



Kust  
visie

# Kustvisie

Referentiesituatie overstromingsmodellering

Rapport

Referentiesituatie Overstromingsmodellering  
I/RA/11630/21.195/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

21 november 2023

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	17/02/2023	Eerste versie	HCL, FZO, LDN, ADA	VBA	ABO
2.0	22/03/2023	Finale versie na aanvulling en revisie WL	Dieter Vanneste	VBA	ABO
3.0	21/11/2023	Lay-out aanpassing	HCL, FZO, LDN, ADA	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.*

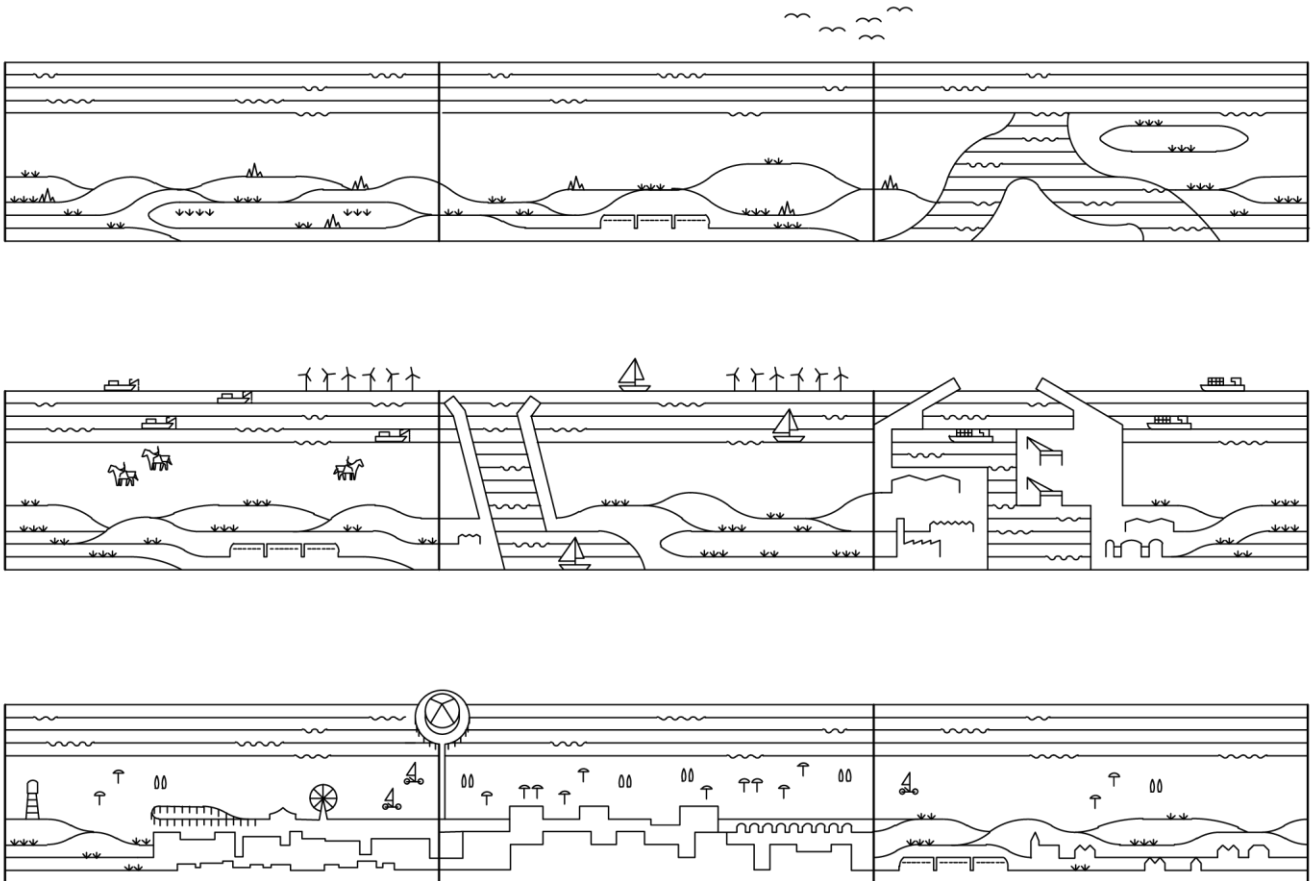
*Dit document maakt deel uit van de onderbouwende studies. Het wordt gedeeld om inzicht en achtergrond te geven in het studiewerk voor en de onderbouwing van het strategisch beleidsplan Kustvisie.*

*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

## Overstromingsmodellering







# Inhoud

1	Inleiding	12
1.1	De opdracht	12
1.2	Doel van het rapport	12
1.3	Leeswijzer	13
2	Methodologie	15
2.1	Randvoorwaarden overstromingsmodel	15
2.1.1	Zeewering ter hoogte van strandzones	15
2.1.2	Havens	21
2.2	Overstromingsmodellering	24
2.2.1	1D model Mike 11	24
2.2.2	2DH model Mike21	24
2.2.3	Modelkoppelingen	25
2.3	Schadeberekening	26
2.4	Samenvatting aannames	29
3	Resultaten	31
3.1	Inleiding	31
3.2	Scenario +1m zeespiegelstijging	32
3.2.1	Randvoorwaarden	32
3.2.2	Overstromingsberekening	35
3.2.3	Schade- en slachtofferberekening	36
3.3	Scenario +2m zeespiegelstijging	40
3.3.1	Randvoorwaarden	40
3.3.2	Overstromingsberekening	42
3.3.3	Schade- en slachtofferberekening	44
3.4	Scenario +3m zeespiegelstijging	48

3.4.1	Randvoorwaarden	48
3.4.2	Overstromingsberekening	50
3.4.3	Schade- en slachtofferberekening	52
4	Vergelijking met andere overstromingsmodelleringsen en schade- en slachtofferberekeningen	57
4.1	CLIMAR	57
4.2	Berekeningen in kader van MPKV	58
4.3	Samenvatting	60
5	Conclusies en samenvatting	63
6	Referenties	67

## Lijst van tabellen

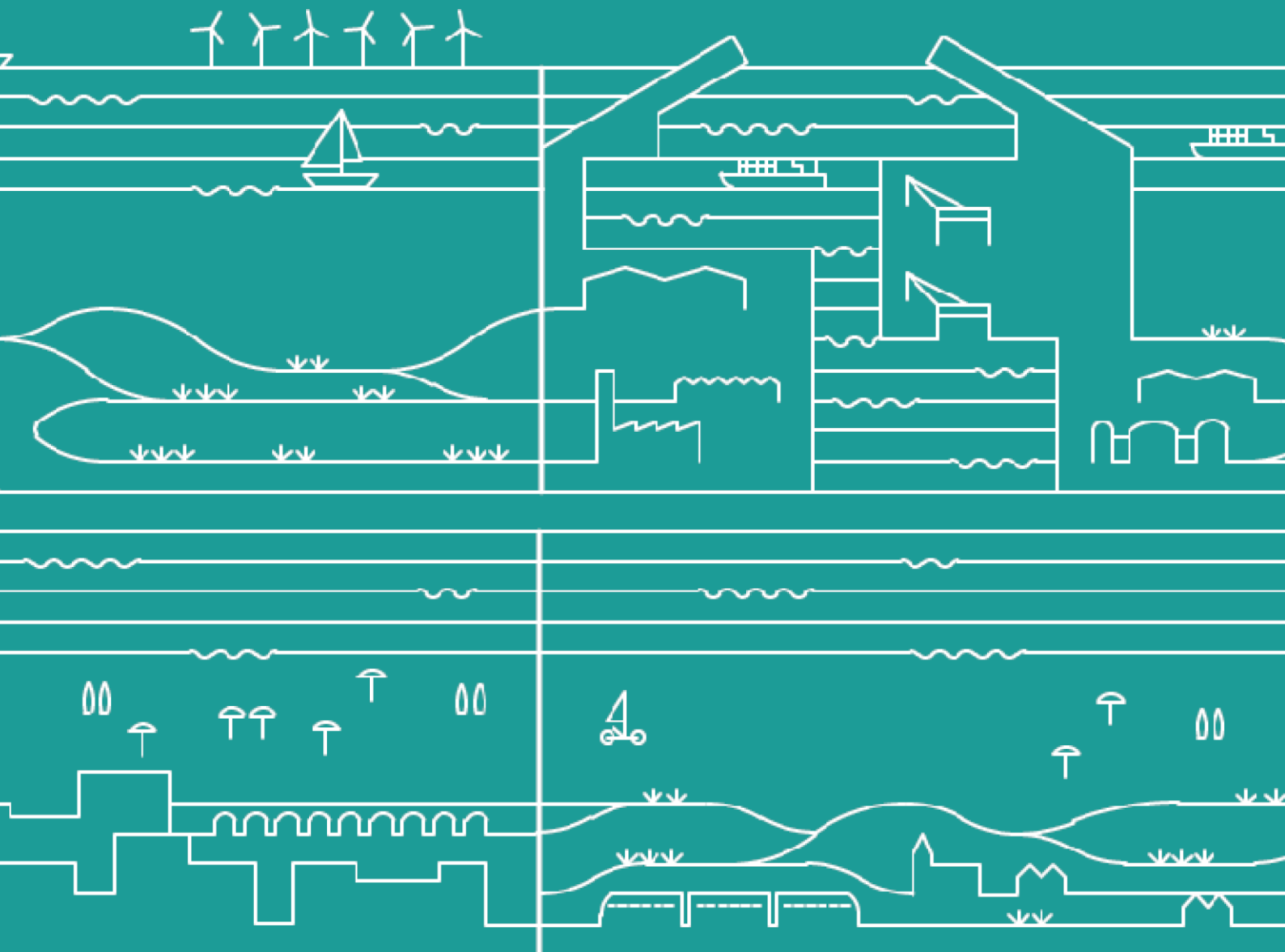
Tabel 2-1:	Overzicht van beschouwde structuren en kruinpeilen (m TAW).	23
Tabel 2-2:	Ruwheidscoëfficiënten voor de verschillende types bodemgebruik	25
Tabel 3-1:	Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).	36
Tabel 3-2:	Schade in de havens bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).	36
Tabel 3-3:	Schade en slachtoffers op de zeewering per kustdeel bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1) (berekend voor dijken).	37
Tabel 3-4:	Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).	44
Tabel 3-5:	Schade in de havens bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).	44
Tabel 3-6:	Schade en slachtoffers op de zeewering per kustdeel bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2) (berekend voor dijken).	45
Tabel 3-7:	Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).	52
Tabel 3-8:	Schade in de havens bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3)	52
Tabel 3-9:	Schade en slachtoffers op de zeewering per kustdeel bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3) (berekend voor dijken).	53
Tabel 4-1:	Totale schade en slachtoffers voor de scenario's uit CLIMAR uit (Van der Biest <i>et al.</i> , 2009) en de scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging in deze studie.	58
Tabel 4-2:	Totale schade en slachtoffers voor het scenario met +1 m zeespiegelstijging (ZSS1) en de resultaten uit de schade en risicoberekening uit (Vanneste, D. <i>et al.</i> , 2018) voor +7.5 en +8 m TAW. De verschillen t.o.v. ZSS1 zijn in (%) weergegeven.	60
Tabel 5-1:	Totale schade en slachtoffers voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging.	64
Tabel 5-2:	Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging.	64
Tabel 5-3:	Schade in de havens voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging.	64

Tabel 5-4: Schade op de zeevering per kustdeel voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging (berekend voor dijken).	65
Tabel 5-5: Slachtoffers op de zeevering per kustdeel voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging (berekend voor dijken).	66

## Lijst van figuren

Figuur 2-1: Verloop waterstand (water level) tijdens maatgevende storm; het astronomisch getij (astronomical spring tide) + stormopzet (storm surge) (Suzuki <i>et al.</i> , 2016). Symmetrisch profiel.	16
Figuur 2-2: Voorbeeld van een tijdreeks met variatie vrijboord duin ( $R_c$ , gele lijn) tijdens de storm en moment van bresvorming (blauwe stippellijn op 22 uur) op basis van een symmetrisch stormprofiel (piek op 22 uur). Sectie 34, +2 m zeespiegelstijging.	17
Figuur 2-3: Voorbeeld van tijdreeks met variatie duin ratio (rode lijn) tijdens de storm en moment van bresvorming (blauwe stippellijn op 21 uur) op basis van een symmetrisch stormprofiel (piek op 22 uur). Sectie 245, +3 m zeespiegelstijging.	17
Figuur 2-4: Vergelijking van het symmetrische en asymmetrische stormprofiel.	18
Figuur 2-5: Overslagdebiet ( $q$ ) als functie van minimum vrijboord ( $R_c$ ) voor +1 m zeespiegelstijging.	19
Figuur 2-6: Overslagdebiet ( $q$ ) als functie van minimum vrijboord ( $R_c$ ) voor +2 m zeespiegelstijging.	19
Figuur 2-7: Overslagdebiet ( $q$ ) als functie van minimum vrijboord ( $R_c$ ) voor +3 m zeespiegelstijging.	20
Figuur 2-8: Voorbeeld van tijdreeks met variatie vrijboord (paarse lijn) tijdens de storm en moment van falen (zwarte stippellijn op 22 uur) op basis van een symmetrisch stormprofiel (piek op 22 uur). Sectie 30, +3 m zeespiegelstijging.	20
Figuur 2-9: Voorbeeld van de tijdreeks met waterstandsvariatie tijdens de storm (asymmetrisch stormprofiel) in Nieuwpoort voor +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging. De stormvloedkering kan een zeespiegelstijging van +1 m weerstaan en beïnvloedt dan het waterpeil in de haven.	22
Figuur 2-10: Voorbeeld van de tijdreeks van waterstanden en debieten over de zeevering tijdens de 1000-jarige storm bij +3 m zeespiegelstijging voor een specifieke locatie in Nieuwpoort.	22
Figuur 2-11: Voorbeeld van bodemgebruik in LATIS zoals toegepast in de schadeberekeningen.	26
Figuur 2-12: Bodemgebruik als achtergrondkaart met daarboven de uitgestrektheid (in zwart) van de maximale schadekaart voor de originele versie (link) en aangepaste versie (rechts).	27
Figuur 2-13: Havencontouren voor de havens van Zeebrugge en Blankenberge met het gebied zeewaarts van de zeeveringscontour in groen en het gebied tussen zeeveringscontour en veiligheidslijn in blauw.	27
Figuur 2-14: Havencontour voor de haven van Oostende met het gebied zeewaarts van de zeeveringscontour in groen en het gebied tussen zeeveringscontour en veiligheidslijn in blauw.	28
Figuur 2-15: Havencontour voor de haven van Nieuwpoort met het gebied zeewaarts van de zeeveringscontour in groen en het gebied tussen zeeveringscontour en veiligheidslijn in blauw.	28
Figuur 3-1: Overzicht van de randvoorwaarden voor duinen bij +1 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige duin (geen bres), Cat 2: bres omwille van lage vrijboord, Cat 3: bres omwille van duinvolume (duin-ratio), Cat 4: bres omwille van vrijboord en duin-ratio.	32
Figuur 3-2: Overzicht van de randvoorwaarden voor dijken bij +1 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige dijk, Cat 2: overslag ( $< 100$ l/m/s), Cat 3: falen van dijk (overslag $> 100$ l/m/s of overflow).	33
Figuur 3-3: Overzicht van de resultaten veiligheidsscan bij +1 m zeespiegelstijging als indicatie waar overstroming van het havengebied optreedt. Rode kleur geeft ter hoogte van structuren falen aan, ter hoogte van de waterkant een maximum debiet $> 50$ l/m/s en ter hoogte van de zeevering een debiet $> 1$ l/m/s.	34

Figuur 3-4: Resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1): overstromingsdiepte (m).	35
Figuur 3-5: Resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1): horizontale stroomsnelheid (m/s).	35
Figuur 3-6: Resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1): stijgsnelheid (m/h).	36
Figuur 3-7 : Schade door overstromingsdiepte in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).	38
Figuur 3-8 : Additionele schade in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).	38
Figuur 3-9 :Slachtoffers in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).	39
Figuur 3-10 : Overzicht van de randvoorwaarden voor duinen bij +2 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige duin (geen bres), Cat 2: bres omwille van lage vrijboord, Cat 3: bres omwille van duinvolume (duin-ratio), Cat 4: bres omwille van vrijboord en duin-ratio.	40
Figuur 3-11 : Overzicht van de randvoorwaarden voor dijken bij +2 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige dijk, Cat 2: overslag (< 100 l/m/s), Cat 3: falen van dijk (overslag > 100 l/m/s of overflow).	41
Figuur 3-12: Overzicht van de resultaten veiligheidsscan bij +2 m zeespiegelstijging als indicatie waar overstroming van het havengebied optreedt. Rode kleur geeft ter hoogte van structuren (bollen) falen aan, ter hoogte van de waterkant (dunne lijn) een maximum debiet > 50 l/m/s en ter hoogte van de zeewering (dikke lijn) een debiet > 1 l/m/s.	42
Figuur 3-13: Resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2): overstromingsdiepte (m).	43
Figuur 3-14: Resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2): horizontale stroomsnelheid (m/s).	43
Figuur 3-15: Resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2): stijgsnelheid (m/h).	44
Figuur 3-16 : Schade door overstromingsdiepte in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).	46
Figuur 3-17: Additionele schade in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).	46
Figuur 3-18: Slachtoffers in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).	47
Figuur 3-19 : Overzicht van de randvoorwaarden voor duinen bij +3 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige duin (geen bres), Cat 2: bres omwille van lage vrijboord, Cat 3: bres omwille van duinvolume (duin-ratio), Cat 4: bres omwille van vrijboord en duin-ratio.	48
Figuur 3-20 : Overzicht van de randvoorwaarden voor dijken bij +3 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige dijk, Cat 2: overslag (< 100 l/m/s), Cat 3: falen van dijk (overslag > 100 l/m/s of overflow).	49
Figuur 3-21: Overzicht van de resultaten veiligheidsscan bij +3 m zeespiegelstijging als indicatie waar overstroming van het havengebied optreedt. Rode kleur geeft ter hoogte van structuren (bollen) falen aan, ter hoogte van de waterkant (dunne lijn) een maximum debiet > 50 l/m/s en ter hoogte van de zeewering (dikke lijn) een debiet > 1 l/m/s.	50
Figuur 3-22: Resultaten van de overstromingsberekening bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3): overstromingsdiepte (m).	51
Figuur 3-23: Resultaten van de overstromingsberekening bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3): horizontale stroomsnelheid (m/s).	51
Figuur 3-24: Resultaten van de overstromingsberekening bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3): stijgsnelheid (m/h).	52
Figuur 3-25: Schade door overstromingsdiepte in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).	54
Figuur 3-26: Additionele schade in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).	54
Figuur 3-27: Slachtoffers in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).	55
Figuur 4-1: Berekende overstromingsdiepte (m) in geval van een storm in het worst case klimaatscenario (stormwaterpeil +10.40 m TAW) uit (Van der Biest <i>et al.</i> , 2009).	58
Figuur 4-2: Berekende overstromingsdiepte (m) in geval van de +8 m TAW storm uit (Parrado <i>et al.</i> , 2017).	59



# 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 kustsysteem 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 uitvoerbare 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 vormt daar onderdeel van en biedt meer achtergrond in de overstromingsmodellering en schadeberekening van de referentiesituatie.

## 1.2 Doel van het rapport

Dit rapport presenteert de resultaten van de overstromingsmodellering en de berekeningen van schade en slachtoffers in de referentiesituatie. De referentiesituatie betekent daarbij de situatie na uitvoering van het Masterplan Kustveiligheid, maar zonder Kustvisie maatregelen.

De modellering en berekening in dit onderzoek zijn gebaseerd op de methodologie ontwikkeld in het kader van Masterplan Kustveiligheid. De volledige methodologie die daarin wordt toegepast is echter te gedetailleerd voor dit strategisch onderzoek en in samenwerking met het Waterbouwkundig Laboratorium is daarom een vereenvoudigde aanpak uitgewerkt. Vertrekkende van de beschikbare modelberekeningen in het kader van de veiligheidsscan binnen Kustvisie (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a) zijn randvoorwaarden voor de overstromingsberekening bepaald. Vervolgens zijn deze overstromingsberekeningen uitgevoerd door het Waterbouwkundig Laboratorium, waarna op basis van deze resultaten met het LATIS model schade en slachtoffers zijn bepaald.

Voor deze studie zijn drie specifieke situaties doorgerekend vertrekkende van de referentiesituatie waarbij een 1000-jarige storm voorkomt bij +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging. Het gaat dus niet om een volledige risicoanalyse, maar de resultaten in dit rapport geven inzicht in de uitgestrektheid van het impactgebied en de schade en slachtoffers voor de referentiesituatie en onderbouwen daarmee de nut en noodzaak van Kustvisie.

### **1.3 Leeswijzer**

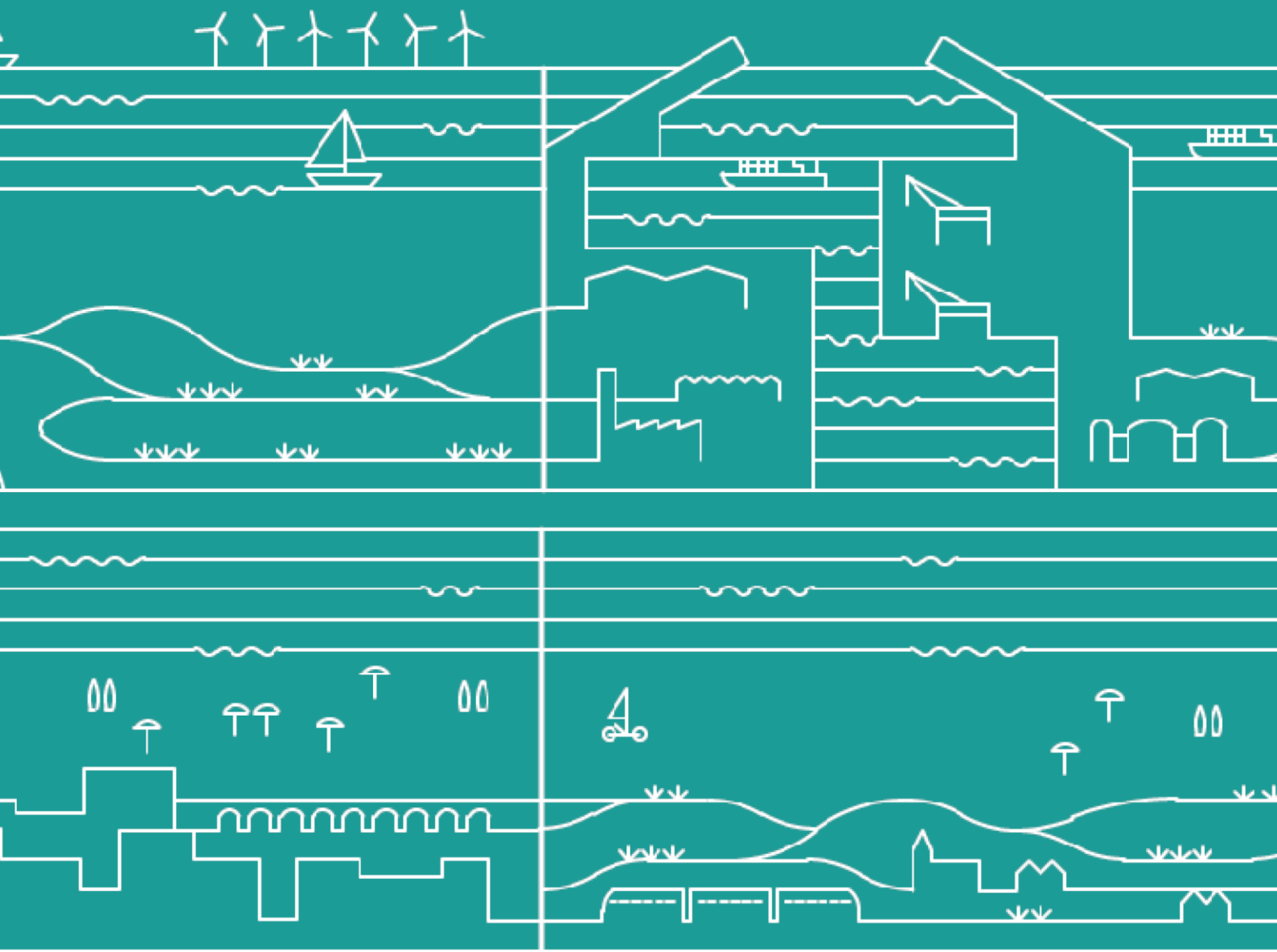
Hoofdstuk 2 geeft de methodologie weer voor het bepalen van de randvoorwaarden van de overstromingsmodellering, de overstromingsmodellering en de berekening van schade en slachtoffers.

De resultaten worden toegelicht in Hoofdstuk 3 voor de drie zeespiegelstijgingsniveaus van +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging. Eerst worden de randvoorwaarden getoond, daarna de resultaten van de overstromingsberekening en tot slot de resultaten van de schadeberekening.

In Hoofdstuk 4 wordt, voor zover mogelijk, een vergelijking gemaakt met andere overstromingsmodelleringen van de Vlaamse kust.

Hoofdstuk 5 geeft een algemene samenvatting van de rekenresultaten.





# Methodologie

# 2 Methodologie

## 2.1 Randvoorwaarden overstromingsmodel

Randvoorwaarden voor het overstromingsmodel zijn bepaald voor de volledige Vlaamse kust. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de zeekering ter hoogte van de strandzones (sectie 2.1.1) en de havens (sectie 2.1.2).

### 2.1.1 Zeekering ter hoogte van strandzones

De randvoorwaarden voor het overstromingsmodel aan de zeekering zijn gebaseerd op de veiligheidsscan berekeningen die zijn uitgevoerd binnen Kustvisie (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a). De resultaten bij zeespiegelstijgingsniveau's van +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging zijn gebruikt om te bepalen of de zeekering faalt en overstroming vanuit zee kan optreden doorheen de ontstane bres. Voor wat betreft de grootte van de ontstane bres wordt gebruik gemaakt van gegevens uit voorgaande studies, zoals CLIMAR (Van der Biest *et al.*, 2009), en zijn breedte en hoogte van het maaiveld voor nieuwe bressen bepaald uit het referentie-hoogtemodel.

