

# NMIJ scenario berekeningen 2014

Rijkswaterstaat Midden Nederland

29 oktober 2014 – update september 2015

Definitief rapport

9V6742-0A2-100



Document title NMIJ scenario berekeningen 2014

Document short title NMIJ scenario berekeningen 2014

Status Definitief rapport

Date 29 oktober 2014 – update september 2015

Project name Natuurlijker Markermeer IJmeer

Project number 9V6742-0A2-100

Client Rijkswaterstaat Midden Nederland

Reference 9V6742.A2/R0201/903718/BW/Nijm

Drafted by Marieke Bakker en Thomas Vijverberg

Checked by Pascal Boderie 

Date/initials check 29-10-2014 .....

Approved by Roelof Moll

Date/initials approval 29-10-2014 

## INHOUDSOPGAVE

	Blz.	
1	INLEIDING	1
	1.1 Doel	1
	1.2 Leeswijzer	1
2	MODELSPECIFICATIES EN SCENARIO'S	2
	2.1 Modelspecificaties	2
	2.2 Scenario's	4
3	RESULTATEN	8
	3.1 Slibconcentratie	8
	3.2 Verandering van de bodemlaag	10
	3.3 Slibdynamica rondom putten	12
	3.4 Percentage licht aan de bodem	13
	3.5 Doorzicht, Secchi-diepte	14
4	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	16
5	REFERENTIES	17

## BIJLAGE(N):

- A. Gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (jaargemiddeld) (mg/l), scenario's met en zonder putten;
- B. Verschil met referentie, gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (jaargemiddeld) (mg/l), scenario's met en zonder putten;
- C. Gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (zomer) (mg/l), scenario's met en zonder putten;
- D. Verschil met referentie, gemiddelde slibconcentratie aan de bodem (zomer) (mg/l), scenario's met en zonder putten;
- E. Gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (winter) (mg/l), scenario's met en zonder putten;
- F. Verschil met referentie, gemiddelde slibconcentratie aan de bodem (winter) (mg/l), scenario's met en zonder putten;
- G. Verandering in het jaar van de bodemlaag (S2) (kg/m<sup>2</sup>), scenario's met en zonder putten;
- H. Verschil met referentie: verandering in het jaar van de bodemlaag (S2) (kg/m<sup>2</sup>), scenario's met en zonder putten;
- I. Gemiddelde in het voorjaar van het percentage licht aan de bodem (%) als contourlijn (rood=referentie, blauw=scenario) en als verschil met referentie (kleurschaal);
- J. Gemiddelde in de zomer van het percentage licht aan de bodem (%) als contourlijn (rood=referentie, blauw=scenario) en als verschil met referentie (kleurschaal);
- K. Gemiddeld doorzicht: Secchi diepte (cm) in het voorjaar (maart-mei), scenario's met en zonder putten;

- L. Gemiddeld doorzicht; Secchi diepte (cm) in de zomer (april-sept), scenario's met en zonder putten;
- M. Gemiddeld doorzicht; Secchi diepte (cm) in de winter (jan-maart), scenario's met en zonder putten.

## **1 INLEIDING**

### **1.1 Doel**

Het Onderzoeksprogramma Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer (NMIJ) heeft onder andere tot doel om de effectiviteit van maatregelen vast te stellen, die bijdragen aan een robuust Toekomstbestendig Ecologisch Systeem (TBES) in het Markermeer-IJmeer. Daarbij staan een aantal aspecten centraal zoals het op gewenste locaties verlagen van de slibconcentraties. Om de bereikbaarheid van dit doel te toetsen is een Delft-3D slib-model ontwikkeld (Van Kessel et al., 2009) en gevalideerd (Boderie et al., 2012). Dit model is in eerdere jaren gebruikt om verschillende scenario's te beoordelen. In 2012 zijn de eerste berekeningen uitgevoerd. Hierin zijn scenario's doorgerekend met een groot moeras, luwtestructuren langs de Noord-Hollandse kust en een vooroever Lepelaarsplassen. In 2013 is een optimalisatieslag gemaakt en zijn er opnieuw diverse scenario's doorberekend. De scenario's bevatten toen o.a. een moeras van 500 ha en 5000 ha, luwtestructuren op diverse locaties en verdiepte geulen. In 2014 zijn opnieuw berekeningen uitgevoerd. Hiervoor zijn dezelfde scenario's als in 2013 gebruikt met als toevoeging negen diepe zandwinputten. Dit rapport gaat in op deze resultaten en laat daarmee de effectiviteit van diepe zandwinputten in verschillende scenario's op de slibhuishouding in het meer zien.

### **1.2 Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de modelspecificaties zoals gebruikt voor deze modelstudie. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de opgestelde en beoordeelde scenario's.

In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de scenario's beschreven waarin onderscheidt wordt gemaakt in slibconcentraties aan de bodem, jaargemiddeld en voor de zomer en winterperiode. Daarnaast wordt ook ingegaan op het effect op de bodemlaag en het effect op de hoeveelheid licht aan de bodem. Dit alles in zowel absolute zin als ten opzichte van de referentie situatie.

Hoofdstuk 4 geeft beknopt de conclusies weer.

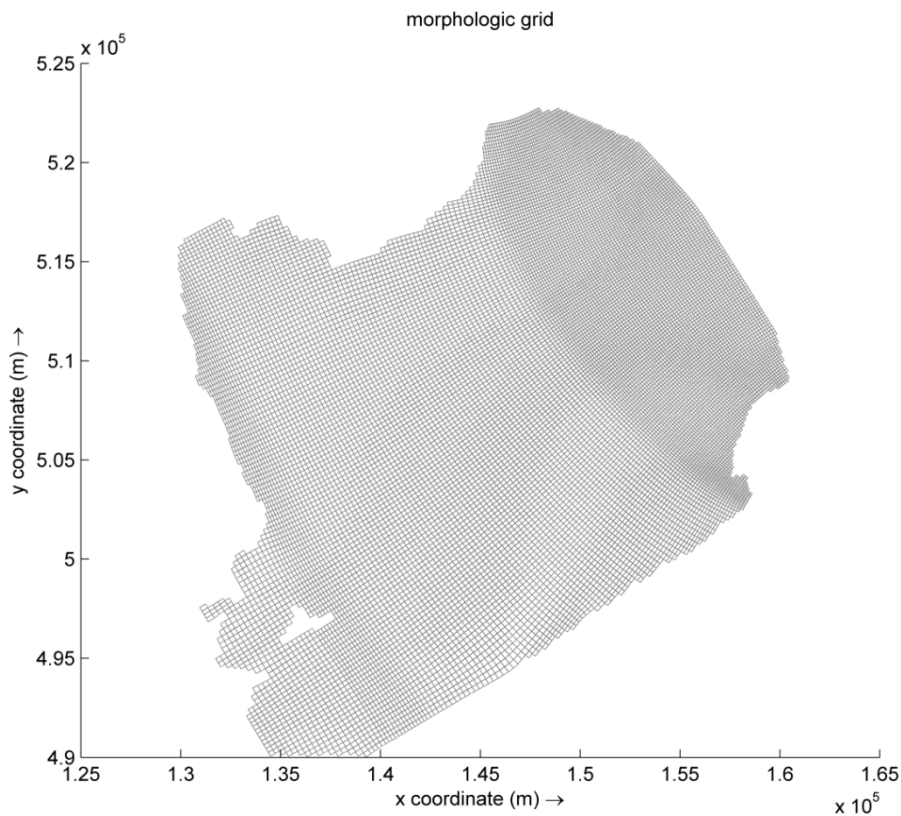
## 2 MODELSPECIFICATIES EN SCENARIO'S

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de modelspecificaties en van de te beoordelen scenario's.

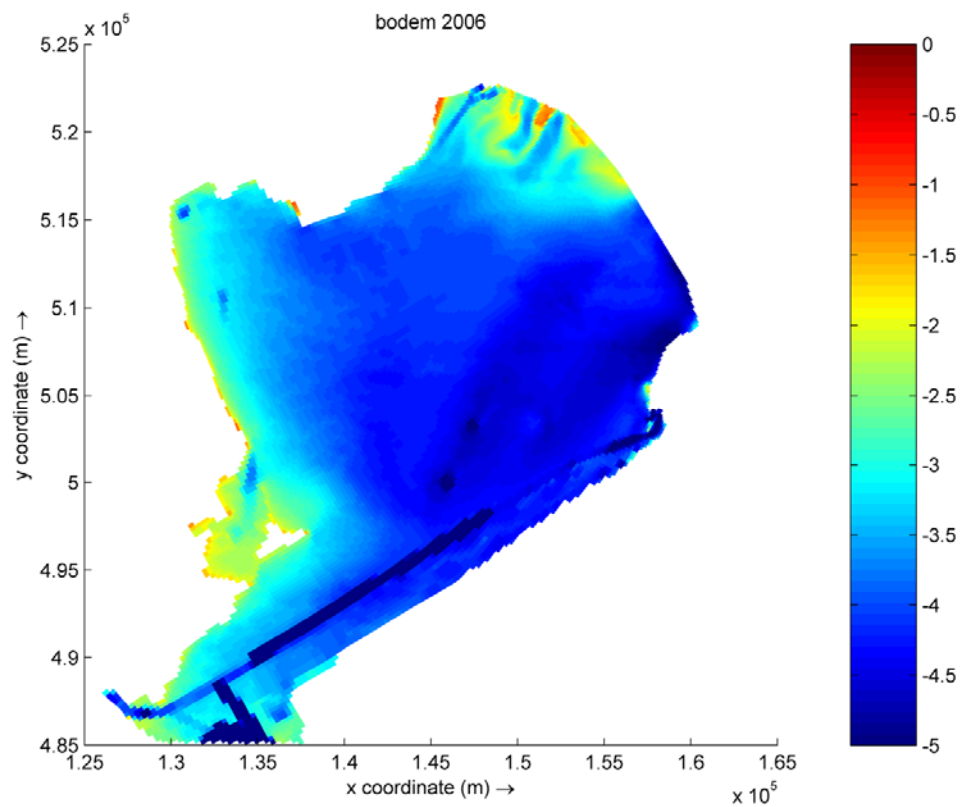
### 2.1 Modelspecificaties

Voor de berekeningen van dit jaar heeft Deltares hetzelfde slibmodel gebruikt als vorig jaar. Het model is beschreven in Vijverberg et al.(2013) en beknopt gekarakteriseerd door:

- Als basis dient het in 2009 ontwikkelde Delft-3D slibmodel (Van Kessel et al., 2009). Dit model is voor het project NMIJ gekalibreerd door Deltares (Boderie et al., 2012), in dit model wordt gekoppeld gerekend wat betreft golven en stroming. Voor de golven wordt SWAN gebruikt.
- De uitkomst van de gekoppelde golven en stroming som wordt gebruikt als invoer voor Delft-3D Water Quality (DELWAQ). Deze module berekent de zwevende stof concentraties (het slibgehalte) en uitdoving van licht.
- Voor alle berekeningen wordt hetzelfde rekenrooster gebruikt. Dit om consistentie te verkrijgen tussen alle berekeningen en onderlinge vergelijking eenvoudiger te maken. Dit rekenrooster heeft een algemene celgrootte van 200 x 200 m op het midden van het meer. Bij de Noord-Hollandse kust en langs de Houtribdijk is een verfijning aanwezig met een celgrootte van ongeveer 150 x 150 m. Figuur 2.1 geeft het rooster weer. De resolutie van dit rooster is net voldoende om de zandwinputten te schematiseren (resultaten zijn vergeleken met een 4x4 verfijnd rooster en komen –op lokaal detail na- goed overeen).
- Als bodeminvoer is de situatie van 2006 het uitgangspunt. Deze bodem is gebruikt in eerdere berekeningen, zo ook voor kalibratie van het model (Boderie et al., 2012). Figuur 2.2 geeft de bodemligging weer.
- De ruwheid in het model is gebaseerd op schelpenkaarten, zodat de ruwheid ruimtelijk varieert en overeenkomt met de gekalibreerde versie van het model. De schelpenkaarten zijn gebaseerd op ruimtelijke opnames uit 1999-2000 (Noordhuis, 2010).
- Voor windstatistiek is gekozen voor het jaar 2006 vanwege de representativiteit voor de afgelopen 20 gemeten jaren. Als invoer in het model wordt een uurgemiddelde windsnelheid en -richting toegepast.
- Voor het waterpeil op het meer wordt het meerpeil uit het referentiejaar 2006 opgelegd. Het meerpeil is het gerealiseerde peil dat het streefpeil benadert waarbij het winterpeil (21 september tot en met 20 maart) NAP -0,40 m is. Het zomerpeil (21 maart tot en met 20 september) is NAP -0,20 m. Op de overgang zit een periode van twee weken om het nieuwe peil te bereiken.
- Voor beoordeling van de scenario's wordt onderscheid gemaakt tussen winter-, lente- en zomerresultaten. Voor de zomer is de volgende periode gedefinieerd: 1 april tot en met 30 september, voor de lente 1 april tot en met 30 juni en voor de winter de periode 1 oktober tot en met 31 maart.
- De (verschil)kaarten voor de beoordeling van de scenario's worden met behulp van een Matlab script gemaakt op basis van de DELWAQ resultaten.



**Figuur 2.1: Rekenrooster van het model**



**Figuur 2.2: Bodemhoogte in m t.o.v. NAP zoals gemeten in 2006, geprojecteerd op het oorspronkelijke rekenrooster**

## 2.2 Scenario's

Met het model zijn verschillende scenario's doorgerekend van maatregelen in het Markermeer. Dezelfde scenario's als vorig jaar zijn doorgerekend met en zonder diepe zandwinputten. De volgende tabel geeft een overzicht van alle scenario's:

Scenario	Met/zonder putten en geulen <sup>1</sup> (Markerwadden)
1: Huidige situatie zonder enige maatregelen	Zonder putten en geulen
	Met putten en geulen
2: Luwtestructuren in Hoornsche Hop (conform MIRT variant dammen West) en 500 ha Moeras + geulen behorend bij 500 ha moeras (eerste fase MarkerWadden).	Zonder putten en geulen
	Met putten en geulen
3: Luwtestructuren in Hoornsche Hop (conform MIRT variant dammen West), luwtestructuren op Enkhuizerzand en 5000 ha Moeras + geulen behorend bij 5000 ha Moeras (eindsituatie MarkerWadden)	Zonder putten en geulen
	Met putten <sup>2</sup> en geulen

De putten bestaan uit kleine putten van ca. 12 ha en grote putten van ca. 20 ha, zie figuur 2.3. De putten zijn grotendeels geplaatst op en nabij de 2 km lijn van de dijk. Dit in verband met de maximale afstand van locatie van zandwinning en zandbehoefte. De put die dicht bij Hoorn ligt is iets verder naar het oosten verschoven, omdat die locatie logischer is in combinatie met de luwtestructuren.

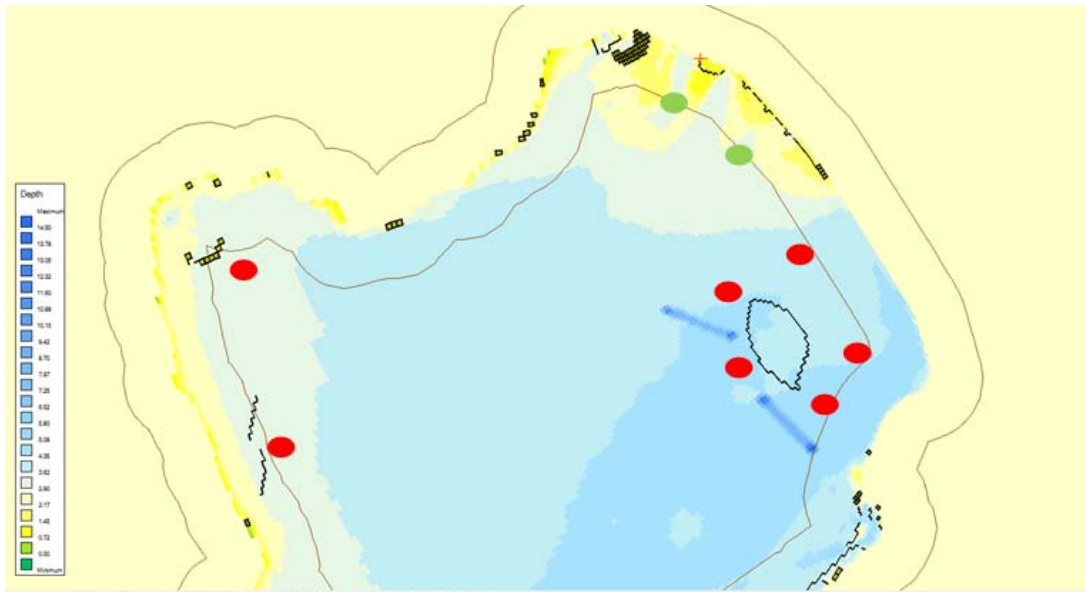
De putten bij het Enkhuizerzand worden wel op de 2 km lijn gelegd, echter wel in de diepe delen (oude geulen). Op die manier tast het de ecologische waarden niet aan en is het eventueel nog mogelijk om combinaties te maken met luwtestructuren daar. Deze structuren zullen namelijk vooral op de ondiepe delen worden geplaatst (rekening houdend met ecologische waarden). Hierdoor ontstaat een goede interactie tussen luwtestructuren en putten en kunnen de maatregelen elkaar versterken.

De putten rondom MarkerWadden zijn zo geplaatst dat deze zo min mogelijk in de weg liggen voor de eventuele uitbreiding van MarkerWadden. Hier is uitgegaan van scenario 2 met een moeras van 500 ha. Als gevolg hiervan heeft een deel van de zandwinputten voor scenario 3 geen effect doordat ze binnen of vlak naast het moeras vallen.

<sup>1</sup> Het was oorspronkelijk de bedoeling om enkel de putten toe te voegen aan de originele scenario's. Uiteindelijk is een bodemfile voor de originele scenario's gebruikt zonder de daarin behorende geulen. In de bodemfile voor de scenario's met putten zitten juist zowel de putten als de geulen.

<sup>2</sup> Drie putten liggen binnen de Markerwadden en zullen geen effect hebben.



