

Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbepierking Volkeraksluizen

**Beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en
evaluatie maatregelen Stevinsluis**

1201226-005

Titel

Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen
 Beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1201226-005	1201226-005-ZKS-0007	161
Classificatie			
vertrouwelijk tot juni 2011			

Trefwoorden

Stevinsluis, zoutindringing, praktijkproef, zoutlekbeperkende maatregelen, luchtbellenscherm, waterscherm, drempel, lekkende ebdeuren.

Samenvatting

Het voorliggende rapport beschrijft de praktijkproef in de Stevinsluis te Den Oever (Afsluitdijk) die van 1 april tot 27 mei 2010 plaatsvond als onderdeel van de 'Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen'. In deze periode zijn meerdere proeven met verschillende (combinaties van) zoutlekbeperkende maatregelen zoals water- en luchtbellenschermen, verhoogde drempel en zoetwaterdebiet (methode lekkende ebdeuren) uitgevoerd. Het doel van de proeven was de effectiviteit – uitgedrukt als 'doorlaatfractie' – van verschillende (combinaties van) zoutlekbeperkende maatregelen te bepalen. Tevens is de effectiviteit van de bestaande luchtbellenschermen in de Stevinsluis bepaald.

Deze effectiviteit is nodig in een volgende stap van de studie, als berekeningen uitgevoerd worden om advies te geven over maatregelen die in de Volkeraksluizen kunnen worden geïmplementeerd om de zoutlek naar het Hollandsch Diep te beperken als het Volkerak-Zoommeer zout is.

Tijdens de praktijkproeven is de zoutmassa in de sluis kolk continue bepaald op basis van gemeten zoutconcentraties op 25 lokatie's (in vijf verticalen) langs de kolkwand. Verder is de zoutconcentratie in beide voorhavens gemeten en zijn waterstanden in de kolk en in beide voorhavens continue gemeten.

De belangrijkste conclusies zijn:

- Er zijn meerdere combinaties van zoutlekbeperkende middelen die in potentie niet meer dan 25 % van de ongeremde zout-zoet uitwisseling doorlaten.
- De bestaande luchtbellenschermen van de Stevinsluis laten 40-50% van de ongeremde zout-zoet uitwisseling door.
- De klassieke 'lekkende ebdeuren' methode, waarin de sluis kolk met zoetwater wordt doorspoeld, beperkt effectief de zoutlek.
- Ook het gebruik van zoet water via een waterscherm aan de zeezijde beperkt de zoutlek. Een waterscherm in combinatie met het nieuwe Δ -luchtbellenscherm heeft een hogere effectiviteit dan een water- of luchtbellenscherm afzonderlijk.
- De gewaarschuwde scheepvaart bleek geen hinder van de luchtbellenschermen en waterschermen te ondervinden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf Review	Paraaf Goedkeuring	Paraaf
1	juli 2010	dr. ir. R.E. Uittenbogaard ir. J.M. Cornelisse	ir. T.H.G. Jongeling	ir. T. Schilperoort	
2	okt 2010	dr. ir. R.E. Uittenbogaard ir. J.M. Cornelisse	ir. T.H.G. Jongeling	ir. T. Schilperoort	
3	april 2011	dr. ir. R.E. Uittenbogaard ir. J.M. Cornelisse	ir. T.H.G. Jongeling	ir. T. Schilperoort	

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Beknopt overzicht van het project	1
1.3	Activiteiten en deeltaken	4
1.4	Overzicht van producten van het project	5
1.5	Dit rapport	6
1.6	Dankwoord	6
2	De werking van en zoutlek door een schutsluis	9
2.1	Mechanisme van zoutlek	9
2.2	Schutting naar zoute zijde	10
2.3	Schutting naar zoete zijde	13
2.4	Zoutlek door nivelleren	14
2.5	Verandering van zoutmassa in de kolk tijdens schuttingen	15
2.6	Invloed scheepvaart op zout-zoet uitwisseling	19
2.7	Methode van lekkende ebdeuren	23
2.8	De zoutlek-beperkende werking van een luchtbellenscherm	27
3	Beschrijving Praktijkproef	31
3.1	Doelstelling	31
3.2	De Stevinsluis met zoutlekbeperkende middelen	31
3.3	Bodem en zout rondom de Stevinsluis	38
3.4	Grondslag analyse praktijkproeven Stevinsluis	44
3.5	Invloed van zoutlekbeperkende middelen op de zoutlek	46
3.6	Toegepaste methode van analyse	49
3.7	Voorbeelden van schutting naar Waddenzee en naar IJsselmeer	50
3.8	Demonstratie toegepaste analyse	66
3.9	Invloed scheepvaart op verandering zoutmassa van onbeschermdde kolk	72
3.10	Referentie verandering zoutmassa van onbeschermdde kolk	74
4	Het meetprogramma en de resultaten	77
4.1	Inleiding	77
4.2	De zoutlekbeperkende middelen en programma van waarnemingen	77
4.3	De doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen	81
4.3.1	Extra, hogere drempel	83
4.3.2	S-luchtbellenschermen met wel / niet extra, hogere drempel	83
4.3.3	Δ -waterschermen en/of Δ -luchtbellenschermen en wel / niet extra, hogere drempel	87
4.3.4	Lekkende ebdeuren	87
4.4	Het zouttransport tijdens geopende kolk	92
4.4.1	Inleiding	92
4.4.2	Drempelhoogte 1,18m boven kolkvloer	96
4.4.3	Luchtbellenschermen en zonder/met extra, hogere drempel aan meerzijde	98
4.4.4	Waterschermen en zonder/met Δ -luchtbellenschermen aan zeezijde	108
4.4.5	Samenvatting	114
5	Discussie, Conclusies en Aanbevelingen	119

5.1	Discussie	119
5.1.1	Variaties in de waarnemingen	119
5.1.2	Doorlaatfractie van luchtbellenschermen, theorie en grenswaarden	121
5.1.3	Locatie luchtbellens/waterschermen t.o.v. sluisdeuren	123
5.1.4	Meting met ADCP	124
5.1.5	Scheepvaart	126
5.1.6	Extra, hoge drempel aan meerszijde in de kolk	128
5.1.7	Keuze uit de beste zoutlekbeperkende middelen, zonder methode lekkende ebdeuren.	131
5.1.8	Zoetwaterverlies of gebruik van verzilt water?	136
5.2	Conclusies	137
5.3	Aanbevelingen	139
6	Adviezen beperken zoutlek Stevinsluis	141
6.1	Inleiding	141
6.2	Invloed operationele parameters op de zoutlek door de schutsluis.	142
6.3	Overwegingen voor minimale zoutlek zonder fysieke aanpassingen	150
6.4	Overwegingen voor minimale zoutlek met fysieke aanpassingen	152
6.5	Conclusies	157
6.6	Aanbevelingen	158
7	Referenties	161
Bijlage(n)		
A	Theorie zouttransport door schutsluis	A-1
A.1	Inleiding	A-1
A.2	Zouttransport door schutsluis	A-1
B	Theorie doorlaatfractie van luchtbellenscherm	B-1
B.1	Inleiding	B-1
B.2	Theorie reductie zoutlek door luchtbellenschermen	B-1
C	Definitie zoutmassa, tijdschaal en theoretische schatters	C-1
D	Analyse methode lekkende ebdeuren	D-1
E	Waterverplaatsing door schroefstraal van schip	E-1

Uitgebreide samenvatting

Dit rapport beschrijft de praktijkproef in de Stevinsluis te Den Oever welke vanaf 31 maart tot 27 mei 2010 plaatsvond als onderdeel van de 'Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen'.

Introductie

Om een advies te geven over maatregelen die de zoutlek door de Volkeraksluizen voldoende beperken, wordt het Zoutlekmodel toegepast. Het Zoutlekmodel berekent het zouttransport (in kg/s) door een scheepvaartsluis, al dan niet met inzet van zoutlekbeperrkende maatregelen. De effectiviteit van maatregelen wordt in het Zoutlekmodel vertegenwoordigd door de zogenaamde *doorlaatfractie* parameter. Van traditionele luchtbellenschermen (dat wil zeggen geperforeerde buizen) is voor de doorlaatfractie weliswaar een semi-empirische theorie ontwikkeld en in schutsluizen zonder scheepvaart getoetst (Abraham & V.d. Burgh, 1962), maar deze doorlaatfractie is niet bekend voor andere zoutlekbeperrkende middelen noch voor andere ontwerpen van luchtbellenschermen.

Doelstelling

De eerste doelstelling van de praktijkproeven in de Stevinsluis is om de effectiviteit (doorlaatfractie) van verschillende zoutlekbeperrkende maatregelen in een werkende schutsluis te bepalen. Een tweede doelstelling is het verzamelen van meetgegevens die het mogelijk maken om het Zoutlekmodel te valideren voor het zouttransport door een schutsluis zonder de inzet van zoutlekbeperrkende maatregelen.

De onderzochte maatregelen zijn:

- Traditionele luchtbellenscherm – ook S-luchtbellenscherm genoemd
- Innovatief luchtbellenscherm – ook Δ -luchtbellenscherm genoemd
- Waterscherm, wel of niet in combinatie met een luchtbellenscherm
- Drempel
- Extra zoetwaterdebiet door de kolk (zg. methode lekkende ebdeuren)

De metingen en de ervaringen opgedaan met de proeven in de Stevinsluis moeten voldoende informatie leveren om een advies voor zoutlekbeperrkende maatregelen voor de Volkeraksluizen te geven.

Keuze voor de Stevinsluis

De Stevinsluis werd gekozen als locatie voor de praktijkproef omdat het nu een zoet-zout overgang vormt tussen de Waddenzee en het IJsselmeer. De kolk van de Stevinsluis komt overeen met de kolken van de Volkeraksluizen in de wijze waarop het kolkpeil wordt genivelleerd (dat wil zeggen via rinketschuiven in de sluisdeuren) en door het kenmerkende verschil in zoutgehalte van circa 20 ppt.

Het getij bij de Stevinsluis levert inzicht in de invloed van peilvariaties op de zoutlek. Variaties in het zoutgehalte als gevolg van het wisselend spuiregim (IJsselmeerwater via spuisluizen in Afsluitdijk, polderwater via gemaal Leemans) bieden inzicht in de invloed van het zoutgehalte op de zoutlek. De Stevinsluis is voorzien van werkende luchtbellenschermen bestaande uit geperforeerde buizen, een systeem dat vroeger ook in de Volkeraksluizen werd gebruikt. Dit gaf de mogelijkheid om de innovatieve Δ -luchtbellenschermen van Deltares te vergelijken met de traditionele S-luchtbellenschermen van de Stevinsluis.

Aanpak en meetopstelling

Aan zowel de Waddenzeezijde als aan de IJsselmeerzijde van de sluis is een stalen frame geplaatst. Het frame aan de Waddenzeezijde bevat een Δ -luchtbellenscherm en een waterscherm. Het frame aan de IJsselmeerzijde bevat alleen een Δ -luchtbellenscherm. De innovatieve Δ -luchtbellenschermen bestaan uit twee rijen met onderling versprongen diffusers ("douchekoppen") van circa 20 cm doorsnede. Beide frames bevatten de mogelijkheid om aanvullend een drempel te plaatsen. De toevoerleidingen voor lucht naar het Δ -luchtbellenscherm en voor water naar het waterscherm liepen door de beschikbare schotbalkspanningen. Het water werd ingenomen uit de voorhaven aan de IJsselmeerzijde.

De kern van de praktijkproef was het continu opnemen van (de variatie van) het zoutgehalte in de Stevinssluis. De meetopstelling bestond uit:

- Saliniteit in de sluis: Vijf verticale profielen elk met vijf sensoren.
- Saliniteit in de Waddenzee voorhaven: Eén verticaal profiel van vijf sensoren
- Saliniteit in de IJsselmeer voorhaven: Eén verticaal profiel van vijf sensoren
- Waterstand in de sluis en in beide voorhavens (totaal 3 sensoren)
- Stand van de sluisdeuren, open of dicht
- Stand van de rinketschuiven
- Luchtdebiet van het Δ -luchtbellenscherm
- Waterdebiet van het waterscherm
- Periode van werkende compressoren van het S-luchtbellenscherm
- Scheepvaartverkeer (handmatig bijgehouden, video, officiële registratie)

De vijf verticalen in de sluis tonen niet alleen de positie en grootte van de zouttong, maar geven geïntegreerd over het watervolume van de kolk de zoutmassa. Uit het verloop van de zoutmassa in de tijd is de zoutlek af te leiden. En door schuttingen met en zonder zoutbeperkende middelen is tenslotte de effectiviteit van zoutbeperkende middelen te achterhalen.

Verschillende luchtdebieten (van 100 tot 450 l/s) en een tweetal zoetwaterdebieten (900 en 1600 l/s) zijn onderzocht, naast de traditionele luchtbellenschermen (125 l/s en 250 l/s) van de Stevinssluis.

Het bleek nodig de zoetwaterlozingen door de spuissluis en door het gemaal zo veel mogelijk om te leiden, omdat het zoutgehalte aan de Waddenzeezijde anders te laag was voor een effectieve proef. Door deze omleiding varieerde het zoutgehalte in de zoute voorhaven tussen 15 en 20 ppt.

De praktijkproef vond plaats tijdens alle getijfasen en terwijl de schutsluis in normaal bedrijf was. In overleg met de sluismeester zijn 15 minuten lange openingstijden van de sluisdeuren gehanteerd om in verhouding te blijven met de openingstijden (25-30 minuten) van de langere en diepere Volkeraksluizen.

Resultaten

Van 31 maart tot 27 mei 2010 zijn in totaal 844 schuttingen en 22 (combinaties van) zoutlekbeperkende maatregelen bemeten. Per schutting is de zoutlek (in ton) berekend uit de metingen. Voor iedere schutting is daarnaast de theoretische schatting bepaald van wat de zoutlek zou zijn geweest zonder zoutlekbeperkende middelen. Uit de theoretische schatting en de gemeten zoutlek is vervolgens direct de doorlaatfractie te bepalen. Tabel 1 geeft een overzicht van schuttingen, de (combinaties van) zoutlekbeperkende maatregelen en de bepaalde doorlaatfractie.

Tabel 1 Overzicht en samenvatting van analyse van onderzochte (combinaties van) zoutlekbeperkende middelen bij geopende sluisdeuren naar zeezijde (boven) en naar meerzijde (onder) met definitie en naamgeving van de onderzochte varianten. De hellingshoek is een maat voor de doorlaatfractie, de correlatiecoëfficiënt r^2 voor de betrouwbaarheid van de gevonden doorlaatfractie. Nl/s is het door compressoren ingezogen luchtdebiet onder normale atmosferische omstandigheden, in de tekst gemakshalve l/s genoteerd.

Zee-zijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nl/s]	Water [l/s]	Aantal schuttingen	Hellingshoek (doorlaatfractie)	r^2
1	Onbeschermd kolk	0	0	157	0,99	0,94
2	S-luchtbellenscherm	103	0	97	0,73	0,70
3	S-luchtbellenscherm	246	0	76	0,48	0,73
4	Δ -luchtbellenscherm	144	0	1	-	-
5	Δ -luchtbellenscherm	207	0	28	0,25	0,77
6	Δ -luchtbellenscherm	431	0	15	0,23	0,76
7	Δ -luchtbellen- & waterscherm	94	1543	9	0,46	0,98
8	Δ -luchtbellen- & waterscherm	221	889	8	0,00	0
9	Δ -luchtbellen- & waterscherm	227	1479	7	0,57	0,82
10	Δ -luchtbellen- & waterscherm	411	1523	16	0,07	0,33
11	Δ -waterscherm	0	860	7	0,14	0,31
12	Δ -waterscherm	0	1505	10	0,56	0,77
13	Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenscherm	123	0	7	0,13	0,50

Meer-zijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nl/s]	Water [l/s]	Aantal schuttingen	Hellingshoek (doorlaatfractie)	r^2
1	Onbeschermd kolk	0	0	144	0,96	0,96
2	Verhoogde drempel	0	0	64	0,78	0,95
3	S-luchtbellenscherm	103	0	78	0,60	0,90
4	S-luchtbellenscherm	245	0	36	0,38	0,89
5	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	99	0	17	0,41	0,77
6	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	248	0	51	0,27	0,88
7	Δ -luchtbellenscherm	241	0	28	0,20	0,72
8	Δ -luchtbellenscherm	439	0	23	0,21	0,85
9	Δ -luchtbellenscherm & verhoogde drempel	103	0	8	0,47	0,92
10	Δ -luchtbellenscherm & verhoogde drempel	201	0	6	0,24	0,91
11	Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenscherm	187	0	11	0,07	0,08

Conclusies

Uit de metingen volgt dat er meerdere combinaties van zoutlekbeperkende middelen zijn die in potentie niet meer dan 25 % van de ongeremde zout-zoet uitwisseling doorlaten (doorlaatfractie < 0,25). De bestaande luchtbellenschermen van de Stevinluis laten 40-50% van de ongeremde zout-zoet uitwisseling door.

Voor de Stevinsluis geven de volgende combinaties de laagste zoutlek:

- Aan de zeezijde:
 - een 1600 l/s waterscher¹ gevoed met zoet water in combinatie met het innovatieve Δ -luchtbellenscherm met 100 l/s; én
 - bij grotere verschillen in zoutgehalte over het scherm: een 1600 l/s waterscher¹ gevoed met 400 l/s luchtdebiet;
- Aan de meerzijde:
 - het innovatieve Δ -luchtbellenscherm met 100 l/s geplaatst achter een 1,2 m hoge drempel; én
 - bij grotere verschillen in zoutgehalte over het scherm: het innovatieve Δ -luchtbellenscherm met 200 l/s luchtdebiet geplaatst achter een 1,2 m hoge drempel; óf het innovatieve Δ -luchtbellenscherm zonder drempel met 440 l/s luchtdebiet;

De innovatieve luchtbellenschermen blijken zonder drempel bij tenminste 200 l/s goed bestand te zijn tegen de zoutdruk maar bij 100 l/s wél baat bij de beschermende werking van een drempel te hebben.

Toepassen van lekkende ebdeuren, waarbij een debiet van zoet water van meerzijde door de kolk naar de lager gelegen zeezijde stroomt, bleek zeer effectief te zijn.

Effect van maatregelen op scheepvaart

Op basis van observaties tijdens de praktijkproef en gevoerde gesprekken met een aantal schippers wordt geconcludeerd dat de beroepsscheepvaart door de Stevinsluis geen hinder ondervond van de luchtbellen- en waterschermen. Geïnformeerde schippers hielden rekening met een traject door de schermen waarover roer en schroef minder goed werken. Geïnformeerde recreatievaart nam voldoende vaarsnelheid in acht bij passage van de schermen.

Advies voor (verdere) zoutlekbeperving door de Stevinsluis

Tenslotte zijn enkele mogelijkheden om de operationele omstandigheden van en rondom de Stevinsluis aan te passen teneinde de zoutlek door deze schutsluis naar het IJsselmeer te verminderen gepresenteerd. We schatten dat de Stevinsluis 0,45-0,65 Mton per jaar zout bijdraagt aan het totaal van ca 4,8 Mton zout naar het IJsselmeer. Naast de hierboven genoemde inzet van zoutlekbepervende middelen bevelen we de volgende methoden als beste aan.

In 50% van de schuttingen wordt een schip “opgehaald” met een lege schutting en daarna volgt de nuttige schutting. Door betere planning en het toestaan van wachttijden kunnen minder lege schuttingen bereikt worden en daalt de zoutlek met circa 50%.

Het spuien van zoet water via de naastliggende spuisluizen in de Afsluitdijk en van zoeter water via het gemaal Leemans in zeezijde-voorhaven verlaagt zeer effectief de zoutlek. Spuien door het gemaal Leemans in de noordelijke zeezijde-voorhaven bij hoge buitenwaterstand verlaagt de zoutlek door de schutsluis nog meer dan spuien bij lage buitenwaterstand.

¹ De lucht- en waterdebieten zijn in de tekst naar boven afgerond.

De zuidelijke meerzijde-voorhaven is dieper dan de kolk en kan als zoutvang dienen mits het zoute water hieruit tijdig naar zeezijde gebracht kan worden. Mogelijkheden voor afvoer uit de zoutvang zijn een hevel tijdens lage buitenwaterstand, pompen of onttrekken uit een verlengde zoutvang naar en via het gemaal Leemans of met een verlengde zoutvang naar en via de spuisluizen.

De traditionele luchtbellenschermen van de Stevinsluis en hun voeding via een bufferdruktank en compressoren kunnen verbeterd worden, zowel in lager energieverbruik als in verdere reductie van zoutlek.

1 Introductie

1.1 Algemeen

De Waterdienst van Rijkswaterstaat heeft op 3 november 2009 opdracht gegeven aan Deltares voor de uitvoering van de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen (zaaknummer 31030032). Deze studie wordt uitgevoerd onder de voorwaarden van de raamovereenkomst met nummer WD-4924 betreffende "Specialistische adviezen van de Stichting Deltares t.b.v. het Ministerie van Verkeer en Waterstaat".

Het (Deltares) onderzoek is ondersteund door een begeleidingsgroep welke is samengesteld uit vertegenwoordigers van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, DG Water en de betrokken diensten van Rijkswaterstaat (Waterdienst, Dienst Infrastructuur, Dienst Zeeland, Dienst Zuid-Holland, en Dienst IJsselmeergebied), het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en PWN drinkwaterleidingbedrijf Noord-Holland.

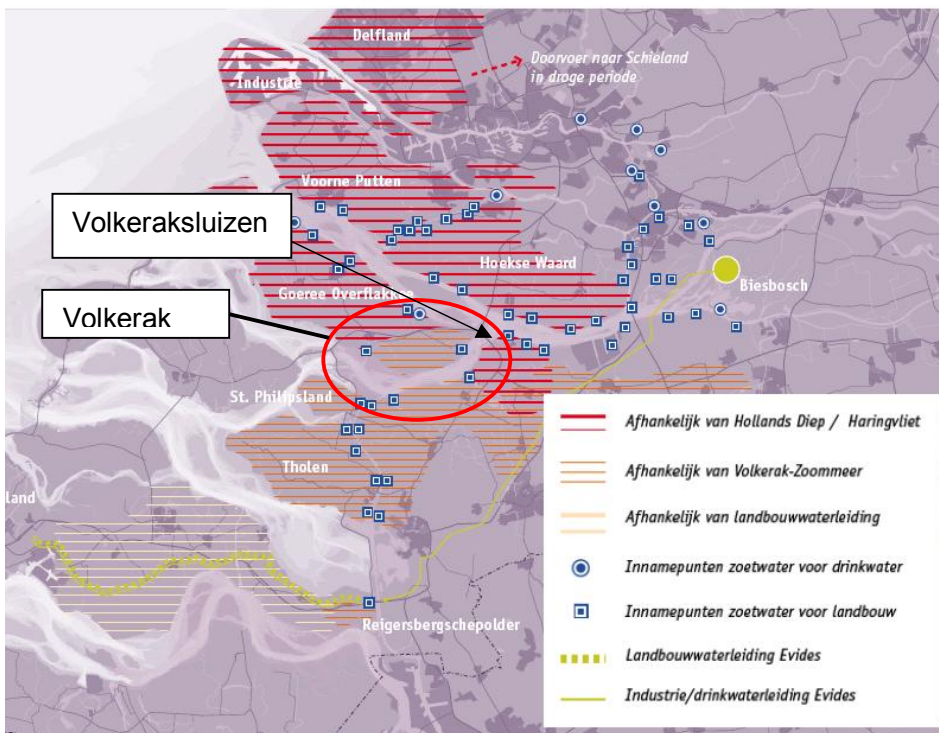
1.2 Beknopt overzicht van het project

Voor het oplossen van het blauwalgenprobleem in het Volkerak-Zoommeer concludeert de planstudie/MER voor dit gebied dat het zoute alternatief de enige effectieve maatregel is, waarbij dit alternatief tevens de basis legt voor een duurzaam en gezond ecologisch systeem. Het toelaten van zout water uit de Oosterschelde in het Volkerak-Zoommeer sluit aan op het advies van de Commissie Veerman en de beleidsvoornemens zoals opgenomen in het Nationaal Waterplan. Een randvoorwaarde betreft het realiseren van maatregelen voor het behoud of de verbetering van de zoetwatervoorziening rondom het Volkerak-Zoommeer en in het Noordelijk Deltabekken. Uit de planstudie/MER komt naar voren dat voor de gebieden die direct grenzen aan het Volkerak-Zoommeer, goede oplossingen aanwezig zijn voor een duurzame zoetwatervoorziening.

Wanneer het Volkerak zout wordt, vindt tijdens het schutten in de Volkeraksluizen een beweging van zout water plaats vanuit het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep, waar het zich vervolgens zal verspreiden naar het Haringvliet en Spui (zie Figuur 1.1 en Figuur 1.2). De stroming van zout van het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep noemen wij in dit rapport: de zoutlek. In het Hollandsch Diep, Haringvliet en Spui bevinden zich meerdere waterinnamepunten voor de drink- en industriewatervoorziening, voor het peilbeheer en voor de watervoorziening ten behoeve van land- en tuinbouw (zie Figuur 1.2). Verkennend onderzoek heeft aangegeven dat indien de zoutlek beperkt blijft tot 60 kg/s, het chloridegehalte bij waterinnamepunten voldoende laag blijft, zodat ingrijpende mitigerende maatregelen dan niet hoeven te worden uitgevoerd.

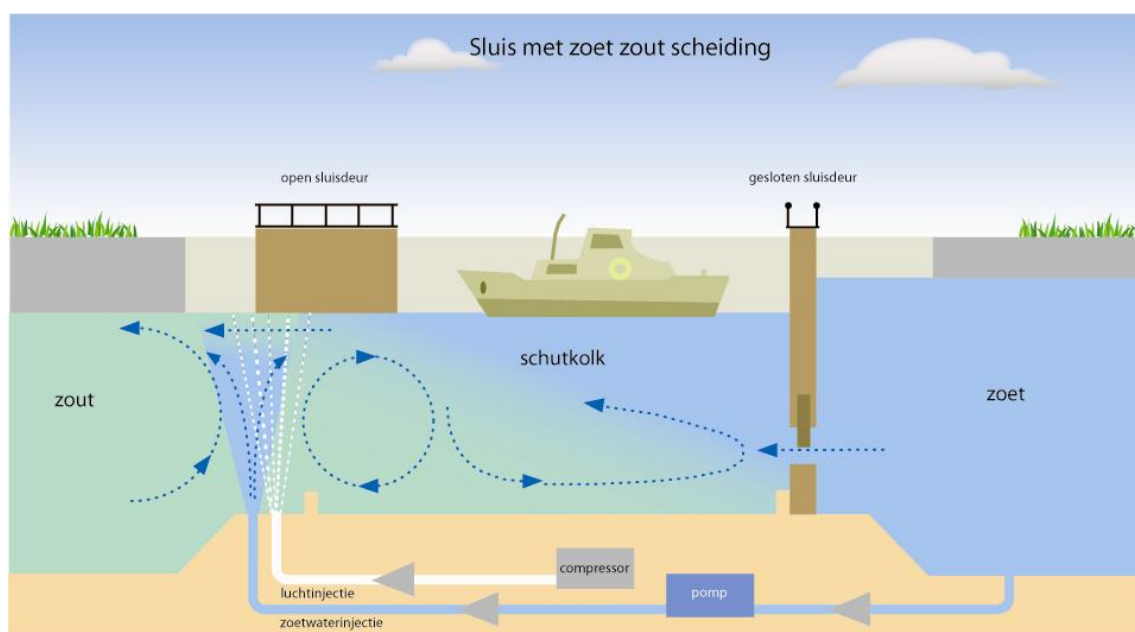


Figuur 1.1 De Volkeraksluizen vormen de verbinding tussen het Volkerak en het Hollandsch Diep. De scheepvaartsluizen bestaan uit 3 beroepsvaartsluizen en 1 jachtensluis. Tussen beide sluizencomplexen bevindt zich een spuisluis (Bron: Google Earth)



Figuur 1.2 Zoetwater innamepunten in en rondom het Volkerak (Bron: Zoet Water Zuidwestelijke Delta, juni 2009)

In de periode 1970-1987 – toen het Volkerak nog in open verbinding stond met de Oosterschelde – werd de zoutlek van de Volkeraksluizen beperkt door diverse maatregelen. Daarbij bleken luchtbellenschermen en het spuien van zoet water door de kolken bij laag water aan Volkerakzijde (lekkende ebdeuren) zeer effectief te zijn. Uit recente studies is gebleken dat nieuwe (innovatieve) methoden beschikbaar zijn voor een efficiënte beperking van de zoutlek zoals middelen voor een betere en dichtere verdeling van lucht in een luchtbellenscherm over de volledige breedte van de sluiscolk en het beperken van de zoutdoordringing door de combinatie van lucht- en (zoet)waterinjectie (Figuur 1.3).



Figuur 1.3 Schematische weergave van zoutlekbeperkende maatregelen in een scheepvaartsluis met zoet-zout scheiding: luchtbellenscherm in combinatie met zoetwaterinjectie en zoetwater instroom via de sluisdeuren. (Bron: Rijkswaterstaat)

Het hoofddoel van dit onderzoek is om te onderbouwen dat met de implementatie van zoutlekbeperkende maatregelen bij de Volkeraksluizen de zoutlek wordt beperkt tot minder dan 60 kg/s, uitgaande van het verwachte scheepsaanbod (vertaald in aantal schuttingen) in 2020. Het onderzoek heeft als kern een serie praktijkproeven, gericht op het bepalen van de effectiviteit van maatregelen die in de Volkeraksluizen kunnen worden geïmplementeerd om de zoutlek te beperken. Daarmee kan het ontwerp daarvan worden gebaseerd op in de praktijk, op een andere locatie, getoetste maatregelen.

Na een verkenning door Rijkswaterstaat en Deltares is de Stevinsluis in de Afsluitdijk bij Den Oever gekozen als locatie voor de praktijkproef. De Stevinsluis is als geschikt aangemerkt vanwege de daar aanwezige zoet-zout overgang, de afmetingen van de sluis en de beschikbare infrastructuur en voorzieningen ter plaatse. In vergelijking met de Volkeraksluizen leidt de combinatie van geringere diepte (4,7m i.p.v. 7,5m) bij hetzelfde zoutgehalte in de Stevinsluis een ca. 21% geringere voortplantingssnelheid van de zouttong. De overige aan dichtheid gerelateerde effecten en de werking van het luchtbellenscherm kunnen over en weer goed worden vertaald. Verder wordt de Stevinsluis op identieke manier gevuld als de Volkeraksluizen, namelijk via rinketschuiven laag in de sluisdeuren.

Om de zoutlek en het effect van zoutlekbeperkende maatregelen zo nauwkeurig mogelijk te kunnen bepalen wordt een combinatie van numerieke modellering, laboratoriumproeven en veldmetingen gehanteerd:

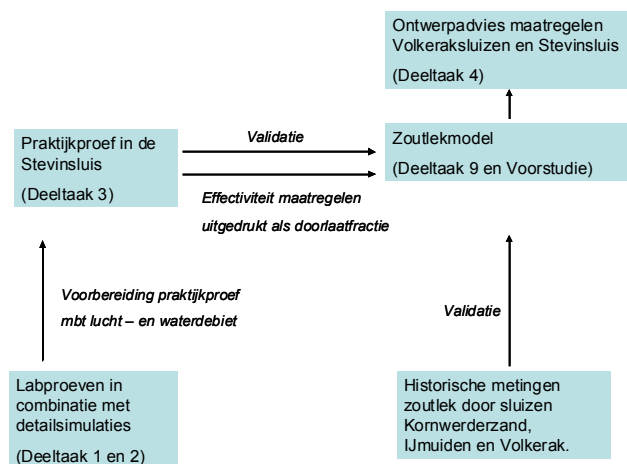
1. Numerieke modellering is hierbij onder te verdelen in:
 - a Gedetailleerde modellering van uitwisselingsstromingen in de Stevinsluis;
 - b Berekening van de zoutlek door de Stevinsluis en de Volkeraksluizen met behulp van het zogenaamde Zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010);
 - c Modellering van zoutverspreiding in het Noordelijk Deltabekken;
2. Laboratoriumproeven van de combinatie uitwisselingsstroming, luchtbellenscherm en waterinjectie op kleine schaal; en
3. Praktijkproeven in de Stevinsluis.

1.3 Activiteiten en deeltaken

Om het onderzoek goed te organiseren en uit te voeren is een aantal activiteiten in de vorm van deeltaken gedefinieerd. Dit betreft:

- 1 Verkenning praktijkproeven Stevinsluis door middel van detailsimulaties met CFX model en SPH model;
- 2 Verkenning maatregelen met behulp van laboratoriumproeven;
- 3 Voorbereiden, uitvoeren en verwerken meetgegevens van de praktijkproeven Stevinsluis;
- 4 Evaluatie en optimalisatie maatregelen met behulp van het Zoutlekmodel voor (a.) Stevinsluis en (b.) Volkeraksluizen inclusief bijbehorende specificaties (effectiviteit, kosten, e.d.);
- 5 Opstellen protocol met richtlijnen voor sluis- en maatregelenbeheer;
- 6 Evaluatie door middel van deskundigenoordeel van de invloed en mogelijkheden van maatregelen ten behoeve van vismigratie (met name intrek);
- 7 Opzet en calibratie/validatie 3D Noordelijk Deltabekken model voor zoutverspreiding inclusief scenarioberekeningen zoutlek;
- 8 Evaluatie mogelijke maatregelen voor andere sluizen;
- 9 Ontwikkeling en oplevering generiek Zoutlekmodel voor vergelijkbare sluizen.

Als voorbereiding van de praktijkproeven in de Stevinsluis zijn twee deeltaken uitgevoerd om vooraf een kwantitatieve schatting te hebben van het effect van een luchtbellenscherm in combinatie met een waterinjectie tegen zoutintrusie in een sluiscolk. Deeltaak 1 betreft een serie gedetailleerde computerberekeningen en Deeltaak 2 betreft een laboratoriumstudie op kleine schaal. In beide deeltaken wordt het proces van de zoutuitwisseling in een scheepvaartsluis bij opening van de sluisdeur aan één zijde bij gelijke waterstand in colk en voorhaven bestudeerd, al dan niet in combinatie met een luchtbellenscherm en/of een zoetwaterinjectie. In deze studies wordt geen aandacht gegeven aan andere fysische processen die van belang zijn in een schutcyclus, zoals nivellering, de door scheepvaart geforceerde waterbeweging en het effect van het openen en sluiten van de deuren tijdens een schutcyclus. Het effect van deze processen wordt alleen beschouwd in de praktijkproeven in de Stevinsluis (deeltaak 3). De resultaten van de praktijkproeven worden vervolgens gebruikt in het Zoutlekmodel (deeltaak 9). In deeltaak 4 wordt het Zoutlekmodel gebruikt om tot optimale zoutlekbeperkende maatregelen voor de Volkeraksluizen te komen en om de daggemiddelde zoutlek bij de Volkeraksluizen te berekenen. Figuur 1.4 geeft deze werkwijze schematisch weer.



Figuur 1.4 Overzicht van deeltaken in de ontwerpstudie en Praktijkproeven Zoutlekbeperring Volkeraksluizen.

1.4 Overzicht van producten van het project

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de producten welke in het kader van het onderzoek zijn of nog zullen worden opgeleverd. Deze producten bestaan uit verslagen, rapporten, gegevensbestanden en een simulatiemodel.

Product	Deeltaak
1. Bespreekverslag van startoverleg met de opdrachtgever	
2. Rapport detailsimulaties Stevinsluis inclusief vergelijking labproef	1
3. 1 ^e versie Zoutlekmodel	1
4. Rapport labproeven	2
5. Digitale datasets meetgegevens labproeven	2
6. Meetplan en meetprotocol voor het uitvoeren van de praktijkproeven Stevinsluis	1 & 2
7a. Verslag tussenresultaten praktijkproeven Stevinsluis	3
7b. Rapport beschrijving en resultaten praktijkproeven Stevinsluis	3
8. Digitale datasets meetgegevens praktijkproeven	3
9. Rapport evaluatie maatregelen Stevinsluis	4a
10. Rapport evaluatie maatregelen Volkeraksluizen	4b
11a. Concept Eindrapport	alle
11b. (Definitief) Eindrapport	alle
12. Richtlijnen operationeel beheer Volkeraksluizen	5
13. Rapport evaluatie visintrek	6
14. Rapport kalibratie 3D zoutmodellering Noordelijk Deltabekken	7
15. Rapport scenarioberekeningen zoutverspreiding zoutlek Volkeraksluizen	7
16. Rapport mogelijkheden andere sluizen	8
17. Model zoutlek sluizen inclusief handleiding	9

1.5 Dit rapport

Het voorliggende rapport beschrijft de praktijkproeven in de Stevinsluis te Den Oever welke vanaf 1 april tot 27 mei 2010 plaats vonden. Het rapport analyseert metingen van de zoutmassa in de kolk van de Stevinsluis en concludeert de zoutlekbeperkende werking van water- en luchtbellenschermen, een extra, hoge drempel en door een zoetwaterdebiet door de kolk (methode lekkende ebdeuren).

Hoofdstuk 2 biedt een introductie tot de werking van een zout-zoet schutsluis en diverse mogelijkheden de zoutlek te beperken. We bespreken kort de invloed op de zoutlek door scheepvaart, drempels, door een zoetwaterdebiet (methode van lekkende ebdeuren) en door luchtbellenschermen, eventueel versterkt door een waterscherm. Tevens introduceert dit hoofdstuk onze grafische weergave van de status van een schutsluis m.b.t. zoutlek.

Hoofdstuk 3 geeft het overzicht van de praktijkproef in de Stevinsluis en beschrijft beknopt de installatie van de toegepaste zoutlekbeperkende middelen, meetinstrumenten en onze methoden van analyse. Verder bespreekt dit hoofdstuk kort welke invloedsfactoren rondom de Stevinsluis het zouttransport door deze sluis mede beïnvloeden.

Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten van de praktijkproef in termen van de doorlaatfractie van de oorspronkelijke zoutlek welke door toepassing van zoutlekbeperkende middelen nog wél naar de zoete zijde van de schutsluis wordt getransporteerd.

In Hoofdstuk 5 geven we afsluitend een nabeschuiving en de conclusies van de praktijkproef en aanbevelingen voor vervolgonderzoek en nader onderzoek.

In Hoofdstuk 6 presenteren we onze ervaringen en analyses van de operationele omstandigheden van en rondom de Stevinsluis en op welke wijze de zoutlek door deze schutsluis verder beperkt kan worden.

Voordat we dit hoofdstuk afsluiten met de introductie van de werking van een schutsluis geven we eerst het volgende dankwoord.

1.6 Dankwoord

We danken van harte alle sluismeesters en technisch personeel van en rondom de Stevinsluis te Den Oever voor hun gastvrijheid om in hun kantoor extra kabels en regelapparatuur en laptops te installeren, de gewenste schutcycli in te stellen en hun zorg dat onze meetinstrumenten in de kolk niet door scheepvaart beschadigd werden.

We danken Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier voor het omleiden van de zoetwaterlozingen van het gemaal Leemans bij Den Oever naar gemaal Lely bij Medemblik en het PWN drinkwaterleidingbedrijf Noord-Holland voor hun tolerantie deze zoetwater lozing dat enig zout uit de Wieringermeerpolder bevatte voor hun inlaten bij Andijk toe te staan.

We danken ir. Hans van Pagee (Waterdienst) voor de ontelbare keren dat hij als tussenpersoon voor aanvullende gegevens, het aanpassen van het spuiregiem bij de Stevinsluis, belemmering van scheepvaart etc. heeft moeten optreden. Uiteraard danken we ook alle diensten van Rijkswaterstaat die vervolgens bereidwillig aan onze verzoeken meewerkten.

Voor het beoogde lezerspubliek is dit rapport beknopt gehouden in de beschrijving van de werktuigbouwkundige ontwerpen van de frames met luchtbellenscherm, waterscherm en hun toevoerleidingen etc. en van de ontwerpen en realisatie voor data-inwinning, meetinstrumenten en calibratiemethoden. Dankzij al het werk van vnl. onze Deltares instrumentatiegroep is deze meetcampagne succesvol verlopen en zijn er uitgebreide meetbestanden gearhiveerd die uitstekend bewerkt konden worden waarvan dit rapport naar we hopen het bewijs levert.

Het installeren van de frames, lucht- en waterleidingen, kabels, meetinstrumenten etc. in en rondom de Stevinluis vergde veel talent en vakmanschap van Deltares collega's die we hier met naam willen noemen: Marcel Busink en Marcel Grootenboer onder leiding van ir. John Cornelisse, de tweede auteur van dit rapport. Zij waren de kwartiermakers in de ijzige en winderige periode van februari 2010 die van maandag tot vrijdag in een recreatiewoning in Den Oever overnachtten. Toen de zon weer ging schijnen en het ijs in het IJsselmeer was gesmolten kwamen er wel bezoekers zoals de eerste auteur van dit rapport.

Een essentieel ingrediënt van de uniforme luchtverdeling van innovatieve Deltares-luchtbellenschermen over de kolkbreedte is een klein luchtventiel dat boven 0,5 atmosfeer een constante luchtmassaflux levert. Door deze vinding van Dr. Ken O'Hara (Flow Through) raakte hij betrokken bij deze opdracht en we danken hem voor al zijn enthousiasme en zorg voor het ontwerp en voor het verloop van onze praktijkproeven.

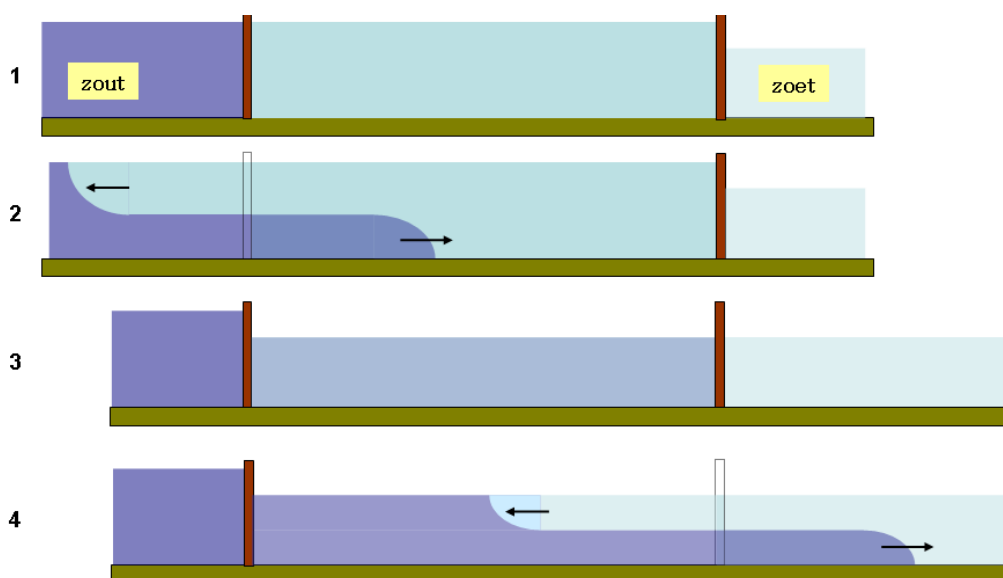
2 De werking van en zoutlek door een schutsluis

2.1 Mechanisme van zoutlek

In dit onderdeel introduceren we de principes en de werking van een schutsluis als scheiding tussen zoet en zout water en eventuele verschillen in waterstand. Tevens introduceren we de mechanismen van zoutlek en methoden om de zoutlek door een schutsluis te beperken. We onderzochten deze methoden tijdens de praktijkproef in de Stevinssluis.

In verticale langsdoorsneden van een kolk en voorhavens, zoals Figuur 2.1 en vergelijkbare figuren, is zout water donker blauw gekleurd, zoet water licht blauw en gradaties tussen donker en licht blauw als indicatie van menging tussen zout en zoet water. Gesloten sluisdeuren zijn verticale bruine balken en open deuren zijn dun en zwart gearceerd. Tussen de sluisdeuren bevindt zich de kolk met de groene balk als kolkvloer. Links en rechts van de kolk liggen de zg. voorhavens die hier dezelfde diepte hebben als de kolkvloer. Zwarte pijlen geven de stroomrichting van de desbetreffende waterlaag.

Stadium 2 in Figuur 2.1 toont schematisch de uitwisseling van zout water aan de zoute zijde met het brakke kolkwater zodra de sluisdeuren aan de zoute zijde worden geopend (dunne lijnen in stadium 2 van Figuur 2.1). Stadium 4 in dit figuur toont de zouttong die uit de kolk naar de zoete zijde uittreedt zodra de sluisdeuren naar de zoete zijde zijn geopend (dunne lijnen).



Figuur 2.1 Schutting naar zoute zijde gevolgd door schutting naar zoete zijde; bij hoge buitenwaterstand.

Stadium 1: de sluisdeuren aan beide kanten zijn dicht, het waterpeil in de kolk is gelijk aan dat van de zoutezijde.

Stadium 2: uitwisseling van zout water met zoeter kolkwater terwijl de sluisdeuren aan de zoutezijde open staan.

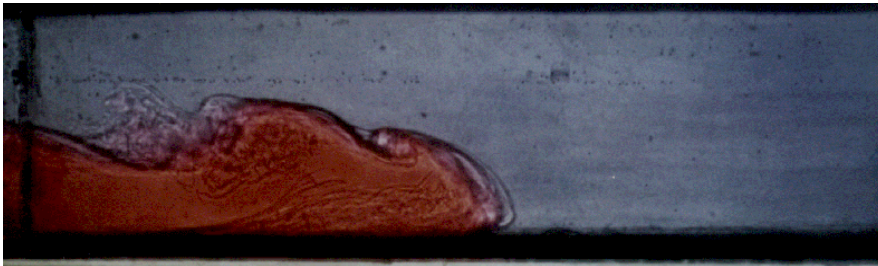
Stadium 3: de sluisdeuren aan beide kanten zijn dicht, het waterpeil in de kolk is verlaagd na nivelering en is gelijk aan dat van de zoetezijde.

Stadium 4: uitwisseling van brak kolkwater met zoet water.

Figuur 2.1 en vergelijkbare figuren tonen schematisch de zouttong die in werkelijkheid (Figuur 2.2) zich met golfbewegingen en turbulentie voortplant en onderweg enige menging veroorzaakt. De zoettong in de bovenlaag van stadia 2 en 4 in Figuur 2.1 gedraagt zich als een keer-symmetrisch beeld van de zouttong (rechts wordt links, onder wordt boven) en heeft vergelijkbare eigenschappen. Dit stromingsproces is theoretisch en experimenteel goed begrepen. Bij gelijke temperaturen is zout water zwaarder dan zoet water en bij gelijke waterstanden bezit zout water daardoor meer potentiële energie dan zoet water. Deze potentiële energie wordt in beweging (kinetische energie) omgezet (Figuur 2.2) waarbij steeds meer zout water in beweging komt en deelneemt aan de zouttong waardoor de zouttong een constante eindsnelheid, voortplantingssnelheid genoemd, bereikt. In Engelstalige literatuur wordt voorgaand samengevat onder het begrip *lock-exchange flow*.

De voortplantingssnelheid van de zouttong is ruwweg evenredig met de wortel uit het verschil in zoutgehalten van zouttong en kolkwater en de waterdiepte. De dikte van de zouttong is evenredig met de kolkdiepte boven eventuele drempels. Zodoende verwisselt de zouttong een zoutmassa evenredig met de tijdsduur dat de zouttong voortplant, met de kolkdiepte en met het verschil in de zoutgehalten beiden tot de macht 1,5. Deze rekenregel is toepasbaar totdat de uitgewisselde zoutmassa bijna gelijk is aan het kolkvolume vermenigvuldigd met het verschil in zoutgehalten tussen de kolk en de relevante voorhaven.

Tijdens deze interne uitwisseling van kolkwater met water uit een voorhaven verandert de waterstand in de kolk nauwelijks maar wel treden er aanmerkelijke horizontale snelheden op die krachten op afgemeerde schepen uitoefenen en het in- of uitvaren kunnen hinderen. In het bijzonder wordt het invaren met de stroming in de toplaag mee gehinderd door de verminderde werking van het roer en tijdens afremmen en afmeren.



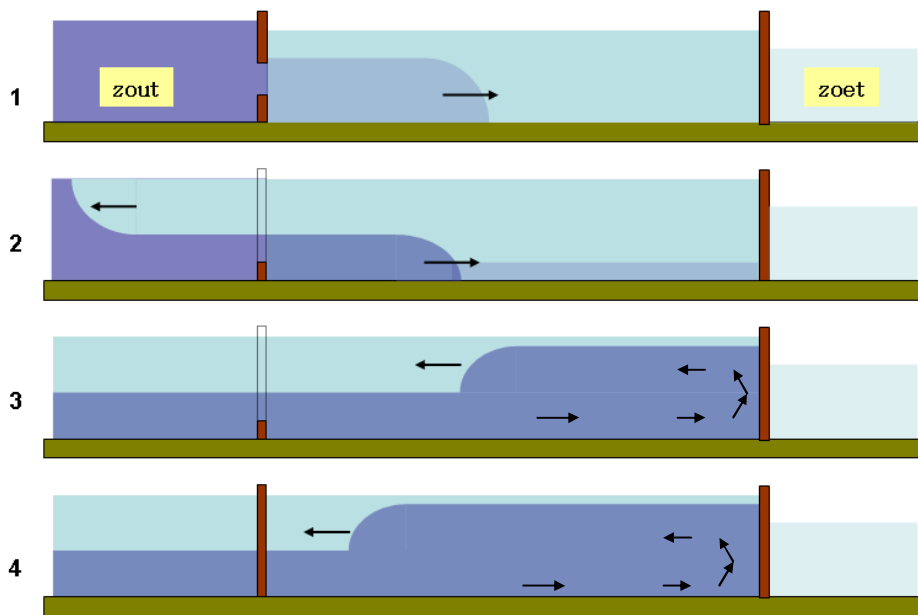
Figuur 2.2 Laboratoriumproef toont een zoute tong (rood) die van rechts naar links onder het zoetere water (blauw) indringt en boven de zoute tong wordt zoeter water naar links gestuwd.

In een werkelijke schutsluis treden meer stadia en stromingsprocessen op die bovenstaand beeld compliceren en welke we als volgt toelichten.

2.2 Schutting naar zoute zijde

We gaan uit van een situatie waarin de waterstand in de kolk gelijk is aan de waterstand aan de zoete zijde en de kolk met zoet water is gevuld. De waterstand aan de zoute zijde nemen we hoger dan aan de zoete zijde en we noemen dit hoge buitenwaterstand. Altijd dient eerst de waterstand in de kolk genivelleerd te worden met de waterstand aan de zijde waarnaar geschut wordt. Daartoe worden in de Stevinsluis en Volkeraksluizen zg. rinketschuiven in de sluisdeuren geopend; bij andere sluisstypen kunnen bijvoorbeeld omloopriolen worden gebruikt of langsvulsystemen. Rinketschuiven zijn stalen platen die verticaal in hun

sponningen bewegen en in principe twee uiterste standen hebben nl. volledig open of volledig dicht. Echter, tussenstanden zijn mogelijk waarover later meer bij de bespreking van de methode van "lekkende ebdeuren". Tijdens het nivelleren wordt water getransporteerd van hoge buitenwaterstand naar kolk en vervolgens van kolk naar de zijde waarnaar geschut gaat worden. Dit volume water heet de schuttschijf en is gelijk aan het product van kolkoppervlak en de verandering in kolkwaterstand.



Figuur 2.3 Schutting naar zoute zijde bij hoge buitenwaterstand..

Stadium 1: met volledig geopende rinketschuif nivelleren van de kolk met de waterstand aan de zoute zijde, een geremde zouttong treedt de kolk in. Daarna worden de sluisdeuren geopend.

Stadium 2: uitwisseling van zout water met zoeter kolkwater terwijl de sluisdeuren open staan, de drempel vormt een hindernis en er is enig zout water op de kolkvloer o.a. door het nivelleren (stadium 2).

Stadium 3: de zouttong kaatst tegen de gesloten sluisdeur en op weg terug naar de open sluisdeuren vult de zouttong grotendeels de kolk. Ondertussen vaart het schip naar buiten en eventueel een volgend schip naar binnen.

Stadium 4: naar gelang de zg. deuropentijd kan het sluiten van de sluisdeuren de zout-zoet uitwisseling van stadium 3 onderbreken.

Wanneer het verschil in waterstand over de nog gesloten sluisdeuren voldoende klein is (bovengrens ca. 10 cm) kan de aandrijving zonder overbelasting de sluisdeuren open duwen waarbij het laatste restant van de schuttschijf wordt verplaatst. Tijdens het nivelleren naar hoge buitenwaterstand treedt zout water de zoetere kolk in en vormt een bescheiden en geremde zouttong die zich over de kolkvloer verspreid (stadium 1, Figuur 2.3).

De sluisdeuren van de Stevinsluis en Volkeraksluizen zijn zg. puntdeuren (zie Figuur 3.1) die tegen elkaar en tegen een drempel op de kolkvloer afsluiten. Tussen deze drempels kan zouter water in de kolk achter blijven hoewel kwetsbaar door schoefstralen en oscillaties in de kolk. Bij de zout-zoet uitwisseling werkt deze zoute onderlaag als een ruwe valse vloer en de drempels hebben zodoende de kolkdiepte verkleind. In stadium 2 van Figuur 2.3 staan de sluisdeuren aan zeezijde open en vindt de zout-zoet uitwisseling plaats welke gehinderd

wordt door een drempel en de zoutere onderlaag op de kolkvloer t.g.v. nivelleren of restanten zout water tussen de drempels.

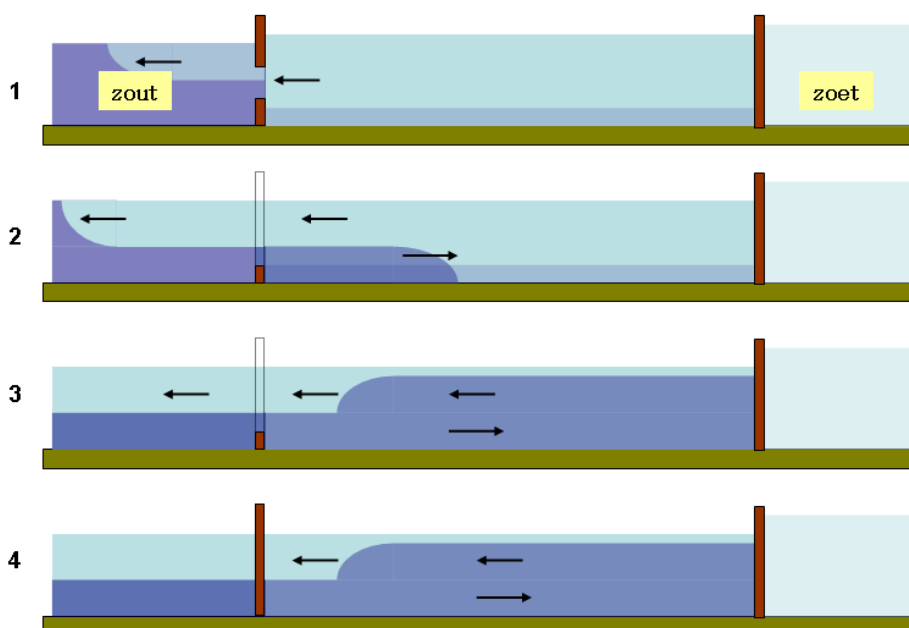
Tussen stadia 2 en 3 in Figuur 2.3 is de zouttong tegen de dichte sluisdeuren gestuwd waarbij zijn kinetische energie weer grotendeels, maar niet volledig, in potentiële energie wordt omgezet: de zouttong klimt langs de gesloten sluisdeur omhoog maar bereikt veelal niet het wateroppervlak. Daarna wordt de potentiële energie van deze opgestuwde zoutmassa weer in beweging omgezet en reist de zouttong terug naar de open sluisdeuren. Door turbulente wrijving en menging vult de zouttong de kolk niet volledig, zoals schematisch is aangegeven met de licht-blauwe kleur van de toplaag van de kolk in Figuur 2.3. De zouttong stuwt het zoetere kolkwater naar de zoute voorhaven waar het zich traag verspreid als een drijvende vlek.

Tussen stadia 3 en 4 worden de sluisdeuren gesloten; het tijdsinterval dat de sluisdeuren open staan heet deuropentijd. Bij voldoende korte deuropentijd wordt de zouttong in zijn reis geremd doordat zijn aandrijving vanaf de zeezijde wordt afgebroken. De deuropentijd wordt bepaald door het veilig in- en uitvaren en afmeren van schepen. Na sluiten van de sluisdeuren zal de zouttong zich trager in de kolk voortplanten en na reflectie tegen de inmiddels gesloten sluisdeuren voor zg. interne golven in de kolk zorgen. De meest scheepvaart steekt voldoende diep om door o.a. schroefwerking de dunne en brakke toplaag tenminste ten dele te vermengen met het onderliggende kolkwater.

Bij voldoende lange deuropentijden verlaat de zouttong de kolk en laat achter een ondiepe brakwater toplaag welke maar een gering verschil in zoutgehalte heeft met dat van de zoute voorhaven. De voorraad zoeter kolkwater is nu grotendeels naar de zoute voorhaven gestroomd en er blijft nog een brakke toplaag over. Bij voldoende lange deuropentijden verlaat de dunne en brakke toplaag uiterst traag de kolk en voedt de eerdere genoemde drijvende vlek in de zoute voorhaven. Wanneer in de zoute voorhaven een getij heerst zal deze ook in de kolk heersen: bij opkomend tij wordt dan de kolk met zout water uit de voorhaven gevuld en bij vallend tij loopt het kolkwater naar de zoute voorhaven.

Bij schutten tijdens lage buitenwaterstand (zoute zijde lagere waterstand dan zoete zijde) dient de hogere waterstand in de kolk vanaf de laatste schutting naar de zoete zijde genivelleerd te worden naar de lagere waterstand aan de zoute zijde. De rinketschuiven lozen nu kolkwater naar de zoute zijde. Dit is stadium 1 in Figuur 2.4. De schuttschijf van zoeter kolkwater vormt nu een opdrijvende vlek in de zoute voorhaven. Deze schuttschijf bevat vnl. zoet water dat door nivelleren naar de zoute zijde wordt overgebracht wat een verlies van zoet water is. Er zijn sluisstypen waar dit schutverlies beperkt wordt door de zoete toplaag van de kolk tijdelijk naar een apart reservoir te voeren en tijdens nivelleren later weer naar de kolk te pompen.

De stromingsprocessen in de daarop volgende stadia 2 t/m 4 in Figuur 2.4 zijn gelijk aan die bij hoge buitenwaterstand. In onze praktijkproef in de Stevinsluis gebruiken we deze eigenschap door de verandering van de zoutmassa in de kolk tijdens alle schuttingen naar zout én naar zoet en bij hoge én bij lage buitenwaterstanden te meten.



Figuur 2.4 Schutting naar zoute zijde bij lage buitenwaterstand.

Stadium 1: met volledig geopende rinketschuif nivelleren van de kolk met de waterstand aan de zoute zijde. Daarna worden de sluisdeuren geopend.

Stadium 2: uitwisseling van zout water met zoeter kolkwater terwijl de sluisdeuren open staan, de drempel vormt een hindernis.

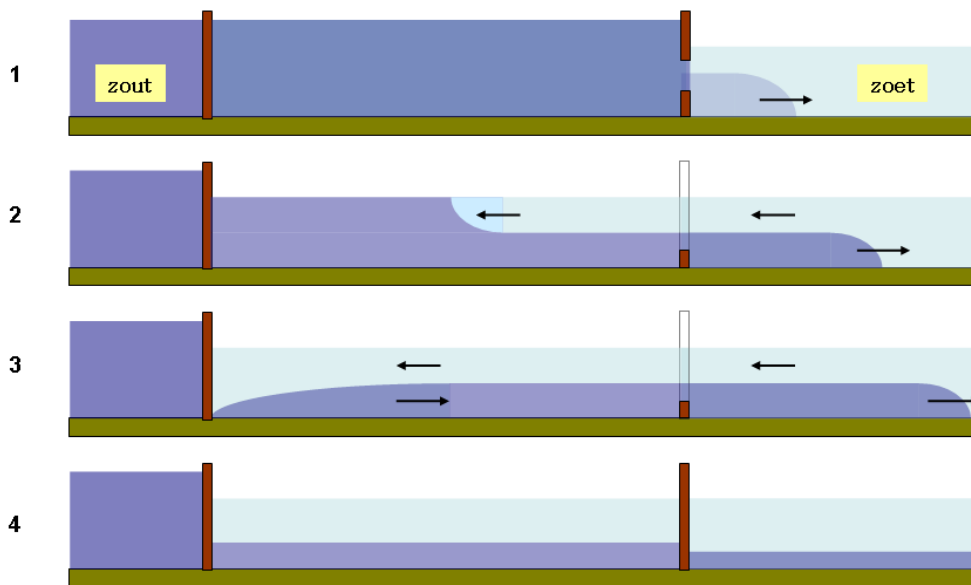
Stadium 3: de zouttong reflecteert tegen de dichte sluisdeur en de zouttong vult grotendeels de kolk op weg terug naar de open sluisdeuren. Ondertussen vaart het schip naar buiten en eventueel een volgend schip naar binnen.

Stadium 4: naar gelang de zg. deuropentijd kan het sluiten van de sluisdeuren de zout-zoet uitwisseling van stadium 3 onderbreken.

2.3 Schutting naar zoete zijde

We beschouwen nu een schutting naar de zoete zijde waarbij de waterstand aan de zoute zijde hoger is dan aan de zoete zijde. Voordat de sluisdeuren naar de zoete zijde geopend kunnen worden dient de waterstand in de zoutere kolk tot die aan de zoete zijde verlaagd te worden. Dit nivelleren is stadium 1 in Figuur 2.5 waarbij door geopende rinketschuiven brak kolkwater de zoete voorhavens in stroomt. Dit is de eerste bijdrage tot de zoutlek van de schutsluis; bij andere sluisstypen kan deze zoutlek worden beperkt door het zoute kolkwater tijdelijk in een reservoir op te slaan of naar zee terug te pompen en tegelijkertijd zoet water toe te voeren. Echter, bij de Stevinsluis en de Volkeraksluizen stroomt de brakke schuttschijf de zoete voorhavens in. Deze zouttong wordt ingehaald door de zouttong die ontstaat nadat de sluisdeuren in stadium 2 van Figuur 2.5 zijn geopend. De uitwisseling van brak water in de kolk met zoet water in de voorhavens vindt plaats zoals aan de zeezijde. Echter, nu is er sprake van een beperkte voorraad brak kolkwater welke bij voldoende lange deuropentijden uitgeput raakt. In stadium 3 van Figuur 2.5 loopt de zouttong vnl. door massa-tragheid door en de zouttong trekt achter zich aan en na reflectie tegen de dichte sluisdeuren zoet water de kolk in. Tussen de drempels aan beide kolkeinden kan nog een restant zouter kolkwater in de kolk achter blijven maar schroefstralen en oscillaties in de kolk kunnen deze onderlaag eroderen.

Inmiddels kan de lezer zich wel voorstellen welke processen optreden bij schutten naar de zoete zijde tijdens lage buitenwaterstand: tijdens het nivelleren van de kolk van de lage waterstand aan de zoute zijde naar de hogere waterstand aan de zoete zijde wordt een schuttschijf aan zoet water de kolk in gebracht. Deze schuttschijf vormt een verlies aan zoetwater omdat tijdens het nivelleren naar de zoute voorhaven stroomt. We zullen later de invloed van de scheepsbeweging op de zout-zoet uitwisseling bespreken.



Figuur 2.5 Schutting naar zoete zijde bij hoge buitenwaterstand.

Stadium 1: met volledig geopende rinketschuif nivelleren van de kolk met de waterstand aan de zoete zijde. Daarna worden de sluisdeuren geopend.

Stadium 2: uitwisseling van zouter kolkwater met zoet water terwijl de sluisdeuren open staan, de drempel vormt een hindernis.

Stadium 3: de zoetwatertong kaatst tegen de gesloten sluisdeur en de uittredende zouttong trekt nog zoet water de kolk in. Ondertussen vaart het schip naar buiten en eventueel een volgend schip naar binnen.

Stadium 4: naar gelang de zg. deuropentijd kan het sluiten van de sluisdeuren de zout-zoet uitwisseling van stadium 3 onderbreken; een restant zout water kan tussen de drempels achterblijven.

2.4 Zoutlek door nivelleren

Uit voorgaande vatten we samen dat de zout-zoet uitwisseling voor de zoute tong (onderlaag) en de zoete tong (bovenlaag) dezelfde eigenschappen bezitten, zij het keer-symmetrisch (rechts wordt links en onder wordt boven). De eigenschappen van uitwisselingsstromingen, welke wetenschappelijk onderbouwd zijn, vormen de hoeksteen van onze metingen en analyses in hoofdstuk 3 en verder. We kunnen wél de uitwisseling van zout en zoet water door geopende sluisdeuren beperken en daarmee de zoutlek van de schutsluis naar de zoete zijde. Echter, de zoutlek door nivelleren blijft bestaan zolang de waterstand aan de zoute zijde hoger is dan aan de zoete zijde.

Tijdens hoge buitenwaterstand aan de zoute zijde kan de bijdrage tot de zoutlek door nivelleren niet worden beperkt tenzij kolkwater bij neerwaarts nivelleren tijdelijk wordt opgeslagen of direct naar de zoute voorhaven wordt terug gepompt. De bijdrage door nivelleren bij hoge buitenwaterstand tot de zoutlek is onvermijdelijk en is evenredig met het aantal schuttingen per tijdseenheid, met het kolkoppervlak en met het verschil in waterstanden. Overigens, voor de Volkeraksluizen zal de gunstige situatie blijven gelden dat de waterstand in het zoete Hollandsch Diep hoger is dan in het te verzilten Volkerak-Zoommeer: dan is er geen bijdrage tot de zoutlek door nivelleren. Anderzijds concluderen we dat bij lage buitenwaterstand aan de zoute zijde door nivelleren zoet water naar de zoute zijde wordt afgevoerd. Dit zg. schutverlies van zoet water is onvermijdelijk bij sluizen zonder pompen en is evenredig met het aantal schuttingen per tijdseenheid, met het kolkoppervlak en met het verschil in waterstanden. Kortom nivelleren in sluizen met rinketschuiven of omloopriolen geeft óf een bijdrage tot de zoutlek (bij hoge zoute buitenwaterstand) óf een verlies aan zoetwater (bij lage zoute buitenwaterstand).

2.5 Verandering van zoutmassa in de kolk tijdens schuttingen

In dit rapport worden de hierboven beschreven stadia en veranderingen in zoutgehalte, zoutmassa en waterstand in de kolk van de Stevinsluis weergegeven met figuren zoals Figuur 2.6. We lichten deze figuren als volgt toe, deze zijn enerzijds schematisch en gebaseerd op de principes van het zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010), anderzijds zo reëel mogelijk betrokken op de afmetingen van de Stevinsluis, zijn voorhavens en het getij bij Den Oever. In dit voorbeeld nemen we voor de zee 20 ppt zoutgehalte welke in het voorjaar bij Den Oever optreedt door het spuien via de spuisluizen in de Afsluitdijk. Het voornemen is om het Volkerak-Zoommeer tot 20 ppt te verzilten.

De centrale grafiek in Figuur 2.6 toont blauwe lijnen voor dicht/open rinketschuiven en dicht/open sluisdeuren aan de zoute (zee-) zijde en groene lijnen voor de zoete (meer-) zijde. De waarde "0" vertegenwoordigt "alles gesloten", de waarde "1" rinketschuiven open, maar sluisdeuren dicht, en waarde "2" betekent sluisdeuren open.

De onderste grafiek in Figuur 2.6 toont in zwart de waterstand van de zoute zijde (Waddenzee) t.o.v. de zoete zijde (IJsselmeer) en in rood de waterstand in de kolk t.o.v. de zoete zijde. Tevens tonen de blauwe en groene blokken de fractie (0 tot 1) van opening van alleen de rinketschuiven. Tenslotte toont de paarse lijn de zoutlek door de monding van de voorhaven aan de zoete zijde naar het IJsselmeer.

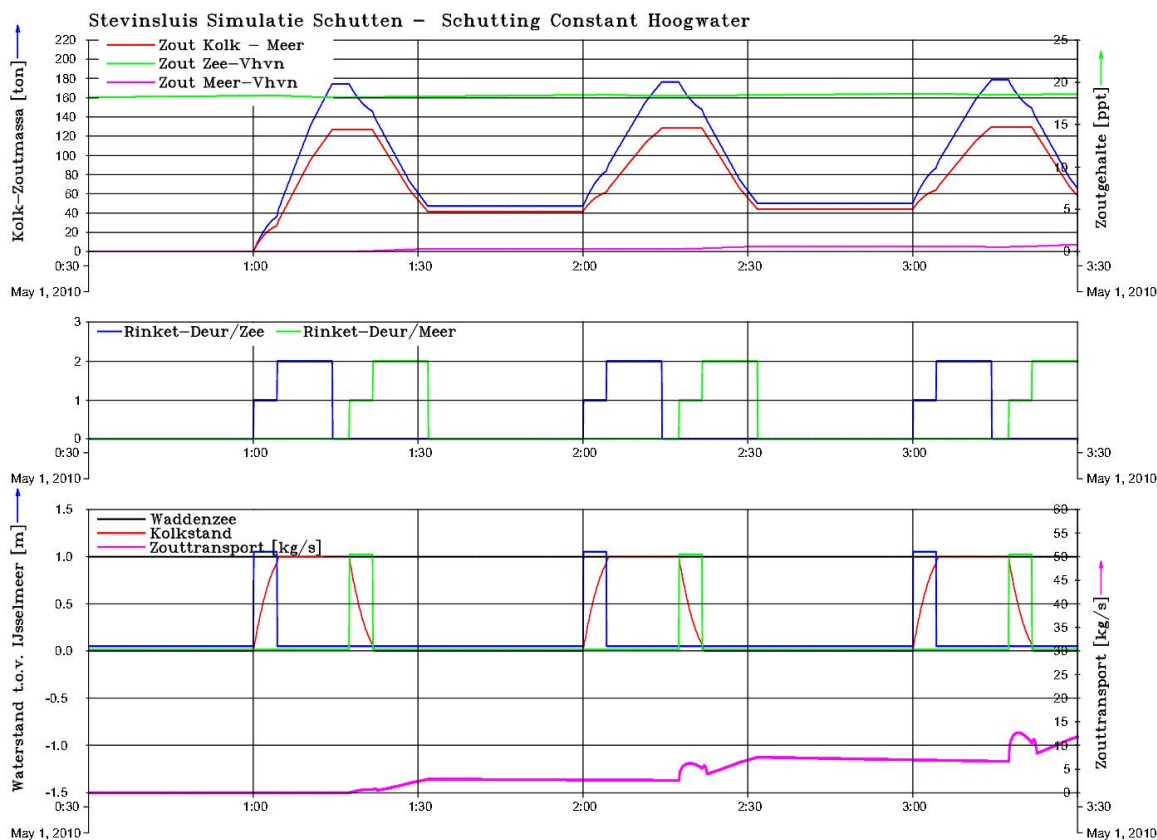
De blauwe lijn in de bovenste grafiek in Figuur 2.6 geeft de zoutmassa in de kolk (schaal op linker as in tonnen zout), de rode lijn het gemiddelde zoutgehalte van het kolkwater (schaal op rechter as in ppt=*parts per thousand* of ruwweg kg zout /m³ water), de groene lijn het diepte-gemiddelde zoutgehalte in de voorhaven aan de zoute zijde (Waddenzee) en de paarse lijn het volume-gemiddeld zoutgehalte in de voorhaven aan de zoete zijde (IJsselmeer).

We beschrijven nu met Figuur 2.6 wat er vnl. in de kolk gebeurt tijdens een schutting, eerst naar de zoute zijde en daarna naar de zoete zijde. Deze schutting gebeurt tijdens 1m hoge buitenwaterstand aan de zoute zijde, zonder getij en met 20 ppt zoutgehalte op zee. Voor 1:00 uur was de kolk zoet en heeft de waterstand van het IJsselmeer.

Om 1:00 uur worden aan de zoute zijde de rinketschuiven volledig geopend (centrale grafiek: blauwe lijn waarde 1, idem onderste grafiek) waardoor het peil in de kolk (rode lijn onderste

grafiek) snel stijgt tot dat van de zoute zijde. In de kolk neemt de zoutmassa toe en ook het gemiddelde zoutgehalte (bovenste grafiek). Bij voldoende gering verschil in waterstand over de nog dichte sluisdeuren worden deze geopend en nivelleert de kolk zich tenslotte volledig in waterstand met die van de zoute zijde. De sluisdeuren naar de zoute zijde open gaan dus open (centrale grafiek: blauwe lijn waarde 2) en de zout-zoet uitwisseling treedt op die na uitvaren en invaren van de schepen en na een deuropentijd van 10 minuten wordt afgebroken doordat de sluisdeuren naar de zoute zijde sluiten. Na ca. 3 minuten van omschakelen van bediening worden de rinketschuiven aan de zoete zijde volledig geopend (centrale figuur: groene lijn waarde 1, idem onderste grafiek). Het peil in de kolk nadert snel dat van de voorhaven aan de zoete zijde (IJsselmeer). Gedurende dit nivelleren neemt wél de zoutmassa in de kolk af (bovenste grafiek, blauwe lijn) maar niet het zoutgehalte (bovenste grafiek, rode lijn) als het zoutgehalte in de kolk homogeen gemengd is. De zoete voorhaven ontvangt de schuttschijf aan brak water uit de kolk en geeft dit extra watervolume snel door naar het IJsselmeer (piek in paarse lijn, onderste figuur).

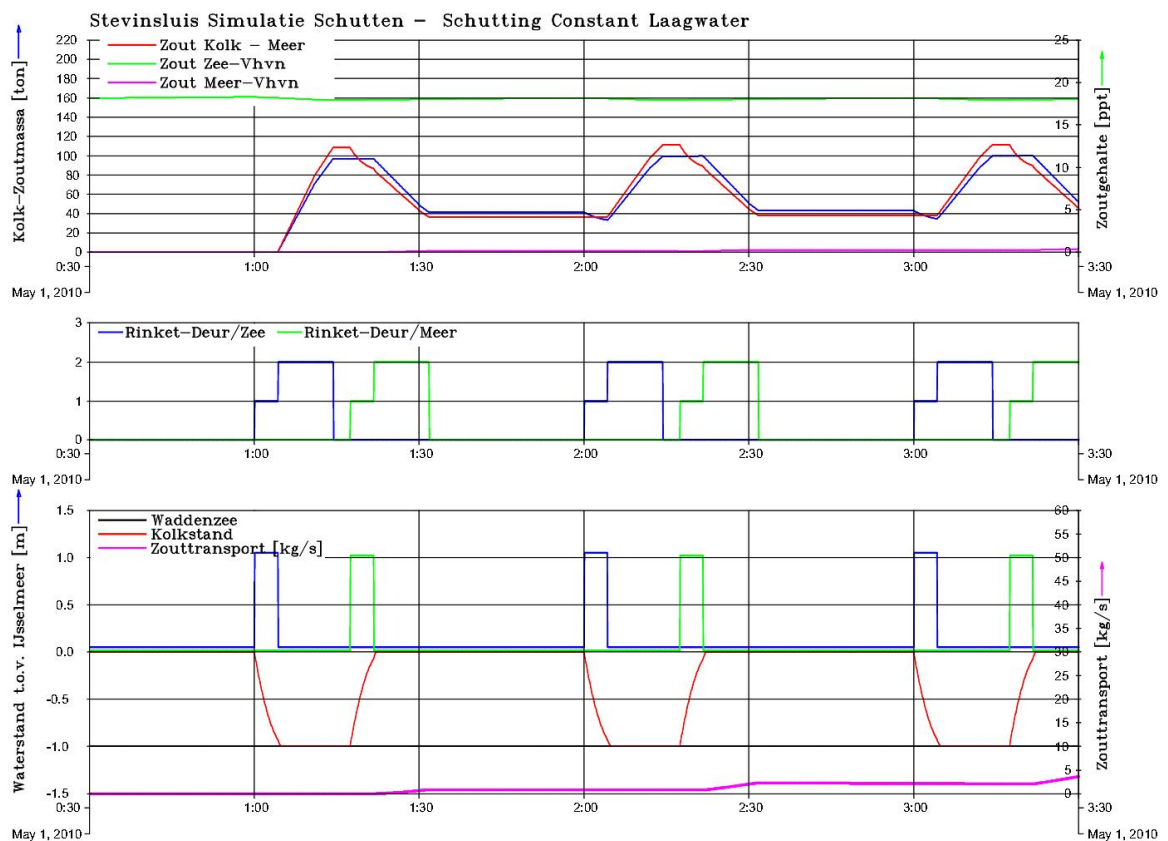
Bij voldoende klein verhang openen de sluisdeuren naar de zoete zijde en begint het uittreden van de zouttong naar de voorhaven. Hierdoor stijgt zeer gering het zoutgehalte in de voorhaven aan de zoete zijde (onderste grafiek, paarse lijn) welke resulteert in een trage zoet-zout uitwisseling door de monding van deze voorhaven met het IJsselmeer. Na 10 minuten deuropentijd en uitvaren en invaren van schepen sluiten de sluisdeuren naar de zoete zijde en blijft een rest zoutmassa en zoutgehalte in de kolk over. Om 2:00 uur herhaalt dit proces zich weer etc..



Figuur 2.6 Schematische schutting naar zoute zijde (Waddenzee) en zoete zijde (IJsselmeer) tijdens hoge buitenwaterstand aan zoute zijde, geen getij, zee met 20 ppt zoutgehalte.

Figuur 2.7 toont schuttingen naar de zoete en zoute zijden bij lage buitenwaterstand aan de zoute zijde. Tijdens het nivelleren van de kolk met de lage zoute zijde zien we om 2:00 en 3:00 uur dat het zoutgehalte in de kolk constant blijft maar de zoutmassa in de kolk afneemt: er wordt brak kolkwater naar de zoute voorhaven geloosd. Ook in dit voorbeeld veronderstellen we dat het zout in de kolk homogeen is gemengd. Omgekeerd, tijdens nivelleren naar de hogere waterstand aan de zoete zijde wordt zoet water de kolk ingelaten wat de zoutmassa in de kolk niet wijzigt maar door verdunning wél het zoutgehalte in de kolk verlaagt.

