

**Ontwerpstudie en
Praktijkproef
Zoutlekbeperving
Volkeraksluizen**



Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen

**Deelproject 2 Verkenning effectiviteit zoutlekbepervende
maatregelen op laboratoriumschaal**

ir. D.R. Mastbergen

1201226-002

Titel

Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen

Opdrachtgever

RWS WaterDienst

Project

1201226-002

Pagina's

41

Trefwoorden

luchtbellenscherm, zoutlekbeperring, scheepvaartsluizen, waterscherm, zout-zoetscheiding, dichtheidsstromen

Samenvatting

Het voorliggende rapport geeft een verslag van de in december 2009 uitgevoerde labproeven uitgevoerd in het kader van het project Zoutlekbeperring Volkerak. Deze proeven zijn bedoeld als voorbereiding op de praktijkproeven bij de Stevinluis en ter validatie van de toegepaste numerieke modellen.

Er zijn modelproeven uitgevoerd in een 14 m lange goot met glazen wanden, waarin een sluiskolk en een voorhaven zijn gemodelleerd bij een waterdiepte van 0,29 m. Het lucht- en waterdebiet van het zoutlekbeperrkende scherm alsmede het verschil in zoutgehalte van voorhaven en kolk zijn gevarieerd.

Uit de proeven is gebleken dat een grote reductie van de zoutuitwisseling en het zouttransport tussen voorhaven en schutkolk mogelijk is door het toepassen van een luchtbellenscherm of een combinatie van een luchtbellen- en een waterscherm. Uit de metingen volgt echter dat de invloed van het waterscherm alleen gering is ten opzichte van die van het luchtbellenscherm.




Summary

The present report gives the results of the laboratory tests performed in December 2009 as a part of the Volkerak Salinization Control project in a 14 m flume with glass windows and a waterdepth of 0.29 m. The purpose of these tests was to model the salt intrusion in a ship lock by exchange flow and the effect of salinization control measures such as a pneumatic or hydraulic barrier. The results will be used to validate numerical models and to prepare for the field tests at the Stevin locks.

It appeared that the application of a pneumatic barrier or the combination of a pneumatic and a hydraulic barrier is very effective in salinization reduction. With a hydraulic barrier alone however, the effect is minor.

Referenties

Zie referentielijst

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	feb. 2010	Ir. D.R. Mastbergen					
1.1	april 2010	Ir. D.R. Mastbergen		Ir. R.J. de Jong		Ir. T. Schilperoort	

Status

definitief

Inhoud

Uitgebreide Samenvatting	iv
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
2 Opzet labproeven	7
2.1 Doelstelling	7
2.2 Proefopstelling	7
2.2.1 Keuze faciliteit	7
2.2.2 Voorbereiding	9
2.3 Metingen	11
2.3.1 Instrumenten en data-acquisitie	11
2.3.2 VeZo zoutverticalen	12
2.3.3 Videoregistraties	12
2.4 Proefuitvoering	13
2.4.1 Proefinstellingen	13
2.4.2 Proefprocedure	14
2.5 Schaalregels	14
3 Meetresultaten	17
3.1 Uitgevoerde proeven	17
3.1.1 Proevenprogramma	17
3.1.2 Proefinstellingen	18
3.1.3 Waarnemingen	20
3.2 Dataverwerking	21
3.2.1 Omrekening naar fysische eenheden	21
3.2.2 Begrippen m.b.t. de zoutbeweging	22
3.2.3 Meet- en videobestanden	23
3.3 Uitwerking per proef	24
3.3.1 Gemeten gerealiseerde instellingen	24
3.3.2 Meetresultaten uit Yokogawa geleidendheidsmeter	25
3.3.3 Meetresultaten uit analyse VeZo's	26
3.3.4 Grafieken per proef	26
3.3.5 Saliniteit kolk	27
3.3.6 Zoutuitwisseling	28
3.3.7 Zouttransport	30
3.4 Analyse meetresultaten	31
3.4.1 Literatuurstudie modelonderzoek zoutlekbeperking bij schutsluizen	31
3.4.2 Dimensieloze parameters	32
3.4.3 Vergelijking met literatuur, luchtbellenscherm	34
3.4.4 Vergelijking met literatuur, waterscherm	35
3.4.5 Vergelijking met literatuur, tijdsduur van opening	36

4 Conclusies en Aanbevelingen	39
4.1 Conclusies laboratoriumproeven	39
4.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek	40
5 Referenties	41

Bijlagen

Bijlage A	Grafieken Meetresultaten Vezo's per proef
Bijlage B	Grafieken Zoutcontouren
Bijlage C	Grafieken Verticaal gemiddelde Vezo's
Bijlage D	Grafieken Zoutprofielen
Bijlage E	Notitie Zwakke schaalwet bellengordijn

Begrippenlijst zoutlekbeperving bij schutsluizen

- 1 De zoutindringing (of het zoutbezwaar) is de totale hoeveelheid zout (zoutmassa in kg) die gedurende een bepaalde tijdsduur (bijv. een dag) tijdens het schutproces door de schutsluis van de voorhaven naar de zoetwaterzijde is gestroomd.
- 2 Het zouttransport (in kg/s) is de hoeveelheid zout die de schutkolk indringt gemiddeld over een zekere tijdsduur (bijv. de opentijd). Een negatief zouttransport betekent dat het zout de kolk uitstroomt naar de zoete voorhaven. Bij een gemiddelde over een langere periode met verschillende schutcycli wordt i.p.v. over zouttransport gesproken over de zoutlek (bijv. uitgedrukt in ton/dag of omgerekend naar kg/s).
- 3 De zoutuitwisseling (uitgedrukt in een percentage %) is de hoeveelheid zout die vanuit de voorhaven de sluis kolk gedurende een bepaalde tijdsduur in is gestroomd gerelateerd aan de hoeveelheid zout in de sluis kolk als die geheel gevuld zou zijn met het zoute water van de voorhaven. De definitie geldt ook voor een zoute kolk en een zoete voorhaven (stoomrichting zout omgekeerd).
- 4 De reductiefactor (factor η) is gedefinieerd als het opgetreden zouttransport bij de sluis met zoutlekbepervende maatregelen, gedeeld door het transport bij een lock-exchange flow (dus zonder zoutlekbepervende maatregelen) met hetzelfde dichtheidsverschil.
- 5 Een kolkuitwisselingsstroming (lock-exchange flow) is gedefinieerd als de dichtheidsstroming die optreedt bij het openen van de sluisdeur ten gevolge van alleen een dichtheidsverschil van het water, dus zonder de effecten van nivellering en/of zoutlekbepervende maatregelen.
- 6 Het zoutfront is een onderdeel van de kolkuitwisselingsstroming: het zoute water stroomt in een laag (zouttong) onder het zoete water door (soms intrusie genoemd) en beide stromen vertonen een front, het zoet- of zoutfront. In en nabij de fronten vindt relatief veel menging plaats.
- 7 De lengte van de zoute onderlaag, gerekend vanaf de kolkingang, wordt de intrusielengte genoemd.

Uitgebreide Samenvatting

Een belangrijk aspect bij het besluit om het Volkerak-Zoommeer te verzilten ter bestrijding van blauwalg en ter verbetering van de waterkwaliteit, is de optredende zoutlek door de Volkerak scheepvaartsluizen. De zoutlek door deze schutsluizen naar het Hollandsch Diep, dat behouden dient te blijven als zoetwaterreservoir, is onaanvaardbaar groot zonder toepassing van voldoende effectieve maatregelen. Een deel van de zoutlek is een gevolg van de verplaatsing van scheepsvolumes van het zoete naar het zoute pand en van het nivelleren van de kolken als het zoute pand hoger staat dan het zoete pand. Dit deel is niet met beperkte maatregelen te compenseren. Een ander belangrijk deel van de zoutlek is het gevolg van de kolkuitwisselingsstroming bij openstaande sluisdeuren. Deze kolkuitwisselingsstroming is wel met beperkte maatregelen te beïnvloeden. Gedacht wordt nu aan een combinatie van zoutlekbeperkende maatregelen die de schutcyclus niet verlengen, zoals een luchtbellens- en een waterscherm (of zoutlekbeperkend scherm). Deltares is gevraagd door RWS hiernaar een studie uit te voeren.

De verschillende maatregelen zullen getest worden met praktijkproeven bij de Stevinsluis in de Afsluitdijk (Deeltaak 3) alvorens te worden toegepast bij de Volkerak schutsluizen. Voorafgaand aan deze praktijkproeven zijn numerieke berekeningen (Deeltaak 1) en laboratoriumproeven (Deeltaak 2) uitgevoerd.

Het voorliggende rapport geeft een verslag van de in december 2009 uitgevoerde laboratoriumproeven. Er zijn proeven uitgevoerd in een 14 m lange goot met glazen wanden, waarin de sluisdijk en de voorhaven geschematiseerd zijn aangebracht bij een waterdiepte van 0,29 m. Het lucht- en waterdebiet van het zoutlekbeperkende scherm alsmede het verschil in zoutgehalte van voorhaven en kolk zijn gevarieerd. De sluisdeur is gemodelleerd met een verticaal wegneembare schuif als scheiding tussen zoet en zout water. De afmetingen en openstellingstijd en de ingestelde waarden voor lucht- en waterdebiet zijn zo goed mogelijk verschaald op basis van de Stevinluisituatie. De proeven beogen echter geen volledige verschaalde weergave te bieden van de Stevin- of Volkeraksluizen.

De labproeven zijn vooral bedoeld om de processen van een zout-zoet dichtheidsstroming bij een luchtbellens- en een waterscherm als scheidingsmiddel van zout en zoet water in een modelschutkolk inzichtelijk te maken. Daartoe is het proces van zoutuitwisseling zo goed mogelijk zichtbaar gemaakt en met video vastgelegd, zie Foto 0.1. De meetresultaten zijn daarnaast bedoeld om de numerieke 3D modellen te valideren waarmee ook de praktijkproeven zullen worden nagerekend, zodat deze met voldoende vertrouwen kunnen worden ingezet. Vooral de interactie tussen dichtheidsstroming en luchtbellens- en waterscherm is tot nog toe niet gevalideerd in dergelijke numerieke modellen.

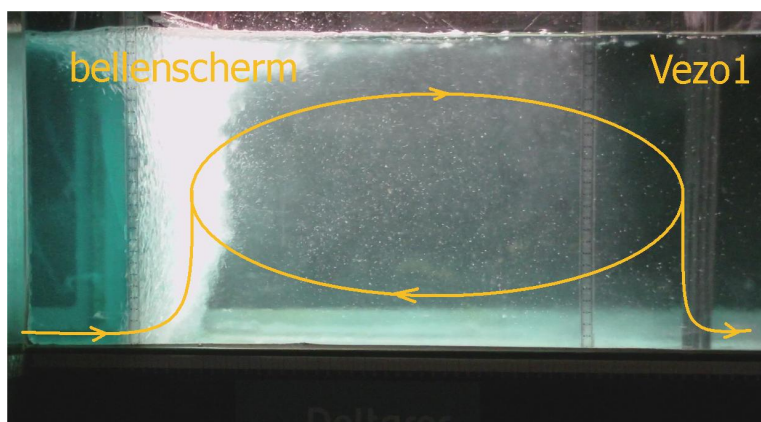
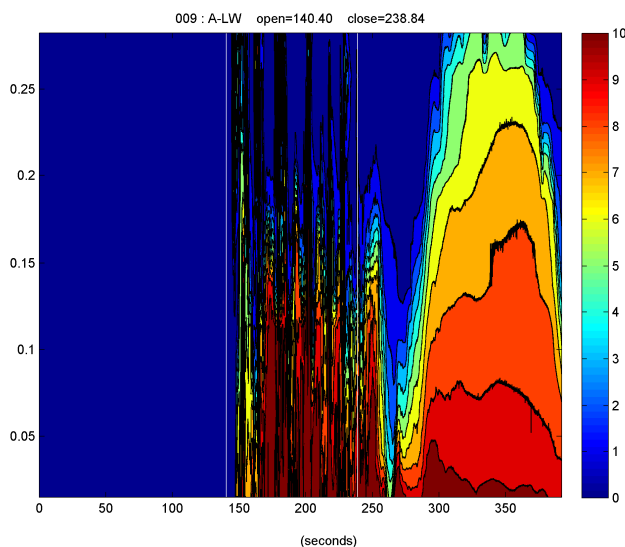


Foto 0.1 Brakwatercirculatie in de sluis kolk achter het luchtbellenscherm

Er zijn in totaal bijna 20 proeven uitgevoerd met verschillende saliniteit (= maat voor het zoutgehalte van het water) van de voorhaven en de kolk, gemeten voor en na iedere proef met een geleidendheidsmeter en met variatie van het lucht- en waterdebiet. Gemeten zijn het water- en luchtdebiet en de saliniteit in de kolk in een tweetal verticalen (VeZo's) gedurende de openstelling van de kolk tot enige tijd na sluiting van de verticale schuif. De meetresultaten van de VeZo's zijn weergegeven in tijdreeksen, contourplots (zie als voorbeeld Figuur 0.1) en zoutprofielen, waarvan animaties zijn gemaakt. In deze grafieken is het binnendringen van het zout (de zogenaamde zouttong) en de reflectie tegen het gesloten andere einde van de kolk te zien. Bij toepassing van het luchtbellenscherm is te zien dat het zout sterk over de vertikaal wordt gemengd. Bij het sluiten van de verticale schuif treden nog langdurig interne dichtheidsgolven op. De uitwisselingsstroming is ook goed zichtbaar gemaakt aan de voorhavenszijde met waterstofgasbelletjes en laserlicht (een lasermes).

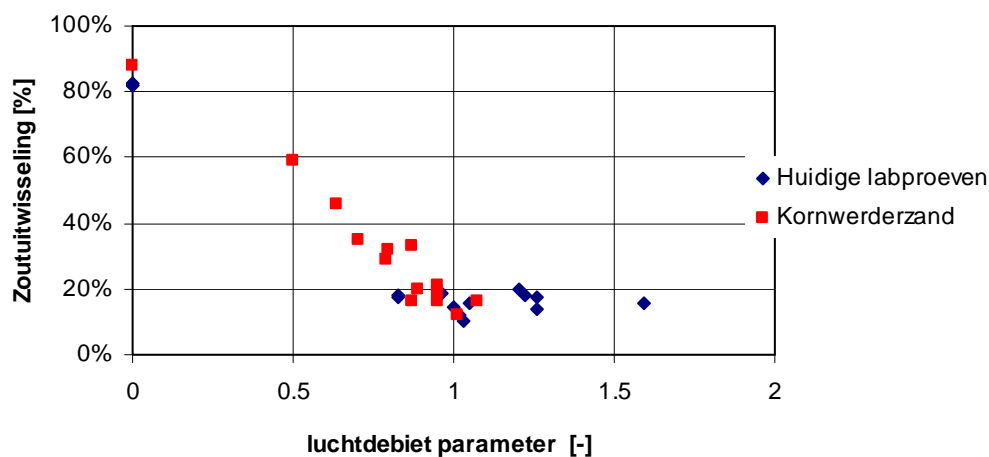


Figuur 0.1 Contourplot van saliniteit (in ppt) in de tijd gemeten met VeZo1

De effectiviteit van de zoutlekbepanking is gekwantificeerd door middeling van de gemeten saliniteit met de Vezo's vanaf het moment van sluiting en met een zoutgehaltemeting na menging van het water in de kolk, zodat voor iedere proefinstelling de opgetreden zoutlek kon worden vastgesteld. Ter vergelijking zijn proeven gedaan zonder zoutlekbepankende maatregelen (kolkuitwisselingsstroming of lock-exchange flow). Uit het verschil is de zg.

reductiefactor bepaald. De proefresultaten zijn uitgewerkt en onderling vergeleken. Om de meetresultaten te kunnen vergelijken met eerder uitgevoerd laboratorium- en veldonderzoek, is bovendien nog een korte literatuurstudie uitgevoerd.

Uit de proeven is gebleken dat een belangrijke reductie van de zoutuitwisseling (en dus het zouttransport tussen voorhaven en schutkolk) mogelijk is door het toepassen van een luchtbellenscherm of een combinatie van een luchtbellens- en een waterscherm, zie Figuur 0.2. In deze figuur is de zoutuitwisseling als functie van de dimensieloze luchtdebietparameter weergegeven, tezamen met de resultaten van eerdere praktijkmetingen (sluis Kornwerderzand, 1962).

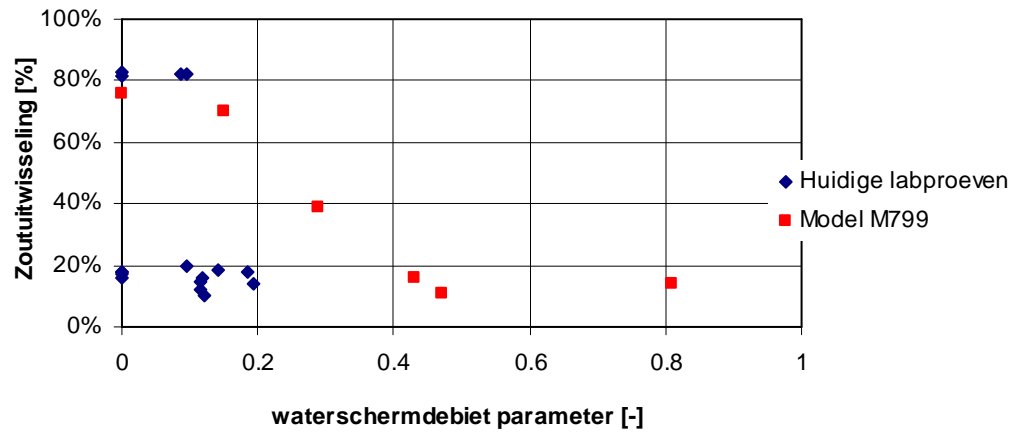


Figuur 0.2 Zoutuitwisseling als functie van de luchtdebietparameter, huidige proeven en praktijkproeven met luchtbellenscherm

Het blijkt mogelijk het luchtdebiet een factor 2 (parameter 1,6 naar 0,8) te reduceren zonder significante toename van de zoutuitwisseling, zie Figuur 0.2. Het kenmerkende stromingspatroon, waarbij een brakwater-circulatiezone ontstaat direct achter het luchtbellenscherm (zie Foto 0.1), bleef bij deze lagere luchtdebieten behouden.

Uit de metingen volgt echter dat de invloed van het toegepaste waterscherm gering is ten opzichte van die van het luchtbellenscherm, zie Figuur 0.3, waarin de zoutuitwisseling is weergegeven als functie van het dimensieloze waterschermdebiet, ingesteld op basis van de beschikbare capaciteit bij de Stevinsluis, en vergeleken met die van eerder modelonderzoek (M799, 1963). De lage waarden in het traject tussen 0 en 0,2 worden veroorzaakt door het luchtbellenscherm dat in die gevallen parallel aan het waterscherm heeft gestaan. De hoge waarden met alleen een waterscherm komen overeen met de metingen van het eerdere modelonderzoek.

De inzet van een zoetwaterscherm in een brakwaterkolk in combinatie met een luchtbellenscherm met gereduceerd luchtdebiet (ongeveer 1 in Figuur 0.2) leverde de grootste reductie op van de zoutuitwisseling.



Figuur 0.3 Zoutuitwisseling als functie van de waterschermdesbetparameter, huidige proeven en eerder modelonderzoek met grote zoutwaterschermdesbeten

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).

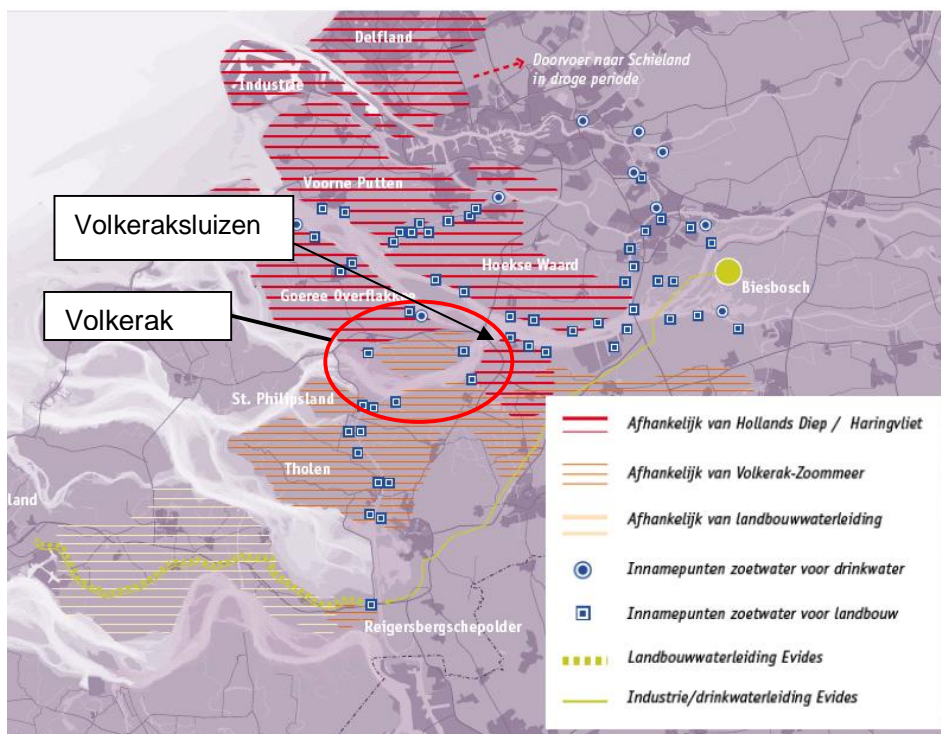
1.2 Beknopt overzicht van het project

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, lekt tijdens het schutten zout water via de Volkeraksluizen 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.