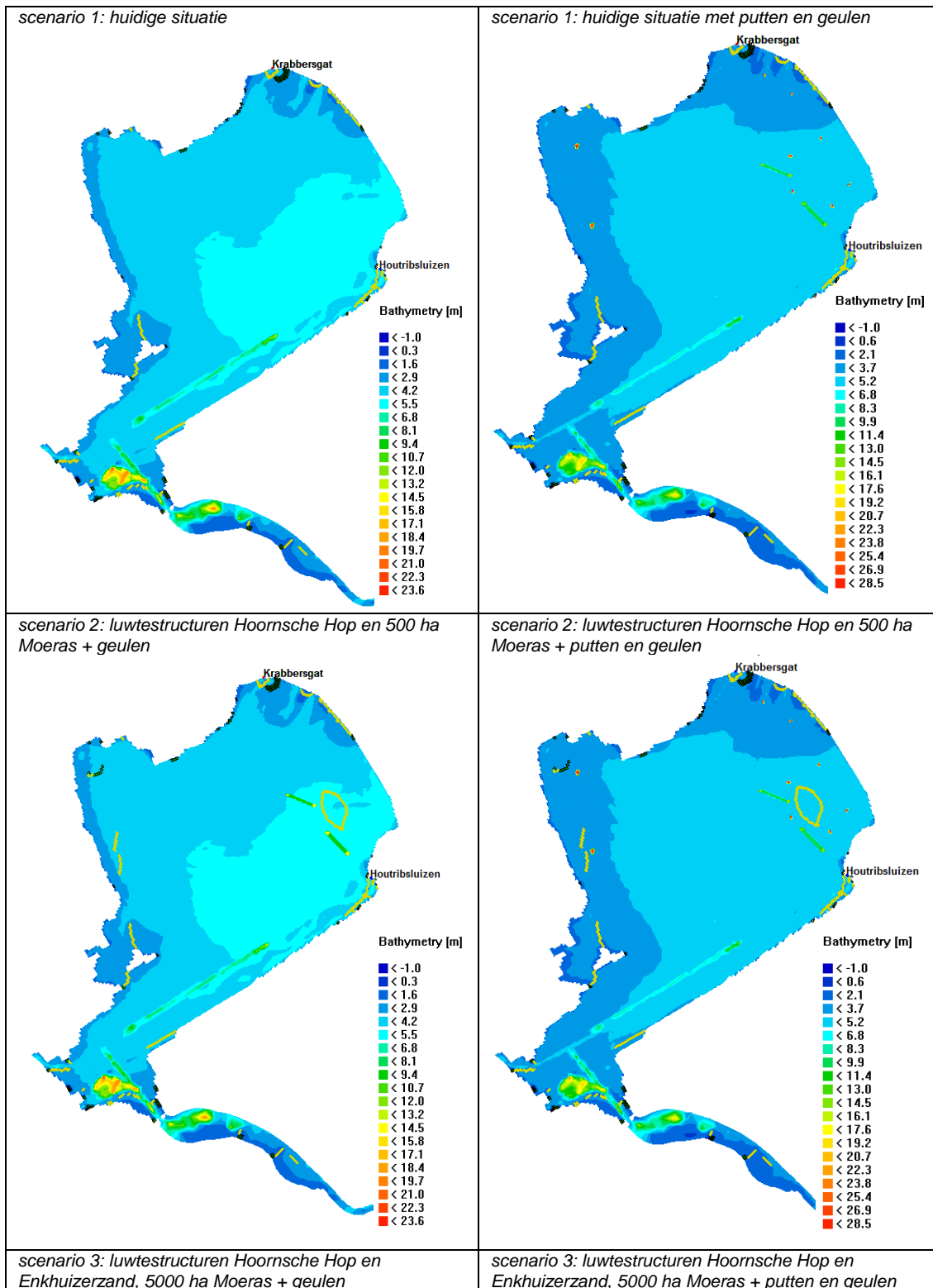


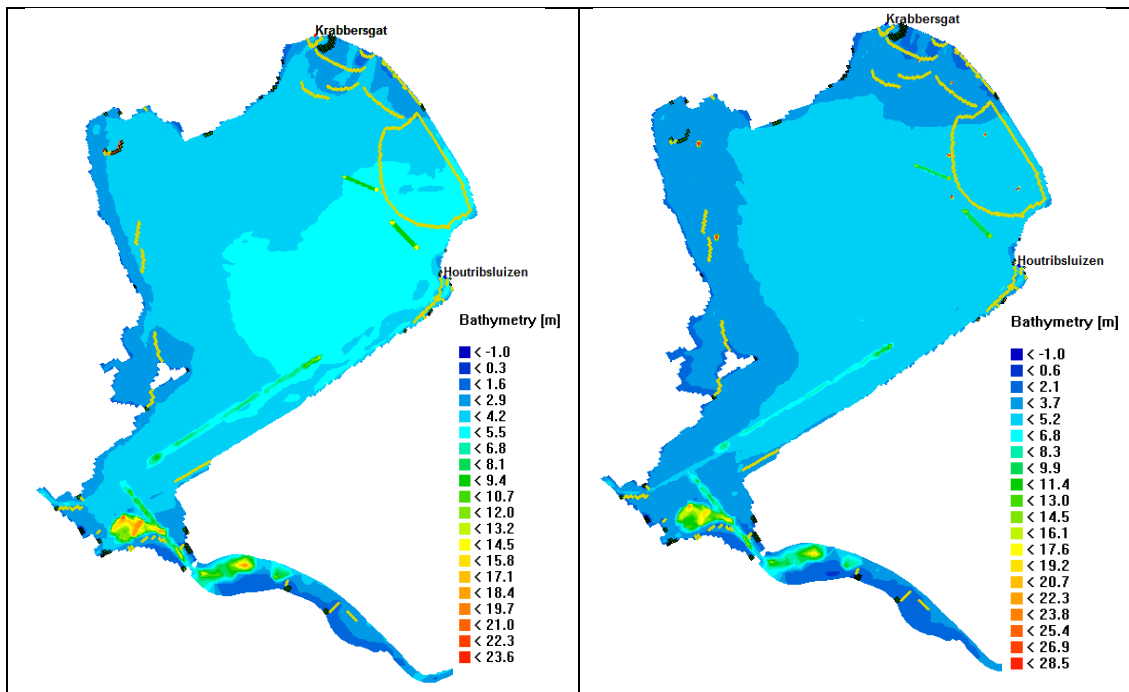
**Figuur 2.3: Locaties zandwinputten, groen: kleine putten (12 ha) en rood: grote putten (20 ha)**

De kleine putten zijn gecreëerd door twee gridpunten een diepte te geven van 30 meter. Door interpolatie ontstaat een diepe put. De grote putten zijn gecreëerd door drie gridpunten een diepte mee te geven van 30 m. De gridcellen in het noordoosten zijn iets kleiner dan de gridcellen in het zuidoosten, zie figuur 2.1. Als gevolg hiervan zullen de putten rondom de Markerwadden iets kleiner zijn dan de putten in de Hoornsche Hop.

Type put	Gemiddelde oppervlakte Delft-3D (ha)
Groen (ca. 12 ha)	11.2
Rood (ca. 20 ha)	23.1

De schematisaties van de scenario's in het Delft3D model zijn weergegeven in figuur 2.4.





Figuur 2.4: Overzicht verschillende scenario's met en zonder putten en bodemhoogte

### 3 RESULTATEN

Om het effect van de zandwinputten op de slibhuishouding te bepalen zijn de volgende parameters beoordeeld voor de scenario's met en zonder putten:

- Gemiddelde slibconcentratie in waterkolom nabij de bodem (jaargemiddeld, gemiddeld over de zomerperiode, gemiddeld over de winterperiode) (mg/l);
- Verschil (%) met referentie van de gemiddelde slibconcentratie in waterkolom nabij de bodem (jaargemiddeld, gemiddeld over de zomerperiode, gemiddeld over de winterperiode);
- Veranderingen in het simulatiejaar slib in de bodemlaag (kg/m<sup>2</sup>);
- Verschil (absoluut) met referentie, veranderingen in het simulatiejaar slib in de bodemlaag (kg/m<sup>2</sup>). Deze resultaten kunnen gezien worden als erosie en sedimentatie in het Markermeer;
- Gemiddelde (contour) en verschil met referentie (kleurschaal), percentage licht aan de bodem (%), (gemiddeld over de voorjaarsperiode, gemiddeld over de zomerperiode);
- Gemiddeld doorzicht: Secchi diepte (cm), (gemiddeld over de voorjaarsperiode, gemiddeld over de zomerperiode, gemiddeld over de winterperiode).

Om het aantal figuren in het rapport enigszins te beperken zijn een aantal modelresultaten opgenomen in de bijlagen.

In dit rapport wordt alleen het effect van de zandwinputten beschreven, omdat dit een nieuw aspect is in de scenario's ten opzichte van de vorig jaar gerapporteerde berekeningen. Het effect van de luwtmaatregelen en Markerwadden is in het rapport van vorig jaar aan bod gekomen. Met uitzondering van de figuren met gemiddeld doorzicht, zijn de effecten op doorzicht nog niet eerder beschreven en daarom worden de effecten van de scenario's zonder putten in dit rapport ook meegenomen.

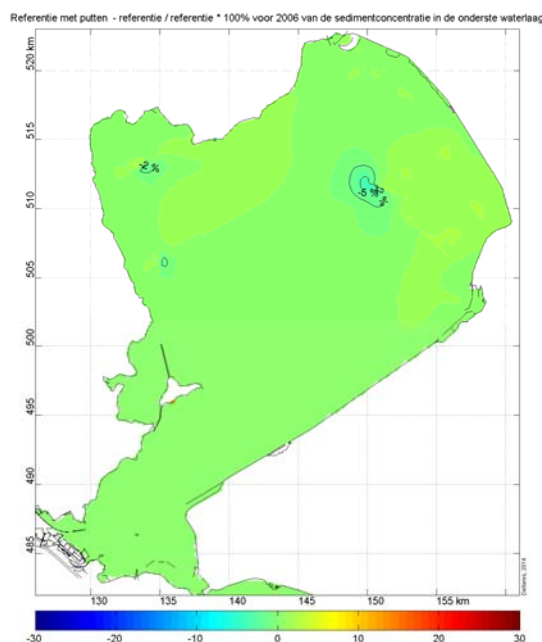
#### 3.1 Slibconcentratie

De effecten van de zandwinputten zijn in eerste instantie bekeken op basis van de gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem gedurende het hele jaar. In appendix A zijn de gemiddelde waarden voor de 3 scenario's weergegeven met en zonder putten. In appendix B zijn de verschillen ten opzichte van de referentiesituatie geplot, zie ook figuur 3.1 en 3.2. Op basis van de resultaten kan het volgende worden geconcludeerd over de zandwinputten in de verschillende scenario's:

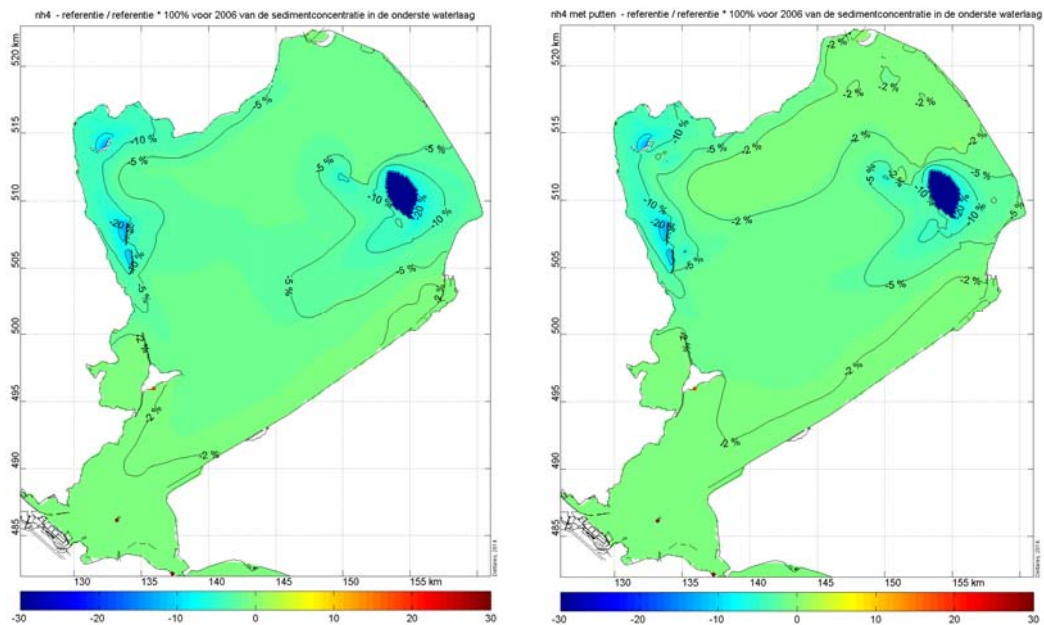
- De slibconcentratie gemiddeld over jaar varieert tussen de 45 en 60 mg/l in het midden van het meer. De verschillende scenario's laten geen grote verschillen zien ten opzichte van de referentiesituatie voor dit totaalbeeld. De toe- danwel afnames zijn in de orde van een aantal procenten en zijn vooral goed zichtbaar in de figuren waarin de verschillen ten opzichte van de referentiesituatie zijn geplot. De resultaten zijn geanalyseerd door de scenario's met putten te vergelijken met de scenario's zonder putten.
- Voor de referentiesituatie (scenario 1) met putten is een duidelijke afname van de slibconcentratie te zien bij de zandwinputten bij de Hoornsche Hop. Het effect is vooral lokaal, zie figuur 3.1. De verlaging is ordegrrootte 1 a 2% ten opzichte van de gemiddelde concentratie, wat overeenkomt met een verlaging van 0.4 tot 1 mg/l. Er is ook een vermindering van de slibconcentratie te zien ter hoogte van de geulen, dit effect wordt in deze studie niet beoordeeld.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Het effect van geulen is eerder beoordeeld (Vijverberg et al., 2013).

- Voor de referentiesituatie met putten is er weinig tot geen effect te zien voor de putten in het oosten en de putten bij het Enkhuizerzand. Lokaal (in het oosten en westen) is zelfs een lichte verhoging van slibconcentratie te zien van circa 1 a 2%, wat neerkomt op een verhoging van 0.4 tot 1.3 mg/l. Deze wordt in het model veroorzaakt door lokale erosie rondom de putten, hier wordt in paragraaf 3.3 verder op ingegaan. De erosie is het grootst rondom de putten in het oosten, waarschijnlijk als gevolg van golfwerking. Dit verklaart waarom er geen effect van de putten zichtbaar is wat betreft een verlaging van de slibconcentratie. De putten in het Enkhuizerzand zijn mogelijk te klein om een effect op de hoeveelheid slib aan de bodem te kunnen laten zien.
- Voor scenario 2 met putten is ook een verlaging van de slibconcentratie te zien voor de putten in de Hoornsche Hop. Ter plaatse van de putten in het Enkhuizerzand blijft de slibconcentratie gelijk. Rondom de putten in het Enkhuizerzand neemt de slibconcentratie echter toe, dit is te zien aan de contourlijnen in dat gebied (er ontstaat een contourlijn van -2% naast de contourlijn van -5%). Rondom de Markerwadden lijkt de slibconcentratie aan de bodem ook licht toe te nemen. Deze toename kan verklaard worden door de erosie rondom de putten en vooral aan de noordwest kant van het Markermeer, zie paragraaf 3.2. Ten opzichte van de referentiesituatie neemt de slibconcentratie van scenario 2 met putten nog steeds af.
- Voor scenario 3 met putten hebben vooral de putten in de Hoornsche Hop effect op de slibhuishouding. Voor de putten bij de Markerwadden en het Enkhuizerzand is geen effect zichtbaar. Opgemerkt wordt dat er voor scenario 3 slechts drie in plaats van vijf putten effect hebben rondom de Markerwadden, waarvan twee putten dicht tegen de Markerwadden aan liggen. Er is een lichte verhoging van de slibconcentratie aan de bodem waarneembaar in het midden van het meer. Ten opzichte van de referentiesituatie neemt de slibconcentratie van scenario 3 met putten licht toe. Ook voor scenario 3 zonder putten nam de slibconcentratie aan de bodem licht toe.



**Figuur 3.1: Scenario 1 met putten, verschil met referentie (scenario 1), gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (jaargemiddeld) (mg/l)**



**Figuur 3.2: Scenario 2, verschil met referentie (scenario 1), gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (jaargemiddeld) (mg/l), links: zonder putten, rechts: met putten**

De resultaten van de gemiddelde slibconcentraties zijn ook voor een zomerseizoen en een winterseizoen apart bekeken, zie bijlagen C, D, E en F. Over het algemeen ontstaat een zelfde beeld als bij de jaargemiddelde resultaten. De verschillen zijn als volgt:

- Het globale beeld is dat de slibconcentraties in de zomer lager zijn dan gemiddeld. De slibconcentratie gemiddeld over de zomer is ongeveer 40 mg/l in het midden van het meer. De slibconcentraties in de winter zijn juist hoger dan gemiddeld. De slibconcentratie gemiddeld over de winter is ongeveer 60 mg/l in het midden van het meer.
- In de figuren waarin het verschil met referentie is geplot zijn dezelfde patronen waarneembaar als voor de jaargemiddelde situatie. In de figuren met de slibconcentratie gemiddeld over de winter zijn de verschillen iets duidelijker zichtbaar. Dit betekent dat de absolute toe- en afnames van de slibconcentratie in de winter een groter zijn. Waarschijnlijk zijn de effecten qua slibdynamica gedurende de winter meer bepalend voor de jaargemiddelde resultaten.

### 3.2 Verandering van de bodemlaag

De verandering van de hoeveelheid sediment in de bodemlaag gedurende het simulatie jaar en het verschil met de referentiesituatie worden weergegeven in bijlagen G en H. De resultaten zijn geanalyseerd door de scenario's met putten te vergelijken met de scenario's zonder putten (bijlage H). Uit deze resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

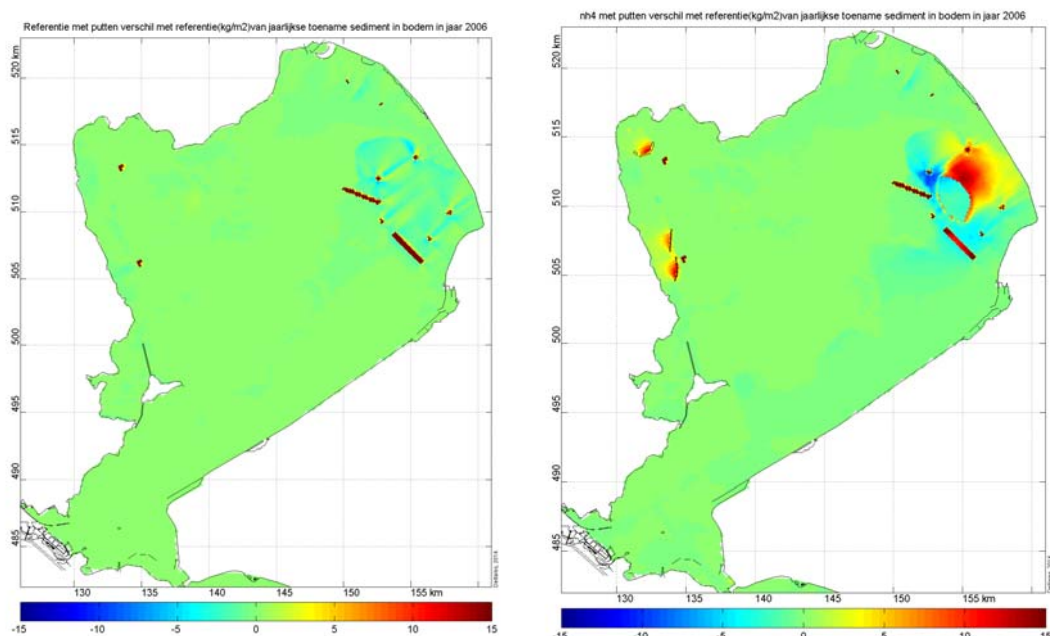
- Voor de referentiesituatie met putten treedt sedimentatie op in alle putten. De zandwinputten bij het Hoornsche Hop vangen in totaal het meeste sediment door hun relatief grote oppervlak, zie figuur 3.3. Daarna vangen de putten in het oosten treedt het meeste sediment<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> De putten in het in het oosten zijn iets kleiner dan de putten in de Hoornsche Hop als gevolg van het verschil in grid cel grootte, zie paragraaf 2.2.



De putten bij het Enkhuizerzand vangen het minste sedimentatie op, als gevolg van het kleine oppervlak (circa 12 ha in plaats van 20 ha). Verder valt op dat er naast sedimentatie ook erosie optreedt. In eerdere scenario's was verondersteld dat de optredende erosie voornamelijk werd veroorzaakt door de opgestuwde stroming langs de Markerwadden. Blijkbaar treedt er ook erosie op als gevolg van geulen en putten. Deze erosie wordt vooral veroorzaakt door golven (lokale golfgroei en defractie), zie paragraaf 3.3. De hoeveelheid erosie is klein in vergelijking tot sedimentatie, 2 tot 5 kg/m<sup>2</sup> in vergelijking tot 12 tot 15 kg/m<sup>2</sup>, maar treedt wel op over een groter oppervlak.

- Voor scenario 2 met putten treedt een vergelijkbaar sedimentatiepatroon op in de putten als voor de referentiesituatie met putten (figuur H.2 en H.3). Er treedt sedimentatie op in alle putten. Het erosiepatroon van scenario 2 toont wel verschillen met scenario 1. Er treedt een stuk minder erosie op bij de putten in het Hoornsche Hop als gevolg van de luwtestructuren. De luwtestructuren zorgen voor een golf luw gebied aan de lijszijde. Het gevolg is dat er op die locaties geen erosie optreedt, zie ook paragraaf 3.3. Verder treedt er meer erosie op ten noordwesten van de Markerwadden. Bij een stroming tegen de klok in bezinkt het slib in de geul, waardoor mogelijk er minder slib neerslaat ten noordwesten van de Markerwadden. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor de vergrote erosie.
- Voor scenario 3 met putten (figuur H.5) treedt een vergelijkbaar sedimentatiepatroon op als voor scenario 2 met putten. Het enige verschil is dat er twee putten in de Markerwadden vallen waardoor geen sedimentatie optreedt. Verder treedt er niet veel extra erosie op als gevolg van de putten. De erosie ten noordwesten van de Markerwadden verandert nauwelijks. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het feit dat twee putten vlak tegen het moeras aanliggen.

