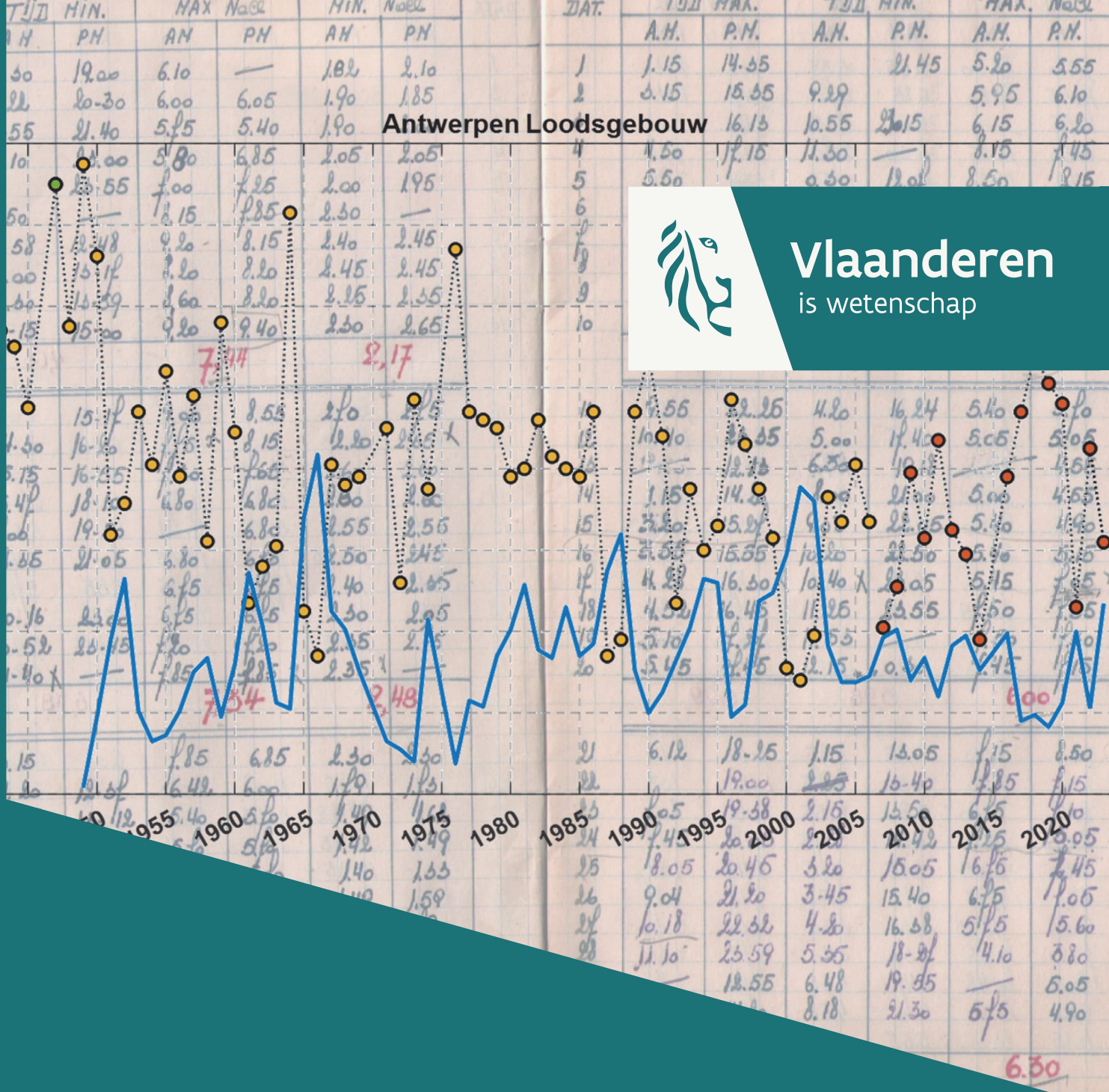




Vlaanderen
is wetenschap



19_081_1
WL rapporten

Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium

Deelrapport 1 – literatuuronderzoek en data-analyse

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium

Deelrapport 1 – literatuuronderzoek en data-analyse

Smolders, S.; Kaptein, S.; Ozkir, S.; Stark, J.

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024
 D/2024/3241/082

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Smolders, S.; Kaptein, S.; Ozkir, S.; Stark, J. (2024). Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium: Deelrapport 1 – literatuuronderzoek en data-analyse. Versie 4.0. WL Rapporten, 19_081_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	Laurens Hermans, afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2024R19_081_1
Keywords (3-5):	Saliniteit, zoutgradiënt, data		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en Sediment > Hydrodynamica > Zouttong > Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	31	Bijlagen (p.):	33
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Kaptein, S.; Smolders, S.
------------	---------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Stark, J.	Getekend door: Jeroen Stark (Signature) Getekend op: 2024-09-03 15:54:03 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Smolders, S.	Getekend door: Sven Smolders (Signatur) Getekend op: 2024-06-23 09:31:48 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2024-06-23 20:57:40 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	--

Abstract

In het kader van de Evaluatie Verdrag Beleid & Beheer 2014-2018 werd door de beheerders een lijst onderzoeksvragen voor toekomstig onderzoek geformuleerd. Deze lijst ligt aan de basis van het onderzoeksprogramma Agenda voor de Toekomst II. Een van de prioritaire topics die daaruit naar voren kwam, was de saliniteit in het Schelde estuarium. Dit topic wordt door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) verder uitgewerkt en voorliggend rapport is daarin deelrapport 1. In dit rapport wordt een literatuurstudie uitgevoerd en wordt een antwoord op belangrijke onderzoeksvragen gezocht in een data-analyse op gemeten waarden voor saliniteit in het Schelde estuarium van vroeger en nu.

Een eerste belangrijke onderzoeksvraag is of er een verschuiving merkbaar is van de saliniteitsgradiënt doorheen de jaren? Op basis van de gemeten saliniteiten in het Schelde-estuarium en gezien het historisch perspectief dat geschetst werd, is er niet meteen een zichtbare verschuiving van de saliniteitsgradiënt in de afgelopen 75 jaren. De variatie in de data is echter zo groot en zo afhankelijk van vele invloedsfactoren, waarvan de bovenafvoer ongetwijfeld de grootste is, dat een trendanalyse op de data zeer moeilijk blijkt. De hoogst gemeten saliniteiten gemeten te Antwerpen Loodsgebouw dateren uit 1947 en 1949 en dat geeft ook een vertekend beeld, want via numerieke modellering kan worden aangetoond dat er wel degelijk een verschuiving of verdere indringing plaatsvindt (zie deelrapport 2: Smolders en Kaptein, 2024). De omstandigheden zijn de laatste jaren echter nooit zo erg geweest dat de maximale saliniteitswaarden in Antwerpen zoals in 1947 en 1949 bereikt of overtroffen werden.

Verder geeft in dit rapport een analytisch model een duidelijke relatie tussen hogere zoutindringing en een toegenomen dwarssectie van het estuarium. Deze dwarssectie is de laatste decennia op tal van plaatsen wel toegenomen, waardoor het zout verder kan indringen.

Vervolgens werd in dit rapport de relatie tussen bovenafvoer en zoutindringing bekeken. Opwaarts zouttransport door dispersie en menging wordt tegengewerkt door advectief transport afwaarts door het bovendebiet. Een eenduidige relatie tussen zoutindringing en zoetwaterdebiet wordt in de data niet gevonden. De reden is dat zoutindringing een trager proces is dan zout-uitspoeling, waardoor geen eenduidige relatie opgemaakt kan worden tussen het ogenblikkelijk voorafgaande debiet en de zoutindringing. Verder wordt een eventuele relatie verstoord door tal van andere omgevingsfactoren zoals wind, golven en getijfase. Via scenario analyse met een 3D numeriek model, bekeken in deelrapport 2, is deze relatie er duidelijk wel. Voorliggend rapport geeft enkele grootteordes om voor bepaalde locaties het zout volledig uit te spoelen. Hoe verder afwaarts, hoe hoger dit debiet zal moeten zijn.

In het teken van klimaatverandering kan zeespiegelstijging beschouwd worden als een verruiming van het estuarium, i.e. de bodem blijft hetzelfde, maar het waterpeil stijgt. In dat geval zal er ook een hoger bovendebiet nodig zijn om het zout terug te dringen en kan er gesproken worden van een verschuiving van de zoutgradiënt.

Tenslotte geeft het voorgestelde analytisch model de actoren weer die de grootste invloed hebben op de zoutindringing. Zoutindringing is een traag proces. Er zijn weken tot maanden nodig om het zout na uitspoeling weer ver opwaarts te laten indringen. Het bovendebiet is de belangrijkste factor. Datzelfde geldt voor de geometrie van het estuarium. Bij verdere verruiming (of zeespiegelstijging) zal er een hoger bovendebiet nodig zijn om de zoutgradiënt tot op dezelfde plaats terug te dringen. Tenslotte is er nog de dispersiecoëfficiënt of de mate waarin het zout via horizontale menging opwaarts kan migreren. Hoe lager deze coëfficiënt hoe minder ver het zout zal indringen.

Inhoudstafel

Abstract	IV
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Onderzoeksvragen.....	1
1.1 Inleiding.....	1
1.2 Onderzoeksvragen	1
1.3 Opbouw van dit rapport.....	1
2 Locaties, afstanden, tijd en referentievlakken	2
2.1 Locaties en afstanden in het Schelde estuarium	2
2.2 Tijdsaanduiding in dit rapport.....	2
2.3 Verticaal referentievlak.....	2
3 Definities, parameters, formules en eenheden voor zout	6
3.1 Saliniteit	6
3.2 Chloriniteit	7
3.3 Chlorositeit.....	7
3.4 Chloorgehalte.....	8
3.5 Praktische Saliniteits-Schaal.....	8
3.6 Absolute Saliniteit	10
3.7 Saliniteit en conductiviteit in het Schelde-estuarium	11
4 Zouttransport in estuaria	12
4.1 Factoren die menging en zouttransport beïnvloeden in estuaria	12
4.1.1 Getij en geometrie van het estuarium.....	12
4.1.2 Zoetwaterdebiet of bovenafvoer	12
4.1.3 Meteorologie	13
4.1.4 Coriolis kracht	13
4.2 Analytische modellen.....	13
4.2.1 Analytisch model Cai et al. (2015)	14
4.3 Complexe modellen	15
5 Data analyse Schelde-estuarium	16
5.1 Saliniteitsgradiënt	16
5.2 Invloed bovendebiet	19

5.3	Historisch perspectief	23
5.3.1	Neerslag	23
5.3.2	Historische zoutindringing	25
6	Conclusie.....	27
6.1	Conclusies.....	27
6.1.1	Verschuiving saliniteitsgradiënt doorheen de jaren.....	27
6.1.2	Relatie bovenafvoer en zoutindringing.....	27
6.1.3	Zoutindringing tegengaan.....	28
6.1.4	Zeespiegelstijging faciliteert zoutindring.....	28
7	Referenties	29
7.1	Literatuur	29
7.2	Data	31
Bijlage 1	Titratie van een zoutoplossing met zilvernitraat.....	B1
Bijlage 2	Effect van de atoommassa op de chloriniteit.....	B3
Bijlage 3	Referentie Samenstelling zeewater.....	B5
Bijlage 4	Overzicht zoutdata WL archief	B6
	Metingen Schultz 1916 – 1918	B6
	1943 13-uursmetingen regio Antwerpen	B8
	1944 13-uursmetingen regio Antwerpen	B12
	1945.....	B16
	1946 – 1947 - 1948.....	B16
	1949.....	B17
	1950 - 1951.....	B18
	1952-1975.....	B31
Bijlage 5	Debieten/waterstanden Gentbrugge	B33

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Lijst met gekende meetlocaties en hun afstand tot de monding	5
Tabel 2 – Parameter waarden voor UNESCO formule (IOC, SCOR and IAPSO, 2010)	10
Tabel 3 – Eigenschappen zilvernitraatoplossing.....	B1
Tabel 4 – Referentie samenstelling zeewater met $S_p=35,000$ en $S_R=35,16504$ g/kg	B5
Tabel 5 – Overzicht beschikbare data langsverloop eerste deel 1950	B19
Tabel 6 – Overzicht beschikbare data langsverloop tweede deel 1950.....	B20
Tabel 7 – Overzicht beschikbare data langsverloop laatste deel 1950 en 1951	B21
Tabel 8 – Overzicht zoutmetingen 1949 – 1972 per locatie.....	B31

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtskaart met meetlocaties en plaatsnamen.....	3
Figuur 2 – Detailkaart regio Antwerpen met meetlocaties en plaatsnamen	4
Figuur 3 – Voorbeeld van zoutindringing tijdens vloed. Voorbeeld komt uit een numeriek modelscenario.	17
Figuur 4 – Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium bij kentering hoog- en laagwater (KHW en KLW) bij maximale indringing in 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 en 2023.	18
Figuur 5 – Saliniteitsamplitude in het Schelde-estuarium bij maximum saliniteit per jaar voor 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 en 2023	18
Figuur 6 – geometrische kenmerken van de Zeeschelde bepaald uit GIS analyse bathymetrie 2013: A geeft de afname van de dwarssectie weer richting opwaarts; B geeft de maximale diepte per dwarssectie weer; C geeft de breedte van de dwarssectie weer en in paneel D worden de volumes van de verschillende secties (genummerd in paneel C) weergegeven. De secties hebben niet steeds dezelfde lengte wat zijn invloed heeft in de volumebepaling.	20
Figuur 7 – Saliniteit meetstation Hemiksem vanaf jan 2019 tot maart 2020 en debiet te Schelle.....	21
Figuur 8 – Saliniteit meetpaal Oosterweel (oppervlakte) vanaf jan 2019 tot maart 2020 en debiet te Schelle.	21
Figuur 9 – Maximale gesimuleerde afstand tot waar een saliniteitswaarde van 1 kan teruggevonden worden in het estuarium in functie van het totale constante bovendebiet.	22
Figuur 10 – Overzicht van de jaarlijkse neerslag en het aantal regendagen te Ukkel van 1880 tot 2023 (brondata van KMI).....	24
Figuur 11 – Inschatting van de lengte en het aantal droogteperiodes per jaar (brondata van KMI)	24
Figuur 12 – jaarlijks maximum zoutwaarde gemeten ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw en jaarlijks gemiddeld debiet te Schelle.	25
Figuur 13 – gemeten en gesimuleerde saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw in 1949	26
Figuur 15 – Saliniteitsmetingen ter hoogte van Oosterweel door Schultz in 1917.....	B6
Figuur 16 – Saliniteitsmetingen ter hoogte van Lillo door Schultz in 1917.....	B7
Figuur 17 – 18-uursmeting ter hoogte van Lillo te 26-27 oktober 1918 door Schultz	B7
Figuur 18 – Saliniteitsmetingen te Lillo in 1918 door Schultz	B8
Figuur 19 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 20 mei 1943	B9
Figuur 20 - 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 1 juni 1943.....	B9
Figuur 21 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 11 juni 1943	B10
Figuur 22 – 13-uursmeting saliniteit te Palingplaat, 29 juni 1943.....	B10
Figuur 23 – 13-uursmeting saliniteit langs de Scheldekaai ter hoogte van Hangar 10, 11 augustus 1943... ..	B11
Figuur 24 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 25 augustus 1943	B11
Figuur 25 – Saliniteitsmetingen bij KHW te Antwerpen Loodsgebouw, 1943.	B12
Figuur 26 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 1 februari 1944	B13
Figuur 27 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 8 maart 1944	B13

Figuur 28 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 13 april 1944.....	B14
Figuur 29 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 10 oktober 1944	B14
Figuur 30 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 26 oktober 1944	B15
Figuur 31 – Saliniteitsmetingen bij KHW te Antwerpen Loodsgebouw, 1944	B15
Figuur 32 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw (Margueriedok), Kalloo, Hoboken en Temse, 1945. Hoog- en laagwaterstanden te Antwerpen weergegeven.	B16
Figuur 33 – Saliniteitsmetingen te Schelle (Inter-Escaut) in 1946,1947, 1948.....	B17
Figuur 34 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw, 1949.	B17
Figuur 35 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw in 1950. Metingen met resistiviteitsmeter gecontroleerd door waterstalen waaruit via titratie de saliniteit bepaald werd.....	B18
Figuur 36 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw in 1951.	B18
Figuur 37 – Langsverlopen chlorositeit, januari 1950.	B22
Figuur 38 – Langsverlopen chlorositeit, februari 1950.	B22
Figuur 39 – Langsverlopen chlorositeit, maart 1950.....	B23
Figuur 40 – Langsverlopen chlorositeit, april 1950.	B23
Figuur 41 – Langsverlopen chlorositeit, mei-juni 1950.	B24
Figuur 42 – Langsverlopen chlorositeit, juni 1950.	B24
Figuur 43 – Langsverlopen chlorositeit, juli 1950.....	B25
Figuur 44 – Langsverlopen chlorositeit, augustus 1950.....	B25
Figuur 45 – Langsverlopen chlorositeit, augustus - september 1950.	B26
Figuur 46 – Langsverlopen chlorositeit, september-oktober 1950.....	B26
Figuur 47 – Langsverlopen chlorositeit, oktober-november 1950.....	B27
Figuur 48 – Langsverlopen chlorositeit, december 1950.	B27
Figuur 49 – Overzicht langsverloop chlorositeit in 1950: Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Bath, Doel, Liefkenshoek, St. Marie, Antwerpen Loodsgebouw, Hemiksem, Hingene.	B28
Figuur 50 – Overzicht langsverloop chlorositeit in 1950: Antwerpen Loodsgebouw, Hemiksem, Hingene, Temse, Sint-Amands, Dendermonde, Schoonaarde, Gentbrugge.	B28
Figuur 51 – Langsverlopen chlorositeit, januari-februari 1951.....	B29
Figuur 52 – Langsverlopen chlorositeit, februari-maart-april1951.....	B29
Figuur 53 – Langsverlopen chlorositeit, april-mei-juni 1951.....	B30
Figuur 54 – Langsverlopen chlorositeit, juni-juli 1951.	B30
Figuur 55 – Overzicht langsverloop chlorositeit in 1950: Doel, Liefkenshoek, St. Marie, Antwerpen Loodsgebouw, Hemiksem, Hingene, Temse, Sint-Amands, Dendermonde, Schoonaarde, Gentbrugge.....	B31

1 Onderzoeksvragen

1.1 Inleiding

In het kader van de Evaluatie Verdrag Beleid & Beheer 2014-2018 werd door de beheerders een lijst onderzoeksvragen voor toekomstig onderzoek geformuleerd. Deze lijst ligt aan de basis van het onderzoeksprogramma Agenda voor de Toekomst II. Een van de prioritaire topics die daaruit naar voren kwam, was de saliniteit in het Schelde estuarium. Dit topic wordt door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) verder uitgewerkt en voorliggend rapport is daarin deelrapport 1. In dit rapport wordt een literatuurstudie uitgevoerd en wordt een antwoord op belangrijke onderzoeksvragen gezocht in een data-analyse op gemeten waarden voor saliniteit in het Schelde estuarium van vroeger en nu.

1.2 Onderzoeksvragen

Door de beheerders werden voor het Schelde estuarium specifieke onderzoeksvragen rond saliniteit geïdentificeerd en geformuleerd:

1. Is er sprake van een significante verschuiving in de saliniteitsgradiënt in het Schelde estuarium in de afgelopen 50 jaar? Zo ja, wat is de verklaring hiervoor en wat zijn de gevolgen voor het estuarium?
2. Bestaat er een relatie tussen het zoetwaterdebiet boven in het estuarium en de lengte waarin het zout in het estuarium kan binnendringen? Zo ja, wat is dan het minimale bovendebiet dat nodig is om verdere zoutindringing tegen te houden en zo ook ecologische schade te vermijden?
3. Het klimaat verandert en de zeespiegel stijgt. Wat is het effect van een stijgende zeespiegel op mogelijke verder indringing van zout in het estuarium? De klimaatverandering heeft ook effect op ons weerpatroon: de laatste jaren worden gekenmerkt met langere periodes zonder neerslag. Wat is het effect van deze langere droogteperiodes op de zoutindringing?
4. Hoe robuust of gevoelig is de zoutindringing in het Schelde estuarium? Welke opties zijn er om verdere indringing in de toekomst tegen te gaan?

Antwoorden op bovenstaande onderzoeksvragen worden in de eerste plaats gezocht in bestaande literatuur en in een data analyse van de bestaande data van het Schelde estuarium (=deelrapport 1; dit rapport). Verder zal gebruik gemaakt worden van het 3D SCALDIS model (Smolders et al.; 2016) om bijkomende inzichten via scenario analyse te verschaffen (= deelrapport 2, Smolders en Kaptein, 2024).

1.3 Opbouw van dit rapport

Dit rapport geeft in hoofdstuk 2 een overzicht van alle plaatsnamen (op kaart) gebruikt in dit rapport, alsook info over tijdsaanduiding en referentievlakken. Hoofdstuk 3 wordt gebruikt om kort nog eens door de meest gebruikte definities en eenheden voor zout te gaan. Er worden ook vergelijkingen gegeven om van de ene eenheid naar de andere om te rekenen. Hoofdstuk 4 bespreekt de transportmechanismen van zout in estuaria in het algemeen met aandacht voor een analytische oplossingsmethode. Hoofdstuk 5 beschrijft de zoutgradiënt in het Schelde-estuarium en bespreekt de invloed van de bovenafvoer op de zoutindringing. Op basis van gedigitaliseerde data uit het WL archief worden de huidige metingen in een historisch perspectief geplaatst. Hoofdstuk 6 formuleert de belangrijkste conclusies en antwoorden op de gestelde onderzoeksvragen.

2 Locaties, afstanden, tijd en referentievlakken

2.1 Locaties en afstanden in het Schelde estuarium

Alle plaatsnamen en namen van meetlocaties die in dit rapport voorkomen, worden in onderstaande kaarten weergegeven (Figuur 1 en Figuur 2). Tevens wordt in grafieken vaak de afstand van een bepaalde meetlocatie tot de monding gebruikt; voor de monding, km 0, werd het nauwste stuk tussen Vlissingen en Breskens genomen en om de afstanden te berekenen werd gebruik gemaakt van de centrale as van het estuarium (en niet volgens de vaargeul). Alle locaties en hun berekende afstanden tot de gekozen mondingslocatie worden samengevat in Tabel 1.

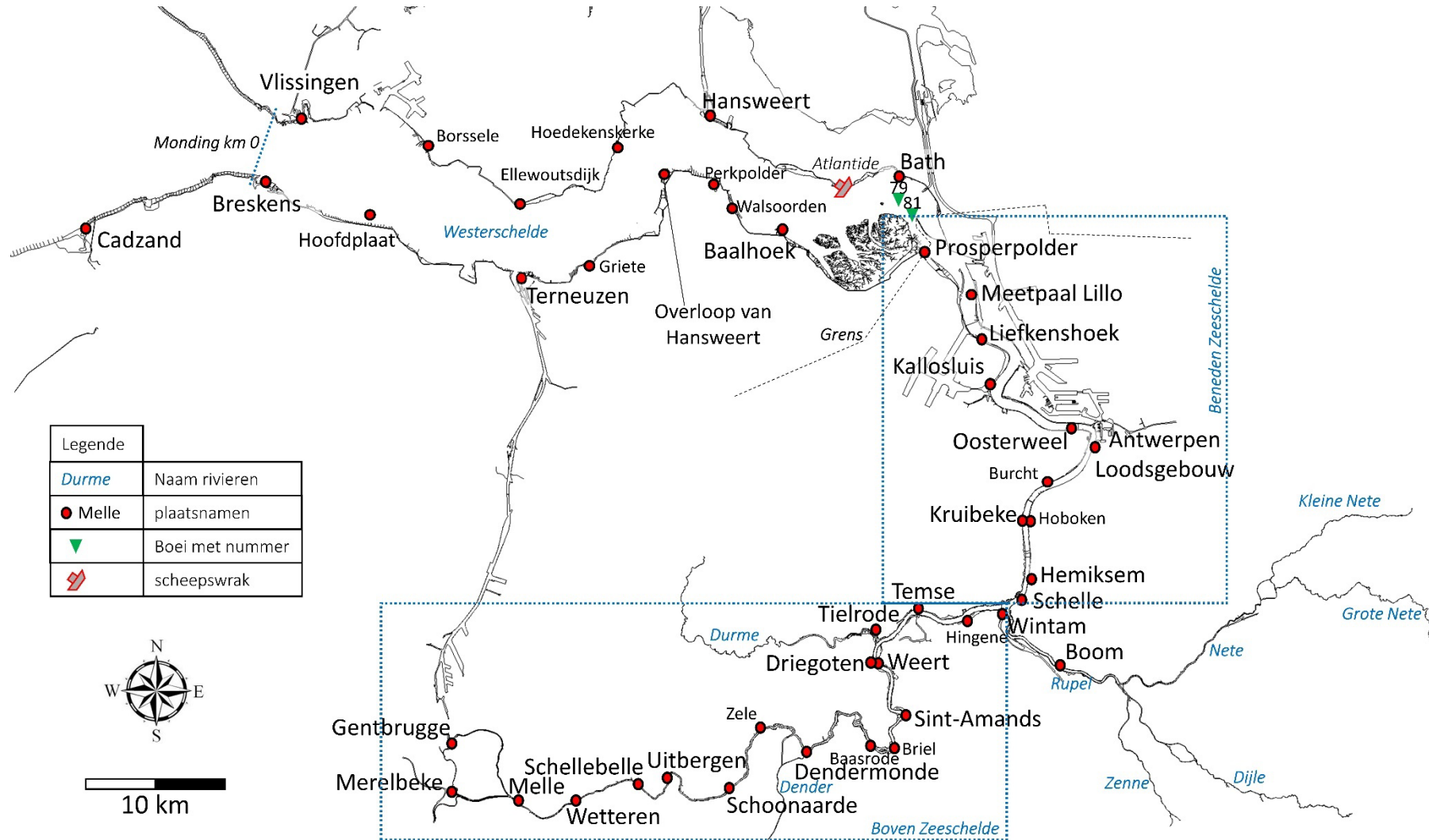
2.2 Tijdsaanduiding in dit rapport

Alle tijdsaanduidingen in dit rapport staan in UTC+1 of zijn hiernaar verrekend. Dit komt overeen met de lokale wintertijd. UTC is een Engelse afkorting van Universal Time Coordinated of in het Nederlands gecoördineerde universele tijd. De naam voor de tijdszone waarin België ligt, is MET of Midden-Europese Tijd (CET of Central European Time in het Engels).

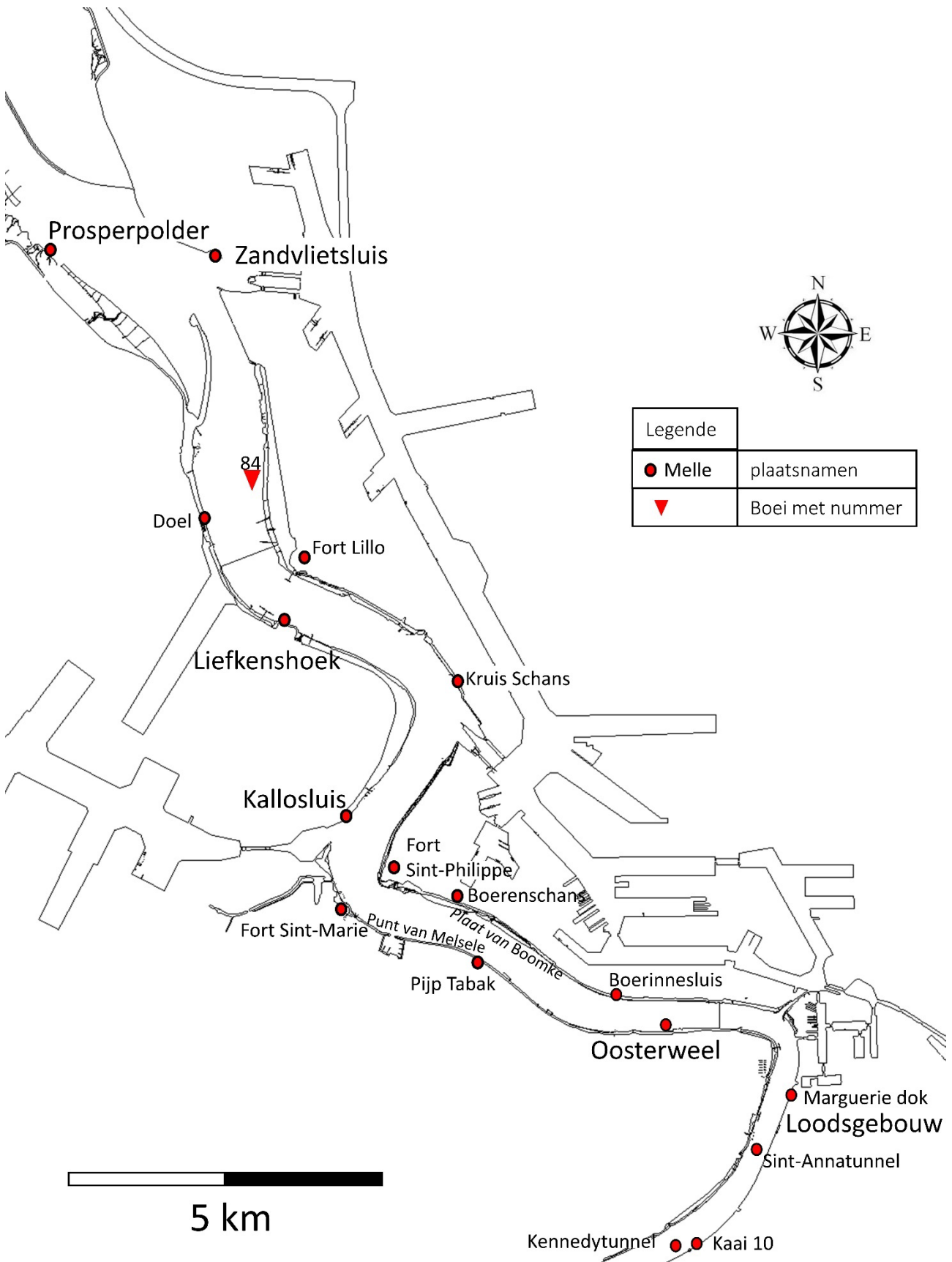
Samengevat geeft dit voor België: MET = UTC+1

2.3 Verticaal referentievlak

Als verticaal referentievlak wordt m TAW (Tweede Algemene Waterpassing) gebruikt in dit rapport.



Figuur 1 – Overzichtskart met meetlocaties en plaatsnamen



Figuur 2 – Detailkaart regio Antwerpen met meetlocaties en plaatsnamen

Tabel 1 – Lijst met gekende meetlocaties en hun afstand tot de monding

locatie	Berekende afstand tot monding [km]	locatie	Berekende afstand tot monding [km]
Breskens	1,3	Boerinneluis	75,2
Vlissingen	2,5	Meetpaal Oosterweel	76,0
Hoofdplaat	8,2	Antwerpen Loodsgebouw	
Borssele	10,5	= Margueriedok	78,7
Ellewoutsdijk	19,0	Antwerpen Sint-Annatunnel	80,0
Terneuzen	20,0	Antwerpen Kennedytunnel	81,8
Griete	23,7	Burcht	83,6
Hoedekenskerke	31,3	Hoboken (veer)	86,5
Overloop van Hansweert	31,5	Kruibeke (veer)	86,6
Hansweert	36,2	Hemiksem	89,6
Perkpolder	38,8	Schelle	92,2
Walsoorden	41,1	Wintam	93,4
Baalhoek	44,2	Hingene	96,1
Wrak Atlantide	49,2	Temse	99,5
Bath	51,5	Driegoten	104,7
Boei 79	51,7	Weert	104,8
Boei 81	52,9	Sint-Amands	109,9
Prosperpolder	56,9	Briel	111,8
Zandvlietsluis	58,3	Baasrode	114,6
Meetpaal Lillo	61,5	Dendermonde	123,0
Boei 84	62,1	Zele	127,3
Doel	62,4	Schoonaarde	133,8
(Fort) Lillo	63,8	Uitbergen	139,2
Liefkenshoek	64,2	Schellebelle	142,7
Kruis Schans	66,9	Wetteren	147,4
Kallosluis	69,3	Melle	152,7
Fort Sint-Philippe	70,3	Merelbeke (stuw)	157,0
Fort Sint-Marie	70,5	Tijarm Gentbrugge: Gentbrugge (stuw)	161,0
Boerenschans	72,0	Durme: Tielrode	104,3
Pijp Tabak	72,6		

3 Definities, parameters, formules en eenheden voor zout

Om het zoutgehalte of saliniteit van het zeewater te beschrijven zijn er verschillende parameters en definities in omloop. Sommige van die parameters lijken ook nog eens sterk op elkaar en worden vaak verkeerdelijk gebruikt of met elkaar verward. Daarom start dit rapport met een overzicht van de meest gebruikte parameters, hun definities en de verschillende formules om de eenheden naar elkaar om te rekenen.

De samenstelling van de opgeloste stoffen in zeewater is zeer complex. De meest voorkomende opgeloste stoffen in zeewater bepalen ook de fysische eigenschappen ervan. Los van de gedetailleerde samenstelling of de absolute hoeveelheden, is het zo dat de relatieve hoeveelheden steeds in dezelfde verhoudingen blijken voor te komen. Dit geldt voor zeewater, maar is niet meer van toepassing op verdunningen zoals in estuaria waar kleine afwijkingen kunnen voorkomen. Aangezien in zeewater de verhoudingen in opgeloste stoffen gelijk blijven, volstaat het om slechts één van de stoffen te meten om de volledige samenstelling van de belangrijkste opgeloste stoffen te kunnen bepalen.

