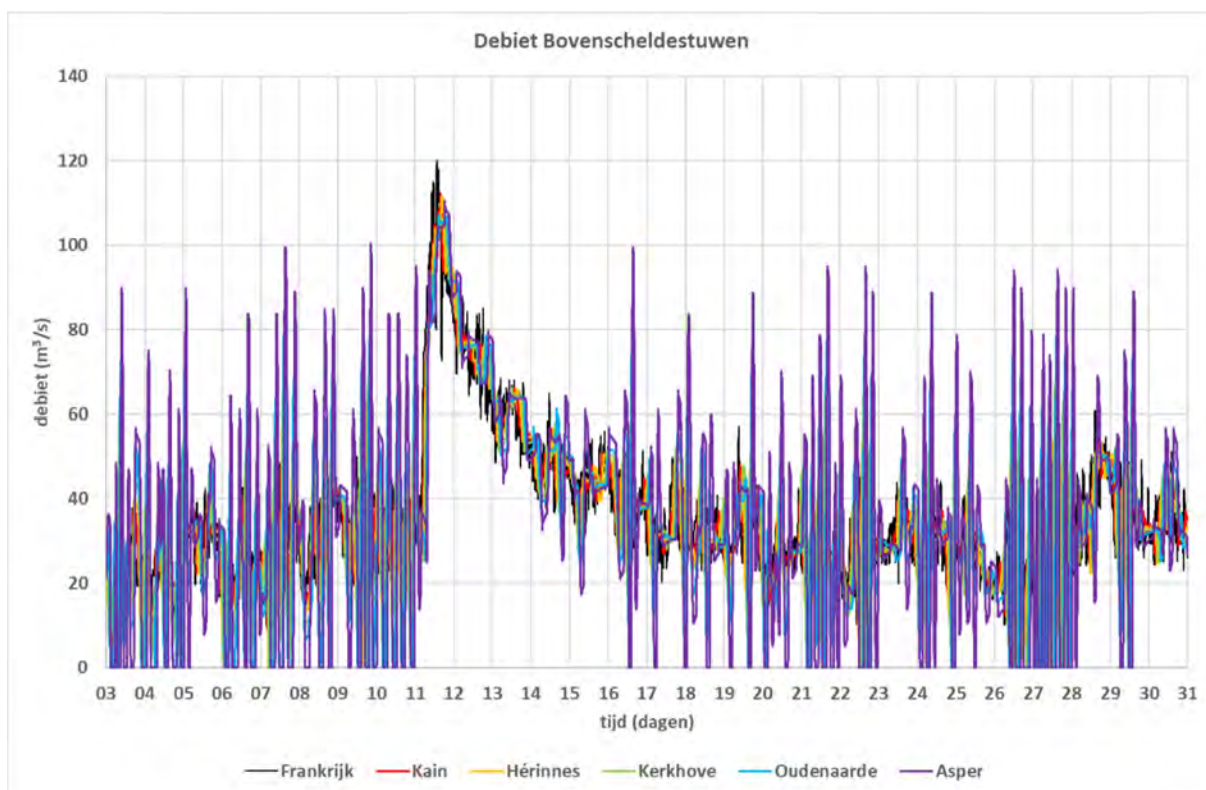
Figuur 80 – Parameterset 6 (met ruimere tolerantie voor waterpeil) - synthetisch hydrogram



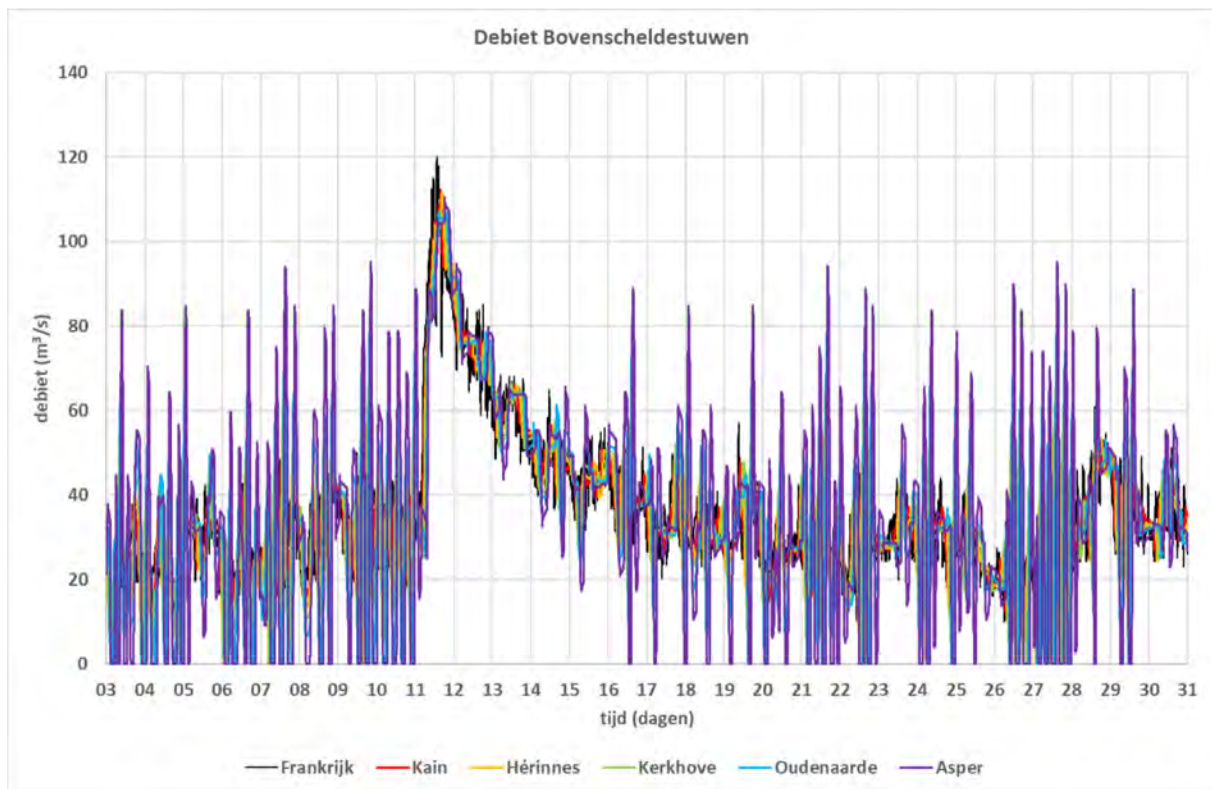
Figuur 81 – Parameterset 0 (referentie) – maart 2018



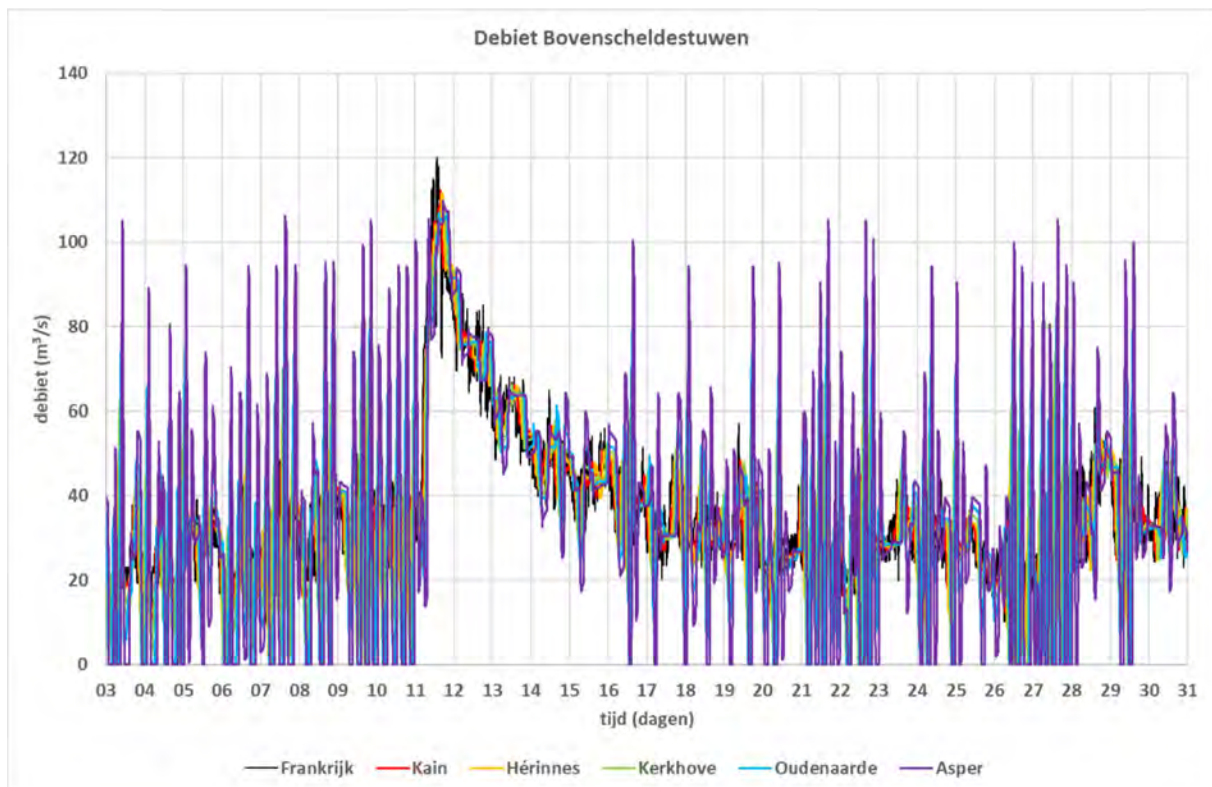
Figuur 82 – Parameterset 1 (met trend) – maart 2018



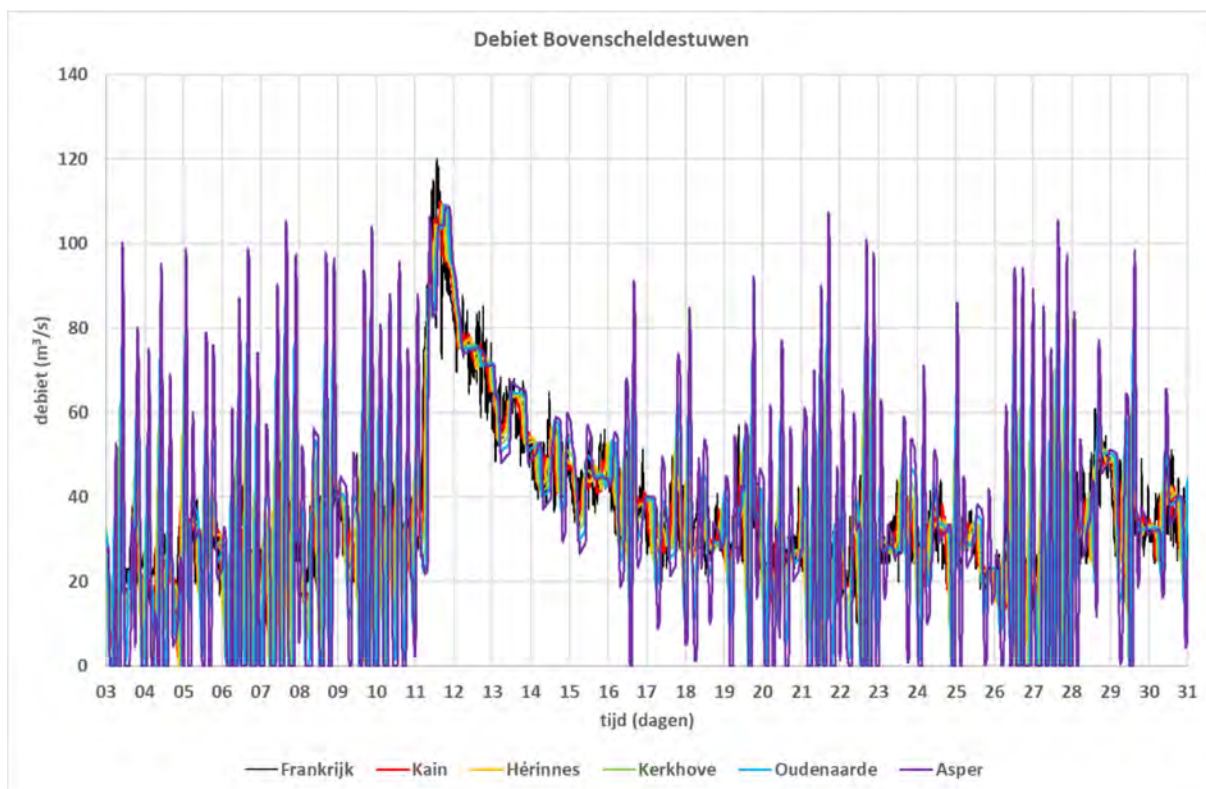
Figuur 83 – Parameterset 2 (zonder rusttijd) – maart 2018



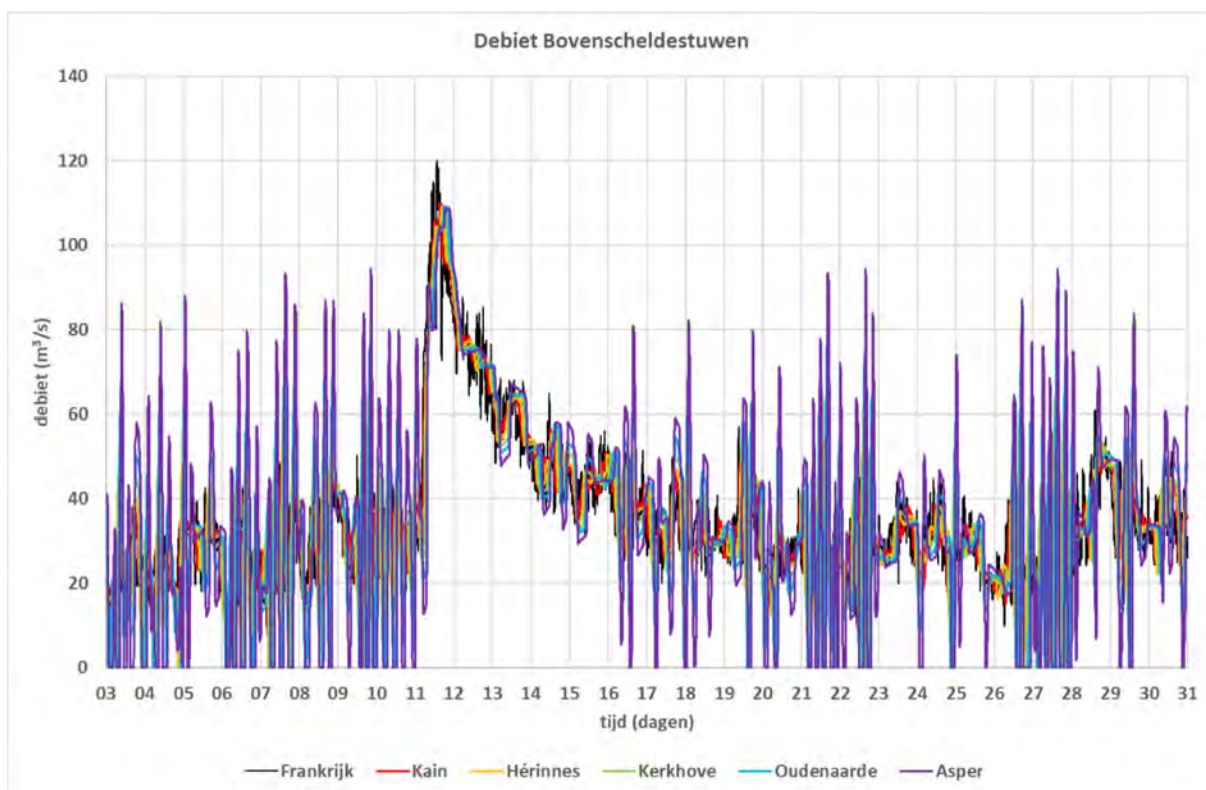
Figuur 84 – Parameterset 3 (met langere rusttijd) – maart 2018



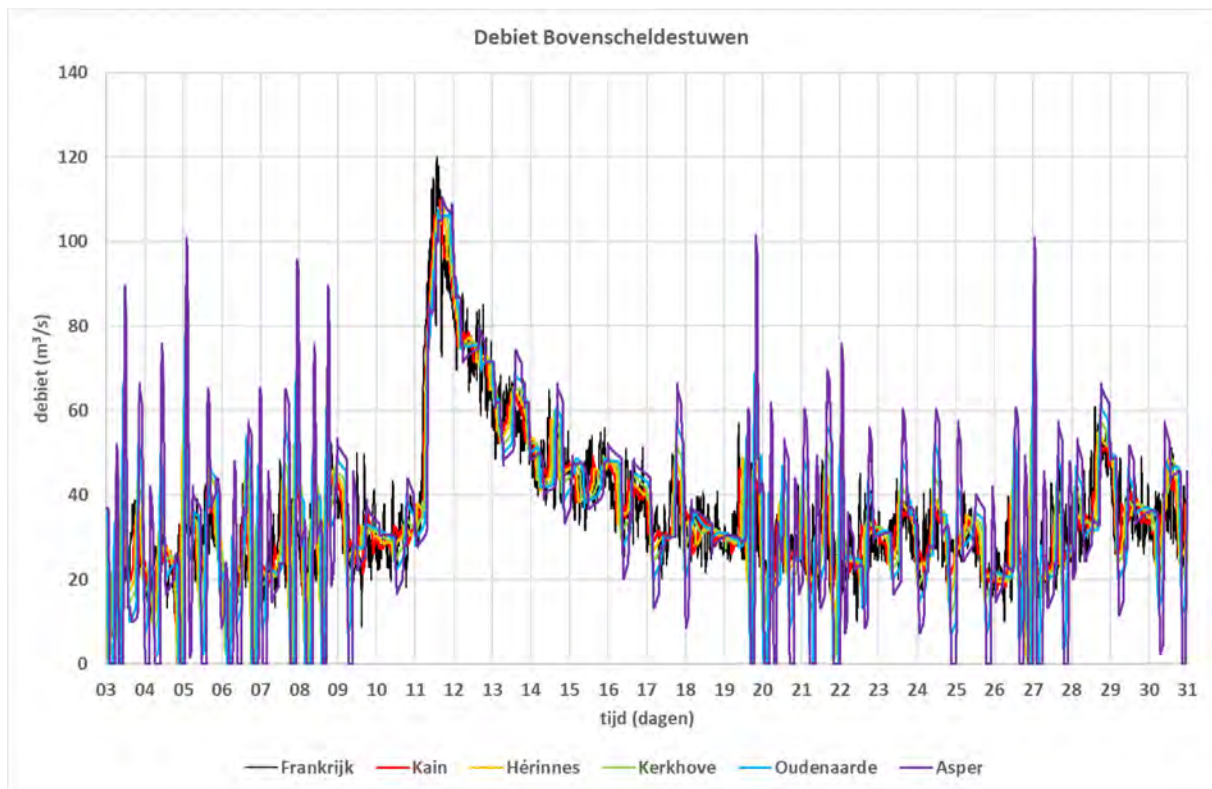
Figuur 85 – Parameterset 4 (met kortere werktijd) – maart 2018



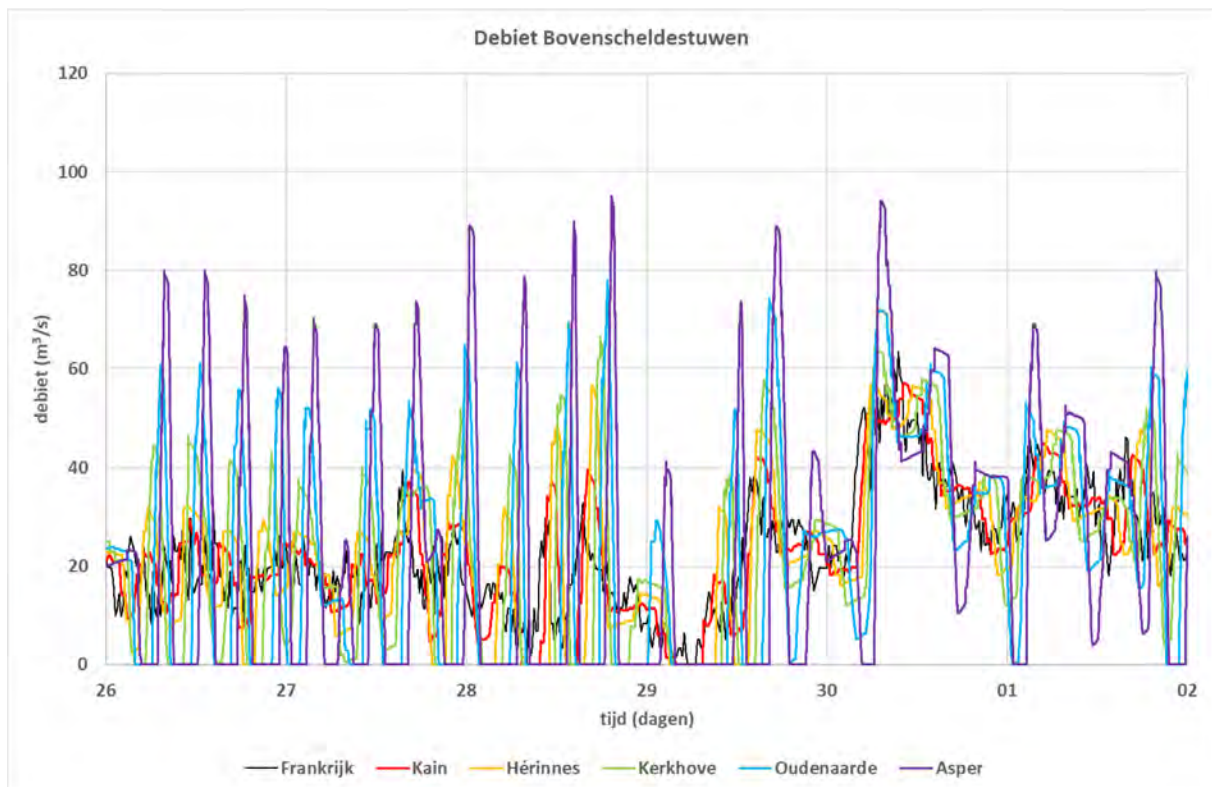
Figuur 86 – Parameterset 5 (met kortere werktijd en zonder rusttijd) – maart 2018



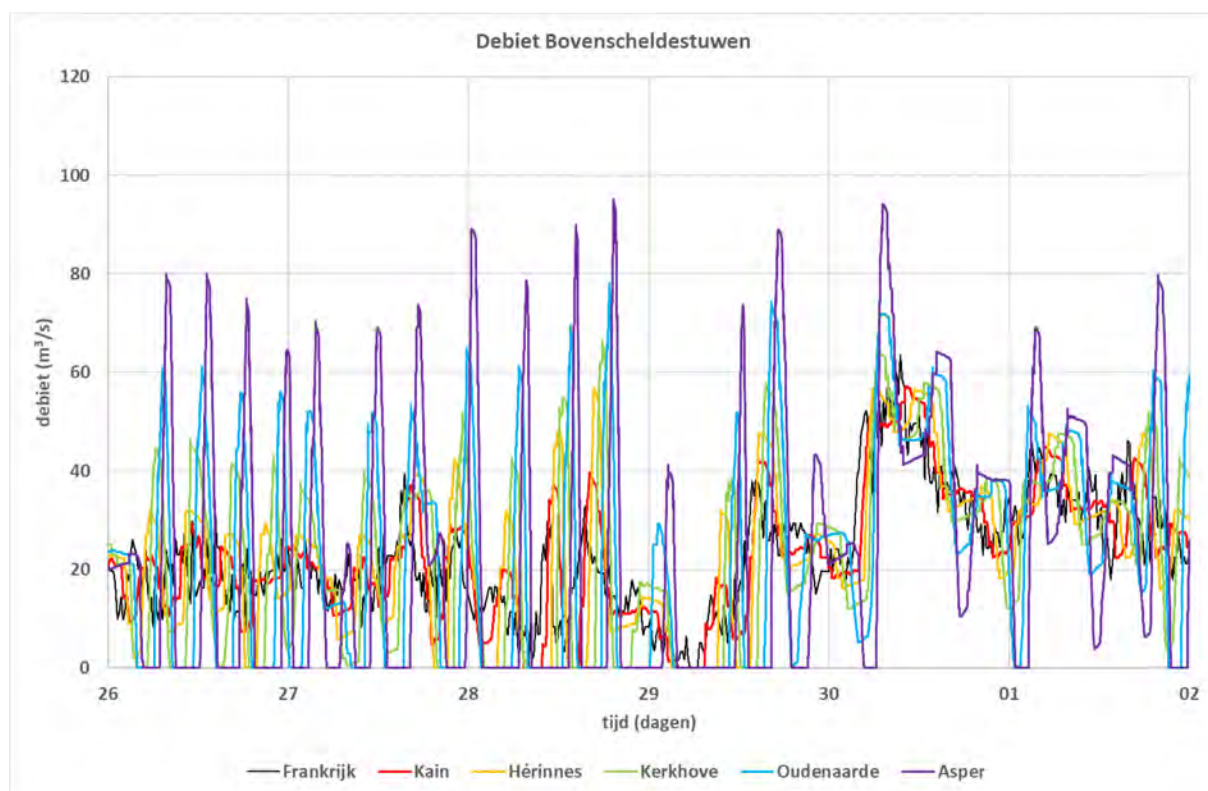
Figuur 87 – Parameterset 6 (met ruimere tolerantie voor waterpeil) – maart 2018



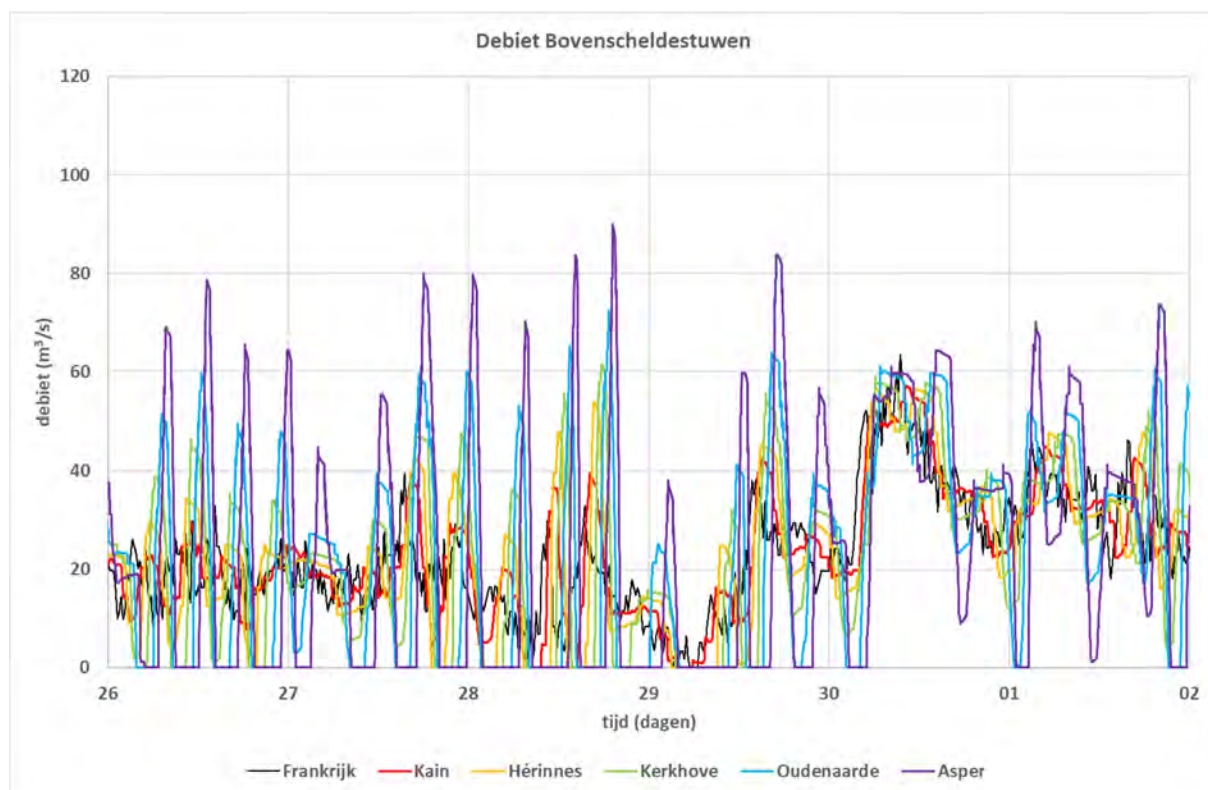
Figuur 88 – Parameterset 0 (referentie) – april 2018



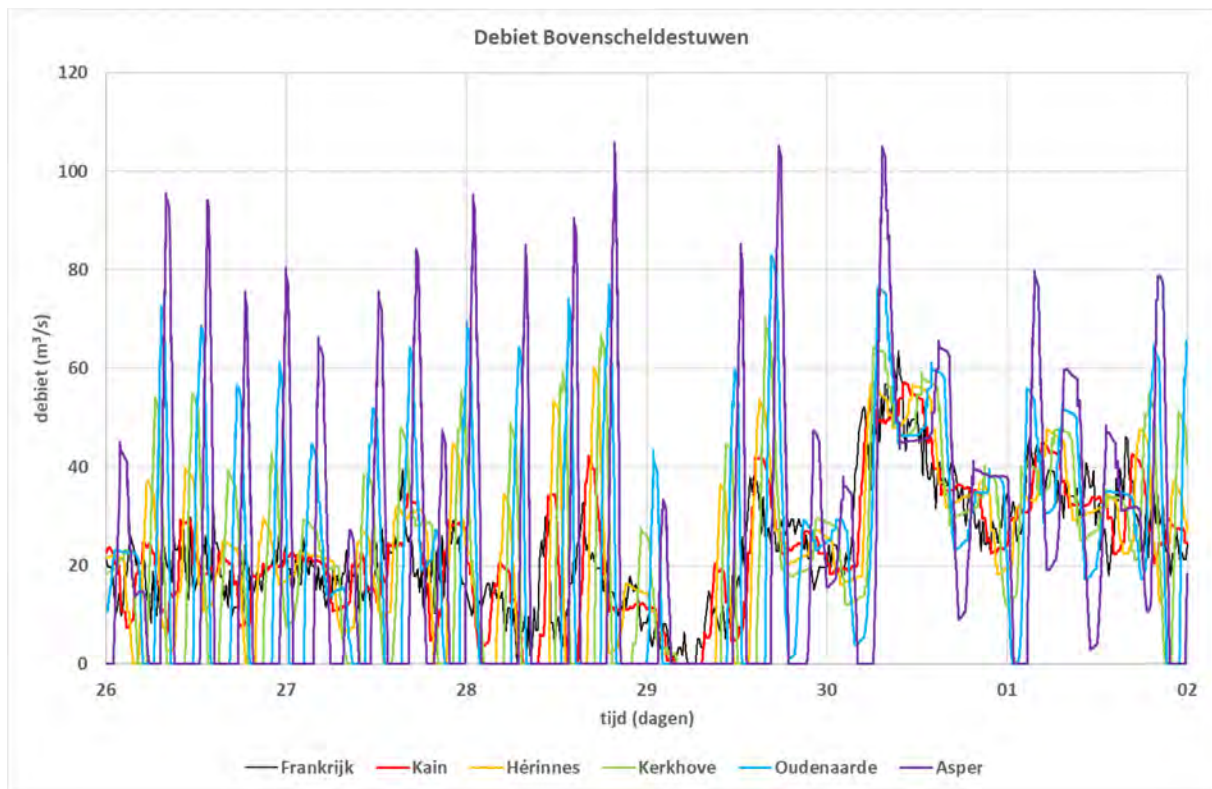
Figuur 89 – Parameterset 1 (met trend) – april 2018



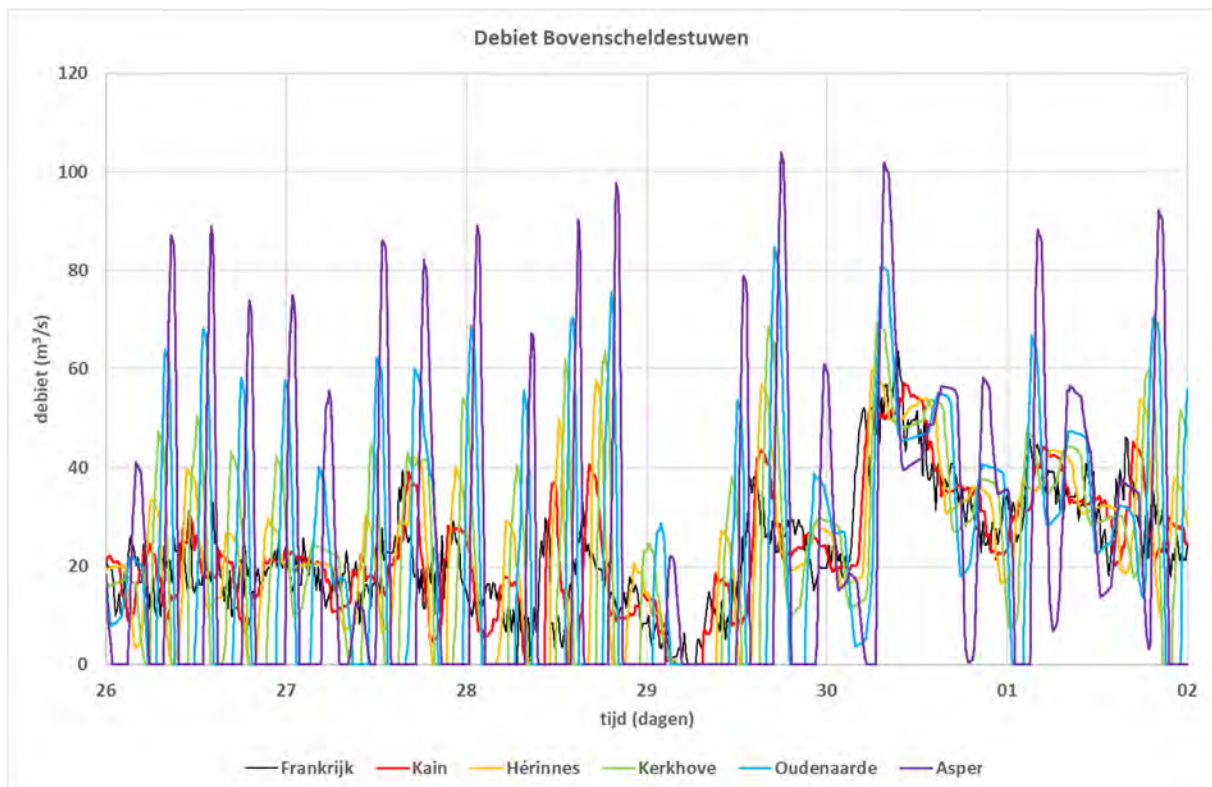
Figuur 90 – Parameterset 2 (zonder rusttijd) – april 2018



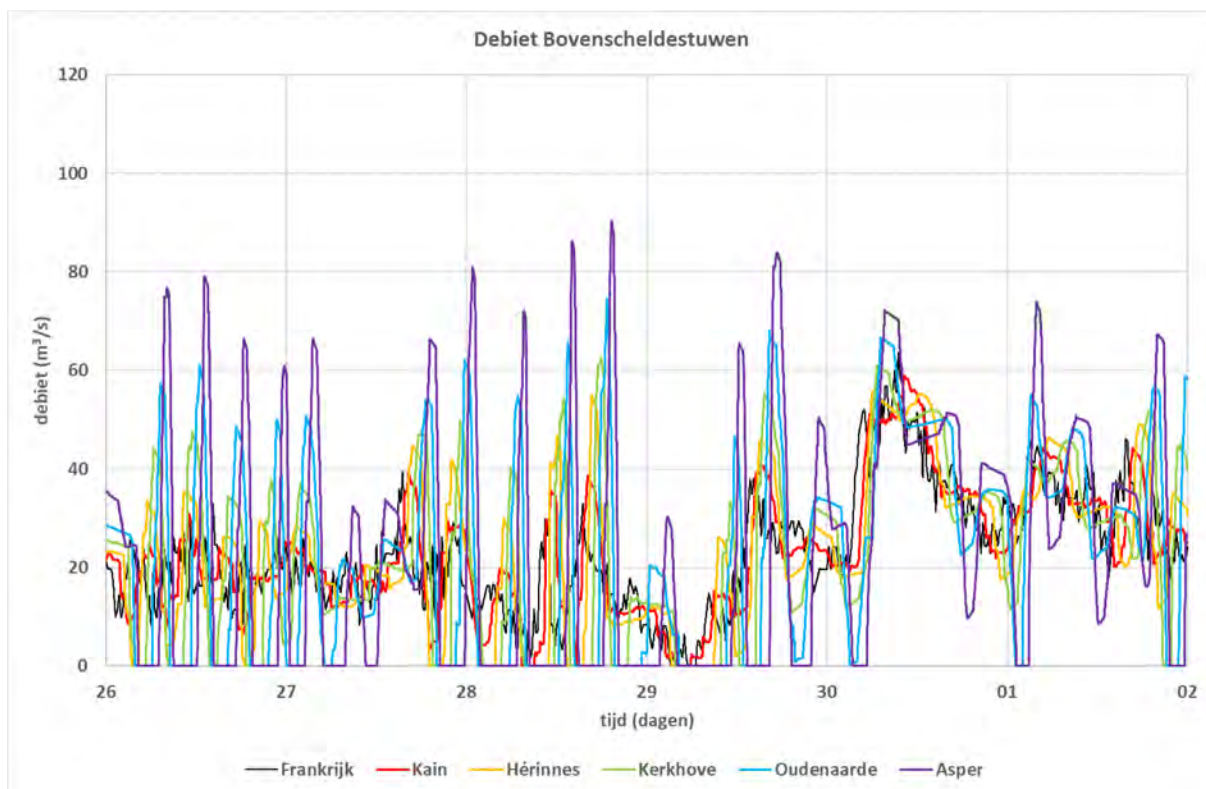
Figuur 91 – Parameterset 3 (met langere rusttijd) – april 2018



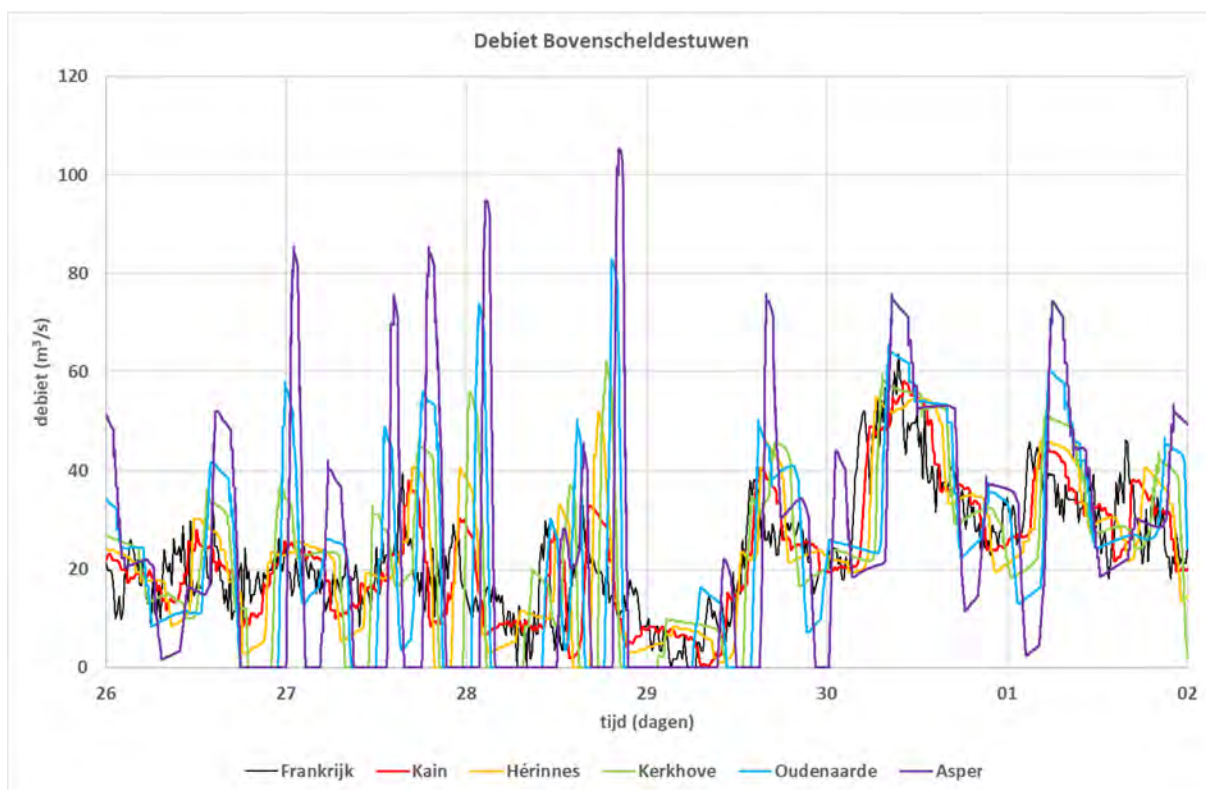
Figuur 92 – Parameterset 4 (met kortere werktijd) – april 2018



Figuur 93 – Parameterset 5 (met kortere werktijd en zonder rusttijd) – april 2018



Figuur 94 – Parameterset 6 (met ruimere tolerantie voor waterpeil) – april 2018



6.3 Conclusies en aanbevelingen

Theoretische beschouwingen op basis van de fysische kenmerken van de verschillende panden van de gekanaliseerde Haut-Escaut en Bovenschelde doen vermoeden dat een automatische lokale sturing op waterpeil aanleiding zou kunnen geven tot versterkingen van debietschommelingen bij afvoeren minder dan 20 à 80 m³/s. Controleberekeningen met synthetische en historische gebeurtenissen bevestigen dit vermoeden.

De versterking van de debietsafname op het einde van een was, kan ertoe leiden dat de meest afwaarts gelegen stuwen tijdelijk sluiten. Deze sluiting zou een negatieve impact kunnen hebben op de werking van de vispassages.

Kleine debietschommelingen op de Haut-Escaut in Frankrijk of Wallonië zouden aanleiding kunnen geven tot het ontstaan van grote debietschommelingen op de Bovenschelde in Vlaanderen en het tijdelijk sluiten van een aantal stuwen in Vlaanderen. De laterale instroming vanuit de zijlopen van de Bovenschelde volstaat niet om dit te voorkomen. Indien het niet mogelijk zou blijken om de versterking van de schommelingen in Vlaanderen te voorkomen, dan dient men het ontstaan van deze schommelingen in Frankrijk of Wallonië te beperken.

De parameters van het onderzochte sturingsalgoritme blijken slechts een beperkte invloed te hebben op de werking van de volledige stuwenketen. De ongewenste versterking van een toename of afname van het debiet bij lage afvoeren blijft optreden bij verschillende combinaties van sturingsparameters.

In een laatste stap dient de interactie tussen de stuwen en de vispassages onderzocht te worden. Daarbij dient gecontroleerd te worden welk effect de versterking van debietschommelingen heeft op de werking van de vispassages. Indien zou blijken dat het voorgestelde sturingsalgoritme een ongewenste impact heeft op de werking van de vispassages, dan moeten alternatieve sturingsalgoritmen onderzocht worden.

7 Interactie

7.1 Methodologie

7.1.1 Modelvariant

De interactie tussen de bestaande stuwen en vispassages en eventuele toekomstige turbines langsheen de Bovenschelde werd bestudeerd met het model dat eerder gebruikt werd voor de studie van de stuwen. In dit model werden de vispassages (en het toegevoegd debiet), de turbines en de lekverliezen en schutverliezen van de sluizen opnieuw geactiveerd.

7.1.2 Scenario's

De vispassages werden overgenomen uit scenario S2, beschreven in paragraaf 5.1.2. Dit scenario maakt gebruik van een bekkentrap in Kerkhove en nevengeulen in Oudenaarde en Asper. Het voorziet ook in de plaatsing van turbines in Kerkhove, Oudenaarde en Asper.

7.1.3 Sturing

Alle vispassages openen op basis van het debiet over de stuwen en sluiten op basis van het waterpeil opwaarts van de stuwen.

Voor de stuwen werd de sturing met basisparameters (beschreven in paragraaf 6.1.3) gebruikt.

7.1.4 Analyse

De analyse focust op de interactie tussen de verschillende kunstwerken (stuwen, turbines en vispassage) op een specifieke site. Eerst wordt gecontroleerd of de versterking van kleine afvoergolven in een stuwenketen een negatieve impact zou kunnen hebben op de werking van de vispassages en turbines naast die stuwen. Daarna wordt gecontroleerd of de aanwezigheid van de andere kunstwerken naast de stuwen (turbines en vispassage) een positieve of een negatieve invloed heeft op de versterking van kleine afvoergolven.

De analyses werden uitgevoerd aan de hand van synthetische en historische gebeurtenissen.

De synthetische gebeurtenissen zijn de sinusoidale hydrogrammen met variabele duur, zoals beschreven in paragraaf 6.1.5. Deze synthetische hydrogrammen houden geen rekening met zijdelingse instroming langsheen de Bovenschelde.

De historische gebeurtenissen omvatten de was van maart 2018, de droogweelperiode van april 2018 en het volledige jaar 2019. Het jaar 2019 werd opnieuw opgesplitst in 12 deelperioden van 1 maand, waarbij de eerste 2 dagen van elke maand gebruikt werden als initialisatieperiode.

7.2 Resultaten

7.2.1 Figuren

De resultaten worden gevisualiseerd in twee reeksen figuren.

Elke figuur van de eerste reeks geeft het gedrag van de kunstwerken op een bepaalde site weer aan de hand van: (1) het waterpeil opwaarts van de stuw, (2) de stand van de stuwklep, (3) de stand van het segment (4) het debiet over de stuw, (5) het debiet door de eerste turbine, (6) het debiet door de tweede turbine, (7) het toegevoegd debiet en (8) het debiet doorheen de vispassage. Op de bestudeerde sites en in de bestudeerde scenario's is er momenteel nergens een toegevoegd debiet.

Elke figuur van de tweede reeks toont de impact van de bijkomende kunstwerken (turbines en vispassage) op een bepaalde site op de werking van de stuwen op die site aan de hand van (1) het debiet doorheen een stuw in afwezigheid van andere kunstwerken (= grafiek 'stuw - zonder interactie'), en (2) het debiet doorheen een stuw in aanwezigheid van andere kunstwerken (= grafiek 'stuw - met interactie'). De eerste grafiek werd overgenomen uit de studie van de stuwen (hoofdstuk 6), de tweede grafiek werd berekend tijdens de studie van de interactie (hoofdstuk 7).

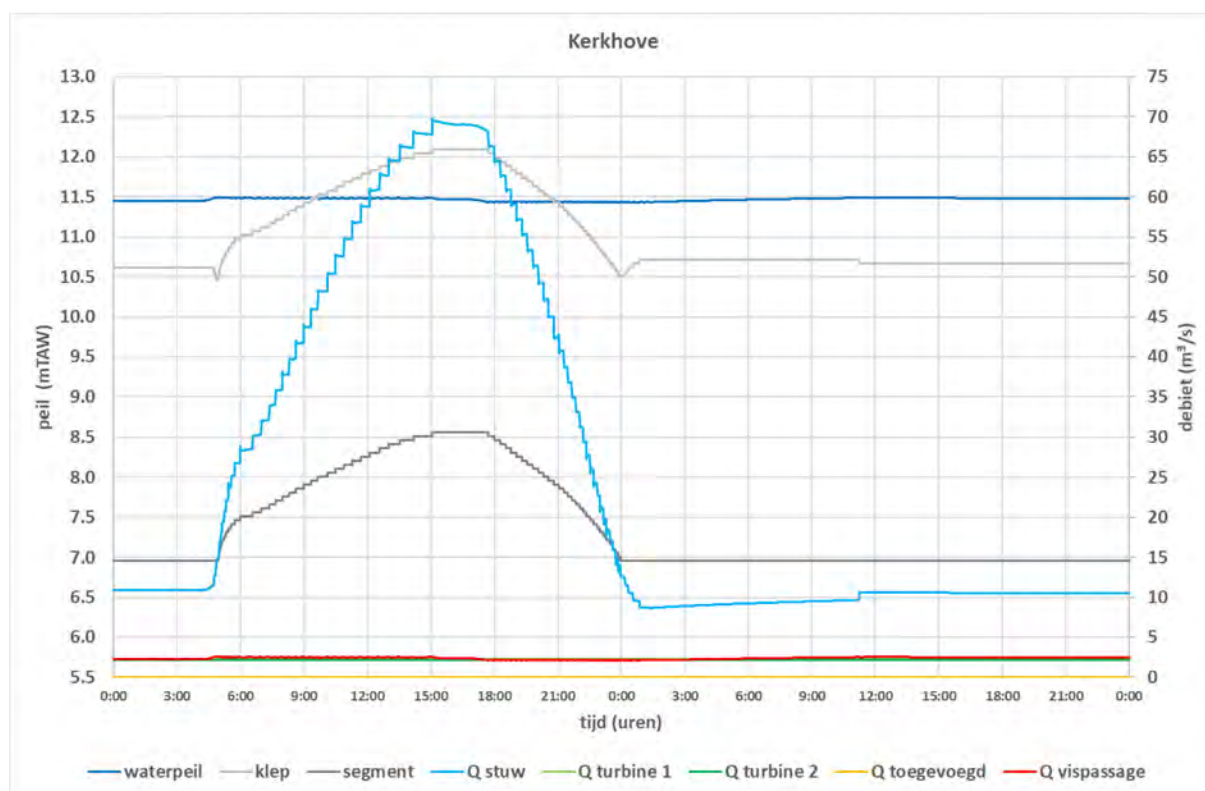
7.2.2 Synthetische gebeurtenissen

De resultaten van de analyses met synthetische gebeurtenissen worden getoond in Figuur 95 t.e.m. Figuur 106 (eerste reeks) en Figuur 107 t.e.m. Figuur 118 (tweede reeks).

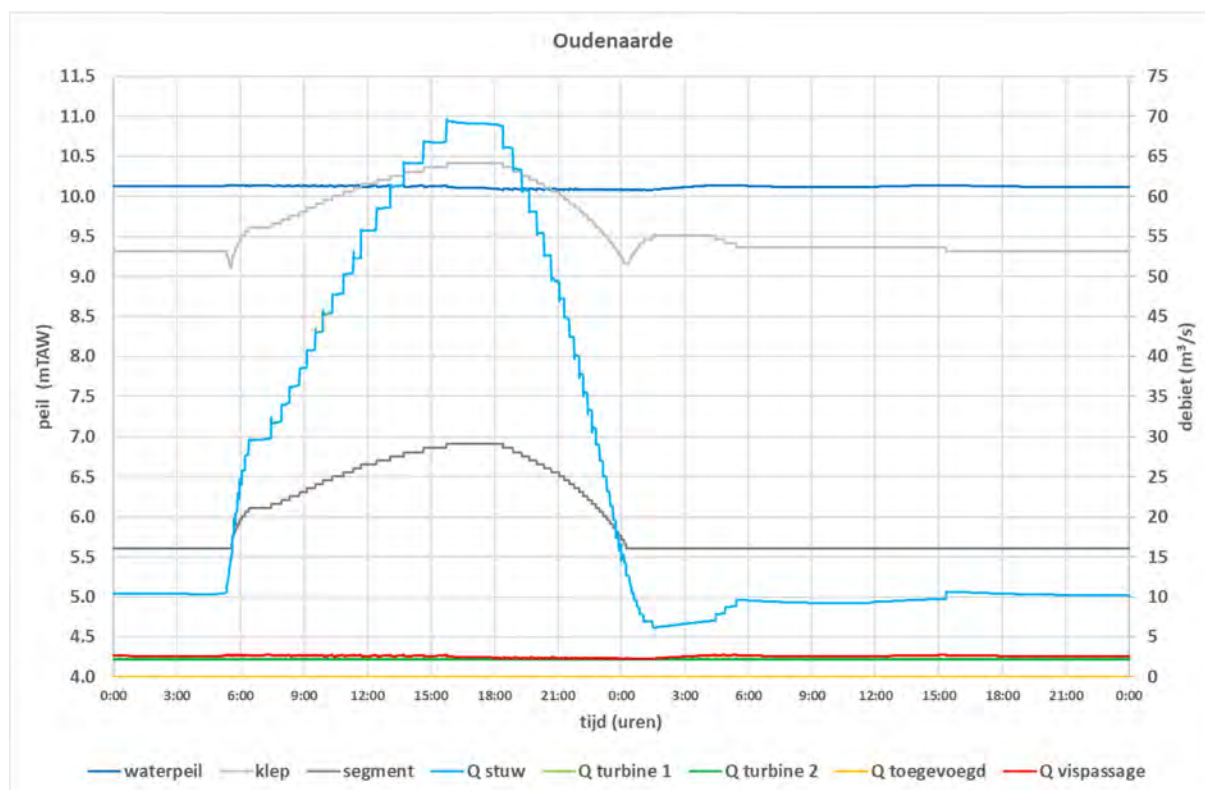
Uit de eerste reeks figuren blijkt dat de kleppen van de stuwen van Oudenaarde en Asper soms volledig opgetrokken worden (m.a.w. geen overstortdebiet). Dit leidt soms tot het uitschakelen van één van de turbines, maar de vispassage blijft wel open.

De tweede reeks figuren toont aan dat de inzet van de bijkomende kunstwerken op een bepaalde site logischerwijze vooral leidt tot een afname van het debiet dat over de stuw gaat, zowel bij lage als bij middelhoge afvoeren. Hierdoor neemt de kans op het volledig optrekken van de klep van de stuw toe, maar dat hoeft op zich geen probleem te vormen. Het beschikbare debiet wordt in deze situaties juist optimaal ingezet voor vismigratie en energiewinning.