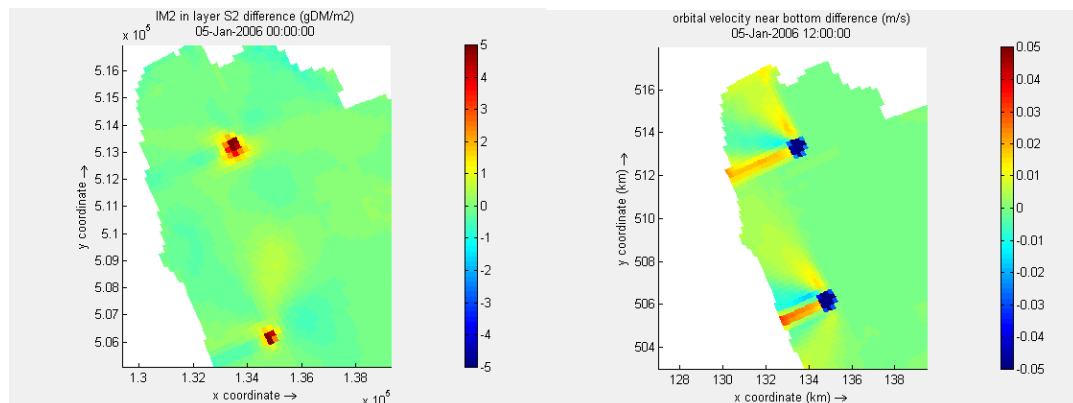


**Figuur 3.3: Verschil met referentie (scenario 1), verandering van de bodemlaag (jaargemiddeld) (kg/m<sup>2</sup>), links: scenario 1 met putten, rechts: scenario 2 met putten**

### 3.3 Slibdynamica rondom putten

De resultaten laten zien dat op sommige locaties in de buurt van een put het slibgehalte in het water toeneemt. Dat is opvallend en bij eerdere scenario berekeningen met het slibmodel niet geconstateerd.<sup>5</sup> Er is een nadere analyse uitgevoerd naar de slibdynamica rondom de putten in de Hoornsche Hop om te onderzoeken of de erosie/sedimentatie patronen geloofwaardig zijn. Er zijn berekeningen uitgevoerd met het huidige rooster, 5 januari 2006 (wind 7 m/s uit 70 graden, ONO), en met een 4x4 verfijnd rooster voor 28 december 2005 (9 m/s, 70 graden).<sup>6</sup> Het is uitgesloten dat het fenomeen het gevolg is van een te grof rooster omdat fenomenen op beide roosters in principe gelijk zijn.

Uit de analyse blijkt dat de slibveranderingen worden veroorzaakt door golven. Figuur 3.4 geeft een overzicht van het verschil tussen de situatie met en zonder putten wat betreft aanslibbing en orbitaalsnelheid nabij de bodem als gevolg van golven (maat voor erosie).



**Figuur 3.4: Verschil (met – zonder putten) op 5 januari 2006 (wind 70°, 7m/s), links: aanslibbing, rechts: orbitaal snelheid als gevolg van golven nabij de bodem, ( maat voor bodemschuifspanning en daarmee erosie)**

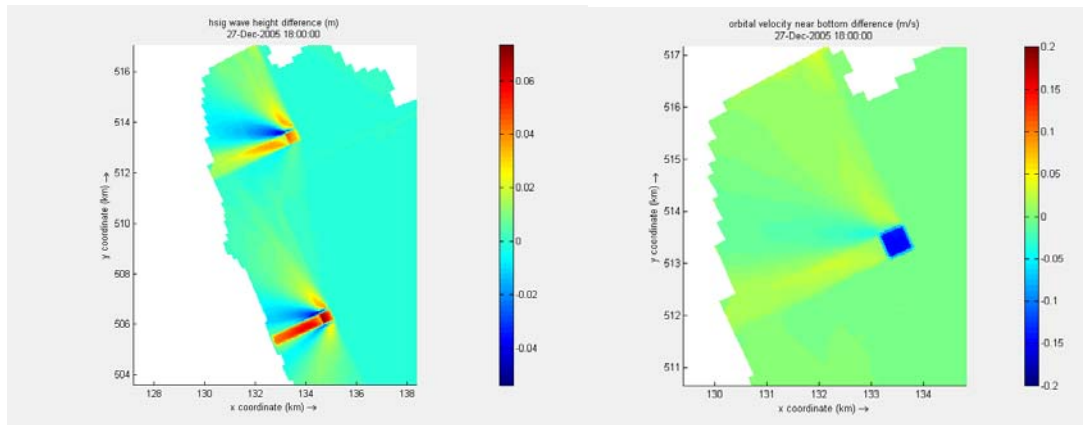
Figuur 3.5 (verfijnd rooster) laat twee fenomenen zien. Er vindt golfgroei plaats ter plaatse van de put. De golfgroei-curve voor een diepte van 4m (Markermeer) en 20m (put) verschillen sterk. Boven de diepe put groeit de golf en wanneer die golf de overkant van de put bereikt “past” de golf niet meer bij de kleinere diepte en breekt de golf (golfhoogte weer kleiner). Daarnaast vindt er refractie plaats. De golven komen met een richting van 90 graden (vanuit het oosten) op de put af. De loopsnelheid van een golf is een functie van de waterdiepte, waardoor de golf afbuigt van de diepte. De refractie zie je terug in de patronen achter de put (twee banen met verhoogde golven die loodrecht op elkaar staan met daartussen golfsluwt).

<sup>5</sup> In eerdere berekeningen, m.u.v. de Markerwadden scenario's, kon dit effect niet worden gezien omdat (1) golven niet spectraal werden gemodelleerd (in de Bretsneiderbenadering treedt het fenomeen niet op) en (2) omdat er geen kleine putten zijn doorgerekend (NMIJ scenario's 2012 en 2013). Bij nader inzien is het fenomeen ook zichtbaar in de geulen die voor Markerwadden zijn doorgerekend maar het effect van de veranderde golfkarakteristiek rond die geulen is kleiner omdat (1) de lokale waterdiepte groter is en (2) het effect gemaskeerd wordt door de aanwezigheid van grootschalige luwtstructuren die de veranderde golfkarakteristieken deels teniet doen.

<sup>6</sup> Voor deze periode zijn de omstandigheden vergelijkbaar met 5 januari 2006 en zijn resultaten beschikbaar op een 4x4 verfijnd rooster.



Refractiepatronen worden gestuurd door de richting van het golffront en zijn afhankelijk van de vormgeving van de put.



**Figuur 3.5: Verschil (met – zonder putten) op 28 december 2005 (9 m/s, 70 graden), links: golfhogte, rechts: effect daarvan op orbitaal snelheid aan de bodem (maat voor bodemschuifspanning en daarmee erosie)**

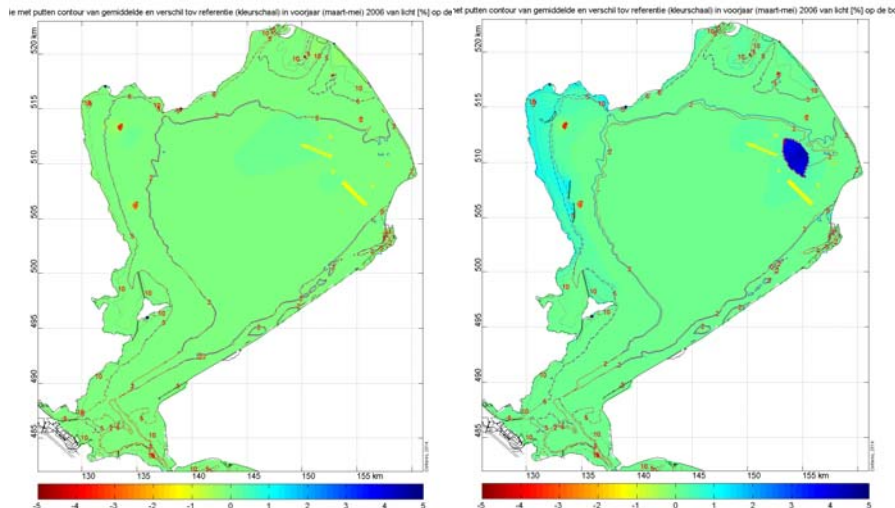
De conclusie is dat het begrijpelijk is dat als gevolg van de aanleg van een verdieping (de put) de golfkarakteristieken boven de put en aan de lijszijde ervan veranderen waardoor ten opzichte van de situatie zonder aanwezigheid van putten extra nette erosie buiten de put optreedt. Er zijn echter ook gebieden buiten de put waar extra nette sedimentatie voorkomt. Het gevolg van dit fenomeen op de effectiviteit van invang van slib van de put als geheel (inclusief omgeving) is nog niet gekwantificeerd. Het effect van putten voor de vermindering van het slibgehalte lijkt echter te worden tegengewerkt door extra erosie aan de lijszijde (aan de rand van de put en ook in een gebied verder van de put vandaan). Voor scenario 1 zijn er duidelijk erosie patronen zien voor de putten in de Hoornsche Hop. Terwijl voor scenario 2 die erosiegebieden beschermd worden door luwtestructuren en het blijkt dat de erosiepatronen ontbreken. Mogelijk kan een zorgvuldige aanleg van luwtestructuren in combinatie met een put de erosie verminderen.

### 3.4 Percentage licht aan de bodem

De verandering van het percentage licht aan de bodem ten opzichte van de referentiesituatie gedurende de lente en de zomer worden weergegeven in bijlagen I en J. Figuur 3.6 toont twee resultaten. Uit deze resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden over de verschillende scenario's met en zonder putten.

- De drie verschillende scenario's met putten laten min of meer dezelfde effecten zien qua licht aan de bodem wanneer we de vergelijking maken met de scenario's zonder putten. In de omgeving van de putten en geulen is alleen in de omgeving van de Markerwadden geulen een kleine toename van bodemlicht te zien. Natuurlijk neemt de hoeveelheid licht aan de bodem in de putten en geulen sterk af als gevolg van de veel grotere lokale diepte.

- De contour van 2% (blauw=scenario) verandert nauwelijks wanneer we de scenario's met putten vergelijken met de scenario's zonder putten. Hieruit blijkt dat de putten geen effect hebben op het algemene beeld van doorzicht in het meer.

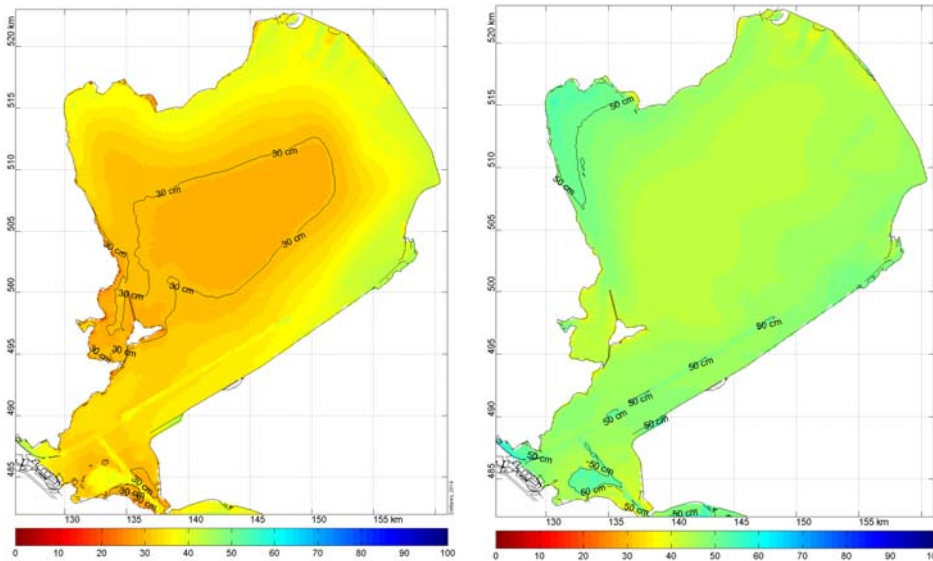


**Figuur 3.6: Gemiddelde in het voorjaar van het percentage licht aan de bodem [%] als contourlijn (rood=referentie, blauw=scenario) en als verschil met referentie (kleurschaal). Links: scenario 1 met putten, rechts: scenario 2 met putten**

### 3.5 Doorzicht, Secchi-diepte

De absolute waarde van het doorzicht in het meer wordt tot uitdrukking gebracht door de Secchi-diepte. De gemiddelde resultaten (zowel gemiddeld over de periode, als over de waterkolom) gedurende de lente, de zomer en de winter worden weergegeven in bijlagen K, L en M. Deze resultaten zijn nog niet in eerdere NMIJ rapporten gepresenteerd. Daarnaast toont figuur 3.7 twee resultaten. Om die reden zal eerst het doorzicht voor de referentiesituatie en scenario 2 en 3 worden beschreven voor de verschillende jaargetijden. Vervolgens wordt aan de hand van de verschillen tussen de scenario's met en zonder putten het effect van de putten op het doorzicht beschreven.

- Het doorzicht varieert met de seizoenen per locatie in het meer. Het gemiddelde doorzicht is het grootst in de zomer en ongeveer 10 cm lager in het voorjaar en in de winter. Het algemene beeld is dat het doorzicht in het midden van het meer het laagst is en langs de randen het hoogst. De precieze verdeling van het doorzicht over het midden en/of de randen verschilt per seizoen.
- Voor de referentiesituatie in het voorjaar (figuur K.1) is het doorzicht in het midden van het meer en in de richting van de Gouwzee het laagst (ongeveer 30 cm). Het doorzicht langs de noordoostelijke randen is het hoogst (ongeveer 40 cm). Voor de winter (figuur M.1) is het doorzicht ongeveer vergelijkbaar. Het doorzicht in het midden van het meer is iets groter (30-33 cm) en het laagste doorzicht komt voor in zuidwestelijke hoek nabij de Gouwzee. Langs de noordoostelijke randen is het doorzicht het grootst (ongeveer 40 cm). In de zomer (figuur L.1) is het doorzicht in het midden van het meer een stuk hoger vergeleken met de andere seizoenen (ongeveer 40 cm). In de Hoornsche Hop en in de diepere gedeeltes van het meer, o.a. de vaargeul en de IJmeerput, is het doorzicht dan het grootst (50 cm).



Figuur 3.7: Gemiddeld doorzicht Referentiesituatie, Secchi diepte[cm], links: voorjaar, rechts: zomer

- Voor scenario 2 zien we grotendeels dezelfde beelden qua doorzicht als voor de referentiesituatie. Hieronder zullen enkel de verschillen worden beschreven. Het gebied in het midden van het meer met het lage doorzicht wordt kleiner of het doorzicht wordt lichtelijk groter als gevolg van de Markerwadden. Deze effecten zien we voor alle seizoenen (figuren K.3, L.3 en M.3). Aan de noordoostelijke rand is het doorzicht licht verhoogd. De luwtestructuren in de Hoornsche Hop zorgen ook voor een lichte verhoging van het doorzicht aan de lijkzijde, ongeveer van 30 cm naar 40 cm in het voorjaar.
- Voor scenario 3 zien we grotendeels dezelfde effecten als scenario 2. Hieronder zullen opnieuw de verschillen met de referentiesituatie worden beschreven. Het gebied in het midden van het meer met het lage doorzicht wordt kleiner. Bij de noordoostelijke randen wordt het doorzicht vergroot, mede dankzij de luwtestructuren bij het Enkhuizerzand. Het doorzicht neemt hier toe van rond de 35 – 40 cm naar 45 – 50 cm. Ook de luwtestructuren bij de Hoornsche Hop zorgen ook voor een lichte verhoging van het doorzicht aan de lijkzijde (gelijk aan scenario 2). Deze effecten zien we voor alle seizoenen (figuren K.5, L.5 en M.5).

Het effect van de kleine putten wordt hieronder beschreven voor de verschillende scenario's en seizoenen. Over het algemeen zijn de veranderingen in doorzicht heel lokaal. Op de locaties van de putten neemt het doorzicht toe. Daarnaast is er soms lokaal rondom de putten een lichte toe- of afname te zien van het doorzicht.

- Voor de referentiesituatie met putten (figuren K.2, L.2 en M.2) is er voor de putten in de Hoornsche Hop een toename van het doorzicht in de put te zien en rondom de put een afname van het doorzicht. Dit effect is vooral duidelijk in het voorjaar en winter en minder in de zomer. Voor de putten in het noordoosten is een toename van het doorzicht in de putten te zien voor alle seizoenen. In het voorjaar is er een hele lichte toename van het doorzicht langs de noordoostelijke rand.
- Voor scenario 2 en 3 met putten (figuren K.4, L.4 en M.4 en K.6, L.6 en M.6) zijn er voor de putten grotendeels dezelfde effecten te zien als voor de referentiesituatie met putten. Het enige verschil is dat voor scenario 3 het doorzicht langs de noordoost zijde niet verhoogd is in het voorjaar.

## 4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit deze studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- De zandwinputten in de Hoornsche Hop zijn het meest effectief voor alle drie de scenario's. Zij zorgen voor een daling van de slibconcentratie nabij de bodem van circa 1 a 2%. Het is vooral een lokaal effect.
- De overige putten vangen wel sediment in, maar hebben geen duidelijk lokaal effect op de hoeveelheid slib nabij de bodem. Er is zelfs een lichte toename van circa 1 a 2% van de hoeveelheid slib aan de bodem zichtbaar voor bepaalde gebieden in het meer. De verhoging is vooral zichtbaar voor scenario 1 en 2.
- De verhoging van de slibconcentratie is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van de optredende erosie rondom de putten. Voor scenario 1 treedt vooral erosie op rondom de putten in het oosten. Voor scenario 2 treedt er vooral erosie op bij de putten noordwesten van de Markerwadden. Voor scenario 3 treedt er niet veel extra erosie op als gevolg van de putten.<sup>7</sup>
- De erosie rondom de putten wordt voornamelijk veroorzaakt door golven, lokale golfgroei en refractie. Afhankelijk van de locatie van de put en de aanwezigheid van luwtestructuren vind er meer of minder erosie plaats rondom de putten.
- Voor alle scenario's met putten vermindert het percentage licht aan de bodem. De veranderingen zijn enkel lokaal en grotendeels het gevolg van de grotere diepte van de putten en geulen.
- Het doorzicht wordt verhoogd in de putten. Het doorzicht wordt in het model voornamelijk bepaald door de slibconcentratie, hierdoor is de vermindering daarvan vooral de grootste oorzaak van het verhoogde doorzicht. Het effect van de zandwinputten op doorzicht is echter zeer lokaal en beperkt.

---

<sup>7</sup> Rondom de Markerwadden in scenario 3 zijn 2 putten niet actief en 2 putten minder actief.

## 5 REFERENTIES

Boderie, P.M.A., A. Smale, C. Thiange (2012). *Validation suspended sediment model Markermeer – Version II & Application to silt screen*. Deltares rapport 1201198-010.

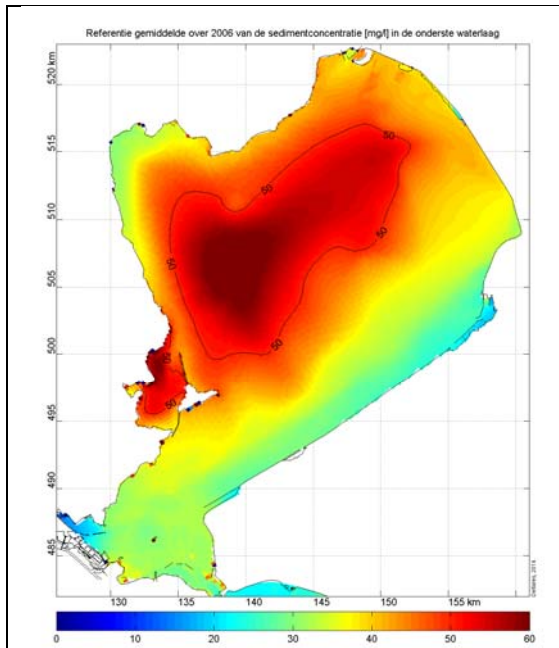
Noordhuis, R. (2010). *Ecosysteem IJsselmeergebied: nog altijd onderweg, trends en ontwikkelingen in water en natuur van het Natte Hart van Nederland*, Rijkswaterstaat Midden Nederland.

Kessel, T. van, G.J. de Boer, and P.M.A. Boderie (2009). *Calibration suspended sediment model Markermeer*. Deltares rapport Q4612.

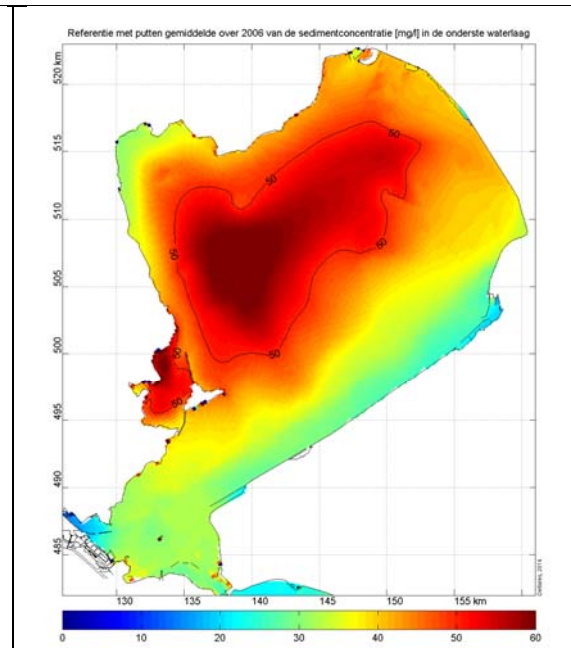
Vijverberg, T., Bakker, M. (2013). *NMIJ scenario berekeningen - zomer 2013*. Royal HaskoningDHV rapport 9V6742-0A2-100/R/903718/Nijm.