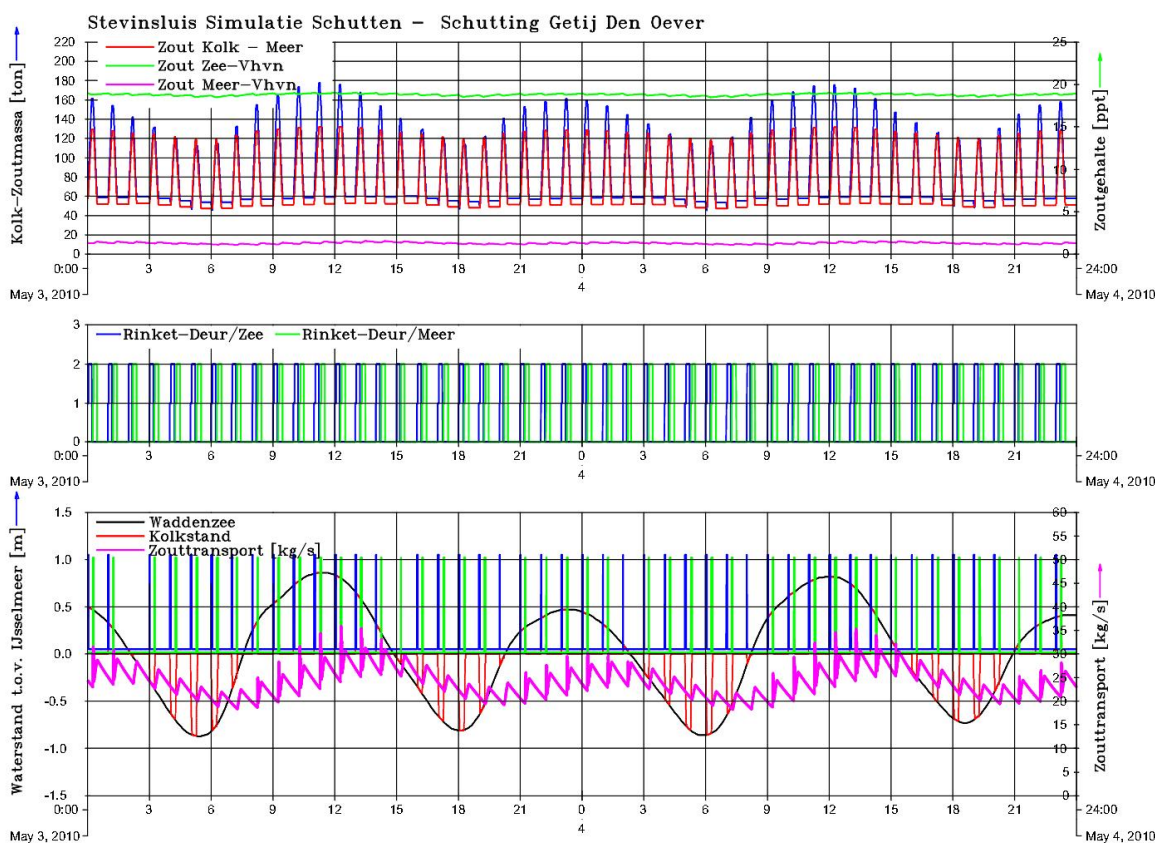
Het patroon van zout-zoet uitwisseling in de kolk is gelijk aan dat in Figuur 2.6. In vergelijking met hoge buitenwaterstand (Figuur 2.6) vertoont de zoutlek naar het IJsselmeer bij lage buitenwaterstand (onderste grafiek, paarse lijn) niet meer de zoutpuls (schuttschijf) door het nivelleren, immers bij lage buitenwaterstand op zee wordt er zoet water naar de kolk en dus vanuit het IJsselmeer ingelaten.



Figuur 2.7 Schematische schutting naar zoute zijde (Waddenzee) en zoete zijde (IJsselmeer) tijdens lage buitenwaterstand aan zoute zijde, geen getij, zee met 20 ppt zoutgehalte.

Met getij wisselen de patronen in Figuren 2.10 en 2.11 elkaar af waarbij de zoutlek (onderste grafiek, paarse lijn) een zweving vertoont met een dal volgend op de laagste waterstand op zee (onderste grafiek, zwarte lijn). In dit voorbeeld kozen we voor één schutting per uur, met 10 minuten deuropentijd en met 3 minuten omschakeltijd voor de bediening van de sluisdeuren aan het andere kolkeind.

De zweving in de zoutlek (onderste grafiek, paarse lijn) komt voornamelijk door het aantrekken van zoet water uit het IJsselmeer of afgeven van brakker water naar het IJsselmeer voor het nivelleren van de kolk. De zoetere schuttschijf neemt evenredig toe met het verschil in lagere waterstand aan de zoute zijde en de waterstand aan de zoete zijde. Zodra de buitenwaterstand lager is dan de waterstand aan zoete zijde wordt tijdens elke nivellering zoet water naar de kolk gevoerd. Per nivellering of per schutting wordt de kolk stapsgewijs zoeter en tevens wordt met dalende buitenwaterstand de (zoete) schuttschijf groter. Zowel de toenemende schuttschijf als het zoeter worden van de kolk na elke schutting geven een tijdsvertragend effect van de afname van de zoutlek in verhouding tot de verandering van de waterstand. Het omgekeerde geldt bij toenemende buitenwaterstand hoger dan de zoete zijde: de schuttschijf neemt toe en de kolk werd na elke schutting zouter. Zodoende neemt de zoutlek vertraagd toe ten opzichte van de toename van de buitenwaterstand.



Figuur 2.8 Schematische schutting naar zoute zijde (Waddenzee) en zoete zijde (IJsselmeer) tijdens reëel getij (onderste grafiek, zwarte lijn) bij Den Oever, zee met 20 ppt zoutgehalte.

2.6 Invloed scheepvaart op zout-zoet uitwisseling

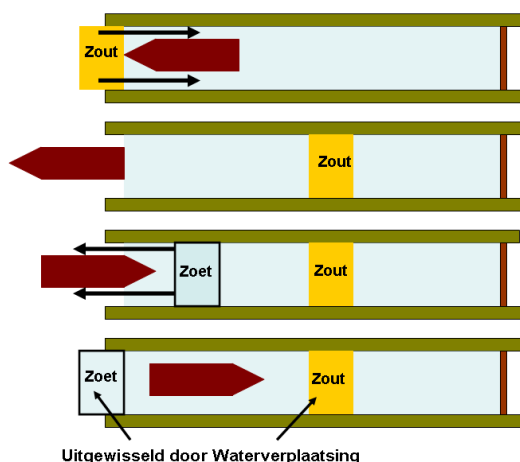
De functie van een schutsluis is het doorlaten van scheepvaart. Hierbij is het volume water dat een schip verdringt essentieel, dit volume heet de waterverplaatsing. Naarmate een schip zwaarder wordt b.v. meer lading vervoert neemt zijn waterverplaatsing toe. De rol van de waterverplaatsing op de zoutlek kunnen we beter begrijpen door een onderscheid te maken tussen de statische waterverplaatsing van een stil liggend of afgemeerd schip in de kolk en de dynamische waterverplaatsing van en door in- en uitvarende schepen.

We veronderstellen dat de zout-zoet uitwisseling, uitgedrukt in zoutmassa per tijdseenheid, door geopende sluisdeuren niet wordt beïnvloed door schepen en scheepvaart; op deze aanname komen we nog terug.

We beginnen met de rol van de statische waterverplaatsing van een schip op de zoutlek. De statische waterverplaatsing verkleint het volume kolkwater waardoor bij gelijk tempo in zout-zoet uitwisseling het zoutgehalte in de kolk sneller het zoutgehalte van de geopende zijde nadert. Zodoende stijgt bij gelijke deuropentijden maar toenemende statische waterverplaatsing door het schip het verschil in zoutgehalte tussen kolk en de nog gesloten zijde. Hierbij gaan we uit van een nog onvolledig uitgewisselde kolk en tevens dat het schip de zout-zoet uitwisseling niet beïnvloed. Op dit laatste aspect komen we nog terug. Tijdens de daarop volgende schutting verhoogt dit grotere verschil in zoutgehalten de uitwisseling van kolkwater met de andere voorhaven. Anderzijds is tijdens de volgende schutting het netto kolkvolume geringer dan van een lege kolk. Het zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010) rekent met deze tegengestelde invloeden van de statische waterverplaatsing op de zoet-zout uitwisseling. In dit zoutlekmodel hanteren we de rekenregel dat tijdens geopende sluisdeuren het uitwisselbare kolkvolume gelijk is aan het lege kolkvolume verminderd met de statische waterverplaatsing van schepen in de kolk.

De invloed van de dynamische waterverplaatsing op de zout-zoet uitwisseling verklaren we aan de hand van Figuur 2.9. De dynamische waterverplaatsing valt uiteen in twee bijdragen. De eerste bijdrage komt door het verplaatsen van een schip in/uit de kolk waarbij tussen kolk en voorhaven water wordt verplaatst. Deze eerste bijdrage is redelijk duidelijk en deze zullen we hierna verder uitwerken en daarna de tweede bijdrage, namelijk het effect van schroefwerking, beschouwen.

Een schip dat de kolk naar de zoute zijde verlaat zuigt door zijn dynamische waterverplaatsing zout water de kolk in. Ondanks menging door de schroef etc. zal het aangezogen zoute water vnl. onder het schip en over de kolkvloer de kolk instromen. Later, maar in dezelfde schutting, vaart vervolgens een identiek schip de kolk binnen en verdringt door zijn dynamische waterverplaatsing kolkwater naar de zoute zijde. Ondanks menging verdringt het invarende schip vooral de zoete toplaag in de kolk naar de voorhaven.



Figuur 2.9 Naar zee uitvarend schip trekt zout water de kolk in en van zee invarend schip perst zoeter kolkwater de kolk uit. De schematische rechthoeken met "zout" en "zoet" vertegenwoordigen de waterverplaatsing van elk schip.

Figuur 2.9 toont schematisch dat twee tegengesteld varende schepen met gelijke waterverplaatsing de zout-zoet uitwisseling vergroten. Per schutting wordt de door in- en uitvarende schepen veroorzaakte zout-zoet uitwisseling ruwweg gelijk gesteld aan hun waterverplaatsing in één vaarrichting maal het initiële verschil in zoutgehalten tussen kolk en relevante voorhaven.

De bovengrens in zout-zoet uitwisseling wordt bereikt als per schutting de waterverplaatsing van de schepen gelijk is aan ca. 50% van het lege kolkvolume. Immers neemt de totale waterverplaatsing nog meer toe dan wordt het uitgewisselde volume water begrensd door het lege kolkvolume verminderd met de waterverplaatsing. In de limiet van een kolk volledig met schepen gevuld is er geen netto uitwisseling van zoutmassa. Voor zowel de Stevinsluis als de Volkeraksluizen blijkt per schutting de totale waterverplaatsing aanmerkelijk kleiner te zijn dan het halve lege kolkvolume: in deze sluisen neemt dus de zoutlek toe bij een toename in waterverplaatsing van schepen.

De tweede bijdrage tot de dynamische waterverplaatsing komt door de schroefwerking. Nadat een schip de kolk invaart remt het door met de schroef achteruit te slaan welke water verplaatst naar de gesloten sluisdeuren. Omgekeerd, tijdens het uitvaren, versnelt het schip in de kolk uit stilstand en de schroef stuwt water naar de gesloten sluisdeuren. In beide gevallen zal de schroefstraal orde-grootte de scheepswaterverplaatsing verplaatsen. Tijdens uitvaren werkt de schroefstraal mee om water van de voorhaven naar de kolk te stuwen wat nodig is voor de vervanging van de waterverplaatsing, zoals hiervoor besproken. Omgekeerd, tijdens afremmen in de kolk van een inmiddels ingevaren schip zal de schroef water uit de richting van de open sluisdeuren aanzuigen. Hierdoor ontstaat een circulatie die mogelijk binnen de kolk blijft bij voldoende grote afstand tussen schroef en open sluisdeuren. Verder speelt hierbij ook de diepte waaruit de schroef water aanzuigt en stuwt in relatie tot de momentane locatie en diepte van de zouttong. De invloed van schroefstralen op de zoutlek kunnen wij niet schatten en hangt af van de diepgang en vaarsnelheid en de locatie van een schip t.o.v. zouttong. Overigens, uit onze waarnemingen in de Stevinsluis blijkt dat de schroefwerking de kolk niet opmengt: de zouttong is duidelijk zichtbaar in onze registraties.

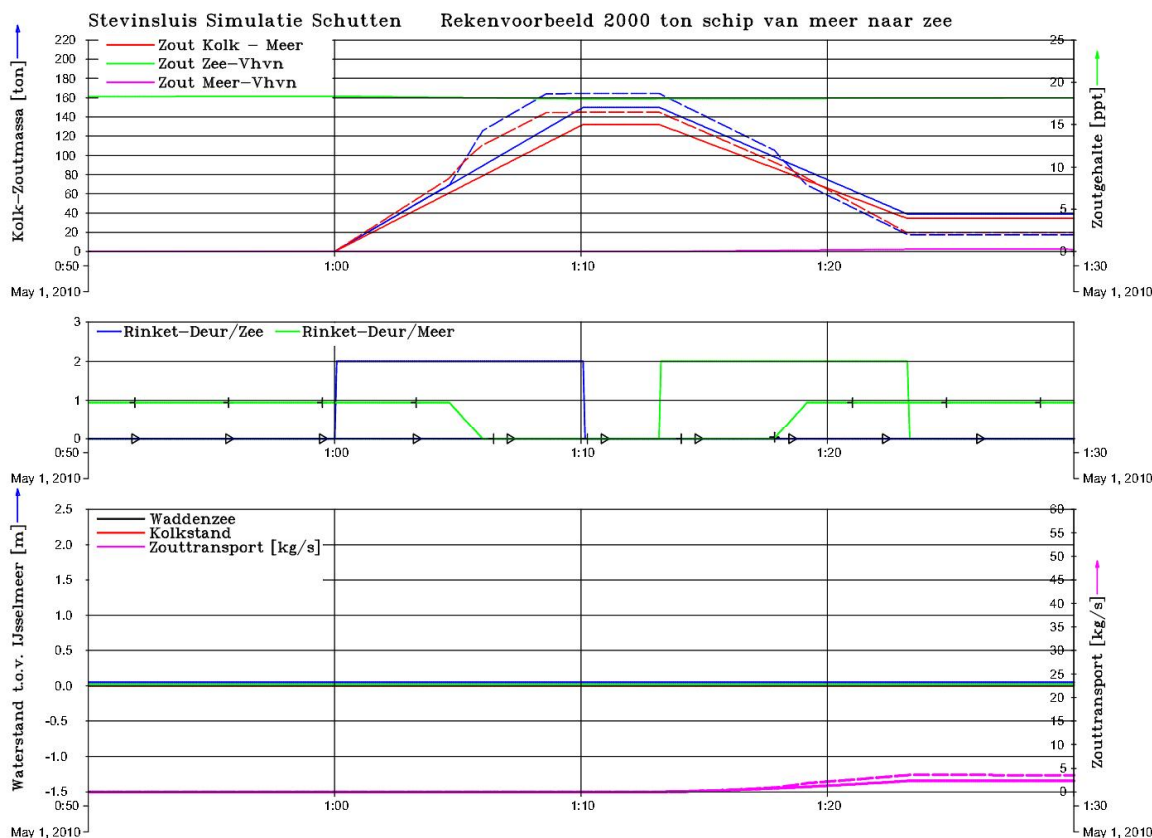
We komen nog terug op onze veronderstelling dat de zout-zoet uitwisseling door dichtheidsverschillen over open sluisdeuren (Figuur 2.1) niet door scheepvaart wordt

gehinderd. Deze veronderstelling is als volgt aanvechtbaar. Van de meeste schepen ligt het overgrote deel van hun waterverplaatsing boven de zouttong (zie b.v. Figuur 2.2). Dan hinderen deze schepen het uittreden van de zoete toplaag tijdens invaren, of tijdens (nog) afgemeerd liggen of tijdens trager uitvaren dan de zoete toplaag uitstroomt. Deze laatste mogelijkheid treedt alleen kortstondig op tussen losmaken van wal en met de motor op gang komen naar de voorhaven. Daarnaast is er de schroefstraal die meer of minder dan de dynamische waterverplaatsing water stuwt.

Noch eerder laboratoriumonderzoek noch aanvullend onderzoek met numerieke simulaties (Groenenboom, 2010) in dit project leverden betrouwbare resultaten. We hanteren daarom dat de scheepvaart de door dichtheidsverschillen aangedreven zout-zoet uitwisseling via geopende sluisdeuren niet beperkt. We rekenen wél met de reductie van het lege kolkvolume als gevolg van de statische waterverplaatsing van schepen in de kolk én met de extra zout-zoet uitwisseling door de eerste bijdrage van dynamische waterverplaatsing van in- en uitvarende schepen.

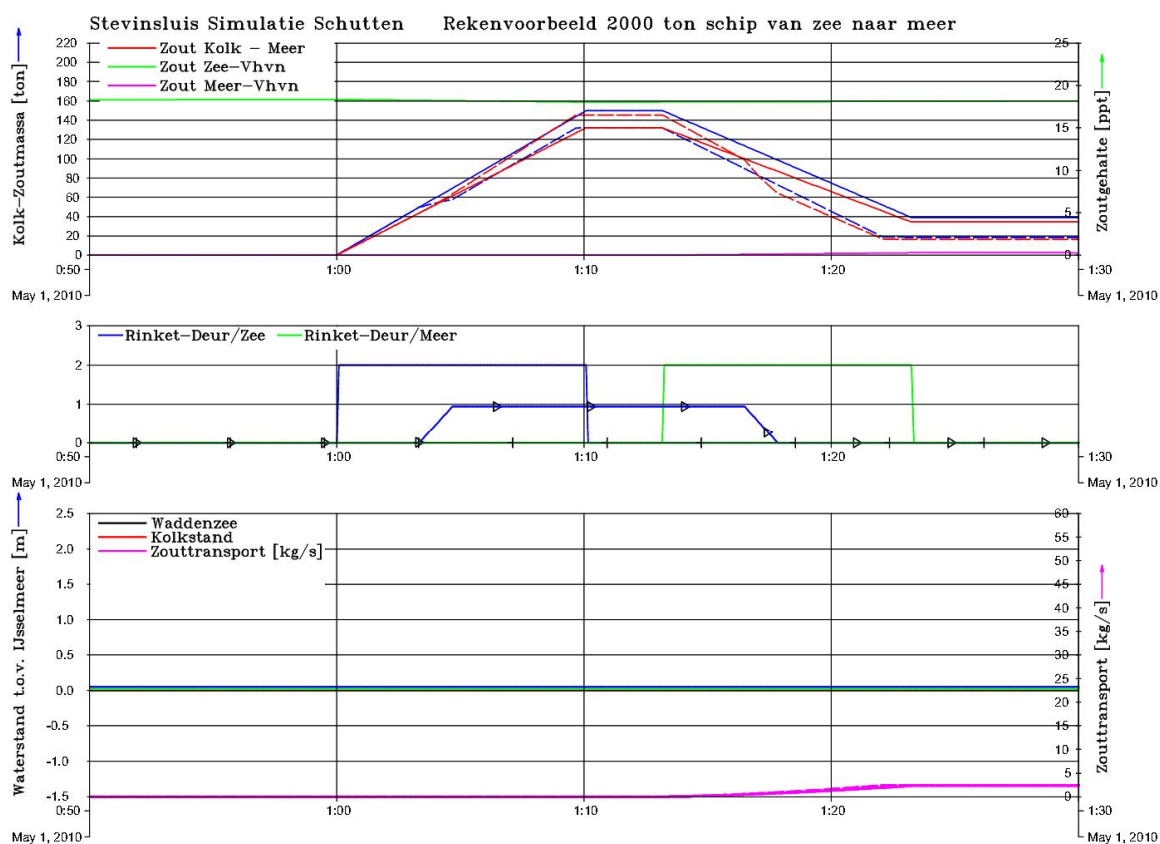
We illustreren voorgaand schematisch met Figuur 2.10 voor een groot schip met 2000 ton waterverplaatsing dat via de kolk van de zoete voorhaven naar de zoute voorhaven wordt geschut zonder verschil in waterstand. In de bovenste grafiek hebben de getrokken lijnen betrekking op een schutting zonder schip en de gestippelde met schip. In de centrale grafiek toont de groene lijn met + tekens de waterverplaatsing van een schip met 2000 ton waterverplaatsing omgerekend in een equivalent diepte (hier bijna 1m) over het gehele kolkoppervlak.

Het zoutgehalte van het kolkwater, in volume verminderd door de statische waterverplaatsing, neemt sneller toe omdat we veronderstellen dat de zout-zoet uitwisseling ongewijzigd blijft. De toename van de zoutmassa is daarom ook ongewijzigd. Om ca. 1:05 uur verlaat het schip de kolk naar zee en trekt dan zouter water uit de zoute voorhaven de kolk in. De zoutmassa en het zoutgehalte in de kolk stijgen nu sneller dan zonder dynamische waterverplaatsing. Het resultaat is een zoutere kolk op het moment van schutten naar de zoete zijde. Vervolgens vergroot het zoutere kolkwater de zout-zoet uitwisseling met de zoete voorhaven. Bij open sluisdeuren naar de zoete zijde dalen de zoutmassa en het zoutgehalte in de kolk sneller dan zonder de voorafgaande schutting met schip (naar zee). Om 1:17 uur vaart vanaf de zoete zijde een 2000 ton schip de kolk in en verdringt sneller de zoutmassa de kolk uit dan zonder schip en met schip is het volume kolkwater geringer (statische waterverplaatsing) waardoor het zoutgehalte in de kolk nog sneller daalt. Het resultaat is dat tijdens de schutting naar de zoete zijde de afname van zoutmassa in de kolk en dus de zoutlek door deze scheepsbewegingen groter wordt. De zoutlek is hierdoor toegenomen.



Figuur 2.10 Groene lijn met + tekens in centrale grafiek toont de equivalente waterdiepte van een schip met 2000 ton waterverplaatsing. Om 1:05 verlaat dit schip de kolk naar de zoute zijde en om 1:17 uur vaart een vergelijkbaar schip de kolk in vanaf de zoete zijde. De stippellijnen tonen de zoutmassa en het zoutgehalte in de kolk met schip, de getrokken lijnen zonder schip.

Figuur 2.11 toont schematisch de geringe toename in zoutlek wanneer een schip van zee naar meer wordt geschut. Om 1:05 uur vaart het schip de kolk in en perst brak kolkwater naar buiten terwijl de zout-zoet uitwisseling ongestoord doorgaat waardoor het zoutgehalte in het geringere kolkvolume sneller stijgt dan zonder schip. Terwijl het schip in de kolk ligt afgemeerd daalt tijdens geopende sluisdeuren naar de zoete zijde het zoutgehalte van het kolkwater sneller dan zonder de waterverplaatsing van het schip. Het tempo waarin de zoutmassa in de kolk afneemt blijft ongewijzigd als we aannemen dat zout-zoet uitwisseling ongewijzigd blijft. Het om 1:17 uur uitvarende schip zuigt nu zoet water uit de voorhaven de kolk in waardoor het gemiddelde zoutgehalte van het kolkwater sterker daalt dan zonder schip. De zoutlek is hierdoor in geringe mate toegenomen.



Figuur 2.11 Blauwe lijn met Δ tekens in centrale grafiek toont de equivalente waterdiepte van een schip met 2000 ton waterverplaatsing. Om 1:05 vaart het schip de kolk in vanaf de zoute zijde en om 1:17 uur vaart dit schip de kolk uit naar de zoete zijde. De stippellijnen tonen de zoutmassa en het zoutgehalte in de kolk met schip, de getrokken lijnen zonder schip.

2.7 Methode van lekkende ebdeuren

Teneinde de zoutlek naar het Hollandsch Diep te beperken is in de jaren '70 de zg. methode van "lekkende ebdeuren" in de Volkeraksluizen toegepast. Deze techniek beproefden we opnieuw in de Stevinsluis. De Volkeraksluizen en de Stevinsluis hebben zg. puntdeuren die in gesloten toestand met hun punt naar de zijde met de hoogste waterstand wijzen en in die stand door de waterdruk extra afdichten. Zodoende zijn per kolkeinde twee paar puntdeuren nl. de eb- en vloeddeuren.

Ebdeuren zijn de sluisdeuren die bediend worden tijdens schutten naar lage waterstand aan de zoute zijde waarbij de vloeddeuren altijd open staan. Door de rinketschuiven in de ebdeuren tenminste gedeeltelijk te openen wordt een kunstmatig lek gecreëerd dat overigens ook bij slecht onderhoud kan ontstaan (maar is dan veel kleiner).

Dergelijke lekkende ebdeuren voeren vanaf de zoete zijde met hogere waterstand zoet water door de kolk waar het opmengt met zouter kolkwater; het opgemengde water verlaat de kolk via de rinketschuiven in de andere ebdeuren naar de zoute zijde. Lekkende ebdeuren brengen zout naar zee door verlies van zoet water en dit debiet heet ebdebiet, zie Figuur 2.12.

In de Volkeraksluizen is de methode van lekkende ebdeuren zeer effectief tegen zoutlek gebleken vanwege:

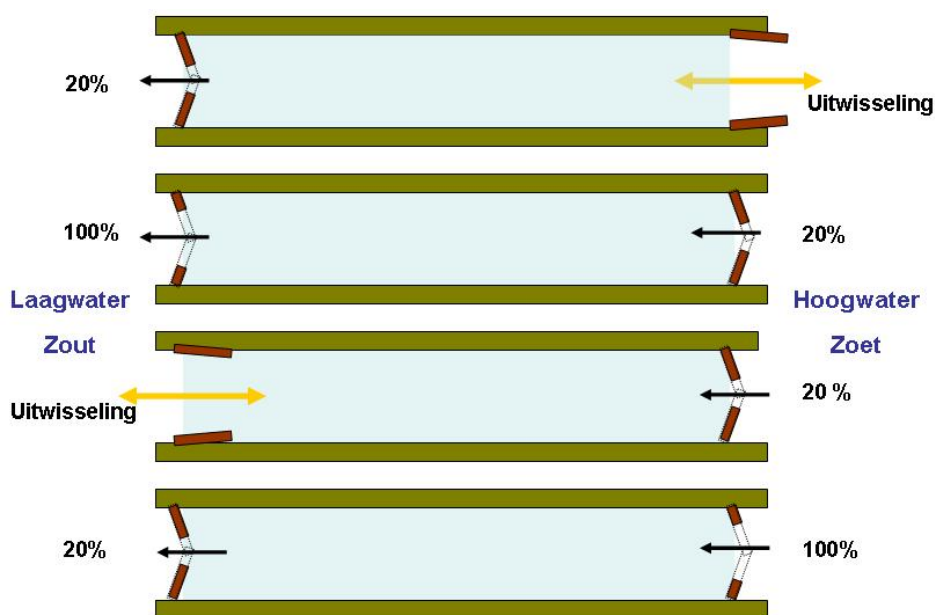
- de retourstroming van zout uit de kolk en eventueel zout uit de zoete voorhaven naar de zoute zijde;
- de verzoeting van de zoute voorhaven en
- het lagere zoutgehalte van het kolkwater.

De laatste twee onderling afhankelijke invloeden beperken sterk de zout-zoet uitwisseling door geopende sluisdeuren vanwege de evenredigheid van de uitgewisselde zoutmassa met het verschil in zoutgehalten tot de macht 1,5.

Overigens, het verlies van zoet water door nivelleren naar de lage waterstand aan de zoute zijde (zie Figuur 2.4) is als proces vergelijkbaar maar we rekenen het equivalente debiet (schutverlies) niet tot het ebdebiet door lekkende ebdeuren.

Bij gebrek aan nauwkeurige beschrijving uit het verleden kiezen we voor de procedure volgens Figuur 2.12 waarbij altijd zoet water via de kolk naar de lager gelegen zoute zijde stroomt. Van belang zijn de grenzen aan minimale en maximale opening van de rinketschuiven in één paar ebdeuren, aannemende dat aan het andere kolkeinde óf de rinketschuiven volledig geopend zijn óf de ebdeuren. De zijde met minimale rinketopening ligt tegenover de zijde waarnaar geschut gaat worden. Vooral de minimale rinketopening bepaalt het ebdebiet maar tevens het verlies van zoet water en het zouttransport terug naar de zoute zijde.

Aan de zijde waarnaar geschut gaat worden staan de rinketschuiven voor het nivelleren volledig open. Doordat aan de andere zijde de rinketschuiven nog gedeeltelijk open staan en water door de kolk stroomt ontstaat er een blijvend verval over de volledig geopende rinketschuiven. Dit verval moet tot ca. 10 cm beperkt blijven opdat de aandrijving zonder schade de sluisdeuren kan openen. Onze ervaring in de Stevinsluis en met het daar heersende getij geeft als bovengrens 30-35% van volledige opening van de rinketschuiven.

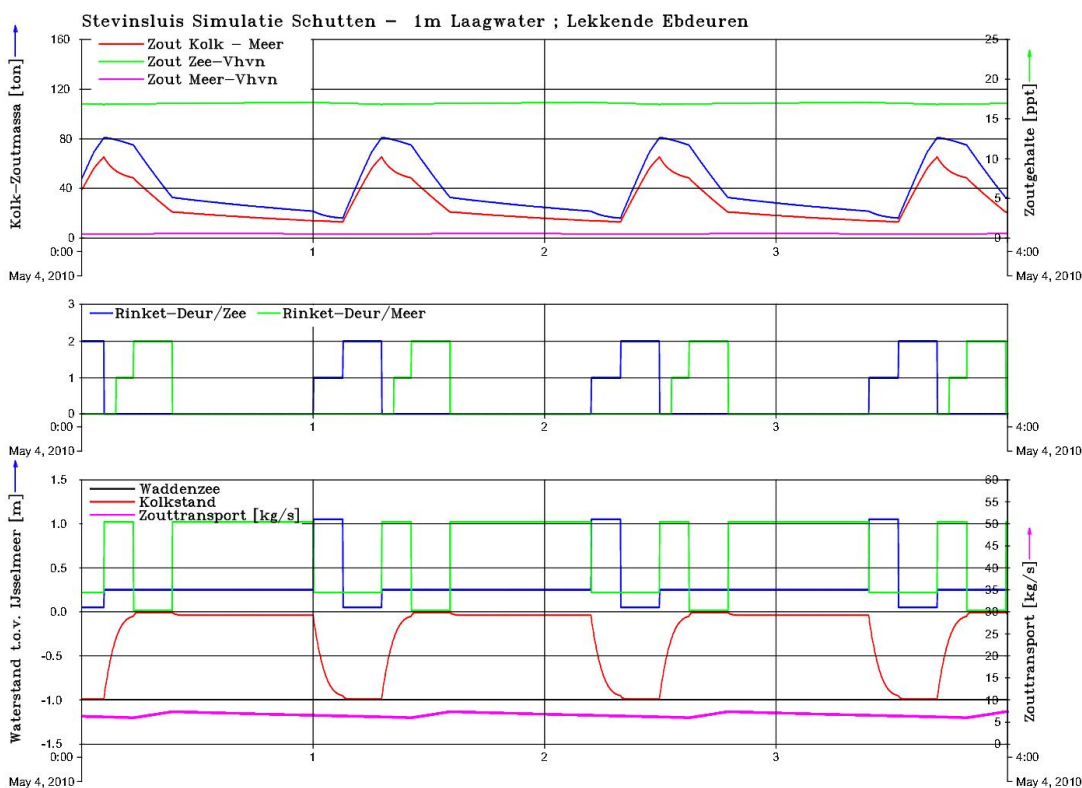


Figuur 2.12 Onze uitvoering van de methode van lekkende ebdeuren waarbij ongeacht de schutstadia met zoet water zout uit de kolk naar de lager gelegen zoute zijde wordt terug gebracht.

Als demonstratie van de invloed van lekkende ebdeuren op de zoutlek tonen we in Figuur 2.13 schematisch de waterstand, het zoutgehalte en de zoutmassa van de kolk terwijl de rinketschuiven minimaal 20% geopend zijn (zie onderste grafiek). Deze patronen in het verloop van zoutmassa komen overeen met onze waarnemingen. Bij schutten naar de zoete zijde is de waterstand in de kolk gelijk aan die van de zoete voorhaven (onderste grafiek, rode lijn). Zodra de sluisdeuren aan de zoete zijde sluiten neemt de waterstand in de kolk wat af doordat de rinketschuiven aan de zoute zijde 20% open staan maar aan de zoete zijde voor 100%. Het ebdebiet door de kolk stuwt nu brak kolkwater naar de lager gelegen zoute voorhaven.

Tijdens het nivelleren naar de zoute zijde blijven de rinketschuiven aan de zoete zijde voor 20% open zodat er een verhang over de nog gesloten sluisdeuren aan de zoute zijde blijft. Zie ook de waarden van de opening van de rinketschuiven in de onderste grafiek waarvan de blauwe voor de rinketschuiven aan de zoute zijde voor de leesbaarheid verticaal is verschoven.

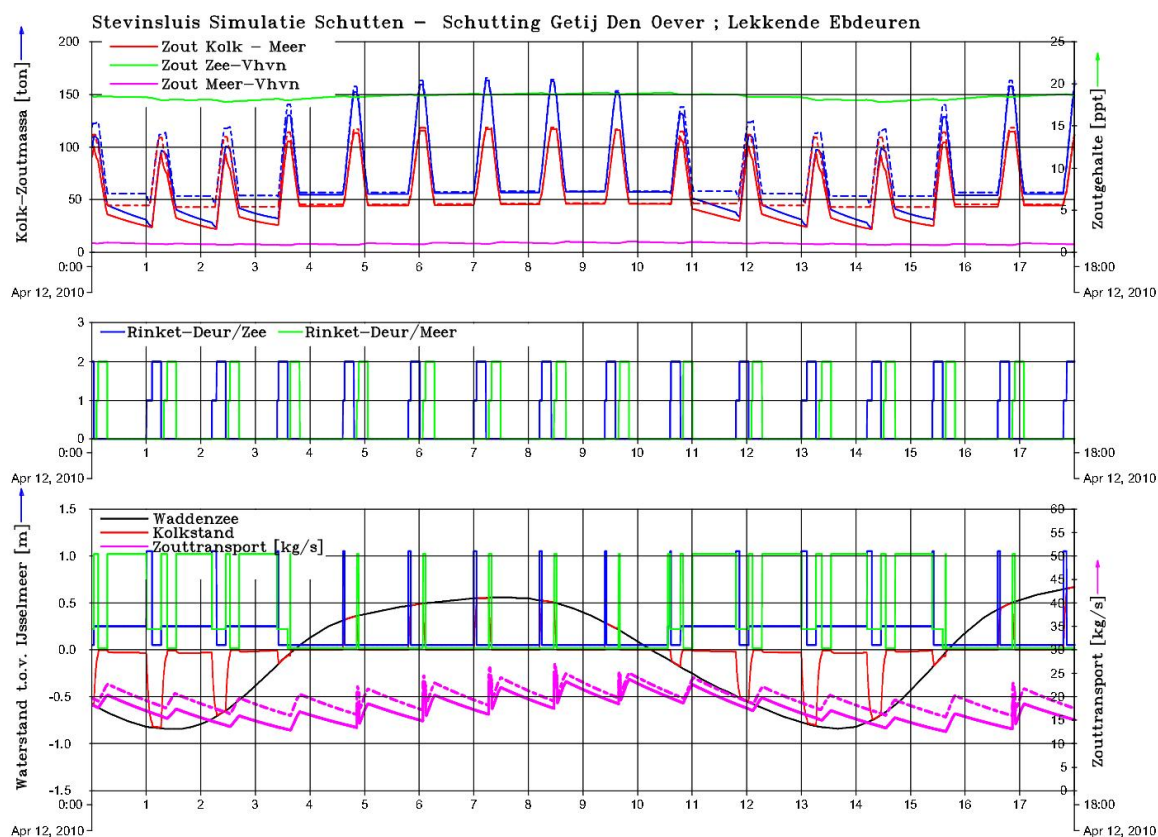
Het nivelleren duurt langer omdat ruwweg 20% van het debiet niet ten goede komt aan het vullen of legen van de schutstadij. Het verhang is hier voldoende gering om de aandrijving zonder schade de sluisdeuren naar de zoute zijde te laten open. Dan loopt de kolk snel leeg tot het peil van de lage buitenwaterstand: zie het knikje in de rode lijn (onderste grafiek) juist boven -1m kolkpeil. Om dit verhang over de sluisdeur aan de zoute zijde te vermijden kunnen de voor 20% geopende rinketschuiven aan de zoete zijde tijdelijk gesloten worden. Het ebdebiet, als oorzaak van het verhang, wordt dan tijdelijk onderbroken zodat de kolk wél volledig tot het laagwaterpeil nivelleert voordat de sluisdeuren naar de zoute zijde openen. Deze onderbreking van het ebdebiet zal de tijd voor het nivelleren verkorten tot die zonder ebdebiet.



Figuur 2.13 Schematische schuttingen met methode van lekkende ebdeuren voor minimaal 20% geopende rinketschuiven, bij 1m lage buitenwaterstand en zee met 20 ppt zoutgehalte.

Als demonstratie van de invloed van lekkende ebdeuren op de zoutlek onder reële getijcondities vergelijken we in Figuur 2.14 de gestippelde lijnen zónder en de getrokken lijnen mét de methode van lekkende ebdeuren. We namen 20% opening van de rinketschuiven tegenover de zijde waarnaar geschut wordt of gaat worden. Zo lang als mogelijk worden de rinketschuiven aan de zoute zijde op 20% gehouden zodat de kolk zo goed mogelijk in verbinding blijft met de zoete voorhaven. Nadat de sluisdeuren naar de zoete zijde tijdens lage buitenwaterstand sluiten daalt gering het peil in de kolk passende bij het verhang voor het ebdebiet door de kolk met 100% opening van de rinketschuiven naar de zoete zijde en 20% opening naar de zoute zijde. Bij dalende lage buitenwaterstand neemt de tijd voor nivelleren toe, in de onderste grafiek van Figuur 2.14 is deze verlenging door de gehanteerde tijdschaal nauwelijks zichtbaar als een grotere breedte van de blauwe blokken van 100% geopende rinketschuiven.

Met de methode van lekkende ebdeuren neemt gedurende lage buitenwaterstand de zoutlek (onderste grafiek, paarse lijn) gestaag af naarmate de kolk steeds zoeter wordt door het zoetwater ebdebiet. Tijdens hoge buitenwaterstand, volgende op een periode met lekkende ebdeuren, loopt de zoutlek traag op naar de zoutlek zonder laagwaterperiode van lekkende ebdeuren. Door het (zoetwater) ebdebiet daalt het zoutgehalte in de voorhaven aan de zoute zijde gering (bovenste grafiek, groene lijn) wat de zout-zoet uitwisseling met de zoute zijde enigszins reduceert.



Figuur 2.14 Schematische schutting met lekkende ebdeuren (getrokken lijnen) en zonder (gestippelde lijnen) naar zoute zijde (Waddenzee) en zoete zijde (IJsselmeer) tijdens lage buitenwaterstand aan zoute zijde, tijdens reëel getij (onderste grafiek, zwarte lijn) bij Den Oever, zee met 20 ppt zoutgehalte.

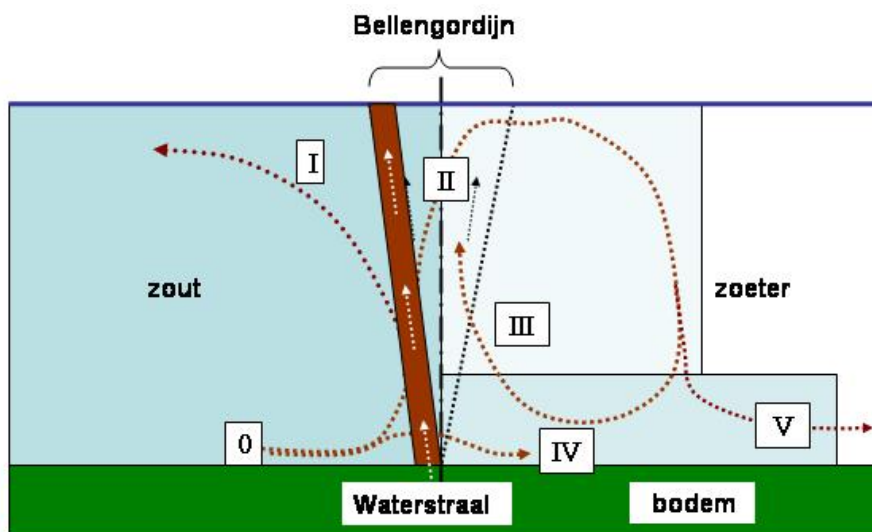
2.8 De zoutlek-beperkende werking van een luchtbellenscherm

Een luchtbellenscherm wordt gevormd door kleine luchtbellens in het water te blazen en zo gelijkmatig mogelijk over de kolkbreedte verdeeld. Door de introductie van lucht in de vorm van luchtbellens wordt effectief een opdrijvende waterstraal gecreëerd die over ca. 75% van de waterdiepte veel omgevingswater meesleurt. Over de bovenste ca. 25% van de waterdiepte stroomt het meegesleurde water zijdelings af en vormt een beperkte recirculatiezone waarin het water weer bij de teen van het luchtbellenscherm wordt mee gesleurd. Deze eigenschappen zijn uitvoerig en voor kolken geldende waterdiepten gemeten (Bulson, 1961).

Experimenten in diepe sluisen van IJmuiden, ondersteund met semi-empirische theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962), tonen aan dat op voorgaande wijze en bij dezelfde verschillen in zoutgehalte het zouttransport via een luchtbellenscherm tot minimaal 20% van zijn oorspronkelijke grootte beperkt kan worden. Hiervoor zijn aanmerkelijke hoeveelheden lucht nodig die worden uitgedrukt per eenheid van kolkbreedte d.w.z. als specifiek luchtdebit (Nm²/s) waarbij N refereert naar de (Normale) atmosferische omstandigheden waaronder lucht door een compressor wordt ingezogen.

Figuur 2.15 toont de complexe stromingspatronen die een correct ingestelde luchtbellenscherm veroorzaakt en welke resulteren in een zwakkere zouttong die minder

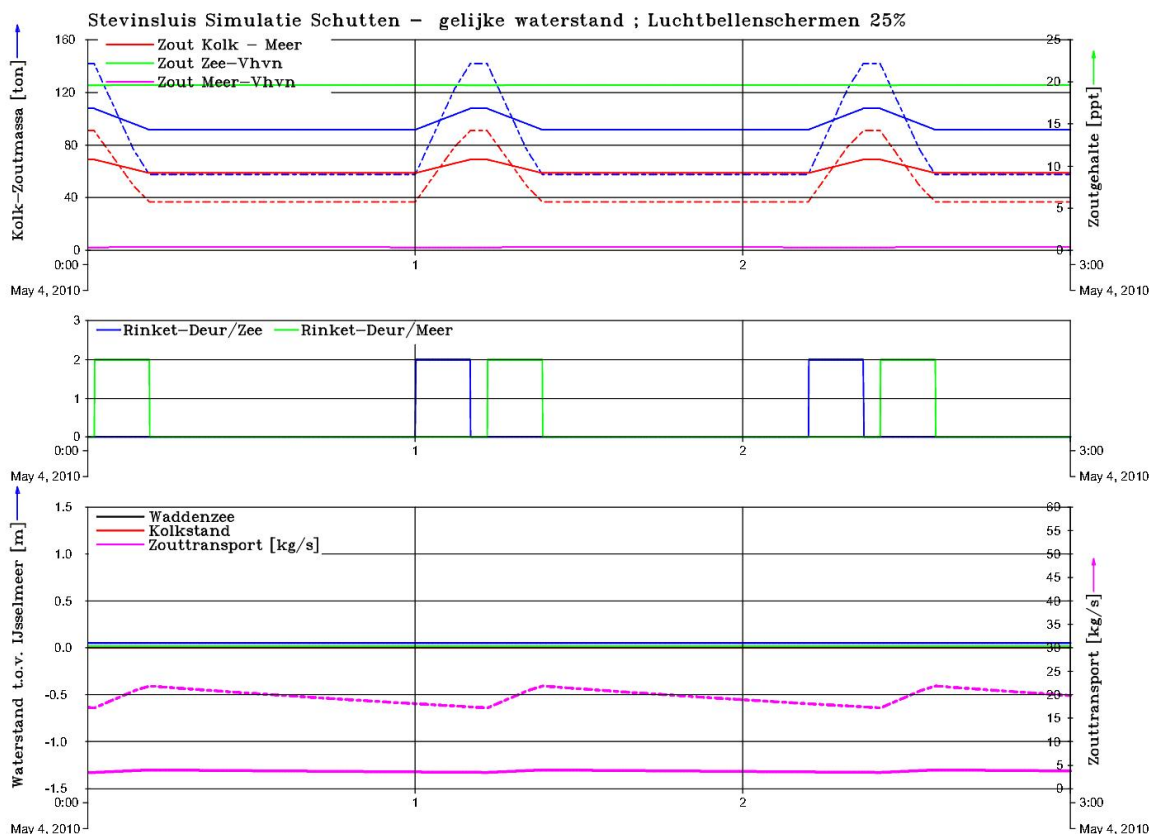
zoutmassa verplaatst. Passerende scheepvaart blijkt de werking van een luchtbellenscherm niet merkbaar te hinderen. Scheepvaart ondervindt mogelijk hinder van de circulatiepatronen aan het wateroppervlak wanneer deze het schip in vaarrichting “duwen”. Voor een goede zoutwerende werking van een luchtbellenscherm is het belangrijk dat het “gordijn” aan luchtballen geen spleten vertoont waardoor zout water kan passeren. Verder blijkt de teen van een luchtbellenscherm een potentiële lek te zijn van zout water. In het verleden zijn geperforeerde buizen gebruikt maar ons ontwerp bestaat uit een dubbele rij diffusers (we spreken wel over “douchekoppen”) die elkaar afschermen en meteen bij de teen een brede en dichte strook luchtballen introduceren. Een vraag die we in dit rapport beantwoorden luidt of met zulke diffusers een drempel nog een extra beschermende werking voor de teen van het luchtbellenscherm geeft.



Figuur 2.15 Zoutlekbeperkende werking luchtbellenscherm ondersteund met een waterscherm (bruine band) op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale langsdoorsnede van een kolk. (0) Aanstromend zout aangedreven door drukverschil door horizontale verschillen in zoutgehalten (I) Opwaarts transport van zout en loslating naar de zoute zijde. (II) Menging van zout in zoeter water in het luchtbellenscherm en gedeeltelijk transport van zout naar de zoetere zijde. (III) Recirculatie van inkomend zout en aangedreven door het luchtbellenscherm. (IV) Binnendringen van zout aan de teen van het luchtbellenscherm. (V) De vorming van een zwakkere zouttong (zie ook Figuur 2.2) door de beperkte levering van zout.

Voor gelijke waterstanden aan zoute en zoete zijde toont Figuur 2.16 schematisch de afname van de zoutlek door luchtbellenschermen ten opzichte van de situatie zonder bellenschermen: bij geopende sluisdeuren wordt nog slechts 25% van de zoutmassa uitgewisseld bij hetzelfde verschil in zoutgehalten. De getrokken rode lijn in de bovenste grafiek toont met luchtbellenschermen geringere variaties in het zoutgehalte in de kolk welke nu rond het gemiddelde (10 ppt) fluctueert van het zoutgehalte van de Waddenzee (20 ppt) bij Den Oever en van het IJsselmeer (0 ppt).

Door deze tendens naar een gemiddeld zoutgehalte van de kolk neemt het verschil tussen het zoutgehalte in de kolk met dat van enige voorhaven af. Hierdoor daalt de aandrijving van de zout-zoet uitwisseling meer dan evenredig (macht 1,5) en is de resulterende zoutlek kleiner omdat de bovengenoemde 25% betrokken dient te worden op de doorgelaten zoutmassa bij deze kleinere verschillen in zoutgehalten.



Figuur 2.16 Schematische schutting met luchtbellenscherm (getrokken lijnen) en zonder (gestippelde lijnen) naar zoute zijde (Waddenzee) en zoete zijde (IJsselmeer) zonder verschil in waterstand, zee heeft 20 ppt zoutgehalte..

Een tweede innovatie die we in de praktijkproef onderzoeken betreft de toevoeging van een zoetwaterstraal aan de zoute zijde van een luchtbellenscherm. Door mechanisme II in Figuur 2.15 en bij voldoende zoetwaterdebiet wordt vooral zoet water uit de waterstraal het luchtbellenscherm in gemengd welke het zoutgehalte in volume III in Figuur 2.15 kan verlagen. Numerieke simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010) en laboratoriumproeven (Mastbergen, 2010) tonen deze reducerende invloeden op het zouttransport door een luchtbellenscherm, gecombineerd met een zoetwaterscherm.

Tenslotte onderzoeken we de vraag wat de ondergrens is van het zouttransport via een luchtbellenscherm en bij welk luchtdebiet deze ondergrens wordt bereikt. Dit optimum is thans niet bekend, wél weten we dat bij voldoende groot luchtdebiet een luchtbellenscherm eerder een mengsel van (zout-zoet) water wordt dan een scheiding tussen zout en zoet water.

Op basis van de metingen in de Stevinsluis en voortbouwend op de numerieke berekeningen, de laboratoriumproeven en de ervaringen met de methode van lekkende ebdeuren wensen we getalsmatig inzicht te krijgen in de optimale verdeling van een gegeven debiet/verlies aan zoet water voor de maximale beperking van de zoutlek door een schutsluis. Hierbij onderzoeken we ook de invloed van verhoogde drempel(s) op zowel de zout-zoet uitwisseling als op de zout-zoet scheiding door luchtbellenschermen. Dat zijn de doelstellingen voor de praktijkproef in de Stevinsluis en van het voorliggende rapport.

3 Beschrijving Praktijkproef

3.1 Doelstelling

In de voorstudie (Uittenbogaard, 2010) zijn met het daarin beschreven zoutlekmodel schattingen gepresenteerd van de zoutlek door de Volkeraksluizen met het Volkerak-Zoommeer tot 20 ppt zout verzilt. Het zoutlekmodel berust op de bekende theorie voor het ongehinderde zouttransport door geopende sluisdeuren, in Engelstalige vakliteratuur *lock-exchange flow* genoemd. Met verschillende zoutlekbeperkende middelen zoals luchtbellenschermen, waterschermen, verhoogde drempels en een zoetwaterdebiet door de kolk bij lage buitenwaterstand (ebdebiet, lekkende ebdeuren) kan het zouttransport door geopende sluisdeuren worden beperkt. Dergelijke beperkingen in het doorlaten van zout door geopende sluisdeuren worden in het zoutlekmodel vertegenwoordigd door hun zg. doorlaatfractie parameter. Van luchtbellenschermen is voor de doorlaatfractie weliswaar een semi-empirische theorie ontwikkeld en in schutsluizen zonder scheepvaart getoetst (Abraham & V.d. Burgh, 1962) maar deze doorlaatfractie is niet bekend voor andere zoutlekbeperkende middelen noch voor andere ontwerpen van luchtverdelers van luchtbellenschermen

Onder reële omstandigheden van een in bedrijf zijnde schutsluis met scheepvaart onderzoeken we twee fundamentele bouwstenen van het zoutlekmodel:

- de toepasbaarheid van de theorie van ongehinderd zouttransport door geopende sluisdeuren;
- de doorlaatfractie van de zoutlekbeperkende middelen.

Dit rapport beperkt zich voornamelijk tot de beantwoording van voorgaande vragen maar biedt wel een doorkijk naar de mogelijkheden om het gewenste doel voor de Volkeraksluizen te bereiken. Overigens, het extra zouttransport dat optreedt bij het nivelleren van de schutsluis tijdens hoge buitenwaterstand, dus bij gesloten sluisdeuren, is niet van belang voor de Volkeraksluizen omdat de waterstand in het Hollandsch Diep altijd hoger zal zijn dan in het Volkerak-Zoommeer en blijft dan ook in de huidige rapportage van de Stevinsluis praktijkproef buiten beeld. Anderzijds zorgt nivelleren met zoet water uit het Hollandsch Diep wel voor een vermindering van het zoutgehalte in de kolk en daarmee ook van het zouttransport naar het Hollandsch Diep.

3.2 De Stevinsluis met zoutlekbeperkende middelen

In juli 2009 is door Rijkswaterstaat WD en Deltares de keuze voor de Stevinsluis als testlocatie voor de Volkeraksluizen gemaakt vanwege het aanwezige zout-zoet verschil en de gelijke wijze waarop de kolk wordt genivelleerd met zg. verticaal bewegende schuiven in hun sluisdeuren (rinketschuiven).

In dit onderdeel geven we de relevante afmetingen van de Stevinsluis en we verkennen de omgeving in termen van bodemligging en de verspreiding van zoet en zout water. Verder presenteren we welke zoutlekbeperkende middelen in of rondom de Stevinsluis aanwezig zijn en welke door Deltares t.b.v. de praktijkproef zijn geïnstalleerd.

Figuur 3.1 toont een overzicht van de Stevinsluis en de voorhaven naar de Waddenzee en de brug in de A7-snelweg naar de Afsluitdijk. De kolkvloer ligt op -4,7m NAP en de kolk is tussen gesloten vloed- of ebdeuren 148.6m lang. Aan het wateroppervlak is de kolk 14,0m breed

maar 14,6m breed op diepten groter dan -1,2m NAP (tot 2,5m boven de kolkvloer). De sluishoofden met de dubbele puntdeuren zijn over de gehele diepte 14,0m breed. Bij de bodem op -4,7m NAP hebben de sluisdeuren een aanslag tegen een drempel van 30 cm hoogte waarmee de bovenkant van de drempel op -4,4m NAP ligt.

Voor enig inzicht in de ordegrrootte van zoutmassa in de kolk en het zouttransport geven we het volgende rekenvoorbeeld. Bij NAP waterstand bedraagt het kolkvolume ca. 10.000 m³. Wanneer het zoutgehalte in de kolk met 15 ppt (15 kg zout/m³) daalt tijdens een schutting naar het IJsselmeer wordt per schutting 150 ton zout naar het IJsselmeer getransporteerd. Op drukke dagen zijn er 15 schuttingen zodat met voorgaand voorbeeld een zouttransport van ca. 26 kg zout/s optreedt (2250 ton/dag).

Het belang van zoutlekbeperkende middelen in de Stevinsluis is dan ook aanwezig en deze zijn in de sluis in de vorm van luchtbellenschermen uitgevoerd. Verder blijkt de schutsluis tegen zouttransport beschermd te worden door lozingen van zoet water in en vóór de zoute voorhaven van de Stevinsluis zoals we hierna nog zullen toelichten.

De overzichtsfoto (Figuur 3.1) toont per zijde twee paar sluisdeuren (puntdeuren), aan zeezijde geopend en naar meerzijde gesloten. De sluisdeuren met de punt gericht naar zee zijn de vloeddeuren en het paar met de V-vorm wijzend naar de zoete zijde zijn de ebdeuren. Rond gelijk water worden zowel de eb- als vloeddeuren gesloten. Op de foto is er kennelijk sprake van een gelijk-water situatie want zowel de eb- als vloeddeuren zijn gesloten, in dit geval aan meerzijde. In de kolk is een schip zichtbaar dat van zeezijde de kolk inkwam.

Tussen elk paar van vloed- en ebdeuren en aan zowel de zeezijde als aan de meerzijde liggen de luchtbellenschermen van de Stevinsluis. Elk scherm bestaat uit een geperforeerde buis in een sleuf in de verhoogde drempel. Deze schermen worden gevoed met één of twee compressoren van de Stevinsluis die nominaal resp. 125 en 250 l/s lucht van atmosferische druk leveren; een derde compressor is aanwezig en dient als reserve.



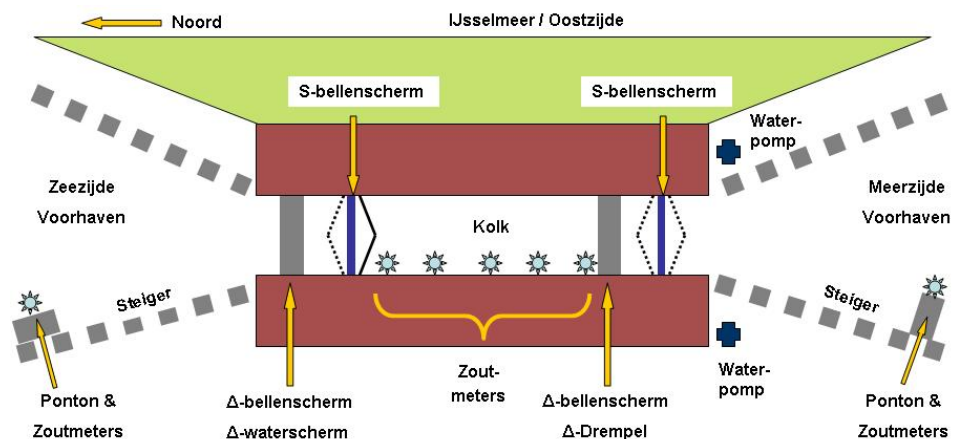
Figuur 3.1 Overzichtsfoto Stevinssluuis met zijn voorhavens naar Waddenzee (Noord) en IJsselmeer (Zuid). Bij de letter S van de tekst Sluiskolkade in de foto is de uitlaat van het gemaal Leemans zichtbaar.

We bespreken hierna de directe omgeving van de Stevinssluuis en de installatie van onze instrumenten e.d..

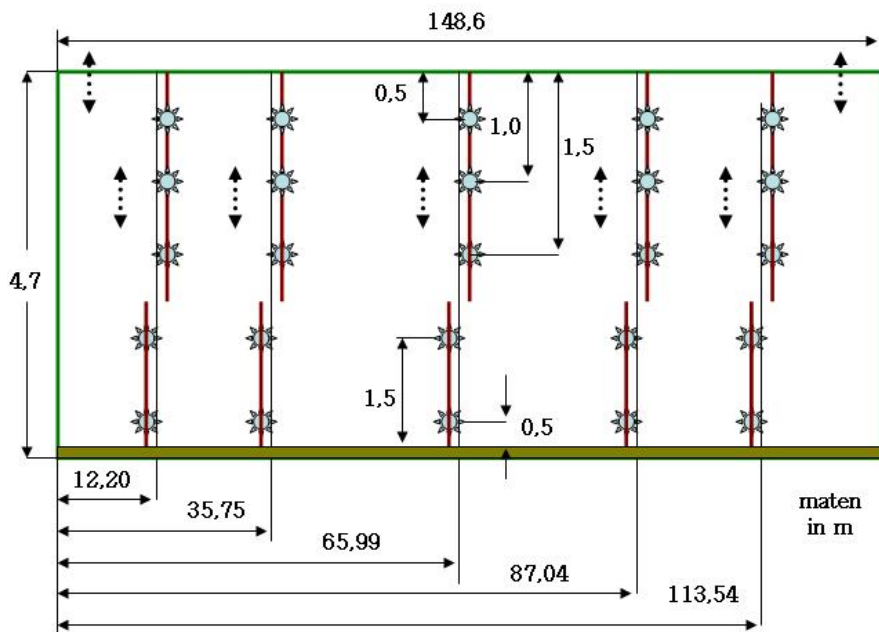
Op de foto zijn bij de gebouwen naast de kolk parkeerplaatsen zichtbaar waarop we de compressor plaatsen voor onze luchtbellenschermen. Met een kraanwagen zijn de frames met onze luchtbellenschermen, een waterscherm aan zeezijde en een verhoogde drempel in de kolk aan meerzijde geplaatst, zie ook Figuur 3.2. (Figuur 3.2a)

Figuur 3.2b (verticale langsdoorsnede) toont de posities van de zoutmeters welke gelijktijdig waterdruk, temperatuur en de geleidbaarheid van water meten. Per verticaal hangen drie zoutmeters aan een drijvende boei en twee zoutmeters verankerd op vast positie boven de kolkvloer zodat ongeacht het kolkpeil de verticale verdeling van zoutgehalte over de waterkolom goed wordt gemeten. De drukopnemers in de zoutmeter bepalen de werkelijke diepte onder het wateroppervlak waarbij we rekening houden met het zoutgehalte in de kolom boven de desbetreffende zoutmeter. In elke voorhaven hangen gelijkmatig verdeeld vijf

zoutmeters aan een drijvend boei (zie ook Figuur 3.2a). Hiermee meten we de zoutverdeling in beide voorhavens en op ca. 50m van de sluisdeuren.



Figuur 3.2a Schematisch overzicht van posities zoutlekbepervende middelen, meetpunten en benaming; met drukmeters werden de waterstanden in kolk en voorhavens gemeten. De kolk is 148,6m lang, 14,3m breed, de kolkvloer ligt op -4,7m NAP. De frames met de Δ-luchtbellenscherm etc. liggen op ca. 10m aan zeezijde van de sluisdeuren.



Figuur 3.2b. Positie van 25 zoutmeters (druk, temperatuur en geleidbaarheid) in de kolk en rechts is de zeezijde: de bovenste drie hangend aan een boei die in de kolk drijft en de twee onderste zoutmeters op vaste hoogte boven de kolkvloer.

Op de foto zijn ook de fuikvormige geleidewerken naar de kolk zichtbaar. Bij de punt van de westelijke geleidewerken in beide voorhavens plaatsten we pontons en bevestigden daaraan zoutopnemers voor het meten van zout en stratificatie in elke voorhaven, zoals in Figuur 3.2a schematisch aangegeven. De pontons staken vanaf de geleidewerken in de richting van de vaargeul naar de kolk teneinde zo diep mogelijk de verticale zoutprofielen te kunnen registreren. De waterdiepte bij de geleidewerken is geringer dan van de kolk.

Ten behoeve van ons waterscherm plaatsten we tegen de kademuur enkele tientallen meters ten westen van het westelijke geleidewerk in de zuidelijke voorhaven een waterpomp met zijn energievoorziening. De tweede waterpomp en zijn energievoorziening werd juist ten oosten van het oostelijke geleidewerk geplaatst. Deze pompen namen op ca. 2m diepte zoet water in waarmee via 60cm diameter leidingen ons waterscherm werd gevoed dat was geplaatst vóór de noordelijke sluisdeuren en bij onze luchtbellenschermen. De water- en luchtleidingen en het merendeel van onze bekabeling voor instrumenten lagen aan de westelijke zijde van de kolk en werden voor publiek en passanten afgeschermd.

In dit rapport noemen we de oorspronkelijke luchtbellenschermen van de Stevinsluis kortweg S-luchtbellenscherm en die van Deltares Δ -luchtbellenscherm, en voorts het waterscherm van Deltares aan zeezijde Δ -waterscherm. Een S-luchtbellenscherm wordt gevormd door lucht uit één geperforeerde buis over de ter plekke gereduceerde kolkbreedte van 14m, en deze buis ligt ingebed in de drempel tussen de vloed- en ebdeuren, één buis aan meerzijde en één buis aan zeezijde, zie Figuur 3.2. De S-luchtbellenschermen worden gevoed met de compressoren van het Stevinsluiscomplex en deze compressoren kunnen op half of heel vermogen werken en ze leveren dan nominaal 125 en 250 N ℓ /s ; N ℓ /s betekent ingezogen lucht in ℓ /s bij normale atmosferische omstandigheden. Deze luchtdebieten zijn door vermogensmetingen en compressorspecificaties geschat. Enkele minuten vóór openen van de sluisdeuren wordt het S-luchtbellenscherm ingeschakeld. Soms wordt tijdens geopende sluisdeuren een S-luchtbellenscherm uitgeschakeld door de sluismeester of om onduidelijke redenen.

De Δ -luchtbellenschermen zijn geplaatst op twee frames één in het sluishoofd aan zeezijde ca. 10m vóór en buiten de kolk en één in de kolk en ca. 10m voor de sluisdeuren bij meerzijde, zie Figuur 3.2. Over de kolkbreedte heeft elk frame twee luchtkokers met rijen van aaneensluitende geperforeerde diffusers die per luchtkoker zijn versprongen om een dicht luchtbellenscherm te creëren. De diffusers zijn aanvankelijk horizontaal geplaatst d.w.z. ze blazen verticaal omhoog lucht in het water. Elke luchtkoker kan apart worden ingeschakeld; het luchtdebiet naar elke luchtkoker wordt gemeten. Elke diffuser wordt gevoed met één of meerdere luchtventielen die het luchtdebiet gelijkmatig over de kolkbreedte verdelen. De luchtkokers zijn aangesloten op een gehuurde compressor. Enkele minuten voor het openen van de sluisdeuren wordt de compressor van het Δ -luchtbellenscherm op toeren gebracht en pas nadat duidelijk een luchtbellenscherm aan het wateroppervlak zichtbaar is worden de relevante sluisdeuren geopend. Pas nadat de sluisdeuren zijn gesloten wordt de compressor weer gereduceerd tot stationair toerental. Over de deuropentijd van de deuren berekenen we het gemiddelde van het gemeten luchtdebiet naar de Δ -luchtbellenschermen.

Aan zeezijde is ons frame (in Figuur 3.2: linker grijs vlak in kolk) voorzien van een waterscherm bestaande uit een 5 cm brede sleuf gevoed met twee waterpompen met totaal maximaal 1,6 m³/s aan waterdebiet. Over de gehele locale sluishoofdbreedte van 14m bestaat de sleuf van het waterscherm uit vier gelijke segmenten die elk gevoed worden met de helft van het debiet van elk van de twee waterpompen; deze vier waterdebieten zijn afzonderlijk gemeten en over de deuropentijd gemiddeld. Het waterscherm is aan zeezijde naast de luchtkokers geplaatst. De waterpompen zuigen water op van een diepte van ca. 2m in de voorhaven aan meerzijde (zie Figuur 3.2). Zodoende creëren deze pompen een zoeter en dus oprijvend waterscherm aan de zeezijde en vóór de sluisdeuren.

De totale hoogte boven vloerniveau van beide frames was gelijk aan de hoogte van de 30cm hoge drempel van de Stevinsluis. Bij horizontale opstelling lagen de diffusers van het Δ -luchtbellenschermen ca. 30 cm boven de vloer, bij verticale opstelling (90° gekanteld) lag

het middelpunt van de diffusers ca. 20 cm boven de vloer. We onderzochten de Δ -luchtbellenschermen over het bereik van 100-400 Nl/s hoewel het ontwerp geschikt is voor maximaal 1200 Nl/s. De toevoerleidingen voor water en lucht waren in bestaande schotbalkspinningen verwerkt en vormden ook onder water geen beperking in de locale dwarsdoorsnede van de kolk.

Als laatste in het meetprogramma is op het frame bij de meerzijde-sluisdeuren een drempel gemonteerd die tot 1,18m boven de kolkvloer uitsteekt; de kolkvloer ligt op -4,7m NAP en het IJsselmeer-waterpeil was als regel -0,2m NAP. De bestaande drempel van de Stevinsluis is 30 cm hoog en dient als aanslag van de sluisdeuren. De verhoogde drempel lag ca. 50 cm naast (aan zeezijde van) de Δ -luchtbellenschermen (in Figuur 3.2 rechter grijs vlak in kolk). Tegelijk met het plaatsen van de verhoogde drempel zijn de luchtkokers gekanteld zodat de diffusers naar elkaar in horizontale richting lucht blazen teneinde volgens visuele laboratoriumproeven een nog dichter luchtscherm te creëren.

De posities van de rinketschuiven in de sluisdeuren werden door ons gemeten. Met deze schuiven wordt de kolk genivelleerd naar meer- of zeezijde. Voor onze proeven is het Bedieningsprotocol aangepast zodat deze schuiven tijdens eb gedeeltelijk geopend konden blijven (kierstand) bij gesloten deuren waardoor zoet water door de kolk stroomt en de kolk verzoet doordat zout naar de zeezijde terug stroomt. Deze bekende methode werd o.a. toegepast in de Volkeraksluizen en heet "lekkende ebdeuren"; het daartoe benodigde zoetwaterdebiet wordt ebdebiet genoemd.

Ten slotte werden alle stuursignalen van de schutsluis digitaal geregistreerd zodat momenten van open/sluiten van sluisdeuren en rinketschuiven meestal per seconde bekend waren. . Drie webcams hebben continue beelden gemaakt, o.a. om scheepvaart vast te stellen. De passage van de beroepsvaart wordt door sluismeesters geregistreerd en hebben we ontvangen. Via kabels en soms met draadloze verbindingen werden alle signalen naar 11 PC's gevoerd en in hun computergeheugen opgeslagen en tevens op een aparte PC verzameld en tweevoudig gearhiveerd. In diverse kelderruimten van de aandrijving van de sluisdeuren plaatsten we de meeste van onze 15 PC's die de gemeten signalen opsloegen en doorgaven aan een centrale PC voor archivering.

Op de sluis zijn drie webcams geplaatst waarmee het bovenhoofd, het benedenhoofd en de sluis als geheel om de 10 seconden is vastgelegd. Op deze manier is de werking van luchtbellenschermen en in en uitvaren van schepen over de gehele meetperiode vastgelegd. Tevens zijn de passerende schepen geregistreerd in een landelijk transportregister voor de binnenscheepvaart.

De volgende reeks foto's geven een indruk van de gevolgen van de installatie van deze zoutlekbeperkende middelen en meetinstrumenten voor de kolk en zijn directe omgeving.



Figuur 3.3 Compilage van foto's van de Stevinssluis tijdens onze praktijkproef:

Linksboven: één van de vijf boeien (blauw) met per boei drie zoutopnemers die met de waterstand mee bewegen, daarachter het gebouw met onze werkplaats en kantoren.

Rechtsboven: links en rechts van de kolk in het gras twee bruine waterleidingen van de waterpompen aan meerzijde-voorhaven naar waterschermd voor de sluisdeuren naar zeezijde-voorhaven, links op de kolkkade de grijze persluchtleiding naar onze luchtbellenschermen bij de kolkeinden. In de kolk aan linkerzijde (westzijde) fenders ter bescherming van de zoutmeters.

Midden-links: PC's afgeschermd tegen druiptocht in de ruimte voor de aandrijving van de deuren.

Midden-centraal: één van de twee waterpompen met zijn diesलगenerator.

Midden-rechts: de gele compressor voor onze luchtbellenschermen.

Linksonder: een voorbeeld van kenmerkende tankers door de Stevinssluis: 9-10m breed, 80-85m lang en tot 3m diepgang.

Onder-centraal: het U-vormige frame voor de luchtbellens- en waterschermen (horizontaal) en toevoerleidingen (verticale kokers) daaronder op de kolkkade de grijze persluchtleiding voor onze luchtbellenschermen.

Rechtsonder: de kraan die het frame met de toevoerleidingen in de schotbalkspanningen laat zakken en op de kolkvloer plaatst.

Het meest zuidelijk gelegen gebouw naast de kolk op de foto diende als werkplaats en met bureaus voor het Deltares personeel en voor overleg met bezoekers. Het betrokken Deltares personeel verbleef van maandag t/m donderdag in Den Oever en overnachtte daar in een gehuurde recreatiewoning.

3.3 Bodem en zout rondom de Stevinsluis

De foto (Figuur 3.1) toont eveneens de uitlaat van het gemaal Leemans (zie ook zuidwestelijke hoek in Figuur 3.4) dat water uit de Wieringermeerpolder in de zoute voorhaven brengt. Enerzijds is dit een uitstekend gekozen locatie om het zoutgehalte voor de sluisdeuren te verlagen en het zouttransport naar het IJsselmeer te beperken. Anderzijds voor onze praktijkproeven wensten we een hoog zoutgehalte in de noordelijke voorhaven. Na divers overleg is dit gemaal gestopt en is het overslaan van water uit de Wieringermeerpolder verlegd naar gemaal Lely bij Medemblik en geloosd in het IJsselmeer.

Deltares heeft met een 2D waterbeweging- en zouttransportmodel berekent wat de invloed van het verzilte polderwater zou kunnen zijn op de waterinmamelocatie bij Andijk ten behoeve van de drinkwatervoorziening. De berekeningen gaven aan dat deze verhoging minder dan ca. 20-25 mg Cl/l zou zijn. Tijdens de proefperiode zijn echter beduidend hogere Chloride gehalten gemeten dan op basis van deze berekeningen werd verwacht. RWS-Waterdienst is voornemens om nader te onderzoeken wat de oorzaak is van deze (tijdelijke) verhogingen.

Een andere bron van zoet water voor de noordelijke voorhaven zijn de naastgelegen spuisluizen in de Afsluitdijk. In het jaargetijde van ons onderzoek (februari-mei) werd veel zoet water via deze spuisluizen geloosd en kennelijk door de banaanvormige strekdam in de Waddenzee (zie Figuur 3.4) naar de havens van Den Oever en naar de noordelijke voorhaven van de Stevinsluis geleid waar deze bijdraagt aan een zoetere voorhaven en geringer zouttransport naar het IJsselmeer.

Uit onze metingen bleek dat zowel het gemaal Leemans als de spuisluizen het zoutgehalte in de noordelijke voorhaven van ca. 20 ppt zout in dit jaargetijde naar ca. 5-10 ppt en zelfs minder kunnen verlagen met een aanmerkelijke en voor de praktijkproeven ongewenste stratificatie. Door het spuuregime blijken de langjarige metingen (Van Aken, 2007) in het Marsdiep niet voor het zoutgehalte bij Den Oever toepasbaar.

Na divers overleg is besloten om deze spuisluizen alleen gedurende het weekend te gebruiken en zo veel als mogelijk het overige debiet via de spuisluizen bij Kornwerderzand naast de Lorentzsluis te lozen. Uit metingen bleek dat het zoutgehalte in de noordelijke voorhaven zich na stop zetten van de lozing in ca. 24 uur voldoende herstelde. Deze tijdelijke maatregelen leverden als regel een zoutgehalte van 15-20 ppt in de noordelijke voorhaven. In onze meetperiode was de wind voortdurend noordelijk waardoor het gespuide zoete water tegen de Afsluitdijk en de noordelijke voorhaven in werd gestuwd.



Figuur 3.4 Bathymetrie van de Waddenzee nabij de Stevinssluis, merk op de banaanvormige strekdam (noordzijde rode kader) gelegen voor de uitwateringsluizen (oostzijde rode kader), zie ook Figuur 3.5.

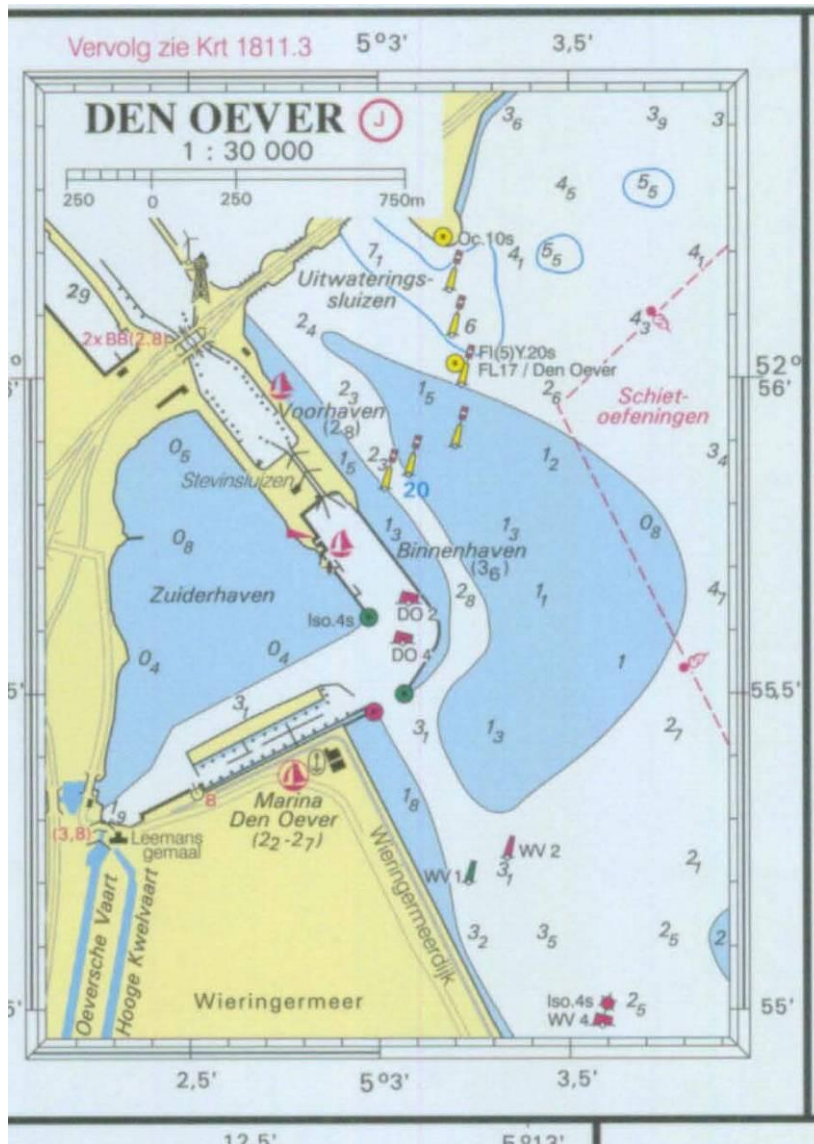
Ten behoeve van onze meetcampagne werden onderhoudsbaggerwerkzaamheden uitgesteld tot in mei. De baggerwerkzaamheden in de noordelijke voorhaven moesten toch in mei doorgaan tijdens onze door vorst en ijs verlate metingen. Tijdens en direct na deze baggerwerkzaamheden in de zeezijde-voorhaven bleken de geleidbaarheid-sensoren van de zoutmeters in die voorhaven sterk te verlopen en uit te vallen. Daarna vielen op dezelfde wijze ook enkele zoutmeters in de kolk uit. De fabrikant (Schlumberger) heeft ons nieuwe zoutmeters geleverd maar de oorzaak van hun uitval is ons niet uitgelegd. Door de baggerwerkzaamheden tijdens het meetprogramma is de bathymetrie van de noordelijke voorhaven gewijzigd met onbekende invloed op onze analyses van metingen voor en na de baggerwerkzaamheden. Ter controle bleven we handmatige metingen van de zoutprofielen uitvoeren tot het einde van ons proevenprogramma.

We ondervonden problemen met onze zoutopnemers in deze voorhaven waarschijnlijk door het omgewoelde slib na een periode van baggeren. De leverancier van deze instrumenten onderzoekt dit nog nader aan de hand van genomen watermonsters met slib en de signalen van de zoutopnemers.

Juist voor onze meetcampagne waren de baggerwerkzaamheden in de zuidelijke voorhaven afgerond maar tijdens onze metingen werden er nog wel egaliseer werkzaamheden uitgevoerd in deze voorhaven. Deze leverden een 5,1m diepe geul vanaf de monding van deze voorhaven naar de Stevinssluis, zie Figuur 3.6. De geul in deze voorhaven, dieper gelegen dan de kolkvloer, werkte volgens onze zoutmetingen daardoor als zoutvang. We maakten nog enkele dieptemetingen vanuit de zuidelijke voorhaven via de vaargeul naar ZO het IJsselmeer op en vonden dat de bodem vanaf de diepste locatie tussen de strekdammen

na enkele honderden meters weer op liep naar ca. -3,8m NAP en als drempel voor de zoutvang fungeert.