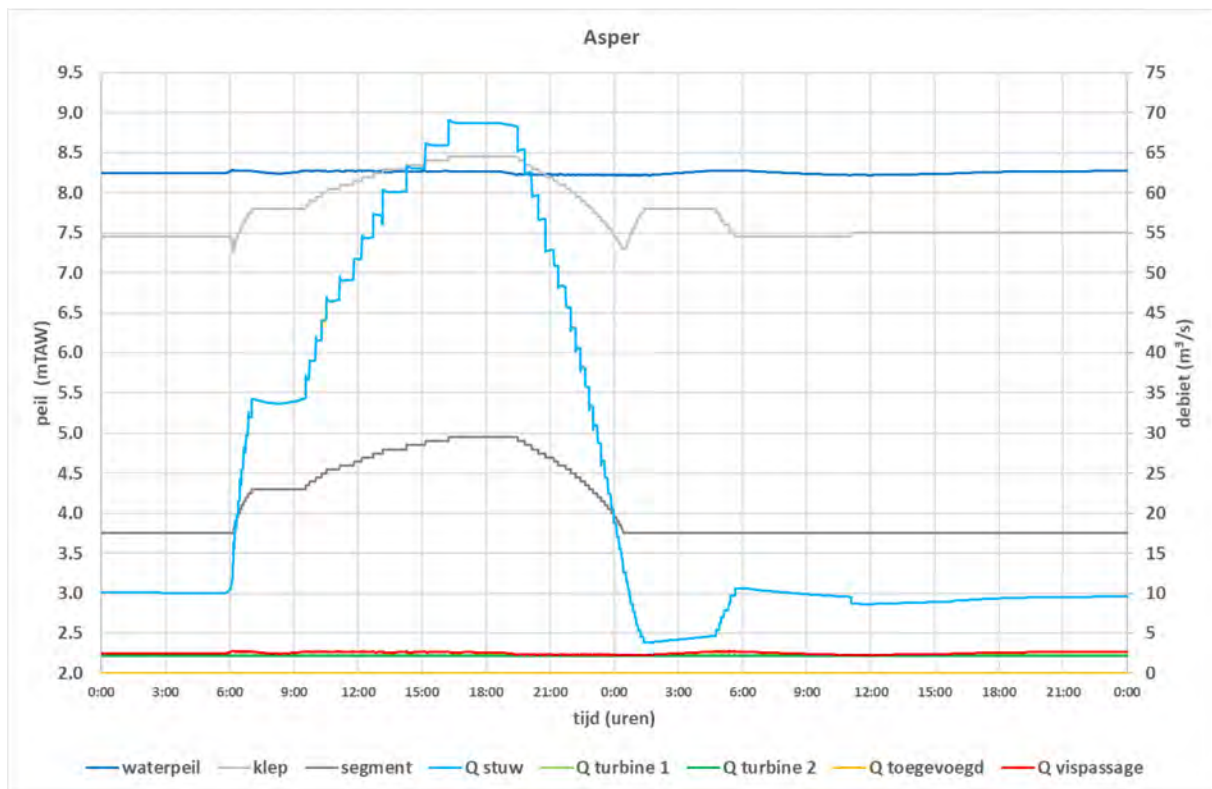
Figuur 95 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur - Kerkhove (reeks 1)



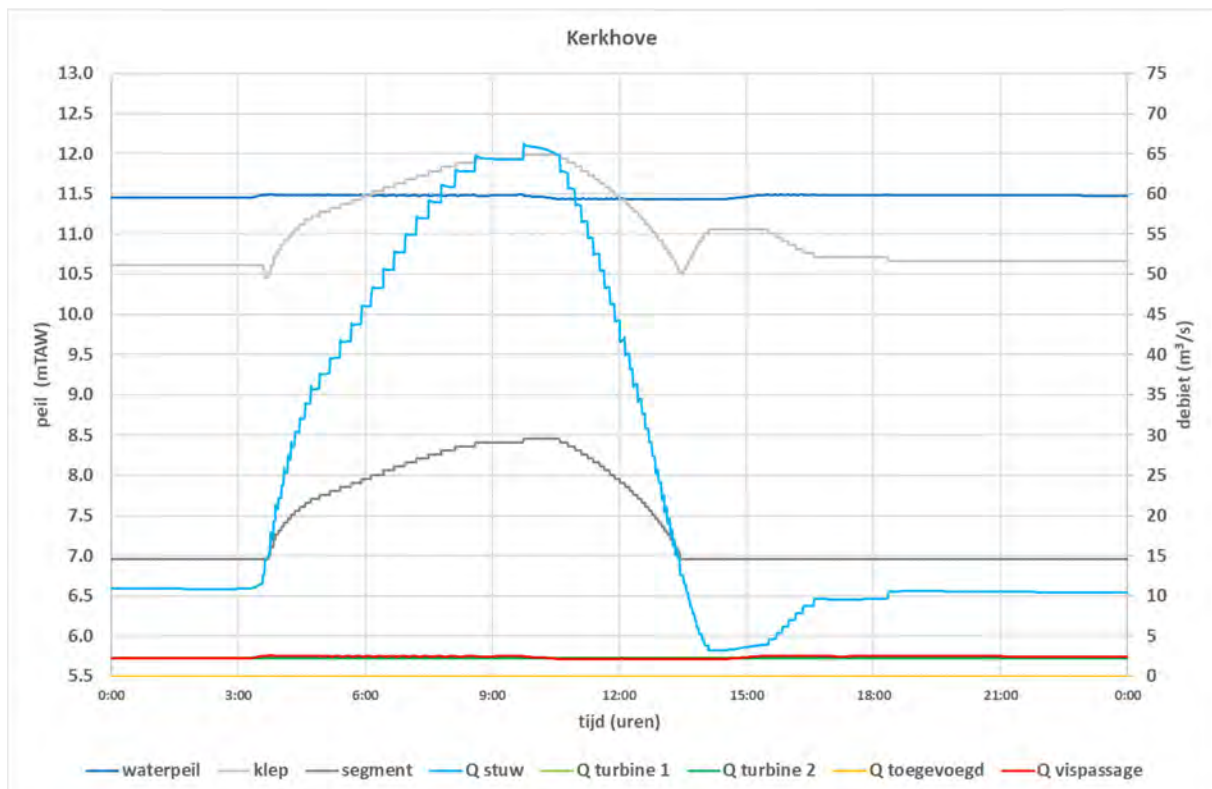
Figuur 96 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Oudenaarde (reeks 1)



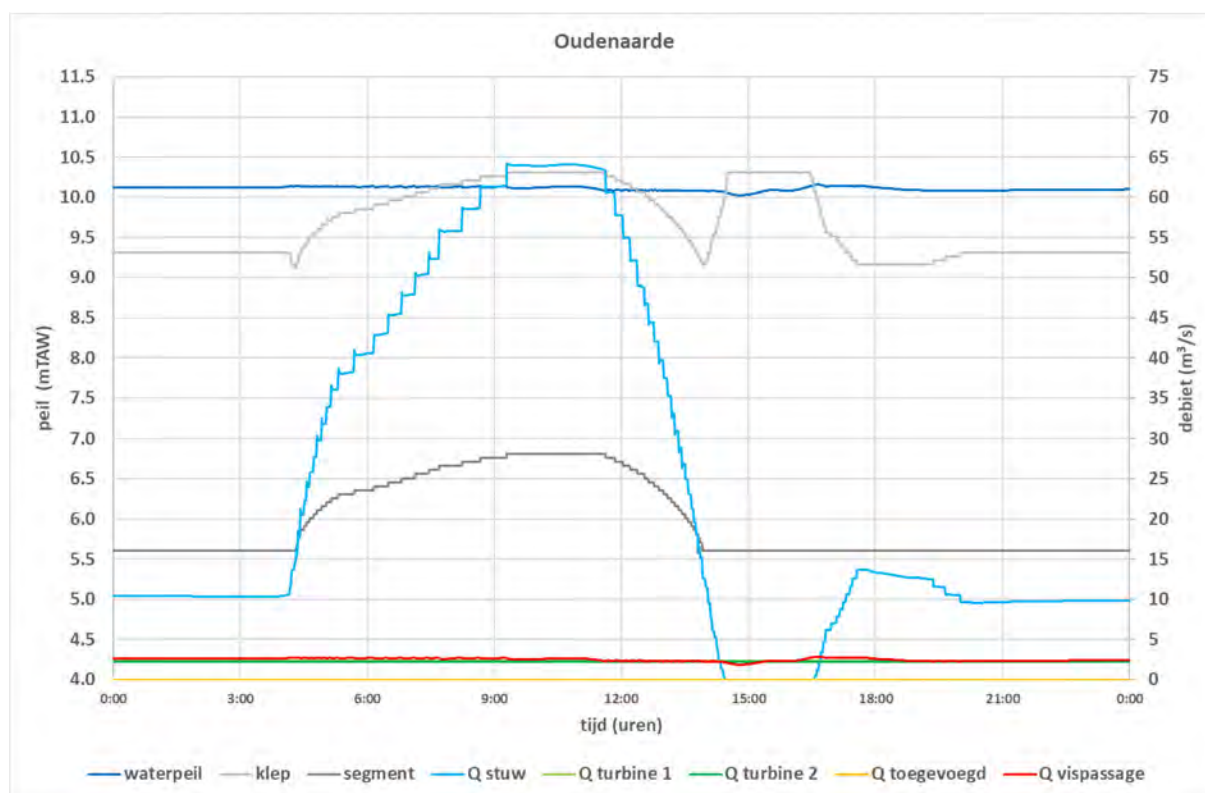
Figuur 97 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Asper (reeks 1)



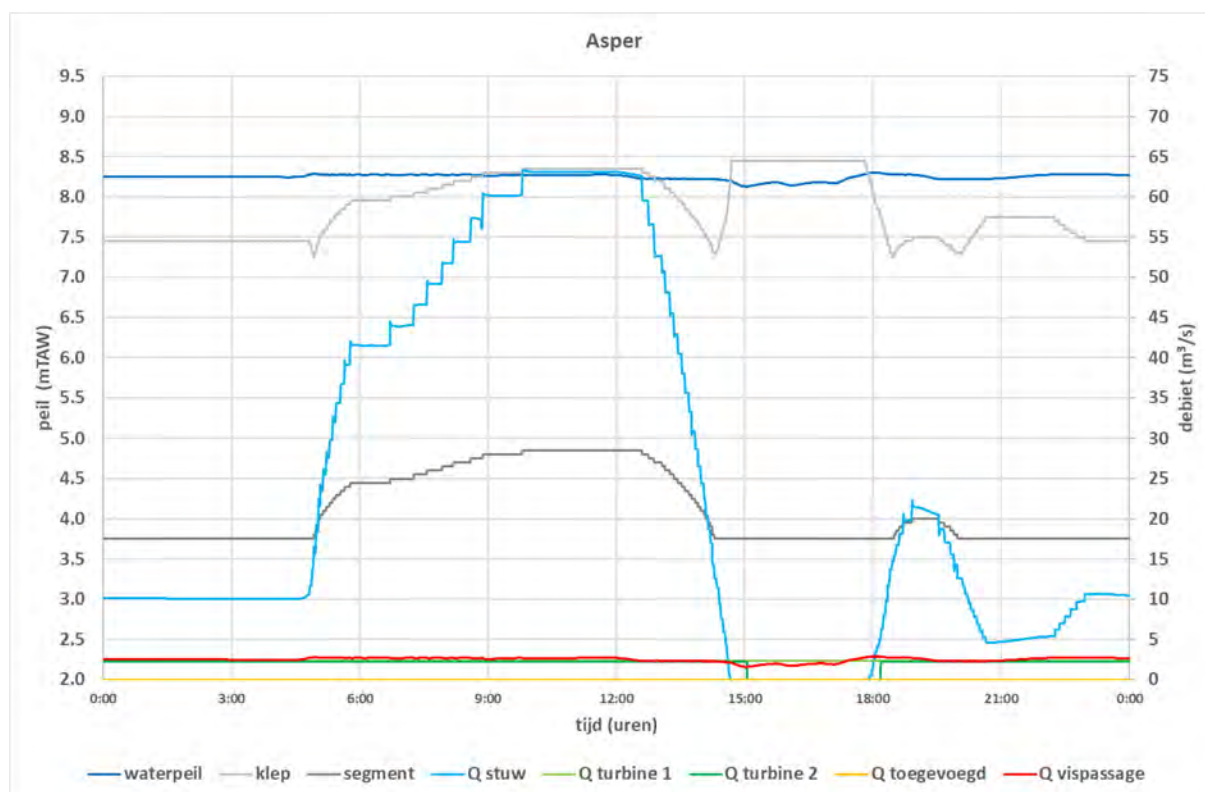
Figuur 98 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Kerkhove (reeks 1)



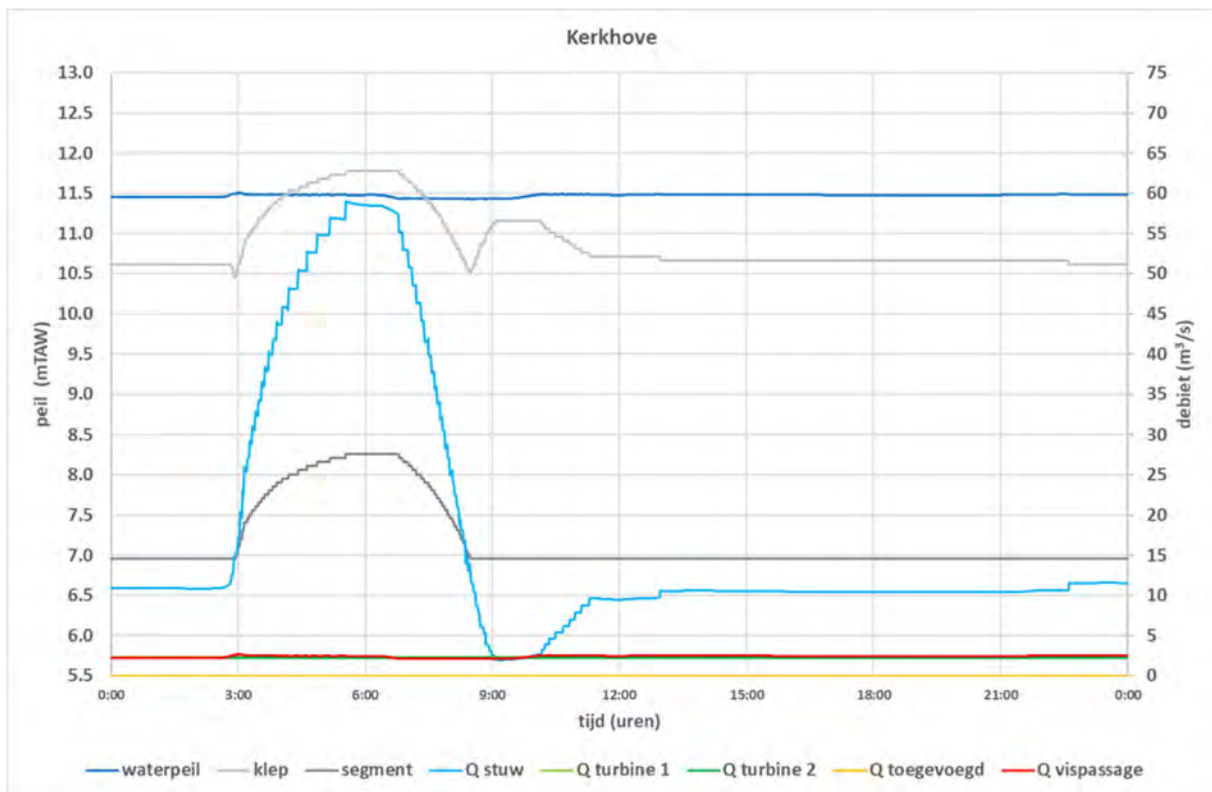
Figuur 99 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Oudenaarde (reeks 1)



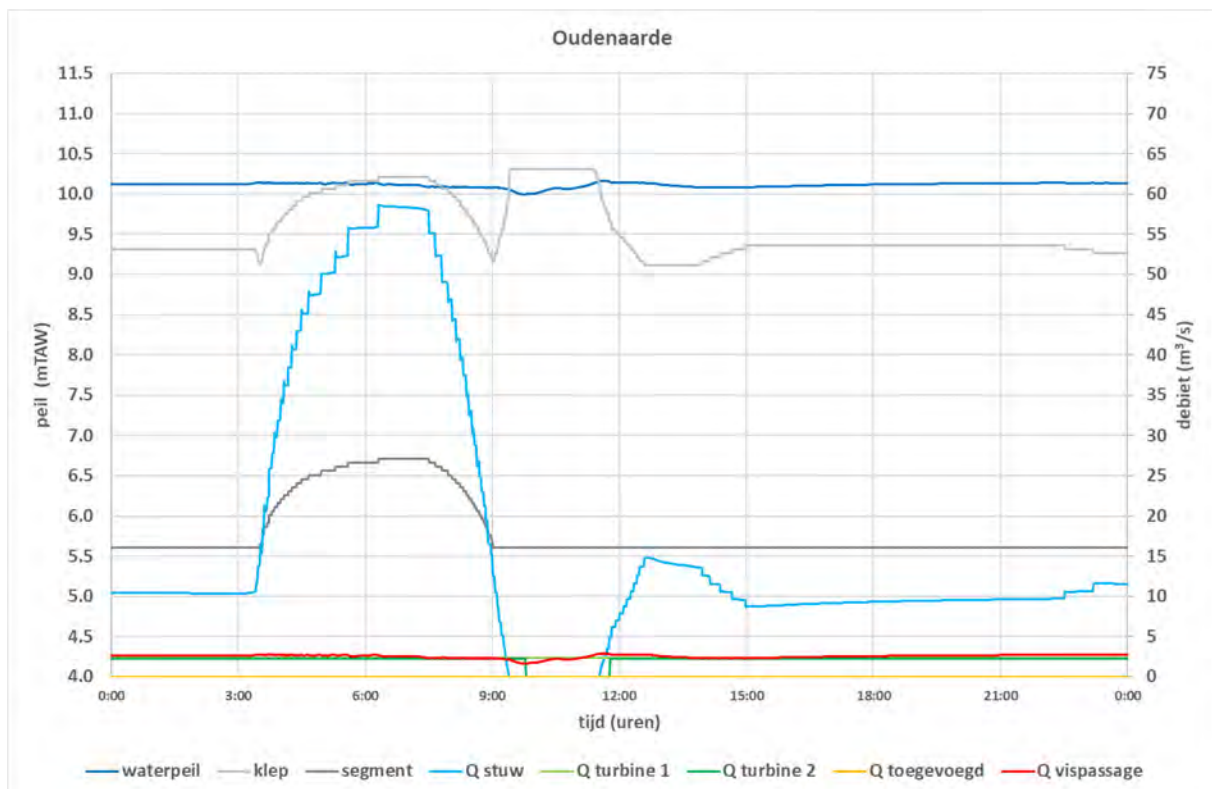
Figuur 100 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Asper (reeks 1)



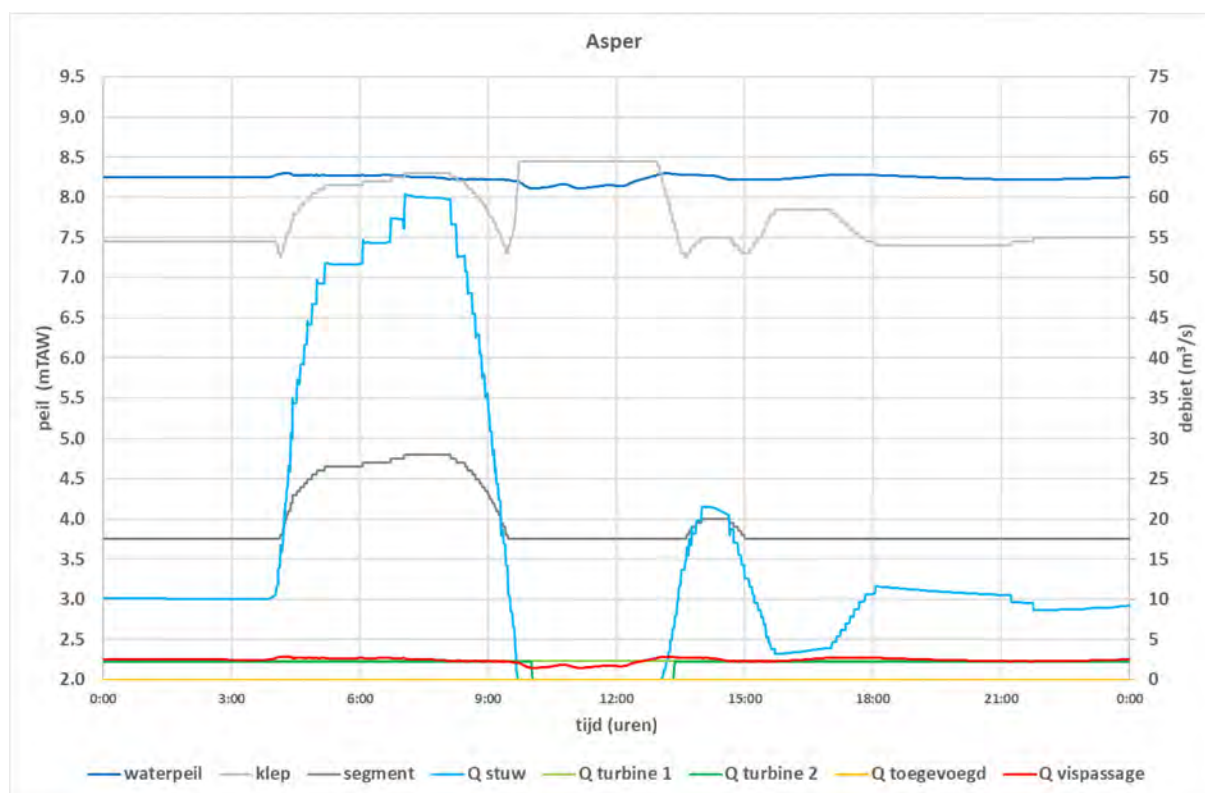
Figuur 101 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Kerkhove (reeks 1)



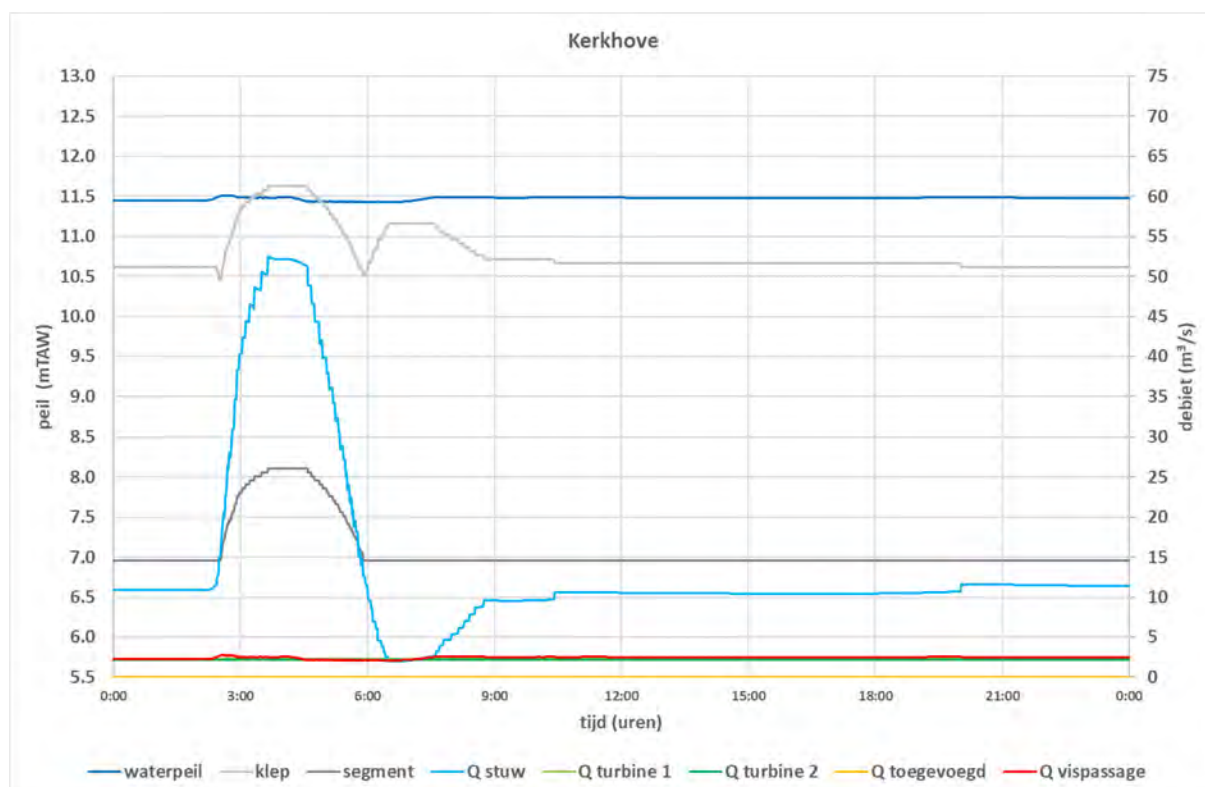
Figuur 102 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Oudenaarde (reeks 1)



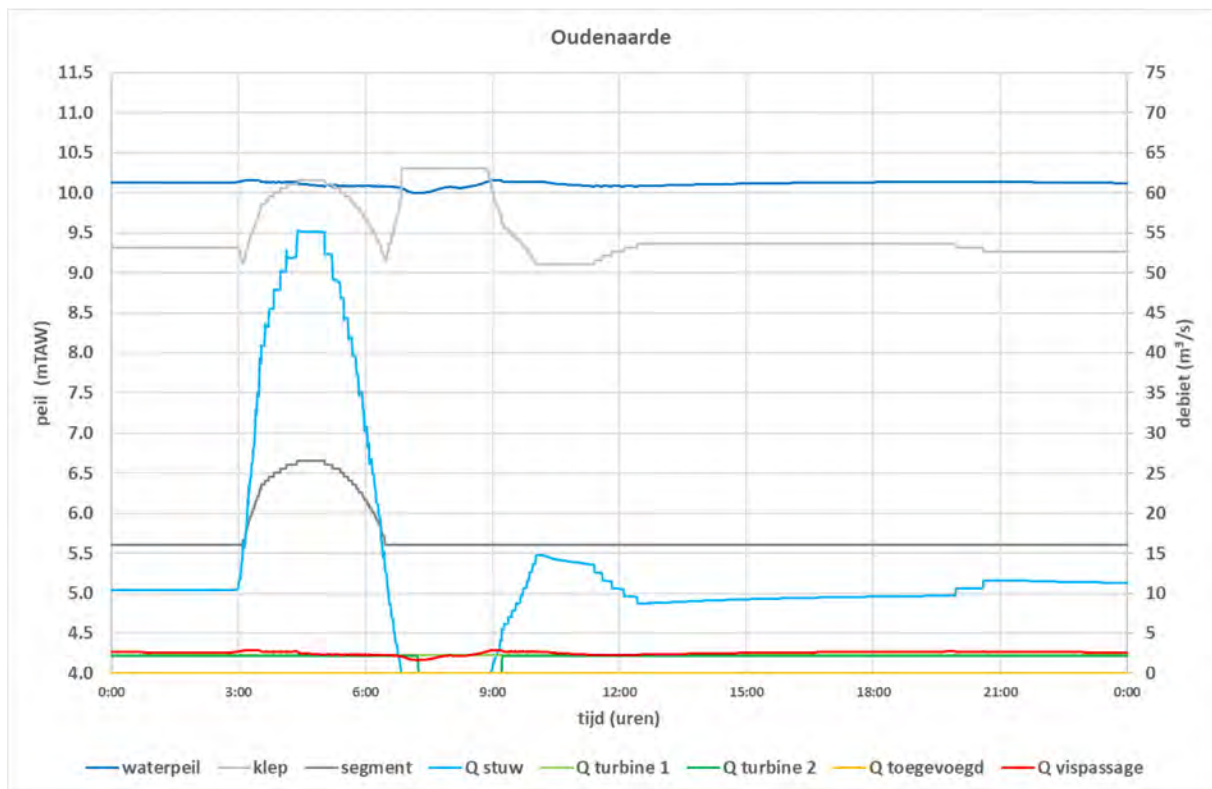
Figuur 103 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Asper (reeks 1)



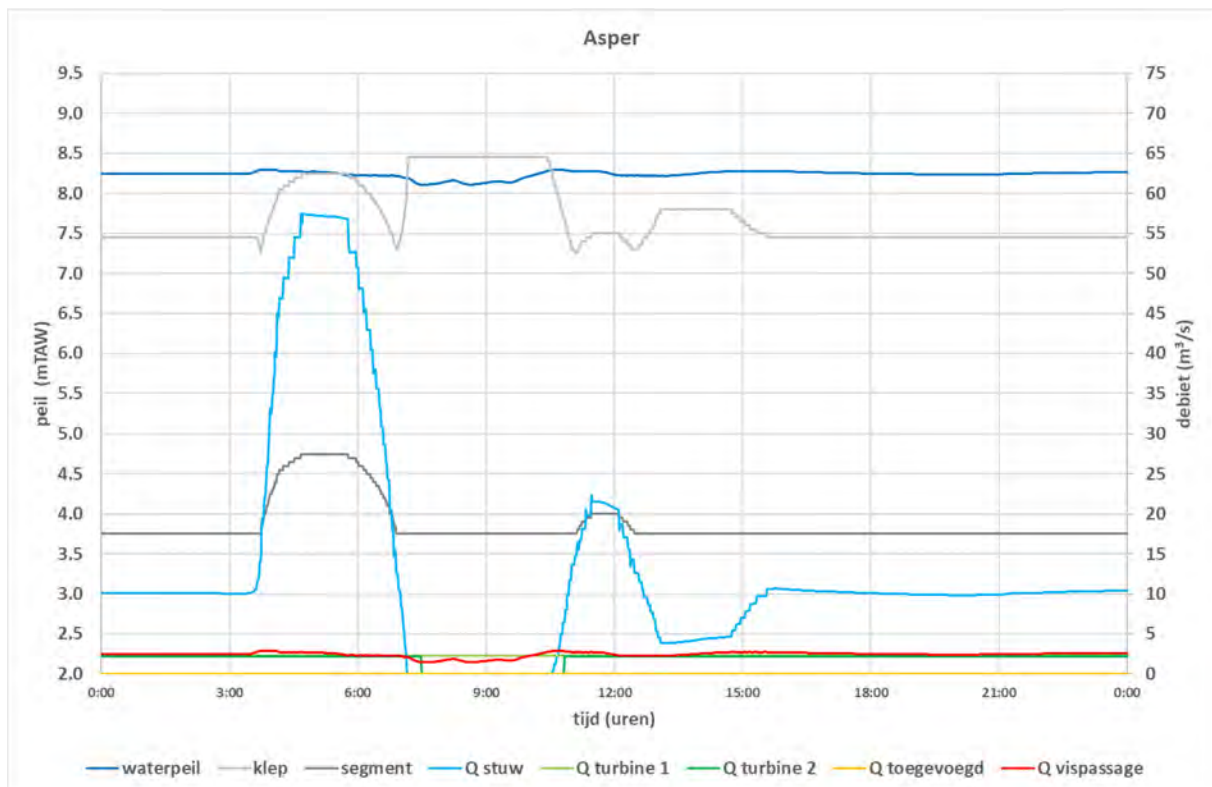
Figuur 104 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Kerkhove (reeks 1)



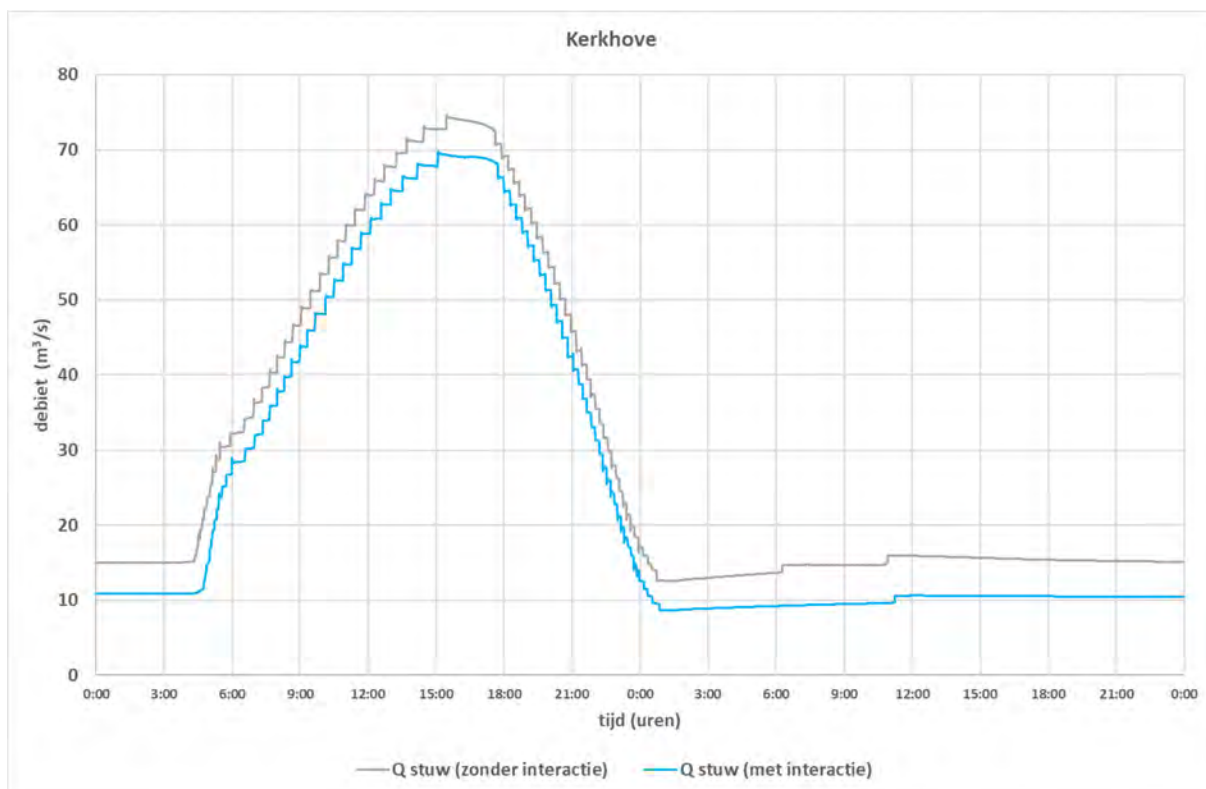
Figuur 105 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Oudenaarde (reeks 1)



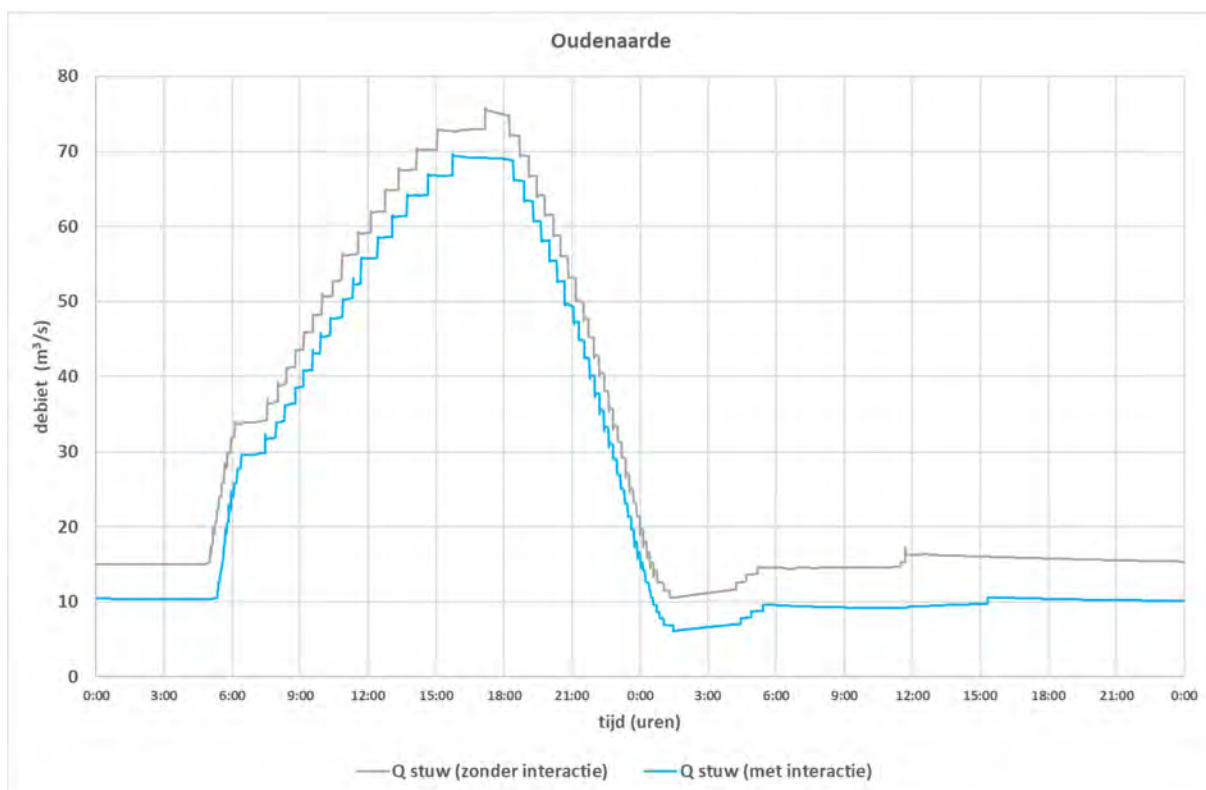
Figuur 106 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Asper (reeks 1)



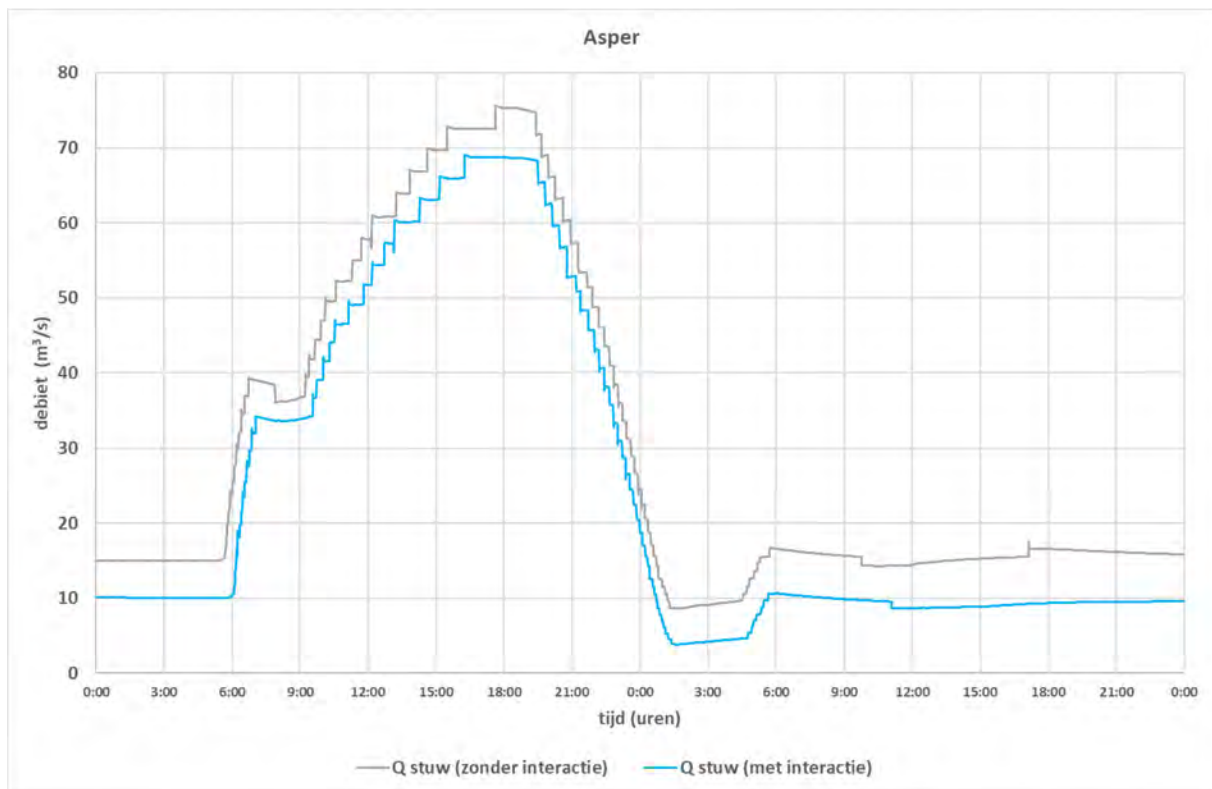
Figuur 107 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Kerkhove (reeks 2)



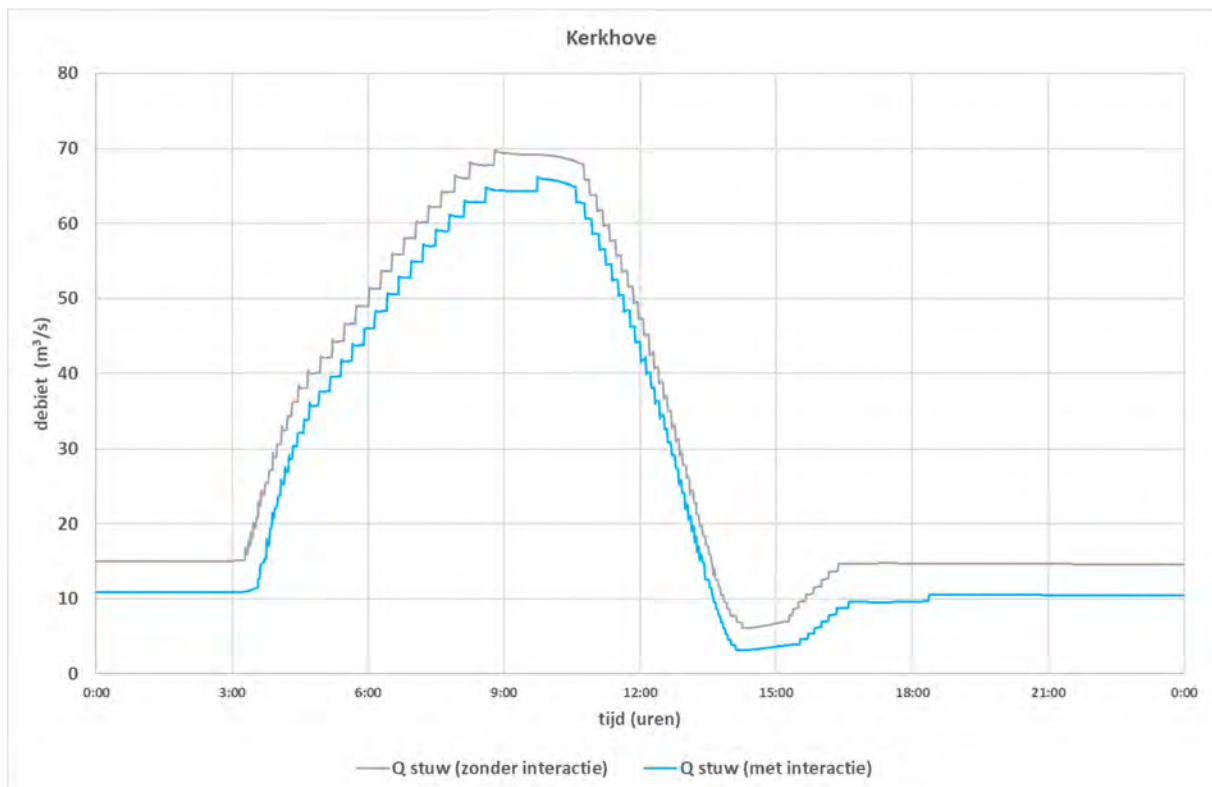
Figuur 108 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 24 uur – Oudenaarde (reeks 2)



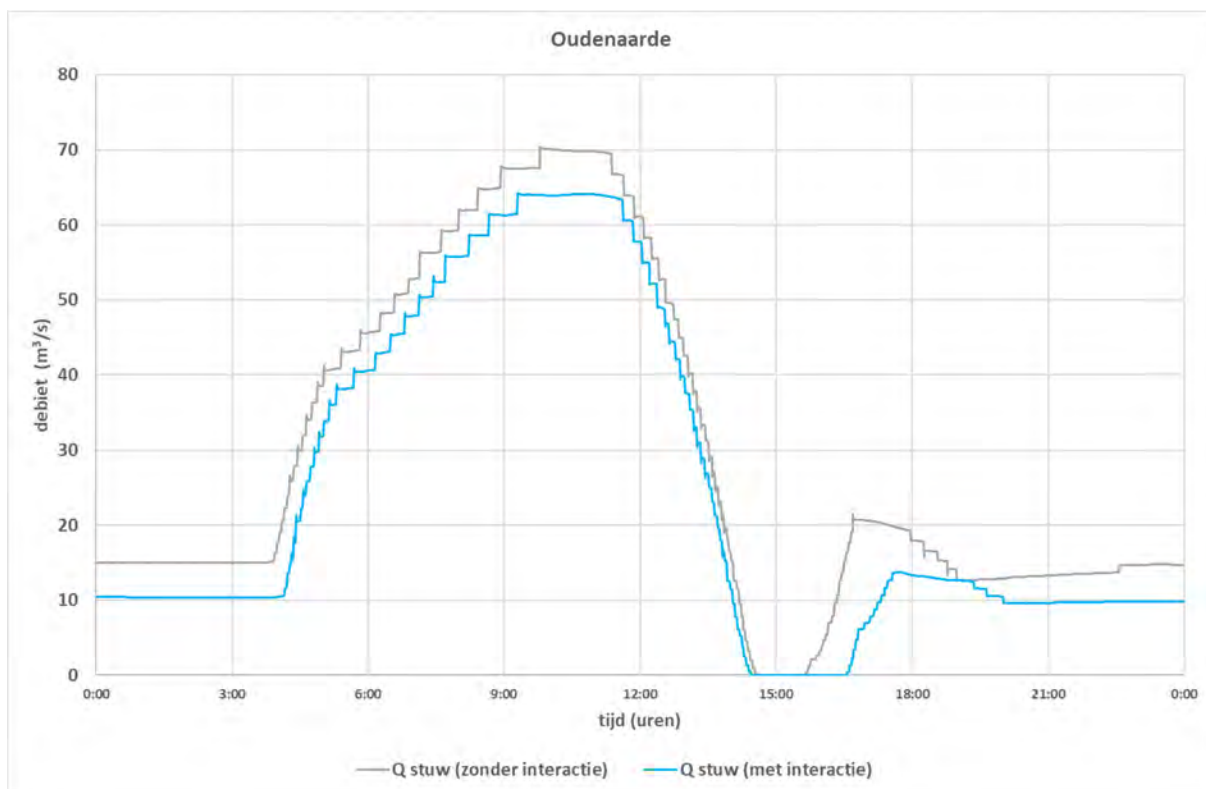
Figuur 109 – Sinusoidaal hydrogram met een duur van 24 uur – Asper (reeks 2)



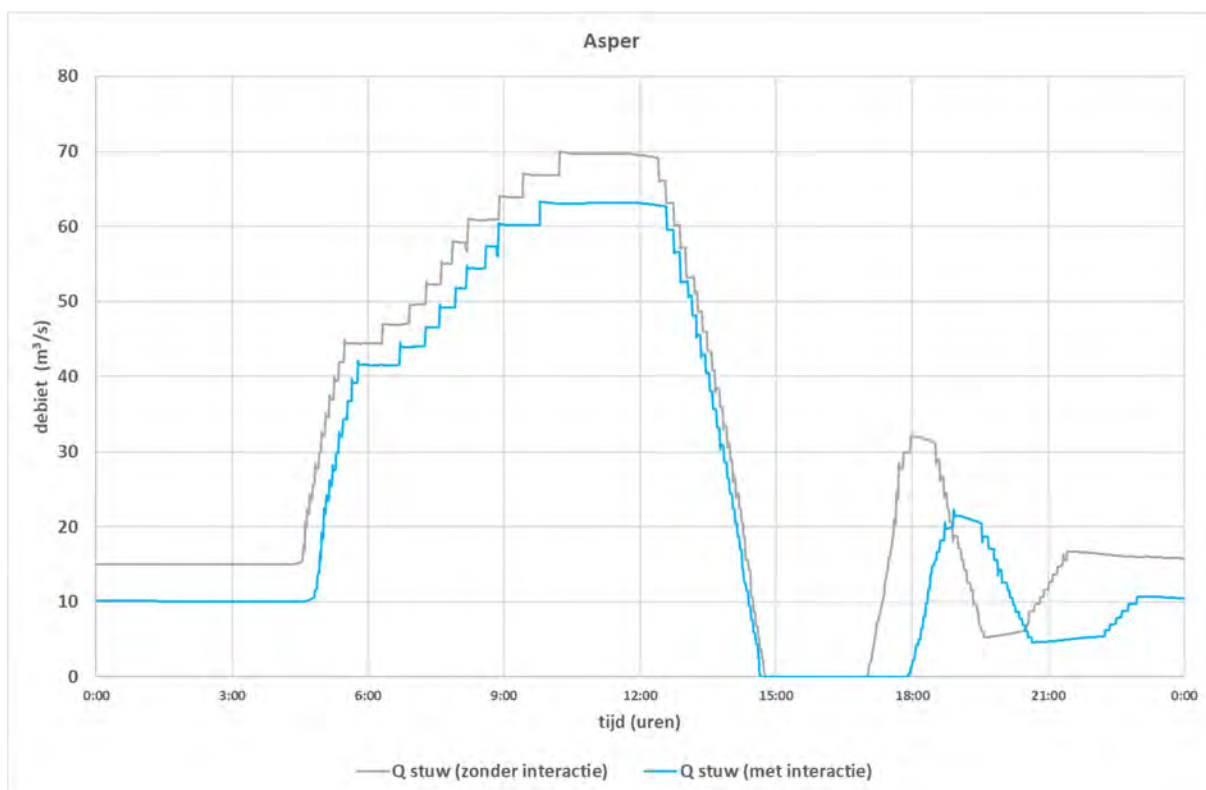
Figuur 110 – Sinusoidaal hydrogram met een duur van 12 uur – Kerkhove (reeks 2)



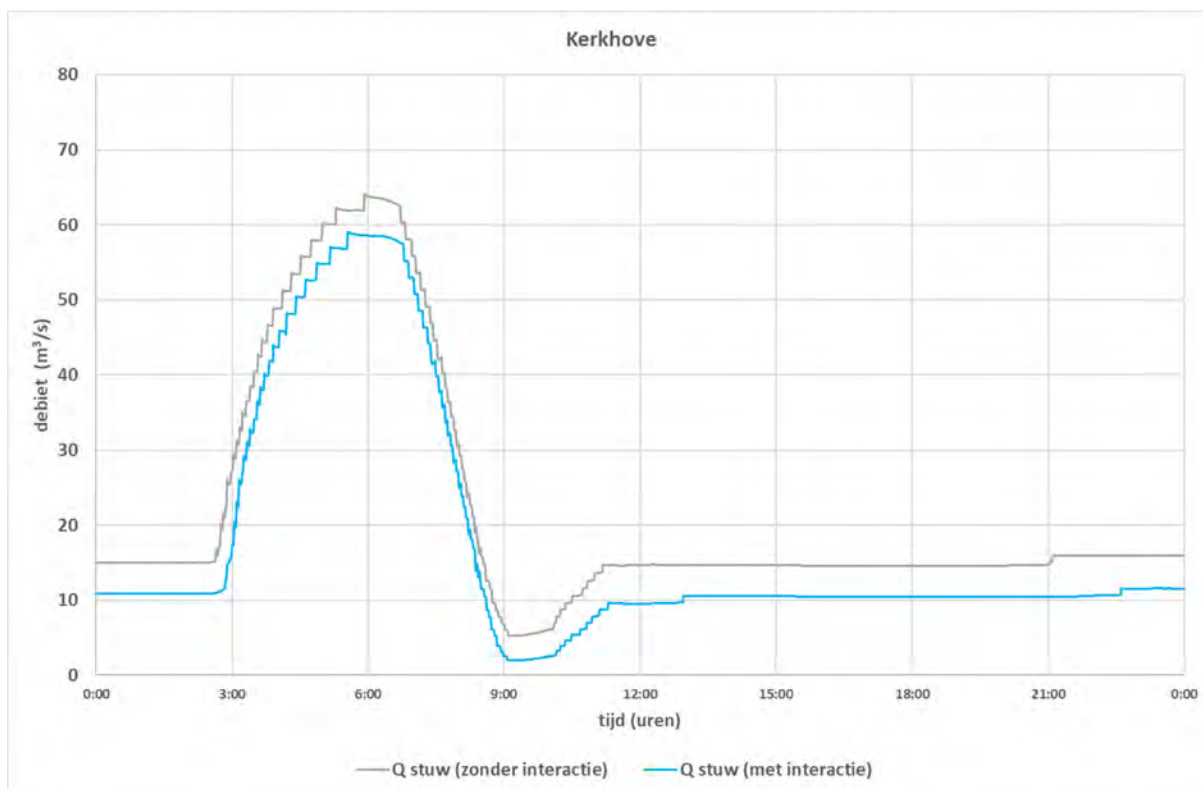
Figuur 111 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Oudenaarde (reeks 2)



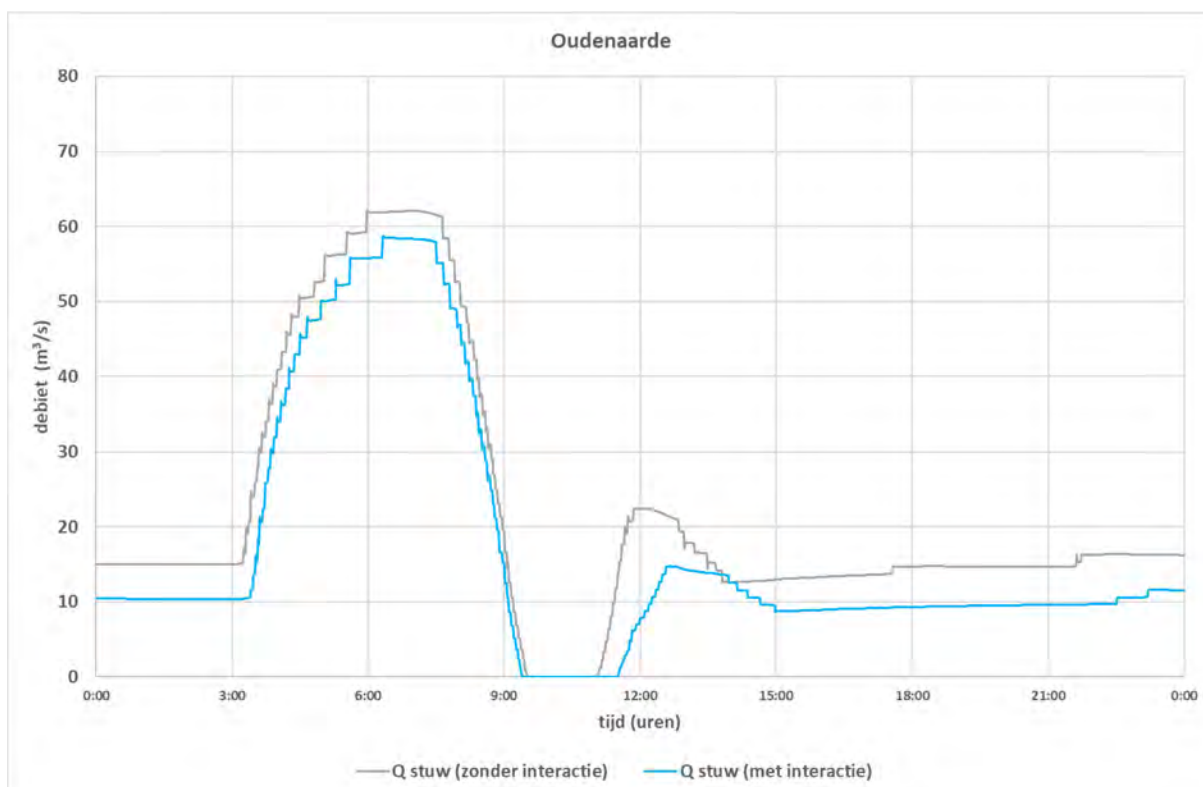
Figuur 112 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 12 uur – Asper (reeks 2)



