

Verkenning oplossingsrichtingen voor een betere waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer

Arno Nolte, Tineke Troost, Gerben de Boer, Claudette Spiteri en
Bregje van Wesenbeeck

Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat Waterdienst

Verkenning oplossingsrichtingen voor een betere waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer

Verkenning Grevelingen, water en getij

Arno Nolte, Tineke Troost, Gerben de Boer, Claudette
Spiteri en Bregje van Wesenbeeck

Rapport

oktober 2008

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Waterdienst						
Titel	Verkenning oplossingsrichtingen voor een betere waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer						
Samenvatting							
<p>Rijkswaterstaat is gestart met de Verkenning Grevelingenmeer, water en getij. De aanleiding van de Verkenning is de achteruitgang in waterkwaliteit en ecologische toestand. De voornaamste kenmerken hiervan zijn zuurstofarme en zuurstofloze condities in de waterkolom, de zich uitbreidende aanwezigheid van witte bacteriematten op de bodem en de daarmee geassocieerde achteruitgang van het bodemleven. In deze fase worden door Rijkswaterstaat oplossingsrichtingen verkend. De door Deltares uitgevoerde studie draagt op twee aspecten aan de verkenning van de oplossingsrichtingen bij:</p> <p>a Vergroten van de systeemkennis b Kwantificeren van het effect en de effectiviteit van oplossingsrichtingen voor de zuurstofhuishouding door middel van 3D modelberekeningen</p> <p>Sturende factoren voor de zuurstofhuishouding van het Grevelingenmeer zijn (gebrek aan) dynamiek waardoor tijdelijke stratificatie kan ontstaan, primaire productie en de stikstofbelasting. De sturende factor voor de waterbodem en het bodemleven is mogelijk laag dynamische condities waardoor slib en organisch materiaal in de bodem ophopen. Nader onderzoek is nodig om deze hypothese te toetsen.</p> <p>Uit de door modelberekeningen ondersteunde analyse blijkt dat met een gedempt getij (8x vergrote capaciteit van de Brouwerssluis) voldoende dynamiek bereikt wordt om de zuurstofhuishouding te verbeteren. De locatie van de sluis is vervolgens wel van invloed in de buurt van de sluis, maar niet voor het areaal zuurstofloosheid. De Flakkeese Spuisluis (0,5x) heeft behalve mogelijk lokaal, geen significant effect op de zuurstofhuishouding.</p> <p>Op basis van de beschikbare gegevens, kennis en modelberekeningen is geen uitspraak te doen over de ontwikkeling van de bodem en het bodemleven voor de verschillende oplossingsrichtingen. Aanbevolen wordt om hier in de komende planstudie gericht onderzoek naar te doen.</p>							
Referenties			WD-5003				
Versie	Auteur(s)		Date	Opmerking	Review	Goedgekeurd door	
1.0	Arno Nolte	<i>AN</i>	14 augustus '08		H. Los	<i>HL</i>	T. Schilperoort
	Tineke Troost	<i>TT</i>					<i>TS</i>
2.0	Arno Nolte	<i>AN</i>	27 oktober '08		H. Los	<i>HL</i>	T. Schilperoort
	Tineke Troost	<i>TT</i>					<i>TS</i>
Projectnummer			Z4576				
Trefwoorden			Grevelingen, waterkwaliteit, zuurstof, stratificatie, ecologie, getijdynamiek				
Aantal pagina's			106				
Classificatie			Geen				
Status			Definitief				

Inhoud

1	Inleiding.....	1
1.1	Algemeen.....	1
1.2	Problematiek.....	1
1.3	Doel en aanpak van deze studie	2
1.4	Leeswijzer.....	2
2	Probleemidentificatie Grevelingenmeer	3
2.1	Zuurstofloosheid in mariene systemen.....	3
2.2	Data-analyse zuurstofvraag.....	4
2.3	Witte matten op de bodem: Bacterie of schimmel?.....	7
2.4	Probleemdefinitie Grevelingenmeer	8
3	Het hydrodynamisch model.....	11
3.1	Inleiding en aanpassingen.....	11
3.2	Kalibratie.....	12
3.2.1	Tijdreeksen.....	12
3.2.2	Verloop in diepte en tijd (z-t diagrammen).....	13
3.2.3	Dwarsdoorsneden	14
4	Generiek Ecologisch Model Grevelingenmeer	17
4.1	Inleiding.....	17
4.2	Modelopzet en -instellingen.....	17
4.2.1	Waterbeweging, rekenrooster en rekenschema.....	17
4.2.2	Meteorologische condities.....	19
4.2.3	Initiële condities	19
4.2.4	Open randen	20
4.2.5	Lozingen.....	21
4.2.6	Overige forceringen.....	21
4.2.7	Graas en begraving.....	21
4.3	Kalibratieresultaten	22
4.3.1	Nutriënten, chlorofyl, zuurstof en doorzicht op DONAR locatie Dreischor.....	22
4.3.2	Zuurstofconcentraties GTSO locaties	28
4.3.3	algensamenstelling.....	29
4.4	Lessen uit de kalibratie.....	30
5	Scenario's	31
5.1	Beschrijving van scenario's	31
5.2	Modelaanpak scenario's.....	32
5.3	Kalibratie vs. Huidig.....	33

5.4	Huidig+ vs. Huidig	33
5.5	Doorspoel vs. Huidig	34
5.6	Gedempt getij vs. Huidig	34
5.7	Gedempt getij 70Z:30N vs. Huidig	34
5.8	Noorderspuisluis vs. Huidig.....	35
5.9	Maximaal getij vs. Huidig.....	35
5.10	Trends in scenario's	35
6	Samenvattende discussie, conclusies en aanbevelingen	41
6.1	Inleiding	41
6.2	Systeemkennis	41
6.3	Conclusies met betrekking tot oplossingsrichtingen	43
6.4	Aanbevelingen.....	44

Appendices

A	Referenties
B	Opzet en kalibratie hydrodynamisch model uit WL Delft Hydraulics 2006
C	Verticale zuurstofprofielen GTSO03, GTSO13 en GTSO19 voor kalibratie en alle oplossingsrichtingen
D	Bodemkaarten zuurstofgehalte op 7 juli voor kalibratie en alle oplossingsrichtingen
E	Tijdseries DONAR locatie Dreischor voor kalibratie en alle oplossingsrichtingen
F	Stikstof- en fosfaatbalansen voor het Grevelingenmeer voor kalibratie en alle oplossingsrichtingen
G	Stroomsnelheden (gemiddeld en maximaal) bij oppervlak en bodem voor kalibratie en alle oplossingsrichtingen

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Na de stormvloedramp van 1953 werd besloten de Grevelingen af te sluiten. In 1965 werd de Grevelingendam, in het oosten van de Grevelingen, gesloten en hiermee stopte de invoer van zoetwater. In 1971 werd in het westen de Brouwersdam voltooid, die de Grevelingen van de Noordzee afsloot. De Grevelingen was nu een afgesloten meer, zonder invloed van getijden en werd langzaam zoeter. In 1978 werd een spuisluis in de Brouwersdam aangelegd en begin jaren tachtig een hevelsluis in de Grevelingendam. Middels deze sluisen kon een constant hoog zoutgehalte (circa 30 ppt saliniteit/17 g/l chloride) gehandhaafd worden. Tegenwoordig is enkel de sluis in de Brouwersdam in gebruik.

De afgelopen jaren is een teruggang geconstateerd in de waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer. Het is de vraag of de ecologisch streefcondities die zijn vastgesteld als doel voor de Kader Richtlijn Water in 2015, gehaald gaan worden. Als grootste problemen voor de waterkwaliteit en ecologische toestand zijn geconstateerd lage zuurstofconcentraties, ophoping van organisch materiaal in de bodem en een drastische afname van het doorzicht (Hoeksema 2002; Slager 2008). Het is niet geheel duidelijk wat de sturende factor(en) achter deze problemen is (zijn) en, belangrijker, hoe deze problemen verholpen kunnen worden.

De onderhavige door Deltares uitgevoerde studie verkent mogelijkheden om de ecologische kwaliteit van de Grevelingen minimaal te behouden door middel van het vergroten van de uitwisseling tussen de Grevelingen en de Noordzee en de Grevelingen en de Oosterschelde. Daarnaast werpt deze studie licht op de sturende factor(en) door gecombineerde systeem- en modelanalyse.

Wij benadrukken vooraf dat dit rapport zich uitsluitend richt op de waterkwaliteit en de ecologische toestand van het meer (dus niet het terrestrische deel van de Grevelingen). Positieve of negatieve effecten op andere belangen en een afweging tussen belangen zoals recreatie of getijde-energie worden niet in dit rapport meegenomen. Deze effecten en afweging wordt in andere delen van de verkenning uitgevoerd.

Deze studie is een onderdeel van de verkenning Grevelingen, water en getij, die door Rijkswaterstaat wordt uitgevoerd.

1.2 Problematiek

De belangrijkste factor die de Grevelingen onderscheidt van de andere zoute Deltabekkens, zoals de Oosterschelde, is het ontbreken van getij. Mede hierdoor ontstaat in de Grevelingen regelmatig stratificatie, zowel van lagen met verschillende zoutgehaltes als van lagen met verschillende temperaturen. Een bekend gevolg van langdurige stratificatie is het zuurstofloos raken van de onderste laag van de waterkolom met nadelige gevolgen voor organismen die op en in de bodem leven. Recentelijk werd in de Grevelingen grote sterfte van het bodemleven waargenomen (Lengkeek, Bouma et al. 2007) en in de jaren 2005 en 2006 trad oestersterfte op, vermoedelijk door lage zuurstofconcentraties in de waterkolom. Tevens wordt vorming van witte matten op de bodem van het meer gerapporteerd (Hoeksema 2002;

Lengkeek, Bouma et al. 2007). Zuurstofloze condities in de onderste waterlagen gedurende de zomermaanden zouden daarvan de oorzaak zijn, mogelijk versterkt door de vermoede aanwezigheid van grote hoeveelheden organisch materiaal (Lengkeek, Bouma et al. 2007). Paradoxaal lijkt er veel organisch materiaal (polysaproob) te zijn, terwijl het meer tegelijkertijd arm aan nutriënten is (oligotroof). Er zijn echter geen metingen van de hoeveelheid organisch materiaal om de hypothese te verifiëren of te falsifiëren.

1.3 Doel en aanpak van deze studie

Deze studie verkent mogelijkheden om de zuurstofhuishouding het Grevelingenmeer te verbeteren. Eerst wordt een beschrijving gegeven van het Grevelingen-systeem en de bestaande problematiek. Vervolgens wordt een verkennende ecologische analyse gericht op de gerapporteerde witte matten gepresenteerd, die helderheid moet verschaffen over de sturende factoren.

Daarnaast is een model opgezet voor de hydrodynamica van de Grevelingen. Gekozen is om het hydrodynamisch model te gebruiken zoals opgezet en gevalideerd in de studie "Effect van ingebruikname Flakkeese spuisluis op de hydrodynamica en waterkwaliteit van het Grevelingenmeer" (WL | Delft Hydraulics, 2006). Dit model is nogmaals gevalideerd op basis van onder andere temperatuur en zoutgehalte. Het hydrodynamisch model is vervolgens gebruikt als basis voor een ecologisch model, dat ook weer gekalibreerd is aan de hand van zuurstofconcentraties, nutriënten- en chlorofylconcentraties, en algensamenstelling.

Het hydrodynamische en het ecologische model zijn vervolgens gebruikt om een aantal scenario's door te rekenen. Deze scenario's bestaan uit een aantal mogelijke aanpassingen in sluisdoorvoer en -beheer. Met behulp van de uitkomsten van deze scenario's wordt het te verwachten effect van deze ingrepen op de stratificatie en zuurstofloosheid in de onderste waterlagen besproken.

1.4 Leeswijzer

- Hoofdstuk 2: Probleemidentificatie Grevelingenmeer
- Hoofdstuk 3: Opzet en kalibratie van het 3D hydrodynamisch model
- Hoofdstuk 4: Opzet en kalibratie van het 3D ecologisch model
- Hoofdstuk 5: Beschrijvingen en uitkomsten van de verschillende scenario's
- Hoofdstuk 6: Samenvattende discussie, conclusies en aanbevelingen

2 Probleemidentificatie Grevelingenmeer

Wat zijn de problemen waar het Grevelingenmeer mee kampt en waar worden zij door veroorzaakt? Een goede probleemidentificatie en inzicht in de sturende factoren zijn essentiële voorwaarden om de efficiëntste maatregel(en) te kunnen selecteren. In algemene termen wordt gesproken over een achteruitgang van de waterkwaliteit en de ecologische condities. Voor de waterkwaliteit worden in het bijzonder zuurstofarme of zuurstofloze condities in de waterkolom als een probleem gezien. Deze veroorzaken de laatste jaren vermoedelijk het afsterven van (commerciële) oesterpercelen.

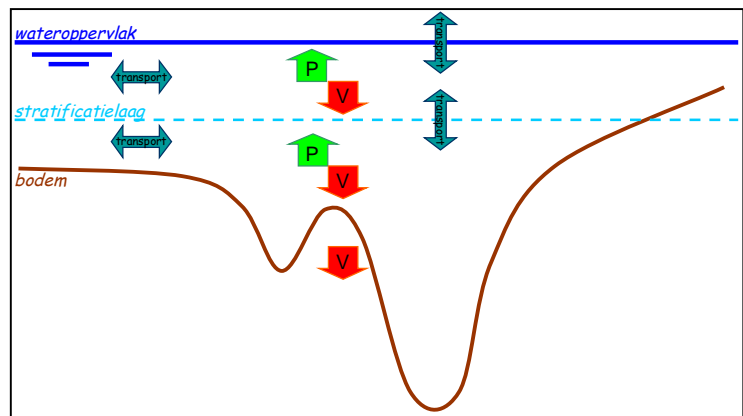
Voor de ecologische condities wordt in het bijzonder gedacht aan de aanwezigheid van witte matten op de bodem en het ontbreken van ander bodemleven op die plekken. Dergelijke condities worden al langere tijd in diepere delen (> 10 m) van het meer aangetroffen, maar worden nu lokaal ook al op 5 tot 6 meter diepte gevonden. Daarnaast is er overlast van zeesla op sommige ondiepe plekken.

In dit hoofdstuk gaan we nader in op het voorkomen van zuurstofarme of zuurstofloze condities en de aanwezigheid van witte matten.

2.1 Zuurstofloosheid in mariene systemen

Lage zuurstofspanningen (of anoxia) in de waterkolom komen veel voor in mariene systemen en estuaria. Een gebrek aan opgelost zuurstof in de waterkolom ontstaat als het verbruik van zuurstof groter is dan de toevoer van zuurstof door transport of biologische productie. De termen van de zuurstofbalans zijn:

- Biologische productie (+)
- Biologisch en chemisch verbruik (-)
- Reaeratie aan oppervlak (+ of -)
- Verticaal transport (+ of -)
- Horizontaal transport (+ of -)



Figuur 2.1 Schematische weergave van de zuurstoffluxen in de waterkolom boven en onder de stratificatielaag en in de bodem (P = productie, V = verbruik) – pijlen zijn niet representatief voor de grootte van de flux

Zuurstof wordt verbruikt door oxidatie van organisch materiaal, door respiratie van organismen maar ook door oxidatie van anorganische gereduceerde stoffen zoals ammonium, sulfides en methaan. Verbruik treedt zowel in de waterkolom als in de bodem op. Het (verticale) transport van zuurstof in de waterkolom kan sterk verminderen als het water min of meer stagnant is en/of als er sprake is van zout- en/of temperatuurgelaagdheid.

Als zuurstof niet meer beschikbaar is voor de afbraak van organisch materiaal schakelen bacteriën over op anaerobe respiratie of verandert de samenstelling van de bacteriepopulatie. Bij de afbraak van organisch materiaal komen elektronen vrij en die worden meestal afgegeven aan zuurstof. De tweede beste elektronenacceptoren zijn de geoxideerde vormen van stikstof, zoals nitraat en nitriet. In de afwezigheid van zuurstof zal dus in eerste instantie denitrificatie optreden. Daarna treedt reductie van

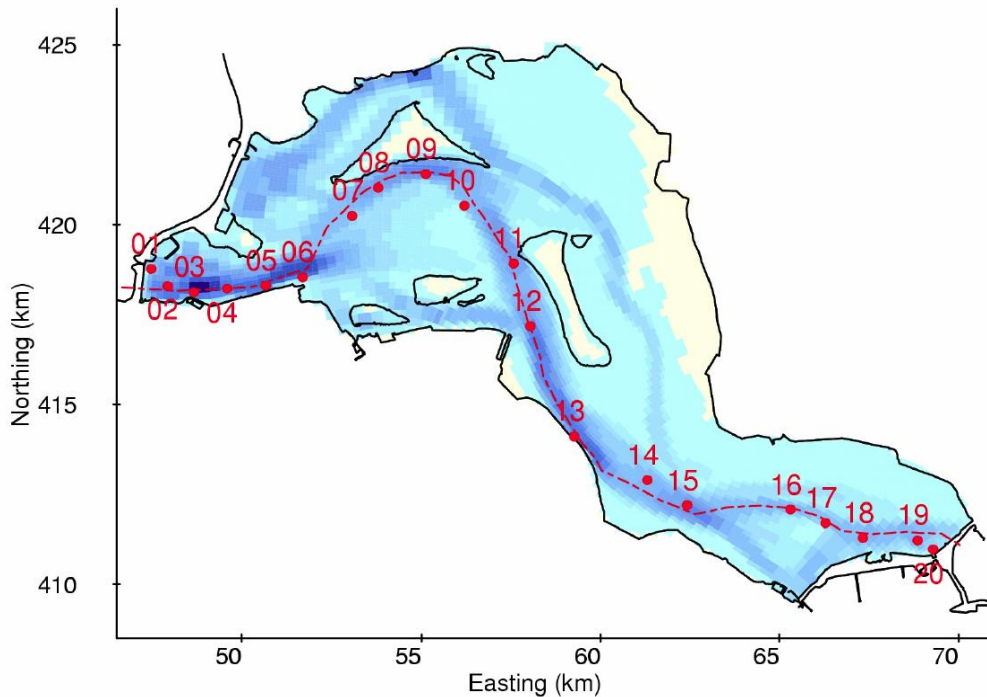
mangaanoxide en ijzeroxide op voor zover deze componenten in het systeem aanwezig zijn. Tot slot schakelen bacteriën over op de reductie van sulfaat, waarbij sulfide ontstaat, maar ook het gas waterstofsulfide dat sterk naar rotte eieren ruikt. Als de gevormde gereduceerde componenten (NH_4^+ , Fe(II), Mn(II), sulfides, CH_4) in contact komen met zuurstof, bijvoorbeeld door diffusie naar de waterkolom treedt reoxidatie op waarbij zuurstof wordt verbruikt. De zuurstofvraag bestaat dus uit directe oxidatie van organisch materiaal, maar ook uit reoxidatie van gereduceerde componenten en dus via een indirecte mineralisatie van organisch materiaal. Afhankelijk van de situatie kan de indirecte mineralisatie meer dan 50% van de zuurstofvraag vormen (bijvoorbeeld Ferro 2003, Wijsman 2001). Vooral bij een hoge organisch stof belasting in mariene systemen kan de directe zuurstofvraag slechts een beperkte bijdrage aan de totale zuurstofvraag leveren.

Zuurstofloze condities worden vaak gerelateerd aan eutrofiëringsproblematiek. Hoewel een relatie bestaat, is dit zeker niet per definitie waar. Er zijn eutrofe systemen zonder zuurstofproblemen en er zijn oligotrofe systemen met zuurstofproblemen. Voor het Grevelingenmeer gaat de laatste situatie op. De nutriëntenbelasting en de nutriëntenconcentraties zijn relatief laag en toch treden lage zuurstofconcentraties op. In het Grevelingenmeer ligt niet het verbruik, maar het geringe transport ten grondslag aan de lage concentraties.

Lage zuurstofconcentraties zijn dodelijk voor het merendeel van het dierlijk leven die in het water en op de bodem leven. Een gezond aquatisch systeem bevat meestal niet minder dan 8 mg/l zuurstof. Concentraties tussen 6 en 4 mg/l hebben al negatieve gevolgen op de groei van mariene organismen en onder de 2 mg/l treedt onherroepelijk sterfte op (Gray, Shiu-sun Wu et al. 2002). Hoewel vissen gevoeliger lijken te zijn voor lage zuurstofconcentraties dan bijvoorbeeld crustaceae en echinodermen (Gray, Shiu-sun Wu et al. 2002), hebben lage zuurstofconcentraties vaak grotere sterfte onder substraatgebonden organismen tot gevolg. Vissen kunnen immers ergens anders heen migreren, maar anemonen, wormen, schelpdieren, krabben en kreeften zijn minder mobiel, waardoor zij bij lage zuurstofconcentraties vaak het slachtoffer worden. De effecten zijn niet onomkeerbaar, maar het herstel van deze gemeenschappen kan wel enkele jaren duren.

2.2 Data-analyse zuurstofvraag

De zuurstofconcentraties in de waterkolom worden regelmatig gemonitord in 20 GTSO locaties gelegen langs een lengtedoorsnede van de Grevelingen die de (zuidelijke) diepe geul volgt. De metingen bestaan uit verticale profielen met ongeveer per meter een meting. Een overzicht van deze locaties is gegeven in Figuur 2.2.



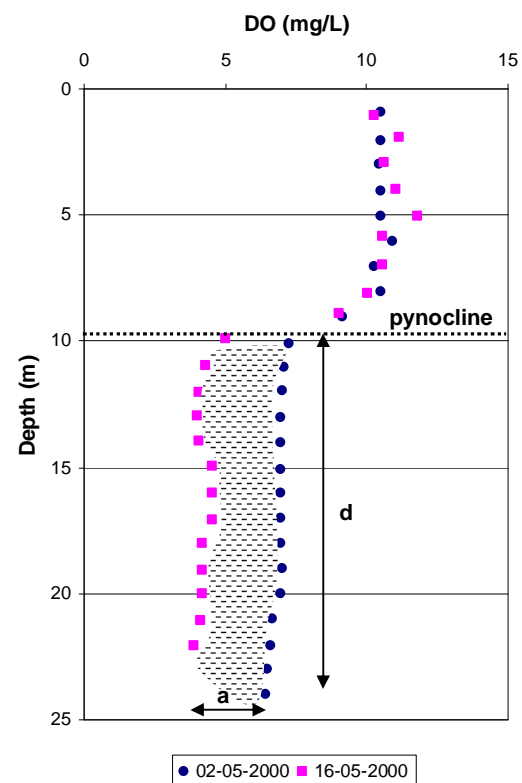
Figuur 2.2 Locatie van GTSO meetpunten in het Grevelingenmeer

De gemeten zuurstofconcentraties van het jaar 2000 zijn geanalyseerd om inzicht te geven in de zuurstofvraag in het Grevelingenmeer. De zuurstofvraag is geschat door het vergelijken van twee opeenvolgende verticale GTSO profielen voor hetzelfde meetpunt (zie voorbeeld in Figuur 2.3). In beide profielen zijn de zuurstofconcentraties vergelijkbaar tot de spronglaag (ongeveer diepte 10 m). Op grotere dieptes is de zuurstofconcentratie gemeten op de latere datum structureel lager. De zuurstofvraag kan nu geschat worden door horizontaal transport te negeren en aan te nemen dat het zuurstof lokaal verbruikt is door directe of indirecte afbraak van organisch materiaal in de bodem of in de waterkolom onder de spronglaag (pycnocline). Het verbruikte zuurstof wordt weergegeven door het gearceerde gebied in Figuur 2.2.

De netto zuurstofvraag is dan als volgt gedefinieerd:

$$\text{Netto O}_2 \text{ vraag} = \frac{\Delta\text{O}_2 \times d}{t_2 - t_1}$$

waarbij ' ΔO_2 ' het verschil in gemiddelde O_2 concentratie onder de spronglaag is en ' d ' de dikte van de waterkolom onder de spronglaag. ' $t_2 - t_1$ ' betreft het aantal dagen tussen de twee profielen. De netto zuurstofvraag is in de eenheid $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$.



Figuur 2.3 Voorbeeld van twee opeenvolgende zuurstofprofielen (GTSO-13 Dreischor)

Tabel 2.1 geeft de berekende zuurstofvraag weer voor een aantal meetpunten langs de GTSO lengtedoorsnede. Omdat er voor de berekening een duidelijke spronglaag nodig is en een eenduidige afname van de zuurstofconcentratie onder de spronglaag, kan de zuurstofvraag met deze methode maar voor een klein aantal situaties geschat worden.

Tabel 2.1 Geschatte zuurstofvraag ($\text{g/m}^2/\text{d}$) op basis van opeenvolgende GTSO profielen

Locatie/meetpunt	Datum 1	Datum 2	Berekende zuurstofvraag ($\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$)
GTSO-03 (SCH)	02-05-2000	16-05-2000	8,2
GTSO-03 (SCH)	11-07-2000	26-07-2000	2,3
GTSO-05	21-03-2000	03-04-2000	1,9
GTSO-05	02-05-2000	16-05-2000	3,3
GTSO-06 (OSSE)	30-05-2000	14-06-2000	4,3
GTSO-06 (OSSE)	11-07-2000	26-07-2000	3,6
GTSO-13 (DREI)	02-05-2000	16-05-2000	2,2
GTSO-13 (DREI)	30-05-2000	14-06-2000	2,8

In een zeer korte actie is in de wetenschappelijke literatuur gezocht naar gemeten zuurstofvraag. Vanwege de aard van de actie is het overzicht arbitrair en incompleet en heeft derhalve geen andere functie dan het aangeven van een typische range (Tabel 2.2). Uit de scan komen voornamelijk lagere waarden en bij uitzondering waarden die overeenkomen met de geschatte waarden in de Grevelingen. Deze lijken dus hoog. In de meest vergelijkbare systemen (Noordzee, Chesapeake Bay) worden echter in ordegrutte vergelijkbare waarden gevonden. Een voorzichtige conclusie lijkt gerechtvaardigd dat de zuurstofvraag in het Grevelingenmeer hoog, maar niet uitzonderlijk hoog is. Vervolgonderzoek is nodig om meer inzicht te krijgen.

Tabel 2.2 Quick-scan overzicht van zuurstofvraag van de bodem uit de literatuur

Locatie	Type systeem	Gevonden range ($\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$)
Galvestone Bay (VS) ^a	Estuarium	0,05 – 0,35
Neuse river estuary (VS) ^b	Estuarium	0,26 – 0,29
Rotorua Lake (New Zealand) ^c	Meer, zoetwater	0,12 – 0,38
Rotokakahi Lake (New Zealand) ^d	Meer, zoetwater	0,2
Cannonsville Reservoir (VS) ^e	Meer, zoetwater	0,66 – 1,67
Chesapeake Bay (VS) ^f	Estuarium	1,5 – 3,1
Noordzee Broad Fourteens Frisian Front Oestergronden ^g	Zee	0,03 – 0,6
		0,24 – 1,6
		0,08 – 0,5
Tolo Harbour (HK) ^h	Zee	1 – 3
Tolo Harbour (HK) ⁱ	Zee	0,4 – 1,1

a. Zimmerman A. R., Benner R., 1994. Denitrification, nutrient regeneration and carbon mineralization in sediments of Galveston Bay, Texas, USA. *Mar. Eco. Prog. Ser.*, **114**, 275-288.

b. Rizzo W.M., Lackey G. J., Christian R.R., 1992. Significance of euphotic, subtidal sediments to oxygen and nutrient cycling in a temperate estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **86**, 51-61.

c. Burns, N.M., Gibbs M.M., Hickmann M.L., 1996. Measurement of oxygen production and demand in lake waters., *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **30**, 127-133.

d. Erickson M.J., Auer M. T., 1998. Chemical exchange at the sediment-water interface of Cannonsville Reservoir. *Lake Reserv. Manage.*, **14**, 266-277.

e. Rabouille C., Denis L., Dedieu K., Stora G., Lansard B., Grenz C., 2003. Oxygen demand in coastal marine sediments: comparing in situ microelectrodes and laboratory core incubations. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **285-286**, 49-69.

- f. Boynton W.R., Kemp W.M., 1985. Nutrient regeneration and oxygen consumption by sediments along an estuarine salinity gradient, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **23**, 45-55.
- g. Boon A.R., Duineveld G.C.A., 1998. Chlorophyll a as a marker for bioturbation and carbon flux in southern and central North Sea sediments, *Mar.Eco.Prog. Ser.*, **162**, 33-43.
- h. Lee J.H.W., Arega F., 1999. Eutrophication dynamics of Tolo Harbour, Hong Kong, *Mar Poll. Bull.*, **39**(1-12), 187-192.
- i. Hu W.F., Lo W., Chua H., Sin S.N., Yu P.H.F., 2001. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong, *Environment International*, **26**, 369-375.

2.3 Witte matten op de bodem: Bacterie of schimmel?

Er bestaan minstens vijfhonderd soorten mariene schimmels, waarvan de meesten organisch materiaal afbreken. Een klein deel is parasitair en leeft op sponzen, vissen, zeewier en schelpdieren, en anderen vormen lichenen in een mutualisme met algen. De meeste mariene schimmels komen vrij in de waterkolom voor en zijn zo klein dat ze niet te onderscheiden zijn met het blote oog. Sommige mariene schimmels zijn substraat gebonden. Deze schimmels verschillen van bacteriën in het feit dat de schimmels sterk aeroob zijn. Anaerobe schimmels zijn tamelijk zeldzaam en vaak zijn dit de parasitaire schimmels (Vishniac 1956). In de literatuur zijn geen voorbeelden te vinden van mariene schimmels die substraat gebonden zijn, voorkomen onder lage zuurstofspanningen en die grote witte matten vormen.

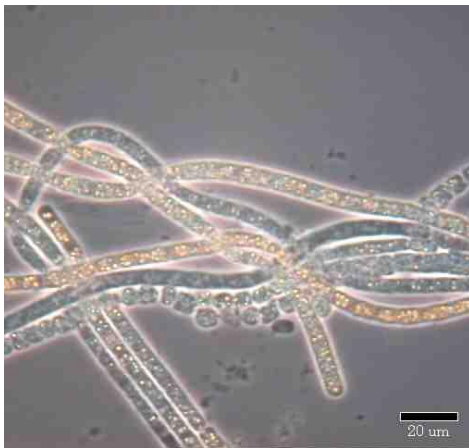
Het ontstaan van witte matten op de bodem van mariene systemen wordt vaker waargenomen, voornamelijk in stagnante systemen met lage zuurstofconcentraties en met een hoog gehalte aan organisch materiaal. Twee soorten zwavelbacteriën, die witte matten of strengen kunnen veroorzaken, zijn bekend; *Thioploca* spp. en *Beggiatoa* spp. (Fenchel and Bernard 1995; Jørgensen and Gallardo 1999; Musmann, Schulz et al. 2003). Van deze bacteriën komt de eerste voornamelijk voor langs de Pacifische kust van Zuid-Amerika (Jørgensen and Gallardo 1999) en wordt de tweede over de hele wereld gevonden (<http://www.csc.noaa.gov/>).

Beggiatoa soorten (Figuur 2.4) worden zowel in kustgebieden als in de diepzee aangetroffen. Ook worden ze vaak gevonden bij zogenaamde 'hydrothermal vents'. Dit zijn plekken op de oceaانبodem waar hete waterstromen met grote hoeveelheden zwavel en andere 'giftige' stoffen uit de aardkorst komen. Ze hebben dan ook een voorkeur voor vervuild water, met veel organisch afval, zoals rioolozingen, en worden daarom vaak gezien als een indicatorsoort voor vervuiling in mariene systemen (<http://en.wikipedia.org/wiki/Beggiatoa>).



Figuur 2.4 *Beggiatoa* spp. op de oceaانبodem (Bron: <http://www.whitesandbay.org/>)

Beggiatoa spp. komt voor als enkele cel, maar ook in filamenten van enkele tientallen cellen samen (Figuur 2.5). De bacterie oxideert zwavelelementen als energiebron. Meestal wordt hiervoor waterstofsulfide gebruikt, ook wel zwavelwaterstof genoemd. Bij dit proces wordt sulfaat gevormd: $\text{H}_2\text{S} + 2 \text{O}_2 = \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$. Omdat de bacterie hiervoor zowel zuurstof als waterstofsulfide nodig heeft leeft de bacterie op het grensvlak van zuurstof en sulfide. Meestal bevindt dit grensvlak zich in de bodem en sulfide oxiderende bacteriën zoals *Beggiatoa* spp. komen dan ook in grote getale voor in mariene kustsedimenten zonder witte matten op het sedimentoppervlak te vormen (Mussmann, Schulz et al. 2003). Pas wanneer het grensvlak van zuurstof en sulfide boven of op het sedimentoppervlak komt te liggen, worden de bacteriekolonies zichtbaar (Fenchel and Bernard 1995). De matten worden gevormd zodat van onder makkelijk zwavelwaterstof kan worden ingevangen en van boven het weinige zuurstof, dat zich nog in de waterkolom bevindt. Naast dat de bacterie dus een indicator is voor slechte waterkwaliteit en zuurstofloosheid is de verwachting dat de bacterie het probleem eerder vergroot dan verkleint door het laatste zuurstof uit het water te verbruiken.



Figuur 2.5 Strengen van *Beggiatoa* cellen (Bron: <http://filebox.vt.edu/>)

2.4 Probleemdefinitie Grevelingenmeer

Stratificatie en zuurstofloosheid van diepe putten wordt als een van de grote problemen in de Grevelingen gezien. De laatste jaren blijken effecten van zuurstofloosheid niet beperkt te blijven tot slechts de diepe putten, maar lijkt de kwaliteit van het gehele meer achteruit te gaan. Voor het huidige beheer van de Grevelingen is het streven om niet meer dan 5% van de bodem zuurstofarm te laten worden en dit streven wordt al enkele jaren niet gehaald (Lengkeek, Bouma et al. 2007). Bovendien is zuurstofarm gedefinieerd als een zuurstofconcentratie kleiner dan 3 mg/l. Sterfte van bijvoorbeeld oesters, een belangrijk product uit de Grevelingen, treedt echter al op bij concentraties die kleiner zijn dan de 5 mg/l en concentraties van lager dan 6 mg/l zijn vaak al beperkend voor organismen. In 2005 en 2006 is een aanzienlijk deel van de gecultiveerde oesters in de Grevelingen gestorven als gevolg van zuurstofloze condities. Aangezien de Grevelingen meer dan 500 ha oesterperceel herbergt en deze percelen meestal tussen de vijf en tien meter diepte liggen, lijken de lage zuurstofconcentraties in de Grevelingen geen lokaal probleem van de diepe putten meer te zijn.

Daarnaast wordt de aanwezigheid van witte matten op de bodem van het meer geconstateerd. Ook dit beperkt zich niet tot de diepe putten. De witte matten worden aangetroffen tot op een diepte van 5 meter, voornamelijk aan de oostzijde van het meer (Lengkeek, Bouma et al. 2007). Het voorkomen van de witte matten wordt gerelateerd aan ophoping van organisch materiaal, maar hiervoor zijn geen directe metingen beschikbaar. Ook van de verspreiding van de witte matten zijn geen integrale opnames bekend, noch in ruimte, noch in tijd.

Diverse aspecten van de probleemstelling met betrekking tot waterkwaliteit en ecologische toestand zijn nu geïdentificeerd:

- a Stratificatie
- b Lage zuurstofconcentraties in de zomer in het hele meer
- c Voorkomen van witte matten op de bodem van het meer (en het ontbreken van bodemleven op deze plekken)
- d Beschikbaar en hoeveelheid organisch materiaal
- e Sterfte van oesterpercelen

Nog niet eerder ter sprake gekomen is de geconstateerde overlast van zeesla, voornamelijk in de vorm van ophoping en stankoverlast achter vooroeververdedigingen bij recreatiegebieden. Dit rapport doet verder geen onderzoek naar deze problematiek.

Hoewel het duidelijk is dat bovenstaande aspecten niet los van elkaar gezien mogen worden, is bij de start van de studie niet op voorhand duidelijk wat de sturende factor(en) is (zijn). Sommige van de geïdentificeerde problemen zijn het gevolg van andere. Bij een analyse van oplossingen dient daarom veel aandacht te worden besteed aan het onderscheiden van oorzaak en gevolg. In hoofdstuk 6 komen wij hierop terug, omdat dan naast metingen ook met modelanalyse verkregen kennis beschikbaar is voor een nadere analyse.

3 Het hydrodynamisch model

3.1 Inleiding en aanpassingen

In deze studie is gebruikt gemaakt van een hydrodynamisch model dat in een vorige studie is opgezet en gekalibreerd (WL | Delft Hydraulics 2006). Aan het model zijn kleine, vooral software-technische wijzigingen aangebracht, maar de opzet is niet wezenlijk veranderd. Voor de volledigheid is in Appendix B de beschrijving van het hydrodynamisch model toegevoegd. In dit hoofdstuk wordt volstaan met een beknopt overzicht van de wijzigingen en een korte presentatie van het kalibratieresultaat.

De simulaties voor hydrodynamica en waterkwaliteit zijn uitgevoerd voor het jaar 2000 (WL | Delft Hydraulics 2006). Voor dit jaar waren zowel goede kalibratiedata beschikbaar als gegevens van de externe factoren, zoals meteorologische condities en concentraties van de lozingen.

Wijzigingen in hydrodynamisch model van de Grevelingen ten opzichte van eerdere opzet:

- a De belangrijkste wijziging betreft een update in de Delft3D-FLOW software in de tussenliggende periode waarbij een fout in de code is hersteld. De fout had betrekking op de berekening van de watertemperatuur en in het bijzonder op de warmteuitwisseling tussen het water en de atmosfeer. Door het herstel van de fout kan nu gerekend worden met de standaard waarden voor het Stanton en het Dalton getal, waarmee het model veel beter aansluit bij fysisch realisme.
- b Aanpassen van 'enkelvoudige' cellen in de onderste laag. In een z-lagen schematisatie is het mogelijk dat een rekencel geen horizontale buren heeft en dus alleen in de verticaal verbonden is met een andere rekencel. Per definitie heeft dit tot gevolg dat uitwisseling met de omgeving alleen via diffusie plaatsvindt en dat de stroomsnelheid nul is. Dit kan storende consequenties hebben voor bijvoorbeeld lokale ophoping van materiaal of onrealistische verlaging van de zuurstofconcentratie. Om dit te voorkomen is ervoor gezorgd dat een cel in de onderste laag altijd verbonden is met ten minste een van zijn buurcellen.
- c Ten behoeve van de koppeling van het hydrodynamisch model aan het GEM model is een aantal wijzigingen aangebracht, die vooral tot gevolg hebben dat in GEM makkelijker en flexibeler gewerkt kan worden. De wijzigingen hebben geen wezenlijk effect op de hydrodynamische resultaten.
 - Brouwerssluis als debietrand in plaats van lozing (vanwege numerieke stabiliteitscriteria kon hierdoor in GEM met een tijdstap van 1 uur in plaats van circa 1 minuut gerekend worden)
 - Polderlozingen zijn iets verschoven om ervoor te zorgen dat zij in een scenario met meer getij niet in droogvallende cellen blijken te vallen
 - Neerslag, verdamping en afstroming toegevoegd als puntbronnen in plaats van ruimtelijk verdeeld

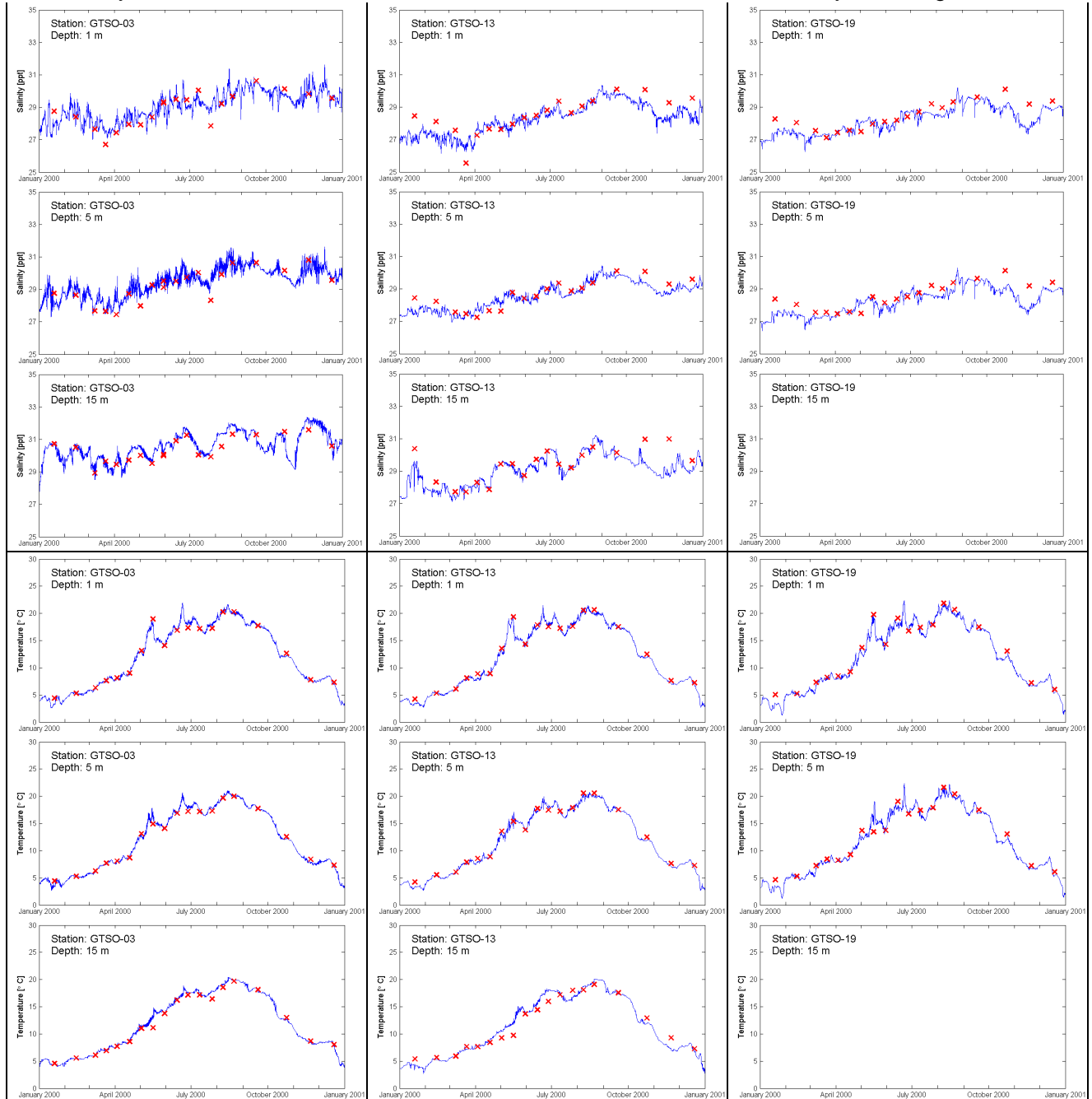
3.2 Kalibratie

3.2.1 Tijdreeksen

West: Nabij Brouwersdam

Midden: Dreischor

Oost: Nabij Grevelingendam

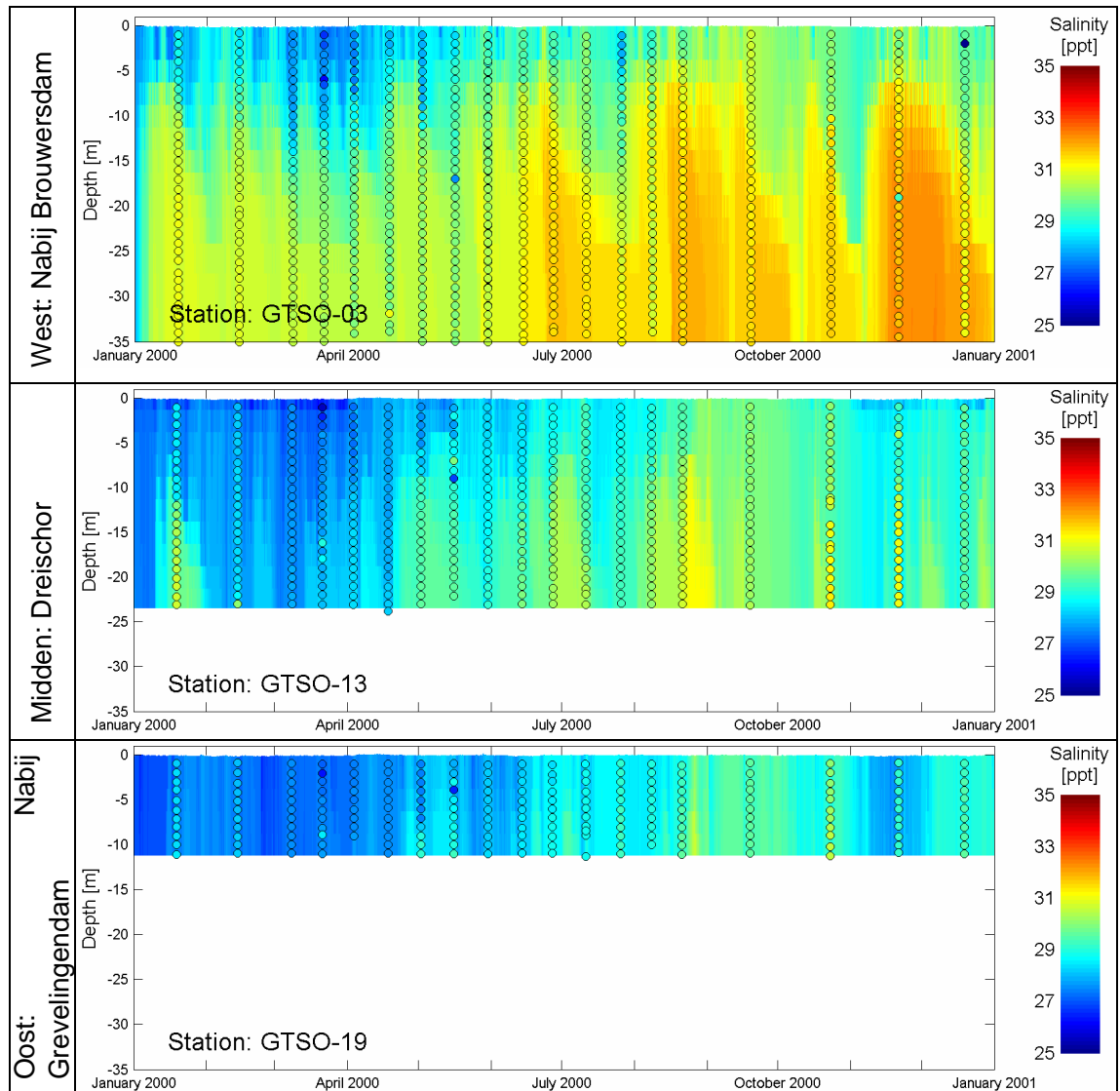


Figuur 3.1 Gemeten en berekende saliniteit (bovenste rij, in ppt) en temperatuur (onderste rij, in °C) in het westen, midden en oosten van het Grevelingenmeer in het kalibratiejaar 2000

De overeenkomst tussen gemeten en berekende saliniteit en temperatuur is over het algemeen zeer goed (Figuur 3.1). In het midden en oosten wordt de saliniteit in het najaar onderschat, hetgeen ook in WL | Delft Hydraulics (2006) werd geconstateerd. In het najaar ontbreken gegevens van de Brouwerssluisdebieten. In het model zijn deze

als nihil verondersteld. Als deze aanname onjuist is en er in werkelijkheid wel een significant debiet was, wordt in het model de grootte van de zouttong onderschat waardoor deze niet het midden en oosten van het meer bereikt.

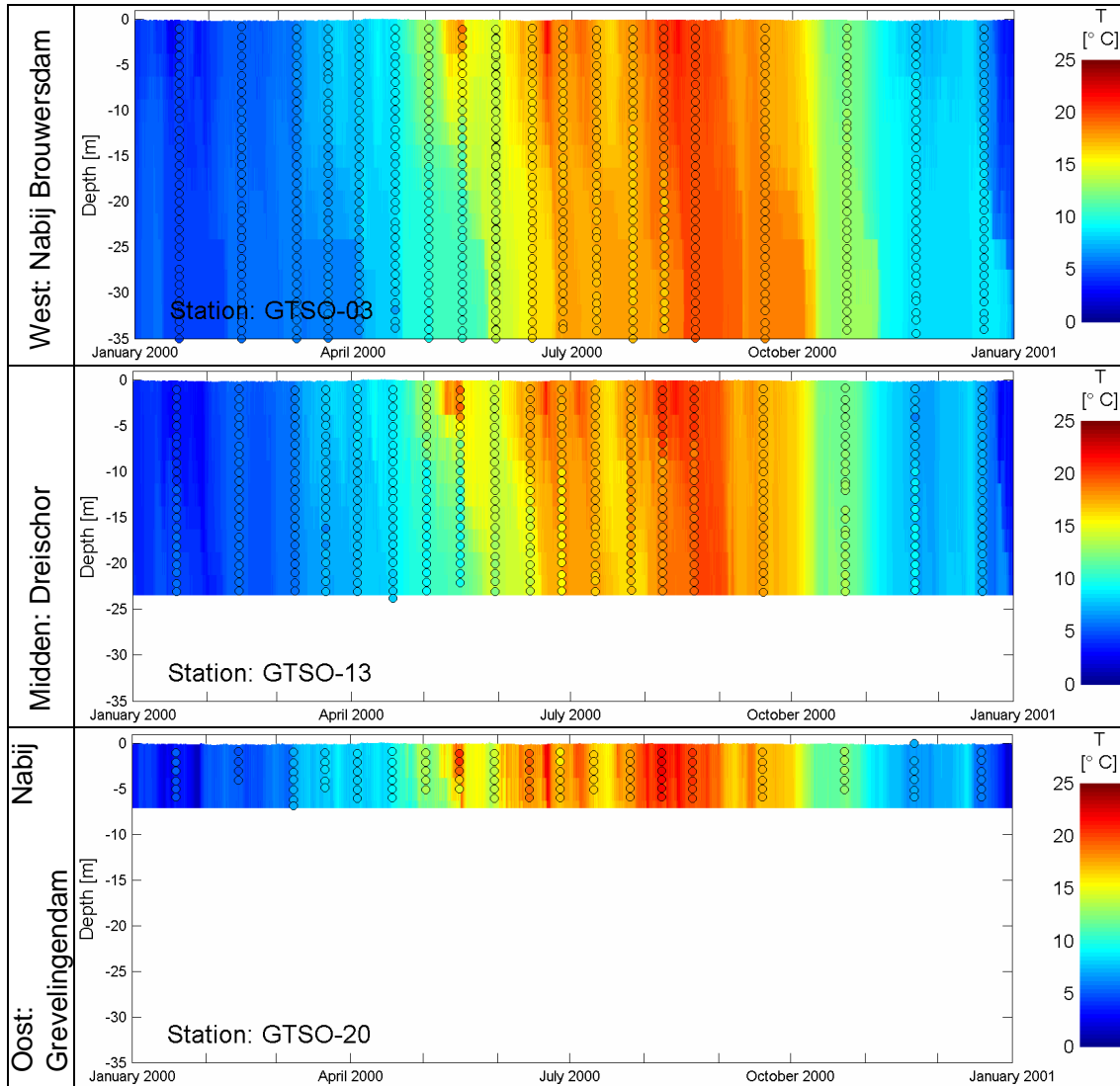
3.2.2 Verloop in diepte en tijd (z-t diagrammen)



Figuur 3.2 Gemeten en berekende profielen van saliniteit (in ppt) in het westen, midden en oosten van het Grevelingenmeer in het kalibratiejaar 2000

In Figuur 3.2 is voor een selectie van drie GTSO-stations het gesimuleerde zoutgehalte geplot als functie van de diepte en de tijd. In de open bolletjes zijn de gemeten waarden geplot. De gesimuleerde waarden komen goed overeen met de metingen, zowel wat betreft het tijdsverloop als wat betreft de reproductie van stratificatie. In Figuur 3.3 is hetzelfde gedaan voor de temperatuur. Ook hier is de overeenkomst met de metingen zeer goed.