3.1 Saliniteit

Saliniteit is een maat voor de hoeveelheid vaste stoffen opgelost in zeewater. In de praktijk betekent dit de hoeveelheid stoffen die achter blijven in een filter wanneer zeewater er doorheen wordt gestuurd. Vroeger werd daarvoor een glasvezel filter gebruikt met een nominale porie grootte van 0,45 μm ; tegenwoordig zijn filters met een nominale porie grootte van 0,2 μm de standaard. Het bepalen van de exacte saliniteit is complex. Enerzijds omdat in zeewater zowat alle op aarde gekende elementen kunnen voorkomen en het praktisch niet haalbaar is deze via chemische analyse allemaal te bepalen. Anderzijds worden er bij de bepaling van saliniteit altijd wel ergens benaderde waarden of afrondingen gemaakt. Vandaag de dag is een enorme accuraatheid (tot $\pm 0,006\%$) nodig om de algemene oceaancirculatie goed te begrijpen. (Pawlowicz, 2013).

Het is ook niet mogelijk om de zouten via uitdroging te bepalen omdat vooral chloride in de laatste stappen van het droogproces mee verdwijnt. Daarom heeft een internationale commissie in 1902 (Forch, Knudsen and Sørensen, 1902) een techniek bepaald die misschien niet alle opgeloste stoffen bepaald, maar die wel het grootste deel ervan bepaald. Belangrijk hierbij was dat de techniek reproduceerbaar was. Uit deze techniek is een definitie van saliniteit ontstaan:

Saliniteit = de totale hoeveelheid vaste stof in gram per kilogram zeewater [g/kg of ‰ of ppt], indien alle carbonaten (HCO_3^- en CO_3^{2-}) omgezet zijn in oxiden, alle organische stof is geoxideerd en alle broom en jodium in gedachte is vervangen¹ door een equivalente hoeveelheid chloor.

¹ Bij het meten van de saliniteit door titratie worden broom en jodium ionen samen met de chloorionen mee getitreerd en dus gemeten.

Saliniteit wordt heden ten dage niet meer via deze techniek bepaald omdat deze te complex en te traag is. De saliniteit in de oceanen schommelt tussen 33 ‰ en 37 ‰. De saliniteit aan de oppervlakte in regio's in een hogere breedtegraad of regio's met heel hoge precipitatie of door verdunning door uitmonding van rivieren, kan beduidend lager liggen. Anderzijds kan de saliniteit in afgesloten of ingesloten zeeën oplopen tot 40 ‰ en meer, denk maar aan de dode en rode zee. Vaak wordt 35 ‰ als een gemiddelde voor alle oceanen genomen.

3.2 Chloriniteit

Aangezien de opgeloste zouten in vaste verhoudingen voorkomen volstaat het dus om slechts één van hen te bepalen om de hele samenstelling van het zeewater te weten te komen. Zo vormen chloride ionen 55 procent van het totaal aan opgeloste zouten in zeewater en kunnen deze gemakkelijk en met redelijke accuraatheid bepaald worden door titratie met zilvernitraat waarbij kaliumchromaat als indicator gebruikt wordt. Een voorbeeld van dergelijke berekening en titratie is gegeven in bijlage 1. Uit die titratietechniek volgt de definitie van chloriniteit:

Chloriniteit = dit is de totale hoeveelheid chloor, broom en jodium in gram per kilogram zeewater [g/kg of ‰ of ppt], als het broom en jodium in een equivalente hoeveelheid chloor zijn omgerekend met behulp van de atoomgewichten (Elzerman, 1953).

De empirische relatie tussen saliniteit en chloriniteit werd voor het eerst vastgelegd door de internationale commissie in 1902 (Forch, Knudsen and Sørensen, 1902):

$$\text{Saliniteit} = 0,03 + 1,805 * \text{Chloriniteit} \quad (1)$$

In bovenstaande relatie worden zowel saliniteit als chloriniteit uitgedrukt in g/kg zeewater of in promille ‰. Bovenstaande relatie wordt ook wel de Sørensen vergelijking genoemd. Deze relatie werd gevormd door analyses van stalen zeewater uit de Baltische zee. De factor 0,03 in deze vergelijking wordt veroorzaakt door opgeloste stoffen (gedeeltelijk calciumsulfaat en gedeeltelijk calciumbicarbonaat) die via rivierwater in de Baltische zee terecht komen. Door de definitie van saliniteit worden deze opgeloste stoffen meegeteld wanneer we spreken over saliniteit, maar niet wanneer we spreken over chloriniteit. Op de UNESCO meeting in 1965 in Rome werd beslist dat de omzetting van gemeten chloriniteit naar saliniteit beter niet gedaan wordt en als ze toch wordt omgezet om dan volgende vergelijking te gebruiken (UNESCO, 1966):

$$\text{Saliniteit} = 1,80655 * \text{Chloriniteit} \quad (2)$$

De afhankelijkheid van de definitie van chloriniteit van de atoomgewichten en een alternatieve definitie worden in Bijlage 2 gegeven alsook de relatie met het chloorequivalent.

3.3 Chlorositeit

Vaak worden concentraties en substanties in water bepaald en gerapporteerd op volumebasis. De chlorositeit heeft een gelijkaardige definitie als de chloriniteit, maar wordt bepaald per volume:

Chlorositeit = dit is de totale hoeveelheid chloor, broom en jodium in gram per liter zeewater op 20°C [g/l], als het broom en jodium in een equivalente hoeveelheid chloor zijn omgerekend met behulp van de atoomgewichten (Sverdrup et al., 1942)

De chlorositeit kan snel bekomen worden door de chloriniteit van een water staal te vermenigvuldigen met zijn dichtheid op 20°C:

$$\text{Chlorositeit} = \text{Chloriniteit} * \rho * 1000 \quad (3)$$

Hier is ρ de massadichtheid van het water bij 20°C uitgedrukt in [kg/m³]. Om van m³ naar liter te gaan wordt er in de formule nog vermenigvuldigd met een factor 1000. Voor deze omzetting is dus de massadichtheid² van het water nodig en dit is vaak moeilijk om accuraat te bepalen; zeker vergeleken met de eenvoud van de zilvernitraat titratie om de chloriniteit te bepalen. Wanneer de chloriniteit en de temperatuur van een water staal bekend zijn, bestaan er wel omzettingstabellen om de chlorositeit te bepalen. Elzerman (1953) beschrijft dergelijke omzettingstabellen in zijn appendix 1a, 1b, 3a en 3b. Deze tabellen kwamen tot stand door gegevens van verschillende bronnen samen te voegen (Knudsen, 1901; Krümmel, 1907; Landolt-Börnstein, 1927).

Bij oude metingen in het Schelde estuarium werd verondersteld dat voor elk gemeten molecule Chloor er een equivalent aan Natrium beschikbaar was en werd de gemeten chlorositeit vaak omgerekend naar een hoeveelheid NaCl per liter water [g NaCl/L]. Deze omrekening werd gedaan door de relatieve atoomgewichten in rekening te brengen (atoommassa Cl = 35,453 u; atoommassa Na = 22,989769 u; Cl/Na = 0,648458). De gemeten chlorositeit werd vermenigvuldigd met 1,648458 om het equivalente hoeveelheid NaCl per liter te vinden.

3.4 Chloorgehalte

Chloorgehalte = dit is de werkelijke hoeveelheid chloor ionen uitgedrukt in gram per kilogram zeewater (Elzerman, 1953).

Aangezien in deze definitie enkel de werkelijke chloor ionen tellen en geen rekening wordt gehouden met de chloorequivalenten voor bromide en jodide, zal het chloorgehalte steeds lager zijn dan de chloriniteit. Volgens Elzerman (1953) geldt:

$$\text{Chloorgehalte} = 0,9990 * \text{Chloriniteit} \quad (4)$$

Deze relatie geldt enkel voor zeewater.

3.5 Praktische Saliniteits-Schaal

Alle moderne schattingen van saliniteit zijn tegenwoordig gebaseerd op het meten van de elektrische conductiviteit van het water. Maar de elektrische conductiviteit van zeewater is afhankelijk van de temperatuur en in iets minder mate van de druk. Het omzetten van de gemeten conductiviteit, temperatuur en druk naar saliniteit is complex en niet lineair. In 1980 werd daarom door oceanografen de Praktische Saliniteits-Schaal (S_p) ingevoerd als een benadering voor de werkelijke saliniteit. De Praktische Saliniteits-Schaal wordt gedefinieerd door een standaard, die de Praktische Saliniteits-Schaal 1978 of PSS-78 wordt genoemd, en is een functie van conductiviteit, temperatuur en druk. Belangrijk is om hierbij te vermelden dat voor Praktische Saliniteit geen eenheden worden gebruikt of dat deze dimensieloos is. Vaak wordt verkeerdelijk toch een eenheid achter de getallen toegevoegd zoals PSU, dat dan voor Praktische Saliniteit Units staat, maar dit is wetenschappelijk niet correct (Pawlowicz, 2013).

² De massadichtheid van zuiver water bij 4°C = 1000 kg/m³ (Elzerman, 1953)

De Praktische Saliniteits-Schaal werd indertijd zo gedefinieerd dat de waarden vergelijkbaar zijn (minder dan 0,5 % verschil) met de waarden van saliniteiten bepaald op basis van de gemeten chloriniteit.

De praktische saliniteit is enkel gedefinieerd tussen saliniteit 2 en 42. Voor het berekenen van lagere waarden dan saliniteit 2 op basis van conductiviteitsmetingen wordt verwezen naar Hill et al. (1986) en Poisson en Gadhoumi (1993). De formule die door UNESCO (IOC, SCOR and IAPSO, 2010) gebruikt wordt, maakt gebruik van de conductiviteitsratio K_{15} , welke de verhouding geeft tussen de elektrische conductiviteit van het waterstaal bij een temperatuur van 15°C en een luchtdruk van 101325 Pa, en de elektrische conductiviteit van een standaard KaliumChloride (KCl) oplossing op dezelfde temperatuur en druk. De massafractie van KCl in de standaard oplossing is $32,4356 \cdot 10^{-3}$ (massa KCl per massa-eenheid oplossing). De praktische saliniteit S_p wordt dan gegeven door de vergelijking:

$$S_p = \sum_{i=0}^5 a_i (K_{15})^{i/2} \quad \text{waarbij} \quad K_{15} = \frac{C(S_p, T=15^\circ\text{C}, P=101325 \text{ Pa})}{C(35, T=15^\circ\text{C}, P=101325 \text{ Pa})} \quad (5)$$

Met C de conductiviteit [mS/cm] en T de temperatuur van het water en P de luchtdruk). De parameterwaarden a_i worden gegeven in Tabel 2. Bovenstaande formule geldt onder standaard omstandigheden. Voor metingen op het terrein moet bovenstaande formule gecorrigeerd worden voor temperatuur en druk. De formules die hieronder gegeven worden zijn geldig binnen het temperatuurbereik $-2^\circ\text{C} \leq T \leq 35^\circ\text{C}$ en een druk van 0 tot 10000 dbar. K_{15} wordt in onderstaande formule vervangen door de conductiviteitsratio R:

$$R = \frac{C(S_p, T, P)}{C(35, 15^\circ\text{C}, 101325 \text{ Pa})} = \frac{C(S_p, T, P)}{C(S_p, T, 101325 \text{ Pa})} * \frac{C(S_p, T, 101325 \text{ Pa})}{C(35, T, 101325 \text{ Pa})} * \frac{C(35, T, 101325 \text{ Pa})}{C(35, 15^\circ\text{C}, 101325 \text{ Pa})} = R_p R_t r_t \quad (6)$$

waarbij:

$$r_t = \sum_{i=0}^4 c_i (T)^i \quad (7)$$

waarbij de parameterwaarden voor c_i in Tabel 2 kunnen worden teruggevonden.

$$R_p = 1 + \frac{\sum_{i=1}^3 e_i P^i}{1 + d_1 T + d_2 T^2 + R(d_3 + d_4 T)} \quad (8)$$

Waarbij de parameterwaarden voor d_i en e_i in Tabel 2 kunnen worden teruggevonden. Wanneer R bekend is uit een meting kan daarmee R_p en r_t berekend worden en met deze kan dan R_t bepaald worden:

$$R_t = \frac{R}{R_p r_t} \quad (9)$$

Voor een andere temperatuur dan 15°C kan dan de praktische saliniteit berekend worden met volgende vergelijking:

$$S_p = \sum_{i=0}^5 a_i (R_t)^{i/2} + \frac{(T-15)}{(1+0,0162(T-15))} \sum_{i=0}^5 b_i (R_t)^{i/2} \quad (10)$$

Waarbij de parameterwaarden a_i en b_i in Tabel 2 kunnen worden teruggevonden.

Tabel 2 – Parameter waarden voor UNESCO formule (IOC, SCOR and IAPSO, 2010)

i	a _i	b _i	c _i	d _i	e _i
0	0,0080	0,0005	0,6766097		
1	-0,1692	-0,0056	0,0200564	3,426*10 ⁻²	2,070*10 ⁻⁵
2	25,3851	-0,0066	0,0001104259	4,464*10 ⁻⁴	-6,370*10 ⁻¹⁰
3	14,0941	-0,0375	-6,9698*10 ⁻⁷	0,4215	3,989*10 ⁻¹⁵
4	-7,0261	0,0636	1,0031*10 ⁻⁹	-3,107*10 ⁻³	
5	2,7081	-0,0144			

3.6 Absolute Saliniteit

Het referentiemateriaal waarmee men saliniteitsmeters kalibreert, noemt men IAPSO (International Association for Physical Sciences of the Ocean) standaard zeewater en het wordt geproduceerd door slechts één bedrijf in het Verenigd Koninkrijk, die het zeewater, nodig voor de bereiding van de standaard, halen van een specifieke plaats in de Atlantische oceaan. Maar aangezien dit standaard zeewater degradeert als het ouder wordt en dus voor technische problemen zorgt, werd er overgeschakeld op een nieuwe zeewater standaard, TEOS-10 (IOC, SCOR and IAPSO, 2010), die een betere maat voor saliniteit in zeewater geeft en Absolute Saliniteit (S_A) wordt genoemd. TEOS-10 geeft de best beschikbare schatting van de massafractie van de in zeewater opgeloste stoffen en wordt daarom vaak uitgedrukt in g/kg. Ruimtelijke variaties in de samenstelling van zeewater maakt dat Absolute Saliniteit niet zomaar vergeleken kan worden met Praktische Saliniteit. Op basis van TEOS-10 werd er een beste schatting gemaakt van de belangrijkste anorganische componenten in IAPSO standaard zeewater en deze zijn gebruikt om artificieel de samenstelling van zeewater na te maken en dit wordt dan de Referentie Samenstelling genoemd. In deze samenstelling wordt geen rekening gehouden met opgeloste organische stoffen of gassen. De samenstelling wordt gegeven in de tabel in bijlage 3. Op basis van deze Referentie Samenstelling wordt er een Referentie Saliniteit (S_R) gedefinieerd die staat voor de massafractie van de opgeloste stoffen in de Referentie Samenstelling. De eenheden zijn gram opgeloste stoffen per kilogram zeewater. In praktijk betekent dit dat de concentraties van de voorkomende anorganische stoffen worden vermenigvuldigd met hun respectievelijke atoommassa's³ en de bekomen waarden worden daarna bij elkaar opgeteld. (IOC, 2010).

Om de absolute Saliniteit van een staal zeewater te bepalen, kan eerst de conductiviteit, temperatuur en druk gemeten worden, zoals voor de Praktische Saliniteit. Dan wordt de Referentie Saliniteit berekend alsof dit staal de Referentie Samenstelling had. Tenslotte wordt een kleine correctiefactor (ΔS_A) gebruikt om te corrigeren voor de verschillen in samenstelling. Deze correctiefactor wordt de saliniteitsanomalie genoemd.

³ De onzekerheid over bepaalde atoomgewichten draagt hier bij tot een onzekerheid van ongeveer 1 mg/kg op de Referentie Saliniteit.

3.7 Saliniteit en conductiviteit in het Schelde-estuarium

De saliniteit in het Schelde-estuarium wordt bepaald via conductiviteitsmetingen. Op verschillende locaties staan YSI-, CTD- en Aanderaa-sondes die temperatuur en conductiviteit continu meten. Deze waarden kunnen dan omgezet worden naar een saliniteitswaarde. Echter, hoe verder we van de monding opwaarts trekken des te minder zal het water in de Schelde op zeewater lijken en des te groter zullen de fouten worden in bovenstaande relaties. Het water van de Schelde zal ook een licht andere samenstelling krijgen (Swart, 1982). Door conductiviteitsmetingen te vergelijken met chloriniteitsmetingen (bepaald via titratie) bepaalde Swart (1982) volgende relatie voor saliniteit van water in de Westerschelde:

$$\text{saliniteit} = 1,7838 * \text{chloriniteit} + 0,85039 \quad (11)$$

Deze relatie werd algemeen gebruikt voor water uit de Westerschelde, maar zou idealiter aangepast worden per locatie. Voor de omrekening van conductiviteit naar saliniteit werd op het WL een empirische relatie bepaald voor de berekening van saliniteit [-] op basis van gemeten conductiviteit [mS/cm] en temperatuur [°C] (De Boeck et al., 2014):

$$\text{saliniteit} = a * \text{Conductiviteit}^2 + b * \text{Conductiviteit} - 0,1219 \quad (12)$$

Waarbij:

$$b = 0,00036 * T^2 - 0,02874 * T + 1,06171 \quad (13)$$

met T de temperatuur van het water

en

$$\begin{aligned} a &= -0,000208 * T + 0,00488 \quad \text{als } T < 10^\circ\text{C} \\ a &= -0,000065 * T + 0,003492 \quad \text{als } T \geq 10^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (14)$$

Echter, voor bijvoorbeeld MONEOS rapportage wordt wel de UNESCO formule gebruikt (vergelijking 10 uit dit rapport) (e.g. Vandenbruwaene et al., 2021). Keller en Ides (2007) berekenden het verschil tussen bovenstaande methode en de UNESCO formule en vonden dat dit tot 0,12 g/L kan bedragen voor waarden die in het Schelde-estuarium voorkomen. Deze afwijking is klein ten opzichte van de grootteorde van saliniteitswaarden en beide methoden kunnen dan ook naast elkaar gebruikt worden. In dit rapport wordt gebruik gemaakt van data uitgedrukt in saliniteit. Gemeten conductiviteit werd reeds omgezet naar saliniteit. Soms is het niet duidelijk of er gebruik werd gemaakt van de Unesco formule (vergelijking 10) of van de WL formule (vergelijking 12).

4 Zouttransport in estuaria

4.1 Factoren die menging en zouttransport beïnvloeden in estuaria

De menging in estuaria wordt veroorzaakt door een combinatie van turbulente diffusie op kleine schaal en advectieve processen op grote schaal. De turbulente diffusie op kleine schaal zorgt voor uitwisseling van massa tussen verschillende gelijklopende stroombanen. We spreken van longitudinale dispersie wanneer deze uitwisseling optreedt tussen stroombanen met verschillende stroomsnelheden. Zo wordt de dispersie coëfficiënt of mengingscoëfficiënt beschreven als de verhouding tussen enerzijds het niet-advectief transport van zout over een dwarssectie en de zoutgradiënt langsheen het estuarium anderzijds. De dispersiecoëfficiënt wordt gebruikt om het complexe mengingsproces en transport met al zijn onderdelen te vatten in één component. Het complex mengingsproces wordt beïnvloed door zeer vele factoren, waarvan de belangrijkste: het getij, de bovenafvoer en de geometrie van het estuarium zijn, maar ook Coriolis kracht en meteorologie (e.g. wind) kunnen een rol spelen. De dispersiecoëfficiënt is dan ook geen constante voor heel het estuarium, maar varieert in plaats en tijd.

Hieronder worden enkele factoren die het zouttransport beïnvloeden kort besproken.

4.1.1 Getij en geometrie van het estuarium

Het getij zorgt voor eb- en vloedstroming in het estuarium met daarbij een doortij-springtij variatie. Dit zorgt voor een grote tijdsvariatie in het mengingsproces. Door de interactie van het getij met de bodem zorgt dit ook voor ruimtelijke asymmetrie in de stromingspatronen zowel lokaal als langsheen het hele estuarium. De ruimtelijke variatie van de breedte van de geul (of meerdere geulen naast elkaar) zorgt voor variatie in de hoog- en laagwaterstanden en leidt tot asymmetrie tussen eb en vloed. Dit alles heeft op zijn beurt weer een impact op de verschillende mengingsprocessen

Bij elke vloedcyclus wordt zout water opwaarts getransporteerd en bij het daaropvolgende eb getij komt dit weer afwaarts. De reikwijdte van deze stroomop- en stroomafwaartse beweging wordt de getij-excursie lengte genoemd en zorgt, afhankelijk van de locatie in het estuarium, voor een aanzienlijke variatie in de saliniteit over één getijcyclus. Belangrijk is te vermelden is dat er een verschil is tussen het horizontaal getij en het verticaal getij. De maximum saliniteit zal optreden bij het omdraaien van de vloed naar eb stroomrichting, kentering genaamd. Dit moment volgt, weer afhankelijk van de locatie in het estuarium, meestal enige tijd nadat de hoogste waterstand bereikt is. Het water kan dus op een bepaald moment al aan het zakken zijn, terwijl het nog steeds stroomopwaarts stroomt. Maximale saliniteitswaarden worden dus bereikt bij kentering na het hoogwater.

4.1.2 Zoetwaterdebiet of bovenafvoer

Het zoetwaterdebiet of de bovenafvoer heeft een heel grote impact op de mengingsprocessen in een estuarium. Bij zeer grote debieten kunnen grote zoutgradiënten over de verticaal ontstaan, die voor densiteitsstromen kunnen zorgen. De hoeveelheid bovenafvoer kan dus bepalen of het water in een estuarium gelaagd (zoetwatertong boven zoutwater), half gelaagd of goed gemengd zal zijn.

Het zoetwaterdebiet kan ook de duur van kentering en de getij-asymmetrie beïnvloeden (i.e., ervoor zorgen dat vloed korter en eb langer zal duren).

4.1.3 Meteorologie

De belangrijkste meteorologische effecten ontstaan door wind. Wind kan voor getijopzet zorgen en kan lokaal voor circulatiepatronen zorgen. Bovendien zorgt wind ook voor golven en stormvloed en welke een grote impact hebben op de menging in een estuarium.

In ondiepe estuaria met lage bovenafvoer kan de wind zelfs een zeer belangrijke factor zijn in de turbulente menging en circulatie van het water.

4.1.4 Coriolis kracht

De Coriolis kracht is een kracht die inwerkt op vooral brede en open watermassa's onder invloed van de aardrotatie. In het noordelijk halfrond wordt het bewegende water naar rechts afgebogen onder invloed van deze kracht. Hoe belangrijk deze kracht is voor een bepaald (deel van een) estuarium kan bepaald worden door het dimensieloos Rossby getal (R_o) te bepalen. Dit nummer geeft de verhouding weer tussen de horizontale stroomsnelheid U [m/s] en het product van de karakteristieke lengte, L_s [m], van een estuarium, i.e. de breedte in dit geval met de Coriolis frequentie, f [1/s] (Fischer et al., 1979).

$$R_o = \frac{U}{L_s * f} \quad (15)$$

De Coriolis frequentie voor een breedtegraad van $51,1^\circ$ (e.g. de noorderbreedte ter hoogte van Hansweert) bedraagt $1,14 * 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Wanneer het Rossby getal $< 0,1$ wordt aangenomen dat de Coriolis kracht een duidelijke invloed heeft. Invullen van bovenstaande formule met waarden van de Westerschelde geeft waarden in de buurt van die $0,1$. Dit geldt enkel voor de breedste stukken in de monding en enkel bij lage stroomsnelheden. De Coriolis kracht heeft dus maar een zeer beperkte invloed op de menging in het Schelde-estuarium.

4.2 Analytische modellen

De relatie en effecten van bovengenoemde factoren die het zouttransport in estuaria beïnvloeden kunnen beter begrepen worden door gebruik te maken van analytische modellen. Dergelijke modellen worden vaak gebruikt om zoutindringing in estuaria te bestuderen en te voorspellen. Voorspellende analytische modellen gaan uit van behoud van massa. Dat wil zeggen dat het transport van zout door dispersie en advectie in evenwicht is en dat de effectieve longitudinale dispersiecoëfficiënt alle types van menging in zich draagt. Ze gaan uit van een evenwichtssituatie. Die is nodig om de analytische vergelijkingen te kunnen oplossen. Vaak worden nog bijkomende aannames gemaakt om de oplossing te vereenvoudigen. In veel gevallen wordt verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt constant is in de tijd en ruimte. Dit is zoals hierboven reeds beschreven in werkelijkheid zeker niet zo. De meeste analytische modellen uit de literatuur zijn sterk vergelijkbaar met elkaar en vaak komen dezelfde vergelijkingen terug. Hieronder wordt kort een voorbeeld van dergelijk model van Cai et al. (2015) beschreven. Het grote voordeel van analytische modellen is dat ze een goed inzicht verschaffen in de verschillende processen die spelen bij zouttransport.

4.2.1 Analytisch model Cai et al. (2015)

Dit analytisch model bouwt voort op de modellen van Savenije (1986, 1989, 1993, 2005, 2012). Het model wordt gekoppeld met een hydrodynamisch model van Cai et al. (2012), waarin een eenvoudige analytische oplossing voor de getijdynamica kan gebruikt worden om de snelheidsamplitude langsheen het estuarium (en dus ook de getij excursie lengte) te berekenen op basis van de geometrie van het estuarium, de bodemwrijving en de getijamplitude aan de afwaartse rand. De getij excursie lengte geeft de informatie nodig om in te schatten hoever het gemiddelde zoutprofiel (berekend onder getijgemiddelde condities) tijdens hoog- en laagwater opwaarts, respectievelijk, afwaarts verschuift.

Volgens Savenije (2005 en 2012) kan de getijgemiddelde dwarssectiegemiddelde massaflux van zout, F , uitgedrukt worden als:

$$F = -Q * S - A * D * \frac{\partial S}{\partial x} \quad (16)$$

waarbij Q het zoetwaterdebiet opwaarts voorstelt; S de getijgemiddelde saliniteit; x de longitudinale coördinaat langsheen het estuarium; A de getijgemiddelde dwarssectie en D de longitudinale dispersiecoëfficiënt. De eerste term aan de rechterzijde stelt de advectie flux voor en deze is altijd negatief omdat x in de stroomopwaartse richting positief is verondersteld. De tweede term aan de rechterzijde stelt de dispersie flux voor en deze stroomt van locaties met hoge saliniteit naar locaties met lage saliniteit en deze is negatief in stroomopwaartse richting.

In een estuarium met een convergerende dwarssectie (zoals het Schelde estuarium) kan de dwarssectie met volgende vergelijking beschreven worden:

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{x}{a}\right) \quad (17)$$

waarbij \overline{A}_0 de dwarssectie aan de zeerand van het estuarium voorstelt en a de convergentiefactor. Op vergelijkbare wijze kunnen de gemiddelde breedte \overline{B} en diepte \overline{h} beschreven worden.

In een evenwichtssituatie is er geen netto massa flux van zout ($F = 0$) en kan de vergelijking 16 herschreven worden als:

$$Q * S = A * D * \frac{\partial S}{\partial x} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial S}{S} = -\frac{Q}{A * D} \partial x \quad (18)$$

Uit deze vergelijking volgt ook dat in het gebied met de grootste verandering in het doorstroomoppervlak, A , de verandering in de zoutconcentratie in de X -richting het sterkst zal zijn. Uiteraard afhankelijk van de daarbij behorende afvoer.

De longitudinale dispersie coëfficiënt D varieert in dit analytisch model met de afstand x en wordt volgens Savenije beschreven als:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = -K \frac{Q}{A} \quad (19)$$

Waarbij K de dimensieloze Van der Burgh coëfficiënt is. Als K klein is dan domineert de menging door het getij het zouttransport (vooral in de monding van het estuarium); als K de waarde 1 nadert (opwaarts in het estuarium) zal densiteitstroming de dominante factor in het zouttransport worden. Uit vergelijking 18 en 19 kan volgende vergelijking afgeleid worden:

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{S}{S_0}\right)^K \quad (20)$$

Integratie van alle bovenstaande vergelijkingen geeft de gemiddelde saliniteit langsheen een convergerend estuarium:

$$\frac{S}{S_0} = \left(1 - \frac{K*Q*a}{A_0*D_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right]\right)^{1/K} \quad (21)$$

Om uit deze vergelijking de maximale zoutindringing (L) in het estuarium te berekenen, wordt de linkse zijde gelijk aan 0 gesteld (dus als S=0) en dit geeft volgende oplossing:

$$L = a \ln\left(\frac{D_0*A_0}{K*a*Q} + 1\right) \quad (22)$$

Deze oplossing geeft aan dat de maximale zoutindringing bij een evenwichtssituatie evenredig is met de dwarssectie aan de monding (A_0) en de convergentiefactor (a) en omgekeerd evenredig is met de bovenafvoer.

Wanneer we verder ook het getij in rekening brengen, betekend dit dat het zout bij evenwicht nog een halve getij excursie lengte verder opwaarts (vloed) kan indringen.

De getij excursie lengte, E, kan analytisch als volgt bepaald worden volgens Savenije (2005, 2012):

$$E = 2v/\omega \quad (23)$$

waarbij v de amplitude van de stroomsnelheid voorstelt en ω de getijfrequentie. In Savenije et al. (2008) worden deze parameters en hun berekeningswijze verder uitgewerkt. Het concept van Cai et al. (2012) was om deze toe te passen op stukjes van estuaria en in die stukken wel met lineaire oplossingen te werken. Dit wordt hier echter niet verder uitgewerkt, wegens niet relevant voor deze studie.

Het veronderstellen van een evenwichtssituatie wil zeggen dat het zoutgehalte zich ogenblikkelijk aanpast aan veranderende omstandigheden, zoals bijvoorbeeld het bovendebiet. Bij een verhoging van het debiet is de reactietijd van het systeem wel vaak snel, maar bij een verlaging van het bovendebiet kan de aanpassingstijd dagen tot maanden duren.

Vaak worden analytische modellen gekalibreerd op basis van metingen. Dit om een inschatting te maken van de dispersiecoëfficiënt, D, die vaak de onbekende is.

Analytische modellen kunnen ook gekalibreerd worden op basis van de resultaten van complexe modellen. Een voorbeeld hiervan wordt beschreven in Schramkowski en Smolders (2024) specifiek voor het Schelde-estuarium.

4.3 Complexe modellen

De dispersiecoëfficiënt varieert in ruimte en tijd: verschillende omstandigheden zoals dwarsdoorsnede, fase van het getij en bovenafvoer hebben grote invloed op de dispersie of menging. Dus zelfs al kan een dispersiecoëfficiënt bepaald worden aan de hand van metingen dan is deze enkel geldig voor de omstandigheden die optraden tijdens de meting. Dit maakt het moeilijk een analytische model te gebruiken om voorspellingen te doen. Analytische modellen hebben hun meerwaarde in het begrijpen van de verschillende processen en de invloed die die processen op elkaar en het zouttransport uitoefenen. Om dichter bij de realiteit te staan werd er in deze studie dan ook geopteerd om ook scenario analyse te doen met een complex 3D model. De resultaten daarvan maken deel uit van deelrapport 2 van deze studie (Smolders en Kaptein, 2024).

5 Data analyse Schelde-estuarium

5.1 Saliniteitsgradiënt

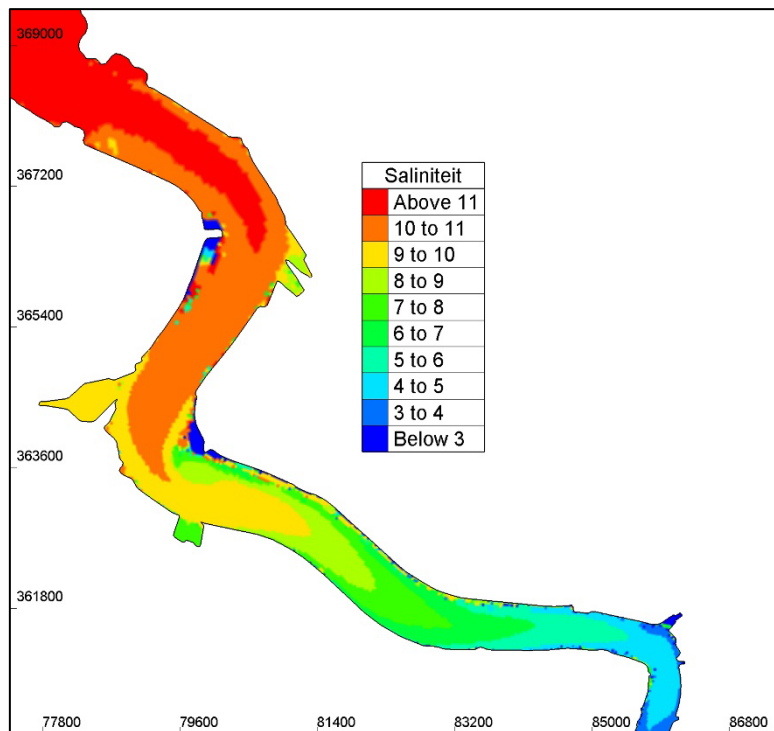
Door enkele vaste meetposten langsheen het Schelde-estuarium kan er op elk moment een langsprofiel of verloop van de saliniteit in het estuarium gemaakt worden. Bij kentering hoogwater en bij kentering laagwater wordt er per meetpost respectievelijk de hoogste en laagste saliniteitswaarde aangetroffen.