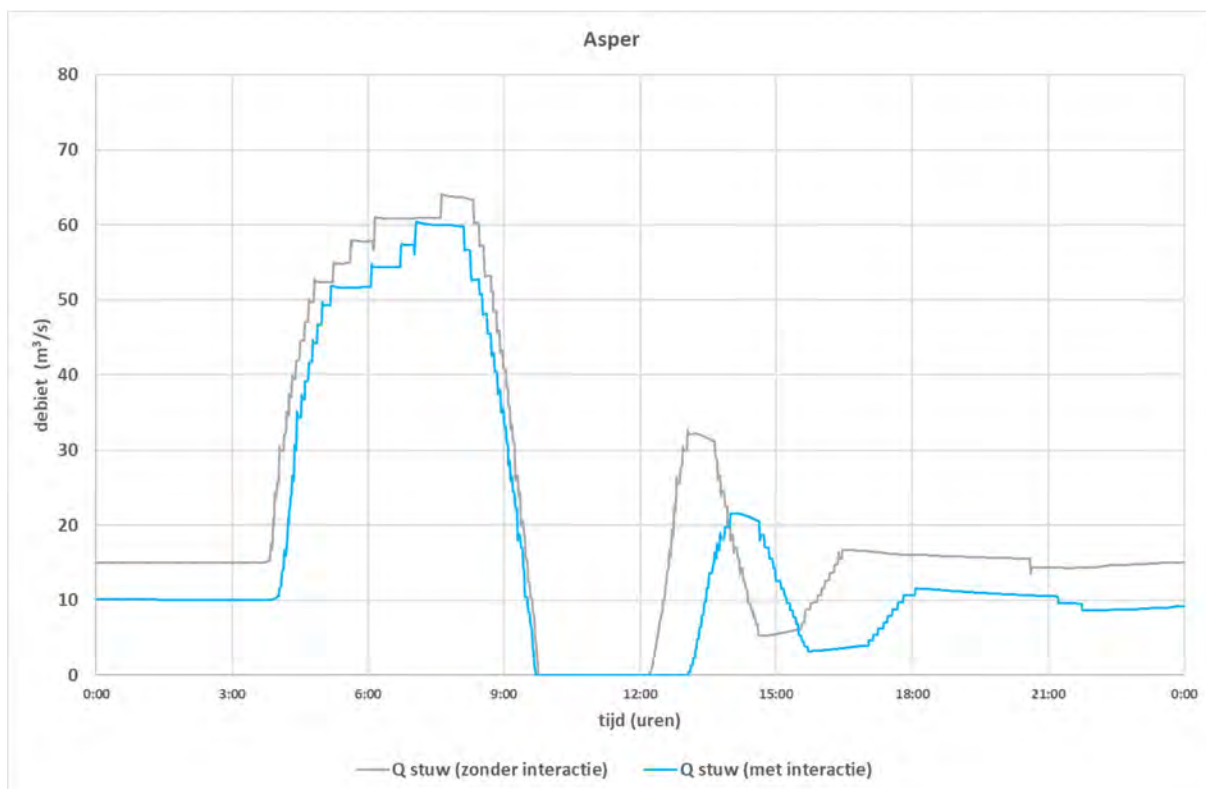
Figuur 113 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Kerkhove (reeks 2)



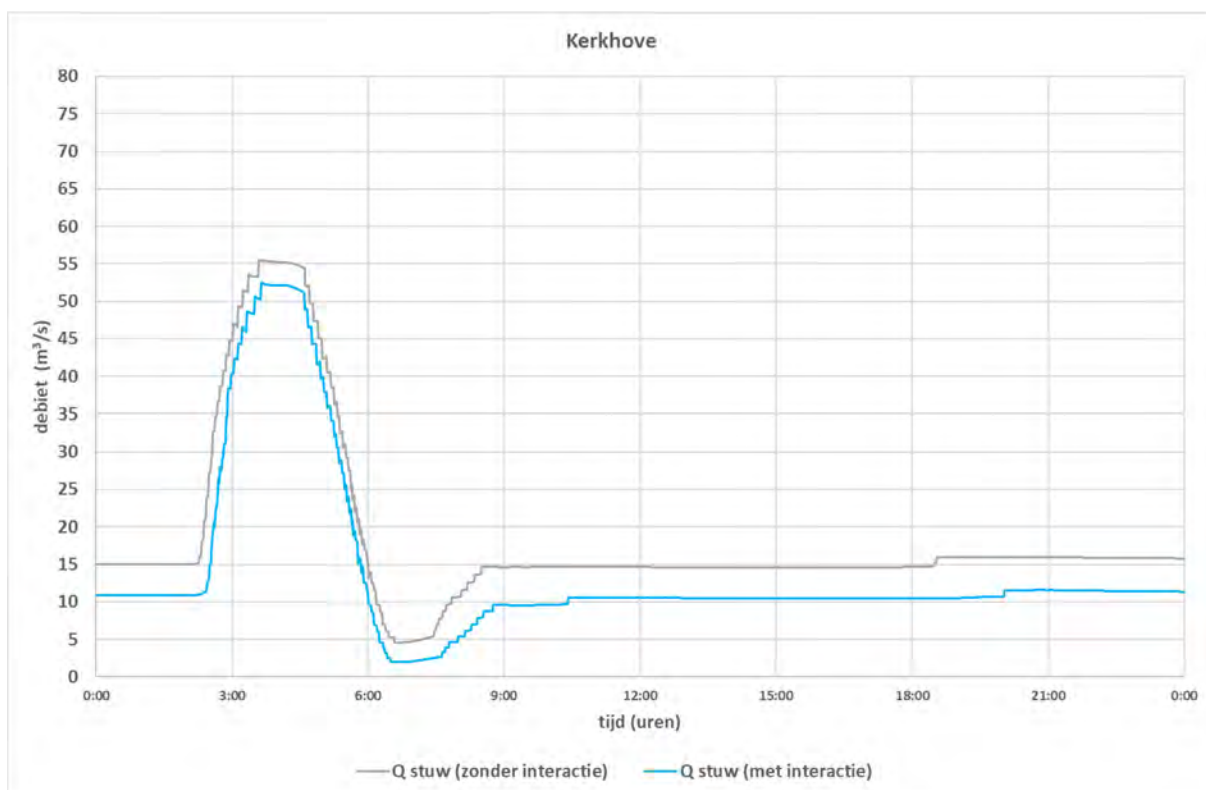
Figuur 114 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Oudenaarde (reeks 2)



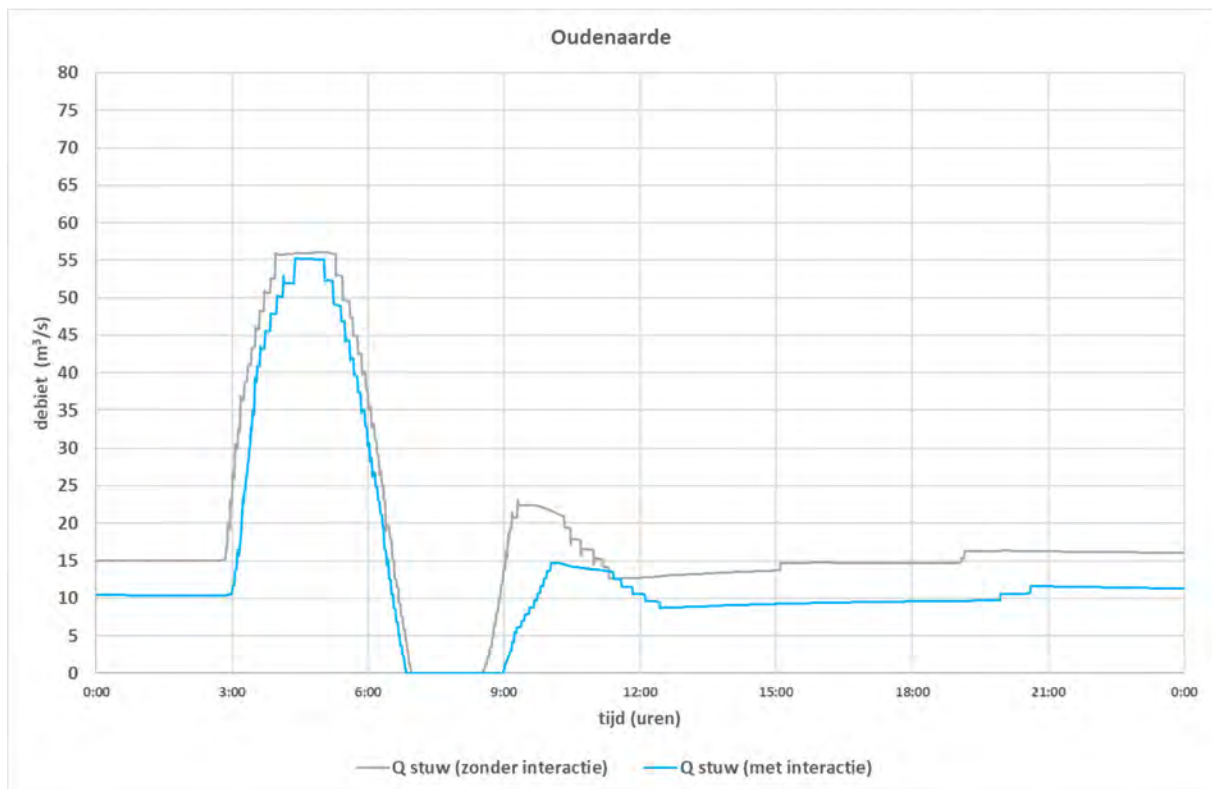
Figuur 115 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 6 uur – Asper (reeks 2)



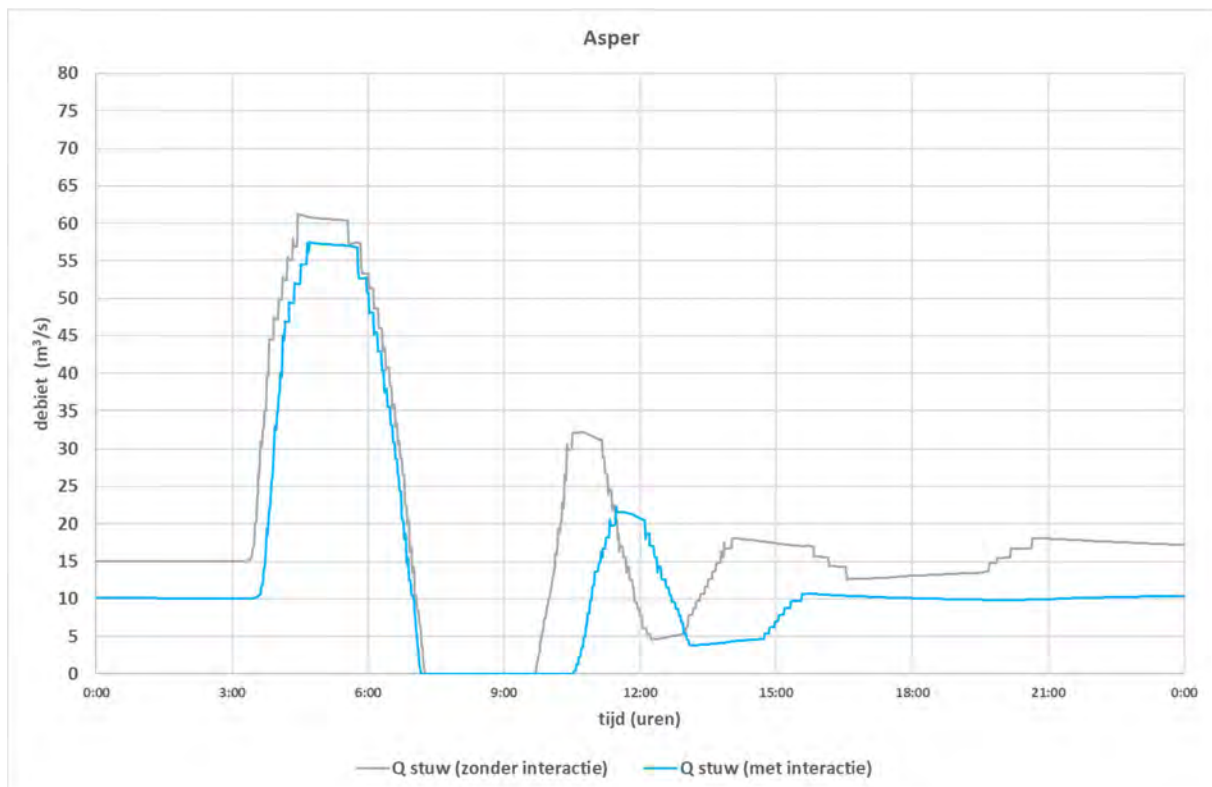
Figuur 116 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Kerkhove (reeks 2)



Figuur 117 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Oudenaarde (reeks 2)



Figuur 118 – Sinusoïdaal hydrogram met een duur van 3 uur – Asper (reeks 2)



7.2.3 Historische gebeurtenissen

Was van maart 2018

De resultaten voor de was van maart 2018 worden getoond in Figuur 119 t.e.m. Figuur 121 (eerste reeks) en Figuur 131 t.e.m. Figuur 133 (tweede reeks). Uit de eerste reeks blijkt dat de turbines en vispassages, op één uitzondering na, altijd operationeel blijven. Enkel in Asper wordt de tweede turbine kortstondig uitgeschakeld. De tweede reeks toont aan dat de afvoer over de stuwen, zoals verwacht, afneemt.

Droogweerperiode van april 2018

De resultaten voor de droogweerperiode van april 2018 kunnen teruggevonden worden in Figuur 122 t.e.m. Figuur 124 (eerste reeks) en Figuur 134 t.e.m. Figuur 136 (tweede reeks). Uit de eerste reeks figuren blijkt dat op alle sites de twee turbines achtereenvolgens uitgeschakeld worden. De vispassages blijven echter altijd open. In de tweede reeks figuren zien we dat niet alleen de grootte van de afvoerpieken over de stuwen verminderd wordt, maar dat ook het aantal afvoerpieken afneemt. Het waterverbruik door de andere kunstwerken, zorgt er immers voor dat de bergingscapaciteit in een pand toeneemt, zodat het langer duurt voor het waterpeil voldoende hersteld is om de stuw terug in beweging te brengen (zie ook bespreking zomermaanden tweede reeks 2019 hieronder).

Volledige jaar 2019

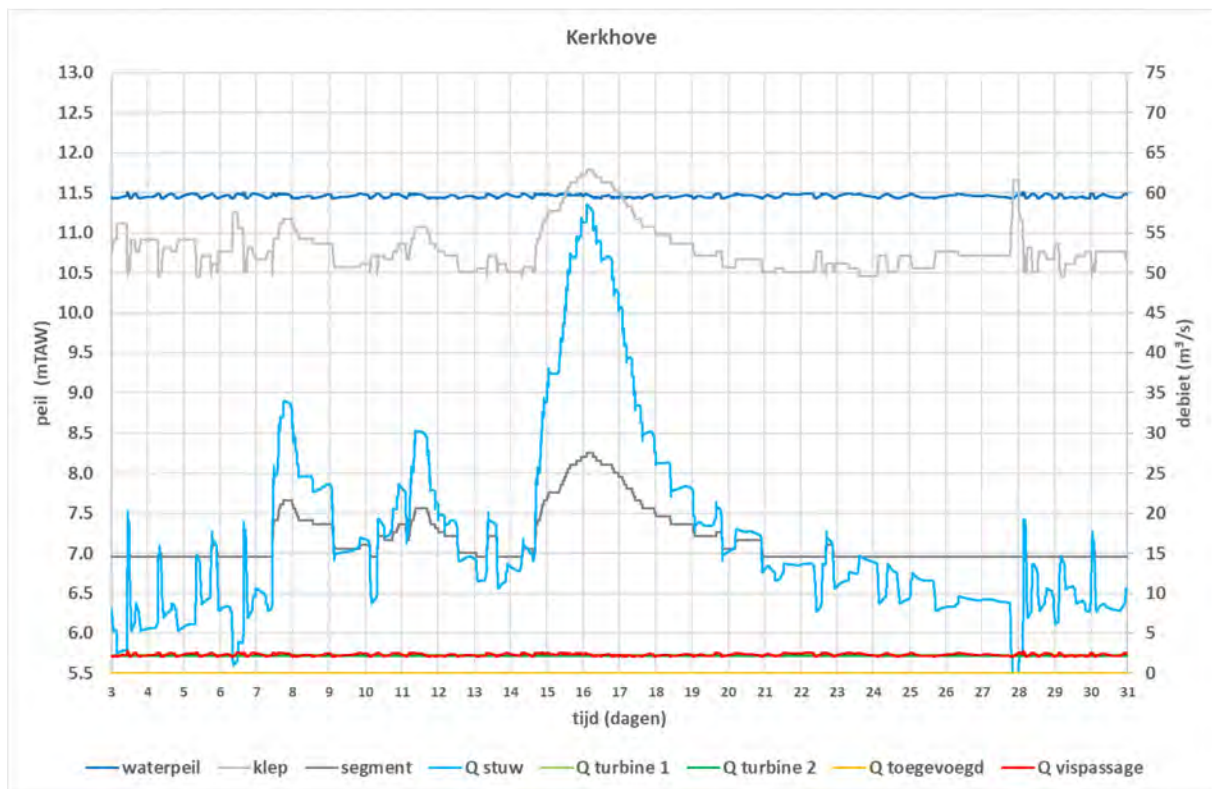
De resultaten voor een natte maand (maart 2019) en een droge maand (augustus 2019) worden getoond in Figuur 125 t.e.m. Figuur 130 (eerste reeks) en Figuur 137 t.e.m. Figuur 142 (tweede reeks). De resultaten voor de overige maanden werden opgenomen in Bijlage 1 (Interactie – figuren reeks 1) en Bijlage 2 (Interactie – figuren reeks 2).

De eerste reeks figuren toont aan dat de tweede turbine regelmatig uitgeschakeld wordt en de eerste turbine af en toe. De vispassages blijven, op één uitzondering na (Kerkhove in augustus) altijd open.

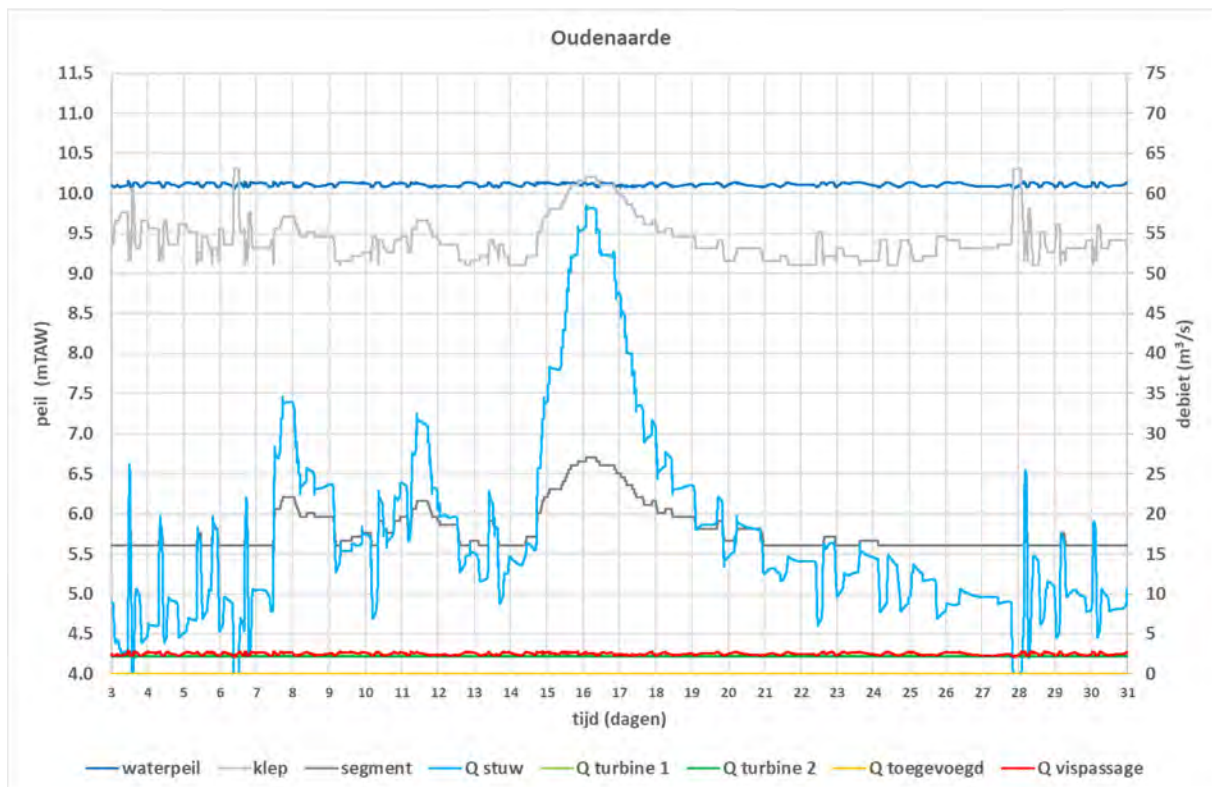
Uit de tweede reeks figuren blijkt dat de aanwezigheid van de bijkomende kunstwerken (turbines en vispassage) vooral leidt tot een (verwachte) afname van de afvoer over de stuwen, zowel bij lage als middelhoge afvoeren. Tijdens de zomermaanden neemt het aantal afvoerpiekjes af. Tijdens deze periode leidt het waterverbruik door de andere kunstwerken tot lagere waterpeilen opwaarts van de stuwen. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 143 t.e.m. Figuur 148. Als gevolg van deze lagere waterpeilen ontstaat er iets meer bergingscapaciteit om kleine debietschommelingen op te vangen.

Het toegepaste model maakt gebruik van daggemiddelde schutverliezen. De mogelijke impact van schutgolven op de werking van de kunstwerken langsheen de Bovenschelde wordt dus niet in rekening gebracht.

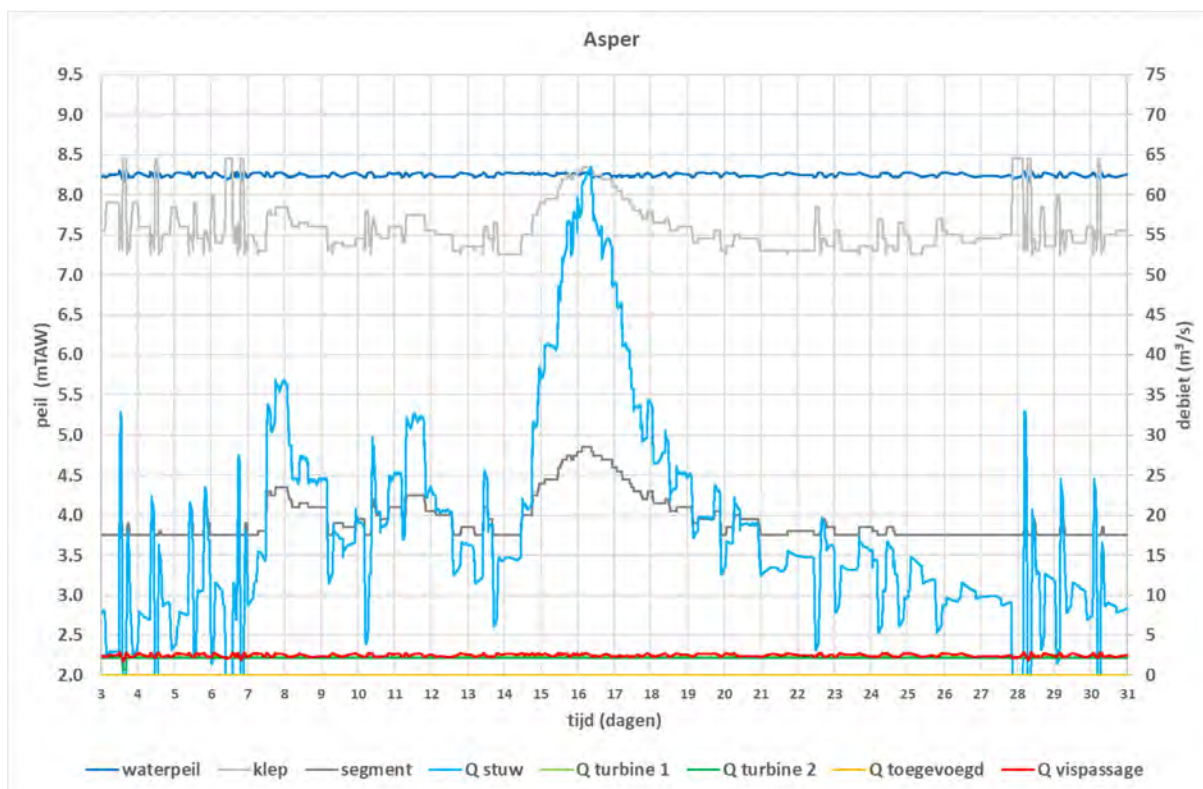
Figuur 119 – Maart 2018 – Kerkhove (reeks 1)



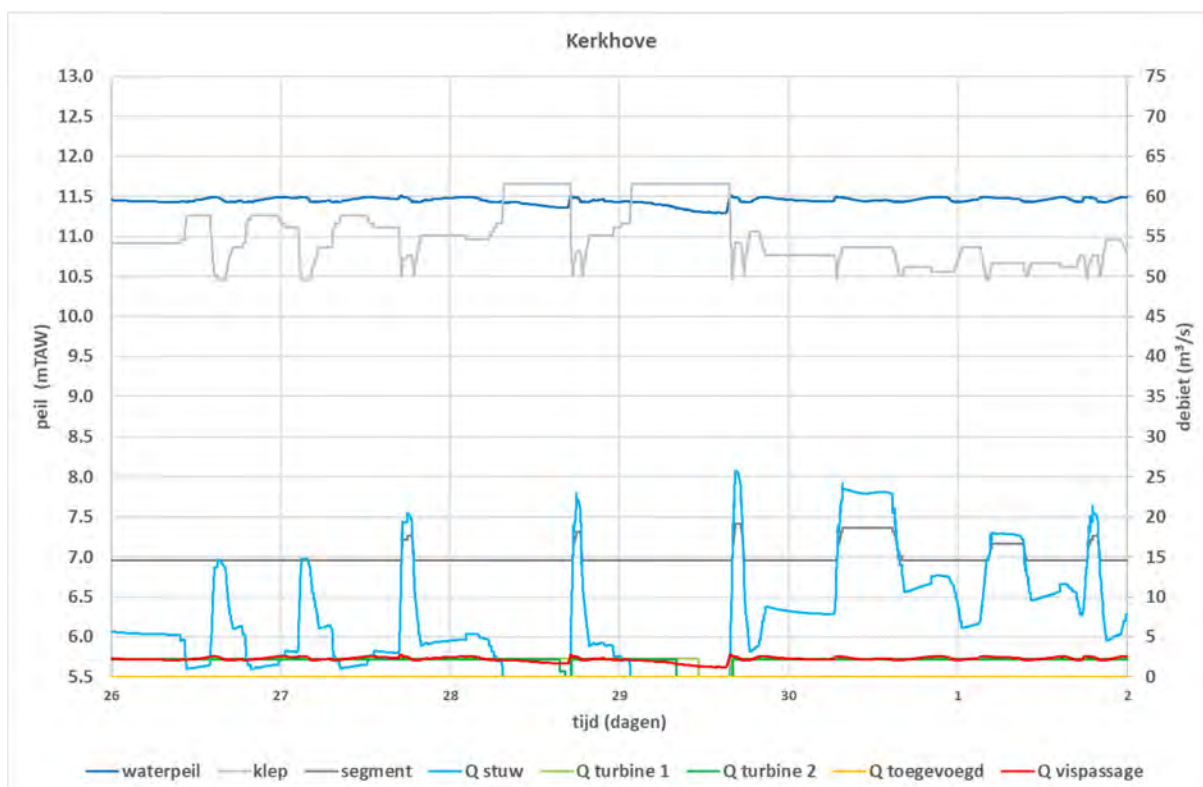
Figuur 120 – Maart 2018 – Oudenaarde (reeks 1)



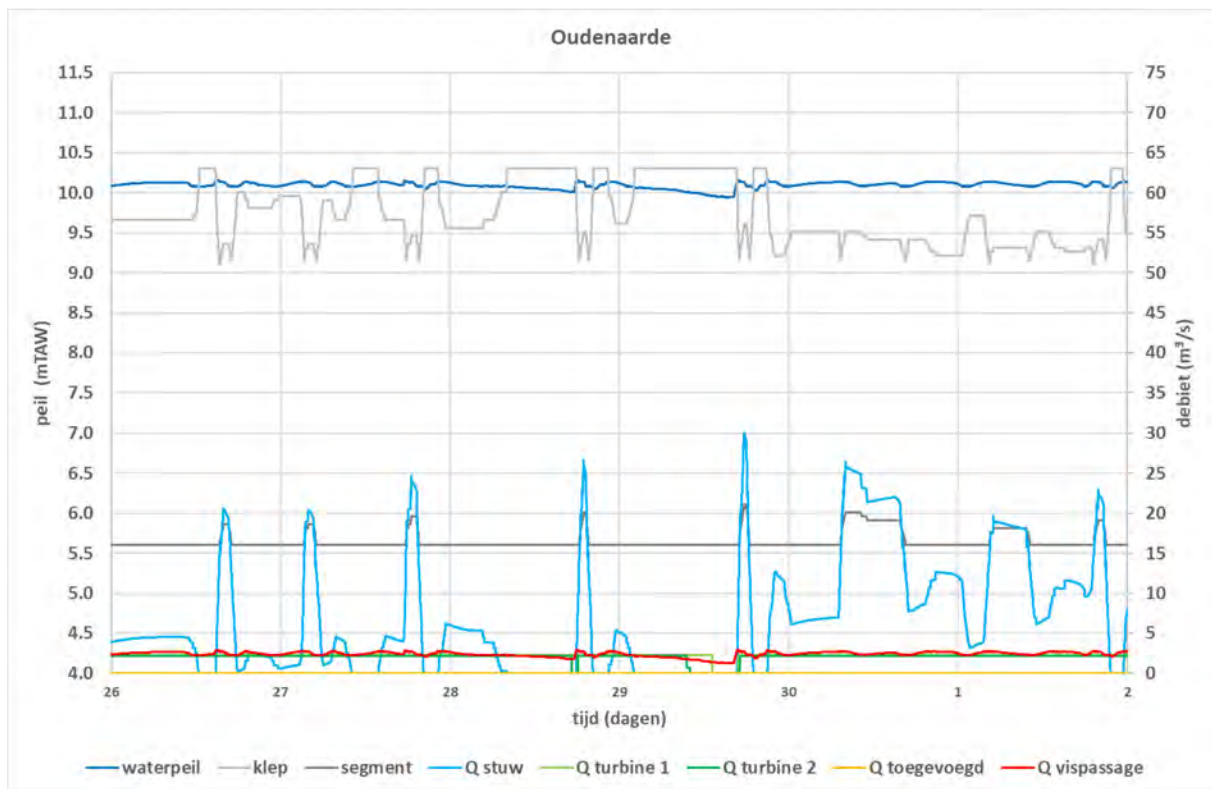
Figuur 121 – Maart 2018 – Asper (reeks 1)



Figuur 122 – April 2018 – Kerkhove (reeks 1)



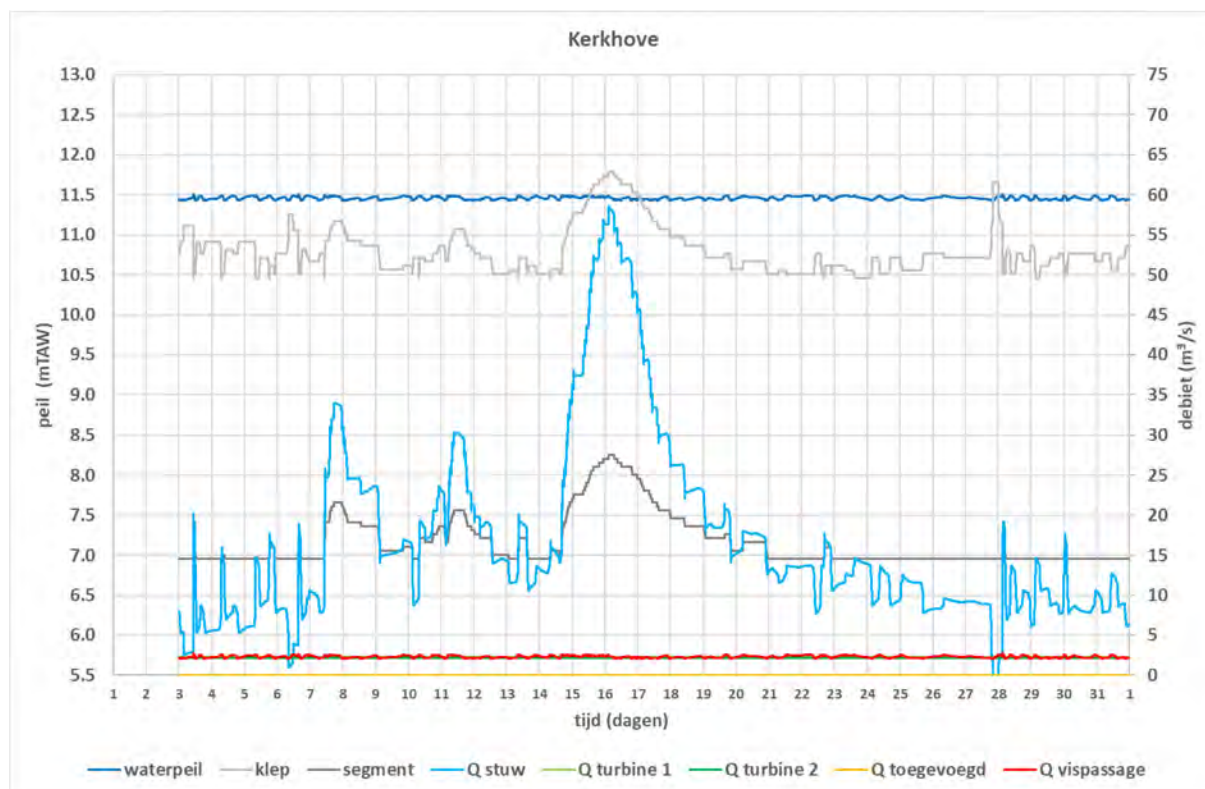
Figuur 123 – April 2018 – Oudenaarde (reeks 1)



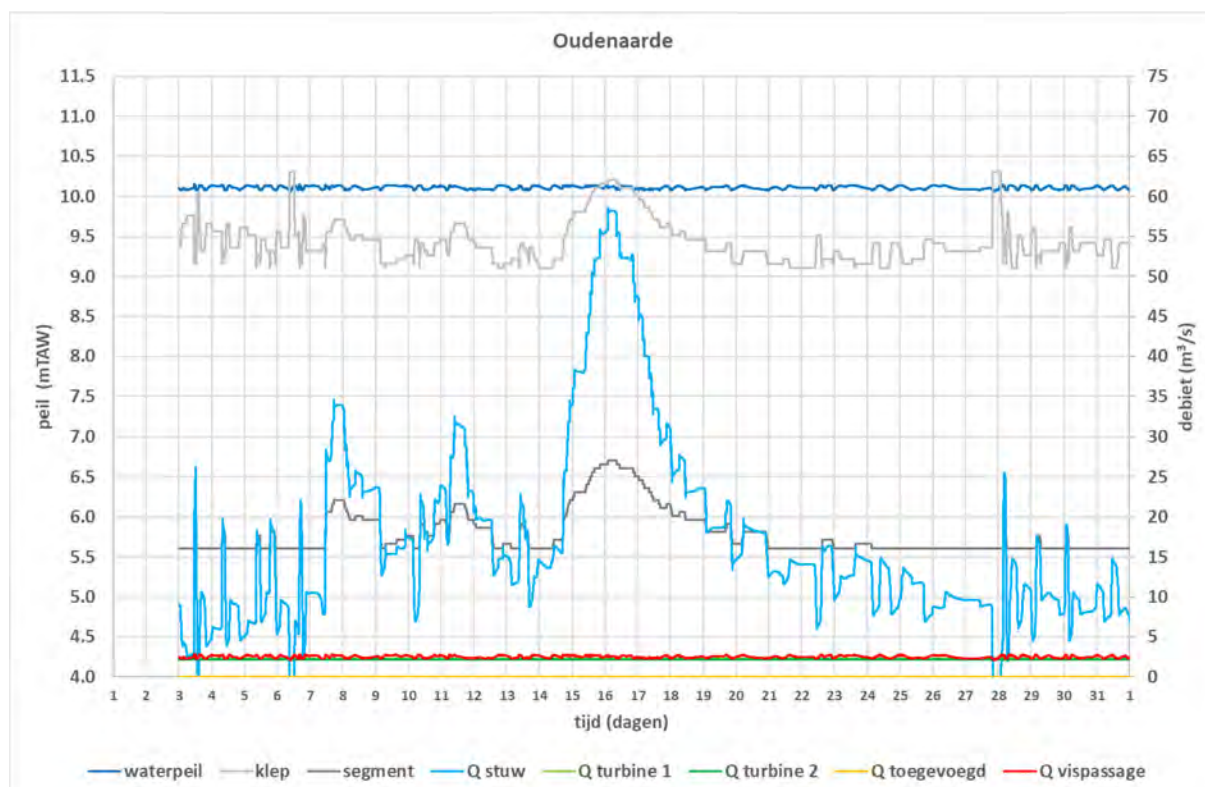
Figuur 124 – April 2018 – Asper (reeks 1)



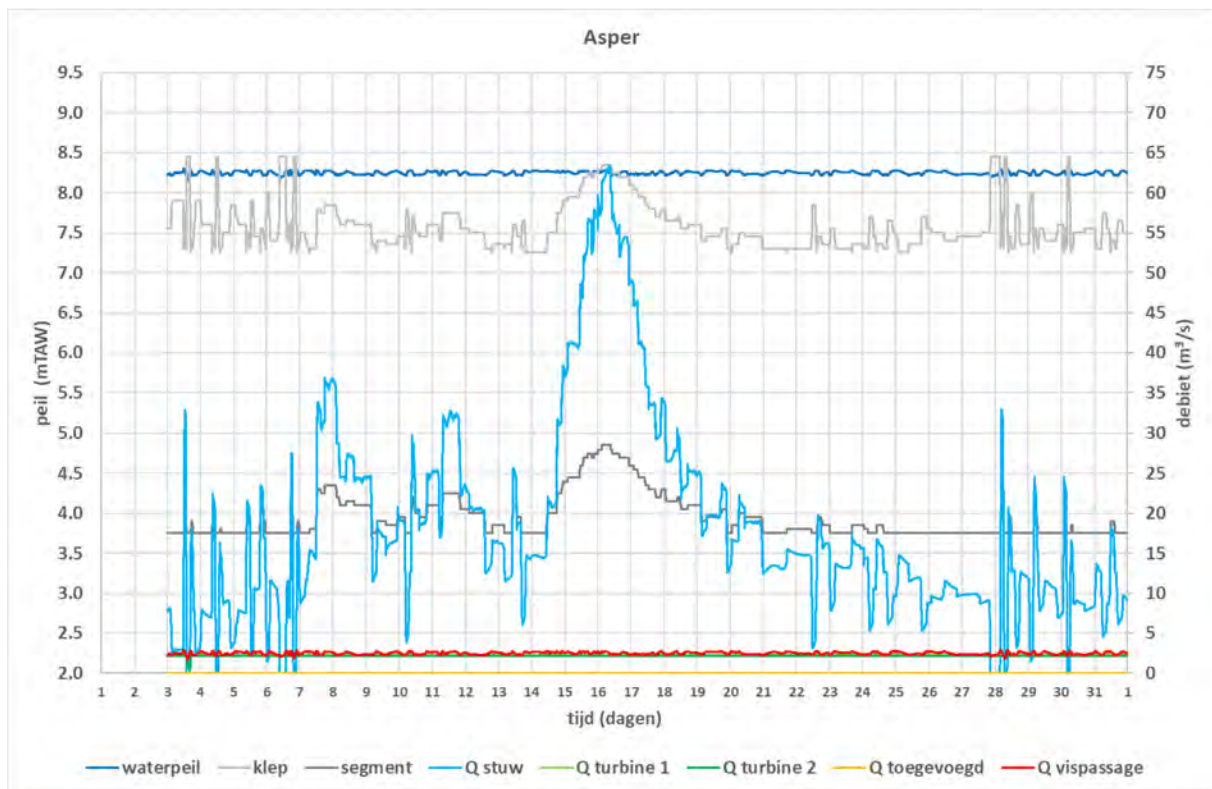
Figuur 125 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 1)



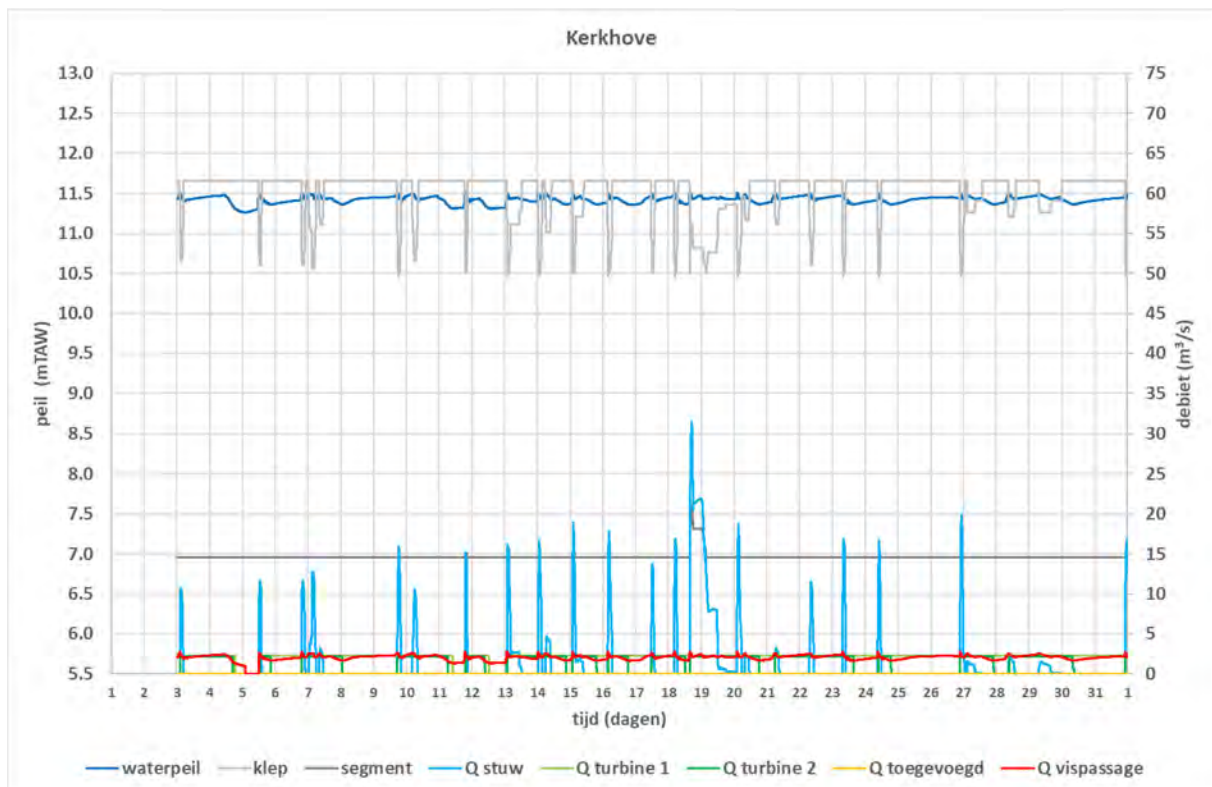
Figuur 126 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



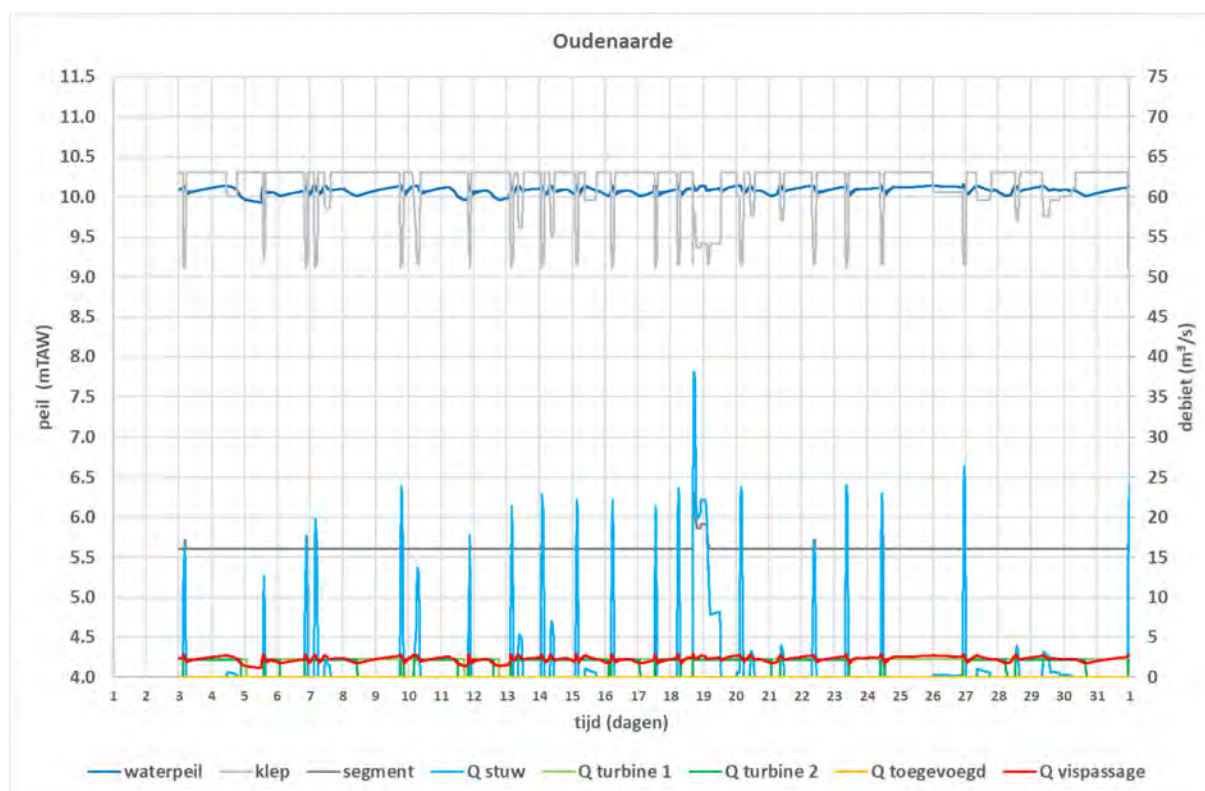
Figuur 127 – Maart 2019 – Asper (reeks 1)



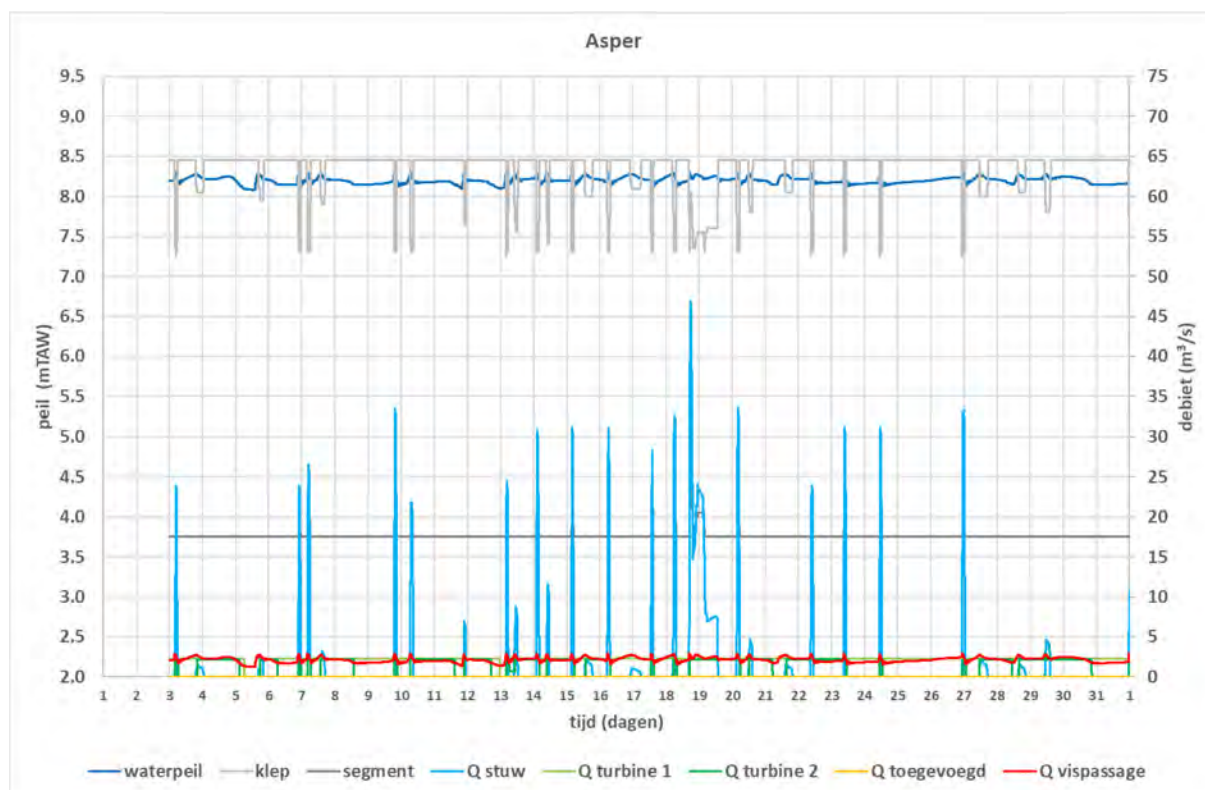
Figuur 128 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 1)



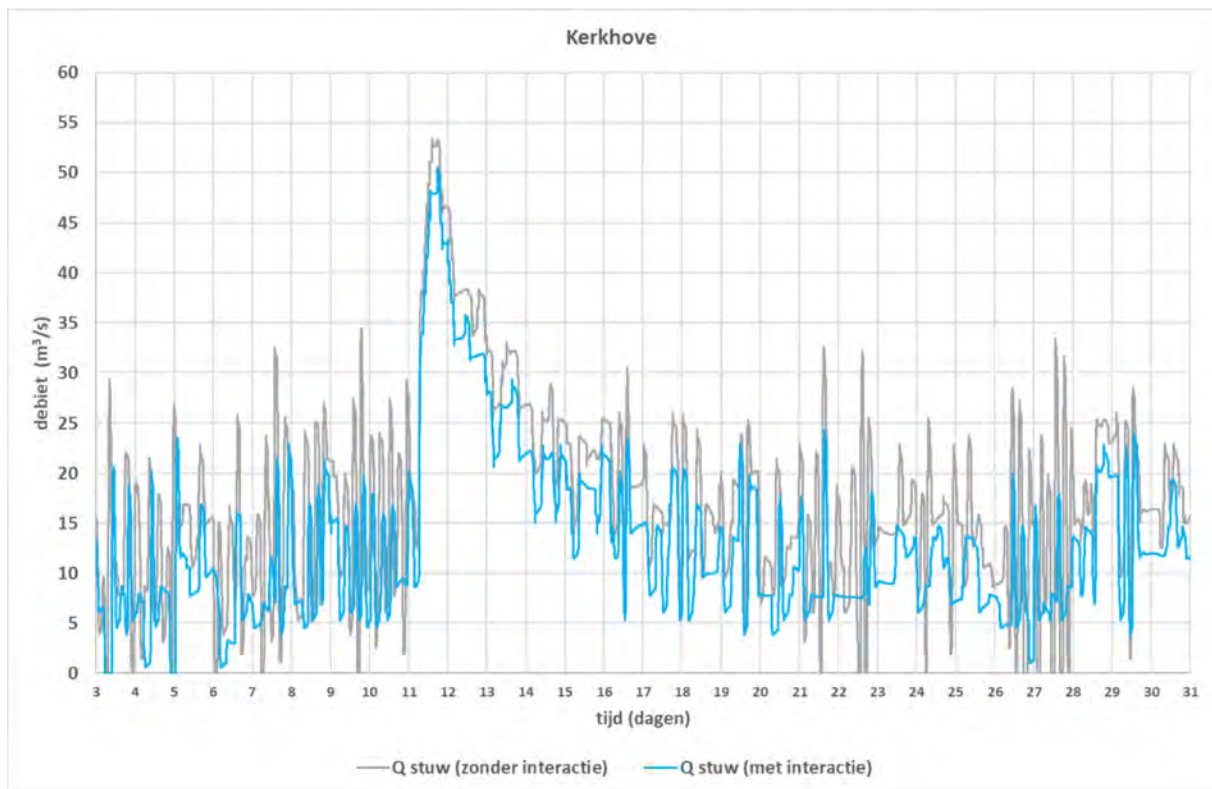
Figuur 129 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



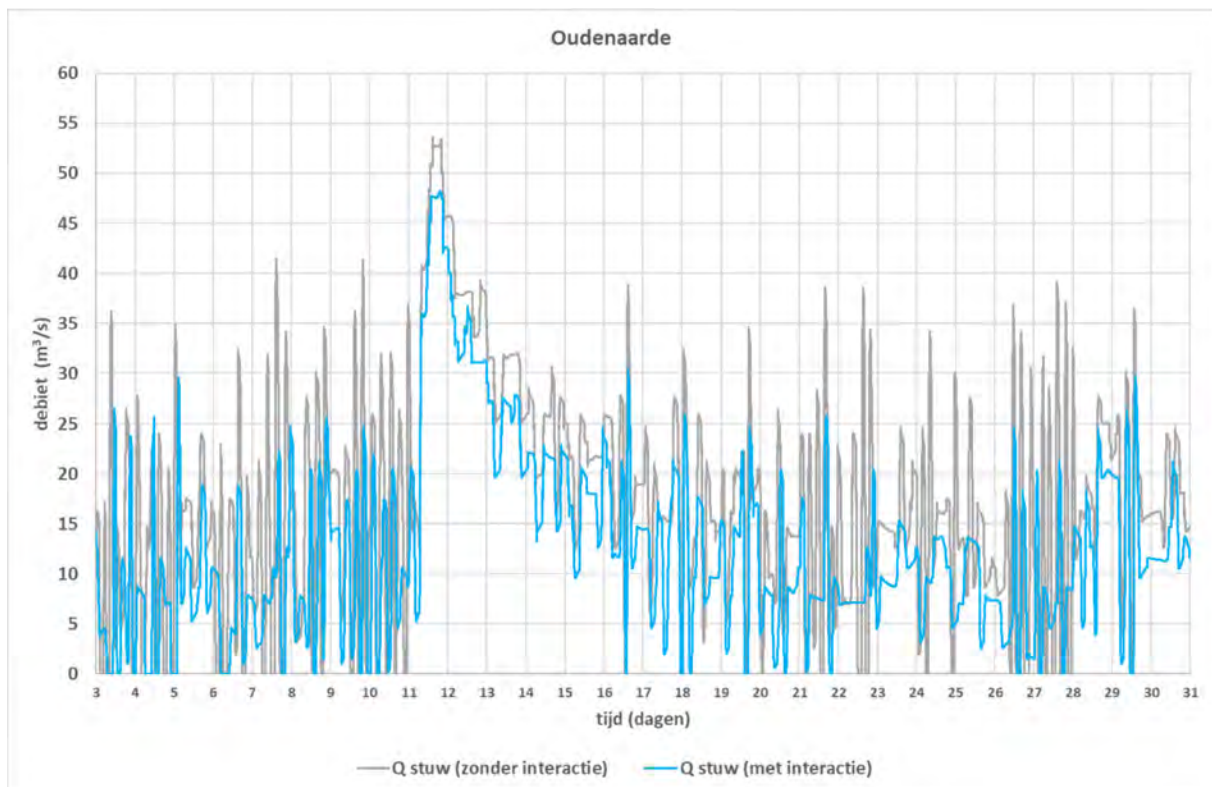
Figuur 130 – Augustus 2019 – Asper (reeks 1)