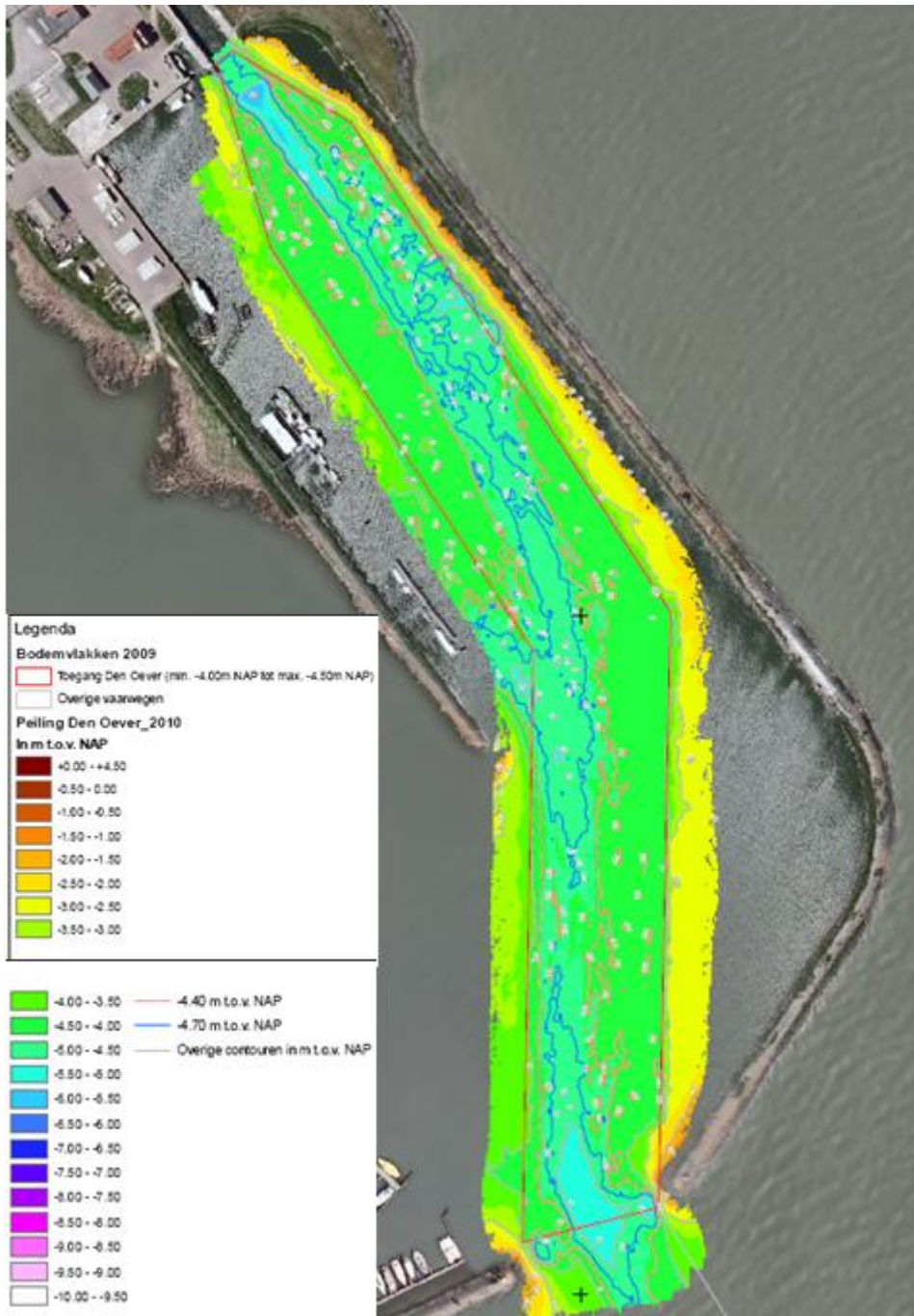
Wat we niet begrepen waren enkele hoge zoutgehalten, op één dag zelfs 18 ppt, in de meest zuidwestelijke hoek van de Zuiderhaven en ter hoogte van het gebouw van gemaal Leemans met een diepte van slechts 2,3-2,5m. Mogelijk speelt hier locale kwel al of niet gestimuleerd door hoge buitenwaterstand een rol maar dit is niet getalsmatig nader onderzocht.



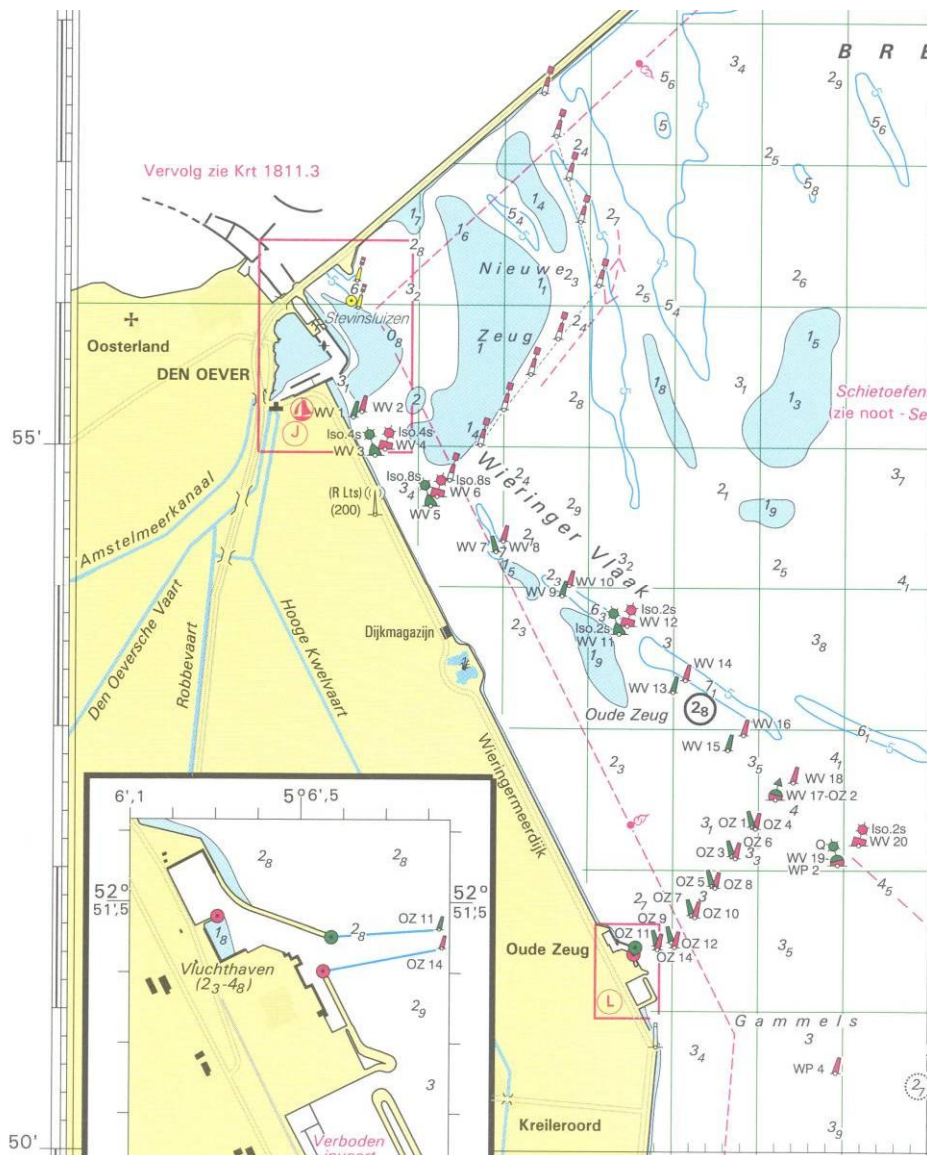
Figuur 3.5 Bathymetrie aan IJsselmeerszijde en nabij de Stevinsluis. Merk op de ligging van de uitwateringsluizen naast de Stevinsluis en de ondiepere omgeving en vaargeul naar Marina Den Oever (ZW in kaart) en de ondiepe stroomgeul naar de spuilsuizen (oostelijk naast de strekdam van de voorhaven).

Onduidelijk is verder waar het zout vanuit de zuidelijke voorhaven van de Stevinsluis naar toe wordt getransporteerd. De kaarten in Figuur 3.5 en Figuur 3.7 bieden diverse routes waarvan we de minst ondiepe zuidelijke vaarweg in de zuidoostelijke richting naar de zandwinputten

als meest waarschijnlijk vermoeden. Een poging in deze putten zoutgehalten te meten is niet voldoende geslaagd om e.a. te bevestigen.

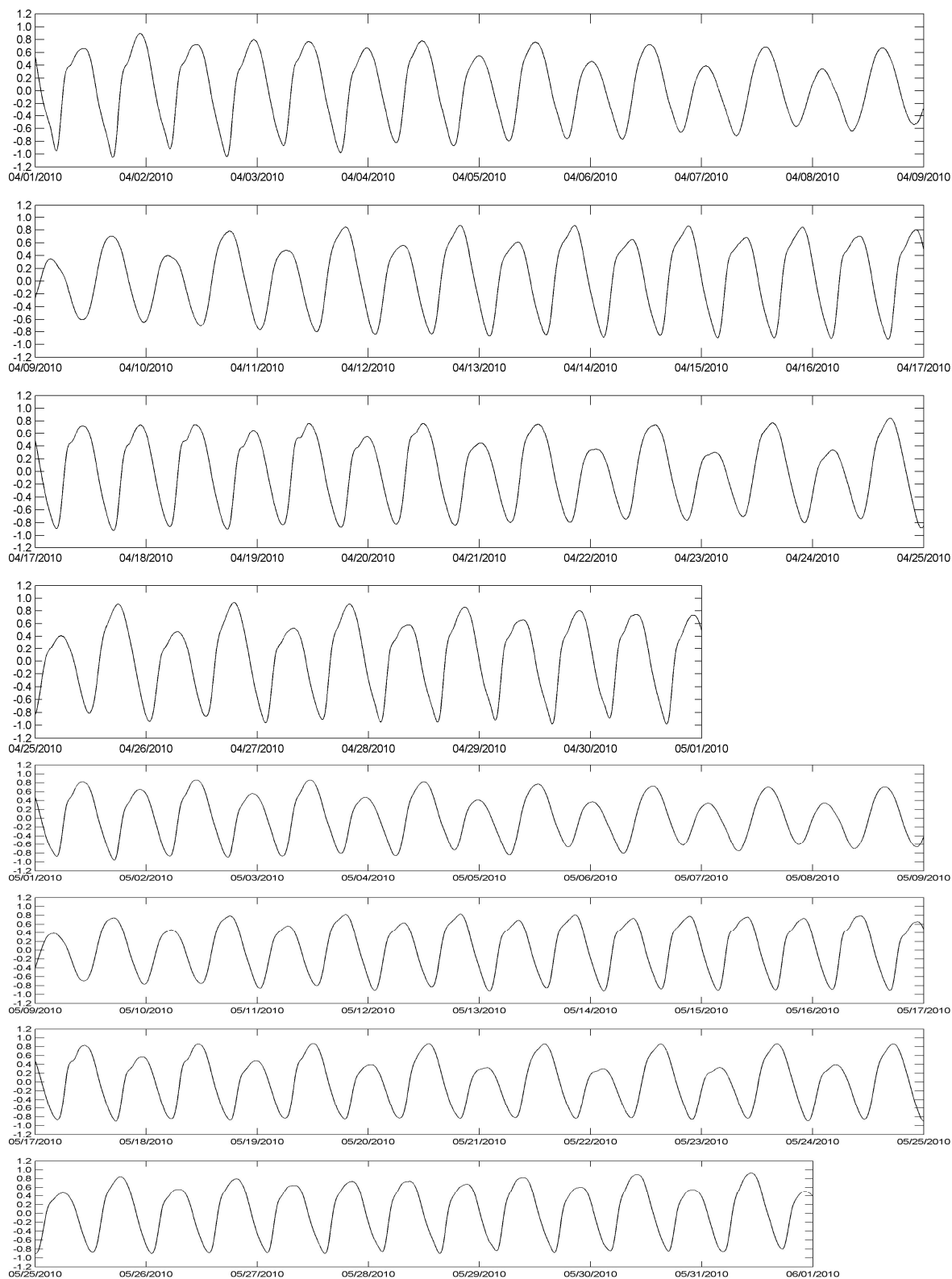


Figuur 3.6 Bathymetrie zuidelijk voorhaven van de Stevinssluis, merk op de 5,1m diepe geul vanaf de monding van de voorhaven naar de Stevinssluis, onze metingen tonen dat deze voorhaven als zoutvang werkt.



Figuur 3.7 Bathymetrie aan IJsselmeerzijde van de Stevinssluis, merk op de 5-6m diepe zandwinputten in het zuidoostelijke deel van deze kaart.

Figuur 3.8 toont het getij bij de monding van de noordelijke voorhaven van de Stevinssluis met in sommige perioden een kortdurende ebperiode en veelal een getijslag van ca. 1,5m. De diepste schepen kunnen alleen bij vloed naar de Waddenzee geschut worden vanwege de beperkte diepte van de monding van de noordelijke voorhaven naar de Waddenzee, zie ook Figuur 3.5.



Figuur 3.8 Getijvoorspelling bij Stevinssluis voor april en mei 2010.

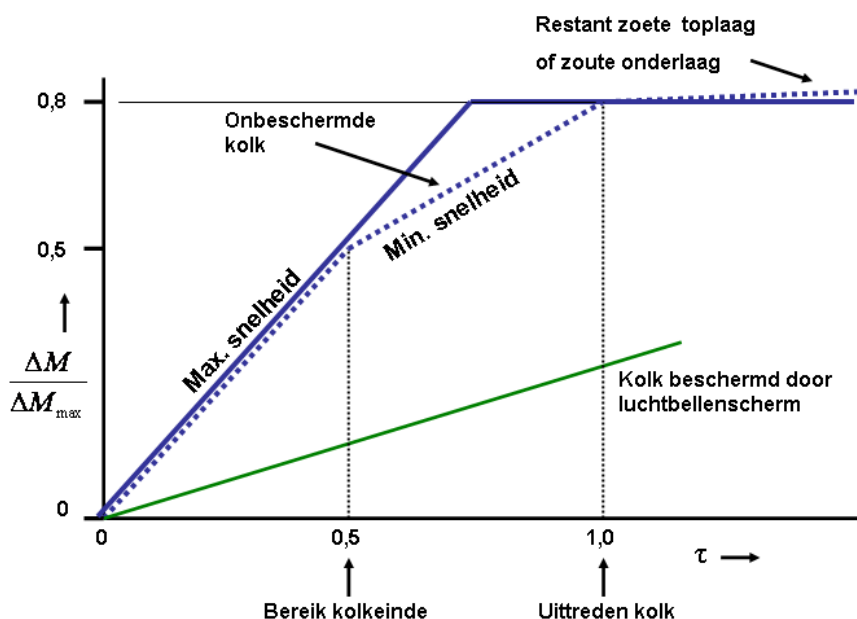
3.4 Grondslag analyse praktijkproeven Stevinsluis

In dit onderdeel introduceren we de grondslagen van de analyse van de praktijkproeven met de Stevinsluis ter onderbouwing van onze later te rapporteren analyse van de zoutlek door de Volkeraksluizen en met een nog te maken selectie van zoutlekbeperkende middelen. Appendix A vat wiskundig de onderliggende theorie samen.

Hoofdstuk 2 geeft een uitgebreide inleiding waaruit telkens één essentiële bouwsteen bleek nl. de zout-zoet uitwisseling van de zoutmassa in de kolk tijdens geopende sluisdeuren. Zoals in Hoofdstuk 2 met voorbeelden gedemonstreerd, kunnen we deze zout-zoet uitwisseling met luchtbellenschermen afremmen. Het meten en analyseren van de veranderingen van de zoutmassa in de kolk vormt de hoeksteen van deze studie en hier bespreken we dit proces in meer kwantitatieve zin dan in Hoofdstuk 2. Appendix C verklaart de wijze waarop zoutmassa, tijdschaal en theoretische schatter uit de waarnemingen zijn afgeleid.

Figuur 3.9 toont het karakteristieke verloop van de toename van de zoutmassa (ΔM) in de kolk uitgezet tegen een dimensieloze tijd τ na openen van de sluisdeuren naar zeezijde (zoute zijde). De toename in zoutmassa is maximaal gelijk aan het verschil tussen de zoutmassa in de kolk wanneer deze volledig met water van de zeezijde is gevuld en de zoutmassa op het moment van het openen van de kolk (ΔM_{\max}). De verticale as in Figuur 3.9 geeft de verhouding tussen de momentane verandering van de zoutmassa en zijn maximale verandering.

De dimensieloze tijd τ is gebaseerd op de reistijd van de ongeremde zouttong vanaf de geopende sluisdeur naar het gesloten kolkeinde ($\tau = 0,5$) en na reflectie weer terug naar de geopende sluisdeuren waar dan per definitie $\tau = 1$ geldt. Zie Appendix A voor de wiskundige definitie van τ . De horizontale as in Figuur 3.9 geeft het dimensieloze tijdsinterval na het openen van de sluisdeuren.



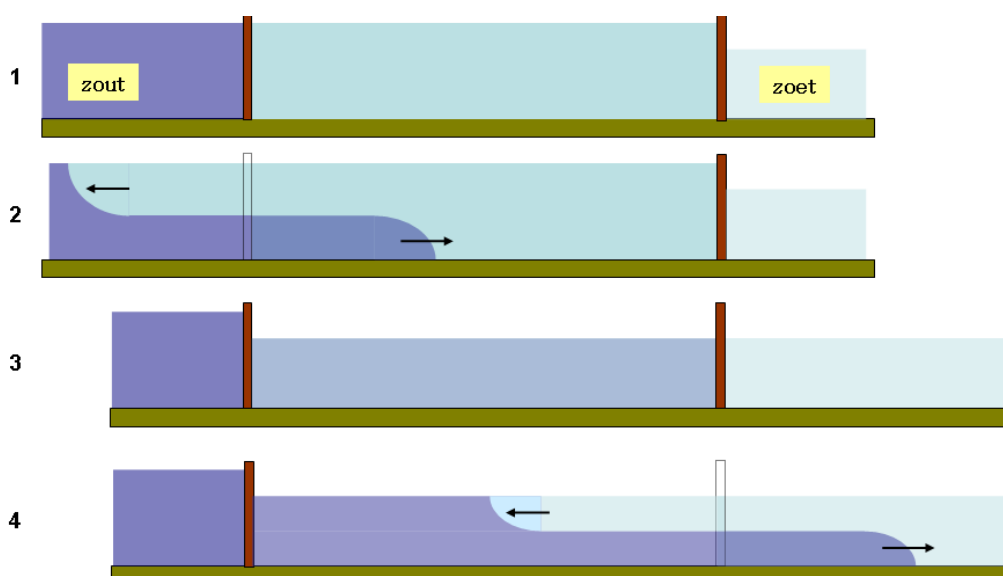
Figuur 3.9 Verloop van relatieve verandering van de zoutmassa in de kolk (verticale as) tegen de dimensieloze tijd (horizontale as) na openen sluisdeuren volgens theorie en praktijk (blauwe stippellijnen) en met enig zoutlekbeperkend middel (groene lijn). De getrokken blauwe lijn is een vereenvoudigde benadering voor een onbeschermde kolk.

De theorie (Shin e.a., 2004) geeft twee uitersten in de initiële snelheid waarmee de zoutmassa in de kolk toeneemt nl. evenredig met het dimensieloze tijdsinterval en 0,73 maal het dimensieloze tijdsinterval. Bij het bereiken van het gesloten kolkeinde ($\tau = 0,5$) reflecteert de zouttong en reist in tegengesteld aan de onderste zouttong waardoor de interne wrijving en menging wordt vergroot. Op $\tau = 1$ treedt de zouttong uit de geopende monding van de kolk.

Onderweg verbruikt de zouttong de zg. potentiële energie tussen het verschil in gewicht tussen zout water buiten de kolk en zoeter water in de kolk. De initiële toename van de zoutmassa zal dan geleidelijk afbuigen naar de lijn met de laagste snelheid ($0,73 \tau$) van toename (zie Figuur 3.9).

Aangekomen bij het kolkeinde wordt deze potentiële energie daarom niet volledig terug gewonnen uit de snelheid van de zouttong en stijgt de zouttong niet tot de volledige waterdiepte maar tot ca. 80 - 90 % hiervan: er blijft nog een rest zoeter kolkwater in de toplaag. In Figuur 3.9 betekent voorgaand dat de verandering van de zoutmassa ca. 80-90% van de maximale zoutmassa is op het moment dat de zouttong de kolk uittreedt. In het tussenliggende tijdsinterval loopt de zouttong over en tegen het nog instromende zoute water in waarbij nog meer energie door turbulentie verloren gaat: de snelheid van toename van de zoutmassa na reflectie (τ groter dan 0,5) is dan geringer dan vóór reflectie.

Voor zeer lange openingstijden van de kolk, kortweg deuropentijd genoemd, zal het restant van het zoetere kolkwater zich traag over het wateroppervlak van de zoute voorhaven gaan verspreiden. Echter, deze verspreiding treedt op bij veel langere deuropentijden dan gebruikelijk is voor een in bedrijf zijnde schutsluis: de sluismeester sluit de sluisdeuren immers zo snel mogelijk om de ingekomen schepen naar de zoete voorhaven te schutten.



Figuur 3.10 Schematisch verloop van zoutindringing in een kolk na openen aan zee- en meerzijde.

Voorgaand proces treedt ook op tijdens het schutten naar de zoete voorhaven (hierna meerzijde genoemd) waarbij de zouttong uit de kolk de voorhaven in loopt en omgekeerd een zoetwatertong aan het oppervlak de kolk binnen stroomt, zie ook de uitleg in hoofdstuk 2. De zoetwatertong reflecteert ook aan het gesloten kolkeinde maar laat een rest zouter kolkwater bij de bodem achter, bevorderd door de 30cm hoge drempels. Zonder acht te slaan op het teken van deze afname in zoutmassa verloopt de zoutuitwisseling met de zoete voorhaven zoals geschetst in Figuur 3.9 waarbij 80-90% van de kolk met zoet water is gevuld. De aandrijving van de dan uittredende zoutmassa die het gezochte zoutbezwaar levert komt door het verschil in gewicht tussen water in de kolk en in de voorhaven. Of nauwkeuriger geformuleerd deze aandrijving ontstaat door het verschil tussen de verticale hydrostatische drukverdeling in het kolkwater op het moment dat de sluisdeuren naar meerzijde openen en de geringere druktoename vanaf het wateroppervlak in de zoete voorhaven door het geringere gewicht van het water in de zoete voorhaven. Dit alles bij gelijke waterstand in kolk en voorhaven(s).

3.5 Invloed van zoutlekbeperkende middelen op de zoutlek

Door aan de zeezijde de indringing van zout in de kolk door enig zoutlekbeperkend middel, veelal luchtbellenschermen, te vertragen en de kolk tijdig te sluiten wordt het gewicht van het kolkwater na sluiten van de kolk minder dan zonder vertraging. In Figuur 3.9 is deze remmende werking op de toename in zoutmassa door de groene lijn geschetst. Wanneer vervolgens de sluismeester de kolk weer tijdig afsluit heeft de kolk door het zoutlekbeperkende middel nog niet zijn 80% uitwisselingsgraad bereikt. Hierdoor is de aandrijving van de uittredende zouttong geringer dan zonder zoutlekbeperkend middel waardoor bij schutten naar meerzijde de uittredende zouttong trager uitstroomt. Ten slotte kan aan de meerzijde deze vertraagde uitstroming, door geringere verschillen in zoutgehalten, nog meer worden afgeremd door ook aan meerzijde een zoutlekbeperkend middel toe te passen.

We wensen voorgaande veranderingen van de zoutmassa in de kolk aan de hand van waarnemingen in een schutsluis vast te stellen, zowel het ongehinderde verloop in Figuur 3.9 als die door een zoutlekbeperkend middel gehinderd verloop. Voor de effectiviteit van het zoutlekbeperkende middel definiëren we de zg. doorlaatfractie als verhouding tussen de relatieve verandering van de waargenomen zoutmassa mét en zónder zoutlekbeperkende middel bij dezelfde verschillen in zoutgehalten. Met Figuur 3.9 vinden we deze verhouding als de fractie (symbool η) van de waargenomen zoutmassa ΔM_{obs} mét (groene lijn) en zónder zoutlekbeperkend middel op hetzelfde dimensieloze tijdsinterval, in formulevorm:

$$\eta(\tau) = \frac{\left[\Delta M_{\text{obs}}(\tau) / \Delta M_{\text{max}} \right]_{\text{Zoutremmend middel}}}{\left[\Delta M_{\text{obs}}(\tau) / \Delta M_{\text{max}} \right]_{\text{Onbeschermd}}} \quad (3.3.1)$$

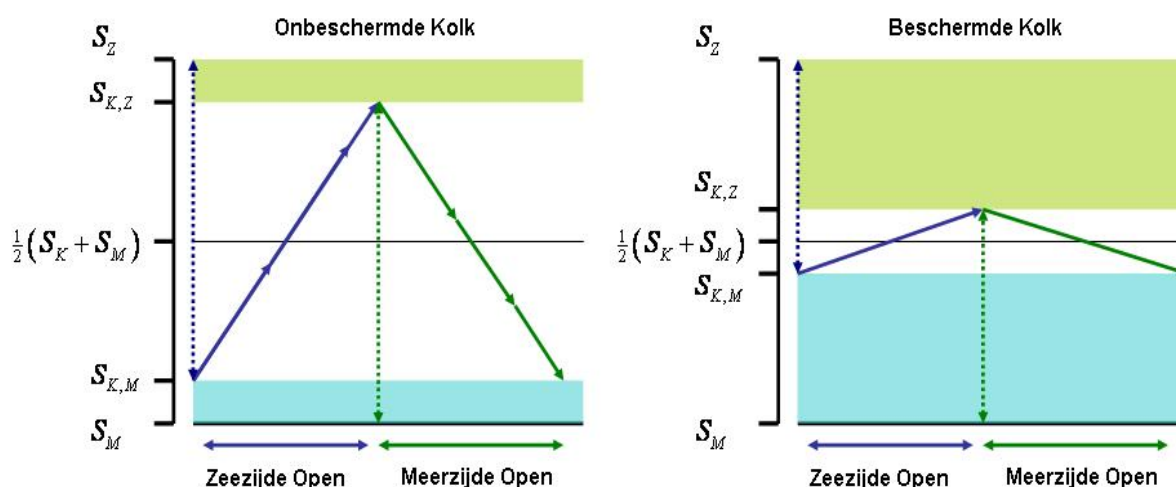
Waarbij in alle gevallen de dimensieloze tijd is betrokken op de snelheid waarmee de denkbeeldige ongeremde zouttong de kolk vanaf de zeezijde indringt of naar meerzijde uittreedt bij dezelfde verschillen in zoutgehalten. Appendix A licht deze methode toe aan de hand van de theorie van zouttransport in een sluis kolk.

In een werkende schutsluis varieert de waterstand en zoutgehalte in de voorhavens zodat nimmer een schutting met en zonder zoutlekbeperkend middel bij identieke condities voor

zout en waterstand vergeleken kan worden. Echter, door in Figuur 3.9 en in vergelijking (3.3.1) de waargenomen verandering in de zoutmassa te normeren met zijn maximale verandering van de zoutmassa in de kolk gedurende dezelfde schutting wordt de anders storende invloed van variatie in zoutgehalten en waterstanden op de bepaling van $\eta(\tau)$ volgens vergelijking (3.3.1) theoretisch gezien verwijderd, voor details zie Appendices A en C. De maximale verandering van de zoutmassa in de kolk (ΔM_{max}) is gelijk aan het product van kolkvolume bij gegeven waterstand in de kolk en het initiële verschil in zoutgehalten tussen kolk en voorhaven op het moment dat de deuren worden geopend.

Zoals getoond in hoofdstuk 2 neemt door het gebruik van gelijke luchtbellenschermen aan beide kolkeinden het verschil in zoutgehalte tussen de nog gesloten kolk en de voorhaven waarnaar geschut wordt af. Deze afname van verschillen in zoutgehalten tussen kolk en voorhaven door zoutlekbeperkende middelen levert een meer dan evenredige beperking in de zoutlek. We lichten dit hierna toe.

We bespreken nu de invloed van de doorlaatfracties aan zee- en meerzijde op het zoutverlies d.w.z. de zoutlek door de kolk naar meerzijde. We beschouwen de vereenvoudigde situatie van een schutsluis welke zonder verschillen in waterstand alleen als scheiding tussen zout en zoet water werkt. In deze situatie is het zouttransport voor het nivelleren van de kolk afwezig. Appendix A geeft de analytische oplossing die we met Figuur 3.11 als volgt toelichten.



Figuur 3.11 Variaties in volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk gedurende beschermd en onbeschermd schutten naar zeezijde en meerzijde bij gelijke waterstanden en zonder invloed van scheepvaart.

De diepte-gemiddelde zoutconcentratie in de voorhaven aan zeezijde noteren we als S_Z en van de voorhaven aan meerzijde als S_M . Door schutten neemt het gemiddelde zoutgehalte S_K in de kolk twee uiterste waarden aan nl. het minimale zoutgehalte $S_{K,M}$ van de kolk na een schutting met de meerzijde en het maximale zoutgehalte $S_{K,Z}$ van de kolk na een schutting met de zeezijde. Het minimale zoutgehalte $S_{K,M}$ in de kolk ligt boven het zoutgehalte van de meerzijde-voorhaven; er blijft nog een restant zout water in de kolk achter. Evenzo ligt het maximale zoutgehalte $S_{K,Z}$ in de kolk onder het zoutgehalte S_Z van de zeezijde-voorhaven; er blijft nog een restant zoet water in de kolk achter. De verhouding tussen $(S_{K,Z} - S_{K,M})$ en $(S_K - S_M)$ leidt tot de uitwisselingsgraad van ca. 80 % bij redelijk lange deuropentijden waarover we eerder spraken. De verandering van de zoutmassa is gelijk aan het product van het zoutconcentratieverschil $(S_{K,Z} - S_{K,M})$ met het kolkvolume en tijdens continue schutbedrijf

onder dezelfde omstandigheden moet tijdens schutten naar zeezijde de verandering in zoutmassa gelijk zijn aan wat de kolk bij schutten naar meerzijde verlaat (behoudswet van massa). Deze symmetrie geldt bij verwaarloosbare waterverplaatsing door de scheepvaart.

Tijdens een schutting naar zeezijde neemt het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk toe volgens de blauwe lijn in

Figuur 3.11 en bij schutten naar meerzijde weer af volgens de groene lijn. De hellingshoek van deze lijnen is evenredig met de snelheid waarmee de zoutmassa in de kolk toe- of afneemt. Deze hellingshoek wordt bepaald door het initiële verschil in zoutgehalten tussen voorhavens en kolk, in

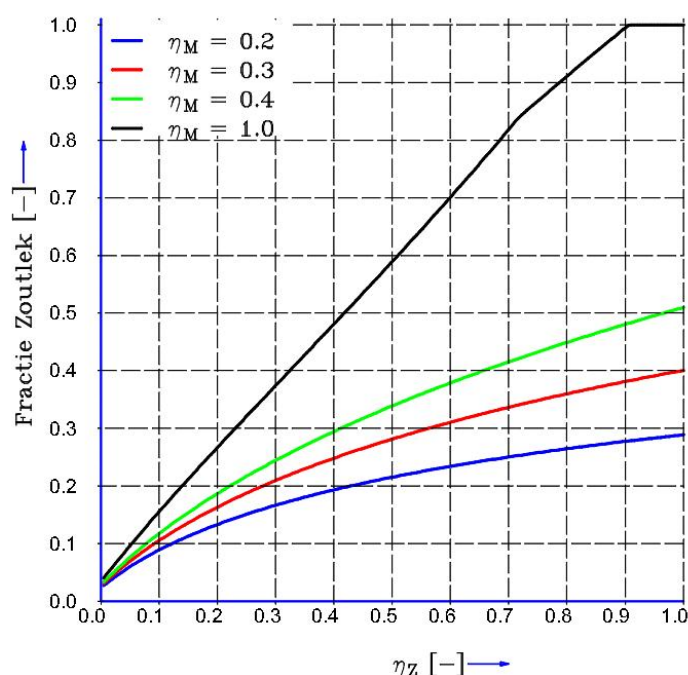
Figuur 3.11 aangegeven met de verticale gestippelde blauwe en groene lijnen. De hellingshoek geeft het zouttransport (kg zout/s) weer en blijkt theoretisch evenredig te zijn met het product van het initiële verschil in zoutgehalten én de wortel daaruit; de voortplantingssnelheid van de zouttong in de kolk is nl. evenredig met de wortel uit het initiële verschil in zoutgehalten, zie verder Appendix A. Deze relatie is essentieel voor het begrijpen van het cumulatieve effect van zoutlekbeperkende middelen op de zoutlek door de kolk naar meerzijde.

Ten opzichte van een onbeschermd kolk worden de variaties in zoutgehalten bij een beschermd kolk bij toepassing van gelijkwerkende beschermende middelen aan beide kolkeinden geringer (rechterdeel)

Figuur 3.11), immers vanuit zee komt er minder zoutmassa de kolk in en aan meerzijde verlaat er in verhouding evenveel en dus ook minder zoutmassa de kolk. In de onbereikbare limiet van ideale zoutlekbeperkende middelen aan beide kolkeinden nadert het zoutverschil ($S_{K,Z} - S_{K,M}$) de waarde nul. Zodoende naderen de zoutgehalten van de kolk het gemiddelde van de zoutgehalten van beide voorhavens; in

Figuur 3.11 met de horizontale zwarte lijn aangegeven.

In die limiet is het zouttransport niet alleen beperkt door gelijke zoutlekbeperkende middelen met doorlaatfractie η aan beide kolkeinden maar tevens beperkt met de factor $1/2\sqrt{2} \approx 0,35$ omdat ideaal zoutlekbeperkende middelen de initiële verschillen in zoutgehalten tussen kolk en voorhavens halveren t.o.v. een onbeschermd kolk met 100% uitwisselingsgraad. Dit zijn geïdealiseerde theoretische uitkomsten voor een schutsluis zonder nauwe mondingen van voorhavens, zonder verschillen in waterstand tussen de voorhavens en zonder invloed van scheepvaart. Echter, door voorhavens, waterverplaatsing door scheepvaart en verschillen in waterstanden wijkt de toepassing op de Volkeraksluizen van voorgaande geabstraheerd beeld af, zie Figuur 3.12 samengesteld met het zoutlekmodel dat in (Uittenbogaard, 2010) is beschreven. De zoutlekfractie kan nu wel groter zijn dan de kleinste doorlaatfractie van zouttransport door geopende sluisdeuren.



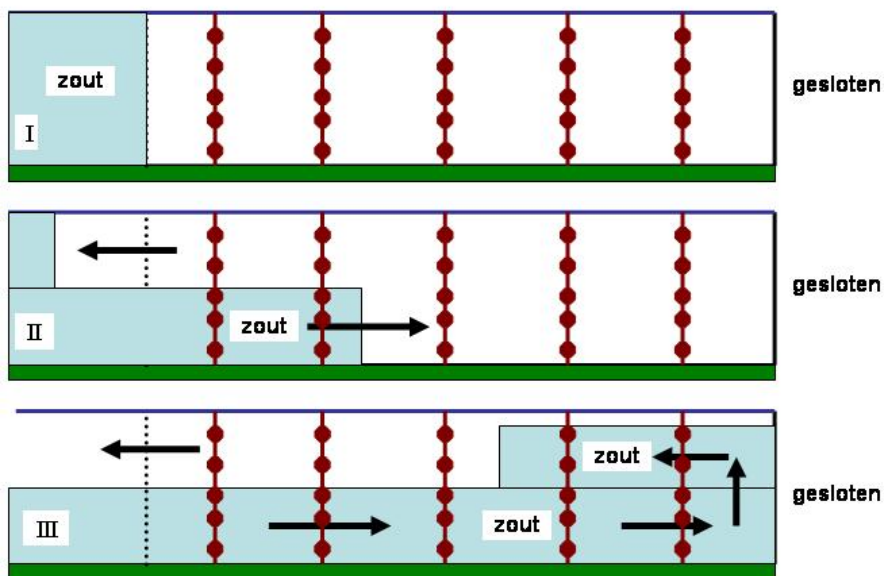
Figuur 3.12 Invloed doorlaatfracties op zoutlekfractie toegepast op de Volkeraksluizen met 0,5m hogere waterstand in Hollandsch Diep t.o.v. Volkerak-Zoommeer, 20 ppt verschil in zoutgehalte van de voorhavens, scheepvaart volgens prognose 2020 en 20 schuttingen per dag per kolk en met vaste deuropentijd van 25 minuten, zie verder (Uittenbogaard, 2010).

3.6 Toegepaste methode van analyse

Voor het toetsen van de theorie en het vaststellen van de doorlaatfractie van een zoutlekbeperkend middel blijkt uit voorgaande beschrijving dat we het tijdsverloop van de zoutmassa in de kolk dienen te registreren en tevens de maximale verandering van de zoutmassa in de kolk d.w.z. bij volledige vervanging van het kolkwater door dat van de voorhaven m.a.w. de zoutgehalten in de voorhavens aan zee- en meerzijde. Tevens moeten we de waterstand in de kolk registreren waaruit we het kolkvolume berekenen gedurende de periode dat de kolk naar zee- of meerzijde is geopend. Wanneer de kolk volledig zou zijn doorgemengd is de zoutmassa gelijk aan het product van het kolkvolume en het zoutgehalte van de kolk. Echter, door het onderbreken van de zoutindringing of -uittreding (Figuur 3.10) zal er stratificatie optreden in de kolk b.v. door de vorming van een brakke toplaag of het achterblijven van een zoutere onderlaag. Ook in de voorhavens kan zoutstratificatie optreden zowel door het schutproces zelf maar ook door externe invloeden zoals door zoet water geloosd via de nabij gelegen spuisluizen en/of afwatering en beïnvloed door wind en getij. Deze externe stratificatie zal tijdens schutten ten dele naar de kolk worden overgebracht waarbij de diepte van de rinketschuiven in relatie tot eventuele stratificatie in de voorhaven en kolk de zoutconcentratie van het doorgelaten water beïnvloed.

Daarom schatten we de zoutmassa in de kolk nauwkeuriger als de sommatie van het product van de op diverse diepten en horizontale locaties gemeten zoutgehalten in de kolk en hun representatief aandeel in het totale kolkvolume zonder acht te slaan op de waterverplaatsing van de schepen welke hooguit 10% van het kolkvolume bedraagt. Figuur 3.13 toont schematische de vijf verticalen met elke vijf opnemers die elk de geleidbaarheid-temperatuur-

druk meten waaruit het zoutgehalte kan worden afgeleid en hun diepte t.o.v. het wateroppervlak bij bekende atmosferische druk. We noemen deze instrumenten kortweg de zoutopnemers.



Figuur 3.13 Schematisch, positie 25 geleidbaarheid-temperatuur-druk (CTD) opnemers in de 148,6m lange kolk, zie ook Figuur 3.2bt. De drie bovenste opnemers bewegen mee met het wateroppervlak, de onderste twee zijn op vaste hoogte boven de kolkvloer bevestigd.

In de kolk zijn alle zoutopnemers tegen de kolkwand aan westzijde geplaatst en beschermd tegen scheepvaart. De scheepvaart kreeg via meldingsborden bij de sluis de instructie aan de oostzijde af te meren en de sluismeesters zagen hier nauwkeurig op toe. De bovenste drie zoutopnemers zijn op diepten van ca. 0,5 , 1,0 en 1,5m aan een drijvende boei opgehangen zodat deze opnemers voortdurend het zoutgehalte tot dicht onder het wateroppervlak meten, mede i.v.m. de brakkere toplaag, zie ook Figuur 3.2b. De twee overige en diepste gelegen zoutopnemers waren op 0,5 en 1,5 m boven de kolkvloer verankerd en meten voldoende goed de voortplanting van de zouttong en ook de achterblijvende zoute onderlaag na schutten naar meerzijde.

In beide voorhavens maten we ook de verticale verdeling van de zoutgehalten en met drukopnemers hun momentane diepten. Tevens zijn met andere drukopnemers de waterstanden in de voorhavens, in de kolk en de atmosferische druk gemeten. Met deze gegevens kunnen we Figuur 3.9 construeren voor elke schutting naar zee- en meerzijde zowel de zoutmassaveranderingen als de snelheid waarmee de zouttong door de kolk loopt waaruit de dimensieloze tijd τ in Figuur 3.9 volgt.

3.7 Voorbeelden van schutting naar Waddenzee en naar IJsselmeer

De volgende Figuur 3.14a t/m Figuur 3.14g tonen opeenvolgende stadia van de gemeten zoutindringing tijdens een schutting naar zeezijde vanaf 10:09:39 tot 10:47:08 op 2 april nadat tijdens vloed de kolk is genivelleerd met de voorhaven aan zeezijde. Later in dit rapport zullen we nog de invloed van scheepvaart bespreken waarvan we de tijdstippen van passage, afmetingen en diepgang ontvingen. De datum en tijdstippen zijn in de figuren aangegeven als 20100402 (jaar-maand-dag) en 100939 (uur-minuten-seconden). De waterstanden in de

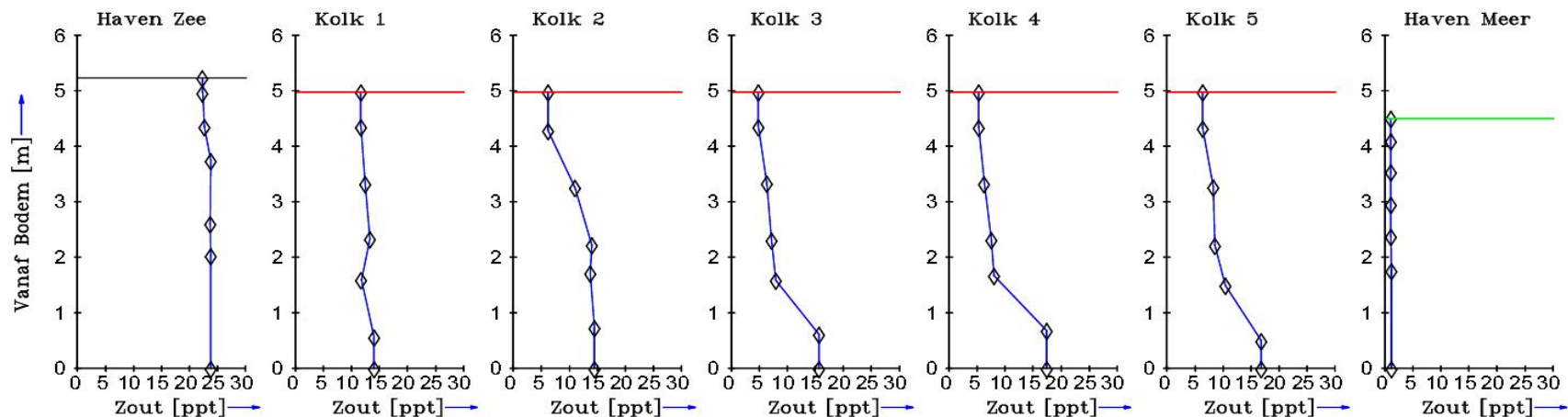
voorhavens en kolk zijn als horizontale lijnen in de bovenste rij aangegeven en met ruitvormige symbolen de diepten van de zoutopnemers waarbij de ondiepste en diepste meetwaarden naar resp. wateroppervlak en kolkvloer zijn gekopieerd. Aan zeezijde in de voorhaven bedraagt bij deze schutting het zoutgehalte ca. 26 ppt en dit zoutgehalte is bijna uniform over de waterdiepte; aan meerzijde in de voorhaven bedraagt het zoutgehalte ca. 1,2 ppt. Kort hierna is het diepste meetpunt in de voorhaven aan meerzijde naar ca. 4,3m diepte gebracht d.w.z. nagenoeg tot op het niveau van de 30 cm hoge drempel op de kolkvloer. Zonder de scheepvaart te hinderen bleek een vergelijkbare diepte voor de diepste zoutopnemer in de zeezijde-voorhaven niet haalbaar. Als aanvulling op de zoutmetingen in de zeezijde-voorhaven plaatsten we pas tijdens de laatste reeks waarnemingen een afzuiging van water buiten de sluisdeuren aan zeezijde en ca. 25cm boven de kolkvloer waarvan we het zoutgehalte maten. Vóór die tijd en ter aanvulling op de gemeten zoutprofielen kopieerden we de diepste zoutmeting in de kolk bij schutten naar zeezijde als zijnde het zoutgehalte in het diepste punt van de zeezijde-voorhaven.

De horizontale zwarte, rode en groene lijnen in de zeven grafieken met verticale zoutprofielen geven de waterstand t.o.v. de kolkvloer in de voorhaven aan zeezijde (meeste linkse grafiek), aan meerzijde (meest rechtse grafiek) in de kolk (overige grafieken). Figuur 3.14a toont het laatste stadium van het nivelleren van de kolk met de waterstand aan zeezijde waarbij via geopende rinketschuiven in de sluisdeuren aan zeezijde zouter water de kolk in wordt gestuwd. De waterstanden in de grafieken van Figuur 3.14a tonen dat de kolk nog niet volledig op zeeniveau is maar (uiteraard) wél juist na het openen van de sluisdeuren in Figuur 3.14b. In Figuur 3.14b en Figuur 3.14c reist de zouttong vanaf de geopende sluisdeuren naar het gesloten kolkeinde. Op het moment van Figuur Figuur 3.14d is het zoutgehalte over de gehele kolkvloer ca. 26 ppt d.w.z. het zoutgehalte in de zeezijde-voorhaven en reist de zouttong na reflectie tegen het gesloten kolkeinde terug naar de zeezijde. Het zoutgehalte (Figuur 3.14d) in de toplaag bij grafiek "Kolk 1" is lager dan bij het gesloten kolkeinde in grafiek "Kolk 5" in Figuur 3.14d wat duidt op het uittreden van het zoetere kolkwater aan het oppervlak naar de zeezijde. Dit uittreden wordt ook waargenomen in het verticale zoutprofiel in de voorhaven aan zeezijde want deze buigt af naar lagere zoutgehalte bij het wateroppervlak terwijl voor opening van de sluisdeuren het zoutprofiel bijna uniform over de diepte was.

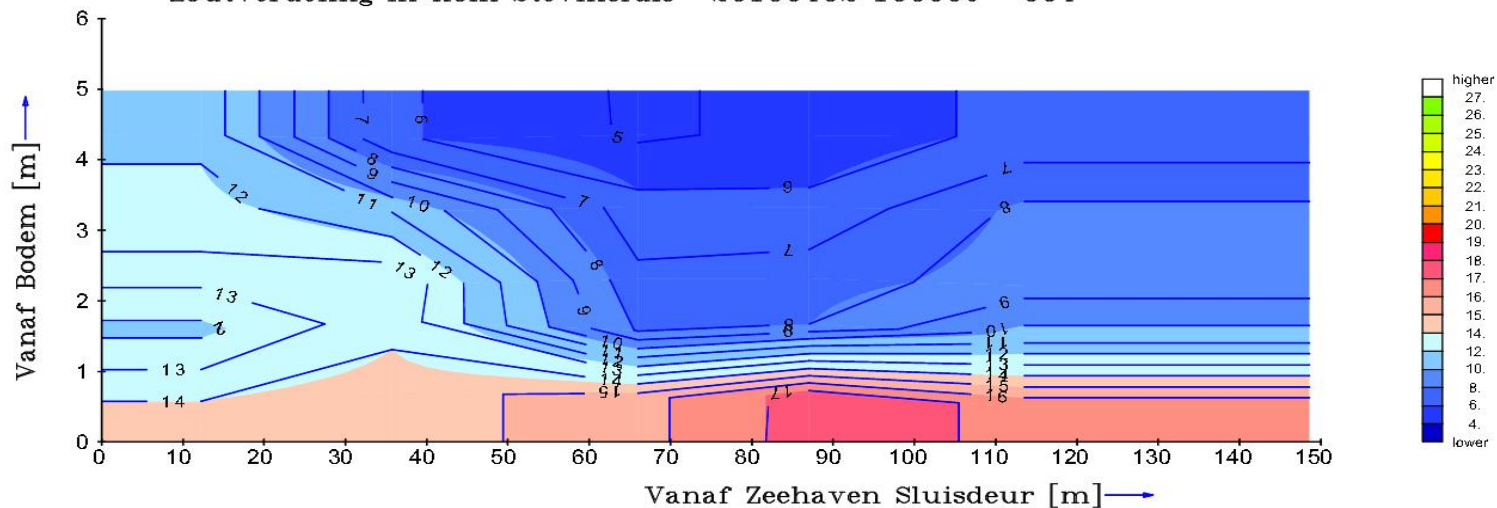
Bij het sluiten van de kolk naar zeezijde blijft er in de toplaag nog een verdunde rest van het oorspronkelijke zoetere kolkwater in de kolk achter waardoor de uitwisselingsgraad van de kolk met water uit de voorhaven aan zeezijde niet de volledige 100% bereikt.

De daarop volgende Figuur 3.15a t/m Figuur 3.15g tonen de indringing van een zoetwatertong aan het wateroppervlak van de kolk zodra deze naar meerzijde wordt geopend. De laatste Figuur 3.15g toont dat er nog een rest brak water in de kolk achterblijft op het moment van sluiten naar meerzijde.

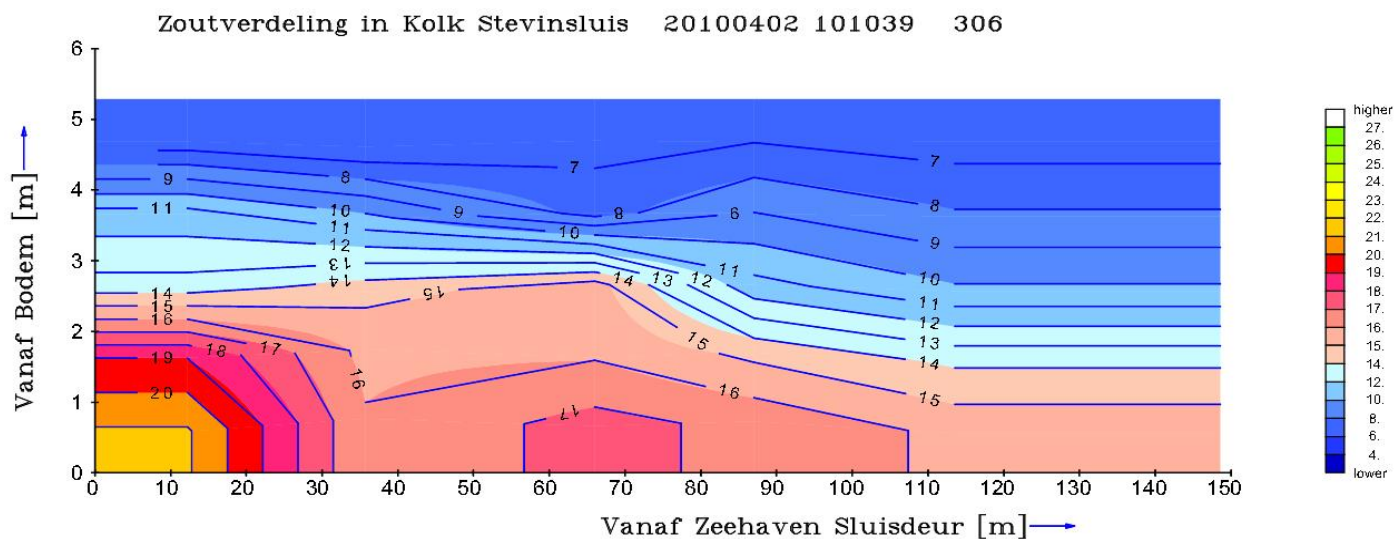
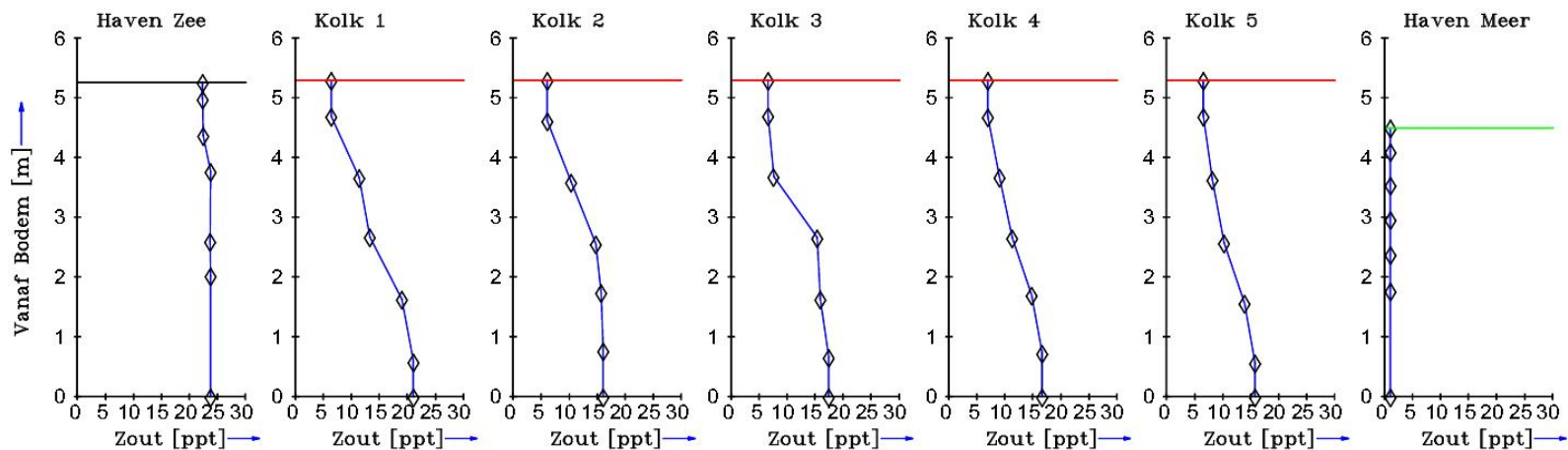
Uit deze bespreking van de tijdsafhankelijke verdeling van zout in de kolk concluderen we dat onze meetmethode een begrijpelijk inzicht biedt in elk stadium van elke schutting. We concluderen dat de analyse van de verandering van de zoutmassa in de kolk tijdens schuttingen met dergelijk inzicht in principe nauwkeurig gevolgd kan worden.



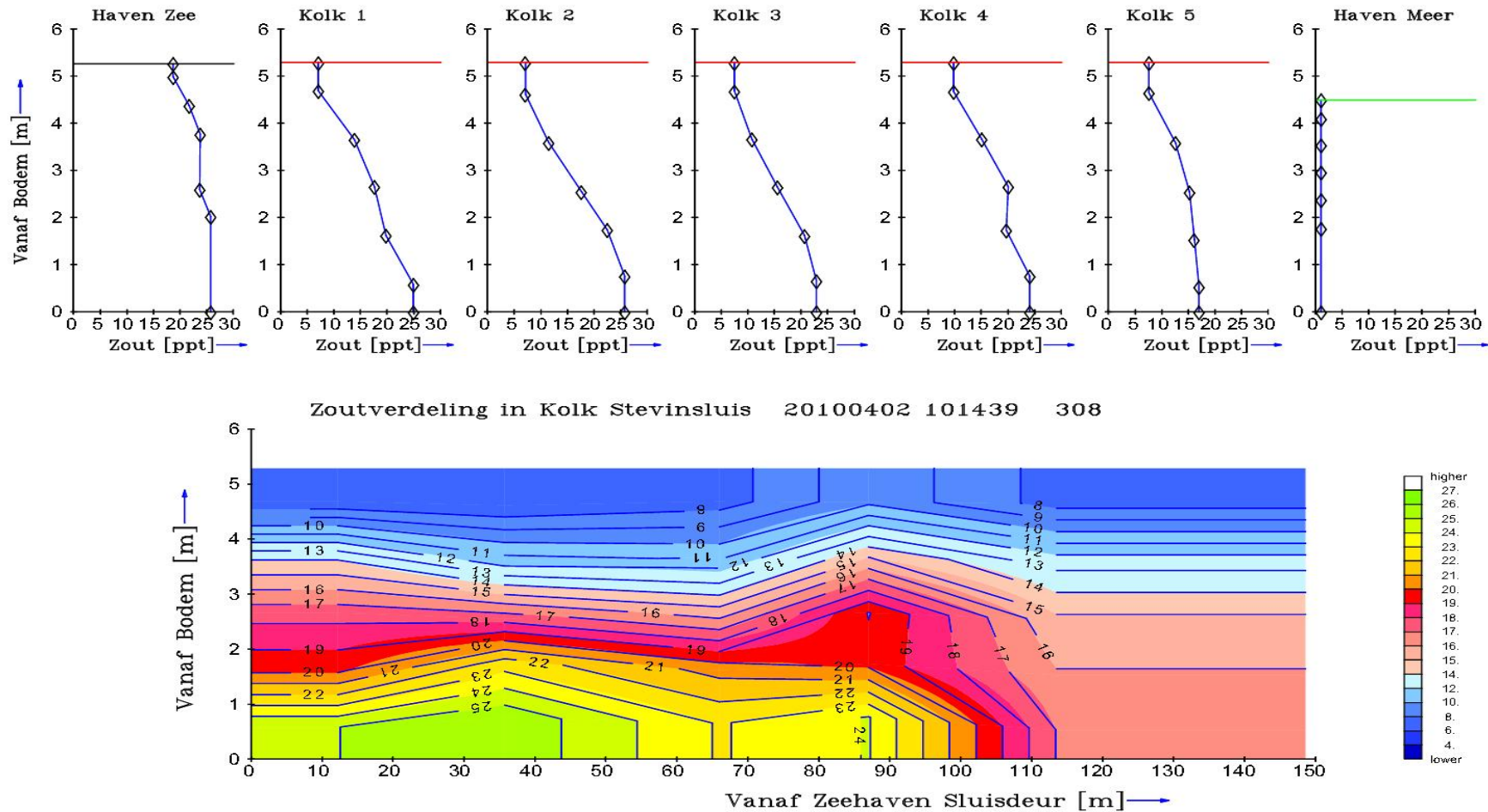
Zoutverdeling in Kolk Stevinsluis 20100402 100639 304



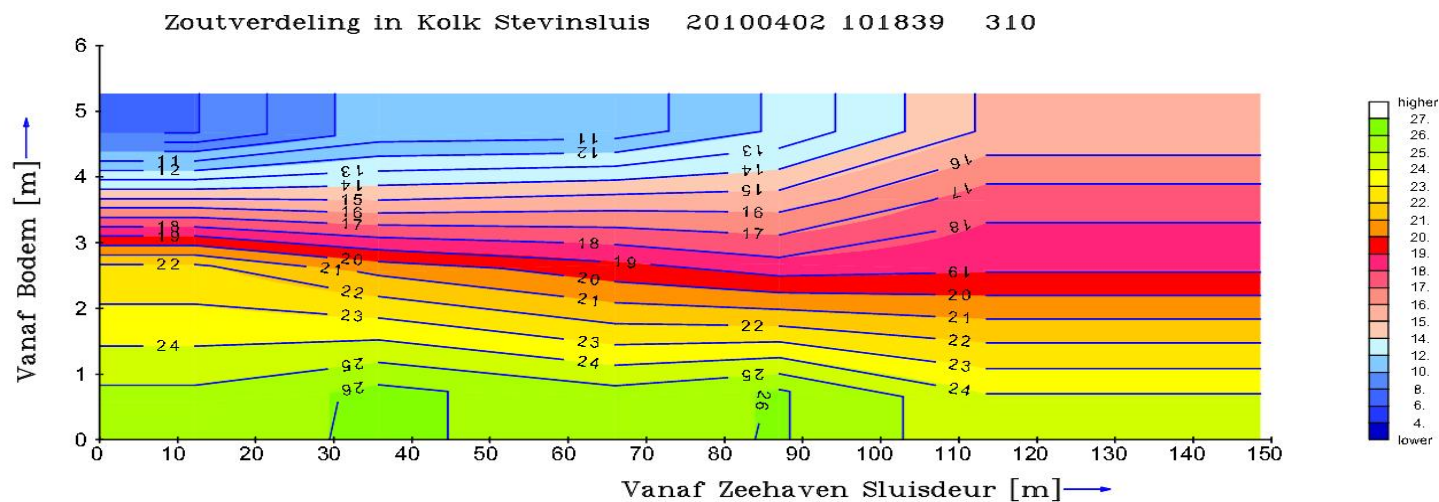
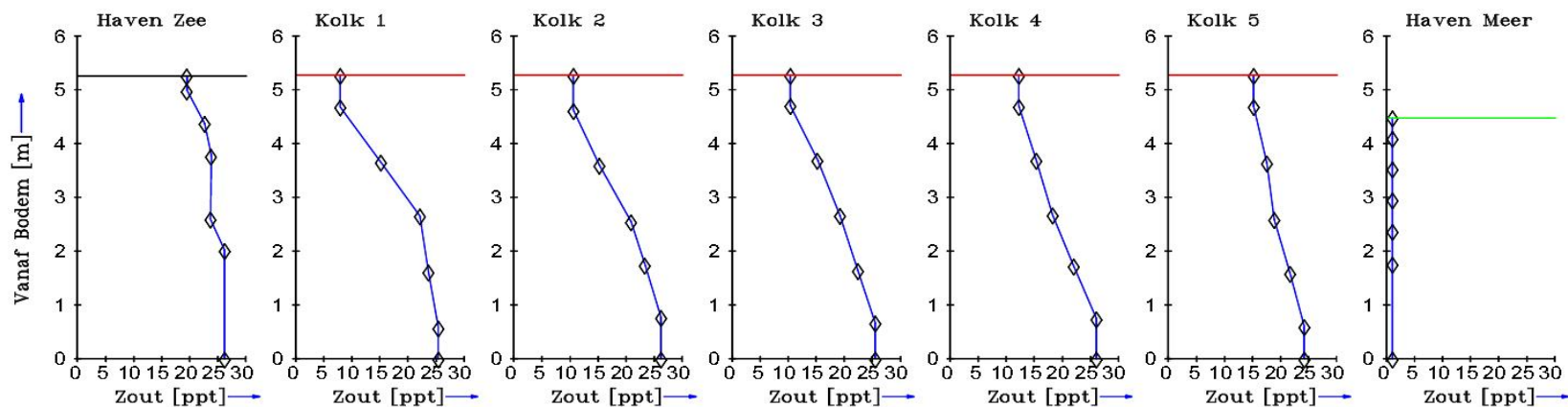
Figuur 3.14a Verdeling zoutgehalte na nivelleren van de kolk met waterstand aan zeezijde 3 minuten voor opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



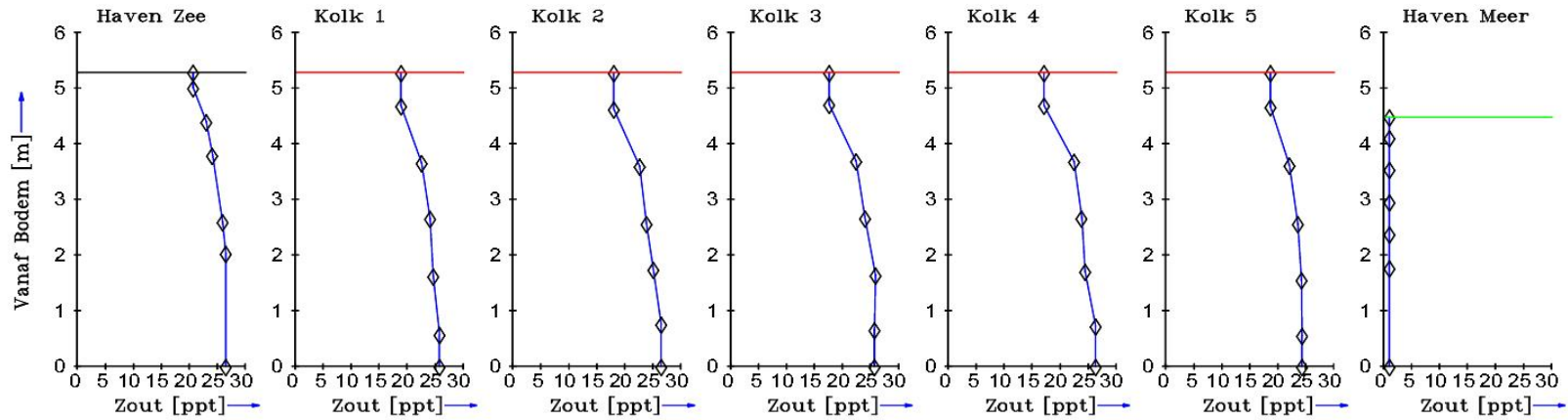
Figuur 3.14b Begin van indringen zouttong 1 minuut na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



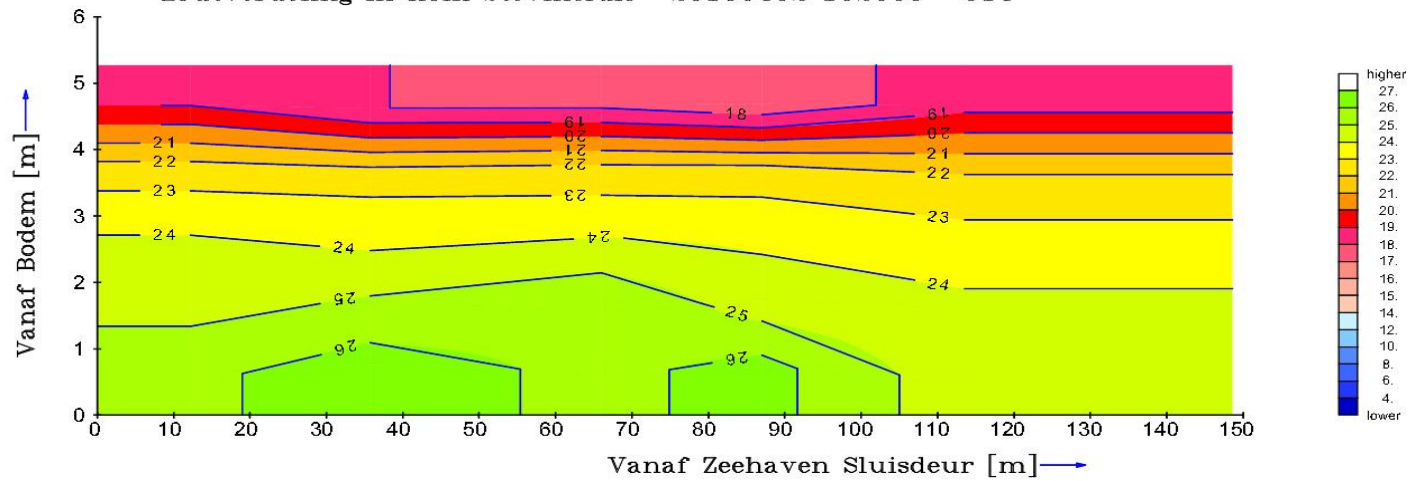
Figuur 3.14c Reis van zouttong naar gesloten kolkeinde, uittreden van zoetere toplaag al merkbaar in zoutprofiel in voorhaven zeezijde ; 5 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



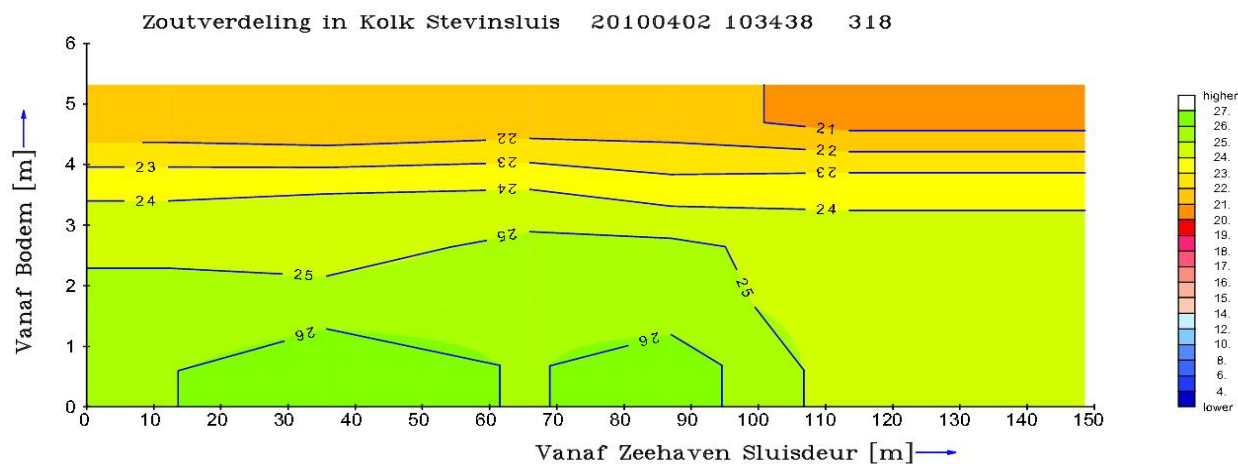
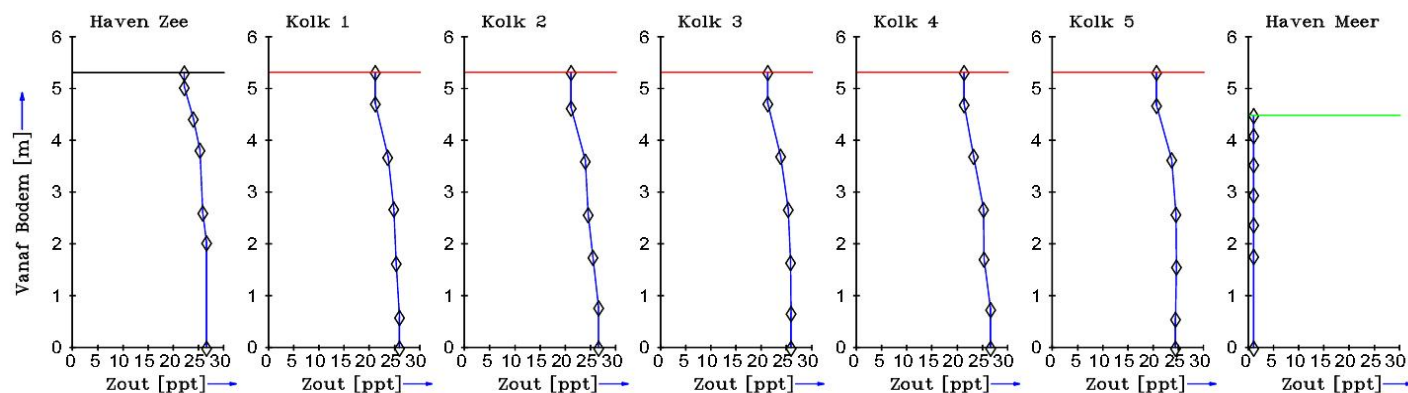
Figuur 3.14d Reis van zouttong terug naar zeezijde en na reflectie tegen kolkeinde en verdringing van zoetere toplaag ook merkbaar in zoutprofiel voorhaven zeezijde; 9 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



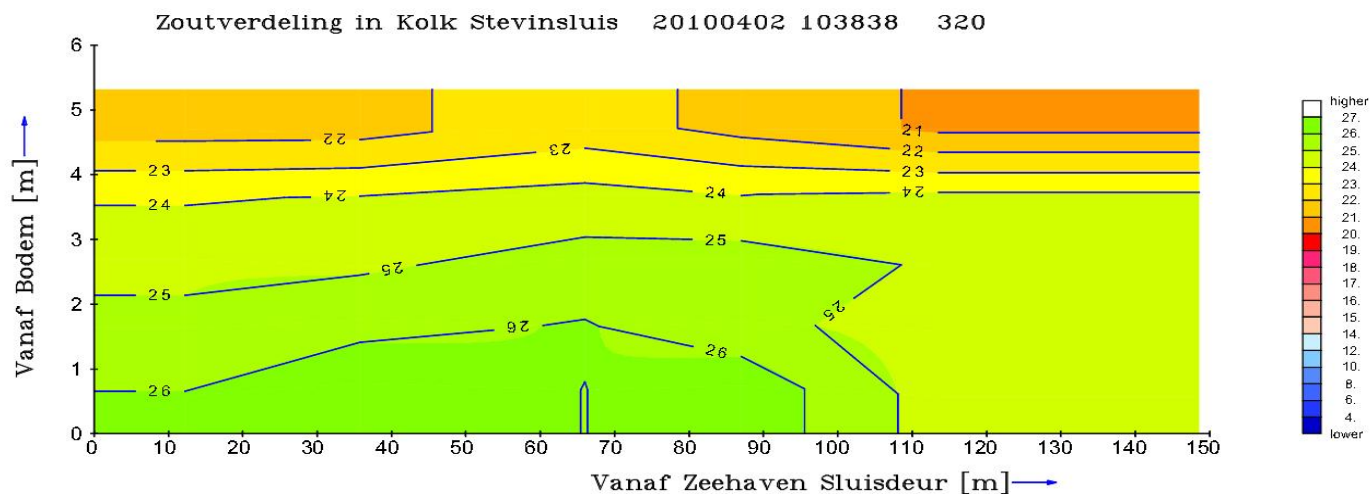
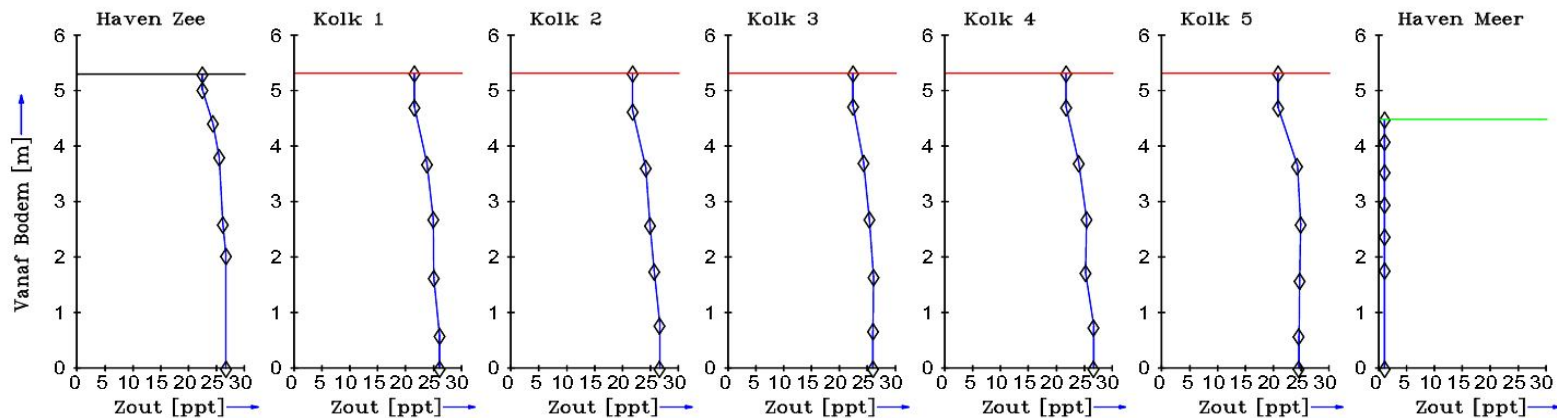
Zoutverdeling in Kolk Stevinsluis 20100402 102638 314



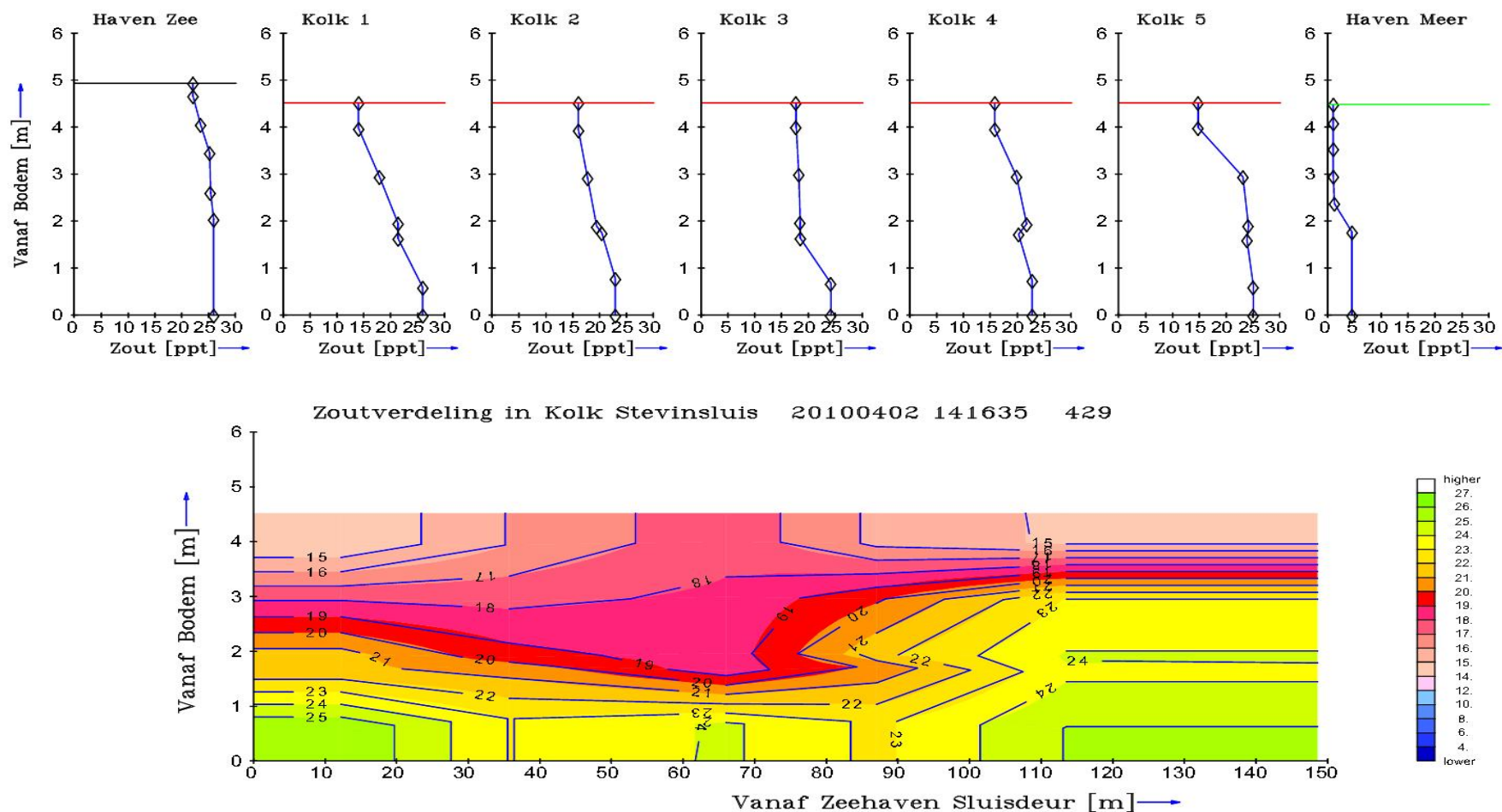
Figuur 3.14e Reis van zouttong terug naar zeezijde en na reflectie tegen kolkeinde en verdringing van zoetere toplaag; 13 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



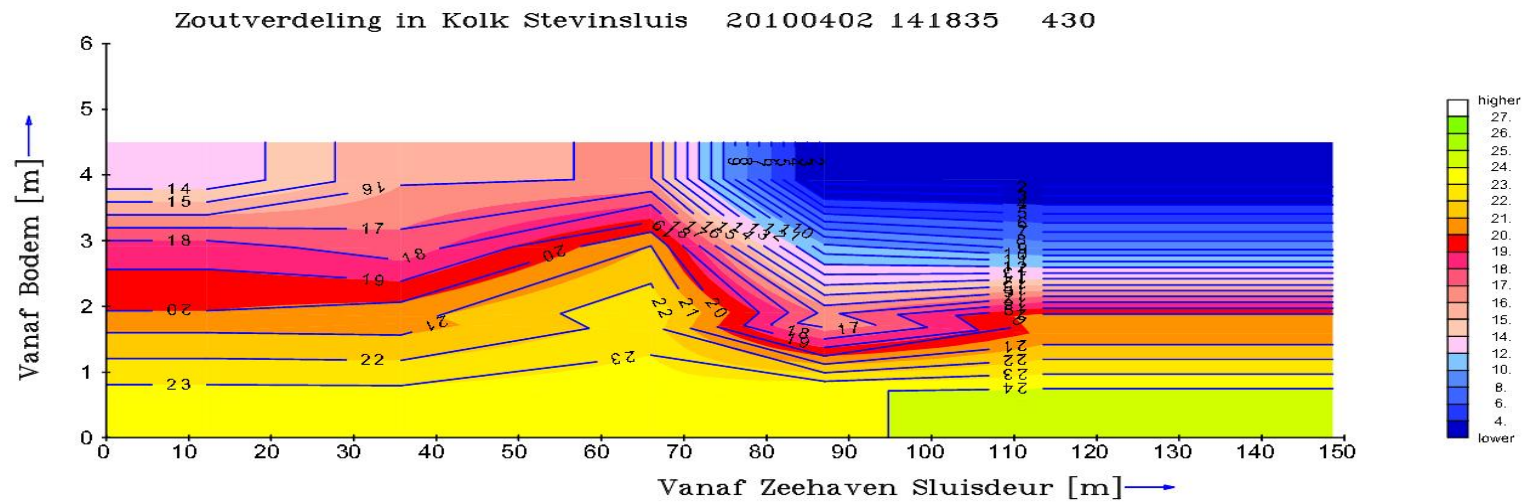
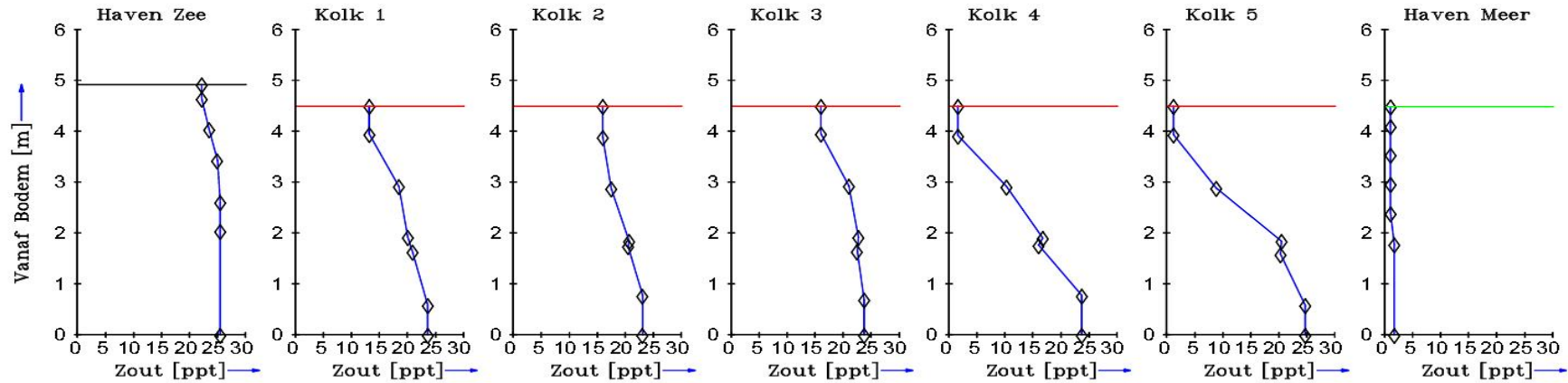
Figuur 3.14f Zouttong heeft kolk aan zeezijde verlaten, brakkere toplaag blijft aanwezig; 15 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



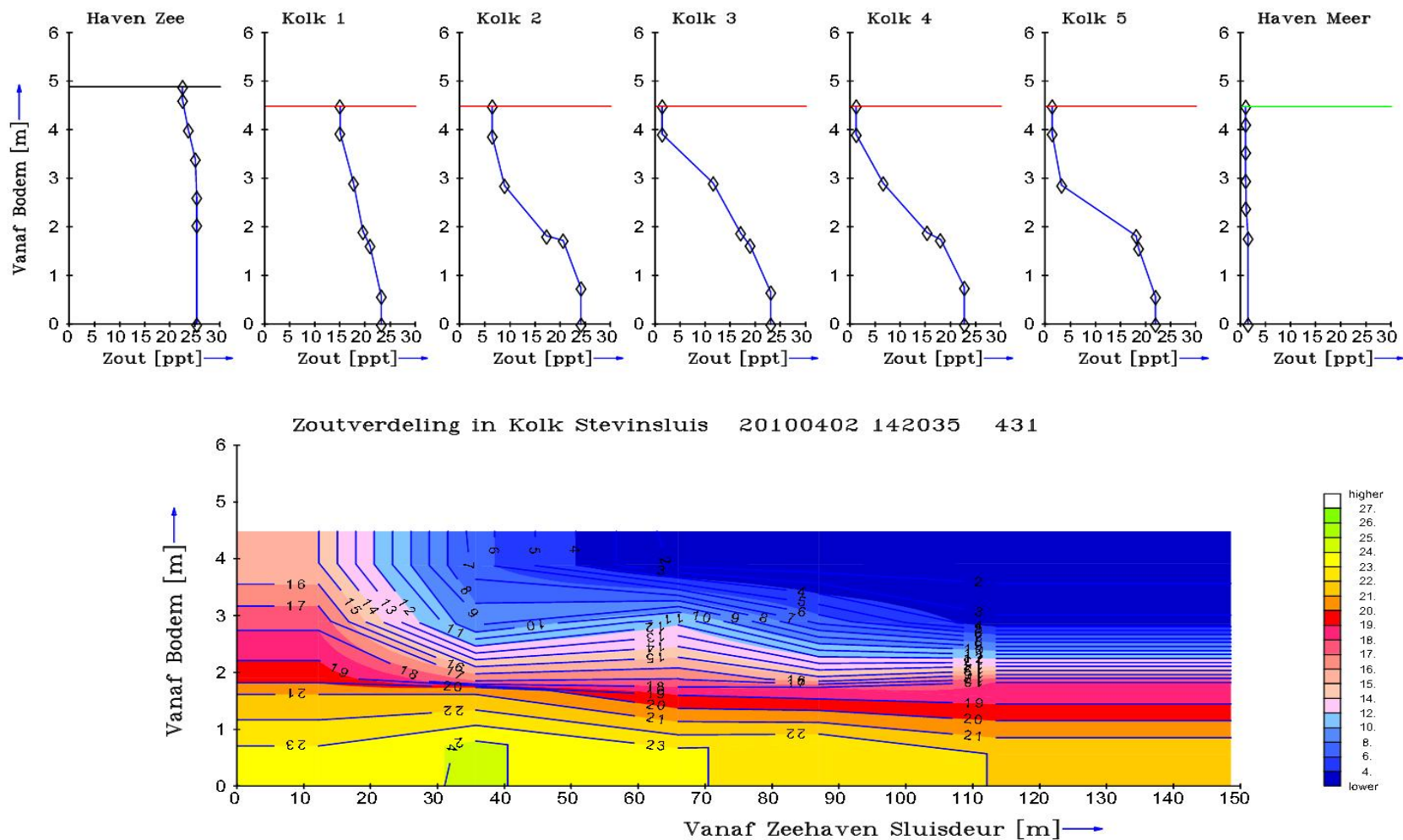
Figuur 3.14g Trage indringing van laatste restant zout in kolk; 29 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur.