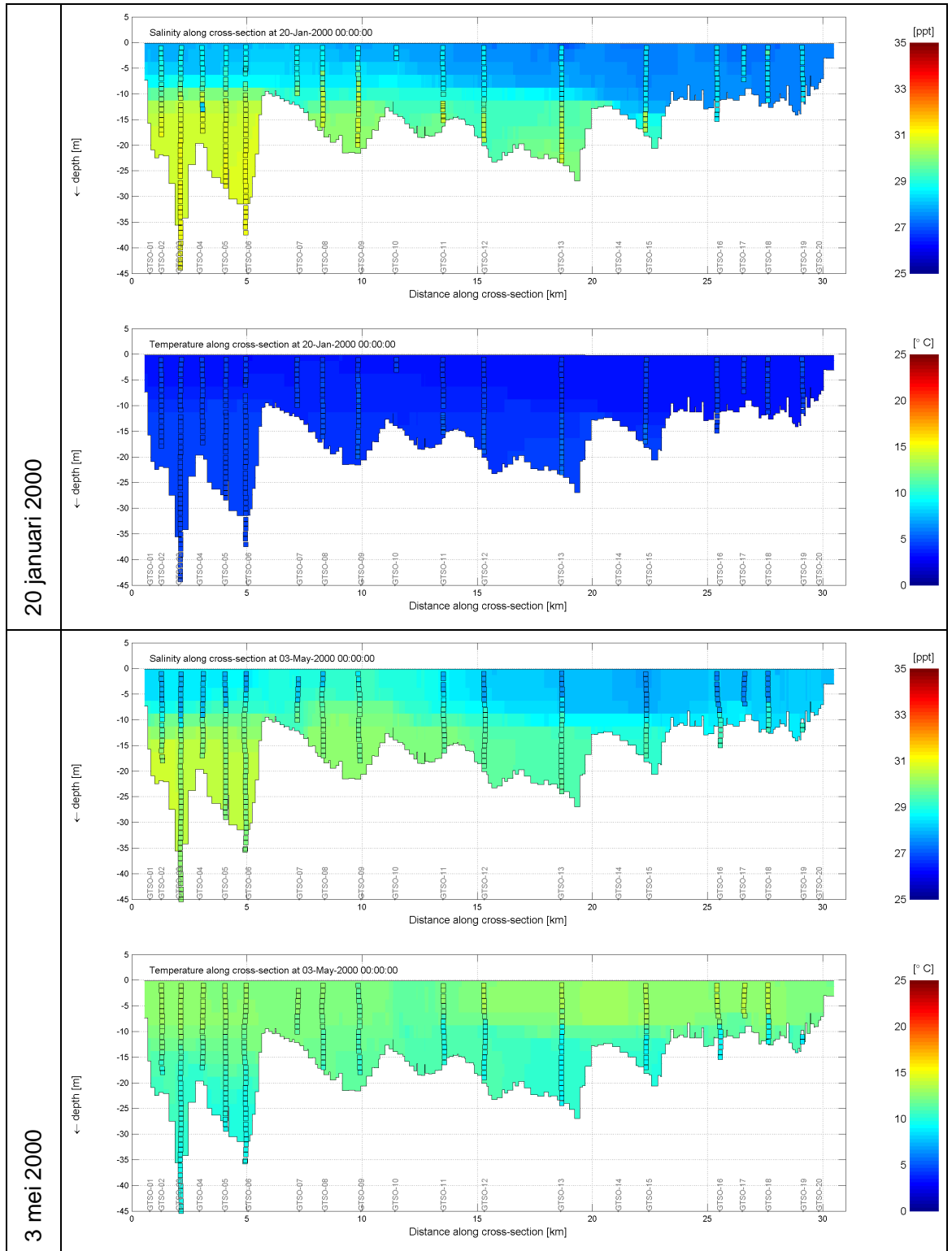
Diagrammen voor de overige GTSO-stations zijn te vinden op de bijgesloten CD.

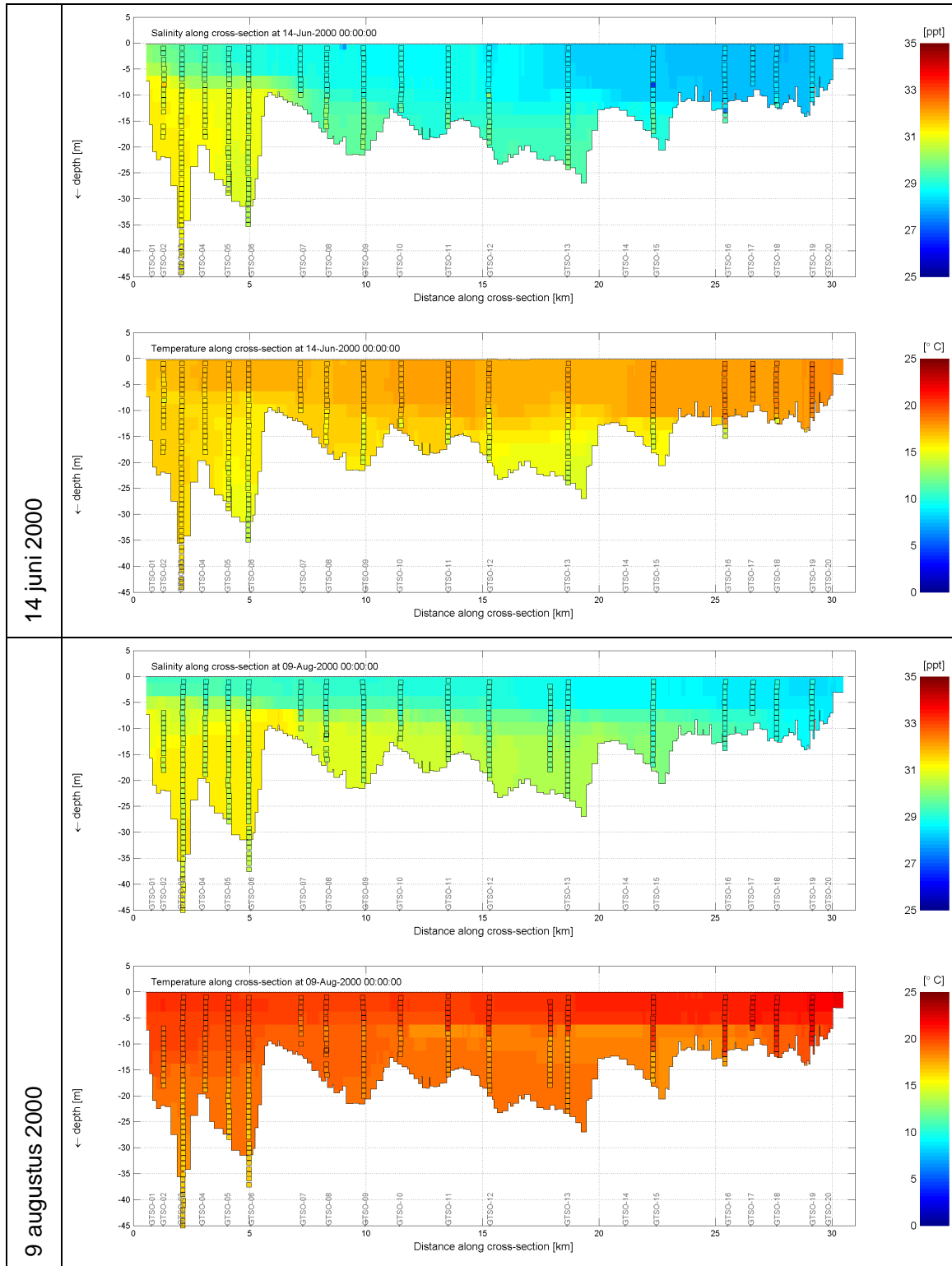


Figuur 3.3 Gemeten en berekende profielen van temperatuur (in °C) in het westen, midden en oosten van het Grevelingenmeer in het kalibratiejaar 2000

3.2.3 Dwarsdoorsneden

In Figuur 3.4 is voor verschillende tijdstippen het zoutgehalte en de temperatuur in een dwarsdoorsnede door het model geplot. De locatie van de dwarsdoorsnede is weergegeven in Figuur 2.2. De gemeten waarden zijn in de open bolletjes geplot. Ook hier blijkt een goede overeenkomst met de metingen wat betreft stratificatie en de ruimtelijke variatie daarin.





Figuur 3.4 Gemeten en berekende profielen van saliniteit (in ppt) en temperatuur (in °C) op vier verschillende dagen in het kalibratiejaar 2000 – de dwarsdoorsnede volgt de (zuidelijke) geul van het Grevelingenmeer

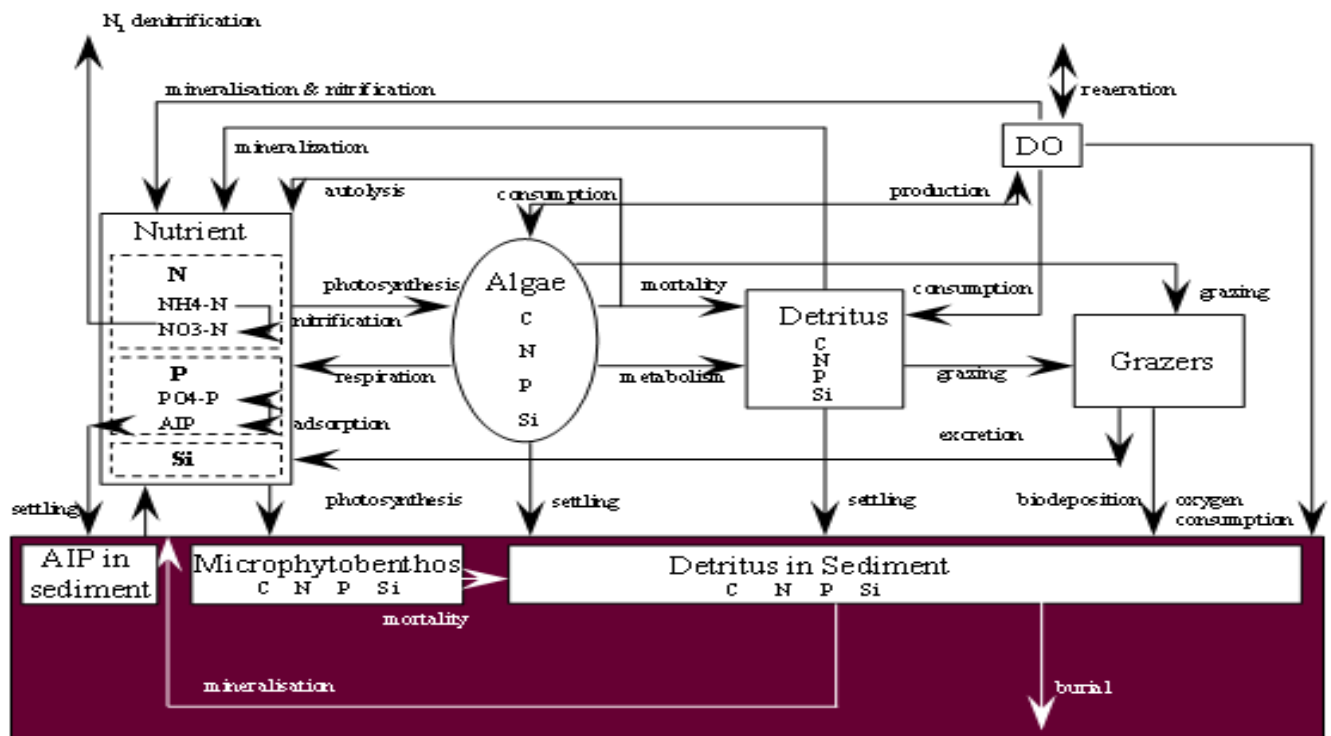
4 Generiek Ecologisch Model Grevelingenmeer

4.1 Inleiding

Het Generiek Ecologisch Model (GEM) berekent de concentraties van nutriënten (nitraat, ammonium, ortho-fosfaat, silicium), opgelost zuurstof, zoutgehalte, fytoplankton (diatomeeën, flagellaten, dinoflagellaten en *phaeocystis*), en detritus. Het GEM model maakt gebruik van de waterbeweging zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. Daarnaast bestaat de invoer in GEM uit meteorologische condities, initiële waarden, concentraties op open randen, polderlozingen, en enkele andere forceringen.

In GEM worden (onder andere) de volgende processen gesimuleerd:

- fytoplankton processen: primaire productie, respiratie en mortaliteit
- extinctie van licht
- afbraak van organisch materiaal in water en sediment
- nitrificatie en denitrificatie
- reaeratie
- sedimentatie en resuspensie
- begraving van organisch materiaal



Figuur 4.1 Schematisch overzicht van gemodelleerde stoffen en de belangrijkste (proces)fluxen in GEM

4.2 Modelopzet en -instellingen

4.2.1 Waterbeweging, rekenrooster en rekenschema

Bij de toepassingen van het GEM model wordt de waterbeweging gebruikt zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. Ook is dezelfde schematisatie gebruikt als in het hydrodynamisch model. Wel zijn de twee bovenste lagen van het rekenrooster

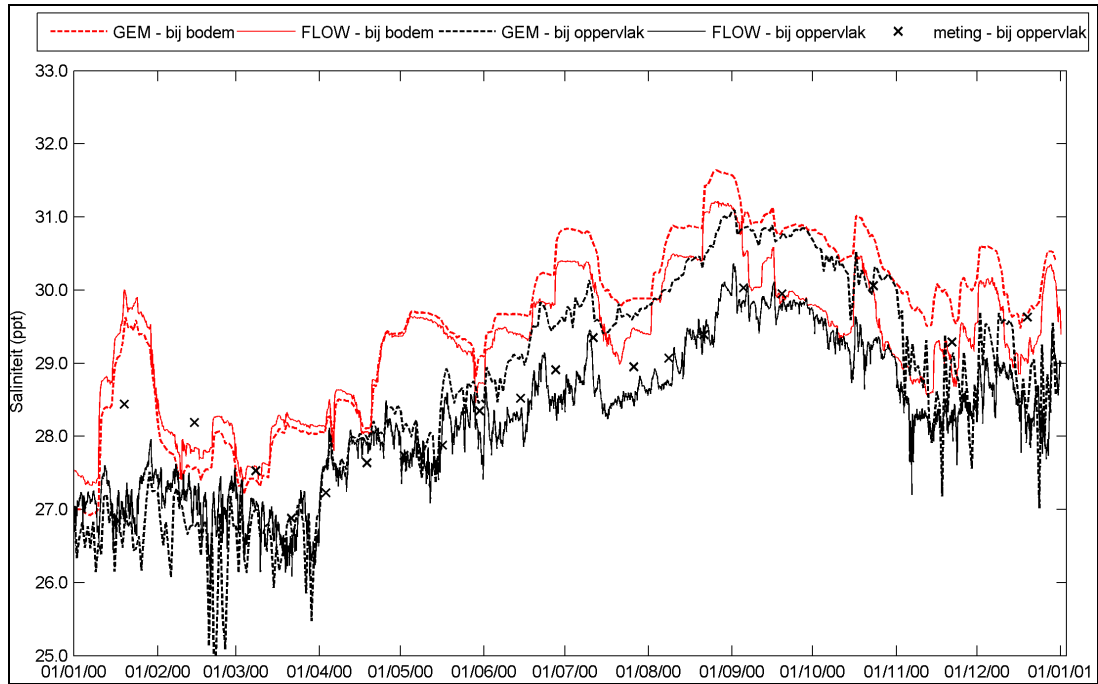
samen gevoegd om numerieke problemen met het (bijna) droogvallen van gridcellen te voorkomen. De bovenste laag krijgt daarmee een dikte van circa 3,5 meter. Aangezien de waterkolom over deze diepte goed gemengd is, wordt van deze samenvoeging geen significant effect verwacht op de berekende waarden. Verder zijn om dezelfde reden alle cellen waarin de waterdiepte gedurende het jaar kleiner worden dan 1 cm op inactief gezet. Dit betekent dat er in deze cellen geen processen meer plaatsvinden, maar er blijft wel transport optreden. Tabel 4.1 geeft een overzicht van een aantal technische gegevens van het GEM model.

Tabel 4.1 Technische gegevens van de modellering: rekengrid, numerieke methode, tijdstap en rekentijd

aantal lagen	13
aantal cellen per laag	4103
totaal aantal cellen	53339
aantal actieve cellen (transport)	8934
geïnactiveerde cellen (< 1 cm waterdiepte)	479
rekschema	16 (impliciet, upwind horizontaal, centraal verticaal, iteratieve solver)
tijdstap	1 uur
begintijd	1 januari 2000
eindtijd	30 december 2000

Voor de kalibratie van het GEM-model is allereerst een vergelijking gemaakt tussen het zoutgehalte berekend in het hydrodynamisch model (FLOW), en het zoutgehalte berekend in het GEM model (Figuur 4.2). Deze vergelijking wordt uitgevoerd om aan te tonen dat het GEM model met voldoende nauwkeurigheid de resultaten van het FLOW model reproduceert. Factoren die bij de koppeling een rol spelen, zijn tijdstap van de koppeling, tijdstap van de berekening, horizontale en/of verticale aggregatie van het rekenrooster en het numerieke schema.

De figuur laat zien dat de overeenkomst tussen beide zoutgehalten redelijk goed is. In de periodes januari tot juni en november tot december is de overeenkomst goed. In de zomerperiode is het zoutgehalte van de GEM-som in de oppervlaktelaag ongeveer 1 ppt hoger dan die van de hydrodynamicaberekening. Ondanks diverse testen is hiervoor geen sluitende verklaring gevonden. Het vermoeden bestaat dat een andere (numerieke) afhandeling van verdamping tussen FLOW en GEM de oorzaak is van de verschillen, aangezien verdamping in de zomer het grootst is en water aan de oppervlaktelaag onttrekt (en dus het zoutgehalte verhoogt). Voor vervolgberekeningen in het kader van de komende planstudie zal de afwijking nader onderzocht moeten worden.



Figuur 4.2 Vergelijking van saliniteit berekend met Delft3D-FLOW en met GEM voor locatie Dreischor

4.2.2 Meteorologische condities

De meteorologische aansturing bestaat uit windsnelheid en instraling. De windsnelheid komt overeen met die in het hydrodynamische model en wordt per uur opgegeven. Data voor instraling aan het oppervlak is afkomstig uit een eerdere GEM studie voor het Veerse Meer (WL | Delft Hydraulics, 2006), en wordt in de vorm van een voortschrijdend weekgemiddelde per dag opgegeven. Deze gegevens zijn afkomstig van KNMI station Vlissingen.

Regen en verdamping worden meegenomen in het hydrodynamisch model als toevoer en afvoer van water. Omdat er geen nutriënten in regen- en verdampingswater aanwezig zijn, beïnvloeden deze processen de nutriëntenconcentraties indirect door verdunning en 'indikking'.

4.2.3 Initiële condities

Als initiële condities worden de concentraties gebruikt die aan het begin van het jaar gemeten zijn in DONAR locatie Dreischor:

Zoutgehalte = 27,0 ppt
 NH_4^+ = 0,15 mg-N/l
 NO_3^- = 0,35 mg-N/l
 PO_4 = 0,06 mg-P/l
Si = 0,50 mg-Si/l

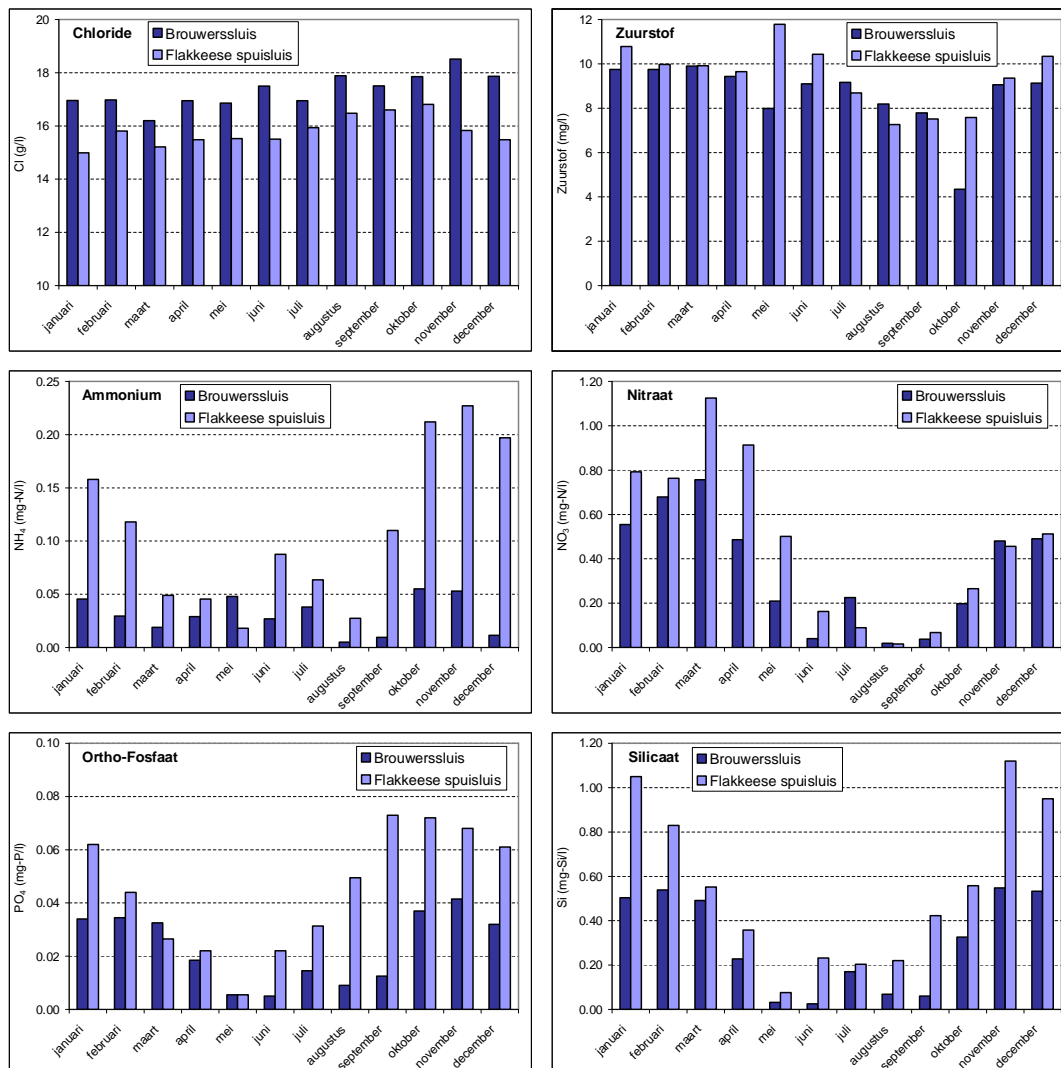
Omdat er van detritus geen metingen beschikbaar zijn, zijn de initiële concentratie en verdeling hiervan bepaald door het model eerst een keer te draaien zodat het zich in kan spelen. De resulterende detritusconcentraties in waterkolom en bodem zijn vervolgens gebruikt als initiële waarden.

4.2.4 Open randen

De Grevelingen is geen gesloten systeem, maar heeft in het westen een uitwisseling met de Noordzee via de Brouwerssluis, en in het oosten een uitwisseling met de Oosterschelde via de Flakkeese Spuisluis. Deze uitwisselingen worden meegenomen in het model als open randen. Figuur toont de toegepaste randconcentraties.

De algen- en nutriëntenconcentraties die via de Brouwerssluis het model binnenkomen, bestaan uit het gemiddelde van gemeten waarden van de twee meest dichtbij gelegen meetstations, namelijk Goeree 6 km en Schouwen 10 km. Het zoutgehalte komt van metingen genomen bij de Brouwersdam zelf. In oktober 2000 is een lage zuurstofconcentratie op de Noordzee gemeten (4,3 mg/l). Deze waarde is onveranderd op de modelrand toegepast, maar betwijfeld mag worden hoe reëel deze waarde is.

De nutriëntenconcentraties die op Flakkeese Spuisluis staan, zijn gebaseerd op de meetwaarden in Zijpe wat het dichtstbij gelegen meetpunt is waarvoor data beschikbaar zijn voor het jaar 2000. De hier binnenkomende algenconcentraties zijn onbekend en zijn op 0 gezet.



Figuur 4.3 Toegepaste concentraties van chloride, opgelost zuurstof en nutriënten op instroom door de Brouwerssluis en door de Flakkeese Spuisluis

4.2.5 Lozingen

Er zijn vijf locaties met polderlozingen in de Grevelingen. Dit zijn Battenoord, Dreischor, Herkingen, De Kille, en Den Osse¹. De lozingsgegevens zijn maandgemiddelden gebaseerd op metingen en zijn ook gebruikt in een 1D modelstudie van de Zeeuwse Delta waar het Grevelingenmeer onderdeel van uitmaakt (WL | Delft Hydraulics 2007a).

De (nutriënten)belasting via regenwater is niet in het model opgenomen. Gezien de lange verblijftijd in het meer kan deze omissie gezien worden als een onderschatting van de belasting. Desondanks wordt het onwaarschijnlijk geacht dat deze omissie van significant belang is voor de uitkomst van deze studie.

4.2.6 Overige forceringen

Omdat de concentratie anorganisch slib in de Grevelingen erg laag en weinig variabel is, is besloten om deze niet dynamisch te modeleren. In plaats daarvan is een constante concentratie van 4 mg/l opgelegd in het hele systeem. Hoewel deze keuze voor de huidige situatie voldoende representatief is, is het denkbaar dat de slibconcentratie in toekomstige scenario's met grotere doorstroming en stroomsnelheden hoger komt te liggen, en dan wellicht wel invloed heeft op bijvoorbeeld het doorzicht en dus op de primaire productie. Deze variatie is niet in de modelscenario's meegenomen.

Verder is een forcing-functie met betrekking tot de fosfaatvastlegging en -nalevering door de bodem opgelegd. Deze opgelegde fosfaatfunctie is gekalibreerd op basis van de ortho-fosfaatconcentraties gemeten in locatie Dreischor.

In tegenstelling tot het zoutgehalte wordt de watertemperatuur niet opnieuw berekend in het GEM Grevelingenmeer. Voor de watertemperatuur zijn de door FLOW berekende waarden overgenomen in GEM.

4.2.7 Graas en begraving

De kalibratie is begonnen met de standaard processen en parameterwaarden van het GEM model voor de Noordzee (Los *et al.* 2008), aangezien verwacht mag worden dat de Noordzee en het Grevelingenmeer qua processnelheden grotendeels vergelijkbaar zullen zijn. Een uitzondering moet worden gemaakt voor het modelleren van graas dat in de Deltawateren een grotere rol speelt dan in de Noordzee.

Hoewel het mogelijk is om graas door filter-feeders expliciet in GEM te modelleren, werd een complexe(re) modellering onverantwoord geacht vanwege het ontbreken van (meet)gegevens over de actuele graas in het Grevelingenmeer. In plaats van expliciete graasmodellering is de sedimentatiesnelheid van algen gebruikt om op een eenvoudige manier het verdwijnen van algen uit de waterkolom door graas mee te nemen in het model. Door de sedimentatiesnelheid te verhogen, verdwijnen namelijk meer algen uit de waterkolom. Met de gekozen eenvoudige modellering wordt recht gedaan aan de beperkt beschikbare kennis, terwijl graas niet verwaarloosd wordt. Voor de komende planstudie wordt aanbevolen om nader onderzoek te doen naar de te verwachten

1. In dit rapport is het kalibratiejaar 2000 gekozen. Inmiddels wordt Den Osse afgeleid naar de Oosterschelde (Burghsluis).

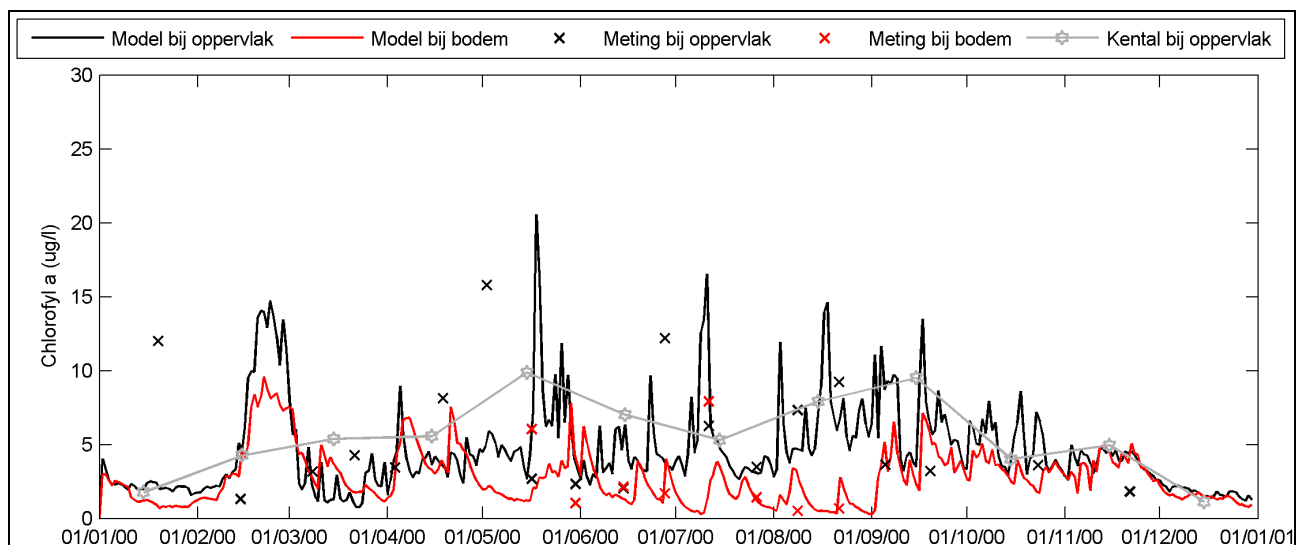
ontwikkeling van graas voor de verschillende oplossingsrichtingen. Op basis van een uitwerking en analyse van beschikbare BIOMON data en een vergelijking met overeenkomstige watersystemen moet meer duidelijkheid kunnen geven over de te verwachten ontwikkeling van grazers.

Voor de begravingsnelheid ('burial rate') is afgeweken van de standaard Noordzee instelling. Deze procesparameter wordt vaak als gebiedsspecifiek beschouwd en is daarom een veel gebruikte kalibratieparameter. Begraving is een verdwijnterm voor detritus naar diepere lagen in de bodem, waarmee detritus voorgoed onttrokken wordt aan het systeem. Begraving beïnvloedt daarmee indirect de zuurstofvraag van de bodem en het beschikbaar komen van nutriënten door mineralisatie van organisch materiaal in de bodem en is daarom van belang. In paragraaf 4.4 komen we hierop terug.

4.3 Kalibratieresultaten

4.3.1 Nutriënten, chlorofyl, zuurstof en doorzicht op DONAR locatie Dreischor

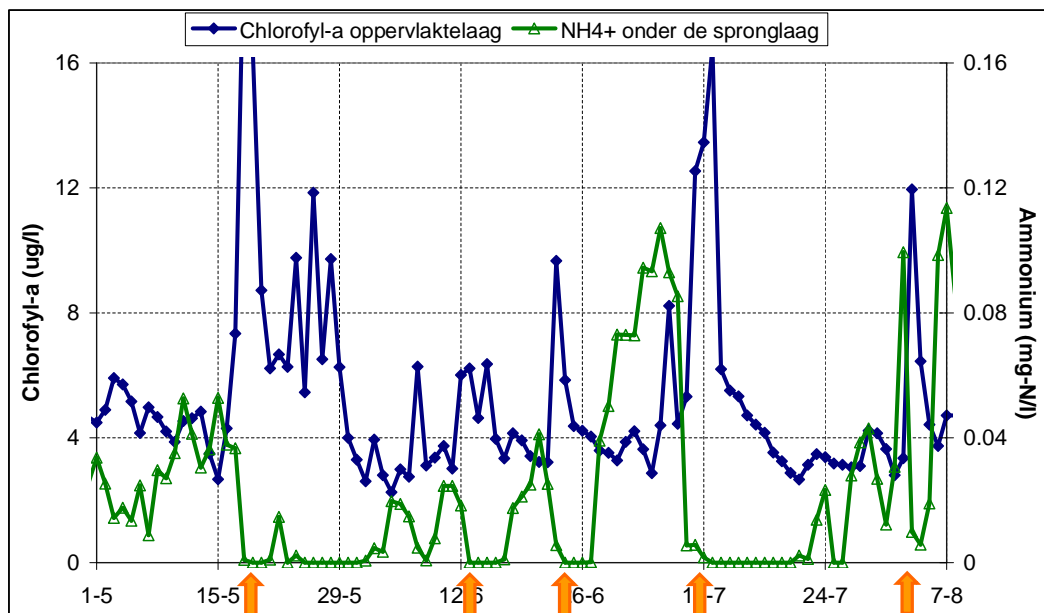
Voor kalibratie op basis van nutriënten, chlorofyl, zuurstof, en doorzicht/extinctiv zijn er DONAR metingen beschikbaar voor de locatie Dreischor (GTSO 13), zowel in de oppervlaktelaag als vlak boven de bodem. In appendix E.1 zijn de modelresultaten vergeleken met deze metingen. Ook zijn in deze figuren gemiddelde waarden (kentallen) te zien die zijn berekend op basis van metingen uit de periode 2000-2006.



Figuur 4.4 Berekende chlorofyl-a concentratie (kalibratie) vergeleken met metingen op locatie Dreischor

Het gemiddelde niveau wordt door het model goed voorspeld (Figuur 4.4). Hoewel de timing van de pieken niet altijd overeenkomt met de metingen, laat het model ook zien dat er een aanzienlijke, hoog frequente variatie gedurende het jaar bestaat. In het model wordt deze stijging veroorzaakt door momenten van opmenging van de waterkolom, waardoor nutriënten (in het bijzonder stikstof) beschikbaar komen in de oppervlaktelaag. Dit wordt geïllustreerd door de ammoniumconcentratie in de onderlaag en de chlorofylconcentratie in de oppervlaktelaag uit te zetten (Figuur 4.5). Chlorofyl vertoont een piek op het moment dat de ammoniumconcentratie onder de spronglaag

afneemt. Deze afname wordt veroorzaakt door opmenging van de waterkolom en het beschikbaar gekomen stikstof wordt vrijwel direct voor primaire productie verbruikt.



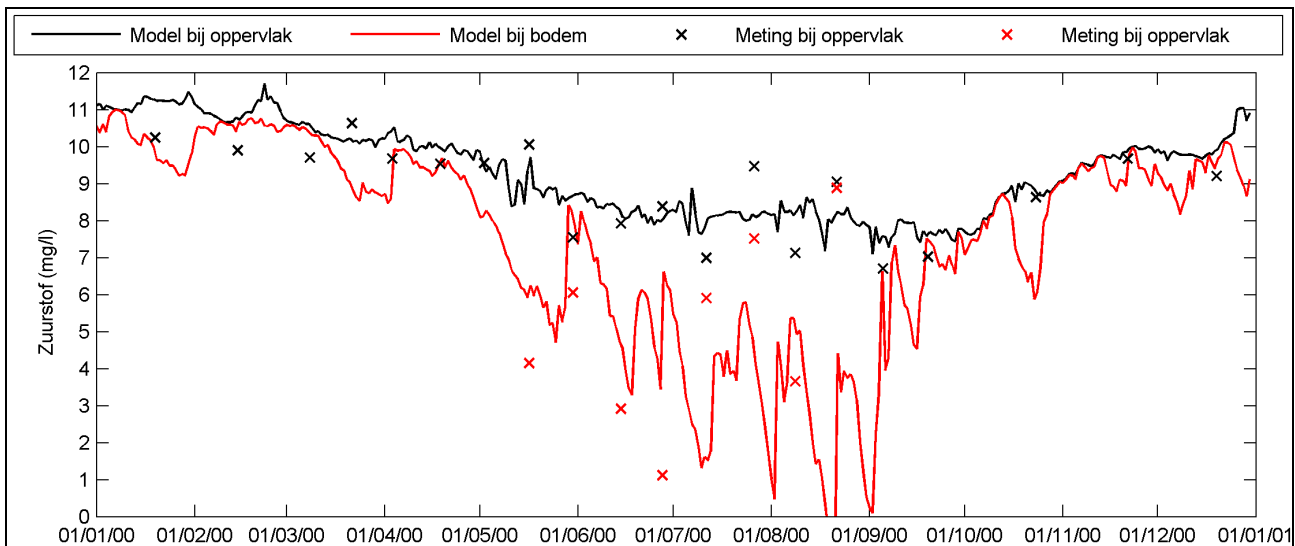
Figuur 4.5 Berekende Chlorofyl-a concentratie in de oppervlaktelaag en ammoniumconcentratie onder de spronglaag op locatie Dreischor – de pijlen geven moment van opmenging van de waterkolom aan, waarbij chlorofyl toeneemt door het beschikbaar komen van stikstof vanonder de spronglaag

In tegenstelling tot de metingen laat de modelberekening in februari een voorjaarspiek zien, waar chlorofyl oploopt tot circa 15 $\mu\text{g/l}$. De voorjaarsbloei wordt uiteindelijk door fosfaat gelimiteerd. Tijdens de kalibratie is veel tijd besteed aan het verklaren van deze voorspelde voorjaarspiek. In de winter zijn voldoende nutriënten aanwezig en treedt derhalve geen nutriëntlimitatie op. Er is echter zo weinig licht dat de balans van groei, respiratie, sterfte en sedimentatie/gras negatief is. De hoeveelheid algen neemt niet toe door lichtlimitatie. Zodra de dagen lang genoeg worden, ontstaat een moment waarop lichtlimitatie in de ondiepe gebieden opgeheven wordt. In de diepe, verticaal goed gemengde gebieden wordt lichtlimitatie later opgeheven. In GEM is er dan geen rem op groei, totdat een andere limitatie – in dit geval dus door fosfaat – de groei beperkt. Deze cyclus is plaatsafhankelijk want diepte, extinctie en misschien ook beschikbaar fosfaat variëren. Horizontale menging zorgt voor nivellering.

Op basis van de metingen is niet duidelijk waarom in werkelijkheid geen voorjaarsbloei optreedt. De metingen geven immers ook aan dat er voldoende nutriënten aanwezig zijn. Een hypothese is dat er in de winter in de ondiepe gebieden meer slib aanwezig is in de waterkolom door hogere windsnelheden en dus golven, waardoor er meer lichtlimitatie is dan in het model aangenomen. Hierdoor zou de voorjaarsbloei beperkt en/of uitgesmeerd kunnen worden. Deze hogere slibconcentraties worden niet in de metingen gevangen, omdat locatie Dreischor in de diepe geul ligt. Daarnaast speelt mogelijk gras een rol. Aangezien de graasdruk in de winter relatief laag is, wordt niet verwacht dat dit een sturende factor is.

Zuurstof

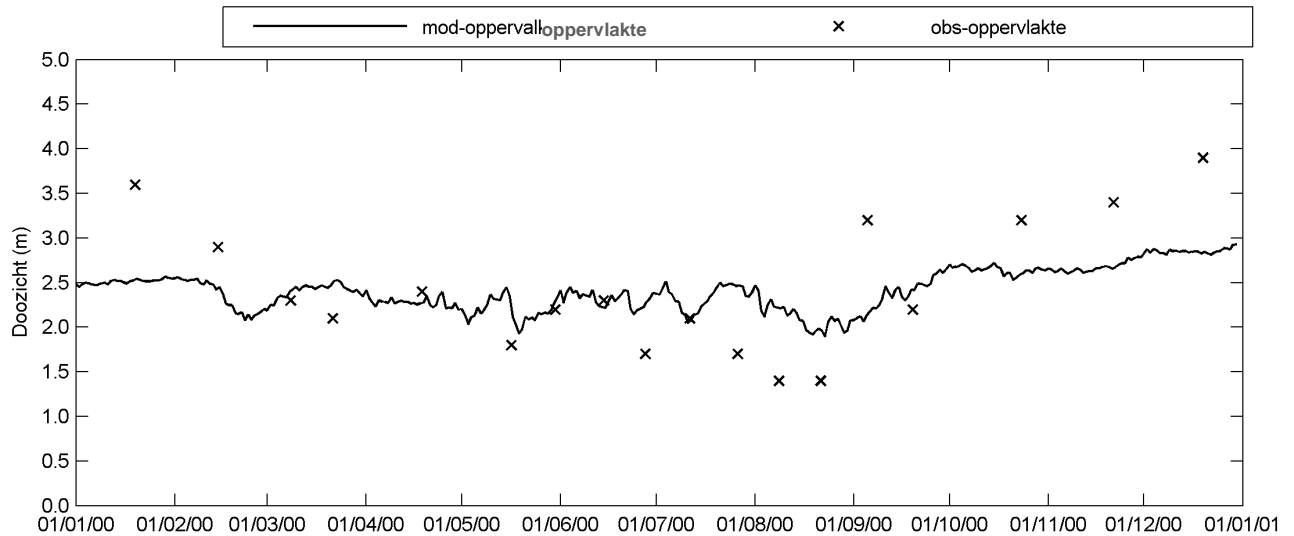
Zuurstofconcentraties bij zowel het oppervlak als bij de bodem komen goed overeen met de metingen. Zowel de metingen als het model laten tijdelijke stratificatie en tussentijdse opmenging zien. Tussen bodem en oppervlak zijn in de zomer duidelijke verschillen te zien, wat gerelateerd is aan de stratificatie van het meer. De modellering van zuurstof wordt uitgebreider besproken in de volgende paragraaf wanneer de modelresultaten met de GTSO metingen worden vergeleken.



Figuur 4.6 Berekende opgelost-zuurstofconcentratie (kalibratie) vergeleken met metingen op locatie Dreischor

Doorzicht

Het gemeten doorzicht is hoger in het winterhalfjaar en lager in het zomerhalfjaar. Het gemiddelde doorzicht laat geen duidelijke trend zien door het jaar heen, maar gemiddeld zit het model in de goede range. In het model is een verhoogde achtergrondextinctie toegepast ($0,2 \text{ m}^{-1}$ in plaats van $0,08 \text{ m}^{-1}$) om de voorjaarsbloei van fytoplankton te vertragen en te temperen. Het gebruik van deze verhoogde waarde heeft als nevengevolg dat het doorzicht in de winter onderschat wordt.



Figuur 4.7 Berekend doorzicht (kalibratie) vergeleken met metingen op locatie Dreischor

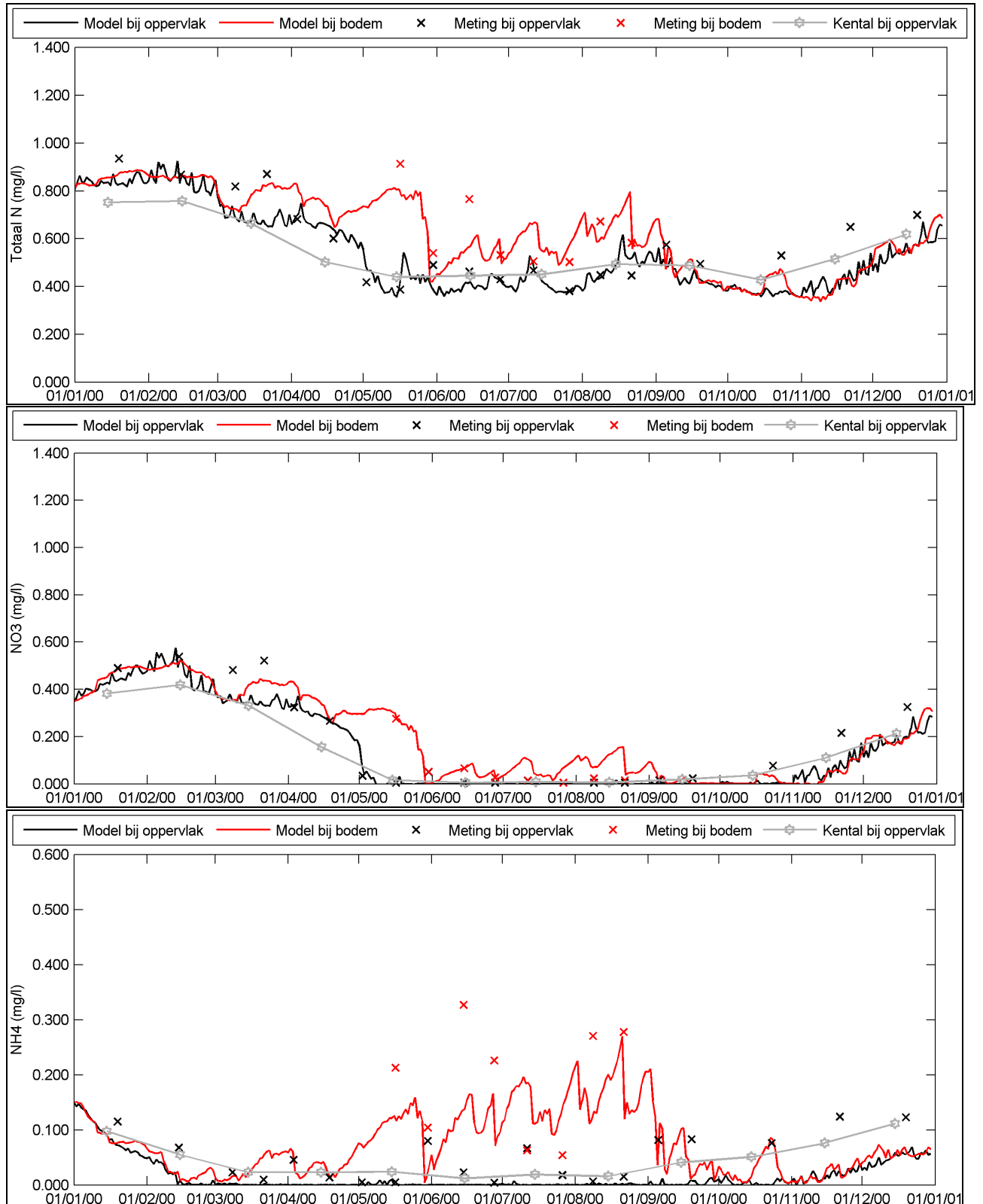
Nutriënten: totaal stikstof, nitraat en ammonium

Figuur 4.8 vergelijkt de gemeten en berekende totaal stikstof-, nitraat- en ammoniumconcentraties. De overeenkomst is goed voor totaal stikstof en nitraat. Voor ammonium is de overeenkomst ook goed, maar ammonium wordt te vroeg in de winter/het voorjaar uitgeput. Stikstof is gedurende de hele zomerperiode limiterend in de bovenlaag van de waterkolom. Dit is terug te vinden in zowel metingen als modelresultaten.

Voor de berekening van totaal stikstof is een refractaire stikstoffractie van 0,3 mg-N/l aangenomen. Deze fractie blijkt uit de metingen, aangezien er tussen totaal stikstof en de som van nitraat, ammonium en organisch stikstof een vrijwel constant verschil van 0,2 en 0,4 mg-N/l blijkt te zitten. Dit refractair stikstof bestaat grotendeels uit opgelost organisch stikstof (DON). Aangezien deze fractie geen rol speelt bij primaire productie en/of zuurstofvraag, is ter kalibratie een vaste waarde van 0,3 mg-N/l gehanteerd.

In de balansen (appendix F.1) is te zien dat ongeveer 55% van stikstof in de waterkolom uit mineralisatie afkomstig is (15,4 g-N/m²/j); de rest komt het systeem binnen via de modelrand (Brouwerssluis, bijna 40%) en een veel kleiner gedeelte via de polderlozingen (5%). Als de netto (=instroom minus uitstroom = 2,6 g-N/m²/j) in plaats van de bruto instrooming via de Brouwerssluis wordt genomen, blijkt dat mineralisatie ongeveer 6 keer zo groot is als de netto belasting vanaf de Noordzee. Interne turn-over van stikstof is derhalve zeer belangrijk in het Grevelingenmeer.

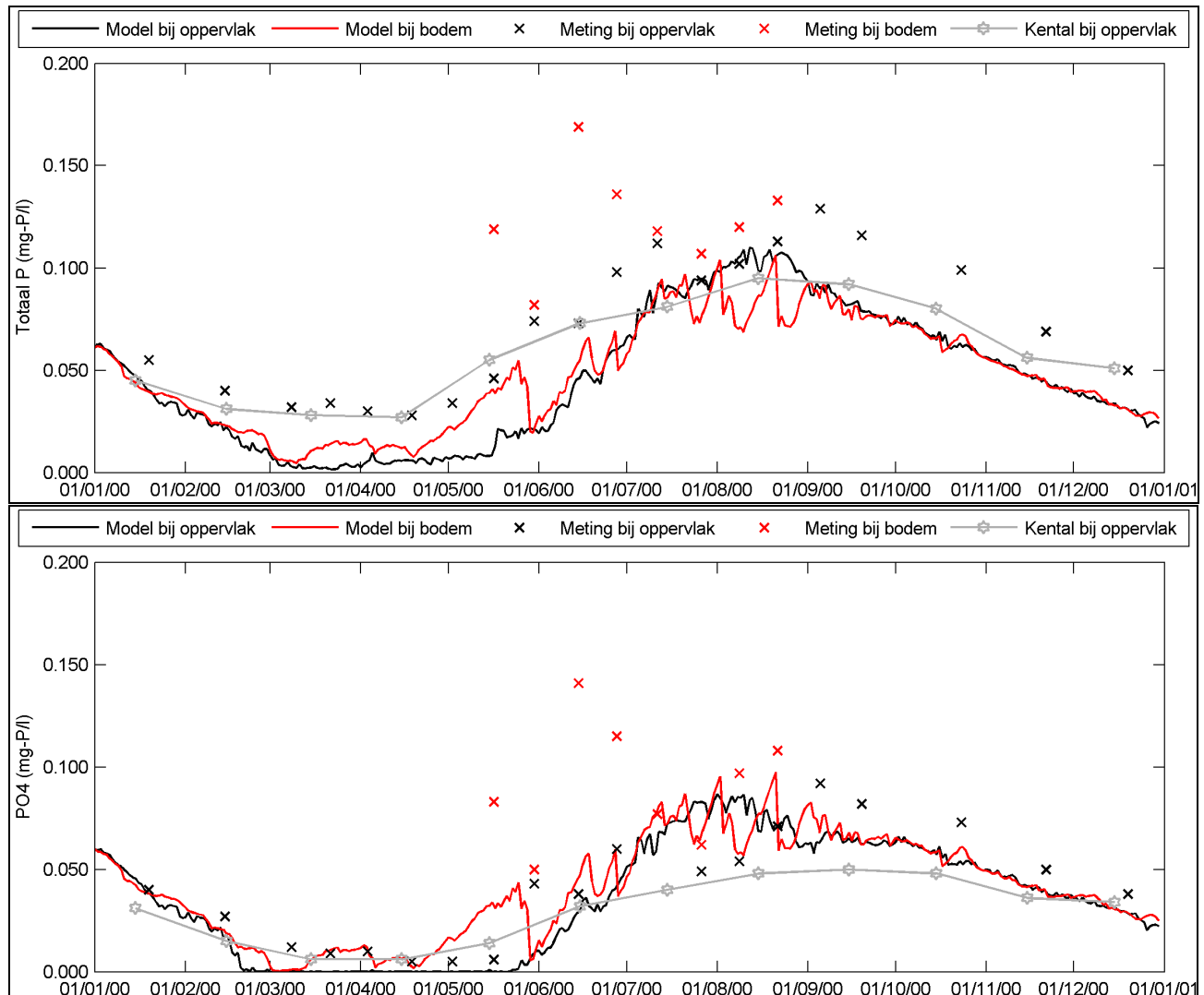
Stikstof verdwijnt voornamelijk uit de waterkolom door sedimentatie en graas, denitrificatie in de waterkolom is hier van ondergeschikt belang. Waarschijnlijk is denitrificatie wel belangrijk in het sediment, maar aangezien dit proces niet expliciet wordt gemodelleerd is de verdwijnterm door denitrificatie (dat wil zeggen de omzetting naar N₂) meegenomen in de begravingsterm.