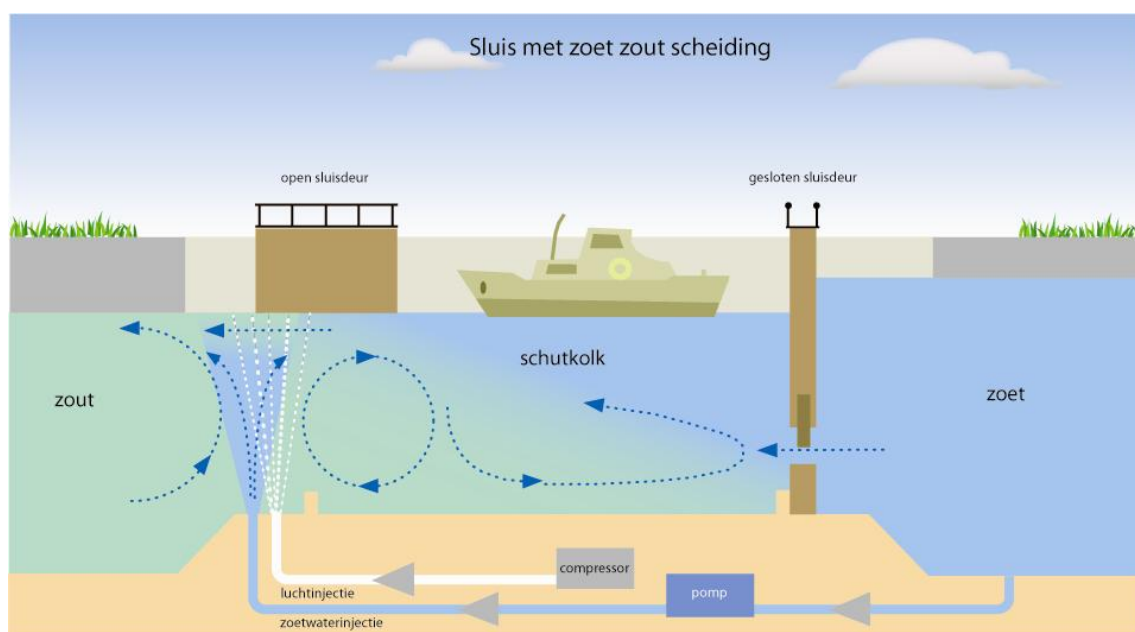


Figuur 1.1 De Volkeraksluizen vormen de verbinding tussen het Volkerak en het Hollandsch Diep. De scheepvaartsluizen bestaan uit 3 beroepsvaartsluizen en 1 jachtensluis. (Bron: Google Earth)



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 (lekkende ebedeuren) 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 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 het onderzoek is om te onderbouwen dat met implementatie van de 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 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 geeft de combinatie van geringere diepte en hoger zoutgehalte in de Stevinsluis een nagenoeg gelijke voortplanting 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 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:

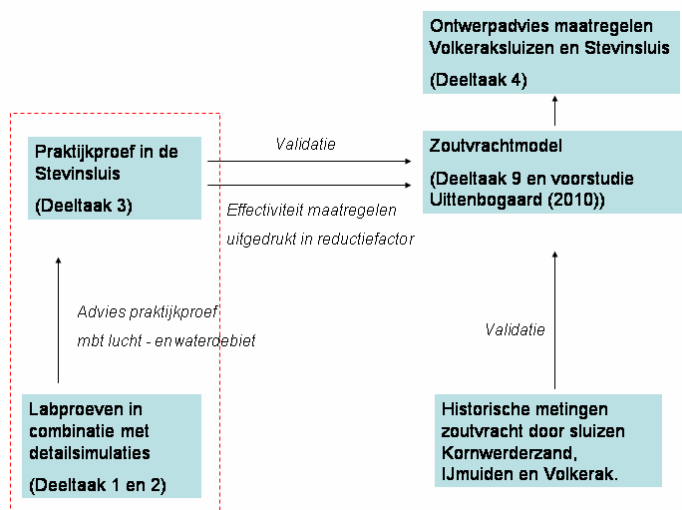
- 1 Numerieke modellering, onder te verdelen in
 - a Gedetailleerde modellering van uitwisselingsstromingen in de Stevinsluis;
 - b Berekening van de zoutlek door de Stevinsluis en de Volkeraksluizen met behulp van het zogenaamde Zoutvrachtmodel (Uittenbogaard, 2010);
 - c Modellering van zoutverspreiding 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 Stevinsluis door middel van detailsimulaties met CFX model en SPH model;
- 2 Verkenning maatregelen in laboratoriumproeven;
- 3 Voorbereiden, uitvoeren en verwerken meetgegevens van de praktijkproeven Stevinsluis;
- 4 Evaluatie en optimalisatie maatregelen met behulp van het Zoutvrachtmodel 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 kalibratie/validatie 3D Noordelijk Deltabekken model voor zoutverspreiding inclusief scenarioberekeningen zoutlek;
- 8 Evaluatie mogelijke maatregelen voor andere sluizen;
- 9 Ontwikkeling en oplevering generiek Zoutvrachtmodel 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 zoutinvasie in een sluis. 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 kolk 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 van de deuren bij voltooiing van de schutcyclus. Het effect van deze processen wordt alleen beschouwd in de praktijkproeven bij de Stevinsluis (deeltaak 3). De resultaten van de praktijkproeven worden vervolgens gebruikt in het Zoutvrachtmodel (deeltaak 9). In deeltaak 4 wordt het Zoutvrachtmodel 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 Zoutvrachtmodel	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 sluisen	8
17. Model zoutvracht sluisen inclusief handleiding	9

1.5 Dit rapport

Het voorliggende rapport, getiteld Deelproject 2 Verkenning effectiviteit zoutlekbeperkende maatregelen op laboratoriumschaal is product nummer 4 uit de bovenstaande serie producten van de 'Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen'.

In dit rapport wordt de uitvoering van de proeven en de uitwerking van de meetresultaten beschreven en worden conclusies verbonden aan de onderlinge vergelijking van de resultaten en de vergelijking met model- en praktijkonderzoek in het verleden.

In hoofdstuk 1, Uitgebreide Samenvatting, zijn al in het kort de hoofdzaken uit het rapport gepresenteerd. Na de algemene inleiding (dit hoofdstuk) wordt in hoofdstuk 3 de opzet en invulling van de laboratoriumproeven uitgebreid beschreven en worden in hoofdstuk 4 de resultaten van de metingen en de analyses gegeven. In hoofdstuk 5 staan de conclusies en aanbevelingen. De bijlagen bevatten de meetresultaten als tijdreeksen per proef, terwijl de proefgemiddelde waarden in de tabellen in hoofdstuk 4 gegeven zijn.

Bij dit rapport hoort een data- DVD (productnummer 5), waarop behalve de meetgegevens ook fotomateriaal, video's van alle proeven en animaties van de zoutmetingen staan.

2 Opzet labproeven

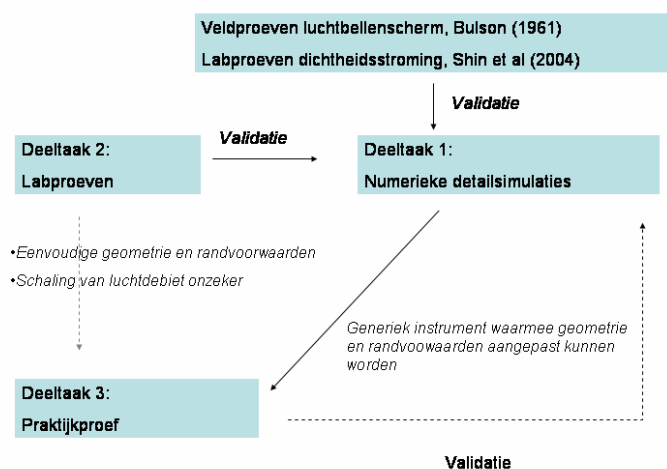
2.1 Doelstelling

Het doel van het project is om tot haalbare ontwerpopties te komen voor maatregelen die in de Volkeraksluizen kunnen worden geïmplementeerd om de zoutlek vanuit het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep te beperken.

Eenvoudige maatregelen die in de huidige situatie van de Volkeraksluizen kunnen worden toegepast en geen extra schuttijd vergen, zijn het gebruik van luchtbellenschermen of het toepassen van een drempel. Andere mogelijke maatregelen betreffen het gebruik van een zoetwaterscherm al of niet in combinatie met een luchtbellenscherm of een drempel.

Het doel van de laboratoriumproeven is het visualiseren van het interactieproces van het luchtbellenscherm en het waterscherm in de scheiding van zout en zoet water voor de sluiskolk en het kwantificeren van de zoutlek gedurende de openstelling van de sluis.

Met de meetresultaten wordt het numerieke stromingsmodel (Numerieke detailsimulaties, G. Keetels, 2010, product 2) gevalideerd voor een geometrische eenvoudige situatie. De proefresultaten zijn mede bepalend voor de vormgeving van de combinatie water- en luchtbellenscherm bij de praktijkproef in de Stevinsluis. In Figuur 2.1 is de samenhang tussen de deeltaken geschetst.



Figuur 2.1 Samenhang deeltaken labproeven, numerieke detailsimulaties en veldexperimenten

2.2 Proefopstelling

2.2.1 Keuze faciliteit

De labproeven zijn vooral bedoeld om de processen bij een luchtbellens- en een waterscherm als scheidingsmiddel van zout en zoet water in een schutkolk inzichtelijk te maken en de effectiviteit van de zoutlekbepanking te kwantificeren.

Het uitgangspunt bij de proefopzet is dat geen exact schaalmodel van het Volkerak- of Stevinsluizencomplex wordt nagestreefd, maar dat specifieke maatregelen voor de scheiding

van zout en zoet water, in een laboratoriumproef onder omstandigheden die zo goed mogelijk lijken op die van de praktijkproef in de Stevinsluis, worden bestudeerd.

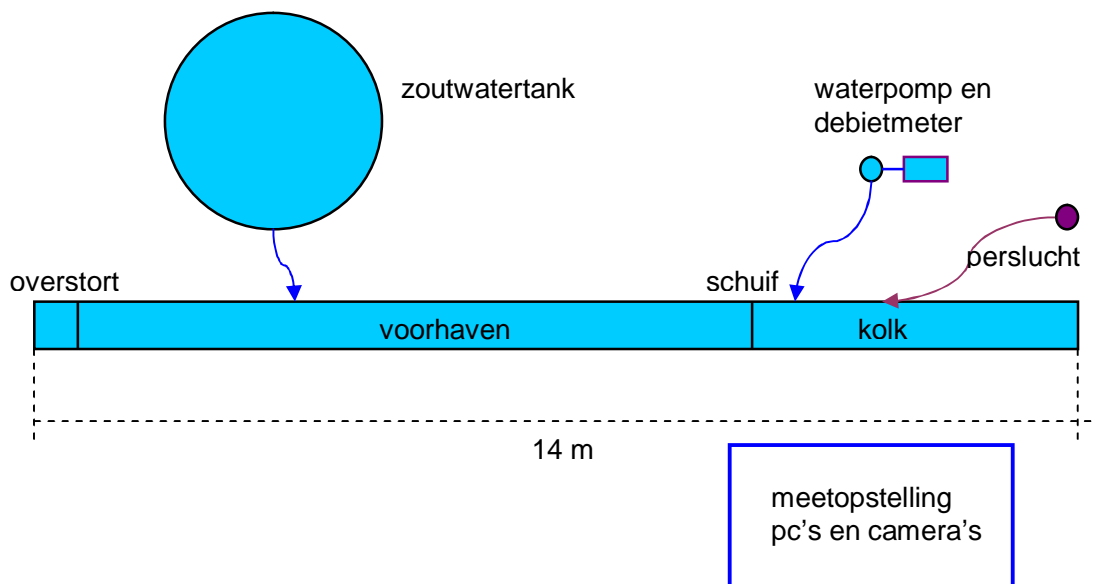
De onderdelen die een modelproef ten minste zal moeten bevatten, zijn:

- Zout en zoet water met het juiste dichtheidsverschil,
- Zoveel mogelijk juiste geometrische verhoudingen van de sluiskolk,
- Luchtbellenscherm met voldoende fijne belletjes verdeeld over de breedte,
- Zoet of brakwater jetsysteem voor waterscherm met voldoende druk en debiet.

Voor de proeven is een gesloten gootdeel benodigd dat gevuld kan worden met zout en met zoet water, gescheiden door een wegneembaar schot. Er zijn dus geen stroming en/of golfvoorzieningen nodig. De goot bestaat liefst uit zoveel mogelijk glas voor visuele inspectie en camera/video registratie.

Na inventarisatie van de Deltares faciliteiten, rekening houdend met geschiktheid voor zout water (corrosie), beschikbaarheid in de beoogde periode en de kosten, bleek de beste mogelijkheid de voormalige Oliegoot met een breedte van 0,5 m, een diepte van 0,5 m en een totale lengte van 14 m (2 delen), zie Figuur 2.2.

Het is van belang dat ook aan de zoute zijde (de “voorhaven”) voldoende gootlengte of oppervlak beschikbaar is om de reflectie van de zoetong zoveel mogelijk te vertragen. Bij plaatsing van de deur op 4,25 m, de theoretische benodigde kolk lengte bij deze breedte, is een “zoute” lengte van bijna 10 m beschikbaar, dit lijkt voldoende. Gezien de raamindeling van de goot wordt de kolkscheiding op 4,21 m aangehouden. Wel is het zo dat het zoete water vanuit de sluiskolk in het model niet zijdelings kan spreiden, zoals in de voorhaven in werkelijkheid. Ook andere 3D effecten bij het openen en sluiten van de deuren of evt. schuiven spelen in het model, gezien de eenvoudige modellering van de deur, geen rol.



Figuur 2.2 Schematisch overzicht proefopstelling (bovenaanzicht)

Na de keuze van de Oliegoot was de voorkeur deze te plaatsen in de Baggergoothal, omdat daar de benodigde logistiek aanwezig is zoals een hijskraan.

Voor het aanmaken van zout water van de juiste saliniteit is de Pekelinstallatie in de Zout-Zoethal van Deltares beschikbaar. Deze installatie kan verplaatst worden naar een andere

locatie of het benodigde zoute water kan in grote containers aangevoerd worden. Het na een proef afgewerkte brakke water kan op het riool geloosd worden binnen de huidige vergunning voor Deltares.

Voor het luchtbellenscherm wordt gebruikt gemaakt van het bestaande Deltares persluchtstelsel, zie Foto 2.2. Vorm en afmetingen van een luchtbellenscherm tot in detail op schaal modelleren is niet mogelijk vanwege schaafeffecten (oppervlaktespanning water/lucht). Belangrijk is dat de krachten die de luchtballen op het water uitoefenen juist worden weergegeven.

2.2.2 Voorbereiding

Om een werkende proefopstelling te verkrijgen zijn eerst een aantal voorbereidingen getroffen, zoals het plaatsen van de Oliegoot in de Baggergoothal, het repareren van twee glasramen, de montage van een bodemplaat met een aansluiting voor een waterschermpomp, een instelbare spleet (voor het waterscherp) en het maken van een overstortrand aan de zoutzijde. De waterpomp (tot 5 l/s) is geplaatst en verbonden met een debietmeter met een Ø40 mm leiding.

Pekel (10 ton) is besteld waarmee zout water met de gewenste dichtheid kan worden aangemaakt. De pekkel is opgeslagen in de pekkelinstallatie. De benodigde pekkel is in een container met een vorkheftruck naar de Baggergoot vervoerd. Het zoute water is op de gewenste saliniteit aangemaakt in een cilindervormige 10 m³ opslagtank vanwaar het in de goot gepompt wordt.

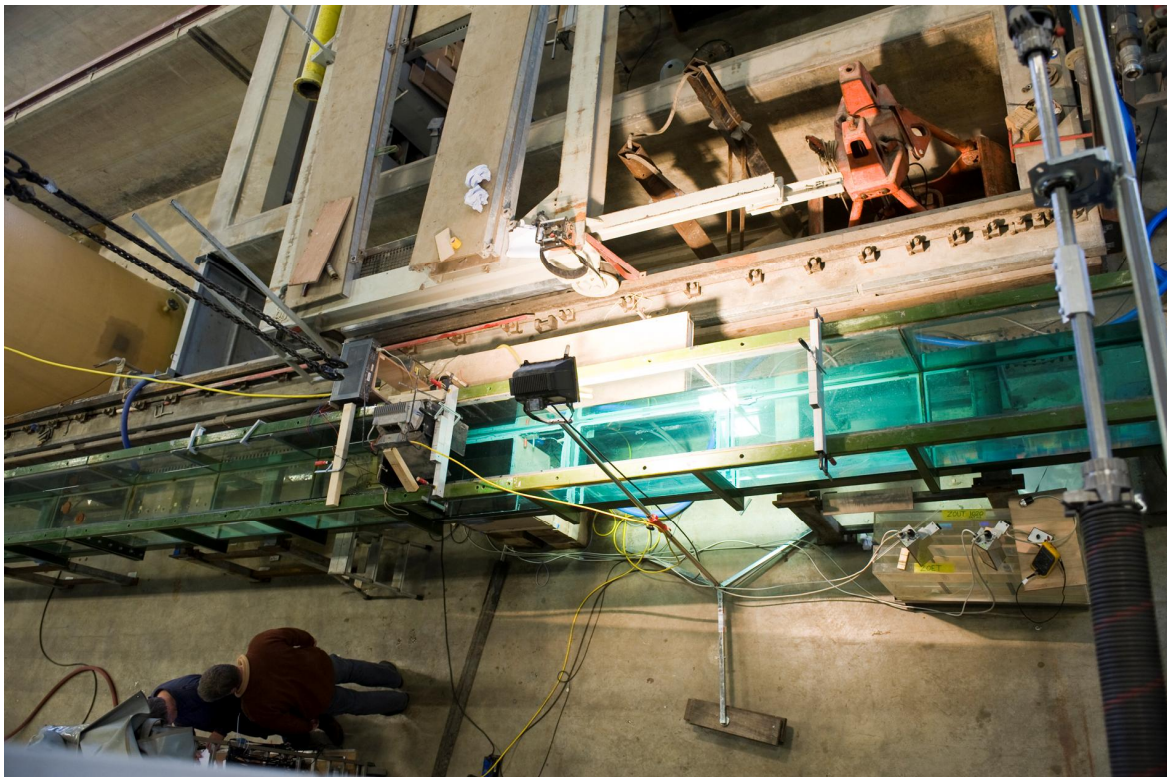
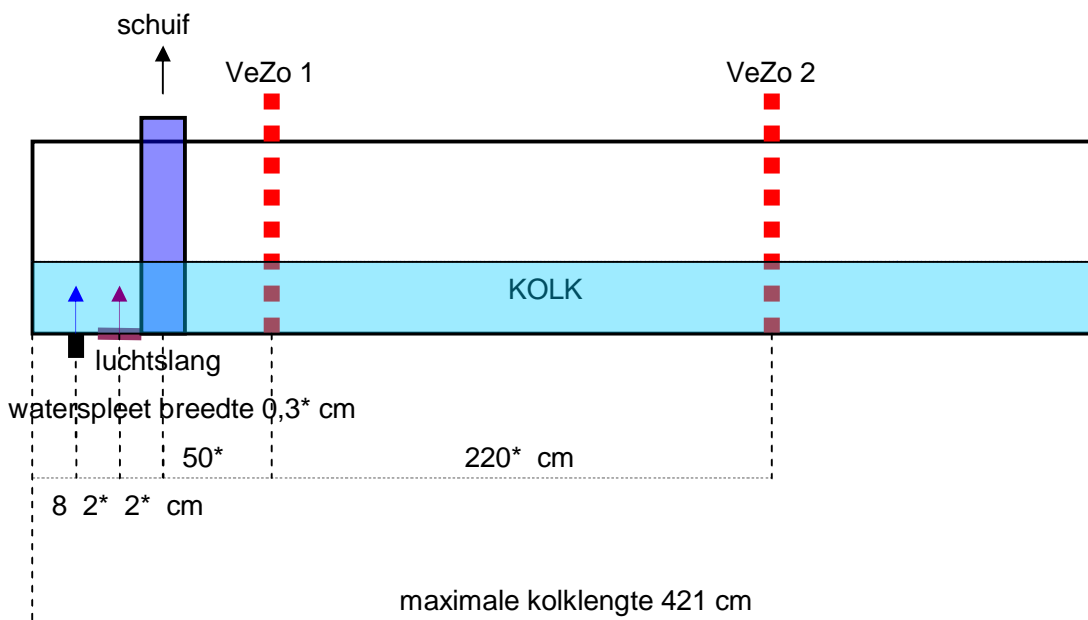


Foto 2.1 Proefopstelling Oliegoot in Baggergoothal

Het tussenschot of de schuif, de simulatie van de sluisdeur, bestaat uit een houten plaat met rubber strippen, welke zonder verdere voorzieningen in de goot tussen de glasramen wordt geplaatst en een waterdichte afscheiding tussen zout en zoet vormt.

Het luchtbellenscherm, zie Foto 2.2, wordt gevormd door perslucht door een rubberen, zeer fijn geperforeerde strip die in de handel verkrijgbaar is, te voeren. Het jetwater voor het waterscherm wordt door een spleet van instelbare breedte (begonnen is met 0,6 cm) over de volle gootbreedte ingebracht. Het jetwater wordt geleverd door een waterpomp en met een flexibele slang aangevoerd naar een waterdichte kist onder de goot waarvan de bodemplaat met spleet de bovenzijde vormt.

De luchtslang en de schuif zijn verplaatsbaar, de positie van de spleet voor het jetwater ligt vast, zie Figuur 2.3. De met een * gemarkeerde waarden zijn variabel, zie Tabel 3.4.



Figuur 2.3 Schematische weergave onderdelen proefopstelling (zijaanzicht sluisenkolk)

De benodigde uitvoeringstijd per proef hangt voornamelijk af van de voorzieningen voor het voorbereiden van de goot zoals het vullen met zout en zoet water en het afvoeren en schoonspoelen.

De saliniteit van het zoute water is naar wens aan te maken. Voor de proeven is aanvankelijk 32 ppt aangehouden, dit komt overeen met een dichtheid van 1022 kg/m^3 . Zout water wordt gemaakt door samenvoegen van 1,1 volumedelen pekkel + 8,9 volumedelen zoet water.

De goot wordt gevuld met water tot een vast niveau dat tijdens een proef met een overstort aan de zeezijde wordt gehandhaafd. De waterstand in de kolk en in de voorhaven wordt gelijk gehouden voor aanvang van de proef.