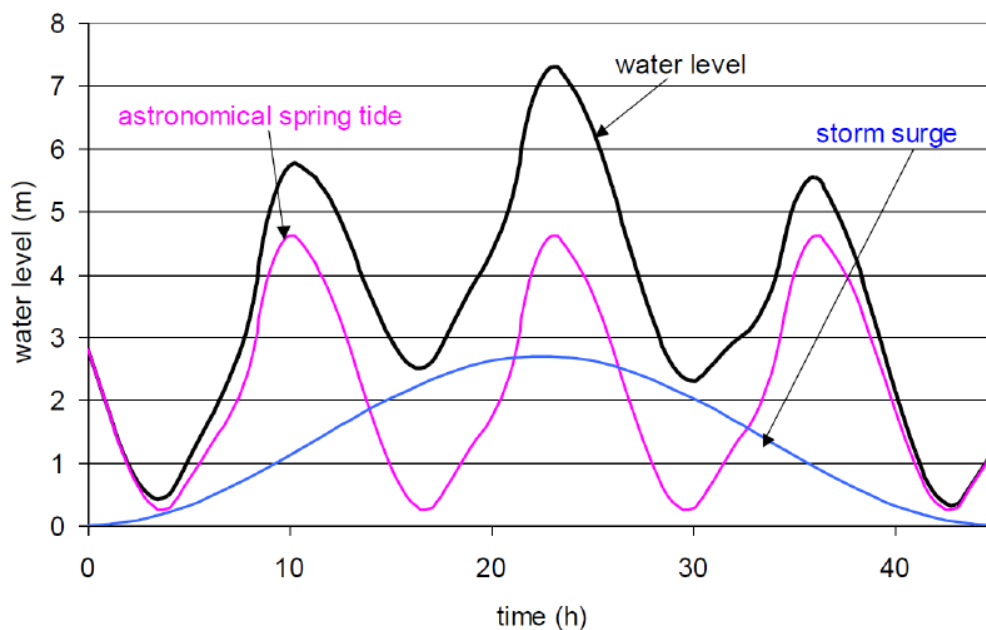
Bij de bepaling van de bresgeometrie is rekening gehouden met het volgende (cf CLIMAR):

- De initiële breedte van een bres is afhankelijk van het faalmechanisme. In het geval van falen door overslag is deze breedte gelijk aan de onbebouwde breedte van de sectie. Bij falen door andere mechanismen is de initiële breedte van de bres gelijk aan de breedte (loodrecht op de kustlijn) van de zeekering.
- De maximale breedte van een bres wordt beperkt tot de onbebouwde breedte van de sectie. Deze beperking is gebaseerd op de veronderstelling dat de bebouwing op de zeedijk niet zal instorten en dat het puin van gebouwen die toch zouden instorten een eventuele bres terug zal afsluiten.
- Het initiële bodempeil van een bres wordt gelijkgesteld aan het stilwaterpeil op het tijdstip van bresvorming, verminderd met 20 cm. De bresgroei (dieptegroei en breedtegroei) wordt gesimuleerd door middel van het erosie-gebaseerde bresgroeimodel. De parameters van dit model werden gekalibreerd door vergelijking met de empirische Verheij-van der Knaap vergelijking.
- Het minimale bodempeil van een bres wordt beperkt tot het maaiveldpeil van de kustvlakte aan de landzijde van de zeekering. De eventuele vorming van een wiel of een erosiegeul wordt dus niet in rekening gebracht.

De methodiek van de veiligheidsscan volgt daarbij de methodologie die is voorgesteld in Suzuki *et al.* (2016), hoewel vereenvoudigd (IMDC, 2019). Een XBeach morfodynamische modellering (Roelvink *et al.*, 2009) wordt daarbij toegepast om strand- en duinerosie te berekenen voor een maatgevende storm met terugkeerperiode van 1000 jaar met behulp van tijdsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden (Figuur 2-1). Daarnaast wordt een SWASH-modellering (Zijlema *et al.*, 2011) uitgevoerd om de gemiddelde overslag ter hoogte van de veiligheidslijn voor een storm met dezelfde retourperiode in te schatten, met behulp van constante hydraulische randvoorwaarden tijdens de piek van de storm.

Voor deze oefening is de 67 km lange kust onderverdeeld in 255 kustsecties, gedefinieerd binnen het Masterplan Kustveiligheid. Voor elk van deze 255 secties werden kritische profielen gedefinieerd, waarbij de bovengenoemde aanpak werd toegepast.

De 255 secties zijn onder te verdelen in duinen en dijken. De bepaling van de randvoorwaarden voor het overstromingsmodel is verschillend voor deze twee gevallen. De methode voor duinen wordt toegelicht in paragraaf 2.1.1.1, die voor dijken in paragraaf 2.1.1.2.



Figuur 2-1: Verloop waterstand (water level) tijdens maatgevende storm: het astronomisch getij (astronomical spring tide) + stormopzet (storm surge) (Suzuki *et al.*, 2016). Symmetrisch profiel.

### 2.1.1.1 Duinen

Bij secties waar de zeewering bestaat uit duinen wordt aangenomen dat overstroming vanuit zee kan voorkomen wanneer er bresvorming van deze duinen voorkomt. Er wordt verder aangenomen dat eventuele golfoverslag over de duinen geen risico vormt voor de grootschalige overstroming die in deze studie wordt berekend.

Twee criteria zijn gedefinieerd om een bres te bepalen, namelijk wanneer de vrijboord van het duin (de resterende hoogte van het duin boven het waterpeil) tijdens de storm te klein wordt of wanneer het zandvolume in de duin tijdens de storm onvoldoende wordt om bresvorming te vermijden.

Het eerste criterium is gebaseerd op de variatie in tijd van het duinvrijboord ( $R_c$ , de vrije hoogte van het resterende duin boven het waterpeil). Wanneer de vrijboordwaarde gedurende de storm kleiner wordt dan 1 m, wordt aangenomen dat er een bres ontstaat. Het tijdstip van bresvorming komt daarbij overeen met het eerste tijdstip waarop de vrijboord lager wordt dan 1 m.

Het tweede criterium is gebaseerd op het zandvolume in de duin. Om te vermijden dat er bresvorming kan ontstaan moet er een minimaal zandvolume boven het waterpeil aanwezig zijn in de duin. Gelijkaardig aan de veiligheidsscan (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a), is het minimaal volume gedefinieerd als het grensvolume ( $V_{grens}$ ) (Suzuki *et al.*, 2016). Dit grensvolume is vergeleken met het resterende duinvolume boven het tijdsvariërende waterpeil ( $V_{rest}$ ) (inclusief een toeslag van 25 %). Dit is gecombineerd in de duin-ratio:

$$\text{Duin ratio: } (V_{rest} - 0.25 \cdot V_{eroded}) / V_{grens}$$

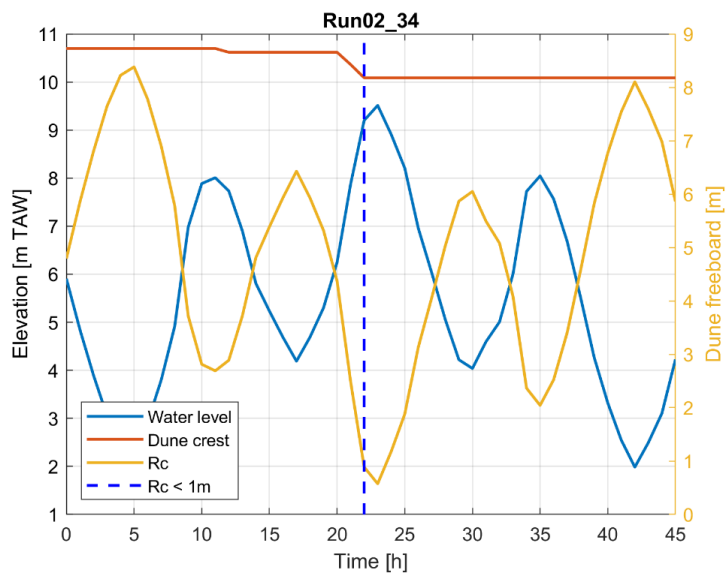
Wanneer de duin ratio kleiner wordt dan 1, wordt een bresvorming verondersteld. Het tijdstip van deze bresvorming wordt gelijk genomen aan het moment in de tijdreeks wanneer de duin ratio kleiner wordt dan 1.

De twee criteria zijn geëvalueerd voor alle duin secties van de 255 kustsecties voor +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging. Indien het profiel uit de sectie faalt is het faalmechanisme gelijk genomen aan datgene wat eerst voorkomt. Gebaseerd op de twee criteria zijn de volgende categorieën gedefinieerd in relatie tot het faalmechanisme:

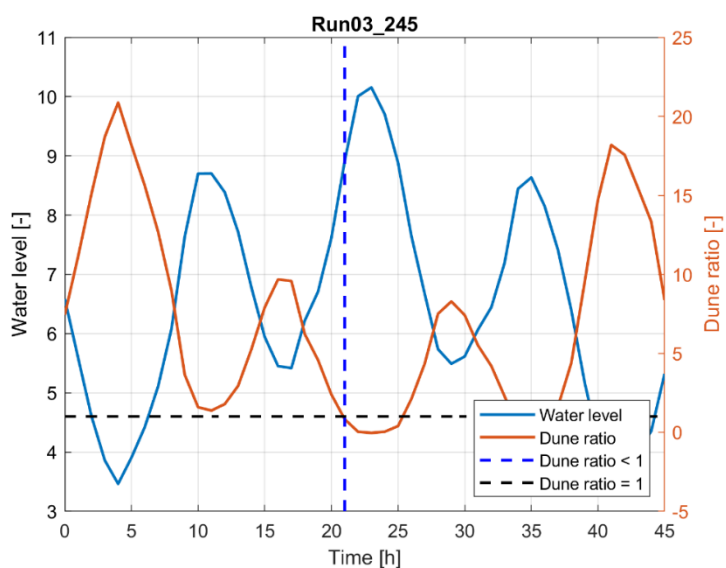
1. Veilige duin. Geen bresvorming tijdens de maatgevende storm. Geen overstroming vanuit zee in de sectie.
2. Bresvorming door beperkte vrijboord.  $R_c < 1$  m. Overstroming vanuit zee.
3. Bresvorming door beperkt duinvolume. Duin ratio  $< 1$ . Overstroming vanuit zee.
4. Bresvorming door tegelijkertijd zowel beperkte vrijboord en beperkt duinvolume. Overstroming vanuit zee.

Er wordt opgemerkt dat voor een aantal secties geen Xbeach modellering is uitgevoerd in de veiligheidsscan (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a) gezien deze reeds zonder modellering als onveilig konden worden beschouwd omdat de vrijboord van de duin reeds zonder erosie tijdens de storm lager is dan 1 m boven het stormwaterpeil. In deze gevallen is dezelfde oefening toegepast (evalueren vrijboord en duin ratio) op basis van het initiële duinprofiel in plaats van het tijdsvariërende eroderende profiel zoals in de meeste gevallen. Dit kan leiden tot een verschil in tijdstip van bresvorming.

Een voorbeeld van een tijdreeks van een duin waarin er risico is op bresvorming door een beperkte vrijboord (categorie 2) wordt getoond in Figuur 2-2. Een duin met risico op bresvorming door een te beperkt resterend zandvolume boven het waterpeil (duin ratio) wordt getoond in Figuur 2-3.



Figuur 2-2: Voorbeeld van een tijdreeks met variatie vrijboord duin ( $R_c$ , gele lijn) tijdens de storm en moment van bresvorming (blauwe stippellijn op 22 uur) op basis van een symmetrisch stormprofiel (piek op 22 uur). Sectie 34, +2 m zeespiegelstijging.

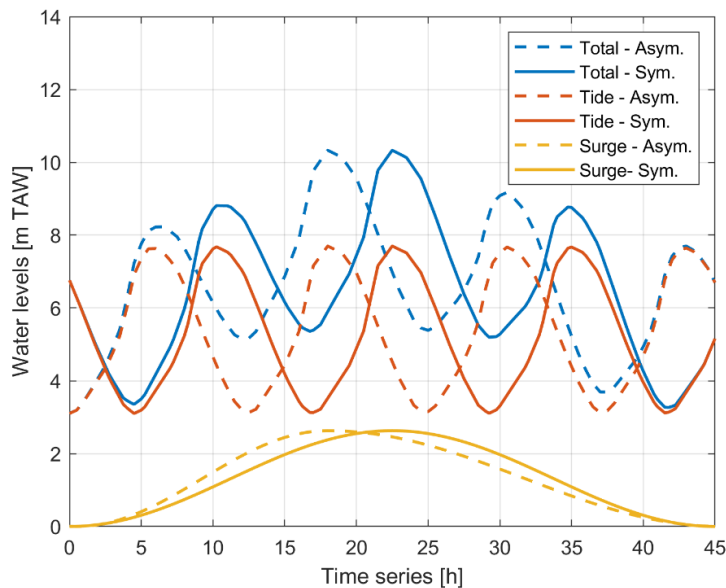


Figuur 2-3: Voorbeeld van tijdreeks met variatie duin ratio (rode lijn) tijdens de storm en moment van bresvorming (blauwe stippellijn op 21 uur) op basis van een symmetrisch stormprofiel (piek op 22 uur). Sectie 245, +3 m zeespiegelstijging.

Om de analyse af te stemmen op de input van het Mike 21 overstromingsmodel, werd na de bovengenoemde analyse besloten dat het gebruik van het asymmetrische stormprofiel in plaats van een symmetrisch stormprofiel nodig zou zijn. Dit asymmetrische stormprofiel wordt voorgesteld in de nieuwe methodologie voor kustveiligheid die in 2022 langs de hele kust wordt toegepast.

De belangrijkste verschillen tussen de symmetrische en asymmetrische profielen is een tijdsverschuiving van de piek van de storm (4,5 uur eerder voor het asymmetrische profiel), Figuur 2-4, en de asymmetrische vorm van de stormvloedcomponent. De piek ligt nu dus op 18 uur in plaats van op 22,5 uur (de totale duur van de storm is 45 uur). Een vergelijking van beide stormtijdseries wordt getoond in Figuur 2-4.

De tijdstippen van bresvorming zoals berekend op basis van een symmetrisch profiel zijn geconcentreerd rond de hoge waterpieken, in hoofdzaak rond de tweede piek wanneer de stormvloed het hoogst is (22,5 uur). Daarom kan worden aangenomen dat als het asymmetrische profiel in de berekeningen was gebruikt, er meestal nog steeds bresvorming zou optreden bij de hoge waterpieken. Alle berekende momenten van bresvorming zijn dus 4,5 uur eerder in tijd opgenomen in overeenstemming met de tijdreeks van het asymmetrische stormprofiel.



Figuur 2-4: Vergelijking van het symmetrische en asymmetrische stormprofiel.

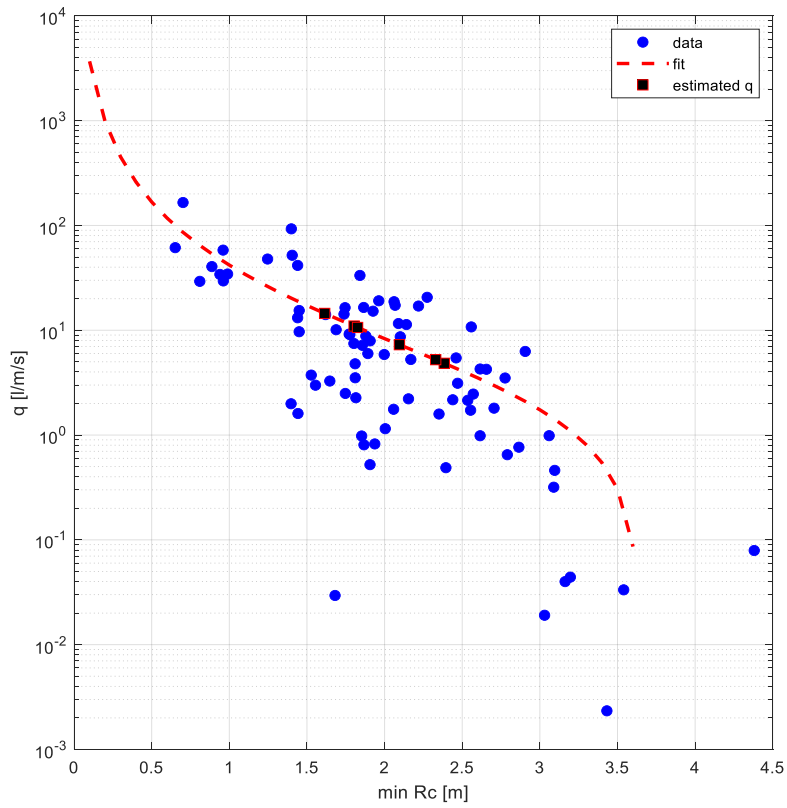
### 2.1.1.2 Dijken

Bij secties waar de zeewering bestaat uit dijken wordt aangenomen dat overstroming vanuit zee kan voorkomen wanneer er rechtstreekse overstroming is doordat de hoogte van de dijk lager is dan het waterpeil (negatieve vrijboord,  $R_c < 0$  m) of wanneer de golfoverslag hoger is dan 100 l/m/s waardoor er een risico is dat de dijk faalt en bresvorming kan optreden gelijkaardig aan (Verwaest *et al.*, 2008). Overslagdebieten lager dan 100 l/m/s worden niet meegenomen in de overstromingsberekening gezien wordt aangenomen dat deze geen risico vormen voor de grootschalige overstroming die in deze studie wordt berekend.

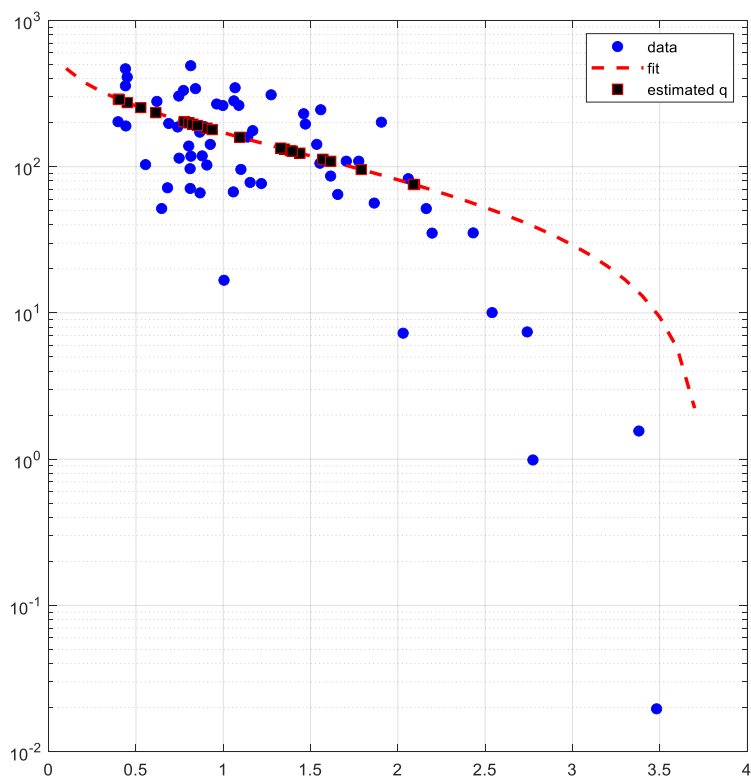
Er wordt onderscheid gemaakt in drie faalmechanismen voor de dijken:

1. Veilige dijk. Geen falen tijdens de maatgevende storm, gemiddelde overslag is kleiner dan 1 l/m/s en kruin van de dijk is hoger dan stormwaterpeil. Geen overstroming vanuit zee in de sectie.
2. Overslag. Gemiddelde overslag tussen 1 l/m/s en 100 l/m/s en kruin van de dijk is hoger dan stormwaterpeil. Geen grootschalige overstroming vanuit zee in de sectie.
3. Overstroming. Gemiddelde overslag groter dan 100 l/m/s of het waterpeil tijdens de maatgevende storm wordt op een bepaald moment hoger dan de kruin van de dijk.

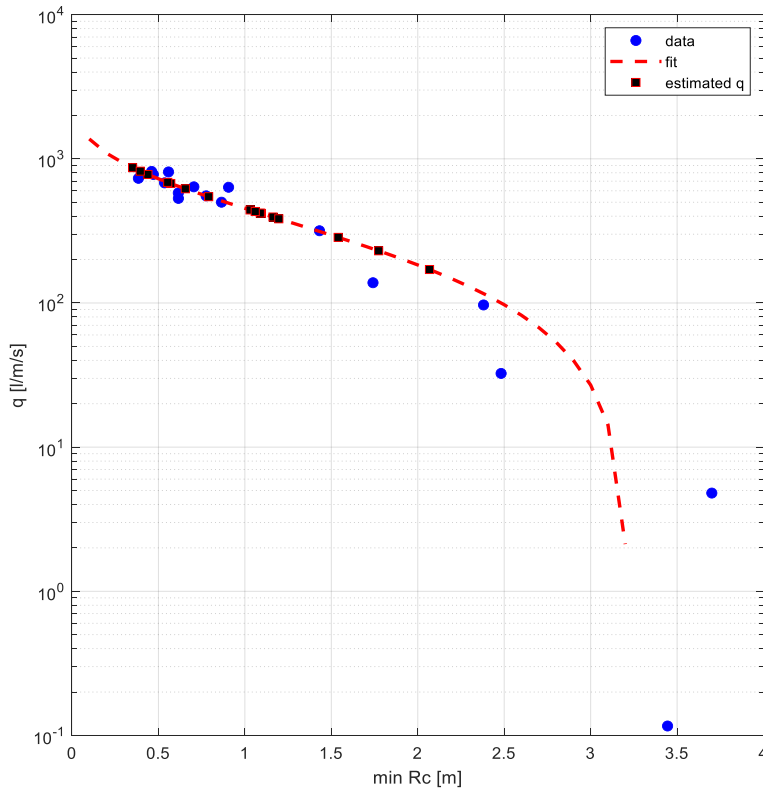
De gemiddelde overslagdebieten zijn gebaseerd op de SWASH berekeningen als onderdeel van de veiligheidsscan oefening (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a). In een aantal gevallen zijn geen SWASH berekeningen uitgevoerd, bijvoorbeeld wanneer bij +2 m zeespiegelstijging het overslagdebiet reeds groter was dan het veiligheids criterium van 1 l/m/s is bij +3 m zeespiegelstijging automatisch een onveilige sectie aangenomen zonder bijkomende berekening. In deze gevallen zonder SWASH resultaat is de gemiddelde overslag bepaald aan de hand van een exponentiële fit tussen vrijboord dijk ( $R_c$  (m)) en gemiddelde overslagdebiet ( $q$  (l/m/s)). Deze fit is gebaseerd op de beschikbare rekenresultaten en uitgevoerd per zeespiegelstijgingsniveau van +1 m, +2 m en +3 m (Figuur 2-5 tot Figuur 2-7).



Figuur 2-5 : Overslagdebiet (q) als functie van minimum vrijboord (Rc) voor +1 m zeespiegelstijging.

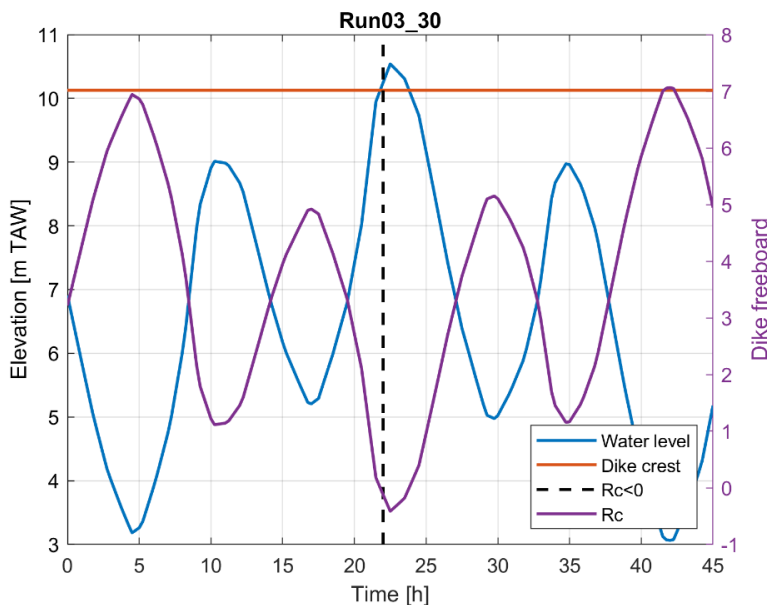


Figuur 2-6 : Overslagdebiet (q) als functie van minimum vrijboord (Rc) voor +2 m zeespiegelstijging.



Figuur 2-7 : Overslagdebiet ( $q$ ) als functie van minimum vrijboord ( $R_c$ ) voor +3 m zeespiegelstijging.

Voor die gevallen waar rechtstreekse overstrooming voorkomt ( $R_c < 0$  m), wordt het tijdstip van falen gelijk genomen aan het eerste moment in de tijdreeks waarop de waterstand boven de kruin van de dijk uitkomt, zie bijvoorbeeld Figuur 2-8. Voor de gevallen waarbij falen is bepaald door het overslagdebiet wordt het tijdstip van falen gelijk verondersteld als het piekmoment van de storm.



Figuur 2-8 : Voorbeeld van tijdreeks met variatie vrijboord (paarse lijn) tijdens de storm en moment van falen (zwarte stippellijn op 22 uur) op basis van een symmetrisch stormprofiel (piek op 22 uur). Sectie 30, +3 m zeespiegelstijging.

Gelijkaardig aan de duinen (sectie 2.1.1.1) is er een aanpassing van de tijdstippen voor falen uitgevoerd om in lijn te zijn met het asymmetrische stormprofiel dat in de overstroomingsberekening wordt toegepast (Figuur 2-4). Alle berekende momenten van bresvorming zijn dus 4,5 uur eerder in tijd opgenomen in overeenstemming met de tijdreeks van het asymmetrische stormprofiel.

## 2.1.2 Havens

De havens zijn een van de zwakste schakels aan de Vlaamse kust en zijn bijgevolg een belangrijk onderdeel van de overstromingsberekeningen. Daarvoor zijn overloop- en overslagtijdreeksen langs de perimeters van de havens van Zeebrugge, Blankenberge, Oostende en Nieuwpoort bepaald en de momenten van falen van structuren (stuwen en sluizen).

De overslag- en overloopberekening is uitgevoerd op basis van de Europese Overtopping Manual (EurOtop, 2018) en onderliggende documenten. Overloop begint op te treden wanneer de vrijboord van de kering bijna nul wordt. Beide verschijnselen, overslag en overloop, komen voor bij bepaalde ranges van vrijboord waarbij overslag dominant is bij grotere vrijboord en overflow dominant in het andere geval.

