



Verticale ruimte voor de rivier

Bureaustudie en OKADER berekeningen naar de invloed van verruwing op de dijkversterkingsopgaven en -kosten

Opdrachtgever



Dr. ir. Ties Rijcken (Flows Productions)



Verticale ruimte voor de rivier



Bureaustudie en OKADER berekeningen naar de
invloed van verruwing op de dijkversterkingsopgaven
en -kosten

Eindrapport

Auteur(s)

Cees Oerlemans
Jochem Caspers

4525.10

juli 2021

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Aanpak van de werkzaamheden	1
1.4	Leeswijzer	2
2	Bureaustudie verruwing en dijkversterking	3
2.1	Waterstandsverhoging door verruwing	3
2.2	Eerdere OKADER analyses	5
2.3	Aanbevolen rapporten voor artikel	6
3	Analyse met OKADER	7
3.1	Werkwijze en uitgangspunten van OKADER	7
3.2	Berekeningen dijkversterkingsopgaven en kosten voor verschillende maten van waterstandstoename	10
3.3	Resultaten	12
4	Conclusies en aanbevelingen	17
4.1	Conclusies	17
4.2	Aanbevelingen	19
5	Referenties	20
	Bijlagen	23
A	OKADER-berekeningen	25

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De natuur profiteert van meer begroeiing in de uiterwaarden langs de Nederlandse Rivieren. Tegelijkertijd kan begroeiing leiden tot hogere waterstanden welke een bedreiging kunnen vormen voor de waterveiligheid. Om deze bedreigingen tegen te gaan moeten mitigerende maatregelen worden genomen. Er is echter weinig bekend over de gevolgen van verruwing op de dijkversterkingsopgaven en kosten. Flows Productions heeft opdracht gekregen van het Wereld Natuurfonds (WWF) om een onlineproductie te maken (artikel met video) over de implicaties van verruwing voor de huidige en toekomstige dijkversterkingen. Deze rapportage ondersteunt deze onlineproductie met als titel: "Verticale Ruimte voor de Rivier".

1.2 Doelstelling

Het doel van de werkzaamheden is om in samenwerking met Flows Productions een eerste beeld te schetsen van de implicaties van verruwing voor de Rijntakken op de dijkversterkingen en kosten. Hiervoor zal gebruik gemaakt worden van een tool die, in samenwerking met andere partijen, is ontwikkeld door HKV; Opgave en Kosten Analyse Dijken En Rivierverruiming tool, ook wel OKADER genoemd. Het eindresultaat bestaat uit een bijdrage aan het artikel, berekeningen met OKADER met een bondige rapportage en review van het filmscript.

1.3 Aanpak van de werkzaamheden

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door Jochem Caspers, Hermjan Barneveld en Cees Oerlemans. Cees Oerlemans was daarin verantwoordelijk voor de algehele coördinatie en heeft meegeschreven aan het artikel. Jochem Caspers heeft de berekeningen van OKADER opgesteld en uitgevoerd, inclusief de bijbehorende analyse. Hermjan Barneveld heeft opgetreden als interne adviseur en projectonderdelen gereviewd.

Gedurende het proces zijn er meerdere overleggen geweest met Ties Rijcken en Alphons van Winden (Bureau Stroming) om uitgangspunten vast te stellen en resultaten te interpreteren. Daarnaast zijn er verschillende commentaarrondes geweest over de uitkomsten van OKADER en de bijdrages aan het artikel.

1.4

Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk is de achtergrond bij het vraagstuk beschreven aan de hand van relevante achtergrond rapporten (hoofdstuk 2). Een aantal van deze rapporten zijn opgenomen door middel van referenties in de productie. In hoofdstuk 3 worden de uitgangspunten, werkwijzen en resultaten van OKADER beschreven. Dit geeft een beeld van de dijkversterkingskosten gerelateerd aan verschillende niveaus van waterstandsverhoging. Conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 4.

2 Bureaustudie verruwing en dijkversterking

In dit hoofdstuk worden de resultaten van een bondige bureaustudie besproken. Doel van deze bureaustudie is om een achtergrond te geven over de relatie tussen begroeiing en opstuwing, en tussen opstuwing en dijkversterkingen.

2.1 Waterstandsverhoging door verruwing

2.1.1 Stuwkromme-effect op de Rijntakken

Begroeiing leidt tot verruwing wat leidt tot hogere waterstanden. Een plaatselijke verhoging van de waterstand werkt door in bovenstroomse richting. Dit wordt het stuwkromme-effect genoemd. De grootste opstuwing ter plaatse van de begroeiing. Bovenstrooms ervan dempt de opstuwing uit via een stuwkromme. Het stuwkromme-effect is sterk afhankelijk van de grootte van de verstoring, de afvoer, de evenwichtsdiepte, het bodemverhang en de lokale breedte.

Voor een eerste schatting wordt vaak gebruik gemaakt van de eerste orde benadering van Bélanger (Van der Klis, van Vuren, & van Schijndel, 2006). Het stuwefect wat overblijft op een afstand L kan dan benaderd worden met:

$$\Delta h_L \approx \Delta h_0 \cdot e^{-\frac{L}{\lambda}}$$

Met:

- Δh_L stuwefect op afstand L
- Δh_0 grootte verstoring
- L afstand tot verstoring
- λ karakteristieke stuwkromme lengte

Tabel 1

Globale schattingen van karakteristieke waarden voor de aanpassingslengten van de Rijntakken (Van der Klis, van Vuren, & van Schijndel, 2006). De evenwichtsdiepte behoort bij de afvoer die 50% van de tijd overschreden wordt.

	Boven-Rijn	Pannerdens kanaal	Waal	Nederrijn-Lek	IJssel
Verhang	0,1 m/km	0,04 m/km	0,12 m/km	0,15 m/km	0,11 m/km
Evenwichtsdiepte	6 m	4,5 m	6 m	5 m	4,5 m
Aanpassingslengte	20 km	38 km	18 km	11 km	14 km
Afstand waar $\Delta h_L \approx 0,1 \Delta h_0$	46 km	87 km	41 km	25 km	32 km

Uit de vergelijking volgt dat de invloed van een verstoring exponentieel afneemt met de afstand. Stel dat gewerkt wordt met een waterstandseffect van 10 cm, dan blijft daar na (ruim) twee keer de aanpassingslengte nog 1 cm (10%) van over.

Relevant voor deze studie is dat, wanneer je meer begroeiing wil toestaan in de Rijntakken, dat een waterstandseffect heeft over vele tientallen kilometers. De tabel laat de aanpassingslengten zien die horen bij een afvoer die 50% van de tijd overschreden wordt. Om een idee te krijgen van de lengtes

Wanneer gekeken wordt naar hoogwater – bijvoorbeeld een afvoer met een terugkeertijd van 10 jaar – neemt de evenwichtsdiepte op de Rijntakken toe. De toename wisselt afhankelijk van de Rijntak en is ongeveer 4 meter, afgeleid uit betrekkinglijnen (Rijkswaterstaat, 2012b). In tabel 2 zijn de aanpassingslengte gepresenteerd bij een verhoging van de evenwichtsdiepte van 4 meter. Dit geeft een eerste beeld van de invloed van hogere afvoeren op de stuwkromme lengten. Te zien is dat in geval van hoogwater de lengte van de stuwkromme toeneemt met een factor 1.5 – 2.

Tabel 2

Globale schattingen van karakteristieke waarden voor de aanpassingslengten van de Rijntakken met een verhoogde evenwichtsdiepte door hoogwater. De evenwichtsdiepte is een schatting die behoort bij de afvoer met een terugkeertijd van 10 jaar.

	Boven-Rijn	Pannerdens kanaal	Waal	Nederrijn-Lek	IJssel
Verhang	0,1 m/km	0,04 m/km	0,12 m/km	0,15 m/km	0,11 m/km
Evenwichtsdiepte	10 m	8,5 m	10 m	9 m	8,5 m
Aanpassingslengte	33 km	71 km	28 km	20 km	26 km
Afstand waar $\Delta h_t \approx 0,1 \Delta h_0$	76 km	163 km	64 km	46 km	59 km

2.1.2

Waterstandseffecten door vegetatie (PAGW)

In de PAGW wordt gekeken naar hoe hoogwaardige riviernatuur kan worden gerealiseerd op een goede manier. Tot 2050 wil het PAGW voor duizenden hectares het ecotooptypen aanpassen (Heusden et al., 2021).

Het effect van een aangepaste ecotoopkartering is in kaart gebracht in het kader van het PAGW. Voor een precieze beschrijving van de aangepast ecotoopkartering wordt verwezen naar het rapport (HKV, 2020). De vegetatieverandering resulteert voor de meeste gebieden in een verruwing, en voor enkele zones in vergladding. Voor verschillende afvoeren zijn berekeningen gemaakt om het waterstandseffect van verandering in vegetatie te kwantificeren.

De vegetatieverandering in het kader van PAGW leiden tot een waterstandsverhoging op de Maas (0-25 cm), Waal (0-25cm), Pannerdens kanaal (0-15 cm) en de IJssel (0 – 35 cm). Op de Nederrijn-Lek is een

verlaging waarneembaar van enkele centimeters. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een lagere afvoer richting de Nederrijn-Lek.

Belangrijk is of verruwing wordt toegepast op de gehele breedte van het winterbed. Voorbeeld, wanneer over de gehele breedte zachthoutoibos/struweel wordt aangelegd over het gehele winterbed bij Heusden zorgt dit voor een opstuwing tot 50 cm in de Maas (HKV, 2020).

Bovenstaande geeft een beeld van de ordegrootte van waterstandsverhoging waarmee rekening moet worden gehouden wanneer (grootschalige) verruwing wordt toegestaan.

2.2 Eerdere OKADER analyses

Voor deze studie wordt het instrument OKADER gebruikt (hoofdstuk 2). Onderstaand zijn resultaten verzameld uit vorige analyses en rapporten om een bandbreedte te schetsen van de reductie in dijkversterkingskosten afhankelijk van de waterstandsdeling. Hiervoor zijn vier projecten gedocumenteerd (tabel 2). Globaal gezien komt dit neer op een reductie in dijkversterkingskosten van 2 – 2,5 % per 10 cm waterstandsdeling.

De verwachting is dat vergelijkbare verschillen in kosten worden gevonden wanneer naar waterstandsverhoging (door opstuwing) wordt gekeken in plaats van naar waterstandsdeling.

Tabel 3

Reductie dijkversterkingskost en op basis van OKADER berekeningen uit het verleden.

Locatie	Waterstandsdeling [cm]	Reductie dijkversterkingskosten [%]	Bron
IJsselpoort	5	1 - 1,5	(Werkgroep financiële uitwisseling tussen dijkversterking en rivierverruiming, 2019)
Meanderende Maas	10	2,5	
Maasoeverpark	<i>onbekend</i>	2,5	
Rivierverruiming Rijntakken	20	4	(van Vuren, et al., 2017)

2.3

Aanbevolen rapporten voor artikel

Deze studie vormt de basis van het artikel en animatie die wordt geproduceerd door Flows Productions. Daarbij wordt aanbevolen om de volgende rapporten en achtergronddocumenten te gebruiken en op te nemen als referentie:

1. Onderzoeken en rapporten die zijn uitgevoerd in het kader van Stroomlijn. Hierbij valt te denken aan het normatief kader waarin de scope en de beoogde waterstandseffecten staan (Rijkswaterstaat 2012a) en verschillende andere onderzoeken waarin de link tussen vegetatieontwikkeling en waterstandseffecten is onderzocht (Barneveld et al. 2018; Wijbenga et al, 2016)
2. Achtergrond rapporten en onderzoeken met OKADER. Bijvoorbeeld Van der Meij et al. (2016) voor de werkwijze en uitgangspunten, Kroekenstoel et al (2021) voor het synthesesedocument en Kolen et al. (2021).

3 Analyse met OKADER

In dit hoofdstuk worden het gebruik en de resultaten van OKADER toegelicht. In de volgende paragraaf worden de globale werkwijze, voordelen en beperkingen van OKADER besproken. In paragraaf 3.2 worden de resultaten gepresenteerd van verschillende maten aan waterstandstoename. Dit schetst een beeld over de relatie tussen verruwing en dijkversterkingsopgaven, en geeft een eerste beeld van locaties waarbij verruwing leidt tot beperkte mitigerende maatregelen.

3.1 Werkwijze en uitgangspunten van OKADER

3.1.1 Globale werkwijze OKADER

Het instrument Opgave en Kosten Analyse Dijken En Rivierverruiming (OKADER) is ontwikkeld om de invloed van rivierverruimende maatregelen op dijkversterkingsopgaven en -kosten te kwantificeren. In OKADER 2020 wordt gebruik gemaakt van betrekkinglijnen (Q-h relaties), die het verband tussen de rivierafvoer bij Lobith/Borgharen en de lokale waterstand aan de teen van de dijk geven. Deze betrekkinglijnen worden gecombineerd met afvoerstatistiek (Q-T relaties) en een onzekerheidstoeslag en leiden zo tot lokale waterstandsstatistiek. De nieuwe kennis over modelonzekerheden (zoals later wordt beschreven) kan door de gebruiker hierin worden verwerkt als deze rekent met de optie van betrekkinglijnen. Deze toepassing is geschikt voor het bovenriviereengebied omdat daar waterstanden vooral bepaald worden door de afvoer en minder door de combinatie met storm. Voor het overgangsgebied is het werken met de betrekkinglijnen minder geschikt vanwege de invloed van meerpeil of stormopzet (Kolen et al., 2021)

Binnen OKADER wordt gewerkt met een kostendatabase. Met behulp van deze kostendatabase is het mogelijk om benodigde veranderingen aan het dijkprofiel om te zetten in kosten. Per dijkvak worden daar de volgende stappen voor doorlopen (Van der Meij, 2016):

3. Bepaling van de faalkans op basis van de belasting op en sterkte van de waterkering. Dit gebeurt voor drie faalmechanismen: (1) overslag en overloop, (2) piping en (3) macrostabiliteit. Een 'fragility curve' geeft aan hoe groot de faalkans is van een dijk bij een bepaalde waterstand. Gecombineerd geven de belasting en sterkte van de dijk een faalkans.
4. Vaststellen of er een veiligheidsopgave is door de huidige faalkans te vergelijken met de faalkanseis (o.b.v. de norm, faalkansbegroting en lengte-effect). Vervolgens wordt berekend hoe de dijk versterkt kan worden, gegeven (de toename van) de belasting en de wettelijk vereiste faalkans. Dit betekent dat de dijk ofwel in de hoogte ofwel in de breedte

ofwel in beide richtingen aangepast wordt. Als dit niet mogelijk is wordt overgestapt naar een harde constructie.

5. De kosten voor het aanleggen van een berm, een constructie of verhogen van een dijk worden voor de gegeven locatie berekend. Vervolgens kan op basis van de aanpassingen in hoogte en breedte worden geraamd hoeveel de bijbehorende versterking kost.

Om de kosten van de dijkversterkingsmaatregelen te bepalen wordt gebruik gemaakt van KOSWAT. Deze methode is bedoeld om een eerste indicatie van de kosten te geven. KOSWAT wordt door veel waterschappen gebruikt in de voorfase van HWBP-projecten. Deze methode is niet het meest nauwkeurige instrument, maar maakt het wel mogelijk om voor een groot gebied kosten te ramen. Binnen KOSWAT wordt rekening gehouden met alle gemaakte kosten. Dus niet enkel de kosten voor grondverzet, maar ook aanleggen van bestrating, verwijderen van bekleding of aankopen van gronden (Van der Meij, 2016). Daarbij wordt gebruik gemaakt van de Standaard Systematiek voor Kostenramingen in de Grond Water en Wegenbouw sector (SSK-2010). In de kosten wordt gewerkt met een discontovoet en restwaarde. De restwaarde wordt gebruikt om rekening te houden met versterkingen die aan het einde van de beschouwde periode plaatsvinden. Stel dat een periode wordt bekeken van 2050-2100 en er vindt in 2095 een versterking plaats. Dan heeft deze versterking nog een restwaarde omdat rekening wordt gehouden met een levensduur van 50 jaar.

3.1.2 Uitgangspunten en beperkingen

De methode van OKADER heeft een aantal uitgangspunten en aannamen die invloed hebben op de interpretatie van de resultaten. Voor een volledige lijst met uitgangspunten wordt verwezen naar (Van der Meij, 2016). Onderstaand een selectie die relevant is voor deze studie:

Algemeen

1. De methode is geldig voor het bovenrivierengebied (Rijntakken en Maas);
2. In de analyses is aangenomen dat dijken niet verlegd worden;
3. Kunstwerken en verharde bekledingen worden niet meegenomen;
4. In de methode wordt gewerkt met de VNK vakindeling;
5. De restwaarde van de dijkversterking in 2100 is meegenomen;
6. Waterstandsstatistiek is conform Grade-werklijn 9 maart 2015, zonder statistische onzekerheden;
7. Voor het effect van losse maatregelen wordt aangenomen dat de effecten optelbaar zijn;
8. In de analyses wordt uitgegaan van klimaatscenario W+. Er wordt daarbij geïnterpoleerd tussen twee zichtjaren (2050 en 2100);
9. Afvoeren boven de $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ worden conform het beleidsmatige uitgangspunt gehandhaafd;
10. Bodemdaling en zetting worden meegenomen met dezelfde getallen als aangenomen binnen DPR en DPRD.

Kosten

11. Er wordt gewerkt met een discontovoet van 3%;
12. De methode van KOSWAT wordt gebruikt om kosten af te leiden;
13. Constructieve maatregelen worden ingezet zodra er niet voldoende ruimte beschikbaar is, er worden dus geen gebouwen gesloopt;
14. Bestaande weginfrastructuur in de invloedzone van de maatregel wordt vervangen. Wanneer een weg op de kruin aanwezig is en de dijk niet verhoogd hoeft te worden, wordt dit deel herstel in plaats van vervangen;
15. Ramingen worden gemaakt met prijspeil 2015.

Hoewel deze methode zoveel mogelijk aansluit bij het WBI2017 en het OI2014 (Ontwerpinstrumentarium), is de methode niet geschikt voor toetsing of dijkontwerp, maar alleen voor een afweging van rivierveruiming of verruwing versus dijkversterkingen op een schaalniveau van tientallen kilometers. Daartoe is bijvoorbeeld gebruik gemaakt van typologieën (van verschillende modelkeringen) om de geotechnische fragility curves aan dijkvakken toe te kennen. In de praktijk wordt vaak afgeweken van de aannames en uitgangspunten van OKADER. Hierdoor leveren de ramingen mogelijk een overschatting van de kosten. Aangezien alle varianten op basis van dezelfde uitgangspunten worden bepaald, geven de ramingen wel een goed beeld van de relatieve verschillen.