Figuur 4.8 Berekende totaal-stikstof-, nitraat- en ammoniumconcentratie (kalibratie) vergeleken met metingen op locatie Dreischor

Nutriënten: totaal fosfaat en ortho-fosfaat

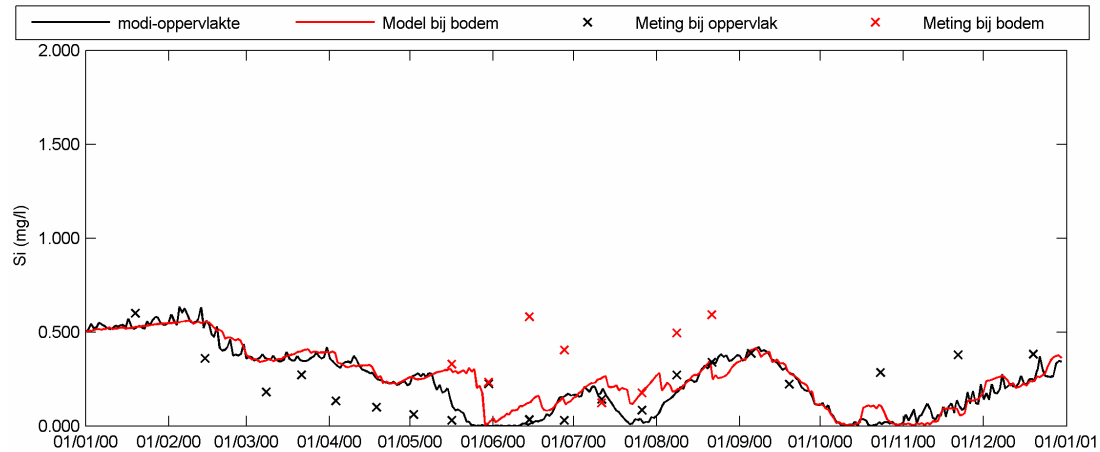
Fosfaat is gelimiteerd in het voorjaar doordat het tijdens deze periode wordt vastgelegd in de bodem, en heeft een piek in de zomer doordat het fosfaat uit de bodem dan weer vrijkomt onder invloed van lage zuurstofconcentraties (fosfaatnalevering).



Figuur 4.9 Berekende totaal-fosfaat- en ortho-fosfaatconcentratie (kalibratie) vergeleken met metingen op locatie Dreischor

De gesimuleerde fosfaatconcentraties komen goed overeen met de gemeten waarden, wat voor een deel te danken is aan de kalibratie van de opgelegde naleveringsfunctie van fosfaat. De netto input van fosfaat in de waterkolom via deze gekalibreerde nalevering is ongeveer 20% van de totale fosfaatinput in de waterkolom. Er komt dus meer fosfaat vrij uit de bodem, dan dat er wordt geadsorbeerd. Dit suggereert dat de bodem fungeert als een fosfaatleverancier.

Silicaat neemt aan het begin van het jaar geleidelijk af, wat te maken heeft met de groei van diatomeeën, maar is niet voor langere tijd limiterend. Met name de toename in augustus/september wordt zeer goed gereproduceerd, terwijl de afname in januari-mei niet exact het gemeten patroon volgt. De timing van silicium uitputting is wel goed.



Figuur 4.10 Berekende opgelost-siliciumconcentratie (kalibratie) vergeleken met metingen op locatie Dreischor

4.3.2 Zuurstofconcentraties GTSO locaties

Voor de verdere kalibratie van het GEM-model van de Grevelingen is gebruik gemaakt van de GTSO metingen met betrekking tot zuurstofconcentratie. Een overzicht van de GTSO-meetlocaties is te zien in Figuur 2.2. In appendix C.1 zijn de gemeten zuurstofconcentraties (gekleurde bolletjes) en de gemodelleerde zuurstofprofielen (achtergrondkleur) te zien voor drie locaties. Dit zijn de locatie Dreischor (GTSO 13), een westelijke en tevens diepste locatie vlakbij de Brouwerssluis (GTSO 3), en een oostelijke en relatief ondiepe locatie bij de Flakkeese Spuisluis (GTSO 19). De zuurstofprofielen van de overige GTSO-locaties zijn niet in dit rapport afgedrukt, maar zijn te vinden in op de bijgeleverde CD.

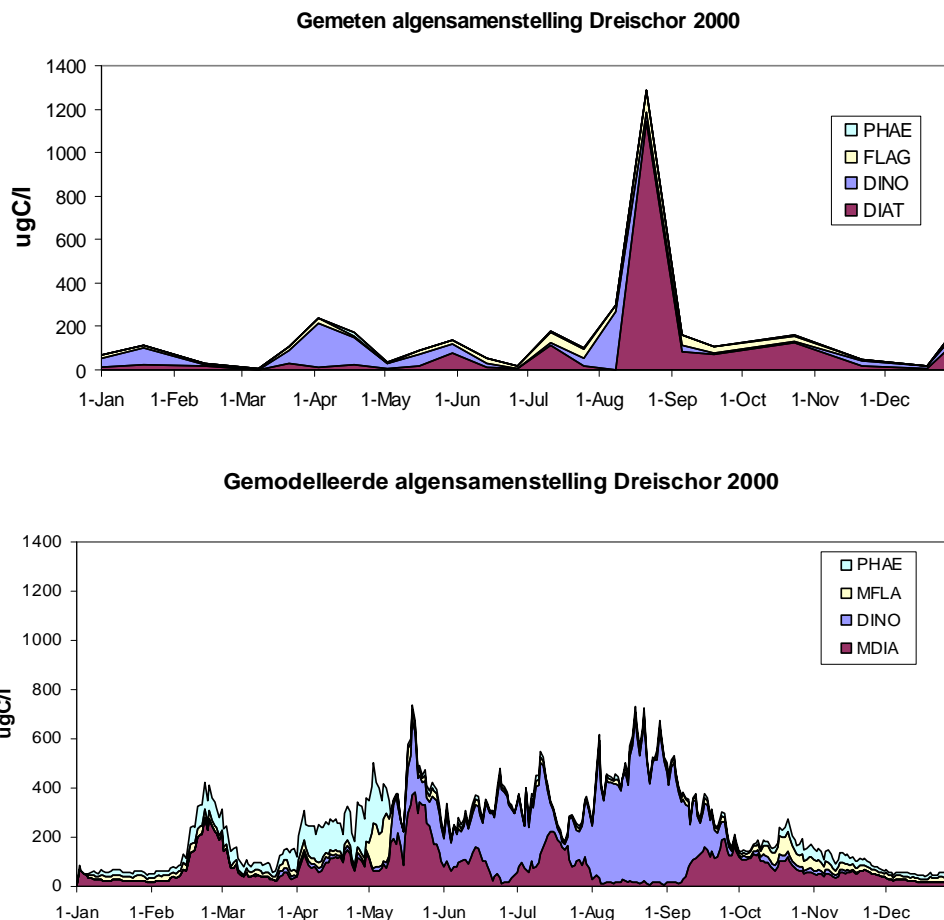
De zuurstofprofielen laten zien dat het model in staat is om zuurstofloosheid in de diepere lagen van het systeem te simuleren. De periodes van zuurstofloosheid treden met name op in de zomerperiode. Zowel uit de metingen als uit het model komt naar voren dat periodes enkele dagen tot enkele weken kunnen duren. Er is dus geen sprake van permanent zuurstofloze condities, maar van meerdere kortere periodes. Windmenging speelt hierin een dominante rol. In een periode van lagere windsnelheden (waarschijnlijk in combinatie met een hogere luchttemperatuur en zoninstraling) kan stratificatie optreden met lagere zuurstofconcentraties tot gevolg. Als na enige tijd weer hogere windsnelheden optreden, kan de stratificatie worden afgebroken. Hoewel de metingen en modelresultaten niet 100% met elkaar overeenkomen, wat te zien is aan kleurverschillen tussen de bolletjes (metingen) en de achtergrondkleur (modelresultaat), is de overeenkomst zeker goed te noemen. Het grootste verschil bestaat uit verschuivingen in de tijd van de modelresultaten ten opzichte van de metingen. Ook is in sommige gevallen de werkelijke zuurstofloosheid iets sterker aanwezig dan die in de modelresultaten.

In de zuurstof-bodemkaart in appendix D.1 is te zien dat de zuurstofproblematiek het grootste is in de dieper gelegen gebieden zoals de geulen, het noordwestelijke gebied langs (het noordelijk deel van) de Brouwersdam en de Preekhilpolder, en het zuidoostelijke gebied langs de Grevelingendam.

4.3.3 algensamenstelling

Ten slotte zijn er ook DONAR-data beschikbaar voor de algengroepensamenstelling welke gemeten is in Dreischor (Figuur 4.2a). De metingen kunnen worden vergeleken met de gemodelleerde algensamenstellingen (Figuur 4.2b). Beide figuren laten geen duidelijk seizoenspatroon in de algensamenstelling zien. Dinoflagellaten (DINO) en diatomeeën (DIAT) zijn duidelijk de meest voorkomende soorten, die beide vrijwel het hele jaar aanwezig zijn in zowel de metingen als in de modelresultaten. Echter, in de metingen zijn diatomeeën het meest dominant, terwijl in het modelresultaten juist de dinoflagellaten duidelijker aanwezig zijn. Flagellaten (FLAG) zijn in zowel metingen als model het hele jaar aanwezig, maar slechts in zeer kleine hoeveelheden. *Phaeocystis* (PHAE) is niet gemeten maar komt in voor- en najaar wel voor in de modelresultaten, zij het in kleine hoeveelheden.

Het uitblijven van een duidelijk seizoenspatroon, en het tegelijkertijd voorkomen van de algentypes in vergelijkbare hoeveelheden, duidt er op dat de omstandigheden in het Grevelingenmeer door de tijd heen niet uitgesproken geschikt zijn voor een of ander algentype. Mogelijk bestaan er ook ruimtelijke verschillen in geschiktheid en dus in de groei van verschillende algentypes (bijvoorbeeld tussen diepe en ondiepe gebieden), waarna de algen door transport met elkaar gemengd worden. Een en ander maakt het model gevoelig voor kleine verschillen in nutriëntenconcentraties, omgevingscondities, en waterbeweging wat de verschillen tussen metingen en model zou kunnen verklaren (zie ook WL | Delft Hydraulics 2007b).



Figuur 4.11 Gemeten en gemodelleerde algensamenstelling in DONAR locatie Dreischor in 2000

4.4 Lessen uit de kalibratie

De kalibratie heeft een aantal lessen gebracht. Op basis van modelanalyse kunnen conclusies getrokken worden met betrekking tot het systeemgedrag van het Grevelingenmeer (zie hiervoor paragraaf 6.1). Daarnaast kunnen ook lessen met betrekking tot het modelgedrag getrokken worden die van invloed zijn op de toepasbaarheid van de resultaten en/of kunnen leiden tot aanbevelingen voor modelverbeteringen in de planstudie.

Primaire productie op ondiepe gebieden & Lichtklimaat

In tegenstelling tot de metingen berekent het GEM model een voorjaarspiek van chlorofyl-a. We hebben geconstateerd dat het model in februari/maart primaire productie berekent in de ondiepe gebieden. Er zijn geen veldmetingen bekend waardoor te staven is, waarom dit in de werkelijkheid niet lijkt te gebeuren. Misschien is er meer graas of is het troebeler in deze ondiepe gebieden. Het is dus niet mogelijk aan te wijzen of de modelformulering voor primaire productie aangepast zou moeten worden (bijvoorbeeld lagere groeiconstanten of een andere invloed van de temperatuur) of juist de modelformuleringen voor de omgevingsfactoren (graas, lichtklimaat, ...).

In dit GEM model hebben wij de oplossing gezocht in een verhoogde achtergrondsextinctie die niet consistent is met het gemeten doorzicht. Kortom, wij moeten concluderen dat geen consistente set modelparameters voor primaire productie en lichtklimaat is gevonden. De interactie tussen en de combinatie van ondiepe en diepe gebieden dient nader bekeken te worden in het GEM model.

Stikstoflimitatie & Begraving

Tijdens de kalibratie is gebleken dat de berekende chlorofylconcentratie en de primaire productie op jaarbasis voornamelijk bepaald worden door de beschikbaarheid van stikstof. Overigens is stikstoflimitatie in de zomer in overeenstemming met de metingen. Met name de begravingsterm bleek van relatief grote invloed. Zoals eerder gemeld is dit in het huidige model feitelijk een combinatie van denitrificatie en daadwerkelijke begraving, waarbij de eerste in werkelijkheid waarschijnlijk groter is dan de tweede. Aangezien metingen ontbreken om deze afzonderlijke fluxen te onderscheiden zal het lastig zijn om hier nauwkeuriger uitspraken over te doen.

5 Scenario's

5.1 Beschrijving van scenario's

Om de effecten van de verschillende sluizen en sluisbeheren te onderzoeken zijn in overleg met de opdrachtgever zeven scenario's gedefinieerd. In al deze zeven scenarioberekeningen is gebruik gemaakt van een synthetische getijdencyclus gebaseerd op een sinus met een periode van precies 24 uur in plaats van de werkelijke frequentie van circa 24,8 uur. Hiervoor is gekozen om de dagelijkse modelresultaten binnen een scenario beter met elkaar te kunnen vergelijken, omdat het getij met de synthetische sinus dan elke dag precies hetzelfde is. Uiteraard is ervoor gezorgd dat het getijdebiet gelijk blijft. Verder is aangenomen dat de Brouwerssluis in alle scenario's het gehele jaar openstaat, hetgeen overeenkomt met de huidige praktijk.

Huidige situatie (HS):

De synthetische sinus en de Brouwerssluis die het hele jaar openstaat, leiden tot verschillen ten opzichte van werkelijke situatie, en dus ook ten opzichte van het kalibratiescenario (hoofdstuk 4). Om de scenario's te kunnen vergelijken met de huidige situatie, is dit scenario doorgerekend op basis van een synthetische sinus en een open Brouwerssluis in het najaar. Dit scenario wordt de 'Huidige Situatie' genoemd. Voor het daggemiddeld debiet in dit scenario is uitgegaan van $125 \text{ m}^3/\text{s}$, wat dus niet afwijkt van de kalibratie.

Huidige situatie+ (HS+):

Vervolgens is een scenario doorgerekend waarin de autonome ontwikkeling van de Grevelingen is opgenomen, welke bestaat uit de ingebruikname van de Flakkeese Spuisluis. Hierbij is uitgegaan van een daggemiddeld debiet van $65 \text{ m}^3/\text{s}$. Het daggemiddeld debiet van de Brouwerssluis wordt hierdoor niet beïnvloed en blijft staan op $125 \text{ m}^3/\text{s}$.

Doorspoelscenario oost → west (DS):

In het doorspoelscenario is geprobeerd om de verversing van de Grevelingen zo efficiënt mogelijk te maken zonder grote infrastructurele aanpassingen. Er is gekozen voor doorspoeling van oost naar west, omdat dit overeenkomt bij de uitstroomrichting van de grote rivieren en daarmee beter aansluit bij estuariene dynamiek. Hiervoor is de capaciteit van de Flakkeese Spuisluis verdubbeld naar $135 \text{ m}^3/\text{s}$, en wordt deze alleen opengezet om water in de Grevelingen te laten. Verder is de capaciteit van de Brouwersdam aangepast naar $135 \text{ m}^3/\text{s}$, en wordt deze sluis alleen opengezet om water uit de Grevelingen naar de Noordzee te laten stromen.

Gedempt getij (GG):

In het gedempt getij scenario is de capaciteit van de Brouwerssluis 8 keer zo groot gemaakt. Dit resulteert in een getijslag van ongeveer een halve meter (tussen -35 cm en + 15 cm). De Flakkeese spuisluis houdt hierbij haar actuele capaciteit van $65 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gedempt getij 70Z:30N (GG*)

In dit scenario wordt het uitwisselingsdebiet door Brouwersdam ook 8 keer vergroot, maar het debiet wordt verdeeld over twee sluizen. 70% gaat via een vergrote spuisluis op de huidige locatie en 30% via een nieuw te bouwen sluis in het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam. De Flakkeese spuisluis behoudt een capaciteit van $65 \text{ m}^3/\text{s}$.

Maximaal getij (MG):

In het maximaal getij scenario is de capaciteit van de Brouwerssluis 20 keer zo groot gemaakt. Dit resulteert in een getijslag van circa 1 meter (tussen -70 cm en + 30 cm). Wederom houdt de Flakkeese spuisluis haar actuele capaciteit van 65 m³/s.

Noorderspuisluis (NS)

In dit scenario is wordt gespuid via een nieuw te bouwen sluis in het noordelijke gedeelte van de Brouwersdam met een capaciteit vergelijkbaar met 14 keer die van de huidige spuisluis. De huidige spuisluis behoudt hierbij haar capaciteit van 125 m³/s, en de Flakkeese spuisluis een capaciteit van 65 m³/s.

Tabel 5.1 Overzicht van scenario's

Scenario's Verkenning 'Grevelingen water en getij'										
ID	omschrijving	Brouwerssluis (m ³ /s daggem.)		Flakkeese Spuisluis (m ³ /s daggem.)		Noorderspuisluis		getijslag (cm) <i>Schatting</i>	Gem. waterstand streefpeil (cm NAP)	Intergetijde /areaal (ha) <i>schatting</i>
		in	uit	in	uit	in	uit			
1: HS	Huidig	125	125	0	0	0	0	5	-20	50
2: HS+	Huidig+ Scenario	125	125	65	65	0	0	10	-20	200
3: DS	Doorspoel Scenario	0	135	135	0	0	0	5	0	50
4: GG	Gedempt getij	1000	1000	65	65	0	0	50	-10	1000
5: MG	Maximaal Getij	2500	2500	65	65	0	0	100	-20	1900
6: NS	Noorderspuisluis	125	125	65	65	1750	1750	75	-20	1500
7: GG*	Gedempt getij (70Z:30N)	700	700	65	65	300	300	50	-10	1000

Toelichting:

- **Huidige situatie (HS)** zonder autonome ontwikkeling is nodig voor de kalibratie van het model
- **Huidige situatie (HS+)** = autonome ontwikkeling, dat wil zeggen met ingebruikname Flakkeese Spuisluis.
- **Doorspoelscenario (DS)** Middenstand op circa NAP, capaciteit FS verdubbeld, doorspoeling van Oost naar West
- **Gedempt getij (GG)** 8x huidig doorlaatmiddel en getijslag tussen -35 cm en +15 cm NAP
- **Maximaal getij (MG)** 20x huidig doorlaatmiddel met getijslag tussen +30 cm en -70 cm NAP
- **Noorderspuisluis1 (NS1)** 15x huidig doorlaatmiddel in het noordelijk deel van de Brouwersdam
- **Gedempt getij 70Z:30N (NS2)** 8x huidig doorlaatmiddel verdeeld over zuider- (70%) en noorderspuisluis (30%) in de Brouwersdam

5.2 Modelaanpak scenario's

Bij de berekening van de scenario's zijn alleen de debieten door de sluis/sluizen veranderd. Randvoorwaarden, lozingen, meteorologische condities, processen en parameterinstellingen zijn ongewijzigd ten opzichte van de kalibratie. Waar nodig is de bathymetrie lokaal aangepast om grote sluisdebieten te kunnen verwerken. Initiële condities zijn eveneens ongewijzigd. In het FLOW model is een jaar inspeeltijd voldoende om eventuele effecten van initiële condities op te heffen. In het GEM wordt geen jaar ingespeeld. De bodem die een langere verblijftijd en dus ook een langere aanpassingstijd heeft dan de waterkolom, heeft zich nog niet volledig kunnen aanpassen aan de gewijzigde omstandigheden. Dit zal enigszins van invloed zijn op de modelresultaten, maar verwacht wordt dat dit niet geldt voor de conclusies ten aanzien van de zuurstofhuishouding. Zoals zal blijken, is hiervoor namelijk de dynamiek

belangrijker dan de zuurstofvraag door de bodem. De effecten van deze aanname zullen in het vervolg van de planstudie nader bekeken moeten worden.

Het is te verwachten dat de randvoorwaarden veranderen als gevolg van de grotere uitwisseling tussen het Grevelingenmeer en de Noordzee (dat wil zeggen dat de concentratie op de Noordzee beïnvloed wordt door de uitstroming vanuit het Grevelingenmeer) en dat de slibconcentratie hoger wordt met gevolgen voor het lichtklimaat. Tot slot zou de nalevering van fosfaat uit de bodem kunnen veranderen. Geen van deze effecten is in de huidige modellering meegenomen.

5.3 Kalibratie vs. Huidig

In appendix C.2 zijn de zuurstofprofielen weergegeven van het Huidige Scenario (HS). Deze zuurstofprofielen komen goed overeen met die van het Kalibratie Scenario (KS, zie appendix C.1), en de synthetische getijcyclus lijkt dus geen wezenlijk verschil te veroorzaken ten opzichte van de werkelijke getijcyclus. Wel wijken beide scenario's duidelijk van elkaar af in de periode oktober-november. Er is in deze periode een verschil te zien in met name het zuurstofgehalte, wat in het HS duidelijk hoger ligt dan in het KS. Dit is met name zichtbaar op locatie GTSO-03, waar in het KS in november zelfs zuurstofloosheid optreedt, wat niet het geval is in het HS. Dit verschil tussen beide scenario's wordt veroorzaakt doordat de Brouwersluis in het KS in het najaar gesloten is, terwijl in het HS de sluis het hele jaar open staat. Ook de ruimtelijke verdeling van zuurstofloosheid (zie de bodemkaart in appendix D.2) komt vrijwel geheel overeen met die van het KS.

In appendix E.2 zijn de chlorofyl- en nutriëntenconcentraties gegeven, en in appendix F.2 de nutriëntenbalansen. Zowel de concentraties als de balansen van het HS komen zeer goed overeen met die van het KS, en vallen de curves van beide scenario's vrijwel geheel over elkaar heen. De zeer kleine verschillen in het najaar zijn weer terug te leiden zijn op het verschil in opening van de Brouwersluis.

5.4 Huidig+ vs. Huidig

De zuurstofprofielen van het Huidig Scenario + (HS+) zijn te vinden in appendix C.3. De verschillen in zuurstofgehalten tussen wel (HS+) of geen (HS) gebruik van de Flakkeese Spuisluis zijn klein. Wat zuurstofgehalte betreft, zijn er vrijwel alleen verschillen te vinden ten oosten van de locatie GTSO-15, dus dicht bij de Flakkeese Spuisluis zelf. In die zuidoostelijke gebieden ligt het zuurstofgehalte in de periode mei-juli boven dat van het HS scenario (zie bv GTSO-19). De Flakkeese Spuisluis heeft dus een positief maar lokaal effect op de zuurstofloosheid in het voorjaar. Dat dit effect slechts lokaal optreedt, is ook goed te zien in de zuurstof-bodemkaart in appendix D.3.

Ook wat de chlorofyl- en nutriëntenconcentraties (appendix E.3) betreft, zijn er weinig verschillen tussen het HS en HS+. De stikstofpiek komt iets hoger te liggen dankzij de vergrote toevoer van stikstof door de Flakkeese spuisluis. In de stikstofbalans (appendix F.3) is inderdaad een toename te zien van de stikstofimport via de randen (van 43% naar 55% van de totale stikstofimport). De verhoogde stikstofconcentraties leiden tot een kleine toename in chlorofylgehalte. De fosfaatpiek komt juist iets lager te liggen dan in het HS. Dit ligt niet aan veranderingen van de fosfaat in- of uitvoer via de randen of aan mineralisatie- of sedimentatie processen (zie de balansen in appendix F.3), maar is te verklaren met een toename in de algenbiomassa.

5.5 Doorspoel vs. Huidig

De zuurstofprofielen van het Doorspoel Scenario (DS) zijn gegeven in appendix C. Het effect van het DS op zuurstofgehalte is tweeledig. In het westen – dus dichterbij de Brouwerssluis – is een duidelijke verslechtering te zien, met langdurige periodes van zuurstofloosheid (zie bv. GTSO-03). In het oosten, dichterbij de Flakkeese Spuisluis (zie bv. GTSO-19), is echter een verbetering te zien. In het middengedeelte van het meer treden zuurstofarme condities minder vaak op, maar als ze optreden duurt het langer. Deze ruimtelijke verschillen in effect zijn ook te zien in de bodem-zuurstofkaart in appendix D.4.

Wat de nutriënten (appendix E.4) betreft, is er vooral sprake van een opvallend grote toename in stikstofconcentratie. Dit is te danken aan een hogere stikstofconcentratie op de Oosterschelde dan op de Noordzee (zie appendix F.4). De toename van stikstofconcentratie leidt met name in het voor- en najaar tot een grotere algengroei, met daaraan gekoppeld een afname in de fosfaatconcentratie en een toename in de chlorofyl-concentratie. In de zomerperiode vallen verder de grotere pieken van zowel stikstof als fosfaat nabij de bodem op. Dit is het gevolg van een sterkere en langer durende stratificatie waardoor nutriënten die uit het sediment nageleverd worden, kunnen opbouwen onder de spronglaag. Omdat de periode van stratificatie langer duurt, duurt de opbouw langer en worden de pieken hoger.

5.6 Gedempt getij vs. Huidig

Zuurstofprofielen behorende bij het Gedempt Getij (GG) scenario zijn te vinden in appendix C.5. Het GG laat wat zuurstofgehalten betreft een duidelijke verbetering zien ten opzichte van het HS over de gehele lengte van de geul. In de zomer treden er af en toe nog periodes met zuurstofloosheid op, maar deze periodes zijn slechts van korte duur. Opvallend in de zuurstof-bodemkaart in appendix D.5 is de duidelijke verslechtering van het gebied langs het noordelijk deel van de Brouwersdam.

De stikstofpiek (appendix E.5) ligt duidelijk hoger en de fosfaatpiek ligt duidelijk lager ten opzichte van het HS. Verder gaat de NH_4^+ concentratie iets omlaag. De chlorofylconcentraties komen iets hoger te liggen.

De stikstofbalans (appendix F.5) laat zien dat de rol van de in- en uitvoer via de modelranden veel groter is geworden. In verhouding zijn de processen minder belangrijk geworden.

5.7 Gedempt getij 70Z:30N vs. Huidig

De zuurstofprofielen van het tweede Gedempt getij scenario (GG*), te vinden in appendix C, zijn zeer vergelijkbaar met die van het GG. Dit is voor een deel begrijpelijk, omdat in beide scenario's de doorstroom met de Noordzee even groot is (8x de huidige doorstroom). Maar de verdeling van de doorstroom over een noordelijke en zuidelijke waarin de twee scenario's van elkaar afwijken heeft blijkbaar ook weinig effect op de zuurstofloosheid in de geul (de zuurstofprofielen zijn allen van locaties in de geul). Wel zijn de zuurstofconcentraties in het noordwesten van de Grevelingen enigszins verbeterd (appendix D.6), maar zuurstofarme condities zijn nog niet helemaal verdwenen.

Ook de stikstofpiek van dit scenario (appendix E.6) ligt lager dan in het HS, maar is vergelijkbaar met die van NS. De fosfaatpiek ligt lager dan in het HS, maar minder laag dan in NS. Balansen (appendix F.6) zijn overeenkomstig die van het GG.

5.8 Noorderspuisluis vs. Huidig

De zuurstofprofielen van het Noorderspuisluis scenario (NS) zijn te vinden in appendix C. In deze zuurstofprofielen is een duidelijke verbetering te zien ten opzichte van het HS. Deze verbetering is niet zo groot als in het MG, wat te maken heeft met het verschil in de totale sluiscapaciteit tussen de twee scenario's (MG: 2500 m³/s, NS: 750 m³/s). Ten opzichte van het GG met een capaciteit van 'slechts' 1000 m³/s, treedt er in de zuidoostelijke locaties wel een verbetering op, maar in de westelijke locaties (voor de Brouwerssluis) juist een verslechtering (met name in GTSO-03). Hierbij moet worden opgemerkt dat deze locaties alleen in de geul liggen. Als we in de overige gebieden kijken (appendix D.7), blijkt in het noordwesten vlak voor de noordelijke spuisluis een duidelijke verbetering te zien, wat ook een van de redenen was om dit scenario te mee te nemen. Door de ingebruikname van de Noorderspuisluis wordt het zuurstofprobleem dus eigenlijk verlegt van het noordwesten naar het zuidwesten.

De veranderingen in nutriëntenconcentraties (appendix E.7) zijn in lijn met de veranderingen in de andere scenario's. De stikstofpiek ligt enigszins hoger, en de fosfaatpiek ligt duidelijk lager dan in het HS. De balansen (appendix F.7) laten een grote overeenkomst zien met die van het MG.

5.9 Maximaal getij vs. Huidig

In appendix C zijn de zuurstofprofielen van het Maximaal Getij (MG) scenario weergegeven. In dit scenario is de waterkolom het hele jaar door goed gemengd, en treedt er geen zuurstofloosheid meer op. Eenzelfde beeld komt ook voort uit de zuurstof-bodemkaart in appendix D.6. Het MG laat dus een duidelijke verbetering zien ten opzichte van zowel het HS als het GG.

Wat de nutriëntenconcentraties (appendix E.8) betreft, ligt zowel de stikstofpiek wederom hoger en de fosfaatpiek wederom lager dan in het HS. Echter, ten opzichte van het GG, zijn de stikstofconcentraties echter gelijk en treedt dus alleen een afname in fosfaat op, samen met aanzienlijk hogere concentraties van chlorofyl en veel lagere concentraties van NH₄⁺.

Net als in het GG laten de balansen (appendix F.8) zien dat in en uitvoer via de modelranden dominant zijn geworden voor het functioneren van het systeem.

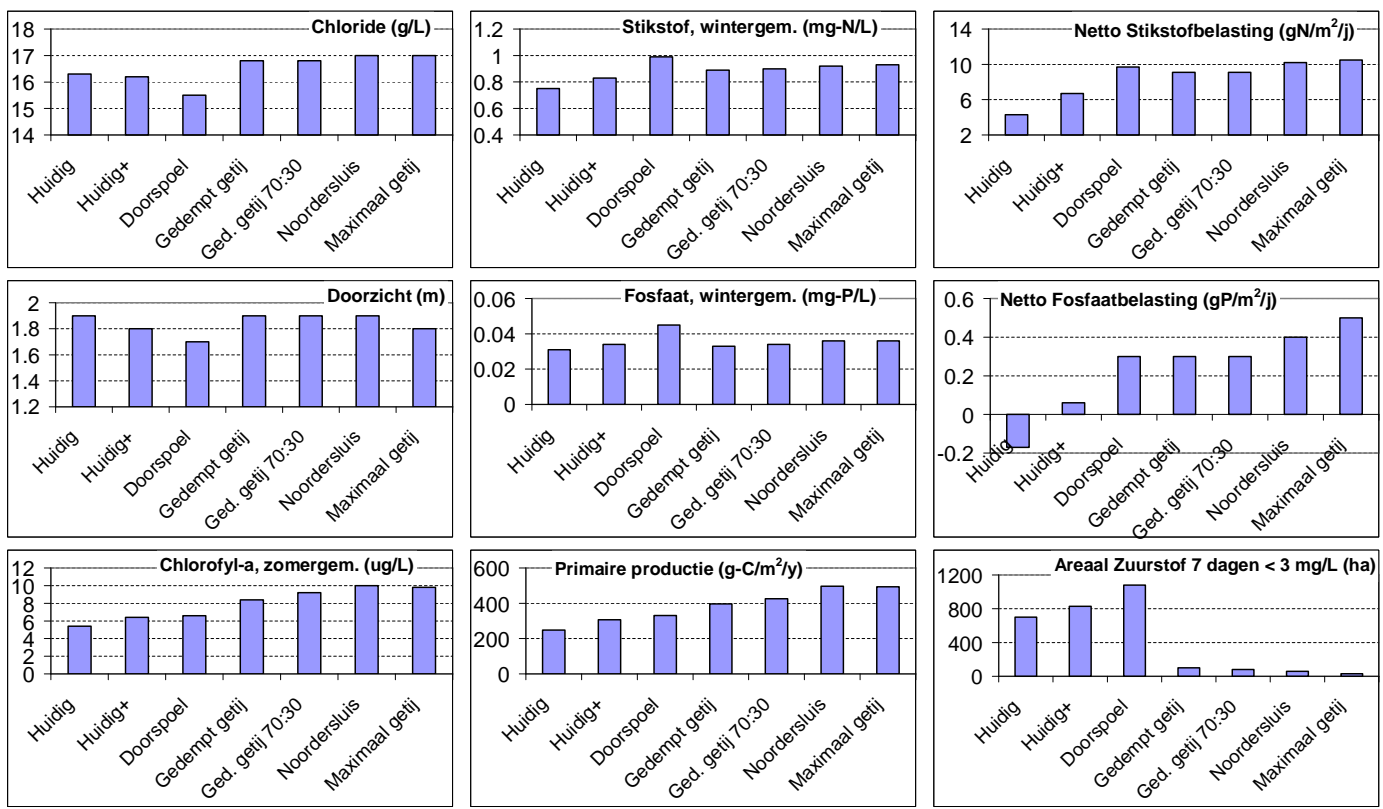
5.10 Trends in scenario's

In deze paragraaf wordt een samenvattend overzicht gegeven van alle scenario's. Hiervoor is onder andere gebruikt gemaakt van het concept beoordelingskader dat door Witteveen+Bos en Bureau Waardenburg is opgesteld. Tabel 5.2 geeft een overzicht van kenmerken van de waterkwaliteit en de ecologische kwaliteit voor de verschillende oplossingsrichtingen. Figuur 5.1 toont enkele van de meest inzichtelijke kenmerken.

Tabel 5.2 Karakteristieken (berekend) van het Grevelingenmeer voor verschillende oplossingsrichtingen
(* Winter = december, januari en februari; ** Zomer = april tot en met september)

	Kalibratie	Oplossingsrichtingen						
	Jaar 2000	Huidig	Huidig+	Doorspoel (oost → west)	Gedempt getij	Gedempt getij 70Z:30N	Noordersluis	Maximaal getij
Chloride								
Jaargemiddelde concentratie (g/L)	16,2	16,3	16,2	15,5	16,8	16,8	17,0	17,0
Totaal N								
Wintergemiddelde * concentratie (mg-N/L)	0,75	0,75	0,83	0,99	0,89	0,90	0,92	0,93
Belasting vanuit de Noordzee (g-N/m ² /yr)	10,6	13,4	13,6	–	110,2	110,2	207	276
Belasting naar de Noordzee (g-N/m ² /yr)	8,0	10,5	11,4	14,0	105,4	105,4	201	269
Belasting via Flakkeese spuisluis (g-N/m ² /yr)	–	–	10,8	22,3	10,8	10,8	10,8	10,8
Belasting naar de Oosterschelde (g-N/m ² /yr)	–	–	7,7	–	7,9	7,9	8,0	8,1
Overige belasting (g-N/m ² /yr)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Netto belasting (g-N/m ² /yr)	+4,0	+4,3	+6,7	+9,7	+9,1	+9,1	+10,2	+10,5
Totaal P								
Wintergemiddelde * concentratie (mg-P/L)	0,033	0,031	0,034	0,045	0,033	0,034	0,036	0,036
Belasting vanuit de Noordzee (g-P/m ² /yr)	0,62	0,84	0,86	–	6,9	6,9	13,0	17,3
Belasting naar de Noordzee (g-P/m ² /yr)	0,91	1,14	1,02	1,5	6,9	6,9	12,9	17,2
Belasting via Flakkeese spuisluis (g-P/m ² /yr)	–	–	0,80	1,7	0,80	0,80	0,80	0,80
Belasting naar de Oosterschelde (g-P/m ² /yr)	–	–	0,71	–	0,65	0,64	0,63	0,62
Overige belasting (g-P/m ² /yr)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Netto belasting (g-P/m ² /yr)	-0,16	-0,17	+0,06	+0,3	+0,3	+0,3	+0,4	+0,5
Chlorofyl-a								
Jaargemiddelde concentratie (µg/L)	4,5	4,7	5,7	6,3	7,9	8,6	9,1	9,1

Zomergemiddelde ** concentratie (µg/L)	5,3	5,4	6,4	6,6	8,4	9,2	10,0	9,8
Primaire Productie (g-C/m ² /yr)	243	248	307	331	397	426	497	494
Zuurstof – Areaal met minimaal 7 dagen aaneengesloten periode met lage zuurstofconcentratie in de waterkolom circa 1 m boven de bodem (ha)								
< 5 mg/l	1680	1570	1640	1460	500	530	250	160
< 4 mg/l	1240	1170	1250	1240	130	100	100	40
< 3 mg/l	860	700	830	1080	100	80	60	30
< 2 mg/l	430	330	490	930	80	60	40	30
< 1 mg/l	200	180	220	770	80	50	40	30
Doorzicht (m)	2,0	1,9	1,8	1,7	1,9	1,9	1,9	1,8



Figuur 5.1 Staafdiagram karakteristieken van het Grevelingenmeer voor verschillende oplossingsrichtingen

Chloride / zoutgehalte:

- Voor alle oplossingsrichtingen blijft de chlorideconcentratie hoog en dus het zoute karakter van het Grevelingenmeer gehandhaafd. Aangezien de Oosterschelde ter hoogte van de Flakkeese spuisluis iets minder zout is dan de Grevelingen, neemt de chlorideconcentratie af als de uitwisseling

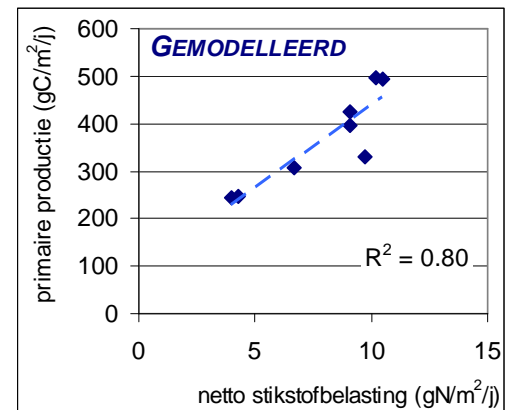
met de Oosterschelde groter wordt. In het doorspoelscenario daalt de chlorideconcentratie het meest, omdat geen instroom vanuit de zoute(re) Noordzee meer plaatsvindt.

Nutriënten (stikstof en fosfaat)

- Voor zowel stikstof als fosfaat geldt dat de (winter)concentratie zowel op de Noordzee als in de Oosterschelde hoger is dan in de Grevelingen. Iedere verhoging van de uitwisseling met de Noordzee en/of de Oosterschelde betekent daardoor automatisch een verhoging van de nutriëntenconcentratie in de Grevelingen. Aangezien de (winter)concentratie op de Oosterschelde het hoogst is, heeft vooral doorspoelen een groot effect omdat dan geen menging met Noordzeewater plaatsvindt.
- De netto belasting van stikstof en fosfaat neemt voor alle oplossingsrichtingen toe. Vaak wordt niet beseft dat het vergroten van de uitwisseling naast een afname van de verblijftijd ook per definitie zorgt voor een toename van de belasting: Belasting is immers gedefinieerd als debiet maal concentratie. Een verhoging van het debiet betekent – bij een gelijkblijvende concentratie – automatisch een hogere belasting. Uiteraard gaat met de grotere uitwisseling het merendeel van de toename ook weer het systeem uit (zie Tabel 5.2). Het feit dat de netto belasting toeneemt, houdt in dat meer fosfaat worden vastgelegd en dat meer stikstof wordt vastgelegd en/of gedenitrificeerd in de Grevelingen.

Primaire productie en chlorofyl-a

- Voor alle oplossingsrichtingen nemen zowel de primaire productie en de (zomer)gemiddelde chlorofylconcentratie toe ten opzichte van de huidige situatie. De reden hiervoor is de hogere nutriëntenbelasting. In de huidige situatie is primaire productie in de zomer stikstofgelimiteerd. Dit blijft in alle scenario's zo, maar door de hogere belasting wel op een hoger biomassaniveau. Met andere woorden: er zijn meer nutriënten beschikbaar en aangezien nutriënten (dat wil zeggen stikstof) limiterend waren is meer primaire productie mogelijk.²
- Er is een goede correlatie tussen de berekende primaire productie en de netto stikstofbelasting. Als het doorspoelscenario dat qua karakter enigszins afwijkt van de andere scenario's, weggelaten wordt, ontstaat zelfs een correlatie van $R^2=0.96$. Of in werkelijkheid deze lineaire relatie ook op zal treden is niet te zeggen. Het is waarschijnlijk dat de graasdruk zich eveneens zal aanpassen aan nieuwe omstandigheden en dat dit van wezenlijke invloed zal zijn op deze relatie. Aanvullend onderzoek zal nodig zijn om meer over deze relatie te kunnen zeggen.



Zuurstof

2. In het huidige kustwater is P een belangrijkere limitatie dan N. (NB: Voor circa 2000 was het andersom, maar een grotere afname van P-belasting dan van N-belasting resulteert in deze omslag.) In de Grevelingen is een P-limitatie in de zomer nog niet aan de orde, omdat door nalevering van P uit de bodem voldoende P beschikbaar komt. In het model is niet meegenomen hoe dit in de toekomst kan veranderen.

- In de oplossingsrichtingen met tenminste een gedempt getij, is de zuurstofconcentratie in de waterkolom volledig of vrijwel volledig verbeterd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat stratificatie met tenminste een gedempt getij succesvol kan worden vermeden. Hoewel de primaire productie en dus de productie van organisch koolstof toeneemt, neemt het zuurstofprobleem niet per definitie toe. De grotere beschikbaarheid van organisch materiaal wordt in voldoende mate gecompenseerd door menging zodat geen of nauwelijks locaties met zuurstofarme condities in de waterkolom ontstaan.
- De ingebruikname van de Flakkeese spuisluis draagt gevarieerd bij aan het oplossen van de zuurstofproblematiek. Het areaal waarop zuurstofarme condities ontstaan, neemt niet af en in het doorspoelscenario wordt zelfs een kleine toename berekend. Het debiet dat door de Flakkeese spuisluis kan worden uitgewisseld, is blijkbaar onvoldoende om stratificatie betekenisvol te veranderen. In dit geval betekent de hogere nutriëntenbelasting en de daaruit volgende grotere productie van organisch materiaal wel dat het probleem toeneemt.

Doorzicht

- In alle oplossingsrichtingen blijft het doorzicht ongeveer gelijk. De berekende jaargemiddelde waarden variëren van 1,7 tot 2,0 meter. Minder doorzicht valt samen met meer chlorofyl en organisch materiaal in de waterkolom (niet getoond).

Locatie van de sluis

- Voor het totaal areaal zuurstofarme condities in het Grevelingenmeer maakt de locatie van de sluis en/of het aanleggen van een of twee spuisluizen geen significant verschil. Het (opgetelde) debiet en dus de getijslag zijn uiteindelijk bepalend voor de verbetering van de zuurstofhuishouding. Met een spuisluis in het zuidelijk deel van de Brouwersdam kunnen in de noordelijke geul nog op beperkte schaal zuurstofarme condities optreden. Met een spuisluis in het noordelijk deel kunnen juist in het zuidelijk deel nog op beperkte schaal zuurstofarme condities voorkomen. In dit laatste geval treden de condities wel op grotere diepte op.

6 Samenvattende discussie, conclusies en aanbevelingen

6.1 Inleiding

In deze fase van de verkenning worden door Rijkswaterstaat oplossingsrichtingen verkend ter verbetering van de waterkwaliteit en de ecologische toestand van het Grevelingenmeer. De voornaamste kenmerken hiervan zijn zuurstofarme en zuurstofloze condities in de waterkolom, de zich uitbreidende aanwezigheid van witte bacteriematten op de bodem en de daarmee geassocieerde achteruitgang van het bodemleven. Het voorkomen van de bacteriematten wordt gezien als habitatverlies.

De door Deltares uitgevoerde studie draagt op twee aspecten aan de verkenning van de oplossingsrichtingen bij:

- a Vergroten van de systeemkennis: Wat zijn de sturende factoren die zorgen voor bovenstaande kenmerken van het Grevelingenmeer? Zo kan gericht naar oplossingsrichtingen gezocht worden die op de efficiëntste wijze de sturende factoren beïnvloeden.
- b Kwantificeren van het effect en de effectiviteit van oplossingsrichtingen voor de zuurstofhuishouding door middel van 3D modelberekeningen wat een objectieve vergelijking mogelijk maakt.

Het model is geschikt om aan te geven om een maatregel wel of niet een significant effect heeft op de zuurstofhuishouding van het Grevelingenmeer. Het model is minder geschikt om (zeer) lokale effecten te kwantificeren. Tevens wordt de bodem niet gedetailleerd gemodelleerd. Deze elementen worden derhalve op basis van expert judgement ingevuld.

6.2 Systeemkennis

Van alle Deltawateren heeft het Grevelingenmeer de laagste nutriëntenbelasting (uitgedrukt per m² wateroppervlak). Vanuit dit perspectief is de verslechterende waterkwaliteit en ecologische toestand dan ook onverwacht te noemen. Een slechte toestand wordt immers meestal geassocieerd met een hoge belasting.

Sinds zijn ontstaan heeft het Grevelingenmeer een aantal stadia doorlopen die diverse keren hebben geleid tot een veranderend sluisbeheer (zie bijvoorbeeld bekkenrapportage RIKZ 2002). Iedere keer past het meer zich aan aan het nieuwe beheer. Op basis van de voortschrijdende langzame verandering (verslechtering) kan geconcludeerd worden dat het Grevelingenmeer nog steeds geen nieuw (dynamisch) evenwicht bereikt heeft. De lange verblijftijd van 3 tot 6 maanden draagt zeker bij aan deze lange aanpassingstijd.

Bij de analyse van de huidige toestand blijkt het complex om oorzaak en gevolg van de achteruitgang van de ecologische condities uit elkaar te houden. Met andere woorden: Wat zijn sturende factoren en wat zijn volgende factoren?

Het ontstaan van zuurstofloze condities in de waterkolom is goed begrepen. Zout- en temperatuurstratificatie in combinatie met de zuurstofvraag door afbraak van het

voldoende beschikbare organisch materiaal of andere gereduceerde stoffen zoals sulfides verlagen de zuurstofconcentratie beneden de spronglaag. Aangezien de mate van stratificatie relatief gering is – veelal hooguit enkele graden Celsius en slechts 1 tot 2 g Cl/l – treedt regelmatig menging op van de waterkolom. Diepe delen van het meer zijn dus niet langdurig zuurstofarm, maar eerder gedurende meerdere kortere periodes (dagen tot weken) per jaar. De beperkte (getij)dynamiek in het Grevelingenmeer in combinatie met een mogelijk vrij hoge zuurstofvraag van de bodem is de sturende factor die tijdelijke stratificatie mogelijk maakt.

Veel minder goed begrepen is het gedrag en de invloed van de bodem op de waterkwaliteit en de ecologische toestand. Tot voor kort werden de witte maten op de bodem gerapporteerd als bestaande uit schimmels. De door Deltares geponeerde hypothese dat het hier zou gaan om sulfide oxiderende bacteriën in plaats van schimmels is inmiddels door door Bureau Waardenburg uitgevoerd laboratoriumonderzoek bevestigd. Het gaat om de bacterie *Beggiatoa* spp. die voorkomt op het grensvlak van sulfide en zuurstof. Het sulfide wordt in de bodem gevormd door afbraak van organisch materiaal met sulfaat. Opvallend genoeg is de aanwezigheid van *Beggiatoa* juist een indicatie voor beschikbaarheid van zuurstof in de waterkolom (→ de bacterie komt voor op de grenslaag). Dit zou er dus op kunnen wijzen dat zuurstofarme condities in de waterkolom niet tot de sturende factoren behoort.

Mede door deze nieuwe inzichten begint er grip te komen op wat er gebeurt in de bodem. Er is daarentegen nog onvoldoende bekend om vast te stellen waarom het gebeurt, laat staan om te voorspellen hoe de bodem zich zal ontwikkelen. Met name het tijdsaspect is onbeantwoord: Daar waar de tijdschaal in de waterkolom 3 tot 6 maanden is, is de tijdschaal in de bodem vele jaren, wellicht zelfs meer dan tien jaar. De sturende factoren voor de toestand van de bodem zijn waarschijnlijk de hoeveelheid organisch materiaal en de hoeveelheid fijn anorganisch materiaal (slib) die in vele jaren zijn geaccumuleerd. Recente metingen van deze grootheden zijn er niet. Modelberekeningen hebben laten zien dat de hoeveelheid organisch materiaal voornamelijk bepaald wordt door de stikstofbelasting, aangezien primaire productie in de zomer stikstofgelimiteerd is. De rol van anorganisch slib is onbekend. Ook is niet bekend in hoeverre het gebrek aan dynamiek (dat wil zeggen lage stroomsnelheden) van belang is voor de huidige toestand van de bodem.

Oplossingsrichtingen

De doorgerekende oplossingsrichtingen hebben betrekking op het verhogen van de dynamiek door herintroductie van getij en het verkleinen van de verblijftijd. Met uitzondering van de huidige situatie is ingebruikname van de Flakkeese Spuisluis onderdeel van alle scenario's.

