

Kust  
visie

# Kustvisie

Referentiesituatie verzilting

Rapport

Referentiesituatie verzilting  
I/RA/11630/21.196/ABO

Opgesteld in opdracht van

Vlaamse Overheid- Departement Mobiliteit en Openbare Werken i.s.m. Agentschap Maritieme  
Dienstverlening en Kust  
MT/02401

Onder begeleiding van

Studieteam Hoogtij(d)  
IMDC, Arcadis, ORG,  
Econopolis, Common Ground, An Luyten, Connect, LDR en Jeroen Bryon

22 november 2023

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	05/05/2023	Concept	JWA	API, VBA	ABO
2.0	22/11/2023	Aanpassing lay-out en verwerking opmerkingen	JWA	API, VBA	ABO

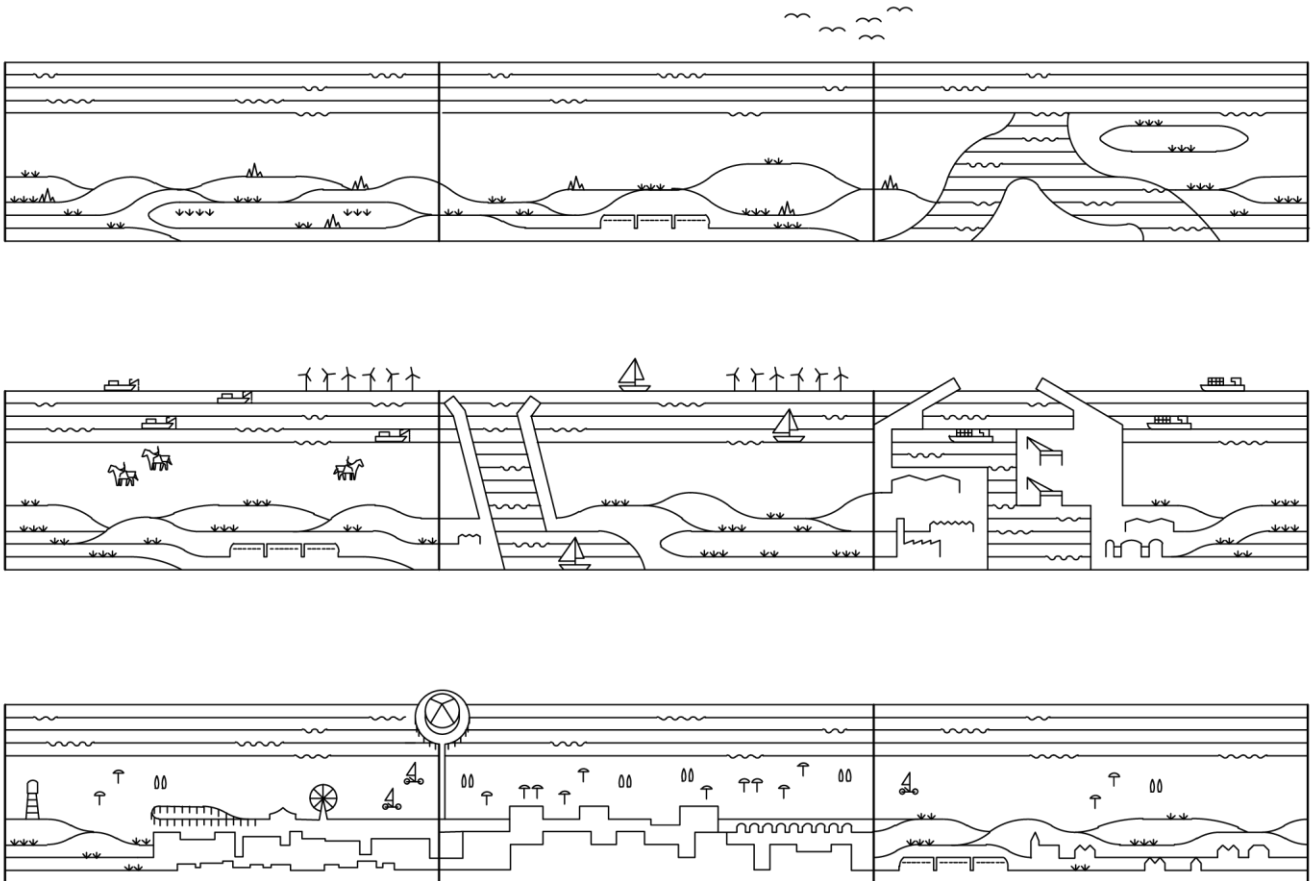
*De studies en het onderzoek in Kustvisie zijn uitgevoerd ter ondersteuning van het opstellen van het 'strategisch beleidsplan Kustvisie'. Het doel is daarbij een kansrijk kustbeschermingslint af te bakenen, dat is de ruimte waarbinnen de toekomstige zeewering kan worden ontworpen en uitgevoerd om de kust ook op lange termijn te blijven beschermen.*

*Dit document maakt deel uit van de onderbouwende studies. Het wordt gedeeld om inzicht en achtergrond te geven in het studiewerk voor en de onderbouwing van het strategisch beleidsplan Kustvisie.*

*Het onderzoek in Kustvisie is uitgevoerd op een niveau dat gepast is voor de keuze van een kansrijk kustbeschermingslint in het strategisch beleidsplan. De focus ligt daarbij op de studie van de onderscheidende effecten van de alternatieven ten opzichte van de referentiesituatie en ten opzichte van elkaar. Het gaat ook steeds over grootteorde dimensies en conceptuele ontwerpen, geschikt voor het opmaken van voorbeelduitwerkingen en voor de evaluatie van alternatieven op strategisch niveau. Het studiewerk in dit document kan daarom niet worden beschouwd als een detailonderzoek of detailontwerp. Dit gebeurt pas op projectniveau. Verder hoort er bij het strategisch beleidsplan Kustvisie een eerste actieplan 2025 – 2034. Dit actieplan bevat de nodige acties om Kustvisie stapsgewijs uit te voeren. In dit plan zijn ook een aantal acties gedefinieerd met betrekking tot het verder onderzoek, het ontwerp, de uitwerking en de uitvoering van de toekomstige kustbeschermingsmaatregelen binnen het gekozen kustbeschermingslint.*



# Referentiesituatie verzilting







# Inhoud

1	Inleiding	10
1.1	De opdracht	10
1.2	Doel van het rapport	10
1.3	Leeswijzer	11
2	Modelopbouw	13
2.1	Hydrogeologie en modeldomein	13
2.2	Hydrodynamische randvoorwaarden	14
2.2.1	Modelranden	14
2.2.2	Hydrografie	15
2.2.3	Grondwaterwinningen	15
2.2.4	Grondwatervoeding	15
3	Modelkalibratie	17
3.1	Hydrodynamisch transport	17
3.1.1	Peilmetingen	17
3.2	Verificatie zoet-zout evenwicht zonder zeespiegelstijging (referentietoestand)	17
4	Berekeningen zeespiegelstijging	20
4.1	Impact grondwaterstanden	20
4.2	Evolutie zoutconcentraties	21
5	Conclusies	24
6	Referenties	25

# Bijlages

## Bijlage A Modelopbouw 26

A.1	Laagindeling rekenmodel	27
A.2	Hydrogeologie	28
A.3	Peilbeheer polderwaterlopen	32

## Bijlage B Resultaten hydrodynamisch model 34

B.1	Kalibratie	35
B.2	Grondwaterstijghoogtes	37
B.2.1	Referentietoestand	37
B.2.2	Grondwaterstanden referentietoestand en bij zeespiegelstijging	39
B.2.3	Stijghoogteverschillen door zeespiegelstijging	40

## Bijlage C Resultaten zouttransport 44

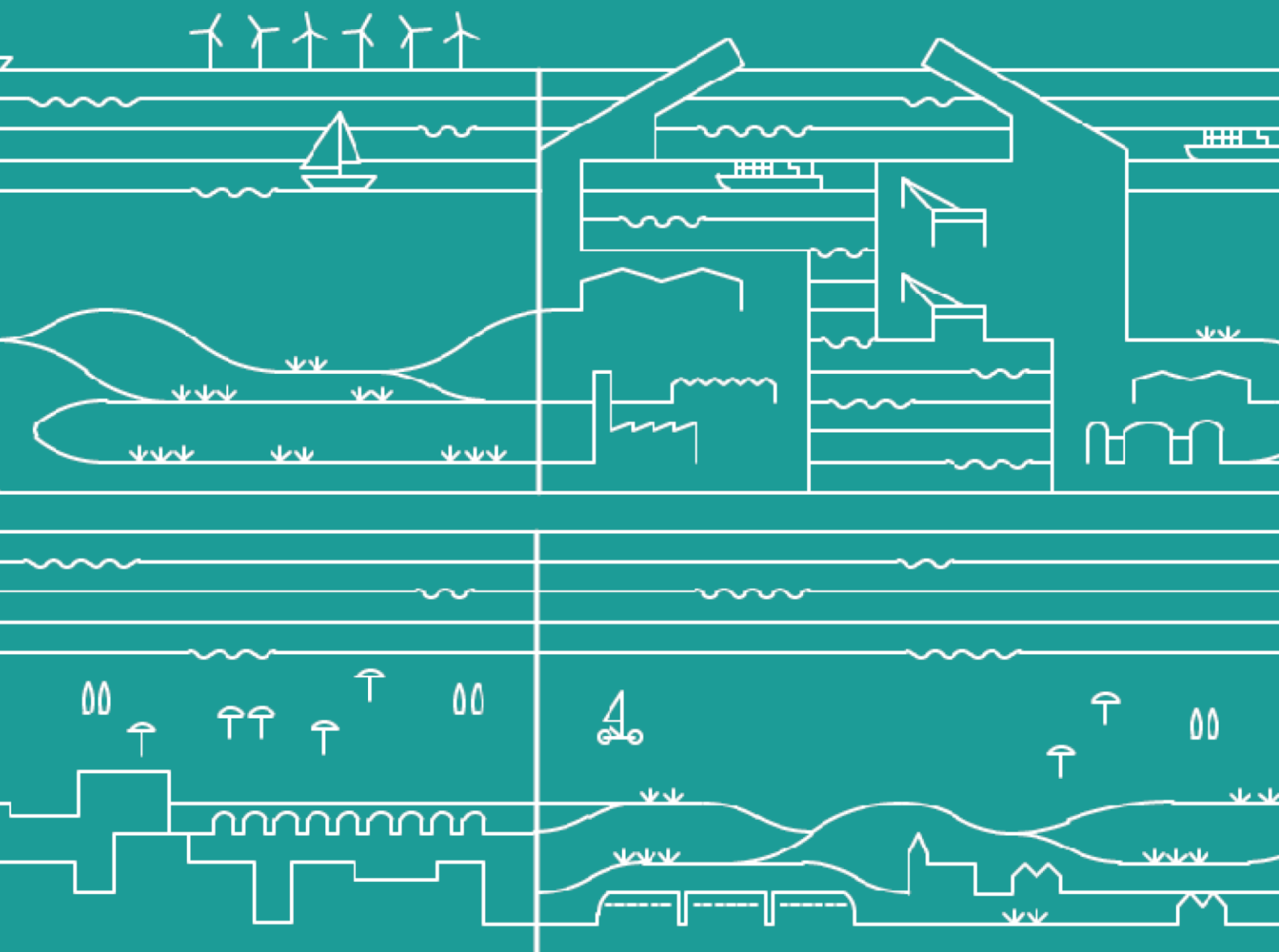
C.1	Modelverificatie referentietoestand met resultaten TOPSOIL project	45
C.2	Evolutie zoutconcentraties Referentietoestand	47
C.3	Evolutie zoutconcentraties bij zeespiegelstijging	50
C.4	Evolutie zoet-zoutfront bij zeespiegelstijging	53

## Lijst van tabellen

Tabel 2-1: Richtwaarden hydrogeologische parameters	14
---	----

## Lijst van figuren

Figuur 2-1: Modeldomein (gearceerd) binnen KPS systeem (blauwe contour).	13
Figuur 4-1: Iso-contouren grondwaterstanden referentietoestand (zonder zeespiegelstijging)	22



# Inleiding

# 1 Inleiding

## 1.1 De opdracht

Op 22 december 2017 nam de Vlaamse overheid de startbeslissing om een 'Kustvisie' voor de lange termijn te maken. Deze visie heeft als doel een adaptieve lange termijn aanpak voor de bescherming van onze kust op te stellen waarbij het mogelijk is om stapsgewijs in te spelen op de zeespiegelstijging en zo te komen tot een veilig, gezond en multifunctioneel kuststelsel dat op duurzame wijze gebruikt wordt voor menselijke behoeften.

Kustvisie zal daarbij de maatschappelijk meest wenselijke alternatieven identificeren die nodig zijn om onze kust en het achterland ook op lange termijn stapsgewijs te beschermen tegen een zeespiegelstijging tot 3 meter. Het gaat daarbij om het vastleggen van een toekomstige kustlijn met bijhorende ruimte, namelijk een toekomstig lint waarin plaats is voor het ontwikkelen van de gepaste kustverdediging in combinatie met eventuele andere opportuniteiten.

Het consortium Hoogtij(d) is gevraagd het studiewerk en de begeleiding van het proces- en onderzoekstraject uit te voeren. Het heeft daarvoor een proces- en projectaanpak opgesteld die via een co-creatietraject in samenwerking met stakeholders tot gedragen oplossingen wil komen. Daarbij wordt een ambitieus realisme vooropgesteld waarbij we op zoek gaan naar:

- Een gedragen Kustvisie door het doorlopen van een intensief participatie en co-creatietraject;
- Een onderbouwde Kustvisie door het uitvoeren van een geïntegreerd ontwerp onderzoek;
- Een uitvoerbaar Kustvisie door het uitwerken van een flexibel en adaptief toekomstig beleid.

Gedurende het traject worden verschillende studies uitgevoerd en rapportages opgesteld ter duiding van het onderzoek en het proces. Dit document is daar onderdeel van en biedt meer achtergrond in de verzilting via grondwater voor de huidige situatie en bij zeespiegelstijging. .

## 1.2 Doel van het rapport

Dit rapport onderzoekt de referentiesituatie verzilting, zowel in huidige toestand als de invloed van zeespiegelstijging. Met een stijging van de zeespiegel stijgt ook de grondwaterstand langs de vloedlijn (stijghoogte). Dit kan leiden tot wijziging van de grondwaterstanden en -stromingen waardoor er ook een wijziging wordt verwacht van het huidige (al dan niet dynamische) evenwicht tussen het zoete en zoute grondwater in de achterliggende poldergebieden.

Om de potentiële wijziging en omvang van het impactgebied te onderzoeken bij de huidige kustlijnligging, maar zowel mét als zonder toekomstige zeespiegelstijging, wordt een tijdsafhankelijk grondwaterstromingsmodel opgebouwd met een modeldomein over de volledige lengte van de Vlaamse kustzone. Met dit model worden huidige grondwaterstanden, -stromingen en zoet-zout evenwichten berekend over een periode van 150 jaar, mét en zonder verhoging van de zeespiegel (referentiesituatie).

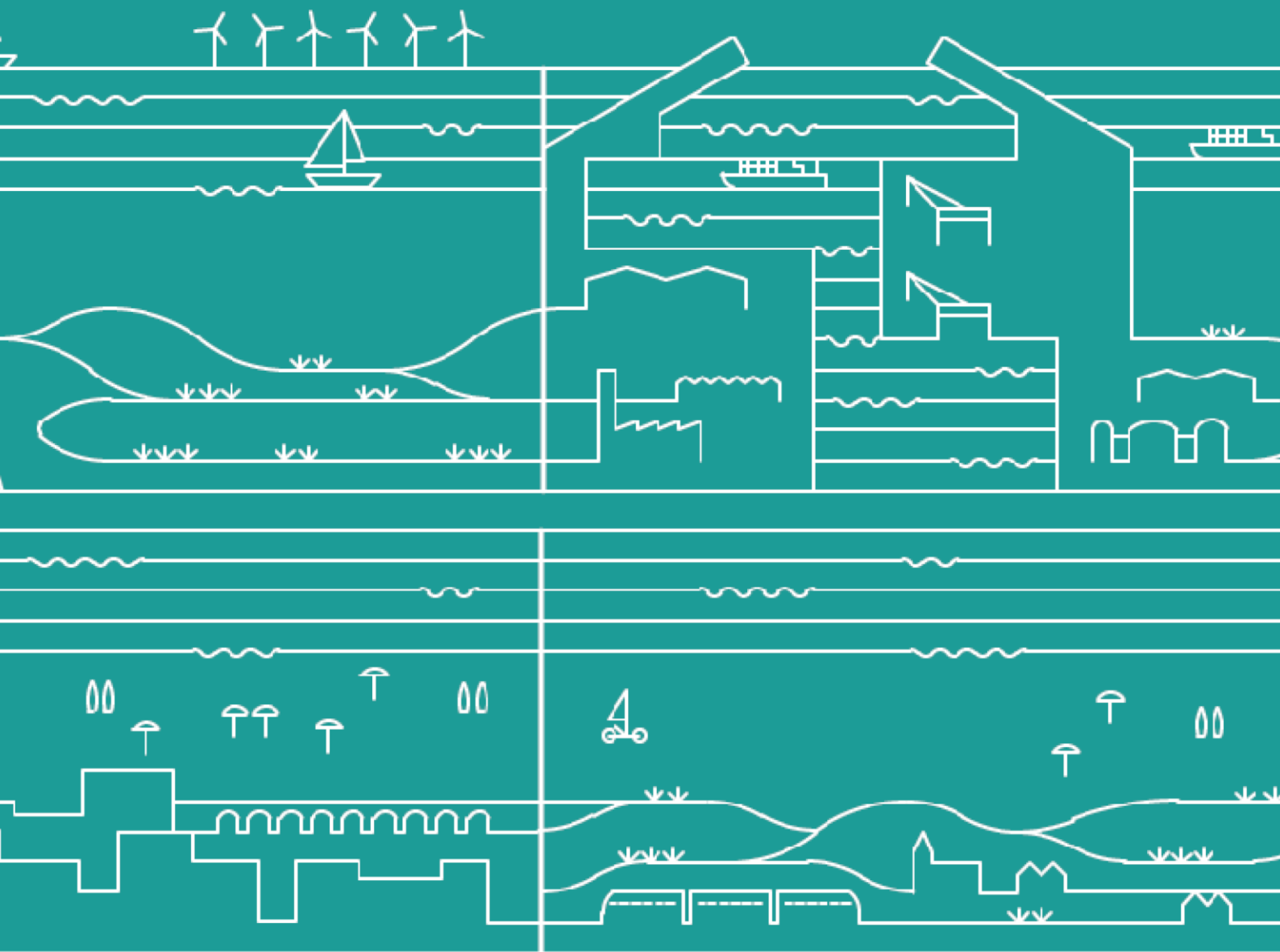
De grondwaterstromingen worden berekend met behulp van een 3-D grondwaterstromingsmodel opgebouwd met het MODFLOW USG rekenalgoritme. De dichtheitsafhankelijke grondwaterstroming wordt berekend door middel van het variable density package. Voor allocatie van het conceptueel model wordt gebruik gemaakt van de GMS (v10.6) preprocessor, uitgegeven door Aquaveo (<http://www.aquaveo.com>). Het model berekent dus zowel de grondwaterstroming, als het transport van zout water, waarbij het opgeloste stoffentransport rekening houdt met dichtheitsafhankelijke stroming.

Na opbouw van het model en parametrisatie worden de modelresultaten voor de actuele situatie zonder zeespiegelstijging geverifieerd aan de hand van beschikbare metingen. Het grondwaterstromingsmodel wordt geverifieerd aan de hand van de gemeten grondwaterstanden en beschikbare balanstermen. Voor het zouttransport wordt het model geverifieerd aan de hand van de gedocumenteerde evoluties van het zoet-zoutvlak tussen 1974 en 2017.

Voor de begroting van de impact onder invloed van zeespiegelstijging wordt eerst een referentieberekening gedaan waarbij een grondwatermodellering wordt uitgevoerd zonder zeespiegelstijging. Vervolgens wordt een grondwatermodellering uitgevoerd voor drie scenario's met verschillende zeespiegelstijgingsniveaus waarbij de zeewaartse condities worden gewijzigd, namelijk een gemiddeld zeeniveau met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging. Uit de resultaten van deze berekeningen en de vergelijking met de referentieberekening kan het impactgebied voor verzilting via grondwater worden bepaald.

### **1.3 Leeswijzer**

Het rapport begint met een beknopt overzicht van de opbouw van het model, voor zowel de hydrogeologie als de hydrografie, in hoofdstuk 2. Vervolgens wordt de kalibratie van het model, met betrekking tot het hydrodynamisch transport, en de verificatie van het zoet-zout evenwicht, besproken in hoofdstuk 3. De doorgerekende scenario's en referentiesituatie worden gepresenteerd in hoofdstuk 4, waarna het rapport wordt afgesloten met een korte conclusie in hoofdstuk 5.

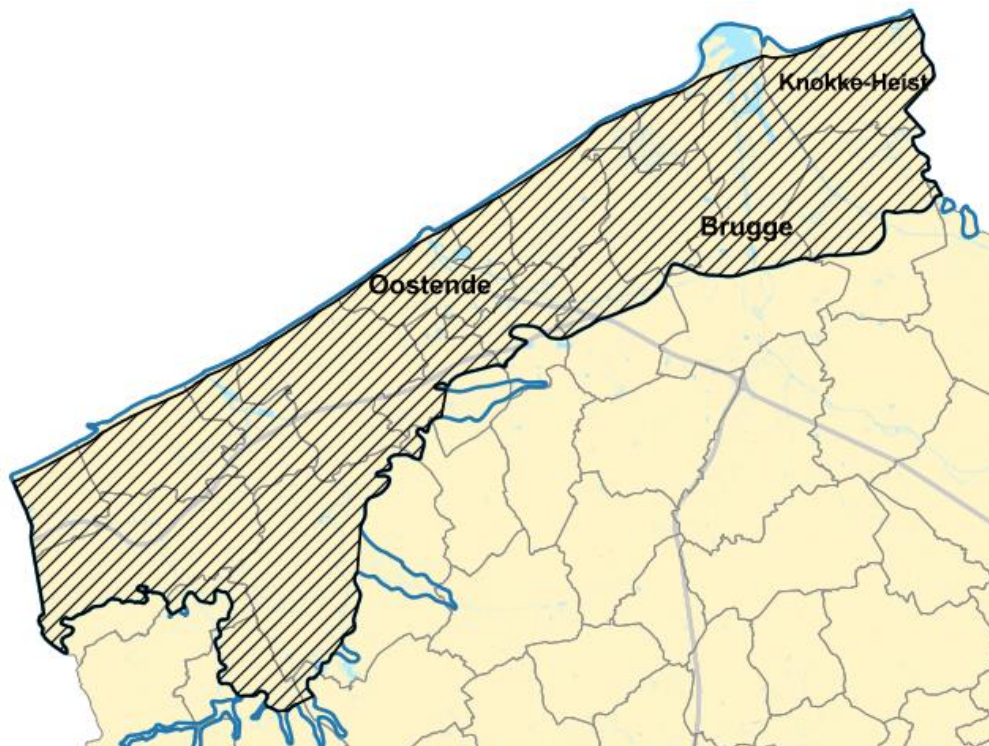


# Modelopbouw

# 2 Modelopbouw

## 2.1 Hydrogeologie en modeldomein

Er werd een modeldomein afgebakend binnen het Kust en Poldersysteem (KPS) met kleine reducties van het modeldomein (Figuur 2-1).



Figuur 2-1: Modeldomein (gearceerd) binnen KPS systeem (blauwe contour).

Er werd gewerkt met een rekenrooster met variabele celgrootte en oriëntatie. De maximale celgrootte bedraagt 200x200 m waarbij een hogere resolutie tot 50 bij 50 m wordt voorzien ter hoogte van elementen met steile gradiënten in drukhoogte (kanalen en overgang tussen aanvulgronden, duin- en poldergebieden) of sterke zoutwatergradiënt (bv. havenmonden, IJzer en havendokken). In het horizontale vlak werden met deze werkwijze 38 183 rekencellen gereserveerd.

De onderverdeling in hydrogeologische eenheden, parameterwaarden (Tabel 2-1) en verticale onderverdeling in rekenlagen (Tabel Bijlage A-1) werd uitgevoerd conform de aanmaak van het rekenrooster toegepast in het Scaldwin project (Universiteit Gent/Deltares, 2012). De top van de Ieperiaan aquitard (HCOV0900) wordt als basis van het model beschouwd. In de voorgenoemde studie worden 23 rekenlagen gebruikt. In het kader van voorliggende impactberekening werd beslist om een extra rekenlaag toe te voegen voor een aparte toekenning van de hoge doorlatendheden van duinen en ophogingen. Het totaal actieve rekencellen over de 24 lagen bedraagt 916 392.

Binnen het KPS varieert de top van de Ieperiaan aquitard tussen 0 m TAW in het zuidwesten tot -180 m TAW in het noordoosten waarmee het aantal actieve rekenlagen varieert tussen 1 en 24.



