



departement
**Mobiliteit en
Openbare Werken**

Integraal plan Boven-Zeeschelde

DEELRAPPORT 2: GETIJRAPPORT BOVEN-ZEESCHELDE, RUPEL EN DURME



13_131

WL Rapporten

Integraal Plan Boven-Zeeschelde

Deelrapport 2 – Getijrapport Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme

Vandenbruwaene, W.; Meire, D.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Vanlierde, E.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Januari 2016

WL2016R13_131_2

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vandenbruwaene, W.; Meire, D.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Vanlierde, E.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal Plan Boven-Zeeschelde: Deelrapport 2 – Getijrapport Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme. Versie 6.0. WL Rapporten, 13_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be








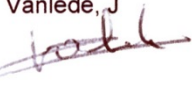
www.waterbouwkundiglaboratorium.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welk andere wijze ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Documentidentificatie

Titel:	Integraal Plan Boven-Zeeschelde: Deelrapport 2 – Getijrapport Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme		
Opdrachtgever:	aZS	Ref.:	WL2016R13_131_2
Keywords (3-5):	getij; morfologie; historische analyse; Boven-Zeeschelde en bijrivieren		
Tekst (p.):	62	Bijlagen (p.):	62
Vertrouwelijk:	<input type="checkbox"/> Ja	Uitzondering:	<input type="checkbox"/> Opdrachtgever
			<input type="checkbox"/> Intern
			<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
		Vrijgegeven vanaf: /	
	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Goedkeuring

Auteur	Revisor	Projectleider	Coördinator Studie & Advies	Afdelingshoofd
Vandenbruwaene, W. 	Plancke, Y. 	Vanlede, J. 	Verwaest, T. 	Mostaert, F. 
Meire, D. 	Vanlierde, E. 			
Vanlede, J. 				

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur(s)
1.0	03/03/2015	Conceptversie	Vandenbruwaene, W.; Meire, D.; Vanlede, J.
2.0	06/03/2015	Inhoudelijke revisie	Plancke, Y.
3.0	07/04/2015	Revisie opdrachtgever	De Beukelaer-Dossche, M.; Dhondt, J.; Bosmans, S.
4.0	15/12/2015	Externe revisie	Adams, R.; Van Braeckel, A.; Roose, F.; K. Kuijper
5.0	22/12/2015	Finaal concept	Vandenbruwaene, W.; Meire, D.; Vanlede, J.
6.0	08/01/2016	Definitieve versie	Vandenbruwaene, W.; Meire, D.; Vanlede, J.

Abstract

Voorliggende studie behandelt de historische evolutie van het getij en de morfologie in de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme over de periode 1930-2013. Gebaseerd op de dagelijkse hoog- en laagwaterstanden werden er voor acht getijposten diverse jaargemiddelde getijparameters afgeleid. De morfologie werd gekwantificeerd door op verschillende tijdstippen (om de 10 à 20 jaar) de segment-gemiddelde geuldiepte, het geulvolume en het geulareaal te bepalen. Voor de kwantificering werd hierbij een nieuwe methodologie ontwikkeld om op basis van het gemiddeld laagwatervlak geuldimensies (e.g. geulvolumes) meer accuraat te berekenen. De studie toont aan dat getij en morfologie in de Boven-Zeeschelde grondig gewijzigd zijn in de periode 1960-1980. Zo is er een belangrijke toename in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume (die zich tevens verderzet na 1960-1980), een verlaging van de laagwaterstanden, een toename in celeriteit en een afname in getij-asymmetrie (i.e. van het verticaal getij). Wat betreft de bijrivieren is er in de Rupel een toename in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume, en een verlaging van de laagwaterstanden. De Durme daarentegen wordt gekenmerkt door een evolutie van verondieping en afname in geulvolume.

Inhoudstafel

Inhoudstafel	I
Lijst van de tabellen	III
Lijst van de figuren	IV
Lijst met afkortingen.....	1
1. Inleiding	2
1.1. Situering	2
1.2. Voorgaande studies	2
2. Methodiek.....	3
2.1. Metingen	3
2.2. Digitalisatie en validatie van historische hoog- en laagwaterstanden	3
2.3. Kwaliteit van de data	4
2.4. Bepaling van springtij en doortij	7
2.5. Berekening van de jaargemiddelde getijparameters	7
2.6. Bepaling van de langdurige waterstandtrends	8
2.6.1. Bepalen van langjarige trends te Vlissingen	8
2.6.2. Bepalen van langjarige trends voor overige meetstations	9
2.7. Bathymetrische analyse	9
2.7.1. Opdeling in segmenten	9
2.7.2. Refereren ten opzichte van het GLW vlak	10
2.7.3. Bepaling van het geulareaal, het geulvolume en de geuldiepte	10
3. Evolutie jaargemiddelde getijparameters	13
3.1. Hoogwater, laagwater en getijslag	13
3.1.1. Hoogwater	13
3.1.2. Laagwater	14
3.1.3. Getijslag	16
3.1.4. Springtij	18
3.1.5. Doodtij	20
3.2. Extreem hoogwater en laagwater	23
3.3. Stijgings- en dalingsduur	32
3.3.1. Afzonderlijke duurtijden	32
3.3.2. Asymmetrie van het verticale getij	35
3.4. Tijdsvertraging ten opzichte van Vlissingen	37
4. Analyse van de langjarige waterstandtrends.....	40
4.1. Resultaten voor lineaire term	40
4.2. Resultaten voor 18,6 jarige cyclus	41
4.3. Vergelijking met voorgaande studies	41
5. Evolutie bovenafvoer	43
6. Morfologische evolutie.....	45
6.1. Geuldiepte (segment-gemiddeld).....	45
6.2. Geulareaal en geulvolume	49
7. Relaties tussen bovenafvoer, getij en geuldiepte	51
7.1. Bovenafvoer en waterstanden (GHW en GLW)	51
7.2. Celeriteit laagwatergolf en geuldiepte bij GLW	54
7.3. Celeriteit hoogwatergolf en geuldiepte bij GHW	56
7.4. Waterstandsverhang en geuldiepte	56

8. Conclusies en aanbevelingen.....	59
8.1. Conclusies.....	59
8.2. Aanbevelingen	60
9. Referenties	61
Appendix A – Vergelijking jaargemiddeld HW en LW.....	A1
Appendix B – Langjarige waterstandtrends.....	A8
Appendix C – Waterstanden vs. Bovenafvoer.....	A13
Appendix D – Bathymetrieën (mGLW).....	A20
Appendix E – Hypsometrische curves (mTAW).....	A60

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht van de gedigitaliseerde getijposten	4
Tabel 2 - Aantal weerhouden jaren voor hoogwater (HW) en laagwater (LW) gebruik makende van het 50% criterium versus het 75% criterium (totaal aantal jaar = 85).	5
Tabel 3 – Overzicht van het faseverschil ϕ berekend op basis van maanculminaties (Van Cauwenberghe, 1977) en berekend op basis van meetgegevens (Depreiter et al., 2014; Levy et al., 2014).	9
Tabel 4 – Overzicht van de geanalyseerde bathymetrische gegevens	11
Tabel 5 – Overzicht van GLW standen (in m TAW) gebruikt om de GLW vlakken aan te maken voor de Boven-Zeeschelde (blauw), Durme (groen) en Rupel (rood).....	12
Tabel 6 – Overzicht van de berekende lineaire component volgens verschillende referentiewerken voor de hoogwaters.	42
Tabel 7 – Overzicht van de berekende lineaire component volgens verschillende referentiewerken voor de laagwaters.	42
Tabel 8 – Karakteristieke getallen (gemiddeld, minimum, maximum, 25 ^{ste} percentiel en 75 ^{ste} percentiel) omtrent de bovenafvoeren van de Schelde, Durme en Rupel.....	44

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Locatie van de gedigitaliseerde getijposten afgebeeld met de topo-bathymetrie van 2011.....	4
Figuur 2 – De jaargemiddelde hoogwaters te Dendermonde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).....	6
Figuur 3 – De jaargemiddelde laagwaters te Dendermonde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).....	6
Figuur 4 – Aanduiding van de getijparameters op een getijkromme	7
Figuur 5 – Aanduiding van de getijparameters voor getijkrommes van 2 meetstations	8
Figuur 6 – Geanalyseerde bathymetrische segmenten voor de Boven-Zeeschelde (blauw), Durme (groen) en Rupel (rood).....	11
Figuur 7 – Gemiddeld laagwater (GLW) en gemiddeld hoogwater (GHW) in het Schelde estuarium over de tijdsperiode 2001-2010.	12
Figuur 8 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde).....	13
Figuur 9 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	14
Figuur 10 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde).....	15
Figuur 11 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	15
Figuur 12 – Vergelijking tussen de evolutie van de thalweg en de evolutie van het gemiddeld laagwater ter hoogte van Waasmunsterbrug.	16
Figuur 13 – Evolutie van de jaargemiddelde getijslag voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde).....	17
Figuur 14 – Evolutie van de jaargemiddelde getijslag voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	17
Figuur 15 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij springtij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde).....	18
Figuur 16 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater bij springtij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde).....	19
Figuur 17 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij springtij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	19
Figuur 18 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater bij springtij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	20
Figuur 19 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij doortij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde).....	21
Figuur 20 – Evolutie van de jaargemiddelde laagwater bij doortij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde).....	21
Figuur 21 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij doortij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	22
Figuur 22 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater bij doortij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).....	22
Figuur 23 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Temse (Boven-Zeeschelde).....	23

Figuur 24 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	24
Figuur 25 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	24
Figuur 26 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Wetteren (Boven-Zeeschelde)	25
Figuur 27 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Melle (Boven-Zeeschelde)	25
Figuur 28 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Tielrode (Durme)	26
Figuur 29 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Waasmunsterbrug (Durme).....	26
Figuur 30 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Walem (Rupel)	27
Figuur 31 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Temse (Boven-Zeeschelde).....	27
Figuur 32 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	28
Figuur 33 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	28
Figuur 34 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Wetteren (Boven-Zeeschelde)	29
Figuur 35 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Melle (Boven-Zeeschelde)	29
Figuur 36 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Tielrode (Durme)	30
Figuur 37 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Waasmunsterbrug (Durme).....	30
Figuur 38 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Walem (Rupel)	31
Figuur 39 – Evolutie van de jaargemiddelde stijgingsduur voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)	32
Figuur 40 – Evolutie van de jaargemiddelde dalingsduur voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)	33
Figuur 41 – Evolutie van de jaargemiddelde stijgingsduur voor de getijposten Tielrode (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)	33
Figuur 42 – Evolutie van de jaargemiddelde dalingsduur voor de getijposten Tielrode (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)	34
Figuur 43 – Evolutie van de jaargemiddelde dalingsduur (links) en stijgingsduur (rechts) voor de getijpost te Waasmunster (Durme)	34
Figuur 44 - Verticale getijasymmetrie en de vorm van de cross sectie (Friedrichs, 2010)	35
Figuur 45 – Evolutie van de jaargemiddelde getij-asymmetrie (dalingsduur/stijgingsduur) voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde).....	36
Figuur 46 – Evolutie van de jaargemiddelde getijasymmetrie voor de getijposten Tielrode (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)	36

Figuur 47 – Evolutie van de jaargemiddelde getijasymmetrie voor de getijposten Waasmunsterbrug (Durme)	37
Figuur 48 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij hoogwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)	38
Figuur 49 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij laagwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)	38
Figuur 50 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij hoogwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug op de Durme en Walem op de Rupel	39
Figuur 51 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij laagwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug op de Durme en Walem op de Rupel	39
Figuur 52 – Lineaire component van de langjarige fit voor alle meetstations in de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel	40
Figuur 53– Amplitude parameter voor de 18,6 jarige cyclus van de langjarige fit voor alle meetstations in de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel	41
Figuur 54 – Evolutie van de bovenafvoer in de Boven-Zeeschelde (A), Rupel (B) en Durme (C)	43
Figuur 55 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Temse-Dendermonde over de periode 1930-2011	46
Figuur 56 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Dendermonde-Schoonaarde over de periode 1930-2011	46
Figuur 57 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Schoonaarde-Wetteren over de periode 1930-2011	47
Figuur 58 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Wetteren-Melle over de periode 1930-2011	47
Figuur 59 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment monding Rupel-Walem over de periode 1930-2010	48
Figuur 60 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme) over de periode 1930-2011	48
Figuur 61 – Relatieve wijziging in geulareaal, geuldiepte en geulvolume voor de segmenten Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme over de tijdsperiode 1930-recent. Voor de Boven-Zeeschelde wordt een onderscheid gemaakt tussen de periodes 1930-1960 en 1960-2011 conform de observaties van historische wijzigingen in geuldiepte (zie §6.1)	49
Figuur 62 – Historische evolutie van het geulareaal in de verschillende deelsegmenten	50
Figuur 63 – Historische evolutie van het geulvolume in de verschillende deelsegmenten	50
Figuur 64 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde hoogwaterstanden (t.o.v. trendlijn) en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Boven-Zeeschelde (a = richtingscoëfficiënt van de lineaire trendlijn)	51
Figuur 65 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde laagwaterstanden (t.o.v. trendlijn) en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Boven-Zeeschelde (a = richtingscoëfficiënt van de lineaire trendlijn)	52
Figuur 66 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde hoogwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor het meetstation langs de Rupel	52
Figuur 67 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde laagwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor het meetstation langs de Rupel	53
Figuur 68 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde hoogwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Durme	53
Figuur 69 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde laagwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Durme	54

Figuur 70 – Celeriteit van de laagwatergolf op basis van de data (volle lijn) en berekend op basis van de gemiddelde diepte (stippellijn) in de Boven-Zeeschelde	55
Figuur 71 – Celeriteit van de laagwatergolf op basis van de data (volle lijn) en berekend op basis van de gemiddelde diepte (stippellijn) in de Durme	55
Figuur 72 – Celeriteit van de hoogwatergolf op basis van de data (volle lijn) en berekend op basis van de geschatte gemiddelde diepte (stippellijn) in de Boven-Zeeschelde.....	56
Figuur 73 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Temse-Dendermonde	57
Figuur 74 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Dendermonde - Schoonaarde ..	57
Figuur 75 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Schoonaarde – Wetteren.....	58
Figuur 76 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Wetteren - Melle.....	58
Figuur 77 – De jaargemiddelde hoogwaters te Temse berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A1
Figuur 78 – De jaargemiddelde laagwaters te Temse berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A1
Figuur 79 – De jaargemiddelde hoogwaters te Schoonaarde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A2
Figuur 80 – De jaargemiddelde laagwaters te Schoonaarde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A2
Figuur 81 – De jaargemiddelde hoogwaters te Wetteren berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A3
Figuur 82 – De jaargemiddelde laagwaters te Wetteren berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A3
Figuur 83 – De jaargemiddelde hoogwaters te Melle berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A4
Figuur 84 – De jaargemiddelde laagwaters te Melle berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A4
Figuur 85 – De jaargemiddelde hoogwaters te Walem berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A5
Figuur 86 – De jaargemiddelde laagwaters te Walem berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A5
Figuur 87 – De jaargemiddelde hoogwaters te Tielrode berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A6
Figuur 88 – De jaargemiddelde laagwaters te Tielrode berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A6
Figuur 89 – De jaargemiddelde hoogwaters te Waasmunster berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).	A7
Figuur 90 – De jaargemiddelde laagwaters te Waasmunster (deels bodempeil, zie Figuur 12) berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waardes (E).....	A7
Figuur 91 – Langjarige trends en residuen te Temse bij hoogwater	A8
Figuur 92 – Langjarige trends en residuen te Dendermonde bij hoogwater.....	A8
Figuur 93 – Langjarige trends en residuen te Schoonaarde bij hoogwater	A9
Figuur 94 – Langjarige trends en residuen te Wetteren bij hoogwater.....	A9
Figuur 95 – Langjarige trends en residuen te Melle bij hoogwater.....	A10
Figuur 96 – Langjarige trends en residuen te Temse bij laagwater.....	A10

Figuur 97 – Langjarige trends en residuen te Dendermonde bij laagwater	A11
Figuur 98 – Langjarige trends en residuen te Schoonaarde bij laagwater	A11
Figuur 99 – Langjarige trends en residuen te Wetteren bij laagwater	A12
Figuur 100 – Langjarige trends en residuen te Melle bij laagwater	A12
Figuur 101 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Temse en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A13
Figuur 102 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Dendermonde en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A13
Figuur 103 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Schoonaarde en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A14
Figuur 104 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Wetteren en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A14
Figuur 105 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Melle en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A15
Figuur 106 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Temse en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A15
Figuur 107 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Dendermonde en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A16
Figuur 108 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Schoonaarde en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A16
Figuur 109 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Wetteren en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A17
Figuur 110 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Melle en bovenafvoer Schelde [m ³ /s]	A17
Figuur 111 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Tielrode en bovenafvoer Durme [m ³ /s]	A18
Figuur 112 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Waasmunsterbrug en bovenafvoer Durme [m ³ /s]	A18
Figuur 113 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Tielrode en bovenafvoer Durme [m ³ /s]	A19
Figuur 114 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Waasmunsterbrug en bovenafvoer Durme [m ³ /s]	A19
Figuur 115 – 1930 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A20
Figuur 116 – 1950 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A21
Figuur 117 – 1960 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A22
Figuur 118 – 1973 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A23
Figuur 119 – 1980 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A24
Figuur 120 – 1990 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A25
Figuur 121 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A26
Figuur 122 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A27
Figuur 123 – 1930 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A28
Figuur 124 – 1950 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A29
Figuur 125 – 1960 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A30
Figuur 126 – 1980 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A31
Figuur 127 – 1990 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A32
Figuur 128 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde).	A33
Figuur 129 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A34

Figuur 130 – 1930 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A35
Figuur 131 – 1950 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A36
Figuur 132 – 1960 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A37
Figuur 133 – 1980 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A38
Figuur 134 – 1990 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A39
Figuur 135 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A40
Figuur 136 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A41
Figuur 137 – 1930 bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A42
Figuur 138 – 1950 bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A43
Figuur 139 – 1960 bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A44
Figuur 140 – 1980 bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A45
Figuur 141 – 1990 bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A46
Figuur 142 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A47
Figuur 143 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A48
Figuur 144 – 1930 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A49
Figuur 145 – 1950 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A50
Figuur 146 – 1970 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A51
Figuur 147 – 1980 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A52
Figuur 148 – 1997 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A53
Figuur 149 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A54
Figuur 150 – 1930 bathymetrie van de Rupel	A55
Figuur 151 – 1960 bathymetrie van de Rupel	A56
Figuur 152 – 1976 bathymetrie van de Rupel	A57
Figuur 153 – 1997 bathymetrie van de Rupel	A58
Figuur 154 – 2010 topo-bathymetrie van de Rupel	A59
Figuur 155 – Hypsometrische curves voor het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)	A60
Figuur 156 – Hypsometrische curves voor het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)	A60
Figuur 157 – Hypsometrische curves voor het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)	A61
Figuur 158 – Hypsometrische curves voor het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)	A61
Figuur 159 – Hypsometrische curves voor het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)	A62
Figuur 160 – Hypsometrische curves voor het segment monding Rupel-Walem (Rupel)	A62

Lijst met afkortingen

Afkorting	Betekenis
GHW / GLW	Gemiddeld Hoog / Laag Water
HHW / LLW	Hoogste Hoog Water en Laagste Laag Water
HW / LW	Hoog / Laag Water
INBO	Instituut voor Natuur en Bosonderzoek
LIDAR	Laser Imaging Detection And Ranging
NAP	Nieuw Amsterdams Peil
TAW	Tweede Algemene Waterpassing
UA	Universiteit Antwerpen

1. Inleiding

1.1. Situering

De opdracht “Integraal plan Boven-Zeeschelde” (bestek 16EI/13/57) heeft betrekking op het opstellen van een duurzaam beheerplan en een integraal plan voor de Boven-Zeeschelde en het Zuidelijk deel van de Ringvaart waarin de functies bevaarbaarheid, natuur en veiligheid naast nevenfuncties dienen te worden bestudeerd en opgenomen. Hiervoor dienen onder andere volgende aspecten te worden uitgevoerd :

- opmaak van een duurzaam beheerplan volgens de huidige klassering van de vaarweg (klasse IV voor de Boven-Zeeschelde en klasse Va voor het Zuidelijk deel van de Ringvaart);
- vergund krijgen van dit beheerplan;
- uitvoeren van literatuurstudie en wetenschappelijk onderzoek om morfologische ingrepen in de rivier te kunnen simuleren en toetsen in samenwerking met het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout;
- uitvoeren van wetenschappelijk onderzoek om het effect van veranderingen in getij en morfologie door te vertalen naar veranderingen in waterkwaliteit, leefomgeving (areaal en kwaliteit) en ecosysteemrespons (productie en verschuivingen in voedselweb) in samenwerking met Universiteit Antwerpen en het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek;
- verder uitwerken van alternatieven rekening houdend met de bovenvermelde functies en nevenfuncties;
- het verder uitbreiden van het onderliggende model van de MKBA om de verschillende functies mee te beoordelen en deze te analyseren;
- opstellen van een strategisch MER voor een integraal plan rekening houdend met toegang voor CEMT klasse Va schepen;
- opstellen van een gedetailleerd implementatieplan voor dit integraal plan;
- ondersteuning tijdens de uitvoering van de studieopdracht;

Het Waterbouwkundig Laboratorium is binnen vast gedeelte 2 van de opdracht (Wetenschappelijk en toegepast onderzoek BZS in nauwe samenwerking met UA en INBO) post 2 verantwoordelijk voor de opmaak van een getijrapport van de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme. Deze deeltaak bestaat uit:

- Digitalisatie van waterstanden (laagwater en hoogwater, periode 1930-nu) + controle
- Analyse van historische bathymetrieën
- Analyse van historische waterstanden
- Relatie tussen bathymetrische en getij-parameters, conform eerdere studie Beneden-Zeeschelde
- Rapportage over de historische getijdenwerking en de evolutie hiervan

1.2. Voorgaande studies

Eerdere studies onderzochten reeds de historische evolutie van het getij in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde, en legden de link met de morfologische wijzigingen in het estuarium (Kuijper, 2013; Plancke et al., 2012; Wang, 2013). Wat betreft de Boven-Zeeschelde werd de historische evolutie van het getij besproken in Levy et al. (2014), de morfologische evolutie werd bestudeerd in IMDC (2013). Voorliggende studie differentieert zich van eerdere Boven-Zeeschelde studies door: (1) bepaling van de jaargemiddelde getijkarakteristieken op basis van de hoog- en laagwaterstanden (in Levy et al. (2014) werd gebruik gemaakt van beschikbare jaargemiddelde waarden), (2) morfologische analyse werd uitgevoerd ten opzichte van GLW (in IMDC et al. (2013) was dit ten opzichte van 0 m TAW), en (3) er werden links gelegd tussen de historische wijzigingen in het getij en de morfologie, en dit zowel voor de Boven-Zeeschelde, de Rupel, en de Durme.

2. Methodiek

2.1. Metingen

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de evolutie van het getij van 1930 tot en met 2013 op basis van data-analyse. Uiteraard zijn over die periode heel wat wijzigingen gebeurd in de meetmethodes voor het bepalen van de waterstanden.

Van 1930 tot 1 januari 2005 werden de hoog- en laagwaters uitsluitend bepaald op basis van prikdata. De waterstanden werden op millimeterpapier geregistreerd, en vervolgens werden de hoog- en laagwaters handmatig gedigitaliseerd (of ingeprikt). Vanaf 2005 worden de data voor alle stations aan de hand van continue telemetrische meetreeksen geregistreerd. De hoog- en laagwaters worden bepaald gebruik makend van een algoritme, waardoor geen handmatige tussenkomst noodzakelijk is. We merken op dat de periode 2005-2008 als een overgangperiode kan beschouwd worden waarbij nog deels gewerkt werd met prikdata.

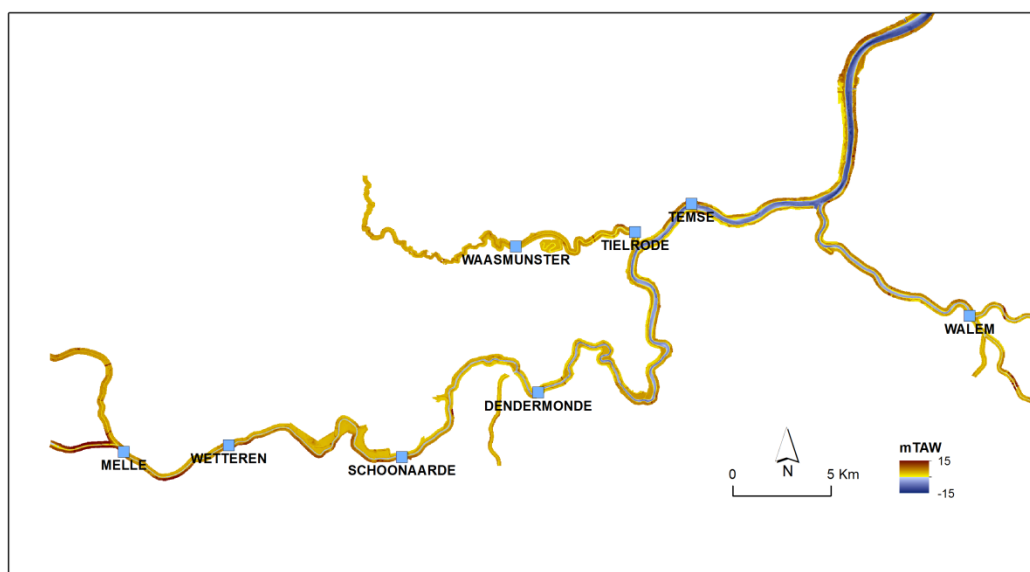
Naast de manier van meten veranderde ook het referentievlak. Tegenwoordig worden de waterstandsmetingen in Vlaanderen uitgedrukt t.o.v. het referentievlak TAW (Tweede Algemene Waterpassing). Voorheen werd gewerkt t.o.v. het NKD vlak (Nul Krijgs Depot). Beide vlakken verschillen ten opzichte van elkaar: enerzijds is er het échte hoogteverschil tussen de (lokale) nivelleringsvlakken, anderzijds geldt het feit dat noch het NKD- noch het TAW-vlak 100% horizontaal zijn noch loodrecht op de graviteit, noch perfect de als Belgisch gedefinieerde geïde volgen, en dus niet 100% aan elkaar evenwijdig zijn, waardoor hun verschil niet constant is. Voor meer informatie wordt verwezen naar Vereycken et al. (2015).

Een inschatting van de nauwkeurigheid van de waterstandsmetingen wordt in verschillende, tienjarige, rapporten aangehaald (e.g., Taverniers en Mostaert, 2009). Voor de metingen van de waterstanden wordt een foutenmarge van ± 2 cm aangehaald op de meting. Men kan veronderstellen dat de werkelijke foutenmarge iets hoger is, door de onzekerheid op de nivellering van de meetstations. De foutenmarge op de tijdstippen wordt op ca. 2 min geschat.

Naast de nauwkeurigheid van de metingen, is uiteraard ook de beschikbaarheid van de metingen belangrijk. Zo zijn er niet altijd data beschikbaar voor de periode 1939-1945 ten gevolge van de oorlogsgebeurtenissen. Meer informatie omtrent de beschikbaarheid van metingen wordt gegeven in de 10-jarige overzichten (e.g., Belmans & Claessens, 1984; Codde & De Keyser, 1954; Taverniers & Mostaert, 2009).

2.2. Digitalisatie en validatie van historische hoog- en laagwaterstanden

Binnen het kader van deze studie werden historische hoog- en laagwaterstanden gedigitaliseerd en gevalideerd voor verschillende getijposten in de Boven-Zeeschelde, en de bijrivieren Durme en Rupel (Figuur 1 en Tabel 1). De digitalisatieoefening bestond erin om hoogwaters en laagwaters getabelleerd in tijoverzichten voor de periode 1930 tot en met 1980 over te typen. Vanaf 1981 zijn de hoog- en laagwaterstanden direct digitaal beschikbaar. Een gedeelte van deze digitaal beschikbare data werd verkregen door het digitaliseren van HW en LW's geregistreerd op analoge tijbladen met behulp van een digitaliseerpen. De laatste jaren echter (vanaf 2005 ten vroegste) werden HW en LW's voornamelijk bepaald uit continue telemetrische meetreeksen van waterstand.



Figuur 1 – Locatie van de gedigitaliseerde getijposten afgebeeld met de topo-bathymetrie van 2011.

Tabel 1 – Overzicht van de gedigitaliseerde getijposten

Station	Periode	Bekken
Temse	1930-1940, 1950-2013	Boven-Zeeschelde
Dendermonde	1930-2013	Boven-Zeeschelde
Schoonaarde	1930-2013	Boven-Zeeschelde
Wetteren	1930-2013	Boven-Zeeschelde
Melle	1930-2013	Boven-Zeeschelde
Tielrode	1930-2013	Durme
Waasmunster	1930-2013	Durme
Walem	1930-2013	Rupel

2.3. Kwaliteit van de data

Tijdens de digitalisatie werd voor iedere hoog- en laagwaterstand een kwaliteitsvlag toegekend. Er zijn 4 mogelijke kwaliteitsvlaggen:

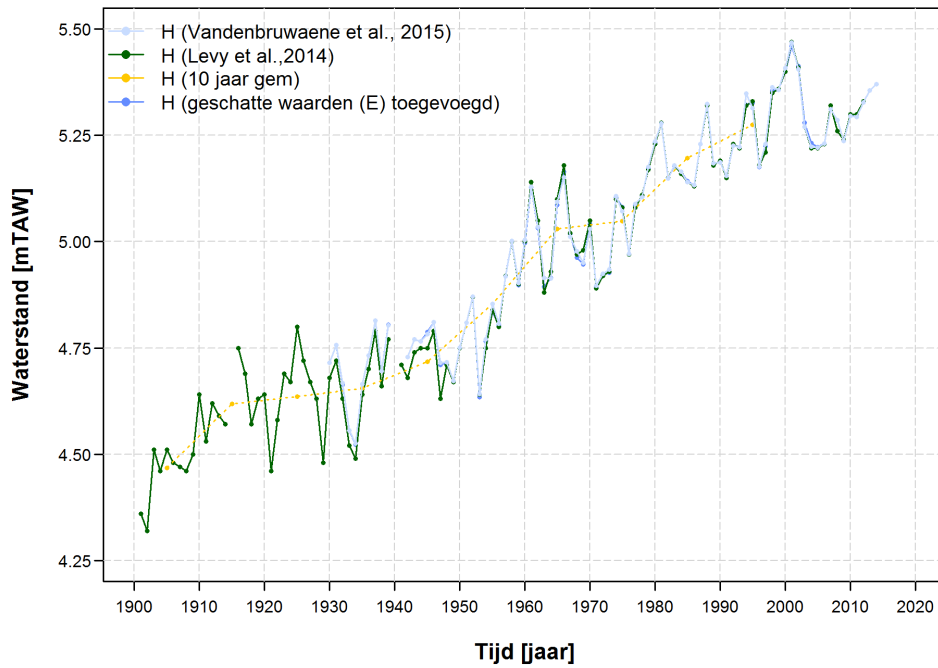
- Good (G): de data heeft een goede kwaliteit
- Estimated (E): het tijdstip en/of de hoogte van de meting was onbekend en de hoogte is geschat op basis van metingen op nabijgelegen posten terwijl het tijdstip geschat is gebruikmakend van het tijdstip van het vorige datapunt en een gemiddelde tijd voor een getij afkomstig uit het desbetreffende 10-jarig overzicht.
- Suspected (S): de validator heeft redenen om te twijfelen aan de kwaliteit van de data maar kan geen betere gegevens verschaffen
- Missing (M): er is geen dataregistratie voor dit datapunt

In voorliggende studie werd eerst een kwaliteitscontrole uitgevoerd vooraleer een berekende waarde op te nemen als resultaat. Zo moet meer dan 50% van de gegevens gebruikt voor de berekening van een jaargemiddelde getijparameter een kwaliteitsvlag “Good” hebben. In het T2009 rapport (Depreiter et al., 2014) werd een percentage van 75 % vooropgesteld. Een vergelijking tussen beide methodes toont aan dat gebruik makende van het 50% criterium er 0 tot 9 jaar meer wordt weerhouden, afhankelijk van de beschouwde getijpost (Tabel 2).

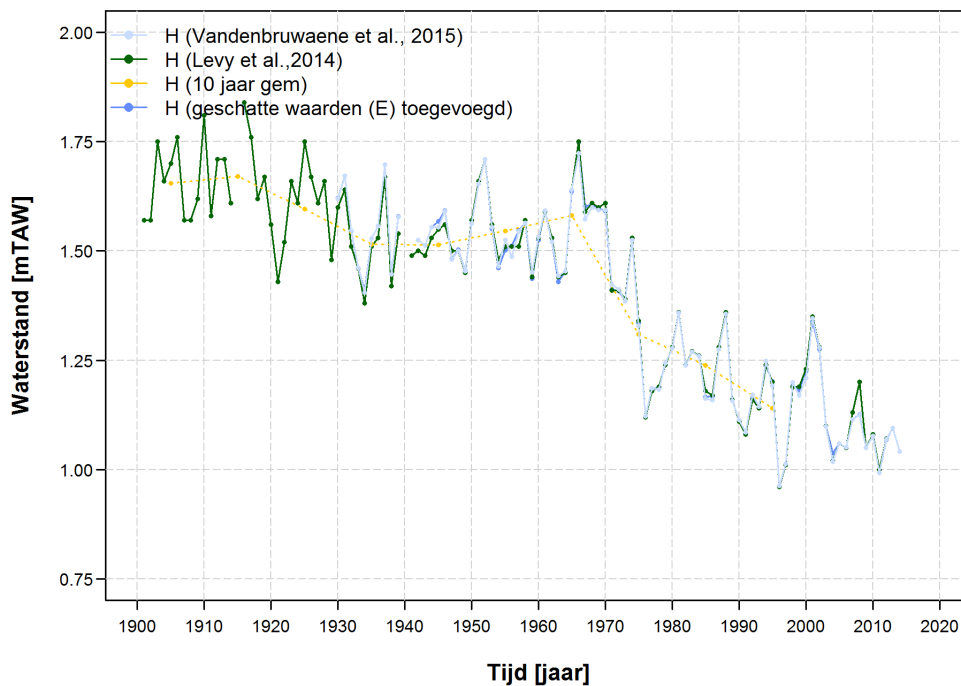
Tabel 2 - Aantal weerhouden jaren voor hoogwater (HW) en laagwater (LW) gebruik makende van het 50% criterium versus het 75% criterium (totaal aantal jaar = 85).

	HW		LW	
	50 %	75 %	50 %	75 %
Melle	61	60	61	60
Wetteren	82	77	82	74
Schoonaarde	79	70	79	71
Dendermonde	83	83	83	82
Temse	74	72	69	66
Walem	85	80	85	80
Tielrode	83	81	83	81
Waasmunsterbrug	79	72	79	72

Naast het aantal weerhouden jaren kan ook de absolute waarde van een berekende jaargemiddelde getijparameter verschillen afhankelijk van de gebruikte methodiek. In Figuur 2 en Figuur 3 zijn respectievelijk de jaargemiddelde hoog- en laagwaters te Dendermonde weergegeven berekend volgens de methodiek toegepast in voorliggend rapport (i.e. enkel kwaliteitsvlag “Good” + 50% criterium), de methodiek gebruikt in Levy et al. (2014), en de tienjaarlijkse gemiddelden. Bijkomend wordt niet alleen het jaargemiddeld hoogwater/laagwater weergegeven berekend op basis van gegevens met een kwaliteitsvlag “Good” (lichtblauwe lijn), maar ook het jaargemiddeld hoogwater/laagwater berekend op basis van gegevens met zowel een kwaliteitsvlag “Good” als een kwaliteitsvlag “Estimated” (i.e. de blauwe lijn). De vergelijking toont aan dat het verschil in jaargemiddeld hoogwater/laagwater tussen de verschillende methodes slechts enkele centimeters bedraagt en dus heel beperkt is. De figuren voor de overige meetposten zijn weergegeven in Appendix (Appendix A – Vergelijking jaargemiddeld HW en LW, Figuur 77 tot en met Figuur 90).



Figuur 2 – De jaargemiddelde hoogwaters te Dendermonde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



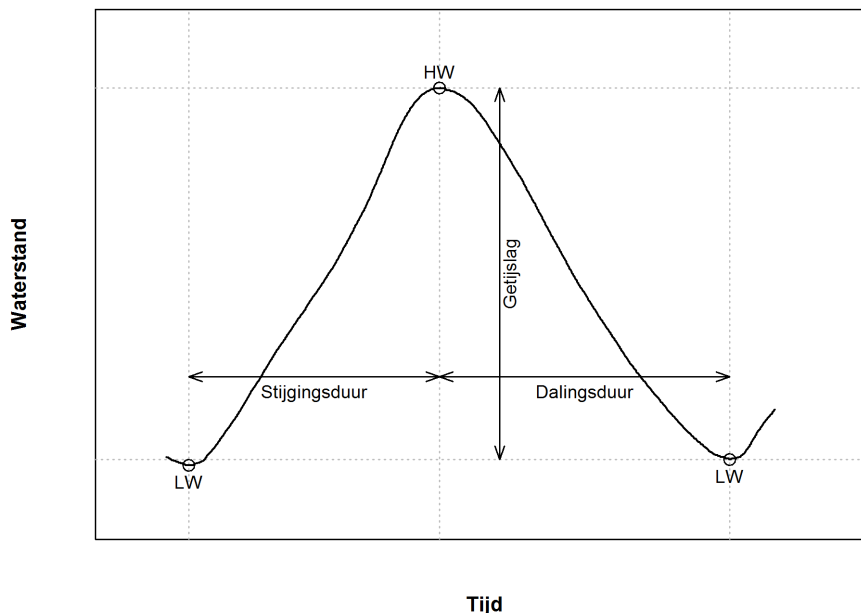
Figuur 3 – De jaargemiddelde laagwaters te Dendermonde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.

2.4. Bepaling van springtij en doottij

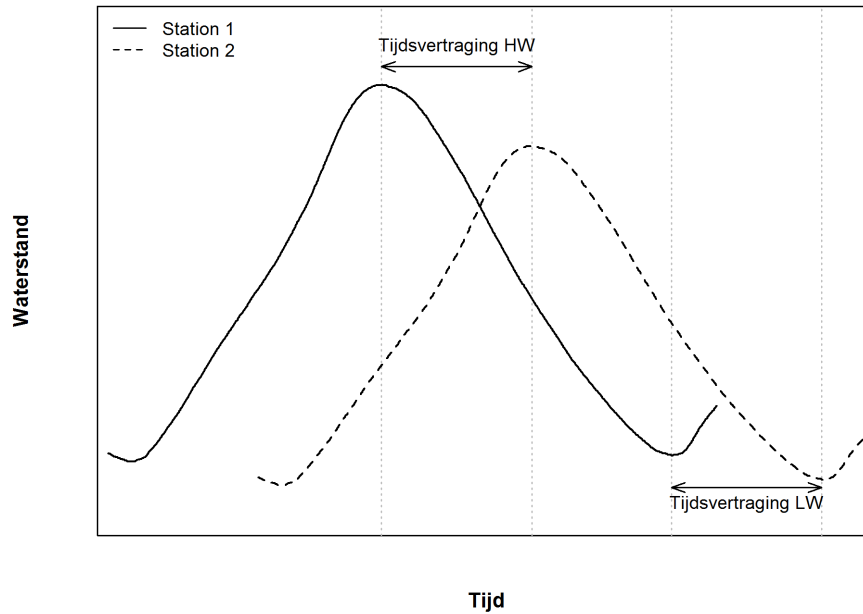
Springtij en doottij worden respectievelijk gedefinieerd op basis van het tijdstip nieuwe/volle maan en op basis van het tijdstip eerste/laatste kwartier. Springtij HW is hierbij het HW te Antwerpen dat volgt op de 5^{de} maanspassage doorheen de meridiaan van Ukkel, volgend op het tijdstip van nieuwe maan of volle maan. Springtij LW is het LW dat volgt op springtij HW. Doodtij HW is dan het HW te Antwerpen dat volgt op de 5^{de} maanspassage doorheen de meridiaan van Ukkel, volgend op het tijdstip van het eerste kwartier of het laatste kwartier. In R werd een algoritme uitgewerkt om HW en LW bij springtij en doottij te selecteren op basis van de tijdstippen van de maanspassages, de tijdstippen van nieuwe/volle maan en eerste/laatste kwartier, en de tijdstippen van HW en LW.

2.5. Berekening van de jaargemiddelde getijparameters

Voor deze studie werden een aantal karakteristieke getijparameters afgeleid op basis van de hoog- en laagwaterstanden en de bijhorende tijdstippen. Het gaat om de hoog- en laagwaterstanden bij gemiddeld getij – springtij – doottij – extreme condities, de stijgings- en dalingsduur, en de tijdsvertraging ten opzichte van Vlissingen. Deze parameters zijn eveneens aangeduid in Figuur 4 en Figuur 5. Voor elk van deze parameters werden de jaargemiddelde waarden berekend en dit voor iedere getijpost over de beschikbare tijdsperiode (Tabel 1). Alle berekeningen werden uitgevoerd in R.



Figuur 4 – Aanduiding van de getijparameters op een getijkromme



Figuur 5 – Aanduiding van de getijparameters voor getijkrommes van 2 meetstations

2.6. Bepaling van de langdurige waterstandtrends

2.6.1. Bepalen van langjarige trends te Vlissingen

Na de bepaling van de jaargemiddelde getijparameters werd gekeken op welke manier de getijparameters evolueren over de periode 1930 tot recent. Fenomenen zoals zeespiegelstijging en de 18.6 jarige nodale cyclus zullen er immers voor zorgen dat er ter hoogte van de afwaartse rand van het estuarium (getijpost Vlissingen) bepaalde lange termijn trends worden waargenomen in bijvoorbeeld de waterstandsgegevens. Meer opwaarts het estuarium zullen ook nog andere factoren een invloed hebben (zie §2.6.2). Ter hoogte van Vlissingen kan de langjarige waterstandtrend beschreven worden aan de hand van onderstaande vergelijking:

$$WL = \mu + \lambda t + \alpha \sin(\omega t - \varphi)$$

Hierbij is WL de geschatte waterhoogte [m], t de tijd [jaar], μ het snijpunt van de rechte [m], λ de helling van de rechte [m/jaar], α de amplitude van de 18.6 jarige cyclus [m], ω de frequentie van de 18.6 jarige cyclus [1/jaar], en φ het faseverschil [rad].

De eerste twee termen beschrijven het effect van de zeespiegelstijging (lineaire trend) op de waterhoogte, de laatste term beschrijft het effect van de 18.6 jarige nodale cyclus. Deze 18.6 jarige cyclus is een gevolg van de positie van de aardas t.o.v. de maanbaan en de aardbaan, en heeft dus een astronomische oorsprong. Het faseverschil φ van deze 18.6 jarige cyclus kan dan ook berekend worden op basis van de maanculminaties (Van Cauwenberghe, 1977). Het is echter ook mogelijk om het faseverschil te berekenen op basis van de meetgegevens ter hoogte van Vlissingen (Depreiter et al., 2014; Levy et al., 2014). Een overzicht van de faseverschillen berekend volgens de verschillende methodes is weergegeven in Tabel 3. Het valt op dat de berekende waarden voor de faseverschillen sterk vergelijkbaar zijn ondanks het verschil in methodologie. Desondanks werd in deze studie gekozen om de waarden te gebruiken op basis van de maanculminaties (Van Cauwenberghe, 1977). De 18.6 jarige cyclus kent immers een louter astronomische oorsprong terwijl meetgegevens ook worden beïnvloed door andere processen.

Tabel 3 – Overzicht van het faseverschil ϕ berekend op basis van maanculminaties (Van Cauwenberghe, 1977) en berekend op basis van meetgegevens (Depreiter et al., 2014; Levy et al., 2014). * duidt aan dat de berekende faseverschillen zijn aangepast zodat ze in tegenfase zijn (i.e. LW's zijn minimaal als HW's maximaal zijn)

	HW	LW	Jaren	
			max	min
Van Cauwenberghe (1977)	0.3088	3.45093	1997, 2016	1988, 2006
Levy et al. (2014)	-1.27×10^{-4}	3.141466	1996, 2015	1987, 2006
T2009 (Depreiter et al., 2014)	0.100866*	3.242459*	1997, 2016	1987, 2006

2.6.2. Bepalen van langjarige trends voor overige meetstations

Voor de andere meetstations kan eenzelfde langjarige trend worden opgesteld als voor Vlissingen. Aangezien het faseverschil ϕ gebaseerd is op de astronomische tabel wordt een vaste waarde aangenomen voor alle stations (Van Cauwenberghe, 1977; zie Tabel 3). We veronderstellen het faseverschil dus constant over het volledige estuarium.

Het verschil tussen Vlissingen en de opwaartse getijposten is dat de lineaire trend ter hoogte van Vlissingen kan gelijk gesteld worden aan de zeespiegelstijging, terwijl voor de opwaartse getijposten morfologische wijzigingen in het estuarium ook een invloed hebben. Bijgevolg spreken we hier eerder van een lineaire trend dan van een zeespiegelstijging. Bovendien neemt opwaarts Temse de invloed van de bovenafvoer sterk toe (zie ook §7.1), wat leidt tot een grotere jaarlijkse variatie in waterstand. Op lange termijn wordt echter geen trend in bovenafvoer waargenomen (§5), en bijgevolg heeft bovenafvoer geen bijdrage tot de lineaire component.

Voor de meetstations opwaarts Vlissingen werd volgende methodiek toegepast voor het bepalen van de parameters in bovenstaande vergelijking (zie §2.6.1):

1. Φ wordt vastgelegd, respectievelijk 0.3088 en 3.45093 voor hoog- en laagwater volgens Van Cauwenberghe (1977) (zie Tabel 3)
2. μ , λ en α worden bepaald m.b.v. de nls functie (R software) waarbij
 - a) $\alpha > 0$ wordt vooropgesteld
 - b) voor laagwater worden de periodes 1930-1970 en 1980-2013 apart gefit, omdat de wijzigingen in het estuarium in de jaren '70 tot een duidelijke trendbreuk hebben geleid.
3. Indien de parameter α statistisch niet weerhouden wordt ($p > 0.05$), wordt de langjarige trend vereenvoudigd tot een lineaire trend, waarbij μ en λ opnieuw worden bepaald, gebruik makende van de nls functie (R software). Dit treedt vooral op in de meest opwaartse stations.

2.7. Bathymetrische analyse

2.7.1. Opdeling in segmenten

Voor de bathymetrische analyse werden alle beschikbare bathymetrische gegevens van de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel over de tijdsperiode 1930 tot recent opgevraagd bij aMT (afdeling Maritieme Toegang). Vermits in deze studie de link wordt gelegd tussen de morfologische wijzigingen in het estuarium en de respons van het getij werden de bathymetrieën opgesplitst in segmenten tussen de getijposten (Figuur 6). Een overzicht van de bathymetrische segmenten en de geanalyseerde tijdstippen wordt weergegeven in Tabel 4. We merken op dat voor het merendeel van deze tijdstippen er enkel

morfologische informatie beschikbaar is voor het subtidaal (i.e. bathymetrische gegevens). Voor de meest recente tijdstippen (2001 en 2011) is er op basis van LIDAR metingen naast het subtidaal ook informatie beschikbaar over de hoogteligging van het intertidaal (i.e. topo-bathymetrische gegevens).

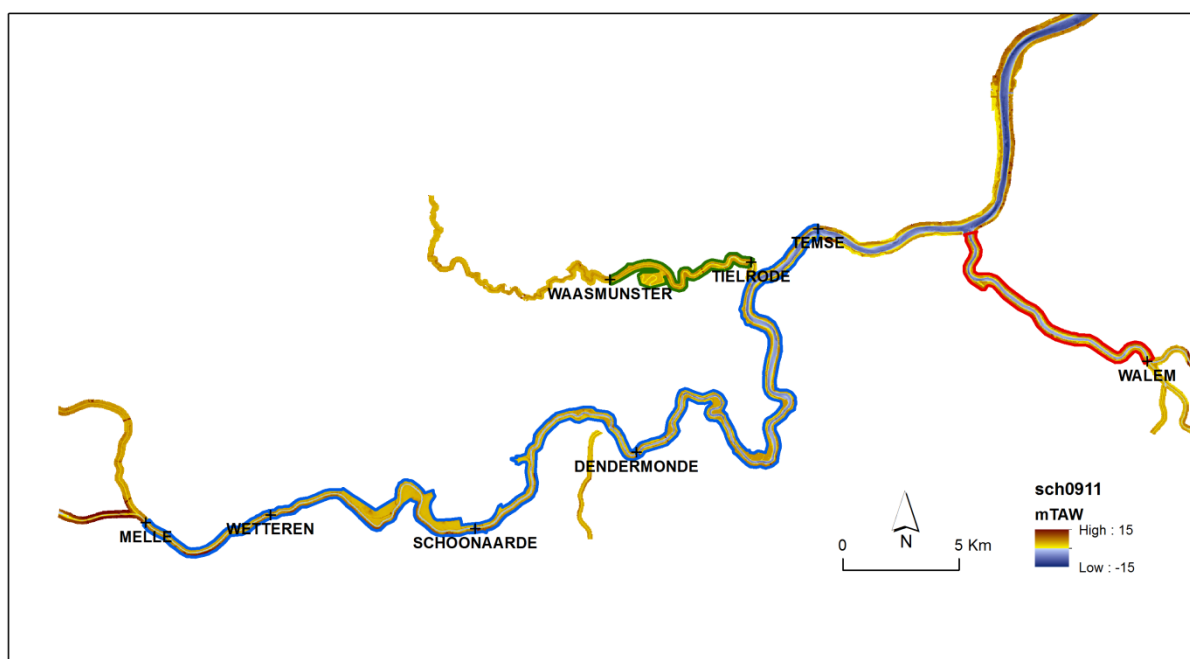
2.7.2. Refereren ten opzichte van het GLW vlak

In eerdere morfologische analyses van de Zeeschelde werden geuldieptes en geulvolumes berekend ten opzichte van het horizontaal referentievlak TAW (o.a. IMDC, 2013; Plancke et al., 2012). Deze methode laat toe om geuldieptes/geulvolumes te berekenen indien het gemiddeld laagwatervlak (GLW vlak) horizontaal is zoals het geval is voor de Beneden-Zeeschelde (zie Figuur 7, km 60-95). In de meer opwaartse delen van het estuarium (e.g., Boven-Zeeschelde, km 95-160 in Figuur 7) is er echter een sterke verhoging van het GLW vlak. Bijgevolg kan het horizontaal TAW referentievlak niet gebruikt worden om nauwkeurig geuldieptes/geulvolumes te berekenen voor de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel. Bovendien is het GLW vlak variabel in de tijd wat niet in rekening wordt gebracht door te rekenen met het TAW vlak. Om hieraan tegemoet te komen werd voor ieder bathymetrisch tijdstip een GLW vlak aangemaakt. Het GLW vlak werd aangemaakt door de GLW standen van de getijposten (Tabel 5) lineair te interpoleren langsheen de vaargeul. De GLW standen per getijpost werden bepaald door een gemiddelde te nemen van de jaarlijkse GLW waarden over een periode van 11 jaar, waarin het jaar van bathymetrische opname het midden vormt van deze periode (cf. Tabel 5 en Tabel 4). Op die manier wordt de jaarlijkse variatie in GLW ten gevolge van bovenafvoer uitgemiddeld. Voor de bathymetrie van 2011 werd het GLW vlak berekend op basis van de tijdsperiode 2003-2013. We merken op dat deze 11-jarige GLW-standen berekend werden op basis van jaarlijkse GLW standen zoals gepresenteerd in §3. Voor de afwaartse rand van de Rupel werd gebruik gemaakt van de getijpost Schelle-Hingene (gelegen aan de monding van Rupel). Voor deze getijpost werden de laagwaterstanden nog niet gedigitaliseerd en berekend volgens de methodiek in deze studie, maar zijn jaarlijkse GLW standen wel beschikbaar (Levy et al., 2014). Door uiteindelijk de aangemaakte GLW vlakken af te trekken van de bijhorende bathymetrieën werden de bathymetrische gegevens voor de verschillende tijdstippen gerefereerd ten opzichte van het GLW vlak (Appendix D – Bathymetrieën (mGLW)). Deze methodiek laat toe om accuraat geuldieptes en geulvolumes onder gemiddeld laagwater te berekenen wat cruciaal is om historische wijzigingen in morfologie en getij met elkaar te linken.

2.7.3. Bepaling van het geulareaal, het geulvolume en de geuldiepte

Gebruik makende van de 'surface volume' tool in ArcGIS 10 en de bathymetrische gegevens werd het geulareaal en het geulvolume bepaald onder het 0m GLW vlak voor elk van de segmenten. Vervolgens werd het geulvolume gedeeld door het geulareaal om op die manier de segment-gemiddelde geuldiepte te bekomen. Bovenstaande analyse werd nadien herhaald gebruik makende van het -2m GLW, -5m GLW en het 0m TAW referentievlak. Op die manier werd nagegaan of de morfologische wijzigingen vooral plaatsvonden in de diepe delen van de geul of de ondiepe delen. Bepaling van de geuldiepte onder het -5m GLW vlak geeft bijvoorbeeld informatie over de morfologische wijzigingen in het diepere deel (< -5m GLW). Bovendien zorgt de opdeling in diepteklassen er voor dat mogelijke artefacten herkend worden. Het is zo dat niet alle peilingen het volledige areaal bedekken tot op het niveau 0m GLW (te ondiep om te peilen)¹. Dit zorgt er voor dat er afwijkingen kunnen optreden in de bepaling van de morfologische parameters. Door de morfologische parameters te bepalen ten opzichte van het -2m GLW vlak wordt hier aan tegemoet gekomen. De historische evolutie van de geuldiepte ten opzichte van een GLW vlak is steeds een combinatie van wijzigingen in het GLW niveau en bathymetrische wijzigingen. Om die reden werd de geuldiepte ook steeds bepaald ten opzichte van het 0m TAW vlak wat een vast referentievlak in tijd en ruimte is. Ter info worden de hypsometrische curves in m TAW weergegeven in Appendix (Appendix E – Hypsometrische curves (mTAW)).

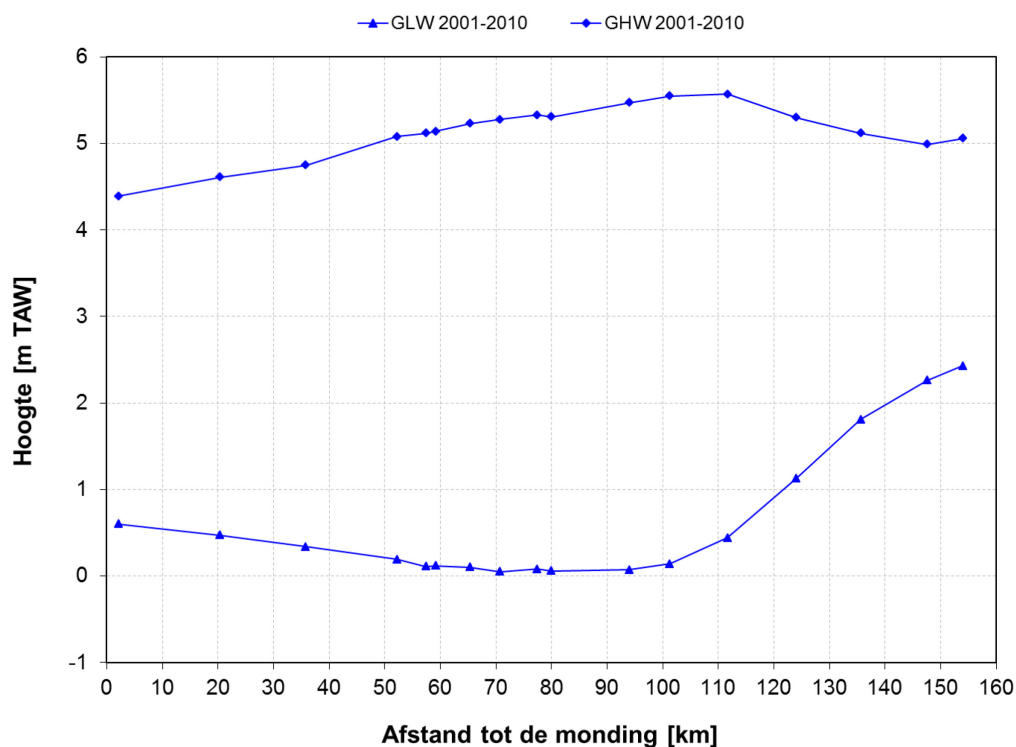
¹ De Boven-Zeeschelde bathymetrie voor het tijdstip 1990 heeft in de meest opwaartse delen een kleiner areaal dan de overige tijdstippen. Dit wijst er op dat de waterstand tijdens peilen lager was waardoor een deel van de ondiepe delen (tussen 0m en -2m GLW) niet volledig zijn meegenomen tijdens de peiling. Bijgevolg wordt voor het segment Wetteren-Melle het tijdstip 1990 niet weergegeven in de morfologische evolutie (zie §6).



Figuur 6 – Geanalyseerde bathymetrische segmenten voor de Boven-Zeeschelde (blauw), Durme (groen) en Rupel (rood).

Tabel 4 – Overzicht van de geanalyseerde bathymetrische gegevens

Segment	Tijdstip	Bekken
Temse – Dendermonde	1930, 1950, 1960, 1973, 1980, 1990, 2001, 2011	Boven-Zeeschelde
Dendermonde - Schoonaarde	1930, 1950, 1960, 1980, 1990, 2001, 2011	Boven-Zeeschelde
Schoonaarde - Wetteren	1930, 1950, 1960, 1980, 1990, 2001, 2011	Boven-Zeeschelde
Wetteren – Melle	1930, 1950, 1960, 1980, 1990, 2001, 2011	Boven-Zeeschelde
Tielrode - Waasmunsterbrug	1930, 1950, 1970, 1980, 1997, 2011	Durme
Monding Rupel - Walem	1930, 1960, 1976, 1997, 2010	Rupel



Figuur 7 – Gemiddeld laagwater (GLW) en gemiddeld hoogwater (GHW) in het Schelde estuarium over de tijdsperiode 2001-2010.

Tabel 5 – Overzicht van GLW standen (in m TAW) gebruikt om de GLW vlakken aan te maken voor de Boven-Zeeschelde (blauw), Durme (groen) en Rupel (rood).

Getijpost	1925-1935	1945-1955	1955-1965	1967-1978	1975-1985	1985-1995	1996-2006	2003-2013
Temse	0,43	0,47	0,34	0,23	0,11	0,11	0,09	0,12
Dendermonde	1,58	1,54	1,52	1,4	1,24	1,18	1,12	1,07
Schoonaarde	2,06	2,04	2,11		1,98	1,87	1,83	1,73
Wetteren	2,27	2,42	2,5		2,47	2,37	2,31	2,15
Melle	2,5	2,7	2,63		2,7	2,62	2,52	2,33
Tielrode	0,63	0,6		0,48 ²	0,17		0,20 ³	0,16
Waasmunsterbrug	1,46	1,12		2,56 ²	2,53		2,53 ³	3,56
Walem	1,04		0,82	0,53 ²			0,47 ³	0,54
Schelle-Hingene ⁴	0,21		0,25	0,04 ²			0,05 ³	0,02

² Voor de Durme getijposten is het GLW berekend over de periode 1965-1975, voor de Rupel getijposten over de periode 1971-1981

³ Voor de Durme en Rupel getijposten is het GLW berekend over de periode 1992-2002

⁴ Schelle-Hingene werd niet mee opgenomen in deze studie. GLW waarden voor deze tijpost werden afgeleid op basis van Levy et al. (2014).

3. Evolutie jaargemiddelde getijparameters

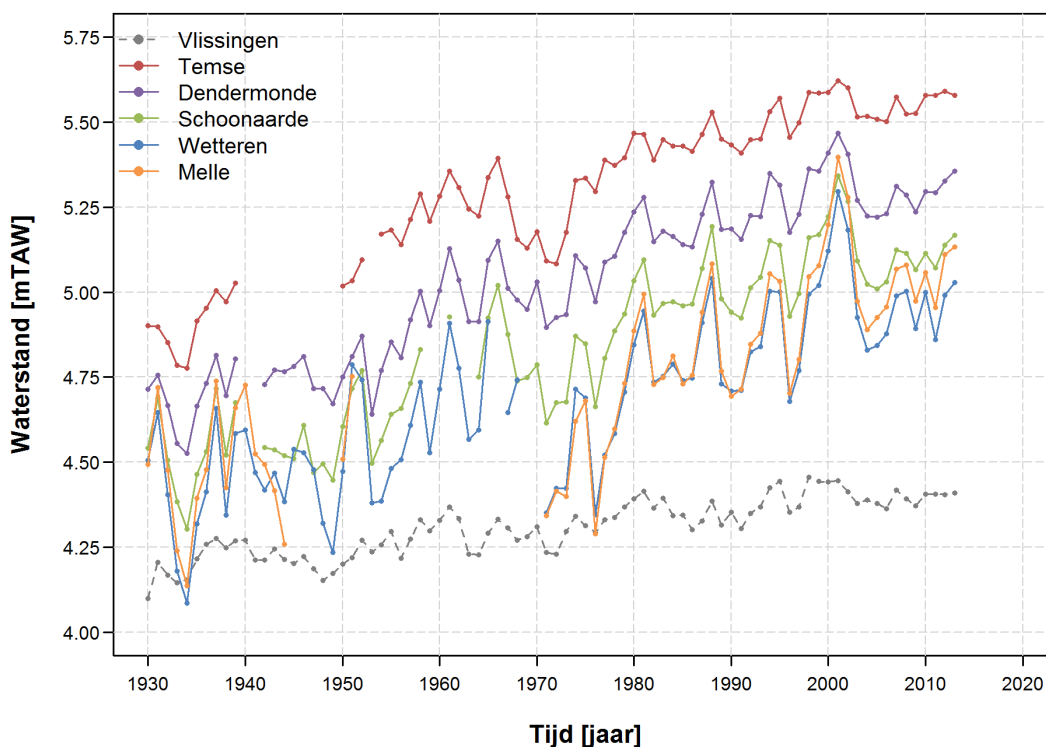
3.1. Hoogwater, laagwater en getijslag

3.1.1. Hoogwater

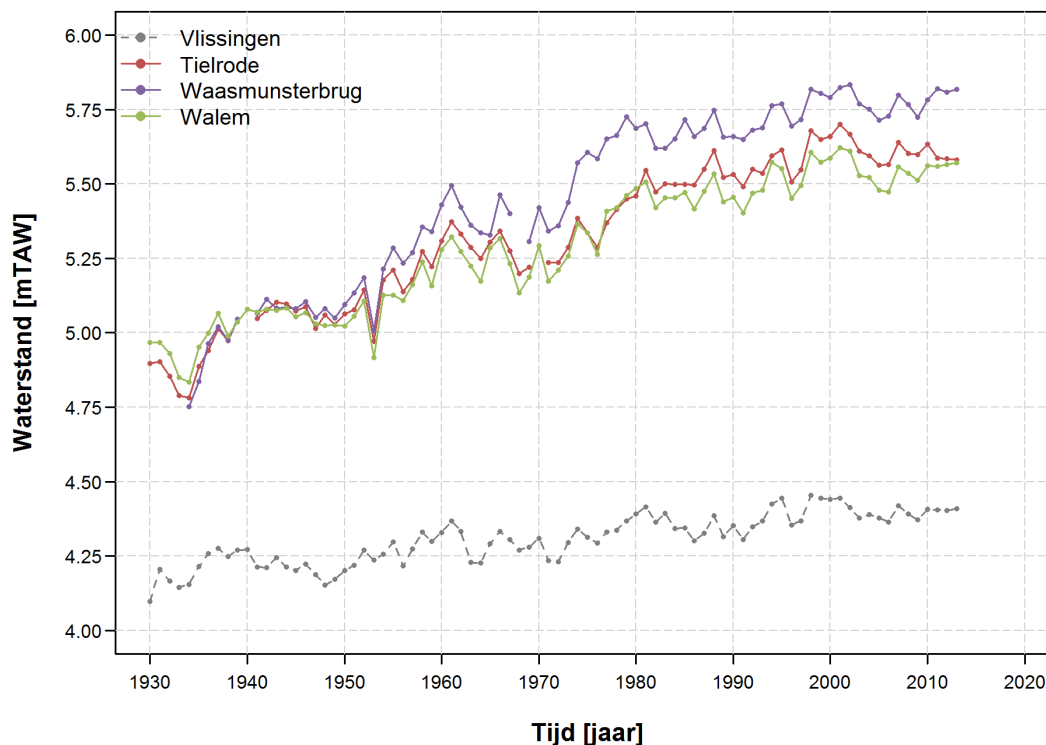
Over de periode 1930-2013 observeren we in de Boven-Zeeschelde een stijging van de jaargemiddelde hoogwaters (Figuur 8). Ook aan de afwaartse rand van het estuarium (getijpost Vlissingen) wordt een stijging van de jaargemiddelde hoogwaters waargenomen. De stijging te Vlissingen is echter duidelijk kleiner (± 25 cm) in vergelijking met de stijging in hoogwater in de Boven-Zeeschelde (minstens 50 cm voor de verschillende getijposten).

Naast een algemene stijging van de hoogwaters in de tijd observeren we ruimtelijk dat de hoogste jaargemiddelde hoogwaterstanden worden waargenomen in Temse, en dat deze afnemen in stroomopwaartse richting. De getijposten van Melle en Wetteren vormen hierop een uitzondering. In Wetteren worden doorgaans lagere hoogwaterstanden genoteerd vergeleken met Melle, zij het dat de verschillen tussen beide stations beperkt zijn. Na 2003 zijn de verschillen iets groter, de gemiddelde hoogwaters te Wetteren liggen dan ca. 5 à 10 cm lager dan te Melle. De jaarlijkse variatie in de gemiddelde hoogwaters neemt toe, naarmate men zich meer opwaarts begeeft in het estuarium. Dit is te wijten aan de toenemende invloed van de bovenafvoer op de waterstanden. Deze invloed wordt in detail onderzocht in hoofdstuk 5.

Voor de getijposten Walem (Rupel) en Tielrode (Durme) observeren we een stijging in jaargemiddeld hoogwater vergelijkbaar met de stijging in de Boven-Zeeschelde (ruim 50 cm over de periode 1930-2013, cf. Figuur 8 en Figuur 9). Voor de getijpost Waasmunsterbrug (opwaarts Durme) wordt een stijging waargenomen die beduidend hoger is (ongeveer 1m).