De geometrieën van de bestudeerde dwarsdoorsneden variëren van verticale kademuren tot dijken en stortsteenbekledingen. Reductiefactoren voor golfrichting, aanwezigheid van een stormwand of ruwheid zijn in de berekening meegenomen gelijkaardig aan de aanpak voor ontwerp maatregelen havens (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022b). In dit geval zijn echter geen maatregelen ontworpen, maar de debieten bepaald uitgaande van de referentiesituatie.

De methodologie die wordt gebruikt om overslagdebieten te berekenen, wordt uitgelegd in (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022b). Met betrekking tot overloop wordt formule 5.20 uit de Europese Overtopping Manual (EurOtop, 2018) gebruikt. Er wordt daarbij geen onderscheid gemaakt tussen verschillende type doorsnedes en geometrieën omdat er geen geschikte formule is voor alle typen en geometrieën. Er is bijvoorbeeld geen specifieke overloopformule voor verticale en steile wanden.

De overslag- en overlooptijdreeksen zijn berekend voor een 1000-jarige storm met een verloop van 45 uur onder de huidige omstandigheden en voor +1m, +2m en +3m zeespiegelstijging. De tijdreeksen zijn opgesteld voor geselecteerde zones langs het havenbekken, aangeleverd door het Waterbouwkundig Laboratorium, die als input dienden voor het overstromingsmodel.

De piekwaarden van de offshore significante golfhogte, periode, golfrichting en waterstanden zijn zoals vermeld in het hydraulisch randvoorwaardenboek en de randvoorwaardennota (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022c). Golfpenetratie en lokaal gegenereerde windgolffarakteristieken zijn gebaseerd op bestaande golfmodellen binnen de Vlaamse havens zoals uitgelegd in (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022b). Het stormprofiel voor waterstanden en golven is gebaseerd op een asymmetrisch profiel over de 45-uurs storm zoals geïllustreerd in Figuur 2-4, en voor de haven van Nieuwpoort in Figuur 2-9.

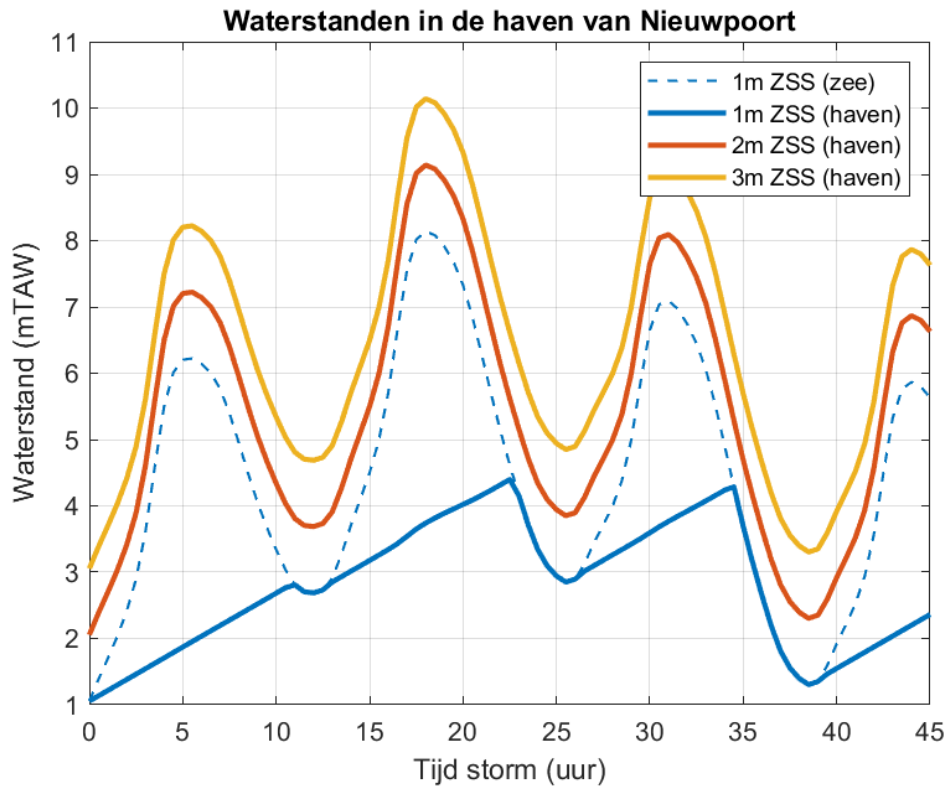
In het geval van de haven van Nieuwpoort is er een verschil tussen de waterstanden binnen en buiten door de aanwezigheid van de stormvloedkering bij de ingang van de haven. Dit verschil wordt meegenomen in de berekening. De belangrijkste aanname was dat de huidige stormvloedkering volledig functioneel blijft bij +1m zeespiegelstijging waardoor het waterpeil in de haven een ander verloop volgt dan de variatie op zee. Wanneer de haveningang is afgesloten voor de zee, is de bepalende factor voor het optreden van overslag of overloop langs de kademuren het waterpeil in het havenbassin. Dit waterniveau is afhankelijk van het ontwerp en de werking van de stormvloedkering, namelijk de kruinhoogte van de barrière die de golfoverslag over de structuur beïnvloedt, en de sluitingsperiode die bepaalt hoeveel waterafvoer uit het achterland in het bassin moet worden opgeslagen terwijl de barrière gesloten blijft. De stormvloedkering is echter niet ontworpen voor hogere zeespiegelstijgingen en er wordt aangenomen dat deze in dat geval faalt en de haven open is waardoor het waterpeil in de haven het waterpeil op zee volgt. Dit leidt tot de variatie in waterstanden voor de verschillende zeespiegelstijgingniveaus in Nieuwpoort zoals geïllustreerd in Figuur 2-9, met een voorbeeld van de tijdreeks voor overloop en overslag bij +3 m zeespiegelstijging in Figuur 2-10.

In dit onderzoek wordt in Nieuwpoort tot +1 m zeespiegelstijging uitgegaan van het volgende:

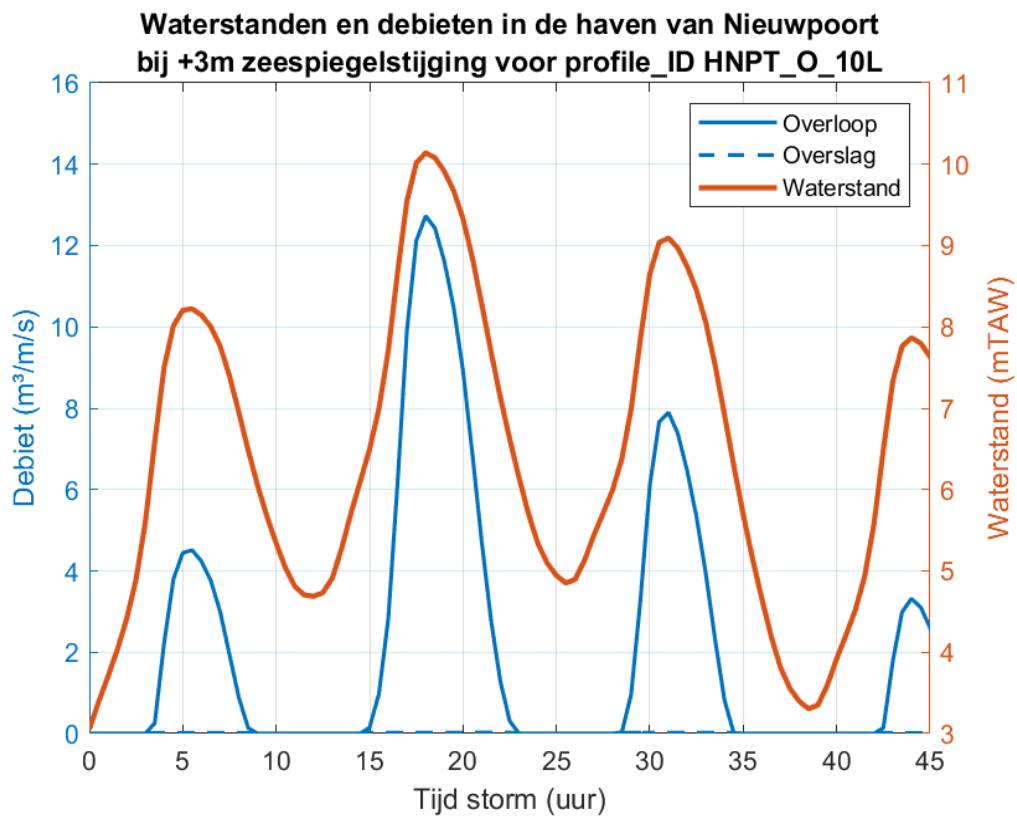
- Variërende golftransmissie over de top van de barrière op basis van het stormprofiel, wat bijdraagt aan enige toename van het watervolume dat in het bassin moet worden opgeslagen tijdens de periode dat het bekken gesloten is, en ook enige golfbeweging in het bekken veroorzaakt die bovenop lokaal gegenereerde windgolven bijdraagt;
- Een bovenafvoer van 35m<sup>3</sup>/s, gelijkaardig aan de ontwerpwaarde voor de stormvloedkering. Deze bovenafvoer is dominant in de stijging van het waterpeil in het bassin wanneer de kering is gesloten;
- Mogelijkheid tot tussentijdse gedeeltelijke lozing van watervolumes die in het bassin zijn opgeslagen tijdens de stormduur van 45 uur.

Tot slot zijn er ook structuren zoals uitwateringsconstructies, stuwen en sluizen aanwezig in de havens. Wanneer de kleppen of deuren van deze constructies falen ontstaat een bres waardoor overstroming vanuit zee mogelijk is. Het moment van falen van deze constructies is gelijk genomen aan het moment waarop het waterpeil tijdens de storm de kruinhoogte van de lokale structuur bereikt. Indien dit niet gebeurt tijdens de storm wordt aangenomen dat deze structuur niet zal falen. In de methodiek overstromingsmodellering wordt daarnaast nog rekening gehouden met de optredende golven voor de structuur. Dit betekent dat structuren in dat geval sneller zullen falen. Een overzicht van de beschouwde structuren wordt weergegeven in Tabel 2-1. In Zeebrugge is de nieuwe zeesluis beslist beleid, maar in lijn met het huidige overstromingsmodel is de Visartsluis beschouwd.





Figuur 2-9: Voorbeeld van de tijdreeks met waterstandsvariatie tijdens de storm (asymmetrisch stormprofiel) in Nieuwpoort voor +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging. De stormvloedkering kan een zeespiegelstijging van +1 m weerstaan en beïnvloedt dan het waterpeil in de haven.



Figuur 2-10: Voorbeeld van de tijdreeks van waterstanden en debieten over de zeewering tijdens de 1000-jarige storm bij +3 m zeespiegelstijging voor een specifieke locatie in Nieuwpoort.

Tabel 2-1 : Overzicht van beschouwde structuren en kruinpeilen (m TAW).

Haven	Structuur	Kruinpeil (mTAW)
Nieuwpoort	Stormvloedkering (in aanbouw)	8.50
	Stuw Nieuw Bedelf	6.83
	Gravensluis	7.19
	Stuw Kreek van Nieuwendamme	6.89
	Ieperstuw	6.84
	Iepersluis	7.05
	Stuw Veurne Ambacht	6.87
	Veurnesluis	7.06
	Stuw kanaal Nieuwpoort – Duinkerke	6.78
	Kattesas	7.16
	De Piete	7.00
Oostende	Mercatorsluis	7.00
	Demeysluis	8.00
	Sas-slijkens	6.58
	Sint-Maarten sas	7.00
	Spuisluis	6.90
	Visserijsluis	6.91
Blankenberge	Uitwatering Blankenbergse Vaart	7.00
Zeebrugge	Pierre Vandammesluis	9.00
	Visartsluis	6.80
	Uitwateringskoker Leopoldkanaal	8.00

## 2.2 Overstromingsmodellering

De hydraulische modellering van de overstroming in de kustvlakte bij het optreden van de extreme stormvloed werd door het Waterbouwkundig Laboratorium uitgevoerd met de commercieel beschikbare versie van het softwarepakket DHI MIKE Flood versie 2021<sup>1</sup>. Deze software vormt een koppeling tussen de pakketten MIKE11 en MIKE21. Het 1D model MIKE11 wordt gebruikt voor het modelleren van de overslag en de stroming doorheen bressen en sifons, terwijl het 2DH model MIKE21 gebruikt wordt voor het modelleren van de overstroming in de kustvlakte op een raster van 20x20 m.

In wat volgt worden beide deelaspecten van het overstromingsmodel nader omschreven.

### 2.2.1 1D model Mike 11

#### 2.2.1.1 Bressen

De bressen worden gemodelleerd door middel van een dijkbreuk structuur ("dam break"). Voor elke bres wordt een afzonderlijke structuur gedefinieerd. Elke structuur wordt ingebed in een kort (50 m), breed (300 m) kanaal met een lage ruwheid. De locatie van de bressen, het tijdstip van bresvorming en de geometrie volgen uit de analyse van het faalgedrag van de zeewering (sectie 2.1).

De stroming doorheen een bres wordt berekend door middel van standaard stromingsvergelijkingen en ladingsverliescoëfficiënten. Aan de zeezijde van de breskanalen wordt een tijdsafhankelijk waterpeil opgelegd. De landzijde wordt gekoppeld aan het 2DH model van de kustvlakte.

#### 2.2.1.2 Golfoverslag

Overslag wordt gemodelleerd als stroming over een vaste drempel ("weir"). Voor elke sectie waarin overslag optreedt, wordt een afzonderlijke drempel gedefinieerd. Elke drempel wordt ingebed in een kort (50 m), breed (300 m) kanaal met een lage ruwheid. De drempels vormen een vereenvoudigde, conceptuele weergave van de zeewering waarover de golfoverslag optreedt. Ze zijn 300 m breed en V-vormig, met een bodempeil dat lineair varieert tussen 11 m TAW en 12 m TAW.

De stroming over de drempel wordt berekend door middel van de vergelijkingen voor een brede drempel ("broad crested weir") en de standaard ladingsverliescoëfficiënten. Aan de zeezijde van de overslagkanalen wordt een tijdsafhankelijk debiet opgelegd. De landzijde wordt gekoppeld aan het 2D model van de kustvlakte.

#### 2.2.1.3 Sifons

Sifons worden gemodelleerd door middel van een duiker ("culvert"). Voor elke sifon wordt een afzonderlijke structuur gedefinieerd, bestaande uit één of meerdere parallelle leidingen. Elke duiker wordt ingebed in een smal (20 m) kanaal met een lage ruwheid, waarvan de lengte overeenstemt met die van de leidingen. De afmetingen van de leidingen worden in de mate van het mogelijke afgeleid uit bouwkundige plannen. Wanneer geen plannen beschikbaar zijn, worden ze geschat op basis van gegevens van naburige, vermoedelijk gelijkaardige, sifons. Aan de leidingen wordt een ruwheid toegekend die representatief is voor licht verweerd beton.

De stroming doorheen de duikers wordt berekend door middel van de standaard ladingsverliescoëfficiënten. Beide zijden van de sifonkanalen worden gekoppeld aan het 2D model van de kustvlakte.

### 2.2.2 2DH model Mike21

De overstroming in de kustvlakte wordt gemodelleerd in het 2DH model Mike21, dat met dieptegemiddelde waarden werkt. De vergelijkingen worden opgelost op een rooster van celafmetingen 20x20 m.

#### 2.2.2.1 Hoogtemodel

Aan de hand van het DHM-Vlaanderen (versie 2005, resolutie 5x5 m, zonder gebouwen) werd een hoogtemodel voor de volledige kustvlakte opgebouwd. De hoogtegegevens met een resolutie van 5x5 m werden geaggregeerd tot een vereenvoudigd hoogtemodel met een resolutie van 20x20 m. Hierbij werd aan elke cel van het hoogtemodel een hoogte toegekend die overeenstemt met de gemiddelde hoogte van de vier samenstellende cellen van het DHM-Vlaanderen. Het hoogtemodel werd opgemaakt in de coördinatenstelsels Lambert 72 (ligging) en TAW (hoogte).

In sommige delen van de kustvlakte bevinden zich lijnvormige structuren (dijken, wegbermen, spoorwegbermen, ...) die een waterkerende invloed kunnen hebben. Om te vermijden dat door aggregatie van de hoogtegegevens deze structuren afgevlakt zouden worden (met een onrealistisch stromingspatroon als gevolg) werden een aantal manuele correcties uitgevoerd om de kruinpeilen van deze structuren te herstellen.

---

<sup>1</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-flood>

### 2.2.2.2 Bodemruwheid

Het bodemgebruik in de kustvlakte werd afgeleid uit het databestand Corine Land Cover 2000. Aan elke bodemgebruiksklasse werd vervolgens een ruwheidswaarde toegekend. De bodemgebruiksklassen en de bijhorende ruwheden worden vermeld in onderstaande tabel (Strickler's  $k = 1/\text{Manning's } n$ ).

Tabel 2-2 : Ruwheidscoëfficiënten voor de verschillende types bodemgebruik

Bodemgebruik	Ruwheidscoëfficiënt (Strickler)
Bebouwing	10
Industrie/infrastructuur	15
Recreatie	20
Landbouw	25
Bos	10
Natuur	25
Strand/duin	30
Aquatische natuur	30
Water	35

### 2.2.2.3 Turbulente viscositeit

Turbulente viscositeit wordt berekend op basis van fluxen in combinatie met een constante turbulente viscositeitscoëfficiënt. De waarde van deze viscositeitscoëfficiënt wordt ruw begroot op  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 2.2.2.4 Windwrijving

De invloed van windwrijving op het wateroppervlak in de kustvlakte wordt in beperkte mate in rekening gebracht. De windwrijving wordt berekend op basis van de standaard vergelijkingen voor windwrijving boven een open wateroppervlak. De standaard windwrijvingscoëfficiënt (0.0026) is bedoeld voor krachtige winden boven open zee. In geval van overstroming van een landoppervlak zal een deel van het wateroppervlak afgeschermd worden door niet overstroomde landschapselementen en vormt het gebruik van de standaardwaarde ongetwijfeld een overschatting van de werkelijke invloed van de windwrijving. Op basis van literatuurwaarden werd de windwrijvingscoëfficiënt verlaagd tot 0.0008.

## 2.2.3 Modelkoppelingen

### 2.2.3.1 Bressen

De landzijde van de 1D kanalen waarin de bressen gelegen zijn, wordt gekoppeld aan een aantal cellen van het 2D model van de kustvlakte. Deze koppeling gebeurt aan de landzijde van de voet van de zeewering. Het aantal cellen per koppeling wordt bepaald door de maximale breedte van de bres te delen door de afmetingen van de cellen van het hoogtemodel (20 m). De individuele cellen worden geselecteerd op basis van hun ligging (binnen de beschouwde sectie) en hun maaiveldpeil (zo laag mogelijk).

### 2.2.3.2 Golfoverslag

De landzijde van de 1D kanalen waarin de overslagdrempels gelegen zijn, wordt eveneens gekoppeld aan een aantal cellen van het 2D model van de kustvlakte. Ditmaal gebeurt de koppeling aan de landzijde van de kruin van de zeewering. Het aantal cellen per koppeling wordt bepaald door de totale overslagbreedte te delen door de afmetingen van de cellen van het hoogtemodel (20 m). De individuele cellen worden opnieuw geselecteerd op basis van hun ligging (binnen de beschouwde sectie en zo mogelijk in de onbebouwde delen) en hun maaiveldpeil (zo hoog mogelijk).

### 2.2.3.3 Sifons

Beide zijden van de 1D kanalen waarin de sifons gelegen zijn, worden gekoppeld aan één enkele cel van het 2D model van de kustvlakte. De cellen worden geselecteerd op basis van hun ligging (zo dicht mogelijk bij de werkelijke ligging van de uiteinden van de sifon) en hun maaiveldpeil (zo laag mogelijk).

## 2.3 Schadeberekening

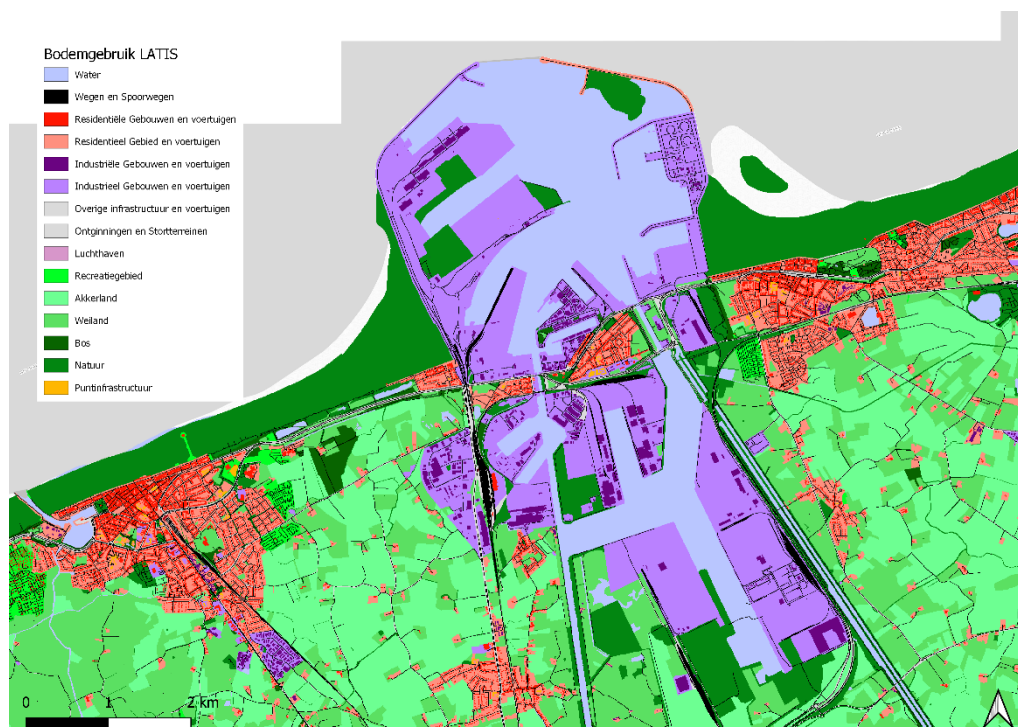
De schade- en slachtofferberekening wordt uitgevoerd met de LATIS tool versie 4.1 ontwikkeld door het Waterbouwkundig Laboratorium in samenwerking met Universiteit Gent. De schade bij een overstroming wordt bepaald door de waterdiepte en de maximale schade. Waarbij de maximale schade dan weer afhankelijk is van het landgebruik type en de socio-economische context. Deze informatie zit in de Base Layer Packages (BLP) van LATIS en in deze studie werd de BLP van 2016 gebruikt. De laatste wijzingen van de LATIS software zijn beschreven door Beullens, J. *et al.* (2017) en Van Ackere, S. *et al.* (2021). Een voorbeeld van bodemgebruik wordt geïllustreerd in Figuur 2-11.

In het kader van Kustvisie zijn enkele invoerlagen van de LATIS tool licht uitgebreid in de haven van Zeebrugge. Een reeks zones in industriegebied werden niet meegenomen in de schadeberekeningen, vermoedelijk omdat deze pas bij de extreme waterstanden die in Kustvisie voorkomen overstromen en in eerder schadeberekeningen niet of minder bijdroegen. Het gaat over het gedeelte voor de zeewering in Zeebrugge. De maximale schadekaart en het landbouwgebruik werden uitgebreid, zoals gepresenteerd in Figuur 2-12. Voor de maximale schadekaart werden waarden gebruikt overeenkomstig met de zones achter de zeewering gebaseerd op het bodemgebruik. Voor de kaart van de landbouwzones werd de kustzone uitgebreid. Het wordt aanbevolen in volgende versies van de LATIS tool dit verder uit te werken.

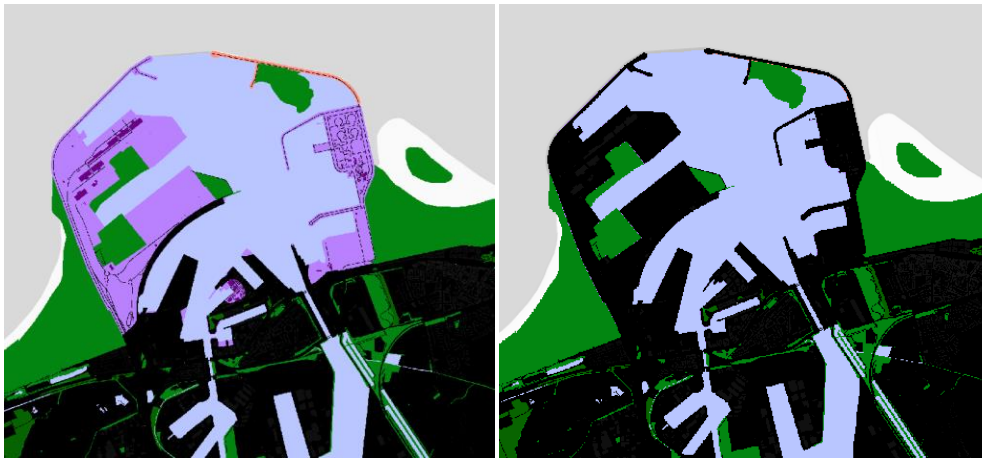
De methodologie achter de schade- en slachtofferberekeningen wordt in detail beschreven in Vanneste, D. *et al.* (2018). Bij de berekeningen wordt er onderscheid gemaakt tussen schade op de kustvlakte en schade op de zeewering. De economische schade op de kustvlakte wordt verdeeld in schade ten gevolge van overstromingen en additionele schade ten gevolge van hoge stroomsnelheden. Verder kunnen gebouwen op een zeewering ook additionele schade ondervinden door golfoverslag. Deze restschade op de zeewering wordt bepaald als het verschil van de maximale schade en schade door overstroming, welke gebaseerd is op de gemodelleerde waterdiepte uit de overstromingskaart van de kustvlakte. Van deze potentiële maximale additionele schade wordt een percentage in rekening gebracht d.m.v. een schadefactor  $\beta$  gebaseerd op het overslagdebiet. Aangezien er enkel een overslagdebiet langs de dijken werd berekend en niet langs de duinen, is ook enkel voor de dijken een schade berekening uitgevoerd. Dit blijkt echter een goede indicatie te geven van de zeewering. Op basis van de berekende schade en slachtoffers op de zeewering bij een stormwaterpeil van +8mTAW in (Vanneste, D. *et al.*, 2018) blijkt 90% van de totale schade te wijten aan schade in kustdelen met dijksecties en wat betreft slachtoffers blijkt circa 98% van het totale aantal slachtoffers gelinkt aan dijksecties.