Voor alle hydrogeologische formaties, uitgezonderd de Polderafzettingen (HCOV0130) werden de doorlatendheden opgelegd zoals weergegeven in Tabel 2-1. Voor de polderafzettingen werd beroep gedaan op de profieltypekaart conform de aanmaak van het rekenrooster toegepast in het Scaldwin project (Universiteit Gent/Deltares, 2012). De ruimtelijke verdeling van de hydraulische conductiviteiten wordt voor de verschillende polderafzettingen weergegeven in Figuur bijlage A-1 tot Figuur bijlage A-4

Tabel 2-1: Richtwaarden hydrogeologische parameters

HCOV (Subeenheid)	Code H3DV2 (Deckers J. <i>et al.</i> , 2019)	Horizontale doorlatendheid [m/d]	Bron	Verticale anisotropie [-]
Ophogingen	0110	1	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	5
Duinen	0120	14	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	5
Polderafzettingen 130		Variabel	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	
Deklagen	0150	5	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	5
Pleistoceen afzettingen	0170	7	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	5
Bartoniaan aquitardsysteem	0500	0,025	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	
Ledo-Paniseliaan Brusseliaan aquifersysteem	0600	7	(Universiteit Gent/Deltares, 2012)	
Paniseliaan Aquitard	0700	0,01	(VMM, 2008)	25
Kleiig zand van Pittem	0700	0,01	(VMM, 2008): range 0,01 – 1	25
Klei van Merelbeke	0701	0,01	(VMM, 2008): 0,003	25
Ieperiaan Aquifer	0800	1	(VMM, 2008): range 0,03 – 1,5	5

## 2.2 Hydrodynamische randvoorwaarden

De grondwaterstroming wordt gestuurd door de volgende impulsen:

- Interactie ter hoogte van de laterale modelranden (sectie 2.2.1)
- Interactie met de hydrografie (sectie 2.2.2)
- Bemalingen en grondwaterwinningen (sectie 2.2.3)
- Grondwatervoeding (sectie 2.2.4)

### 2.2.1 Modelranden

Ter hoogte van de modelranden wordt een ondoorlatende grens opgelegd (no flux boundary). Ter hoogte van de oostelijke en westelijke modelgrenzen wordt dit verantwoord door het opleggen van deze grens parallel aan de grondwaterstroming, namelijk loodrecht op de kustlijn. Landinwaarts wordt de grens ruim buiten het interessegebied gelegd, eventuele conceptuele foute aannames worden gecorrigeerd door de opgelegde stijghoogte in het dens netwerk waterlopen en polders. Zeewaarts wordt de modelgrens op 500 m van de laagwaterlijn gelegd. De stand van de zeespiegel wordt opgelegd tussen deze modelgrens en de (huidige) laagwaterlijn. Ter hoogte van de havenmonden (Nieuwpoort tot aan de Ganzepoot, Oostende tot aan de sluis van het kanaal Gent-Oostende, jachthaven Blankenberg en voorhaven Zeebrugge) wordt de laagwaterlijn vervangen door de contouren van de getijdegebonden zones of kaaimuren.

## 2.2.2 Hydrografie

Zowel voor de berekening van de grondwaterstroming als de mobiliteit van het zoet-zout grensvlak moet de hydrografie met het nodige detail worden ingebracht. Alhoewel het model werd opgebouwd met als doel oriënterende berekeningen uit te voeren, werd besloten om alle beschikbare detail van kanalen waterlopen en polderlopen te verrekenen:

- Kanalen en havendokken worden jaarrond watervoerend beschouwd. Deze worden in het model ingebracht als MODFLOW RIVER boundary met opgelegd vast gekend peil. De randvoorwaarde wordt opgelegd in alle rekenlagen met top boven de bedding van het beschouwde kanaal of havendok.
- Waterlopen van 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> categorie worden eveneens beschouwd als jaarrond watervoerend. Deze worden in het model ingebracht als MODFLOW RIVER boundary met geïnventariseerde jaargemiddelde oppervlaktewaterstand hetzij uit beschikbare tijdreeksen van waterstanden, hetzij uit oppervlaktewatermodellen, of uit inventarisatie van de polderpeilen.
- De polderwaterlopen met gekend polderpeil worden in het model ingebracht als MODFLOW RIVER boundary. Voor de keuze van de op te leggen stijghoogte werden de polderbesturen gecontacteerd voor een actualisatie van het gevoerde peilbeheer. Voor een overzicht van de geconsulteerde bronnen en polderbesturen wordt verwezen naar bijlage A.3. In het merendeel van de polders wordt een verschillend zomer- en winterpeil als oppervlaktewaterstand opgelegd. In het model werden deze omgerekend naar een (rekenkundig) jaargemiddeld op te leggen peil.
- Voor waterlopen van 3<sup>e</sup> categorie en hoger wordt een MODFLOW DRAIN randvoorwaarde opgelegd. De drainagehoogte werd berekend als het maximum van achtereenvolgens het digitaal hoogtemodel (DHM) Vlaanderen (resolutie 1x1m), en het opgelegde polderpeil.

## 2.2.3 Grondwaterwinningen

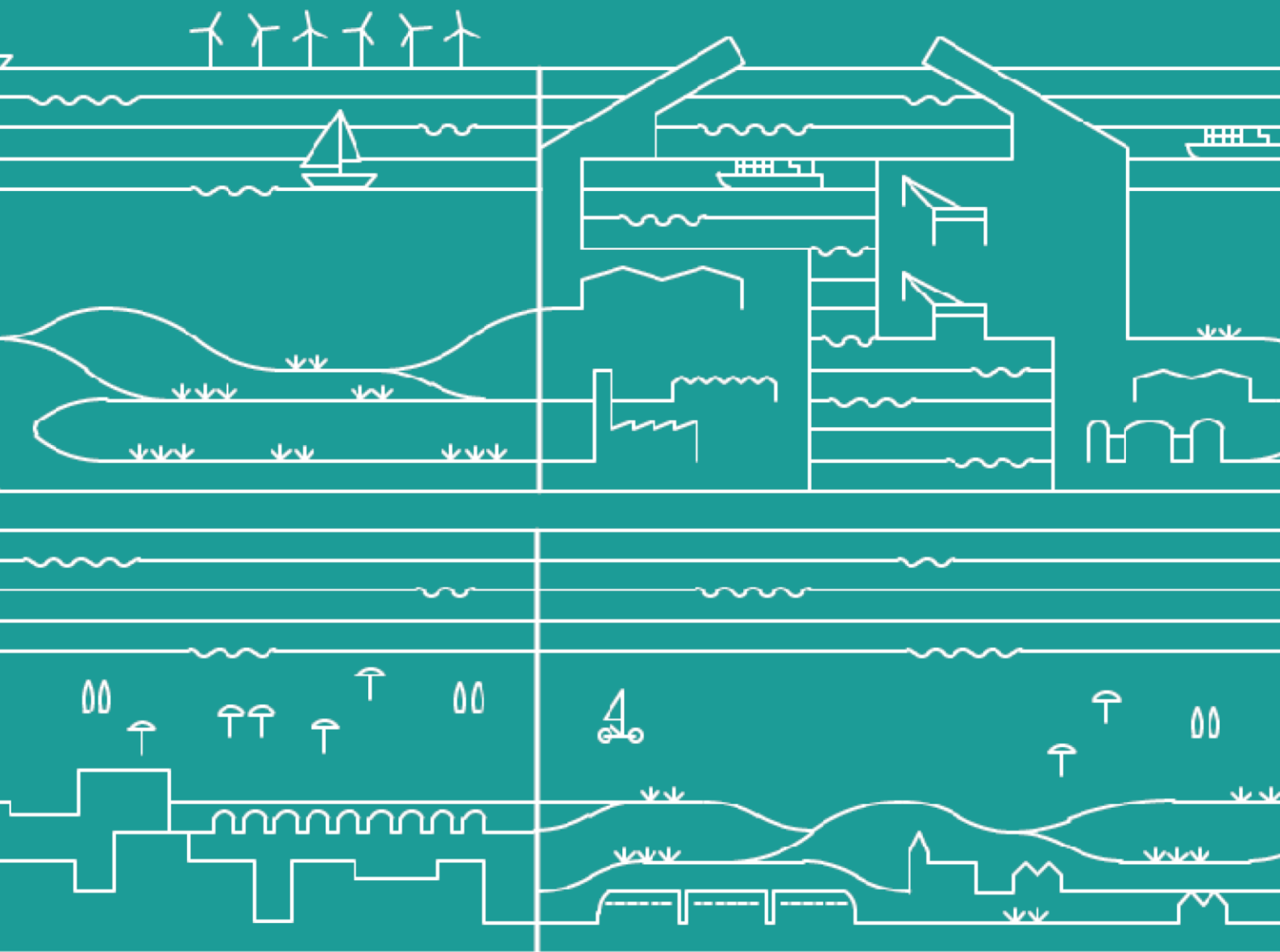
De grondwaterwinningen met filter boven de scheidende laag van de Ieperiaan Aquitard werden geselecteerd uit de vergunningsdatabank van de VMM<sup>1</sup>. Hieruit werden de tijdelijke vergunningen in kader van bemalingen niet weerhouden voor invoer in het model. De vergunde debieten worden permanent opgelegd tijdens de volledige duur van de transportberekeningen. Hierbij werden lozingen als positieve debieten berekend in m<sup>3</sup>/dag en permanente winningen als negatieve debieten in m<sup>3</sup>/dag.

## 2.2.4 Grondwatervoeding

In kader van de opbouw Vlaams Grondwatermodel (Meyus *et al.*, 2000) werd een ruimtelijk verdeeld grondwatervoeding berekend aan de hand van het WETSPA model (Wang *et al.*, 1996). Voor het studiegebied bedraagt de grondwatervoeding gemiddeld 100 mm/jaar. Ter hoogte van de duinen wordt meer dan 320 mm/jaar gevoed, ca. 100 mm/jaar op de kreekruggen, en 25 tot 50 mm/jaar ter hoogte van de poelgronden.

---

<sup>1</sup> (<https://www.dov.vlaanderen.be>, bevroegd op 12/04/2022)



# Modelkalibratie

# 3 Modelkalibratie

## 3.1 Hydrodynamisch transport

### 3.1.1 Peilmetingen

Peilmetingen voor verificatie van de grondwaterstanden werden gedownload van de DOV databank. Voor opname in de kalibratiedataset werden alle peilregistraties in de meetperiode 2004-2019 beschouwd met minimaal 2 metingen per jaar en gedurende een periode van minimaal 2 jaar. Tijdreeksen met significante trends als gevolg van wijzigend pompregime werden niet weerhouden in de kalibratiedataset. In Figuur bijlage B-1 wordt een overzicht gegeven van de spreiding van de weerhouden meetlocaties.

De met het model berekende grondwaterstanden worden in Figuur bijlage B-3 vergeleken met de (over een periode van 15 jaar van 2004-2019) uitgemiddelde grondwaterstanden. Gemiddeld wijken de berekende grondwaterstanden 5 cm af van de gemeten waarden met een gemiddelde absolute afwijking van 50 cm (Figuur bijlage B-2).

## 3.2 Verificatie zoet-zout evenwicht zonder zeespiegelstijging (referentietoestand)

De tijdsafhankelijke simulatie wordt gestart met de gekarteerde zoet-zoutwaterverdeling anno 1974 volgens (De Breuck *et al.*, 1989). Hierin wordt het grensvlak aangegeven waaronder een concentratie opgeloste stoffen of saliniteit voorkomt van meer dan 1,5 g/l. Voor een vertaling naar startconcentraties wordt een saliniteit van 1,5 g/l toegekend aan dit gekarteerde zoet-zout grensvlak en de concentratie progressief verhoogd in de diepte tot een waarde van 28 g/l ter hoogte van de leperiaan aquifer. Boven dit grensvlak wordt een concentratie van 0 g/l opgelegd. Zodoende wordt reeds een initiële verticale gradiënt van zoutconcentraties opgelegd. Door dispersie tijdens de tijdsafhankelijke simulatie zal het opgelegde zoutfront zich echter verdelen naar een meer realistische zoutverdeling in de diepte. Voor de transportberekening werd een effectieve porositeit gekozen van 0,38 en een longitudinale dispersiviteit (in de richting van de stroming in een horizontaal vlak) van 0,30 m, een transversale dispersiviteit (dwars op de stroming in een horizontaal vlak) van 0,05 m, en een verticale dispersiviteit (verdeling tussen de rekenlagen) van 0,03 m.

Tijdens de berekeningen zal dit zoet-zoutfront zich herverdelen. Onder invloed van infiltrerend regenwater en infiltratie van (zoet) kanaalwater zal het zoet-zoutfront dalen, onder invloed van drainerende hydrografie wordt lokaal een stijging van het zoet-zoutfront berekend.

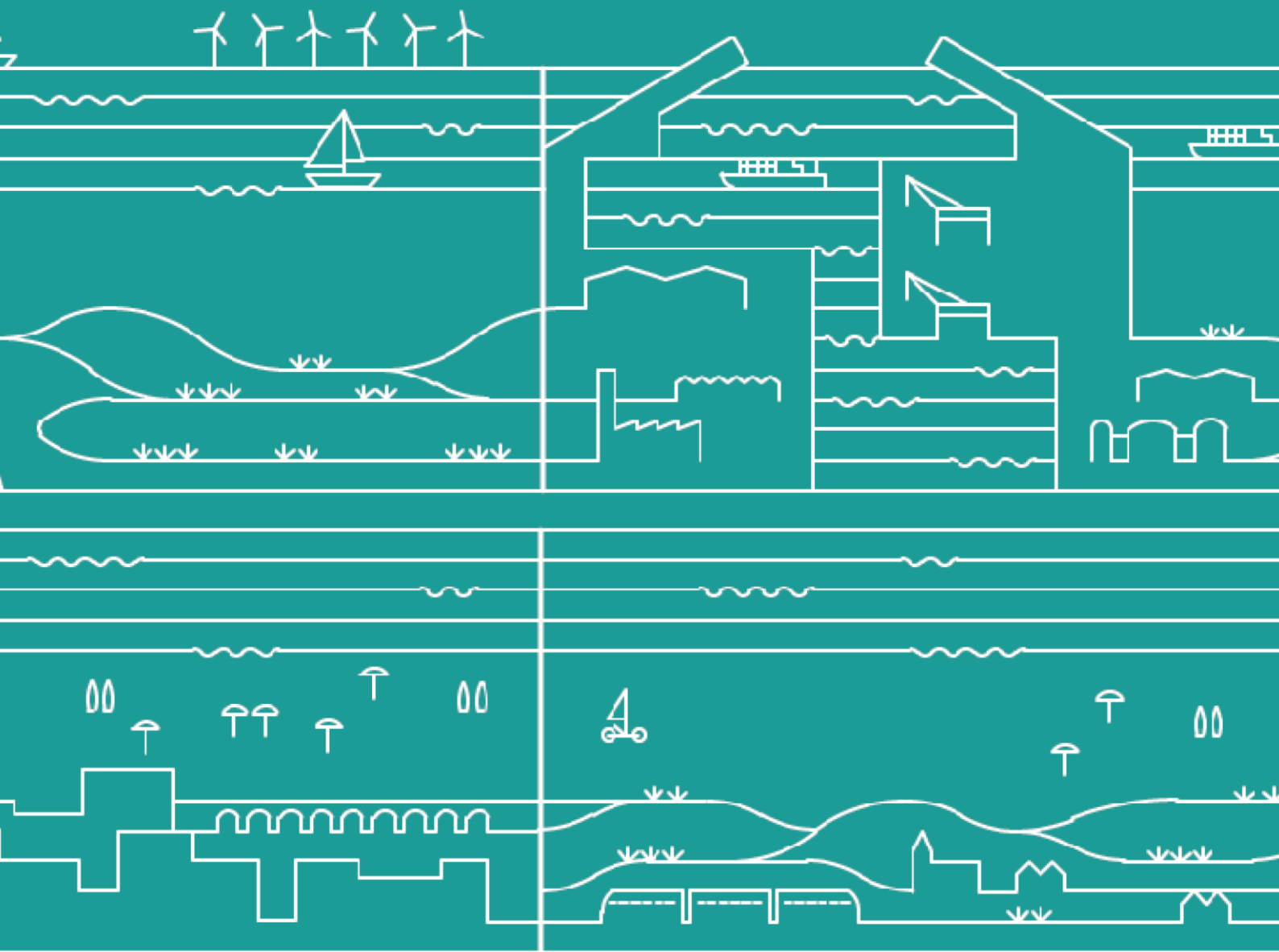
Als verificatie van de transportberekening worden de resultaten na 50 jaar (2025) geverifieerd aan de hand van de resultaten van de recente (2014-2017) metingen in het kader van het TOPSOIL project.

In het kader van dit TOPSOIL project (Deltares, 2019) werd tussen 2014 en 2017 een kartering van de actuele verziltingsgraad van het freatisch grondwater uitgevoerd door middel van elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht of "Airborne electromagnetics (AEM)". Hierbij werden in een aantal profielen de elektromagnetische geleidbaarheid van de ondergrond op verschillende dieptes gemeten en via 3-D interpolatie een quasi gebiedsdekkend 3-D beeld van de verziltingsstoestand opgemaakt. Er wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen achtereenvolgens een "conservatieve" en "optimistische" inschatting van de diepte van het zoutfront. In 75 % van de grondwateranalyses met overwegend zoet water werden geleidbaarheidswaarden gemeten in het bereik van 2 000 tot 5 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Het grensvlak met geleidbaarheden tot 5 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (overeenkomstig een saliniteit van  $\pm 5,0$  g/l) werd beschouwd als een optimistische schatting van de diepte van het zoutfront, het grensvlak met geleidbaarheden tot 2 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (overeenkomstig een saliniteit van  $\pm 1,5$  g/l) als een conservatieve aanname van het grensvlak.

De vergelijking tussen meting (TOPSOIL) en berekeningen wordt gemaakt aan de hand van de diepte van het zoutfront met concentratie van 1,5 g/l met de geschatte dieptes van het TOPSOIL project.

Deze vergelijking wordt in Figuur bijlage C-1 weergegeven relatief aan het maaiveld, in Figuur bijlage C-2 wordt de absolute hoogte van het zoutfront weergegeven.

De berekeningen geven een gelijkaardig patroon van diepere en ondiepere ligging van het zoutfront als de metingen in kader van TOPSOIL. In de zones met diepere ligging van het zoutfront wordt een gelijke diepte berekend. In de poldergebieden met ondiepe ligging van het zoutfront worden in de TOPSOIL metingen grote vlakken weergegeven met zeer ondiep zoutfront 0 tot 2 meter onder maaiveld (m-mv). De berekeningen resulteren hier eerder in een afwisseling van zones met diepere (2 tot 5 m-mv) en ondiepere (0-2 m-mv) ligging van het zoutfront.



# Berekeningen zeespiegelstijging

## 4 Berekeningen zeespiegelstijging

In de modelberekeningen wordt de invloed van de zeespiegelstijging bepaald op de grondwaterstanden en het zoet-zout evenwicht. De overige randvoorwaarden (grondwatervoeding en waterpeilen in de kanalen en waterlopen) worden niet gewijzigd. Er wordt eveneens geen rekening gehouden met de morfologie van de kustvlakte; de gewijzigde stijghoogterandvoorwaarde wordt opgelegd op dezelfde positie.

Er worden drie toestanden van zeespiegelstijging (ZSS) beschouwd waarbij ten opzichte van de referentietoestand anno 2025 (gemiddeld zeeniveau van 2,4 m TAW) het gemiddeld zeeniveau over een periode van 100 jaar (van 2025 tot 2125) progressief verhoogt tot 1) 3,4 m TAW (+1 m ZSS), 2) 4,4 m TAW (+2 m ZSS), en 3) 5,4 m TAW (+3 m ZSS).

De gewijzigde randvoorwaarde wordt opgelegd ter hoogte van de kustlijn en watervlakken in open verbinding met de zee. Het model rekent tijdsafhankelijk over een periode van 150 jaar (50 jaar aanloop van 1975-2025 zonder enige wijziging van de zeespiegel en vervolgens 100 jaar 2025-2125 met wijziging van de zeespiegel) met tijdstappen van 1 jaar.

De resultaten van de berekeningen met progressieve zeespiegelstijging worden vergeleken met de evoluties zonder zeespiegelstijging (referentietoestand). Voor de impactbeoordeling wordt volgende uitvoer gegenereerd:

- Sectie 4.1: Verschilkaarten grondwaterstijghoogte;
- Sectie 4.2: Evolutie van de zoutconcentraties en de resulterende wijzigingen van de diepte van het zoet-zoutfront in 2075 en 2125.

### 4.1 Impact grondwaterstanden

De zeespiegelstijging wordt opgelegd over de volledige diepte ter hoogte van de zeewaartse modelrand. Door de afwisseling van goed en slecht geleidende lagen zal de impact van de zeespiegelstijging zich over grotere afstand propagieren in goed geleidende lagen dan in remmende lagen. Er worden daarom verschilkaarten (van de grondwaterstijghoogte met referentietoestand en toestand zeespiegelstijging +1 m, +2 m, +3 m ZSS in 2075 en 2125) uitgevoerd op verschillende dieptes:

- Verschilkaarten rekenlaag 2 overeenkomstig met het maaiveld in de polders: Figuur bijlage B-7
- Verschilkaarten rekenlaag 7 op een diepte van ca. 12 m-mv: Figuur bijlage B-8
- Verschilkaarten rekenlaag 14 op een diepte van ca. 25 m-mv: Figuur bijlage B-9
- Verschilkaarten rekenlaag 21 op een diepte van ca. 40 m-mv: Figuur bijlage B-10

Voor alle beschouwde dieptes volgen de contouren een sterk onregelmatig patroon langs de kustlijn. De zeespiegelstijging wordt in de havens van Nieuwpoort en Oostende tot 3 km landinwaarts opgelegd wat hier de sterke landinwaartse wijziging verklaart.

Algemeen wordt een stijghoogteverschil berekend dat progressief toeneemt van west naar oost. Aan de westkust reikt de invloed van de zeespiegelstijging tot net achter de duinen, aan de oostkust tot 10 km landinwaarts. Dit is het gevolg van een progressief stijgende dikte van de watervoerende lagen van west naar oost.

Aan het maaiveld (Figuur bijlage B-7) en op een diepte van ca. 12 m-mv (Figuur bijlage B-8) wordt de invloed van de verhoogde zeespiegel reeds op 1 à 2 km van de kustlijn beperkt door de drainerende werking van de polderlopen achter de duinengordel.

Rekenlagen 14 en 21 (Figuur bijlage B-9 en Figuur bijlage B-10) geven de stijging van de grondwaterstanden weer op grotere diepte onder scheidende lagen van het Bartonian aquitardsysteem of de Paniseliaan Aquitard en zonder de milderende invloed van de drainerende polderwaterlopen. Er wordt op deze diepte een stijging van de grondwaterstanden met 10 cm berekend op 10 km van de kustlijn.

## 4.2 Evolutie zoutconcentraties

De evolutie van de zoutconcentraties wordt berekend voor achtereenvolgens de tweede rekenlaag aan het maaiveld in de poldergebieden, en in de quartaire afzettingen (H3DV2 A0100) met onderverdeling tussen de Polderafzettingen (H3DV2 A0130) en de Pleistocene afzettingen (H3DV2 A0170).

De resulterende zoutconcentraties en verschillen worden weergegeven voor achtereenvolgens een zeespiegelstijging van +1 m, +2 m en +3 m en voor de jaren 2075 (50 jaar na begin zeespiegelstijging) en 2125 (100 jaar na begin zeespiegelstijging):

- Verschilkaarten +1 m ZSS: Figuur bijlage C-6
- Verschilkaarten +2 m ZSS: Figuur bijlage C-7
- Verschilkaarten +3 m ZSS: Figuur bijlage C-8

De resulterende stijging van het zoet-zoutfront voor de 3 beschouwde zeespiegelstijgingen worden weergegeven in:

- Verschilkaarten +1 m ZSS: Figuur bijlage C-9
- Verschilkaarten +2 m ZSS: Figuur bijlage C-10
- Verschilkaarten +3 m ZSS: Figuur bijlage C-11

Voor een interpretatie van de wijzigende zoutconcentraties en dieptes van het zoet-zoutfront wordt verwezen naar Figuur 4-1 waarin de grondwaterstanden aan het maaiveld worden weergegeven in de referentietoestand (zonder zeespiegelstijging) met klassen 2,4 m TAW; 3,4 m TAW; 4,4 m TAW; en 5,4 m TAW, en wordt verwezen naar Figuur bijlage B-6 waarin de iso-contourlijnen worden weergegeven bij zeespiegelstijgingen van achtereenvolgens +1 m, +2 m, en +3 m. Zones met grondwaterstanden in en achter de duingordel hoger dan 3,4 m TAW hebben het potentieel om voldoende tegendruk te geven tegen een zeespiegelstijging tot +1 m, zones met grondwaterstand hoger dan 4,4 m TAW voor een zeespiegelstijging tot +2 m, etc.

In de referentietoestand, zonder zeespiegelstijging, worden over quasi de volledige kustlengte grondwaterscheidingen berekend tussen polder en zee (meer bepaald ter hoogte van de west- en oostkust) met grondwaterstroming naar zowel zee als polder. Bij een zeespiegelstijging van 1 m verandert de waterscheiding in de oostkustpolder en ten westen van Oostende naar een netto zuidwaarts gerichte grondwaterstroming. Bij een zeespiegelstijging van 2 m wijzigt de netto grondwaterstroming in de duinen tussen Nieuwpoort en Oostende. Bij een zeespiegelstijging van 3 m wordt in de westkustpolder nog steeds een grondwaterscheiding gemodelleerd in de duinen, in de overige zones wordt een dominante landinwaarts gerichte grondwaterstroming berekend.

Aan de westkust wordt door de beperkte dikte van de watervoerende laag en de hogere grondwaterstanden in de duinen slechts een beperkte wijziging van de concentraties berekend, ongeacht de beschouwde formatie.

Ter hoogte van de havenmond bij Nieuwpoort stijgt de zoutconcentratie in het grondwater vanaf een zeespiegelstijging van +2 m en meer. De randvoorwaarde (+ zoutconcentratie overeenkomstig het zoutgehalte van de zee) wordt hier 3 km landinwaarts gelegd. In de referentietoestand wordt in de omringende opgehoogde terreinen een grondwaterstand berekend van minder dan 3 m TAW. Vanaf een stijging van de zeespiegelrandvoorwaarde tot boven de 3 m TAW keert de richting van de grondwaterstijghoogtegradiënt en verzilt het omliggende grondwater.