Figuur 8 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)

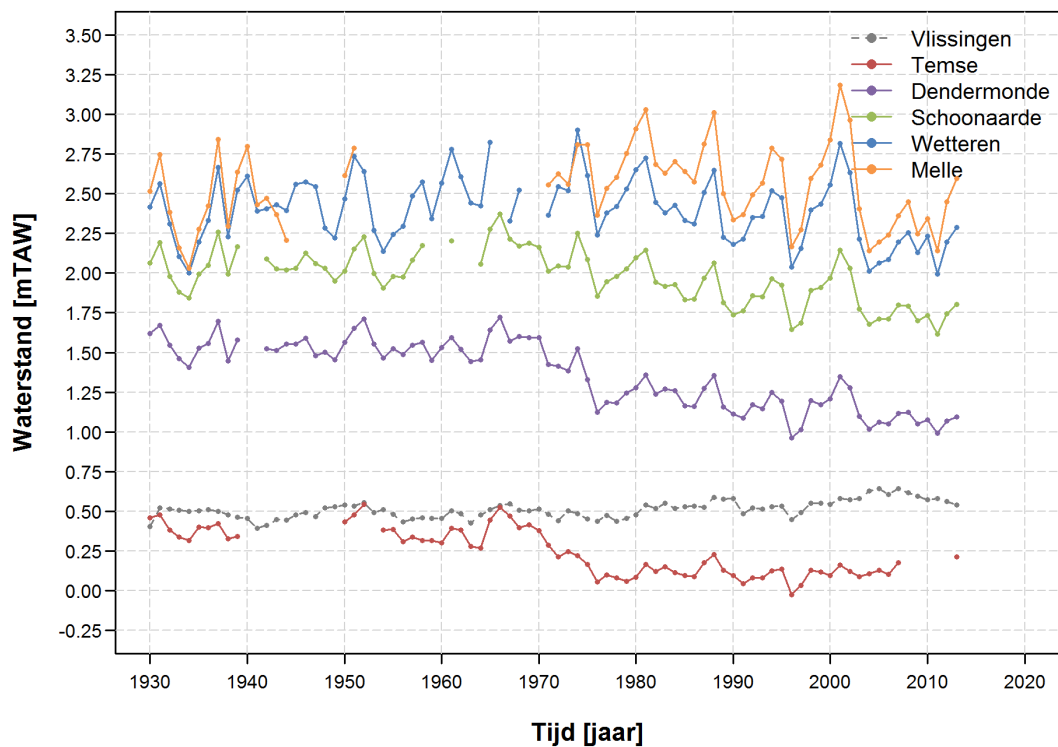


Figuur 9 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)

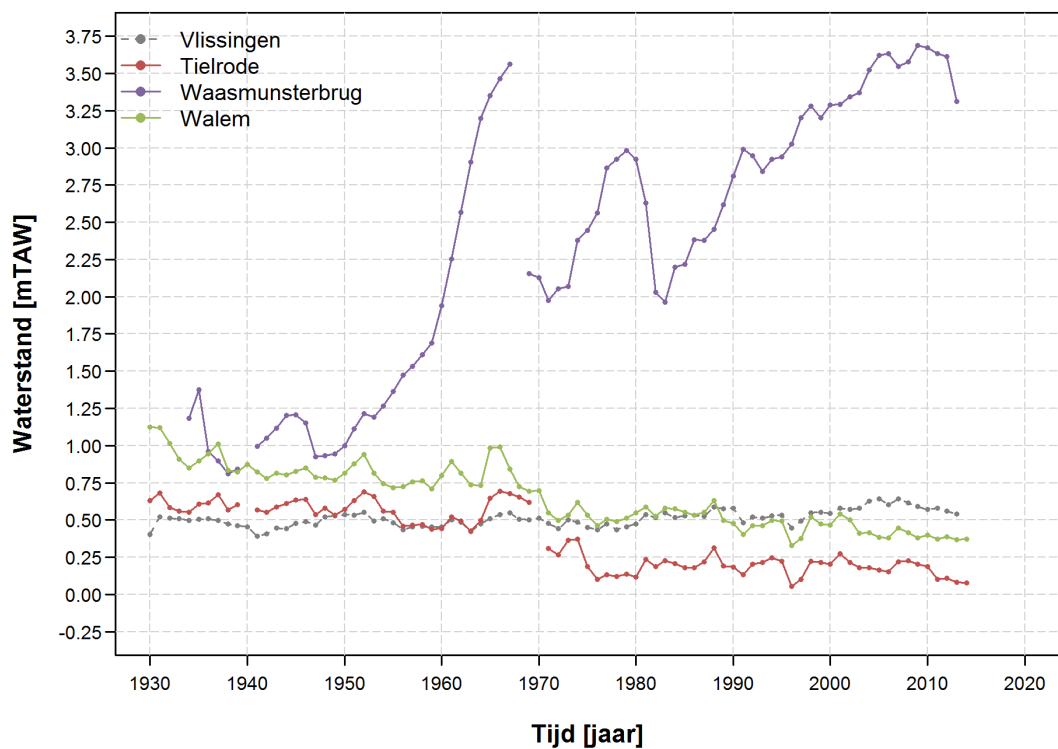
3.1.2. Laagwater

Beschouwen we de lange termijn evolutie van de laagwaterstanden dan kunnen we een onderscheid maken tussen twee periodes. Vóór 1970 is er geen duidelijke wijziging in de jaargemiddelde laagwaters, na 1970 daarentegen vertonen alle curves een neerwaartse trend (Figuur 10). Voor de getijpost Temse vindt deze daling plaats in een eerder korte periode in de jaren '70, terwijl dit voor de andere getijposten meer geleidelijk is. We veronderstellen dat de sedimentonttrekking in de Beneden-Zeeschelde in de periode 1970-1973 (e.g., Van Braeckel et al., 2012) een snellere respons kent in het afwaartse deel van de Boven-Zeeschelde, en een meer geleidelijke respons in de meer opwaartse delen. De daling bedraagt ongeveer 40 cm in Temse en Dendermonde, en 25 cm in Schoonaarde en Wetteren. Ter hoogte van Melle is de afname in laagwaterstand eerder beperkt. We merken hierbij wel op dat de laagwaterstanden ter hoogte van Melle een grote jaarlijkse variatie vertonen door de invloed van de bovenafvoer. Net zoals bij het jaargemiddeld HW neemt de variatie in jaargemiddeld LW toe in de opwaartse richting.

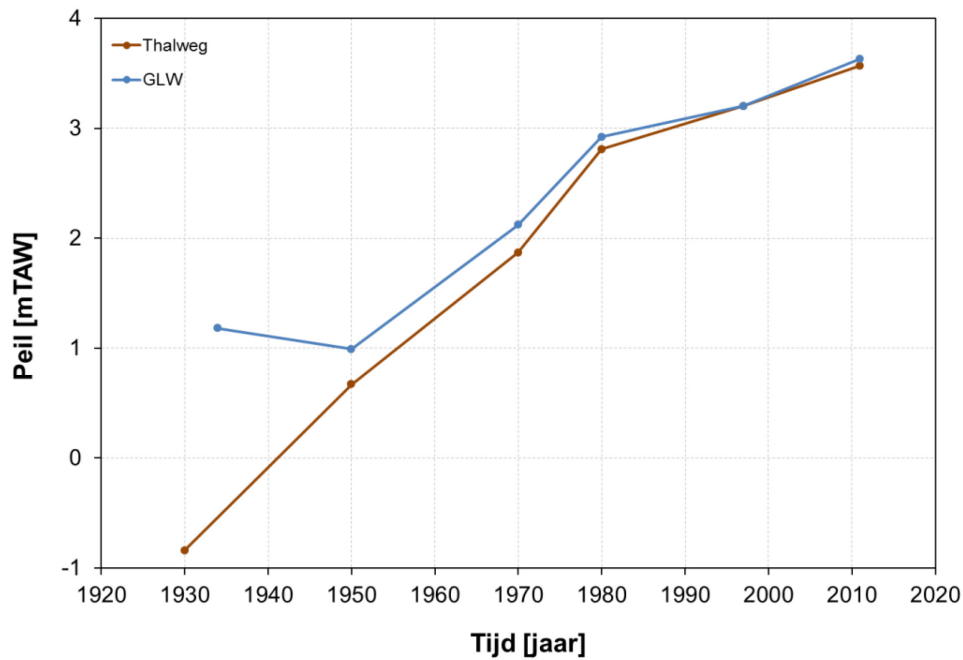
De jaargemiddelde laagwaterstanden ter hoogte van Tielrode (Durme) en Walem (Rupel) vertonen een licht dalende trend vóór 1970. Tussen 1965 en 1975 is er dan een plotse daling van ongeveer 0.5 m, waarna de licht dalende trend zich verderzet (Figuur 11). De metingen van de jaargemiddelde laagwaterstanden voor Waasmunsterbrug (Durme) vertonen echter een sterk contrasterend patroon. Hier is, vanaf 1950, een zeer sterk stijgende trend waarneembaar, waarbij de jaargemiddelde laagwaters met meer dan 2 m zijn toegenomen. Deze stijging in waterstand is toe te schrijven aan de ophoging van de Durmebodembodem. Deze ophoging heeft er voor gezorgd dat de Durmebedding in de opwaartse delen zo goed als droog komt te liggen bij laagwater. Bijgevolg komt de waterstand bij laagwater overeen met het peil van de bedding (zie Figuur 12). Vóór 1950 observeren we kleinere dalingen in waterstand ter hoogte van Waasmunsterbrug die kunnen gelinkt worden met de baggerwerken uitgevoerd tussen 1933-1939 en 1946-1948 (MOW, 1966). Eind jaren zestig, begin jaren tachtig, en in 2013 observeren we opnieuw (grotere) dalingen in waterstand. Ook nu kan een link gelegd worden met uitgevoerde baggerwerkzaamheden (IMDC et al., 2003; IMDC, 2013).



Figuur 10 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)



Figuur 11 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)

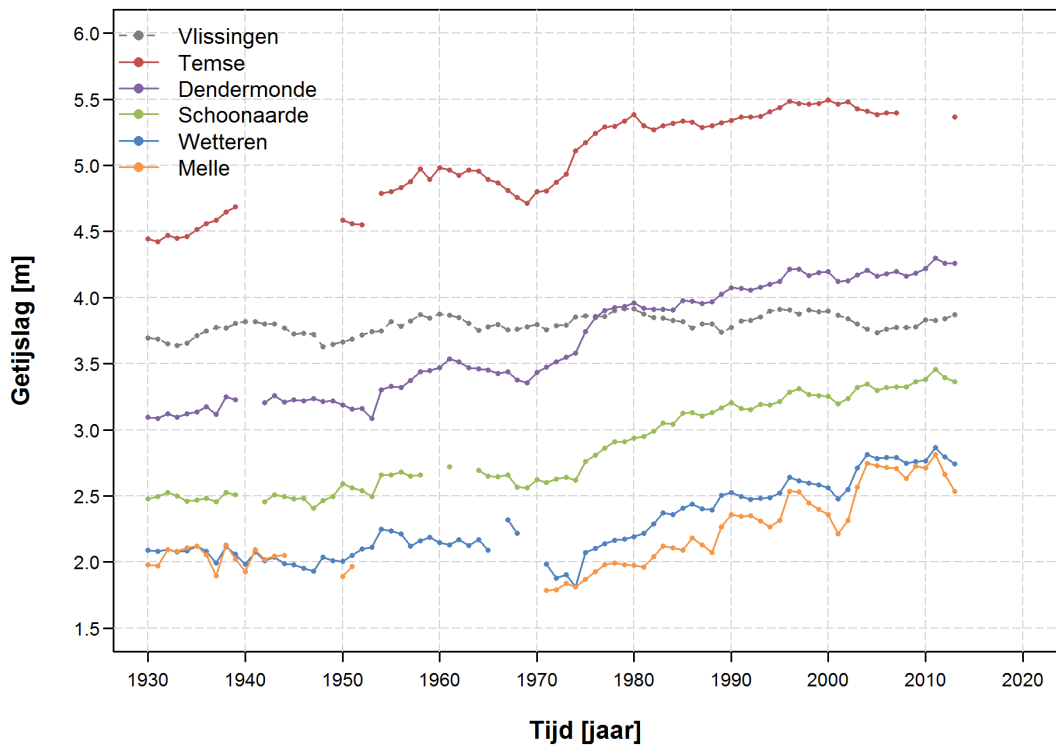


Figuur 12 – Vergelijking tussen de evolutie van de thalweg en de evolutie van het gemiddeld laagwater ter hoogte van Waasmunsterbrug.

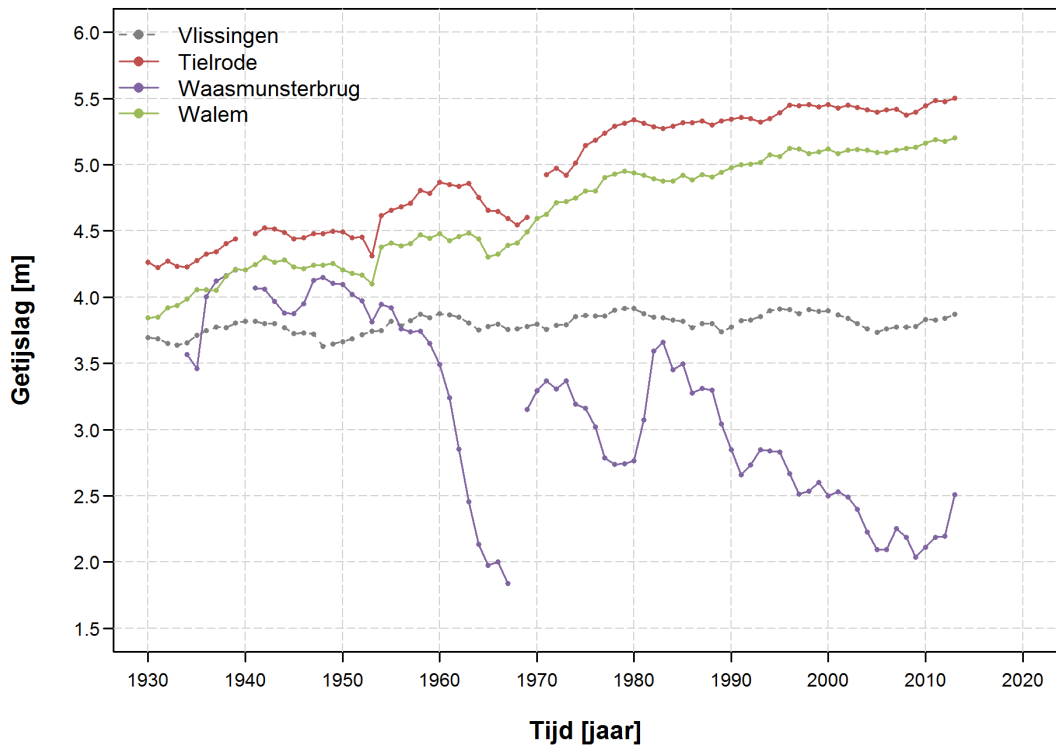
3.1.3. Getijslag

De combinatie van een stijging in jaargemiddeld hoogwater en een daling in jaargemiddeld laagwater resulteert op lange termijn in een toename van de getijslag in de Boven-Zeeschelde (Figuur 13). Beschouwen we de getijslag ruimtelijk dan is de getijslag het grootst in Temse (anno 2013 ongeveer 1.5 m meer in vergelijking met Vlissingen) en neemt de getijslag af in opwaartse richting. Tot 1950 is de getijslag in alle stations min of meer constant. Tussen 1950 en 1970 is er een beperkte verhoging in de getijslag. Vanaf 1970 neemt de getijslag overal duidelijk toe met ongeveer 75 cm over de periode 1970-2013, en dit voor alle beschouwde stations. De eerste verhoging (1950-1970) is voornamelijk te wijten aan een stijging van de hoogwaters, de tweede stijging (na 1970) aan een daling van de laagwaters.

De stijgende hoogwaterstanden en dalende laagwaterstanden resulteren in Tielrode (Durme) en Walem (Rupel) in een verhoogde getijslag (Figuur 14). Deze bedraagt ongeveer 1.25 m, wat iets groter is dan de toename van de getijslag te Temse (ca. 1 m). Aan Waasmunsterbrug daarentegen daalt de getijslag door het overheersende effect van de gestegen laagwaterstanden (= bodempeil, zie Figuur 12).



Figuur 13 – Evolutie van de jaargemiddelde getijslag voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)

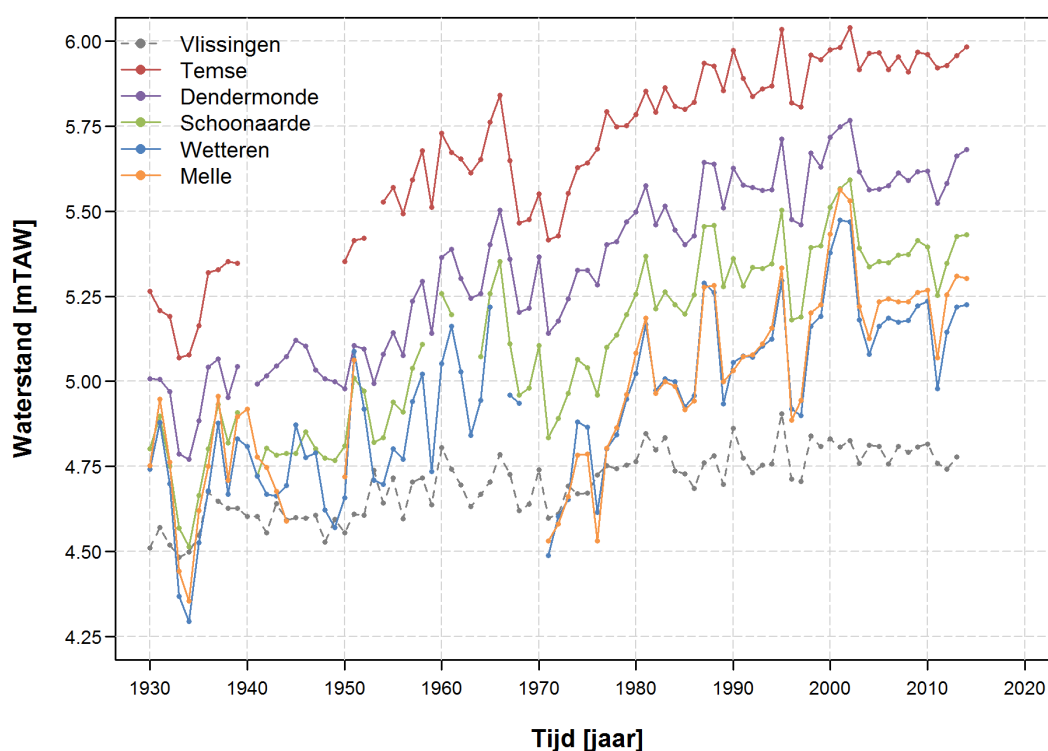


Figuur 14 – Evolutie van de jaargemiddelde getijslag voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)

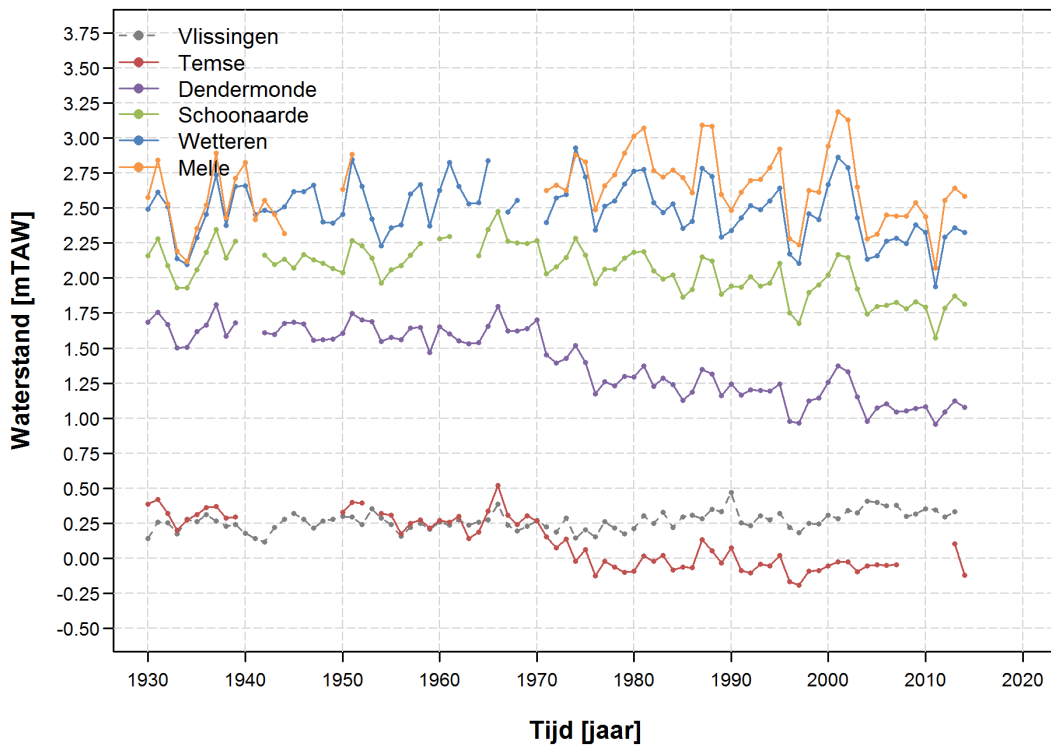
3.1.4. Springtij

Bij springtij condities zijn de lange termijn waterstandtrends in de Boven-Zeeschelde sterk vergelijkbaar met de waargenomen waterstandtrends voor een gemiddeld getij. Bij springtij vertonen de jaargemiddelde hoogwaterstanden eveneens een stijgende trend (Figuur 15), terwijl we bij de jaargemiddelde laagwaterstanden een verlaging observeren (Figuur 16). Deze verlaging treedt vroeger op in de afwaartse stations. Beschouwen we de absolute waarden, dan is bij springtij de toename in hoogwater en de afname in laagwater vergelijkbaar met de respectievelijke toename en afname die we observeren bij een gemiddeld getij.

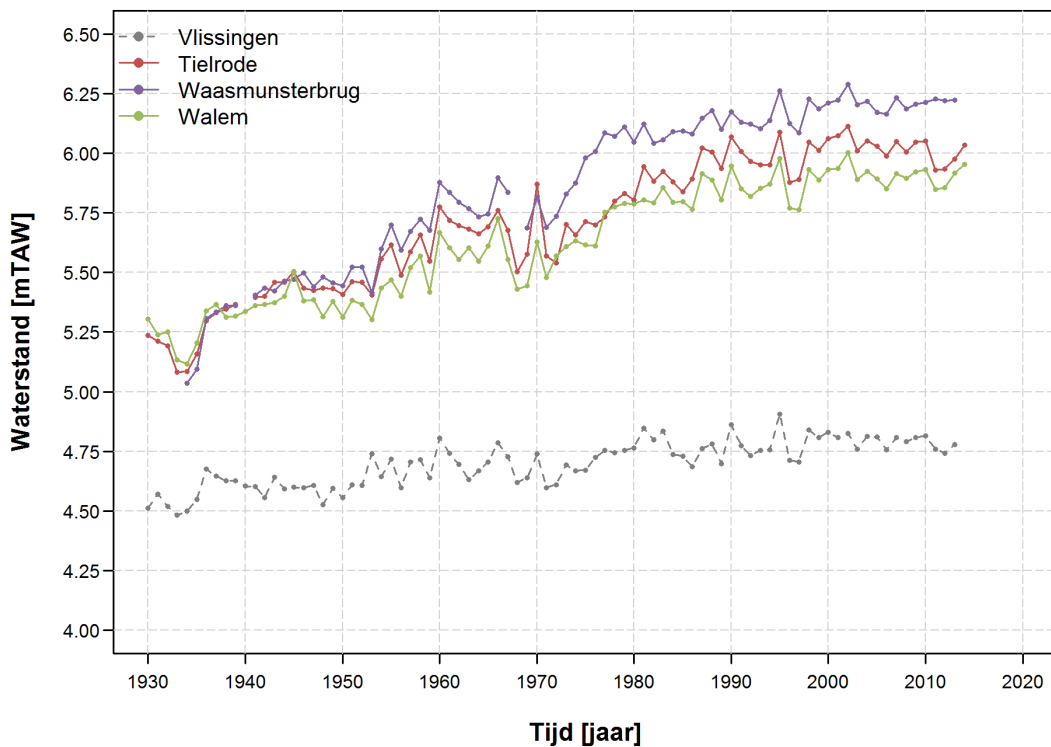
Ook voor de getijstations op de bijrivieren Rupel en Durme kunnen gelijkaardige conclusies getrokken worden voor springtij en gemiddeld getij. Bij springtij vertonen de hoogwatercurves een stijgende trend (Figuur 17), die het meest uitgesproken is voor de metingen aan Waasmunsterbrug. De laagwatercurves te Tielrode en Walem (Figuur 18) vertonen een gelijkaardig dalend verloop voor springtij en gemiddeld getij, met een duidelijke knik rond 1970. Aan Waasmunsterbrug is er bij springtij opnieuw een sterke stijging van de laagwaterstanden (=bodempcil) waarneembaar vanaf 1950.



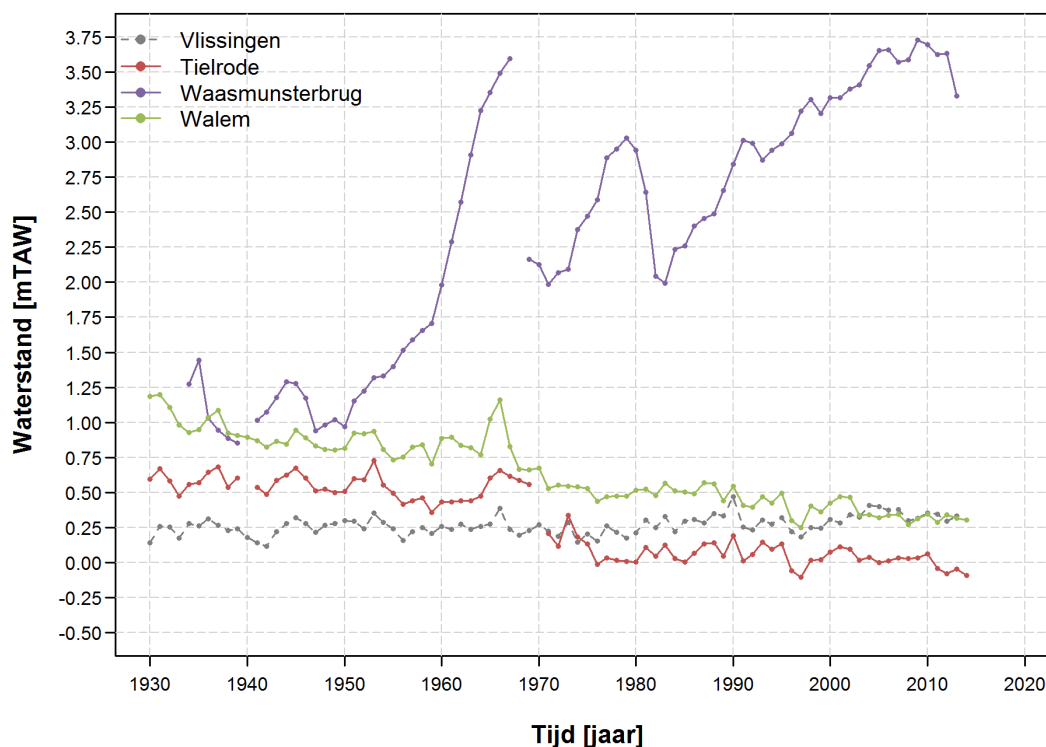
Figuur 15 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij springtij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 16 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater bij springtij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)



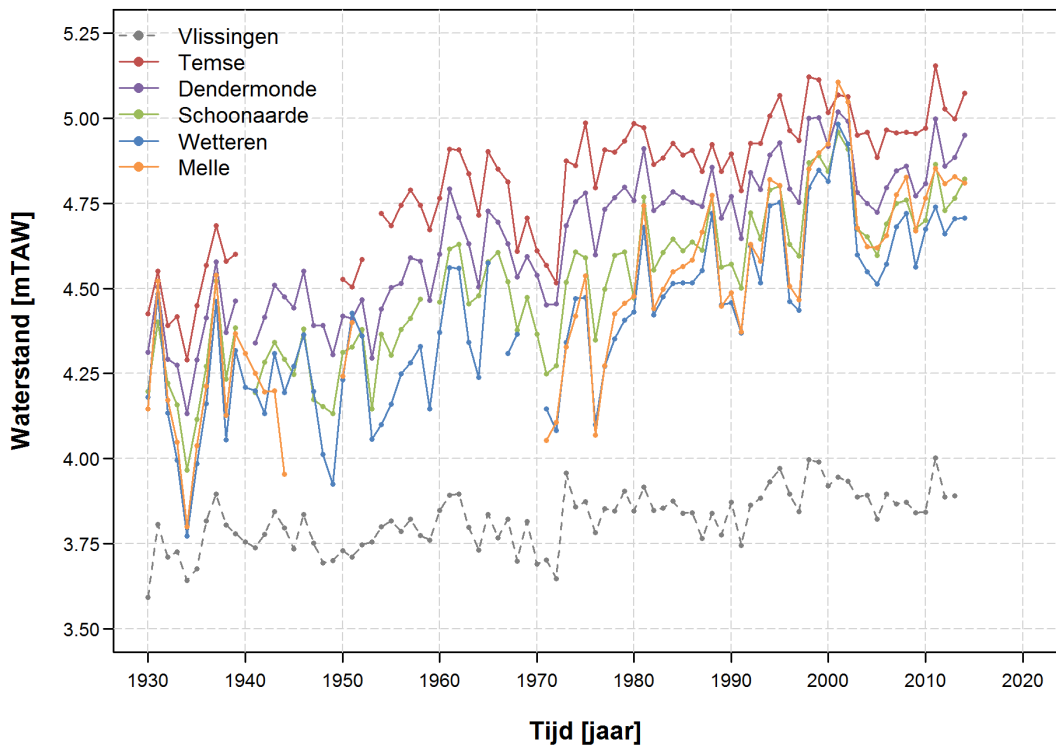
Figuur 17 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij springtij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)



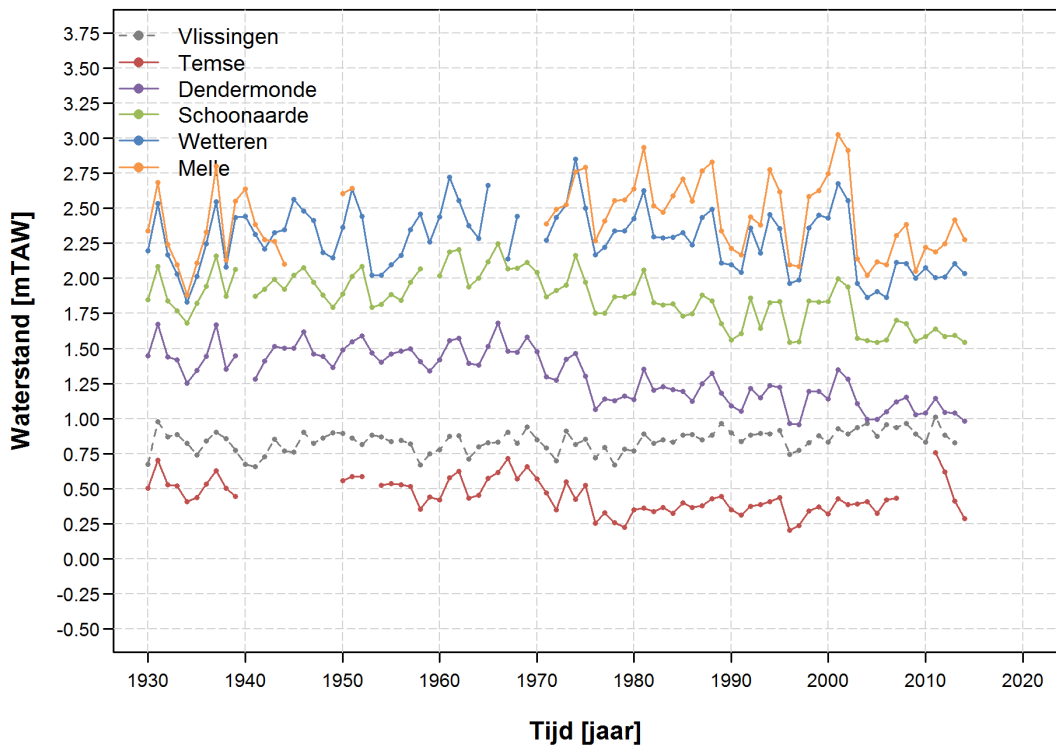
Figuur 18 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater bij springtij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde).

3.1.5. Doodtij

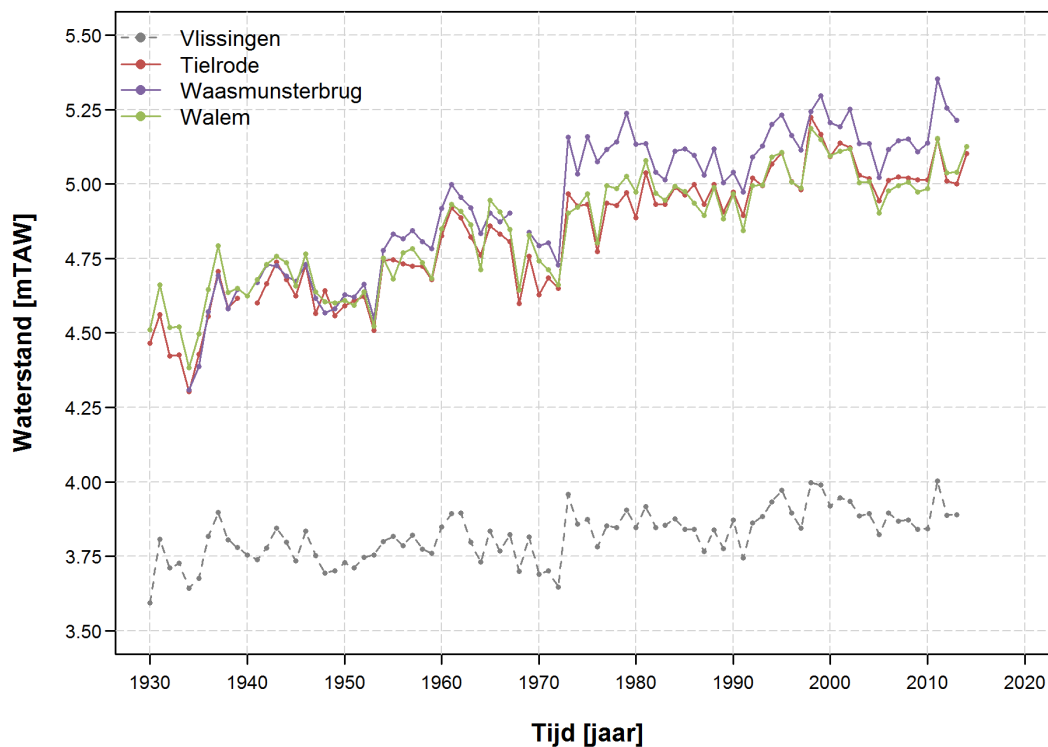
Ook voor doottij blijven de algemene trends van het gemiddeld getij bevestigd. De hoogwaterstanden bij doottij zijn weergegeven in Figuur 19 voor de Boven-Zeeschelde en in Figuur 21 voor Rupel en Durme. De jaargemiddelde laagwaterstanden bij doottij zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 20 en Figuur 22. De daling van de laagwaters en de stijging van de hoogwaters bij doottij is vergelijkbaar met de respectievelijke daling en stijging die we observeren voor een gemiddeld getij. Enkel de laagwaters te Temse vertonen bij doottij een duidelijk minder sterke daling dan de jaargemiddelde waarden (ca. 10 cm vs. 50 cm).



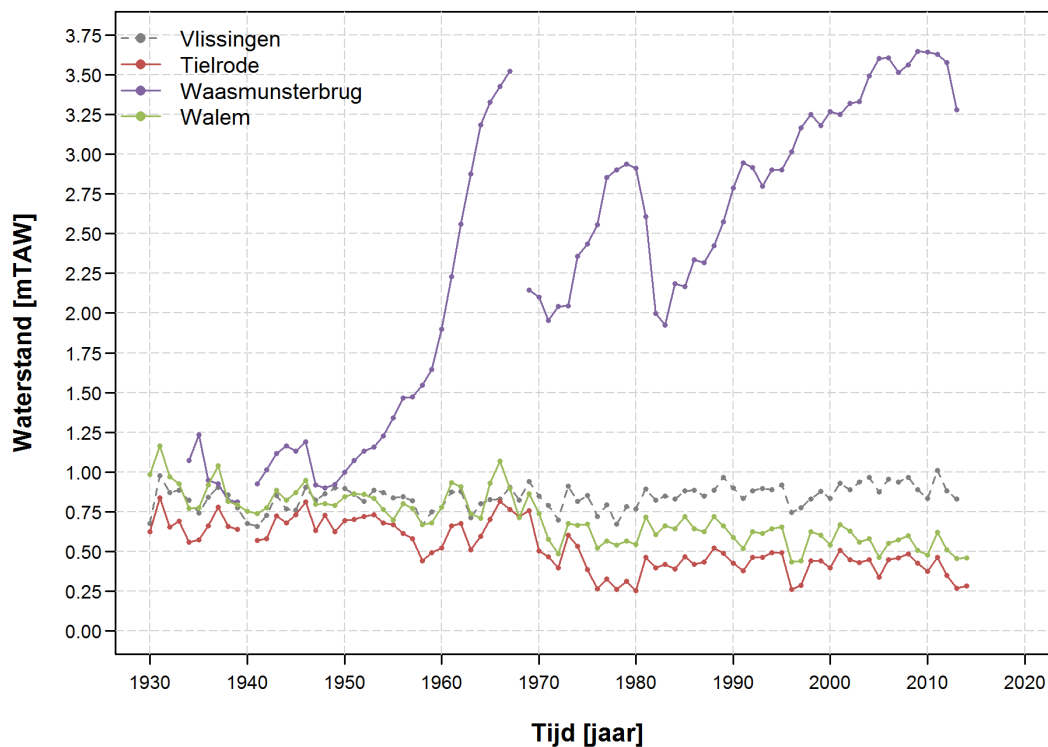
Figuur 19 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij doortij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 20 – Evolutie van de jaargemiddelde laagwater bij doortij voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 21 – Evolutie van het jaargemiddeld hoogwater bij doottij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)



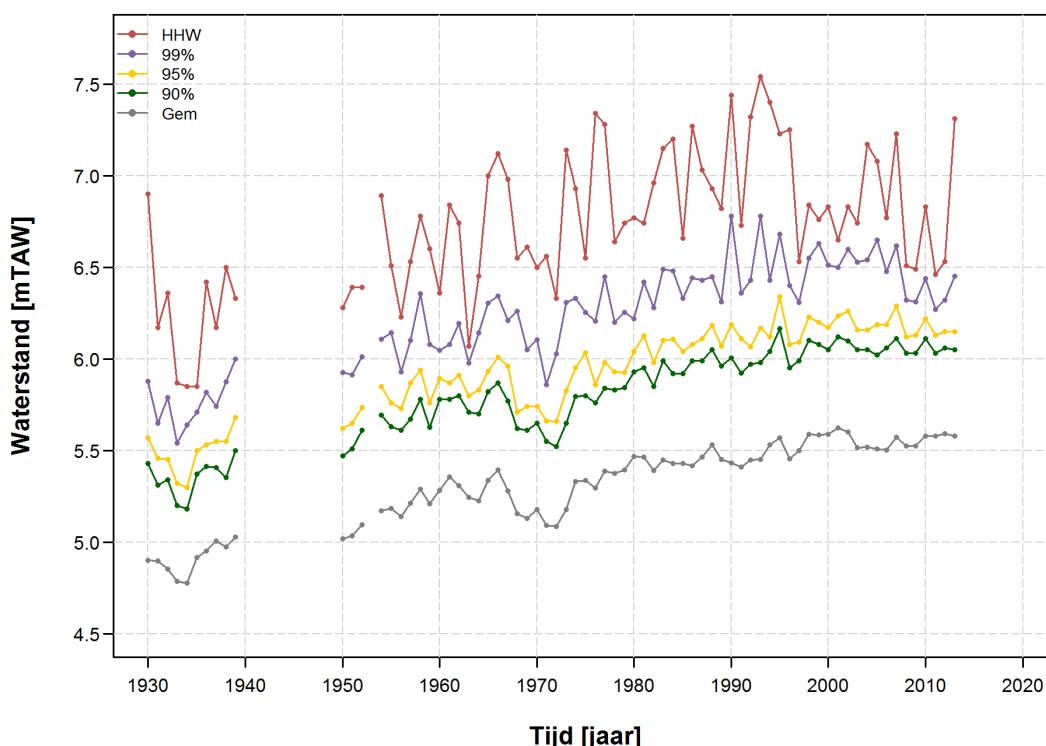
Figuur 22 – Evolutie van het jaargemiddeld laagwater bij doottij voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)

3.2. Extreem hoogwater en laagwater

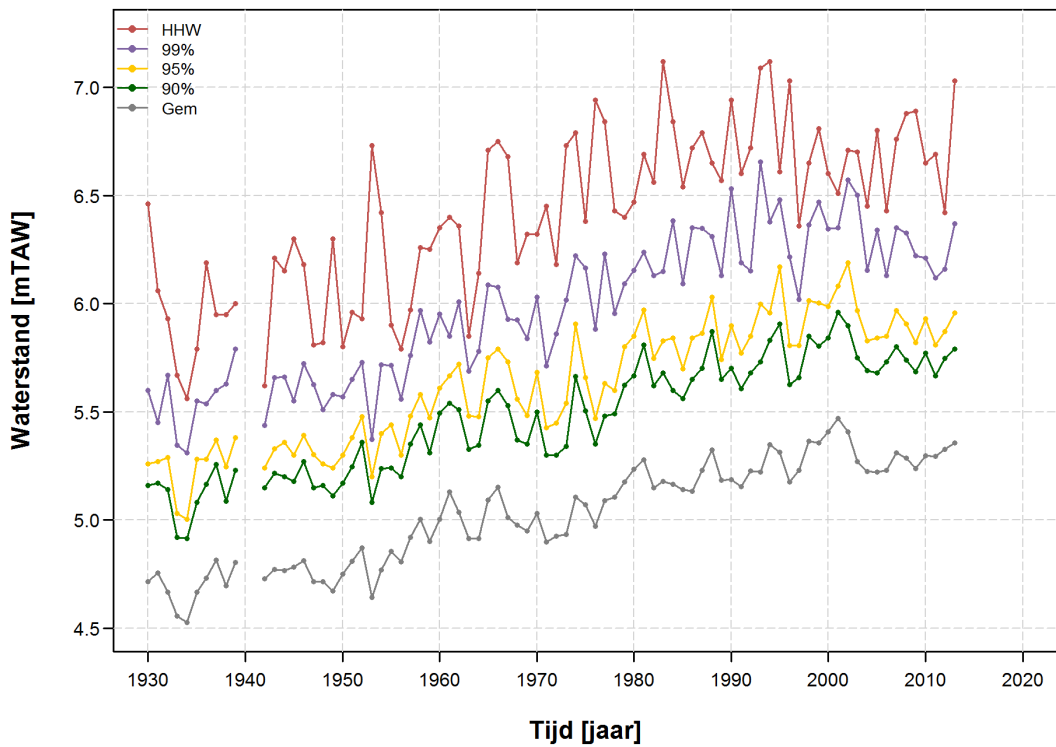
Deze sectie behandelt de extreme hoog- en laagwaterstanden per getijpost. De extreme hoogwaterstanden worden gekarakteriseerd aan de hand van het maximale hoogwater (HHW), en de 90%, 95% en 99% percentielwaardes. De extreme laagwaterstanden worden gekarakteriseerd aan de hand van de minimale waterstand (LLW), en de 1%, 5% en 10% percentielwaardes.

Voor de extreme hoogwaterstanden wordt voor elke station een stijgende trend waargenomen (Figuur 23 tot Figuur 30), overeenkomstig met het stijgend verloop van het jaargemiddeld hoogwater. Deze stijgende trend stopt voor de getijposten Temse en Dendermonde vanaf eind jaren '90. Vanaf dan is er geen éénduidige stijging meer in extreme hoogwaterstanden (Figuur 23 en Figuur 24). Voor de overige getijposten stopt deze stijgende tendens reeds vanaf 1980 (Figuur 25 tot Figuur 30). We merken op dat er grote jaarlijkse variaties zijn in de extreme hoogwaterstanden ten gevolge van het effect van wind (opstuwen van de getijgolf) en bovenafvoer (hogere bovenafvoer leidt tot hogere waterstanden).

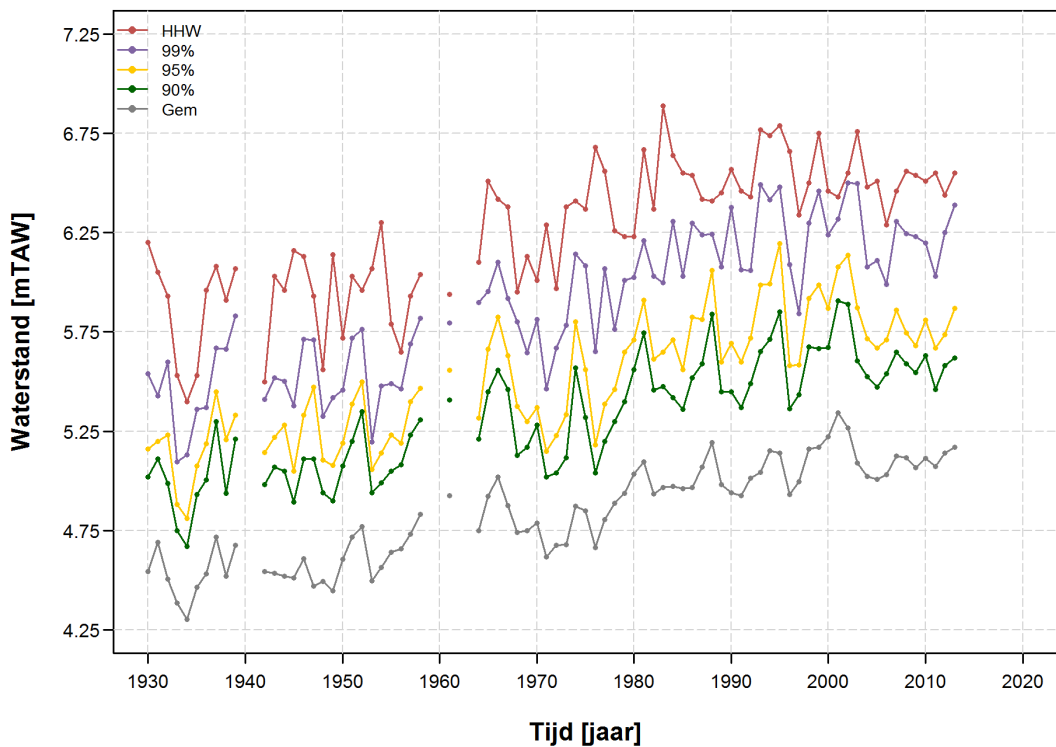
Wat betreft de extreme laagwaterstanden wordt voor de getijposten Temse en Dendermonde een duidelijke daling waargenomen tussen 1965 en 1980 (Figuur 31). Deze daling komt enkel voor in de periode 1965-1980, in de periodes ervoor en erna vertonen de extrema een relatief constant verloop. De overige getijposten in de Boven-Zeeschelde (Figuur 32 tot Figuur 35) worden gekenmerkt door een stijging van de extreme laagwaterstanden tot 1965-1970, gevolgd daar een daling tot begin van de jaren 2000. Vanaf 2000 kennen de extreme laagwaterstanden een min of meer constant verloop. Voor de Durme is de evolutie van de extreme laagwaterstanden ter hoogte van Tielrode (Figuur 36) min of meer vergelijkbaar met de evolutie van de getijposten Temse/Dendermonde. Ter hoogte van Waasmunsterbrug is het verschil tussen de extreme laagwaterstanden dan weer heel beperkt (Figuur 37). Dit kan worden gelinkt aan het feit dat er bij laagwater nauwelijks water aanwezig is in dit deel van de Durme. De 'metingen' van laag water zijn dus gewoon het bodempeil. De getijpost Walem (Rupel) tenslotte wordt gekenmerkt door een min of meer constante afname in extreme laagwaterstanden over de periode 1930-2013 (Figuur 38).



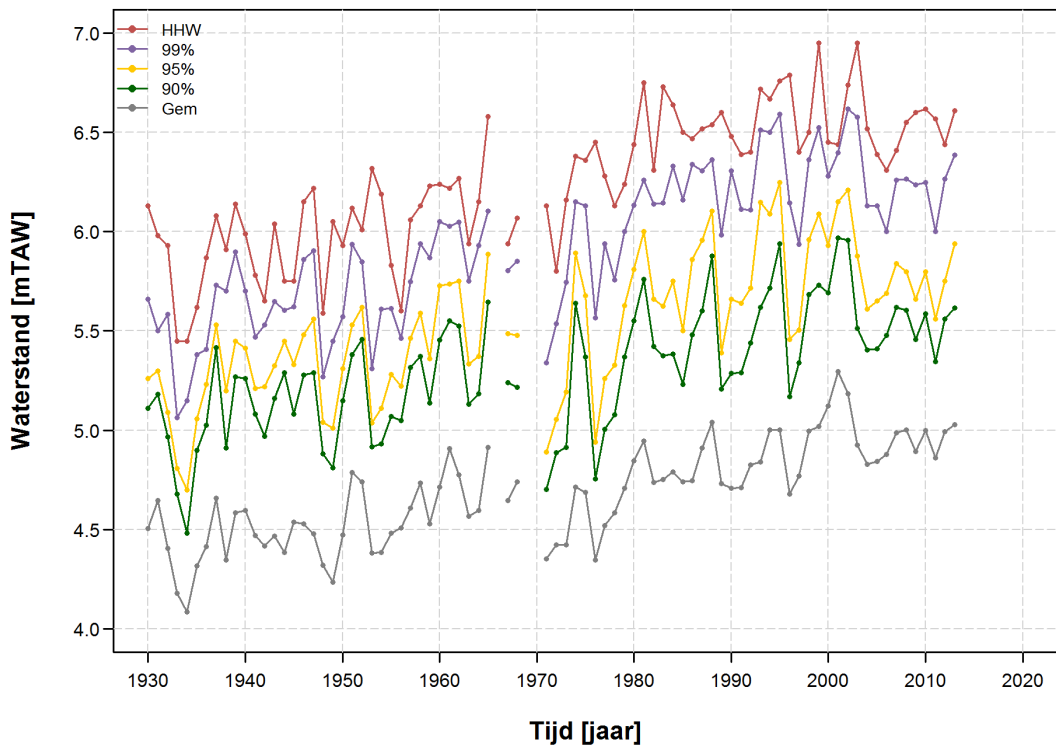
Figuur 23 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Temse (Boven-Zeeschelde)



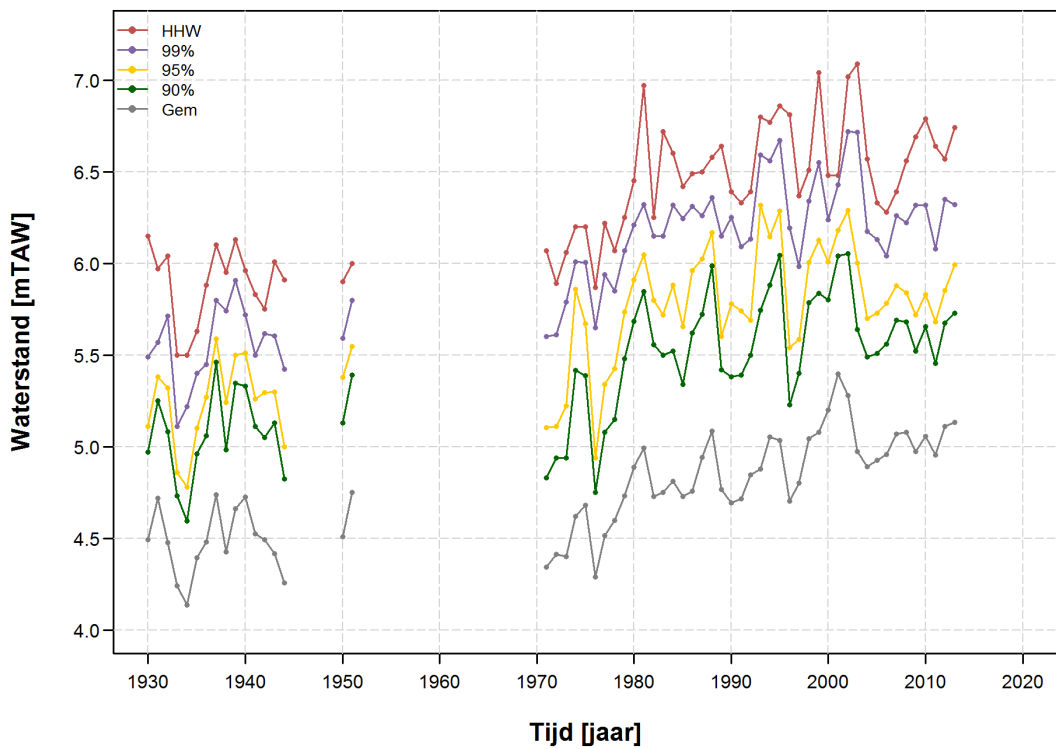
Figuur 24 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



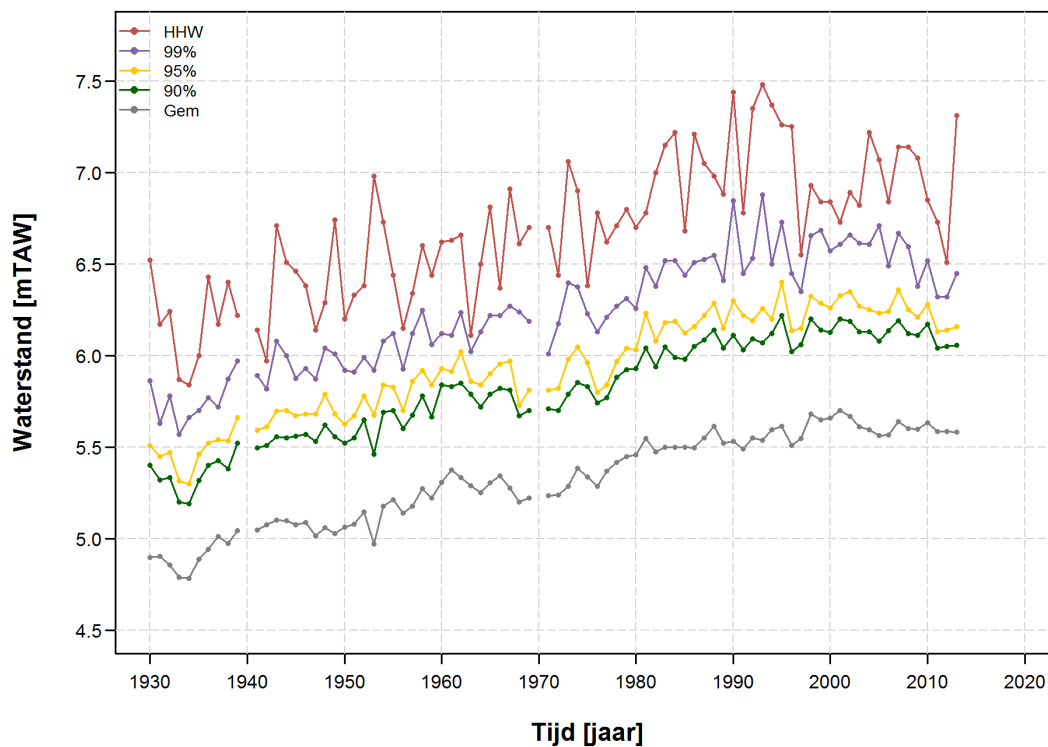
Figuur 25 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



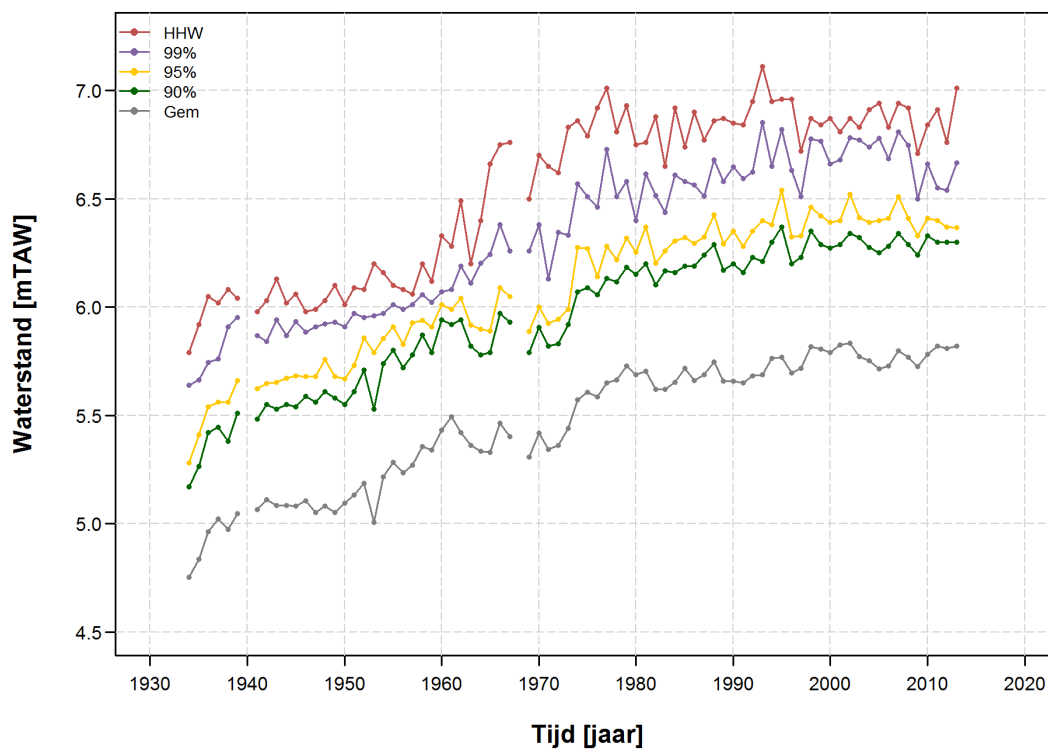
Figuur 26 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Wetteren (Boven-Zeeschelde)



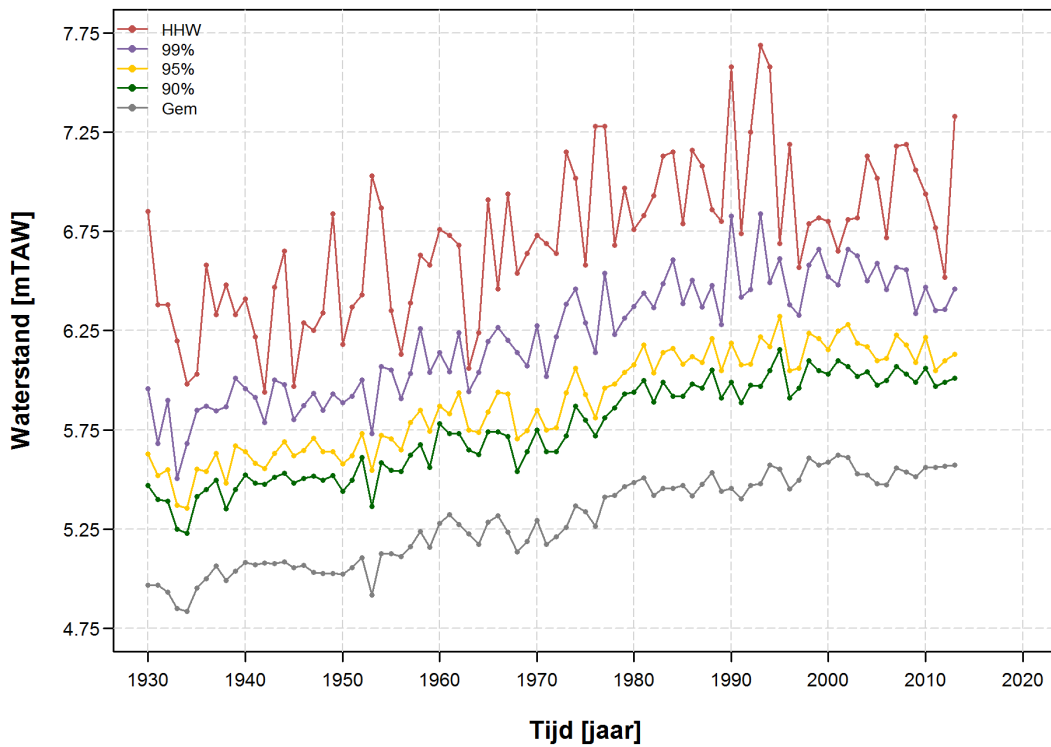
Figuur 27 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Melle (Boven-Zeeschelde)



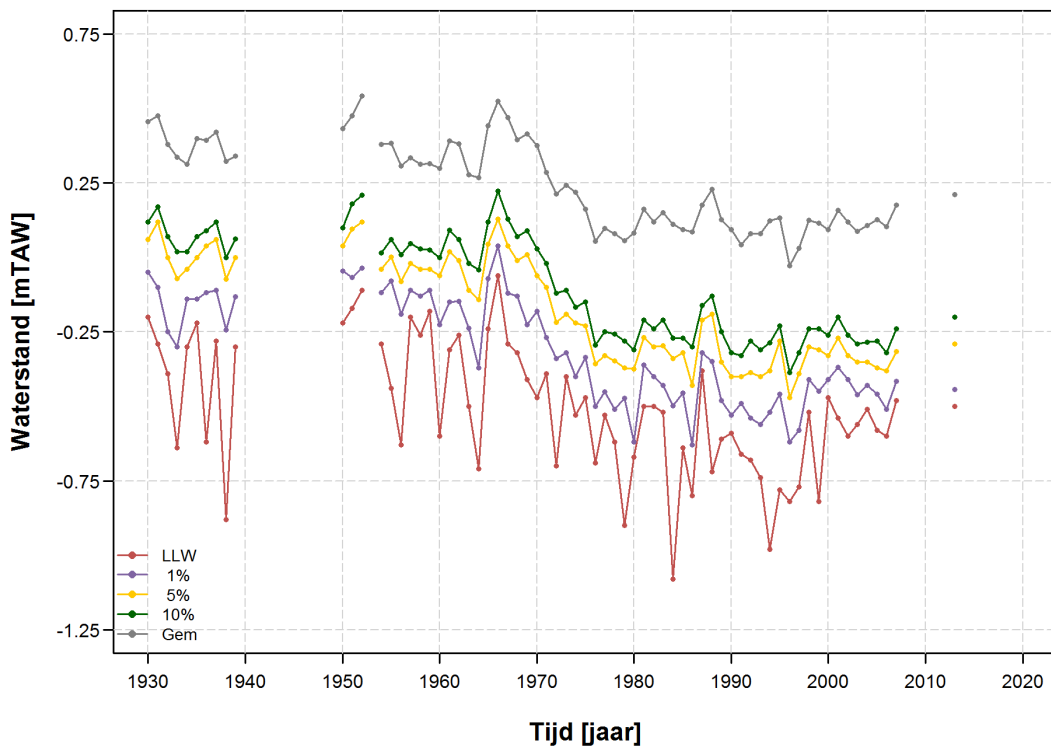
Figuur 28 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Tielrode (Durme)



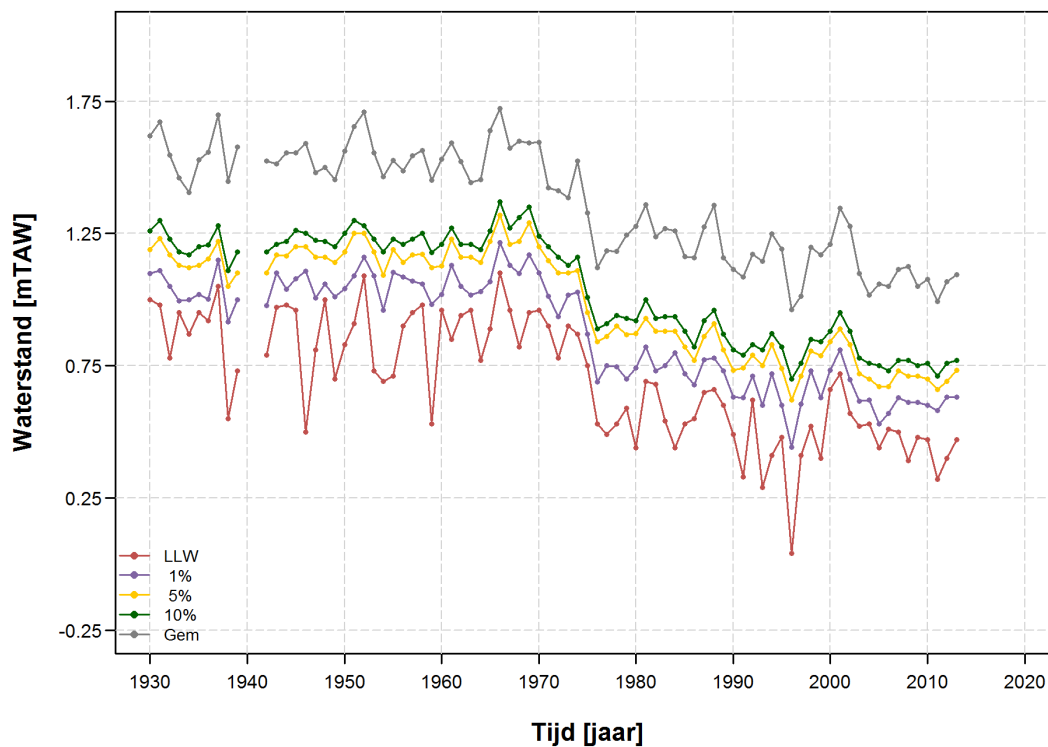
Figuur 29 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Waasmunsterbrug (Durme)



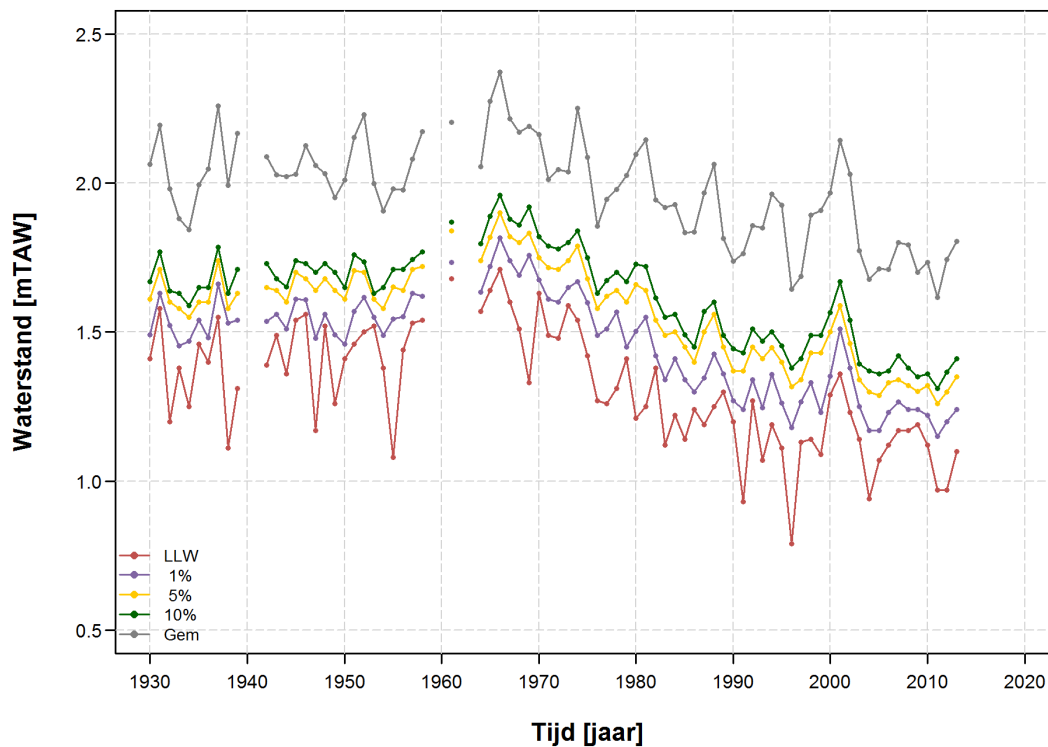
Figuur 30 – Evolutie van de jaarlijkse extreme hoogwaterstanden (90% - 95% - 99% - maximum) voor de getijpost Walem (Rupel)