**Bijlage A**  
**Gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (jaargemiddeld)**  
**(mg/l), scenario's met en zonder putten**

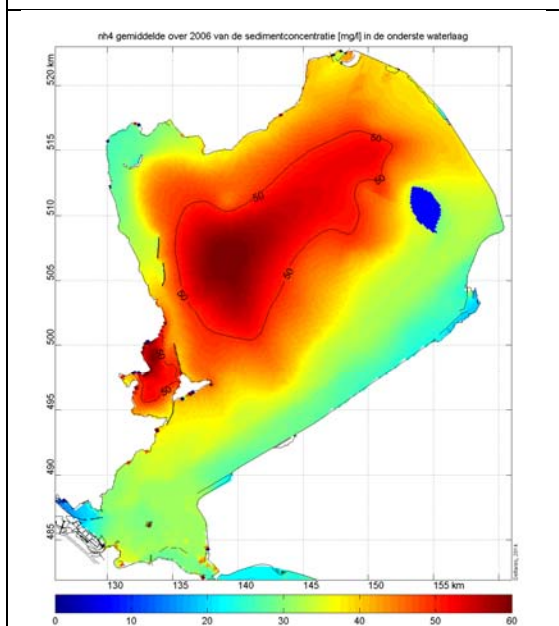




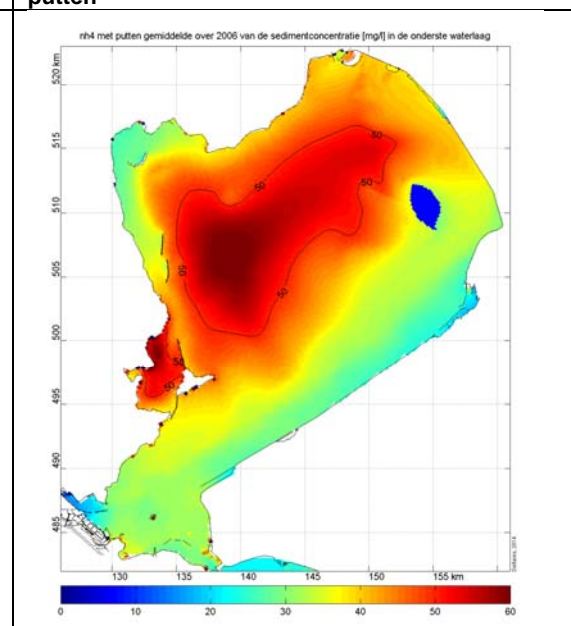
**Figuur A.1: Scenario 1: Huidige situatie**



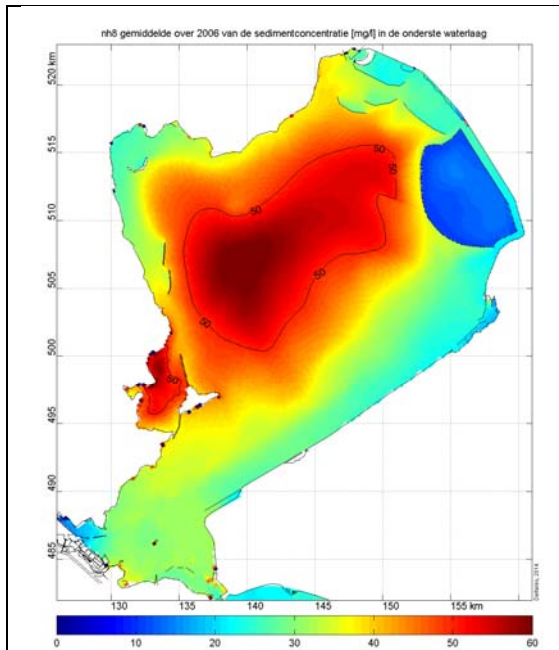
**Figuur A.2: Scenario 1: Huidige situatie met putten**



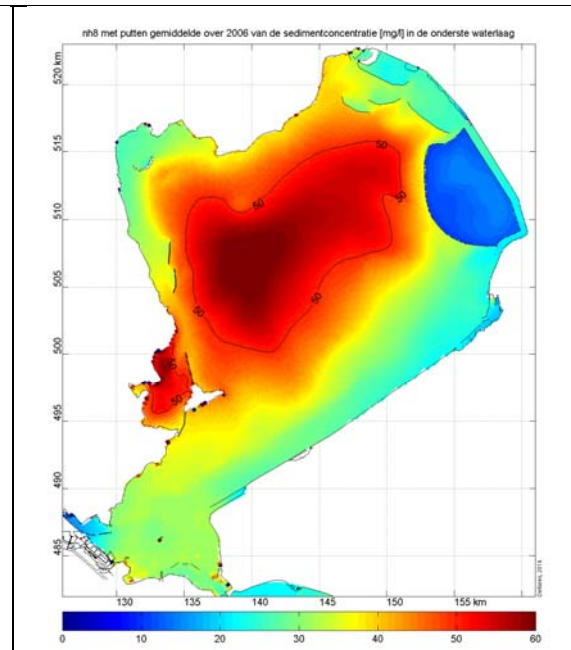
**Figuur A.3: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha)**



**Figuur A.4: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha) met putten**



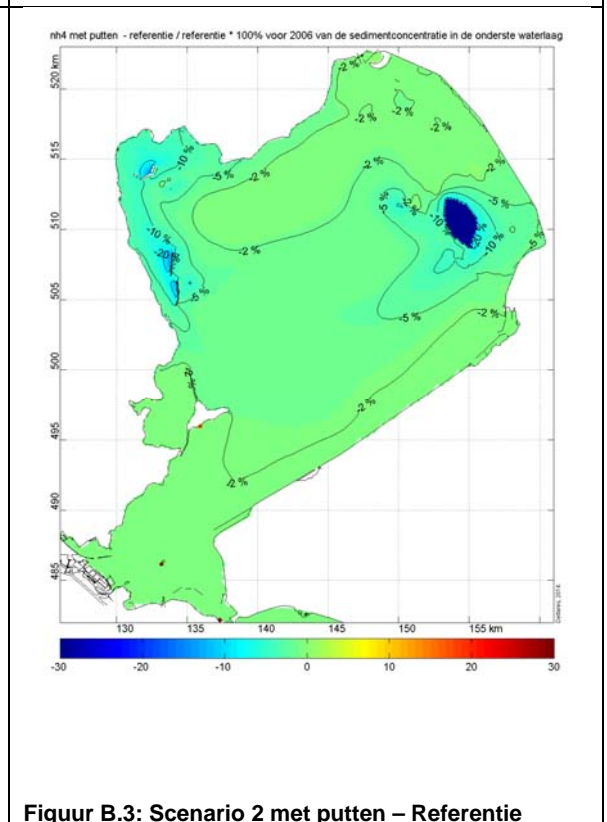
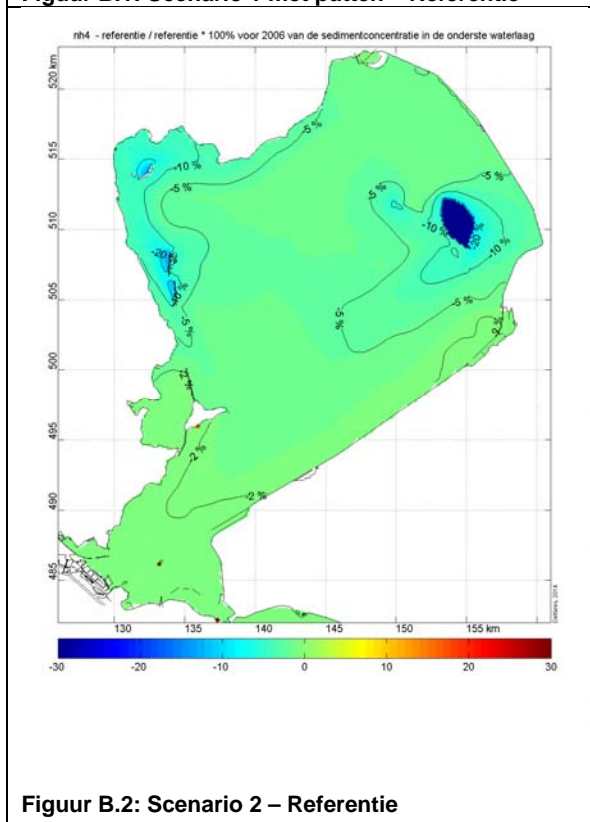
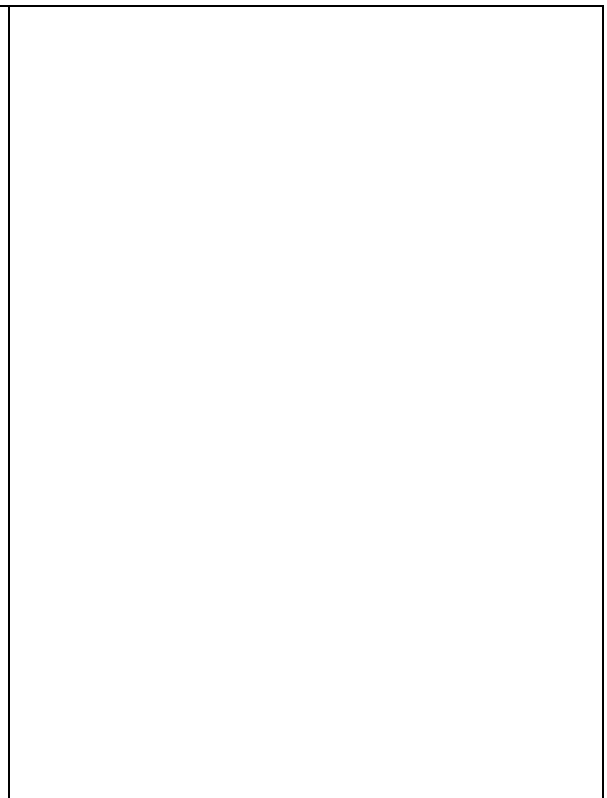
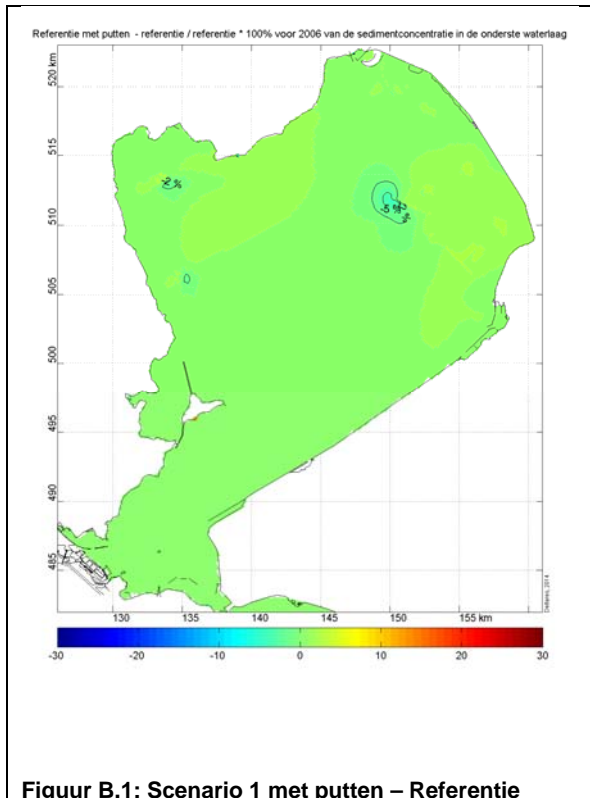
**Figuur A.5: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand**

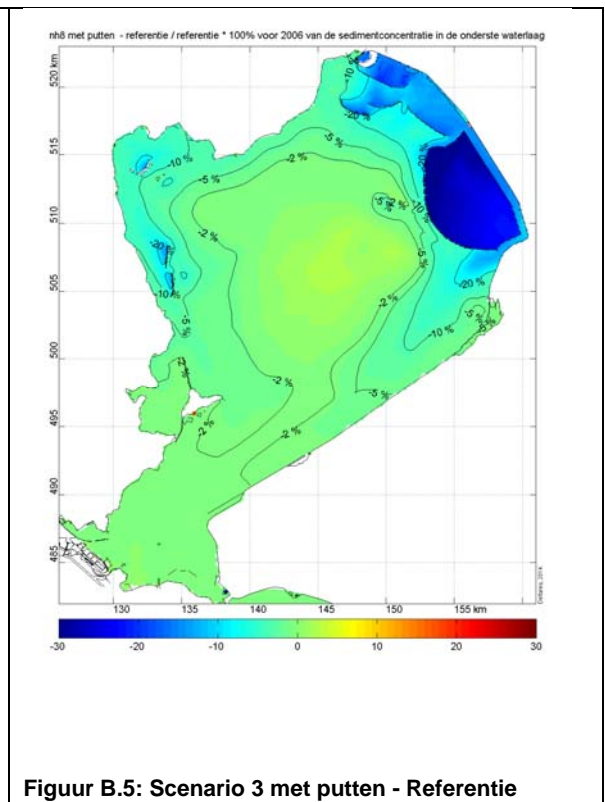
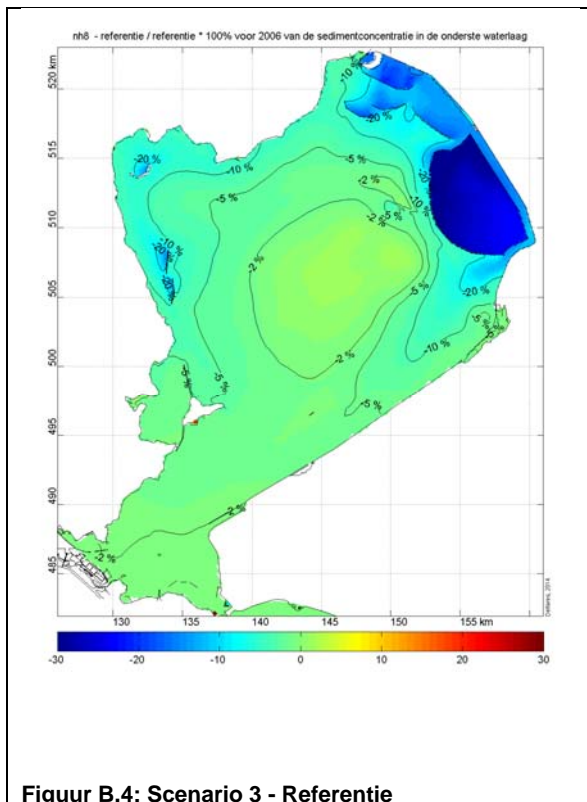


**Figuur A.6: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand met putten**

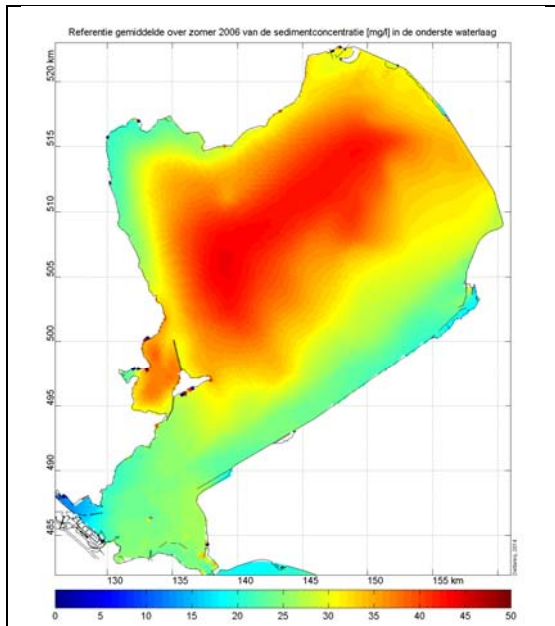


**Bijlage B**  
**Vershil met referentie, gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (jaargemiddeld) (%), scenario's met en zonder putten**

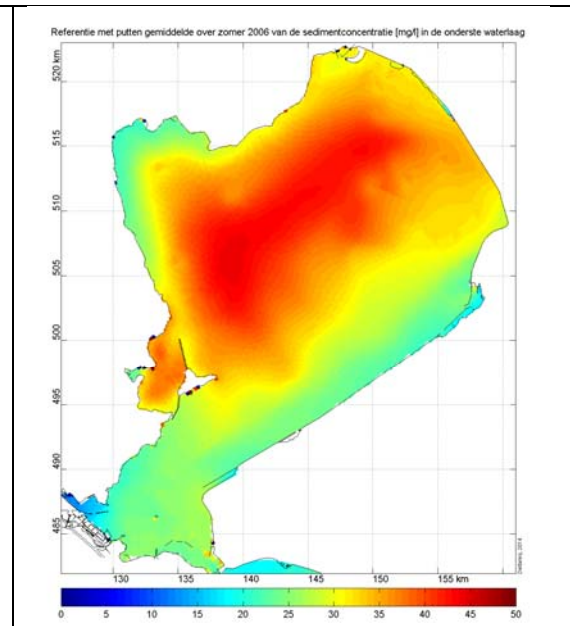




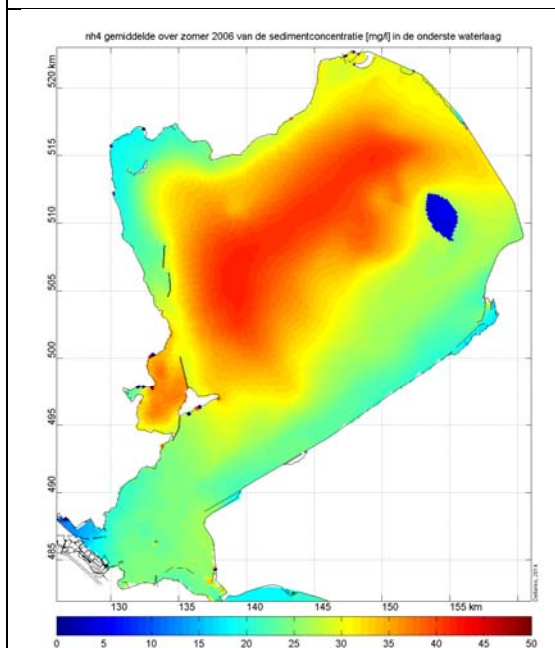
**Bijlage C**  
**Gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (zomer) (mg/l),  
scenario's met en zonder putten**



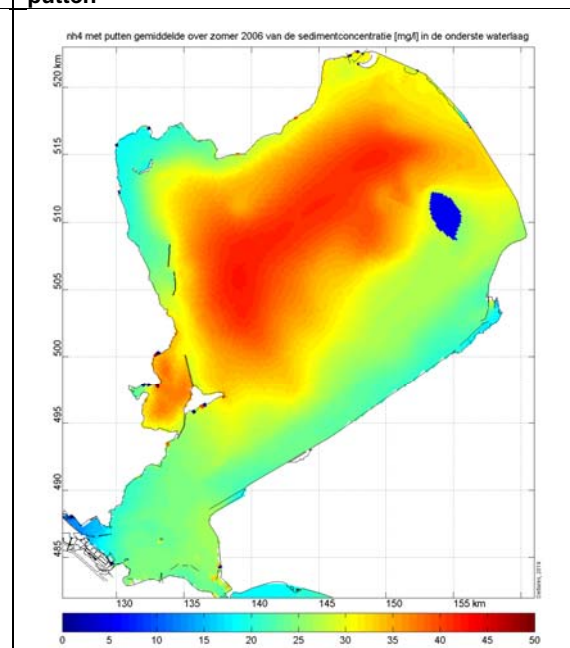
**Figuur C.1: Scenario 1: Huidige situatie**



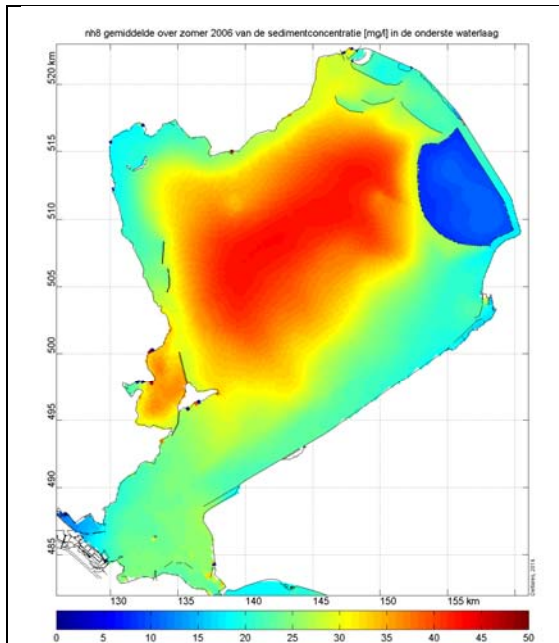
**Figuur C.2: Scenario 1: Huidige situatie met putten**