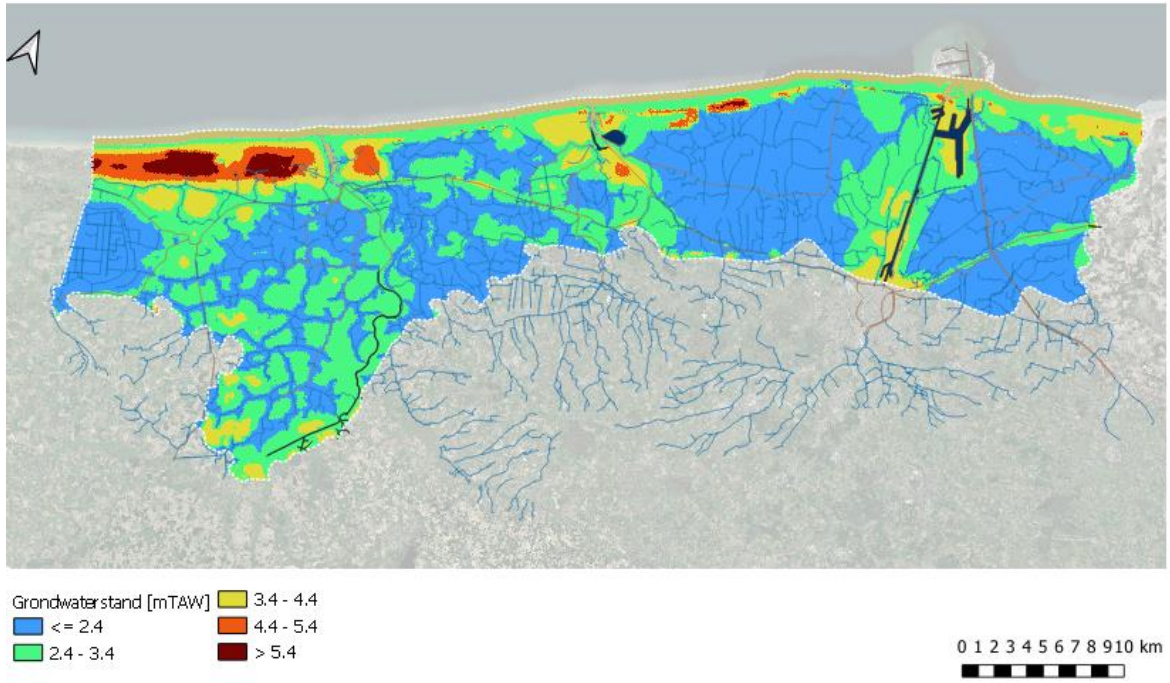
In de duingordel tussen Nieuwpoort en Oostende wordt een grondwaterstand berekend van ca. 3,0 m TAW. Bij een zeespiegelstijging van +1 m wordt een zeer beperkte wijziging berekend van het zoutgehalte (Figuur bijlage C-6). Bij een zeespiegelstijging van meer dan +1 m (bv. bij een zeespiegelstijging van +2 m in 2125 - Figuur bijlage C-7 of een bij een zeespiegelstijging van 1,5 m in 2075 - Figuur bijlage C-8) wordt de stijging van de zoutconcentraties in deze zone zichtbaar.

Tussen Oostende en Zeebrugge wordt eenzelfde patroon berekend. Het effect van een stijging van de zeespiegel van +1 m tegen 2125 wordt gemilderd door de polderlopen in de bovenste grondwaterlagen aan het maaiveld en in de polderafzettingen. In de Pleistocene afzettingen (met progressieve toename van de dikte van deze watervoerende laag van west naar oost) rijkt de stijging van de zoutconcentratie (> 1 g/l) tot 5 km landinwaarts.

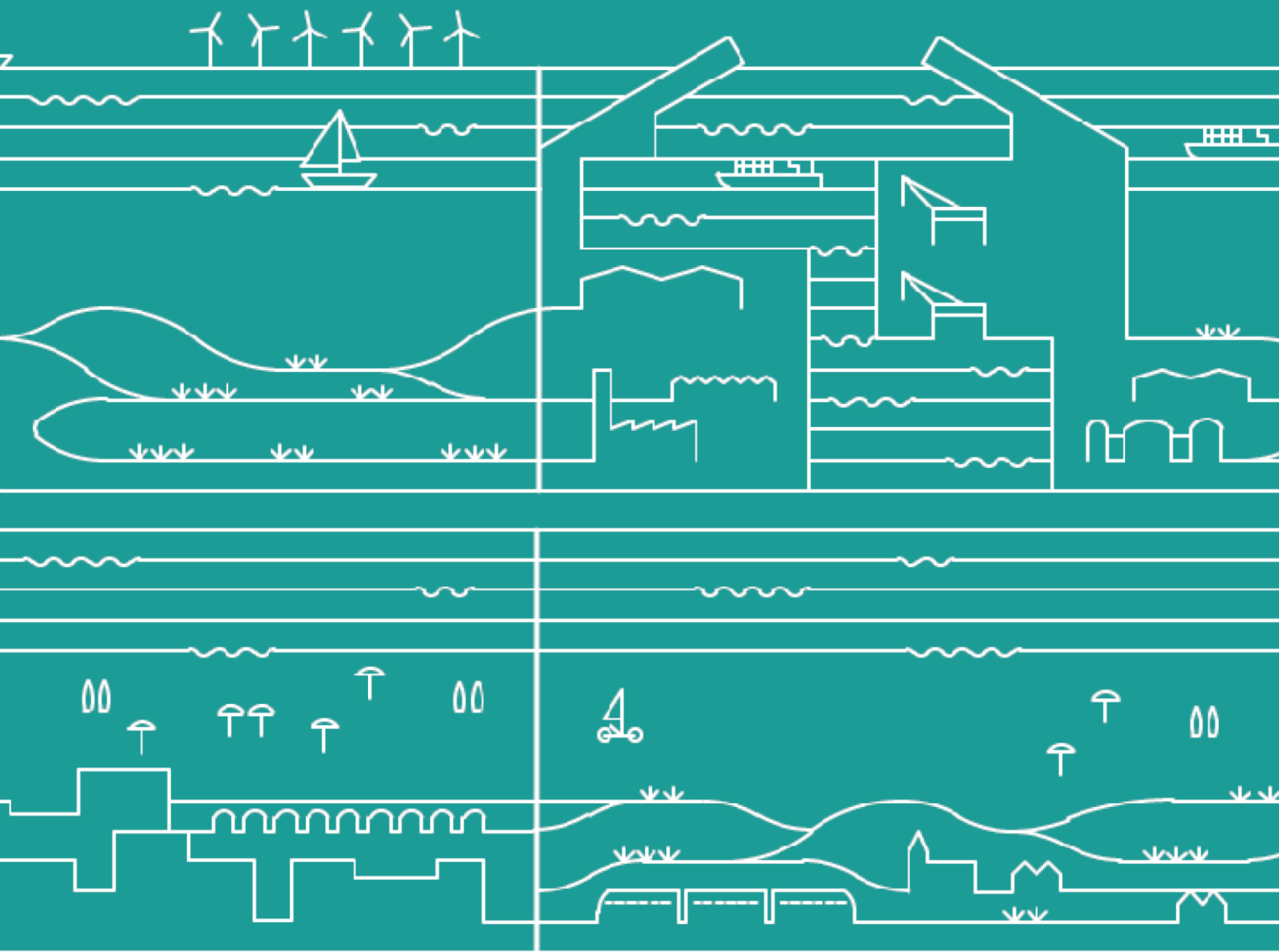
Ter hoogte van het Boudewijnkanaal wordt slechts een beperkte wijziging berekend van de zoutconcentraties en dieptes van het zoutfront. Het oppervlaktewaterpeil en de zoutconcentratie worden niet gewijzigd. De opgebouwde zoutbel en relatief hogere stijghoogtes geven voldoende tegendruk.

De grootste stijging van de zoutconcentraties wordt berekend in de oostkustpolder. Dit is het gevolg van een landinwaarts gerichte grondwaterstroming in combinatie met een grotere dikte van de watervoerende lagen.





Figuur 4-1: Iso-contouren grondwaterstanden referentietoestand (zonder zeespiegelstijging)



**Conclusies**

## 5 Conclusies

In dit rapport is de referentiesituatie verzilting onderzocht aan de hand van een grondwaterstromingsmodel. Met een dichtheitsafhankelijk grondwaterstromingsmodel werd de verstoring van de grondwaterstanden en het huidige zoet-zout evenwicht berekend voor 3 verschillende zeespiegelstijgingen, namelijk +1 m, +2 m, en +3 m boven het huidige gemiddeld zeeniveau van 2,4 m TAW. De berekening werd uitgevoerd over een periode van 100 jaar na start van de zeespiegelstijging en vergeleken met de evolutie van het huidige toestand wanneer het gemiddeld zeeniveau onveranderd blijft op 2,4 m TAW.

De modelresultaten werden verwerkt tot kaarten die een screening en zonering toelaten van hoge en lage gevoeligheid van de toestandsvariabelen voor zeespiegelstijging:

- Wijziging van de zoutconcentraties op grotere diepte als maat voor de verzilting en afname van het winbaar grondwater;
- Wijziging van de zoutconcentraties op geringe diepte en wijziging van de diepte waarop dit zout grondwater wordt aangetroffen als signaalfunctie voor een potentiële verzilting van landbouwgebieden en grondwaterafhankelijke natuur.

Uit de analyse van de resultaten blijkt dat de zones met relatief hoge en lage impact onveranderd blijven voor zowel +1 m, +2 m, en +3 m zeespiegelstijging, enkel de omvang van de impact verschilt. Deze is progressief stijgend van west naar oost:

- Aan de westkust zorgen hoge en brede duinen voor een opbolling van overwegend zoet grondwater. Samen met de relatief dunne watervoerende laag wordt hierdoor de propagatie van de stijgende grondwaterdruk uit de zee bij zeespiegelstijging afgeblokt. Er worden zeer beperkte wijzigingen van de zoutconcentraties verder landinwaarts berekend;
- Verder oostwaarts stijgt de dikte van de watervoerende laag, waardoor zeespiegelstijging hier het zout water verder landinwaarts kan laten stromen en het ondiep grondwater verder kan verzilten. Over een afstand van 2 km landinwaarts wordt een stijging van het zoutfront berekend van meer dan 1 meter.

## 6 Referenties

De Breuck W., De Moor G., Maréchal R. & Tavernier R. (1989). Diepte van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische watervoerende laag van noordelijk Vlaanderen (1974-1975).

Deckers J., De Koninck R., Bos S., Broothaers M., Dirix K., Hamsch L., Lagrou D., Lanckacker T., Matthijs J., Rombaut B., Van Baelen K. & Van Haren T. (2019). Geologisch (G3Dv3) en hydrogeologisch (H3D) 3D-lagenmodel van Vlaanderen. Uitgevoerd in opdracht van Vlaams Planbureau voor Omgeving (Departement Omgeving) en Vlaamse Milieumaatschappij.

Deltares (2019). TOPSOIL Airborne EM kartering van zoet en zout grondwater in Vlaanderen (FRESHEM Vlaanderen). In Opdracht van VMM.

Meyus Y., Batelaan O. & De Smedt F. (2000). Concept Vlaams Grondwater Model (VGM) - Technisch concept van het VGM (deelrapport 1) - Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen (HCOV). Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde, VUB.

Universiteit Gent/Deltares (2012). SCALDWIN: Analyse grensoverschrijdende verzilting grondwater in het poldergebied van de provincies Oost-Vlaanderen, West- Vlaanderen en Zeeland. Eindrapport – Bundeling van de verslagen van de vier deelopdrachten van fase 2. Universiteit Gent/Deltares, 1202391-000.

VMM (2008). Grondwater in Vlaanderen: het Centraal Vlaams Systeem. Vlaamse Milieumaatschappij.

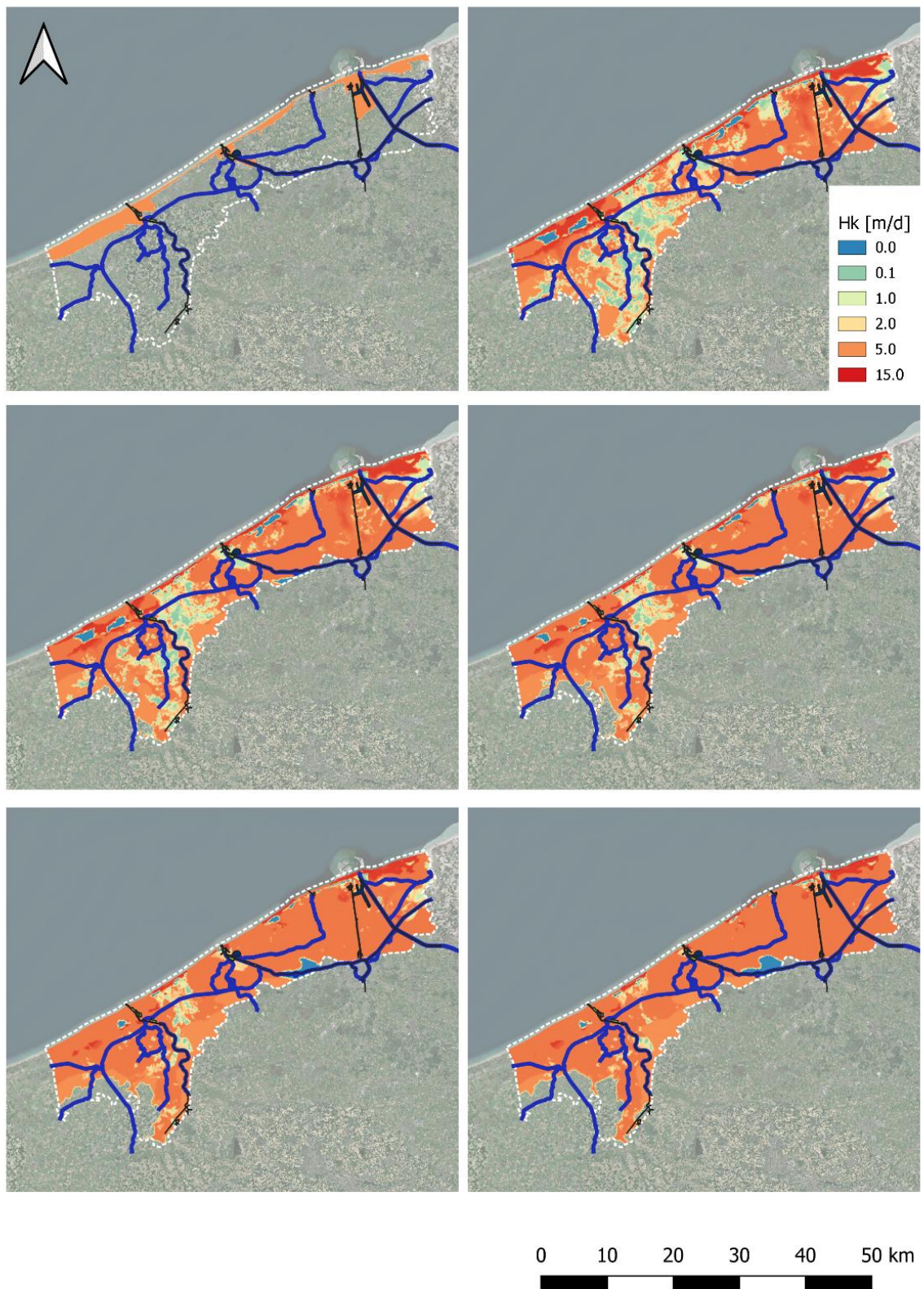
## **Bijlage A Modelopbouw**

## A.1 Laagindeling rekenmodel

Tabel Bijlage A-1: Maximale dikte rekenlagen conform methode toegepast in Scaldwin (Universiteit Gent/Deltares, 2012)

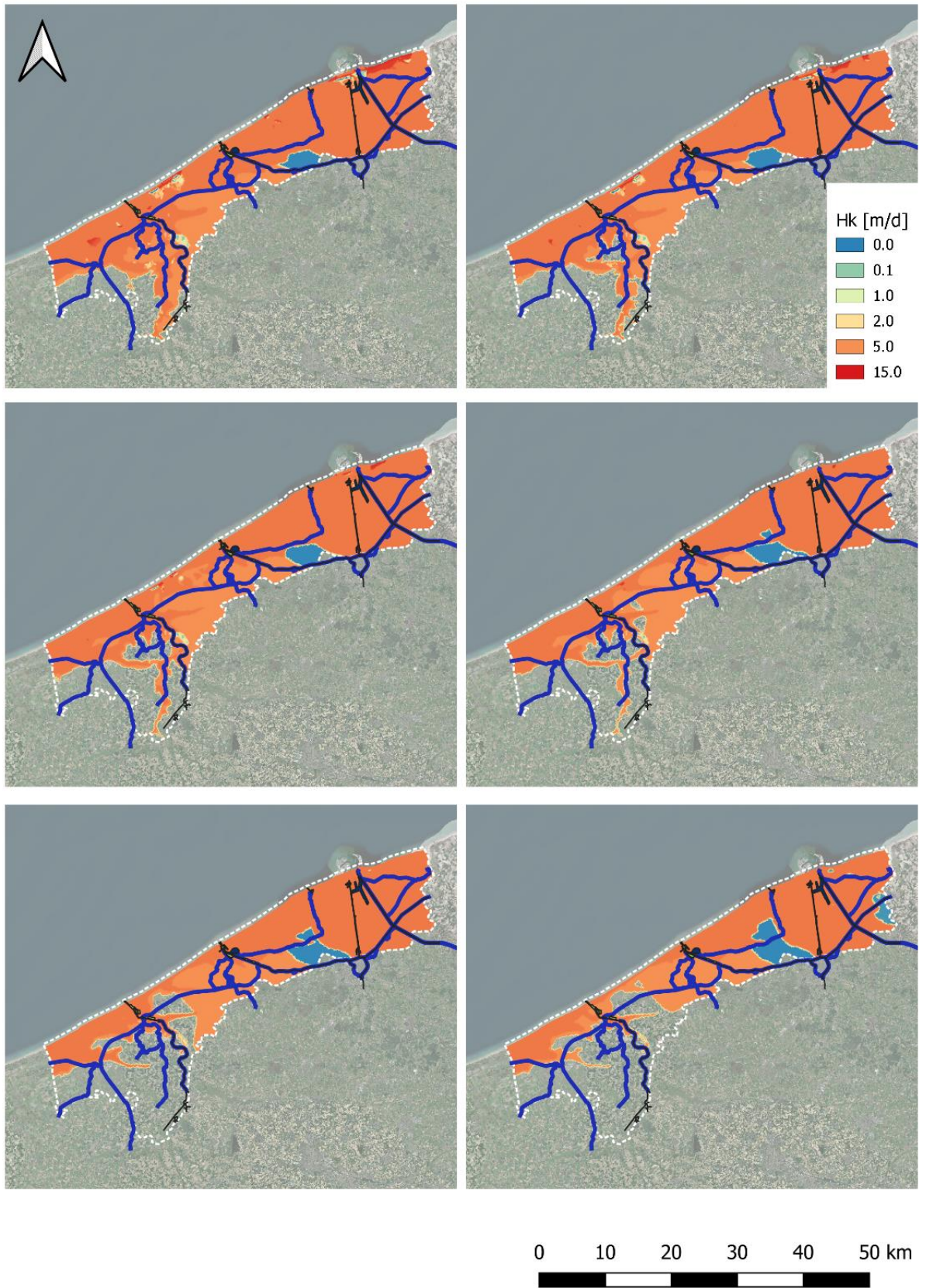
Modellaag	Top [m TAW]	Bodem [m TAW]	Dikte [m]
1	DHM	minimaal. 4 m TAW	variabel
2	DHM / 4 m TAW	-0,7	variabel tot max 4,7 m
3	-0,7	-2,7	2
4	-2,7	-4,7	2
5	-4,7	-6,7	2
6	-6,7	-8,7	2
7	-8,7	-10,7	2
8	-10,7	-12,7	2
9	-12,7	-14,7	2
10	-14,7	-16,7	2
11	-16,7	-18,7	2
12	-18,7	-20,7	2
13	-20,7	-22,7	2
14	-22,7	-24,7	2
15	-24,7	-26,7	2
16	-26,7	-28,7	2
17	-28,7	-30,7	2
18	-30,7	-32,7	2
19	-32,7	-34,7	2
20	-34,7	-36,7	2
21	-36,7	-38,7	2
22	-38,7	-40,7	2
23	-40,7	-110,7	70
24	-110,7	-180,7	70

## A.2 Hydrogeologie



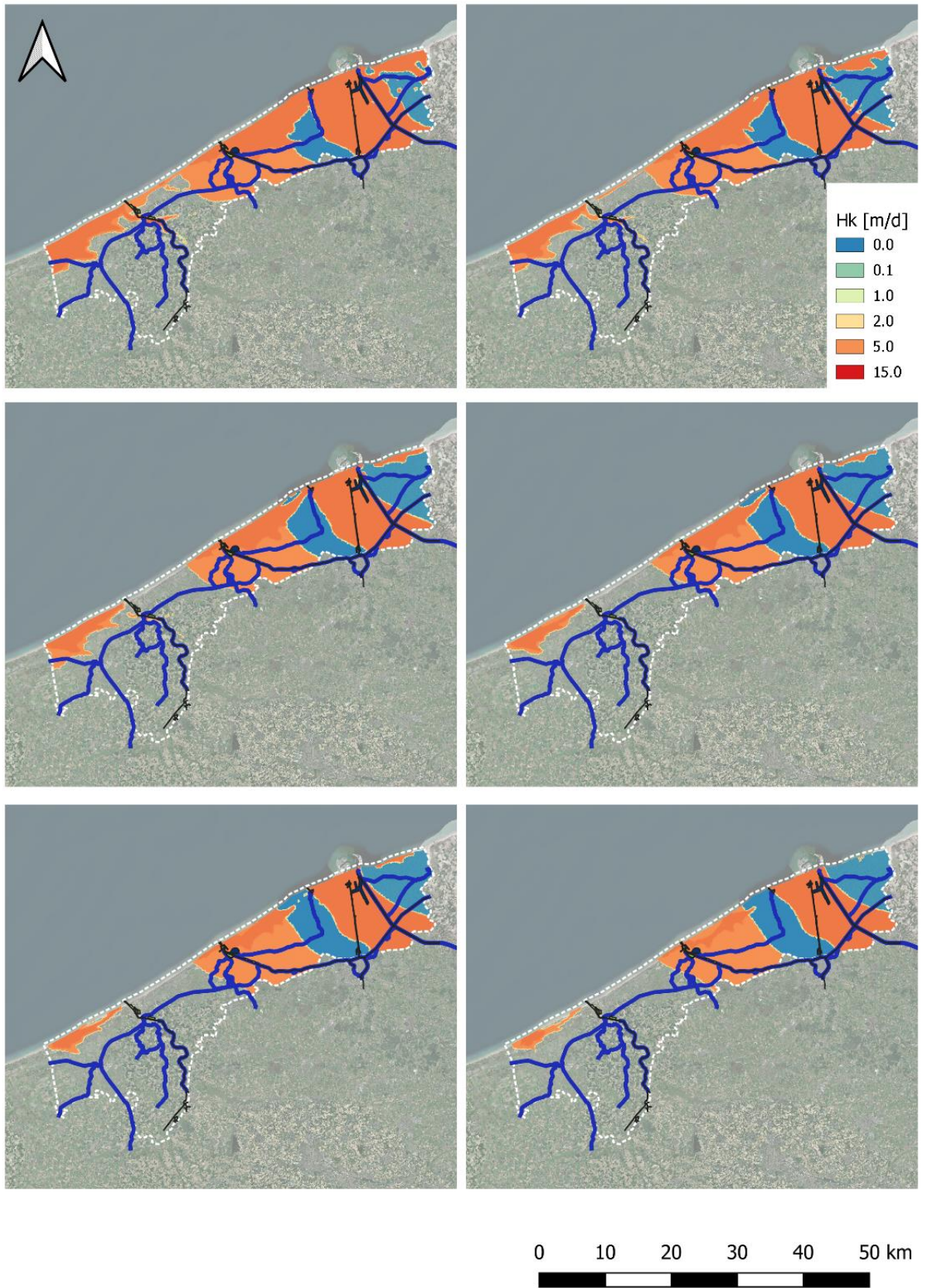
Figuur bijlage A-1: Horizontale conductiviteiten Kh [m/dag] modellen 1 – 6