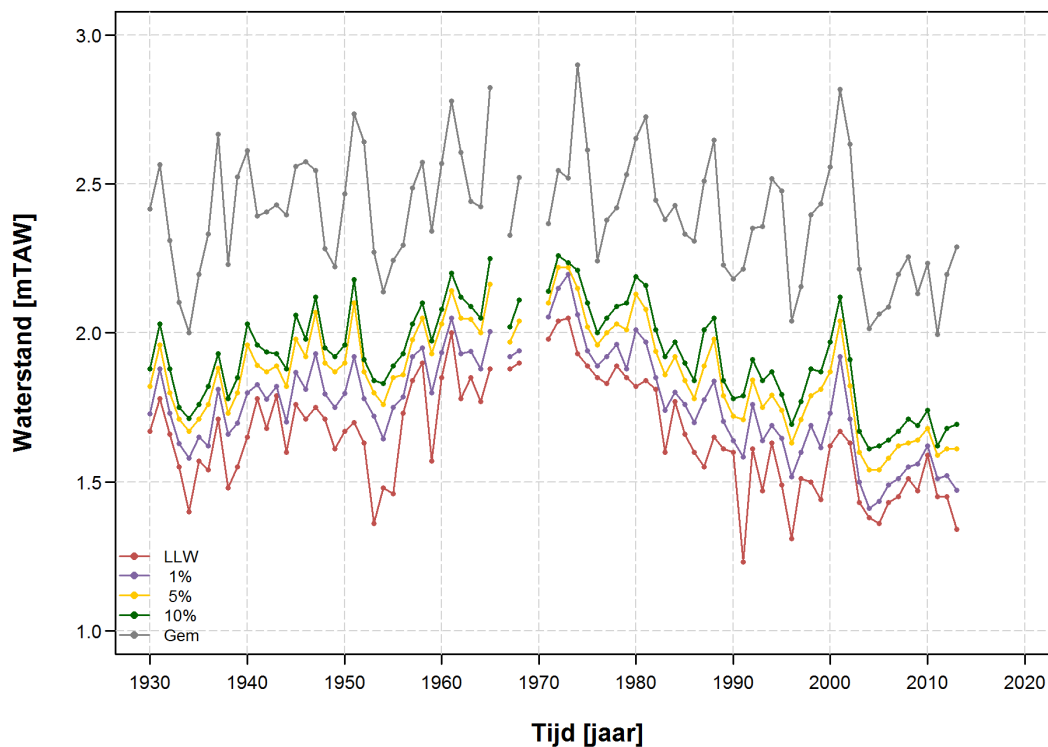
Figuur 31 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Temse (Boven-Zeeschelde)



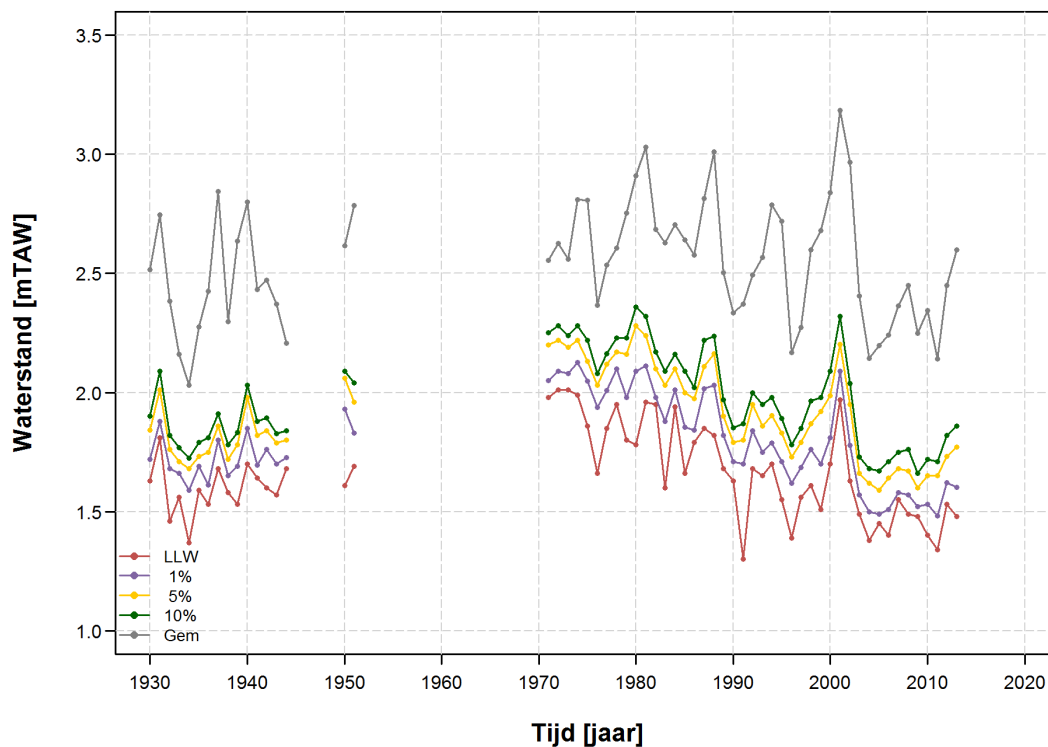
Figuur 32 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



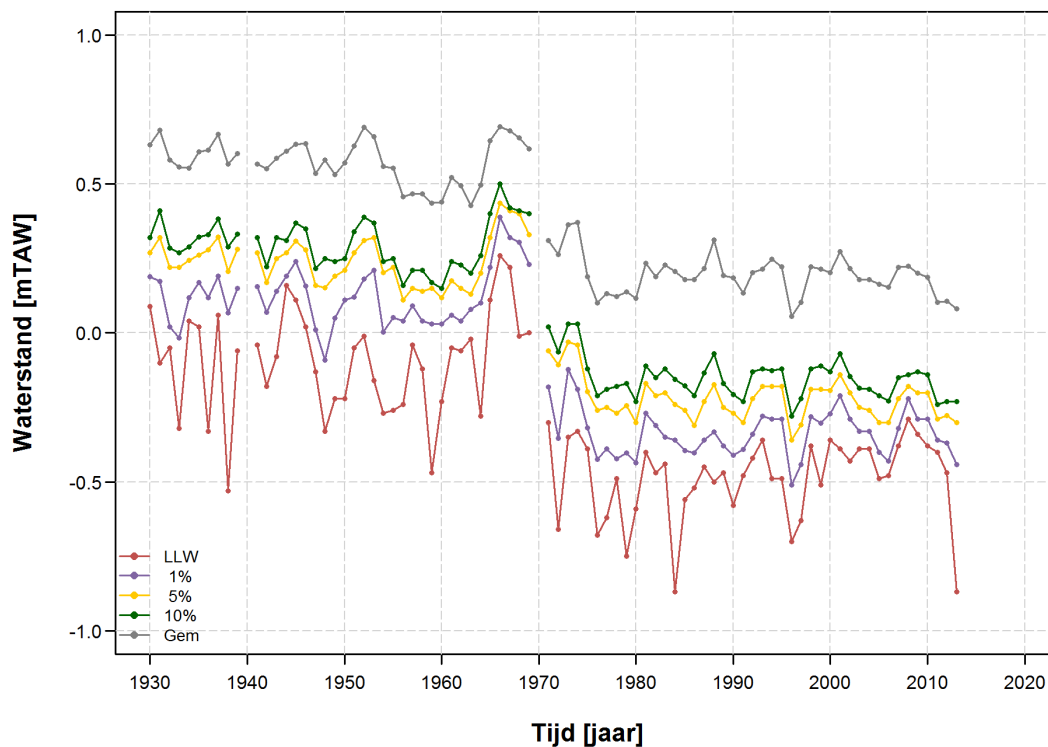
Figuur 33 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



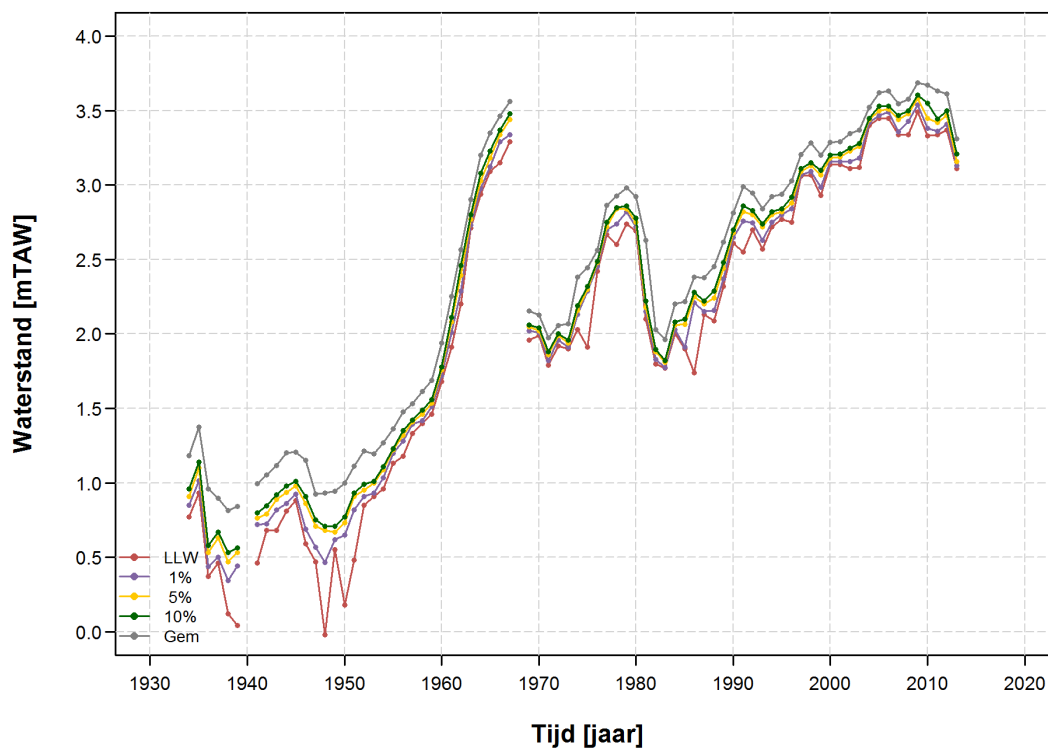
Figuur 34 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Wettersen (Boven-Zeeschelde)



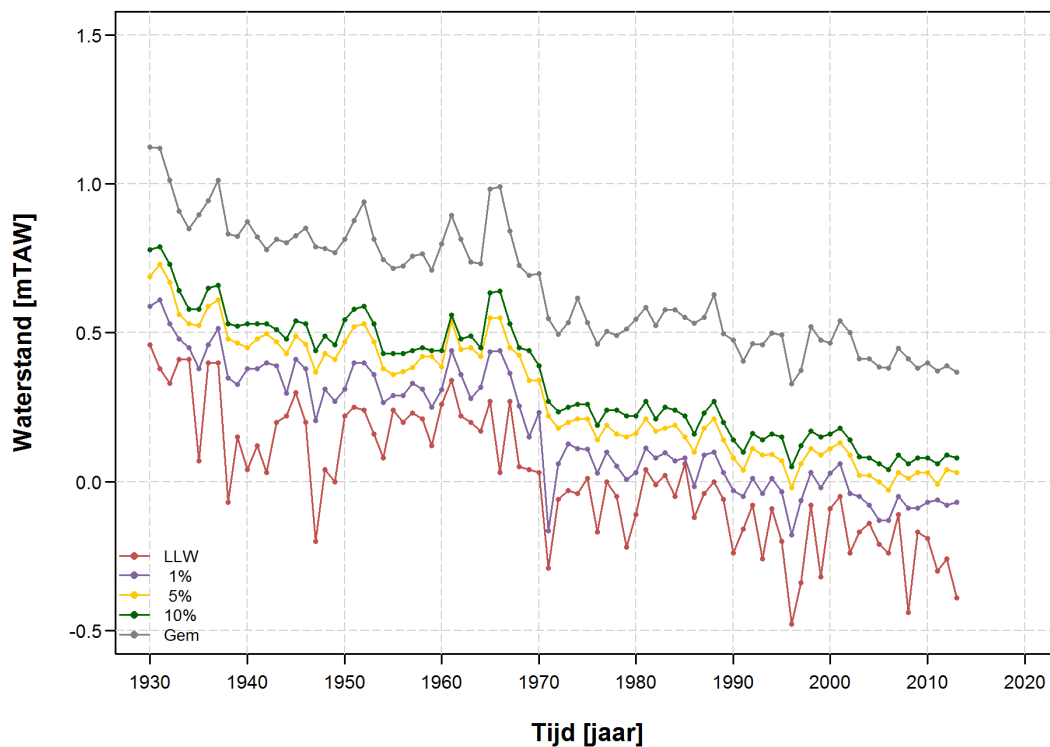
Figuur 35 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 36 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Tielrode (Durme)



Figuur 37 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Waasmunsterbrug (Durme)



Figuur 38 – Evolutie van de jaarlijkse extreme laagwaterstanden (minimum - 1% - 5% - 10%) voor de getijpost Walem (Rupel)

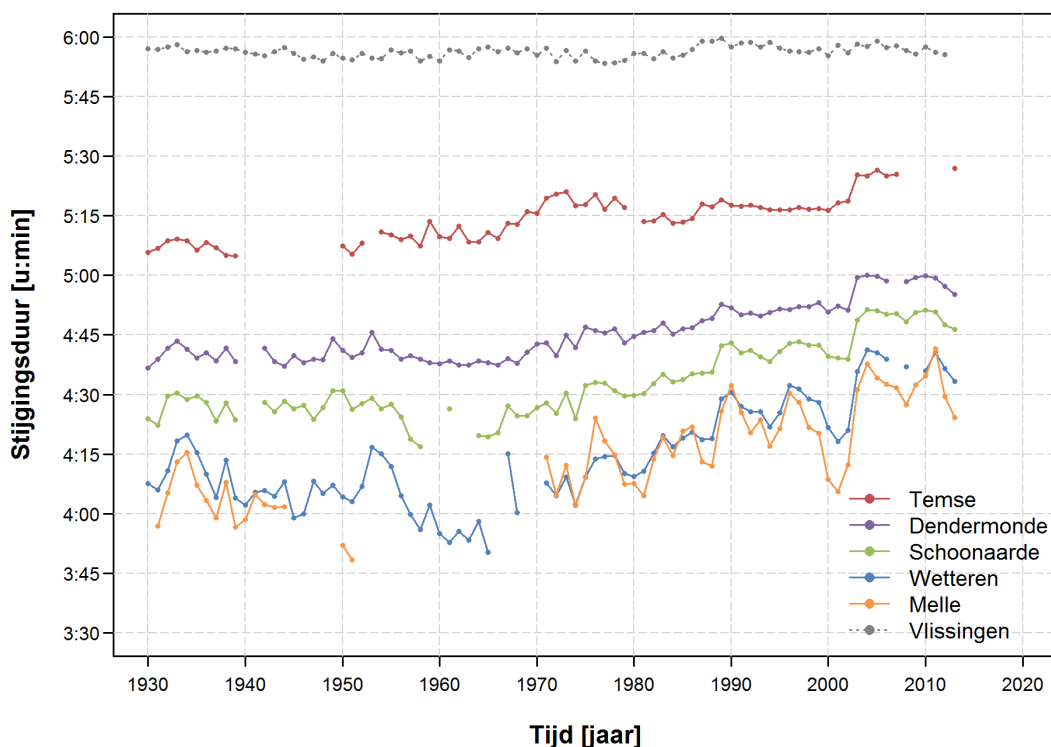
3.3. Stijgings- en dalingsduur

3.3.1. Afzonderlijke duurtijden

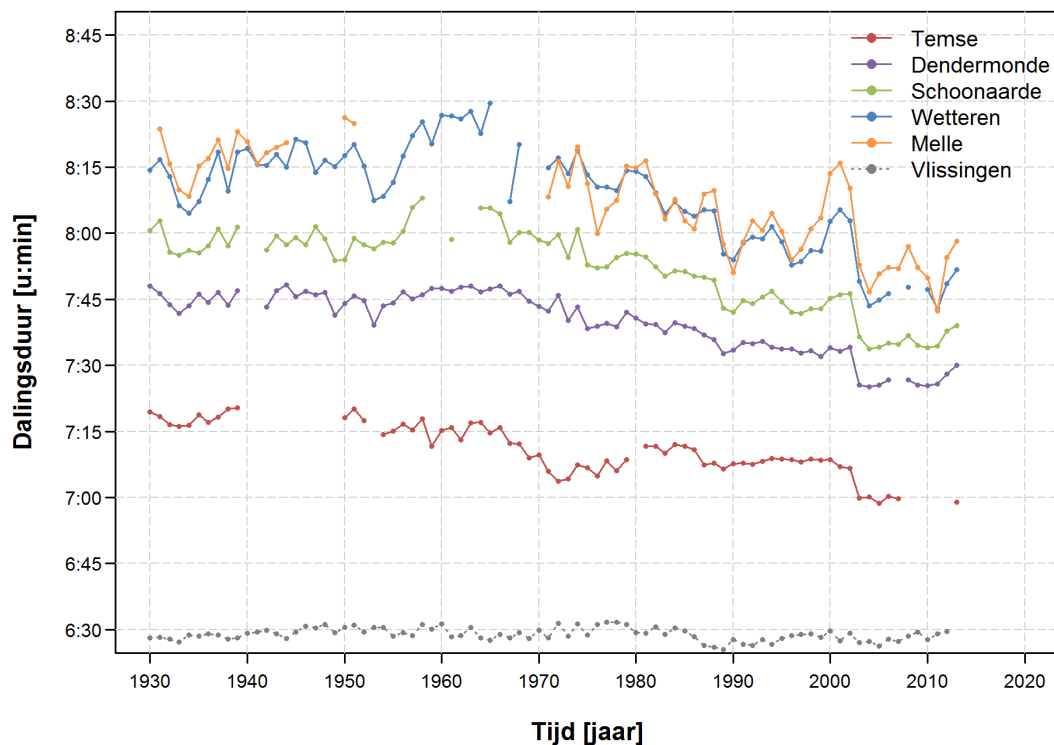
Zoals geïllustreerd in Figuur 4 is de stijgingsduur gedefinieerd als de tijd tussen een laagwater en het opeenvolgend hoogwater. Dalingsduur is de tijd tussen een hoogwater en het opeenvolgende laagwater.

In Figuur 39 en Figuur 40 zijn respectievelijk de evolutie van de jaargemiddelde stijgings- en dalingsduur weergegeven voor de getijposten in de Boven-Zeeschelde. Voor alle stations kan een duidelijke toename van de stijgingsduur en verkorting van de dalingsduur worden waargenomen. De toename van de stijgingsduur in Temse bedraagt ongeveer 20 min over de laatste 80 jaar, en neemt licht toe in stroomopwaartse richting. De toename van de stijgingsduur lijkt zich voor alle stations in te zetten vanaf 1965 - 1970. De toename zet zich eerst in ter hoogte van Temse, en laatst voor de meest opwaartse stations. De curves voor de stations Wetteren en Melle vertonen een veel grilliger patroon, er is duidelijk een grotere jaarlijkse variatie. De resultaten m.b.t. de dalingsduur, weergegeven in Figuur 40, vertonen logischerwijs een omgekeerde trend. In 2003 kan een duidelijke knik in de curves worden opgemerkt. Hiervoor hebben we geen duidelijke verklaring. Aangezien de observatie voor alle meetstations geldt en voorkomt vóór 2005 (toen er werd overgeschakeld naar telemetrie), kan deze niet te wijten zijn aan de wijziging in meetprotocol.

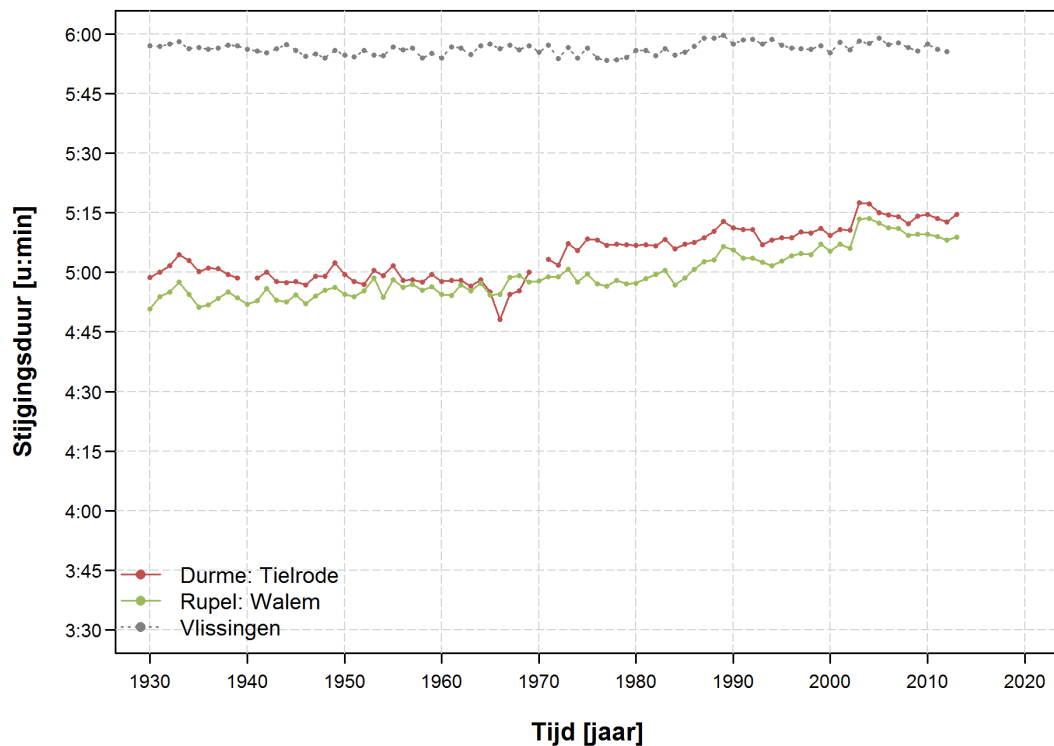
Voor Walem (Rupel) en Tielrode (Durme) kan een gelijkaardige trend worden vastgesteld als voor de Boven-Zeeschelde, met een toename van de stijgingsduur van ongeveer 15 minuten over de volledige periode 1930-2013 (Figuur 41). In Walem is deze stijging gelijkmatig, terwijl in Tielrode een knik in de grafiek kan waargenomen worden tussen 1960 en 1970. Aan Waasmunsterbrug (Figuur 43) is een heel ander patroon merkbaar, waarbij de stijgingsduur dramatisch afneemt. Deze sterke afname wordt waargenomen vanaf 1950. In de periode 1965 tot heden zijn sterke fluctuaties in de stijgingsduur waarneembaar, maar neemt de stijgingsduur netto niet verder meer af. De resultaten m.b.t. de dalingsduur, weergegeven in Figuur 42, vertonen logischerwijs een omgekeerde trend. We kunnen de waarnemingen ter hoogte van Waasmunsterbrug echter niet doorvertalen naar evolutie van het getij vermits vanaf 1950 het GLW peil er overeenstemt met het bodempeil (Figuur 12).



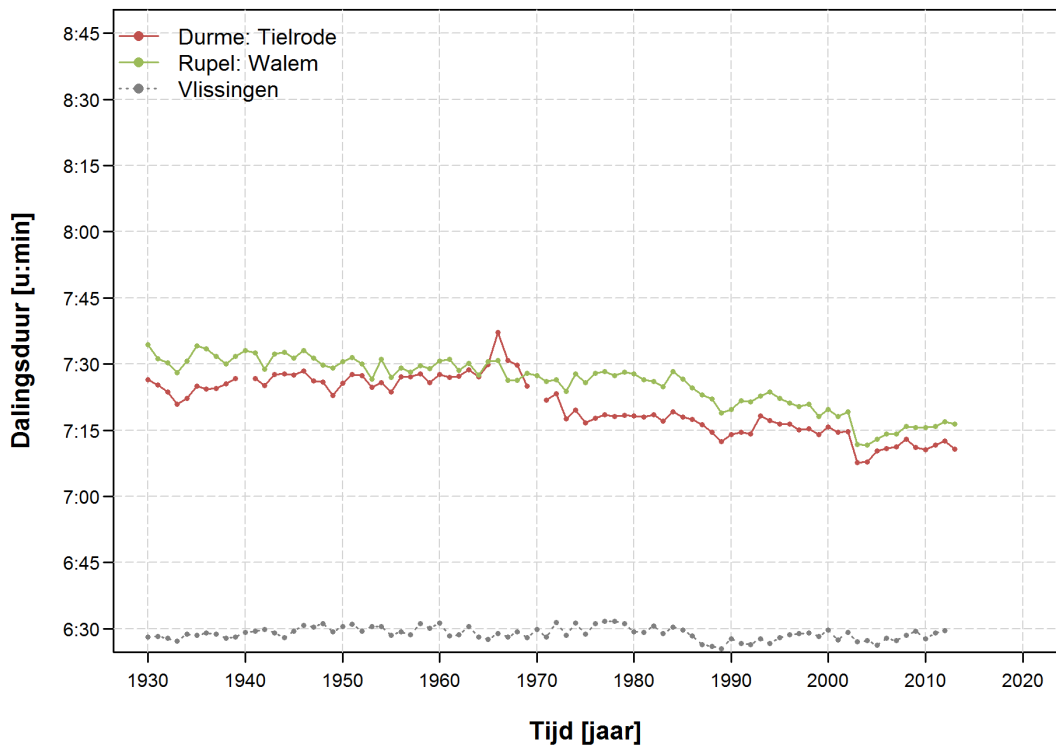
Figuur 39 – Evolutie van de jaargemiddelde stijgingsduur voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde).



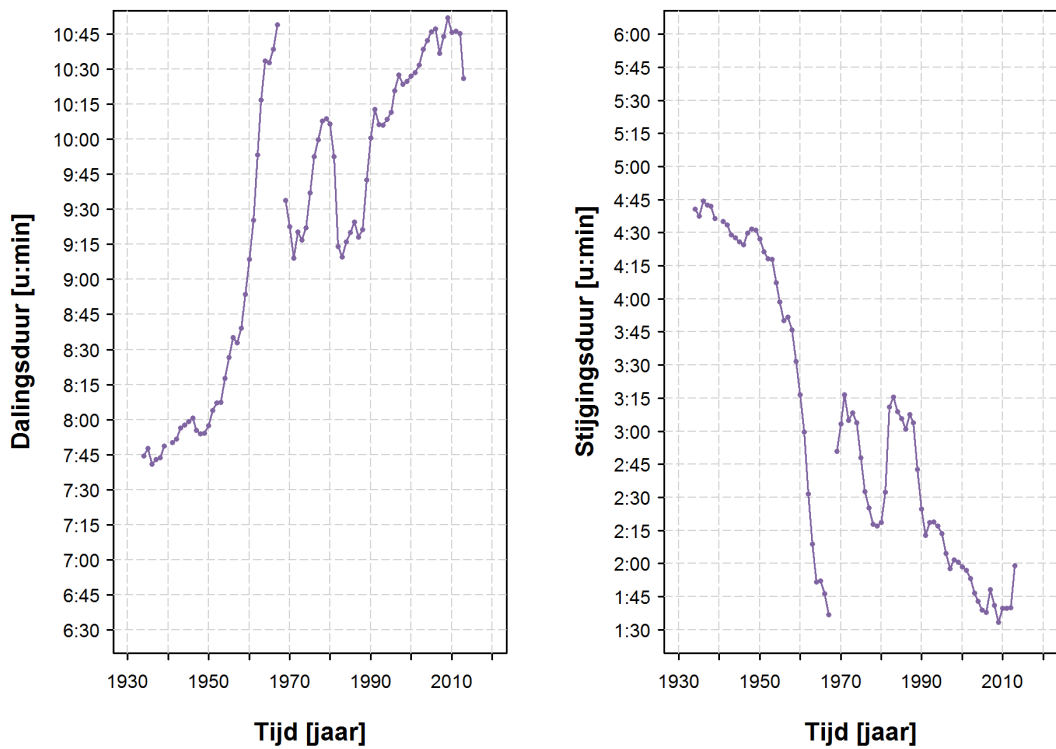
Figuur 40 – Evolutie van de jaargemiddelde dalingsduur voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)



Figuur 41 – Evolutie van de jaargemiddelde stijgingsduur voor de getijposten Tielrode (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)



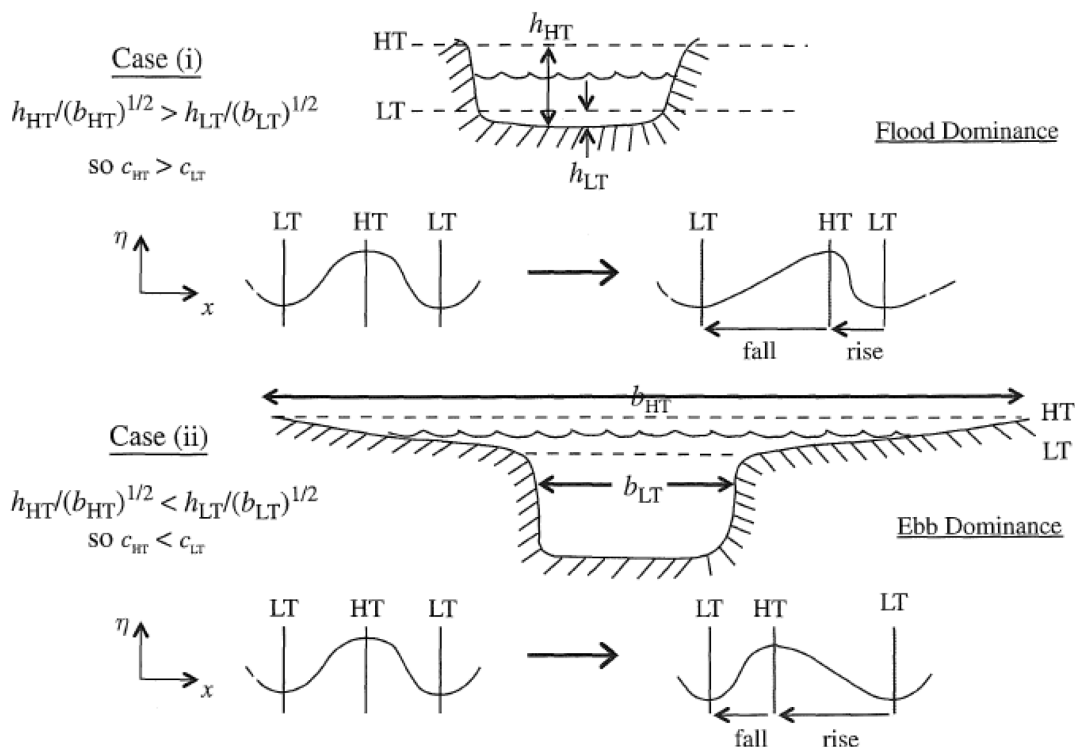
Figuur 42 – Evolutie van de jaargemiddelde dalingsduur voor de getijposten Tielrode (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)



Figuur 43 – Evolutie van de jaargemiddelde dalingsduur (links) en stijgingsduur (rechts) voor de getijpost te Waasmunster (Durme)

3.3.2. Asymmetrie van het verticale getij

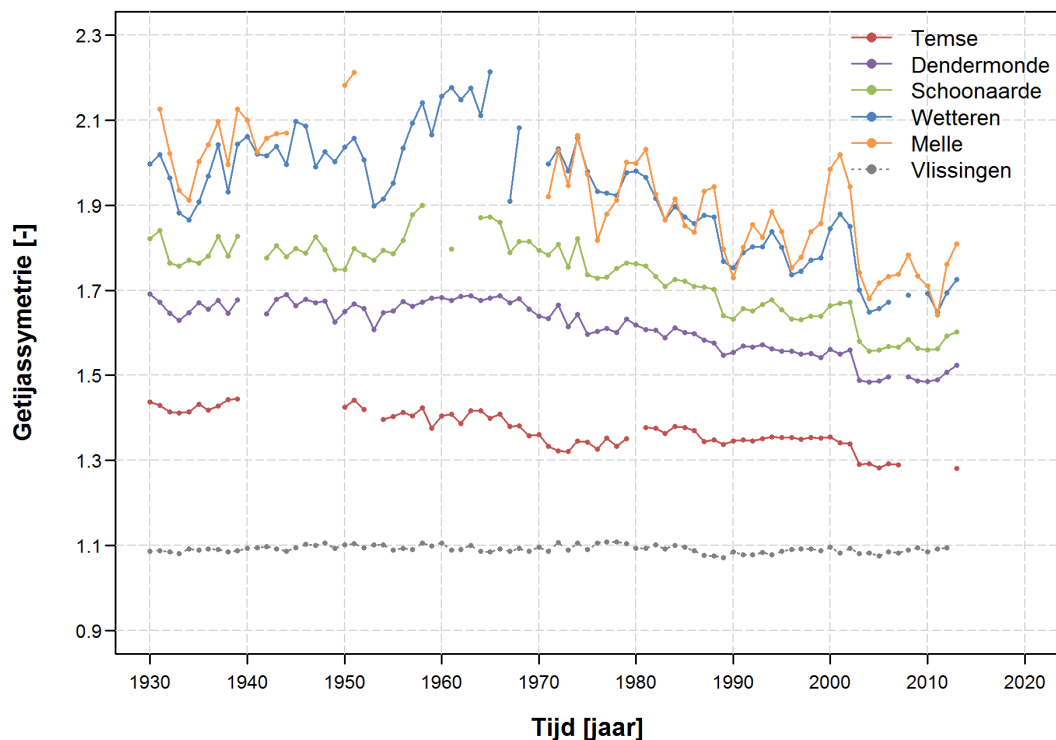
De verhouding van de dalingsduur t.o.v. stijgingsduur geeft een beeld van de asymmetrie van het verticale getij. Een waarde van 1 komt hierbij overeen met een perfect symmetrisch getij. Een waarde groter dan 1 wil zeggen dat de daling van HW naar opeenvolgend LW langer duurt dan de stijging van LW naar opeenvolgend HW. Dit duidt op een vloed dominantie van het verticaal getij, typisch voor een estuarium dat gedomineerd wordt door een beperkte variatie in stroomvoerende breedte over de tijcyclus, en waarbij het hoogwater sneller propageert dan het laagwater. Indien de dalingsduur korter is dan de stijgingsduur wijst dit op een eb gedomineerd estuarium waarbij de variatie in stroomvoerende breedte groot is over de tijcyclus, en waarbij het laagwater sneller propageert en het opeenvolgend hoogwater deels inhaalt (Figuur 44) (Friedrichs, 2010).



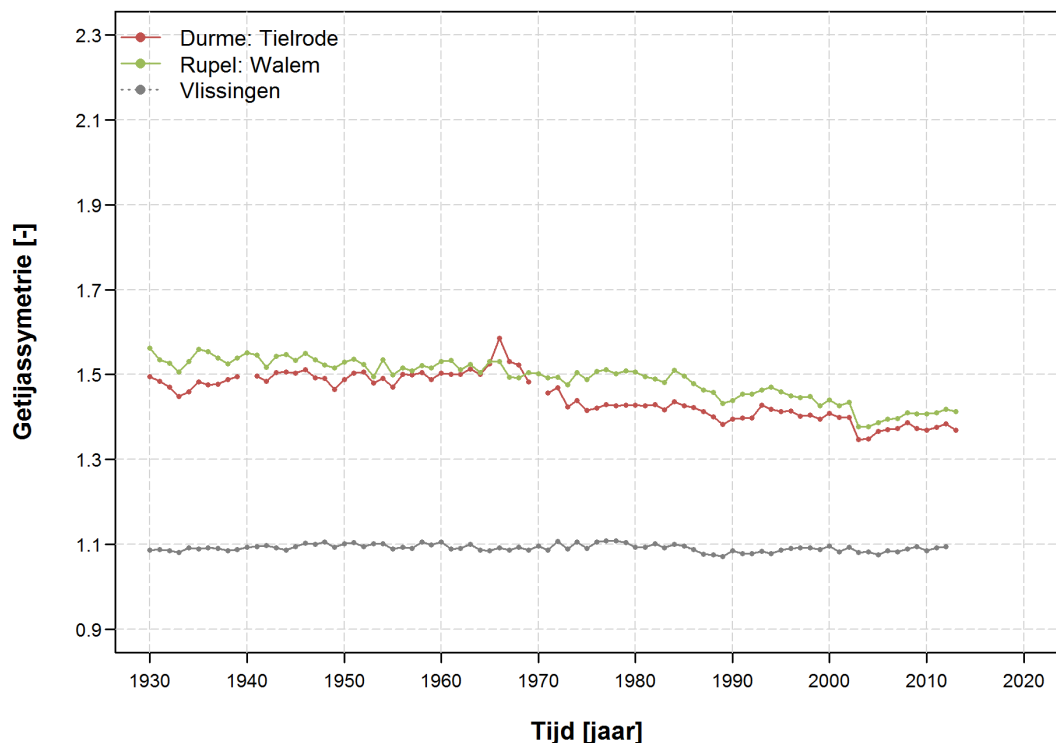
Figuur 44 - Verticale getijasymmetrie en de vorm van de cross sectie (Friedrichs, 2010)

Volgens bovenstaande classificatie is er doorheen het hele Schelde estuarium sprake van vloed dominantie van het verticale getij (zie Figuur 45). In de Boven-Zeeschelde observeren we verder ook een toename in getijasymmetrie in de opwaartse richting (Figuur 45). Voor de stations afzonderlijk is er historisch een verkorting van de dalingsduur en (bijhorende) toename van de stijgingsduur, wat leidt tot een *afname van de getijasymmetrie*. Deze afname bedraagt ongeveer 10% voor de stations Temse, Dendermonde en Schoonaarde en ongeveer 20 % voor Wetteren en Melle. Voor de stations Schoonaarde, Wetteren en Melle kan een duidelijke knik worden waargenomen in de grafiek rond 1970. Rond 2003 vertonen alle curves nog een neerwaartse knik, waarna een verdere afname van de getijasymmetrie lijkt te stoppen en een stabiel niveau bereikt wordt.

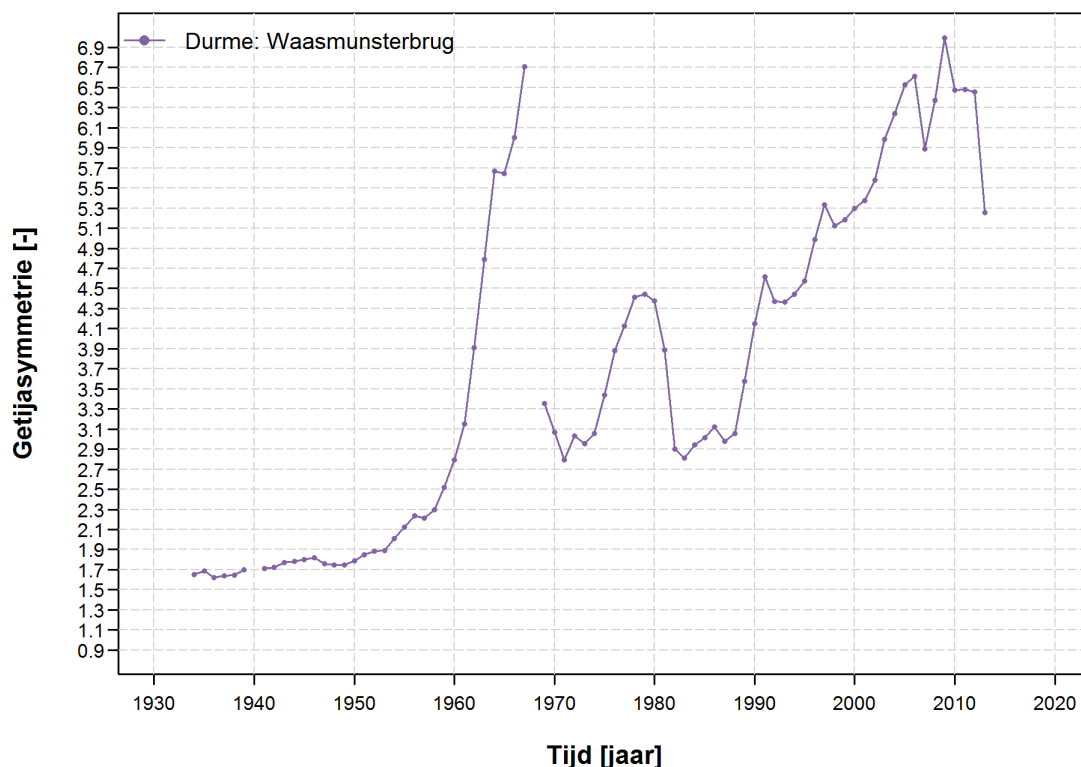
Net zoals in de Boven-Zeeschelde wordt voor de stations Walem (Rupel) en Tielrode (Durme) een geleidelijke afname in de getijasymmetrie waargenomen (Figuur 46). Ter hoogte van Waasmunsterbrug zijn de waarnemingen voor de getijasymmetrie (Figuur 47) vanaf 1950 niet meer bruikbaar vermits het GLW peil in feite het bodempeil is (Figuur 12).



Figuur 45 – Evolutie van de jaargemiddelde getij-asymmetrie (dalingsduur/stijgingsduur) voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde) en Vlissingen (Westerschelde)



Figuur 46 – Evolutie van de jaargemiddelde getijassymmetrie voor de getijposten Tielrode (Durme), Walem (Rupel) en Vlissingen (Westerschelde)



Figuur 47 – Evolutie van de jaargemiddelde getijasymmetrie voor de getijposten Waasmunsterbrug (Durme)

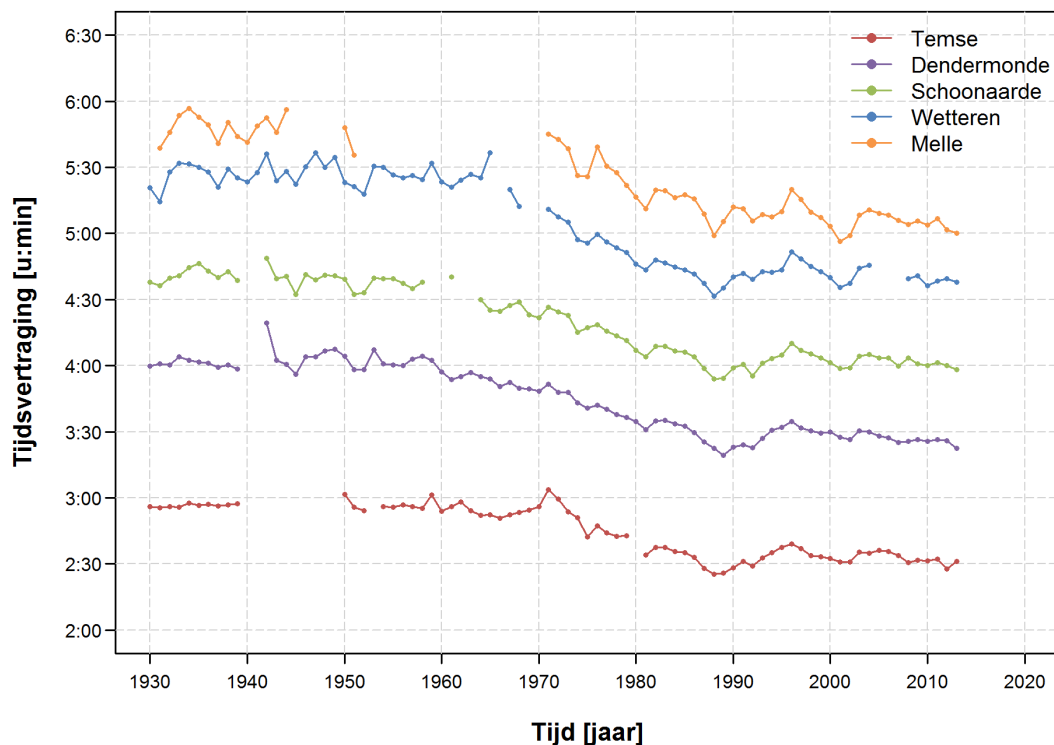
3.4. Tijdsvertraging ten opzichte van Vlissingen

In Figuur 48 en Figuur 49 worden de tijdsvertragingen t.o.v. Vlissingen weergegeven (respectievelijk hoogwater en laagwater) voor de getijposten in de Boven-Zeeschelde. Voor de tijdsvertraging bij hoogwater zien we een dalende trend, ingezet vanaf 1960 - 1970. De trend zet zich eerder in ter hoogte van de meer opwaartse stations (opwaarts Dendermonde) en later te Temse. Een dalende trend komt overeen met een snellere voortplanting van de hoogwatergolf. Voor Temse en Dendermonde merken we een daling van 30 min over de volledige periode van 80 jaar. In de meer opwaarts gelegen meetstations is de afname van de tijdsvertraging nog iets groter, ze bedraagt ongeveer 40 min.

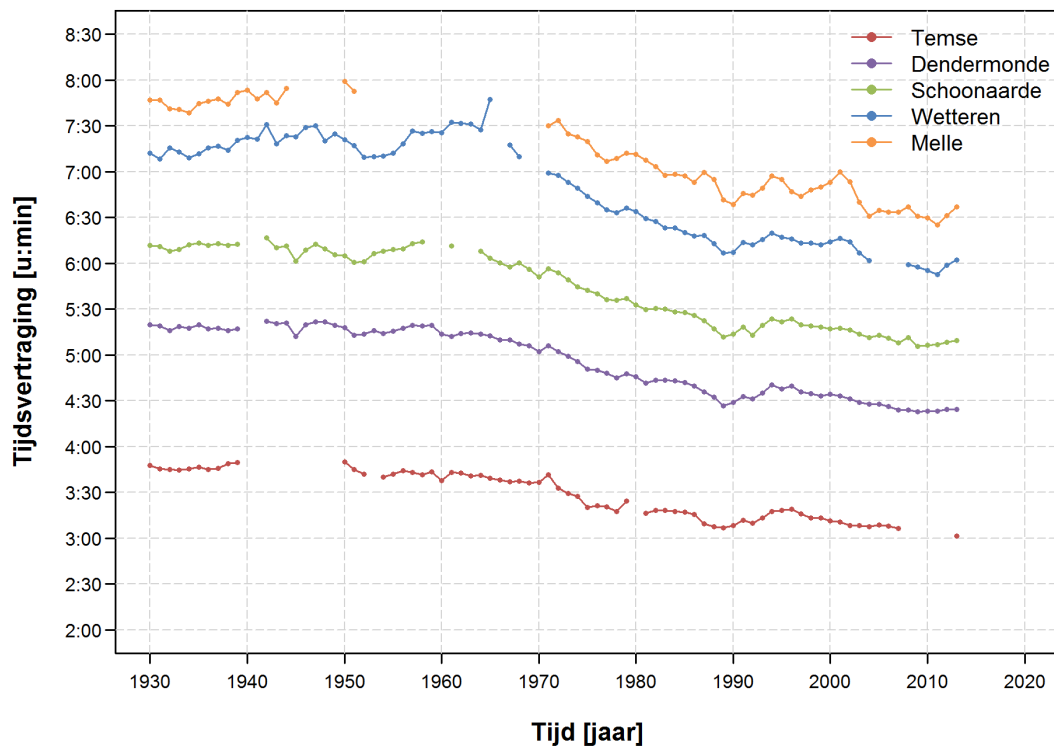
Voor de tijdsvertraging bij laagwater kan eveneens een sterk dalende trend worden waargenomen. Deze trend zet zich in vanaf de jaren 60 en manifesteert zich nog iets sterker dan de tijdsvertraging bij hoogwater. Voor de posten afwaarts van Schoonaarde bedraagt de afname ongeveer 45 minuten, opwaarts van Schoonaarde bedraagt de afname meer dan 1 uur.

In Figuur 50 en Figuur 51 zijn de tijdsvertragingen weergegeven voor respectievelijk hoog- en laagwater op de Rupel en de Durme. Bij hoogwater kan een duidelijke verkorting van de tijdsvertraging worden waargenomen in alle meetstations. Deze verkorting bedraagt ongeveer 30 minuten te Tielrode (Durme) en Walem (Rupel), voor het meetstation aan de Waasmunsterbrug is de verkorting ongeveer 1 uur. De dalende trend is voornamelijk waarneembaar tussen 1960 en 1980, waarna een stabilisatie plaats vindt.

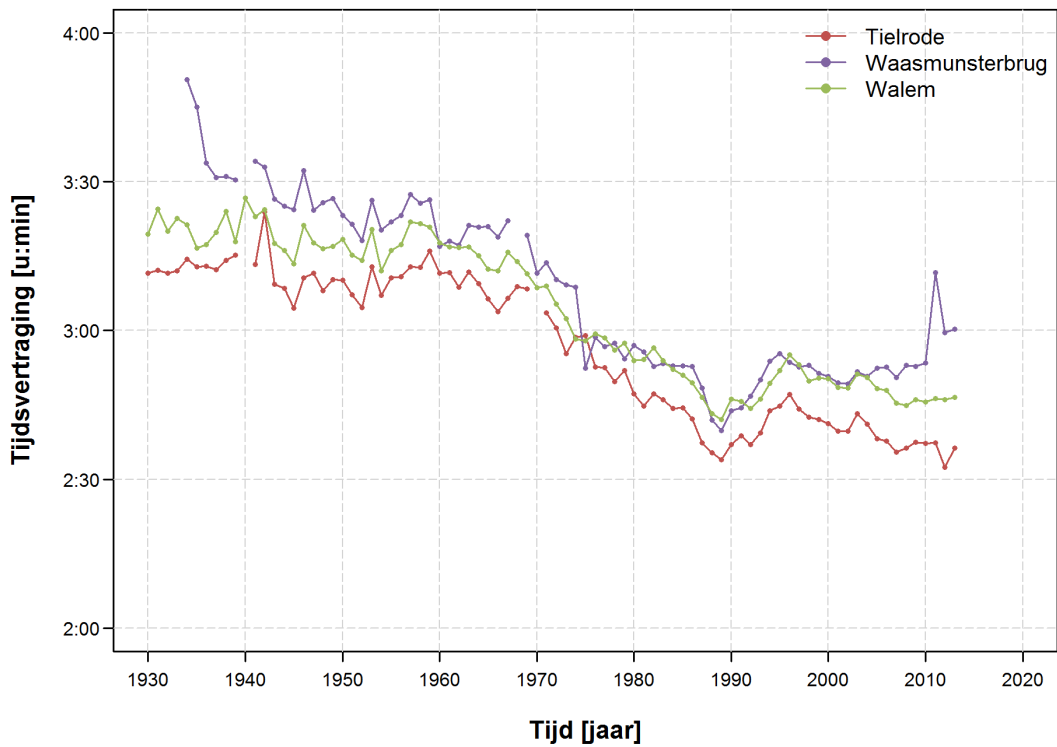
Voor de tijdsvertraging bij laagwater (Figuur 51) is een gelijkaardige daling van ongeveer 45 minuten waarneembaar in Rupel (Walem) en Durme (Tielrode). De verkorting van de tijdsvertraging begint vroeger in de Rupel (vanaf 1960) en is korter en meer uitgesproken in de Durme (vanaf 1970). Vanaf 1950 is een zeer duidelijke verlenging van de tijdsvertraging waarneembaar aan de Waasmunsterbrug. Deze waarneming is echter niet bruikbaar vermits vanaf 1950 het GLW peil in feite het bodempeil is (Figuur 12).



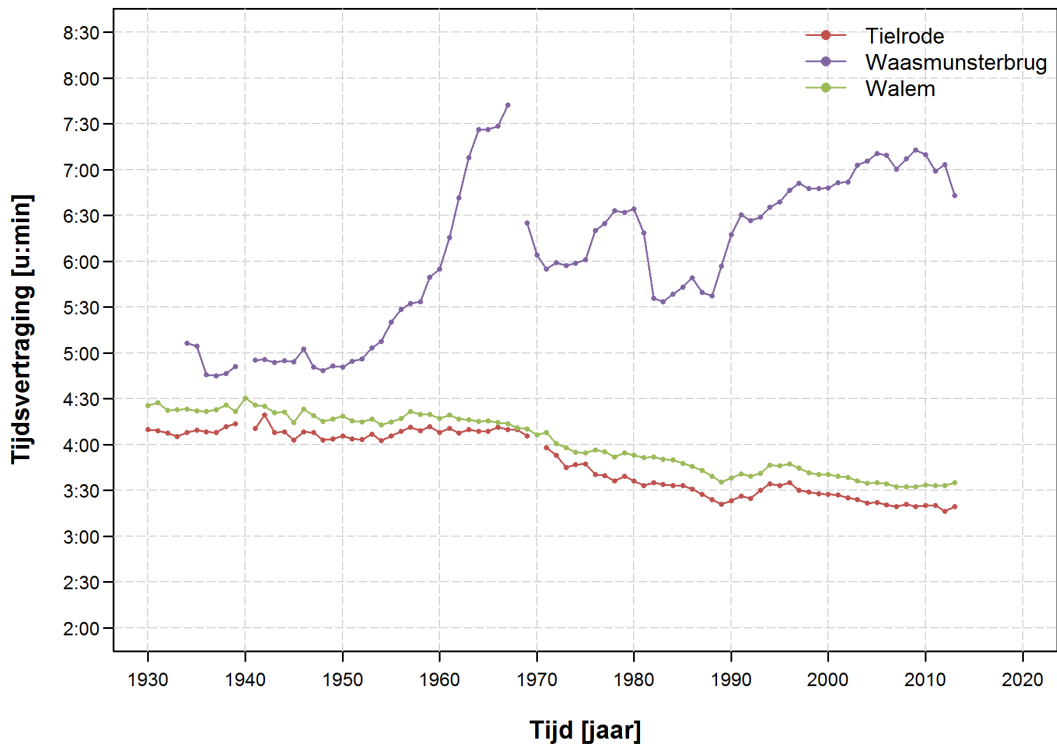
Figuur 48 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij hoogwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 49 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij laagwater voor de getijposten Temse, Dendermonde, Schoonaarde, Wetteren en Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 50 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij hoogwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug op de Durme en Walem op de Rupel.



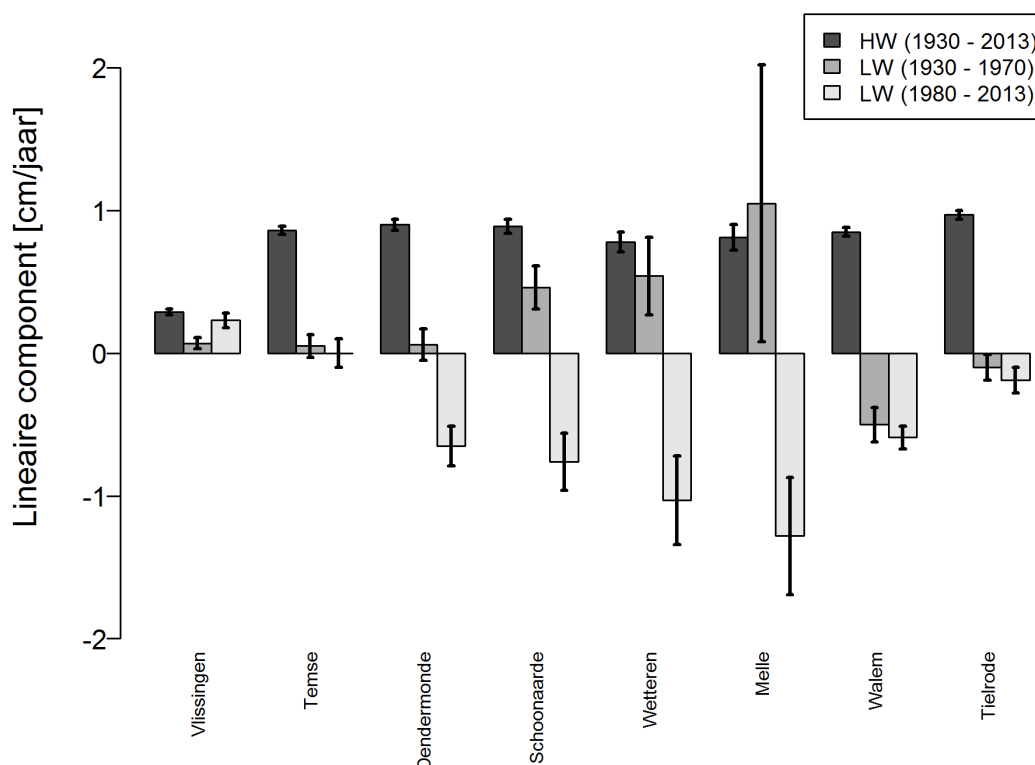
Figuur 51 – Evolutie van de jaargemiddelde tijdsvertraging t.o.v. Vlissingen bij laagwater voor de getijposten Tielrode en Waasmunsterbrug op de Durme en Walem op de Rupel.

4. Analyse van de langjarige waterstandtrends

Langjarige waterstandtrends worden beschreven aan de hand van een lineaire component en een cyclische component. De lineaire component beschrijft hierbij het effect van zeespiegelstijging en morfologische wijzigingen in het estuarium, terwijl de cyclische component het effect van de 18.6 jarige nodale cyclus weergeeft. In dit hoofdstuk worden de berekende componentwaardes weergegeven berekend volgens de methodiek beschreven in §2.6. De gedetailleerde trendfiguren per station zijn opgenomen in appendix (Appendix B – Langjarige waterstandtrends).

4.1. Resultaten voor lineaire term

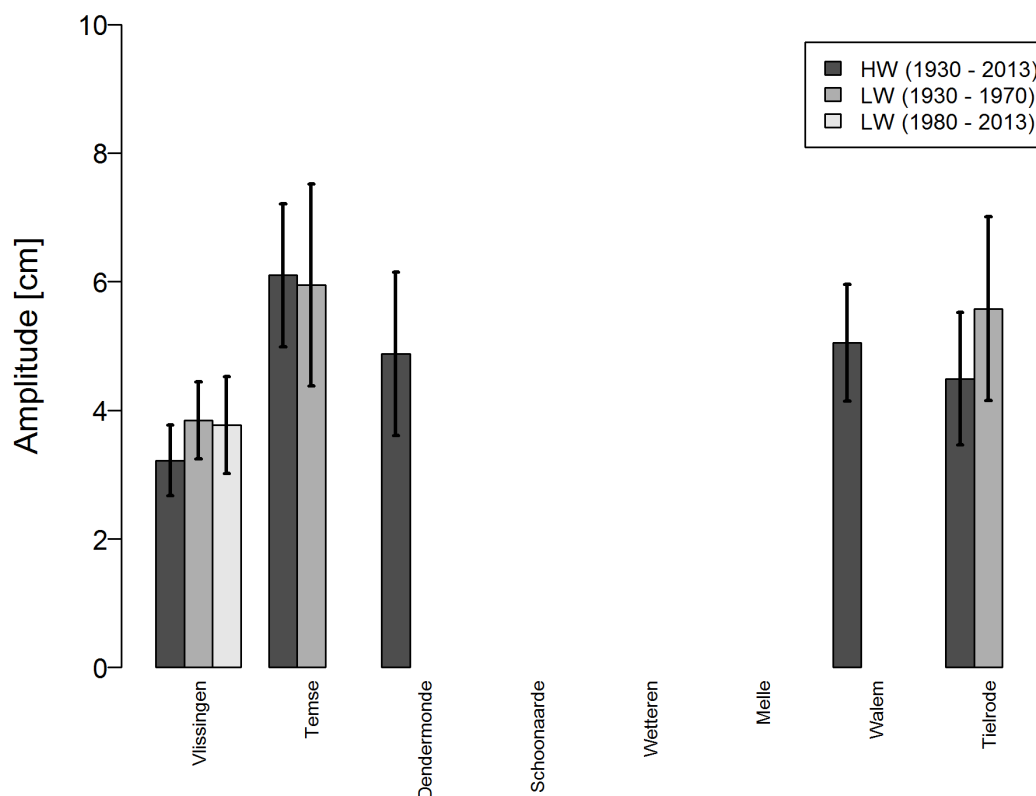
De lineaire component van de langjarige hoogwatertrend is voor de geanalyseerde getijposten in de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel sterk vergelijkbaar en bedraagt ongeveer 0.9 cm/jaar (Figuur 52). Dit is beduidend minder dan de lineaire component ter hoogte van Vlissingen die ca. 0.3 cm/jaar bedraagt. In Vlissingen (afwaartse rand estuarium) wordt de lineaire component immers uitsluitend bepaald door de zeespiegelstijging, terwijl voor de opwaartse getijposten ook de morfologie van het estuarium een effect heeft. De convergentie van het estuarium in combinatie met historische verruimingen leiden er immers toe dat de lineaire component van de langjarige hoogwatertrend hoger ligt in opwaartse richting dan aan de afwaartse rand. Wat betreft de laagwaterstanden toont de evolutie van de jaargemiddelde waardes aan dat we een onderscheid kunnen maken tussen de periode voor en na 1970 (Figuur 10). In de Boven-Zeeschelde is er vóór 1970 geen wijziging in laagwaterstand voor de getijposten Temse en Dendermonde, en is er een stijging in laagwaterstand voor de overige getijposten (tot 1 cm/jaar voor Melle) (Figuur 52). Na 1970 is er voor alle getijposten (behalve Temse) een daling van de laagwaterstanden en is de lineaire component van de langjarige laagwatertrend gelegen tussen -0.65 cm/jaar en -1.28 cm/jaar. De daling neemt hierbij toe in de opwaartse richting (Figuur 52). Voor de getijposten Walem en Tielrode is er een daling in laagwater (waardes zie Tabel 7) en is er geen beduidend onderscheid tussen de periode voor en na 1970.



Figuur 52 – Lineaire component van de langjarige fit voor alle meetstations in de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel

4.2. Resultaten voor 18,6 jarige cyclus

In Figuur 53 is de amplitude van de 18,6 jarige cyclus weergegeven voor alle meetstations. Wanneer deze parameter statistisch niet significant is voor een bepaald meetstation, is bij het betreffende meetstation geen waarde weergegeven. Het is duidelijk dat deze parameter zinvol is voor de meest afwaarts gelegen meetstations, voor de opwaarts gelegen meetstations is dit niet het geval (invloed bovenafvoer).



Figuur 53– Amplitude parameter voor de 18,6 jarige cyclus van de langjarige fit voor alle meetstations in de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel. Indien de amplitude parameter ontbreekt duidt dit er op dat de berekende amplitude parameter statistisch niet significant is (zie §2.6.2, puntje 3).

4.3. Vergelijking met voorgaande studies

In eerdere studies werden reeds lineaire componenten bepaald voor langjarige waterstandtrends. Een vergelijking tussen voorgaande studies en huidige studie toont aan dat de beschouwde tijdsperiode logischerwijs van belang is. Zo is de beschouwde tijdsperiode in voorliggende studie en de studie van Levy et al. (2014) voor een groot deel vergelijkbaar, terwijl in de studie van Depreiter et al. (2014) een veel kortere tijdsperiode werd beschouwd. Bijgevolg komen de berekende waarden in voorliggende studie beter overeen met de berekende waarden in Levy et al. (2014) dan met de berekende waarden in Depreiter et al. (2014) (zie Tabel 6 en Tabel 7).

Tabel 6 – Overzicht van de berekende lineaire component volgens verschillende referentiewerken voor de hoogwaters. De getallen zijn uitgedrukt in meter/jaar.

* duidt aan dat de amplitude van de 18,6 jarige cyclus gelijkgesteld werd aan nul.

	Hoogwater		
Referentie	T2009 (Depreiter et al., 2014)	Levy et al. (2014)	Huidig rapport
Periode	... - 2009		1930 - 2013
Temse	+ 0.71	1974	+0.86 ± 0.03
Dendermonde	+ 0.76	1974	+0.88
Schoonaarde	+ 1.14	1971	+0.80
Wetteren	+ 0.84	1981	+0.89 ± 0.05*
Melle	+ 1.48	1974	+ 0.78 ± 0.07*
Walem	+0.58	1975	+ 0.81 ± 0.09*
Tielrode	+0.99	1901	+ 0.85 ± 0.03
Waasmunsterbrug	+0.50	1977	+ 0.97 ± 0.03
			+ 1.08 ± 0.09*

Tabel 7 – Overzicht van de berekende lineaire component volgens verschillende referentiewerken voor de laagwaters. De getallen zijn uitgedrukt in meter/jaar.

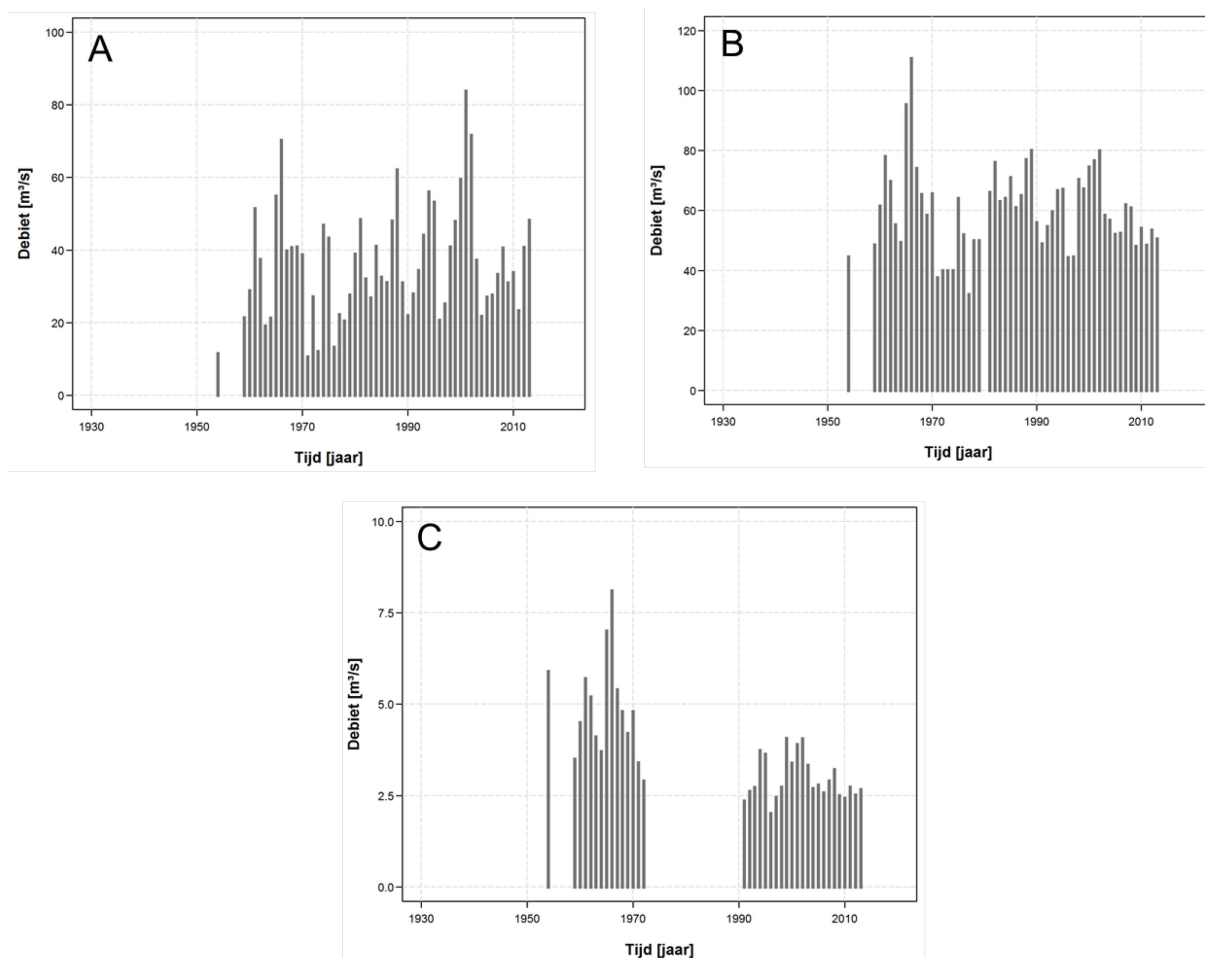
* duidt aan dat de amplitude van de 18,6 jarige cyclus gelijkgesteld werd aan nul.

