

**Verkennd onderzoek
haalbaarheid innovatief
zout/zoet-scheidingsstelsel
Krammersluizen**



**Verkennd onderzoek
haalbaarheid innovatief zout/zoet-
scheidingsysteem Krammersluizen**

ir. D. Dillingh
Dr. ir. R.E. Uittenbogaard
Dr. ir. G.H. Keetels

1205977-000

Titel

Verkennd onderzoek haalbaarheid innovatief zout/zoet-scheidingsstelsel Krammersluizen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1205977-000	1205977-000-VEB-0007	55

Trefwoorden

Chloridegehalte, zoutlek, Krammersluizen, Volkerak-Zoommeer

Samenvatting

De vraag van Rijkswaterstaat is of de maatregelen uit de ontwerpstudie Volkeraksluizen (verbeterd luchtbellenscherm, al dan niet in combinatie met een waterscherm, drempel en/of het doorspoelen van de schutkolk met zoet water en de eventuele aanleg van een zoutafvang) een alternatief kunnen zijn voor de huidige zout/zoet-scheiding van de Krammersluizen.

In het kader van deze vraagstelling is een verkennd onderzoek uitgevoerd naar de resterende zoutlast en de chlorideconcentraties in het Volkerak-Zoommeer. Het doel van het hier beschreven onderzoek is om meer duidelijkheid te verkrijgen over het verloop van de chloridegehalten in het Krammer-Volkerak dat bij verschillende zoutlek- en doorspoel-scenarios zal optreden als de zout/zoet-scheiding van de Krammersluizen wordt vervangen door innovatieve zoutlekbepalende maatregelen.

Een dynamisch zoutlekmodel is ontwikkeld om de alternatieve mogelijkheden voor zoutlekbepalende door technische aanpassingen bij de Krammersluizen te verkennen en de bijbehorende resterende zoutlek te schatten.

Daarnaast is een 3D-Z-lagen-model van het Volkerak-Zoommeer ontwikkeld, dat is gevalideerd aan de hand van chloridemetingen in het Krammer-Volkerak. Een belangrijke invoerparameter daarbij is de opgetreden zoutlek van de Krammersluizen. Deze is geschat aan de hand van de metingen door de zoutlek als ijkparameter te gebruiken.



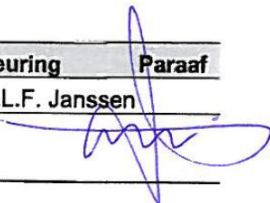
Met het gevalideerde 3D-model zijn verschillende scenarios's voor zoutlek uit de Krammersluizen en doorspoeling van het Volkerak-Zoommeer doorgerekend.

Het dynamisch zoutlekmodel en het 3D-model van het Volkerak-Zoommeer, inclusief de Krammersluizen, hebben elk hun bijzonderheden en beperkingen. De resultaten van beide sporen zijn bijeengebracht in een conceptueel model voor de verzilting van het Krammer-Volkerak. Het terugspoeldebiet via de sluisen van het Krammer-Volkerak naar de Oosterschelde speelt een belangrijke rol bij de uiteindelijke mate van verzilting van het Krammer-Volkerak.

Het verkennde onderzoek heeft het inzicht in de problematiek sterk verdiept.

Referenties

Requirements RWS-Corporate Innovatie-Programma (LTKI, Landelijke Taken Kennis & Innovatie);
 Projectplan Corporate InnovatieProgramma, Cluster Waterveiligheid, deelproject Beperking Zoutindringing, Kenmerk 1205977-000-VEB-0006, Deltares, maart 2012.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
4	Aug. 2012	Ir. D. Dillingh Dr.ir. R.E. Uittenbogaard		Ir. A.C. Bijlsma		Dr.ir. L.L.F. Janssen	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel van het onderzoek	2
1.3	Aanpak	2
1.3.1	Zoutlekbeperkende maatregelen en bijbehorende zoutlek Krammersluizen	2
1.3.2	Modellering chlorideconcentraties en effecten scenario's zoutlek en doorspoeling	3
1.3.3	Koppeling simulaties dynamisch zoutlekmodel en 3D-modellering VZM.	3
1.4	VTSO-metingen	3
1.5	Uitvoering	3
2	De werking van het bestaande zout/zoet-scheidingsstelsel	5
2.1	Het Krammersluizencomplex	5
2.2	Het zout/zoet-scheidingsstelsel	6
3	De 3D-modellering van het Volkerak-Zoommeer	9
3.1	Modelversie	9
3.2	Het rekenrooster	9
3.3	Weergave berekeningsresultaten langs de "talweg"	10
3.4	Overige gegevens	11
4	De zoutlek van de Krammersluizen	13
4.1	Eerdere onderzoeken	13
4.2	De water- en zoutbalans van het Krammer-Volkerak	14
4.2.1	De waterbalans van het Volkerak-Zoommeer	14
4.2.2	De zoutbalans van het Krammer-Volkerak	16
4.3	De modellering van de zoutlek	17
4.4	Conclusies	19
5	Validatieberekeningen voor het 3D-Z-lagen-VZM-model	21
5.1	Beschrijving van simulaties	21
5.2	Invoergegevens	21
5.2.1	Gemeten debieten	22
5.2.2	Overige debieten	22
5.2.3	Meteorologische invoergegevens	22
5.3	Resultaten	23
5.3.1	Algemeen	23
5.3.2	O07	24
5.3.3	P07	25
5.4	Conclusies	26
6	Zoutlek- en doorspoelscenario's	27
6.1	Beschrijving van de zoutlek- en doorspoelscenario's	27
6.1.1	P08: Vroege verzoetingsperiode	27
6.1.2	P09: Verhoogde bruto zoutlek (45 kg/s)	28
6.1.3	P12: Verhoogde bruto zoutlek (45 kg/s) + extra debiet Volkeraksluizen	28
6.1.4	P13: Bruto zoutlek van 19 kg/s + extra debiet Volkeraksluizen	28

6.1.5	P16: Als P13, maar met een aangepast doorspoelregime	29
6.2	Resultaten simulaties zoutlek- en doorspoelscenario's	30
6.2.1	P08: Vroege verzoetingsperiode	30
6.2.2	P09: Verhoogde zoutlek (45 kg/s)	31
6.2.3	P12: Verhoogde zoutlek (45 kg/s) + extra debiet Volkeraksluizen	32
6.2.4	P13: Zoutlek van 19 kg/s + extra debiet Volkeraksluizen	33
6.2.5	P16: Als P13, maar met een aangepast doorspoelregime	34
6.3	Conclusies	36
7	Discussie over netto en bruto zoutlek in de modellering	37
7.1	De modellering van de zoutlek in het 3D-Z-lagen-VZM-model	37
7.2	Berekening van de netto zoutlek in het 3D-Z-lagen-VZM-model	37
7.3	Dynamisch zoutlekmodel	39
7.4	Conclusies	40
8	Conceptueel model verzilting Krammer-Volkerak	41
8.1	Zoutbalans 2007 voor Krammer Volkerak; overzicht bronnen en putten	41
8.2	Zoutlek Krammersluizen	42
8.3	Relatie zoutlek Krammersluizen en zoutgehalte Krammer-Volkerak (schematisch)	43
8.4	Zoutbalans Krammer-Volkerak	44
8.5	Gekoppeld dynamisch zoutlekmodel	45
8.6	Samenvatting/conclusie	48
9	Conclusies en aanbevelingen	49
9.1	Inleiding	49
9.2	Alternatieve zoutlekbeperkende maatregelen	49
9.3	De huidige zoutlek van de Krammersluizen	50
9.4	Validatieberekeningen voor het 3D-Z-lagen-VZM-model	51
9.5	Zoutlek- en doorspoelscenario's	51
9.6	Netto en bruto zoutlek Krammersluizen in de 3D-modellering	52
9.7	Conceptueel model verzilting Krammer-Volkerak	52
9.8	Eindconclusies	53
9.9	Aanbevelingen	54
10	Literatuur	55
Bijlage(n)		
A	VTSO-metingen	A-1
A.1	VTSO-metingen Chloridegehalte Krammer-Volkerak (januari t/m mei 2008)	A-1
A.2	VTSO-metingen Krammer-Volkerak; Chloridegehalte Krammersluizen (mg/l)	A-3
B	Rekenrooster(fijn) VZM-model + ingezoomd op het Krammer-Volkerak	B-1
C	Resultaten validatiesimulaties VZM-model	C-1
C.1	Resultaten simulatie O07	C-1
C.1.1	Invoergegevens	C-1
C.1.2	Tijdplots O07	C-3
C.1.3	Dwarsdoorsnedes O07	C-4
C.2	Resultaten simulatie P07	C-5

C.2.1	Invoergegevens	C-5
C.2.2	Tijdplots P07	C-7
C.2.3	Dwarsdoorsnedes P07	C-8
D	Resultaten simulaties scenario's zoutlek en doorspoeling	D-1
D.1	Resultaten scenario P08	D-1
D.1.1	Tijdplots P08	D-1
D.1.2	Dwarsdoorsnedes P08	D-2
D.2	Resultaten scenario P09	D-3
D.2.1	Tijdplots P09	D-3
D.2.2	Dwarsdoorsnedes P09	D-4
D.3	Resultaten scenario P12	D-5
D.3.1	Tijdplots P12	D-5
D.3.2	Dwarsdoorsnedes P12	D-6
D.4	Resultaten scenario P13	D-7
D.4.1	Tijdplots P13	D-7
D.4.2	Dwarsdoorsnedes P13	D-8
D.5	Resultaten scenario P16	D-9
D.5.1	Tijdplots P16	D-9
E	Zouttransporten voor de simulaties P07, P09, P12 en P13	E-1
E.1	Zouttransporten P07	E-1
E.2	Zouttransporten P09	E-2
E.3	Zouttransporten P12	E-2
E.4	Zouttransporten P13	E-3
F	Krammersluizencomplex, simulaties met het dynamisch zoutlekmodel	F-1
F.1	Inleiding	F-1
F.2	Voorgestelde toekomstige situatie	F-1
F.3	Duwvaartsluizen	F-2
F.4	Jachtensluizen	F-5
F.5	Voorlopige conclusies	F-6

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In 2009-2010 is door Deltares in opdracht van RWS-WD een Ontwerpstudie en Praktijkproef uitgevoerd t.b.v. de maatregelen die nodig zijn voor zoutlekbeperking Volkeraksluizen als in de toekomst op het Volkerak-Zoommeer (VZM) weer zout water wordt toegelaten.

Ook is een verkenning uitgevoerd naar de mogelijke maatregelen voor de beperking van de zoutindringing in de Nieuwe Waterweg.

Belangrijke resultaten van deze studies zijn dat de zoutlek bij schutsluizen sterk kan worden gereduceerd door innovatieve maatregelen zoals een verbeterd luchtbellenscherm, al dan niet in combinatie met een waterscherm, drempel en/of het doorspoelen van de schutkolk met zoet water (lekkende ebdeur), en de eventuele aanleg van een zoutafvang. De onderzochte maatregelen zijn breder toepasbaar.

Een sluizencomplex dat in belangrijke mate ontworpen is voor de scheiding van zoet- en zoutwater is het Krammersluizencomplex (de verbinding tussen de Oosterschelde en het VZM). Het is gebleken dat het beheer en onderhoud van deze sluis erg kostbaar is, terwijl ook de schuttijden vanwege de extra uitwisseling van zoet en zout water zo lang zijn dat dit de capaciteit van de sluizen ernstig beperkt.

Voor 2015 moet het zout/zoet-scheidingssysteem groot onderhoud ondergaan (kosten ca. 15-20 M€). Daarnaast zal binnen afzienbare tijd (10-15 jaar) de capaciteit moeten worden vergroot (kosten aanleg 3^e kolk ca. 350 M€).

De vraag van Rijkswaterstaat is nu of de (vernieuwde) maatregelen uit de ontwerpstudie Volkeraksluizen een alternatief kunnen zijn voor de huidige zout/zoet-scheiding van de Krammersluizen. Het voordeel van een dergelijke aanpassing is:

- minder beheer en onderhoud (besparing op groot onderhoud en beperking van het reguliere B&O);
- kortere schuttijd met als gevolg dat voorlopig nog geen 3^e kolk nodig is;
- de aanpassing van het zout/zoet-scheidingssysteem anticipeert op ontmanteling van het systeem als op termijn het VZM zout wordt.

In het kader van het CIP (Corporate Innovatieprogramma) van Rijkswaterstaat is door de Waterdienst en de Dienst Zeeland (beide van Rijkswaterstaat) voorgesteld om de Krammersluizen als voorbeeld te nemen voor een implementatiepilot van innovatieve zoutlekbeperkende maatregelen. Voor de periode 2012-2015 beoogt Rijkswaterstaat om in een 3- tal stappen te komen tot een voorstel voor aanpassing van het huidige zout/zoet-scheidings-systeem. Dit betreft:

1. Een nadere verkenning van de mogelijkheden voor implementatie van een alternatief systeem voor zoutlekbeperking (technische haalbaarheid, resterende zoutlast en chlorideconcentraties in VZM);
2. Voorbereiden, uitvoeren en evalueren van een implementatiepilot op één van de Krammerjachtensluizen;
3. Uitwerken van de mogelijkheden voor aanpassing van de andere Krammerjachtensluis en van de duwvaartsluizen. Dit betreft zowel de technische lay-out als het bepalen van de te verwachten resterende zoutlast op het VZM en eventuele effecten op de Oosterschelde

Het voorliggende rapport is onderdeel van stap 1 en beschrijft het verkennende onderzoek naar de resterende zoutlast en de chlorideconcentraties in het Volkerak-Zoommeer.

Voor een goed begrip van de in dit rapport besproken problematiek wordt in hoofdstuk 2 de werking van het huidige Krammersluizencomplex beknopt beschreven.

1.2 Doel van het onderzoek

Het hier beschreven onderzoek heeft als doel meer duidelijkheid te verkrijgen over het verloop van de chloridegehalten in het Krammer-Volkerak dat bij verschillende zoutlek- en doorspoel-scenarios zal optreden als de zout/zoet-scheiding van de Krammersluizen wordt vervangen door innovatieve zoutlekbeperkende maatregelen.

Het gaat dus om twee hoofdvragen waarop dit verkennende onderzoek een antwoord wil geven:

- Welke zoutlekbeperkende maatregelen zijn nuttig en nodig voor de Krammersluizen en wat is de bijbehorende resterende zoutlek;
- Wat betekent de zoutlek in de nieuwe situatie voor de chloridegehalten in het Krammer-Volkerak.

Deze onderzoeksvragen zijn van belang voor de beoordeling van de haalbaarheid van een alternatieve zout/zoet-scheiding bij de Krammersluizen.

1.3 Aanpak

In de aanpak kunnen drie stappen worden onderscheiden:

1. De benodigde zoutlekbeperkende maatregelen en de bijbehorende resterende zoutlek;
2. De modellering van de chlorideconcentraties in het Volkerak-Zoommeer en het berekenen van de effecten van een aantal scenario's voor zoutlek en doorspoeling;
3. De koppeling van de resultaten van stappen 1. en 2. voor de toekomstige situatie met alternatieve zout/zoet-scheiding.

1.3.1 Zoutlekbeperkende maatregelen en bijbehorende zoutlek Krammersluizen

Dit betreft een verkenning van alternatieve mogelijkheden voor zoutlekbeperving door technische aanpassingen bij de Krammersluizen, en het kwantificeren van de bijbehorende resterende zoutlek. Het bleek daarvoor noodzakelijk om het bestaande stationaire zoutlekmodel, zoals dat ontwikkeld was t.b.v. een ontwerpstudie en praktijkproef voor zoutlekbeperving bij de Volkeraksluizen bij een mogelijk toekomstig zout Volkerak-Zoommeer (zie Uittenbogaard, 2010), om te werken tot een dynamisch zoutlekmodel in verband met de getijrandvoorwaarde aan de Oosterscheldezijde van de Krammersluizen. Met dit dynamische zoutlekmodel is voor enkele gekozen varianten van combinaties van zoutlekbeperkende maatregelen de resterende zoutlek berekend voor het Krammersluizencomplex (jachten- en duwvaartsluizen).

De resultaten van dit onderzoek staan beschreven in bijlage F van dit rapport. Naderhand zijn meerdere analyses uitgevoerd in het kader van de voorbereiding van de implementatiepilot in één van de Krammer-jachtensluizen (zie stap 2, paragraaf 1.1). Het dynamische zoutlekmodel wordt beschreven in de rapportage van deze analyses (Uittenbogaard en Cornelisse, 2012).

1.3.2 Modelling chlorideconcentraties en effecten scenario's zoutlek en doorspoeling

Er was nog geen goed afgeregeld 3D-model van het Volkerak-Zoommeer beschikbaar voor dit onderzoek. Het bestaande niet-gevalideerde 2D-model van het Volkerak-Zoommeer zal daarom worden uitgebreid tot een 3D-model (hoofdstuk 3). Dit model zal worden gevalideerd aan de hand van metingen (VTSO-metingen, zie paragraaf 1.4) voor twee perioden met duidelijk verschillende beheersituaties (hoofdstuk 5). Daarvoor is het van belang over goede randvoorwaarden te beschikken. Een belangrijke parameter daarbij is de zoutlek van de Krammersluizen (hoofdstuk 4).

Bij gebleken voldoende kwaliteit van het model worden daarmee enkele scenario's voor de zoutlek van de Krammersluizen en de doorspoeling van het Volkerak-Zoommeer doorgerekend (hoofdstuk 6).

1.3.3 Koppeling simulaties dynamisch zoutlekmodel en 3D-modellering VZM.

De stappen 1. en 2. in de aanpak zijn min of meer apart van elkaar uitgevoerd. Elk model heeft zijn eigen bijzonderheden en beperkingen. De resultaten van beide stappen worden bij elkaar gebracht in de hoofdstukken 7 en 8 om een schatting te krijgen van de chloridegehalten in het Krammer-Volkerak bij toepassing van gekozen innovatieve zout/zoet-scheiding.

1.4 VTSO-metingen

Voor de validatie van het 3D-VZM-model spelen naast de continue metingen van de chlorideconcentraties bij de meetpunten Galathea en Nieuw-Vossemeer (zie hoofdstuk 4, figuur 4.1) de zogenaamde VTSO-metingen een prominente rol.

Het chloridegehalte in het Krammer-Volkerak is gedurende de periode 1986-2010 uitgebreid bemonsterd. Via de VTSO-database kan een goed inzicht worden verkregen in het verloop van het gehalte in Krammer-Volkerak, zowel in de tijd als over de diepte. VTSO staat voor temperatuur, zout en zuurstof. Bijlage A.1 geeft een voorbeeld van de chloridegehalten gemeten op de onderscheiden meetlocaties op verschillende dieptes. Bijlage A.2 geeft het verloop in de tijd van deze metingen voor de locatie Krammersluizen (d.i. de Krammerput, meetpunt 16 van bijlage A.1). De figuren zijn geleverd door Rijkswaterstaat.

Het gedrag van deze put is in belangrijke mate afhankelijk van de resterende zoutlek die vanuit de Krammersluizen doordringt naar het Krammer-Volkerak. Samen met de gegevens over het beheer van de sluizen kan hieruit worden afgeleid in welke mate de resterende zoutlek leidt tot een verhoging van het chloridegehalte in het oppervlaktewater van het Volkerak en de uitstroming naar de Eendracht.

1.5 Uitvoering

Het projectteam bestond uit:

Douwe Dillingh	- projectleider en eindrapportage
Dick Verploegh	- modelbouw en 3D-simulatie
Theo van der Kaaij	- 3D-simulatie
Geert Keetels (tot 01-01-2012)	- data-analyse, randvoorwaarden, balansen
Rob Uittenbogaard	- simulaties met het dynamisch zoutlekmodel en formulering conceptuele model verzilting Krammer-Volkerak

Namens de opdrachtgever hebben Hans van Pagee (RWS Waterdienst) en René Boeters (RWS Dienst Zeeland) de studie begeleid.

De review van het rapport is uitgevoerd door Arnout Bijlsma.

2 De werking van het bestaande zout/zoet-scheidingsstelsel

2.1 Het Krammersluizencomplex

Voor een goed begrip van de in dit rapport besproken problematiek volgt hier een beknopte beschrijving van de werking van het huidige Krammersluizencomplex. Degene die goed op de hoogte is van de werking van het complex kan dit hoofdstuk uiteraard overslaan. Onderstaande afbeelding is overgenomen uit Uittenbogaard en Cornelisse (2012) en geeft een mooi overzicht van het hele complex en de diverse onderdelen.



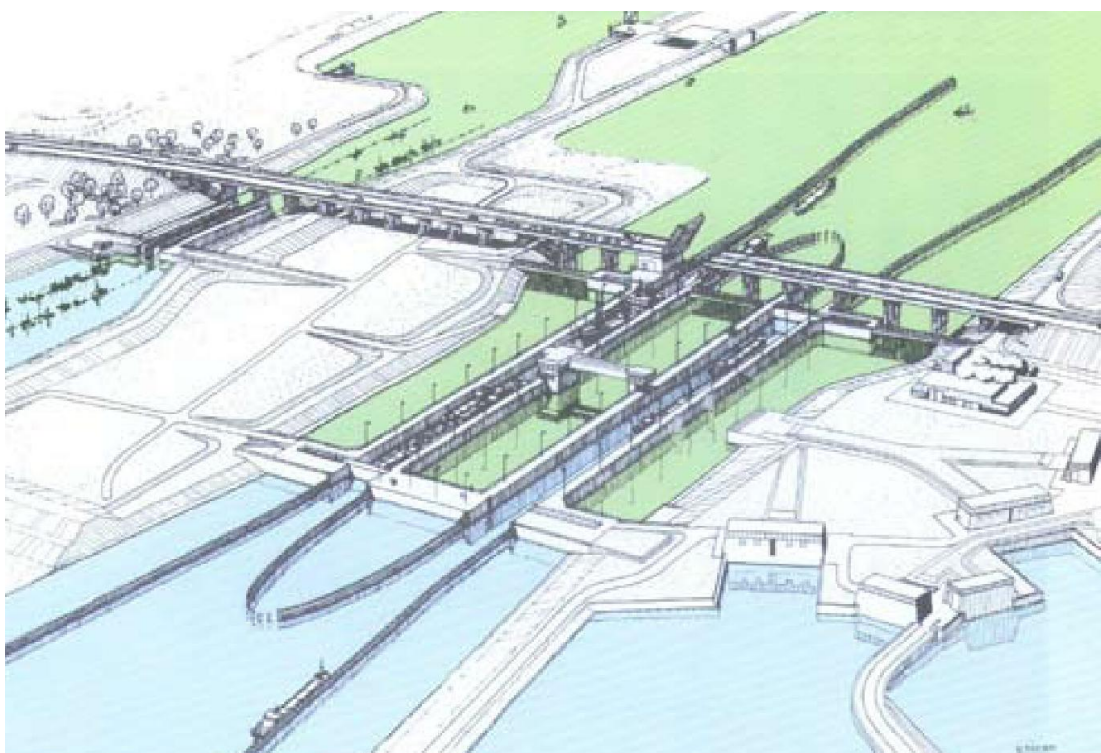
Figuur 2.1 Het Krammersluizencomplex in de Philipsdam (OS=Oosterschelde, KV=Krammer-Volkerak)

De volgende tekst en figuren zijn ontleend aan een brochure van Rijkswaterstaat (2007).

Het Krammersluizencomplex bestaat uit 2 sluisen die voor vierbaks-duwvaarteenheden geschikt zijn. Deze sluisen zullen verder worden aangeduid als de duwvaartsluizen. Zij zijn elk 280 m lang en 24 m breed. Tevens zijn er 2 jachtensluizen van elk 9 bij 75 m. De drempeldiepte van de duwvaartsluizen bedraagt NAP - 6,25 m en van de jachtensluizen NAP - 3,70 m. Er zijn voorzieningen getroffen om later een derde duwvaartsuis te bouwen als daaraan behoefte bestaat.

Om te voorkomen dat tijdens het schutten grote hoeveelheden zout water uit de Oosterschelde op het zoete randmeer (Volkerak-Zoommeer) terecht zouden komen en omgekeerd te veel

zoet water op de Oosterschelde komt, is dit sluisencomplex uitgerust met een vernuftig zout/zoet-scheidingssysteem. Dit systeem maakt enerzijds gebruik van het gegeven dat zout water zwaarder is dan zoet water en anderzijds van bufferbekkens en pompen om het water dat in de sluisen komt terug te voeren.



Figuur 2.2 Perspectieftekening Krammersluizencomplex (bron: Rijkswaterstaat, 2007)

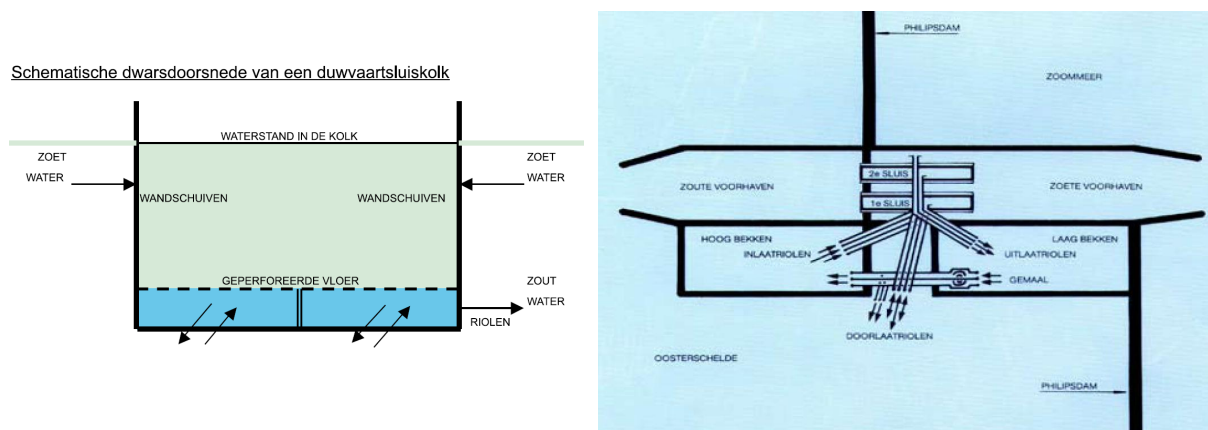
Elk van de 2 duwvaartsluizen bestaat uit een gewapend betonnen bakprofiel met een 3 meter dikke vloer en een geperforeerde tussenvloer. In het midden van elke schutkolk monden tussen de vloeren aan- en afvoerringen uit, die aansluiting geven op de 2 bufferbekkens en op de aangrenzende Oosterschelde (Slaak). De sluisen worden aan 3 zijden omgeven door het zoete water van het Krammer. De 4^e zijde wordt van de zoute Oosterschelde gescheiden door middel van keerwanden tussen de sluishoofden (zie figuur 2.2).

2.2 Het zout/zoet-scheidingssysteem

Het principe van het zout/zoet-scheidingssysteem is, dat bij een gesloten sluisdeur het zoute water in de sluiskolk wordt vervangen door zoet water of omgekeerd, afhankelijk van de richting waarin het geschutte schip vaart. Bij het scheidingssysteem horen een laagwaterbassin (ca. 45 ha) met een lage waterstand en een hoogwaterbassin (ca. 41 ha) met een hoge waterstand. De schutkolken staan met deze bassins en met de Oosterschelde (Slaak) in verbinding door een stelsel van riolen en doorlaatwerken.

In de sluiswanden zitten openingen die met schuiven zijn afgesloten. Door deze schuiven te openen, kan men zoet water vanuit het randmeer door de openingen in- en uitlaten (figuur 2.3).

Het inlaten van dit water is mogelijk als tegelijkertijd evenveel zout water via de geperforeerde vloer en door de riolen en het uitlaatwerk wegloopt naar het lage bekken. Zo wordt het zoute water in de gesloten sluis kolk dus vervangen door zoet water, dat van bovenaf wordt ingelaten.



Figuur 2.3 Schematische dwarsdoorsnede (li) en schema van het riolenstelsel (re).
(bron: Rijkswaterstaat, 2007)

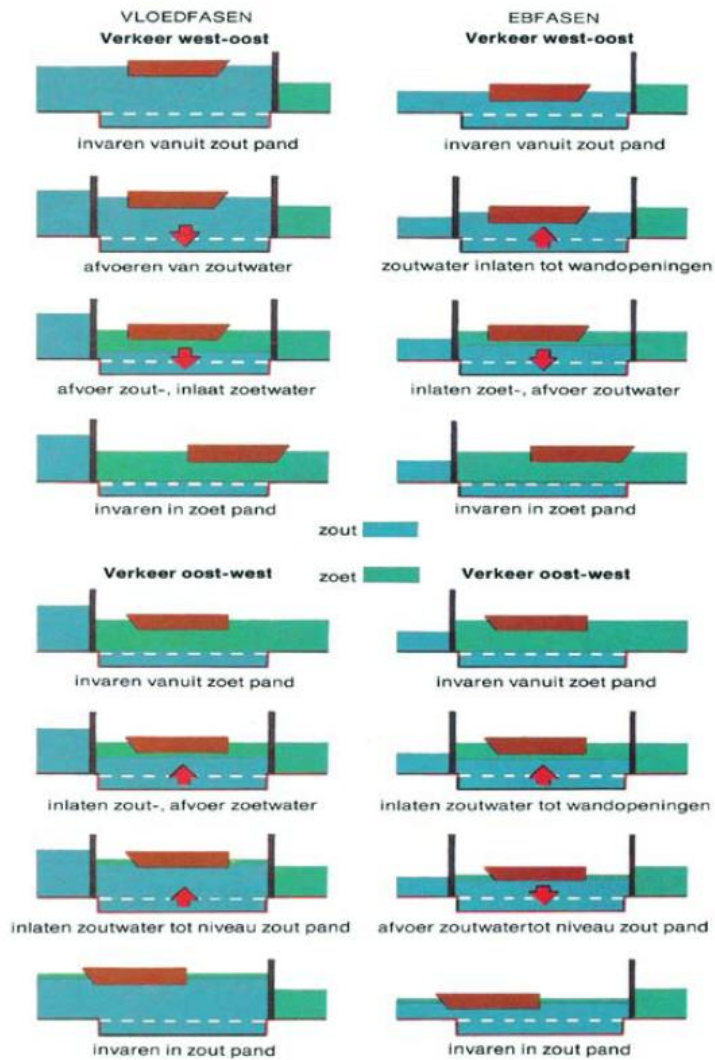
Als de schutkolk met zout water moet worden gevuld – dus als een schip van het randmeer naar de Oosterschelde moet – laat men dit zoute water vanuit het hoge bekken via het inlaatwerk, de riolen en de geperforeerde vloer van onderen in de sluis kolk lopen. Omdat zout water zwaarder is dan zoet water, vermengen beide soorten zich vrijwel niet. Het zoute water duwt het zoete water naar boven, totdat dit door de genoemde openingen in de sluiswand naar buiten is gestroomd. Hierbij wordt de sluis dus van onderen af van zout water voorzien. Afhankelijk van de waterstand op de Oosterschelde hoeft in bepaalde perioden geen gebruik te worden gemaakt van beide bassins, maar neemt de Oosterschelde die functie over.

Om de verbinding van elke sluis kolk met elk doorlaatwerk mogelijk te maken is er een netwerk van riolen gebouwd (figuur 2.3). De doorsnede van een rioolbuis komt ongeveer overeen met die van een tunnel van een ondergrondse spoorweg. Bij het hierboven beschrevene is voor het stromen van water gebruik gemaakt van de wet van de communicerende vaten. Het water in de bekkens moet op peil worden gehouden.

Dat kan gebeuren door zout water uit het lage bekken op de Oosterschelde of in het hoge bekken te pompen. Hiervoor is een gemaal gebouwd met 3 regelbare schroefcentrifugaal-pompen, die elk $11,5 \text{ m}^3$ water per seconde kunnen verzetten.

De jachtensluizen zijn uitgevoerd als tweelingsluizen met een tussenwand. De jachtensluizen hebben een zout/zoet-scheidingsstelsel gelijk aan dat van de duwvaartsluizen, met dien verstande dat de functie van de bekkens wordt overgenomen door een gemaal, dat door middel van riolen rechtstreeks in verbinding staat met de Oosterschelde en de schutkolken. Dit gemaal heeft een capaciteit van $4,2 \text{ m}^3$ per seconde.

In figuur 2.4 worden de diverse stadia in de werking van het zout/zoet-scheidingsstelsel van de duwvaartsluizen aan de hand van schematische figuren weergegeven.



Figuur 2.4 Werking zout/zoet-scheidingsstelsel Krammer-duwvaartsluizen (bron: Rijkswaterstaat, 2007)

3 De 3D-modellering van het Volkerak-Zoommeer

3.1 Modelversie

In figuur 3.1 wordt de positie van het Volkerak-Zoommeer (donkerblauw) getoond in het geheel van de Zeeuwse Delta. Van het VZM is een 3D-model gemaakt met behulp van de Delft3D-FLOW software (versienr.: 4.00.06.0834). Het betreft een volledig geteste versie, welke intern beschikbaar is gesteld. In de loop van het project is hierop een aanpassing aangebracht om de zoutfluxen door een doorsnede voor het onderhavige project beter uit te kunnen rekenen (zie hoofdstuk 7). Deze researchversie heeft nr. 4.00.07.000000 gekregen.

3.2 Het rekenrooster

Het toegepaste rekenrooster en de bodemligging zijn conform gebruik en beschrijving in Hulsbergen (2006). De resolutie van het model bedraagt 60 tot 100 m. De resolutie is daarbij gedefinieerd als de wortel uit het oppervlak van een gridcel. Omdat niet alle gridcellen even groot zijn vanwege het kromlijnige rooster, heeft de resolutie een zekere range. De bodemligging was gegeven op een grid van 5x5 m. Bijlage B geeft een beeld van het rekenrooster. Figuur 3.2 geeft daarnaast een beeld van de diepteligging. De toegepaste rekentijdstap bedraagt 2 minuten.



Figuur 3.1 Het Volkerak-Zoommeer (donkerblauw)

Voor het schematiseren van gridcellen in de verticaal bestaan twee methodes: een verdeling volgens het σ -lagenmodel of volgens het Z-lagenmodel. Bij het σ -lagenmodel is het aantal lagen (of gridcellen in de verticaal) over het hele model constant. Bij grotere diepte neemt dus de laagdikte toe; de laagdikte “ademt mee” met de bodemligging. Bij het Z-lagenmodel is de dikte van elke laag constant en varieert het aantal lagen bij variërende diepte.

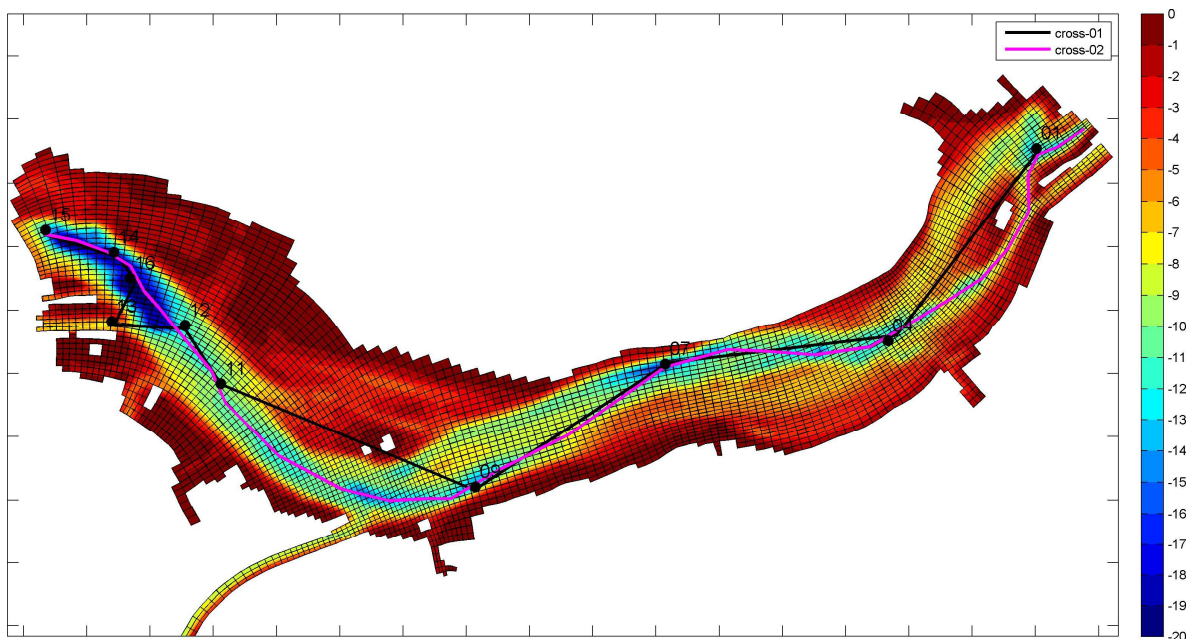
Het Z-lagenmodel is geschikter voor een zwak-dynamisch systeem als het Volkerak-Zoommeer waarin stratificatie op kan treden.