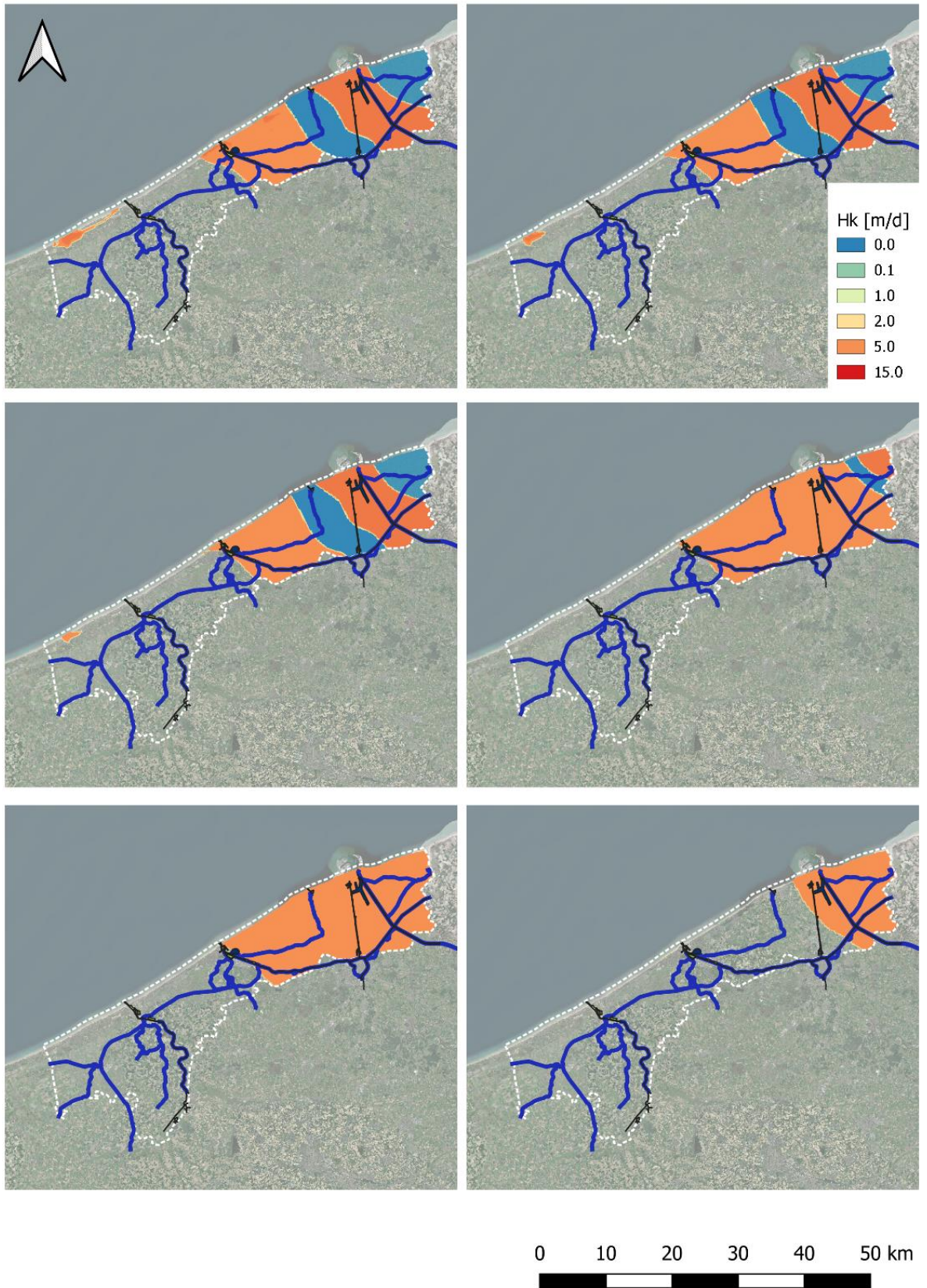
Figuur bijlage A-2. Horizontale conductiviteiten Kh [m/dag] modellen 7 – 12





Figuur bijlage A-3: Horizontale conductiviteiten  $K_h$  [m/dag] modellen 13 – 18

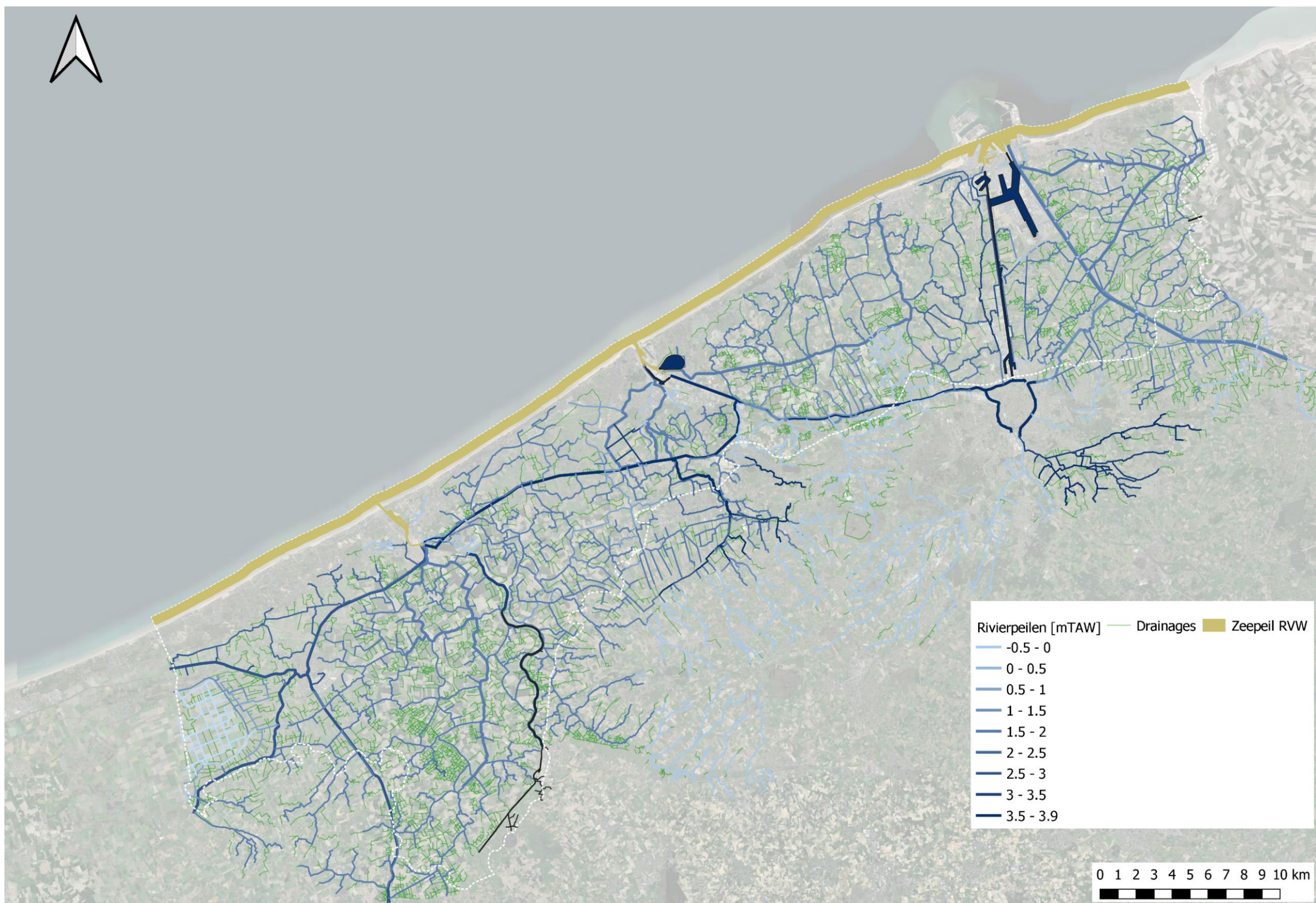




Figuur bijlage A-4: Horizontale conductiviteiten  $K_h$  [m/dag] modellen 19 – 24

### **A.3 Peilbeheer polderwaterlopen**



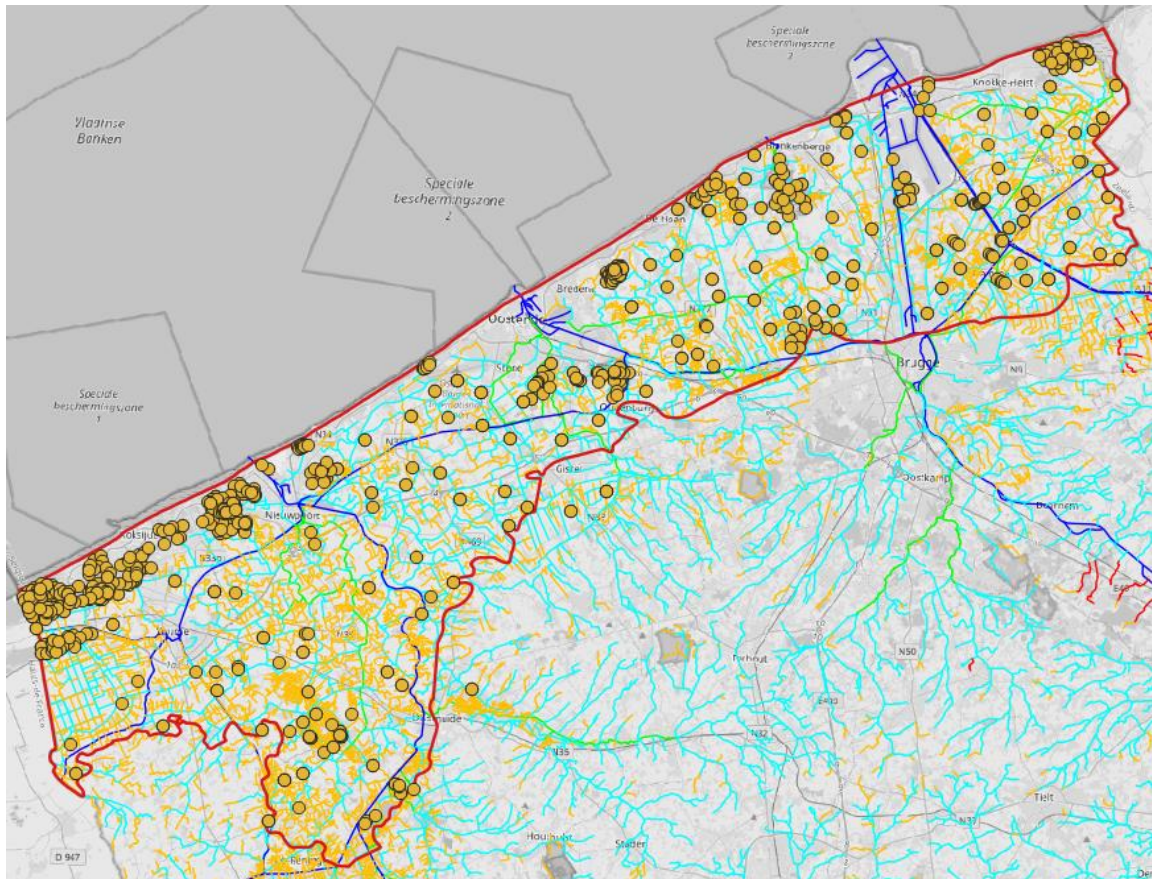


Figuur bijlage A-5: MODFLOW RIVER en DRAIN randvoorwaarden met weergave van jaargemiddelde waterstand in oppervlaktewater

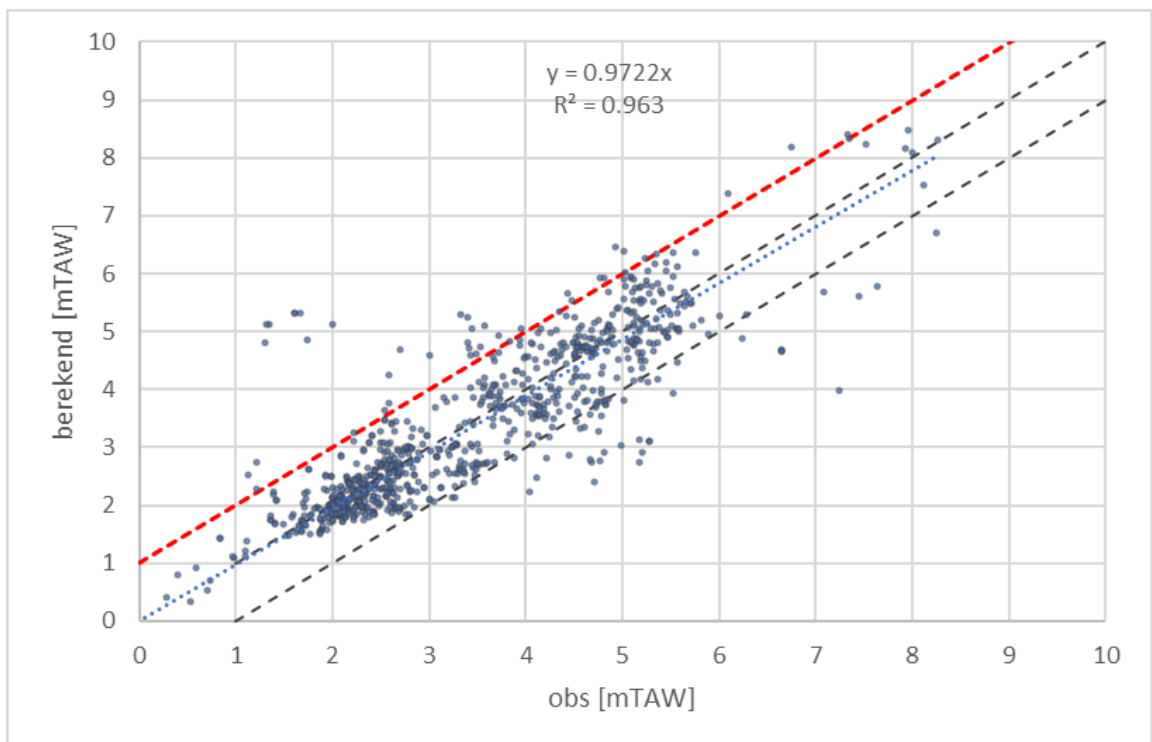
## **Bijlage B Resultaten hydrodynamisch model**



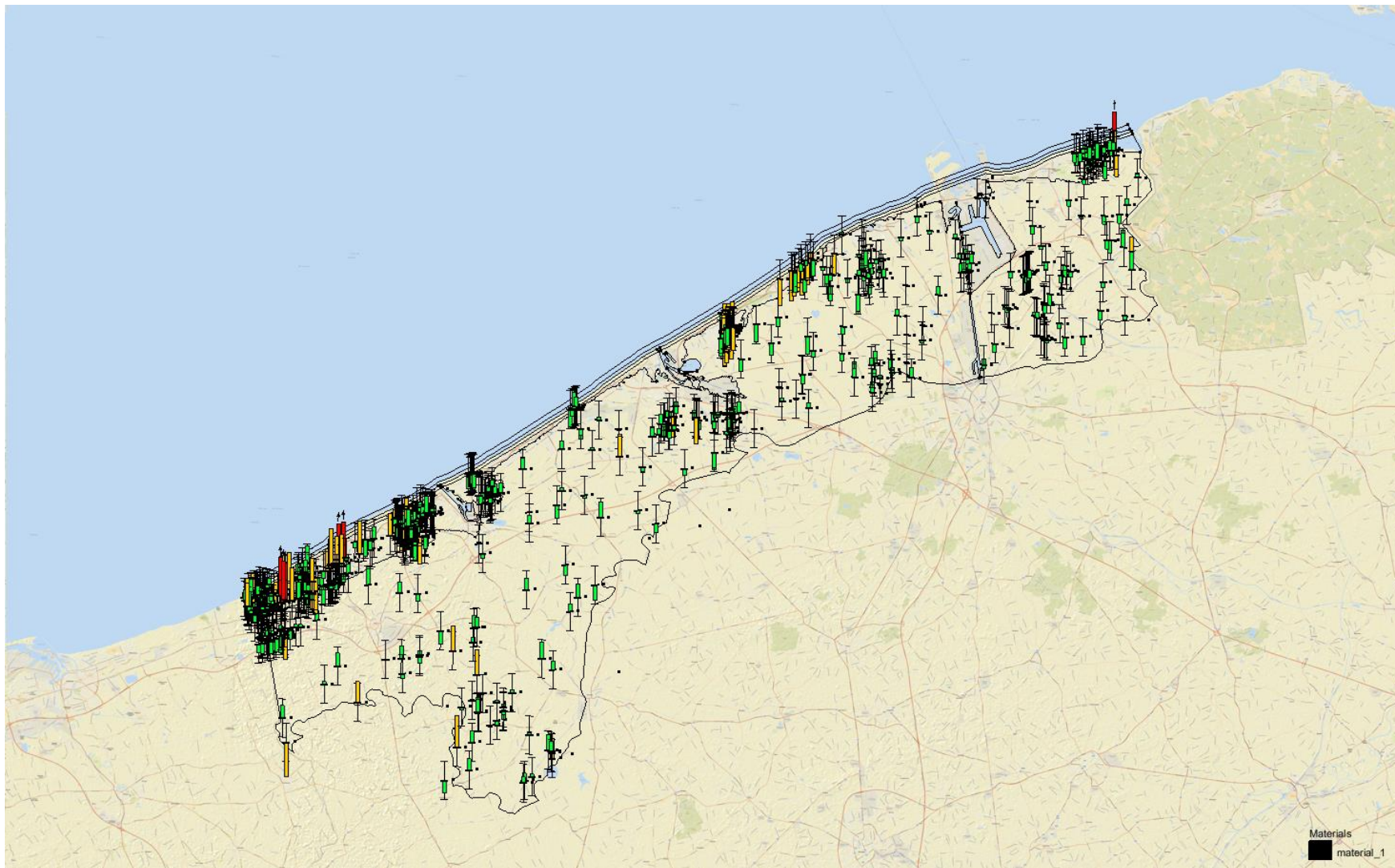
## B.1 Kalibratie



Figuur bijlage B-1: Weerhouden locaties grondwaterstandmetingen voor kalibratie hydrodynamisch model



Figuur bijlage B-2: correlatie berekende vs. geobserveerde grondwaterstanden

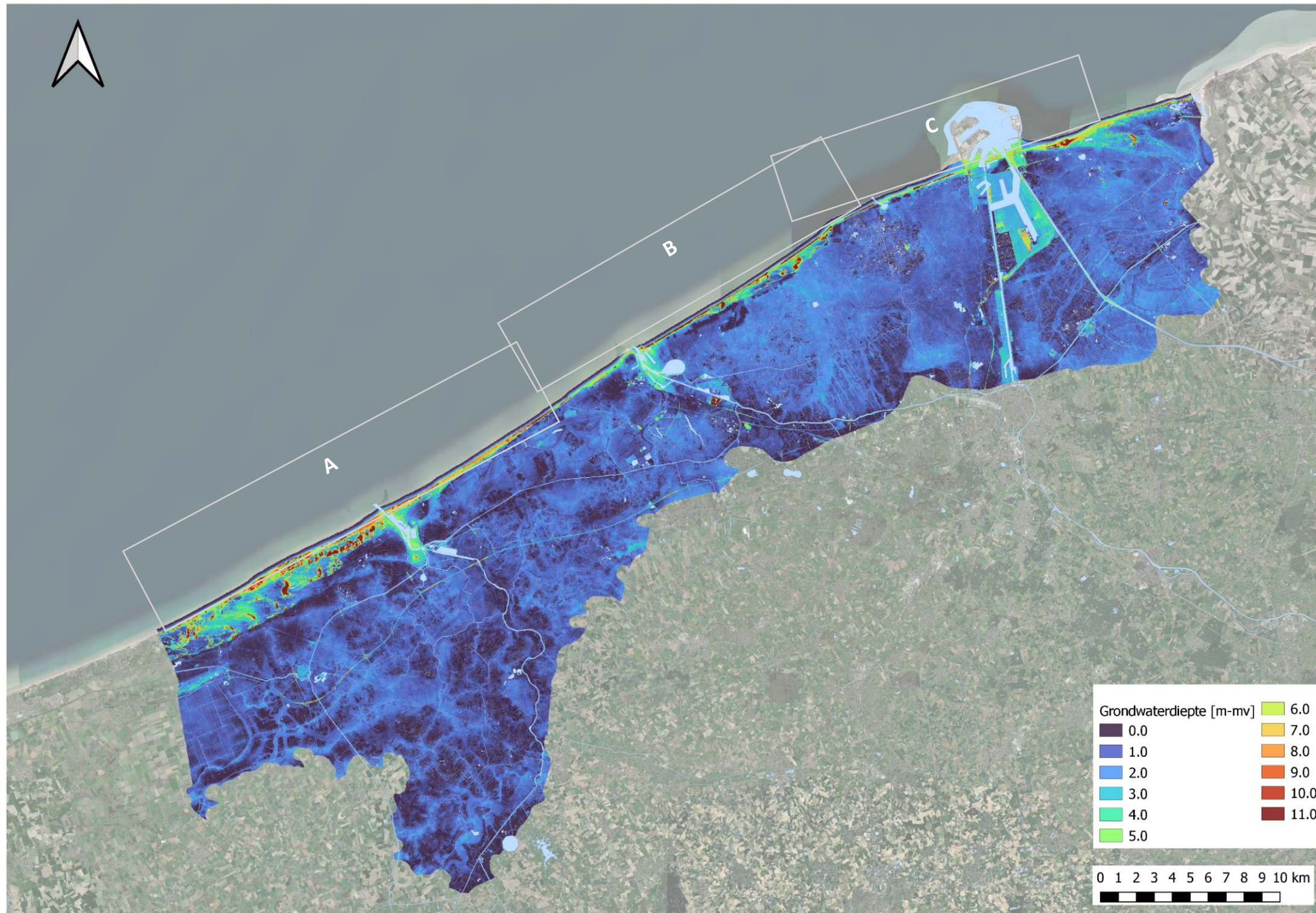


Figuur bijlage B-3: Ruimtelijke spreiding afwijking tussen berekende grondwaterstanden en geobserveerde waarden



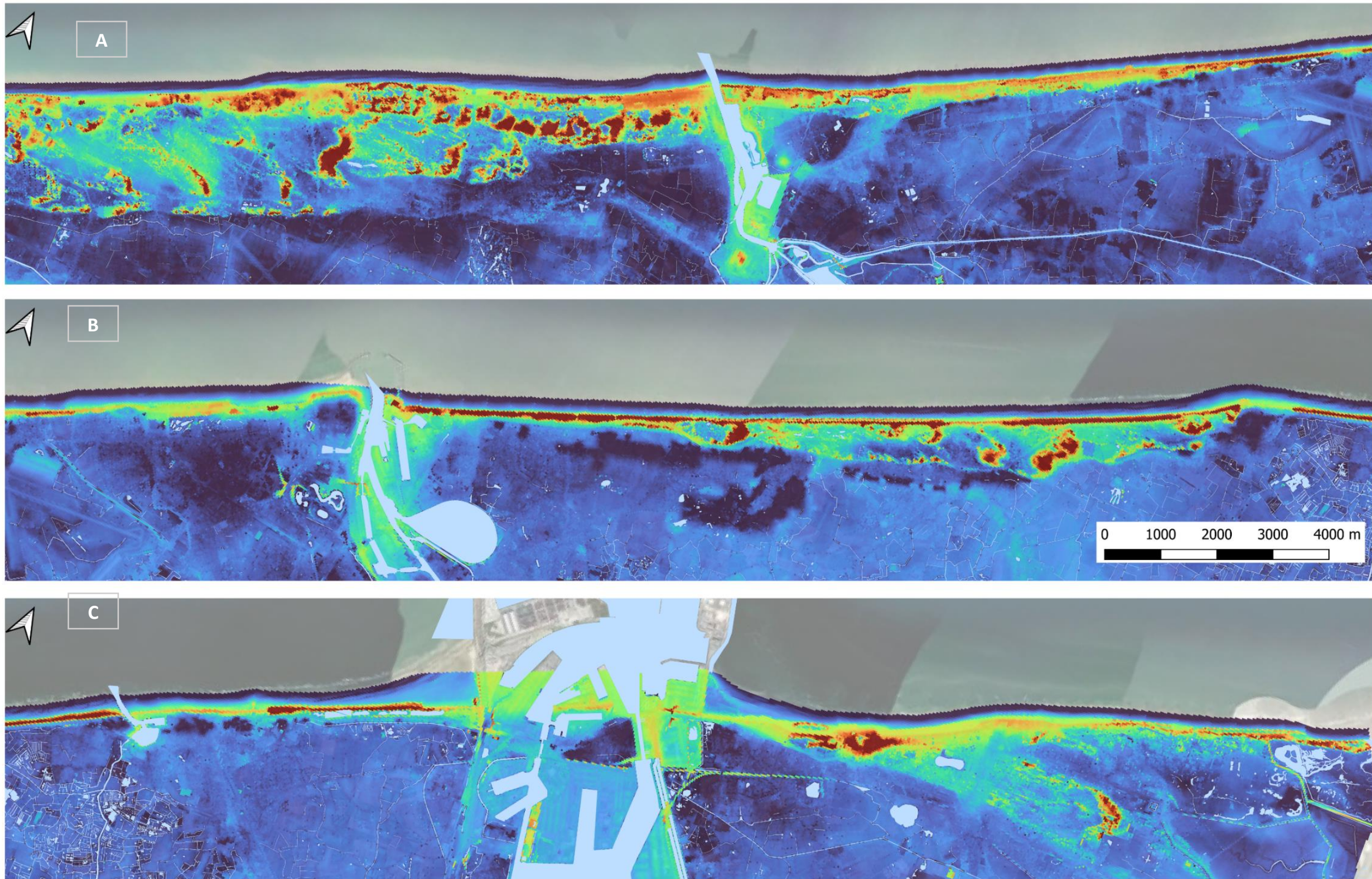
## B.2 Grondwaterstijghoogtes

### B.2.1 Referentietoestand



Figuur bijlage B-4: Berekende jaargemiddelde grondwaterdiepte actuele toestand.