Huidige situatie (HS)

Huidige situatie (HS+)

= autonome ontwikkeling

Doorspoelscenario (DS)

Gedempt getij (GG)

Gedempt getij 70Z:30N (GG*)

Noordersluis (NS)

Maximaal getij (MG)

Ingebruikname Flakkeese Spuisluis

Capaciteit FS verdubbeld, doorspoeling van Oost naar West, middenstand op NAP

8× debiet huidige sluis en getijslag tussen -35 cm en +15 cm NAP

8× debiet huidige sluis verdeeld over de huidige locatie (70%) en een sluis in het noordelijke deel van de Brouwersdam (30%)

14× debiet huidige sluis in het noordelijk deel van de Brouwersdam en handhaving van de spuisluis op de huidige locatie

20× debiet huidige sluis en getijslag tussen -70 cm en +30 cm NAP

6.3 Conclusies met betrekking tot oplossingsrichtingen

- 1 Sturende factoren voor de zuurstofhuishouding van het Grevelingenmeer zijn (gebrek aan) dynamiek waardoor tijdelijke stratificatie kan ontstaan, primaire productie en de stikstofbelasting.
- 2 Sturende factoren voor de waterbodem en het bodemleven zijn onduidelijk. De beschikbaarheid van organisch materiaal en de accumulatie van fijn slib lijken van belang, maar uitsluitel op basis van metingen hierover is er niet. Het ontbreken van dynamiek in de waterkolom is waarschijnlijk belangrijk, maar de mate van belangrijkheid is onbekend. Op basis van de beschikbare gegevens, kennis en modelberekeningen is dan ook geen uitspraak te doen over de ontwikkeling van de bodem en het bodemleven voor de verschillende oplossingsrichtingen.
- 3 Het totale areaal met zuurstofarme condities wordt niet significant beïnvloed door ingebruikname van de Flakkeese Spuisluis (HS+). Door het relatief beperkte debiet (0,5× capaciteit huidige Brouwerssluis) wordt de dynamiek nauwelijks vergroot en tijdelijke stratificatie blijft aanwezig. Lokaal – ter hoogte van de Flakkeese spuisluis – zijn wel positieve effecten te verwachten.
- 4 Doorspoelen van het Grevelingenmeer van de Flakkeese Spuisluis naar de Brouwerssluis verhoogt de dynamiek ten opzichte van de huidige situatie niet. Door een hogere stikstofbelasting neemt de primaire productie toe. De zuurstofproblematiek in de waterkolom neemt eerder toe dan af. Van de doorgerekende oplossingsrichtingen geeft het doorspoelscenario het slechtste resultaat met betrekking tot zuurstof in de waterkolom. Door het grotere debiet (135 m³/s in plaats van 65 m³/s) worden de positieve effecten in het oostelijk deel van het meer iets groter.
- 5 Verhogen van de dynamiek door een grotere capaciteit van de Brouwerssluis is effectief in het opheffen of beperken van tijdelijke stratificatie en daardoor in het vermijden van verlaagde zuurstofconcentraties in de waterkolom. Van de beschouwde oplossingsrichtingen wordt vanaf een gedempt getij (8× vergrote capaciteit van de Brouwerssluis) voldoende dynamiek bereikt om de zuurstofhuishouding te verbeteren. In deze studie is niet onderzocht wat het minimaal benodigde debiet is om de zuurstofhuishouding te verbeteren.
- 6 De locatie van de vergrote spuisluis – op de huidige locatie en/of in het noordelijk deel van de Brouwersdam – is minder belangrijk dan het (totale) debiet, behalve in de directe omgeving van de sluis.
 - i. Bij een grote Noordersluis (14× huidige debiet) treden zuurstofarme condities op in de diepe putten bij de huidige, zuidelijke sluis.
 - ii. Bij een 8× vergrote Brouwerssluis op de huidige locatie blijven nog zuurstofarme condities optreden in de diepe delen bij het noordelijke deel van de Brouwersdam.
 - iii. In beide gevallen is het areaal echter klein ten opzichte van het totale oppervlak van het Grevelingenmeer.

6.4 Aanbevelingen

De waterbodem

Ondersteund door modelberekeningen is geconcludeerd dat meer dynamiek bijdraagt aan het verbeteren van de waterkwaliteit en van de zuurstofproblematiek in de waterkolom in het bijzonder. Ook is in de systeemanalyse geconcludeerd dat de aanwezigheid van de witte bacteriematten eerder een teken is van de aanwezigheid van zuurstof dan de afwezigheid van zuurstof, aangezien zij voorkomen op het grensvlak van sulfide en zuurstof. Op basis van een betere zuurstofconcentratie in de waterkolom kan derhalve geen uitspraak gedaan worden over een verbetering van de waterbodemkwaliteit en/of de ecologische toestand van de bodem. De causale relaties hiervoor zijn vooralsnog onvoldoende duidelijke, mede als gevolg van het ontbreken van recente meetgegevens.

Wij bevelen daarom aan om in het kader van de komende planstudie gericht onderzoek te doen naar hoe de bodem zal reageren op de oplossingsrichtingen, waarbij het onderzoek antwoord moet geven op de volgende vragen:

- Hoe is de ontstaansgeschiedenis van de bodem te verklaren?
- Waarom komen *Beggiatoa* in zulke grote hoeveelheden voor en waarom breidt hun voorkomen zich uit?
- Wat zijn de sturende factoren die de kwaliteit en ecologische toestand van de bodem beïnvloeden?
- Hoe zullen de bodem en het bodemleven reageren op de oplossingsrichtingen?

Omdat het effect van de oplossingsrichtingen op de waterbodem onduidelijk is en de waterbodem van essentieel belang is voor de waterkwaliteit en de ecologische toestand van het Grevelingenmeer, bevelen wij aan om de keuze voor een oplossingsrichting af te laten hangen van nader onderzoek naar de reactie van de bodem.

Voor nader onderzoek is het verzamelen van de volgende gegevens waardevol:

- Informatie over het voorkomen en de verspreiding van de *Beggiatoa* matten in het gehele meer en door het jaar heen (dat wil zeggen ruimte en tijd).
- Informatie over de samenstelling van de bodem, in het bijzonder hoeveelheid organisch materiaal en hoeveelheid slib.
- Metingen aan de zuurstofcondities dicht bij de bodem (of in de eerste centimeter van de bodem) door het jaar heen en zowel in diepe als in ondiepe delen. Deze metingen zouden gekoppeld moeten worden aan metingen naar het gehalte aan organisch materiaal in de bodem, chlorofyll-a en organisch materiaal in de waterkolom, stratificatie en temperatuur.
- Metingen aan de toestand van de ondiepere delen van het meer, met name aan het zuurstofgehalte in ondiepere delen in de zomer.

Zonder inzicht in deze gegevens en een betere analyse van het huidige probleem is een voorspelling van de meest effectieve beheersmaatregel complex. Tevens zullen zonder deze inzichten veranderingen die optreden door veranderingen in beheer moeilijk te kwantificeren zijn. Aangezien het risico bestaat dat bij sommige voorgestelde oplossingsrichtingen voor een ander beheer van het Grevelingenmeer de situatie van het meer eerder (licht) verslechterd dan verbeterd, is het aan te bevelen adequate monitoring van de huidige situatie en de situatie tijdens en na de veranderingen in beheersmaatregelen uit te voeren.

Ingebruikname Flakkeese spuisluis

Op basis van de modelanalyse is geconcludeerd dat de capaciteit van alleen de Flakkeese Spuisluis onvoldoende is om voldoende getijdynamiek te genereren voor het verbeteren van de zuurstofhuishouding in het Grevelingenmeer. Door hogere stroomsnelheden wordt ter hoogte van de spuisluis in het oostelijk deel van het meer wel meer dynamiek verwacht. Wij bevelen daarnaast aan om de ingebruikname van de Flakkeese Spuisluis in het kader van onderzoeksdoeleinden te overwegen. Bij een goede monitoring van de stromingen die door het doorlaatmiddel worden geïnduceerd, en van de ecologische veranderingen die door de verbinding met de Oosterschelde tot stand komen, zal ingebruikname tot meer inzicht leiden in de processen die sturend zijn voor de (lokale) waterkwaliteit en ecologie.

Modelverbeteringen en -aanpassingen

Tijdens de kalibratie van het GEM model zijn enkele punten geïdentificeerd, die bij vervolgstudies waar het model ingezet wordt, verbeteringen en/of aanpassingen behoeven:

- Graas door schelpdieren is nu niet expliciet gemodelleerd, maar als een verliesterm door sedimentatie meegenomen. De graasdruk wordt gezien als een positieve invloed op een watersysteem. Op dit moment is naar onze mening onvoldoende kennis beschikbaar om te kunnen voorspellen hoe en/of hoe snel de graasdruk zich zal ontwikkelen bij een grootschalige ingreep zoals bij een gedempt of maximaal getij. Dit is een onderzoeksvraag die niet alleen voor het Grevelingenmeer, maar bijvoorbeeld ook voor een zout Volkerak-Zoommeer, van groot belang is. Uitwerking en analyse van BIOMON data, maar ook analyseren van overeenkomstige watersystemen of vergelijkbare ingrepen zouden onderdeel moeten zijn van dergelijk onderzoek.
- De nutriëntenbelasting door neerslag dient ter compleetheid te worden toegevoegd. Echter aangezien de verblijftijd in de oplossingsrichtingen vanaf een gedempt getij aanzienlijk afneemt, wordt het belang van deze nutriëntenbelasting kleiner dan in de huidige situatie het geval is.
- De bodem dient (verder) ingespeeld te worden zodat de initiële conditie van de bodem geen invloed heeft op het berekende modelresultaat.
- De onverklaarde afwijking van door GEM berekend zoutgehalte ten opzichte van door FLOW berekend zoutgehalte dient te worden onderzocht.

A Literatuur

- Diaz, R. J. (2001). "Overview of hypoxia around the world." *Journal of environmental quality* 30(2): 275-281.
- Fenchel, T. and C. Bernard (1995). "Mats of colourless sulphur bacteria. I. Major microbial processes." *Marine Ecology Progress Series* 128: 161-170.
- Ferro, I. (2003). "Cycling of iron and manganese in freshwater, estuarine and deep sea sediments", PhD thesis, Groningen University, juni 2003.
- Gray, J. S., R. Shiu-sun Wu, et al. (2002). "Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment." *Marine Ecology Progress Series* 238: 249-279.
- Hoeksema, H. J. (2002). Grevelingenmeer; van kwetsbaar naar weerbaar? RIKZ/2002.033.
- Jørgensen, B. B. and V. A. Gallardo (1999). "Thioploca spp.: filamentous sulfur bacteria with nitrate vacuoles." *Fems Microbiology Ecology* 28(4): 301-313.
- Lengkeek, W., S. Bouma, et al. (2007). Het effect van zuurstofdeficiëntie op het bodemleven in het Grevelingenmeer, Bureau Waardenburg bv. rapport nr. 07-186.
- Los, F.J., M.T. Villars and M.W.M. Van der Tol (2008): "A 3-dimensional primary production model (BLOOM/GEM) and its applications to the (southern) North Sea (coupled physical-chemical-ecological model)", *Journal of Marine Systems* (2008), doi:10.1016 / j.jmarsys.2008.01.002
- Mussmann, M., H. N. Schulz, et al. (2003). "Phylogeny and distribution of nitrate-storing *Beggiatoa* spp. in coastal marine sediments." *Environmental Microbiology* 5(6): 523-533.
- Slager, J. W. (2008). Verkenning 'Grevelingen water en getij'. projectplan.
- van Bragt, P. H. (2000-2006, August 2007). "Biodiversiteit en waarom duiken in de Grevelingen ook leuk is!"
- Vishniac, H. S. (1956). "On the ecology of the lower marine fungi." *Biological Bulletin* 111(3): 410-414.
- WL | Delft Hydraulics (2006). Effect van ingebruikname Flakkeese spuisluis op de hydrodynamica en waterkwaliteit van het Grevelingenmeer, Rapport Z4161, in opdracht van RIKZ, juni 2006.
- WL | Delft Hydraulics (2007a): "Deltamodel - hulpmiddel ter ondersteuning van het beheer en beleid van de zuidwestelijke Delta", Rapportnummer Q4435, in opdracht van RIKZ, E. Meijers en S. Groot, december 2007
- WL | Delft Hydraulics (2007b): "A first validation of BLOOM for species groups", Rapportnummer Z4449, in opdracht van RIKZ, B. van Wesenbeeck, December 2007
- Wijsman, J. (2001). "Early diagenetic processes in northwestern Black Sea sediments", PhD thesis, Groningen University, januari 2001.

B Opzet en kalibratie 3D Hydrodynamisch model

Het hydrodynamisch model is opgezet en gekalibreerd in een eerdere studie (WL | Delft Hydraulics 2006). In de huidige studie zijn beperkte, vooral software-technische aanpassingen aangebracht. Deze Appendix is een reproductie van hoofdstukken 2 en 3 van de vorige studie. Deze informatie is geldig voor de toepassing van het hydrodynamisch model in deze studie met uitzondering van de aanpassingen die in paragraaf 3.1 zijn vermeld.

2 Opzet van het hydrodynamisch model

2.1 Inleiding

Het Grevelingenmeer staat niet in directe verbinding met de open zee. Alleen de Brouwerssluis zorgt voor een nauwe verbinding met de Noordzee. Getij is daardoor niet of nauwelijks aanwezig in het Grevelingenmeer. Het hydrodynamisch systeem laat zich omschrijven als zwak dynamisch. Zonder de menging veroorzaakt door getij kunnen zout- en temperatuursverschillen stratificatie veroorzaken. Deze verschillen worden veroorzaakt door in- en uitstromingen van water met een ander zoutgehalte of temperatuur dan in het Grevelingenmeer aanwezig is. In geval van temperatuur speelt opwarming en afkoeling aan het oppervlak ook een rol. Het ontstaan van stratificatie wordt tegengewerkt door menging ten gevolge van windgedreven stroming. De balans tussen het ontstaan van stratificatie door zoutgehalte- en temperatuursverschillen enerzijds en het opmengen van de waterkolom door windgedreven stroming anderzijds is het belangrijkste hydrodynamische proces in het Grevelingenmeer.

2.2 Waterbalans

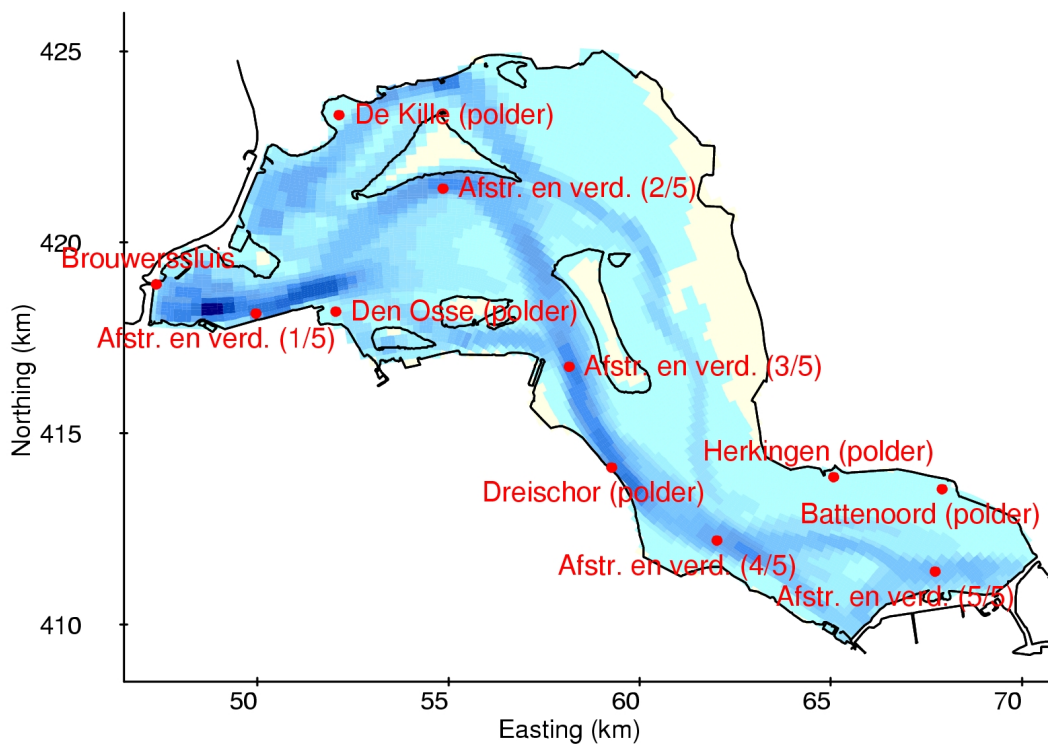
Het Grevelingenmeer is een gesloten watersysteem. Dit wil zeggen dat het waterpeil bepaald wordt door het verschil tussen de inkomende en uitgaande debieten. Hetzelfde geldt voor het zoutgehalte, dat bepaald wordt door de verhouding tussen het zoutgehalte van het instromende en het uitstromende water (inclusief neerslag en verdamping). Hiermee is de kwaliteit van de invoerdata sterk bepalend voor de kwaliteit en nauwkeurigheid van de berekeningen van het hydrodynamisch model. Voor de temperatuur ligt het iets anders. Daar speelt de warmteuitwisseling met de atmosfeer een grote rol. Deze wordt door het (temperatuur)model berekend.

De onderstaande bronnen (ingående debieten) en putten (uitgaande debieten) worden onderscheiden. Zie Figuur 2.1 voor een overzicht van de lozingslocaties.

- Brouwerssluis: Deze sluis in de Brouwersdam verbindt het Grevelingenmeer met de Noordzee en zorgt daarmee voor een toevoer van zout water. Vanaf 1999 is er een permanente uitwisseling, met een incidentele sluiting ten behoeve van de visserij (30 dagen regeling). De modeldata bestaat uit debieten berekend uit de waterstandregistraties over de sluis en de schuifhoogten. Bij gaten in de data is aangenomen dat de sluis dicht is. De tijdsresolutie van de debietdata bedraagt 10 minuten. Voor het zoutgehalte en de temperatuur van de ingaande debieten is gebruik gemaakt van het gemeten chloridegehalte en temperatuur op locatie BG8 (Brouwersdam zeezijde). Het gemiddelde van boven- en ondersensor waarden is gebruikt. De beschikbare dagwaarden zijn lineair geïnterpoleerd naar 10-minuten waarden.
- Neerslag: Voor de invoer van neerslag is gebruik gemaakt van het gemiddelde van de meetwaarden in Dirksland en Brouwershaven (dagwaarden). Indien op een tijdstip

slechts een van de twee waarden bekend is, wordt de bekende waarde genomen; indien beide niet bekend zijn wordt geen neerslag verondersteld. De neerslag wordt verspreid over het wateroppervlak opgegeven.

- Verdamping: Voor de verdamping zijn de gemeten dagwaarden van Wilhelminadorp gebruikt. Gaten in de data zijn lineair geïnterpoleerd. Het verdampingsdebiet wordt verspreid over vijf plaatsen in de bovenste rekenlaag aan het model onttrokken.
- Polders: Voor de polderdebieten zijn maandgemiddelde waarden gebruikt. Vijf polders zijn onderscheiden: Battenoord, Dreischor, Herkingen, de Kille en Den Osse.
- Afstroming: Voor de afstroming van buitendijks gebied zijn maandgemiddelde debieten gebruikt. Het afstromingsdebiet is verspreid over vijf plaatsen in de bovenste rekenlaag van het model toegevoegd.

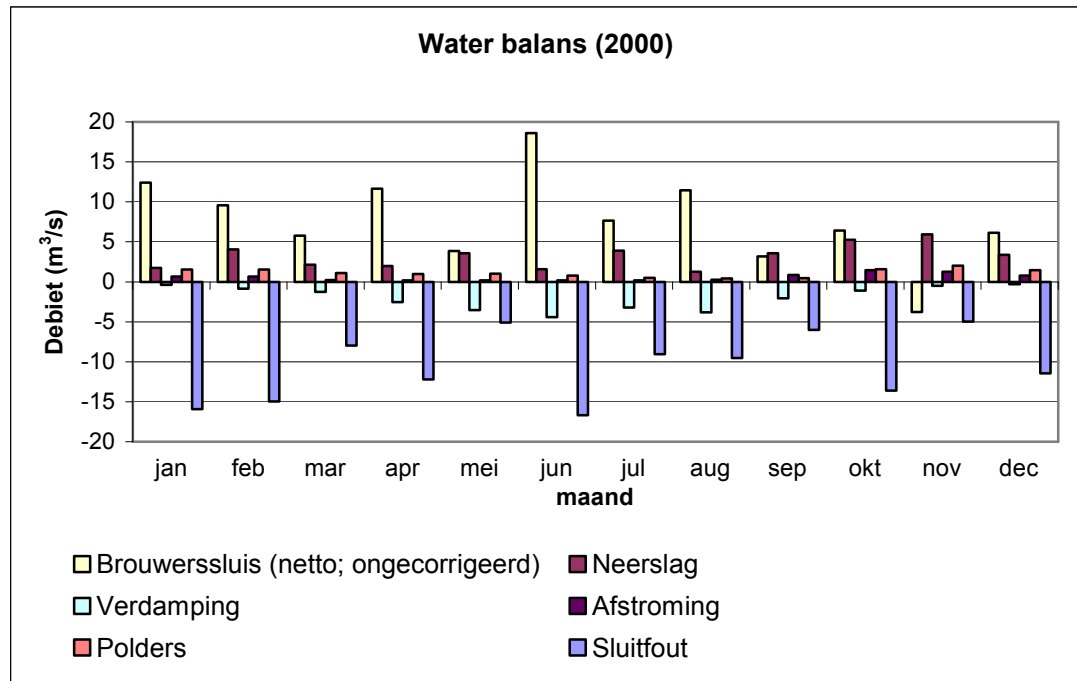


Figuur 2.1 Overzicht van locaties van puntlozingen. Afstroming en verdamping zijn als puntlozing over vijf plaatsen in de bovenlaag van het model verdeeld.

Op basis van de gegevens van bovenstaande bronnen en putten is een waterbalans opgesteld. Hieruit bleek dat, uitgaande van de debietdata, het waterpeil in het Grevelingenmeer geleidelijk zou stijgen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de gegevens een netto instroming via de Brouwerssluis laten zien. In werkelijkheid is er een netto uitstroming door de Brouwerssluis, aangezien het polderwater afgevoerd moet worden.

Daarom is besloten om met de aanname dat het waterpeil over het jaar constant is, de waterbalans te sluiten. Hiertoe is verspreid over elke maand een maandelijks sluitdebiet opgeteld bij het Brouwerssluisdebiet. In werkelijkheid kan de waterstand over de maanden variëren. Kleine variaties in de waterstand zijn echter hydrodynamisch gezien onbelangrijk.

De sluitfout in de waterbalans kan verschillende oorzaken hebben. De belangrijkste oorzaak is waarschijnlijk de onnauwkeurigheid van de metingen, voornamelijk de Brouwerssluisdebeten. Door de Brouwerssluis gaan piekdebieten van meer dan $400 \text{ m}^3/\text{s}$, in beide richtingen. Bij het aftrekken van twee grote getallen (om tot een netto debiet te komen) kan een kleine meetonauwkeurigheid in de piekdebieten leiden tot een verkeerd netto debiet. In Figuur 2.2 is een overzicht van de waterbalans van het jaar 2000 gepresenteerd.

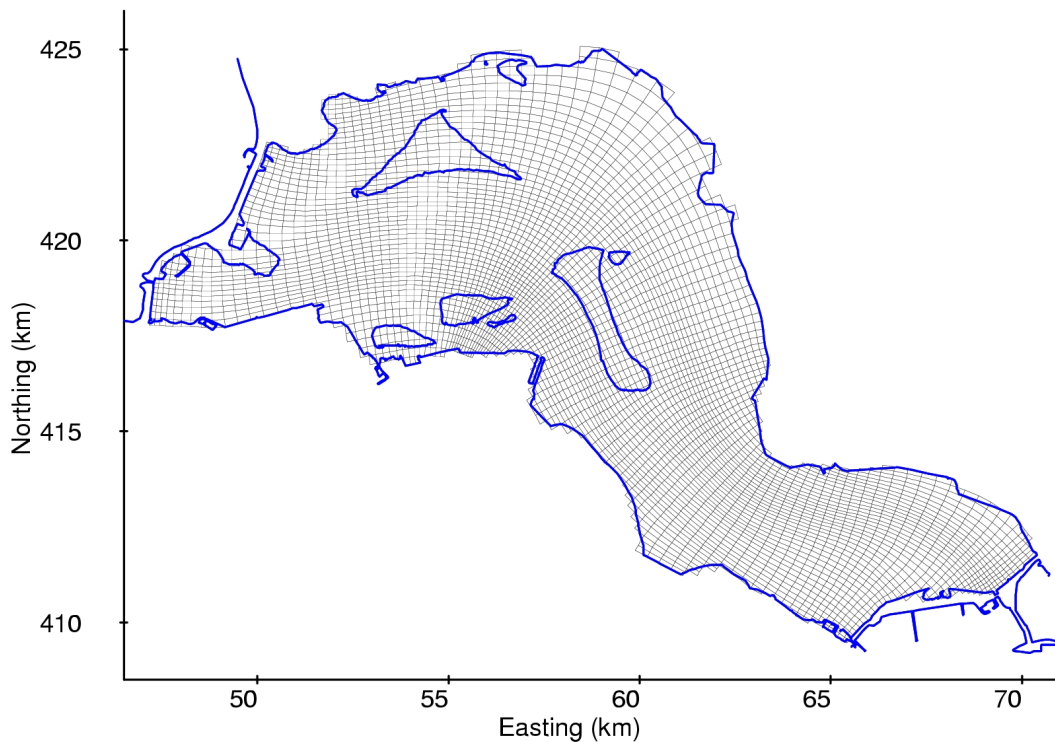


Figuur 2.2 Waterbalans voor het jaar 2000 (persoonlijke communicatie Herman Haas, RIKZ Middelburg en Piet Lievense, RWS Directie Zeeland).

De gecorrigeerde debieten in de waterbalans dienen als uitgangspunt voor de modelverificatie. Voor de scenarioberekeningen zal gebruik worden gemaakt van geschematiseerde debieten door de Brouwerssluis (zie paragraaf 4.1).

2.3 Rekenrooster

Uitgangspunt bij het maken van het 3D Grevelingen rekenrooster was het 2D rekenrooster van het SIMONA Grevelingen model dat ter beschikking is gesteld door Rijkswaterstaat. Het deel van het oorspronkelijke SIMONA rooster dat de Noordzee besloeg is weggelaten. Het resterende horizontale rooster is met een factor 2 bij 2 vergroefd om tot acceptabele rekentijden van het 3D Grevelingen model te komen. Met deze vergroving van het rekenrooster is een balans gevonden tussen de benodigde rekentijd en een correcte en nauwkeurige schematisatie van de bathymetrie en in het bijzonder de geulen daarin. Aantal actieve rekencellen in de horizontaal bedraagt circa 4200. De celgroottes bedragen 100 tot 250 m, met uitschieters naar 400 m in het uiterste noorden van het model. Zie Figuur 2.3 voor een overzicht van het gebruikte horizontale rekenrooster.



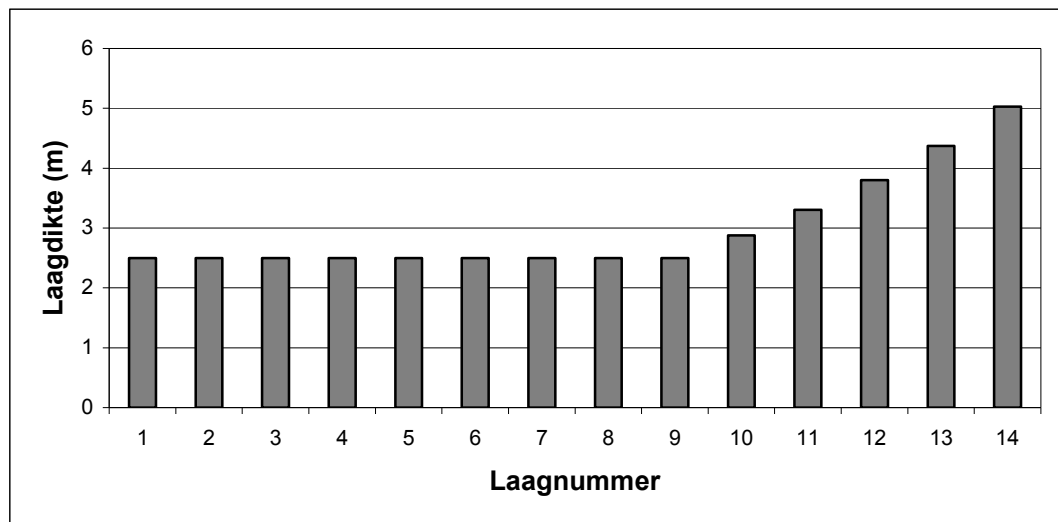
Figuur 2.3: Overzicht van het horizontale rekenrooster.

In de verticale dimensie wordt gewerkt met een zogenaamd z-lagen (of vaste lagen) rooster. Dit houdt in dat de verticale roosterlijnen op een vaste diepte liggen en strikt horizontaal lopen. Voordeel van de z-lagen schematisatie ten opzichte van de meer gangbare σ -lagen schematisatie is dat het artificieel opmengen ('creeping') van stratificatie sterk wordt verminderd.

Het maximale aantal verticale rekenlagen dat wordt gebruikt, is 14. Dit maximale aantal lagen wordt alleen gebruikt in de diepste putten van het 3D Grevelingen model. Het aantal rekenlagen dat daadwerkelijk gebruikt wordt, verschilt per locatie, afhankelijk van de lokale diepte. De laagdiktes variëren over de diepte, met een laagdikte van 2,5 m in de bovenste laag tot een laagdikte van 5,0 m in de onderste laag. In Tabel 2.1 en Figuur 2.4 is een overzicht van de verticale laagverdeling te vinden.

Tabel 2.1: Verdeling van laagdikten over de vertikaal – diepten ten opzichte van NAP

Laagnummer (vanaf boven)	Laagdikte (m)	Cumulatieve diepte (m)	Laagnummer (vanaf boven)	Laagdikte (m)	Cumulatieve diepte (m)
1	2,5	0,0 – 2,5	8	2,5	17,5 – 20,0
2	2,5	2,5 – 5,0	9	2,5	20,0 – 22,5
3	2,5	5,0 – 7,5	10	2,9	22,5 – 25,4
4	2,5	7,5 – 10,0	11	3,3	25,4 – 28,7
5	2,5	10,0 – 12,5	12	3,8	28,7 – 32,5
6	2,5	12,5 – 15,0	13	4,4	32,5 – 36,9
7	2,5	15,0 – 17,5	14	5,0	36,9 – 42,0

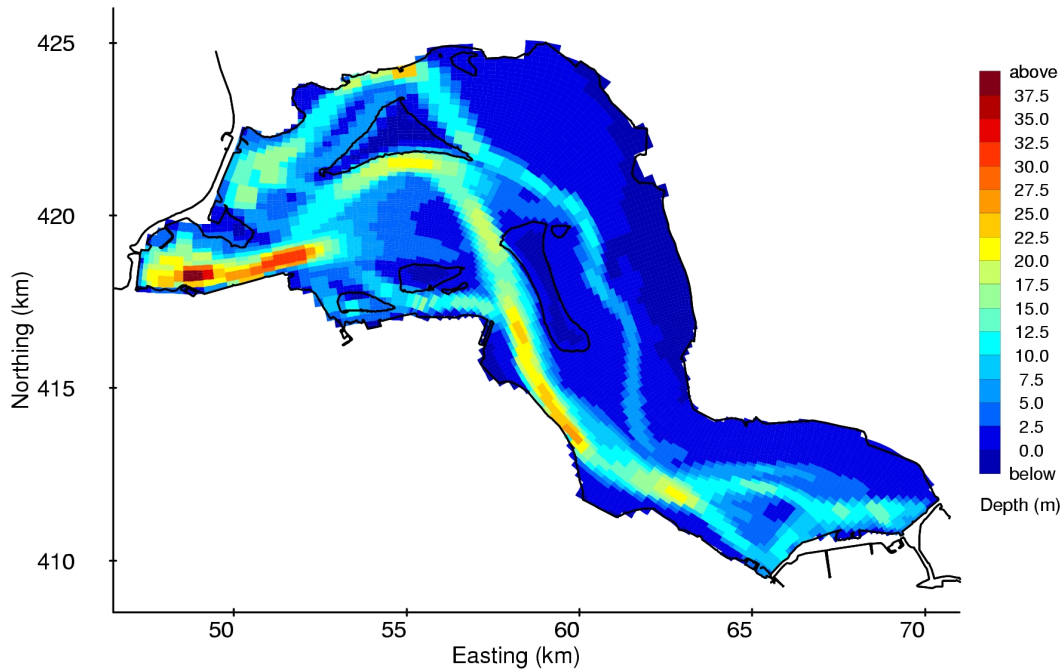


Figuur 2.4: Verdeling van laagdikten over de vertikaal; laag 1 is de bovenste laag.

2.4 Bathymetrie

De bathymetrie van het Grevelingenmeer is te omschrijven als een geulenstelsel met enkele putten, dat door een ondiep gebied (ca. 1 m diep) met platen loopt. De putten variëren in diepte van circa 20 m tot maximaal ca. 45 m.

Bij het maken van de bathymetrie is gebruik gemaakt van de bathymetrie gegevens van het SIMONA Grevelingen model. In het nieuwe model zijn de dieptes gespecificeerd in de centra van de rekencellen. Deze schematisatie zorgt voor een optimale representatie van geulen op een relatief grof rooster. In Figuur 2.5 wordt een overzicht van de gebruikte modelbathymetrie gepresenteerd.



Figuur 2.5: Overzicht van de modelbathymetrie.

2.5 Meteorologische aansturing

2.5.1 Wind

De windaansturing is van belang voor de aandrijving van de stroming in het Grevelingenmeer. Het ontstaan van stratificatie wordt tegengewerkt door menging ten gevolge van windgedreven stroming. Voor de windaansturing worden dagwaarden van de windrichting en magnitude van meetstation Vlissingen gebruikt, afkomstig van het KNMI. De aansturing wordt uniform over het wateroppervlak toegepast.

2.5.2 Temperatuur

Voor de berekening van de temperatuur wordt het 'Ocean Heat Flux' Model gebruikt. Dit temperatuursmodel gebruikt als invoer de luchttemperatuur op 2 m boven het wateroppervlak, de relatieve luchtvochtigheid en de bewolgingsgraad. De bruto zoninstraling wordt berekend op basis van de tijd, de hoogtegraad en de positie van de aarde. De netto zoninstraling wordt dan berekend door te corrigeren voor de bewolgingsgraad.

Voor de meteo-aansturing worden dagwaarden voor de luchttemperatuur, de luchtvochtigheid en de bewolgingsgraad van meetstation Vlissingen gebruikt, afkomstig van het KNMI. Deze aansturing wordt uniform over het modeloppervlak toegepast.

Afregelparameters van het temperatuursmodel zijn de Stanton coëfficiënt voor de convectieve warmte flux en de Dalton coëfficiënt voor de evaporatieve warmte flux. De

uiteindelijk gebruikte waarden, na het gevoeligheidsonderzoek (zie hoofdstuk 3), zijn respectievelijk $3,045 \times 10^{-3}$ en $2,55 \times 10^{-3}$. De Secchi diepte, die de troebelheid van het water weergeeft, is op 2,0 m ingesteld; voor de luchtdichtheid is een waarde van $1,205 \text{ kg/m}^3$ genomen.

2.6 Overige instellingen en parameters

Turbulentie modellering

In de horizontale richting wordt een constante turbulente viscositeit en diffusiviteit gebruikt. Na gevoeligheidsonderzoek zijn de waarden voor beide ingesteld op $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.

Voor de verticale turbulentie modellering wordt het k-epsilon model gebruikt. Hierin wordt de menging als gevolg van wind meegenomen als bronterm. Na gevoeligheidsonderzoek is de achtergrondwaarde voor de turbulente viscositeit en diffusiviteit ingesteld op $5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Bodemwrijving

Bodemwrijving is meegenomen door een Manning coëfficiënt van $0,020 \text{ s/m}^{1/3}$ te specificeren. Deze waarde is overgenomen van het SIMONA 2D Grevelingen model.

Initiële condities en inspelen

Alle modelberekeningen zijn gestart met een uniform zoutgehalte van 27 ppt en een uniforme temperatuur van 5 graden. In alle gevallen is het inspelen op 1 januari 1999 gestart. De gebruikte inspeeltijd bedraagt een jaar. Gezien de basingemiddelde verblijftijd van orde 2 maanden is het nauwkeuriger vaststellen van de initiële condities overbodig.

Tijdstap en rekenduur

De gebruikte tijdstap bedraagt 2,0 minuten. De geschiktheid van deze tijdstap is bevestigd door gevoeligheidsonderzoek. De rekenduur van het 3D Grevelingen model voor een jaarsimulatie bedraagt ongeveer 1 dag per doorgerekend jaar op een 3,6 MHz processor.

3 Gevoeligheidsonderzoek en verificatie

3.1 Gevoeligheidsonderzoek

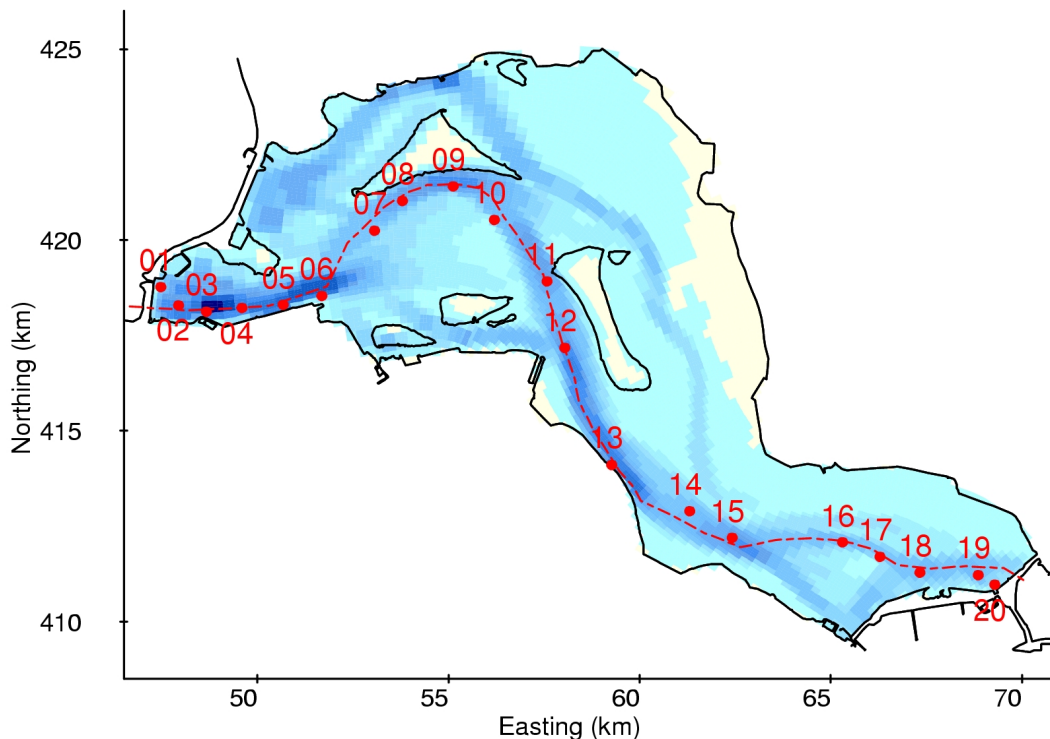
Met het opgezette 3D Grevelingen model is een groot aantal gevoeligheidsberekeningen gedaan. Hierbij lag de nadruk op het verkrijgen van zo goed mogelijke instellingen om stratificatie in het bijzonder en zout- en temperatuur verspreiding in het algemeen correct te representeren. Daarbij is ook ruime aandacht geweest voor het seizoensverloop van de temperatuur.

Er is bij het gevoeligheidsonderzoek gekeken naar de volgende parameters:

- Horizontale viscositeit en diffusiviteit: Het SIMONA 2D Grevelingen model rekent met een horizontale viscositeit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$. Voor het 3D Grevelingen model is gekozen voor een horizontale viscositeit en diffusiviteit van beide $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Verticale achtergrondviscositeit en diffusiviteit: In het 3D Grevelingen model wordt voor de verticale impuls en stofverspreiding met het k-epsilon model gewerkt. Daarnaast kan een achtergrondwaarde voor de verticale viscositeit en diffusiviteit gespecificeerd worden. De waarde voor beide is gevarieerd van $0,0$ tot $5,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Uiteindelijk is voor zowel de viscositeit als de diffusiviteit een waarde van $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ genomen.
- Secchi diepte: De Secchi diepte is een maat voor de troebelheid van het water. De gebruikte Secchi diepte is $2,0 \text{ m}$. Het verloop en de verspreiding van temperatuur bleek ongevoelig voor variaties in de Secchi diepte.
- Stanton en Dalton coëfficiënt: De Stanton en Dalton coëfficiënt zijn een maat voor respectievelijk de advectieve en evaporatieve warmteflux. Deze coëfficiënten zijn de belangrijkste afregelparameters van het temperatuursmodel. Initieel zijn de settings van het 3D Veerse Meer model gebruikt (Stanton: $1,885 \times 10^{-3}$; Dalton: $2,25 \times 10^{-3}$). Na gevoeligheidsberekeningen is de Stanton coëfficiënt op $3,045 \times 10^{-3}$ gezet. De uiteindelijk gebruikte waarde voor de Dalton coëfficiënt is eveneens $3,045 \times 10^{-3}$.
- Tijdstap: Een tijdstap van 2 minuten is gebruikt. Het verlagen van de tijdstap naar 1 minuut gaf geen significant ander resultaten.
- Aantal verticale lagen: Het gebruikte aantal verticale rekenlagen is 14 . Gevoeligheidsberekeningen met 28 lagen (gehalveerde laagdikten) gaven enigszins verbeterde resultaten met betrekking tot zout- en temperatuurtransport. Echter, gezien de toenemende rekentijd is vastgehouden aan het gebruik van 14 lagen.

3.2 Verificatie

De verificatie van het 3D Grevelingen model is uitgevoerd voor het jaar 2000, waarbij 1999 als inspeeljaar fungeerde. Voor de verificatie is gebruik gemaakt van GTSO metingen met betrekking tot zoutgehalte en temperatuur. De locaties van de GTSO metingen zijn gepresenteerd in Figuur 3.1. Gekeken is naar de horizontale en verticale verspreiding en het tijdsverloop van zoutgehalte en temperatuur over het gehele jaar. Een selectie van de resultaten van de uiteindelijke berekening zal hieronder worden gepresenteerd.

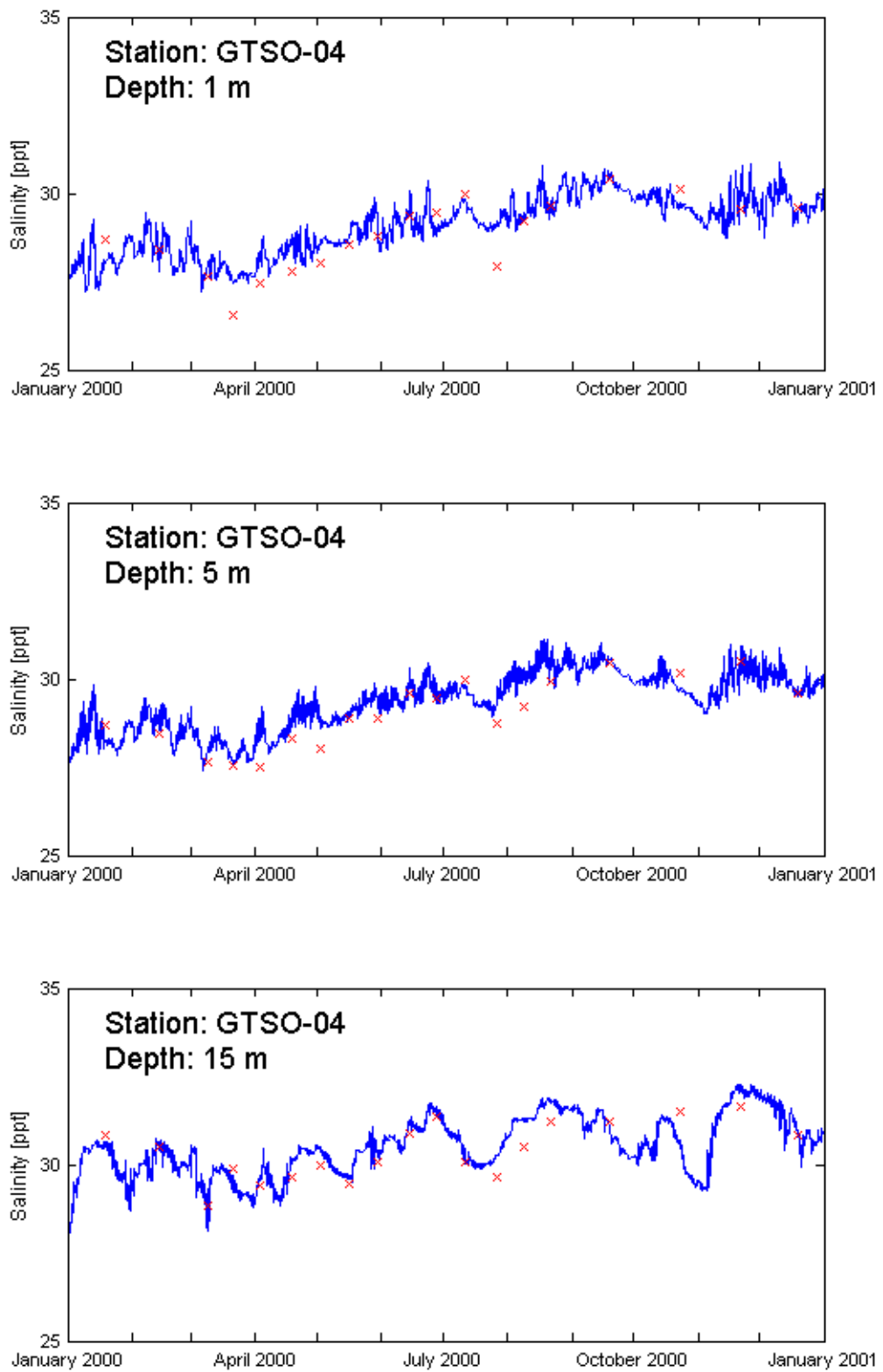


Figuur 3.1: Overzicht van de GTSO meetlocaties (rode bollen). Langs de rode stippellijn worden dwarsdoorsneden geplott.

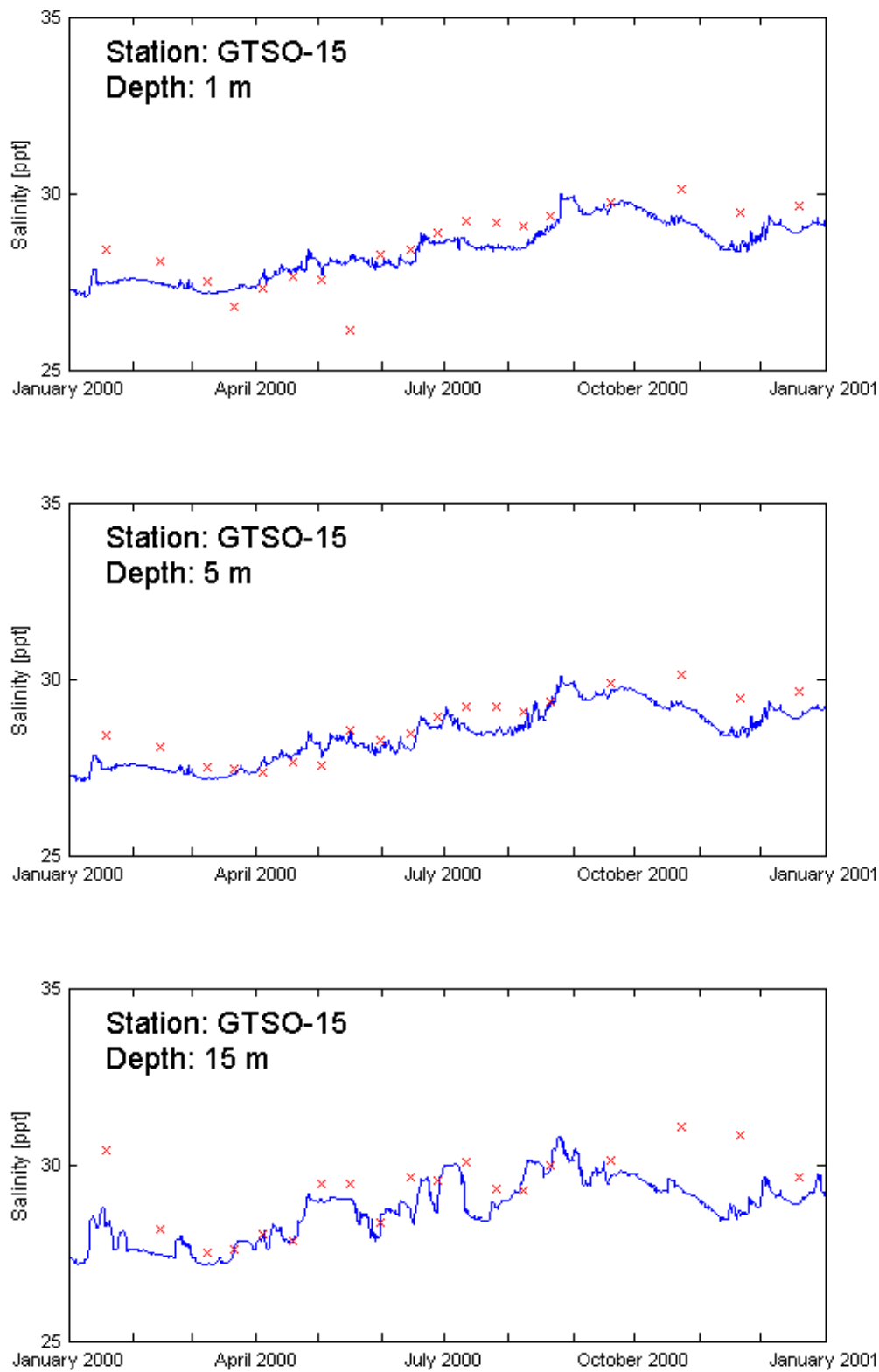
3.2.1 Tijdreeksen

In Figuur 3.2 en 3.3 is voor twee stations het gesimuleerde zoutgehalteverloop geplott tegen de gemeten waarden. Dit is gedaan voor verschillende diepten: 1 m, 5 m en 15 m. De overeenkomst met de metingen is goed. In station GTSO-15 is te zien dat aan het einde van het jaar, op 15 m diepte, het zoutgehalte onderschat wordt. Een oorzaak hiervan zou kunnen zijn dat er aan het einde van het jaar enkele gaten in de Brouwerssluis debieten zitten. Het Brouwerssluis debiet is daar nihil verondersteld, waardoor de grootte van de zouttong onderschat wordt en niet het zuidoosten van het Grevelingenmeer bereikt.

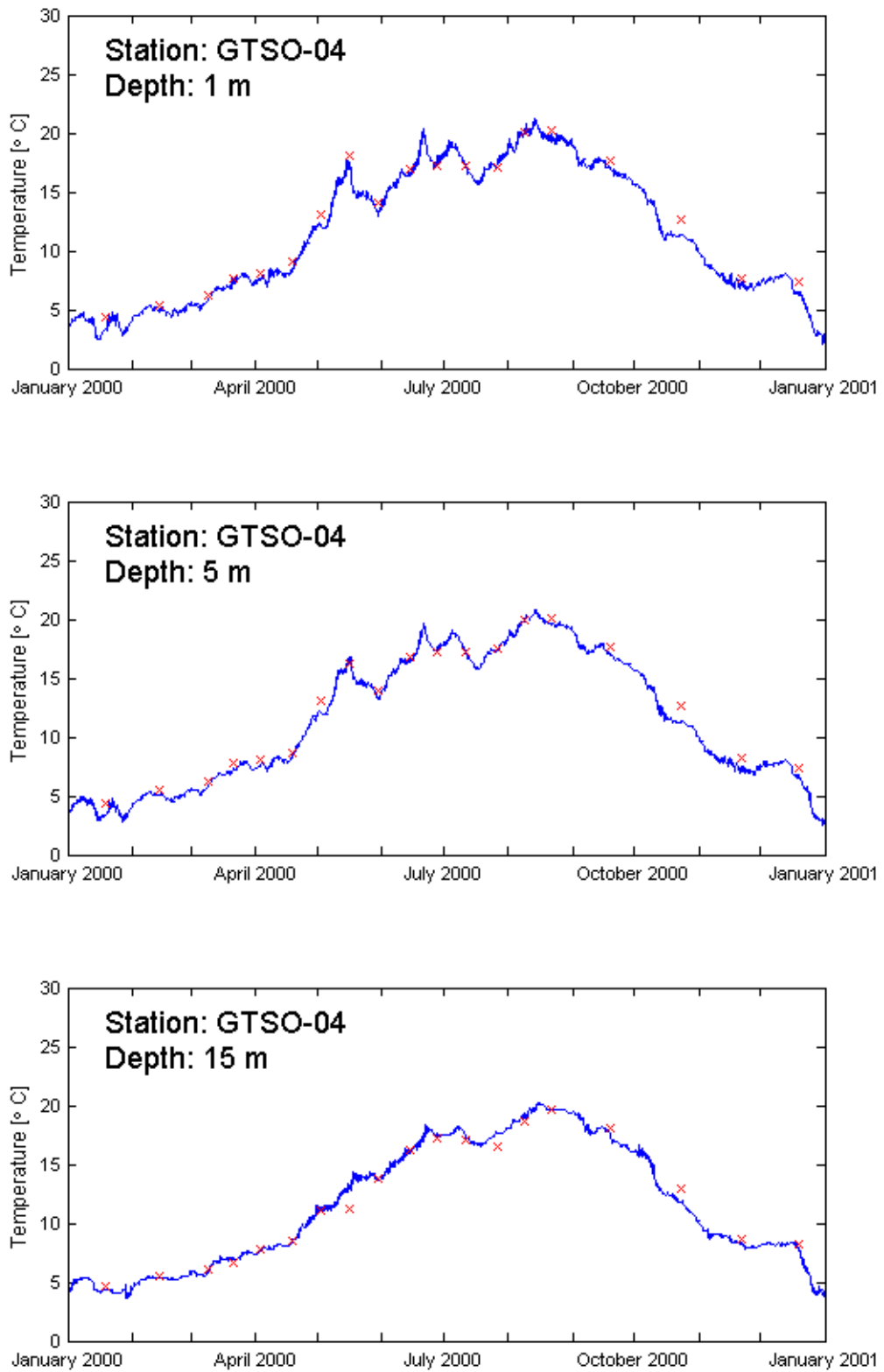
In Figuur 3.4 en 3.5 is de gesimuleerde temperatuur geplott tegen de gemeten waarden. De overeenkomst met de metingen is zeer goed. Zowel het seizoensverloop als variaties over tijdschalen van weken worden goed gereproduceerd.