3.1.3

Invloed programmering HWBP op OKADER resultaten

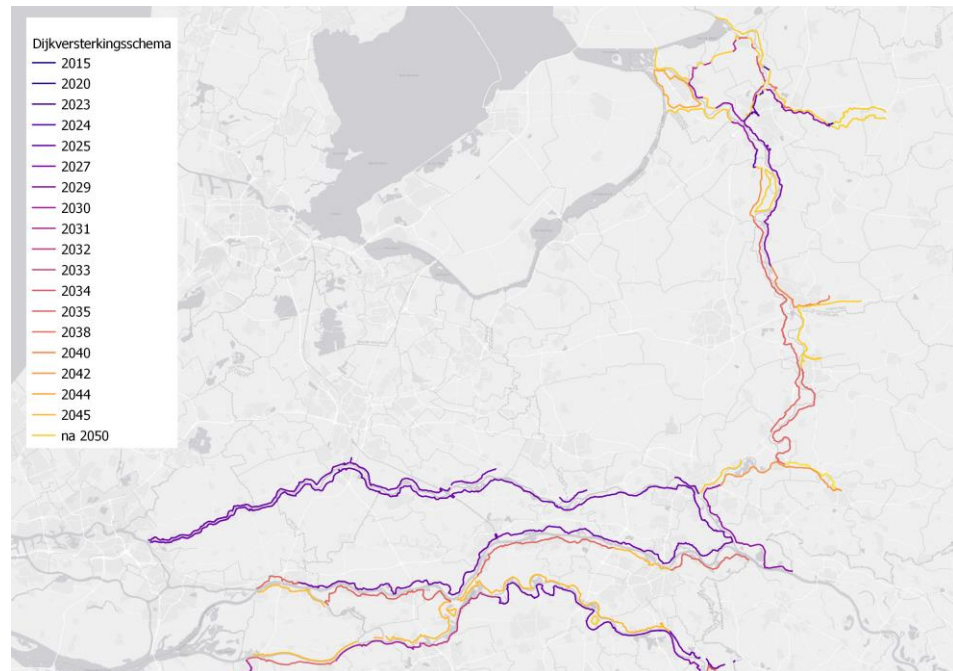
OKADER houdt rekening met de dijkversterkingen die op het programma staat. Op deze manier geeft OKADER een realistischer beeld van de kosten, aangezien de kosten afhankelijk zijn van het moment van dijkversterking. Tegelijkertijd kan de opgenomen programmering het effect van verruwing vertroebelen. Het kan zijn dat er al een versterking heeft plaatsgevonden waarbij je – in geval van verruwing – terug moet om opnieuw te versterken. Dit komt niet duidelijk naar voren uit de resultaten van OKADER, omdat OKADER wel rekening houdt met het moment van dijkversterking, maar niet met de toename in hoogte/bermbreedte voor de geprogrammeerde dijkversterking.

Daarnaast kan opstuwung invloed hebben op het de programmering zelf. Wanneer de faalkans eerder in de buurt komt bij de norm die gesteld is voor een traject, wordt de programmering gewijzigd. Voor meer informatie over de programmering wordt verwezen naar Asselman et al. (2017) en Kolen et al. (2021).

Disclaimer: de opgenomen programmering is een momentopname en tot stand gekomen door. Het kan zijn dat de informatie in deze programmering inmiddels achterhaald is. Voor de toepassing van OKADER is een benadering van de programmering het belangrijkste, maar voor het invoerbepaald is niet gestreefd naar volledigheid.

Figuur 1

Versterking van dijken volgens de HWBP-programmering (Invoerbestand OKADER-2021).



3.2

Berekeningen dijkversterkingsopgaven en kosten voor verschillende maten van waterstandstoename

Verruwing leidt tot een toename van de waterstand. Met OKADER zijn berekeningen gemaakt voor verschillende hoeveelheden van waterstandsverhoging voor de Rijntakken. Op deze manier wordt een beeld geschetst van de relatie tussen opstuwing en de kosten. Aangezien dit een quick scan betreft van de toename in dijkversterkingskosten door verruwing, is uitgegaan van een uniforme waterstandsverhoging over alle Rijntakken. Dit is een grove aanname, aangezien in werkelijkheid de waterstandstoename sterk afhankelijk is van de bodemligging. Tegelijkertijd hebben we gezien dat het stuwkromme-effect een grote rol speelt. Opstuwing is merkbaar over vele tientallen kilometers.

In Tabel 3 zijn verschillende groottes van waterstandsverhoging gebruikt. Daarbij is dezelfde bandbreedte – tot 50 cm – gehanteerd als geschetst in paragraaf 2.1.2.

Tabel 4

Verschillende alternatieven en naam OKADER-berekening. In de bestandsnaam van de bijgevoegde kaarten is de naam van de OKADER-berekening opgenomen. Deze naamgeving komt terug in de resultaten van OKADER.

Waterstandseffect	Naam OKADER-berekening
0 cm (Referentie)	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ref
5 cm	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ooibos05
10 cm	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ooibos10
20 cm	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ooibos20
30 cm	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ooibos20
40 cm	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ooibos20
50 cm	Invoer_Rijn_2021_Som3c_QTQH_Ooibos20

De resultaten zijn weergegeven voor zichtjaar 2075. Dit levert de beste relatieve vergelijking, omdat de ontwerplevensduur waarmee rekening wordt gehouden 50 jaar bedraagt. Een tussentijds beeld (bijv. in 2050) wordt onder andere vertroebeld door de HWBP-programmering. De resultaten zijn grofweg in te delen in twee categorieën:

1. **Opgaven.** Voor verschillende alternatieven kan berekend worden hoe groot de opgave is voor de drie verschillende faalmechanismen:
 - a. Overslag en overloop;
 - b. Piping;
 - c. Macrostabieleit.

De opgave voor overslag en overloop wordt uitgedrukt in (een tekort aan) hoogte. De opgaven voor piping en macrostabieleit worden uitgedrukt in (een tekort aan) bermbreedte.

2. **Kosten.** OKADER berekent de kosten die gemaakt moeten worden om het dijkprofiel aan te passen. Deze kosten worden uitgedrukt in contante waardes. Voor de kosten is ook gerekend met de optie van harde constructies.

Voor de opgaven en kosten worden de totale waardes berekend, en het verschil met de referentie. De invoer van OKADER bestaat onder andere uit een waterstandseffect afhankelijk van de rivierafvoer. In de onderstaande tabel is het waterstandseffect weergegeven voor de verschillende alternatieven (Tabel 4).

Tabel 4

Waterstandseffect per afvoerniveau zoals gebruikt in de OKADER sommen.

Afvoer [m ³ /s]	Ref.	Waterstandseffect [cm] per alternatief					
		5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
6000	0	0	0	0	0	0	0
8000	0	2	3	6	10	13	16
10000	0	4	6	13	20	26	33
13000	0	5	10	20	30	40	50
16000	0	5	10	20	30	40	50
16500	0	5	10	20	30	40	50
17000	0	5	10	20	30	40	50
18000	0	5	10	20	30	40	50
20000	0	5	10	20	30	40	50

3.3

Resultaten

De resultaten voor alle sommen uit Tabel 4 zijn de terug te vinden in Appendix A. Van elke variant zijn er kaarten van de kosten en de opgave gerelateerd aan verschillende faalmechanismen. In de volgende paragraaf zijn de dijkversterkingskosten uitgesplitst per tak. Vervolgens worden, naar aanleiding van de resultaten van de kaarten en de tabel met uitgesplitste kosten, enkele observaties besproken.

3.3.1

Kosten uitgesplitst per tak

De totale kosten voor dijversterking zijn berekend voor de referentie en verschillende maten van waterstandsverhoging (Tabel 5). De totale kosten zijn berekend voor zichtjaar 2075. Meerkosten – het verschil tussen de som en de referentie - zijn weergegeven in Tabel 6.

Als eerste valt op dat de totale kosten per riviertak verschillen. De opgave en kosten zijn hoger op de Waal en de Nederrijn-Lek dan op de IJssel. Dit is te zien aan de totale kosten voor de referentiesituatie, waarbij de kosten op ongeveer 2 miljoen per kilometer liggen voor de IJssel en boven de 8 miljoen voor de Nederrijn-Lek en de Waal. Voor 10 cm waterstandstoename nemen de totale kosten met ongeveer 70 miljoen toe, voor 50 cm waterstandstoename loopt dit op naar ruim 440 miljoen. Dit komt overeen met respectievelijk 1,7% en 10,6%, wat neerkomt op een globale toename in totale kosten van 2% per 10 cm waterstandsverhoging. Dit is in lijn met eerdere OKADER analyses (paragraaf 2.2).

De meerkosten verschillen sterk afhankelijk van de Rijntak. Zo zijn – in het geval van 20 cm waterstandstoename – De meerkosten per km rivierdijk gelijk aan 160.000 euro voor de IJssel en 640.000 euro voor het Pannerdens kanaal. Ondanks de uniforme waterstandstoename zijn er grote verschillen te zien, wat aangeeft dat naast de grootte van de verstoring ook de locatie zeer bepalend is in de uiteindelijke mitigerende maatregelen ten aanzien van verruwing.

Tabel 5

Totale kosten voor dijkversterking met zichtjaar 2075 in miljoenen euro's. In a) zijn de totale kosten weergegeven, in b) het gemiddelde per kilometer rivierdijk. De referentie geeft de totale kosten, voor de alternatieven van 5 cm en 10 cm waterstandsverhoging zijn meerkosten weergegeven t.o.v. de referentie.

a)

		Totale kosten [Meuro]					
Riviertak	Ref	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Boven-Rijn	58	60	61	63	68	71	74
Waal	1687	1694	1708	1729	1754	1778	1804
Pann. kanaal	137	140	144	150	151	155	156
IJssel	528	531	539	567	611	647	669
Nederrijn-Lek	1750	1763	1779	1814	1854	1861	1900
Totaal	4160	4188	4231	4323	4438	4512	4603

b)

		Gemiddelde totale kosten [Meuro/km]					
Riviertak	Ref	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Boven-Rijn	4,31	4,45	4,53	4,68	5,05	5,27	5,49
Waal	8,02	8,06	8,12	8,22	8,34	8,46	8,58
Pann. kanaal	6,70	6,85	7,05	7,34	7,39	7,58	7,63
IJssel	2,18	2,19	2,23	2,34	2,52	2,67	2,76
Nederrijn-Lek	8,87	8,94	9,02	9,20	9,40	9,43	9,63
Totaal	6,09	6,13	6,19	6,32	6,49	6,60	6,73

Tabel 6

Meerkosten voor dijkversterking met zichtjaar 2075 in miljoenen euro's. In a) zijn de meerkosten weergegeven, in b) het gemiddelde per kilometer rivierdijk. De referentie geeft de totale kosten, voor de alternatieven van 5 cm en 10 cm waterstandsverhoging zijn meerkosten weergegeven t.o.v. de referentie.

a)

		Meerkosten [Meuro]					
Riviertak	Ref (tot.)	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Boven-Rijn	58	2	3	5	10	13	16
Waal	1159	7	21	42	67	91	117
Pann. kanaal	137	3	7	13	14	18	19
IJssel	528	3	11	39	83	119	141
Nederrijn-Lek	1041	13	29	64	104	111	150
Totaal	2923	28	71	163	278	352	443

b)

		Gemiddelde meerkosten [Meuro/km]					
Riviertak	Ref (tot.)	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
Boven-Rijn	4,31	0,15	0,22	0,37	0,74	0,97	1,19
Waal	8,02	0,03	0,10	0,20	0,32	0,43	0,56
Pann. kanaal	6,70	0,15	0,34	0,64	0,68	0,88	0,93
IJssel	2,18	0,01	0,05	0,16	0,34	0,49	0,58
Nederrijn-Lek	8,87	0,07	0,15	0,32	0,53	0,56	0,76
Totaal	6,09	0,04	0,10	0,24	0,41	0,51	0,65

3.3.2

Observaties

Onderstaand enkele observaties op basis van de OKADER-resultaten van verschillende sommen. Doel is om een aantal opvallende trends te benoemen die het artikel en de animatie ondersteunen, niet zozeer om een compleet en volledig beeld te geven van de resultaten van alle sommen:

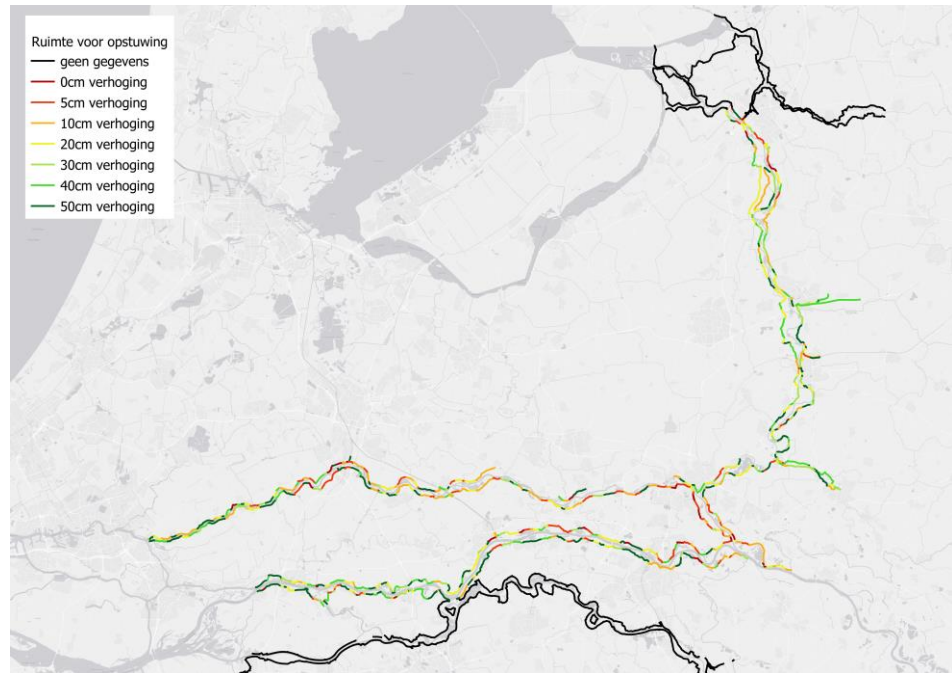
1. **Kaart totale kosten.** De kaart met totale kosten voor Ooibos (10 cm) verschilt niet veel met de kaart van totale kosten voor de referentie. Wel laat het zien voor welke gebieden een grote opgave ligt of de kosten hoog zijn. Zo is te zien dat het, vergeleken met andere riviertrajecten, ongunstig is om verruwing toe te staan op benedenstroomse gedeelte van de Lek. Doordat de totale kosten hoog zijn vanwege de klimaatopgave die er ligt, vallen de relatieve kosten die gemoeid zijn met opstuwing lager uit. Het is dus verstandig om, wanneer op zoek wordt gegaan naar kansrijke trajecten voor verruwing, zowel de totale kosten als meerkosten te beschouwen.
2. **Verschilkaarten dijkversterkingskosten.** De verschilkaart in dijkversterkingskosten laat eveneens een uniform beeld zien. Dit is mede te verklaren doordat alle dijkvakken aangepakt moeten worden om bestand te zijn tegen klimaatveranderingen. Opstuwing heeft dan ook invloed op de dimensionering, maar niet zozeer op de vraag of er een versterking plaats moet vinden.
3. **Verschilkaarten opgave hoogte.** De hoogteopgave varieert van 5-10 cm over de Rijntakken. De verschilkaarten laten een verschil zien tussen opgave voor de referentie en voor 10 cm verruwing in 2075. Dat betekent dat de opgave die er ligt voor klimaatverandering al is aangepakt. Alle keringen voldoen dan (bijna precies) aan de norm, wat betekent dat de extra opgave voor de verruwing vrijwel 1-op-1 terug te zien in de verschilkaart in de hoogte opgave.
4. **Verschilkaarten opgave piping en macrostabiliteit.** Met de huidige uitgangspunten en aannamen heeft verruwing minder effect op de opgave voor piping en macrostabiliteit. Dit komt doordat de faalmechanismen voor piping en macrostabiliteit minder gevoelig zijn voor een waterstandstoename voor de hogere afvoerniveaus dan mechanismen voor overloop en overslag.

De resultaten voor de verschillende sommen zijn gecombineerd in de onderstaande combinatiekaart. De resultaten van de sommen met 0, 10, 20, 30, 40 en 50 cm opstuwing zijn gecombineerd tot een combinatiekaart. Op deze kaart is weergegeven hoeveel opstuwing mogelijk is voor een maximaal bedrag van 300.000 euro per kilometer dijk. Deze 300.000 euro komt overeen met ongeveer 5% van de totale kosten per kilometer voor het zichtjaar 2075 (tabel 5b). Groen betekent veel verticale ruimte, rood betekent beperkte verticale ruimte. Het levert een krachtige kaart op die tegelijkertijd kan vertekenen. Onderstaand een aantal observaties en kanttekeningen:

- **Groen en gele kaart.** De kaart kleurt voornamelijk groen en geel. Wat een indicatie is dat, voor 300.000 euro per kilometer dijk, best wat verticale ruimte te realiseren is.
- **Lappendeken.** Zoals te zien op de combinatiekaart worden groene trajecten onderbroken door rode stukken. In hoofdstuk 1 is beschreven dat de lengte van stuwkrommen in de Rijntakken tientallen kilometers is. De fragmentatie in het aantal centimeters opstuwing wat gerealiseerd kan worden voor 300.000 euro per kilometer rivierdijk maakt het lastig om – op basis van de combinatiekaart – kansrijke trajecten aan te duiden waar daadwerkelijk opstuwing te realiseren is voor een beperkte prijs. We raden dan ook aan om voorzichtig te zijn met het communiceren van percentages, zoals “voor X % van de dijken is een opstuwing mogelijk van x cm”. De lappendeken maakt het lastig om daadwerkelijk opstuwing te realiseren en het is dan ook te voorbarig om met een percentage de potentie van opstuwing aan te duiden. Het nodigt natuurlijk wel uit om naar bepaalde trajecten te kijken, en eventuele knelpunten verder te onderzoeken.
- **Marginale kosten.** Door een drempelwaarde van 300.000 euro per kilometer aan te houden verlies je het gevoel voor de kosten afname/toename rond de drempel. Dit werkt twee kanten op: 1) wanneer, voor een bepaald dijkvak, 300.000 euro per kilometer dijk 19 cm opstuwing gerealiseerd kan worden, komt dit dijkvak in de categorie 10 cm terecht in plaats van in de categorie voor 20 cm. Andersom 2) doet een dijkvak in de categorie van 30 cm wellicht vermoeden dat het realiseren van opstuwing relatief goedkoop is, maar kunnen de kosten in het geval één extra centimeter (31 cm) ineens sterk toenemen.

Figuur 2

Combinatiekaart met hoeveelheid opstuwing die – per vak – te realiseren is tegen een bedrag van 300.000 euro per kilometer dijk. Deze kaart combineert de informatie voor de OKADER sommen met uniforme waterstandsverhoging van 5, 10, 20, 30, 40 en 50 centimeter.



4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Begroeiing leidt tot verruwing wat leidt tot opstuwing. De resulterende hogere waterstanden hebben gevolgen voor de dijkversterkingsopgaven en -kosten. In deze studie is een voorlopige analyse gemaakt van het effect van begroeiing op de dijkversterkingsopgaven en -kosten van de Rijntakken. Aan de hand van elk hoofdstuk worden enkele conclusies getrokken.

4.1.1 Bureaustudie verruwing en dijkversterking

De bureaustudie in Hoofdstuk 1 wijst uit dat het stuwkromme effect een essentiële rol speelt wanneer de waterstandsverhoging door opstuwing beschouwd wordt. De grootste opstuwing treedt op ter plaatse van de begroeiing. Bovenstrooms dempt de waterstandsverhoging uit via een stuwkromme. De lengtes van de stuwkromme voor de Rijntakken verschillen, maar liggen in de ordergrote van tientallen kilometers. Dat betekent dat het effect van begroeiing merkbaar is over lange trajecten.

Om een beeld te krijgen van de ordegrrootte van waterstandsverhoging door begroeiing zijn enkele (PAGW) studies bekeken. Daar is gevonden dat, wanneer (grootschalige) verruwing wordt toegestaan, waterstanden op de Rijntakken toenemen. De vegetatieverandering in het kader van PAGW leiden tot een waterstandsverhoging op de Maas (0 - 25 cm), Waal (0 - 25cm), Pannerdens kanaal (0 - 15 cm) en de IJssel (0 - 35 cm). Afhankelijk van de locatie en of verruwing wordt toegestaan over de volledige breedte van de rivier kan de opstuwing oplopen tot 50 centimeter.

Eerdere OKADER analyses zijn bekeken om een bandbreedte te schetsen van de relatie tussen waterstandseffecten dijkversterkingskosten. Globaal gezien komt dit neer op een reductie in dijkversterkingskosten van 2 tot 2,5 % per 10 cm waterstandsvaling. Een waterstandsverhoging zal leiden tot een vergelijkbare toename in dijkversterkingskosten.