Voor het aantal slachtoffers wordt de berekening uitgevoerd waarbij de bevolking verdeeld wordt over de statistische sectoren voor de klassen bebouwing en industrie.

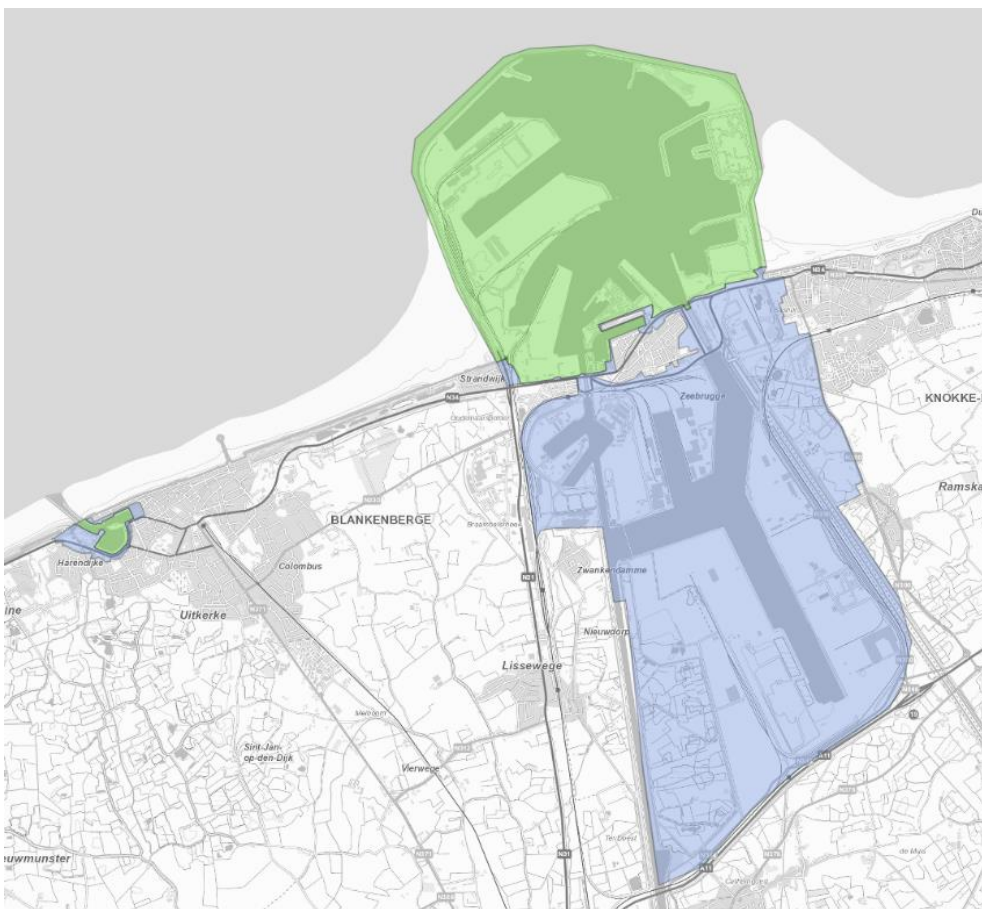
De resultaten worden apart weergegeven voor de zeewering en kustvlakte. In principe zijn de havens opgenomen in de resultaten voor de kustvlakte. Ter illustratie zijn deze resultaten ook voor iedere haven weergegeven waarbij het havengebied is gevisualiseerd in Figuur 2-13 tot Figuur 2-15. Er wordt een opsplitsing gemaakt van het havengebied (groene arcering) zeewaarts van de zeeweringscontour, de contour waar de zeewering in de haven is gelegen om het achterland te beschermen, en het havengebied (blauwe arcering) tussen de zeeweringscontour en de veiligheidslijn, de lijn die de grens met bebouwing vormt.



Figuur 2-11: Voorbeeld van bodemgebruik in LATIS zoals toegepast in de schadeberekeningen.



Figuur 2-12: Bodemgebruik als achtergrondkaart met daarboven de uitgestrektheid (in zwart) van de maximale schadekaart voor de originele versie (link) en aangepaste versie (rechts).

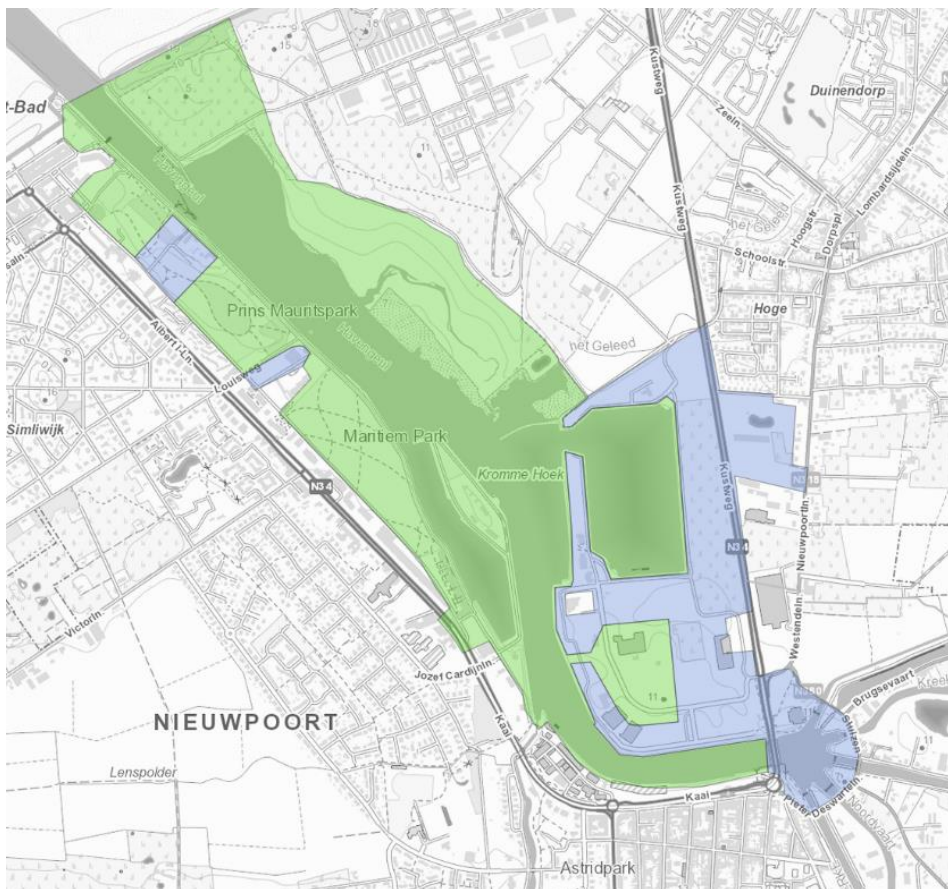


Figuur 2-13: Havencontouren voor de havens van Zeebrugge en Blankenberge met het gebied zeewaarts van de zeeweringscontour in groen en het gebied tussen zeeweringscontour en veiligheidslijn in blauw.





Figuur 2-14: Havencontour voor de haven van Oostende met het gebied zeewaarts van de zeeweringscontour in groen en het gebied tussen zeeweringscontour en veiligheidslijn in blauw.

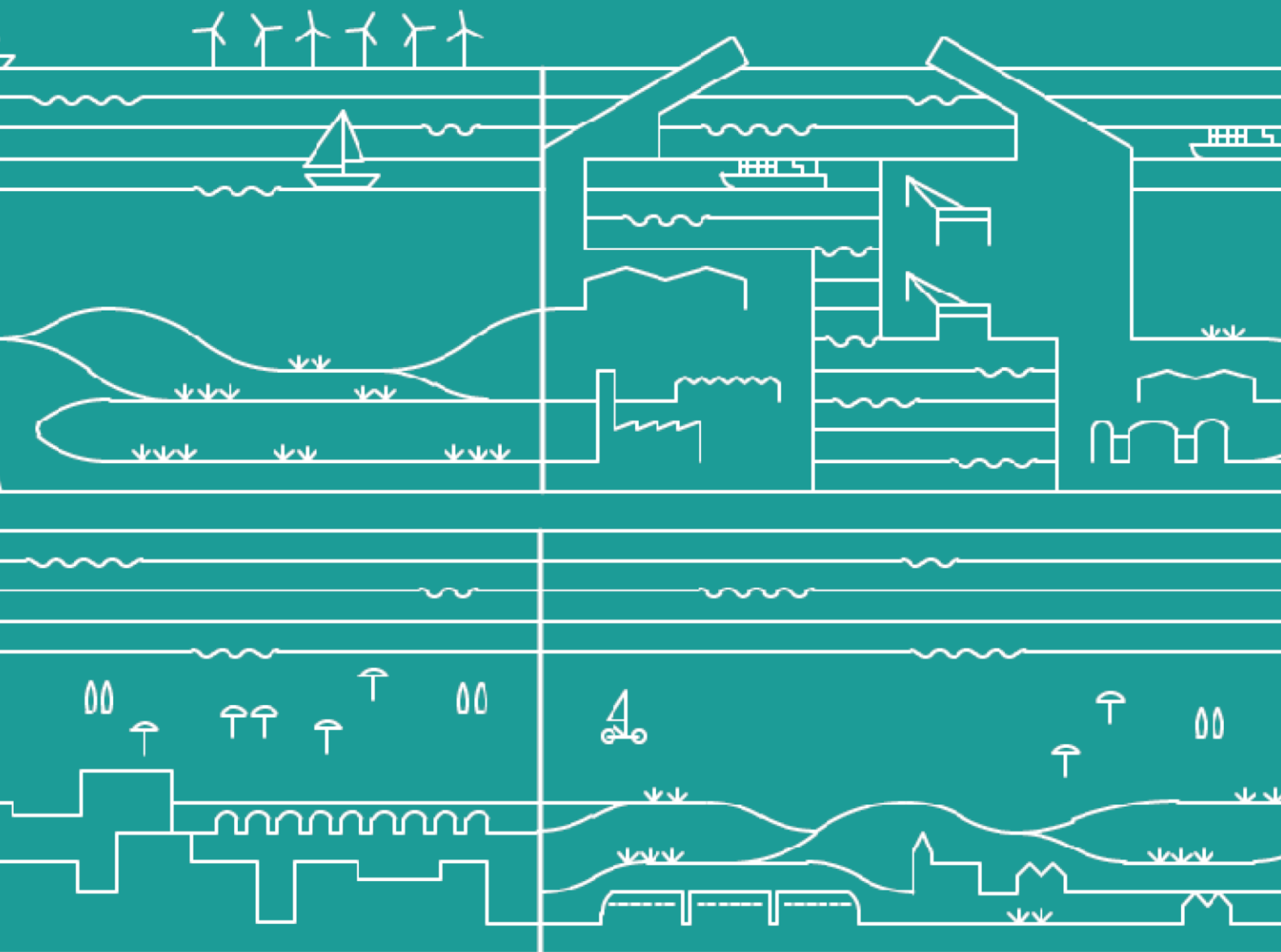


Figuur 2-15: Havencontour voor de haven van Nieuwpoort met het gebied zeewaarts van de zeeweringscontour in groen en het gebied tussen zeeweringscontour en veiligheidslijn in blauw.

## 2.4 Samenvatting aannames

- De overstromingsmodellering en schade- en slachtofferberekening zijn uitgevoerd voor een specifieke situatie, namelijk de 1000-jarige storm bij +1 m, +2 m en + 3 m zeespiegelstijging. Er is geen volledige risicoanalyse uitgevoerd.
- De studie bekijkt de overstroming ten gevolge van stormvloed en vanuit zee. Er wordt geen rekening gehouden met mogelijk overstromingen vanuit het achterland.
- Er wordt aangenomen dat er geen overstroming optreedt vanuit de buurlanden. Omgekeerd, in kader van een realistische voorspelling van de overstromingsparameters, kan de overstroming vanuit zee vanuit Vlaanderen zich wel uitspreiden naar de buurlanden. De schade- en slachtofferberekeningen daarentegen zijn enkel geldig voor het Vlaamse gebied.
- De aanpak sluit aan bij de methodiek voor de overstromingsmodellering en schade- en risicoberekeningen die gebeuren in het kader van het Masterplan Kustveiligheid, maar gezien de strategische aard van de studie en het verschil in detailgraad wordt gewerkt met een vereenvoudigde aanpak en aannames.
- Bij het bepalen van de randvoorwaarden is vertrokken van de referentiesituatie 2030. De referentiesituatie betekent daarbij de situatie na uitvoering van het Masterplan Kustveiligheid, maar zonder kustvisie maatregelen. Daarbij is gebruik gemaakt van de rekenresultaten van de veiligheidsscan (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a). De belangrijkste aspecten met betrekking tot de randvoorwaarden worden hieronder aangehaald.
  - In de duin- en dijksecties van de zeewering langs de strandzones wordt het moment van falen van de sectie beschouwd als input in het overstromingsmodel. Het overslagdebiet is niet apart meegenomen in de overstromingsmodellering gezien de bijdrage hiervan beperkt is. Voor het bepalen van het moment van falen worden duinsecties geëvalueerd op vrijboord en duin-ratio. Bij dijksecties gebeurt de evaluatie aan de hand van het overslagdebiet tijdens de piek van de storm en de vrijboord, waarbij het moment van falen gelijk wordt verondersteld met de piek van de storm.
  - De dimensies van de bressen in dijken en duinen zijn overgenomen uit voorgaande studies en aangevuld met een GIS analyse.
  - In de haven wordt zowel het overslagdebiet, het overflowdebiet (rechtstreeks overstromen) als het falen van structuren op basis vergelijking waterstanden met kruinpeil structuren meegenomen. De debieten zijn bepaald op basis van vereenvoudigde EurOtop berekeningen.
- Het overstromingsmodel is gelijkaardig aan het model ingezet voor de laatste toetsing (Parrado *et al.*, 2017).
- Voor de schade- en slachtofferberekening is het LATIS model v4.1 toegepast. Daarbij zijn de kaarten met maximale schade en landbouw uitgebreid om het volledige domein aan overstromde terrein te kunnen meenemen in de berekening. De bepaling van de schade op de zeewering is niet uitgevoerd voor de duinsecties. Enkel de secties met dijken zijn opgenomen gezien de beschikbaarheid van debietgegevens in deze secties. Deze dijksecties domineren echter in de waarden voor schade en slachtoffers en geven een goede indicatie.





# Resultaten

# 3 Resultaten

## 3.1 Inleiding

In de volgende secties worden de resultaten gepresenteerd voor drie situaties van zeespiegelstijging telkens in combinatie met een 1000-jarige storm:

- scenario +1 m zeespiegelstijging (ZSS1);
- scenario +2 m zeespiegelstijging (ZSS2);
- scenario +3 m zeespiegelstijging (ZSS3).

Voor elk van deze situaties worden telkens:

- de randvoorwaarden geïllustreerd op basis van waar langsheen de zeewering bressen in de duinen en falen van dijken voorkomen en waar in de havens overslag of overflow kan worden verwacht.
- de resultaten van de overstromingsberekeningen getoond aan de hand van het volgende kaartmateriaal:
  - Overstromingsdiepte (m). De maximale waterstand in iedere locatie tijdens de overstromingsduur. De resultaten geven inzicht in de ruimtelijke omvang van de overstroming en worden gebruikt voor de schadeberekening.
  - Stroomsnelheid (m/s). De maximale (horizontale) stroomsnelheid tijdens de overstroming. De resultaten worden gebruikt als invoer voor additionele schadeberekening en berekening van slachtoffers.
  - Stijgsnelheid (m/h). De snelheid waarmee het waterpeil stijgt wat van belang is in het kader van de berekening van slachtoffers.
- de resultaten van de berekening van schade en slachtoffers opgenomen voor de kustvlakte en de zeewering waarbij de havens als onderdeel van de kustvlakte zijn uitgelicht.

## 3.2 Scenario +1m zeespiegelstijging

### 3.2.1 Randvoorwaarden

#### 3.2.1.1 Zeewering

##### 3.2.1.1.1 Duinen

Figuur 3-1 toont de resultaten van de bepaling van de randvoorwaarden voor de overstromingsberekeningen van de duinsecties bij +1 m zeespiegelstijging. Opgemerkt wordt dat de meeste duinsecties veilig zijn voor dit zeespiegelstijgingsniveau (Cat. 1). Slechts bij enkele duinen ontstaat een bres, hetzij door een beperkte vrijboord (Cat. 2), hetzij door een beperkt duinvolume (duin ratio, Cat. 3). Deze duinen zijn vooral geconcentreerd aan de westkant van de kust (De Panne-Koksijde), waar de duinen het laagst zijn (zie Paragraaf 4.1 van (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a)).



Figuur 3-1: Overzicht van de randvoorwaarden voor duinen bij +1 m zeespiegelstijging. Cat. 1: veilige duin (geen bres). Cat. 2: bres omwille van lage vrijboord. Cat. 3: bres omwille van duinvolume (duin-ratio). Cat. 4: bres omwille van vrijboord en duin-ratio.

##### 3.2.1.1.2 Dijken

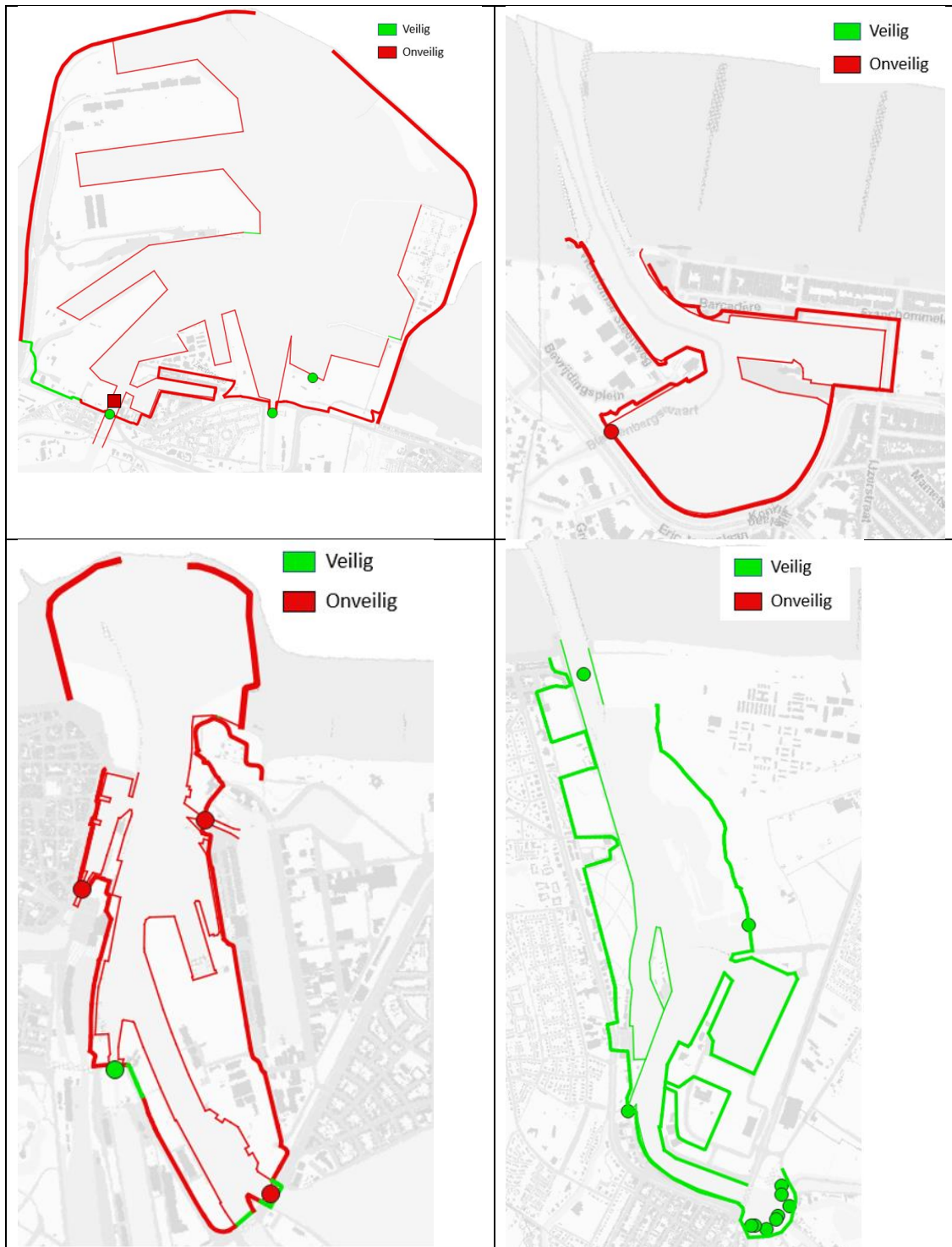
Figuur 3-2 toont de resultaten van de bepaling van de randvoorwaarden voor de overstromingsberekeningen van de dijksecties bij +1 m zeespiegelstijging. Er wordt opgemerkt dat er bij +1 m zeespiegelstijging in de meeste gevallen overslag over de dijk optreedt ( $> 11$  l/m/s, Cat. 2) die wat betreft kustveiligheid tot een onveilige sectie leidt (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a), maar waarvan het overslagdebiet te beperkt is om tot meer dan lokale overstroming te leiden. Slechts één dijkdoorsnede (namelijk Sectie 105, Mariakerke) faalt, waaruit zeewater naar het achterland kan stromen (Cat. 3).



Figuur 3-2 : Overzicht van de randvoorwaarden voor dijken bij +1 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige dijk. Cat 2: overslag (< 100 l/m/s). Cat 3: falen van dijk (overslag > 100 l/m/s of overflow).

### 3.2.1.2 Havens

De havens zijn zwakke schakels in de kustverdediging. Bij +1 m zeespiegelstijging falen verschillende structuren, zoals de uitwatering in Blankenberge en de meeste sluisen (op de Demey sluis na) in Oostende. In Zeebrugge is de Visartsluis opgenomen in het overstromingsmodel en deze faalt bij +1 m zeespiegelstijging. Verder komt er in de havens van Zeebrugge, Blankenberge en Oostende water over de kaaimuur en over de zeekering. Enkel Nieuwpoort blijft beschermd door de stormvloedkering bij +1 m zeespiegelstijging en kent geen overstroming vanuit zee. Dit wordt geïllustreerd op basis van de resultaten van de veiligheidsscan (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a) in Figuur 3-3. Ter hoogte van de structuren geeft de rode kleur aan of deze falen. Zeebrugge wijkt wat dat betreft in dit rapport af van de veiligheidsscan, gezien in de veiligheidsscan al is gewerkt met de toekomstige nieuwe zeeluis en in het overstromingsmodel de Visartsluis aanwezig is welke faalt bij +1 m zeespiegelstijging (aangegeven door het rode vierkant in de figuur). Ter hoogte van de waterkant wordt in de panelen van de figuur aangegeven of er een maximaal debiet groter dan 50 l/m/s voorkomt en ter hoogte van de zeekering of er een maximaal debiet groter dan 1 l/m/s voorkomt.



Figuur 3-3: Overzicht van de resultaten veiligheidsscan bij +1 m zeespiegelstijging als indicatie waar overstroming van het havengebied optreedt. Rode kleur geeft ter hoogte van structuren falen aan, ter hoogte van de waterkant een maximum debiet > 50 l/m/s en ter hoogte van de zeewering een debiet > 1 l/m/s.

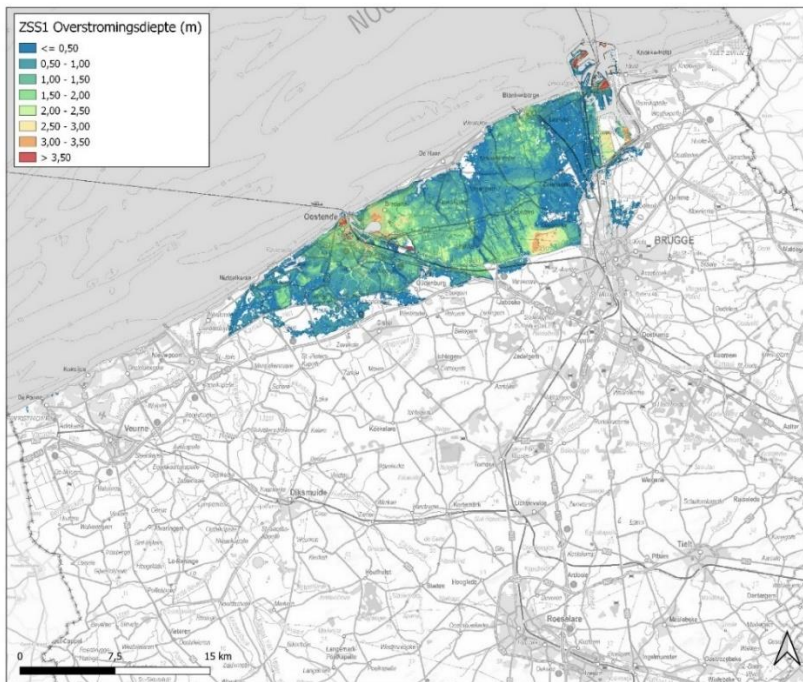


### 3.2.2 Overstromingsberekening

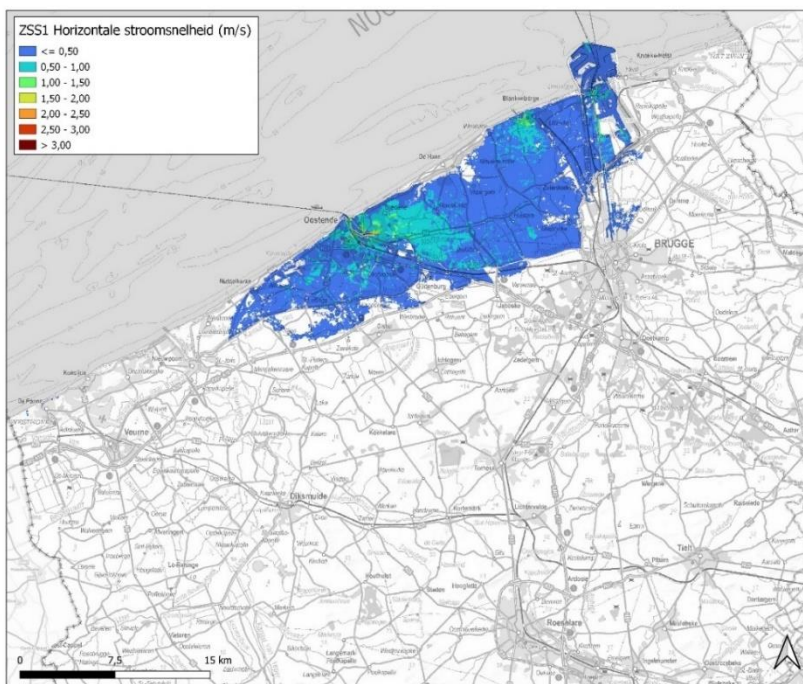
De resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging worden gevisualiseerd in Figuur 3-4, Figuur 3-5 en Figuur 3-6 voor wat betreft respectievelijk overstromingsdiepte, horizontale stroomsnelheid en stijgsnelheid.