	Laagwater		
Referentie	T2009 (Depreiter et al., 2014)	Levy et al. (2014)	Huidig rapport
Periode	... - 2009		1980 - 2013
Temse	-0.03	1975	+0.01 ± 0.10*
Dendermonde	-0.51	1974	- 0.56
Schoonaarde	-0.81	1970	-0.65 ± 0.14*
Wetteren	n.s.	1981	-0.71
Melle	-0.89	1974	-1.03 ± 0.31*
Walem	-0.35	1970	-1.28 ± 0.41*
Tielrode	-0.24	1970	-0.59 ± 0.08*
Waasmunsterbrug	+6.15	1982	+0.02
			-0.19 ± 0.09*
			+4.97 ± 0.40*

5. Evolutie bovenafvoer

De jaarlijkse bovenafvoer van een rivier wordt in grote mate bepaald door de neerslaghoeveelheid die het bijhorende stroombekken ontvangt. Gezien neerslaghoeveelheden sterk fluctueren kunnen er tussen opeenvolgende jaren grote variaties in bovenafvoer optreden (Figuur 54). In de Boven-Zeeschelde is de gemiddelde bovenafvoer over de tijdsperiode 1954-2013 ca. 37 m³/s (Tabel 8). Dit is beduidend lager dan de gemiddelde bovenafvoer voor de Rupel die over dezelfde tijdsperiode ca. 60 m³/s bedraagt. De bovenafvoer in de Durme is klein ten opzichte van de bovenafvoer in de Boven-Zeeschelde en de Rupel. Op de lange termijn is er geen significante trend in jaarlijkse bovenafvoer in de Boven-Zeeschelde (lineaire regressie; R² = 0.03; p = 0.15) en de Rupel (lineaire regressie; R² = 0.005; p = 0.6). Tenslotte merken we nog op dat de bovenafvoer in de Boven-Zeeschelde niet steeds op dezelfde locatie werd gemeten. In 1969 werden immers de werken aan de Ringvaart te Gent vervolledigd. Bijgevolg werd de bovenafvoer tot 1969 opgemeten in Gentbrugge en na 1969 in Merelbeke/Melle. Er werd geen analyse gemaakt omtrent een verschil in bovenafvoer voor en na de werken in Gent vanwege het geringe aantal metingen vóór 1969. Meer informatie omtrent de waterhuishouding rond Gent is terug te vinden in bijvoorbeeld Michielsens et al. (2012).

In §7.1 wordt dieper ingegaan op de relatie tussen de bovenafvoer en de waterstanden in het estuarium. Een overzicht van bovenafvoer in combinatie met jaargemiddelde waterstand wordt weergegeven in Appendix (Appendix C – Waterstanden vs. Bovenafvoer). Meer informatie omtrent de meting en berekening van de bovenafvoer is terug te vinden in Vanlierde et al. (2014).



Figuur 54 – Evolutie van de bovenafvoer in de Boven-Zeeschelde (A), Rupel (B) en Durme (C).

Tabel 8 – Karakteristieke getallen (gemiddeld, minimum, maximum, 25^{ste} percentiel en 75^{ste} percentiel) omtrent de bovenafvoeren van de Schelde, Durme en Rupel.

Eveneens zijn de kengetallen omtrent de verhouding tussen Rupel en Schelde weergegeven.

Getallen in m³/s.

	Gem	Min	Max	P (0.25)	P (0.75)
Boven-Zeeschelde	36.5	10.6	83.8	26.4	44.7
Durme	3.7	2	8.1	2.7	4.1
Rupel	60.2	32	110.7	50	67.1
Rupel / Boven-Zeeschelde	1.87	0.85	3.94	1.43	2.17

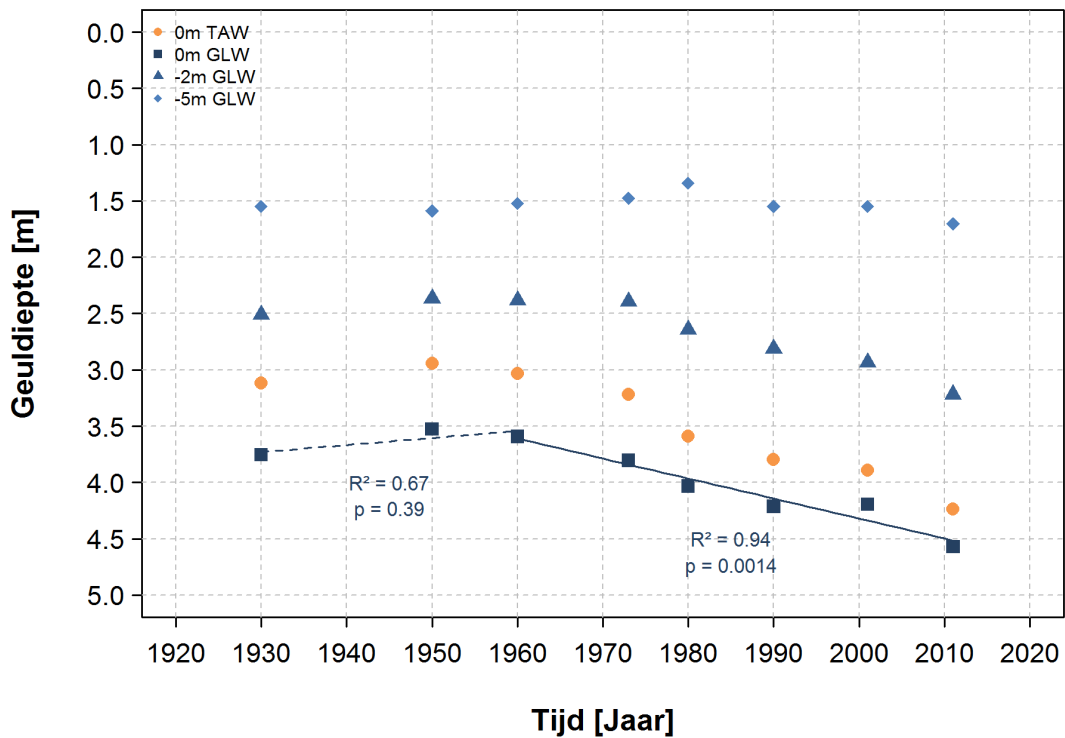
6. Morfologische evolutie

6.1. Geuldiepte (segment-gemiddeld)

Op basis van de segment-gemiddelde geuldiepte ten opzichte van het 0m GLW referentievlak observeren we in alle segmenten van de Boven-Zeeschelde een afname in geuldiepte voor de periode 1930-1960, en een toename in geuldiepte voor de periode 1960-2011 (Figuur 55 tot Figuur 58). Om na te gaan of deze correlaties significant zijn werd een lineaire regressie uitgevoerd voor beide tijdperiodes. Hieruit volgt dat er een significante toename is in segment-gemiddelde geuldiepte ($p < 0.05$) in de periode 1960-2011 voor 3 van de 4 geanalyseerde segmenten (Figuur 55 tot Figuur 57). Enkel voor het meest opwaartse segment (Wetteren-Melle) is er geen significante toename in segment-gemiddelde geuldiepte ($p > 0.05$, zie Figuur 58). Voor de periode 1930-1960 is het aantal observaties beperkt (3 tijdstippen) en is er geen significante afname in de segment-gemiddelde geuldiepte ($p > 0.05$ voor alle 4 segmenten). De significante toename in segment-gemiddelde geuldiepte over de periode 1960-2011 in 3 van de 4 segmenten is voornamelijk toe te schrijven aan een toename in geuldiepte in het deel van de geul dat gelegen is tussen 0m GLW en -5m GLW. We observeren immers dat de geuldiepte ten opzichte van -2m GLW de trend volgt van de geuldiepte ten opzichte van het 0m GLW vlak, terwijl de geuldiepte ten opzichte van -5m GLW min of meer constant blijft. Dit suggereert dat de diepere delen van de geul ($< -5m$ GLW) in de periode 1960-2011 weinig gewijzigd zijn, terwijl de diepte in de ondiepere delen van de geul is toegenomen. De toename in segment-gemiddelde geuldiepte is dus te wijten aan het dieper worden van de geul in de zone van de geulrand (0m GLW) tot het niveau -5m GLW, en niet aan het dieper worden van de diepste delen ($< -5m$ GLW) van de geul. In het meest opwaartse segment (Wetteren-Melle) is er geen significante toename in segment-gemiddelde geuldiepte over de periode 1960-2011. Wel observeren we tussen 1960 en 1980 een belangrijk toename in geuldiepte. Deze toename is het gevolg van de verdieping van het segment. Vanaf 1980 observeren we immers dat delen van de geul gelegen zijn onder het niveau -5m GLW (Figuur 58).

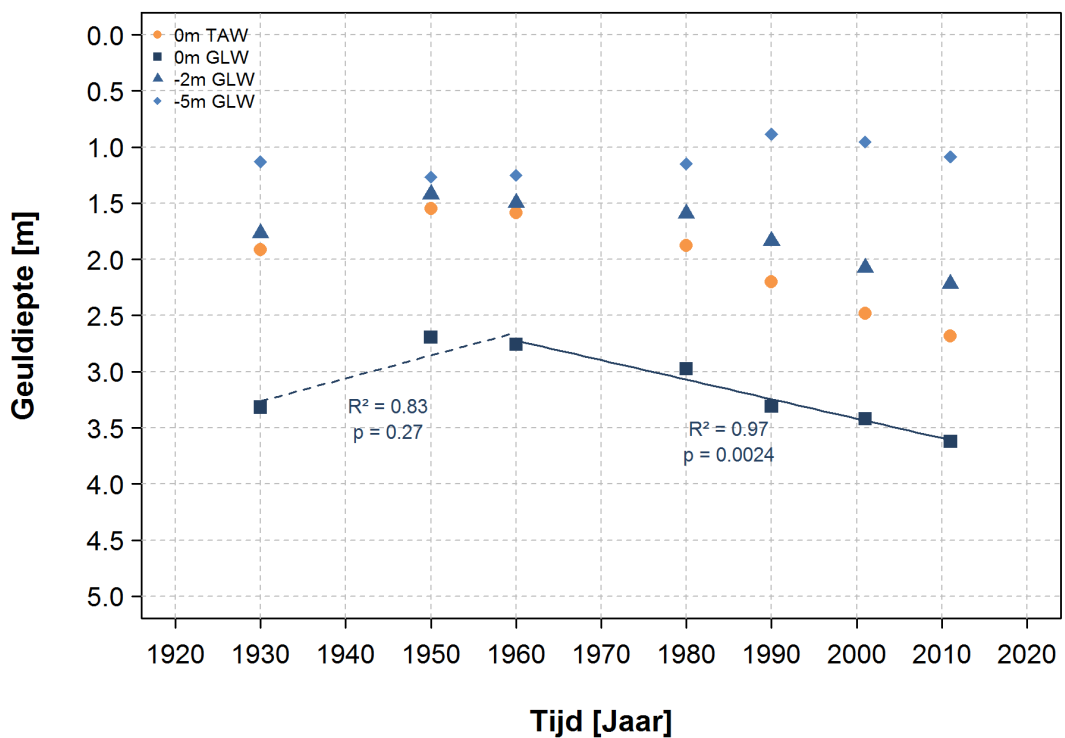
De Rupel wordt gekenmerkt door een significante toename in segment-gemiddelde geuldiepte over de periode 1930-2010 ($p = 0.0023$, analyse uitgevoerd voor geuldiepte ten opzichte van 0m GLW, zie Figuur 59). In de periode 1930-1960 is de toename in geuldiepte voornamelijk toe te schrijven aan het verdiepen van de ondiepere delen van de geul (tussen -5m en 0m GLW). We observeren immers dat de geuldiepte ten opzichte van het -2m GLW vlak min of meer de trend volgt in geuldieptewijziging ten opzichte van het 0m GLW vlak. De geuldiepte ten opzichte van het -5m GLW vlak daarentegen neemt af. Over de periode 1960-2010 is er een toename in geuldiepte ten opzichte van zowel het 0m, -2m en -5m GLW vlak. Dit impliceert dat er zowel in de ondiepere delen (tussen -5m en 0m GLW) als in de diepere delen ($< -5m$ GLW) een toename is in geuldiepte.

In tegenstelling tot de Rupel en de Boven-Zeeschelde wordt de Durme gekenmerkt door een historiek van verondieping. Over de periode 1930-2011 is er een significante afname in segment-gemiddelde geuldiepte ($p = 0.0016$, analyse geuldiepte ten opzichte van het 0m GLW vlak, zie Figuur 60). De afname in segment-gemiddelde geuldiepte is toe te schrijven aan zowel het verondiepen van de ondiepe delen, als het verondiepen van de diepere delen van de geul. Zowel de geuldiepte ten opzichte van het -2m GLW vlak als ten opzichte van het -5m GLW vlak volgen min of meer de trend in geuldiepte-afname ten opzichte van het 0m GLW vlak. De verondieping in de Durme is zelfs dermate sterk dat het deel van de geul gelegen onder -5m GLW verdwenen is tussen 1980 en 1997.



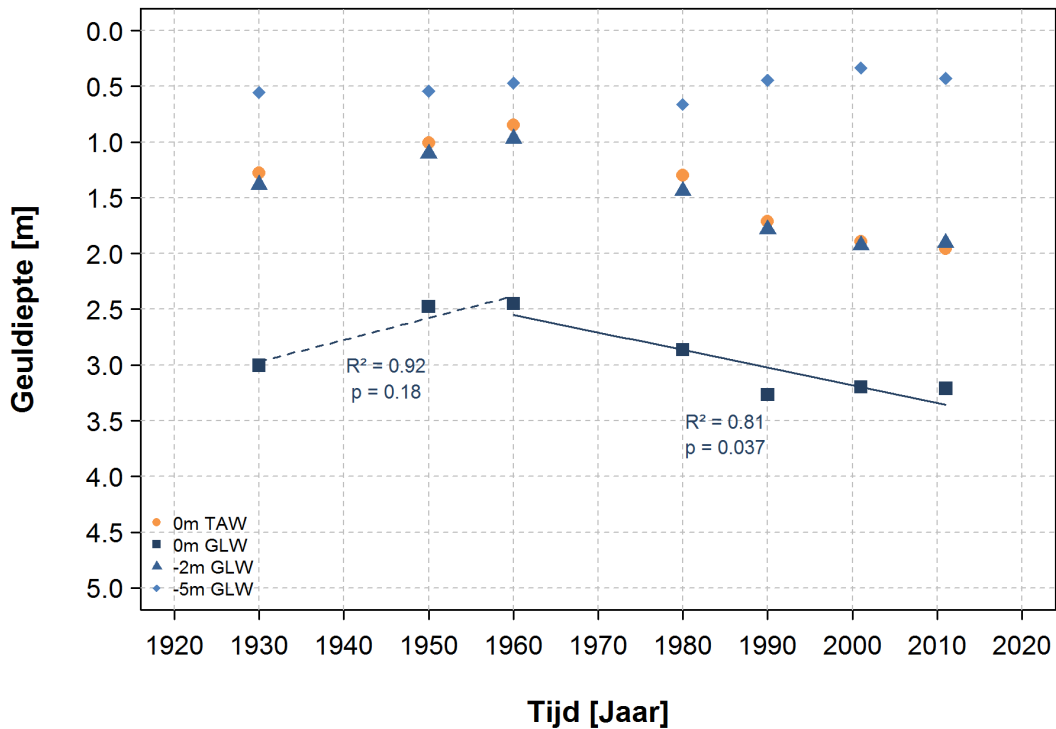
Figuur 55 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Temse-Dendermonde over de periode 1930-2011. De gemiddelde geuldiepte is weergegeven ten opzichte van 4 verschillende referentievlakken (0m TAW, 0m GLW, -2m GLW en -5m GLW).

De significante trendlijn wordt voorgesteld met een volle lijn, de niet significante trendlijn met een streepjeslijn.



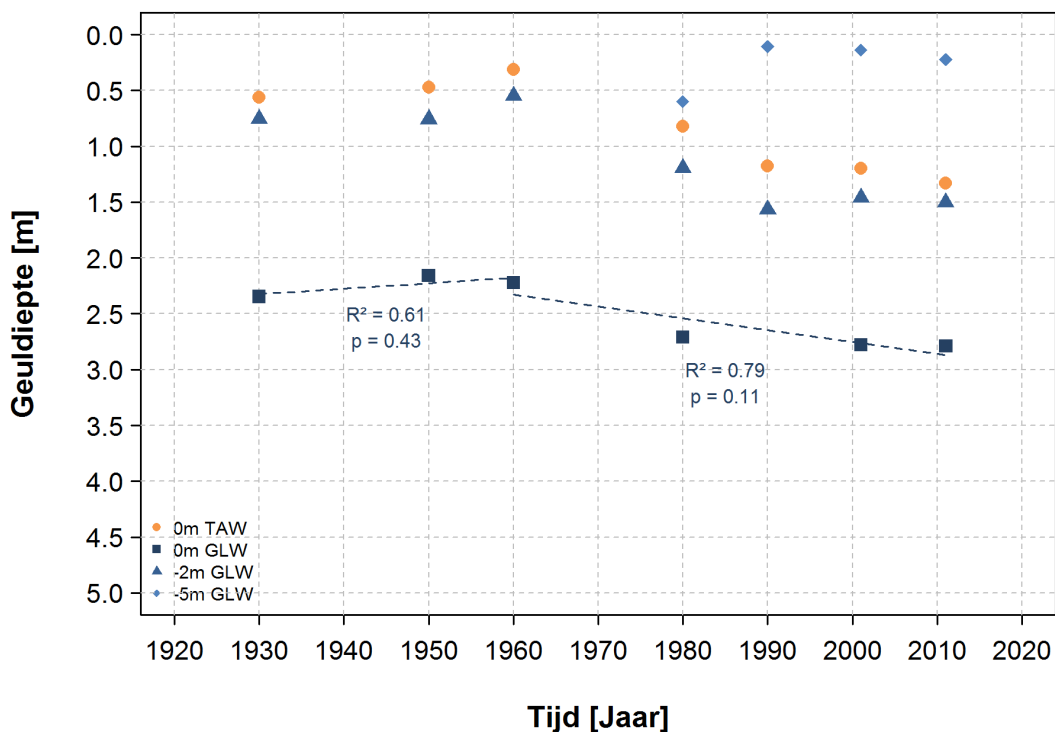
Figuur 56 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Dendermonde-Schoonaarde over de periode 1930-2011. De gemiddelde geuldiepte is weergegeven ten opzichte van 4 verschillende referentievlakken (0m TAW, 0m GLW, -2m GLW en -5m GLW).

De significante trendlijn wordt voorgesteld met een volle lijn, de niet significante trendlijn met een streepjeslijn.



Figuur 57 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Schoonaarde-Wetteren over de periode 1930-2011. De gemiddelde geuldiepte is weergegeven ten opzichte van 4 verschillende referentievlakken (0m TAW, 0m GLW, -2m GLW en -5m GLW).

De significante trendlijn wordt voorgesteld met een volle lijn, de niet significante trendlijn met een streepjeslijn.

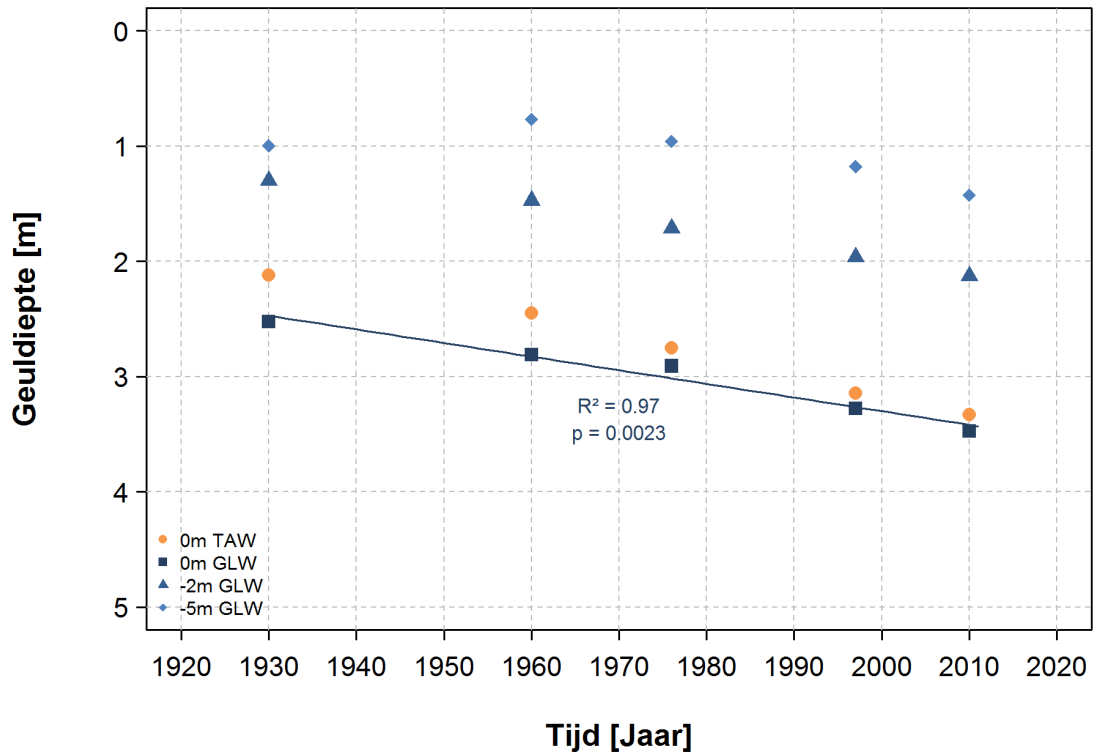


Figuur 58 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Wetteren-Melle over de periode 1930-2011.

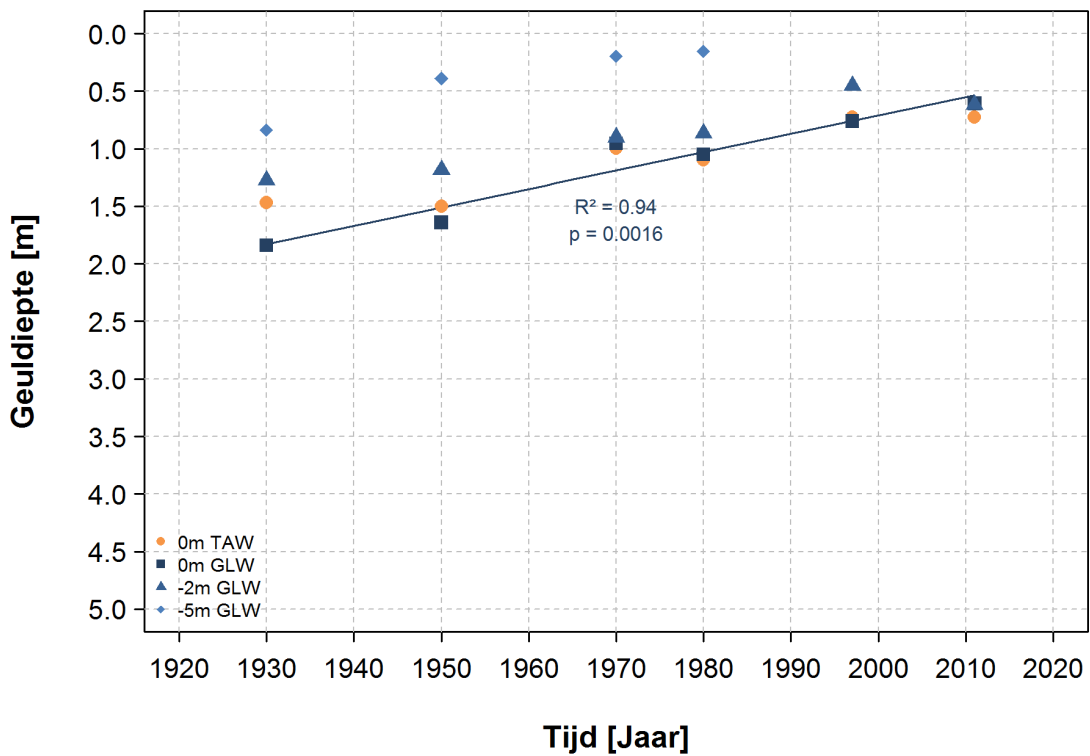
De gemiddelde geuldiepte is weergegeven ten opzichte van 4 verschillende referentievlakken (0m TAW, 0m GLW, -2m GLW en -5m GLW).

Ten gevolge het beperkt gepeilde areaal is het tijdstip 1990 voor de 0m GLW analyse niet weergegeven (§2.7.3).

Vermits de trendlijnen niet significant zijn worden deze voorgesteld met een streepjeslijn.



Figuur 59 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment monding Rupel-Walem over de periode 1930-2010. De gemiddelde geuldiepte is weergegeven ten opzichte van 4 verschillende referentievlakken (0m TAW, 0m GLW, -2m GLW en -5m GLW).

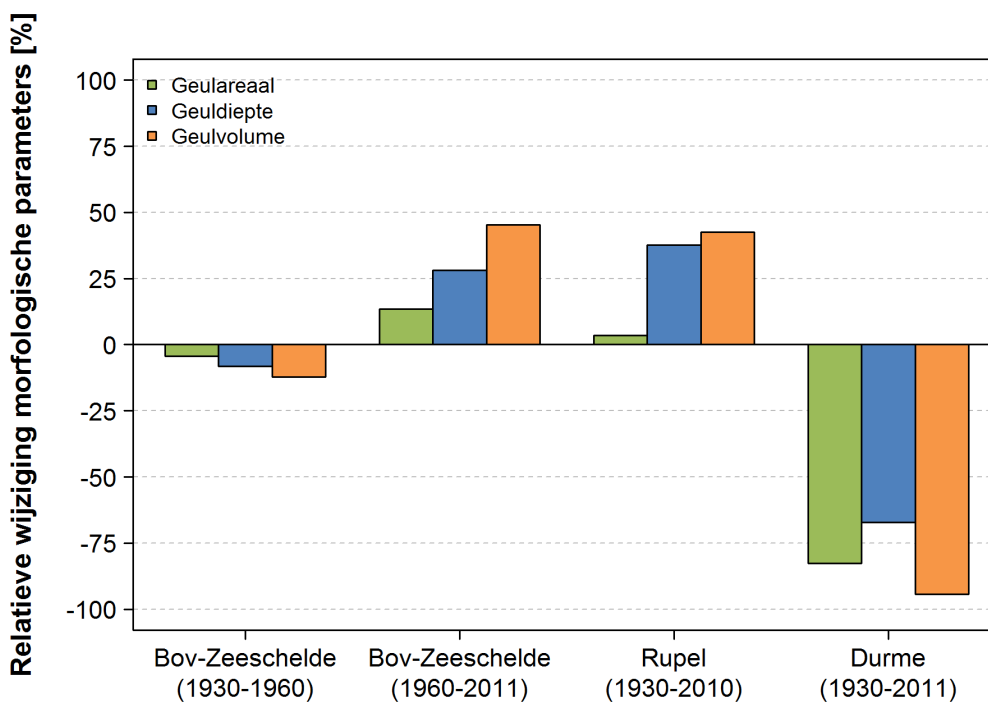


Figuur 60 – Evolutie van de gemiddelde geuldiepte in het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme) over de periode 1930-2011. De gemiddelde geuldiepte is weergegeven ten opzichte van 4 verschillende referentievlakken (0m TAW, 0m GLW, -2m GLW en -5m GLW).

6.2. Geulareaal en geulvolume

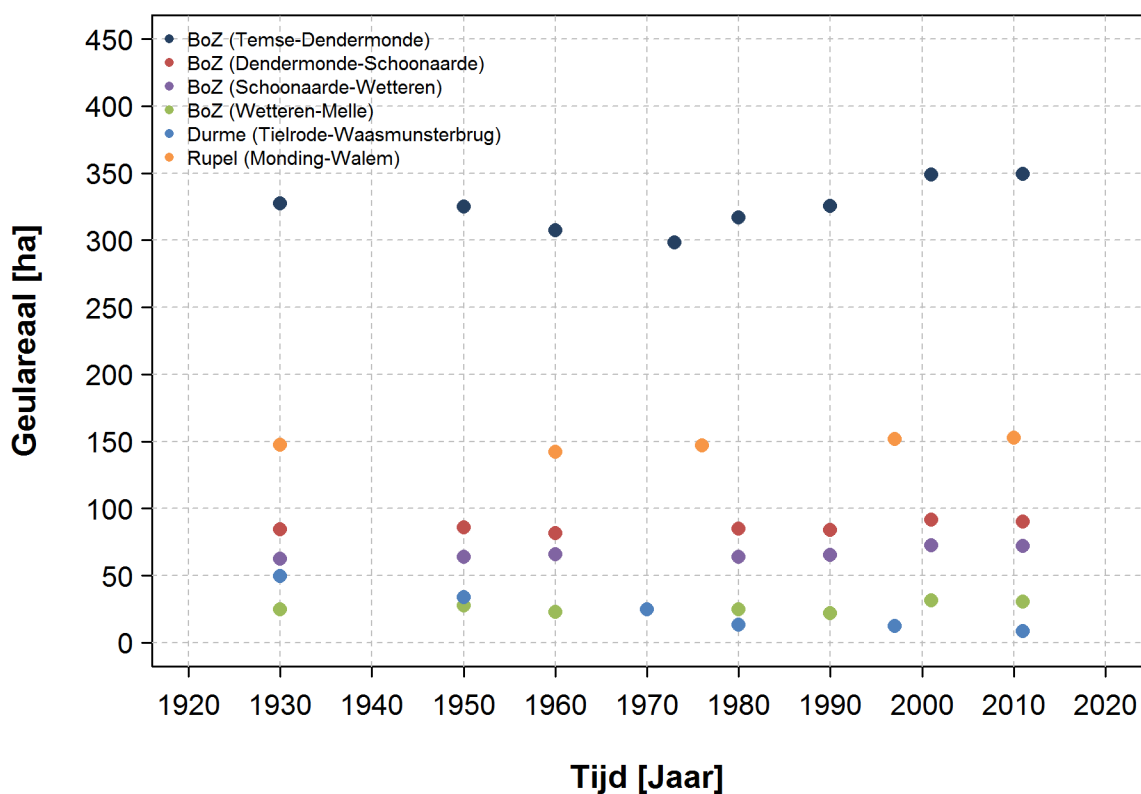
In de Boven-Zeeschelde en Rupel observeren we een toename in geulvolume van bijna 50% over respectievelijk de periode 1960-2011 en 1930-2010. Met uitzondering van de periode 1960-1976 verloopt deze toename in geulvolume min of meer constant in de tijd (Figuur 63). De toename in geulvolume is grotendeels toe te schrijven aan een toename in geuldiepte (segment-gemiddeld), terwijl de wijzigingen in geulareaal eerder beperkt zijn. Dit is zeker het geval voor de Rupel waarbij de toename in geulvolume bijna uitsluitend toe te schrijven is aan een toename in geuldiepte (Figuur 61). Eerdere analyse toonde reeds aan dat er een significante toename is in geuldiepte in de Boven-Zeeschelde en Rupel (§6.1). Enkel over de periode 1930-1960 is er geen significante wijziging in geuldiepte van de Boven-Zeeschelde. Ook de wijzigingen in geulareaal en geulvolume zijn in deze periode beperkt (Figuur 61)

In de Durme is er over de periode 1930-2011 een afname in geulareaal en geuldiepte van respectievelijk 83% en 67% (Figuur 61). Dit resulteert in een afname van het geulvolume met maar liefst 94%. In tegenstelling tot de Boven-Zeeschelde en Rupel zijn de wijzigingen in geulareaal voor de Durme groot. Een deel van de afname in geulareaal (25%) kan verklaard worden door een meanderafsnijding die plaatsvond tussen 1930 en 1950 (cf. Figuur 144 en Figuur 145 in Appendix). Vanaf 1950 is de Durmegeul echter niet meer verkort, en is de afname in geulareaal te verklaren door het versmallen van de Durmegeul. In combinatie met een significante verondieping van de geul (zie §6.1) resulteerde dit in een drastische afname van het geulvolume.

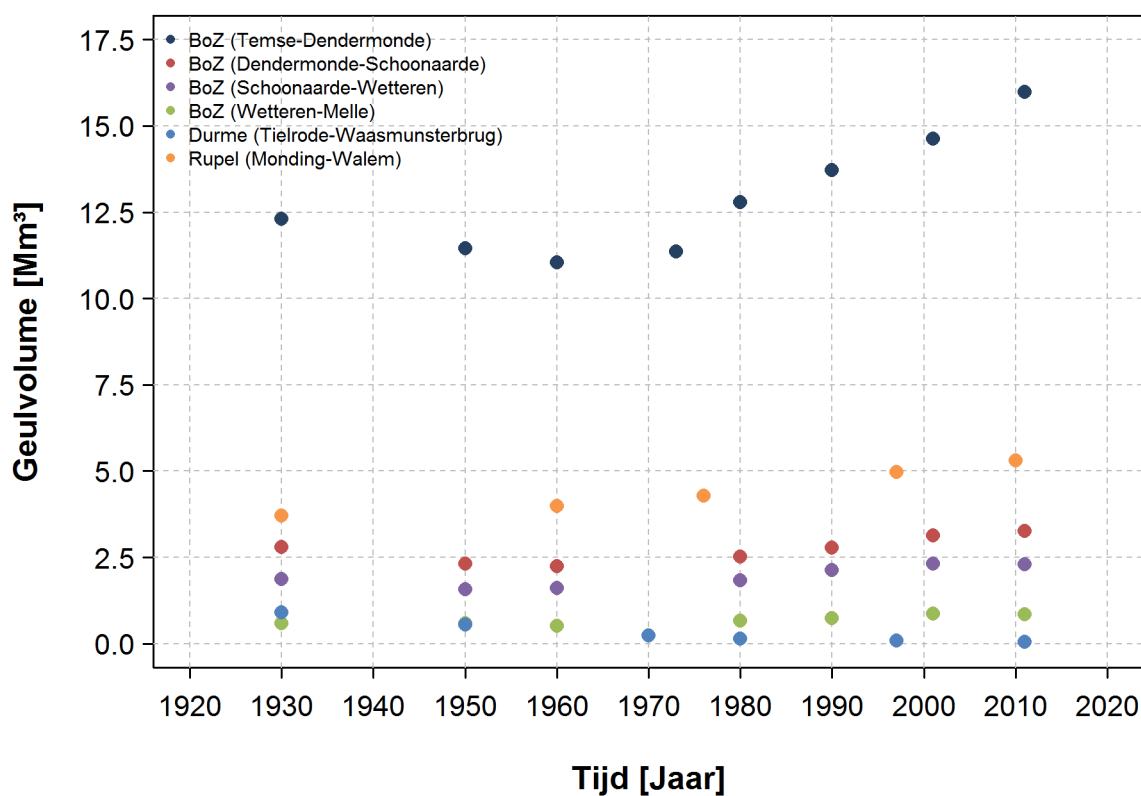


Figuur 61 – Relatieve wijziging in geulareaal, geuldiepte en geulvolume voor de segmenten Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme over de tijdsperiode 1930-recent.

Voor de Boven-Zeeschelde wordt een onderscheid gemaakt tussen de periodes 1930-1960 en 1960-2011 conform de observaties van historische wijzigingen in geuldiepte (zie §6.1).



Figuur 62 – Historische evolutie van het geulareaal in de verschillende deelsegmenten (segmenten zie Figuur 6). Het geulareaal werd bepaald op basis van het 0m GLW vlak.



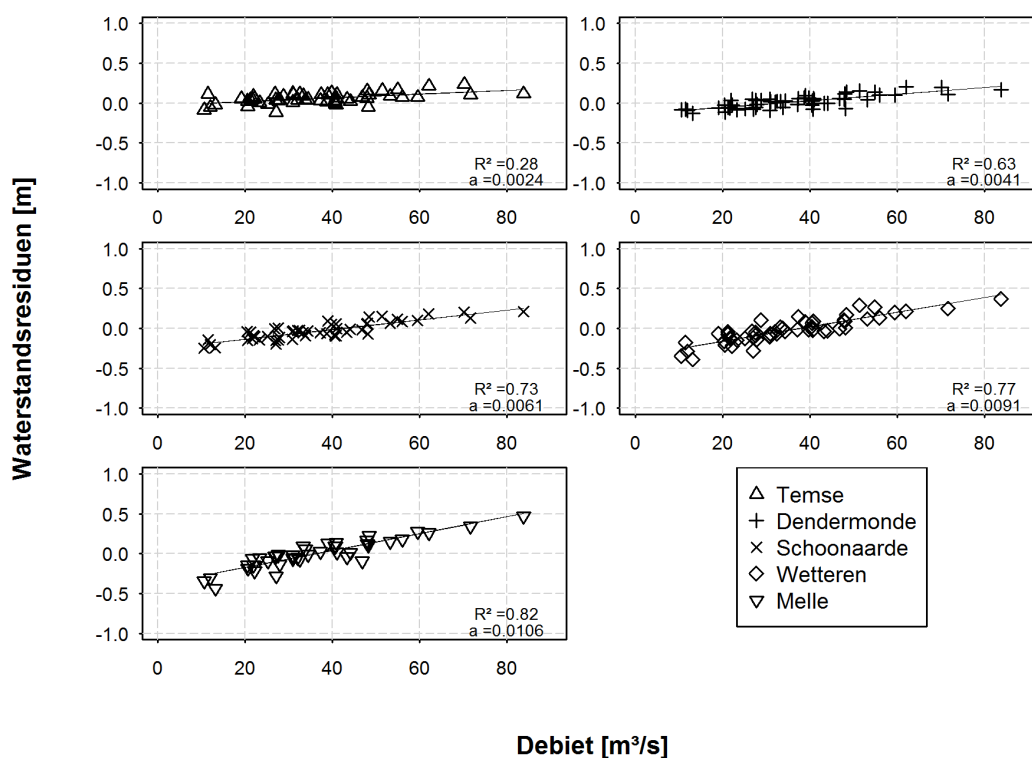
Figuur 63 – Historische evolutie van het geulvolume in de verschillende deelsegmenten (segmenten zie Figuur 6). Het geulvolume werd berekend onder het 0m GLW vlak.

7. Relaties tussen bovenafvoer, getij en geuldiepte

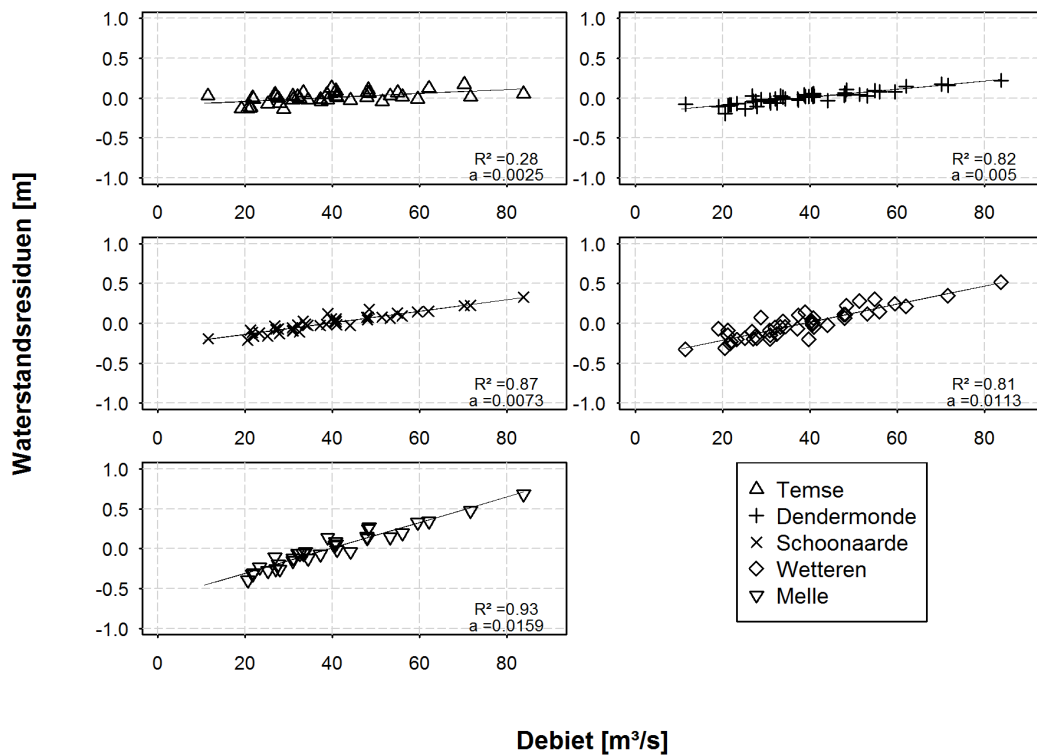
7.1. Bovenafvoer en waterstanden (GHW en GLW)

We observeren dat verhoogde bovenafvoer leidt tot een verhoging van de waterstanden, en dat lage bovenafvoer resulteert in lagere waterstanden. Bovendien is het effect van bovenafvoer het grootst voor de meest opwaartse getijposten, wat leidt tot grotere fluctuaties in bovenafvoer (zie Appendix C – Waterstanden vs. Bovenafvoer). Om deze hypothese te testen werden de waterstandsresiduen (i.e. de gemeten hoogwaterstand/laagwaterstand min de langjarige trend zoals beschreven in hoofdstuk 4) geplott ten opzichte van de bovenafvoer (Figuur 64 en Figuur 65). Deze analyse toont aan dat er een positieve correlatie is tussen beide parameters waarbij voor lagere bovenafvoer de waterstandsresiduen negatief zijn (dus waterstand onder de langjarige trendlijn), en voor hogere bovenafvoer de residuen positief zijn (dus waterstand boven de langjarige trendlijn). Met uitzondering van Temse is de R^2 van de relatie steeds groter dan 0.6, waarbij de relatie sterker wordt in opwaartse richting. Bovendien wordt in opwaartse richting de helling van de lineaire trendlijn groter wat er op wijst dat de invloed van bovenafvoer toeneemt. Over het algemeen zijn de relaties tussen de laagwaterresiduen en de bovenafvoer sterker (hogere R^2 en grotere helling trendlijn) dan de relaties tussen de hoogwaterresiduen en de bovenafvoer. Bovenafvoer heeft dus een nog grotere invloed op de laagwaterstanden dan op de hoogwaterstanden. Algemeen kunnen we concluderen dat stroomopwaarts Dendermonde de bovenafvoer een belangrijke invloed op de jaargemiddelde waterstanden.

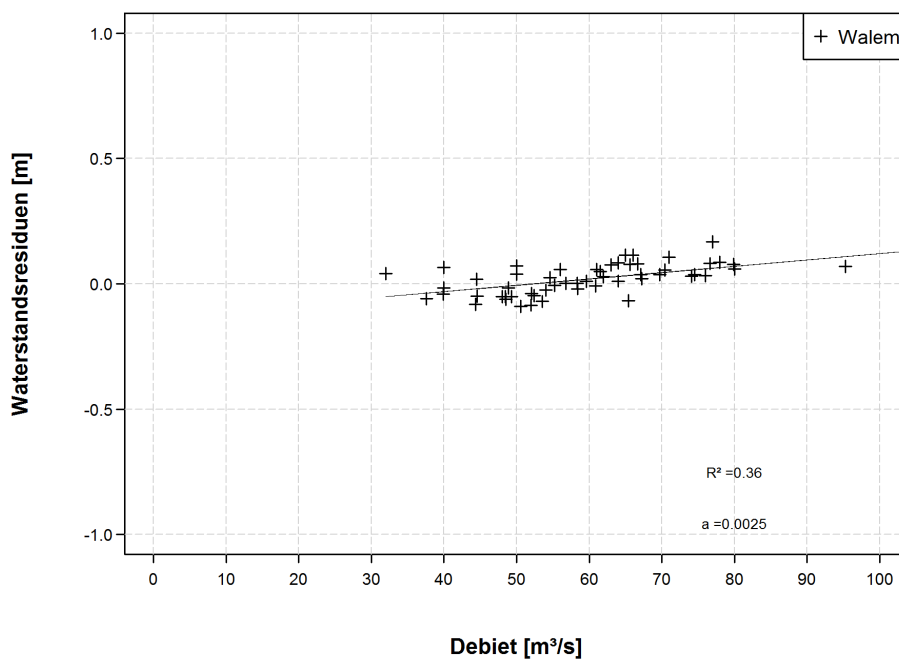
Wat betreft Rupel en Durme kunnen we stellen dat er in de Rupel een correlatie is tussen de waterstandsresiduen en de bovenafvoer ter hoogte van de tijpost Walem. Bovenafvoer heeft hierbij het grootste effect op de laagwaterstanden terwijl het beeld voor de hoogwaterstanden minder éénduidig is (respectievelijk Figuur 65 en Figuur 64). In de Durme is de relatie tussen bovenafvoeren en de residuen sterker voor de hoogwaters (Figuur 68) dan voor de laagwaters (Figuur 69). Te Waasmunster is de relatie bij laagwater onbestaande (Figuur 69). De 'laagwaterstand' te Waasmunster komt in feite overeen met het bodempeil.



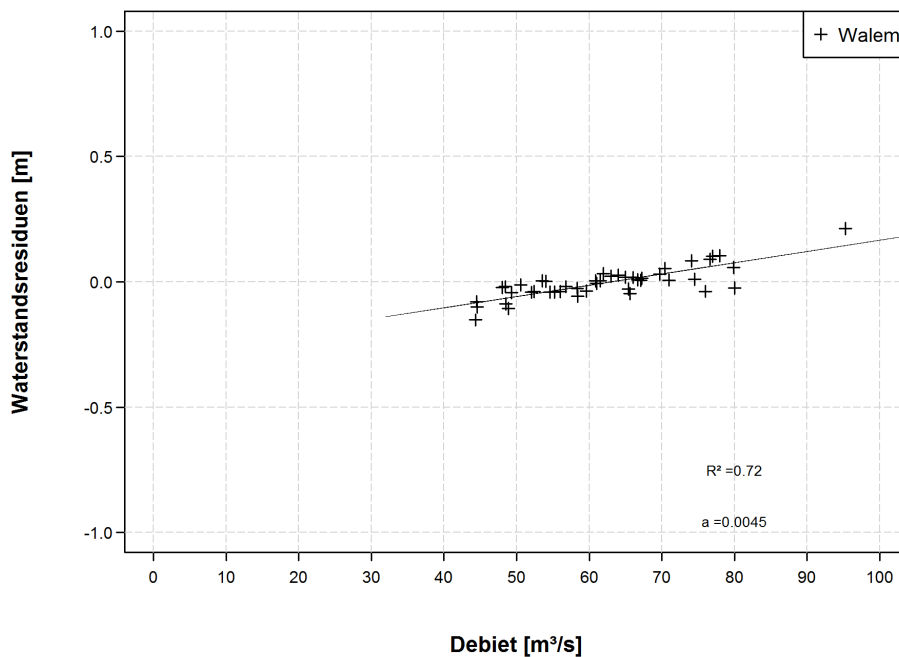
Figuur 64 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde hoogwaterstanden (t.o.v. trendlijn) en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Boven-Zeeschelde (a = richtingscoëfficiënt van de lineaire trendlijn)



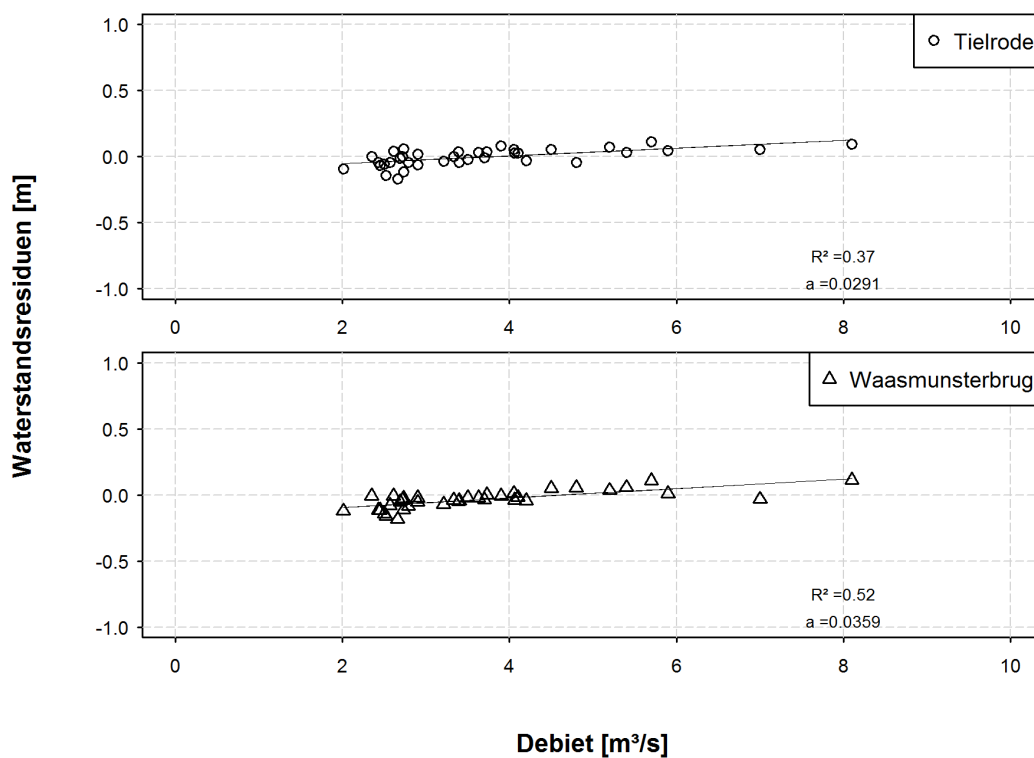
Figuur 65 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde laagwaterstanden (t.o.v. trendlijn) en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Boven-Zeeschelde (a = richtingscoëfficiënt van de lineaire trendlijn)



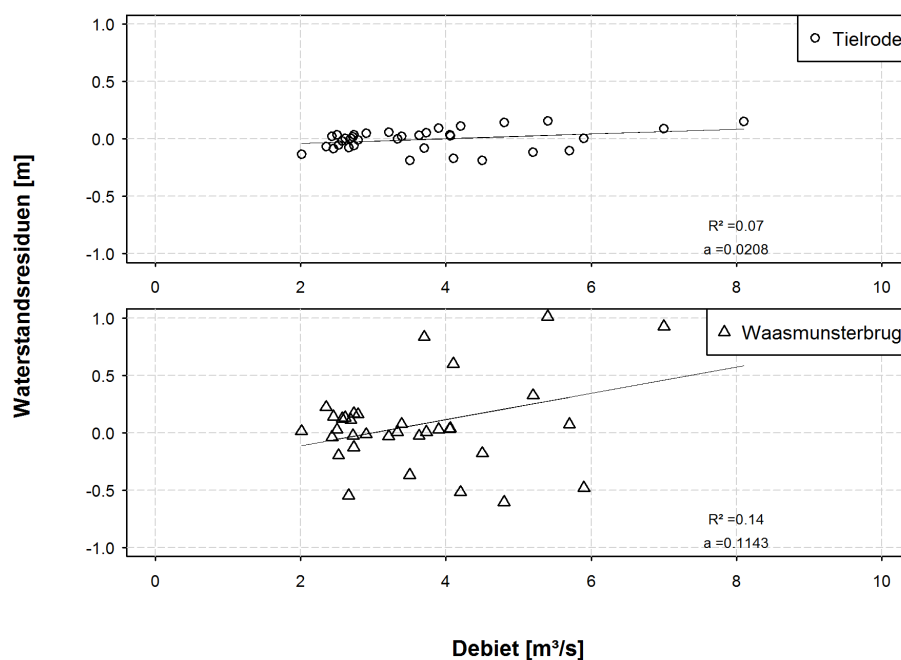
Figuur 66 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde hoogwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor het meetstation langs de Rupel



Figuur 67 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde laagwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor het meetstation langs de Rupel



Figuur 68 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde hoogwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Durme



Figuur 69 – Relatie tussen het residu van de jaargemiddelde laagwaterstanden ten opzichte van de trendlijn en de bovenafvoer voor de meetstations langs de Durme

7.2. Celeriteit laagwatergolf en geuldiepte bij GLW

In Figuur 70 is de celeriteit van de laagwatergolf weergegeven in de Boven-Zeeschelde. Deze werd bepaald door de jaargemiddelde tijdsvertraging van een station te vergelijken met deze van het volgende, afwaarts gelegen station. Gebruik makende van de gemiddelde diepte bij laagwater op basis van de bathymetrieën (zie §2.7.3 en §6.1) kan de celeriteit ook theoretisch berekend worden aan de hand van de celeriteitsvergelijking voor een ondiep water golf, waarbij geldt:

$$c = \sqrt{gd}$$

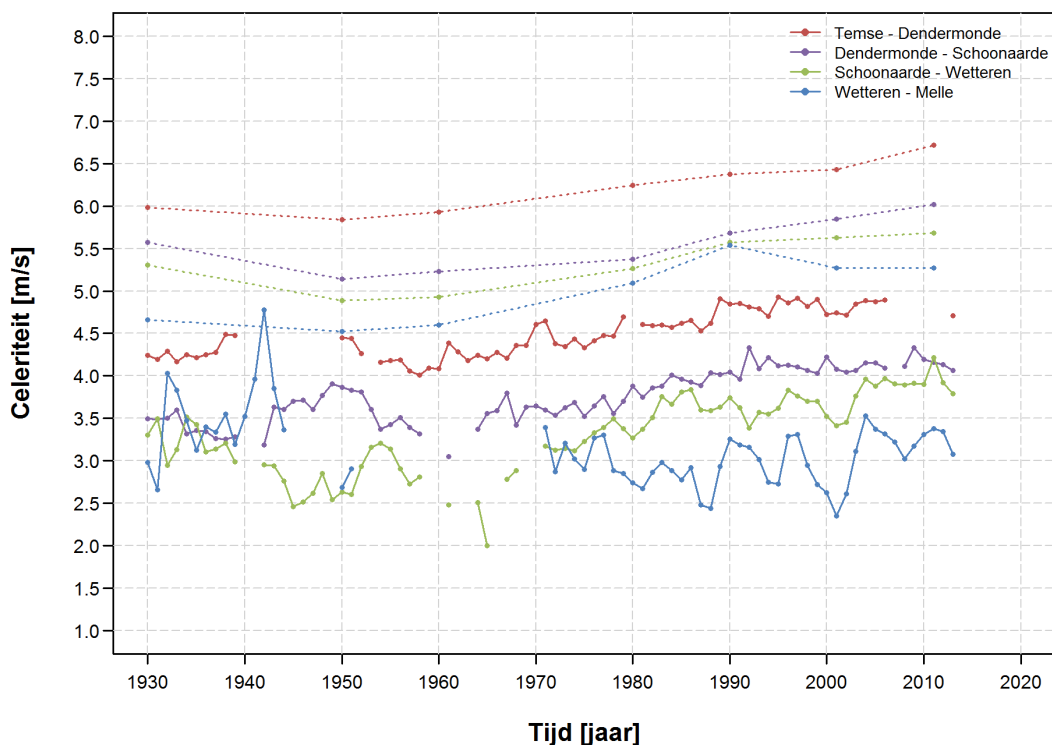
met: c = de celeriteit of voorplantingssnelheid [m/s]

g = de gravitatieversnelling = 9.81 m/s²

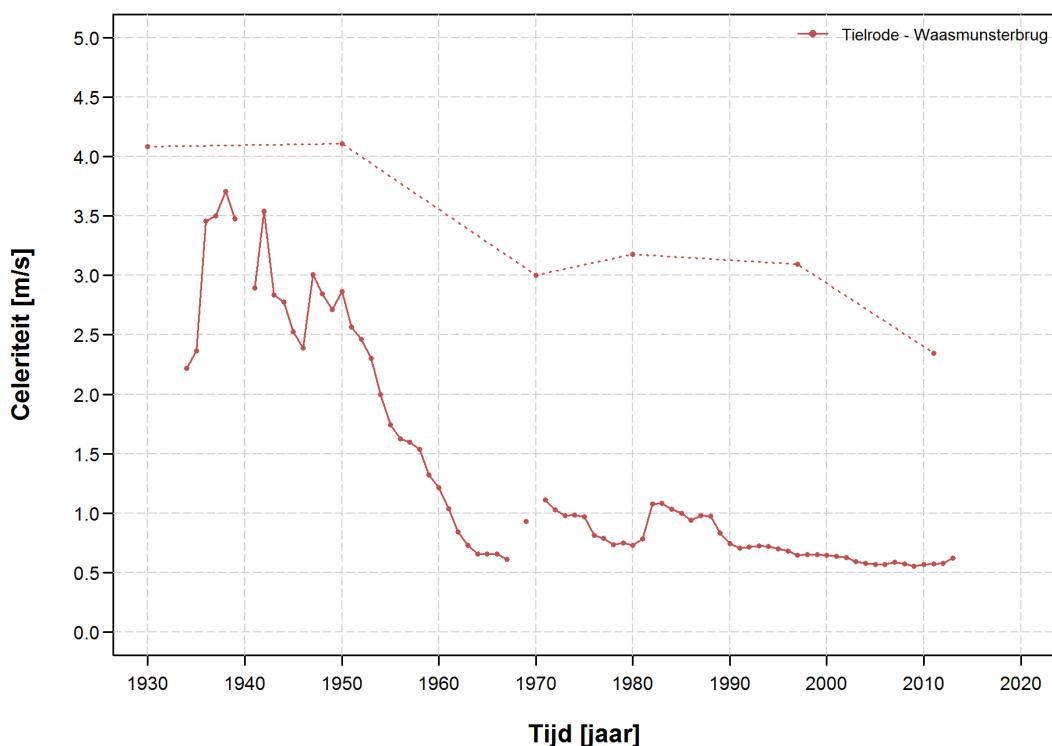
d = de diepte [m]

Op basis van deze theoretische berekening zien we een sterke overschatting van de snelheid van de golf van ongeveer 50 % t.o.v. de gemeten waarden. Daarentegen wordt de toename van de snelheid doorheen de tijd wel goed voorspeld. Deze toename bedraagt ongeveer 0.5 m/s in alle meettransecten. De uitzondering hierop is het transect Wetteren – Melle, waar geen duidelijk toename van de golfsnelheid wordt waargenomen. We merken op dat in het geval van een estuariumgeul, de bepaling van de diepte in bovenstaande vergelijking bemoeilijkt wordt door de sterke dieptegradiënt in de dwarsrichting van de geul. Daarenboven houdt bovenstaande vergelijking geen rekening met bodemwrijving, bijkomende wrijving ten gevolge van geulmeandering, convergentie langsheen het estuarium, en getijreflecties. Deze factoren verklaren in belangrijke mate waarom de absolute waarden in celeriteit tussen de theoretische berekening en deze op basis van de observaties verschillen ten opzichte van elkaar.

Ook voor de Durme (Figuur 71) is de berekende snelheid van de golf een overschatting t.o.v. de metingen. De afname in golfsnelheid is zowel voor de berekening uit de bathymetrie als in de observaties van dezelfde orde.



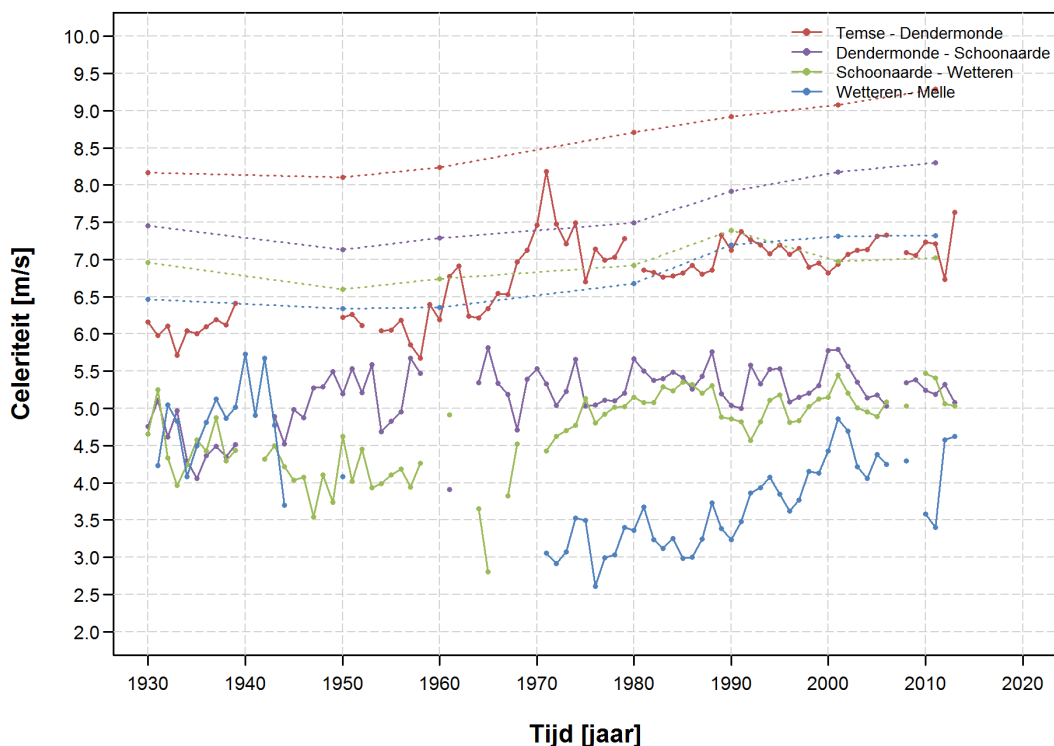
Figuur 70 – Celeriteit van de laagwatergolf op basis van de data (volle lijn) en berekend op basis van de gemiddelde diepte (stippellijn) in de Boven-Zeeschelde



Figuur 71 – Celeriteit van de laagwatergolf op basis van de data (volle lijn) en berekend op basis van de gemiddelde diepte (stippellijn) in de Durme

7.3. Celeriteit hoogwatergolf en geuldiepte bij GHW

Voor de meeste bathymetrieën is enkel het subtidale deel beschikbaar, waardoor de gemiddelde diepte onder HW niet berekend kan worden op basis van deze data, in tegenstelling tot de diepte onder GLW. De gemiddelde diepte onder GHW werd daarom geschat door bij de gemiddelde diepte onder GLW het hoogteverschil tussen hoogwater en laagwater op te tellen. Hiervoor werden de 10-jarige gemiddelden gebruikt. Op deze manier wordt een inschatting gemaakt van de golfsnelheid op basis van de diepte, weergegeven in Figuur 72. Opnieuw zien we dat de berekening van de snelheid van de golf op basis van de diepte een overschatting is van de waargenomen snelheid.

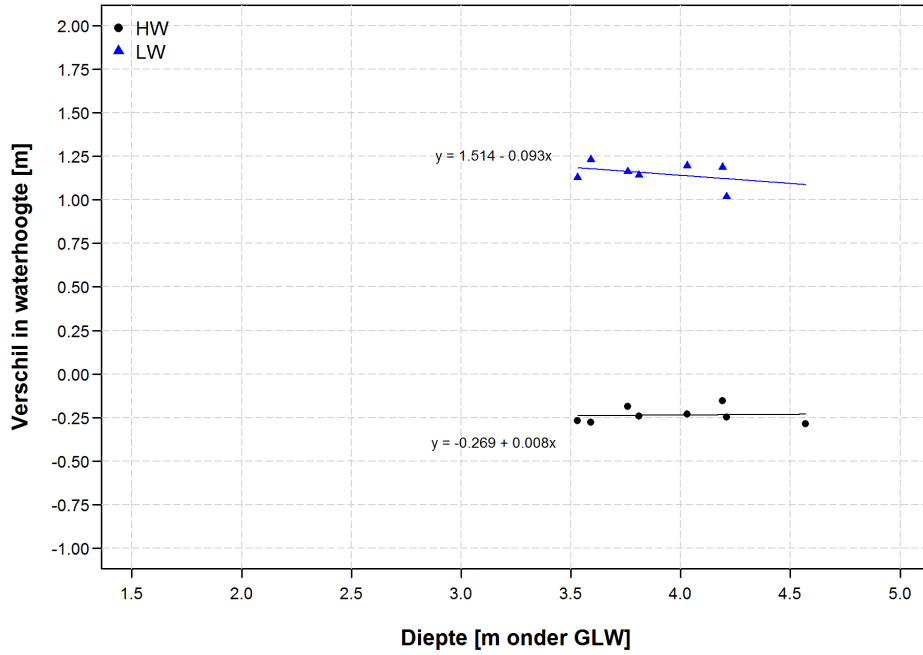


Figuur 72 – Celeriteit van de hoogwatergolf op basis van de data (volle lijn) en berekend op basis van de geschatte gemiddelde diepte (stippellijn) in de Boven-Zeeschelde

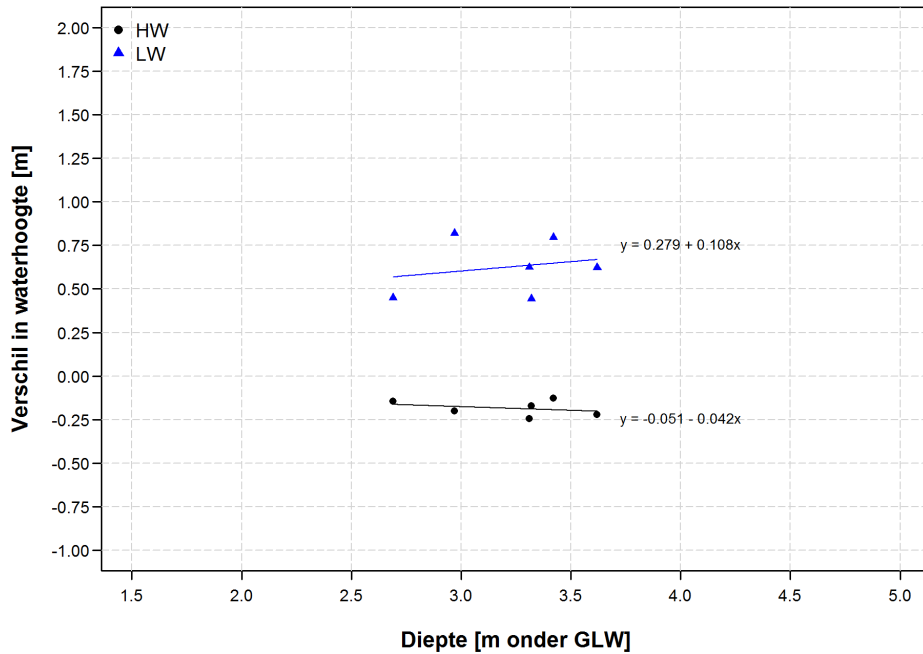
7.4. Waterstandsverhang en geuldiepte

In deze paragraaf wordt nagegaan of er in de tijd een verband is tussen de wijziging in geuldiepte en het verhang in laagwater en hoogwater. Een toename in geuldiepte impliceert immers dat de getijgolf minder wrijving ondervindt waardoor het waterstandsverhang afneemt. Om deze hypothese te testen werd over elke segment (Figuur 6) en voor elk tijdstip (zie Tabel 4) het waterstandsverhang (zowel voor GHW als GLW) geplotted ten opzichte van de geuldiepte, en werd een lineaire trendanalyse uitgevoerd.

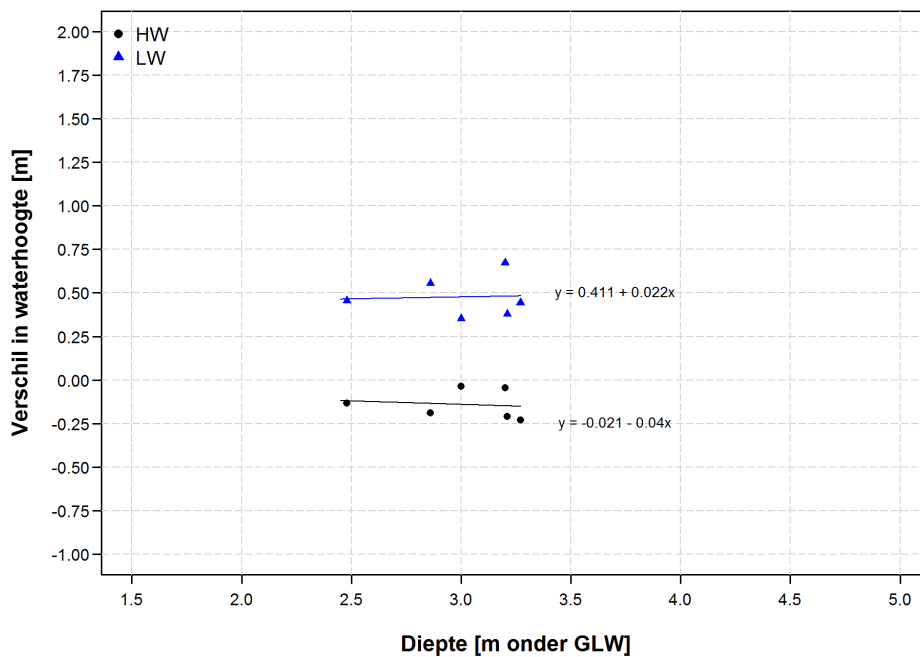
Van Figuur 73 tot Figuur 76 is het verschil in waterhoogte (i.e. het waterstandsverhang) versus de waterdiepte onder GLW weergegeven voor de secties Temse-Dendermonde, Dendermonde-Schoonaarde, Schoonaarde-Wetteren en Wetteren-Melle. Het verschil in waterhoogte is berekend als het verschil tussen het opwaartse station en het afwaartse station. Indien bovenstaande hypothese geldt dan neemt het waterstandsverhang af met toenemende geuldiepte. We observeren dit echter niet voor alle secties. Enkel voor de sectie Temse-Dendermonde (HW) en de sectie Schoonaarde-Wetteren (HW en LW) is er sprake van een afname in waterstandsverhang. We kunnen dan ook concluderen dat er geen duidelijk verband is tussen historische wijzigingen in geuldiepte en het waterstandsverhang.