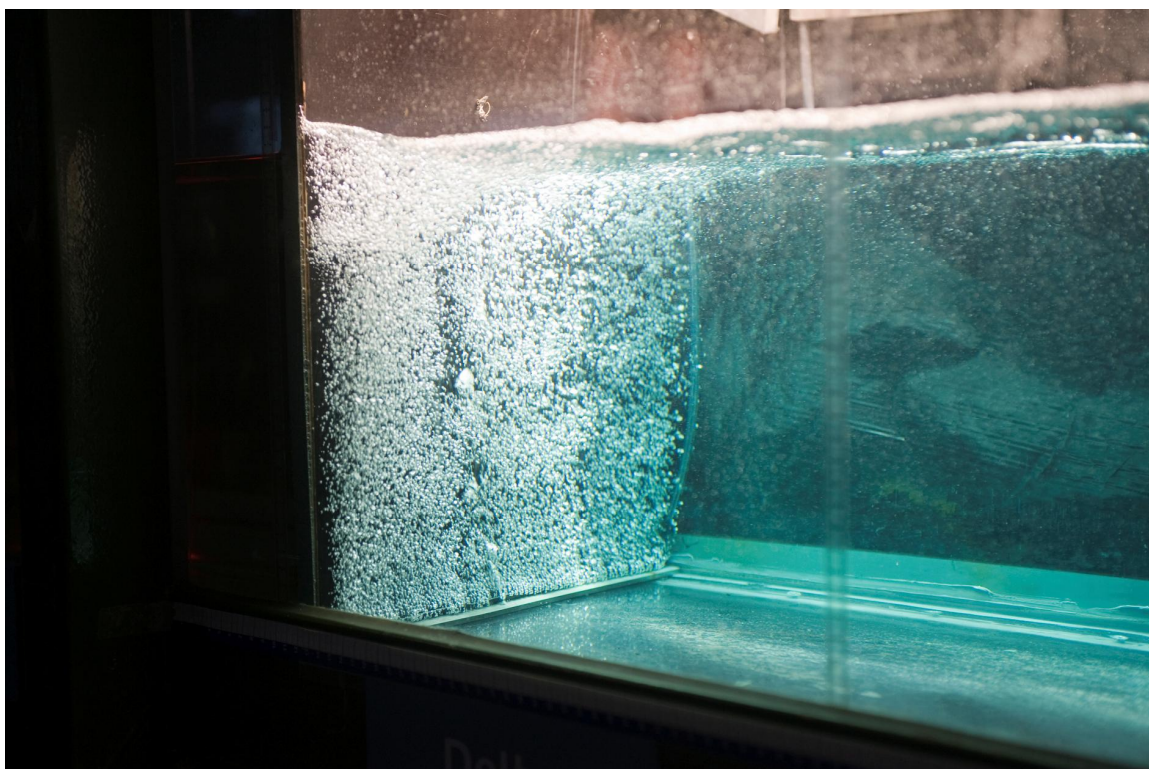


Foto 2.2 Luchtbellenscherm gezien van kolkzijde, waterdiepte 0,29 m

2.3 Metingen

2.3.1 Instrumenten en data-acquisitie

Voor het aanmaken van het zoute water en voor controle tijdens de proeven wordt een nauwkeurige digitale hand-geleidingsopnemer annex thermometer toegepast van het merk Yokogawa. Het luchtdebiet wordt gemeten met een luchtmeter die tevens een regelaar is voor de luchttoevoer bij de beschikbare persluchtdruk. Ook het waterschermdebiet wordt gemeten tijdens de proeven met een elektromagnetische debietmeter $\varnothing 50$ mm. Voorafgaand aan een proef worden de gewenste waarden ingeregeld en vervolgens worden de gerealiseerde waarden tijdens een proef vastgelegd. Met behulp van continu op PC bemonsterde zoutgehaltemeters in 2 verticalen (VeZo = Verticale Zoutopnemer) wordt het verloop van het zoutgehalte tijdens de proeven vastgelegd. De meting levert dus tijdreeksen op van dichtheid of saliniteit op een bepaald punt van een verticale raai in de sluis kolk. Deze meetreeksen worden gebruikt voor het bepalen van de zoutverticalen, de zoutuitwisseling en het zouttransport in de tijd en zullen worden vergeleken met simulaties met een numeriek model (Numerieke detailsimulaties, G. Keetels, 2010, product 2). Het moment van openen en sluiten van de schuif wordt tijdens de proef vastgelegd in de meetbestanden door handmatig een schakelaar om te zetten. Het markeersignaal van 0 of 5 Volt wordt op de meet-pc vastgelegd. De meet-PC wordt gestart voor aanvang proef en bemonstert de 27 kanalen hoogfrequent met 100 Hz (dus een tijdsinterval van 10 ms), zie Tabel 2.1. Na sluiting van de schuif wordt de meting nog voortgezet totdat een min of meer stabiele gelaagde situatie is ontstaan in de kolk.

Tabel 2.1 Data-acquisitie kanalen op meet-PC

Kanaal #	Meting	Bereik (Volt)
1	luchtdebietmeter	1 – 5 V
2	waterdebietmeter	1 – 5 V
3	markering openen/ sluiten schuif	0 – 5 V
4 t/m 15	VeZo 1-1 t/m 1-12	0 – 10 V
16 t/m 27	VeZo 2-1 t/m 2-12	0 – 10 V

2.3.2 VeZo zoutverticalen

De zoutverdeling in de verticaal (zoutprofiel) is gemeten met de VeZo's. Dit zijn instrumenten die het zoutgehalte meten op basis van de elektrische geleidbaarheid en die nog zijn toegepast in het Rijnmondmodel (zie bijv. WL Publicatie 254, 1981). De VeZo heeft 12 opneempunten verdeeld op 23,4 mm per staaf (dit is 1,50 m op modelschaal 1:64 van het Rijnmondmodel) vanaf 15 mm van de bodem. Bij een waterdiepte van 0,29 m geeft dit een optimale verdeling van de zoutmeetpunten. De maximale indompeling is 0,40 m. Er zijn twee VeZo's beschikbaar, deze zijn eerst afgeregeld en gekalibreerd. Er zijn dus in totaal 24 meetsignalen beschikbaar die tijdens een proef in de tijd bemonsterd worden. De VeZo's staan op een vaste plaats in de goot, die zo nodig per proef aangepast wordt. De VeZo's meten de elektrische geleidbaarheid. De vertaling van geleidbaarheid en temperatuur naar saliniteit c.q. dichtheid wordt berekend met de zg. SACO relaties (Salt Conversion, C. Kuijper, 1999), met behulp van de volgende relaties:

- Conductivity → Salinity : NaCl, Labrique/Kohlrausch.
- Salinity → Density: NaCl, Millero/Delft Hydraulics

Tabel 2.2 geeft de relatie weer tussen de verschillende grootheden volgens deze relaties voor de ingestelde saliniteiten.

Tabel 2.2 Relatie tussen saliniteit, chloriniteit en dichtheid (SACO)

Saliniteit ppt	Chloriniteit ppt	Temperatuur °C	Dichtheid kg/m ³
35	21,23	15	1024,44
20	12,13	15	1013,58
10	6,07	15	1006,34
0	0	15	999,10

2.3.3 Videoregistraties

Het zoute water is m.b.v. kleurvloeistof en een waterstoffbellenscherm visueel geaccentueerd, zodat de waargenomen laagdikte en intrusielengte al een redelijke indruk geven van de hoeveelheid zout die de kolk indringt. Er zijn twee videocamera's opgesteld, een gewone digitale videocamera en een Retiga hoge-resolutie camera met directe opslag op PC. Op basis van de opgenomen beelden kan in een later stadium met behulp van beeldbewerking (PIV) het snelheidsbeeld in de tijd worden vastgesteld. Met behulp van een lasermes en waterstofgasbellenmarkering is het stroombeeld zo goed mogelijk zichtbaar gemaakt, zie Foto 2.3. Op deze foto is het stroombeeld zichtbaar na opening van de schuif

aan de voorhavenszijde met een verticale bron (elektrode) van waterstofgasbelletjes, aangelicht door een lasermes dat door de glasbodem schijnt. Deze gasbelletjes zijn zo klein en fijn verdeeld dat deze de stroming niet merkbaar beïnvloeden, in tegenstelling tot de luchtbellen.

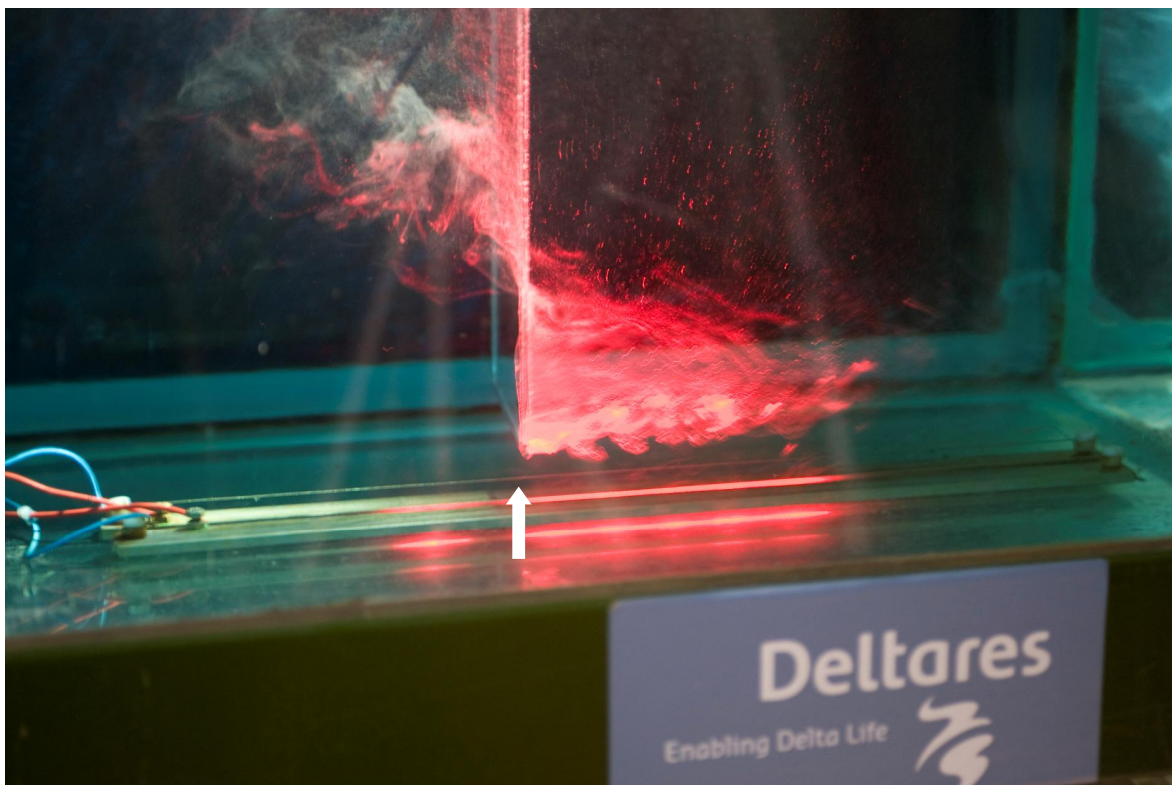


Foto 2.3 *Stroombeeld aan zijde voorhaven gevisualiseerd met H₂ bellen (verticale elektrode: zie pijl) en lasermes (onder de glasbodem)*

2.4 Proefuitvoering

2.4.1 Proefinstellingen

Doel van de te onderzoeken maatregelen is het beperken van de indringing van zout water gedurende de openstellingstijd van de sluisdeuren bij het schutten. Daarom wordt de schuif slechts gedurende een vaste, beperkte tijd opengesteld. De ingedrongen hoeveelheid zout is dan nauwkeuriger te bepalen dan bij continue openstelling, waarbij alleen de metingen van de twee VeZo verticalen op een bepaald tijdstip beschikbaar zijn. Als referentieproef geldt de situatie met zout/zoet zonder scheidingsmaatregelen (vrije kolkuitwisseling of “lock exchange”). De looptijd van de zouttong in de sluiscolk en weer terug (de dubbele looptijd) is de richtlijn voor de openstellingstijd. Na de dubbele looptijd is de sluiscolk al voor een groot deel gevuld met zout water (ongeveer 80%), althans zonder beperkende maatregelen. Deze tijd komt ook overeen met de in de praktijk gehanteerde en verschaalde openstellingstijd.

Om het luchtbellen- en waterscherm te testen zijn eerst proeven gedaan met alleen zoet water. Uitgangspunt is een gelijk waterniveau in kolk en voorhaven, dus alleen de uitwisselingsstroming t.g.v. het verschil in dichtheid wordt bekeken. Verdere proeven zijn ingevuld door nadere optimalisatie van water- en luchtbellenscherm (debiet, uitstroom-

snelheid en plaatsing). Gezien de doelstelling en het beperkte karakter van de labproeven is gekozen voor uitsluitend een variatie van luchtbel- en waterschermdebiet, plaatsing en uitstroomsnelheid en is uitsluitend zoet water toegepast voor het waterscherm.

2.4.2 Proefprocedure

Eerst worden de schuif en het luchtbelstrip in de goot geplaatst op de gewenste locatie t.o.v. de bodemspleet, zie Figuur 2.3. Nadat de goot is gevuld tot de gewenste waterdiepte met zout water in de voorhaven en zoet water in de kolk wordt het luchtdebiet ingesteld. Vervolgens wordt de waterpomp ingeschakeld (het gewenste debiet is vooraf al ingesteld) en direct daarna de schuif opgetrokken. Op dat moment begint het zoute water langs de bodem de sluiskolk binnen te stromen en het zoete water uit de kolk langs het oppervlak weg te stromen richting overstort.

Een proef bestaat uit het wegnemen van de schuif en het vervolgens meten en waarnemen van de processen tijdens de looptijd van de dichtheidsstroom met behulp van kleurstof en zoutgehaltemetingen. Na een vaste openstellingstijd wordt de schuif weer gesloten. De effectiviteit van het scheidingsmiddel (luchtbel- en waterscherm) blijkt uit de hoeveelheid zout die uiteindelijk is ingedrongen gedurende de opentijd van de kolk. De totale doorgelaten hoeveelheid zout wordt bepaald door het zoutgehalte te meten in de kolk met de losse geleidendheidsmeter na volledige handmatige doormenging van het kolkvolume. Omdat de tijdmetingen met de VeZo's ook nog enige tijd na sluiting worden voortgezet, geven deze door uitmiddeling ook een beeld van het uiteindelijke zoutgehalte. Na afloop van de proef wordt zowel het gedeeltelijk gemengde zoete water in de sluiskolk als het zoute water aan de voorhavenszijde afgevoerd.

2.5 Schaalregels

Uitgaande van de geometrie van de Stevinsluis van 14 m x 4,7 m (4,4 m met drempel) x 120 m is bij een gootbreedte van 0,5 m een waterdiepte van 0,17 m en een lengte van de zoete zijde, de sluiskolk, van 4,25 m nodig. Bij een grotere waterdiepte is de geometrie niet meer geheel gelijkvormig met die van de Stevinsluis. Het voordeel van een grotere waterdiepte is echter de betere visualisatie- en meetmogelijkheden van het proces. Bovendien is het Reynoldsgetal dan hoger, dus dichterbij de praktijk. De keuze van waterdiepte, luchtdebiet en waterdebiet hangen met elkaar samen, gezien de schaalregels. De beschikbare kolk lengte is maximaal 4,21 m (gelijk aan 4 gootramen).

Met een diepteschaal n_h , een breedteschaal n_B en een lengteschaal n_L wordt de snelheidsschaal volgens Froude $n_h^{0,5}$ en de schaal voor het waterschermdebiet volgens Froude $n_Q = n_B * n_h^{1,5}$. De dichtheid wordt niet verschaald dus $n_\rho = 1$. De tijdschaal wederom volgens Froude is $n_t = n_L/n_h^{0,5}$.

Met een verhoudingsgewijs wat grotere waterdiepte, nl. 29 cm, passen de VeZo's precies daarin. In Tabel 2.3 zijn, uitgaande van deze waterstand, het lucht- en waterdebiet bepaald voor de Stevinsluis en het model.

Voor de schaal van het luchtdebiet per eenheid van breedte is aangehouden $n_q = 0,5 * n_h^{1,5}$, zie notitie Bellengordijn, Zwakke schaalwet, Bijlage E. De factor 0,5 in deze schaalregel is tamelijk onzeker, anderzijds is de gevoeligheid voor de grootte van het luchtdebiet niet zo groot (in theorie een macht 1/3). Voor het luchtdebiet is uitgegaan van een waarde van maximaal 100 NI/s,m voor de Stevinsluis (NI is Normaal liter d.w.z. het luchtvolume bij atmosferische druk). Verschaald geeft dit maximaal 92 NI/min, dit is goed realiseerbaar met de persluchtvoorziening in de goot.

Het waterdebiet volgens de theorie (Bulson, 1961) passend bij dit luchtdebiet (de entrainment), is 21 l/s (22 m³/s in Stevinsluis), maar dit is wel zeer hoog. In de veldproef bij

de Stevinsluis is het met een pompinstallatie realiseerbare waterdebiet veel kleiner, nl. 1,6 m³/s (met een sleufbreedte van 10 of 5 cm), dat is dan in het model 0,88 l/s. Dit is bij de proeven aangehouden. De pomp kan dit makkelijk leveren. De watersleuf is dan 0,50 m x 0,6 of 0,3 cm. Een vaste opentijd van 90 s is voor alle proeven zoveel mogelijk aangehouden, gerekend vanaf het moment van ophalen van de schuif. Dit is iets meer dan de dubbele looptijd zonder luchtbellenscherm (80 s) en komt overeen met 11 minuten openstelling in de Stevinsluis en 25 minuten in de Volkeraksluis.

Tabel 2.3 Keuze verscaling proefinstellingen t.o.v. Stevinsluis

Grootheid	Eenheid	Stevinsluis	Model	Schaal
lengte	m	120	4,09	29,3
breedte	m	14	0,5	28
diepte	m	4,7	0,29	16,2
dichtheid zout	kg/m ³	1015	1015	1
dichtheid zoet	kg/m ³	1000	1000	1
Looptijd	sec	581	80	7,29
	min	9,7	1,33	7,29
loopsnelheid	m/s	0,41	0,10	4,03
luchtdebiet per breedte	l/s/m	100	3,06	32,6
luchtdebiet	Nm ³ /min, NI/min	84	91,8	915
Waterdebiet ingesteld	m ³ /s, l/s	1,6	0,876	1827
spleetdikte	m	0,05	0,0031	16,1
spleetsnelheid	m/s	2,3	0,57	4,04
zouttransport	kg/s	8,7	0,00475	1827

In Tabel 2.4 zijn de grootheden verschaald ten opzichte van de situatie van de Volkeraksluis, uitgaande van een zelfde maximaal luchtdebiet per strekkende meter breedte (100 NI/sm, dit geeft in model 46 NI/min) en een maximaal toelaatbaar zoetwaterlek van 25 m³/s verdeeld over 3 sluisen, wat een maximaal waterschermdebiet geeft van 8,3 m³/s (in model 1,3 l/s).

Tabel 2.4 Keuze verscaling proefinstellingen t.o.v. Volkeraksluis

Grootheid	Eenheid	Volkeraksluis	Model	Schaal
lengte	m	350	4,09	85,6
breedte	m	24	0,5	48
diepte	m	7,5	0,29	25,9
dichtheid zout	kg/m ³	1015	1015	1
dichtheid zoet	kg/m ³	1000	1000	1
Looptijd	sec	1343	80	16,8
	min	22,4	1,33	16,8
loopsnelheid	m/s	0,52	0,10	5,1
luchtdebiet per breedte	l/s/m	100	1,52	65,7
luchtdebiet	Nm ³ /min, NI/min	144	45,6	3158
Waterdebiet ingesteld	m ³ /s, l/s	8,33	1,32	6313
spleetdikte	m	0,081	0,0031	26,1
spleetsnelheid	m/s	4,3	0,85	5,1
zouttransport	kg/s	30	0,00475	6313

3 Meetresultaten

3.1 Uitgevoerde proeven

3.1.1 Proevenprogramma

In Tabel 3.1 is het proevenprogramma weergegeven zoals dit uiteindelijk is uitgevoerd. Na de testproeven in zoet water (T-serie) is eerst een aantal proeven met een voorhaven met 35 ppt zoutgehalte en een zoete kolk (A-serie) uitgevoerd en vervolgens met een saliniteitsverschil tussen voorhaven en kolk van 20 ppt (B, C en D serie). De profinstellingen zijn zodanig gekozen dat deze een realistische weergave geven van de lucht- en waterschermdebieten die beoogd zijn in de Stevinsluis. Verschillende combinaties van luchtbellenschermbelangen (L) en waterscherm (W) zijn uitgetest waarbij ook de afstand en de plaats van de schermen ten opzichte van de schuif is gevarieerd. Als referentie dienen de proeven zonder voorzieningen (lock-exchange, code 0).

Tabel 3.1 Overzicht uitgevoerde proeven

Proef #	Datum	Beschrijving	Code
1	3-dec-09	testproef luchtbellenschermbelangen in zoet water	T-L
2	4-dec-09	testproef waterscherm in zoet water	T-W
3	4-dec-09	testproef water+luchtbellenschermbelangen in zoet water	T-LW
4	7-dec-09	klassieke lock exchange zout water	A-0
5	8-dec-09	luchtbellenschermbelangen in zout/zoet water (Stevinsluisschaal)	A-L
6	8-dec-09	waterscherm in zout/zoet water (Stevinsluisschaal)	A-W
7	9-dec-09	water+luchtbellenschermbelangen in zout/zoet water (Stevinsluisschaal)	A-LW
8	10-dec-09	waterscherm in zout/zoet water als 6 met smallere spleet	A-W
9	10-dec-09	water+luchtbellenschermbelangen in zout/zoet water als 7 met smallere spleet	A-LW
10	11-dec-09	klassieke lock exchange met verlaagde saliniteit	B-0
11	14-dec-09	waterscherm+luchtbellenschermbelangen in zout/zoet water (Stevinsluisschaal)	B-LW
12	14-dec-09	water+luchtbellenschermbelangen als 11 met verhoogd water- en gereduceerd luchtdebiet (Volkeraksluisschaal)	B-LW
13	15-dec-09	water+luchtbellenschermbelangen als 12 op 0,5 m voor de schuif	B-LW
14	17-dec-09	luchtbellenschermbelangen in zout/zoet water verder gereduceerd luchtdebiet	B-L
15	18-dec-09	water+luchtbellenschermbelangen als 14 met verder gereduceerd luchtdebiet	B-LW
16	21-dec-09	waterscherm op 0,5 m + luchtbellenschermbelangen in zout/zoet water als 15	B-LW
17	17-dec-09	water+luchtbellenschermbelangen in brakwaterkolk voorhaven zout	C-LW
18	18-dec-09	alleen luchtbellenschermbelangen in brakwaterkolk en verder verlaagd luchtdebiet	C-L
19	21-dec-09	zoute kolk + luchtbellenschermbelangen in voorhaven zoet	D-L

Tabel 3.2 geeft de proevenmatrix.

Tabel 3.2 Proevenmatrix met codering

Code	Voorhaven ppt	Kolk ppt	Lock exchange Serie 0	Lucht Serie L	Water Serie W	Lucht en water Serie LW
T	0	0		Proef 1	Proef 2	Proef 3
A	35	0	Proef 4	Proef 5	Proef 6, 8	Proef 7, 9
B	20	0	Proef 10	Proef 14		Proef 11, 12, 13, 15, 16
C	30	10		Proef 18		Proef 17
D	0	20		Proef 19		

Hierin zijn T, A, B, C, D een codering van de proevenseries met:

- T = testserie met zoet water
- A = voorhaven 35 ppt kolk zoet
- B = voorhaven 20 ppt kolk zoet
- C = voorhaven 30 ppt kolk 10 ppt
- D = voorhaven zoet kolk 20 ppt,

Toegevoegd is daarnaast een codering voor de zoutlekbepurende voorzieningen:

- 0 = geen voorziening
- L = met luchtbellenscherm
- W = met waterscherm.