De overstromingen zijn slecht in beperkte mate te wijten aan overstroming of falen bij dijken en duinen langsheen de strandzones, maar vooral door falen van structuren of overstroming vanuit havens.

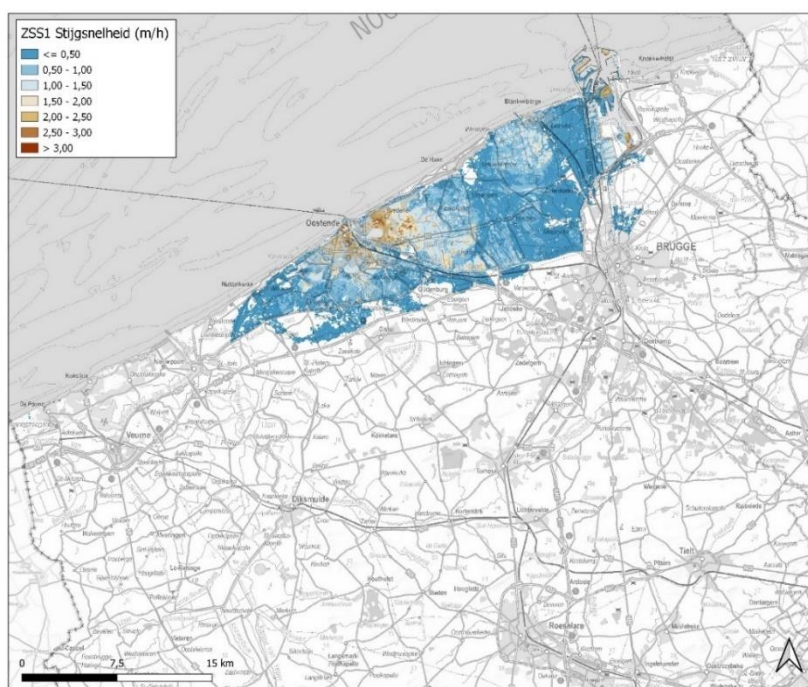
Een ruimer gebied van de kustvlakte loopt daarbij onder water. Aan de westkust is er geen tot beperkte, lokale overstroming. De gefinaliseerde stormvloedkering in Nieuwpoort neemt een groot risico voor overstroming weg. In het duingebied in de westhoek ontstaan wel enkele bressen in de duinen van de zeewaartse reep, maar de overstroming heeft een zeer beperkte omvang omdat naar het achterland toe een duinenlandschap aanwezig is dat verdere verspreiding verhindert.



Figuur 3-4: Resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1): overstromingsdiepte (m).



Figuur 3-5: Resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1): horizontale stroomsnelheid (m/s).



Figuur 3-6. Resultaten van de overstromingsberekening bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1): stijgsnelheid (m/h).

### 3.2.3 Schade- en slachtofferberekening

Tabel 3-1 geeft de economische schade ten gevolge van overstromingsdiepte, de additionele schade ten gevolge van stroomsnelheden en het aantal slachtoffers voor het scenario met een zeespiegelstijging van 1 m. Figuur 3-7 t.e.m. Figuur 3-9 geven de ruimtelijke verdeling van de cijfers in de tabel. Tabel 3-2 geeft de specifieke schade in de havens voor en achter de zeewering. Dit is een deel van de totale schade uit Tabel 3-1.

Tabel 3-3 geeft de schade en het aantal slachtoffers op de zeewering per kustdeel voor het scenario met een zeespiegelstijging van 1m.

Tabel 3-1 : Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).

	ZSS1
Schade overstromingsdiepte [mln. EURO]	6 798.9
Additionele schade [mln. EURO]	628.9
Aantal slachtoffers [#]	598.5

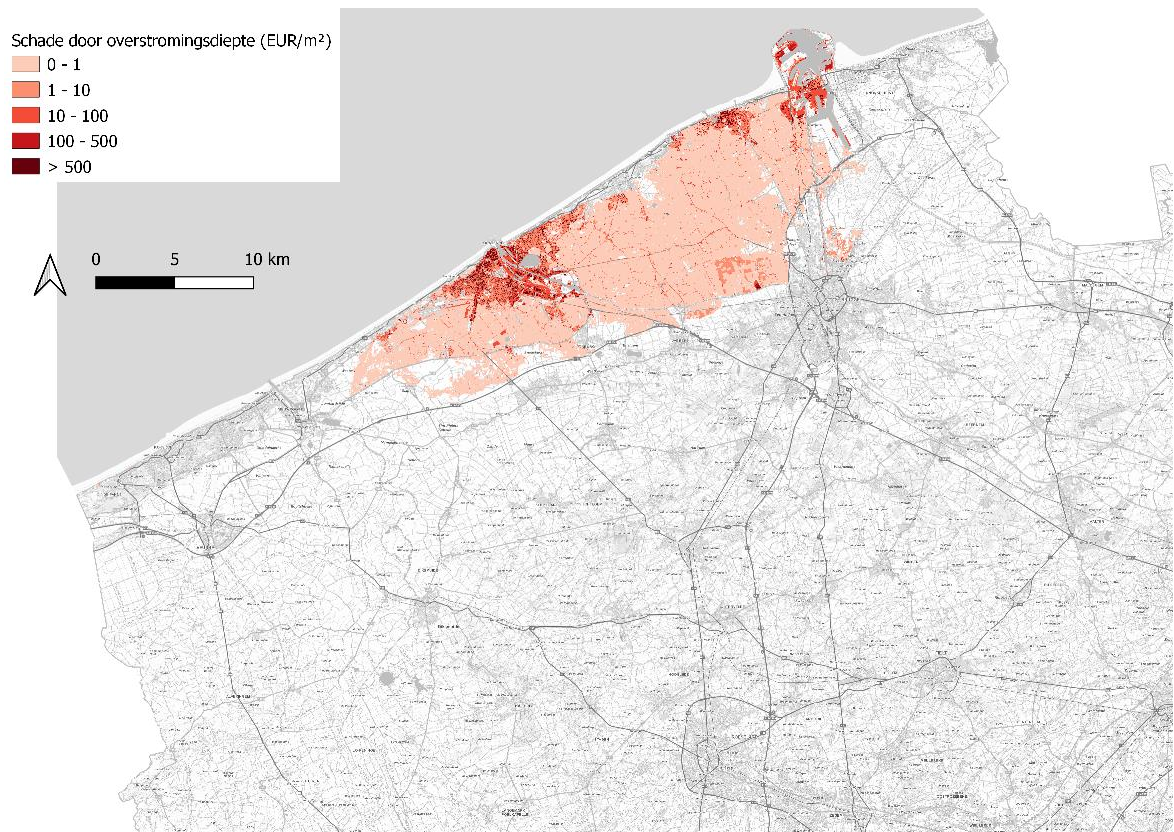
Tabel 3-2 : Schade in de havens bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).

Haven		Schade ZSS1 [mln. Euro]
Blankenberge	Achter zeewering	9.4
	Voor zeewering	1.4
Nieuwpoort	Achter zeewering	0.3
	Voor zeewering	0.2
Oostende	Achter zeewering	276.6
	Voor zeewering	50.1
Zeebrugge	Achter zeewering	237.8
	Voor zeewering	198.3

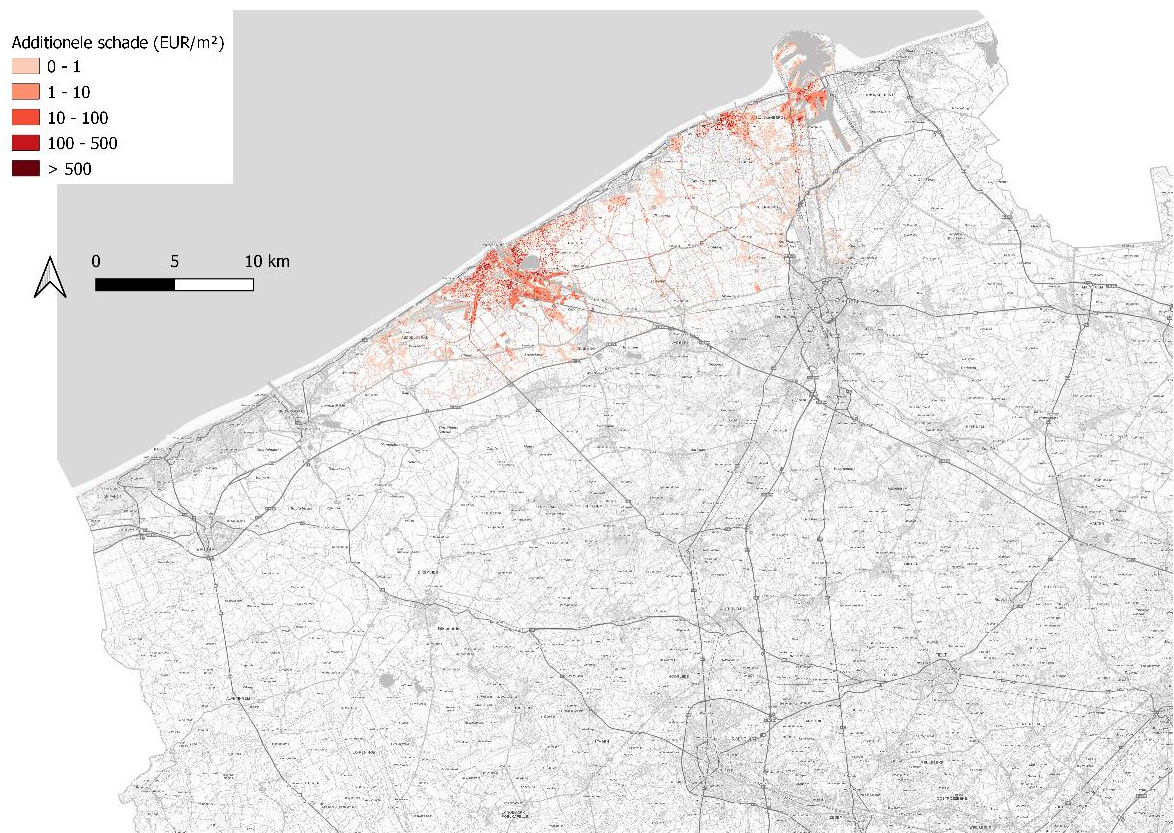
Tabel 3-3 : Schade en slachtoffers op de zeevering per kustdeel bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1) (berekend voor dijken).

Kustdeel	Sectie	Schade ZSS1 [EUR]	Slachtoffers ZSS1 [#]
Natuurreserveaat Westhoek	1-6	nvt	nvt
Verkaveling Westhoek	7-12	nvt	nvt
De Panne centrum	13-18	nvt	nvt
Sint-Idesbald	19-25	nvt	nvt
Koksijde-Bad	26-34	189 541	3.4
Koksijde - Oostduinkerke	35-42	nvt	nvt
Oostduinkerke-Bad	43-44	nvt	nvt
Oostduinkerke - Nieuwpoort	46-51	nvt	nvt
Groenendijk-Bad en Nieuwpoort-Bad	52-59	13 847	15.0
Militair domein Lombardsijde	60-66	nvt	nvt
Sint-Laureinsstrand	67-73	nvt	nvt
Westende-Bad	74-78	294 224	5.5
Middelkerke	79-92	503 208	21.0
Raversijde-West	93-97	nvt	nvt
Raversijde, Mariakerke en Oostende West	98-108	2 904 412	170.7
Oostende centrum	109-117	672 683	22.2
Spinoladijk	119-124	nvt	nvt
Bredene	125-136	nvt	nvt
Bredene - De Haan	137-150	nvt	nvt
De Haan centrum	151-155	523	
De Haan - Wenduine	156-167	nvt	nvt
Wenduine	168-176	721 046	19.4
Wenduine - Blankenberge	177-184	nvt	nvt
Blankenberge	185-194	933 565	29.3
Blankenberge - Zeebrugge	195-210	4 114	0.2
Zeebrugge-Bad	211-216	63 062	1.2
Heist	217-222	134 362	3.9
Duinbergen en Albertstrand	223-232	383 668	8.1
Knokke Zoute	233-239	946 261	24.0
Lekkerbek	240-249	97 089	1.3
Totaal		7 861 637	325





Figuur 3-7 : Schade door overstromingsdiepte in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).



Figuur 3-8 : Additionele schade in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).





Figuur 3-9 :Slachtoffers in de kustvlakte bij +1 m zeespiegelstijging (scenario ZSS1).

### 3.3 Scenario +2m zeespiegelstijging

#### 3.3.1 Randvoorwaarden

##### 3.3.1.1 Zeewering

###### 3.3.1.1.1 Duinen

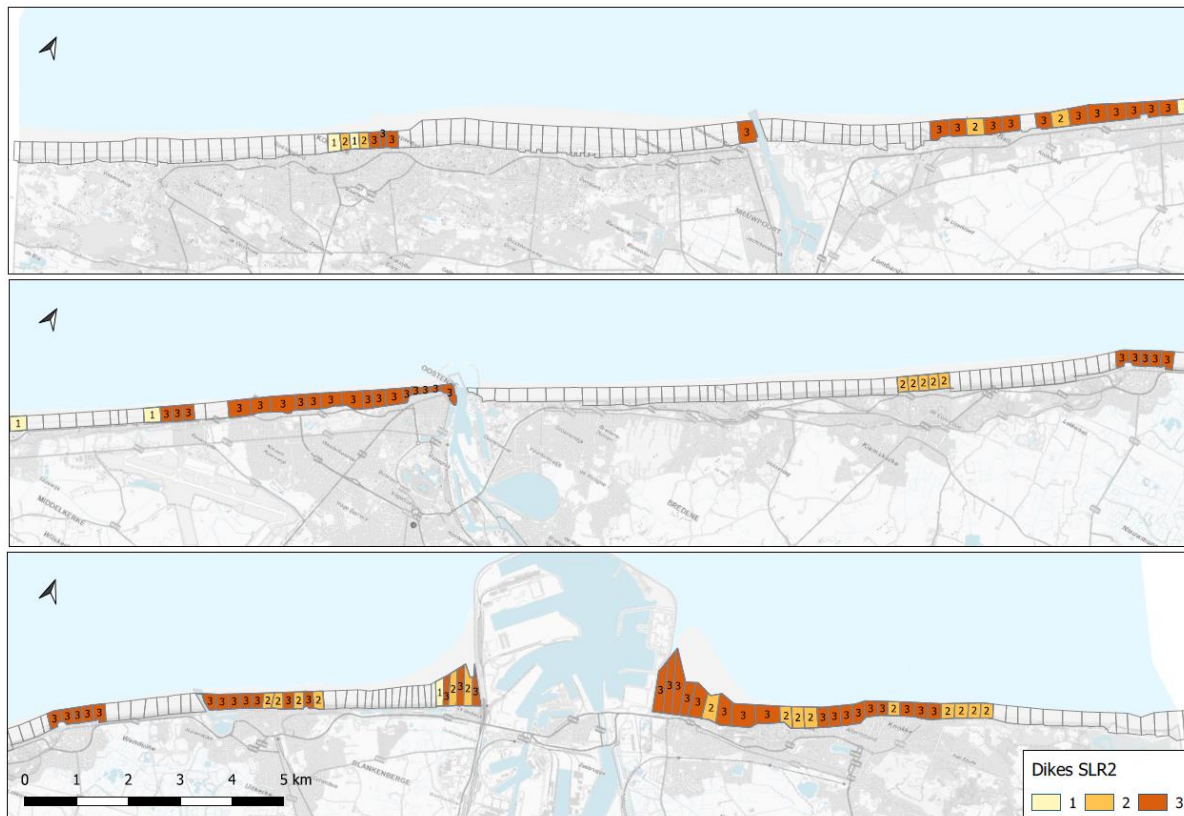
Figuur 3-10 toont de resultaten van de bepaling van de randvoorwaarden voor de overstromingsberekeningen van de duinsecties bij +2 m zeespiegelstijging. Bresvorming en dus overstroming komt voor in een groter aantal secties in vergelijking met de situatie bij +1 m zeespiegelstijging. Veel van deze secties zijn gelegen aan de Westkust (De Panne – Koksijde), waarbij er langsheen de rest van kust verspreid enkele bressen voorkomen. Grote stukken duinen zijn echter nog steeds veilig (Cat. 1) zonder risico op overstromingen van het binnenland (bv. De Haan-Wenduine en Blankenberge-Zeebrugge). In totaal treedt overstroming op vanuit ongeveer 35% van de duinsecties.



Figuur 3-10 : Overzicht van de randvoorwaarden voor duinen bij +2 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige duin (geen bres). Cat 2: bres omwille van lage vrijboord. Cat 3: bres omwille van duinvolume (duin-ratio). Cat 4: bres omwille van vrijboord en duin-ratio.

### 3.3.1.1.2 Dijken

Figuur 3-11 toont de resultaten van de bepaling van de randvoorwaarden voor de overstromingsberekeningen van de dijksecties bij +2 m zeespiegelstijging. De stijging van het waterpeil met 1 m ten opzichte van het +1 m zeespiegelstijging-scenario (paragraaf 3.2.1.1.2) leidt tot een aanzienlijke toename van de gemiddelde golfoverslag en rechtstreekse overstroming treedt op van enkele dijksecties. Als gevolg hiervan worden de meeste secties die werden geclassificeerd als overslaggevallen voor +1 m zeespiegelstijging (Cat. 2), nu gedefinieerd als dijksecties met overstroming (Cat. 3). Dat is bijvoorbeeld het geval in het gebied ten westen van Oostende of in Wenduine. Voor slechts enkele secties (bv. De Haan) komt overstroming niet voor bij +2 m zeespiegelstijging.



Figuur 3-11 : Overzicht van de randvoorwaarden voor dijken bij +2 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige dijk. Cat 2: overslag (< 100 l/m/s). Cat 3: falen van dijk (overslag > 100 l/m/s of overflow).

### 3.3.1.2 Havens

Bij +2 m zeespiegelstijging neemt het overstromingsrisico vanuit de havens verder toe. In Nieuwpoort is de stormvloedkering niet bestand tegen de 1000-jarige storm bij +2 m zeespiegelstijging en falen alle structuren en overstroomt de haven. In Blankenberge neemt het overstromingsdebiet verder toe ten opzichte van +1 m zeespiegelstijging. In Oostende is er bijkomend falen van de Demeysluis waardoor overstroming doorheen alle structuren optreedt en neemt het overstromingsdebiet over de zeekering verder toe. In Zeebrugge was er reeds falen van de Visartsluis in het overstromingsmodel bij +1 m zeespiegelstijging. Bij +2 m zeespiegelstijging faalt ook de uitwatering van het Leopoldkanaal, maar blijft volgens de aannames de Pierre Vandamme sluis nog weerstand bieden. De overstromingsdebieten over de zeekering nemen wel toe.

De situatie in de havens wordt geïllustreerd op basis van de resultaten van de veiligheidsscan (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a) in Figuur 3-12 waarin ter hoogte van de structuren (afwijkend voor Visartsluis) de rode kleur aangeeft of deze falen, ter hoogte van de waterkant of er een maximaal debiet groter dan 50 l/m/s voorkomt en ter hoogte van de zeekering of er een maximaal debiet groter dan 1 l/m/s voorkomt.



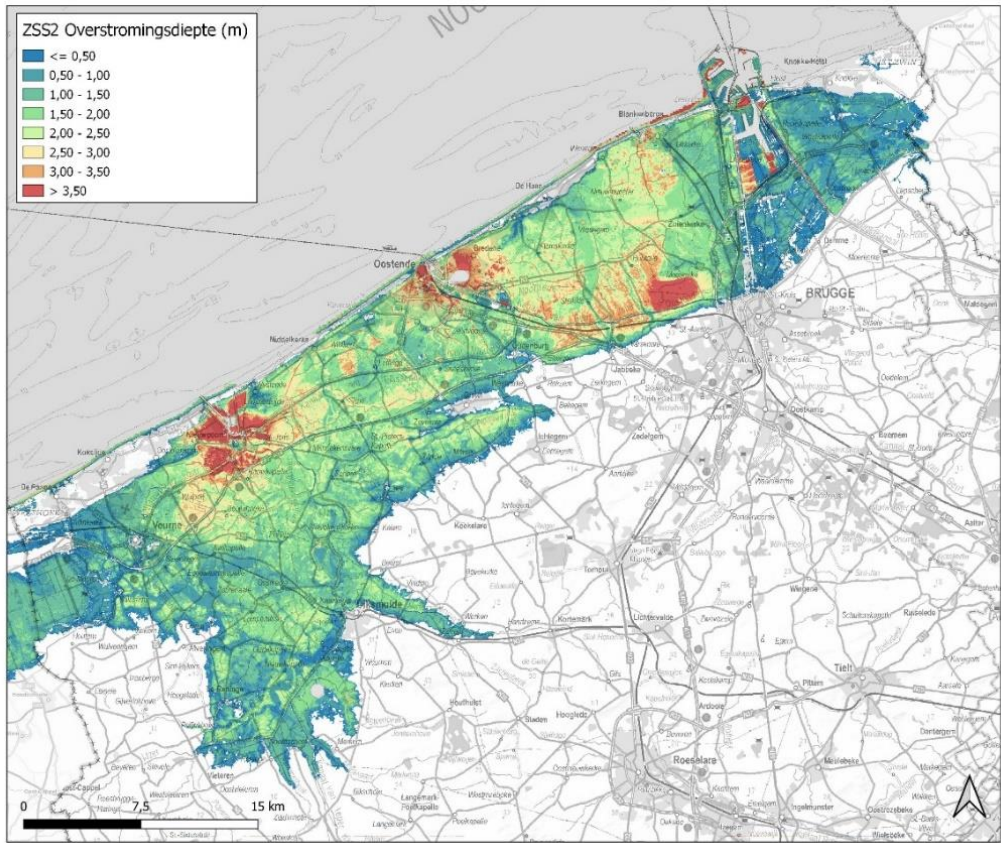


Figuur 3-12: Overzicht van de resultaten veiligheidsscan bij +2 m zeespiegelstijging als indicatie waar overstroming van het havengebied optreedt. Rode kleur geeft ter hoogte van structuren (bollen) falen aan, ter hoogte van de waterkant (dunne lijn) een maximum debiet > 50 l/m/s en ter hoogte van de zeewering (dikke lijn) een debiet > 1 l/m/s.

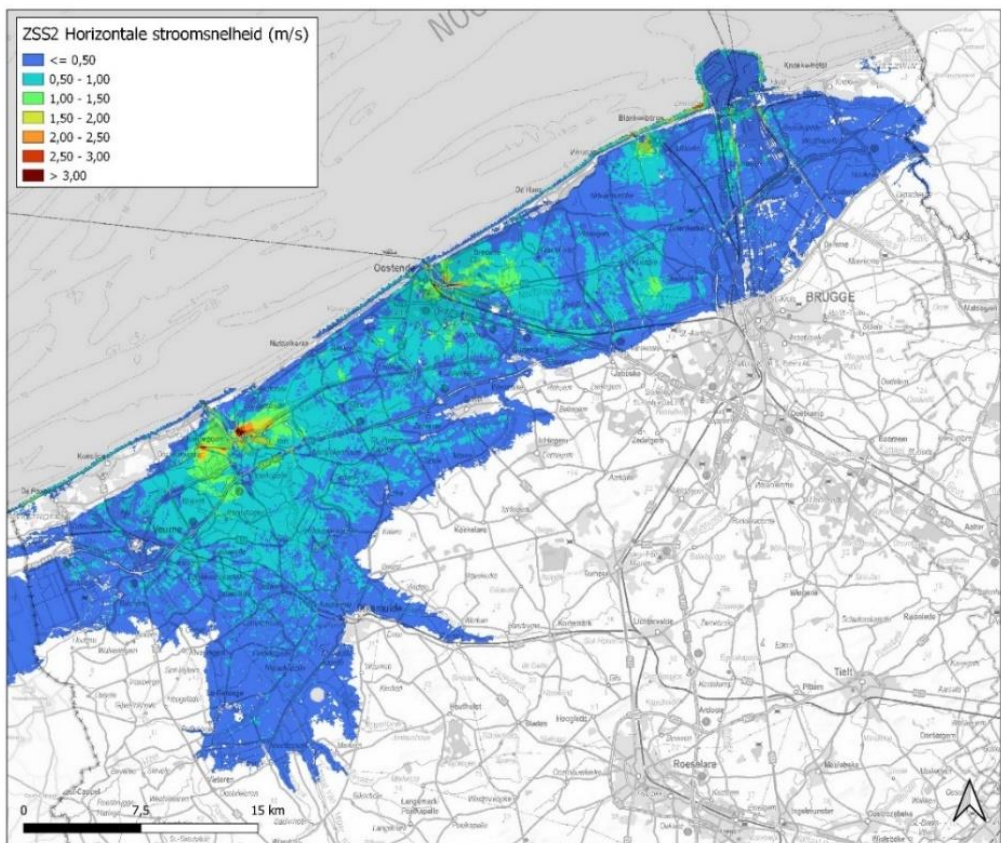
### 3.3.2 Overstromingsberekening

De resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging worden gevisualiseerd in Figuur 3-13, Figuur 3-14 en Figuur 3-15 voor wat betreft respectievelijk overstromingsdiepte, horizontale stroomsnelheid en stijgsnelheid.