Het toegepaste VZM-Z-lagenmodel kent 20 lagen. Het diepste punt ligt op NAP-22,8 m, de hoogste waterstand op NAP+0,4 m. Bij 20 lagen met gelijke dikte levert dit een laagdikte van 1,16 m. Omdat de bodemligging in de ruimte varieert, variëren ook de dikte van de onderste laag en het aantal lagen in de ruimte. De bovenste laag varieert in dikte in de tijd met de variaties van de waterhoogte.

3.3 Weergave berekeningsresultaten langs de “talweg”

Figuur 3.2 laat het rekenrooster van het Volkerak-Zoommeer zien met daarin getekend de basislijn(en) van het profiel waarlangs de chloridegehaltes van de VTSO-metingen van bijlage A.1 zijn getekend (rechte lijnstukken, cross-01, blauw) en dat van de resultaten van de uitgevoerde simulaties (doorgetrokken lijn, cross-02, magenta).

Merk op dat de berekende modelresultaten dus gegeven worden langs de zogenaamde “talweg”, d.i. de vloeiende lijn in langsrichting, die de diepste punten van een rivierbed of dal verbindt. Zij geven daardoor een realistische weergave van het diepteverloop en het zoutgehalte over de lengte van het Krammer-Volkerak. De profielen van de VTSO-metingen van bijlage A.1 bestaan uit interpolaties tussen de individuele meetpunten (met lineaire interpolatie van de bodemligging), die soms misleidend kunnen zijn door plotartefacten.



Figuur 3.2 Rekenrooster en basislijnen gepresenteerde chlorideprofielen Volkerak-Zoommeer. Cross-01 betreft bijlage A.1 (VTSO-metingen), cross-02 heeft betrekking op de simulaties van dit rapport.

3.4 Overige gegevens

De watertemperatuur is mee gemodelleerd, omdat die mede stratificatie veroorzaakt, zij het dat de stratificatie door saliniteit veel sterker is. Van de verschillende warmtetransportmodellen binnen Delft3D-FLOW is gekozen voor het Ocean heat flux model.

Secchi-waarde (doorzicht) = 1,5 m;

Stanton en Dalton nummer (voor het heat flux model) = 0,0013.

Voor de turbulentie is het k- ϵ -model toegepast;

Horizontale viscositeit: 0,5 m²/s;

Diffusiviteit: 0,1 m²/s;

Manning coëfficiënt voor de bodemruwheid = 0,0265 s/m^{1/3}.

Opmerking:

Bij toepassing van bovengenoemde waarde voor het Stanton en Dalton nummer bleken de temperaturen wat hoger uit te vallen dan gemeten. Er is nog getracht tot betere resultaten te komen door het Stanton en Dalton nummer te variëren (0,013), maar dat leverde iets te lage temperaturen, terwijl de verschillen in de chlorideconcentraties heel klein waren. Er is daarom verder afgezien van het ijken op de temperatuurmetingen.

4 De zoutlek van de Krammersluizen

Getracht is een beeld te krijgen van de zoutlek van de Krammersluizen uit eerdere onderzoeken en op basis van beschikbare metingen. De water- en zoutbalans spelen daarbij een belangrijke rol. Hierover wordt gerapporteerd na eerst eerdere onderzoeken te hebben besproken. Daarna wordt in dit hoofdstuk de problematiek van de modellering van de zoutlek aan de orde gesteld. Het hoofdstuk eindigt met een aantal conclusies.

4.1 Eerdere onderzoeken

In Jongeling (2006) wordt op basis van experimenteel onderzoek bij de Krammersluizen de uitwisseling van water per schutting van de Krammersluizen geschat op 1 tot 5% van het kolkvolume. Dat komt bij 24 schuttingen per dag van de beroepssluis en 11 schuttingen per dag van de jachtensluizen overeen met een jaargemiddelde zoutflux van 5 tot 18 kg/s. Hierbij is een uitwisselingspercentage van 20% aangenomen voor de jachtensluizen (communicatie J. Cornelisse (Deltares) en L. Dekker (RWS)). Deze getallen moeten geïnterpreteerd worden als een range voor de bruto zoutlast. Hiermee wordt bedoeld de zoutlast van de sluisen naar de voorhaven aan de Krammer-zijde (en dus zonder correctie voor het zoutverlies van Krammer naar Oosterschelde ten gevolge van het schut- en doorspoelproces).

Hulsbergen (2006) heeft een zoutlekdebiet van gemiddeld $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ toegepast. Met een zoutgehalte van 30 psu (water uit de Oosterschelde) geeft dat een zoutlast van 15 kg/s. De keuze voor de waarde van $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ is gebaseerd op een goede overeenstemming tussen de gradiënt in het chloridegehalte in het Krammer-Volkerak volgens de modelresultaten en die volgens de metingen. De simulatie van Hulsbergen heeft betrekking op het jaar 2000. De gebruikte zoutlek kan gezien worden als het netto effect op het Volkerak-Zoommeer (mondelinge communicatie met R. Hulsbergen). Zoute kwel is niet beschouwd.

In Nolte (2011) is de bruto zoutlek geleidelijk vergroot van circa 3 kg/s (overeenkomend met 1% van het kolkvolume) tot 12 kg/s. Met 12 kg/s wordt in het gebruikte 2D-model een betere met de metingen overeenkomende gradiënt in de chlorideconcentraties op het VZM berekend. Deze waarde is met behulp van calibratie op de actuele metingen bij Galathea en Nieuw-Vossemeer verkregen. De berekeningen hebben betrekking op de eerste 4 maanden van 2011. Gesteld wordt in Nolte (2011) dat aan de waarde van 12 kg/s geen gewicht gegeven moet worden zonder nader onderzoek en/of nadere kwantificering. Het is dus puur een calibratiewaarde waarmee de met het 2D-model berekende chloridegradiënt zo goed mogelijk overeenkwam met de gemeten chloridegradiënt. Er kan volgens Nolte (2011) voorzichtig geconcludeerd worden dat de minimale waarde van 3 kg/s (1% van het kolkvolume) voor de zoutlek door de Krammersluizen als een onderschatting kan worden gezien.

Recent zijn zeer uitgebreide metingen en dito rapportage (Regeling, 1989) met 1116 figuren van o.a. de zout-zoet uitwisseling in een duwvaartkolk weer boven tafel gekomen. Deze verdienen meer studie.

Regeling (1989) beschrijft in honderden figuren de troskrachten op schepen, de werking van de riolen en de neerwaartse uitwisseling (van zoute naar zoete kolk) en de opwaartse uitwisseling: inbrengen zout water uit hoog bekken, wat zoet water uit kolk via wandschuiven naar het Volkerak terugstuwt. Getoond worden talrijke voorbeelden van het zoutgehalte van de

kolken op het moment dat deze naar het Volkerak openen. Echter, de figuren vermelden niet het zoutgehalte maar de geleidendheid zonder referentie naar temperatuur en zonder referentie naar de geleidendheid van het zogenaamde omarmende zoete water in de relevante voorhaven. De figuren tonen dat op het moment van schutten naar het Volkerak de geleidendheid van het kolkwater 2-3 mS/cm bedraagt wat overeen kan komen met 2-3 psu zoutgehalte (1100-1700 mg/l chloride-concentratie) bij ca. 10° C. Deze resultaten zouden vergeleken kunnen worden met de mogelijk lagere zoutgehalten in de voorhaven zoals die later zijn gemeten (zie Figuur 8.2 van paragraaf 8.3).

Verder meldt Regeling (1989) dat er soms nog een laagje brak water op de kolkvloer achterblijft welke voor zoutlek zou kunnen zorgen. Mogelijk kan tijdens het opwaarts uitwisselen enig verticaal gemengd zout in het zoete water via de wandschuiven naar de Volkerak-zijde worden gestuwd. Hieruit kan geen redelijke zoutlek worden afgeleid, maar nadere studie naar deze zeer uitgebreide metingen is aan te bevelen.

In de conclusies van dit hoofdstuk (paragraaf 4.4) worden de bevindingen van deze paragraaf verder besproken.

4.2 De water- en zoutbalans van het Krammer-Volkerak

4.2.1 De waterbalans van het Volkerak-Zoommeer

Omdat het Volkerak-Zoommeer een gesloten systeem is waarin het waterpeil op een bepaald niveau gehandhaafd moet worden, is het van belang dat de waterbalans sluitend is. Dat is ook nodig bij de modellering (hoofdstukken 5 en 6). In de praktijk is dat op basis van beschikbare metingen zelden het geval en moet een geschikte manier gekozen worden om de balans sluitend te maken.

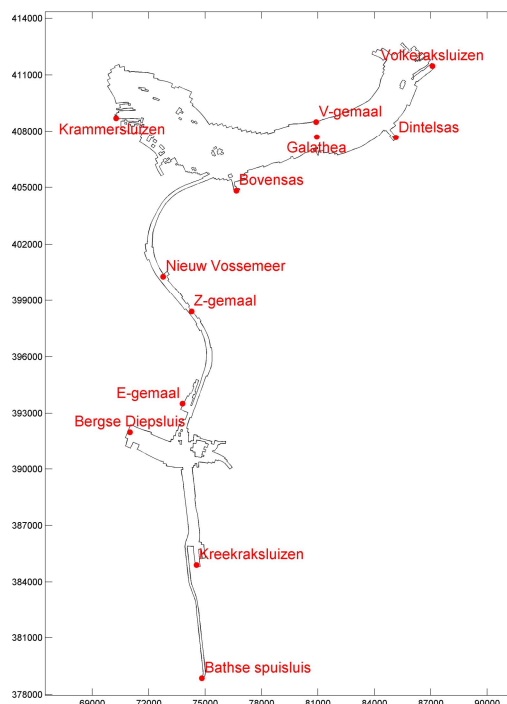
De waterbalans van het Volkerak-Zoommeer bestaat uit de volgende bijdragen:

1. Volkeraksluizen (som van schutverliezen en spuidebieten)
2. Neerslag
3. Verdamping
4. Dintel
5. Steenbergse Vliet
6. Krammersluizen
7. Poldergemalen
8. Bathse Spuisluis
9. Kreekraksluizen
10. Berging
11. Sluitfout

Zie Figuur 4.1 voor de locaties aan het Volkerak-Zoommeer.

Om de waterbalans te sluiten zijn bij andere studies verschillende strategieën gebruikt.

In De Vries et al. (2011) is er voor gekozen om de balans op maandbasis te sluiten door de sluitfout te interpreteren als het debiet dat door de poldergemalen aan het Volkerak-Zoommeer wordt toegevoegd. In Hulsbergen (2006) is er voor gekozen om de balans te sluiten door aanpassing van het debiet door de Bathse spuisluis en een vast peil te hanteren.



Figuur 4.1 Locaties aan het Volkerak-Zoommeer

In deze studie wordt de volgende strategie gevolgd om de balans te sluiten:

$$F_{\text{Volksluis}} + F^+ + F_p + F_E + F_{\text{Dintel}} + F_{\text{Vliet}} + F_{\text{gemalen}} + F_{\text{Krammer}} + F_{\text{Kreekrak}} + F_{\text{Bath}} + F^- = Q_{\text{berging}} + Q_{\text{dagsluitfout}}$$

$F_{\text{Volksluis}}$ = totale debiet door de Volkeraksluizen als gevolg van schutverliezen en spuien.

F^+ = extra bron bij de Volkeraksluizen om de balans op maandbasis te kunnen sluiten in het geval van een watertekort.

F_p = totale aanvoerdebiet door neerslag, gebaseerd op meteorologische gegevens van KNMI-station Tholen.

F_E = totale afvoerdebiet door verdamping, gebaseerd op meteorologische gegevens van KNMI-station Vlissingen.

F_{Dintel} = gemeten afvoerdebiet van de Dintel (meetpunt Dintelsas)

F_{Vliet} = gemeten afvoerdebiet van de Steenbergse Vliet (meetpunt Bovensas)

F_{gemalen} = gemeten afvoerdebiet van de poldergemalen (aanvoer van water naar het Volkerak-Zoommeer). Alleen voor de periode 2000 tot 2004 is data beschikbaar. Voor de andere jaren is deze term gelijk genomen aan het gemiddelde verloop over de periode 2000 tot 2004. Het betreft hier de som van de gemalen E (Eendracht), Z (Zoommeer) en V (Volkerak), zie figuur 4.1.

F_{Krammer} = debiet aan zoet water richting de Oosterschelde door het schutten bij de Krammersluizen.

F_{Kreekrak} = debiet bij de Kreekraksluizen.

F_{Bath} = spuidebiet bij de Bathse Spuisluis richting de Westerschelde.

F^- = extra put nabij de Bathse Spuisluis om de maandbalans te sluiten in het geval van een wateroverschot.

Q_{berging} = berging geschat op basis van waterstanden.

$Q_{\text{dagsluitfout}}$ = dagelijkse sluitfout die maandgemiddeld gelijk aan nul is.

Het debiet bij de Bergse Diepsluis is jaargemiddeld gering en wordt hier verwaarloosd.

4.2.2 De zoutbalans van het Krammer-Volkerak

Op basis van de waterbalans en de VTSO-metingen is tevens een zoutbalans opgesteld van het Krammer-Volkerak.

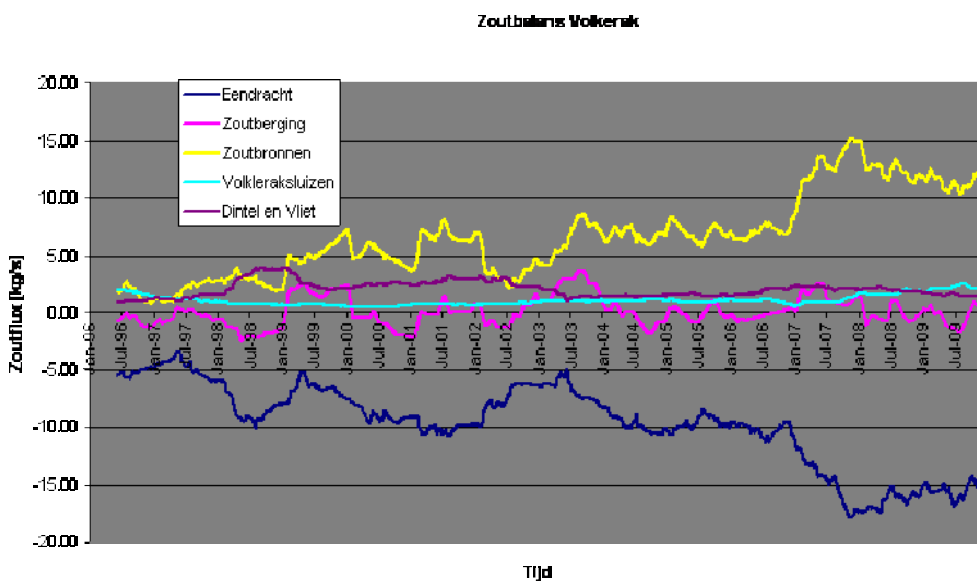
De benadering in deze paragraaf is op sommige punten tamelijk grof, maar dient ook alleen om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de orde van grootte van de hoeveelheden waarom het hier gaat.

In de zoutbalans worden de volgende zoutfluxtermen onderscheiden:

$$\text{Zoutbronnen} + \text{Volkeraksluizen} + \text{Dintel en Vliet} + \text{Eendracht} = \text{Berging}$$

De bijdrage van de hoeveelheid zout via het V-gemaal is hier verwaarloosd.

In Figuur 4.2 zijn de verlopen weergegeven van deze zoutfluxtermen, gemiddeld over een tijdvenster van 300 dagen.



Figuur 4.2 Gemiddelde zoutfluxen Krammer-Volkerak

De term *Volkeraksluizen* volgt uit de $F_{volksluis}$ en F^+ uit de waterbalans, vermenigvuldigd met een chloridegehalte van 100 mg/l (chloridegehalte zoet water Hollandsch Diep). Deze chlorideflux is vervolgens omgerekend naar een zoutflux.

De term *Dintel en Vliet* volgt uit de sommatie van de F_{Dintel} en F_{Vliet} uit de waterbalans vermenigvuldigd met een chloridegehalte van 100 mg/l. (gemiddelde waarde over de jaren 2000 en 2001))

De term *Eendracht* is berekend uit het product van $F_{Eendracht}$ en het gemeten chloridegehalte bij de meetlocatie Nieuw-Vossemeer. $F_{Eendracht}$ is het debiet dat vanuit het Krammer-Volkerak door de Eendracht naar het zuiden stroomt en is berekend uit de termen van de waterbalans van paragraaf 4.2.1 die betrekking hebben op het Krammer-Volkerak. De zoutflux door de Eendracht varieert tussen de 5 en 10 kg/s in de periode 1998 - 2007. In de loop van 2007 neemt de zoutflux door de Eendracht toe tot circa 15 kg/s.

De term *Berging* is geschat uit de VTSO-metingen (Cl-gehalte) van het Krammer-Volkerak door eerst per meetlocatie te middelen over de verticaal, vervolgens deze resultaten te middelen over het aantal locaties en dit gemiddelde te vermenigvuldigen met het volume water van het Krammer-Volkerak.

De term *Zoutbronnen* bestaat uit de netto zoutlek bij de Krammersluizen en kwel. De netto zoutlek is het verschil tussen de bruto zoutlek (naar het VZM) en de uitspoeling naar de Oosterschelde ($F_{Krammer}$ uit de waterbalans).

De uitspoeling van zout als gevolg van de waterflux $F_{Krammer}$ is gemiddeld over veel jaren circa 5 kg/s, berekend uit het product van het debiet zoetwaterverlies (schutverlies) van 9 m³/s en het gemeten chloridegehalte in de bovenste laag bij de Krammersluizen.

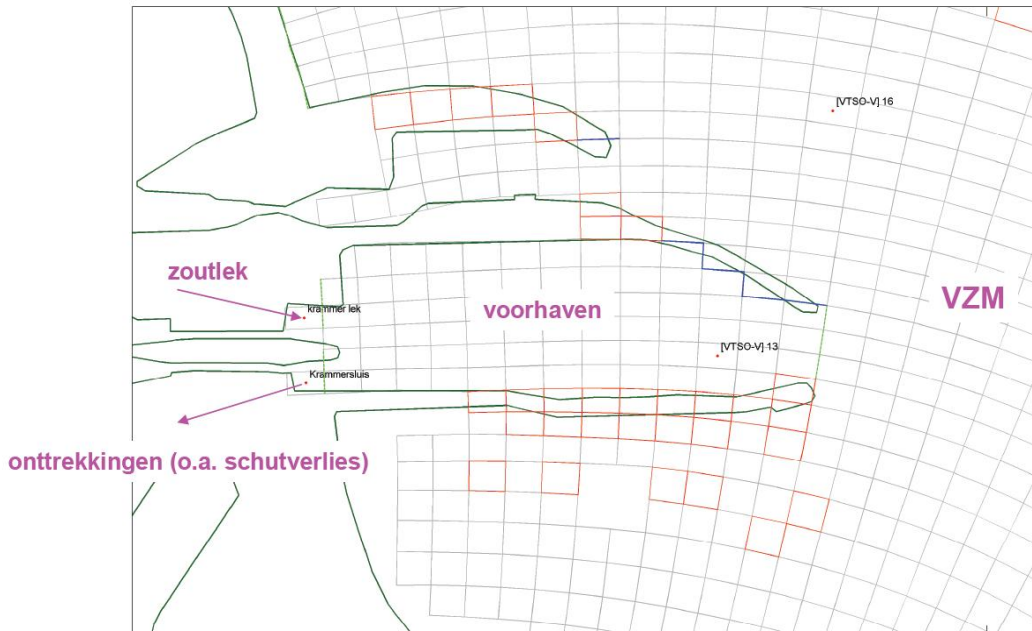
De zoutflux door kwel wordt geschat op circa 3 tot 3,5 kg/s voor het hele Volkerak-Zoommeer (Nolte, 2011). Op basis van de oppervlakteverhouding en de aanname dat de kweldruk regelmatig verdeeld is, komt dat uit op circa 2 kg/s voor het Krammer-Volkerak.

Over de periode januari 2000 – januari 2007 bedraagt de term *Zoutbronnen* ruwweg 2 – 8 kg/s (figuur 4.2) en over de periode januari 2007 – juli 2008 ongeveer 8 – 15 kg/s. Het is niet exact duidelijk waardoor deze toename in de term zoutbronnen veroorzaakt wordt. In Dekker (2008) worden een aantal mogelijkheden genoemd voor het minder goed functioneren van de zout-zoetscheidingen: slijtage, storingen, werkzaamheden, schutdiscipline.

De (bruto) zoutlek bij de Krammersluizen (van Oosterschelde naar VZM) is dan circa 5-11 kg/s voor de periode van januari 2000 tot januari 2007 en circa 11-18 kg/s in de periode januari 2007 tot juli 2009.

4.3 De modellering van de zoutlek

De modellering van de zoutlek bij de Krammersluizen is complex en is hier als volgt uitgevoerd:



Figuur 4.3 Detail van het VZM-model bij de Krammersluizen

De zoutlek (kg/s) wordt in het systeem ingebracht door een debiet (m^3/s) met een bepaalde saliniteit: (zoutflux = debiet x saliniteit).

Debiëten konden alleen als bronnen worden ingebracht in en als putten worden onttrokken aan het Volkerak-Zoommeermodel. De zoutlek wordt als een bron ingebracht en wordt bij de sluisen (zie Figuur 4.3) aan de noordzijde ingelaten middels een continu debiet met een saliniteit van 30 psu (psu staat voor practical salinity unit en is getalsmatig gelijk aan de vroeger gebruikelijke eenheid ppt: parts per thousand). Een debiet van $0,4 m^3/s$ met 30 psu brengt bijvoorbeeld een hoeveelheid zout van 12 kg/s in het systeem. Een even groot debiet wordt ook weer afgevoerd aan de zuidzijde van de sluisen om de waterbalans op orde te houden (correctiedebiet zoutlek). De zoutlek wordt over de diepte gelijkmatig verdeeld ingebracht. Zowel het debiet als de saliniteit worden dus gelijkmatig verdeeld toegevoerd.

Het schutverlies naar de Oosterschelde (tijdgemiddeld debiet van ca. $9 m^3/s$) wordt als put onttrokken aan de zuidzijde (zie figuur 4.3) op dezelfde locatie als het correctiedebiet voor de zoutlek. De onttrekking van het totale debiet geschiedt gelijkmatig verdeeld over de diepte. De zoutgehalten volgen uit de berekeningen met het model en verschillen per dieptelaag. De achterliggende gedachte is dat er zoveel menging is opgetreden, o.a. door scheepvaart, dat het niet veel uitmaakt uit welke lagen onttrokken wordt. In hoeverre dat juist is, is niet bekend.

Een alternatief zou kunnen zijn de zoutlek in de onderste laag/lagen in te brengen en het schutverlies alleen aan de bovenste laag/lagen te onttrekken. Dan zal er vermoedelijk minder zout bij de put weer aan het systeem worden onttrokken en zal de netto zoutlast die in het VZM terecht komt groter zijn. Welke aanname daarover ook gedaan wordt, de juistheid ervan valt niet te verifiëren. Om de modellering op dit punt te verbeteren zijn goede metingen onontbeerlijk. Helaas ontbreken dergelijke metingen.

De gebruikte modellering geeft het beste weer hoe de processen in werkelijkheid plaatsvinden. De zoutlek komt via de sluizen in de voorhaven, terwijl het schutverlies (zoet water) op een andere plek uit de voorhaven onttrokken wordt, namelijk via de schuiven in de wanden van de schutkolken. Op deze wijze kunnen scenario's voor zoutlek door de sluizen en voor onttrekkingen (schutverlies en doorspoeldebieten) eenvoudig worden gevarieerd. Een bijkomstig probleem was dat de resterende zoutlek door de mond van de voorhaven naar het Krammer-Volkerak niet goed berekend kon worden. Dat was nog een onvolkomenheid in de software, die in een later stadium is verbeterd (zie hoofdstuk 7).

De bruto zoutlek (de zoutflux die toch door de zout/zoet-scheiding heen komt) is hier dus de knop waaraan gedraaid moet worden om in hoofdstuk 5 de modelresultaten en de metingen bij elkaar te brengen. Dat geeft dus niet de werkelijke bruto zoutlek, maar regelt het model zodanig af dat de resterende netto zoutlek door de mond van de voorhaven wel correspondeert met de gemeten chloride-concentraties.

4.4 Conclusies

Via eerdere onderzoeken en via de VTSSO-metingen is getracht een indruk te krijgen van de grootte van de zoutlek van de Krammersluizen.

De verschillende informatiebronnen zijn moeilijk met elkaar te vergelijken. Zoute kwel wordt niet overal meegenomen, de onderzoeken hebben betrekking op verschillende periodes en de modelleringen zijn niet gelijk en ook niet altijd duidelijk beschreven. Verder wordt het effect van de zoutlek bij de duwvaartsluizen soms vergeleken met de gemeten chloridegradiënt in het Krammer-Volkerak, maar die wordt mede bepaald door de jachtensluizen, andere zoutbronnen (Dintel, Vliet, Volkeraksluizen) en de waterbalans. Het toekennen van sluitfouten in de waterbalans aan een bepaalde waterbron heeft invloed op de berekende chloridegradiënt.

Hulsbergen (2006) komt op 15 kg/s voor het jaar 2000 (netto effect op het Volkerak-Zoommeer). Zoute kwel is daarbij buiten beschouwing gelaten. Dat lijkt erg hoog in het licht van andere onderzoeken. Nolte (2011) komt op 3 tot 12 kg/s voor de eerste 4 maanden van 2011. Toch is in 2011 het VZM veel zouter dan in 2000.

Een belangrijke bron van informatie wordt gevormd door de VTSSO-metingen in het Krammer-Volkerak. De zoutbalans van paragraaf 4.2 komt uit op een geschatte range (in de tijd) voor de bruto zoutlek van 5-11 kg/s voor de periode 2000 t/m 2006 en van 11-18 kg/s voor de periode 2007 tot medio 2009. Over de nauwkeurigheid van de verschillende schattingen in statistische termen kan hier niets gezegd worden. In de zoutbalans is wel rekening gehouden met zoute kwel. De zoutlek van de jachtensluizen is niet apart gemodelleerd. De bruto zoutlek die is berekend uit de zoutbalans van het Krammer-Volkerak geldt dus voor duwvaartsluizen en jachtensluizen samen.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen bruto zoutlek en netto zoutlek. De bruto zoutlek is dan de hoeveelheid zout die toch door het zout/zoet-scheidingsstelsel heen komt; de netto zoutlek is dan de bruto zoutlek verminderd met de hoeveelheid zout die teruggespoeld wordt naar de zoute zijde van de sluiswolk. De netto zoutlek is de hoeveelheid zout die uiteindelijk via de monding van de voorhaven in het Krammer-Volkerak terecht komt. Men dient zich steeds bewust te zijn van wat er bedoeld wordt.

Er is een notoir gebrek aan metingen in sluizen als de Krammersluizen. Er is geen meetreeks bekend waaraan de gekozen modellering kan worden getoetst. Er is dringend behoefte aan adequate metingen in de tijd van zoutgehalten in kolk, voorhaven en net buiten de mond van de voorhaven om iets te kunnen zeggen over de mate van menging afhankelijk van plaats en tijd. Zonder dergelijke metingen zal de modellering altijd gebrekkig zijn en zijn de resultaten navenant.

Recent zijn zeer uitgebreide metingen en dito rapportage (Regeling, 1989) met 1116 figuren van o.a. de zout/zoet-uitwisseling in een duwvaarkolk weer boven tafel gekomen. Hieruit kan geen redelijke zoutlek worden afgeleid, maar nadere studie naar deze zeer uitgebreide metingen is aan te bevelen.

5 Validatieberekeningen voor het 3D-Z-lagen-VZM-model

5.1 Beschrijving van simulaties

Om na te gaan of het ontwikkelde 3D-Z-lagen-VZM-model voldoende goed de metingen weergeeft zijn twee periodes doorgerekend. Gekozen is voor twee periodes met een duidelijk verschillend karakter, zie tabel 5.1 en bijlage 1.2.

Tabel 5.1 Periode validatieberekeningen

Codering	Periode	Data
O07	1	1 januari 2000 t/m 30 juni 2001
P07	2	1 oktober 2006 t/m 31 december 2007

De letters O en P van de codes zijn toegekend aan berekeningen die betrekking hebben op periode 1 respectievelijk periode 2. Het cijfer betreft een intern administratienummer. Dat het eerste nummer hier 07 is geeft aan dat al 6 proefberekeningen zijn gedaan om het model goed werkend te krijgen en te zoeken naar een formulering van de zoutlek die de metingen zo goed mogelijk weergeeft.

Omdat zoute kwel (geschat op ca. 2 kg/s voor het Krammer-Volkerak, zie paragraaf 4.2) moeilijk uniform verdeeld over het model valt in te voeren is deze in de modelberekeningen niet expliciet ingevoerd maar inbegrepen gedacht bij de bruto zoutlek door de Krammersluizen. De ingevoerde zoutlek die een goede overeenkomst met de meetwaarden oplevert om die reden aan de hoge kant.

O07

De eerste periode, die loopt van januari 2000 t/m 30 juni 2001, heeft een duidelijke verzoetingsperiode in het begin van 2001, en valt in de periode vóór de hogere chloride gehalten. Vanaf ongeveer 2003/2004 nemen de chloridegehalten aanmerkelijk toe. Voor deze eerste periode is uiteindelijk om een goede overeenkomst met de metingen te krijgen een (bruto) zoutlek voor de Krammersluizen ingevoerd van 12 kg/s.

P07

De tweede periode kenmerkt zich door de overgang naar verhoogde chloridegehalten. In de loop van 2007 liggen de gehalten weer hoger dan in de jaren daarvoor (zie bijlage A.2). Er lijkt sprake van een significante verandering in het chloridegehalte in het Volkerak-Zoommeer vanaf begin 2007. De exacte oorzaak daarvan is niet bekend. Voor deze tweede periode is de zoutlek als volgt gemodelleerd: de zoutlek bij de Krammersluizen bedraagt tot 1 januari 2007 12 kg/s. Daarna loopt de zoutlek lineair op tot 21 kg/s op 1 juli 2007 en blijft daarna op dat niveau. Het lineaire verloop is gebaseerd op het verloop van de lijnen in figuur 4.2.

5.2 Invoergegevens

De bijlagen C.1.1 en C.2.1 laten de in het model ingevoerde debieten (bronnen en putten) voor de eerste periode (O07) respectievelijk de tweede periode (P07) zien. Er is onderscheid gemaakt tussen gemeten debieten en overige debieten (putten en bronnen).

5.2.1 Gemeten debieten

Ingevoerd zijn dagwaardes, ontleend aan de datasets t.b.v. het onderzoek beschreven in De Vries et al. (2011). De data voor poldergemalen is ontleend aan Hulsbergen, 2006. Het is de som van een drietal gemalen (in figuur 4.1 aangeduid als V-, Z-, en E-gemaal). Alleen voor de periode 2000 tot 2004 is data beschikbaar. Voor de andere jaren is deze term gelijk genomen aan het gemiddelde verloop over de periode 2000 tot 2004. De verdeling van de som over de drie gemalen is niet bekend. Bij de simulaties zijn ze voor elk van de drie gemalen ingevoerd als 1/3 van poldergemalen.

5.2.2 Overige debieten

De overige debieten zijn:

- Sluitbron Volkeraksluizen
- Zoutlek
- Compensatie zoutlek

Sluitbron Volkeraksluizen is een extra bron om de waterbalans op maandbasis sluitend te maken. Hier is er is voor gekozen om de sluitfout in het geval van een watertekort aan te vullen met een extra bron bij de Volkeraksluizen. In het geval van een wateroverschot (ook op maandbasis) zou een extra put bij de Bathse Spuisluis zijn ingevoerd. Dat bleek echter niet nodig.

Zoutlek is een bron die gebruikt is om de zoutlek bij de Krammersluizen in het model in te voeren. Voor de invoer wordt water met een zoutgehalte van 30 psu (parts per thousand) toegepast. Om bijvoorbeeld een zoutlek van 15 kg/s te simuleren moet een bron van 0,5 m³/s met 30 psu zout worden toegepast. Voor een zoutlek van 12 kg/s is 0,4 m³/s nodig, etc.. Het is dus een kunstmatig extra debiet dat ook weer gecompenseerd moet worden om de waterbalans sluitend te houden.

Compensatie zoutlek is de put die de bron voor de zoutlek moet compenseren. Deze put verwijderd evenveel water uit het VZM (overigens inclusief het erin opgeloste zout) als de bron zoutlek er in brengt.

5.2.3 Meteorologische invoergegevens

De tijdreeksen voor neerslag en verdamping zijn ontleend aan de complete dataset aan- en afvoerdebieten van RWS-Zeeland (HMCZ) en betreffen de KNMI stations Tholen (neerslag) en Vlissingen (gewasverdamping * 1.33) (zie De Vries et al., 2011). Het betreffen dagwaardes in mm/uur.

Voor simulatie O07 zijn voor windrichting en windsnelheid uurwaardes van KNMI-station Tholen gebruikt. Voor relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur en bewolingsgraad zijn gemiddelde waardes gebruikt van de daggemiddelden van de KNMI-stations Vlissingen en Rotterdam.

Voor simulatie P07 zijn voor windrichting, windsnelheid, luchttemperatuur en zoninstraling (solar radiation) de uurwaardes van KNMI-station Wilhelminadorp gebruikt.

Het was noodzakelijk om voor simulatie O07 deels andere meteorologische meetgegevens te gebruiken dan voor simulatie P07 vanwege het voorkomen van een te groot hiaat voor interpolatie in de waarnemingsreeks van Wilhelminadorp in 2000. Deze tijdreeksen voor

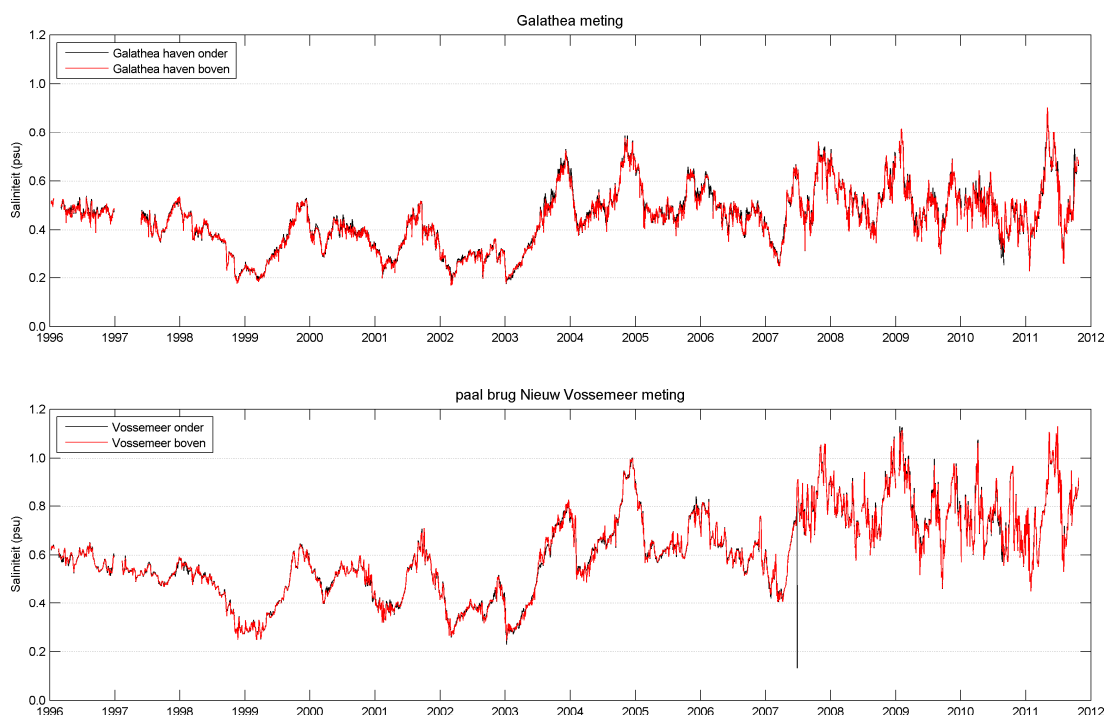
luchtvochtigheid, luchttemperatuur en bewolgingsgraad zijn ook gebruikt in Hulsbergen (2006). Het toegepaste Ocean heat flux model van Delft3D-Flow voor de watertemperatuur rekent de bewolgingsgraad weer om naar de zoninstraling.

5.3 Resultaten

5.3.1 Algemeen

De resultaten van de simulaties worden getoond aan de hand van de tijdplots van de berekende en gemeten waarden voor de waterstand bij Galathea, het chloridegehalte bij Galathea en het chloridegehalte bij Nieuw-Vossemeer (zie Figuur 4.1 voor de posities van deze locaties). Meetpunt Galathea wordt gezien als representatief voor het Krammer-Volkerak.

De stations Galathea en Nieuw Vossemeer kennen voor de meting van de saliniteit beide een meetpositie “onder” en “boven”. Figuur 5.0 laat voor beide stations de resultaten zien voor beide meetposities. De meetpunten staan uiteraard niet in de vaargeul. Meetpaal Galathea staat ten zuiden van de diepe geul. De lokale waterdiepte is 5 à 6 m. Vanwege de marginale verschillen tussen de meetposities “onder” en “boven” over de hele tijdreeks, worden verder alleen de metingen van de meetposities “onder” in de figuren getoond. Kennelijk is er sprake van goede menging over de bovenste meters.