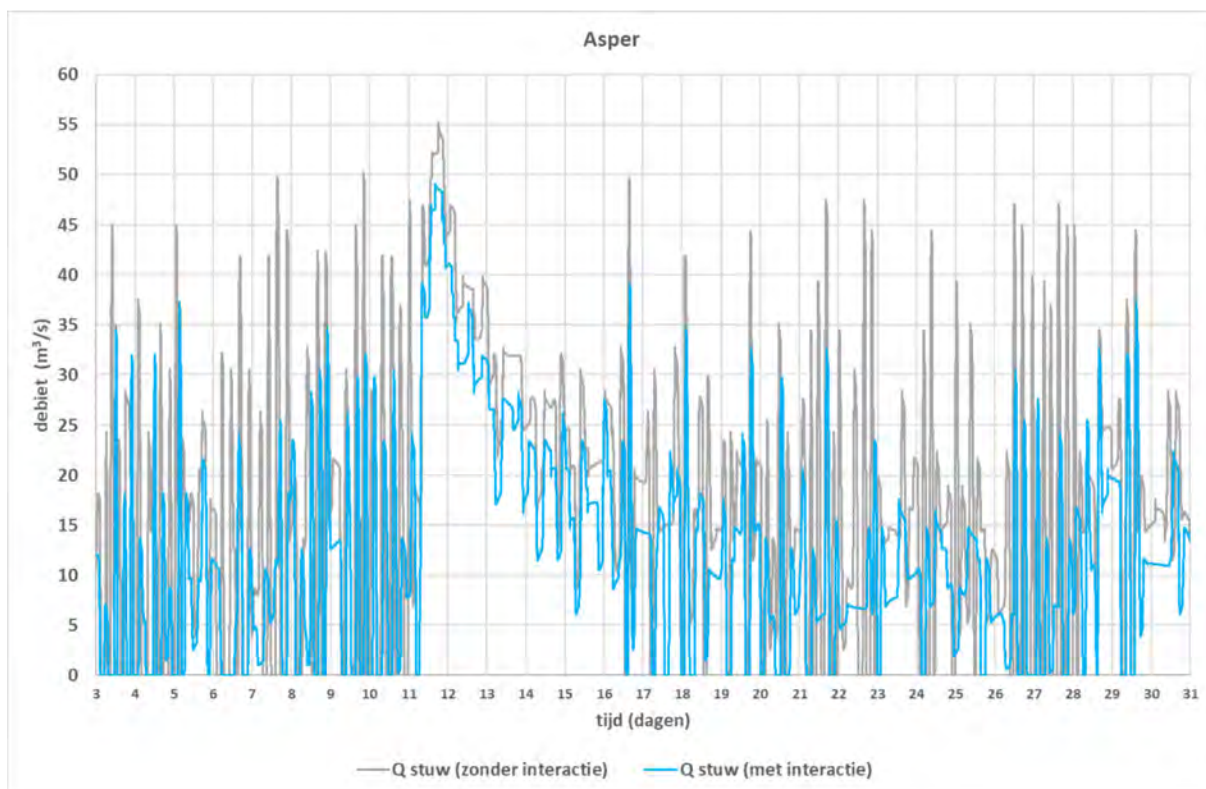
Figuur 131 – Maart 2018 – Kerkhove (reeks 2)



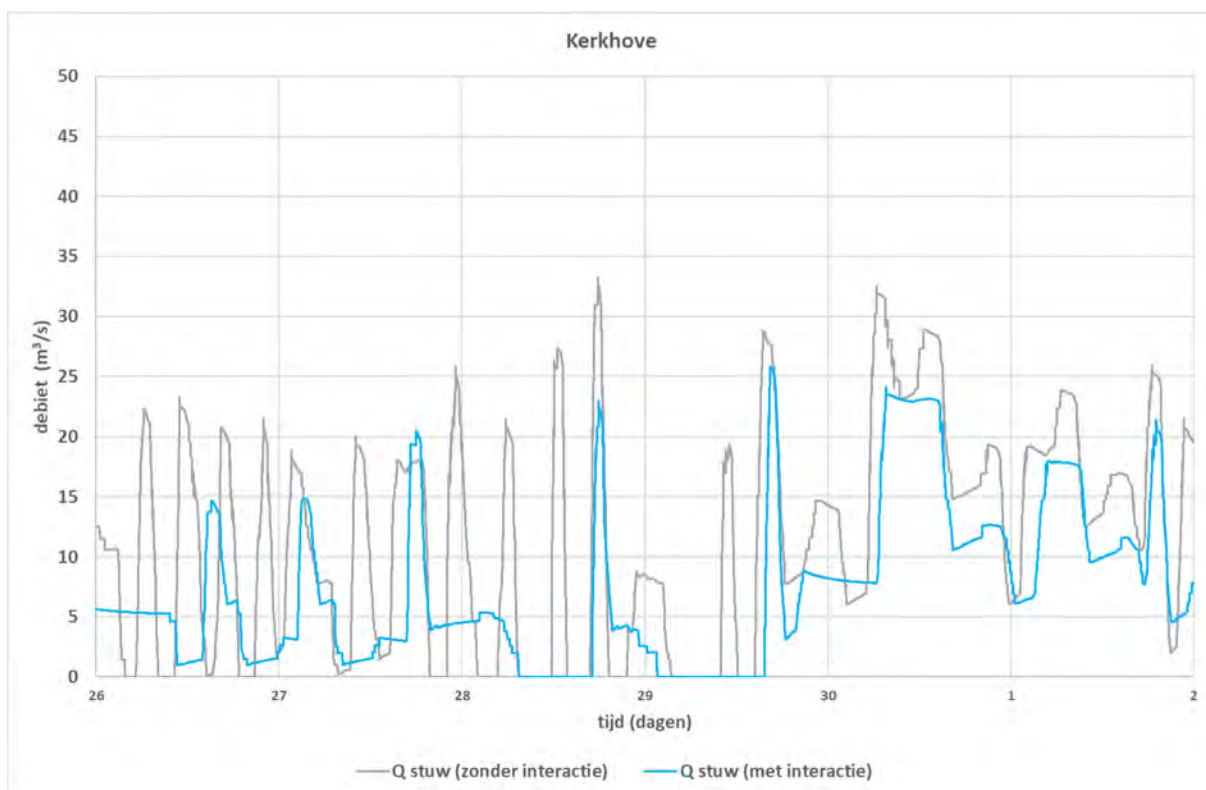
Figuur 132 – Maart 2018 – Oudenaarde (reeks 2)



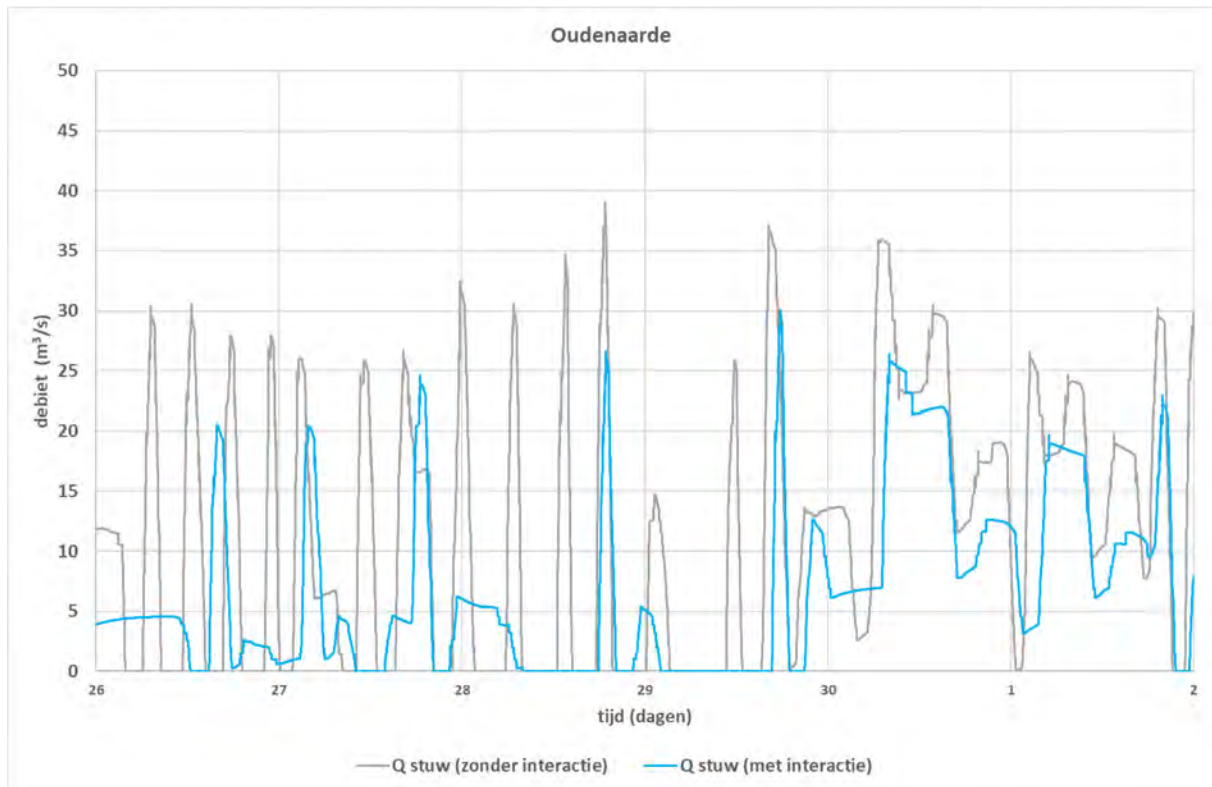
Figuur 133 – Maart 2018 – Asper (reeks 2)



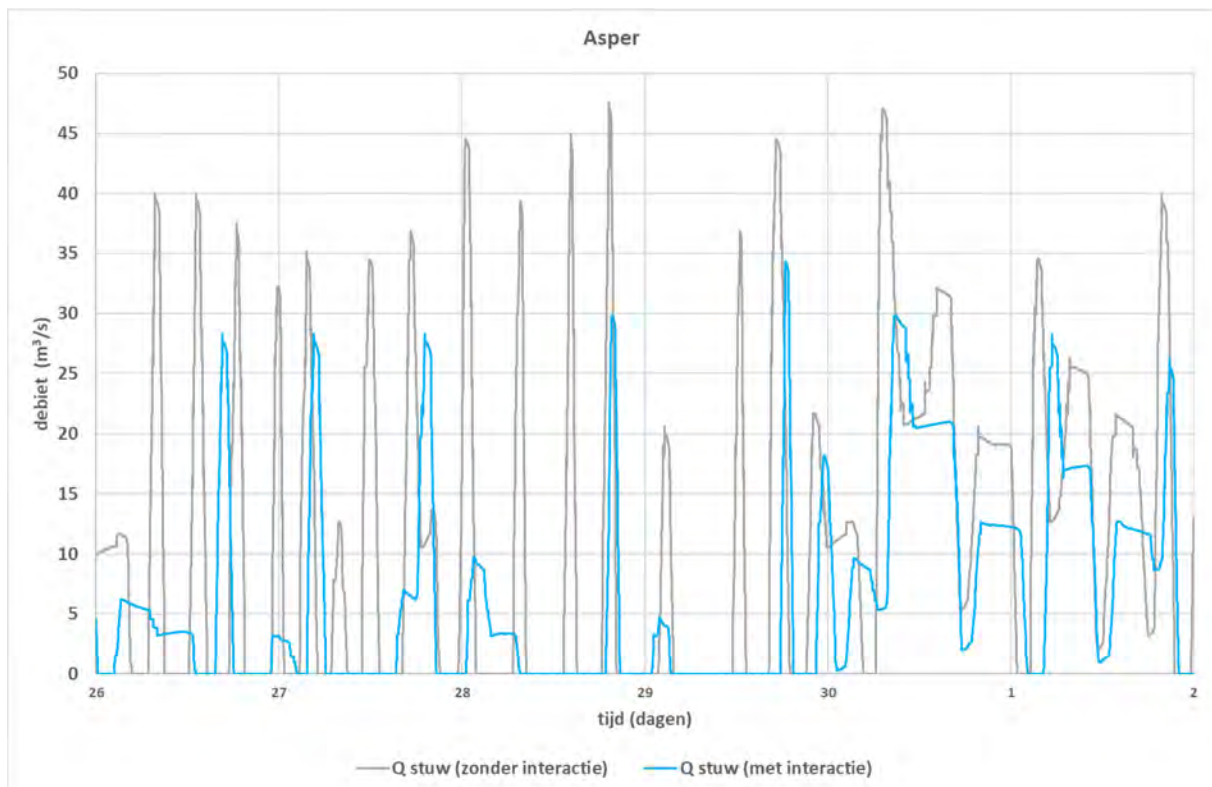
Figuur 134 – April 2018 – Kerkhove (reeks 2)



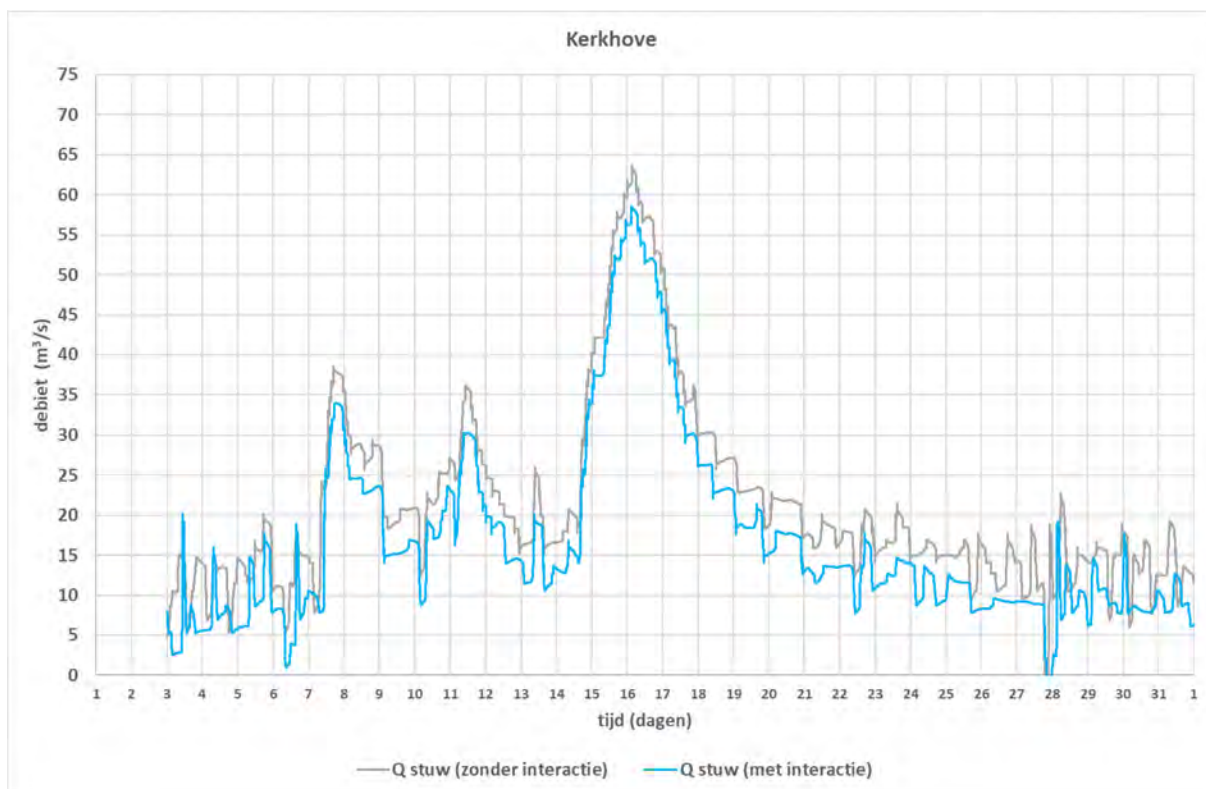
Figuur 135 – April 2018 – Oudenaarde (reeks 2)



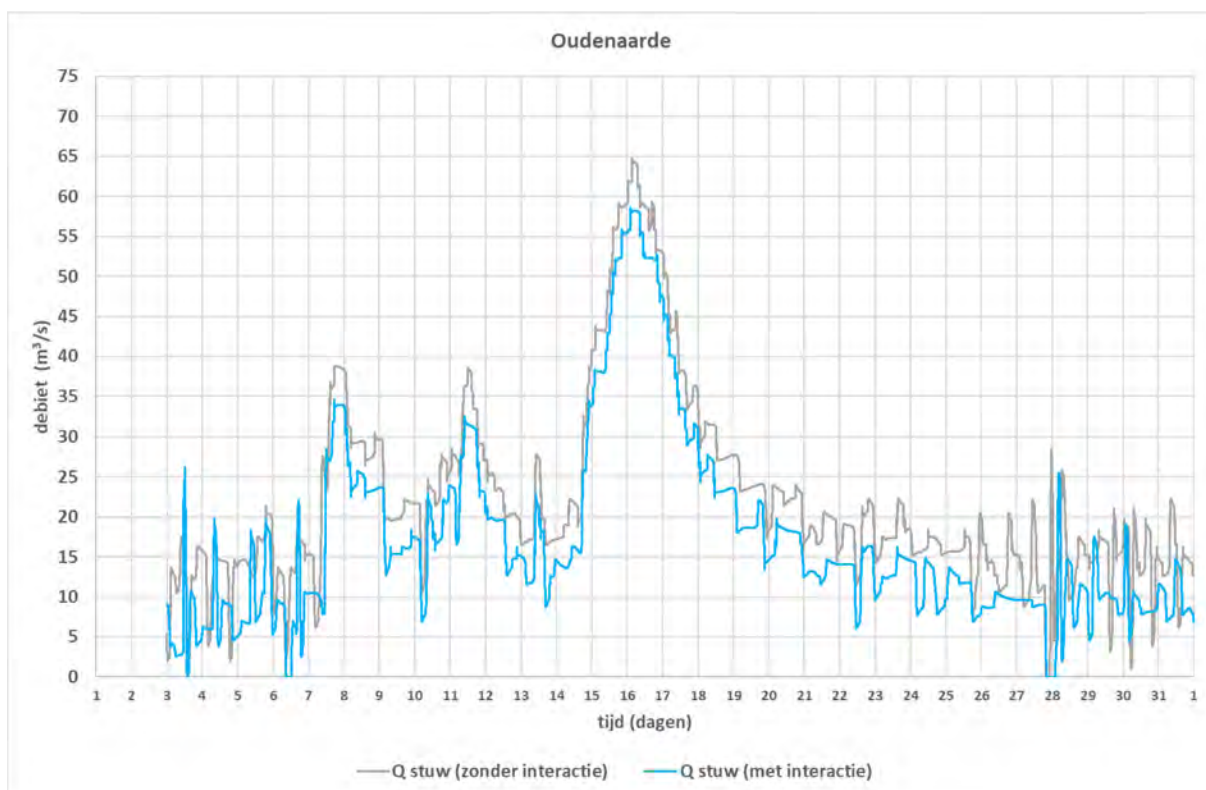
Figuur 136 – April 2018 – Asper (reeks 2)



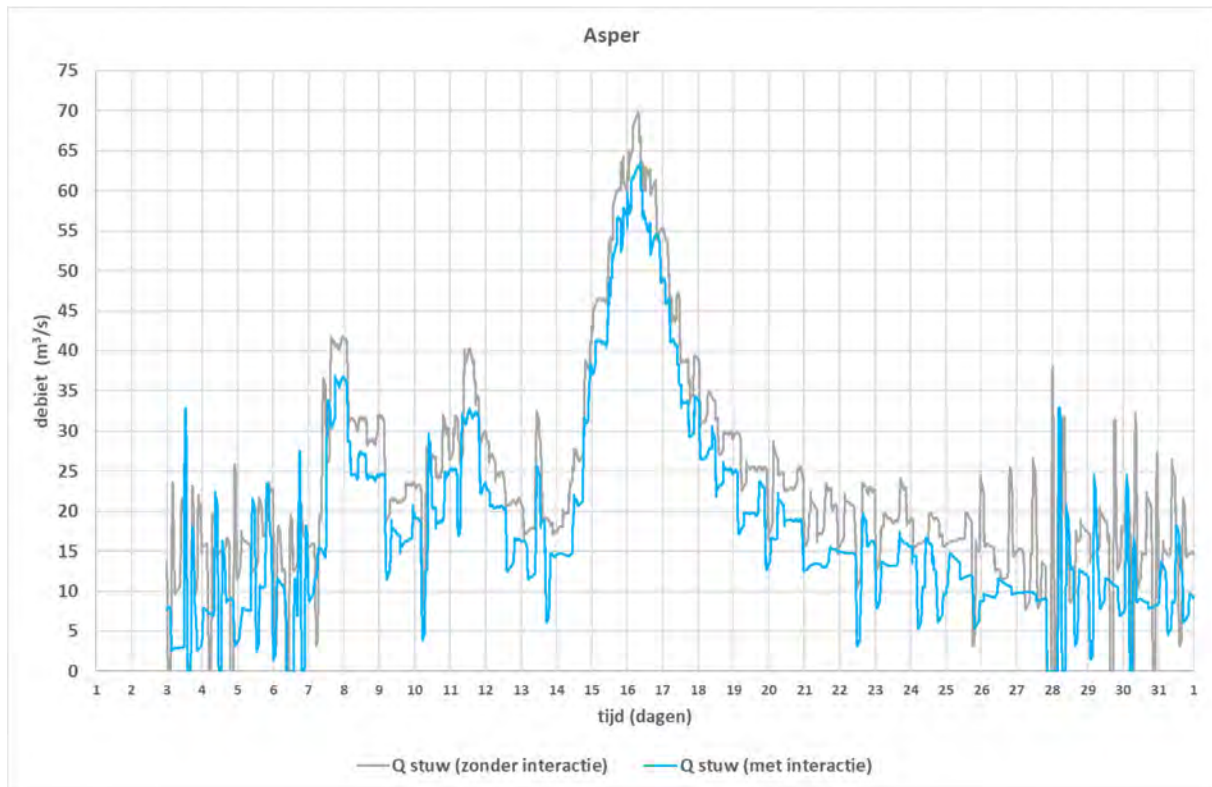
Figuur 137 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 2)



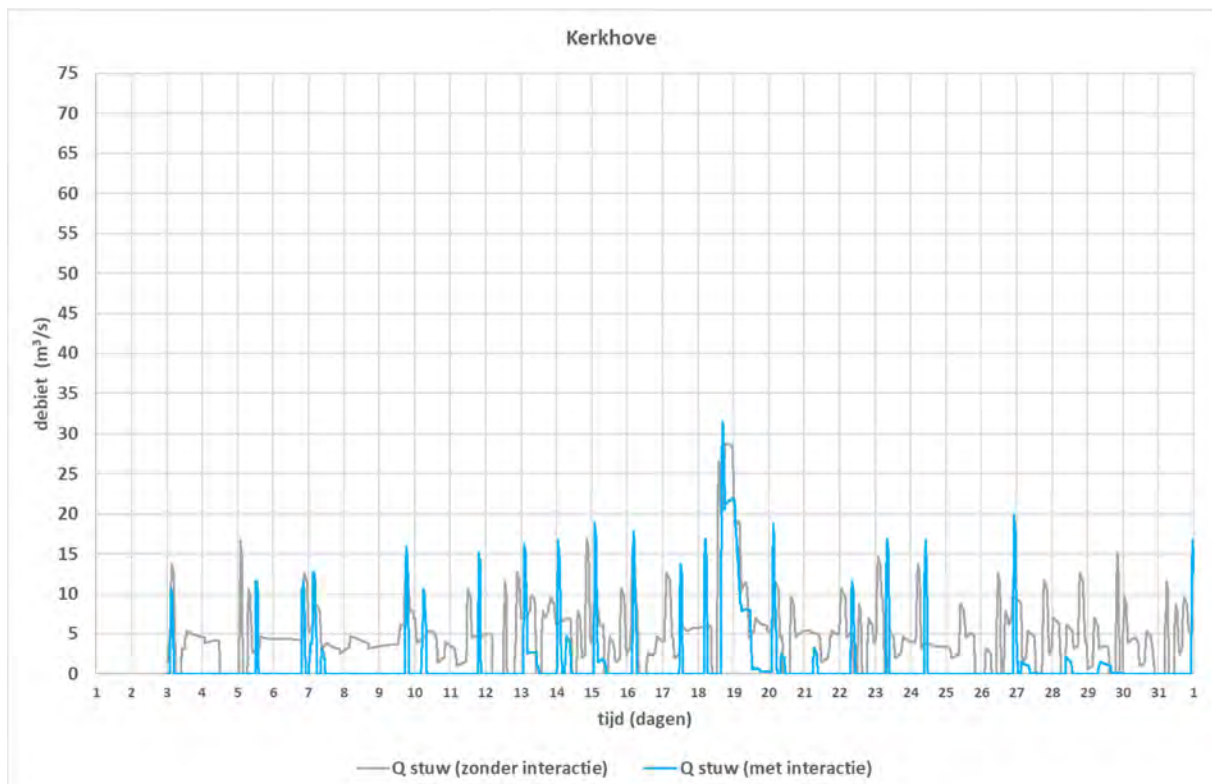
Figuur 138 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



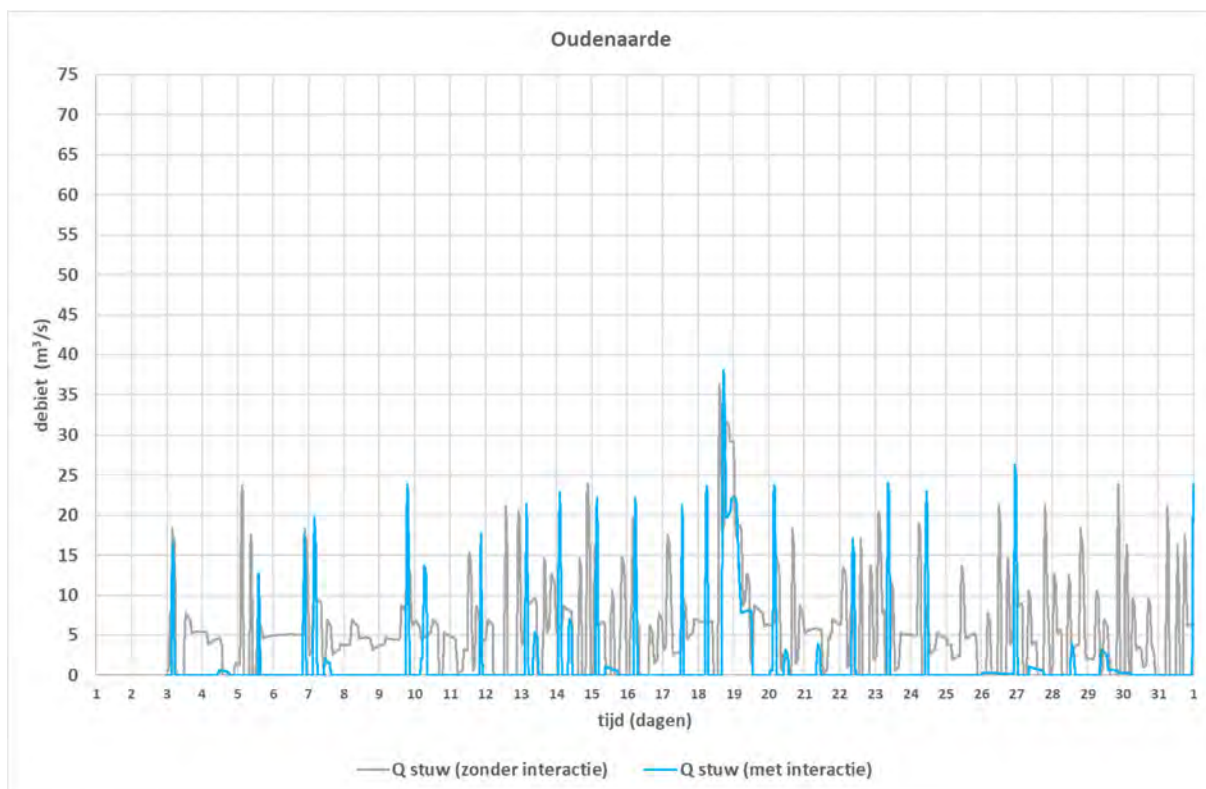
Figuur 139 – Maart 2019 – Asper (reeks 2)



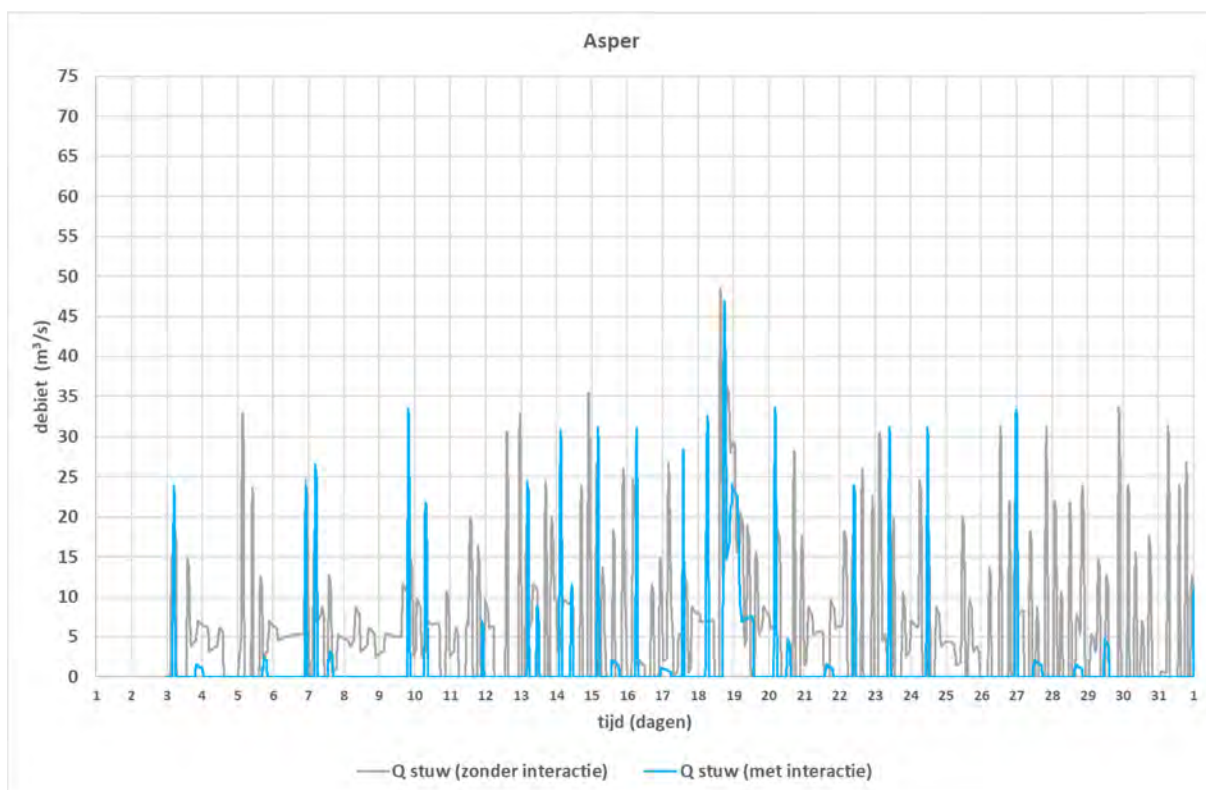
Figuur 140 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 2)



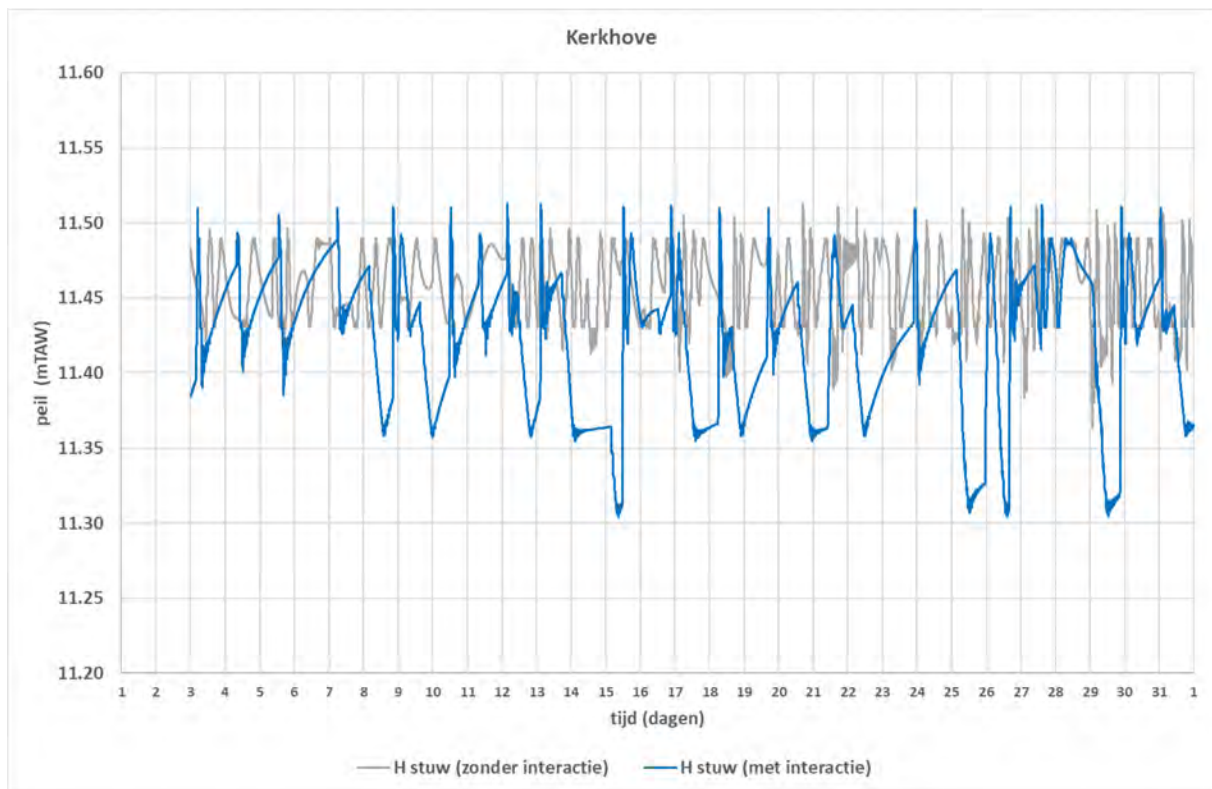
Figuur 141 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



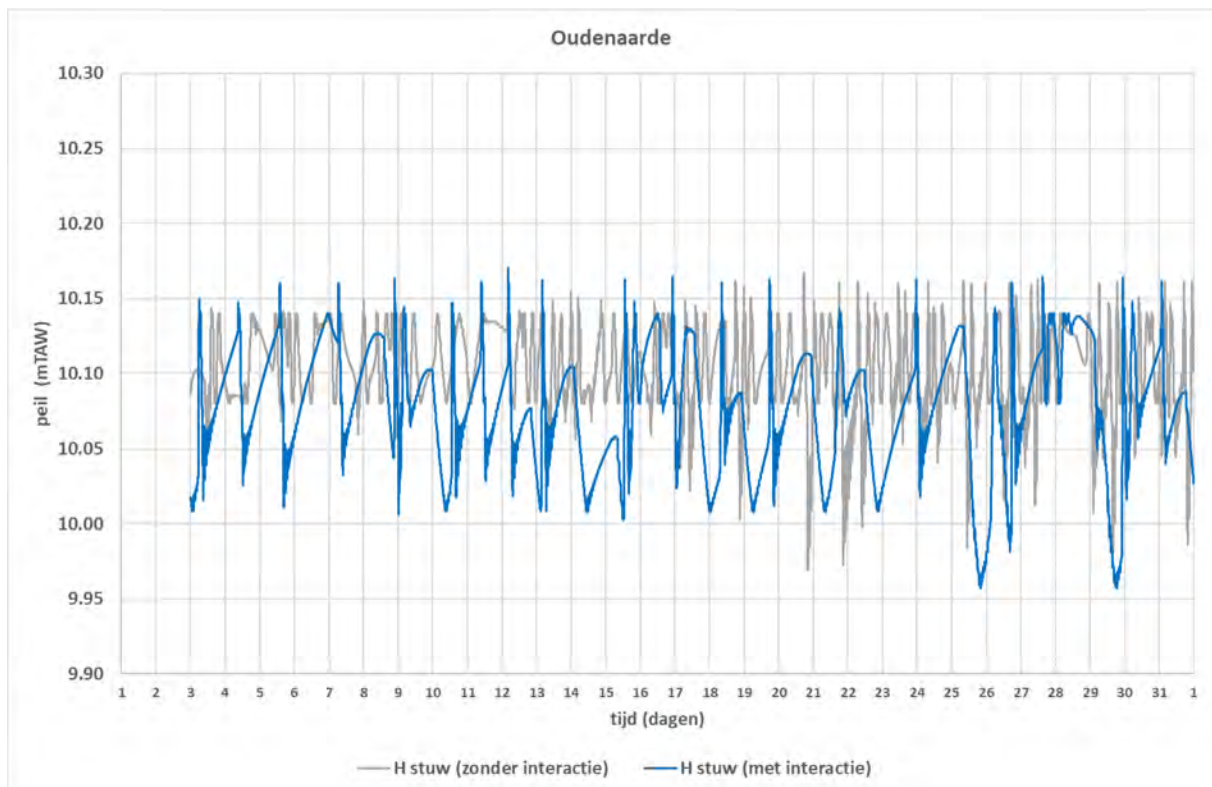
Figuur 142 – Augustus 2019 – Asper (reeks 2)



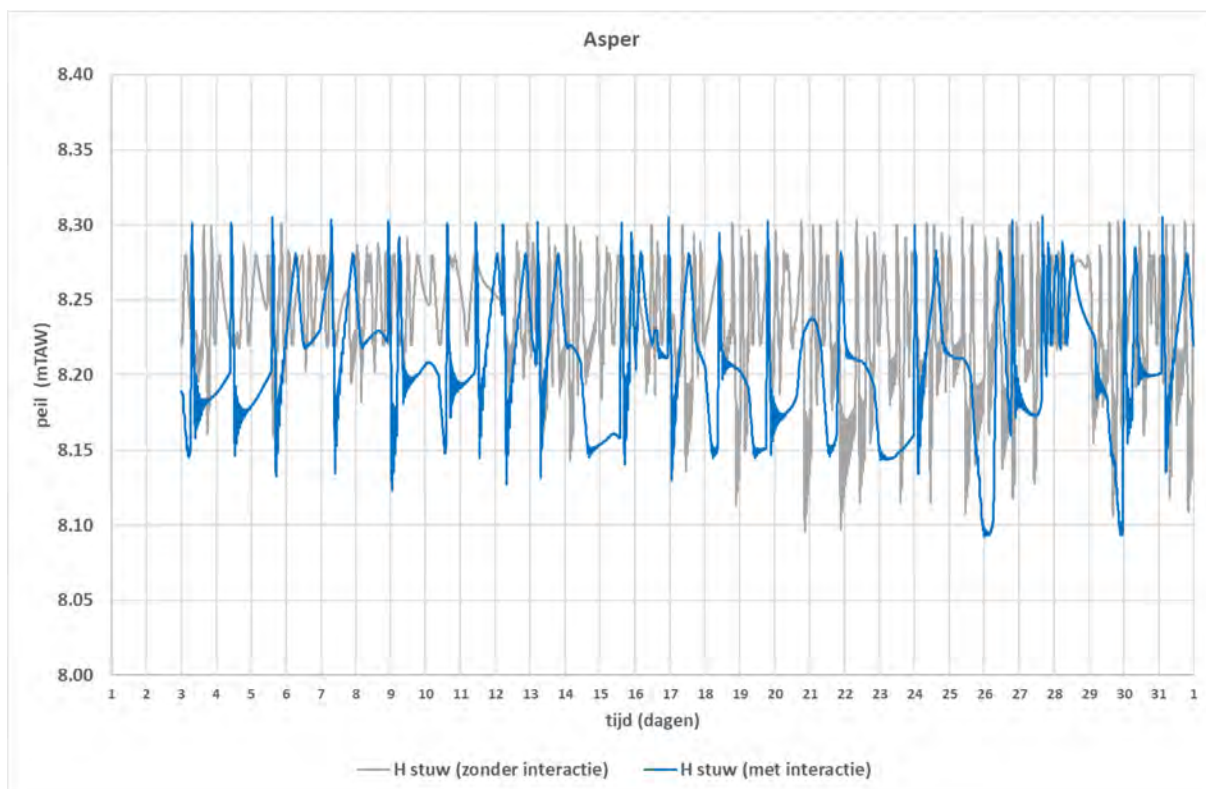
Figuur 143 – Juli 2019 – Kerkhove (reeks 3)



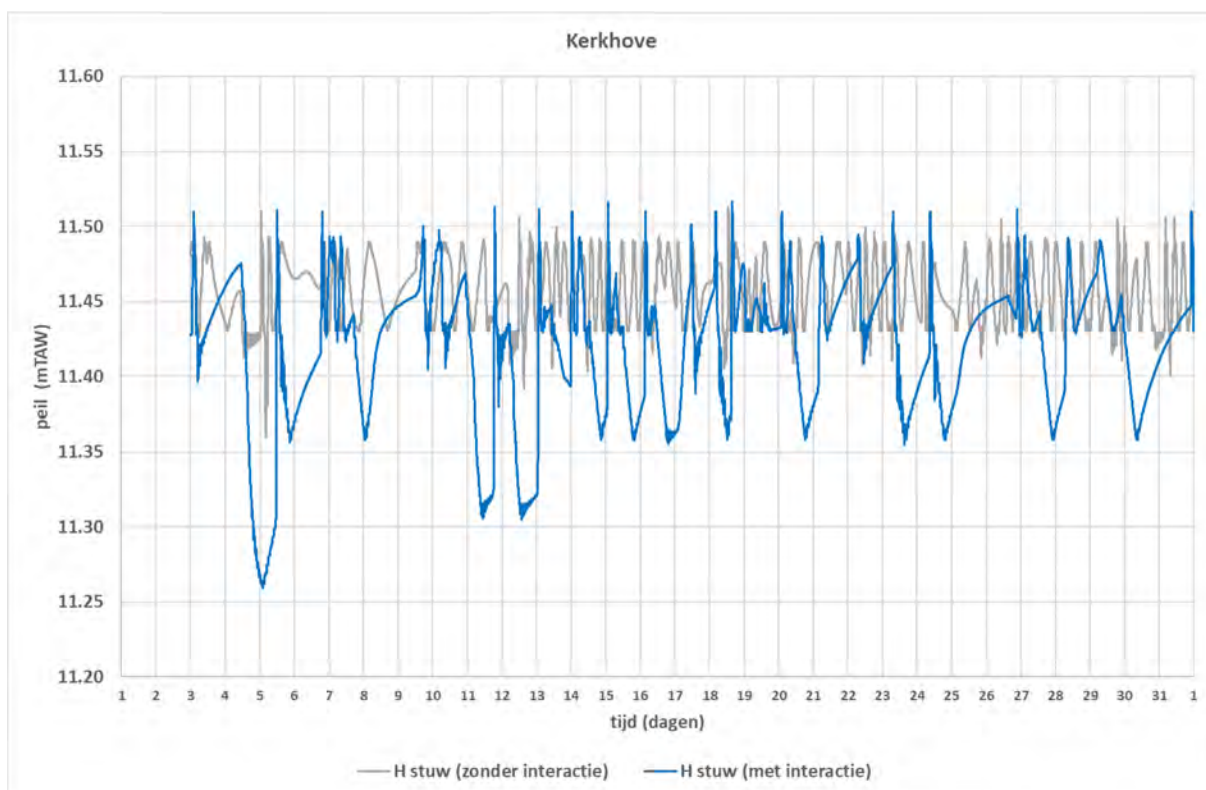
Figuur 144 – Juli 2019 – Oudenaarde (reeks 3)



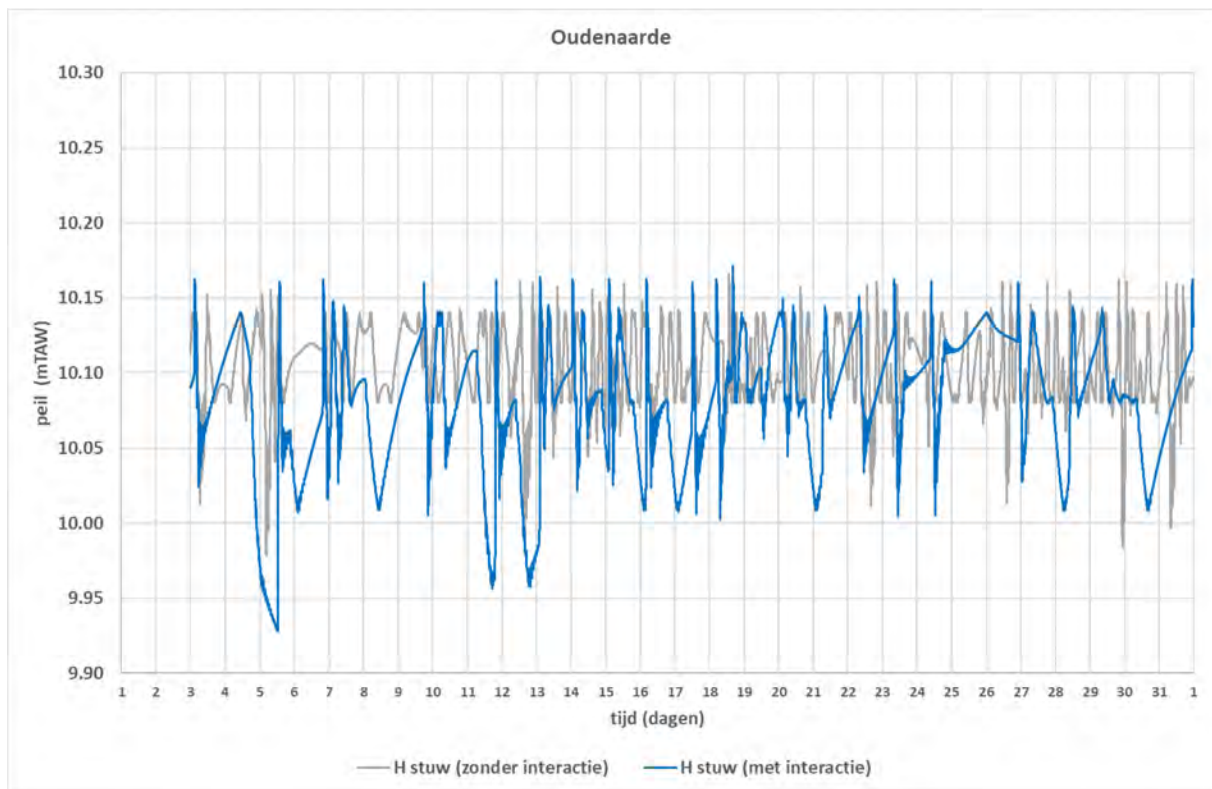
Figuur 145 – Juli 2019 – Asper (reeks 3)



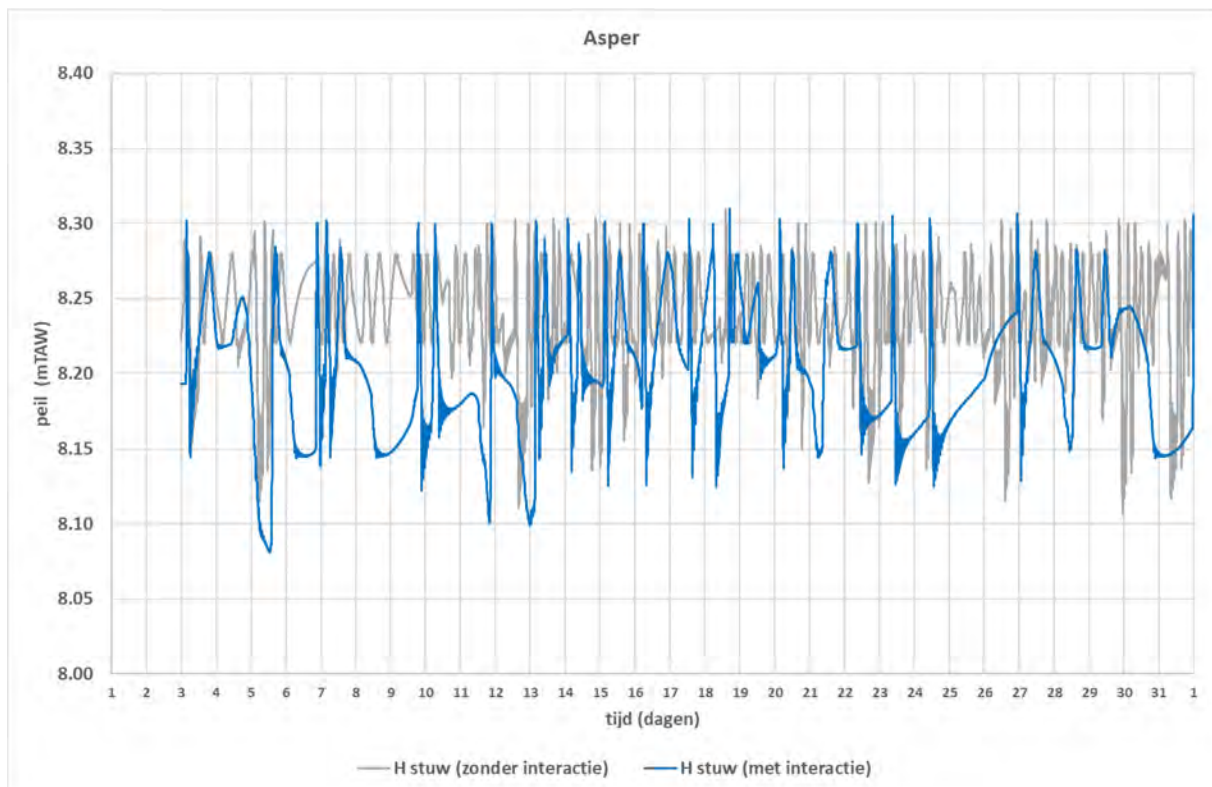
Figuur 146 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 3)



Figuur 147 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 3)



Figuur 148 – Augustus 2019 – Asper (reeks 3)



7.3 Conclusies en aanbevelingen

Tijdens de analyse van de stuwwerking was gebleken dat een lokale sturing op waterpeil aanleiding kan geven tot versterking van kleine debietschommelingen. De studie van de interactie tussen de stuwen, turbines en de vispassages toont aan dat deze debietschommelingen geen negatieve invloed hebben op de werking van de vispassages.

De aanwezigheid van kunstwerken zoals vispassages en turbines leidt logischerwijze tot een afname van het debiet over de stuwen bij lage en middelhoge afvoeren. Hierdoor neemt de kans op het volledig optrekken van de kleppen van de stuwen (m.a.w. geen overstortdebiet) tijdens debietschommelingen en tijdens droogweerperioden toe. Dit hoeft echter niet tot operationele problemen te leiden. Het beschikbare debiet wordt in deze situaties juist optimaal ingezet voor vismigratie en energiewinning. Licht verlaagde waterstanden in droogweerperiodes opwaarts van de stuwen zouden tevens kunnen bijdragen tot het dempen van kleine debietschommelingen.

Het toegepaste model maakt gebruik van daggemiddelde schutverliezen. De mogelijke impact van schutgolven op de werking van de kunstwerken langsheen de Bovenschelde wordt dus niet in rekening gebracht.

Aanvullend onderzoek naar de mogelijkheden van een centrale, anticipatieve sturing blijft nuttig met het oog op het beperken van de schommelingen van het debiet over de stuwen en het daaraan gekoppelde frequent op- en afschakelen van de turbines. Voor het verzekeren van de goede werking van de vispassages lijkt een dergelijke sturing echter niet noodzakelijk.

8 Samenvatting conclusies en aanbevelingen

In de volgende paragrafen worden de conclusies en aanbevelingen van de verschillende deelstudies (eerder beschreven in paragrafen 5.3, 6.3 en 7.3) nog eens samengevat.

8.1 Vispassages en turbines

De bestaande vispassages in Kerkhove, Oudenaarde en Asper kennen een zeer hoog openingspercentage bij alle scenario's ongeacht het hydrologische regime.

De werkingsgraad van eventuele turbines is gevoeliger aan het hydrologische regime, omdat bij watertekort steeds voorrang gegeven wordt aan het openhouden van de vispassages. De werkingsgraad van de eerste turbine blijft evenwel hoog en ook de werkingsgraad van de tweede turbine is nog steeds aanvaardbaar.

In een eerdere studie (Vanderkimpfen et al., 2023) werd reeds onderzocht welke voor- of nadelen er verbonden zijn aan het criterium voor het openen van een vispassage (waterpeil of debiet). Uit deze studie bleek dat opening op basis van debiet en sluiting op basis van waterpeil over het algemeen de meest optimale regeling lijkt. Om de impact van de keuze van het openingsmechanisme te minimaliseren kan men opteren voor een flexibel algoritme, waarbij de vispassage geopend wordt op basis van een combinatie van waterpeil en debiet. De beheerder kan dan zelf beslissen om de vispassage te openen op basis van waterpeil en/of debiet. Op basis van ervaring, weersomstandigheden en beheerprioriteiten, kan hij dan steeds het meest geschikte mechanisme instellen. Een dergelijk algoritme werd reeds uitgewerkt voor de vispassage van Kerkhove (Vanderkimpfen et al., 2019b) en wordt ook aanbevolen voor de vispassages van Oudenaarde en Asper.

Indien in Kerkhove, Oudenaarde of Asper waterkrachtcentrales gebouwd zouden worden, dan dient tijdens het ontwerp onderzocht te worden of de toevoeging van een tweede vispassage noodzakelijk is. De behoefte aan een bijkomende vispassage zal afhangen van de precieze inplanting van de turbines.

8.2 Stuwen

Theoretische beschouwingen op basis van de fysische kenmerken van de verschillende panden van de gekanaliseerde Haut-Escaut en Bovenschelde doen vermoeden dat een automatische lokale sturing op waterpeil aanleiding zou kunnen geven tot versterkingen van debietschommelingen bij afvoeren minder dan 20 à 80 m³/s. Controleberekeningen met synthetische en historische gebeurtenissen bevestigen dit vermoeden.

De versterking van de debietsafname op het einde van een was, kan ertoe leiden dat de meest afwaarts gelegen stuwen tijdelijk sluiten. Deze sluiting zou een negatieve impact kunnen hebben op de werking van de vispassages.

Kleine debietschommelingen op de Haut-Escaut in Frankrijk of Wallonië zouden aanleiding kunnen geven tot het ontstaan van grote debietschommelingen op de Bovenschelde in Vlaanderen en het tijdelijk sluiten van een aantal stuwen in Vlaanderen. De laterale instroming vanuit de zijlopen van de Bovenschelde volstaat niet om dit te voorkomen. Indien het niet mogelijk zou blijken om de versterking van de schommelingen in Vlaanderen te voorkomen, dan dient men het ontstaan van deze schommelingen in Frankrijk of Wallonië te beperken.

De parameters van het onderzochte sturingsalgoritme blijken slechts een beperkte invloed te hebben op de werking van de volledige stuwenketen. De ongewenste versterking van een toename of afname van het debiet bij lage afvoeren blijft optreden bij verschillende combinaties van sturingsparameters.

In een laatste stap dient de interactie tussen de stuwen en de vispassages onderzocht te worden. Daarbij dient gecontroleerd te worden welk effect de versterking van debietschommelingen heeft op de werking van de vispassages. Indien zou blijken dat het voorgestelde sturingsalgoritme een ongewenste impact heeft op de werking van de vispassages, dan moeten alternatieve sturingsalgoritmen onderzocht worden.

8.3 Interactie

Tijdens de analyse van de stuwwerking was gebleken dat een lokale sturing op waterpeil aanleiding kan geven tot versterking van kleine debietschommelingen. De studie van de interactie tussen de stuwen, turbines en de vispassages toont aan dat deze debietschommelingen geen negatieve invloed hebben op de werking van de vispassages.

De aanwezigheid van kunstwerken zoals vispassages en turbines leidt logischerwijze tot een afname van het debiet over de stuwen bij lage en middelhoge afvoeren. Hierdoor neemt de kans op het volledig optrekken van de kleppen van de stuwen (m.a.w. geen overstortdebiet) tijdens debietschommelingen en tijdens droogweerperioden toe. Dit hoeft echter niet tot operationele problemen te leiden. Het beschikbare debiet wordt in deze situaties juist optimaal ingezet voor vismigratie en energiewinning. Licht verlaagde waterstanden in droogweerperiodes opwaarts van de stuwen zouden tevens kunnen bijdragen tot het dempen van kleine debietschommelingen.