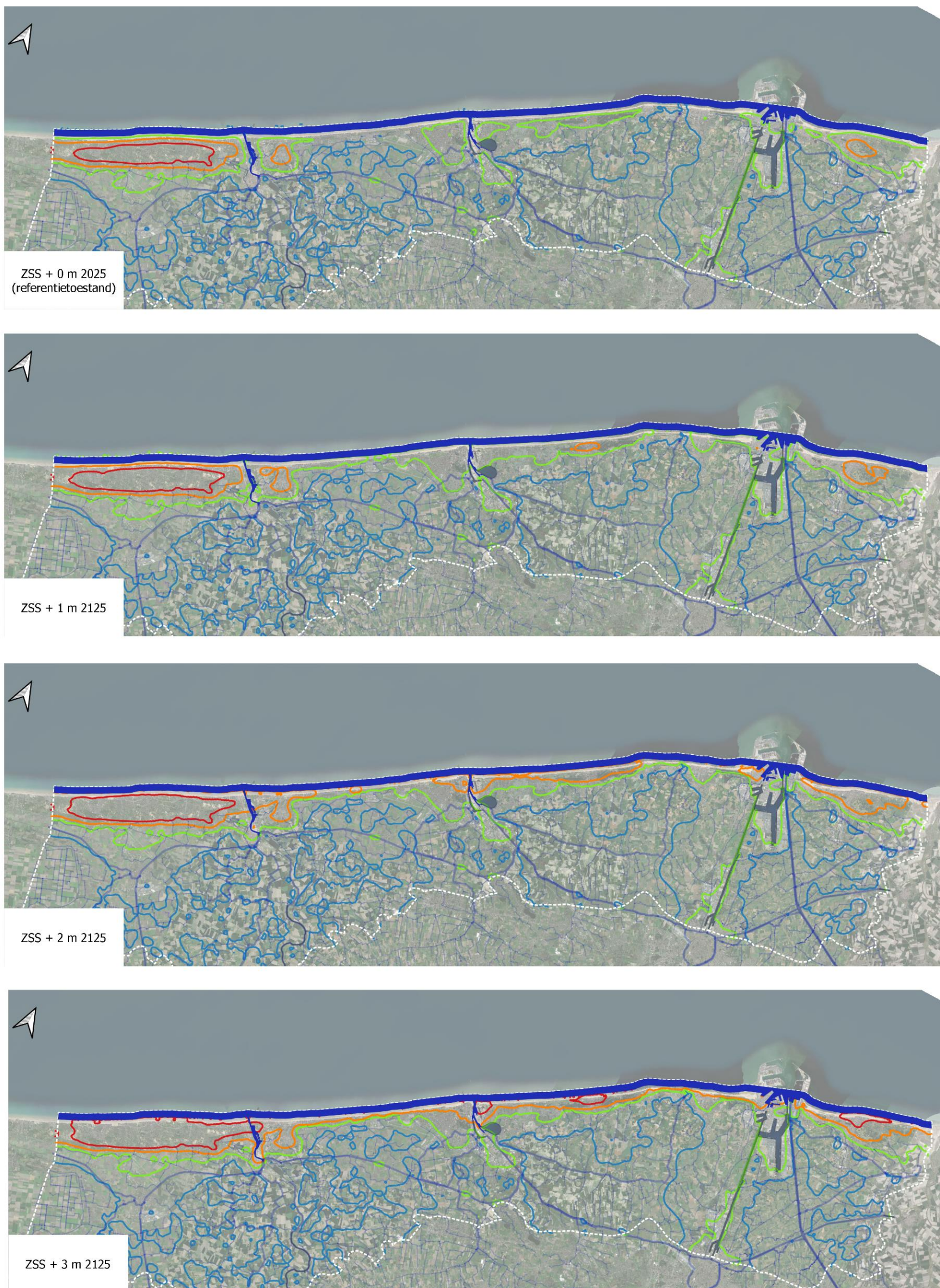




Figuur bijlage B-5: Berekende jaargemiddelde grondwaterdiepte actuele toestand (zoom kustlijn A, B, C Figuur bijlage B-4).



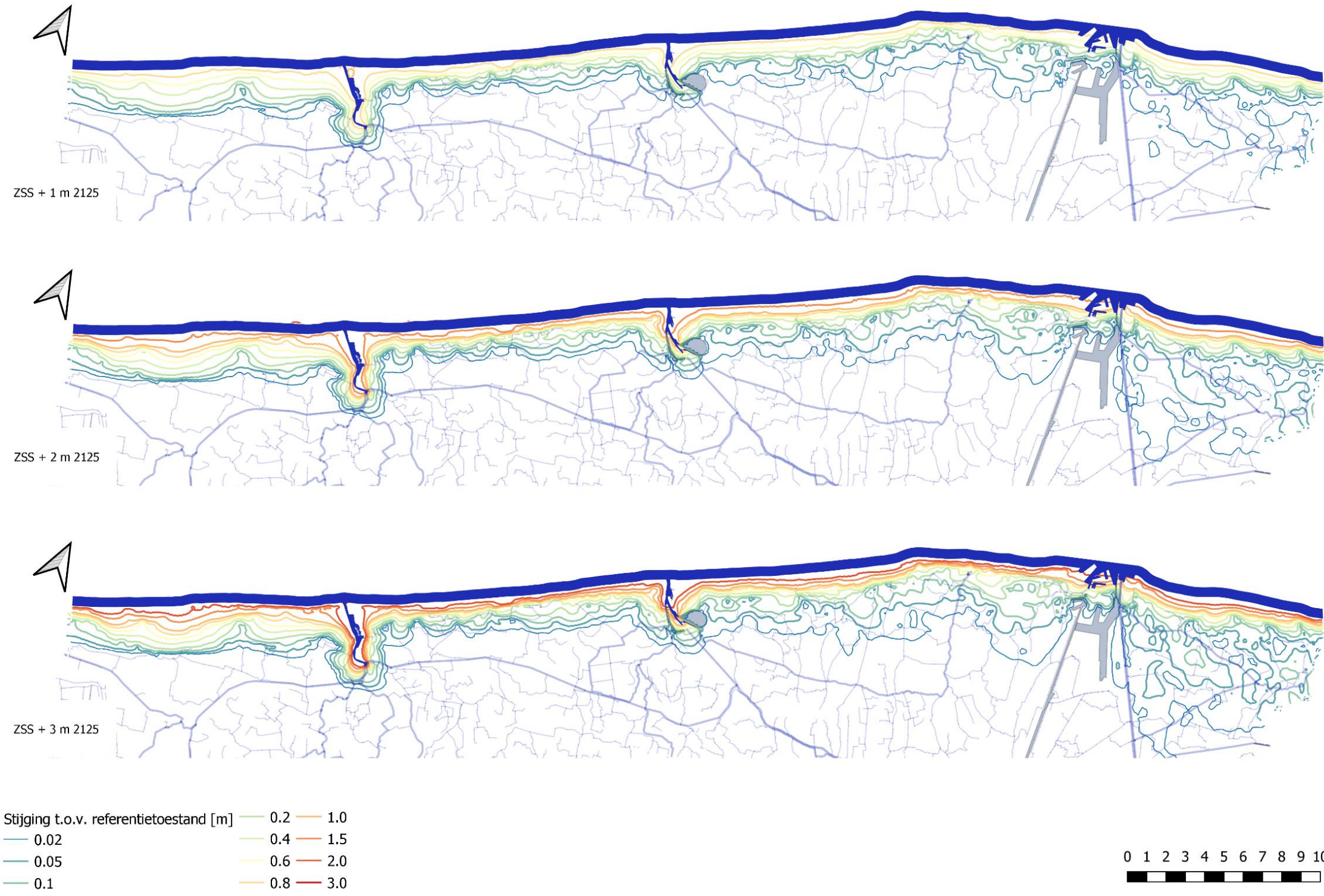
B.2.2 Grondwaterstanden referentietoestand en bij zeespiegelstijging



Figuur bijlage B-6: iso-contourlijnen grondwaterstanden freatische laag in referentietoestand en bij zeespiegelstijgingen van +1, +2 en +3 meter

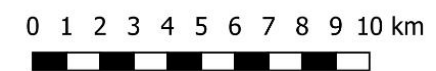
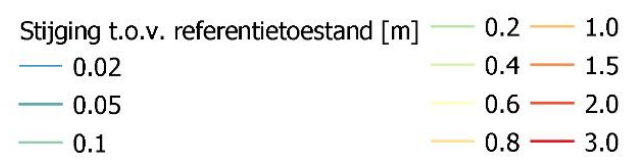
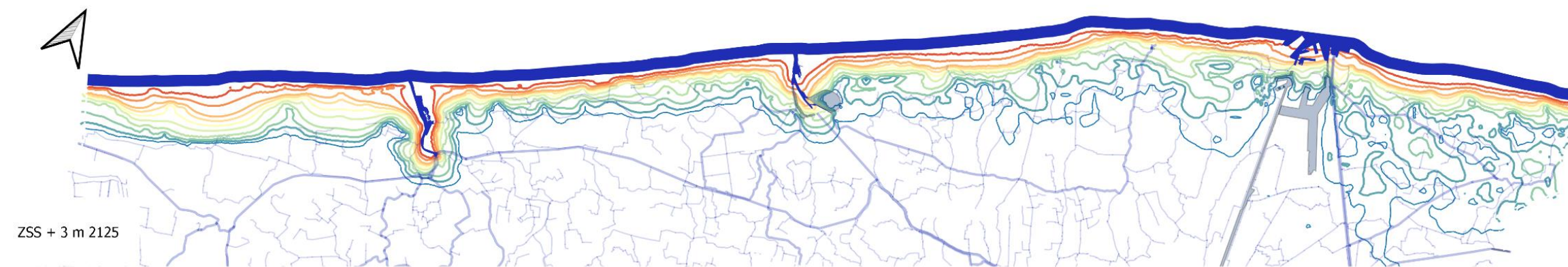
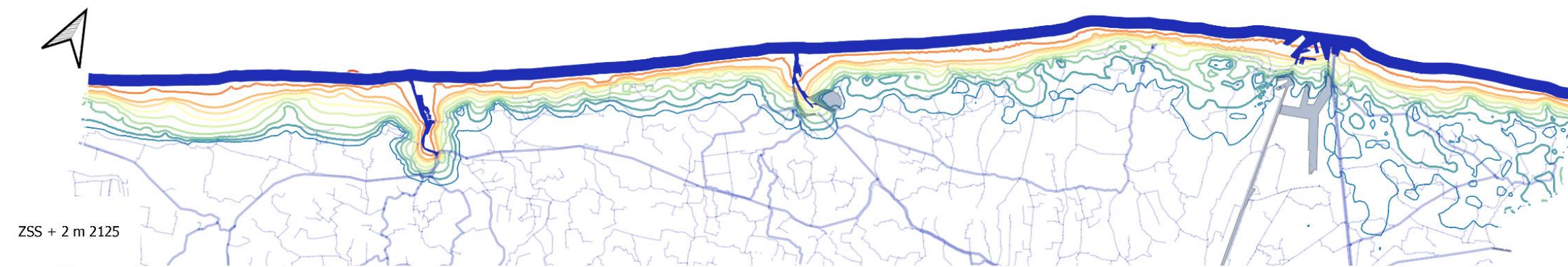
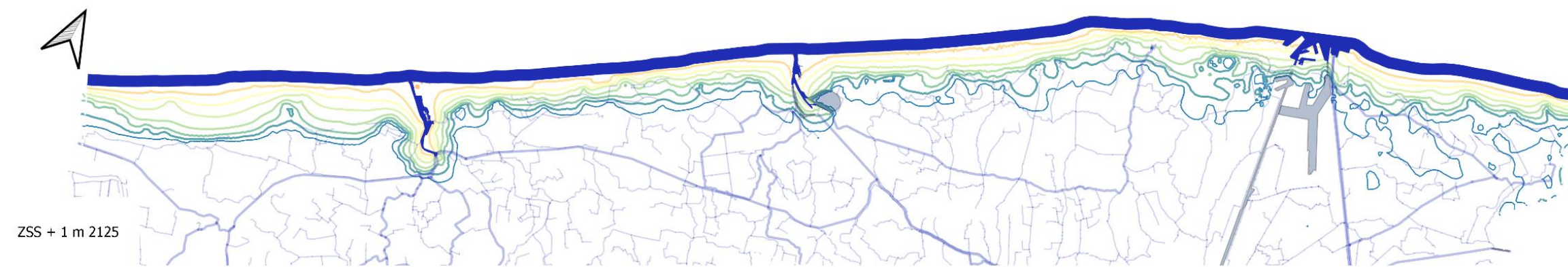


**B.2.3 Stijgheightverschillen door zeespiegelstijging**



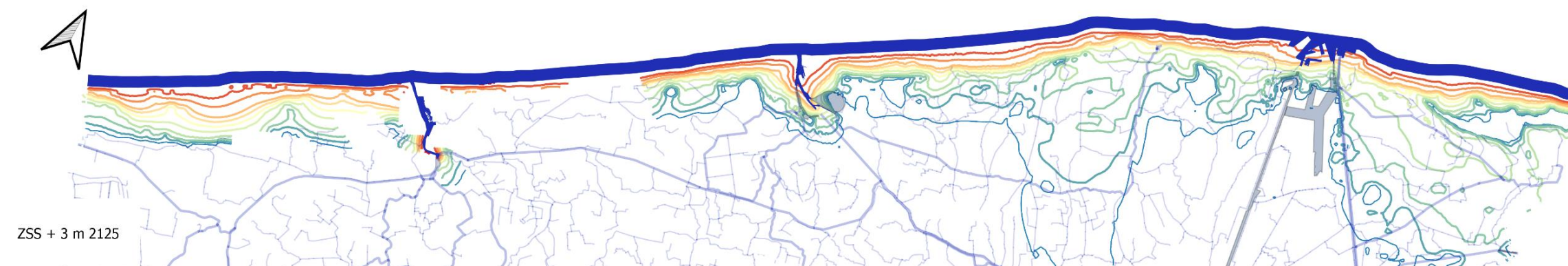
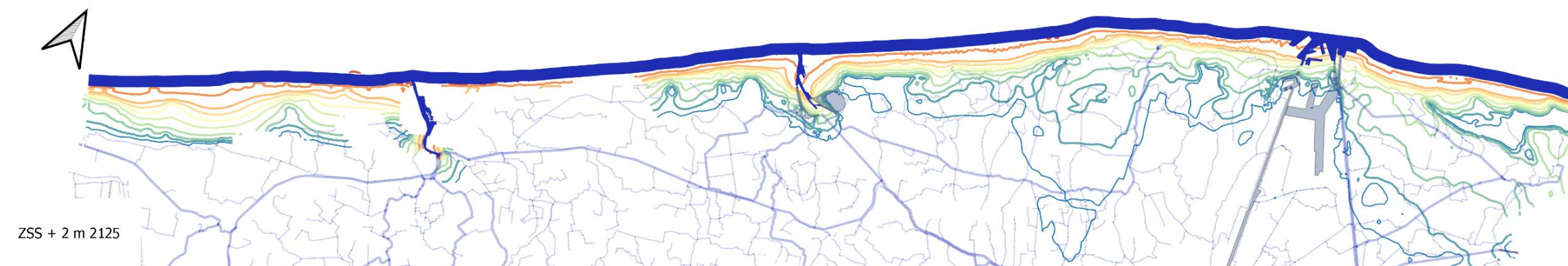
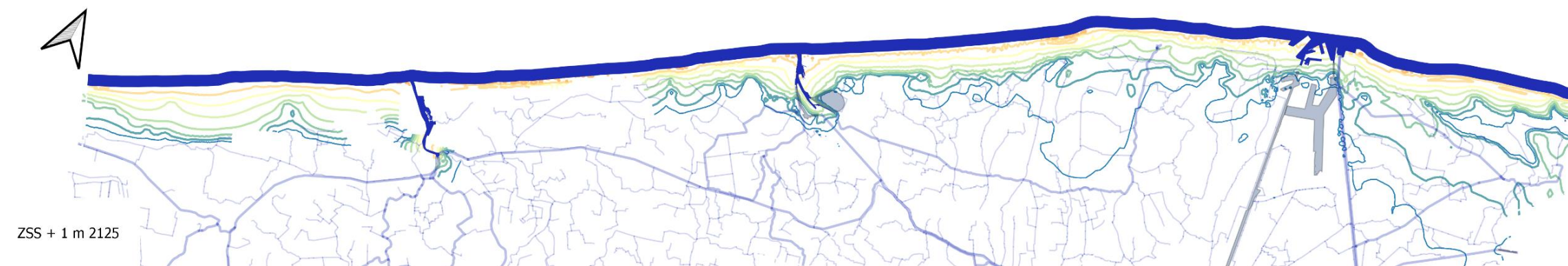
Figuur bijlage B-7: Verschilkaart grondwaterstand in 2125 [+ = stijging in m] rekenlaag 2 (maaiveld) bij zeespiegelstijgingen van achtereenvolgens +1, +2 en +3 m in 2125. Waar de rekenlaag geen actieve cellen bevat wordt de iso-contourlijn onderbroken.





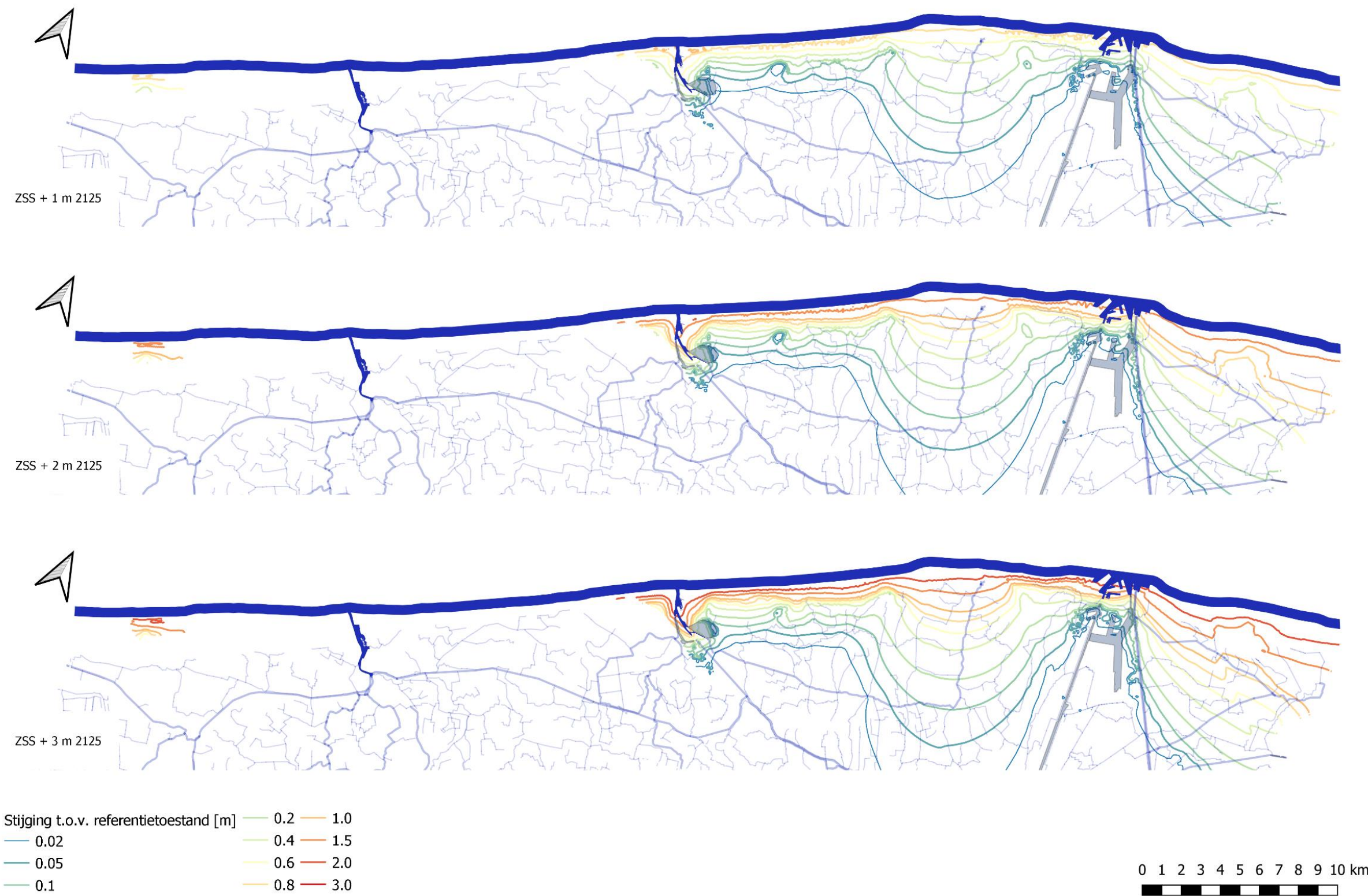
Figuur bijlage B-8: Verschilkaart grondwaterstand in 2125 [+ = stijging in m] rekenlaag 7 ( $\pm 12$  m onder maaiveld) bij zeespiegelstijgingen van achtereenvolgens +1, +2 en +3 m in 2125. Waar de rekenlaag geen actieve cellen bevat wordt de iso-contourlijn onderbroken.





Figuur bijlage B-9: Verschilkaart grondwaterstand in 2125 [+ = stijging in m] rekenlaag 14 ( $\pm 25$  m onder maaiveld) bij zeespiegelstijgingen van achtereenvolgens +1, +2 en +3 m in 2125. Waar de rekenlaag geen actieve cellen bevat wordt de iso-contourlijn onderbroken.



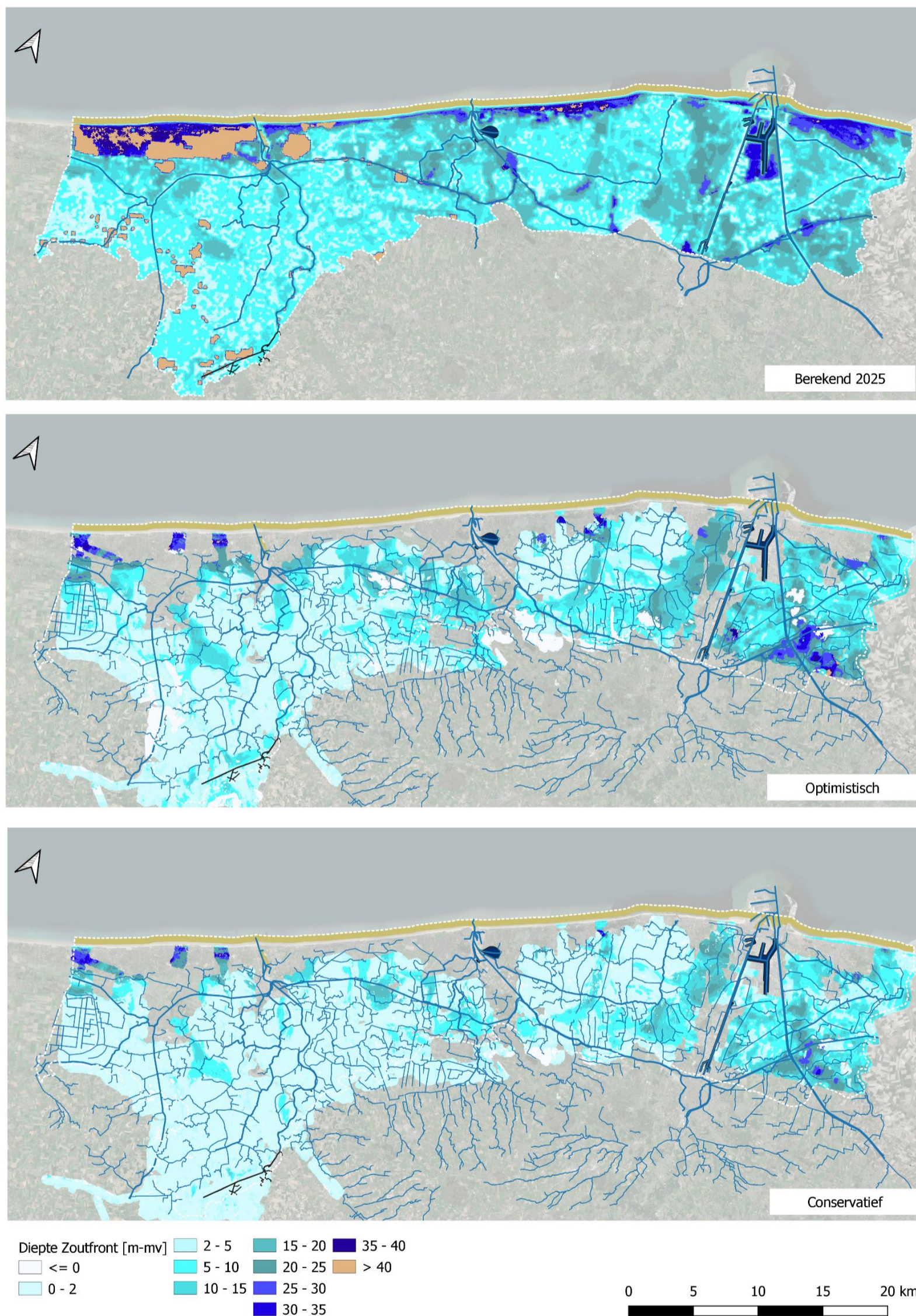


Figuur bijlage B-10: Verschilkaart grondwaterstand in 2125 [+ = stijging in m] rekenlaag 21 ( $\pm 40$  m onder maaiveld) bij zeespiegelstijgingen van achtereenvolgens +1, +2 en +3 m in 2125. Waar de rekenlaag geen actieve cellen bevat wordt de iso-contourlijn onderbroken.