OKADER is ontwikkeld om zicht te krijgen op de financiering van rivierverruimende maatregelen. De tool geeft een globaal inzicht in de versterkingsopgave. Hoewel uitgangspunten, aannames en rekenregels zijn zoveel mogelijk consistent met het ontwerpinstrumentarium, is het detail niveau grover en wordt er gebruik gemaakt van fragility curves in plaats van een probabilistische aanpak. De tool is daarom enkel geschikt om toe te passen in een verkenning.

Met OKADER zijn sommen gemaakt voor de waterstandsverhoging op de Rijntakken. Daarbij is een uniforme waterstandsverhoging toegepast van 0 (referentie), 5, 10, 20, 30, 40 en 50 cm. Dit is een sterke vereenvoudiging omdat de waterstandseffecten door begroeiing in de praktijk niet uniform zijn, maar zullen verschillen afhankelijk van de locatie van de begroeiing en eigenschappen van de riviertak. De berekeningen zijn gemaakt om zicht te krijgen op dijkversterkingsopgave en kosten voor zichtjaar 2075. De resultaten van OKADER bestaan uit een globaal inzicht in de versterkingsopgave, toename in versterkingsopgave door opstuwing, absolute versterkingskosten en toename van dijkversterkingskosten.

Het waterstandseffect heeft de grootste invloed op de hoogte opgave en minder op de opgave voor piping en macrostabiliteit. Voor 10 cm waterstandstoename nemen de kosten toe met ongeveer 2%, wat in lijn is met de eerdere analyses die met OKADER zijn uitgevoerd. Vervolgens is geanalyseerd hoeveel opstuwing gerealiseerd kan worden tegen een bedrag van 300.000 euro per kilometer rivierdijk. Dit levert een gefragmenteerd beeld op, voor sommige dijkvakken is nauwelijks opstuwing mogelijk, voor andere dijkvakken is opstuwing van 50 centimeter mogelijk. De resultaten wijzen uit dat er meer ruimte is voor opstuwing op de IJssel dan op de Waal en het benedenstroomse deel van de Nederrijn-Lek.

4.2 Aanbevelingen

In dit rapport is een voorlopige analyse gepresenteerd over het effect van opstuwing op de dijkversterkingsopgave en -kosten. De aannames en beperkingen van de werkwijze nodigen uit om verder onderzoek te doen. Zeker wanneer de wens bestaat om kansrijke trajecten te identificeren voor vegetatieontwikkeling. Hieronder worden een aantal aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

4.2.1 Waterstandseffect door vegetatieontwikkeling

In deze studie zijn geen berekeningen gemaakt voor de invloed van vegetatieontwikkeling op de waterstand. In de overweging of vegetatieontwikkeling wenselijk is op specifieke locaties wordt geadviseerd om berekeningen uit te voeren met 2D-waterbewegingsmodellen zoals WAQUA.

4.2.2 Detaillering dijkversterkingsopgave en kosten

Zoals beschreven in de werkwijze kan met OKADER op een relatief snelle en eenduidige manier een eerste indruk worden verkregen van de toename in dijkversterkingskosten ten gevolge van waterstandstoename. De huidige situatie wordt daarbij als uitgangspunt genomen waarmee een schatting van relatieve verschillen kan worden gemaakt. Aangezien gerekend wordt met vrij extreme waterstandstoename (tot 50 cm) wordt aanbevolen om in meer detail te kijken of de werkwijze van OKADER voor deze grote toename houdbaar is, of dat aanvullende correcties noodzakelijk zijn.

Wanneer gezocht wordt naar kansrijk trajecten voor vegetatieontwikkeling wordt aangeraden om deze analyse als uitgangspunt te gebruiken voor verder onderzoek. De verwachting is dat gedetailleerder onderzoek op trajectniveau het mogelijk maakt om meer kans te benutten dan op basis van een voorlopige (OKADER) analyse alleen.

5 Referenties

Asselman et al., 2017

Waterveiligheidskosten & baten en baten voor natuur van maatregelpakketten Rijn – achtergrondrapportage MKBA. Nathalie Asselman (Deltares), Saskia van Vuren (HKV), Joost Pol (HKV), Otto Levelt (Deltares), Dennis Wagenaar (Deltares), Rick Wortelboer (Deltares), Joanna Viera da Silva (HKV), Carolien Wegman (HKV). In opdracht van Ministerie van Infrastructuur en Milieu. Consortium Deltares, HKV lijn in water en Rijkswaterstaat. 21 november 2017.

Barneveld et al., 2018

Voorlopige analyse compensatieprogramma Stroomlijn in de Duursche en Fortmondse Waarden. Hermjan Barneveld en Joanna Viera da Silva. In opdracht van Rijkswaterstaat, programma Stroomlijn. HKV lijn in water. 23 maart 2018.

Van Heusden et al., 2021

Ecologische Systeemopgave PAGW-Rivieren – Naar klimaatbestendige robuuste riviernatuur in 2050. W. van Heusden, H. Sluiter, M. Tijnagel, W. Vercrujssse en A. Zuidhof. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Februari 2021.

HKV, 2020

Natuuropgave – effect van de aangepaste ecotoopkartering. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV lijn in water. HKV-rapport 4257.10, 13 november 2020.

Kolen et al., 2021

Actualisatie OKADER: Voor toepassing bij de IRM-MER. Bas Kolen, Jochem Caspers en Joost Pol. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV lijn in water. April 2021.

Kroekenstoel et al., 2021

Synthesedocument OKADER: OKADER, verbeteringen, uitkomsten pilots en recente analyses. David Kroekenstoel. Rijkswaterstaat-WVL. 25 oktober 2019.

Rijkswaterstaat, 2012a

Normatief kader voor vegetatiebeheer grote rivieren. In opdracht van DGRW. Rijkswaterstaat. 6 juni 2012

Rijkswaterstaat, 2012b

Rivierkundige Informatiemap Rijn, Waal en IJssel. Rijkswaterstaat Oost-Nederland.

Van der Meij et al., 2016

Uitwerking methode voor bepaling kostenreductie rivierverruiming, Kostenreductie dijkverbeteringen door uitvoering rivierverruiming. In opdracht van Rijkswaterstaat. Consortium Deltares, HKV lijn in water, Arcadis, Royal HaskoningDHV en RWS-WVL. Juli 2016.

Van der Klis, 2006

Zicht op onzekerheden in de PKB Ruimte voor de Rivier, onzekerheden in de hydraulische effecten van rivierverruimende maatregelen. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Juni 2016.

Van Vuren et al., 2017.

Beleidsstudie Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming Toepassing methodiek op Rijntakken. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. Consortium Deltares, HKV IJN in water, Arcadis, Royal HaskoningDHV en RWS-WVL. Januari 2017.

Werkgroep financiële uitwisseling tussen dijkversterking en rivierverruiming, 2019

Eindadvies verkenning 'Financiële uitwisseling tussen dijkversterking en rivierverruiming'. 10 juli 2019.

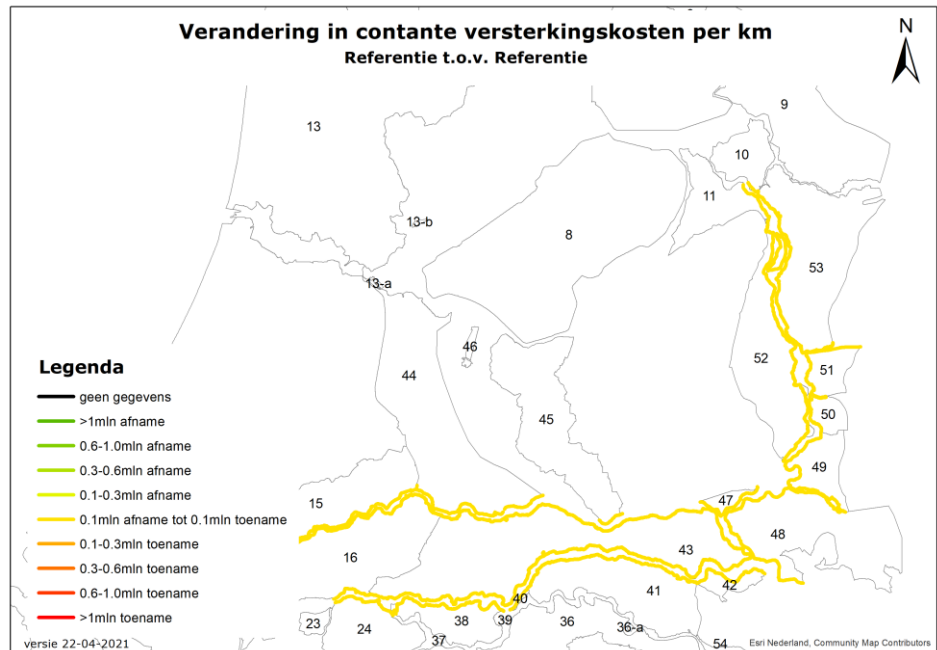
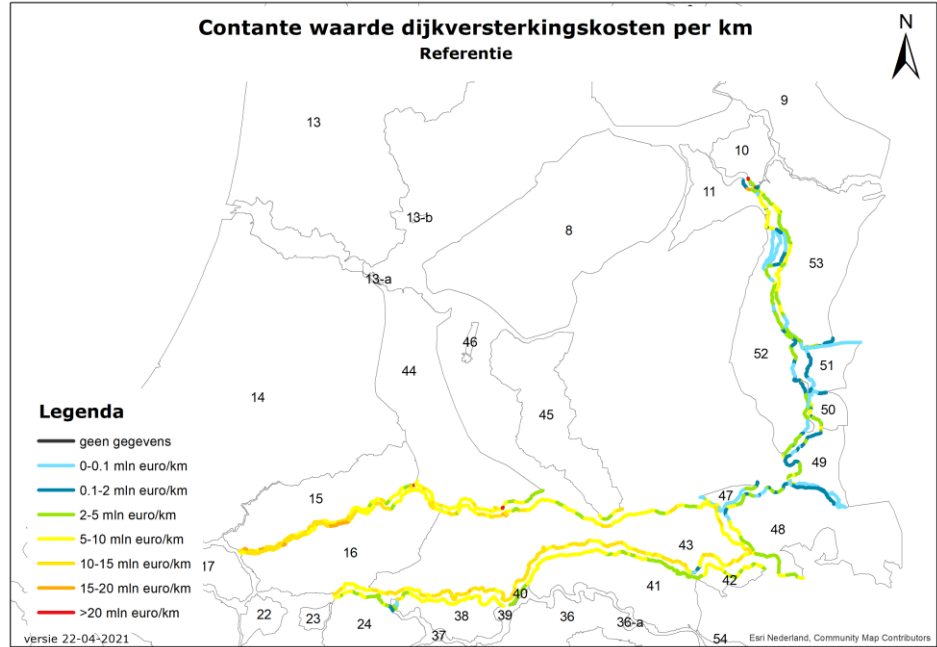
Wijbenga et al., 2016

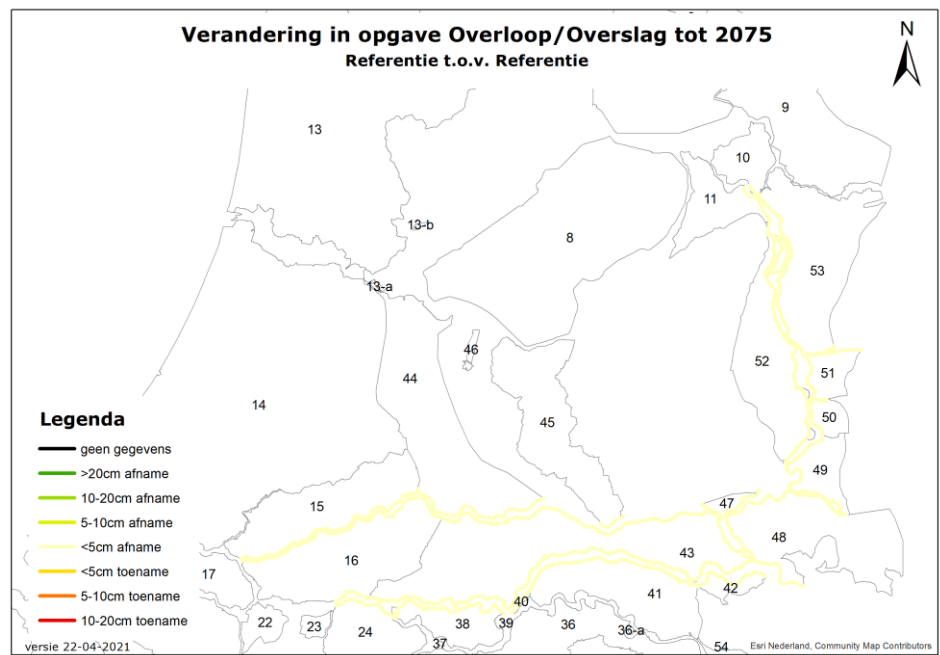
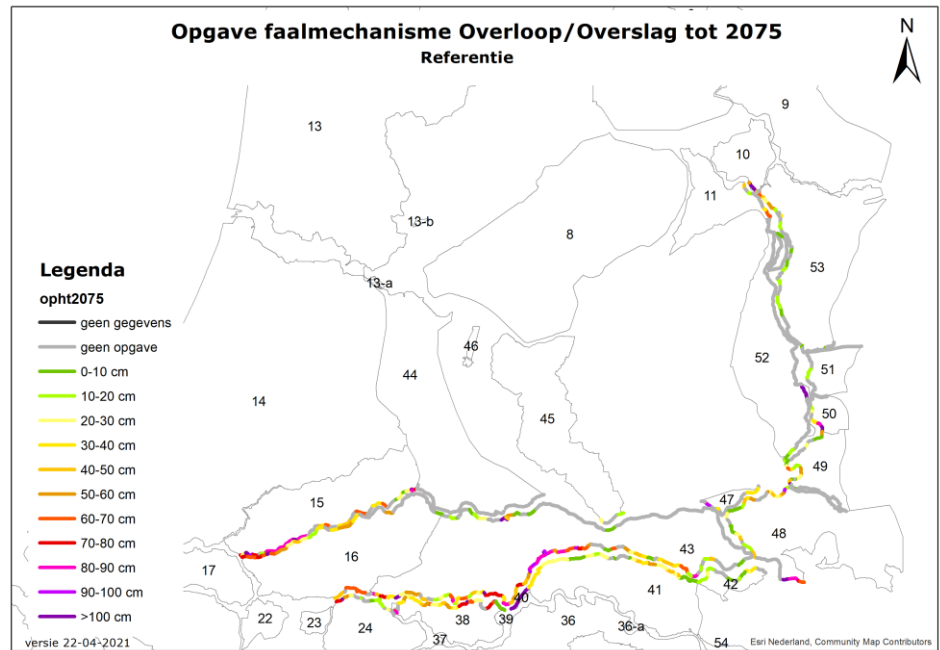
RBK-beoordeling van lokaal kleine ingrepen. Anne Wijbenga, Hermjan Barneveld en Carolien Wegman. In opdracht van Consortium Courant. HKV IJN in water. 13 mei 2016.

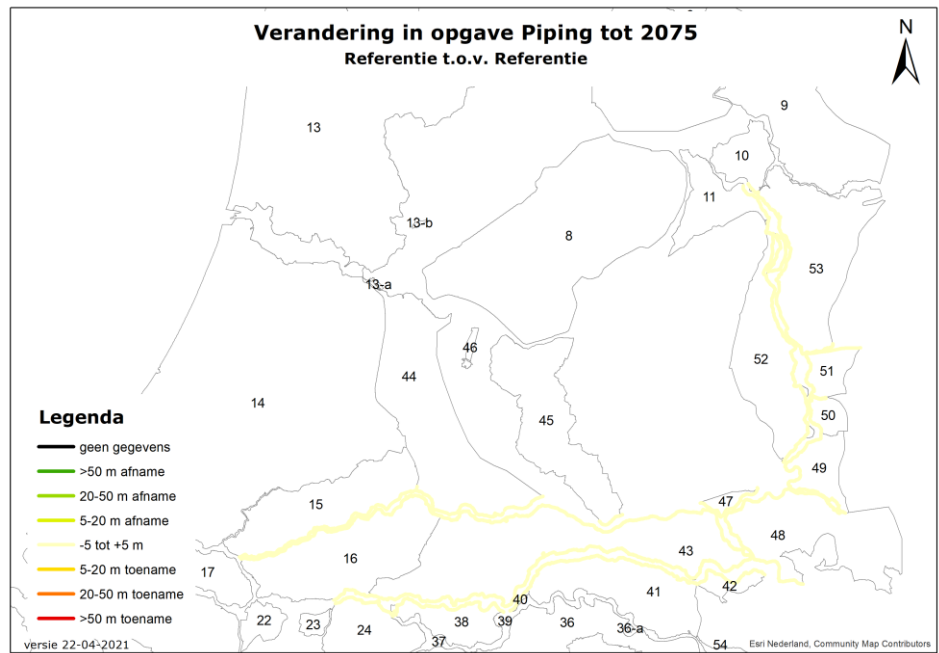
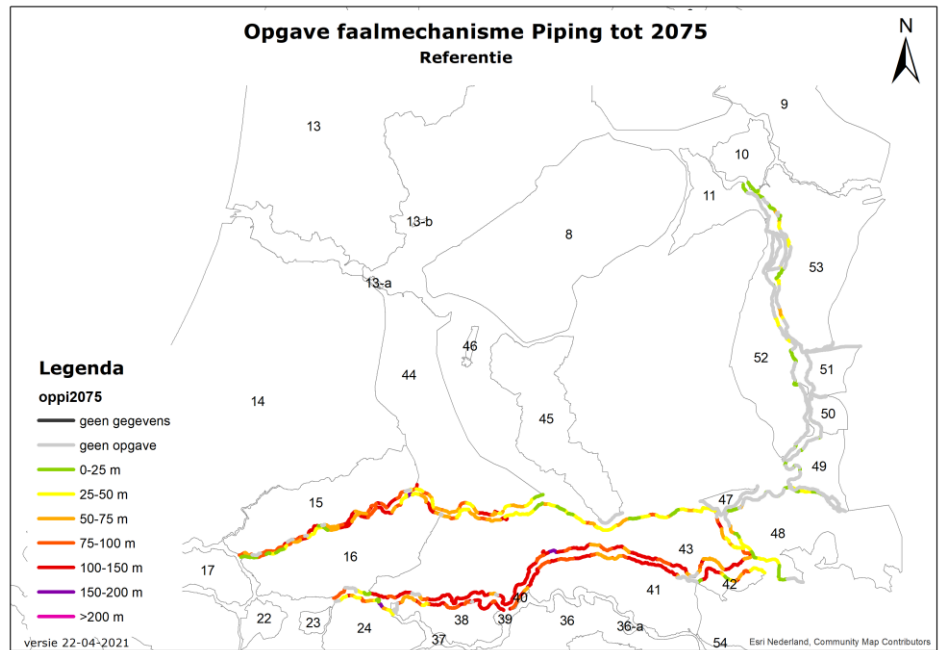
Bijlagen