Het toegepaste model maakt gebruik van daggemiddelde schutverliezen. De mogelijke impact van schutgolven op de werking van de kunstwerken langsheen de Bovenschelde wordt dus niet in rekening gebracht.

Aanvullend onderzoek naar de mogelijkheden van een centrale, anticipatieve sturing blijft nuttig met het oog op het beperken van de schommelingen van het debiet over de stuwen en het daaraan gekoppelde frequent op- en afschakelen van de turbines. Voor het verzekeren van de goede werking van de vispassages lijkt een dergelijke sturing echter niet noodzakelijk.

9 Referenties

Antea (2011). Project-MER voor de bouw van 3 nieuwe sluisen op de Boven-Schelde te Asper, Oudenaarde en Kerkhove.

Engie Fabricom (2019). Boven-Schelde - Vernieuwen en ontdubbelen van de stuw te Kerkhove, Grafische user interface Automation (EM-A-003).

Neumüller, M. en Bernhauer, W. (1969): Stauregelung und Abflußregelung an Laufwasserkraftwerken; Wasserwirtschaft 10 (1969); S. 297ff

Neumüller, M. en Bernhauer, W. (1976): Stauregelung und Abflußregelung an Laufwasserkraftwerken mit automatischen Verfahren; Wasserwirtschaft 66 (1976) 6, S. 253ff

Tritel (2010). Maatschappelijke kosten-batenanalyse voor de bouw van de nieuwe sluisen op de Boven-Schelde.

Vanderkimpfen, P.; De Boeck, K.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2019a). Mike11 model Leie, Bovenshelde en Gentse Kanalen: Beschrijving versie 2015. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_106_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

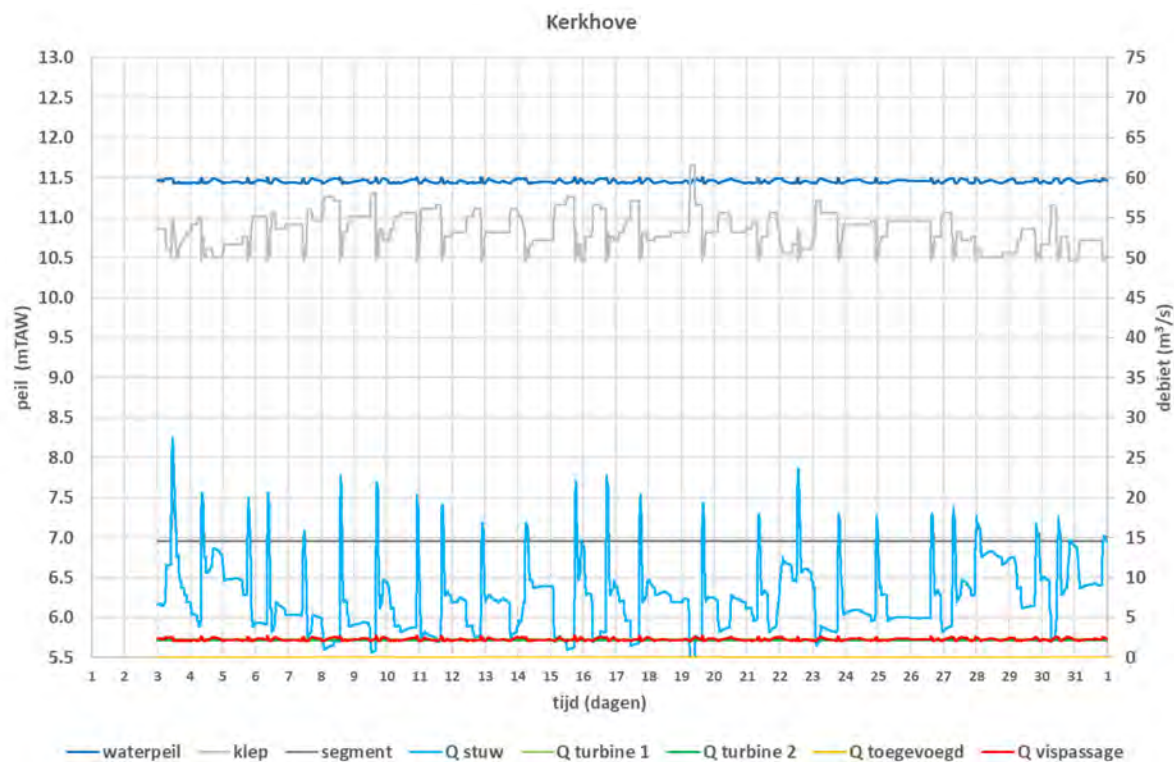
Vanderkimpfen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2019b). Voorstel sturing vispassage Kerkhove. Versie 3.0. WL Memo's, 16_045_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vanderkimpfen, P.; Pereira, F.; Mostaert, F. (2020). Modelleren Bovenshelde in Wallonië: Modelbeschrijving. Versie 4.0. WL Rapporten, 20_048_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

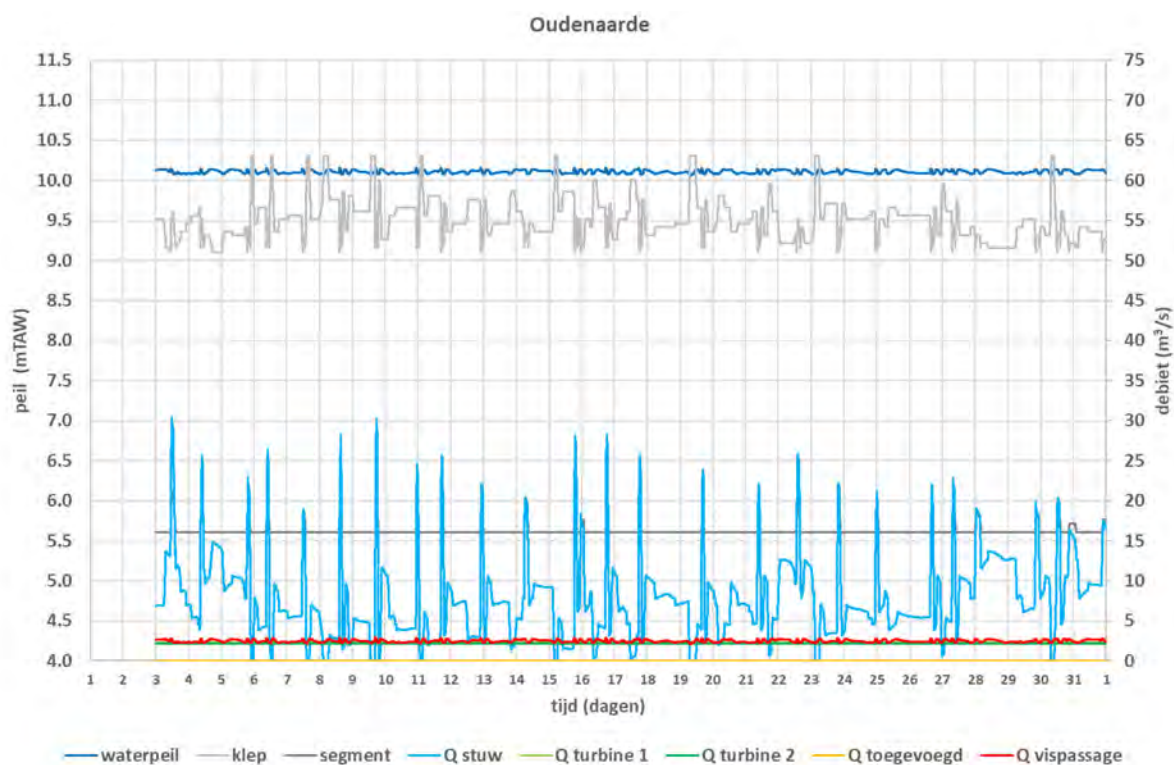
Vanderkimpfen, P.; Pereira, F.; Visser, K.P.; Viaene, P. (2023). Slim stuwen – fase 3: Sturing stuwen en vispassages Dender. Versie 4.0. WL Rapporten, 19_013_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage 1 Interactie – figuren reeks 1

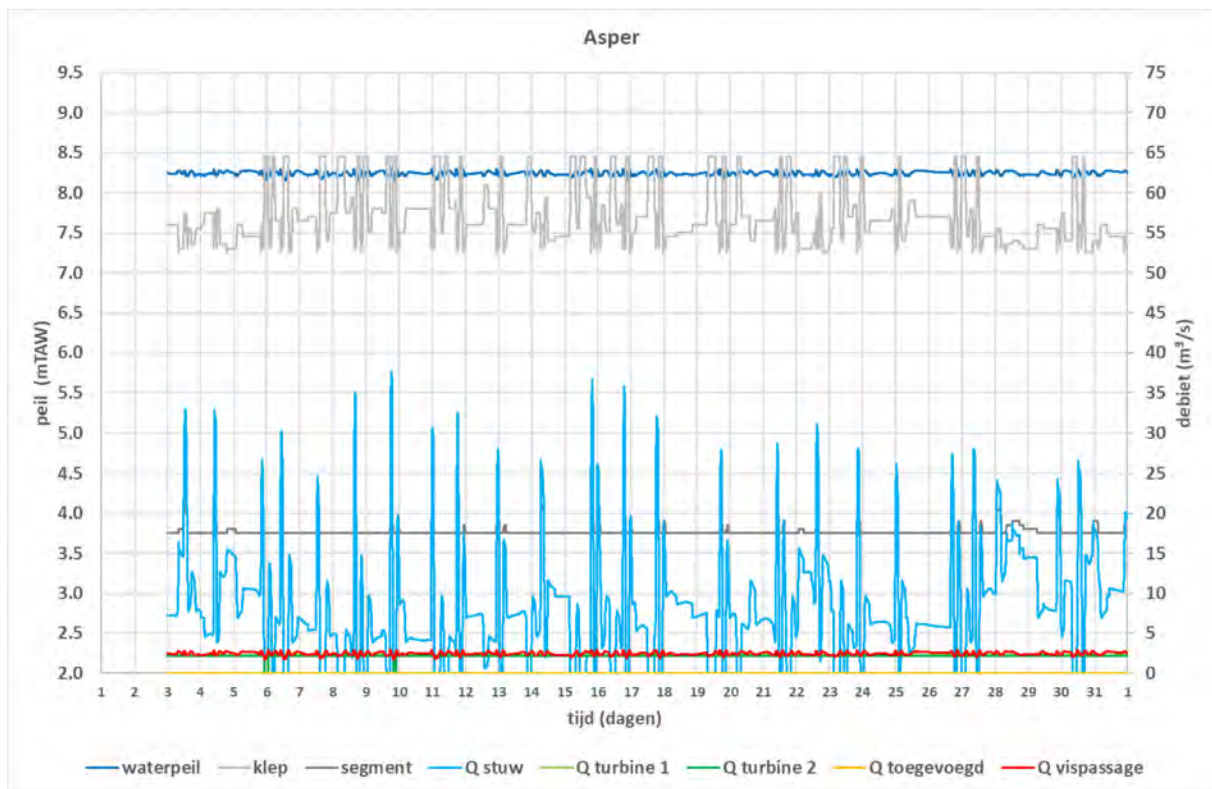
Figuur 149 – Januari 2019 – Kerkhove (reeks 1)



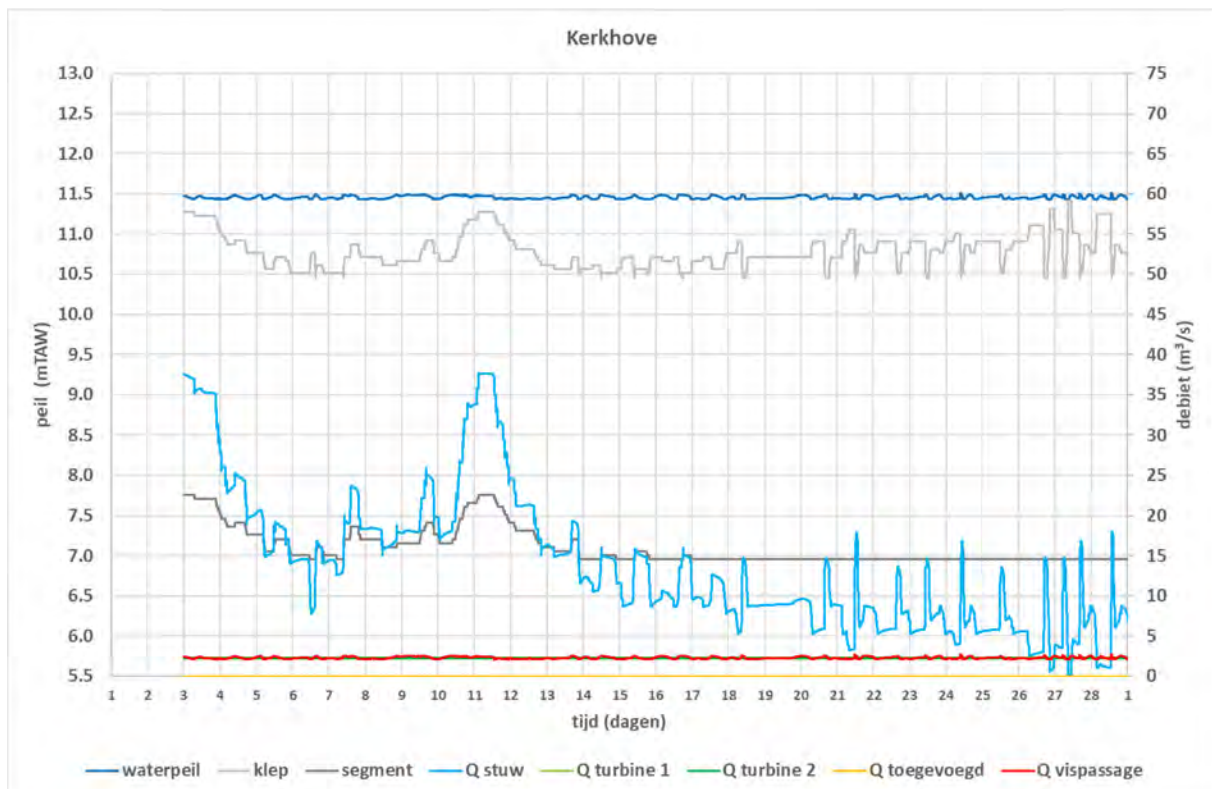
Figuur 150 – Januari 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



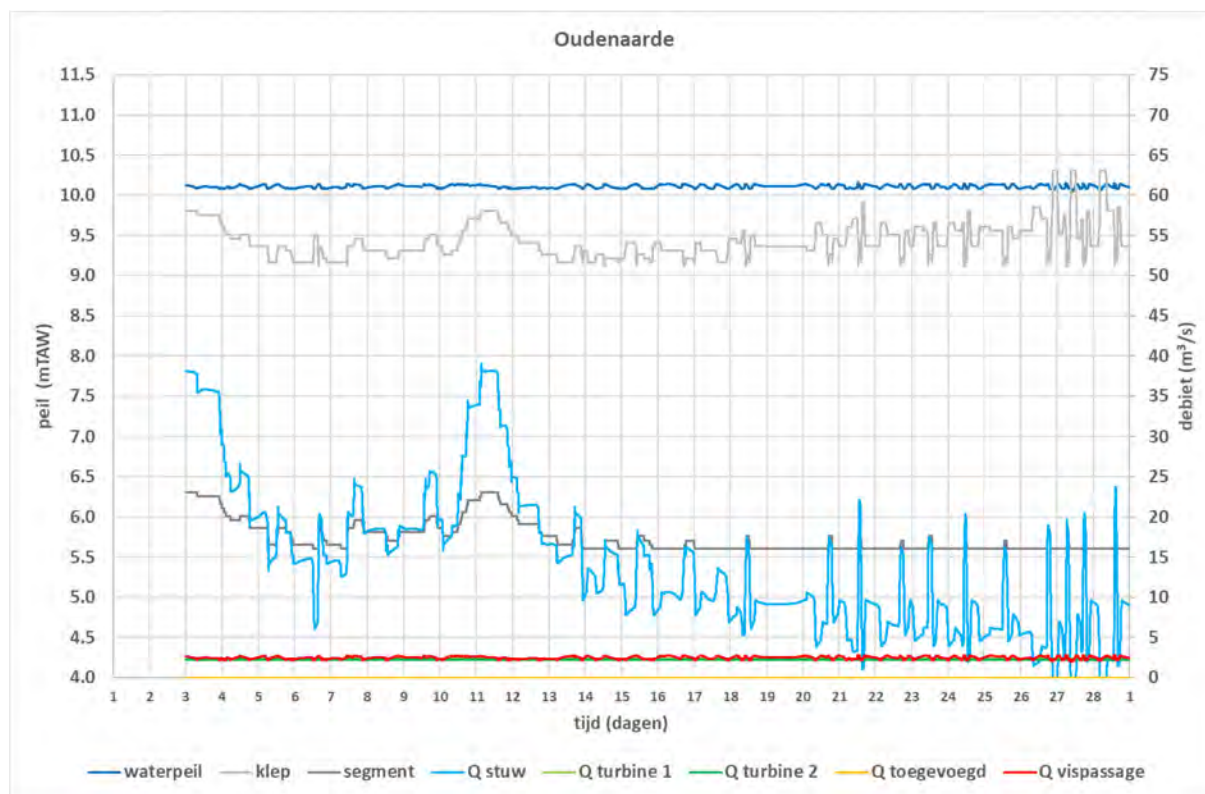
Figuur 151 – Januari 2019 – Asper (reeks 1)



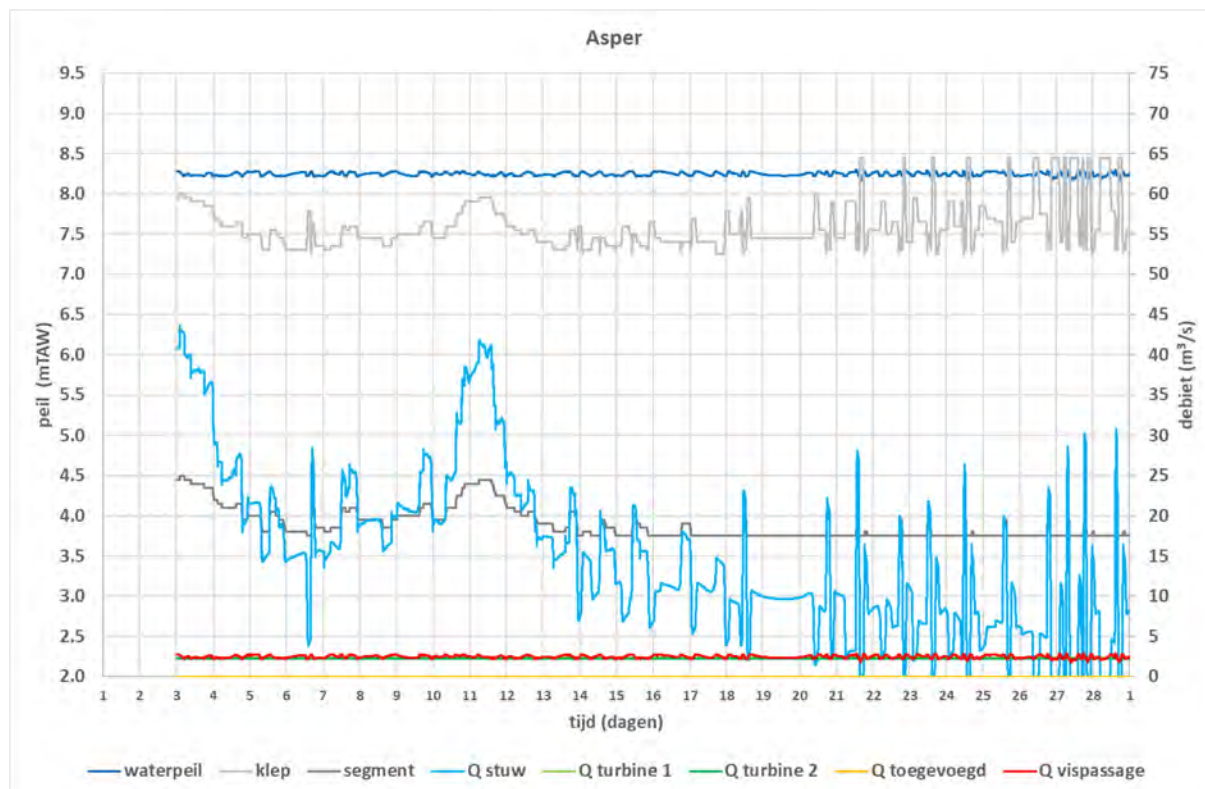
Figuur 152 – Februari 2019 – Kerkhove (reeks 1)



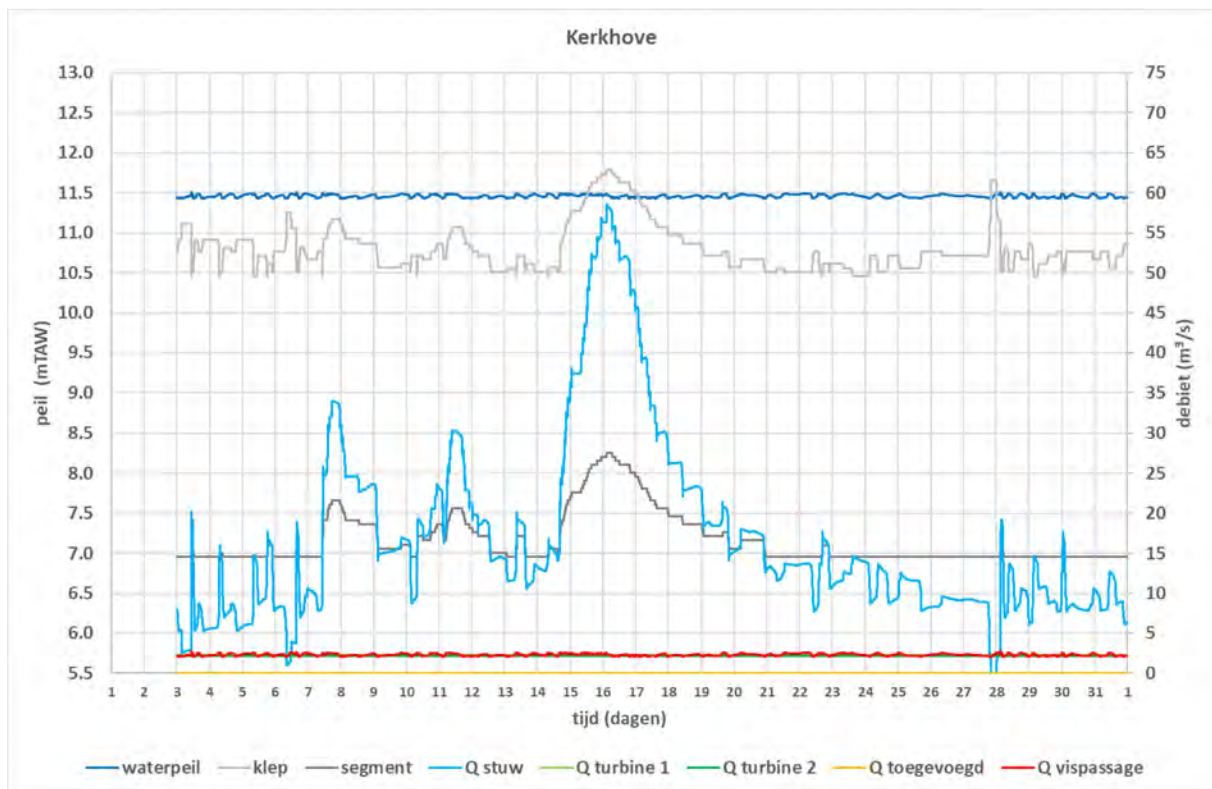
Figuur 153 – Februari 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



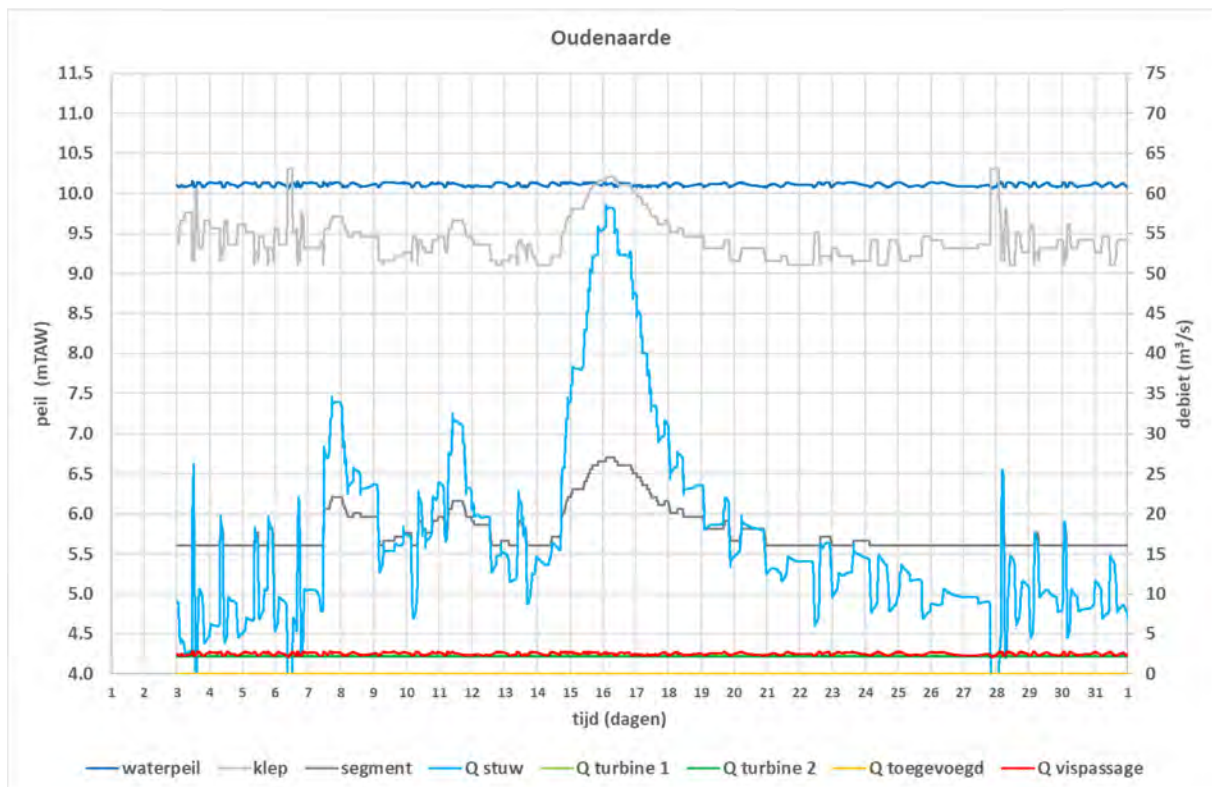
Figuur 154 – Februari 2019 – Asper (reeks 1)



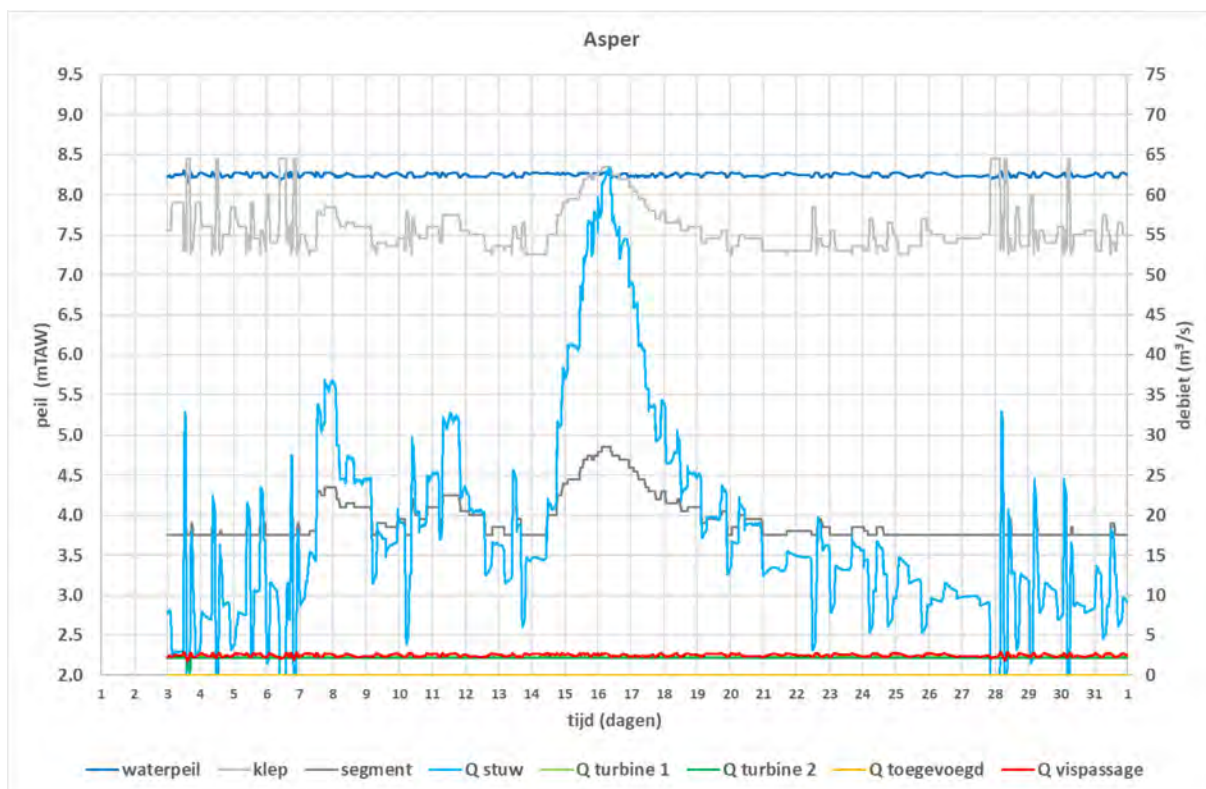
Figuur 155 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 1)



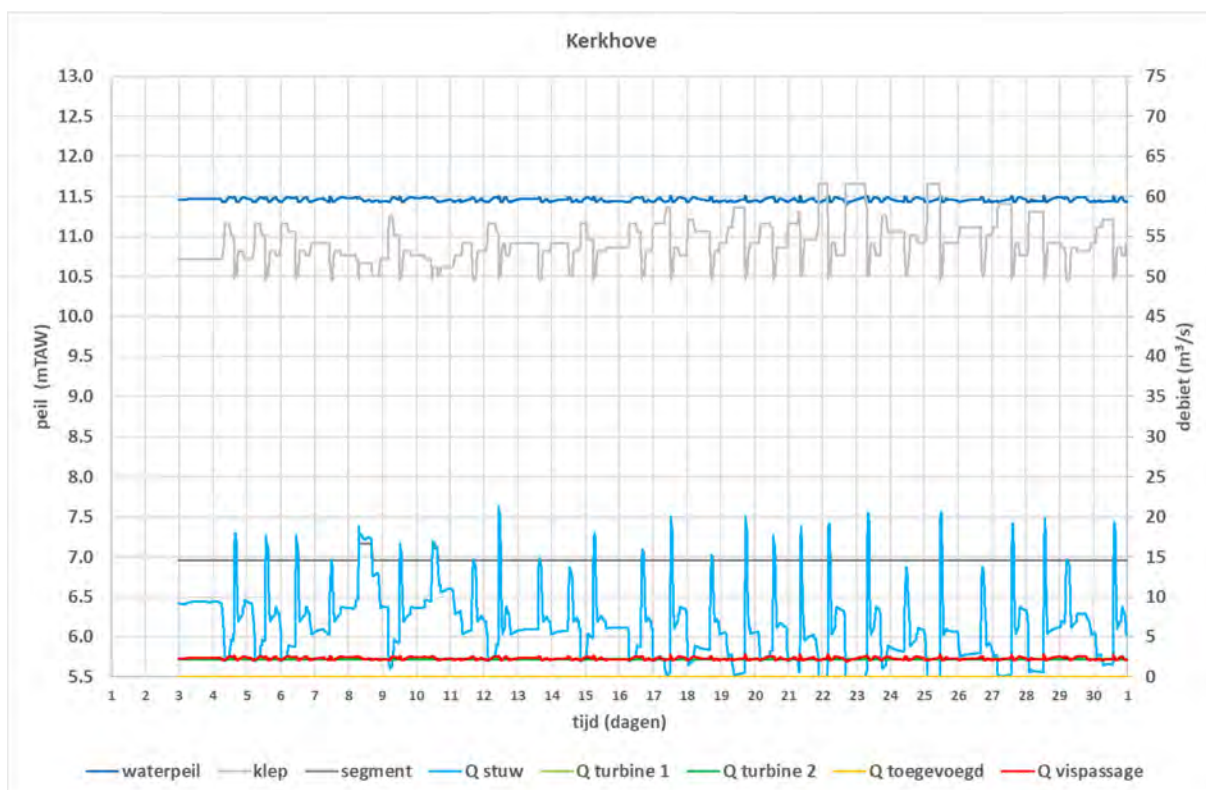
Figuur 156 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



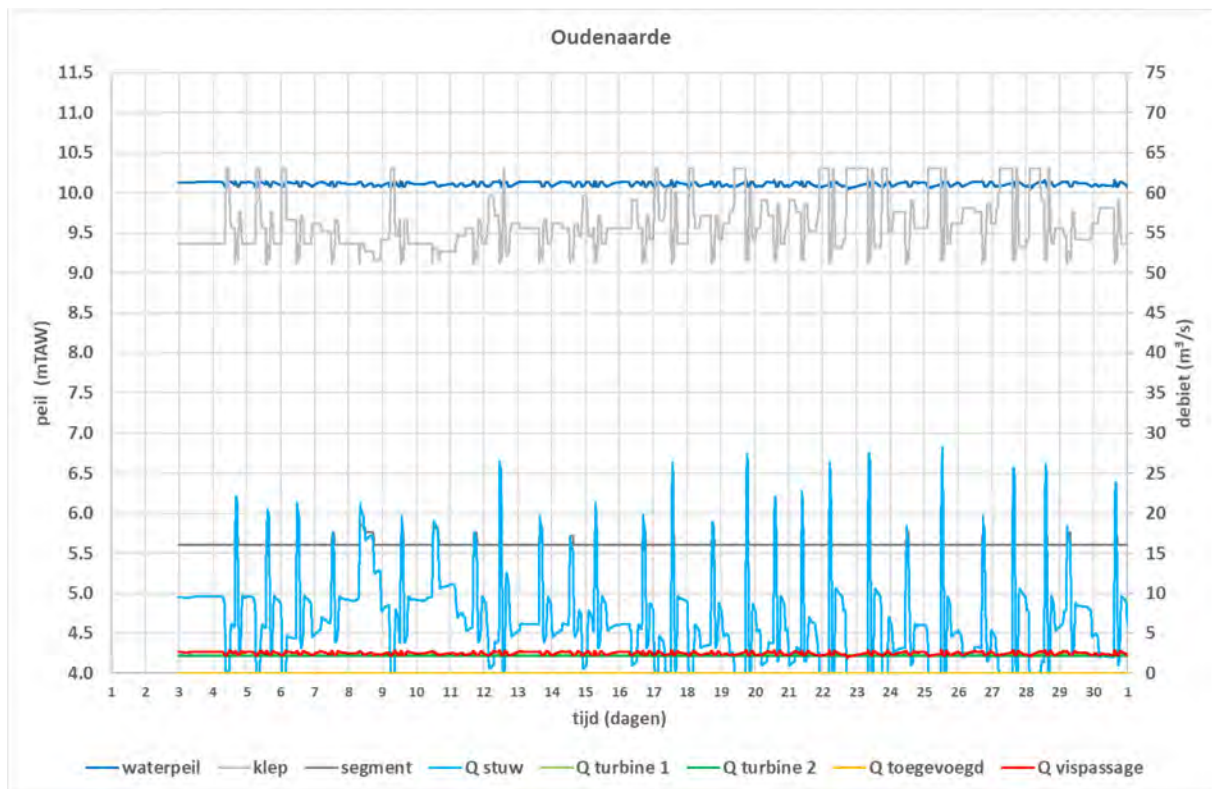
Figuur 157 – Maart 2019 – Asper (reeks 1)



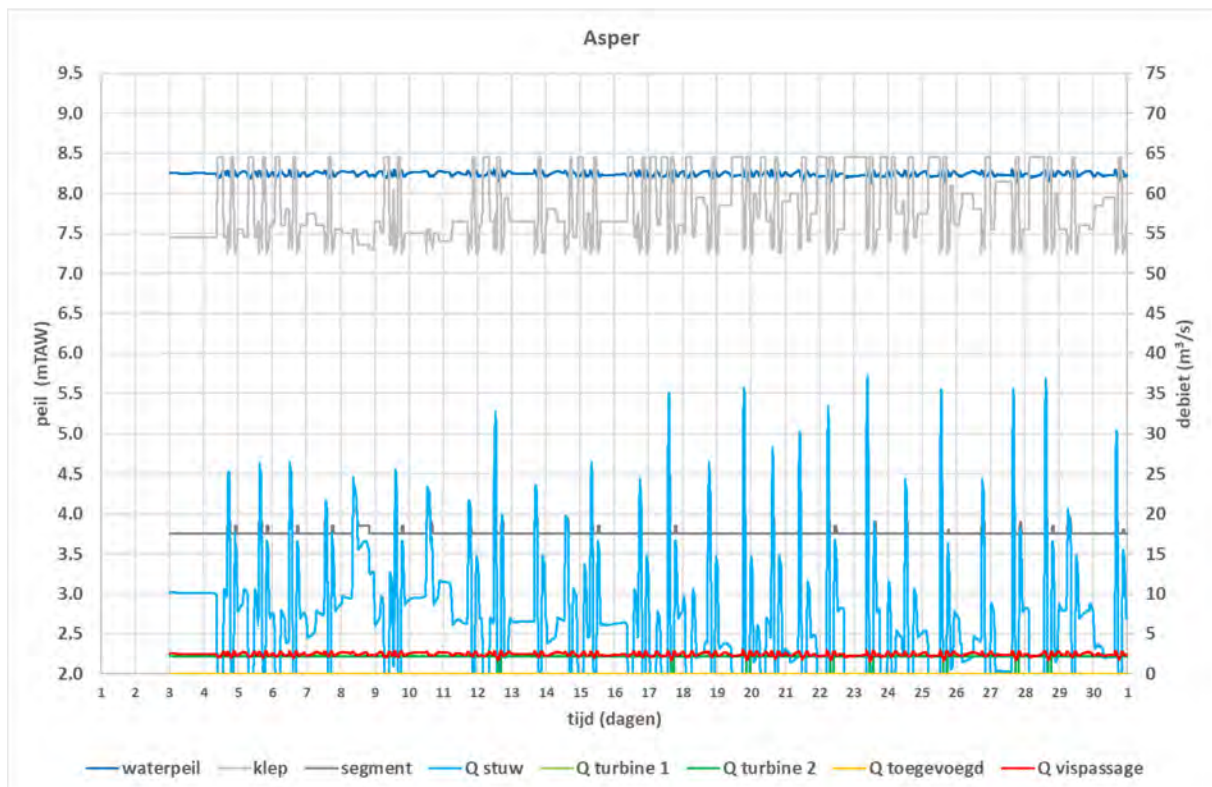
Figuur 158 – April 2019 – Kerkhove (reeks 1)



Figuur 159 – April 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



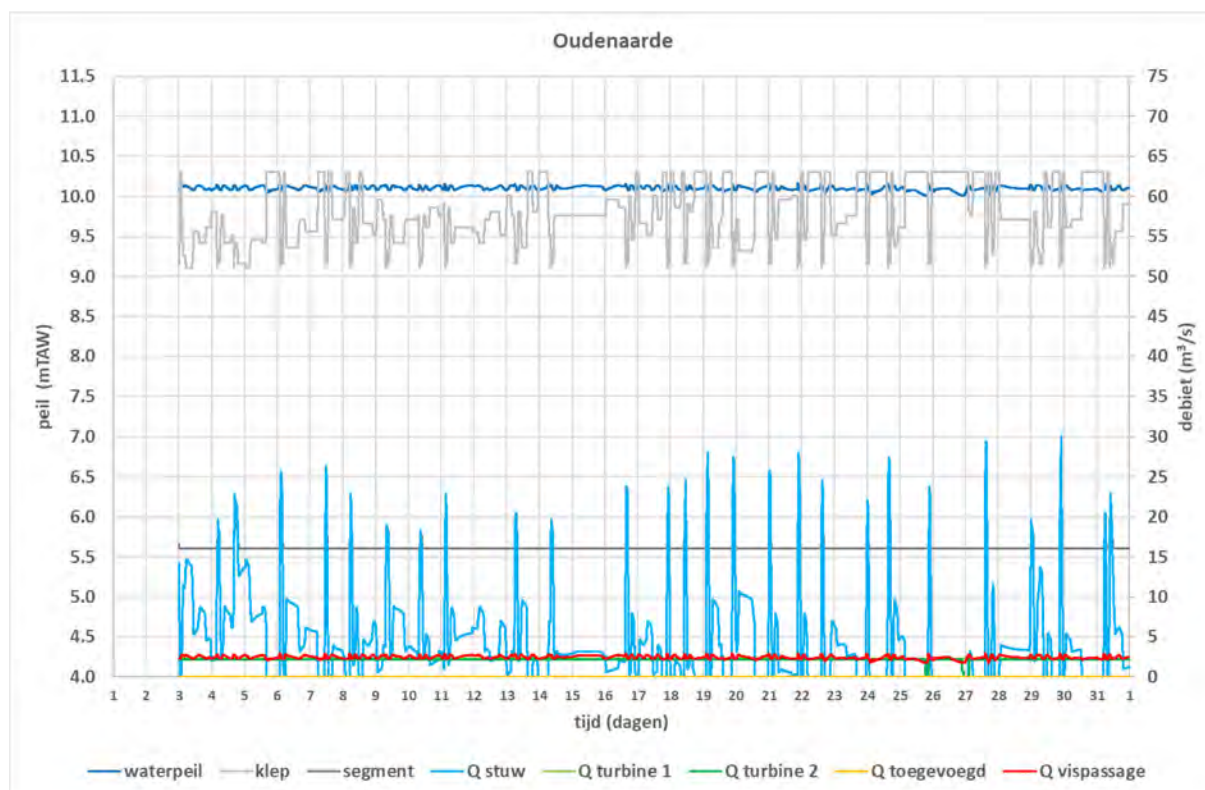
Figuur 160 – April 2019 – Asper (reeks 1)



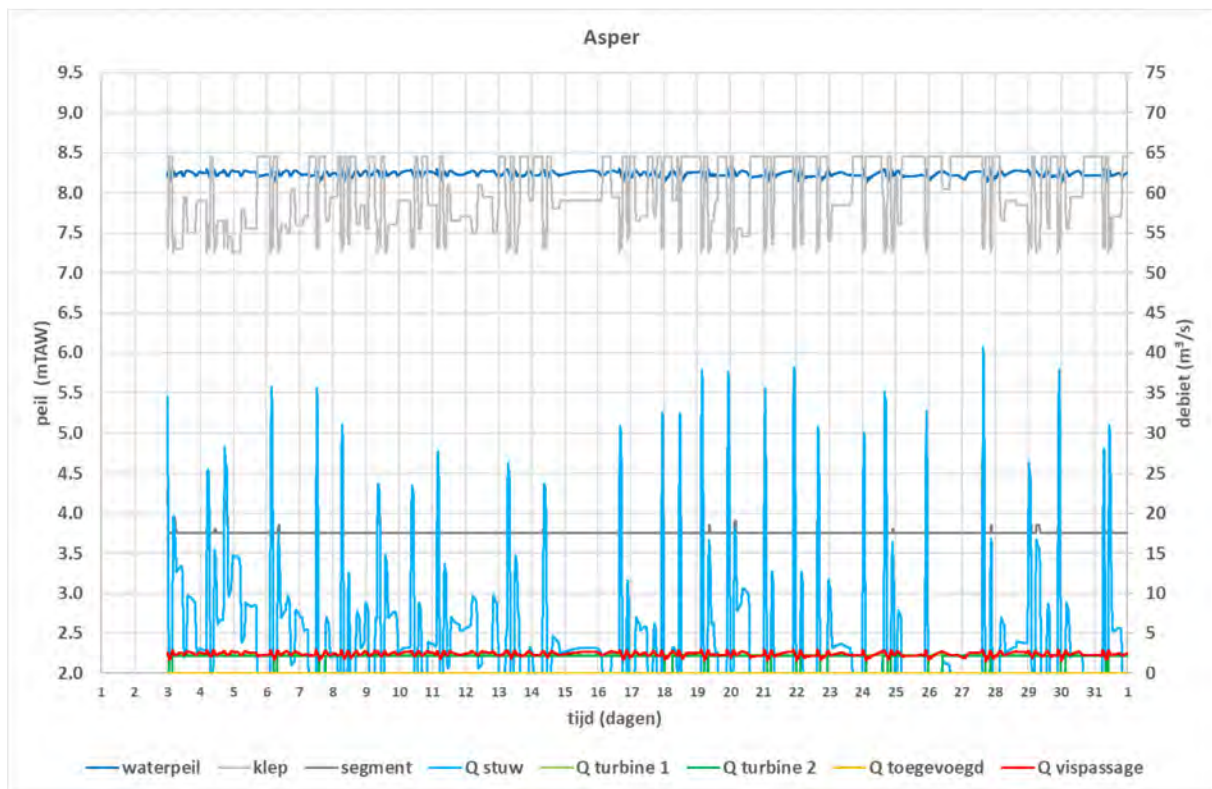
Figuur 161 – Mei 2019 – Kerkhove (reeks 1)



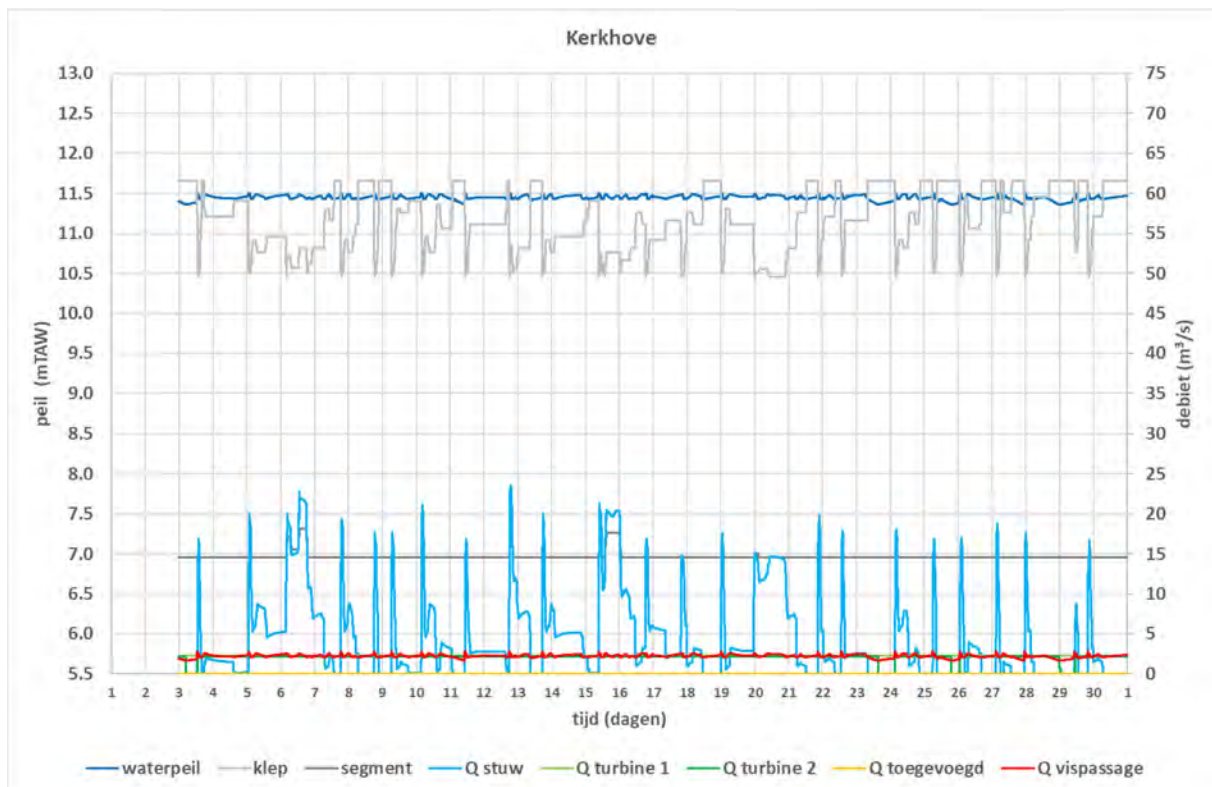
Figuur 162 – Mei 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



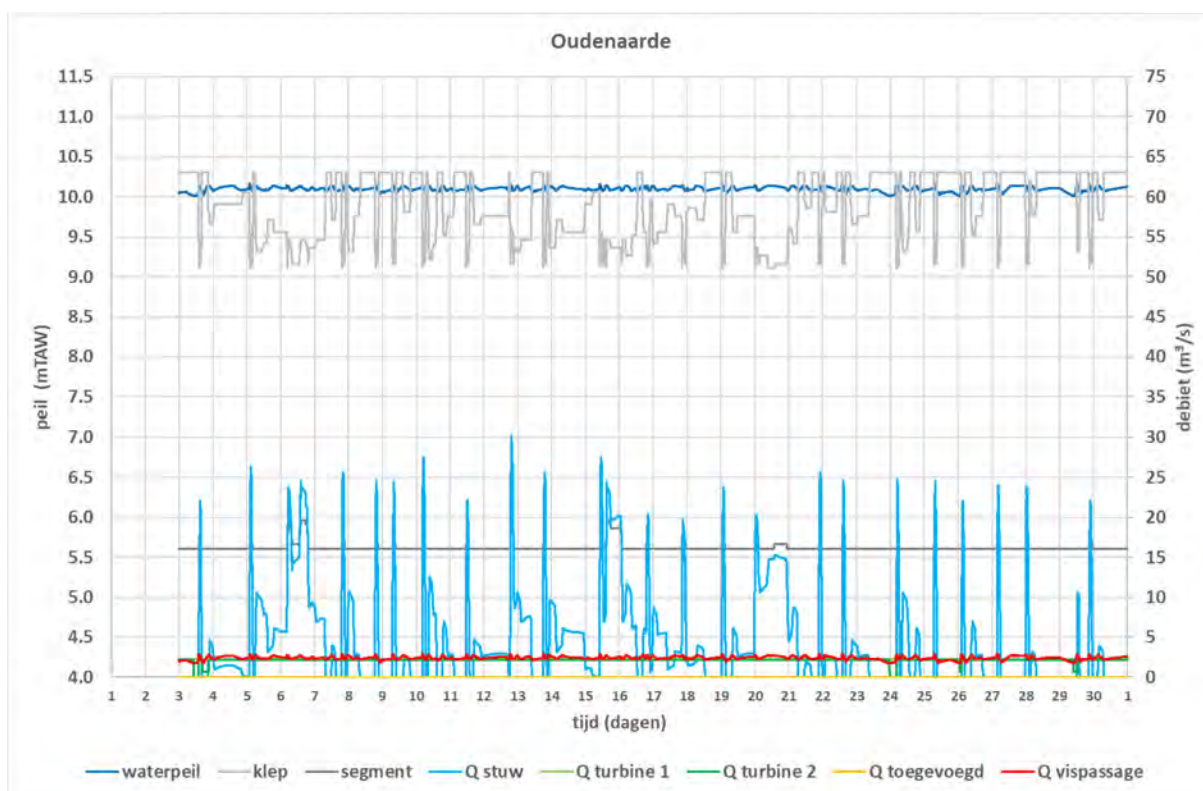
Figuur 163 – Mei 2019 – Asper (reeks 1)



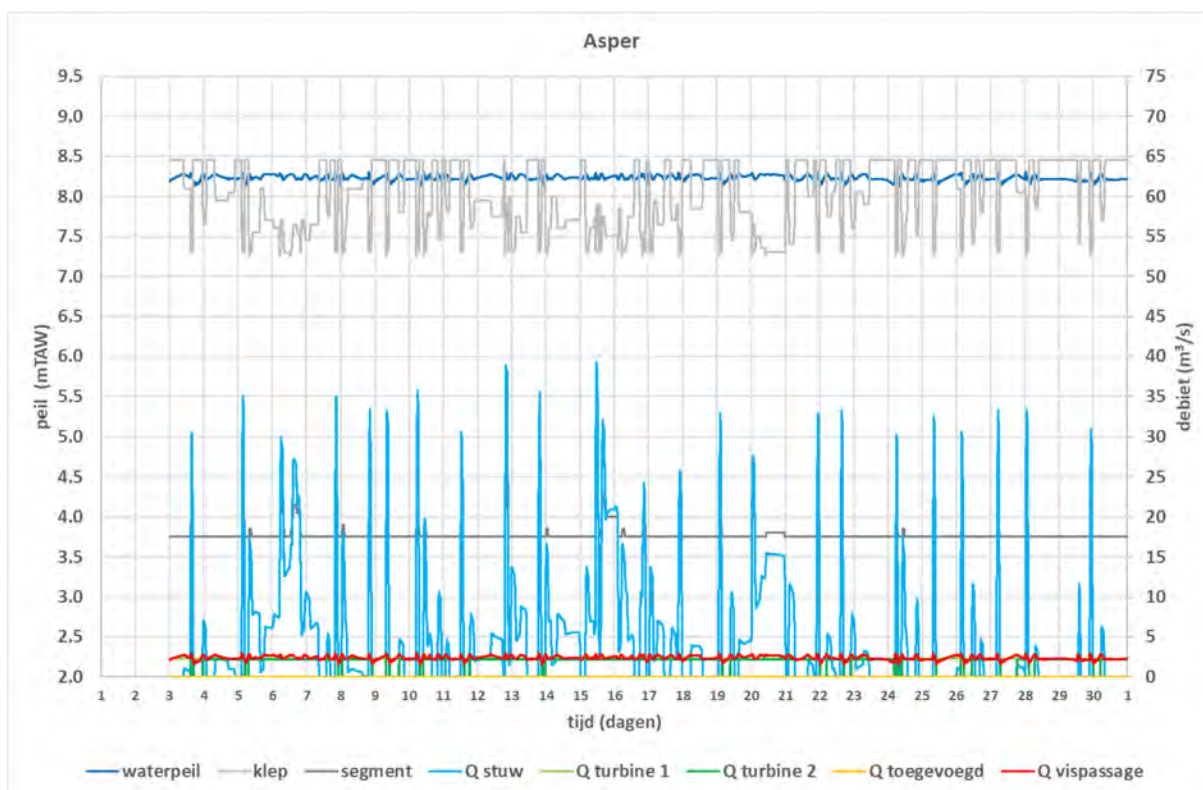
Figuur 164 – Juni 2019 – Kerkhove (reeks 1)