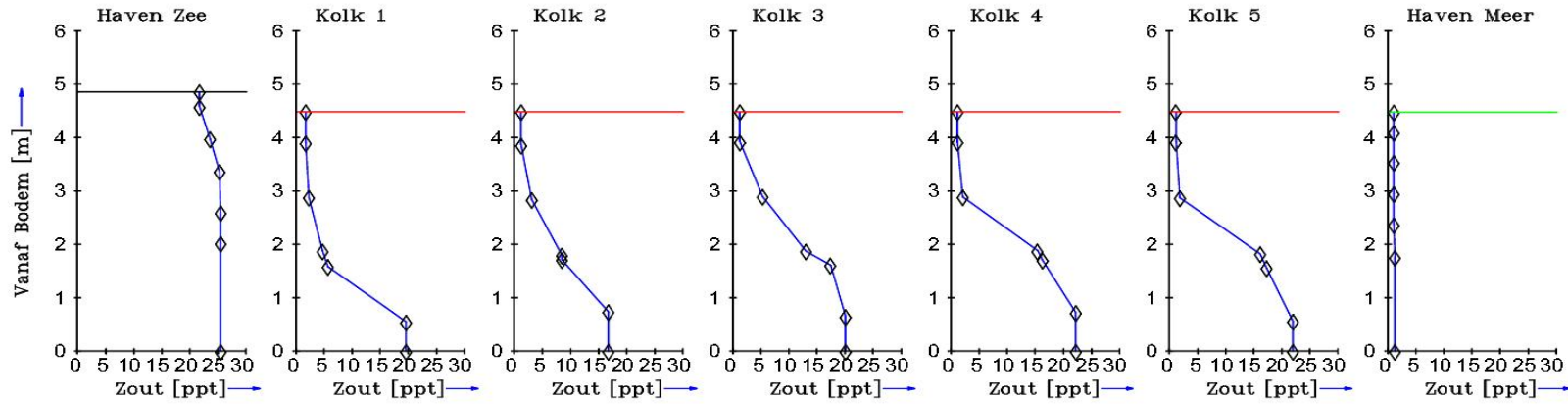
Figuur 3.15a Indringing zoetwatertong enkele seconden na openen sluisdeuren naar meerzijde, de uittrekende zouttong verhoogt het zoutgehalte bij de bodem van de voorhaven aan meerzijde (zie meeste rechtse zoutprofiel)



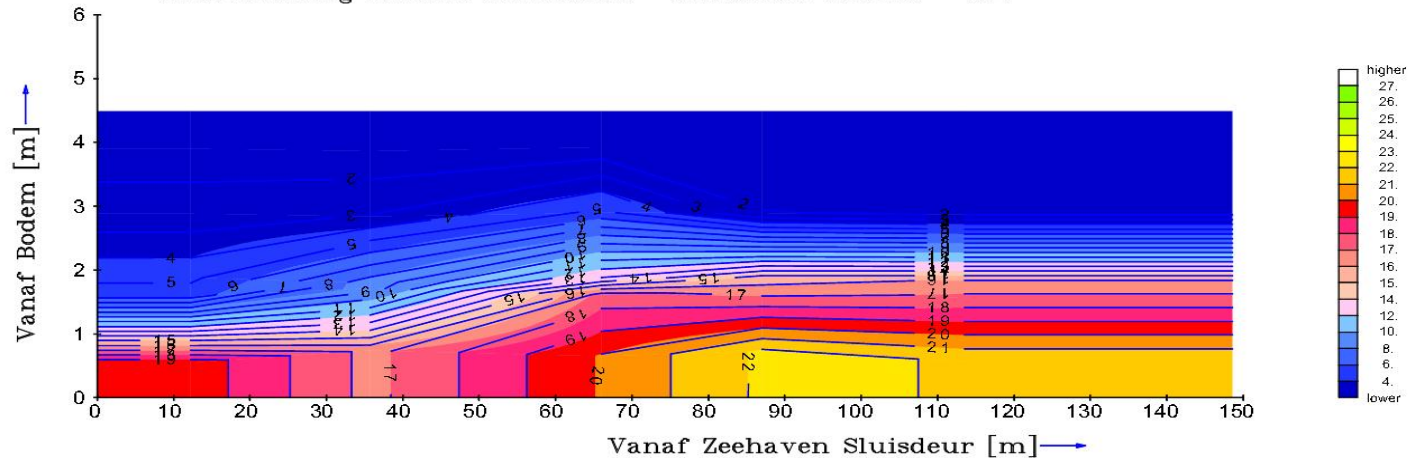
Figuur 3.15b Indringing zoetwatertong, 2 minuten na openen sluisdeuren naar meerzijde om 14:16:35.



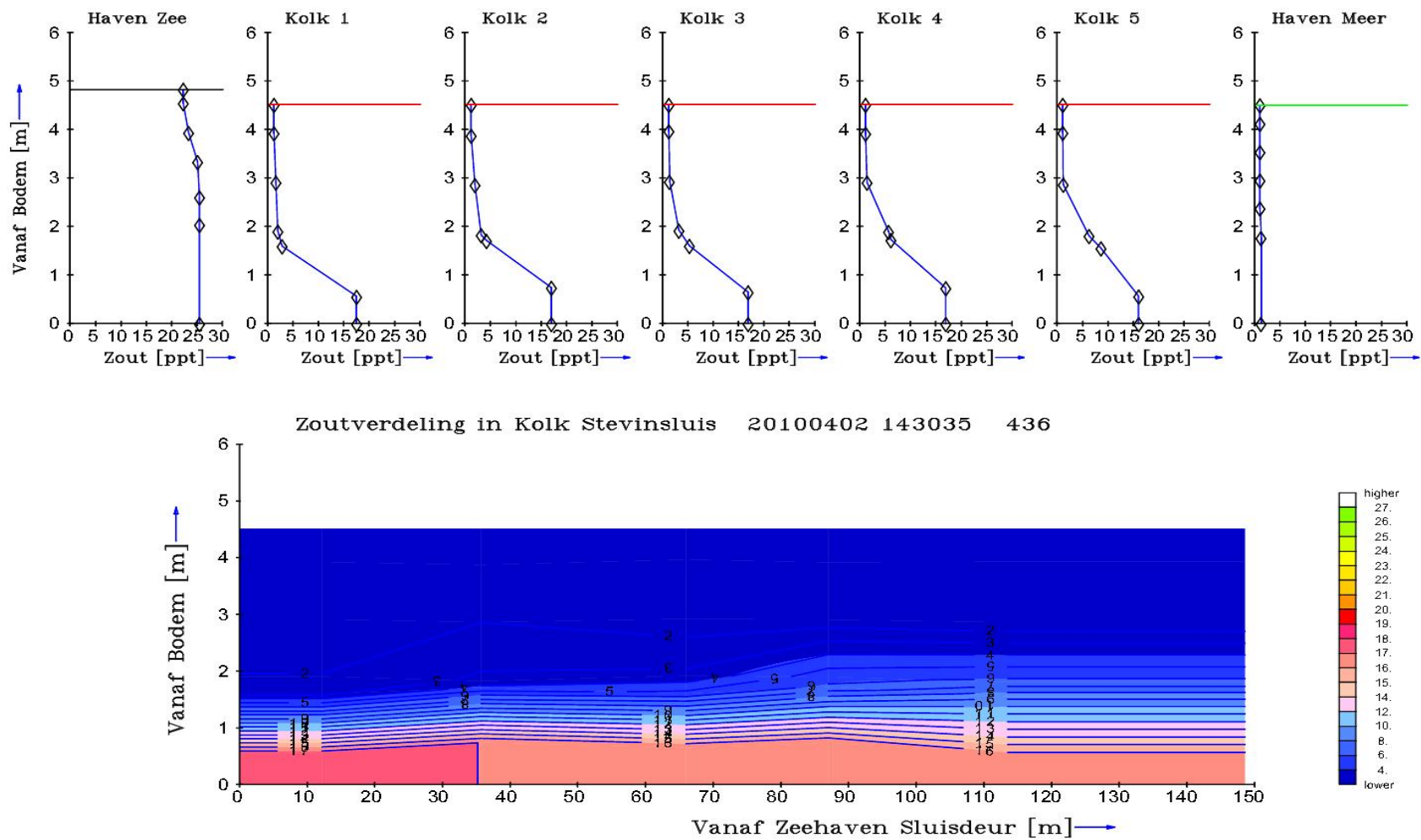
Figuur 3.15c Indringing zoetwatertong, 4 minuten na openen sluisdeuren naar meerzijde om 14:16:35.



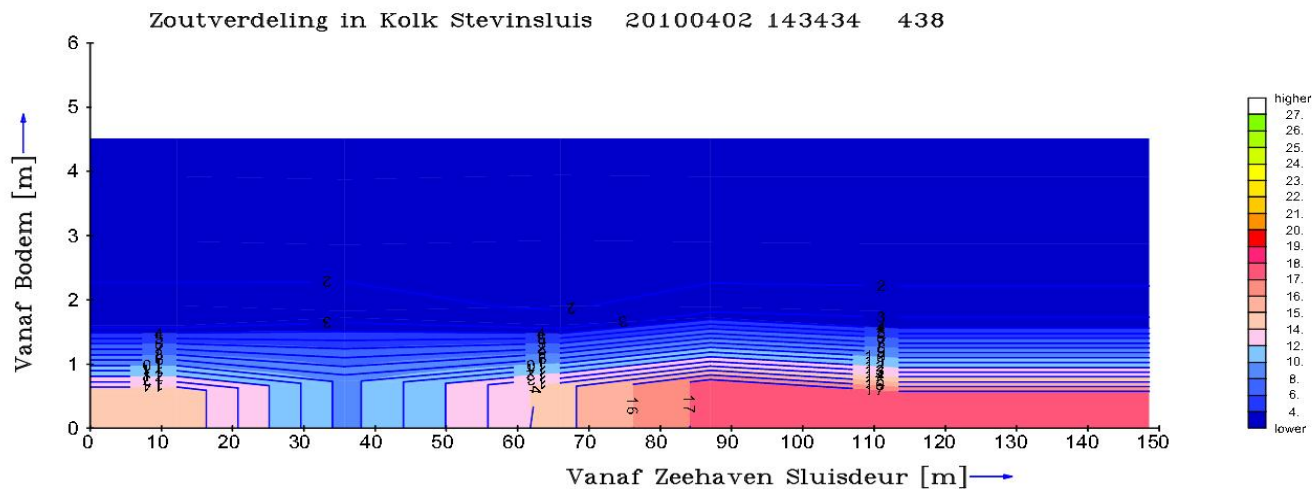
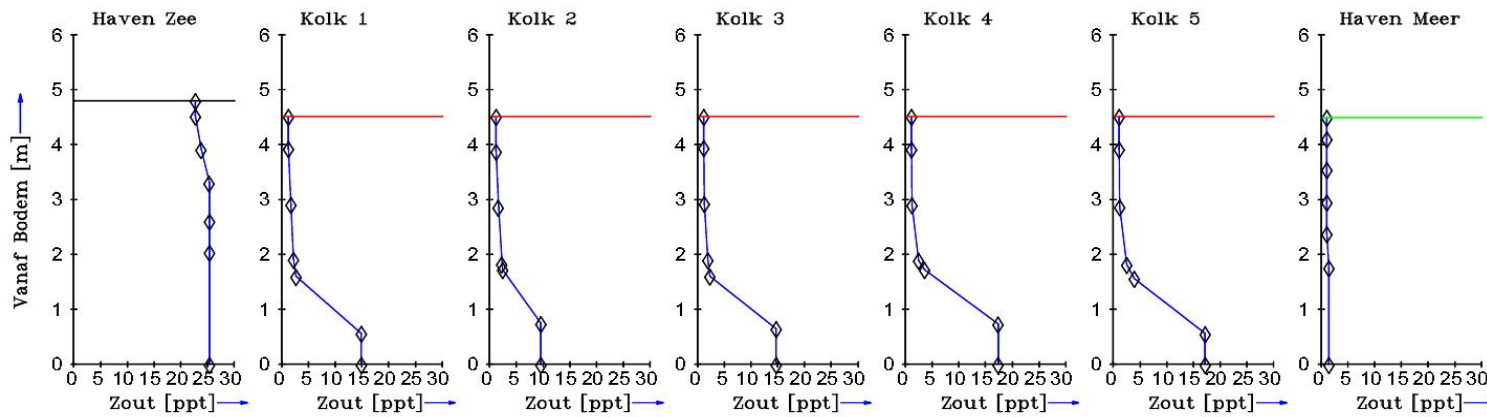
Zoutverdeling in Kolk Stevinsluis 20100402 142635 434



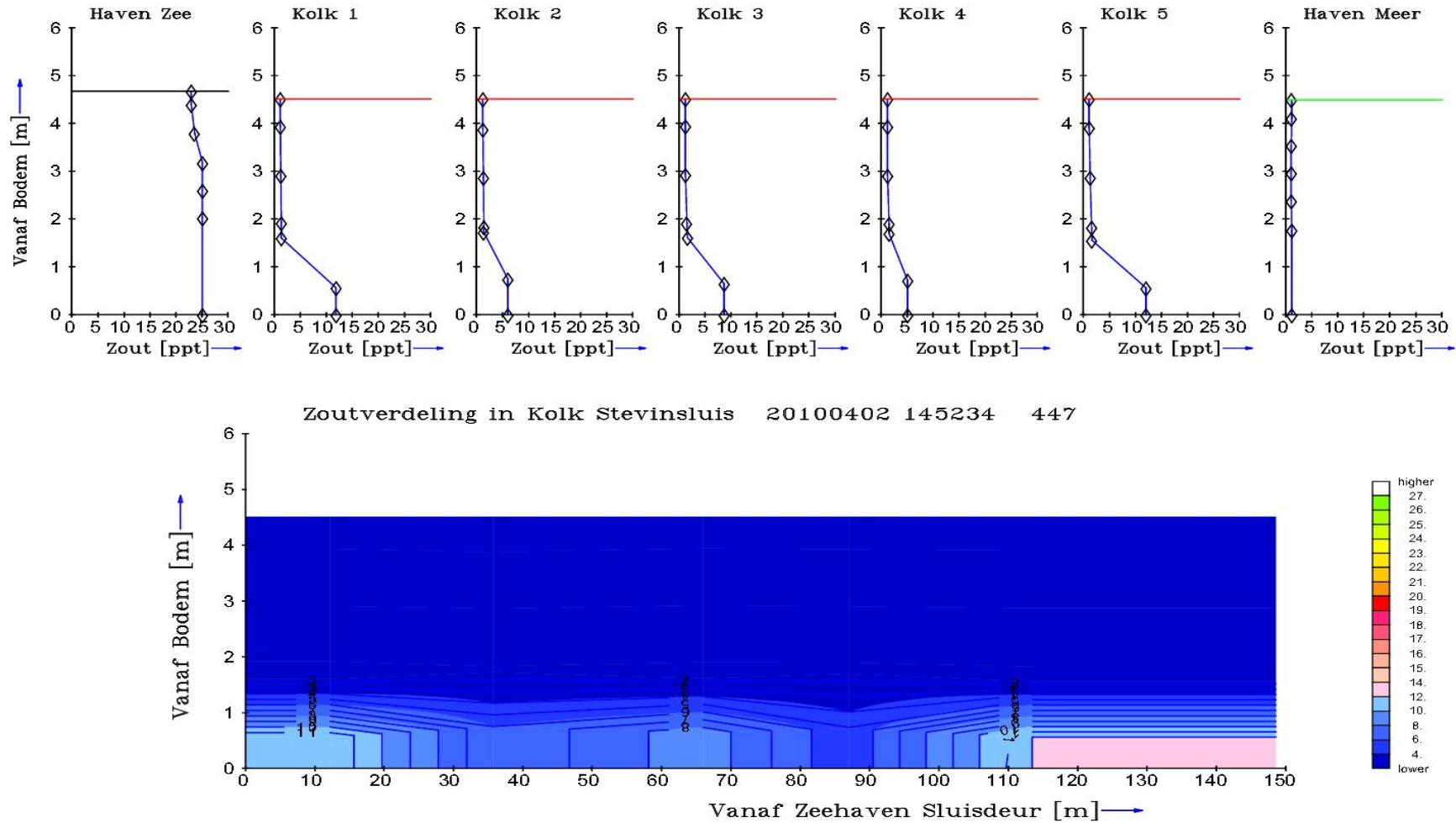
Figuur 3.15d Na reflectie loopt de zoetwatertong terug naar meerzijde, 10 minuten na openen sluisdeuren naar meerzijde om 14:16:35.



Figuur 3.15e Opgemengde zoutere onderlaag van de kolk stroomt traag naar meerzijde, 14 minuten na openen sluisdeuren naar meerzijde om 14:16:35.



Figuur 3.15f Opgemengde zoutere onderlaag van de kolk stroomt traag naar meerzijde, 18 minuten na openen sluisdeuren naar meerzijde om 14:16:35.



Figuur 3.15g Verdunde maar nog zoute onderlaag blijft in de kolk achter op het moment van sluiten sluisdeuren naar meerzijde om 14:52:34. Demonstratie toegepaste analyse

3.8 Demonstratie toegepaste analyse

In dit onderdeel bespreken we enkele markante voorbeelden van onze analyse van veranderingen van de zoutmassa in de kolk en de invloed van zoutlekbepurende middelen. We zullen stapsgewijs de informatie in deze analyse opvoeren. We beginnen met Figuur 3.16 en Figuur 3.17 voor een reeks schuttingen op 2 april 2010 tijdens onze meetcampagne. Eerder toonden we in Figuur 3.14 en Figuur 3.15 schuttingen op deze dag.

Figuur 3.16 en Figuur 3.17 en volgende figuren zijn opgedeeld in de volgende drie onderdelen. De bovenste figuur toont het verloop van de zoutmassa in de kolk uitgedrukt in tonnen zout als functie van de tijd. Deze zoutmassa is de gesommeerde bijdragen van alle zoutopnemers in de kolk gewogen met hun representatief aandeel in het totale kolkvolume, zie ook Figuur 3.13. Het representatieve volume-aandeel wordt bepaald uit de gemiddelden van de diepten van opeenvolgende zoutmeters in dezelfde verticaal vermenigvuldigd met de lokale kolkbreedte en met de gemiddelden van de horizontale afstanden tot opeenvolgende verticalen langs de kolk. Er is niet voor scheepsvolume gecorrigeerd.

De rode lijn in de onderste grafiek toont het verschil in waterstand tussen de kolk en het IJsselmeer. Wanneer dit verschil nul is staat de kolk in verbinding met de meerzijde of de kolk is als laatste geopend geweest naar meerzijde. In de middelste grafiek tonen we in de tijd de toestand van de verbinding van de kolk met zeezijde of meerzijde. De zwarte lijn in de onderste grafiek geeft het verschil in waterstand van de voorhaven aan zeezijde t.o.v. meerzijde. Verschillen dicht bij de nulwaarde duiden op gelijk water met maximale opwaartse of neerwaartse snelheid van de zeespiegel.

Als regel zal de rode lijn in de onderste grafiek de waarde nul geven als de kolk open of geopend is geweest naar meerzijde. De rode lijn zal de waarde van de zwarte lijn aannemen zodra de kolk via geopende schuiven of sluisdeuren in verbinding staat of heeft gestaan met de voorhaven aan zeezijde. De overgang van de rode lijn van het waterstandverschil van de zeezijde-voorhaven naar nul en vice versa is het stadium van het zg. nivelleren van de kolk; een noodzakelijke overgang voordat schutten naar zee of meer kan beginnen.

De blauwe lijn in de centrale grafiek kan drie waarden aannemen nl. de waarde 0 als de kolk naar zeezijde gesloten is, de waarde 1 voor geopende rinketschuiven in de sluisdeuren aan zeezijde en de waarde 2 voor geopende sluisdeuren naar zeezijde. Analoog geldt de groene lijn in de centrale grafiek voor de eventuele everbinding tussen kolk en meerzijde-voorhaven.

In de bovenste grafiek markeren we de zoutmassa in de kolk op het moment dat de sluisdeuren naar zeezijde openen, dus na nivelleren met de zeewaterstand, met \square symbolen en de zoutmassa in de kolk op het moment van sluiten van deze sluisdeuren met een Δ symbolen. De groene lijnen in de bovenste grafiek geven de maximale en minimale zoutmassa van de kolk aan bij gegeven waterstand in de kolk en bij de over de diepte gemiddelde en gemeten zoutgehalten in de voorhavens aan resp. de zeezijde en meerzijde.

In het tijdsinterval tussen \square en Δ symbolen neemt de zoutmassa toe en deze verandering van zoutmassa tijdens geopende sluisdeuren naar zeezijde registreren we samen met de gegevens op het moment dat de kolk werd geopend. Uit deze gegevens kunnen we de maximale kolkvulling bepalen en de snelheid van de ongeremde zouttong waarmee we het

tijdsinterval sinds openen van de kolk dimensieloos maken tot het dimensieloze tijdsinterval τ , zie onderdeel 3.4. Met deze metingen en naverwerking maken we grafieken vergelijkbaar met die Figuur 3.9 die we later in dit rapport tonen.

Evenzo markeren we in de bovenste grafiek met + symbolen de zoutmassa in de kolk op het moment dat de sluisdeuren naar meerzijde openen en met X symbolen de zoutmassa in de kolk bij sluiten naar meerzijde.

In het vorige onderdeel toonden we al met Figuur 3.14 en Figuur 3.15 de langer durende schuttingen naar zeezijde (van 10:09 tot 10:47) en naar meerzijde (van 14:16 tot 14:52) op deze dag. De bijbehorende verandering van de zoutmassa in de kolk in de bovenste grafiek van Figuur 3.14 toont dat de kolk niet volledig zijn maximale of minimale zoutmassa bereikt door het achter blijven van de verdunde rest van oorspronkelijk kolkwater, zoals besproken aan de hand van Figuur 3.14 en Figuur 3.15. Tijdens deze schuttingen verplaatst er ca. 160 ton zout van zeezijde naar de kolk en van kolk naar meerzijde. De overige schuttingen op deze dag zijn korter zodat de toename of afname van de zoutmassa wordt onderbroken door het sluiten van de kolk. Merk op dat na de schutting om ca. 12:35 en 16:40 uur de rinketschuiven naar zeezijde geopend blijven (centrale grafiek, waarde 1 voor blauwe lijn) zodat de waterstand en zoutgehalte in de kolk zich richten naar die in de voorhaven aan zeezijde. De reden voor deze procedure is ons niet bekend.

In het tijdsinterval tussen sluiten en weer openen van de kolk vindt nivellering plaats waarbij naar gelang de voorafgaande schutting en eb of vloed zout of zoet water de kolk instroomt. In Figuur 3.16 is goed te zien dat bij nivelleren tijdens vloedcondities de zoutmassa in de kolk toeneemt na openen van de schuiven in de zee-deuren en afneemt bij openen van de schuiven in de meer-deuren. Bij de Volkeraksluizen is er sprake van een lage buitenwatestand waarbij de waterstand in het Hollandsch Diep hoger is dan in het Volkerak-Zoommeer. In die toestand betekent nivelleren dat voordat een schutting naar de zoute meerzijde plaats vindt de kolk eerst wordt bijgevuld met relatief zoet water uit het Hollandsch Diep. Voorafgaand aan een schutting naar het Volkerak-Zoommeer zal dit inmiddels brakke water, nl. vermengd met het zoute restant kolkwater, in het Volkerak-Zoommeer stromen. Dit zg. schutverlies van zoet water voor het nivelleren van de kolk betekent een verlies van zoet water uit het Hollandsch Diep of in de Stevinluis uit het IJsselmeer. Het voordeel van dit schutverlies aan zoetwater is dat de kolk zoeter wordt.

Ten opzichte van Figuur 3.16 is de bovenste grafiek in Figuur 3.17 uitgebreid met de verschillen tussen diepte-gemiddelde resp. volume-gemiddelde zoutgehalten van zeezijde-voorhaven en kolk en tussen volume-gemiddelde resp. dieptegemiddelde zoutgehalten van kolk en meerzijde-voorhaven (schaalverdeling in ppt langs rechteras van de grafiek). Deze verschillen tonen het kenmerkend verloop tijdens vloed en eb (na 15:15) beïnvloed door het nivelleren van de kolk met zout of zoet water. De zoutlekbeperkende middelen werken dus bij variërende verschillen in zoutgehalten.

Ten slotte bespreken we Figuur 3.18 als demonstratie van de meest complexe situatie die we op de laatste meetdag (26 mei 2010) onderzochten nl. met zoutlekbeperkende middelen door luchtbellenscherm, waterscherm en de gehele dag met een extra drempel van 1,18m hoogte in de kolk aan meerzijde. De centrale grafiek in Figuur 3.18 is nu uitgebreid met indicatoren voor het ingeschakeld zijn van de luchtbellenschermen aan meerzijde én aan zeezijde en met het waterscherm aan zeezijde wel/niet gecombineerd met het luchtbellenscherm. De groene lijnen voor maximale en minimale zoutmassa in de kolk zijn nu weg gelaten.

We lopen als volgt deze laatste succesvolle en lange meetdag door waar we met drie ploegdiensten van sluismeesters samenwerkten.

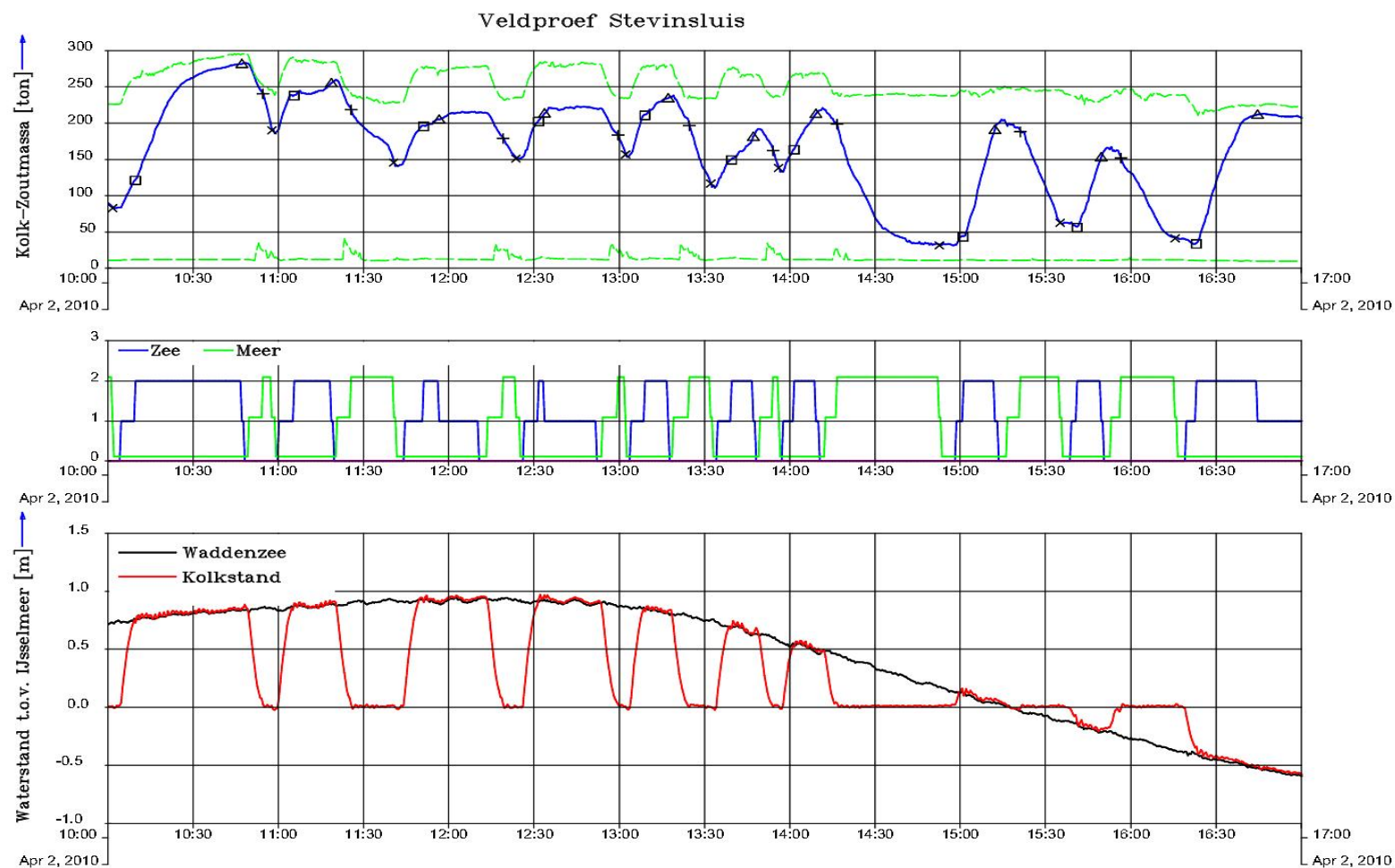
Tijdens de onbeschermdde schutting naar zee om 06:37 stijgt de zoutmassa met 85 ton. Daarna volgt er om 07:44 een schutting naar meerzijde waarbij het Δ -luchtbellenscherm aan meerzijde is ingeschakeld. Dit scherm werkt met 100 N ℓ /s en is geplaatst tussen de 1.18m hoge extra drempel in de kolk en de sluisdeuren aan meerzijde. Deze beschermde schutting naar meerzijde remt de zoutlek naar het IJsselmeer dermate dat de daarop volgende onbeschermdde schutting om 08:05 naar zeezijde met een gering verschil in zoutgehalte plaats vindt en de zoutmassa in de kolk stijgt met 35 ton i.p.v. de voorgaande 85 ton. Deze laatste schutting duurt weliswaar korter dan die om 06:37 maar het is vooral de geringere looptijd van de zoutong in de schutting om 08:05 die de kolk gedurende de 15 minuten deuropentijd minder snel met zeewater vult.

Een nog opvallender reductie in zouttransport naar de kolk vindt plaats bij de daarop volgende schutting naar zeezijde om 09:36 waar nu de combinatie van het Δ -luchtbellenscherm met ca. 100 N ℓ /s luchtdebiet en het Δ -waterscherm met ca. 1500 ℓ /s debiet is ingeschakeld. De toename in zoutmassa is nu slechts ca. 1,3 ton gedurende 15 minuten deuropentijd. De daarop volgende herhalingen tot 13:47 met dezelfde combinatie van zoutlekbeperkende middelen tonen hetzelfde beeld van een nauwelijks zichtbare stijging van de zoutmassa in de kolk tijdens schuttingen naar zeezijde.

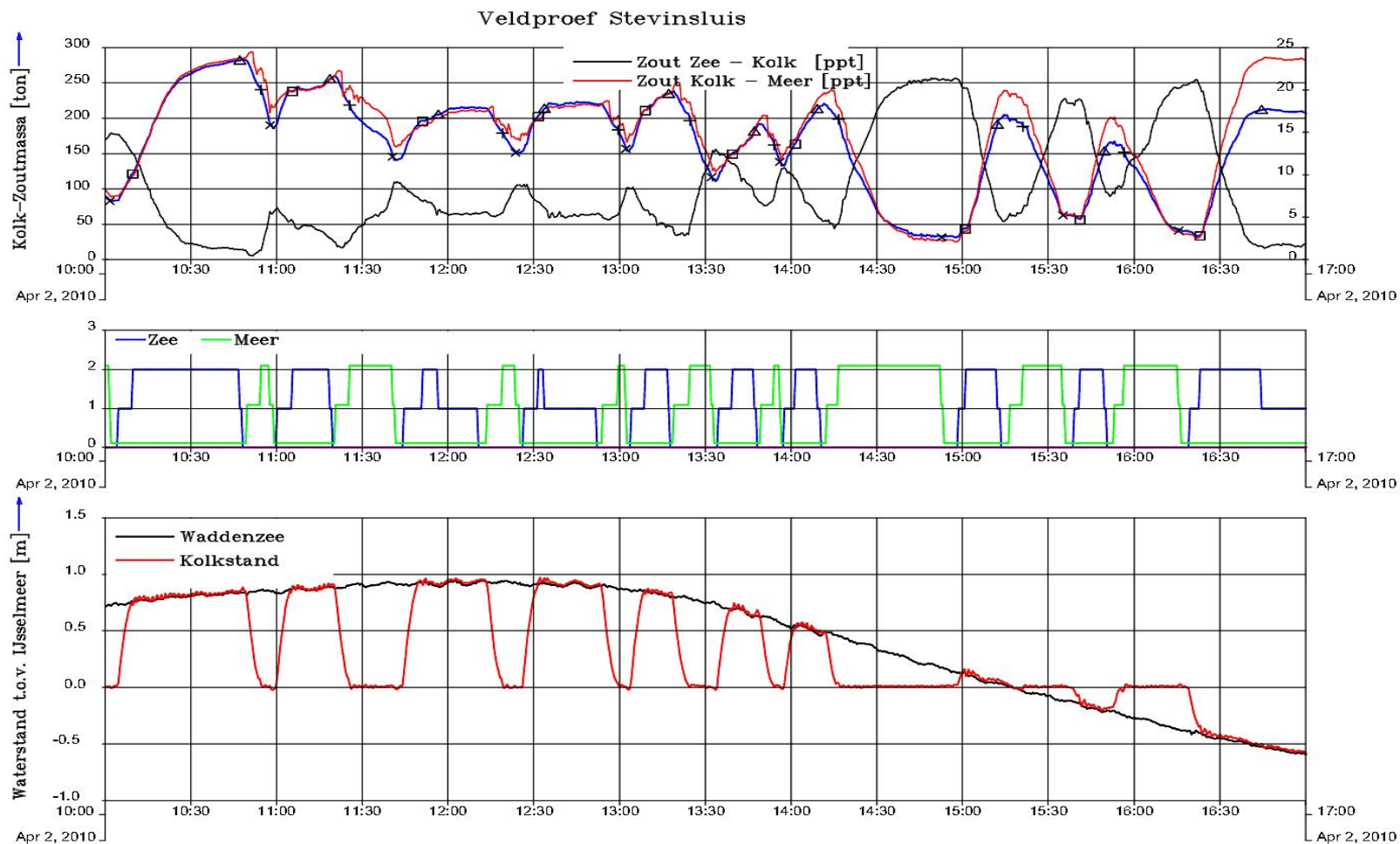
Na 13:47 uur wordt de beschermende werking van Δ -luchtbellenscherm aan meerzijde opgeheven: dit is in Figuur 3.18 zichtbaar door het ontbreken van de rode blokvormige curven. Hierdoor neemt het zoutverlies naar meerzijde toe waardoor het verschil in zoutgehalte tussen zeezijde en kolk opvallend toeneemt. Desondanks, bij deze grotere verschillen in zoutgehalten tussen zeezijde-voorhaven en de kolk, blijft de combinatie van Δ -luchtbellenscherm en Δ -waterscherm zeer goed werken. We verwijzen ook naar Figuur 3.11 in onderdeel 3.5 waar we schematisch de dempende werking van zoutlekbeperkende middelen op de variaties in zoutgehalte van de kolk bespraken. Karakteristiek is het zaagtand verloop van het verschil in zoutgehalten tussen voorhavens en kolk volgens resp. de rode en de zwarte lijnen in de bovenste grafiek van Figuur 3.18. Het zoutgehalte in de kolk varieert rond het gemiddelde (ca. 7 ppt) van de zoutgehalten in de beide voorhavens van ca. 0 en 14 ppt.

Ten slotte wordt op 26 mei 2010 dit onderzoek na 17:10 tot 22:30 vervolgd met een serie waarnemingen met alléén het Δ -waterscherm met ca. 1500 ℓ /s. Figuur 2.2.2 toont dat dit scherm zeker beschermend werkt maar minder sterk dan in combinatie met het Δ -luchtbellenscherm hoewel door nivelleren bij deze vloedtoestand het zoutgehalte in de kolk zal zijn toegenomen.

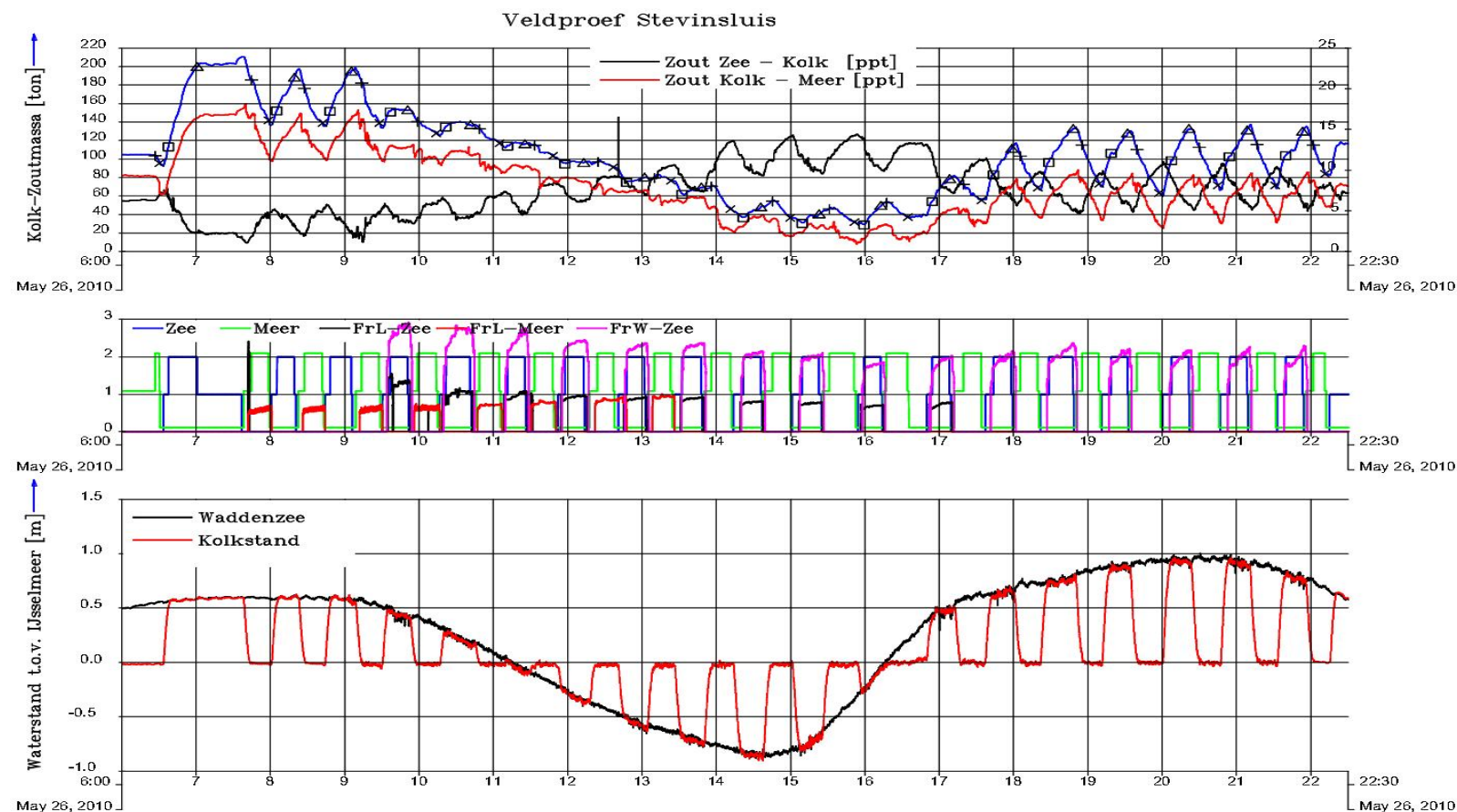
Gedurende deze waarnemingen verloopt het verschil in zoutgehalten tussen kolk en voorhavens. Alleen normeren met de maximale verandering in zoutmassa, zie onderdeel 3.5, en normeren van de verstreken deuropentijd van de kolk is met de looptijd van de zoutong door de kolk een correct onderling vergelijken van de invloed van zoutlekbeperkende middelen t.o.v. een onbeschermdde kolk mogelijk. Deze laatste bewerkingen zullen we in de volgende onderdelen presenteren.



Figuur 3.16 Verloop van gemeten zoutmassa in de kolk zonder zoutlekbeperkende middelen (bovenste figuur) en waterstandsverschillen tussen voorhavens zeezijde en meerzijde en tussen kolk en meerzijde (onderste figuur). In middelste figuur ringetschuiven open (niveau 1), sluisdeuren open (niveau 2).



Figuur 3.17 Herhaling van Figuur 2.2.1a maar nu in de bovenste grafiek uitgebreid met het verschil tussen diepte-gemiddeld zoutgehalte in de zeezijde-voorhaven en volume-gemiddeld zoutgehalte van de kolk (zwarte lijn, referentie naar rechter schaalwaarden in ppt) en het verschil tussen volume-gemiddeld zoutgehalte in de kolk en het diepte-gemiddelde zoutgehalte in de meerzijde-voorhaven (rode lijn bovenste grafiek).



Figuur 3.18 De invloed op de verandering van zoutmassa in de kolk t.o.v. onbeschermde kolk om 06:37 uur en daarna wisselende toepassing van zoutlekbepurende middelen. In centrale grafiek: Δ -luchtbellenscherm zwarte lijn aan zeezijde en rode lijn aan meerzijde, Δ -waterscherm aan zeezijde paarse lijn, de gehele dag met extra drempel van 1,18m hoogte in de kolk aan meerzijde

3.9 Invloed scheepvaart op verandering zoutmassa van onbeschermde kolk

Van Rijkswaterstaat IJsselmeergebied ontvingen we van de beroepsvaart door de Stevinsluis de afmetingen, vaarrichting en de tijdstippen van aanmelding en het verlaten van de sluis. Het tijdstip van aanmelding bleek niet altijd gelijk aan het tijdstip dat een schip de sluis binnenkomt maar kan veel eerder genoteerd zijn bij vroegtijdige aanmelding bij de sluismeester. We denken dat in de volgende voorbeelden het tijdstip van aanmelding wél samenvalt met het moment van invaren en ondersteund door schommelingen in het kolkpeil. In onze bestanden zochten we combinaties van grote schepen op dagen waarin de kolk niet beschermd is door zoutlekbeperkende middelen en de theoretische schatting als referentie kan worden gebruikt. Op 31 maart passeerden grote schepen met kenmerkende lengte van 80-85m, breedte van 9-10,6m en diepgang tot 2,9m. Uit zijn vaarrichting volgt of een schip eerst aan zeezijde de sluis (van Noord naar Zuid) binnenkomt of eerst aan meerzijde (van Zuid naar Noord). Op 31 maart zijn geen zoutlekbeperkende middelen ingezet.

We beschouwden dergelijke schuttingen met opvallend grote schepen op deze en andere dagen. Aan de hand van voorbeelden in Figuur 3.19 concluderen we dat alleen uitvarende schepen een merkbare verstoring van de zoutmassa in de kolk geven. Echter, deze verstoringen resulteren niet opvallend in een blijvende correctie op de verandering van de zoutmassa wanneer de kolk wordt afgesloten.

De verticale as in Figuur 3.19 is het product van het zoutgehalte en het volume van een lege kolk (zonder schepen) van ca. 10.000 m³ water bij kolkpeil gelijk aan dat van het IJsselmeer. Zodoende komt 100 ton zout overeen met een zoutgehalte van het kolkwater van ca. 10 kg/m³ of ca. 10 ppt. Met 10 ppt komt 2000 m³ dynamische waterverplaatsing (zie hoofdstuk 2) overeen met 20 ton aan verplaatste zoutmassa.

De onderste grafiek in Figuur 3.19 verraadt de passage van een schip door de sterke schommelingen in de door ons momentaan gemeten waterstanden in de kolk en/of juist buiten de kolk.

Wanneer een schip de kolk verlaat moet dit schip eerst op gang komen waarvoor de schroefstraal ruwweg één tot tweemaal de statische waterverplaatsing van het schip verplaatst; dit is de tweede bijdrage tot de dynamische waterverplaatsing (zie hoofdstuk 2). Hierbij onttrekt de schroef water onder en rondom het schip en verplaatst de schroef dit water áchter het schip; de diepte van onttrekking is onbekend omdat de schroefstraal zo krachtig is dat ook zout water uit de onderlaag kan worden aangezogen.

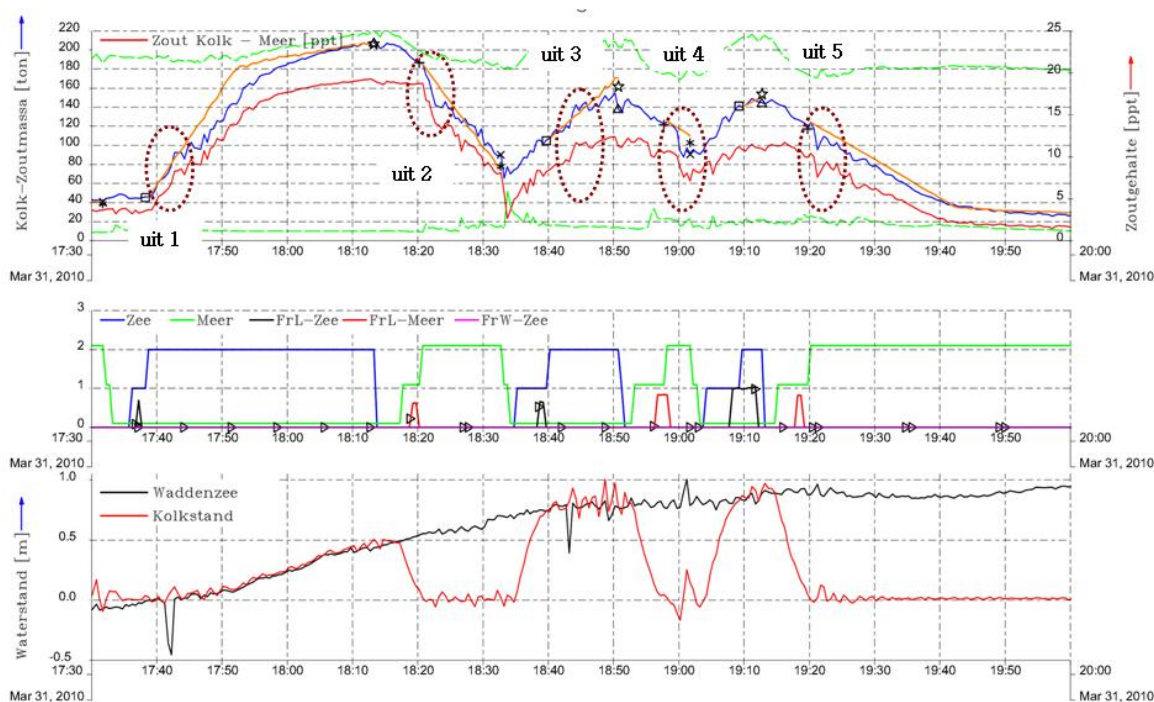
Bij een versnellend schip transporteert de schroef meer water dan de verdringing door het onderwater scheepsvolume omdat het schip vertraagd reageert op de schroefkracht. Voor een vertragend schip geldt het omgekeerde: bij het begin van stoppen verplaatst de afremmende schroef minder water dan het varende schip verdringt.

Wanneer een schip de kolk invaart zal het schip in de kolk afremmen waarbij de schroefstraal water áchter het schip onttrekt en vóór het schip stuwt. Merk hierbij op dat, ongeacht of schepen in de kolk op gang komen (bij uitvaren) of stoppen (bij invaren), de schroefstralen water naar het gesloten kolkeinde stuwten. Het complexe samenspel en stromingsproces van schroefstralen, gelaagdheid en het verdringen van water door varende schepen gebeurt terwijl bij schutten naar zee de zouttong de kolk in loopt of bij schutten naar meer de zouttong de kolk verlaat. Hierbij hoort ook het moment van openen van de sluisdeuren, de positie van de zouttong, de dikte van de zouttong in verhouding tot de scheepsdiepte en in verhouding

tot de positie/tijdstip waarop een schip invaart en stopt of begint met versnellen voor uitvaren.

Zonder numerieke simulaties en/of laboratoriumexperimenten kunnen we geen uitspraak doen over het netto effect van de schroefwerking én van de verdringing van een schip in de kolk op de zoutmassa in de kolk.

Figuur 3.19 maar ook analyses van schuttingen op andere dagen tonen dat schepen die de kolk naar de zoete zijde uitvaren een opvallend snelle en sterke daling van de zoutmassa in de kolk veroorzaken, zie daartoe schepen 2, 4 en 5 in Figuur 3.19. Deze sterke afname in zoutmassa lijkt echter tijdelijk te zijn omdat de uiteindelijke verandering van de zoutmassa in de kolk niet opvallend afwijkt van de theoretische schatter zónder scheepsbewegingen.



Figuur 3.19 Invloed scheepvaart op de totale verandering in zoutmassa in de kolk. De oranje lijnen onder een hellingshoek is het theoretisch geschatte verloop van de zoutmassa.

- Schip 1 Z→N : 1920 m³ en 2,8m diep;
- Schip 2 N→Z : 1000 m³ en 1,5m diep ;
- Schip 3 Z→N : 1300 m³ en 2,8m diep ;
- Schip 4 N→Z : 2360 m³ en 2,9m diep ;
- Schip 5 N→Z : 1000 m³ en 1,3m diep .

We herhalen dat de zoutmassa in de kolk zonder waterverplaatsing van de schepen is berekend en controleren hiermee of de theoretische schatter voor de totale verandering van de zoutmassa vanaf openen tot sluiten van de deuren voor scheepvaart moet worden gecorrigeerd. Volgens deze en andere registraties lijkt een dergelijke en thans onbekende correctie niet nodig. Wel bevelen we gedetailleerd onderzoek aan om de invloed van scheepvaart beter te kunnen kwantificeren voor een groter bereik in operationele omstandigheden. We merken hier op dat als regel de diepgang van de scheepvaart door Volkeraksluizen nauwelijks groter is dan door de Stevinsluis. De Volkeraksluizen zijn dieper dan de Stevinsluis. Hieruit concluderen we dat de invloed van de scheepvaart op de zout-zoet uitwisseling in de Volkeraksluizen geringer zal zijn dan in de Stevinsluis.

Voorgaande empirische bevindingen onderbouwen de veronderstelling in (Uittenbogaard, 2010) en in hoofdstuk 2 dat de zoutlek wordt overschat door de waterverplaatsing van scheepvaart in twee richtingen als uitgewisseld watervolume op te tellen voor de zout-zoet uitwisseling door open sluisdeuren.

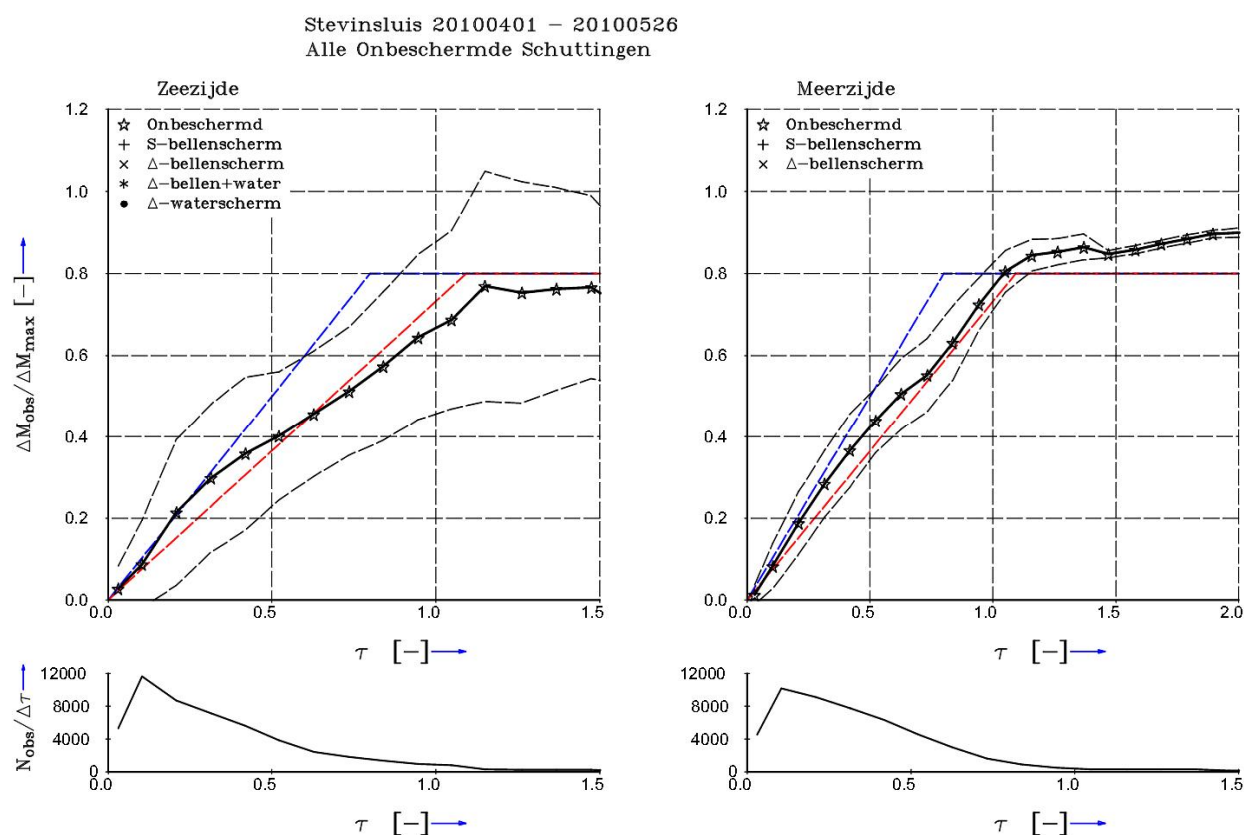
In het volgende onderdeel en in het volgende hoofdstuk bespreken we o.a. het waargenomen zouttransport door open sluisdeuren. Uiteraard zullen de storingen door scheepvaart, zoals getoond in Figuur 3.19, ons bij de analyse parten spelen.

3.10 Referentie verandering zoutmassa van onbeschermd kolk

In dit onderdeel presenteren we de referentie voor schuttingen naar zeezijde en naar meerzijde zonder enig zoutlekbeperkend middel en met scheepvaart. We noemen deze kortweg onbeschermd schuttingen en de voortplanting van de zouttong tijdens deze schuttingen noemen we kortweg ongehinderde of ongeremde zouttong.

Zoals besproken in onderdeel 3.5 en vergelijking (3.3.1) dient deze referentie om de doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen te schatten. Appendix C geeft details over de wijze waarop (3.3.1) uit metingen wordt afgeleid en in het bijzonder de dimensieloze tijdschaal τ en de veranderingen van de zoutmassa in de kolk zonder en met zoutlekbeperkende middelen.

Van de 23 meetdagen zijn van de betrouwbare en voldoende lange schuttingen de veranderingen van de zoutmassa in de kolk bepaald en geselecteerd op de afwezigheid van enig zoutlekbeperkend middel, zonder ook een extra drempel in de kolk en zonder lekkende ebdeuren. Per schutting naar zeezijde en naar meerzijde is de normering uit onderdeel 3.5 toegepast. Op het moment dat de kolk werd geopend bepalen we de looptijd van de ongeremde zouttong en ook de maximale verandering van de zoutmassa.

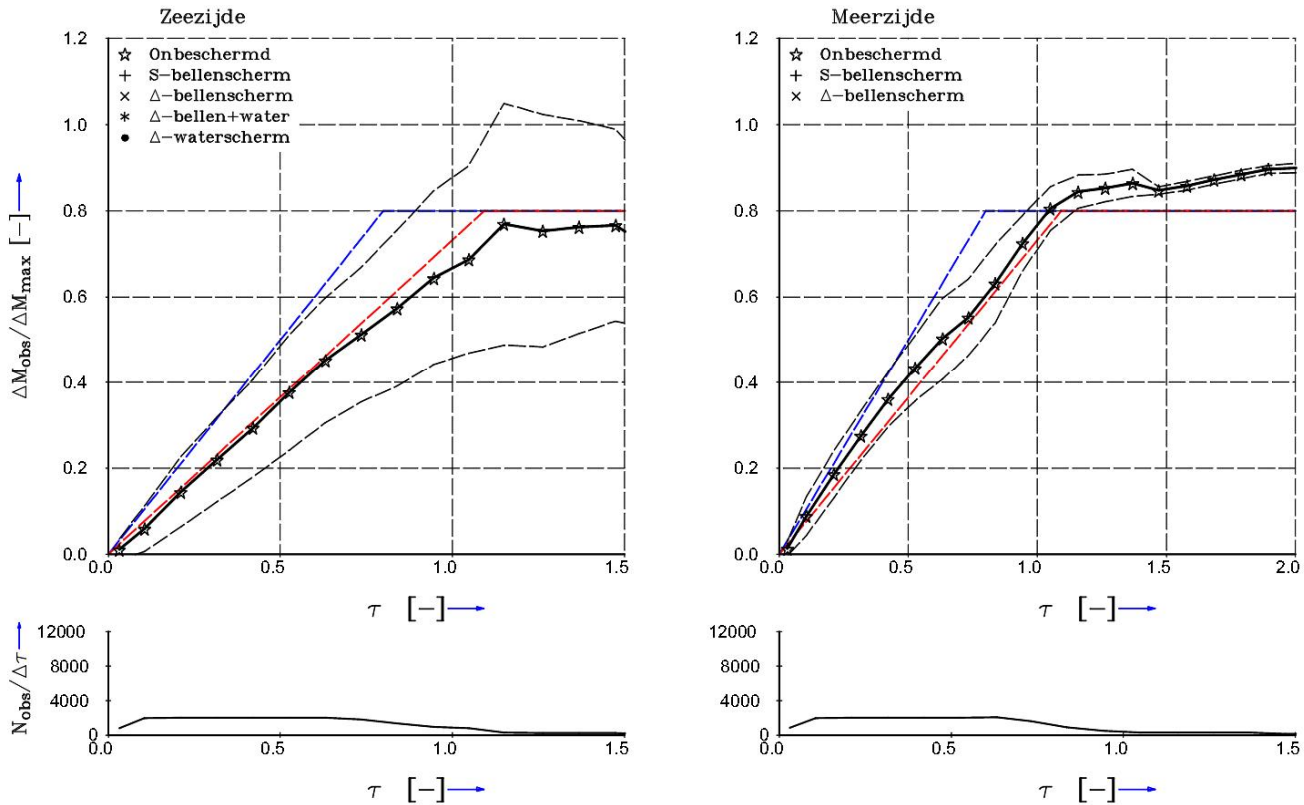


Figuur 3.20 Verloop van de waargenomen verandering van de zoutmassa in de kolk ΔM_{obs} , genormeerd met zijn maximale verandering ΔM_{max} , tegen het tijdsinterval na opening van de kolk genormeerd met de looptijd van de ongehinderde zouttong heen en terug door de kolk. De getrokken lijn toont het gemiddelde per tijdsinterval, de stippellijnen +/- de standaardafwijking. De onderste grafiek toont het aantal meetpunten per 0,1 interval van de dimensieloze tijd τ .

Figuur 3.20 toont dit dimensieloze verloop van de genormeerde zoutmassa tegen de dimensieloze tijdsinterval τ na opening van de kolk aan zeezijde en aan meerzijde. De getrokken lijn is het gemiddelde per 0,1 interval in τ en de stippellijnen de waarde +/- de standaardafwijking als indicatie voor de betrouwbaarheid van het gemiddelde verloop. De open-ster symbolen duiden op waarnemingen in de onbeschermd kolk, de overige symbolen in de legenda komen nog later ter sprake. Figuur 3.20 toont verder het aantal meetpunten per 0,1 interval van τ waarop de gemiddelde waarde en de standaardafwijking voor dit interval zijn bepaald. Het aantal meetpunten in deze intervallen van τ daalt voor grotere waarden van τ wat duidt op een afname in het aantal schuttingen gelijk of langer dan deze genormeerde deuropentijd.

Gedurende de eerste fase waarin de zouttong nog niet het gesloten kolkeinde heeft bereikt ($\tau < 0,5$) neigt het verloop van de genormeerde zoutmassa in Figuur 3.20 naar een toename volgens een energie-behoudende voortplanting van de zouttong (blauwe lijn). Daarna neigt het gemiddelde verloop naar de situatie van maximaal energieverlies (rode lijn). De (on)zekerheid in voorgaande analyse wordt getoond met Figuur 3.21 welke is gebaseerd op langere schuttingen waar de ongehinderde zouttong tenminste 70% van zijn looptijd heen en terug door de kolk heeft afgelegd.

Stevinsluis 20100401 – 20100526
 Alle Onbeschermd Schuttingen met $\tau_{\max} > 0.7$



Figuur 3.21 Als figuur 3.21 maar nu voor alle schuttingen met maximale deuropentijd groter dan 70% van de doorlooptijd van de zouttong heen en terug door de kolk; vergelijk het aantal meetpunten in onderste grafiek met die voor Figuur 3.21 .

Wanneer de ongeremde zouttong (kolk open naar zeezijde) of de zoetwatertong (kolk open naar meerzijde) heen en terug door de kolk is gereisd ($\tau = 1$) is de zoutmassa in de kolk met ruwweg 80% vervangen door water uit de zeezijde-voorhaven dan wel uit de meerzijde-voorhaven. Voor $\tau = 1$ blijkt deze uitwisseling van water aan zeezijde wat minder dan 80% en aan meerzijde wat meer dan 80% te zijn.

We vertrouwen meer op Figuur 3.21 dan Figuur 3.20 omdat bij kortere schuttingen onnauwkeurigheden in (kortere) tijdsintervallen en (geringere) verschillen in zoutgehalte sterker door spreken.

In het volgende hoofdstuk zullen we het gemiddelde verloop van de genormeerde zoutmassa volgens Figuur 3.21 voor alle voldoende lange deuropentijden van de kolk in termen van τ ($\tau > 0,7$) als referentie gebruiken voor het bepalen van de doorlaafractie van de onderzochte zoutlekbeperkende middelen.

4 Het meetprogramma en de resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk presenteren we de essentie van deze studie nl. de mate waarin zoutlekbeperkende middelen de zoutlek kunnen beperken door een normaal in bedrijf zijnde schutsluis.

Voor aansluiting met eerder onderzoek presenteren we in onderdeel 4.3 eerst de zg. doorlaatfractie als functie van een dimensieloze tijd zoals Abraham en V.d. Burgh (1962) uit geïdealiseerde proeven met schutsluizen maar zonder scheepvaart bij Kornwerderzand (Lorentzsluis 5m diep) en IJmuiden (7,5 , 10 en 15m diep) bepaalden.

Voor de definitie van de doorlaatfractie verwijzen we naar onderdeel 3.5 en Figuur 3.9 en voor de invloed van de doorlaatfracties op de zoutlek door de schutsluis verwijzen naar de tekst in 3.5 en tevens naar Figuur 3.12.

We vervolgen dit hoofdstuk met een meer pragmatische methode die evenals de vorige methode past bij de theorie uit Appendix A, en toegelicht in onderdeel 3.5, over de invloed van de doorlaatfracties op het zouttransport door geopende sluisdeuren. In deze pragmatische methode stellen we vast de verhouding tussen de totale verandering in de zoutmassa van een beschermde kolk t.o.v. die in een onbeschermd kolk vanaf het moment van het openen van de sluisdeuren t/m het sluiten van de deuren aan dezelfde zijde en inclusief scheepvaart. Met deze laatste aanpak, hoewel vergelijkbaar met de voornoemde, vereffenen we alle effecten die tot de verandering van de zoutmassa in de geopende kolk hebben kunnen bijdragen zoals de oscillaties na nivelleren en sluiten van de rinketschuiven, de menging door de bewegende sluisdeuren en door de scheepvaart. Gelukkig blijken de resultaten van beide methoden wel goed onderling overeen te komen zodat we robuuste conclusies kunnen trekken over het effect van de door ons onderzochte zoutlekbeperkende middelen die we in het volgende onderdeel zullen benoemen.

4.2 De zoutlekbeperkende middelen en programma van waarnemingen

Onze praktijkproeven in de Stevinsluis richtten zich op de gehele kolk d.w.z. zonder gebruik te maken van sluisdeuren halverwege de kolk en alleen op maatregelen aan de zeezijde en/of meerzijde van de kolk d.w.z. zonder gebruik te maken van een luchtbellenscherm halverwege de kolk. Verder pasten we afzonderlijk toe de luchtbellenschermen van de Stevinsluis óf die door Deltares aangebracht.

Per zee- of meerzijde zijn de gebruikte schuttingen opgedeeld in klassen naar gelang instellingen en/of combinaties van de volgende zoutlekbeperkende middelen:

- Een onbeschermd kolk aan zeezijde en/of meerzijde ;
- Een 1,18m hoge, extra drempel aan de meerzijde van de kolk ;
- Luchtbellenschermen van de Stevinsluis met half en vol vermogen van de eigen compressor met nominaal 125 en 250 Nl/s luchtdebiet verdeeld over de locale sluishoofdbreedte van 14m;
- Luchtbellenschermen van Deltares aan zeezijde en/of meerzijde met vnl. 100, 200 en 400 Nl/s luchtdebiet verdeeld over de locale breedte van 14m;

- Waterschermb van Deltares met 900 en 1600 l/s waterdebiet verdeeld over de lokale kolkbreedte van 14m.
- Combinaties van geheel en gedeeltelijk geopende rinketschuiven (methode lekkende ebdeuren) en Δ -luchtbellenschermen met 100 - 200 N l/s.

In dit rapport noemen we de oorspronkelijke luchtbellenschermen van de Stevinsluis kortweg S-luchtbellenscherm en die van Deltares Δ -luchtbellenscherm en Δ -waterschermb voor het waterschermb van Deltares aan zeezijde. In legenda van figuren verkorten we deze namen tot S-bellenscherm, Δ -bellenscherm en Δ -waterschermb. Verder noemen we het volledige tijdsinterval waarover de kolk naar meer- of zeezijde is geopend door de sluisdeuren de deuropentijd. Voor het leesgemak herhalen we hierna de zoutlekbeperkende middelen die in onderdelen 2.7 en 3.2 al eerder zijn besproken.

Een S-luchtbellenscherm wordt gevormd door lucht uit één geperforeerde buis over de lokale sluishoofdbreedte van 14m in de drempel op de kolkvloer en deze buis ligt tussen de zg. vloed- en ebdeuren, één buis aan meerzijde en één buis aan zeezijde. De S-luchtbellenschermen worden gevoed met de compressoren van het Stevinsluiscomplex en deze compressoren kunnen op half of heel vermogen werken en ze leveren dan nominaal 125 en 250 Nl/s. In overleg met de leverancier zijn deze luchtdebieten gecontroleerd aan de hand van metingen van het verbruik van electriciteit en de eigenschappen van de compressoren. Enkele minuten vóór openen van de sluisdeuren wordt het S-luchtbellenscherm ingeschakeld. Soms wordt tijdens geopende sluisdeuren een S-luchtbellenscherm uitgeschakeld door de sluismeester of om onduidelijke redenen. Zodoende kan het luchtdebiet gemiddeld over de deuropentijd van de relevante sluisdeuren minder zijn dan de nominale waarden van 125 en 1250 Nl/s. Het gemiddelde luchtdebiet berekenen we uit de fractie van de deuropentijd dat een S-luchtbellenscherm was ingeschakeld, zonder directe meting van luchtdebieten naar de S-luchtbellenschermen.

De Δ -luchtbellenschermen zijn geplaatst op twee frames één aan zeezijde vóór en buiten de kolk en één in de kolk en ca. 10m voor de sluisdeuren bij meerzijde. Over de kolkbreedte heeft elk frame twee luchtkokers met rijen van aaneensluitende geperforeerde diffusers die per luchtkoker zijn versprongen om een dicht luchtbellenscherm te creëren. De diffusers zijn aanvankelijk horizontaal geplaatst d.w.z. ze blazen verticaal omhoog lucht in het water. Elke luchtkoker kan apart worden ingeschakeld; het luchtdebiet naar elke luchtkoker wordt gemeten. Elke diffuser wordt gevoed met één of meerdere luchtventielen die het luchtdebiet gelijkmatig over de kolkbreedte verdelen. De luchtkokers zijn aangesloten op een gehuurde compressor. Enkele minuten voor het openen van de sluisdeuren wordt de compressor van het Δ -luchtbellenscherm op toeren gebracht en pas nadat duidelijk een luchtbellenscherm aan het wateroppervlak zichtbaar is worden de relevante sluisdeuren geopend. Pas nadat de sluisdeuren zijn gesloten wordt de compressor weer gereduceerd tot stationair toerental. Over de deuropentijd berekenen we het gemiddelde van het gemeten luchtdebiet naar de Δ -luchtbellenschermen.

Aan zeezijde is ons frame voorzien van een waterschermb dat bestaat uit een 5 cm brede sleuf gevoed met twee waterpompen met totaal maximaal 1,6 m³/s aan waterdebiet. Over de gehele lokale kolkbreedte van 14m bestaat de sleuf van het waterschermb uit vier gelijke segmenten die elk gevoed worden met de helft van het debiet van elk van de twee waterpompen; deze vier waterdebieten zijn afzonderlijk gemeten en over de deuropentijd gemiddeld. Het waterschermb is aan zeezijde naast de luchtkokers geplaatst. De waterpompen zuigen water op van een diepte van ca. 2m in de voorhaven aan meerzijde.

Zodoende creëren deze pompen een zoeter en dus opdrijvend waterscherm aan de zeezijde en vóór de sluisdeuren.

De totale hoogte boven de kolkvloer van beide frames was gelijk aan de hoogte van de 30cm hoge drempel van de Stevinsluis. Bij horizontale opstelling lagen de diffusers van het Δ -luchtbellenschermen ca. 30 cm boven de kolkvloer en blazen verticaal omhoog, bij verticale opstelling blazen de diffusers horizontaal en lag het middelpunt van de diffusers ca. 20 cm boven de kolkvloer. De toevoerleidingen voor water en lucht waren in de bestaande schotbalksponningen verwerkt en vormden ook onder water geen beperking in het locale doorvaartprofiel van de kolk.

Tijdens lage buitenwaterstand is van 12 tot 14 april de methode van lekkende ebdeuren toegepast door gelijktijdig rinketschuiven aan één zijde volledig te openen en dan aan de andere zijde gedeeltelijk te openen, zie hoofdstuk 2 voor meer uitleg. Tijdens deze experimenten werden de Δ -luchtbellenschermen gebruikt.

Als laatste in het meetprogramma is op het frame bij de meerzijde-sluisdeuren een drempel gemonteerd die tot 1,18m boven de kolkvloer uitsteekt ; de kolkvloer ligt op -4,7m NAP en het IJsselmeer-waterpeil was als regel -0,2m NAP. De oorspronkelijke drempel van de Stevinsluis is 30 cm hoog en dient vooral als aanslag van de sluisdeuren. De verhoogde drempel lag aan de zee kant en ca. 30 cm naast de Δ -luchtbellenschermen. Tegelijkertijd zijn de luchtkokers gekanteld zodat de diffusers naar elkaar in horizontale richting lucht blazen teneinde volgens visuele laboratoriumproeven een nog dichter luchtscherm te creëren. Verder is sindsdien het luchtdebiet van de Δ -luchtbellenschermen aan meerzijde beperkt tot ca. 200 Nl/s door het gebruik van één luchtventiel per diffuser zodat ook met 50 en 100 Nl/s gemeten kon worden.

Tegelijkertijd is het frame aan zeezijde geïnspecteerd en gereinigd. Aan zeezijde kreeg één luchtkoker sindsdien één ventiel per diffuser en de tweede luchtkoker drie ventielen per diffuser. Op deze wijze konden we luchtdebieten van ca. 50 – 400 Nl/s toepassen.

De optie van 50 Nl/s is echter niet toegepast vanwege het op dat moment verkregen inzicht in de geringe werking van het S-luchtbellenscherm met 125 Nl/s.

Tabellen 4.1 en 4.2 geven het overzicht van het aantal geanalyseerde schuttingen opgedeeld in cases waarbij S-luchtbellenscherm staat voor het luchtbellenscherm van de Stevinsluis en Δ -luchtbellenscherm en Δ -waterscherm door Deltares ontworpen en tijdelijk in de Stevinsluis geïnstalleerd.

Zeezijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nℓ/s]	Water [ℓ/s]	Fr_t [-]	Schuttingen
1	Onbeschermdde kolk	0	0	0	157
2	S-luchtbellenscherm	103	0	0,77	97
3	S-luchtbellenscherm	246	0	1,44	76
4	Δ-luchtbellenscherm	144	0	0,64	1
5	Δ-luchtbellenscherm	207	0	1,22	28
6	Δ-luchtbellenscherm	431	0	1,67	15
7	Δ-luchtbellen- & waterscherm	94	1543	0,83	9
8	Δ-luchtbellen- & waterscherm	221	889	0,98	8
9	Δ-luchtbellen- & waterscherm	227	1479	1,14	7
10	Δ-luchtbellen- & waterscherm	411	1523	1,13	16
11	Δ-waterscherm	0	860	(1,92)	7
12	Δ-waterscherm	0	1505	(2,21)	10
13	Lekkende ebdeuren & Δ-luchtbellenscherm	123	0	0,58	7

Tabel 4.1 Overzicht van geanalyseerde schuttingen bij geopende sluisdeuren naar zeezijde met definitie en naamgeving van de onderzochte cases. S-luchtbellenscherm van de Stevinsluis, Δ-luchtbellenscherm en Δ-waterscherm van Deltares. Fr_t is het zg. Froude-lucht getal (Abraham & V.d. Burgh, 1962) gerelateerd aan het luchtbellenscherm of tussen haakjes aan het waterscherm en gemiddeld per case.

Meerzijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nℓ/s]	Water [ℓ/s]	Fr_t [-]	Schuttingen
1	Onbeschermdde kolk	0	0	0	144
2	Verhoogde drempel	0	0	0	64
3	S-luchtbellenscherm	103	0	0,67	78
4	S-luchtbellenscherm	245	0	1,02	36
5	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	99	0	0,61	17
6	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	248	0	1,08	51
7	Δ-luchtbellenscherm	241	0	1,10	28
8	Δ-luchtbellenscherm	439	0	1,23	23
9	Δ-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	103	0	0,73	8
10	Δ-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	201	0	0,82	6
11	Lekkende ebdeuren & Δ-luchtbellenscherm	187	0	1,06	11

Tabel 4.2 Overzicht van geanalyseerde schuttingen bij geopende sluisdeuren naar meerzijde met definitie en naamgeving van de onderzochte cases. S-luchtbellenscherm van de Stevinsluis, Δ-luchtbellenscherm en Δ-waterscherm van Deltares. Fr_t is het zg. Froude-lucht getal (Abraham & V.d. Burgh, 1962) gerelateerd aan het luchtbellenscherm en gemiddeld per case.

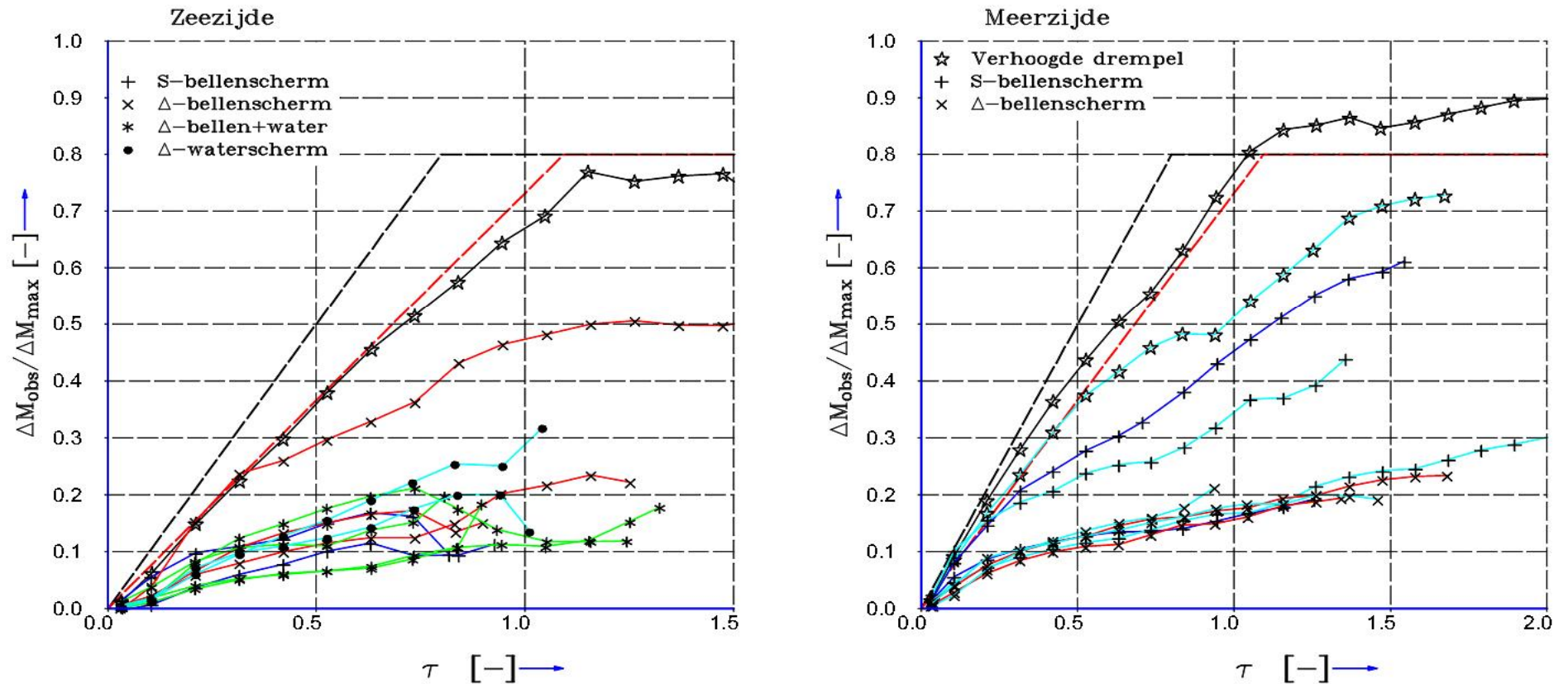
4.3 De doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen

In onderdeel 3.5 en met (3.3.1) is de definitie van de doorlaatfractie van een zoutlekbeperkend middel gegeven. Als referentie voor deze doorlaatfractie dient de genormeerde verandering van de zoutmassa in de kolk zonder zoutlekbeperkende middelen. Verder selecteren we alleen schuttingen met voldoende lange deuropentijden groter dan $\tau > 0,7$ teneinde onnauwkeurigheden in tijdsinterval en verschillen in zoutgehalte te verkleinen. Deze referentie is in onderdeel 3.10 van het vorige hoofdstuk gepresenteerd, in Figuur 3.21 getoond en theoretisch in Appendix A en uit metingen in Appendix C afgeleid.

Door de hoge tijdsresolutie van onze waarnemingen kunnen we het genormeerde tijdsverloop als geheel presenteren i.p.v. op bepaalde tijdstippen en bijna op elk gewenst genormeerd tijdstip de doorlaatfractie berekenen. Echter het genormeerde tijdsinterval blijft beperkt door vnl. de gehanteerde deuropentijd van de sluisdeuren en de heersende verschillen in dichtheid over de sluisdeuren die de looptijd van de zouttong door de kolk bepalen. Veelal bereiken we maximale waarden in τ groter dan ca. één waarbij de ongeremde zouttong loopt vanaf de geopende sluisdeur tot het gesloten einde van de kolk en weer terug naar de geopende sluisdeur.

Per klasse van wel/niet zoutlekbeperkende middelen en hun instellingen is het tijdsverloop van de genormeerde verandering van de gemeten zoutmassa in de kolk berekend als functie van de dimensieloze verstreken tijd en gemiddeld over alle schuttingen in dezelfde klasse van maatregelen. Voor deze middeling kozen we genormeerde tijdsintervallen van 0,1 in τ . Onderstaand Figuur 4.1 toont het overzicht. Dit figuur is gebaseerd op schuttingen tijdens het normale schutbedrijf van de Stevinsluis met scheepvaart. Tabellen 4.1 en 4.2 tonen het aantal schuttingen dat per klasse van maatregelen ten grondslag ligt aan de lijnen in Figuur 4.1.

Stevinsluis 20100401 – 20100526
Met open-tijden $\tau_{\max} > 0,7$



Figuur 4.1 Verloop van relatieve verandering van de zoutmassa in de kolk (verticale as) tegen de dimensieloze tijd (horizontale as), gemiddeld per klasse van zoutlekbepurende middelen en voor deuropentijden langer dan $\tau > 0,7$. De zwarte en rode stippellijnen zijn de grenzen maximale en minimale toename en begrensd tot de maximale verandering in zoutmassa van de kolk. De zwarte lijnen met open sterretjes gelden voor een onbeschermde kolk. De overige lijnen en cases worden in de tekst toegelicht.

Figuur 4.1 toont dat een extra, verhoogde drempel de zoutindringing vertraagt (lichtblauwe lijn met open ster). Deze extra drempel is ca. 10m voor de sluisdeuren aan meerzijde in de kolk geplaatst. De hoge drempel blijkt ook de initiële uitstroming (tot onder de lijn voor maximaal energieverlies; rode stippellijn in Figuur 4.1) te beperken.

In Figuur 4.1 tonen de donkerblauwe lijnen het genormeerde verloop van de zoutmassa in de kolk onder bescherming van de S-luchtbellenschermen met nominaal 125 en 250 Nl/s waarvan we later het onderscheid zullen bespreken.

Verder verbinden in Figuur 4.1 de rode lijnen de verandering in genormeerde zoutmassa in de kolk onder bescherming van de Δ -luchtbellenschermen met ca. 200 en 450 Nl/s. De hoogst liggende rode lijn is één experiment met het Δ -luchtbellenscherm met ca. 140 Nl/s.

Aan zeezijde in Figuur 4.1 geven de lichtblauwe lijnen het verloop van de zoutmassa in de kolk onder bescherming van Δ -waterschermen met ca. 900 en 1600 l/s.

Aan zeezijde in Figuur 4.1 tonen de groene lijnen met x tekens de verandering van zoutmassa onder bescherming van de combinatie van Δ -luchtbellenschermen met ca. 100, 200 en 400 Nl/s en Δ -waterschermen met ca. 900 en 1600 l/s.

Aan meerzijde in Figuur 4.1 tonen de lichtblauwe lijnen met + tekens de verandering in zoutmassa onder bescherming van de combinatie van extra drempel met de S-luchtbellenschermen op half en heel compressorvermogen. De lichtblauwe lijnen met x tekens tonen de verandering in zoutmassa onder bescherming van de combinatie van extra drempel met de Δ -luchtbellenschermen met 100 en 200 Nl/s.

Uit de informatie waarop Figuur 4.1 is gebaseerd berekenen we de doorlaatfractie η volgens (3.3.1) van zoutlekbeperkende middelen t.o.v. het verloop van de verandering in zoutmassa van de onbeschermd geopende kolk resp. naar zee- of meerzijde (zwarte lijnen met open ster in Figuur 4.1). We selecteerden alleen schuttingen met voldoende lange deuropentijden van $\tau > 0,7$. De referentie in Figuur 4.1 is het verloop van de zoutmassa volgens de zwarte lijnen met open ster en deze referentie is gebaseerd op resp. 157 en 144 schuttingen naar zee- en meerzijde.

Figuur 4.2 toont de doorlaatfracties van varianten met vnl. de S-luchtbellenschermen die we als volgt toelichten.

4.3.1 Extra, hogere drempel

De extra, 1,18m hoge drempel geeft een bescheiden beperking van de afname van de zoutmassa tijdens geopende kolk naar meerzijde: nl. 70 - 80% van de oorspronkelijke zoutmassa stroomt nog over de hogere drempel naar de voorhaven aan meerzijde.

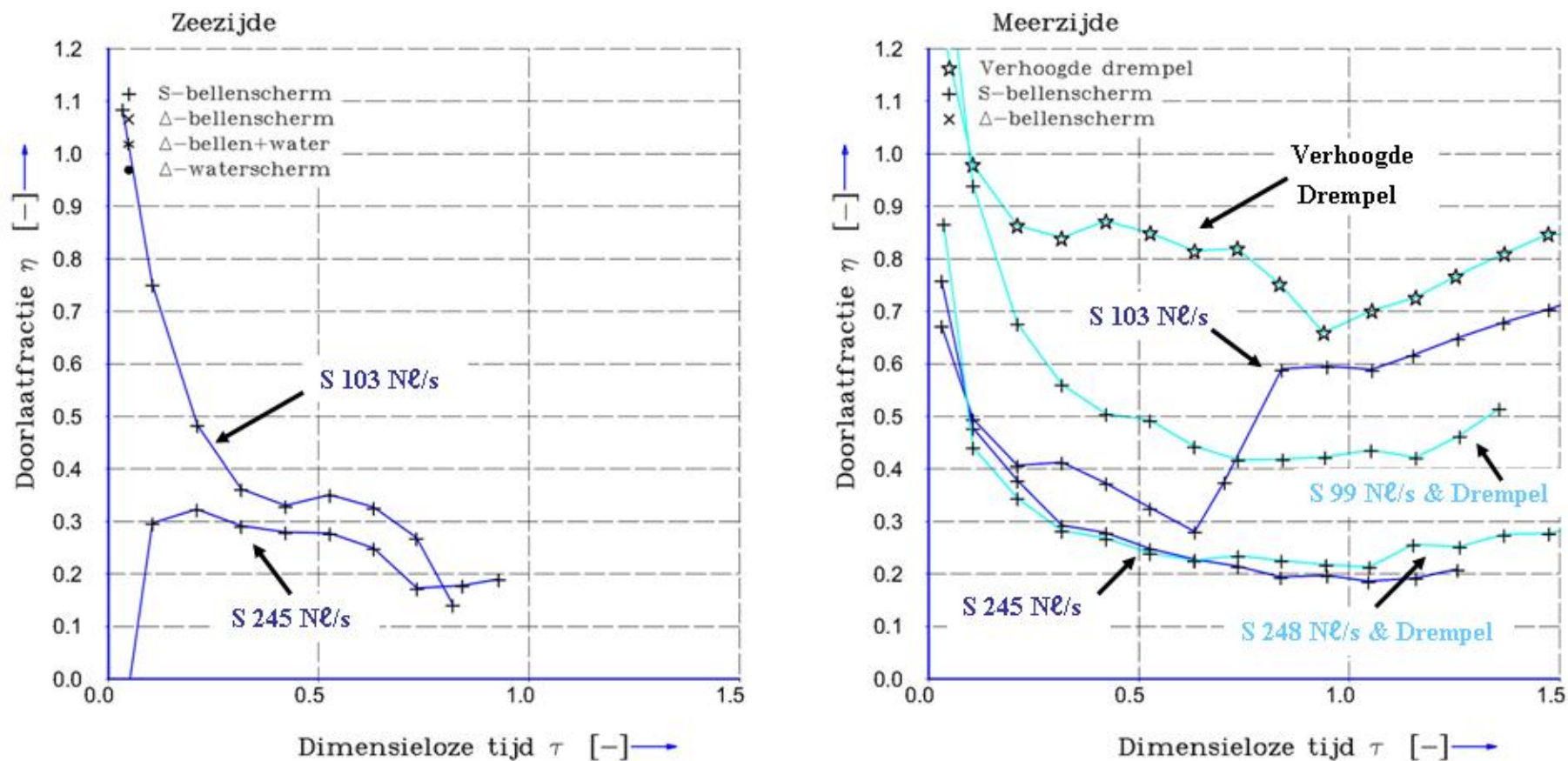
4.3.2 S-luchtbellenschermen met wel / niet extra, hogere drempel

Aan zeezijde (Figuur 4.2) begint de doorlaatfractie van het S-luchtbellenscherm bij vol compressorvermogen zeer laag maar juist hoog bij half compressorvermogen. Overigens, door het delen, zie (3.3.1) van kleine waarden van veranderingen in zoutmassa en elk met zijn onnauwkeurigheid zijn de doorlaatfracties voor kleine waarden van de tijdschaal τ minder nauwkeurig dan voor grotere waarden van τ .

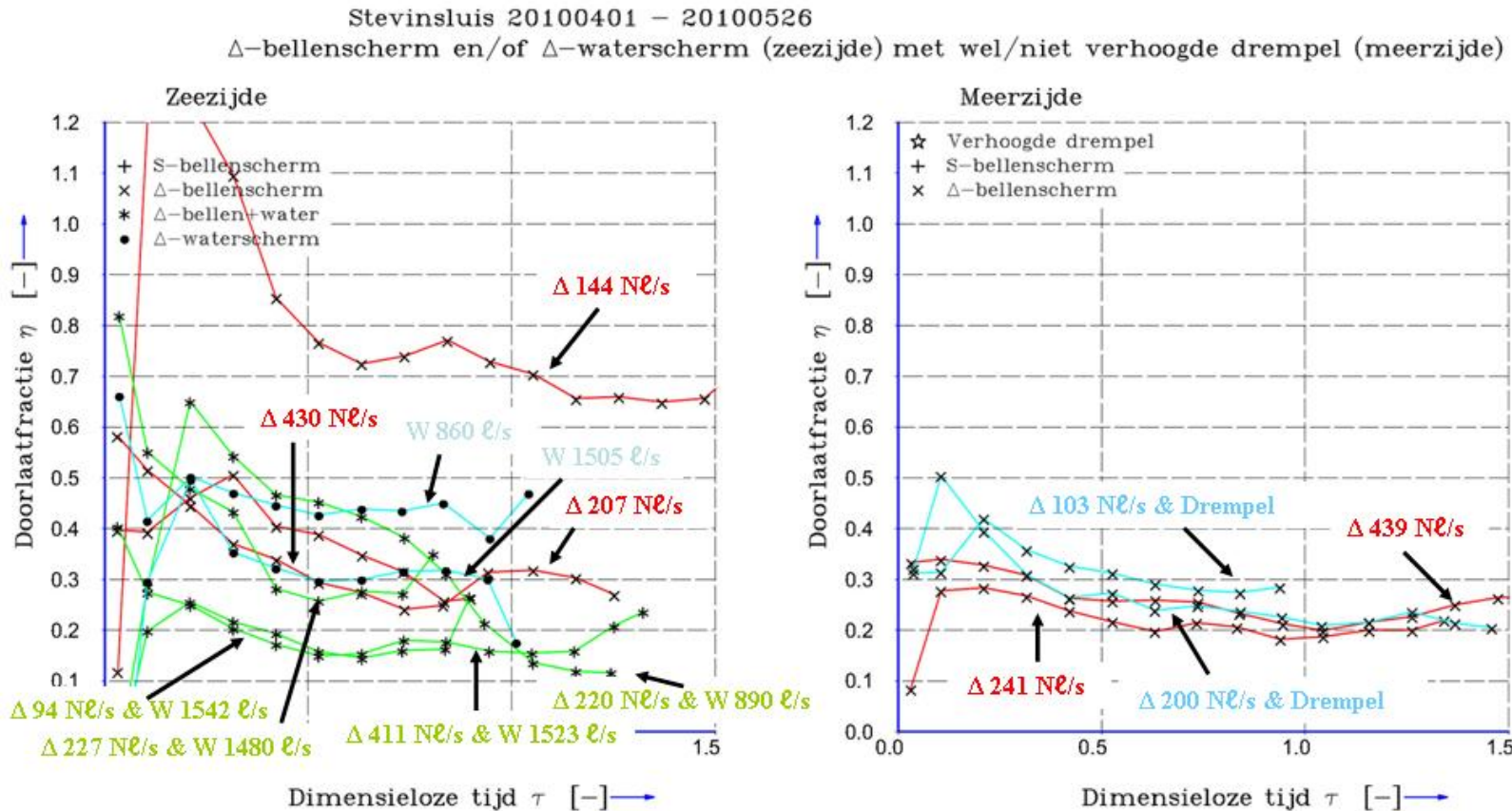
Aan meerzijde (Figuur 4.2) geeft het S-luchtbellenscherm op vol compressorvermogen (nominaal luchtdebiet 250 Nl/s) een duidelijk geringere doorlaatfractie dan bij half compressorvermogen (nominaal luchtdebiet 125 Nl/s). De combinatie van het S-luchtbellenscherm aan meerzijde met de hogere drempel geeft wél een geringere doorlaatfractie voor half vermogen (nominaal luchtdebiet 125 Nl/s) maar niet opvallend voor vol compressorvermogen (nominaal luchtdebiet 250 Nl/s).

We vermoeden dat het S-luchtbellenscherm bij half compressorvermogen juist na het openen van de sluisdeuren bezwijkt onder de zoutdruk en dan met de zouttong meebuigt. Hierbij past de latere daling van de doorlaatfracties van de S-luchtbellenschermen aan zeezijde voor $\tau > 0.7$ wanneer de aandrijvende kracht van de zouttong na het bereiken van het gesloten kolkeinde afneemt. Mogelijk is het S-luchtbellenscherm op vol compressorvermogen voldoende krachtig om nauwelijks water bij de teen van dit scherm door te laten en/of met de zouttong mee te buigen en zal de beschermende werking van de hogere drempel hier weinig aan verbeteren.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 S-bellenschermb en verhoogde drempel (meerzijde)



Figuur 4.2 Verloop van de doorlaatfractie η (3.3.1) van een zoutlekbeperkend middel tegen de dimensieloze tijd voor de S-luchtbellenschermb en met eventueel extra, 1,18m hoge drempel aan meerzijde voor deuropentijden met $\tau > 0,7$. Symbool S voor de luchtbellenschermb van de Stevinsluis en Δ van Deltares.



Figuur 4.3 Verloop van de doorlaatfractie η (3.3.1) van een zoutlekbeperkend middel tegen de dimensieloze tijd voor de Δ -luchtbellenschermen, Δ -waterschermen en combinaties, allen met deuropentijden met $\tau > 0,7$. Aan zeezijde wordt het laagste doorlaatfractie bereikt bij een ca. 1500 ℓ/s waterdebiet in combinatie met ca. 100 $\text{N}\ell/\text{s}$ luchtdebiet of ca. 400 $\text{N}\ell/\text{s}$. Symbol S voor de luchtbellenschermen van de Stevinsluis en Δ van Deltares en W voor waterscherm.

- 4.3.3 Δ -waterschermen en/of Δ -luchtbellenschermen en wel / niet extra, hogere drempel
Figuur 4.3 toont de genormeerde veranderingen van de zoutmassa in de kolk wanneer deze naar zee- of meerzijde is geopend onder bescherming van Δ -luchtbellenschermen (rode lijnen), Δ -waterschermen (lichtblauwe lijnen) of hun combinatie (groene lijnen).

Een opvallend verschil is dat de doorlaatfracties van de Δ -luchtbellenschermen en Δ -waterschermen redelijk constant blijven over het waargenomen tijdsinterval en m.u.v. enkele varianten aan zeezijde niet opvallend dalen in de initiële periode zoals de S-luchtbellenschermen, vergelijk Figuur 4.3 met Figuur 4.2.

De doorlaatfractie van één waarneming aan zeezijde met het Δ -luchtbellenscherm met ca. 140 Nl/s via één luchtkoker is groter dan van vergelijkbare luchtdebieten via het S-luchtbellenscherm. De grotere doorlaatfractie met één luchtkoker suggereert een zwakkere bescherming bij de teen van het enkele Δ -luchtbellenscherm door de openingen tussen de diffusers op één luchtkoker die nu niet door versprongen diffusers op de tweede luchtkoker worden afgedekt.

De doorlaatfractie voor het Δ -luchtbellenscherm met ca. 400 Nl/s aan zeezijde is ruwweg gelijk met doorlaatfractie bij ca. 200 Nl/s luchtdebiet wat mogelijk duidt op het bereiken van een optimaal luchtdebiet waarboven het luchtbellenscherm meer als menger dan als zoutremmer zal gaan werken.

De doorlaatfractie voor het Δ -waterscherm met ca. 900 l/s waterdebiet aan zeezijde volgt redelijk die van het naastliggende Δ -luchtbellenscherm met ca. 400 Nl/s luchtdebiet. Evenzo volgt de doorlaatfractie voor het Δ -waterscherm met ca. 1600 l/s waterdebiet aan zeezijde redelijk die van het nabije Δ -luchtbellenscherm met ca. 200 Nl/s luchtdebiet. Deze waarnemingen wijzen op de mogelijkheid dezelfde doorlaatfracties te behalen met water- of met luchtbellenschermen.

Ten slotte tonen de groene lijnen in Figuur 4.3 dat de combinatie van waterschermen én luchtbellenschermen de laagste doorlaatfractie, veelal tussen 15 % en 20 %, van alle door ons onderzochte variaties en combinaties zonder lekkende ebdeuren leveren.

- 4.3.4 Lekkende ebdeuren

Door een combinatie van aan één zijde volledig en aan de andere zijde ten dele geopende rinketschuiven in de gesloten sluisdeuren ontstaat bij een lagere buitenwaterstand een zg. ebdebiet van zoet water dat continue door de kolk naar zee stroomt en brak water uit de kolk naar de zeezijde-voorhaven stuwt; deze methode is eerder in de Volkeraksluizen toegepast en wordt "lekkende ebdeuren" genoemd. Onderdeel 2.7 licht deze methode verder toe.

Bij de methode van lekkende ebdeuren worden tijdens het schutten naar zeezijde de rinketschuiven aan zeezijde volledig geopend; de rinketschuiven aan meerzijde worden dan op een kierstand gezet. Het omgekeerde geldt voor schutten naar meerzijde. Ook tijdens nivelleren blijven aan het andere kolkeinde de rinketschuiven gedeeltelijk open. Het is essentieel dat het peilverschil over de te openen sluisdeuren voldoende beperkt blijft. De sluisdeuren moeten zonder schade aan de aandrijving geopend kunnen worden.

Zodoende is het in principe mogelijk tijdens laag water altijd een zoetwaterdebiet door de kolk te laten stromen mits de troskrachten voldoende beperkt blijven en aan- en afmeren in de kolk veilig kan verlopen. Tijdens de metingen in de Stevinsluis bleek het zoetwaterdebiet geen hinder te veroorzaken.

Wij hebben de positie van de rinketschuiven in de Stevinsluis gemeten en bij éézijdige opening van de schuiven leidden we uit de verandering van de waterstand in de kolk het debiet af als functie van de gekozen kierstand (fractie schuifopening t.o.v. volledige opening), voor details zie Appendix D.

De effectiviteit van de methode van lekkende ebdeuren blijkt opnieuw uit onze waarnemingen. Het zoetwater- of ebdebiet verlaagt het zoutgehalte in de kolk aanmerkelijk. Hierdoor wordt tijdens geopende sluisdeuren aan meerzijde weinig zout met de meerzijde-voorhaven uitgewisseld. In onderdeel 3.5 bespraken we dat de uitwisseling van zout evenredig is met het verschil in zoutgehalte tot de macht 1,5. Deze reductie in zout-zoet uitwisseling is zichtbaar in registraties zoals Figuur 4.4 welke we nog zullen toelichten. Het ebdebiet voert zout uit de kolk terug naar de zeezijde en verlaagt tevens het zoutgehalte in de zeezijde-voorhaven. De invloed van al deze effecten op de zoutlek kan alleen rekenkundig worden vastgesteld, zie Appendix D en de simulatie in Figuur 4.4b, welke we hierna toelichten.

In één paar sluisdeuren bevinden zich twee rinketschuiven. Bij 1m verschil in waterstand over de sluisdeuren en volledig (100%) geopende rinketschuiven stroom 12 m³/s water. Betrokken op de totale dwarsdoorsnede van de kolk geeft dit debiet ca. 18 cm/s watersnelheid dat lineair met de afstand tot de geopende rinketschuiven naar nul afneemt naar het gesloten kolkeinde.

Uit onze waarnemingen blijkt dat het debiet door de rinketschuiven evenredig is met hun doorstroomd oppervlak zodat b.v. 20% opening 2,4 m³/s debiet geeft bij 1m verschil in waterstand.

Dit debiet is ook aanwezig tijdens nivelleren en er is dus sprake van een restverschil in waterstand waartegen de sluisdeuren (de ebdeuren) nog geopend moeten worden. Wanneer het zoutgehalte in de kolk b.v. 10 ppt bedraagt wordt er 24 kg zout/s uit de kolk naar zee terug gevoerd of 14,4 ton zout in 10 minuten tijd (24 kg zout/s). Wat echter telt is de zoutmassa die bij elke schutting naar meerzijde wordt gevoerd. Aan meerzijde wordt de uitgewisselde zoutmassa kleiner door het verlaagde zoutgehalte van de kolk. Figuur 4.4b toont met een rekenkundig voorbeeld de afname van de zoutmassa in de kolk door lekkende ebdeuren met 20% geopende rinketschuiven.

Bij de Stevinsluis kan alleen tijdens lage buitenwaterstand de methode van lekkende ebdeuren worden ingezet maar bij de Volkeraksluizen met hogere waterstand in het Hollandsche Diep t.o.v. het Volkerak-Zoommeer is deze methode altijd toepasbaar.

Figuur 4.4 toont onze proeven in de Stevinsluis met ca. 20-25 % geopende rinketschuiven tegenover 100% geopende rinketschuiven aan de andere zijde. Deze kierstanden zijn af te lezen in de onderste grafiek van Figuur 4.4 waar de kierstand aan zeezijde in blauw en in groen aan meerzijde is genoteerd. In de periode van 12:00 tot 16:40 uur zijn waarnemingen met lekkende ebdeuren verricht. De zoutmassa (blauwe lijn in bovenste figuurdeel) toont nauwelijks zichtbare dalingen bij schutten naar meerzijde wat duidt op geringe zoutlek. Tijdens deze proeven nam het zoutgehalte in de kolk af (rode lijn in bovenste deel van Figuur

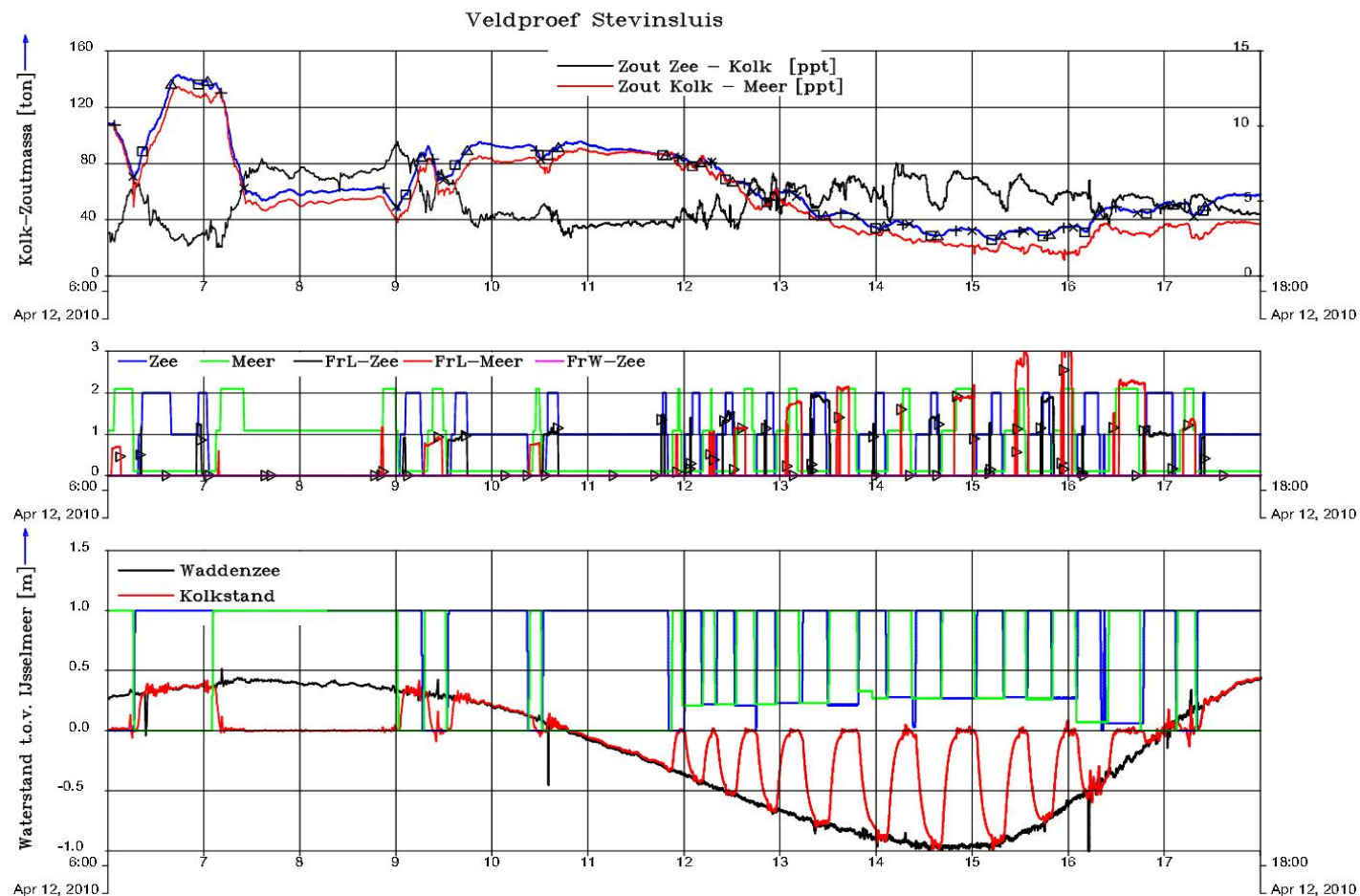
4.4). Deze waarnemingen kunnen we voldoende correct in een rekenkundig model weergeven, zie Figuur 4.4b, zodat we met vertrouwen deze kennis in het zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010) kunnen toepassen. Zonder gebruikmaken van een rekenmodel is de zoutlekbepurende werking van lekkende ebdeuren niet direct uit onze metingen af te leiden omdat het zoutgehalte in de kolk een nieuw en lager evenwicht bereikt. Enerzijds verlaagt het zoetwaterdebiet het zoutgehalte in de kolk door zouttransport naar zee. Anderzijds neemt het zouttransport door geopende sluisdeuren naar de kolk toe omdat het verschil in zoutgehalte tussen zeezijde-voorhaven en kolk toeneemt volgens de zwarte lijn in de bovenste grafiek van Figuur 4.4a.

De methode van lekkende ebdeuren wordt vnl. bepaald door een toelaatbaar verlies van zoet water, langere wachttijden door trager nivelleren en de mogelijkheid de sluisdeuren te openen ondanks een peilverschil tussen kolk en voorhaven. Over dat laatste aspect nog onze volgende bevindingen.

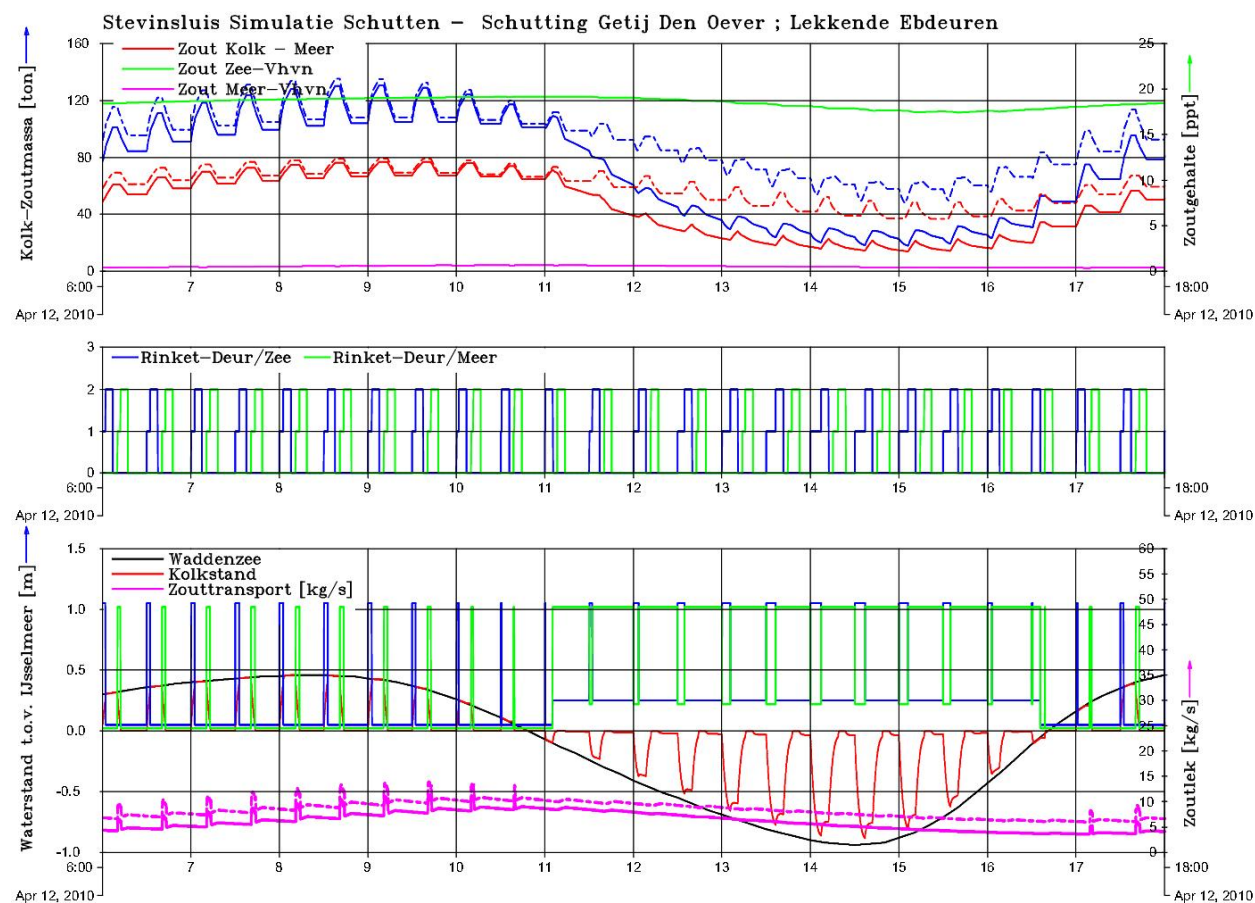
Voor openingen van 30% aan één kolkeinde tegenover 100% rinketopening aan de andere kolkeinde of meer bleek de kolk niet meer op peil te brengen d.w.z. de waterstand van de kolk bleef te veel afwijken van die aan zee- of meerzijde om de sluisdeuren veilig te mogen openen.

Appendix D geeft het volgende voorbeeld. Wanneer de kierstand van de rinketschuiven naar zeezijde tot 100% wordt vergroot zoals bij schutten naar zeezijde maar gelijktijdig de kierstand aan meerzijde 30% bedraagt dan bedraagt het peilverschil tussen kolk en zeezijde-voorhaven nog ca. 8 % van het peilverschil tussen beide voorhavens. Het aldus resterende peilverschil tussen kolk en zeezijde-voorhaven kan te groot zijn om de sluisdeuren te kunnen openen. Overigens in de praktijk van de Stevinsluis blijken de sluisdeuren al geopend te kunnen worden bij peilverschillen tussen kolk en voorhaven kleiner dan 10 cm.

Voor de Volkeraksluizen moet deze grenswaarde in peilverschil over sluisdeuren nog nader worden vastgesteld in relatie tot het benodigde koppel voor het draaien van de sluisdeuren en optredende krachten in de bedieningswerken en de krachten door translatiegolven op de schepen in de kolk. Tevens wordt verlangd dat de som van het ebdebiet en de schutverliezen door de Volkeraksluizen begrensd blijft tot maximaal 25 m³/s, zie ook (Uittenbogaard, 2010). Al deze overwegingen zullen nog nader worden gewogen in de studie naar de vertaling van de bevindingen in dit rapport naar de Volkeraksluizen.



Figuur 4.4a Van 12:00 tot 16:45 is de methode van lekkende ebdeuren toegepast waarbij rinketschuiven aan één zijde volledig geopend zijn en aan de andere zijde 20-30% geopend. Merk op het afnemend verschil tussen zoutgehalten van kolk en meerzijde-voorhaven (rode lijn in bovenste figuur) en het ontbreken van een afname van zoutmassa in de kolk bij schutten naar meerzijde wat duidt op een geringe zoutlek.



Figuur 4.4b. Simulatie van de invloed van lekkende ebdeuren in combinatie met luchtbellenschermen met doorlaafracties van 0,4 op de zoutmassa in de kolk (getrokken lijnen) en zonder lekkende ebdeuren (gestippelde lijnen). De paarse lijn in de onderste grafiek geeft de zoutlek.

4.4 Het zouttransport tijdens geopende kolk

4.4.1 Inleiding

In onderdeel 4.3 werd de wijze van analyse van het zouttransport door geopende sluisdeuren gevolgd zoals in (Abraham & V.d. Burgh, 1962). In dit onderdeel bespreken we de totale veranderingen in zoutmassa in de kolk vanaf het moment van het openen van de sluisdeuren tot en met de sluiting van de deuren, ongeacht de tussenliggende deuropentijd.

In de hierna besproken figuren wordt de waargenomen toe/afname van de zoutmassa in de kolk genoteerd als ΔM_{obs} langs de verticale as. Langs de horizontale as wordt een theoretische schatting van de toe/afname van de zoutmassa van de onbeschermd kolk gegeven; met onbeschermd bedoelen we een kolk zonder luchtbellens-, waterscherm en zonder extra, hogere drempel. Deze theoretische schatter ΔM_{th} is gebaseerd op de analytische oplossing van het bekende zg. *lock-exchange* probleem.

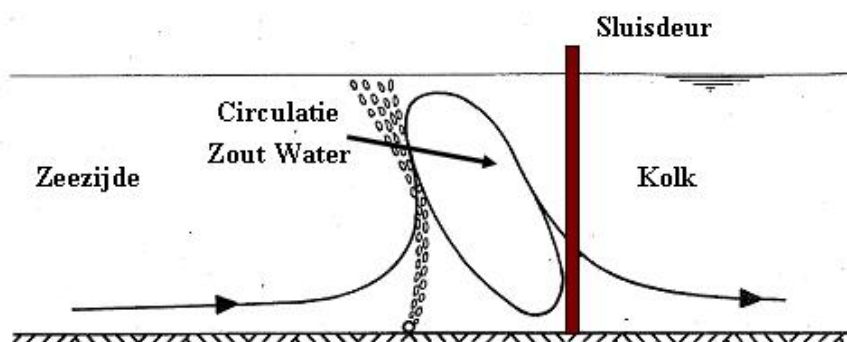
De oplossing van het *lock-exchange* probleem is in Appendix A herhaald in vergelijking (A.5). In Appendix C leggen we in detail uit op welke wijze uit onze waarnemingen de totale verandering van de zoutmassa in de kolk vanaf openen tot sluiten van de sluisdeuren wordt berekend.

Tevens definiëren we in Appendix C de zg. theoretische schatter voor de verandering in zoutmassa zonder zoutlekbeperkende middelen. Deze theoretische schatter vormt de referentie voor de mate waarin zoutlekbeperkende middelen de verandering in zoutmassa beperkt.

De schatter is gebaseerd op de diepte-gemiddelde zoutgehalten in de voorhavens, het volume-gemiddelde zoutgehalte in de kolk en de waterstand boven de drempels van de Stevinsluis. De voortplanting van de zouttong of de zoetwatertong wordt energiebehoudend verondersteld. Op basis van analyses besproken in onderdeel 3.9 wordt er niet gecorrigeerd voor scheepvaart.

Deze schatter benadert en vervangt het referentie-tijdsverloop van een onbeschermd schutting zoals getoond in onderdeel 3.10. We toetsen deze schatter aan de hand van Figuur 4.6 welke we later in dit onderdeel nog bespreken. Eerst bespreken we dat we geen rekening zullen houden met de positie van de Δ -luchtbellens- en/of waterschermen naast de sluisdeuren.

Zoals geschetst in Figuur 3.2 zijn onze frames met Δ -luchtbellenschermen ca. 10m vóór de sluisdeuren aan zeezijde en ca. 10m richting zeezijde vóór de sluisdeuren aan de meerzijde geplaatst. Tussen frames en sluisdeuren ligt een volume van elk ca. 600 m³ dat ogenschijnlijk niet meer door de Δ -luchtbellenschermen geremd kan worden tijdens de uitwisseling met de kolk dan wel met de meerzijde-voorhaven. Anderzijds blijkt een luchtbellenscherm het zoute water in dit volume “gevangen” te houden in een circulatiepatroon zoals geschetst in Figuur 4.5 en onderbouwd met numerieke simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010). Wanneer waterschermen werken kan het volume tussen waterscherm en sluisdeur met een debiet van 900 l/s in 10 minuten door zoet water worden vervangen.



Figuur 4.5 Positie luchtbellenscherm aan zeezijde van de sluisdeuren aan zee- of meerzijde en pad van zout water, figuur overgenomen uit (Abraham & V.d. Burgh, 1962) en onderbouwd met numerieke simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010).

Vanwege de volgende argumenten zien wij geen reden en evenmin een procedure om de verandering van de zoutmassa in de kolk voor dit volume tussen luchtbellenscherm en sluisdeuren te corrigeren.

Eenzijds wordt door het recirculatiepatroon, zie Figuur 4.5, zout water aan de zoete zijde van een luchtbellenscherm gevangen gehouden. Wanneer een waterscherm wordt toegevoegd en tijdig wordt ingeschakeld kan deze het volume tussen waterscherm en sluisdeuren verzoeten. Beide argumenten pleiten voor de plaatsing van een luchtbellenscherm en/of waterscherm aan de zeezijde van een sluisdeur (buiten de kolk).

Anderzijds bij een hogere buitenwaterstand zwaaien de ca. 7m lange vloeddeuren naar zeezijde open én weer dicht. Zodoende zwaaien de vloeddeuren door het volume tussen luchtbellenscherm/waterscherm. Tijdens het openen van de vloeddeuren verplaatst een aanmerkelijk deel van het watervolume tussen luchtbellenscherm/waterscherm en sluisdeuren naar de kolk en later, tijdens sluiten, uit de kolk. Tijdens het openen van de ebdeuren (lage buitenwaterstand) verplaatst de circulatiebel ook eerst de kolk in en wordt later, bij sluiten, buiten gesloten.

Om voorgaande redenen zien we geen procedure om de verandering van de zoutmassa in de kolk voor het volume tussen luchtbellenscherm en sluisdeuren te corrigeren.

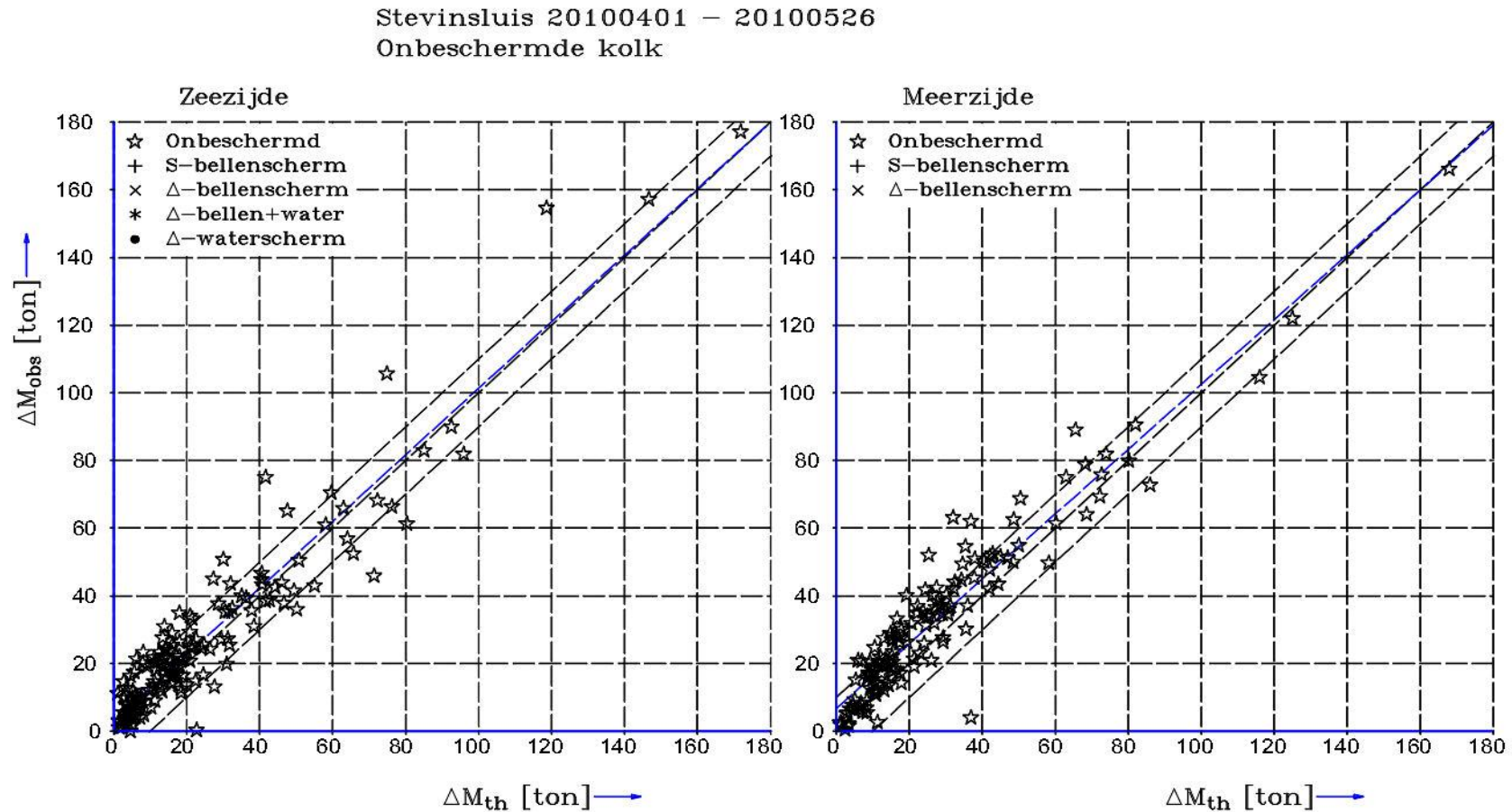
We komen nu terug op de kwaliteit van de theoretische schatter als referentie voor de mate waarin zoutlekbepurende middelen de verandering in zoutmassa beperkt. Figuur 4.6 toont dat met de gekozen instellingen voor dezelfde theoretische schatter (C.9) t/m (C.11) de waargenomen veranderingen in zoutmassa in de onbeschermden kolk voor alle onderzochte cases zeer goed zijn te berekenen. Gedurende deze waarnemingen was er wel scheepvaart door de kolk. De invloed van scheepvaart op de veranderingen in de zoutmassa in de kolk is verborgen omdat er nl. niet voor scheepvaart is gecorrigeerd. De zwarte stippellijnen in Figuur 4.6 zijn die van $\Delta M_{\text{obs}} = \Delta M_{\text{th}}$ en met variatie van +/- 10 ton zoutmassa zijnde de kenmerkende verandering in zoutmassa van de zwaar beladen tankers die de Stevinsluis passeerden. De blauwe stippellijn is de kleinste-kwadraten lineaire regressie tussen ΔM_{obs} en ΔM_{th} . In Figuur 4.6 zijn alle onbeschermden schuttingen opgenomen, ongeacht hun deuropentijd.

We gebruiken daarom deze instellingen en theoretische schatter als referentie voor de cases waarbij de kolk op enige wijze is beschermd met luchtbellenschermen en/of waterschermen en/of drempel. De mate waarin de theoretische schatter voor de onbeschermden kolk de waargenomen verandering in zoutmassa tijdens het schutten overschat vormt de essentie

van dit hoofdstuk nl. de mate van doorlaten van zout door een geopende sluisdeur. Deze doorlaatfractie vormt de tot nu toe onbekende invoerparameter in het zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010) welke zonder zoutlekbeperkende midellen uitgaat van de in Appendix C geformuleerde theoretische schatter.

Er is niet gecorrigeerd voor in- of uitvarende scheepvaart omdat deze een natuurlijk onderdeel van de schutcyclus betreft. Voor een verdere theoretische analyse is deze correctie voor scheepvaart wél nuttig maar anderzijds geven de ongecorrigeerde resultaten een reëel beeld van de eventuele invloed van scheepvaart op het zouttransport tijdens schutten.

Hierna bespreken we de resultaten in termen van veranderingen in zoutmassa in de kolk t.g.v. een schutting naar zee- of meerzijde.



Figuur 4.6 Toetsing theoretische schatter ΔM_{th} voor verandering van zoutmassa in de kolk na schutten naar zee- en meerzijde tegen waargenomen verandering ΔM_{obs} . De centrale zwarte stippellijn $\Delta M_{obs} = \Delta M_{th}$ en de parallelle zwarte stippellijnen voor +/- 10 ton variatie in zoutmassa b.v. door zwaar beladen tankers. De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie

4.4.2 Drempelhoogte 1,18m boven kolkvloer

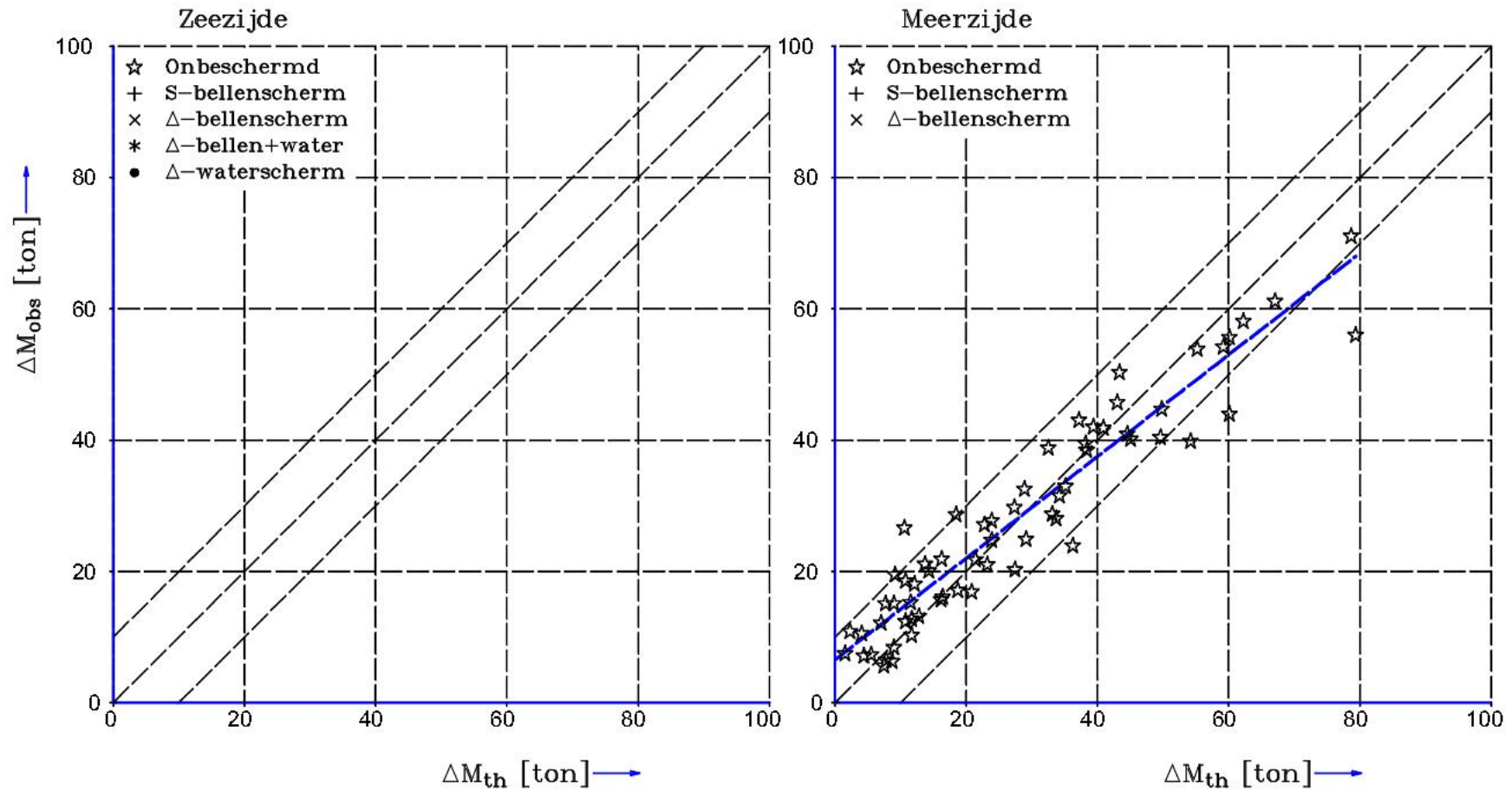
Het effect van een extra, 1,18m hoge drempel in een kolk met ca. 4,5m waterdiepte op het zouttransport door de sluisdeuren naar het IJsselmeer is beperkt. Deze hogere drempel reduceert het zouttransport met ca. 30% d.w.z. 70% van het oorspronkelijke zouttransport door geopende sluisdeuren wordt nog doorgelaten. Figuur 4.7 toont de resultaten van de waargenomen verandering in zoutmassa (verticaal) tegen de theoretische schatter (horizontaal). In Figuur 4.7 en vergelijkbare figuren is de blauwe lijn de kleinste-kwadrate lineaire regressie en getrokken over het waargenomen bereik in veranderingen in zoutmassa.

Appendix C toon de invloed van waterdiepte boven drempels op de theoretische schatter. Stel dat we de theoretische schatter voor de verandering van zoutmassa toepassen en daarvan een reductie met 30% verlangen. Vervolgens rekenen we de overeenkomstige waterdiepte boven de drempels terug. Dan blijkt de effectieve drempelhoogte ca. 80 % van de fysieke drempelhoogte te zijn. Dit is een begrijpelijke uitkomst omdat zwaarder water onder drempelniveau toch óver de drempel kan stromen o.a. door interne golven en menging.

De 1,18m hoge drempel aan meerzijde kan in principe een ca. 1m dikke en permanente zoutlaag in de kolk in stand houden. We bestudeerden daartoe een schutting naar meerzijde van 05:57-6:11 op 25 mei zonder invloed van luchtbellens- en/of waterschermen. Echter, een permanente zoutlaag in de kolk met de 1,18m hoge drempel blijkt niet uit de verticale en horizontale zoutverdeling. Wel zijn er momenten waarop de drempel de uittredende zouttong boven de kolkvloer tenminste lijkt te vertragen.

Een extra drempel is een eenmalige investering die verder geen onderhoud en energie vergt en eventueel beweegbaar kan worden gemaakt voor passage van dieperliggende schepen. Zoals later nog wordt besproken bevordert de hogere drempel wél de remmende werking van het S-luchtbellenscherm op het zouttransport. We vermoeden dat de eerder gevonden zwakke teen van de S-luchtbellenschermen door een drempel beter wordt beschermd en minder zout doorlaat.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Verhoogde drempel
Drempelhoogte 1.18m boven kolkvloer



Figuur 4.7 Verzameling van schuttingen naar meerzijde met extra, 1.18m hoge drempel zonder andere zoutlekbeperkende middelen. De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie

4.4.3 Luchtbellenschermen en zonder/met extra, hogere drempel aan meerzijde

Aan het wateroppervlak lijken de Δ -luchtbellenschermen visueel een consistenter luchtscherm te creëren dan de S-luchtbellenschermen. Tijdens demonstratie van delen van het prototype Δ -luchtbellenscherm in het laboratorium zagen we dat de teen van dit luchtbellenscherm goed bestand lijkt tegen zoutindringing. De constante waarde van de doorlaatfracties (zie onderdeel 4.3) van de Δ -luchtbellenschermen wijzen ook op een goede weerstand van de teen van deze schermen tegen zoutindringing. Deze weerstand blijkt ook uit de totale verandering in zoutmassa waarbij onder redelijk overeenkomende luchtdebieten de Δ -luchtbellenschermen minder zout doorlaten dan de S-luchtbellenschermen.

De S-luchtbellenschermen werken bij 125 en 250 Nl/s (resp. half en vol compressorvermogen) terwijl de Δ -luchtbellenschermen werkten met 200 en 400 Nl/s terwijl we slechts één proef met 100 Nl/s verrichten zodat er een redelijk overlap is in de luchtdebieten voor beide systemen.

Half compressorvermogen S-luchtbellenscherm en zonder/met extra, hogere drempel

De S-luchtbellenscherm met nominaal 103 Nl/s en geven een doorlaatfractie van 73 % aan zeezijde en 60% aan meerzijde. In Figuur 4.8 zijn de grootste veranderingen in zoutmassa gecontroleerd op hun correcte representativiteit.

De combinatie van deze instelling van de S-luchtbellenschermen op half vermogen en mét de extra, hogere drempel (Figuur 4.9) geeft een opvallende verbetering in hun zoutlekbeperkende werking: zonder extra drempel bedraagt de doorlaatfractie 62 % maar met extra, hogere drempel nu 41 %. De extra drempel lijkt de zwakke plek bij de teen van de S-luchtbellenschermen te beschermen tegen het doorlaten van zout hoewel de afstand tussen het S-luchtbellenscherm aan meerzijde en de extra drempel in de kolk ca. 10m bedraagt, zie Figuur 3.2 voor een overzicht.

100 Nl/s Δ -luchtbellenscherm met extra, hogere drempel

Er is alleen gemeten in combinatie met de extra, hogere drempel en met horizontaal lucht blazende luchtverdelers. In die situatie geeft het Δ -luchtbellenscherm bij 100 Nl/s een doorlaatfractie van 47%, zie Figuur 4.10. Gezien de onzekerheden komt dit resultaat wel goed overeen met het S-luchtbellenscherm van nominaal 103 Nl/s en met extra, hogere drempel, Figuur 4.9. Het onderscheid is wel dat het Δ -luchtbellenscherm direct achter de extra, verhoogde drempel is geplaatst terwijl het S-luchtbellenscherm 10m is verwijderd van deze drempel.

Vol compressorvermogen S-luchtbellenscherm en zonder/met extra, hogere drempel

Daarentegen geeft het S-luchtbellenscherm met nominaal 245 Nl/s een aanmerkelijk reductie en bedraagt de doorlaatfractie 48% aan zeezijde en 38% aan meerzijde, zie Figuur 4.11.

De combinatie van deze instelling van de S-luchtbellenschermen met de extra, hogere drempel (Figuur 4.12) geeft wel een verbetering in hun zoutlekbeperkende werking: zonder drempel is de doorlaatfractie 38 % maar met extra, hogere drempel 27 %. Echter, de eerste doorlaatfractie van 38 % wordt in Figuur 4.11 vooral door één weliswaar correcte waarneming bij grote veranderingen in zoutmassa bepaald. Let op de aangepaste schaalverdeling in dit figuur.

200 Nl/s Δ -luchtbellenscherm en zonder/met extra, hogere drempel

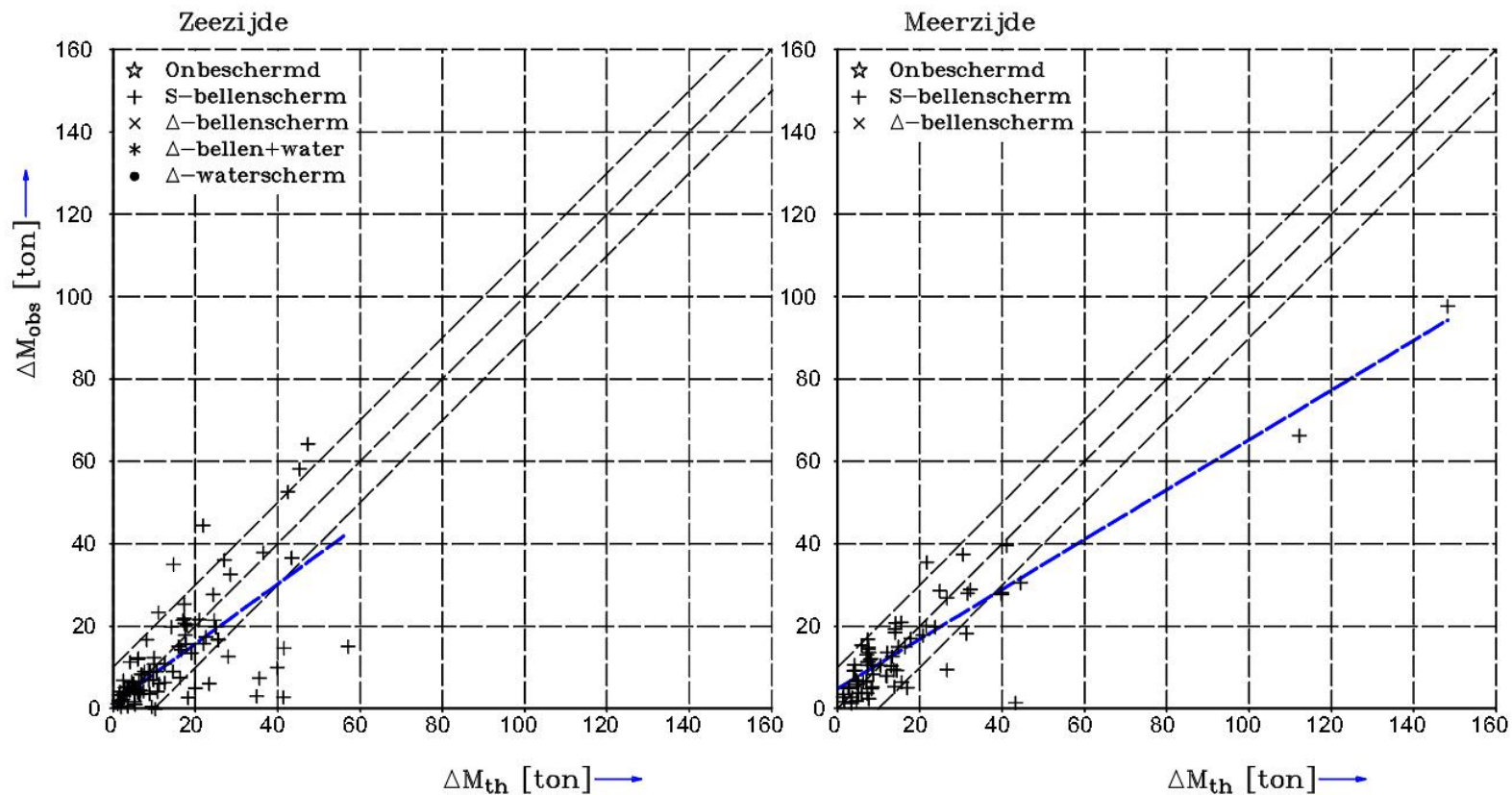
Aan zeezijde geeft het Δ -luchtbellenscherm gevoed met ca. 207 Nl/s een doorlaatfractie van ca. 25 % en aan meerzijde met ca. 241 Nl/s een doorlaatfractie van ca. 20 % (Figuur 4.13). Opvallend is dat de extra, hogere drempel geen significante verandering geeft, zie Figuur 4.14, wat duidt op een sterke scheiding van zout en zoet water bij de teen van het Δ -luchtbellenscherm waar een naburige drempel weinig aan kan verbeteren. Dit in tegenstelling tot de drempel in combinatie met het S-luchtbellenschermen op half compressorvermogen.

450 Nl/s Δ -luchtbellenscherm zonder extra, hogere drempel

Opvallend meer consistente metingen aan meerzijde tonen dat het Δ -luchtbellenscherm bij ca. 440 Nl/s een doorlaatfractie heeft van slechts 21 % terwijl met grotere variaties aan zeezijde de doorlaatfractie ca. 34 % bedraagt, zie Figuur 4.15. Merk op dat voor in het bereik van 60-80 ton van de theoretische schatter er geen opvallend verschil is tussen de waargenomen verandering in de zoutmassa aan zeezijde of meerzijde.

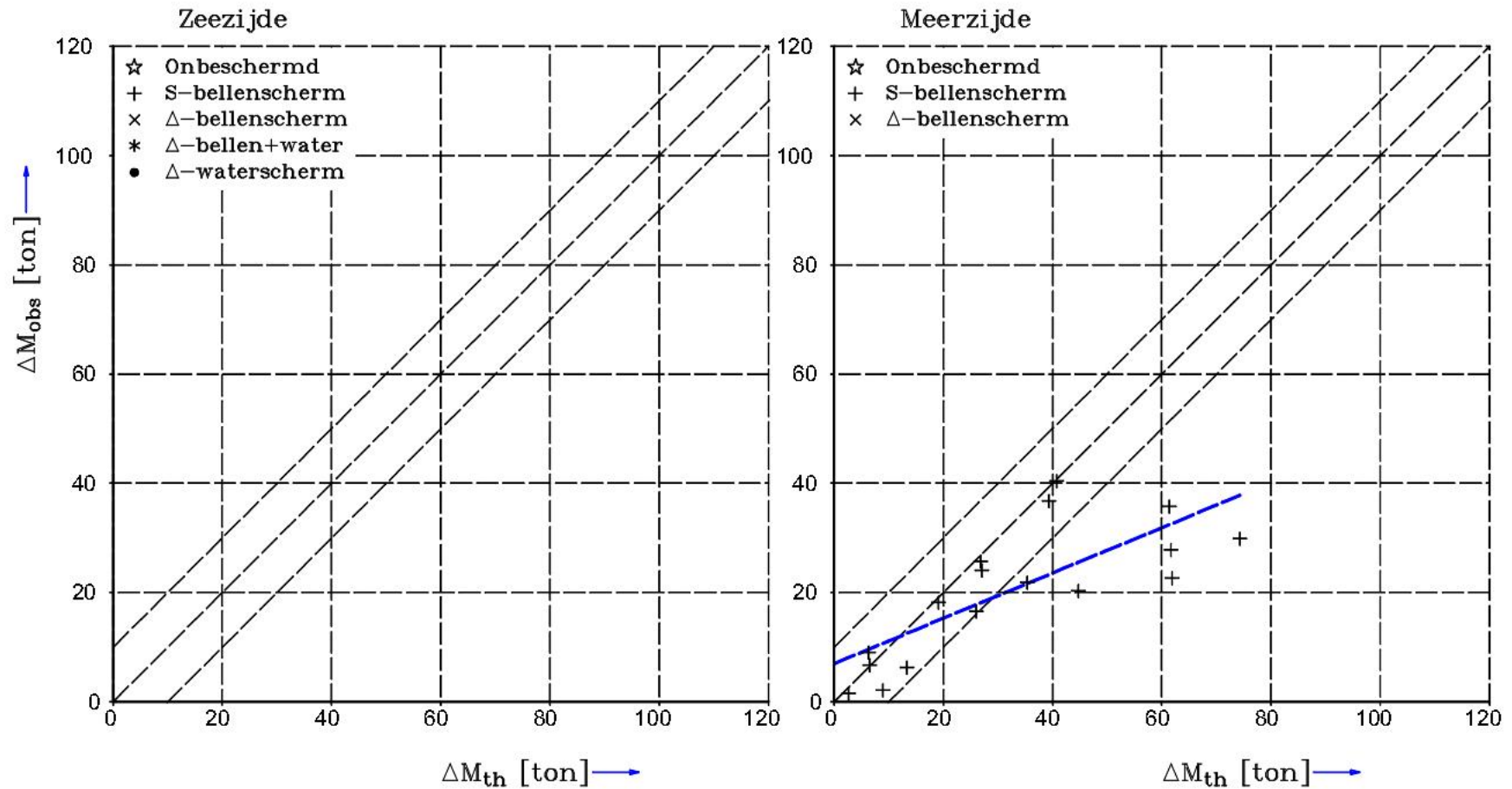
Bij de discussie in Hoofdstuk 5 bespreken we, gezien vanuit de theorie over luchtbellenschermen, dat bij geringe verschillen in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven het luchtbellenscherm met hetzelfde luchtdebiet meer als menger dan als horizontale scheider van zout-zoet gaat werken. In Figuur 4.15 kunnen we deze verklaring herkennen uit de verhouding tussen waargenomen verandering in zoutmassa en de theoretische schatter. Immers bij de hier redelijk constant gehouden deuropentijd duiden kleinere waarden van de theoretische schatter op kleinere verschillen in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven. Voor dergelijke kleine verschillen in zoutgehalte over de schermen lijkt 450 Nl/s luchtdebiet te groot.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 S-bellenschermd
Lucht 103 Nl/s



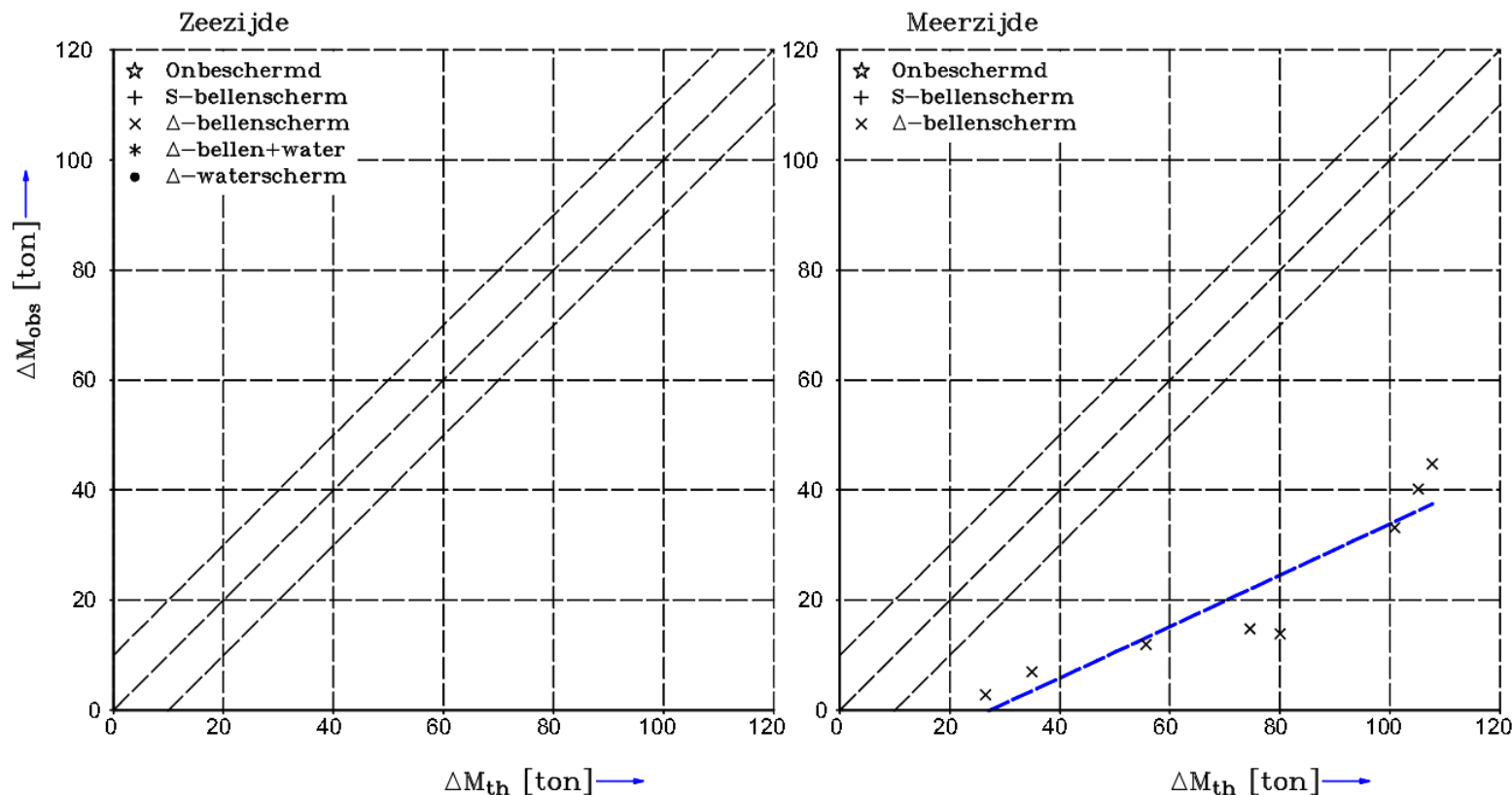
Figuur 4.8 Verzameling van schuttingen naar zee- en meerzijde met alleen het S-luchtbellenschermd op half compressorvermogen (zie Tabel 4.1 en 4.2). De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 S-bellenscherm
Lucht ca. 99 NI/s met verhoogde drempel



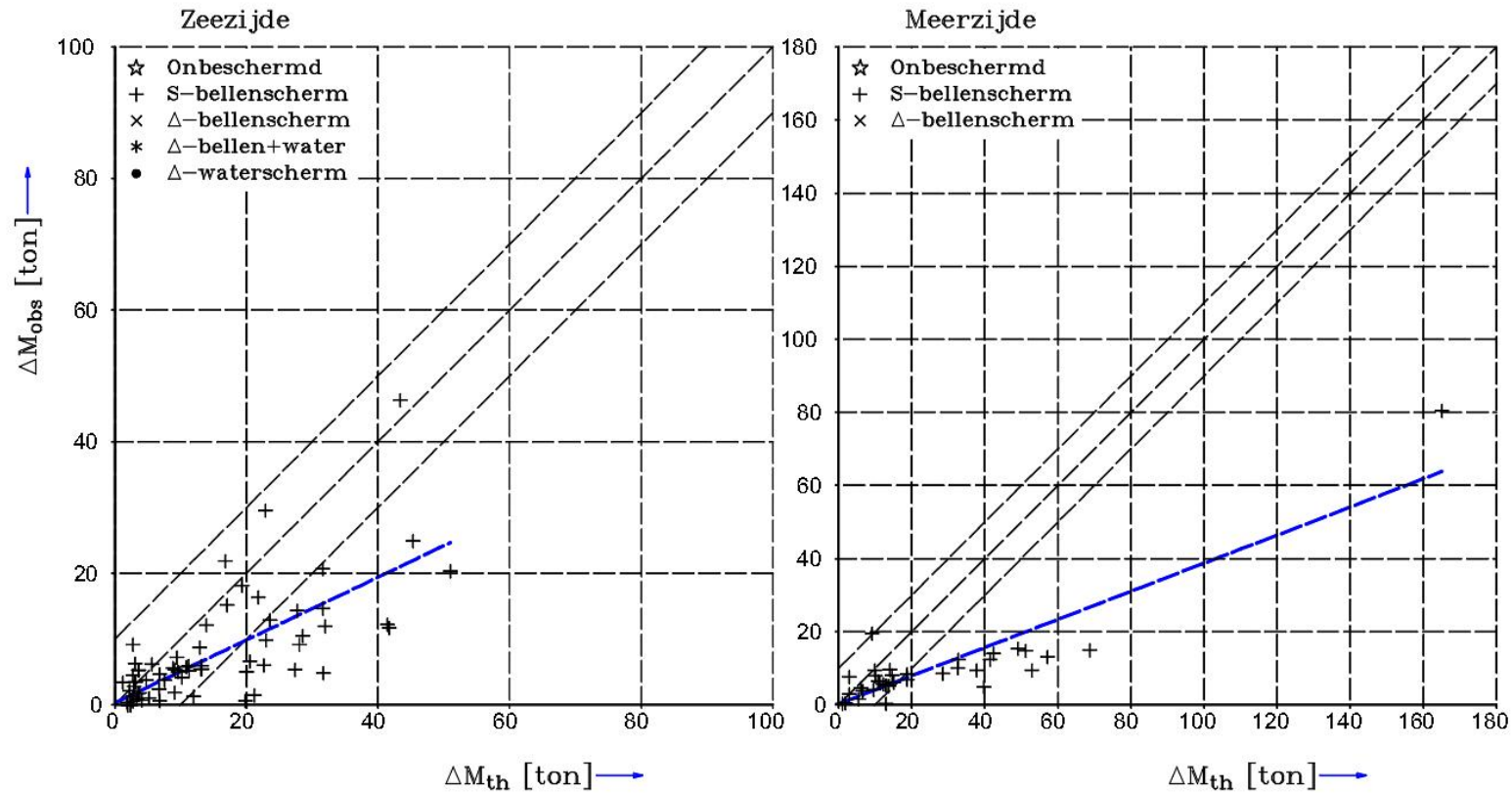
Figuur 4.9 Verzameling van schuttingen naar meerzijde met verhoogde drempel en het S-luchtbellenscherm op half compressorvermogen (zie Tabel 4.1 en 4.2). De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ-bellenschermd
Lucht ca. 103 Nl/s met verhoogde drempel