Aan de monding van het estuarium worden saliniteitswaarden gemeten vergelijkbaar met die van zeewater. Het zeewater in de monding van het Schelde-estuarium is voornamelijk afkomstig uit het Kanaal. De saliniteitswaarde fluctueert echter een beetje omdat het verdund wordt door zoet water voornamelijk afkomstig van de Rijn volgens Lacroix et al. (2004). De zoetwaterafvoer van de Schelde zelf heeft weinig invloed op de saliniteit in de monding. Door die verdunning met zoet water kan de saliniteit in de monding (gemeten aan de meetpaal Vlakte van de Raan) zakken van 35 tot 28. Dit heeft ook effect op de saliniteitswaarden die optreden in het estuarium zelf.

Verder speelt de bovenafvoer of zoetwatertoevoer een heel grote rol in de saliniteitsgradiënt die in het estuarium kan teruggevonden worden. Deze bovenafvoer fluctueert sterk met pieken tot 500 m³/s in de winter tot lange periodes met maar enkele m³/s in de zomerperiode. De Schelde is een regenrivier waarbij de afvoer sterk wisselt afhankelijk van de hoeveelheid en intensiteit van de neerslag die valt in haar stroomgebied.

We spreken van marien of zout water in het estuarium bij saliniteitswaarden boven 30 (=euhalien). Bij saliniteitswaarden tussen 18 en 30 spreken we van sterk brak water (polyhalien). Saliniteitswaarden tussen 5 en 18 kenmerken het brak water (mesohalien). Bij waarden tussen 0,5 en 5 is er sprake van licht zout water (oligohalien) en bij waarden onder de 0,5 hebben we zoet water. De locatie van deze grenzen verschuift tweemaal daags in het estuarium onder invloed van het getij. Daarbovenop komt nog de invloed van de bovenafvoer.

Verder varieert het zoutgehalte ook over een dwarssectie. In het midden van de rivier, in de vaargeul, is de stroming het sterkst en daar zullen de hoogste en laagste waarden gemeten kunnen worden. Dichter bij de oever is het minder diep en zal de stroming minder sterk zijn. Daar loopt de saliniteit als het ware een beetje achter op de hoofdgeul. Op locaties met zijrivieren of aantakking van grotere watermassa's kan de saliniteit ook hierdoor beïnvloed worden. Als men dus op hetzelfde moment een meting uitvoert in het midden van de rivier en aan de oever, kunnen beide metingen enkele saliniteitswaarden verschillen afhankelijk van de exacte locatie in het estuarium. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 3. Deze figuur laat de zoutindringing zien tijdens de vloed fase ter hoogte van Kallo en Oosterweel. Hier is duidelijk de variatie over de dwarssectie zichtbaar. Het is ook duidelijk dat de saliniteit in het midden van de rivier tijdens vloed net iets hoger ligt dan aan de oevers. Bij een langsprofiel van saliniteit kan het dus voorvallen dat er op een bepaalde plaats wordt gemeten vanop de oever en op de volgende plaats vanop een meetpaal meer naar het midden van de rivier. Zo'n profiel kan er dan vreemd uitzien met een waarde stroomafwaarts die lager ligt dan de waarde van de meetplaats net stroomopwaarts.

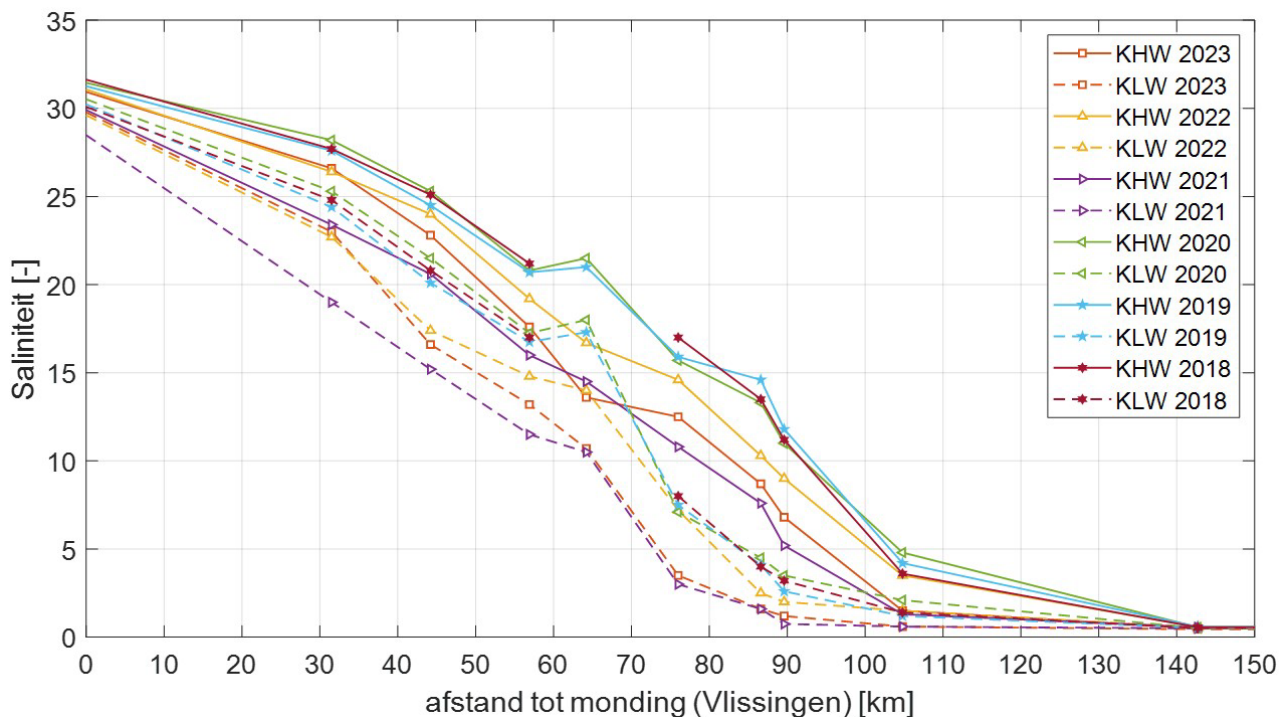


Figuur 3 – Voorbeeld van zoutindringing tijdens vloed. Voorbeeld komt uit een numeriek modelscenario.

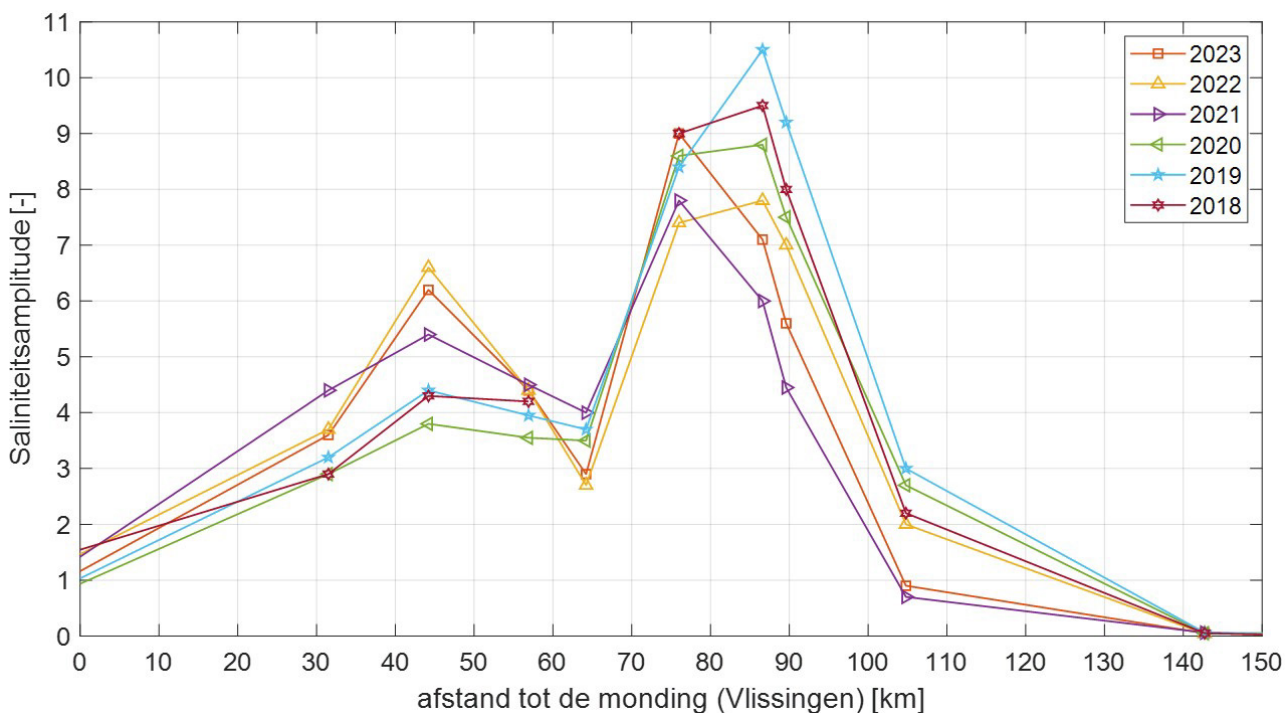
In Figuur 4 wordt het langsverloop van de saliniteit in het Schelde-estuarium grafisch voorgesteld. Voor de jaren 2018 tot en met 2023 wordt er per jaar de maximale saliniteit (langsprofiel) getoond bij kentering hoog- en laagwater. De bolletjes geven de locaties aan waar de waarnemingen werden gedaan langsheen het estuarium. De maximale saliniteit wordt waargenomen op het einde van de zomer tot het einde van het jaar, afhankelijk hoe lang de periode met lagere bovenafvoer duurt. Tijdens deze periode met lage bovenafvoer krijgt het zout de tijd om opwaarts te migreren. In jaren met droge zomers en lange droge periodes (e.g. 2018, 2019 en 2020) kan het zout dan ook verder opwaarts migreren dan in jaren met meer neerslag en hogere bovenafvoer (e.g. 2021).

De amplitude van de saliniteit op een bepaalde locatie wordt beschouwd als het verschil in de saliniteit tijdens kentering hoogwater en kentering laagwater. Deze amplitude is niet op alle locaties even groot. Deze amplitude wordt bepaald door de afstand die het getij tijdens eb en vloed kan afleggen in een bepaalde sectie van het estuarium. Hoe langer deze afstand, hoe groter het verschil in saliniteit tussen kentering hoogwater en kentering laagwater. In het deel van het estuarium waar de dwarsdoorsnede het sterkst verandert, worden de grootste veranderingen in saliniteit waargenomen in het estuarium. Dit werd ook aangetoond aan de hand van het analytisch model uit sectie 4.2.1. (vergelijking 18). Figuur 5 toont de amplitudes voor de maximale saliniteiten uit Figuur 4. De maximale amplitude wordt gemeten ter hoogte van de stations Kruibeke en Hemiksem (km 86 – 89). Het valt verder op dat jaren met langere droge periodes en minder pieken in bovenafvoer (e.g. jaren 2018, 2019, 2020) hogere saliniteitsamplitudes laten noteren ter hoogte van Kruibeke en Hemiksem en lagere amplitudes ter hoogte van het station Baalhoek (km 44). Bij jaren met meer bovenafvoer (e.g. 2021, 2022 en 2023) is de amplitude ter hoogte van Kruibeke en Hemiksem lager, maar in de Westerschelde ter hoogte van Baalhoek hoger. Deze trend wordt ook aangetoond met behulp van een numeriek model in Smolders en Kaptein (2024) voor scenario analyse met verschillende bovenafvoeren.

Bij stormtij dringt er veel meer water het estuarium binnen en zal er vaak een piek in saliniteit gemeten worden. Aangezien dit water tijdens de daaropvolgende eb fase weer afgevoerd wordt, blijft de piek vaak beperkt tot een enkel stormtij.



Figuur 4 – Saliniteitsgradiënt in het Schelde-estuarium bij kentering hoog- en laagwater (KHW en KLW) bij maximale indringing in 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 en 2023.



Figuur 5 – Saliniteitsamplitude in het Schelde-estuarium bij maximum saliniteit per jaar voor 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 en 2023

5.2 Invloed bovendebiet

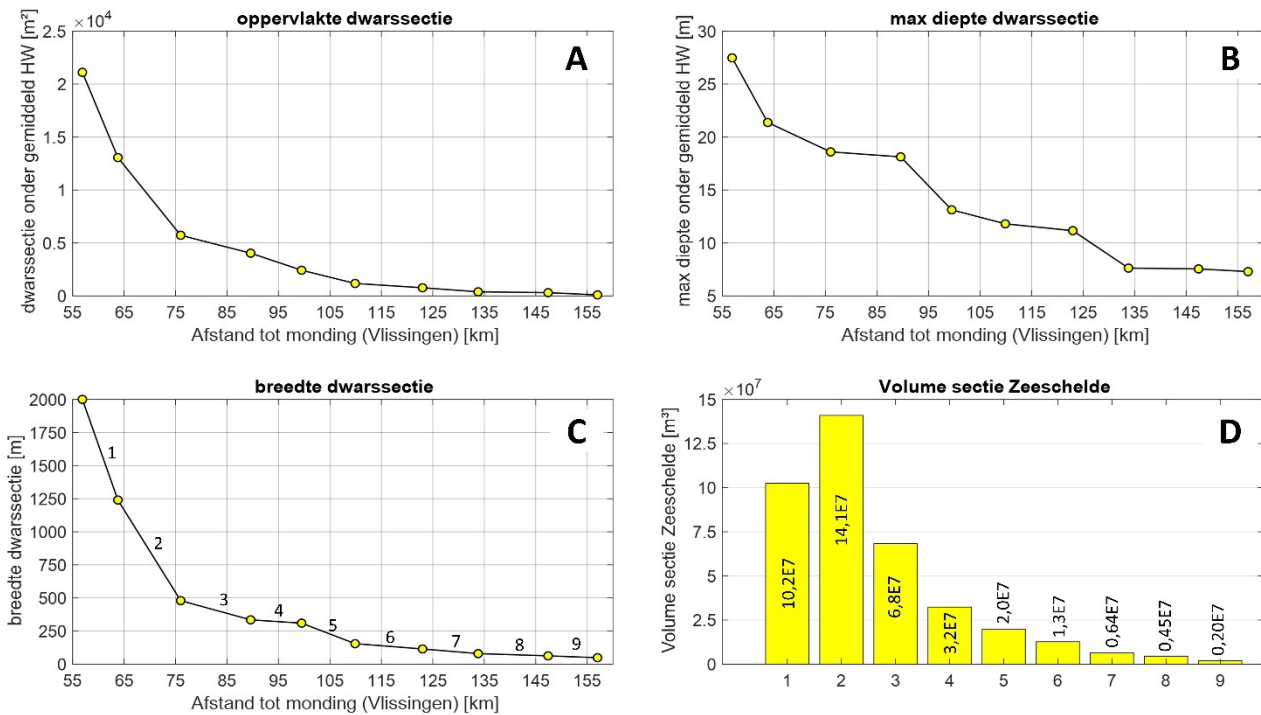
De bovenafvoer of het zoetwaterdebiet is de belangrijkste bepalende factor voor zoutindringing in het Schelde-estuarium. Bij zeer hoge afvoer zal het zout relatief snel, in enkele dagen, ver terug richting afwaarts gespoeld worden. Dit proces verloopt relatief snel afhankelijk van de grootte van de piek in bovenafvoer. Dit werd ook aangetoond door middel van enkel modelscenario's door Matsoukis et al. (2013) waarbij zij aantoonde dat een piek in bovenafvoer te Merelbeke reeds na anderhalf uur waarneembaar was te Dendermonde. Het duurt daarna echter een lange tijd (er is een lange tijd een veel lagere bovenafvoer nodig; termijn van weken of maanden) voordat het zout weer ver stroomopwaarts migreert. Dit is een relatief traag proces dat afhankelijk is van vele factoren zoals besproken in hoofdstuk 4, maar vooral van de bovenafvoer of het gebrek daaraan.

Aangezien het uitspoelen dus snel en de indringing traag verloopt is het belangrijk de geschiedenis van het bovendebiet te kennen bij de interpretatie van de zoutmetingen. Deze processen verhinderen ook om debietwaardes één op één te linken met saliniteitswaardes voor een bepaalde meetpost. Bovendien spelen er nog vele andere factoren een belangrijke rol bij de zoutindringing: zoals onder meer het getij (springtij t.o.v. doottij) en de mate waarin het water in het estuarium gemengd wordt. Deze menging is zeer plaats afhankelijk. De grote en snelle variatie in bovendebiet zorgt er bovendien voor dat het systeem niet in evenwicht zal zijn en dat maakt het moeilijk om de mate van zoutindringing te voorspellen.

Hoe verder stroomopwaarts, hoe sterker de bovenafvoer een invloed zal hebben op de zoutindringing. Het Schelde-estuarium is een trechtvormig estuarium waarbij de breedte quasi exponentieel afneemt met de lengte. Ook de oppervlakte van de dwarssecties neemt bijna exponentieel af naarmate men meer stroomopwaarts gaat (paneel A en C in Figuur 6). Naarmate men dus meer stroomafwaarts gaat, zal er veel meer debiet nodig zijn om het zout verder uit te spoelen. Zo zal een kleine piek in de bovenafvoer voldoende zijn om het zout bv uit sectie Hemiksem (km 90) te spoelen, maar zal er veel meer nodig zijn om het zout tot voorbij Antwerpen uit te spoelen. Verder is er variatie in spring- en doottij en zal er bij springtij een hoger debiet nodig zijn om verdere zoutindringing te vermijden dan bij doottij. Ook de lokale menging van het water zal zorgen voor een variabele parameter die de dispersie van zoutwater naar opwaarts mee zal bepalen. Bij een hogere lokale mengingscoëfficiënt of dispersiecoëfficiënt zal er een hoger debiet nodig zijn om zoutindringing tegen te gaan. Deze menging is sterk afhankelijk van het getij en de lokale geometrie/bathymetrie, maar ook van de bovenafvoer zelf.

In Keller en Ides (2007) werd een poging gedaan om debieten te linken aan bepaalde chloridewaarden tijdens kentering laagwater. Zij vonden dat voor Liefkenshoek deze correlatie maximaal was indien de invloed van het bovendebiet over een periode van 31 dagen in beschouwing werd genomen. Voor kentering hoogwater werd dan weer voor een periode van 41 dagen de maximale correlatie gevonden. Echter, indien de beschouwde datareeks voldoende lang is, zullen de gevonden waarden enkel een soort van gemiddelde voorstellen. Het proces van uitspoeling is een proces van slechts enkele dagen, afhankelijk van de piek van de bovenafvoer. Het is voornamelijk bij indringing dat er een veel langere periode beschouwd moet worden.

In Plancke et al. (2020) werd reeds de invloed van het bovendebiet op zoutindringing bestudeerd. Er werd gekeken naar het debiet te Melle en de verblijftijd in de Boven-Zeeschelde als verklarende parameters. Voor het debiet te Melle en voor de verblijftijd werd steeds gerekend met de dagwaarde van de meting zelf. Er wordt getracht een lineaire relatie te bepalen tussen debiet en zoutgehalte enerzijds en verblijftijd Boven-Zeeschelde en zoutgehalte anderzijds. De resultaten geven tegenstrijdige antwoorden: enerzijds wordt een sterke daling van het zoutgehalte bij hogere bovenafvoer gevonden en anderzijds een hoger zoutgehalte bij kortere verblijftijden in de Boven Zeeschelde. Kortere verblijftijd betekent een hogere bovenafvoer. Dit toont aan dat de relatie met het debiet niet éénduidig te vatten is.

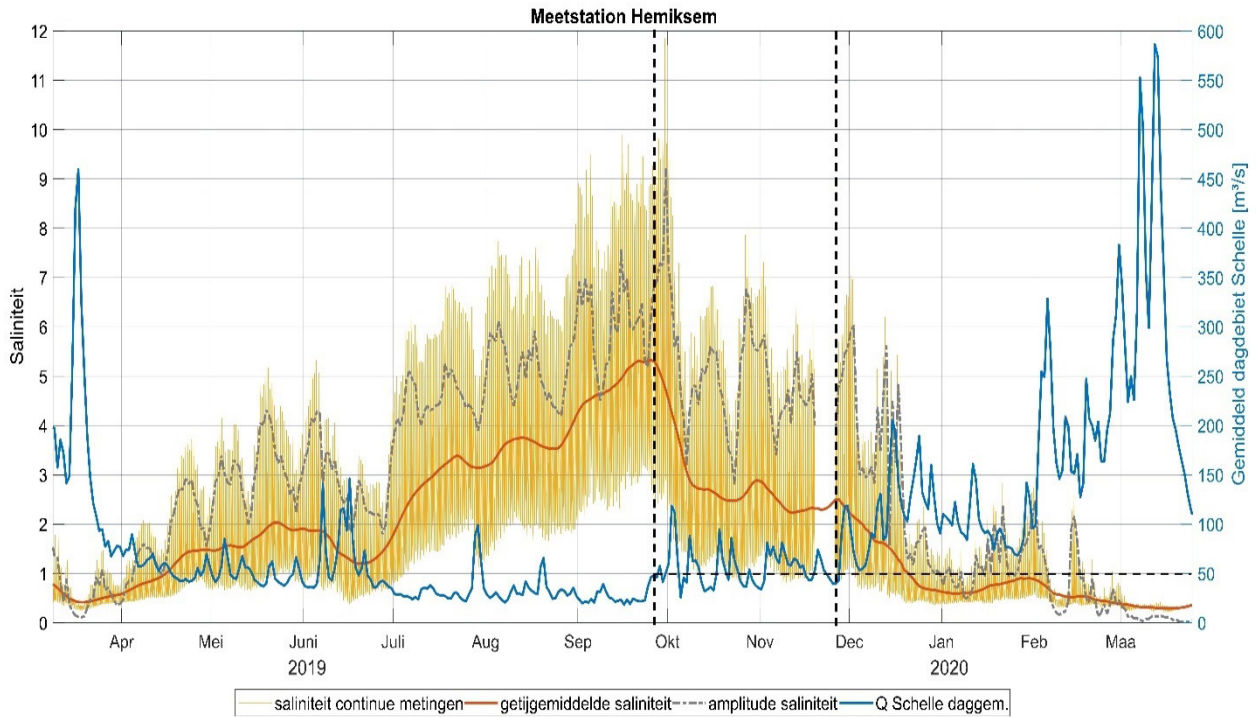


Figuur 6 – geometrische kenmerken van de Zeeschelde bepaald uit GIS analyse bathymetrie 2013: A geeft de afname van de dwarssectie weer richting opwaarts; B geeft de maximale diepte per dwarssectie weer; C geeft de breedte van de dwarssectie weer en in paneel D worden de volumes van de verschillende secties (genummerd in paneel C) weergegeven. De secties hebben niet steeds dezelfde lengte wat zijn invloed heeft in de volumebepaling.

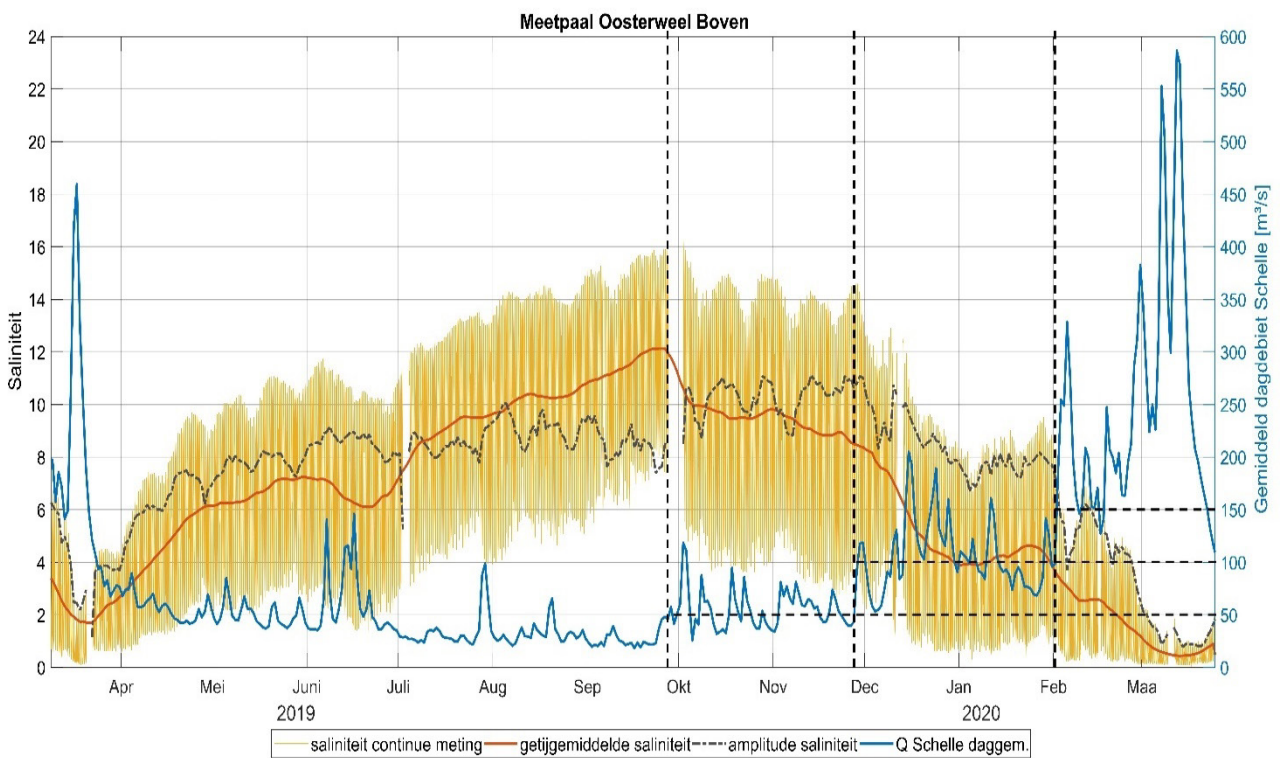
Bovendien suggereert vergelijking 18 van het analytisch model dat er een hogere bovenafvoer nodig is bij lagere zoutwaarden dan bij hogere zoutwaarden op dezelfde locatie of dwarssectie. Dit zou betekenen dat er een kleiner debiet nodig is om een ver binnengedrongen zoutgradiënt een beetje terug te dringen, maar dat er hogere debieten nodig zijn om deze volledig uit te spoelen. Aangezien de zoutgradiënt zoals die beschreven is in de vorige sectie zich bij een bepaalde verhoging van het debiet meer naar afwaarts zal verplaatsen. Hierdoor zal op een bepaalde locatie de saliniteit dalen. Maar om op die locatie de saliniteit nog verder te laten dalen, moet de hele zoutgradiënt nog verder afwaarts verplaatsen en daar is een nog hoger debiet voor nodig.

Twee voorbeelden worden hier gegeven: een eerste van voor de meetposten van Hemiksem in Figuur 6 en een tweede van de meetpaal Oosterweel in Figuur 7. De continue metingen zijn geplot vanaf 1 januari 2019 tot einde maart 2020. Er werd voor elke locatie een getijgemiddelde saliniteit berekend (rode lijn) om gemakkelijker een stijging of daling in saliniteit te herkennen uit de metingen. Tegelijk werd het debiet te Schelle op beide plots weergegeven. Wanneer we voor Hemiksem zien dat tegen eind oktober 2019 de saliniteit sterk daalt, dan gebeurt dit wanneer het debiet stijgt boven de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Ook in Oosterweel daalt de saliniteit in die periode al is dat daar minder sterk. Het debiet blijft dan tot eind december rond die $50 \text{ m}^3/\text{s}$ schommelen en de saliniteit zakt niet meer verder. Pas tegen eind december, wanneer het debiet stijgt boven de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ daalt de saliniteit verder in Hemiksem en in Oosterweel. Echter bij debieten boven de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ blijft de saliniteit te Oosterweel hangen rond waarde 4. Pas wanneer het debiet boven de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ gaat, daalt de saliniteit verder tot de waarde van zoet water.

Een relatief klein debiet is voldoende om het zout niet te ver opwaarts te laten indringen, maar een veel hoger debiet is nodig om het volledig uit te spoelen.

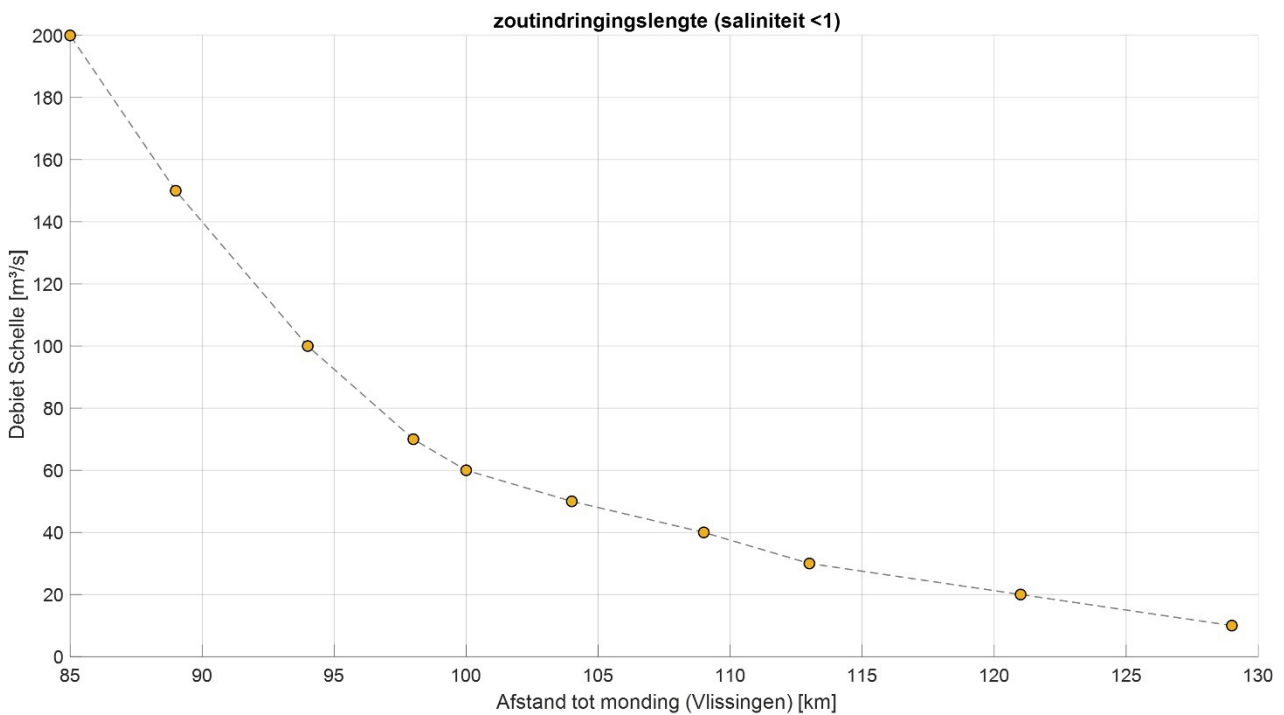


Figuur 7 – Saliniteit meetstation Hemiksem vanaf jan 2019 tot maart 2020 en debiet te Schelle.



Figuur 8 – Saliniteit meetpaal Oosterweel (oppervlakte) vanaf jan 2019 tot maart 2020 en debiet te Schelle.

Met behulp van een 3D numeriek model werd zoutindringing gesimuleerd voor verschillende constante bovenafvoeren. Deze evenwichtsberekeningen worden uitvoerig beschreven in deelrapport 2 van deze studie (Smolders en Kaptein, 2024). Uit scenario's met verschillende constante bovenafvoer werd steeds de locatie bepaald waar de maximale saliniteit 1 was (gele punten in Figuur 8). Bijvoorbeeld in een scenario waarbij het bovendebiet constant werd gehouden op 60 m³/s werd er een maximale saliniteit van 1 aangetroffen op km 100 van de monding. Of om dit resultaat anders te interpreteren toont de figuur aan dat om de zoutindringing niet verder te laten komen dan Temse (km 100) een minimale bovenafvoer van 60 m³/s volstaat. Voor Hemiksem (km 90) zou dit 140 m³/s zijn. In Figuur 6 is te zien hoe de saliniteit halverwege januari 2020 tot onder waarde 1 zakt bij debieten die inderdaad in de buurt van de 140 m³/s liggen.



Figuur 9 – Maximale gesimuleerde afstand tot waar een saliniteitswaarde van 1 kan teruggevonden worden in het estuarium in functie van het totale constante bovendebiet.