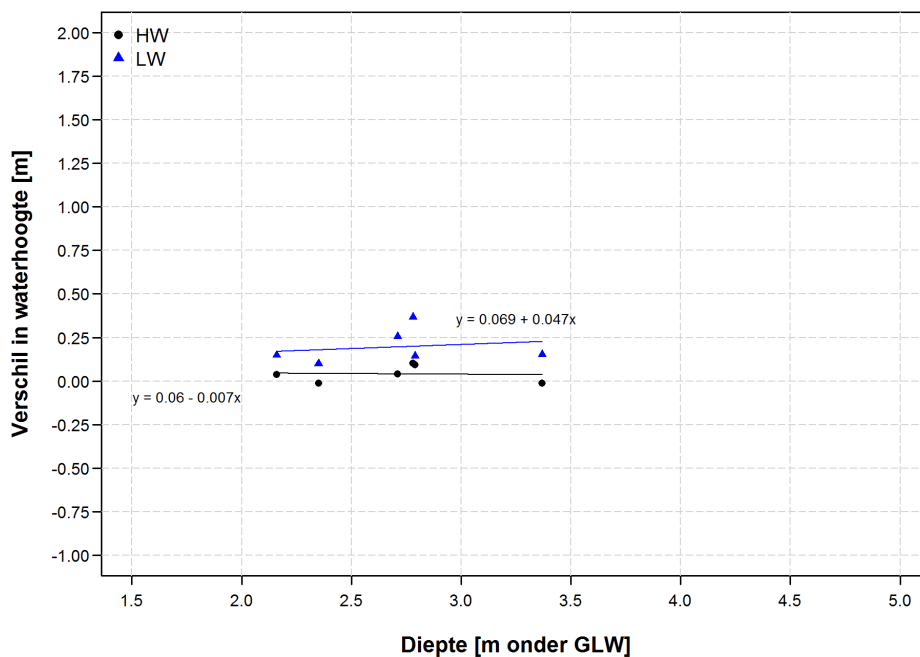
Figuur 73 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Temse-Dendermonde



Figuur 74 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Dendermonde - Schoonaarde



Figuur 75 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Schoonaarde – Wetteren



Figuur 76 – Diepte onder GLW vs. verschil in waterhoogte voor de sectie Wetteren - Melle

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1. Conclusies

De getijkarakteristieken in de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme worden bepaald door het getij aan de afwaartse rand van het estuarium (i.e. ter hoogte van Vlissingen), de bovenafvoer aan de opwaartse rand, en de morfologie die de convergentie (geometrie) en de demping (bodempwrijving) van het estuarium bepalen. Historische wijzigingen in deze parameters (vooral het getij en de morfologie zijn sterk gewijzigd) hebben dan ook een belangrijk effect op de evolutie van het getij. In deze studie werd nagegaan hoe de historische evolutie van het getij en de morfologie verlopen is in de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme, en wat de mogelijke verbanden zijn tussen beide.

Beschouwen we de jaargemiddelde hoogwaters in de Boven-Zeeschelde dan is er over de periode 1930 tot 2013 een min of meer constante toename in HW (Figuur 8). Deze toename is sterk vergelijkbaar voor de verschillende getijposten in de Boven-Zeeschelde (± 1 cm/jaar, zie Figuur 52), en is als gevolg van de wijzigende convergentie en demping van het estuarium duidelijk hoger dan de HW toename aan de afwaartse rand (enkele mm/jaar ter hoogte van Vlissingen, zie Figuur 52). Ook in de Rupel en de Durme worden gelijkaardige patronen waargenomen (Figuur 9 en Figuur 52).

Het is moeilijk om het effect van morfologische veranderingen op de hoogwaterstanden exact vast te stellen in een zuivere data-analyse, aangezien er geen historische informatie beschikbaar is voor de hoogteligging van het intertidaal. Het is pas vanaf 2001 dat de hoogteligging van bijvoorbeeld slikkengebieden gedetailleerd gekend is op basis van LIDAR opnames. Wel werd in deze studie een methodiek ontwikkeld (zie §2.7) die toelaat om geulvolumes accuraat te kwantificeren bij gemiddeld laagwater (GLW). Deze methodiek laat toe om het effect van morfologische wijzigingen in het subtidaal op de laagwaterstanden in kaart te brengen.

Vóór 1970 wordt in de Boven-Zeeschelde een stijgende trend waargenomen in de jaargemiddelde laagwaterstanden, waarbij de stijging in jaargemiddeld laagwater toeneemt in opwaartse richting (Figuur 10 en Figuur 52). Vanaf 1970 vertonen de getijposten in de Boven-Zeeschelde een omgekeerde tendens waarbij een dalende trend in jaargemiddelde laagwaterstanden wordt waargenomen (Figuur 10 en Figuur 52). Deze observaties komen goed overeen met de morfologische wijzigingen in de Boven-Zeeschelde. Tussen 1930 en 1960 is er een reductie in de segment-gemiddelde geuldiepte en het geulvolume met ongeveer 10% (Figuur 61). De reductie in geuldiepte is echter niet significant gezien het gering aantal datapunten in die periode ($p > 0.05$, zie Figuur 55 tot Figuur 58). Vanaf 1960 wordt deze trend omgekeerd en is er een duidelijke toename in geuldiepte en geulvolume (respectievelijk met 28% en 45%, zie Figuur 61), wat de daling in de jaargemiddelde laagwaterstanden vanaf 1970 verklaart. De toename in geuldiepte is voor alle segmenten significant ($p < 0.05$, zie Figuur 55 Figuur 57), behalve voor het meest opwaartse segment ($p > 0.05$, zie Figuur 58). Analyse van de geuldiepte ten opzichte van verschillende referentieniveaus toont aan dat de toename in segment-gemiddelde geuldiepte voornamelijk te wijten is aan het dieper worden van de geul in de zone van de geulrand (0m GLW) tot het niveau -5m GLW, en niet aan het dieper worden van de diepste delen (< -5 m GLW).

De laagwaterstanden in de Boven-Zeeschelde worden niet enkel beïnvloed door wijzigingen in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume maar worden ook sterk bepaald door fluctuaties in bovenafvoer. Een hogere jaargemiddelde bovenafvoer leidt tot een hogere jaargemiddelde laagwaterstand (Figuur 65). Deze correlatie is het sterkst in het meest opwaartse deel van de Boven-Zeeschelde en neemt af in stroomafwaartse richting. Ook voor de hoogwaterstanden worden gelijkaardige relaties waargenomen (Figuur 64). We merken op dat er op lange termijn geen significante trend in bovenafvoer wordt waargenomen (§5). Bovenafvoer speelt dus geen rol in de langjarige trendanalyse van de waterstand.

In de Rupel is er over de tijdperiode 1930-2010 een significante toename in segment-gemiddelde geuldiepte (Figuur 59). De toename in segment-gemiddelde geuldiepte (+38%, Figuur 61) leidt tot een toename in het geulvolume (+43%, Figuur 61). In de getijpost van Walem is er dan ook al vanaf 1930 een daling in jaargemiddeld laagwater (Figuur 52).

Waar de Boven-Zeeschelde en Rupel tussen 1930 en 2011 hoofdzakelijk gekenmerkt worden door een toename in geulvolume (de Rupel uitsluitend), kent de Durme een tegenovergestelde evolutie. In de Durme wordt tussen 1930 en 2011 een afname in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume waargenomen met respectievelijk 67% en 94% (Figuur 61). Ten gevolge deze sterke afname komt de Durmebedding ter hoogte van Waasmunsterbrug vanaf 1950 nagenoeg droog te liggen bij GLW (zie Figuur 11 en Figuur 12). Ter hoogte van Tielrode (nabij de monding van de Durme) is dit niet het geval en is er een afname in laagwaterstand (Figuur 11 en Figuur 52). Dit suggereert dat er in het deel tussen de monding van de Durme en Tielrode geen belangrijke verondieping plaatsvond. We merken nog op dat de wijzigingen in geulvolume in de Boven-Zeeschelde en de Rupel hoofdzakelijk een gevolg zijn van wijzigingen in geuldiepte (Figuur 61). In de Durme is dit een combinatie van wijzigingen in geuldiepte en geulareaal (onder andere door meanderafsnijding).

Een toename in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume leidt niet enkel tot een verlaging van de laagwaterstanden maar heeft ook zijn effect op de voortplanting van de getijgolf. Zo is de celeriteit bij laagwater sterk toegenomen in de Boven-Zeeschelde vanaf 1970 (Figuur 70). Dit moment valt samen met de toename in segment-gemiddelde geuldiepte die plaatsvond tussen 1960 en 1980. Ook voor hoogwater is er een toename in celeriteit (Figuur 72). Toch is de toename in celeriteit tussen laagwater en hoogwater relatief gezien verschillend. Over de periode 1930 tot recent is de tijdsvertraging bij hoogwater afgenomen met 30-40 minuten, terwijl dit voor laagwater 45-60 minuten bedraagt (zie respectievelijk Figuur 48 en Figuur 49). Dit verschil in afname in tijdsvertraging (en dus toename in celeriteit) leidt er toe dat de getijasymmetrie (van het verticaal getij) in de tijd is afgenomen (Figuur 45).

8.2. Aanbevelingen

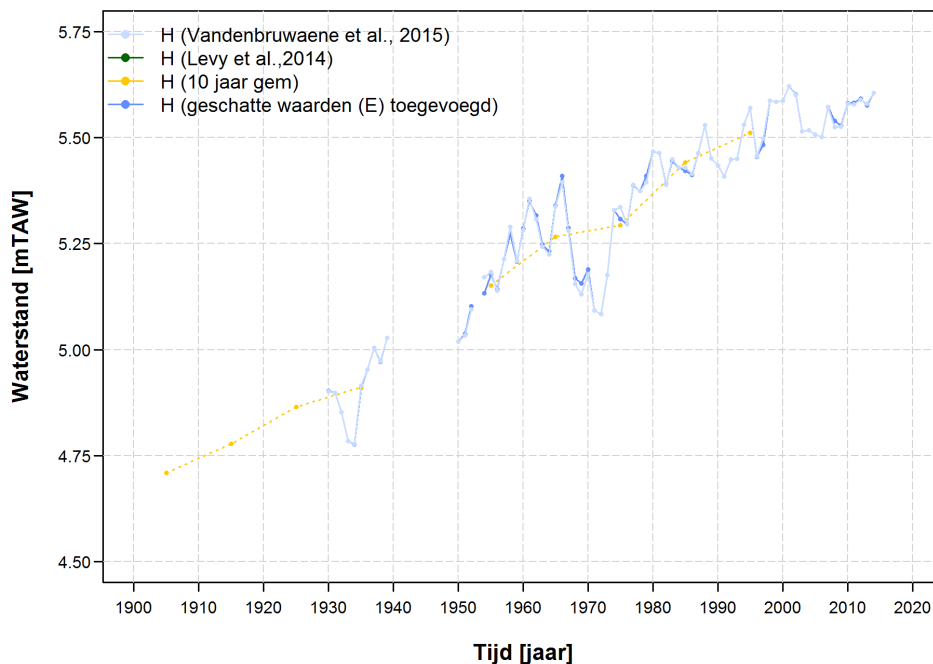
Vanaf de periode 1960-1980 observeren we in de Boven-Zeeschelde een duidelijke toename in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume. Deze toename in geulvolume leidt tot een afname in GLW en een toename van de celeriteit. De vraag die zich echter stelt is wat de toename in geulvolume heeft veroorzaakt. Ingrepen stroomafwaarts (Beneden-Zeeschelde en Westerschelde) kunnen er toe leiden dat grotere volumes water doorheen de Boven-Zeeschelde stromen. Dit heeft tot gevolg dat de geuldimensies zich aanpassen en het geulvolume toeneemt. De eerste verruiming van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde vond plaats in de periode 1970-1976 (e.g., Van Braeckel et al., 2012). Deze periode komt overeen met de periode waarin we belangrijke morfologische en hydrodynamische wijzigingen observeren in de Boven-Zeeschelde. Toch kunnen ook ingrepen in de Boven-Zeeschelde zelf deze wijzigingen verklaren. Om een beter idee te krijgen over wat de toename in segment-gemiddelde geuldiepte en geulvolume in de Boven-Zeeschelde heeft veroorzaakt is het van belang om de Schelde in zijn geheel te beschouwen. Welke ingrepen hebben zich voorgedaan in de Boven-Zeeschelde en stroomafwaarts de Boven-Zeeschelde, wanneer vonden deze ingrepen plaats, en op welke manier zijn de getij karakteristieken in de Beneden-Zeeschelde gewijzigd ten opzichte van deze in de Boven-Zeeschelde? Een vergelijking tussen de historische evolutie van het getij en de morfologie van zowel de Boven-Zeeschelde, Beneden-Zeeschelde en Westerschelde strekt dan ook tot de aanbevelingen.

9. Referenties

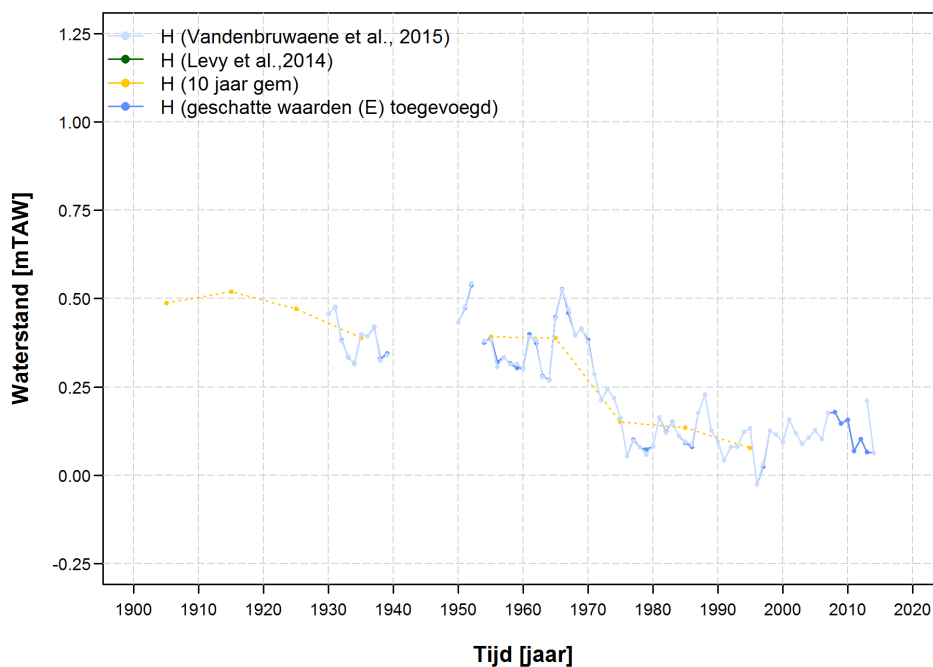
- Belmans, H & Claessens, J. (1984). Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1971-1980.
- Codde, R. & De Keyser, L. (1954). Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het tijdperk 1941-1950.
- Depreiter, D.; Cleveringa, J.; van der Laan, T.; Maris, T.; Ysebaert, T.; Wijnhoven, S. (2014). T2009-rapport Schelde-estuarium. IMDC/Arcadis/Universiteit Antwerpen/Imares/NIOZ: [s.l.]. 522 + 2 bijlagen pp.
- Friedrichs, C. T. (2010). Barotropic tides in channelized estuaries. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*, 27–61.
- Kuijper, K. (2013). Data-analysis water levels, bathymetry Western Scheldt. International Marine & Dredging Consultants/Deltares/Svašek Hydraulics BV/ARCADIS Nederland BV: Antwerp. 125 + annexes pp.
- Levy, Y.; Plancke, Y.; Peeters, P.; Taverniers, E.; Mostaert, F. (2014). Het getij in de Zeeschelde en haar bijrivieren: Langjarig overzicht van de voornaamste getijkenmerken. Versie 2_0. WL Rapporten, 12_071. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Michielsen, S.; Pereira, F.; Mostaert, F. (2012). Opmaak van modellen voor onderzoek naar waterbeschikbaarheid en -allocatiestrategieën in het Scheldestroomgebied: deelrapport 1. Inventarisatie. versie 3.0. WL Rapporten, 724_04. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. V, 65 + 2 p. appendices, 11 p. tables, 5 p. fig. pp.
- Ministerie van Openbare Werken, Bruggen en Wegen, Bestuur der Waterwegen (1966). Nota betreffende het Durme-probleem. MOD 139.
- Plancke, Y.; Maximova, T.; Ides, S.; Peeters, P.; Taverniers, E.; Mostaert, F. (2012). Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid: Sub project 1: Data analysis and hypothesis - Lower Sea Scheldt. Version 4.0. WL Rapporten, 756/05. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium
- Taverniers, E. & Mostaert, F. (2009). Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1991-2000: T.O. tijwaarnemingen Zeescheldebekken 1991-2000. Versie 2.0, heruitg. papieren versie. WL Rapporten, 833_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. I, 170 pp.
- IMDC; Belgroma; Soesma; HAECON; Resource Analysis; Technum (2003). Actualisatie van het Sigmaphan. Integrale verkenning Scheldebekken. Integrale verkenning Rupelbekken. Planstudie rivierherstelproject Durme: deelopdracht 4: maatschappelijke impactstudie: morfologische modelstudie van de Durme: Volume 2a. Ontwikkeling en ijking van morfologisch model van de Durme. AWZ. Afdeling Zeeschelde: [s.l.]. III, 28 + appendices pp.
- IMDC (2013). LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid. Zeeschelde-nota analyse bodemligging.
- IMDC (2014) Duurzaam beheerplan Boven-Zeeschelde klasse IV. Post 1 - Inventarisatie bestaande gegevens
- Van Cauwenberghe, C. (1977). Getijvoorspelling bij stormtij langs de Belgische kust. Rapport Hydrografische Dienst der Kust, 17. Ministerie van Openbare Werken. Dienst der Kust. Hydrografie: Oostende. 9 p. + appendices pp.
- Van Braeckel, A.; Coen, L.; Peeters, P.; Plancke, Y.; Mikkelsen, J.; Van den Bergh, E. (2012). Historische evolutie van Zeescheldehabitats: kwantitatieve en kwalitatieve analyse van invloedsfactoren. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, 2012(59). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek/Waterbouwkundig Laboratorium: Brussel. 111 + bijlagen pp
- Vanlierde, E.; Cornet, E.; Vereycken, K.; Taverniers, E.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Methode berekening debieten in de Schelde. Berekening debieten te Schelle, afwaarts Dendermonde en aan de Belgisch-Nederlandse grens Versie 5.0. WL Rapporten, 12_077. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Vereycken, K.; Vanlierde E.; Taverniers, E.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Over Referentievlakken en peilschaalopmetingen in het Zeescheldebekken. Versie 3.0. WL Rapporten, 12_058. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Wang, Z.B. (2013). Data-analyse waterstanden Westerschelde. International Marine & Dredging Consultants/Deltares/Svašek Hydraulics BV/ARCADIS Nederland BV: Antwerpen. 23 pp.

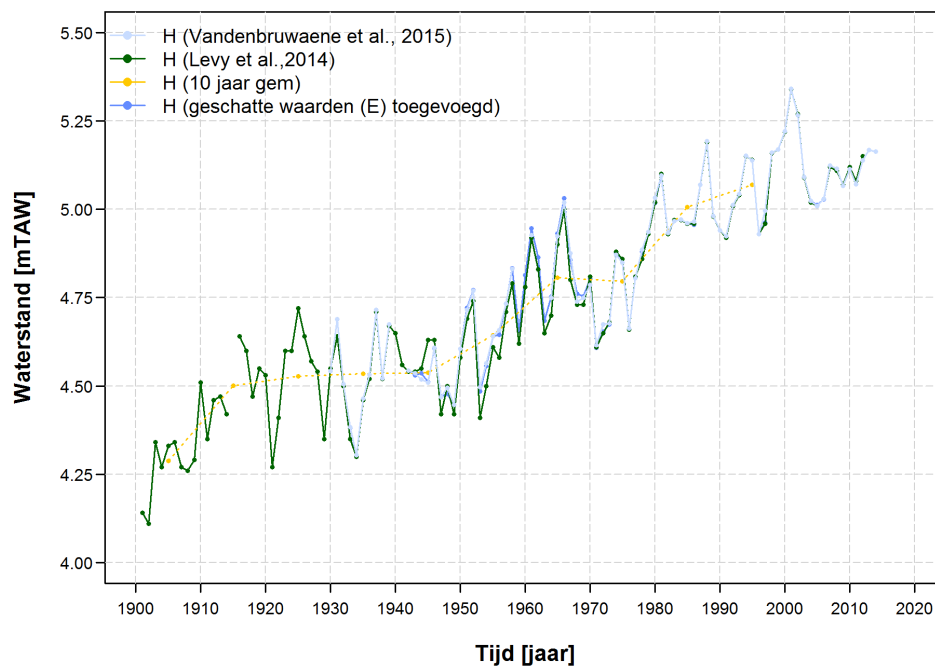
Appendix A – Vergelijking jaargemiddeld HW en LW



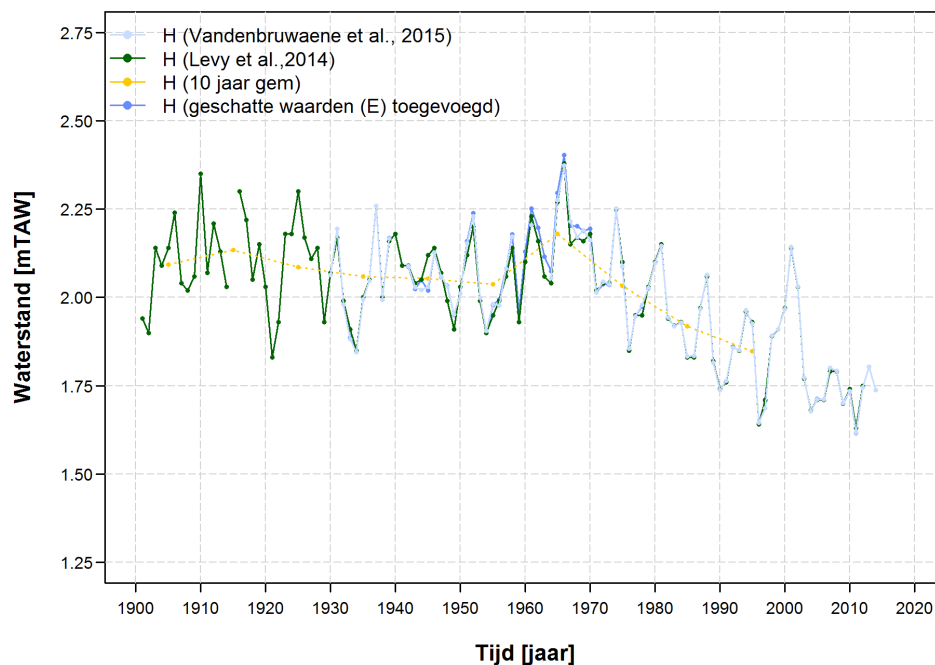
Figuur 77 – De jaargemiddelde hoogwaters te Temse berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



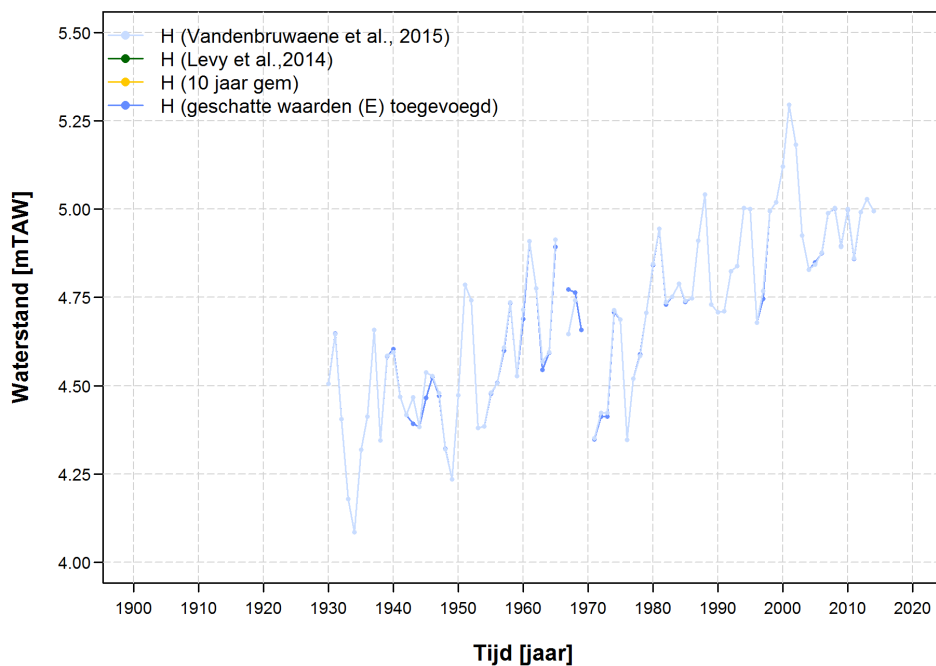
Figuur 78 – De jaargemiddelde laagwaters te Temse berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



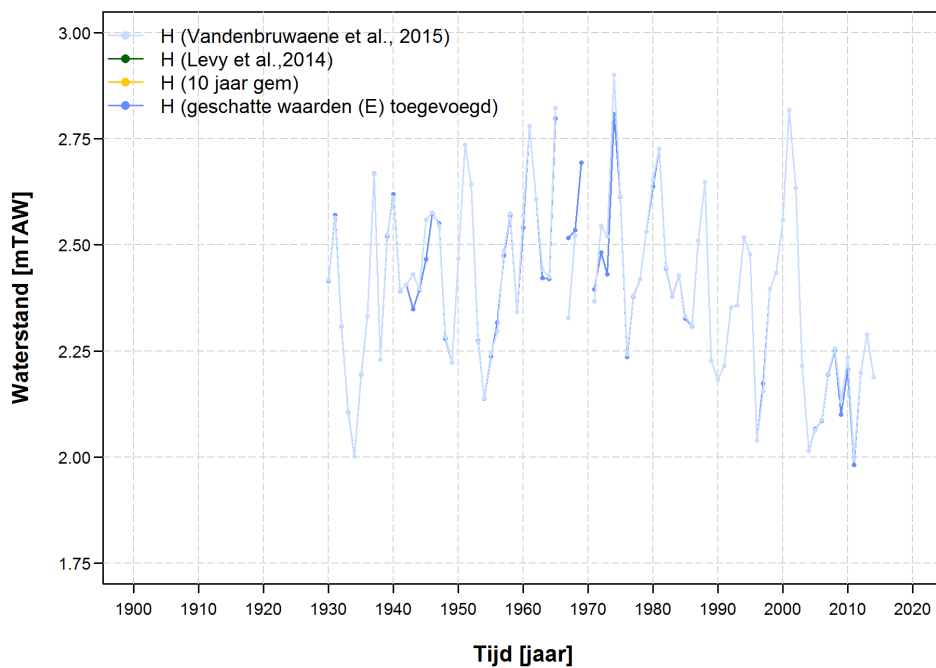
Figuur 79 – De jaargemiddelde hoogwaters te Schoonaarde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



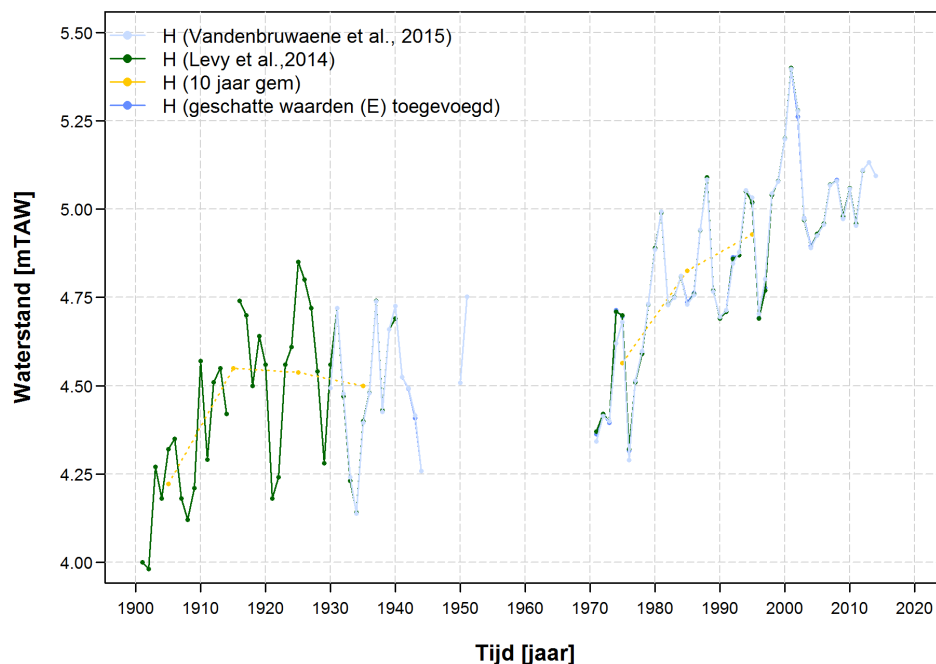
Figuur 80 – De jaargemiddelde laagwaters te Schoonaarde berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



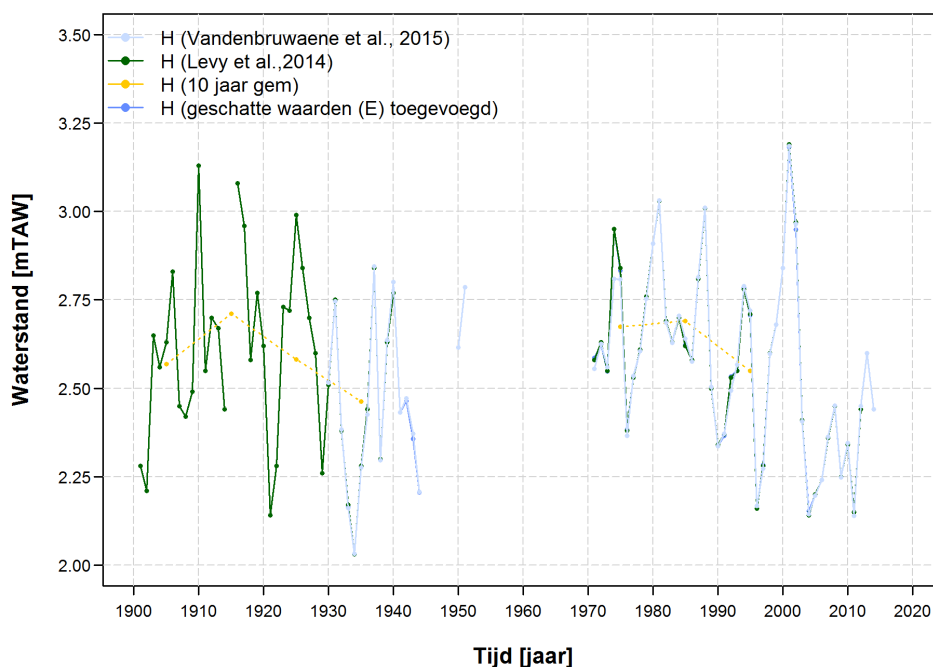
Figuur 81 – De jaargemiddelde hoogwaters te Wetteren berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



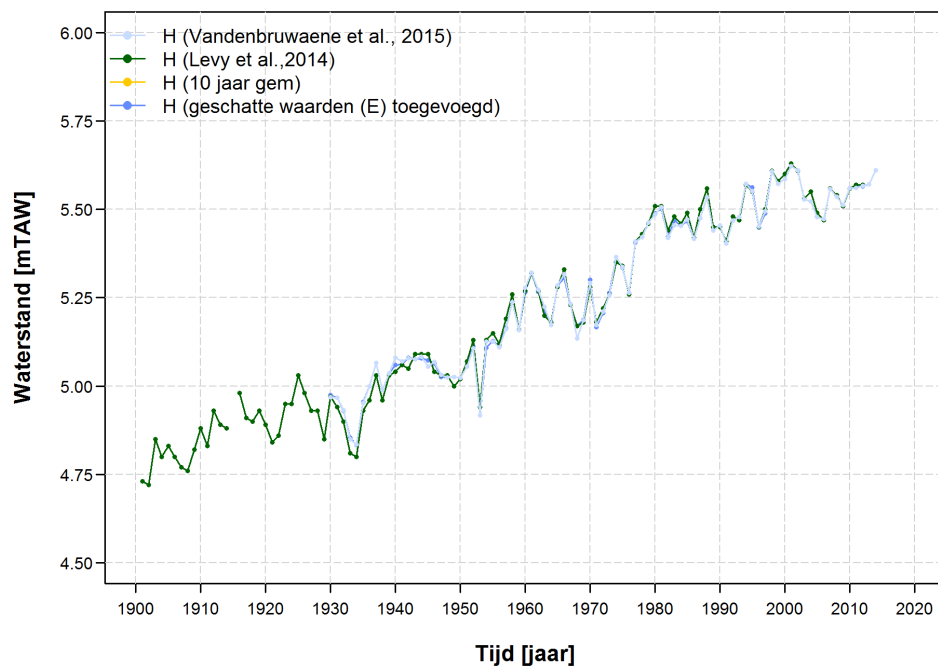
Figuur 82 – De jaargemiddelde laagwaters te Wetteren berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



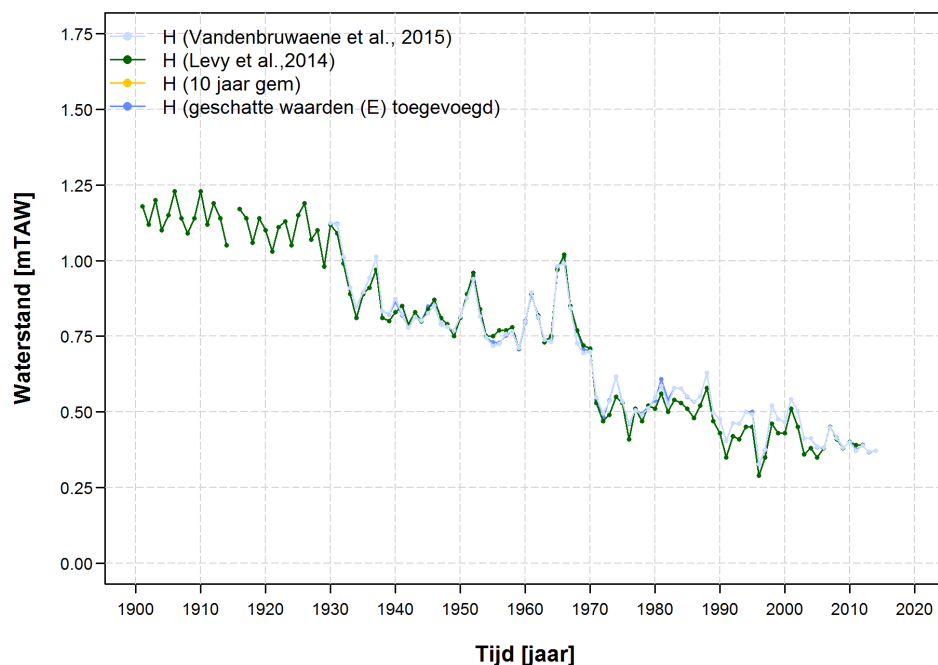
Figuur 83 – De jaargemiddelde hoogwaters te Melle berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



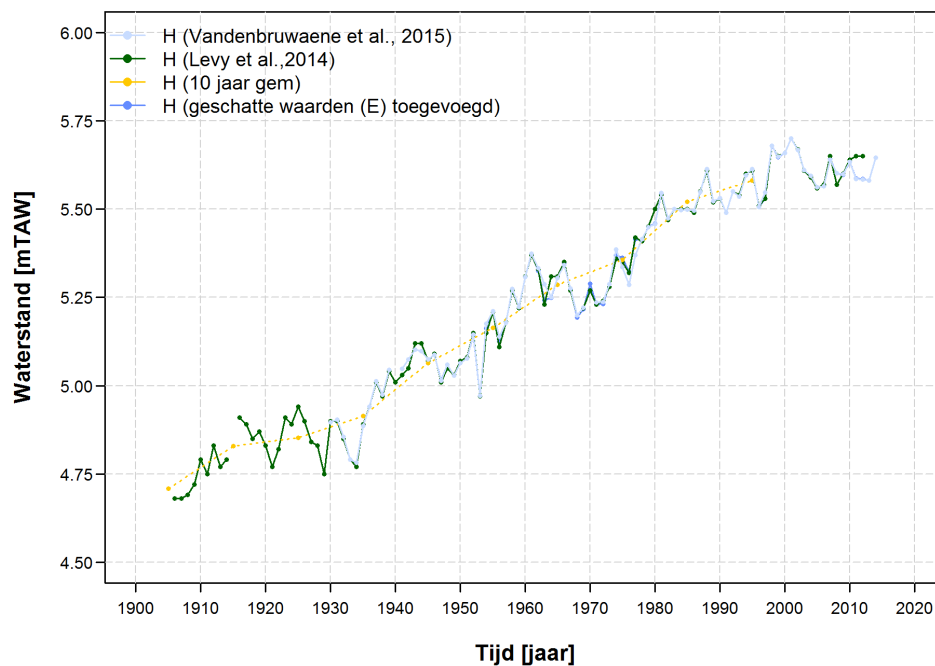
Figuur 84 – De jaargemiddelde laagwaters te Melle berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



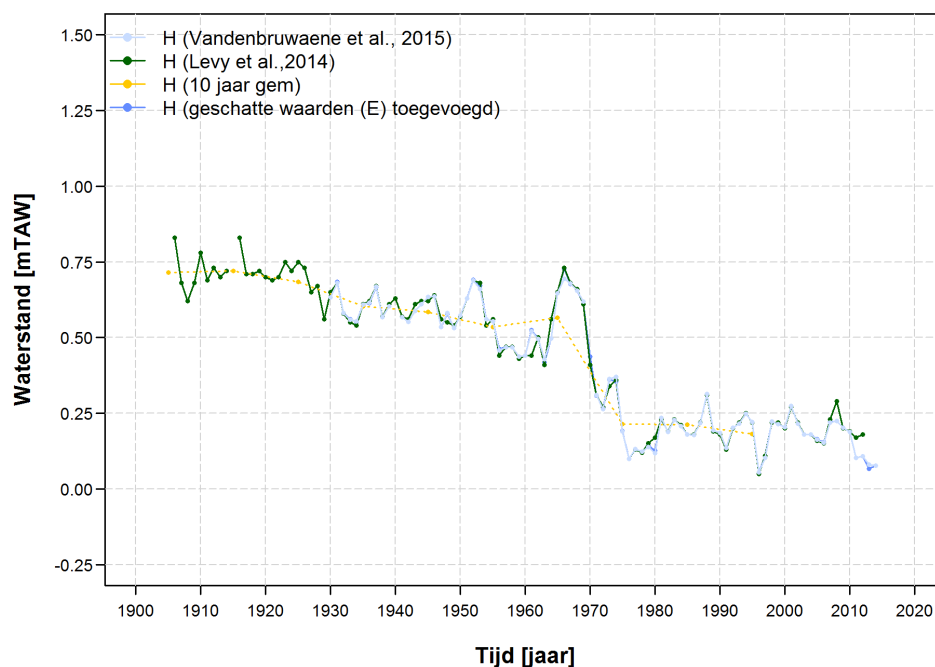
Figuur 85 – De jaargemiddelde hoogwaters te Walem berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



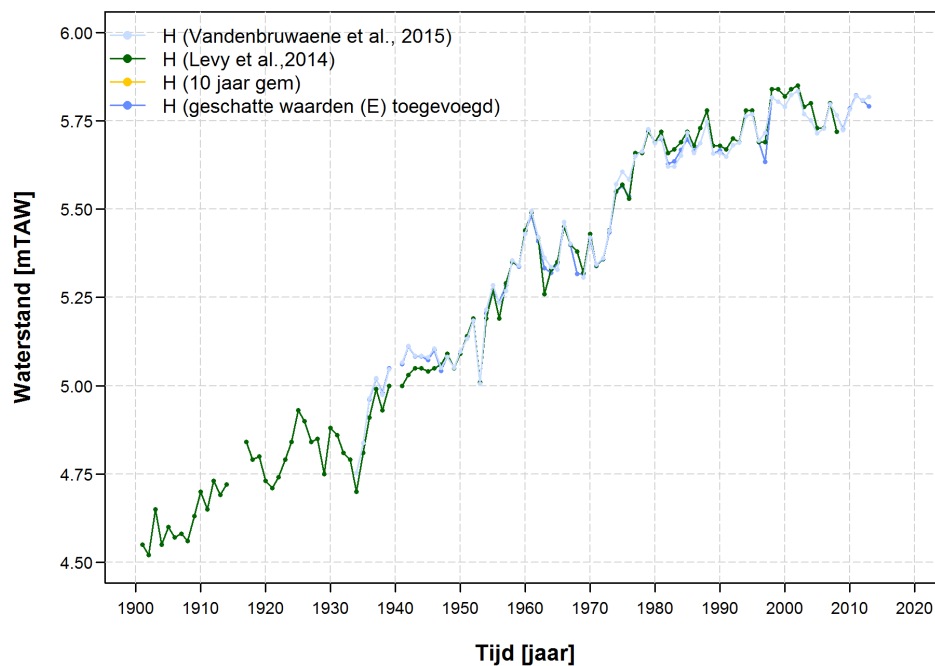
Figuur 86 – De jaargemiddelde laagwaters te Walem berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



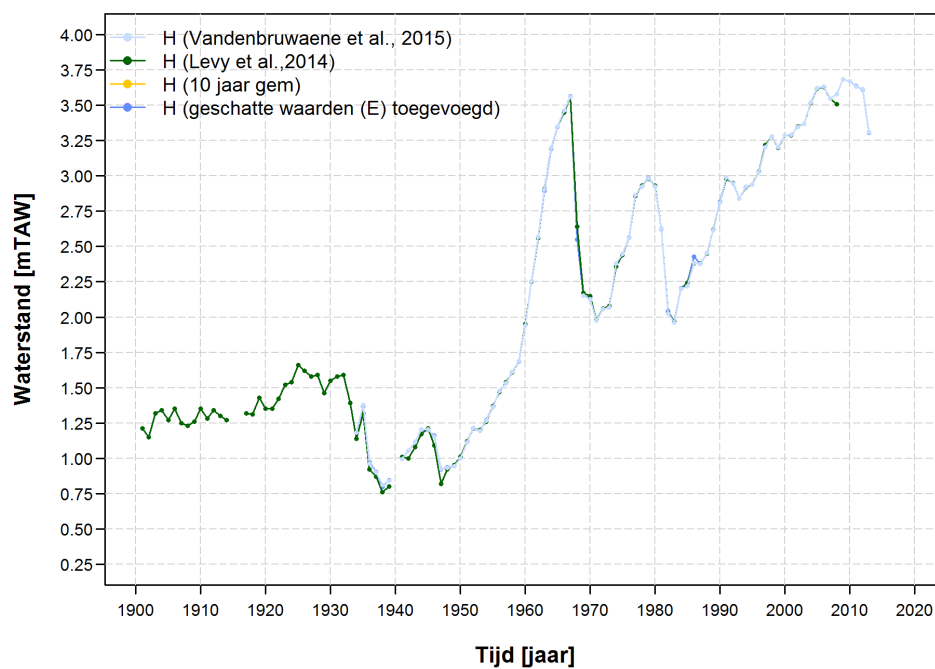
Figuur 87 – De jaargemiddelde hoogwaters te Tielrode berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.



Figuur 88 – De jaargemiddelde laagwaters te Tielrode berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.

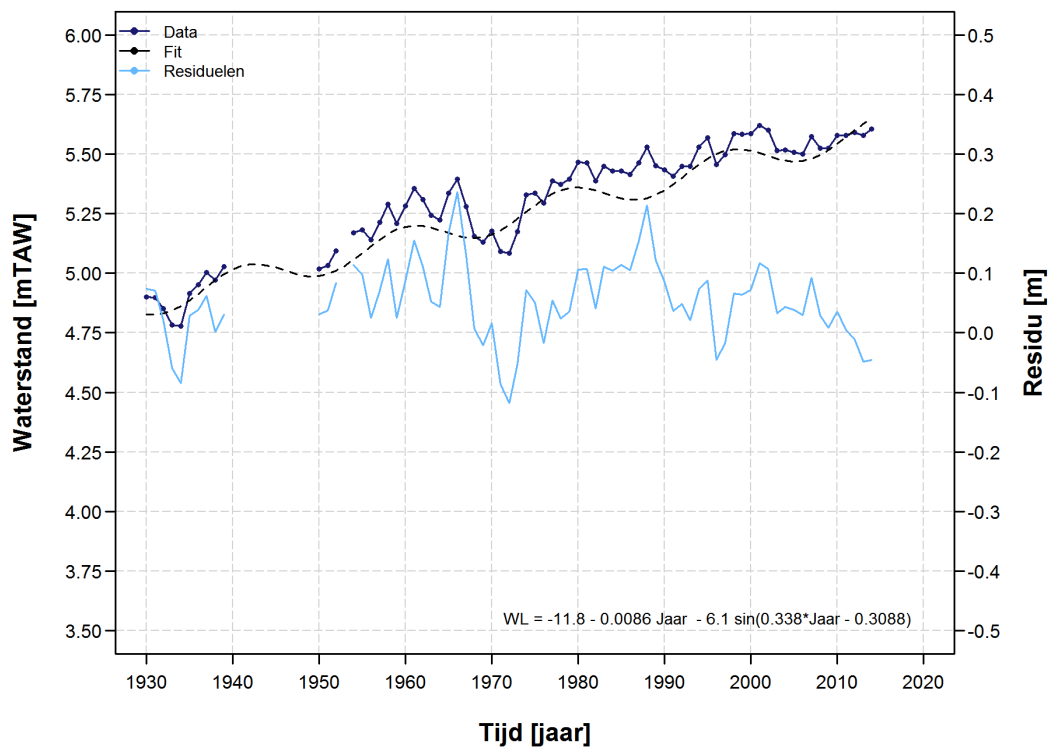


Figuur 89 – De jaargemiddelde hoogwaters te Waasmunster berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.

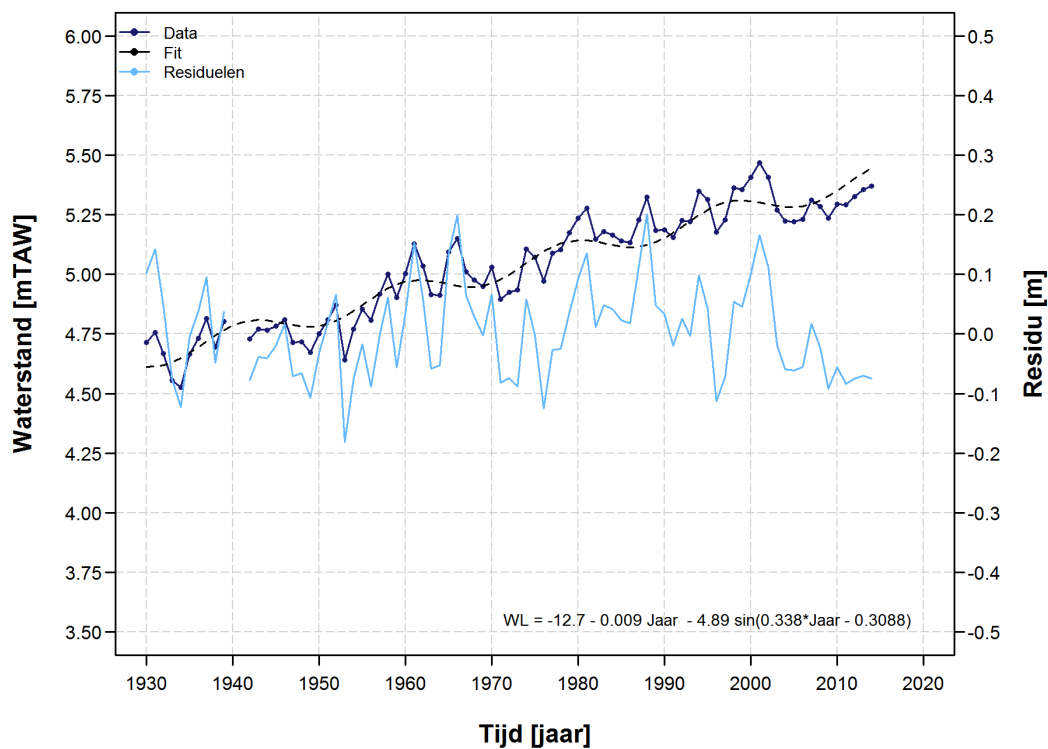


Figuur 90 – De jaargemiddelde laagwaters te Waasmunster (deels bodempeil, zie Figuur 12) berekend volgens de methodiek in voorliggend rapport, de methodiek volgens Levy et al. (2014), en de methodiek inclusief geschatte waarden (E). Naast de jaargemiddelde waarden worden ook de tienjarige gemiddelden weergegeven.

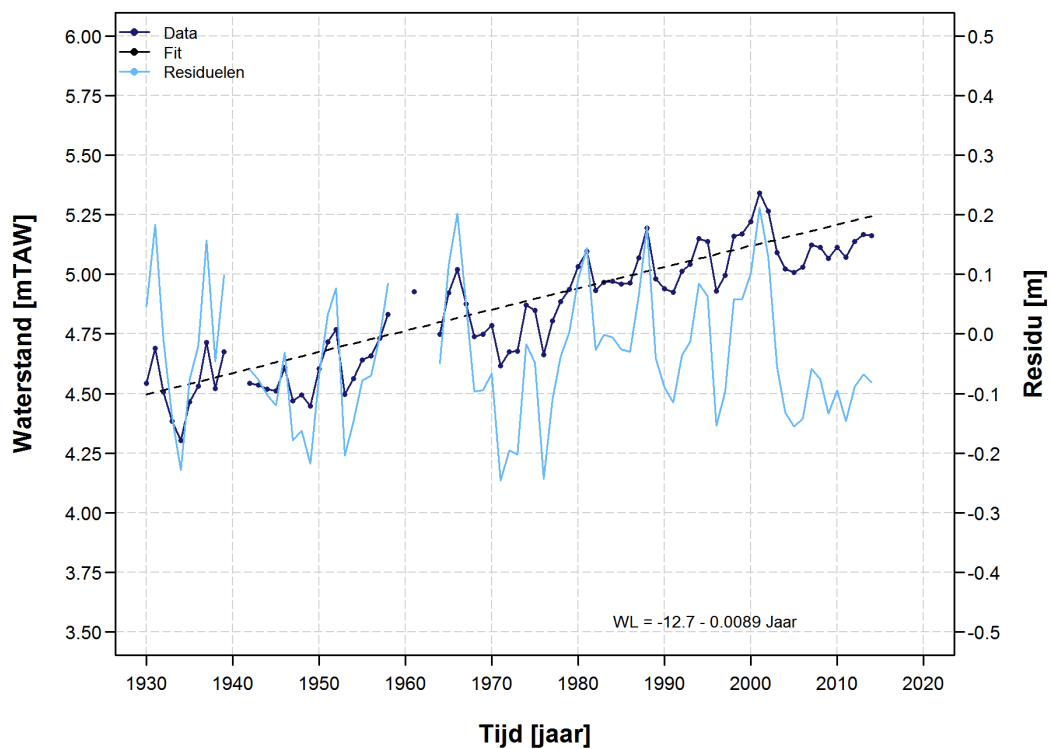
Appendix B – Langjarige waterstandtrends



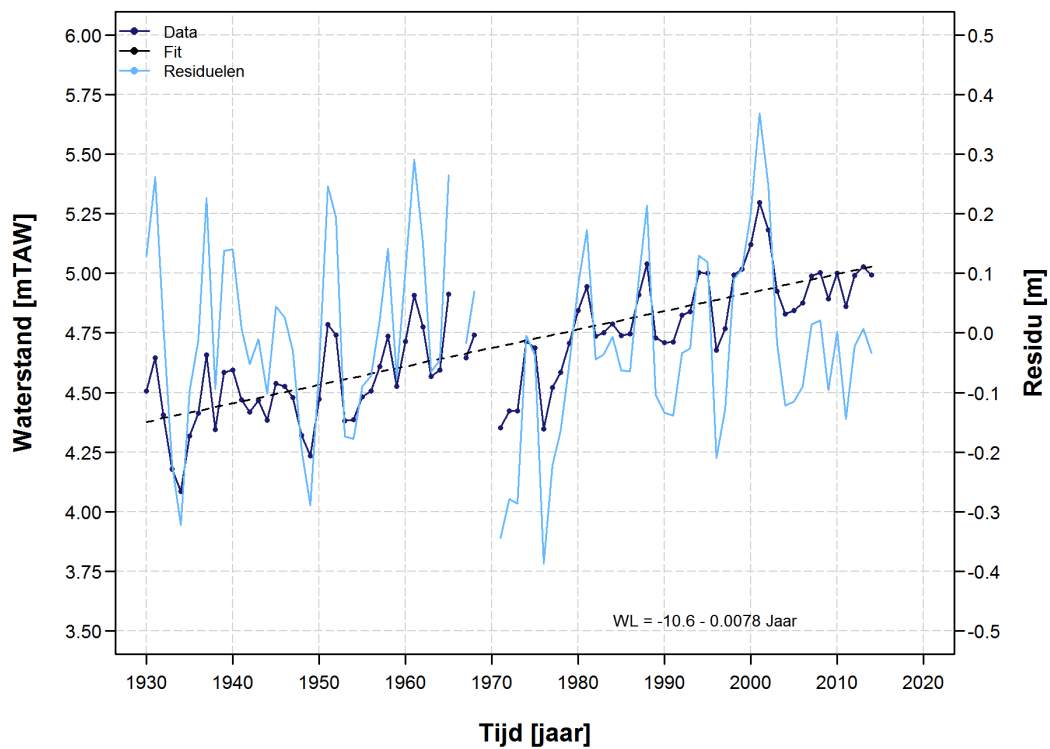
Figuur 91 – Langjarige trends en residuen te Temse bij hoogwater



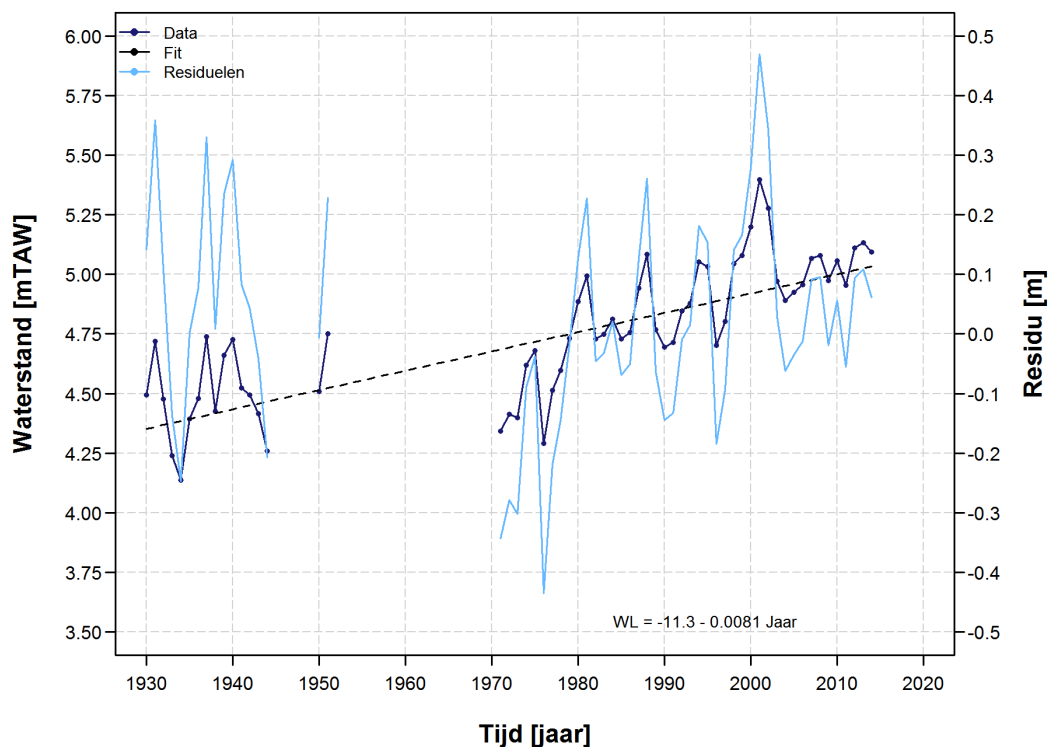
Figuur 92 – Langjarige trends en residuen te Dendermonde bij hoogwater



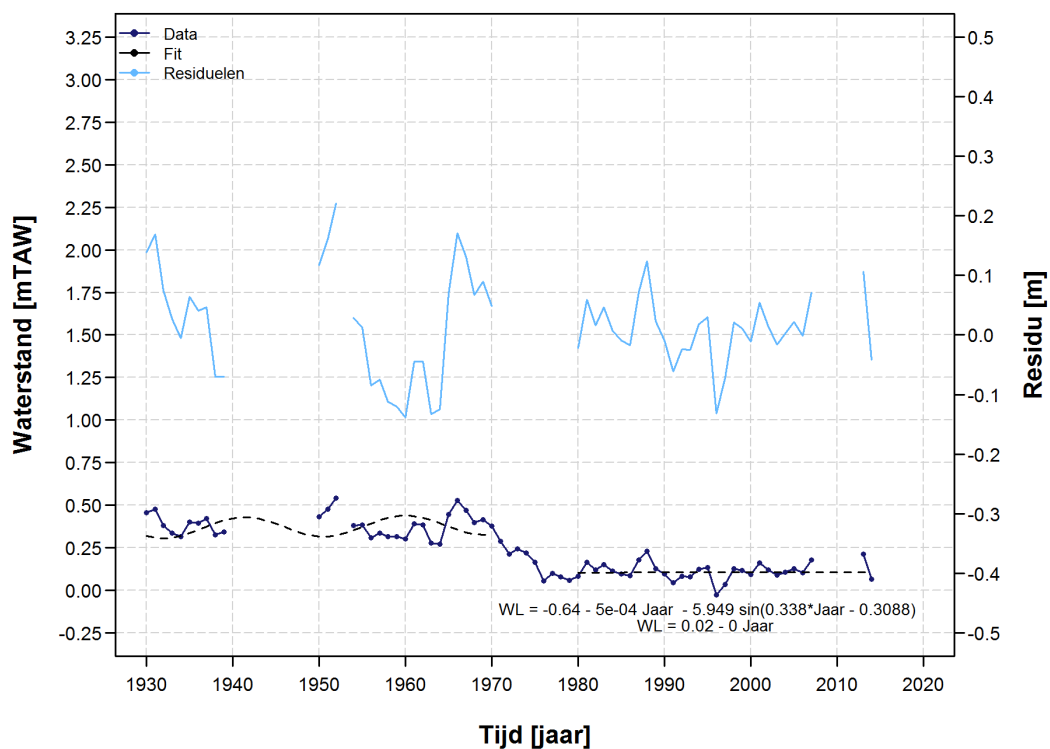
Figuur 93 – Langjarige trends en residuen te Schoonaarde bij hoogwater



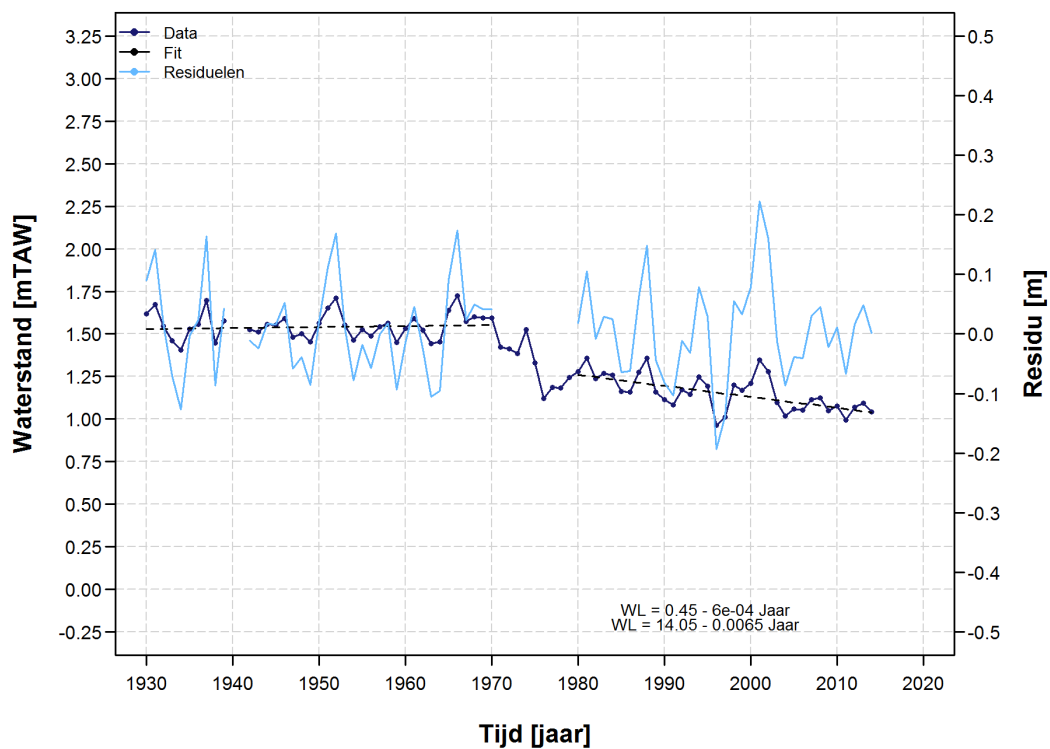
Figuur 94 – Langjarige trends en residuen te Wetteren bij hoogwater



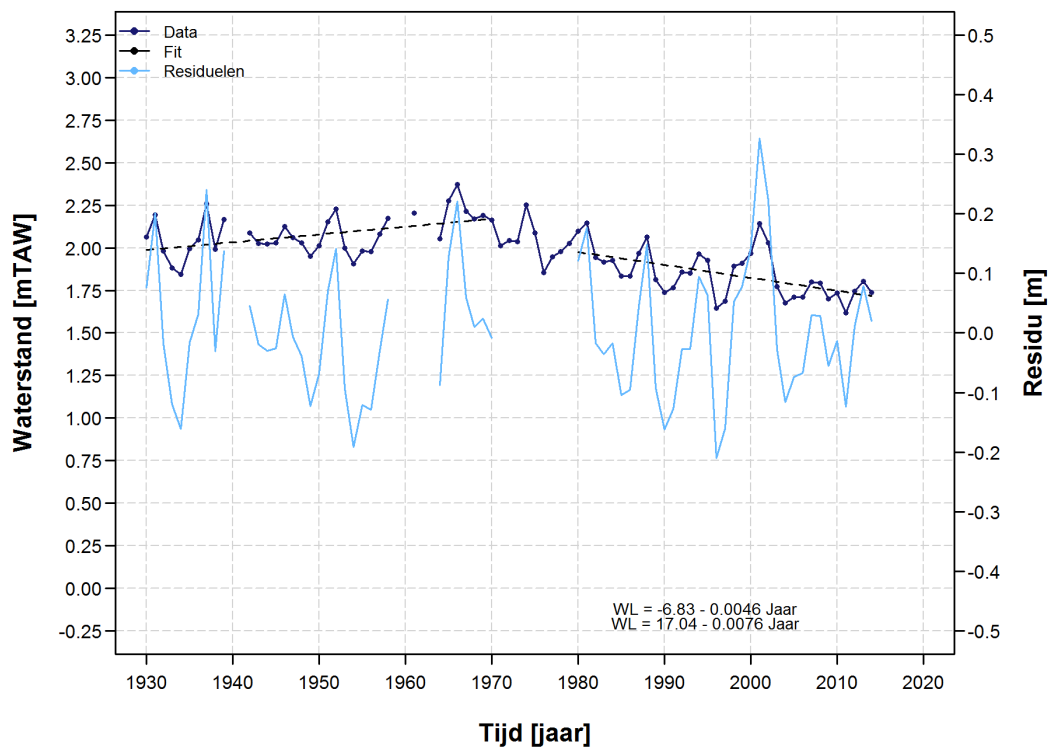
Figuur 95 – Langjarige trends en residuen te Melle bij hoogwater



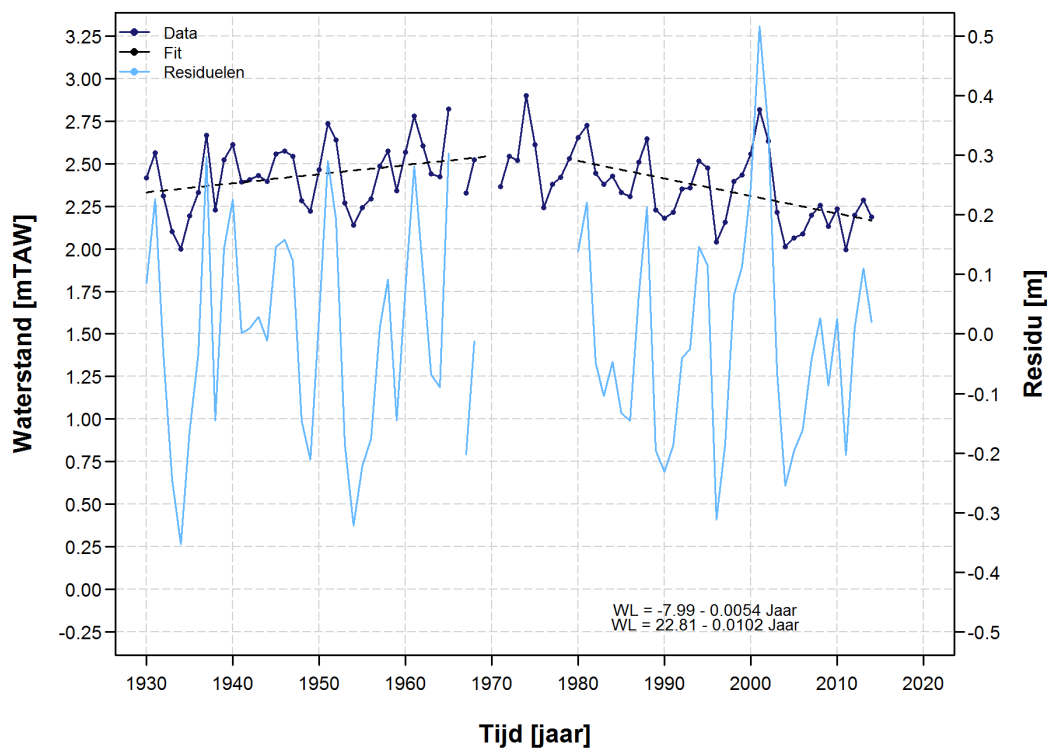
Figuur 96 – Langjarige trends en residuen te Temse bij laagwater