3.1.2 Proefinstellingen

De waterstand is steeds constant gehouden op 0,29 m hoogte met behulp van een overstort. Het waterscherm werd gevoed met een waterpomp welke het water betreft uit het reservoir van de Baggergoot, dit is altijd zoet water. Het zoute water werd aangemaakt in de mengtank door mengen van pekkel met water uit het reservoir. Met een kleine pomp werd het water in de tank gecirculeerd en zodoende goed gemengd. De verkregen saliniteit werd eerst gecontroleerd alvorens de goot te vullen. Lucht- en waterschermdebiet werden ingeregeld bij het starten van de proef direct voordat de schuif werd geopend. De instellingen staan in de proevenmatrix, zie Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Proevenmatrix met instelwaarden

Serie T	0 ppt		
92	Proef 1	Proef 3	
0		Proef 2	
Serie A	35 ppt		
92	Proef 5	Proef 7	
46			Proef 9
0	Proef 4	Proef 6, 8	
Serie B, C, D	20 ppt		
92		Proef 11	
46			Proef 12, 13
28	Proef 14	Proef 15, 16, 17C	
14	Proef 18C, 19D		
0	Proef 10		
Q_{lucht} (NI/min) ↑			
Q_{water} (l/s) →	0	0,88	1,31

De beschikbare kolk lengte wordt bepaald door de gekozen plaats van de schuif. De kolk lengte is dan 4,21 m verminderd met de afstand van de schuif ten opzichte van het nulpunt (= het vierde raam, 421 cm vanaf einde kolk), zie Tabel 3.4 en Figuur 2.3. De plaats van de waterspleet is 8 cm t.o.v. het nulpunt van de afstandsmeting in de sluiskolk, zie Figuur 2.3. In deze figuur is de kolk lengte dus $421 - 8 - 2 - 2 = 409$ cm.

De plaats van de VeZo's is gevarieerd om deze optimaal te laten meten in relatie met het proces bij de schuif en in de kolk. Omdat het proces in de sluiskolk nog lang na sluiting van de schuif in beweging bleef (interne golven met geringe demping) is bij een aantal proeven gedurende nog wat langere tijd doorgemeten. Het signaal van de VeZo's bleef dan nog meer dan 10 minuten in beweging hoewel er dan uiteraard geen zoutindringing meer plaatsvond en ook het luchtbellenscherm en de waterscherm al lang waren afgeschakeld. Met behulp van het markeersignaal is bij de proeven met een schakelaar handmatig aangegeven op welk moment de schuif omhoog ging (aan), geheel geopend was (uit), na ongeveer 90 seconden weer gesloten werd (aan) en weer geheel dicht was (uit). De opentijd is hieruit afgeleid als verschil tussen de tijdstippen van begin openen en eind sluiten. Het openen van de schuif geschiedde met behulp van de elektrische lier van de kraan in de hal. De snelheid van openen was aanvankelijk wat langzamer (ongeveer 20 sec), maar is later wat versneld omdat het zoute water direct indrong en in de eerste momenten nog beperkt leek te worden door de beschikbare spleetopening, terwijl de verstoring van het wateroppervlak verwaarloosbaar bleek ten opzichte van die van het luchtbellenscherm.

Tabel 3.4 Overzicht ingestelde positie onderdelen in proefopstelling

Proef #	plaats bellen cm	plaats schuif cm	spleet dikte cm	Lengte kolk cm	VeZo1 t.o.v. schuif cm	VeZo2 t.o.v. schuif cm	Afstand VeZo's cm	Volume kolk m ³
1	3	0	0,6	421	141	282	141	0,61
2	12	0	0,6	421	141	282	141	0,61
3	12	0	0,6	421	141	282	141	0,61
4	12	0	0	421	141	282	141	0,61
5	10	12	0	409	50	150	100	0,593
6	10	12	0,6	409	50	150	100	0,593
7	10	12	0,6	409	50	150	100	0,593
8	10	12	0,3	409	50	150	100	0,593
9	10	12	0,3	409	50	150	100	0,593
10	10	12	0	409	50	150	100	0,593
11	10	12	0,3	409	50	270	220	0,593
12	10	12	0,3	409	50	270	220	0,593
13	10	60	0,3	361	50	150	100	0,523
14	10	12	0	409	50	270	220	0,593
15	10	12	0,3	409	50	270	220	0,593
16	56	58	0,3	363	50	150	100	0,526
17	10	12	0,3	409	50	270	220	0,593
18	10	12	0	409	50	270	220	0,593
19	10	12	0	409	50	270	220	0,593

3.1.3 Waarnemingen

Bij de zuivere lock-exchange proeven 4 en 10 en ook bij de proeven met alleen waterscherm 6 en 8 was de indringende zoutwatertong duidelijk zichtbaar hoewel de kleurstof al sterk verdund was, voornamelijk door verschil in lichtbreking van het zoute en het zoete water. Ook waren de met het zoute water meegevoerde fijne waterstofgasbelletjes, aangelicht door het lasermes nog zichtbaar (proef 8 en 10). Bij sluiting was het teruggekaatste front in de sluiskolk meestal nog niet helemaal gearriveerd en bleven er nog langdurig interne golven heen en weer lopen. Er resteerde in de goot uiteindelijk een dunne zoete toplaag van enkele cm's.

Bij toepassing van het luchtbellenscherm was de hierdoor veroorzaakte opwaartse circulatiestroming sterk dominant ten opzichte van de zoutindringing, ook bij de laagste luchtdebieten. Het zoute water werd omhoog getransporteerd en kwam dan pas in de kolk terecht, zie Foto 3.1. Het wateroppervlak werd bij het luchtbellenscherm omhoog gedrukt en er ontstonden oppervlaktegolven. Er ontwikkelde zich direct achter het luchtbellenscherm een circulatiezone van brak water die zich tot of voorbij de eerste VeZo uitstrekte (ongeveer 2x waterdiepte). Uit deze zone drong het zoute water weer als een gewone zouttong, maar sterk vertraagd en verdund, verder langs de bodem de kolk in. Kenmerken van dit stroombeeld zijn ook duidelijk waarneembaar aan de zoutprofielen (animaties) en zoutcontouren, waarin de saliniteit in verschillende kleuren is weergegeven.

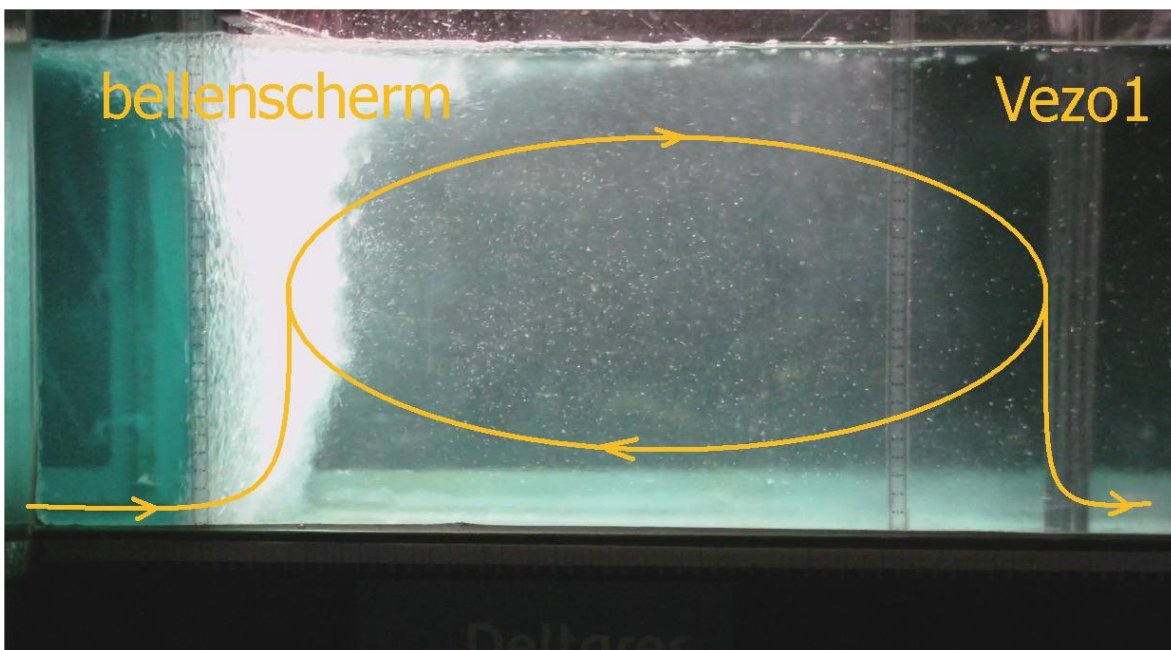


Foto 3.1 Brakwatercirculatie in de sluiskolk achter het luchtbellenscherm

De filmopnamen van alle proeven, zie Tabel 3.5, zijn beschikbaar gesteld op een bij dit rapport behorende DVD.

Bij het langzaam lichten van de schuif (proef 4, 5) trad direct zoutindringing op zonder zichtbare zoetwater-retourstroming. Pas na opening over meer dan de helft van de waterdiepte nam de dikte van het zoutfront niet meer toe. Bij de latere proeven is de schuif sneller geopend.

De invloed van het waterscherm was niet zichtbaar aan het oppervlak of in het water. Bij hoge uittredesnelheid (alleen bij testen beproefd, geen meting) trad wel een opbolling van het oppervlak op. Aan de zoute voorhavenzijde was de uitwisselingsstroom ook goed zichtbaar, dit is vastgelegd met de hoge-resolutie Retiga videocamera, zie Foto 2.3. Na enige tijd (na sluiting schuif) was ook hier een reflectie waarneembaar van het zoetwaterfront.

Om alvast zonder uitgebreide PIV analyse (Particle Image Velocimetry) een beeld te krijgen van het stroomsnelheidsveld bij het luchtbellenscherm, is een handmatige analyse van de videobeelden van proef 1-TL uitgevoerd.

3.2 Dataverwerking

3.2.1 Omrekening naar fysische eenheden

De meetsignalen zijn voor verdere analyse omgerekend naar de bijbehorende fysische eenheden volgens onderstaande relaties.

Luchtdebietmeter met bereik 1-5 Volt:

$$Q_l = \frac{V_1 - 1}{4} * 1000$$

waarin:

Q_l in NI/min

V_1 in Volt.

Waterschermdebietmeter eveneens met bereik 1-5 Volt:

$$Q_w = \frac{V_2 - 1}{4} * 10$$

waarin:

Q_w in l/s

V_2 in Volt.

De VeZo's geven een signaal van 0 tot 10 Volt wat overeen komt met 0 tot 100 mS/cm.

Geleidendheid (conductivity):

$$C_{i,j} = V_n * 10$$

waarin:

$i = 1-2$, VeZo raai #

$j = 1-12$ VeZo opnemer #

$n =$ kanaal # 4-27

$C_{i,j}$ in mS/cm

V_n in Volt.

De opnemers zijn gekalibreerd en zijn steeds afgeregeld op de juiste waarden in een reservoir met zoet water (0 ppt) en een met zout water met bekende geleidendheid (35 ppt).

3.2.2 Begrippen m.b.t. de zoutbeweging

De resultaten zijn omgerekend naar de onderstaande belangrijke grootheden die te maken hebben met de zoutlek (zie ook Begrippenlijst).

1. De zoutindringing (of ook wel het zoutbezwaar genoemd) is de totale hoeveelheid zout (zoutmassa in kg) die gedurende een bepaalde tijdsduur door de schutsluis van de voorhaven naar de zoetwaterzijde is gestroomd.

Bij de labproeven, waarbij alleen het instromen van zout van de voorhaven naar een zoete kolk en omgekeerd is bekeken, is die zoutindringing gedefinieerd als de zoutmassa die gedurende de openstellingstijd van de sluiskolk naar binnen is gestroomd. Deze wordt als volgt berekend:

$$Z_n = \frac{1}{1000} (S_{k,n} \rho_{v,v} - S_{k,v} \rho_{k,v}) V_k$$

Hierin zijn:

$\rho_{v,v}$	= dichtheid water voorhaven, voor opening	[kg/m ³]
$\rho_{k,v}$	= dichtheid water sluiskolk, voor opening	[kg/m ³]
$S_{v,v}$	= saliniteit water voorhaven, voor opening	[ppt]
$S_{k,v}$	= saliniteit water sluiskolk, voor opening	[ppt]
$S_{k,n}$	= saliniteit water sluiskolk, na sluiting	[ppt]
V_k	= volume water sluiskolk	[m ³]
Z_n	= hoeveelheid ingedrongen zout in sluiskolk na sluiting	[kg]

2. Het zouttransport (in kg/s) is de gemiddelde hoeveelheid zout die de schutkolk passeert per tijdseenheid.

Bij de labproeven wordt slechts een halve schutcyclus beschouwd (alleen openstelling aan één zijde). Het zouttransport bij de labproeven is daarom gedefinieerd als de hoeveelheid zout die de sluiskolk per tijdseenheid instroomt, gemiddeld over de openstellingstijd:

$$Z = \frac{Z_n}{t_{\text{open}}} = \frac{\frac{1}{1000} (S_{k,n} \rho_{v,v} - S_{k,v} \rho_{k,v}) V_k}{t_{\text{open}}}$$

Hierin is t_{open} de openstellingstijd of deur-open-tijd in [s].

Een negatief zouttransport betekent dat het zout de kolk niet in, maar uitstroomt. Dat vindt plaats bij een zoute kolk die geopend wordt op een zoete voorhaven.

3. De zoutuitwisseling (uitgedrukt in een percentage %) is de hoeveelheid zout die de sluiskolk gedurende een bepaalde tijdsduur de kolk in is gestroomd gerelateerd aan de hoeveelheid zout in de sluiskolk als die geheel gevuld is met water van de voorhaven. De zoutuitwisseling van de sluiskolk wordt in de literatuur op deze wijze gedefinieerd sinds Van Der Burgh, 1961.

Voor de labproeven wordt deze als volgt berekend:

$$U_n = \frac{Z_n}{Z_\infty} = \frac{S_{k,n} \rho_{v,v} - S_{k,v} \rho_{k,v}}{S_{v,v} \rho_{v,v} - S_{k,v} \rho_{k,v}}$$

Hierin is z_{∞} de hoeveelheid ingedrongen zout in de sluiskolk na volledige uitwisseling in [kg].

Bij 100% uitwisseling geldt dus $s_{k,n} = s_{v,v}$. Een zuivere kolk-uitwisselingsstroming (lock-exchange flow) is gedefinieerd als de dichtheidsstroming die optreedt bij het openen van de sluisdeur ten gevolge van alleen een dichtheidsverschil van het water (zoals proeven 4 en 10), dus zonder nivellering en zoutlekbeperkende maatregelen. Bij deze proeven is de zoutuitwisseling U ongeveer 80% na een openstellingstijd van ongeveer de dubbele looptijd. Bij een groter dichtheidsverschil verloopt de uitwisseling sneller en is het zouttransport dus groter maar het percentage dat wordt bereikt is vergelijkbaar.

4. De reductiefactor (factor η) is gedefinieerd om de effectiviteit van de zoutlekbeperkende maatregelen te kunnen vergelijken (Uittenbogaard, 2010). De reductiefactor is gedefinieerd als het opgetreden zouttransport gerelateerd aan het transport bij een lock-exchange flow, dus zonder zoutlekbeperkende maatregelen met hetzelfde dichtheidsverschil. Voor de A-serie proeven (35 ppt) is dit dus proef 4 en voor de B-serie proef 10. Ook voor de C- en D serie is proef 10 als referentie genomen, omdat het saliniteitsverschil bij al deze proeven 20 ppt was.

De reductiefactor wordt als volgt berekend:

$$\eta_n = \left(\frac{s_{k,n} \rho_{v,v} - s_{k,v} \rho_{k,v}}{s_{k,n-0} \rho_{v,v-0} - s_{k,v-0} \rho_{k,v-0}} \right) \frac{V_k t_{open-0}}{V_{k-0} t_{open}}$$

Hierin refereert de index 0 naar de referentieproef. Bij $n = 100\%$ is er geen beperking opgetreden en is er dus evenveel zout ingedrongen als bij de lock-exchange proef (ongeveer 80%). Behalve kleine verschillen in kolk lengte en opentijd zijn er nog andere geringe afwijkingen in proefuitvoering (saliniteit, temperatuur, snelheid van openen schuif etc.) waardoor er geringe verschillen optreden die niet het gevolg zijn van de zoutlekbeperkende maatregelen. Er zijn geen lock-exchange proeven uitgevoerd met een brak- en zoutwater kolk (proeven 17 t/m 19) en mede daarom is de reductiefactor minder goed onderling vergelijkbaar dan de uitwisseling of het zouttransport.

3.2.3 Meet- en videobestanden

Van elke meting zijn met behulp van het data-acquisitieprogramma Testpoint (Delft Measure) drie meetbestanden opgeslagen met automatisch gegenereerde chronologische nummering:

- 1 [projectnaam]001.raw meetbestanden met originele data (in Volt),
- 2 [projectnaam]001.dat omgerekend in fysische eenheden en met tijdas toegevoegd in ms in de eerste kolom,
- 3 [projectnaam]001.set de ingestelde omrekenfactoren.

waarin [projectnaam] = Volkerak 002 en 001 een volgnummer.

De laatste proeven zijn uitgevoerd in afwijkende volgorde (14, 17, 18, 15, 16, 19). Bij enkele proeven (proef 11, 12) is na afloop van de proef nog een controlemeting gedaan om de gemiddelde waarden van de VeZo's te kunnen bepalen. Deze bleek echter niet noemenswaardig af te wijken van de gemiddelde waarden direct bepaald uit de eigenlijke meetbestanden vanaf het moment van sluiting. Deze meting is daarom verder niet meer

uitgevoerd. Daardoor zijn echter de nummering van de proef en de meetbestanden niet meer synchroon. Tabel 3.5 geeft een overzicht van de bestanden. De videobestanden zijn bewerkt door te knippen, proefnummer en code toe te voegen, te comprimeren (tot 25 Mb, met toevoeging klein) en in een ander videoformaat om te zetten. Al deze bestanden staan op de bij dit rapport behorende DVD. Daarnaast zijn van elke proef de Retiga videobestanden beschikbaar, genummerd Proef #.seq (deze zijn echter te groot voor een DVD).

Tabel 3.5 Overzicht meet- en videobestanden

Proef #	meetbestand	Videobestand (origineel) Quicktime movie	Videobestand bewerkt Windows media video
1	Volkerak 002001.dat	FILE Proef 1.mov	
2	Volkerak 002002.dat	FILE Proef 2.mov	
3	Volkerak 002003.dat	FILE Proef 3.mov	
4	Volkerak 002004.dat	FILE Proef 4.mov FILE Proef 4 details.mov FILE Proef 4 overzicht.mov	Labproef 4 A-0.wmv Labproef 4 details.wmv Labproef 4 overzicht.wmv
5	Volkerak 002005.dat	FILE Proef 5.mov	Labproef 5 A-L.wmv
6	Volkerak 002006.dat	FILE Proef 6.mov	Labproef 6 A-W.wmv
7	Volkerak 002007.dat	FILE Proef 7.mov	Labproef 7 A-LW.wmv
8	Volkerak 002008.dat	FILE Proef 8.mov	Labproef 8 A-W.wmv
9	Volkerak 002009.dat	FILE Proef 9.mov FILE 9 Lasermes.mov	Labproef 9 A-LW.wmv Labproef 9 lasermes.wmv
10	Volkerak 002010.dat	FILE Proef 10.mov	Labproef 10 B-0.wmv
11	Volkerak 002011.dat	geen video	
12	Volkerak 002013.dat	FILE Proef 12.mov	Labproef 12 B-LW.wmv
13	Volkerak 002015.dat	FILE Proef 13.mov	Labproef 13 B-LW.wmv
14	Volkerak 002016.dat	FILE Proef 14.mov	Labproef 14 B-L.wmv
15	Volkerak 002019.dat	FILE Proef 15.mov	Labproef 15 B-LW.wmv
16	Volkerak 002020.dat	FILE Proef 16.mov	Labproef 16 B-LW.wmv
17	Volkerak 002017.dat	FILE Proef 17.mov	Labproef 17 C-LW.wmv
18	Volkerak 002018.dat	FILE Proef 18.mov	Labproef 18 C-L.wmv
19	Volkerak 002021.dat	FILE Proef 19.mov	Labproef 19 D-L.wmv

3.3 Uitwerking per proef

3.3.1 Gemeten gerealiseerde instellingen

De gemeten waarden van het lucht- en waterdebiet zijn gemiddeld over de openstellingstijd en Tabel 3.6 opgenomen. De gemeten waarden waren zeer constant tijdens de proeven. Ook de gerealiseerde openstellingstijd is uit de meetbestanden afgeleid. De opgegeven temperatuur in kolk en voorhaven is voorafgaand aan de proef gemeten met de Yokogawa.

Tabel 3.6 Gemeten gerealiseerde instellingen per proef

Proef #	Q _{water} l/s	Q _{lucht} NI/min	Openst. tijd sec	Temp. voor haven °C	Temp. kolk °C
4	0	0	101,7	13,7	
5	0	92,1	90,1	14,6	
6	0,82	0	93,9	14	
7	0,90	91,8	115,1	13,9	
8	0,89	0	98,2	14,1	
9	1,31	46,3	98,4	14,1	
10	0	0	93,9	13,2	
11	0,86	95,2	98,1	13,4	
12	1,38	46,7	94,1	13,4	
13	1,31	46,4	91,5	13,5	
14	0	28,1	97,0	13	
15	0,87	28,5	96,4	12,1	11,8
16	0,87	27,7	94,2	11,5	11,6
17	0,87	25,4	90,8	12,8	12,9
18	0	14,3	94,6	13,2	12,9
19	0	13,2	105,1	14,2	12,6

3.3.2 Meetresultaten uit Yokogawa geleidendheidsmeter

Op basis van de handmatig uitgevoerde geleidendheids- en temperatuurmetingen met de Yokogawa zijn in Tabel 3.7 de saliniteit en de dichtheid bepaald.

Tabel 3.7 Berekende waarden uit meetresultaten Yokogawa geleidendheidsmetingen

Proef #	Saliniteit voorhaven S _{v,v} ppt	Saliniteit kolk voor S _{k,v} ppt	Dichtheid voorhaven ρ _{v,v} kg/m ³	Dichtheid kolk voor ρ _{k,v} kg/m ³	Saliniteit voorhaven na S _{k,n} ppt	Saliniteit kolk na S _{k,n} ppt
4	34,9	0	1024,7	999,9		28,4
5	33,1	0	1023,1	999,9		6,2
6	34,0	0	1024,0	999,9		22,4
7	33,9	0	1023,9	999,9	33,3	10,7
8	33,9	0	1023,9	999,9	27,7	28,4
9	33,8	0	1023,8	999,9	26,0	6,5
10	20,4	0	1014,2	999,9	14,8	20,0
11	19,9	0	1013,8	999,9	16,1	3,0
12	19,8	0	1013,7	999,9	15,3	2,6
13	19,7	0	1013,7	999,9	15,7	3,3
14	20,1	0	1014,1	999,9	18,1	3,5
15	20,8	0	1014,7	999,5	17,6	2,8
16	21,1	0	1015,0	999,5	17,2	3,2
17	29,1	10,3	1020,6	1006,9	26,1	12,2
18	30,0	9,9	1021,2	1006,6	29,1	12,4
19	0	18,3	999,2	1012,8	1,4	14,9

3.3.3 Meetresultaten uit analyse VeZo's

De saliniteit in de kolk na de proef is ook bepaald door het berekenen uit de meetsignalen van de gemiddelde waarde van alle VeZo's vanaf het moment van sluiting tot het einde van de meting en vervolgens omgerekend. De overige in Tabel 3.8 gegeven grootheden zijn hieruit afgeleid.