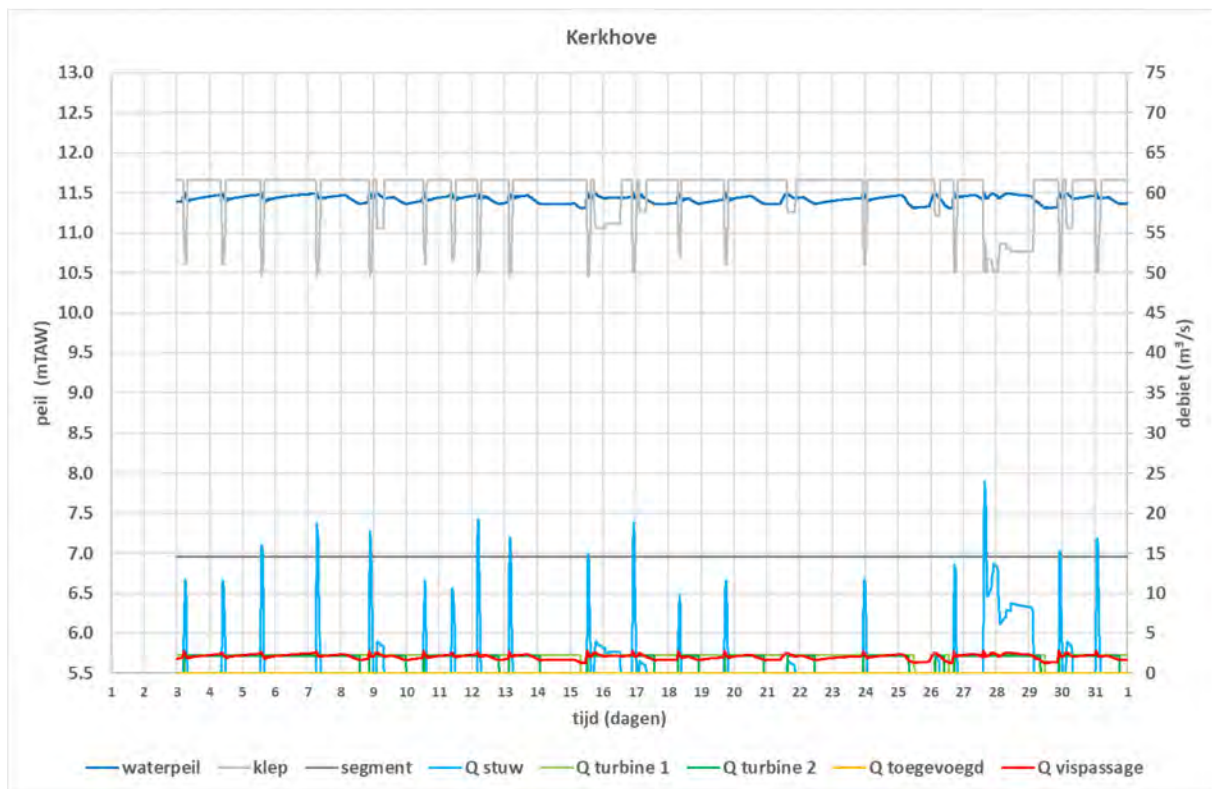
Figuur 165 – Juni 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



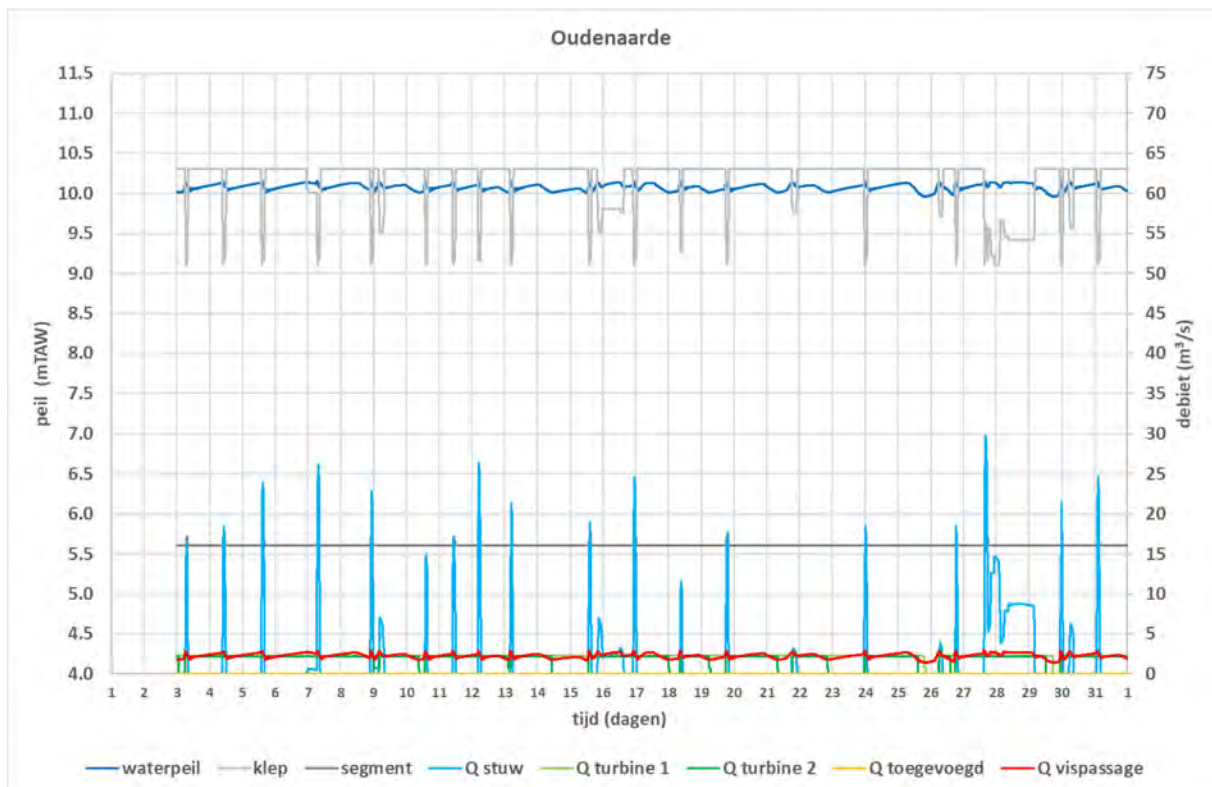
Figuur 166 – Juni 2019 – Asper (reeks 1)



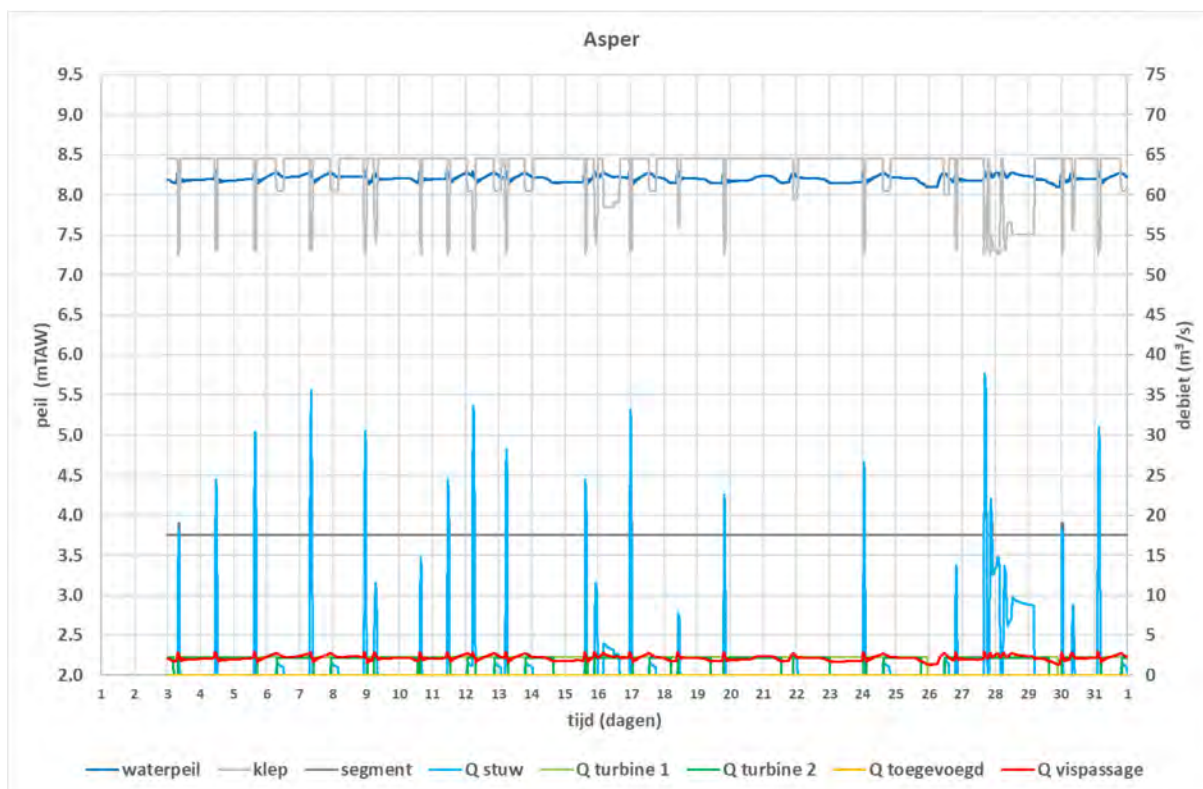
Figuur 167 – Juli 2019 – Kerkhove (reeks 1)



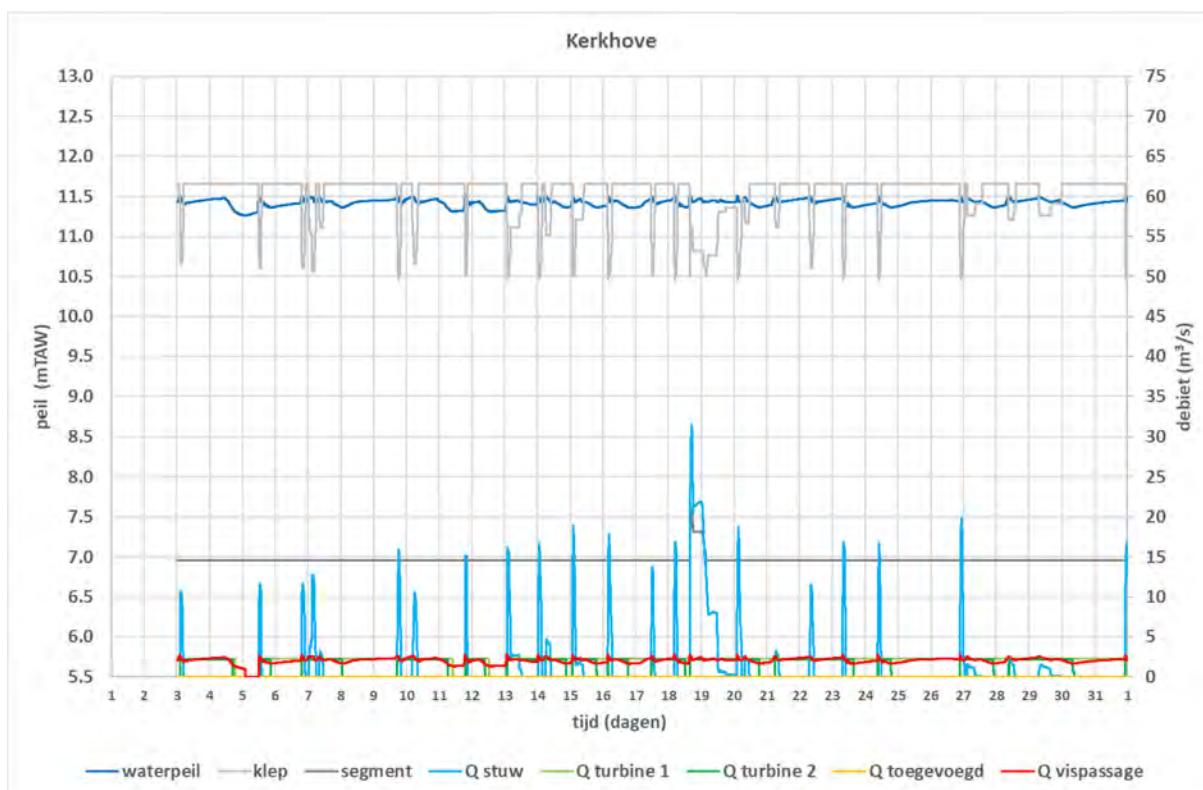
Figuur 168 – Juli 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



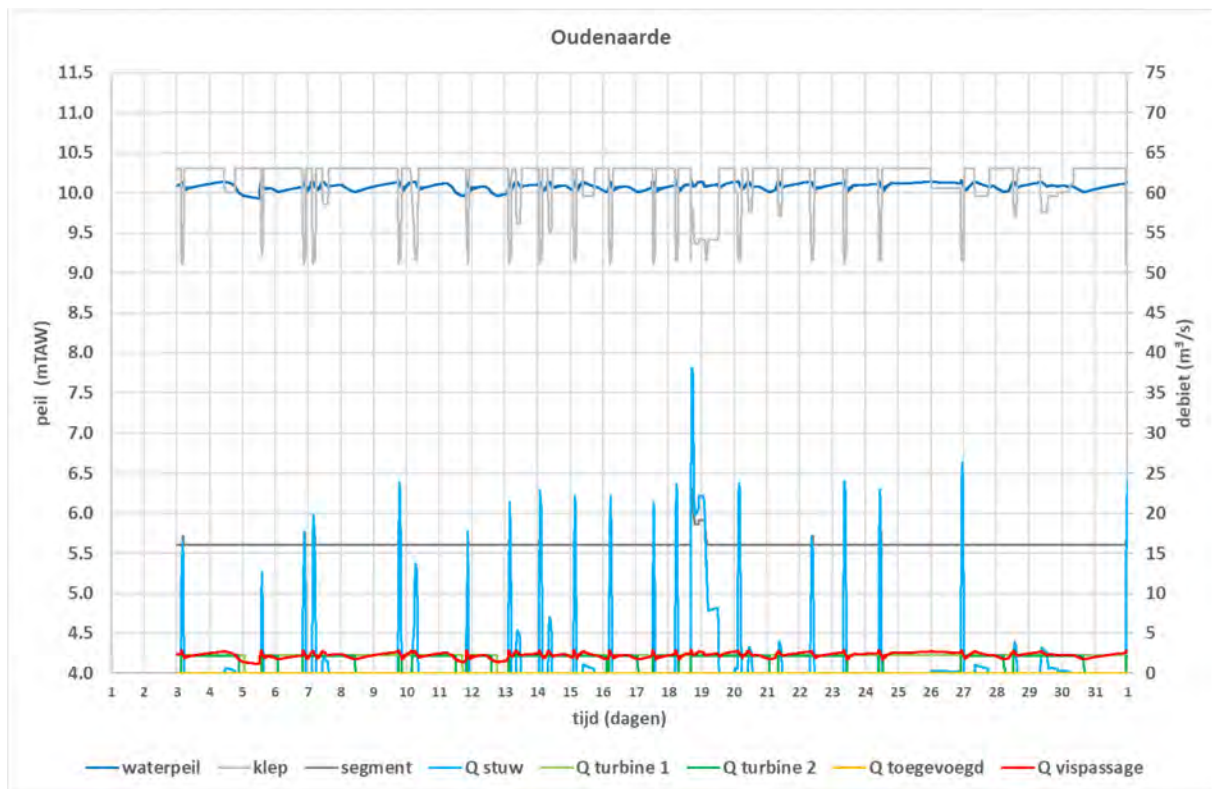
Figuur 169 – Juli 2019 – Asper (reeks 1)



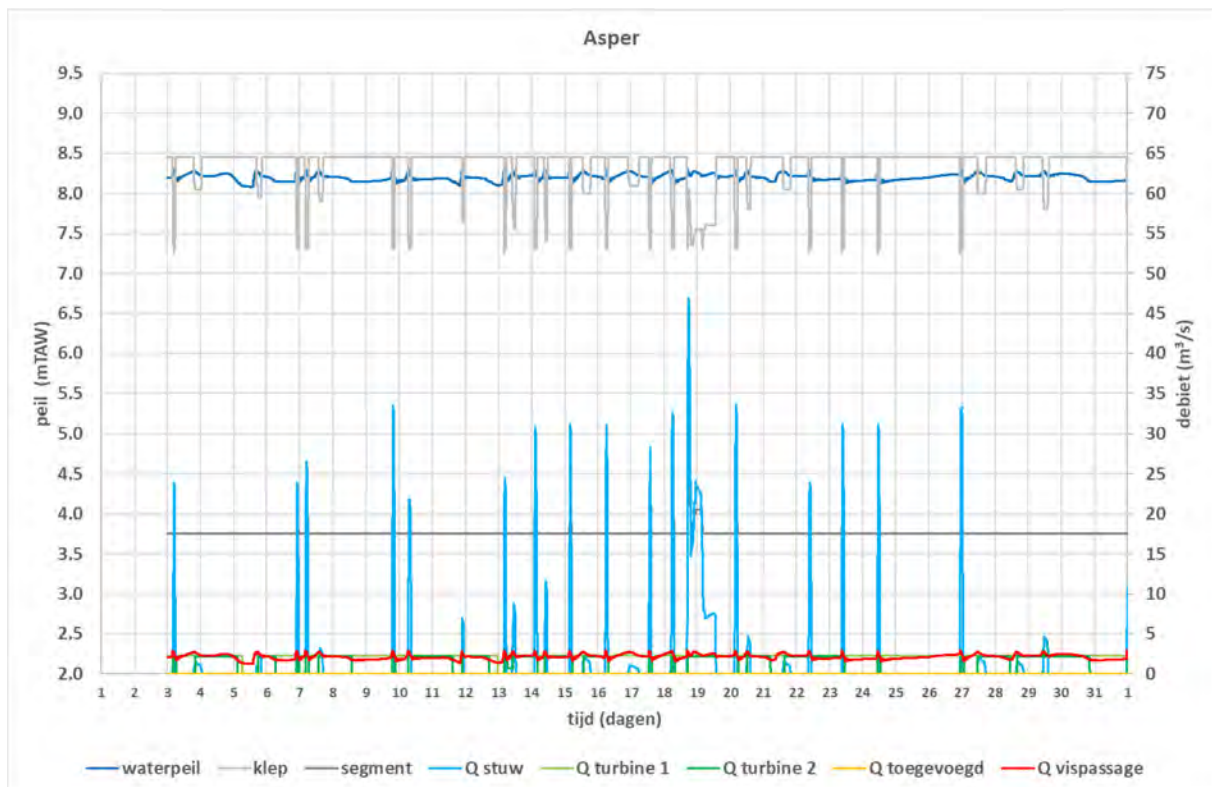
Figuur 170 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 1)



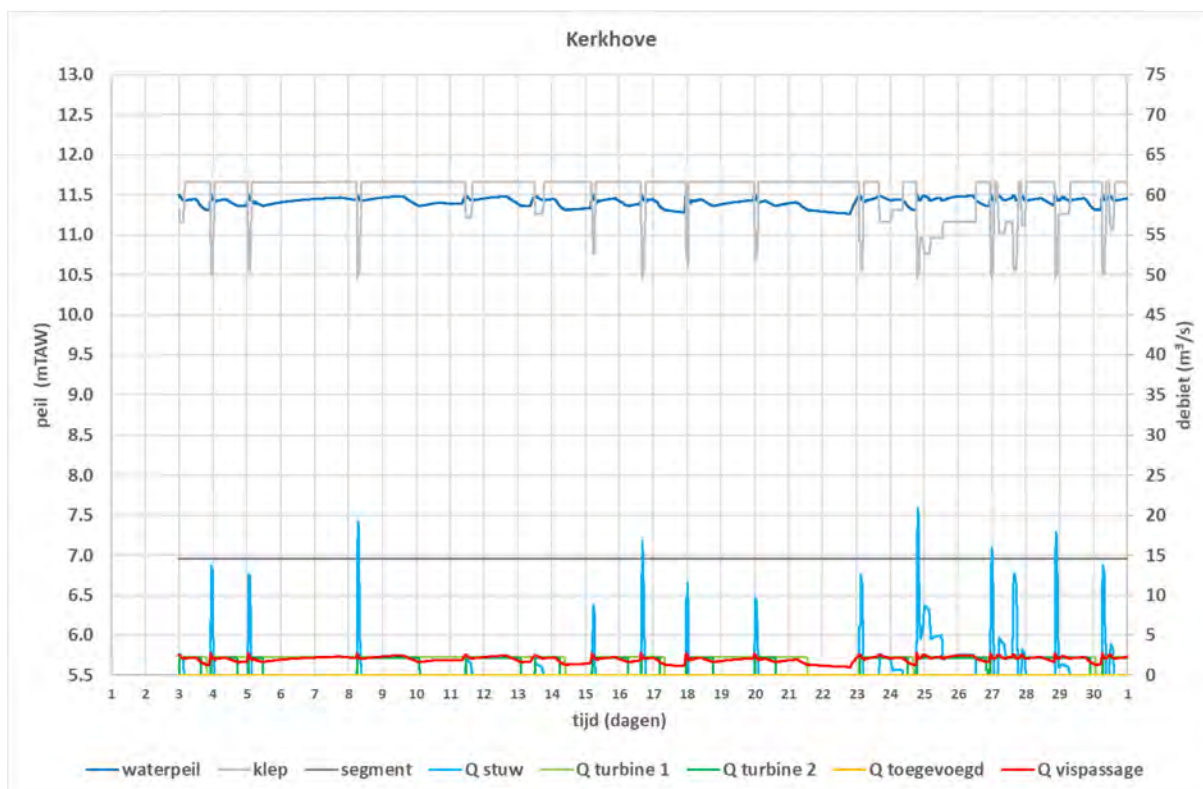
Figuur 171 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



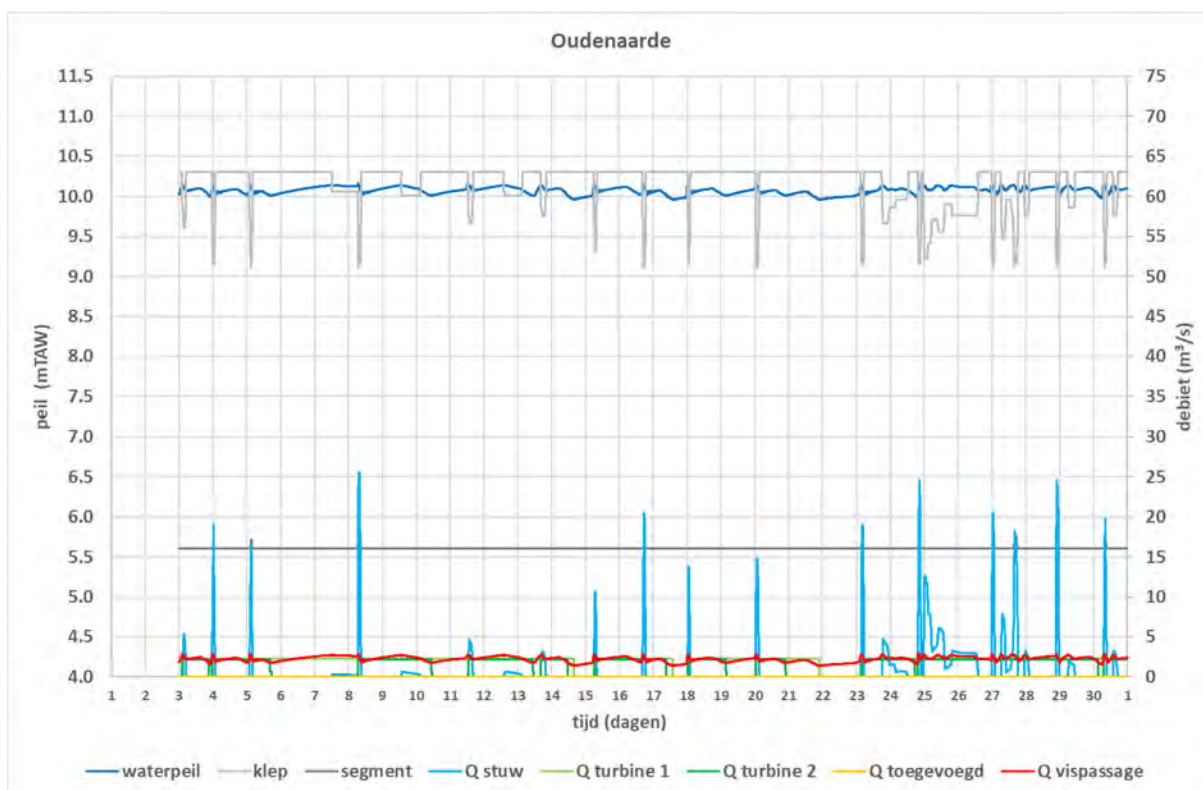
Figuur 172 – Augustus 2019 – Asper (reeks 1)



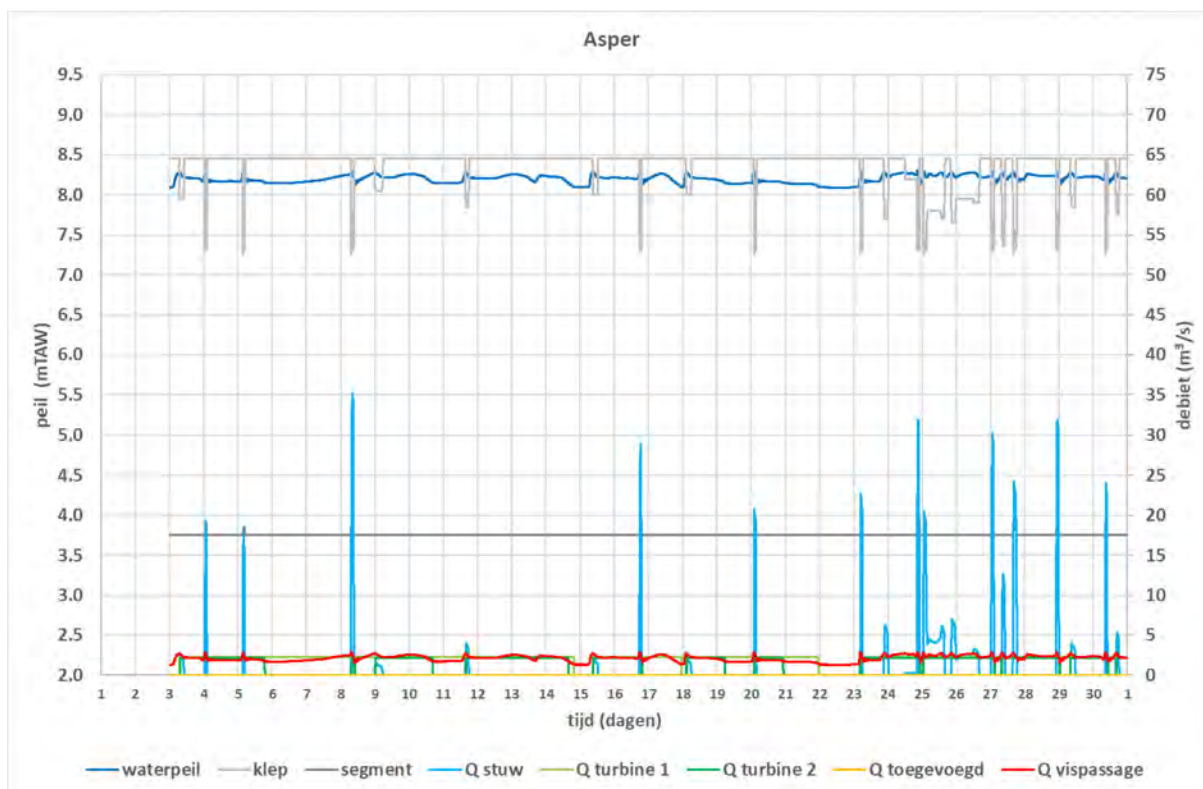
Figuur 173 – September 2019 – Kerkhove (reeks 1)



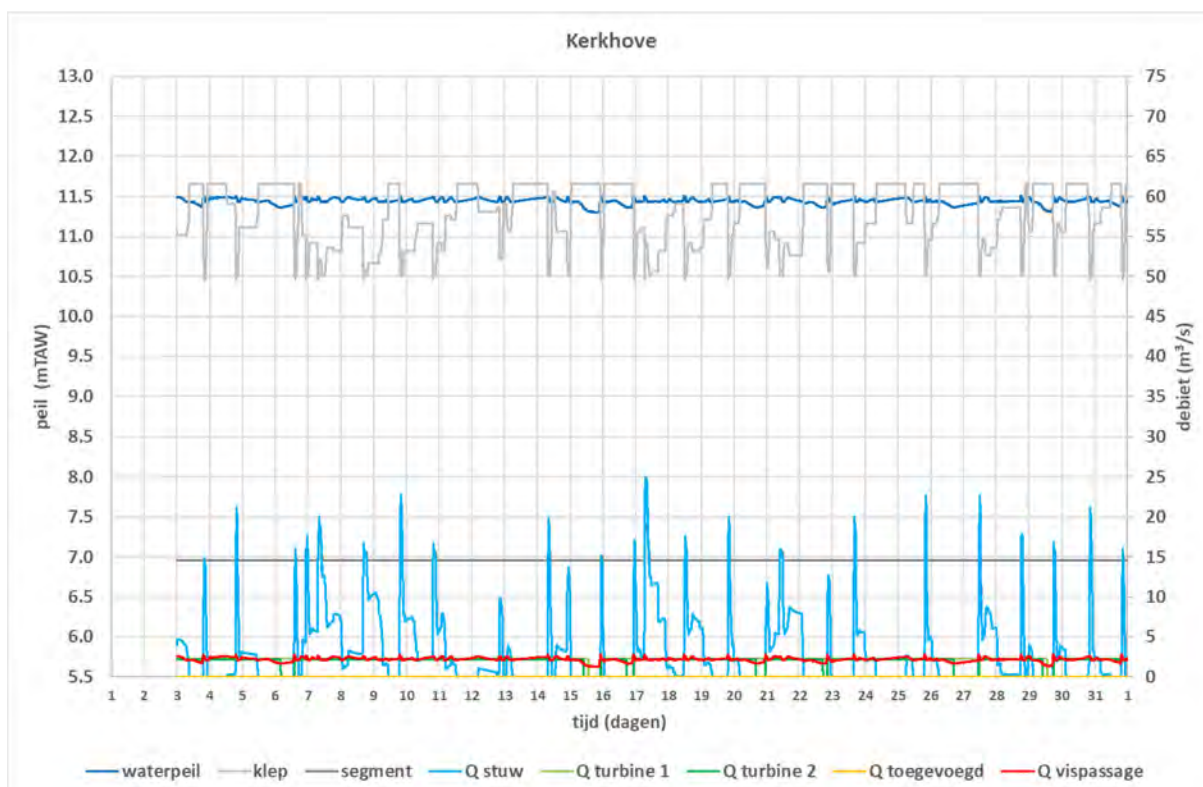
Figuur 174 – September 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



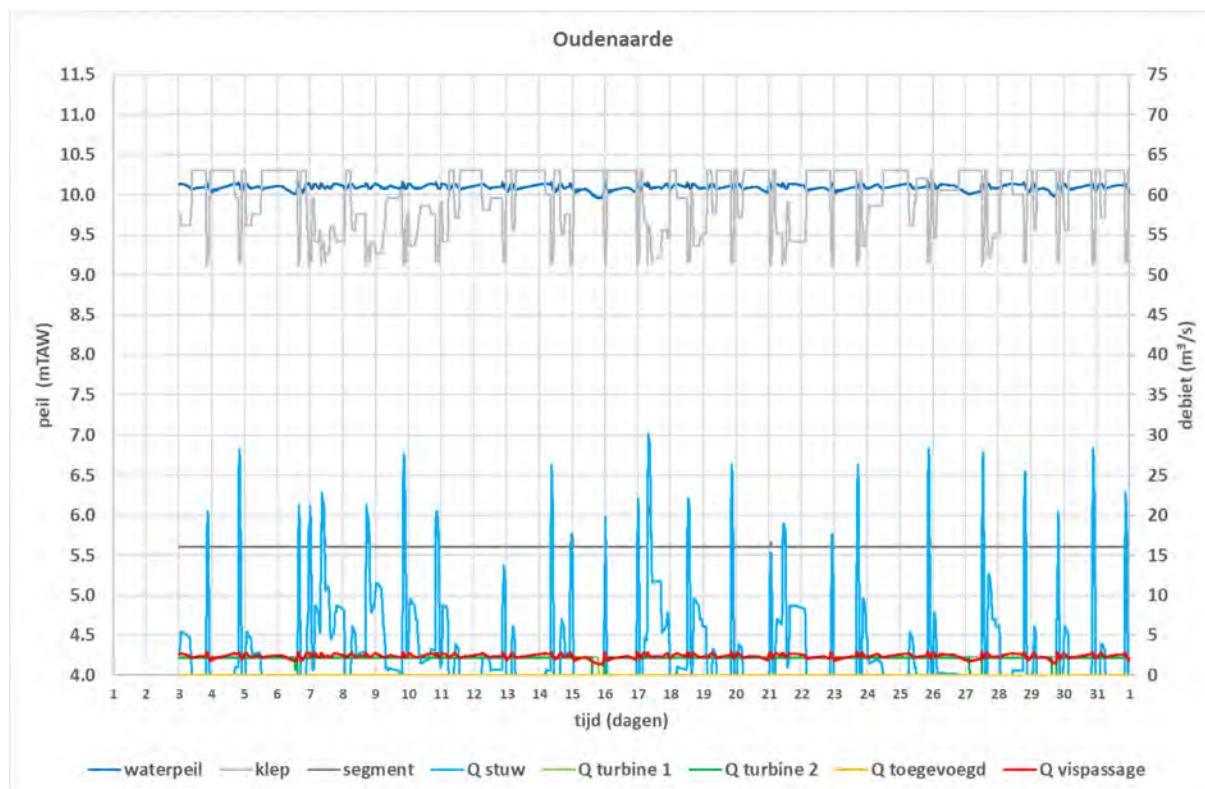
Figuur 175 – September 2019 – Asper (reeks 1)



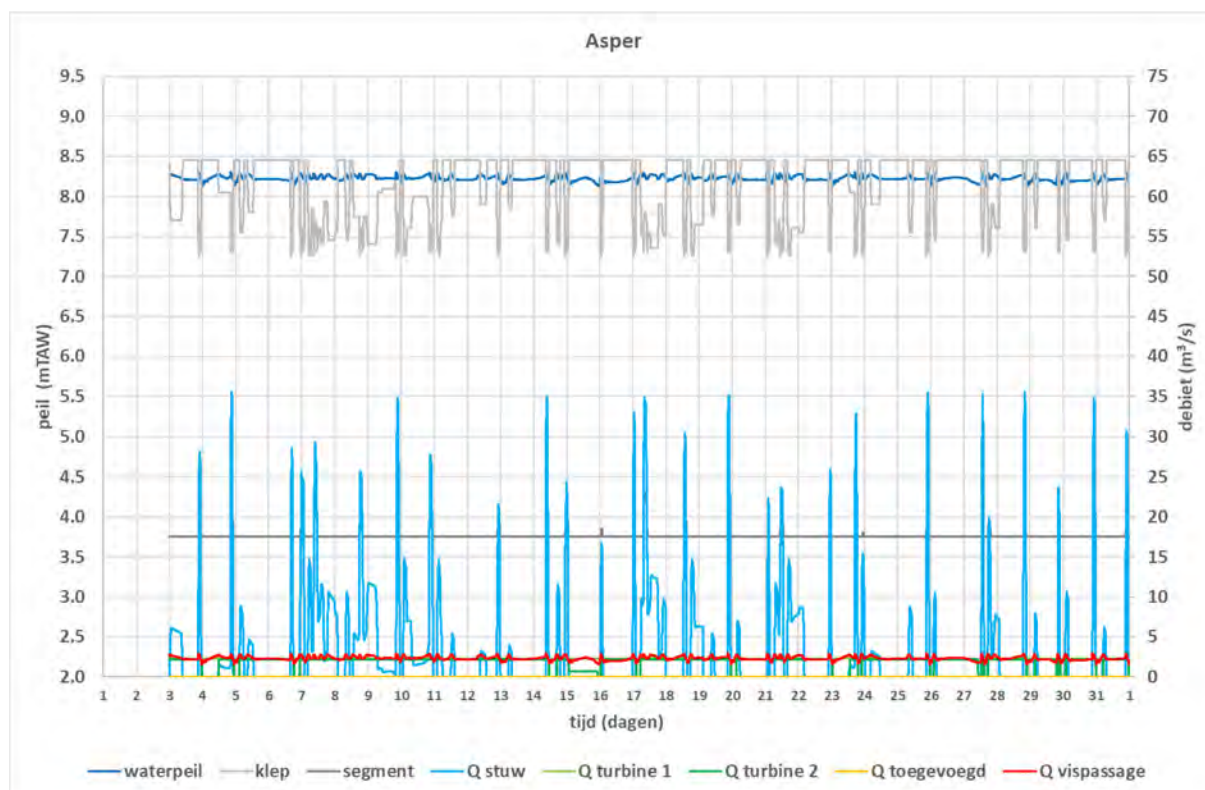
Figuur 176 – Oktober 2019 – Kerkhove (reeks 1)



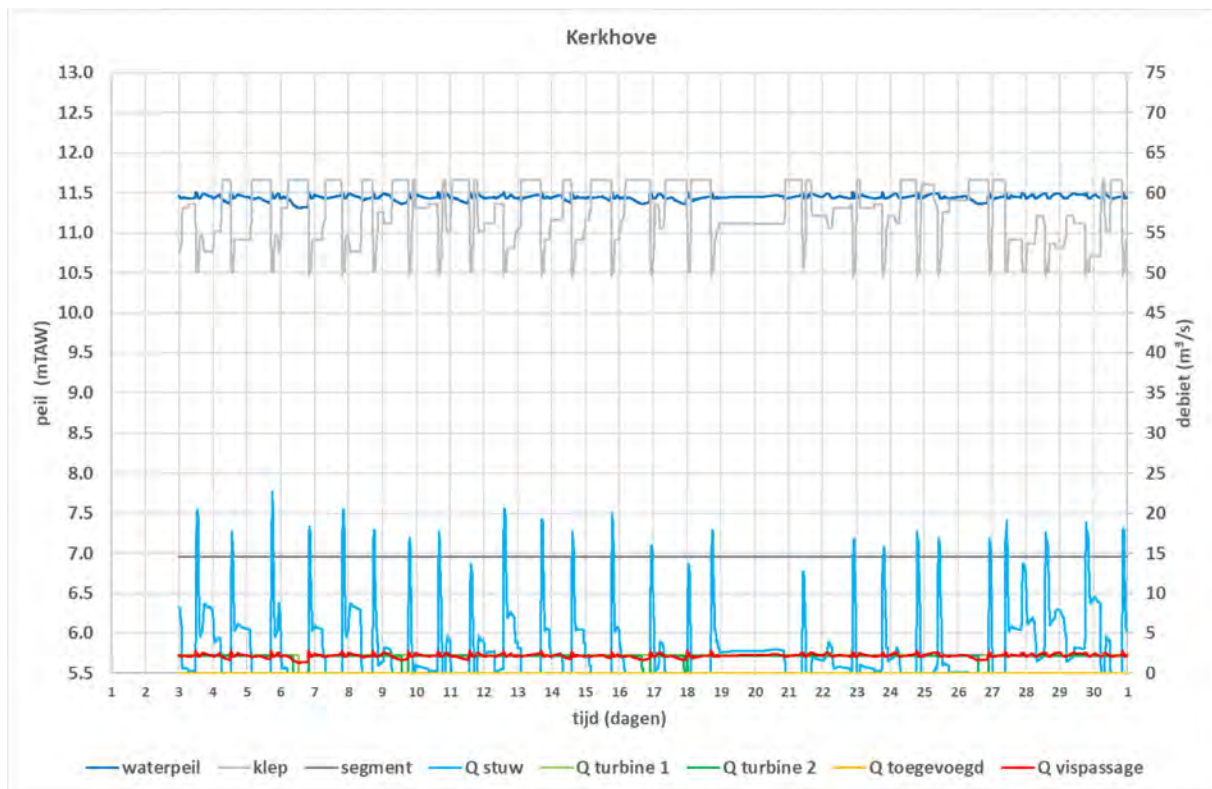
Figuur 177 – Oktober 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



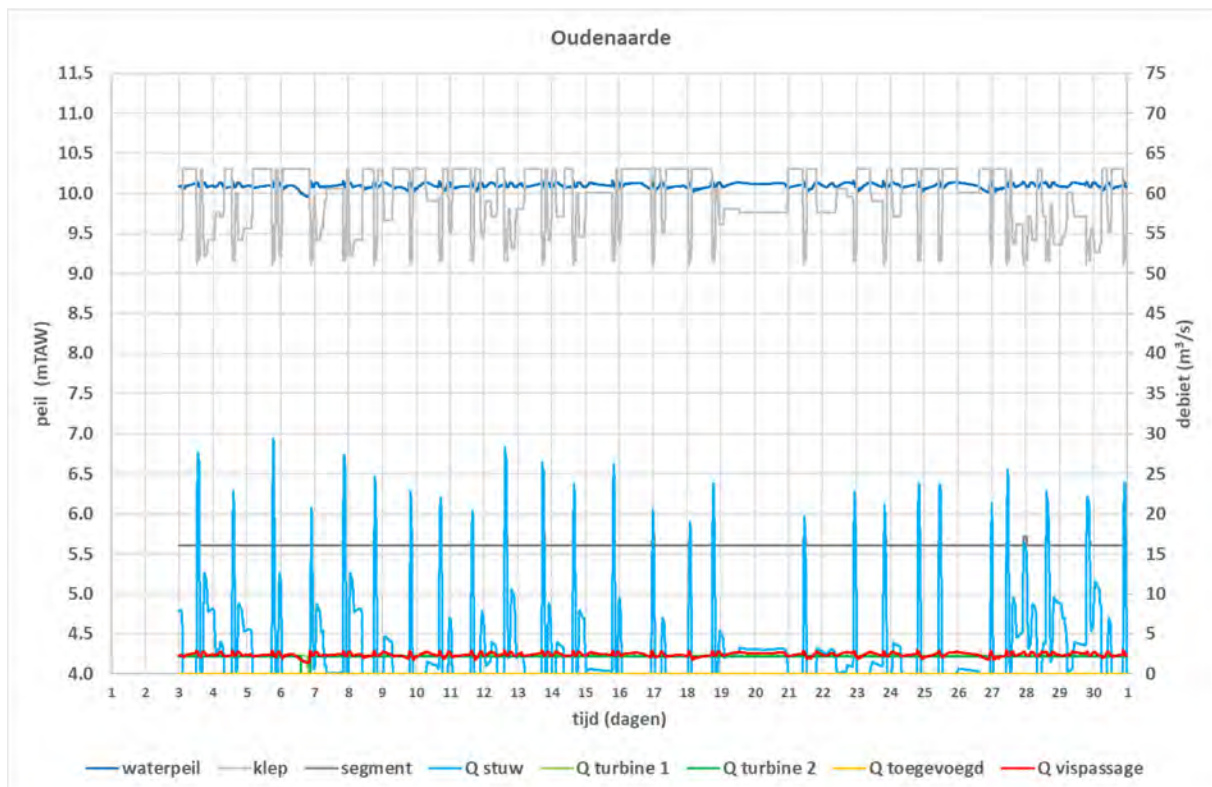
Figuur 178 – Oktober 2019 – Asper (reeks 1)



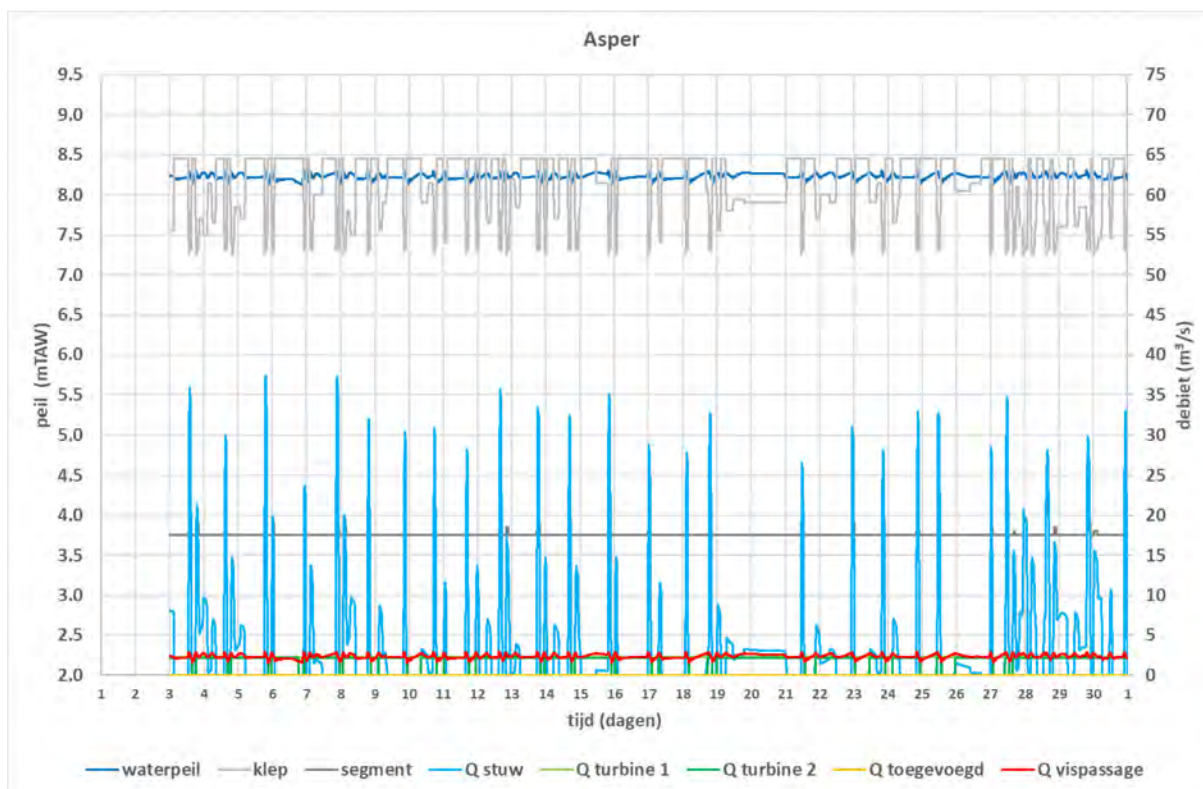
Figuur 179 – November 2019 – Kerkhove (reeks 1)



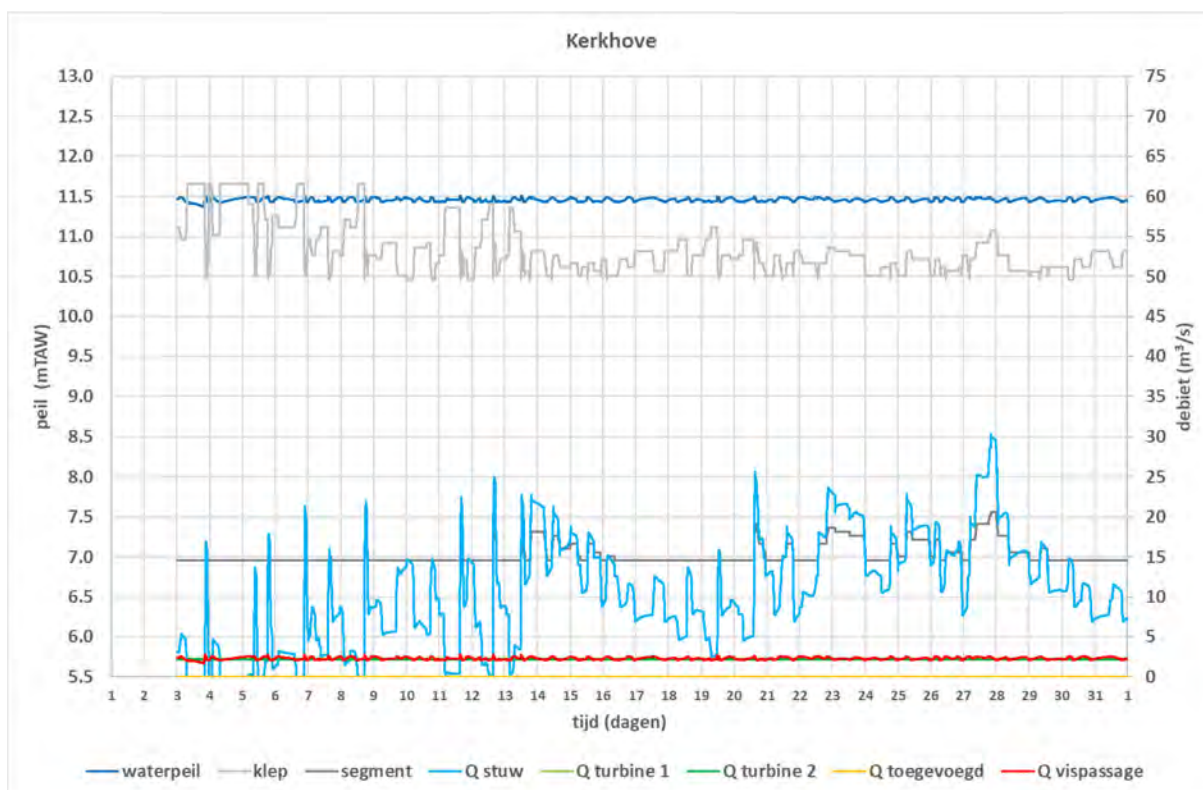
Figuur 180 – November 2019 – Oudenaarde (reeks 1)



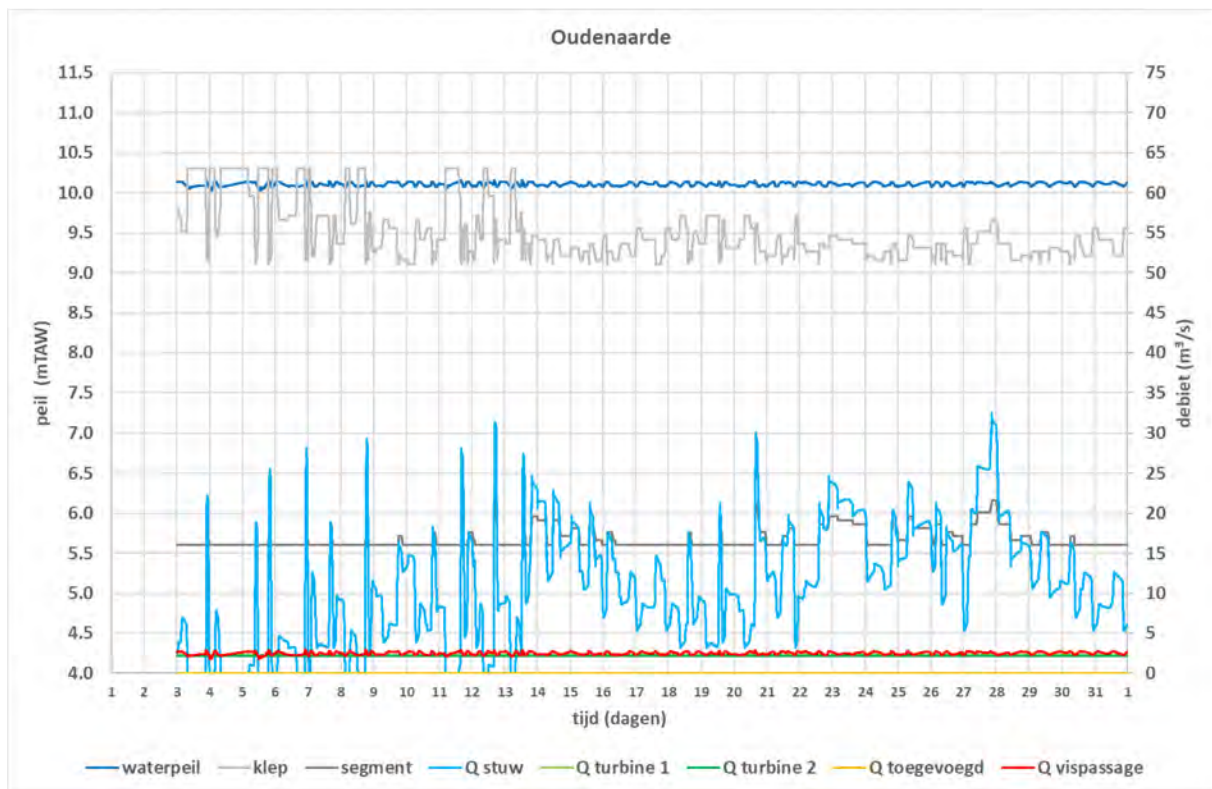
Figuur 181 – November 2019 – Asper (reeks 1)



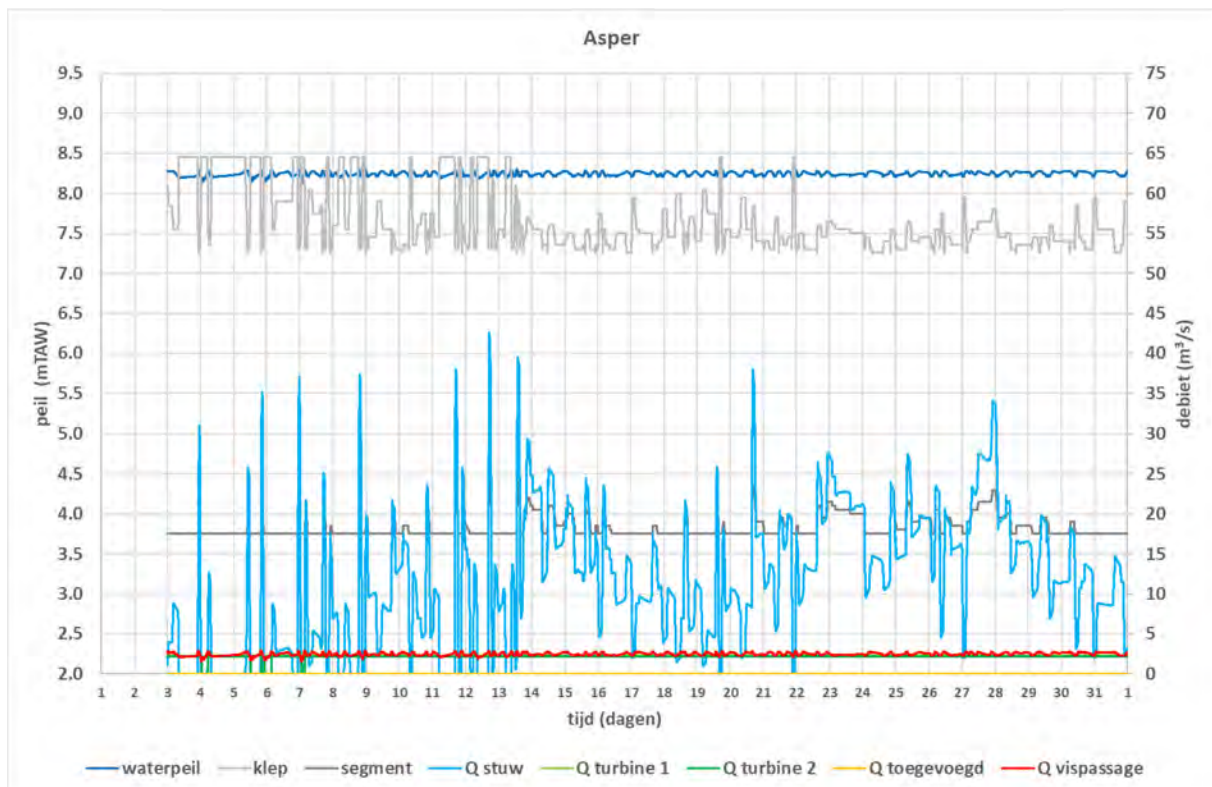
Figuur 182 – December 2019 – Kerkhove (reeks 1)



Figuur 183 – December 2019 – Oudenaarde (reeks 1)