Net zoals bij +1 m zeespiegelstijging is er een grote bijdrage door overstroming vanuit havens, maar komt er nu ook meer watervolume naar het achterland door bressen of falen van dijken of duinen langsheen de strandzones. Daarbij is het overstromingsgebied duidelijk toegenomen en overstroomt quasi de volledige kustvlakte met een overstromingsdiepte in grote delen van 2 m of meer. In tegenstelling tot de situatie bij +1 m zeespiegelstijging overstroomt nu ook de westhoek en strekt het overstromingsgebied zich ver uit naar het zuiden langsheen de IJzer en tot voorbij de Franse grens. Enkele hoger gelegen gebieden langsheen de kuststrook overstroomd niet, zoals bijvoorbeeld het duinenlandschap in de Westhoek, de duinenreep tussen De Haan en Wenduine en het gebied rond Duinbergen-Knokke aan de oostkust.

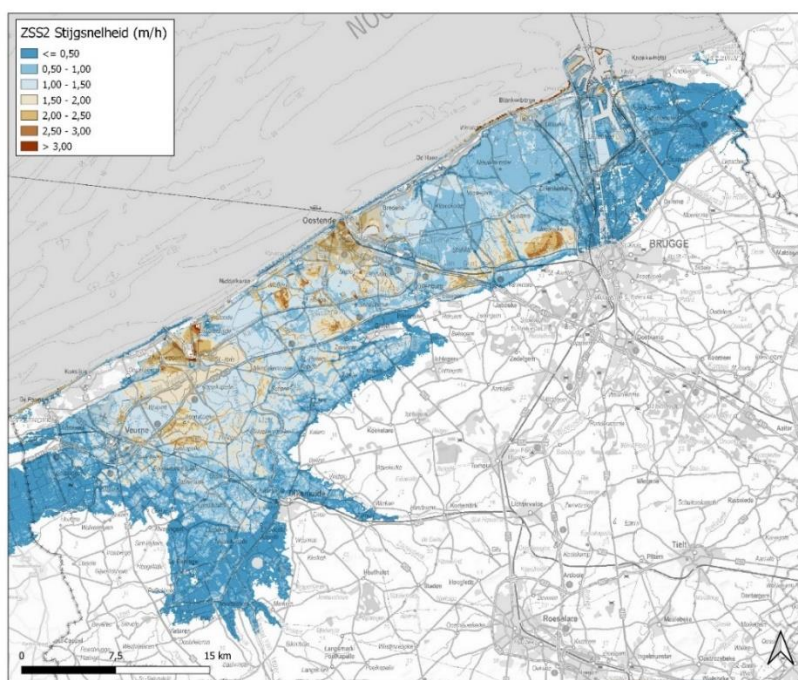


Figuur 3-13: Resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2): overstromingsdiepte (m).



Figuur 3-14: Resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2): horizontale stroomsnelheid (m/s).





Figuur 3-15: Resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2): stijgsnelheid (m/h).

### 3.3.3 Schade- en slachtofferberekening

Tabel 3-4 geeft de economische schade ten gevolge van overstromingsdiepte, de additionele schade ten gevolge van stroomsnelheden en het aantal slachtoffers voor het scenario met een zeespiegelstijging van +2 m. Figuur 3-16 t.e.m. Figuur 3-18 geven de ruimtelijke verdeling van de cijfers in de tabel. Tabel 3-5 geeft de specifieke schade in de havens voor en achter de zeewering. Dit is een deel van de totale schade uit Tabel 3-4.

Tabel 3-6 geeft de schade en het aantal slachtoffers op de zeewering per kustdeel voor het scenario met een zeespiegelstijging van +2 m.

Tabel 3-4 : Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).

	ZSS2
Schade overstromingsdiepte [mln. EURO]	18 055.0
Additionele schade [mln. EURO]	1 234.4
Aantal slachtoffers [#]	2 702.9

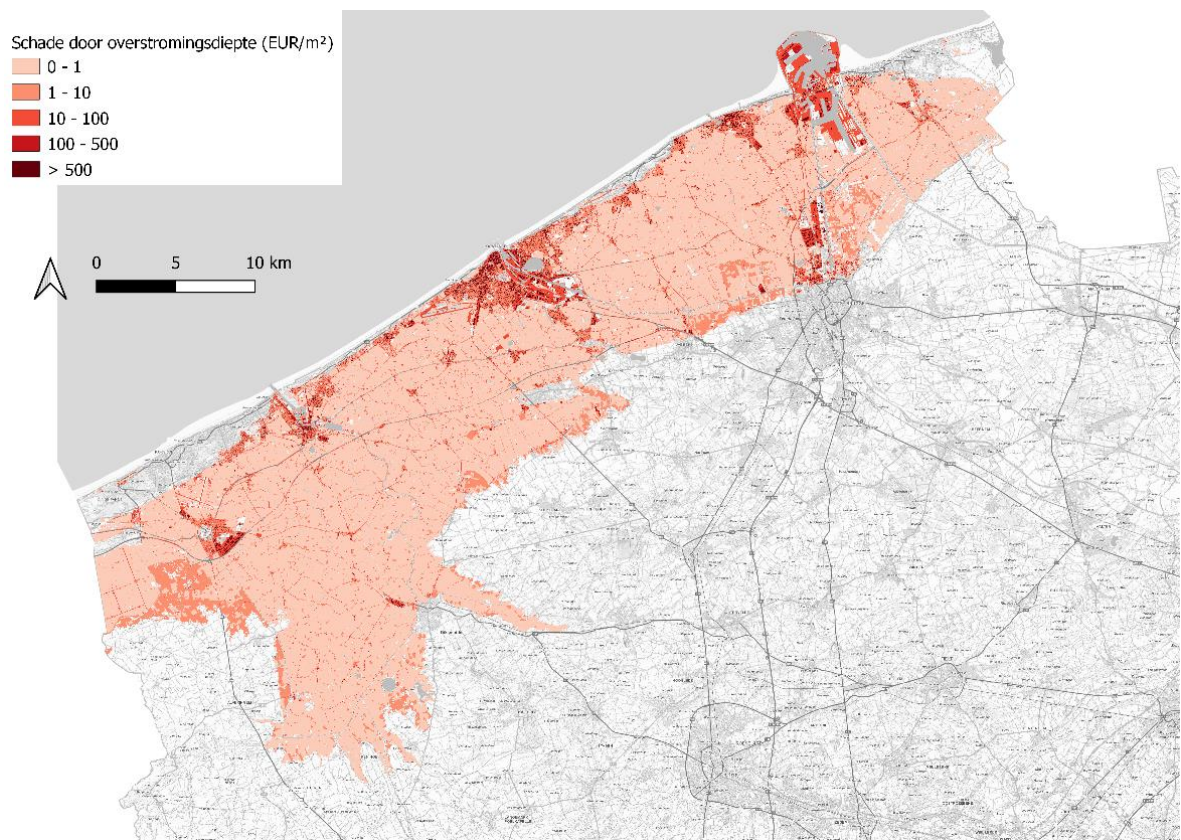
Tabel 3-5 : Schade in de havens bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).

Haven		Schade ZSS2 [mln. Euro]
Blankenberge	Achter zeewering	17.6
	Voor zeewering	1.9
Nieuwpoort	Achter zeewering	50.6
	Voor zeewering	40.8
Oostende	Achter zeewering	385.7
	Voor zeewering	77.2
Zeebrugge	Achter zeewering	586.5
	Voor zeewering	456.5

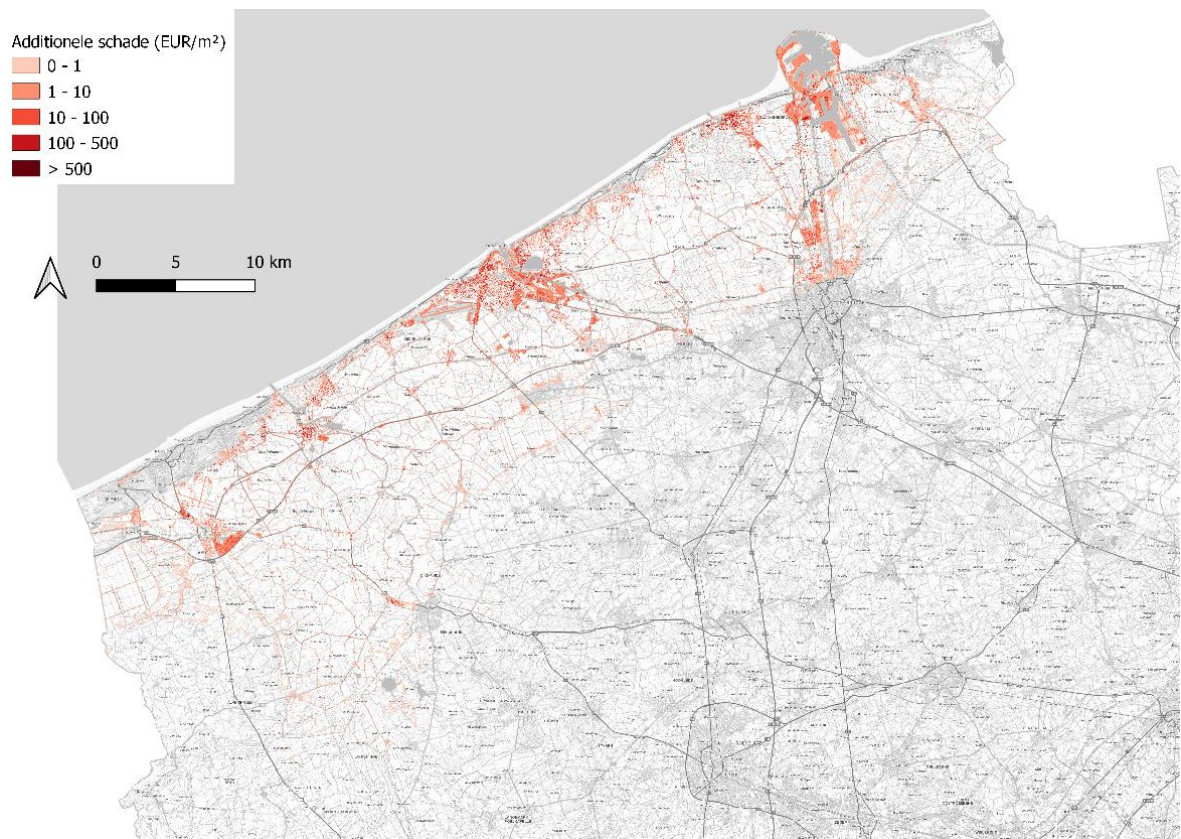
Tabel 3-6 : Schade en slachtoffers op de zeewering per kustdeel bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2) (berekend voor dijken).

Kustdeel	Sectie	Schade ZSS2 [EUR]	Slachtoffers ZSS2 [#]
Natuurreservaat Westhoek	1-6	nvt	nvt
Verkaveling Westhoek	7-12	nvt	nvt
De Panne centrum	13-18	nvt	nvt
Sint-Idesbald	19-25	nvt	nvt
Koksijde-Bad	26-34	13 235 745	241.4
Koksijde - Oostduinkerke	35-42	nvt	nvt
Oostduinkerke-Bad	43-44	nvt	nvt
Oostduinkerke - Nieuwpoort	46-51	nvt	nvt
Groenendijk-Bad en Nieuwpoort-Bad	52-59	150 060	162.5
Militair domein Lombardsijde	60-66	nvt	nvt
Sint-Laureinsstrand	67-73	nvt	nvt
Westende-Bad	74-78	17 879 245	356.4
Middelkerke	79-92	27 982 554	1 199.2
Raversijde-West	93-97	nvt	nvt
Raversijde, Mariakerke en Oostende West	98-108	29 907 279	1 172.8
Oostende centrum	109-117	21 368 275	588.1
Spinoladijk	119-124	nvt	nvt
Bredene	125-136	nvt	nvt
Bredene - De Haan	137-150	nvt	nvt
De Haan centrum	151-155	624 556	12.8
De Haan - Wenduine	156-167	nvt	nvt
Wenduine	168-176	25 068 041	679.7
Wenduine - Blankenberge	177-184	nvt	nvt
Blankenberge	185-194	25 053 768	828.8
Blankenberge - Zeebrugge	195-210	193 477	7.4
Zeebrugge-Bad	211-216	2 994 231	57.4
Heist	217-222	12 632 976	413.3
Duinbergen en Albertstrand	223-232	16 894 996	354.5
Knokke Zoute	233-239	20 010 923	520.6
Lekkerbek	240-249	1 032 167	13.0
Totaal		215 028 293	6 608





Figuur 3-16 : Schade door overstromingsdiepte in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).



Figuur 3-17: Aditionele schade in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).



Figuur 3-18: Slachtoffers in de kustvlakte bij +2 m zeespiegelstijging (scenario ZSS2).



## 3.4 Scenario +3m zeespiegelstijging

### 3.4.1 Randvoorwaarden

#### 3.4.1.1 Zeewering

##### 3.4.1.1.1 Duinen

De resultaten van de bepaling van de randvoorwaarden voor de overstromingsberekeningen van de duinsecties bij +3 m zeespiegelstijging worden getoond in Figuur 3-19.

Ongeveer 50 % van de duinsecties vertoont in dit geval bresvorming, hetzij als gevolg van een te beperkte duinvrijboord (Cat. 2), of een te beperkt duinvolume boven waterpeil (duin-ratio, Cat. 3) of beide (Cat. 4). Duinen met bresvorming komen vooral voor aan de westust (De Panne-Koksijde) en oostkust (Knokke-Heist), terwijl de duinsecties in het centrale deel van de kust, tussen Oostende en Zeebrugge, beduidend minder getroffen worden.



Figuur 3-19 : Overzicht van de randvoorwaarden voor duinen bij +3 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige duin (geen bres). Cat 2: bres omwille van lage vrijboord. Cat 3: bres omwille van duinvolume (duin-ratio). Cat 4: bres omwille van vrijboord en duin-ratio.

##### 3.4.1.1.2 Dijken

De resultaten van de bepaling van de randvoorwaarden voor de overstromingsberekeningen van de dijkssecties bij +3 m zeespiegelstijging zijn gevisualiseerd in Figuur 3-20. Er kan worden waargenomen dat voor een dergelijk extreem scenario de meeste secties zullen worden overstroomd (Cat. 3). Slechts zeer lokaal zijn er afwijkingen met vier secties, verspreid langsheen de kust, die een gemiddeld overtoppingsdebiet van minder dan 100 l/m/s vertonen (Cat. 2), met slechts één daarvan lager dan 1 l/m/s (Cat. 1).



Figuur 3-20 : Overzicht van de randvoorwaarden voor dijken bij +3 m zeespiegelstijging. Cat 1: veilige dijk. Cat 2: overslag (< 100 l/m/s). Cat 3: falen van dijk (overslag > 100 l/m/s of overflow).

### 3.4.1.2 Havens

Bij +3 m zeespiegelstijging treedt overal overstrooming op vanuit de havens, waarbij alle structuren gefaald zijn. Dit wordt geïllustreerd op basis van de resultaten van de veiligheidsscan (Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis), 2022a) in Figuur 3-21 waarin ter hoogte van de structuren (afwijkend voor Visartsluis) de rode kleur aangeeft of deze falen, ter hoogte van de waterkant of er een maximaal debiet groter dan 50 l/m/s voorkomt en ter hoogte van de zeewering of er een maximaal debiet groter dan 1 l/m/s voorkomt.



Figuur 3-21: Overzicht van de resultaten veiligheidsscan bij +3 m zeespiegelstijging als indicatie waar overstroming van het havengebied optreedt. Rode kleur geeft ter hoogte van structuren (bollen) falen aan, ter hoogte van de waterkant (dunne lijn) een maximum debiet > 50 l/m/s en ter hoogte van de zeewering (dikke lijn) een debiet > 1 l/m/s.

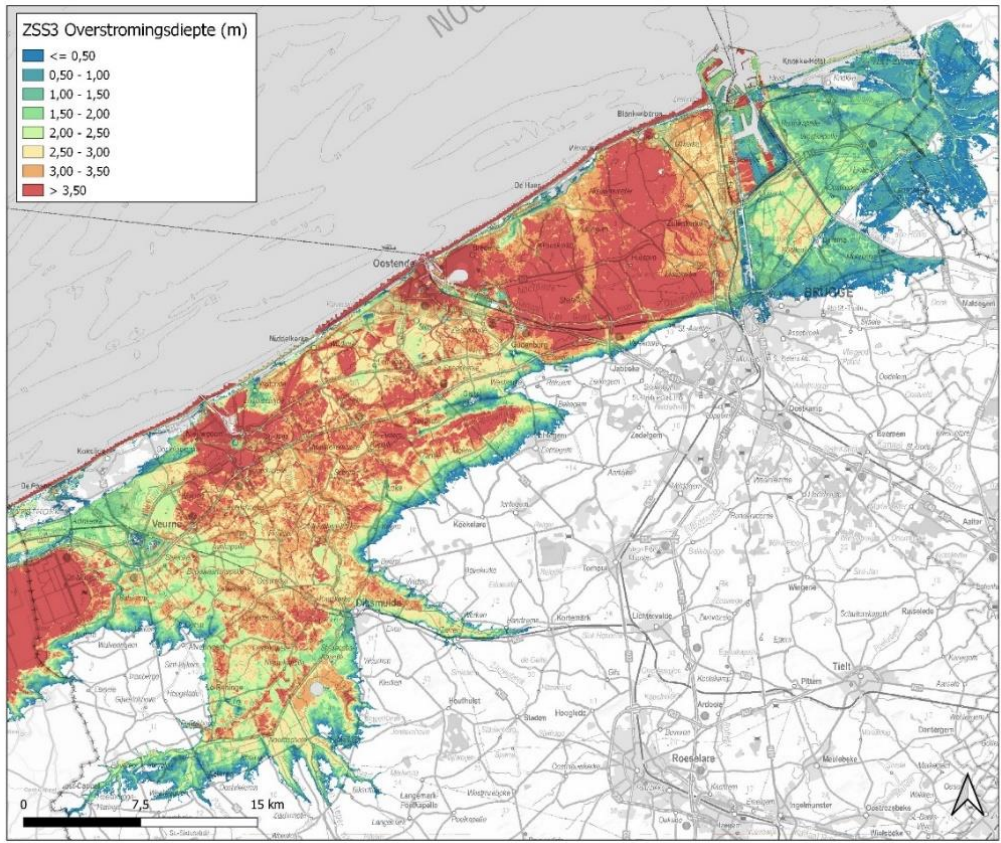
### 3.4.2 Overstromingsberekening

De resultaten van de overstromingsberekening bij +2 m zeespiegelstijging worden gevisualiseerd in Figuur 3-22, Figuur 3-23 en Figuur 3-24 voor wat betreft respectievelijk overstromingsdiepte, horizontale stroomsnelheid en stijgsnelheid.

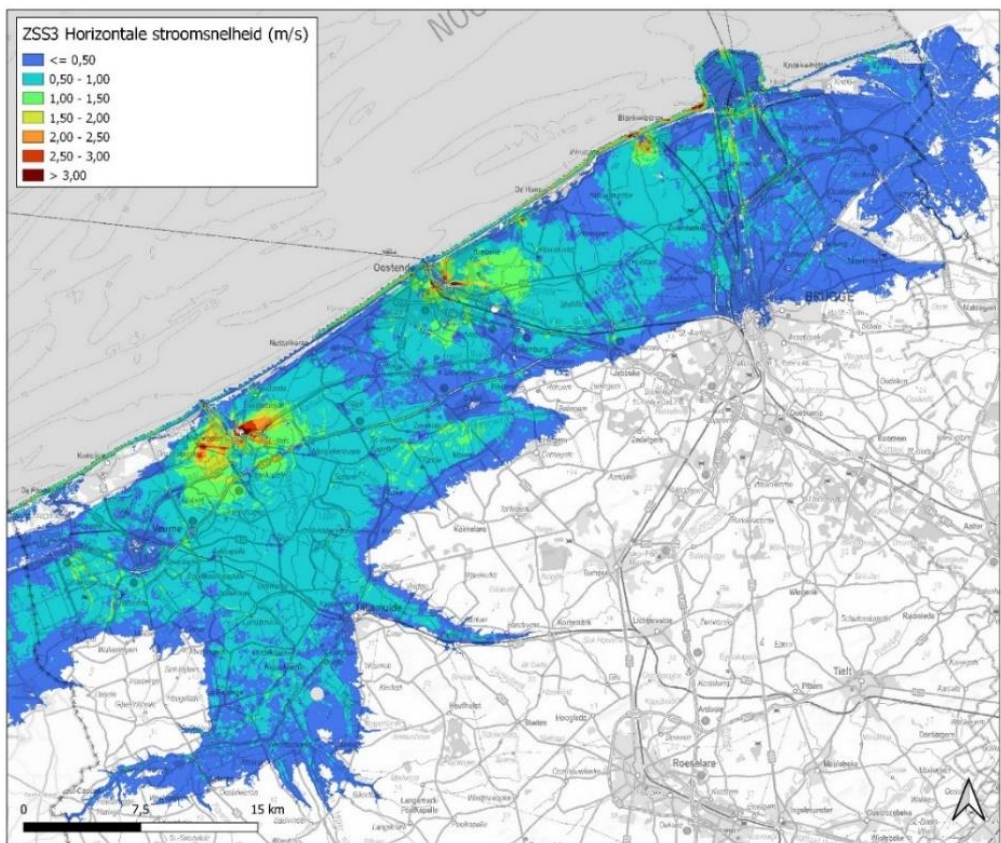
Bij +3 m zeespiegelstijging strekt de overstroming zich uit over de kustvlakte, gelijkaardig aan de omvang bij +2 m zeespiegelstijging. Er is een uitbreiding van het overstromingsgebied richting zuiden merkbaar in het IJzerbekken en in en rond Brugge.

Het overstromingsgebied is verder uitgebreid richting Frankrijk en reikt nu ook over de grens met Nederland. Ten opzichte van + 2 m zeespiegelstijging is er wel een duidelijke toename in overstromingsdiepte met grote delen van de kustvlakte waar de diepte groter is dan 3.5 m. De gebieden langsheen de kust die niet overstromen (duinlandschap in Westhoek, duinengordel De Haan – Wenduien en oostkust) zijn verder afgenomen.

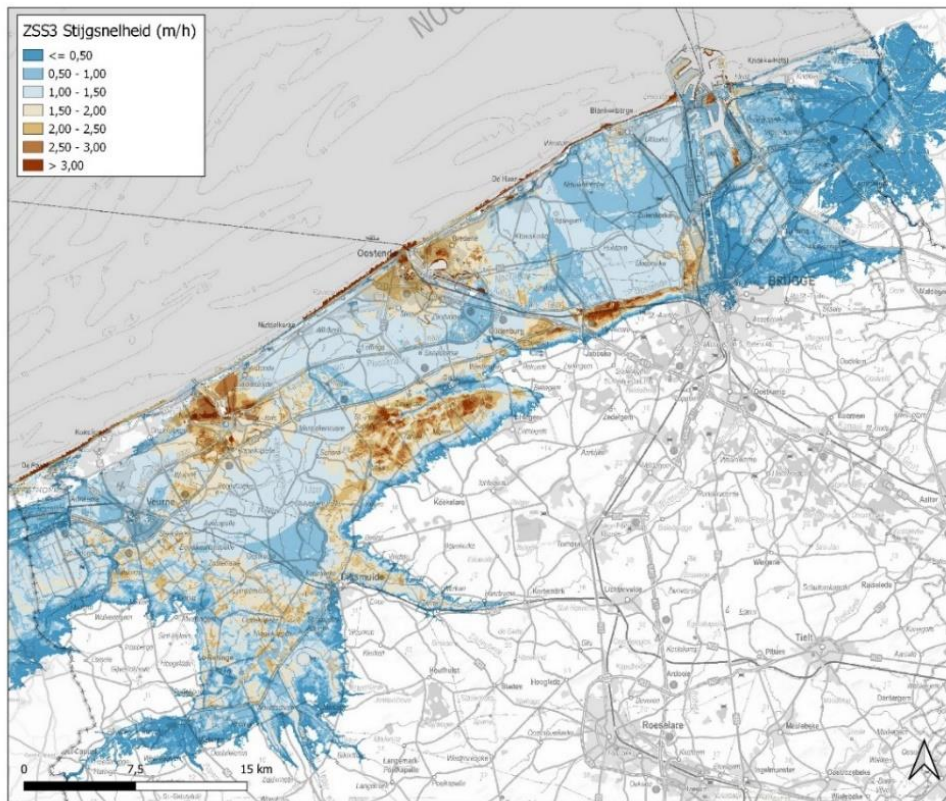




Figuur 3-22: Resultaten van de overstromingsberekening bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3): overstromingsdiepte (m).



Figuur 3-23: Resultaten van de overstromingsberekening bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3): horizontale stroomsnelheid (m/s).



Figuur 3-24. Resultaten van de overstromingsberekening bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3): stijgsnelheid (m/h).

### 3.4.3 Schade- en slachtofferberekening

Tabel 3-7 geeft de economische schade ten gevolge van overstromingsdiepte, de additionele schade ten gevolge van stroomsnelheden en het aantal slachtoffers voor het scenario met een zeespiegelstijging van +3 m. Figuur 3-25 t.e.m. Figuur 3-27 geven de ruimtelijke verdeling van de cijfers in de tabel. Tabel 3-8 geeft de specifieke schade in de havens voor en achter de zeewering. Dit is een deel van de totale schade uit Tabel 3-4.

Tabel 3-9 geeft de schade en het aantal slachtoffers op de zeewering per kustdeel voor het scenario met een zeespiegelstijging van +3 m.

Tabel 3-7 : Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).