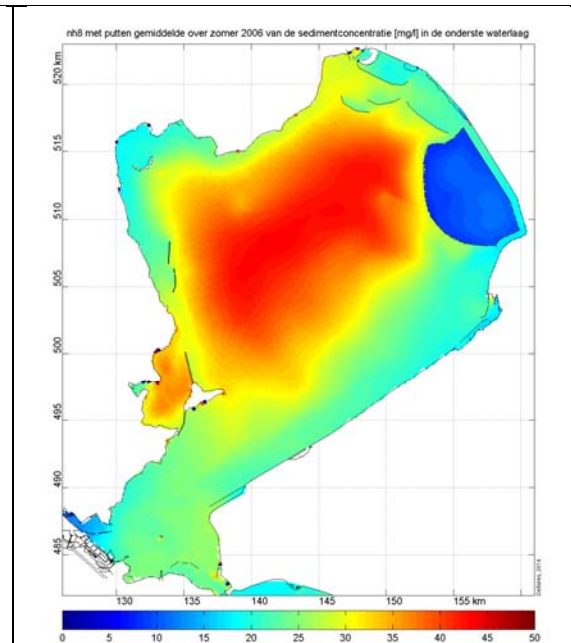
**Figuur C.3: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha)**



**Figuur C.4: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha) met putten**

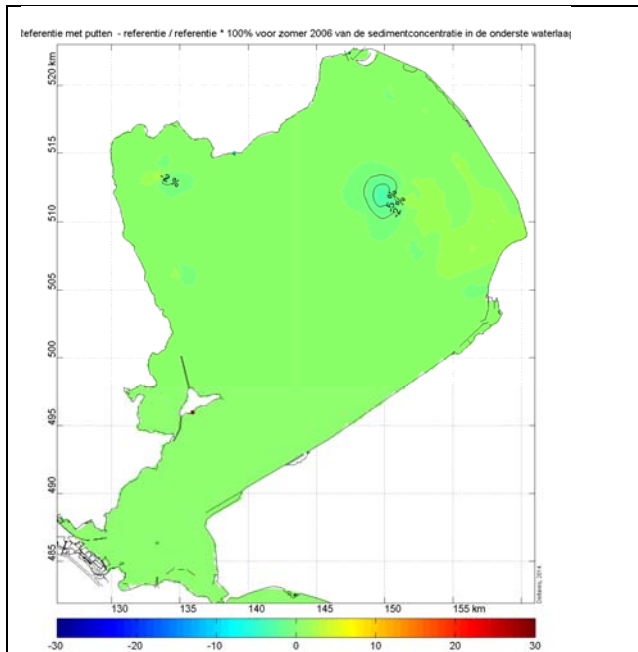


**Figuur C.5: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand**

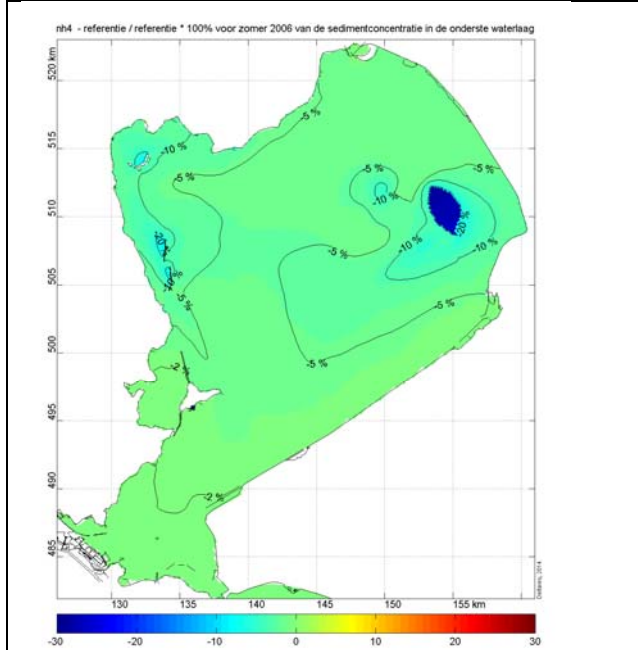


**Figuur C.6: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand met putten**

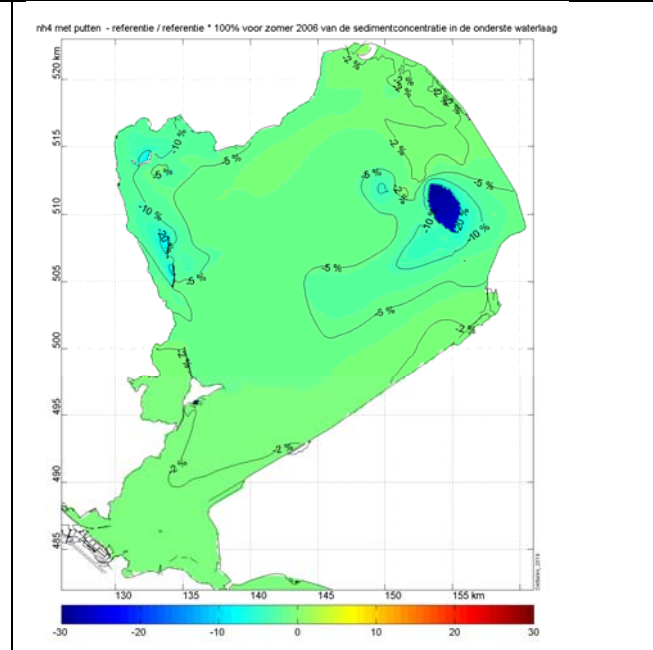
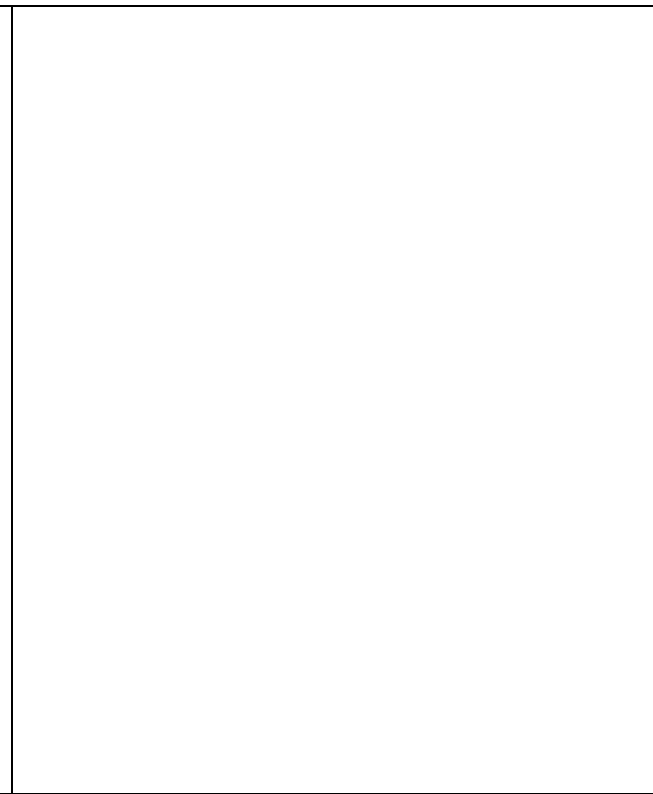
**Bijlage D**  
**Vershil met referentie, gemiddelde slibconcentratie nabij de  
bodem (zomer) (%), scenario's met en zonder putten**



**Figuur D.1: Scenario 1 met putten – Referentie**

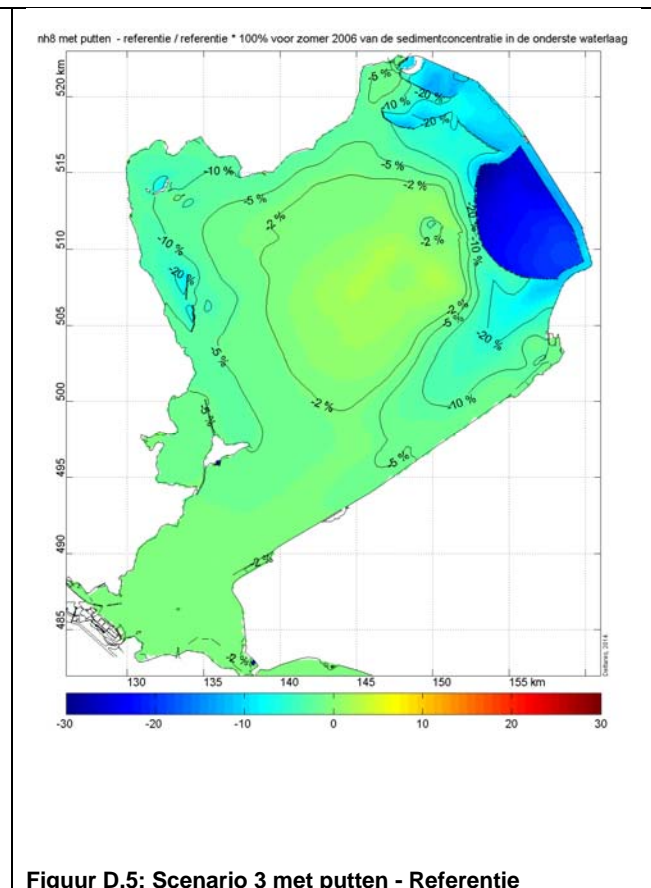
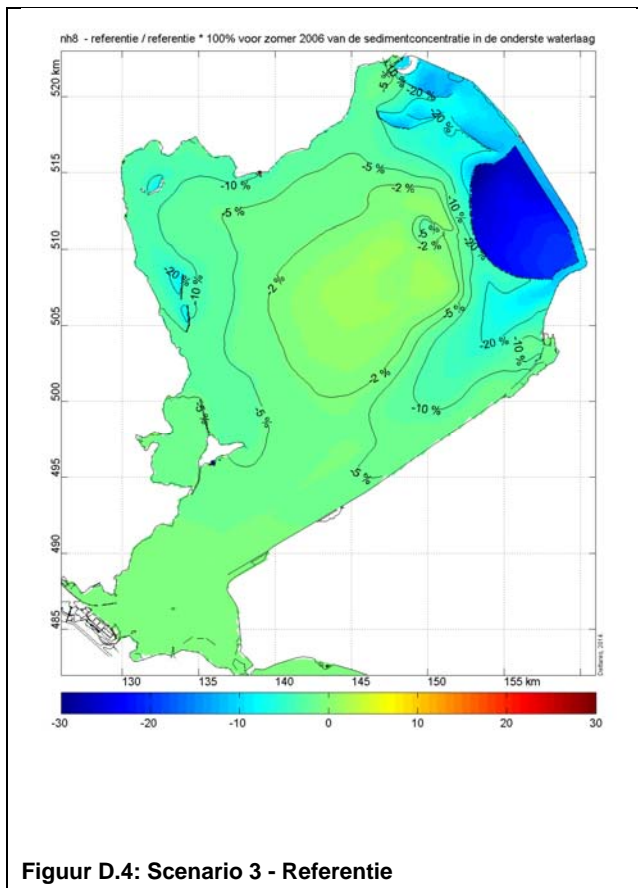


**Figuur D.2: Scenario 2 – Referentie**

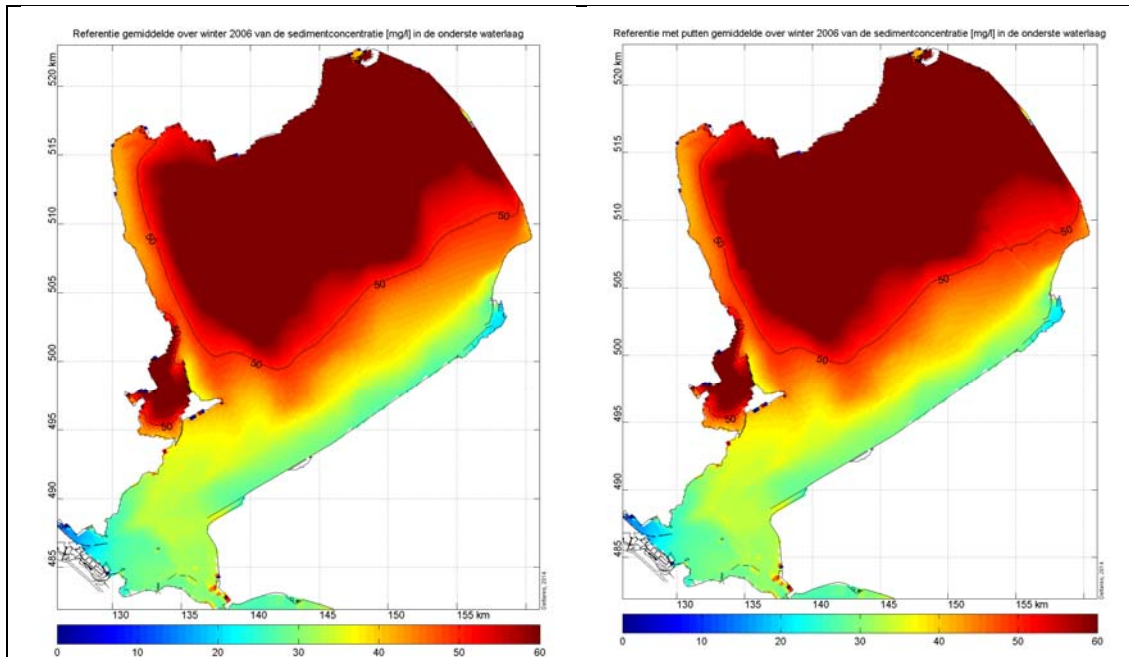


**Figuur D.3: Scenario 2 met putten – Referentie**



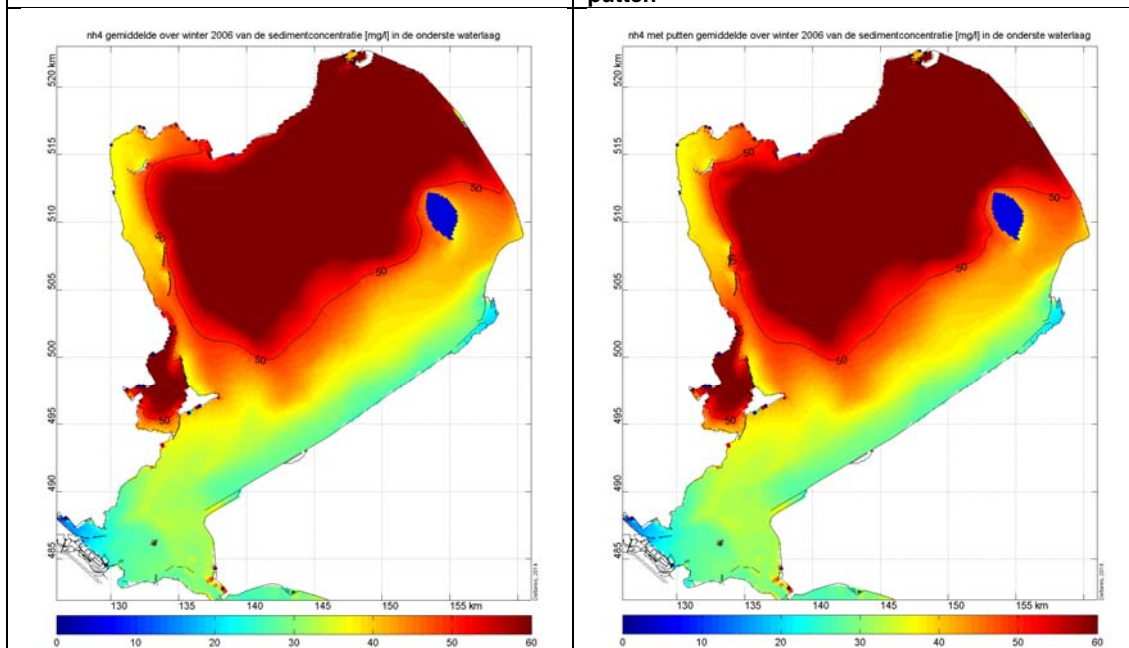


**Bijlage E**  
**Gemiddelde slibconcentratie nabij de bodem (winter) (mg/l),  
scenario's met en zonder putten**



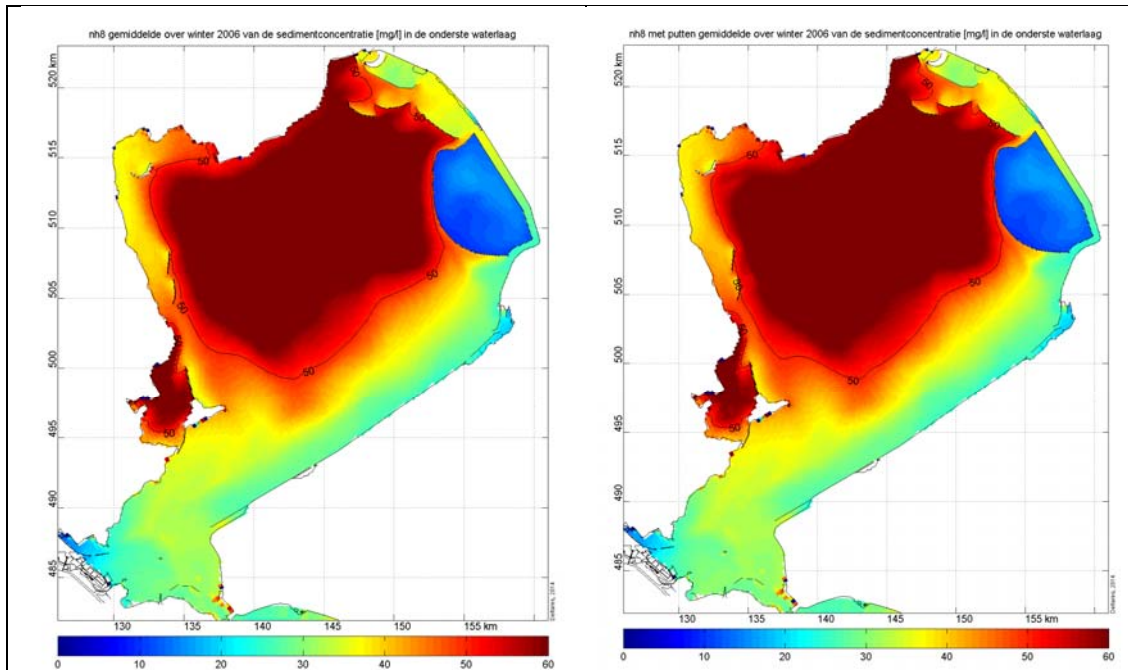
**Figuur E.1: Scenario 1: Huidige situatie**

**Figuur E.2: Scenario 1: Huidige situatie met putten**



**Figuur E.3: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha)**

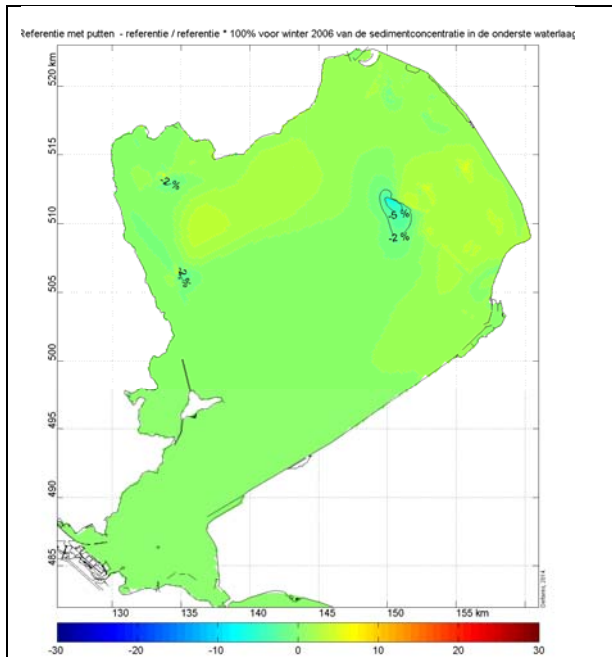
**Figuur E.4: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha) met putten**



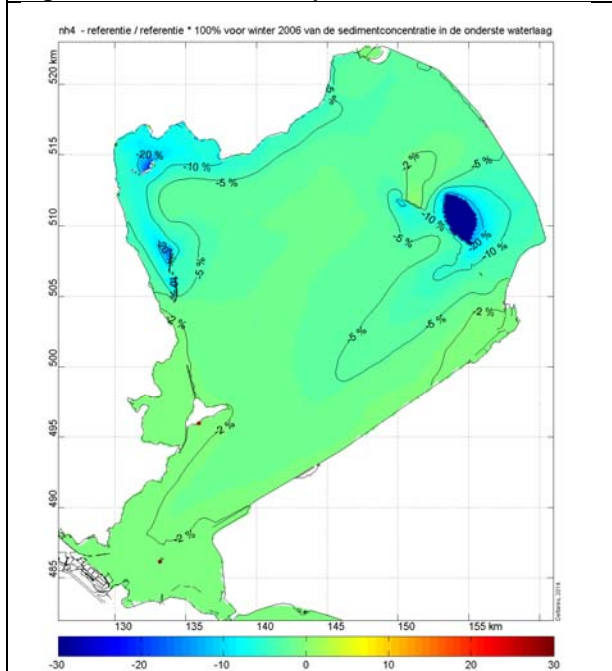
**Figuur E.5: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand**