5.3 Historisch perspectief

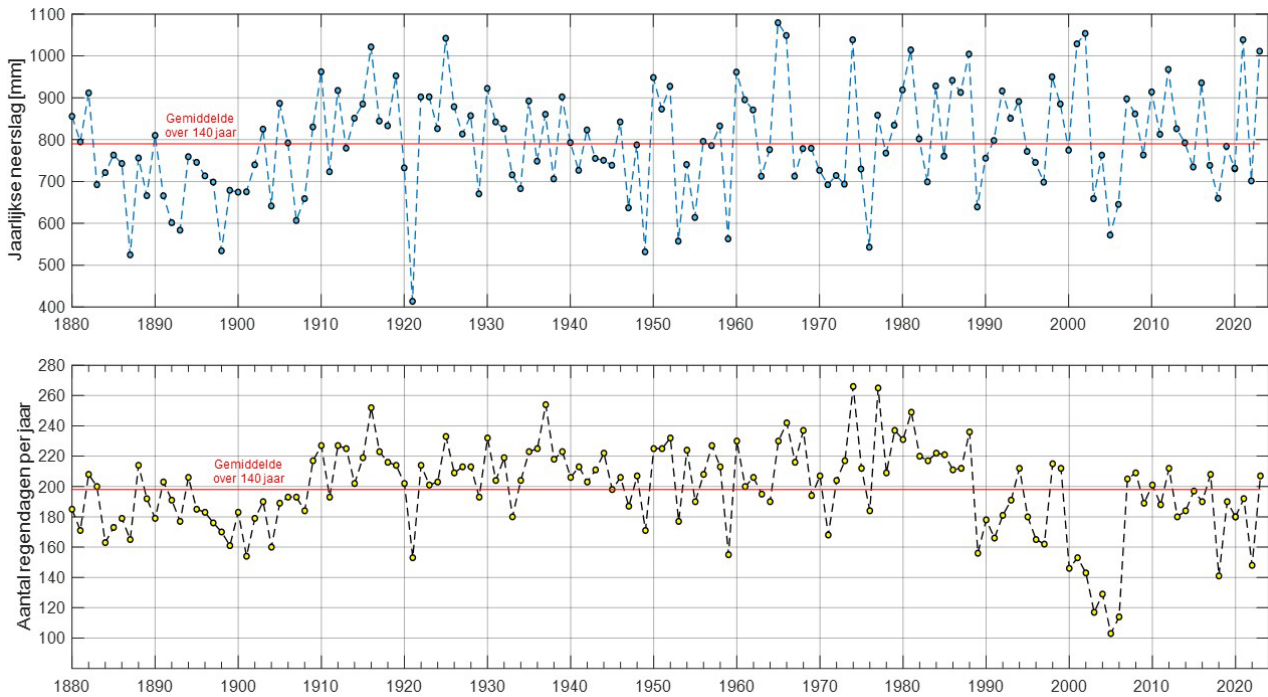
Voor deze studie werd een grote hoeveelheid data uit het WL archief gedigitaliseerd. Het betreft data van tussen 1943 en 1975. Bijlage 4 beschrijft al de data die uit het archief is gedigitaliseerd. Deze data voegt een aanzienlijke tijdsperiode (1943-1975) toe aan het tot voor deze studie bekend tijdsvenster (1975 – 2022). Het stelt ons in staat de huidige trends die waargenomen worden in een langer historisch perspectief te plaatsen.

5.3.1 Neerslag

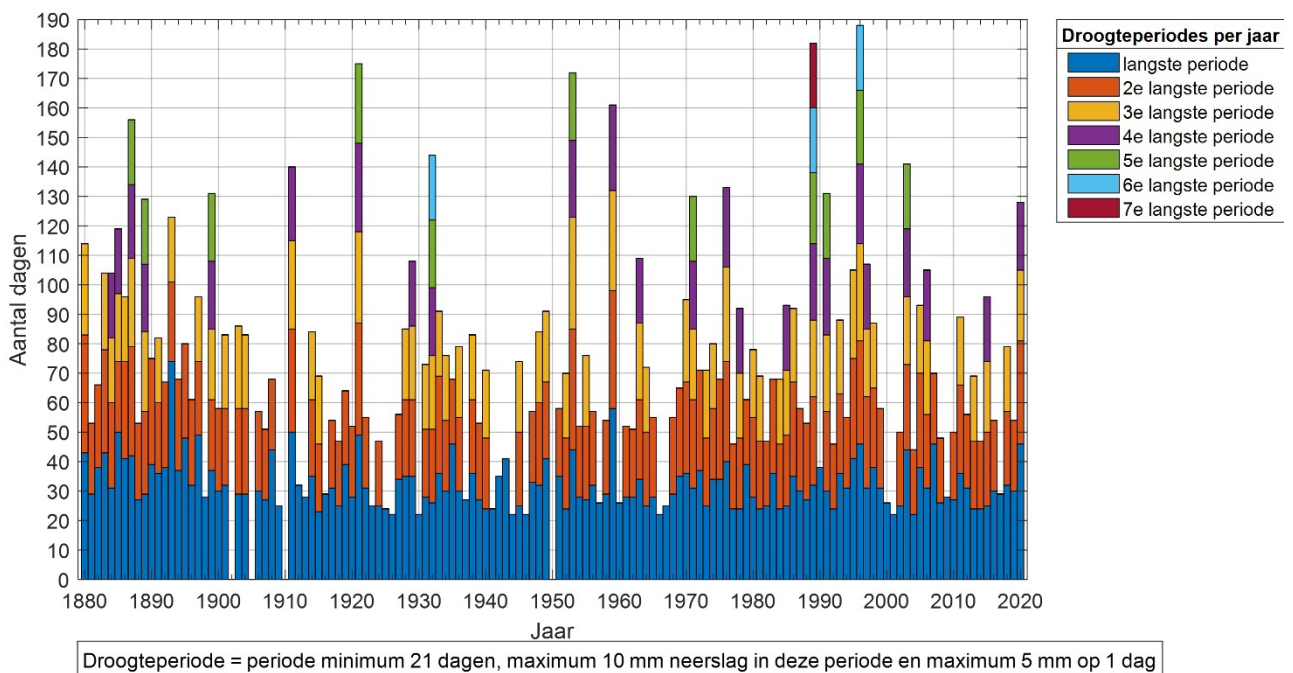
De Schelde is een neerslagrivier en de afvoer is dus sterk afhankelijk van de hoeveelheid en frequentie neerslag die er valt in het stroomgebied. Veranderingen in neerslagfrequentie en hoeveelheid van jaar tot jaar zullen effect hebben op de zoutindringing in het Schelde-estuarium. Voor het historisch perspectief van de zoutmetingen is het daarom interessant om ook deze van de neerslag te bekijken.

Figuur 10 toont de jaarlijkse neerslag vanaf 1880 tot 2023. Deze figuur toont aan dat in het begin van de metingen de jaarlijkse neerslag beduidend lager lag dan het langjarig gemiddelde (790 mm). De beginjaren van vorige eeuw waren dan weer beduidend natter. Uitzondering is hier 1921 dat een uitzonderlijk droog jaar was. De figuur toont eveneens het aantal regendagen per jaar. Langere droge periodes kunnen afgewisseld worden met korte periodes met intense neerslag en op die manier geeft de jaarlijkse hoeveelheid neerslag een vertekend beeld. Wat het aantal regendagen betreft valt vooral de beginjaren 2000 op door het lage aantal regendagen van deze jaren. Nochtans zijn 2001 en 2002 bij de natste jaren wat jaarlijkse hoeveelheid neerslag betreft. Maar aangezien voor zoutindringing de lengte van een droogteperiode van belang is, werden uit deze data droogteperiodes per jaar berekend.

Een periode werd als droog beschouwd als deze minimum 21 dagen lang was, er in deze periode maximum 10 mm neerslag viel waarvan maximum 5 mm op één dag. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 11. Een andere definitie van een droogteperiode geeft licht andere resultaten, maar de definitie gehanteerd voor Figuur 11 geeft toch al een goed idee. Er is ook geen direct relatie gevonden tussen neerslag te Ukkel en het bovendebiet van de Schelde. Vaak is het zo dat het bovendebiet pas zakt wanneer het al een langere periode droog is. Wat ook niet in deze cijfers zichtbaar is, is dat het gebruik (voor o.a. landbouw en industrie) van het oppervlaktewater doorheen deze jaren steeds is toegenomen en dat dit ook zorgt voor een vermindering van de bovenafvoer in het Schelde-estuarium. In de figuur vallen zeker de jaren op waarvan bekend is dat ze zeer droog waren: 1921, 1959 en 1976. Of er een trend in deze data te vinden is, is voer voor een andere studie, maar de cijfers tonen wel aan dat gedurende deze lange periode (1880 – 2020) er veel variatie zit in neerslag, aantal regendagen en droogteperiodes. Een duidelijk zichtbare trend is uit de figuren niet af te leiden.



Figuur 10 – Overzicht van de jaarlijkse neerslag en het aantal regendagen te Ukkel van 1880 tot 2023 (brondata van KMI)

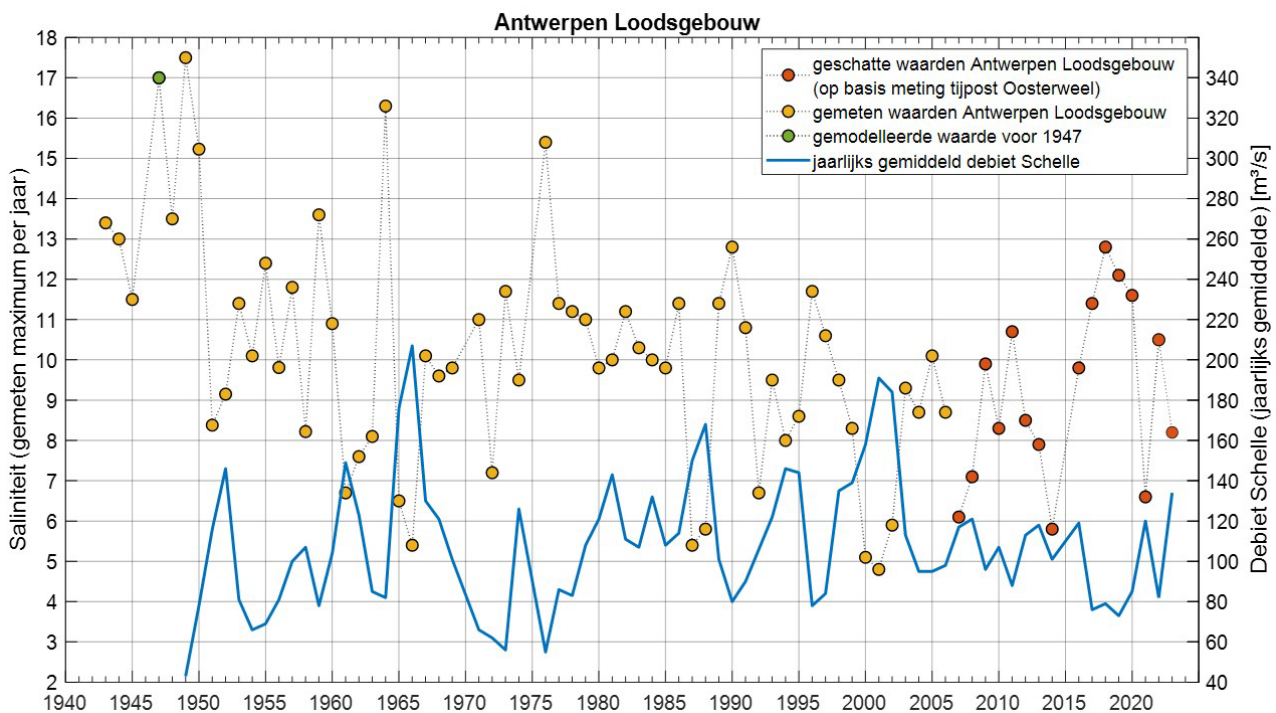


Droogteperiode = periode minimum 21 dagen, maximum 10 mm neerslag in deze periode en maximum 5 mm op 1 dag

Figuur 11 – Inschatting van de lengte en het aantal droogteperiodes per jaar (brondata van KMI)

5.3.2 Historische zoutindringing

De meeste metingen in het archief werden teruggevonden, werden uitgevoerd ter hoogte van het Loodsgebouw te Antwerpen. Dit is ook nu nog een belangrijk tijpost, maar sinds 2006 wordt er geen zoutgehalte meer gemeten. Figuur 12 geeft de maximum gemeten saliniteit per jaar weer voor de locatie Antwerpen Loodsgebouw. Deze locatie heeft de langste bijna ononderbroken tijdreeks aan data en tot op heden is het zo dat voor deze locatie het bovendebiet elk jaar ervoor zorgt dat de saliniteit hier minstens één keer per jaar onder de waarde 0,5 (zoet water) zakt. Voor de jaren 2007 tot 2023 werd een waarde geschat op basis van de metingen van de meetpaal Oosterweel. Deze schatting werd gedaan op basis van voorgaande jaren waarbij zowel te Antwerpen Loodsgebouw als meetpaal Oosterweel saliniteitswaarden beschikbaar waren. In Figuur 12 zijn de geschatte waarden in het oranje weergegeven t.o.v. de gele markers die de gemeten waarden voor de voorgaande jaren weergeven. Voor 1947 ontbraken (door de oorlog) ook saliniteitswaarden en dus ook een maximum. Maar voor dit jaar was er wel data beschikbaar voor een tijpost verder stroomopwaarts en die gaf hoge saliniteitswaarden weer voor 1947. Een hoge waarde voor 1947 zou verder de hoge waarde voor 1949 ondersteunen (geen éénmalige gebeurtenis) en daarom werd voor 1947 een waarde toegevoegd op basis van een hindcast simulatie (zie deelrapport 2, Smolders en Kaptein, 2023). Vanaf 1949 was er ook informatie beschikbaar over het jaargemiddeld debiet te Schelle. Dit is ook in de figuur toegevoegd. In het algemeen hebben jaren met een hoog jaarlijks gemiddeld debiet te Schelle ook een lager maximum saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw. In de beginjaren van de metingen (i.e. 1947 en 1949) worden de hoogste waarden in saliniteit te Antwerpen genoteerd. Enkele droge jaren geven ook hoge saliniteitsmaxima te Antwerpen Loodsgebouw, i.e. de jaren 1959, 1964, 1976 en 1990. Recent kenden de jaren 2017 tot en met 2020 langere droge periodes wat resulteerde in hogere saliniteitsmaxima, met 2018 als uitschieter. 2021 was dan weer een jaar met een lage maximum saliniteit te Antwerpen.

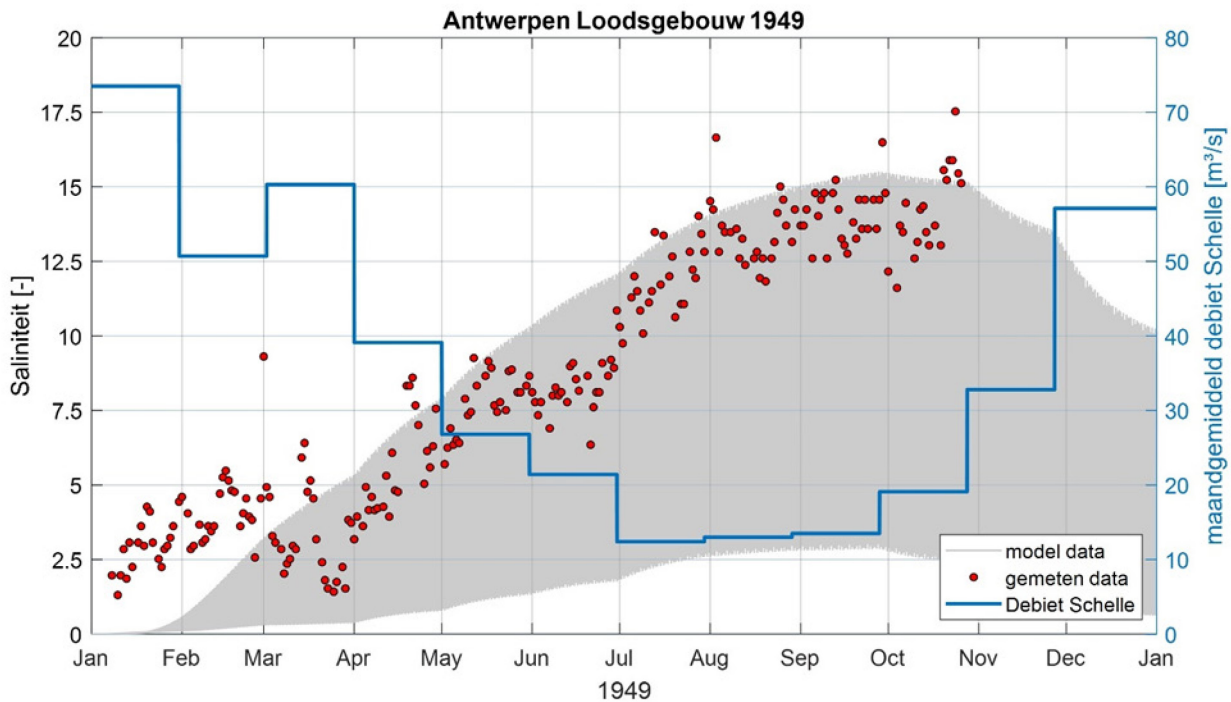


Figuur 12 – jaarlijks maximum zoutwaarde gemeten ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw en jaarlijks gemiddeld debiet te Schelle.

Figuur 12 toont geen duidelijke trend over de jaren. Een hoog jaargemiddeld debiet te Schelle wijst vaker op een jaar met lagere saliniteit in het estuarium, maar zoals eerder vermeld is de variabiliteit afhankelijk van vele factoren zoals lengte van een droge of natte periode met lage afvoer, getij, wind, menging, ...)

De minimale saliniteitswaarden te Antwerpen Loodsgebouw zijn in Figuur 12 niet weergegeven omdat tot op heden het elk jaar zo is geweest dat het zout tot voorbij Antwerpen is uitgespoeld, wat maakt dat deze waarde steeds tussen de 0 en 0,5 varieerde (= waarde voor zoet water).

Aangezien de waarden van eind jaren 40 zo hoog liggen, werd o.a. een hindcast gedaan met een 3D numeriek model van het jaar 1947 en 1949. Meer uitleg over deze hindcast zelf in deelrapport 2 van deze studie (Smolders en Kaptein, 2024). Figuur 13 geeft de resultaten, model en gemeten waarden, voor 1949 weer. Buiten de eerste drie maanden (= inlooperperiode van het model voor zout) komen de resultaten van het model goed overeen met de gemeten waarden. Het model toont hier aan dat met de gegeven randvoorwaarden uit 1949 (bovenafvoer) het inderdaad mogelijk is om dergelijke hoge saliniteitswaarden te Antwerpen Loodsgebouw te bekomen. Dit zorgt voor extra vertrouwen in de gedigitaliseerde data uit het WL archief.



Figuur 13 – gemeten en gesimuleerde saliniteit ter hoogte van Antwerpen Loodsgebouw in 1949

6 Conclusie

6.1 Conclusies

6.1.1 Verschuiving saliniteitsgradiënt doorheen de jaren

Op basis van de gemeten saliniteiten in het Schelde-estuarium en gezien het historisch perspectief dat geschetst werd, is er niet meteen een zichtbare verschuiving van de saliniteitsgradiënt in de afgelopen 75 jaren. De variatie in de data is zo groot en zo afhankelijk van zo veel invloedsfactoren, waarvan de bovenafvoer ongetwijfeld de grootste is, dat een trendanalyse op de data zeer moeilijk is. De hoogst gemeten saliniteiten gemeten te Antwerpen Loodsgebouw dateren uit 1947 en 1949 en dat geeft ook een vertekend beeld. Met een numeriek model kunnen wel alle randvoorwaarden identiek gehouden worden om invloed van één specifieke parameter te testen. Dit wordt in deelrapport 2 van deze studie uitgevoerd (Smolders en Kaptein, 2024)

Verder geeft het voorgelegde analytisch model een duidelijke relatie van zoutindringing met de dwarssectie van het estuarium. Deze dwarssectie is de laatste decennia op tal van plaatsen wel toegenomen, waardoor het zout verder kan indringen. De historische jaren met de hoogst genoteerde saliniteitswaarden te Antwerpen, werden gekenmerkt door zeer lange perioden van lage bovenafvoer (1947 en 1949). Moesten deze randvoorwaarden zich nu voordoen, met de ruimere dwarssecties, zouden hogere saliniteitswaarden (dan de maxima van 1949) te Antwerpen gemeten worden en kan er wel van een verschuiving van de saliniteitsgradiënt gesproken worden.

6.1.2 Relatie bovenafvoer en zoutindringing

Opwaarts zouttransport door dispersie en menging wordt tegengewerkt door advectief transport afwaarts door het bovendebiet. Een eenduidige relatie tussen zoutindringing en zoetwaterdebiet wordt in de data niet gevonden. De reden is dat zoutindringing een trager proces is dan zout-uitspoeling, waardoor geen eenduidige relatie opgemaakt kan worden tussen het voorafgaande debiet en zoutindringing. Verder wordt een eventuele relatie verstoord door tal van andere omgevingsfactoren zoals wind, golven en getijfase. Via scenario analyse met een 3D numeriek model is deze relatie er duidelijk wel.

Op basis van de data-analyse werden voor enkele stations minimale waarden voor een bovendebiet ingeschat om zoutindringing te vermijden. Echter, deze waarden variëren sterk met relatief laag benodigd debiet voor de opwaartse stations tot zeer hoge bovenafvoer voor de meer afwaartse gelegen stations. Verder is er voor een bepaald station een lagere bovenafvoer nodig om de saliniteit te verlagen, dan om deze echt volledig uit te spoelen. Ook de omstandigheden spelen een grote rol, zoals het getij, wind, menging, lokale geometrie/bathymetrie. Zo is er bij springtij een hogere bovenafvoer nodig dan bij doodtij. Dit rapport geeft enkele grootteordes om voor bepaalde locaties het zout volledig uit te spoelen. Zo lijkt het erop dat er voor Hemiksem (km 90) 140 m³/s nodig is om de saliniteitsgradiënt volledig naar afwaarts te verschuiven. Hoe verder afwaarts, hoe hoger dit debiet zal moeten zijn.

6.1.3 Zoutindringing tegengaan

Tenslotte geeft het voorgestelde analytisch model de actoren weer die de grootste invloed hebben op de zoutindringing. Zoutindringing is een traag proces. Er zijn weken tot maanden nodig om het zout na uitspoeling weer ver opwaarts te laten indringen. Het bovendebiet is dus de belangrijkste factor. Datzelfde geldt voor de geometrie van het estuarium. Bij verdere verruiming (of zeespiegelstijging) zal er een hoger bovendebiet nodig zijn om de zoutgradiënt tot op dezelfde plaats terug te dringen. Tenslotte is er nog de dispersiecoëfficiënt of de mate waarin het zout via horizontale menging opwaarts kan migreren. Hoe lager deze coëfficiënt hoe minder ver het zout zal indringen.

6.1.4 Zeespiegelstijging faciliteert zoutindringing

Wanneer zeespiegelstijging geïnterpreteerd wordt als een verruiming van het estuarium (dus bathymetrie blijft hetzelfde en het waterpeil stijgt) zal een hoger bovendebiet nodig zijn om het zout terug te dringen en kan er van een verschuiving van de zoutgradiënt gesproken worden.

7 Referenties

7.1 Literatuur

- Cai, H., Savenije, H.H.G., Toffolon, M., 2012. A new analytical framework for assessing the effect of sea-level rise and dredging on tidal damping in estuaries. *Journal of Geophysical Research*, 117(C9), C09023. doi:10.1029/2012JC008000.
- Cai, H., Savenije, H.H.G. & Gisen, J. I. A., 2015. A coupled analytical model for salt intrusion and tides in convergent estuaries, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2015.1027206
- De Boeck, K., Van Hoestenbergh, T., Vanlierde, E., Deschamps, M., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2014). Saliniteit – chloriniteit – chlorositeit: relaties in gebruik in zeewater en in de Beneden-Zeeschelde: Vol. 12_076 (WL Rapporten). Waterbouwkundig Laboratorium.
- Elzerman, J. J. (1953). Samenstelling en dichtheid van zeewater: verband tussen de verschillende gebruikelijke grootheden ter aanduiding van het zoutgehalte - Methode ter bepaling en berekening van deze grootheden . Rijkswaterstaat, Studiedienst IJmuiden.
- Fischer, Hugo B. et al (1979), *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, New York, ISBN 0-12-258150-4
- Forch, C., Martin Knudsen, und S. P. L. Sörensen. 1902. "Berichte über die Konstantenbestimmungen zur Aufstellung der hydrographischen Tabellen. D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter, 6" . Raekke, naturvidensk. og mathem., Afd XII.1, 151 pp., 1902.
- Hill, K. D., T. M. Dauphinee and D. J. Woods, 1986: The extension of the Practical Salinity Scale 1978 to low salinities, *IEEE J. Oceanic Eng.*, 11, 109–112.
- IOC, SCOR and IAPSO, The international thermodynamic equation of seawater - 2010: Calculations and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. (2010).
- Jacobsen, J. P., and Martin Knudsen. 1940. Urnormal 1937 or primary standard sea-water 1937. *Union GÉod. et Geophys. Intern., Assn. d'Océan-ographie, Pub. sci.*, no. 7, 38 pp., Liverpool, 1940
- Keller, X.; Ides, S. (2007). Analyse saliniteitsdata: hoog- en laagwater kenteringsvaarten Schelde 1975-2006. WL Rapporten, 770_24. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. III, 22 + 62 bijlagen pp
- Knudsen, M., 1901. *Hydrographical Tables*. Copenhagen. 63 pp.
- Krümmel, 1907. *Handbuch der Ozeanographie*. Band1, 2e Auflage, 1907.
- Lacroix, G., Ruddick, K., Ozer, J., & Lancelot, C. (2004). Modelling the impact of the Scheldt and Rhine/Meuse plumes on the salinity distribution in Belgian waters (southern North Sea). *Journal of Sea Research*, 52(3), 149-163.
- Landolt-Börnstein. *Phys.-chem. Tabellen*, 5. Auflage, 1. Ergänzungsband, S. 24, Berlin, 1927
- Lewis, E. L., (1980) The Practical Salinity Scale 1978 and its antecedents. *Journal of Oceanic Engineering*, 5(1). 3- 8.
- Matsoukis, C.; Vanlede, J.; De Maerschack, B.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Effect of fresh water discharge on the salinity intrusion in the Scheldt estuary: Final Report. Version 4.0. WL Rapporten, 13_165. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium.

- Pawlowicz, R. (2013) Key Physical Variables in the Ocean: Temperature, Salinity, and Density. *Nature Education Knowledge* 4(4):13
- Plancke, Y.; Vanlede, J.; Meire, D.; Mostaert, F. (2020). Slibhuishouding in het Schelde-estuarium: Data-analyse. Versie 0.1. WL Rapporten, 20_061_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Poisson, A., and M. H. Gadhoumi, 1993: An extension of the Practical Salinity Scale 1978 and the Equation of State 1980 to high salinities. *Deep-Sea Res. I*, 40, 1689-1698.
- Ramsing, N. B., & Gundersen, J. K. (n.d.). *Seawater and gases: tabulated physical parameters of interest to people working with microsensors in marine systems*. Unisense.
- Savenije, H.H.G., 1986. A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries. *Journal of Hydrology*, 85(1–2), 87–109. doi:10.1016/0022-1694(86)90078-8.
- Savenije, H.H.G., 1989. Salt intrusion model for high-water slack, low-water slack, and mean tide on spread sheet. *Journal of Hydrology*, 107(1–4), 9–18. doi:10.1016/0022-1694(89)90046-2.
- Savenije, H.H.G., 1993. Predictive model for salt intrusion in estuaries. *Journal of Hydrology*, 148(1–4), 203–218. doi:10.1016/0022-1694(93)90260-G.
- Savenije, H.H.G., 2005. *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. New York: Elsevier.
- Savenije, H.H.G., Toffolon, M., Haas, J., Veling, E.J.M., 2008. Analytical description of tidal dynamics in convergent estuaries. *Journal of Geophysical Research*, 113(C10), C10025. doi:10.1029/2007JC004408.
- Savenije, H.H.G., 2012. *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. completely revised 2nd edition, Available from: <http://www.salinityandtides.com>.
- Schramkowski, G.P.; Smolders, S. (2024). An idealized one-dimensional tidally-averaged salinity model for the Scheldt estuary. Version 3.0. WL Rapporten, 20_028. Flanders Hydraulics: Antwerp, Belgium (in preparation).
- Smolders, S.; Kaptein, S. (2024). Zoutintrusie in het Schelde estuarium: Scenario analyse numerieke modellering. Versie 2.1. WL Rapporten, 19_081_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). *Integraal Plan Bovenzeeschede: Subreport 1 – SCALDIS: a 3D Hydrodynamic Model for the Scheldt Estuary*. Version 5.0. WL Rapporten, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., & Fleming, R. H. (1942). *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology* (Vol. 7). New York: Prentice-Hall.
- Swart, J. P. (1982). *Relatie geleidendheid-chloriniteit voor de Westerschelde: Vol. 82.V280 (Nota WWKZ)*. Rijkswaterstaat, Directie waterhuishouding en waterbeweging, district kust en zee, adviesdienst Vlissingen.
- Thatcher, M. L., & Harleman, D. R. (1972). A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries.
- UNESCO, 1966. Second Report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards. Rome, October 1965. *Unesco Tech. Pap. in Mar. Sci.*, No. 4 (incorporated with Nos. 1, 8 and 14 in No. 27, op. cit.)
- Vandenbruwaene, W.; Bertels, J.; Michielsen, S.; Thant, S.; Van Den Berg, M.; Brackx, M.; Hertoghs, R.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Vereecken, H.; Meire, D.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2021). *Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS) – Jaarboek monitoring 2020: data rapportage monitoring waterbeweging en fysische parameters in Zeeschede en bijrivieren*. versie 4.0. WL Rapporten, PA047_10. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XIII, 80 + 17 p. bijl. pp. <https://dx.doi.org/10.48607/84>

Van der Burgh, P., 1972. Ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van zoutverdelingen in estuaria, kanalen en zeeën. Rijkswaterstaat Rapport, 10-72.

7.2 Data

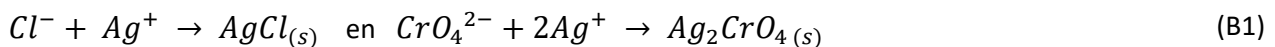
info neerslag per historisch jaar:

<https://www.meteobelgie.be/klimatologie/grafische-gegevens/ukkel-vanaf-1833>

Bijlage 1 Titratie van een zoutoplossing met zilvernitraat

Doel van deze titratie is de massaconcentratie bepalen van een onbekende zoutoplossing. In een omgeving met neutrale pH (tussen 6 en 10) wordt deze neerslagtitratie de methode van Mohr genoemd. In een oplossing met ongekende hoeveelheid zouten zal druppelsgewijs een hoeveelheid zilvernitraat ($AgNO_3$) toegevoegd worden. De zilverionen zullen reageren met de chloriden (maar ook met bromide en jodide ionen en carbonaten en sulfaten) en neerslaan. Er wordt ook een indicatorstof toegevoegd. Bij de methode van Mohr is dat kaliumchromaat (K_2CrO_4). Wanneer alle zout ionen gereageerd hebben met het aanwezig zilverion en zijn neergeslagen, dan zal het zilverion verder reageren met het chromaat en samen het rode zilverchromaat vormen en neerslaan. Dit is het visuele teken om te stoppen met het toevoegen van zilvernitraat. Uit de toegevoegde hoeveelheid zilvernitraat kan dan de massaconcentratie van het aanwezige zout berekend worden. Er zijn een aantal voorwaarden opdat een neerslagtitratie een goede techniek zou zijn om de massaconcentratie van een bepaalde stof te bepalen. De reactie moet snel optreden of het product moet snel neerslaan. De reactie moet volledig optreden. In dit geval moeten alle chloride ionen aan zilver gebonden zijn voordat het zilverion een reactie aangaat met de indicatorstof. Als deze voorwaarden voldaan zijn, kan men ervan uitgaan dat de hoeveelheid toegevoegde zilvernitraat equivalent is aan de hoeveelheid chloride-ionen die in de zoutoplossing aanwezig waren. Bij een titratie noemt men dit dat het equivalentiepunt bereikt is.

Bij de methode van Mohr zullen volgende reacties optreden:



Een voorbeeld:

Er wordt een zilvernitraat oplossing gemaakt door 8,5633 g zilvernitraat op te lossen in 1 L demiwater. De eigenschappen van deze oplossing zijn samengevat in Tabel 3.

Tabel 3 – Eigenschappen zilvernitraatoplossing

	m [g]	M [g/mol]	Aangelengd met	V [L]	C ([mol/L])
$AgNO_3$	8,5633	169,87	demiwater	1000	0,05041

$$C_{Ag^+} = \frac{n_{Ag^+}}{V_{monster}} = \frac{m_{AgNO_3}}{M_{AgNO_3} * V_{AgNO_3}} = \frac{8,5633g}{169,87 \frac{g}{mol} * 1000L} = 0,05041 \text{ mol/L} \quad (B2)$$

Via titratie wordt deze oplossing druppelsgewijs toegevoegd aan een oplossing met ongekend zoutconcentratie. Wanneer een rode neerslag zichtbaar wordt is duidelijk dat het omslagpunt of equivalentiepunt bereikt is. Er is in totaal 12,77 mL zilvernitraat oplossing toegevoegd. Het aantal mol zilvernitraat toegevoegd bedraagt dan:

$$n_{AgNO_3} = C_{AgNO_3} * V_{AgNO_3}(\text{toegevoegd}) = 0,05041 \frac{mol}{L} * 0,01277L = 6,43 * 10^{-4} \text{ mol} \quad (B3)$$

Uit de reactievergelijking weten we dat het aantal mol zilvernitraat in deze titratie overeenkomt met het aantal chlorideionen en dus is:

$$n_{AgNO_3} = n_{NaCl} \quad (B4)$$

Het staal met ongekende zoutoplossing had een volume van 10 mL vervolgens bepalen we het aantal mol NaCl in deze oplossing:

$$C_{NaCl} = \frac{n_{NaCl}}{V_{NaCl}} = \frac{6,43 * 10^{-4} mol}{0,01L} = 6,43 * 10^{-2} mol/L \quad (B5)$$

Aangezien we weten dat de molaire massa van NaCl 58,44 g/mol bedraagt, kunnen we de massaconcentratie eenvoudig berekenen:

$$C_{NaCl} * M_{NaCl} = 6,43 * 10^{-2} \frac{mol}{L} * 58,44 \frac{g}{mol} = \mathbf{3,76 g/L} \quad (B6)$$

Ons staal met ongekend zoutgehalte bevatte dus 3,76 g/L aan chloriden of equivalenten.