	ZSS3
Schade overstromingsdiepte [mln. EURO]	32 192.6
Additionele schade [mln. EURO]	1 435.1
Aantal slachtoffers [#]	10 892.1

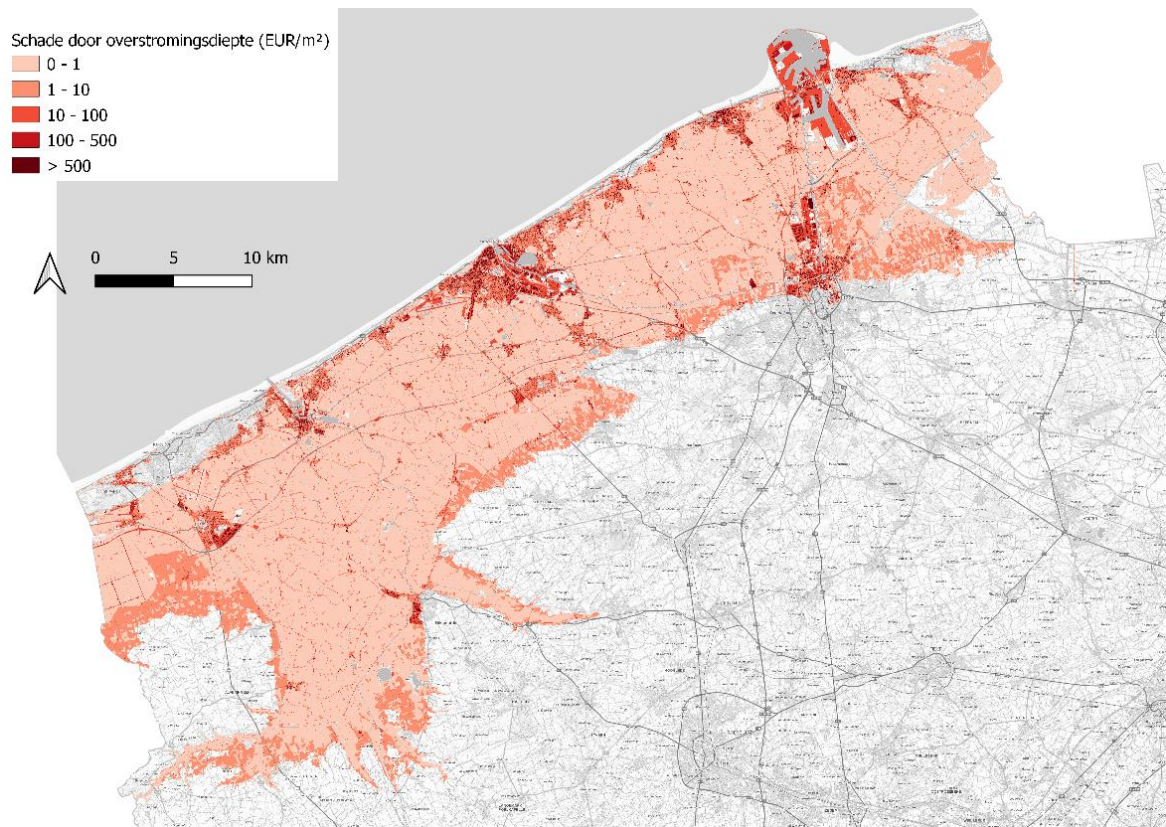
Tabel 3-8 : Schade in de havens bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3)

Haven		Schade ZSS3 [mln. Euro]
Blankenberge	Achter zeewering	24.1
	Voor zeewering	2.3
Nieuwpoort	Achter zeewering	53.9
	Voor zeewering	43.9
Oostende	Achter zeewering	453.1
	Voor zeewering	87.3
Zeebrugge	Achter zeewering	1 015.9
	Voor zeewering	687.3

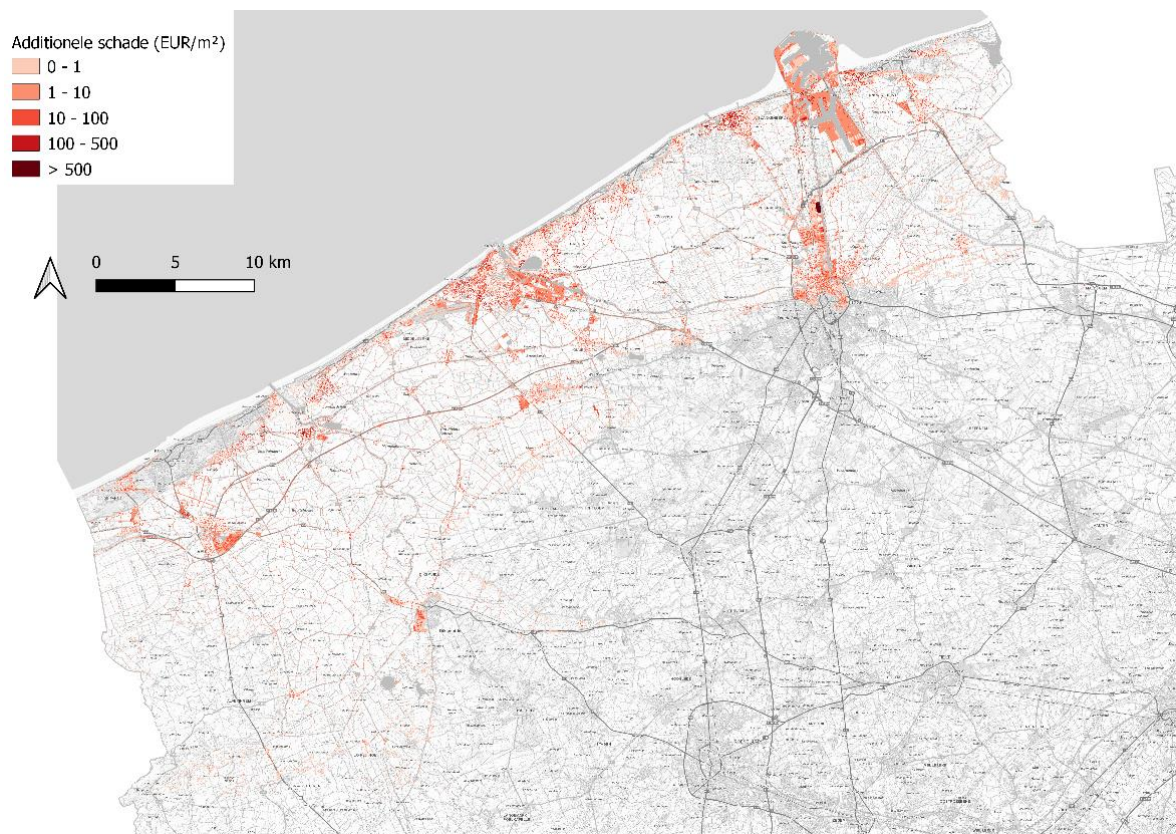
Tabel 3-9 : Schade en slachtoffers op de zeekering per kustdeel bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3) (berekend voor dijken).

Kustdeel	Sectie	Schade ZSS3 [EUR]	Slachtoffers ZSS3 [#]
Natuurreserveaat Westhoek	1-6	nvt	nvt
Verkaveling Westhoek	7-12	nvt	nvt
De Panne centrum	13-18	nvt	nvt
Sint-Idesbald	19-25	nvt	nvt
Koksijde-Bad	26-34	32 500 178	626.3
Koksijde - Oostduinkerke	35-42	nvt	nvt
Oostduinkerke-Bad	43-44	nvt	nvt
Oostduinkerke - Nieuwpoort	46-51	nvt	nvt
Groenendijk-Bad en Nieuwpoort-Bad	52-59	150 060	162.5
Militair domein Lombardsijde	60-66	nvt	nvt
Sint-Laureinsstrand	67-73	nvt	nvt
Westende-Bad	74-78	52 462 717	1 209.4
Middelkerke	79-92	58 614 198	3 008.2
Raversijde-West	93-97	nvt	nvt
Raversijde, Mariakerke en Oostende West	98-108	42 736 620	1 673.5
Oostende centrum	109-117	27 597 388	752.7
Spinoladijk	119-124	nvt	nvt
Bredene	125-136	nvt	nvt
Bredene - De Haan	137-150	nvt	nvt
De Haan centrum	151-155	13 575 286	289.0
De Haan - Wenduine	156-167	nvt	nvt
Wenduine	168-176	25 904 957	699.3
Wenduine - Blankenberge	177-184	nvt	nvt
Blankenberge	185-194	60 992 998	1 953.6
Blankenberge - Zeebrugge	195-210	1 879 484	71.8
Zeebrugge-Bad	211-216	11 491 484	236.2
Heist	217-222	36 071 479	1 106.3
Duinbergen en Albertstrand	223-232	57 277 682	1 266.5
Knokke Zoute	233-239	51 348 563	1 111.3
Lekkerbek	240-249	8 617 710	104.5
Totaal		481 228 071	14 271

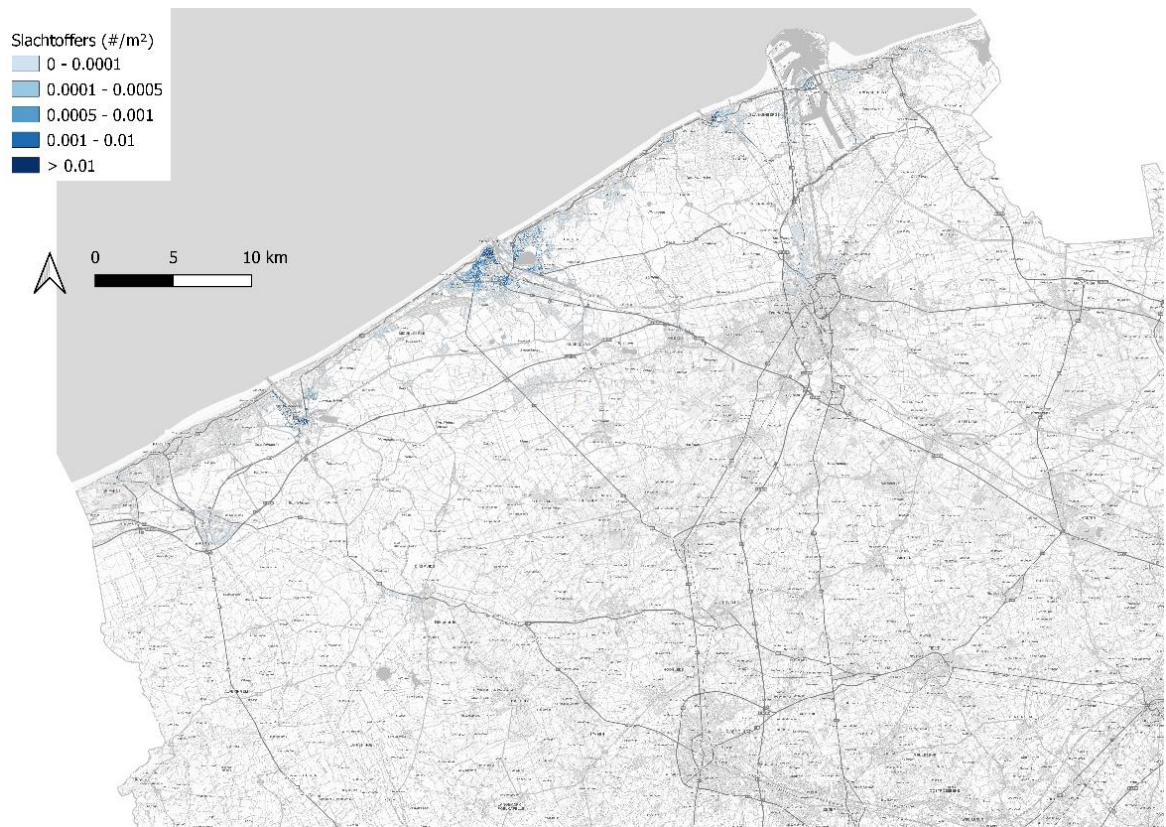




Figuur 3-25: Schade door overstromingsdiepte in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).

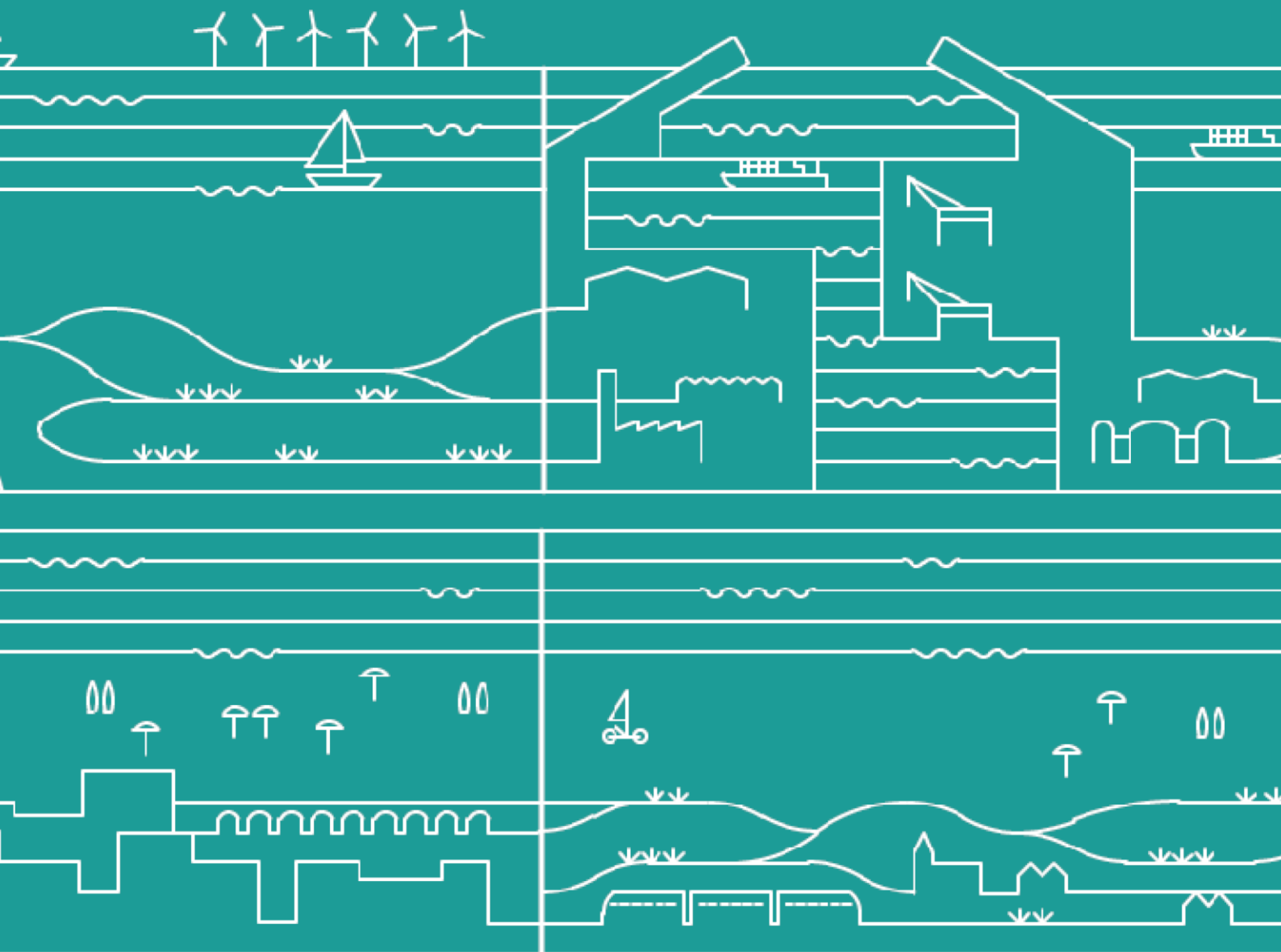


Figuur 3-26: Additionele schade in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).



Figuur 3-27: Slachtoffers in de kustvlakte bij +3 m zeespiegelstijging (scenario ZSS3).





Vergelijking met andere  
overstromingsmodelleringen en  
schade- en slachtofferberekeningen

# 4 Vergelijking met andere overstromingsmodelleringen en schade- en slachtofferberekeningen

In deze sectie wordt een vergelijking gemaakt met voorgaande overstromingsmodelleringen en schade- en slachtofferberekeningen, om de uitkomsten van de voorliggende studie te kaderen ten opzicht van eerdere inschattingen.

Er zijn echter weinig studies die de impact van dergelijke grote zeespiegelstijgingen onderzoeken. In een eerder oefening in het kader van CLIMAR zijn enkele grootschalige verkenningen gebeurd voor zeespiegelstijgingsscenario's. Daarnaast worden in het kader van het Masterplan Kustveiligheid meer gedetailleerde overstromings- en schade- en risicoberekeningen uitgevoerd door het Waterbouwkundig Laboratorium waarin verschillende stormen worden geanalyseerd met maximale stormpeilen in Oostende variërend tussen +6.25 en + 8 m TAW.

## 4.1 CLIMAR

In een studie in het kader van CLIMAR zijn grootschalige overstromingsberekeningen uitgevoerd (Van der Biest *et al.*, 2009). Daarbij wordt vertrokken van een type storm die in de huidige situatie een stormwaterpeil in Oostende heeft van +8 m TAW en een terugkeerperiode van 1 op 17 000 (Van der Biest *et al.*, 2009). Dit type storm wordt eveneens voor de zeespiegelstijgingsscenario's toegepast waarbij waterstanden en golfcondities zijn aangepast aan het scenario. Drie situaties zijn geanalyseerd:

- de huidige situatie, met stormpeil van +8 m TAW (terugkeerperiode van 17 000 jaar);
- een gematigd scenario, met stormpeil van +8.79 m TAW (60 cm gemiddelde zeespiegelstijging en 19 cm extra stormopzet) en 4% stijging windsnelheid;
- een extreem worst case scenario, met stormpeil van +10.40 m TAW (200 cm gemiddelde zeespiegelstijging en 40 cm extra stormopzet) en 8% stijging windsnelheid.

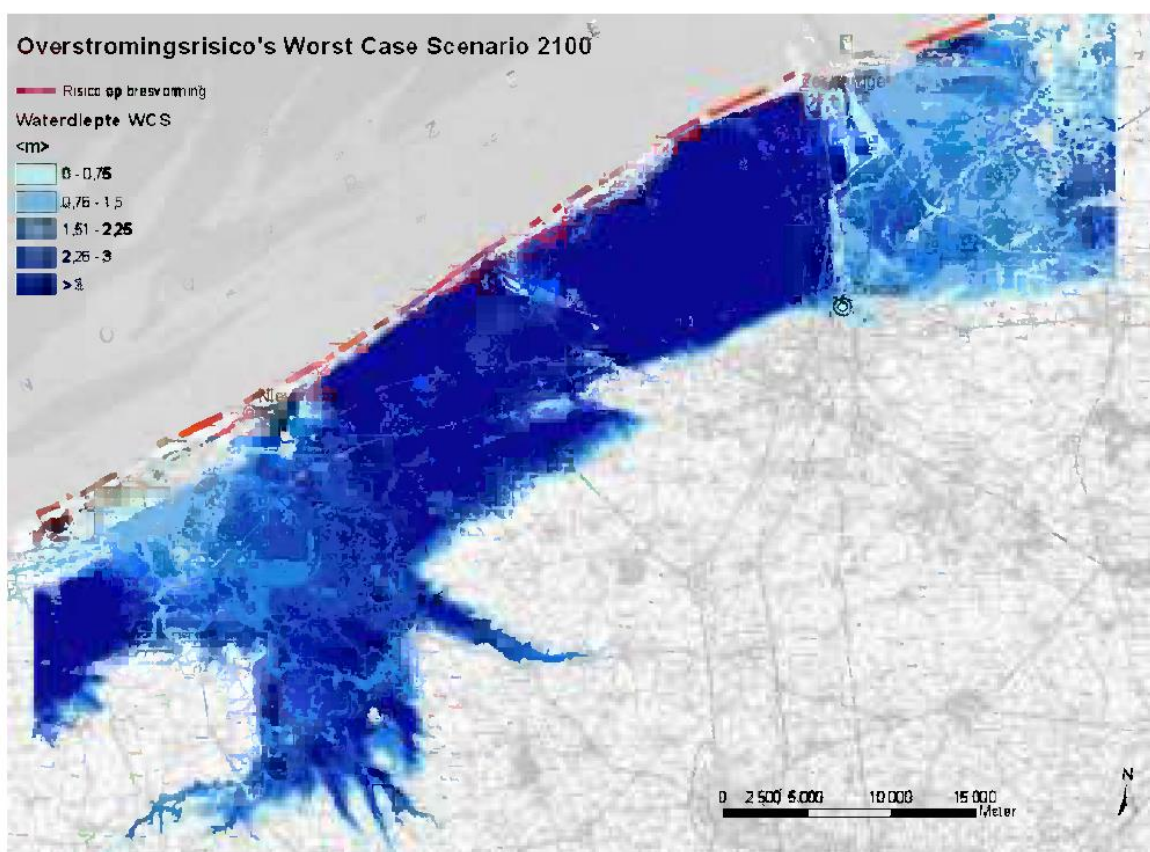
In de voorliggende studie worden niet dezelfde condities geanalyseerd. De storm met terugkeerperiode van 17 000 jaar is extremer dan de maatgevende storm van 1 op 1000 die in deze studie wordt toegepast en kent bijgevolg extremere golfcondities. Wat betreft de stormwaterpeilen in de haven van Oostende zijn er enkele verschillen, maar wordt wel dezelfde range geanalyseerd (stormwaterpeil bij scenario ZSS1 = +8 m TAW, bij scenario ZSS2 = +9 m TAW en bij scenario ZSS3 = +10 m TAW).

Beide studies hanteren wel een vergelijkbare grootschalige aanpak om bressen en falen te bepalen bij dijken en duinen langsheen de strandzones. De achterliggende topografie van stranden en duinen is daarbij gebaseerd op gegevens uit 2003 – 2006. Een belangrijke aanname is echter dat de havens geen onderdeel uitmaakten van het CLIMAR onderzoek en er dus geen overstroming vanuit de zeehavens is meegenomen wat wel is gebeurd in deze studie. De resultaten van de CLIMAR studie kunnen dus worden beschouwd als onderschattingen.

De berekende overstromingsdiepte voor het worst case scenario (uitgedrukt in stormpeil van +10.40 m TAW) worden geïllustreerd in Figuur 4-1. Zoals verwacht overstroomt ook hier het grootste deel van de kustvlakte. In tegenstelling tot deze studie was er nog geen overstroming richting buurlanden mogelijk in het model en door het ontbreken van de debieten vanuit de havens wordt met andere watervolumes en overstromingsdieptes gewerkt.

Wat betreft schade en slachtoffers is de vergelijking niet direct mogelijk door het verschil in aanpak van de havens. In de CLIMAR studies worden stelselmatig lagere inschattingen gevonden. Dit wordt geïllustreerd in Tabel 4-1.

Gezien de aannames van de modelstudie uit CLIMAR is het bijgevolg logisch dat deze lager zijn dan de uitkomsten van deze studie voor alle zeespiegelstijgingsscenario's.



Figuur 4-1: Berekende overstromingsdiepte (m) in geval van een storm in het worst case klimaatscenario (stormwaterpeil +10.40 m TAW) uit (Van der Biest *et al.*, 2009).

Tabel 4-1: Totale schade en slachtoffers voor de scenario's uit CLIMAR uit (Van der Biest *et al.*, 2009) en de scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging in deze studie.

	CLIMAR			ZSS1	ZSS2	ZSS3
	+8.00 m TAW	+8.79 m TAW	+10.40 m TAW	+8.00 m TAW	+9.00 m TAW	+10.40 m TAW
Schade [mln. EURO]	Ca 400	Ca 3 300	Ca 17 000	7 435.66	19 504.43	34 108.93
Aantal slachtoffers [#]	10	260	6 700	923.5	9 310.9	25 163.1

## 4.2 Berekeningen in kader van MPKV

In het kader van het Masterplan Kustveiligheid is de aanpak verder uitgewerkt waarbij een gedetailleerde analyse van bresvorming en falen wordt uitgevoerd als randvoorwaarden voor de overstromingsmodellering waarna een volledige schade en risico berekening volgt. Deze oefening wordt periodiek herhaald.

De resultaten van de toetsing uit 2015 zijn voor wat betreft de overstromingsmodellering beschikbaar in (Parrado *et al.*, 2017) en voor wat betreft de schade en risicoberekening in (Vanneste, D. *et al.*, 2018).

Zes verschillende stormen worden daarbij doorgerekend met maximale stormpeilen tussen +6.25 m TAW en + 8 m TAW in de haven van Oostende. De 1000-jarige storm zoals die in deze studie is onderzocht komt daarbij overeen met de storm met maximaal waterpeil van +7 m TAW in Oostende.

De resultaten van het + 8 m TAW scenario zijn gebruikt om te vergelijken met de resultaten het ZSS1 scenario met +1 m zeespiegelstijging in dit rapport waarbij het maximale stormpeil overeenkomt. Gezien het verschil in type storm (17 000 jarige versus 1 000 jarige) zijn ook de resultaten van + 7 m TAW en +7.5 m TAW hieronder toegevoegd.

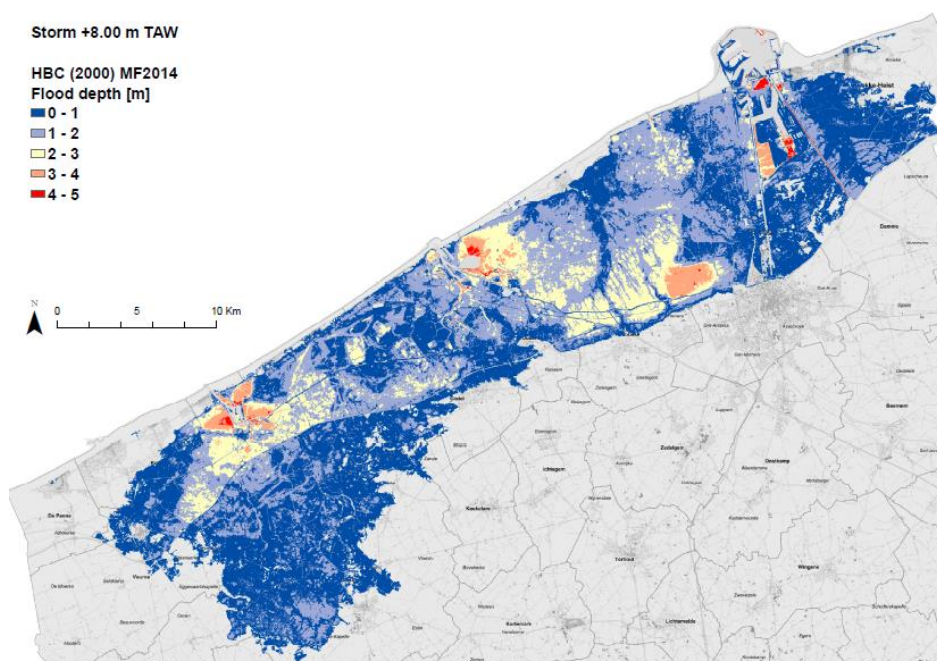
Verder is er een verschil in beide studies van de uitgangssituatie. In (Parrado *et al.*, 2017) en (Vanneste, D. *et al.*, 2018) is de berekening gelinkt aan de toetsing van 2015 en wordt bijgevolg de situatie 2015 toegepast. In deze studie bevat de uitgangssituatie (de referentiesituatie) de volledige uitvoering van het Masterplan Kustveiligheid. Dit betekent in vergelijking met 2015 bijvoorbeeld dat de stormvloedkering in Nieuwpoort verondersteld is om operationeel te zijn en enkele aanpassingen aan de zeewering van de strandzones zoals de uitvoering van enkele suppleties en stormmuren. Gezien het +8 m TAW met een extreme storm is geassocieerd in vergelijking met het ZSS1 scenario en gezien de volledige uitvoering van het MPKV in ZSS1 is het dus de verwachting dat, in tegenstelling tot de CLIMAR studie, de getallen uit de toetsing van 2015 eerder hoger zullen liggen.