Figuur 5.0 Vergelijking meetposities saliniteit “onder” en “boven” bij Galathea en Nieuw Vossemeer.

De waterstand bij Galathea dient ter controle van de waterbalans. Als de waterbalans niet sluit over de hele periode uit zich dat in een vol- of leeglopend Volkerak-Zoommeer. Er zijn natuurlijk afwijkingen als gevolg van onnauwkeurigheden in de berekeningen en in de

metingen. Bovendien is de sluitfout een gemiddelde waarde over een langere periode, hier een maand. In grote lijnen moeten de gemeten en berekende waterstand goed overeen komen.

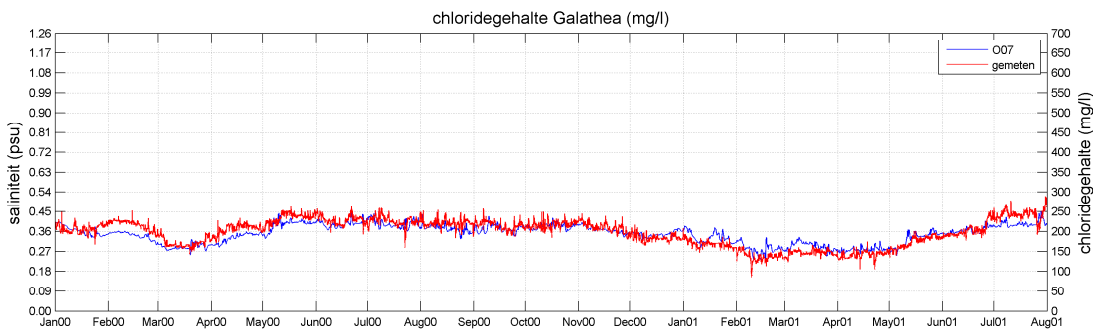
Verschillen tussen de gesimuleerde en gemeten waarden voor het chloridegehalte worden naast model- en meetonauwkeurigheden ook veroorzaakt door de sluitfout in de waterbalans en een constante zoutlek in de simulaties ten opzichte van een meer fluctuerende en onzekere waarde van de werkelijke zoutlek.

De dwarsdoorsnedes laten de verspreiding van het chloridegehalte zien langs de as (figuur 3.2) van het Krammer-Volkerak. De profielen zijn getekend voor die dagen dat er metingen beschikbaar zijn, wat ongeveer neerkomt op een profiel per maand. De metingen zijn aangegeven met vierkantjes.

5.3.2 O07

In Figuur 5.1 is het chloridegehalte bij meetpunt Galathea gegeven en in Figuur 5.2 een voorbeeld van een dwarsdoorsnede.

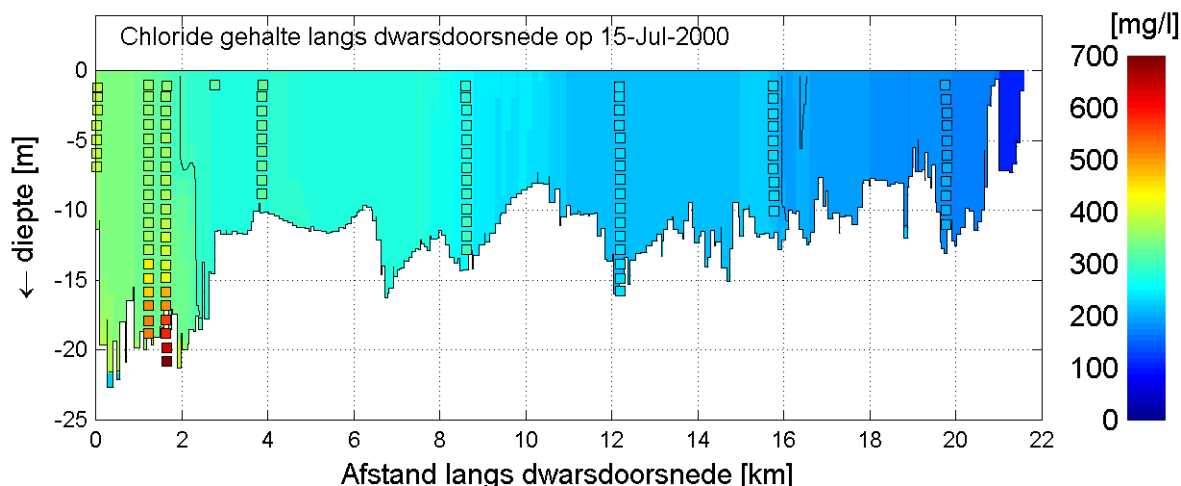
De tijdplots, voor waterstand en chloridegehalte bij Galathea en voor het chloridegehalte bij Nieuw-Vossemeer, zijn gegeven in bijlage C.1.2, alle dwarsdoorsnedes in bijlage C.1.3.



Figuur 5.1 Gemeten en gesimuleerde (O07) chloridegehalten bij meetpunt Galathea

Het gemeten chloridegehalte bij meetpunt Galathea wordt na een inspeelperiode voor de gekozen waarde voor de zoutlek bij de Krammersluizen (12 kg/s) redelijk goed weergegeven door het model.

De berekende chloridegehalten in het lengteprofiel van het Krammer-Volkerak zijn kwalitatief redelijk, maar laten kwantitatief nog wel wat te wensen over. De horizontale gradiënt in het chloridegehalte wordt over het algemeen behoorlijk goed weergegeven. In het diepste gedeelte van de Krammerput verschillen metingen en simulaties het meest. Het model onderschat de hoge zoutgehalten onder in de Krammerput. Figuur 5.2 geeft als voorbeeld de gesimuleerde en gemeten chloridegehalten op 15 juli 2000. Voor de andere TSO-meetdagen in 2000 zijn de figuren opgenomen in bijlage C.1.3.

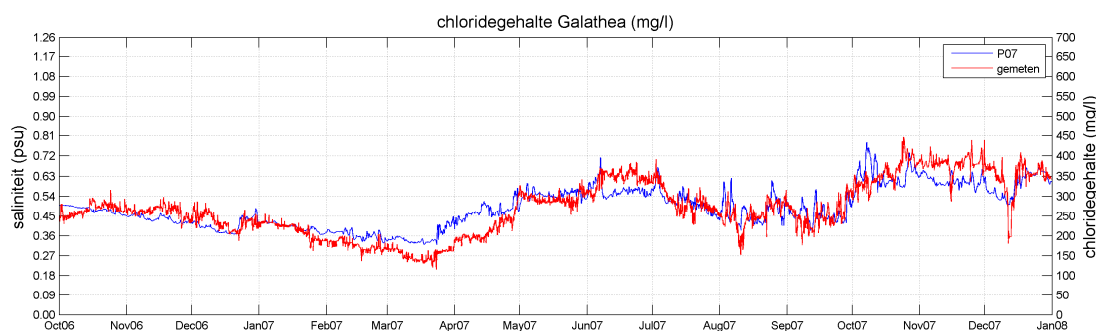


Figuur 5.2 Gemeten en gesimuleerde (O07) chloridegehaltenes Krammer-Volkerak

Bedacht moet worden dat de meetverticaal ter plaatse van de Krammersluizen (meetpunt 13 op bijlage A.1) niet samenvalt met de gesimuleerde dwarsdoorsnede. Meetverticaal 1 van bijlage A.1 komt overeen met de verticale rij blokjes op een afstand van bijna 20 km in figuur 5.2.; meetverticaal 15 komt hierin overeen met de blokjes op afstand 0 km.

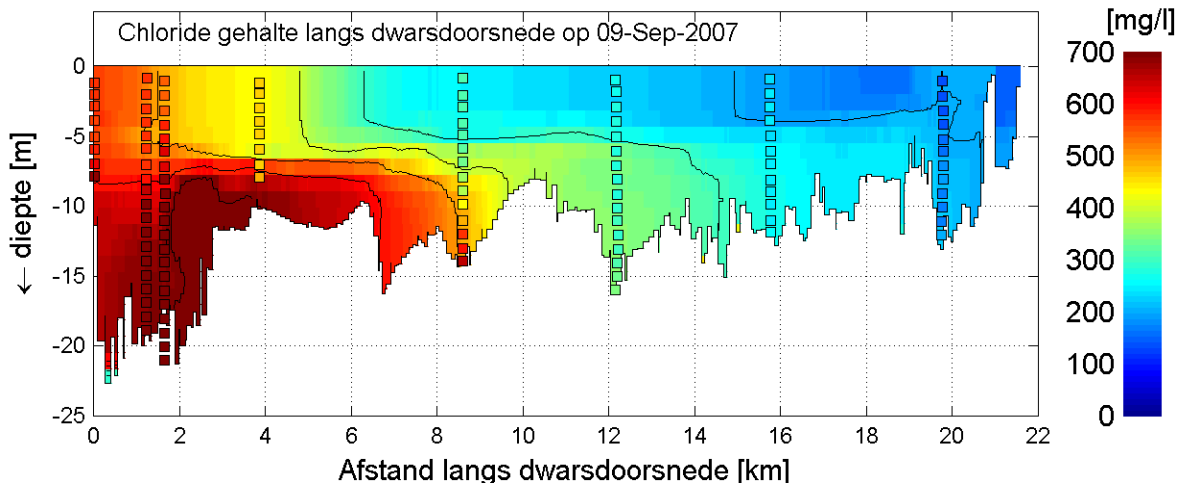
5.3.3 P07

De resultaten van de berekeningen worden getoond in bijlage C.2.2 (tijdplots) en bijlage C.2.3 (dwarsdoorsnedes).



Figuur 5.3 Gemeten en gesimuleerde (P07) chloridegehaltenes bij meetpunt Galathea

De chloridegehaltenes worden in grote lijnen behoorlijk goed gereproduceerd. Dat betekent dat de invoer voor de zoutlek, oplopend tot 21 kg/s, de werkelijkheid redelijk benadert. Mogelijk dat een iets anders gekozen verloop van de zoutlek tot nog betere resultaten leidt.



Figuur 5.4 Gemeten en gesimuleerde (P07) chloridegehaltenes Krammer-Volkerak

In Figuur 5.4 wordt het chlorideprofiel van 9 september 2007 getoond, inclusief de TSO-metingen. Op dat tijdstip is de hoogste waarde van de gesimuleerde zoutlek al ruim twee maanden bereikt. Vooral het westelijk deel van het Krammer-Volkerak is veel zouter dan in 2000 (Figuur 5.2 en bijlage C.1.3). Ook de stratificatie valt op.

5.4 Conclusies

Met de gekozen modellering van het Volkerak-Zoommeer, de modellering van de zoutlek en de toegepaste waarden voor de invoerparameters worden de gemeten chloridegehaltenes in het Krammer-Volkerak redelijk goed gereproduceerd. De waarden voor de zoutlek door de sluiskolk naar de voorhaven die daarvoor nodig waren passen qua orde van grootte goed bij de waarden die in hoofdstuk 4 zijn gevonden.

Geconcludeerd wordt daarom dat de gebruikte wijze van modelleren goed genoeg is voor het simuleren van scenario's voor zoutlek en doorspoeling en de kwalitatieve beoordeling van de uitkomsten. Met de kwantitatieve waarden van de uitkomsten dient voorzichtig te worden omgegaan in het licht van de onvermijdelijke schematisaties en onnauwkeurigheden.

6 Zoutlek- en doorspoelscenario's

6.1 Beschrijving van de zoutlek- en doorspoelscenario's

In Tabel 6.1 zijn de toegepaste doorspoel- en zoutlekscenario's opgesomd. Daarna worden ze uitgebreider beschreven. Ze zijn mede in overleg met Rijkswaterstaat gekozen.

Tabel 6.1 Doorspoelscenario's

Codering	referentie	Omschrijving
P08	P07	Verzoetingsperiode van som O07 vroeg in het jaar;
P09	P07	Verhoogde bruto zoutlek (45 kg/s) op 1 januari 2007;
P12	P09	Verhoogde bruto zoutlek (45 kg/s) op 1 januari 2007, gemiddeld debiet Volkerak-sluizen van 25 m ³ /s over de hele periode; lozing extra debiet via Krammersluizen;
P13	P09	Bruto zoutlek van 19 kg/s, gemiddeld debiet Volkeraksluizen van 25 m ³ /s over de hele periode; lozing extra debiet via Krammersluizen en Bathse Spuisluis in de verhouding 10:15;
P16	P13	Als P13, maar met een aangepast doorspoelregime in de maanden 10-12 en 4-6: minimale doorspoeling

6.1.1 P08: Vroege verzoetingsperiode

Als mogelijke oorzaken van hogere chloridegehalten na 2003 in het VZM worden in Dekker, 2008 genoemd:

- a) Minder neerslag-/afvoerpieken. In de winterperiode 1998-2003 zijn er een aantal keren neerslag/afvoer-pieken voorgekomen, waarbij er gespuid is via de Krammersluizen en het Kreekrakgemaal. Hierdoor verzoette het VZM sterk. Het zoutgehalte in het VZM bij aanvang van het doorspoelen in april daaropvolgend was dan zodanig laag, dat in de hele periode april-september relatief weinig doorgespoeld hoefde te worden.
- b) Minder goed functioneren van de zout-zoetscheidingen door slijtage, storingen, werkzaamheden, schutdiscipline etc. Met name de zout-zoetscheiding van de Bergsediepsluis is in de laatste jaren gedurende langere perioden (weken) buiten bedrijf geweest.

Scenario P08 is bedoeld om na te gaan wat het effect is van een verzoetingsperiode in het begin van 2007 op het verloop van de chloridegehalten in de rest van het jaar. Als uitgangspunt is daarvoor som P07 genomen. De eerste drie maanden van 2001 van de eerste validatiesimulatie (O07) zijn daartoe inclusief de randvoorwaarden integraal overgeplant naar de overeenkomstige drie maanden van 2007 van de tweede validatiesom (P07). Daarmee zijn de waterbalansen automatisch sluitend gebleven.

6.1.2 P09: Verhoogde bruto zoutlek (45 kg/s)

Aangenomen wordt dat er op 1 januari 2007 verhoogde zoutlek optreedt, bijvoorbeeld als gevolg van het in werking treden van een alternatieve zout/zoet-scheiding met behulp van luchtbellens- en waterschermen alleen. Aangenomen is dat de zoutlek door de sluisen dan ten opzichte van het bestaande systeem 2 à 3 keer zo hoog wordt. Zoutlekberekeningen met meer zoutlekbeperkende maatregelen, zoals lekkende ebdeuren, waren nog niet beschikbaar bij het draaien van deze som. Uitgegaan is van een (bruto) zoutlek van 45 kg/s. De overige randvoorwaarden zijn gelijk aan die van P07. Het lijkt een hoge waarde voor de zoutlek, maar het is altijd zinnig een indruk te krijgen van wat er gebeurt bij een veel hogere zoutlek dan mogelijk te realiseren is. Daarmee worden data verkregen die mogelijk nuttig kunnen zijn bij het vaststellen van een verband tussen de zoutlek door de Krammersluizen en het Cl-gehalte in het Volkerak-Zoommeer, dat verder gaat dan de verwachte zoutlek bij een bepaalde optimale combinatie van zoutlekbeperkende maatregelen. Per slot van rekening kan de praktijk uitwijzen dat de zoutlek meer bedraagt dan berekend. Ook kan bestudeerd worden in hoeverre aangepaste doorspoelscenario's het chloridegehalte alsnog binnen de perken kunnen houden.

6.1.3 P12: Verhoogde bruto zoutlek (45 kg/s) + extra debiet Volkeraksluizen

Bij de voorgaande scenario's werd voor het debiet door de Volkeraksluizen naar het VZM uitgegaan van de schutverliezen volgend uit de gegeven meetreeksen voor de waterbalans (gemiddeld over de hele periode 4,63 m³/s) en een maandelijkse correctieterm voor het sluiten van de waterbalans (gemiddeld over de hele periode 6,45 m³/s). In scenario P12 wordt extra zoet water ingelaten bij de Volkeraksluizen tot een gemiddelde van 25 m³/s over de hele periode. Dat betekent dat een extra bron bij de Volkeraksluizen nodig is van $25 - (4,63 + 6,45) = 13,92$ m³/s. Aangenomen is dat dit extra debiet weer geloosd wordt bij de Krammersluizen naar de Oosterschelde, teneinde het Volkerak-Zoommeer optimaal door te spoelen.

Opgemerkt moet worden dat de inlaat van extra zoet water bij de Volkeraksluizen beperkt wordt door de maandelijkse correctieterm voor het sluiten van de waterbalans. In werkelijkheid zullen er ook fouten zitten in andere bronnen en putten. Zou de sluitfout voor de Volkeraksluizen kleiner zijn dan is aangenomen, dan zou ook meer zoet water kunnen worden ingelaten bij de Volkeraksluizen voor doorspoeling. Hiermee wordt het belang van een goede waterbalans nog eens benadrukt.

6.1.4 P13: Bruto zoutlek van 19 kg/s + extra debiet Volkeraksluizen

De in paragraaf 1.3.1 beschreven verkenning van alternatieve mogelijkheden voor zoutlekbeperving en het kwantificeren van de bijbehorende resterende zoutlek werden door Rob Uittenbogaard parallel aan de 3D-modellering uitgevoerd. Voor de beide duwvaartsluizen samen werd een zoutlek van 17 kg/s berekend voor de variant met de minste zoutlek (combinatie van lekkende ebdeuren, luchtbellenschermen en waterschermen). Voor de beide jachtensluizen samen was dat 2 kg/s, totaal dus 19 kg/s. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage F.

De gemiddelde extra bron bij de Volkeraksluizen van 13,92 m³/s wordt in dit scenario afgevoerd via de Krammersluizen (40%) en de Bathse Spuisluis (60%) in de verhouding 10:15.

De genoemde zoutlek van 19 kg/s is op dezelfde manier in het model gebracht als bij de voorgaande simulaties, omdat dat ten tijde van de uitvoering van de simulaties niet anders kon.

Daarbij is wel duidelijk dat dit niet overeenstemt met de situatie waarvoor deze waarde berekend is. De waarden volgens het dynamisch zoutlekmodel gelden voor net buiten de mond van de voorhaven in het Krammer-Volkerak en voor een chlorideconcentratie van 0 mg/l in het Krammer-Volkerak. Ook komen de terugspoeldebieten niet overeen, immers in de nieuwe situatie is het hele schutproces anders (waterschermen, gesloten wandschuiven e.d.). In werkelijkheid is de chlorideconcentratie in het Krammer-Volkerak bovendien in 2007 al in de orde van 400 mg/l bij meetpunt Galathea en zal dus ook een hoeveelheid zout worden teruggespoeld via de zoutuitwisseling tussen voorhaven en Krammer-Volkerak. De netto zoutlek die uiteindelijk in het Krammer-Volkerak terecht komt zal dus lager zijn dan de berekende waarde van 19 kg/s van bijlage F.

6.1.5 P16: Als P13, maar met een aangepast doorspoelregime

De zoutlek is als in P13; de doorspoeling volgt het volgende schema:

- Maand 10-12 van 2006: minimale doorspoeling
- Maand 1-3 van 2007: als P13
- Maand 4-6 van 2007: minimale doorspoeling
- Maand 7-9 van 2007: als P13
- Maand 10-12 van 2007: minimale doorspoeling

Doorspoeling als P13:

Deze is nu uitgewerkt per periode van 3 maanden met doorspoeling als P13 volgens de volgende procedure:

1. Bron (totaal) Volkeraksluizen wordt gesteld op gemiddeld 25 m³/s.
2. Uit de balans:
 - Data Volkeraksluizen, gemiddeld a m³/s (dus per periode van 3 maanden verschillend);
 - Correctieterm waterbalans Volkeraksluizen (sluitbron), gemiddeld b m³/s (idem).
3. Om de totale bron Volkeraksluizen op 25 m³/s te krijgen moet dus een extra bron Volkeraksluizen van 25-a-b m³/s worden ingevoerd.
4. Deze extra bron moet er ook weer uit en wel in de verhouding 10:15:
 - Extra put Krammersluizen = 0,4 x (25-a-b) m³/s;
 - Extra put Bathse Spuisluis = 0,6 x (25-a-b) m³/s.

Minimale doorspoeling:

Uitgaand: alleen schutverlies Krammersluizen en schutverlies Kreekraksluizen. Het debiet bij de Bathse Spuisluis = 0 m³/s, indien mogelijk in verband met een sluitende waterbalans.

Inkomend: debieten rivieren en polders (gemalen), schutverlies Volkeraksluizen en inlaat voor peilbeheer.

Dit is uitgewerkt per periode van 3 maanden met minimale doorspoeling: Eerst is berekend wat er bij de Bathse Spuisluis gemiddeld over de periode van 3 maanden uit is gegaan (BS3) en wat er bij de Volkeraksluizen binnen is gekomen om de waterbalans over de periode van 3 maanden sluitend te houden. De gegeven tijdreeks van de Volkeraksluizen is daarbij buiten beschouwing gebleven. In de betrokken perioden lijkt daarin alleen sprake van schutverlies en aangenomen is dat deze niet kan worden verminderd. Er is dus uitgegaan van de reeks Sluitbron Volkeraksluizen (SV3).

Er kunnen zich nu twee situaties voordoen:

1. BS3 > SV3. In dat geval wordt Sluitbron Volkeraksluizen op nul gesteld en wordt Bathse Spuisluis vervangen door BS3 – SV3 (en dus Bathse Spuisluis ≠ 0);
2. BS3 < SV3. In dat geval wordt Bathse Spuisluis op nul gesteld en wordt Sluitbron Volkeraksluizen vervangen door SV3 – BS3.

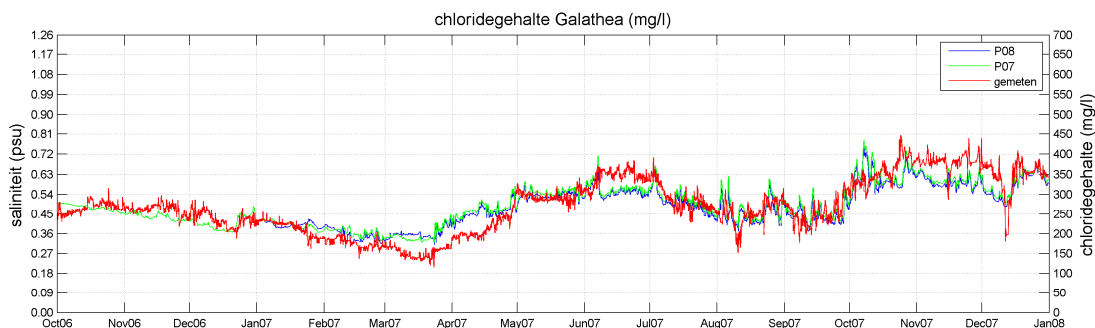
6.2 Resultaten simulaties zoutlek- en doorspoelscenario's

Voor de presentatie van de resultaten is dezelfde opzet gekozen als in hoofdstuk 5. Voor de leesbaarheid worden in de tekst de chloridegehaltes bij Galathea getoond en een voorbeeld van een dwarsdoorsnede. Laatstgenoemde bevat nu geen blokjes van metingen, omdat de simulaties van de scenario's niet beoogen de metingen te reproduceren.

Bij de figuren van de chloridegehaltes bij Galathea en Nieuw-Vossemeer zijn ter vergelijking de resultaten van de referentiesimulaties van zie tabel 6.1 opgenomen en van andere simulaties als dat zinvol wordt geacht. Plaatjes van chlorideprofielen langs de as van het Krammer-Volkerak zijn opgenomen voor het eind van elke laatste week van de maand.

6.2.1 P08: Vroege verzoetingsperiode

Figuur 6.1. geeft de chloridegehaltes bij meetpunt Galathea. Ter vergelijking zijn de gemeten gehalten en de gesimuleerde gehalten van scenario P07 toegevoegd.

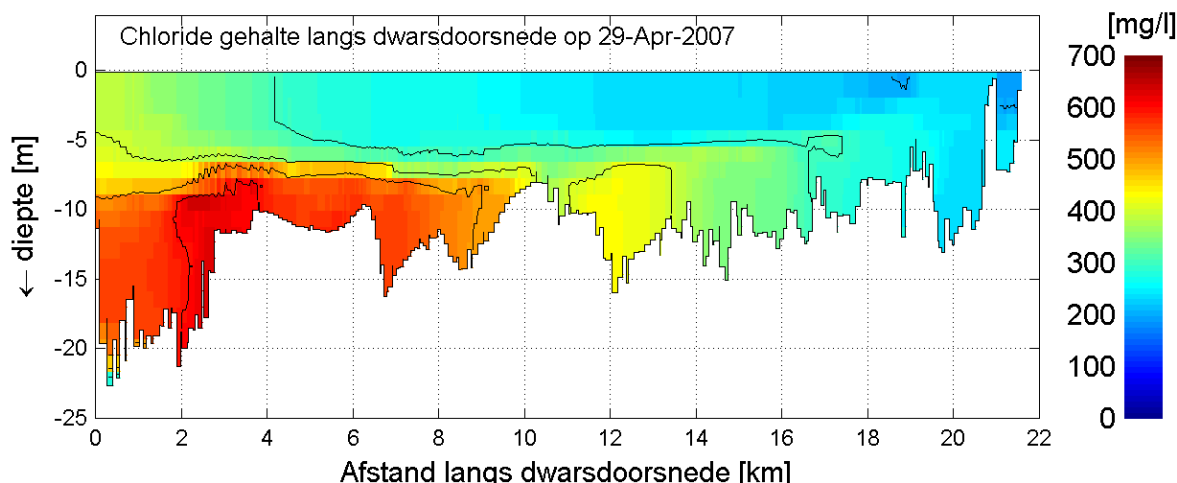


Figuur 6.1 Chloridegehaltenes scenario P08 en referenties (gemeten en P07) bij meetpunt Galathea

Wat opvalt is dat er nauwelijks verschil te zien is tussen de chloridegehaltenes gehalten volgens P07 en P08. De eerste drie maanden van 2001 laten iets lagere chloridegehaltenes zien volgens P08, daarna zelfs iets hoger. De verschillen zijn echter marginaal.

De daling in de waterstand bij Galathea in januari/februari 2007 (bijlage D.1.1) heeft te maken met de overeenkomstige daling bij validatiesom O07 (bijlage C.1.2) door het overbrengen van de “verzoetingsperiode”.

Figuur 6.2 laat het chlorideprofiel van het Krammer-Volkerak zien op 29 april, in de maand na de verzoetingsperiode. Het profiel lijkt in grote lijn veel op het profiel van 15 april bij P07 (zie bijlage C.2.3).

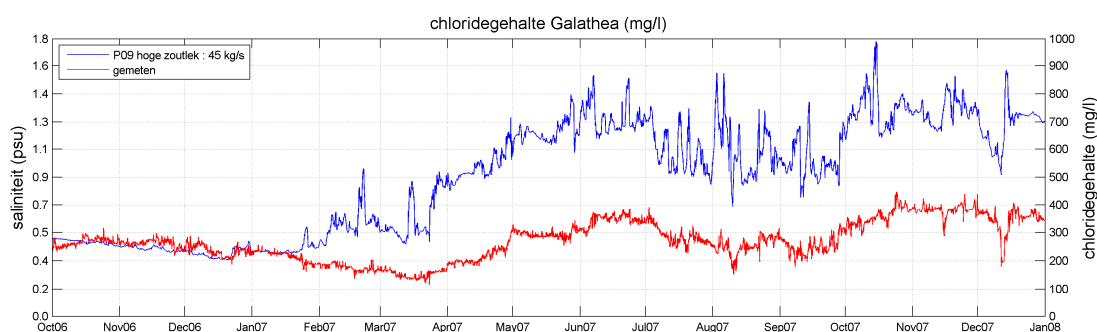


Figuur 6.2 Chlorideprofiel Krammer-Volkerak vlak na de verzoetingsperiode (jan.-maart 2007)

Geconcludeerd kan worden dat een grotere doorspoeling door meer neerslag- en afvoerpieken in de eerste drie maanden van 2007 slechts een marginaal effect heeft op de chloridegehalten in de periode zelf en vlak daarna. Nog later overheerst waarschijnlijk het effect van de toenemende zoutlek van de Krammersluizen van 1 januari tot 1 juli conform simulatie P07 en is het effect van de verzoetingsperiode niet meer terug te vinden.

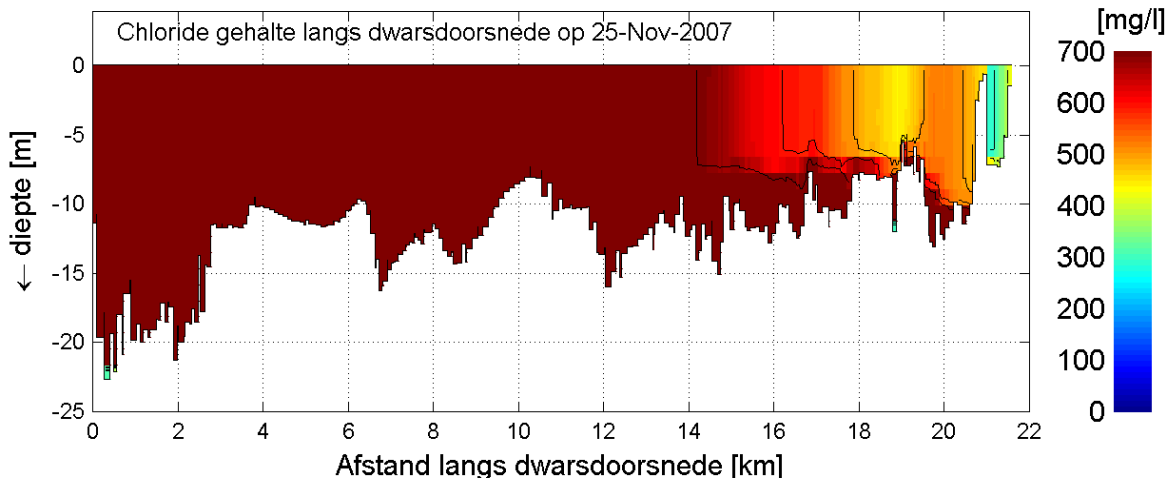
6.2.2 P09: Verhoogde zoutlek (45 kg/s)

Figuur 6.3 laat het effect van de verhoogde zoutlek op 1 januari 2007 op het chloridegehalte bij meetpunt Galathea zien.



Figuur 6.3 Chloridegehalten scenario P09 en gemeten gehalten bij meetpunt Galathea

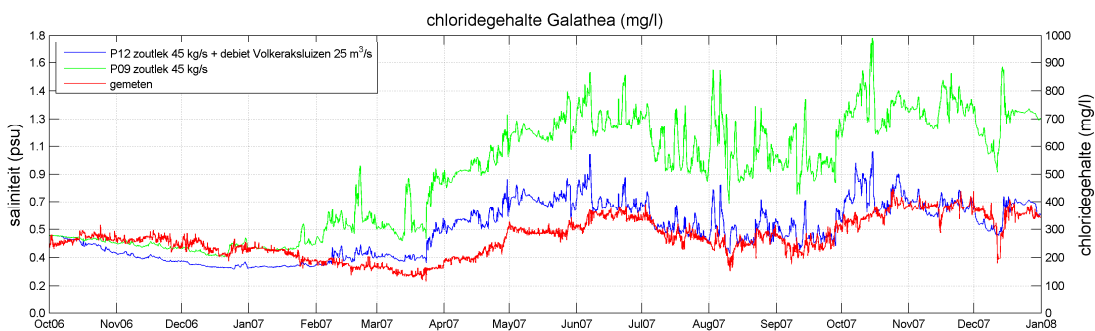
Na een periode van aanpassing aan de met een sprong verhoogde waarde voor de zoutlek op 1 januari 2007 lijkt zich vanaf ca. 1 mei een nieuwe evenwichtssituatie te ontwikkelen met grofweg twee maal zo hoge chloridegehalten bij Galathea. Bij Nieuw Vossemeer is de verhoging ook aanzienlijk, maar nog geen verdubbeling.



Figuur 6.4 Chlorideprofiel Krammer-Volkerak 11 maanden na de verhoging van de zoutlek op 1 januari 2007

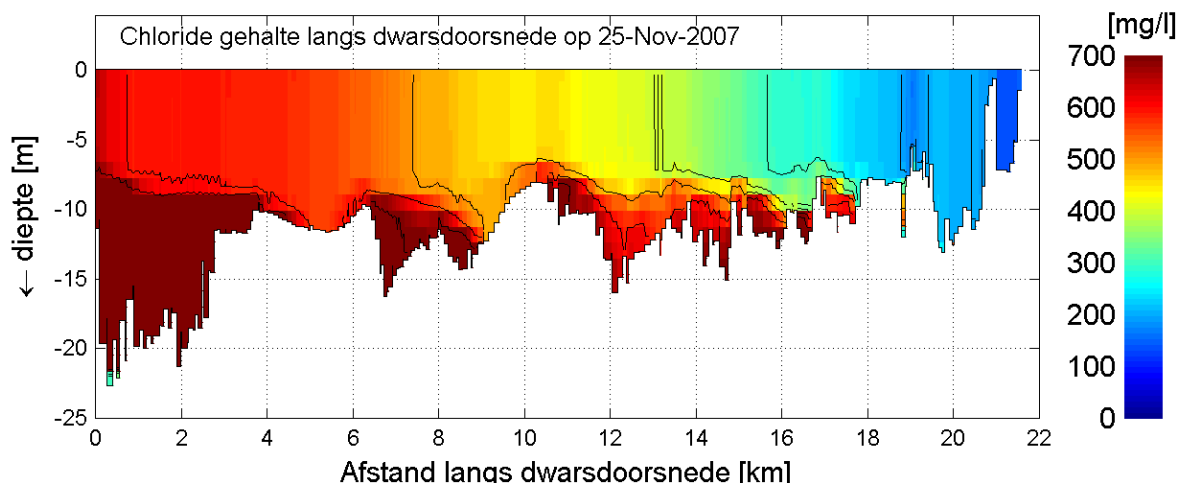
Figuur 6.4 toont het chlorideprofiel van het Krammer-Volkerak op 25 november 2007 volgens scenario P09. Het is duidelijk dat er sprake is van sterke verzilting. Door de gekozen kleurschaal lijkt er in het westelijke deel sprake van een uniforme verdeling van het chloridegehalte, maar hogere gehalten in bijvoorbeeld de Krammerput krijgen de kleur van het maximum van de schaal. Deze figuur drukt vooral de sterke verzilting uit. Voor de ontwikkeling in de tijd van het chlorideprofiel wordt verwezen naar bijlage D.2.2.

6.2.3 P12: Verhoogde zoutlek (45 kg/s) + extra debiet Volkeraksluizen



Figuur 6.5 Chloridegehalten scenario P12 en de referenties P09 en gemeten waarden bij meetpunt Galathea

Figuur 6.5 laat zien dat het doorspoelen van het Krammer-Volkerak met een gemiddeld extra debiet van bijna $14 \text{ m}^3/\text{s}$ (ingelaten bij de Volkeraksluizen en geloosd via de Krammersluizen) het chloridegehalte bij Galathea weer terug brengt tot het niveau van de in 2007 gemeten waarden en dus een effectieve manier is om het chloridegehalte naar beneden te brengen. De groene lijn geeft de gehalten weer zonder de extra bron bij de Volkeraksluizen (scenario P09). De blauwe lijn geeft de resultaten van scenario P12. De rode lijn geeft weer de gemeten waarden. De lagere gehalten voor P12 in de eerste maanden wordt veroorzaakt door het reeds aanwezige extra doorspoeldebiet van bijna $14 \text{ m}^3/\text{s}$.

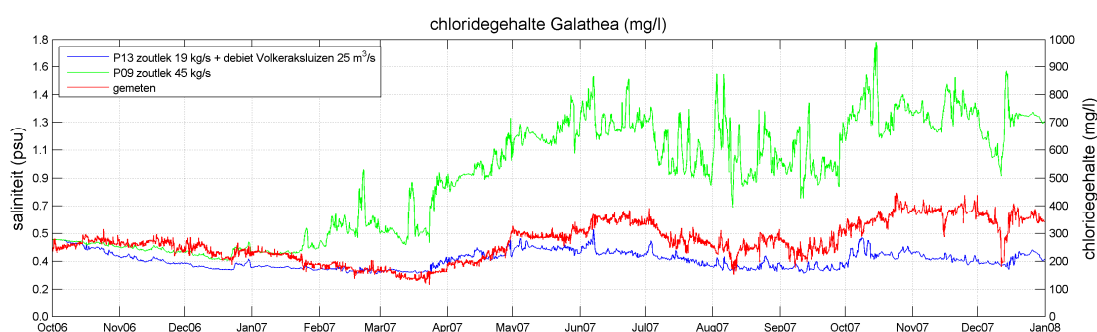


Figuur 6.6 Chlorideprofiel Krammer-Volkerak scenario P12 op 25 november 2007

Figuur 6.6. laat het chlorideprofiel van het Krammer-Volkerak zien na elf maanden vanaf de sprongsgewijze verhoging van de zoutlek op 1 januari 2007. Vergelijking van de chlorideprofielen van P12, P09 en P07 over de periode juli-december 2007 (bijlage D.3.2, D.2.2 en C.2.3) bevestigen het beeld van het sterke terugdringen van het chloridegehalte op het Krammer-Volkerak door het extra debiet tot in de richting van het niveau van de simulatiewaarden van P07.