Bijlage 2 Effect van de atoommassa op de chloriniteit

Bij de titratie worden naast chloride ionen ook bromide en jodide ionen neergeslagen indien die aanwezig zijn. Echter in de berekening achteraf waarbij de hoeveelheid gebruikte zilvernitraat in de titratie wordt omgerekend naar een hoeveelheid chloriden, wordt geen rekening gehouden met de aanwezige bromide en jodide ionen; er wordt aangenomen dat het allemaal chloride ionen zijn. De definitie van chloriniteit introduceert op die manier een chloorequivalent die afhankelijk is van de atoommassa's⁴ van de betreffende ionen. Veranderingen of herdefiniëren van atoommassa's heeft dus een invloed op de relatie tussen saliniteit en chloriniteit zoals in vergelijking 1 en 2 weergegeven. De standaard waarmee chloriniteitsmetingen vergeleken worden, wordt "normaal water" genoemd. Dit is een staal zeewater aangemaakt in een laboratorium waarvan de chloriniteit is aangepast tot 19,4 ‰. In 1937 werd een nieuwe standaard voor chloriniteit aangemaakt (Urnormal-1937 cfr. Jacobsen and Knudsen, 1940), maar in vergelijking met de oude standaard bevatte de nieuwe standaard 19,381 ‰ als chloriniteit. De equivalente hoeveelheid zilver die nodig was om alle halogeniden⁵ in deze nieuwe standaard neer te slaan, werd bepaald. De verhouding tussen chloriniteit en zilver was berekend en was gelijk aan 0,3285233. Op basis hiervan werd een nieuwe definitie van chloriniteit bepaald die onafhankelijk is van de geldend atoommassa's van de betrokken atomen:

Chloriniteit = Het getal dat de chloriniteit weergeeft in g per kg zeewater is gelijk aan het getal dat de massa "atoommassa van zilver" in gram weergeeft dat nodig is om alle halogeniden neer te slaan in 0,3285233 kg zeewater (Sverdrup et al., 1942).

Voor het chloorequivalent blijft de vorige definitie behouden en die is dus wel afhankelijk van de geldend atoommassa's. De verhouding tussen de atoommassa's van chloor en zilver volgens de in 1940 geldend atoommassa's is:

$$\frac{\text{atoommassa Cl}}{\text{atoommassa Ag}} = \frac{35,457}{107,880} = 0,3286707 \quad (\text{B7})$$

Hierdoor wordt de verhouding tussen chloorgehalte en chloriniteit:

$$\frac{0,3286707}{0,3285233} = 1,0004487 \quad (\text{B8})$$

of

$$\text{Chloorequivalent} = 1,00045 * \text{chloriniteit} \quad (\text{B9})$$

Deze verhouding verandert licht wanneer we de huidige (2020) atoommassa's voor chloor en zilver gebruiken:

⁴ De atoommassa van een element is een gewogen gemiddelde over de massagetallen van de isotopen met hun relatieve aanwezigheid in de vrije natuur. Zo is de atoommassa van chloor 35,453 omdat chloor in de natuur voorkomt als ongeveer 75% chloor-35 en 25% chloor-37.

⁵ Halogeniden of haliden is de verzamelnaam voor alle zouten die een verbinding vormen tussen een metaal en een halogeen. Hieronder vallen de Fluoriden, Chloriden, Bromiden, Jodiden, Astatiden en Hydriden.

$$\frac{\text{atoommassa Cl}}{\text{atoommassa Ag}} = \frac{35,453}{107,8682} = 0,3286696 \quad (\text{B10})$$

Dit geeft dan weer:

$$\frac{0,3286696}{0,3285233} = 1,0004454 \quad (\text{B11})$$

Afgerond blijft de factor 1,00045 echter gelijk. Deze verhouding is belangrijk wanneer de chemische samenstelling van zeewater berekend zou worden op basis van een gegeven/gemeten chloriniteit. Het chloorgehalte zal altijd iets hoger liggen. Om hetzelfde chloorgehalte te bekomen met de huidige atoommassa's moet de chloriniteit met 0,0064 ‰ verhoogd moeten worden. In de praktijk ligt dit ver beneden de nauwkeurigheid van een titratie en is het verschil verwaarloosbaar.

Bijlage 3 Referentie Samenstelling zeewater

De Referentie Samenstelling van zeewater wordt gegeven in onderstaande tabel. De waarden zijn overgenomen van Pawlowicz (2013). Deze referentie samenstelling kan gebruikt worden om artificieel zeewater aan te maken. Deze samenstelling bevat geen opgelost organisch materiaal en ook geen gassen. Echt zeewater kan naast de opgesomde anorganische stoffen nog andere stoffen bevatten waarvan de concentratie en de variatie hoger kunnen liggen dan 1 mg/kg. De concentraties van deze stoffen stijgen of dalen niet met de saliniteit, maar worden hoofdzakelijk bepaald door biochemische processen.

Tabel 4 – Referentie samenstelling zeewater met $S_p=35,000$ en $S_R=35,16504$ g/kg

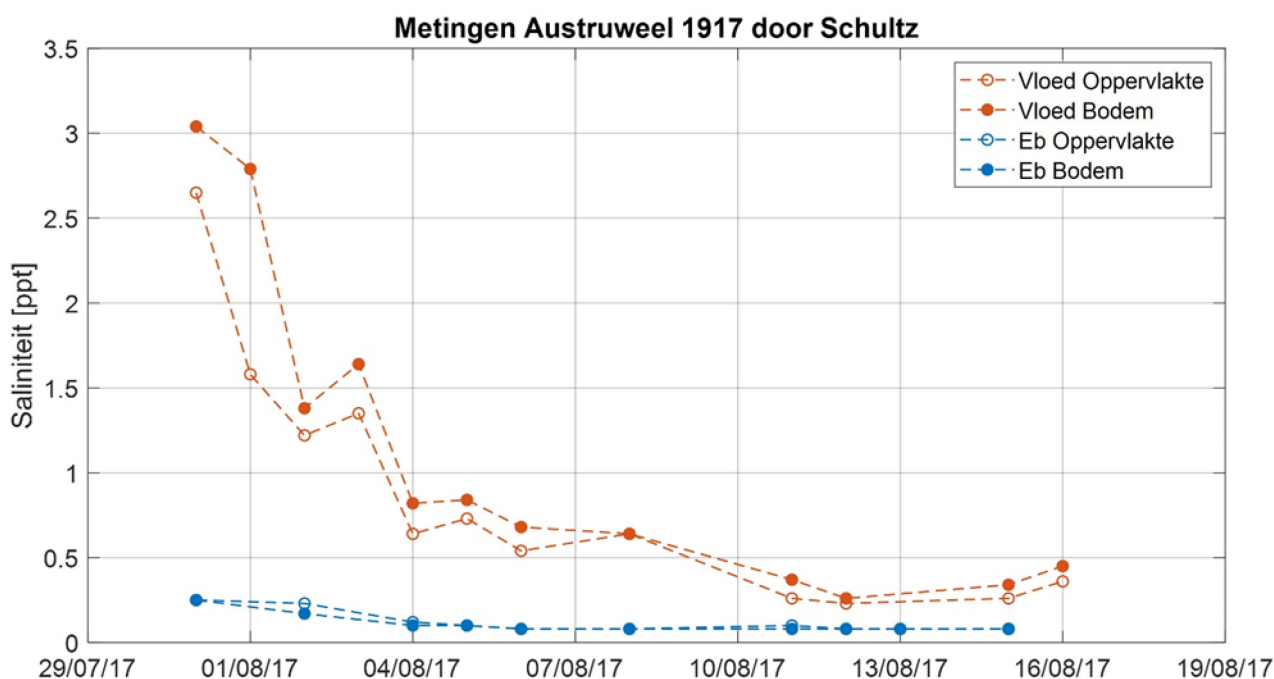
Referentie samenstelling	mmol/kg	mg/kg
Na ⁺	468,9675	10781,45
Mg ²⁺	52,8170	1283,72
Ca ²⁺	10,2820	412,08
K ⁺	10,2077	399,10
Sr ²⁺	0,0907	7,94
Cl ⁻	545,8695	19352,71
SO ₄ ²⁻	28,2353	2712,35
Br ⁻	0,8421	67,29
F ⁻	0,0683	1,30
HCO ₃ ⁻	1,7178	104,81
CO ₃ ²⁻	0,2389	14,34
B(OH) ₃	0,3143	19,43
B(OH) ₄ ⁻	0,1008	7,94
CO ₂	0,0097	0,43
OH ⁻	0,0080	0,14

Bijlage 4 Overzicht zoutdata WL archief

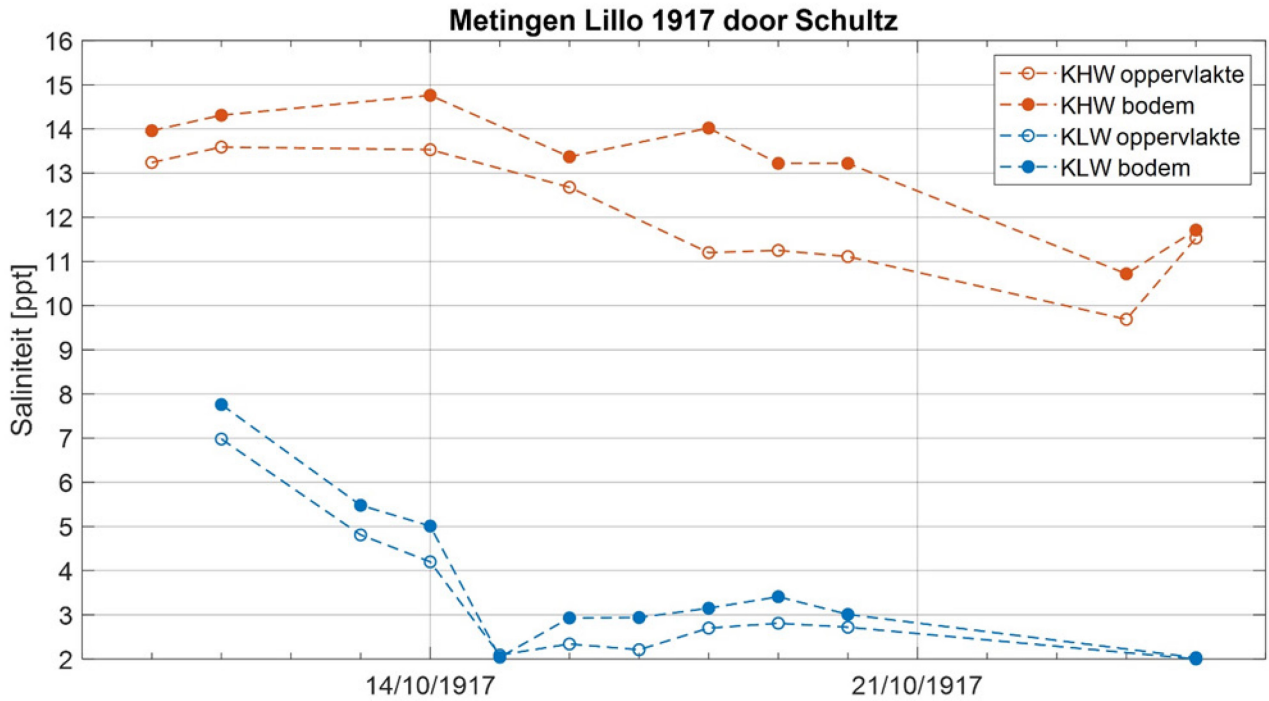
In deze bijlage wordt per jaar een overzicht gegeven van de beschikbare zoutmetingen die uit het WL archief gedigitaliseerd werden. De jaren worden chronologisch gerangschikt van oud naar jong. Voor de vroegste jaren werd de data veelal ook grafisch voorgesteld. Dit maakt het geheel visueel en zorgt meteen voor een eerste controle op typo's die mogelijks bij de digitalisatie zijn gemaakt. De data is meestal vanuit oude notaboekjes of bladen in een Excel blad overgezet.

Metingen Schultz 1916 – 1918

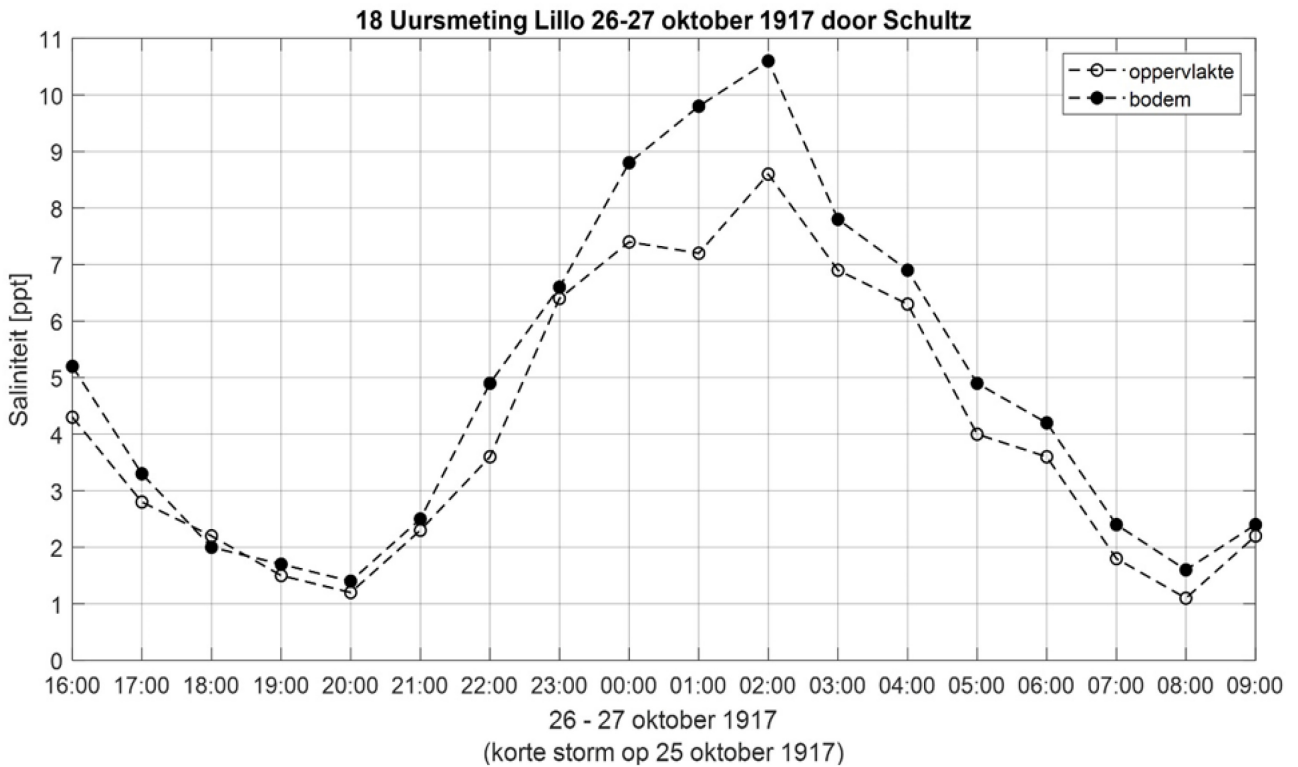
De locatie Lillo zou door Schultz verkeerdelijk gegeven zijn. De metingen met aanduiding locatie Lillo zouden ter hoogte van Fort Frederik genomen zijn.



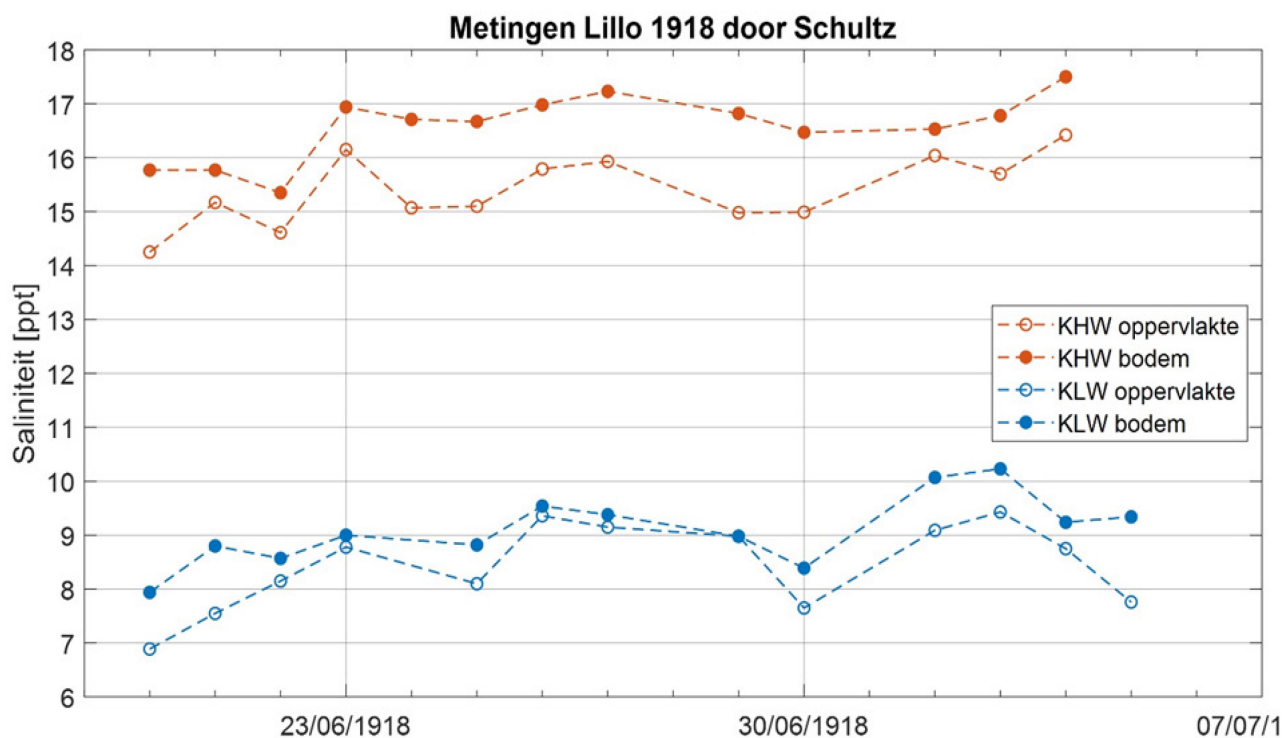
Figuur 14 – Saliniteitsmetingen ter hoogte van Oosterweel door Schultz in 1917.



Figuur 15 – Saliniteitsmetingen ter hoogte van Lillo door Schultz in 1917.



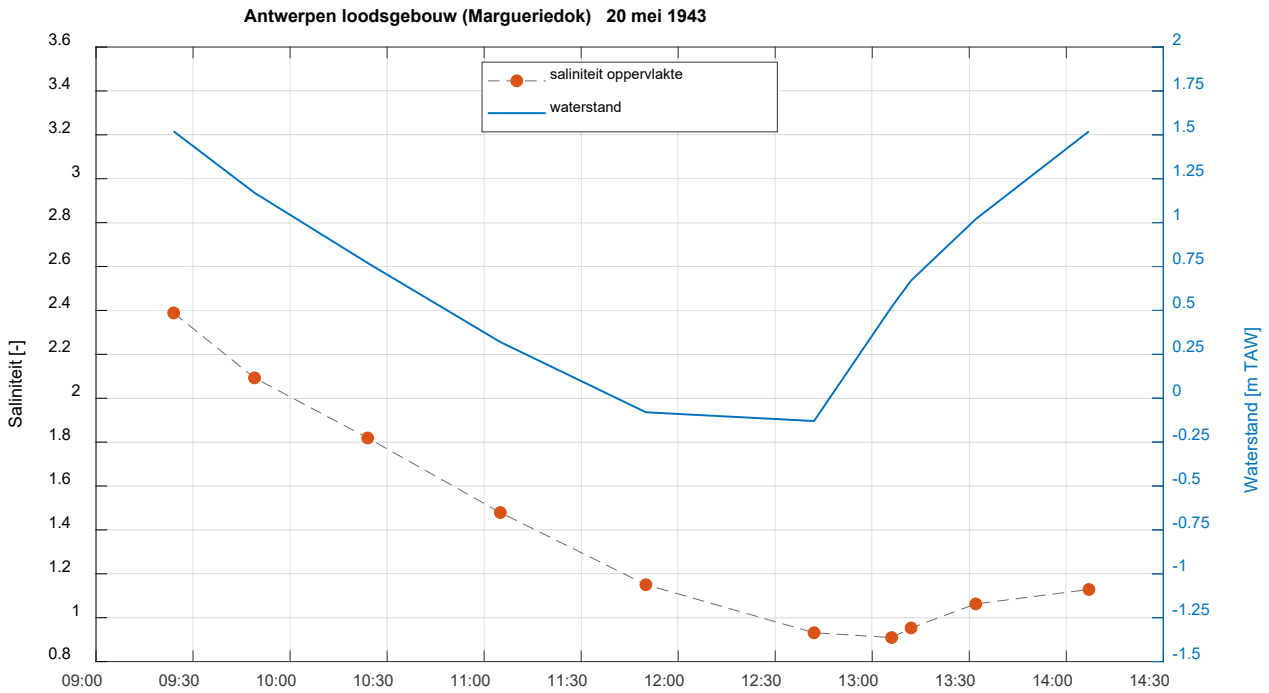
Figuur 16 – 18-uursmeting ter hoogte van Lillo te 26-27 oktober 1918 door Schultz



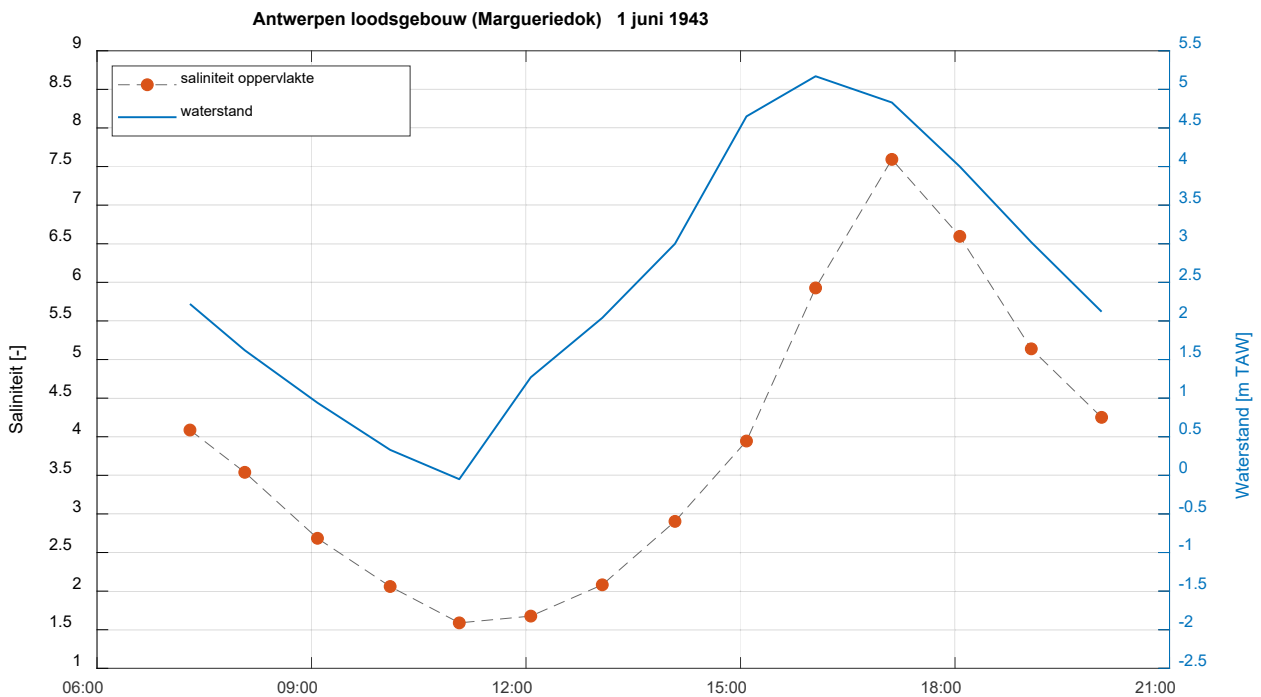
Figuur 17 – Saliniteitsmetingen te Lillo in 1918 door Schultz

1943 13-uursmetingen regio Antwerpen

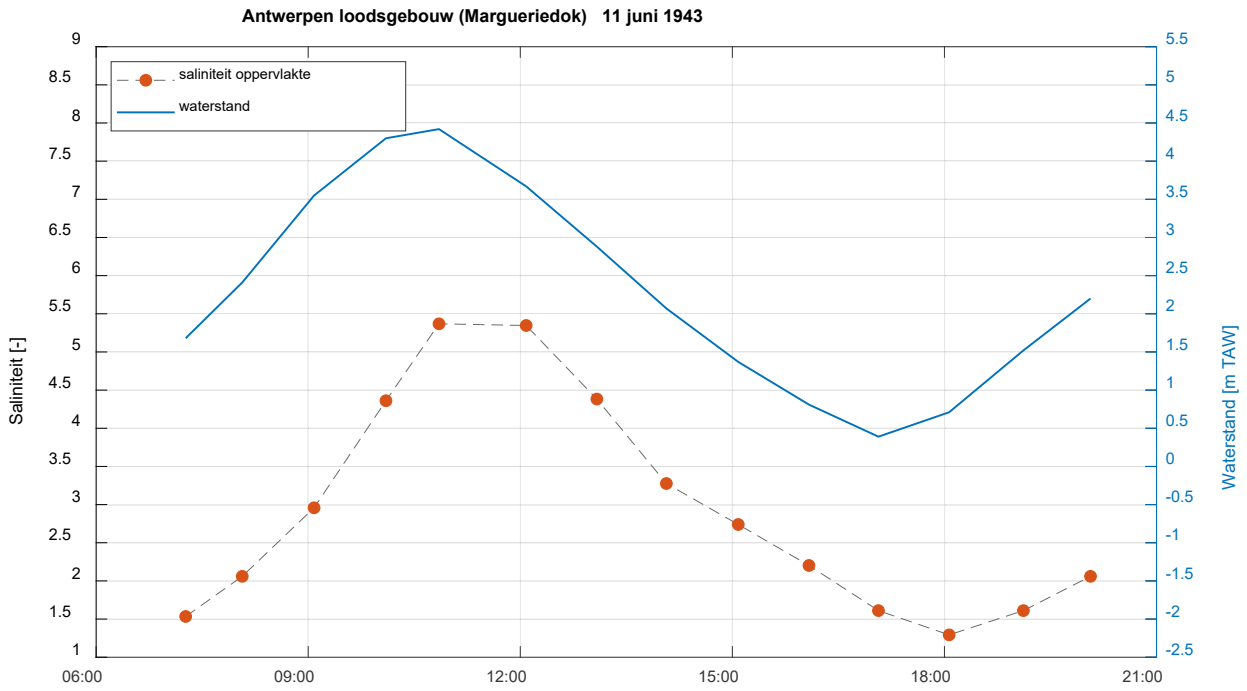
De ruwe data werd voor de figuren omgerekend van g NaCl/L naar saliniteit (via vergelijking 2 en 3 en rekening houdend met het verschil in atoommassa tussen Cl en NaCl) en van m NKD naar m TAW. Er werden monsters genomen op verschillende diepte, maar de variatie in saliniteit in de diepte is beperkt en daarom werden enkel de saliniteitswaarden aan het oppervlak afgebeeld in de figuren. Voor Antwerpen Loodsgebouw werden ook nog enkele zoutgehalten vermeld bij enkele andere getijden. Deze zijn samen met de KHW waarden van de 13-uursmetingen in een figuur gezet. Deze figuur geeft een overzicht voor de maximale saliniteiten in 1943.



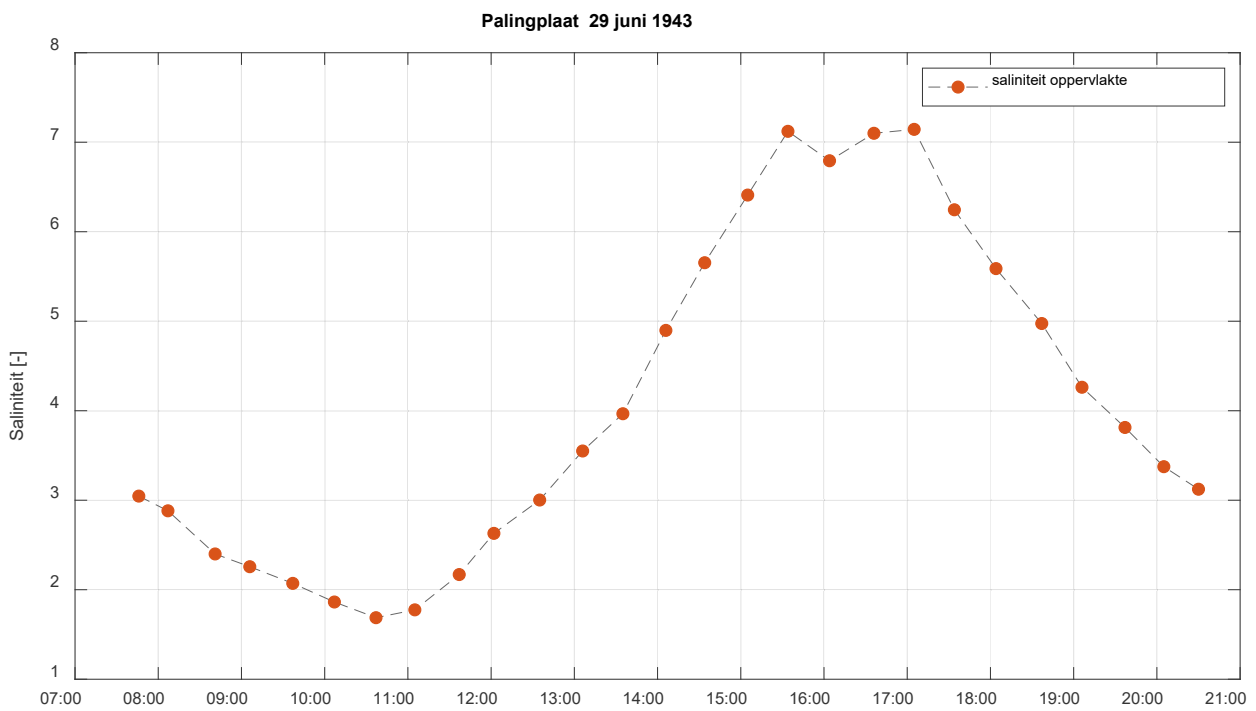
Figuur 18 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 20 mei 1943



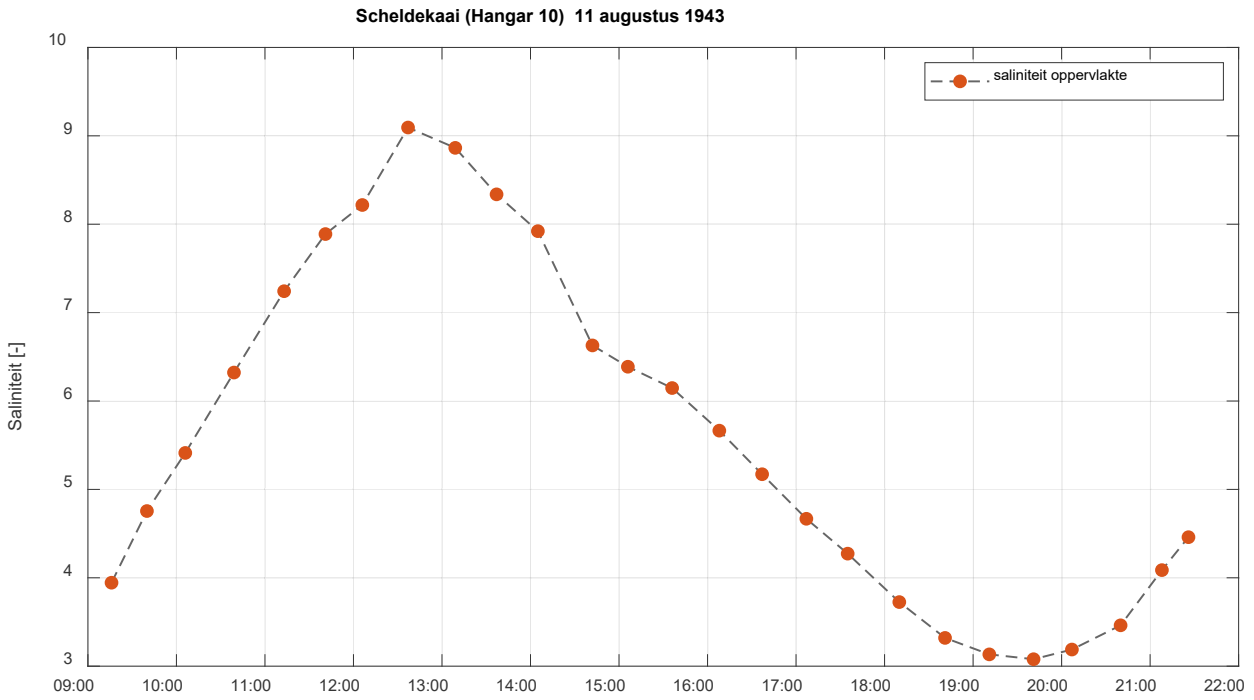
Figuur 19 - 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 1 juni 1943