De resultaten van de overstromingsmodellering van de situatie 2015 zijn geïllustreerd voor de +8 m TAW storm in Figuur 4-2. De resultaten van de overstromingsdiepte voor het ZSS1 scenario met +1 m zeespiegelstijging zijn zichtbaar in Figuur 3-4 in sectie 0. Het overstromd gebied is bij het ZSS1 scenario een stuk minder uitgestrekt. Dit is vooral het geval aan de westkust waar in de resultaten van de toetsing quasi de volledige kustvlakte overstroomt, beperkt dit zich in ZSS1 tot Westende en blijft het gebied ten westen gevrijwaard op enkele lokale overstromingen nabij de zeewering na. Dit verschil is te verklaren door de aanwezigheid van de stormvloedkering in Nieuwpoort die in vergelijking met de berekening 2015 er nu voor zorgt dat er geen overstroming vanuit de haven van Nieuwpoort optreedt. Aan de oostkust is de uitgestrektheid ook een stukje beperkter in de huidige studie. Vermoedelijk is dit gelinkt aan een afname van de overstroming vanuit de haven van Zeebrugge door de aannames rond falen van structuren waarbij de Pierre Vandamme sluis bij +1 m zeespiegelstijging nog niet faalt. Ter hoogte van het centrale deel van de kust worden gelijkaardige resultaten bekomen.

De schade en risicoberekening uit (Vanneste, D. *et al.*, 2018) is op gelijkaardige wijze gebeurd voor wat betreft de schade- en slachtoffer berekening van de individuele stormen. Er is in deze studie geen volledige risicoberekening uitgevoerd. Uit de resultaten van de studie in 2015 kunnen alvast de volgende zaken worden geobserveerd:

- De schade wordt gedomineerd voor alle onderzocht stormen door de schade in de kustvlakte. De schade op de zeewering heeft een minimale bijdrage. Wat betreft de slachtoffers is het genuanceerder; enkel voor de extreemste storm van +8 m TAW vormt de zeewering de belangrijkste bijdrage in het totale aantal slachtoffers, voor de andere stormen bepaalt de kustvlakte het aantal.
- Voor wat betreft de berekening op de zeewering blijken de kustonderdelen met dijken de totale waarde te bepalen. Bij de +8 m TAW storm vormen de kustonderdelen met dijksectie 90% van de totale schade en 98% van aantal slachtoffers op de zeewering.
- De schade en slachtoffers op de zeewering neemt sterk toe van de +7.5 m TAW storm naar de +8 m TAW storm (van ca 4 naar 36 miljoen euro en van 159 naar 1361 slachtoffers). Dit is vermoedelijk gelinkt aan een sterke toename in het overslagdebiet bij deze stormen waarbij de impact snel kan stijgen (bijvoorbeeld de Beta factor bevat een exponentiële stijging in de range 0 – 291 l/m/s). Gezien de gevoeligheid van deze getallen en gezien bij de +8 m TAW storm ook extreme stormcondities zijn toegepast (golfcondities bij 17 000 jarige storm) die mogelijk tot meer overslag leiden dan in deze studie het geval, is er dus enige voorzichtigheid geboden in de analyse van de zeewering.

Figure 6 – Flood depth for +8.00 m TAW storm (HBC 2000). Corrected model Mike Flood version 2014 SP3.



Figuur 4-2: Berekende overstromingsdiepte (m) in geval van de +8 m TAW storm uit (Parrado *et al.*, 2017).

Een vergelijking is gemaakt in Tabel 4-2 tussen de ZSS1 scenario resultaten bij +1 m zeespiegelstijging en de resultaten van de +7.5 m TAW en +8 m TAW stormen uit (Vanneste, D. *et al.*, 2018).

Voor wat betreft de totale schade berekenen het ZSS1 scenario met 7 436 miljoen euro en de +8 m TAW storm met 10 491 miljoen euro gelijkaardige grootteordes. De totale schade is bij de +8 m TAW storm wel een stukje hoger (circa 40%). Gezien de totale schade wordt gedomineerd door de schade in de kustvlakte is dit niet verwonderlijk. Er is in het ZSS1 scenario immers een heel stuk minder overstroming van de kustvlakte. Er is wel een verschil in schade op de zeewering tussen beide berekeningen, maar deze heeft minimale invloed op de totale schade.

Voor wat betreft het totaal aantal slachtoffers is er een groter verschil tussen beide berekeningen. In het ZSS1 scenario is het aantal ca. 924 en in de +8 m TAW storm bedraagt het aantal slachtoffers ca. 2147 (iets meer dan een verdubbeling). Dit is vooral te wijten aan de verschillen ter hoogte van de zeewering (circa drie maal meer slachtoffers op de zeewering bij de +8 m TAW storm in vergelijking met het ZSS1 scenario). Waar bij de schade de zeewering een zeer beperkte bijdrage had, is dat niet het geval voor de slachtoffers bij dergelijke hoge zeespiegelstijging. In het geval van de +8 m TAW storm is er een zeer sterke bijdrage in het totaal aantal slachtoffers van de zeewering. Frappant is de sterke toename ten opzicht van de +7.5 m TAW storm welke meer in lijn liggen met de ZSS1 berekening op de zeewering. Een deel van de verklaring voor de verschillen tussen +8 m TAW en het ZSS1 scenario ligt potentieel in de verschillen in debieten over de zeewering. Bij het opstellen van de randvoorwaarden blijkt de typische range van overslagdebieten bij het ZSS1 scenario tussen de 0 – 200 l/m/s met een groot deel fluctuerend rond 10 l/m/s (zie Figuur 2-5 in sectie 2.1.1.2). Variaties in de debieten (lager dan 291 l/m/s) kunnen leiden tot variaties in de bepaling van de Beta coëfficiënt welke exponentieel kunnen variëren. Gezien de onzekerheden op het bepalen van deze debieten, de verschillen in type storm en golfcondities (1000-jarige versus extremere storm) is het zeer waarschijnlijk dat de overslagdebieten afwijken tussen beide modellen wat tot variatie in het al of niet voorkomen en variatie in waarde van schade en slachtoffers op de zeewering kan leiden.

Tabel 4-2: Totale schade en slachtoffers voor het scenario met +1 m zeespiegelstijging (ZSS1) en de resultaten uit de schade en risicoberekening uit (Vanneste, D. *et al.*, 2018) voor +7.5 en +8 m TAW. De verschillen t.o.v. ZSS1 zijn in (%) weergegeven.

		ZSS1		
		+8.0 m TAW	+7.5 m TAW	+8.0 m TAW
Kustvlakte	Schade [mln. EURO]	7 427.80	6 868.9 (-8%)	10 454.9 (+41%)
	Aantal slachtoffers [#]	598.5	410.5 (-31%)	785.3 (+31%)
Zeewering	Schade [mln. EURO]	7.86	4.2 (-47%)	36.0 (+358%)
	Aantal slachtoffers [#]	325.0	159.3 (-51%)	1361.3 (+319%)
<b>Totaal</b>				
Totaal	Schade [mln. EURO]	7 435.66	6 873.1 (-8%)	10 490.9 (+41%)
	Aantal slachtoffers [#]	923.5	569.8 (-38%)	2146.6 (+132%)

### 4.3 Samenvatting

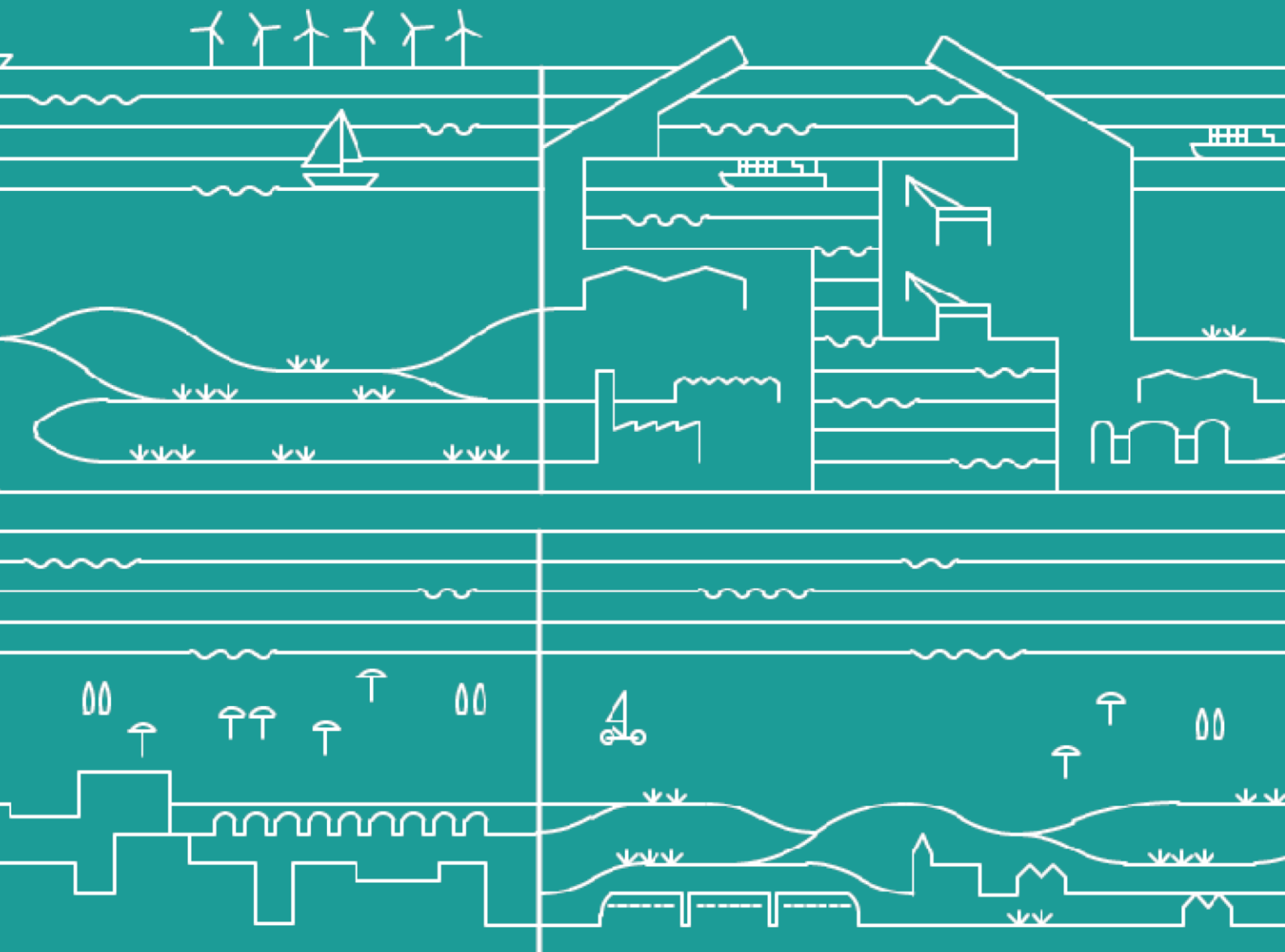
Een rechtstreeks vergelijking tussen alle modellen blijkt niet mogelijk gezien de verschillende uitgangspunten en methodes.

De resultaten uit de CLIMAR studie blijken door de aanname om havens niet op te nemen niet direct vergelijkbaar. De resultaten zouden omwille van deze aanname wel lager moeten uitvallen dan de inschattingen in deze studie wat ook blijkt uit de vergelijking.

De berekeningen in het kader van het Masterplan Kustveiligheid bevatten enkele extremere stormen die, hoewel er verschillen zijn in condities, een kwalitatieve vergelijking toelaten met de overstromingsresultaten in deze studie bij +1m zeespiegelstijging. Een vergelijking leert dat de resultaten in dezelfde lijn zitten, zeker voor wat betreft de schade. Er zijn verschillen omwille van andere uitgangssituaties waaronder de aanname dat het Masterplan is uitgevoerd in deze oefening, beperkt andere condities en de detailgraad van de modellering. Voor wat betreft de slachtoffers zijn de verschillen over het algemeen groter, maar is er enige voorzichtigheid geboden in de interpretatie van de resultaten.

In de slachtofferaantallen speelt de bijdrage van de zeewering bij de hogere waterstanden een belangrijke rol waarbij de invloed van het overslagdebiet van belang is. Door de iets extremere condities die worden beschouwd bij de berekeningen in het kader van het Masterplan Kustveiligheid bij +8m TAW in vergelijking met +1 m zeespiegelstijging leidt dit tot een hogere inschatting van slachtoffers op de zeewering in de toetsing. Een verdere verfijning van de aanpak ter hoogte van de zeewering bij hogere zeespiegelstijgingen en de manier waarop hier schade en slachtoffers wordt berekend kan een meerwaarde bieden.





# Conclusies en samenvatting

## 5 Conclusies en samenvatting

Dit rapport presenteert de resultaten van de overstromingsmodellering en de berekeningen van schade en slachtoffers in de referentiesituatie. De referentiesituatie betekent daarbij de situatie na uitvoering van het Masterplan Kustveiligheid, maar zonder Kustvisie maatregelen. Voor deze studie zijn drie specifieke situaties doorgerekend met het overstromingsmodel zoals wordt ingezet in kader van Masterplan Kustveiligheid in samenwerking met het Waterbouwkundig Laboratorium. De doorgerekende situaties vertrekken van de referentiesituatie waarbij een 1000-jarige storm voorkomt bij +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging met als doel inzicht te krijgen in de uitgestrektheid van het impactgebied en de schade en slachtoffers.

De overstromingsmodellering en de schade- en slachtofferberekening in deze oefening beschouwen extremere situaties en zijn uitgevoerd als een meer verkennende analyse in vergelijking met de typische modellering en de detailgraad die gebeurt voor gelijkaardige oefeningen in het kader van het Masterplan Kustveiligheid. Er is daarom voor dit strategisch onderzoek, een vereenvoudigde aanpak met een reeks aannames uitgewerkt in afstemming met het Waterbouwkundig Labo. Hoewel er geen directe vergelijking met voorgaande berekeningen mogelijk is, lijken de resultaten in de lijn van voorgaande inschattingen te liggen, zeker voor wat de schade betreft, met enige voorzichtigheid voor wat betreft slachtoffers op de zeewering. Verdere verfijningen kunnen een meerwaarde bieden in de toekomst voor wat betreft onder andere het bepalen van de randvoorwaarden aan de zeewering van de strandzones en in de havens, het aanpassen van het overstromingsmodel naar de meest recente situatie en beslist beleid (bijvoorbeeld de uitbreiding van het Zwin en de nieuwe zeesluis in Zeebrugge opnemen), het uitbreiden van de lagen in het LATIS model en het nagaan of aanpassen van de schadefuncties en slachtofferberekeningen voor de extreme situaties die worden beschouwd.

Een bondige samenvatting van de resultaten voor wat betreft totale schade en slachtoffers van de drie scenario's met zeespiegelstijgingsniveaus van +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging zijn opgenomen in Tabel 5-1. Daaruit blijkt de stelselmatige toename in schade en verhoudingsgewijs sterkere toename in slachtoffers met zeespiegelstijging.

Een verdere vergelijking van de drie zeespiegelstijgingen worden getoond in de daaropvolgende tabellen. Tabel 5-2 geeft voor de kustvlakte de economische schade ten gevolge van overstromingsdiepte, de additionele schade ten gevolge van stroomsnelheden en het aantal slachtoffers voor de drie scenario's. De schade in de havens zit tevens opgenomen in Tabel 5-2. Ter informatie is de specifieke schade in de havens voor en achter de zeewering, mee onderdeel van de totale schade voor de kustvlakte uit Tabel 5-2, nog eens apart opgenomen in Tabel 5-3. Tabel 5-4 en Tabel 5-5 geven respectievelijk de schade en het aantal slachtoffers op de zeewering per kustdeel voor de drie scenario's met zeespiegelstijgingsniveaus van +1 m, +2 m en +3 m.

De resultaten van deze studie geven inzicht in de uitgestrektheid bij zeespiegelstijging van de overstroming vanuit zee en een indicatie van grootteorde kost en slachtoffer tijdens de maatgevende storm bij zeespiegelstijging zonder uitvoering van Kustvisie.

Tabel 5-1: Totale schade en slachtoffers voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging.

		ZSS1	ZSS2	ZSS3
Kustvlakte	Schade [mln. EURO]	7 427.80	19 289.40	33 627.70
	Aantal slachtoffers [#]	598.5	2 702.9	10 892.1
Zeewering	Schade [mln. EURO]	7.86	215.03	481.23
	Aantal slachtoffers [#]	325.0	6 608.0	14 271.0
Totaal	Schade [mln. EURO]	7 435.66	19 504.43	34 108.93
	Aantal slachtoffers [#]	923.5	9 310.9	25 163.1

Tabel 5-2: Totale schade en slachtoffers in de kustvlakte voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging.

	ZSS1	ZSS2	ZSS3
Schade overstromingsdiepte [mln. EURO]	6 798.9	18 055.0	32 192.6
Additionele schade [mln. EURO]	628.9	1 234.4	1 435.1
Aantal slachtoffers [#]	598.5	2 702.9	10 892.1

Tabel 5-3: Schade per havengebied, verdeeld in het gebied voor en achter de zeewering, voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging (onderdeel van de totale schade en slachtoffers in de kustvlakte in Tabel 5-2).

Haven		Schade ZSS1 [mln. Euro]	Schade ZSS2 [mln. Euro]	Schade ZSS3 [mln. Euro]
Blankenberge	Achter zeewering	9.4	17.6	24.1
	Voor zeewering	1.4	1.9	2.3
Nieuwpoort	Achter zeewering	0.3	50.6	53.9
	Voor zeewering	0.2	40.8	43.9
Oostende	Achter zeewering	276.6	385.7	453.1
	Voor zeewering	50.1	77.2	87.3
Zeebrugge	Achter zeewering	237.8	586.5	1 015.9
	Voor zeewering	198.3	456.5	687.3

Tabel 5-4: Schade op de zeewering per kustdeel voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging (berekend voor dijken).

Kustdeel	Sectie	Schade ZSS1 [EUR]	Schade ZSS2 [EUR]	Schade ZSS3 [EUR]
Natuurreservaat Westhoek	1-6	nvt	nvt	nvt
Verkaveling Westhoek	7-12	nvt	nvt	nvt
De Panne centrum	13-18	nvt	nvt	nvt
Sint-Idesbald	19-25	nvt	nvt	nvt
Koksijde-Bad	26-34	189 541	13 235 745	32 500 178
Koksijde - Oostduinkerke	35-42	nvt	nvt	nvt
Oostduinkerke-Bad	43-44	nvt	nvt	nvt
Oostduinkerke - Nieuwpoort	46-51	nvt	nvt	nvt
Groenendijk-Bad en Nieuwpoort-Bad	52-59	13 847	150 060	150 060
Militair domein Lombardsijde	60-66	nvt	nvt	nvt
Sint-Laureinsstrand	67-73	nvt	nvt	nvt
Westende-Bad	74-78	294 224	17 879 245	52 462 717
Middelkerke	79-92	503 208	27 982 554	58 614 198
Raversijde-West	93-97	nvt	nvt	nvt
Raversijde, Mariakerke en Oostende West	98-108	2 904 412	29 907 279	42 736 620
Oostende centrum	109-117	672 683	21 368 275	27 597 388
Spinoladijk	119-124	nvt	nvt	nvt
Bredene	125-136	nvt	nvt	nvt
Bredene - De Haan	137-150	nvt	nvt	nvt
De Haan centrum	151-155	523	624 556	13 575 286
De Haan - Wenduine	156-167	nvt	nvt	nvt
Wenduine	168-176	721 046	25 068 041	25 904 957
Wenduine - Blankenberge	177-184	nvt	nvt	nvt
Blankenberge	185-194	933 565	25 053 768	60 992 998
Blankenberge - Zeebrugge	195-210	4 114	193 477	1 879 484
Zeebrugge-Bad	211-216	63 062	2 994 231	11 491 484
Heist	217-222	134 362	12 632 976	36 071 479
Duinbergen en Albertstrand	223-232	383 668	16 894 996	57 277 682
Knokke Zoute	233-239	946 261	20 010 923	51 348 563
Lekkerbek	240-249	97 089	1 032 167	8 617 710
Totaal		7 861 637	215 028 293	481 228 071

Tabel 5-5: Slachtoffers op de zeewering per kustdeel voor de drie scenario's met +1 m, +2 m en +3 m zeespiegelstijging (berekend voor dijken).

Kustdeel	Sectie	Slachtoffers ZSS1 [#]	Slachtoffers ZSS2 [#]	Slachtoffers ZSS3 [#]
Natuurreservaat Westhoek	1-6	nvt	nvt	nvt
Verkaveling Westhoek	7-12	nvt	nvt	nvt
De Panne centrum	13-18	nvt	nvt	nvt
Sint-Idesbald	19-25	nvt	nvt	nvt
Koksijde-Bad	26-34	3.4	241.4	626.3
Koksijde - Oostduinkerke	35-42	nvt	nvt	nvt
Oostduinkerke-Bad	43-44	nvt	nvt	nvt
Oostduinkerke - Nieuwpoort	46-51	nvt	nvt	nvt
Groenendijk-Bad en Nieuwpoort-Bad	52-59	15.0	162.5	162.5
Militair domein Lombardsijde	60-66	nvt	nvt	nvt
Sint-Laureinsstrand	67-73	nvt	nvt	nvt
Westende-Bad	74-78	5.5	356.4	1 209.4
Middelkerke	79-92	21.0	1 199.2	3 008.2
Raversijde-West	93-97	nvt	nvt	nvt
Raversijde, Mariakerke en Oostende West	98-108	170.7	1 172.8	1 673.5
Oostende centrum	109-117	22.2	588.1	752.7
Spinoladijk	119-124	nvt	nvt	nvt
Bredene	125-136	nvt	nvt	nvt
Bredene - De Haan	137-150	nvt	nvt	nvt
De Haan centrum	151-155	nvt	12.8	289.0
De Haan - Wenduine	156-167	nvt	nvt	nvt
Wenduine	168-176	19.4	679.7	699.3
Wenduine - Blankenberge	177-184	nvt	nvt	nvt
Blankenberge	185-194	29.3	828.8	1 953.6
Blankenberge - Zeebrugge	195-210	0.2	7.4	71.8
Zeebrugge-Bad	211-216	1.2	57.4	236.2
Heist	217-222	3.9	413.3	1 106.3
Duinbergen en Albertstrand	223-232	8.1	354.5	1 266.5
Knokke Zoute	233-239	24.0	520.6	1 111.3
Lekkerbek	240-249	1.3	13.0	104.5
Totaal		325	6 608	14 271

## 6 Referenties

Beullens, J., Broidoi, S., De Sutter R., De Mayer P., Verwaest T. & Mostaert F. (2017). Ontwikkeling LATIS 4: Deelrapport bis: Actualisatie basiskaarten en schadewaarden. Versie 3.0. Universiteit Gent, Antea Group, Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen., WL\_Rapporten, 13\_159\_7.

Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis) (2022a). Kustvisie - Veiligheidsscan. I/RA/11630/21.202/ABO/.

Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis) (2022b). Kustvisie - Ontwerp havens. I/RA/11630/21.187/ABO/.

Consortium Hoogtij(d) (IMDC, ORG, Arcadis) (2022c). Kustvisie - (Bouw)technische randvoorwaarden. I/RA/11630/21.183/ABO/.

EurOtop & EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com). Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).

IMDC (2019). Complex Project Kustvisie. D07 Veiligheidsbeoordeling. Startnota kustveiligheidsbeoordeling. I/NO/11505/19.122/VBA/.

Parrado R., Vanneste D., Vanderkimpen P., Verwaest T. & Mostaert F. (2017). Update Flood Risk Coastal Plain -2015: Flood Modeling Report. Flanders Hydraulics Reseach, 14\_150\_1, version 5.0.

Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R. & Lescinski J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coast. Eng.*, 56(11–12), 1133–1152, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>.

Suzuki T., De Roo S., Altomare C., Zhao G., Kolokythas G., Willems M., Verwaest T. & Mostaert F. (2016). Toetsing kustveiligheid 2015 - Methodologie: Toetsingsmethodologie voor dijken en duinen. Versie 10.0. WL Rapporten, 14\_014. Waterbouwkundig Laboratorium & Afdeling Kust: Antwerpen, België.

Van Ackere, S., De Wit B., De Maeyer Ph., Pereira F. & Coen L. (2021). LATIS 4.1: Stand van zaken en verbeteringsmogelijkheden. Versie 2.0. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, WL Rapporten, 13\_159\_11.

Van der Biest K., Verwaest T., Reyns J. & Mostaert F. (2009). CLIMAR: Deelrapport 2 - Kwantificatie van de secundaire gevolgen van de klimaatsverandering in de Belgische kustvlakte. Waterbouwkundig Laboratorium, WL Rapporten, 814\_01, versie 2\_0.

Vanneste, D., Beullens J., Ruiz-Parrado I., Broidoi S. & Mostaert F. (2018). Update overstromingsrisico kustvlakte - 2015: Rapportering schade- en slachtofferisico. Versie 4.0. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, WL Rapporten, 14\_150\_2.

Verwaest T., Van Poucke Ph., Vanderkimpen P., Van der Biest K., Reyns J., Peeters P., Kellens W., Vanneuville W. & Mostaert, F. (2008). Overstromingsrisico's aan de Vlaamse kust. Evaluatie van de zeekering. Deel 1: methodologie. WL Rapporten 718/2A. Waterbouwkundig Laboratorium & Universiteit Gent & Soresma-Haecon.

Zijlema M., Stelling G. & Smit P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Eng.*, 58(10), 992–1012, doi: [10.1016/j.coastaleng.2011.05.015](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015).



# Colofon

<b>COPYRIGHT</b>	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.
<b>OMSLAG</b>	Hoogtij(d)
<b>PUBLICATIEDATUM</b>	21/11/2023
<b>UITGEVER</b>	ir. Annelies Bolle Senior ingenieur Projectleider Kustvisie – consortium Hoogtij(d) +32 479 92 03 08, Annelies.bolle@imdc.be
<b>OPMAAK</b>	Hoogtij(d)







Kust  
visie