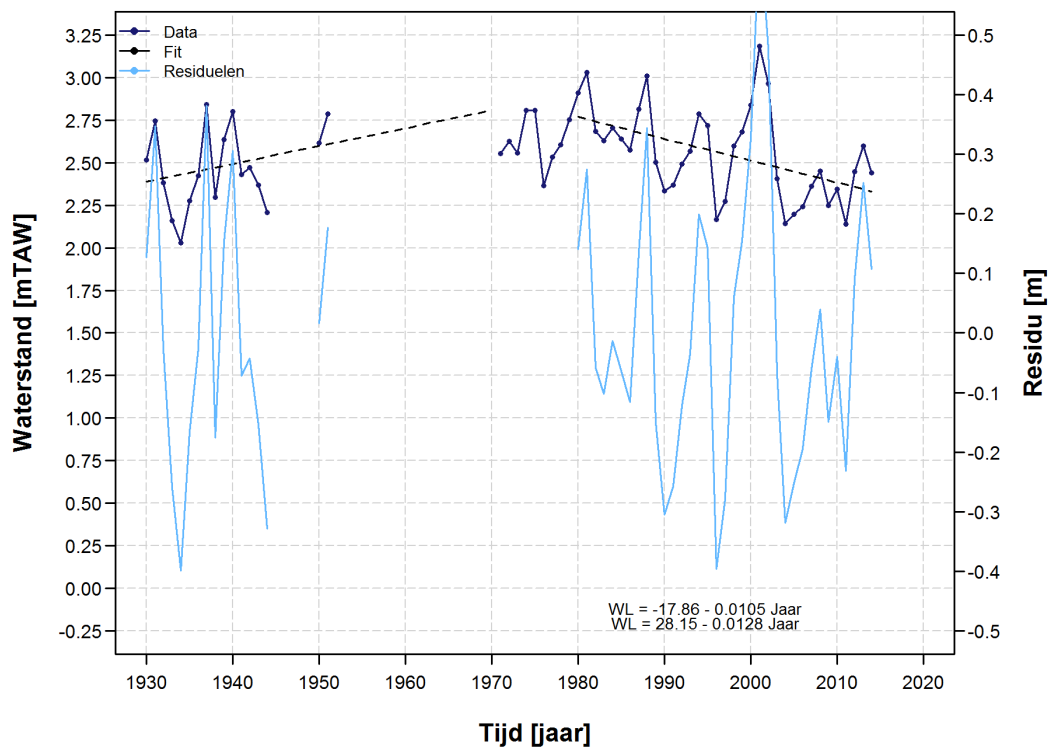
Figuur 97 – Langjarige trends en residuen te Dendermonde bij laagwater



Figuur 98 – Langjarige trends en residuen te Schoonaarde bij laagwater

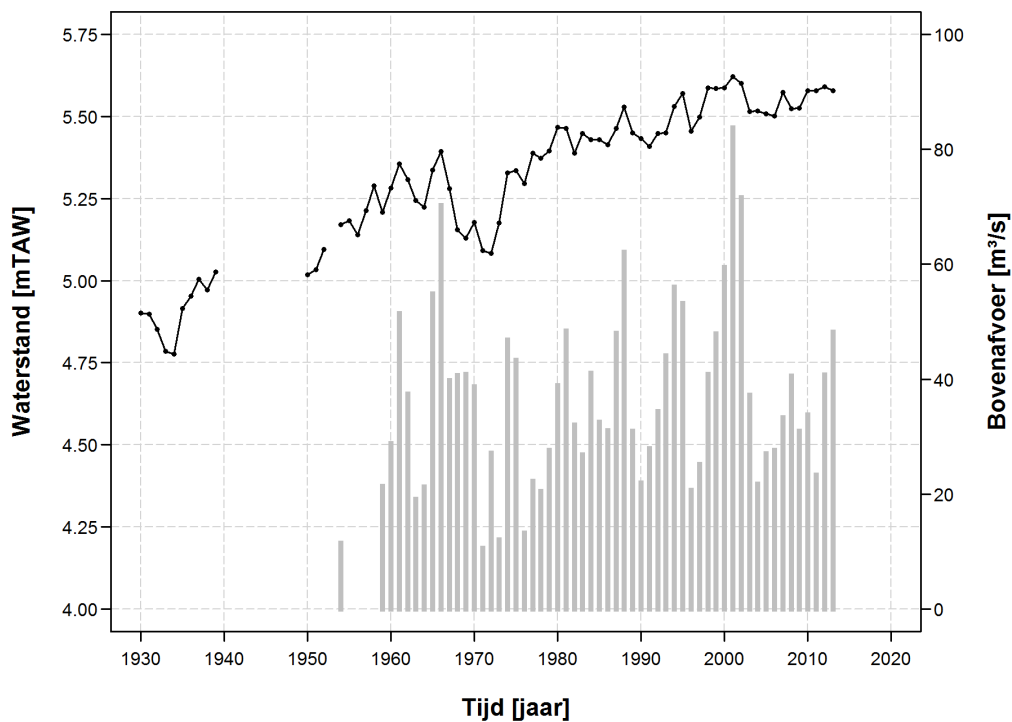


Figuur 99 – Langjarige trends en residuen te Wetteren bij laagwater

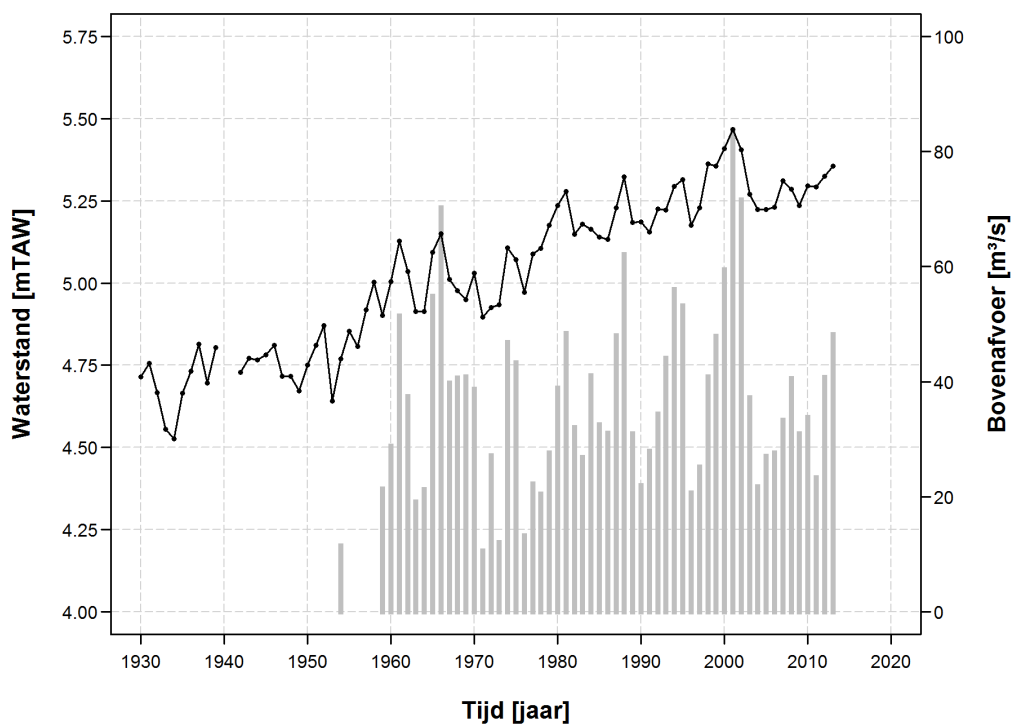


Figuur 100 – Langjarige trends en residuen te Melle bij laagwater

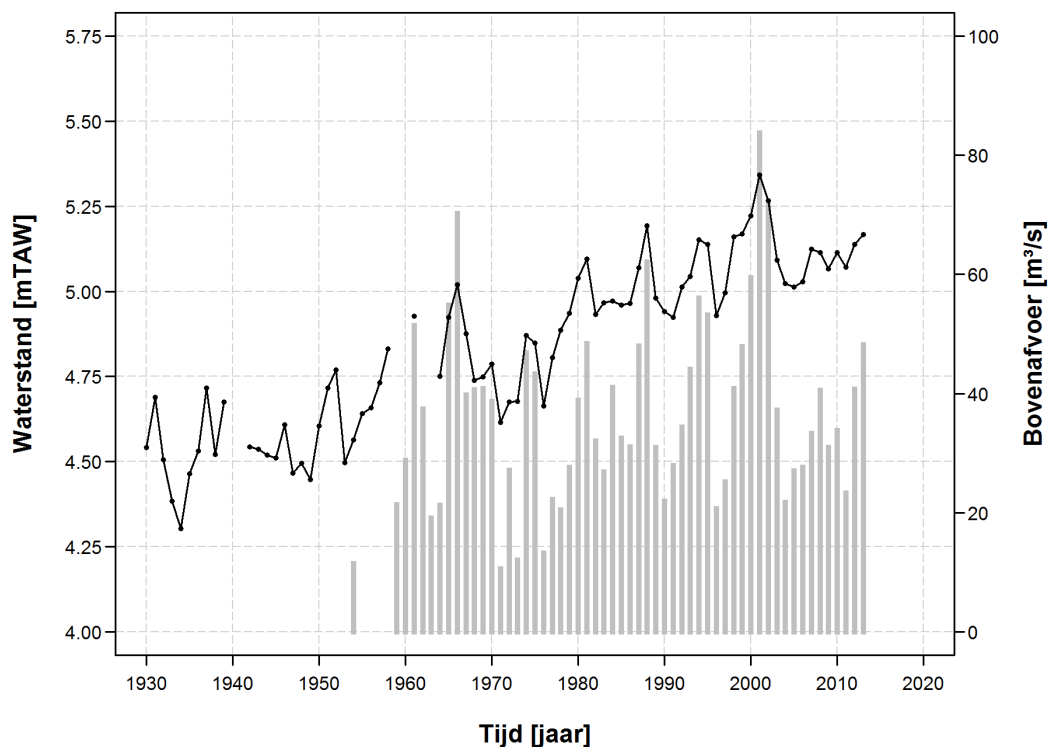
Appendix C – Waterstanden vs. Bovenafvoer



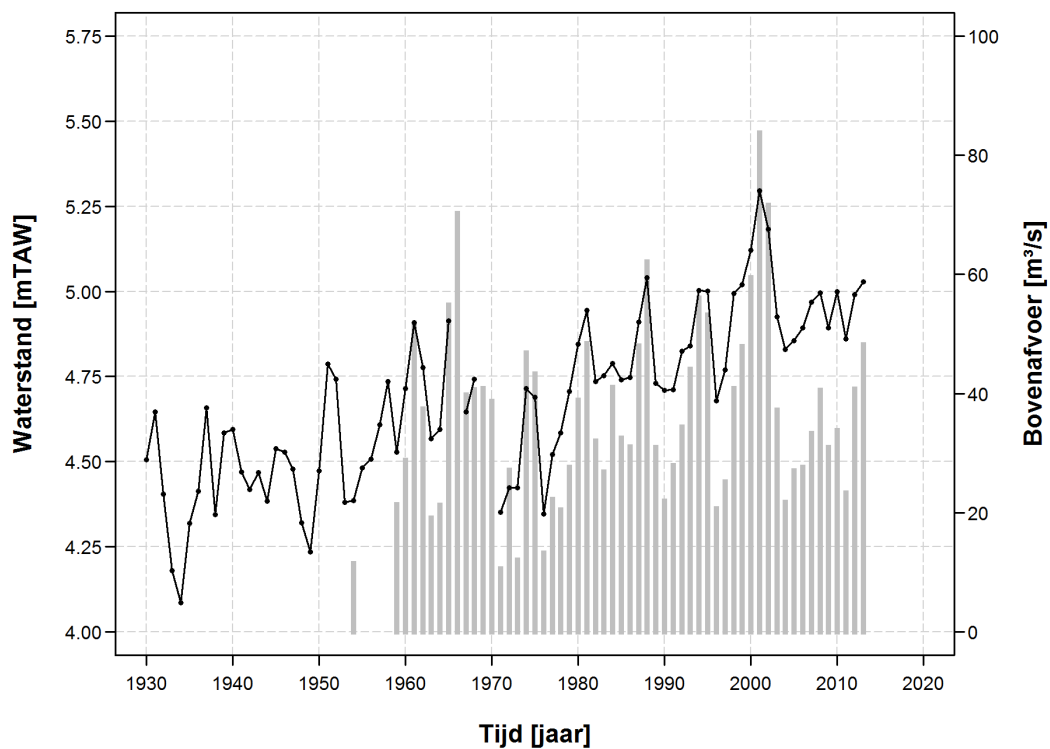
Figuur 101 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Temse en bovenafvoer Schelde [m³/s]



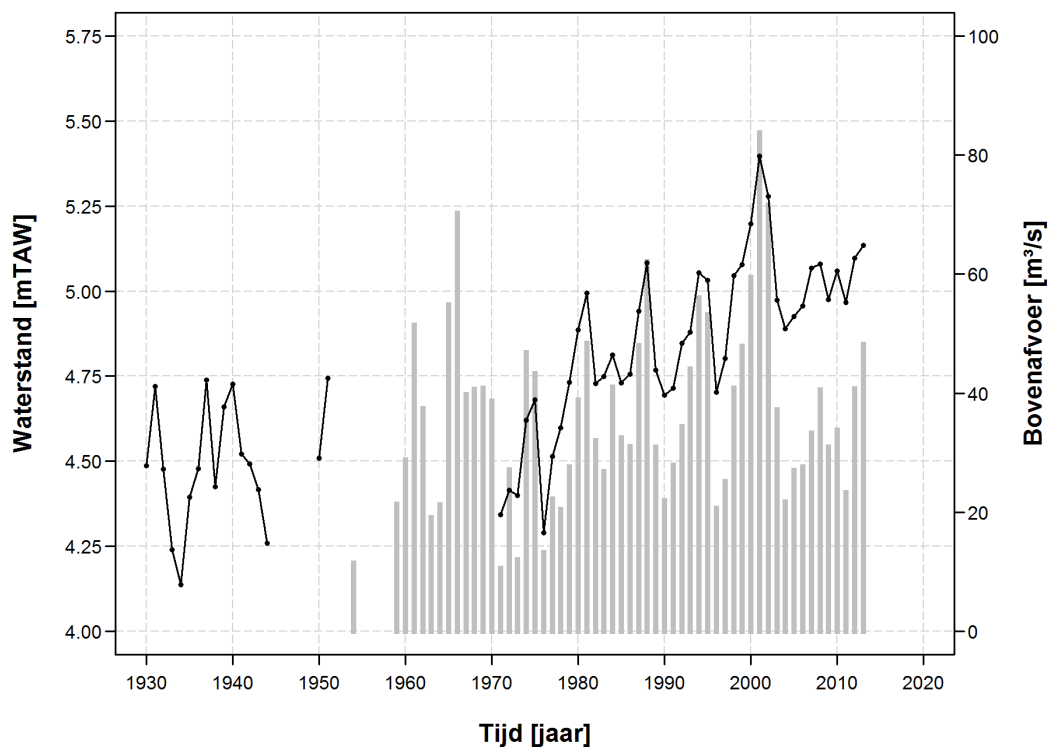
Figuur 102 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Dendermonde en bovenafvoer Schelde [m³/s]



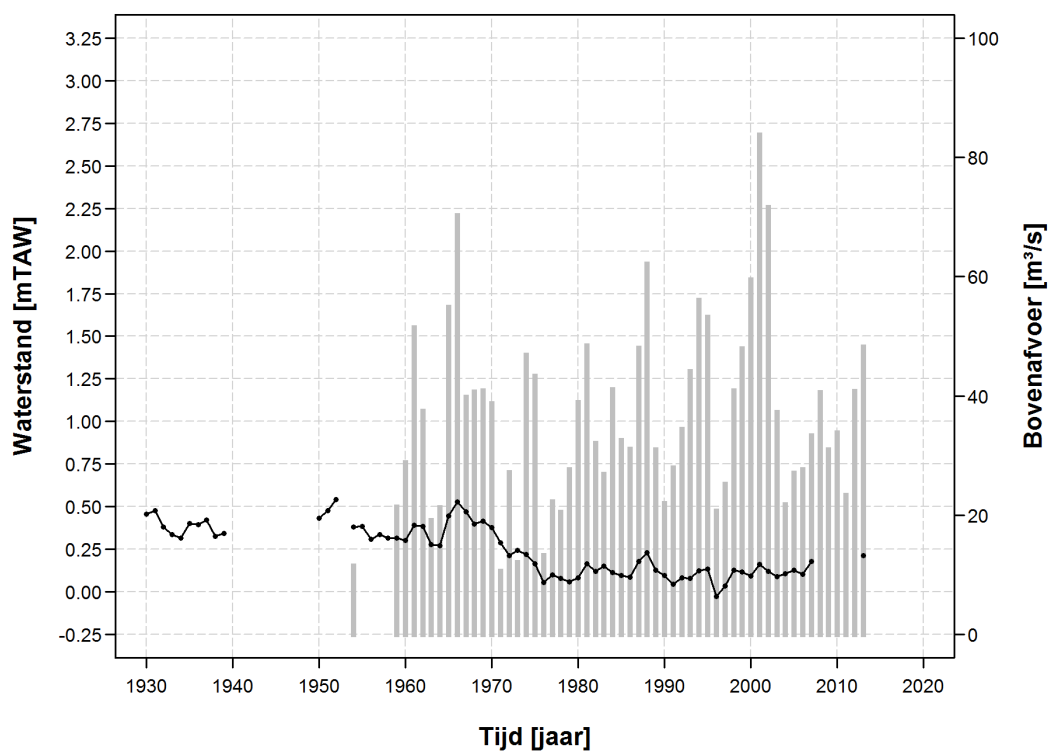
Figuur 103 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Schoonaarde en bovenafvoer Schelde [m³/s]



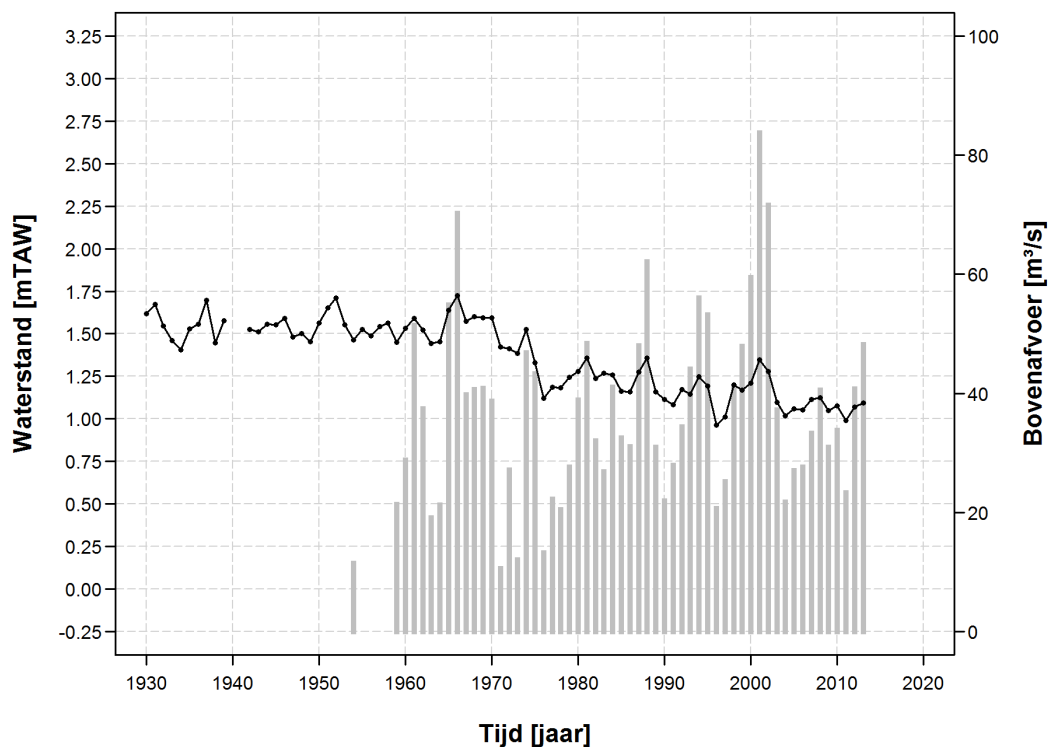
Figuur 104 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Wetteren en bovenafvoer Schelde [m³/s]



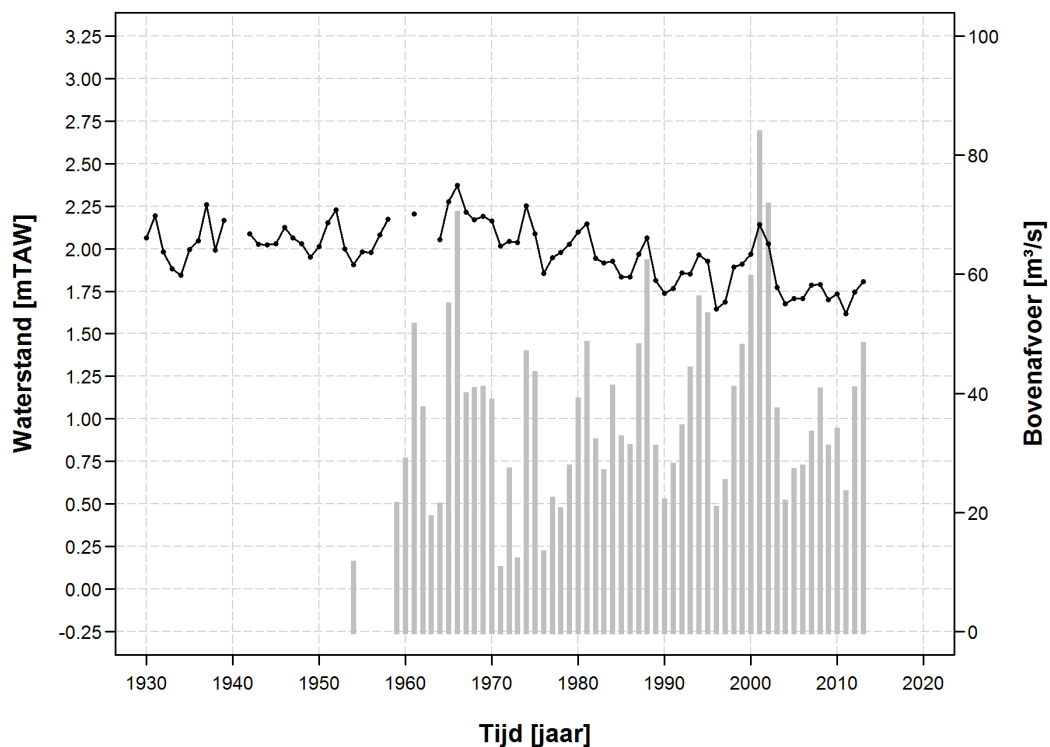
Figuur 105 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Melle en bovenafvoer Schelde [m³/s]



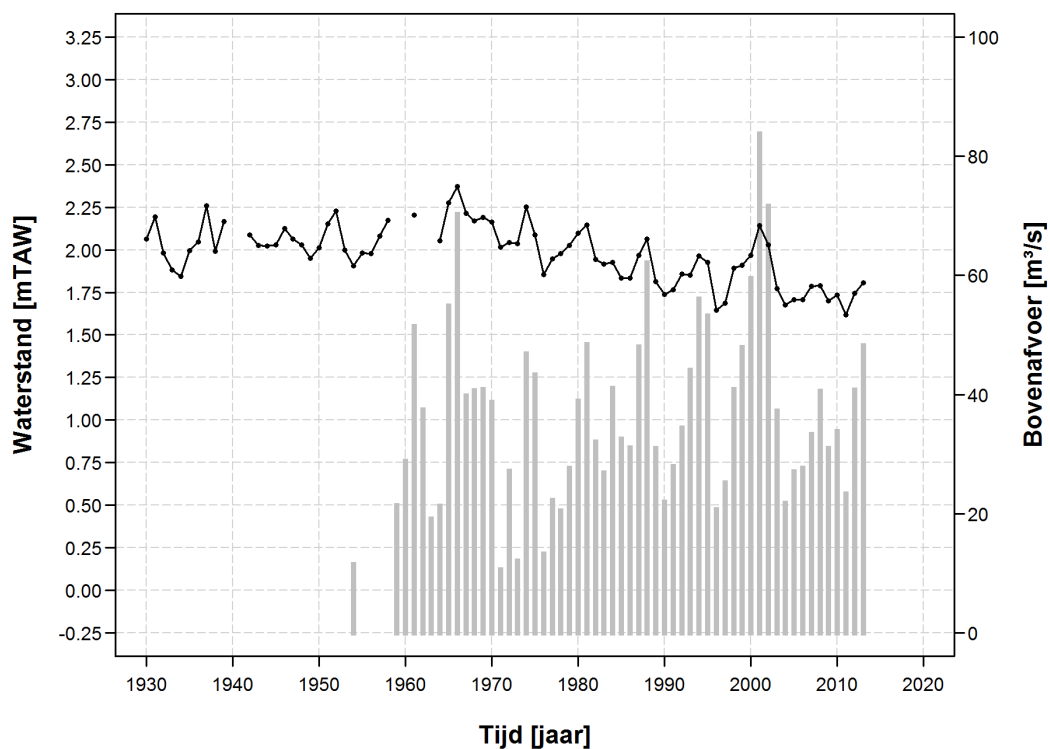
Figuur 106 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Temse en bovenafvoer Schelde [m³/s]



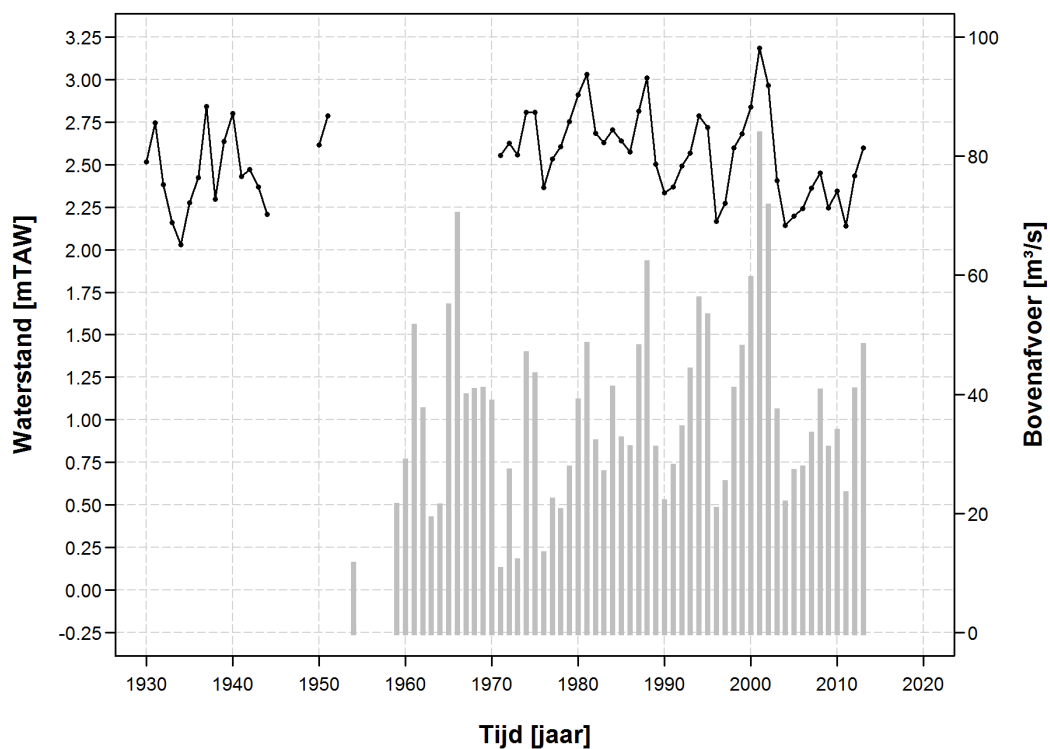
Figuur 107 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Dendermonde en bovenafvoer Schelde [m³/s]



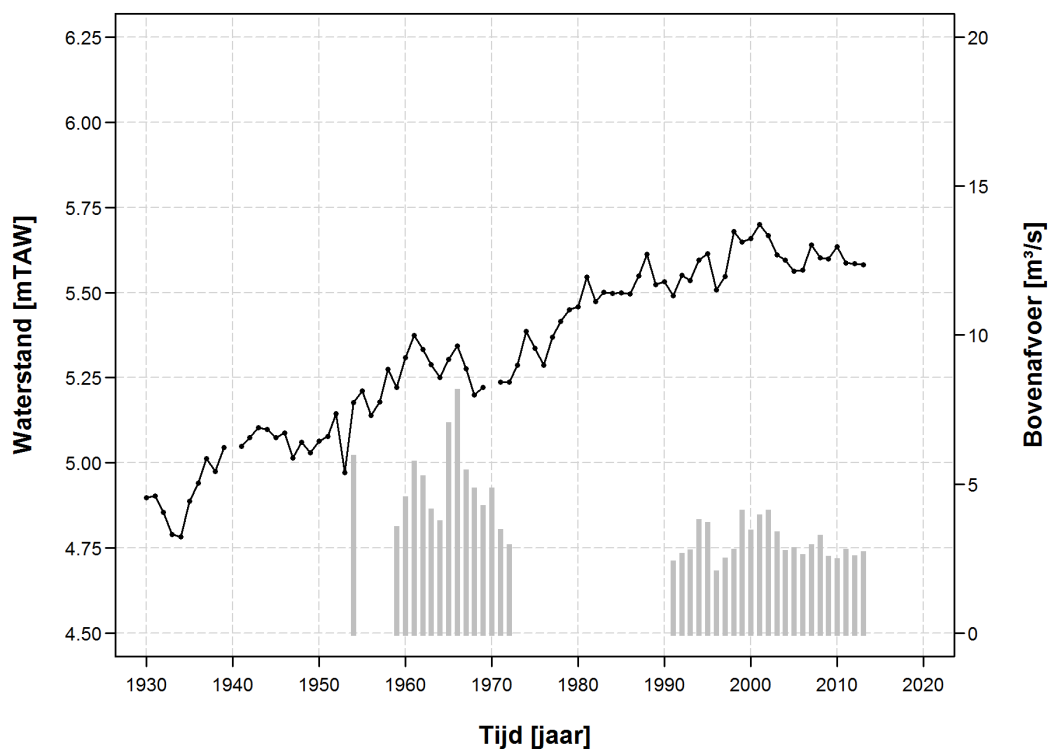
Figuur 108 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Schoonaarde en bovenafvoer Schelde [m³/s]



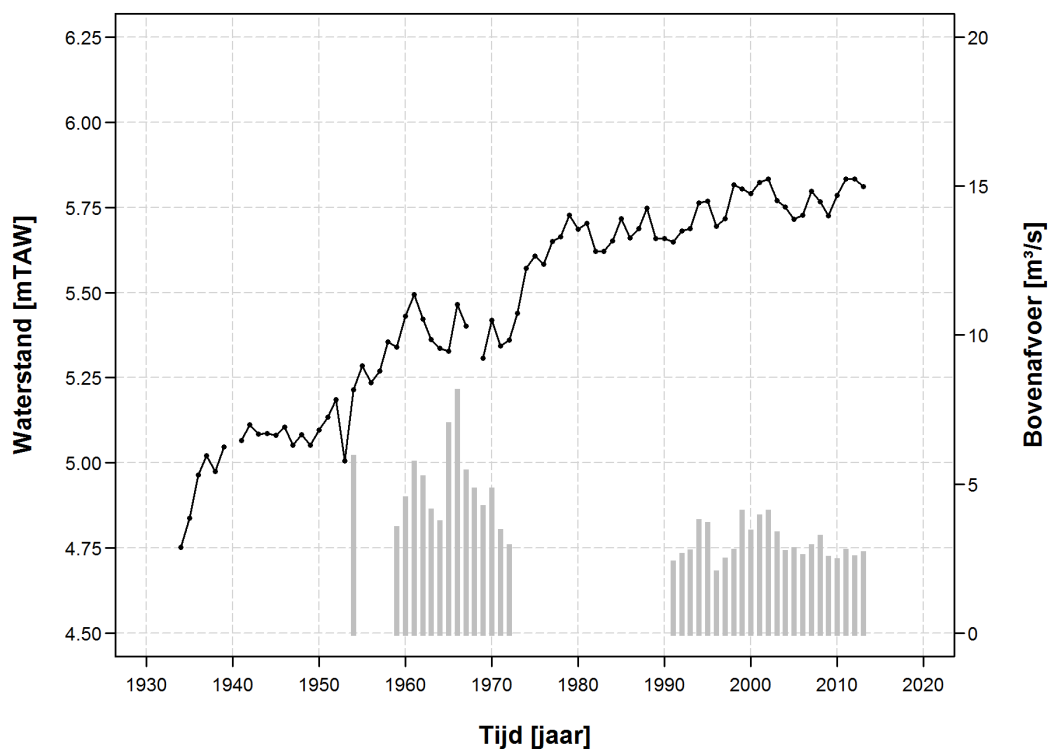
Figuur 109 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Wetteren en bovenafvoer Schelde [m³/s]



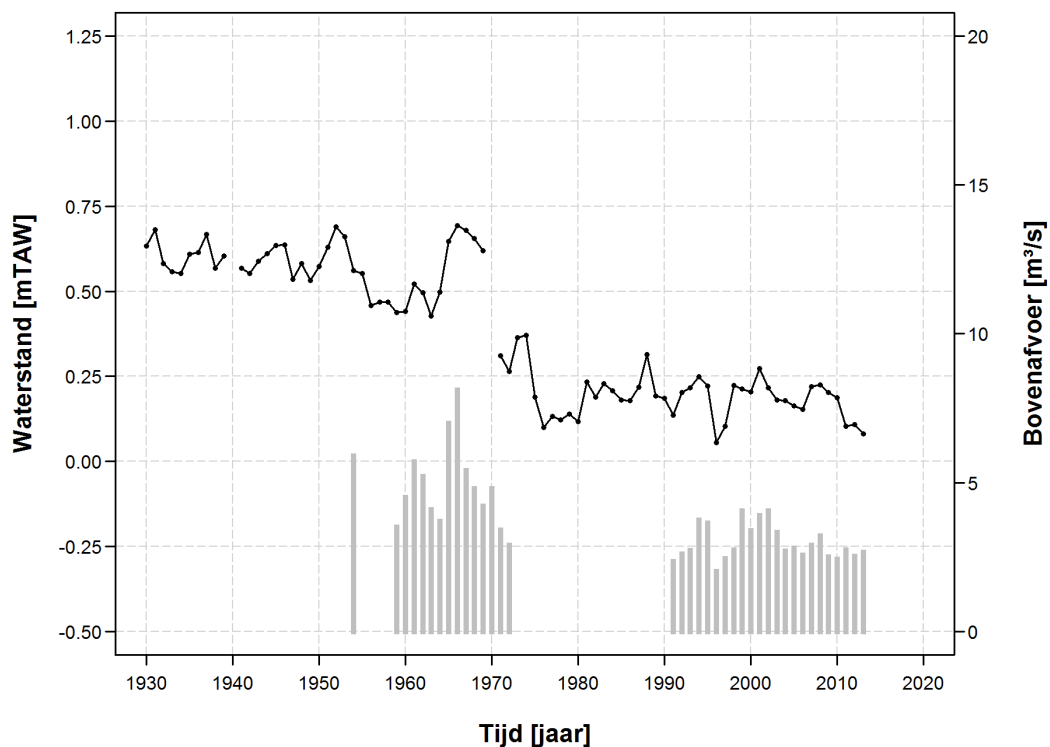
Figuur 110 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Melle en bovenafvoer Schelde [m³/s]



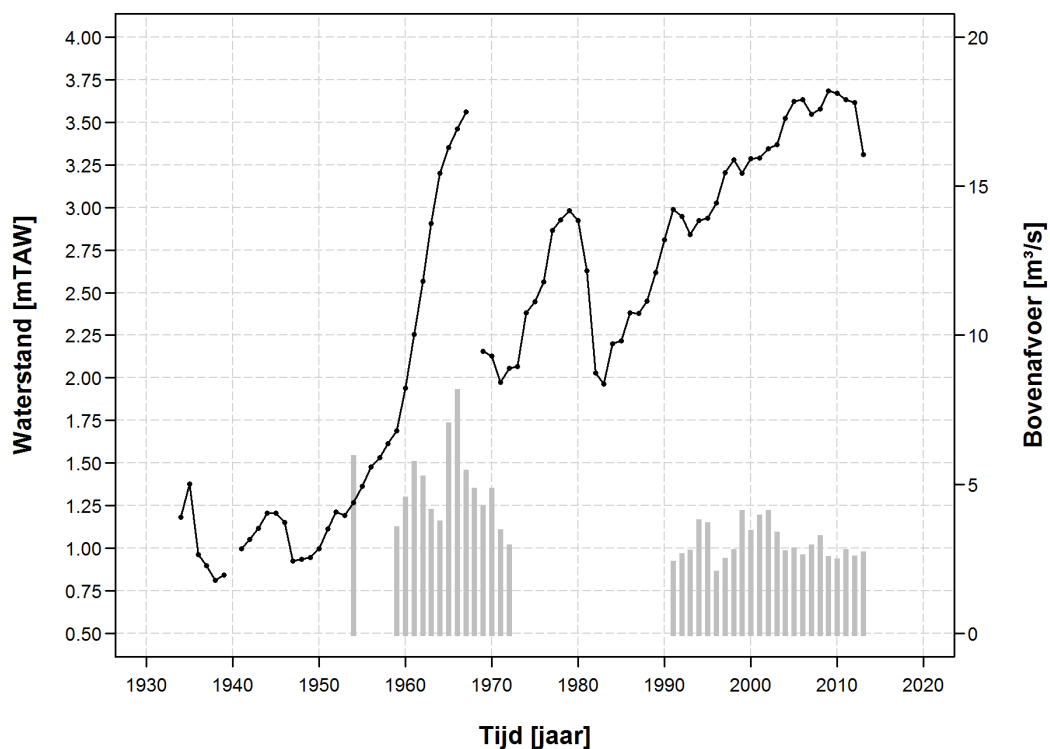
Figuur 111 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Tielrode en bovenafvoer Durme [m³/s]



Figuur 112 – Jaargemiddelde hoogwaterstanden [m TAW] te Waasmunsterbrug en bovenafvoer Durme [m³/s]

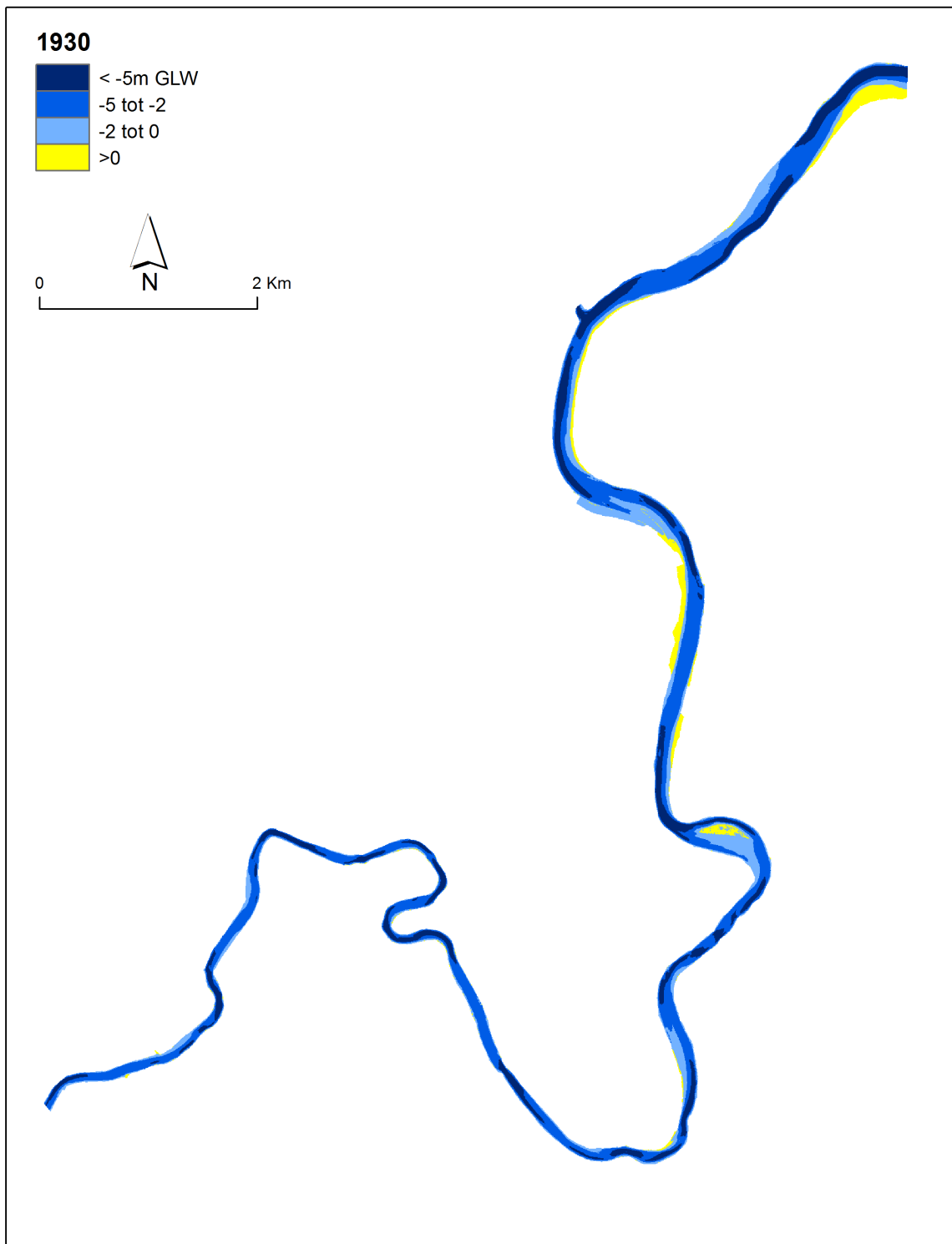


Figuur 113 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Tielrode en bovenafvoer Durme [m³/s]

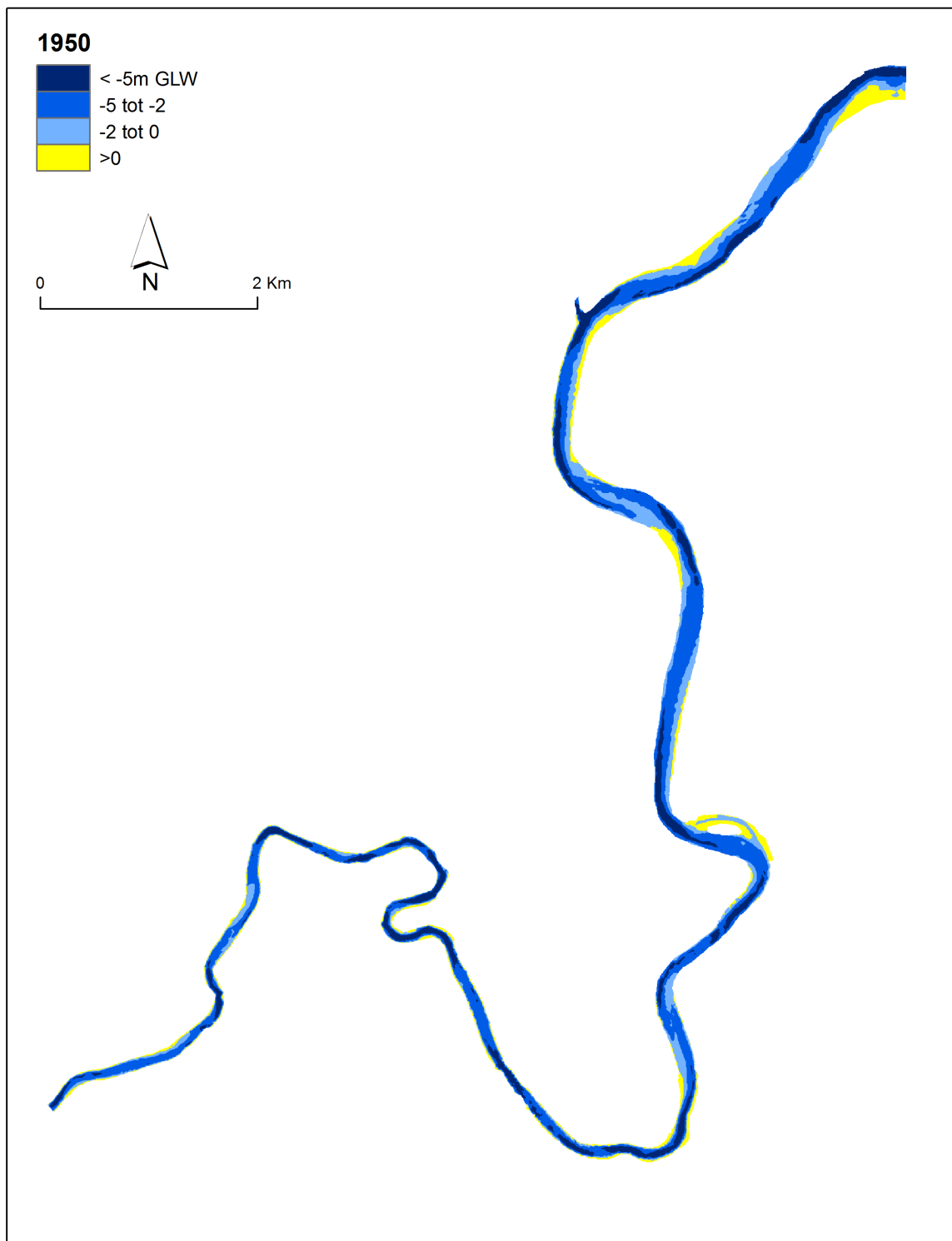


Figuur 114 – Jaargemiddelde laagwaterstanden [m TAW] te Waasmunsterbrug en bovenafvoer Durme [m³/s]

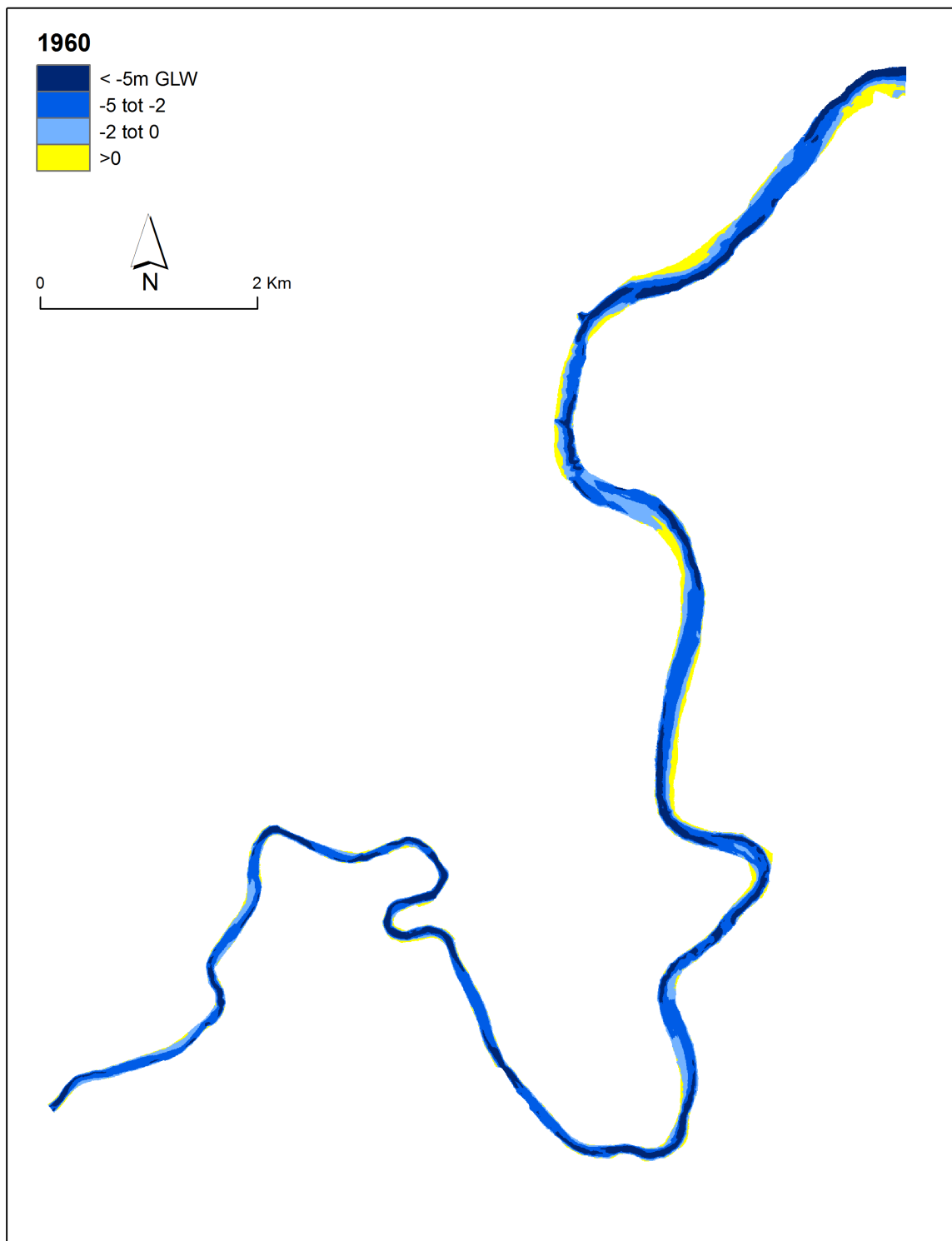
Appendix D – Bathymetrieën (mGLW)



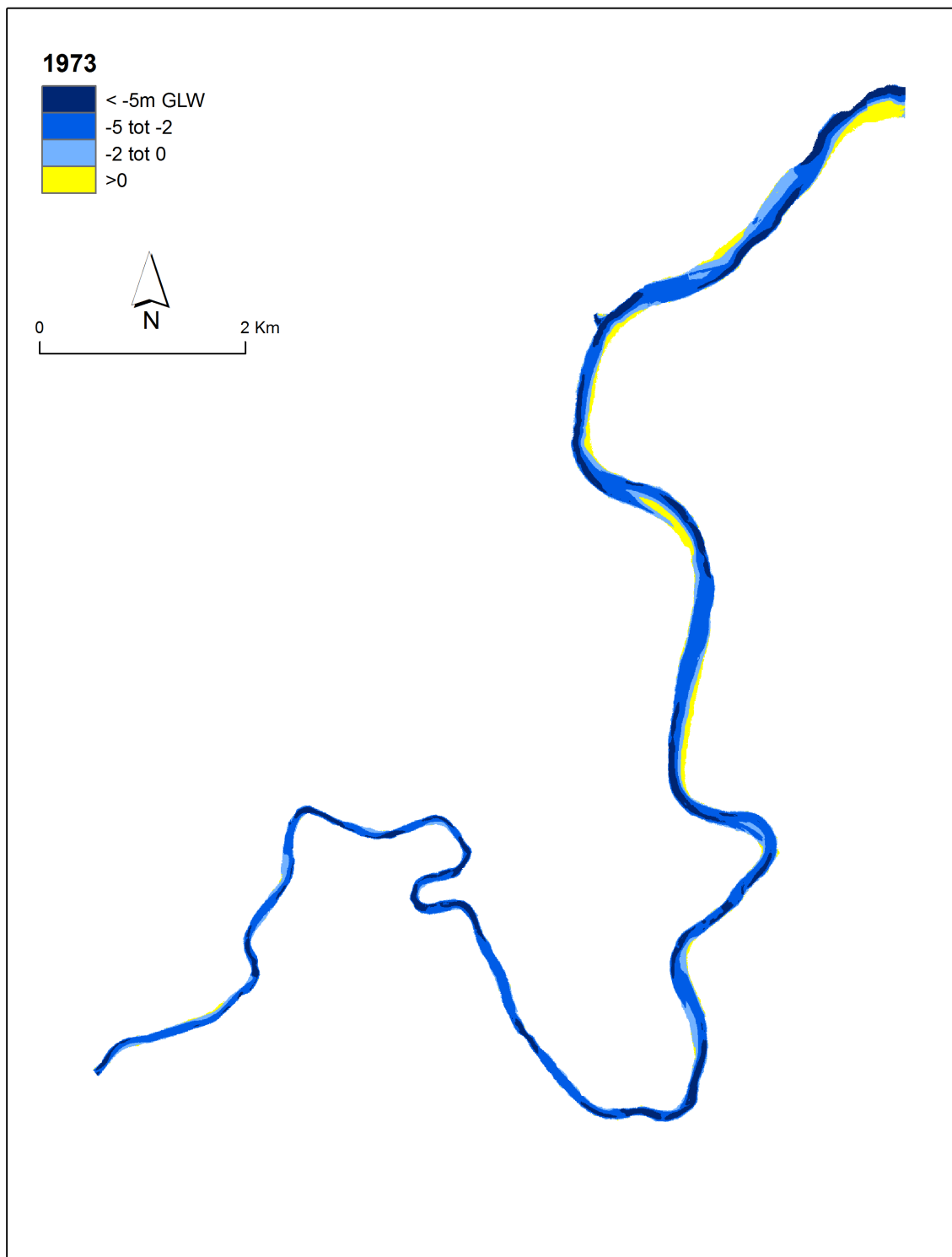
Figuur 115 – 1930 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



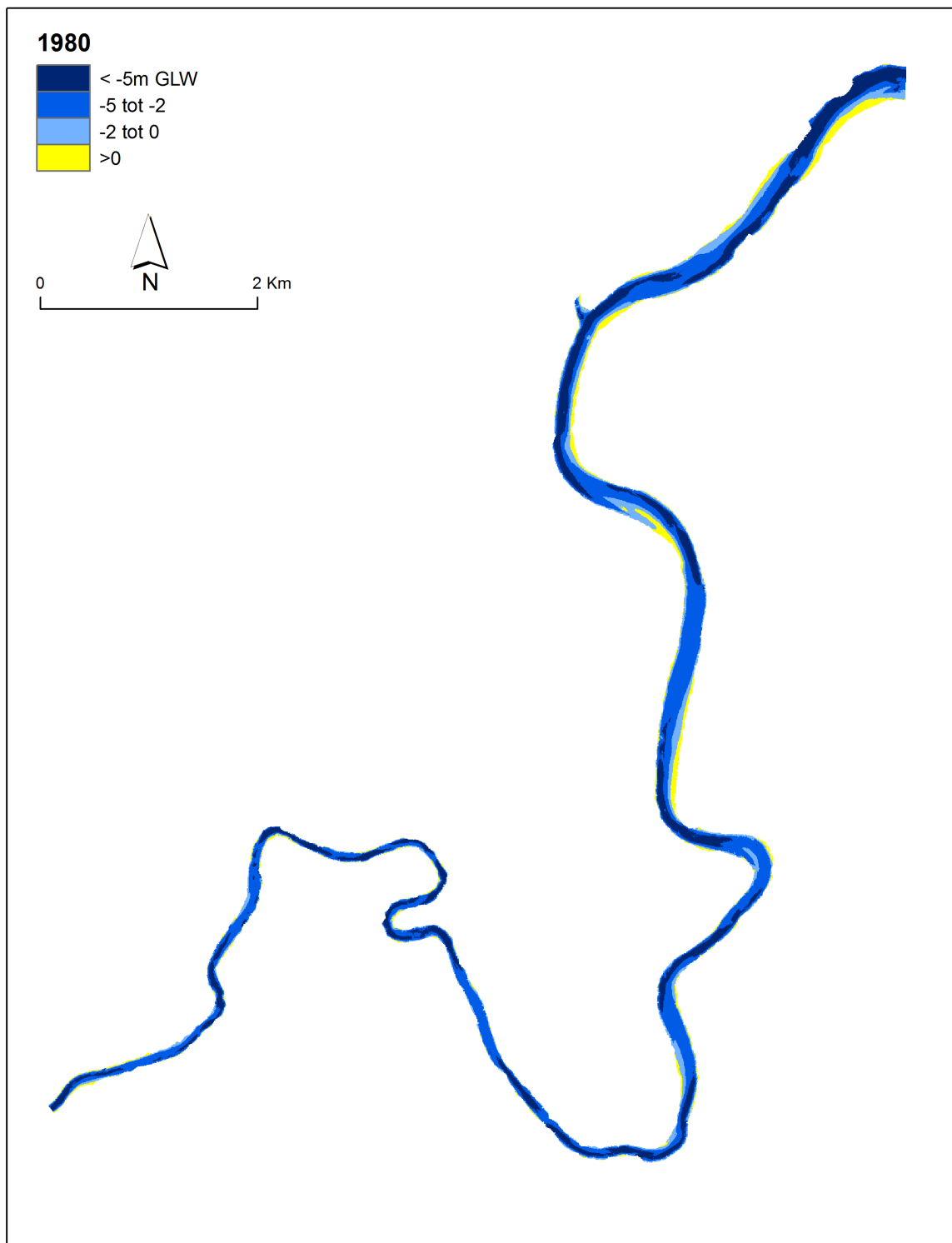
Figuur 116 – 1950 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



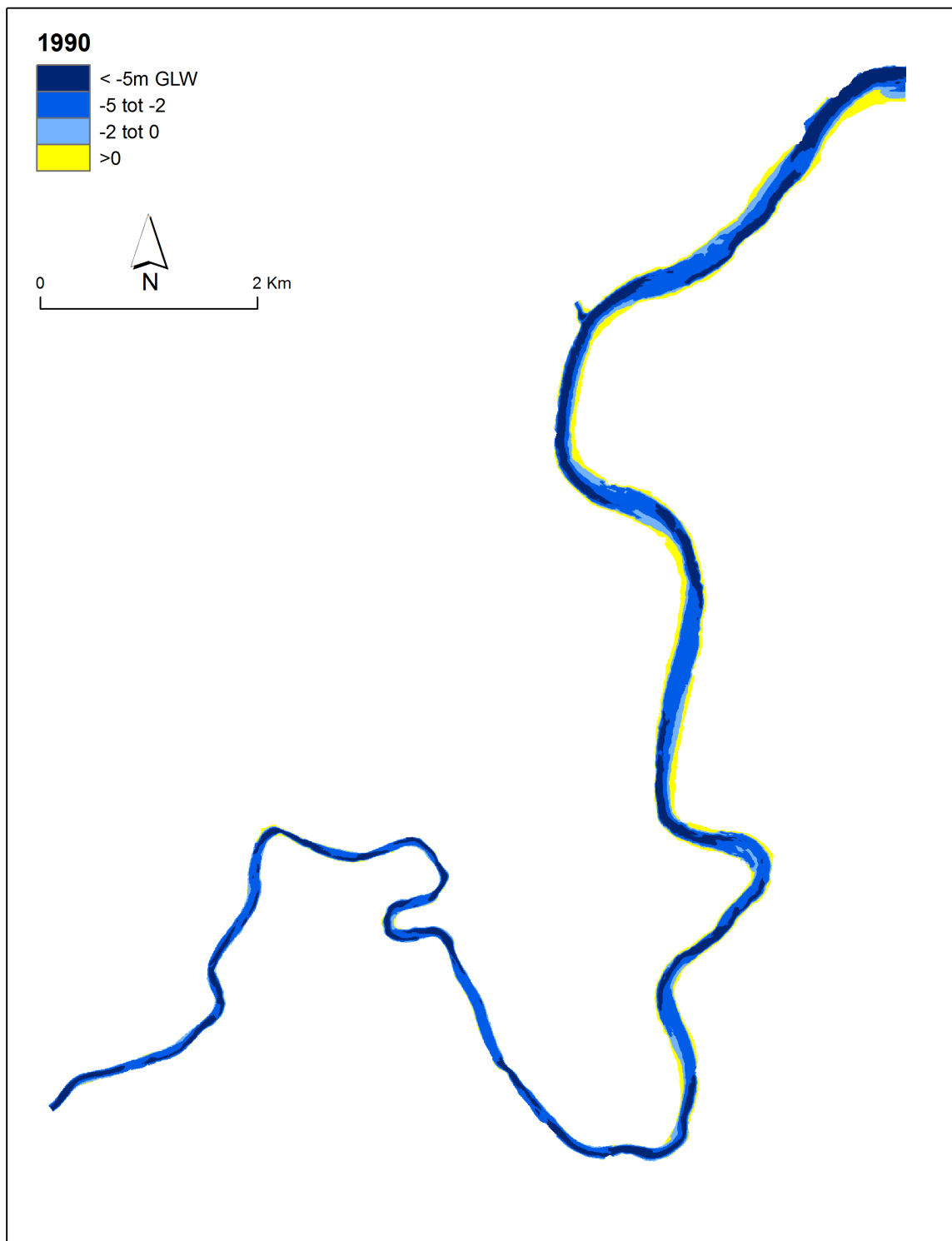
Figuur 117 – 1960 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



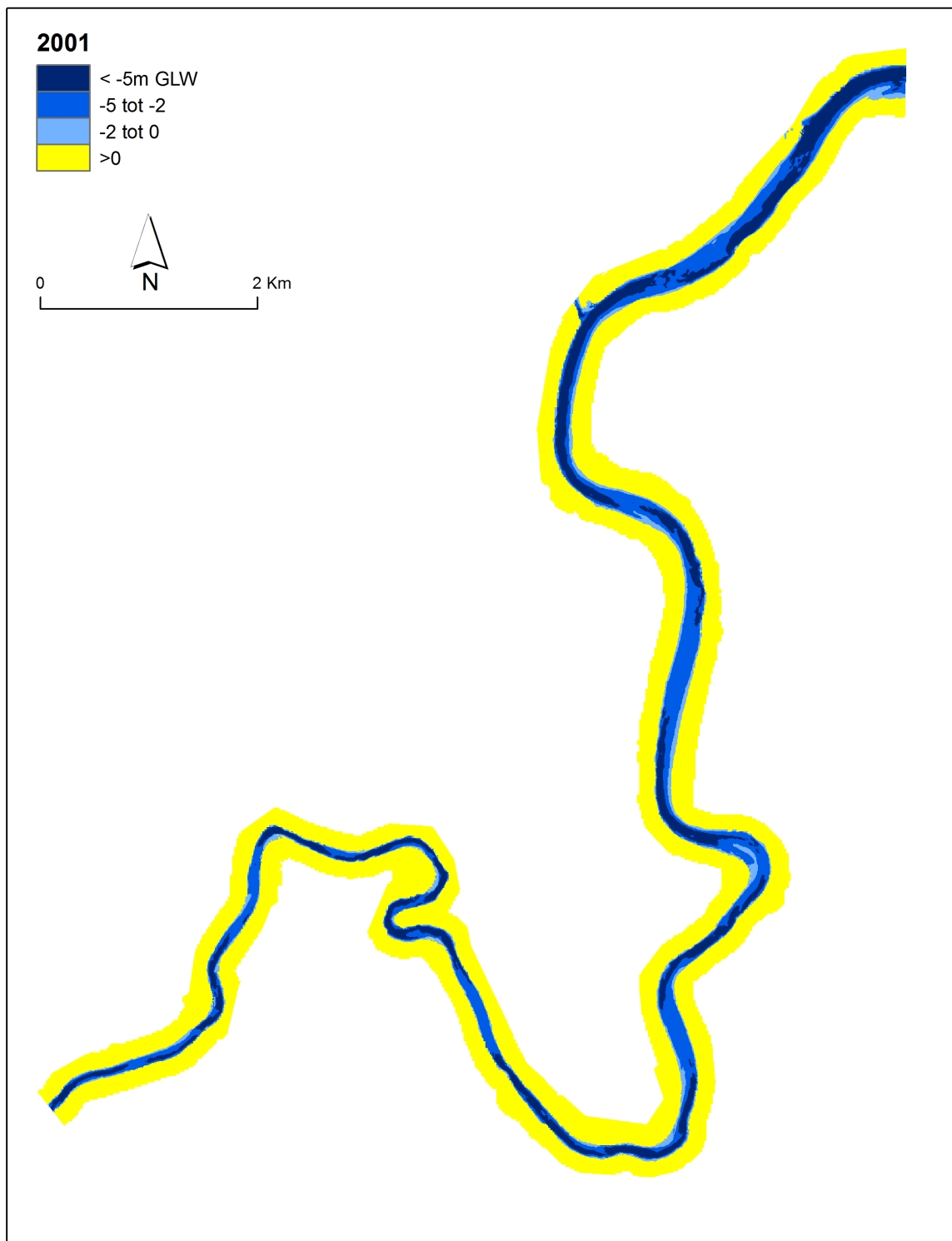
Figuur 118 – 1973 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



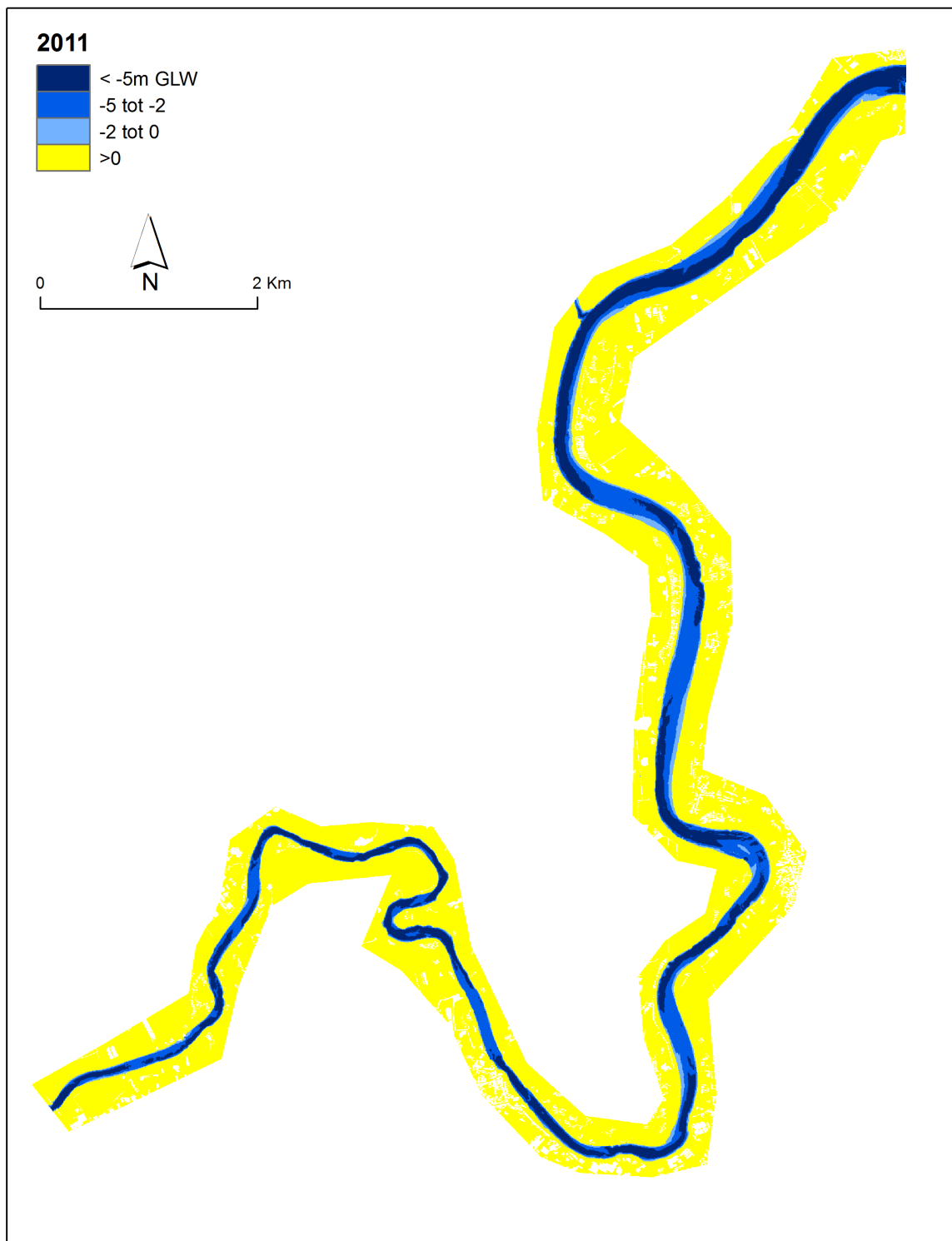
Figuur 119 – 1980 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