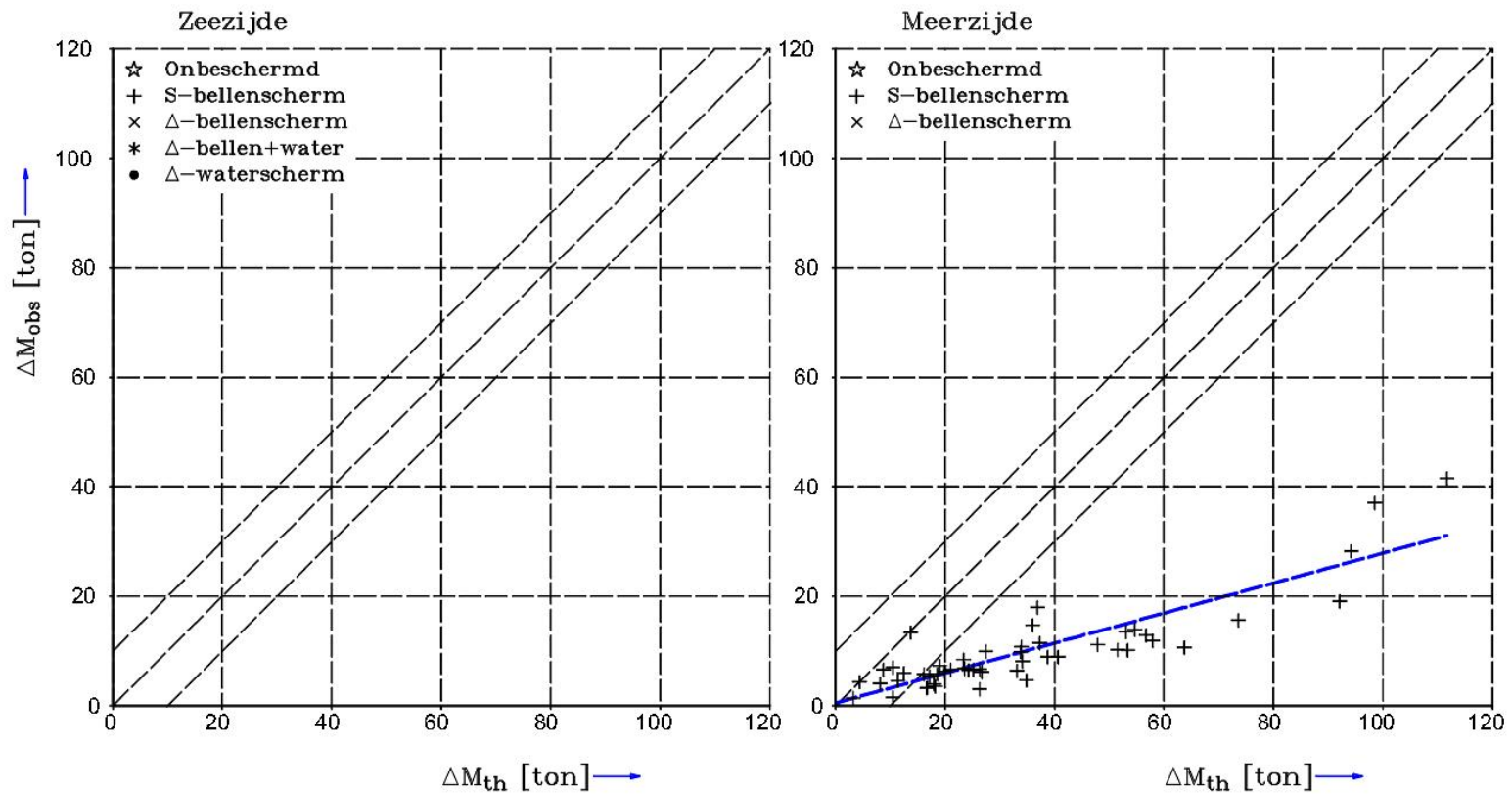
Figuur 4.10 Verzameling van schuttingen naar meerzijde met extra, hogere drempel en het Δ-luchtbellenschermd met 100 Nl/s (zie Tabel 4.1 en 4.2). De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 S-bellenscherm
Lucht 246 Nl/s



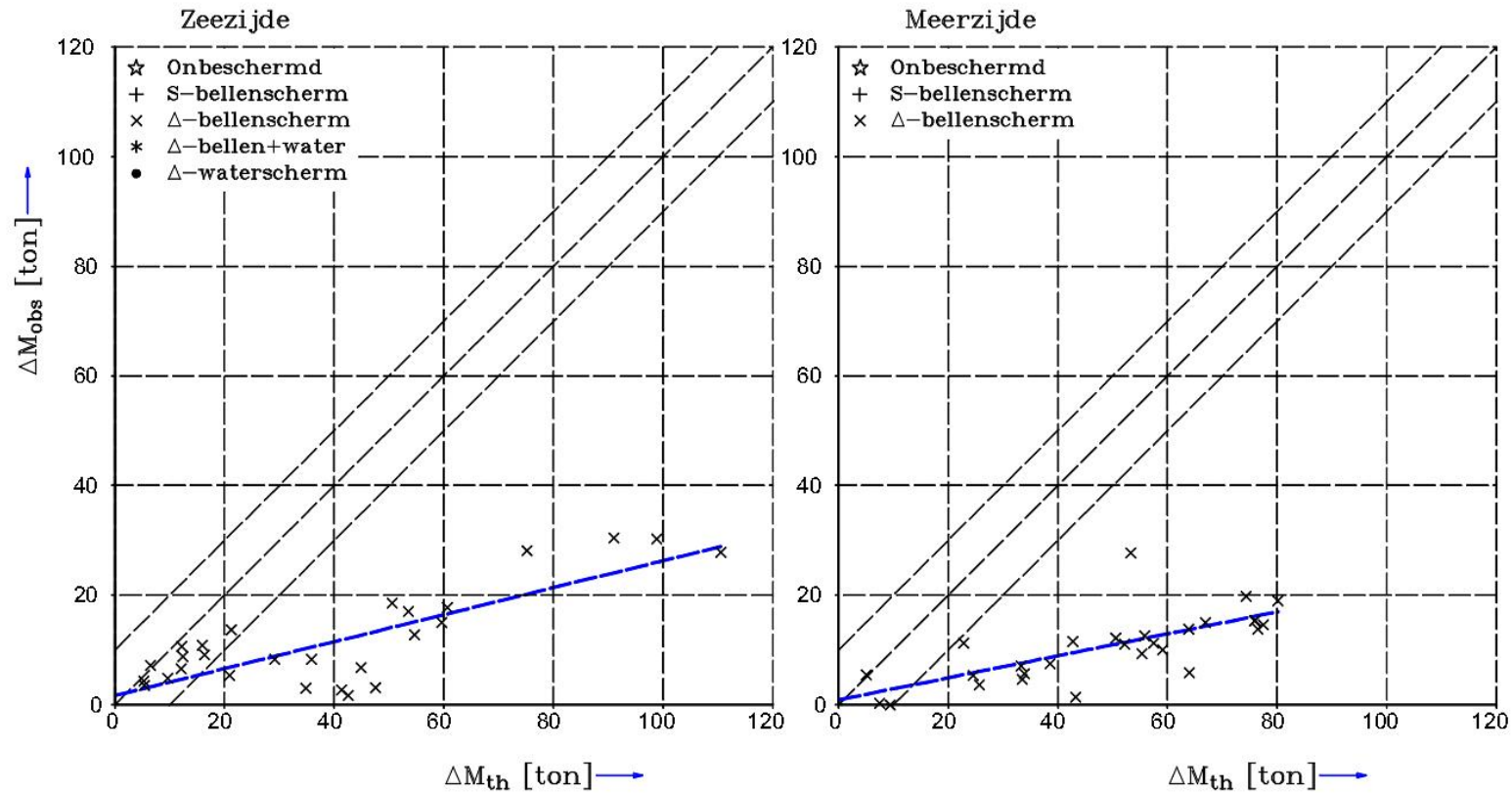
Figuur 4.11 Verzameling van schuttingen naar zee en meerzijde met het S-luchtbellenscherm op volledig compressorvermogen (zie Tabel 4.1 en 4.2). De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 S-bellenschermd
Lucht ca. 248 Nl/s met verhoogde drempel



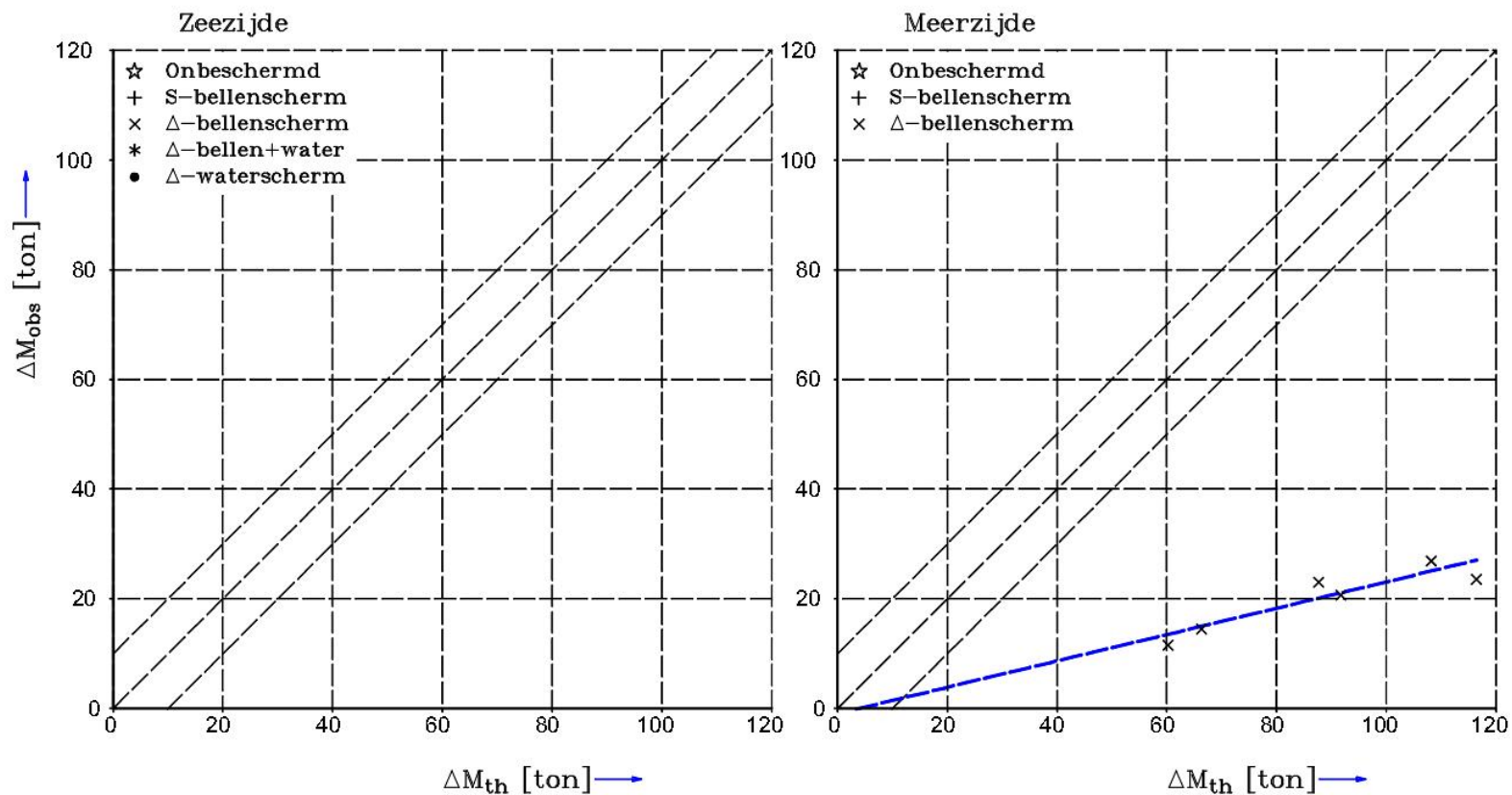
Figuur 4.12 Verzameling van schuttingen naar meerzijde met extra, hogere drempel en het S-luchtbellenschermd op heel compressorvermogen (zie Tabel 4.1 en 4.2). De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellenscherm
 Lucht ca. 207 NI/s zeezijde en 247 NI/s meerzijde



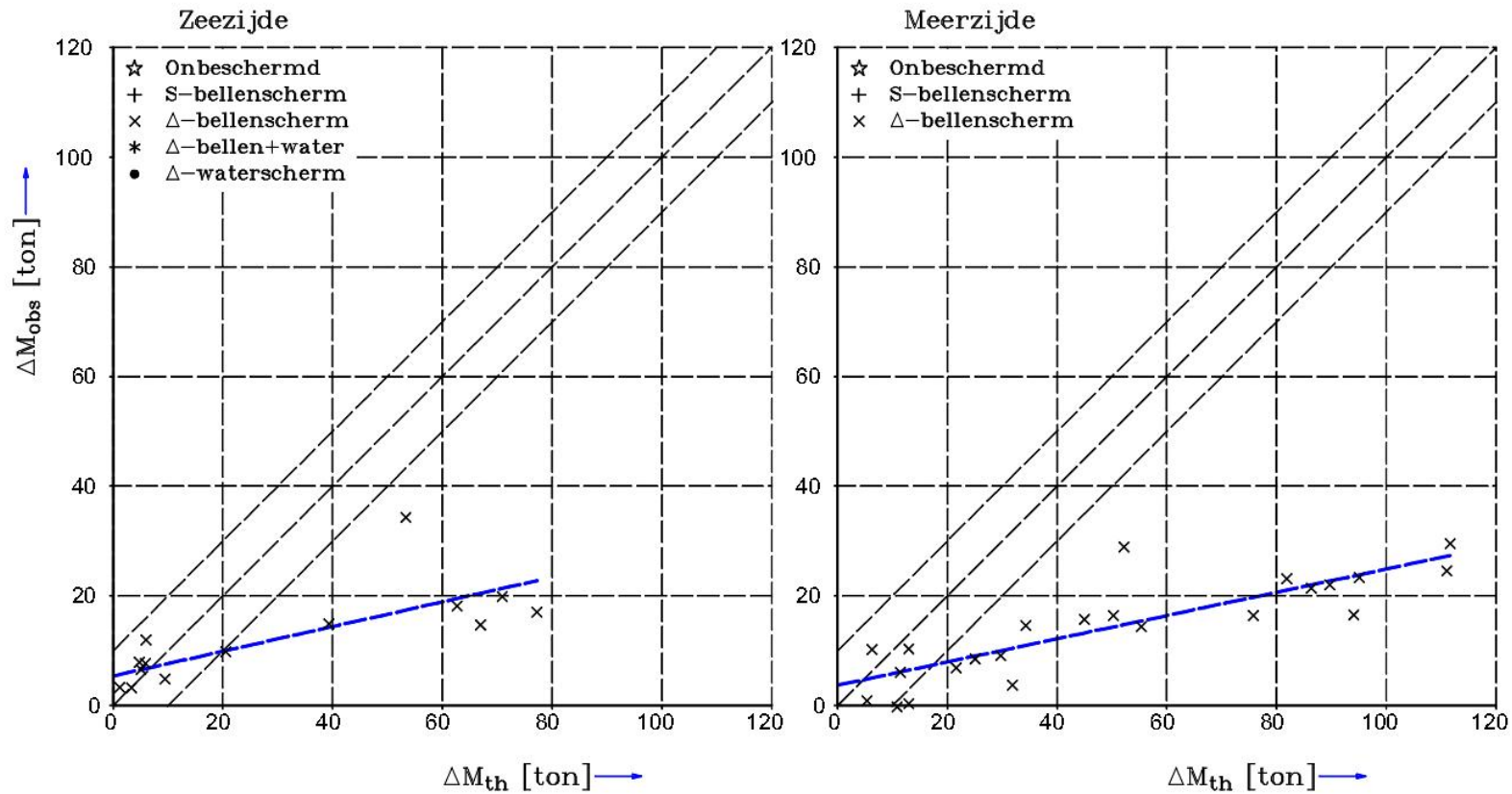
Figuur 4.13 Verzameling van schuttingen naar zee en meerzijde met het Δ -luchtbellenscherm met 207-247 NI/s. De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellenschermd
Lucht ca. 200 NI/s met verhoogde drempel



Figuur 4.14 Verzameling van schuttingen naar meerzijde met extra, hogere drempel en het Δ -luchtbellenschermd met ca. 200 NI/s. De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellenschermd
Lucht ca. 435 NI/s



Figuur 4.15 Verzameling van schuttingen naar zee en meerzijde met het Δ -luchtbellenschermd met gemiddeld 435 NI/s. De blauwe stippellijn toont de kleinste-kwadraten lineaire regressie.

4.4.4 Waterschermen en zonder/met Δ -luchtbellenschermen aan zeezijde

900 ℓ /s waterscherm zonder/met 200 N ℓ /s Δ -luchtbellenscherm

Door tijdgebrek zijn er weinig waarnemingen met alleen het 900 ℓ /s waterscherm gedaan. De resultaten van metingen met dit debiet tonen wel een doorlaatfractie welke aan zeezijde gestaag kleiner wordt bij opeenvolgende schuttingen.

De combinatie van deze instelling van het waterscherm met 200 N ℓ /s lucht via het Δ -luchtbellenscherm duidt op een kleinere doorlaatfractie die ook nu kleiner wordt met opeenvolgende schuttingen, wat niet in Figuur 4.17 is weer te geven. De toevoer van 900 ℓ /s aan zoet water vóór de sluisdeuren aan zeezijde lijkt gestaag het zoutgehalte van o.a. de ca. 10m ruimte tussen het frame met het waterscherm en de sluisdeuren (zie Figuur 3.2) te verminderen. Bij opeenvolgende schuttingen wordt zodoende steeds minder zout water vanuit de zeezijde de kolk in gebracht, zie ook Figuur 4.4.

Ons vermoeden is dat een waterscherm van ca. 900 ℓ /s een kantelpunt vormt in zijn reducerende werking, getuige de duidelijke en betere resultaten met 1600 ℓ /s die we hierna bespreken.

1600 ℓ /s Δ -waterscherm en 100 N ℓ /s Δ -luchtbellenscherm en met extra drempel meerzijde

Een krachtiger waterscherm van 1600 ℓ /s buiten de kolk aan zeezijde laat ca. 50 % van het oorspronkelijke zouttransport door gedurende geopende sluisdeuren aan zeezijde, zie Figuur 4.16.

Door toevoeging van het Δ -luchtbellenscherm met slechts ca. 100 N ℓ /s ontstaat een aanmerkelijke beperking in het doorgelaten zouttransport zoals Figuur 4.16 toont. We hebben slechts één schutting naar zeezijde met alléén het Δ -luchtbellenscherm van ca. 140 N ℓ /s zodat we geen uitspraak kunnen doen of de combinatie van dit waterscherm en luchtbellenscherm bij deze instellingen beter is dan de beste van elk van deze zoutlekbeperkende middelen afzonderlijk.

Figuur 4.16 toont een verschuiving zó dat bij minder dan ca. 25 ton oorspronkelijke verandering van zoutmassa in de kolk er zelfs sprake is van géén toename in de waargenomen zoutmassa (drie metingen). Dit laatste is duidelijk zichtbaar in de tijdsregistratie van het verloop van de zoutmassa in de kolk tijdens geopende sluisdeuren aan zeezijde, zie Figuur 3.18 en de bespreking ervan in onderdeel 3.8.

Ook deze experimenten zijn nauwgezet uitgevoerd met 15 minuten deuropentijd en waarbij tevens de kolk zo zoet mogelijk is gehouden door lange deuropentijden naar meerzijde maar nu met de extra, 1.18m hoge drempel aan meerzijde.

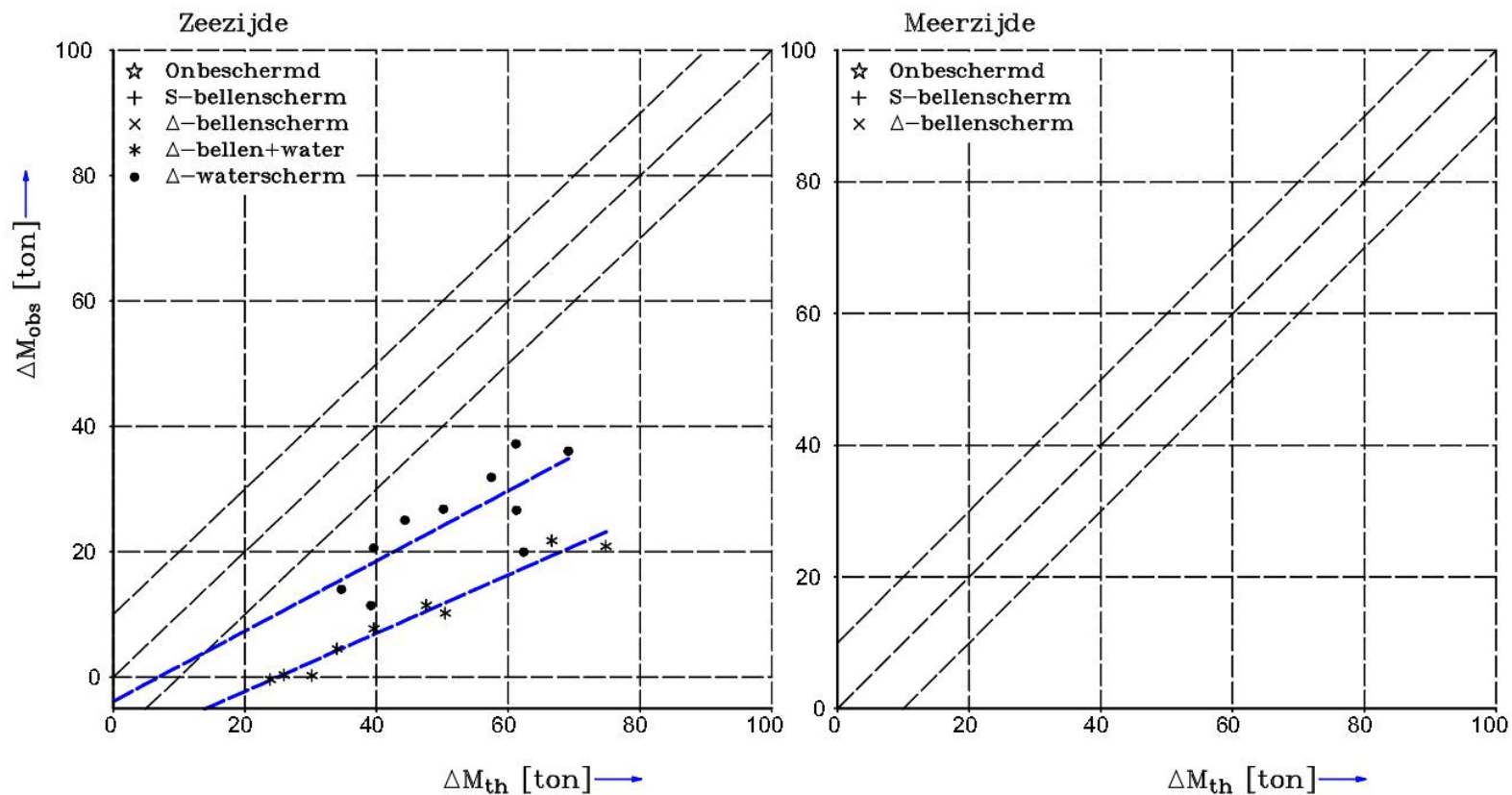
1600 ℓ /s Δ -waterscherm en 400 N ℓ /s Δ -luchtbellenscherm zonder extra drempel meerzijde

Tenslotte blijkt zonder extra drempel aan meerzijde de combinatie van 1600 ℓ /s waterscherm met 400 N ℓ /s Δ -luchtbellenscherm de grootste reductie van de oorspronkelijke zouttransport te leveren waarbij slechts 20 % van het oorspronkelijk zouttransport wordt doorgelaten, zie Figuur 4.19.

1600 ℓ /s waterscherm zonder/met 200 N ℓ /s Δ -luchtbellenscherm

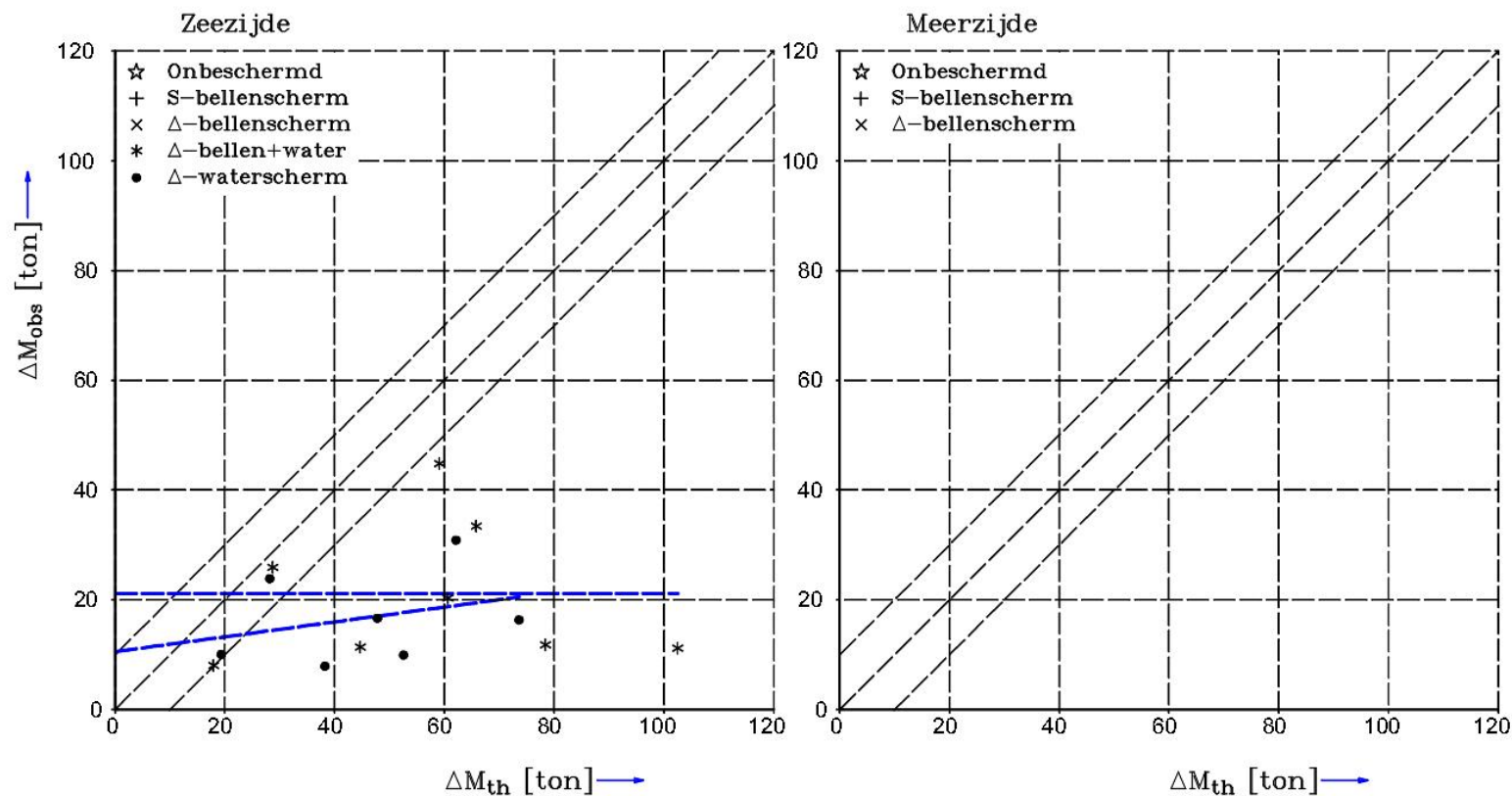
Figuur 4.18 toont dat de toevoeging van een luchtbellenscherm van 200 Nℓ/s aan een waterscherm van 1600 Δ/s de doorlaatfractie nauwelijks verlaagd. Voorgaande combinaties van 100, 200 en 400 Nℓ/s luchtdebiet met 1600 ℓ/s waterdebiet en waarin 200 Nℓ/s minder goed presteert duiden op een thans onbekende optimale mengverhouding tussen water- en luchtdebiet.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellen + waterscherm
 Lucht ca. 94 Nl/s ; Water ca. 1543 l/s



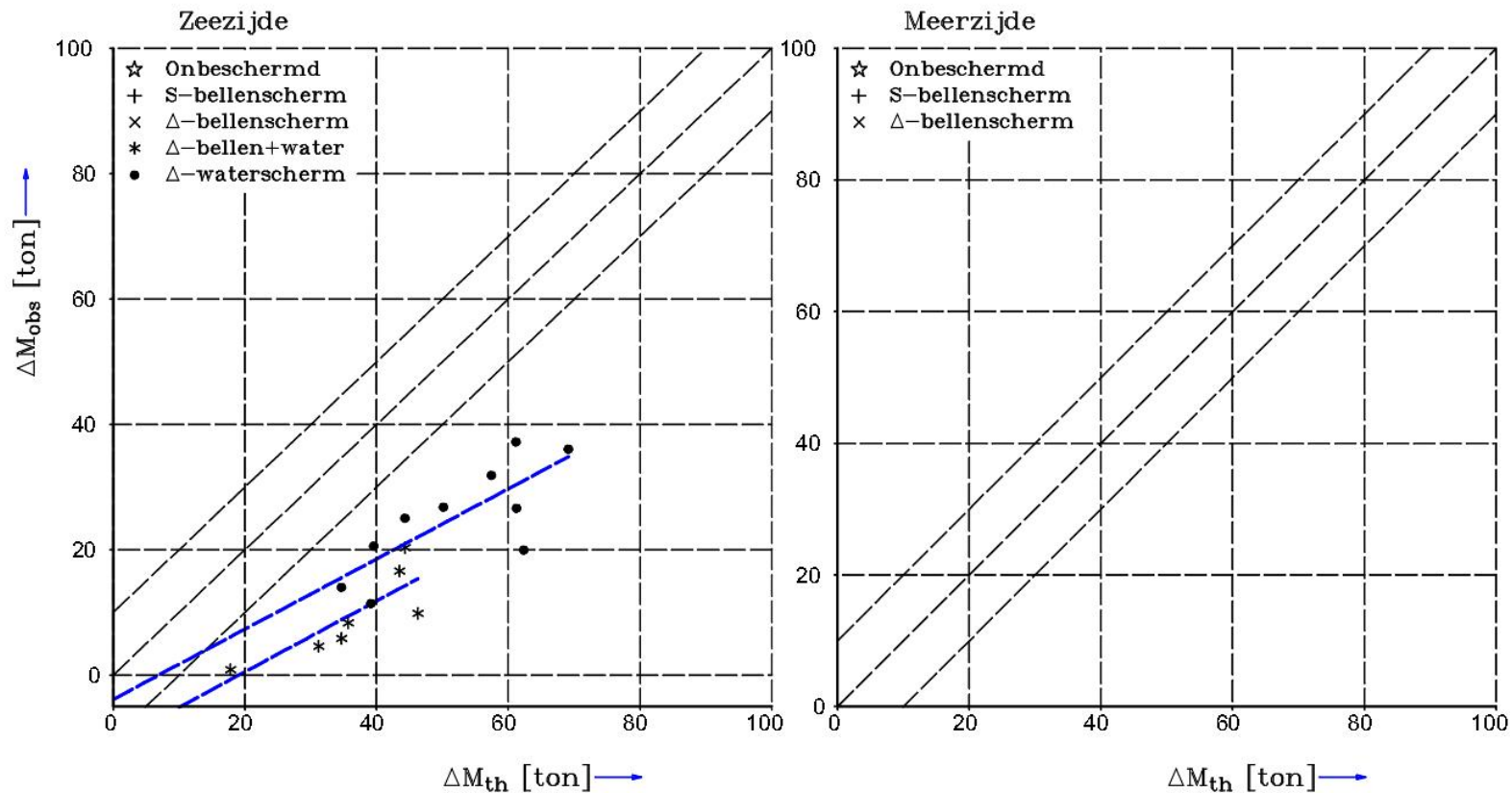
Figuur 4.16 Verzameling van schuttingen naar zeezijde met het Δ -waterscherm met ca. 1543 l/s debiet en in combinatie met het Δ -luchtbellenscherm met ca. 94 Nl/s. De blauwe stippellijnen tonen de kleinste-kwadraten lineaire regressies.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellen + waterschermd
 Lucht ca. 221 NI/s ; Water ca. 889 l/s



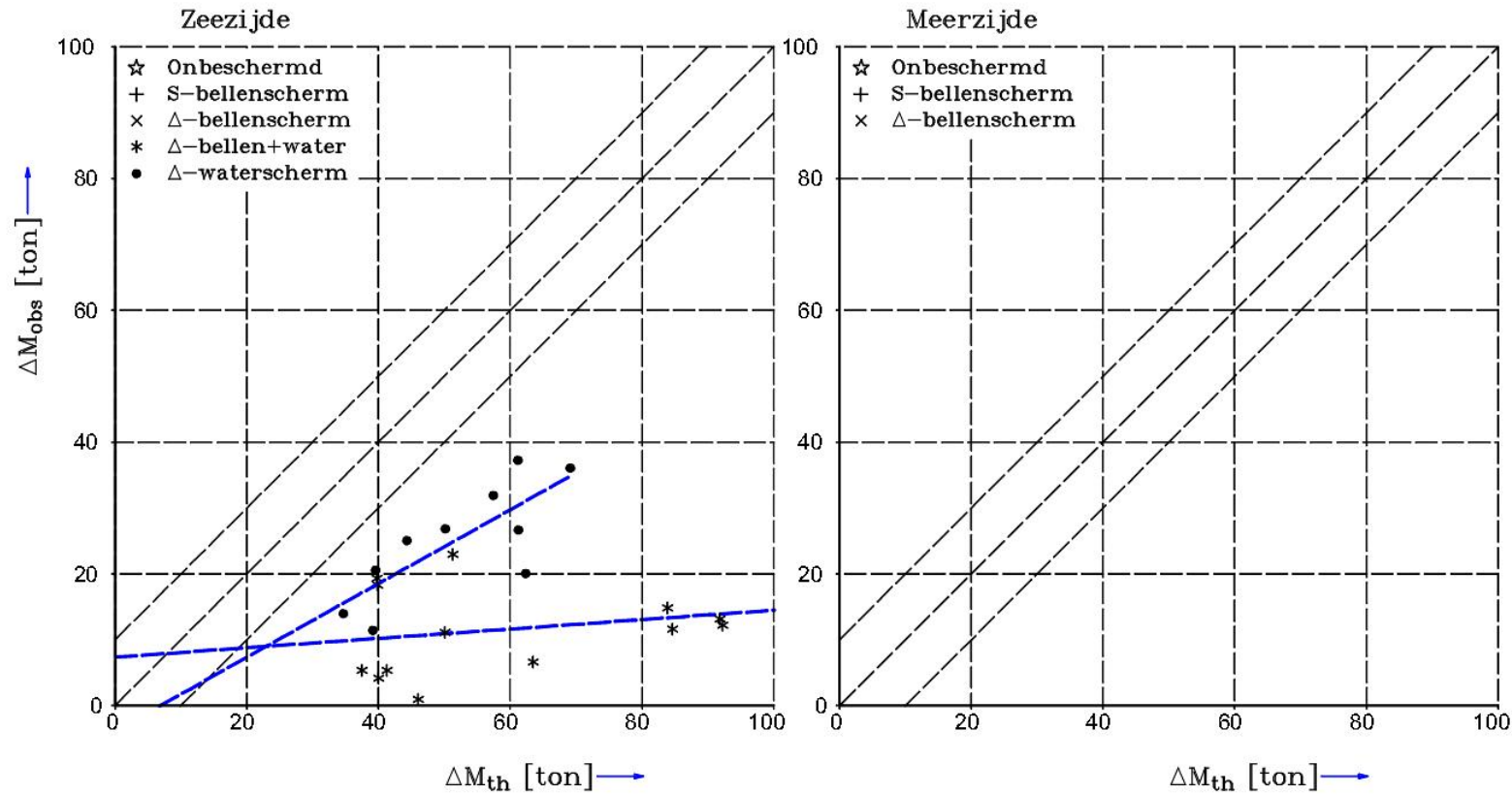
Figuur 4.17 Verzameling van schuttingen naar zeezijde met het Δ -waterschermd met ca. 900 l/s debiet en in combinatie met het Δ -luchtbellenschermd met ca. 220 NI/s. De blauwe stippellijnen tonen de kleinste-kwadraten lineaire regressies.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellen + waterscherm
 Lucht ca. 227 NI/s ; Water ca. 1479 l/s



Figuur 4.18 Verzameling van schuttingen naar zeezijde met het Δ -waterscherm met ca. 1479 l/s debiet en in combinatie met het Δ -luchtbellenscherm met ca. 227 NI/s. De blauwe stipellijnen tonen de kleinste-kwadraten lineaire regressies.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellen + waterscherm
 Lucht ca. 411 Nl/s ; Water ca. 1523 l/s



Figuur 4.19 Verzameling van schuttingen naar zeezijde met het Δ -waterscherm met ca. 1523 l/s debiet en in combinatie met het Δ -luchtbellenscherm met ca. 411 Nl/s. De blauwe stippellijnen tonen de kleinste-kwadraten lineaire regressies.

4.4.5 Samenvatting

Voorgaande analyse van de waarnemingen van totale verandering in zoutmassa, verdeeld over de varianten uit Tabel 4.1 en 4.2, zijn samengevat in Tabel 4.3 en Figuur 4.20 voor schutten naar de zeezijde en in Tabel 4.4 en Figuur 4.21 voor schutten naar de meerzijde.

De regressie voor Δ -luchtbellenscherm met 200 Nl/s gecombineerd met Δ -waterscherm met 900 l/s representeert niet de afname van de totale verandering van de zoutmassa in opeenvolgende schuttingen (lange-duur effect niet inbegrepen).

Tabel 4.3 geeft een negatieve offset voor de Cases 7 en 8 met ca. 1600 l/s waterdebiet. Deze negatieve offset betekent dat tót een zekere verwachte verandering in zoutmassa, zonder zoutlekbeperkende middelen, deze combinatie van luchtbellen- & waterschermen géén zout doorlaten, zie ook Figuur 4.16 en 4.18.

We kunnen met het overzicht in Figuur 4.20 concluderen dat met voldoende krachtig luchtdebiet en/of waterdebiet de doorlaafracties geringer zijn dan 25 % van de ongeremde zoutuitwisseling.

Er lijkt sprake te zijn van een nog onbekend optimum voor de mengverhouding tussen lucht- en waterdebieten welke de laagste doorlaafractie biedt bij gegeven verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven. Figuur 4.20 toont dat tot ca. 50 ton van de theoretische schatter (ongehinderde zout-zoet uitwisseling) de combinatie van 100 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet het minste zout doorlaat maar daarboven de combinatie van 400 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet. De combinatie van 1600 l/s waterdebiet met 200 Nl/s luchtdebiet is minder zoutlekbeperkend dan met 100 en 400 Nl/s luchtdebiet.

Tot 50 ton ongehinderd zout-zoet uitwisseling geven de volgende twee combinaties de beste zoutlekbeperkende werking: het Δ -luchtbellenschermen achter een 1,2m hoge drempel met 100 Nl/s luchtdebiet uit horizontaal naar elkaar blazende diffusers (zie Figuur 4.21) én de combinatie van 100 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet (zie Figuur 4.20).

Naar gelang overwegingen van verbruik van compressor- en pompenergie, van verlies aan zoet water en doorvaart van diepe schepen (drempelhoogte) kunnen er keuzen gemaakt worden die dezelfde geringe doorlaafractie van 25 % opleveren. De combinaties van krachtige waterschermen (1600 l/s) en luchtbellenschermen (100 - 450 Nl/s) geven minimale doorlaafracties van ca. 20%.

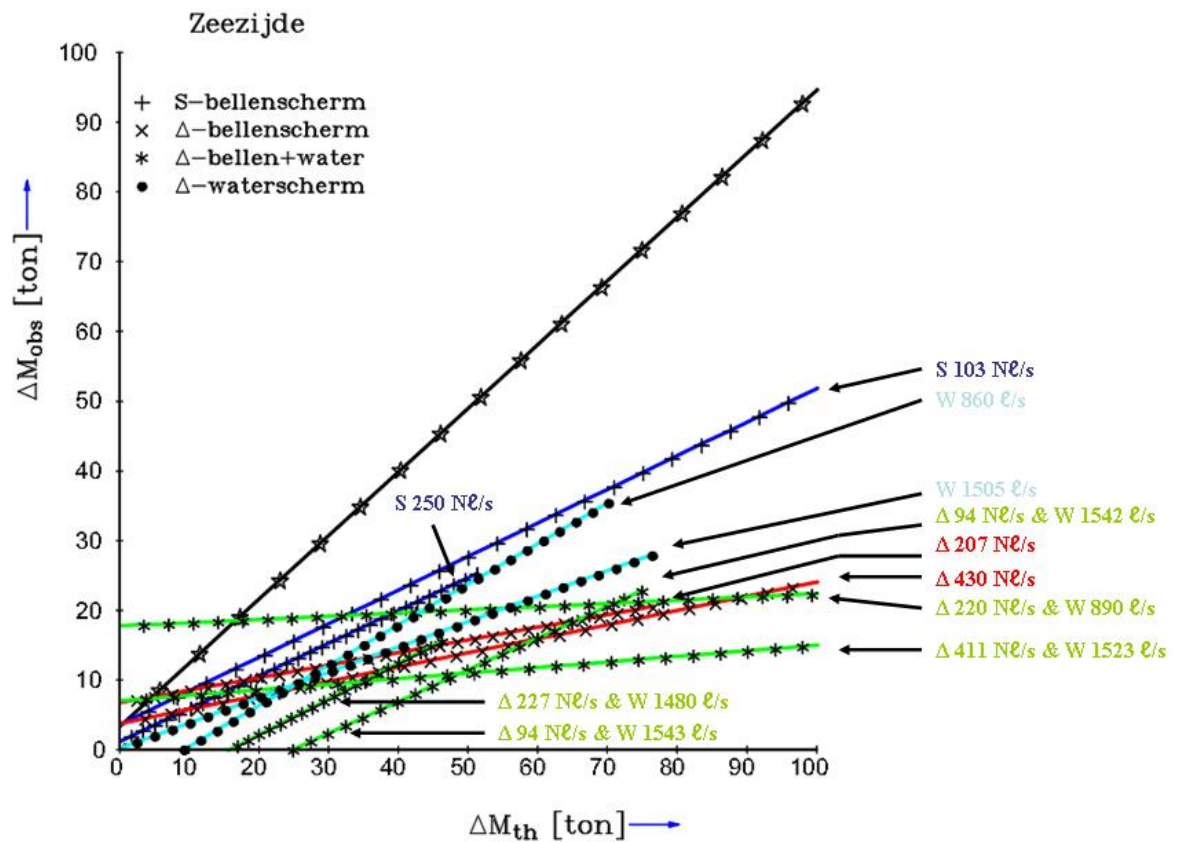
Zeezijde	Omschrijving in tekst	Lucht [N ℓ /s]	Water [ℓ /s]	Offset M _{obs} [ton]	Helling	Corr.	Schuttingen
1	Onbeschermdde kolk	0	0	3,7	0,99	0,94	157
2	S-luchtbellenschermb	103	0	1,1	0,73	0,70	97
3	S-luchtbellenschermb	246	0	0,31	0,48	0,73	76
4	Δ -luchtbellenschermb	144	0	-	-	-	1
5	Δ -luchtbellenschermb	207	0	1,7	0,25	0,77	28
6	Δ -luchtbellenschermb	431	0	5,4	0,23	0,76	15
7	Δ -luchtbellens- & waterschermb	94	1543	-12	0,46	0,98	9
8	Δ -luchtbellens- & waterschermb	221	889	21	0	0	8
9	Δ -luchtbellens- & waterschermb	227	1479	-11	0,57	0,82	7
10	Δ -luchtbellens- & waterschermb	411	1523	7,4	0,07	0,33	16
11	Δ -waterschermb	0	860	11	0,14	0,31	7
12	Δ -waterschermb	0	1505	-3,9	0,56	0,77	10
13	Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenschermb	123	0	2,0	0,13	0,50	7

Tabel 4.3. Relatie tussen observatie en theoretische schatter van verandering van zoutmassa in de kolk bij schutten naar zeezijde. De Offset is M_{obs} bij M_{th} = 0, de Helling is M_{obs} / M_{th} vanaf het punt van offset en Corr. is de correlatiecoëfficiënt.

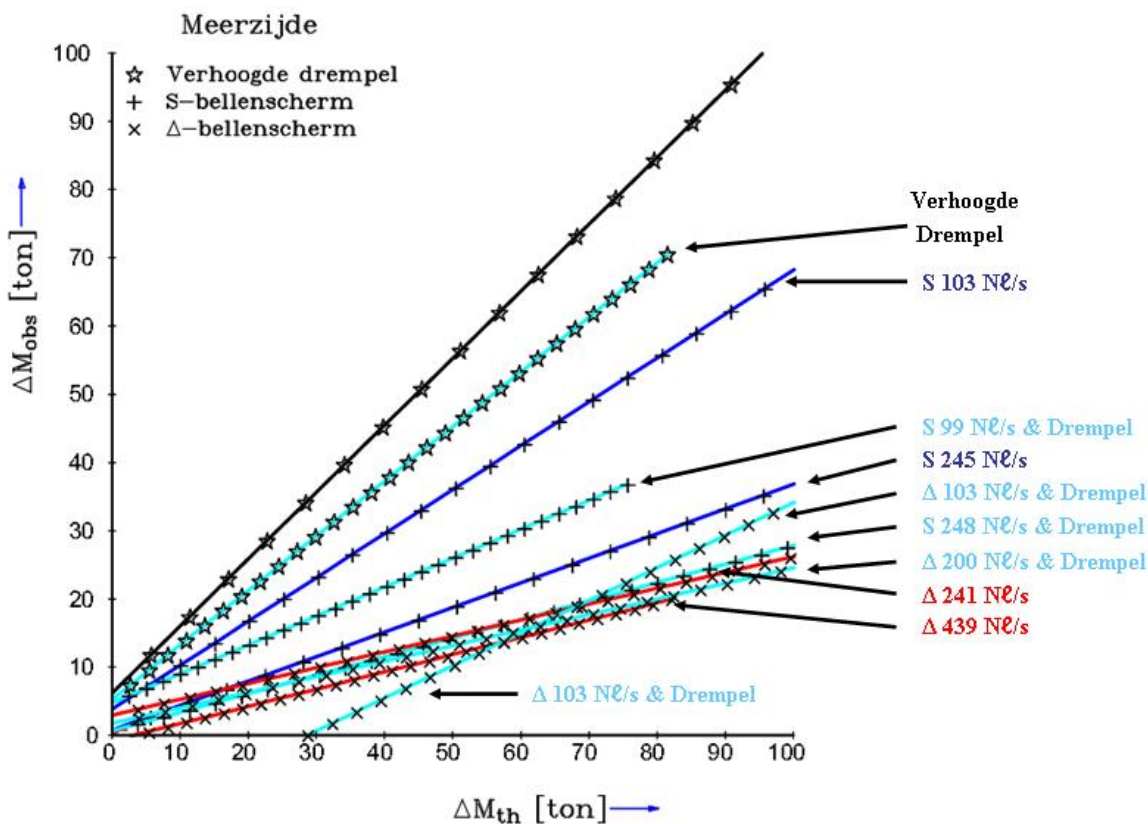
De onderzochte varianten aan meerzijde (Figuur 4.21) tonen dat een extra 1,18 m hoge drempel de doorlatende teen van S-luchtbellenschermb, gecreëerd met geperforeerde buizen, tegen zoutindringing kan beschermen. Ook aan de meerzijde vinden we enkele keuzes om doorlaatfracties geringer dan 25 % te bereiken. Kwalitatief vergelijkbaar met waterschermb ter ondersteuning van luchtbellenschermb kan een gunstige offset worden bereikt door een drempel met een Δ -luchtbellenschermb te combineren. Zie daartoe Case 9 (meerzijde) in Tabel 4.4 en Figuur 4.10 met twee rijen diffusers horizontaal en tegen elkaar in blazen vanaf de zoute zijde bezien direct achter een 1,18m hoge extra drempel.

Meerzijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nℓ/s]	Water [ℓ/s]	Offset M_{obs} [ton]	Helling	Corr.	Schuttingen
1	Onbeschermd kolk	0	0	8,5	0,96	0,96	144
2	Verhoogde drempel	0	0	6,5	0,78	0,95	64
3	S-luchtbellenscherm	103	0	4,8	0,60	0,90	78
4	S-luchtbellenscherm	245	0	0,25	0,38	0,89	36
5	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	99	0	7,0	0,41	0,77	17
6	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	248	0	0,51	0,27	0,88	51
7	Δ -luchtbellenscherm	241	0	0,91	0,20	0,72	28
8	Δ -luchtbellenscherm	439	0	3,7	0,21	0,85	23
9	Δ -luchtbellenscherm & verhoogde drempel	103	0	-13	0,47	0,92	8
10	Δ -luchtbellenscherm & verhoogde drempel	201	0	-0,99	0,24	0,91	6
11	Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenscherm	187	0	1,5	0,07	0,08	11

Tabel 4.4. Relatie tussen observatie en theoretische schatter van verandering van zoutmassa in de kolk bij schutten naar zeezijde. De Offset is M_{obs} bij $M_{th} = 0$, de Helling is M_{obs} / M_{th} vanaf het punt van offset en Corr. is de correlatiecoëfficiënt.



Figuur 4.20 Verzameling van regressielijnen voor de varianten uit Tabel 4.1 en 4.2 voor schuttingen naar zeezijde. Symbool S staat voor Stevinsluis-luchtbellenscher姆, Δ voor Deltares luchtbellenscher姆 en W voor waterscher姆.



Figuur 4.21 Verzameling van regressielijnen voor de varianten uit Tabel 4.1 en 4.2 voor schuttingen naar meerzijde. Symbol S staat voor Stevinsluis-luchtbellenscher姆, Δ voor Deltares luchtbellenscher姆 en W voor waterscher姆.

Over de methode van lekkende ebdeuren kunnen we concluderen dat een zoetwaterdebiet door de kolk de zoutlek sterk kan reduceren en dat dit proces goed begrepen is en in rekenmodellen kan worden gesimuleerd. Voor de goede werking van de schutsluis geldt een berekenbare bovengrens aan dit zoetwaterdebiet. Deze bovengrens wordt vnl. bepaald door het toelaatbare peilverschil over dichte sluisdeuren waaronder deze nog zonder schade aan de aandrijving geopend kunnen worden. Tevens neemt de tijd voor het nivelleren van de kolk toe omdat een deel van het nivelleerdebiet wegloopt door gedeeltelijk geopende rinketschuiven. Tijdens afmeren zal de stroming in de kolk meer aandacht van de schippers vergen. Anderzijds kan zowel het resterende peilverschil als de verlenging van nivelleertijd weer beperkt worden door tijdens het nivelleren de rinketschuiven aan de zijde waarnaar niet wordt genivelleerd te sluiten.

5 Discussie, Conclusies en Aanbevelingen

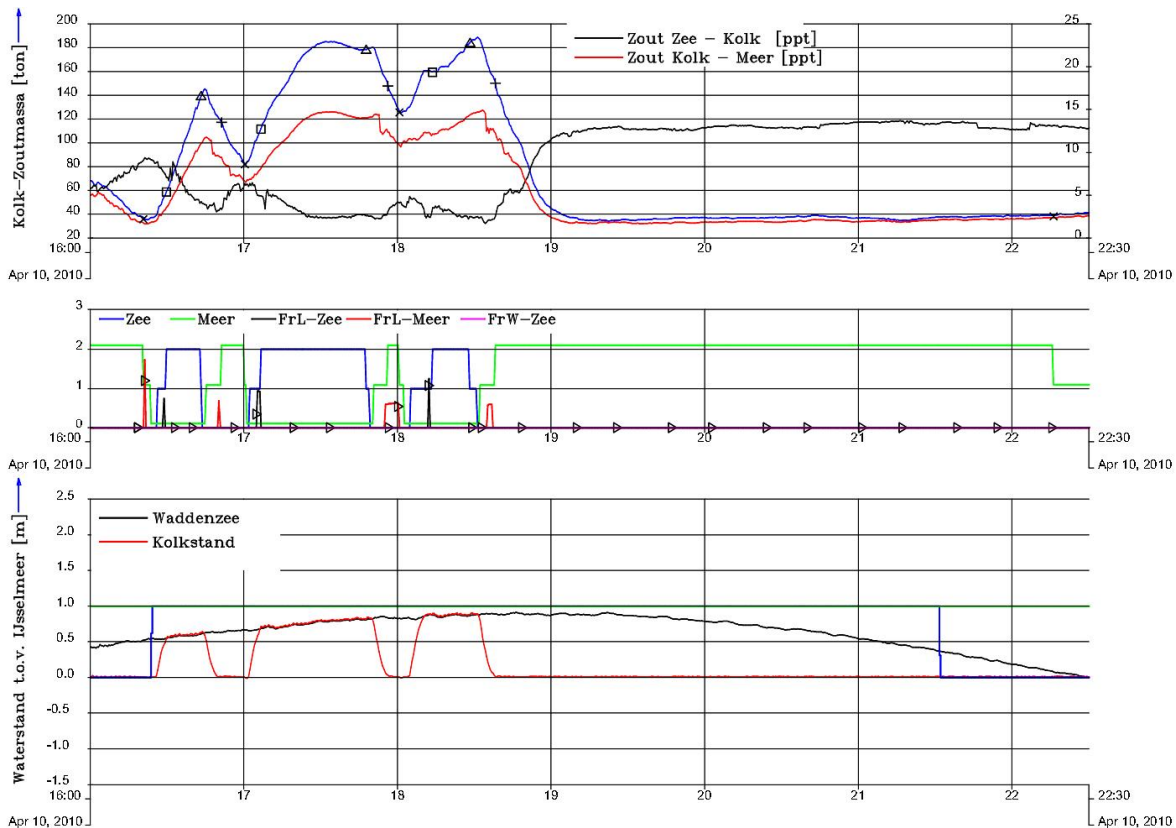
In dit hoofdstuk beperken we ons tot het primaire doel van de praktijkproef nl. het vaststellen van de kwaliteit van zoutlekbeperkende middelen. In hoofdstuk 6 bespreken en concluderen we de mogelijkheden om de zoutlek door de Stevinsluis verder te beperken.

5.1 Discussie

5.1.1 Variaties in de waarnemingen

De waarnemingen aan meerzijde tonen een meer samenhangend beeld van de zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen dan aan zeezijde. Dit onderscheid kan niet geweten worden aan scheepvaart en/of meetfouten van zout in de kolk, immers deze storingen werken op het waargenomen zouttransport door beide kolkeinden.

De oorzaken zoeken we daarom eerder in de meetfouten in de zeezijde-voorhaven of andere invloedsfactoren buiten de kolk aan zeezijde. Ten dele kan de oorzaak van variaties in resultaten aan zeezijde wel verklaard worden doordat de diepst liggende zoutmeter in de zeezijde-voorhaven nog 1,5-2m boven de kolkvloer meet en zodoende niet het volledige zoutprofiel waarnam, zie linksboven in Figuur 3.14. Echter, door aanvulling van deze ontbrekende meting met het maximale zoutgehalte gemeten in de kolk lijkt voorgaande meetfout in de loop van de praktijkproef beperkt te blijven. Daarnaast trad in de voorhaven aan zeezijde een variërende zoutstratificatie op door het spuiregiem van de spuisluizen in de Afsluitdijk waar voor de voortplanting van de zouttong geen algemeen geldende analytische oplossing bekend is. Met de analytische oplossing uit (Shin e.a., 2004) voor een stapvormig dichtheidsprofiel bij de sluisdeur kunnen we aantonen dat door desondanks het dieptegemiddelde zoutgehalte in de voorhaven te gebruiken het zouttransport met hooguit 15% wordt onderschat. Onze waarnemingen vertonen duidelijk meer variaties dan deze afwijking.



Figuur 5.1 Zie tussen 17-18 uur: tijdens deze ongehinderde schutting naar zeezijde neemt de zoutmassa in de kolk af doordat bij opkomend tij de eerder uitgestroomde zoete toplaag de kolk in wordt gestuwd.

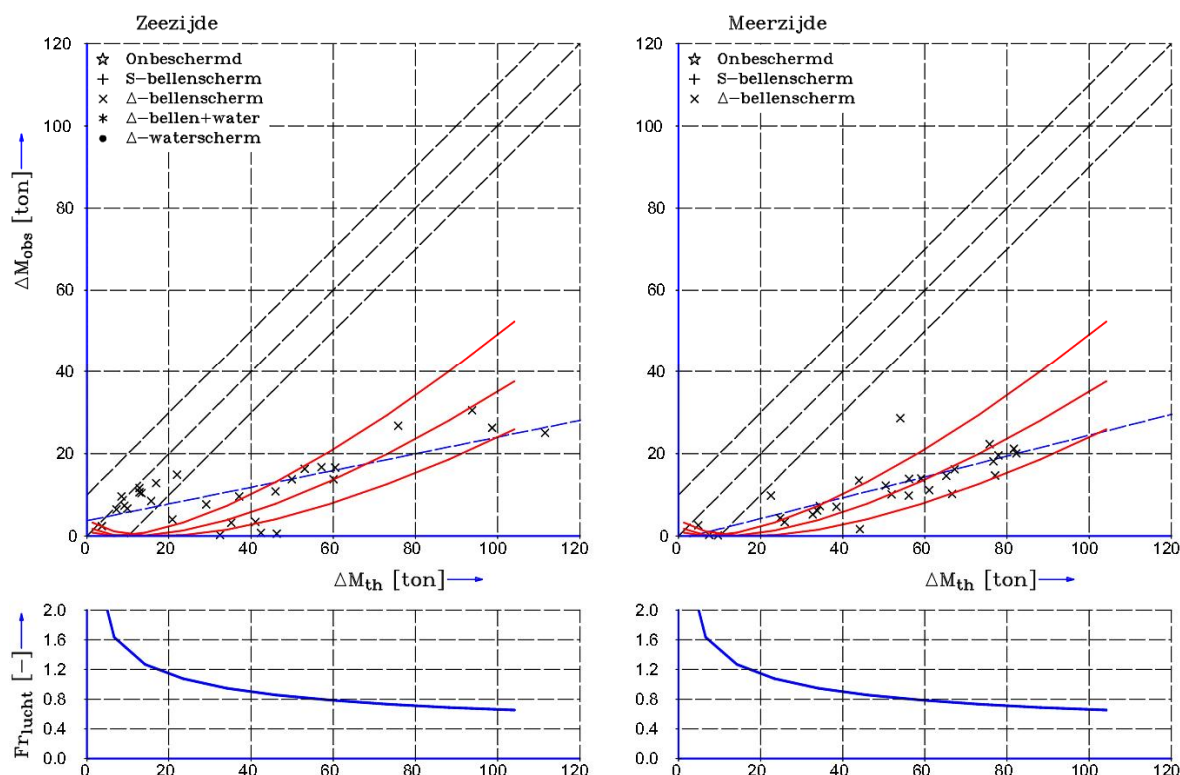
Een bijdrage tot de minder samenhangende resultaten aan zeezijde t.o.v. meerzijde lijkt het getij te zijn. Bij diverse langere schuttingen aan zeezijde vonden we tijdens opkomend tij dat de zoutmassa in de kolk een maximum bereikt en dan weer afneemt voordat de sluisdeuren sloten. Figuur 5.1 toont een voorbeeld tussen 17-18 uur terwijl aan meerzijde met extreem lange deuropentijd van 18:30 tot 22:15 de zoutmassa zijn constante minimale waarde bereikt. Nader onderzoek voor de schutting tussen 17 en 18 uur toont dat de eerdere uitgestroomde zoetere toplaag de kolk weer wordt ingestuwd bij opkomend tij. We verwachten dat ook het omgekeerde kan gebeuren nl. dat bij afnemend tij de zoetere toplaag sneller uit de kolk stroomt dan bij constante waterstand. Echter deze snellere toename van de zoutmassa in de kolk tijdens schutten bij afnemend tij is niet eenvoudig te onderscheiden zonder volledig te vertrouwen op een theoretische referentie. Daarnaast kan de verhouding tussen natte scheepdoorsnede en totale kolkdoorsnede tijdens het getij variëren en invloed op de zoutuitwisseling hebben.

Hierna bespreken we nog een bijdrage tot variaties in de mate van zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen nl. door variaties in het verschil in zoutgehalte over het luchtbellenscherm bij constant luchtdebiet. Bij voldoende geringe verschillen in zoutgehalte kan een luchtbellenscherm meer menging geven dan scheiding van zoet-zout.

5.1.2 Doorlaatfractie van luchtbellenschermen, theorie en grenswaarden

Abraham & V.d. Burgh (1962) toetsten hun semi-empirische theorie voor de doorlaatfractie van luchtbellenschermen bij verschillende waterdiepten in schutsluizen te IJmuiden en Kornwerderzand. Het voorliggende onderzoek had niet het doel hun theorie opnieuw te valideren met waarnemingen in de Stevinsluis. Toch onderzochten we of hun relatie tussen het zg. Froude-lucht getal en de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm met onze waarnemingen gevalideerd konden worden. Zie Appendix B en (Abraham & V.d. Burgh, 1962) voor de wiskundige definitie van het Froude-lucht getal. Het Froude-lucht getal is evenredig met de verhouding tussen de opwaartse snelheid van water dat een luchtbellenscherm naar het oppervlak meeneemt (in het Engels: *entrainment*) en de horizontale snelheid van de zouttong. Deze laatste snelheid is evenredig met de wortel uit de waterdiepte en de wortel uit het verschil in zoutgehalten. We vonden echter geen duidelijk verband tussen het Froude-lucht getal en de doorlaatfractie.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellenscherm
Lucht ca. 200 Nl/s – Vergeleken met theorie bellenscherm



Figuur 5.2 In rood drie schattingen van de waargenomen veranderingen in zoutmassa (verticale as) volgens de theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962) vergeleken met onze waarnemingen met het Δ -luchtbellenscherm bij 200 Nl/s luchtdebiet.

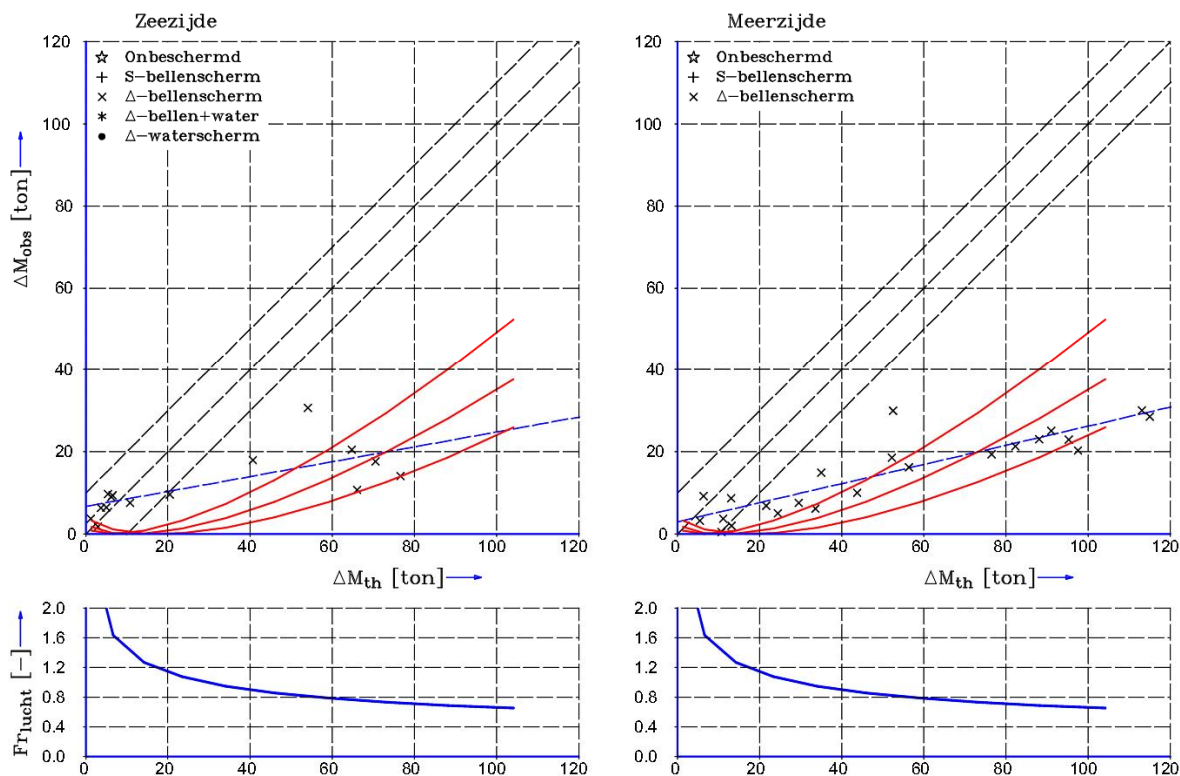
Wij wijten dit gemis aan de wijze waarop wij onze waarnemingen deden nl. in een werkende schutsluis met scheepvaart en met nivelleren welke interne golfbewegingen geven die de gezochte relatie maskeren. Abraham & V.d. Burgh konden kennelijk experimenten verrichten met deuropentijden van 40 minuten en in schutsluizen zonder scheepvaart.

Omgekeerd onderzochten we de toepassing van de theorie uit (Abraham & V.d. Burgh, 1962) als beschrijving van onze waarnemingen van zouttransport gehinderd door luchtbellenschermen. Daartoe kozen we bij de gemiddelde waargenomen deuropentijd van

14 minuten met het Δ -luchtbellenscherm met 200 Nl/s luchtdebiet een bereik van 0 tot 20 ppt in zoutgehalten tussen kolk en voorhavens. Hiermee genereerden we een bereik in de theoretische schatter (horizontale as in Figuur 5.2) betrokken op de Stevinsluis. Gegeven het gemeten luchtdebiet van ca. 200 Nl/s en de verschillen in zoutgehalten pasten we de theorie toe om de waargenomen verandering in zoutmassa (verticale as in Figuur 5.2) te voorspellen. Figuur 5.2 vergelijkt onze waarnemingen met de theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962) waarin sprake is van drie waarden voor één coëfficiënt (zie vgl. B.3 in Appendix B) voor de snelheid van water dat door een luchtbellenscherm wordt meegenomen.

Uitgaande van constante deuropentijden van 14 minuten is voor kleine veranderingen van de zoutmassa in de onbeschermd kolk (horizontale as in Figuur 5.2) het zoutverschil tussen kolk en voorhaven gering. Dan wordt het Froude-lucht getal groter dan ca. 0,8 welk bereik niet in (Abraham & V.d. Burgh, 1962) is onderzocht. Het Froude-lucht getal is onderaan Figuur 5.2 weergegeven. Voor grote Froude-lucht getallen, of kleine verschillen in zoutgehalte, werkt een luchtbellenscherm eerder als mengers dan als scheider van zout en zoet water. Deze veranderde werking van een luchtbellenscherm zou de onderschatting van de theorie, en buiten het bereik van zijn toepasbaarheid, voor onze waarnemingen bij kleine veranderingen van zoutmassa wel kunnen verklaren. Evenzo toont Figuur 5.3 voor Δ -luchtbellenschermen met 450 Nl/s luchtdebiet dat de theorie de waargenomen veranderingen in zoutmassa bij grotere Froude-lucht getallen of kleinere veranderingen in zoutmassa in de kolk onderschat.

Stevinsluis 20100401 – 20100526 Δ -bellenscherm
Lucht ca. 450 Nl/s – Vergeleken met theorie bellenscherm



Figuur 5.3 In rood drie schattingen van de waargenomen veranderingen in zoutmassa (verticale as) volgens de theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962) vergeleken met onze waarnemingen met het Δ -luchtbellenscherm bij 450 Nl/s luchtdebiet.

Uit voorgaande komt het vermoeden dat het luchtdebiet van een luchtbellenscherm afgestemd moet worden op het heersende verschil in zoutgehalten dat dit luchtbellenscherm moet scheiden en wel zó dat een Froude-lucht getal van 1 niet sterk wordt overschreden. Het gemiddelde Froude-luchtgetal van het Δ -luchtbellenscherm bij 450 Nl/s aan zeezijde bedroeg ca. 1,7 maar aan meerzijde ca. 1,2 waar het beter lijkt te scheiden dan aan zeezijde en aan zeezijde beter scheidt bij grote veranderingen in zoutmassa, zie de waarnemingen in Figuur 5.3. Uit tussentijdse analyses bleek dat gaande van 200 naar 450 Nl/s luchtdebiet de doorlaatfractie aan zeezijde niet meer merkbaar afnam. Daarom besloten we tijdens het meetprogramma in de Stevinsluis lagere in plaats van nog hogere luchtdebieten te onderzoeken hoewel de Δ -luchtbellenschermen zijn ontworpen voor luchtdebieten tot 1200 Nl/s.

Voorgaand vermoeden wordt onderbouwd met de uitkomsten van numerieke simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010, figuur 7.11) waaruit een ondergrens blijkt van de doorlaatfractie van luchtbellenschermen/waterschermen voor voldoende grote Froude-lucht getallen d.w.z. te groot luchtdebiet dan wel te gering verschil in zoutgehalten of te kleine waterdiepte. Een conclusie uit deze numerieke studie is dat de doorlaatfractie van de combinatie van luchtbellenscherm en waterscherm een ondergrens van $15 \pm 5\%$ heeft. Het linkerdeel van Figuur 4.3 toont inderdaad deze ondergrens en zijn marges.

Tevens lijken onze waarnemingen wel een andere uitkomst van de numerieke studie (Keetels & Uittenbogaard, 2010) te bevestigen dat de combinatie van luchtbellenscherm en waterscherm er met een gering luchtdebiet al lagere doorlaatfracties bereikt kunnen worden dan van het luchtbellenscherm en het waterscherm afzonderlijk. Laboratoriumproeven (Mastbergen, 2010) gaven vergelijkbare conclusies. Zie onze waarnemingen met 100 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet in Figuur 4.3 en Figuur 4.16. Hoewel we geen waarnemingen met alleen 100 Nl/s luchtdebiet hebben maar deze wel tussen de twee varianten van de S-luchtbellenschermen op half en heel compressorvermogen verwacht mag worden, vergelijk Figuur 4.8 en met Figuur 4.16.

Verdere beperking in zouttransport door geopende sluisdeuren moet met andere technieken dan via het verticaal meenemen van water door lucht of opdrijvend water of verticale waterstralen worden gevonden zoals drempels, zoetwater/ebdebiet door de kolk, een zoutvang aan meerzijde e.d..

5.1.3 Locatie luchtbellenschermen/waterschermen t.o.v. sluisdeuren

Een tweede punt van discussie is de locatie van een luchtbellenscherm en/of waterscherm ten opzichte van de sluisdeuren zoals in onderdeel 4.4 aan de hand van onderstaand Figuur 5.4 (gelijk Figuur 4.6) ter sprake kwam. Wij waren genoodzaakt onze *frames* met luchtbellenschermen en waterschermen en drempel aan de zeezijde van de sluisdeuren naar zee- en meerzijde te plaatsen.

Over de kolkbreedte en aan het wateroppervlak markeerden schuimranden de overgang tussen omhoog gestuwd water door water/bellenschermen en het stagnante kolkwater. Hiervan zijn foto's beschikbaar. Bij hogere lucht- en/of waterdebieten lagen deze schuimranden vanaf het *frame* verder de kolk in en verder de voorhaven in. Tevens zagen we bij toenemende debieten dat de schuimranden minder slingeren en geen onderbrekingen over de kolkbreedte vertoonden.

Deze positie vóór de sluisdeuren lijkt gunstiger te zijn dan de traditionele locatie tussen de eb- en vloeddeuren, zoals van de S-luchtbellenschermen.

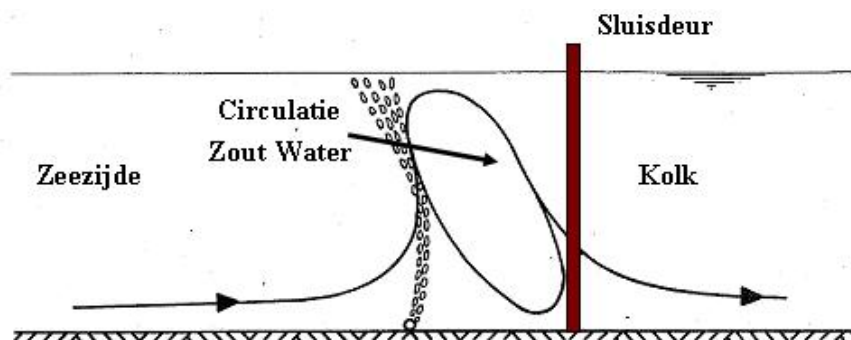
Zowel numerieke simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010) als stroombeelden in laboratoriumproeven (Mastbergen, 2010) tonen dat een luchtbellenscherm aan de zoete zijde een deel van het doorgedrongen zoute water in een verticaal circulatiepatroon vasthoudt, zie Figuur 5.4.

In strijd met voorgaande concludeert Mastbergen (2010) echter dat de verplaatsing van het luchtbellenscherm t.o.v. de sluisdeuren in laboratoriumproeven geen merkbare verbetering van de zoutlekbeperking geeft. In verband met onderstaande discussie over de rol van het zwaaien van de sluisdeuren benadrukken we Mastbergen zijn experimenten verrichtte met een verticaal bewegende schot als sluisdeur.

Eenzijds wordt door het verticale recirculatiepatroon, zie Figuur 5.4, zout water aan de zoete zijde van een luchtbellenscherm gevangen gehouden. Wanneer een waterscherm wordt toegevoegd en tijdig voor opening wordt ingeschakeld kan deze het volume tussen het waterscherm en de sluisdeuren verzoeten. Beide argumenten pleiten voor de plaatsing van een luchtbellenscherm en/of waterscherm aan de zeezijde van een sluisdeur (buiten de kolk).

Anderzijds bij een hogere buitenwaterstand zwaaien de ca. 7m lange vloeddeuren naar zeezijde open én weer dicht. Zodoende zwaaien de vloeddeuren door het volume tussen luchtbellenscherm/waterscherm. Door het openen van de vloeddeuren wordt een aanmerkelijk deel van het watervolume tussen het luchtbellenscherm/waterscherm en de sluisdeuren eerst de kolk in gezogen en later, tijdens sluiten, de kolk uit geperst. Het zwaaien van de vloeddeuren zal het recirculatiepatroon vernietigen.

Tijdens het zwaaien van de zeezijde-ebdeuren (lage buitenwaterstand) wordt de circulatiebel wél de kolk ingezogen echter later bij sluiten buiten gesloten. Ondanks het zwaaien van de ebdeuren blijft mogelijk minder zout uit het recirculatiepatroon (Figuur 5.4) in de dan gesloten kolk achter. Dit is de situatie die in de Volkeraksluizen voortdurend zal optreden met hogere waterstand in het (zoete) Hollandsch Diep dan in het (verzilt) Volkerak-Zoommeer.



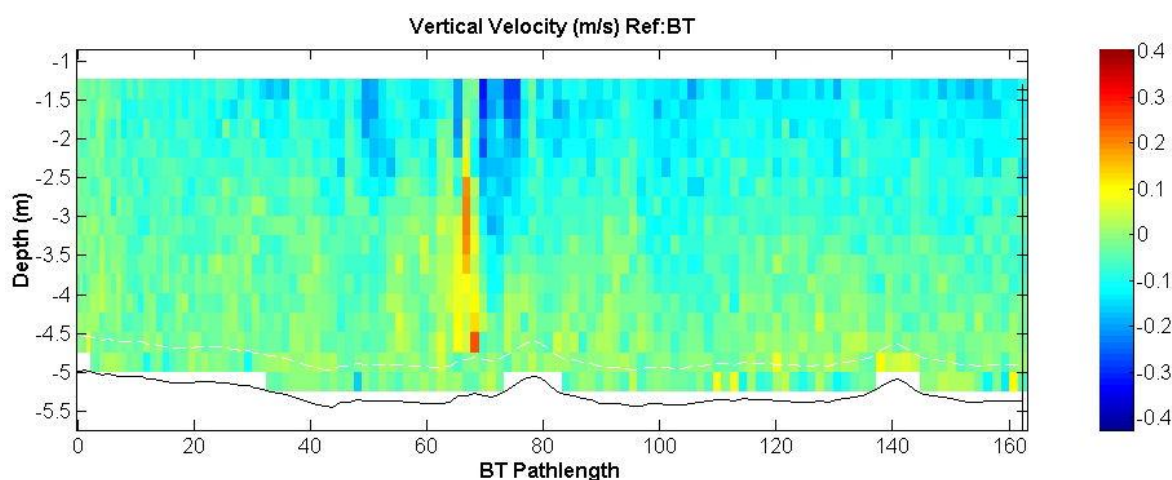
Figuur 5.4 Positie luchtbellenscherm aan zeezijde van de sluisdeuren aan zee- of meerzijde en pad van zout water, figuur overgenomen uit (Abraham & V.d. Burgh, 1962) en onderbouwd met numerieke simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010).

5.1.4 Meting met ADCP

Als aanvulling op de laboratoriumproeven en numerieke simulaties is op 4 mei 2010 tijdens de uitvoering van ons meetprogramma nog onderzocht of met een akoestische snelheidsmeter (ADCP) vanaf een meetvaartuig van RWS IJsselmeergebied de

circulatiepatronen zoals geschetst in Figuur 5.4 konden worden waargenomen. De ADCP berust op het principe een kortdurend hoog-frequente toon uit te zenden, de zg. *ping*. Direct daarna schakelt de ADCP om van luidspreker naar microfoon en luistert naar de echo van de ping die reflecteert op deeltjes en soms dichtheidsverschillen, wanden etc. Als in de richting van de geluidsvoortplanting de reflecterende objecten een snelheid hebben zal de toonhoogte van de echo afwijken van de toonhoogte van de ping, dit is het bekende Doppler effect.. In een zeker kort tijdsinterval wordt de frequentieverschuiving in de echo geschat waaruit de snelheidscomponent volgt in de richting van geluidsvoortplanting en over een lengte- of diepteinterval gelijk aan het product van het tijdsinterval en de snelheid van geluid in water zonder luchtbellen (ca. 1500 m/s). Dit interval is meestal ca. 25 cm en wordt *bin* genoemd. Door in vier verschillende richtingen vanuit de verticaal een *ping* te zenden kunnen de drie snelheidscomponenten over een deel van de waterdiepte worden gemeten met nog een controle op de kwaliteit (vierde geluidsbundel). Dicht bij de ADCP heerst een dode zone o.a. door het omschakelen van luidspreker naar microfoon en met inbegrip van de indompeldiepte van de ADCP vanaf een vaartuig is de eerste 1,5m waterdiepte niet meetbaar. Dicht bij de bodem hinderen reflecties de meting, meestal alleen in het diepste bin.