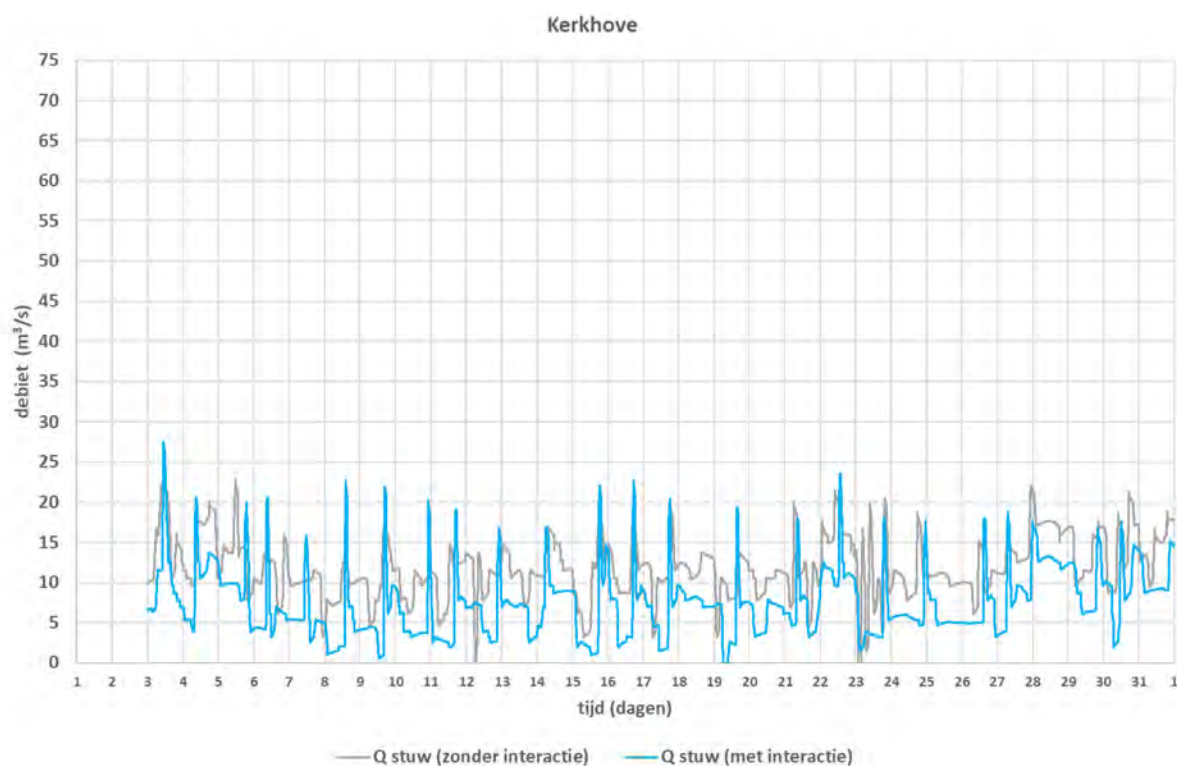


Figuur 184 – December 2019 – Asper (reeks 1)

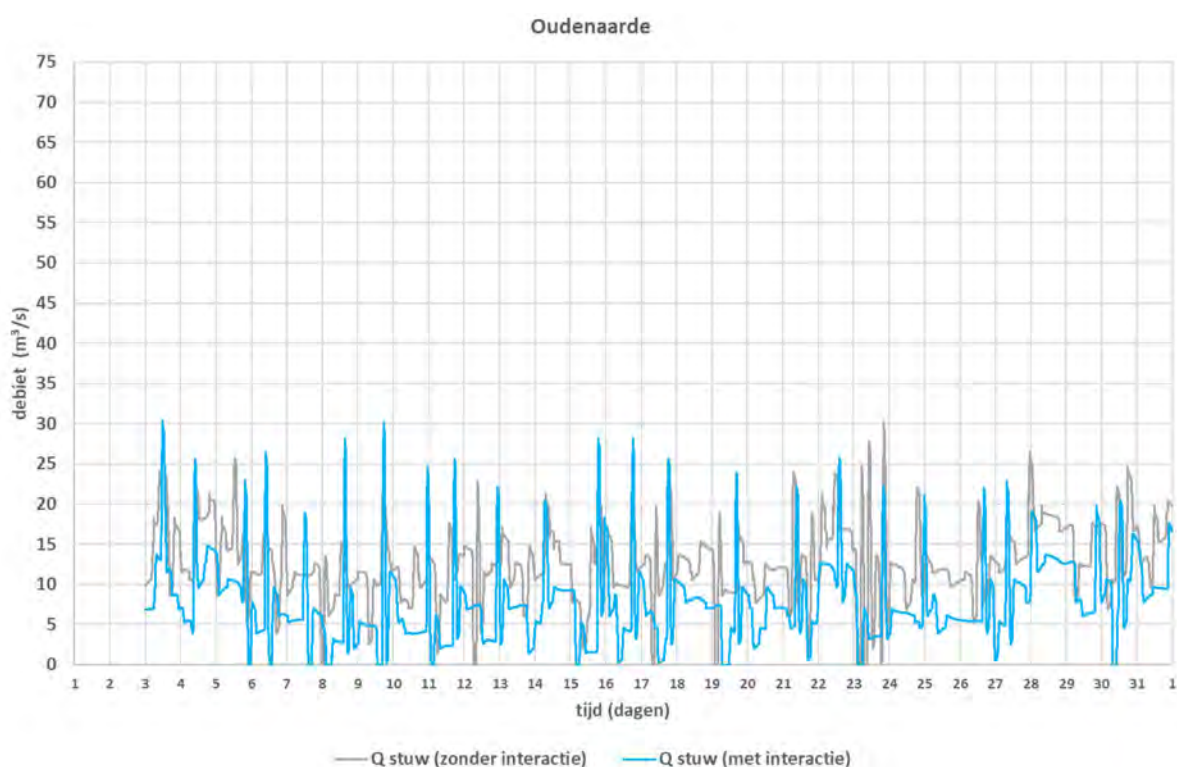


Bijlage 2 Interactie – figuren reeks 2

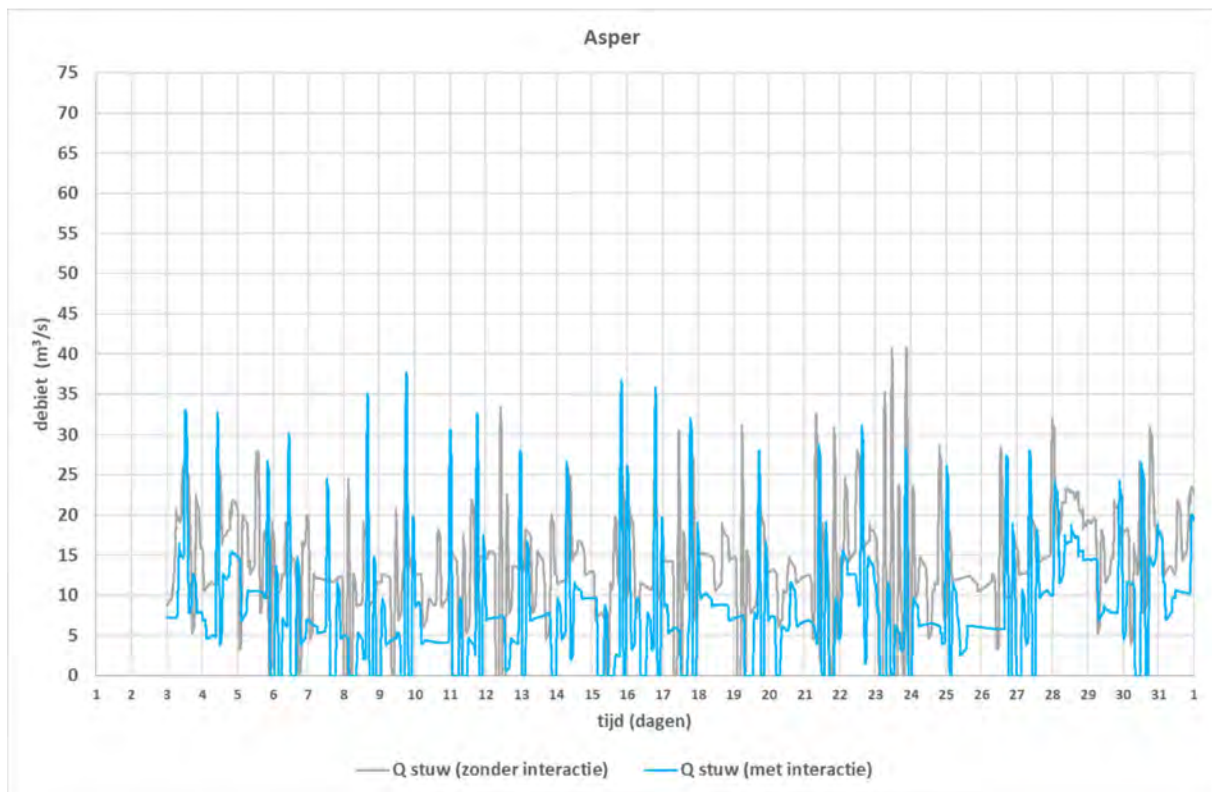
Figuur 185 – Januari 2019 – Kerkhove (reeks 2)



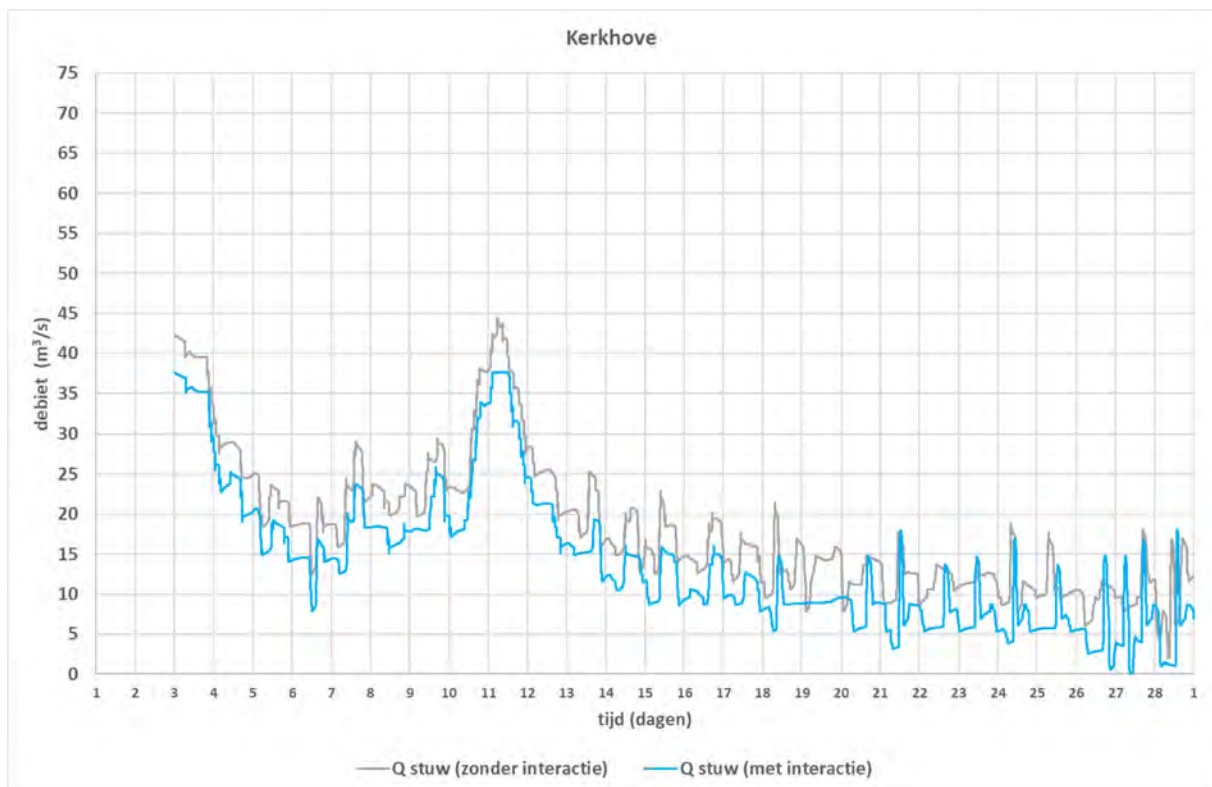
Figuur 186 – Januari 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



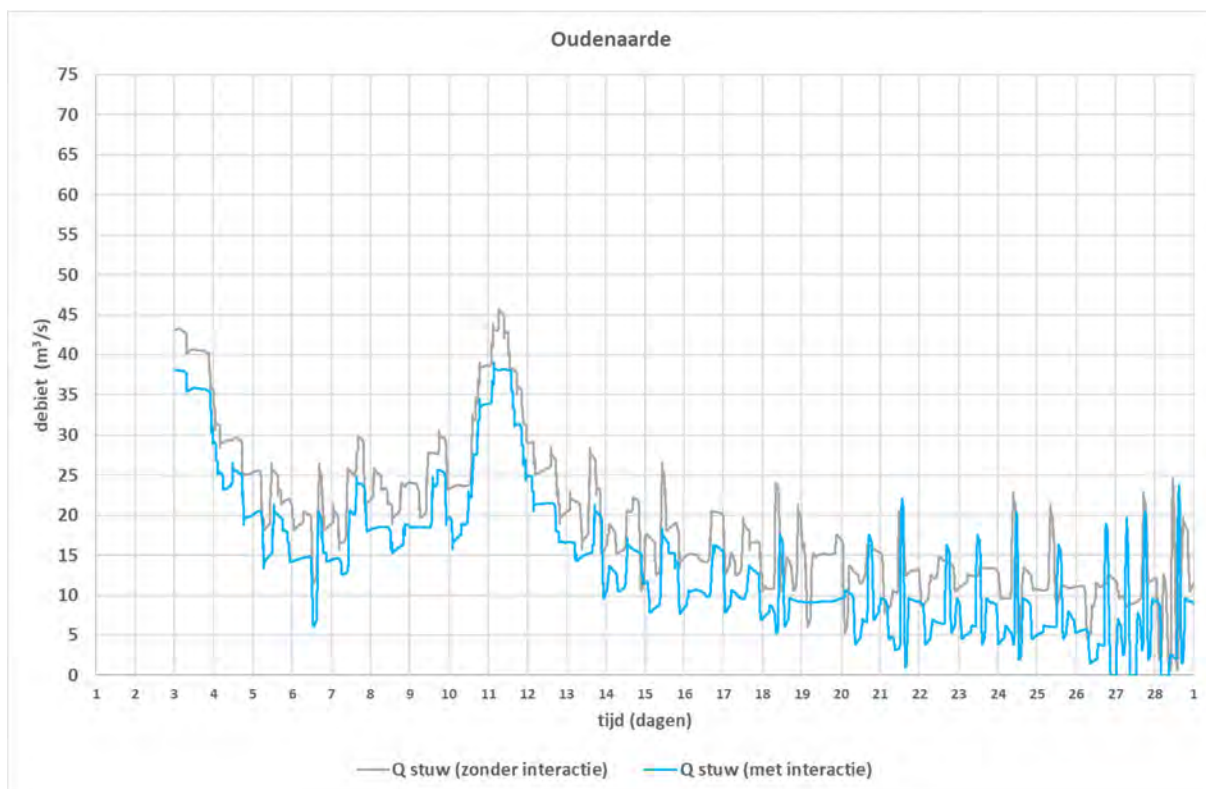
Figuur 187 – Januari 2019 – Asper (reeks 2)



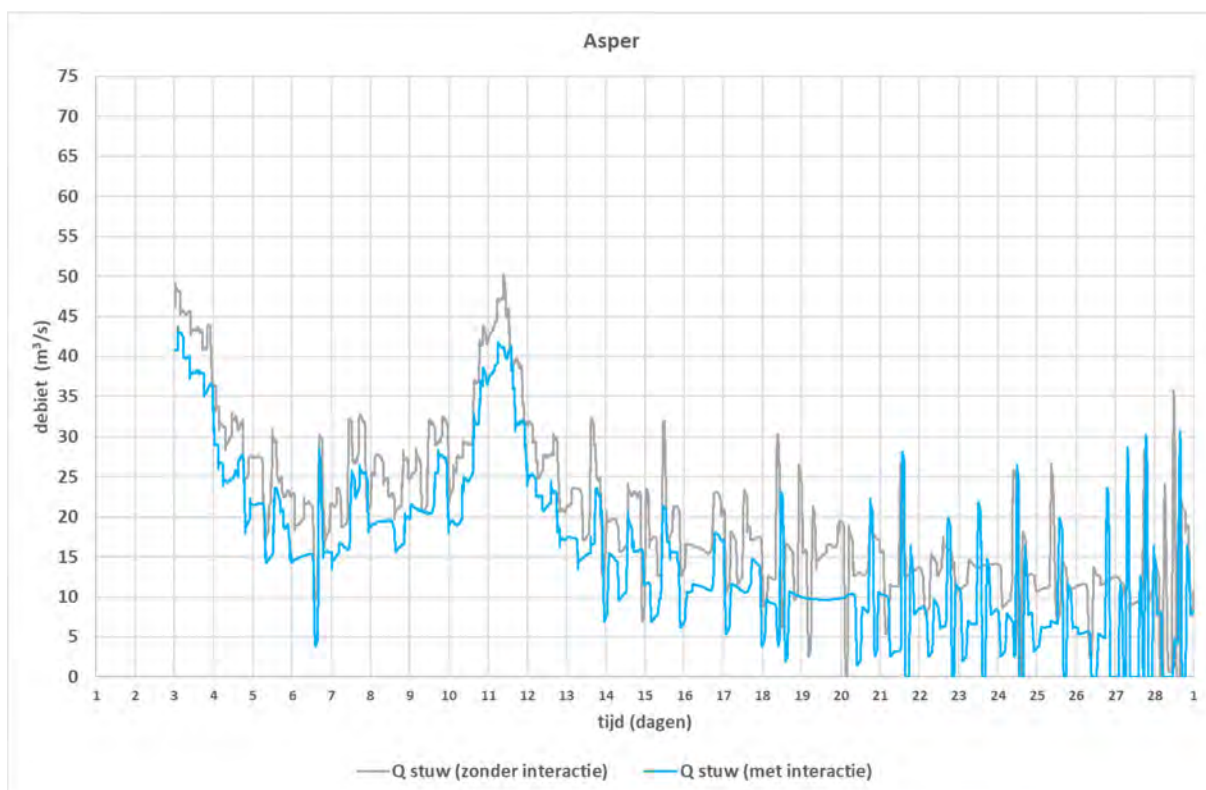
Figuur 188 – Februari 2019 – Kerkhove (reeks 2)



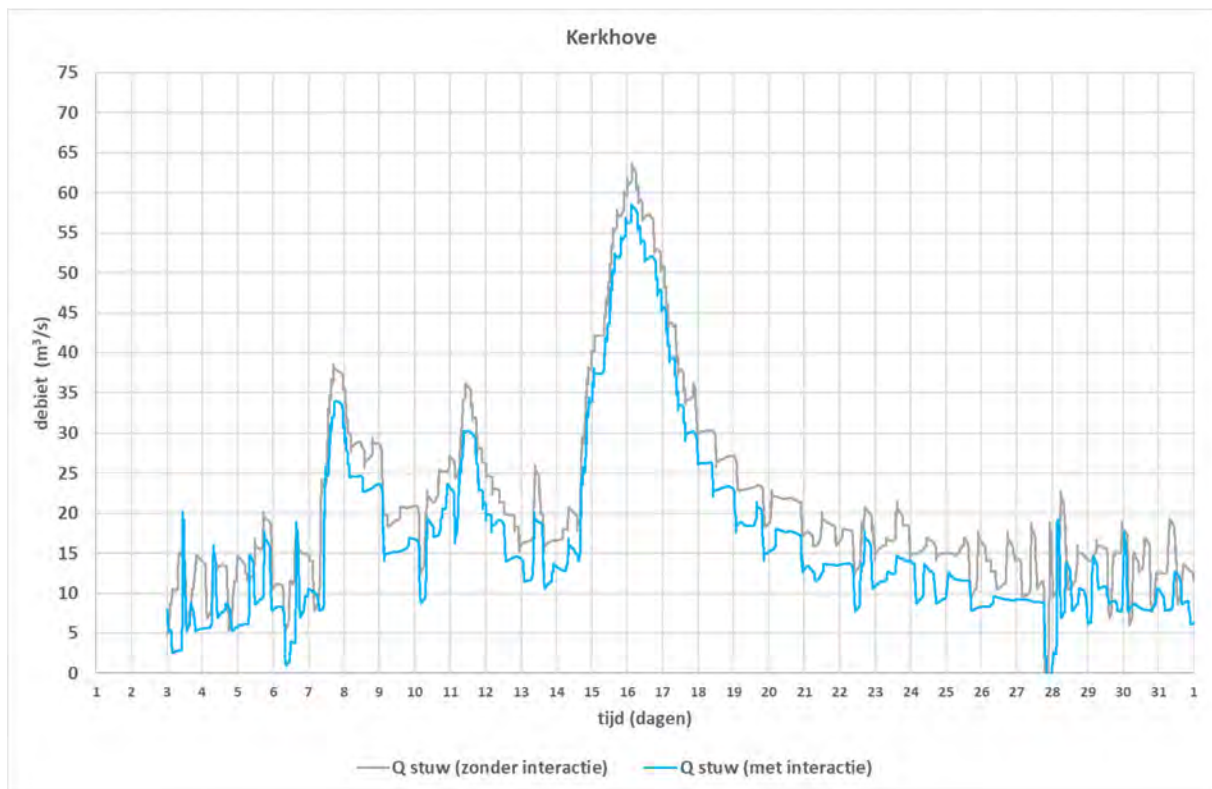
Figuur 189 – Februari 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



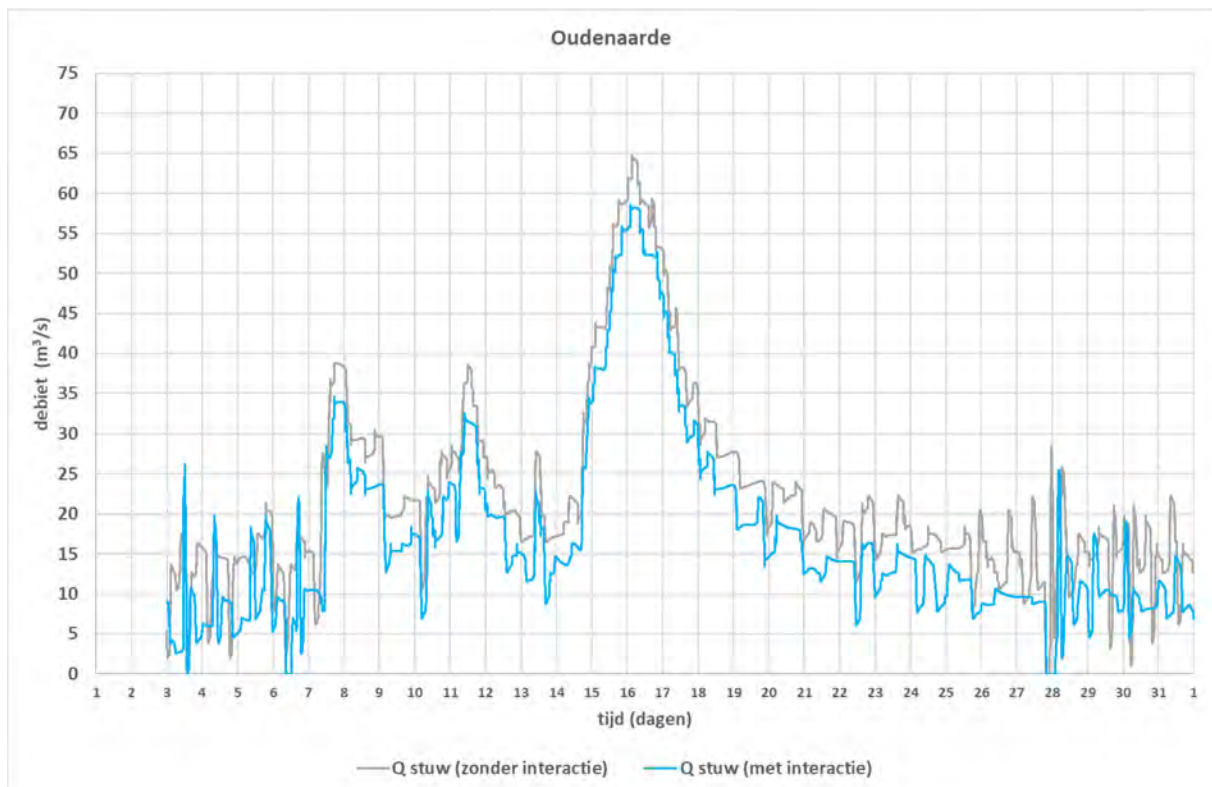
Figuur 190 – Februari 2019 – Asper (reeks 2)



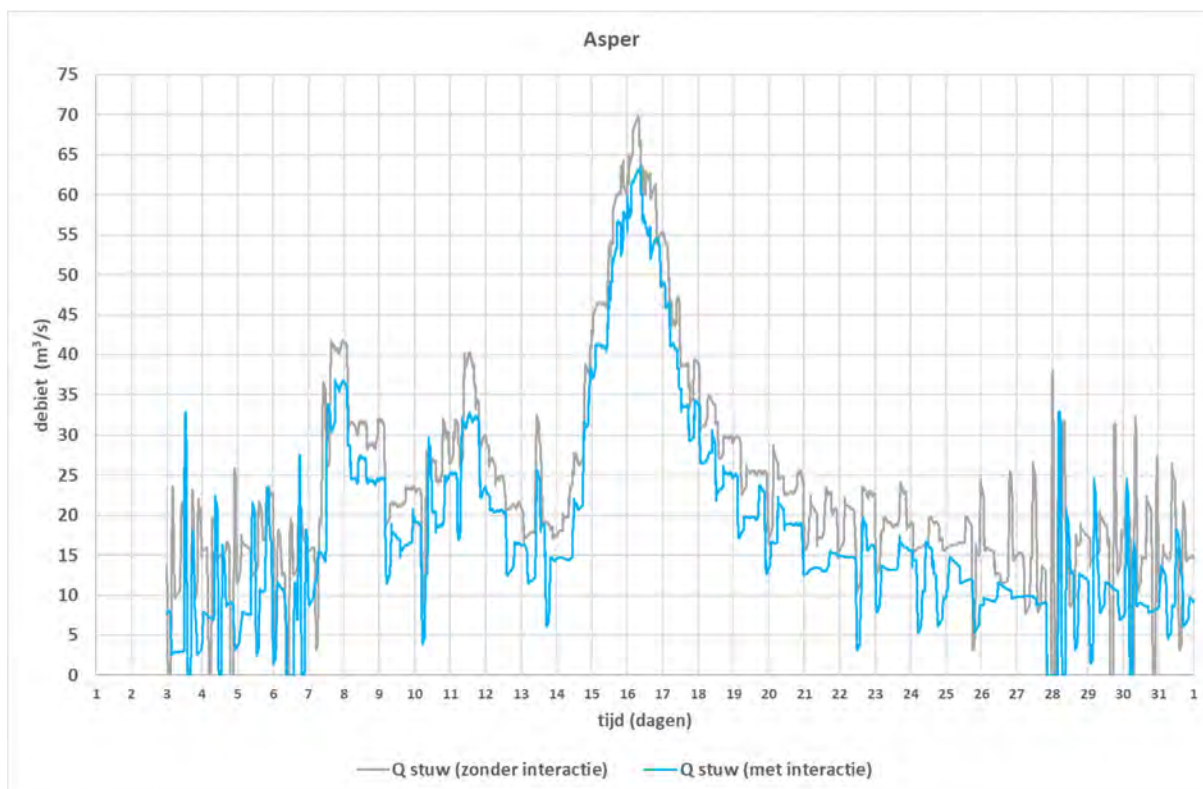
Figuur 191 – Maart 2019 – Kerkhove (reeks 2)



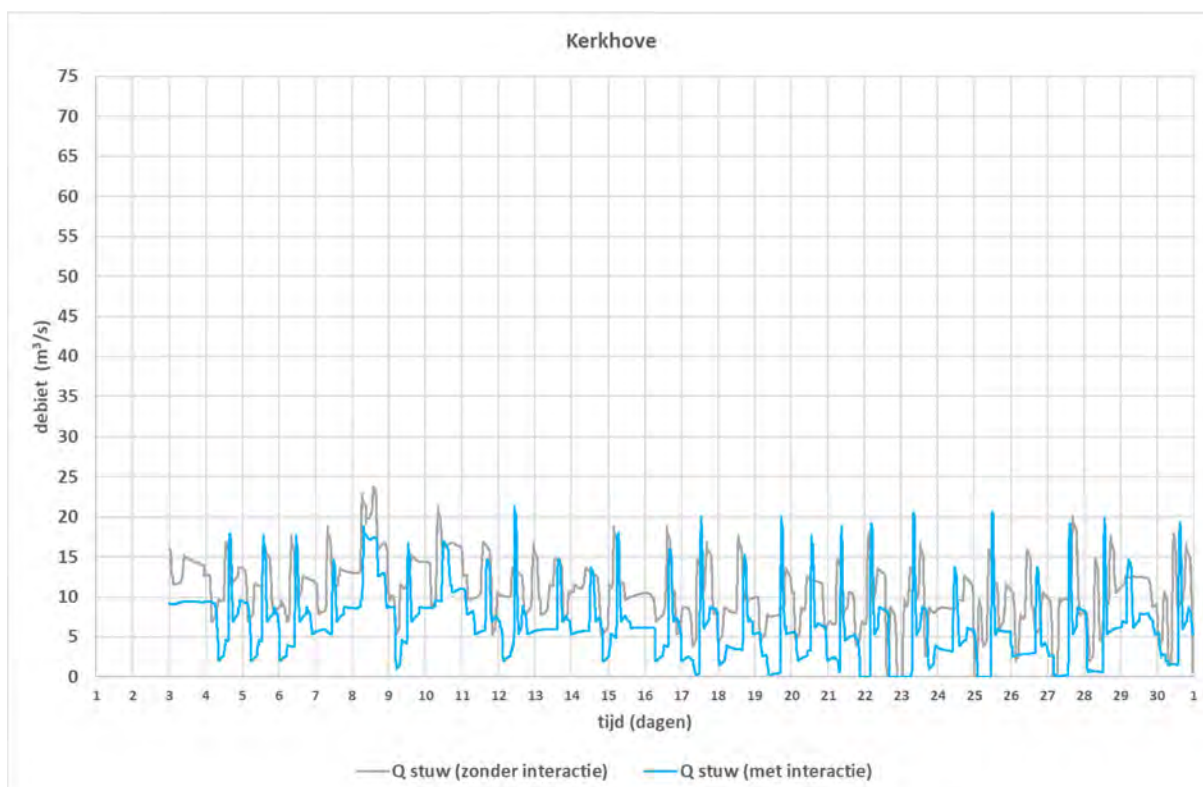
Figuur 192 – Maart 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



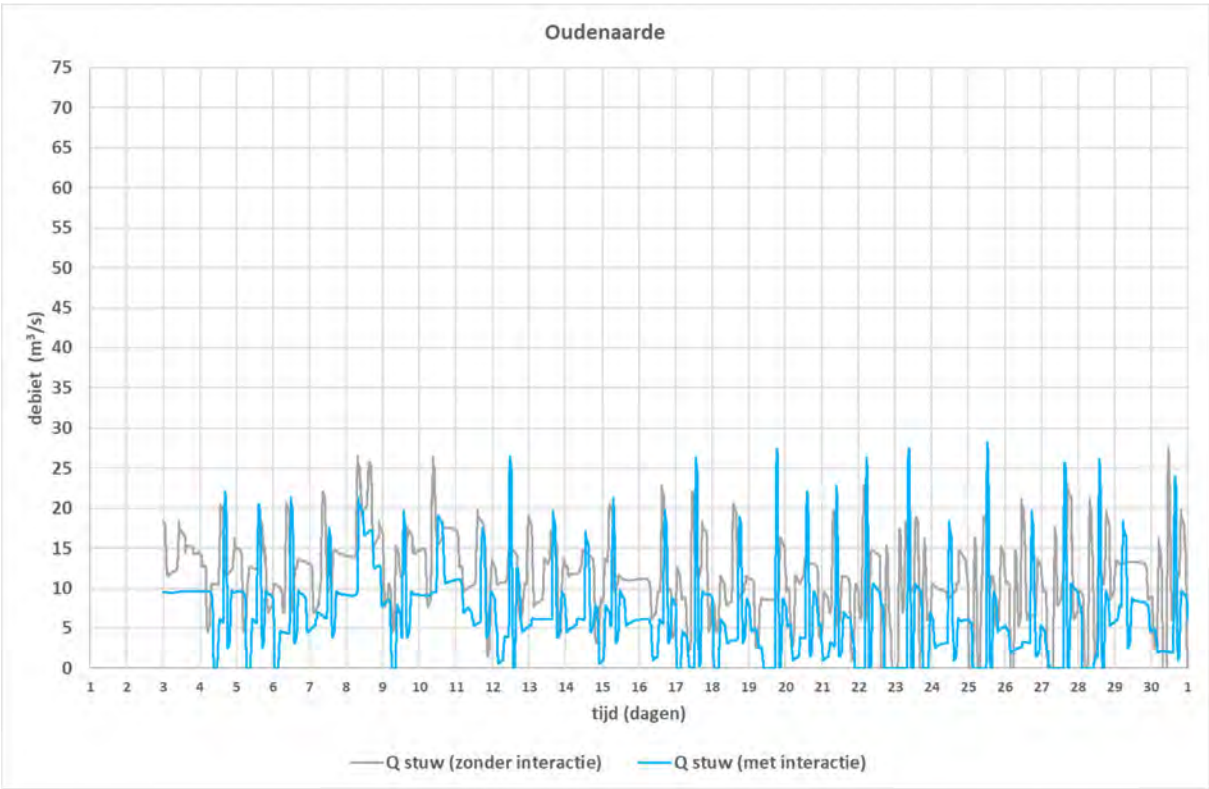
Figuur 193 – Maart 2019 – Asper (reeks 2)



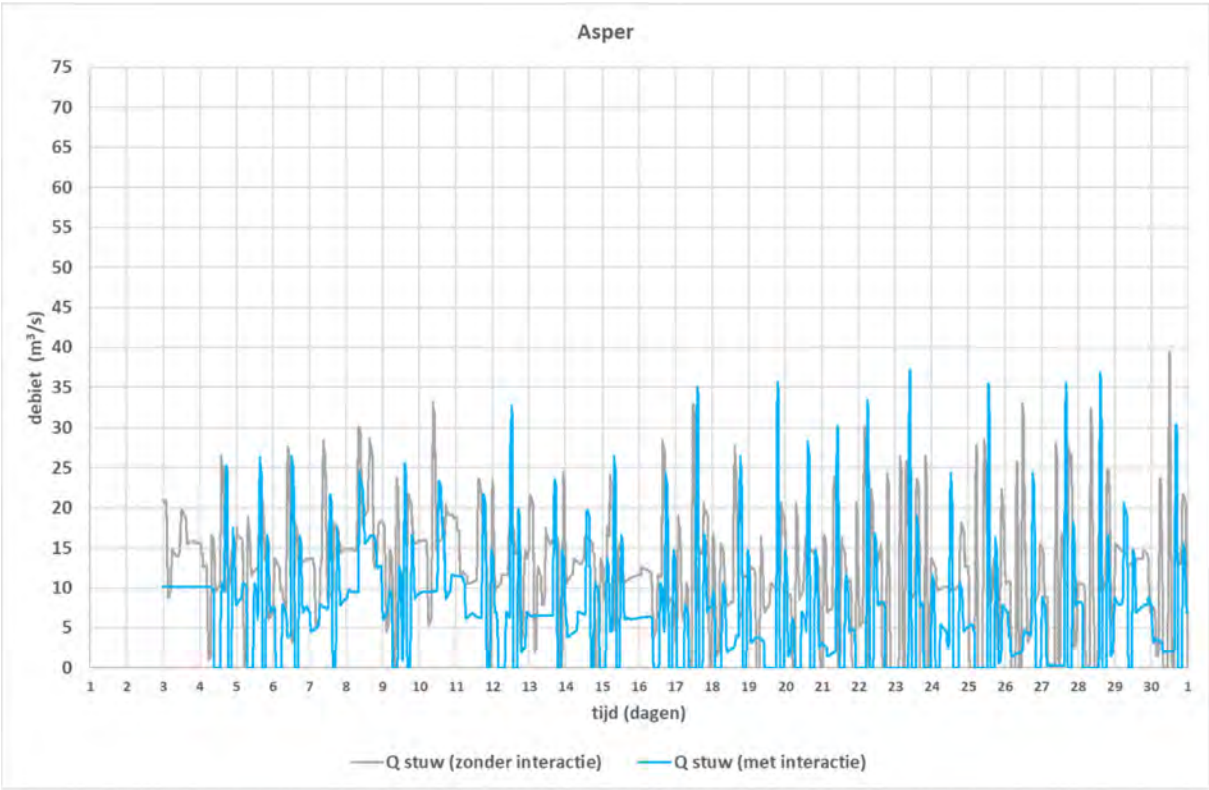
Figuur 194 – April 2019 – Kerkhove (reeks 2)



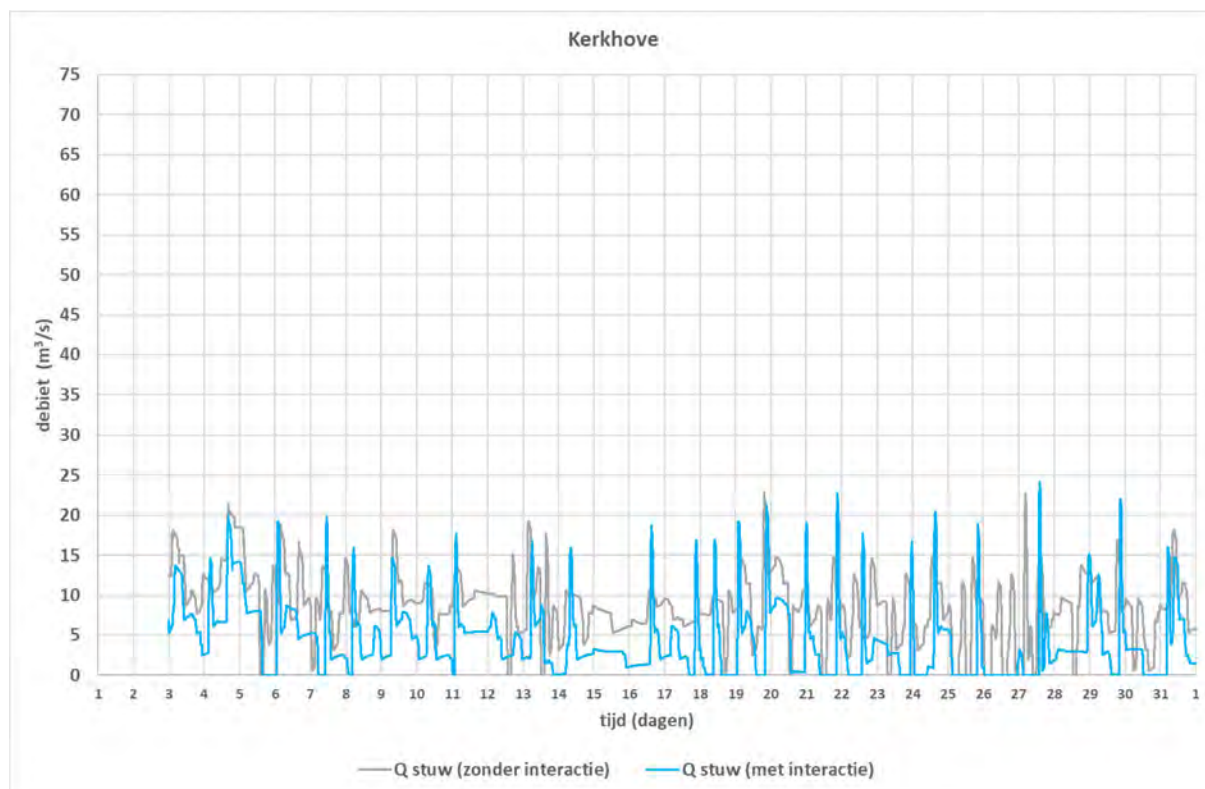
Figuur 195 – April 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



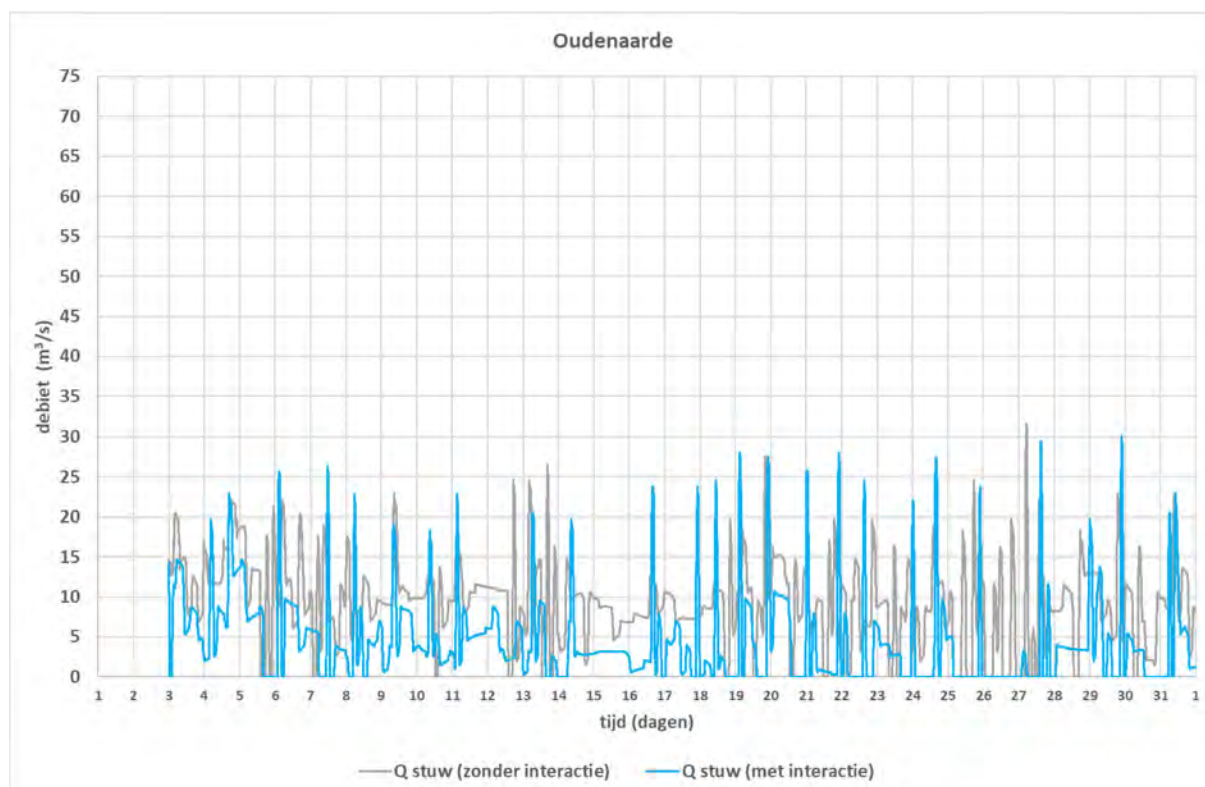
Figuur 196 – April 2019 – Asper (reeks 2)



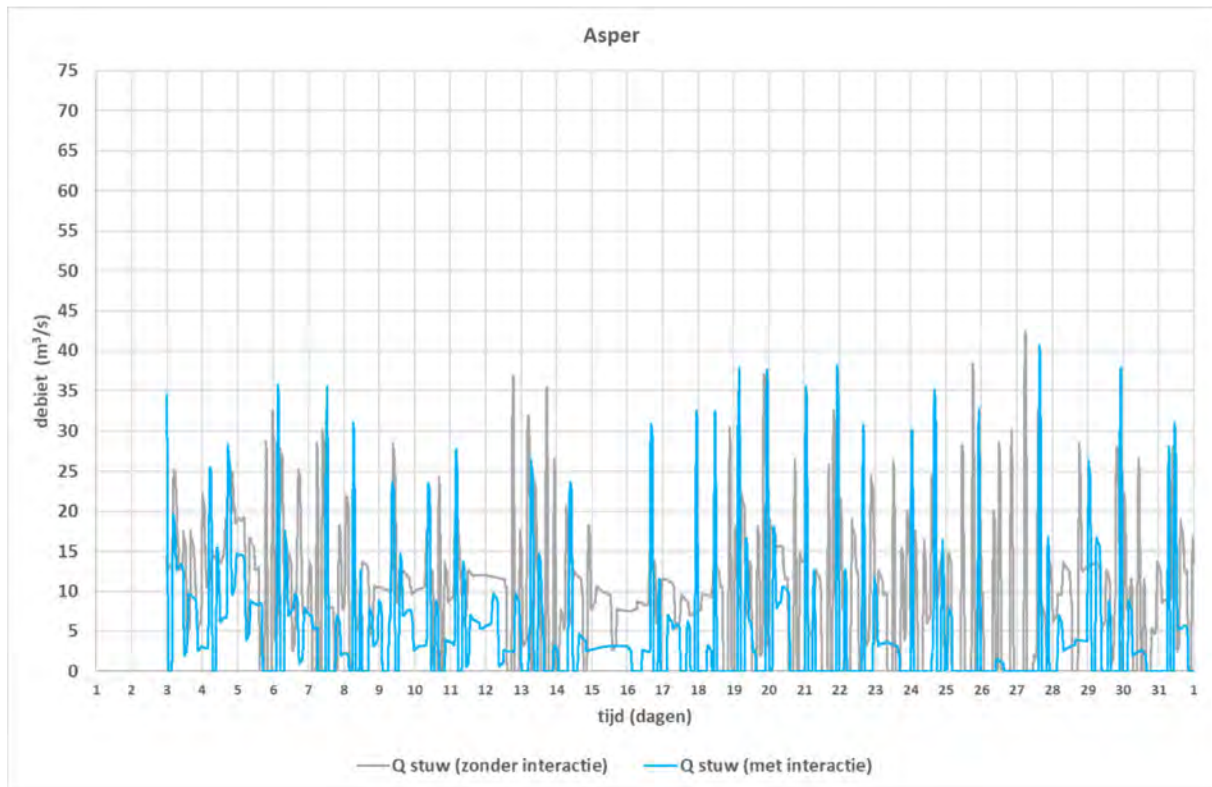
Figuur 197 – Mei 2019 – Kerkhove (reeks 2)



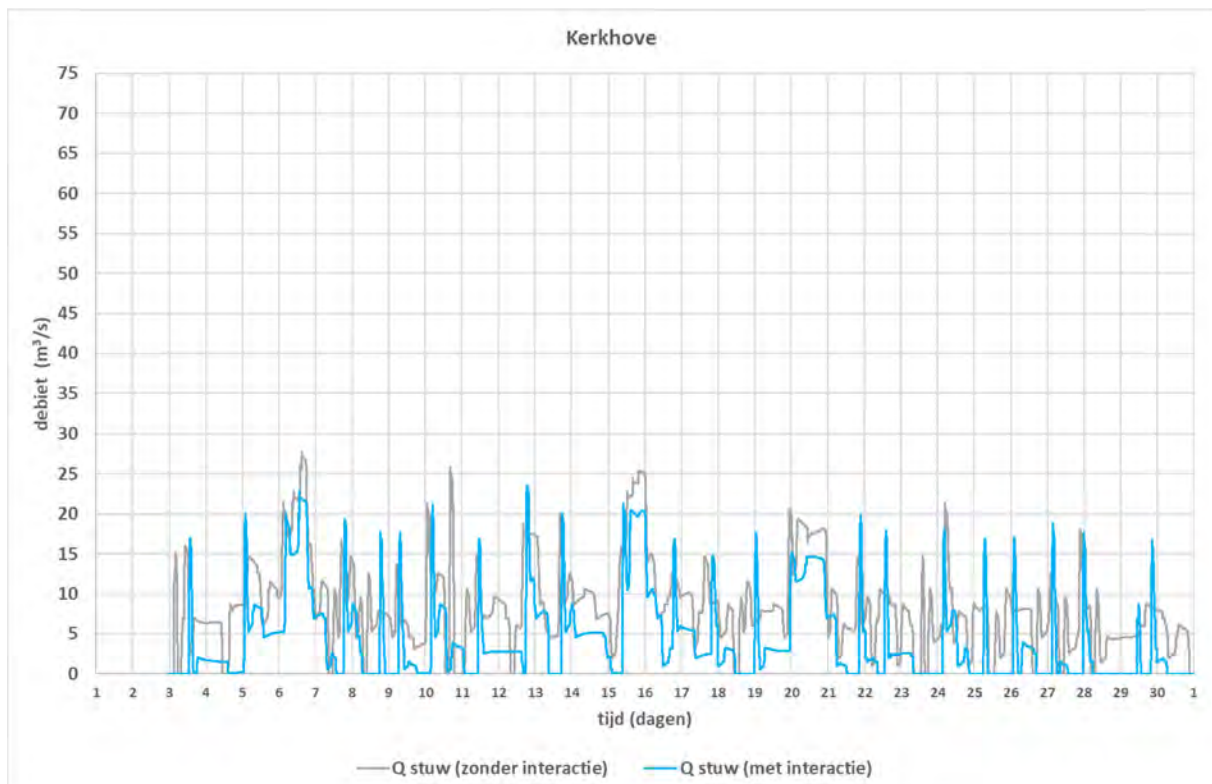
Figuur 198 – Mei 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



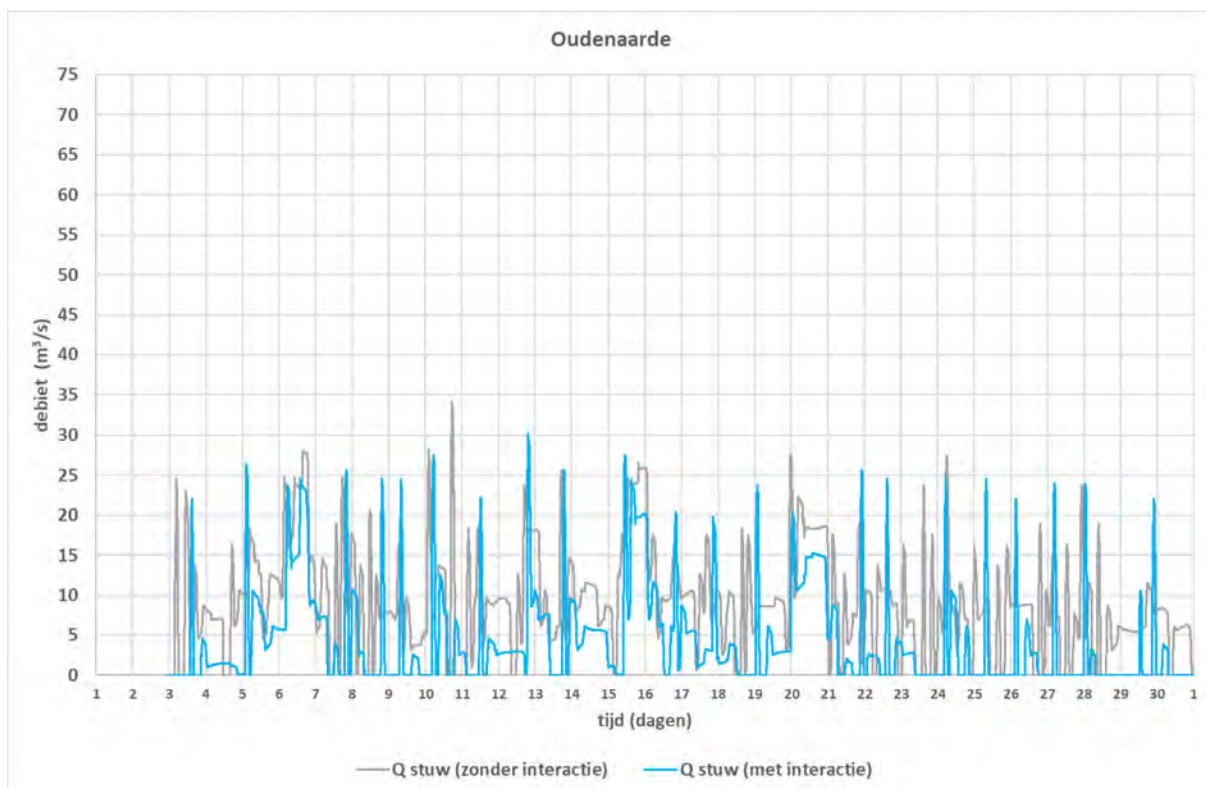
Figuur 199 – Mei 2019 – Asper (reeks 2)



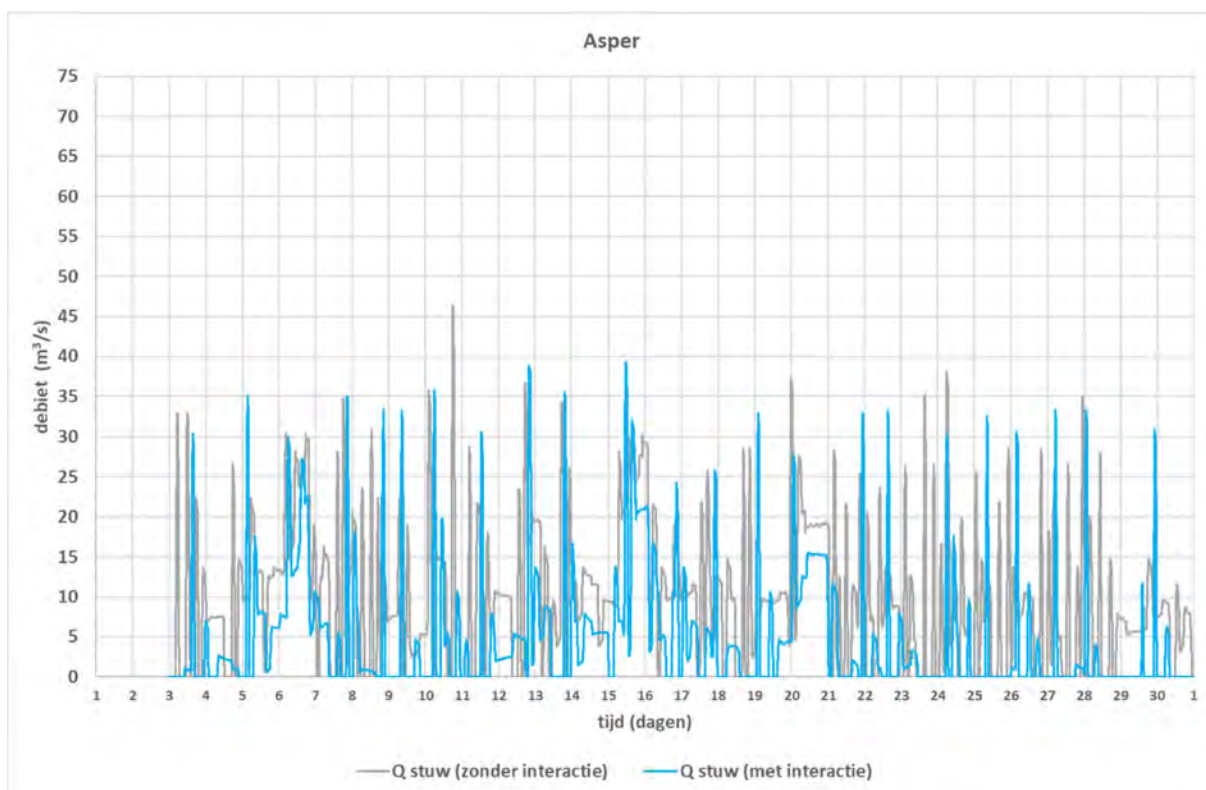
Figuur 200 – Juni 2019 – Kerkhove (reeks 2)