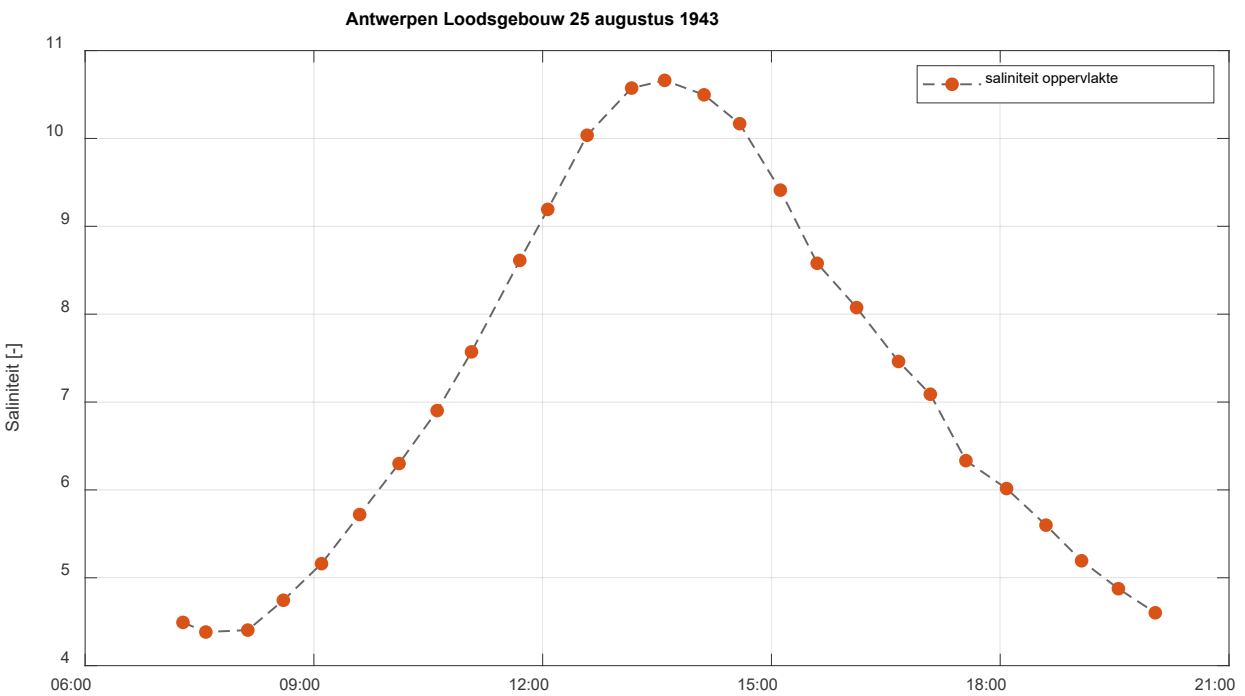
Figuur 20 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 11 juni 1943



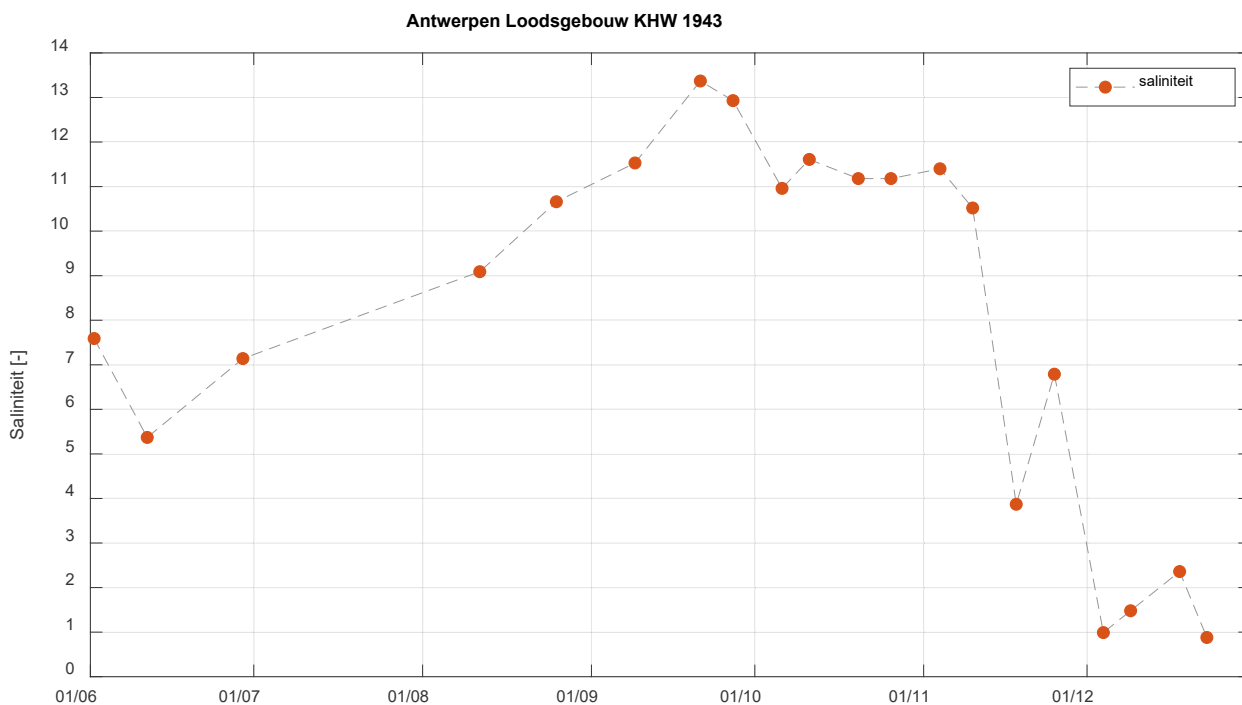
Figuur 21 – 13-uursmeting saliniteit te Palingplaat, 29 juni 1943



Figuur 22 – 13-uursmeting saliniteit langs de Scheldekaai ter hoogte van Hangar 10, 11 augustus 1943



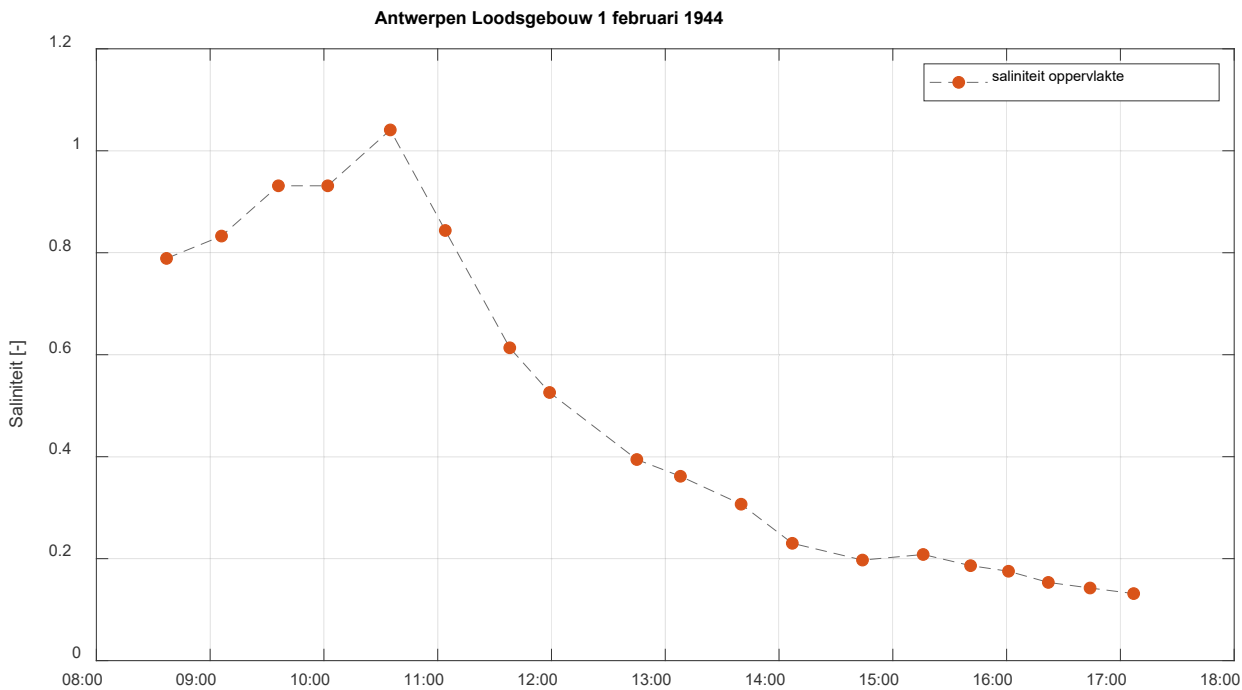
Figuur 23 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 25 augustus 1943



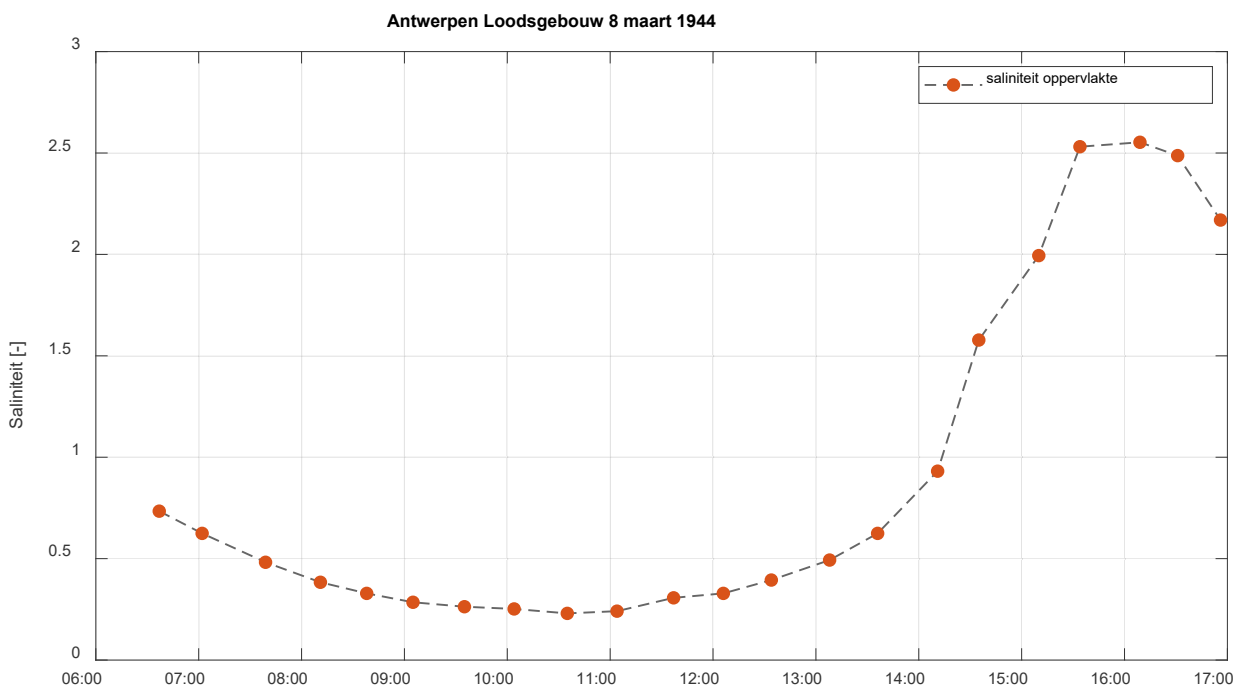
Figuur 24 – Saliniteitsmetingen bij KHW te Antwerpen Loodsgebouw, 1943.

1944 13-uursmetingen regio Antwerpen

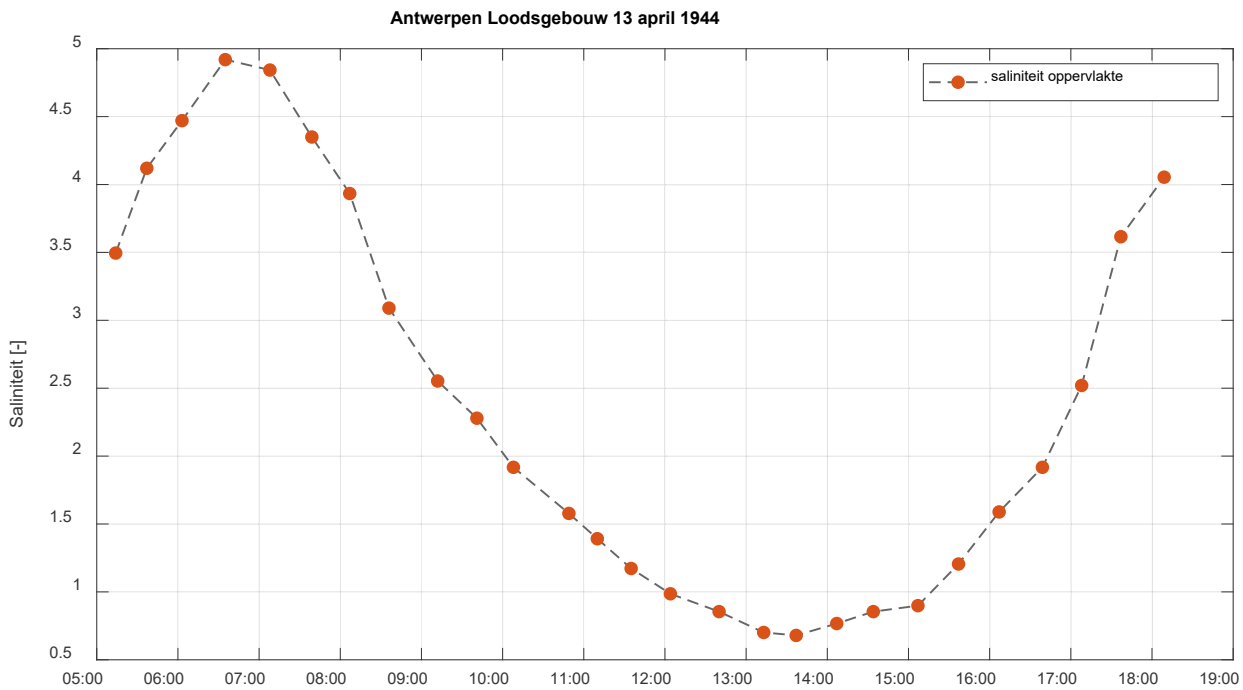
De ruwe data werd voor de figuren omgerekend van g NaCl/L naar saliniteit (via vergelijking 2 en 3 en rekening houdend met het verschil in atoommassa tussen Cl en NaCl) en van m NKD naar m TAW. Er werden monsters genomen op verschillende diepte, maar de variatie in saliniteit in de diepte is beperkt en daarom werden enkel de saliniteitswaarden aan het oppervlak afgebeeld in de figuren. Voor Antwerpen Loodsgebouw werden ook nog enkele zoutgehalten vermeld bij enkele andere getijden. Deze zijn samen met de KHW waarden van de 13-uursmetingen in een figuur gezet. Deze figuur geeft een overzicht voor de maximale saliniteiten in 1944.



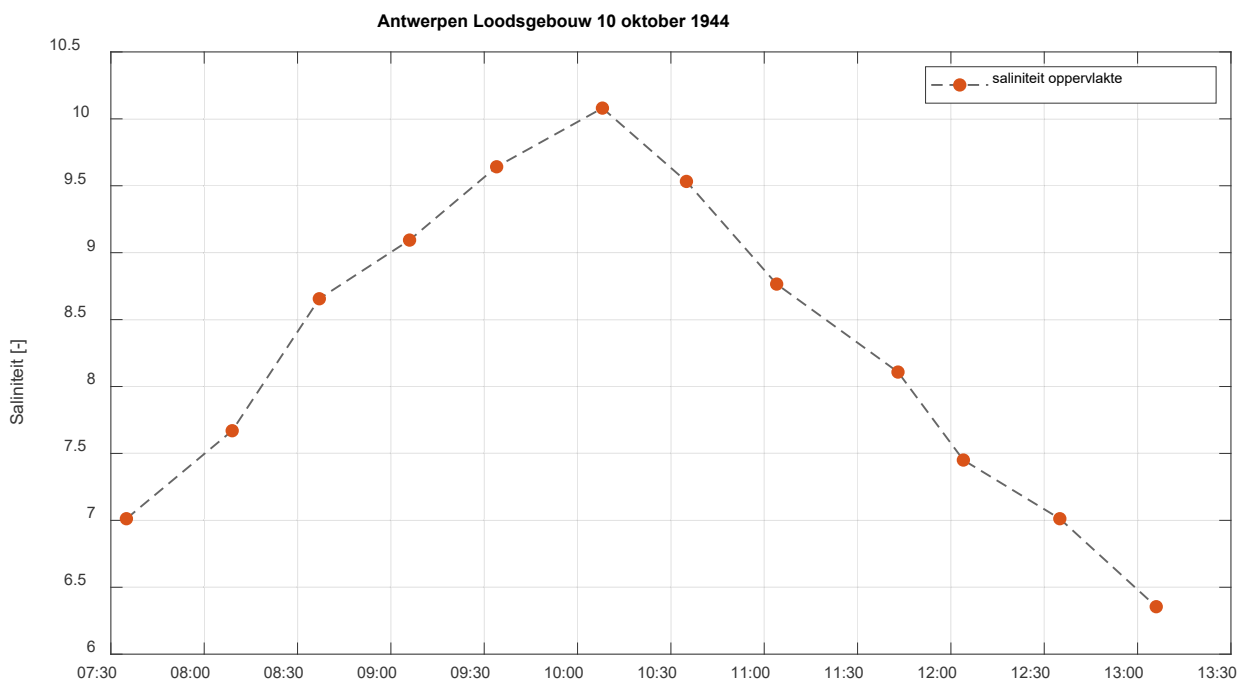
Figuur 25 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 1 februari 1944



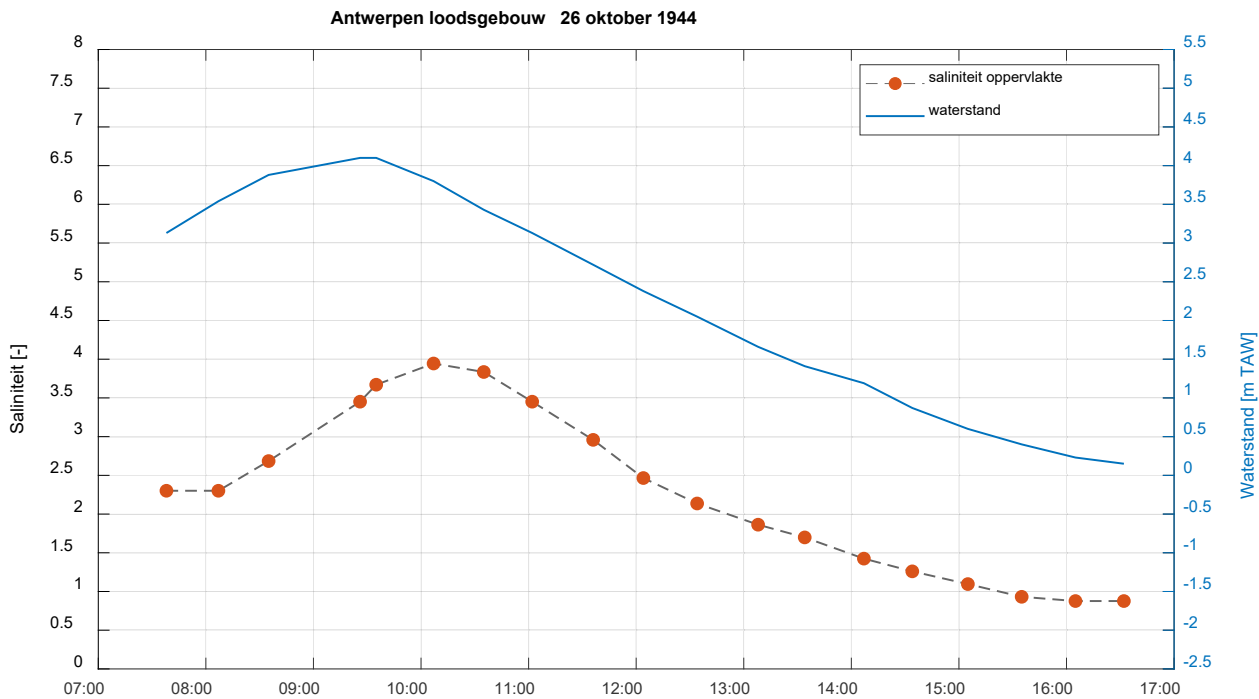
Figuur 26 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 8 maart 1944



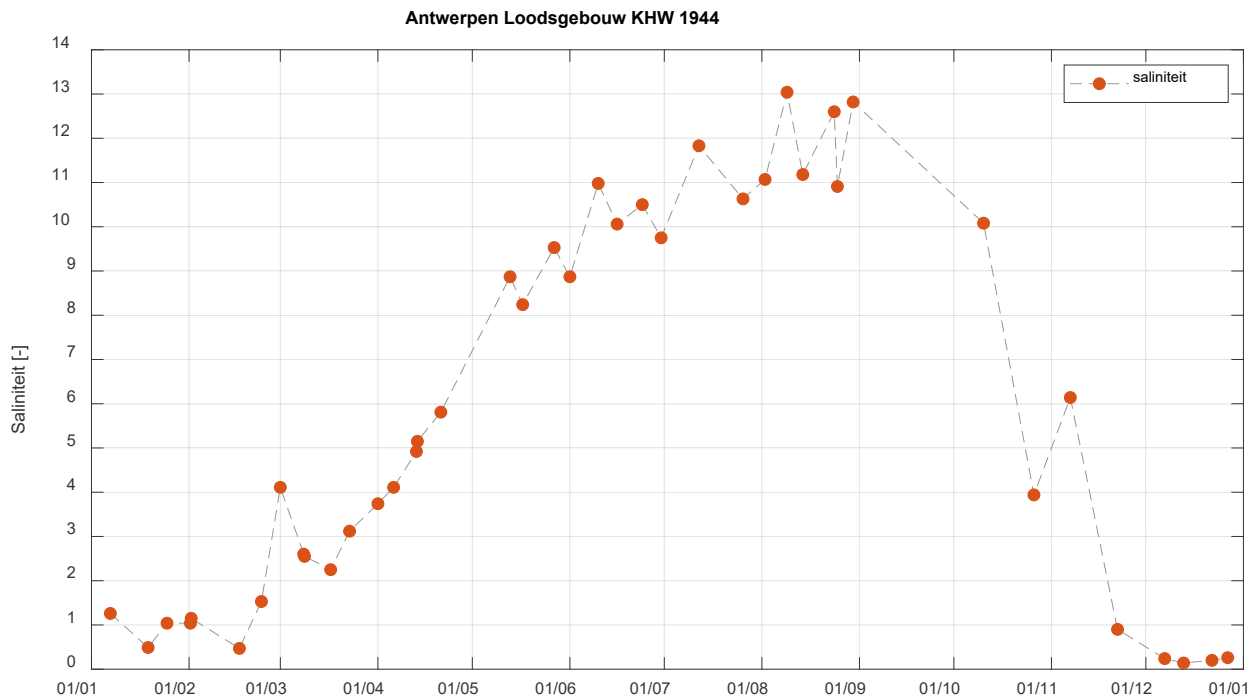
Figuur 27 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 13 april 1944



Figuur 28 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 10 oktober 1944

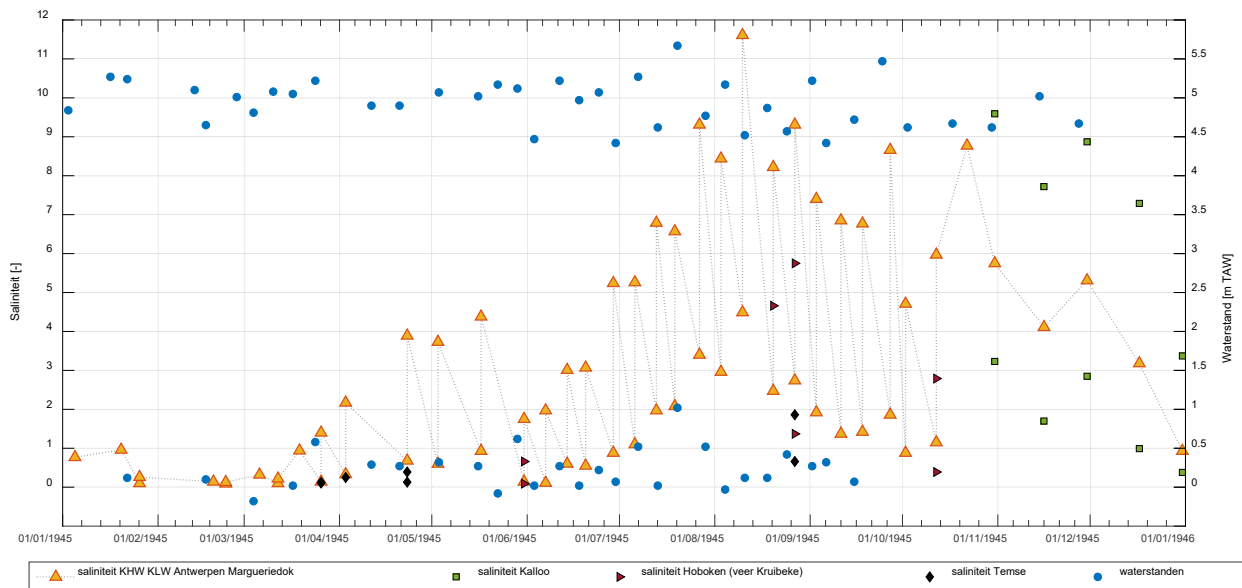


Figuur 29 – 13-uursmeting saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw, 26 oktober 1944



Figuur 30 – Saliniteitsmetingen bij KHW te Antwerpen Loodsgebouw, 1944

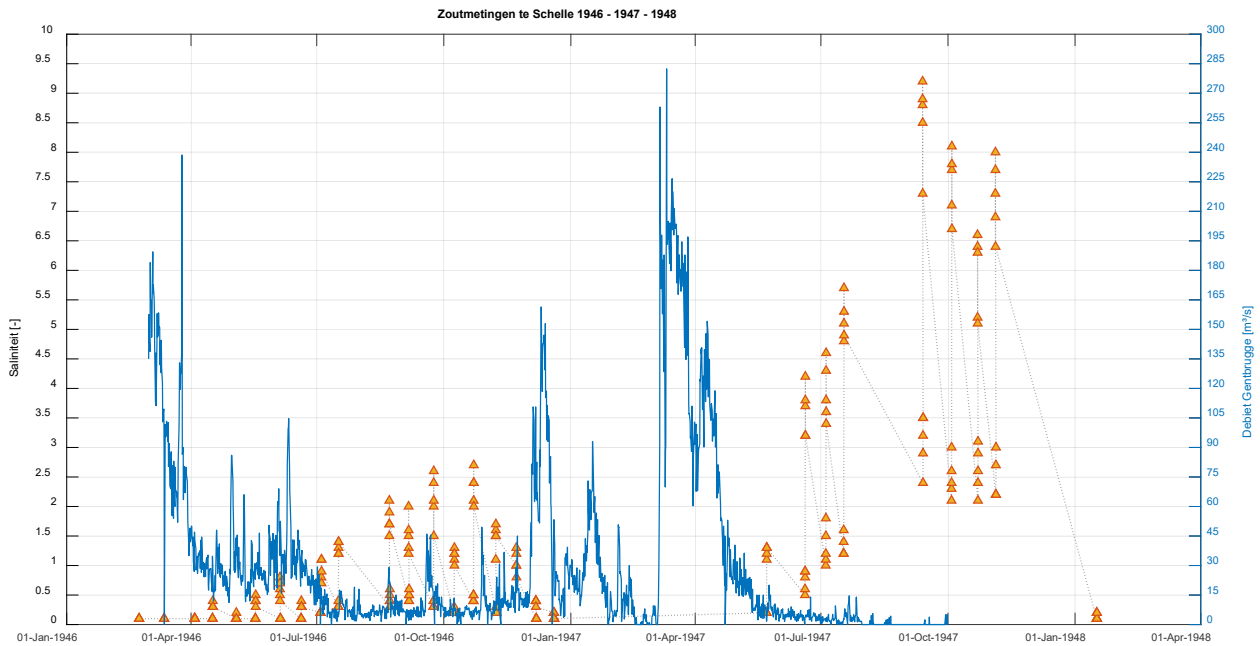
1945



Figuur 31 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw (Margueriedok), Kalloo, Hoboken en Temse, 1945. Hoog- en laagwaterstanden te Antwerpen weergegeven.

1946 – 1947 - 1948

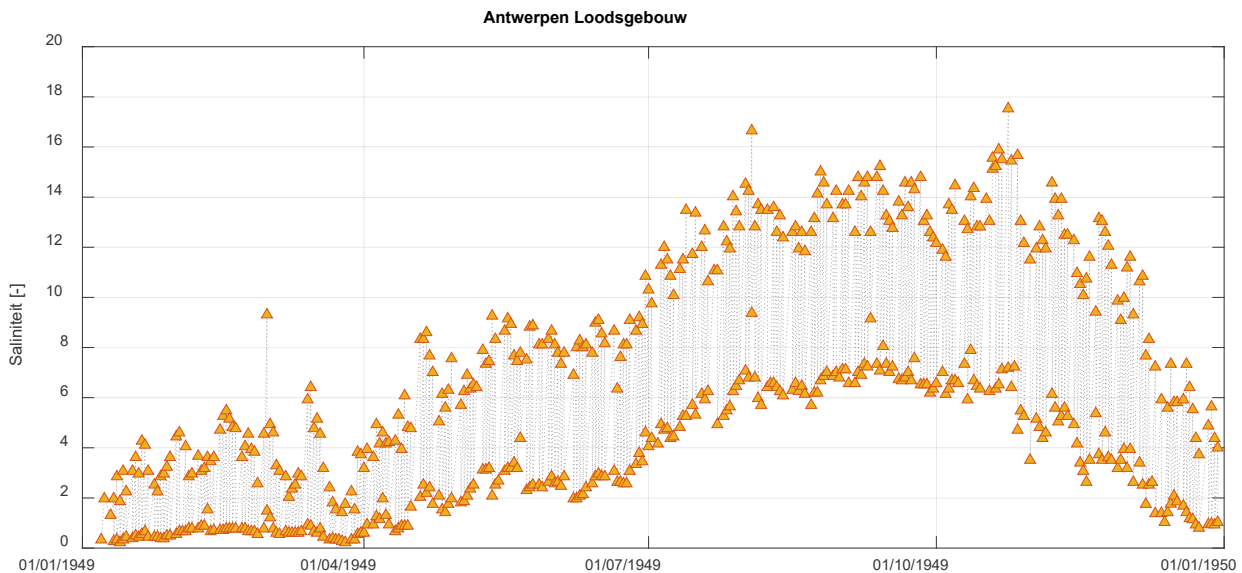
Voor deze jaren zijn er enkel zoutmetingen beschikbaar die genomen werden te Schelle nabij de elektriciteitscentrale (Inter-Escaut). Deze metingen werden overgemaakt aan het Waterbouwkundig Laboratorium. Deze metingen werden ook in 1947 en begin 1948 uitgevoerd. Alle metingen voor deze drie jaren samen zijn met het gemeten debiet te Gentbrugge (data slechts tot 1 oktober 1947 beschikbaar) geplot in onderstaande figuur.



Figuur 32 – Saliniteitsmetingen te Schelle (Inter-Escaut) in 1946,1947, 1948

1949

Voor 1949 is er bijna dagelijkse data beschikbaar voor saliniteit te Antwerpen Loodsgebouw. Een overzicht is gegeven in de figuur hieronder. Op 1 maart was er een stormtij en dat verklaart de veel hogere waarde op dat moment.