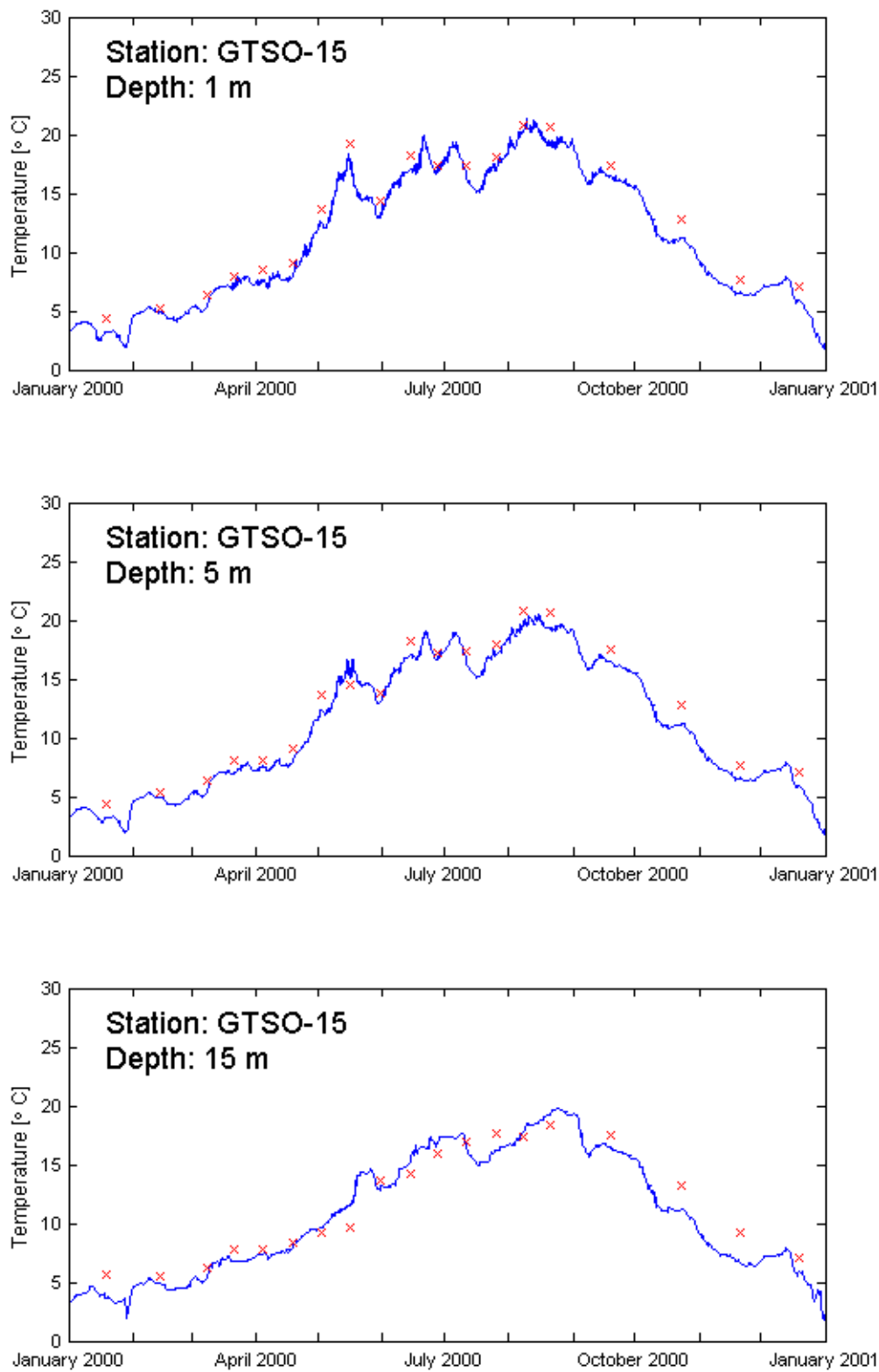
Figuur 3.2: *Tijdreeks van het zoutgehalte op 1 m, 5 m en 15 m diepte op locatie GTSO-04 (blauwe lijn: simulatie; rode kruisjes: GTSO metingen).*



Figuur 3.3: Tijdsreeks van het zoutgehalte op 1 m, 5 m en 15 m diepte op locatie GTSO-15 (blauwe lijn: simulatie; rode kruisjes: GTSO metingen).



Figuur 3.4: Tijdreeks van de temperatuur op 1 m, 5 m en 15 m diepte op locatie GTSO-04 (blauwe lijn: simulatie; rode kruisjes: GTSO metingen).

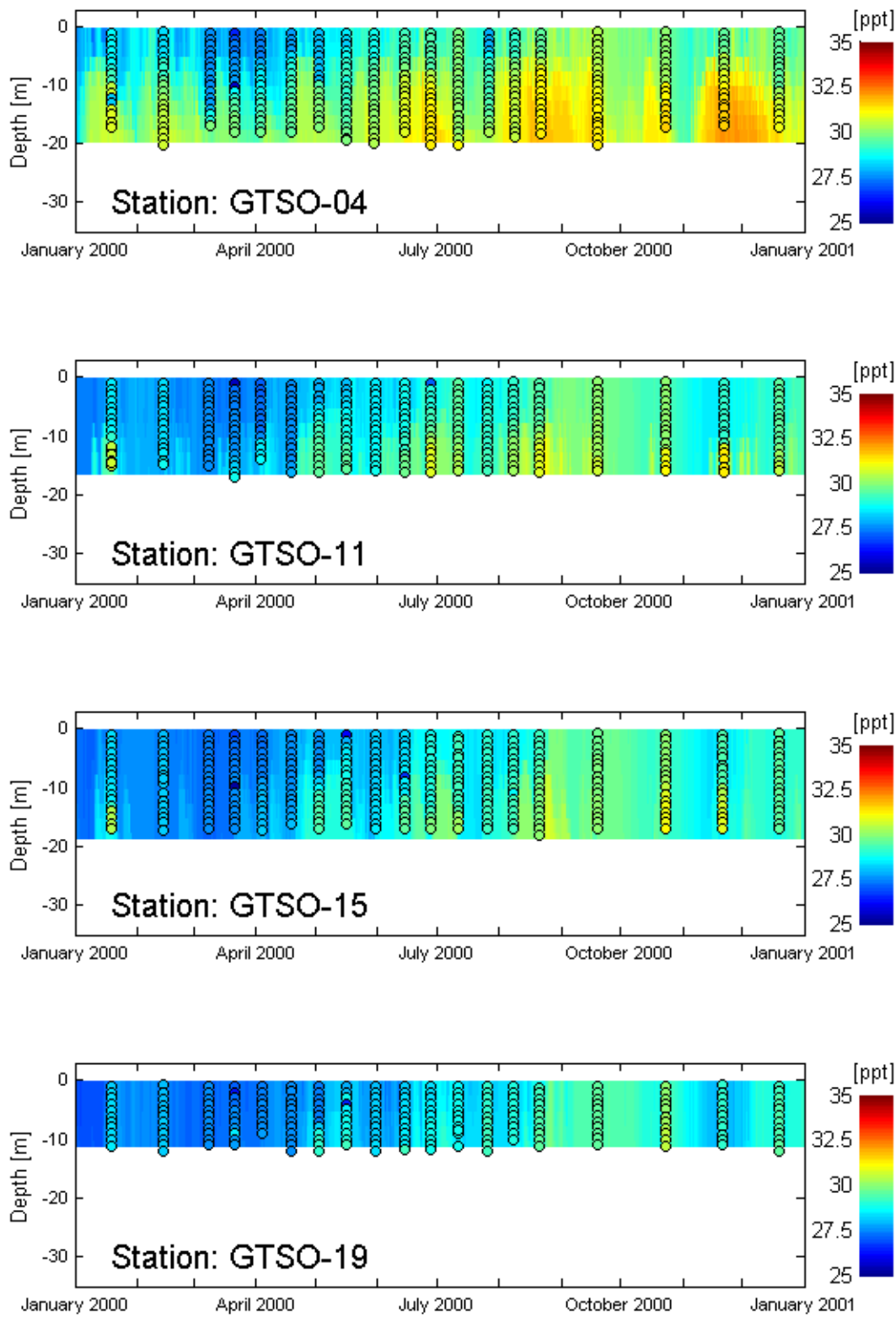


Figuur 3.5: Tijdsreeks van de temperatuur op 1 m, 5 m en 15 m diepte op locatie GTSO-15 (blauwe lijn: simulatie; rode kruisjes: GTSO metingen).

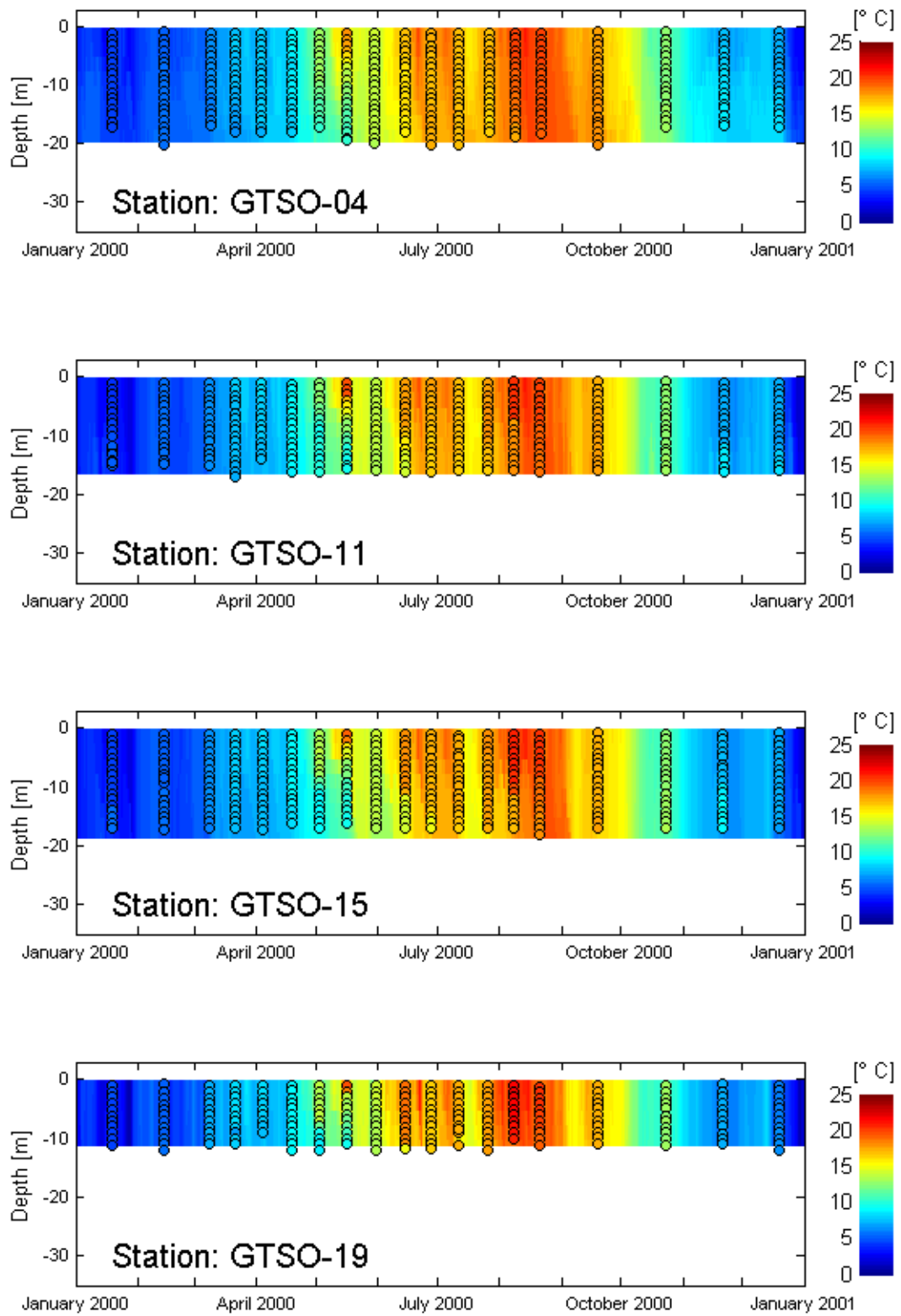
3.2.2 Z-t diagrammen

In Figuur 3.6 is, voor een selectie van vier stations, het gesimuleerde zoutgehalte geplot als functie van de diepte en de tijd. In de open bolletjes zijn de gemeten waarden geplot. De gesimuleerde waarden komen goed overeen met de metingen, zowel wat betreft het tijdsverloop als wat betreft de reproductie van stratificatie.

In Figuur 3.7 is hetzelfde gedaan voor de temperatuur. Ook hier is de overeenkomst met de metingen zeer goed.



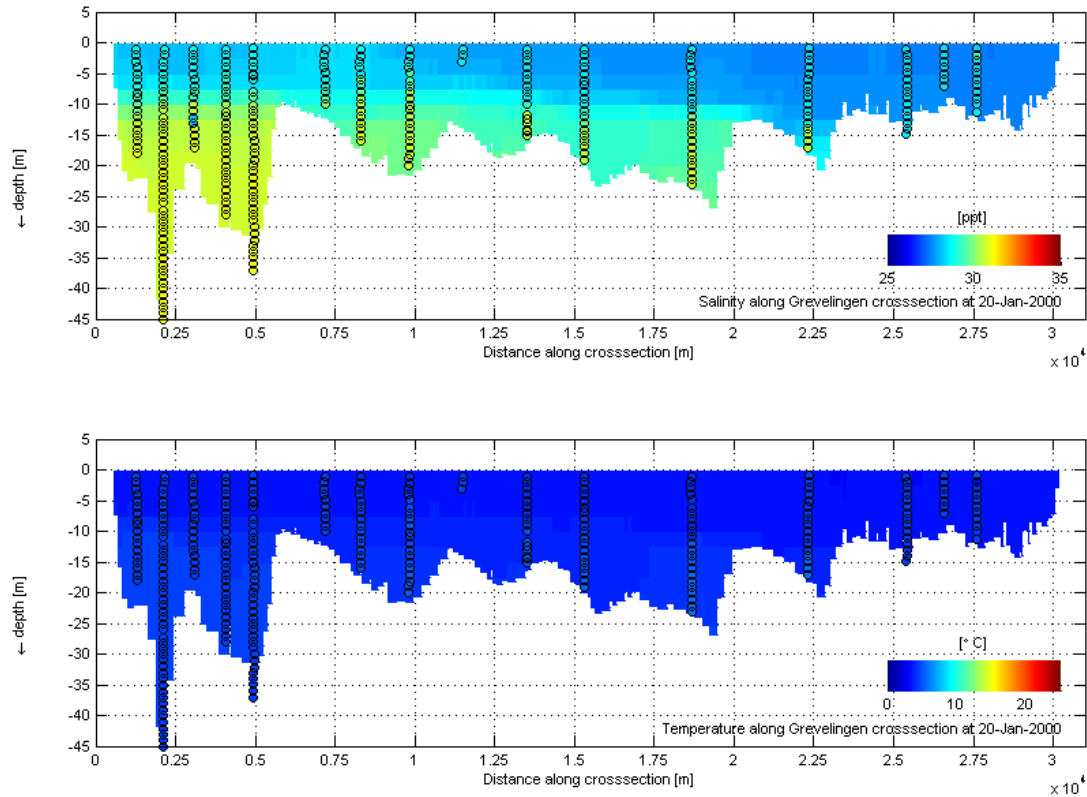
Figuur 3.6: Z-t diagram van het gesimuleerde zoutgehalte op locatie GTSO-04, GTSO-11, GTSO-15 en GTSO-19. De bolletjes zijn de gemeten (GTSO) profielen.



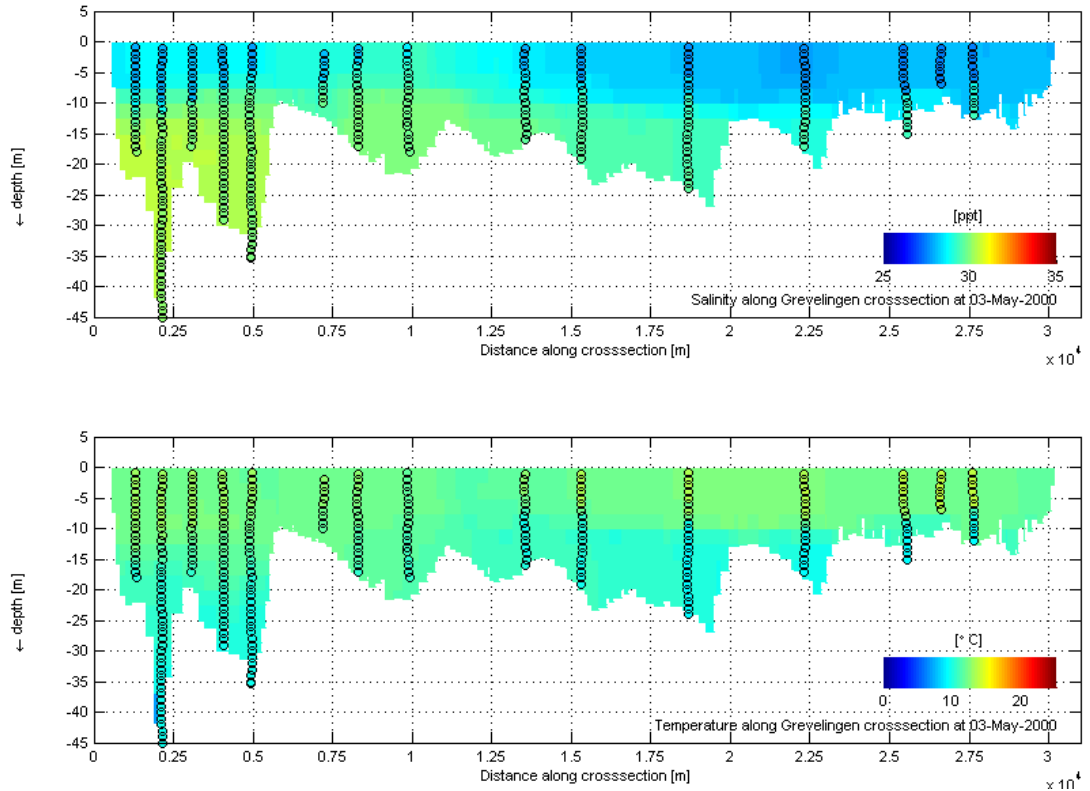
Figuur 3.7: Z-t diagram van de gesimuleerde temperatuur op locatie GTSO-04, GTSO-11, GTSO-15 en GTSO-19. De bolletjes zijn de gemeten (GTSO) profielen.

3.2.3 Dwarsdoorsneden

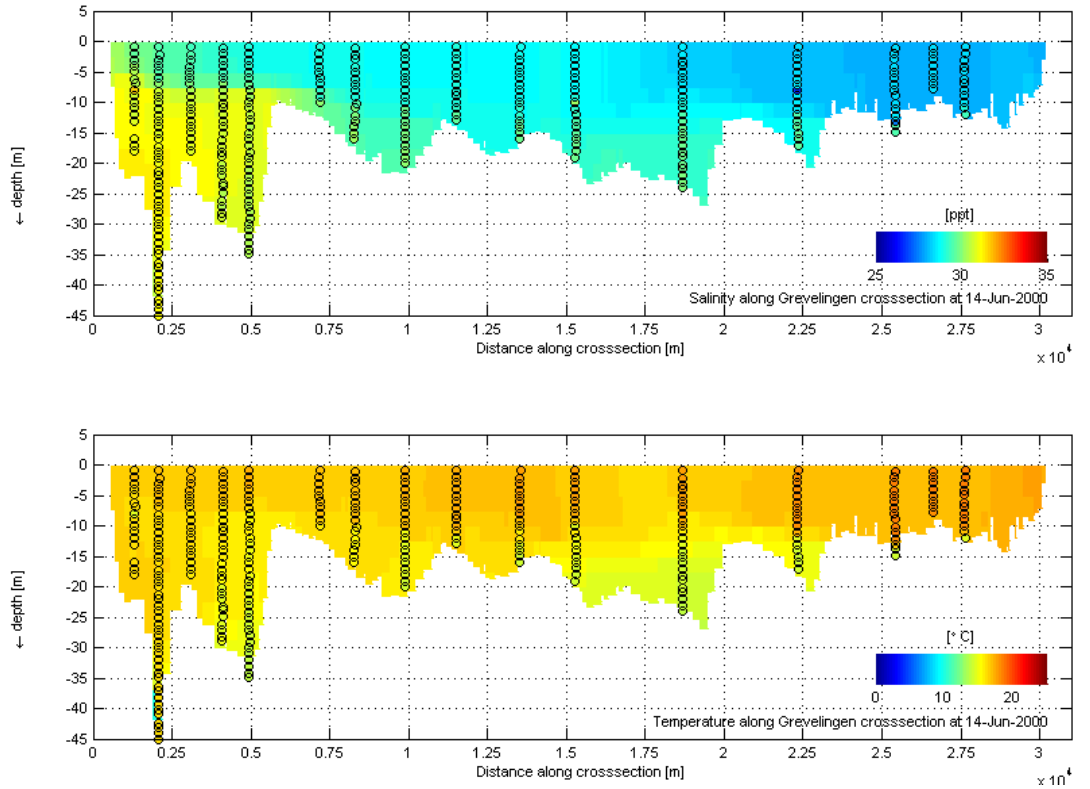
In Figuur 3.8 t/m 3.11 is, op verschillende tijdstippen, het zoutgehalte en de temperatuur in een dwarsdoorsnede door het model geplot. De locatie van de dwarsdoorsnede is weergegeven in Figuur 3.1. De gemeten waarden zijn in de open bolletjes geplot. Ook hier blijkt een goede overeenkomst met de metingen wat betreft stratificatie en de ruimtelijke variatie daarin.



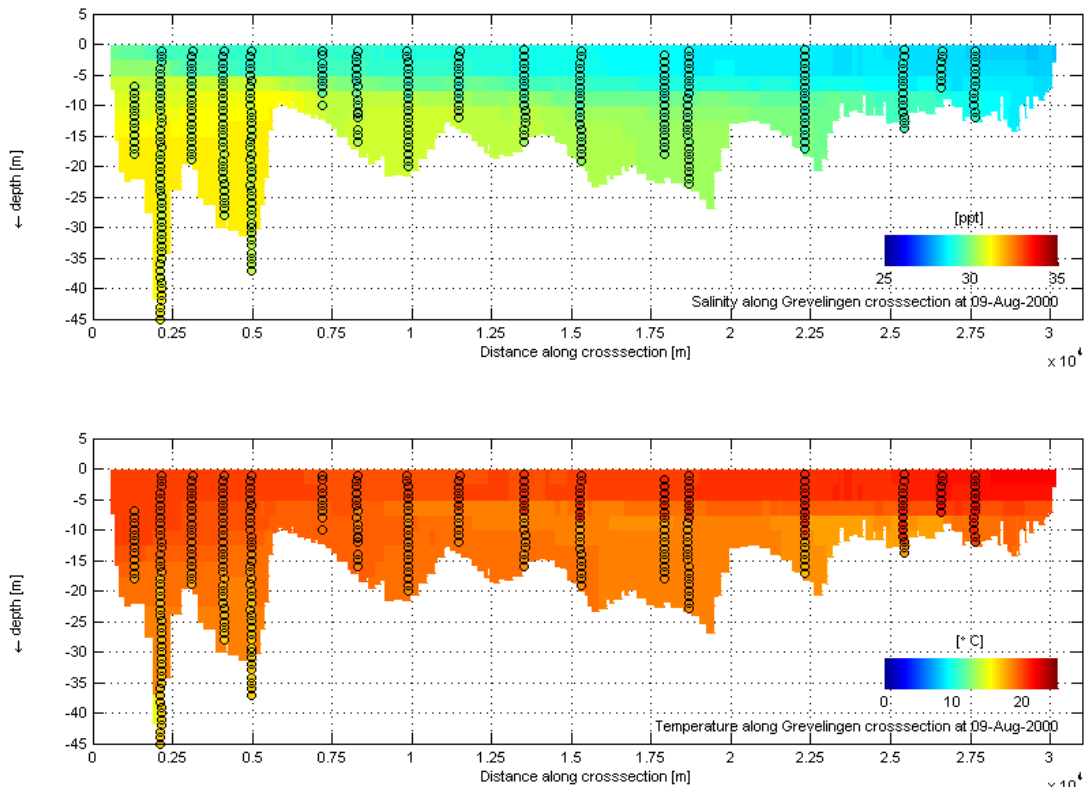
Figuur 3.8: Dwarsdoorsnede op 20 januari 2000 van gesimuleerd zoutgehalte (boven) en temperatuur (onder). De bolletjes zijn de gemeten (GTSO) profielen.



Figuur 3.9: Dwarsdoorsnede op 3 mei 2000 van gesimuleerd zoutgehalte (boven) en temperatuur (onder). De bolletjes zijn de gemeten (GTSO) profielen.



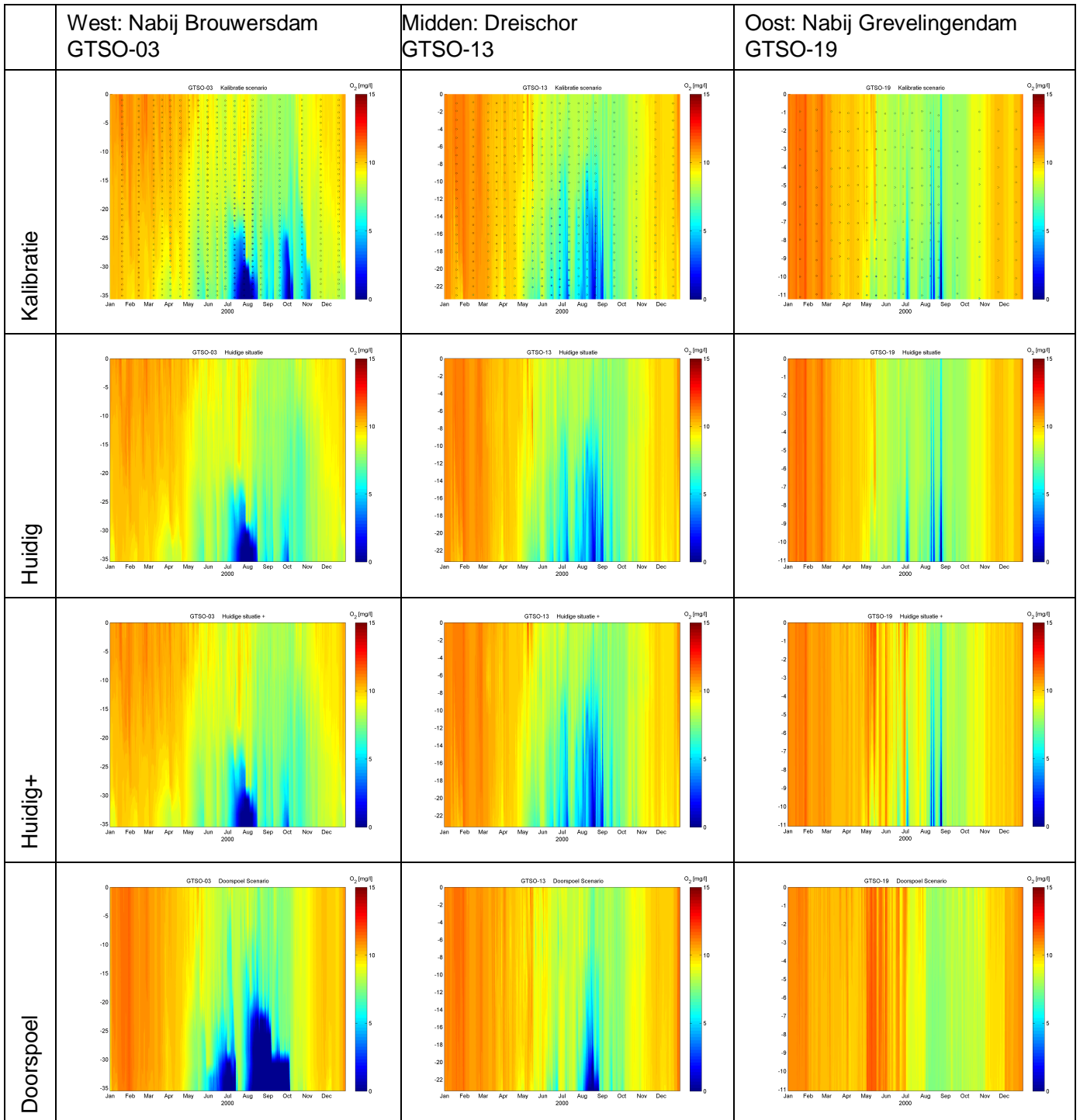
Figuur 3.10: Dwarsdoorsnede op 14 juni 2000 van gesimuleerd zoutgehalte (boven) en temperatuur (onder). De bolletjes zijn de gemeten (GTSO) profielen.

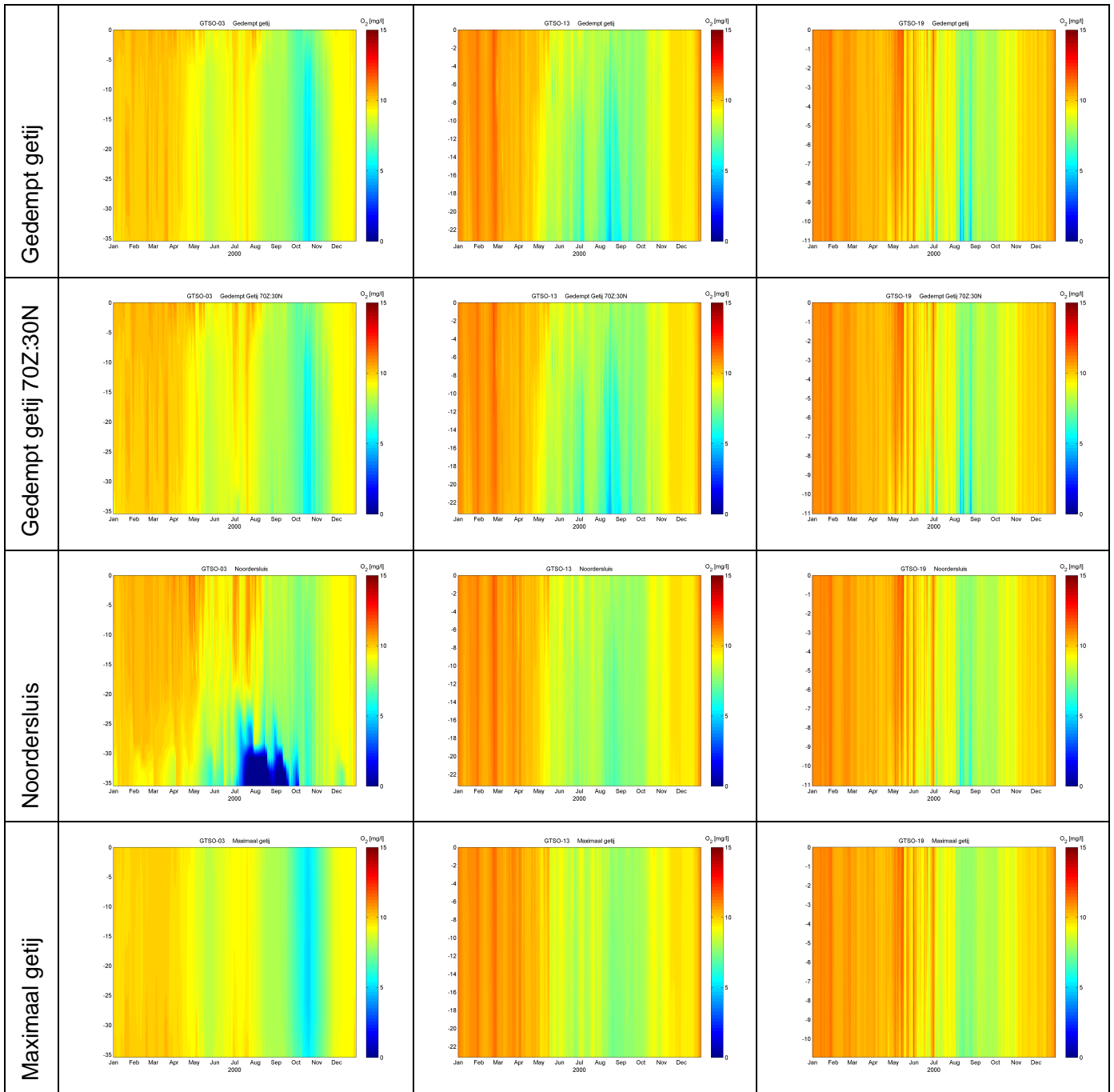


Figuur 3.11: Dwarsdoorsnede op 9 augustus 2000 van gesimuleerd zoutgehalte (boven) en temperatuur (onder). De bolletjes zijn de gemeten (GTSO) profielen.

C Zuurstofprofielen

In deze appendix zijn de gemodelleerde zuurstof-profielen te zien voor drie locaties. Dit zijn de locatie Dreischor (GTSO 13), een westelijke en tevens de meest diepe locatie vlak bij de Brouwerssluis (GTSO 3), en een oostelijke en juist ondiepe locatie bij de Flakkeese Spuisluis (GTSO 19). De zuurstofprofielen van de overige GTSO locaties zijn te vinden in op de bijgeleverde CD.

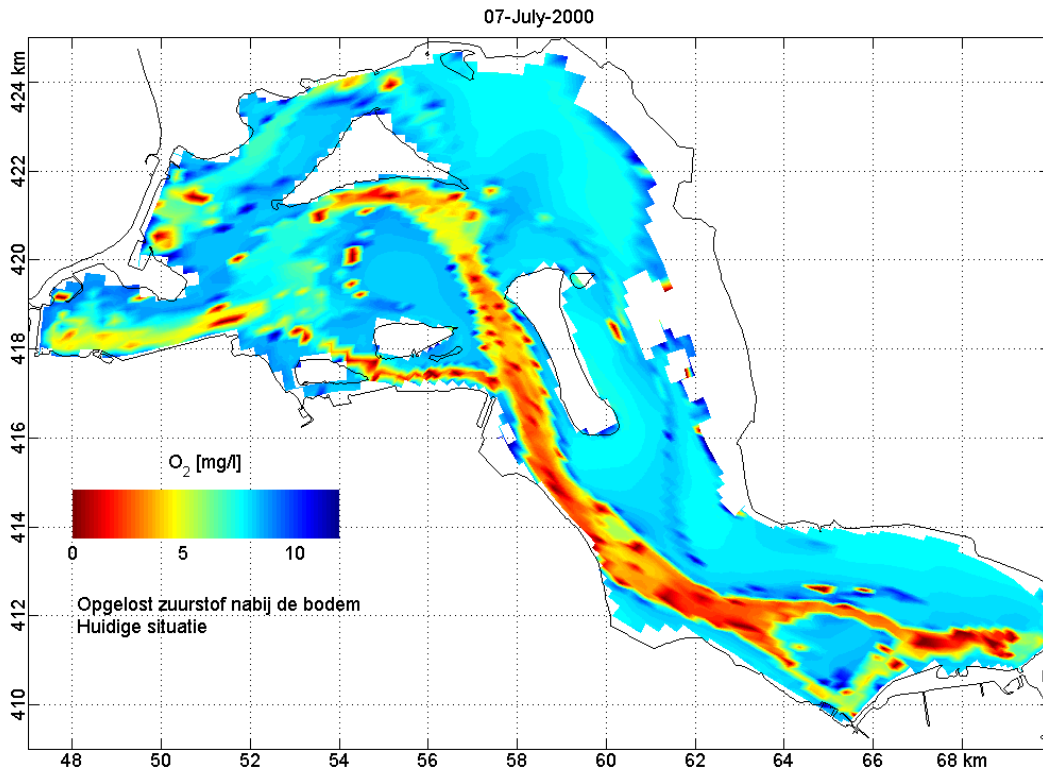




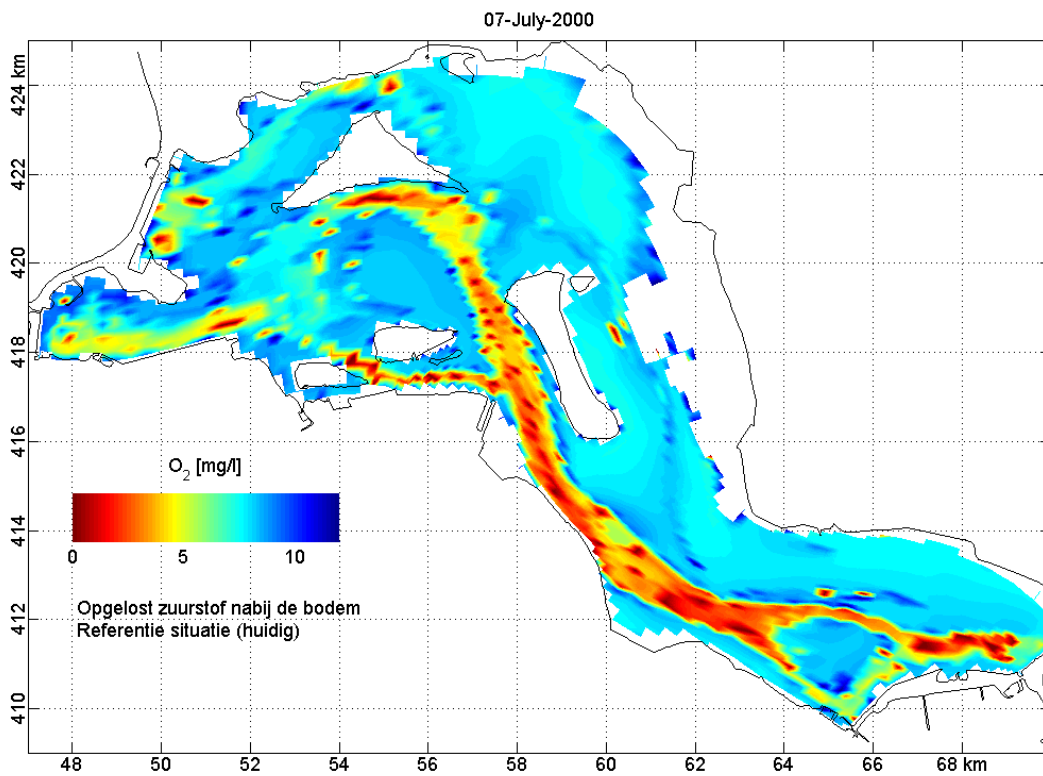
D Bodemkaarten zuurstof 7 juli 2000

In deze appendix zijn zuurstofconcentraties in de onderste laag van de waterkolom te zien op 7 juli, wat een van de momenten is waarop de laagste zuurstofconcentraties optreden.