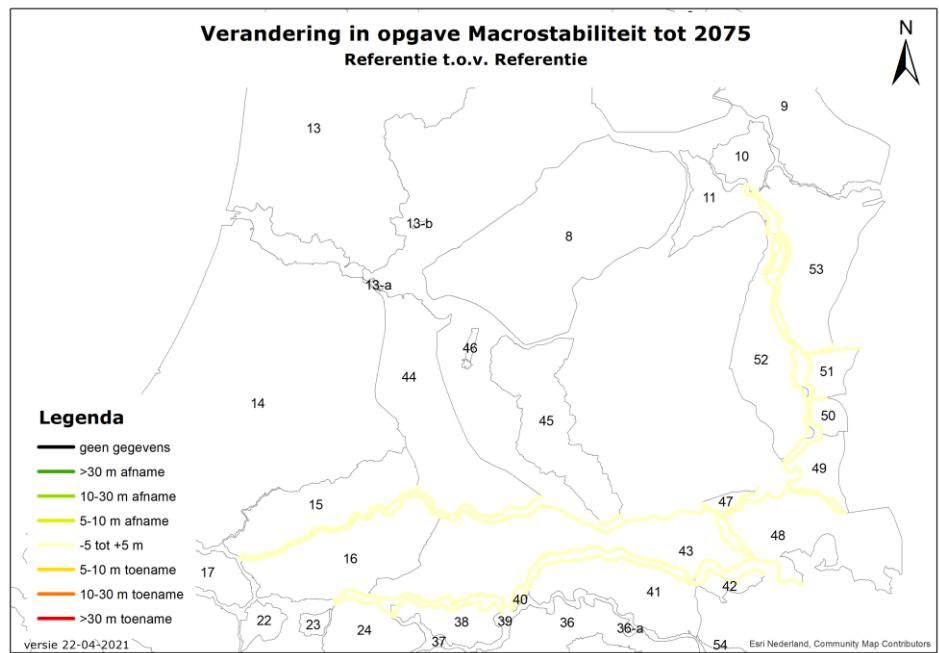
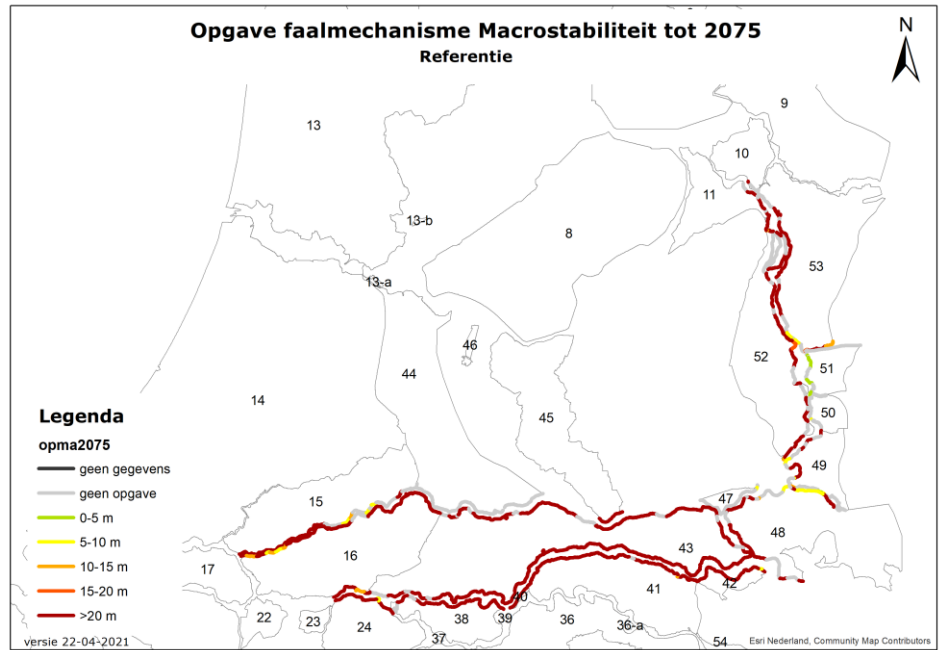
A OKADER-berekeningen

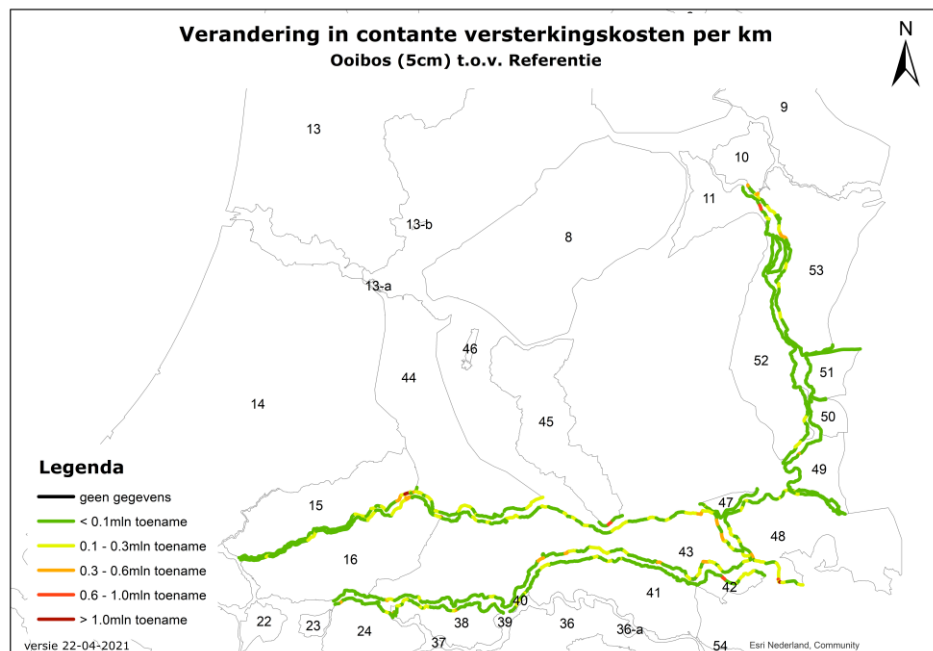
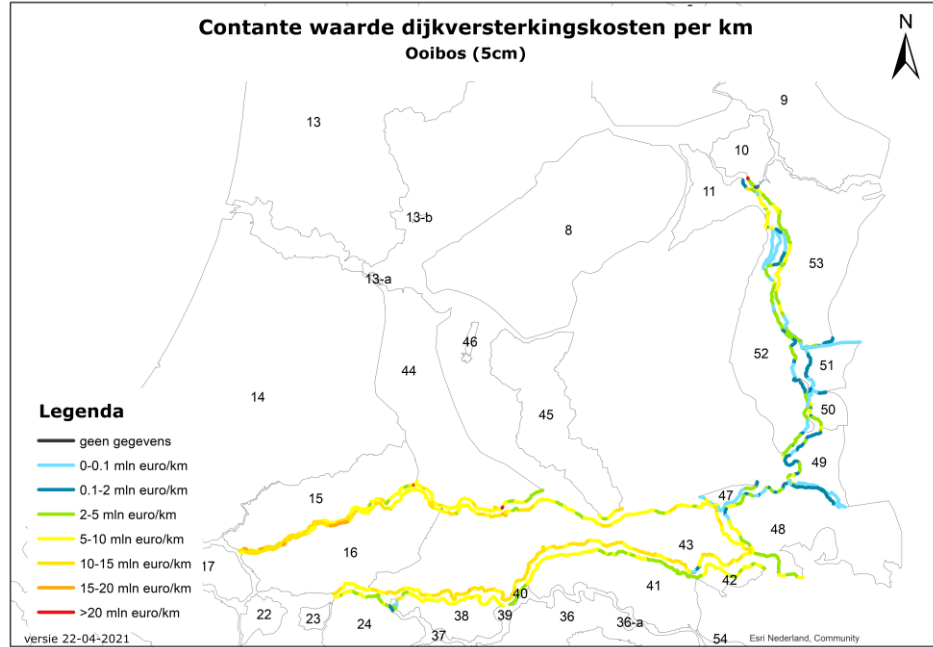
In deze bijlage worden de resultaten van OKADER gepresenteerd voor de sommen van 0 (referentie), 5, 10, 20, 30, 40 en 50 centimeter (uniforme) waterstandsverhoging op de Rijntakken. Per som worden de absolute dijkversterkingskosten, toename in dijkversterkingskosten, versterkingsopgave per mechanisme en toename in versterkingsopgave per mechanisme weergegeven.

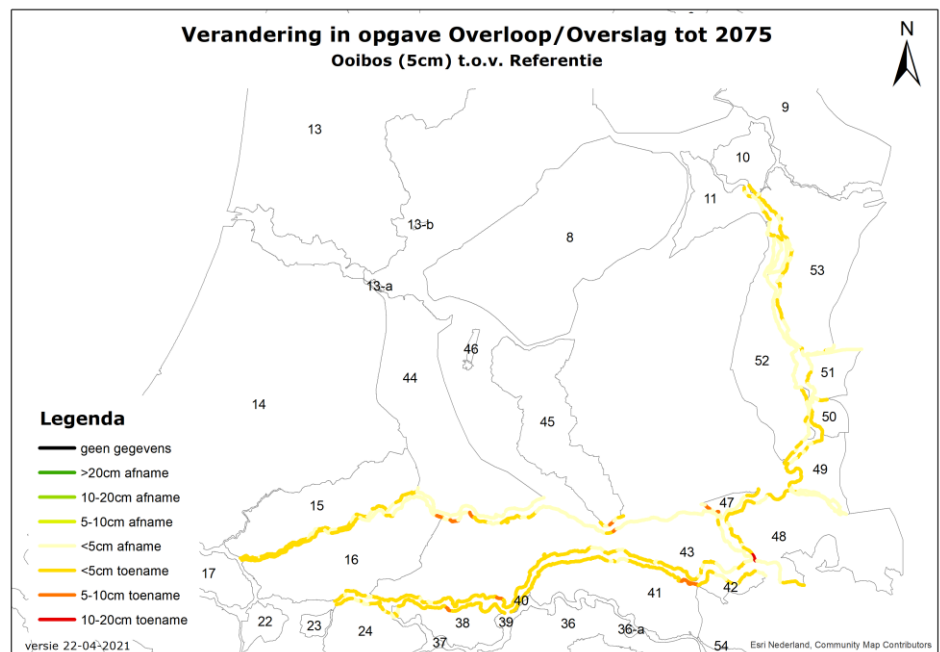
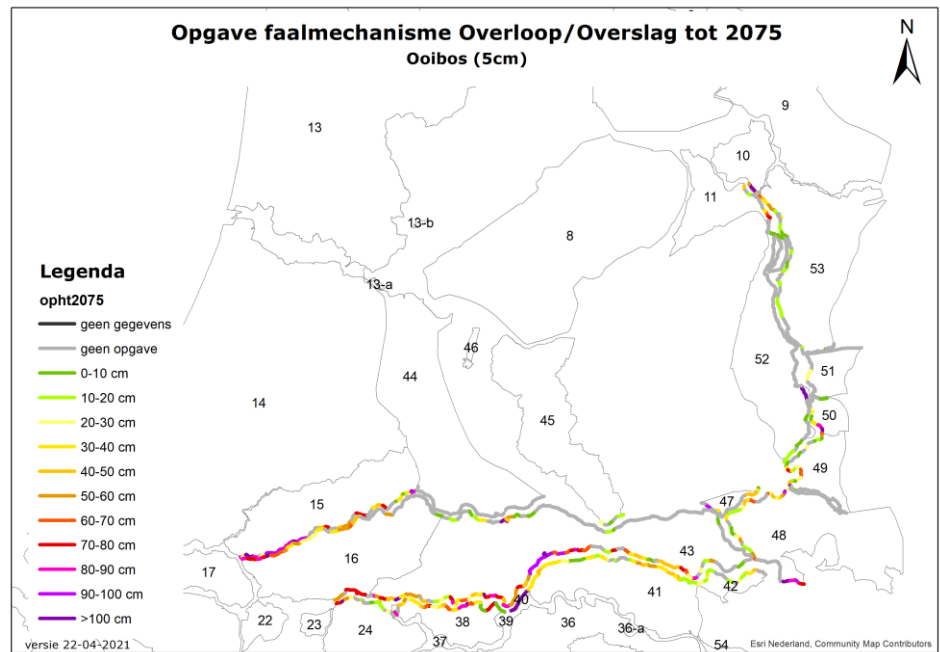


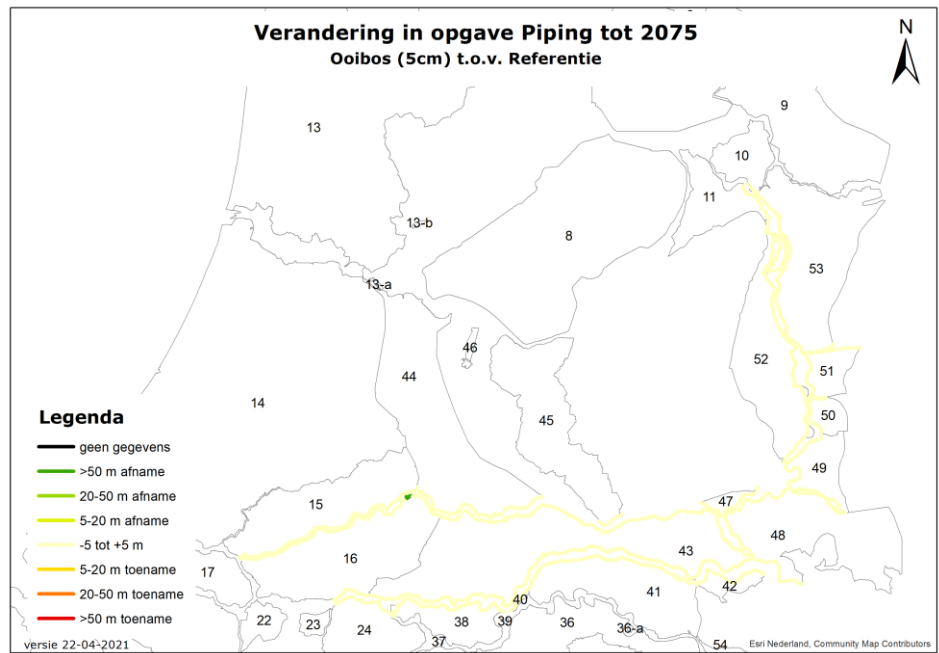
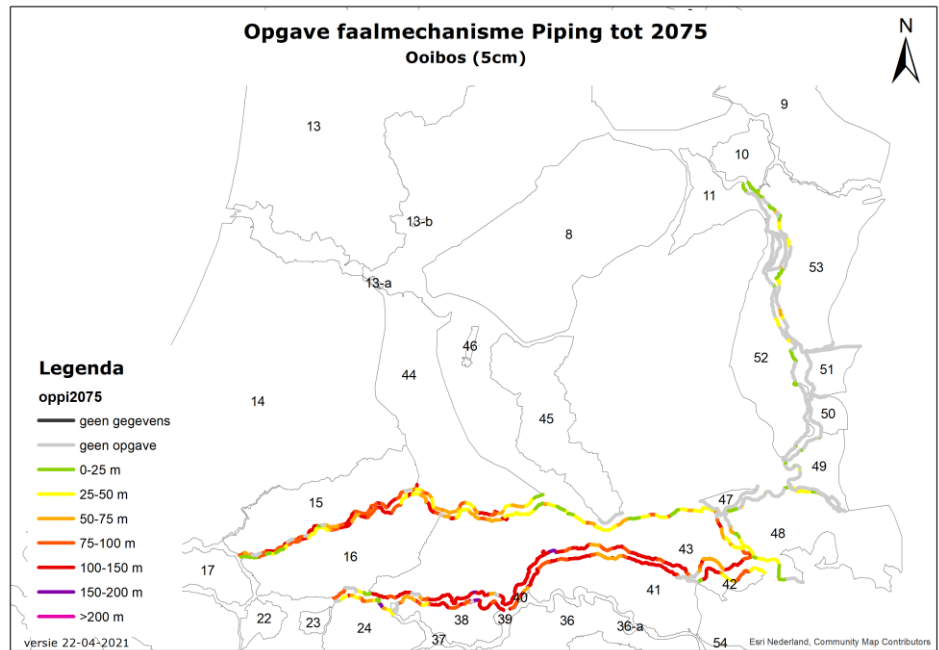


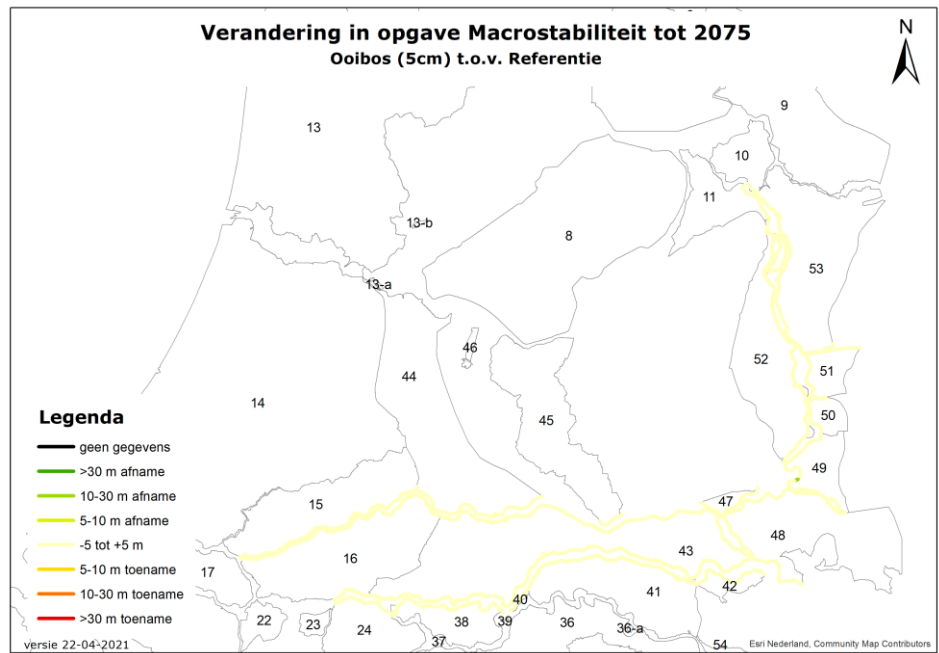
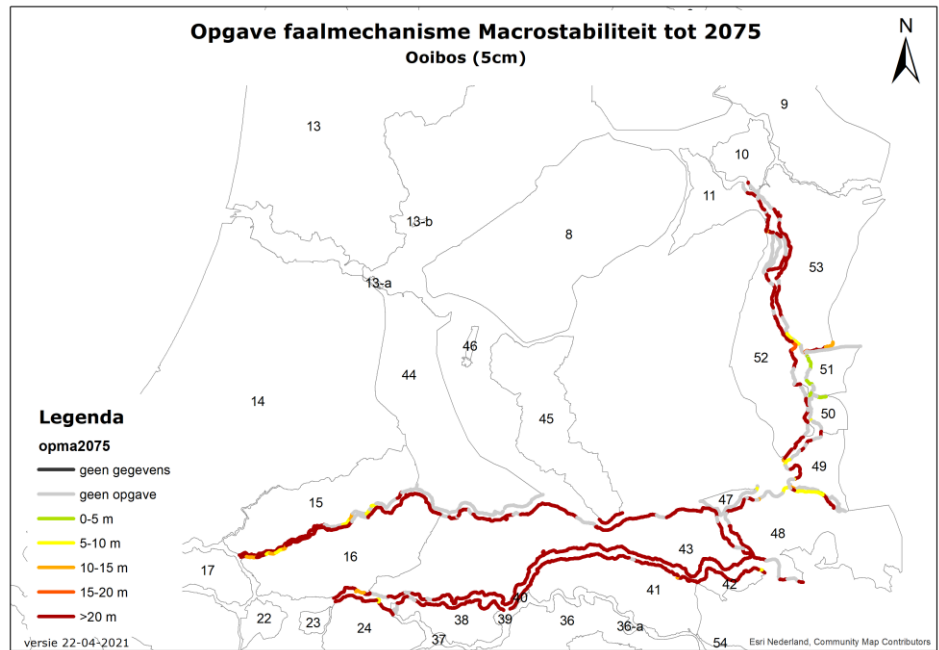