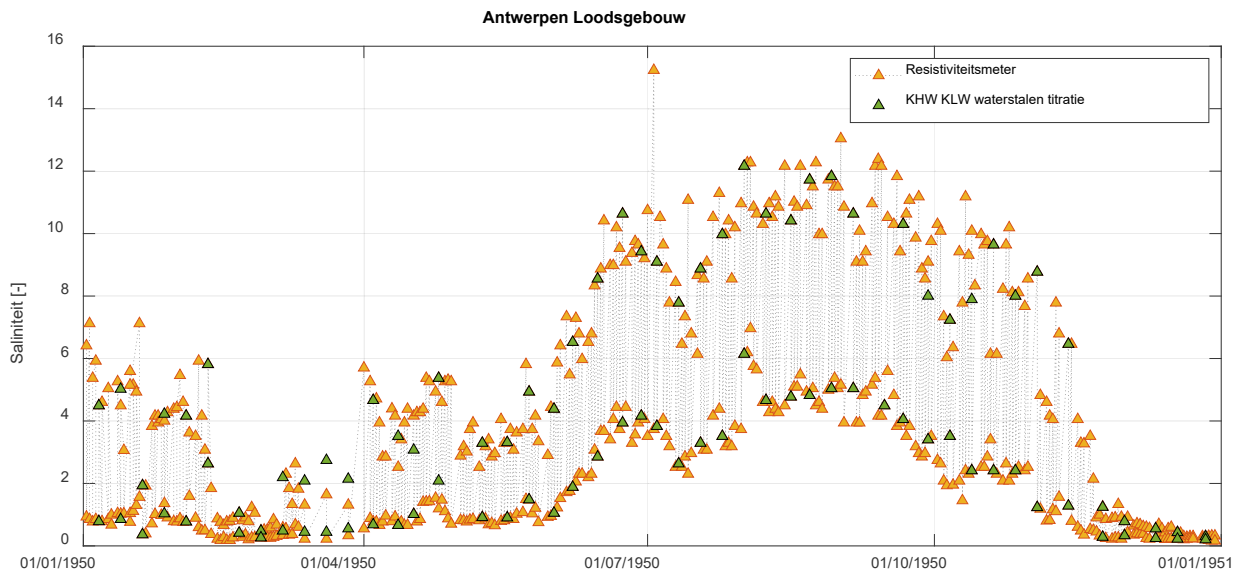
Figuur 33 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw, 1949.

Voor de locatie Liefkenshoek is er data beschikbaar vanaf begin oktober tot het einde van het jaar. Deze data zijn niet opgenomen in dit rapport.

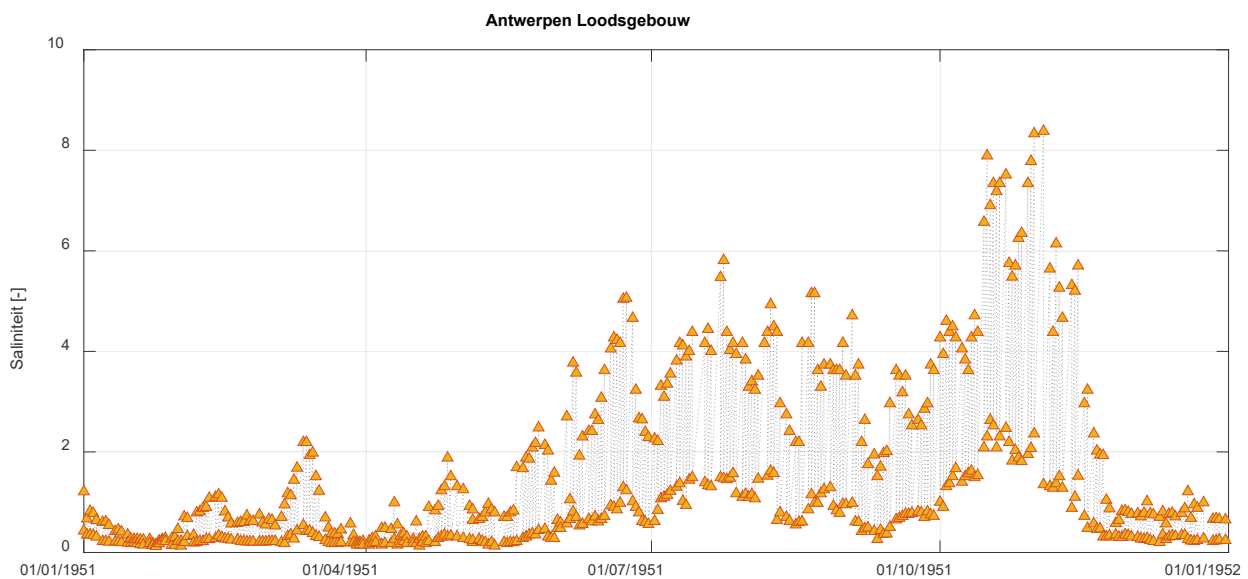
1950 - 1951

De hoogste waarde in 1950 werd op 3 juli gemeten. Er is die dag springtij, maar het betreffende getij is niet hoger dan andere getijden voor of na. De waarde is genoteerd, maar lijkt een outlier.

Voor 1950 en het eerste deel van 1951 werden tweewekelijks saliniteitswaarden gemeten langsheen heel het estuarium. Voor 1951 is er enkel data voor de Zeeschelde beschikbaar. Een overzicht van de weken en welke locatie wanneer werd bemeaten is gegeven in Tabel 5, Tabel 6 en Tabel 7. In de figuren daarna wordt elk langsvverloop grafisch getoond. Ze worden getoond in hun originele meeteenheid: chlorositeit (g/L).



Figuur 34 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw in 1950. Metingen met resistiviteitsmeter gecontroleerd door waterstalen waaruit via titratie de saliniteit bepaald werd.



Figuur 35 – Saliniteitsmetingen te Antwerpen Loodsgebouw in 1951.

Tabel 5 – Overzicht beschikbare data langsverloop eerste deel 1950

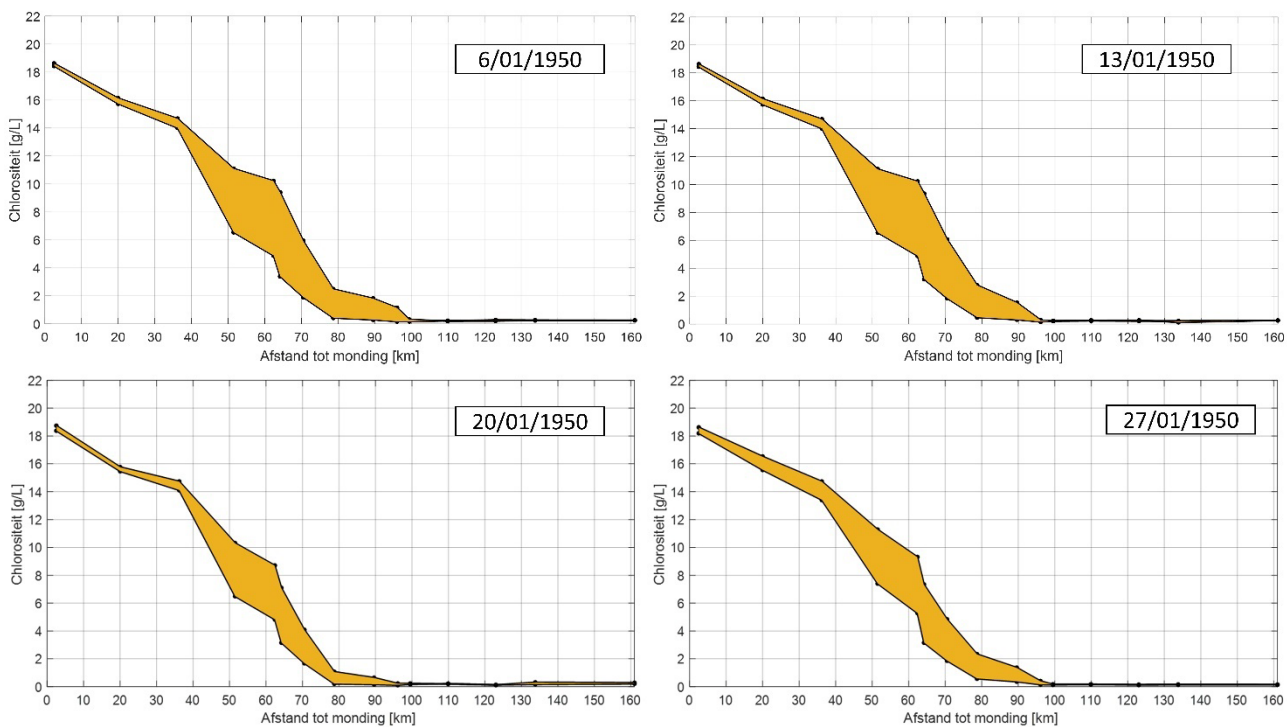
locatie	1950																		
	06/01	13/01	20/01	27/01	03/02	10/02	20/02	22/02	27/02	06/03	10/03	13/03	20/03	27/03	04/04	12/04	14/04	17/04	25/04
Vlissingen																			
Terneuzen																			
Hansweert																			
Bath																			
Doel																			
Ballastplaat																			
Liefkenshoek																			
St. Marie																			
Antwerpen Loodsgebouw																			
Hemiksem																			
Hingene																			
Temse																			
Tielrode																			
Sint-Amands																			
Dendermonde																			
Schoonaarde																			
Gentbrugge																			
Boom																			
Walem																			
Duffel																			
Lier																			
Emblem																			
Grobbendonk																			
Eppegem																			
Mechelen																			
Haacht																			
Hombeek																			
Itegem																			
Daknam (Lokeren)																			

Tabel 6 – Overzicht beschikbare data langsverloop tweede deel 1950

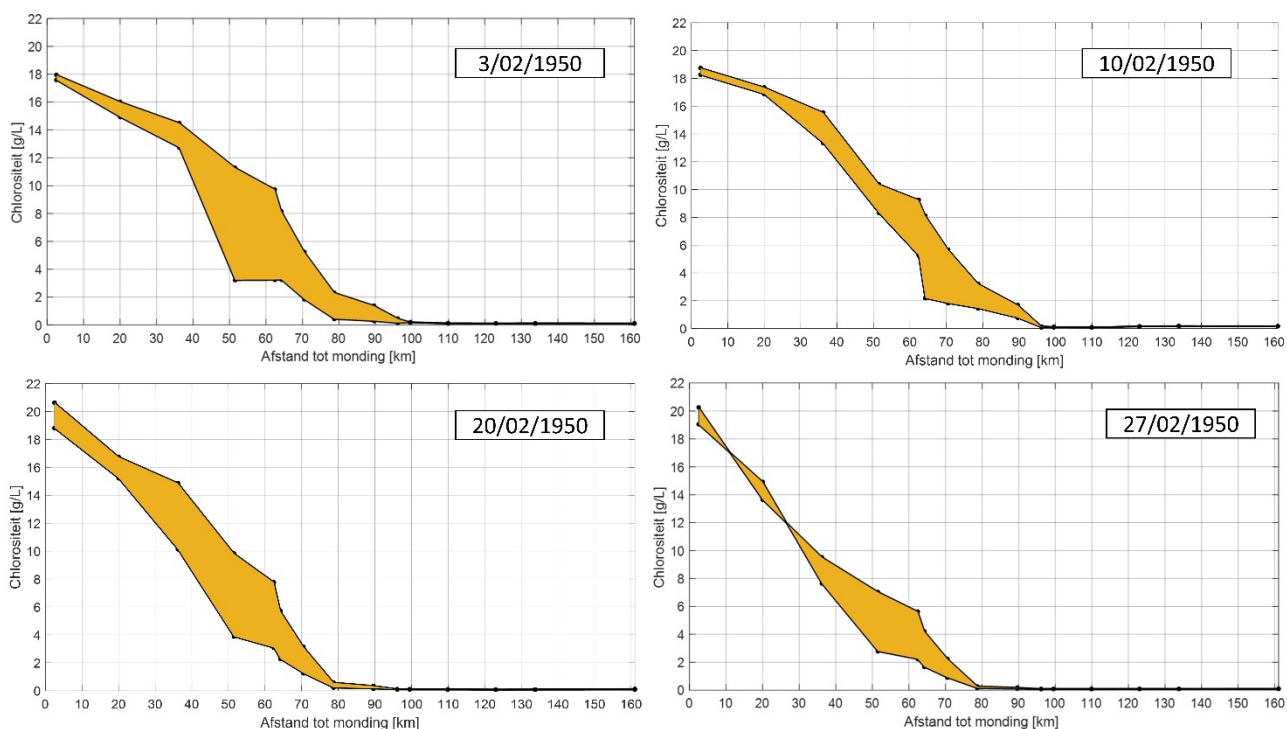
locatie	1950																								
	03/05	09/05	17/05	24/05	01/06	07/06	15/06	23/06	29/06	04/07	11/07	18/07	25/07	01/08	08/08	16/08	22/08	29/08	05/09	15/09	21/09	29/09	06/10	13/10	
Vlissingen																									
Terneuzen																									
Hansweert																									
Bath																									
Doel																									
Ballastplaat																									
Liefkenshoek																									
St. Marie																									
Antwerpen Loodsgebouw																									
Hemiksem																									
Hingene																									
Temse																									
Tielrode																									
Sint-Amands																									
Dendermonde																									
Schoonaarde																									
Gentbrugge																									
Boom																									
Walem																									
Duffel																									
Lier																									
Emblem																									
Grobbendonk																									
Epegem																									
Mechelen																									
Haacht																									
Hombeek																									
Itegem																									
Daknam (Lokeren)																									

Tabel 7 – Overzicht beschikbare data langsverloop laatste deel 1950 en 1951

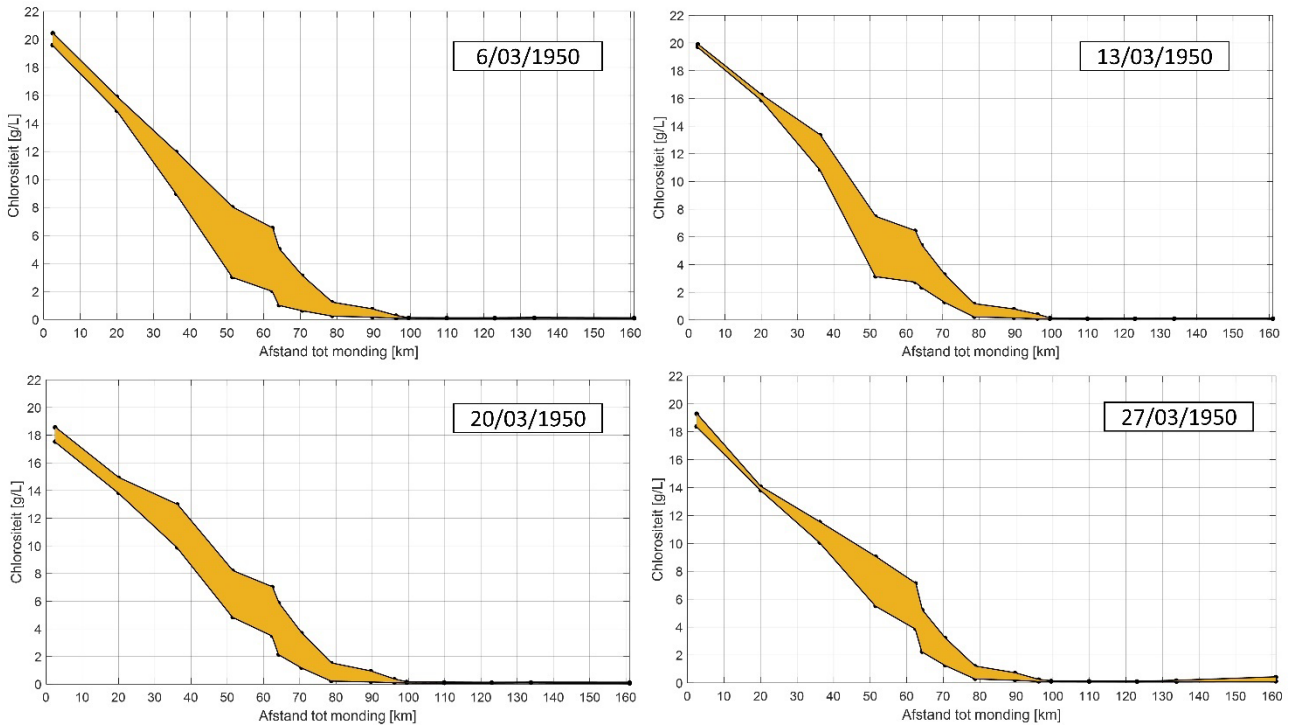
locatie	1950								1951																
	20/10	27/10	03/11	13/11	24/11	01/12	11/12	18/12	27/12	09/01	16/01	24/01	05/02	19/02	05/03	19/03	03/04	19/04	04/05	18/05	01/06	05/06	18/06	16/07	
Vlissingen																									
Terneuzen																									
Hansweert																									
Bath																									
Doel																									
Ballastplaat																									
Liefkenshoek																									
St. Marie																									
Antwerpen Loodsgebouw																									
Hemiksem																									
Hingene																									
Temse																									
Tielrode																									
Sint-Amands																									
Dendermonde																									
Schoonaarde																									
Gentbrugge																									
Boom																									
Walem																									
Duffel																									
Lier																									
Emblem																									
Grobbendonk																									
Epegem																									
Mechelen																									
Haacht																									
Hombeek																									
Itegem																									
Daknam (Lokeren)																									



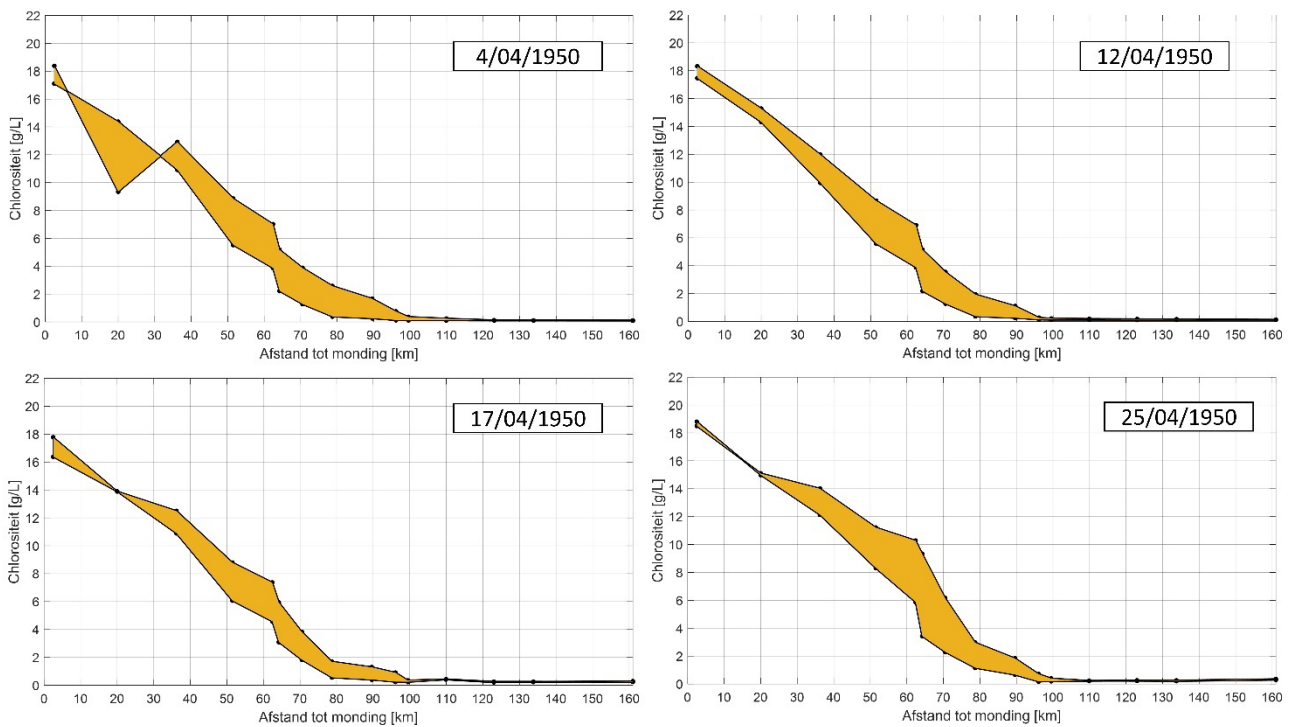
Figuur 36 – Langsverlopen chlorositeit, januari 1950.



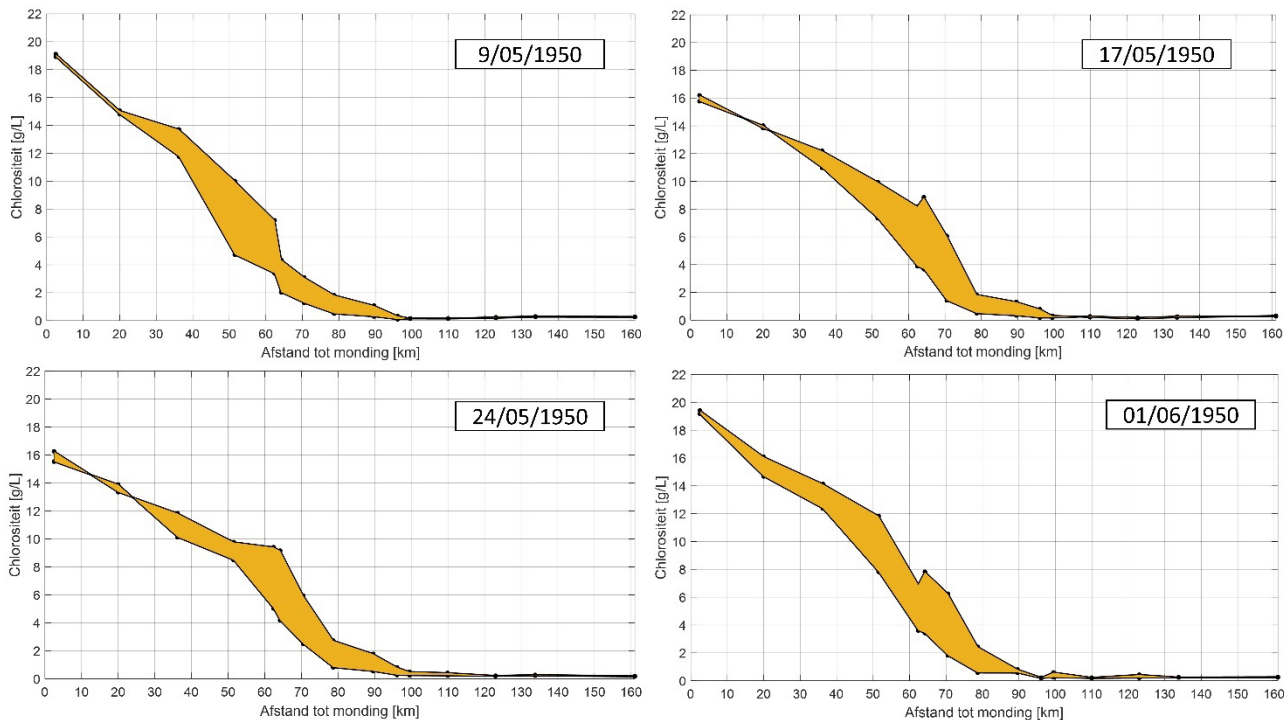
Figuur 37 – Langsverlopen chlorositeit, februari 1950.



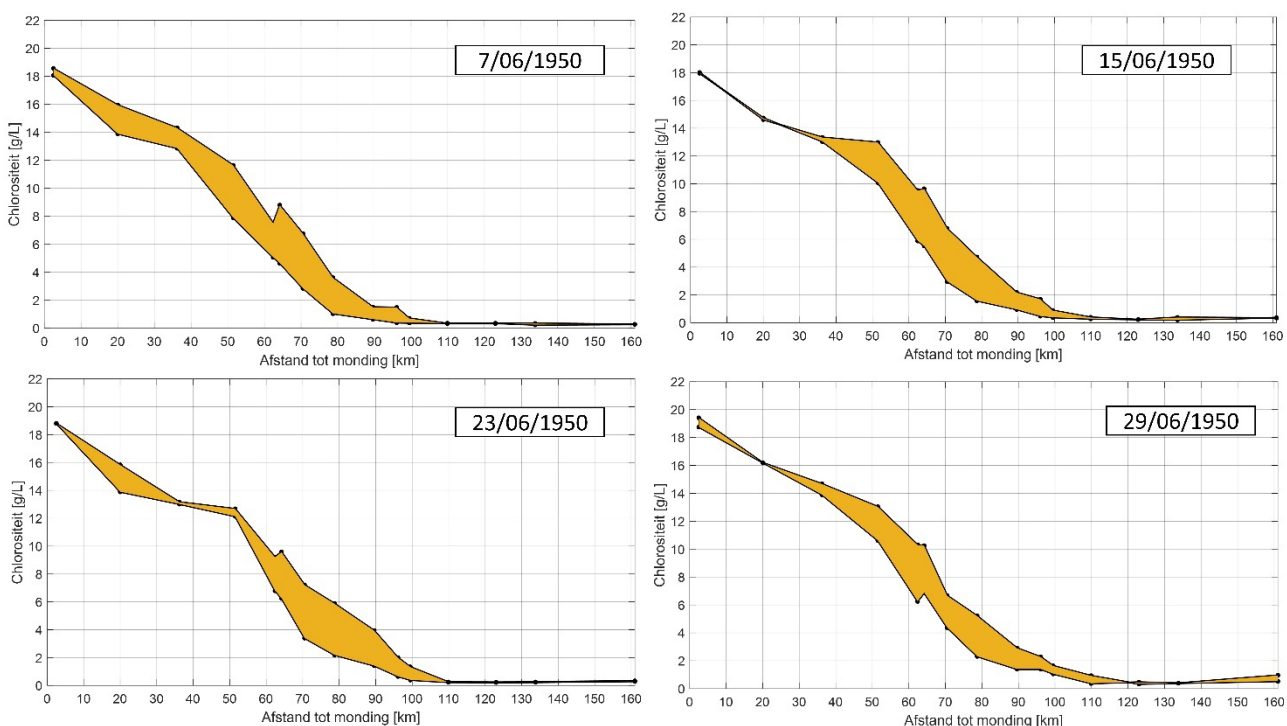
Figuur 38 – Langsverlopen chlorositeit, maart 1950.



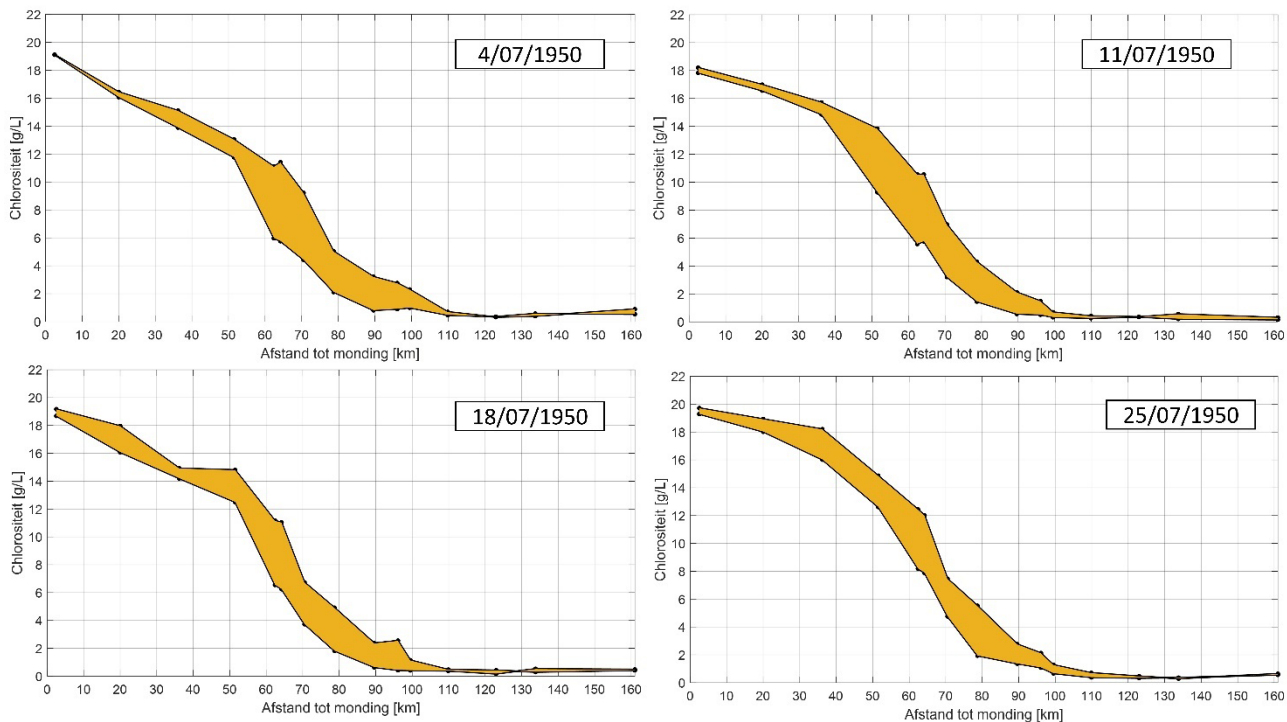
Figuur 39 – Langsverlopen chlorositeit, april 1950.



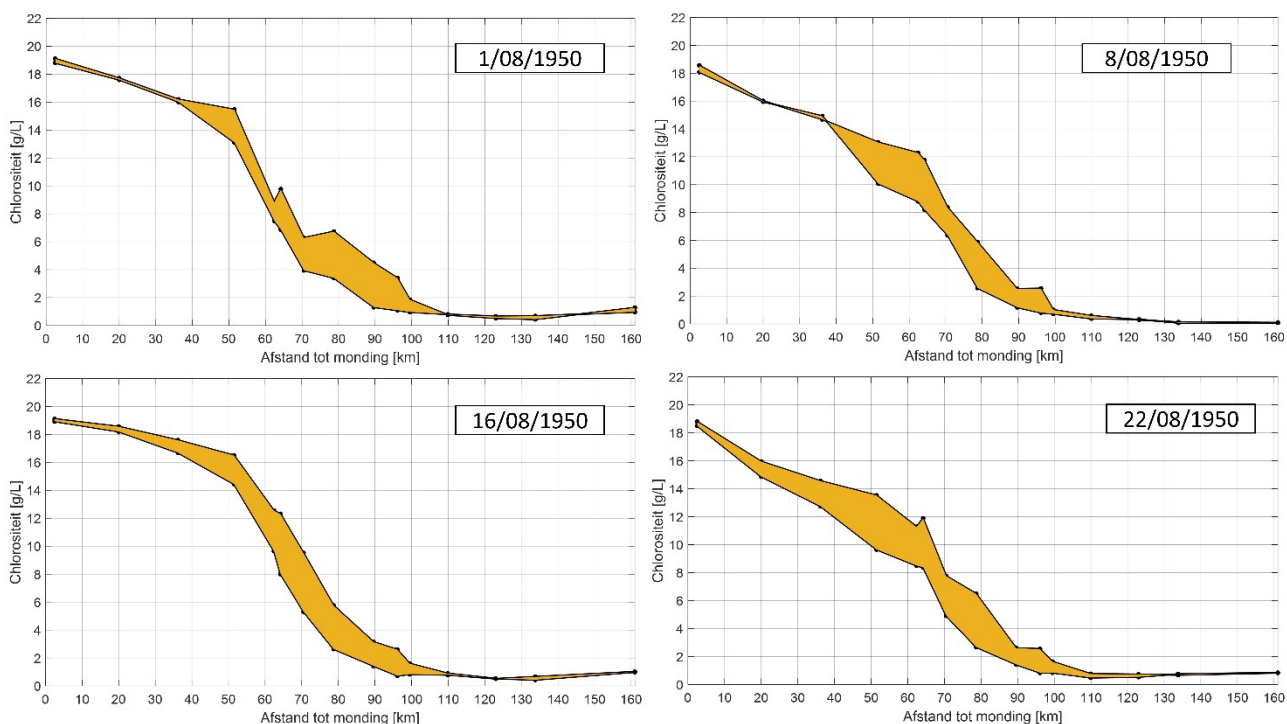
Figuur 40 – Langsverlopen chlorositeit, mei-juni 1950.



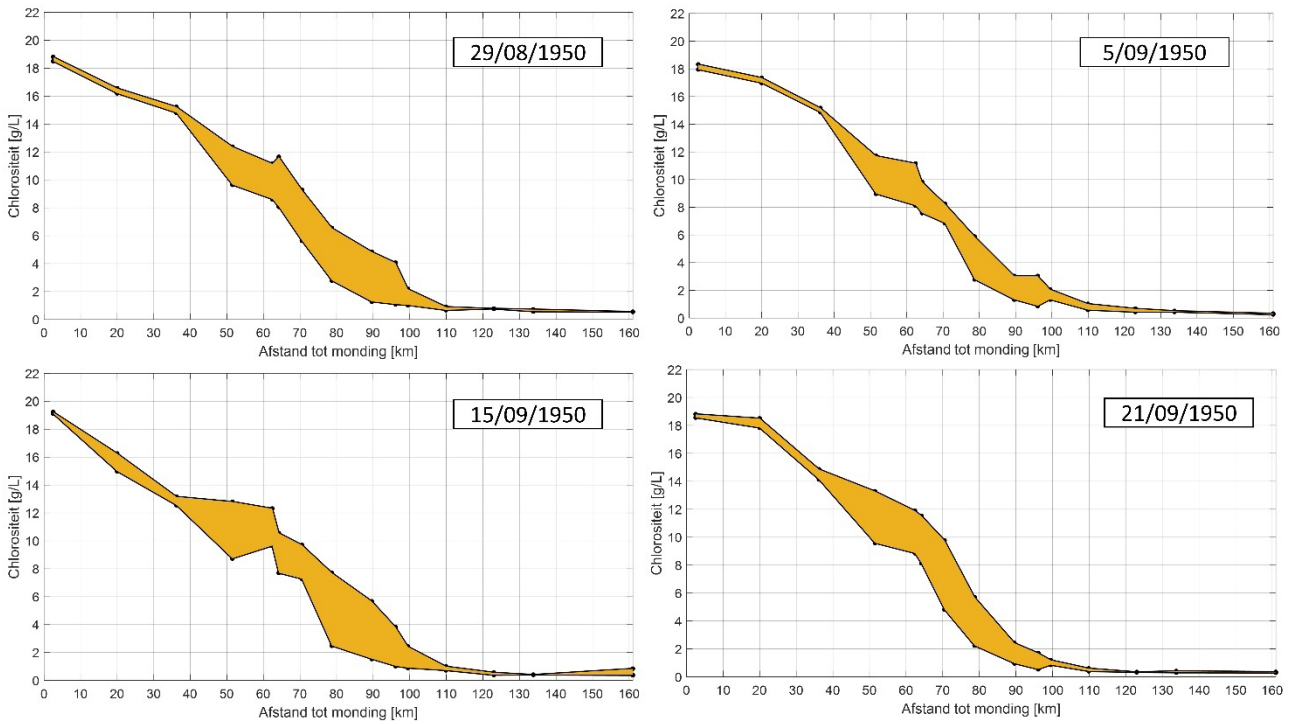
Figuur 41 – Langsverlopen chlorositeit, juni 1950.