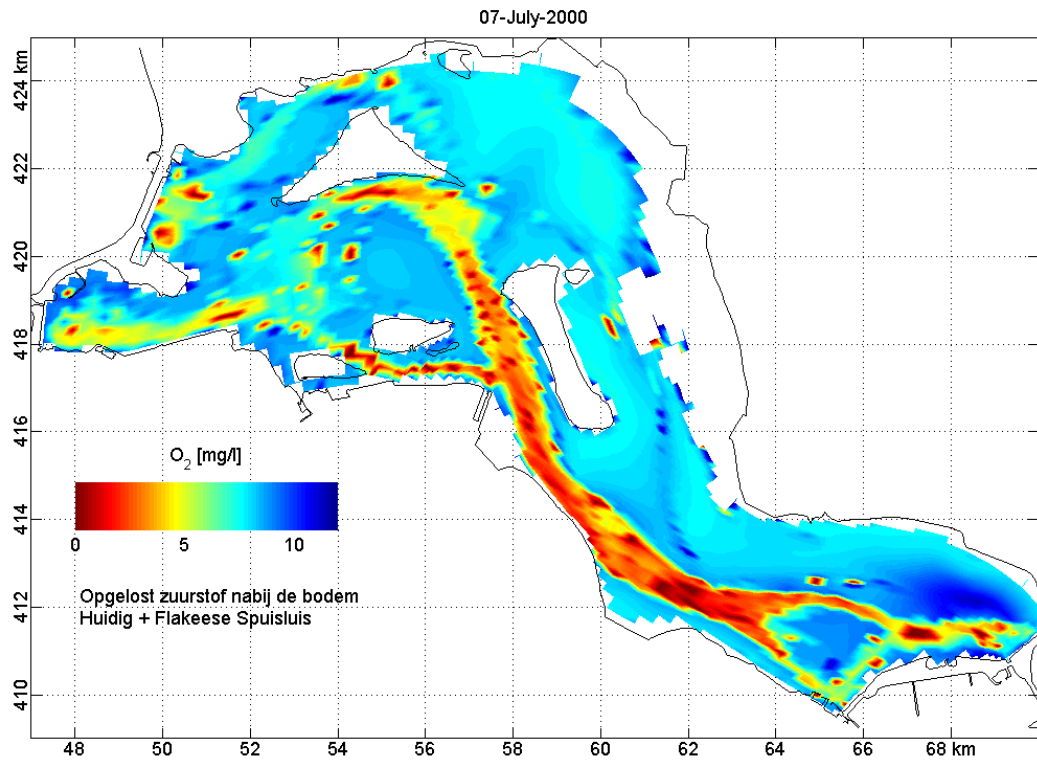
D.1 Kalibratie Scenario



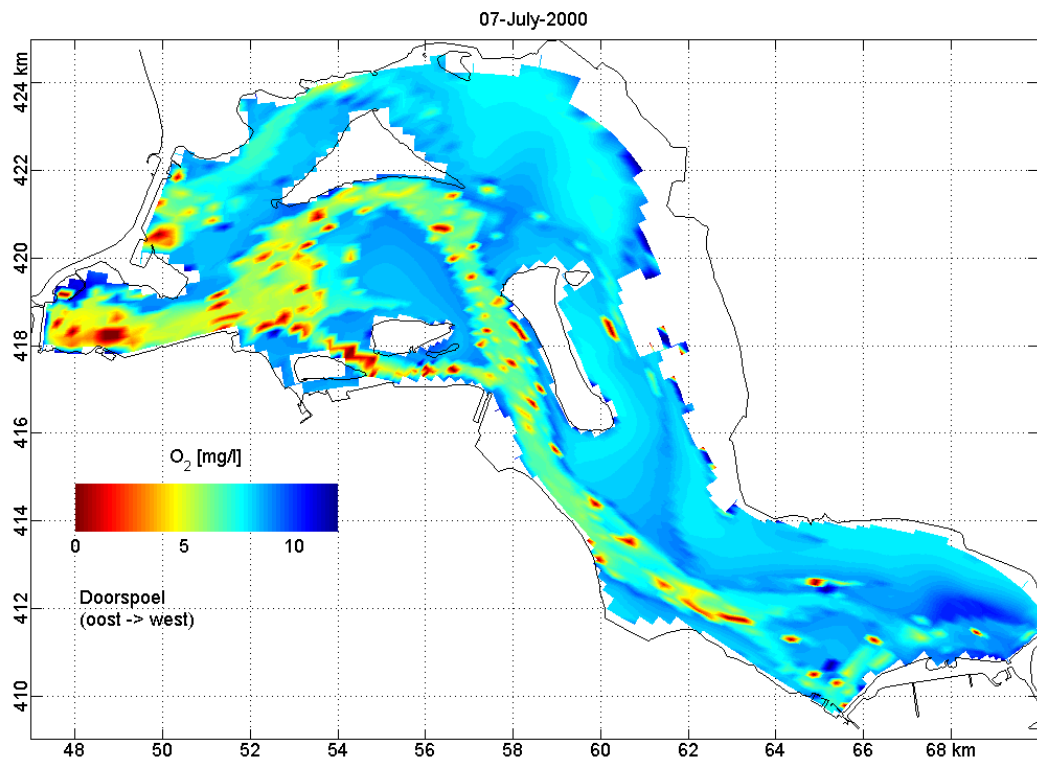
D.2 Huidig Scenario



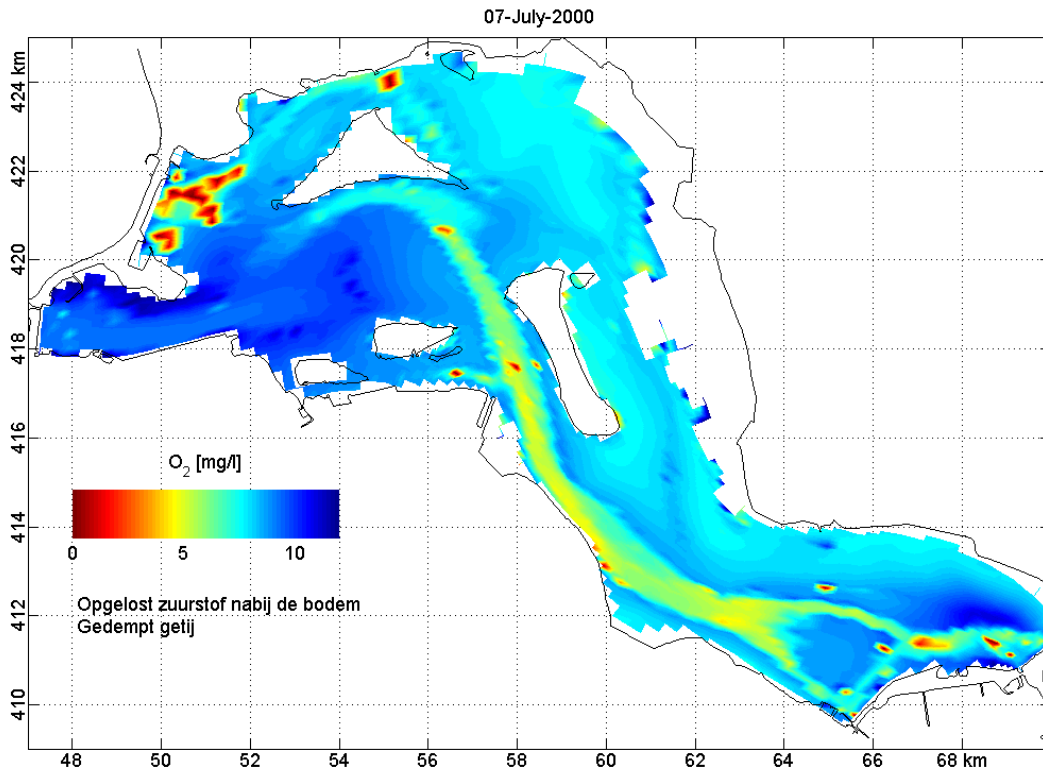
D.3 Huidig+ Scenario



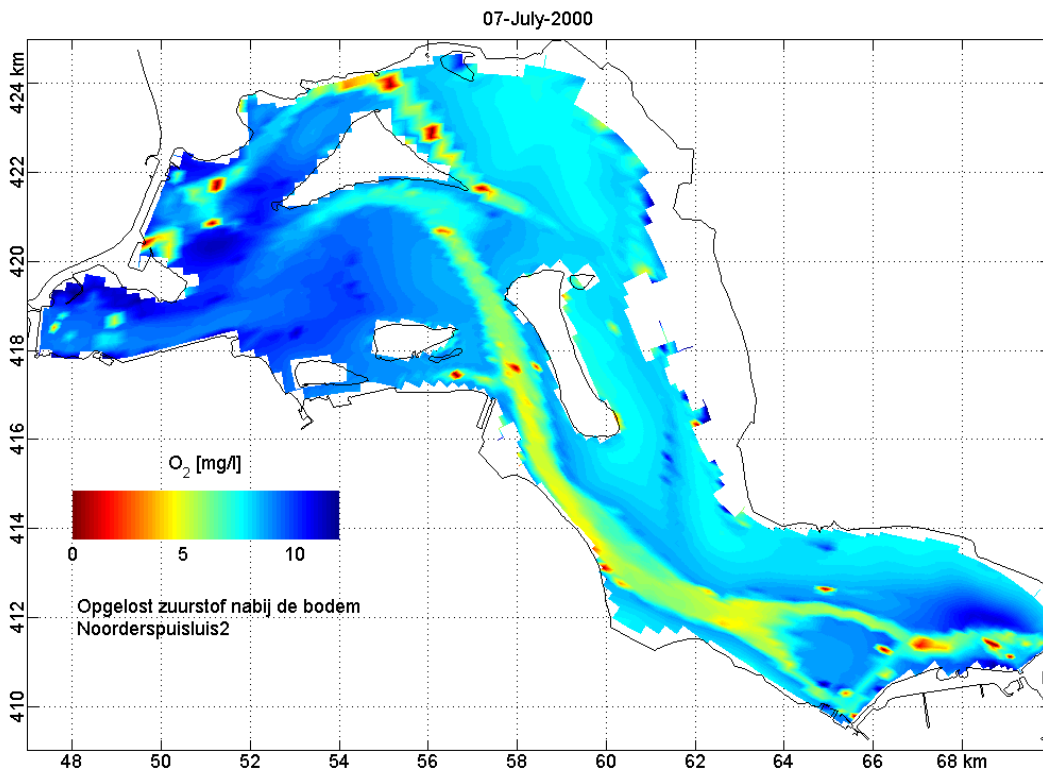
D.4 Doorspoel Scenario



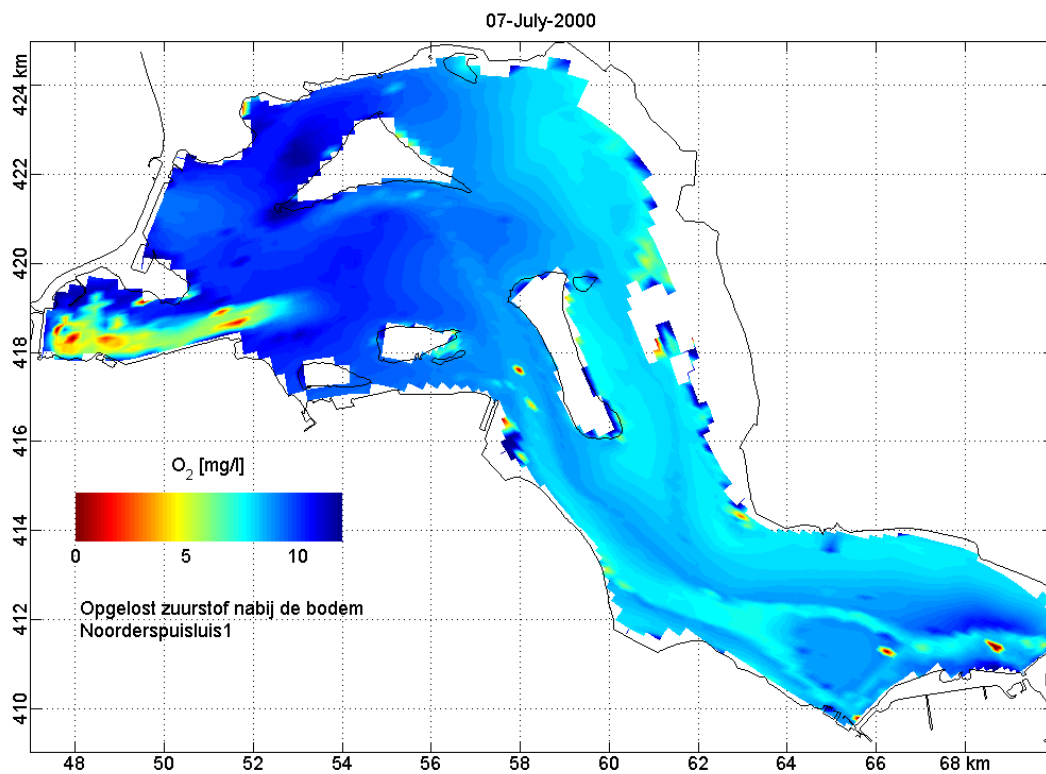
D.5 Gedempt Getij



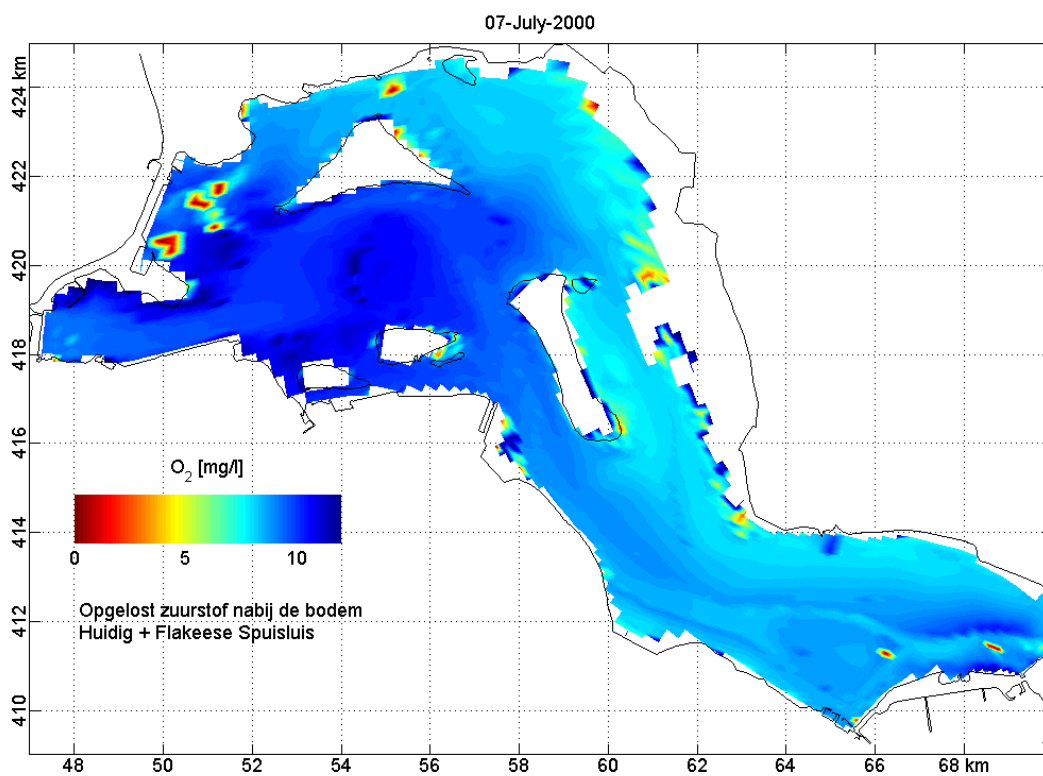
D.6 Gedempt getij 70Z:30N



D.7 Noorderspuisluis

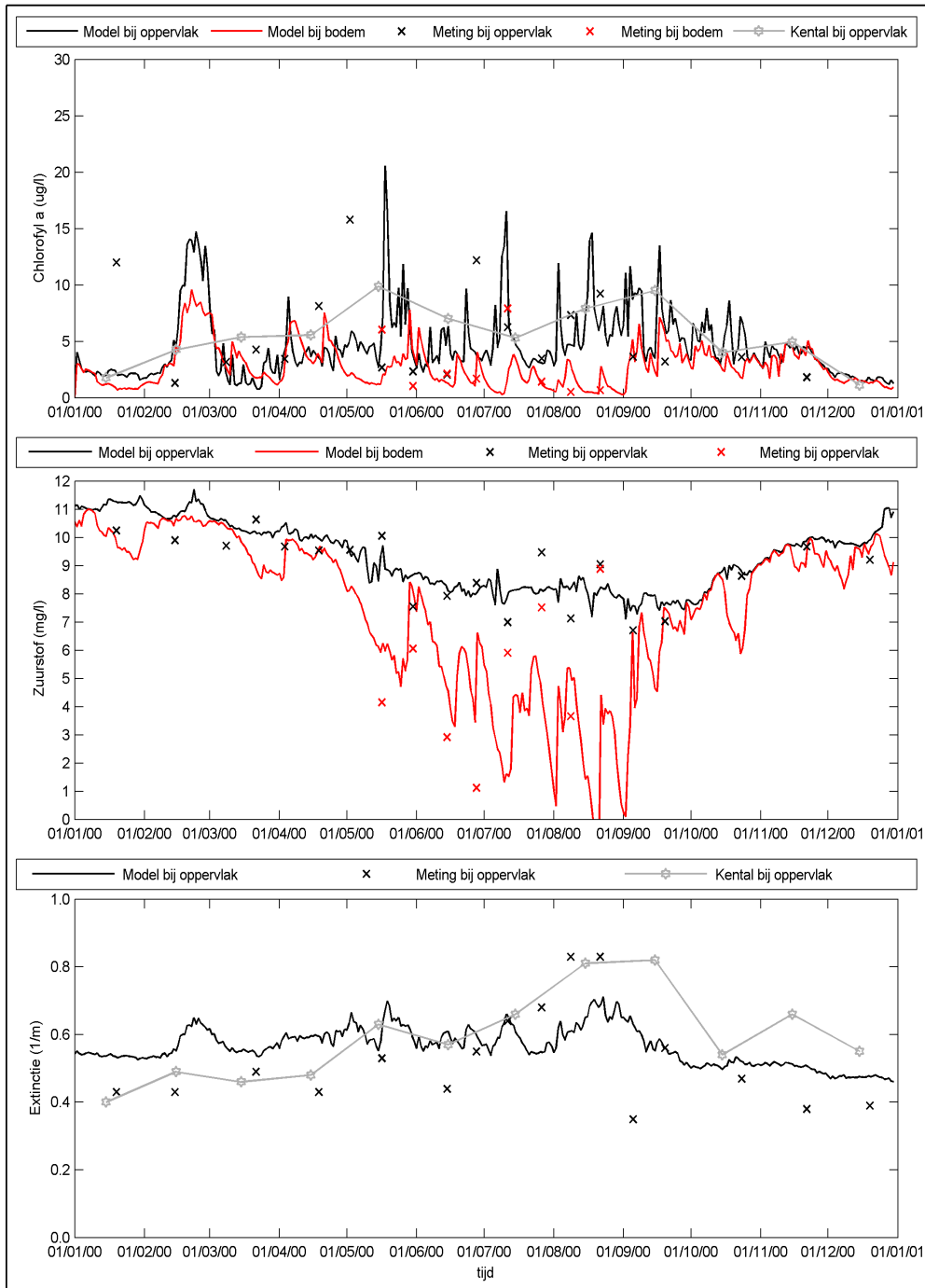


D.8 Maximaal Getij

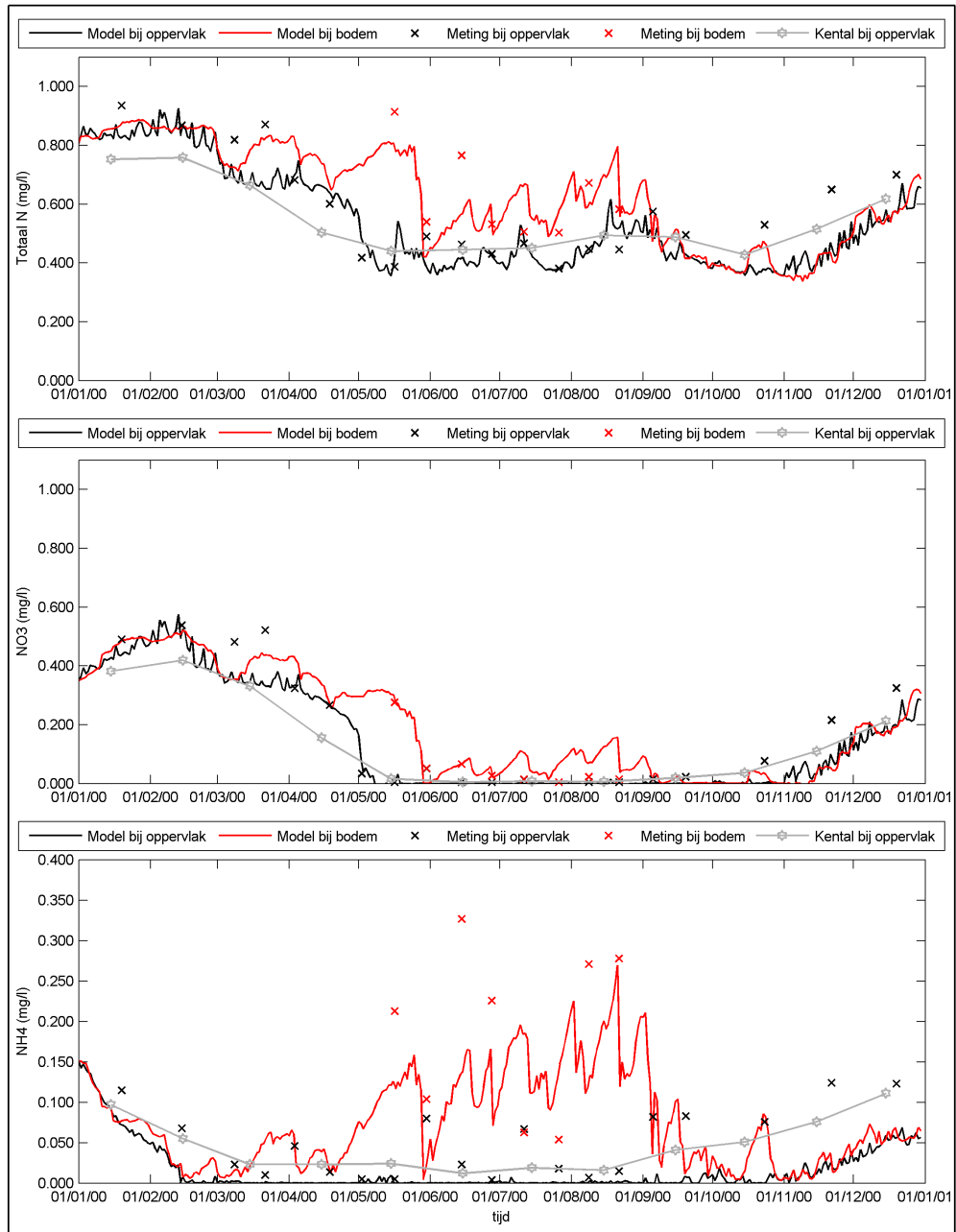


E Tijdseries DONAR locatie Dreischor

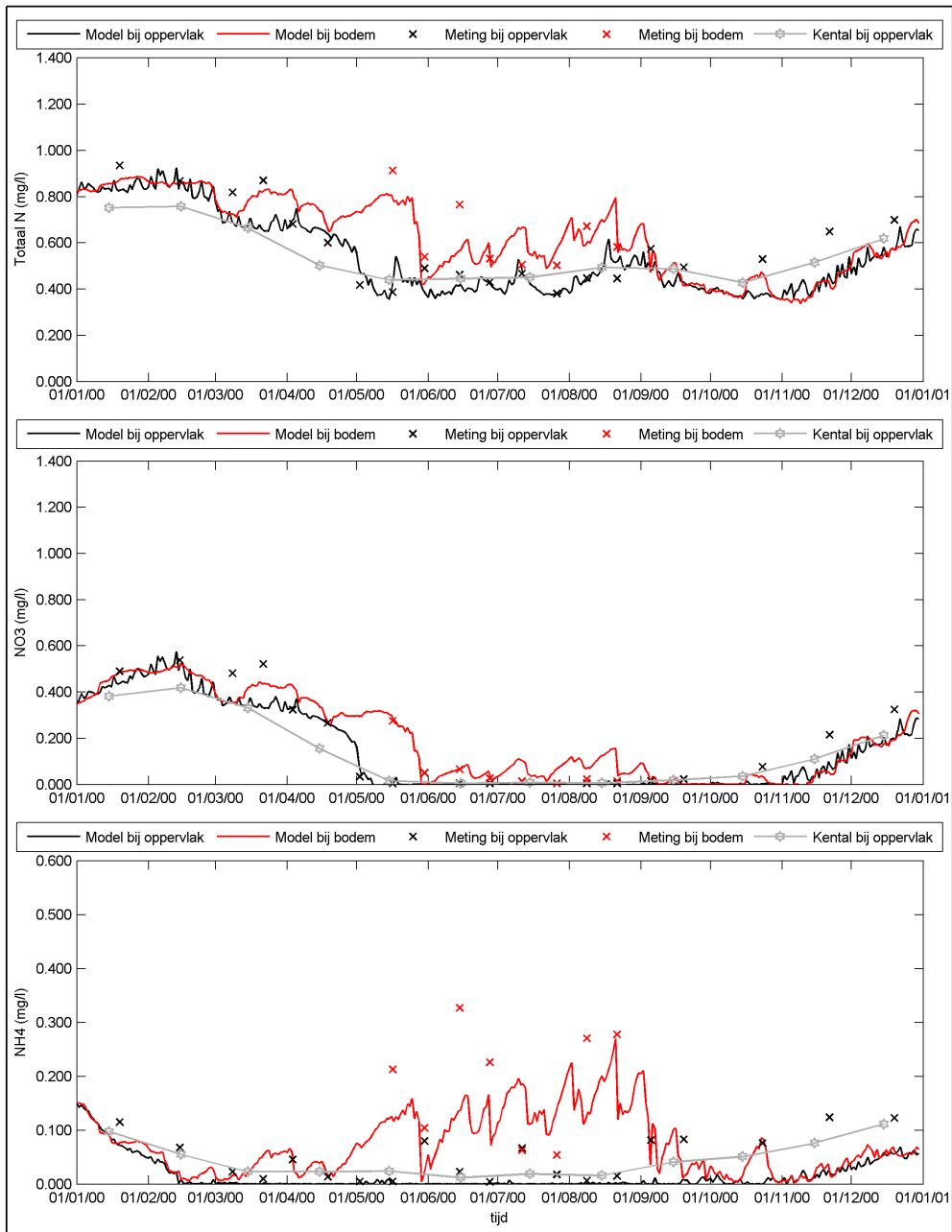
E.1 Kalibratie Scenario



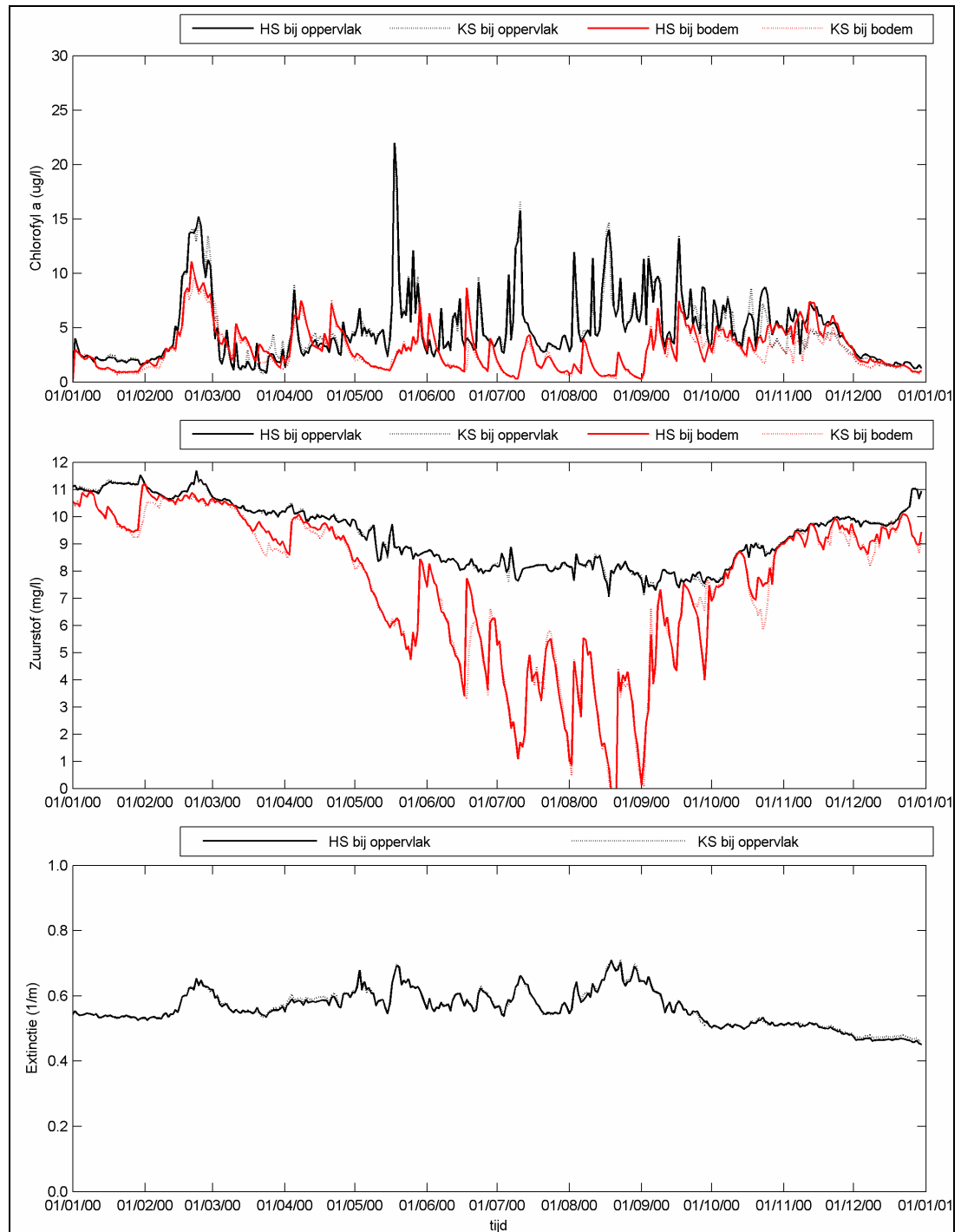
Kalibratie Scenario



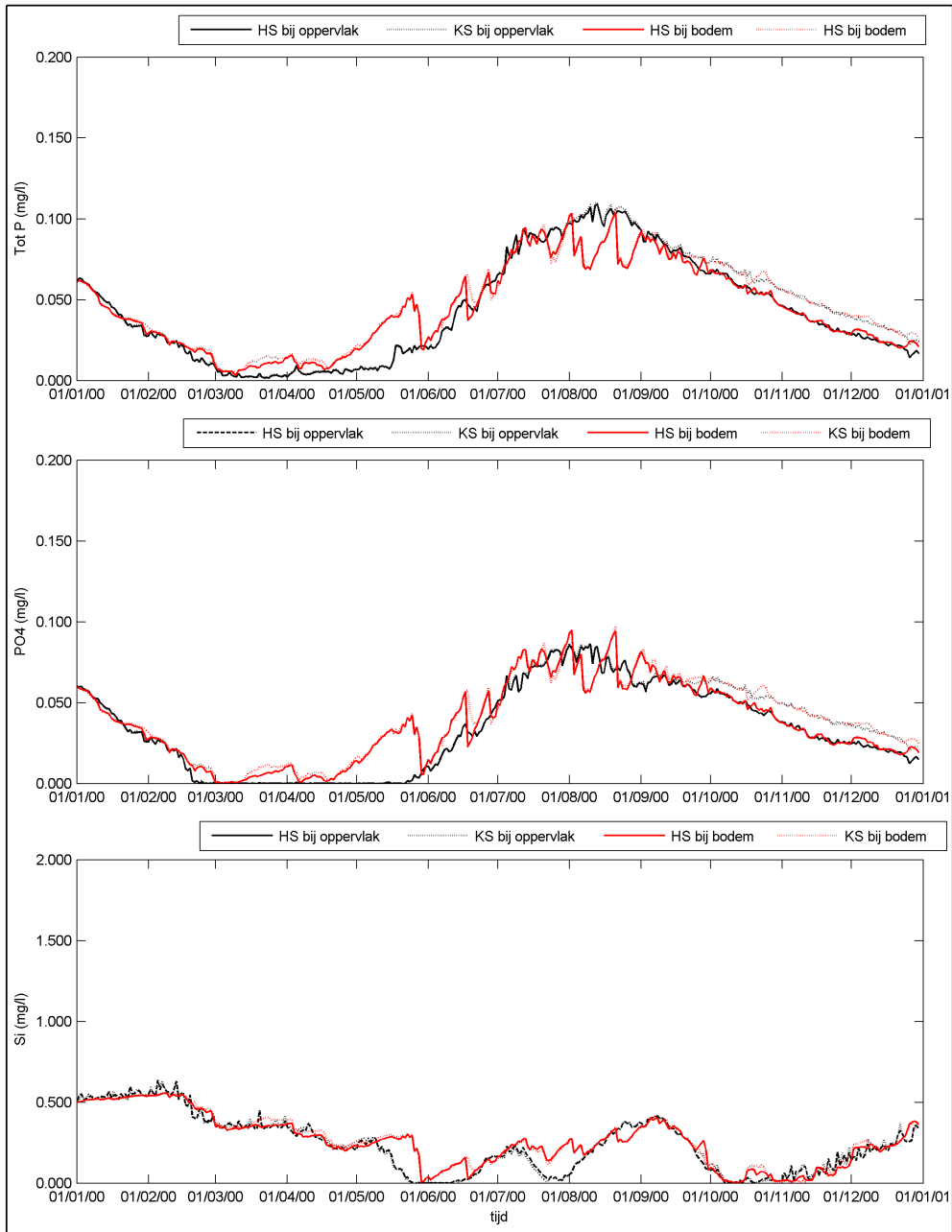
Kalibratie Scenario



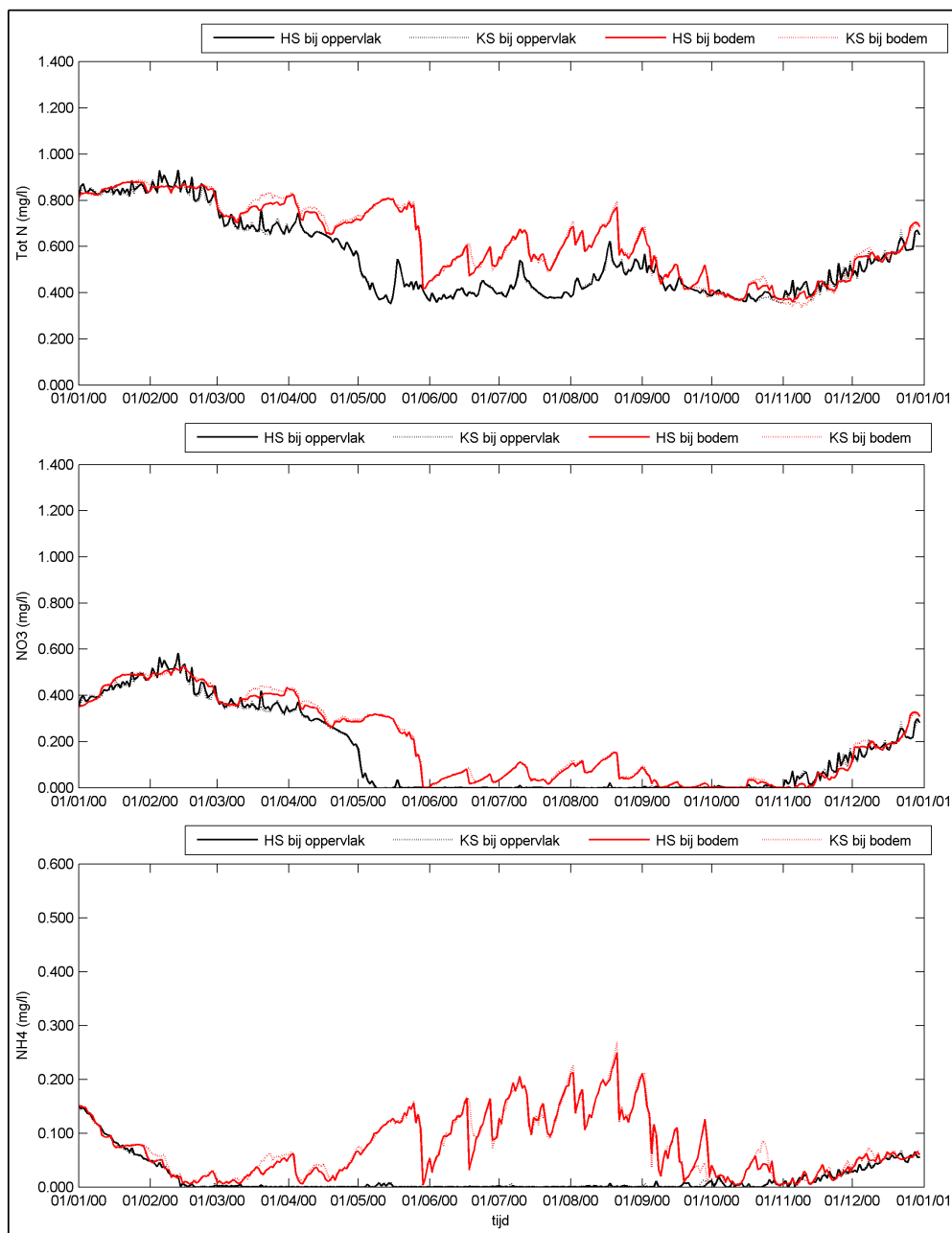
E.2 Huidig vs Kalibratie



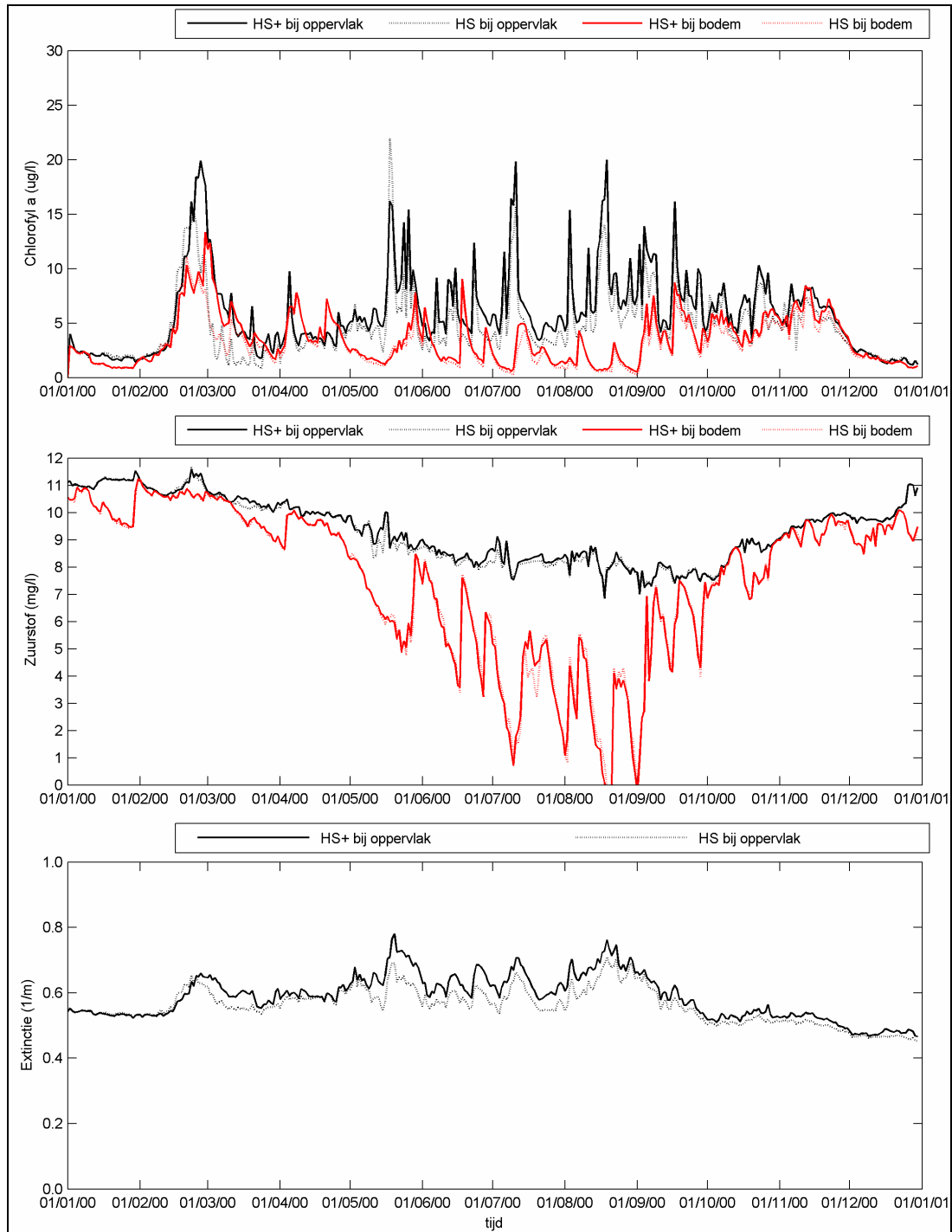
Huidig vs Kalibratie



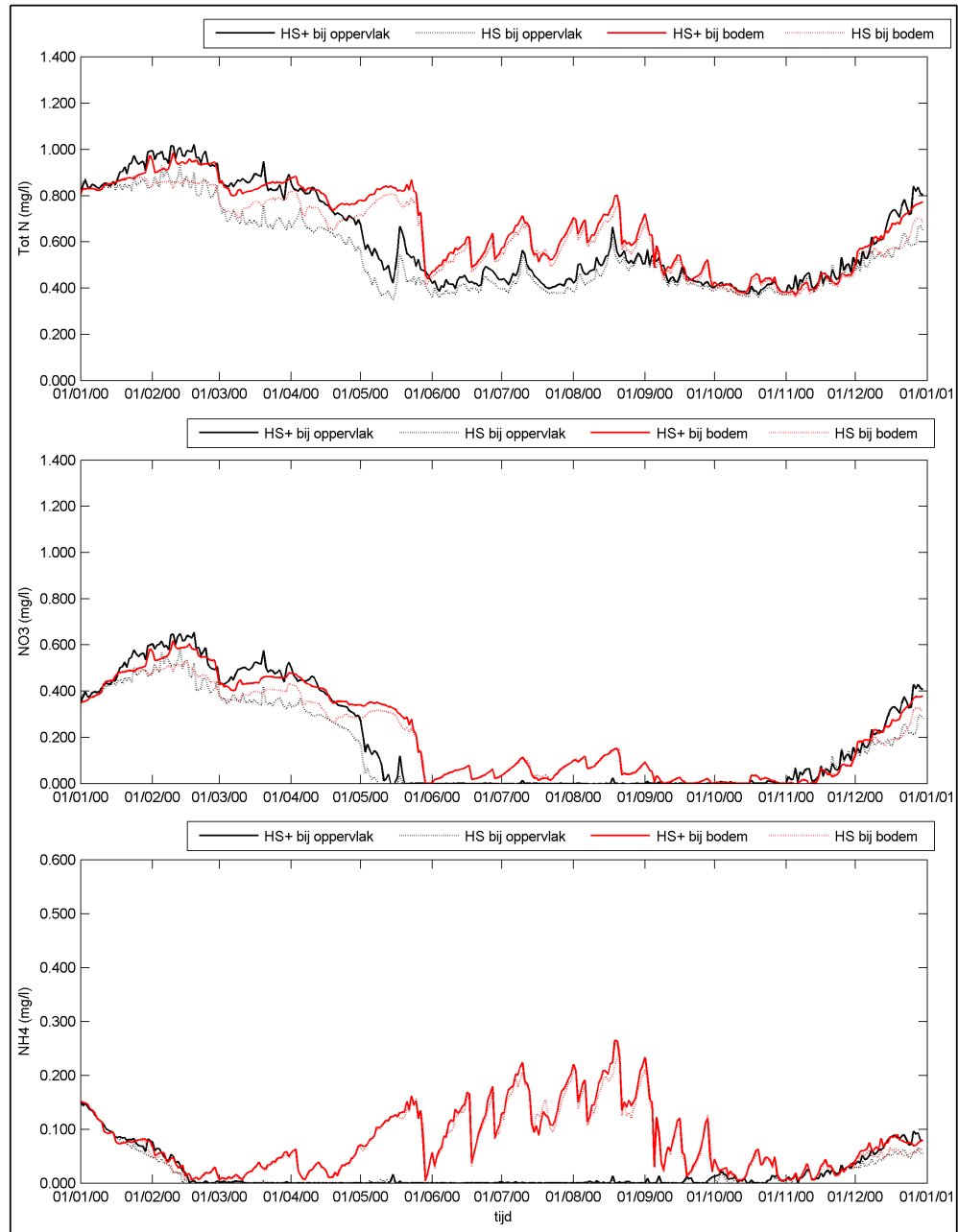
Huidig vs Kalibratie



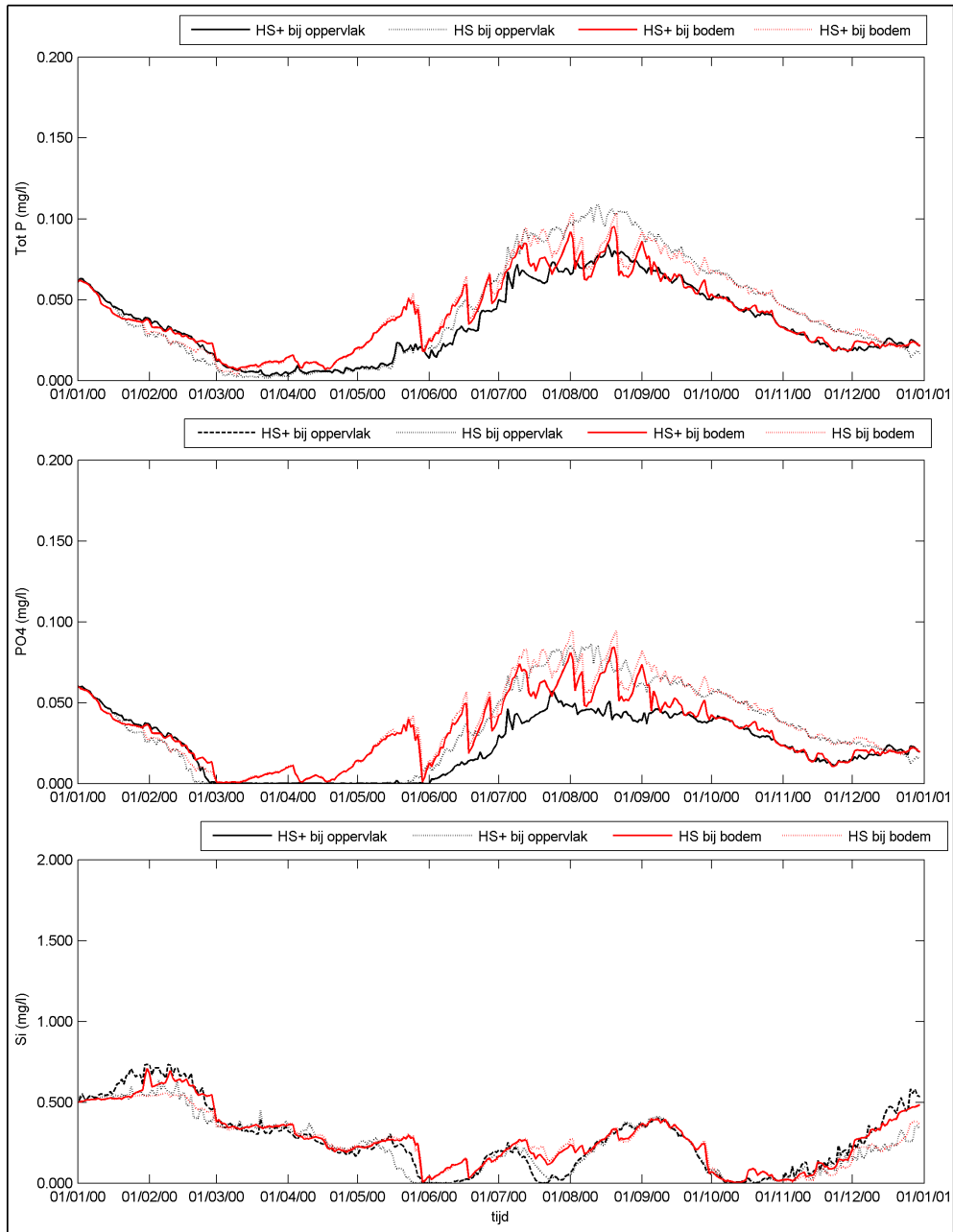
E.3 Huidig+ vs Huidig



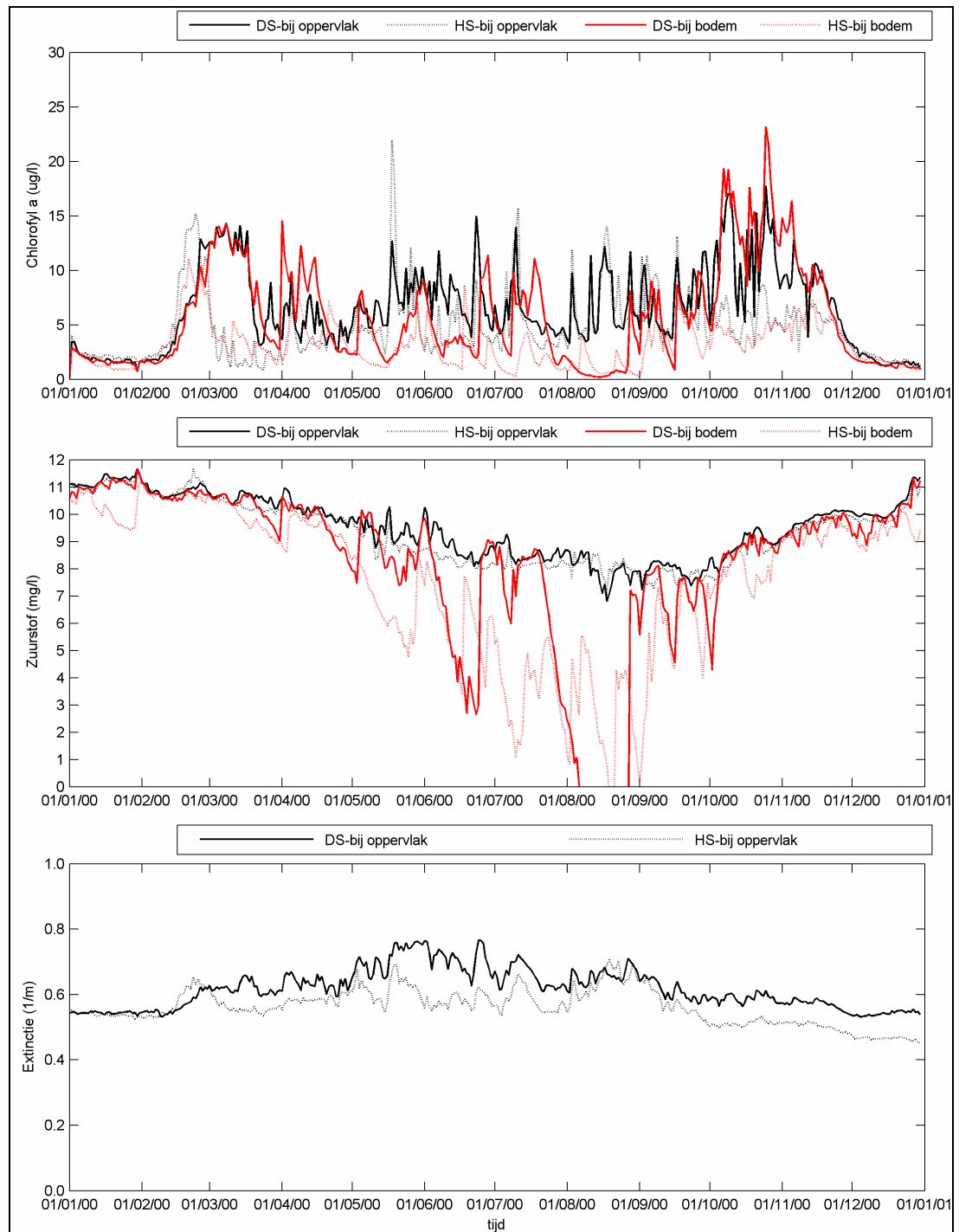
Huidig+ vs Huidig



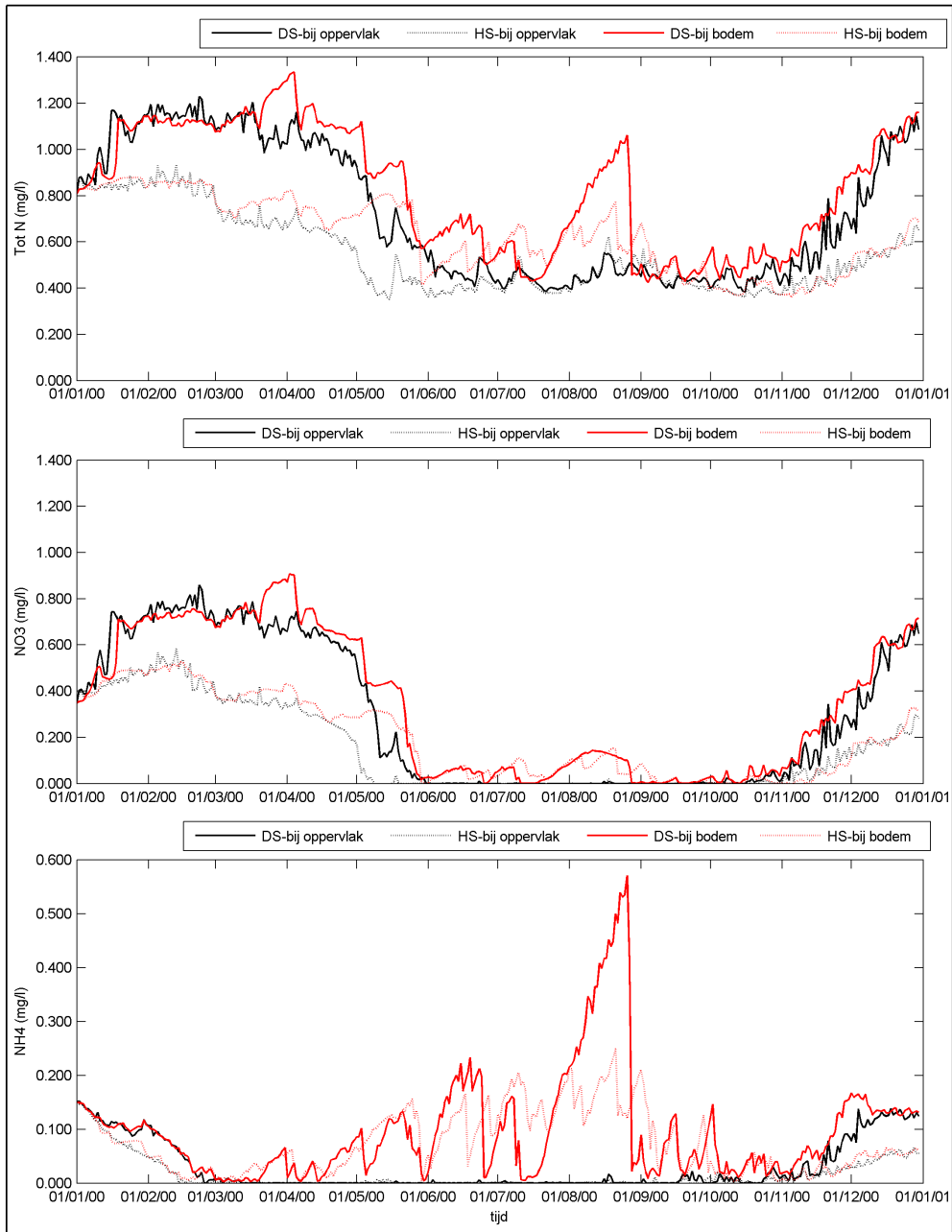
Huidig+ vs Huidig



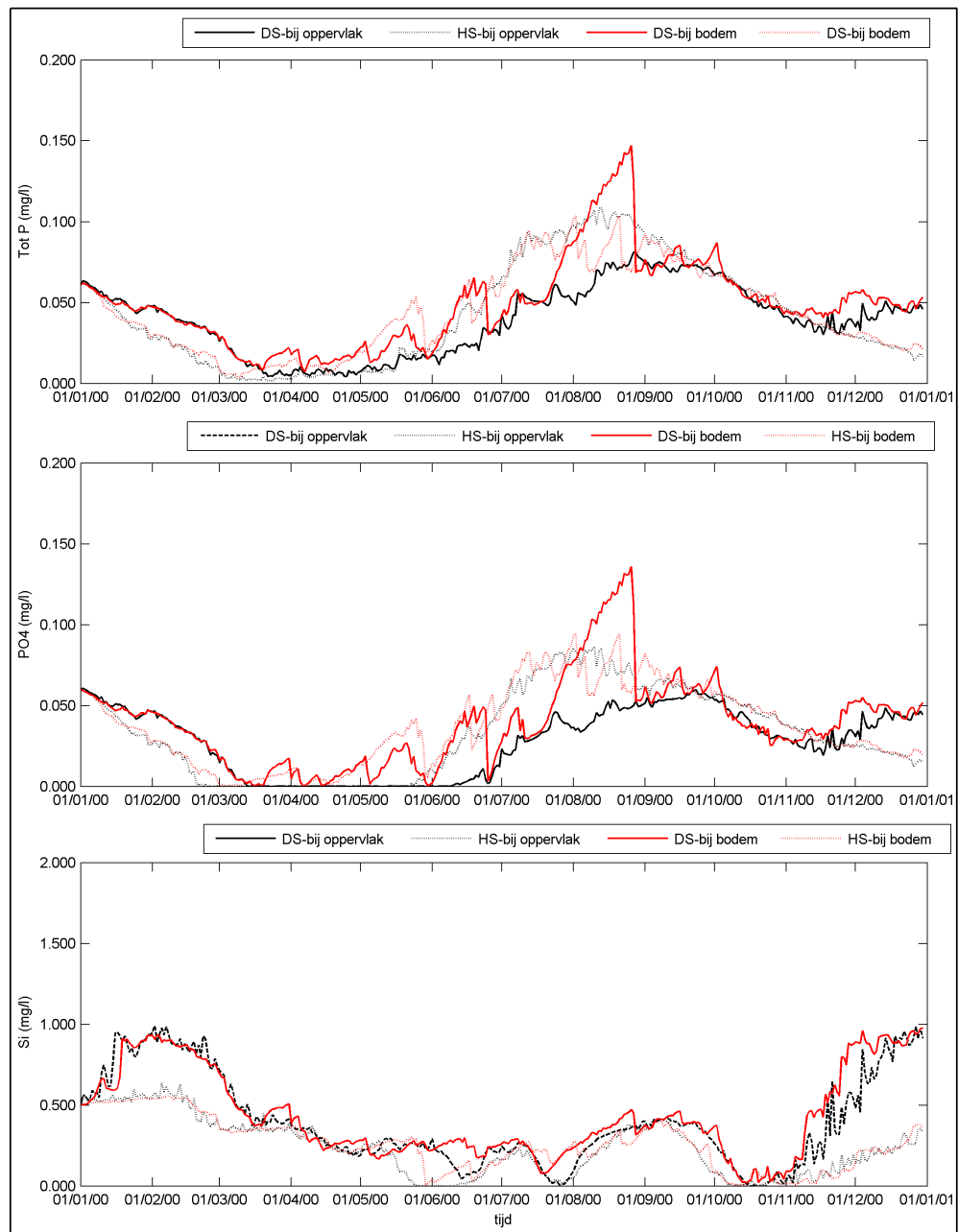
E.4 Doorspoel vs Huidig



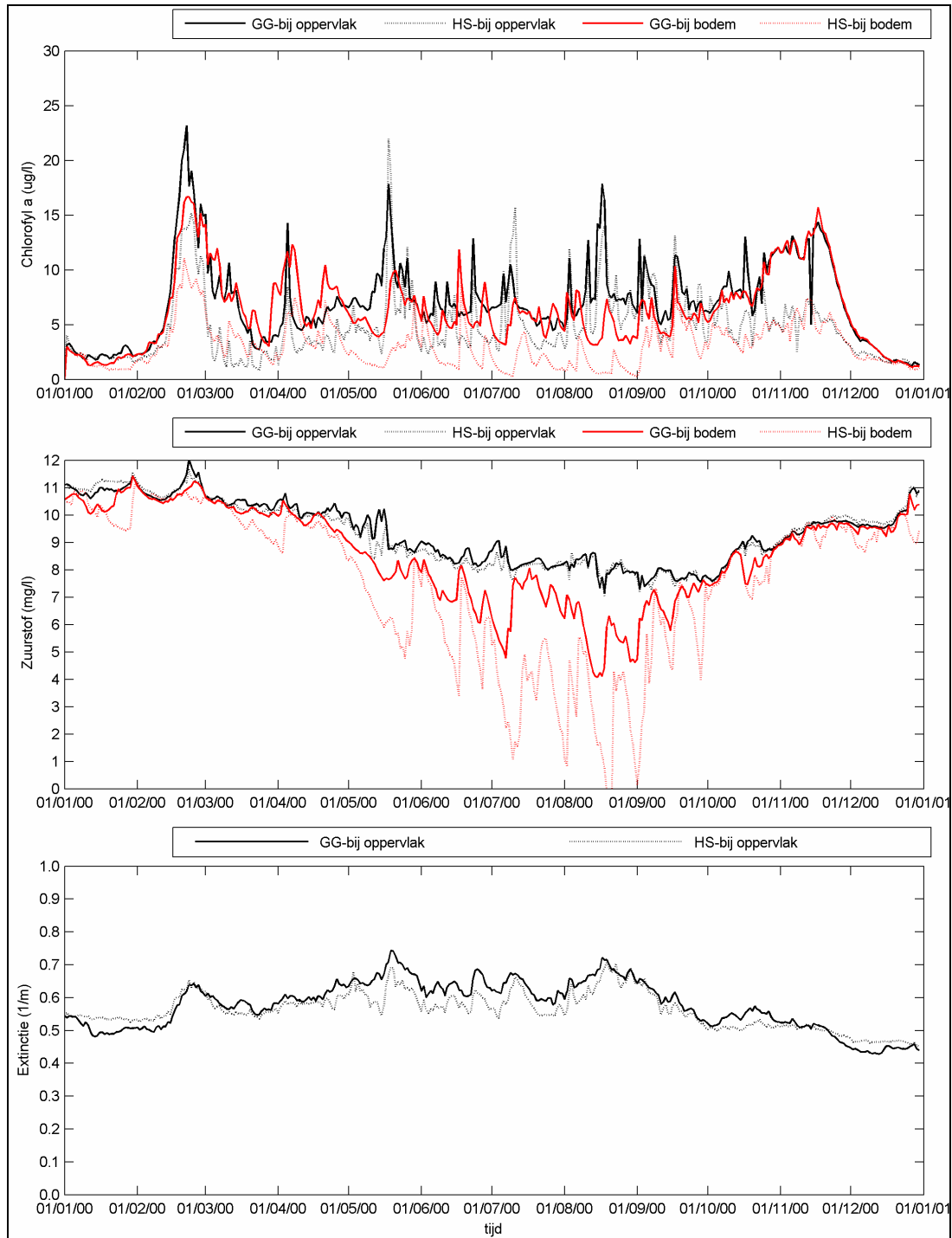
Doorspoel vs Huidig



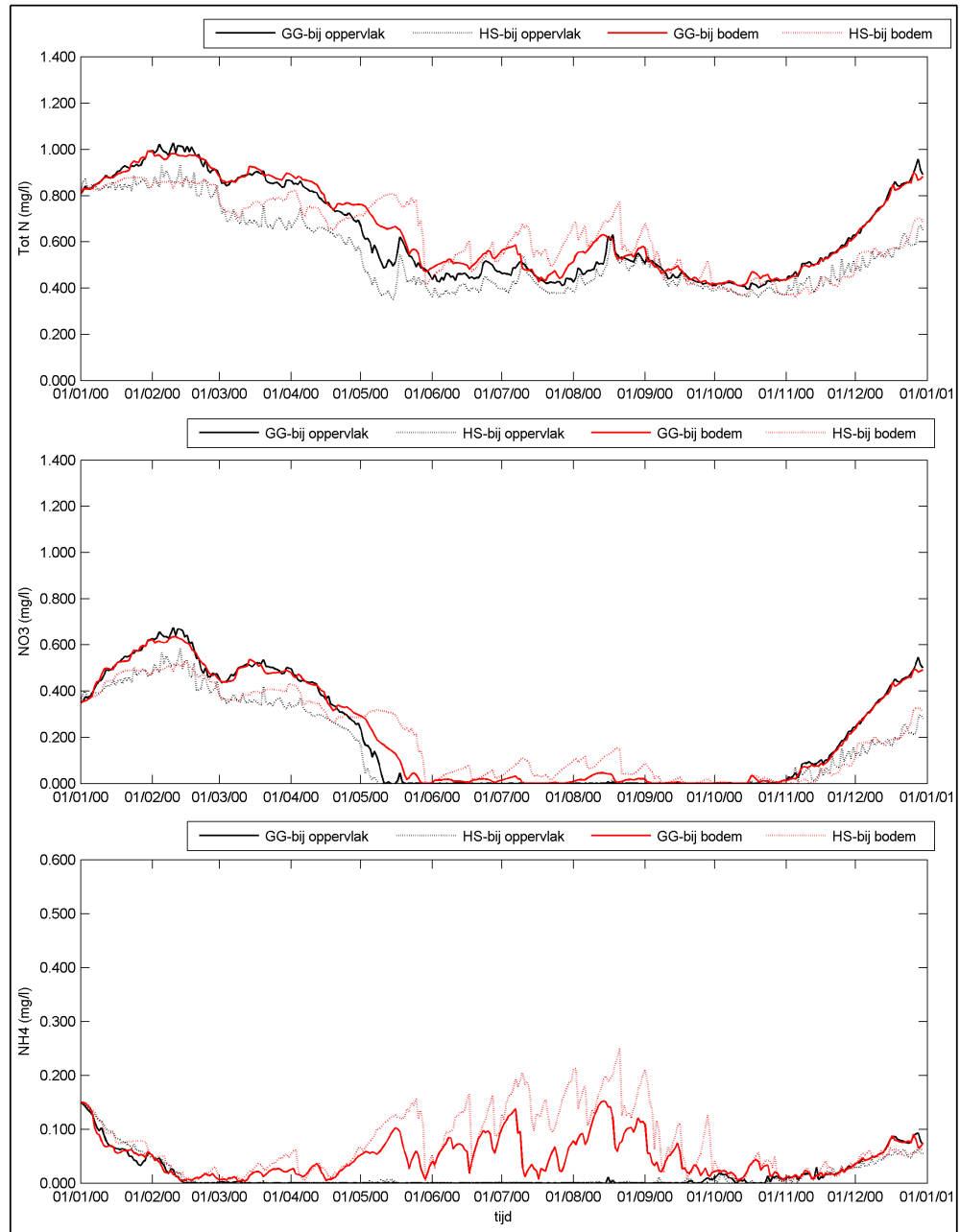
Doorspoel vs Huidig



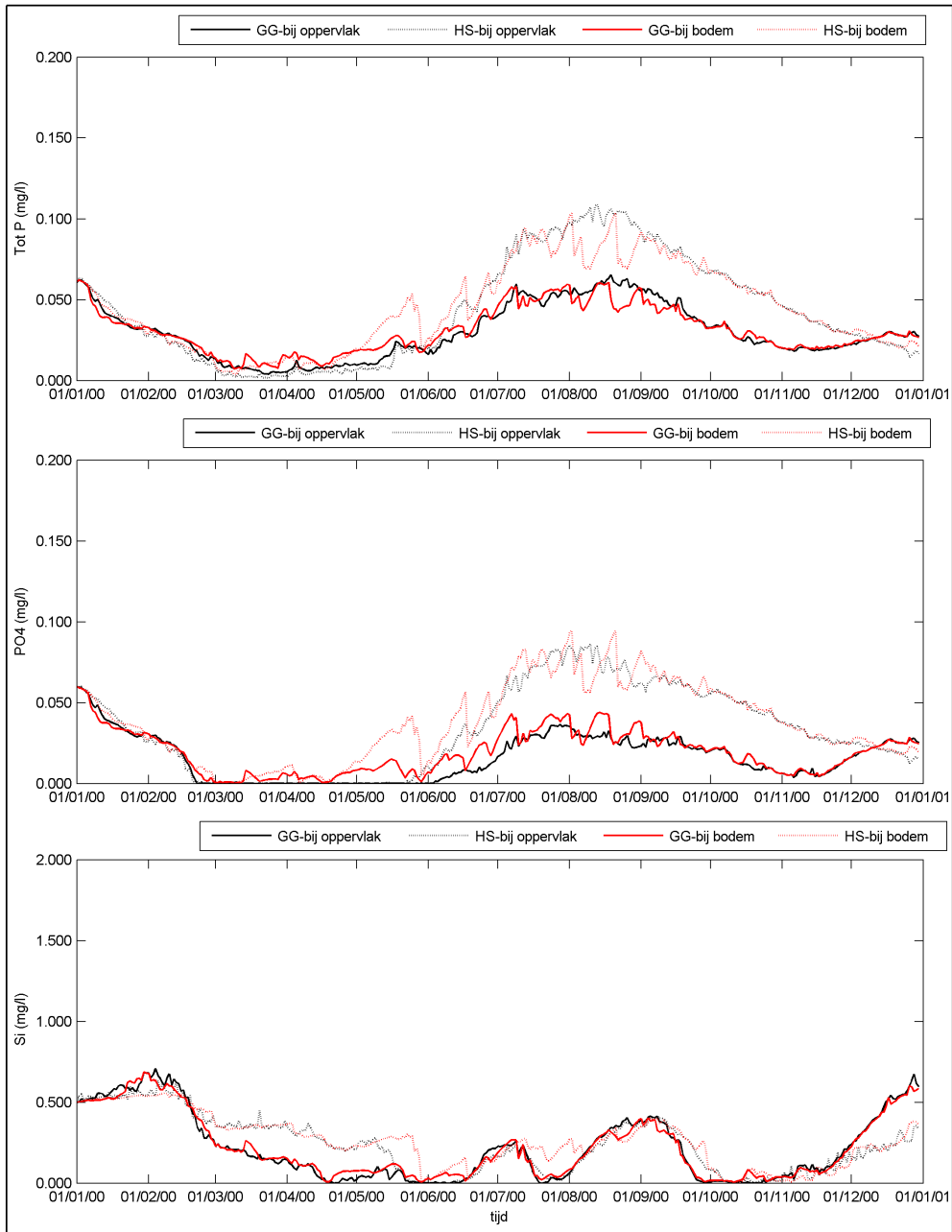
E.5 Gedempt Getij vs Huidig



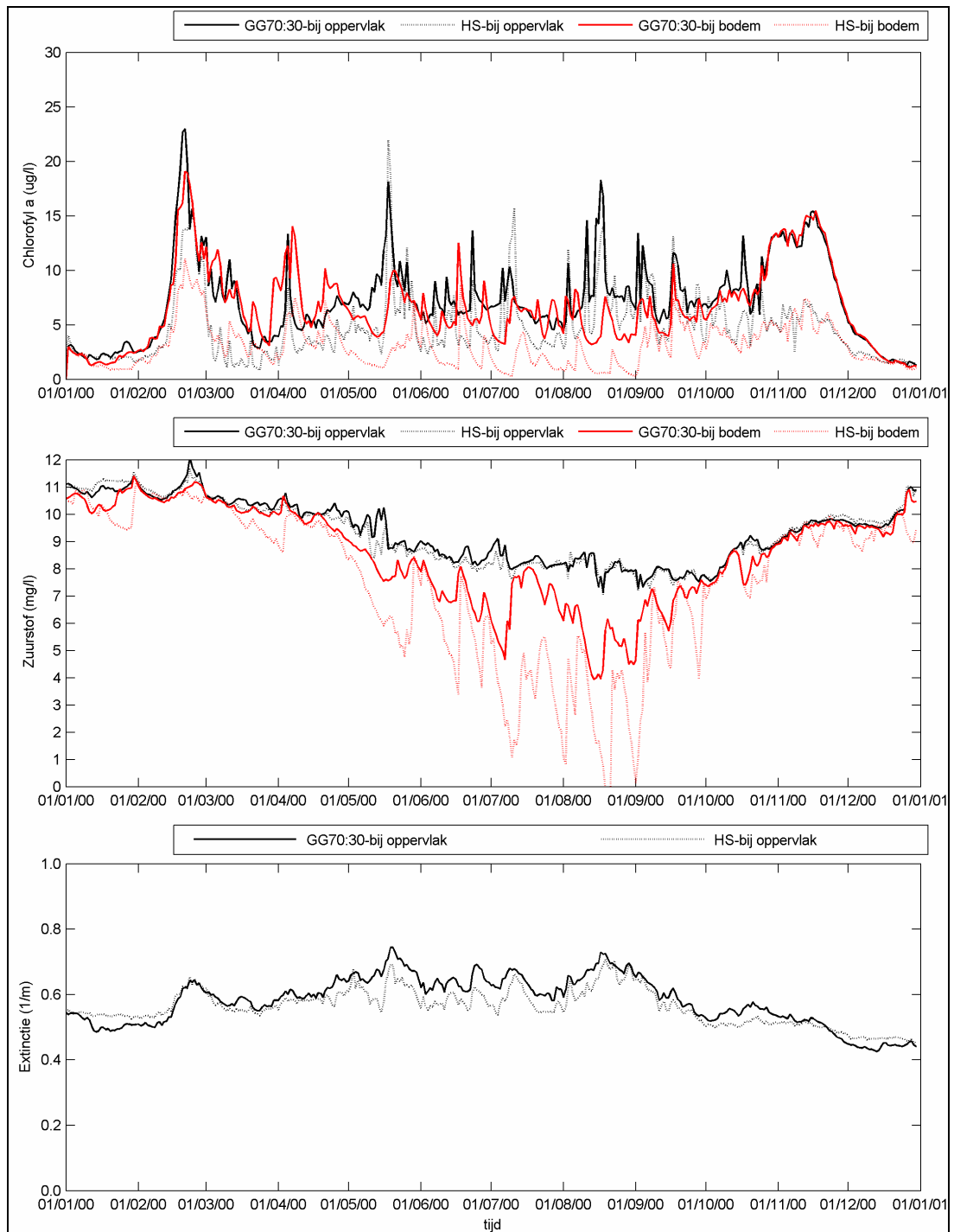
Gedempt Getij vs Huidig



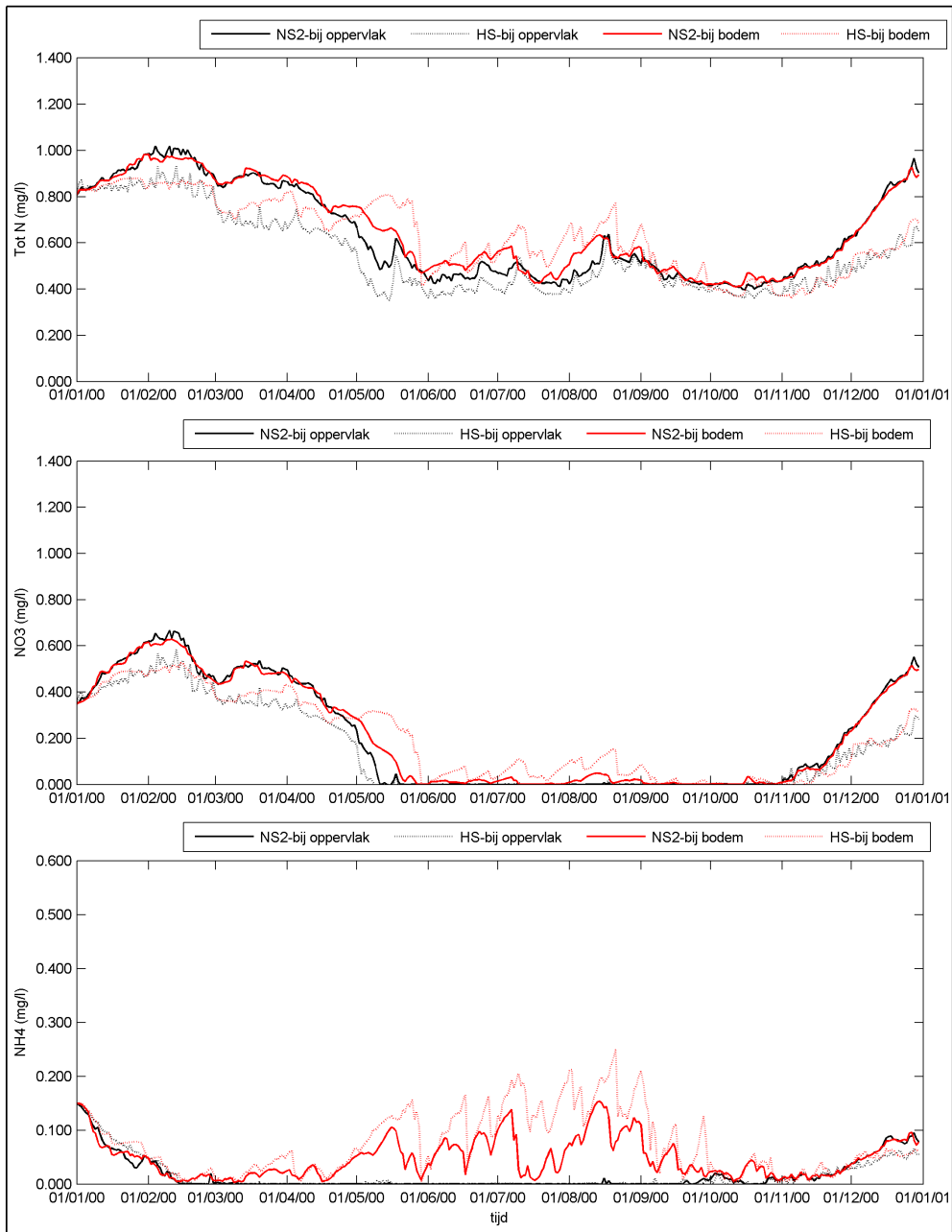
Gedempt Getij vs Huidig



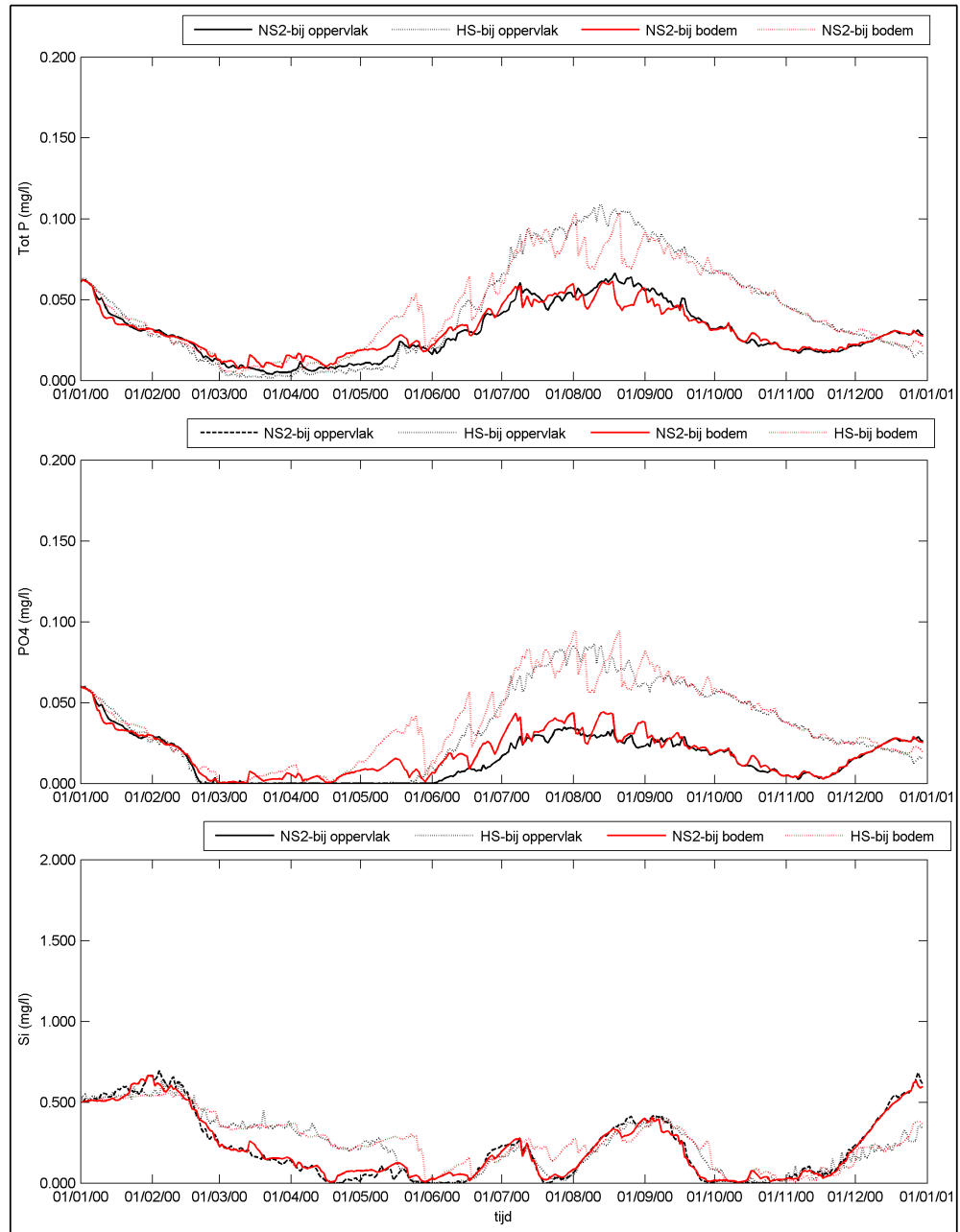
E.6 Gedempt getij 70Z:30N vs Huidig



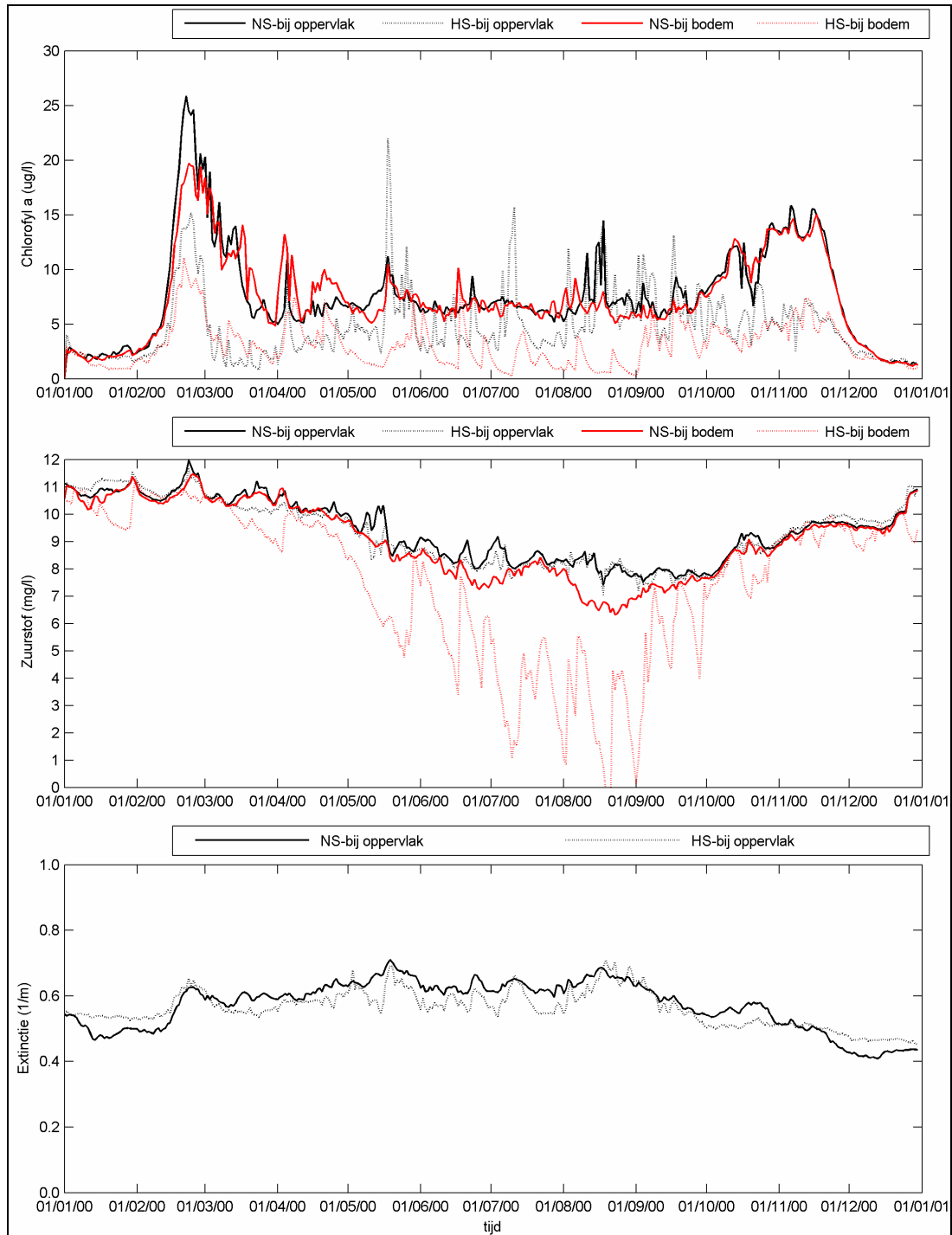
Gedempt getij 70Z:30N vs Huidig



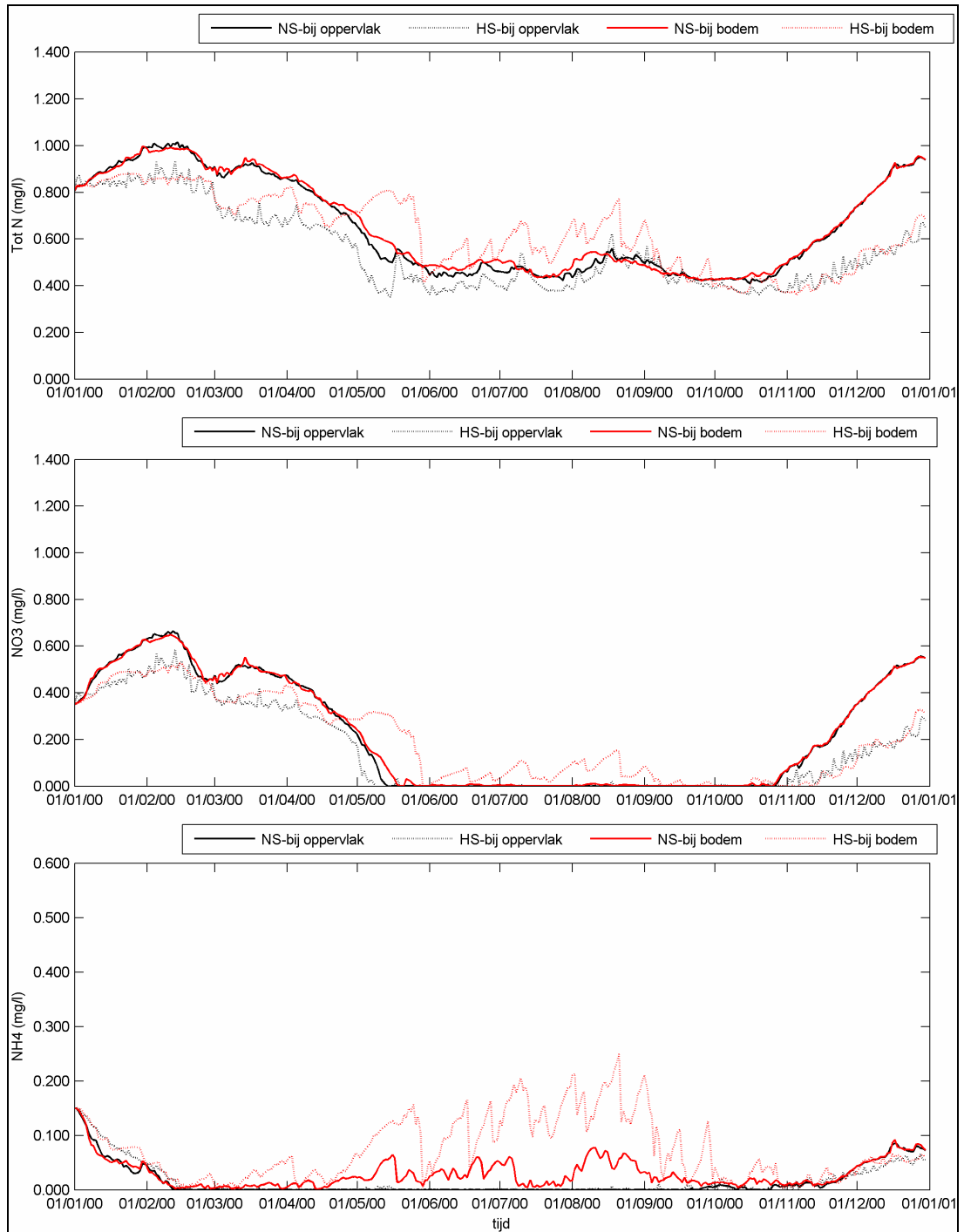
Gedempt getij 70Z:30N vs Huidig



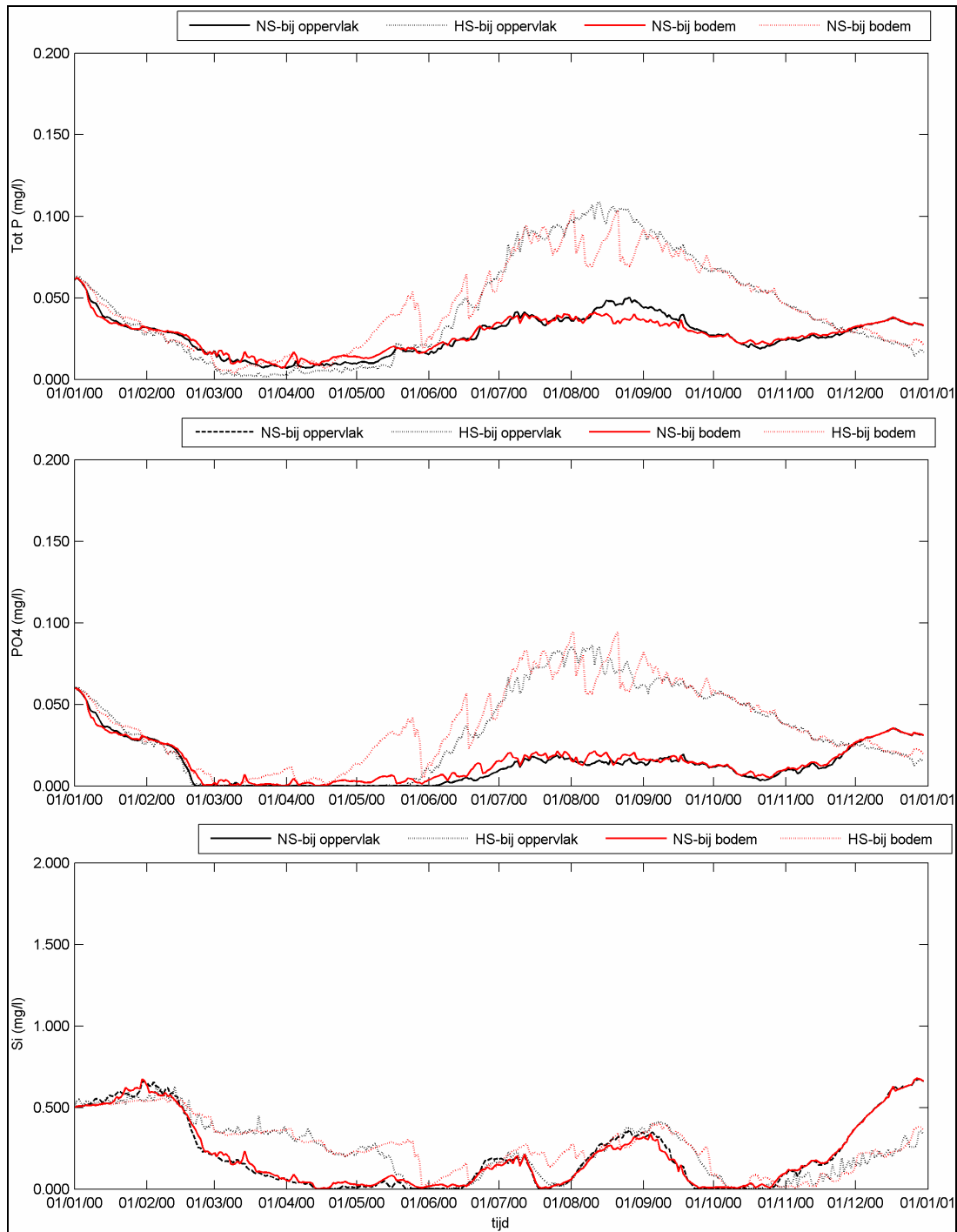
E.7 Noorderspuisluis vs Huidig



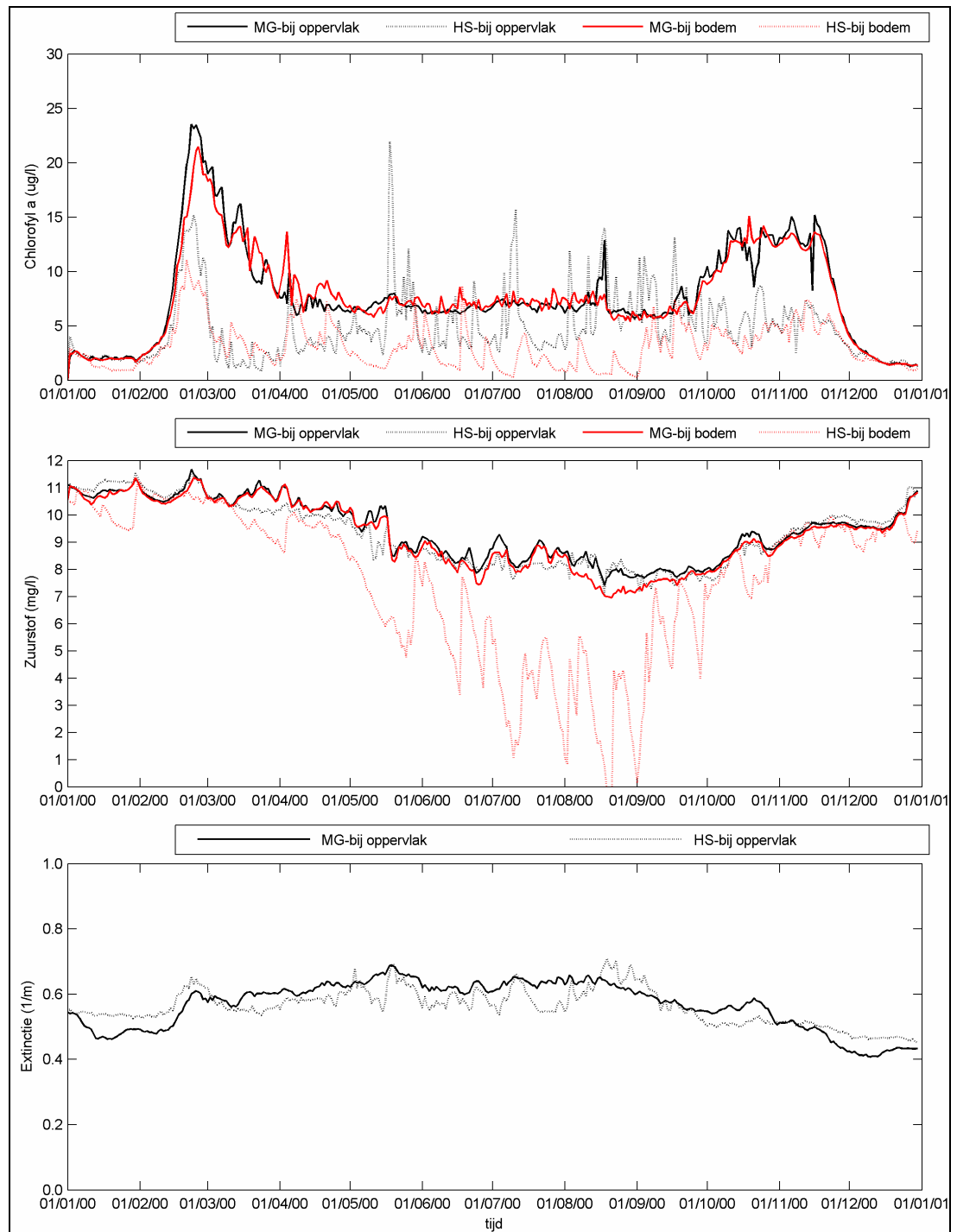
Noorderspuisluis vs Huidig



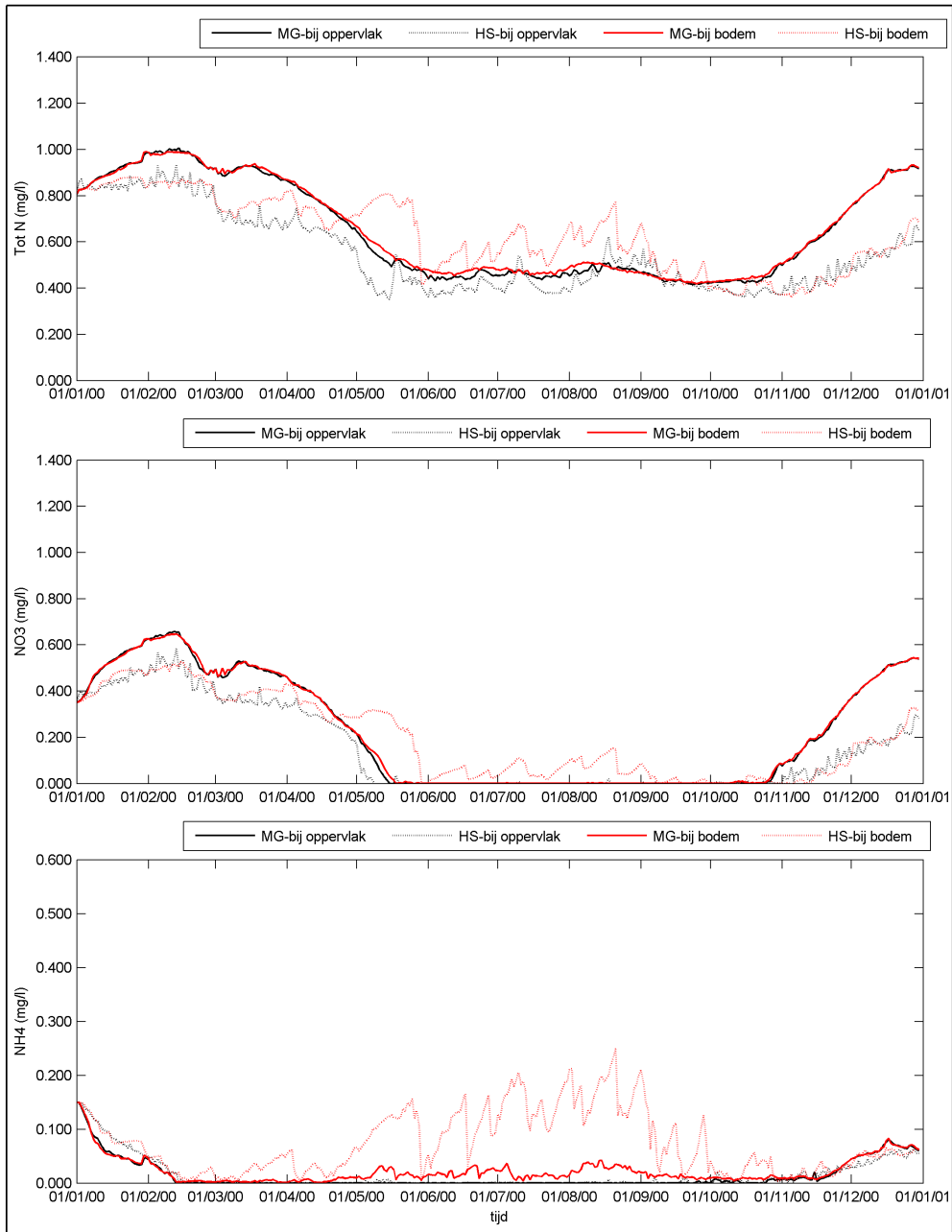