Gedurende de gehele dag zijn de instellingen van dit instrument geoptimaliseerd waarna als beste resultaat Figuur 5.5 is verkregen met ons waterscherm op 1600 ℓ/s . Zoals verwacht konden geen akoestische snelheidsmetingen worden verricht met het luchtbellenscherm aan omdat de oscillaties van de luchtbellen en hun water-lucht oppervlak de reflecties van geluid aanmerkelijk verwarren.



Figuur 5.5 Verticale snelheid op 4 mei 2010 gemeten met een ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) in een verticale langdoorsnede door de kolk, bij 60m is het frame met het waterscherm van 1600 ℓ/s , links hiervan de zeezijde-voorhaven en rechts hiervan de geopende kolk.

Figuur 5.5 geeft wel indicaties voor de verwachte recirculatiepatronen maar niet met het gewenste detail. Elk blokje toont de bin-hoogte en horizontaal de afstand waarover het vaartuig verplaatste voordat de volgende ping werd uitgezonden. De horizontale resolutie en/of betrouwbaarheid kan wel worden verhoogd door trager te varen en/of met kortere tussenpozen pings uit te zenden, echter hun echo op o.a. betonnen wanden moet eerst voldoende zijn gedempt om de analyse niet te verwarren. We menen dat registraties zoals Figuur 5.5 nog wel kunnen worden verbeterd, zij het alleen toepasbaar voor waterschermen zonder luchtbelletjes.

Een andere methode is het waarnemen van de watersnelheid aan het wateroppervlak door de verplaatsing van deeltjes e.d. in een zeker tijdsinterval met één of meerdere digitale cameras te registreren. De relatie tussen watersnelheid aan het oppervlak en de eigenschappen van luchtbellenschermen is goed bekend (Bulson, 1961). De geschikte technieken heten PIV Particle Image Velocimetry (PIV) en Particle Tracking Velocimetry (PTV). In grootschalige experimenten in het laboratorium is deze methode succesvol toegepast. Tijdens het afronden van dit rapport (okt. 2010) zijn door Deltares in de Stevinsluis de eerste PIV waarnemingen met voldoende succes afgerond zodat hierover later nog aanvullende informatie verwacht kan worden. We verwachten de verdeling van de watersnelheid aan het oppervlak door de momenteel aanwezige luchtbellenschermen kwantitatief te kunnen vastleggen en aanvullend te rapporteren.

5.1.5 Scheepvaart

Uit diverse interviews met schippers en eigen waarnemingen blijken de luchtbellenschermen of waterschermen of hun combinatie geen hinder te geven voor de beroepsscheepvaart. Mits gewaarschuwd kunnen schippers goed rekening houden met de korte periode dat hun schroef niet “pakt” in de luchtbellens en het verticale circulatiepatroon het roer van achteren kan aanstromen als het schip onvoldoende vaarsnelheid heeft of juist aan het afremmen is. Daarom lijkt het laatste schip dat de kolk mag binnen komen een grotere afstand tot het luchtbellenscherm te moeten krijgen voor een voldoende en veilige remweg na het kortdurende krachteloze interval van passage door het luchtbellenscherm. Eenmaal afgemeerd in de kolk zijn de troskrachten geringer doordat de kenmerkende retourstroming tijdens de uitwisseling van zoet-zout door luchtbellens/waterschermen wordt onderdrukt, deze conclusie is gerapporteerd in (Vrijburcht, 1989).

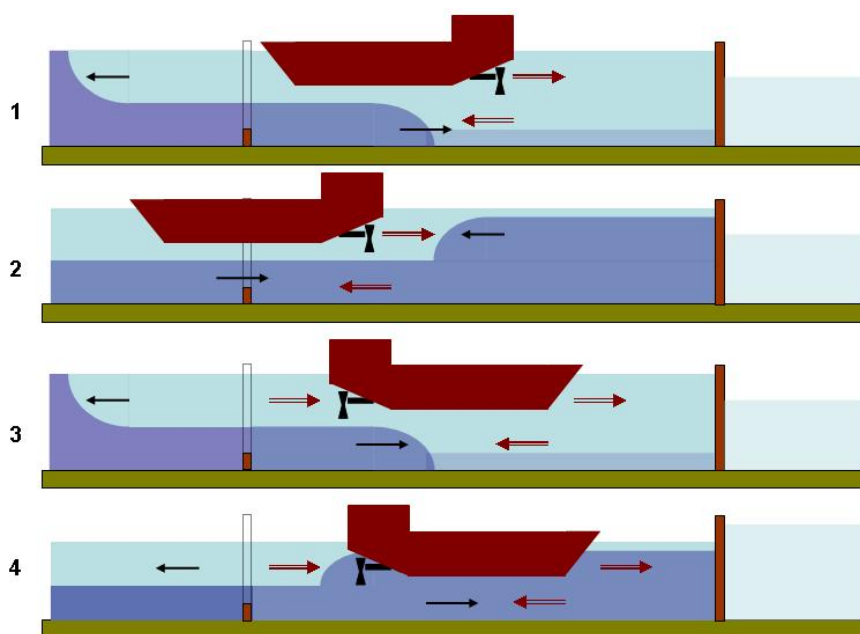
De invloed van scheepvaart op de uitwisseling van zout-zoet in een onbeschermd kolk is niet eenduidig uit onze waarnemingen af te leiden en zeker niet bij werkende luchtbellens/waterschermen. Wij corrigeerden de zoutmassa in de kolk niet voor de waterverplaatsing van schepen. Anderzijds analyseerden we de verandering in de zoutmassa in de kolk vanaf het moment dat de sluisdeuren openen tot en met hun sluiting. Alleen wanneer de kolk bij het openen en sluiten schepen bevat met een verschillende som van hun waterverplaatsing zal er sprake zijn van een fout in de verandering van de zoutmassa in de kolk. Wij namen aan dat bij voldoende schuttingen deze variatie in waterverplaatsing wel ruis maar geen systematische fout introduceert.

Bij tweerichting verkeer, d.w.z. schepen verlaten de kolk en andere schepen varen tijdens dezelfde schutting de kolk in, blijkt het netto effect nauwelijks merkbaar; zelfs hun waterverplaatsing opgevat als uitwisselingsstroming lijkt het werkelijke zouttransport door scheepvaart te overschatten. Wel constateren we dat een diepstekend schip welke aan meerzijde de kolk verlaat veel zoet water de kolk inzuigt en daarmee een wezenlijke bijdrage levert aan de zoutlek i.t.t. tweerichting scheepvaart in een schutting naar meerzijde. Daarom bevelen we tweerichting scheepvaart aan, wat overigens de capaciteit van de schutsluis bevordert.

Wel bevelen we aan studie naar voornoemde aanname (ruis, zonder systematische fout) en meer inzicht in de rol van scheepvaart op het zouttransport door geopende deuren en de invloed van de verhouding tussen scheepsvolume en kolkvolume. De beschikbare informatie uit dit project inclusief de door ons ontvangen registratie van gepasseerde schepen en met 3 webcams is daarvoor wel geschikt. Betrouwbare numerieke simulaties lijken nog een stap te ver, zie (Groeneboom, 2010).

Met deze simulaties beoogden we ook inzicht te krijgen in de invloed van de schroefstraal op de zoutlek. We presenteren hier onze huidige inzichten met nog speculatieve stroombeelden.

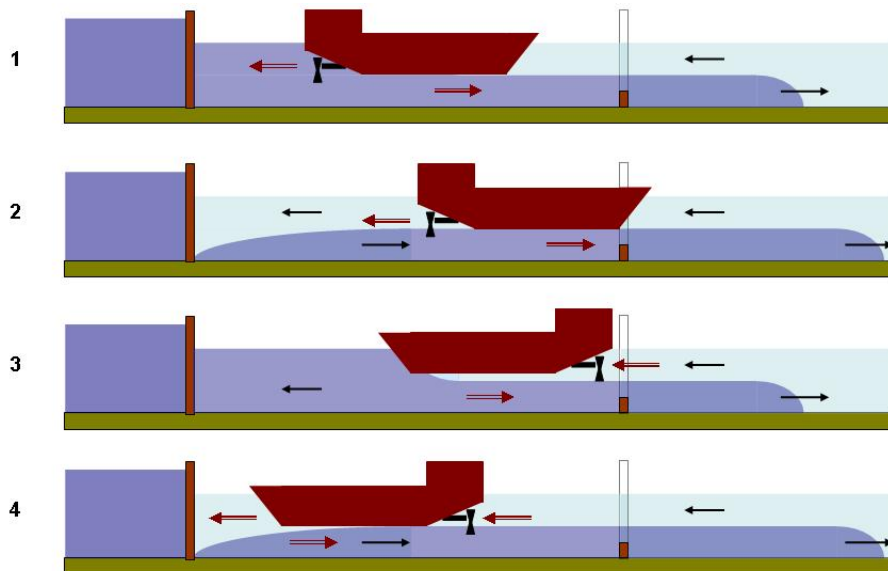
In Appendix E schatten we dat een schroefstraal tenminste de waterverplaatsing maar mogelijk tot tweemaal de waterverplaatsing van een schip aan water transporteert. Vervolgens luidt de vraag op welke wijze dit schroefwater in of buiten de kolk circuleert? Grafieken 1 en 2 in Figuur 5.6 tonen voor een uitvarend en dus versnellend schip dat het schroefwater naar de gesloten deur wordt gestuwd. Aanvankelijk verplaatst de schroef meer water dan het nog traag varende schip verdringt. Hierdoor ontstaat een verhoogde waterstand achter het schip en deze waterstand kan de inkomende zouttong hinderen. Anderzijds kan de schroef van een diepstekend schip juist zouter water uit de onderlaag aantrekken. Onze analyses wijzen op het laatste omdat tijdens een naar zee uitvarend schip de zoutmassa in de kolk sneller stijgt dan zonder schip, zie Figuur 3.20.



Figuur 5.6 De dubbele bruingekleurde pijlen geven mogelijke circulatiepatronen door de schroefstraal van een uitvarend (1 en 2) of invarend (3 en 4) schip vanaf de zoute zijde.

Grafieken 3 en 4 in Figuur 5.6 toont een schip dat vanuit zeezijde de kolk invaart en in de kolk stopt. Door achteruit-slaan stuwt ook nu de schroef water naar de gesloten deur. Doordat het schip de kolk invaart verdringt het aanvankelijk meer water dan de afremmende schroef verplaatst. Naar gelang de tijdstippen van afremmen en zoutindringing en diepte zijn er diverse argumenten die de zoutindringing versterken of juist vertragen. Onze analyses tonen dat een invarend schip niet opvallend het verloop van de zoutmassa in de kolk wijzigt.

Figuur 5.7 geeft de mogelijke stroombeelden van schroefwater van een schip dat de kolk naar de zoete zijde uitvaart waarbij de schroefstraal het schip versnelt. Aanvankelijk verplaatst de schroef meer water dan het nog traag varende schip verdringt. Naar gelang de diepte van de schroef en de dikte van de uittredende zouttong zou de schroef zoeter water de kolk in kunnen zuigen. Onze analyses tonen dat een naar meer uitvarend schip de zoutmassa in de kolk sneller laat dalen dan zonder schip.



Figuur 5.7 De dubbele bruinekleurde pijlen geven mogelijke circulatiepatronen door de schroefstraal van een uitvarend (1 en 2) of invarend (3 en 4) schip vanaf de zoete zijde.

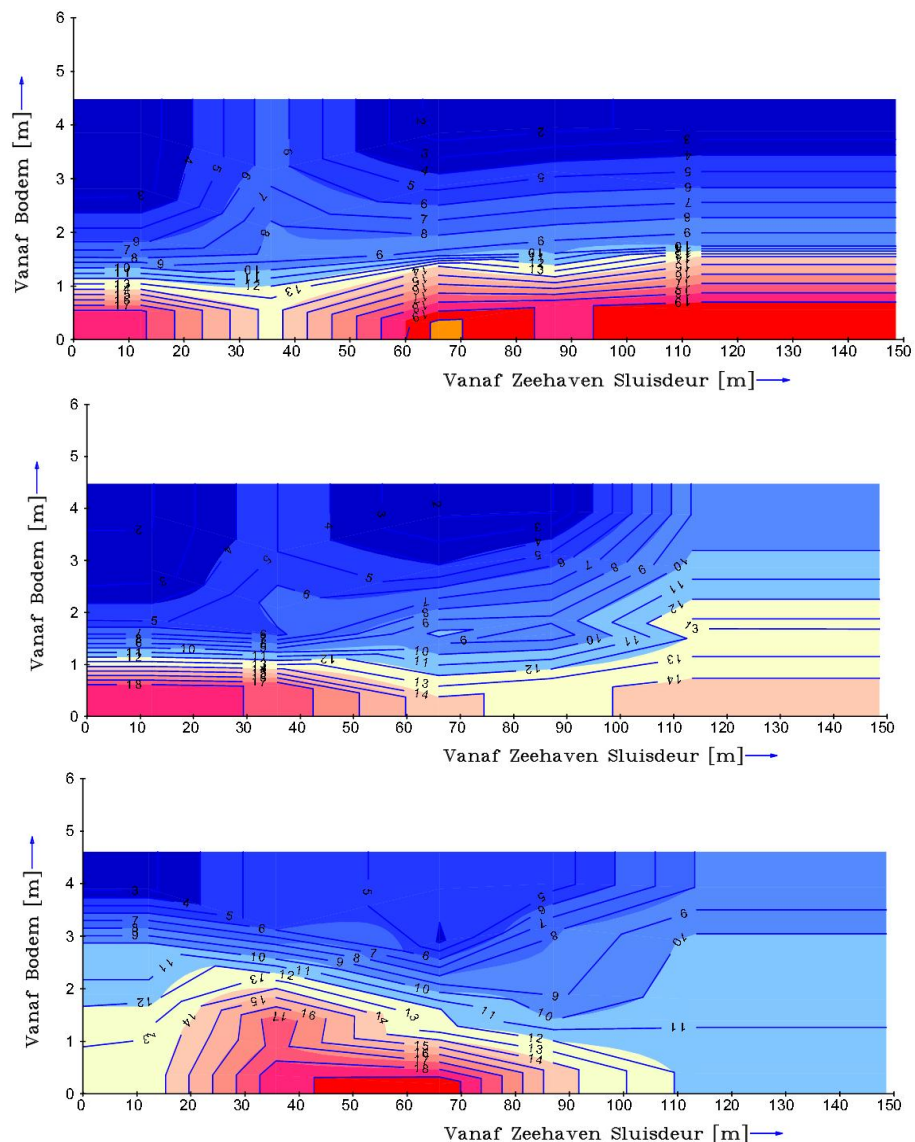
Grafieken 3 en 4 in Figuur 5.7 tonen het mogelijke stroombeeld van schroefwater van een afremmende schip dat de kolk invaart. Onze analyses geven geen opvallende wijziging van de afname van de zoutmassa in de kolk.

Voorgaande overwegingen en inschattingen wensen we met numerieke simulaties te onderbouwen, zoals getracht in (Groeneboom, 2010); schaalproeven met schepen en correcte schroefwerking gecombineerd met tijdsafhankelijke zout-zoet uitwisseling zijn kostbaar en complex ook in de kwantitatieve registratie maar kwalitatief te prefereren boven numerieke simulaties.

5.1.6 Extra, hoge drempel aan meerzijde in de kolk

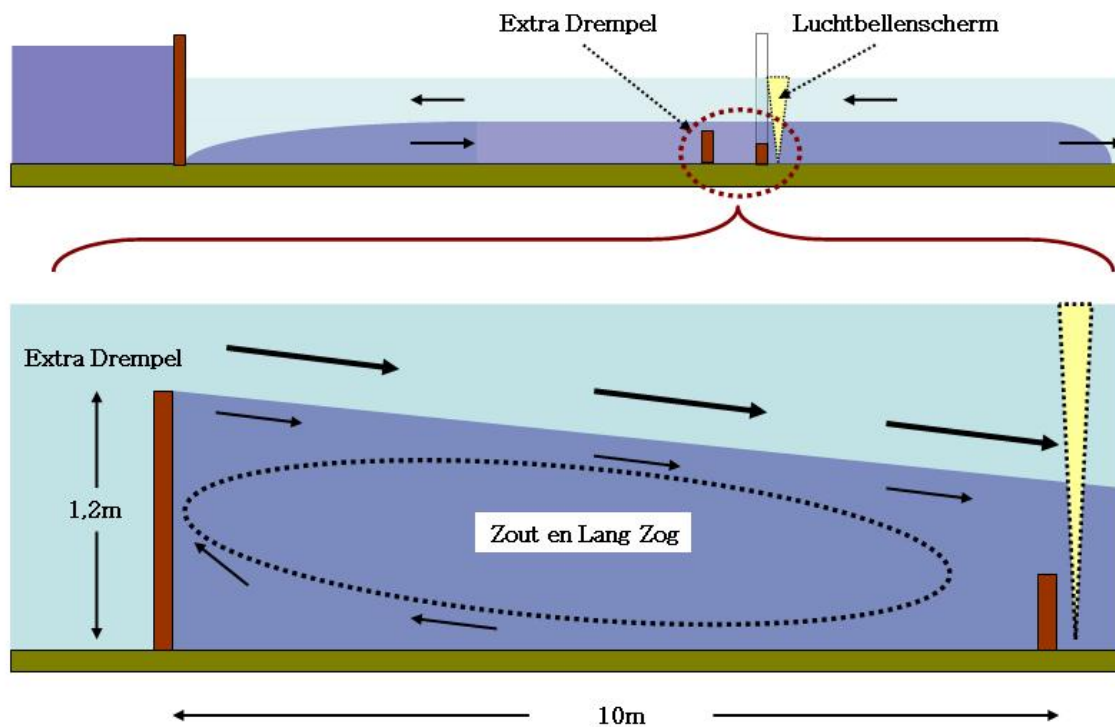
We plaatsten de 1,18m hoge drempel in de kolk op ca. 10m afstand van de sluisdeuren aan meerzijde. Deze drempel sloot bij de kolkwanden niet waterdicht af. Een overweging voor het onderzoeken van een extra, hoge drempel aan de meerzijde in de kolk was zijn remmende invloed op de naar meerzijde uittrekkende én op de van zeezijde inkomende zouttong. Een gedachte was dat deze drempel “op afstand” nl. aan zeezijde merkbaar is mits de drempel een permanente zoutlaag gelijk aan de drempelhoogte in de kolk in stand houdt.

Figuur 5.8 toont dat deze drempel geen permanente zoutlaag in stand houdt, de interne oscillaties tijdens en na het sluiten van de kolk domineren de zoutverdeling. Deze oscillaties kunnen het zoute water, gelegen onder drempelhoogte, over de drempel stuwten.



Figuur 5.8 Zoutverdeling in kolk met extra, 1,18m hoge drempel aan meerzijde in de kolk. Isolijnen van zoutgehalte in ppt, rood is 20 ppt, donker blauw 0 ppt. Op 25 mei 2010 sloten de sluisdeuren naar meerzijde om 6:11; tijdstip bovenste figuur 6:10, centrale figuur 6:12 en tijdstip onderste figuur 6:16. Er blijft geen permanente zoutlaag voor de drempel.

In plaats van deze niet bewezen statische werking van de drempel heeft de drempel wél een meetbare invloed op de werking van de S-luchtbellenschermen aan meerzijde van de kolk en ca. 10m van de drempel verwijderd, zie b.v. Figuur 4.21. Een ongelagde stroming zal boven de drempel loslaten met een zog ter lengte van 4,5 tot 5 maal de drempelhoogte. Dit zog bereikt het 10m verder gelegen S-luchtbellenscherm niet zodat de drempel weinig invloed op dit scherm zou hebben. Echter, we vermoeden dat gelaagdheid dit zog aanmerkelijk zal verlengen waardoor het S-luchtbellenscherm wél in de luwte van de drempel komt te liggen. In deze luwte wordt de teen van het S-luchtbellenscherm minder sterk met zouter water aangestroomd wat zijn zoutlekbeperkende werking verbetert. We onderbouwen dit vermoeden als volgt.



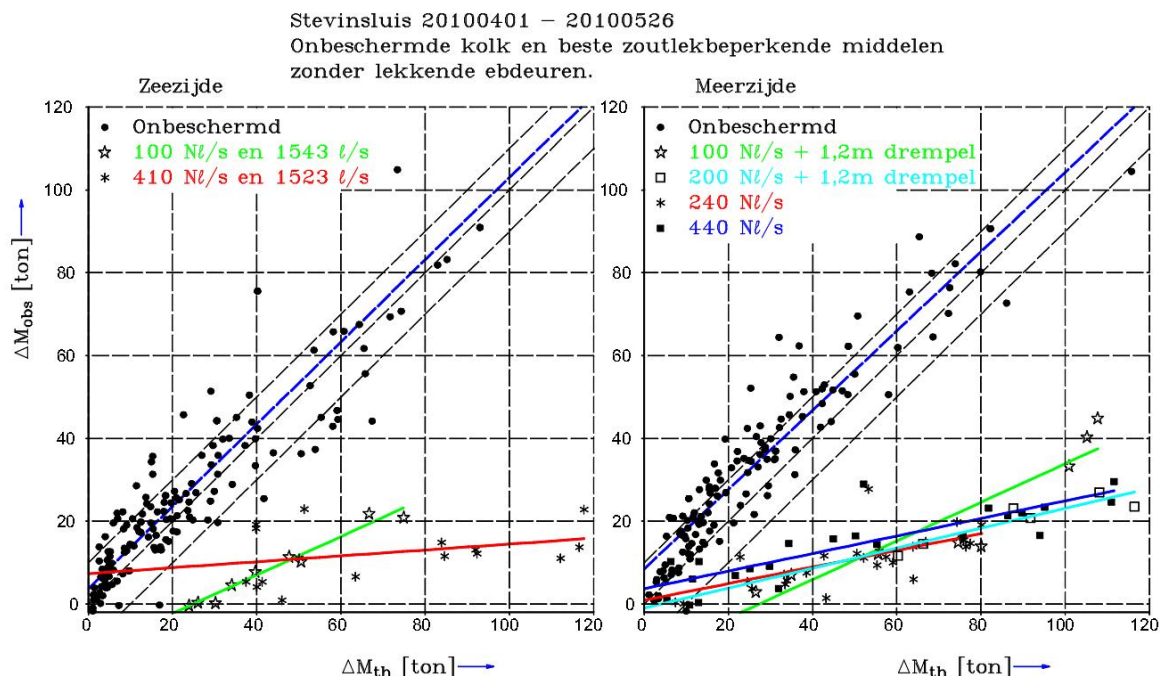
Figuur 5.9 Onderste figuur detail van zog achter extra 1,2m hoge drempel gevuld met zouter water dan daarboven tijdens uittreden van de zouttong (bovenste figuur). De teen van het luchtbellenscherm wordt nu beter beschermd tegen sterke aanstroming dan met de 30cm hoge drempel (rechts in figuren).

Zodra de zoute onderlaag, zichtbaar in de bovenste grafiek van Figuur 5.8, over de drempel stroomt zal deze zouttong de ruimte tussen drempel en de S-luchtbellenscherm met zout water vullen en daarna naar de voorhaven stromen. Terwijl de zouttong de kolk uittreedt volgt brakker, minder zout kolkwater dat ook over de drempel stroomt. Figuur 5.8 toont het afnemend zoutgehalte boven de kolkvoer terwijl de zouttong uittreedt. Inmiddels bevindt zich achter de drempel en onder drempelhoogte het eerder uitgestroomde zoutere kolkwater. Achter de drempel en op drempelhoogte verwachten we na loslating van de stroming nu een menglaag over een bijna stagnante zoute laag achter de drempel, zie Figuur 5.9. Door de geringe verticale menging en geringe verticale uitwisseling van horizontale impuls in een gelaagde menglaag zal het zoggebied achter de drempel veel langer zijn dan in niet-gelaagde stroming. In dit verlengde zoggebied kan de teen van het S-luchtbellenscherm wél in de luwte van de drempel liggen en minder sterk zijdelings worden aangestroomd met zout water en daardoor minder zout doorlaten.

5.1.7 Keuze uit de beste zoutlekbeperkende middelen, zonder methode lekkende ebdeuren.

We bereiden de conclusies in onderdeel 5.2 voor door hier de beste zoutlekbeperkende middelen te benoemen. Tevens zoeken we hier naar criteria waarop de beste zoutlekbeperkende middelen zich onderscheiden van de overigen en onder welke voorwaarden deze beste middelen inzetbaar zijn.

In termen van minimale doorlaatfractie toont Figuur 5.9 de beste van de zoutlekbeperkende middelen uit Figuren 4.20 en 4.21 maar nu inclusief de bijbehorende waarnemingen.



Figuur 5.10 Selectie van beste zoutlekbeperkende middelen, exclusief de methode van lekkende ebdeuren. Verticaal de waargenomen verandering van de zoutmassa in de kolk tegen horizontaal de ongeremde verandering.

Aan zeezijde en tot ca. 55 ton ongeremde verandering (ΔM_{th}) van de zoutmassa in de kolk geeft het waterscherm van 1600 l/s gecombineerd met het Δ -luchtbellenscherm van 100 Nl/s de laagste doorlaatfractie. Boven de ca. 55 ton geeft de combinatie van hetzelfde waterscherm met het Δ -luchtbellenscherm met 410 Nl/s luchtdebiet de laagste doorlaatfractie.

Aan meerzijde en tot ca. 55 ton ongeremde verandering van de zoutmassa in de kolk is de beste combinatie de extra 1,2m hoge drempel en het Δ -luchtbellenscherm ingesteld op 100 Nl/s. Aan meerzijde is er boven ca. 55 ton ongeremde verandering van de zoutmassa in de kolk een competitie in laagste doorlaatfractie tussen:

- 1,2m hoge drempel gecombineerd met het Δ -luchtbellenscherm van 200 Nl/s;
- het Δ -luchtbellenscherm met ca. 240 Nl/s en
- het Δ -luchtbellenscherm met ca. 440 Nl/s luchtdebiet.

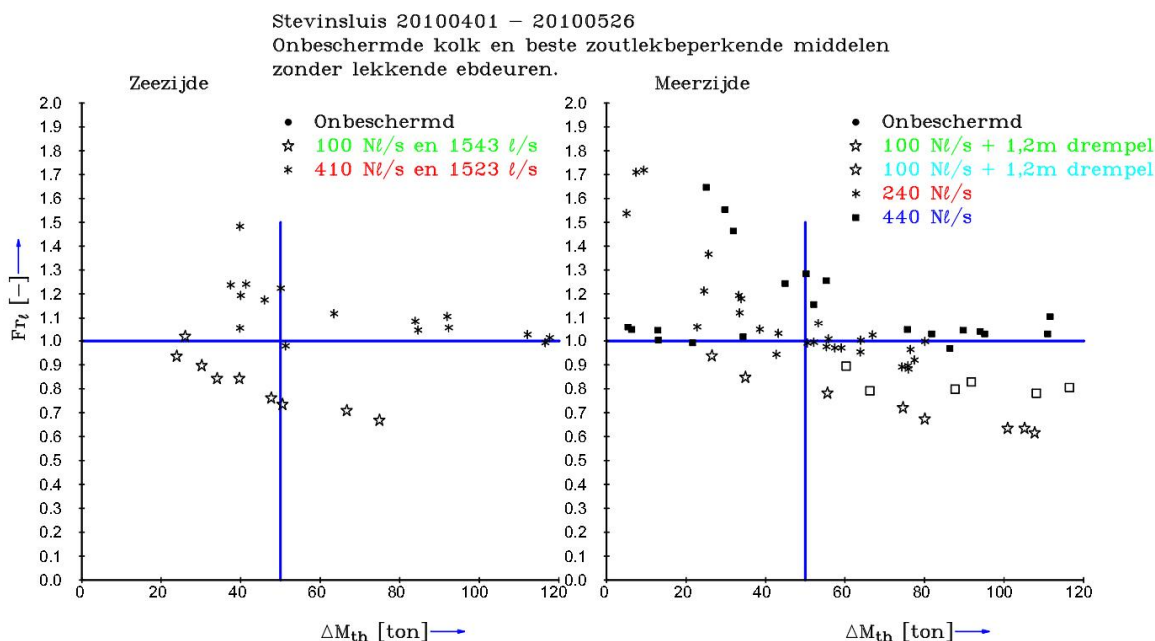
Als *second best* noemen we het S-bellenscherm met ca. 250 Nl/s luchtdebiet gelegen 10m achter (richting meer) de extra 1,2m hoge drempel .

In Figuur 5.10 vergelijken de groene lijnen de werking van een luchtbellenscherm ondersteund met een waterschermbelasting (zeezijde) of met een extra 1,2m hoge drempel (meerzijde). Idem bij grotere verandering van zoutmassa de rode lijn aan zeezijde voor een luchtbellenscherm ondersteund met waterschermbelasting tegen de licht-blaauwe lijn voor een luchtbellenscherm met 1,2m extra hoge drempel aan meerzijde.

Deze conclusies leiden tot de volgende vragen die we hier zullen beantwoorden:

- 1 Wat is de hydrodynamische grondslag van de scheidslijn bij ca. 55 ton ongeremde verandering van de zoutmassa in de kolk?
- 2 Waarom bieden vooral de combinaties waterschermbelasting-luchtbellenscherm of drempel-luchtbellenscherm de geringste doorlaatfractie?
- 3 Zijn de beste combinaties aan beide kolkeinden even goed toepasbaar?

Figuur 5.11 helpt bij de beantwoording van de eerste vraag. Dit figuur toont de Froude-lucht getallen Fr_t volgens vgl. (B.4) in Appendix B van de beste zoutlekbeperkende middelen voor de intervallen in ongeremde verandering in zoutmassa onder of boven 55 ton waarin deze middelen het best presteren. Hieruit volgt een optimaal bereik voor het Froude-luchtgetal van ruwweg 0,8 tot 1,2. Aan de hand van onderdeel 5.1.2 en Figuur 5.3 duidt de bovengrens van ca. 1,2 van het Froude-lucht getal op de werking van een luchtbellenschermen meer als zout-zoet mengers dan als zout-zoet scheider.

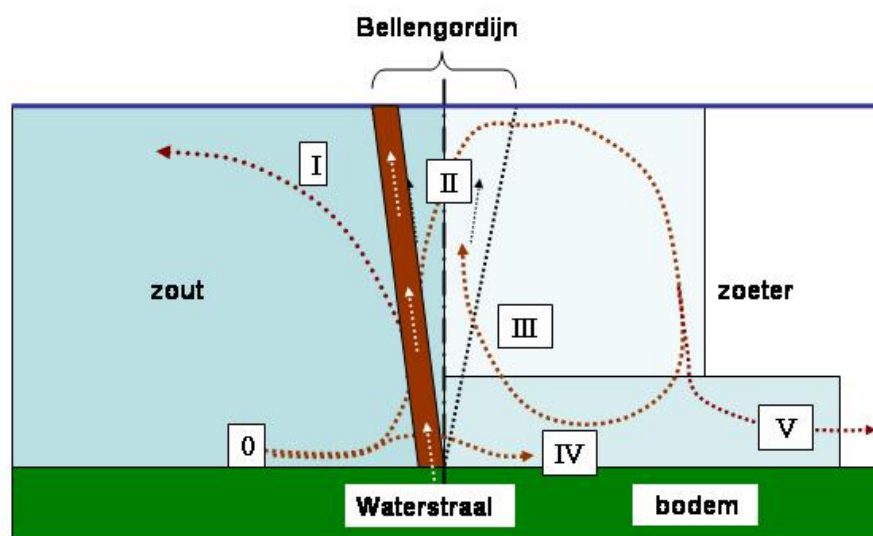


Figuur 5.11 Froude-lucht getal Fr_t (verticaal) als functie van de ongeremde verandering van zoutmassa (ΔM_{th}) van de beste zoutlekbeperkende middelen in Figuur 5.9. Het optimale interval van Fr_t ligt tussen ca. 0,8 en 1,2.

Voor het leesgemak herhalen we hieronder Figuur 2.15. Voor Froude-lucht getallen kleiner dan ca. 0,8 lijkt het luchtbellenscherm te zwak om optimaal als zout-zoet scheiding te functioneren. Het luchtbellenscherm voert veel minder zout water naar het wateroppervlak dan de zout-zoet uitwisseling aanbiedt (stroombaan I in Figuur 2.15). Hierdoor wordt het

merendeel van deze zout-zoet uitwisseling via menging binnen het luchtbellenschermbelasting (stroombanen II en IV in Figuur 2.15).

Op voorwaarde van een dichte en gelijkmatige luchtverdeling dient het luchtdebiet van een luchtbellenschermbelasting aangepast te worden aan het heersende verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven en wel zó dat het Froude-lucht getal tussen 0,8 en 1,2 blijft. Deze grenswaarden verlangen een luchtbellenschermbelasting waarvan het luchtdebiet ingesteld wordt op het verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven. Daarbij moet de luchtverdeling uniform gelijkmatig over de kolkbreedte blijven en voldoende compact zijn in termen van aantal luchtballen over de horizontale dikte. Dit is ons antwoord op de eerste vraag.



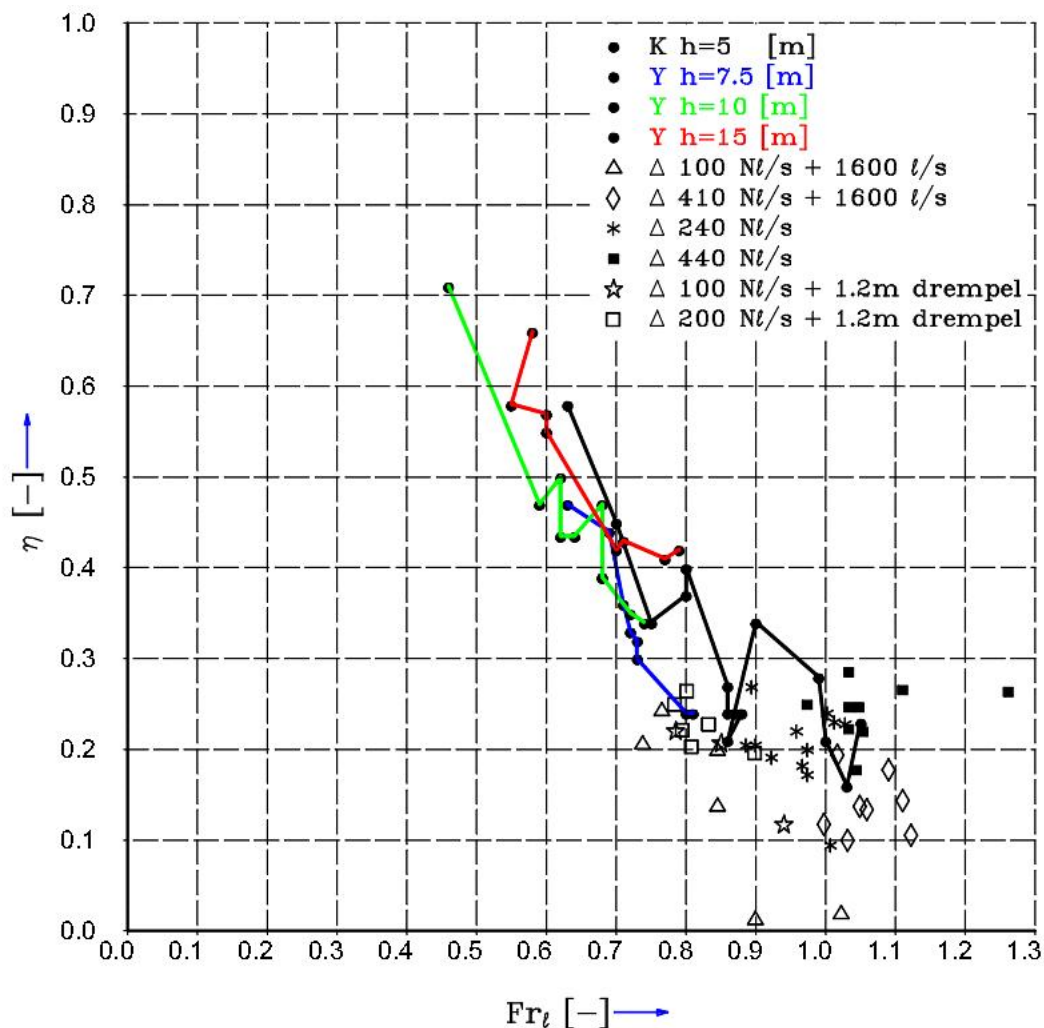
Figuur 5.12 Zoutlekbepurende werking luchtbellenschermbelasting met waterschermbelasting (bruine band) op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale langsdoorsnede van een kolk. (0) Aanstromend zout aangedreven door drukverschil door horizontale verschillen in zoutgehalten (I) Opwaarts transport van zout en loslating naar de zoute zijde. (II) Menging van zout in zoeter water in het luchtbellenschermbelasting en gedeeltelijk transport van zout naar de zoetere zijde. (III) Recirculatie van inkomend zout en aangedreven door het luchtbellenschermbelasting. (IV) Binnendringen van zout aan de teen van het luchtbellenschermbelasting. (V) De vorming van een zwakkere zouttong (zie ook Figuur 2.2) door de beperkte levering van zout.

Ons antwoord op de tweede vraag luidt als volgt. Een belangrijk mechanisme van een luchtbellenschermbelasting als zout-zoet scheiding is de verticale impuls van water dat door het scherm wordt meegesleurd. Over een horizontale zout-zoet scheiding heerst een horizontaal drukverschil. Bij gelijke waterstand wordt het horizontale drukverschil veroorzaakt door het grotere gewicht van de waterkolom aan de zoute zijde t.o.v. de zoete zijde.

Bij toenemende verticale impuls van het meegesleurde water kan een groter horizontaal drukverschil over het luchtbellenschermbelasting heersen voordat het scherm zó sterk ombuigt dat het zijn coherentie verliest en zouter water doorlaat. Hierbij vormt de teen van een luchtbellenschermbelasting de zwakste plek. Immers bij de teen begint het meesleuren van water dat pas hoger in de waterkolom een aanmerkelijke verticale impuls krijgt. Anderzijds heerst bij de teen het grootste horizontale drukverschil.

De teen van een goed werkend Δ -luchtbellenschermbelasting bestaat uit twee rijen van onderling versprongen diffusers naast elkaar omhoog blazend of nog beter tegen elkaar in blazend. Het dikke pakket luchtballen van een Δ -luchtbellenschermbelasting is dan voor zout minder doordringbaar

dan een smaller of ijler luchtbellenscherm uit een geperforeerde buis. Daarnaast weerstaan zowel een drempel als een voldoende krachtig waterscherm nog beter het horizontale drukverschil over het scherm. Ons waterscherm van 1600 l/s stroomt verticaal uit een spleet van 5cm en heeft een beginsnelheid van ca. 2,3 m/s. Vanaf zijn introductie heeft ons waterscherm dus een grote verticale impuls die weinig afbuigt onder het heersende horizontale drukverschil en een drempel kan door zijn stijfheid het horizontale drukverschil weerstaan. Dit is onze verklaring voor de betere werking van een luchtbellenscherm geplaatst achter een drempel of achter een waterscherm.



Figuur 5.13 Verticaal uitgezet de doorlaatfractie (η) tegen horizontaal Froude-lucht getal (Fr_l) voor de experimenten (Abraham & V.d. Burgh, 1962) en (Abraham, 1974) in schutsluizen te Kornwerderzand (K) en IJmuiden (Y) met kolkdiepten van 5m tot 15m; de gekleurde lijnen zijn de resultaten van deze experimenten. De overige punten hebben betrekking op de beste zoutlekbeperkende middelen volgens ons onderzoek, zie Figuur 5.11.

Tenslotte blijkt uit numeriek onderzoek (Keetels & Uittenbogaard, 2010) dat een zoetwaterscherm niet alleen de teen van een luchtbellenscherm verdedigt maar ook zoeter water via stroombaan II in Figuur 2.15 naar de kolk voert.

Figuur 5.12 toont dat zowel met een optimaal ingesteld Δ -luchtbellenscherm en zijn combinatie met drempel of waterscherm lagere doorlaatfracties worden bereikt dan met alleen geperforeerde buizen (gekleurde lijnen in Figuur 5.12). De optimaal ingestelde combinaties van waterscherm en luchtbellenscherm resulteren in doorlaatfracties lager dan ooit met geperforeerde buizen bereikt. De laagste doorlaatfracties zijn gemeten in de 5m diepe Lorentzsluizen te Kornwerderzand bij de destijds hoogst bereikte Froude-lucht getallen (zwarte lijn in Figuur 5.12).

De derde vraag luidt of drempels en (zoet)waterschermen aan beide kolkeinden toepasbaar zijn? Deze vraag kunnen we niet goed beantwoorden maar we bespreken deze als volgt.

Uit (Keetels & Uittenbogaard, 2010) en visuele waarnemingen tijdens de praktijkproef blijkt dat een deel van het zoetere water, geloosd aan de zoute zijde van een luchtbellenscherm (bruine band in Figuur 2.15), naar de kolk wordt gemengd. De kolk is aan meerzijde gesloten en zout wordt de kolk uitgestuwd. Het zoetwatertransport van een zoetwaterscherm naar de kolk én de werking van een waterscherm als fictieve drempel én de coherentie van het Δ -luchtbellenscherm geven de laagste doorlaatfractie.

Een redenering luidt dat een waterscherm aan het kolkeinde meerzijde minder effectief is dan aan het kolkeinde zeezijde. Immers het water van een waterscherm dat aan het kolkeinde meerzijde in de kolk wordt gespuid moet de kolk bijna instantaan weer verlaten omdat de kolk aan zeezijde is afgesloten. Een tegengestelde redenering luidt dat aan meerzijde het water uit het waterscherm eenmaal bij het wateroppervlak aangekomen deelneemt aan de indringing van de zoetwatertong en stimuleert dat zouter water bij de bodem de kolk verlaat. Voor de onderbouwing van deze argumenten voor of tegen de verzoetende werking van een waterscherm aan kolkeinde meerzijde ontbreken experimenten en numeriek onderzoek. Wanneer een voldoende hoge drempel niet toelaatbaar is, verwachten we dat de vervanging van een drempel door een goed ingesteld waterscherm voor dezelfde doorlaatfractie kan zorgen.

Zonder experimenten met waterschermen aan meerzijde van het kolkeinde maar met voornoemde inzichten menen we dat een optimaal ingestelde combinatie van waterscherm en luchtbellenscherm aan het kolkeinde zeezijde de laagste doorlaatfractie levert. Aan kolkeinde meerzijde blijkt een voldoende hoge drempel in combinatie met een optimaal ingesteld luchtbellenscherm de laagste doorlaatfractie te leveren; de drempel kan door een voldoende krachtige waterscherm in combinatie met luchtbellenscherm worden vervangen. Gezien de hydrodynamische werking van een drempel als bescherming van een luchtbellenschermen verwachten we dat een drempel aan zeezijde deze dezelfde bescherming biedt.

De plaatsing van een luchtbellenscherm óp een drempel lijkt niet gunstig omdat de teen van dit scherm door de verhoogde snelheid boven de drempel zwaarder belast zal worden, zie ook Figuur 5.9.

Dit is ons onvolledig antwoord op de derde vraag waarvoor gerichte experimenten en numeriek onderzoek meer duidelijkheid moeten bieden.

5.1.8 Zoetwaterverlies of gebruik van verzilt water?

In deze praktijkproef werd ons waterscherm gevoed met water uit de meerzijde-voorhaven; dit debiet kan opgevat worden als verlies van zoetwater. Eenzelfde verlies ontstaat bij de methode van lekkende ebdeuren. Voor toepassing in de Volkeraksluizen geldt de gestelde bovengrens van 25 m³/s verlies aan zoet water.

De vraag luidt of bij het toepassen van zoetwaterschermen er werkelijk sprake is van verlies van zoetwater óf doelmatig gebruik van verzilt water dat tevens verdere menging tegen gaat? We bespreken deze vraag zonder rekening te houden met schutverliezen door nivelleren.

Tijdens elke schutting naar meerzijde wordt zoet water uit de voorhaven vervangen door brakker water uit de kolk. Enerzijds is er zonder nivelleren deze zout-zoet uitwisseling geen netto transport van water naar de schutsluis. Anderzijds wordt aan meerzijde zoet water met zout gemengd en dit verzilte water vormt wél een verlies van de voorraad zoet water in het IJsselmeer (of Hollandsch Diep bij de Volkeraksluizen). Door transport van het verzilte water uit de meerzijde-voorhaven naar het IJsselmeer (met windgedreven menging in het IJsselmeer) breidt het verlies van bruikbaar zoetwater zich uit tot een denkbeeldig volume waarbuiten het chloridegehalte onder een toegestane bovengrens blijft. Dergelijk transport en menging naar het IJsselmeer kan grotendeels worden voorkomen door voortijdig het verzilte water uit de meerzijde-voorhaven te onttrekken. Het voordeel luidt als volgt.

Met een doorlaatfractie van 0,2 wordt door de Stevinsluis gedurende de schuttingen naar meerzijde ca. 2 m³/s zoet water vervangen door brak kolkwater. Wanneer het uitgewisselde kolkwater 3 ppt chloride bevat zal het pas na 20-voudige verdunning onder de grenswaarde van 150 mg/l chloride komen. In deze context en gegeven dit rekenvoorbeeld neemt gedurende elke schutting naar meerzijde de voorraad bruikbaar zoetwater in het IJsselmeer met 40 m³ per seconde af.

We kunnen de productie van 40 m³/s aan onbruikbaar zoetwater met meer dan 150 mg/l chloride voorkomen door het oorspronkelijke 2 m³/s brakke kolkwater zo direct mogelijk te gebruiken als voeding van waterschermen en/of voor de methode van lekkende ebdeuren. In de meerzijde-voorhaven kan het verzilte water tijdelijk in een zoutvang worden opgevangen. Het verzilte water uit de zoutvang voedt de waterschermen en/of de methode van lekkende ebdeuren. Gedurende een schutting naar zeezijde vraagt ons waterscherm 1,6 m³/s welke qua orde-grootte gelijk is aan de productie van verzilt water tijdens de schutting naar meerzijde.

Met gemiddeld 10 schuttingen per dag naar zeezijde, waarbij per schutting gedurende 15 minuten (bij gemiddelde deuropentijd van 13 minuten) ons waterscherm 1,6 m³/s vraagt, wordt per dag ca. 14.400 m³ water uit de meerzijde-voorhaven gepompt.

Ongeacht de frequentie van schutten of deuropentijd stroomt tijdens lage buitenwaterstand bij onze methode van lekkende ebdeuren 1-2 m³/s water vanuit de meerzijde-voorhaven door de kolk naar zeezijde. Dit debiet vergt derhalve 43.200 tot 84.400 m³ per dag, hierbij aannemende dat 50% van de tijd er een lage buitenwaterstand heerst. Met dit rekenvoorbeeld concluderen we dat ons waterscherm aanmerkelijk zuiniger in watergebruik is dan onze methode van lekkende ebdeuren. Het waterscherm vergt wél pompenergie terwijl bij lekkende ebdeuren de stroming onder vrij verval plaats vindt.

De meerzijde-voorhaven is dieper dan het zoetwatersysteem en werkt als tijdelijke zoutvang, zie Figuur 3.6. Voldoende lage afzuigsnelheden (ca. 10 cm/s) voorkomen het meezuigen van zoet water uit de toplaag in de meerzijde-voorhaven (selectieve onttrekking genoemd).

5.2 Conclusies

De voorstudie (Uittenbogaard, 2010) naar het beperken van de zoutlek door de Volkeraksluizen bij tot 20ppt verzilt Volkerak-Zoommeer ging uit van een ondergrens van 25% in doorlaatfracties van luchtbel- en/of waterschermen. Met andere woorden verondersteld werd dat door geopende sluisdeuren nog minimaal 25% van de ongeremde zout-zoet uitwisseling optreedt. Verder gaf de voorstudie aan dat pas met aanvullende zoutlekbeperkende middelen het gestelde doel van maximaal 60 kg/s zoutlek bereikt kan worden. De overwogen aanvullende zoutlekbeperkende middelen waren vnl. een zoetwaterdebiet door de kolk (zg. methode lekkende ebdeuren) en drempels. Aan het zoetwaterdebiet geldt een bovengrens van daggemiddeld 25 m³/s en aan de drempelhoogte de doorvaart van diepstekende schepen.

De voorliggende studie van de praktijkproef in de Stevinsluis onderzocht voornoemde zoutlekbeperkende middelen en daarover concluderen we als volgt.

Figuur 4.20 en Figuur 4.21 tonen dat veel van de onderzochte zoutlekbeperkende middelen meer dan 25 % van het oorspronkelijke zouttransport door laten. Voor de Stevinsluis geven de volgende combinaties de laagste zoutlek:

- Aan de zeezijde: een 1600 l/s waterscherm gevoed met zoet water in combinatie met het innovatieve Deltares-luchtbellenscherm met 100 l/s én bij grotere verschillen in zoutgehalte over het scherm met 400 l/s luchtdebiet;
- Aan meerzijde: geplaatst achter, d.w.z. aan meerzijde van een 1,2m extra, hoge drempel het innovatieve Deltares-luchtbellenscherm met 100 l/s én bij grotere verschillen in zoutgehalte over het scherm met 200 l/s luchtdebiet óf zonder drempel met 440 l/s luchtdebiet;
- Toepassen van lekkende ebdeuren waarbij een debiet van zoet water van meerzijde door de kolk naar de lager gelegen zeezijde stroomt.

Voor de situatie van de Stevinsluis blijkt de invloed van scheepvaart op de doorlaatfractie gering te zijn.

Onze waarnemingen duiden op een optimaal luchtdebiet waarboven het luchtbellenscherm meer als menger dan als (horizontale) scheiding van zout-zoet gaat werken. Het vermoede optimum ligt bij een lucht-Froude getal van ca. 1,0. Dit betekent dat het optimale luchtdebiet evenredig met het verschil in zoutgehalten tussen kolk en voorhaven tot de macht 1,5 moet worden aangepast.

Er lijkt sprake te zijn van een nog onbekende optimalisatiereguleer voor de mengverhouding tussen lucht- en waterdebieten welke de laagste doorlaatfractie biedt bij gegeven verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven. We vonden dat tot ca. 50 ton van de ongeremde zout-zoet uitwisseling de combinatie van 100 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet het minste zout lekt, daarboven presteert de combinatie van 400 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet beter. De combinatie van 1600 l/s waterdebiet met 200 Nl/s luchtdebiet blijkt minder zoutlekbeperkend dan met 100 en 400 Nl/s luchtdebiet.

Tot 50 ton ongehinderd zout-zoet uitwisseling geven de volgende twee combinaties de beste zoutlekbeperkende werking: het Δ-luchtbellenschermen achter een 1,2m hoge drempel met

100 Nl/s luchtdebiet uit horizontaal naar elkaar blazende diffusers én de combinatie van 100 Nl/s luchtdebiet en 1600 l/s waterdebiet.

Een conclusie uit de numerieke studie (Keetels & Uittenbogaard, 2010, figuur 7.11) luidt dat de minimale doorlaatfractie wordt bereikt met de combinatie van luchtbellenscherm en waterscherm en $15 \pm 5\%$ als ondergrens heeft. Het linkerdeel van Figuur 4.3 toont inderdaad deze ondergrens én zijn marges.

Hieruit volgt dat eventuele verdere beperking in zouttransport door geopende sluisdeuren in andere technieken moet worden gevonden dan via het verticaal meenemen van water door lucht of opdrijvend water of verticale waterstralen. We noemen drempels, zoetwater/ebdebiet door de kolk, een zoutvang aan meerzijde e.d.

De door ons beproefde en klassieke methode van zg. lekkende ebdeuren toont dat een zoetwaterdebiet zeker effectief is om het zoutgehalte in de kolk te verlagen en zodoende de zoutlek aanmerkelijk te beperken. De combinatie van geheel én gedeeltelijk geopende rinketschuiven in de sluisdeuren veroorzaakt het gewenste zoetwaterdebiet. Dit debiet wordt aangedreven door de hogere waterstand aan de zoete zijde van de kolk en leidt tot een blijvend verval over te openen sluisdeuren. Er geldt een bovengrens aan het peilverschil over sluisdeuren waaronder de aandrijving de deuren schadevrij kan openen; deze bovengrens beperkt het zoetwaterdebiet door geheel en gedeeltelijke geopende rinketschuiven. Het protocol van de bediening van de rinketschuiven moet worden aangepast voor gedeeltelijke opening van de rinketschuiven met beveiligingen in relatie tot toelaatbaar verhang over te openen sluisdeuren.

Uit onze waarnemingen blijkt ook een ander goed gebruik van zoetwater nl. voor de waterschermen aan zeezijde die in combinatie met luchtbellenschermen beter zoutlekbeperkend werken dan water- of luchtbellenschermen afzonderlijk.

Niet onderzocht is een zoetwaterscherm in de kolk en aan meerzijde. Met de verkregen inzichten verwachten we dat een zoetwaterscherm in de kolk en aan meerzijde de zoutlek via een luchtbellenscherm wel beperkt. Anderzijds verwachten we dat een zoetwaterscherm aan meerzijde en in de kolk nauwelijks het zoutgehalte in de kolk verlaagt. Immers het zoetwaterdebiet dat aan meerzijde in de kolk wordt gebracht moet de kolk snel verlaten omdat de kolk aan zeezijde is gesloten.

Eén extra drempel van 1,18m hoogte in een 4,7m diepe kolk heeft op zich een beperkte zoutlekbeperkende werking (doorlaatfractie 70 %) door de verminderde aandrijving van de zouttong over een kleinere waterdiepte boven de drempel. Bij de berekening van de zout-zoet uitwisseling (zie Appendix A) over een drempel kan gerekend worden met de waterdiepte verminderd met ca. 80% van de fysieke drempelhoogte. De onderzochte drempel houdt geen permanente zoute onderlaag ter dikte van de drempelhoogte in stand.

Eén extra drempel van 1,18m hoogte verlaagt de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm wanneer dit scherm direct boven de kolkvloer weinig weerstand tegen de zoutdruk heeft zoals bij luchtballen uit geperforeerde buizen.

De luchtbellenschermen van Deltares zijn gebaseerd op twee rijen van versprongen diffusers ("douchekoppen") van ca. 20 cm diameter en deze blijken goed bestand te zijn tegen de

zoutdruk waardoor dit ontwerp alleen bij lage luchtdebieten de beschermende werking van een drempel nodig heeft.

Laboratoriumproeven en interpretaties van de praktijkproef tonen dat het beste zout-zoet afdichtende luchtbellenscherm bestaat uit twee rijen diffusers die horizontaal naar elkaar blazen.

Voor het gestelde doel bij de Volkeraksluizen bestaan combinaties van doorlaatfracties zodat met verschillende maar even effectieve zoutlekbeperkende middelen er ontwerpvarianten gemaakt kunnen worden, zodanig dat ook aan andere eisen kan worden voldaan zoals diepgang van schepen, het verbruik van zoet water en van energieverbruik etc.. Dit is het onderwerp van de geplande studie naar de vertaling van de ervaringen uit de praktijkproef in de Stevinluis naar de Volkeraksluizen.

De beroepsscheepvaart door de Stevinluis ondervond geen hinder van de luchtbellens- en waterschermen. Geïnformeerde schippers hielden rekening met een traject door de schermen waarover roer en schroef minder goed werken. Geïnformeerde recreatievaart nam voldoende vaarsnelheid bij passage van de schermen. De verticale en horizontale circulatie in de nabijheid van de schermen heeft een lengte van hooguit tweemaal de kolkdiepte waarbuiten de schepen ongestoord kunnen afmeren.

In het volgende en voorziene onderdeel van dit project dient eerst te worden vastgesteld dat de lage doorlaatfracties gevonden in de 4,7m diepe Stevinluis ook gelden voor, en toepasbaar zijn in de 7,5m diepe Volkeraksluizen rekening houdend met de eisen van scheepsdiepgang, de toekomstige ontwikkeling van scheepvaart en van maximaal 25 m³/s verbruik van zoet water uit het Hollandsch Diep.

5.3 Aanbevelingen

1. Onderzoek naar de optimale mengverhouding water- en luchtdebiet voor de beste zoutlekbeperkende werking. Onze metingen duiden dat deze mengverhouding afhankelijk is van het verschil in zoutgehalte over deze schermen.
2. Onderzoek naar de invloed op zoutlek door de positie van de water- en luchtbellenschermen ten opzichte van de sluisdeuren, rekening houdend met de verschillende zwaairichtingen van vloed- en ebdeuren.
3. Onderzoek naar de invloed van een drempel (hoogte en afstand tot) op water- en luchtbellenschermen en hun zoutlekbeperkende werking en antwoord op de vraag of hun plaatsing óp de drempel wel/niet gunstiger is dan naast de drempel en aan welke zijde.
4. Rapportage van metingen (okt. 2010) van oppervlaktesnelheden boven luchtbellenschermen.
5. Er blijft nog enige onzekerheid over het luchtdebiet dat aan de S-luchtbellenschermen wordt geleverd, we bevelen aan dit luchtdebiet met een stromingsmeter direct te registreren.
6. De Stevinluis biedt gelegenheid tot onderzoek naar de werking van de huidige of verdiepte meerzijde-voorhaven als zoutvang en het ledigen van de zoutvang naar de zeezijde-voorhaven.

7. De uitgebreide metingen van de dynamische zoutverdeling in de kolk van de Stevinsluis bieden uitstekend validatiemateriaal voor numerieke simulaties met zg. niet-hydrostatische computercodes met bewegend wateroppervlak.

8. We bevelen aan onderzoek naar de invloed van invarende en uitvarende schepen met reëel werkende schroeven op de zout-zoet uitwisseling door geopende sluisdeuren. De beschikbare registraties van zoutindringing, de registratie van beroepsscheepvaart door de sluismeesters, eigen dagboek aantekeningen én beelden van 3 webcams die we rond de kolk installeerden vormen voldoende materiaal voor deze studies.

Eenzijds is de invloed van scheepvaart op de zoutlek door de Stevinsluis marginaal gebleken, zie Figuur 3.20 en begeleidende tekst. Anderzijds, zie b.v. Figuur 5.6 en 5.7 en Appendix E, verwachten we wél aanmerkelijke storingen van de scheepvaart op de zout-zoet uitwisseling in een schutsluis. Thans kennen we de omstandigheden niet waaronder deze storingen wél de zoutlek zullen gaan beïnvloeden.

9. We bevelen aan een dynamische variant van het stationaire zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010) te maken dat geschikt is voor schutsluizen in getijden, en kan o.a. worden toegepast voor onderzoek naar het bedieningsprotocol zoals voor de methode van lekkende ebdeuren, zie Figuur 4.4a+b en voorbeelden in onderdeel 2.7 .

6 Adviezen beperken zoutlek Stevinsluis

6.1 Inleiding

Door het lekken van zoutwater via de Stevinsluis van de Waddenzee naar het IJsselmeer worden de belangen van recreatie, drinkwaterbedrijven, agrarische sector, etc. geschaad, reden om deze te minimaliseren. In dit hoofdstuk wordt besproken waardoor de zoutlek van de Stevinsluis ontstaat en hoe deze, door het nemen van maatregelen, kan worden verminderd.

De zoutlek door de Stevinsluis wordt direct (door het schutten) en indirect (door de waterverplaatsing) veroorzaakt door scheepvaart; geen scheepvaart staat gelijk aan geen zoutlek. De randvoorwaarden van een schutting bepalen hierbij de grootte van de zoutlek door de schutsluis, randvoorwaarden die in paragraaf 6.2 verder worden uitgewerkt.

De grootte van de zoutlek per schutting van Waddenzee naar IJsselmeer is afhankelijk van: het dichtheidsverschil dat over de sluis staat, het waterstandsverschil over de sluis, de tijd dat de sluisdeuren open staan voor het in en uitvaren van schepen en van de genomen zoutremmende maatregelen.

Neemt het dichtheidsverschil over de sluis toe, dan zal de zoutlek door de sluis toenemen omdat de zouttong die door sluis loopt sneller is en meer tonnen zout bevat. De zouttong die een sluis inloopt heeft hierbij een hoogte van ongeveer de halve waterdiepte; bij een hogere buitenwaterstand zal er daarmee meer zout de sluis in komen. Zoutremmende maatregelen (zoals bijvoorbeeld luchtbellenschermen) reduceren de hoeveelheid zout- en zoetwater die per tijdseenheid de sluis in of uit kan lopen; een zouttong loopt daarmee trager door een sluis en per tijdseenheid komt er daardoor minder zout de sluis in. Door de deuren per schutting zo kort mogelijk open te laten staan zal er in alle gevallen minder zout de sluis in komen en zal de zoutlek daarmee ook lager zijn.

De zoutremmende maatregelen zijn onderwerp van de uitgevoerde praktijkproeven beschreven in dit rapport. Op basis van de praktijkmetingen, onze ervaringen en waarnemingen tijdens deze metingen en de uitwerking daarvan met een gekalibreerd zoutlekmodel beschrijven we in dit hoofdstuk de volgende onderwerpen:

- Invloed operationele parameters op de zoutlek door de schutsluis. We presenteren onze schattingen voor zoutlek, energieverbruik en zoetwater verlies uitgaande van het huidige operationeel beheer van de sluis.
- Overwegingen voor minimale zoutlek zonder fysieke aanpassingen. Zonder modificaties aan de schutsluis en/of sluisbediening doen we aanbevelingen voor het bereiken van een minimale zoutlek.
- Overwegingen voor minimale zoutlek met fysieke aanpassingen. Idem echter nu met modificaties aan de schutsluis en/of sluisbediening.

In dit hoofdstuk maken we gebruik van begrippen als zoutlek, zoutlek reductie factor, zoutremmende maatregelen, zoutlekmodel, S-luchtbellenscherm etc, voor de definitie en gebruik zie voorgaande hoofdstukken en met name hoofdstuk 3.

6.2 Invloed operationele parameters op de zoutlek door de schutsluis.

In dit onderdeel bespreken we de relatie van de zoutlek met: zoutgehalte, waterstanden in de Waddenzee en deuropentijd van de sluisdeuren op basis van een gekalibreerd theoretisch model (zoutlekmodel). We schatten: het aantal schuttingen per jaar en het aantal lege schuttingen, het aantal verbruikte kWh t.b.v. de S-luchtbellenschermen, de jaargemiddelde zoutlek van IJsselmeer naar Waddenzee.

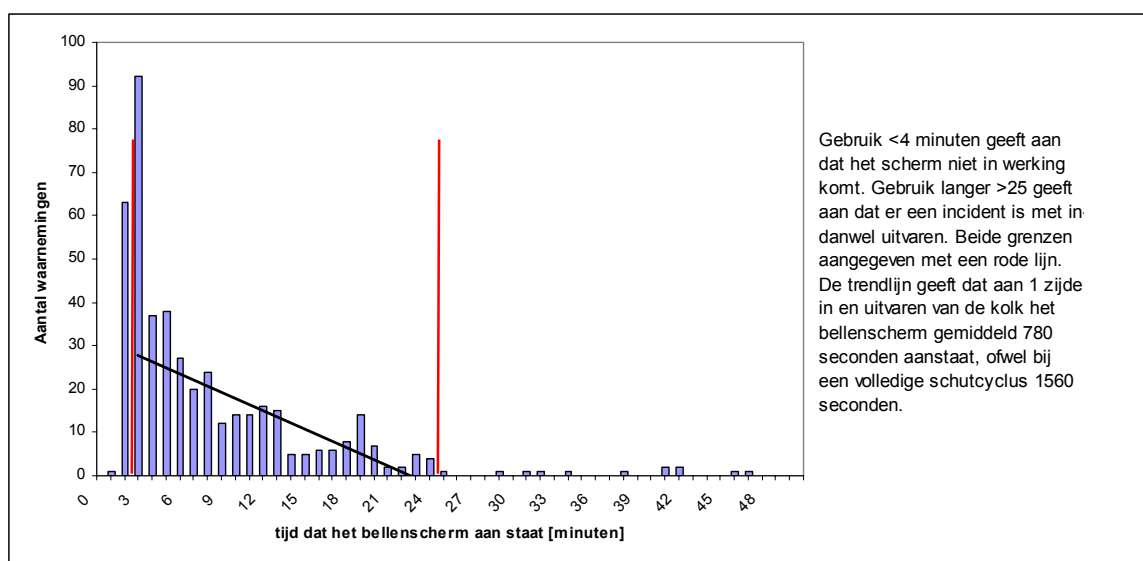
In de periode 1 maart 2010 tot 28 mei 2010 zijn er 1168 beroepsschepen geschut waarvan 888 tussen 06:00 en 18:00 uur. Hiervoor zijn 1005 schuttingen uitgevoerd waarvan 495 van Zuid naar Noord. Het aanbod van schepen over de dag van Zuid en/of Noord was hierbij dusdanig dat 459 maal met een lege schutkolk terug geschut moest worden. Pleziervaart is hierbij niet geregistreerd; het werkelijke aantal schuttingen is daarmee waarschijnlijk hoger en het aantal lege schuttingen mogelijk lager. Op jaarbasis geeft dit ca. 4000 schuttingen, waarbij ca. 1900 maal met een lege kolk is teruggeschut; gegevens over de pleziervaart zijn onbekend.

In de periode 1 juli 2010 tot 7 juli 2010 is het luchtdebiet gemeten dat door de drie Grassair compressoren wordt geleverd aan de S-luchtbellenschermen. In deze periode zijn 70-110 schutcyclus² uitgevoerd waarbij een luchtbellenscherm is aangezet; dit bereik ontstaat doordat tussen in- en uitvaren de deuren soms worden gesloten en daardoor een exacte telling niet meer mogelijk is. Tijdens 20-40 schuttingen is het luchtbellenscherm kort na de start uitgezet of is het luchtbellenscherm zeer lang aan geweest. Ongeveer 70 schutcycli zijn volledig, dat willen zeggen met in- en uitvaren van schepen en een aansluitende deuropening aan beide zijden van de sluis; zie Figuur 1.

De 70 volledige schuttingen zijn in Figuur 6.1 uitgezet tussen de rode lijnen, met op de horizontale as de tijd dat een scherm aanstaat en op de verticale as het bijbehorende aantal waarnemingen. De trendlijn geeft aan dat het in- en uitvaren van een kolk met openen en sluiten van deuren aan één zijde van de kolk gemiddeld 13 minuten duurt. Bij een volledige schutcyclus staan de luchtbellenschermen daarmee 26 minuten aan. De luchtbellenschermen geven in deze 26 minuten 390 Nm³ aan lucht en verbruiken 36 kWh. Bij een prijspeil van 0.09 €/kWh kosten de S-luchtbellenschermen 3,25 € per schutting. Op jaarbasis kost het gebruik van de S-luchtbellenschermen daarmee (minstens) 13.500 €. In deze kosten zijn niet meegenomen: de schuttingen met een deuropentijd langer dan 25 minuten, in- en uitvaart van schepen waarbij tussen door de deuren gesloten worden en schuttingen voor alleen pleziervaart. De jaarlijkse gebruikskosten van de S-luchtbellenschermen zullen daarmee meer zijn dan de 13.500 €.

(Opmerking: Nm³ is in de "luchtwereld" de gangbare schrijfwijze voor m³ bij atmosferische druk).

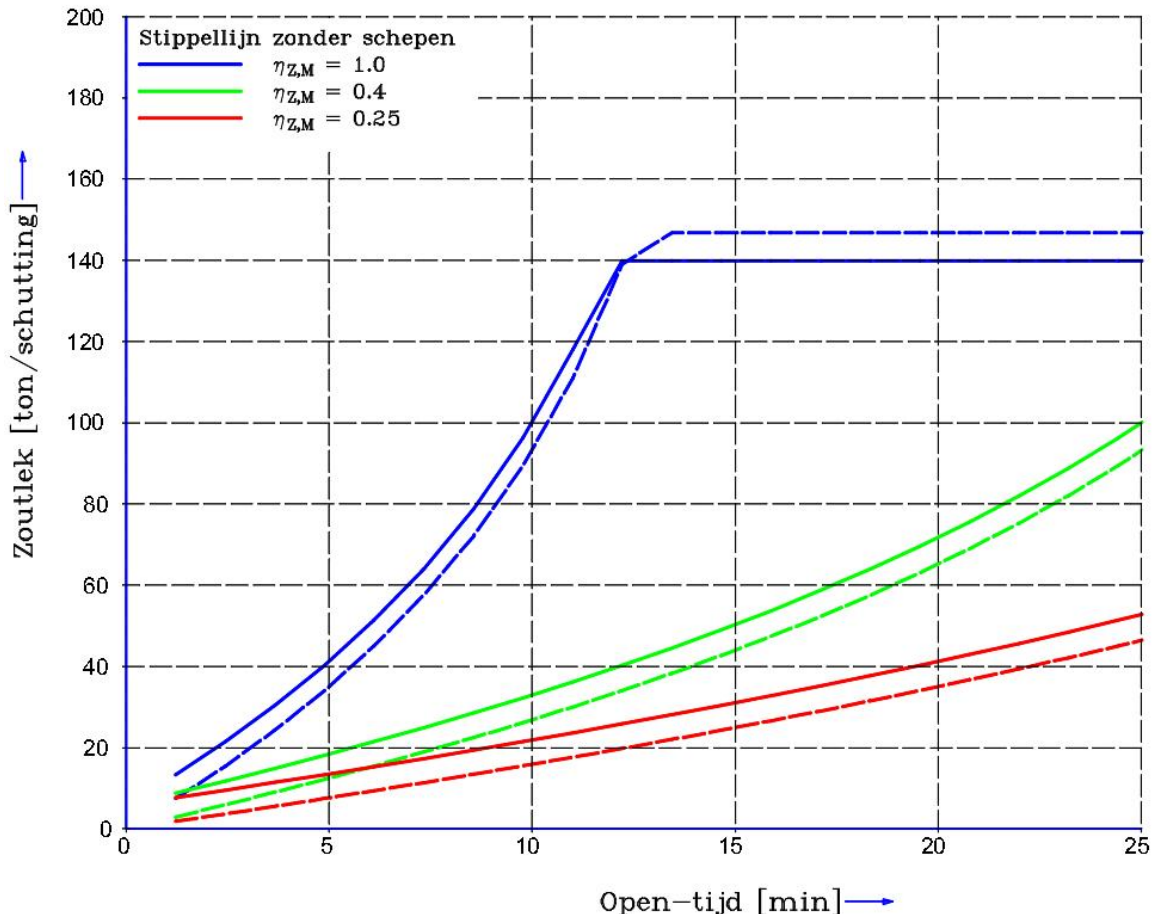
² Een schutcyclus bestaat uit het aaneengesloten schutten van schepen van Zuid naar Noord en het schutten van schepen van Noord naar Zuid. Een schutcyclus kan cyclisch uitgevoerd worden en heeft daarmee voor wat het schutproces betreft een gelijke begin- en eindsituatie.



Figuur 6.1 Histogram deuropentijden Stevin schutsluis in de periode 1 juli 2010 t/m 7 juli 2010

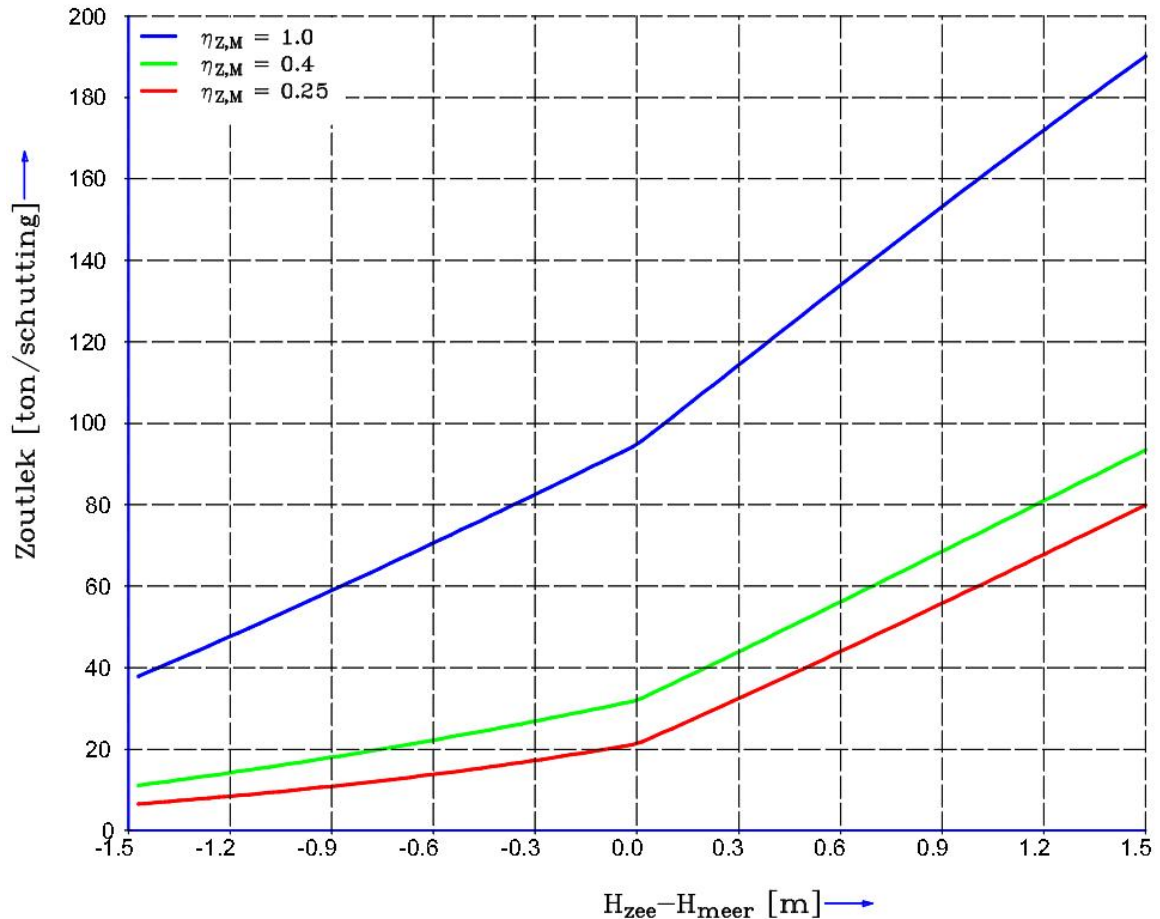
Zoutremmende maatregelen sturen de waterbeweging en/of veranderen lokaal de bulkeigenschappen van water en beïnvloeden direct of indirect, sedimenttransport, vismigratie, etc.; metingen hieraan zijn binnen dit project niet uitgevoerd. Tijdens de praktijkproeven zijn in de nabijheid van de luchtbellenschermen echter geen dode vissen gezien. In de periode april - mei zaten er in de sluis kolk grote scholen "witvisjes" in de directe nabijheid van de S-luchtbellenschermen. Tijdens de praktijkproef is wel geconstateerd dat vooral het achteruitslaan van beroepsvaart een groot aantal dode of gedesoriënteerde witvis op het wateroppervlak geeft. Lekkende ebdeuren is vergelijkbaar met het op een kier zetten van de spuisluizen en zou kunnen bijdragen aan vismigratie tussen IJsselmeer en Waddenzee en zou daarmee geen negatief effect hebben.

Als de schutsluis volledige gevuld is met IJsselmeer water en de deur aan de Waddenzeezijde is geopend bereikt de zouttong in een onbeschermd kolk in ca. 6,5 minuten het einde van de kolk en vult op dat moment de onderste helft (50%) van de kolk met zoutwater. Aansluitend reflecteert de zouttong tegen de dichte deuren en verlaat na ca. 13 minuten de kolk door de geopende deur; de sluis kolk is nu voor ongeveer 80% gevuld met zoutwater. Bij gebruik van luchtbellenschermen wordt de zout-zoet uitwisseling verminderd en neemt de deuropentijd tot volledige uitwisseling aanzienlijk toe. Het gebruik van luchtbellenschermen blijft daarmee, ook bij lange deuropentijd, nuttig. Echter, als de sluisdeuren voldoende lang openstaan, zal de sluis "volledig" zout dan wel zoet worden. Over die periode neemt het rendement van het luchtbellenscherm steeds verder af. Wordt een deuropentijd verwacht die langer is dan de periode waarover het scherm nuttig werkt dan is het efficiënter om het luchtbellenscherm niet aan te zetten. Voor de S-luchtbellenschermen ligt deze grens op ca. 35 minuten en voor de Δ-luchtbellenschermen op ca. 60 minuten. Zie Figuur 6.2.



Figuur 6.2 Relatie deuropentijd en zoutlek bij verschillende doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$), met en zonder scheepvaart. Waddenzee 20 ppt; gelijke waterstand IJsselmeer en Waddenzee. Een onbeschermde kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

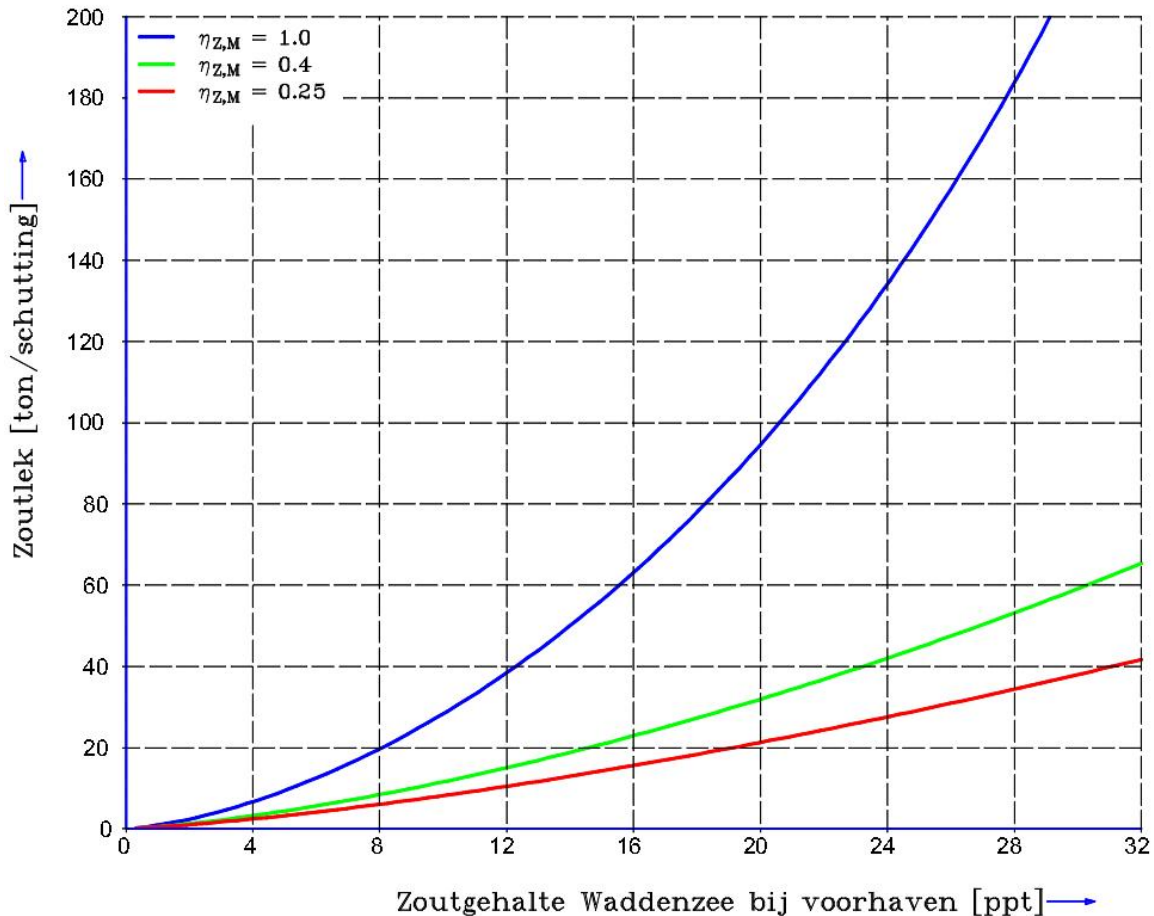
In Figuur 6.2 is gerekend met zout-zoet per zijde door scheepvaart met gemiddelde 600 ton en in twee vaarrichtingen conform de praktijk (getrokken lijnen). Gegeven is in Figuur 6.2 (en de hierna volgende figuren) dat de evenwichtsituatie wordt bereikt na een groot aantal schutcycli. Met gestippelde lijnen is de zoutlek zonder scheepvaart gegeven als functie van de deuropentijd. Uit Figuur 6.2 is af te lezen dat scheepvaart de zoutlek verhoogt met ongeveer 10 ton per schutting. Aan de hand van Figuur 3.20 en in onderdeel 2.7 besproken we dat deze verhoging van 10 ton/schutting door scheepvaart waarschijnlijk een overschatting is.