## **Bijlage C Resultaten zouttransport**

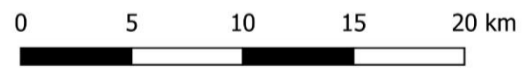
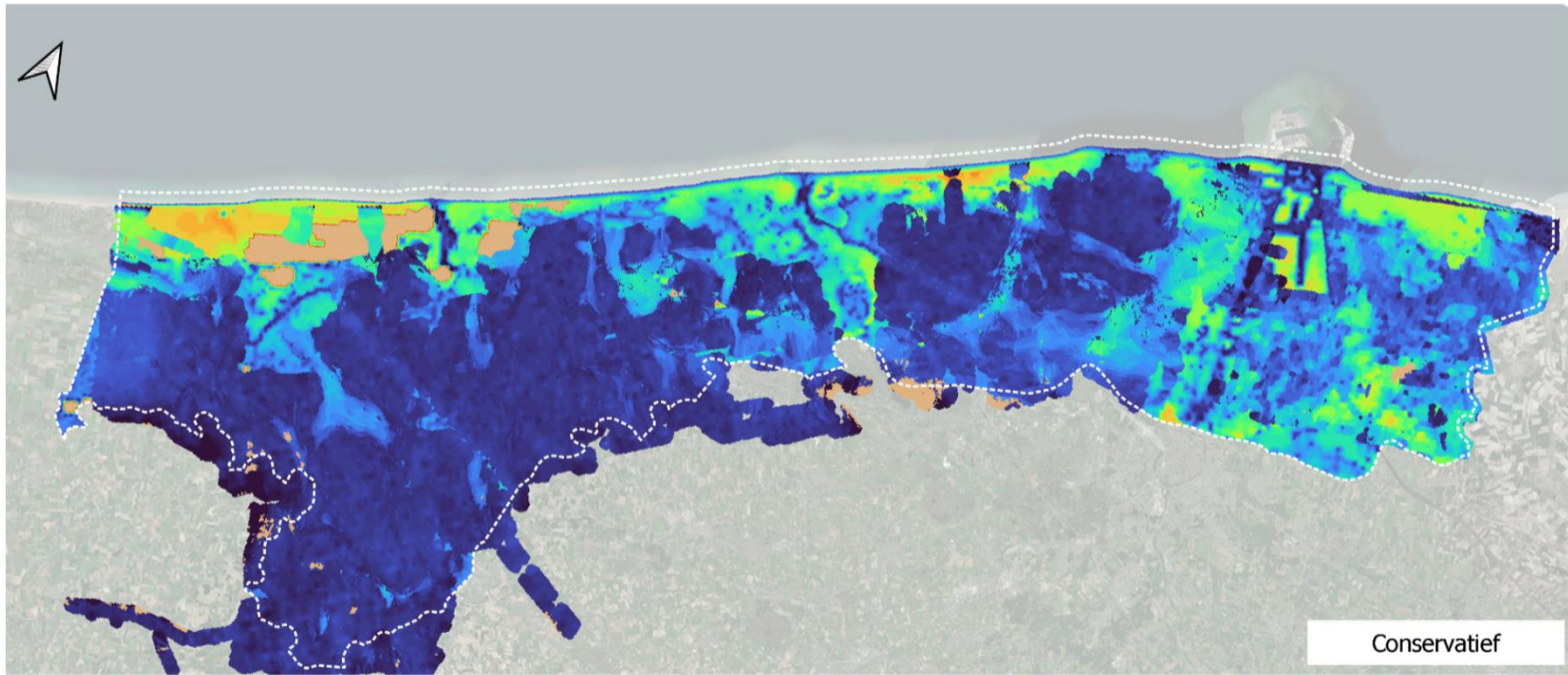
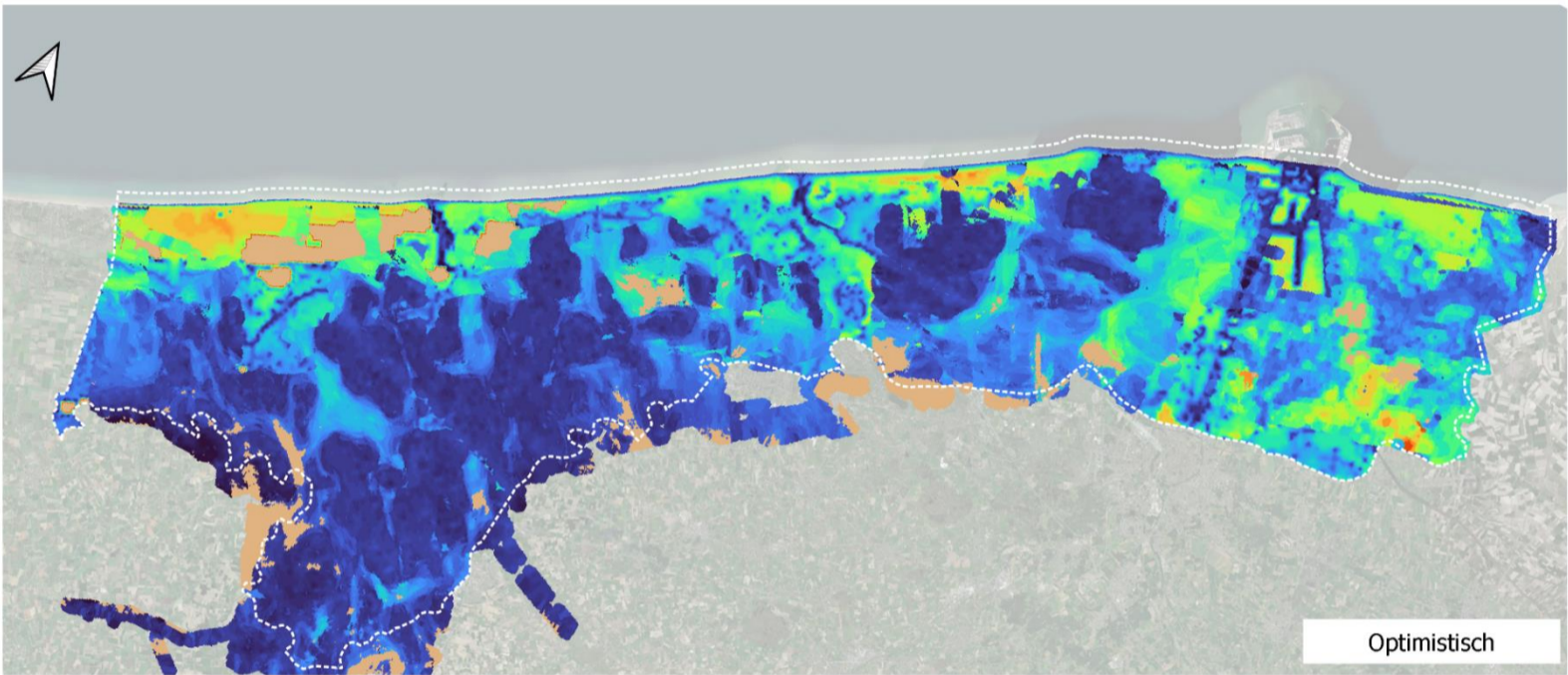
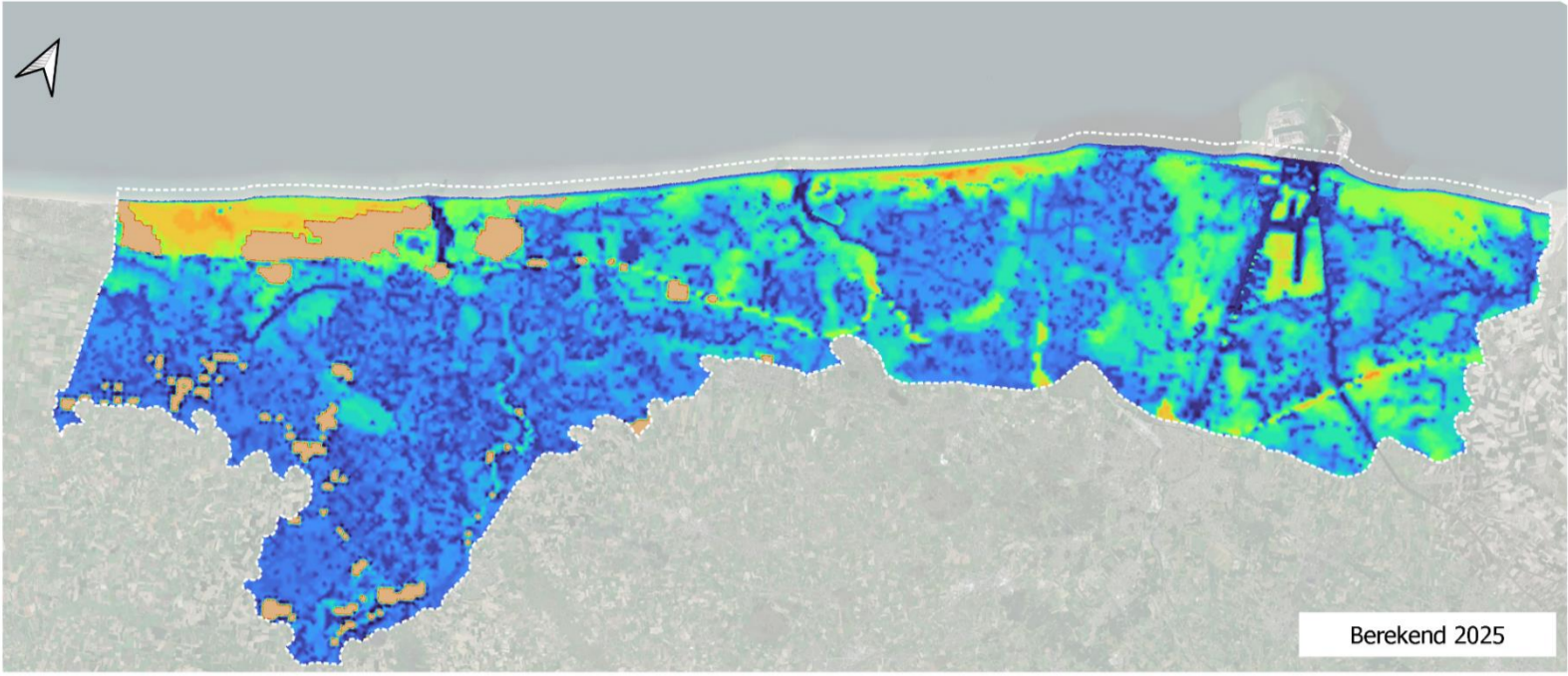


### C.1 Modelverificatie referentietoestand met resultaten TOPSOIL project



Figuur bijlage C-1: Berekende diepte zoutfront (zoutconcentratie > 1500 mg/l) berekend na 50 jaar (2025) (boven), volgens optimistische (midden) en volgens conservatieve (onder) aanname TOPSOIL project (waarnemingen 2014 – 2017)

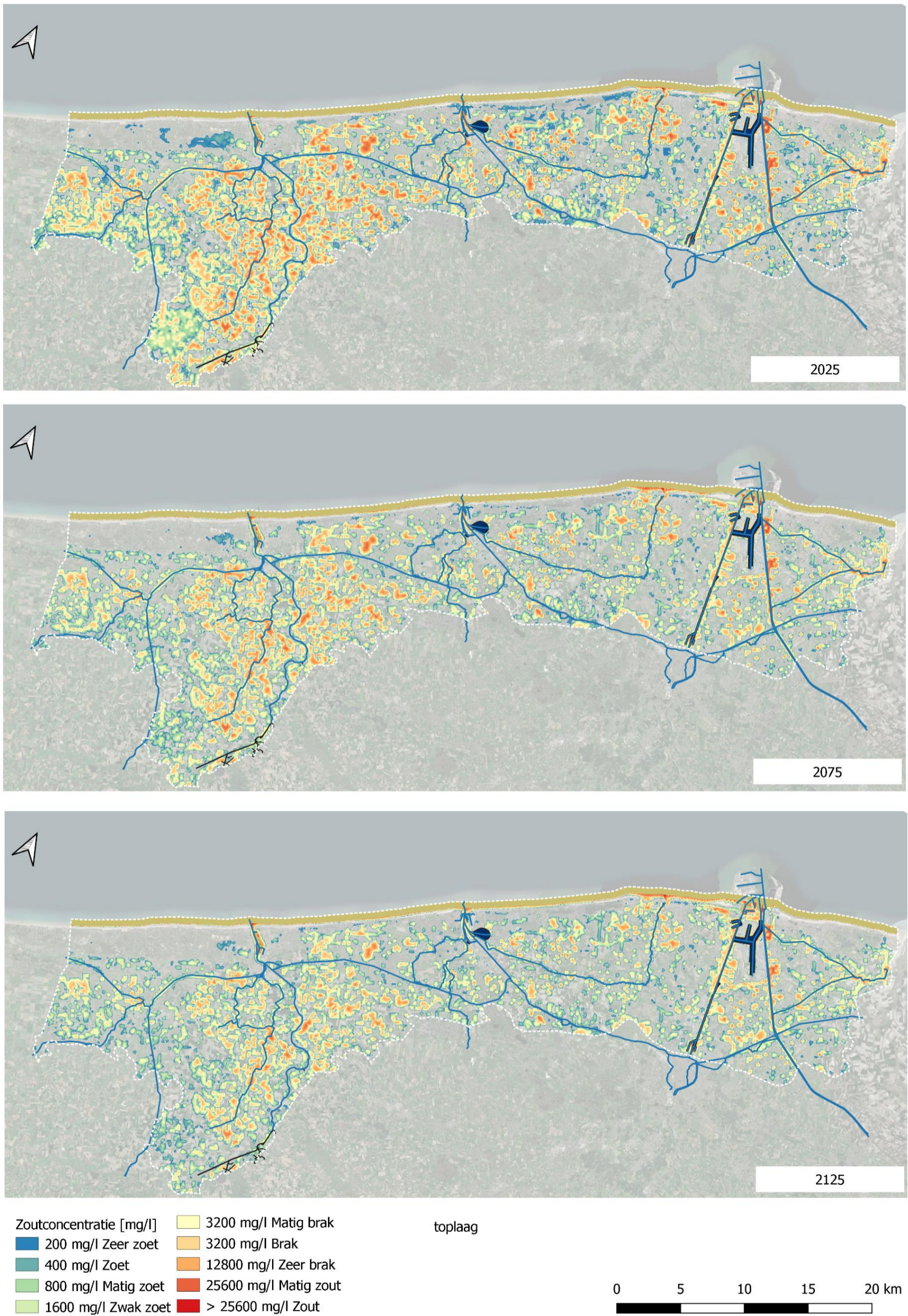




Figuur bijlage C-2: Hoogte zoutfront (zoutconcentratie > 1500 mg/l), berekend na 50 jaar (2025) (boven), volgens optimistische (midden) en volgens conservatieve (onder) aanname TOPSOIL project (waarnemingen 2014 – 2017)

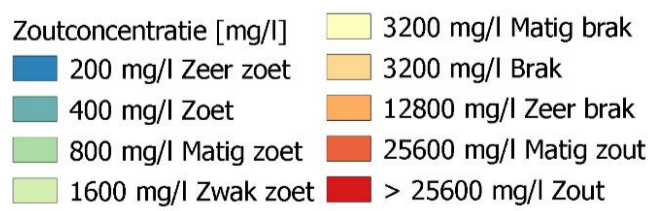
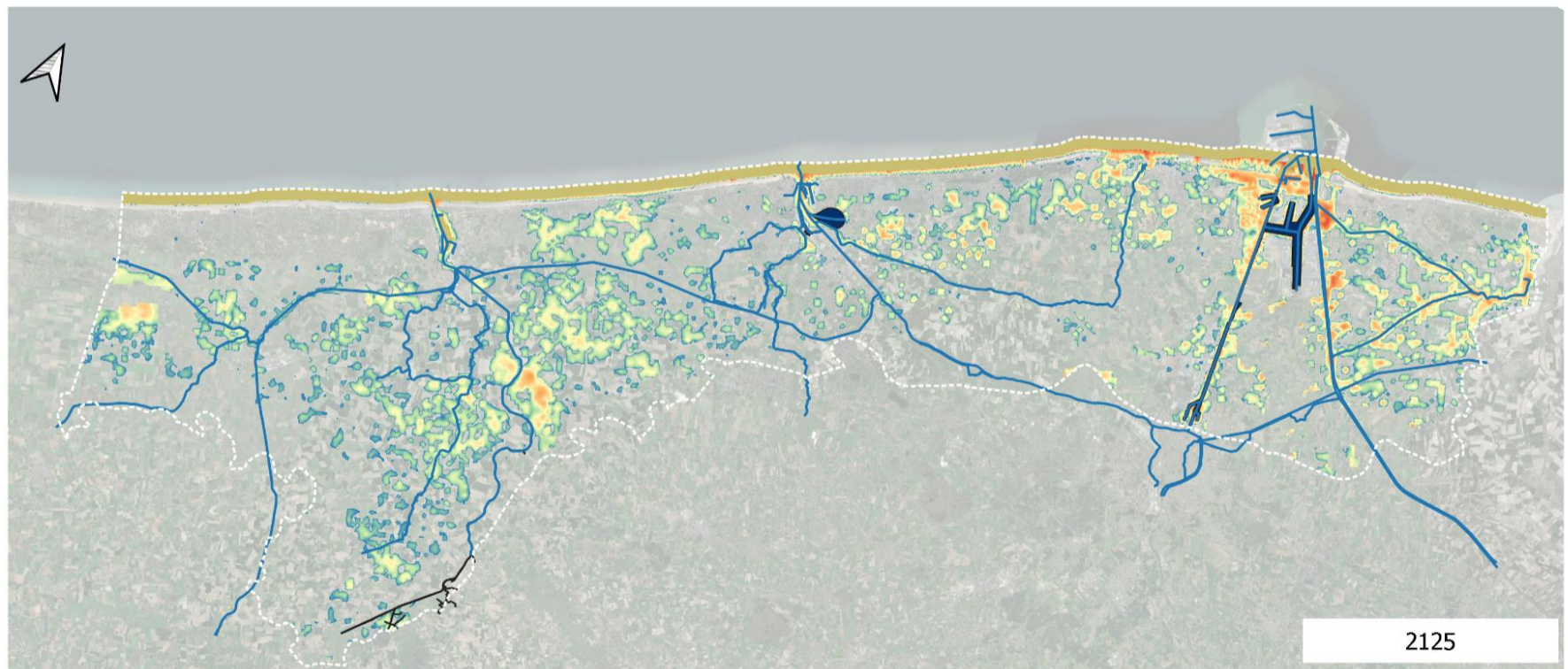
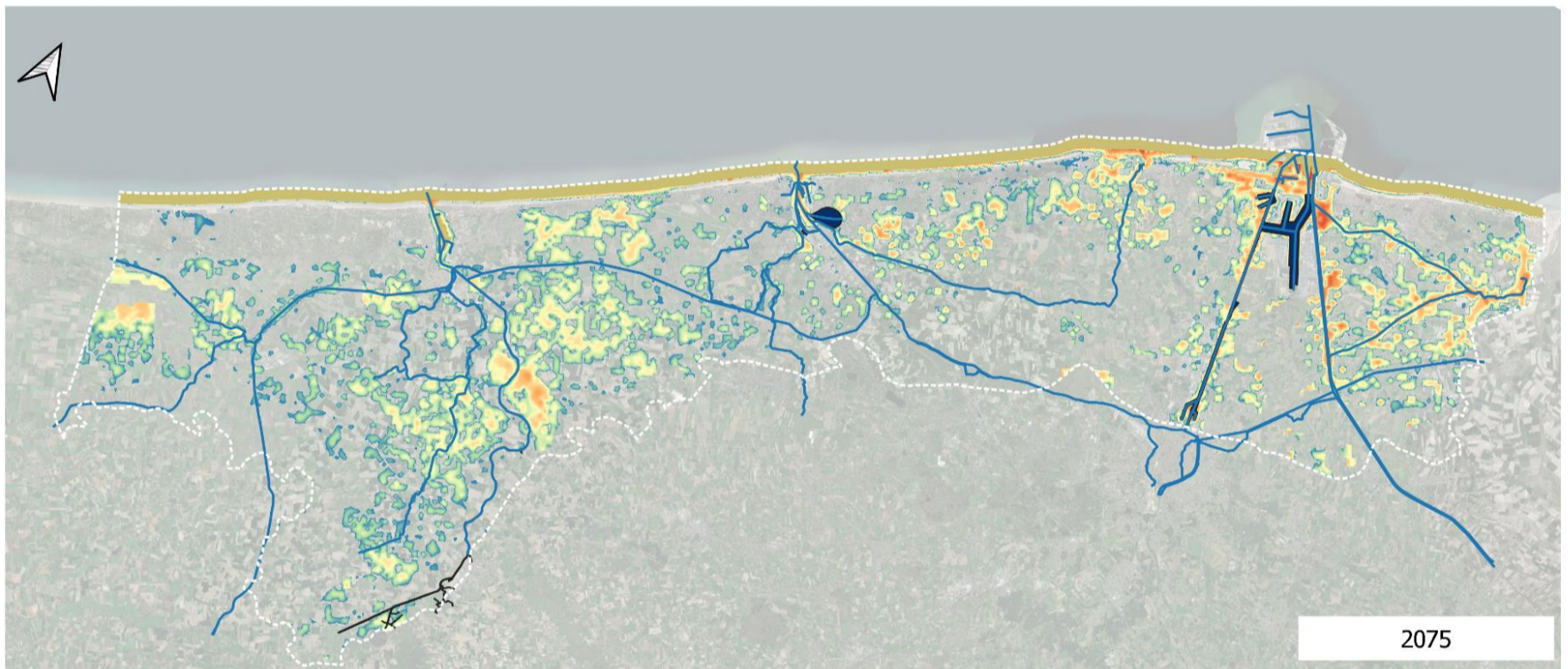
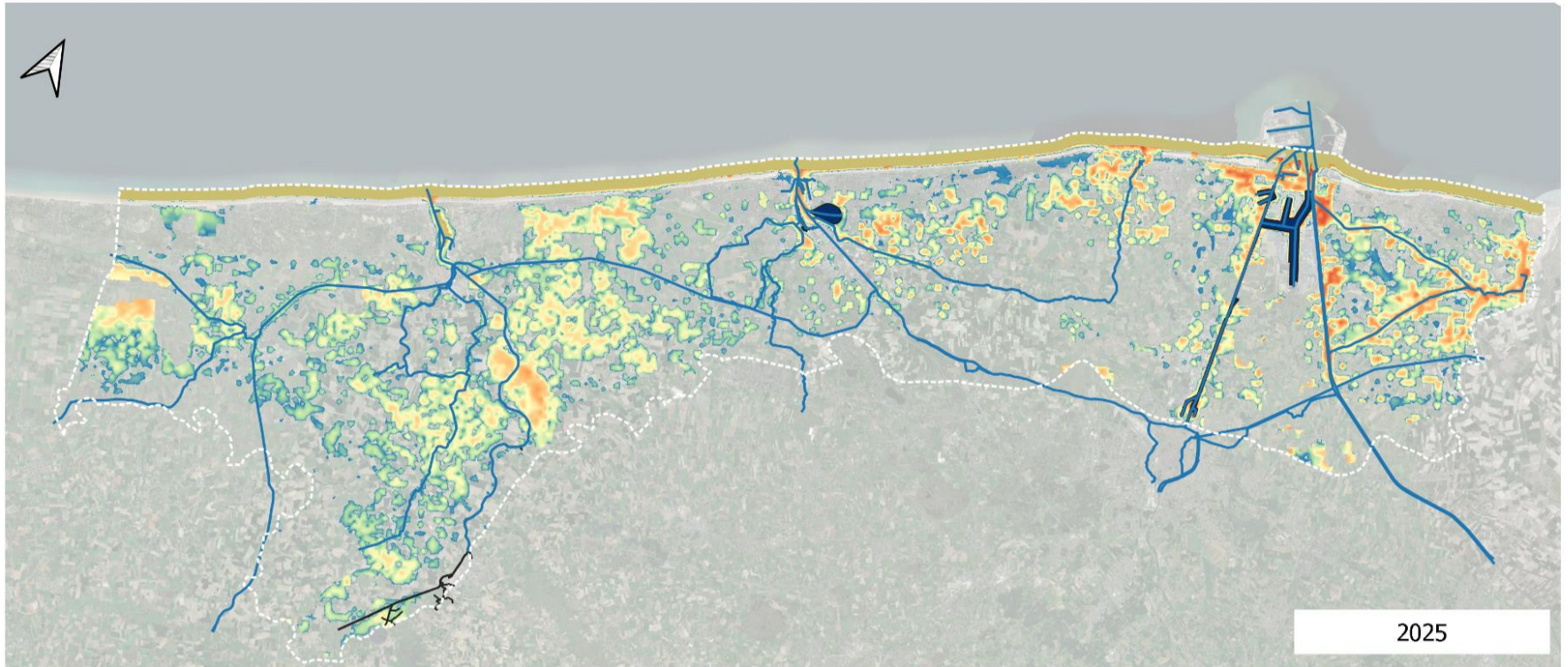


## C.2 Evolutie zoutconcentraties Referentietoestand

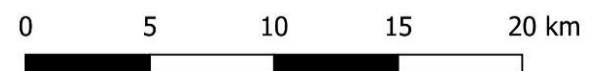


Figuur bijlage C-3: Berekende gemiddelde zoutconcentratie (hoger dan 200 mg/l) in de toplaag na 50, 100 en 150 jaar (2025, 2075, 2125)