6.2.4 P13: Zoutlek van 19 kg/s + extra debiet Volkeraksluizen

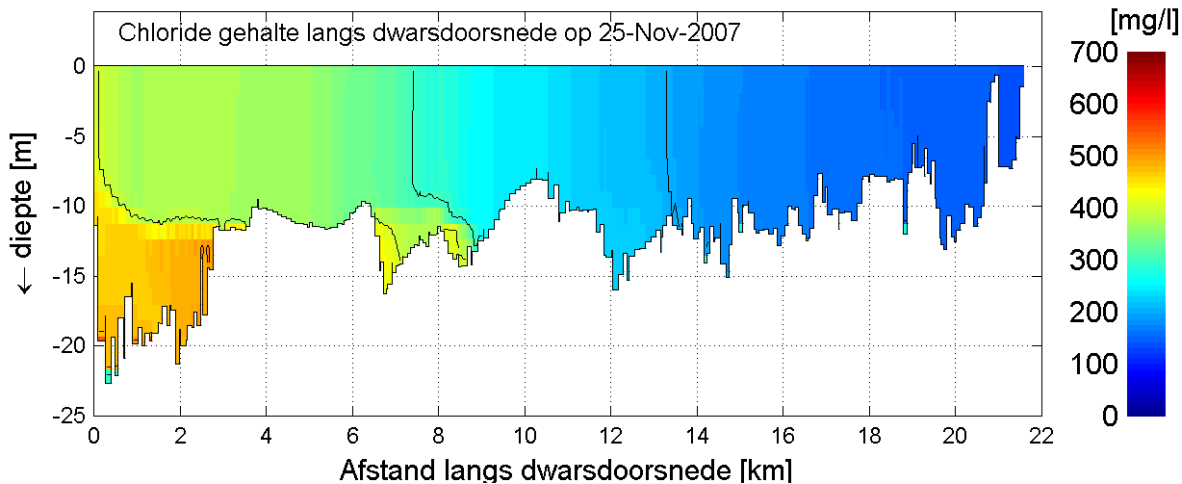
Figuur 6.7 toont de chloridegehalten bij Galathea en Figuur 6.8 het chlorideprofiel op 25 november 2007.



Figuur 6.7 Chloridegehalten scenario P13 en als referenties P09 en de gemeten waarden bij Galathea

P13 laat zich lastig vergelijken met andere scenario's, omdat zowel de zoutlek als de doorspoeling anders is. Scenario P13 beoogde oorspronkelijk een zo goed mogelijk beeld van een toekomstige situatie met alternatieve zout/zoet-scheiding te geven, zie ook de opmerkingen in paragraaf 6.1.4. In de hoofdstukken 7 en 8 wordt hierop terug gekomen. De zoutlek volgens P13 komt qua grootte redelijk overeen met die van P07, zij het dat P07 een lineair verloop van 12 naar 21 kg/s heeft en P13 met een sprong op 1 januari 2007 van 12 kg/s

naar 19 kg/s wordt gebracht. Omdat P07 dicht bij de metingen lag, zijn de gemeten waarden als referentie opgenomen. P09 is als extra referentie opgenomen.



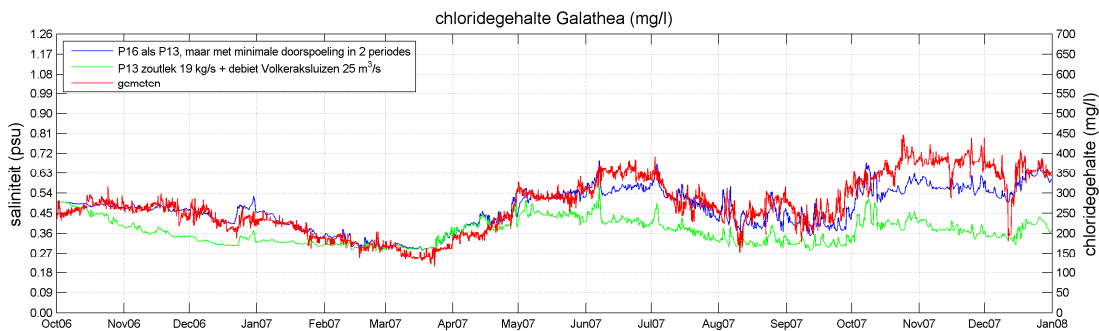
Figuur 6.8 Chlorideprofiel Krammer-Volkerak scenario P13 op 25 november 2007

Scenario P13 geeft volgens figuur 6.7 nog lagere chloridegehaltenes bij Galathea dan daar is gemeten. Dat wordt veroorzaakt door het extra ingelaten debiet bij de Volkeraksluizen van bijna $14\text{m}^3/\text{s}$, dat weer uitgelaten wordt bij de Krammersluizen en de Bathse Spuisluis (verhouding 40%:60%). Dat laatste zorgt ook voor een lager chloridegehalte bij Nieuw Vossemeer (bijlage D.4.1).

Vergelijking van figuur 6.8 en bijlage D.4.2 met bijlage C.2.3 laat zien dat P13 lagere chloridegehaltenes oplevert dan P07. De oorzaak daarvan is gelegen in de extra doorspoeling door middel van het ingelaten extra doorspoeldebiet bij de Volkeraksluizen.

De conclusie is dat een flink extra min of meer continu doorspoeldebiet bij de Volkeraksluizen ook voor de huidige situatie de chloridegehaltenes aanzienlijk zou verlagen.

6.2.5 P16: Als P13, maar met een aangepast doorspoelregime



Figuur 6.9 Chloridegehaltenes scenario P16 en als referenties P13 en de gemeten waarden bij Galathea

De droge perioden worden gekenmerkt door een minimale doorspoeling, omdat er dan te weinig zoet water beschikbaar is. Het schema van de doorspoeling is:

- Maand 10-12 van 2006: minimale doorspoeling
- Maand 1-3 van 2007: als P13
- Maand 4-6 van 2007: minimale doorspoeling
- Maand 7-9 van 2007: als P13
- Maand 10-12 van 2007: minimale doorspoeling

Op bijlage D.5.1 (tijdplots) is te zien hoe dit uitwerkt op de sluitbron en de extra bron bij de Volkeraksluizen, en op de extra putten bij de Krammersluizen en Bathse Spuisluis, na het sluitend maken van de waterbalansen voor elke deelperiode.

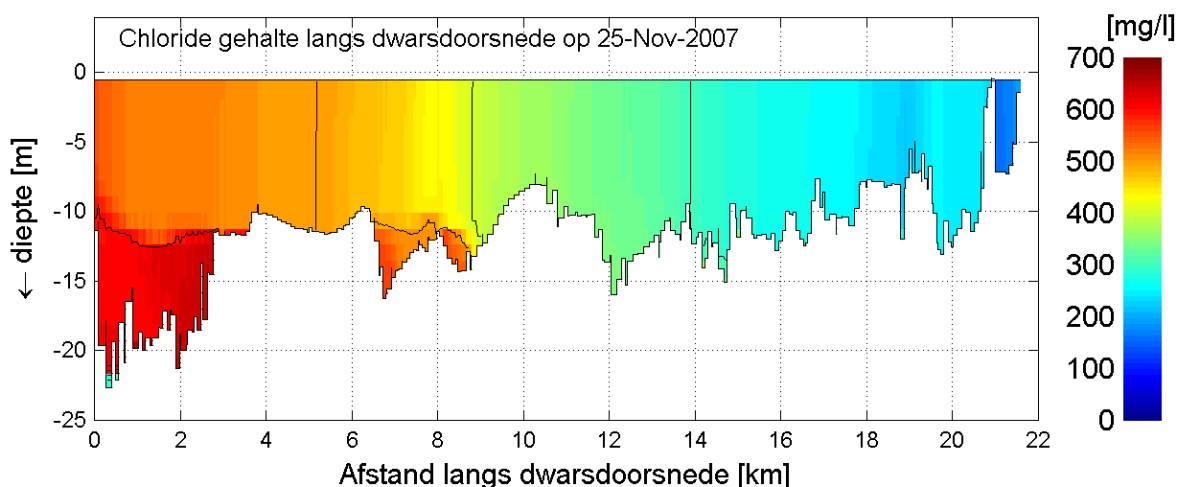
Opmerkelijk zijn de veranderingen in het verloop van de waterstand. Omdat de waterbalansen voor elke deelperiode sluitend zijn gemaakt, sluiten de waterstanden bij de periodeovergangen goed op elkaar aan (geen verlies van water in elke deelperiode). De onderlinge verhoudingen tussen de verschillende debieten is echter veranderd. Vooral voor de periodes met minimale doorspoeling geeft dit afwijkingen van het waterstandverloop t.o.v. de metingen en t.o.v. P13. Zo is te zien dat in de eerste maand van de eerste periode met minimale doorspoeling (okt-dec. 2006) de som van de afvoerende debieten (putten) groter is dan de som van de toevoerende debieten (bronnen), hetgeen resulteert in een dalende waterstand. In de derde maand is dat net andersom (stijgende waterstand).

Het ligt voor de hand te veronderstellen dat gedurende de periodes met minimale doorspoeling de chloridehaltes hoger zijn dan bij de continue doorspoeling van P13, uiteraard met min of meer vloeiende overgangen tussen de periodes.

Over het algemeen zijn de gehalten volgens P16 ongeveer gelijk aan of lager dan de gemeten gehalten. Ten opzichte van P13 liggen ze over het algemeen wel hoger, geheel volgens de verwachting. Figuur 6.9 laat dat ook duidelijk zien.

Vergelijking van de figuren 6.10 en 6.8 en de bijlagen D.4.2 en D.5.2 bevestigt dit beeld.

Geconcludeerd kan worden dat de periodes met minimale doorspoeling (droogteperiodes) een significante invloed hebben op de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer.



Figuur 6.10 Chlorideprofiel Krammer-Volkerak scenario P16 op 25 november 2007

6.3 Conclusies

In deze paragraaf zijn de conclusies van hoofdstuk 6 verzameld.

Een grotere doorspoeling door meer neerslag- en afvoerpieken in de eerste drie maanden van 2007 heeft slechts een marginaal effect heeft op de chloridegehalten in de periode zelf en vlak daarna. Nog later overheerst waarschijnlijk het effect van de toenemende zoutlek van de Krammersluizen.

Een zoutlek uit de kolken van de Krammersluizen van 45 kg/s leidt voor de situatie in 2007 tot zeer (vooralsnog onaanvaardbaar) hoge chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer.

Een effectieve manier om deze hoge chloridegehalten weer terug te brengen tot een aanvaardbaar niveau is het verhogen van het totale invoerdebiet bij de Volkeraksluizen tot 25 m³/s. Dit kwam bij de gekozen wijze van het sluitend maken van de waterbalans door een sluitbron bij de Volkeraksluizen neer op een extra bron van bijna 14 m³/s.

De berekende zoutlek van 19 kg/s met het dynamisch zoutlekmodel voor de situatie met innovatieve zout/zoet-scheiding is op dezelfde manier in het model gebracht als bij de voorgaande simulaties, omdat dat toen niet anders kon (sturing op de zoutflux door een dwarsdoorsnede, was nog niet goed mogelijk). Daarbij is wel duidelijk dat dit niet overeenstemt met de situatie waarvoor deze waarde berekend is. De berekende zoutlek van 19 kg/s volgens het dynamisch zoutlekmodel geldt voor net buiten de mond van de voorhaven in het Krammer-Volkerak en voor een chlorideconcentratie van 0 mg/l in het Krammer-Volkerak. In werkelijkheid is de chlorideconcentratie in het Krammer-Volkerak echter ook niet 0 mg/l en zal dus ook een hoeveelheid zout worden teruggespoeld, afhankelijk van het verziltingsgehalte van het Krammer-Volkerak bij de mond van de voorhaven. De netto zoutlek die uiteindelijk in het Krammer-Volkerak terecht komt zal dus lager zijn dan de berekende waarde van 19 kg/s van bijlage F.

Een flink extra min of meer continu doorspoeldebiet bij de Volkeraksluizen zou ook voor de huidige situatie de chloridegehalten aanzienlijk verlagen.

Periodes met minimale doorspoeling (droogteperiodes) vanwege het niet beschikbaar zijn van extra doorspoeldebiet hebben een significante invloed op de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer.

7 Discussie over netto en bruto zoutlek in de modellering

7.1 De modellering van de zoutlek in het 3D-Z-lagen-VZM-model

In paragraaf 4.3 is beschreven hoe de modellering van de zoutlek bij de Krammersluizen in het 3D-Z-lagen-VZM-model is uitgevoerd. Daarbij zijn aannames gedaan over de manier waarop de zoutlek in de voorhaven wordt ingebracht en schutverlies en spuidebiet worden onttrokken. Voor verbetering van deze modellering zijn goede metingen onontbeerlijk. Helaas ontbreken dergelijke metingen.

Vooralsnog geldt dat met de manier waarop is gemodelleerd de metingen in het VZM redelijk worden gereproduceerd. De hoeveelheid zoutlek bij de sluisen is daarbij gebruikt als te variëren grootte (ijkparameter). Dat zegt op zich nog niets over de juistheid van de gevonden waarden voor de bruto zoutlek van de Krammersluizen, daarvoor zijn er teveel vrijheidsgraden bij de modellering. Echter de waarden die zijn gevonden zijn goed vergelijkbaar met de bevindingen van hoofdstuk 4.

Een verkennende analyse van de zoutbalans in de voorhaven volgens de modelberekeningen is uitgevoerd om meer zicht te krijgen op de uitwerking van de modellering in de voorhaven. Het doel was na te gaan hoeveel zout door de onttrekkingen teruggespoeld werd naar de Oosterschelde en hoeveel zout door de monding van de voorhaven naar het Krammer-Volkerak werd (figuur 3.3) getransporteerd. Daarvoor was eerst enige aanpassing van de software noodzakelijk, daar waar het de berekening van de zoutflux door verticale dwarsprofielen betrof. Deze analyse bleek een onverwacht grote hoeveelheid teruggespoeld zout naar de Oosterschelde aan het licht te brengen voor de beginperiode van validatiesimulatie P07. Dat was reden om de juiste werking van het model in de voorhaven nog eens nauwgezet na te gaan. Geconcludeerd werd dat de werking van het model adequaat is.

7.2 Berekening van de netto zoutlek in het 3D-Z-lagen-VZM-model

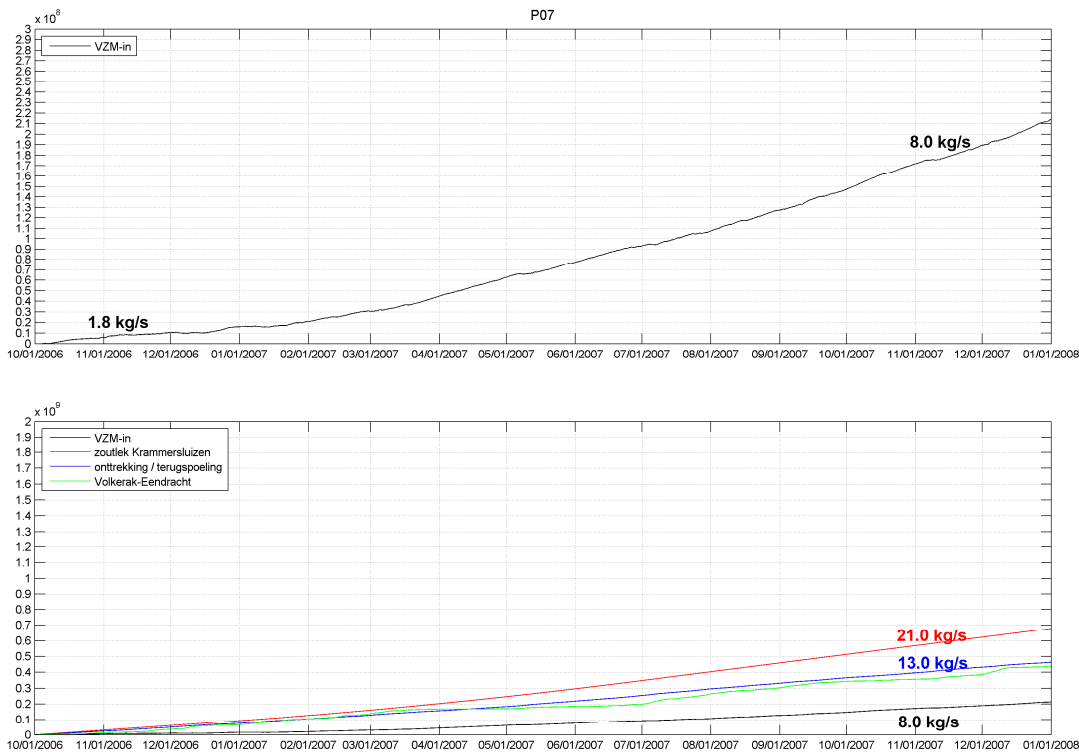
Voor vier simulaties is berekend hoeveel zout er teruggespoeld wordt en hoeveel zout er door de monding van de voorhaven naar het Krammer-Volkerak getransporteerd wordt. Figuur 7.1 geeft als voorbeeld de uitkomsten voor de validatiesimulatie P07.

De lijnen van figuur 7.1 geven de cumulatieve hoeveelheid getransporteerd zout (kg) vanaf het begin van de simulatie tot het betreffende tijdstip. De getallen bij de lijnen geven de gemiddelde zouttransporten in kg/s voor de lijnen met de overeenkomstige kleur en zijn berekend uit de helling van deze lijnen waar de getallen staan.

Voor de validatiesimulatie P07 was de (bruto) zoutlek van de sluisen gemodelleerd als toenemend van 12 tot 21 kg/s, maar werd een bijbehorende werkelijke zoutlast voor het VZM volgens de modellering berekend oplopend van ca. 1,8 kg/s tot 8,0 kg/s. Er wordt dus volgens deze berekeningen veel zout uit de voorhaven teruggespoeld naar de Oosterschelde via het schutverlies en een eventueel spuidebiet (en een kleine bijdrage van het compensatie-zoutlek-debiet). In welke mate dat in werkelijkheid het geval is, is niet bekend. Andere modellering van zoutlek en terugspoeling zal tot andere resultaten leiden bij gelijk zouttransport naar het Krammer-Volkerak (immers voor P07 geijkt op de metingen). Aannemelijk is het wel dat veel zout dat naar de voorhaven lekt weer teruggespoeld wordt.

De zoutbelasting via de mond van de voorhaven is primair bepalend voor de verzilting van het Krammer-Volkerak. Deze belasting is niet constant in de tijd, maar wordt mede bepaald door het terugspoeldebiet en de hoeveelheid zout die daarin wordt meegenomen. Dat laatste hangt mede af van de mate van verzilting van het Krammer-Volkerak en de zoutuitwisseling met de voorhaven. Dit maakt het ook moeilijk de zoutlek op te leggen met een constante waarde aan de buitenzijde van de voorhaven. De gekozen wijze van modelleren maakte het eenvoudig combinaties van scenario's voor zoutlek en doorspoeldebieten te simuleren.

De groene lijn geeft de hoeveelheid zout die door de Eendracht naar het zuiden wordt getransporteerd. In het geval van P07 wordt er dus bijna evenveel zout door de Eendracht naar het zuiden getransporteerd als via de sluizen naar de Oosterschelde.



Figuur 7.1 Cumulatieve getransporteerde hoeveelheden zout [kg] vanaf het begin van de simulatie door de betreffende verticale doorsnede (verticale as); rood = zoutlek sluizen, blauw = teruggespoeld zout, zwart = zoutbelasting van het Krammer-Volkerak, groen = zout naar de Eendracht. De bovenste figuur geeft het zouttransport door de monding van alleen de voorhaven, de onderste figuur geeft alle vier beschouwde transporten. Merk op dat de verticale schaal van de bovenste figuur afwijkt van die van de onderste. De bovenste figuur is geschikt voor het grafisch bepalen van zoutfluxen; de onderste figuur geeft inzicht in de onderlinge verhoudingen tussen de onderscheiden zoutfluxen.

Voor de simulaties P09, P12 en P13 zijn op dezelfde wijze de zouttransporten door de monding van de voorhaven berekend. De figuren zijn opgenomen in bijlage E.

P09 (verhoogde zoutlek) op bijlage E laat zien dat ongeveer de helft van de ingebrachte zoutlek weer wordt teruggespoeld naar de Oosterschelde. De andere helft gaat naar het Krammer-Volkerak. Door de Eendracht gaat ongeveer evenveel. Het transport door de Eendracht laat wat meer fluctuaties zien als gevolg van de fluctuaties in de overige bronnen van het Krammer-Volkerak.

P12 laat nog eens zien hoe effectief het extra doorspoeldebiet bij de Volkeraksluizen is. Volgens dit scenario wordt het extra debiet bij de Volkeraksluizen geheel via de Krammersluizen geloosd. Daarbij wordt dus relatief veel zout meegenomen. De hoeveelheid teruggespoeld zout is aanzienlijk hoger dan bij P09, en de hoeveelheid zout naar het Krammer-Volkerak navenant minder. In de eerste drie maanden van de simulatieperiode wordt er zelfs zout aan het Krammer-Volkerak onttrokken; er is dan wel al een hoger doorspoeldebiet, maar nog geen verhoogde zoutlek door de kolken van de sluizen.

Verder is bij vergelijking met P09 te zien dat er bij P12 minder zout door de Eendracht getransporteerd wordt. Dat komt omdat het Krammer-Volkerak zoeter is geworden door het extra spoeldebiet, waardoor er dus ook minder zout door het debiet door de Eendracht wordt meegenomen.

Bij P13 is te zien dat van de zoutlek door de sluiskolken naar de voorhaven van 19 kg/s er uiteindelijk slechts 3,1 kg/s door de monding van de voorhaven naar het Krammer-Volkerak wordt getransporteerd. De zoutlek van 19 kg/s is enigszins vergelijkbaar met die van P07 (toestand eind 2007). Dat er meer wordt teruggespoeld naar de Oosterschelde wordt veroorzaakt door de 40% van het extra debiet bij de Volkeraksluizen, dat wordt gespuid via de Krammersluizen.

7.3 Dynamisch zoutlekmodel

Het dynamisch zoutlekmodel rekent voor de Krammersluizen expliciet in de tijd elk stadium van schutten door, inclusief de fysische modelconcepten voor de zout/zoet-uitwisseling door geopende sluisdeuren voor een mogelijke toekomstige alternatieve manier van zout/zoet-scheiding met bellenschermen, waterschermen en lekkende ebdeuren. Voor een beschrijving van het dynamisch zoutlekmodel wordt verwezen naar Uittenbogaard (2010) en Uittenbogaard en Cornelisse (2012).

Met het dynamisch zoutlekmodel wordt uiteindelijk de hoeveelheid zout berekend die door de monding van de voorhaven het Krammer-Volkerak in gaat. Daarbij is in eerste instantie uitgegaan van een volledig zoet Krammer-Volkerak, dus met een chloridegehalte van nul. In die zin moet ook de berekende waarde van 19 kg/s (zie bijlage F) voor de toekomstige zoutlek voor de Krammersluizen met alternatieve zout/zoet-scheiding worden verstaan.

Deze waarde kan dus niet zondermeer vergeleken worden met waarden voor de bruto zoutlek zoals die bij de modellering in de vorige hoofdstukken is gebruikt. De saliniteit van het Krammer-Volkerak is niet nul, en dus zal er zout mee getransporteerd worden via de sluizen naar de Oosterschelde. De simulaties hebben laten zien dat de hoeveelheid teruggespoeld zout mede bepalend is voor de verzilting van het Krammer-Volkerak, sterk afhankelijk is van de mate van verzilting ervan, en dus ook veranderlijk is in de tijd.

Ook het invoeren van deze waarde in het gebruikte 3D-Z-lagen-VZM-model net buiten de voorhaven biedt dus geen oplossing. Een dergelijke netto zoutlast zou qua verzilting van het Volkerak-Zoommeer in de buurt van scenario P09 uitkomen en dus zeer hoge chlorideconcentraties in het Krammer-Volkerak opleveren.

Mede op basis van de bevindingen van de simulaties met het 3D-Z-lagen-VZM-model (hoofdstuk 6 en 7) zijn berekeningen met het dynamisch zoutlekmodel uitgevoerd voor toenemende waarden van de saliniteit van het Volkerak-Zoommeer. Dit heeft uiteindelijk geleid tot een conceptueel model voor de verzilting van het Krammer-Volkerak, waarmee het inzicht van de problematiek sterk is verdiept. Dit conceptuele model wordt in hoofdstuk 8 beschreven.

Het model is conceptueel in de zin dat er geen werkelijk Volkerak-Zoommeermodel achter zit dat de dynamische processen van de chloride-verspreiding op een realistische wijze weergeeft. In het ideale geval zouden simulaties gedaan moeten kunnen worden met een gecombineerd dynamische zoutlekmodel en 3D-Z-lagen-VZM-model. Zover is het echter nog niet.

7.4 Conclusies

Nadere analyse van de zoutbeweging in de voorhaven heeft laten zien dat het 3D-Z-lagen-model goed werkt en de resultaten er realistisch uitzien. Er blijkt meer zout teruggespoeld te worden naar de Oosterschelde dan verwacht, maar onrealistisch hoeft dat niet te zijn. Er zijn aannames gedaan over de manier waarop de zoutlek in de voorhaven wordt ingebracht en schutverlies en spuidebiet worden onttrokken.

De zoutbelasting via de mond van de voorhaven is primair verantwoordelijk voor de verzilting van het Krammer-Volkerak. Deze belasting is niet constant in de tijd, maar wordt mede bepaald door het terugspoeldebiet en de hoeveelheid zout die daarin wordt meegenomen. Dat laatste hangt mede af van de mate van verzilting van het Krammer-Volkerak en de zoutuitwisseling met de voorhaven. Voor scenariosimulaties is het dan ook in het algemeen niet mogelijk de zoutlek op te leggen als een constante waarde aan de buitenzijde van de voorhaven.

De schatting voor de netto zoutlek van de Krammersluizen naar het Krammer-Volkerak bij een alternatieve zout/zoet-scheiding zoals dat is beschreven in bijlage F gaat uit van een volledig zoet Krammer-Volkerak. In het licht van het gebleken belang van de naar de Oosterschelde teruggespoelde hoeveelheid zout zijn berekeningen met het dynamisch zoutlekmodel uitgevoerd voor toenemende waarden van de saliniteit van het Volkerak-Zoommeer. Dit heeft uiteindelijk geleid tot een conceptueel model voor de verzilting van het Krammer-Volkerak, waarmee het inzicht van de problematiek sterk is verdiept (zie hoofdstuk 8).

8 Conceptueel model verzilting Krammer-Volkerak

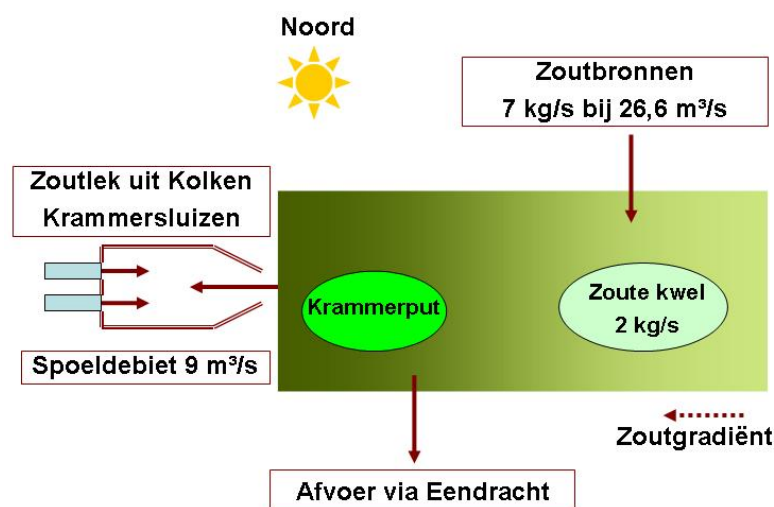
In dit hoofdstuk wordt het conceptuele model voor de verzilting van het Krammer-Volkerak beschreven, zoals dat is geformuleerd door Rob Uittenbogaard (Deltares) naar aanleiding van de bevindingen met de simulaties en de interne discussies in de projectgroep daarover. De tekst voor dit hoofdstuk is een bewerking van een intern memo van Rob Uittenbogaard hierover.

8.1 Zoutbalans 2007 voor Krammer Volkerak; overzicht bronnen en putten

Figuur 8.1 geeft schematisch de processen weer die verantwoordelijk zijn voor de verzilting van het Krammer-Volkerak (zie ook paragraaf 4.2.1). Met “Zoutbronnen” worden hier de andere bronnen aangegeven met een gering zoutgehalte: de Brabantse rivieren, het V-gemaal en de Volkeraksluizen.

De som van alle waterbronnen en –putten leidt tot een afvoer van water in zuidelijke richting via de Eendracht. Het verschil tussen verdamping en neerslag wordt hier verwaarloosd.

Uit de VTSO-metingen (bijlage A.1) blijkt dat het zoutgehalte in westelijke richting toeneemt en dat het water in de Krammerput meer is verzilt dan er boven. Het zoutgehalte boven de Krammerput en in de buurt van de Krammersluizen is hoger dan het gemiddelde zoutgehalte (ca. $7/26,6=0,26$ psu, overeenkomend met een chloridegehalte van 145 mg/l) van de overige zoutbronnen. De waarden van 7 kg/s en $26,6 \text{ m}^3/\text{s}$ volgen uit de gemiddelde zout- en waterbalans van het Krammer-Volkerak voor het jaar 2007. De bergingsterm is verwaarloosd. Hieruit volgt dat er andere zoutbronnen moeten zijn die het zoutgehalte in het westelijke deel tot ca. $0,9 \text{ psu}$ (500 mg Cl/l) verhogen. Een mogelijkheid is de zoute kwel die voor het Krammer-Volkerak in paragraaf 4.2 van dit rapport op ca. 2 kg/s wordt geschat.



Figuur 8.1 Schematisch overzicht van de Krammersluizen en de zout- en waterbronnen ter verklaring van de verzilting van het Krammer-Volkerak in de afgelopen jaren.

De ruimtelijke verdeling van deze zoute kwel is echter nog niet bekend. Denkbaar is dat die zich vooral meer in het westen bevindt, dicht bij de zoute wateren, en in de diepere delen zoals de Krammerput door de ontsluiting van stroomvoerende lagen. Aangenomen wordt dat het water van de zoute kwel een zoutgehalte heeft van 30 psu. Verondersteld wordt dat deze zoute kwel te gering is om het zoutgehalte in het westelijke deel te verklaren. Nader onderzoek hiernaar is gewenst.

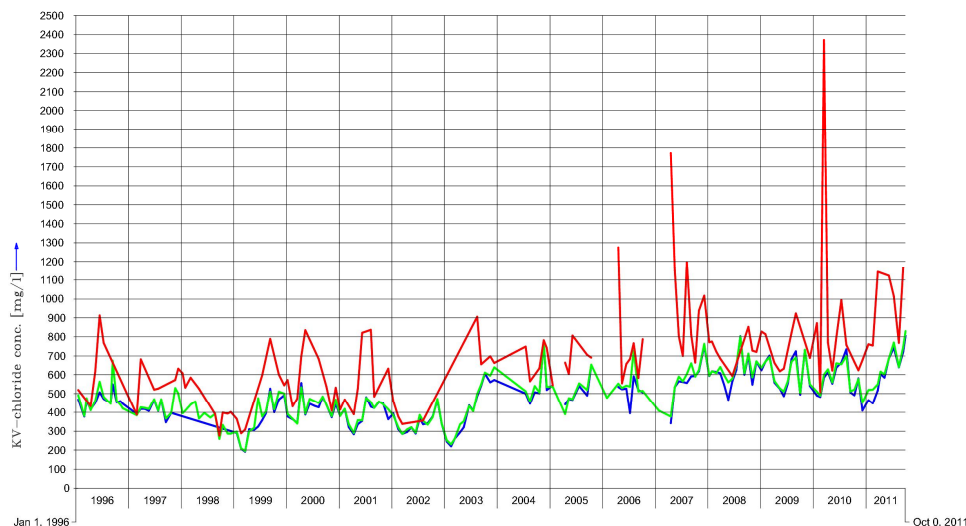
De Krammersluizen vormen een tweede bron van water met een hoger zoutgehalte dan het gemiddelde gehalte van de "Zoutbronnen". De vraag luidt nu of de Krammersluizen in het verleden een netto zoutlek leverden? Deze vraag wordt in de volgende paragraaf besproken.

8.2 Zoutlek Krammersluizen

Krammerput en Krammer-Volkerak zijn zouter dan de overige zoutbronnen. Het ligt dus voor de hand te veronderstellen dat via de Krammersluizen zouter water doordringt naar het Krammer-Volkerak. Echter, via de voorhavens van de Krammersluizen wordt water uit het Krammer-Volkerak onttrokken ten behoeve van de uitwisseling van zoet en zout water bij het schutproces. In figuur 8.1 is dit het spoeldebiet genoemd.

Er kan sprake zijn van een restant aan zoutlek doordat de zout-zoetuitwisseling van de kolkvolumina niet altijd volledig is om de wachttijd voor scheepvaart te bekorten. Niet bekend is welk protocol, en wanneer, in het verleden is gehanteerd.

Zoals Figuur 8.2 toont is de voorhaven zout-gestratificeerd en zouter dan het Krammer-Volkerak.



Figuur 8.2 Chloride-concentratie, maandelijks gemeten in de duwvaart-voorhaven aan Volkerak-zijde op 1m diepte (blauw), 3m diepte (groen) en 6m diepte (rood). De piek in april 2010 stemt overeen met de periode van experimenten met visintrek via tijdelijke geopende kolk van een jachtensluis bij hoog water.

Een dergelijke stratificatie en met zoutgehalte hoger dan buiten de voorhaven in het Krammer-Volkerak zal een zwakke uitwisselingsstroming veroorzaken en daarmee een zoutlek.

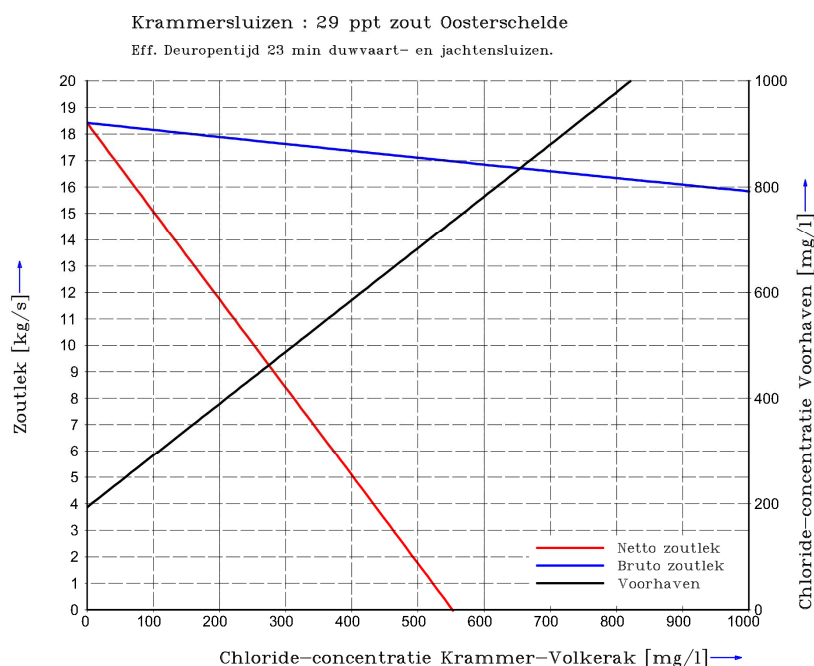
Het spoeldebiet (in hoofdstuk 4 schutverlies genoemd) bedraagt daggemiddeld ca. 9 m³/s, onttrekt verzilt water uit de toplaag van het Krammer-Volkerak en verlaagt de eventuele zoutlek

van de Krammersluizen. In een eerder project (Volkerak zoutlekstudie) verminderde dit spoeldebiet, destijds lekdebiet genoemd, de zoutlek door de kolken te verzoeten. Bij de Krammersluizen is er nog een wezenlijke extra bijdrage van dit spoeldebiet wanneer dit debiet verzilt water naar de Oosterschelde afvoert. In de volgende paragraaf wordt de vermindering van de zoutlek door zouttransport via het spoeldebiet geanalyseerd.

8.3 Relatie zoutlek Krammersluizen en zoutgehalte Kramer-Volkerak (schematisch)

Figuur 8.3 laat ter illustratie de belangrijke reductie in zoutlek door een gekozen spoeldebiet van 17 m³/s via de duwvaartsluizen zien, wanneer deze met luchtbellenschermen, waterschermen en rinkschuiven zijn uitgerust. Figuur 8.3 is indicatief, want het is hier voor een goed begrip nog berekend met het stationaire zoutlekmodel zonder getij en zonder tijdelijke berging in de voorhavens. Verderop worden resultaten met het dynamische zoutlekmodel getoond. De blauwe lijn in Figuur 8.3 toont voor dit schematische (maar weliswaar reële) voorbeeld de zoutlek uit de kolken naar de zoetere voorhaven: deze bruto zoutlek daalt bij toenemende verzilting van het Kramer-Volkerak.