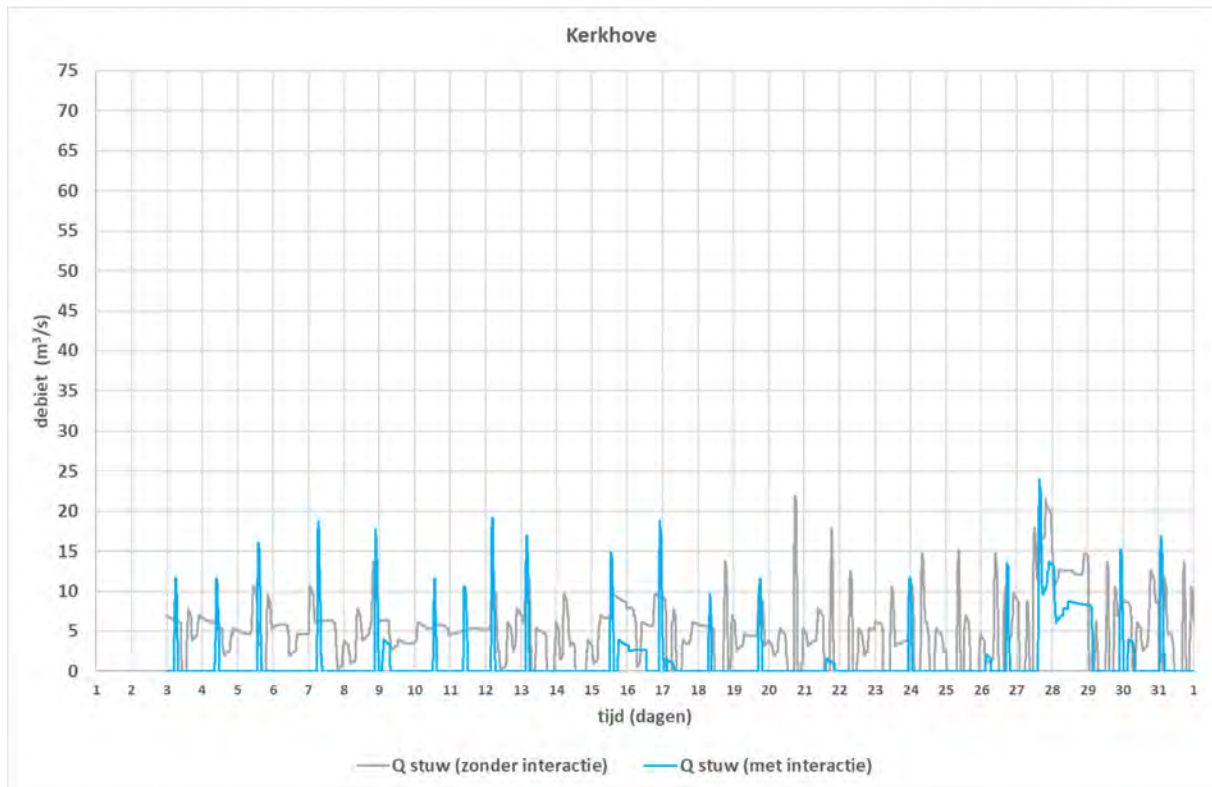
Figuur 201 – Juni 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



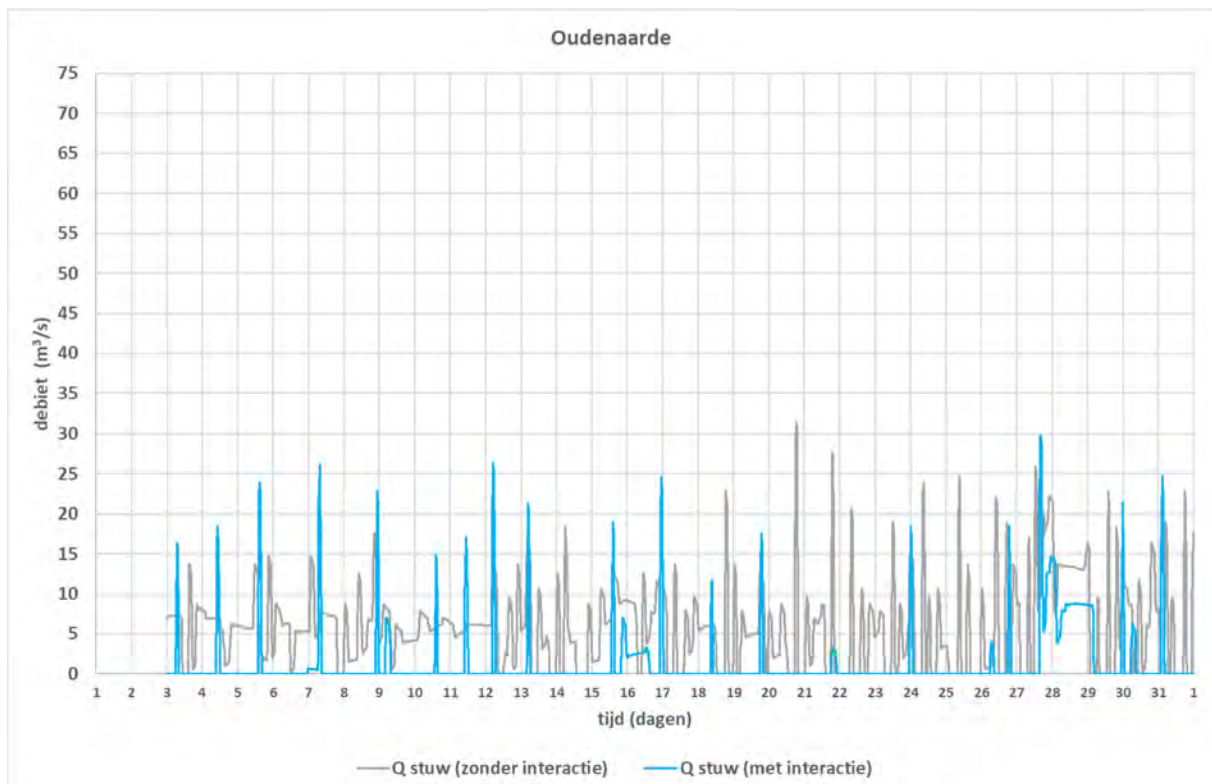
Figuur 202 – Juni 2019 – Asper (reeks 2)



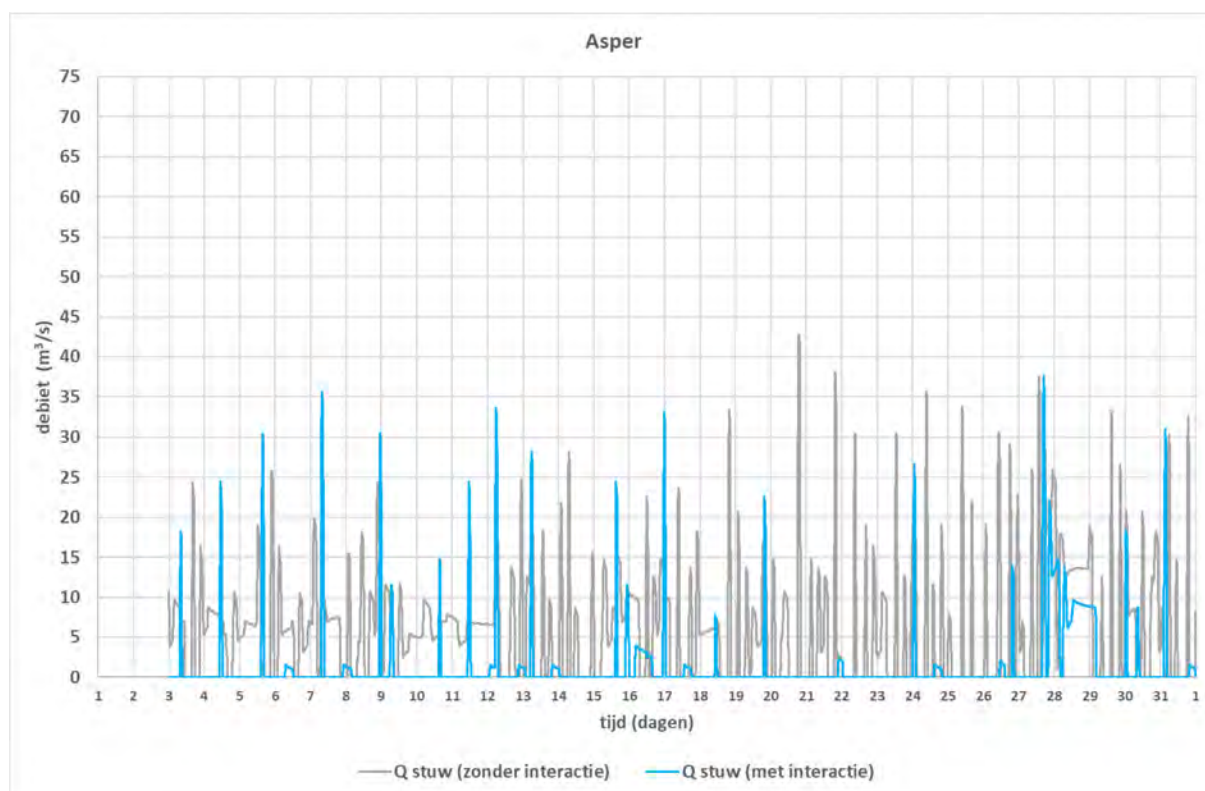
Figuur 203 – Juli 2019 – Kerkhove (reeks 2)



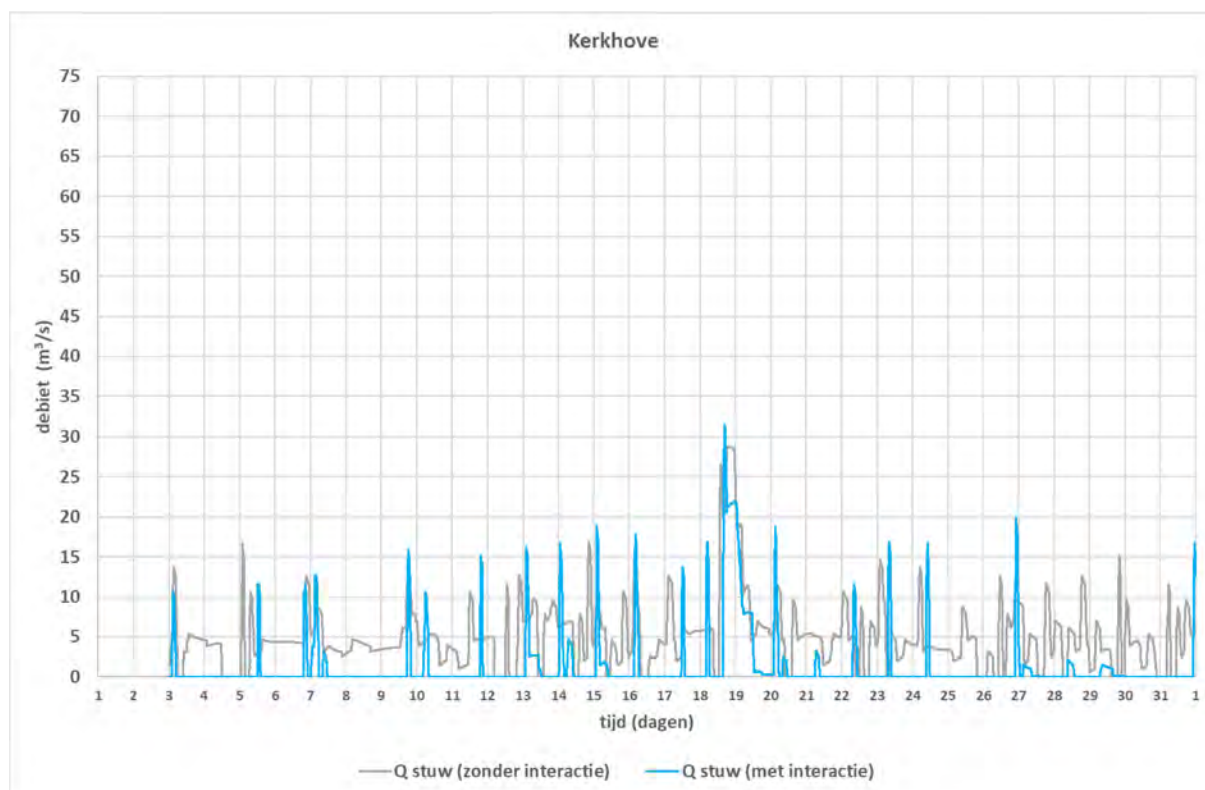
Figuur 204 – Juli 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



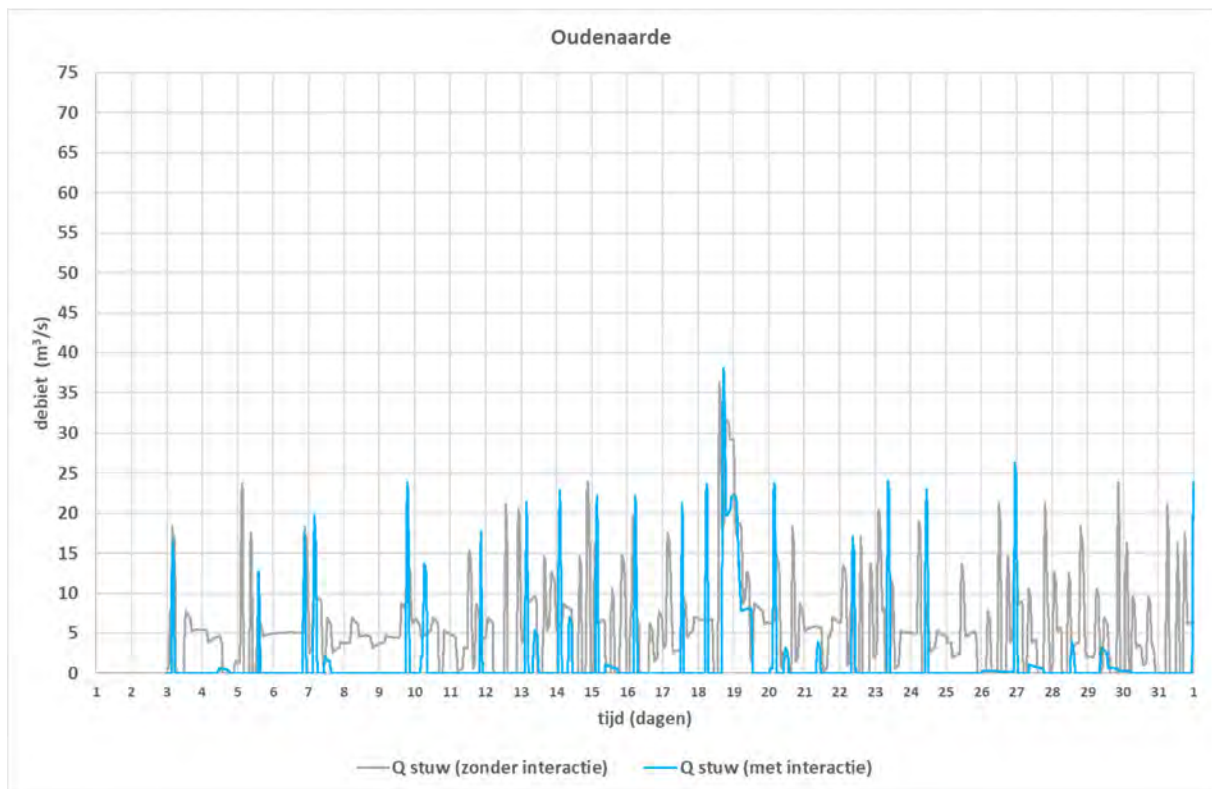
Figuur 205 – Juli 2019 – Asper (reeks 2)



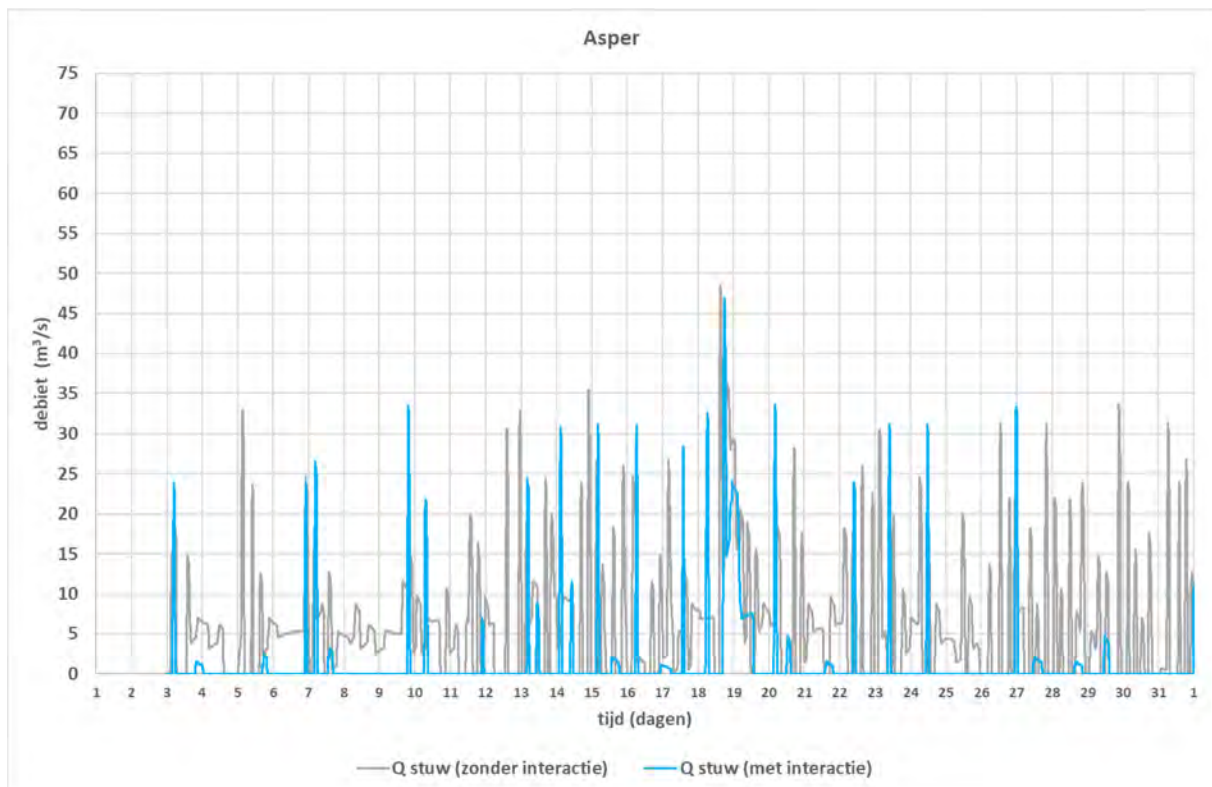
Figuur 206 – Augustus 2019 – Kerkhove (reeks 2)



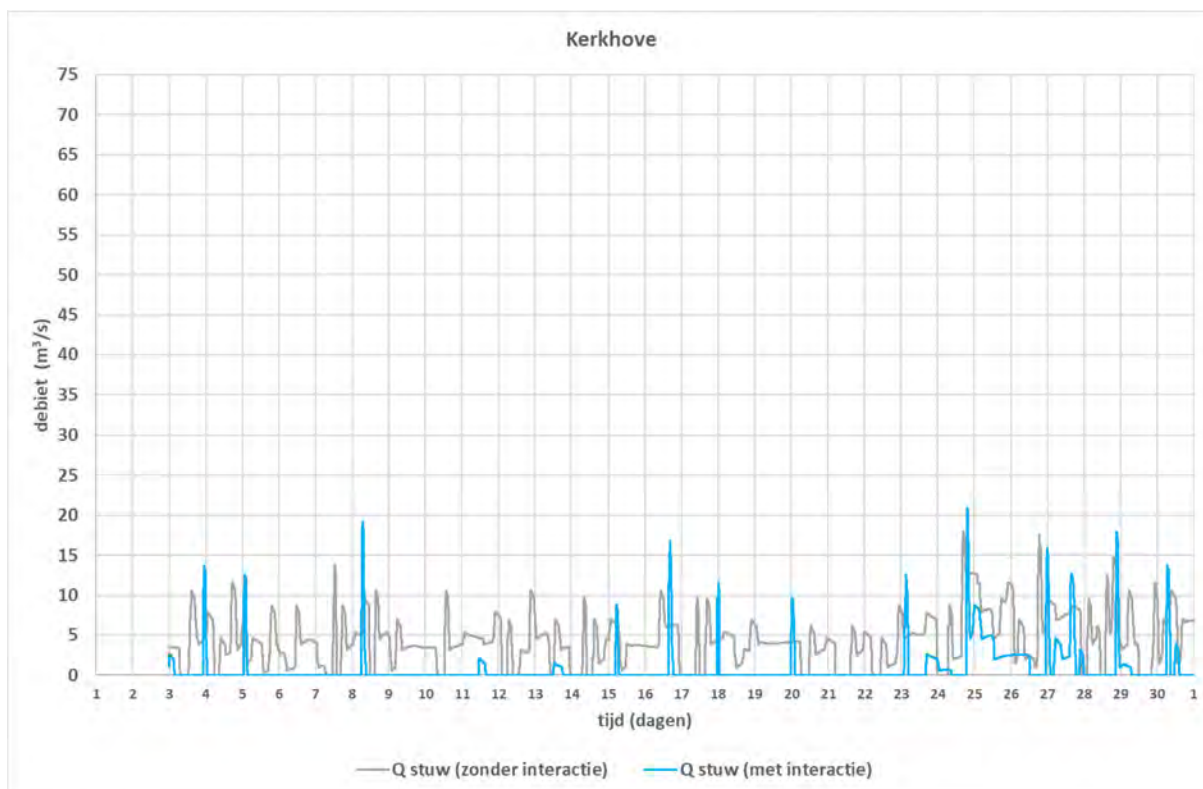
Figuur 207 – Augustus 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



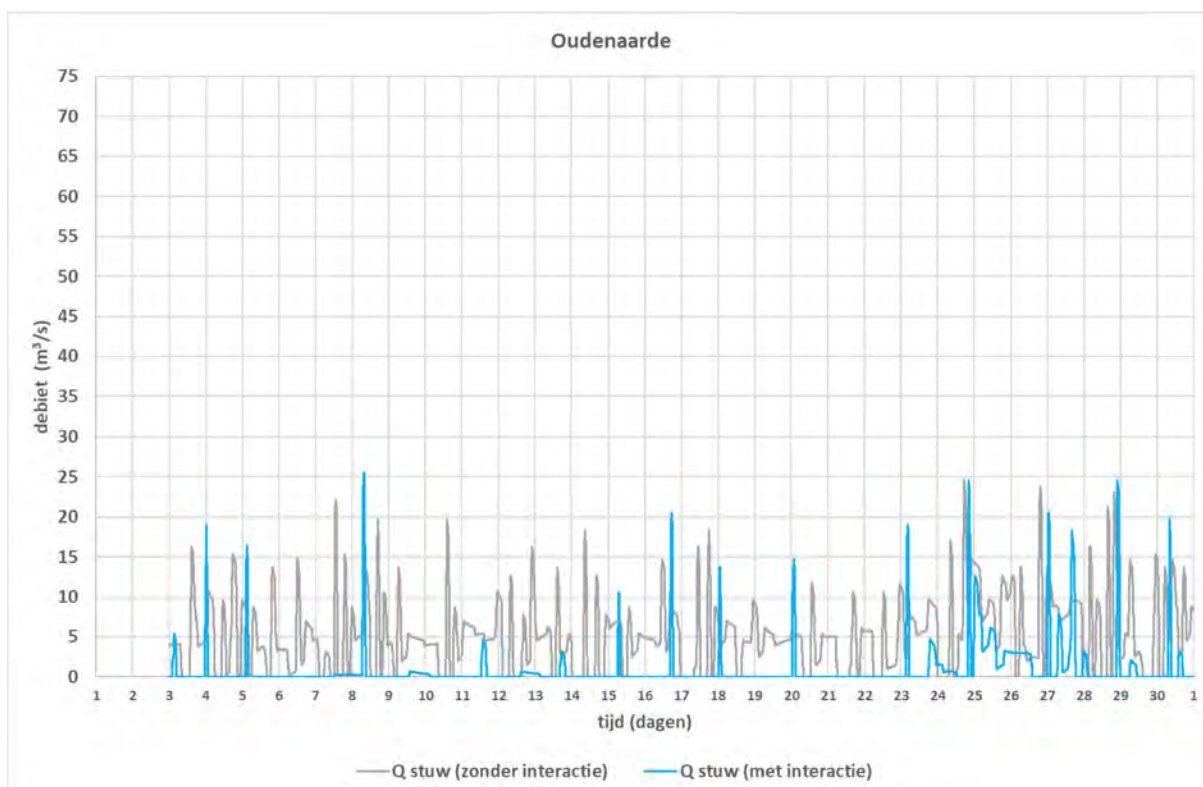
Figuur 208 – Augustus 2019 – Asper (reeks 2)



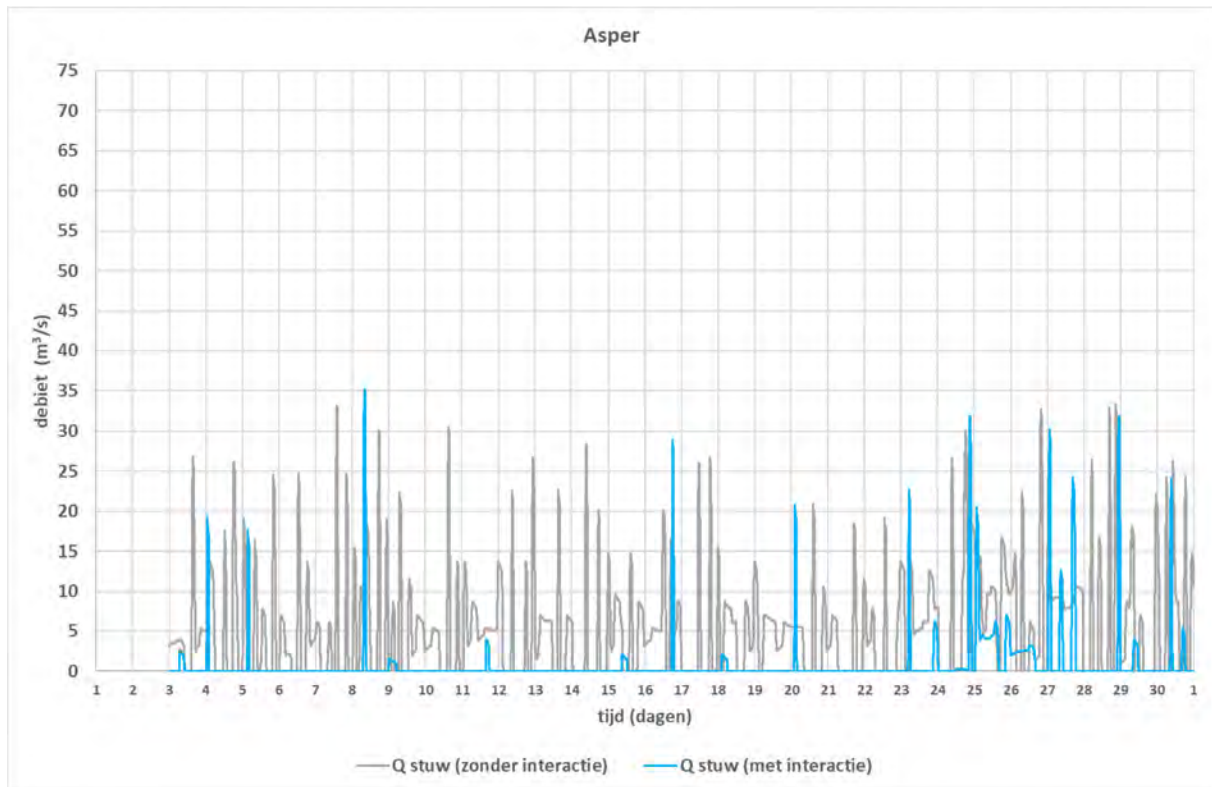
Figuur 209 – September 2019 – Kerkhove (reeks 2)



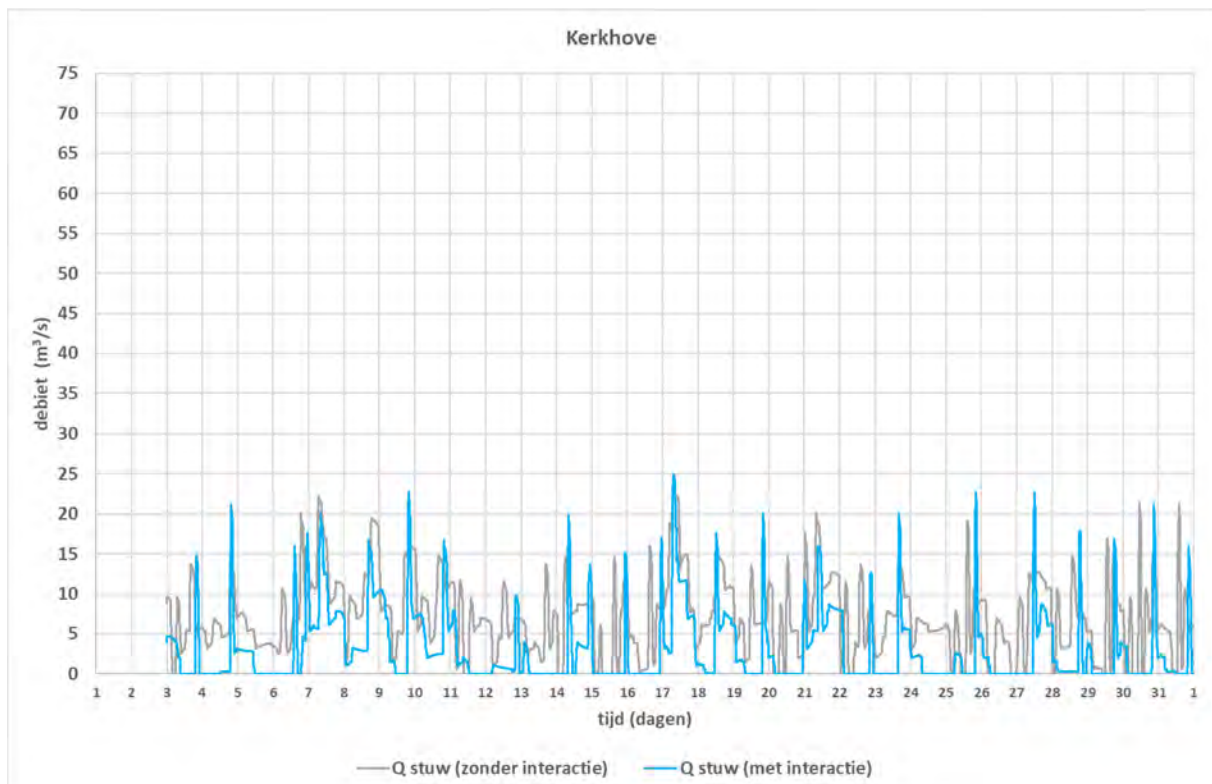
Figuur 210 – September 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



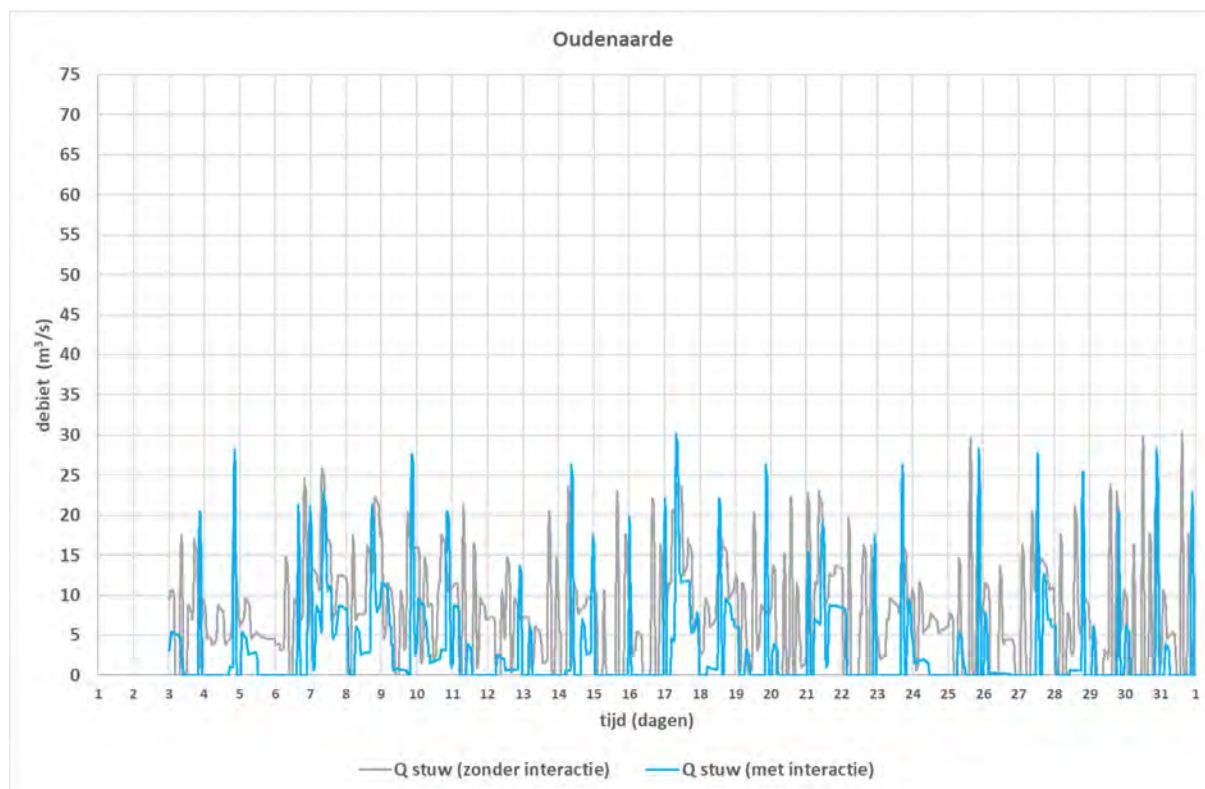
Figuur 211 – September 2019 – Asper (reeks 2)



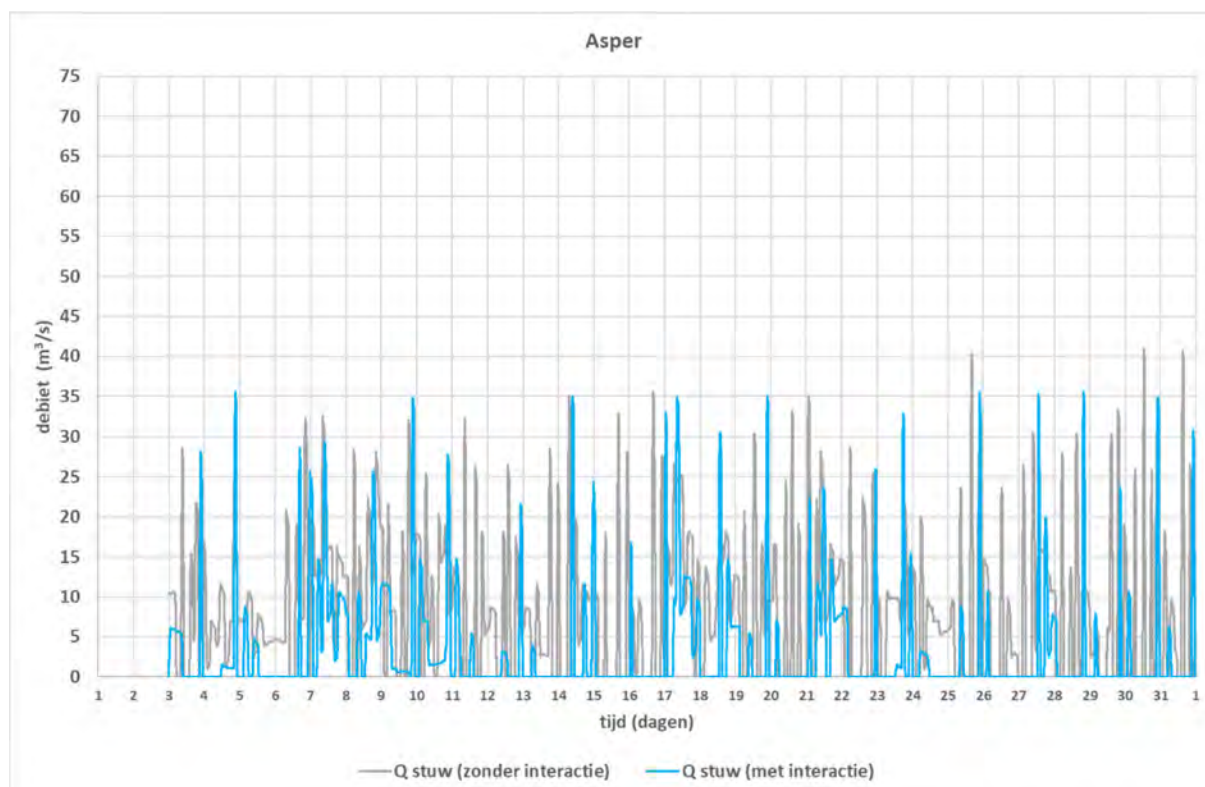
Figuur 212 – Oktober 2019 – Kerkhove (reeks 2)



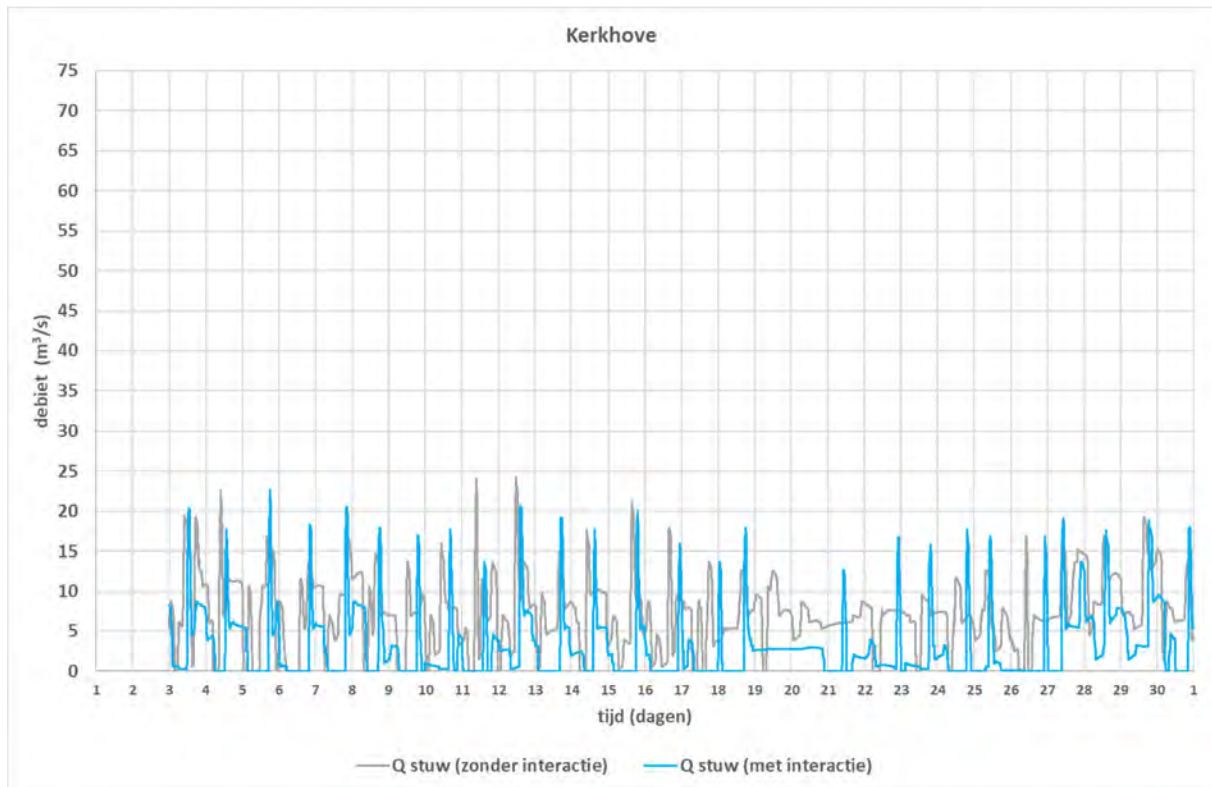
Figuur 213 – Oktober 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



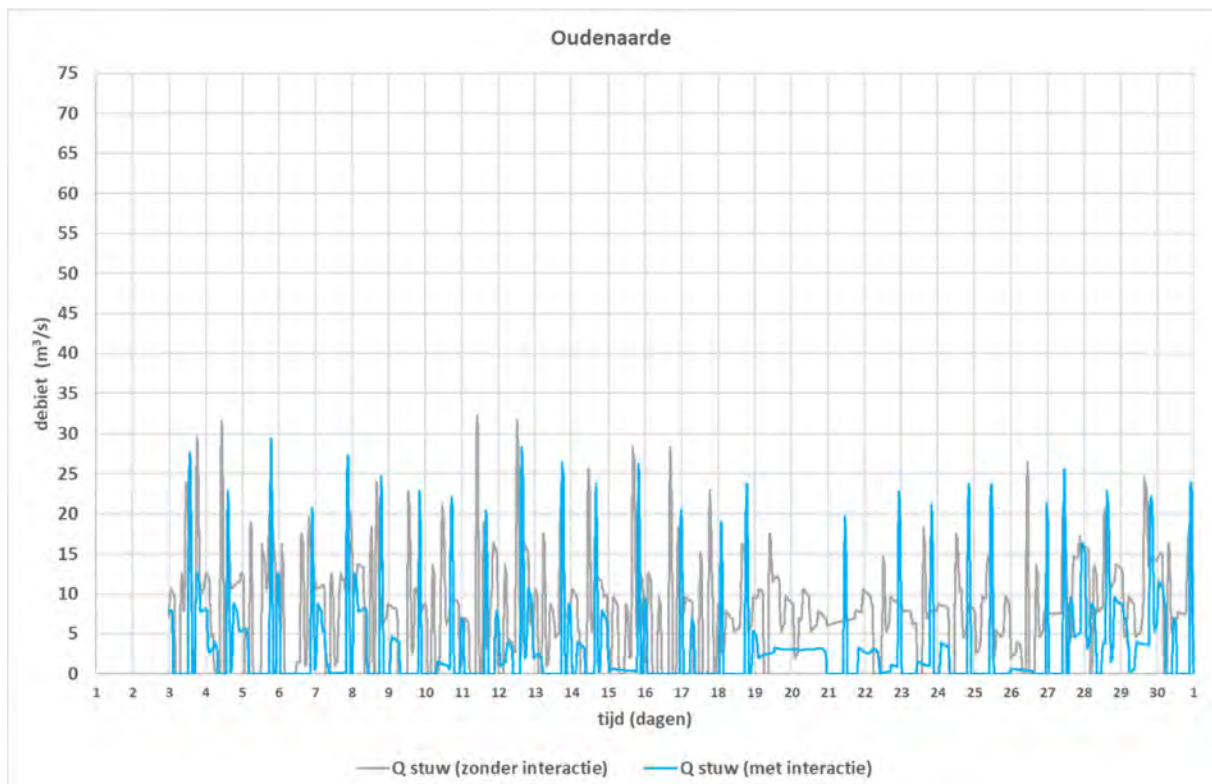
Figuur 214 – Oktober 2019 – Asper (reeks 2)



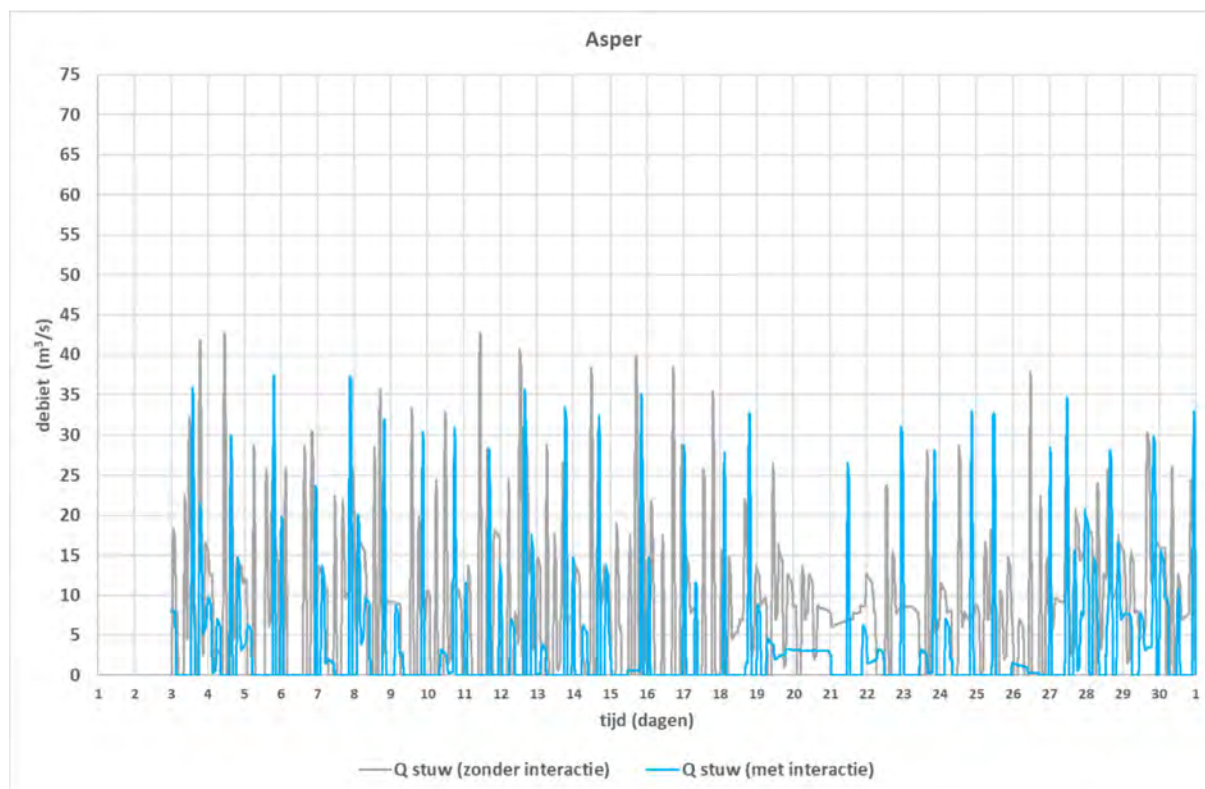
Figuur 215 – November 2019 – Kerkhove (reeks 2)



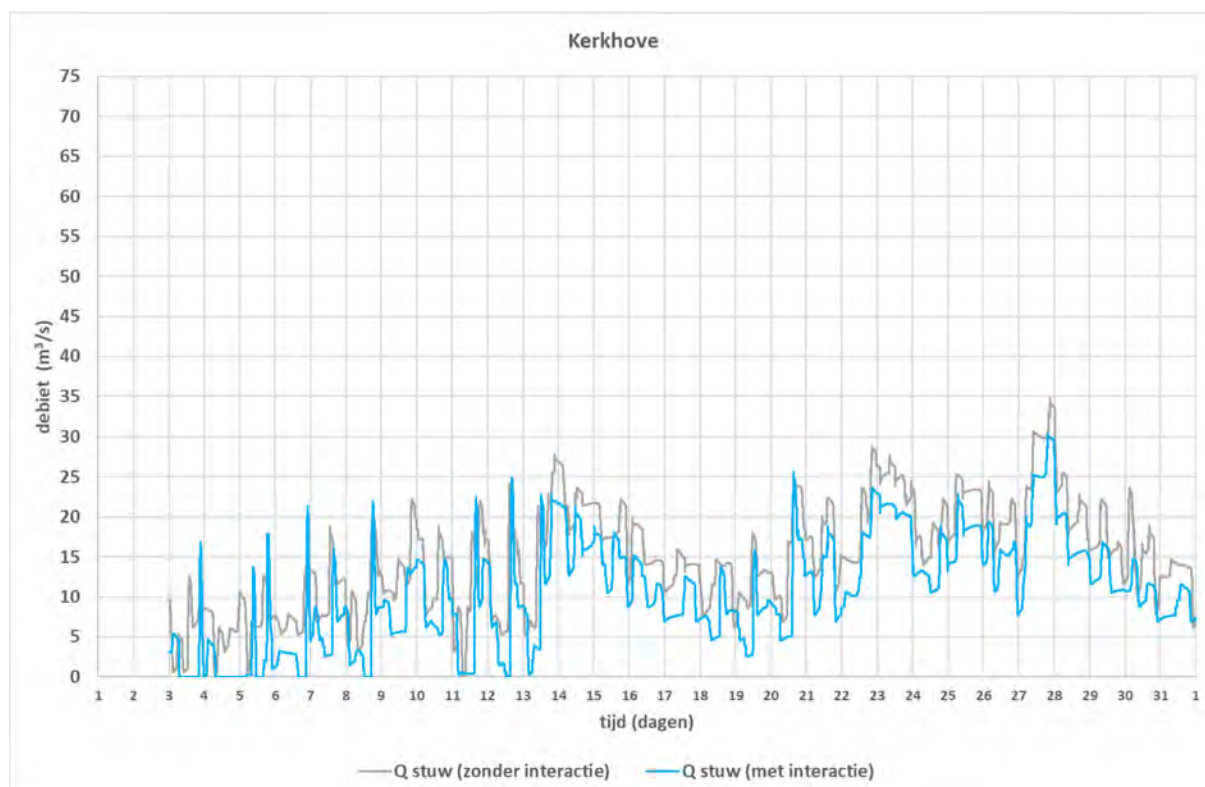
Figuur 216 – November 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



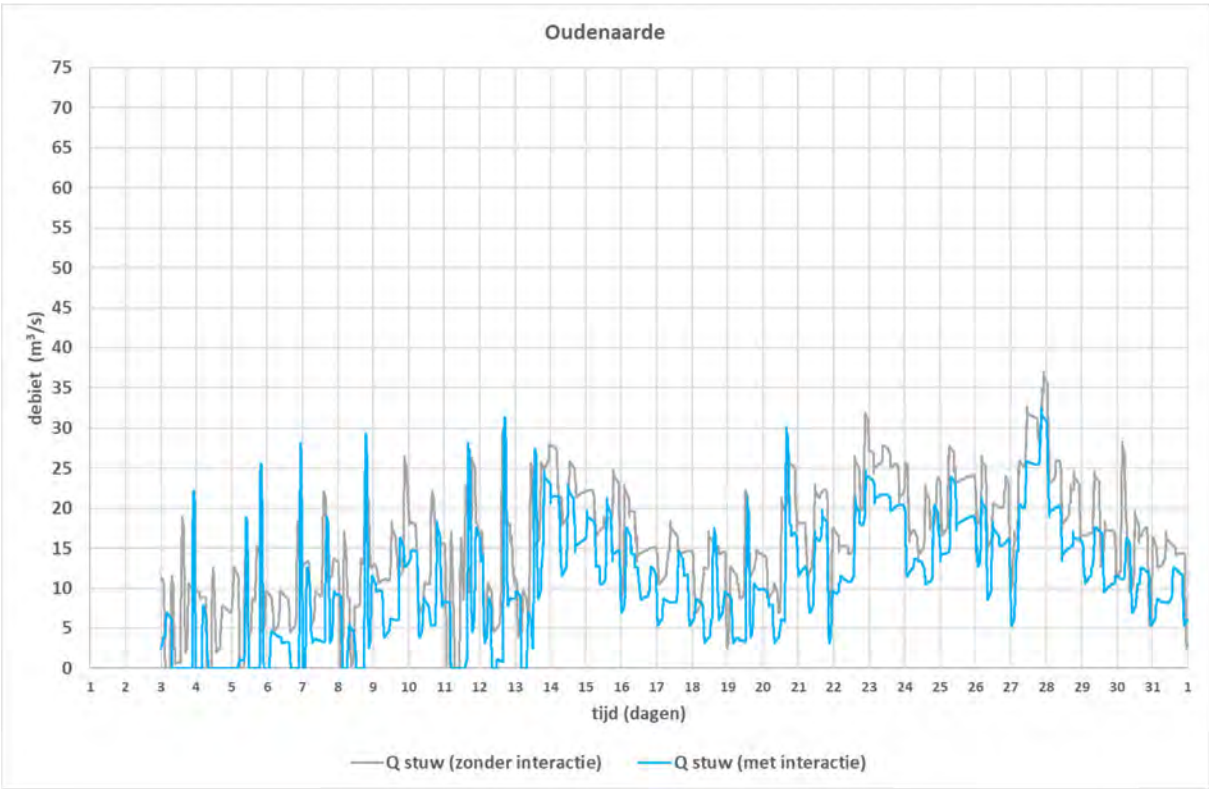
Figuur 217 – November 2019 – Asper (reeks 2)



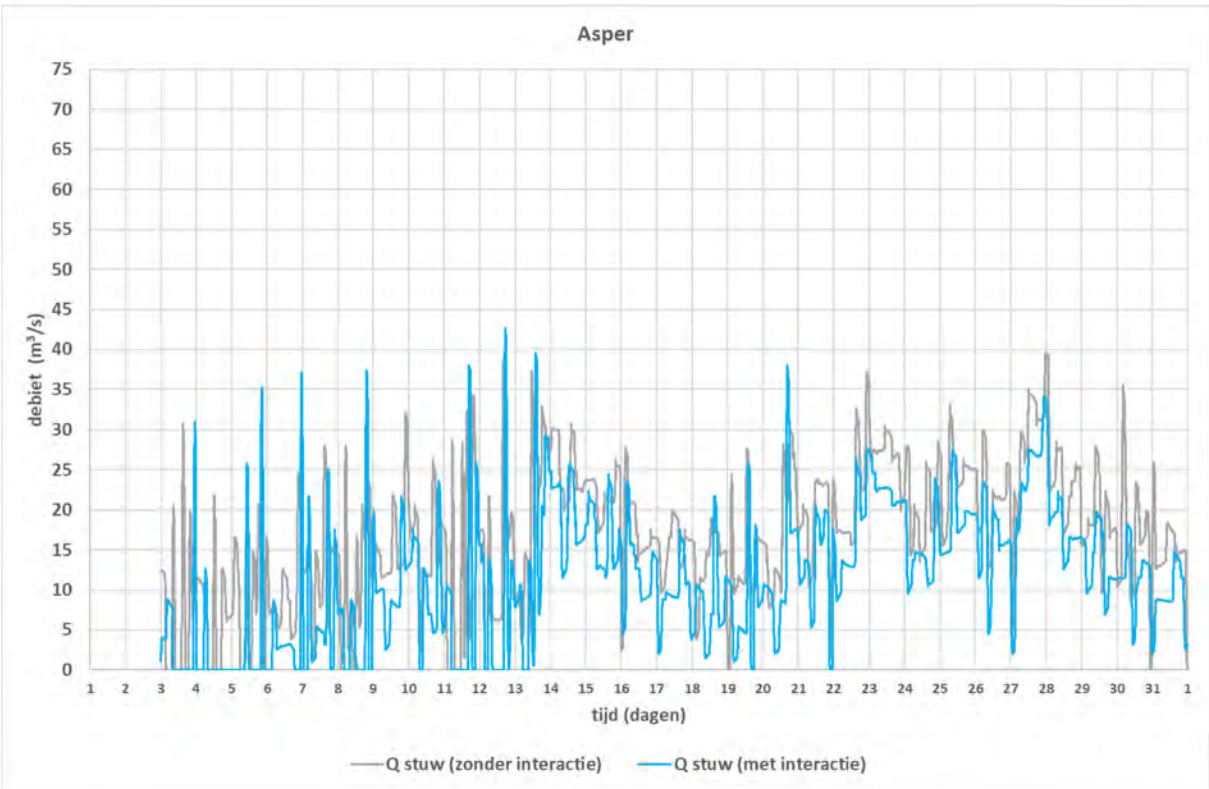
Figuur 218 – December 2019 – Kerkhove (reeks 2)



Figuur 219 – December 2019 – Oudenaarde (reeks 2)



Figuur 220 – December 2019 – Asper (reeks 2)



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be