Tabel 3.8 Berekende waarden uit meetresultaten VeZo's

Proef #	Saliniteit kolk voor $S_{k,v}$ ppt	Saliniteit kolk na $S_{k,n}$ ppt	Zout bezwaar Z kg	Zout transport z kg/s	Zout uitwisseling U %	Reductie factor n %	Loop snelheid c m/s
4	0	28,9	18,1	0,178	82,8%	100%	0,100
5	0	6,0	3,61	0,040	18,0%	20,6%	0,058
6	0	28,0	17,0	0,181	82,2%	96,8%	0,104
7	0	6,8	4,12	0,036	20,0%	23,4%	0,0998
8	0	27,9	16,9	0,172	82,2%	96,4%	0,123
9	0	6,2	3,77	0,038	18,4%	21,5%	0,0733
10	0	16,7	10,0	0,107	81,8%	100%	0,0995
11	0	3,1	1,88	0,019	15,7%	18,8%	0,0470
12	0	2,8	1,67	0,018	14,1%	16,7%	0,0453
13	0	3,5	1,85	0,020	17,7%	20,9%	0,0746
14	0	3,2	1,91	0,020	15,7%	19,0%	0,0488
15	0	2,8	1,53	0,016	12,2%	15,2%	0,0463
16	0	3,1	1,63	0,017	14,5%	18,3%	0,0571
17	10,5	12,3	1,20	0,013	10,5%	12,0%	0,0381
18	9,2	12,6	2,12	0,022	17,3%	21,1%	0,0510
19	18,2	15,1	-1,97	-0,019	17,9%	19,7%	0,0485

De loopsnelheid van het zoutwaterfront is bepaald tussen de tijdstippen van plotselinge toename van de saliniteit, gemeten met de opnemers 1-12 van VeZo1 en 2-12 van VeZo2 (dus dicht bij de bodem). Bij enkele proeven is gebleken dat VeZo sensor 1-9 duidelijk afweek van de andere opnemers, waarschijnlijk door een elektronische storing. Dit signaal is dan bij de verdere bewerking niet beschouwd.

3.3.4 Grafieken per proef

De gemeten geleidendheid is in eerste instantie uitgezet als functie van de tijd per Vezo (dus 2 grafieken per proef), zie Bijlage A. In deze grafieken is tevens het markeersignaal opgenomen (dus het moment van openen en sluiten van de schuif). De bovenste grafiek betreft steeds Vezo1 dicht bij de schuif en de onderste grafiek Vezo2 verderop in de kolk.

Een andere weergave van de meetresultaten geven de zg. zoutcontouren, zie Bijlage B. De meetsignalen per Vezo (dus weer 2 per proef) zijn omgerekend naar saliniteit en weergegeven in kleuren als functie van de waterdiepte (in m) en de meettijd (seconds). De legenda geeft de betekenis van de kleuren in ppt saliniteit, de kleurschaal kan per serie proeven verschillen vanwege de grote toegepaste variatie.

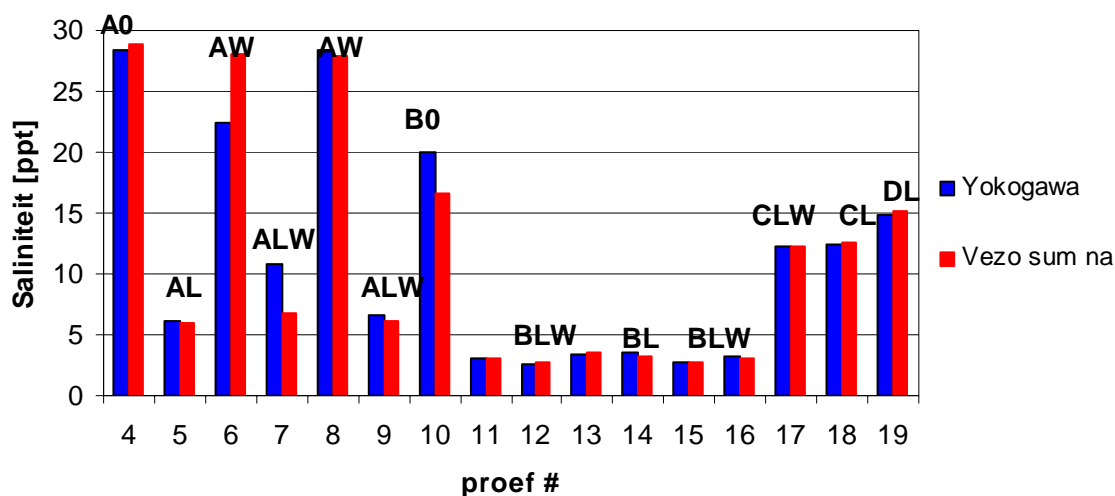
Bij elke grafiek is het proefnummer met de code vermeld en het tijdstip van openen en sluiten van de schuif in s (bijv. 006: A-W open = 14.50 close = 108.36). Met twee verticale witte lijnen zijn de tijdstippen van openen en sluiten ook in de grafiek zelf aangegeven. Omdat de meetduur en de starttijd ten opzichte van het openen van de schuif per proef kunnen verschillen, is de horizontale as ook verschillend. De afstand tussen de lijnen is echter constant (90 sec).

Uit de meetsignalen is de gemiddelde geleidendheid per Vezo-verticaal en het gemiddelde van beide verticalen berekend en net als in Bijlage A weergegeven als functies van de tijd, zie Bijlage C. Het tijdgemiddelde vanaf het moment van sluiting geeft omgerekend de uiteindelijke saliniteit en dichtheid in de kolk na afloop van de proef, zoals gegeven in Tabel 3.8. Duidelijk zichtbaar is dat bij een zuivere kolkuitwisselingsstroming (lock exchange flow), zie proeven 4, 6, 8, 10, de verticaal gemiddelde saliniteit in een raai in de kolk in twee stappen omhoog gaat; de eerste stap komt overeen met het inkomende zoutfront en de tweede met het bij de gesloten achterwand van de kolk gereflecteerde front. Dit front komt dus eerst aan bij Vezo1 dan bij Vezo 2, vervolgens weer bij Vezo 2 en tenslotte weer bij Vezo 1. De loopsnelheid volgt uit deze grafieken. Bij toepassing van een luchtbellenscherm is de variatie bij Vezo1 heel groot, maar Vezo2 geeft al een veel rustiger beeld. In de grafieken is het langdurig aanhouden van interne golven na sluiting van de schuif duidelijk zichtbaar.

Het instromen en reflecteren van het zoutwaterfront, de menging bij het luchtbellenscherm en de interne golven zijn nog duidelijker zichtbaar in de zoutprofielen, dit zijn grafieken van de saliniteit als functie van de waterdiepte voor Vezo1 resp. 2 voor een bepaald tijdstip, zie Bijlage D. De grafieken geven de zoutverticalen VeZo 1 (in blauw) en VeZo 2 (in rood) met de saliniteit (Salinity in ppt) als functie van de plaats in de waterverticaal (Depth in m), per tijdstip als boven de figuur aangegeven (Time in seconds). In de figuren is tevens aangegeven het proefnummer, de code van de proef, het tijdstip van openen (open) en van sluiten (close) in sec net als bij de zoutcontouren. Serie A heeft een horizontale as van 35 ppt, de overige series 25 ppt. De twee gemeten zoutverticalen in de tijd zijn als animaties weergegeven in filmpjes per proef (0,1 sec per plaatje). Deze zijn op de bij het rapport behorende DVD opgenomen als video-bestanden met codering proefnummer ###-003.avi (versie 3, bijvoorbeeld 009-003.avi).

3.3.5 Saliniteit kolk

In Figuur 3.1 is per proef de gemeten saliniteit in de kolk na sluiting weergegeven, gebaseerd op de handmeting met de Yokogawa en analyse van de VeZo's, zie Tabel 3.7 en Tabel 3.8.



Figuur 3.1 Saliniteit in kolk na afloop proef

De gemeten saliniteit in de sluisolk na afloop van de proeven gemeten met de Yokogawa handgeleidingsmeter en uit middeling van de meetresultaten van de VeZo's vanaf het moment van sluiting geeft een goede overeenkomst. Alleen bij de proeven 6, 7 en 10 treedt een significant verschil op. Vergelijking met de overige proeven suggereert dat de VeZo's toch een meer betrouwbaar resultaat opleveren. Mogelijk heeft dit te maken met de menging van de kolk na afloop van de proef, de gelaagdheid bleek vaak zeer hardnekkig ondanks sterk doorroeren met een plank.

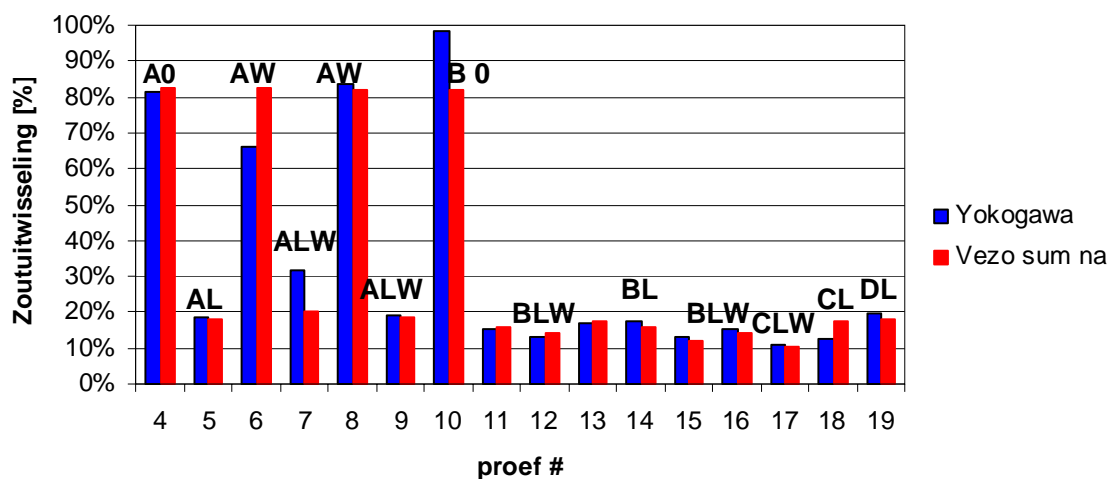
Bij de A-serie proeven 4 t/m 9 met 35 ppt saliniteitsverschil is de saliniteit in de kolk zoals verwacht aanzienlijk hoger dan bij 20 ppt verschil zoals bij de overige proeven. Bij de proeven 6 en 8 met alleen een waterscherp is het verschil in zoutindringing met de proef zonder voorzieningen (proef 4) echter zeer beperkt of vrijwel afwezig.

Bij de proeven 11 t/m 16 (B-serie met 20 ppt) is nauwelijks een significant verschil in resulterende saliniteit waar te nemen ondanks de verschillende instellingen van lucht en waterscherpdebiet en de afstand tot de schuif.

Bij de proeven 17 en 18 (C-serie) is het saliniteitsverschil weliswaar nog steeds 20 ppt, maar is de voorhaven aanvankelijk zouter, 30 ppt en de kolk brak (10 ppt) en bij proef 19 is de kolk zoet en de voorhaven zout (20 ppt) (D), zie Tabel 3.2.

3.3.6 Zoutuitwisseling

In Figuur 3.2 is per proef de zoutuitwisseling berekend uit de gemeten saliniteit in de kolk na sluiting weergegeven, zie Tabel 3.8.



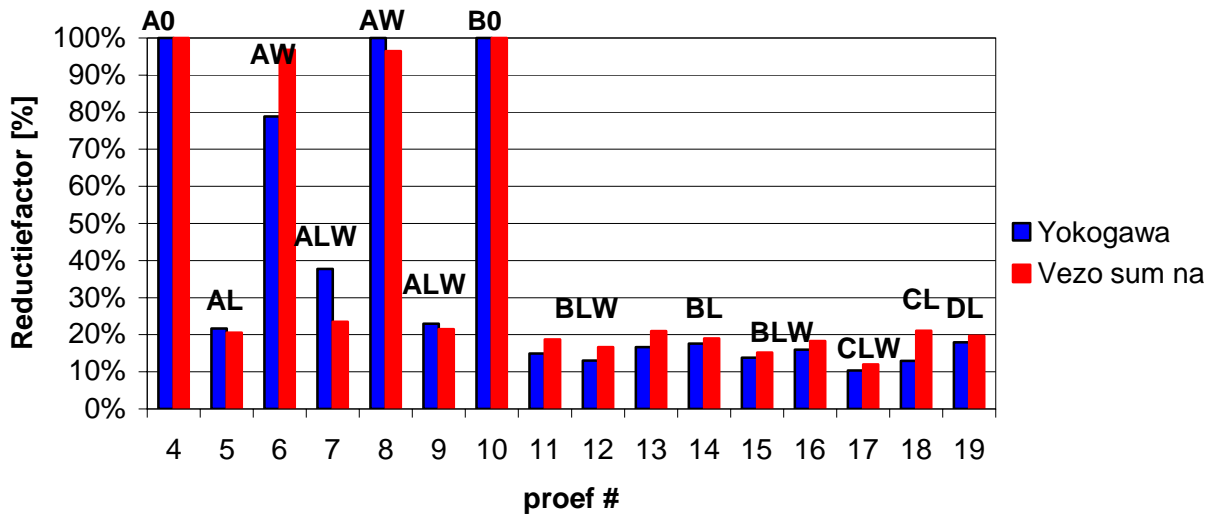
Figuur 3.2 Zoutuitwisseling kolk na afloop proef

De zoutuitwisseling in de sluiskolk is eveneens bepaald op basis van de metingen met de Yokogawa handgeleidendheidsmeter en de meetresultaten van de VeZo's vanaf het moment van sluiting. Het verschil in de aanvankelijke saliniteit van voorhaven en kolk valt nu weg. De zoutuitwisseling is dus een goede maat voor de effectiviteit van de zoutlekbepurende maatregelen. Het blijkt nu dat het luchtbellenscherm al of niet in combinatie met het waterscherm een zeer effectieve reductie geeft ($U_n < 20\%$). Met alleen een waterscherm is de reductie echter nihil, alleen is de saliniteit bij de bodem iets afgenomen (proef 6, 8) vergeleken ongestoorde indringing (proef 4).

Als we kijken naar kleinere verschillen dan zouden we kunnen concluderen dat de combinatie met waterscherm wel gunstig is t.o.v. alleen luchtballen. Proef 14 bij 20 ppt (B-serie) met alleen lucht (verlaagd luchtdebiet 28 NI/min) geeft een zoutuitwisseling van 15,7% en met toevoeging van waterscherm (Stevinschaal 0,87 l/s) bij proef 15 bij een zelfde luchtdebiet wordt dit gereduceerd tot 12,2%. Bij proef 11 echter met hetzelfde waterdebiet maar een hoger luchtdebiet is het effect niet beter (ook 15,7%). Bij de proeven met 35 ppt (A-serie) en hoger luchtdebiet is geen effect aantoonbaar van het waterscherm (blijft 18% bij proeven 5, 7, 9).

Bij proef 17 met brakwater kolk (10 ppt) en zoute voorhaven (30 ppt) is de laagste waarde van de zoutuitwisseling bereikt (10,5%) met een relatief laag luchtdebiet in combinatie met een zoetwaterscherm. Bij verlaging van het luchtdebiet (van 95 naar 46 NI/min) en tegelijk verhoging van het waterdebiet (van 0,86 naar 1,31 l/s, proef 11, 12) wordt ook een beter resultaat verkregen (uitwisseling neemt af van 15,7% naar 14,1%), maar dan komen we al boven de Stevinsluiswaarden qua haalbaar waterdebiet ($1,6 \text{ m}^3/\text{s}$). Misschien mogen we hieruit wel concluderen dat het waterscherm het luchtbellenscherm ondersteunt en een zekere reductie van het luchtdebiet compenseert.

Tussen proef 6 en 8 (serie A-W, met smallere spleet) is geen verschil in effect waargenomen, maar mogelijk dat bij de Stevinsluis nog wel een significante verhoging van de watersnelheid mogelijk is, omdat daar een krachtige pompinstallatie beschikbaar is.

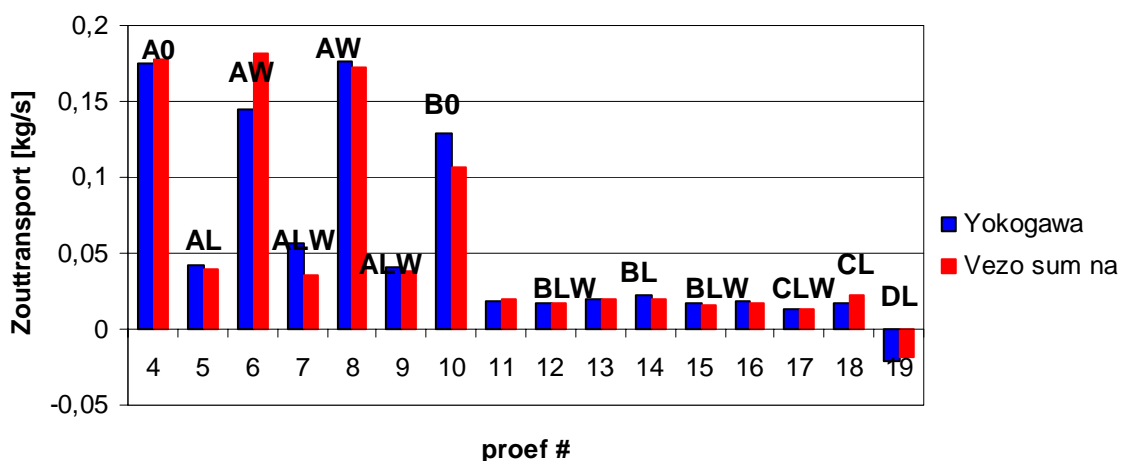


Figuur 3.3 Reductiefactor bepaald t.o.v. proeven 4 resp. 10

Ter vergelijking is in Figuur 3.3 de reductiefactor weergegeven, zie ook Tabel 3.8, waarbij de zoutmassa is vergeleken met de gerealiseerde waarde bij de proeven zonder zoutlekbepurende maatregelen (dus de lock-exchange proeven 4 en 10).

3.3.7 Zouttransport

De conclusies van de vorige paragraaf gelden ook als we naar het zouttransport kijken i.p.v. de zoutuitwisseling, zie Figuur 3.4 en Tabel 3.8.



Figuur 3.4 Zouttransport gemeten in model

Het zouttransport is wel afhankelijk van de aanvankelijke saliniteit, of liever gezegd het verschil in saliniteit tussen kolk en voorhaven. Bij de A-serie proeven met 35 ppt saliniteitsverschil is ook het zouttransport zoals verwacht aanzienlijk hoger dan bij 20 ppt verschil zoals bij de overige proeven.

Bij proef 19 is een negatief zouttransport opgetreden omdat de voorhaven zoet was en de kolk zout. Dit representeert dus de situatie bij opening aan de zoete zijde, met luchtbellenscherm.

3.4 Analyse meetresultaten

3.4.1 Literatuurstudie modelonderzoek zoutlekbepanking bij schutsluizen

Om de meetresultaten te kunnen vergelijken met eerder uitgevoerd laboratorium- en veldonderzoek op het gebied van luchtbellens- en waterschermen voor zoutlekbepanking bij schutsluizen, is in een beperkte aanvulling op de voorstudie nog een korte literatuurstudie uitgevoerd. De eerste suggestie van het zoutlekbepankende effect van een luchtbellenscherm bij schutsluizen, geïllustreerd met laboratoriumonderzoek, wordt gegeven door J. van Veen in De Ingenieur van 1941.

In 1960 is het eerste modelonderzoek naar het stroombeeld bij een luchtbellengordijn uitgevoerd, door het Waterloopkundig Laboratorium, in opdracht van Rijkswaterstaat, M 661. De sluiskolk en zoutindringing zijn hier echter niet gemodelleerd, het luchtbellengordijn was namelijk bedoeld als pneumatische golfbreker voor de Haringvliet-sluizen. Snelheidsprofielen zijn gemeten in een 3 m diepe goot als functie van het luchtdebiet. Ook zijn er praktijkmetingen uitgevoerd in de zeesluis te IJmuiden (waterdiepte 11 m, luchtdebiet maximaal 28 NI/sm). Later zijn door Bulson, 1961 metingen gedaan naar de snelheden ten gevolge van luchtinjectie in de haven van Southampton, in 10 m waterdiepte. Door Abraham en Van der Burgh, 1962, is op basis van o.m. deze metingen een theorie opgesteld over de entrainment van water door het luchtbellenscherm.

Na de proeven bij IJmuiden is een meer uitgebreide set praktijkmetingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat in de sluis te Kornwerderzand (de zustersluis van de Stevinsluis bij de Afsluitdijk, met ongeveer gelijke afmetingen), in 1962. Met behulp van pyknosondes werd in een aantal verticalen op een aantal tijdstippen, gerekend vanaf opening, de dichtheid van het water in de sluiskolk en de voorhaven gemeten. Hieruit is de zoutuitwisseling berekend. Er werden verschillende luchtdebieten toegepast met een totale capaciteit tot 40 Nm³/min.

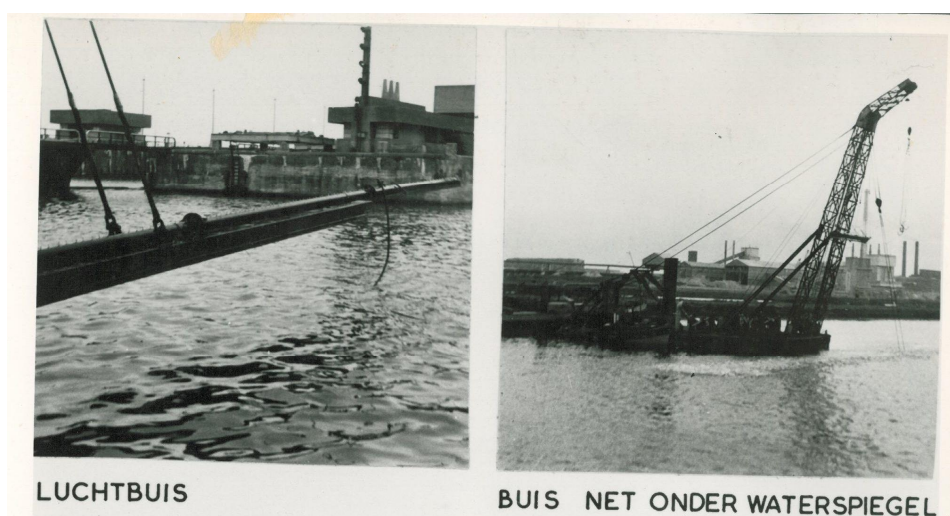


Foto 3.2

Proef met luchtbellenscherm te IJmuiden, 1960

In de periode 1962-1963 is in opdracht van Rijkswaterstaat door het Waterloopkundig Laboratorium modelonderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van een waterscherm op de bestrijding van het zoutbezwaar bij een schutsluis, M 799. In een goot van 0,42 m breedte, 4 m kolklenkte en 0,30 m waterdiepte zijn een aantal proeven uitgevoerd met een zoutwaterscherm met verschillende debieten en configuraties van de instroming bij de bodem. De dichtheid van de voorhaven was 1016 kg/m^3 (23,3 ppt). Saliniteitsprofielen zijn gemeten met een BeZo (Bewegende geleidendheids-Zoutopnemer). Later modelonderzoek is gericht op toepassing van luchtbellenschermen ter beperking van de verzilting in estuaria (M896) en andere methoden van zoutbestrijding bij schutsluizen (Kreekraksluizen, M865). De resultaten van de huidige labproeven worden in de volgende paragrafen vergeleken met de literatuurgegevens.