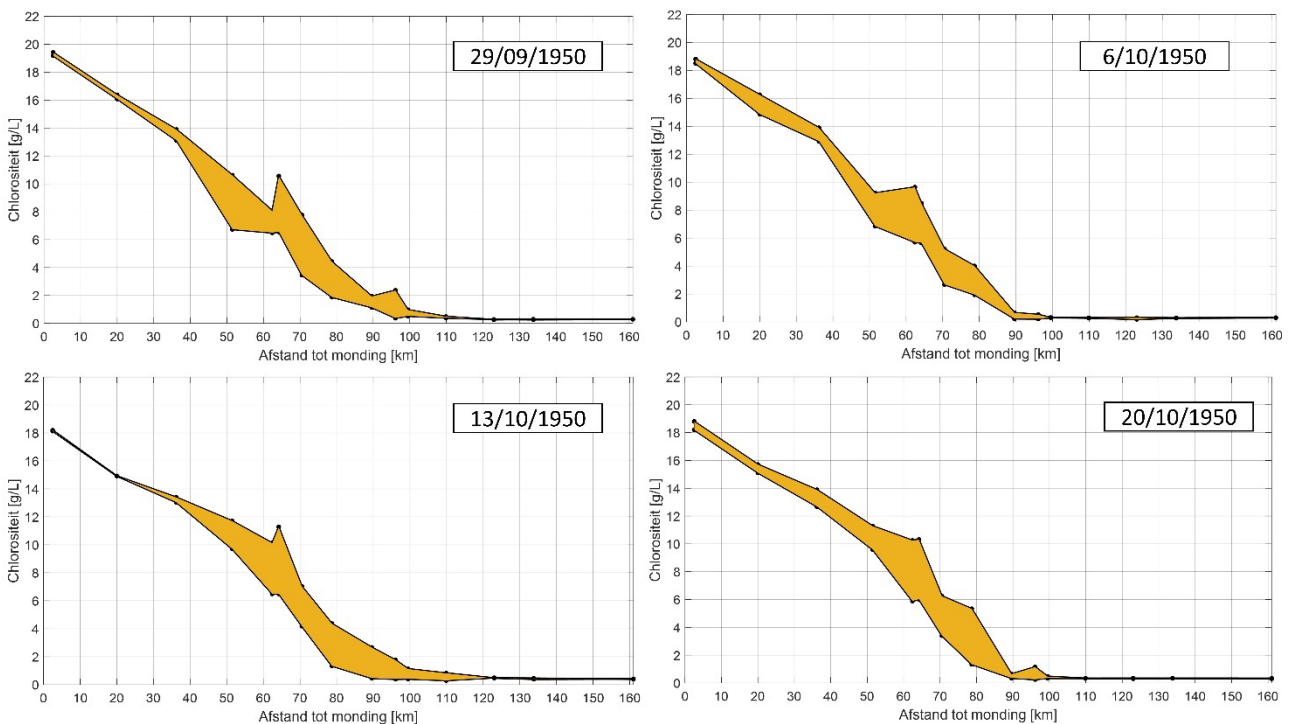
Figuur 42 – Langsverlopen chlorositeit, juli 1950.



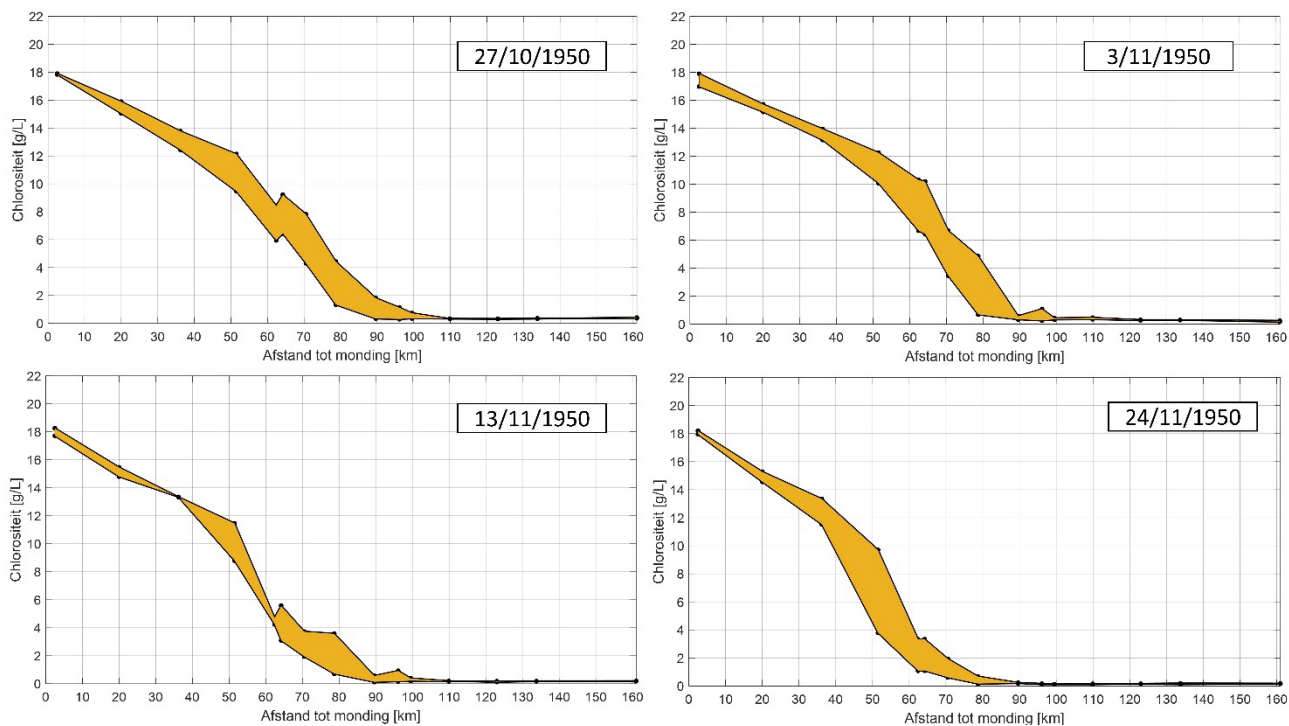
Figuur 43 – Langsverlopen chlorositeit, augustus 1950.



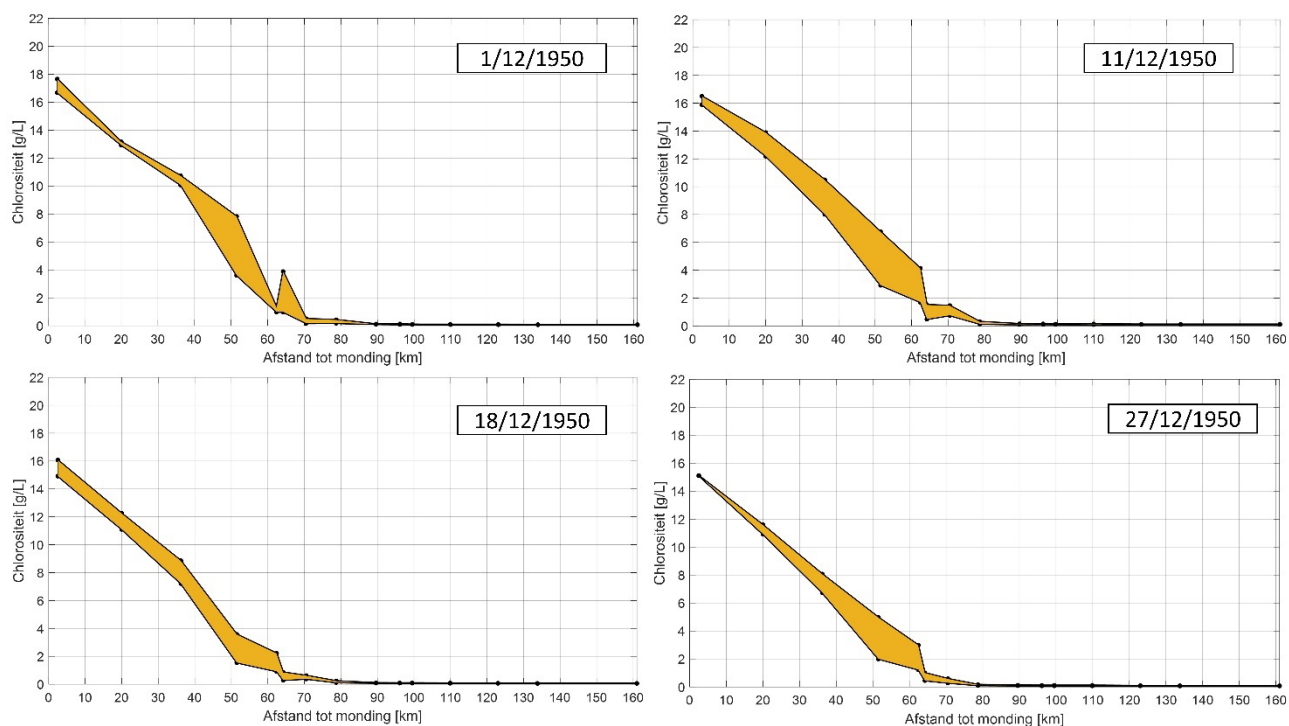
Figuur 44 – Langsverlopen chlorositeit, augustus - september 1950.



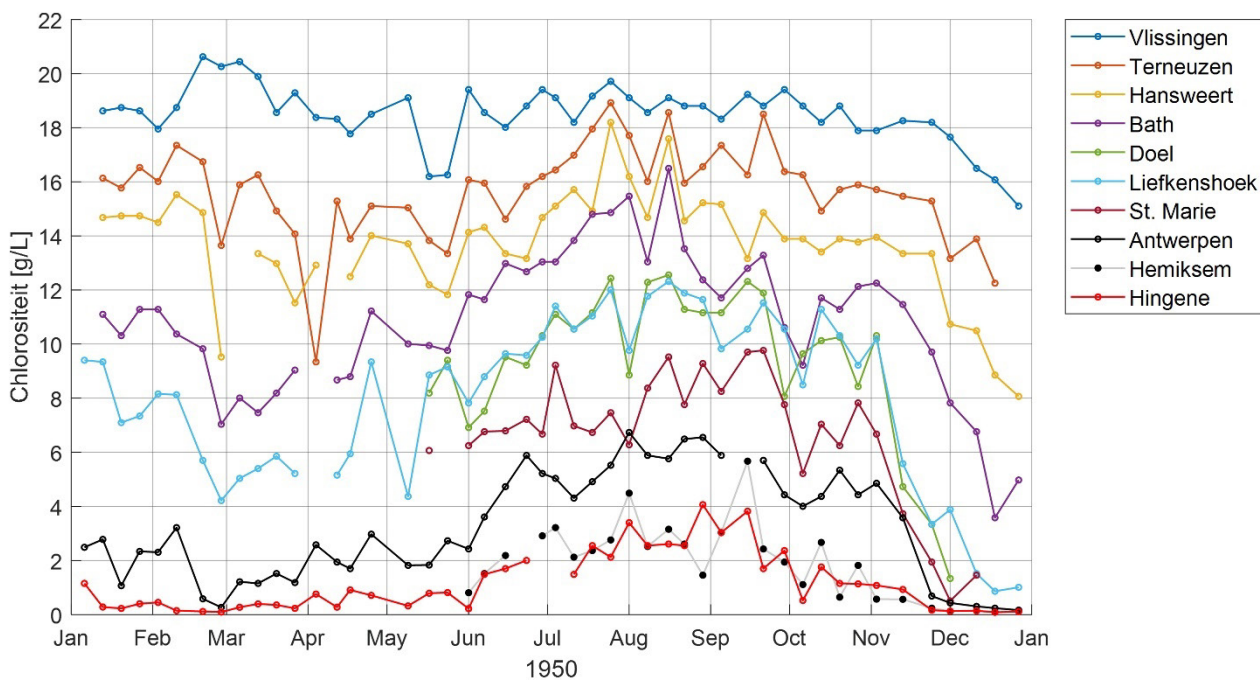
Figuur 45 – Langsverlopen chlorositeit, september-oktober 1950.



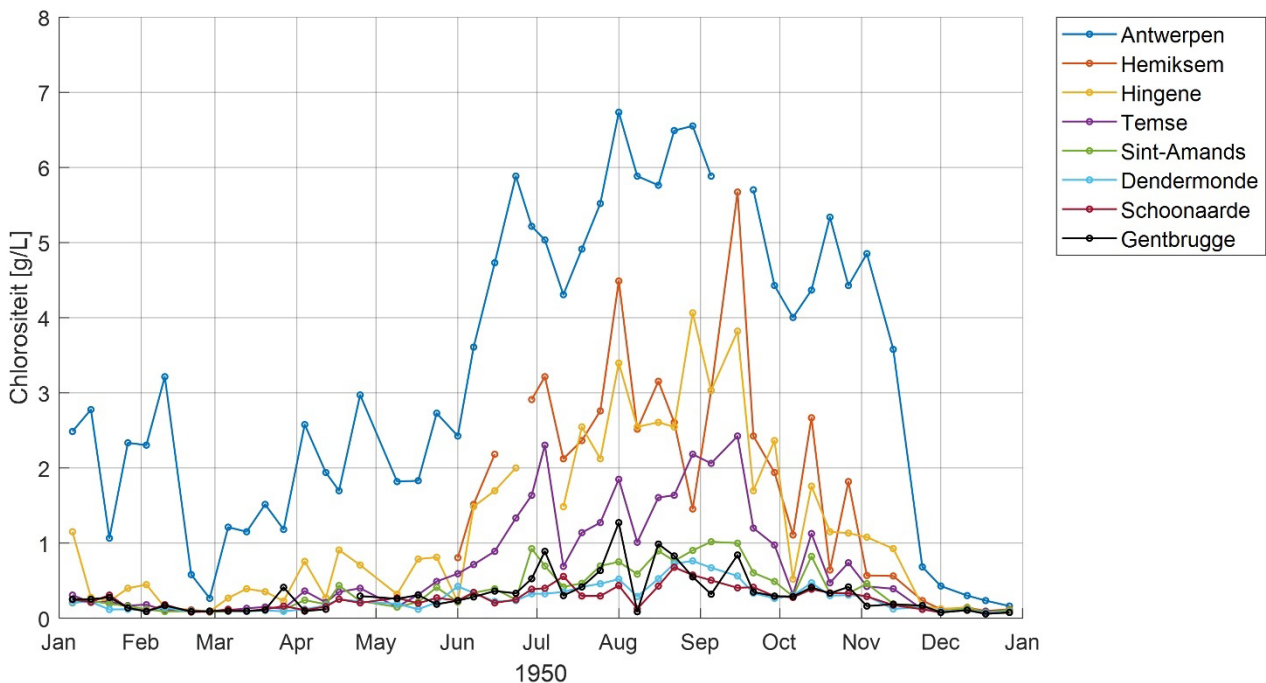
Figuur 46 – Langsverlopen chlorositeit, oktober-november 1950.



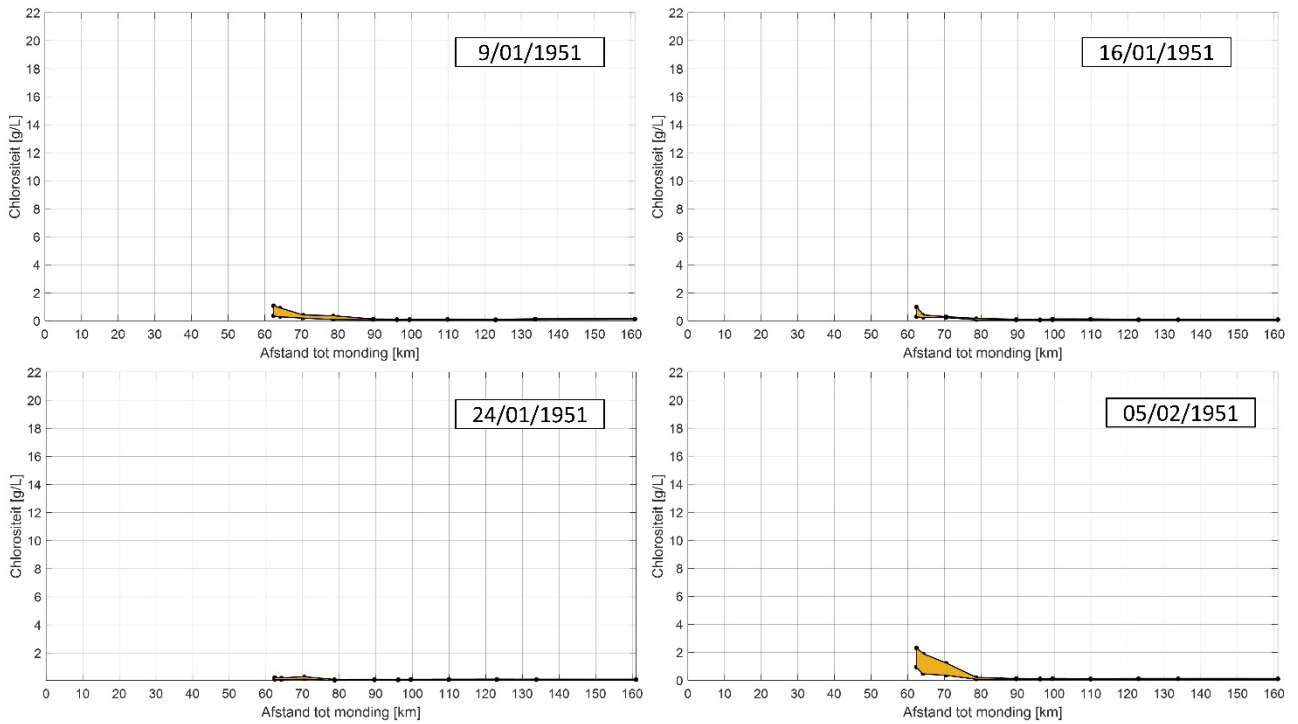
Figuur 47 – Langsverlopen chlorositeit, december 1950.



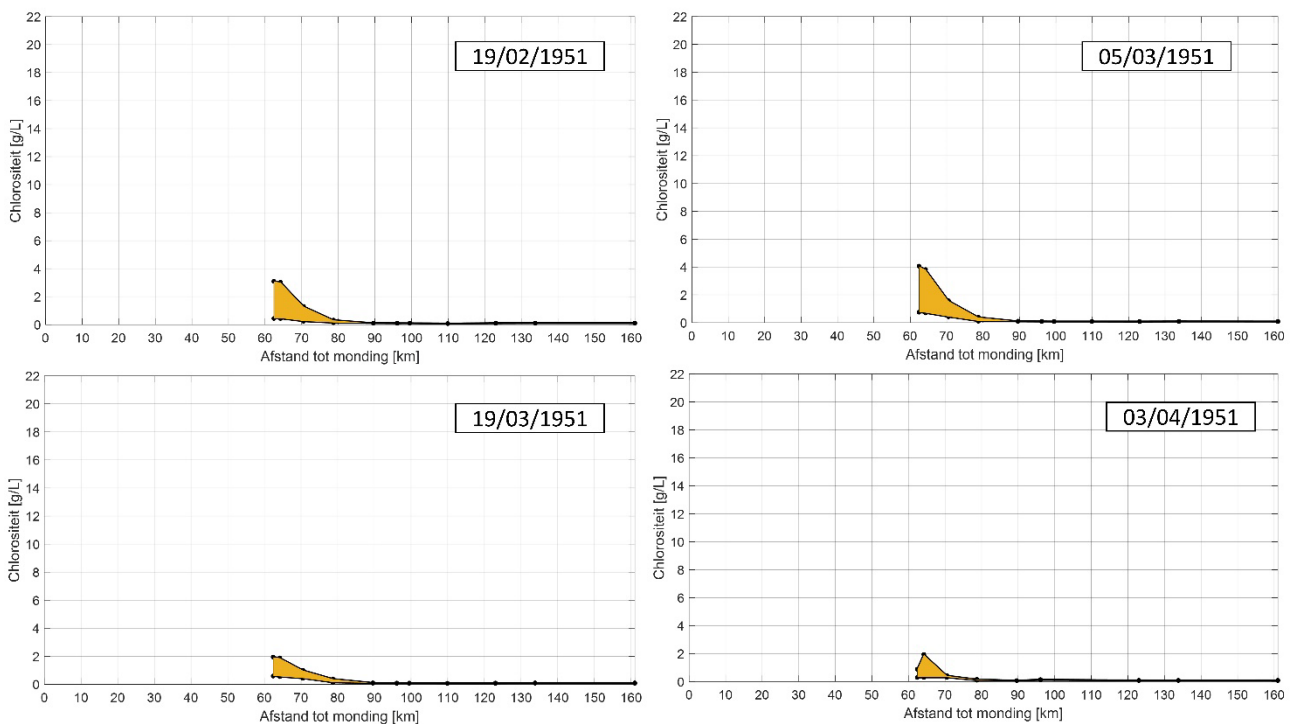
Figuur 48 – Overzicht langsverloop chlorositeit in 1950: Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Bath, Doel, Liefkenshoek, St. Marie, Antwerpen Loodsgebouw, Hemiksem, Hingene.



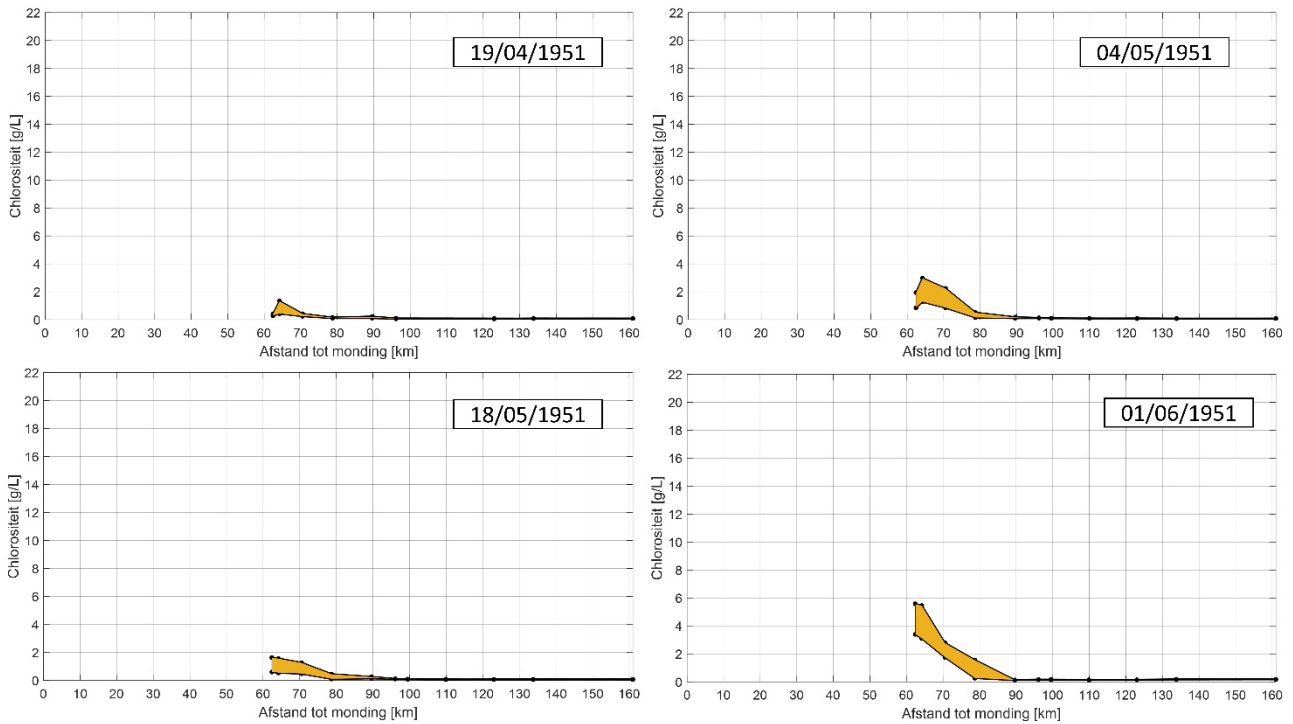
Figuur 49 – Overzicht langsverloop chlorositeit in 1950: Antwerpen Loodsgebouw, Hemiksem, Hingene, Temse, Sint-Amands, Dendermonde, Schoonaarde, Gentbrugge.



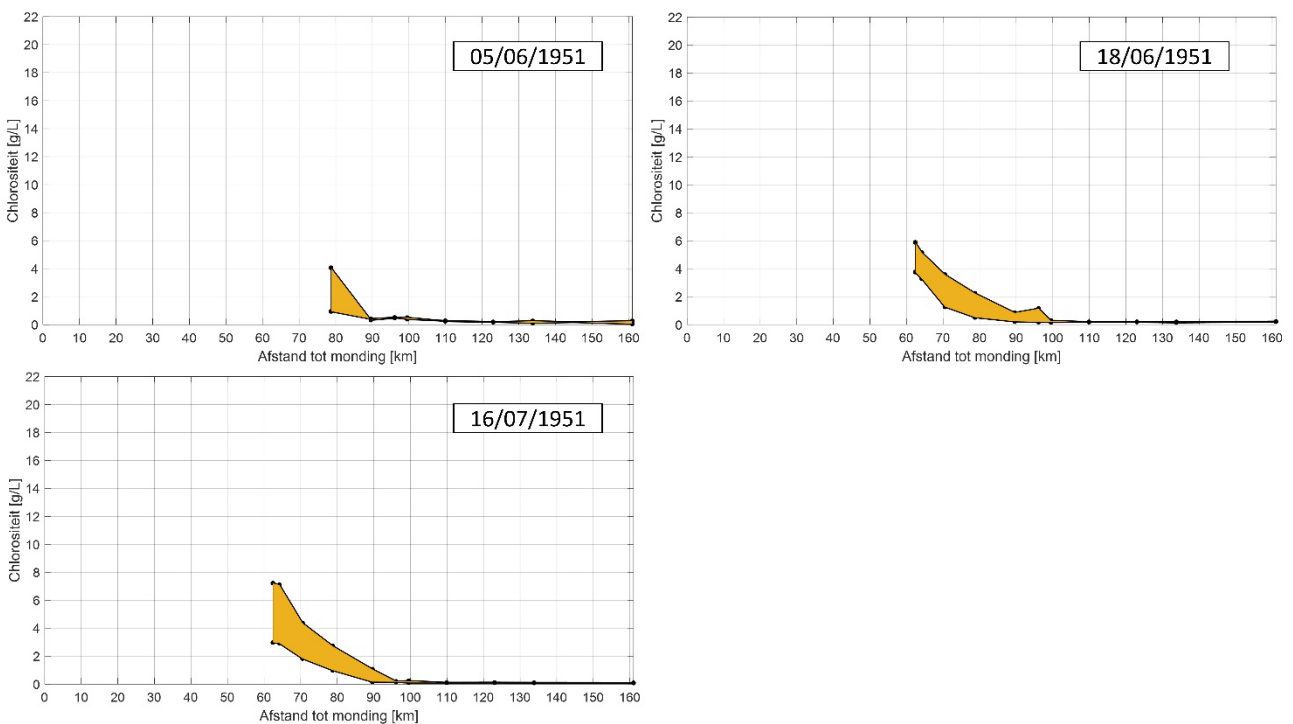
Figuur 50 – Langsverlopen chlorositeit, januari-februari 1951.



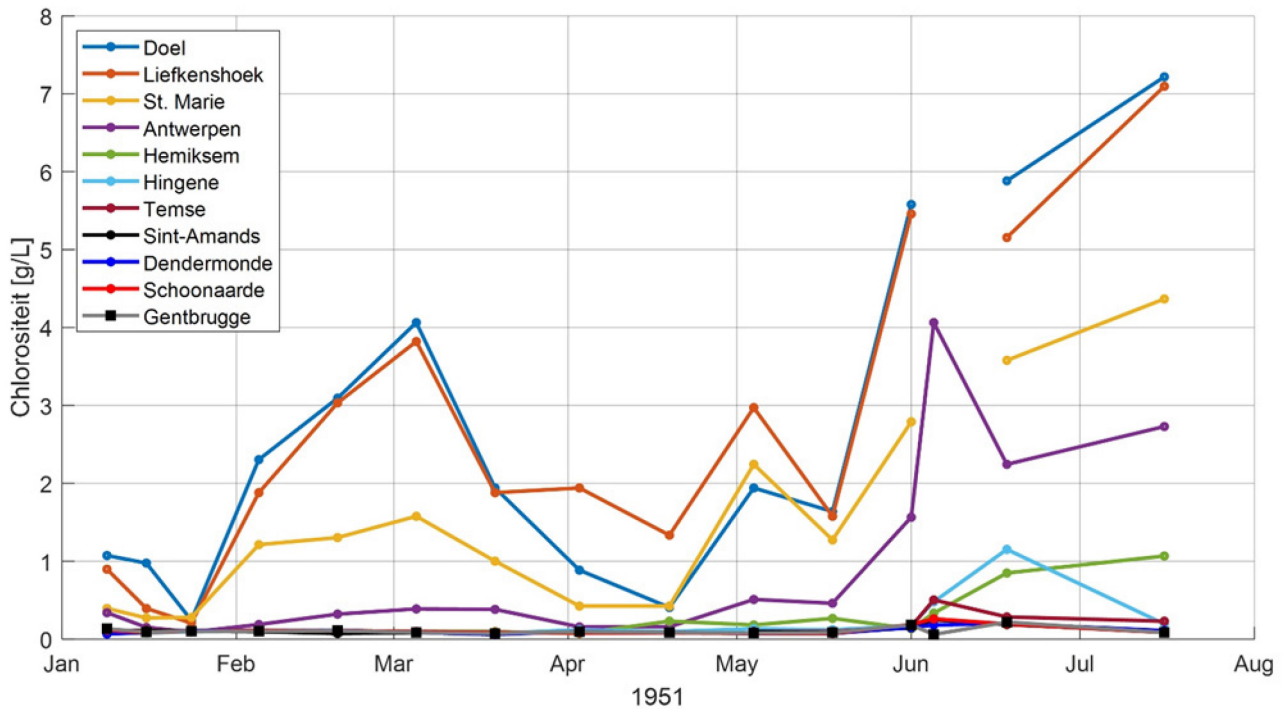
Figuur 51 – Langsverlopen chlorositeit, februari-maart-april 1951.



Figuur 52 – Langsverlopen chlorositeit, april-mei-juni 1951.



Figuur 53 – Langsverlopen chlorositeit, juni-juli 1951.



Figuur 54 – Overzicht langsverloop chlorositeit in 1950: Doel, Liefkenshoek, St. Marie, Antwerpen Loodsgebouw, Hemiksem, Hingene, Temse, Sint-Amands, Dendermonde, Schoonaarde, Gentbrugge.

1952-1975

Een overzicht van de zoutmetingen tussen 1952 en 1972 wordt gegeven in Tabel 8. Het betreft voor de aangegeven locaties 1 meting per week. Voor de ligging van de locaties verwijzen we naar Figuur 1 en Figuur 2. Voor de locatie Antwerpen Loodsgebouw zijn metingen beschikbaar tot 10/2/1975.

Tabel 8 – Overzicht zoutmetingen 1949 – 1972 per locatie

locatie	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Zeebrugge																								
Vlissingen																								
Terneuzen																								
Hansweert																								
Bath																								
Zandvlietsluis																								
Doel																								
Liefkenshoek																								
Kruisschans (Boudewijnsluis)																								
St. Marie																								

Bijlage 5 Debieten/waterstanden Gentbrugge

Belangrijk voor zoutindringing zijn de debieten van de bovenafvoer van het Scheldebekken. Uit het archief zijn data teruggevonden die teruggaan tot 1923 voor de debieten over de stuw bij Gentbrugge. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de data die uit het archief is teruggevonden. De archiefstukken zijn gedigitaliseerd als pdf, maar de datapunten zijn nog niet beschikbaar in tabellen voor pre of post processing gebruik.

jaargemiddeld debiet

1923-1927; 1939; 1941-1943

maandgemiddeld debiet

1924; 1939-1944;

daggemiddelde debieten

- januari – december 1943

- januari – juli 1944

waterstanden voor en na de stuw en berekende debieten op drie tijdstippen per dag (8u, 12u en 16u)

- januari – december 1945 en 1946

- januari – september 1947

waterstanden voor en na de stuw op drie tijdstippen per dag (8u, 12u en 16u); debieten nog te berekenen

- oktober – december 1947

- 1948-1958; 1959 (juni ontbreekt); 1960 (november ontbreekt); 1961 (augustus ontbreekt); 1962-1964; 1965 (mei ontbreekt); 1966; 1967 (oktober ontbreekt); 1968; 1969; 1970 (januari ontbreekt); 1971 (mei ontbreekt); 1972; 1974 (juli ontbreekt); 1975 (maart ontbreekt); 1976-1981; 1982 (januari tot april)

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be