Veel belangrijker is de aanmerkelijke afname van de netto zoutlek, doordat het spoeldebiet van 17 m³/s verzilt water naar de Oosterschelde afvoert. Bij een chloride-concentratie van ca. 550 mg/l buiten de voorhaven geeft dit rekenvoorbeeld zelfs géén netto zoutlek (zie de rode lijn in Figuur 8.3). De teruggespoelde hoeveelheid zout naar de Oosterschelde is dan precies gelijk aan de gelekte hoeveelheid zout uit de kolken. De zwarte lijn in Figuur 8.3 geeft de dieptegemiddelde chloride-concentratie in de voorhaven aan de Kramer-Volkerak-zijde. Naar verwachting zal de zoutere onderlaag in de voorhaven (zie Figuur 8.2) wel met het Kramer-Volkerak uitwisselen en naar de Kramerput stromen hoewel onderweg onderhevig aan verticale menging.



Figuur 8.3 Schematisch voorbeeld van de invloed van de chloride-concentratie (zoutgehalte) in het Kramer-Volkerak op de netto zoutlek (rode lijn) van de duwvaartsluizen als deze in nieuwe stijl zouden gaan werken met o.a. 17 m³/s spoeldebiet, berekend met het stationaire zoutlekmodel.

Hoewel nog indicatief, illustreert het voorbeeld in Figuur 8.3, dat verzilting van het westelijke deel van het Krammer-Volkerak in combinatie met een spoeldebiet kan leiden tot géén netto zoutlek vanuit de monding van de voorhaven. De daartoe benodigde chloride-concentratie in het Krammer-Volkerak volgt ruwweg uit de bruto zoutlek gedeeld door het spoeldebiet. In dit voorbeeld is dat 18,5 kg/s gedeeld door 17 m³/s, en dus een zoutgehalte van 1,088 psu en dus een chloride-concentratie van 602 mg/l. Bij deze laatste concentratie is de bruto zoutlek tot ca. 17 kg/s gedaald (blauwe lijn van figuur 8.3). De tweede iteratie geeft dan 1,0 psu oftewel 554 mg/l wat al zeer goed overeenstemt met het resultaat volgens Figuur 8.3. Bij deze ca. 550 mg/l chloride-concentratie in het Krammer-Volkerak compenseert het zouttransport via het spoeldebiet de zoutlek door de zout-zoet uitwisseling (bruto zoutlek) tussen de voorhavens en het Krammer-Volkerak. De netto zoutlek is dan dus 0 kg/s.

De netto zoutlek wordt negatief als er meer zout naar de Oosterschelde wordt gespoeld dan er via de kolken aan de voorhaven wordt geleverd.

8.4 Zoutbalans Krammer-Volkerak

Vervolgens wordt de beschouwing uitgebreid naar de zoutbalans van het Krammer-Volkerak.

Het afvoerdebiet door de Eendracht wordt in het schematisch voorbeeld gelijk gesteld aan de som van de debieten van de restbronnen (deze leveren de zoutbronnen van figuur 8.1), de zoute kwel en de toevoer van extra (dit is bovenop wat al is meegenomen in de restbronnen) zoet water via de Volkeraksluizen, verminderd met het spoeldebiet door de Krammersluizen. Berging, neerslag en verdamping worden hier dus buiten beschouwing gelaten. Met het extra debiet door de Volkeraksluizen kan het zoutgehalte in het Krammer-Volkerak worden verminderd.

Met deze debieten en de bijbehorende zoutgehaltes kan de zoutbalans van het Krammer-Volkerak worden opgesteld. Het zoutgehalte van de afvoer door de Eendracht wordt daarbij in dit voorbeeld gelijk gesteld aan het zoutgehalte van het westelijke Krammer-Volkerak.

In het geval van een netto zoutlek gelijk aan nul en geen extra zoet water via de Volkeraksluizen volgt voor het zoutgehalte van het Krammer-Volkerak een waarde gelijk aan $(7+2)/26,6 \text{ kg/m}^3 = 0,34 \text{ psu} = 187 \text{ mg Chl/l}$.

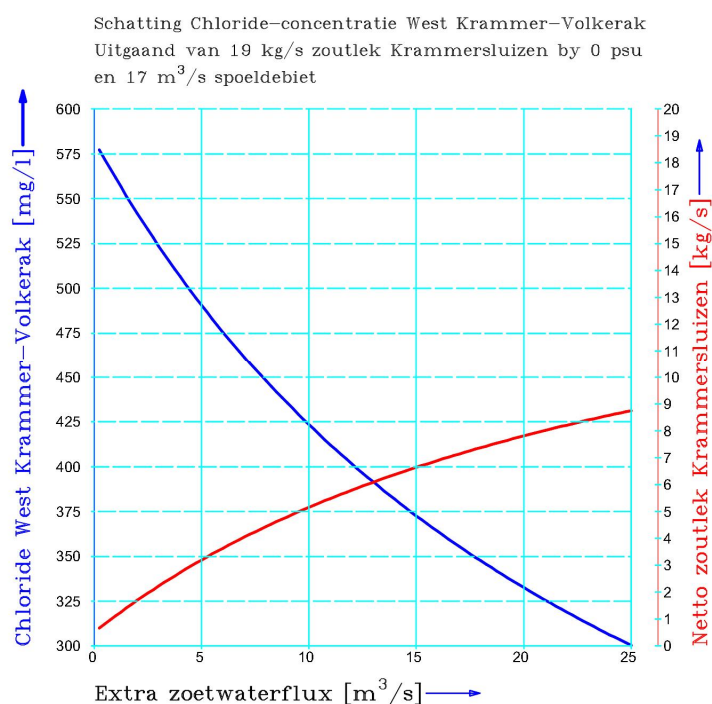
Bij een hoger zoutgehalte van het Krammer-Volkerak dan het hier berekende wordt in dit voorbeeld de netto zoutlek negatief: er wordt dan meer zout naar de Oosterschelde gespoeld dan de kolken aan de voorhaven leveren.

Opgemerkt moet nog worden dat de zoutlek uit de kolken afhangt van het spoeldebiet. Dat zit niet in dit schematische model.

Een tweede opmerking is de veronderstelling dat het door de Eendracht onttrokken water het zoutgehalte van het westelijke Krammer-Volkerak heeft. Zodra de zout/zoetgradiënt in Figuur 8.1 naar het westen schuift kan deze veronderstelling wijzigen en daarmee het rekenresultaat. Om dergelijke effecten in rekening te brengen zijn 3D-simulaties nodig.

Figuur 8.4 laat het resultaat zien van de toepassing van het beschreven schematische model voor de chloride-concentratie op het westelijke Krammer-Volkerak en voor de bijbehorende netto zoutlek gebaseerd op de water- en zoutbronnen volgens Figuur 8.1. De netto zoutlek zonder extra zoetwaterflux bedraagt ca. 1 kg/s. Bij toenemende zoetwaterflux naar het Krammer-Volkerak daalt het zoutgehalte in het Krammer-Volkerak en daarmee de afvoer van

zout via de Eendracht maar stijgt de netto zoutlek vanuit de monding van de voorhavens van de Krammersluizen. Zonder extra zoetwaterflux wordt het evenwicht bereikt bij zeer geringe netto zoutlek en ca. 575 mg/l chloride-concentratie in het Krammer-Volkerak. Het in stand houden van de huidige verzilting met ca. 400 mg/l vergt volgens Figuur 8.4 ca. 12 m³/s extra zoetwaterverbruik (dus boven het spoeldebiet van 17 m³/s).



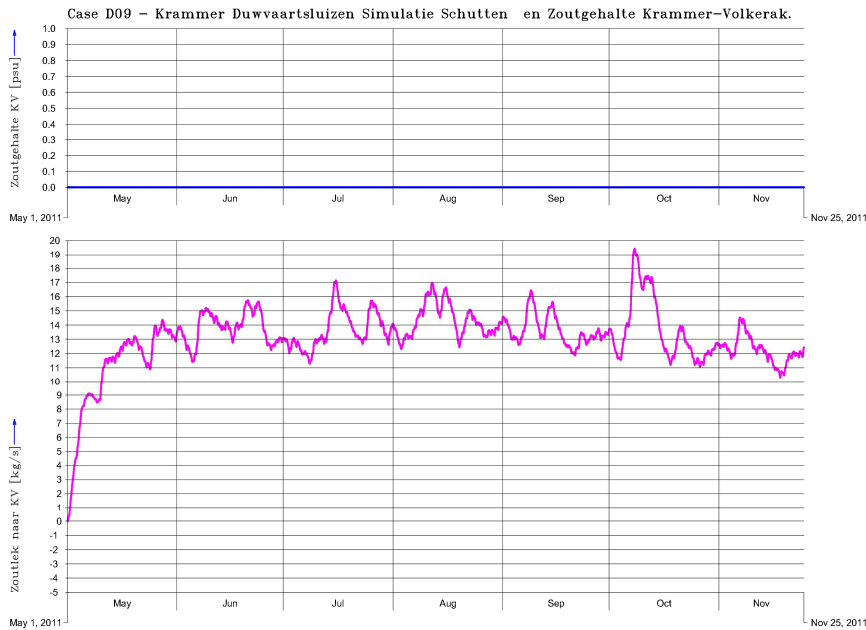
Figuur 8.4 Door een extra zoetwaterflux, bijvoorbeeld via de Volkeraksluizen, daalt de chloride-concentratie (blauwe lijn) in het Krammer-Volkerak waardoor de netto zoutlek (rode lijn) vanuit de voorhavens van de Krammersluizen naar het Krammer-Volkerak stijgt, zoals getoond in Figuur 8.3.

Het voorgaande wordt onderbouwd in de volgende paragraaf door het dynamisch zoutlekmodel schematisch aan het Krammer-Volkerak te koppelen.

8.5 Gekoppeld dynamisch zoutlekmodel

In het voorbeeld dat in deze paragraaf wordt beschreven is het Krammer-Volkerak als één reservoir van 3x7 km² en 5m diepte geschematiseerd en gekoppeld aan het dynamisch zoutlekmodel voor case D09 (zie ook bijlage F) van de duwvaartsluizen. In case D09 worden de kolken beschermd met luchtbellens- en waterschermen aan de Oosterschelde-zijde en met luchtbellenschermen 25 m buiten de kolken in de Krammer-voorhaven. Per kolk wordt 5 m³/s water uit de voorhaven onttrokken zolang het kolkpeil gelijk of lager is dan in de voorhaven aan Krammer-zijde. Daarnaast worden de waterschermen ook gevoed met water uit de voorhaven(s). De opentijden van de kolken variëren met een gegeven gemiddelde opentijd van 23 minuten en volgens een kansverdeling die met metingen overeen stemt. Figuur 8.1 geeft het gehanteerde model waarin de zoutlek en het spoeldebiet nu door het dynamisch zoutlekmodel worden berekend.

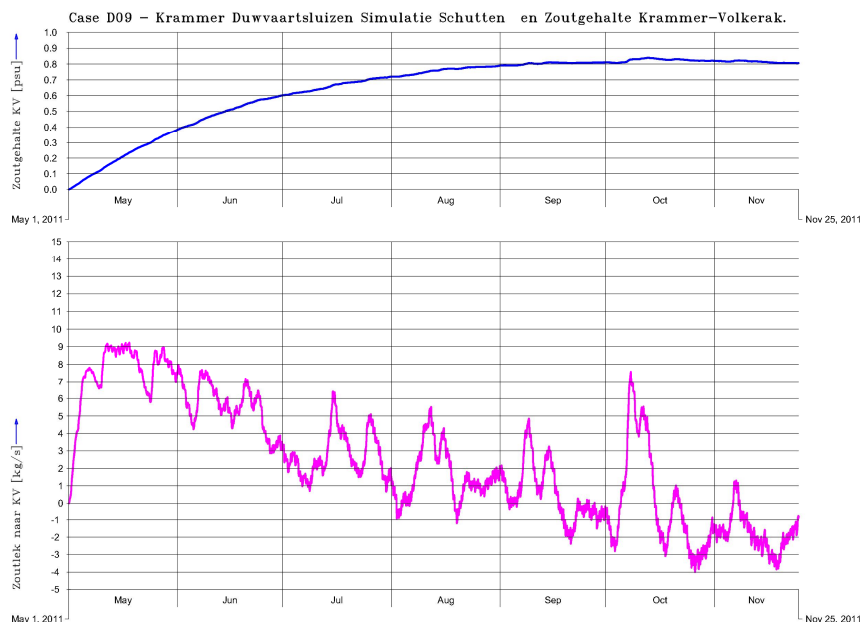
Figuur 8.5 toont de berekende zoutlek (van de voorhaven naar het Krammer-Volkerak), wanneer het Krammer-Volkerak volledig zoet kan worden gehouden. De getoonde variaties in zoutlek komen mede door variaties in het Oosterschelde peil die langer dan een dag aanhouden en door variaties in opentijden.



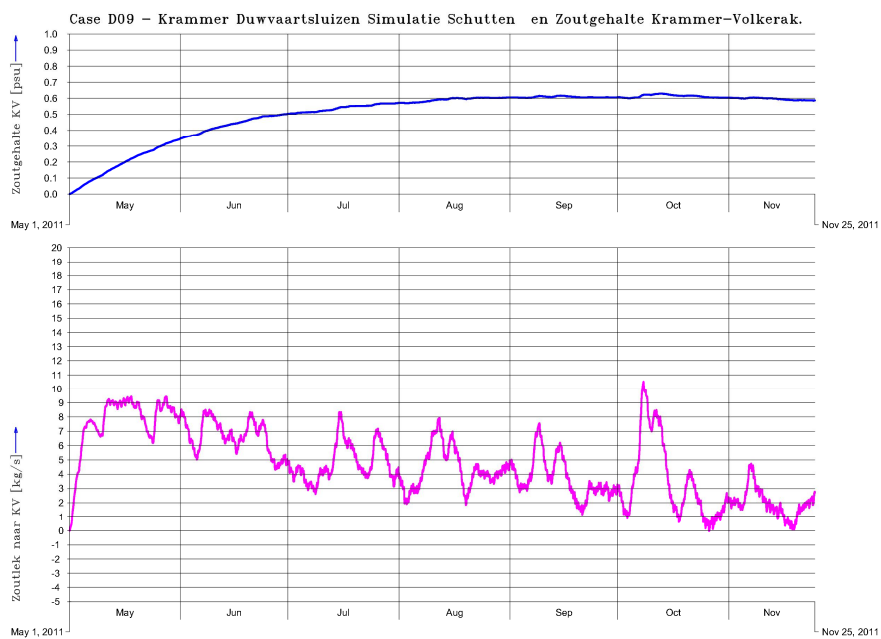
Figuur 8.5 Daggemiddelde zoutlek volgens het dynamisch zoutlekmodel met zoet water in het Krammer-Volkerak (KV) en met gemeten waterstanden in het Zijpe.

Figuur 8.6 toont de terugkoppeling op de zoutlek wanneer het Krammer-Volkerak door de eerder ontstane zoutlek in ca. 6 maanden verzilt tot ca. 0,8 psu (440 mg *Chl/l*). De zoutlek lijkt na ca. 6 maanden zelfs negatief te worden, maar vermoedelijk herstelt deze zich tot nul na de geringe oscillatie of doorschieten van het zoutgehalte in het Krammer-Volkerak, want aan het einde van de simulatie daalt het zoutgehalte enigszins.

Figuur 8.7 toont de terugkoppeling op de zoutlek met een extra zoetwaterdebiet van 10 m³/s, bijvoorbeeld via de Volkeraksluizen. De daggemiddelde netto zoutlek wordt daardoor verhoogd, omdat het zoutgehalte in het Krammer-Volkerak met ca. 0,2 psu wordt verlaagd en er daardoor minder zout wordt teruggepoeld.



Figuur 8.6 Als Figuur 8.5 maar nu gekoppeld aan het Krammer-Volkerak (KV) met bronnen en putten volgens Figuur 8.1.



Figuur 8.7. Als Figuur 8.6 maar met 10 m³/s extra zoetwaterflux

8.6 Samenvatting/conclusie

Gestimuleerd door 3D-simulaties van het Volkerak-Zoommeer is een eenvoudig conceptueel model van het zoutgehalte in het Krammer-Volkerak geformuleerd. Dit conceptuele model maakt begrijpelijk dat de Krammersluizen in het verleden maar weinig zoutlek door de monding van zijn voorhavens leverde. De zoutlek welke de schutkolken leveren aan de voorhavens wordt tenminste ten dele teniet gedaan door het onttrekken van verzilt water uit het Krammer-Volkerak (westelijk Volkerak). Deze situatie kan in de toekomst worden gehandhaafd met de instellingen zoals besproken bij case D09 voor de duwvaartsluizen (en J09 voor de jachtensluizen).

Het mechanisme is dat de voorhavens van de Krammersluizen wel verzilt water naar het Krammer-Volkerak leveren en dus zout lekken wat eerst in de Krammerput wordt geborgen. Vervolgens verzilt de toplaag van het Krammer-Volkerak door menging. Hieruit wordt het spoeldebiet onttrokken dat het verzilte water via de kolken naar de Oosterschelde afvoert en gelijktijdig ook de zoutlek uit de kolken verlaagt. Het spoeldebiet en het zoutgehalte zijn dan in balans met de verticale menging bijvoorbeeld uit de Krammerput en over het traject van de voorhavens naar de put.

De afvoer van zout uit het Krammer-Volkerak wordt mede en sterk bepaald door de zuidelijke afvoer via de Eendracht (schematisch in Figuur 8.1). Hierbij speelt de locatie van de zout/zoet-gradiënt vanaf het oostelijke naar het westelijke deel van het Volkerak. Zodra deze zout/zoet-overgang naar het westelijke deel verschuift neemt het zoutgehalte voor de monding van de Eendracht af en daarmee ook de afvoer van zout uit het Krammer-Volkerak. Schommelingen door wind en variaties in het totale oost naar west debiet (o.a. spuien) bepalen de locatie van de zout/zoet-gradiënt in het Krammer-Volkerak. Dergelijke patronen zijn wel met nauwkeurige 3D-simulaties te bepalen maar niet met het hier gehanteerde conceptuele model.

Het spoeldebiet blijkt een effectief middel tegen zoutlek te zijn, maar vergt wel dat het Krammer-Volkerak op een zeker zoutgehalte mag blijven. Dit zoutgehalte kan wel verlaagd worden met een zoetwaterflux bijvoorbeeld uit het Haringvliet/Hollandsch Diep. De zout/zoet-gradiënt in het Krammer-Volkerak verschuift dan wel in westelijke richting waardoor minder zout via de Eendracht wordt afgevoerd. Kortom, het verzoeten van het westelijke deel van het Krammer-Volkerak wordt tegengewerkt door de vergrote zoutlek van de Krammersluizen en de verminderde afvoer van zout via de Eendracht.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Inleiding

Onderzocht is wat het verloop van de chloridegehalten in het Krammer-Volkerak is bij verschillende zoutlek- en doorspoel-scenarios voor de bestaande situatie. Daarvoor is eerst een 3D-Z-lagen-model ontwikkeld en is het model geijkt aan de gemeten chlorideconcentraties in het Volkerak-Zoommeer. Daarbij is uitgegaan van de bestaande situatie. Een belangrijke invoerparameter daarbij is de zoutlek van de Krammersluizen.

Naast inzicht in de effecten van diverse doorspoelscenario's op de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer, is de belangrijkste achterliggende vraag gelegen in de haalbaarheid van innovatieve maatregelen voor de zout/zoet-scheiding bij de Krammersluizen.

Het gaat om twee hoofdvragen waarop dit verkennende onderzoek een antwoord wil geven:
Welke zoutlekbeperkende maatregelen zijn nuttig en nodig voor de Krammersluizen en wat is de bijbehorende resterende zoutlek;

Wat betekent de zoutlek in de nieuwe situatie voor de chlorideconcentraties in het Krammer-Volkerak.

In de gevolgde aanpak zijn drie stappen onderscheiden:

1. De benodigde zoutlekbeperkende maatregelen en de bijbehorende resterende zoutlek;
2. De modellering van de chlorideconcentraties in het Volkerak-Zoommeer en het berekenen van de effecten van een aantal scenario's voor zoutlek en doorspoeling;
3. De koppeling van de resultaten van 1. en 2. voor de toekomstige situatie met een alternatieve zout/zoet-scheiding.

Stap 1 is parallel uitgevoerd aan de 3D-modellering voor de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer. De resultaten zijn beschreven in bijlage F van het voorliggende rapport.

9.2 Alternatieve zoutlekbeperkende maatregelen

Voor het beperken van de zoutlek door de Krammersluizen naar het Krammer-Volkerak op een alternatieve wijze worden de volgende maatregelen overwogen:

- de wandschuiven niet meer te gebruiken;
- het verwisselen van de kolkinhoud met behulp van de geperforeerde kolkvloer (duwvaartsluizen) of met behulp van gemalen (jachtensluizen) achterwege te laten;
- de sluisdeuren aan Krammer-Volkerak-zijde van eenvoudige rinketschuiven te voorzien;
- nauwkeurig ontworpen luchtbellenschermen aan beide zijden buiten de kolk aan te brengen, aan de zoute Oosterschelde zijde ondersteund met waterschermen;

Met het dynamisch zoutlekmodel zijn veel varianten van combinaties van maatregelen doorgerekend. De voor de zoutlekbeperving optimale varianten (D09 voor de duwvaartsluizen en J09 voor de jachtensluizen) leveren een gezamenlijke bruto zoutlek van 19 kg/s bij 16 schutcycli per dag en 19 m³/s verbruik van water uit het Krammer-Volkerak, onder de veronderstelling dat het Krammer-Volkerak volledig zoet is.

9.3 De huidige zoutlek van de Krammersluizen

Via eerdere onderzoeken en de VTSO-metingen is getracht een indruk te krijgen van de grootte van de zoutlek van de Krammersluizen.

De verschillende informatiebronnen zijn moeilijk met elkaar te vergelijken. Zoute kwel wordt niet overal meegenomen, de onderzoeken hebben betrekking op verschillende periodes en de modelleringen zijn niet gelijk en ook niet altijd duidelijk beschreven. Verder wordt het effect van de zoutlek bij de duwvaartsluizen soms vergeleken met de gemeten chloridegradiënt in het Krammer-Volkerak, maar die wordt mede bepaald door de jachtensluizen, andere zoutbronnen (Dintel, Vliet, Volkeraksluizen) en de waterbalans. Het toekennen van sluitfouten in de waterbalans aan een bepaalde waterbron heeft invloed op de berekende chloridegradiënt.

Hulsbergen (2006) komt op 15 kg/s voor het jaar 2000 (netto effect op het Volkerak-Zoommeer). Zoute kwel is daarbij buiten beschouwing gelaten. Dat lijkt erg hoog in het licht van andere onderzoeken. Nolte (2011) komt op 3 tot 12 kg/s voor de eerste 4 maanden van 2011. Toch is in 2011 het VZM veel zouter dan in 2000.

Een belangrijke bron van informatie wordt gevormd door de VTSO-metingen in het Krammer-Volkerak. De zoutbalans van paragraaf 4.2 komt uit op een geschatte range (in de tijd) voor de bruto zoutlek van 5-11 kg/s voor de periode 2000 t/m 2006 en van 11-18 kg/s voor de periode 2007 tot medio 2009. Over de nauwkeurigheid van de verschillende schattingen in statistische termen kan hier niets gezegd worden. In de zoutbalans is wel rekening gehouden met zoute kwel. De zoutlek van de jachtensluizen is niet apart gemodelleerd. De bruto zoutlek die is berekend uit de zoutbalans van het Krammer-Volkerak geldt dus voor duwvaartsluizen en jachtensluizen samen.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen bruto zoutlek en netto zoutlek. De bruto zoutlek is dan de hoeveelheid zout die toch door het zout/zoet-scheidingssysteem heen komt; de netto zoutlek is dan de bruto zoutlek verminderd met de hoeveelheid zout die teruggespoeld wordt naar de zoute zijde van de sluiskolk. De netto zoutlek is de hoeveelheid zout die uiteindelijk via de monding van de voorhaven in het Krammer-Volkerak terecht komt. Men dient zich steeds bewust te zijn van wat er bedoeld wordt.

Er is een notoir gebrek aan metingen in sluizen als de Krammersluizen. Er is geen meetreeks bekend waaraan de gekozen modellering kan worden getoetst. Er is dringend behoefte aan adequate metingen van zoutgehalten in kolk, voorhaven en net buiten de mond van de voorhaven om iets te kunnen zeggen over de mate van menging afhankelijk van plaats en tijd. Zonder dergelijke metingen zal de modellering altijd gebrekkig zijn en zijn de resultaten navenant.

Recent zijn zeer uitgebreide metingen en dito rapportage (Regeling, 1989) met 1116 figuren van o.a. de zout/zoet-uitwisseling in een duwvaartkolk weer boven tafel gekomen. Hieruit kan geen redelijke zoutlek worden afgeleid, maar nadere studie naar deze zeer uitgebreide metingen is aan te bevelen.

9.4 Validatieberekeningen voor het 3D-Z-lagen-VZM-model

Met de gekozen modellering van het Volkerak-Zoommeer, de modellering van de zoutlek en de toegepaste waarden voor de invoerparameters worden de gemeten chloridegehalten in het Krammer-Volkerak behoorlijk goed gereproduceerd. De waarden voor de zoutlek door de sluiskolk naar de voorhaven die daarvoor nodig waren passen qua orde van grootte goed bij de waarden die in hoofdstuk 4 zijn gevonden.

Geconcludeerd wordt daarom dat de gebruikte wijze van modelleren goed genoeg is voor het simuleren van scenario's voor zoutlek en doorspoeling en de kwalitatieve beoordeling van de uitkomsten. Met de kwantitatieve waarden van de uitkomsten dient voorzichtig te worden omgegaan in het licht van de onvermijdelijke schematisaties en onnauwkeurigheden.

9.5 Zoutlek- en doorspoelscenario's

Geconcludeerd kan worden dat een grotere doorspoeling door meer neerslag- en afvoerpieken in de eerste drie maanden van 2007 slechts een marginaal effect heeft op de chloridegehalten in de periode zelf en vlak daarna. Nog later overheerst waarschijnlijk het effect van de toenemende zoutlek van de Krammersluizen.

Een zoutlek uit de kolken van de Krammersluizen van 45 kg/s (hypothetisch) leidt voor de situatie in 2007 tot zeer (vooralsnog onaanvaardbaar) hoge chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer.

Een effectieve manier om deze hoge chloridegehalten weer terug te brengen tot het niveau van de gemeten waarden was het verhogen van het totale invoerdebiet bij de Volkeraksluizen tot 25 m³/s. Dit kwam bij de gekozen wijze van het sluitend maken van de waterbalans door een sluitbron bij de Volkeraksluizen neer op een extra bron van bijna 14 m³/s.

De berekende zoutlek van 19 kg/s met het dynamisch zoutlekmodel voor de situatie met innovatieve zout/zoet-scheiding is op dezelfde manier in het model gebracht als bij de voorgaande simulaties, omdat dat toen niet anders kon. Daarbij is wel duidelijk dat dit niet overeenstemt met de situatie waarvoor deze waarde berekend is. De waarden volgens het dynamisch zoutlekmodel gelden voor net buiten de mond van de voorhaven in het Krammer-Volkerak en voor een chlorideconcentratie van 0 mg/l in het Krammer-Volkerak. In werkelijkheid is de chlorideconcentratie in het Krammer-Volkerak echter ook niet 0 mg/l en zal dus ook een hoeveelheid zout worden teruggespoeld, afhankelijk van het verziltingsgehalte van het Krammer-Volkerak bij de mond van de voorhaven. De netto zoutlek die uiteindelijk in het Krammer-Volkerak terecht komt zal dus lager zijn dan de berekende waarde van 19 kg/s van bijlage F.

Een flink extra min of meer continu doorspoeldebiet bij de Volkeraksluizen zou ook voor de huidige situatie de chloridegehalten aanzienlijk verlagen.

Periodes met minimale doorspoeling (droogteperiodes) vanwege het niet beschikbaar zijn van extra doorspoeldebiet hebben een significante invloed op de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer.

9.6 Netto en bruto zoutlek Krammersluizen in de 3D-modellering

Nadere analyse van de zoutbeweging in de voorhaven heeft laten zien dat het gebruikte model goed werkt en de resultaten er realistisch uitzien. Er blijkt meer zout teruggespoeld te worden naar de Oosterschelde dan verwacht, maar onrealistisch hoeft dat niet te zijn. Er zijn aannames gedaan over de manier waarop de zoutlek in de voorhaven wordt ingebracht en schutverlies en spuidebiet worden onttrokken. Voor verbetering van deze modellering zijn goede metingen onontbeerlijk.

De hoeveelheid zoutlek bij de sluizen is gebruikt als te variëren grootte (ijkparameter). Dat zegt op zich nog niets over de juistheid van de gevonden waarden voor de bruto zoutlek van de Krammersluizen, daarvoor zijn er teveel vrijheidsgraden bij de modellering. Echter de waarden die zijn gevonden zijn goed vergelijkbaar met de bevindingen van hoofdstuk 4.

De zoutbelasting via de mond van de voorhaven is primair verantwoordelijk voor de verzilting van het Krammer-Volkerak. Deze belasting is niet constant in de tijd, maar wordt mede bepaald door het terugspoeldebiet en de hoeveelheid zout die daarin wordt meegenomen. Dat laatste hangt mede af van de mate van verzilting van het Krammer-Volkerak en de zoutuitwisseling met de voorhaven. Voor scenariosimulaties is het dan ook in het algemeen niet mogelijk de zoutlek op te leggen als een constante waarde aan de buitenzijde van de voorhaven.

9.7 Conceptueel model verzilting Krammer-Volkerak

Gestimuleerd door 3D-simulaties van het Volkerak-Zoommeer is een eenvoudig conceptueel model van het zoutgehalte in het Krammer-Volkerak geformuleerd. Dit conceptuele model maakt begrijpelijk dat de Krammersluizen in het verleden maar weinig zoutlek door de monding van zijn voorhavens leverde. De zoutlek welke de schutkolken leveren aan de voorhavens wordt tenminste ten dele teniet gedaan door het onttrekken van verzilt water uit het Krammer-Volkerak (westelijk Volkerak). Deze situatie kan in de toekomst worden gehandhaafd met de instellingen zoals besproken bij case D09 voor de duwvaartsluizen (en J09 voor de jachtensluizen).

Het mechanisme is dat de voorhavens van de Krammersluizen wel verzilt water naar het Krammer-Volkerak leveren en dus zout lekken wat eerst in de Krammerput wordt geborgen. Vervolgens verzilt de toplaag van het Krammer-Volkerak door menging. Hieruit wordt het spoeldebiet onttrokken dat het verzilt water via de kolken naar de Oosterschelde afvoert en gelijktijdig ook de zoutlek uit de kolken verlaagt. Het spoeldebiet en het zoutgehalte zijn dan in balans met de verticale menging bijvoorbeeld uit de Krammerput en over het traject van de voorhavens naar de put.

De afvoer van zout uit het Krammer-Volkerak wordt mede en sterk bepaald door de zuidelijke afvoer via de Eendracht (schematisch in Figuur 8.1). Hierbij speelt de locatie van de zoet-zout gradiënt vanaf het oostelijke naar het westelijke deel van het Volkerak. Zodra deze zoet-zout overgang naar het westelijke deel verschuift neemt het zoutgehalte voor de monding van de Eendracht af en daarmee ook de afvoer van zout uit het Krammer-Volkerak. Schommelingen door wind maar variaties in het totale oost naar west debiet (o.a. spuien) bepalen de locatie van de zoet-zout gradiënt in het Krammer-Volkerak. Dergelijke patronen zijn wel met nauwkeurige 3D-simulaties te bepalen maar niet met het hier gehanteerde conceptuele model.

Het spoeldebiet blijkt een effectief middel tegen zoutlek te zijn maar vergeet wel dat het Krammer-Volkerak op een zeker zoutgehalte mag blijven. Dit zoutgehalte kan wel verlaagd worden met een zoetwaterflux bijvoorbeeld uit het Haringvliet/Hollandsch Diep. De zoet-zout gradient in het Krammer-Volkerak verschuift dan wel in westelijke richting waardoor minder zout via de Eendracht wordt afgevoerd. Kortom, het verzoeten van het westelijke deel van het Krammer-Volkerak wordt tegengewerkt door vergroting van de netto zoutlek van de Krammersluizen en de verminderde afvoer van zout via de Eendracht.

9.8 Eindconclusies

De eindconclusies worden hier opgehangen aan de twee hoofdvragen waarop dit onderzoek een antwoord wil geven.

1. Welke zoutlekbeperkende maatregelen zijn nuttig en nodig voor de Krammersluizen en wat is de bijbehorende resterende zoutlek;

De volgende combinatie van zoutlekbeperkende maatregelen zijn nuttig uit het oogpunt van vermindering van de onderhoudskosten en verkorting van de schuttijd, en nodig om de zoutlek voldoende te beperken:

- de bestaande wandschuiven dicht zetten;
- het verwisselen van de kolkinhoud met behulp van de geperforeerde kolkvloer (duwvaartsluizen) of met behulp van gemalen (jachtensluizen) achterwege laten;
- de sluisdeuren aan Krammer-Volkerak-zijde van eenvoudige rinketschuiven voorzien;
- nauwkeurig ontworpen luchtbellenschermen aan beide zijden buiten de kolk aanbrengen (met het oog op de hinder bij het afmeren in de kolk), aan de zoute Oosterschelde zijde ondersteund met waterschermen;

Voor de beoogde nieuwe situatie van het Krammersluizen-complex met innovatieve zout/zoet-scheidingssystemen is een totale netto zoutlek berekend van 19 kg/s van de voorhavens van de Krammersluizen naar een volledig zoet Krammer-Volkerak bij een zoetwaterverbruik van 19,2 m³/s en 16 schutcycli per dag. Als meer realistische waarden voor de saliniteit van het Krammer-Volkerak worden ingevoerd, dan reduceert de netto zoutlek bij gelijk zoetwaterverbruik tot vrijwel nihil. Te zoet water in de Krammer bij de voorhavens leidt zelfs tot minder terugspoeld zout en dus hogere waarden voor de netto zoutlek.

2. Wat betekent de zoutlek in de nieuwe situatie voor de chlorideconcentraties in het Krammer-Volkerak.

Een simpele rekenregel is dat wanneer het spoeldebiet in m³/s getalsmatig gelijk is aan de bruto zoutlek in kg/s naar een zoet Krammer-Volkerak, de netto zoutlek van het Krammersluizencomplex nihil is. Dat is bijvoorbeeld bij een (hier geschatte) totale netto zoutlek van 19 kg/s in de nieuwe situatie het geval bij een totaal spoeldebiet van 19 m³/s en een zoutgehalte van het westelijke Krammer-Volkerak van 1 psu (chlorideconcentratie van 550 mg/l).

Het benodigde debiet voor het schutproces in de nieuwe situatie (ca. 19 m³/s) is groter dan voor de huidige situatie (ca. 9 m³/s). De extra benodigde zoetwaterflux door de Krammersluizen naar de Oosterschelde zal geleverd moeten worden door een extra toevoer door de Volkeraksluizen. Bij een maximaal debiet van 25 m³/s door de Volkeraksluizen is er

dan gemiddeld nog ca. 6 m³/s debiet beschikbaar voor het bijsturen van de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer door extra afvoer via de Krammersluizen of via de Eendracht naar de Bathse spuilsuis. Dit debiet is nodig voor de afvoer van de zoutflux van de overige zoutbronnen via de Eendracht en voor het eventuele compenseren van extra zoutlek bij meer dan 16 schutcycli per dag.

De chlorideconcentraties bij de monding van de Eendracht zullen in het licht van de berekende gradiënten in de chlorideconcentraties in het Krammer-Volkerak een stuk lager zijn dan de bovengenoemde 550 mg/l bij de voorhavens in de Krammer.

9.9 Aanbevelingen

Tijdens de studie zijn een aantal zaken naar voren gekomen die nadere aandacht verdienen. De belangrijkste zijn:

1. Er is grote behoefte aan adequate metingen in kolk, voorhaven en net buiten de mond van de voorhaven van zoutgehalten om iets te kunnen zeggen over de mate van menging afhankelijk van plaats en tijd. Metingen van de zoutlek door de Krammersluizen (duwvaartsluizen en jachtensluizen) zijn stellig nodig om de huidige werking en zoutlek van deze sluizen vast te kunnen stellen voordat deze gewijzigd worden.
2. Nader onderzoek naar de locatie en de omvang van de zoute kwel is wenselijk ten einde de modelvorming verder te onderbouwen. De omvang van deze kwel ligt volgens de nu verkregen inzichten dicht in de buurt van de netto zoutlek van de Krammersluizen en van het totaal van de overige zoutbronnen.
3. Het verdient aanbeveling de mogelijkheid te onderzoeken de 3D-modellering van het Krammer-Volkerak voor de nieuwe situatie te verbeteren met een modellering van de zoutlek bij de Krammersluizen conform de werking in het conceptuele model om daarmee voor de nieuwe situatie diverse doorspoelscenario's te kunnen doorrekenen. In theorie zou dat kunnen door de modellen te combineren tot één model, maar dat zal complex zijn en veel rekentijd vergen. Een andere oplossing zou mogelijk kunnen worden gevonden door voor een aantal mogelijke waarden van de verschillende invoerparameters van het dynamisch zoutlekmodel de uitkomsten in een matrix van mogelijke uitkomsten te verzamelen en die te gebruiken voor interpolatie bij tussenliggende waarden van de betrokken parameters.