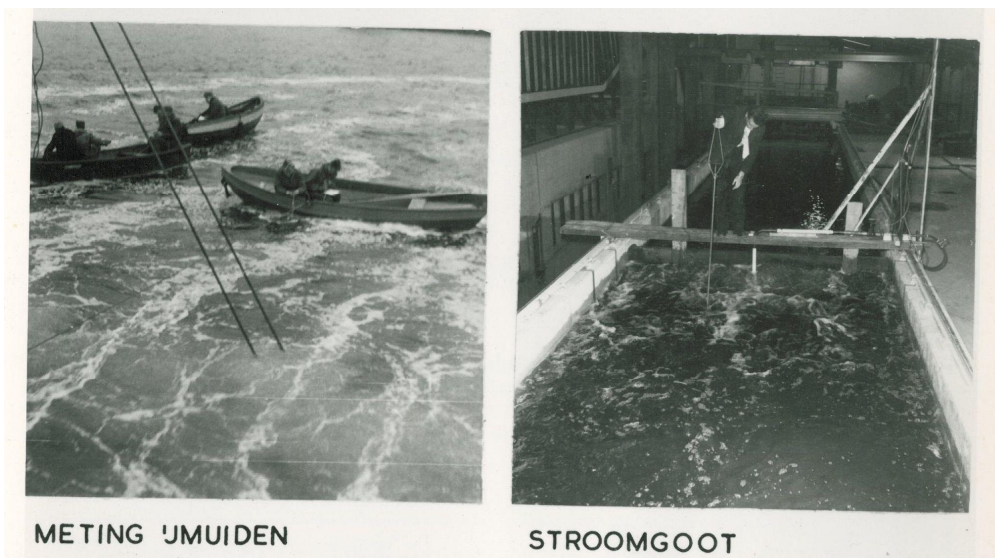


Foto 3.3 Proeven met luchtbellengordijn, Waterloopkundig Laboratorium, 1960

3.4.2 Dimensieloze parameters

De volgende dimensieloze parameters worden gehanteerd in navolging van de literatuurgegevens (Kornwerderzand, 1962, Abraham en Van der Burgh, 1962).

De voortplantingssnelheid interne golf / zoutwaterfront (ongehinderde loopsnelheid):

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}$$

Dimensieloze openingstijdparameter verstreken tijd : dubbele looptijd zoutfront :

$$T = \frac{t \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}}{4L}$$

Dimensieloze luchtdebietparameter:

$$f^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt[3]{q_a g}}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}}$$

Dimensieloze waterschermdebietparameter (M 799, 1963) Q waterscherm : Q zoutindringing:

$$D = \frac{Q_{\text{jet}}}{B \frac{1}{4} h \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}} gh}$$

Om ook de invloed van de waterimpuls in rekening te brengen kan nog worden gedefinieerd:

$$I = \frac{\rho_j}{\rho} \frac{u_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}} gh} D$$

hierin zijn:

$\Delta\rho$	= dichtheidsverschil water voorhaven en kolk (= $\rho_{v,v} - \rho_{k,v}$)	[kg/m ³]
ρ	= dichtheid water voorhaven (= $\rho_{v,v}$)	[kg/m ³]
q_a	= luchtdebiet per eenheid van breedte bij atmosferische druk	[m ² /s]
B	= breedte kolk	[m]
h	= waterdiepte in kolk	[m]
g	= versnelling zwaartekracht (= 9,81)	[m/s ²]
t	= verstreken tijd vanaf opening schuif	[s]
ρ_j	= dichtheid jetwater (zoet of zout/brak)	[kg/m ³]
u_0	= uitstroomsnelheid jetwater bij bodem = $Q_j/(B^*d_{\text{spieet}})$	[m/s]

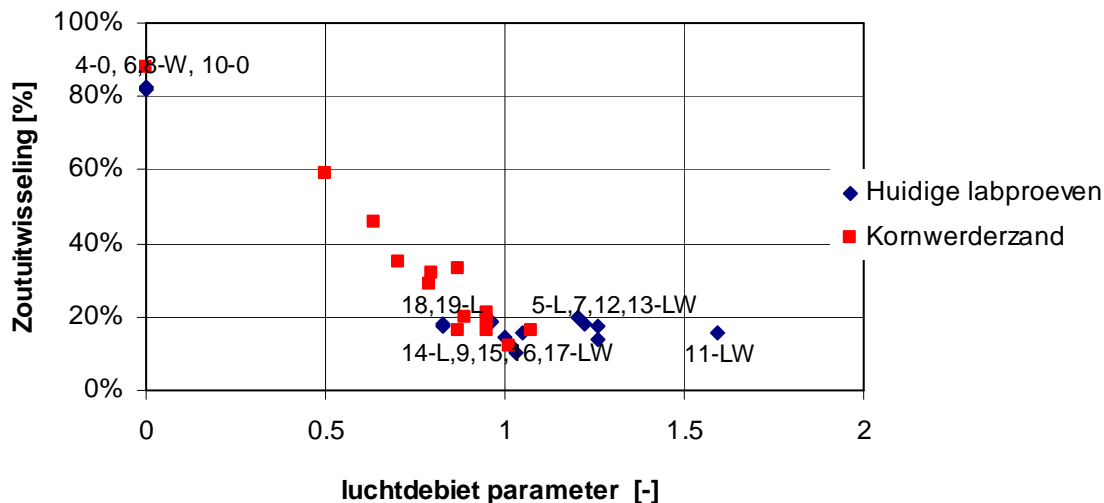
In de tabel worden de berekende waarden gegeven voor de huidige proeven. Het effect van de reductie van de zoutindringing zit niet in de berekende waarde voor de loopsnelheid c en is dus niet direct vergelijkbaar met de gemeten waarden in Tabel 3.8, alleen voor de proeven 4 en 10.

Tabel 3.9 Berekende dimensieloze parameters

Proef #	Code	Loopsnelheid c m/s	Lucht $f^{1/2}$ -	Waterdebiet D -	Impuls I -	Tijd T -
4	A-0	0,131	0	0	0	1,58
5	A-L	0,127	1,22	0	0	1,40
6	A-W	0,129	0	0,087	0,09	1,48
7	A-LW	0,129	1,20	0,097	0,11	1,82
8	A-W	0,129	0	0,095	0,21	1,55
9	A-LW	0,129	0,96	0,141	0,47	1,55
10	B-0	0,100	0	0	0	1,15
11	B-LW	0,099	1,59	0,120	0,34	1,19
12	B-LW	0,098	1,26	0,193	0,89	1,13
13	B-LW	0,098	1,26	0,184	0,81	1,24
14	B-L	0,100	1,05	0	0	1,18
15	B-LW	0,103	1,02	0,117	0,32	1,22
16	B-LW	0,104	1,00	0,115	0,32	1,35
17	C-LW	0,098	1,03	0,122	0,35	1,09
18	C-L	0,101	0,83	0	0	1,17
19	D-L	0,098	0,83	0	0	1,26

3.4.3 Vergelijking met literatuur, luchtbellenscherm

In Figuur 3.5 is de zoutuitwisseling weergegeven als functie van het dimensieloze luchtdebiet $f^{1/2}$ (zie 3.4.2) en vergeleken met de proeven van Kornwerderzand (metingen voor $T = 1$ weergegeven).



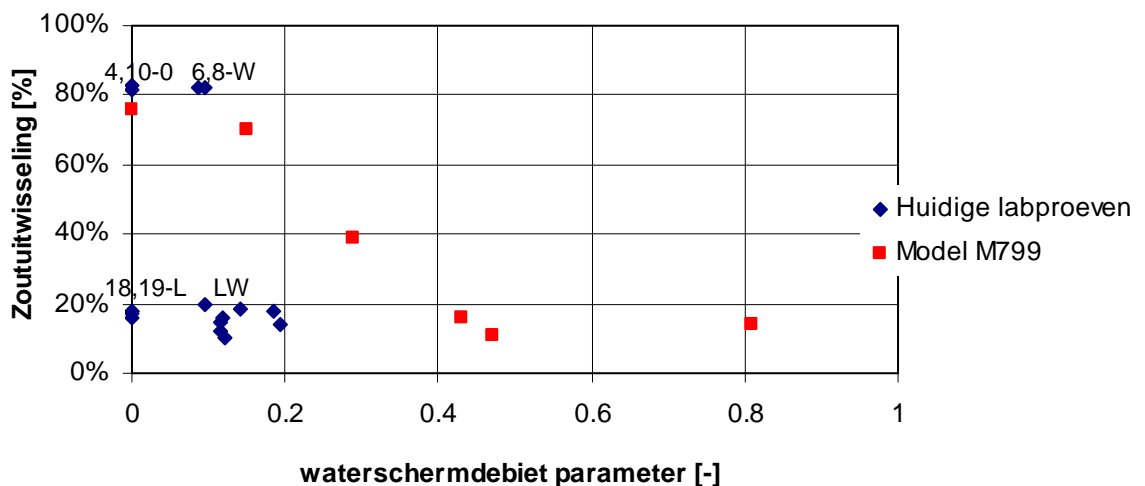
Figuur 3.5 Zoutuitwisseling als functie luchtdebietparameter $f^{1/2}$

De gemeten reductie van de zoutuitwisseling met luchtbellenscherm is groot ($U_n < 20\%$), wat wordt bevestigd door (onder meer) de proeven bij Kornwerderzand met de hoogste luchtdebieten. De laagste waarde is bereikt bij proef 17 met een combinatie van lucht en zoetwaterscherm.

Proeven met overeenkomstig dimensieloos luchtdebiet ($f^{1/2}$ tot ongeveer 1) geven vergelijkbare resultaten, maar de uitgevoerde labproeven met veel hoger luchtdebiet (al of niet met waterscherm, proeven 5, 7, 11-13 met $f^{1/2} = 1,2$ tot 1,6) geven geen extra reductie van de zoutuitwisseling. De trends zoals in de literatuur weergegeven met semi-empirische relaties (vergelijk met fig. 4.2 Voorstudie) en bevestigd door de proeven bij Kornwerderzand, vlakken af bij een minimale zoutuitwisseling van 10-20%, zoals nu proefondervindelijk is vastgesteld. Geconcludeerd kan worden dat het maximale luchtdebiet van 100 NI/sm waarschijnlijk nog gereduceerd kan worden bij handhaving van vrijwel gelijke effectiviteit.

3.4.4 Vergelijking met literatuur, waterscherm

Wordt de zoutuitwisseling op vergelijkbare wijze uitgezet tegen het dimensieloze waterschermdebiet D , zie Figuur 3.6, waarin de huidige labproeven zijn vergeleken met de resultaten van M 799 (voor $T = 1$), dan blijkt dat de toepassing van een waterscherm, zelfs met zout water, wel degelijk effectief kan zijn, mits het waterjetdebiet groot genoeg is. De uitgevoerde labproeven (6, 8) zijn hiermee niet in tegenspraak, maar laten de beperkende werking niet of nauwelijks zien, omdat daarvoor het toegepaste waterdebiet klaarblijkelijk veel te laag was. De ingestelde waarden zijn gebaseerd op een maximale beschikbare capaciteit bij de Stevinsluis. Een positief effect is dan alleen te verwachten in combinatie met een luchtbellenscherm.



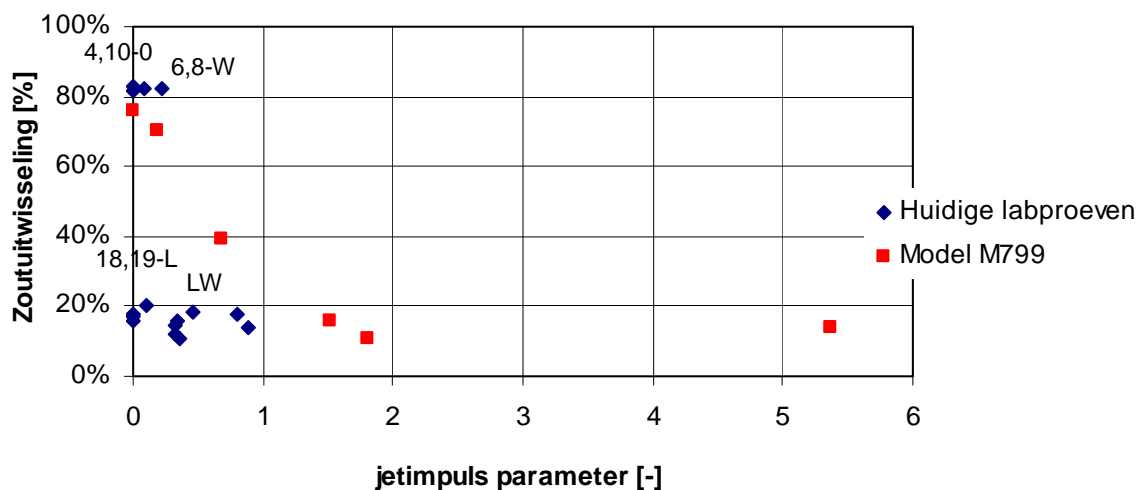
Figuur 3.6 Zoutuitwisseling als functie waterschermdebietparameter D

In M799 werd ook al geconcludeerd dat bij de proeven met $D=0,15$ vrijwel geen effect kon worden waargenomen, maar bij $D=0,29$ en $0,43$ de zoutreductie wel degelijk aanzienlijk was. Pas bij zeer hoge waterschermdebieten kwam het nadelig effect van de toepassing van zout water bij het waterscherm naar voren, bij $D=0,81$ was de zoutwisseling weer iets hoger omdat het waterschermdebiet van de zelfde orde van grootte werd als het zoutwaterdebiet door het zoutfront.

Omgekeerd heeft de toepassing van een zoetwaterschermdebiet dan een extra voordeel, vooral als de sluiskolk brak is (proef 17), omdat dan behalve de beperking van de zoutindringing ook menging met zoet water positief werkt.

Om te kijken of wellicht de waterimpuls een betere maat is dan alleen het waterdebiet, is in Figuur 3.7 de zoutuitwisseling uitgezet tegen de dimensieloze impulsparameter I (zie 3.4.2). Dit geeft echter geen ander beeld. Door reductie van de spleetdikte (proef 8 t.o.v. proef 6) neemt de impuls kennelijk nog te weinig toe. Bij de proeven M799 is de uitstroomsnelheid niet gewijzigd, wel de wijze van inbrengen (met een veld van kleine nozzles).

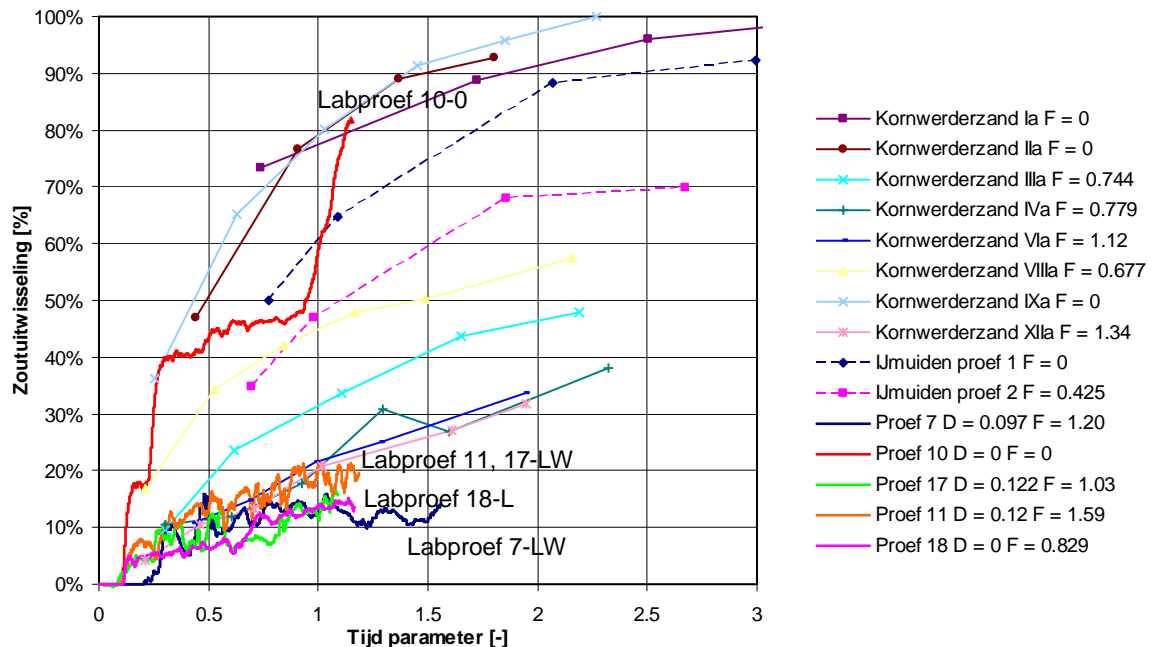
Mogelijk dat bij de Stevinluis nog een significante verhoging van de impuls mogelijk is bij gelijkblijvend debiet door een smallere spleet (< 5 cm) of nozzles toe te passen, dit is afhankelijk van de haalbare pompdruk en vermogen.



Figuur 3.7 Zoutuitwisseling als functie impulsparameter I

3.4.5 Vergelijking met literatuur, tijdsduur van opening

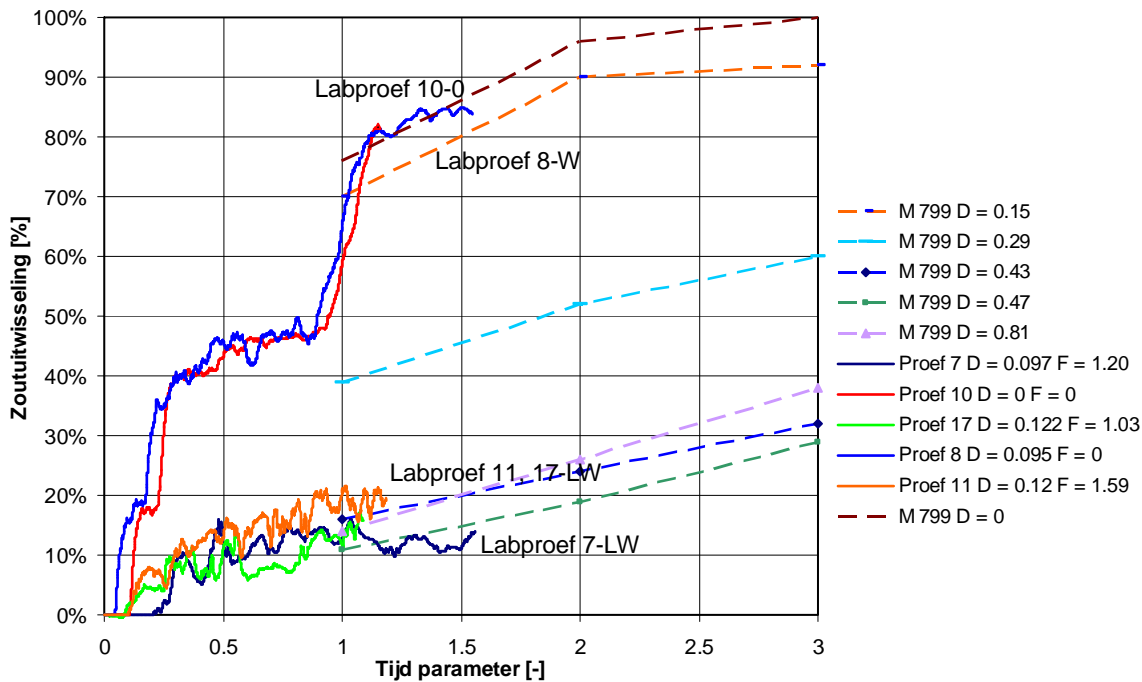
De conclusies worden bevestigd als we de gemeten zoutuitwisseling als functie van de dimensieloze tijdparameter T (zie 3.4.2). weergeven voor verschillende dimensieloze luchtdebieten (F staat hierbij voor $f^{1/2}$) en dan vergelijken met de proeven van Kornwerderzand, zie Figuur 3.5.



Figuur 3.8 Zoutuitwisseling als functie tijdparameter T , met luchtbellenscherm

De getrokken lijnen zijn bepaald uit het gemiddelde van alle $VeZo$'s per tijdstap bij de betreffende labproef. De lijnen zijn afgebroken bij het moment van sluiting van de schuif. Het zoutbezwaar neemt dan niet meer toe hoewel de $VeZo$'s daarna nog langdurig schommelingen in saliniteit laten zien ten gevolge van interne golven. Bij de praktijkmetingen was de opentijd van de sluis vaak veel langer dan de dubbele looptijd ($T = 1$) en zijn nog meetpunten verkregen voor dimensieloze tijdstippen veel groter dan 1 tot 1,5 zoals bij de labproeven. Het is duidelijk dat de zoutuitwisseling dan in alle gevallen flink is toegenomen of zelfs al volledig is.

Verder is het zo dat de voor de berekening van de waarde van de tijdparameter benodigde theoretisch berekende indringsnelheid c niet altijd overeen komt met de werkelijke gemeten indringsnelheid. Dat betekent dat er geen volledige uitwisseling is zoals bij een lock-exchange op het exacte tijdstip $T = 1$. Dit komt omdat door het luchtbellenscherm het indringende water al sterk verdund is en daardoor zoals te verwachten langzamer indringt. Dit is duidelijk waargenomen bij de proeven.



Figuur 3.9 Zoutuitwisseling als functie tijdparameter T , met waterscherm

Op overeenkomstige wijze is gekeken naar de invloed van het dimensieloze waterschermdebiet met en zonder lucht, zie Figuur 3.9.

De modelproeven M 799 zijn enkele minuten voortgezet in de tijd na opening van de schuif (tot $T = 4$), de kolk werd niet gesloten. De weergegeven lijnen zijn dus uitsluitend gebaseerd op metingen op een aantal vaste tijdstippen in 4 verticalen. De geleidendheidsopnemers (BeZo's) werden continu op en neer bewogen zodat de aflezingen complete zoutverticalen opleverden.