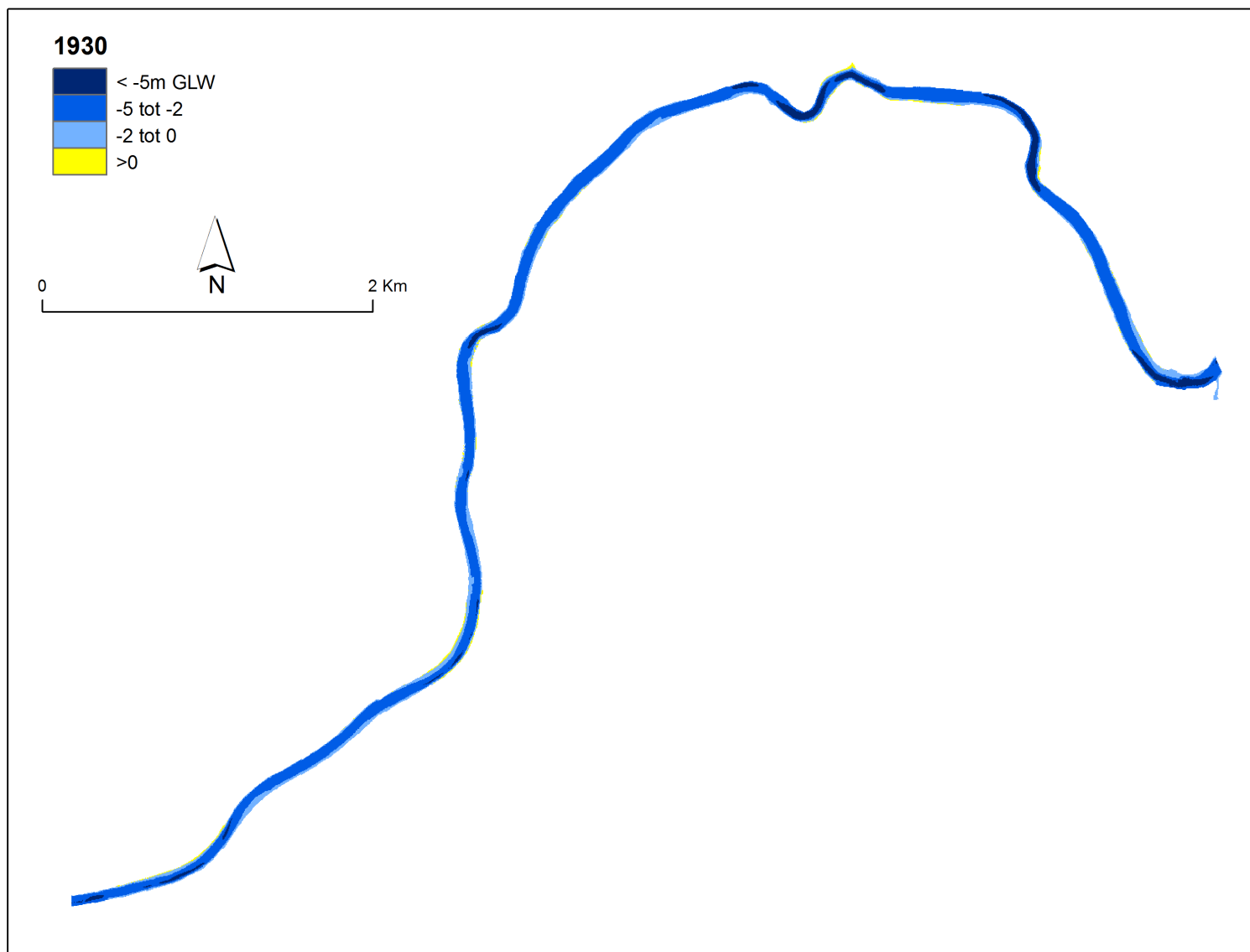
Figuur 120 – 1990 bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



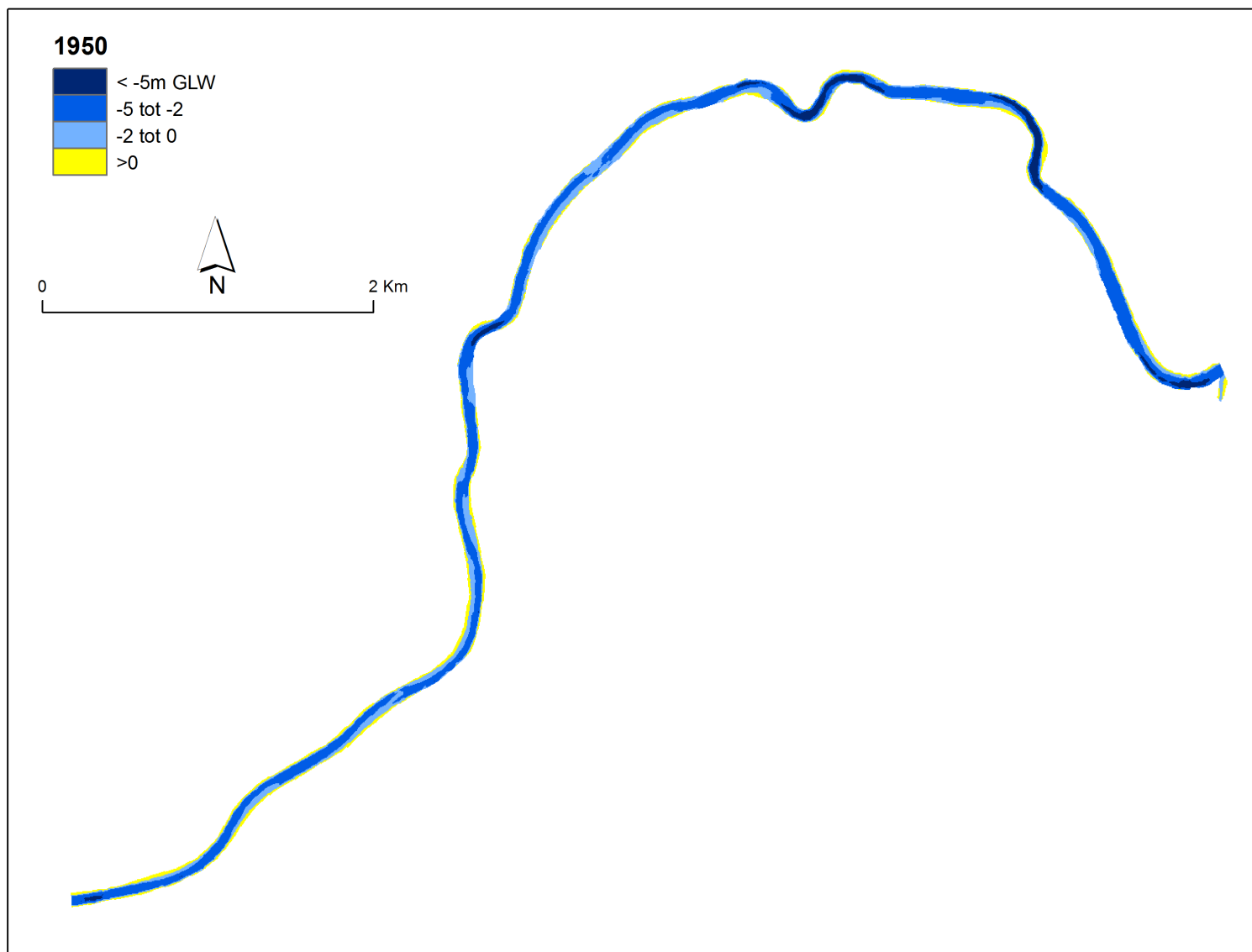
Figuur 121 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



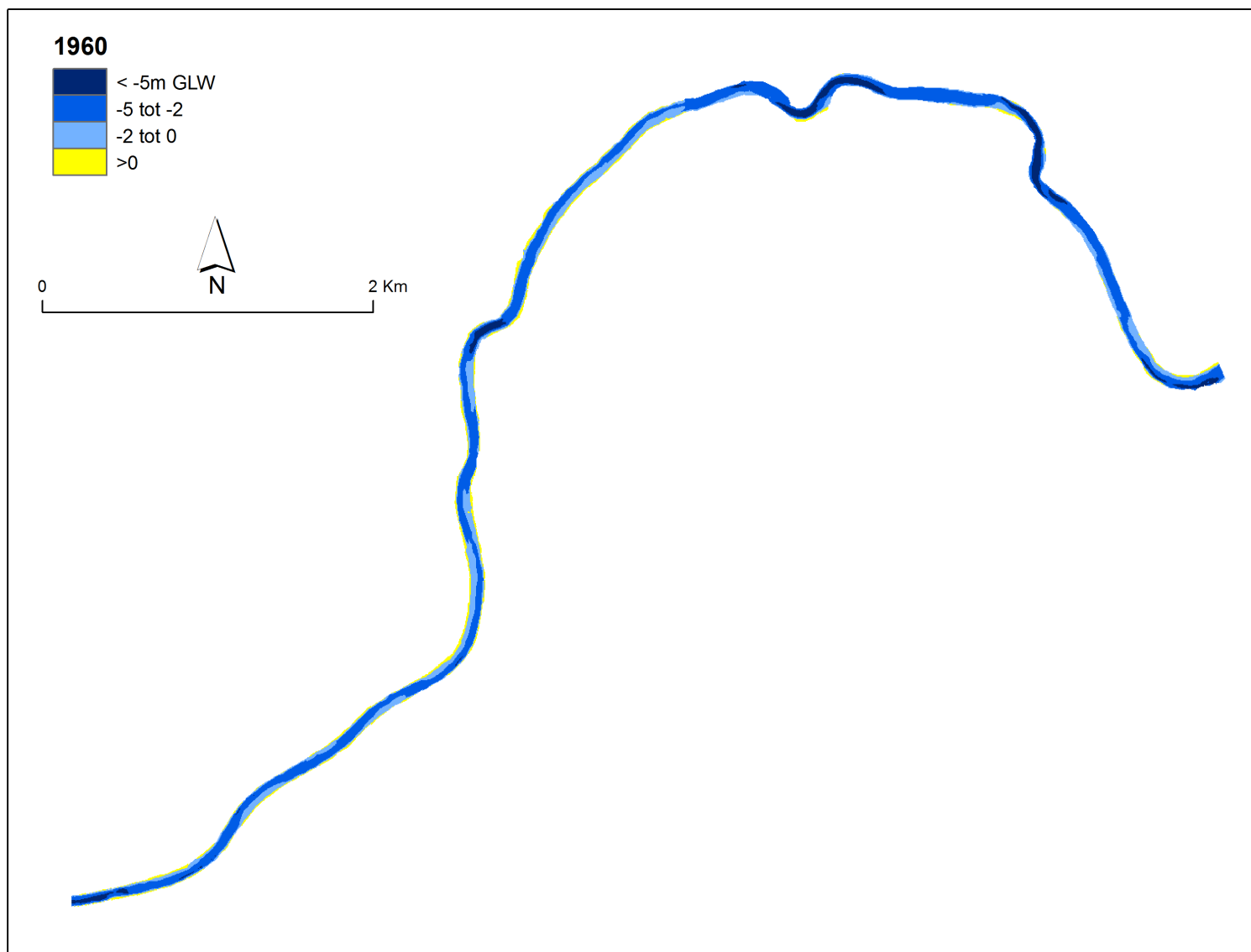
Figuur 122 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



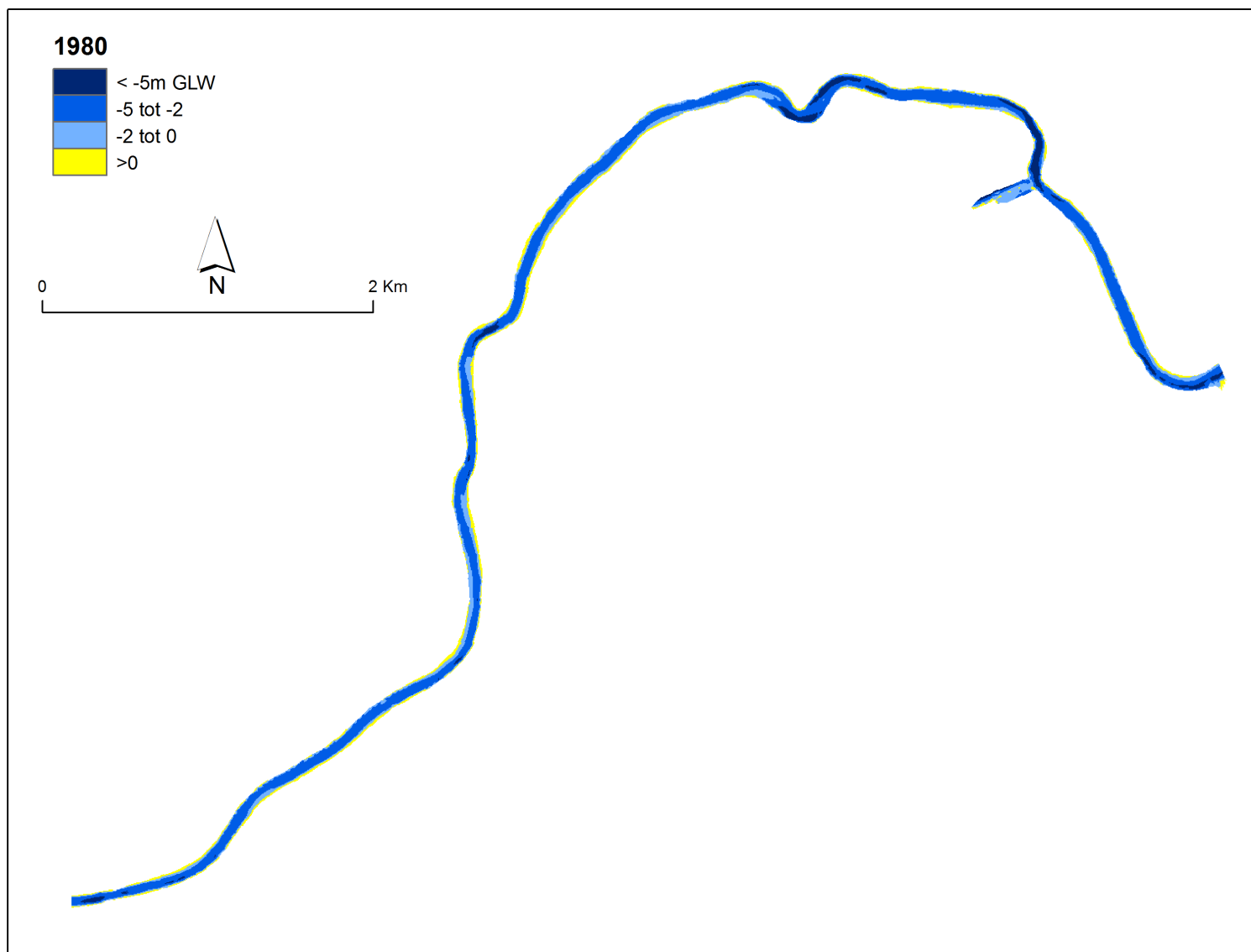
Figuur 123 – 1930 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



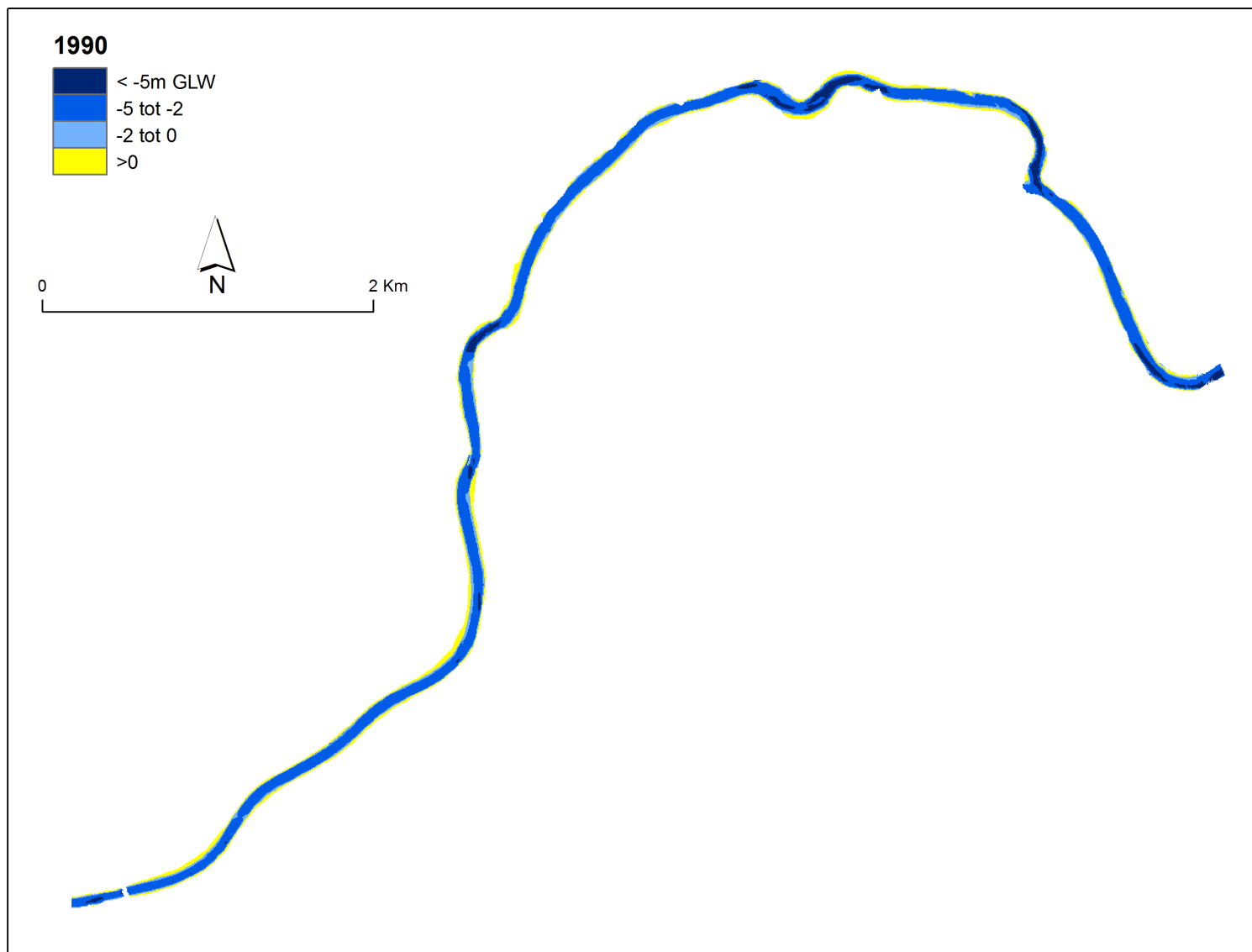
Figuur 124 – 1950 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



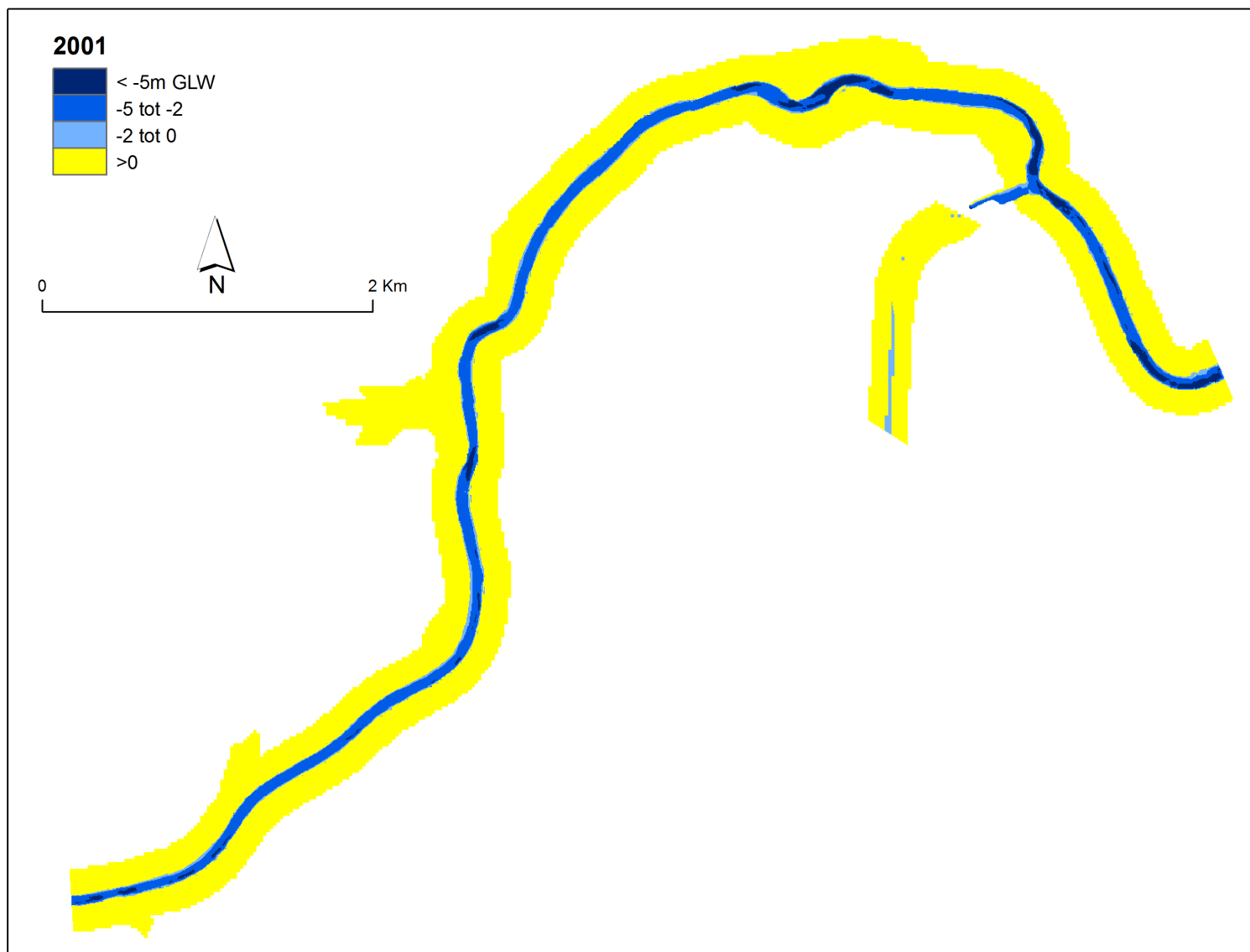
Figuur 125 – 1960 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



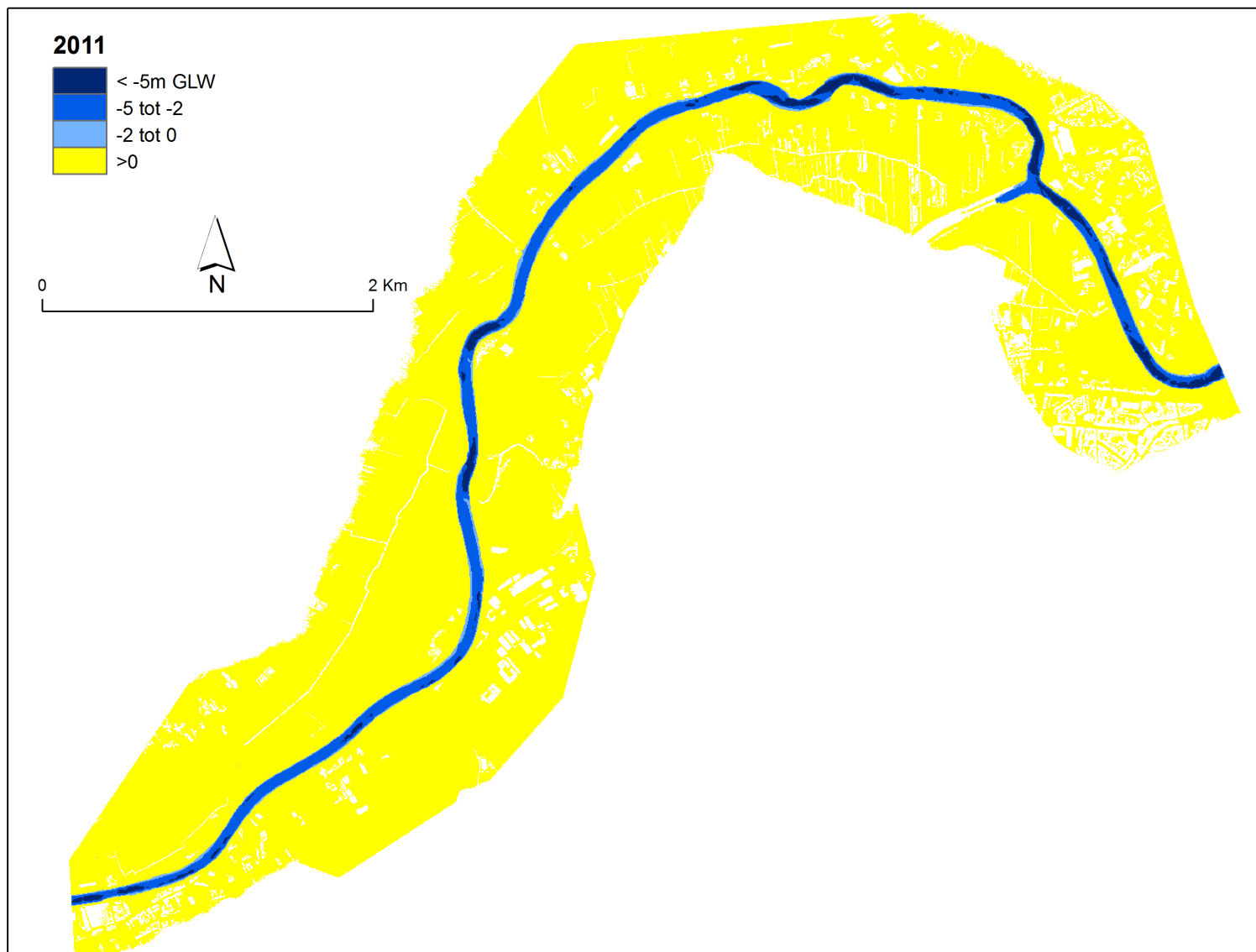
Figuur 126 – 1980 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



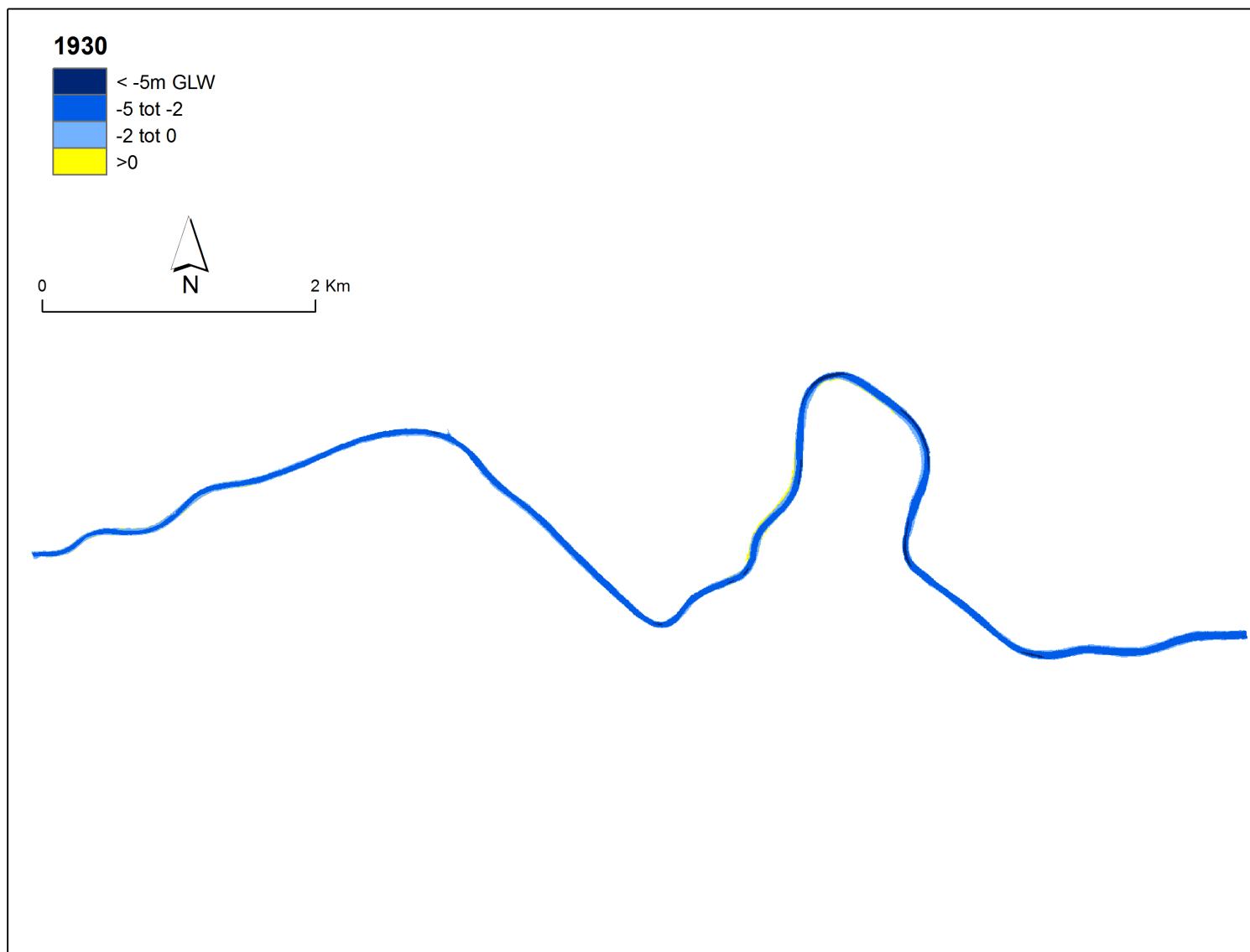
Figuur 127 – 1990 bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



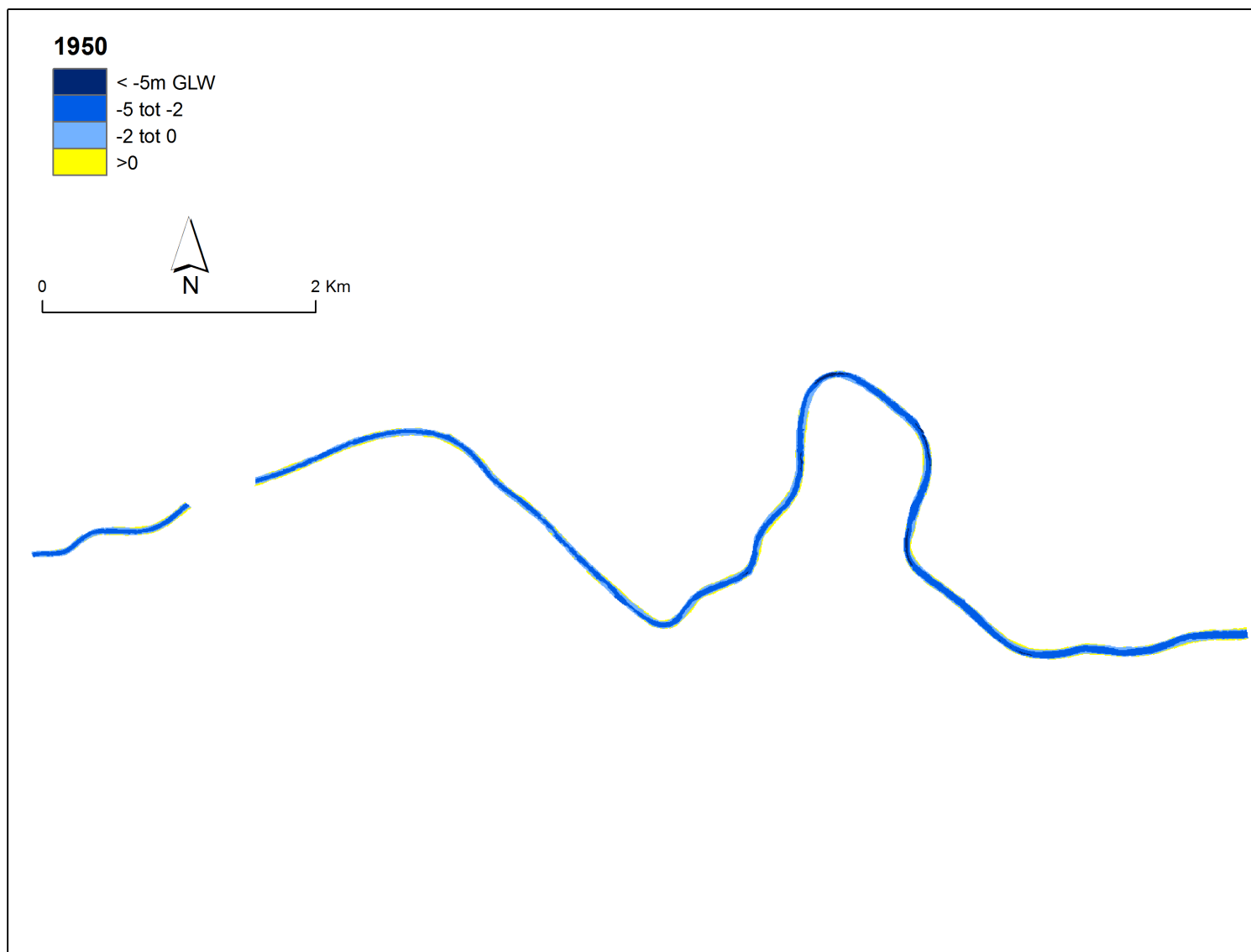
Figuur 128 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



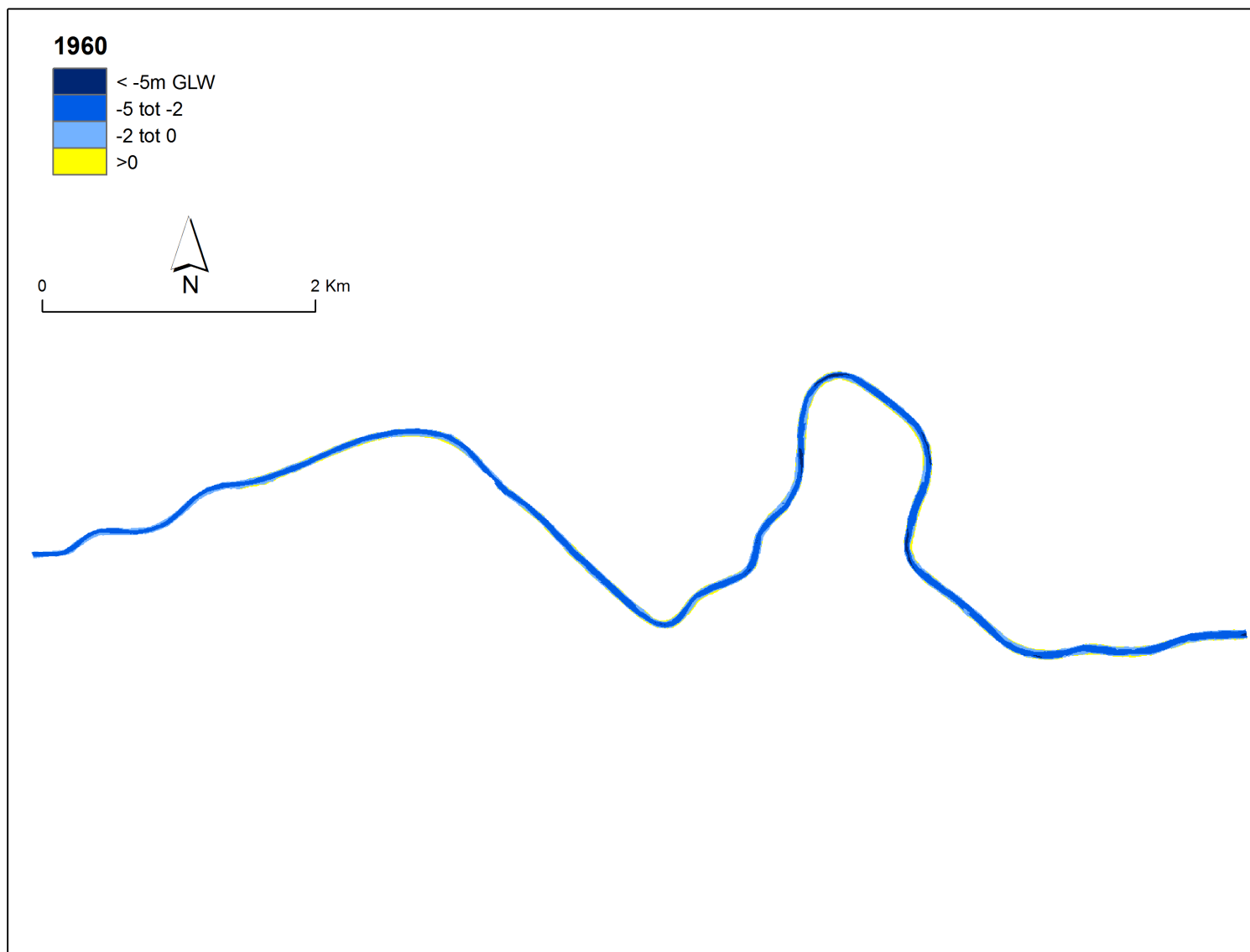
Figuur 129 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



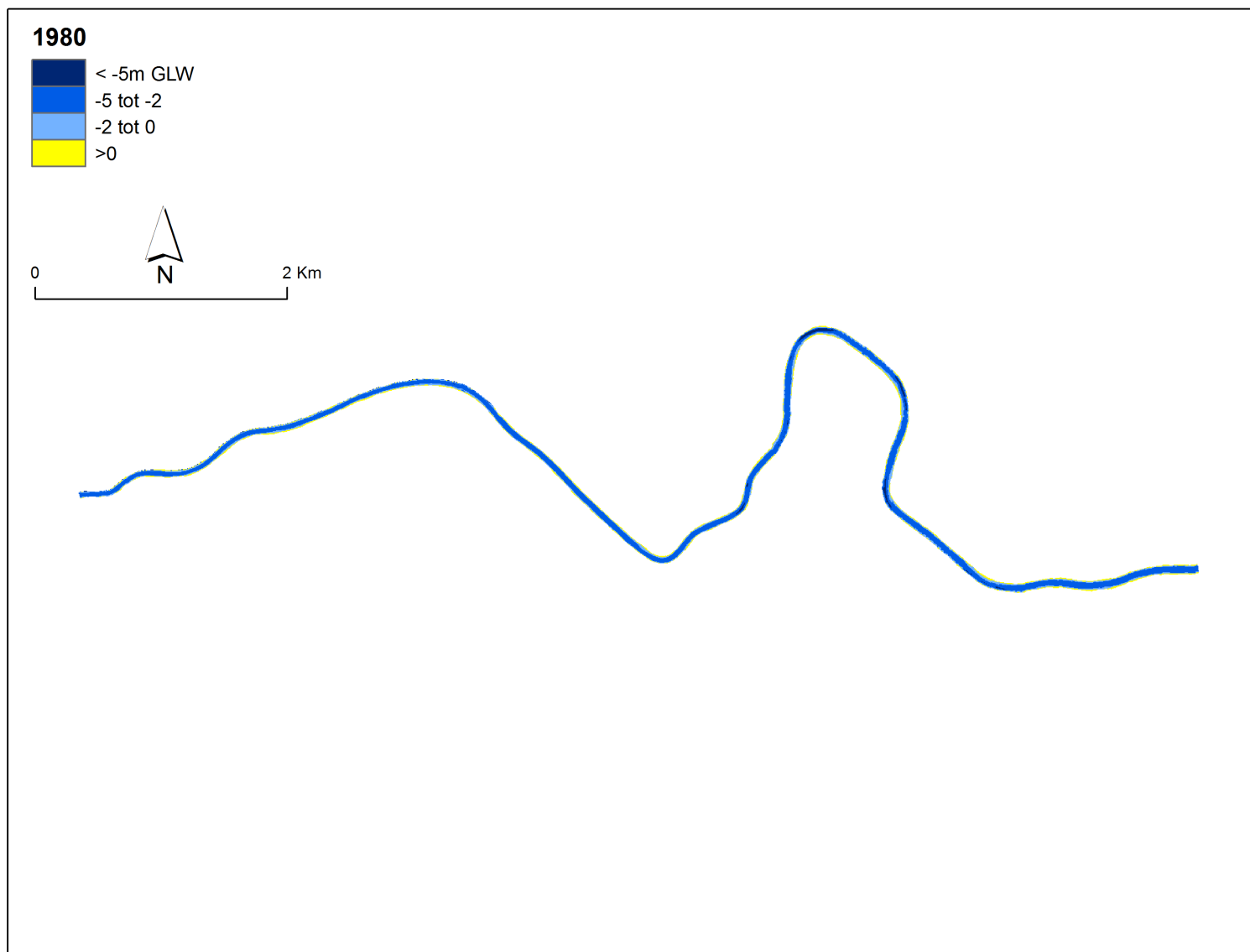
Figuur 130 – 1930 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



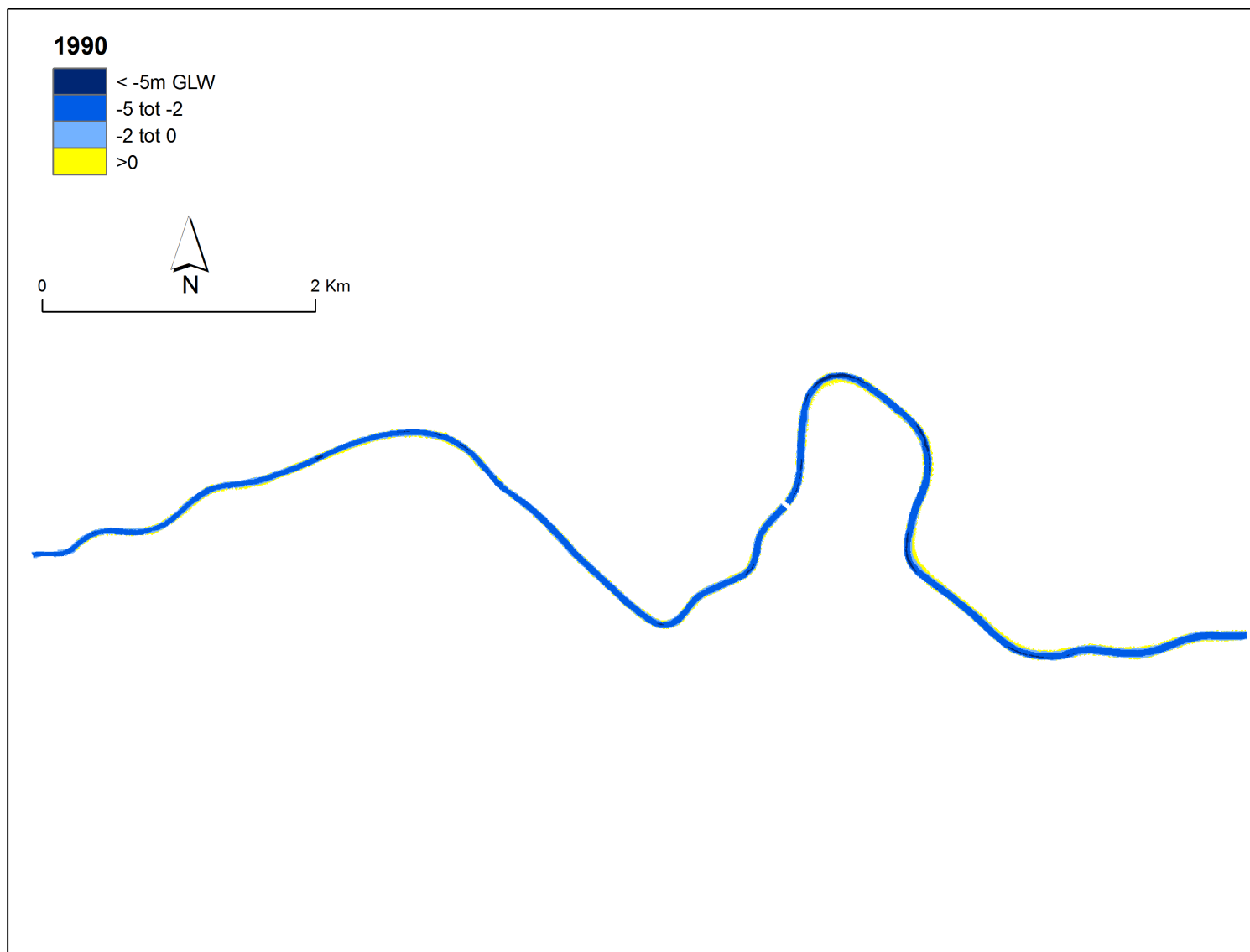
Figuur 131 – 1950 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



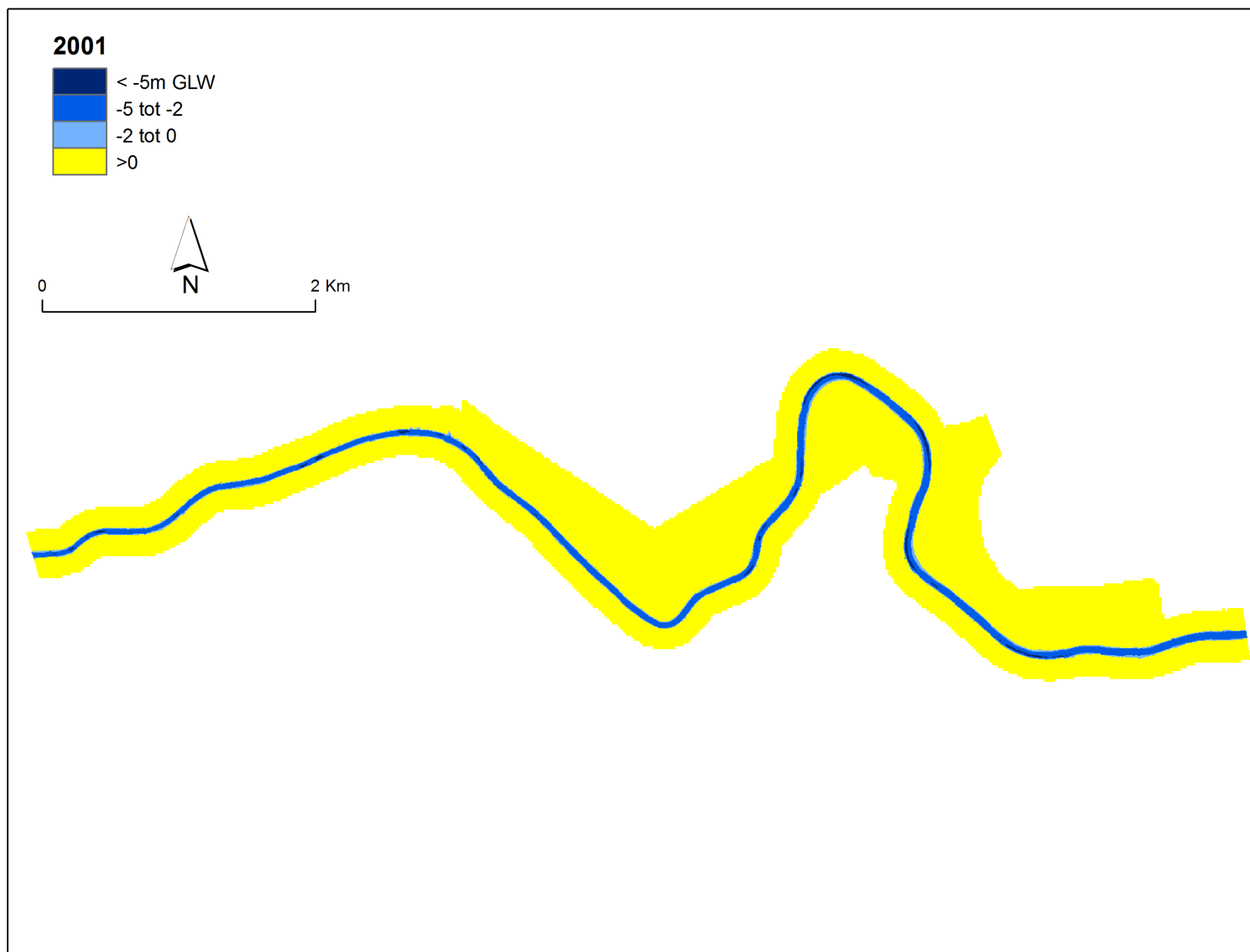
Figuur 132 – 1960 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



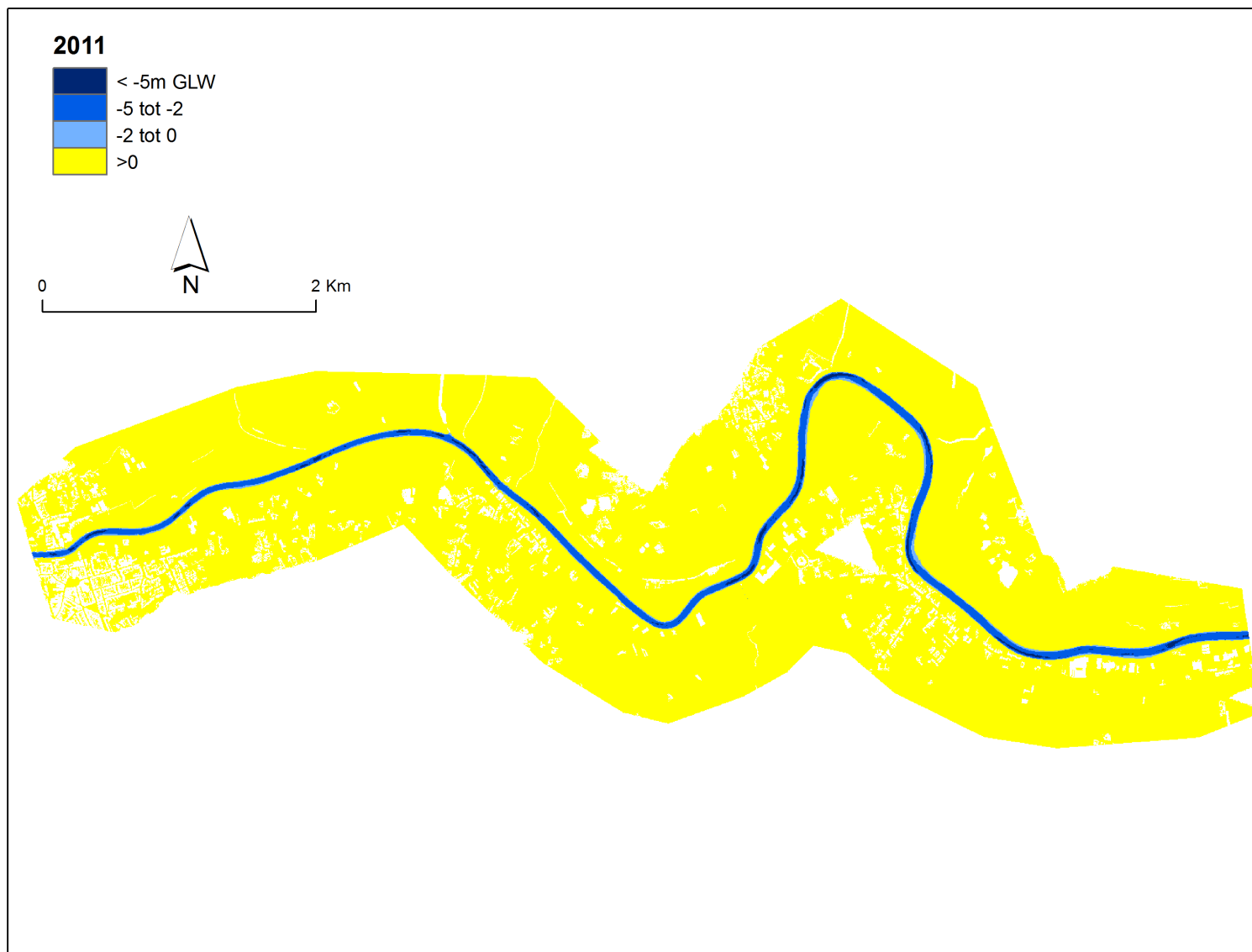
Figuur 133 – 1980 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



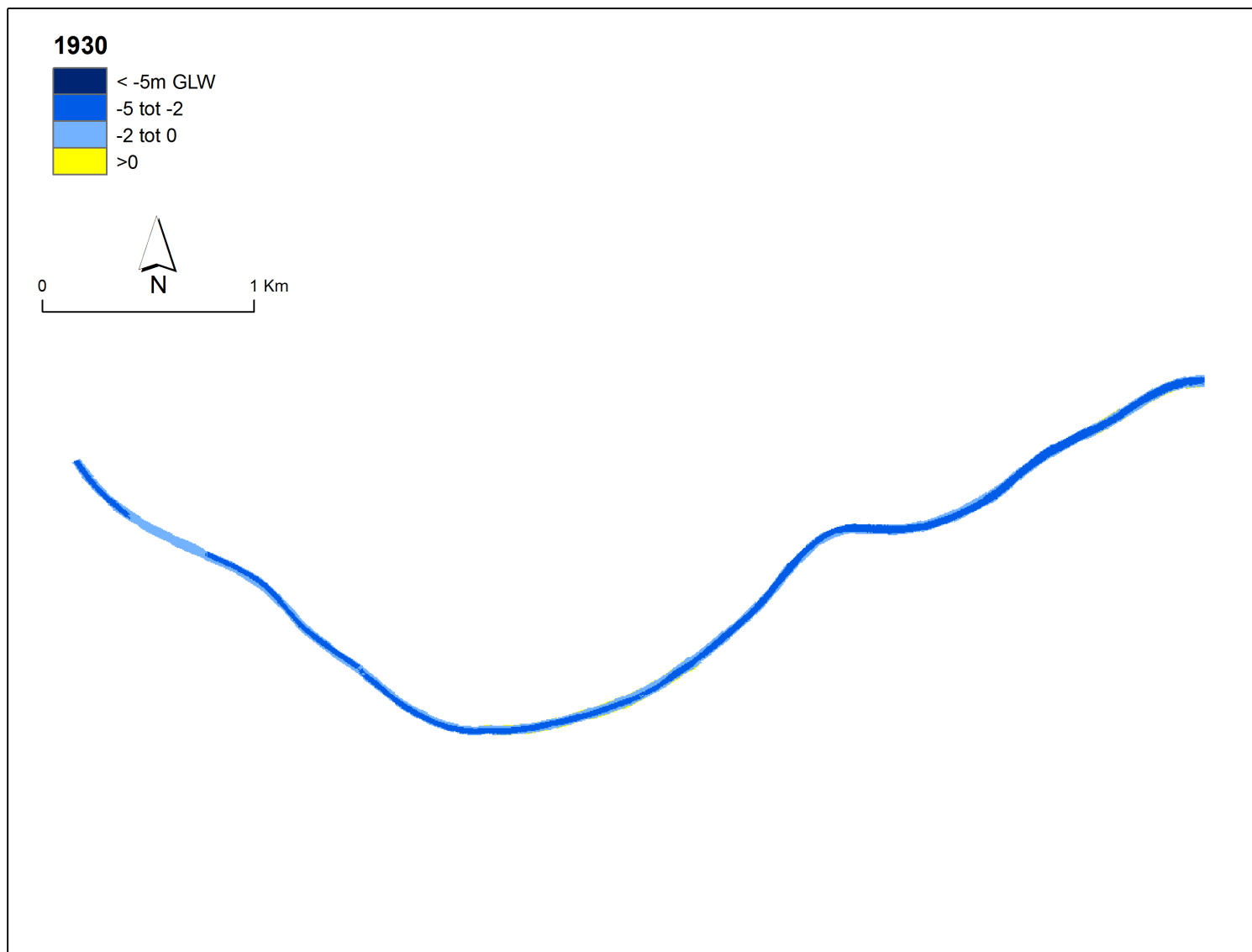
Figuur 134 – 1990 bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



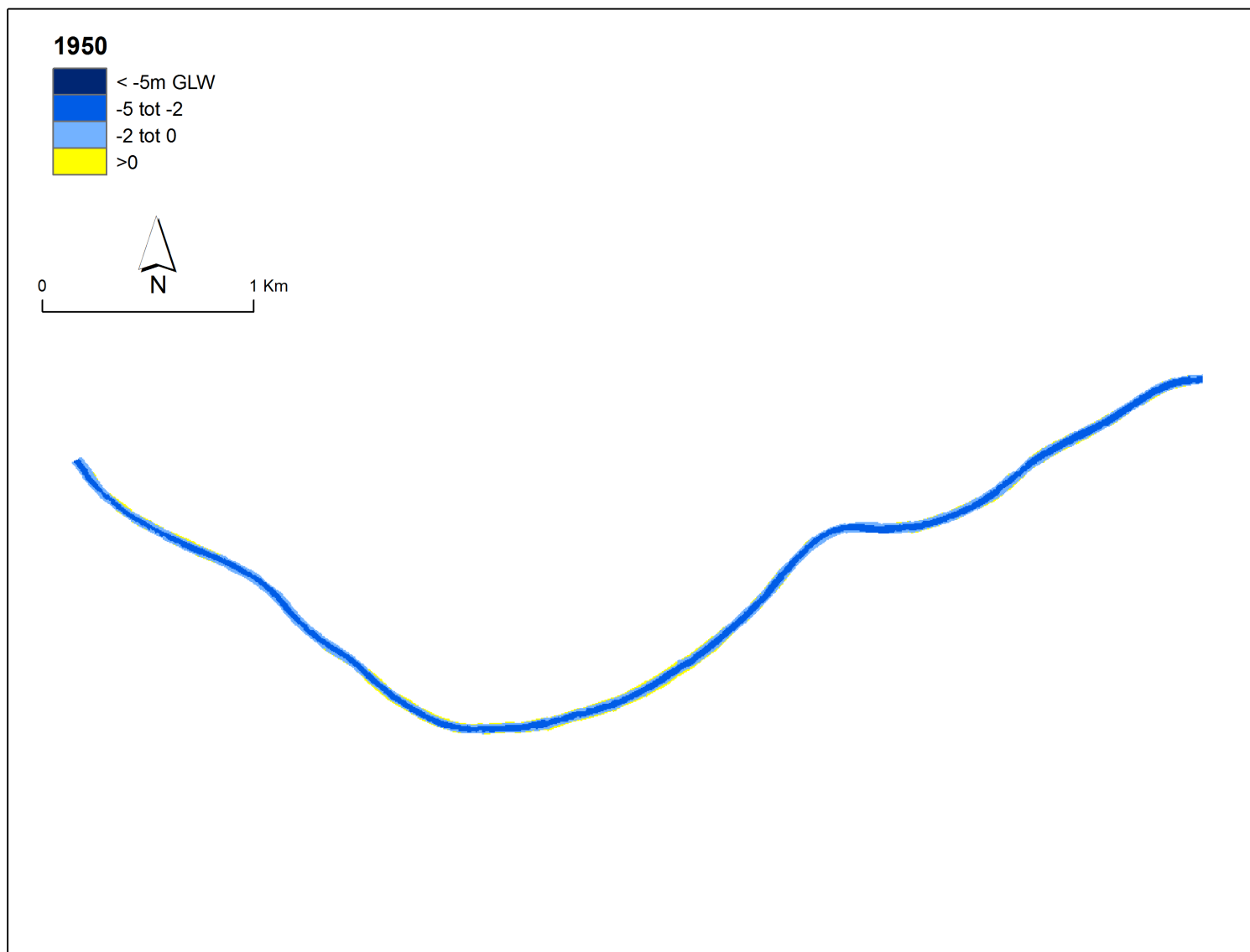
Figuur 135 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



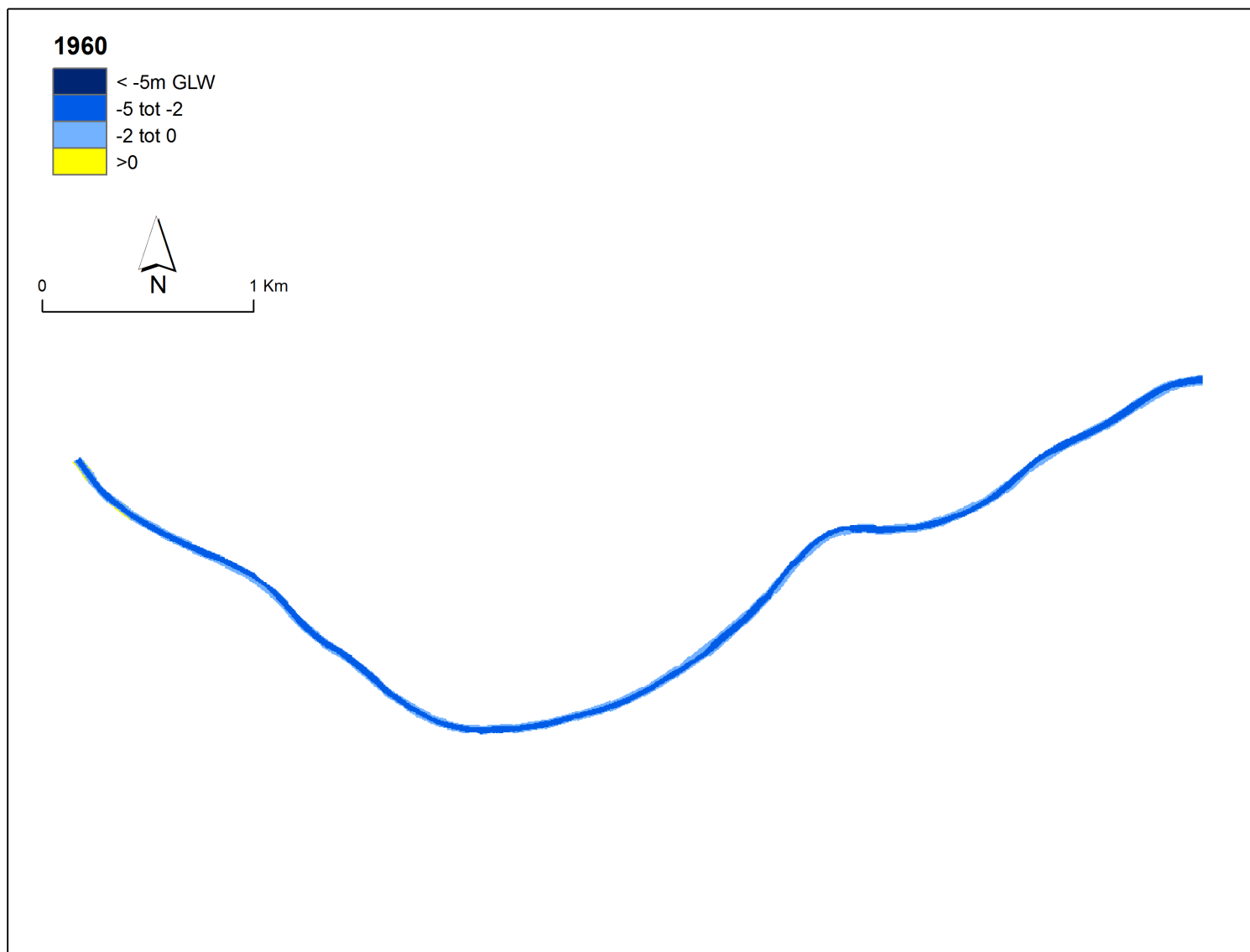
Figuur 136 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



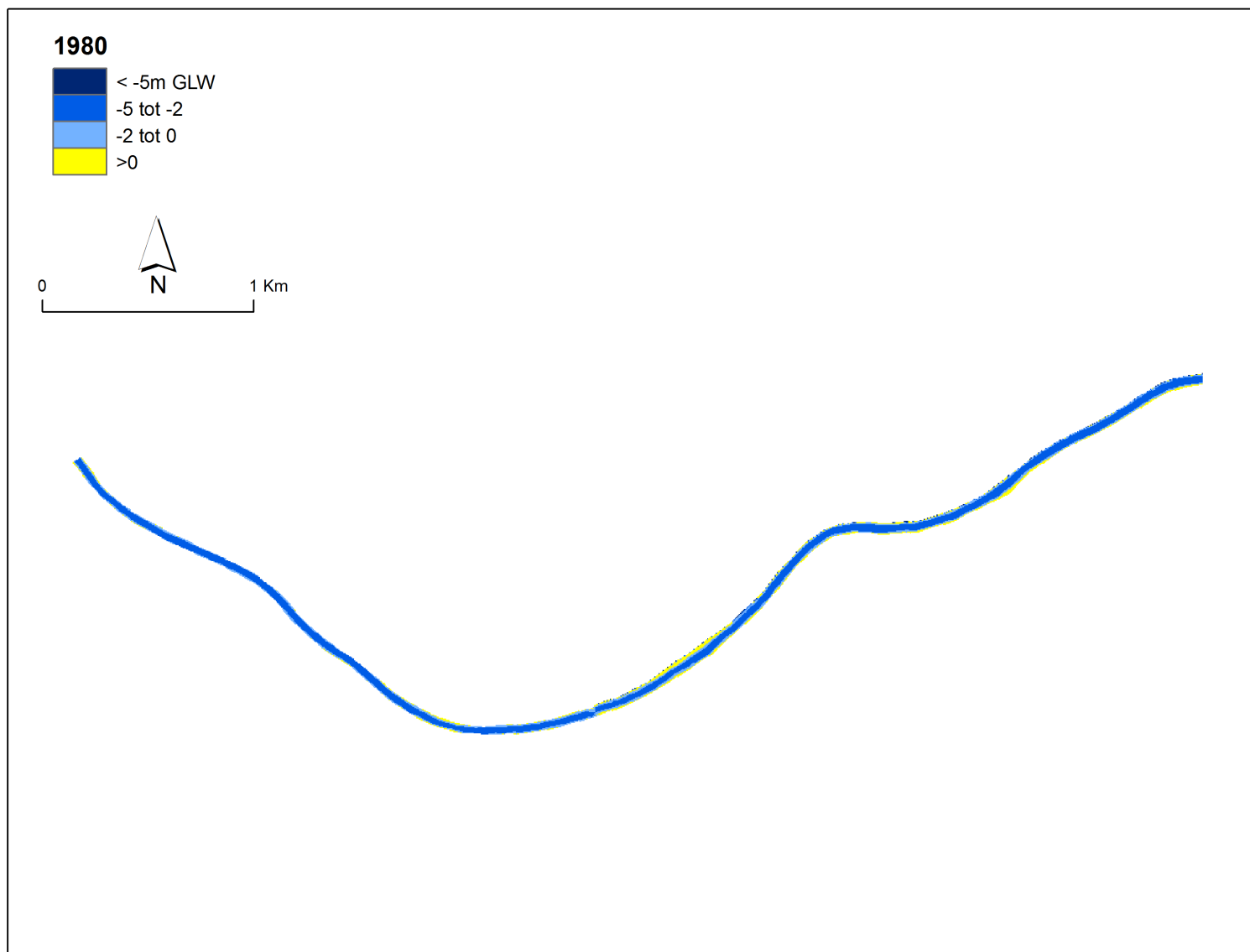
Figuur 137 – 1930 bathymetrie van het segment Wettersen-Melle (Boven-Zeeschelde)



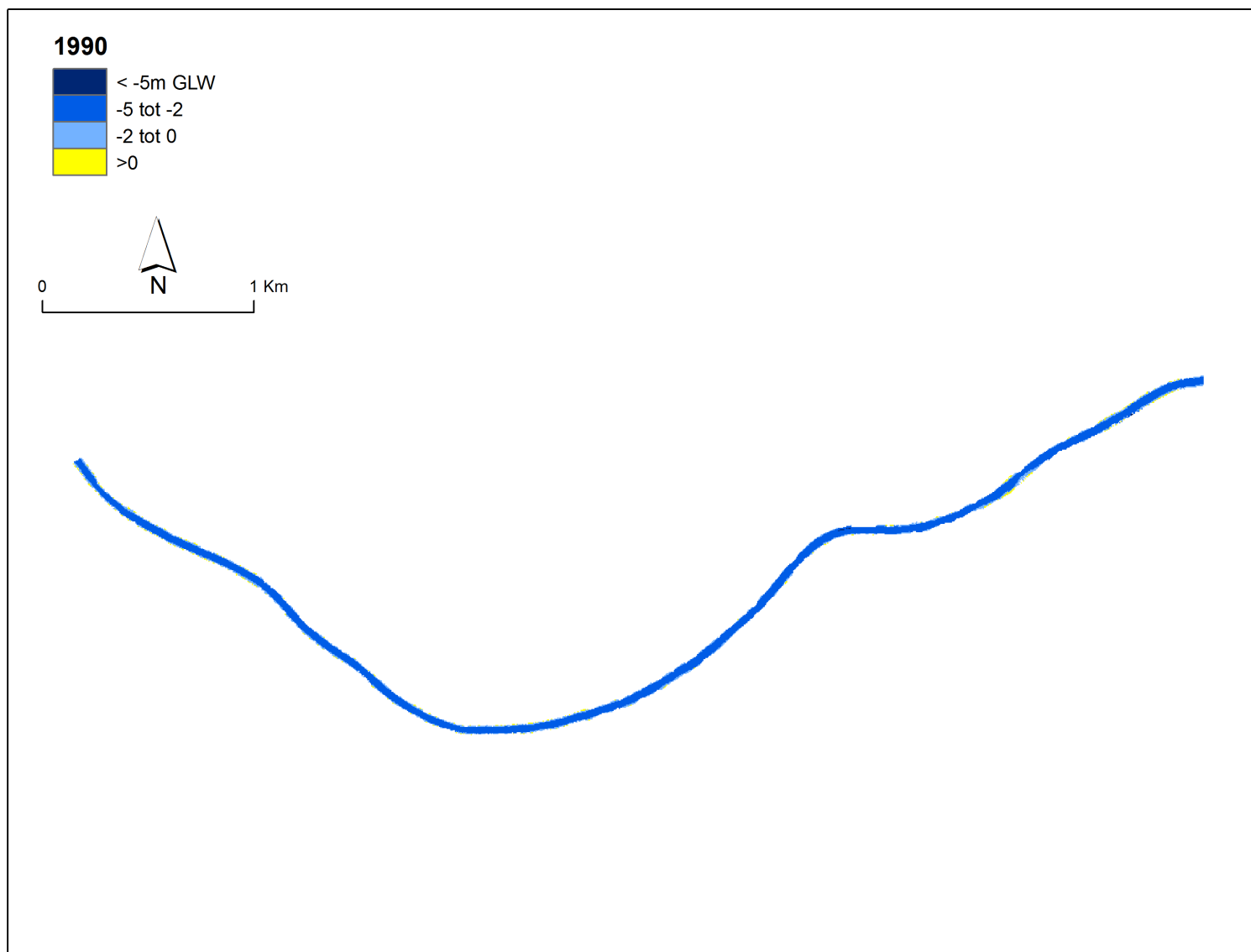
Figuur 138 – 1950 bathymetrie van het segment Wettersen-Melle (Boven-Zeeschelde)