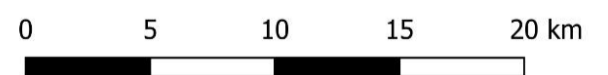
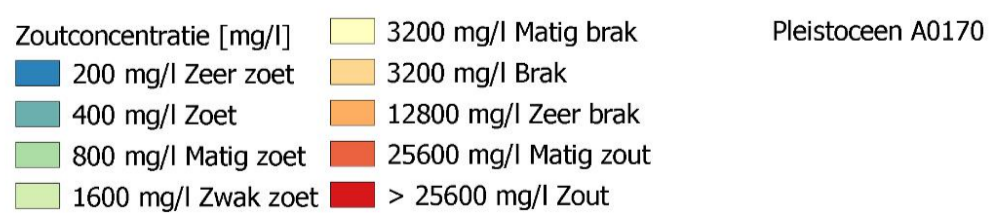
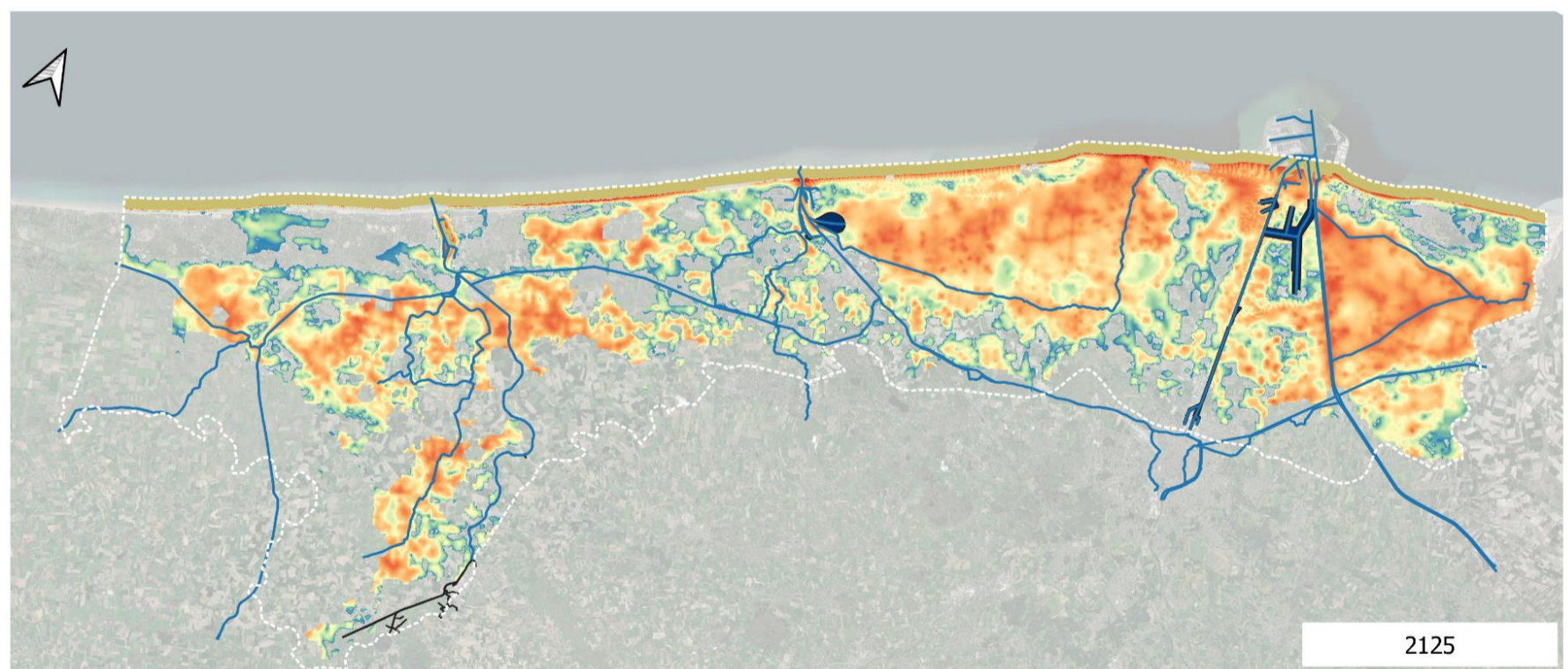
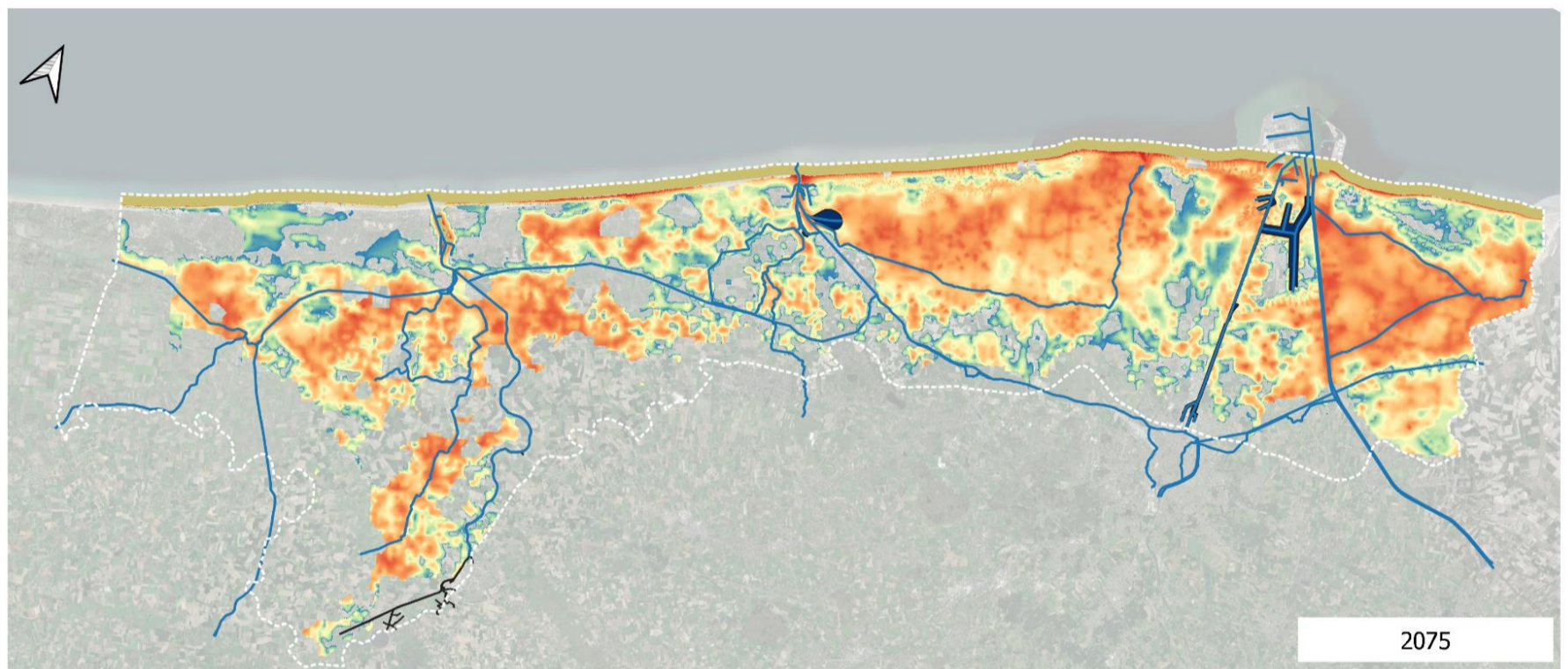
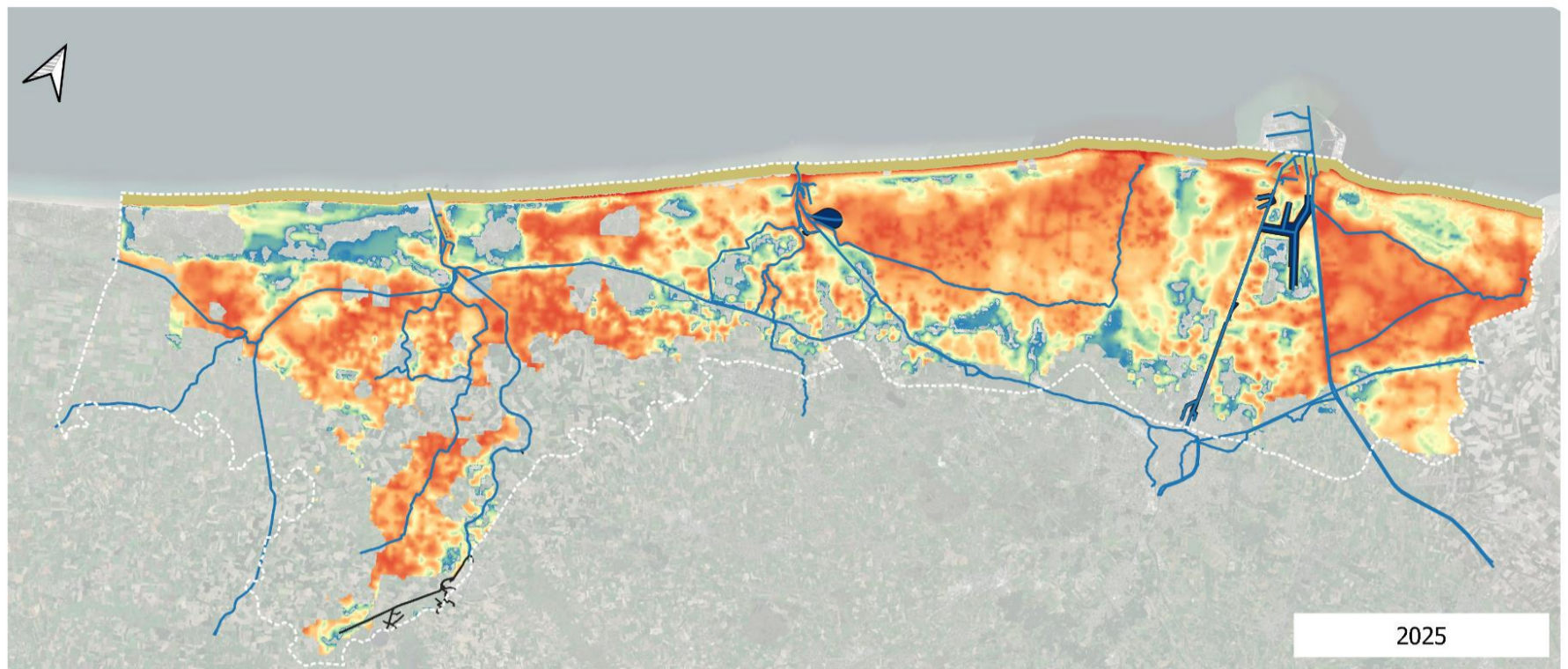


Polderafzettingen A0130



Figuur bijlage C-4: Berekende gemiddelde zoutconcentratie (hoger dan 200 mg/l) in de Polderafzettingen HCOV A0130 na 50, 100 en 150 jaar (2025, 2075, 2125)

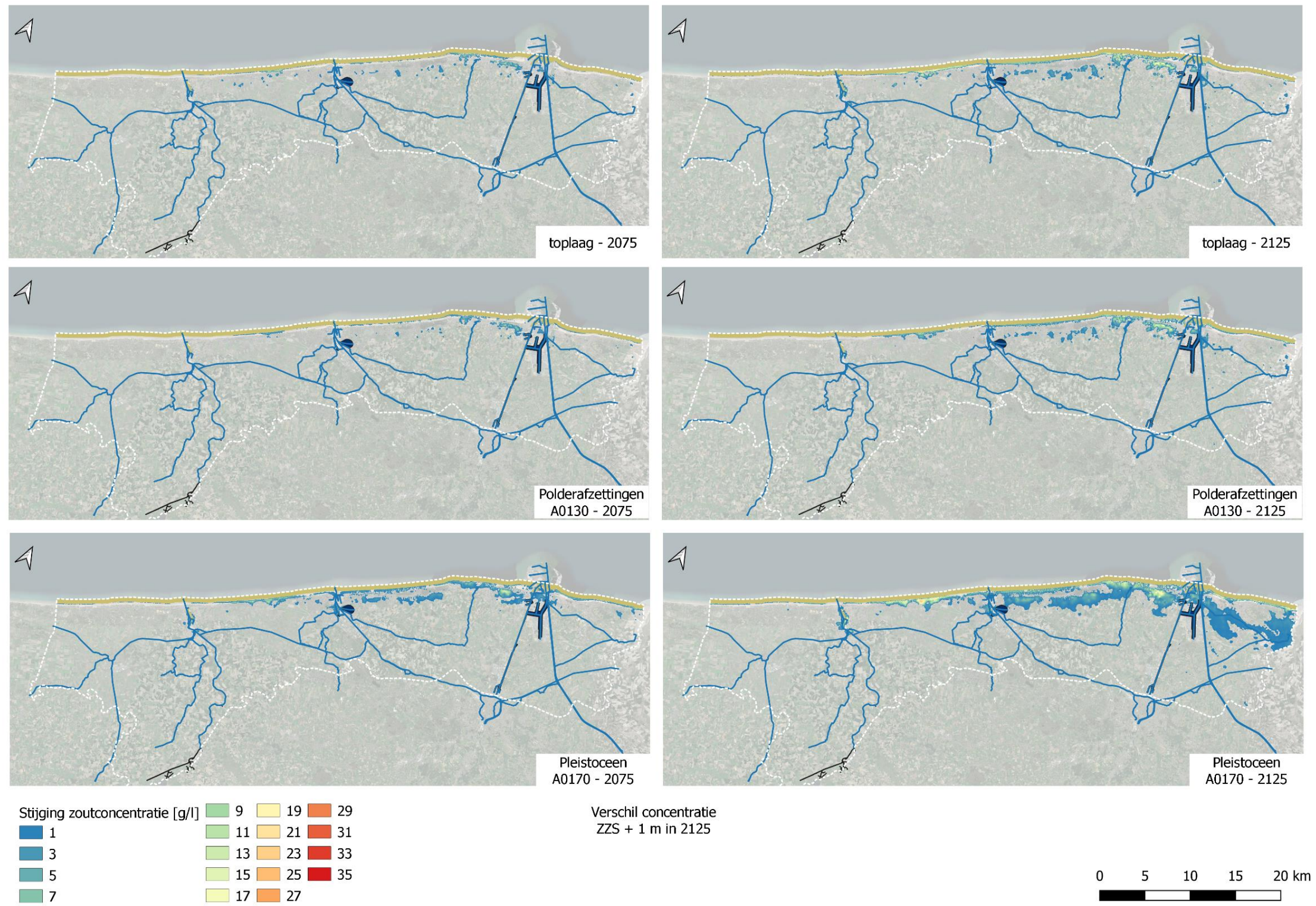




Figuur bijlage C-5: Berekende gemiddelde zoutconcentratie (hoger dan 200 mg/l) in de pleistocene afzettingen HCOV A0170 na 50, 100 en 150 jaar (2025, 2075, 2125)

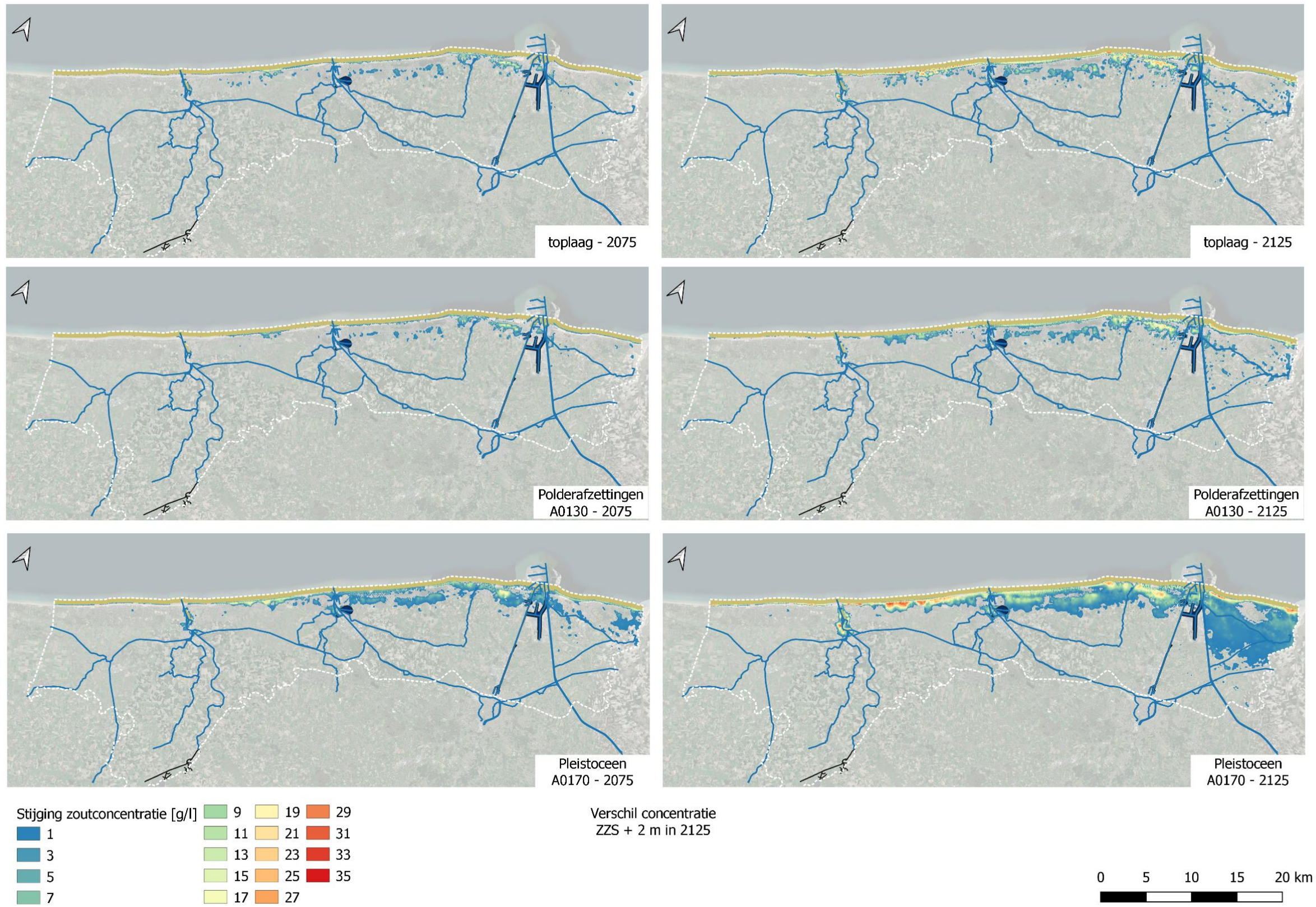


### C.3 Evolutie zoutconcentraties bij zeespiegelstijging



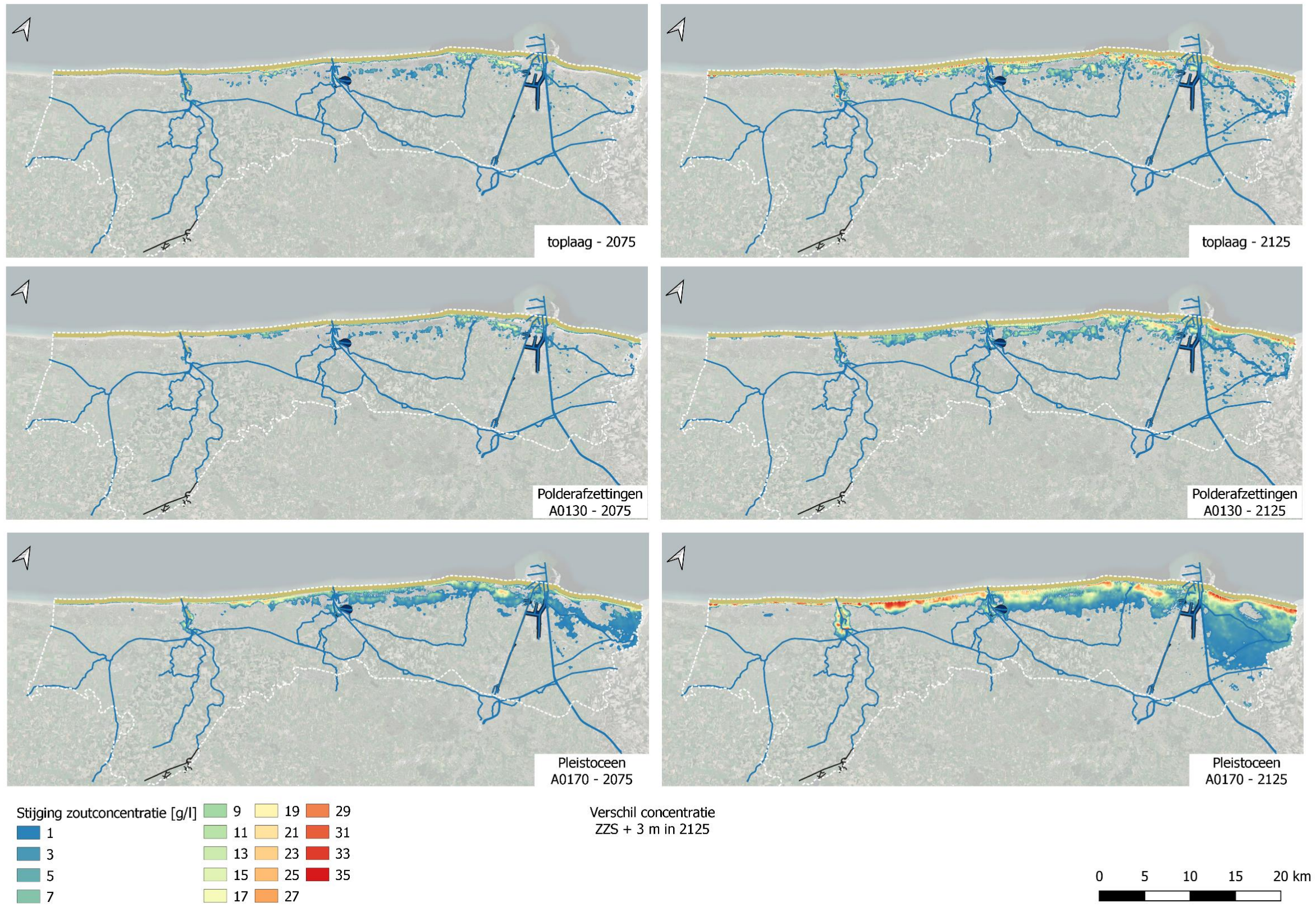
Figuur bijlage C-6: Wijziging van de gemiddelde zoutconcentratie in de top laag, Polderafzettingen en Pleistoceen na 100 en 150 jaar (2075, 2125) bij zeespiegelstijging van +1 m in 2125





Figuur bijlage C-7. Wijziging van de gemiddelde zoutconcentratie in de toplaag, Polderafzettingen en Pleistoceen na 100 en 150 jaar (2075, 2125) bij zeespiegelstijging van +2 m in 2125

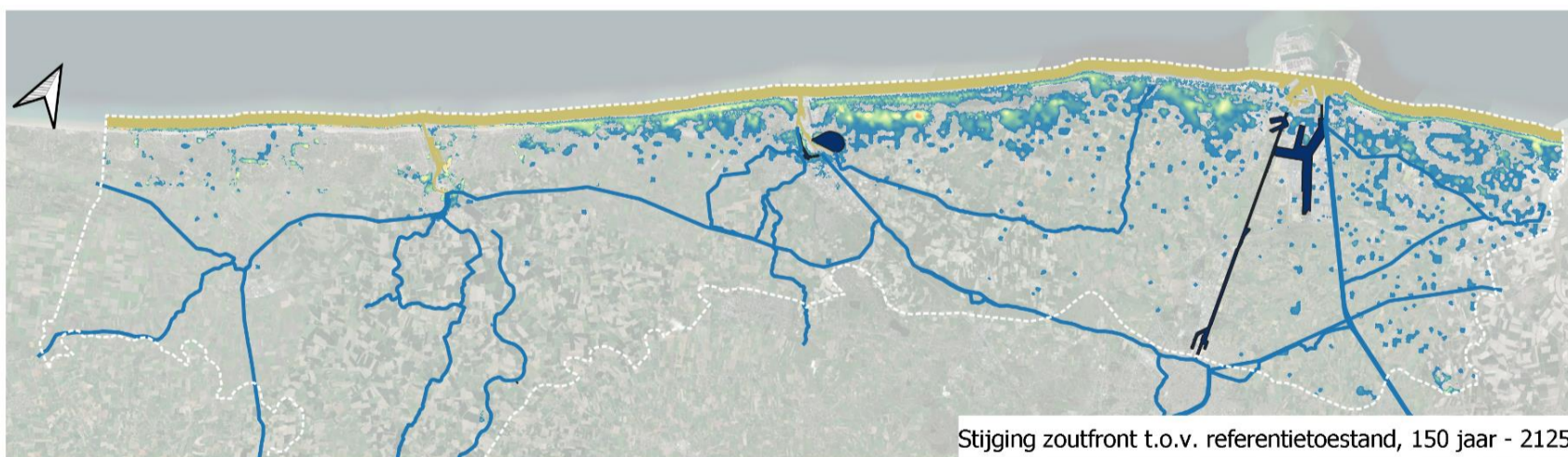
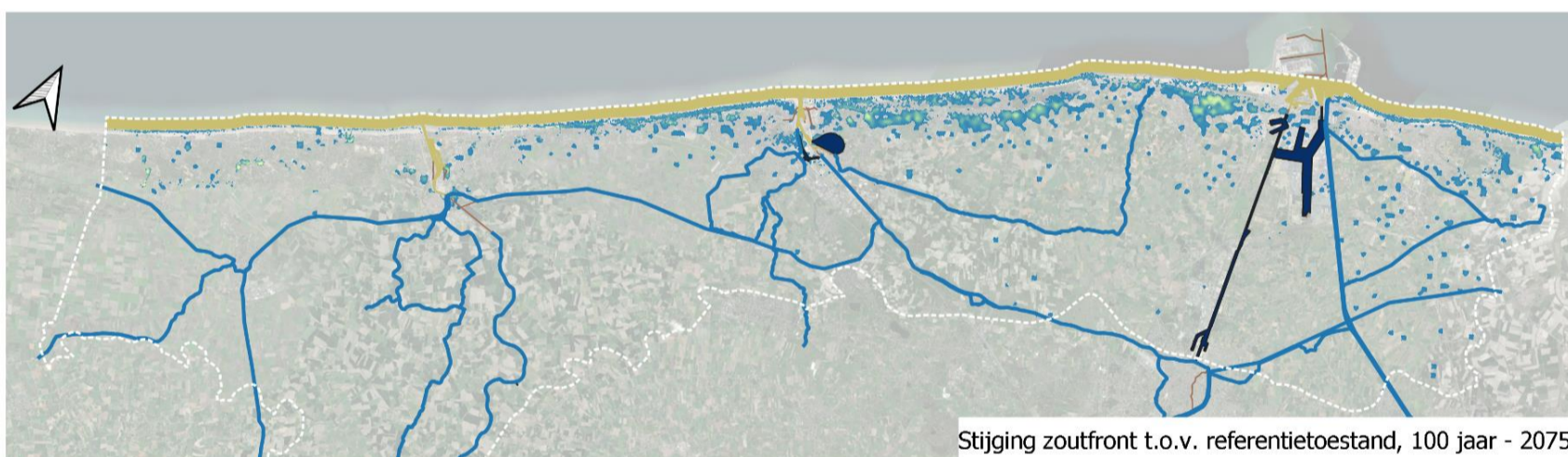
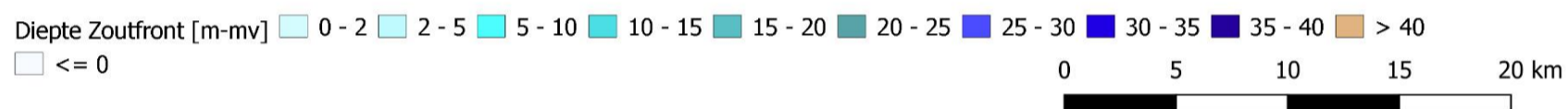
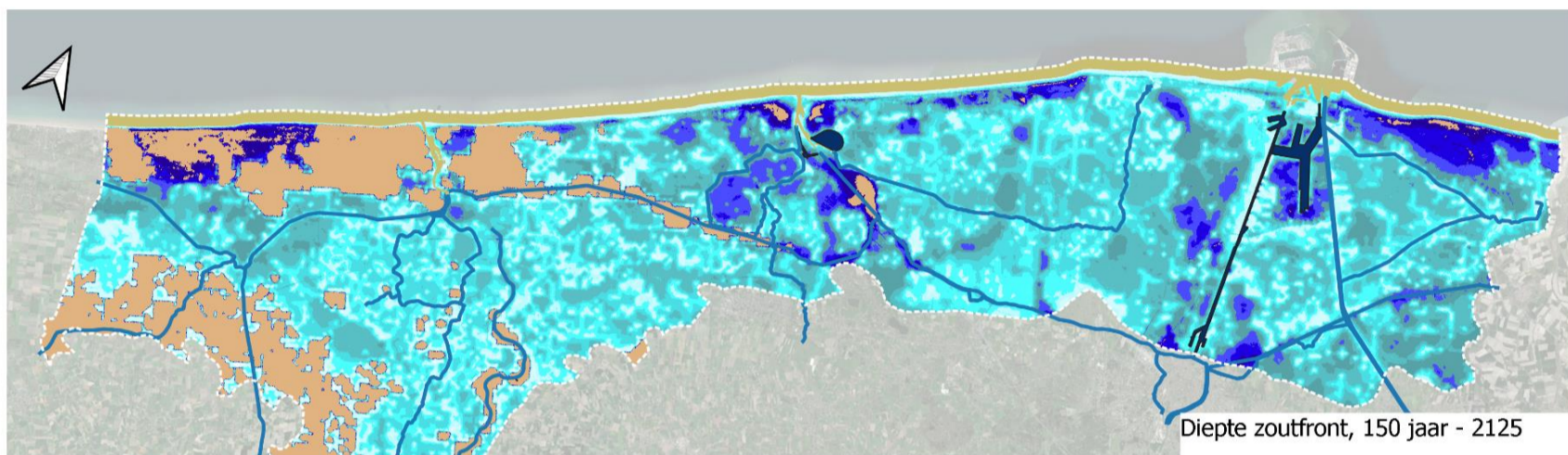
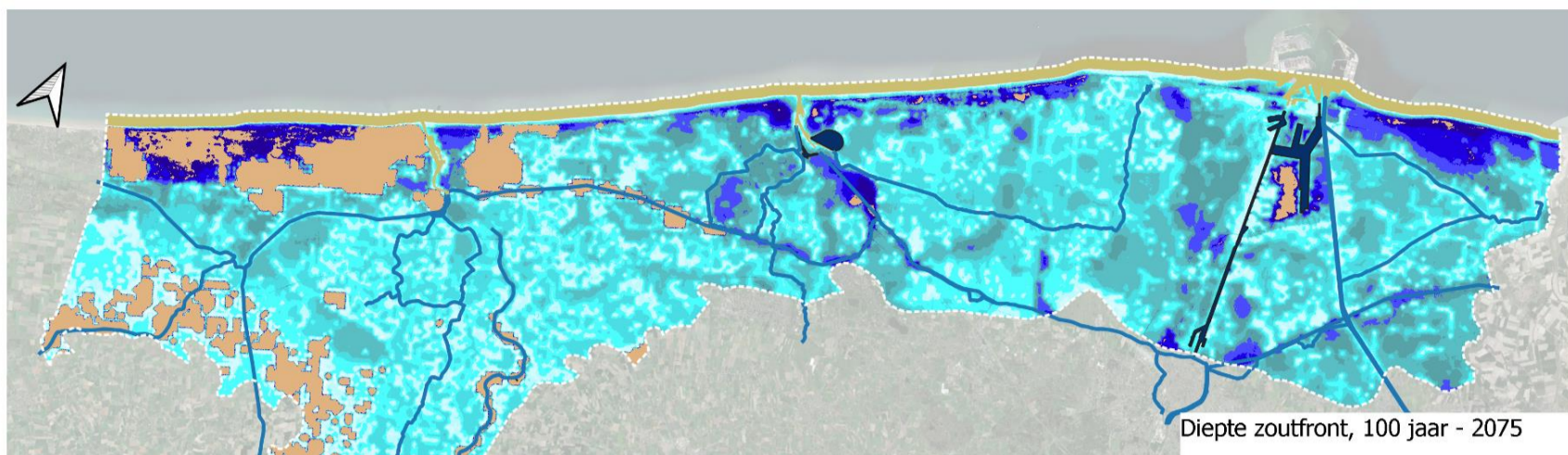