Bij $D = 0,15$ werd waargenomen, evenals bij de huidige labproeven 6 en 8 met $D = 0,1$, dat het waterscherm niet door het binnendringende zoutfront heenbreekt, terwijl dit met hogere waterdebieten en bij de huidige labproeven met het luchtbellenscherm steeds wel het geval was. Om hetzelfde reducerend effect met een waterscherm te verkrijgen is dus een veel hoger waterschermdebiet nodig dan thans is toegepast.

4 Conclusies en Aanbevelingen

4.1 Conclusies laboratoriumproeven

- 1 Bij de huidige laboratoriumproeven is het zoutlekbeperkende effect van een luchtbellenscherm en een waterscherm in een sluiskolk onderzocht, bij verschillende saliniteit van voorhaven en kolk, voor omstandigheden die relevant zijn voor de Stevinsluis en de Volkeraksluis.
- 2 De uiteindelijke zoutlek naar of uit de sluiskolk is afhankelijk van de openstellingstijd, het verschil in saliniteit tussen voorhaven en kolk en de effectiviteit van de zoutlekbeperkende maatregelen.
- 3 Gebleken is dat een grote reductie van de zoutuitwisseling en het zouttransport tussen voorhaven en schutkolk mogelijk is door het toepassen van een luchtbellenscherm of een combinatie van een luchtbellenscherm en een waterscherm.
- 4 Uit de metingen volgt dat de invloed van het waterscherm gering is ten opzichte van die van het luchtbellenscherm. Uit vroeger modelonderzoek is gebleken dat een waterscherm wel degelijk effectief kan zijn, ook bij gebruik van zout water, maar dan alleen bij zeer grote waterschermdebieten.
- 5 Een verplaatsing van het luchtbellenscherm ten opzichte van de schuif gaf geen merkbare verbetering van de zoutlekbeperking.
- 6 Het blijkt mogelijk het luchtdebiet flink te reduceren zonder significante afname van de zoutuitwisseling. Het kenmerkende stromingspatroon, waarbij een brakwater-circulatiezone ontstaat direct achter het luchtbellenscherm, bleef bij deze lagere luchtdebieten behouden.
- 7 De inzet van een zoetwaterscherm in een brakwaterkolk in combinatie met een luchtbellenscherm met gereduceerd luchtdebiet leverde de grootste reductie op van de zoutindringing.
- 8 De proeven bevestigen de literatuurgegevens van model- en praktijkonderzoek op het gebied van zoutlekbeperking bij schutsluizen met lucht- en waterschermen. Ze geven bovendien inzicht van het gedrag bij nog hogere luchtdebieten en vullen de numerieke berekeningen van Deeltaak 1 aan.

4.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

- 1 Voor de praktijkproef bij de Stevinsluis wordt aanbevolen het effect te onderzoeken van het reduceren van het luchtdebiet met en zonder combinatie van een waterscherp.
- 2 Mogelijk kan het verhogen van de waterdruk met de bestaande pompinstallatie bij de Stevinsluis, waarvan het debiet relatief beperkt is, nog een verbetering van het effect van het waterscherp opleveren. Dat betekent dat een smallere spleet of een serie kleine nozzles moet worden toegepast.
- 3 Voor de Volkeraksluizen (met name de nieuw te bouwen beroepsvaartsluis) wordt aanbevolen te onderzoeken of er technische mogelijkheden bestaan om een groter waterscherpdebiet in te kunnen stellen met behulp van zoet of brak water uit de voorhaven gebruik makend van bestaand verval.
- 4 Het verdient in het algemeen aanbeveling bij het operationeel sluisbeheer strak toe te zien op de openstellingstijd en de werking van het luchtbellenscherm door middel van permanente controle van de opentijd, het luchtdebiet en het verloop van het zoutgehalte in de kolk op enkele locaties bijv. op een display in de bedieningsruimte.

5 Referenties

Veen, J. van, 1941, Twee middelen om het zoutbezwaar bij zeesluizen op te heffen, De Ingenieur, no. 10.

Aartsen, M.A., 1960 (feb.), Luchtbellengordijn, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, Report nr. M0661; Rapport model en prototype-onderzoek, i.o.v. Rijkswaterstaat

Burgh, P. van der en P. de Vos, april 1961, Zoutbestrijding door luchtschermen: proeven in de middensluis te IJmuiden, 's-Gravenhage: Rijkswaterstaat, Dienst voor de Waterhuishouding

Bulson, P.S., May 1961, Currents Produced by an Air Curtain in Deep Water, The Dock and Harbour Authority, Vol. 42, No. 487

Burgh, P. van der, 1962 (jan.), Zoutbestrijding door luchtschermen: proeven in de grote schutsluis te Kornwerderzand; Proeven met luchtschermen, Rijkswaterstaat, Dienst voor de Waterhuishouding

Abraham, G. and P. van der Burgh, August 1962, Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers, Delft Hydraulics Publication no. 28

Bruyn, J., 1963 (okt.), Waterschermen ter bestrijding van zoutbezwaar van schutsluizen aan zee, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, Report nr. M 0799, Rapport modelonderzoek, i.o.v. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding

Mazijk, A. van, 1971 (juli), Reproductie zouttoestand getijrivieren (VIII): invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, Report nr. M 0896-VIII i.o.v. Rijkswaterstaat, Deltadienst

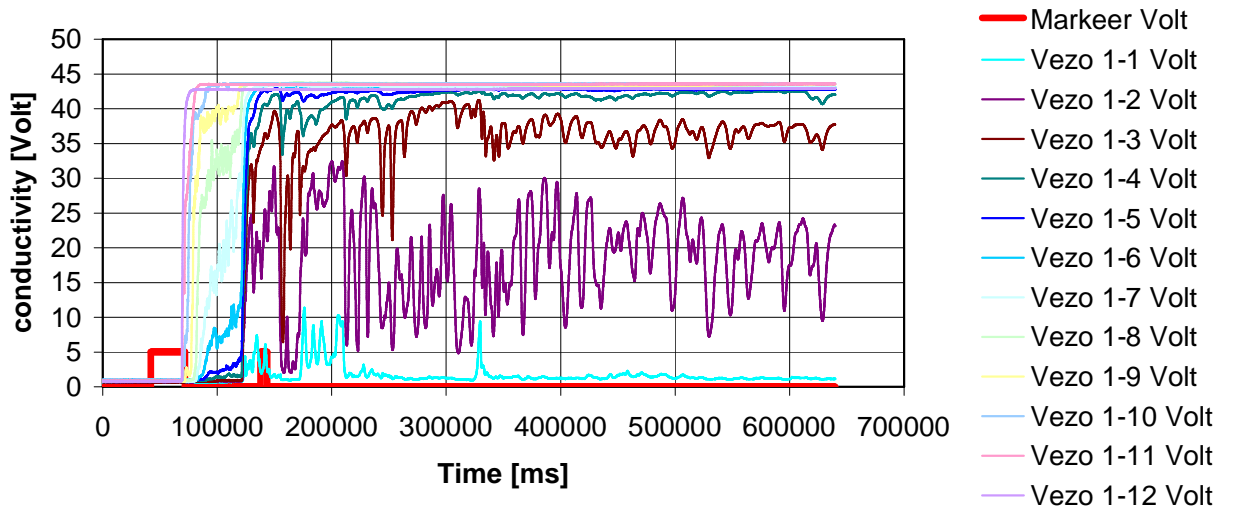
Adriaanse, P., Caldwell, C.R. and L.J. Droppert, April 1981, Rijnmond tidal model control system, Delft Hydraulics Publication no. 254

Kuijper, C., 1999, Salt Conversion, Report WL|Delft Hydraulics, Z163.20

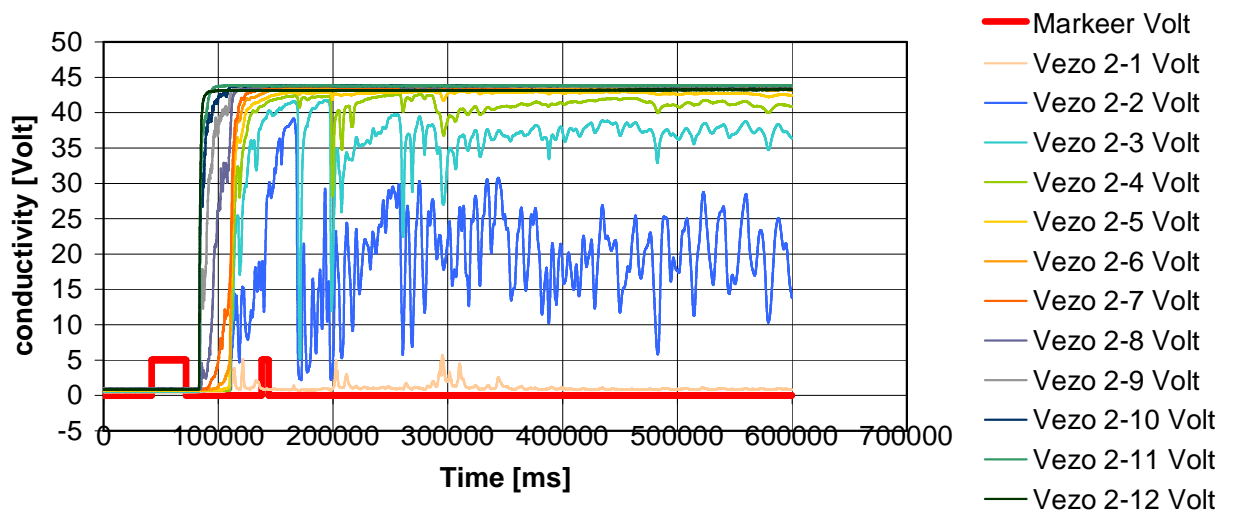
Uittenbogaard, R.E., 2010, Voorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen, Model voor Zoutvrachtberekeningen, Deltares, product 3-17, 1201226.011

Keetels, G., 2010, Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen, Numerieke Detailsimulaties, Deltares, product 2, 1201226.001

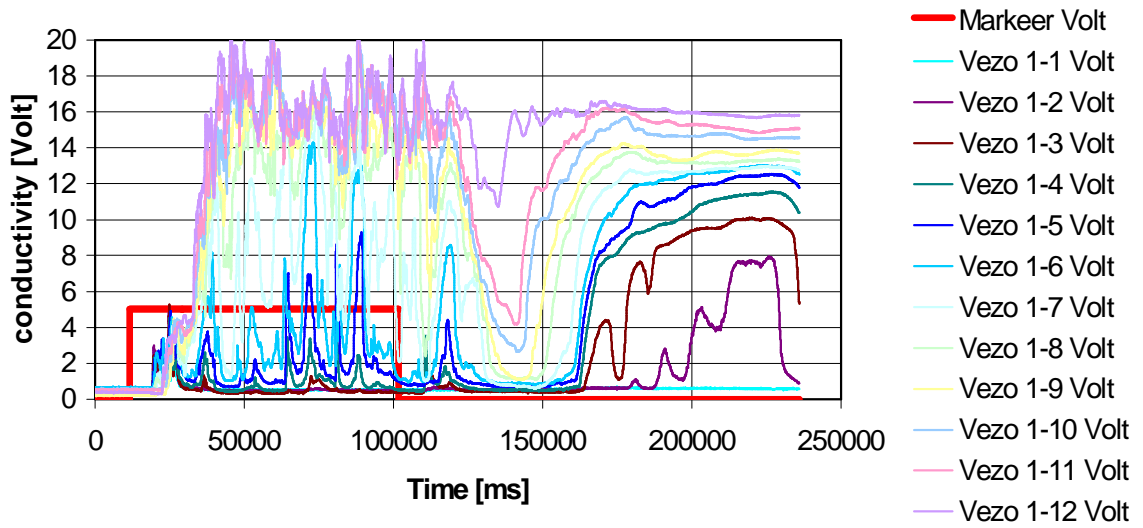
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #004



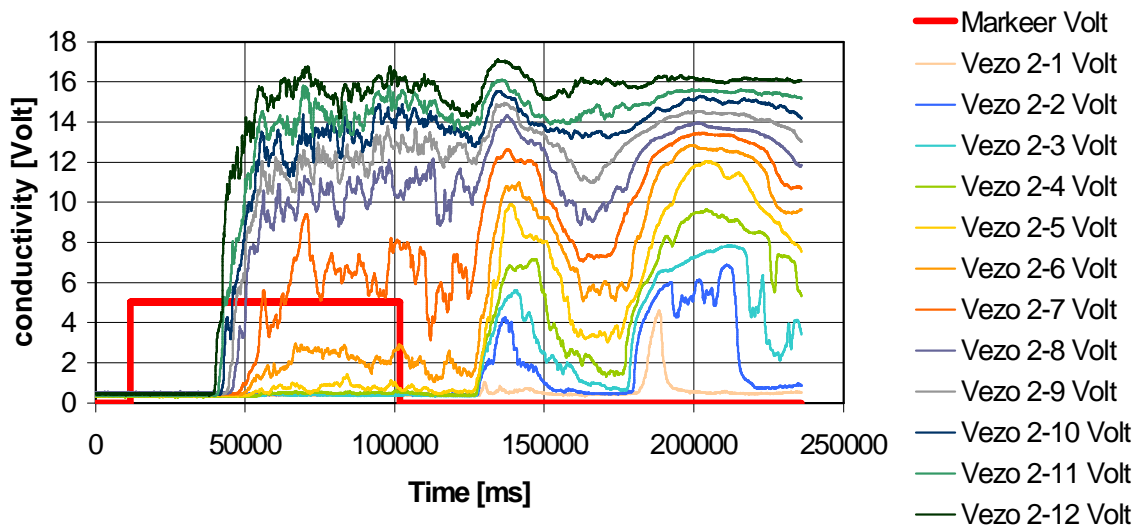
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #004



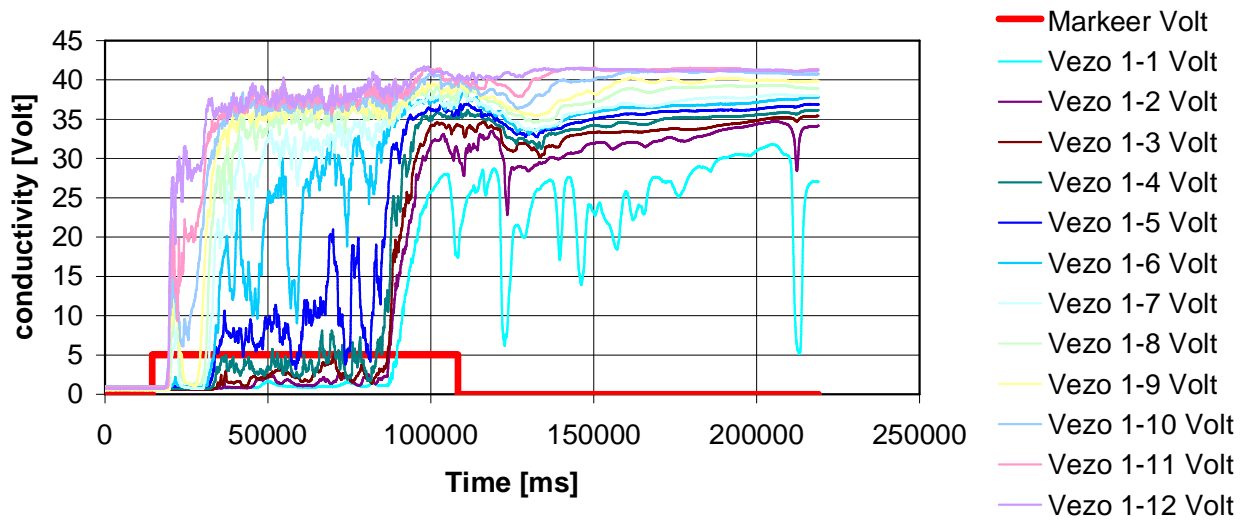
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #005



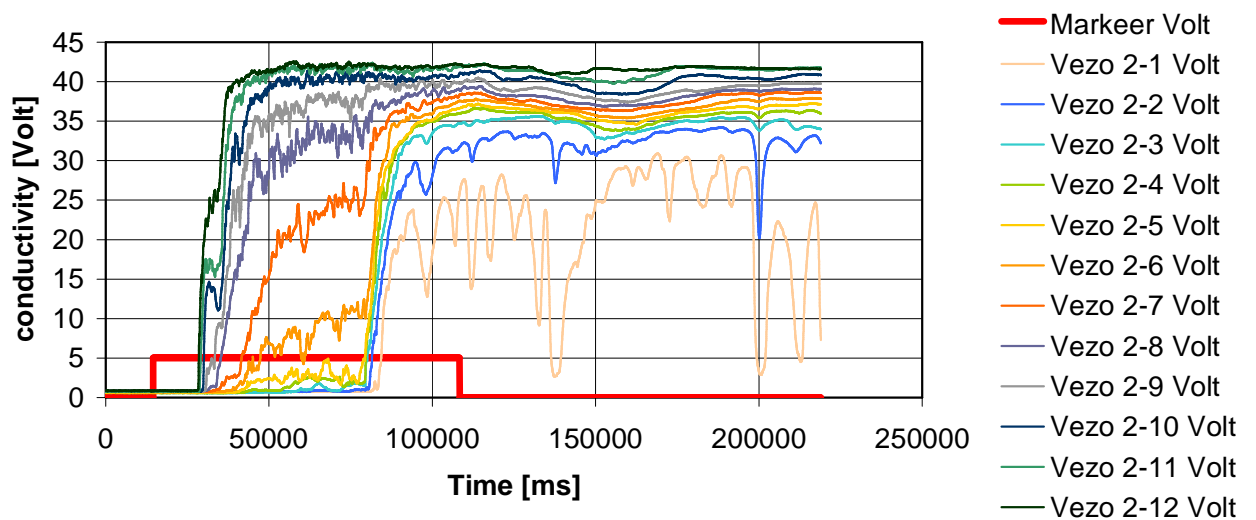
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #005



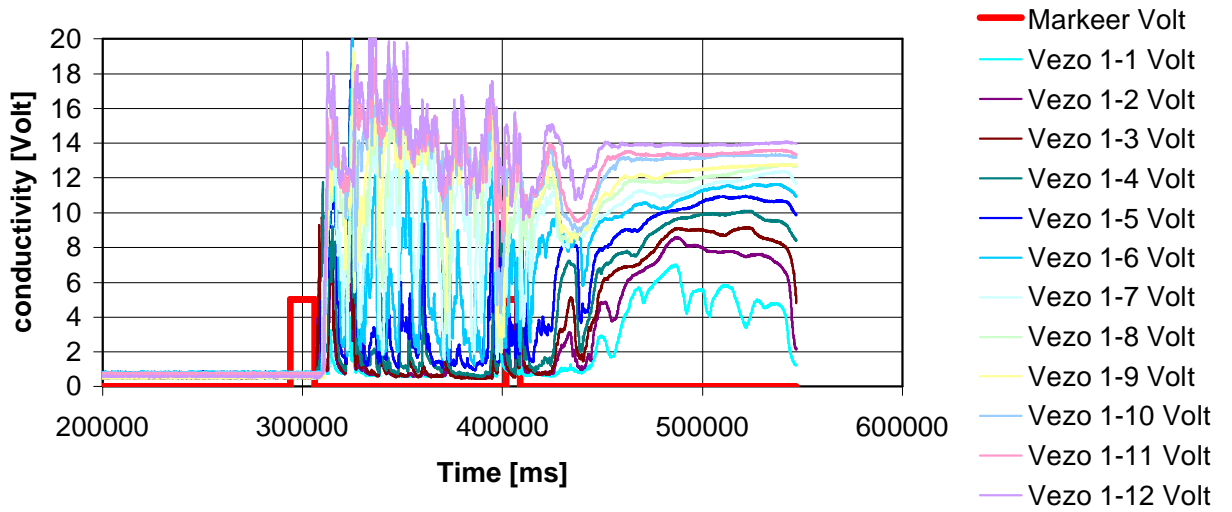
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #006



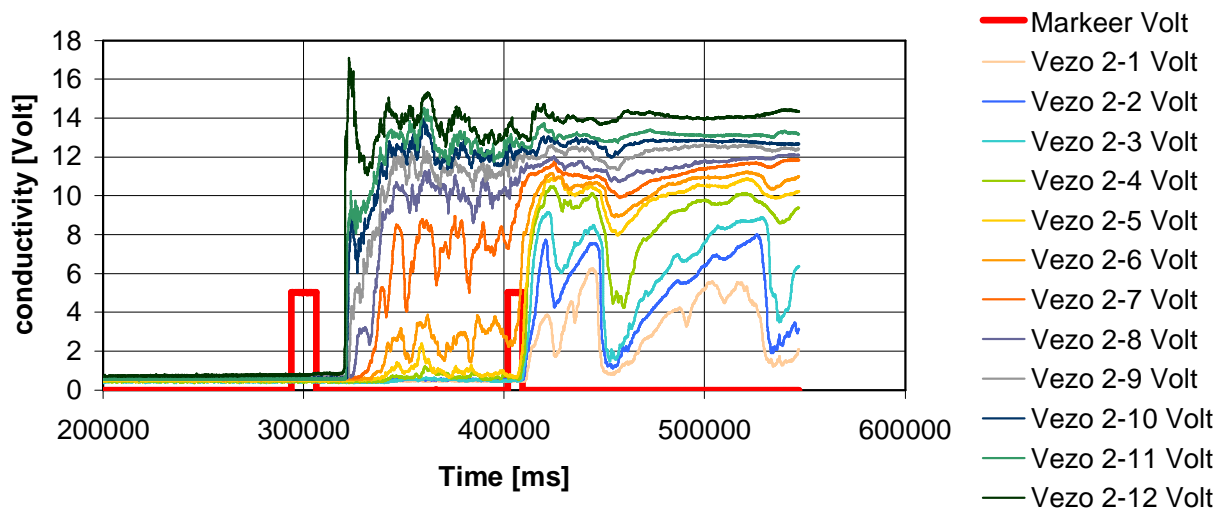
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #006