Noorderspuisluis vs Huidig



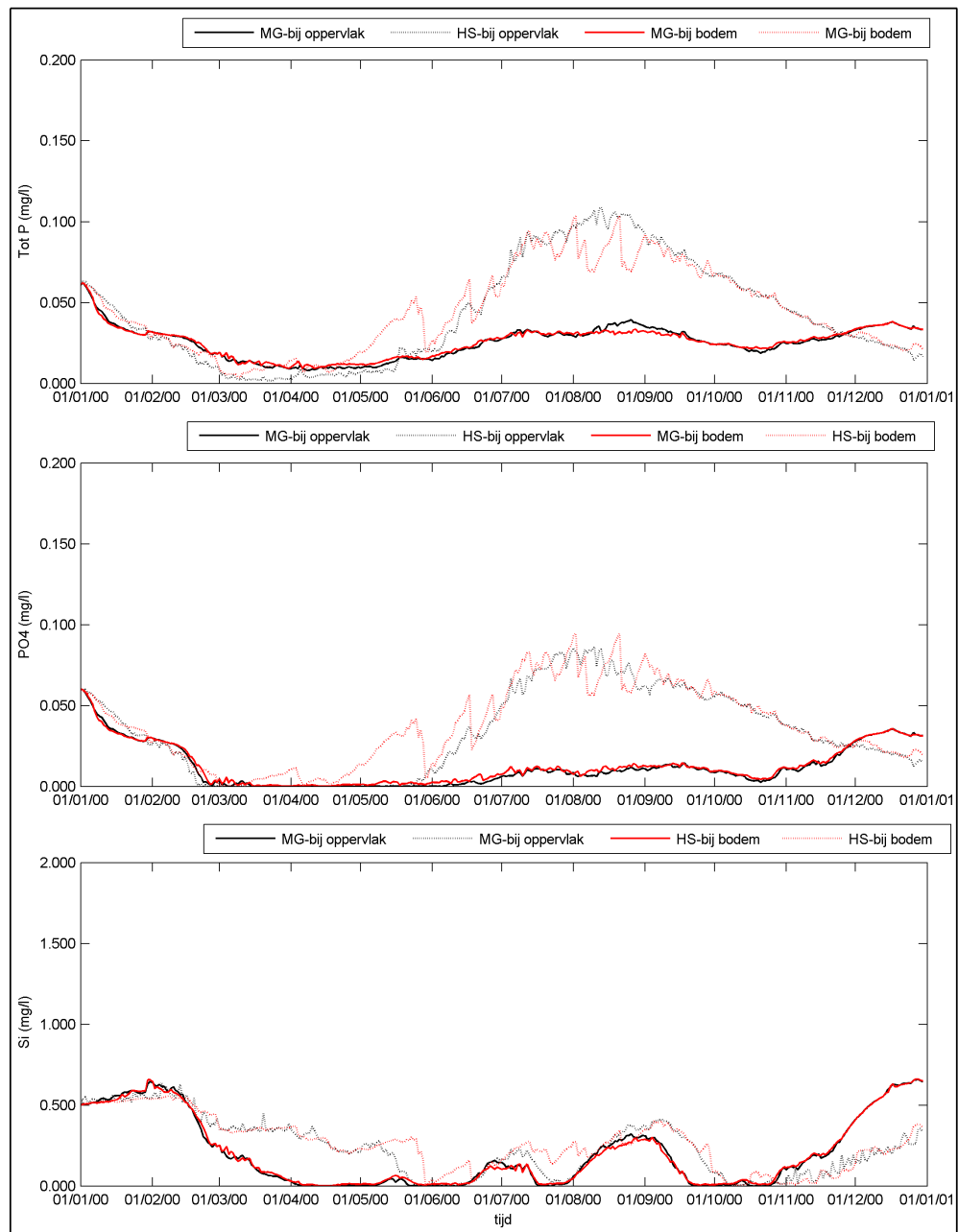
E.8 Maximaal Getij vs Huidig



Maximaal Getij vs Huidig



Maximaal Getij vs Huidig



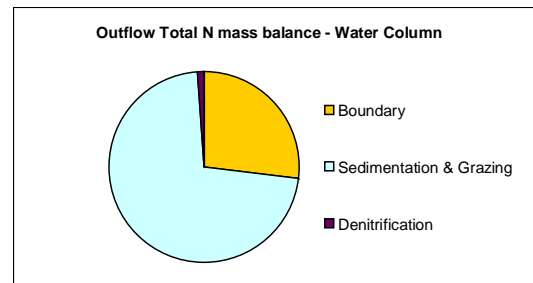
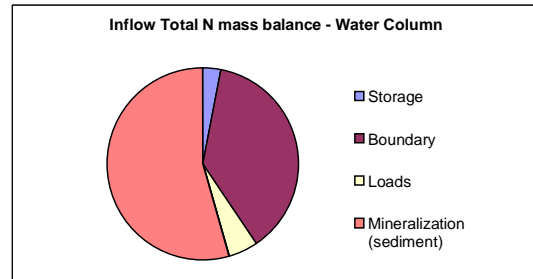
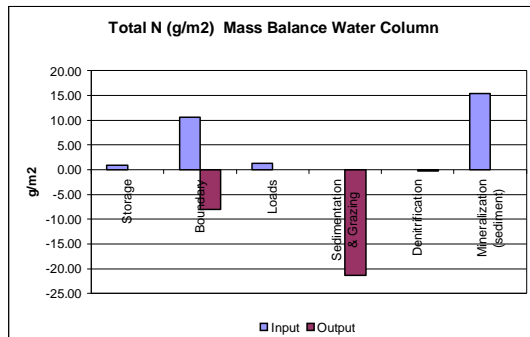
F Nutriëntenbalansen

F.1 Kalibratie Scenario

Stikstof

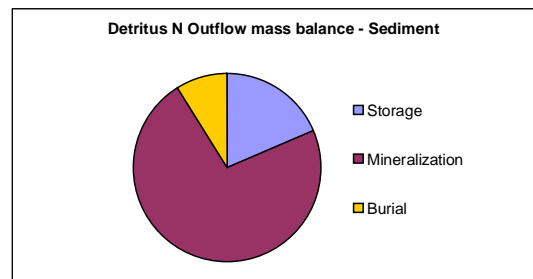
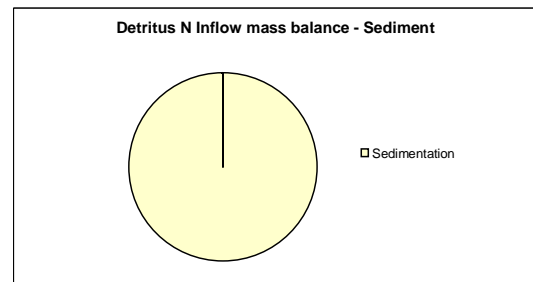
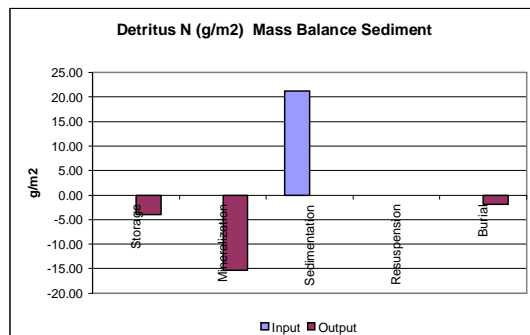
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.88	0.00	3.1%	0.0%
Boundary	10.61	7.96	37.5%	27.0%
Loads	1.37	0.00	4.9%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.01	21.27	0.0%	72.0%
Denitrification	0.00	0.29	0.0%	1.0%
Mineralization (sediment)	15.40	0.00	54.5%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

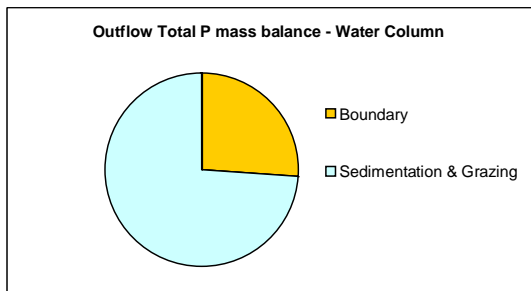
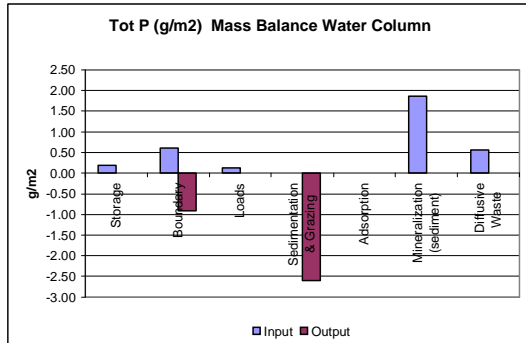
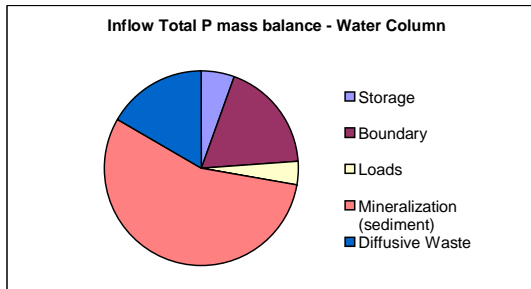
Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	3.98	0.0%	18.7%
Mineralization	0.00	15.40	0.0%	72.4%
Sedimentation	21.27	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.01	0.0%	0.1%
Burial	0.00	1.88	0.0%	8.8%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

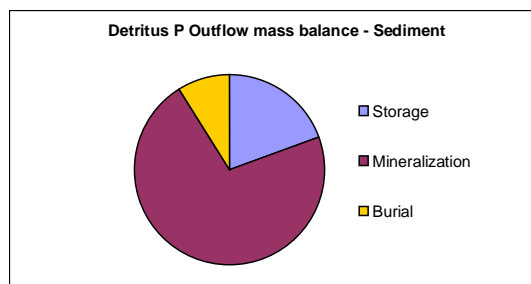
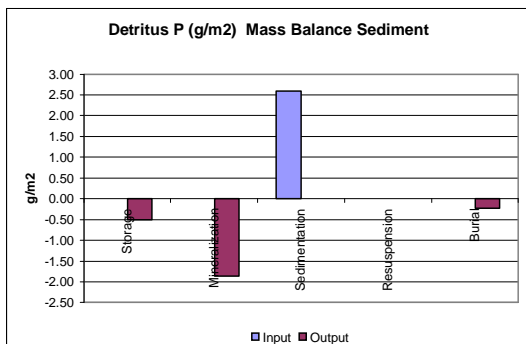
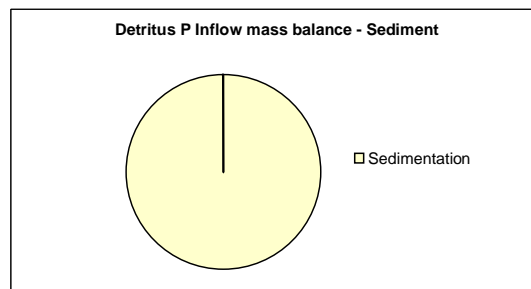
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.21	0.00	5.9%	0.0%
Boundary	0.84	1.13	23.5%	30.4%
Loads	0.13	0.00	3.6%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	2.59	0.0%	69.6%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	1.84	0.00	51.6%	0.0%
Diffusive Waste	0.55	0.00	15.3%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.50	0.0%	19.3%
Mineralization	0.00	1.86	0.0%	71.7%
Sedimentation	2.59	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.23	0.0%	8.9%
Total			100.0%	100.0%

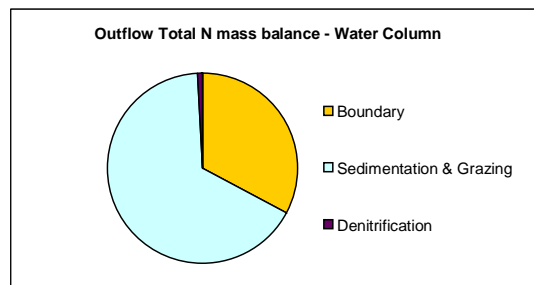
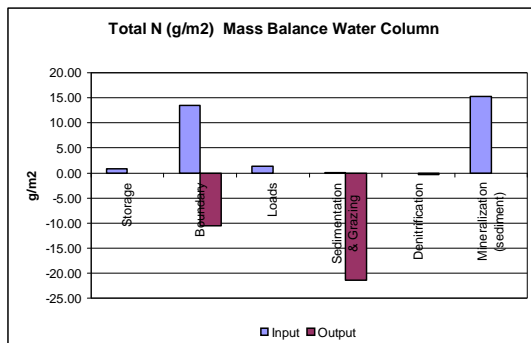
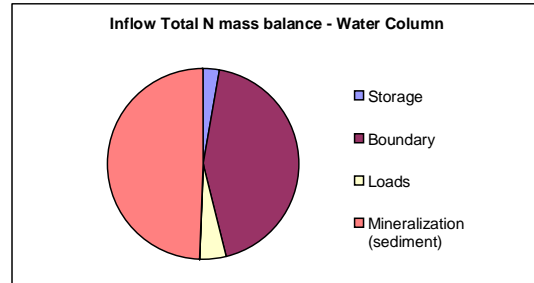