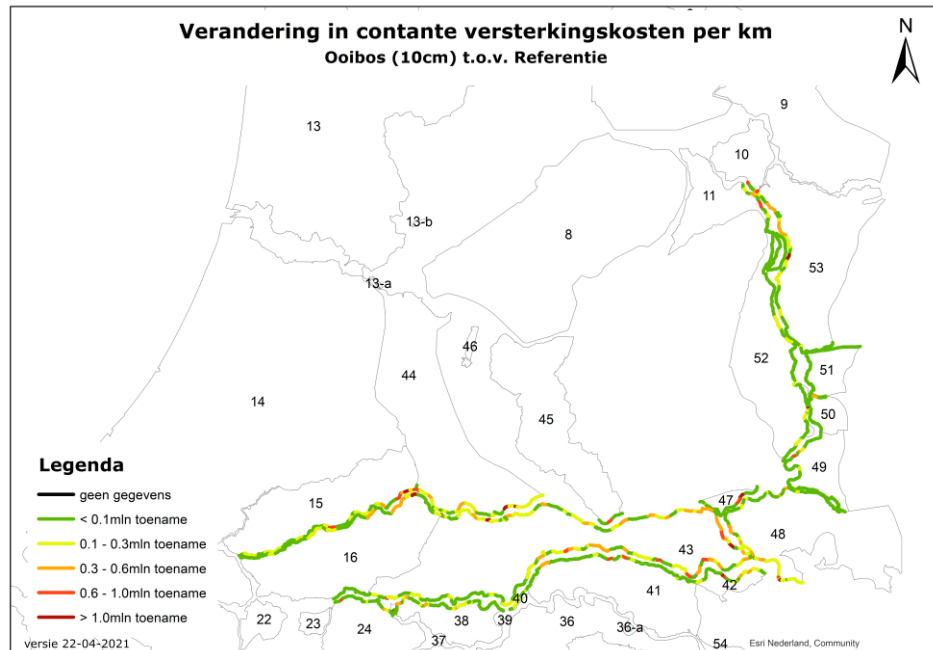
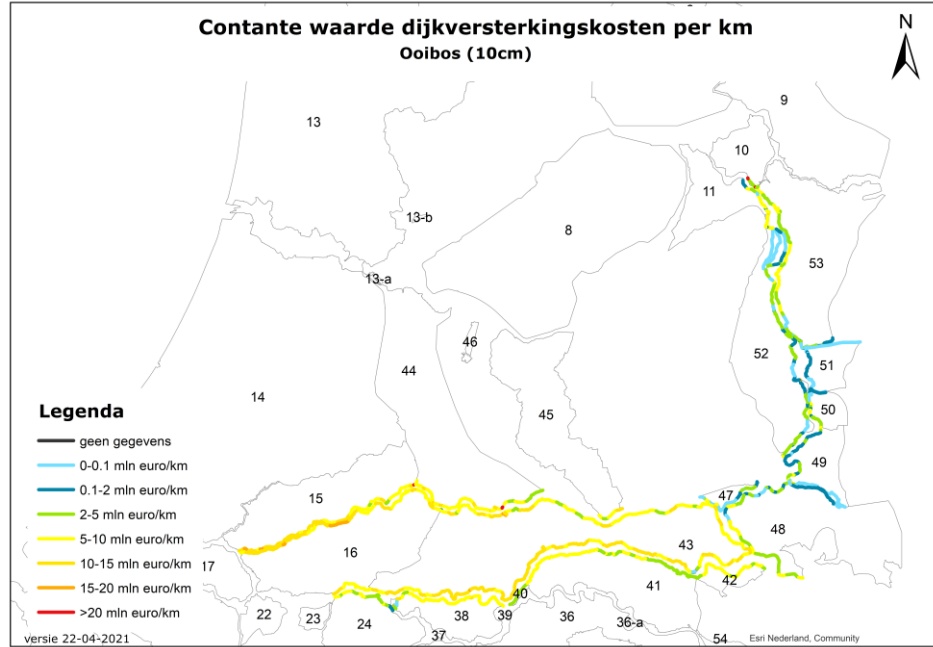


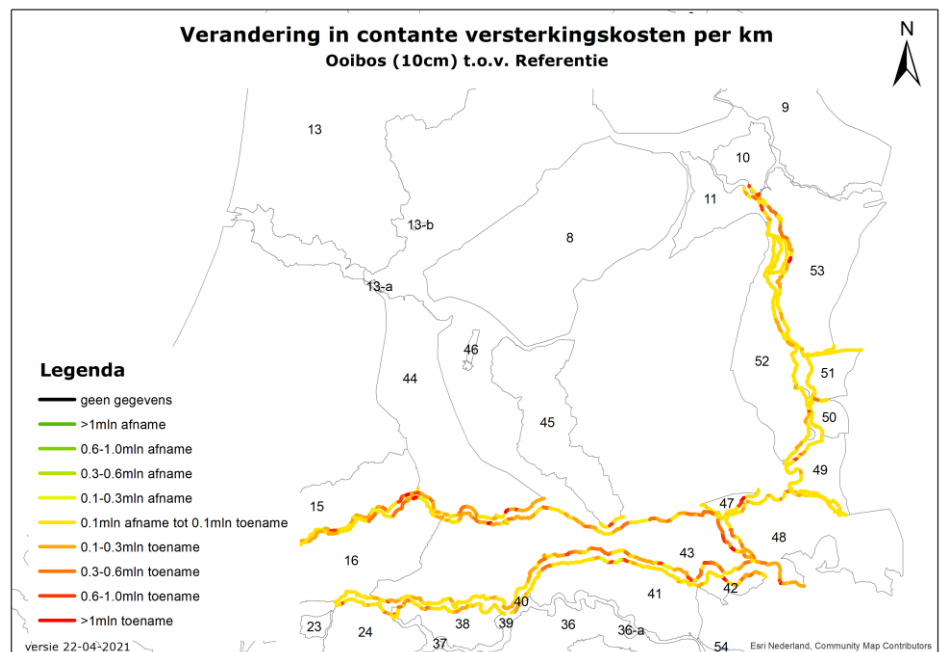
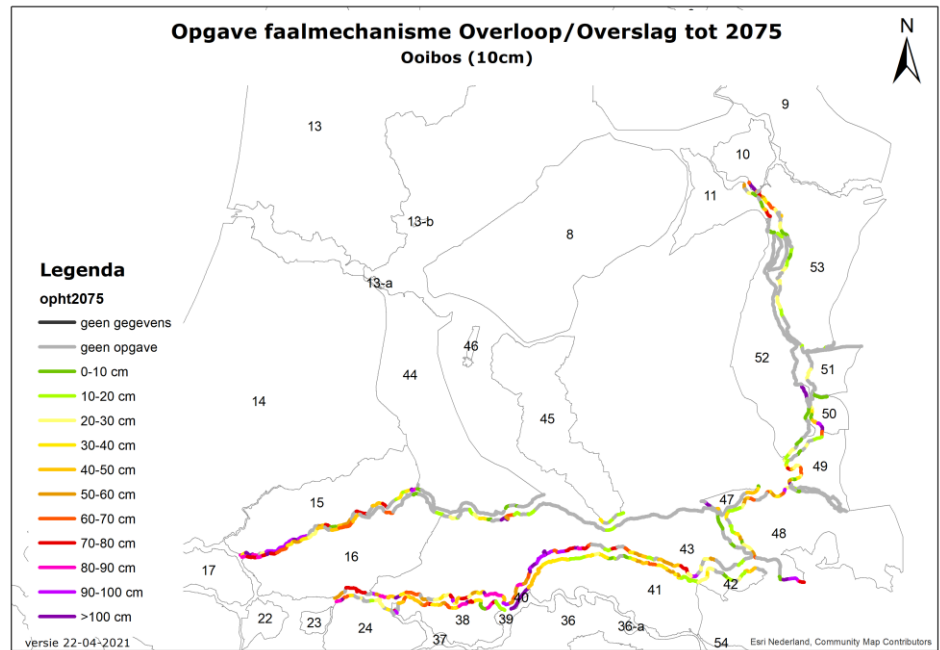


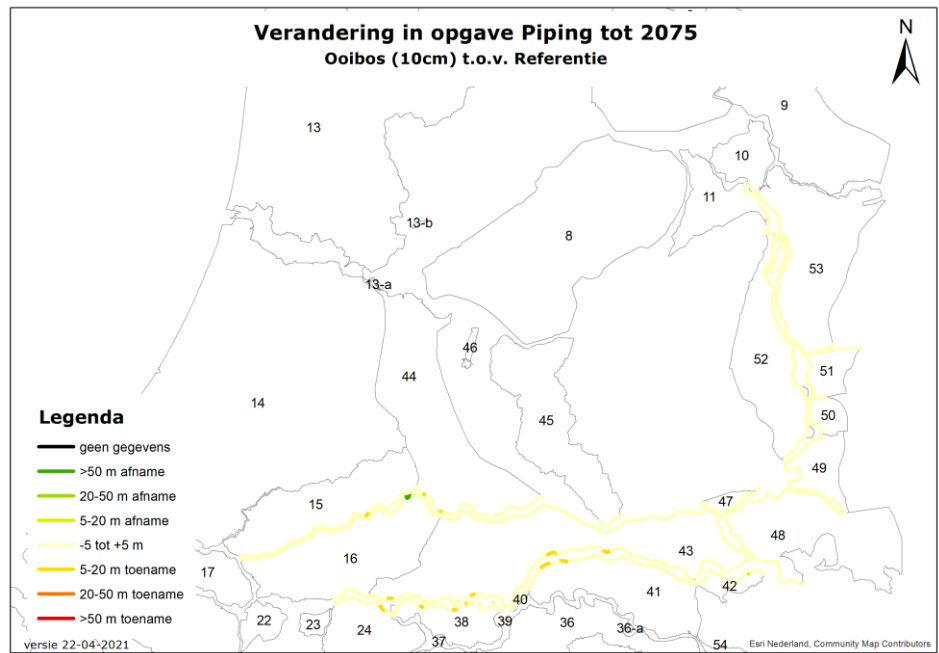
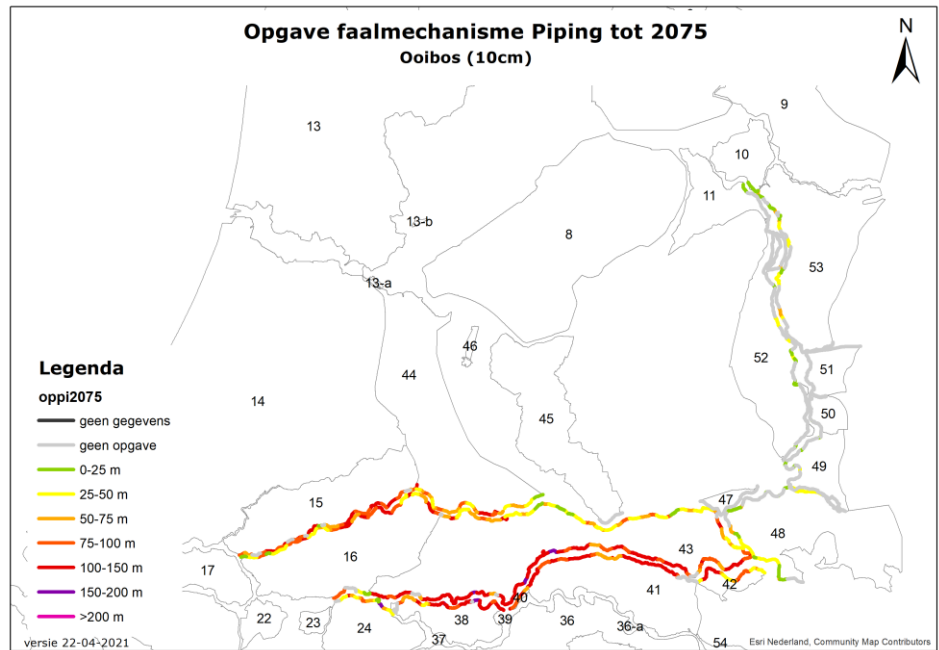


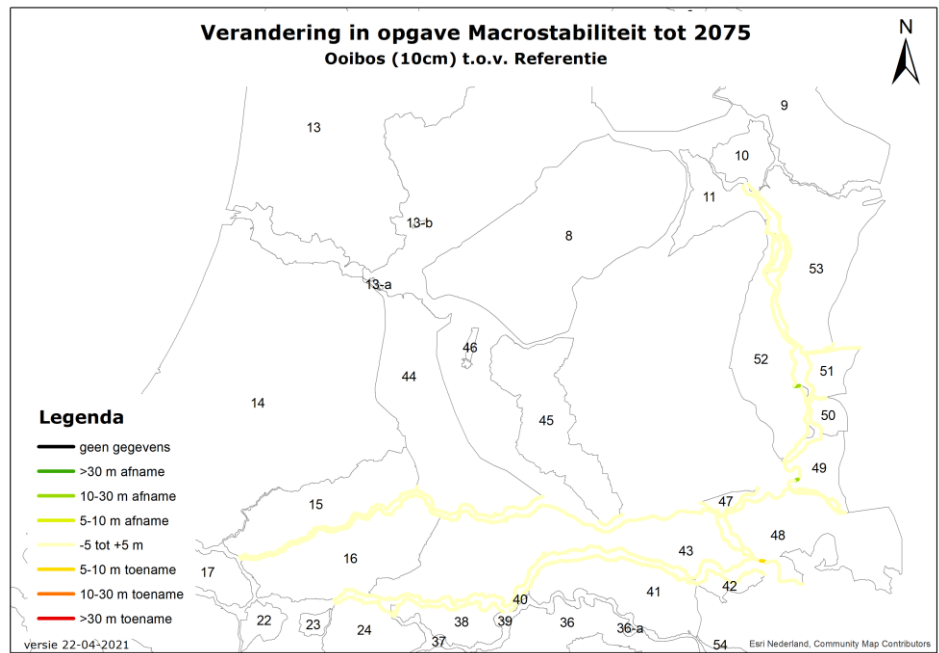
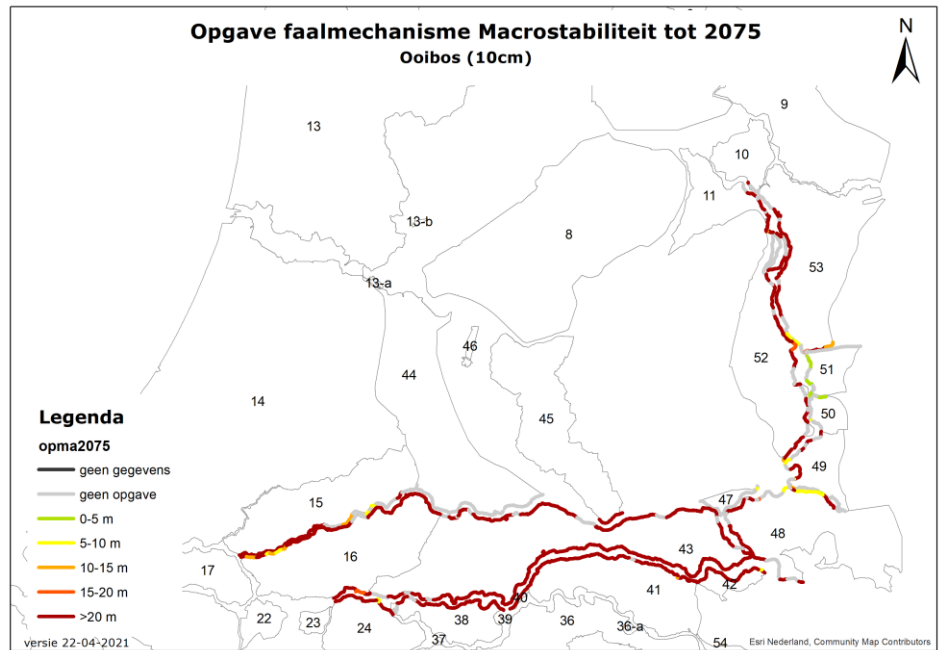


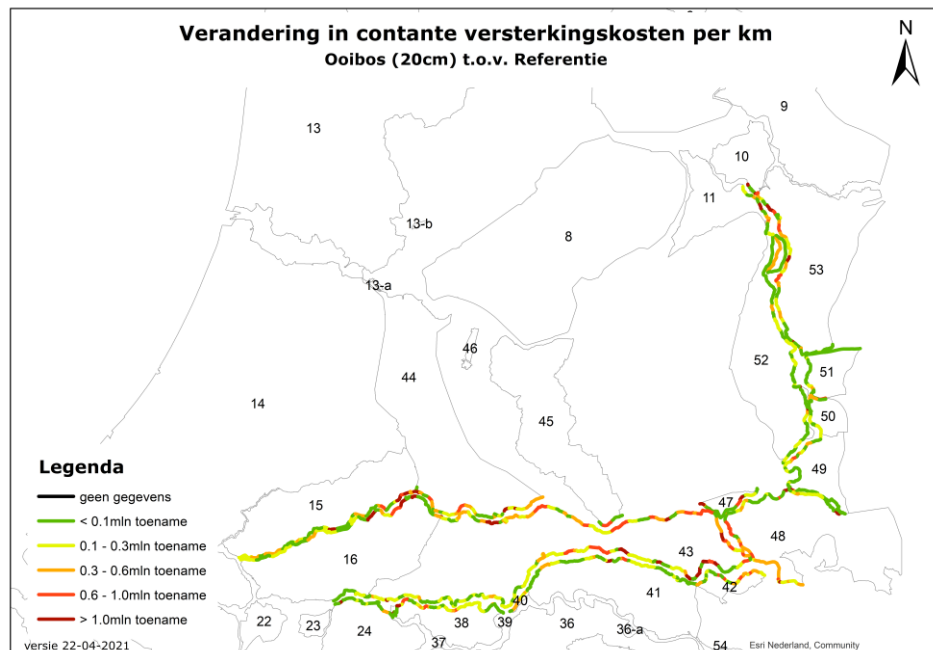
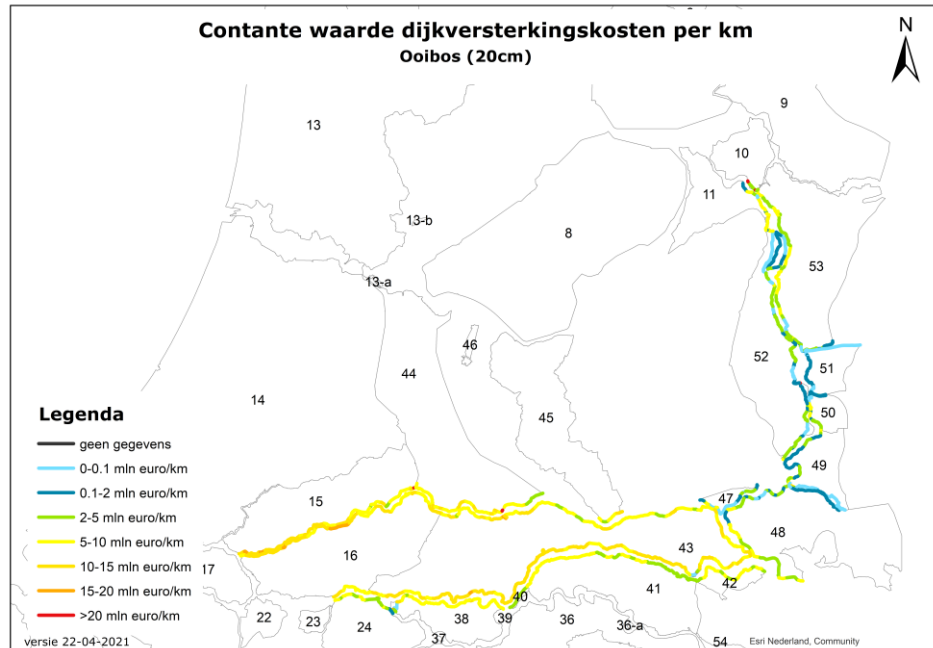