Figuur bijlage C-8. Wijziging van de gemiddelde zoutconcentratie in de toplaag, Polderafzettingen en Pleistoceen na 100 en 150 jaar (2075, 2125) bij zeespiegelstijging van +3 m in 2125

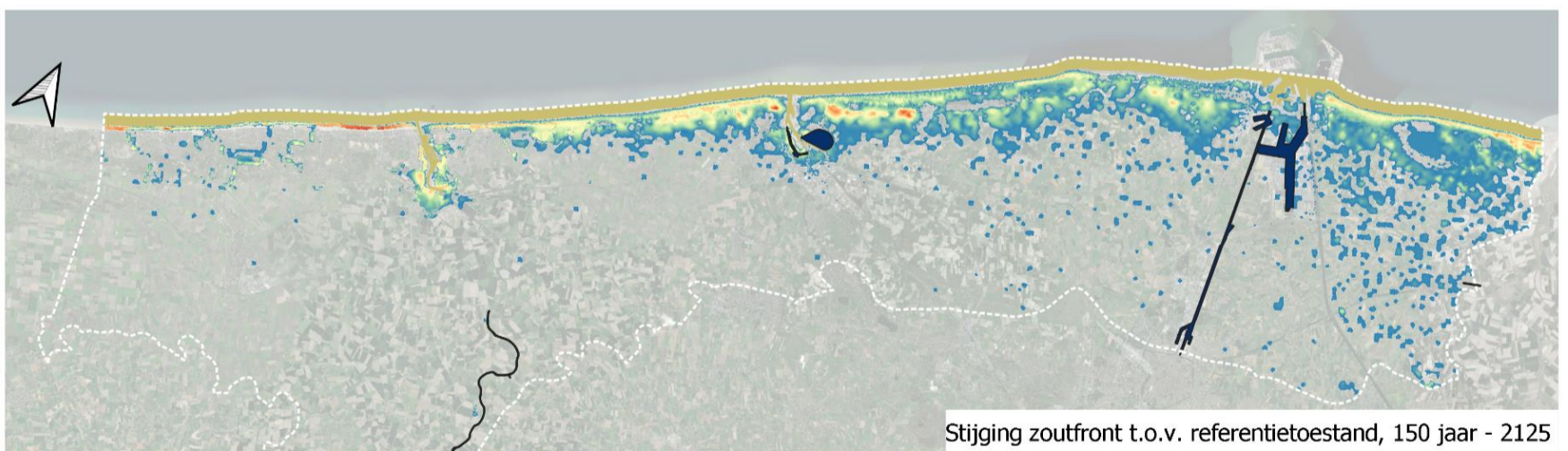
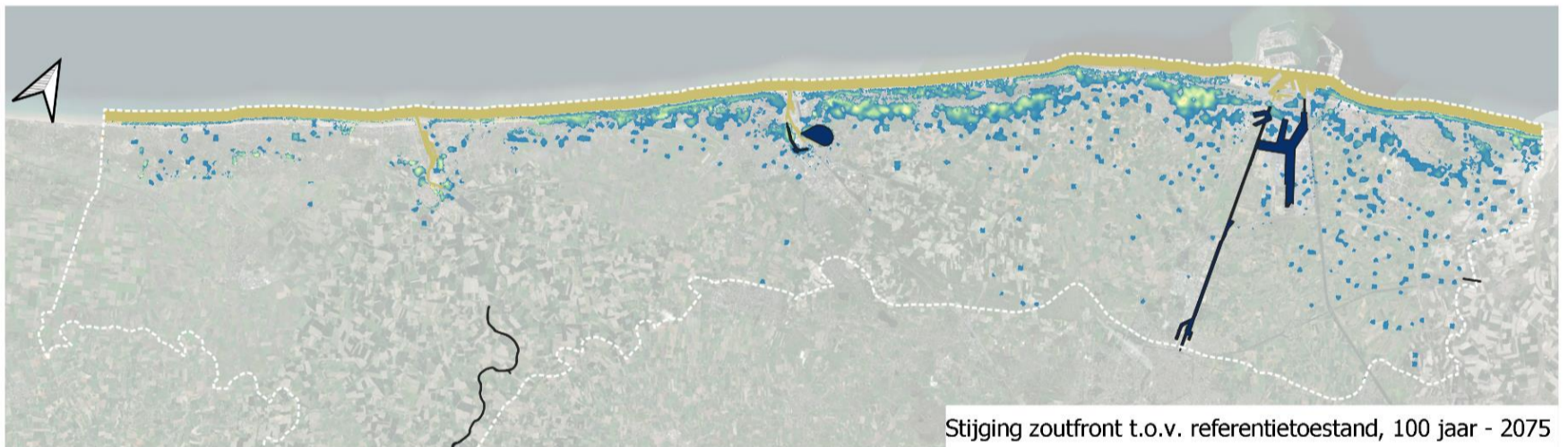
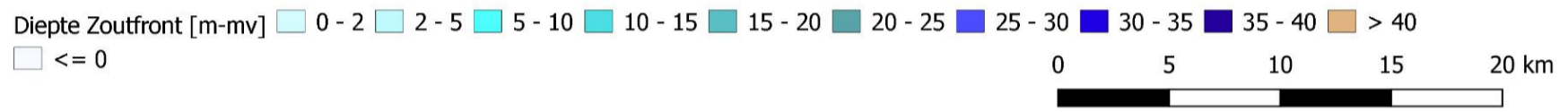
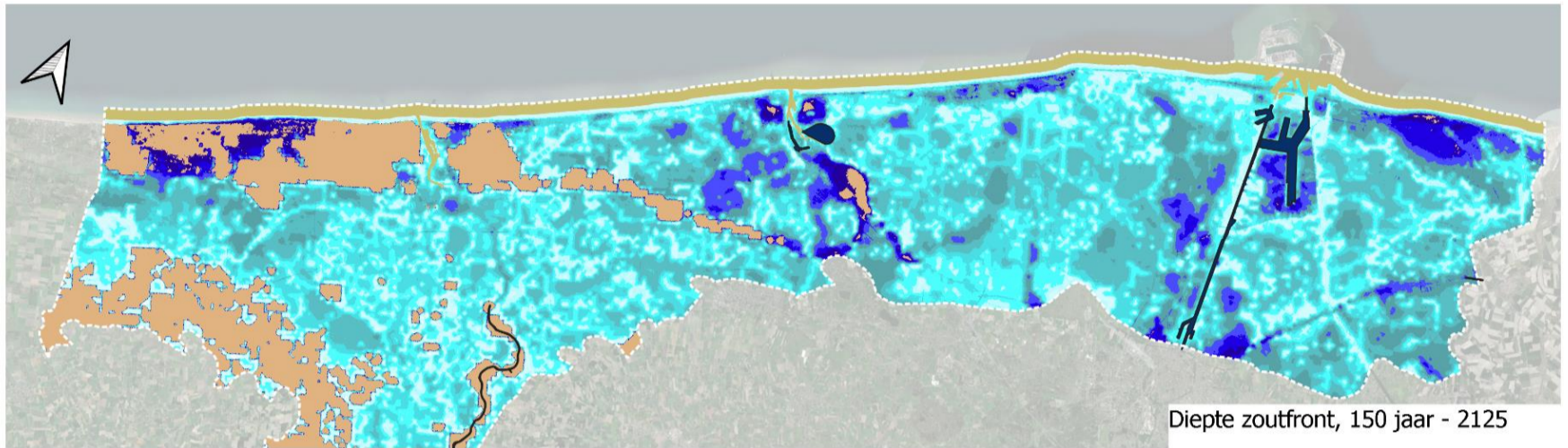
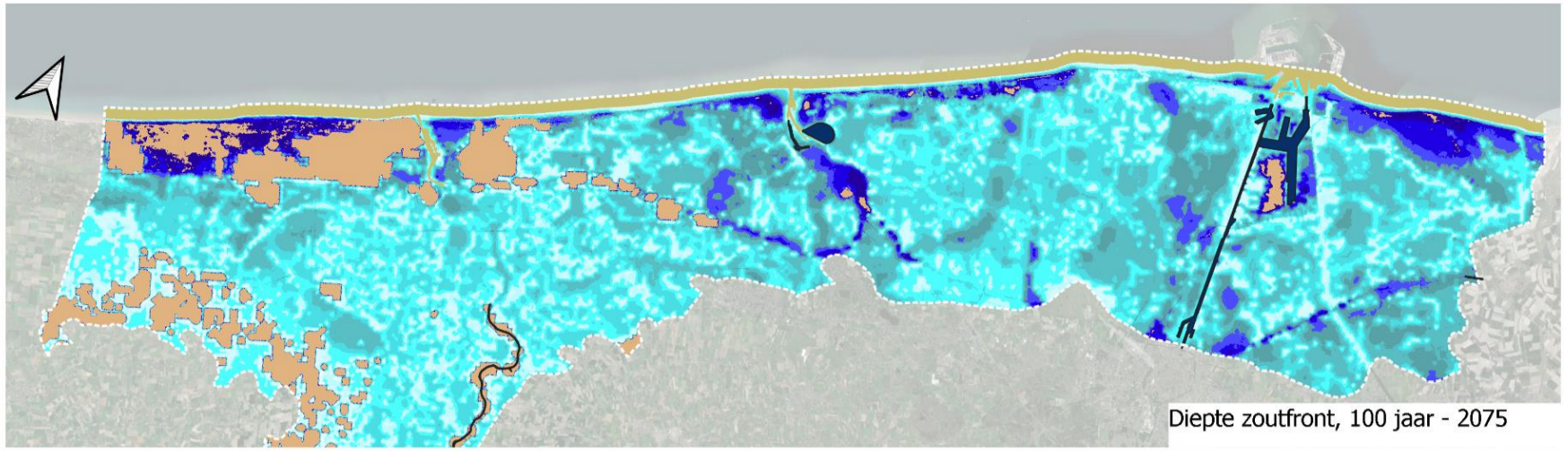


### C.4 Evolutie zoet-zoutfront bij zeespiegelstijging



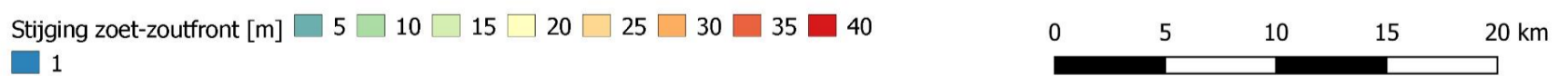
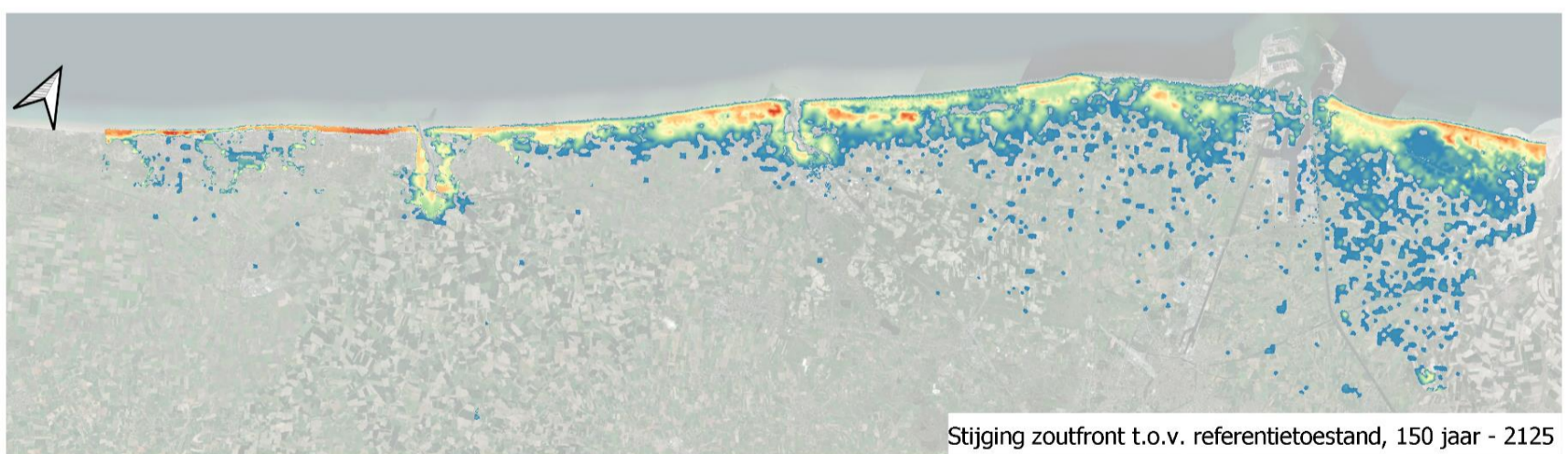
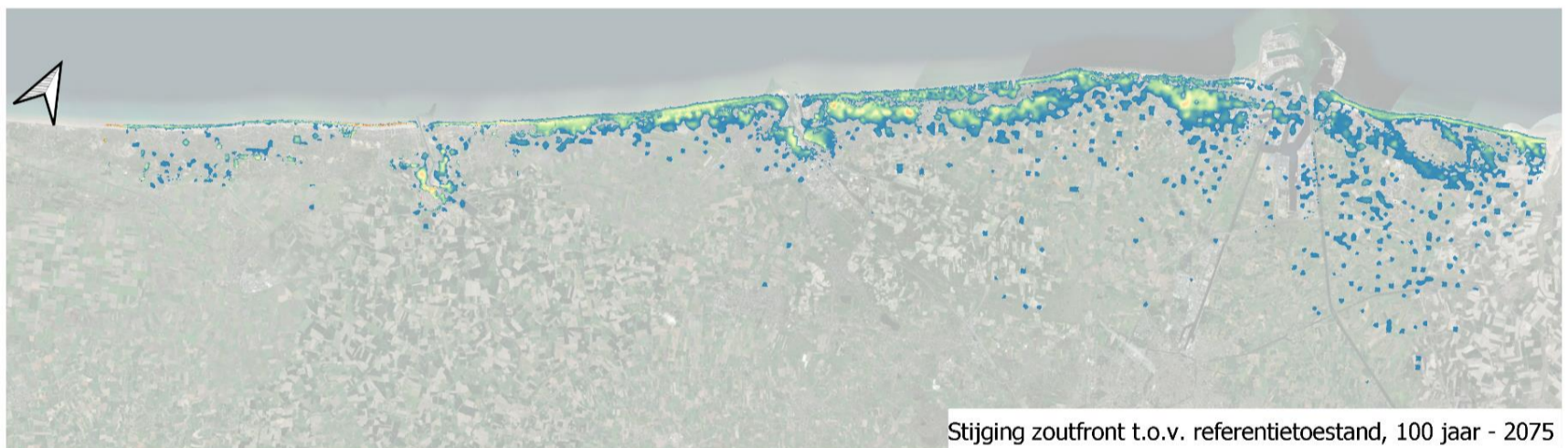
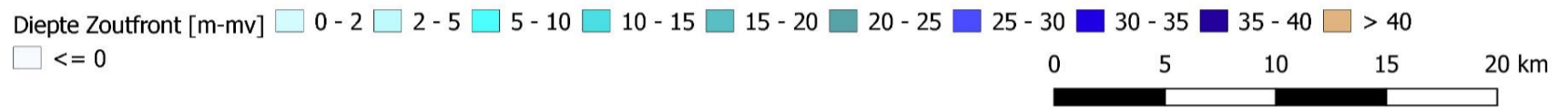
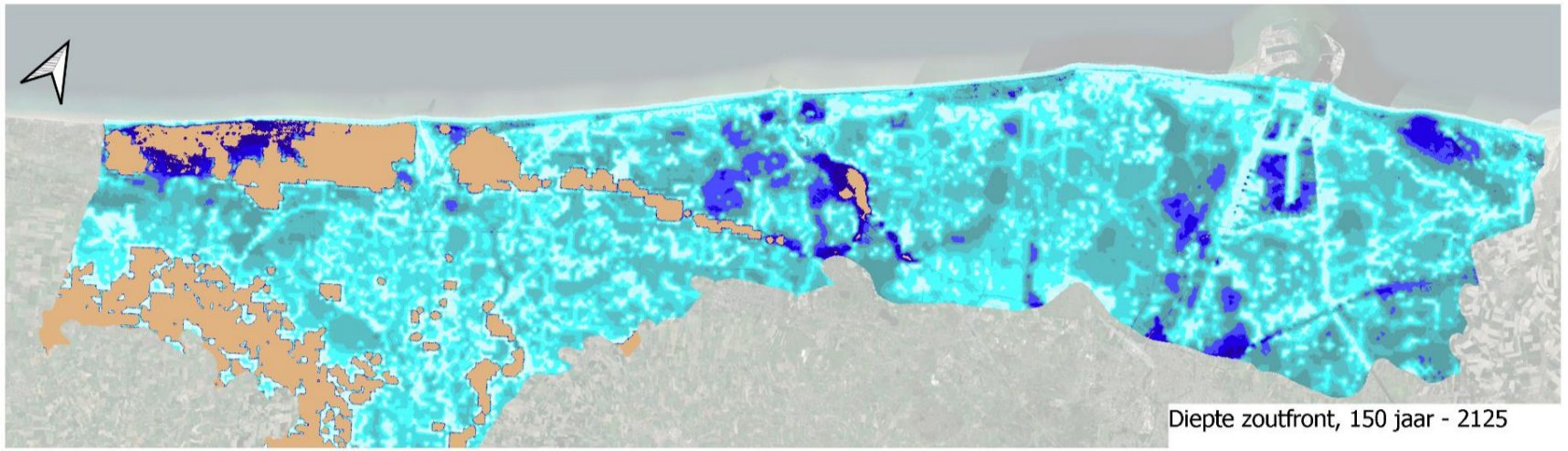
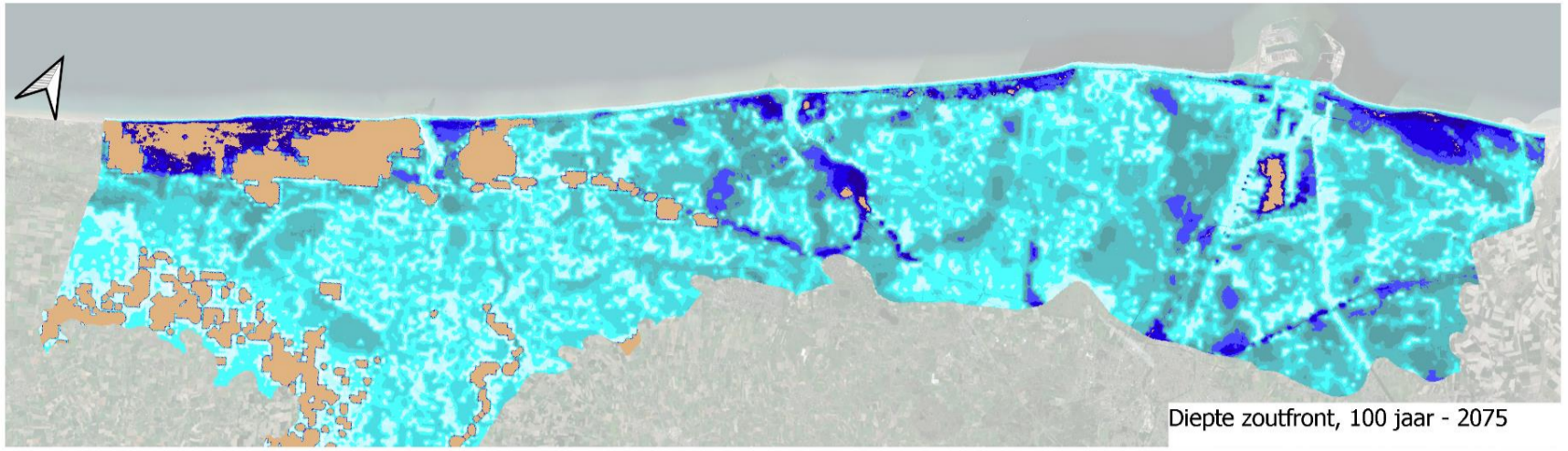
Figuur bijlage C-9: Diepte zoet-zoutfront en stijging van het zoet-zoutfront front in na 100 (2075) en 150 jaar (2125) bij zeespiegelstijging van +1m in 2125





Figuur bijlage C-10: Diepte zoet-zoutfront en stijging van het zoet-zoutfront front in na 100 (2075) en 150 jaar (2125) bij zeespiegelstijging van +2 m in 2125





Figuur bijlage C-11: Diepte zoet-zoutfront en stijging van het zoet-zoutfront front in na 100 (2075) en 150 jaar (2125) bij zeespiegelstijging van +3 m in 2125





# Colofon

**COPYRIGHT**

Copyright © 2023, Alle rechten voorbehouden. Deze publicatie of delen mogen niet worden gekopieerd, gereproduceerd of verzonden in welke vorm of op welke manier dan ook, digitaal of anderszins zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Verwijzing naar een deel van deze publicatie dat tot verkeerde interpretatie kan leiden, is verboden.

**OMSLAG**

Hoogtij(d)

**PUBLICATIEDATUM**

22/11/2023

**UITGEVER**

ir. Annelies Bolle  
Senior ingenieur Projectleider Kustvisie – consortium Hoogtij(d)  
+32 479 92 03 08, Annelies.bolle@imdc.be

**OPMAAK**

Hoogtij(d)





Kust  
visie