**Figuur E.6: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand met putten**

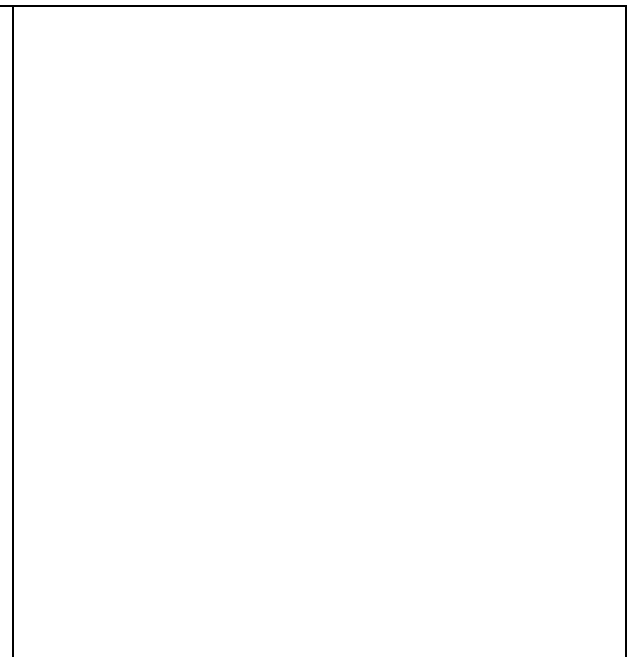
**Bijlage F**  
**Vershil met referentie, gemiddelde slibconcentratie nabij de**  
**bodem (winter) (%), scenario's met en zonder putten**



**Figuur F.1: Scenario 1 met putten – Referentie**

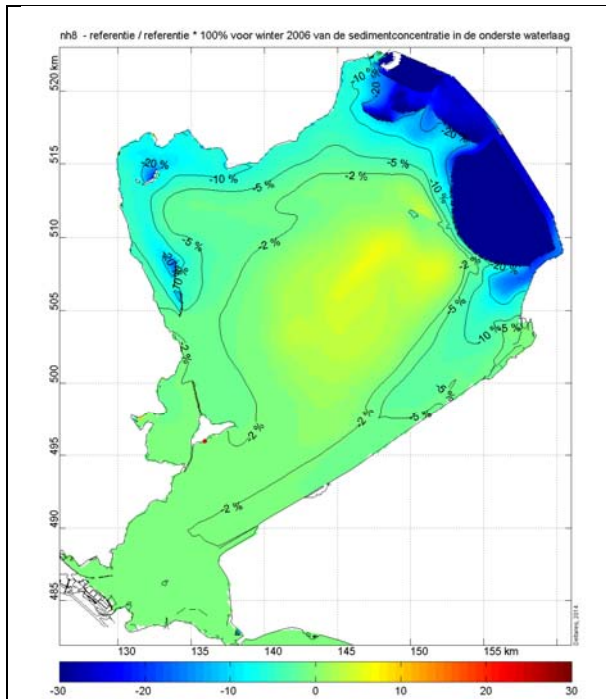


**Figuur F.2: Scenario 2 – Referentie**

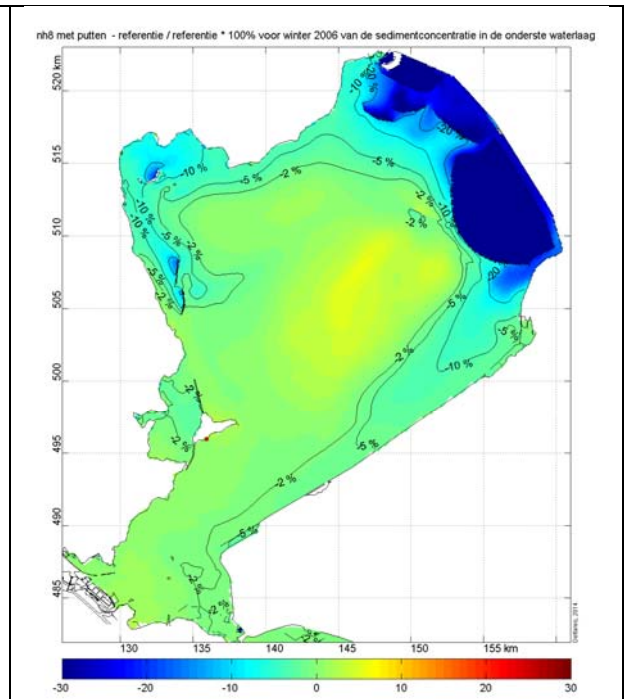


**Figuur F.3: Scenario 2 met putten – Referentie**





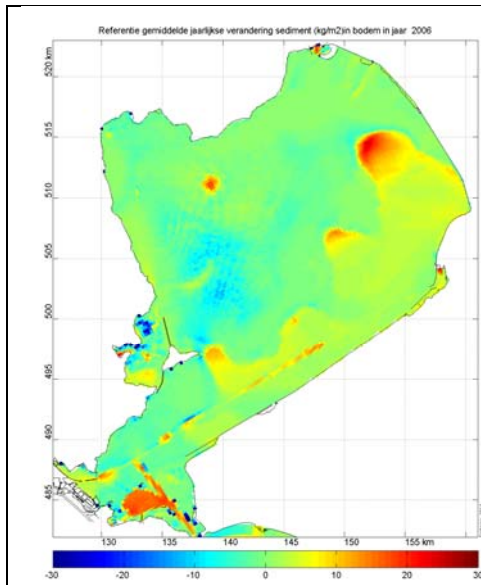
Figuur F.4: Scenario 3 - Referentie



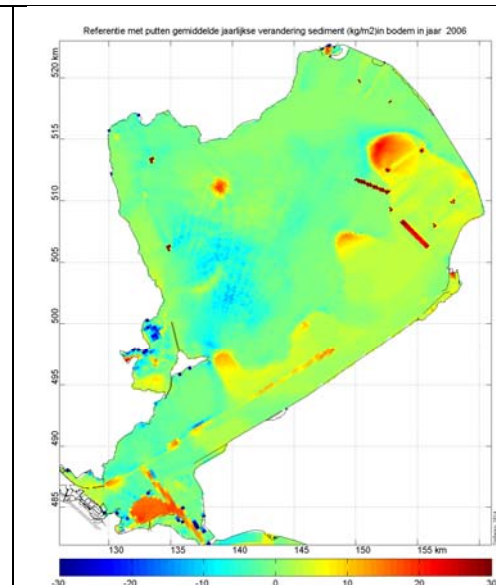
Figuur F.5: Scenario 3 met putten - Referentie

**Bijlage G**  
**Verandering in het jaar van de bodemlaag (S2) (kg/m<sup>2</sup>),  
scenario's met en zonder putten**

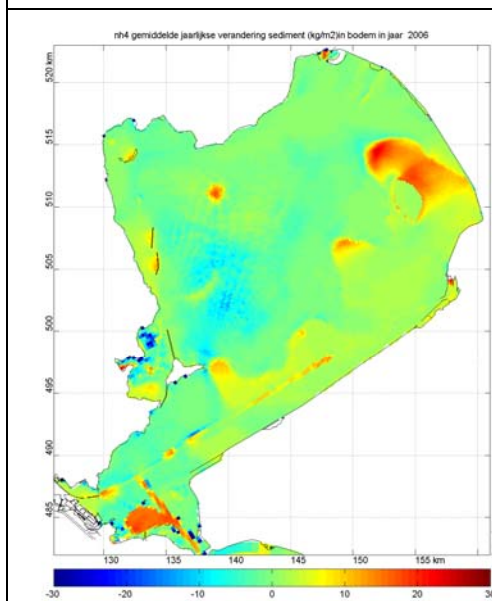




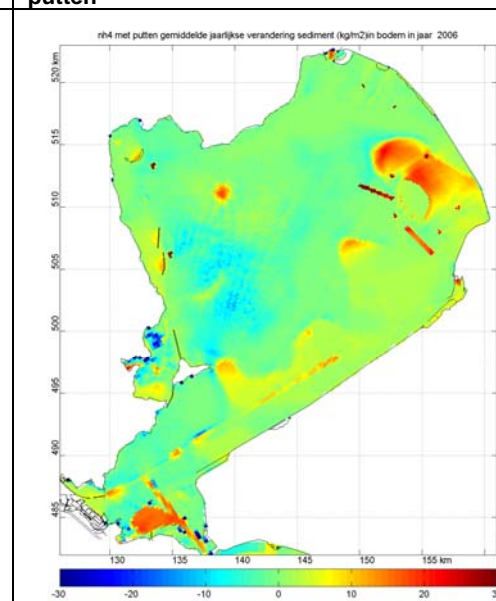
**Figuur G.1: Scenario 1: Huidige situatie**



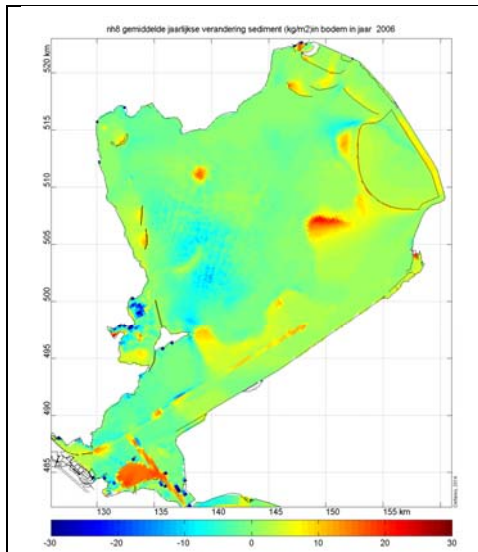
**Figuur G.2: Scenario 1: Huidige situatie met putten**



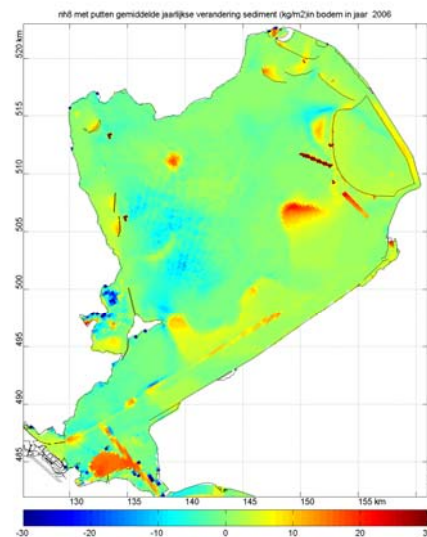
**Figuur G.3: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha)**



**Figuur G.4: Scenario 2: MIRT en Marker Wadden (500 ha) met putten**

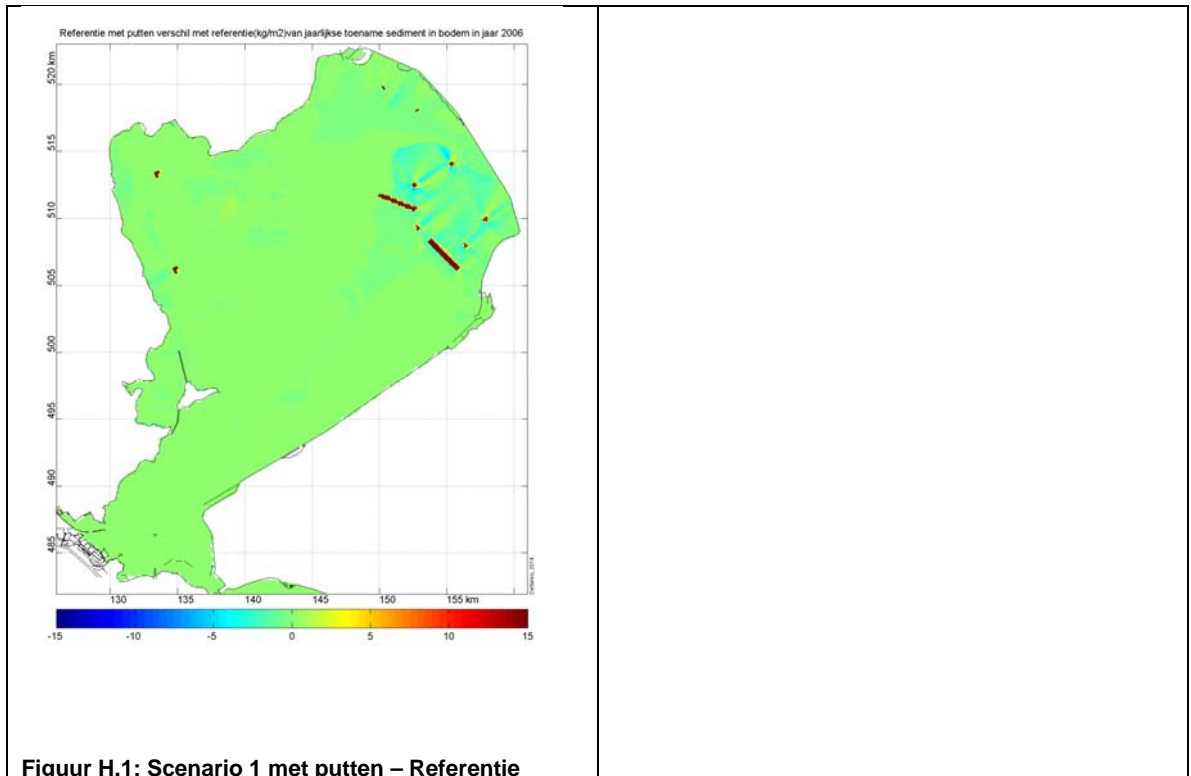


**Figuur G.5: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand**

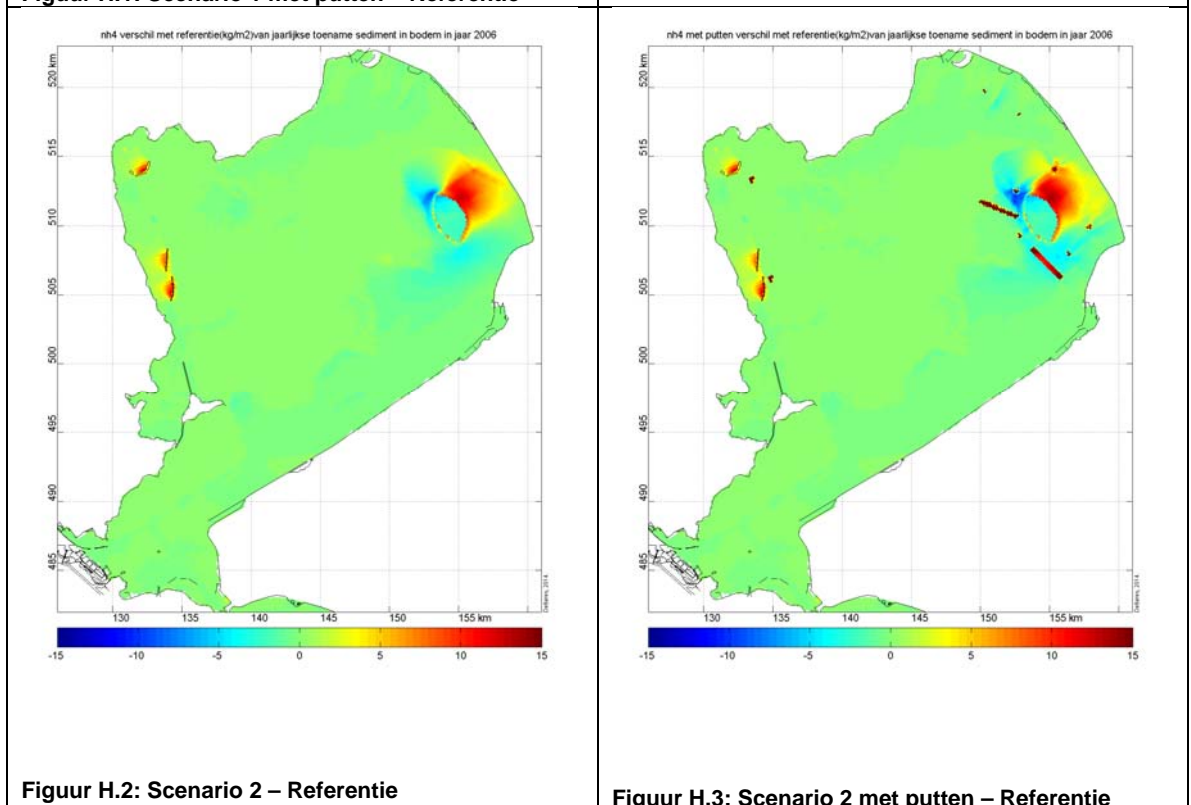


**Figuur G.6: Scenario 3: MIRT en Marker Wadden (5000 ha) en Luwtestructuren Enkhuizen Zand met putten**

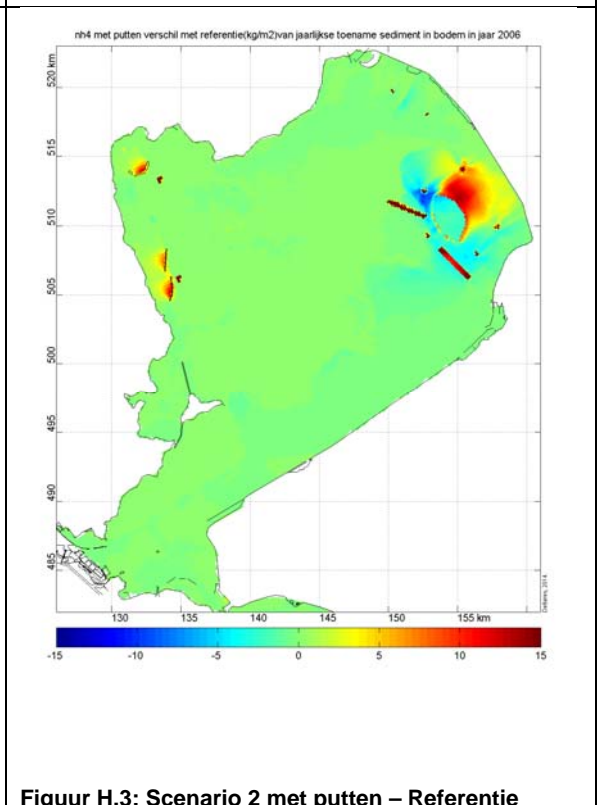
**Bijlage H**  
**Verschil met referentie, verandering in het jaar van de**  
**bodemlaag (S2) (kg/m<sup>2</sup>), scenario's met en zonder putten**



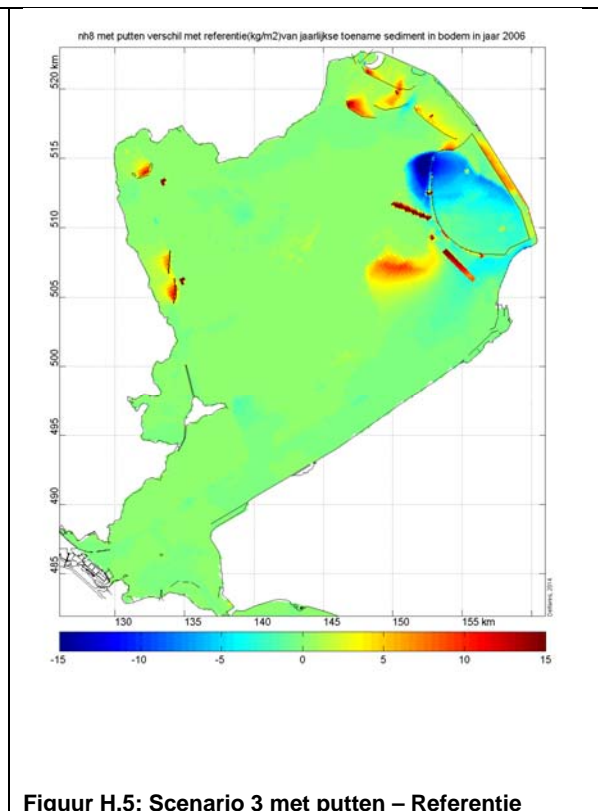
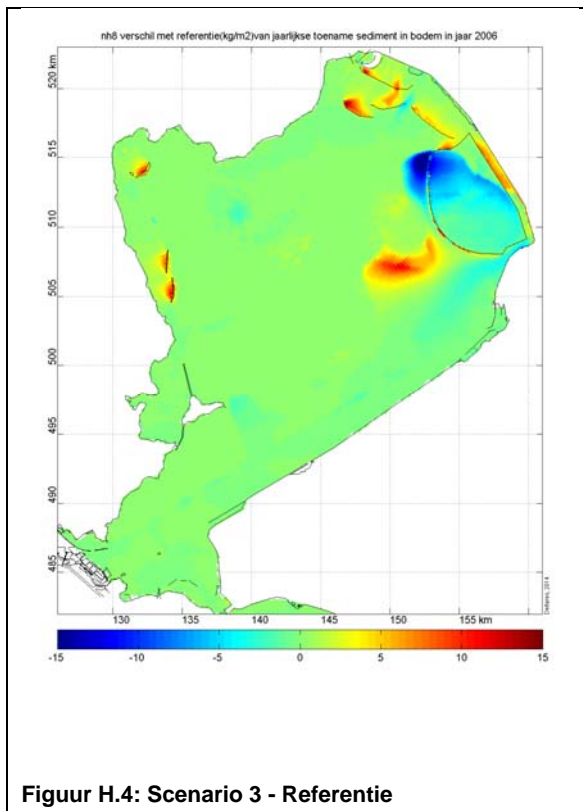
**Figuur H.1: Scenario 1 met putten – Referentie**