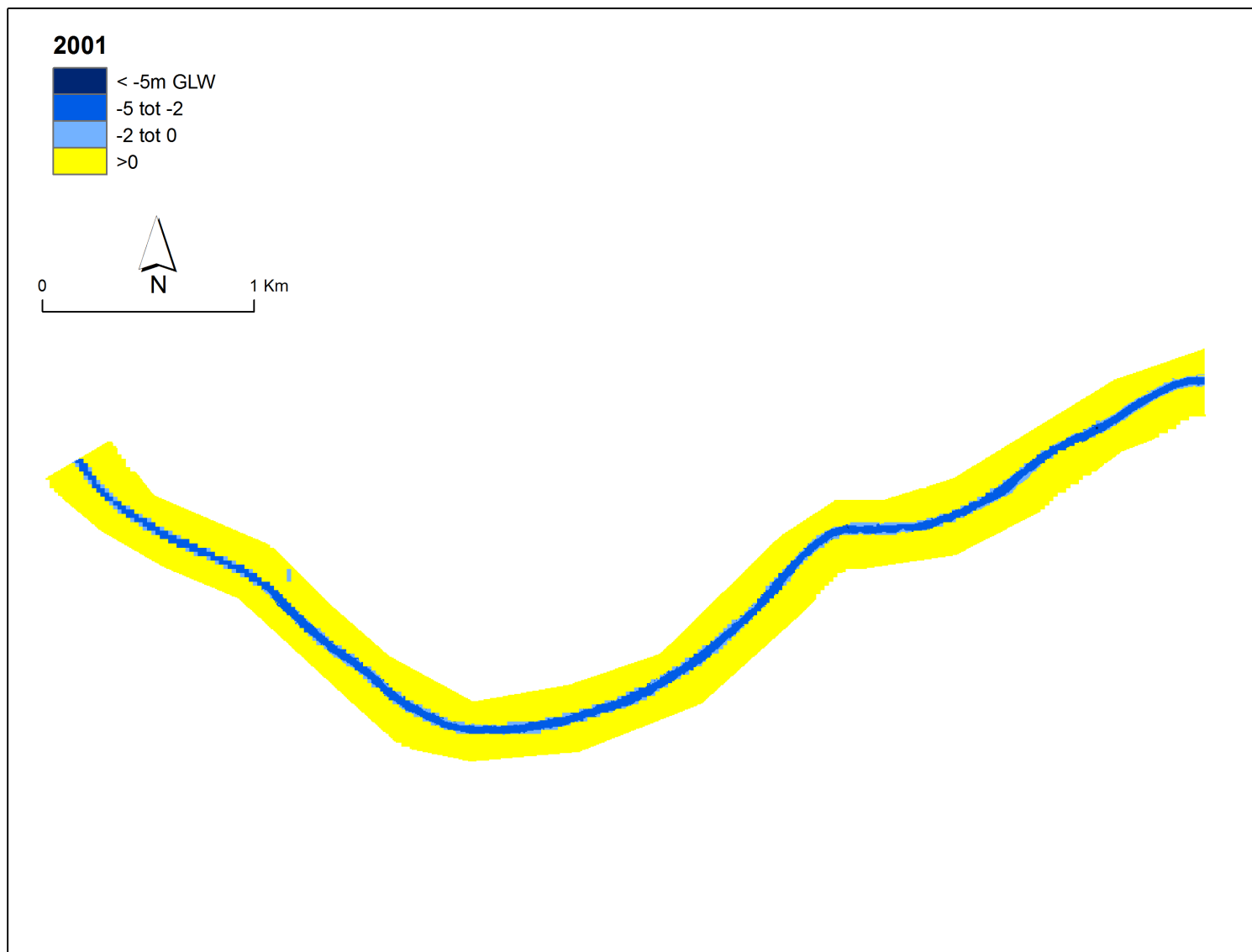
Figuur 139 – 1960 bathymetrie van het segment Wettersen-Melle (Boven-Zeeschelde)



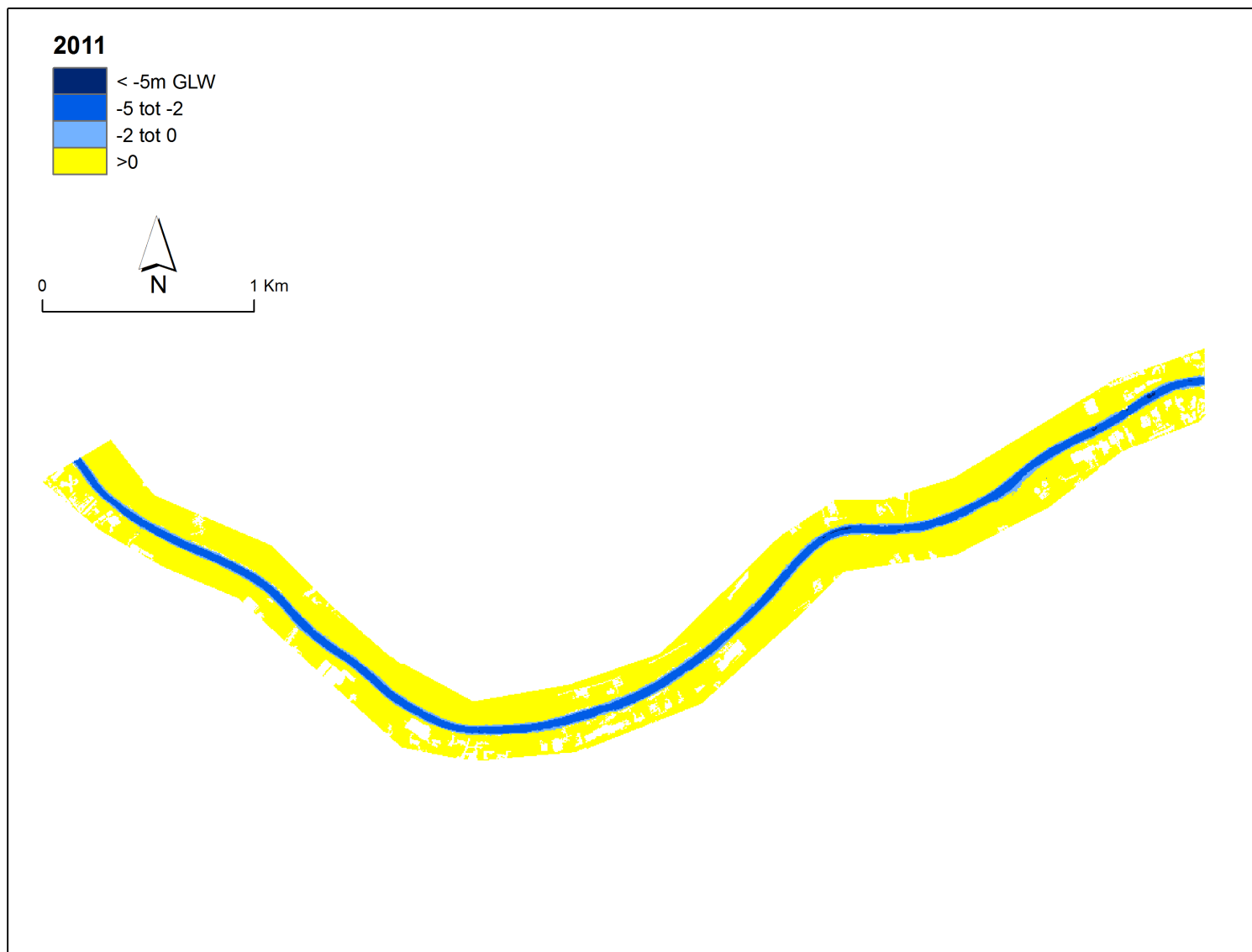
Figuur 140 – 1980 bathymetrie van het segment Wettersen-Melle (Boven-Zeeschelde)



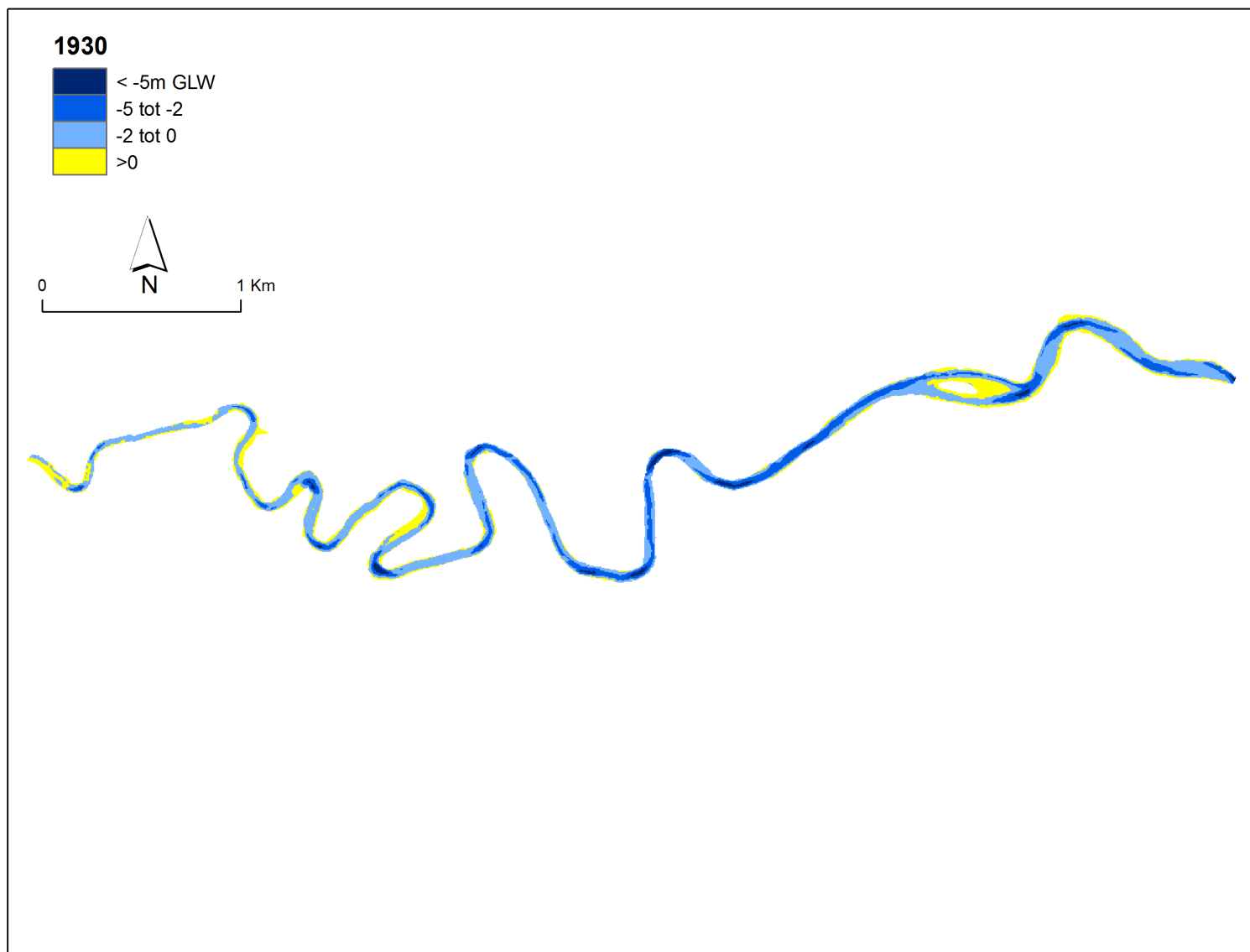
Figuur 141 – 1990 bathymetrie van het segment Wettersen-Melle (Boven-Zeeschelde)



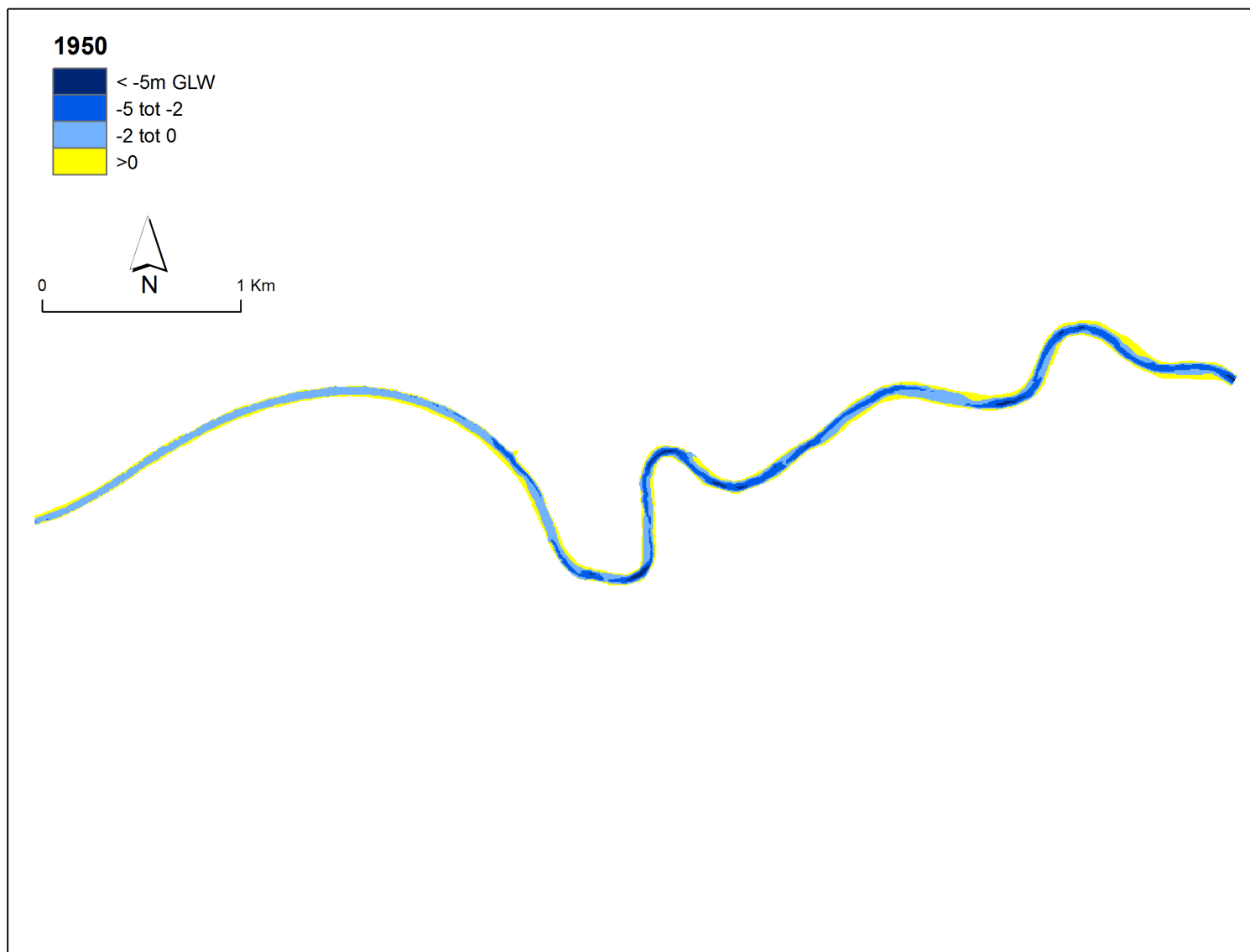
Figuur 142 – 2001 topo-bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)



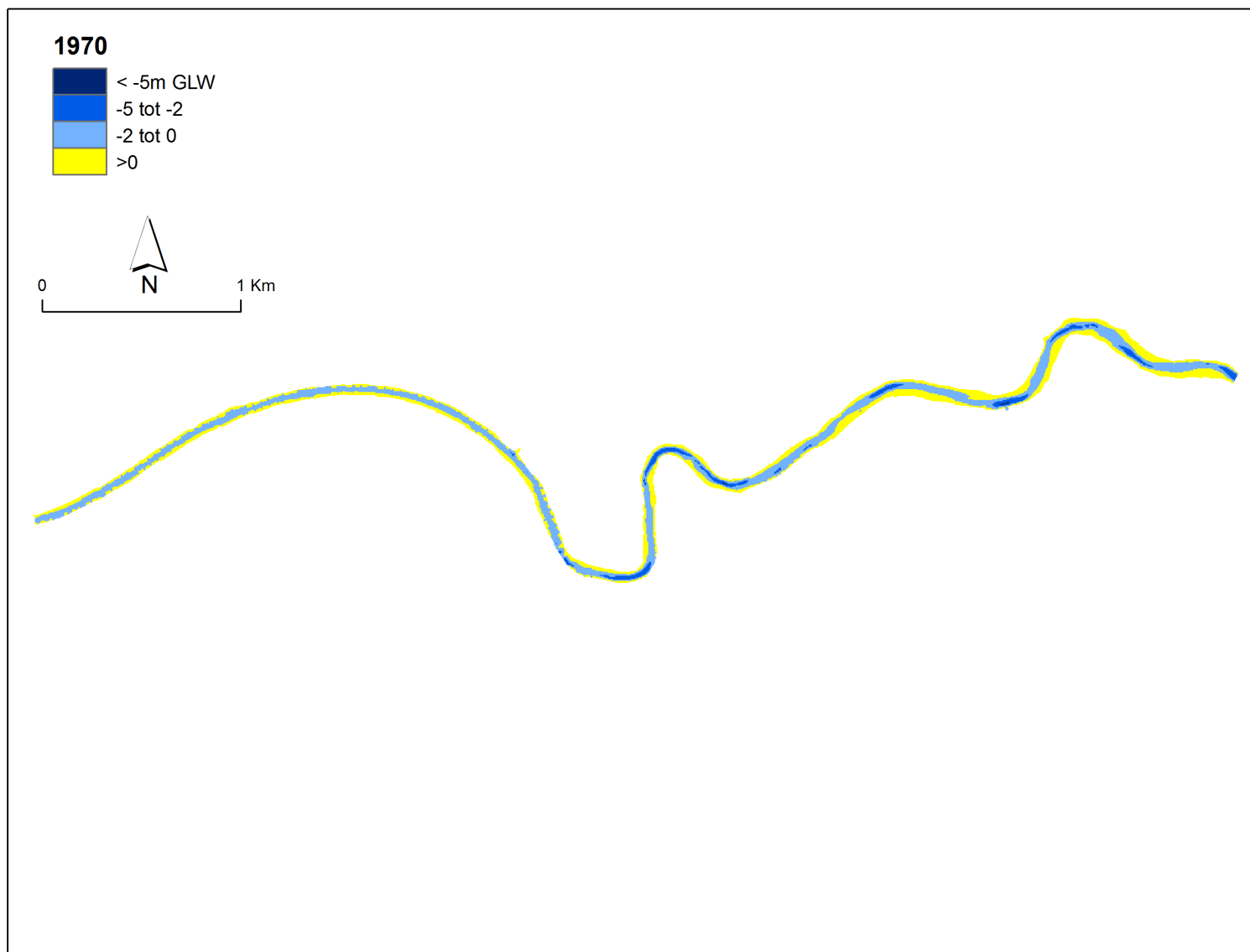
Figuur 143 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)



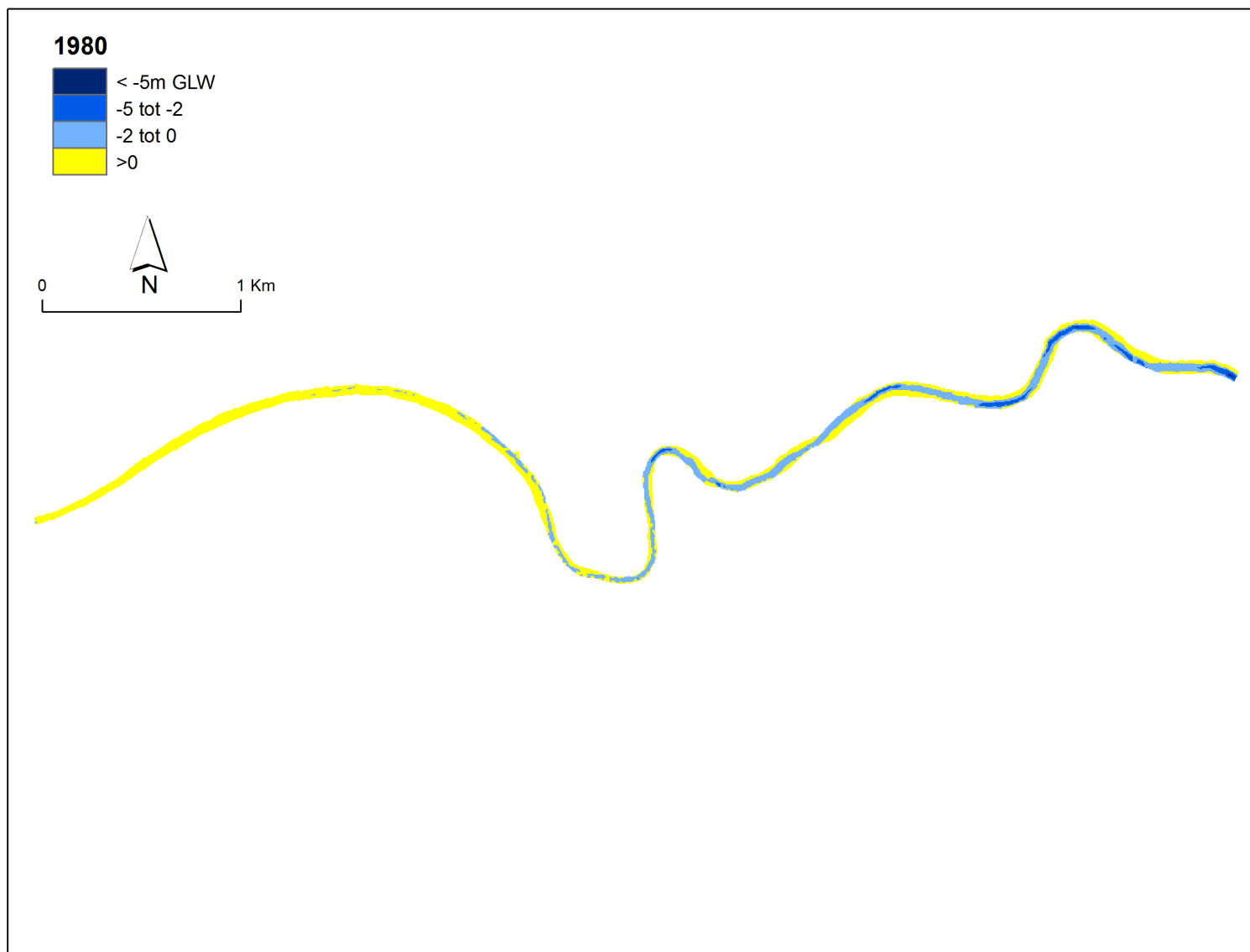
Figuur 144 – 1930 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



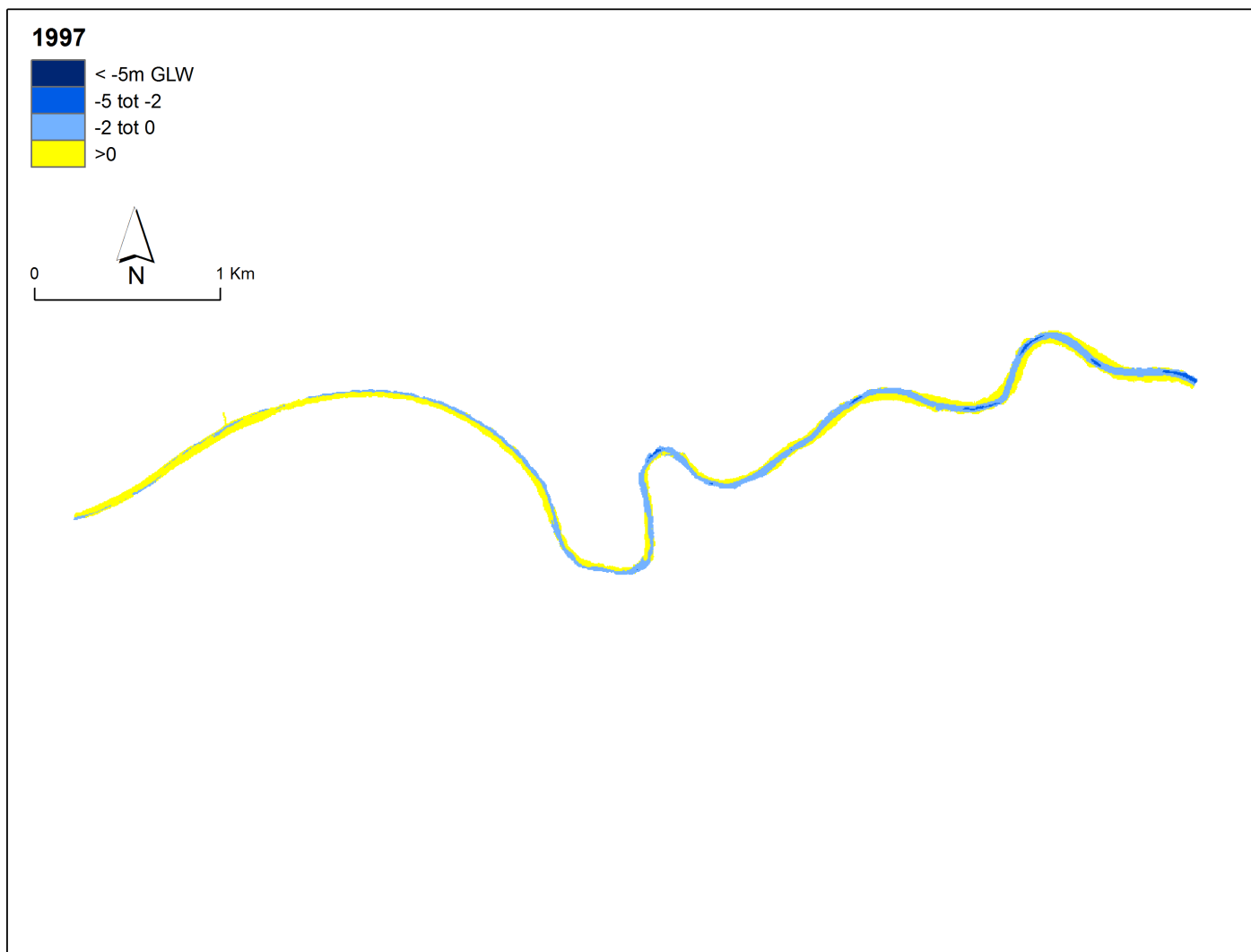
Figuur 145 – 1950 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



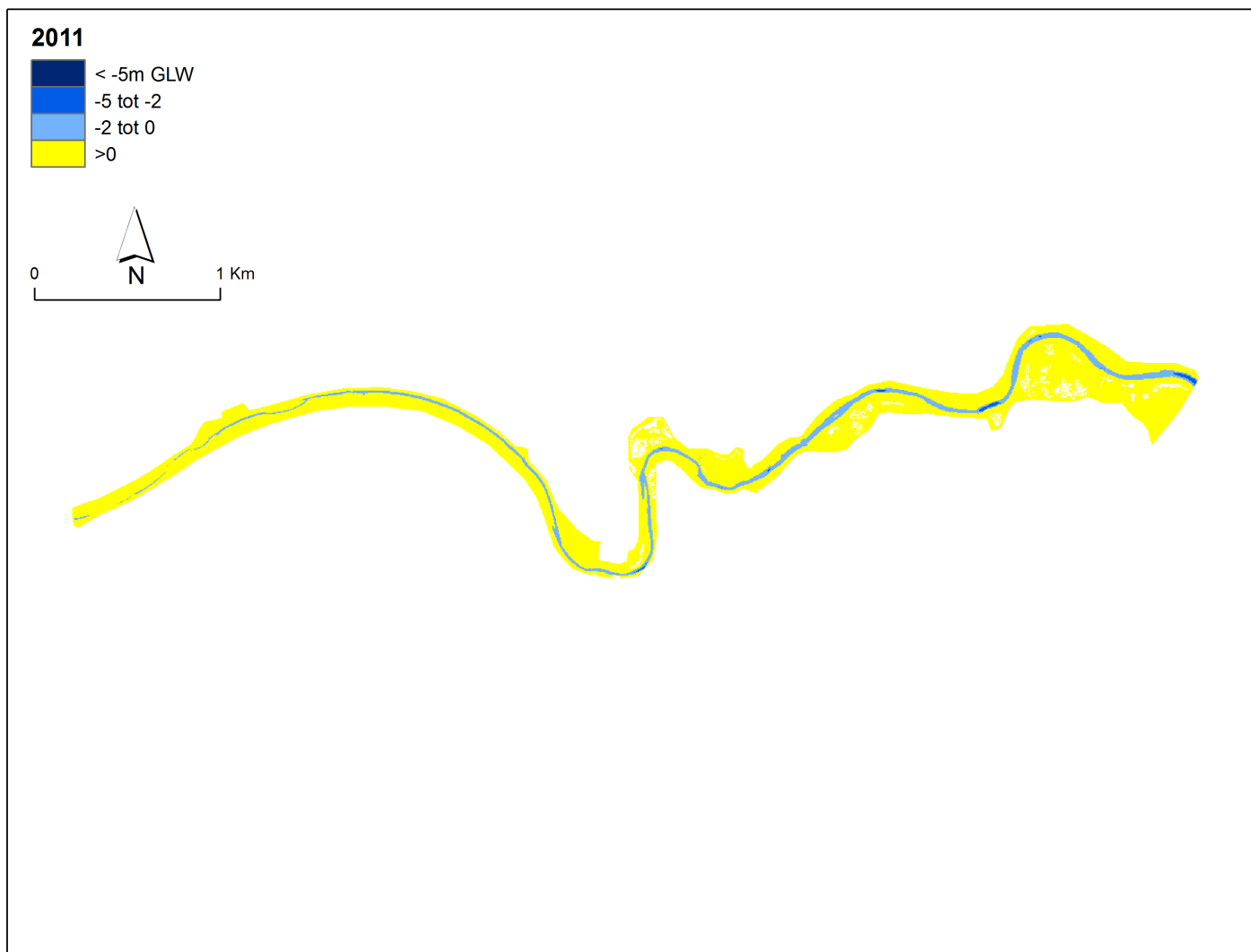
Figuur 146 – 1970 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



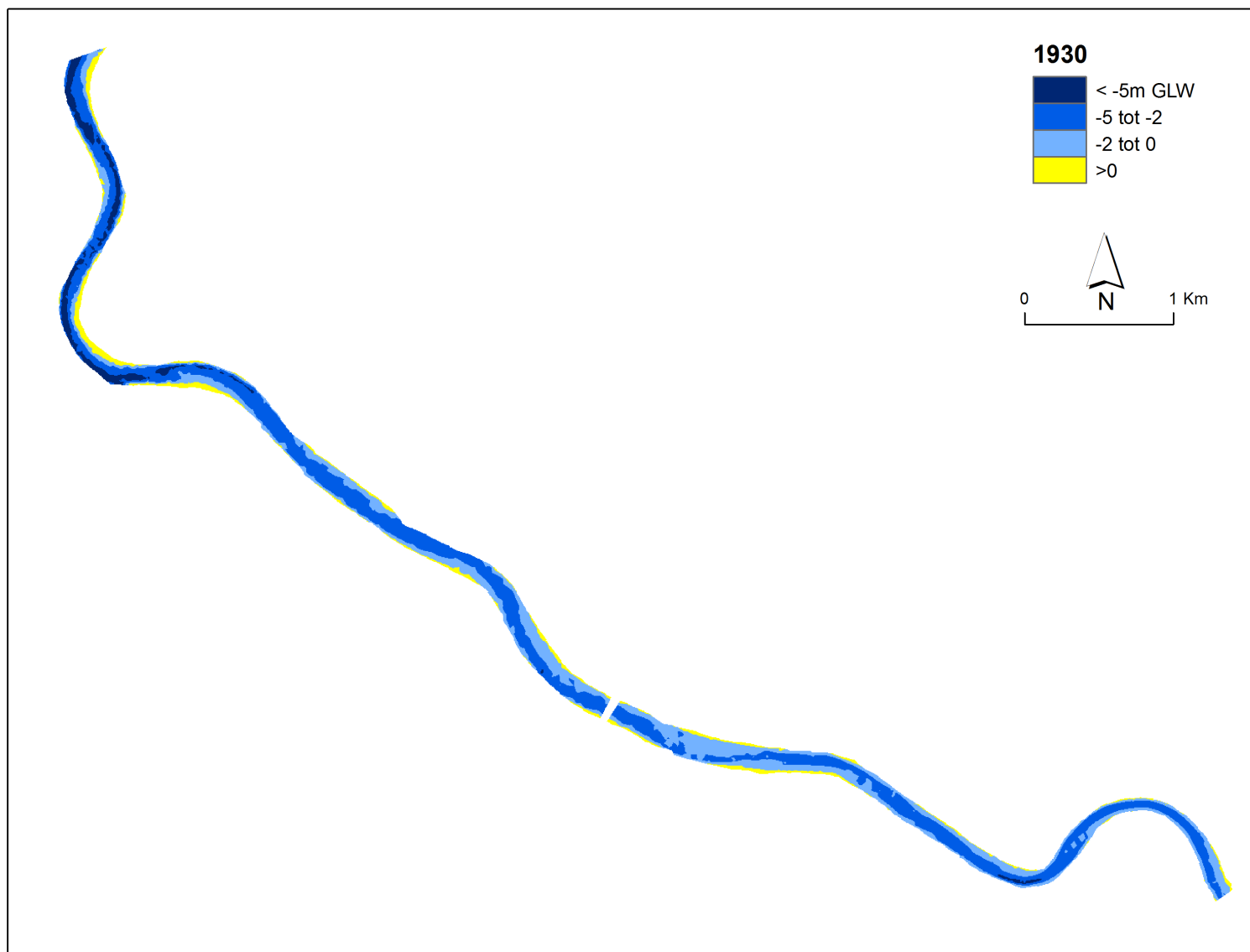
Figuur 147 – 1980 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



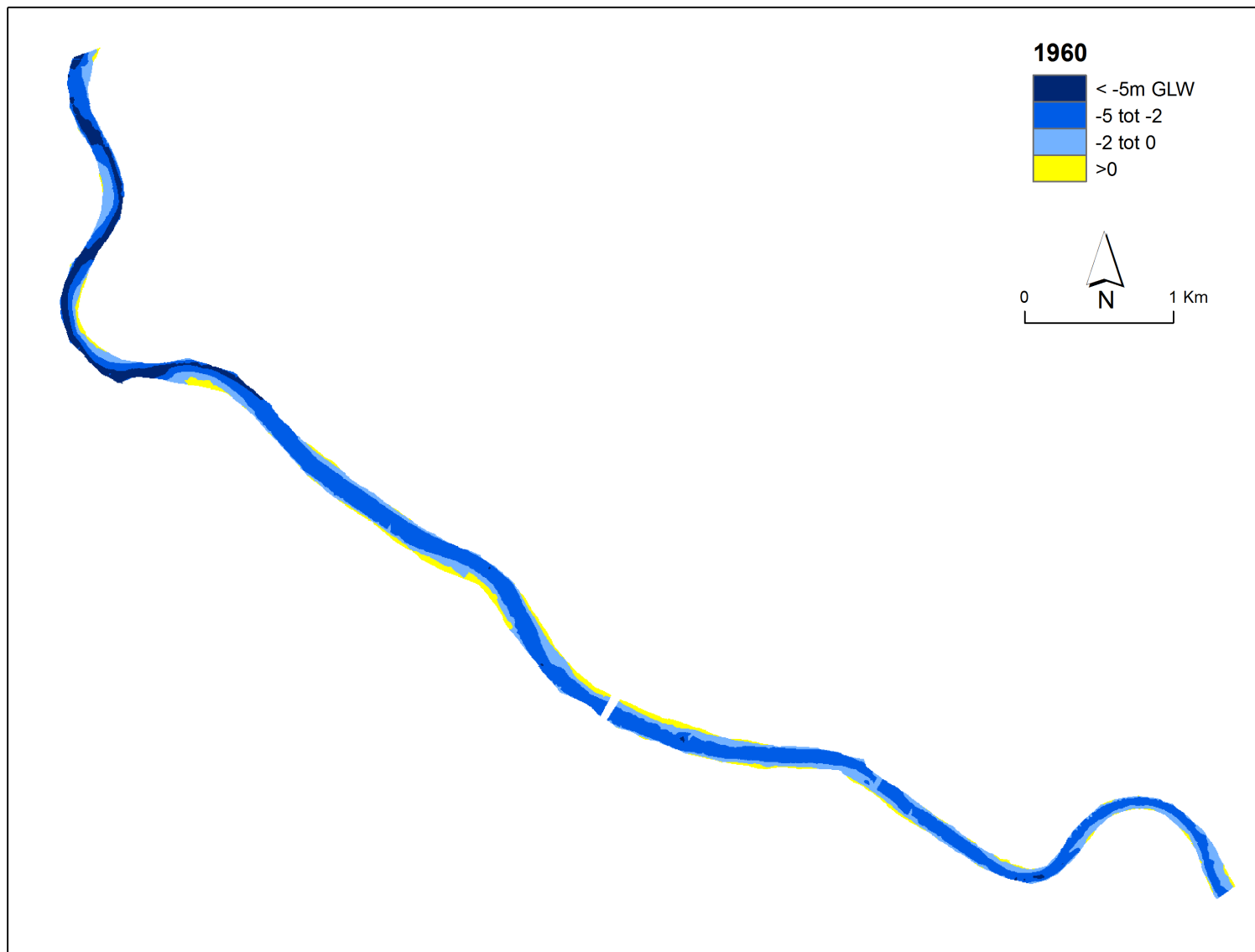
Figuur 148 – 1997 bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



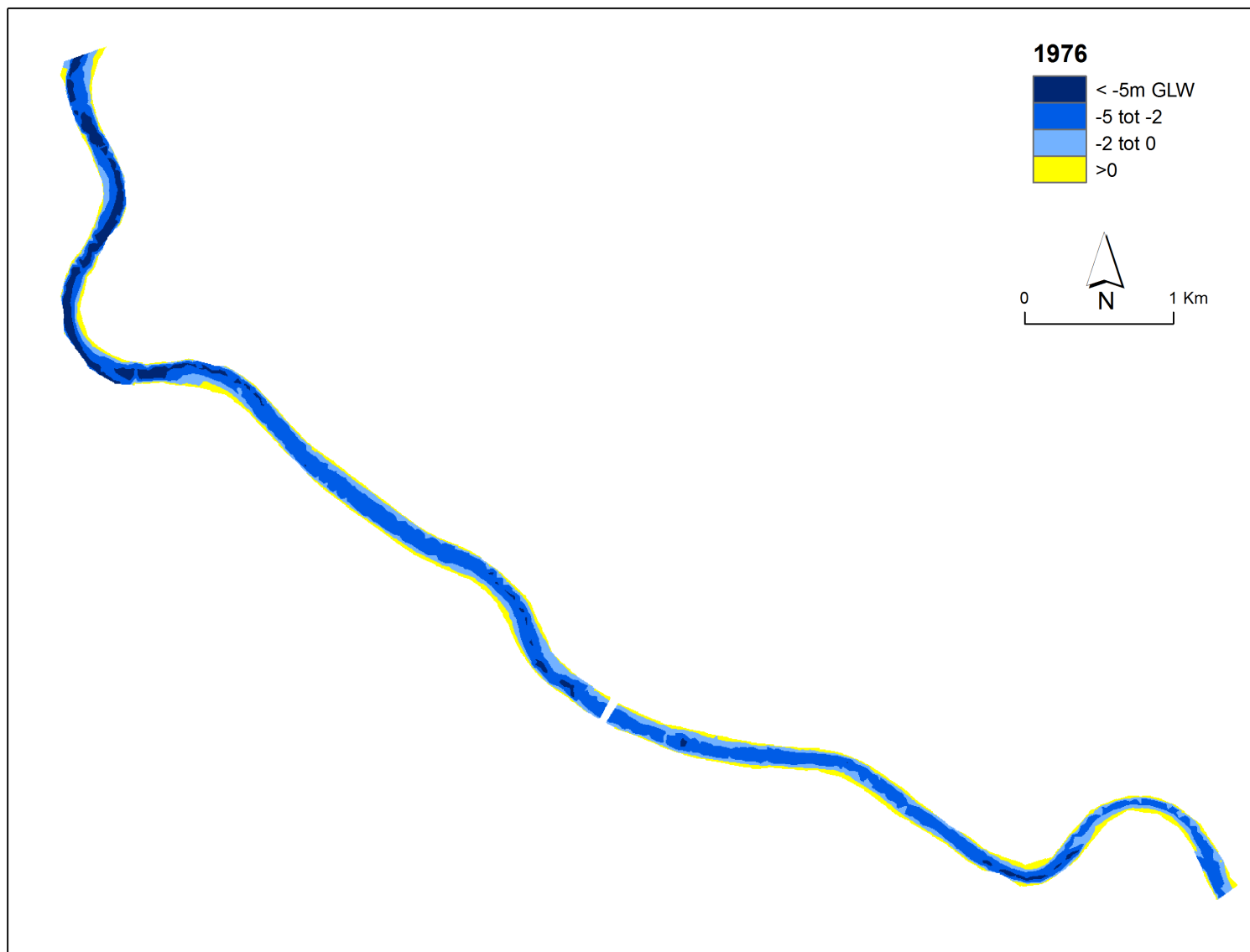
Figuur 149 – 2011 topo-bathymetrie van het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



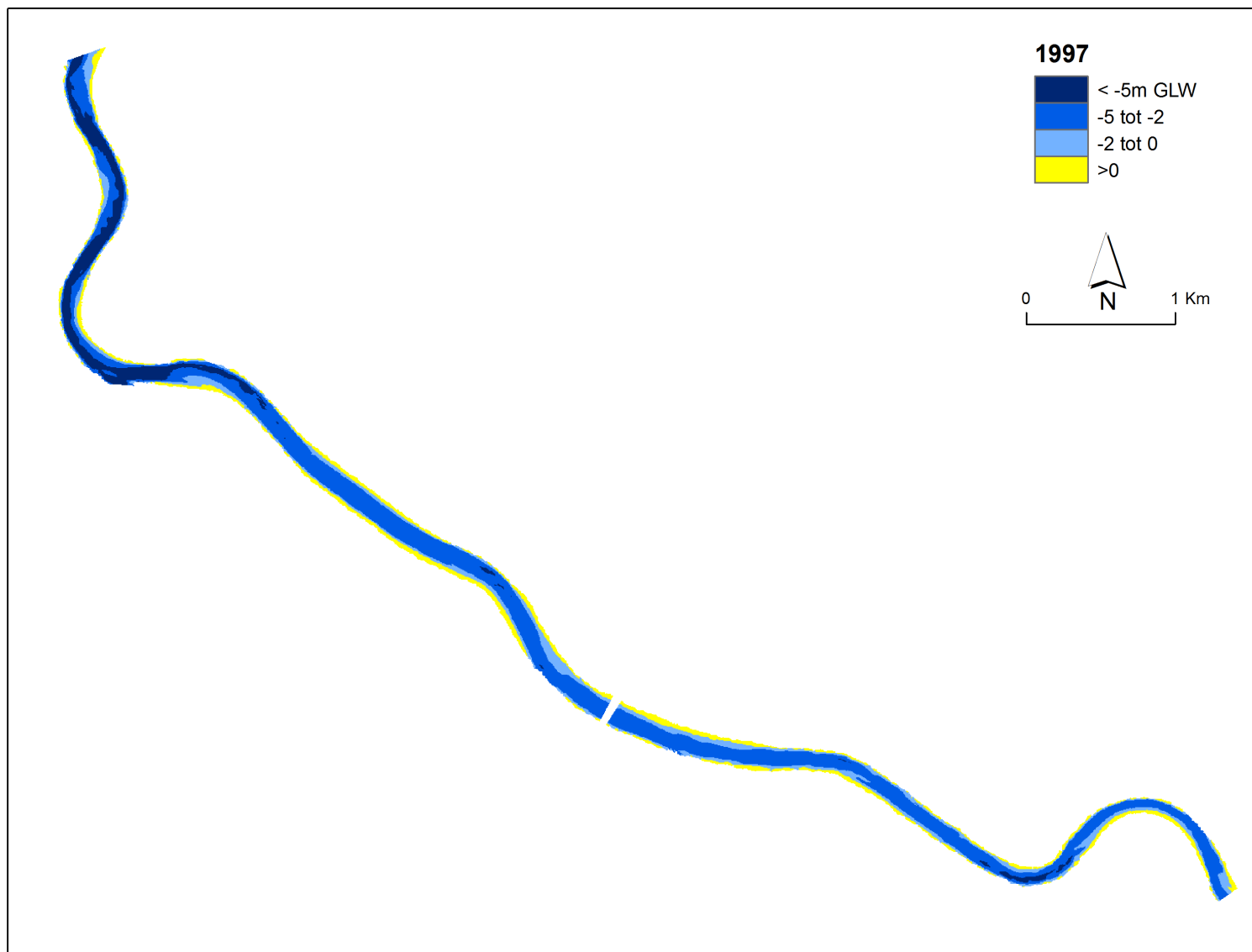
Figuur 150 – 1930 bathymetrie van de Rupel



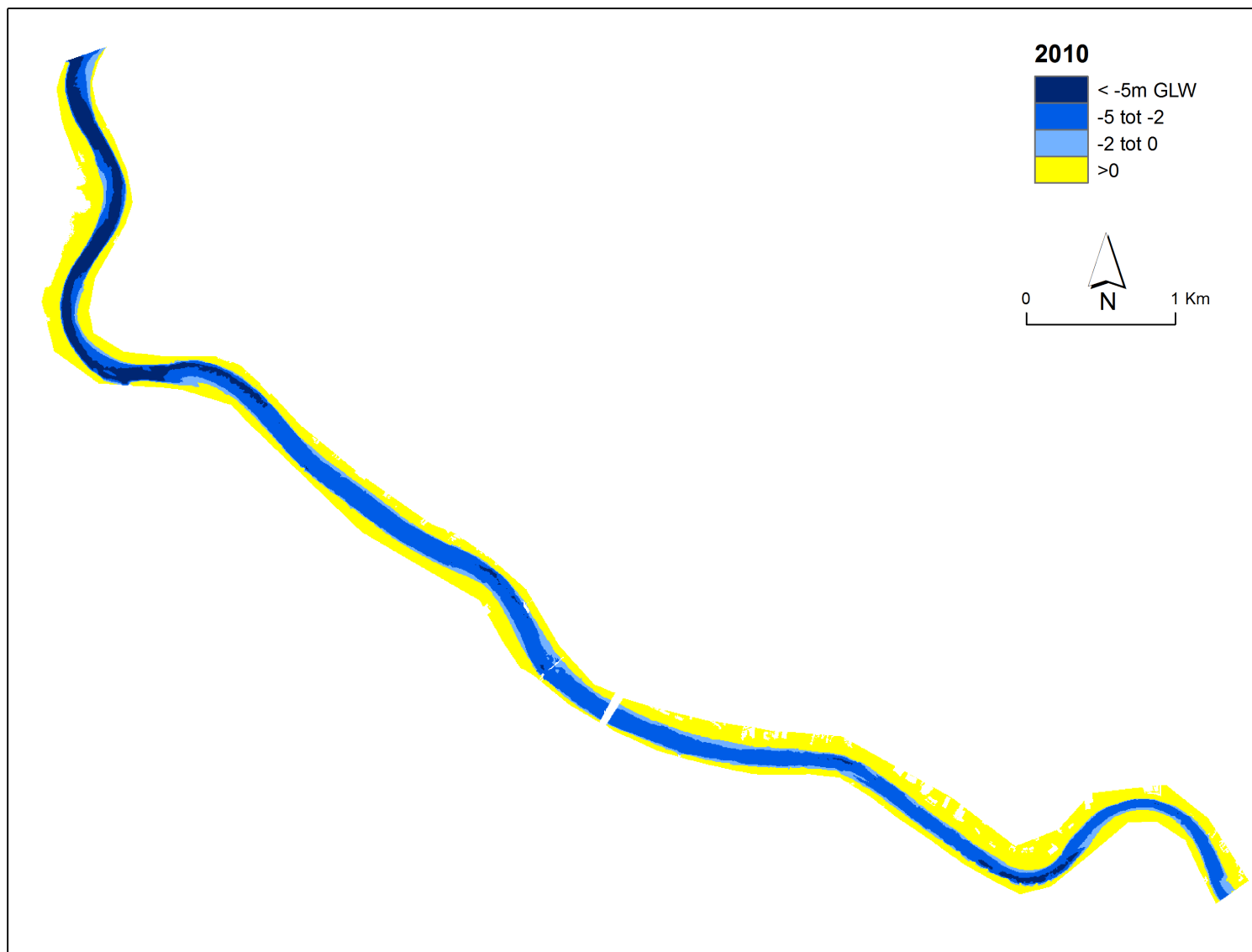
Figuur 151 – 1960 bathymetrie van de Rupel



Figuur 152 – 1976 bathymetrie van de Rupel

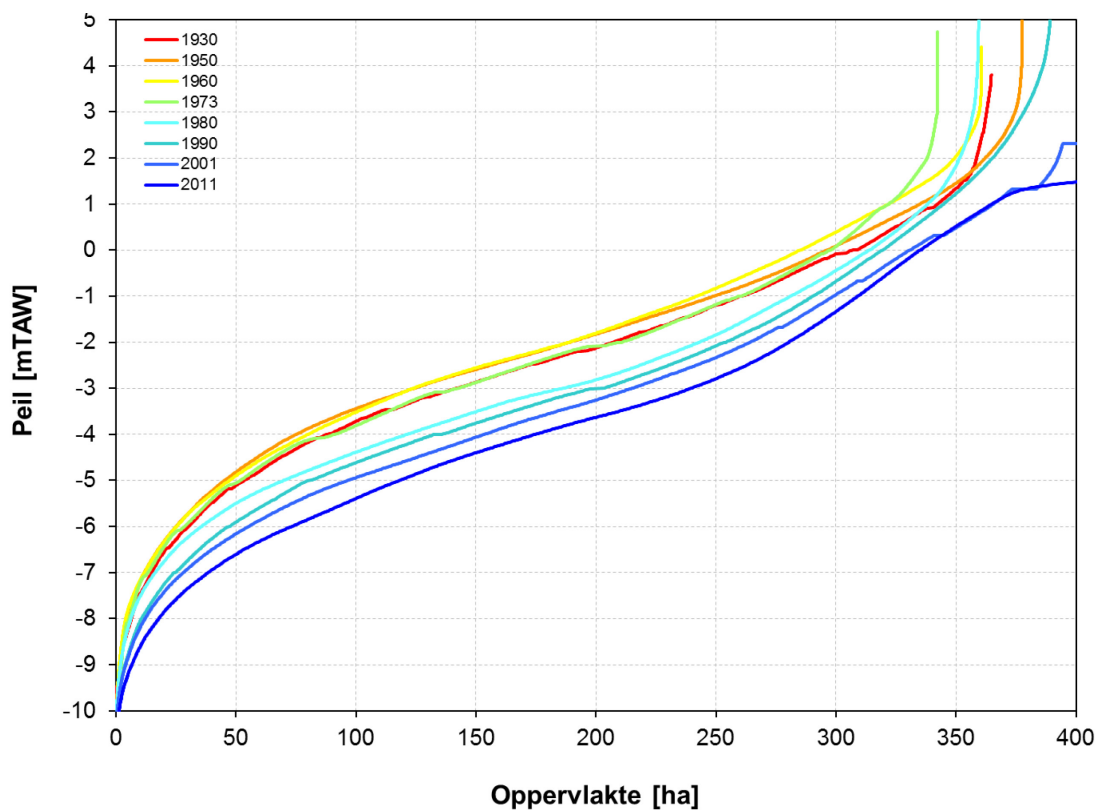


Figuur 153 – 1997 bathymetrie van de Rupel

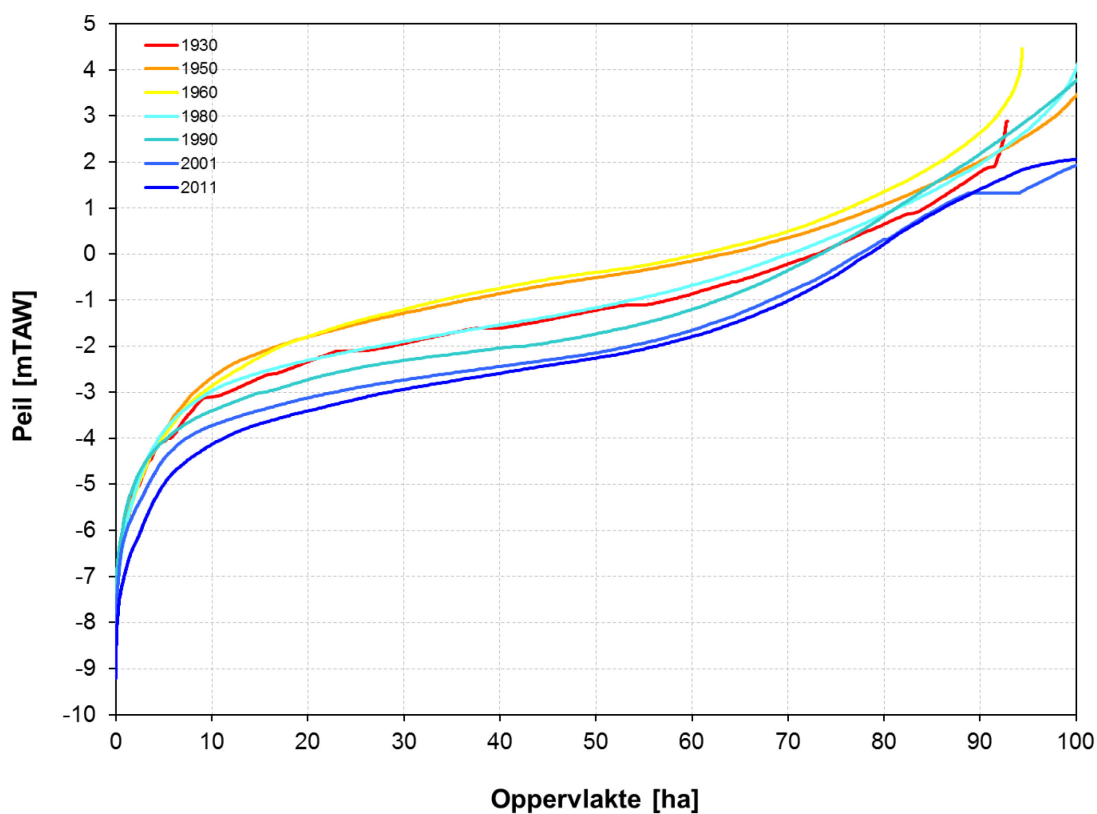


Figuur 154 – 2010 topo-bathymetrie van de Rupel

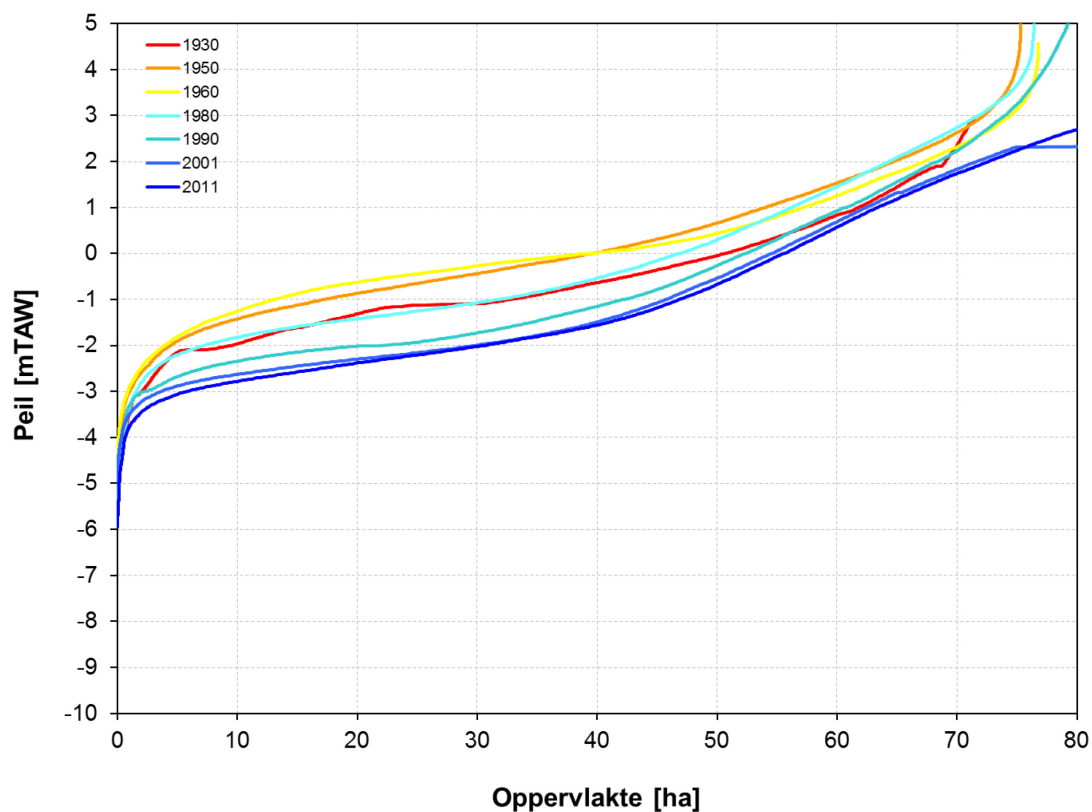
Appendix E – Hypsometrische curves (mTAW)



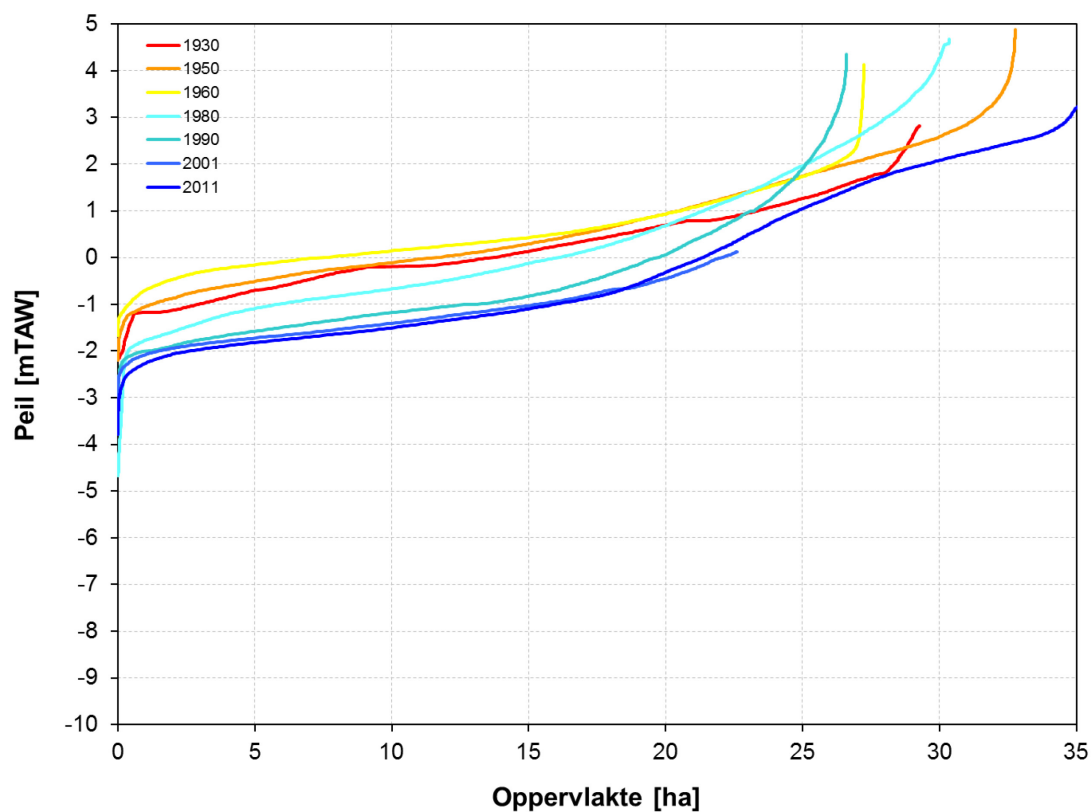
Figuur 155 – Hypsometrische curves voor het segment Temse-Dendermonde (Boven-Zeeschelde)



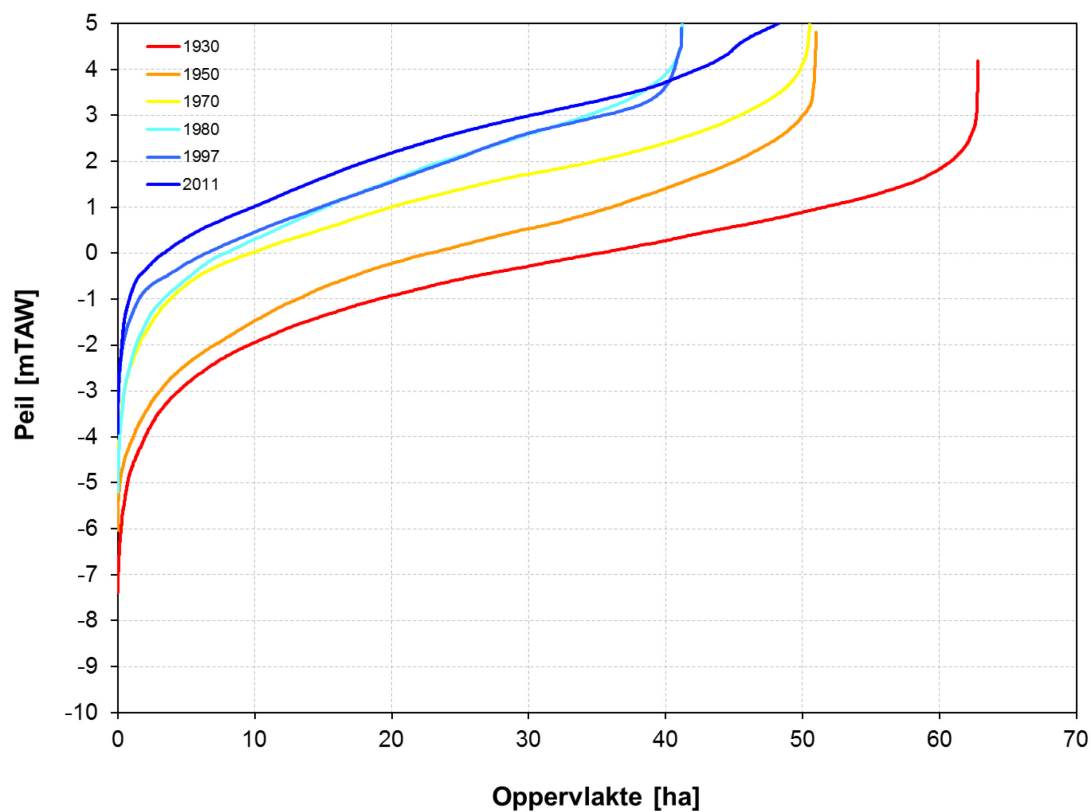
Figuur 156 – Hypsometrische curves voor het segment Dendermonde-Schoonaarde (Boven-Zeeschelde)



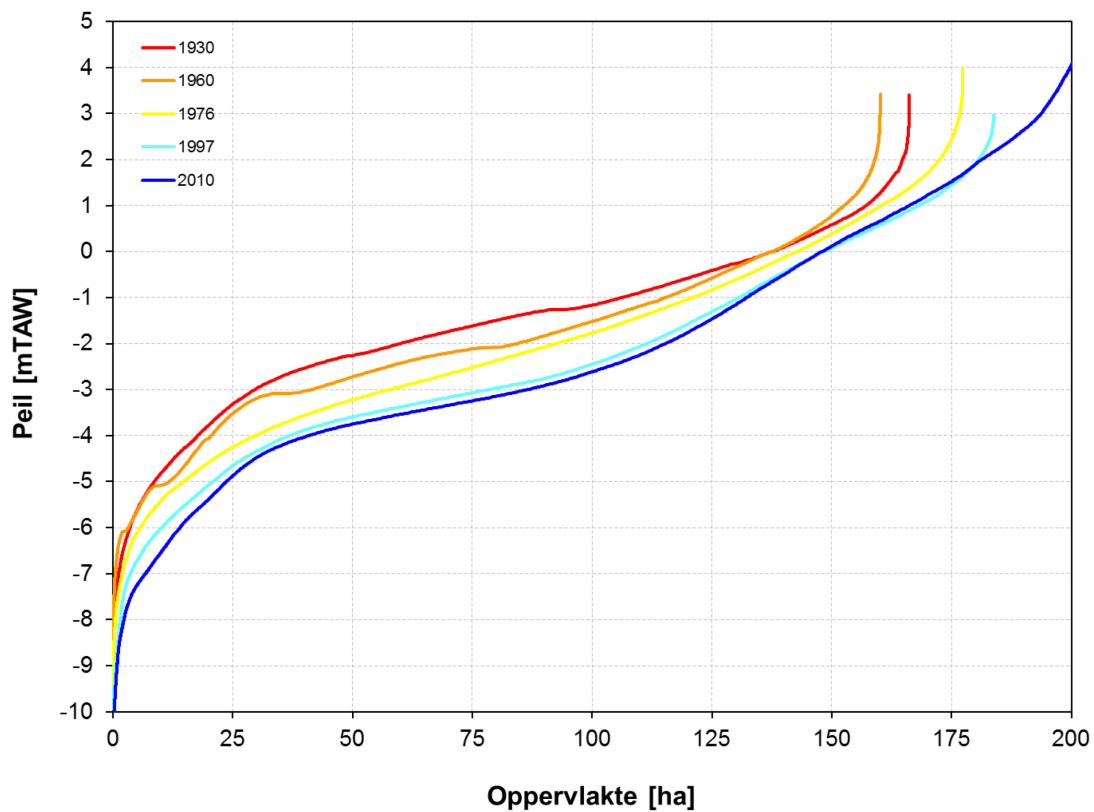
Figuur 157 – Hypsometrische curves voor het segment Schoonaarde-Wetteren (Boven-Zeeschelde)



Figuur 158 – Hypsometrische curves voor het segment Wetteren-Melle (Boven-Zeeschelde)



Figuur 159 – Hypsometrische curves voor het segment Tielrode-Waasmunsterbrug (Durme)



Figuur 160 – Hypsometrische curves voor het segment monding Rupel-Walem (Rupel)



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be