10 Literatuur

Regeling (1989)

Regeling H.J., *Prototypemetingen Krammer- en Kreekraksluizen 1986-1988. Meetseries 2000-3000: operationele gegevens voor de besturing van de Krammerduwvaartsluizen. Deel IV- Tekst en Annexen (drie rapporten, 1116 figuren)*. Waterloopkundig Laboratorium Q373, mei 1989. (Onder Q373 zijn er meerdere rapporten over de Krammersluizen o.a. van H.Derks).

Hulsbergen (2006)

Rolf Hulsbergen, *Predicting Ulva growth in a saline Volkerak-Zoomlake*, rapport Z3926, WL/Delft Hydraulics, Delft, juni 2006.

De Vries et al. (2011)

les de Vries, Johannes Smits, Arno Nolte en Chris Sprengers, *Waterkwaliteit en water- en nutriëntenbalansen Volkerak-Zoommeer 1996-2009*, Deltares, rapport 1203266-000-VEB-0003, Delft, juli 2011.

Nolte (2011)

Arno Nolte, *Spoedadvies Verzilting – Volkerak-Zoommeer*, Deltares, memo 1205046-000-VEB-0001, Delft, 31 mei 2011.

Jongeling (2006)

Tom Jongeling, *Zoutbezwaar van zout Volkerak-Zoommeer*, WL|Delft Hydraulics, project Q4244, Delft, augustus 2006.

Rijkswaterstaat (2007)

Rijkswaterstaat Zeeland, auteur: ir. K. Steenepoorte, *Het Krammersluizencomplex in de Philipsdam*, brochure Rijkswaterstaat, 2007.

Dekker (2008)

Leen Dekker, *Doorspoelen Volkerak-Zoommeer*, memo d.d. 5 november 2008, Rijkswaterstaat, Directie Zeeland.

Uittenbogaard (2010)

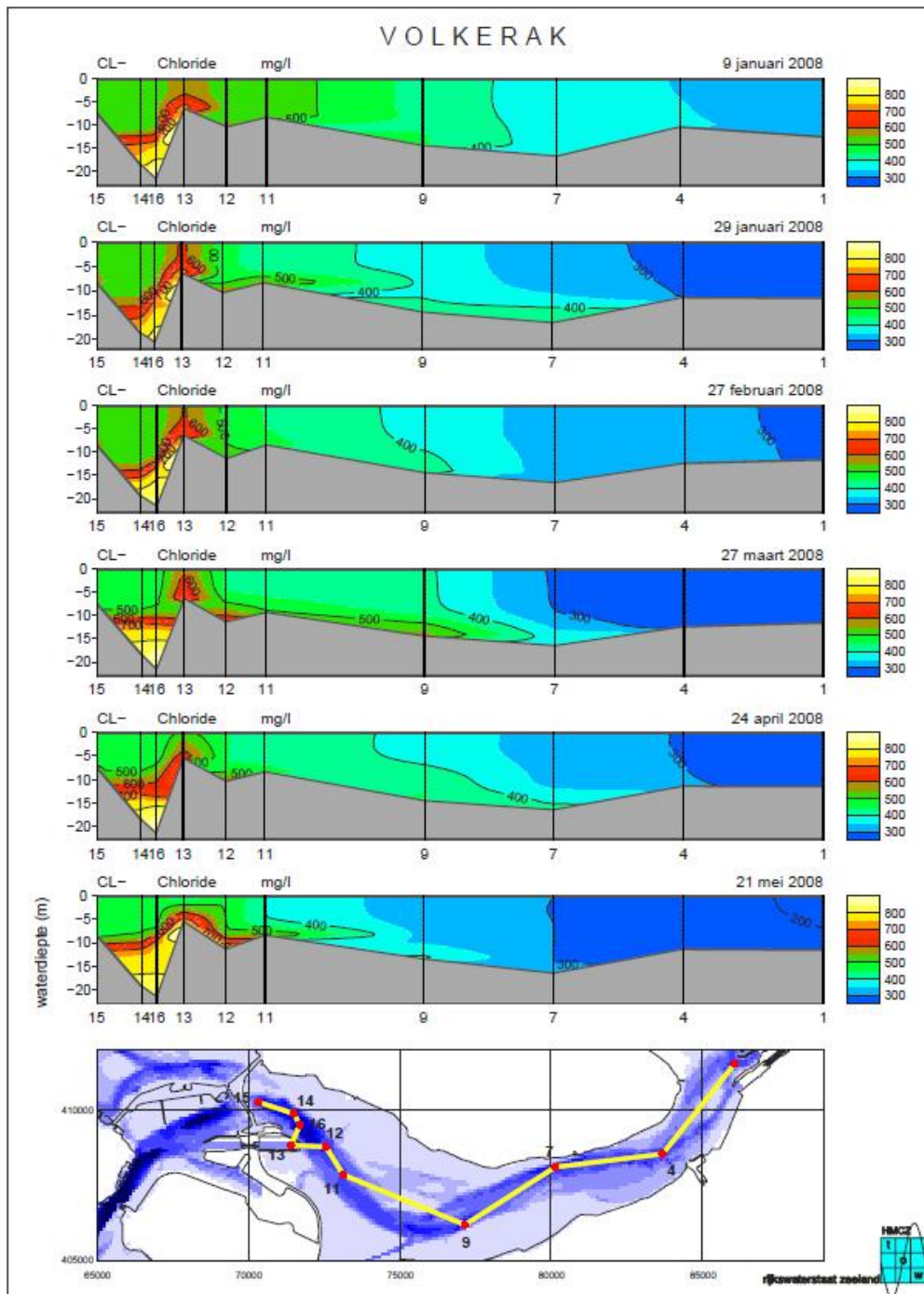
Uittenbogaard, R.E., *Vorstudie: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen; model voor zoutlekberekeningen*, rapport 1201226-11, Deltares, 2010.

Uittenbogaard en Cornelisse (2012)

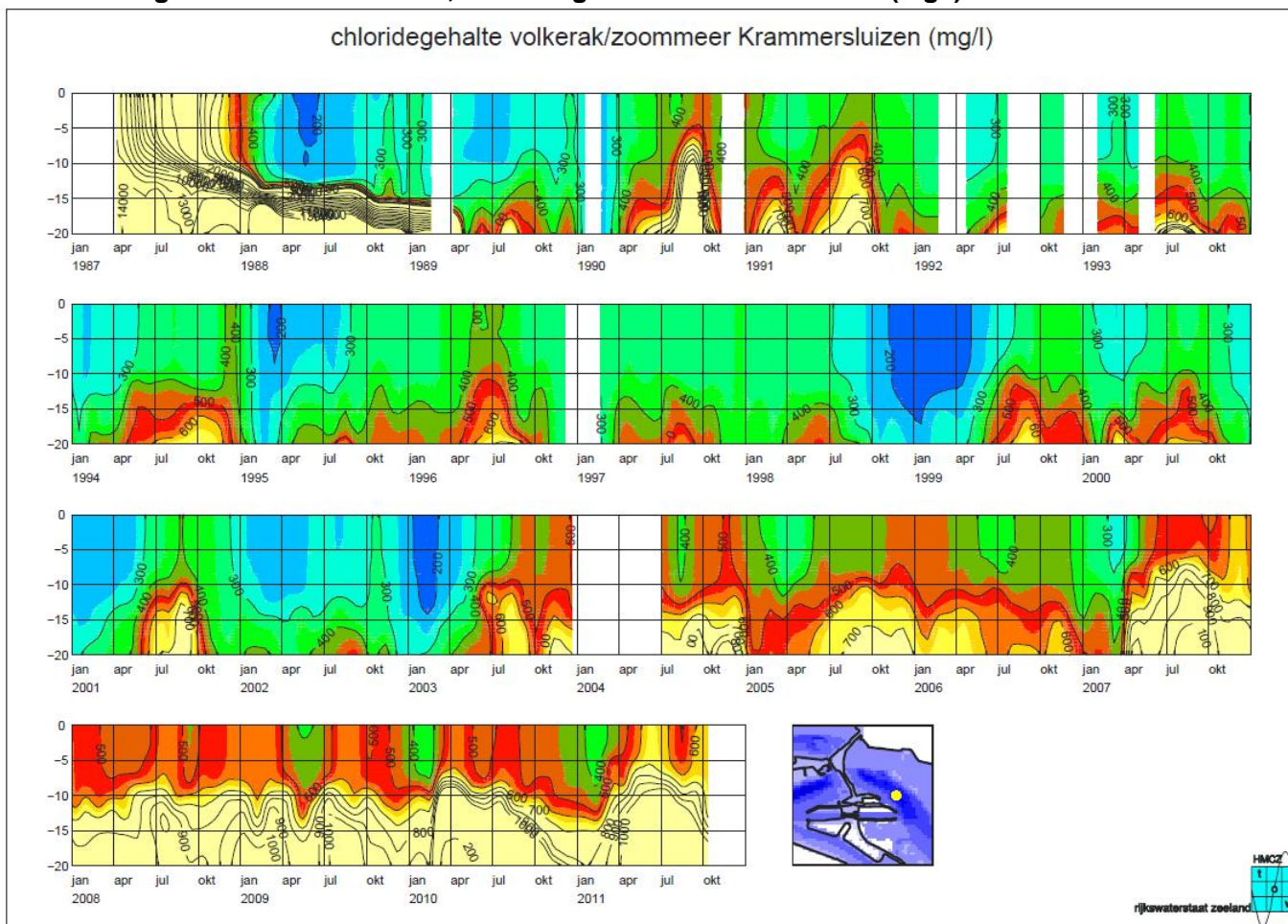
Rob Uittenbogaard, John Cornelisse, *Krammer-Jachtensluizen, Haalbaarheidsonderzoek beperking onderhoud, schuttijd en zoutlek, simulaties met dynamisch zoutlekmodel*, Deltares, rapport 1205977-000-VEB-0001, augustus 2012.

A VTSO-metingen

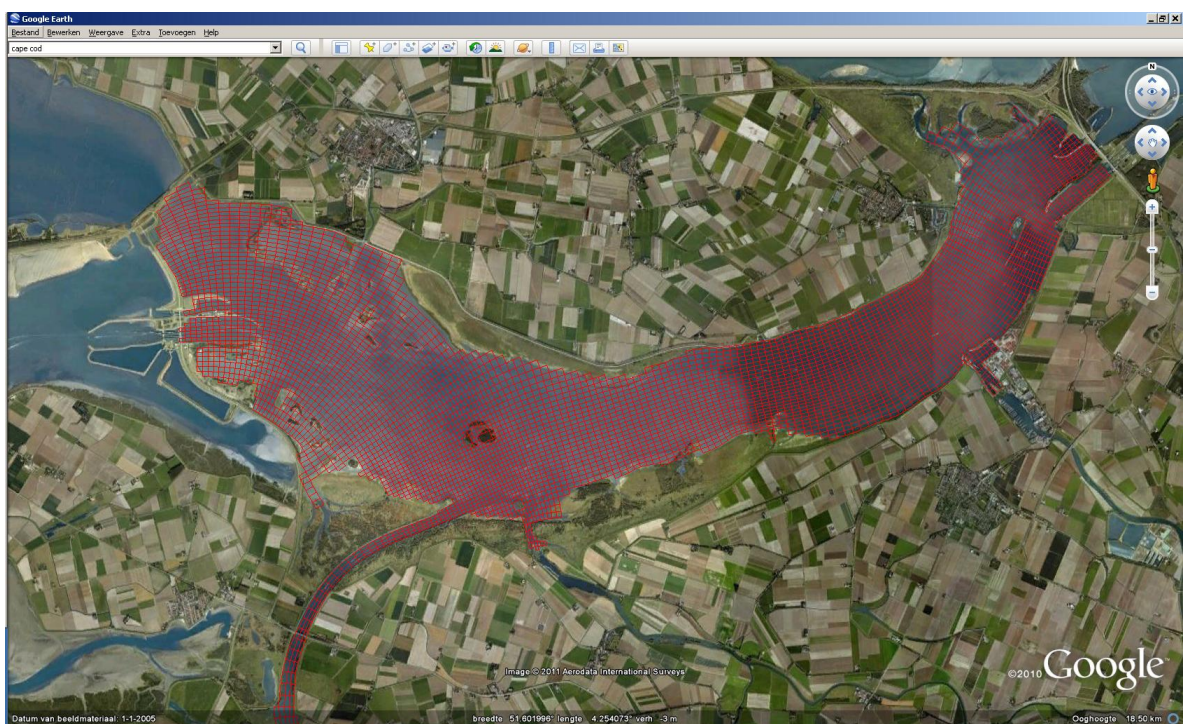
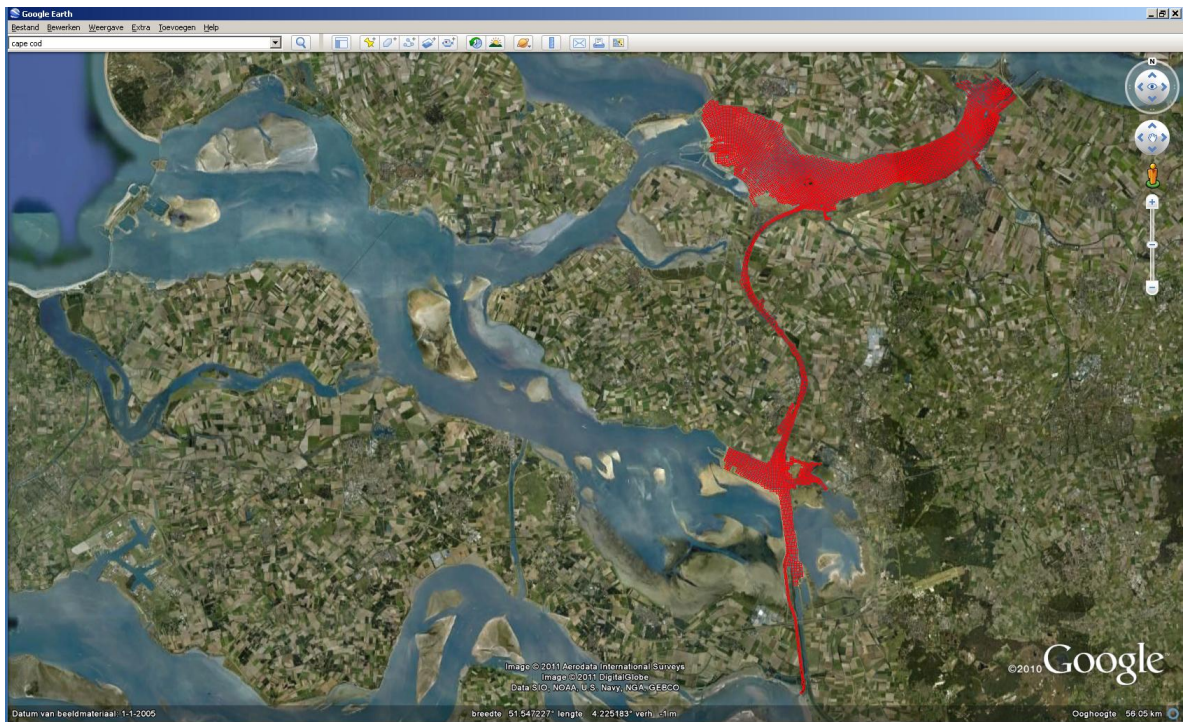
A.1 VTSO-metingen Chloridegehalte Krammer-Volkerak (januari t/m mei 2008)



A.2 VTSO-metingen Krammer-Volkerak; Chloridegehalte Krammersluizen (mg/l)



B Rekenrooster(fijn) VZM-model + ingezoomd op het Krammer-Volkerak

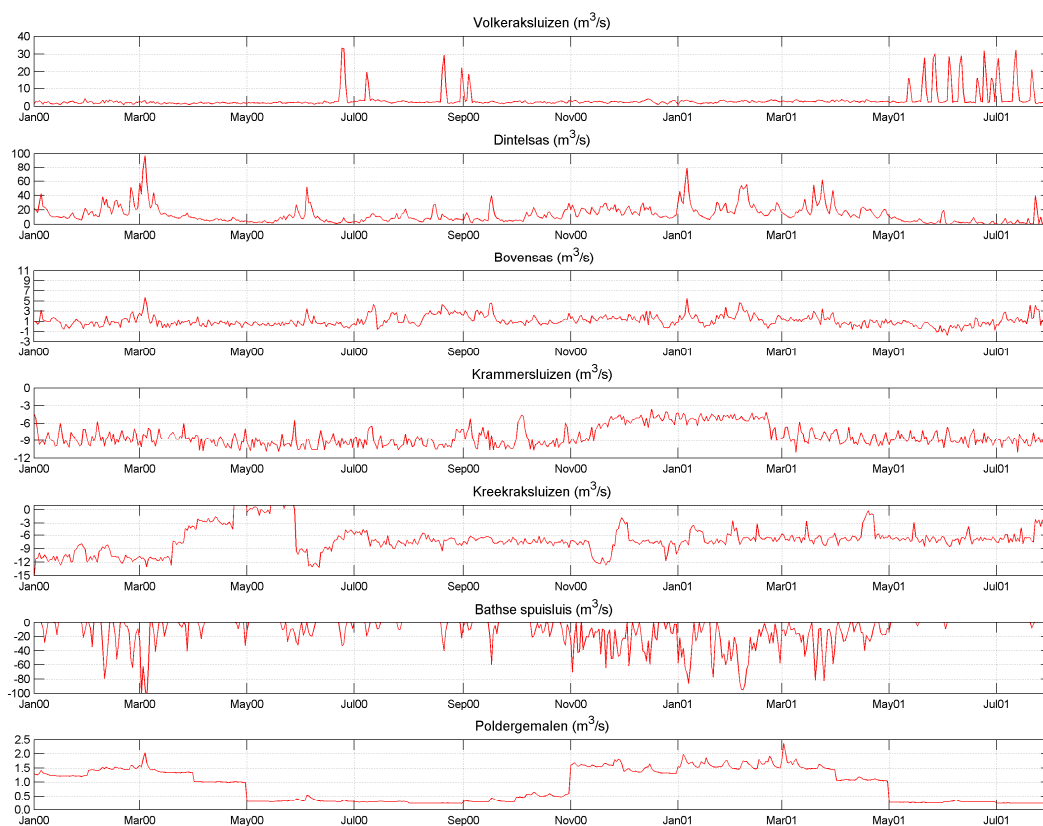


C Resultaten validatiesimulaties VZM-model

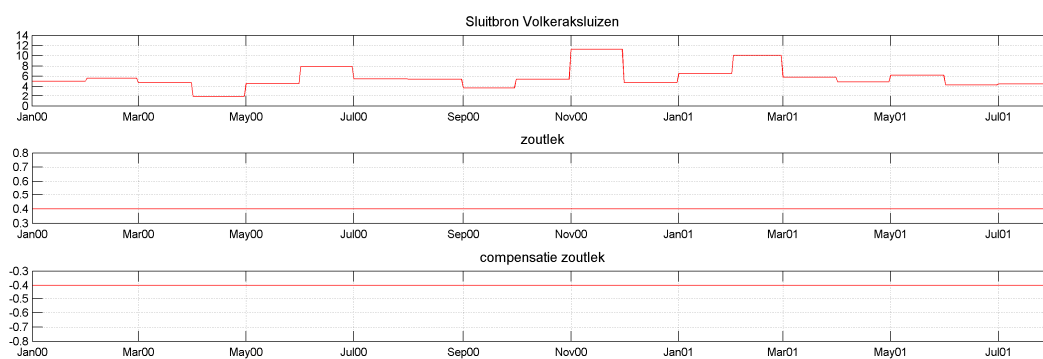
C.1 Resultaten simulatie 007

C.1.1 Invoergegevens

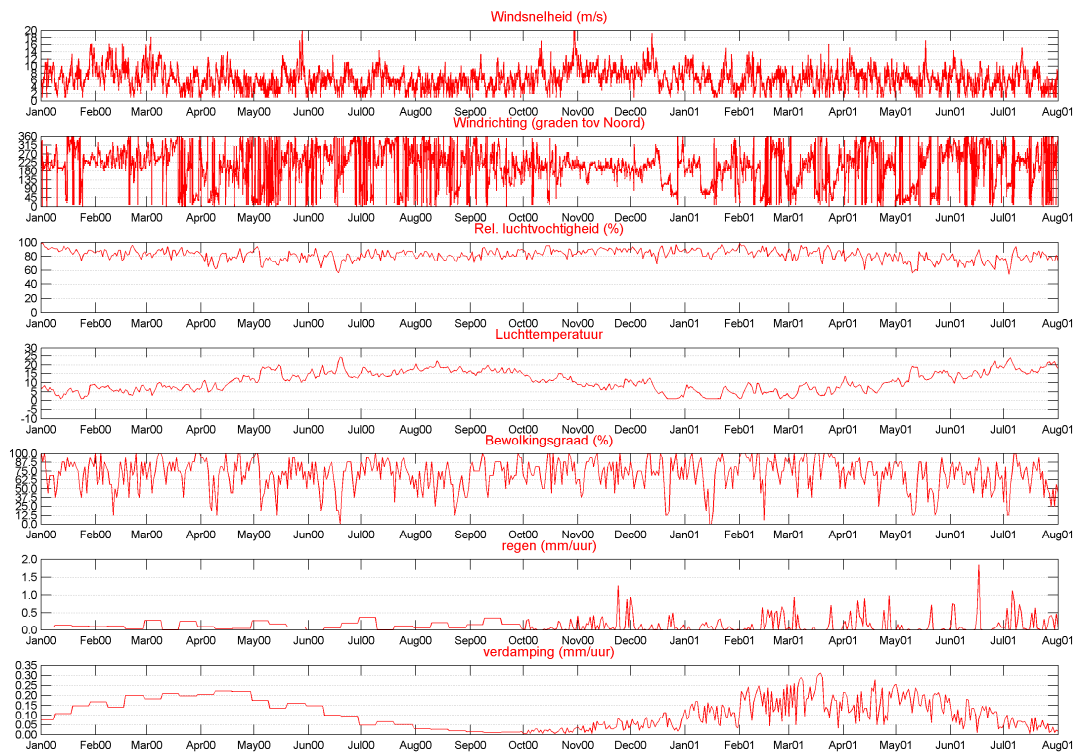
(a) bronnen en putten uit metingen



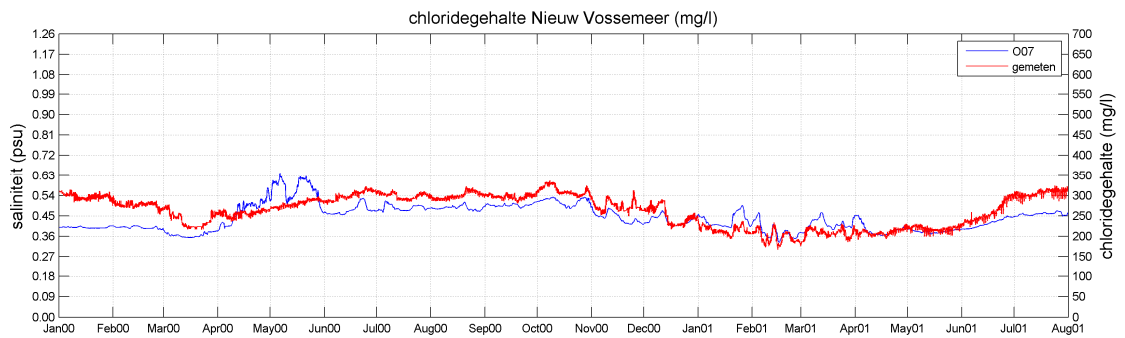
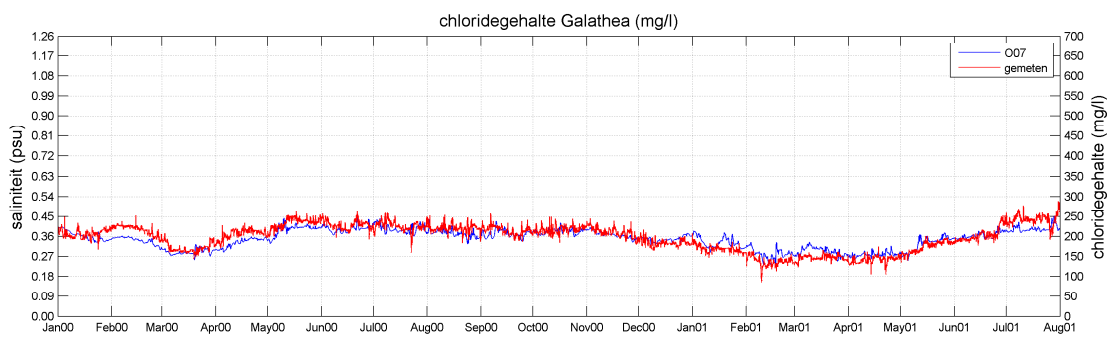
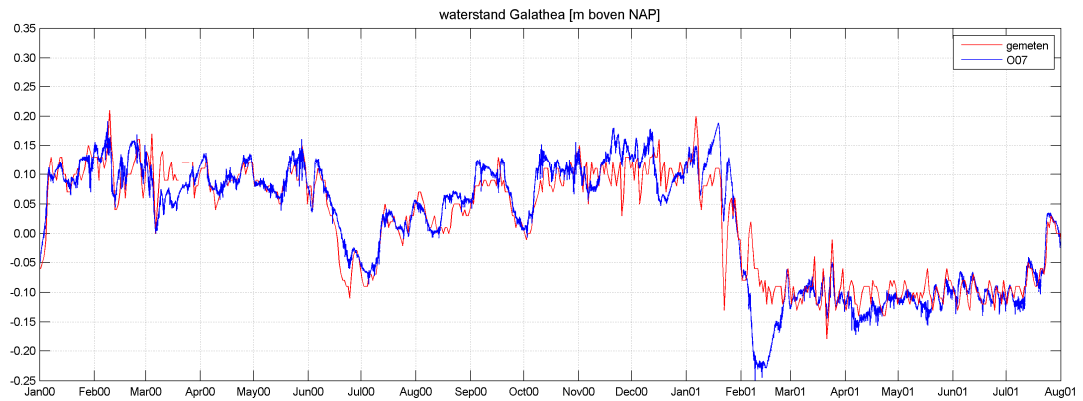
(b) overige bronnen en putten



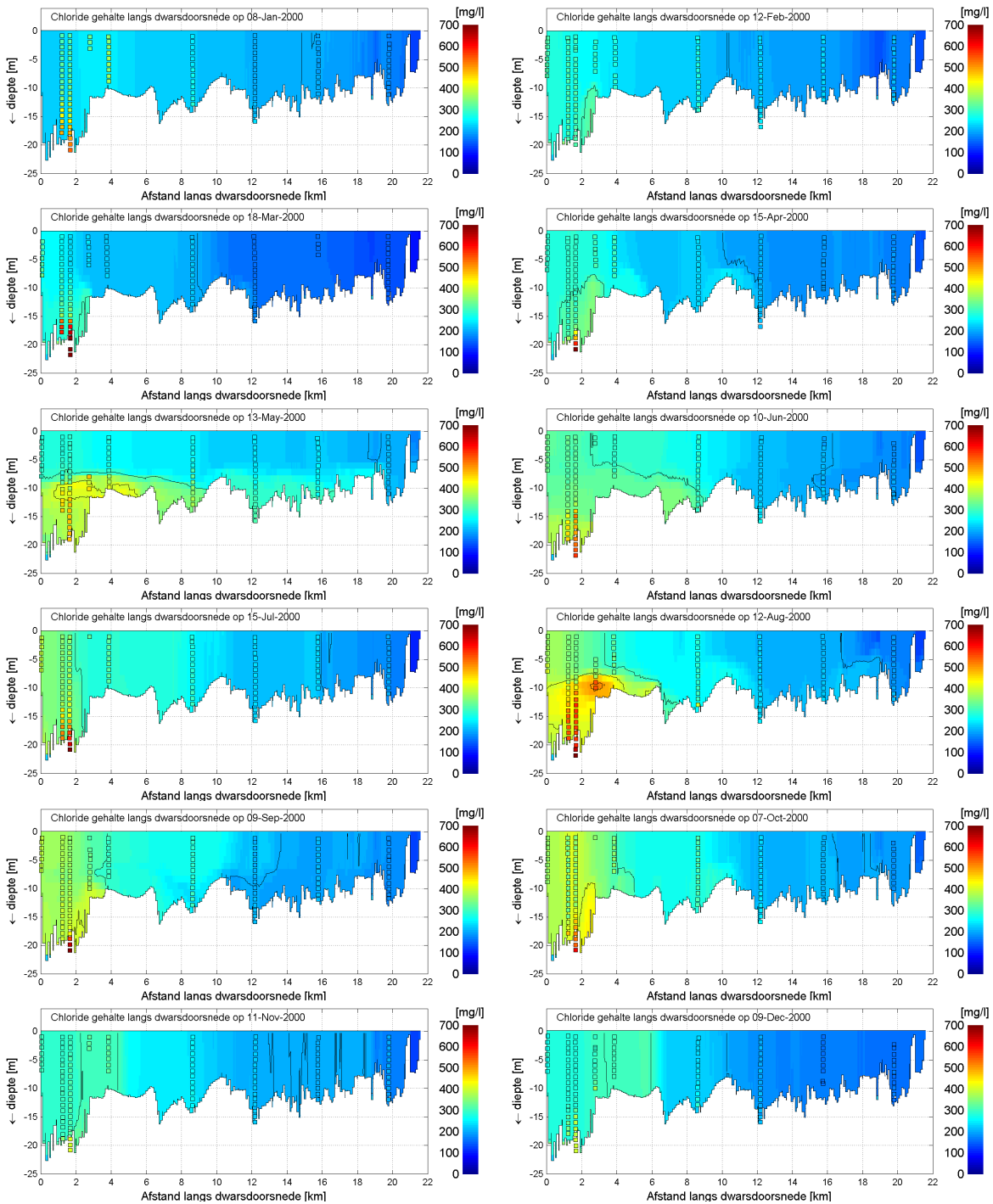
(c) meteorologische invoergegevens



C.1.2 Tijdplots O07



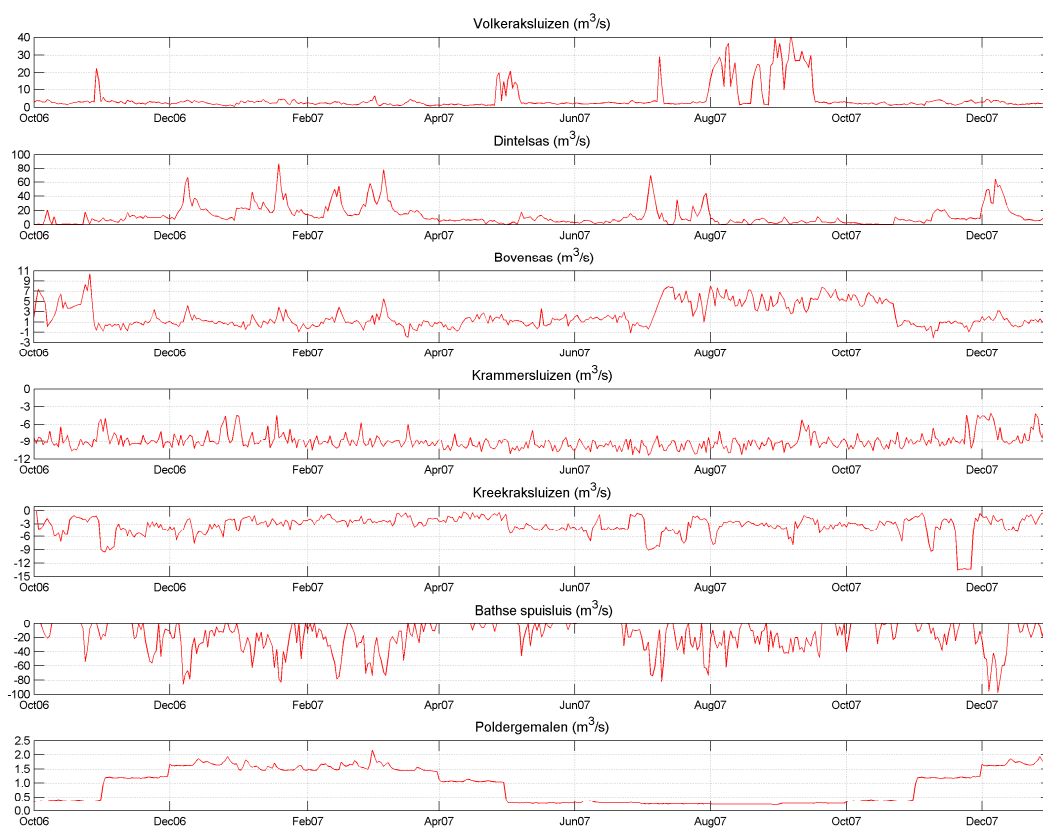
C.1.3 Dwarsdoorsnedes O07



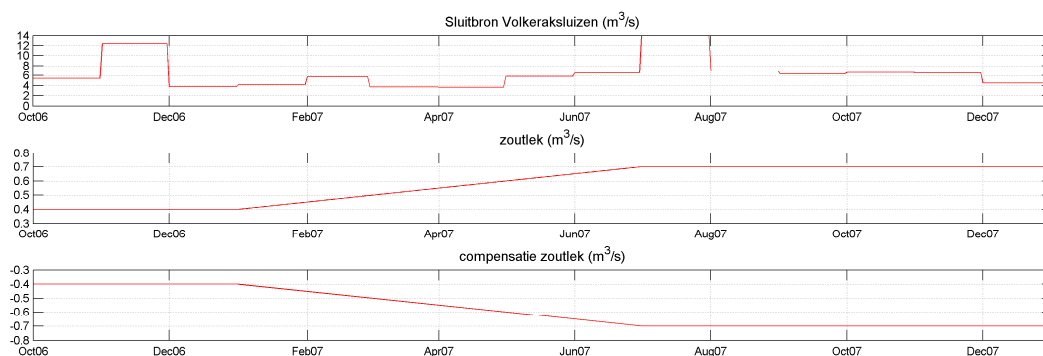
C.2 Resultaten simulatie P07

C.2.1 Invoergegevens

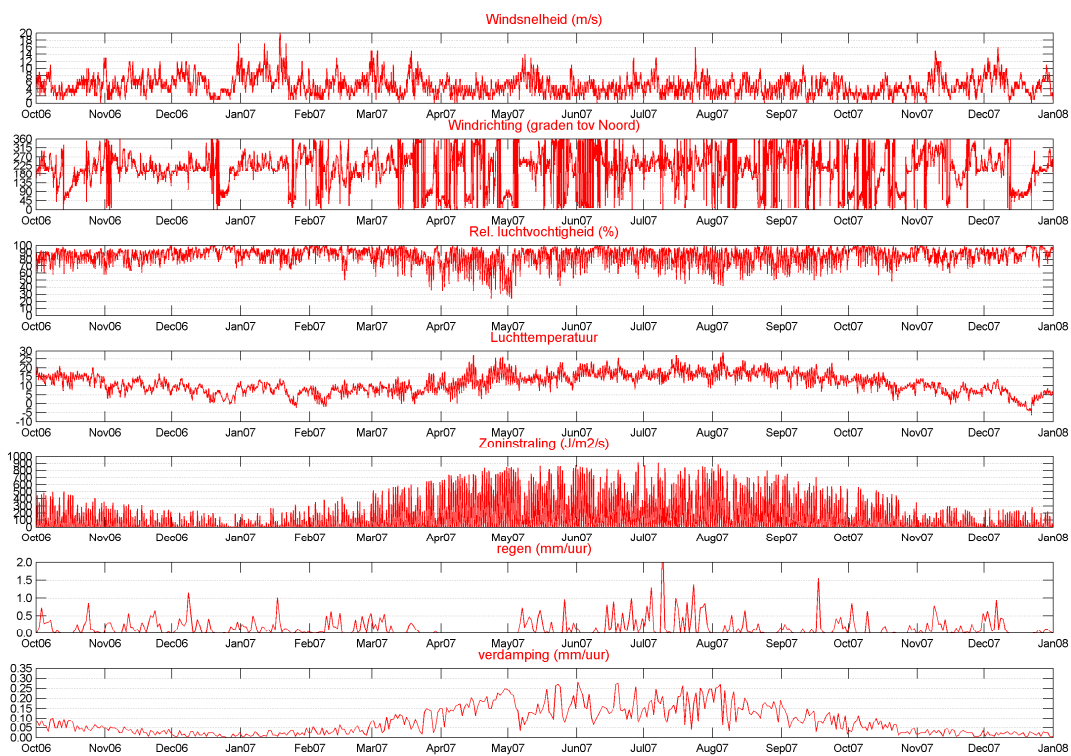
(a) bronnen en putten uit metingen



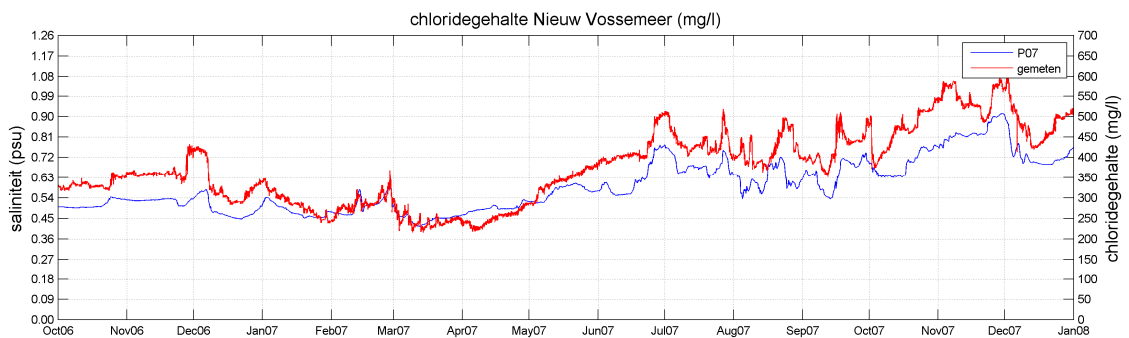
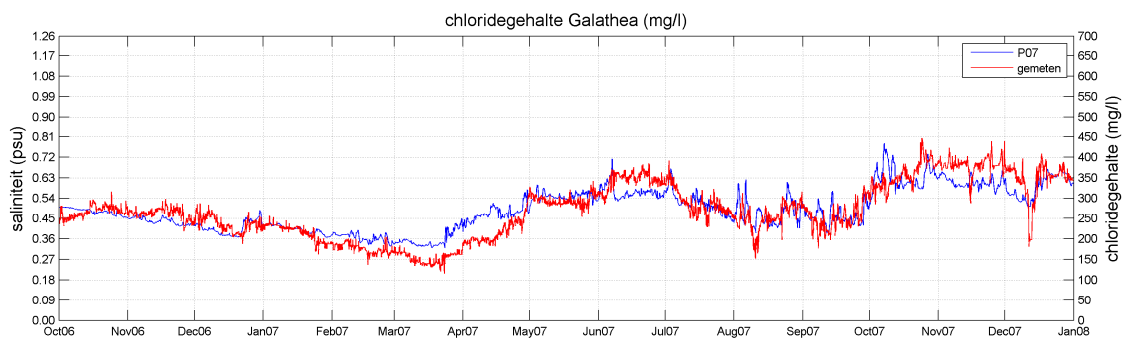
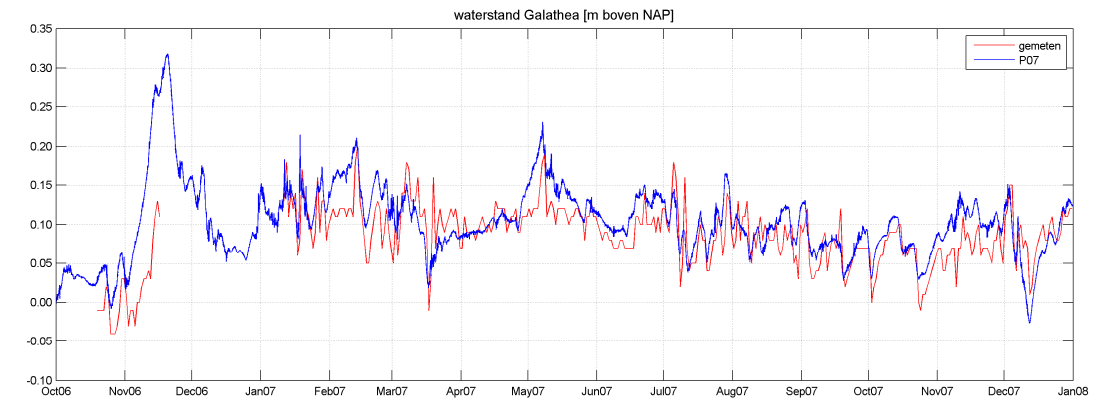
(b) overige bronnen en putten