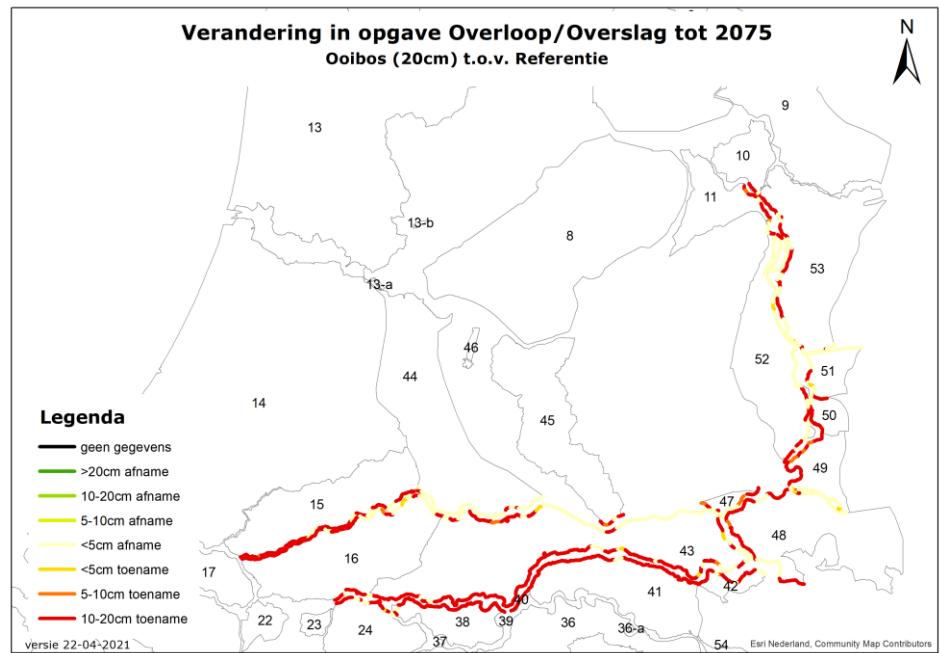
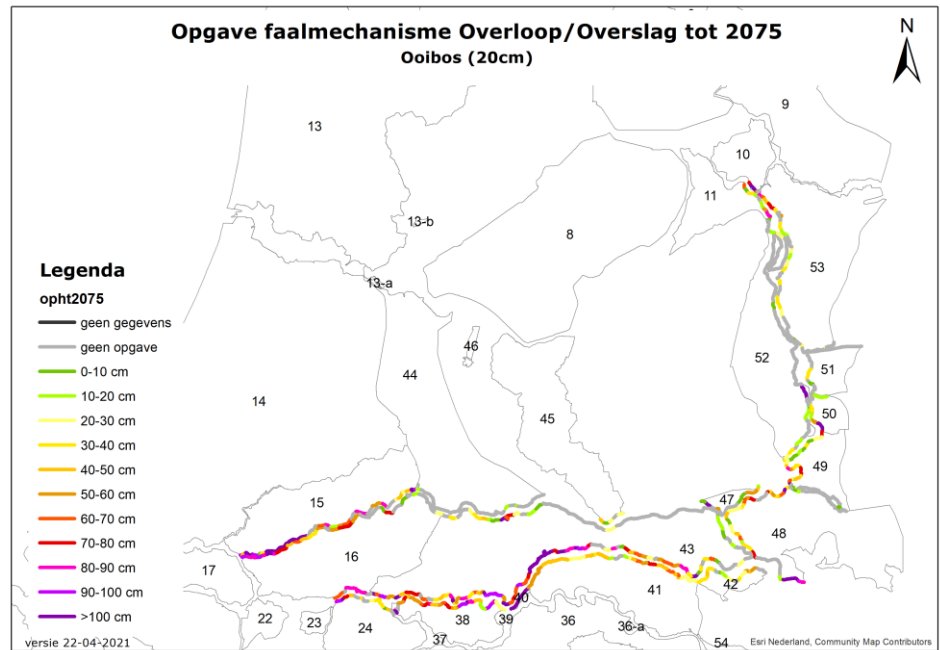


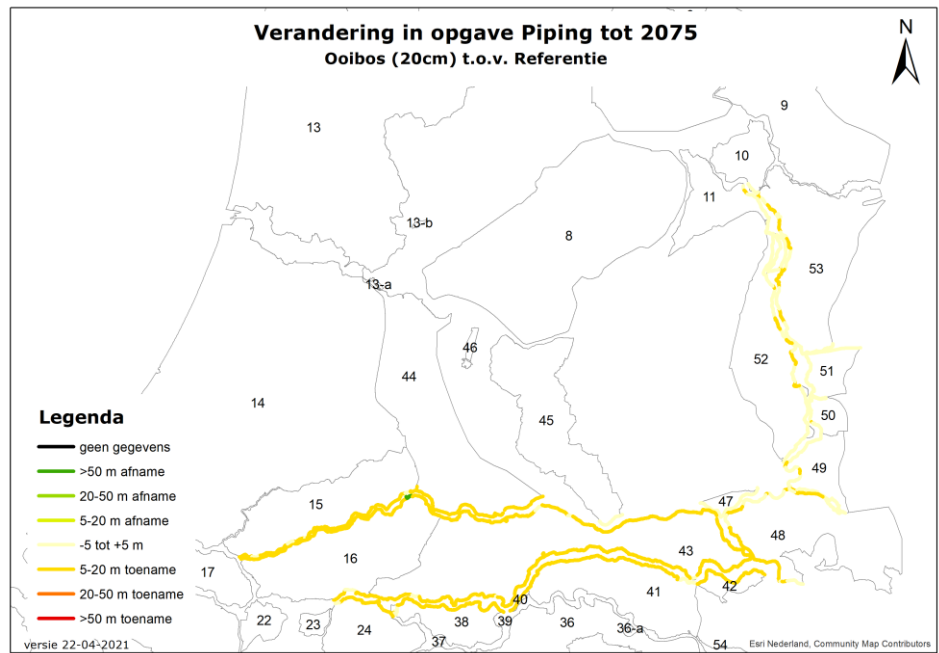
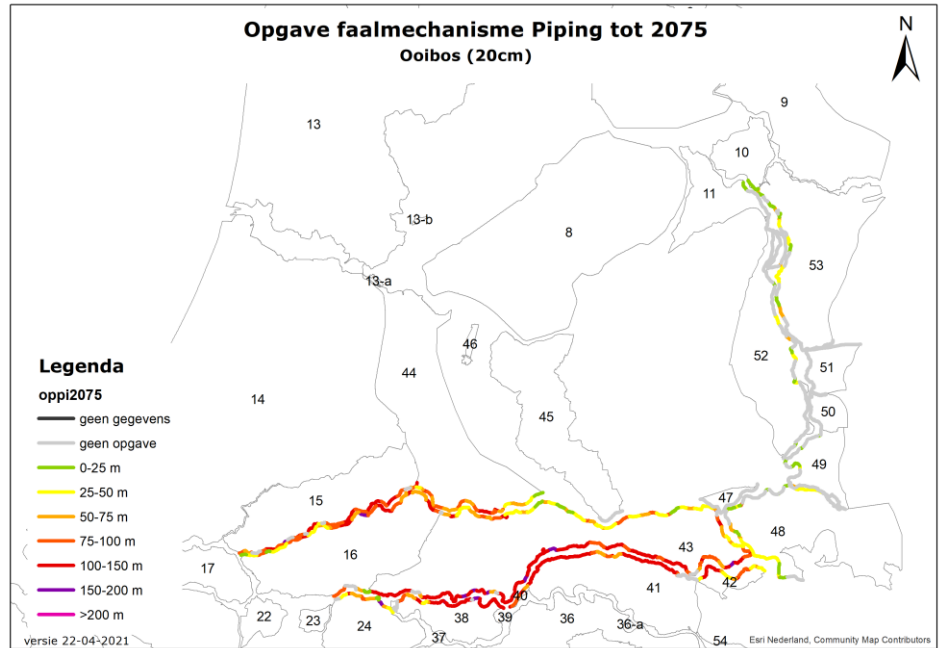


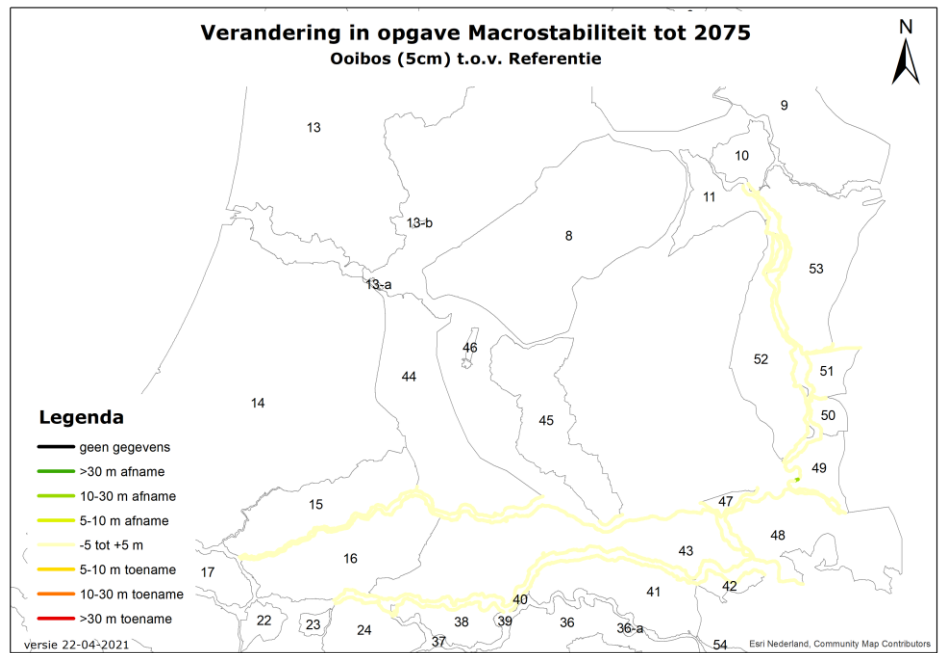
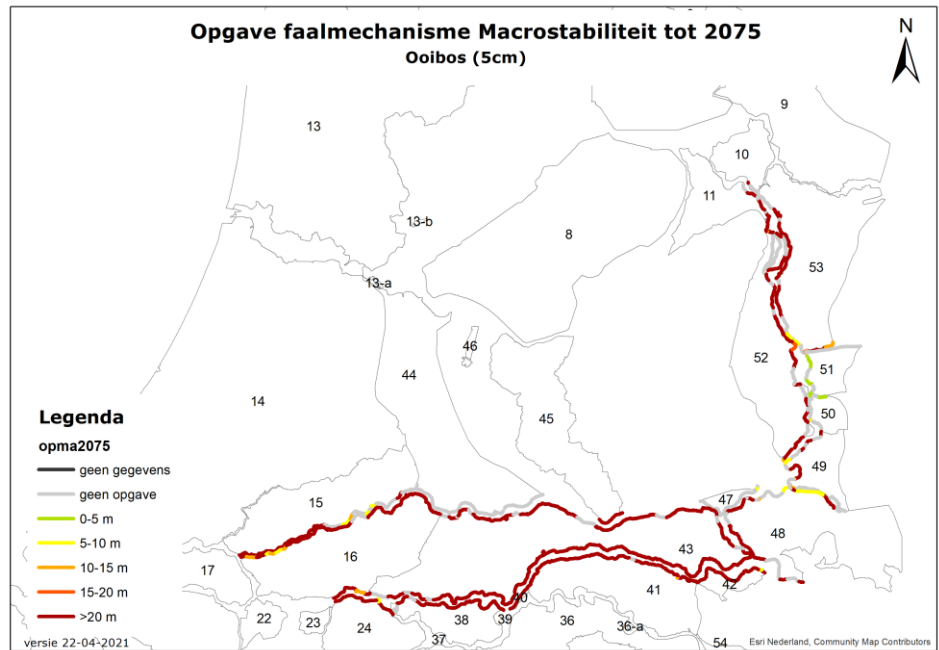


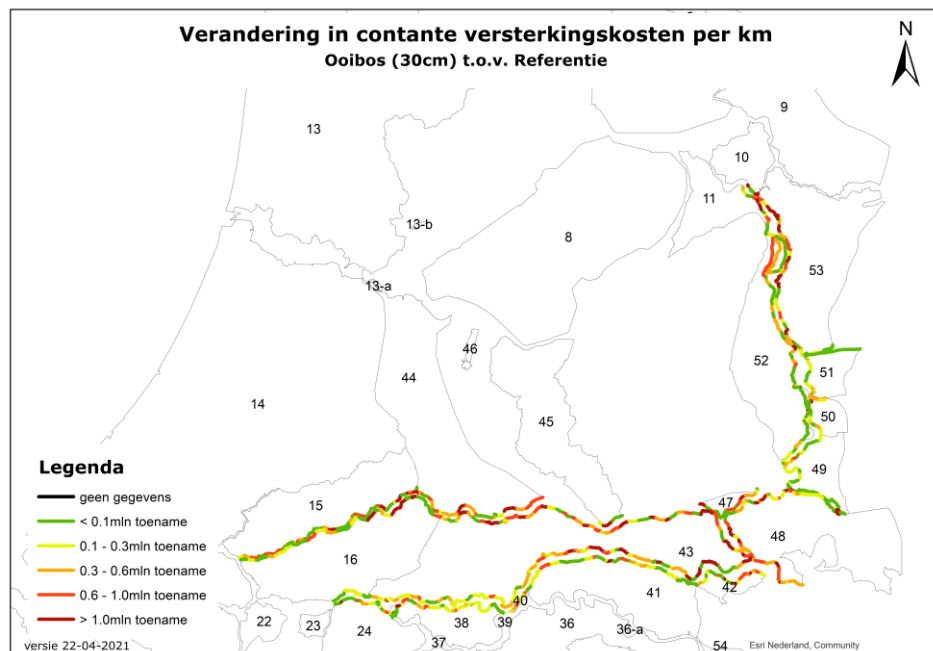
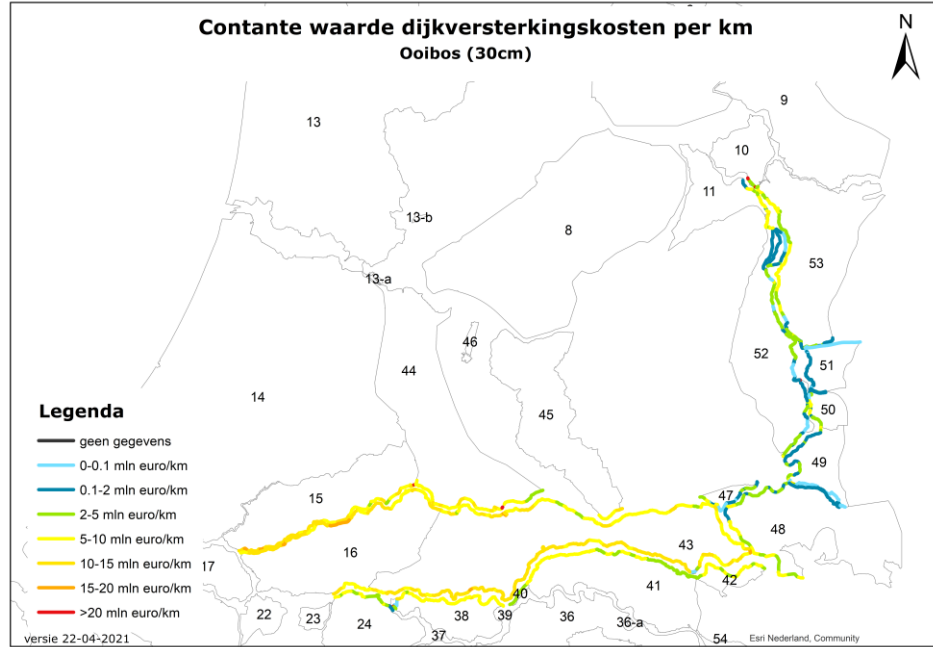


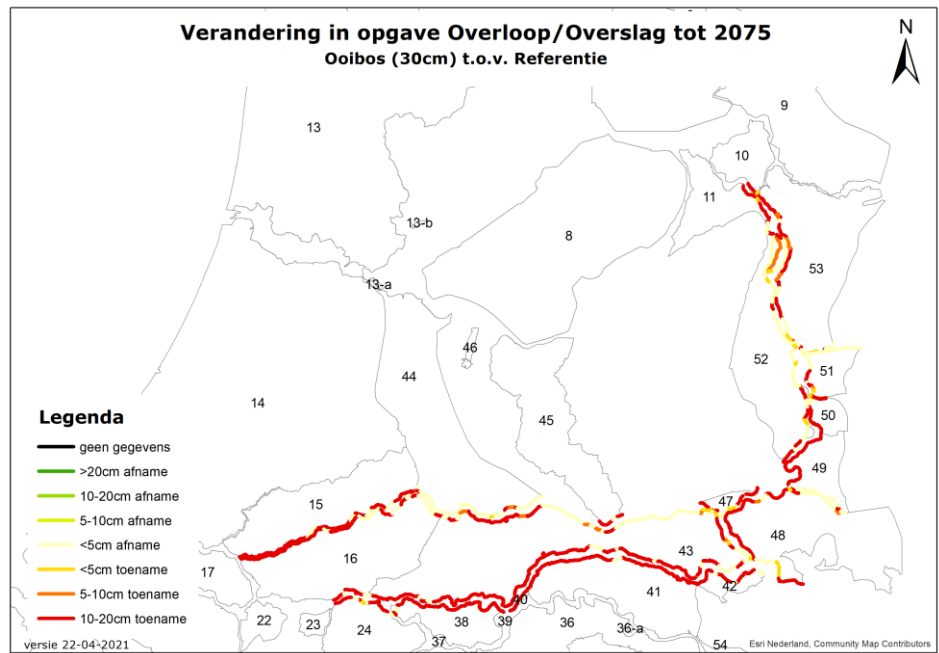
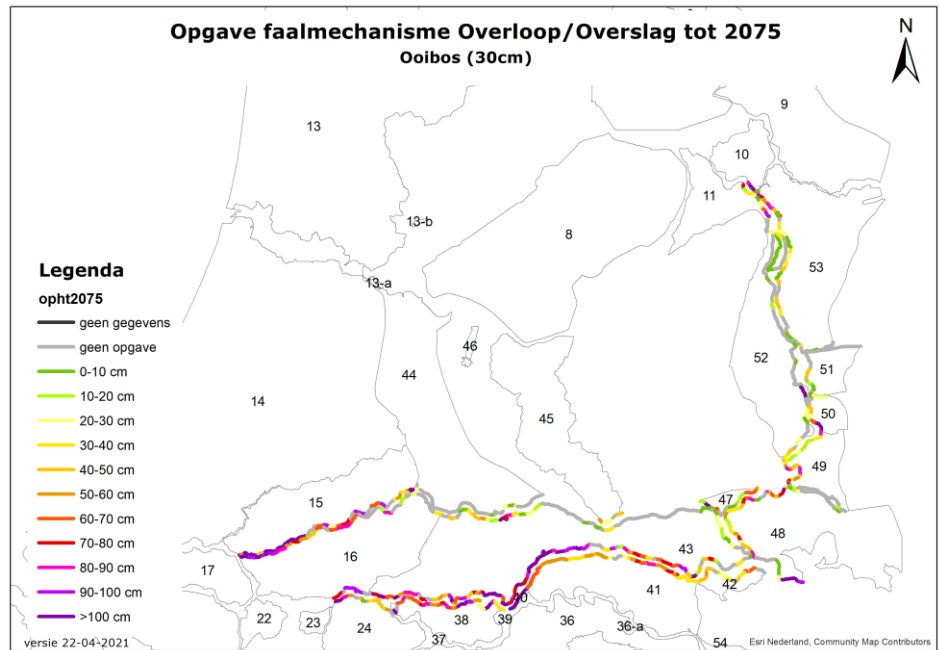