Figuur 6.3 Relatie peilverschil (H_{zee} zijde min H_{meer} zijde) en zoutlek voor verschillende doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$). Waddenzee 20 ppt; 10 minuten deuropentijd; twee richtingen scheepvaart van 600 ton/richting. Een onbeschermde kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

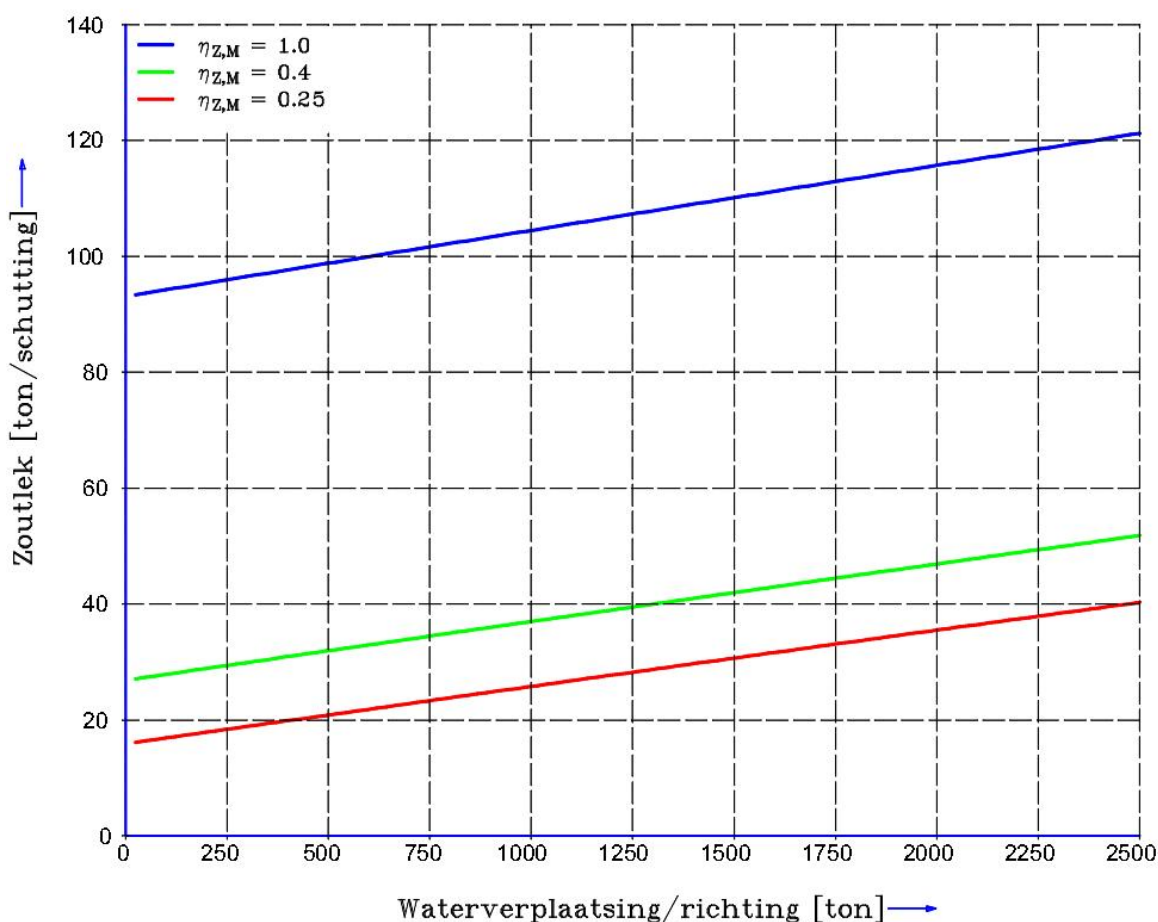
De zoutlek is afhankelijk van het waterstandsverschil over de schutsluis. Deze afhankelijkheid is in Figuur 6.3 uitgezet; met op de horizontale as het waterstandsverschil over de schutsluis en op de verticale as de zoutlek. De knik in Figuur 6.3, berekend met zoutlekmodel, bij een waterstandsverschil van 0.0 m kan als volgt verklaard worden:

- Bij 1.0 m hoger water op zee dan in het IJsselmeer bedraagt het volume van de schutsluis 2000 m³. Hierdoor wordt zeewater met 20 ppt door de sluis naar het IJsselmeer getransporteerd wat extra 40 ton zout/schutting geeft.
- Omgekeerd, bij 1.0 m lagere waterstand op zee t.o.v. het IJsselmeer wordt 2000 m³ water naar zee gebracht maar nu met een typisch zoutgehalte van ca. 8 ppt in de kolk na schutten aan meerzijde zodat nu 16 ton zout naar zee wordt teruggevoerd.



Figuur 6.4 Relatie zoutgehalte voorhaven Waddenzee en zoutlek voor verschillende doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$). Deuropentijd is 10 minuten; waterstand IJsselmeer en Waddenzee is gelijk. Twee richtingen scheepvaart van 600 ton/richting. Een onbeschermde kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

In Figuur 6.4 is op de horizontale as uitgezet het zoutgehalte in de voorhaven zeezijde en op de verticale as de zoutlek. Zoals is te verwachten neemt de zoutlek meer dan lineair toe bij een toenemend zoutgehalte van de voorhaven zeezijde. De noodzaak van het toepassen van een zoutremmende maatregel neemt daarmee toe bij toenemend zoutgehalte in de voorhaven zeezijde.



Figuur 6.5 Zoutlek veroorzaakt door het schutten van schepen bij verschillende doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$). Deuropentijd is 10 minuten; Waddenzee 20 ppt; Waterstand IJsselmeer en Waddenzee is gelijk. Een onbeschermde kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

Door het uitvaren van een schip wordt water de kolk ingetrokken en bij invaren uitgeduwd. Vindt dit plaats aan de zeezijde dan wordt de kolk gemiddeld zouter en aansluitend aan de meerzijde weer zoeter. Deze zoutlek, berekend met het zoutlekmodel, is uitgezet in Figuur 6.5 als functie van de schepstonnage; de berekening is uitgevoerd bij een gelijke waterstand aan meer- en zeezijde. Het toenemen van de tonnage per schutting heeft tot gevolg dat de zoutlek toeneemt, een ongunstig effect. Het schutten van grote schepen is echter aanzienlijk gunstiger in termen van tonnen zoutlek gedeeld door de tonnage van een groot schip dan bij een klein schip.

Tijdens de praktijkproef registreerden we in 23 dagen ca. 470 schuttingen naar de Waddenzee of naar het IJsselmeer, is gelijk aan 20,4 schuttingen/dag met een gemiddelde deuropentijd van 13 minuten. Met de dynamische variant van het zoutlekmodel zijn gedurende 120 dagen schuttingen gesimuleerd voor een 4-tal cases (zie tabel 6.1) uitgaande van het getij bij Den Oever, 20 schuttingen gelijkmatig verdeeld over de dag, met schepen van 600 ton waterverplaatsing in beide richtingen in- en uitvarend bij een deuropentijd van 13

minuten. In werkelijkheid wordt er voornamelijk bij daglicht geschut en naar blijkt ongeacht de waterstand op zee, ondanks dat beladen zandschepen alleen bij gunstige waterstand in de Waddenzee (Van Den Oever naar Den Helder) door de schutsluis gaan.

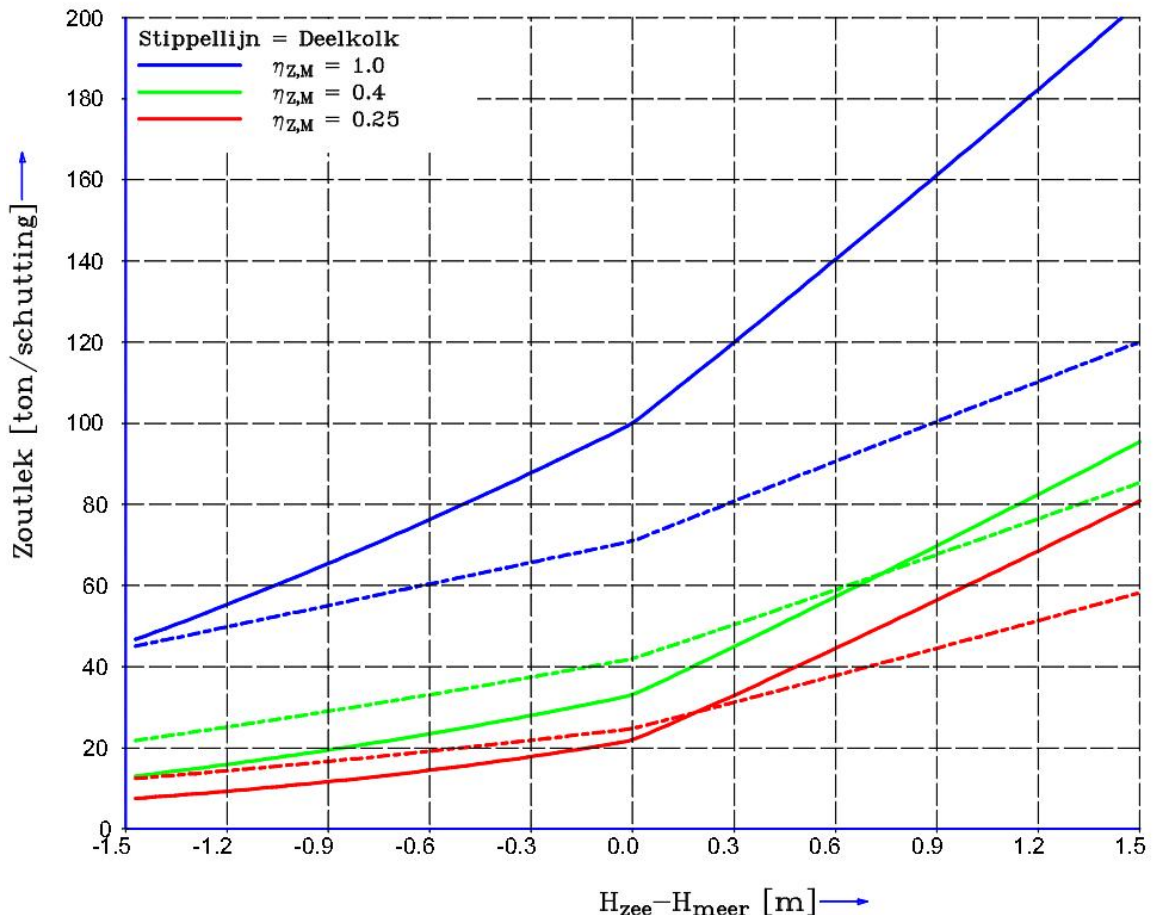
Toelichting	Doorlaatfractie (%) zeezijde	Doorlaatfractie (%) meerzijde	Zoutlek ton/schutting	Zoutlek 10 ³ ton/jaar
S-schermen halve kracht	73	48	86,4	643
S-schermen volle kracht	60	38	60,5	450
Δ-schermen optima forma	25	25	34,6	258
Lekkend ebdebiet	25	25	24,2	180

Tabel 6.1 Zoutlek door de Stevinsluis als functie van de toegepaste zoutremmende maatregel.

In Tabel 6.1 zijn de resultaten van de vier doorgerkende cases gegeven uitgevoerd met reële doorlaatfracties (kolom 2 en 3 in de tabel), gekozen op basis van de in dit rapport gerapporteerde metingen en analyses. Bij de methode van lekkende ebdeuren is als minimale opening van de rinketschuiven 20% gebruikt. De afvoercoëfficiënt van een rinketschuif is conform vergelijking (D.1). De voorlaatste kolom in Tabel 6.1 is gebaseerd op de simulatie zoals hiervoor genoemd. De laatste kolom in Tabel 6.1 is afgeleid van de voorlaatste kolom met 365 dagen en 20,4 schuttingen/dag.

De 0,45-0,65 Mton zoutlek door de Stevinsluis is bescheiden t.o.v. de totale zoutvracht (zie jaarverslag 2001-2002 Rijn; van de Vereniging van Rivierwaterbedrijven (RIWA)) van ca. 4,8 Mton naar het IJsselmeer; bestaande uit 3,0 Mton vanuit de IJssel, 1,0 Mton vanuit de Waddenzee en 0,8 Mton vanuit het gemaal Leemans en Lely. Het gemaal Leemans (en haar zoutvracht naar het IJsselmeer) is ondertussen verlegd naar de voorhaven Waddenzee.

We concluderen op basis van de metingen en simulaties met zoutlekmodel dat met een zelfde en mogelijk grotere bijdrage van de Lorentzsluizen aan de zoutlek naar het IJsselmeer de gezamenlijke zoutlek van deze twee schutsluizen substantieel bijdraagt aan voorgaande zoutvracht.



Figuur 6.6 Relatie peilverschil (H_{zee} zijde min H_{meer} zijde) en zoutlek bij gebruik van volledige en gedeelde kolk, voor diverse maar gelijke doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$). Waddenzee 20 ppt; 10 minuten deuropentijd; twee richtingen scheepvaart met 600 ton/richting. Stippellijnen geven de zoutlek met een deelkolk. Een onbeschermde kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

Op de horizontale as van Figuur 6.6 is het waterstandsverschil tussen zeezijde – meerzijde uitgezet en op de verticale as de zoutlek. De getrokken lijnen geven de zoutlek (bij verschillende doorlaatfracties berekent met het zoutlekmodel) van een volledige kolk en de gestippelde lijnen bij een halve kolk (gebruik deelkolk). Zoals te verwachten geeft een hogere buitenwaterstand in zijn algemeenheid een lagere zoutlek bij gebruik van een deelkolk. Tijdens lagere buitenwaterstand is het gebruik van een deelkolk niet gunstig omdat het nivelleren van een hele kolk een groter ebdebiet veroorzaakt wat meer zout naar zee brengt. Het omslagpunt wel of niet met een deelkolk schutten is afhankelijk van de doorlaatfractie van de luchtbellenschermen; voor de drie onderzochte situaties ligt het omslagpunt niet op hetzelfde peilverschil. De verklaring luidt dat de zoutlek veroorzaakt door nivelleren van dezelfde orde grootte is als de zoutlek tijdens (niet te lang) geopende sluisdeuren. Immers 2000 m² kolkoppervlak 1m nivelleren met 20 ppt zout water geeft 40 ton zout terwijl afhankelijk van de doorlaatfractie de zoutlek per schutting 40-110 ton bedraagt.

Onze analyses, zie Figuur 3.20, tonen dat de zoutmassa in de kolk snel afneemt wanneer een schip naar meerzijde uitvaart. Bij lage buitenwaterstand is de kolk zoeter dan bij hoge buitenwaterstand en dan zal een uitvarend schip minder zout naar de meerzijde-voorhaven brengen. Daarom zouden diepstekende grote schepen bij voorkeur tijdens lage buitenwaterstand naar meerzijde geschut moeten worden. Tijdens hoogwater kunnen de schepen buitengaats de ondiepten passeren vervolgens afmeren aan de wachtsteigers in de zeezijde-voorhaven om tijdens lage buitenwaterstand naar meerzijde geschut te worden.

6.3 Overwegingen voor minimale zoutlek zonder fysieke aanpassingen

In dit onderdeel bespreken we de mogelijkheden om de zoutlek door de Stevinsluis te beperken zonder fysieke veranderingen van de schutsluis en/of de sluisbediening maar met aanwezigheid van de S-luchtbellenschermen. Een reductie in zoutlek is te realiseren door (vnl.) een gewijzigd of een strakker uitgevoerd protocol tijdens schutten:

- 1 Gebruik van deelkolk (halve kolk lengte);
- 2 Maximaal spuien via de schutsluis;
- 3 Spuien via gemaal Leemans maximaliseren door minder te spuien via o.a. het gemaal Lely.
- 4 Spuien via spuisluizen bij Den Oever in plaats van spuien via de spuisluizen van Kornwerderzand;
- 5 Afstemmen bediening schutsluis op openbaar vervoer en
- 6 Optimalisatie afhandeling beroeps- en recreatievaart.

Ad/1

De schutsluis heeft een zg. middendeur waardoor ook geschut kan worden met een deel van de kolk. Door zoveel mogelijk met het kleiner deel van de kolk te schutten neemt de zoutlek af. Door het halveren van de kolk zal de tijd waarbinnen een zouttong heen en weer loopt halveren. Ook het in- en uitvaren, wordt korter maar de tijd voor het bedienen van de sluishoofden blijft gelijk. Zeker voor het schutten van pleziervaart kan een deelkolk toepasbaar zijn. Afgezien van charterschepen is de beroepsvaart over het algemeen langer dan een halve kolk lengte zodat een deelkolk niet voor alle beroepsvaart toepasbaar is. Mogelijk neemt de zoutlek verder af door ook bij de middendeuren luchtbellenscherm in te zetten als zoutlekbeperkend middel.

Ad/2

De schutsluis heeft van oudsher de mogelijkheid om te spuien en combineren van spuien door de schutsluis met de afvoer via gemaal Leemans naar de Waddenzee voorhaven lijkt daarmee ook een goede optie om de zoutlek te beperken.

De onderrand van elke rinketschuif ligt bijna op drempelhoogte waardoor aanvankelijk de zoute onderlaag uit de meerzijde-voorhaven naar de kolk en vervolgens naar de Waddenzee-voorhaven wordt gebracht. Hierbij kan het voordelig zijn om de rinketschuiven van onderen af niet geheel te open opdat er minder zoetwater wordt meegezogen. Dit wordt selectieve onttrekking genoemd. Echter, de sterke stroming naar de rinketschuiven zal desondanks zoeter water hoger uit de waterkolom van de meerzijde-voorhaven meenemen.

Een aanzienlijke reductie van de zoutlek naar het IJsselmeer wordt verwacht door zo veel als mogelijk te spuien in de zeezijde-voorhaven. Immers bij gelijke waterstand IJsselmeer en Waddenzee geeft een halvering van het zoutgehalte 65% minder zoutlek; zie Figuur 6.4. Anderzijds kan spuien van zoetwater (ook de schutsluis of via het gemaal Leemans) in de zoutwater voorhaven meer aanslibbing veroorzaken door geringere turbulentie en geringere verticale menging vanwege de toenemende gelaagdheid door het spuien. Voor deze optie is nader onderzoek nodig.

Ad/3

Het spuien via de spuisluizen in de Afsluitdijk en via het gemaal Leemans direct in de voorhaven zeezijde heeft tot gevolg dat het bovenste deel van de waterkolom zoeter wordt. Om de praktijkproeven mogelijk te maken is de afvoer via Leemans verlegd naar het gemaal Lely nabij Medemblik. Omdat een zoetere zeezijde-voorhaven gunstige effecten heeft op de zoutlek naar het IJsselmeer, kan nu overwogen worden om zoveel mogelijk water via Leemans te spuien en daarmee een zo zoet mogelijke zeezijde-voorhaven te bereiken. Mogelijk dat door de afvoer via het gemaal Leemans tijdens alleen een hogere buitenwaterstand dan op het IJsselmeer te combineren met het spuien via de schutsluis bij een lagere buitenwaterstand de zoutlek verder is te reduceren. Deze methode van getij-afhankelijk spuien met het gemaal Leemans is niet verder onderzocht.

Ad/4

Uit metingen blijkt dat het spuien via de spuisluizen in de Afsluitdijk binnen één dag zichtbaar is in de zoutverticaal in de zeezijde-voorhaven en binnen twee dagen weer nagenoeg is verdwenen. Hoewel de invloed van de spuistroom op het zoutgehalte in de zeezijde-voorhaven geringer zal zijn door de afvoer via het gemaal Leemans kan om de volgende reden de voorkeur van spuien via Den Oever worden overwogen. In Kornwerderzand ligt de Lorentzsluis oostelijk van de spuisluis terwijl tijdens afgaand tij de spuistroom westelijk gaat.

Echter bij de Stevinsluis loopt tijdens afgaand tij de spuistroom längs de monding van de zeezijde-voorhaven van deze schutsluis; na laagwaterkentering kan door komberging de bel spuiwater in de zeezijde-voorhaven van de Stevinsluis worden gestuwd.

Ad5

Tot op heden wordt het openen van de brug over de zeezijde-voorhaven en van de weg over de Afsluitdijk afgestemd op de passage van de bus. Het aanbod van schepen sluit hier vaak niet op aan waardoor lange deuropentijden en/of wachttijden kunnen ontstaan. Ook de uit- en invaart van schepen kunnen langere deuropentijden veroorzaken vooral in een volle sluis en aanbod van pleziervaart waar rustiger en zorgvuldiger afgemeerd wordt.

Voorgaande situatie pleit ervoor de laatste 10% van de kolk lengte niet met schepen te vullen en de deur te sluiten voordat iedereen vastligt. Zodoende blijft de zout-zoet uitwisseling door open sluisdeuren beperkt. Eén gereedliggend vrachtschip, charter of pleziervaart kan binnen 3 minuten deuropentijd in een lege sluis liggen d.w.z. ruim voordat een zouttong heen en terug door de sluis is gegaan (13 minuten). Echter, een sluis vol beleggen met pleziervaart gaat al snel 30-45 minuten duren.

Nadat voor de Stevin schutsluis de maximaal toelaatbare zoutlek is vastgesteld kan uit figuur 6.2 worden afgelezen wat de toelaatbare deuropentijd in relatie met de toegepaste zoutremmende maatregel is; bijvoorbeeld een bellenscherm, lekkende ebdeuren etc. Een klok op de sluis kan de resterende tijd tot sluiten aftellen wat een goed middel blijkt om snel invaren te bevorderen zoals bij de spoorbrug over het Amsterdam Rijnkanaal.

Ad/6

Over een dag varieert het scheepsaanbod van de schutsluis zeer sterk en is afhankelijk van het getij, het weer, vakantieperioden etc. en bestaat uit pleziervaart, charters en vrachtvaart. Door landelijke registratie is het aanbod van vrachtvaart bekend. Overdacht kan worden om de bestaande registratie van beroepsvaart uit te breiden met (gewenste) vaarsnelheid en vaartijden en daarop de schuttingen af te stemmen en te plannen.

Bij een te groot verwacht zoutlek kan besloten worden alleen met volledig met schepen gevulde kolk te schutten en geen enkele kleine schepen apart te schutten. We schatten in dat door deze aanpak de jaarlijkse zoutlek door Stevinsluis halveert. Wordt er evenmin met een lege kolk teruggeschut om een schip op te halen dan reduceert de jaarlijkse zoutlek opnieuw. Wordt tenslotte alleen geschut tijdens lage buitenwaterstand dan vermindert de zoutlek nog meer. Uiteraard hoort bij dit beleid een eerlijke aanbodaafhandeling, voldoende wachtplaatsen en goede communicatie. Ook kan overwogen worden om meer te schutten bij een lage buitenwaterstand. Pleziervaart kan mogelijk gemotiveerd worden door gratis overnachting in een geschikte ligplaats in de voorhavens.

6.4 Overwegingen voor minimale zoutlek met fysieke aanpassingen

In dit onderdeel bespreken we mogelijkheden om de zoutlek te beperken met fysieke aanpassingen van de schutsluis, de omgeving van de sluis en de bediening:

- 1 Effectievere luchtbellenschermen voor reductie zoutlek en energieverbruik;
- 2 Toepassen van methode van lekkende ebdeuren;
- 3 Toepassen van een verhoogde drempel in de sluis;
- 4 Meerzijde-voorhaven als tijdelijke zoutvang en lozen naar zee
- 5 Informatie naar sluismeester over prognose én realisatie dagelijkse zoutlek.

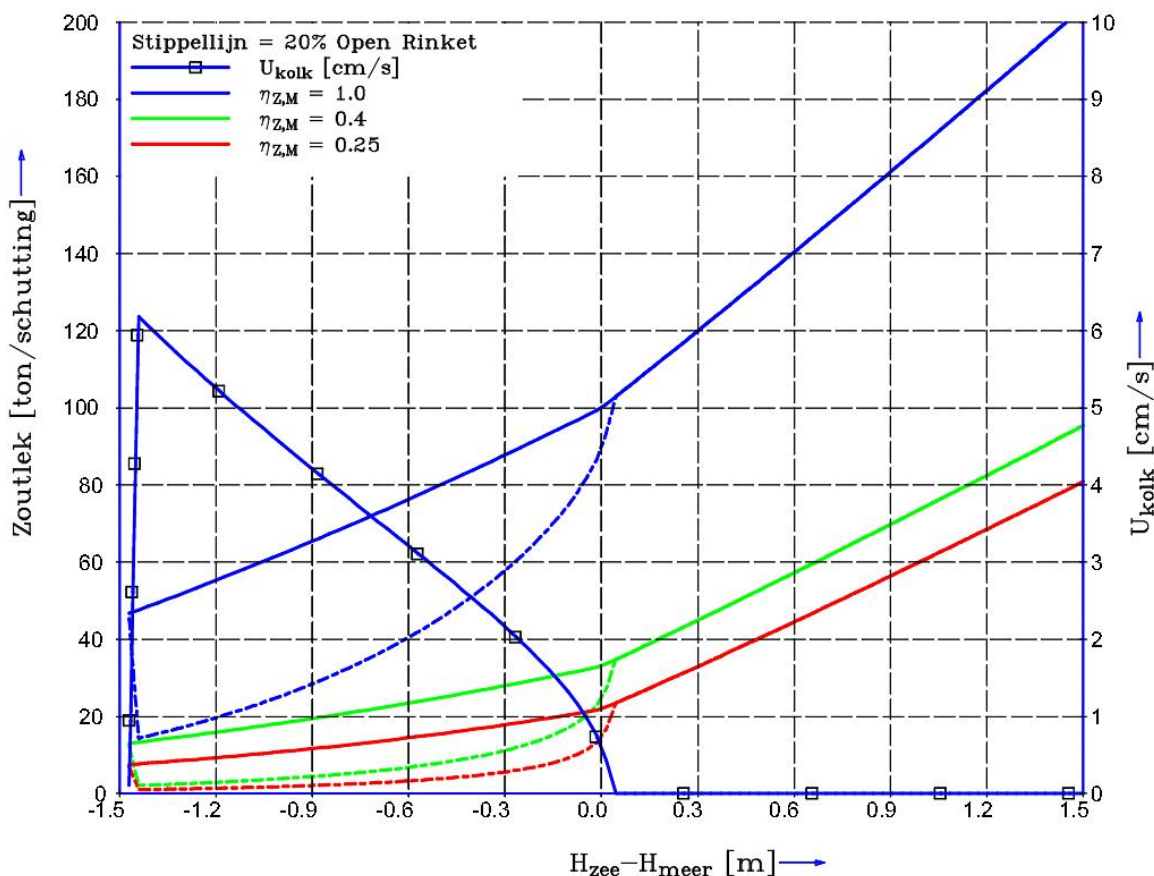
Ad. 1 Effectievere luchtbellenschermen

Momenteel is niet bekend hoe het zoute water zich over het IJsselmeer verspreidt. Naar aanleiding van hoge zoutconcentraties nabij Andijk en in de Zuiderhaven, tijdens de praktijkproeven, is een onderzoeksproject gestart om deze verspreiding vast te stellen. Zowel Waterschappen via hun water inlaatpunten als de drinkwaterleidingsbedrijven als afnemers van IJsselmeer water hebben belang bij een geringe zoutlek. Binnen alle combinaties van zoutremmende maatregelen reduceren luchtbellenscherm de zoutlek en zijn daarmee effectief.

Het bestaande S-luchtbellenscherm met compressoren op vol vermogen geeft een luchtdebiet van 250 Nl/s. Het S-luchtbellenscherm komt geleidelijk op druk omdat er eerst 1 m³ druktank gevuld moet worden en vervolgens duurt het enige tijd om het water uit de geperforeerde buizen van de S-luchtbellenschermen te blazen voordat het scherm over de volle sluisbreedte in werking is. In de aansturing van zowel S-luchtbellenschermen, rinketschuiven, sluislichten als van deuren zijn wachttijden ingesteld. Door de wachttijden te verkorten kan het luchtbellenscherm korter aanstaan met minder energieverbruik en kan een schutcyclus korter worden. Het toepassen van het ontwerp van de Δ-luchtbellenschermen en het vervangen van de druktank door b.v. een overdrukventiel verlaagt het benodigde luchtvolume met ongeveer 25-50% en de compressoren kunnen korter aanstaan.

Ad. 2 Toepassen methode van lekkende ebdeuren

Tijdens de praktijkproeven zijn ook schutcycli met "lekkende ebdeuren" uitgevoerd. De rinketschuiven werden tijdens deze metingen niet volledig gesloten zodat er altijd een zoetwaterdebiet door de kolk stroomde. Voor rinketopeningen groter dan 30% van de volledige opening blijft het verval over de te openen sluisdeuren groter dan ca. 0.1m en kunnen deze deuren niet meer geopend worden; in Figuur 6.7 is gerekend met 20% lekopening. De scheepvaart ondervond, bij de praktijkproeven tot een lekopening van 35%, geen hinder van het zoetwaterdebiet; de snelheid in de kolk was kleiner dan 0,06 m/s (bij een lekopening van 20%); ter vergelijking de snelheid van de zouttong is ca. 0,3 m/s door de kolk. De onderkant van de rinketschuiven is op drempelhoogte (-4,4mNAP) wat een gunstige hoogte is voor het legen van de voorhaven meerzijde als tijdelijke zoutvang. Zodoende zal het zoetwaterdebiet door de kolk niet alleen de zoutlek naar meerzijde beperken maar gelijktijdig het gelekte zoute water uit de meerzijde-voorhaven, als tijdelijke zoutvang, onttrekken.



Figuur 6.7 Invloed lekkende ebdeuren op de zoutlek bij verschillend waterstandverschil ($H_{\text{zee}} - H_{\text{meer}}$), voor verschillende doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$). Waddenzee 20 ppt; 10 minuten deuropentijd; twee richtingen scheepvaart van 600 ton/richting. Stippellijnen voor de zoutlek bij 20% geopende rinketschuiven. Een onbeschermd kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

In Figuur 6.7 is voor drie doorlaatfracties met het zoutlekmodel de zoutlek berekend als functie van het waterstandverschil over de sluis uitgezet (de getrokken lijnen). Het effect van lekkende ebdeuren is berekend met vgl. (D.1) en in Figuur 6.7 met stippellijnen en per doorlaatfractie aangegeven. De berekeningen zijn uitgevoerd met een rinketschuifopening van 20%. Zelfs een geringe verval naar zee geeft dan al een significante reductie in zoutlek. Het toepassen van lekkende ebdeuren resulteert in een langere nivelleerperiode van de kolk. Bij een te groot ebdebiet voor 30-35% opening en/of groot waterstandverschil over de schutsluis zal het verval over de te openen deur te groot blijven. De sluisdeuren kunnen bij te groot verval niet geopend worden, deze belemmering kan weggenomen worden door kortstondig het open-percentages van de schuiven in de deuren aan de andere zijde te verkleinen. Voor recreatievaart (voornamelijk in de zomerperiode) wordt veelvuldig bij een lagere buitenwaterstand gesloten en kunnen lekkende ebdeuren gebruikt worden voor reductie van de zoutlek.

Ad.3 Toepassen van een verhoogde drempel in de sluis

Tijdens de praktijkproeven is bij het binnenhoofd (meerzijde) in de kolk een drempel aangebracht tot een hoogte van -3,52 mNAP. Het effect van een drempel aan zeezijde op de zoutlek is tijdens de praktijkproeven niet onderzocht. Deze drempel aan meerzijde verlaagt bescheiden de zoutlek maar beperkt de diepgang. Toch meldde een schipper dat deze drempel het invaren van zijn diepstekend schip vanaf de meerzijde licht verbeterde. We vermoeden dat deze verbetering komt doordat de afgeremde zouttong minder weerstand biedt dan zonder drempel. Anderzijds, bij uitvaart van een zeer diepstekend schip naar meerzijde werd een wat hogere weerstand gemeld mogelijk door de geringe meewerking van de afgeremde zouttong. Aan meerzijde beperkt een drempel de diepgang evenals aan zeezijde, maar dat laatste is minder relevant, gezien de overige ondiepten in het vaartraject naar de Waddenzee. Echter bij lage buitenwaterstand en een verhoogde drempel aan zeezijde kunnen diepstekende schepen niet meer geschut worden naar een wachtplaats in de zeezijde-voorhaven.

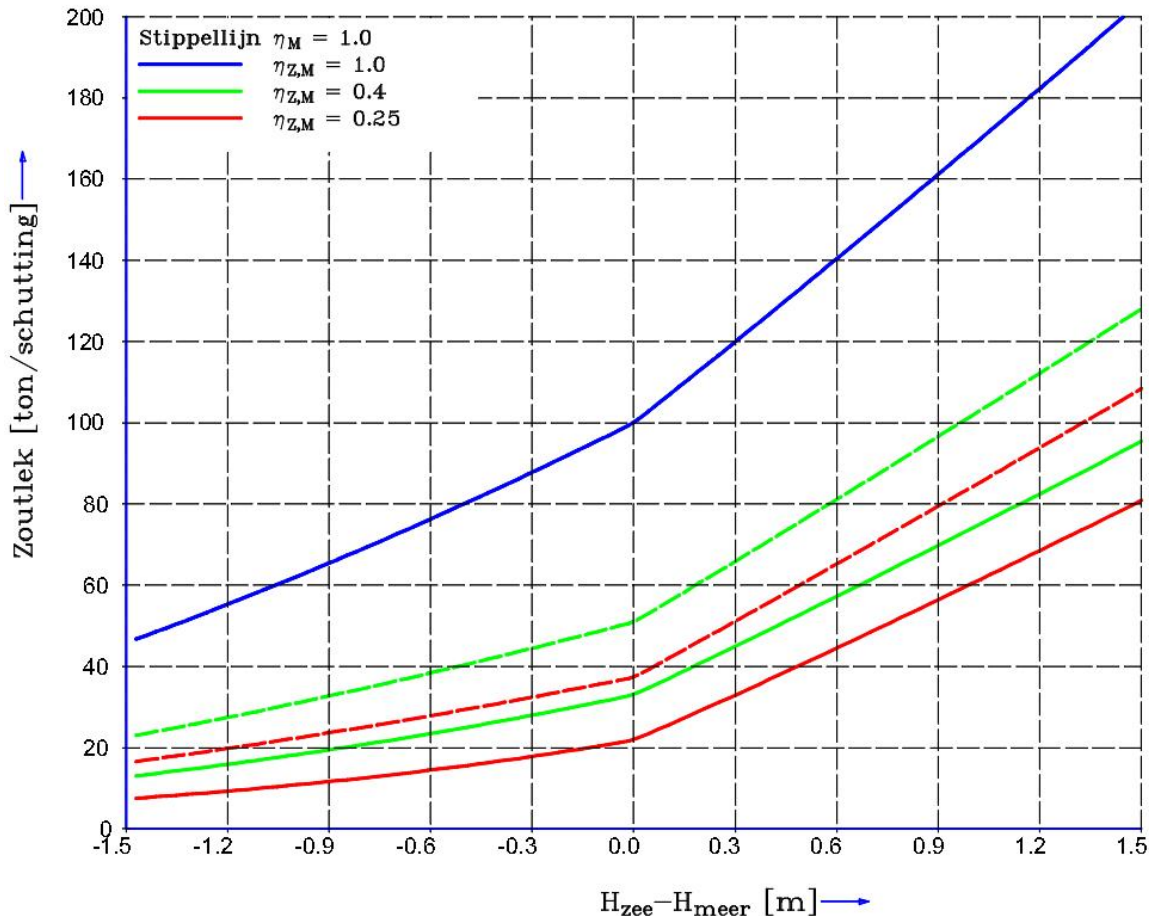
Ad.4 Meerzijde-voorhaven als tijdelijke zoutvang en lozen naar zee

De diepte over de vaarweg van IJsselmeer via de Stevinssluis naar de Waddenzee varieert sterk. De Stevinssluis met zijn voorhavens is dieper dan de aanloop vanaf het IJsselmeer en vanaf de Waddenzee, zie Figuur 6.8 voor enkele diepten.



Figuur 6.8 Diepte meerzijde Stevinssluis.

Het gebruik van de diepe meerzijde-voorhaven als een zoutvang reduceert de zoutlek naar het IJsselmeer mits de zoutvang tijdig geleegd wordt, dat wil zeggen voordat het zoute water zich over het IJsselmeer verspreidt. Over een getijperiode moet ca. 20.000 m³ zouter water geborgen worden in de zoutvang wat mogelijk is met een zoutvang van 200m lang, 20m breed en 5m diep.



Figuur 6.9 Invloed uitschakelen S-luchtbellenscherm aan meerzijde op de zoutlek afhankelijk van waterstandverschil ($H_{\text{zee}} - H_{\text{meer}}$) en diverse doorlaatfracties aan zee- en meerzijde ($\eta_{z,m}$). Waddenzee 20 ppt; 10 minuten deuropentijd; twee richtingen scheepvaart van 600 ton/richting. Stippellijnen geven de zoutlek bij een uitgeschakeld luchtbellenscherm aan de meerzijde. Een onbeschermde kolk heeft een doorlaatfractie van $\eta_{z,m} = 1.0$, S-luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.4$ en Δ -luchtbellenschermen een $\eta_{z,m} = 0.25$.

Een luchtbellenscherm aan meerzijde kan de uittrekkende zouttong opmengen waardoor deze onvoldoende snel uitzakt om binnen de zoutvang te blijven. Dan zou het luchtbellenscherm aan meerzijde uitgeschakeld kunnen worden waardoor de zoutlek toeneemt maar beter in de zoutvang blijft, zie Figuur 6.9 (vergelijkbaar qua opzet met Figuur 6.3 en 6.6).

We bespreken kort de volgende drie mogelijkheden voor het legen van een zoutvang.

Vergroten zoutvang en legen via spuisluisen

De zoutvang kan vergroot worden én in verbinding met de spuisluisen worden gebracht door het verdiepen van -2,5 m NAP naar -5,0 m NAP van de onbetonde geul oostelijk van het sluiscomplex naast de strekdam aan de IJsselmeer zijde.

Legen zoutvang via schutsluis vnl. onder vrij verval

In beperktere mate kan de huidige zoutvang ook geleegd worden door via de schutsluis te spuien (zie lekkende ebdeuren). Legen van de zoutvang tijdens lage buitenwaterstand kan bij een vrij verval via een hevel, opgestart met een airlift, met 0,5 m³/s debiet en een pijp met 0,6 m diameter. Als het luchtbellenscherm aan meerszijde wordt uitgeschakeld zou het vrijkomend elektrische vermogen benut kunnen om de hevel met een pomp uit te breiden. Voorwaarde is dat de snelheden bij de inlaat zo klein zijn (hooguit 1.0 dm/s) dat er geen zoetwater wordt meegetrokken.

Legen zoutvang via gemaal Leemans

Door een ca. 5.0 m diepe geul langs de zuidrand van de Zuiderhaven (Figuur 6.8) wordt de meerszijde-voorhaven als zoutvang tot de locatie van het gemaal Leemans verlengd (onderste rode stip in Figuur 6.8). Met extra leidingwerk kan de zoutvang verbonden worden met de inlaatsecties van het gemaal. Het gemaal brengt dit zoute water en het polderwater naar de zeezijde-voorhaven.

Ad.5 Informatie naar sluismeester over prognose én realisatie dagelijkse zoutlek

Als er gestreefd wordt naar minimale zoutlek dient de sluismeester tijdig inzicht te krijgen in de zoutlek per schutting. Het effect van zoutremmende maatregelen ziet de sluismeester cq beheerder momenteel niet. Anderzijds ziet men wel het aantal kWh dat de compressoren t.b.v de luchtbellenschermen verbruiken. Inzicht in de zoutlek door de schutsluis kan verkregen worden door, op basis van eenvoudiger metingen dan wij thans deden, schattingen voor de zoutlek on line te presenteren. De sluismeesters krijgen dan inzicht in b.v. het cumulatieve dagelijkse effect van hun handelen, ze kunnen bijsturen en meedenken in het verder verlagen van de zoutlek.

Om dit te realiseren kan deels gebruik gemaakt worden van de beschikbare schutsluisgegevens, aangevuld met een beperkt aantal meetinstrumenten en signalen. De gegevens worden on line door een PC ingewonnen, uitgewerkt en gepresenteerd. Presentatie in de vorm van de momentane situatie en een voorspelling voor een aantal schutscenario's. Eventueel aangevuld met vergelijkingsmateriaal zoals behaalde records en jaargemiddelde zoutlek per schutting.

6.5 Conclusies

- Bij een onbeschermd kolk bedraagt de getijgemiddelde zoutlek 140 ton/schutting zodat met ca. 4000 schuttingen per jaar er 0,56 Mton zout wordt gelekt. Door de S-luchtbellenschermen altijd op vol vermogen te gebruiken reduceert bij een deuropentijd van 13 minuten de jaarlijkse zoutlek tot 0,20 Mton.
- Bij een volledige schutcyclus, dat wil zeggen aan beide zijden van de schutkolk in en uitvaart van schepen, staan de luchtbellenschermen 26 minuten aan, leveren zij 390Nm³ aan lucht en verbruiken zij daarbij 36kWh.
- Uit de registratie van de beroepsvaart blijkt dat er perioden op de dag zijn waar het aanbod van schepen eenzijdig is met als gevolg dat in ca. 50% van de uitgevoerde schutcycli er met een lege schutkolk teruggeschut wordt.
- Als de schutsluis volledig gevuld is met zoetwater, dan bereikt de zouttong bij het openen van de Waddenzee deuren na 6.5 minuut het einde van de kolk en verlaat na 13 minuten de sluis; de sluis is dan voor 80% gevuld met zoutwater. Gebruik van een zoutremmende maatregel vertraagt deze uitwisseling en is daarmee ook bij langere deuropentijden zinvol; echter de zoutlek en het energieverbruik van het luchtbellenscherm nemen beiden toe. Staan de deuren extreem lang open dan wordt de zoutlek gelijk aan de zoutlek van de onbeschermd kolk en heeft het

luchtbellenscherm onnodig aangestaan. Hetzelfde geldt voor een kolk aanvankelijk volledig gevuld met zoutwater en dan naar meerzijde geopend.

- De zoutlek is afhankelijk van het waterstandsverschil over de sluis en maximaal tijdens schuttingen bij de hoogste buitenwaterstand. Het uitvoeren van schuttingen bij een lage buitenwaterstand heeft dan ook de voorkeur. Door te schutten met een halve kolk reduceert de zoutlek.
- Bij een toenemend zoutgehalte in de voorhaven zeezijde neemt de zoutlek meer dan evenredig toe. Door te spuien via de sluis, wordt de voorhaven zeezijde zoeter en vermindert de zoutlek. Het spuien via het gemaal Leemans en/of de spuisluizen in de Afsluitdijk vermindert de zoutlek. De invloed van spuien door het gemaal Leemans is direct merkbaar en de invloed van spuien door de Stevin spuisluizen binnen een dag.
- Tijdens het uitvoeren van de praktijkproeven zijn geen dode vissen gezien in de omgeving van de zoutremmende maatregelen. Zowel in als buiten de sluis in de directe nabijheid van de luchtbellenscherm waren grote scholen jonge vis aanwezig. Het achteruitslaan van beroepsvaart geeft in een aantal gevallen een groot aantal dode of gedesoriënteerde vis.
- De voorhaven meerzijde van de schutsluis in Den Oever functioneert als zoutvang en reduceert de zoutlek naar het IJsselmeer.
- Door de schutsluis niet leidend te laten zijn voor de brugbediening neemt bij een aantal schuttingen de deuropentijd toe en daarmee de zoutlek.
- Sluismeesters en beheerders beschikken niet over de middelen om de zoutlek te monitoren.

6.6 Aanbevelingen

- Door het verkorten van de deuropentijd neemt het energieverbruik van de compressoren en ook de zoutlek naar het IJsselmeer aanzienlijk af. Aanbevolen wordt om de verstreken tijd voor in- en uitvaart en de zoutlek zichtbaar te maken voor de scheepvaart en daarmee snel schutten te bevorderen, zonder dat de veiligheid van de scheepvaart in gevaar komt. Bijvoorbeeld door over de gewenste deuropentijd de kleur van de informatie van groen naar rood te laten verlopen.
- Door het combineren van lekkende ebdeuren, spuidebiet door de sluis, het debiet van het gemaal Leemans (tijdens een hoge buitenwaterstand) en het spuien via de spuisluizen kan de voorhaven zeezijde verzoet worden en zal de zoutlek zonder kosten afnemen. Aanbevolen wordt om in overleg met dienstkringen en waterschappen de mogelijkheden tot een geïntegreerd spuidebiet te onderzoeken.
- Het toepassen van lekkende ebdeuren is zeer effectief voor het reduceren van de zoutlek. Op dit moment is niet duidelijk of bij het toepassen van lekkende ebdeuren het luchtbellenscherm aan de meerzijde aan moet staan om een zo klein mogelijk zoutlek te realiseren. Aanbevolen wordt om lekkende ebdeuren als zijnde een eenvoudige aanpassing per direct te realiseren en het rendement van het luchtbellenscherm meerzijde daarbij te onderzoeken.
- Zoutlek beperkende maatregelen en spuien via Leemans en de spuisluizen beïnvloeden het milieu, waterbeweging en haar chemische eigenschappen en daarmee o.a. sedimenttransport en vismigratie. Aanbevolen wordt om zowel aan de slibprocessen en vismigratie metingen en/of studie uit te voeren.
- Aanbevolen wordt om met enige opnemers het zoutgehalte in de voorhavens continue te meten. Aansluitend een procedure te ontwikkelen op basis van deze metingen, het zoutlekmodel en een geaccepteerde zoutlek, waarmee besloten kan worden dat het luchtbellenscherm aangezet moet worden. Verwacht wordt dat bij grote spuidebieten via het Leemans gemaal het luchtbellenscherm uit kan blijven.

- De gebruikstijd van de S-luchtbellenschermen is over korte periode geregistreerd. Op jaarbasis kost het gebruik van de S-luchtbellenschermen daarmee meer dan 13.500 €.; prijspeil 0.09€/kWh. Aanbevolen wordt om de werkelijke kosten vast te stellen en deze af te zetten tegen de besparing die ontstaat door het reduceren van de zoutlek.
- De S-luchtbellenschermen (en mogelijk ook de compressoren met regeling) zijn qua werking, qua benodigd debiet, opstarttijd en de periode dat zij aanstaan minder efficiënt dan waartoe de huidige techniek instaat stelt. Aanbevolen wordt om op het moment van vervanging alternatieven voor de S-luchtbellenschermen en compressoren te onderzoeken
- Uit de beroepsvaartregistratie volgt dat in ca. 50% van de schutcucli met een lege kolk wordt teruggeschut om een volgend schip op te halen. Door de reis van een vrachtschip als geheel te plannen kan mogelijk de wachttijd voor laden en lossen gebruikt worden om dit percentage te verlagen. Aanbevolen wordt om een inventarisatie te doen van wachttijden bij verladen van beroepsvaart en te onderzoeken of het huidige registratie systeem uit te breiden is.
- Aanbevolen wordt om het rendement van zoutremmende maatregelen zichtbaar te maken voor de sluismeester en hem tzt. de middelen te geven om dit rendement te verbeteren op basis van software die een integrale kosten baten analyse uitvoert, waarin scheepvaart, zoutlek, zoetwaterverlies etc worden meegenomen. Als 1e stap in dit traject wordt aanbevolen om te onderzoeken hoe een eenvoudig systeem opgezet kan worden.

7 Referenties

- Abraham, G. & P. v.d. Burgh 1962 *Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers*. Rijkswaterstaat service for Water Management & Delft Hydraulics, Delft Hydraulics Publication no. 28, Aug.
- Aken, H.M. van 2007 Variability of salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *J. Sea Res.*, 59 (2008), pp. 121-132.
- Bulson, P.S. 1961 Currents produced by an air curtain in deep water. *Dock and Harbour Authority*, Vol. 42, No. 487, May 1961, pp. 15-22
- Groeneboom, P. 2010 *Numerical simulation of intrusion of salt water during gate opening of the Stevin lock*. ESI-Group, February.
- Keetels, G.H. & R.E. Uittenbogaard 2010 *Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen. Deeltaak 1 Numerieke simulatie van uitwisselingsstromingen en van uitwisselingsbeperkende maatregelen*. Deltares, 1201226-001.
- Kuyper, C. 1999 *Salt conversions - Formula for NaCl and seawater*. Delft Hydraulics, report Z163-20, May.
- Mastbergen, D.R. 2010 *Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen. Deelproject 2 Verkenning effectiviteit zoutlekbeperekende maatregelen op laboratoriumschaal*. Deltares, 1201226-002.
- Schulze, F.H. 2004 *Evaluatie afleidingsmaatregel uitslagwater Wieringermeer*. Witteveen + Bos, 14 dec.
- Shin, J.O., S.B. Dalziel & P.F. Linden 2004 Gravity currents produced by lock exchange. *J.Fluid Mech.*, vol. 521, pp. 1-34.
- Uittenbogaard, R.E. 2010 *Voorstudie: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen; model voor zoutlekberekeningen*. Deltares1201226-11.
- Vrijburcht, A. 1989 *Het vul- en uitwisselingsproces van een schutsluis. Invloed dichtheidsverschillen op de krachten van schepen. Verslag prototypemetingen*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q176, deel III, januari.

A Theorie zouttransport door schutsluis

A.1 Inleiding

In dit appendix herhalen we kort enkele uitkomsten van de theoretische grondslagen en definities die van belang zijn voor zouttransport door schutsluizen en de werking van luchtbellenschermen. De genoemde referenties geven het volledige overzicht.

A.2 Zouttransport door schutsluis

De zoutlek door geopende sluisdeuren is het product van het verschil ΔS tussen zoutgehalten van kolk en voorhaven en het uitwisselende waterdebiet dat door het verschil in specifieke dichtheid $\Delta\rho$ wordt aangedreven.

Het specifieke uitwisselingsdebiet d.w.z. per eenheid van kolkbreedte luidt:

$$q = hU \quad [m^2 / s] \quad (A.1)$$

Met dikte h en voortplantingssnelheid U van de zouttong. De theorie over het zg. *lock-exchange* probleem doet uitspraken over de dikte h van de zouttong t.o.v. de waterdiepte H in de kolk en over het zg. interne Froude-getal Fr

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g'H}} \quad ; \quad g' = \frac{\rho_+ - \rho_-}{\frac{1}{2}(\rho_+ + \rho_-)} g \quad (A.2)$$

gebaseerd op de gereduceerde gravitatieversnelling g' die wordt bepaald door de initiële verschillen in dichtheid over de te openen sluisdeuren. Met deze theoretische verhoudingsgetallen kan (A.1) worden geschreven als

$$q = \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} H \sqrt{g'H} \quad [m^2 / s] \quad (A.3)$$

waarbij de termen tussen {...} theoretisch bekend zijn, zie b.v. (Shin e.a., 2004).

We maken onderscheid in het zoutgehalte in de kolk op het moment dat de sluisdeuren aan zeezijde óf aan meerzijde worden geopend. Daartoe benoemen we $S_{K,M}$ het volume-gemiddelde zoutgehalte dat de kolk heeft na de vorige schutting met meerzijde en zoutgehalte $S_{K,Z}$ het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk na schutten met zeezijde. Dan noteren we met (A.3) de massaflux (\dot{M}_z) van zout vanuit zeezijde de kolk in als:

$$\dot{M}_z = \eta_z \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} B.H. (S_z - S_{K,M}) \sqrt{g'_{ZKM} H} \quad [kg \text{ zout/s}] \quad (A.4)$$

met kolkbreedte B , doorlaatfractie η_z en zoutgehalte S_z in de zeezijde-voorhaven. De gereduceerde gravitatie g'_{ZKM} is nu gebaseerd op het zoutverschil ($S_z - S_{K,M}$) ten tijde dat de

sluisdeuren aan zeezijde openen. Dit verschil in zoutconcentratie hangt dus af van de schutting naar meerzijde en we zullen later deze afhankelijkheid expliciet in rekening brengen.

De verandering van de zoutmassa in de kolk blijkt uit waarnemingen evenredig met de tijd te verlopen én met de flux (A.4) mits de zouttong de kolk nog niet heeft verlaten. In deze analyse veronderstellen we dat de deuropentijd T van de sluisdeuren kleiner of gelijk is aan de looptijd van de zouttong heen en terug door de kolk. Dan volgt uit (A.4) de verandering in zoutmassa in de kolk als:

$$\Delta M_Z = \eta_Z T_Z \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} B.H. (S_Z - S_{K,M}) \sqrt{g'_{ZKM} H} \quad [\text{kg zout}] \quad (\text{A.5a})$$

En analoog voor de verandering in zoutmassa tijdens geopende sluisdeuren aan meerzijde:

$$\Delta M_M = \eta_M T_M \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} B.H. (S_{K,Z} - S_M) \sqrt{g'_{MKZ} H} \quad [\text{kg zout}] \quad (\text{A.5b})$$

Met de gereduceerde gravitatie g'_{MKZ} gebaseerd op het zoutverschil ($S_{K,Z} - S_M$) ten tijde dat de sluisdeuren aan meerzijde openen.

We maken de analyse dimensieloos met de relevante snelheid van de zouttong en de kolkengte L volgens:

$$\tau_Z = \frac{T_Z \sqrt{g'_{ZKM} H}}{4L} \quad [-] \quad (\text{A.6a})$$

$$\tau_M = \frac{T_M \sqrt{g'_{MKZ} H}}{4L} \quad [-] \quad (\text{A.6b})$$

Verder definiëren we het kolkvolume als:

$$V_{\text{kolk}} = B.H.L \quad (\text{A.8})$$

En de maximale verandering van de zoutmassa in de kolk als:

$$\Delta M_{\text{max}} = V_{\text{kolk}} (S_Z - S_M) \quad [\text{kg zout}] \quad (\text{A.9})$$

We normeren (A.5) nu met de dimensieloze tijd (A.6) en de maximale verandering van de zoutmassa in de kolk en we bereiken het volgende resultaat:

$$\frac{\Delta M_Z}{\Delta M_{\max}} = \eta_Z \tau_Z \left\{ 4 \frac{h}{H} Fr \right\} \frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M} \quad [-] \quad ; \quad \frac{\Delta M_M}{\Delta M_{\max}} = \eta_M \tau_M \left\{ 4 \frac{h}{H} Fr \right\} \frac{S_{K,Z} - S_M}{S_Z - S_M} \quad [-] \quad (\text{A.10})$$

Dit is de grondslag van de analyses in (Abraham & V.d. Burgh, 1962) om de invloed van de doorlaatfractie te onderscheiden van zijn invloed op de verandering van de verschillen in zoutconcentratie tussen kolk en voorhaven. Voor een energiebehoudende voortplanting van de zouttong is de term tussen accoladen gelijk aan 1, en met maximaal energieverlies gelijk aan 0,732, voor details van deze conclusie zie (Shin e.a., 2004). De dimensieloze tijd τ is met (A.6) zó gekozen dat volgens de energiebehoudende oplossing op $\tau = 1$ de zouttong tweemaal de kolk lengte heeft afgelegd. Deze normeringen maken de relatieve verandering van de zoutmassa in de kolk onafhankelijk van het verschil ($S_Z - S_M$) in zoutgehalten tussen beide voorhavens.

Door het verloop van de genormeerde verandering van de zoutmassa volgens (A.10) te vergelijken met het waargenomen verloop in een onbeschermd kolk ($\eta = 1$) volgt de doorlaatfractie uit:

$$\eta(\tau) = \frac{\left[\Delta M_{\text{obs}}(\tau) / \Delta M_{\max} \right]_{\text{Zoutremmend middel}}}{\left[\Delta M_{\text{obs}}(\tau) / \Delta M_{\max} \right]_{\text{Onbeschermd}}} \quad (\text{A.11})$$

Op deze wijze wordt vermeden dat bij het onderling vergelijken met de onbeschermd kolk het resultaat wordt beïnvloed door andere verschillen in zoutgehalte zoals het geval zal zijn in een schutsluis onder invloed van o.a. getij.

Met de eenmaal verkregen doorlaatfractie (A.11) kan (A.5) worden toegepast op een werkende schutsluis waarin de verschillen ($S_Z - S_{K,M}$) en ($S_{K,Z} - S_M$) worden verkleind t.o.v. een onbeschermd kolk, zie Hoofdstuk 3. Het resultaat is een reductie van het zouttransport door geopende sluisdeuren kleiner dan de doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen bij deze deuren.

B Theorie doorlaatfractie van luchtbellenscherm

B.1 Inleiding

Dit appendix herhaalt kort de theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962) voor de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm bij gegeven luchtdebiet en snelheid van de ongeremde zouttong.

B.2 Theorie reductie zoutlek door luchtbellenschermen

Volgens (Abraham & v.d. Burgh, 1962) blijkt onderstaande formule de veldmetingen naar de reductie η door een luchtbellenscherm van het zouttransport door uitwisselingsstroom goed te beschrijven:

$$\eta = \frac{0,185}{\varphi} + \varphi^3 - 0,86\varphi \quad (\text{B.1})$$

In (B.1) geldt voor φ :

$$\varphi = \frac{C_1}{\sqrt{g'H}} \quad ; \quad g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g \quad (\text{B.2})$$

met dichtheidsverschil $\Delta\rho$ en waterdiepte H ter plaatse van de luchtinjectie bij de bodem. Voor de luchtsnelheid C_1 in (B.2) wordt geschat

$$C_1 = \frac{4}{3}(0,40 - 0,47) \frac{(g q_\ell)^{\frac{1}{3}}}{(1 + H / H_{atm})^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{B.3})$$

waarbij H_{atm} de waterhoogte is overeenkomend met de atmosferische druk en q_ℓ het specifieke luchtdebiet uitgedrukt in (Nm^2/s) d.w.z. het luchtdebiet m^3/s per lengte-eenheid van de buis of slang dat het luchtbellenscherm creëert. De hoofdletter N refereert naar het luchtdebiet in l/s dat door een compressor onder atmosferische omstandigheden wordt ingezogen. Het interval aan coëfficiënten van 0,40 tot 0,47 volgt uit (Bulson, 1961). De laagste waarde (0,40) is gekozen voor het berekenen van het maximaal benodigde luchtdebiet.

In (Abraham & v.d. Burgh, 1962) wordt gewerkt met een zg. lucht-Froude getal:

$$Fr_\ell = \frac{(g q_\ell)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{g'H}} \quad (\text{B.4})$$

Met (B.4) en keuze van coëfficiënt C_1 in (B.3) wordt φ in (B.2) bepaald waaruit de doorlaatfractie η in (B.1) volgt, zie de rode lijnen in Figuur 5.2 en 5.3.

C Definitie zoutmassa, tijdschaal en theoretische schatters

In onderdeel 3.8 en in Hoofdstuk 4 wordt de verandering van de zoutmassa in de kolk met en zonder zoutlekbepurende middelen onderling vergeleken. Hieruit volgt de zg. doorlaatfractie η zoals gehanteerd in (Abraham en V.d. Burgh, 1962):

$$\eta(\tau) = \frac{\left[\Delta M_{\text{obs}}(\tau) / \Delta M_{\text{max}} \right]_{\text{Zoutremmend middel}}}{\left[\Delta M_{\text{obs}}(\tau) / \Delta M_{\text{max}} \right]_{\text{Onbeschermd}}} \quad (3.3.1)$$

Dit appendix legt uit op welke wijze (3.3.1) vanuit onze waarnemingen wordt bepaald. In Hoofdstuk 4 wordt de waargenomen totale verandering ΔM_{obs} van de zoutmassa in de kolk vanaf het openen van de sluisdeuren aan één zijde tot en met het sluiten van deze sluisdeuren vergeleken met de theoretische schatter ΔM_{th} zonder zoutlekbepurende middelen. Dit appendix definieert deze theoretische schatter.

De zoutmassa M in de kolk wordt geschat door aan elk van de 25 zoutmeters in de kolk (zie Figuur 3.2b) een representatief volume (V_n) toe te kennen, te vermenigvuldigen met het daarin gemeten zoutgehalte (S_n) en als volgt over deze partiele zoutmassa's te sommeren:

$$M(t) = \sum_{n=1}^{25} V_n(t) S_n(t) \quad (C.1)$$

De deelvolumina V_n worden bepaald door rekening te houden met het verloop van de kolkbreedte van 14,6m bij de vloer naar 14m aan de waterlijn, het tijdsafhankelijke kolkpeil en de momentane diepte van de bovenste drie zoutmeters (zie Figuur 3.2b). Aan de hand van simulaties met een voorgeschreven voortplanting van een zouttong in de kolk is (C.1) gecontroleerd. Hieruit bleek tijdens de initiële fase na openen van de sluisdeuren een afwijking van ten hoogste ca. 10% op te treden, deze fout nam af naarmate de zoutwater- of zoetwatertong meer verticalen met zoutmeters (Figuur 3.2b) bedekte.

In dit rapport wordt (C.1) de waargenomen zoutmassa in de kolk genoemd.

Het volume-gemiddelde zoutgehalte S_K in de kolk volgt uit het delen van de zoutmassa (C.1) door het momentane kolkvolume V_K :

$$S_K(t) = \frac{M(t)}{V_K(t)} \quad ; \quad V_K(t) = \sum_{n=1}^{25} V_n(t) \quad (C.2)$$

Van elke voorhaven wordt het diepte-gemiddelde zoutgehalte bepaald uit vijf zoutmeters, opgehangen aan de remmingwerken, zie Figuur 3.2a. De lokale waterdiepte wordt met een drukmeter gemeten. De diepte van de zoutmeters met hun eigen drukmeters wordt berekend rekening houdend met de gemeten specifieke dichtheid boven de drukmeters. Om voor de hand liggende redenen konden de zoutmeters in de voorhaven niet op de diepste locatie centraal in de vaargeul naar de kolk geplaatst worden. Op het moment van het openen van

de sluisdeuren naar een voorhaven wordt het zoutgehalte op de bodem van de vaargeul gelijk gesteld aan het op dat moment optredende maximale zoutgehalte in de kolk. Later is door afzuigen van water ter hoogte van het Δ -luchtbellenscherm aan zeezijde het zoutgehalte op de kolkvloer en in de vaargeul gemeten.

Gecombineerd met deze laatste schatting volgt het diepte-gemiddelde zoutgehalte S_H in een voorhaven uit

$$S_H(t) = \frac{\sum_{m=1}^6 H_m(t) S_m(t)}{\sum_{m=1}^6 H_m(t)} \quad (C.3)$$

waarbij H_m een diepte-increment is waarover zoutgehalte S_m geldt en m is een teller voor de vijf zoutmeters en de zesde voor de schatting van de diepte en het zoutgehalte bij de bodem van de vaargeul naar de kolk.

Aan het zoutgehalte S_H van een voorhaven voegen we een subscript toe als onderscheid tussen het zoutgehalte in de voorhaven aan meerzijde ($S_{H,M}$) of aan zeezijde ($S_{H,Z}$). Analoog (C.2) en (C.3) berekenen we de volume-gemiddelde en diepte-gemiddelde specifieke dichtheden (symbool ρ) van het water in de kolk en buiten de sluisdeuren in de voorhavens.

Van belang is een schatting voor de maximale zoutmassa welke de kolk kan bevatten als deze zeer lang naar een voorhaven is geopend. Dit maximum baseren we op het momentane kolkvolume $V_K(t)$ en het diepte-gemiddelde zoutgehalte ($S_{H,Z}$) van de zeezijde-voorhaven. Echter, uit onze waarnemingen (zie b.v. Figuur 3.17 om 10:50, 15:00 en 18:40 uur) blijkt dat het zoutgehalte in de kolk nog een fractie δS onder de maximale en boven de minimale waarde ligt en daarom definiëren we de maximale en minimale zoutmassa in de kolk als:

$$M_{\max} = \{S_{H,Z}(t) - \delta S\} V_K(t) \quad ; \quad M_{\min} = \{S_{H,M}(t) + \delta S\} V_K(t) \quad (C.4)$$

waarbij δS 2 ppt blijkt te bedragen.

Ten behoeve van het bepalen van de doorlaatfractie volgens de definitie (3.3.1) en grondslagen in Appendix A wordt de momentane verandering van de zoutmassa in de kolk genormeerd met de maximale verandering gebaseerd op (C.4). Voor een kolk in open verbinding met de zeezijde-voorhaven definiëren we conform (3.3.1) de volgende relatieve verandering van de zoutmassa in de kolk:

$$\text{Kolk open naar zeezijde: } \frac{\Delta M(\Delta t)}{\Delta M_{\max}} = \frac{M(\Delta t) - M(0)}{M_{\max} - M(0)} \quad (C.5)$$

waarbij Δt het tijdsinterval is tussen openen en weer sluiten van de sluisdeuren naar zeezijde. Voor een kolk in open verbinding met de meerzijde-voorhaven definiëren we conform (3.3.1) eveneens een positieve waarde voor de relatieve verandering van de zoutmassa in de kolk:

$$\text{Kolk open naar meerzijde: } \frac{\Delta M(\Delta t)}{\Delta M_{\max}} = \frac{M(0) - M(\Delta t)}{M(0) - M_{\min}} \quad (C.6)$$

met Δt het tijdsinterval tussen openen en sluiten van de sluisdeuren naar meerzijde.

Verder wordt in verband met de definitie (3.3.1) en de grondslagen volgens Appendix A de verstreken tijd Δt sinds openen van de sluisdeuren genormeerd met de reistijd van de zoutwater- of zoetwatertong, die ongehinderd en zonder energieverlies heen en terug door de kolk loopt.

De voortplantingssnelheid c_{tong} van de zouttong vanaf de zeezijde de kolk in gaand wordt gedefinieerd als:

$$c_{\text{tong}} = \frac{1}{2} \sqrt{g' \Delta H} \quad ; \quad g' = g \frac{\rho_{H,Z}(0) - \rho_K(0)}{\frac{1}{2} \{ \rho_{H,Z}(0) + \rho_K(0) \}} \quad ; \quad \Delta H = H_K(0) - H_D \quad (\text{C.7a})$$

In (C.7a) is g' de zg. gereduceerde gravitatieversnelling gebaseerd op de volume-gemiddelde (kolk) en diepte-gemiddelde (voorhaven) specifieke dichtheden. Tevens wordt in (C.7a) de voortplantingssnelheid c_{tong} gebaseerd op de kolkdiepte H_K verminderd met de hoogte H_D van 30 cm van de drempels van de Stevinsluis.

De voortplantingssnelheid c_{tong} van de zoetwatertong vanaf de meerzijde de kolk in gaand wordt gedefinieerd als:

$$c_{\text{tong}} = \frac{1}{2} \sqrt{g' \Delta H} \quad ; \quad g' = g \frac{\rho_K(0) - \rho_{H,M}(0)}{\frac{1}{2} \{ \rho_K(0) + \rho_{H,M}(0) \}} \quad ; \quad \Delta H = H_K(0) - H_D \quad (\text{C.7b})$$

Op het moment van openen van de sluisdeuren wordt bij elke schutting naar zee- of meerzijde (C.7a+b) berekend met de dan heersende specifieke dichtheden en kolkpeil.

De verstreken tijd Δt wordt tot τ genormeerd met de reistijd van de ongehinderde en energiebehoudende tong over de afstand heen en terug door de kolk met kolk lengte L_K :

$$\tau = \frac{\Delta t c_{\text{tong}}}{2L_K} \quad (\text{C.8})$$

Deze genormeerde tijdschaal wordt gehanteerd om verschillende experimenten onderling te vergelijken waaruit het tijdsafhankelijke verloop van de doorlaatfractie volgt, zie (3.3.1) aan het begin van deze appendix.

In Hoofdstuk 4 worden de gemeten veranderingen in zoutmassa in de kolk vergeleken met de volgende theoretische schatter ΔM_{th} voor de verandering van de zoutmassa gedurende de deuropentijd T_{open} :

$$\text{Kolk open naar zeezijde: } \Delta M_{th} = c_{\text{tong}} B_D \{ S_{H,Z}(0) - S_K(0) \} T_{\text{open}} \quad (\text{C.9})$$

met kolkbreedte B_D ter plaatse van de sluisdeuren. Deze theoretische schatter is dus gebaseerd op de voortplanting van een ongeremde en energiebehoudende zouttong en gebaseerd op het kolkpeil boven de drempels. De zoutgehalten in (C.9) worden bepaald op het moment dat de sluisdeuren openen. De theoretische verandering van de ongeremde toename van de zoutmassa in de kolk wanneer deze naar zeezijde is geopend wordt als volgt

begrensd door het verschil tussen de maximaal haalbare zoutmassa (C.4) op het moment dat de sluisdeuren weer sluiten en de initiële zoutmassa:

$$\text{Kolk open naar zeezijde: } \Delta M_{th} \leq \left\{ M_{\max}(T_{open}) - M(0) \right\} \quad (\text{C.10})$$

Analoog wordt de theoretische verandering van de zoutmassa in de kolk begrensd door het verschil tussen de initiële en de minimaal haalbare zoutmassa van de kolk op het moment dat de sluisdeuren naar meerzijde sluiten:

$$\text{Kolk open naar meerzijde: } \Delta M_{th} \leq \left\{ M(0) - M_{\min}(T_{open}) \right\} \quad (\text{C.11})$$

De theoretische verandering van de zoutmassa in de kolk volgens (C.7) en (C.9) t/m (C.11) wordt in Hoofdstuk 4 gehanteerd en blijkt volgens Figuur 4.6 een goede schatter voor de waargenomen veranderingen in zoutmassa van de onbeschermde kolk te zijn.

De saliniteit en dichtheid die hier zijn gehanteerd zijn berekend uit de geleidbaarheid en temperatuur gemeten met de zoutmeters in de kolk en voorhavens, zie Figuur 3.2. Van de zoutmeters is de meting van de geleidbaarheid gecalibreerd met een referentie-instrument en de standaardprocedure van de instrumentatiegroep van Deltares. De temperatuurmeting van de zoutmeters is gecalibreerd aan een referentie-instrument dat halfjaarlijks door het instituut NMI wordt geijkt. Uit de geleidbaarheid en temperatuur van de zoutmeters wordt de saliniteit berekend met de standaardformule van Unesco, zie verder hoofdstuk 3 in (Kuyper, 1999). Uit de saliniteit en temperatuur wordt de dichtheid van het water berekend, zie onderdeel 3.2.1 in (Kuyper, 1999).

Tijdens de praktijkproef werden drie containers met bekend zoutgehalte gebruikt om tussentijds de zoutmeters te controleren op geleidbaarheid en vergeleken met het referentie-instrument van Deltares. De zoutmeters werden regelmatig uit het water genomen en gereinigd en geijkt.

D Analyse methode lekkende ebdeuren

In onderdeel 2.7 wordt de methode van lekkende ebdeuren uitgelegd, de methode die in de Stevinsluis is toegepast, en in onderdeel 4.3.4 wordt besproken. Deze appendix geeft meer kwantitatieve informatie over het debiet dat door een geheel of gedeeltelijke geopende rinketschuif van de Stevinsluis stroomt en de peilverschillen over gesloten sluisdeuren.

Uit waarnemingen van het tijdsverloop van de kolkstand tijdens eb met verschillende kierstanden α ($0 \leq \alpha \leq 1$) van opening van de rinketschuiven van de Stevinsluis vonden we dat voor het waterdebiet Q_{rink} in m^3/s door één paar rinketschuiven (in één stel puntdeuren) geldt:

$$Q_{\text{rink}} = c(\alpha) \sqrt{\Delta H} \quad \text{met} \quad c(\alpha) \approx \alpha c_0 \quad \text{en} \quad c_0 = 12 \left[\text{m}^{\frac{5}{2}} / \text{s} \right] \quad (\text{D.1})$$

met ΔH het verschil in waterstand over de rinketschuiven. We hebben gemeten dat de rinketschuiven ca 1m breed zijn en tot 1,35m geopend kunnen worden zodat bij 100% opening per zijde $2,7\text{m}^2$ doorstroomd oppervlak ontstaat. Overigens, de maximale opening van 1,35m is minder dan volgens tekening maar onze waarnemingen tonen dat de slag van de aandrijfslag tot maximaal 1,35m beperkt blijft.

Een controle op (D.1) is het toepassen van de debietrelatie voor uitstroming door scherp berande doorstroomd oppervlak A welke een afvoercoëfficiënt $\mu=1$ heeft zodat geldt:

$$Q_{\text{rink}} = \mu A \sqrt{2g \Delta H} \quad ; \quad \mu A \sqrt{2g} \approx 12 \quad \text{met} \quad \mu = 1 \quad \text{en} \quad A = 2,7 \left[\text{m}^2 \right] \quad (\text{D.2})$$

Dit resultaat bevestigt (D.1) en onderbouwt de door ons gemeten evenredigheid met de gedeeltelijke openingsfractie α .

Uit (D.1) volgt dat in het begin van het nivelleren van de kolk bij 1m waterstandsverschil er ca. $12 \text{ m}^3/\text{s}$ door de rinketschuiven stroomt. Dit debiet betrokken op de totale dwarsdoorsnede van de kolk geeft ca. 18 cm/s watersnelheid dat lineair met de afstand tot de geopende rinketschuiven naar nul afneemt naar het gesloten kolkeinde. Naar verwachting zal de zoetwaterstraal gaan drijven en wanneer deze toplaag een halve waterdiepte dik is geldt een stroomsnelheid van ca. 18 cm/s halverwege de kolk en in de toplaag.

Uit toepassing van (D.1) aan zeezijde en aan meerzijde met waterstanden H_M aan meerzijde en H_Z aan zeezijde en uit gelijk stellen van de debieten door de schuiven aan beide zijden volgt het gezochte ebdebiet:

$$Q_{\text{lek}} = \frac{\alpha_M \alpha_Z}{\sqrt{\alpha_M^2 + \alpha_Z^2}} \left\{ c_0 \sqrt{H_M - H_Z} \right\} \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] \quad (\text{D.3})$$

met α_M de kierstand van de rinketschuiven aan meerzijde en α_Z de kierstand aan zeezijde.

Voor een waterstandsverschil van 1m bij lage buitenwaterstand en met 100% geopende schuiven aan één zijde en 20% geopend aan de andere zijde geeft (D.3) een zoetwaterdebiet door de sluis van ca. $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit debiet is ook aanwezig tijdens nivelleren en er is dus

sprake van een restverschil in waterstand waartegen de sluisdeuren geopend blijken te kunnen worden.

Voor openingen van 30% aan één kolkeinde tegenover 100% rinketopening aan de andere kolkeinde of meer bleek de kolk niet meer op peil te brengen d.w.z. de waterstand van de kolk bleef te veel afwijken van die aan zee- of meerzijde om de sluisdeuren veilig te mogen openen. Verder vergroot een ebdebiet de (wacht-)tijd voor het nivelleren van de kolk. Uit (D.1) kan de volgende relatie worden afgeleid voor het peilverschil tussen kolk en zeezijde-voorhaven:

$$H_K - H_Z = \frac{H_M - H_Z}{1 + \beta} \quad \text{met} \quad \beta = \left(\frac{\alpha_Z}{\alpha_M} \right)^2 \quad (\text{D.4})$$

Het peilverschil $H_K - H_Z$ tussen kolk en zeezijde-voorhaven is uiteraard gelijk aan het verschil $H_M - H_Z$ in waterstanden tussen meer- en zeezijde wanneer de kierstand aan zeezijde $\alpha_Z = 0$ bedraagt d.w.z. gesloten rinketschuiven aan zeezijde. Wanneer de kierstand van de rinketschuiven naar zeezijde tot 100% ($\alpha_Z = 1$) wordt vergroot zoals bij schutten naar zeezijde maar gelijktijdig de kierstand aan meerzijde 30% ($\alpha_M = 0,3$) bedraagt dan is de waterstand tussen kolk en zeezijde nog ca. 8 % van het totale verschil in waterstanden. Het aldus resterende verschil tussen waterstanden van kolk en zeezijde-voorhaven kan te groot zijn om de sluisdeuren te kunnen openen. Overigens in de praktijk van de Stevinsluis blijken de sluisdeuren al geopend te kunnen worden bij peilverschillen tussen kolk en voorhaven kleiner dan 10cm.

E Waterverplaatsing door schroefstraal van schip

Een schip dat de kolk invaart zal in de kolk afremmen en wanneer een schip de kolk uitvaart eerst gaan versnellen. In beide gevallen wordt met de schroef de benodigde impuls geleverd. De schroef versnelt water in de schroefstraal met een snelheidsverschil ΔU_{prop} . Wanneer de schroefstraal een massaflux van \dot{M}_{prop} verplaatst is de kracht die schroef op het schip (en water) uitoefent gelijk aan:

$$F_{prop} = \dot{M}_{prop} \Delta U_{prop} \quad (\text{E.1})$$

Hiermee wordt het schip vertraagd of versneld maar ook een deel van het verplaatste water (virtuele massa) wat aan kracht F_s vergt:

$$F_s = (M_s + M_v) \frac{dU_s}{dt} \quad (\text{E.2})$$

waarin M_s de massa van het schip is (gelijk aan zijn waterverplaatsing), M_v de virtuele watermassa zijnde een fractie van M_s (kan tot 100% bedragen), en tenslotte is U_s de scheepssnelheid. Uit gelijkstellen van (E.1) met (E.2) volgt voor de afgelegde afstand X tijdens versnellen of vertragen:

$$X = \frac{1}{2} \beta t^2 \quad ; \quad \beta = \frac{\dot{M}_{prop} \Delta U_{prop}}{M_s + M_v} \quad (\text{E.3})$$

Laten we veronderstellen dat de afstand voor versnellen of vertragen gelijk is aan de halve kolk lengte L_K en dan volgt uit (E.3) voor de door de schroefstraal verplaatste watermassa ($\dot{M}_{prop} t$):

$$\frac{\dot{M}_{prop} t}{M_s + M_v} = \frac{L_K}{\Delta U_{prop} t} \quad (\text{E.4})$$

Voor een tijdsinterval van 60 seconden voor stoppen of versnellen in een kolk van 148m lengte met een schroefstraal dat een snelheidsverschil ΔU_{prop} van ca. 2,5 m/s levert volgt uit (E.4):

$$\dot{M}_{prop} t \approx M_s + M_v \quad (\text{E.5})$$

Met (E.5) is getoond dat de schroefstraal meer dan de waterverplaatsing en mogelijk zelfs het dubbele van de waterverplaatsing aan water kan verplaatsen tijdens stoppen of op gang komen van een schip in de kolk.