F.2 Scenario Huidig

Stikstof

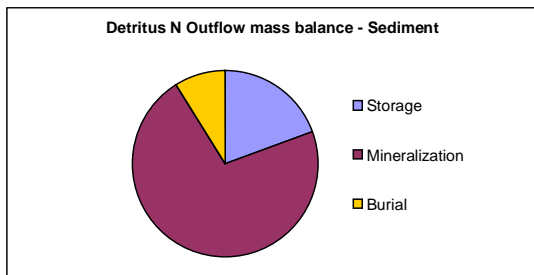
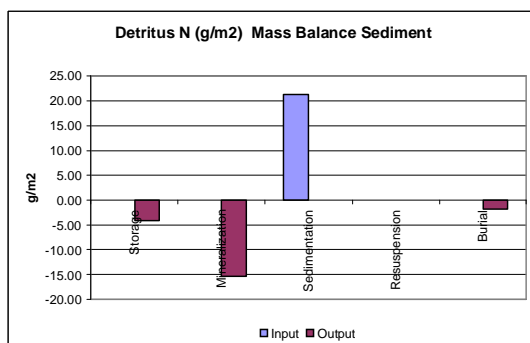
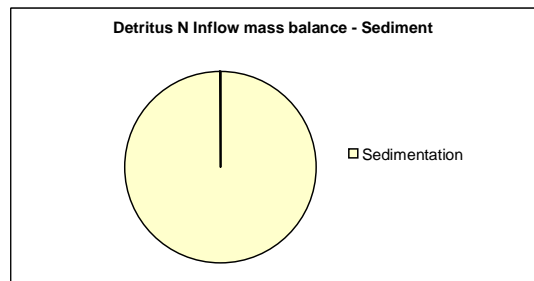
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.82	0.00	2.6%	0.0%
Boundary	13.41	10.53	43.4%	32.8%
Loads	1.37	0.00	4.4%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.01	21.30	0.0%	66.3%
Denitrification	0.00	0.29	0.0%	0.9%
Mineralization (sediment)	15.26	0.00	49.4%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

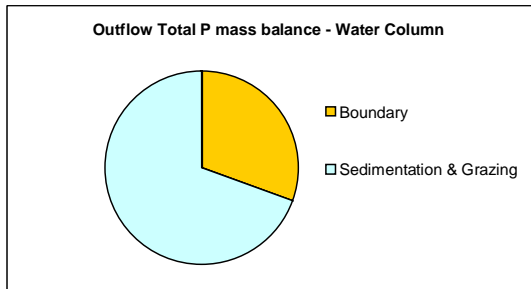
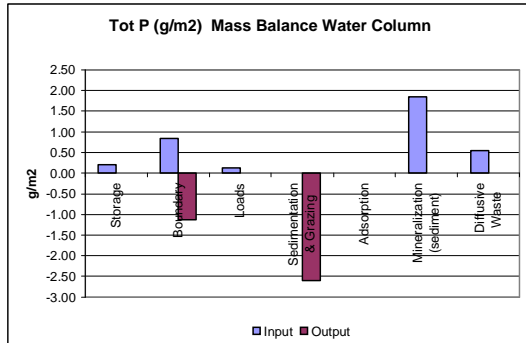
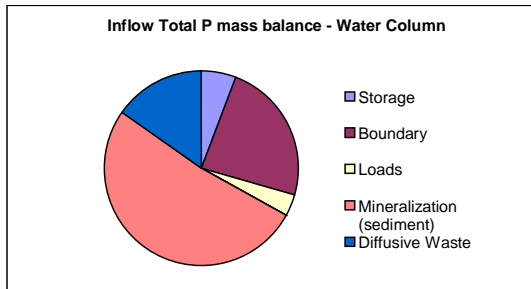
Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	4.15	0.0%	19.5%
Mineralization	0.00	15.26	0.0%	71.7%
Sedimentation	21.30	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.01	0.0%	0.1%
Burial	0.00	1.87	0.0%	8.8%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

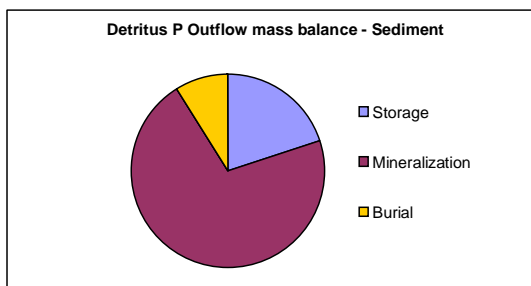
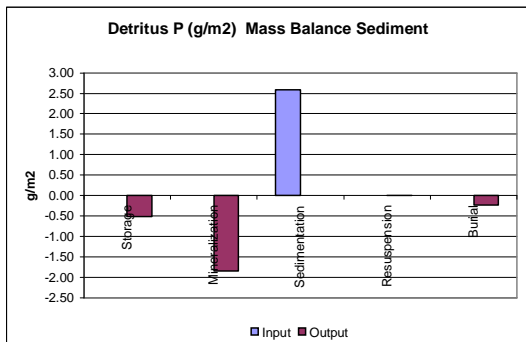
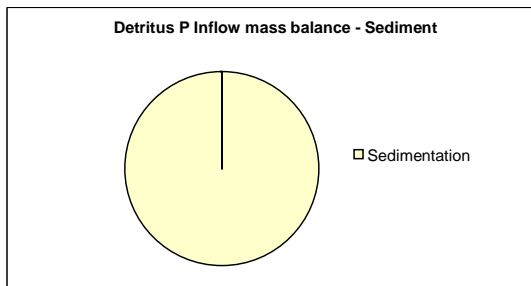
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.21	0.00	5.9%	0.0%
Boundary	0.84	1.13	23.5%	30.4%
Loads	0.13	0.00	3.6%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	2.59	0.0%	69.6%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	1.84	0.00	51.6%	0.0%
Diffusive Waste	0.55	0.00	15.3%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.52	0.0%	20.0%
Mineralization	0.00	1.84	0.0%	71.1%
Sedimentation	2.59	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.23	0.0%	8.8%
Total			100.0%	100.0%

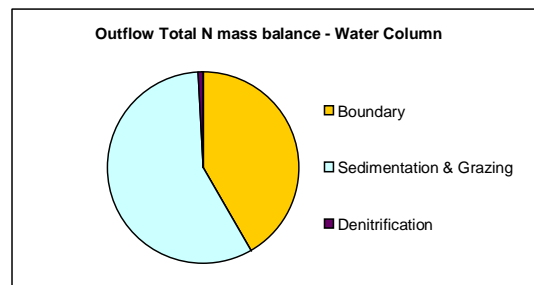
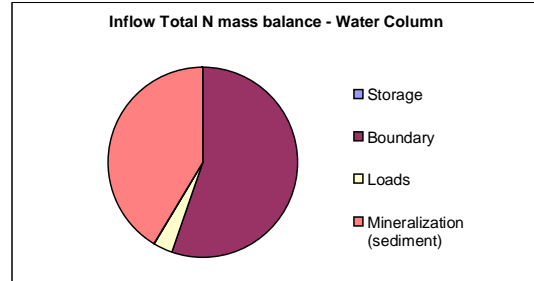
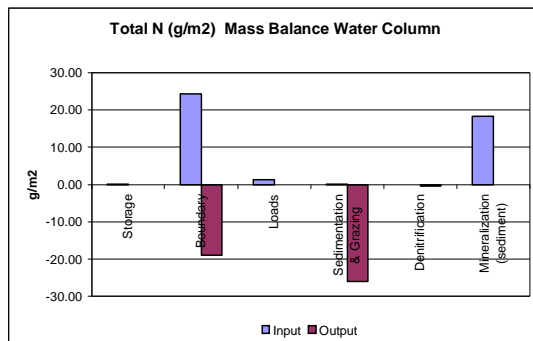


F.3 Scenario Huidig+

Stikstof

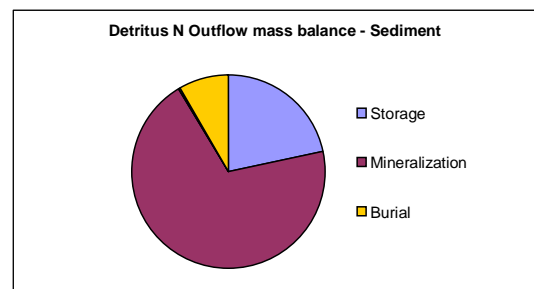
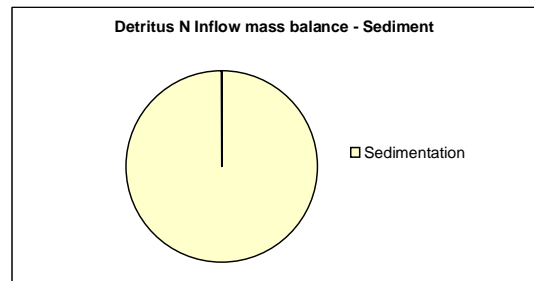
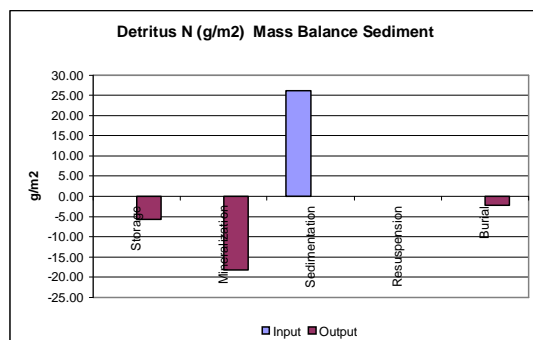
Water Column

Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.05	0.00	0.1%	0.0%
Boundary	24.37	19.02	55.3%	41.8%
Loads	1.37	0.00	3.1%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.02	26.14	0.0%	57.4%
Denitrification	0.00	0.38	0.0%	0.8%
Mineralization (sediment)	18.28	0.00	41.5%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

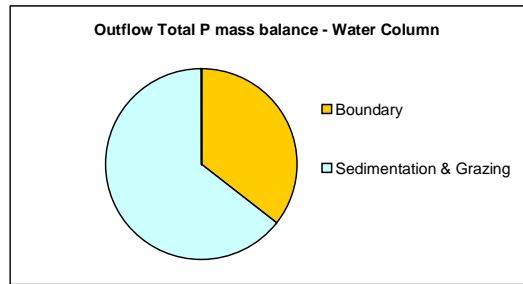
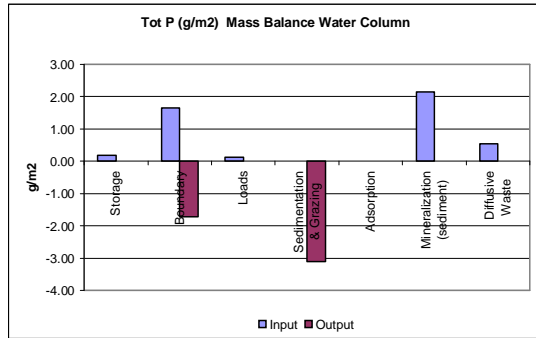
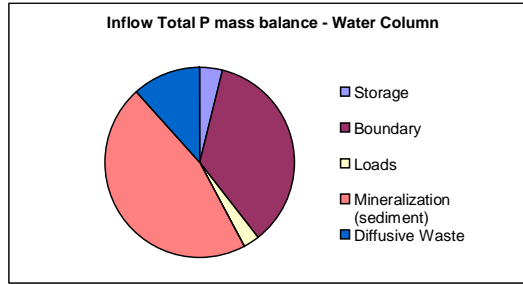
Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	5.63	0.0%	21.6%
Mineralization	0.00	18.28	0.0%	69.9%
Sedimentation	26.14	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.02	0.0%	0.1%
Burial	0.00	2.21	0.0%	8.5%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

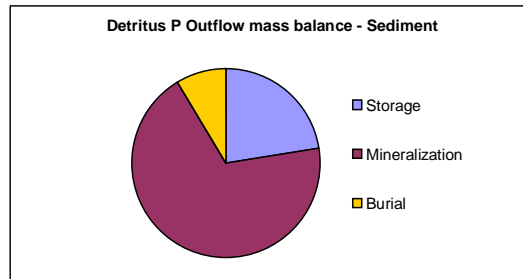
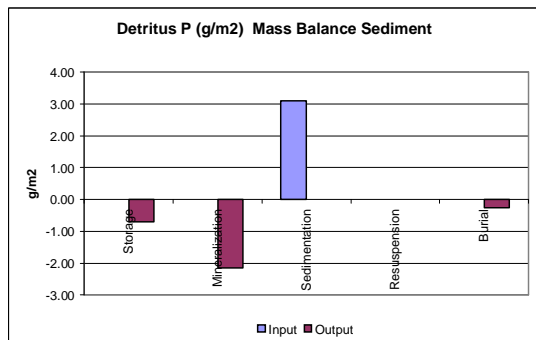
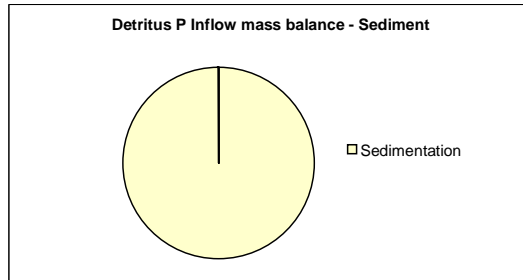
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.19	0.00	4.0%	0.0%
Boundary	1.66	1.72	35.5%	35.7%
Loads	0.13	0.00	2.8%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	3.10	0.0%	64.3%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	2.14	0.00	46.0%	0.0%
Diffusive Waste	0.54	0.00	11.7%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.70	0.0%	22.4%
Mineralization	0.00	2.14	0.0%	69.0%
Sedimentation	3.10	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.26	0.0%	8.5%
Total			100.0%	100.0%

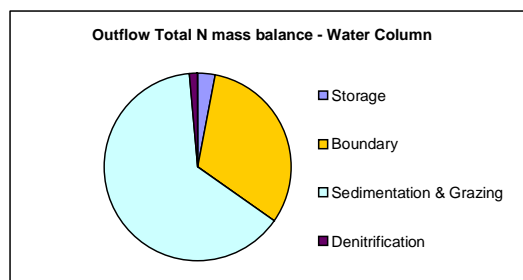
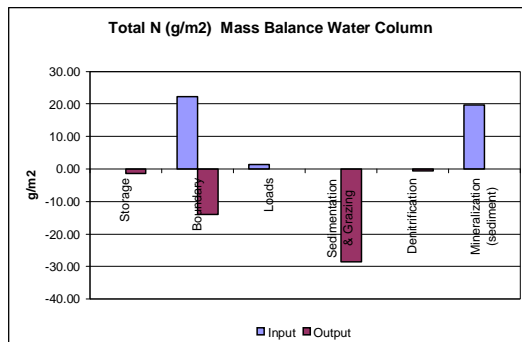
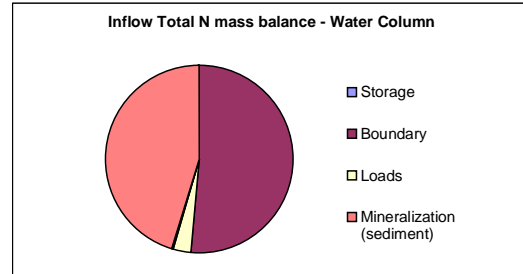


F.4 Scenario Doorspoel

Stikstof

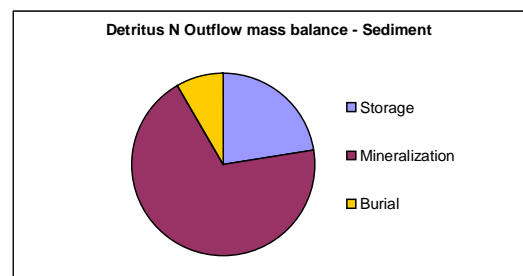
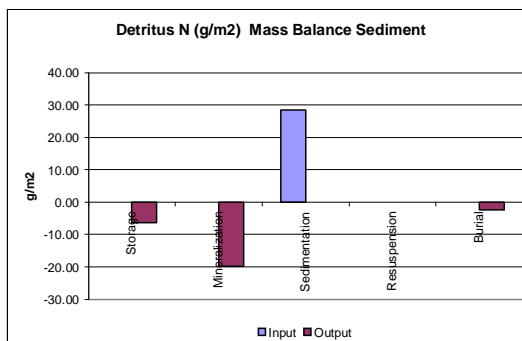
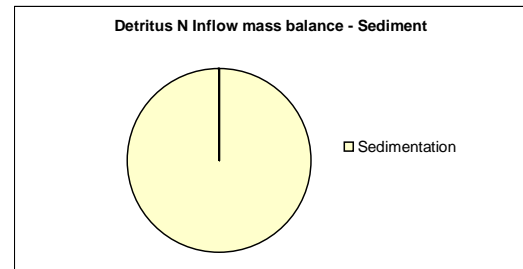
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	1.38	0.0%	3.1%
Boundary	22.33	14.01	51.4%	31.5%
Loads	1.37	0.00	3.2%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.02	28.50	0.0%	64.1%
Denitrification	0.00	0.58	0.0%	1.3%
Mineralization (sediment)	19.73	0.00	45.4%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

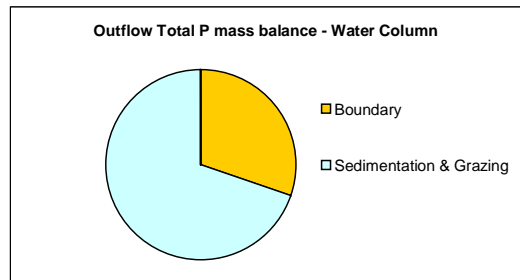
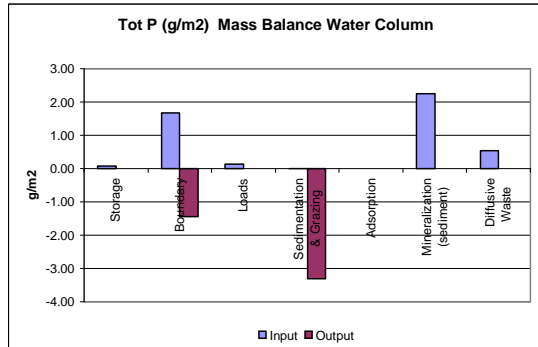
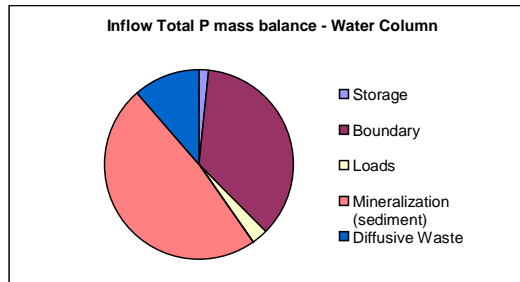
Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	6.40	0.0%	22.5%
Mineralization	0.00	19.73	0.0%	69.2%
Sedimentation	28.50	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.02	0.0%	0.1%
Burial	0.00	2.35	0.0%	8.3%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

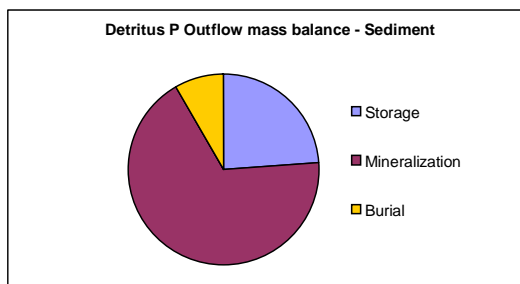
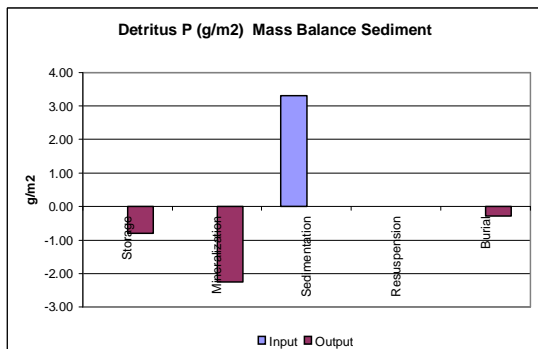
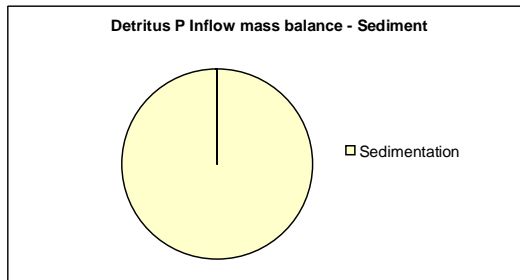
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.08	0.00	1.7%	0.0%
Boundary	1.67	1.45	35.8%	30.4%
Loads	0.13	0.00	2.8%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	3.32	0.0%	69.6%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	2.25	0.00	48.3%	0.0%
Diffusive Waste	0.53	0.00	11.4%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.79	0.0%	23.9%
Mineralization	0.00	2.25	0.0%	67.7%
Sedimentation	3.32	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.28	0.0%	8.3%
Total			100.0%	100.0%

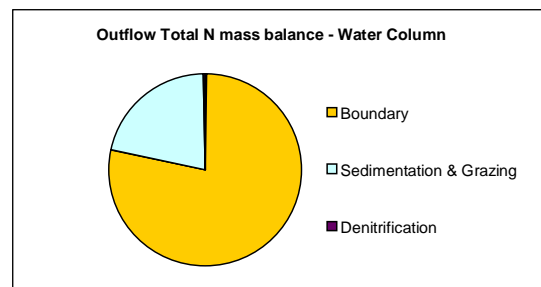
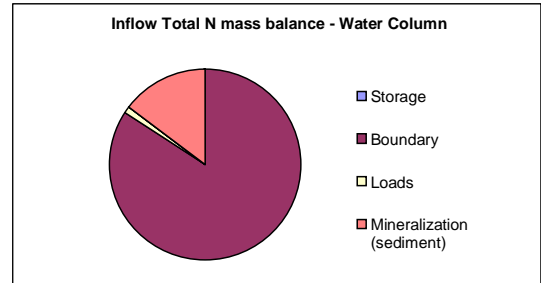
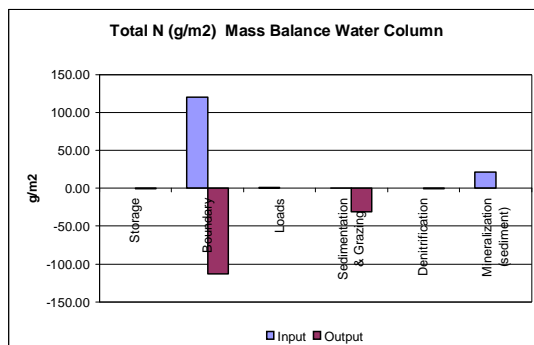


F.5 Scenario Gedempt getij

Stikstof

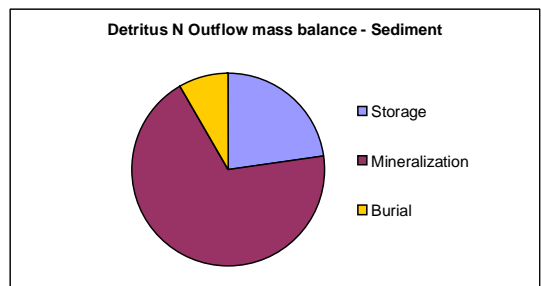
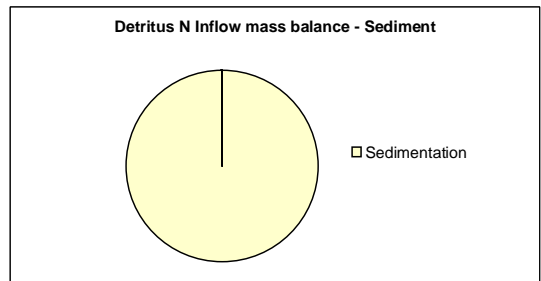
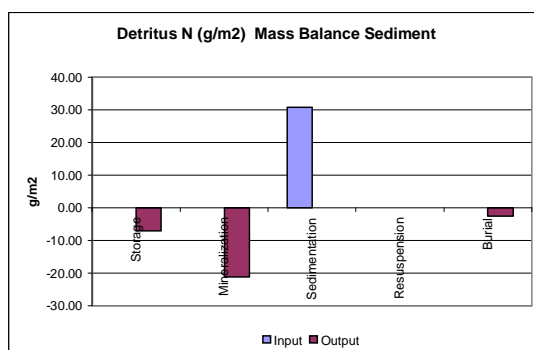
Water Column

Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.43	0.0%	0.3%
Boundary	120.75	113.09	84.2%	78.1%
Loads	1.37	0.00	1.0%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.02	30.81	0.0%	21.3%
Denitrification	0.00	0.42	0.0%	0.3%
Mineralization (sediment)	21.25	0.00	14.8%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

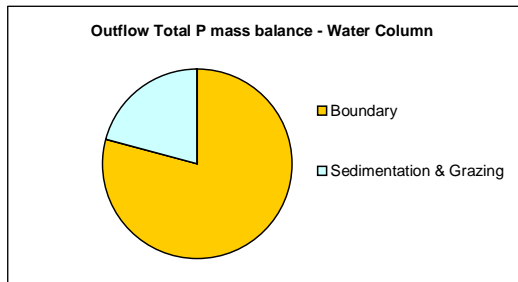
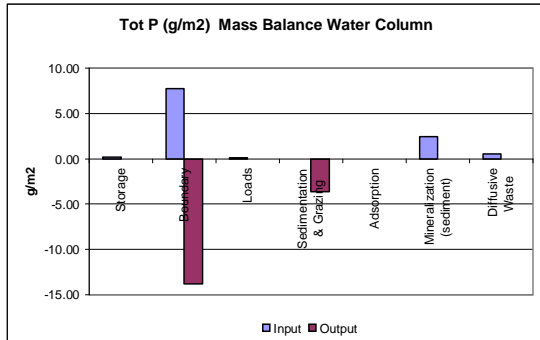
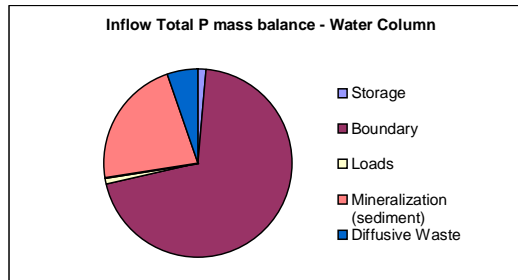
Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	7.00	0.0%	22.7%
Mineralization	0.00	21.25	0.0%	69.0%
Sedimentation	30.81	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.02	0.0%	0.1%
Burial	0.00	2.54	0.0%	8.2%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

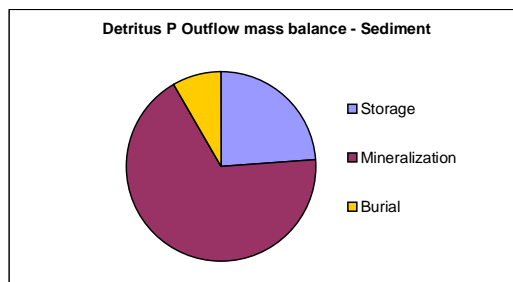
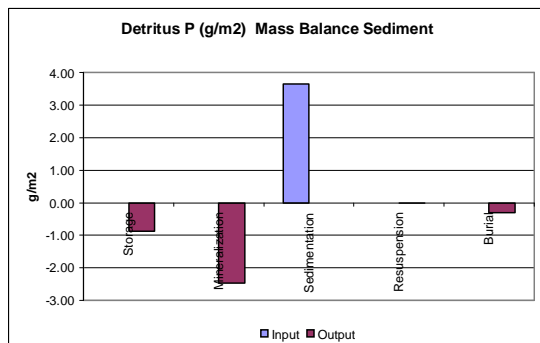
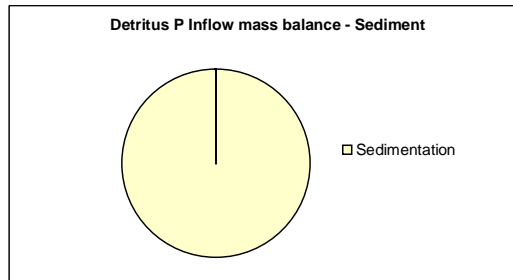
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.15	0.00	1.4%	0.0%
Boundary	7.71	13.78	69.9%	79.1%
Loads	0.13	0.00	1.2%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	3.65	0.0%	20.9%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	2.47	0.00	22.4%	0.0%
Diffusive Waste	0.57	0.00	5.1%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.87	0.0%	23.9%
Mineralization	0.00	2.47	0.0%	67.8%
Sedimentation	3.65	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.30	0.0%	8.3%
Total			100.0%	100.0%

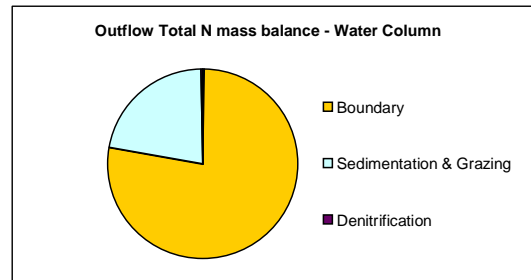
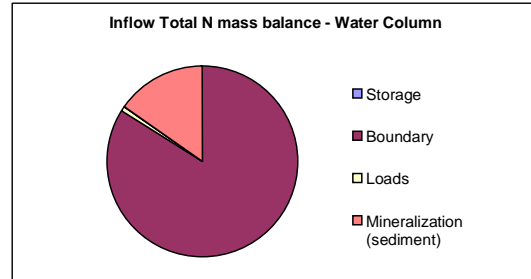
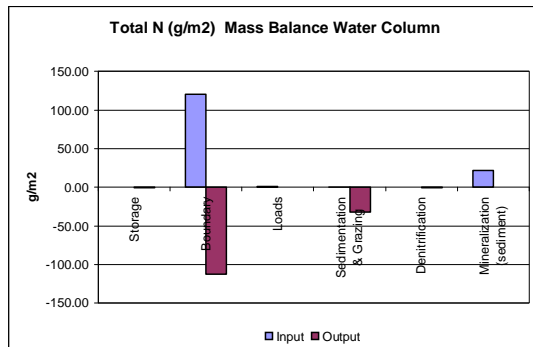


F.6 Scenario Gedempt getij 70Z:30N

Stikstof

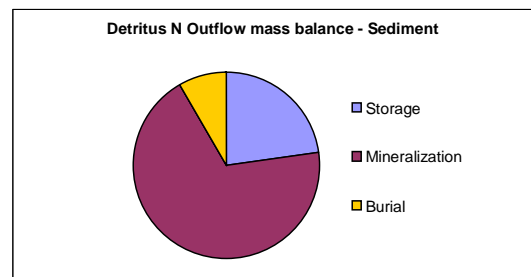
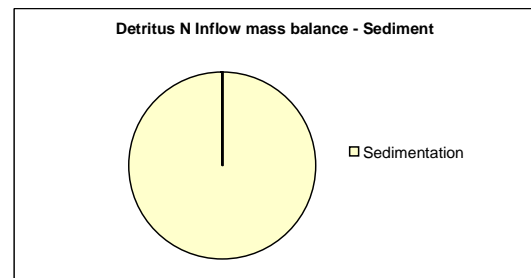
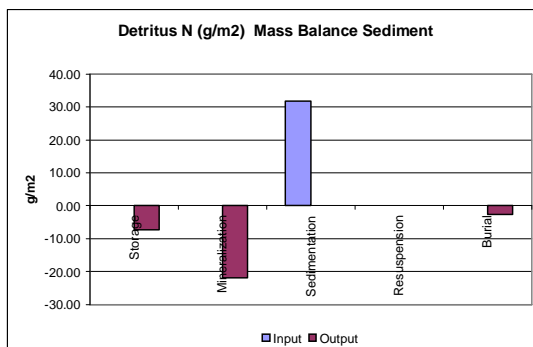
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.48	0.0%	0.3%
Boundary	120.79	113.14	83.8%	77.5%
Loads	1.37	0.00	1.0%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.02	31.86	0.0%	21.8%
Denitrification	0.00	0.43	0.0%	0.3%
Mineralization (sediment)	21.96	0.00	15.2%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

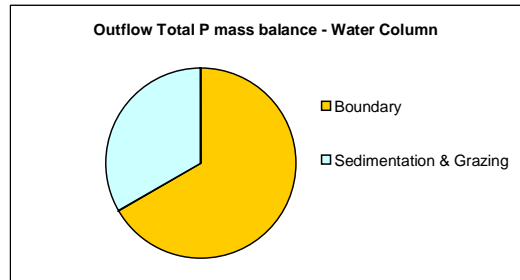
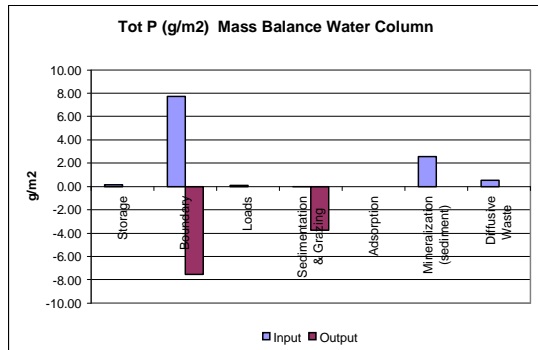
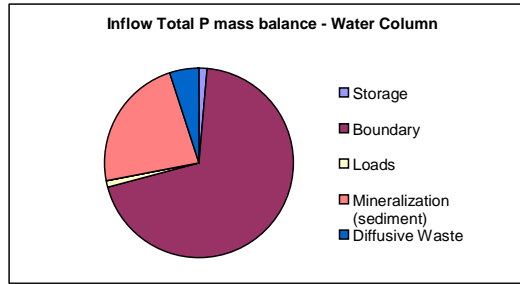
Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	7.26	0.0%	22.8%
Mineralization	0.00	21.96	0.0%	68.9%
Sedimentation	31.86	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.02	0.0%	0.1%
Burial	0.00	2.62	0.0%	8.2%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

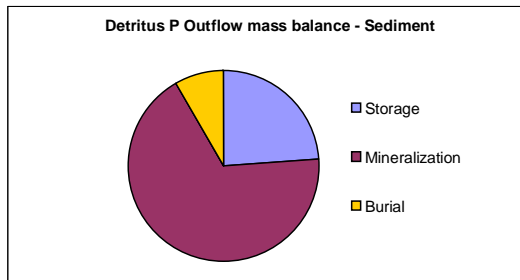
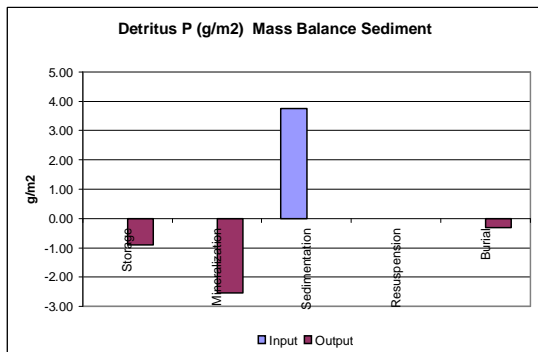
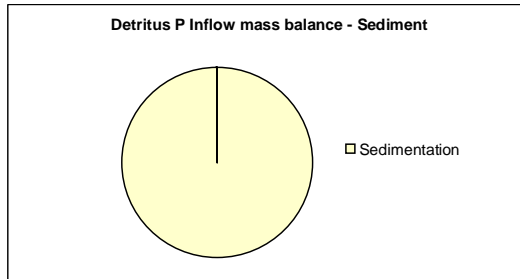
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.14	0.00	1.3%	0.0%
Boundary	7.72	7.54	69.5%	66.8%
Loads	0.13	0.00	1.2%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	3.75	0.0%	33.2%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	2.54	0.00	22.9%	0.0%
Diffusive Waste	0.57	0.00	5.1%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.90	0.0%	23.9%
Mineralization	0.00	2.54	0.0%	67.8%
Sedimentation	3.75	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.31	0.0%	8.3%
Total			100.0%	100.0%

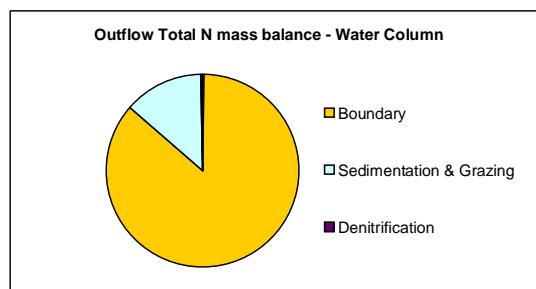
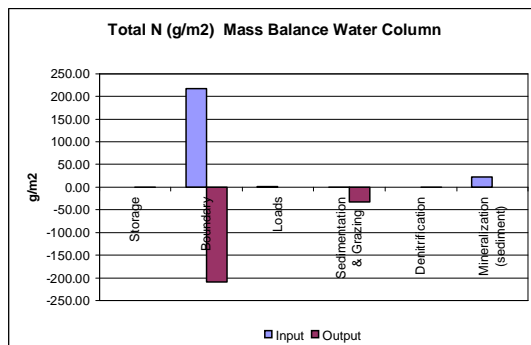
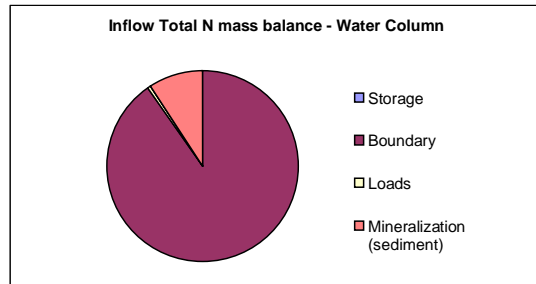


F.7 Scenario Noorderspuijluis

Stikstof

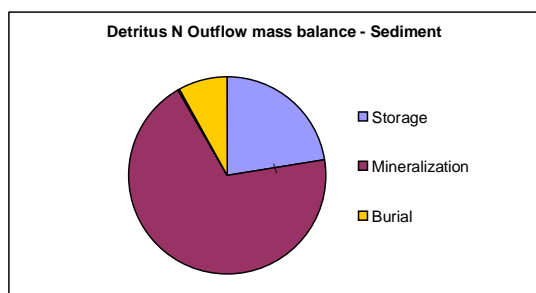
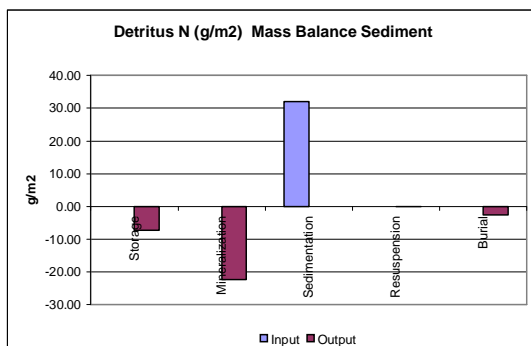
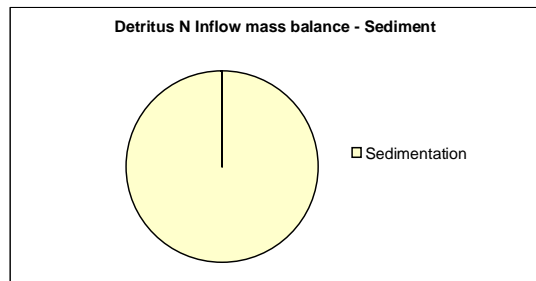
Water Column

Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.56	0.0%	0.2%
Boundary	217.10	208.32	90.2%	86.3%
Loads	1.37	0.00	0.6%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.02	32.05	0.0%	13.3%
Denitrification	0.00	0.48	0.0%	0.2%
Mineralization (sediment)	22.21	0.00	9.2%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

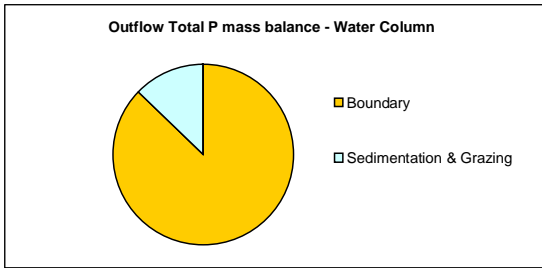
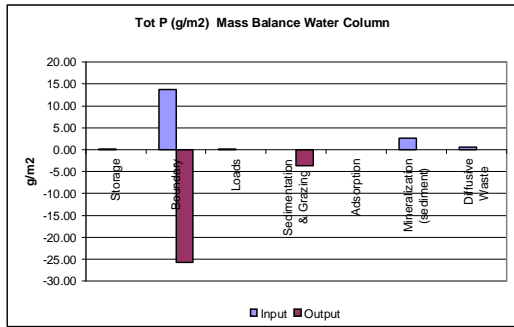
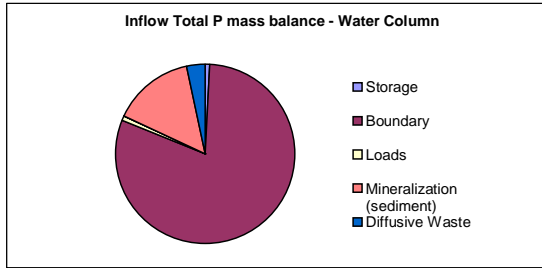
Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	7.19	0.0%	22.4%
Mineralization	0.00	22.21	0.0%	69.3%
Sedimentation	32.05	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.02	0.0%	0.1%
Burial	0.00	2.62	0.0%	8.2%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

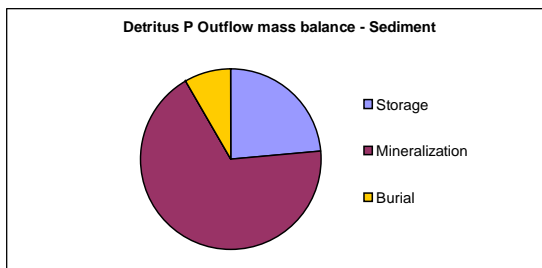
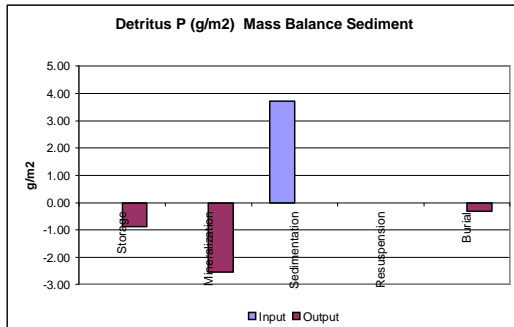
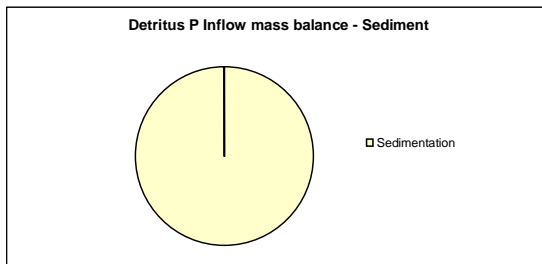
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.13	0.00	0.7%	0.0%
Boundary	13.77	25.67	80.4%	87.3%
Loads	0.13	0.00	0.8%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	3.73	0.0%	12.7%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	2.54	0.00	14.8%	0.0%
Diffusive Waste	0.55	0.00	3.2%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.88	0.0%	23.6%
Mineralization	0.00	2.54	0.0%	68.0%
Sedimentation	3.73	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.31	0.0%	8.3%
Total			100.0%	100.0%

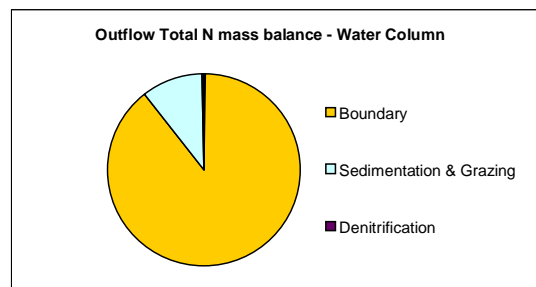
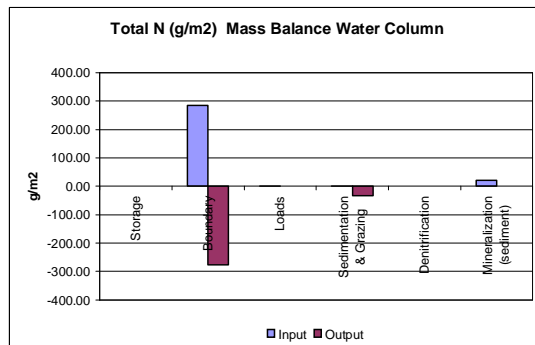
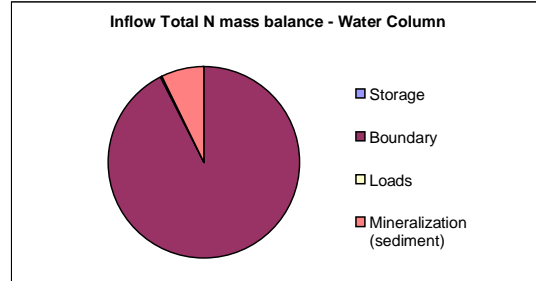


F.8 Scenario Maximaal getij

Stikstof

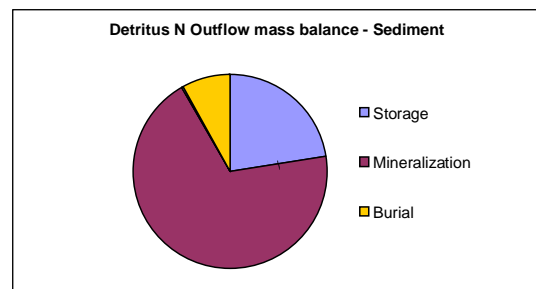
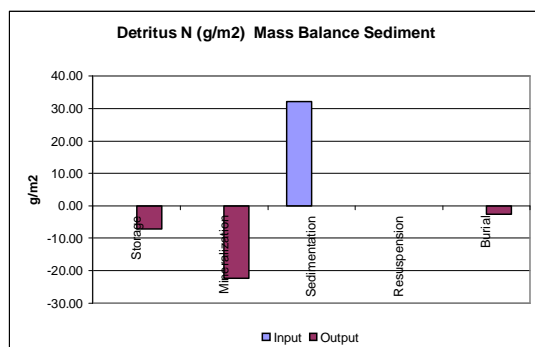
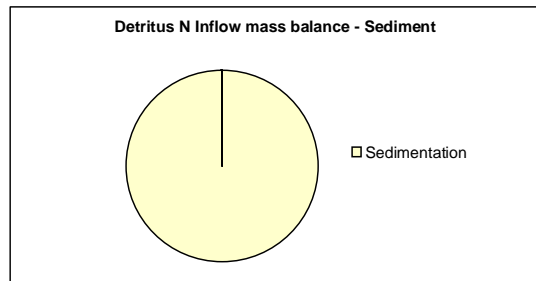
Water Column

Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.53	0.0%	0.2%
Boundary	285.94	276.86	92.4%	89.3%
Loads	1.37	0.00	0.4%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.02	32.09	0.0%	10.4%
Denitrification	0.00	0.47	0.0%	0.2%
Mineralization (sediment)	22.23	0.00	7.2%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

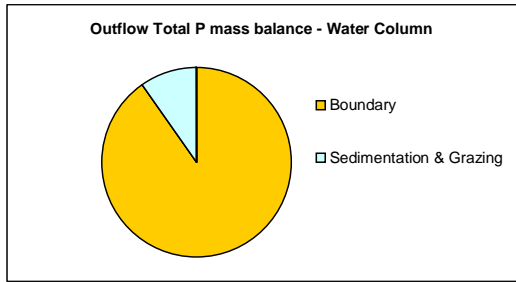
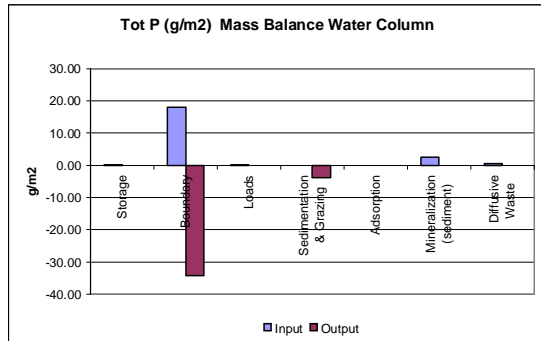
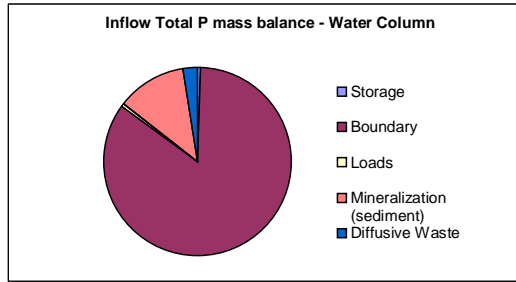
Process	In (g/m ²)	Out (g/m ²)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	7.22	0.0%	22.5%
Mineralization	0.00	22.23	0.0%	69.3%
Sedimentation	32.09	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.02	0.0%	0.1%
Burial	0.00	2.62	0.0%	8.2%
Total			100.0%	100.0%



Fosfaat

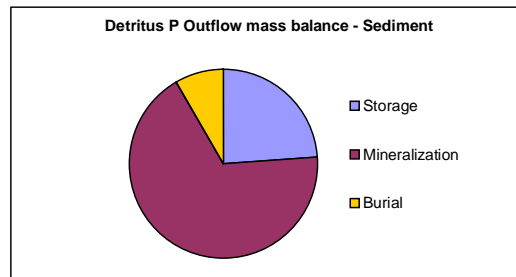
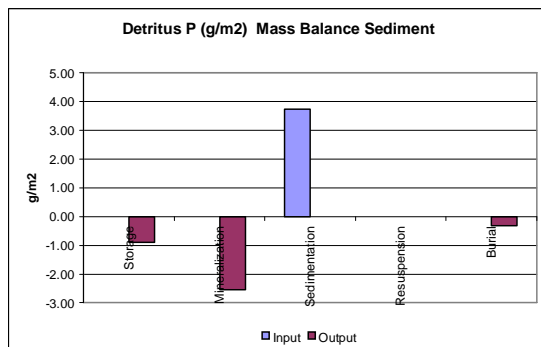
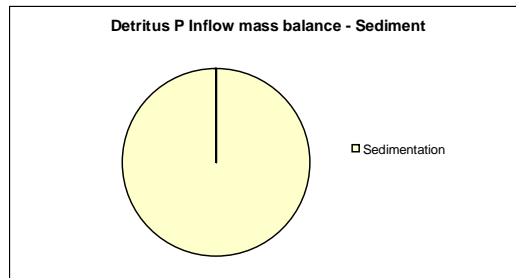
Water Column

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.13	0.00	0.6%	0.0%
Boundary	18.09	34.24	84.4%	90.1%
Loads	0.13	0.00	0.6%	0.0%
Sedimentation & Grazing	0.00	3.75	0.0%	9.9%
Adsorption	0.00	0.00	0.0%	0.0%
Mineralization (sediment)	2.54	0.00	11.9%	0.0%
Diffusive Waste	0.55	0.00	2.6%	0.0%
Total			100.0%	100.0%



Sediment

Process	In (g/m2)	Out (g/m2)	In (%)	Out (%)
Storage	0.00	0.89	0.0%	23.8%
Mineralization	0.00	2.54	0.0%	67.9%
Sedimentation	3.75	0.00	100.0%	0.0%
Resuspension	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Burial	0.00	0.31	0.0%	8.2%
Total			100.0%	100.0%



G Stroomsnelheden

Stroomsnelheden zijn berekend met het FLOW model. De getoonde figuren geven de gemiddelde en maximale berekende stroomsnelheden gedurende een 14-daagse periode weer. In het model wordt met een dagelijks getijsignaal gerekend en dus niet met een springtij-doodtij cyclus. De berekende stroomsnelheden zijn derhalve vooral geschikt voor vergelijkingsdoeleinden.