**Figuur H.2: Scenario 2 – Referentie**

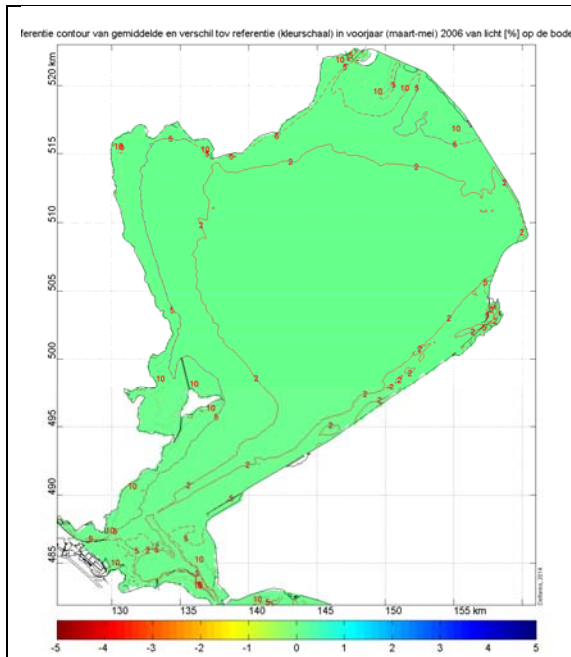


**Figuur H.3: Scenario 2 met putten – Referentie**

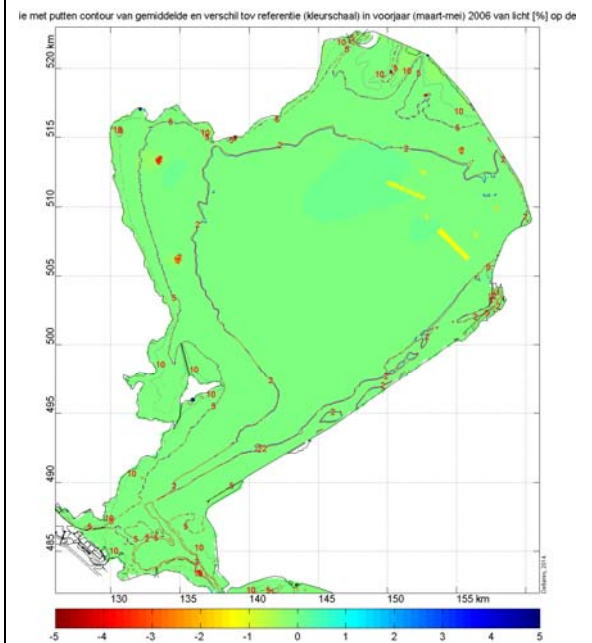


**Bijlage I**  
**Gemiddelde in het voorjaar van het percentage licht aan de bodem [%] als contourlijn (rood=referentie, blauw=scenario) en als verschil met referentie (kleurschaal)**

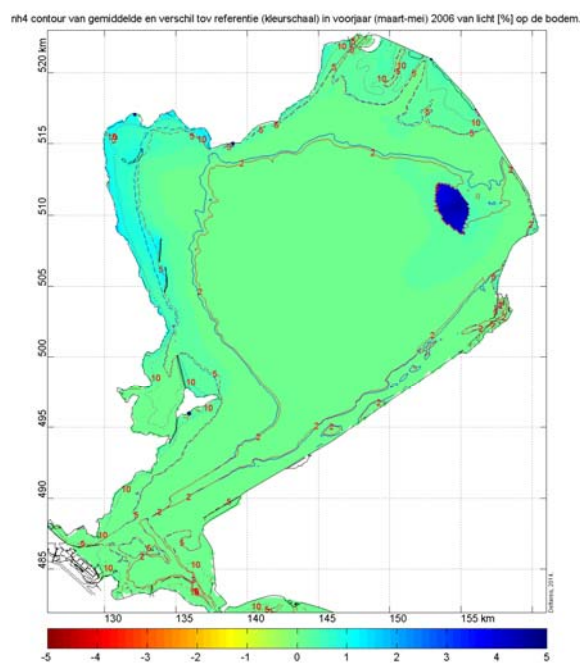




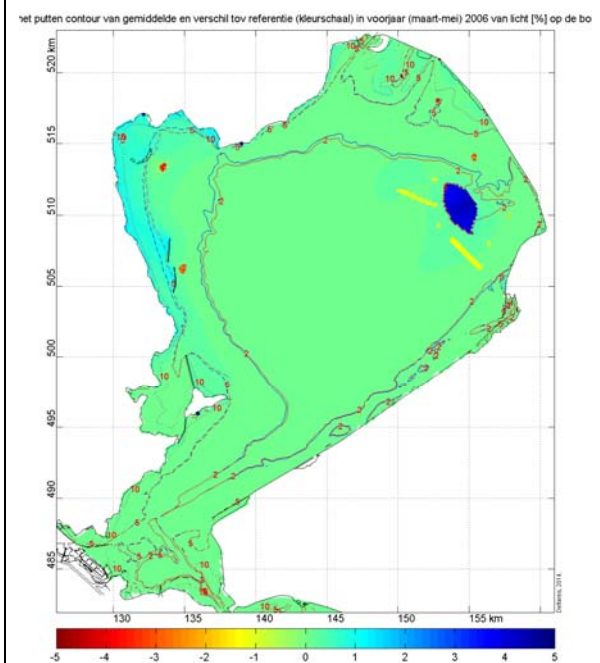
**Figuur I.1: Scenario 1 (Referentie) – Referentie**



**Figuur I.2: Scenario 1 met putten – Referentie**

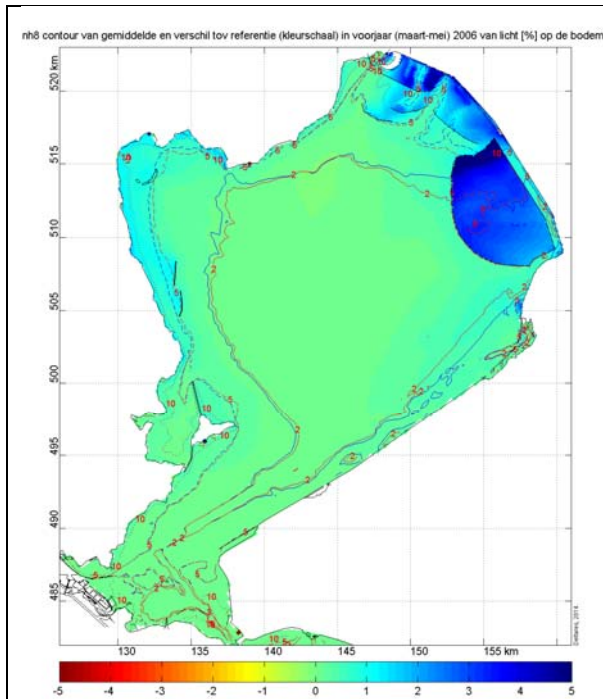


**Figuur I.3: Scenario 2 – Referentie**

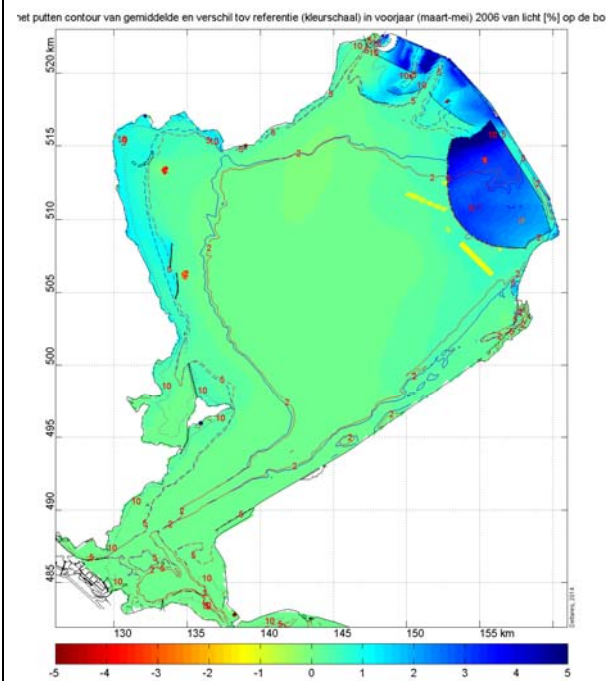


**Figuur I.4: Scenario 2 met putten – Referentie**



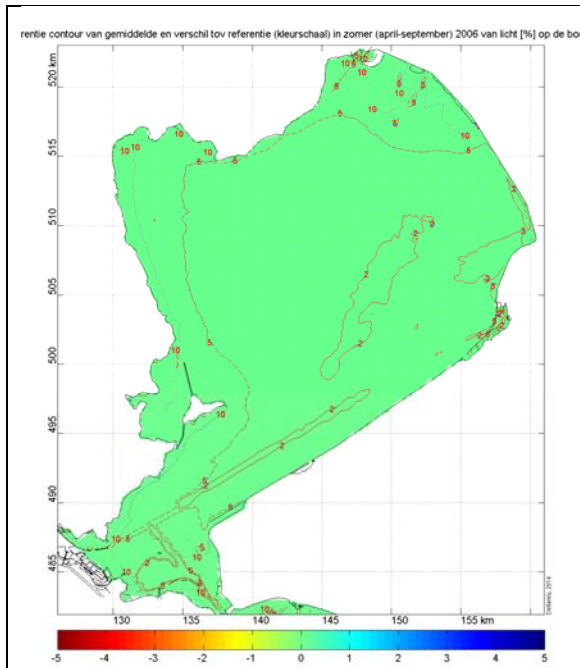


Figuur I.5: Scenario 3 - Referentie

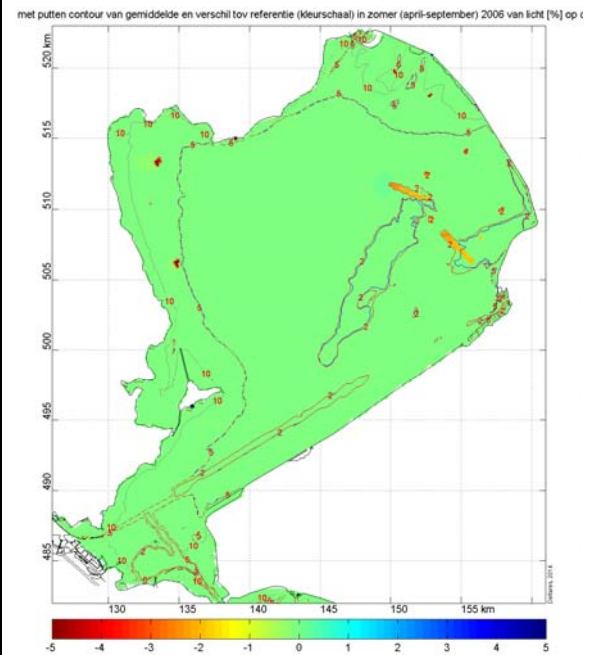


Figuur I.6: Scenario 3 met putten - Referentie

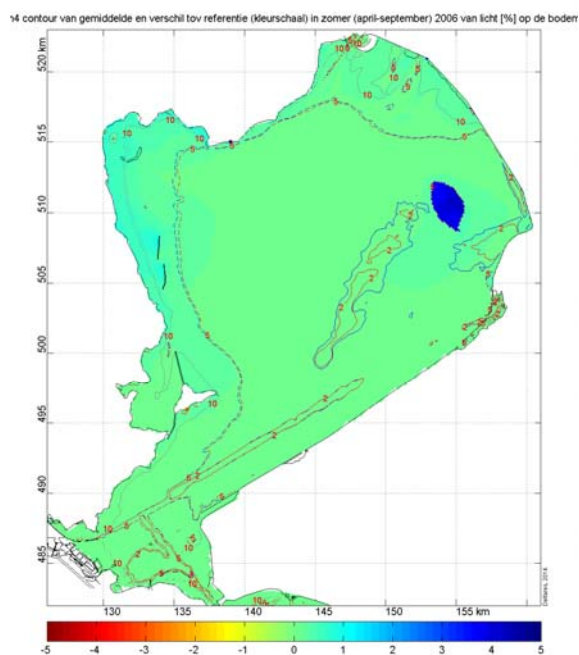
**Bijlage J**  
**Gemiddelde in de zomer van het percentage licht aan de  
bodem [%] als contourlijn (rood=referentie, blauw=scenario)  
en als verschil met referentie (kleurschaal)**



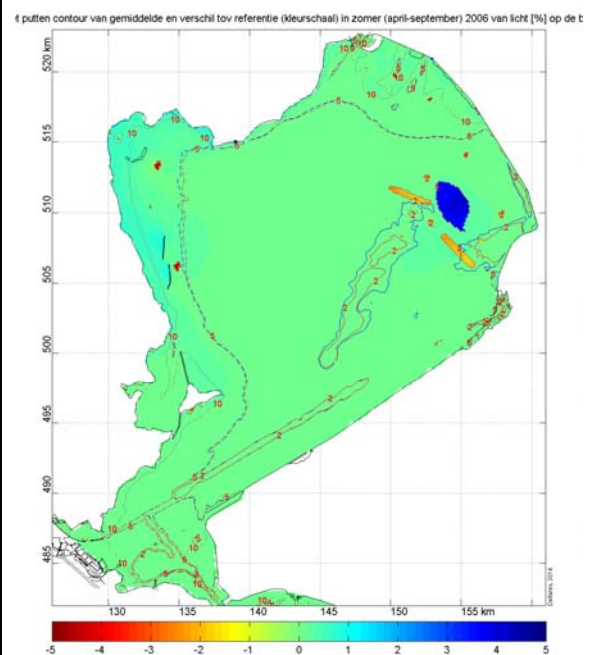
**Figuur J.1: Scenario 1 (Referentie) – Referentie**



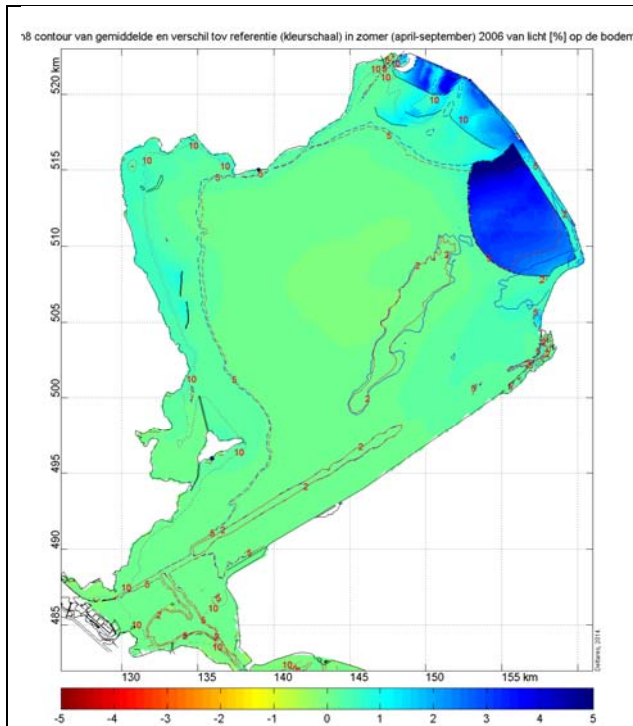
**Figuur J.2: Scenario 1 met putten – Referentie**



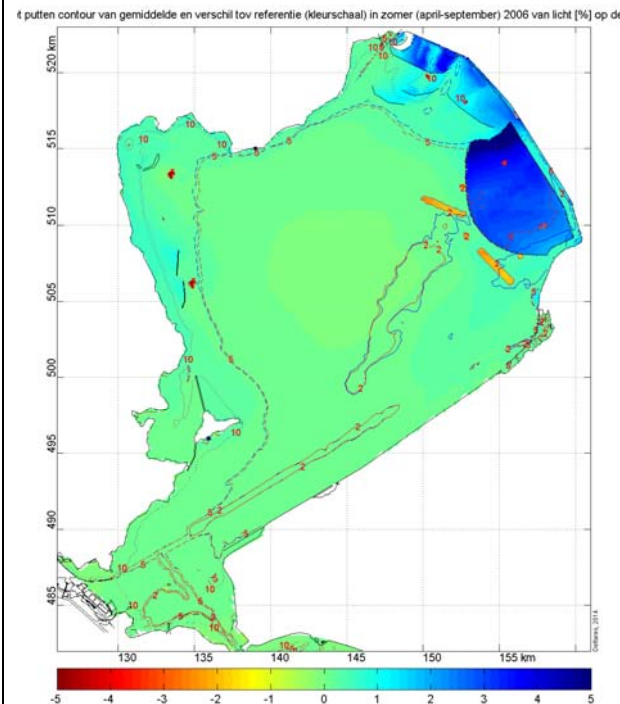
**Figuur J.3: Scenario 2 – Referentie**



**Figuur J.4: Scenario 2 met putten – Referentie**

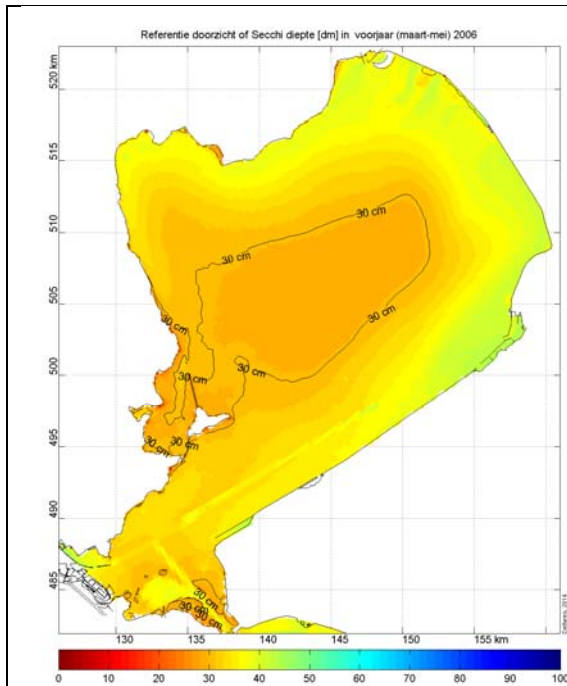


Figuur J.5: Scenario 3 - Referentie

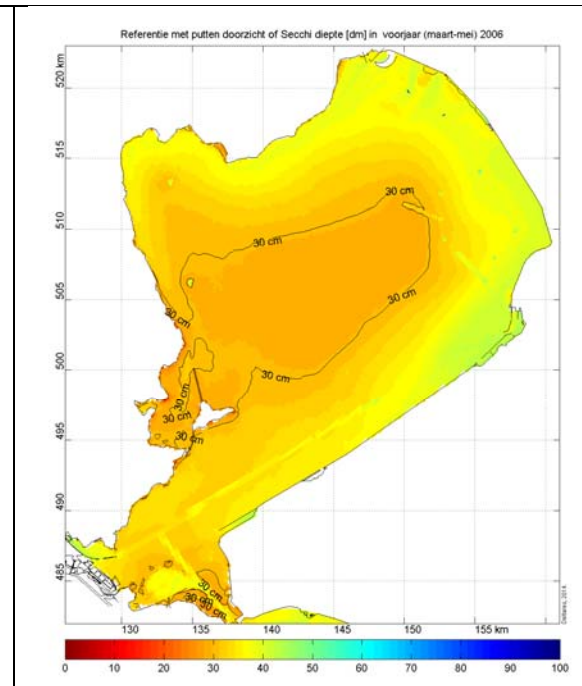


Figuur J.6: Scenario 3 met putten - Referentie

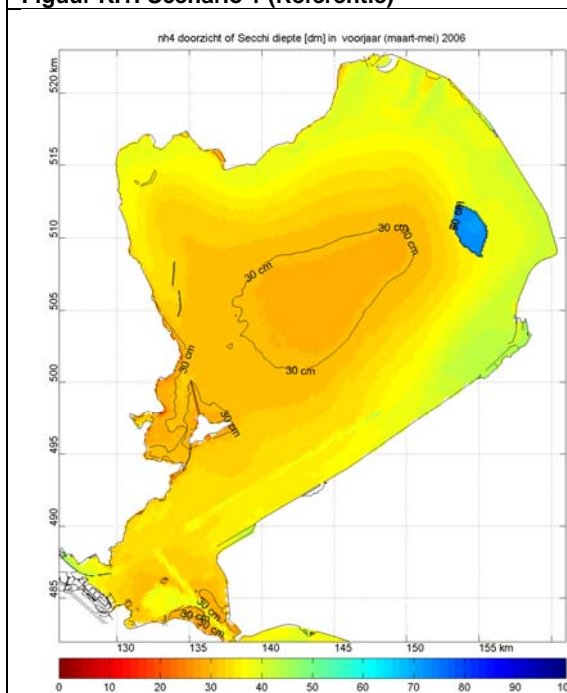
**Bijlage K**  
**Gemiddeld doorzicht of Secchi diepte (dm) in het voorjaar**  
**(maart-mei), scenario's met en zonder putten**