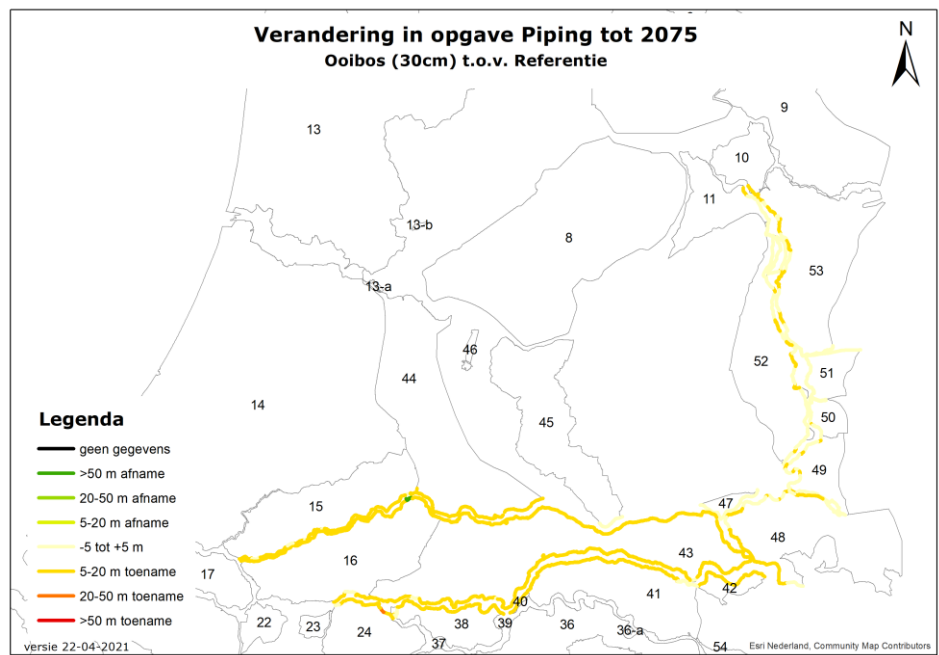
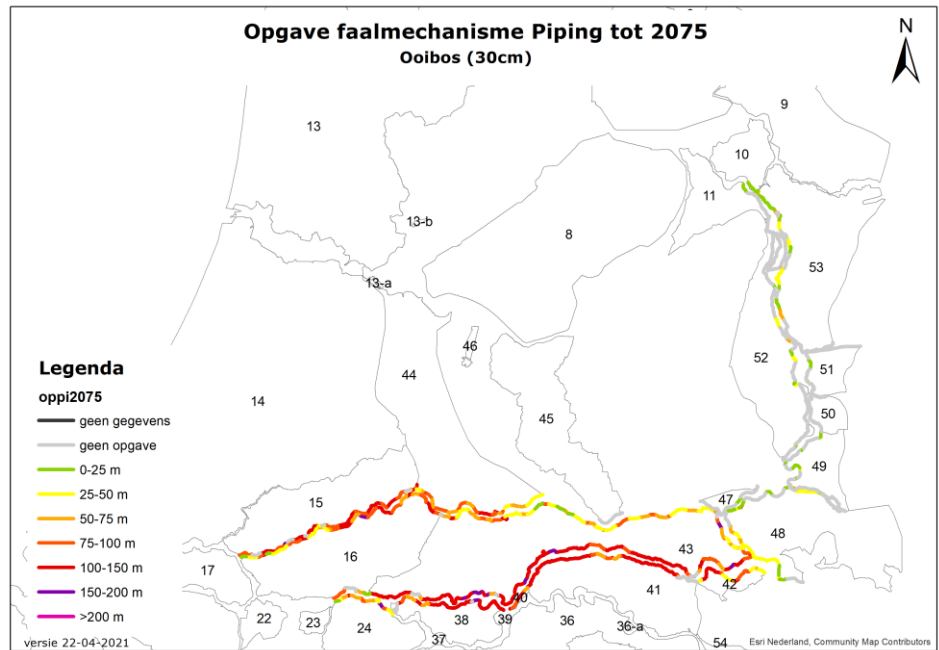


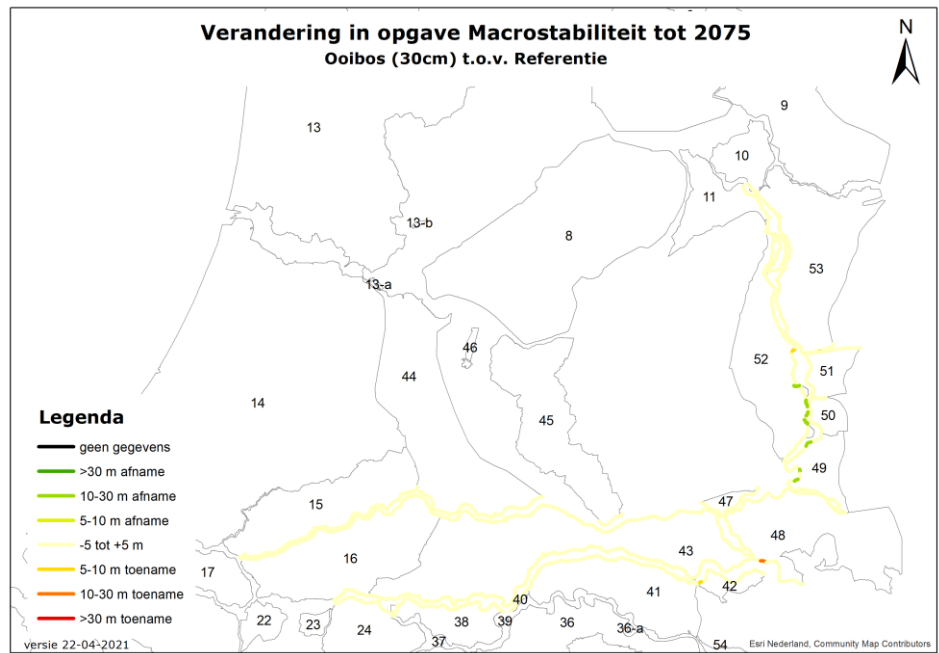
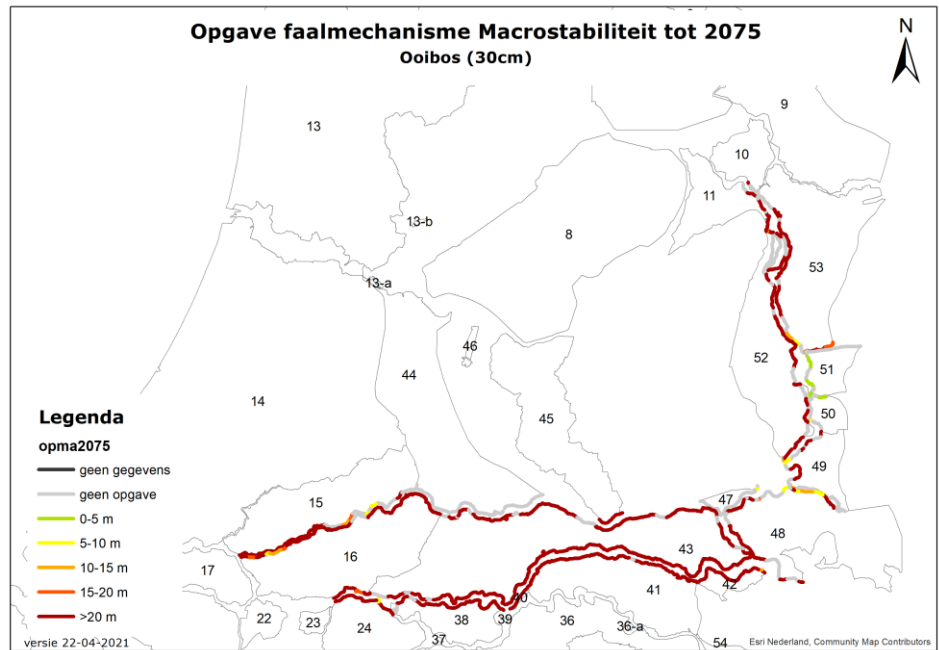






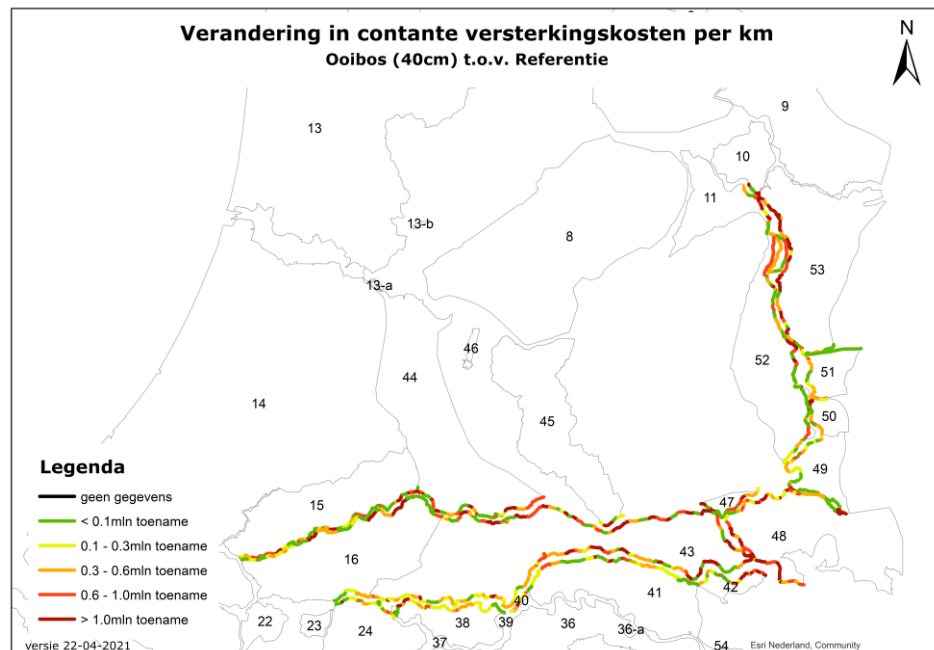
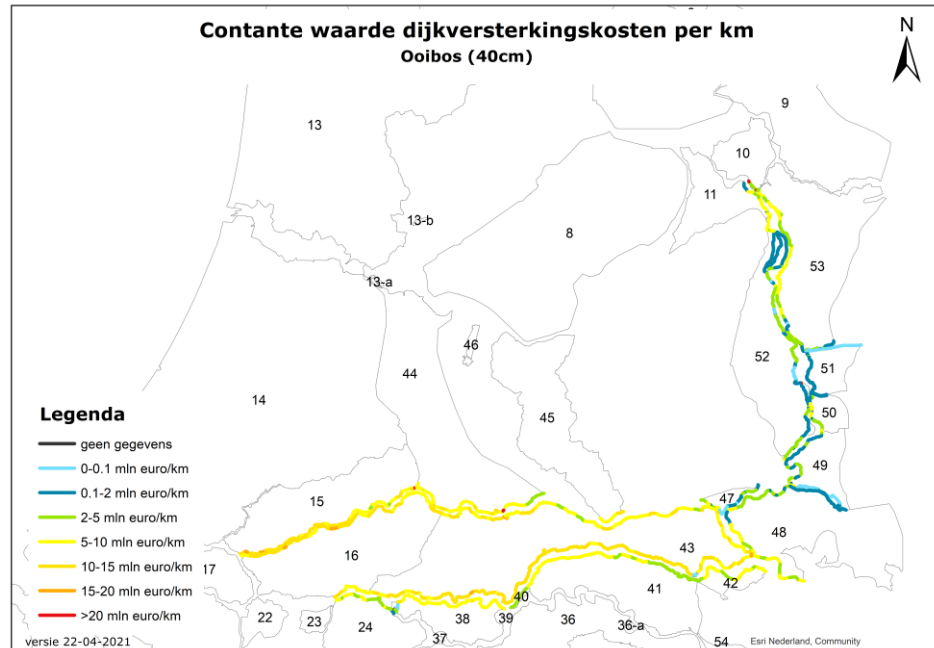


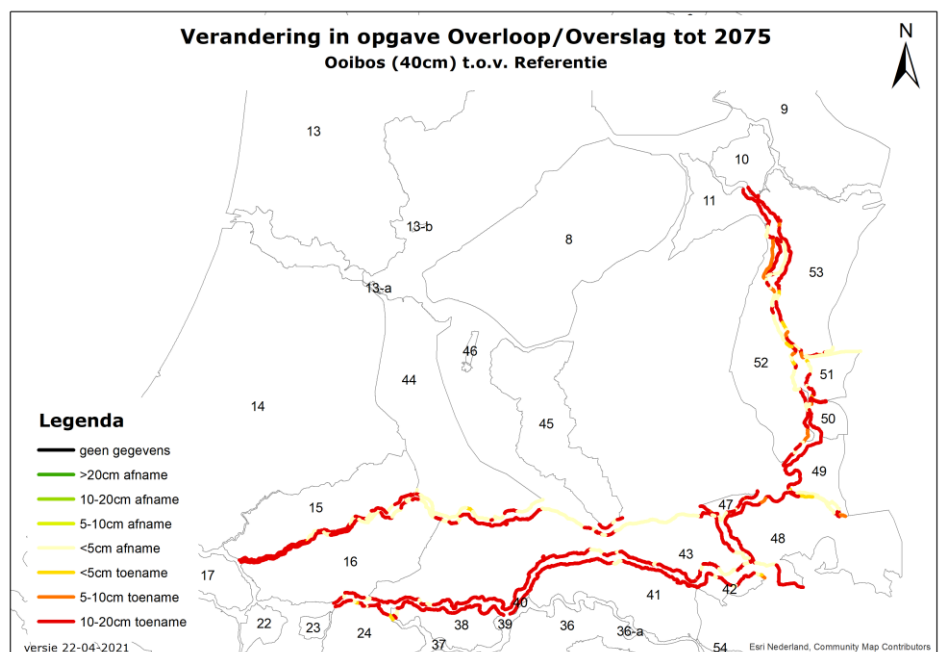
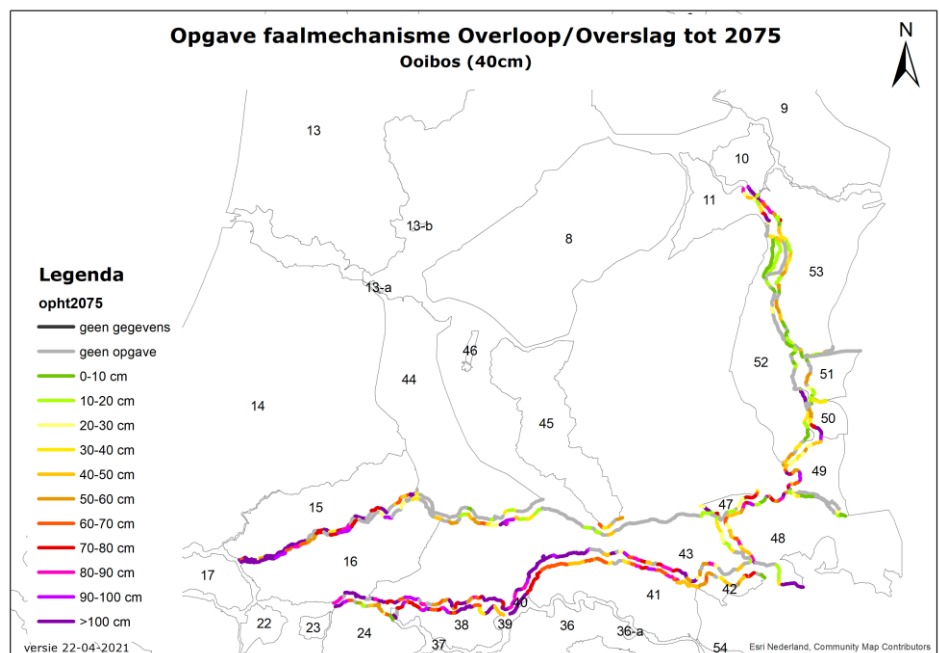


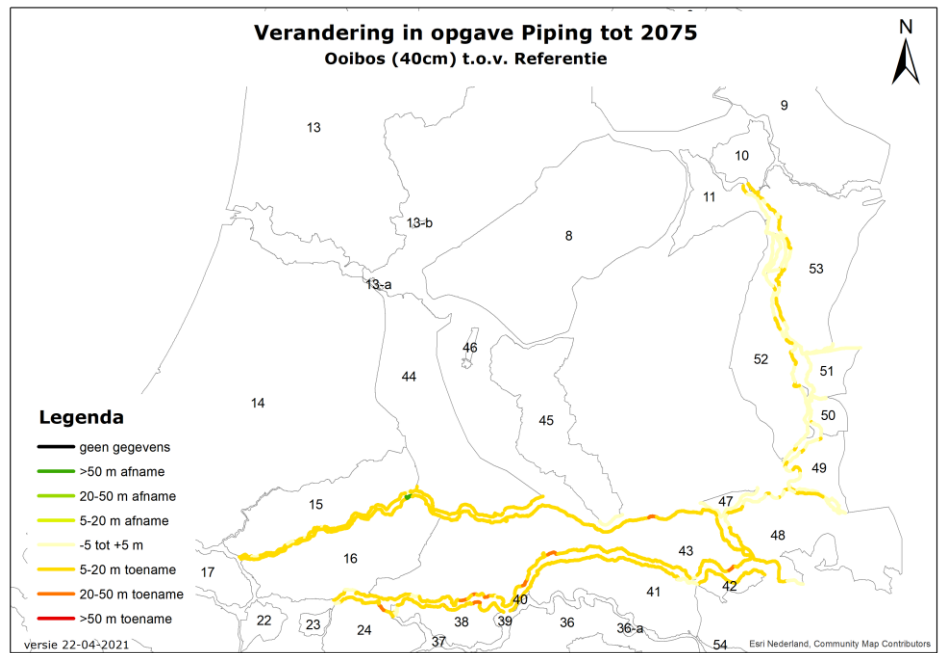
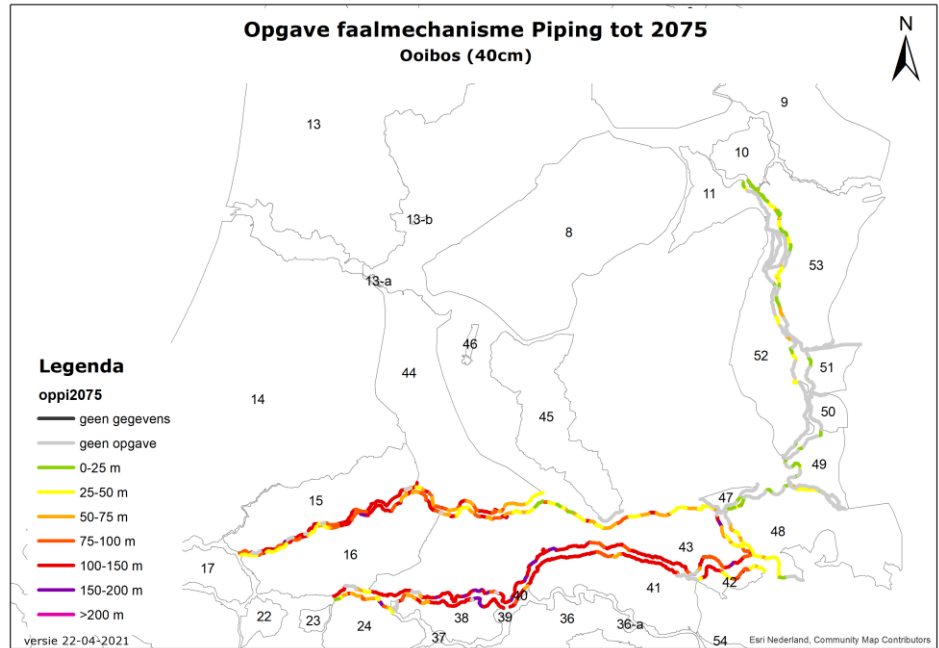