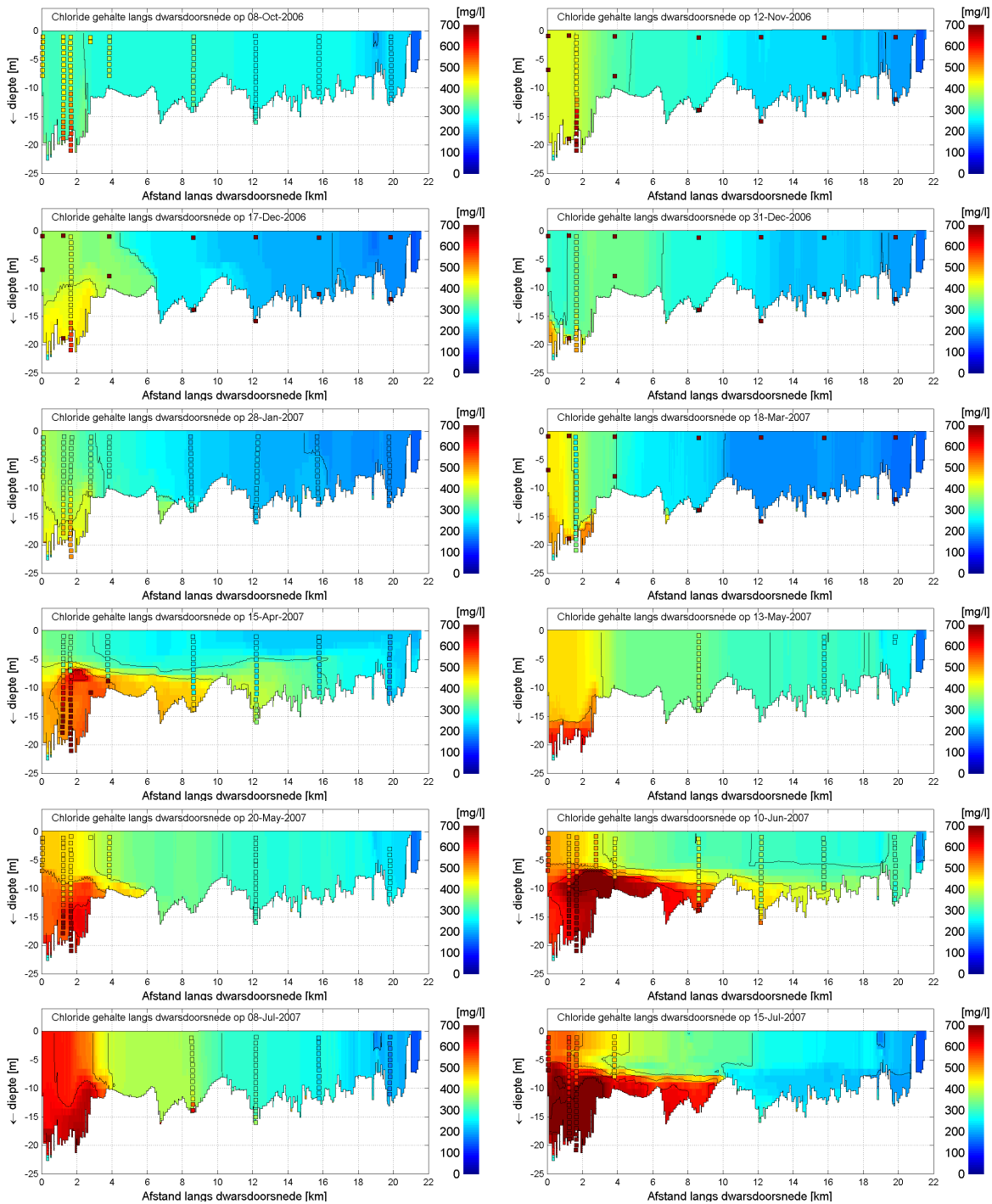
(c) Meteorologische invoergegevens

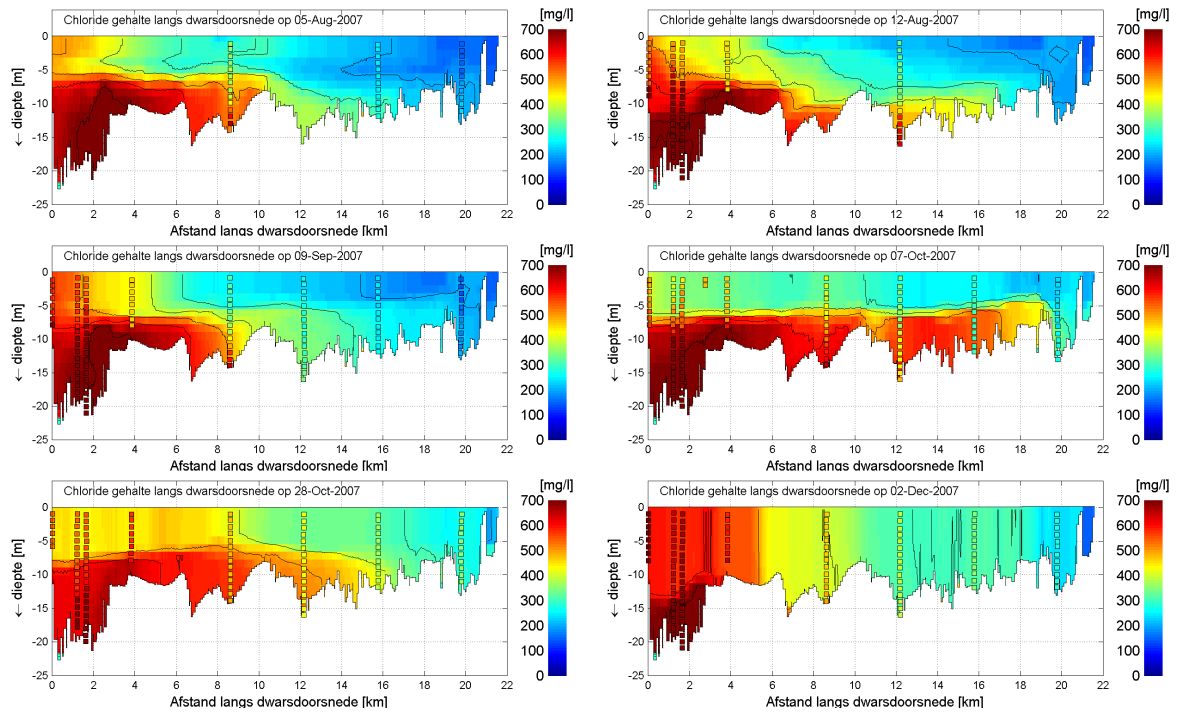


C.2.2 Tijdplots P07



C.2.3 Dwarsdoorsnedes P07

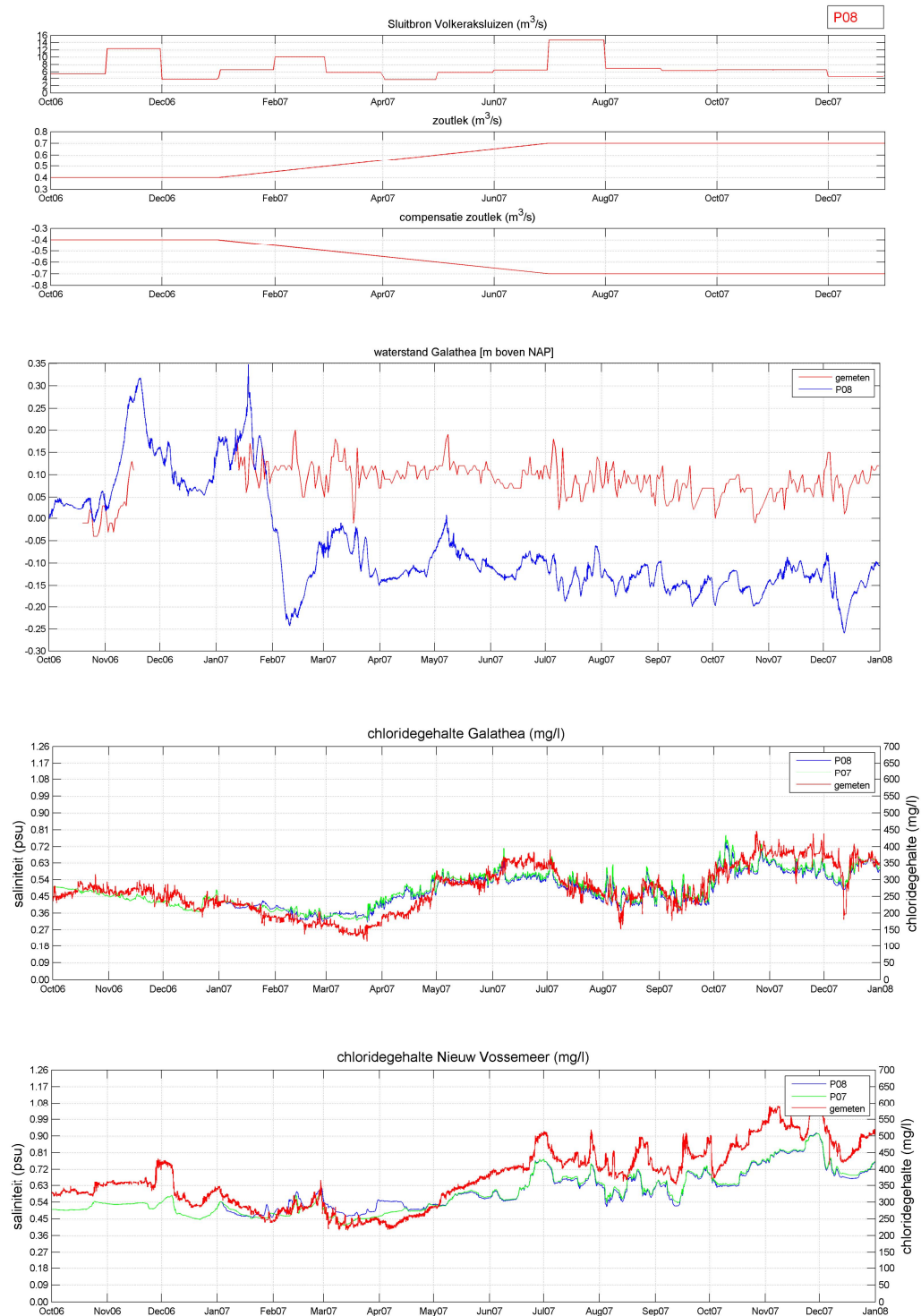




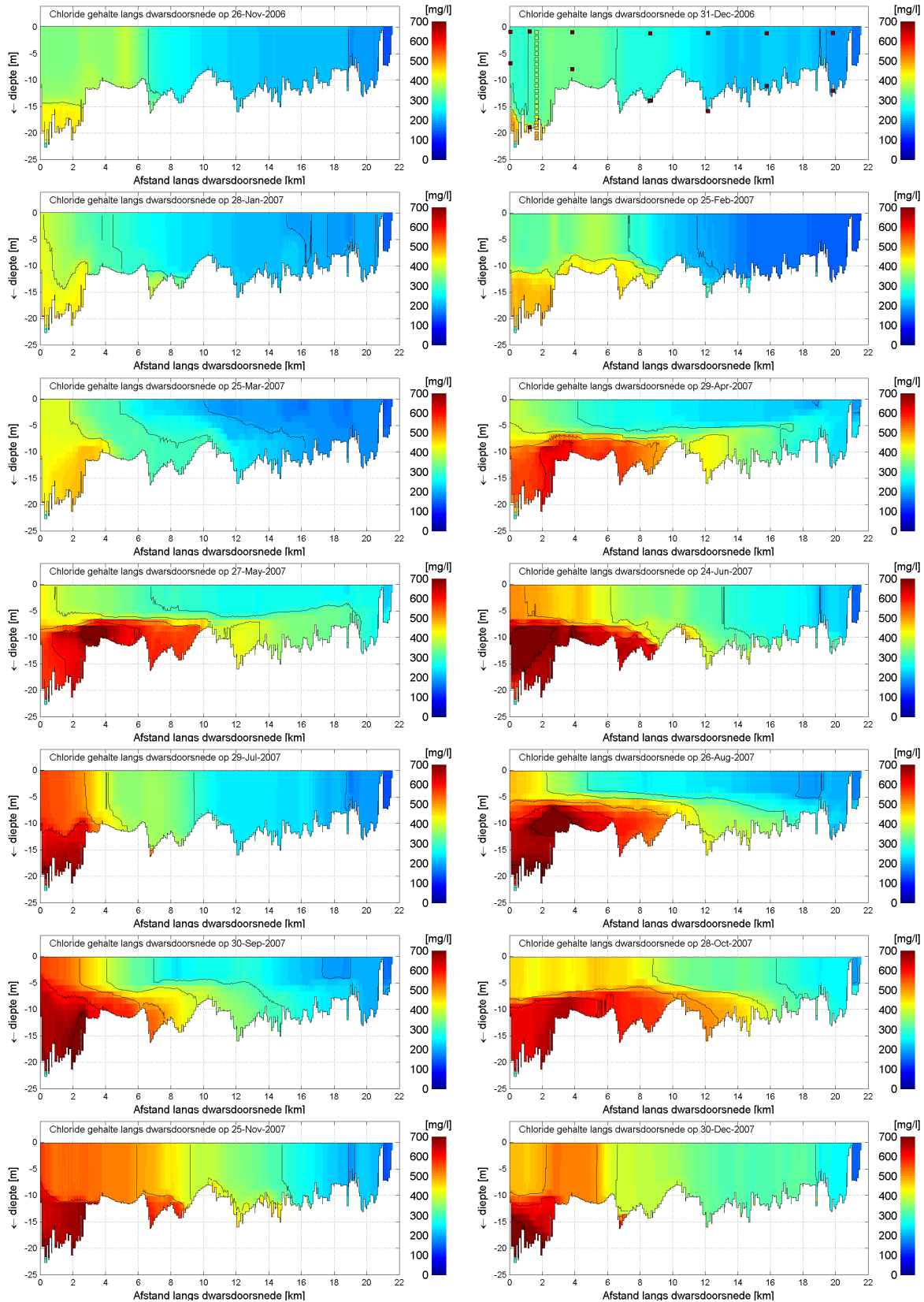
D Resultaten simulaties scenario's zoutlek en doorspoeling