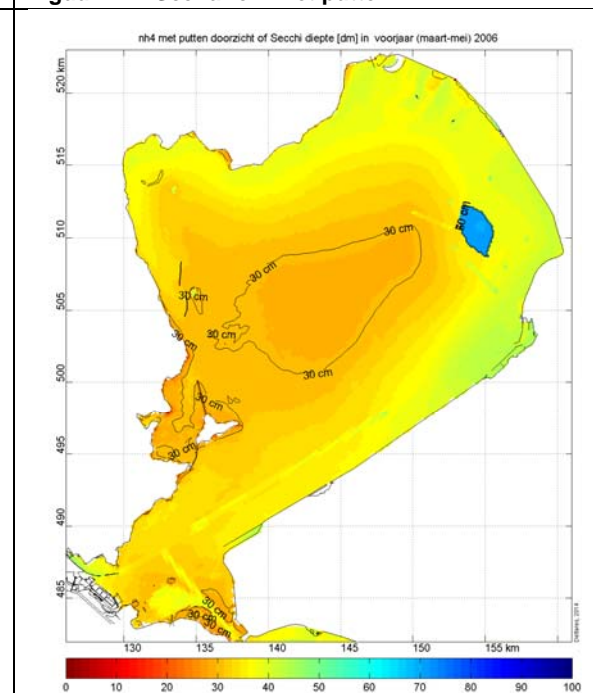
Figuur K.1: Scenario 1 (Referentie)



Figuur K.2: Scenario 1 met putten

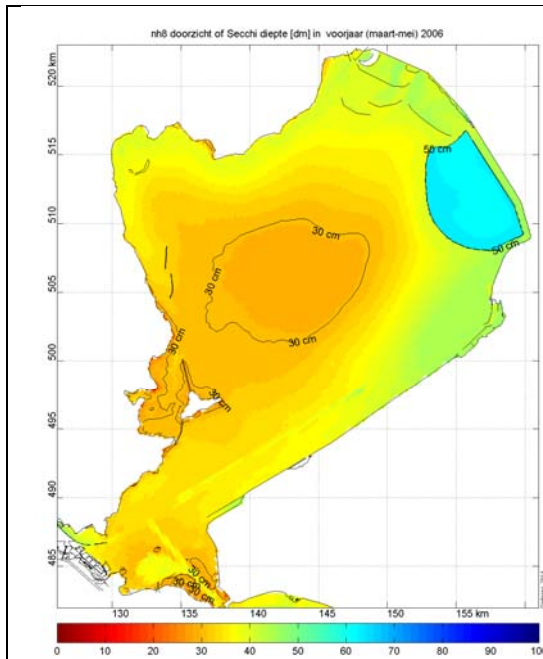


Figuur K.3: Scenario 2

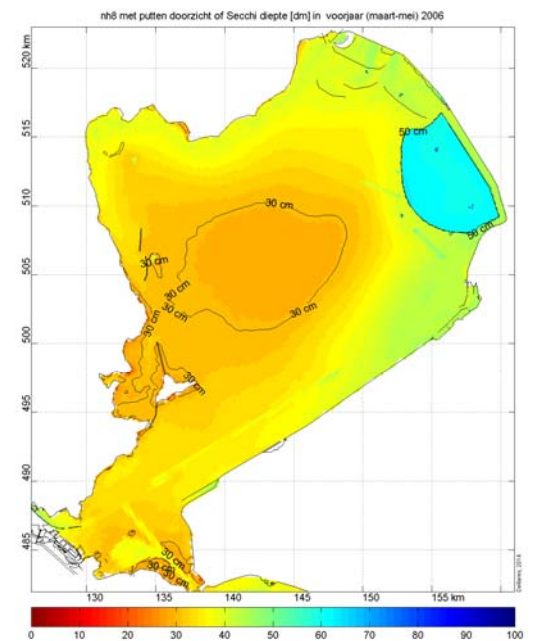


Figuur K.4: Scenario 2 met putten





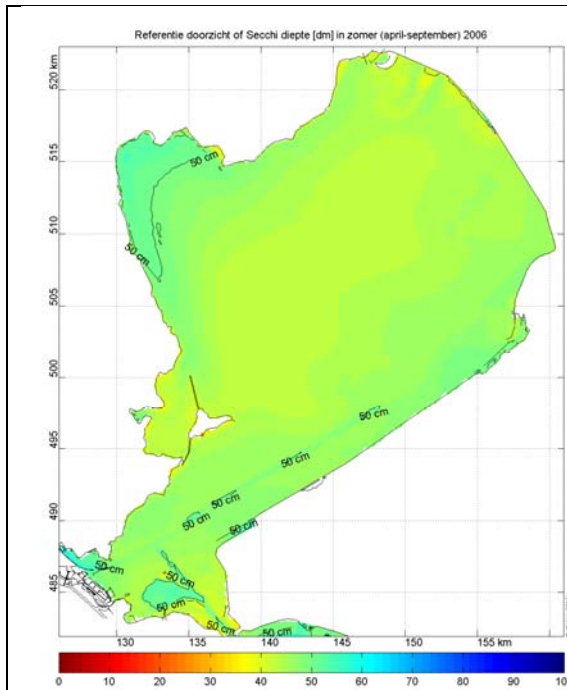
Figuur K.5: Scenario 3



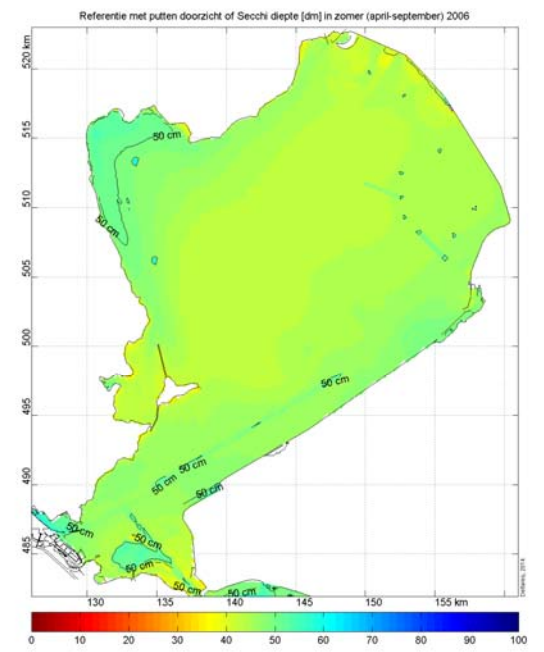
Figuur K.6: Scenario 3 met putten



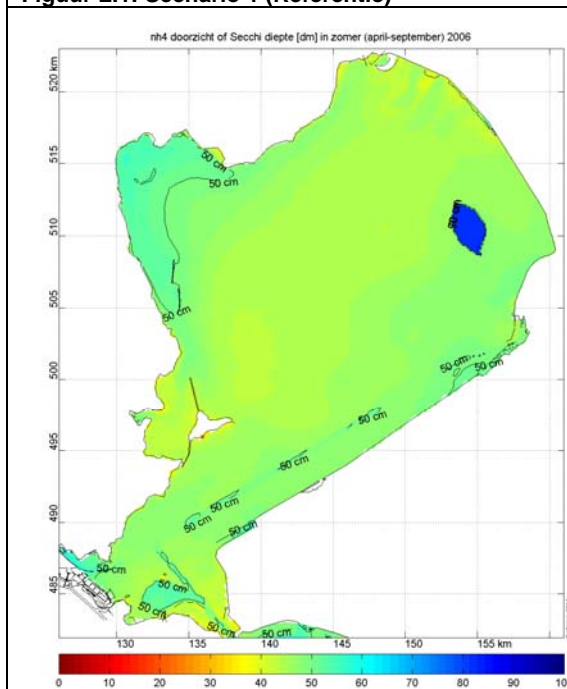
**Bijlage L**  
**Gemiddeld doorzicht of Secchi diepte (dm) in de zomer (april-  
sept), scenario's met en zonder putten**



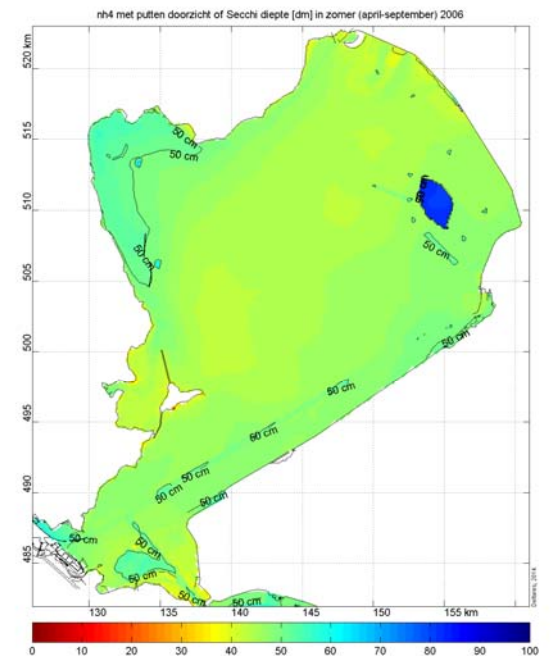
Figuur L.1: Scenario 1 (Referentie)



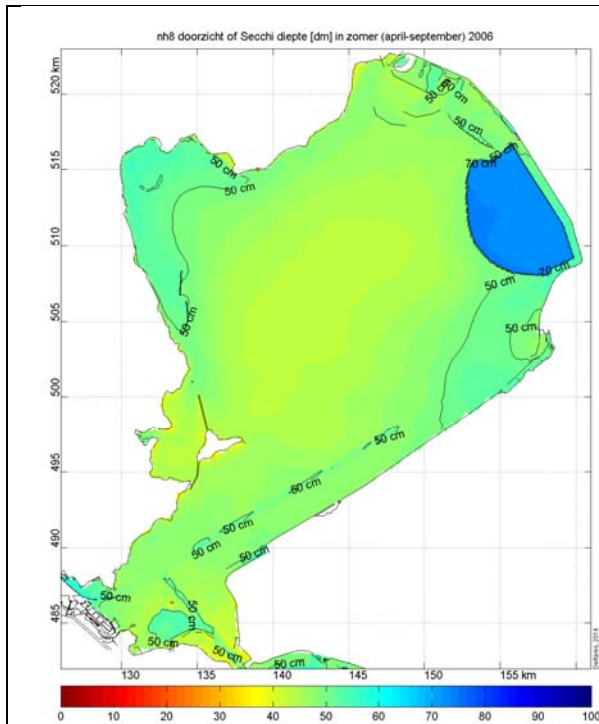
Figuur L.2: Scenario 1 met putten



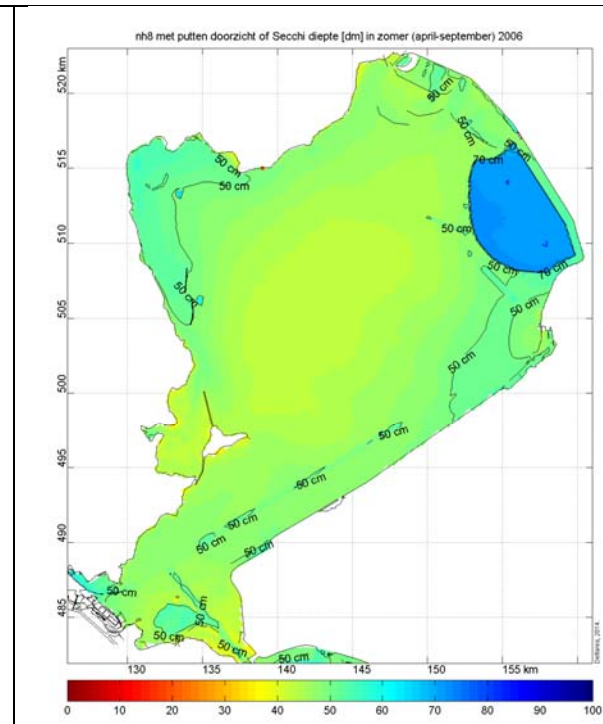
Figuur L.3: Scenario 2



Figuur L.4: Scenario 2 met putten

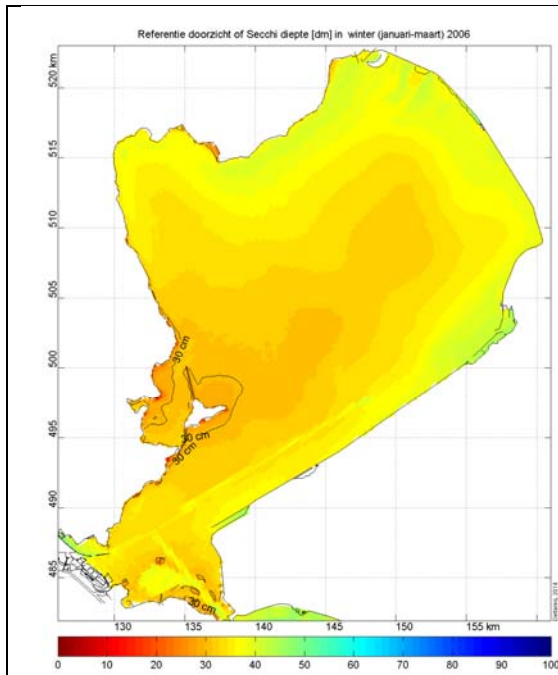


Figuur L.5: Scenario 3

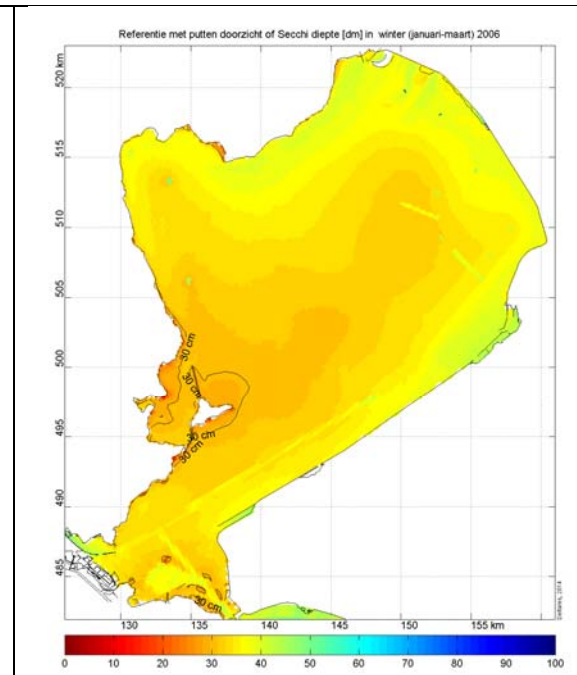


Figuur L.6: Scenario 3 met putten

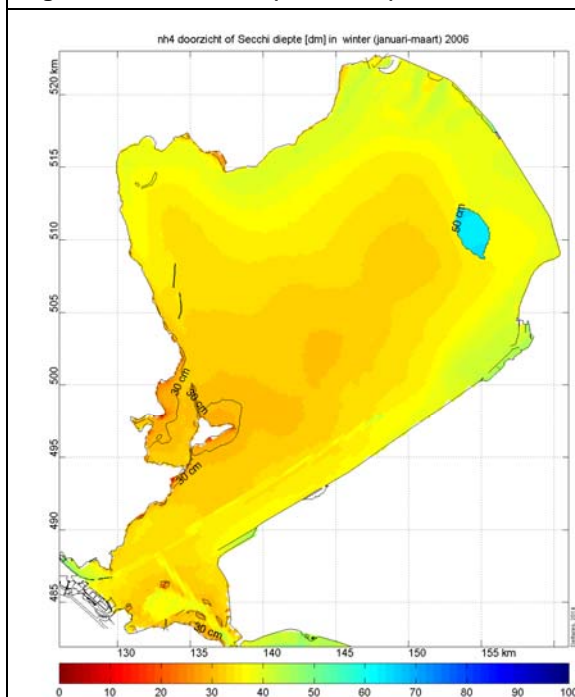
**Bijlage M**  
**Gemiddeld doorzicht of Secchi diepte (cm) in de winter (jan-  
maart), scenario's met en zonder putten**



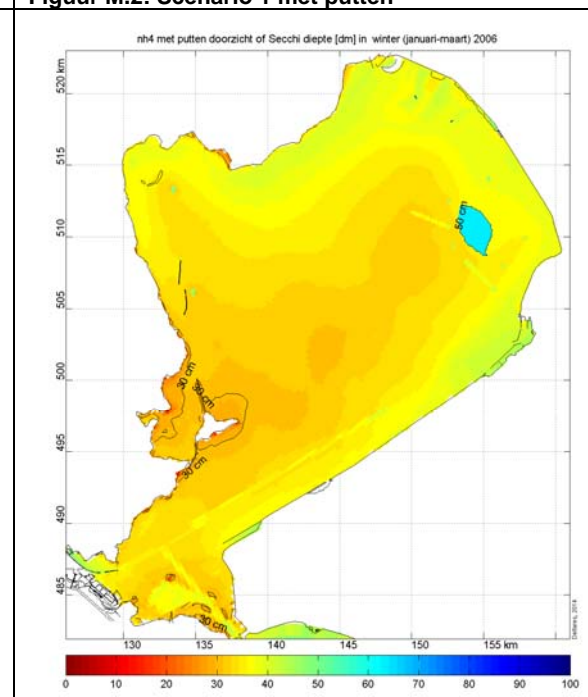
**Figuur M.1: Scenario 1 (Referentie)**



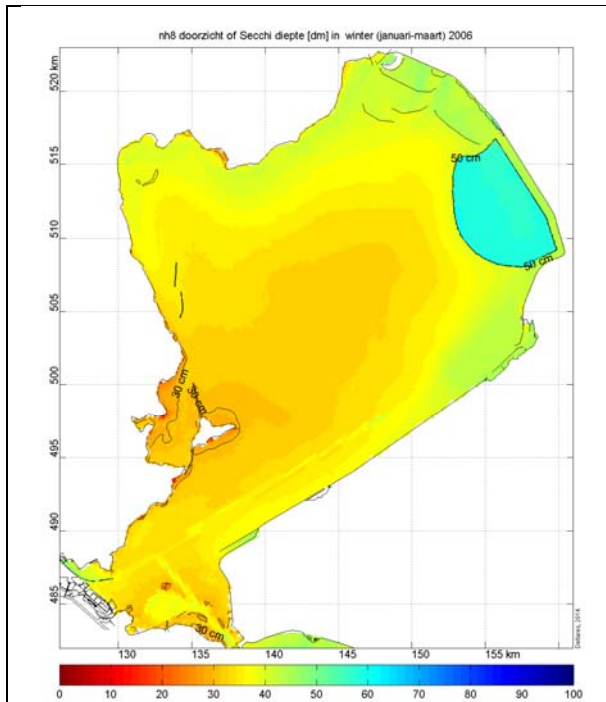
**Figuur M.2: Scenario 1 met putten**



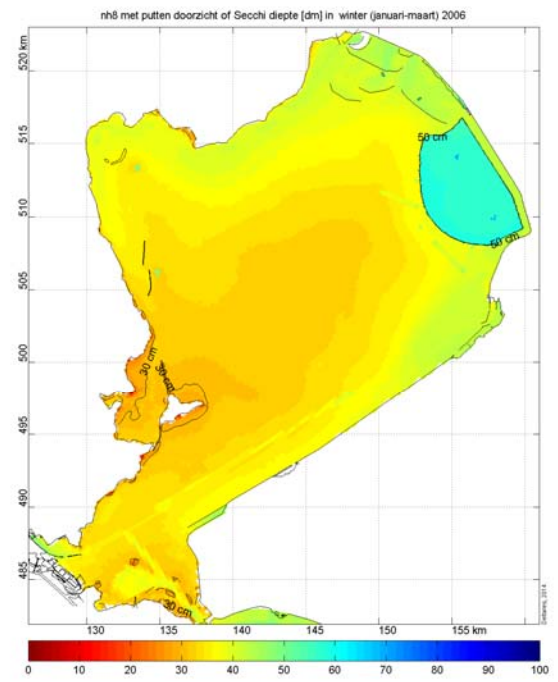
**Figuur M.3: Scenario 2**



**Figuur M.4: Scenario 2 met putten**



**Figuur M.5: Scenario 3**



**Figuur M.6: Scenario 3 met putten**