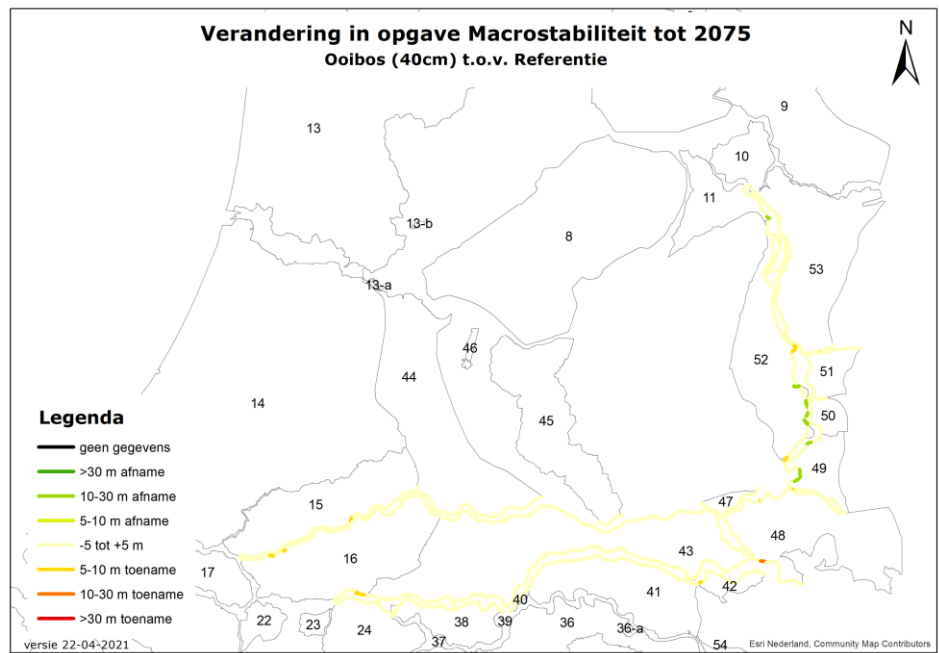
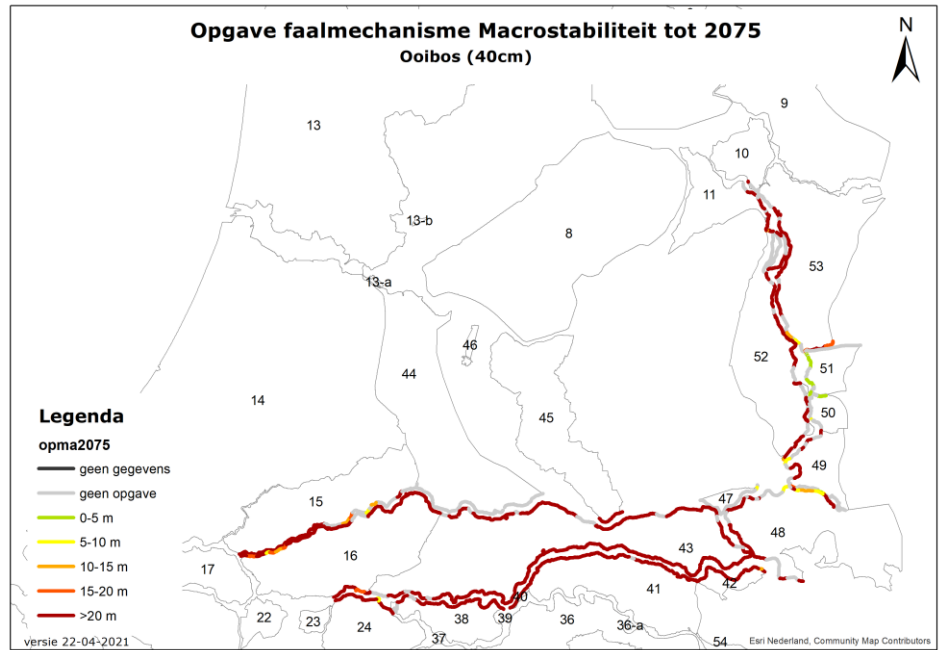
A.6 Kaarten voor 40cm

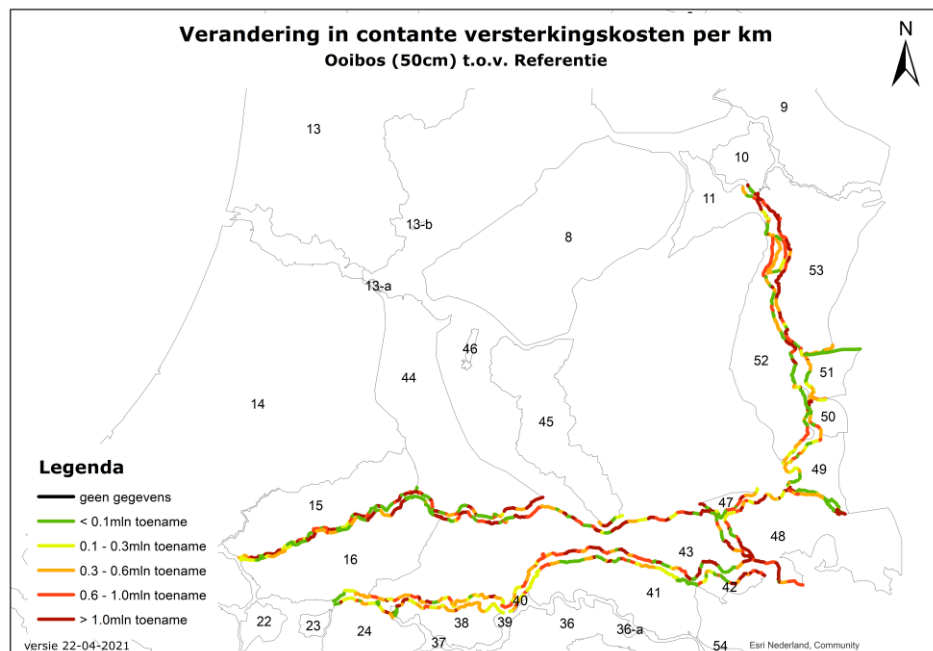
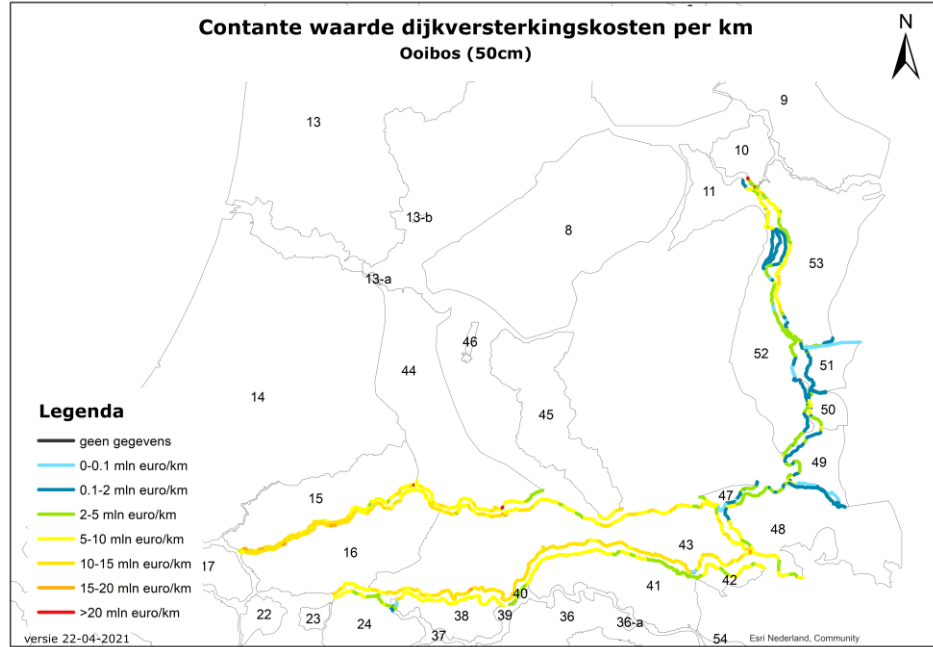
A.6.1 Kosten

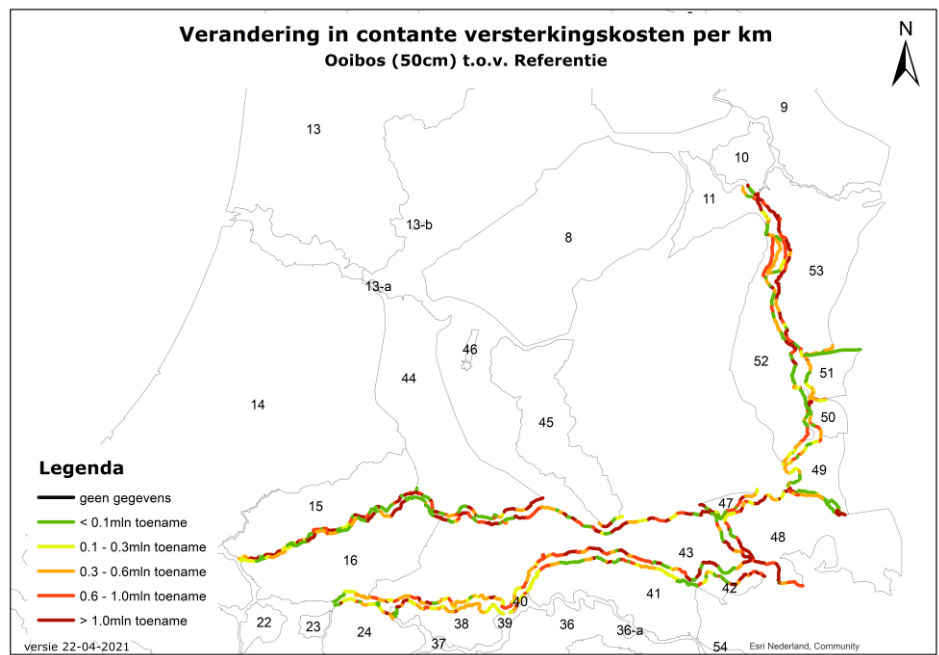
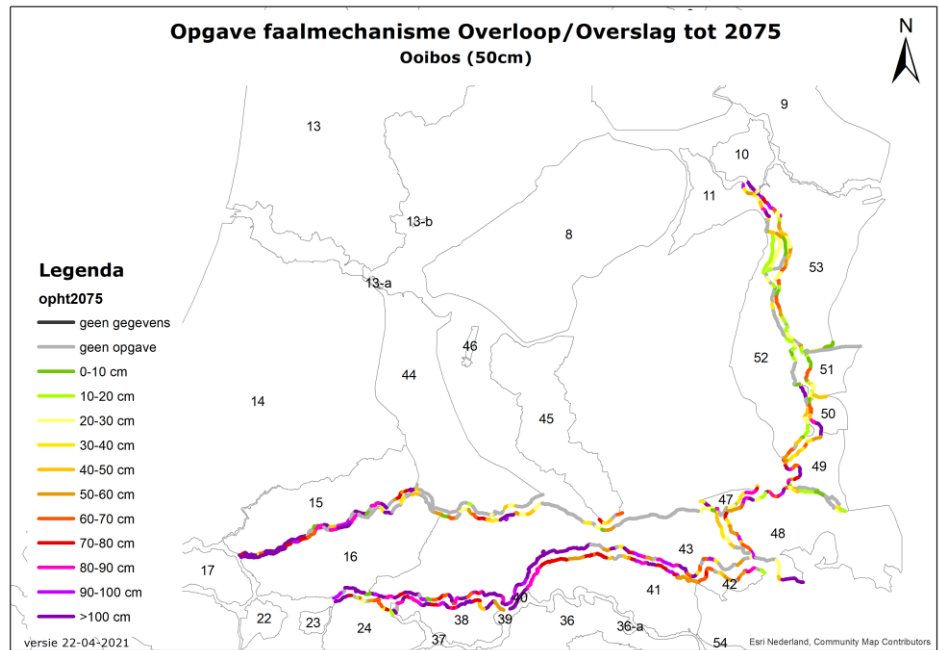


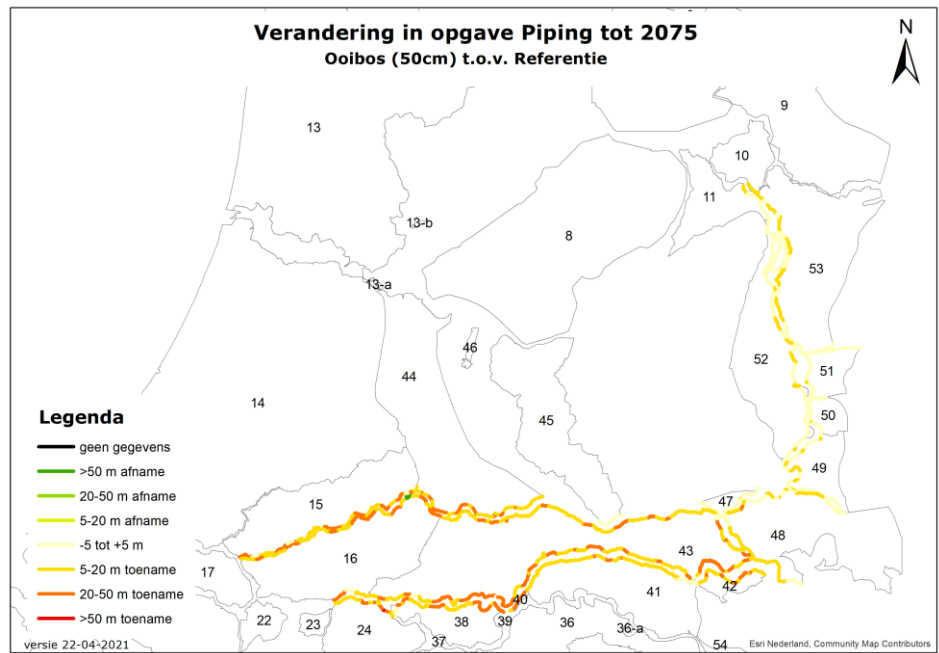
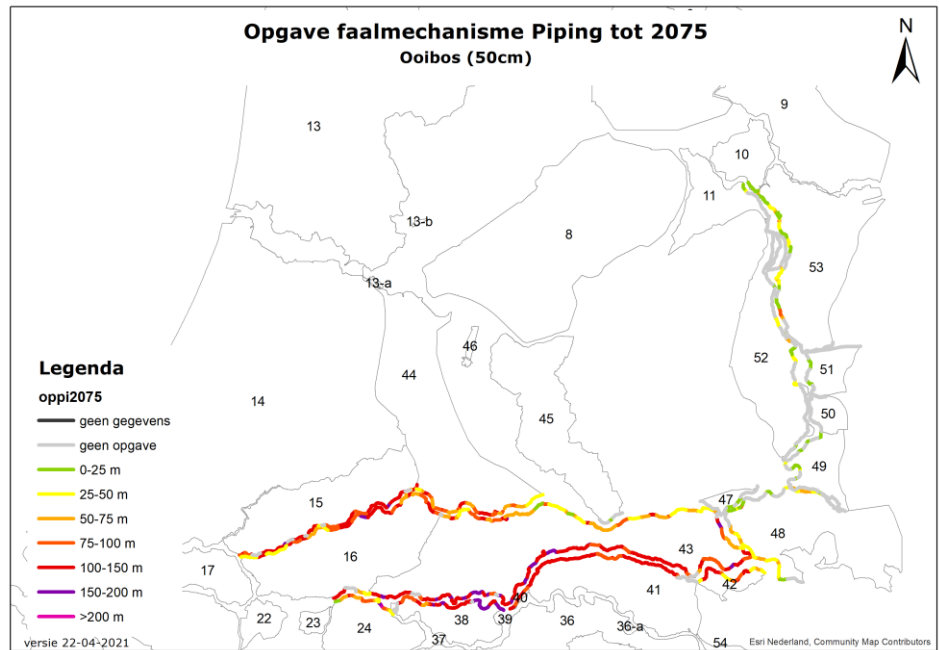


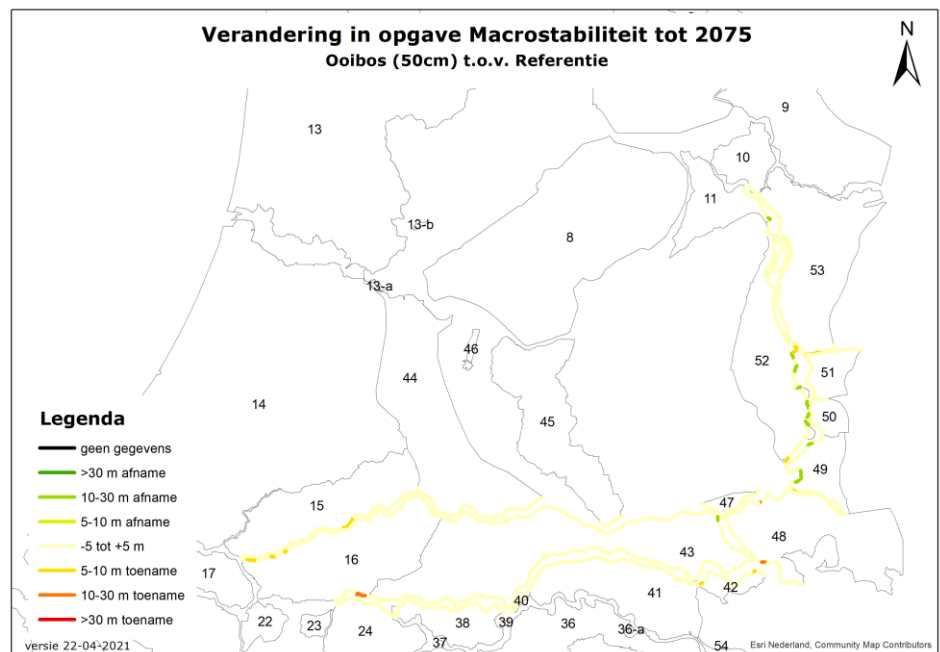
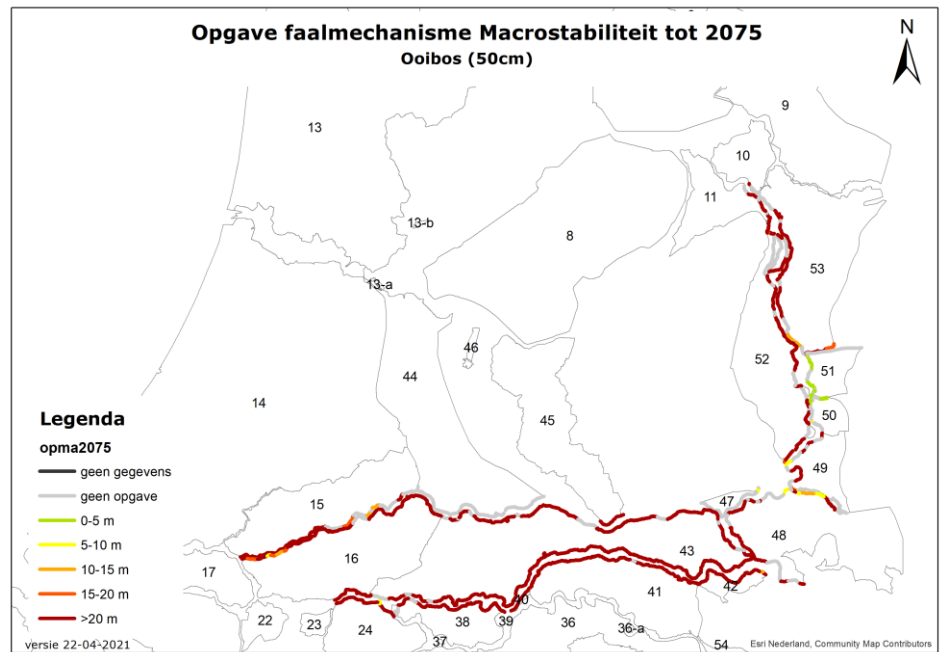














Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

0320 294242

info@hkv.nl

www.hkv.nl