D.1 Resultaten scenario P08

D.1.1 Tijdplots P08

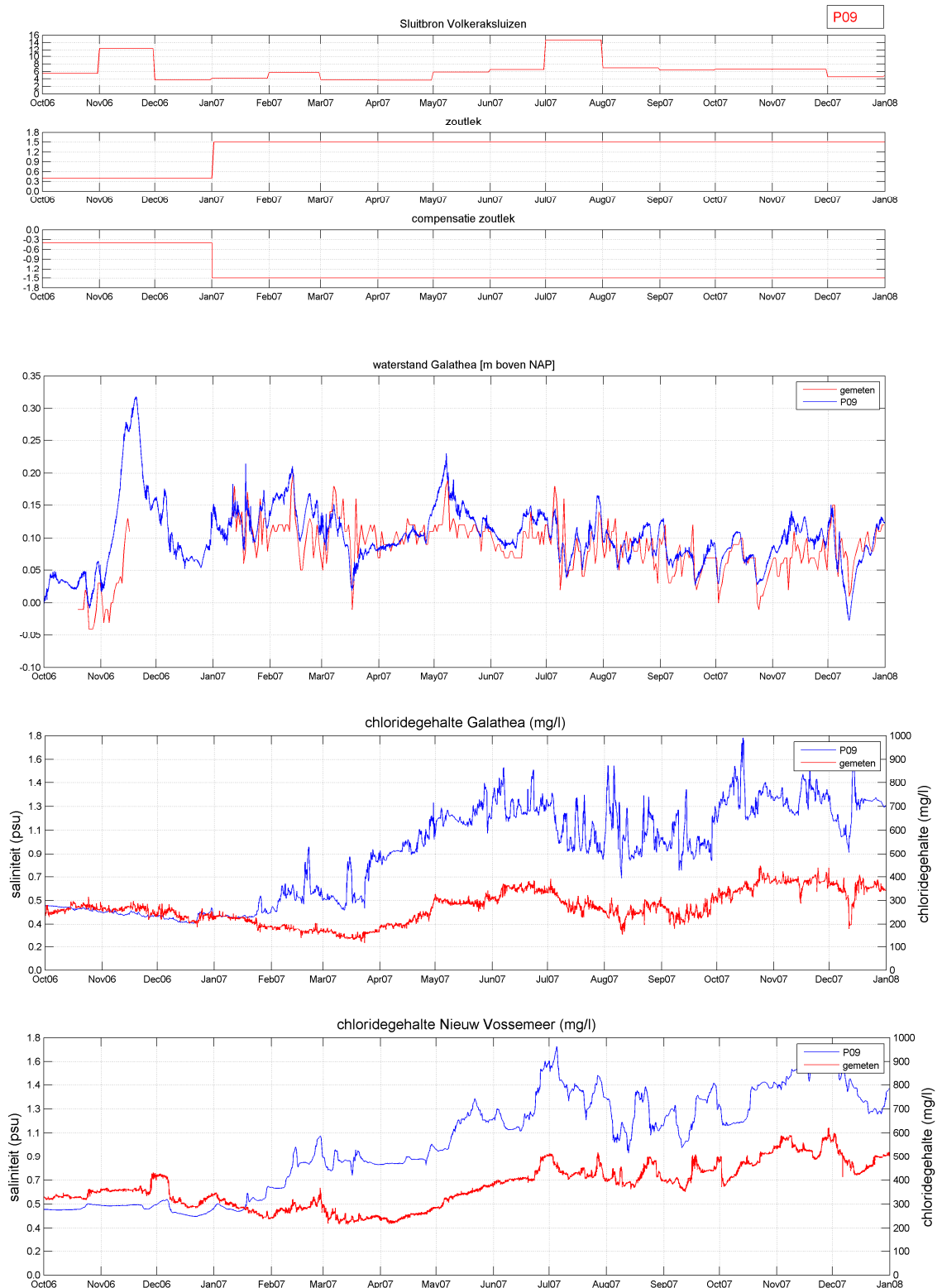


D.1.2 Dwarsdoorsnedes P08

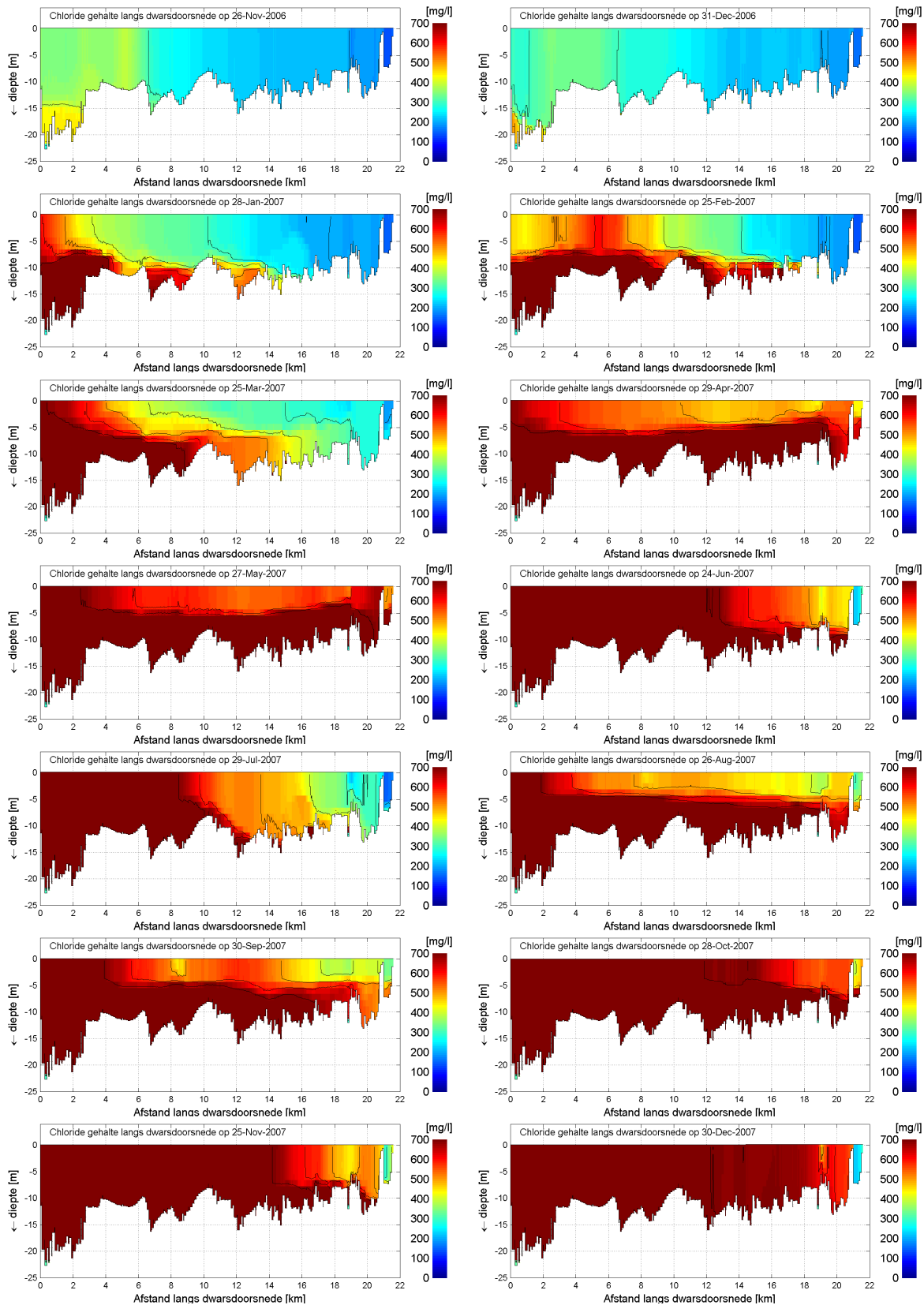


D.2 Resultaten scenario P09

D.2.1 Tijdplots P09

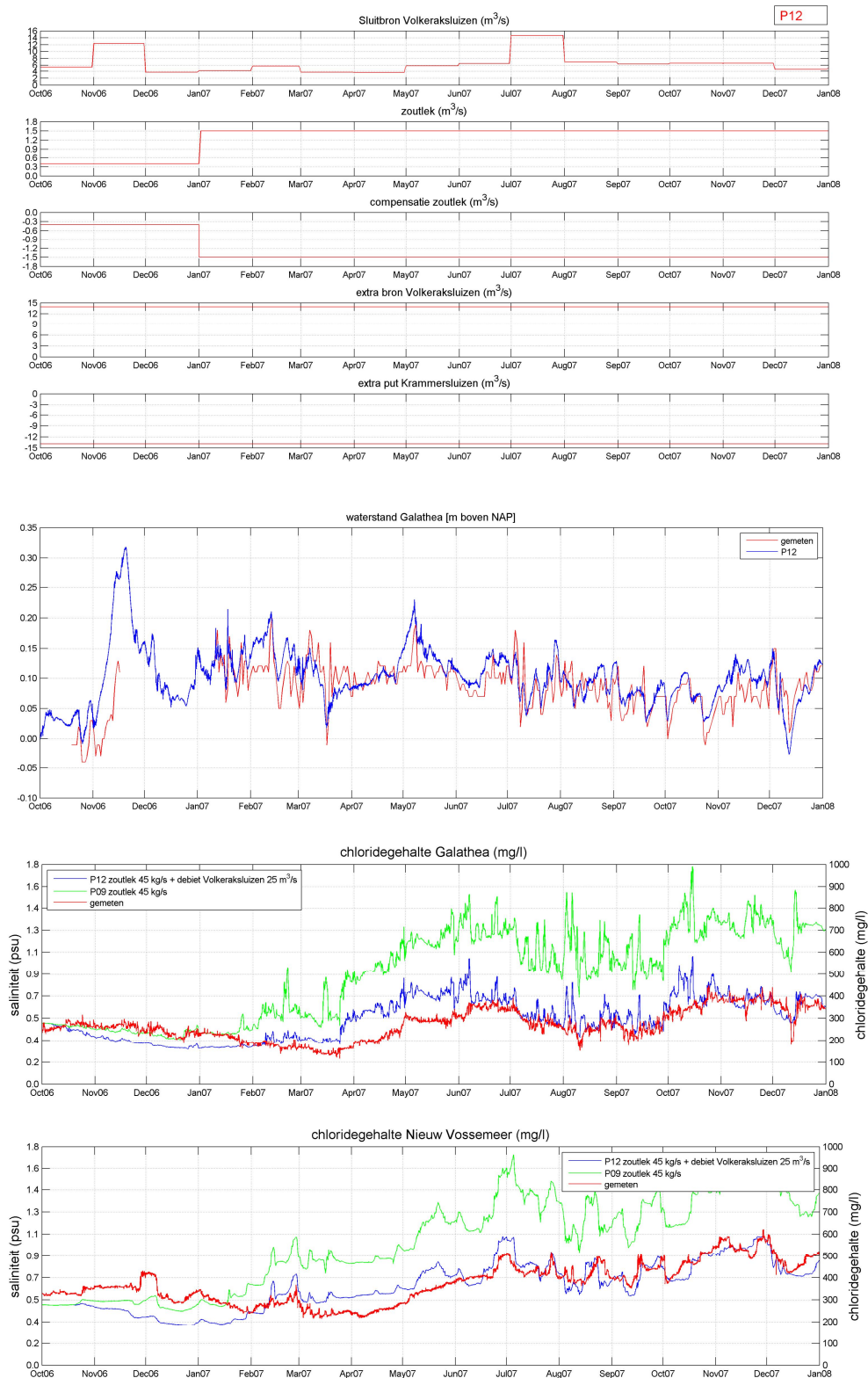


D.2.2 Dwarsdoorsnedes P09

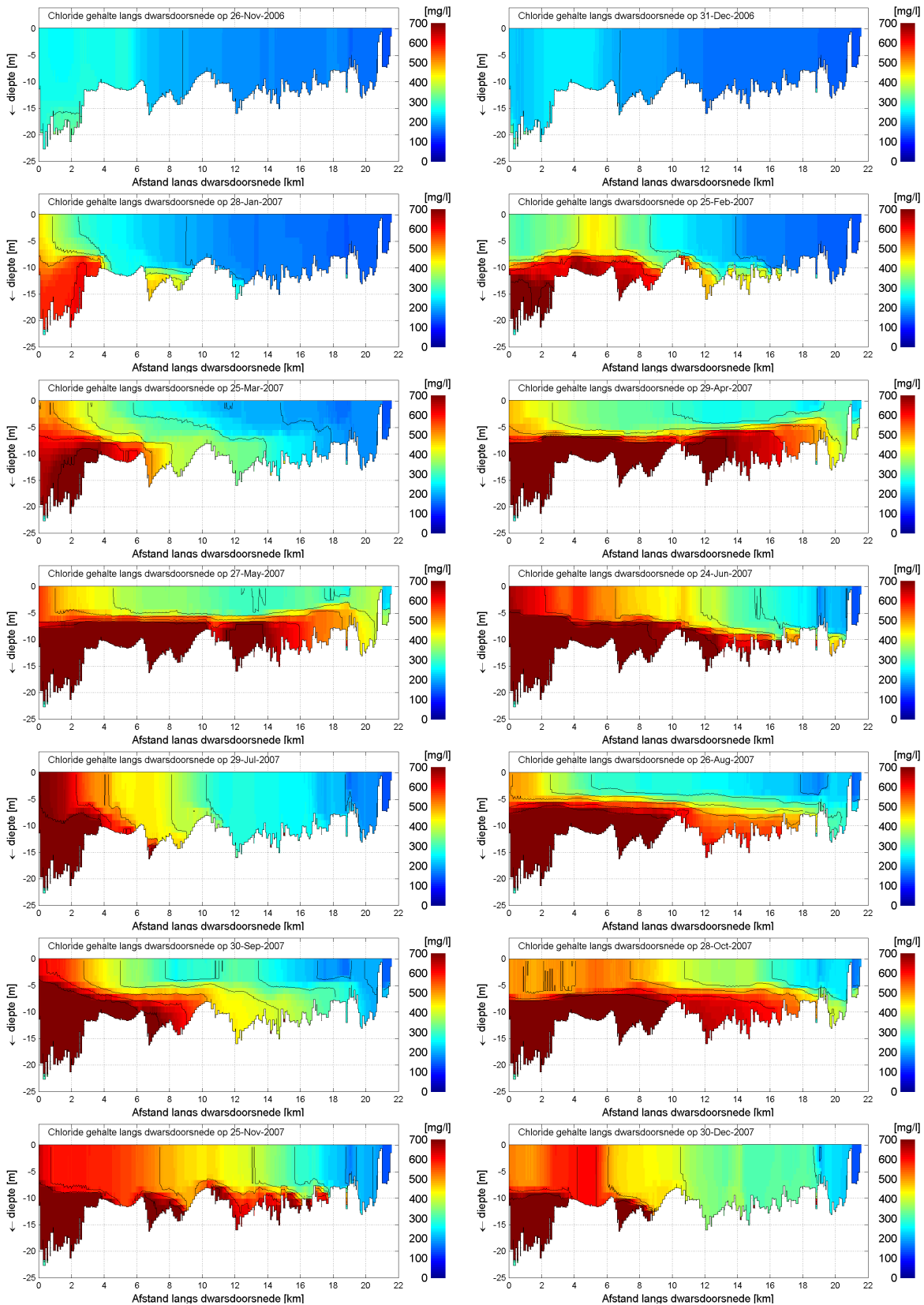


D.3 Resultaten scenario P12

D.3.1 Tijdplots P12

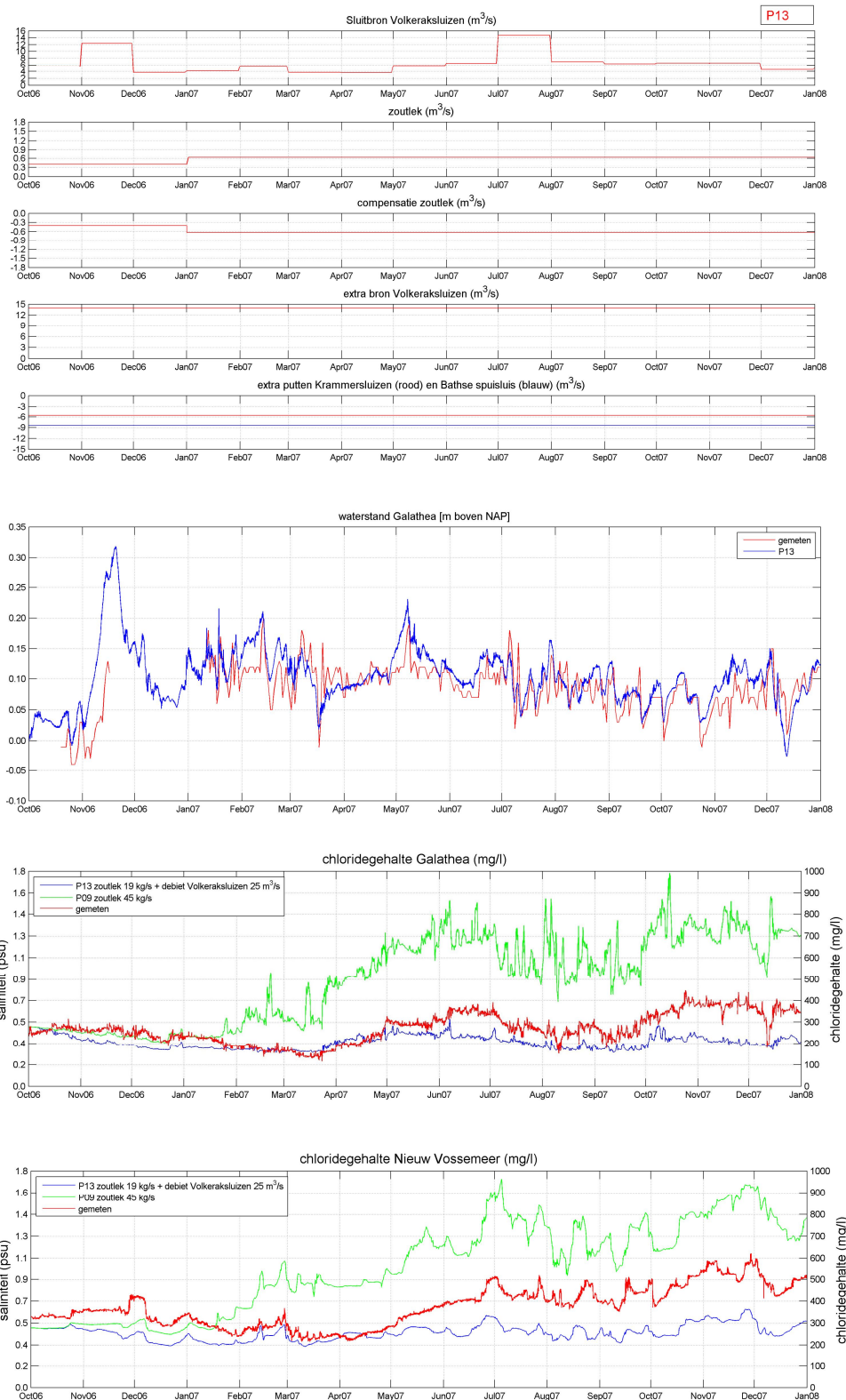


D.3.2 Dwarsdoorsnedes P12

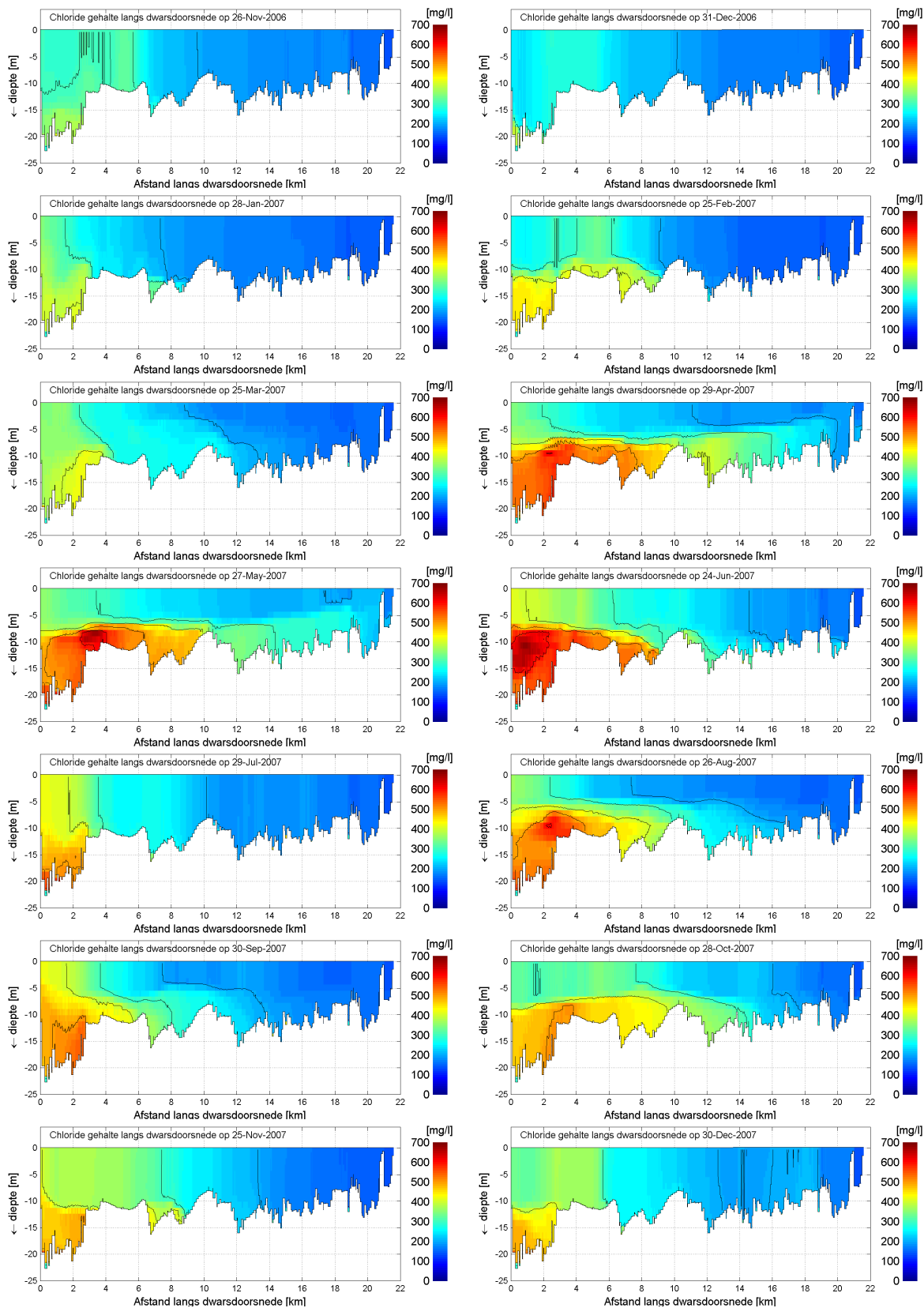


D.4 Resultaten scenario P13

D.4.1 Tijdplots P13

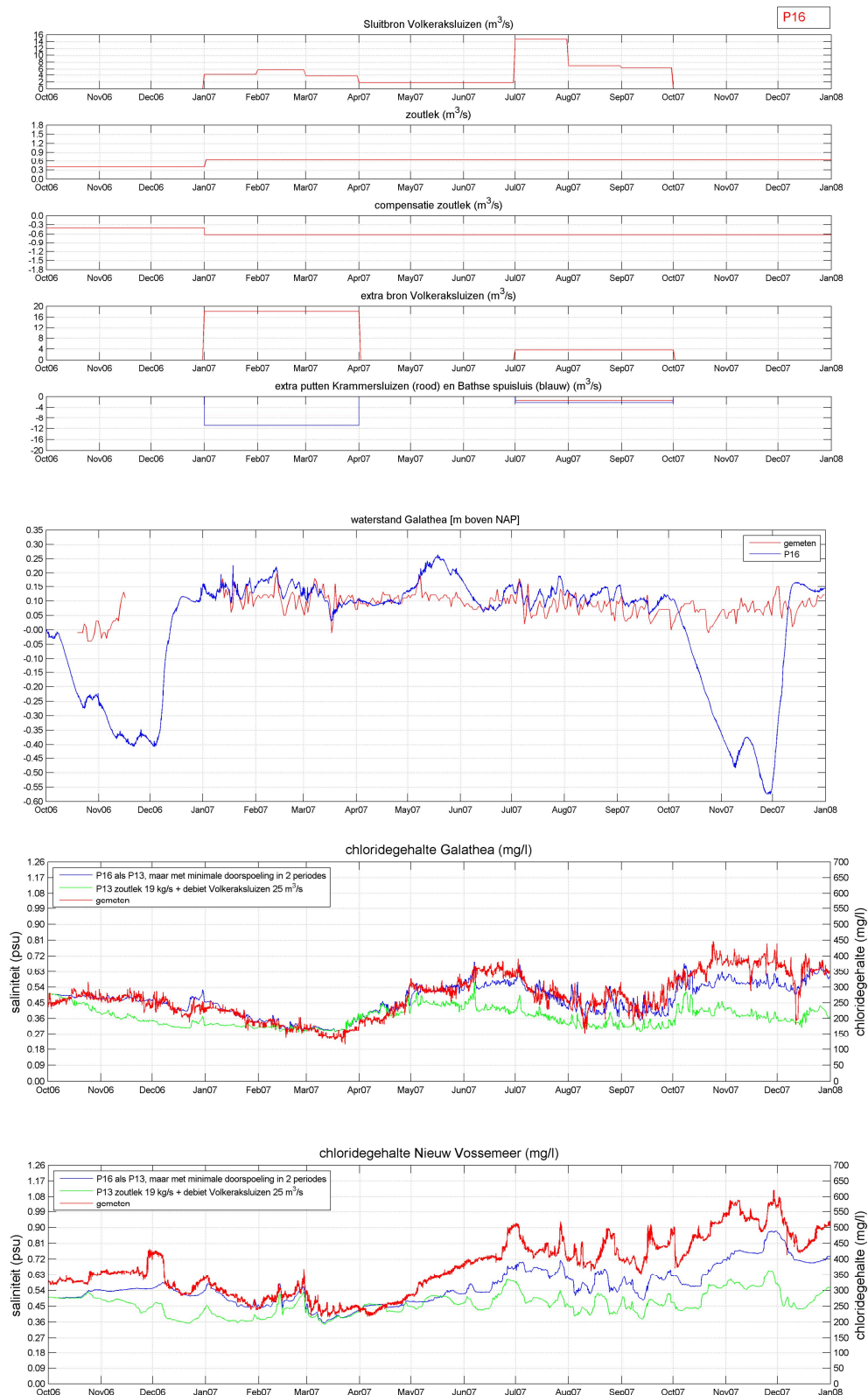


D.4.2 Dwarsdoorsnedes P13



D.5 Resultaten scenario P16

D.5.1 Tijdplots P16



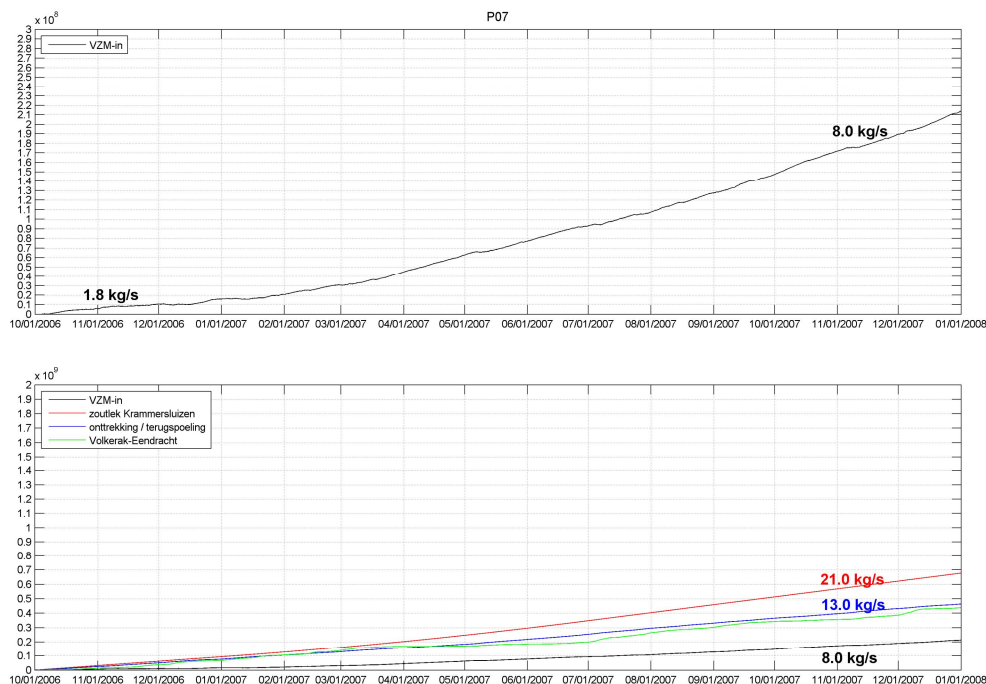
E Zouttransporten voor de simulaties P07, P09, P12 en P13

Cumulatieve getransporteerde hoeveelheden zout [kg] vanaf het begin van de simulatie door de betreffende doorsnede;

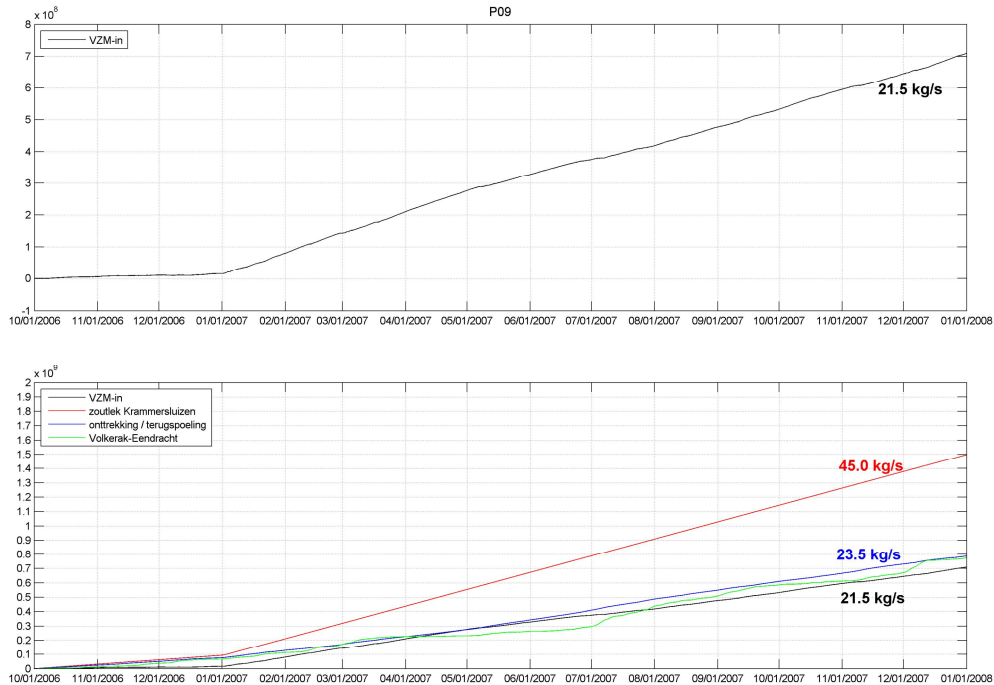
rood = zoutlek sluizen,
 blauw = teruggespoeld zout,
 zwart = zoutbelasting van het Krammer-Volkerak,
 groen = zout naar de Eendracht.

De getallen geven de gemiddelde zouttransporten in kg/s en zijn berekend uit de helling van de getrokken lijnen met overeenkomstige kleur op de plek waar de getallen staan.

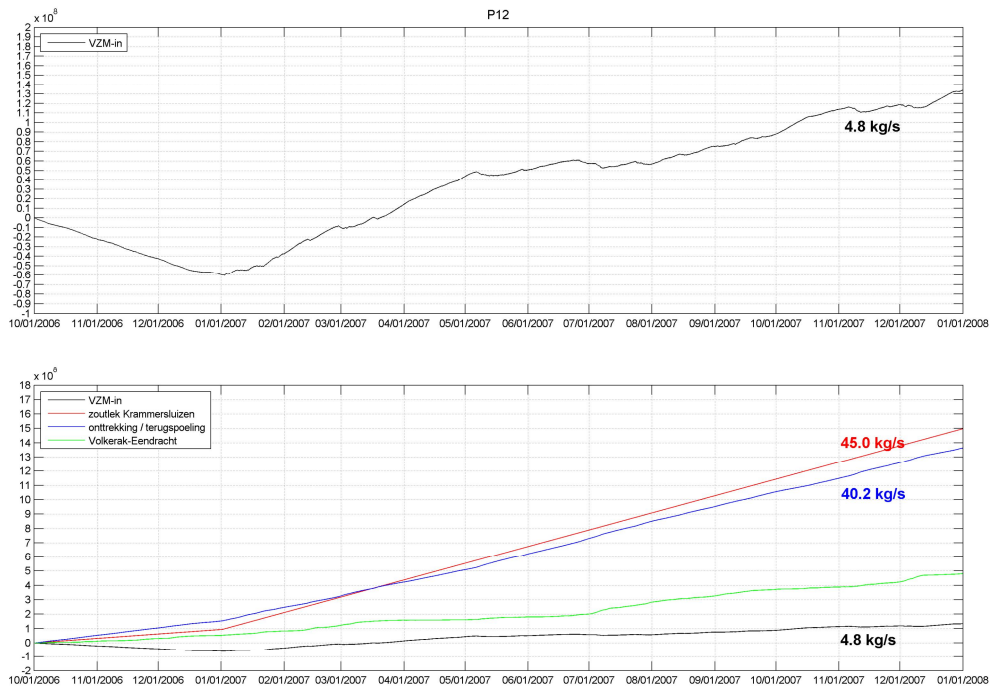
E.1 Zouttransporten P07



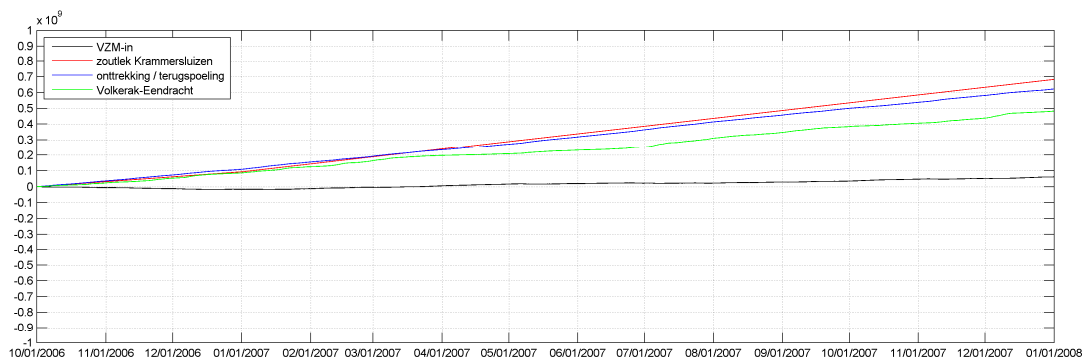
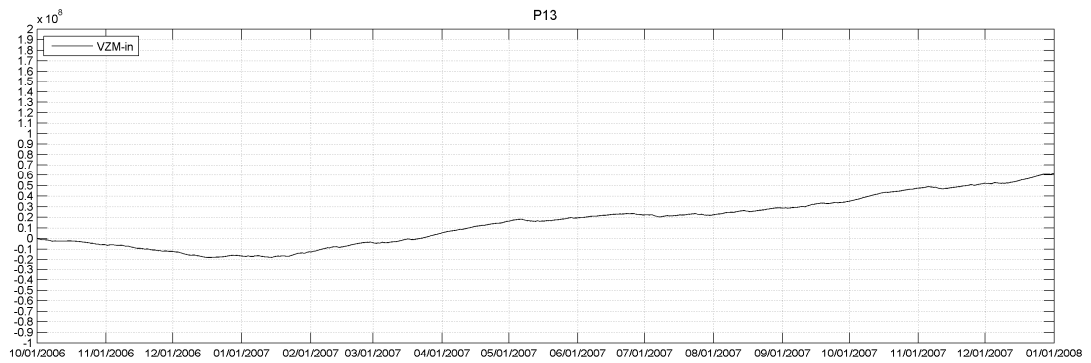
E.2 Zouttransporten P09



E.3 Zouttransporten P12



E.4 Zouttransporten P13



F Krammersluizencomplex, simulaties met het dynamisch zoutlekmodel

Auteur: dr.ir. R.E. Uittenbogaard

Deze bijlage beschrijft de simulaties met het dynamisch zoutlekmodel voor zowel de duwvaartsluizen als de jachtensluizen van het Krammersluizencomplex. De simulaties van de beschreven cases werden uitgevoerd in januari 2012. Meer achtergrondinformatie is te vinden in Uittenbogaard en Cornelisse (2012).

F.1 Inleiding

Het Krammersluizencomplex is een uniek ontwerp gericht op minimale zoutlek vanuit de Oosterschelde (OS) naar het westelijke deel van het Krammer-Volkerak (verder aangeduid als KV). Voordat een kolk naar het KV wordt geopend wordt zijn zoute inhoud door zoet KV-water vervangen. Daartoe stroomt, via wandschuiven hoog in de zijwanden van de kolk, langzaam en verdeeld zoet water uit het KV de kolk in terwijl zijn volume via de bodem wordt onttrokken. Zonder menging door het zout/zoet-scheidingsvlak en wanneer het gehele kolkvolume is verwisseld wordt de kolk volledig zoet en zal er geen zout naar het KV lekken.

Hoewel in eerdere rapporten over uitwisselen wordt gesproken noemen we voornoemd proces het “verwisselen” van het kolkvolume met zoet water. Het begrip “uitwisselen” hanteren we voor de zout-zoet uitwisseling door geopende sluisdeuren. In de jachtensluizen onttrekt een gemaal het kolkvolume, in de duwvaartsluizen stroomt water via de geperforeerde kolkvloer naar een lager gelegen bekken. Een deel van het zoete water waarmee het zoutere kolkvolume is verwisseld, wordt of kan worden terug gewonnen door vervolgens de kolk tot een zekere geringe diepte, maar dieper dan de onderzijde van de wandschuiven, met zout water te vullen en het zoete water via de wandschuiven naar de voorhavens aan de KV-zijde te stuwen. Het daarvoor benodigde zoute water wordt geleverd uit een zg. hoog bekken dat vanuit het laag bekken met gemalen op peil wordt gehouden. De functie van het laag bekken en het hoog bekken is om sneller dan redelijkerwijs mogelijk met gemalen het proces van verwisselen uit te voeren en de wachttijd voor de scheepvaart te beperken hoewel deze tijd toch als lang wordt ervaren.

Door het verwisselen stroomt er door de kolken een debiet aan zoet water welke daggemiddeld ca. 9 m³/s bedraagt. We zouden kunnen stellen dat dit ontwerp van het Krammersluizencomplex de perfectie is van de “methode van lekkende ebdeuren” welke alleen bij laagwater werkt. In een eerdere rapportage over de Krammersluizen wordt gesproken over “spoeldebiet” en dat begrip zullen we hier wél over nemen.

F.2 Voorgestelde toekomstige situatie

De wandschuiven en sluisdeuren zijn na 25 jaar aan groot onderhoud toe. Tevens blijkt de totale schuttijd door het trage verwisselen van de kolkvolumina de doorgang van scheepvaart steeds meer te hinderen. Als remedie wordt daarom overwogen (i) de wandschuiven niet meer te gebruiken, (ii) het verwisselen achterwege te laten en (iii) de sluisdeuren aan KV-zijde van eenvoudige rinketschuiven te voorzien.

In overleg met RWS is het volgende afgesproken. Teneinde de zoutlek te beperken worden luchtbellenschermen eventueel ondersteund met waterschermen aan de (zoute) OS-zijde en buiten de kolk overwogen. Ook aan de KV-zijde en buiten de kolk worden luchtbellenschermen overwogen. De positie van deze laatste schermen verlaagt niet optimaal de zoutlek maar hindert niet het afmeren in de kolken.

Voor een verdere verlaging van de zoutlek wordt opnieuw een spoeldebiet overwogen welke met de beschikbare installaties (gemalen en bekkens) zo vaak als mogelijk wordt ingezet. Zodra het kolkpeil gelijk of lager is dan het KV-peil wordt via ten dele geopende rinketschuiven het spoeldebiet de kolk ingezogen en via gemaal of lage bekkens uit de kolken onttrokken.

Deze bijlage presenteert de zoutlek volgens voorgaande overwegingen. Daartoe wordt gebruik gemaakt van het zogenaamde dynamisch zoutlekmodel dat met tijdstappen van 5 seconden over vele dagen de schutcycli nabootst en de zoutlek berekent bij gegeven getij en zoutgehalte aan de OS-zijde. Aanvankelijk zijn veel cases berekend waarvan case-nummer 09 overbleef. Om misverstanden te voorkomen hanteren we vooralsnog deze nummering, voorafgegaan door "D" voor de duwvaartsluizen en "J" voor de jachtensluizen.

F.3 Duwvaartsluizen

Dhr. L. Dekker (RWS, Dienst Zeeland) leverde histogrammen van de deur-open tijden aan de Oosterschelde (OS) zijde en aan de Volkerak-Zoommeer (KV) zijde van de twee duwvaartsluizen. Voor schutten naar de OS-zijde bedraagt deze 30 minuten en naar de KV-zijde 31,5 minuten. We ronden dit af op gemiddeld 31 minuten per zijde. Deze tijden zijn inclusief de tijden voor openen (4 minuten) en sluiten (4 minuten) van de sluisdeuren. In de termen van onderstaande Tabel F.1 bedraagt de tijd beschikbaar voor in- en uitvaren dan $31-8=23$ minuten.

Tabel F.1. Gemiddelde tijd schutcyclus Krammer-duwvaartsluis: $51 + 45 = 96$ minuten.

OS→KV	Duur (min.)	KV→OS	Duur (min.)
Nivelleren	5	Nivelleren	8
Verwisselen	15	Verwisselen	6
Deur open	4	Deur open	4
Uit- en invaren	23	Uit- en invaren	23
Deur dicht	4	Deur dicht	4
Totaal	51	Totaal	45

Momenteel houdt het dynamisch zoutlekmodel nog geen rekening met het afwijkende zoutgehalte van de hoge en lage bekkens waarmee de schutschijf wordt uitgewisseld. Analoog aan de jachtensluizen veronderstellen we thans dat de schutschijf wordt aangevuld met OS-water en met een debiet dat we thans schatten op $47 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze schatting is niet van belang voor de zoutlek maar alleen voor de nivelleertijden en het maximale aantal schuttingen per dag.

Het onttrekken van een spoeldebiet naar het lage bekken zal het zoutgehalte in het lage bekken verlagen t.o.v. het zoutgehalte in de OS. De pompen die het water uit het lage bekken naar het hoge bekken opvoeren zullen dus ook het zoutgehalte in het hoge bekken verlagen t.o.v. het zoutgehalte in de OS. Het hoge bekken levert water aan de kolk wanneer de schutschijf tijdens hoogwater wordt verhoogd tot het peil van de OS teneinde naar de OS te kunnen schutten.

Tabel F.2. Krammer-duwvaartsluis; invoergegevens voor het dynamisch zoutlekmodel.

Duwvaartsluis	dimensie	
Aantal kolken verbonden met één voorhaven		2
Lengte kolk	m	280
Breedte kolk	m	24
Bodem kolk	m	-11
Geperforeerde vloer	m	-6,25
Drempel OS	m NAP	-6,25
Drempel KV	m NAP	-6,25
Diepte spronglaag t.o.v. en onder drempel	m	0,5
Oppervlak kolk	m ²	6.720
Volume kolk boven OS drempel t.o.v. NAP	m ³	42.000
Volume kolk boven KV drempel t.o.v. NAP	m ³	42.000
Lengte OS voorhaven	m	1.400
Breedte OS voorhaven	m	400
Breedte monding OS voorhaven	m	200
Diepte monding OS voorhaven	m NAP	-7,0
Diepte monding OS voorhaven bij sluisdeuren	m NAP	-6,3
Lengte KV voorhaven	m	1.400
Breedte KV voorhaven	m	400
Breedte monding KV voorhaven	m	200
Diepte monding KV voorhaven	m NAP	-7,5
Diepte monding KV voorhaven bij sluisdeuren	m NAP	-7,1
Saliniteit OS-zijde	psu	29
Saliniteit KV-zijde	psu	0,0
Doorlaatcoëfficiënt KV rinketschuiven	-	1,0
Tijd volledig openen rinketschuiven	min.	2,0
Oppervlak KV rinketschuiven	m ²	20 ⁽⁴⁾
Duur openen en sluiten sluisdeuren ⁽¹⁾	min.	4
Opentijd voor uit- en invaren schepen ⁽²⁾	min.	24
Aantal Schuttingen	/dag	16
Vershil waterstand openen sluisdeuren	m	0,1
Wachttijd omschakelen deur dicht – rinket open	min.	3
Pompdebiet kolk <-> bekken	m ³ /s	47 ⁽³⁾
Waterstand OS volgens Krammerwest, 2011		per 10 min.
Waterstand KV	m NAP	0,0

⁽¹⁾ Openen van de sluisdeuren wordt gesimuleerd, sluiten gebeurt abrupt op de helft van deze sluitduur.

⁽²⁾ Volledig geopende sluisdeuren, zie Tabel F.1.

⁽³⁾ Oppervlak duwvaartsluis is ca. 10 maal groter dan jachtensluis, bij dezelfde nivelleertijd komt het debiet voor verwisselen van het kolkvolume op ca. 47 m³/s.

⁽⁴⁾ Oppervlak duwvaartsluis is ca. 10 maal groter dan jachtensluis, bij dezelfde nivelleertijd zou het rinket-oppervlak op 20 m² komen.

Merk op dat in de toekomstige situatie het verhogen van de schuttschijf (bij laagwater) naar het KV-peil plaats vindt met zoet water via de rinketschuiven in de KV-sluiseuren. Het verlaagde zoutgehalte in de bekkens lijkt dus marginale invloed op de zoutlek te hebben omdat hun inhoud alleen wordt benut voor het aanvullen van de schuttschijf voorafgaand aan een schutting naar de OS-zijde. Deze wat minder zoute schuttschijf (t.o.v. gemaal in de

jachtensluizen) wordt nu met de OS uitgewisseld en verlaagt a priori niet de zoutlek naar het KV.

Kortom, de rol van de bekkens lijkt marginaal voor de zoutlek wanneer de rinketschuiven in de KV-sluisdeuren bestaan en tijdens laagwater werken. De bekkens en hun pompen hebben dan vooral invloed op de nivelleertijd omdat onder vrij verval van of naar de bekkens sneller water verplaatst kan worden dan met de geïnstalleerde pompen.

De conclusie luidt dat de schatting van de zoutlek met het huidige dynamisch zoutlekmodel dat met een gemaal gekoppeld aan de OS werkt i.p.v. bekkens alleen om deze reden nauwelijks overdreven wordt. Blijft staan de overschatting doordat het dynamisch zoutlekmodel met volumegemiddeld zoutgehalte rekent en niet met een eventuele zout/zoet-spronglaag in de kolk.

Tabel F.3. Cases onderzoek beperken zoutlek door twee Krammer-duwvaartsluizen, gemiddelde waarden over 13,6 dagen en 218 schuttingen, zonder invloed scheepvaart, 23 minuten opentijd, zie Tabel F.1.

Case	Toelichting Duwvaartsluizen	Detail per kolk	η OS	η KV	zout kg/s	zoet m ³ /s	schutting /dag/kolk
D00	Referentie: alle deuren rinketschuiven	10 m ²	1,0	1,0	318	1,3	16
D01	OS-zijde bekkens ; KV-zijde rinketschuiven	47 m ³ /s	1,0	1,0	299	1,3	16
D09	Spoeldebiet; water- & bellenscherm OS-zijde; bellenscherm & rinketschuiven KV-zijde	5 m ³ /s	0,15	0,25	17	17	16

Δ -Luchtbellenschermen buiten kolk OS-zijde

Δ -Luchtbellenschermen binnen kolk KV-zijde tegen drempel

Δ -Lucht- & waterschermen buiten kolk OS-zijde, met 3,6 m³/s per waterscherm (referentie 1,6 m³/s per 14*4,7 m² kolkdoorsnede van Stevinsluis)

Luchtbellenscherm 25m buiten kolk in KV-voorhaven, hogere doorlaatfractie en 25m verlies brak deel tussen KV-sluisdeuren en bellenscherm.

Spoeldebiet 5 m³/s met gemaal onttrekken als kolkpeil gelijk of lager is KV-peil en toevoer via deels geopende rinketschuiven in KV-sluisdeuren (vergt geen extra pomp). Naar rato (1: 4,5) dwarsdoorsnede kolk t.o.v. jachtensluis bedraagt het spoeldebiet nu 4,5 m³/s bij dezelfde gemiddelde transportsnelheid van zoet water door de kolk.

De gekozen, gedeeltelijke opening van de rinketschuiven aan één kolkeinde is 0,25 (25%) voor het toepassen van een spoeldebiet.

Teneinde dezelfde nivelleertijd te bereiken schatten we voor de duwvaartsluizen het benodigde oppervlakken van de rinketschuiven op 10 m² per kolk.

Aan de OS-zijde staan de Δ -luchtbellen- en waterschermen buiten de kolken en deze schermen beperken de zout/zoet-uitwisseling tot 15% (η in Tabel F.3). Aan de KV-zijde staan de Δ -luchtbellenschermen 25m buiten de kolken en deze schermen beperken de zout/zoet-uitwisseling tot 25% (η in Tabel F.3). De zoutlek is groter doordat deze 25m niet met schermen wordt beschermd maar deze schermen hinderen nu niet het afmeren in de kolken zelf.

Voor de duwvaartkolken levert elk werkend waterscherm 3,6 m³/s gebaseerd op de ervaring met 1,6 m³/s per 14 x 4,7 m² kolkdoorsnede in de Stevinsluis.

De diepte van de OS-voorhaven van de duwvaartsluizen voor de sluisdeuren van NAP-6,3 m volgt uit de lodingskaart (Rijkswaterstaat Zeeland, Krammersluis, stortebed West, kaartnr. A1-11-133, opnameperiode 16-02-2011).

F.4 Jachtensluizen

Tabellen F.4 en F.5 vatten de gegevens samen voor de berekening van de zoutlek van de Krammer-jachtensluizen met het dynamisch zoutlekmodel. In de huidige situatie wordt een gemaal toegepast voor het nivelleren en de zout/zoet-verwisseling van het kolkvolume. In de voorgestelde toekomstige situatie blijft het gemaal bestaan maar worden de sluisdeuren aan KV-zijde van rinketschuiven voorzien. In de voorgestelde toekomstige situatie wordt een spoeldebiet met het gemaal en gedeeltelijk geopende rinketschuiven ingesteld zodra het kolkpeil gelijk of lager is dan het KV-peil.

Tabel F.4. Gemiddelde tijd schutcyclus Krammer-jachtensluis: 35 + 30 = 65 minuten.

VZM	Duur (min.)	OS	Duur (min.)
Nivelleren	4	Nivelleren	2
Uitwisselen	8	Uitwisselen	5
Deur open	4	Deur open	4
Uit- en invaren	15	Uit- en invaren	15
Deur dicht	4	Deur dicht	4
Totaal	35	Totaal	30

Tabel F.5. Krammer-jachtensluizen; invoergegevens voor het dynamisch zoutlekmodel.

Jachtensluis	dimensie	
Aantal kolken verbonden met één voorhaven		2
Lengte kolk	m	75
Breedte kolk	m	9,1
Bodem kolk	m NAP	-6,9
Drempel OS	m NAP	-3,7
Drempel KV	m NAP	-2,7
Diepte spronglaag t.o.v. en onder drempel	m	0,5
Oppervlak kolk	m ²	682,5
Volume kolk boven OS drempel t.o.v. NAP	m ³	2525
Volume kolk boven KV drempel t.o.v. NAP	m ³	1843
Volume kolk onder OS drempel	m ³	2184
Volume kolk onder KV drempel	m ³	2867
Lengte OS voorhaven	m	400
Breedte OS voorhaven	m	100
Breedte monding OS voorhaven	m	50
Diepte monding OS voorhaven	m NAP	-5,7
Lengte KV voorhaven	m	1000
Breedte KV voorhaven	m	100
Breedte monding KV voorhaven	m	100
Diepte monding KV voorhaven	m NAP	-3,5
Saliniteit OS-zijde (zie Figuur 2.1)	psu	29
Saliniteit KV-zijde	psu	0,1

Doorlaatcoëfficiënt KV rinketschuiven	-	1,0
Oppervlak KV rinketschuiven (zie hoofdtekst)	m ²	2,0
Jachtensluis	dimensie	
Opentijd voor uit- en invaren schepen	min.	19
Aantal Schuttingen	/dag	16
Verschil waterstand openen sluisdeuren	m	0,1
Wachttijd omschakelen deur dicht – rinket open	min.	3
Pompdebiet kolk <-> OS	m ³ /s	5,0
Waterstand OS volgens Krammerwest, 2011		per 10 min.
Waterstand KV	m NAP	0,0

Tabel F.6. Cases onderzoek beperken zoutlek door twee Krammer-jachtensluizen, gemiddelde waarden over 13,6 dagen en 218 schuttingen, zonder invloed scheepvaart, 15 minuten opentijd, zie Tabel F.4.

Case	Toelichting Jachtsluizen	Detail Per kolk	η OS	η KV	zout kg/s	zoet m ³ /s	schutting /dag/kolk
J00	Referentie: alle deuren rinketschuiven	2 m ²	1,0	1,0	37	0,13	16
J01	OS-zijde gemaal ; KV-zijde rinketschuiven	5 m ³ /s	1,0	1,0	35	0,13	16
J09	Spoeldebiet; water- & bellenscherm OS-zijde b ellenscherm & rinketschuiven KV-zijde	1 m ³ /s	0,15	0,25	2,0	2,2	16

Δ -Luchtbellenschermen buiten kolk OS-zijde

Δ -Luchtbellenschermen binnen kolk KV-zijde tegen drempel

Δ -Lucht- & waterschermen buiten kolk OS-zijde, met 0,8 m³/s per waterscherm (referentie 1,6 m³/s per 14*4,7 m² kolkdoorsnede-Stevinsluis)

Spoeldebiet 1 m³/s met gemaal en deels geopende rinketschuiven als kolkpeil gelijk of lager is KV-peil.

Luchtbellenscherm 10m buiten kolk in KV-voorhaven, hogere doorlaatfractie en 10m verlies brak deel tussen KV-sluisdeuren en bellenscherm.

Spoeldebiet 1 m³/s met gemaal onttrekken als kolkpeil gelijk of lager is KV-peil en toevoer via deels geopende rinketschuiven in KV-sluisdeuren.

F.5 Voorlopige conclusies

Voor Case D09 bedraagt de zoutlek **17 kg/s** voor beide duwvaartsluizen mogelijk zonder hinder van scheepvaart in de kolk. Voor de jachtensluizen geeft Case J09 **2 kg/s**, zodat het Krammersluizencomplex totaal **19 kg/s** (2+17) zoutlek aan het KV levert bij 16 schutcycli/dag en 19,2 m³/s verbruik van water uit de KV.

Wanneer de schutcyclus tot hun maximum worden opgevoerd (van 16 naar ca. 23-25 schuttingen/dag) zal de zoutlek nog wat sterker dan proportioneel toenemen omdat de stille perioden tussen opeenvolgende schuttingen waarin het spoeldebiet de kolk verzoet dan bijna verdwijnen.

Latere toevoeging: Voornoemde zoutlek is gebaseerd op de veronderstelling dat het westelijk deel van het Volkerak, hier Krammer-Volkerak genoemd, volledig zoet is. Echter, in de huidige situatie heeft het KV een chloride-concentratie van ca. 500 mg/l oftewel ca. 0,90 psu zoutgehalte. Bij 19,2 m³/s verbruik van water uit de KV zou dan 17,3 kg/s uit de KV worden

onttrokken zodat de Krammersluizen in de voorgestelde toekomstige situatie nauwelijks (19-17,2=1,8 kg/s) zoutlek zouden leveren.