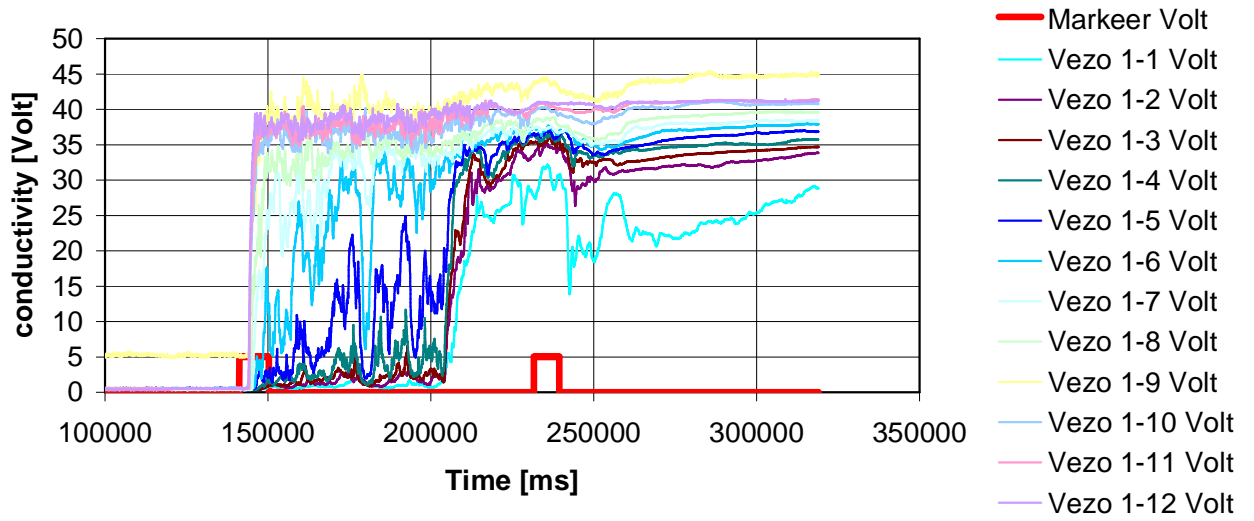
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #007



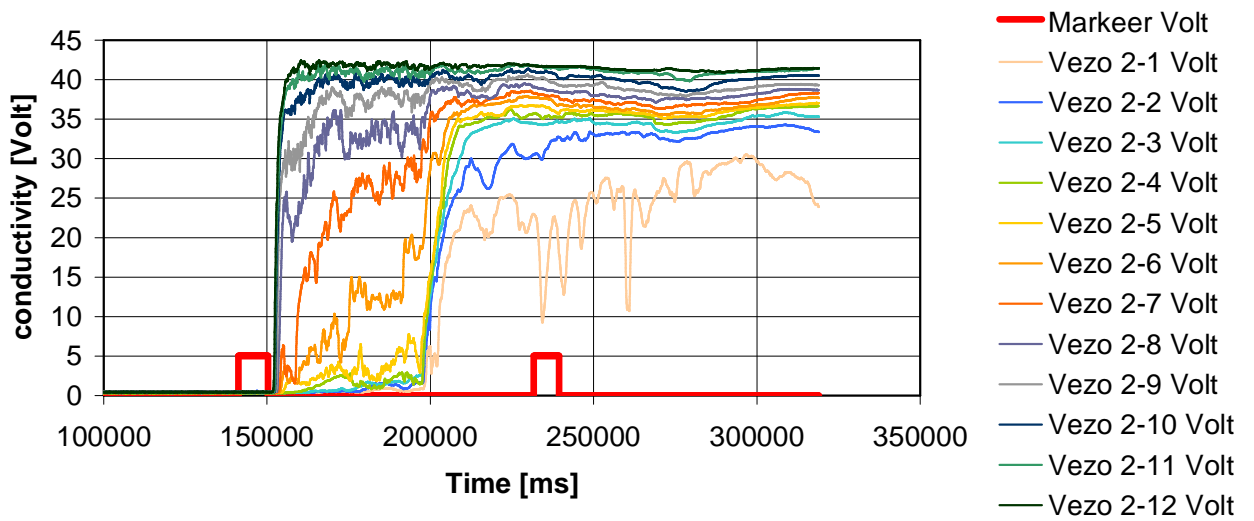
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #007



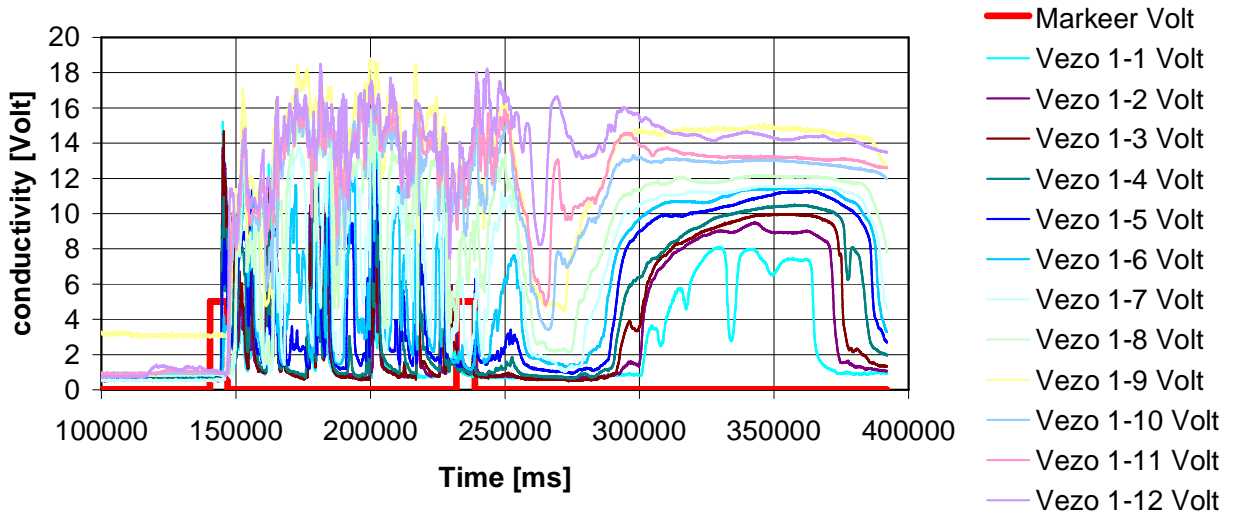
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #008



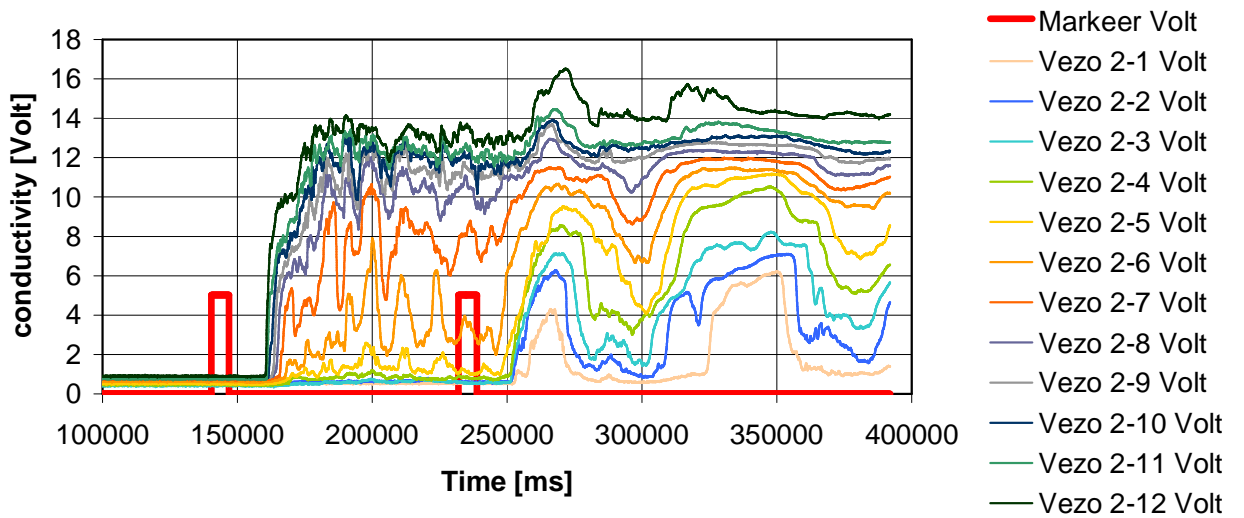
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #008



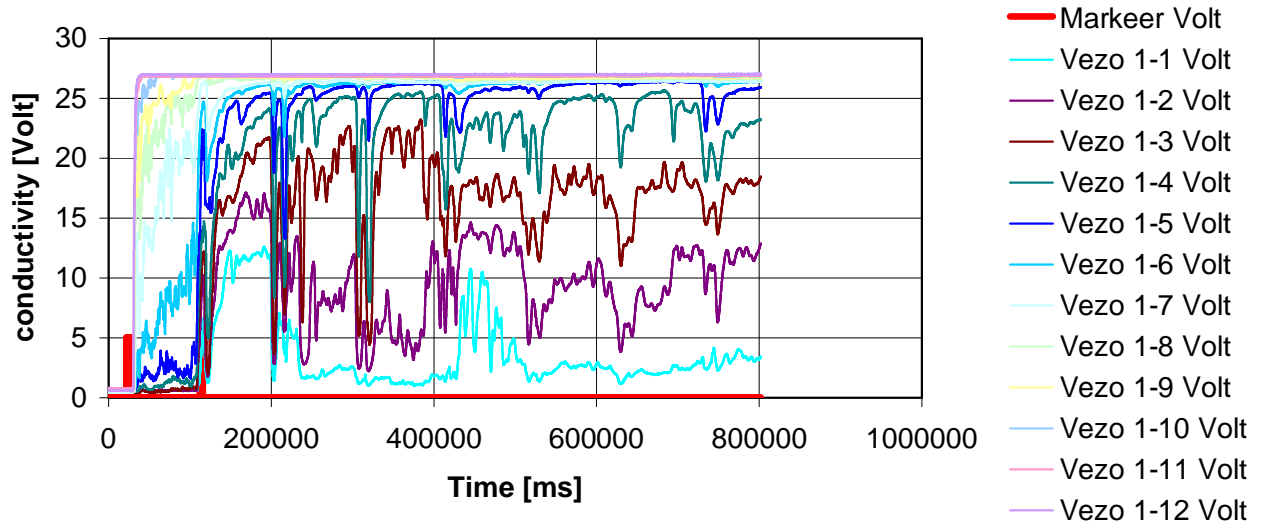
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #009



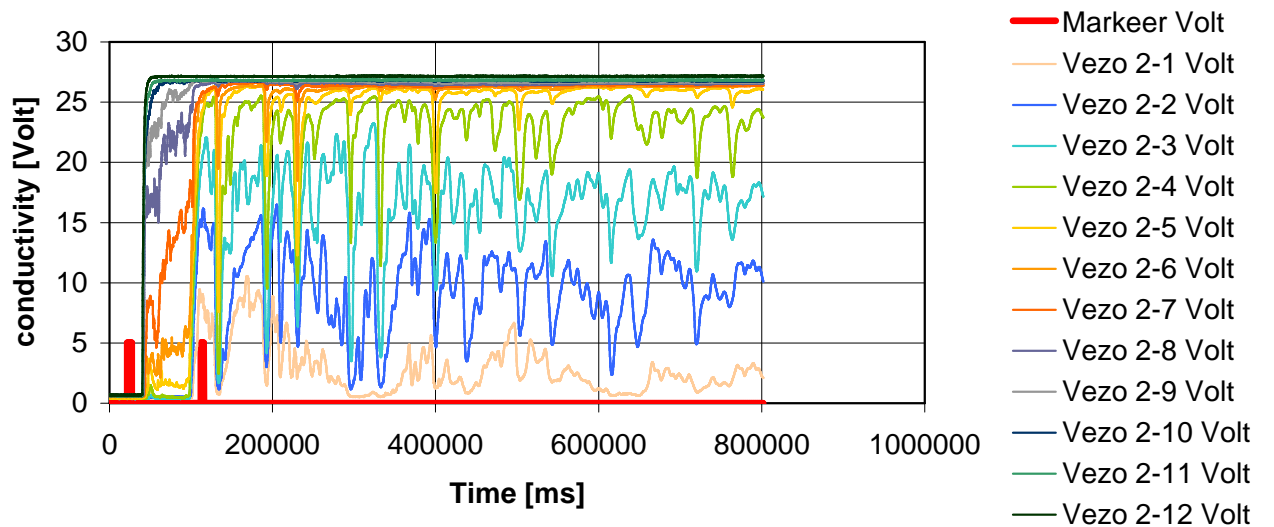
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #009



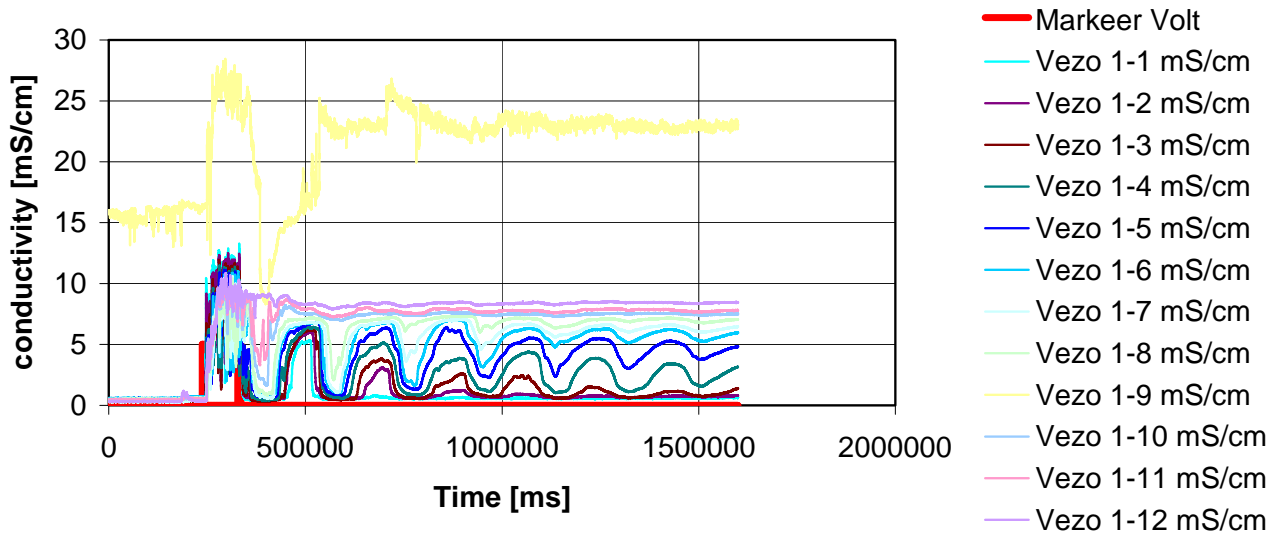
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #010



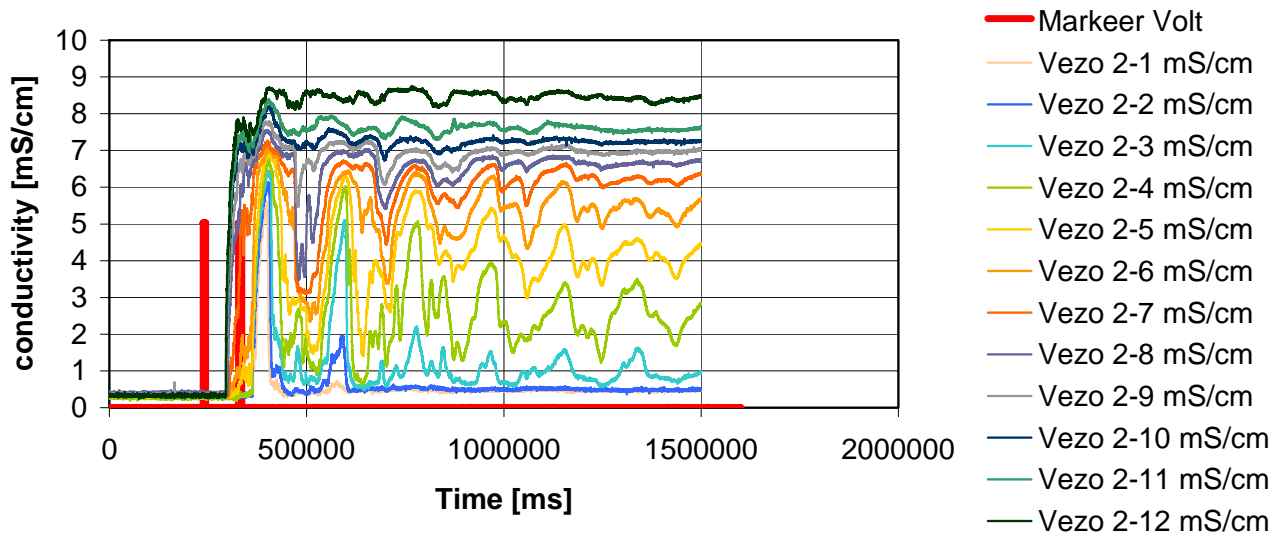
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #010



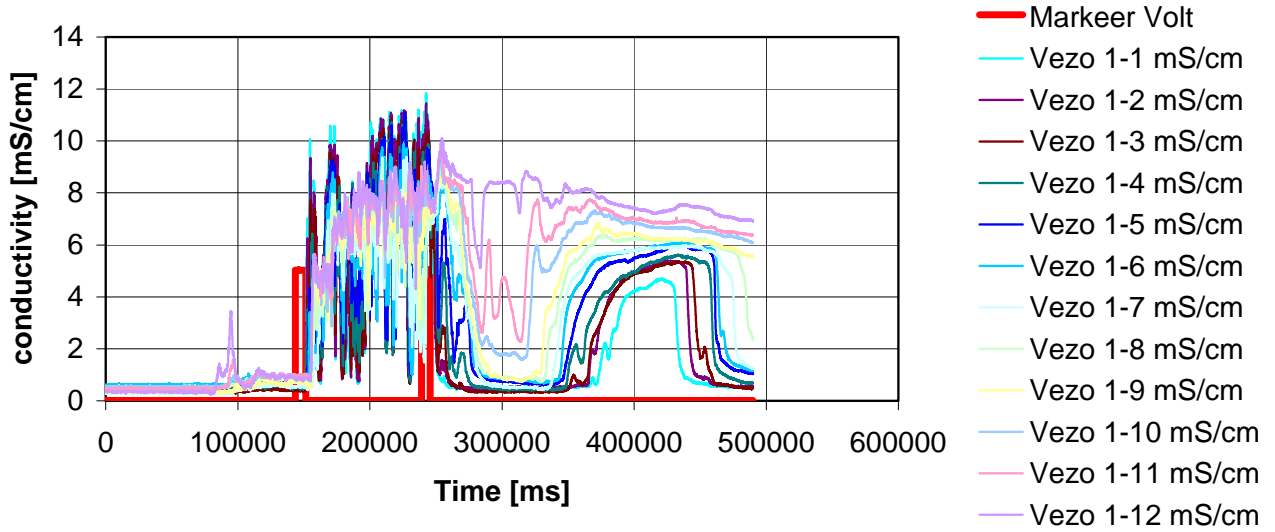
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #011



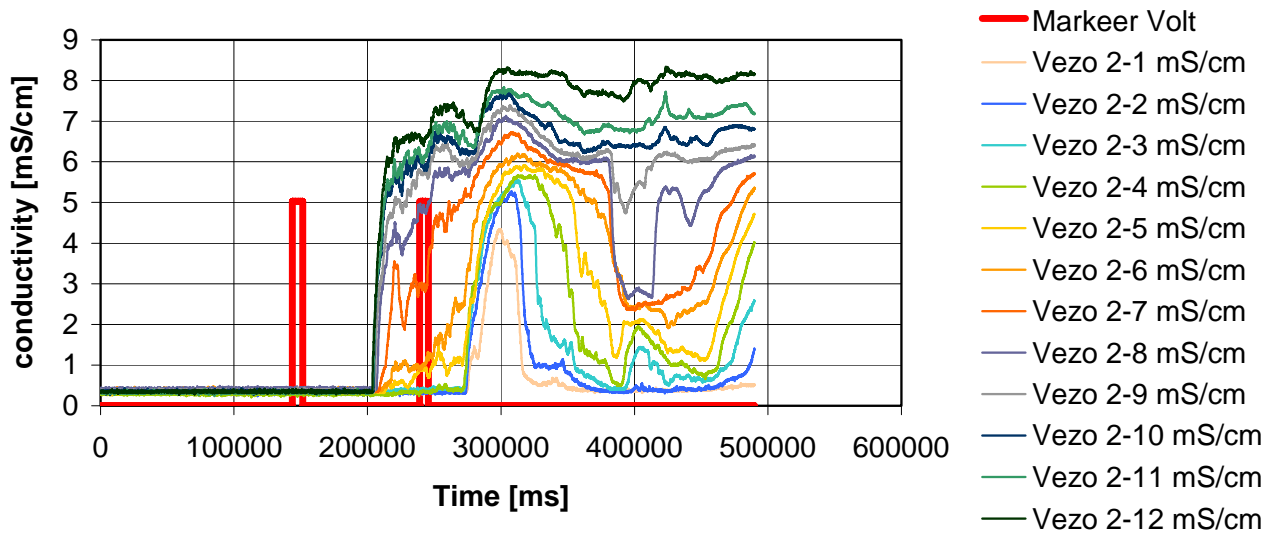
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #011



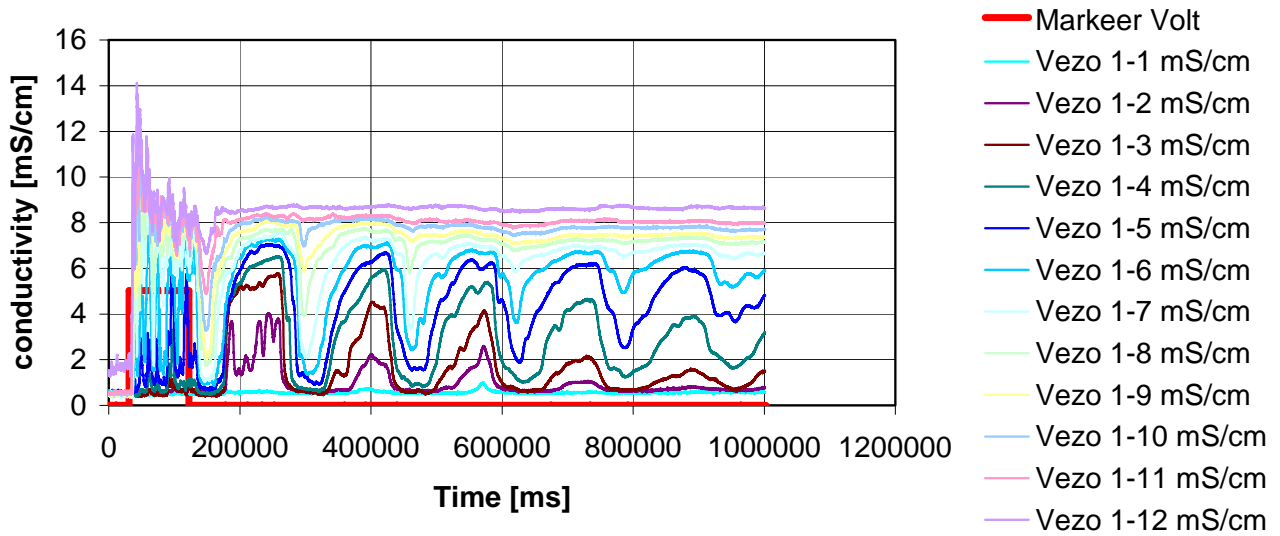
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #012



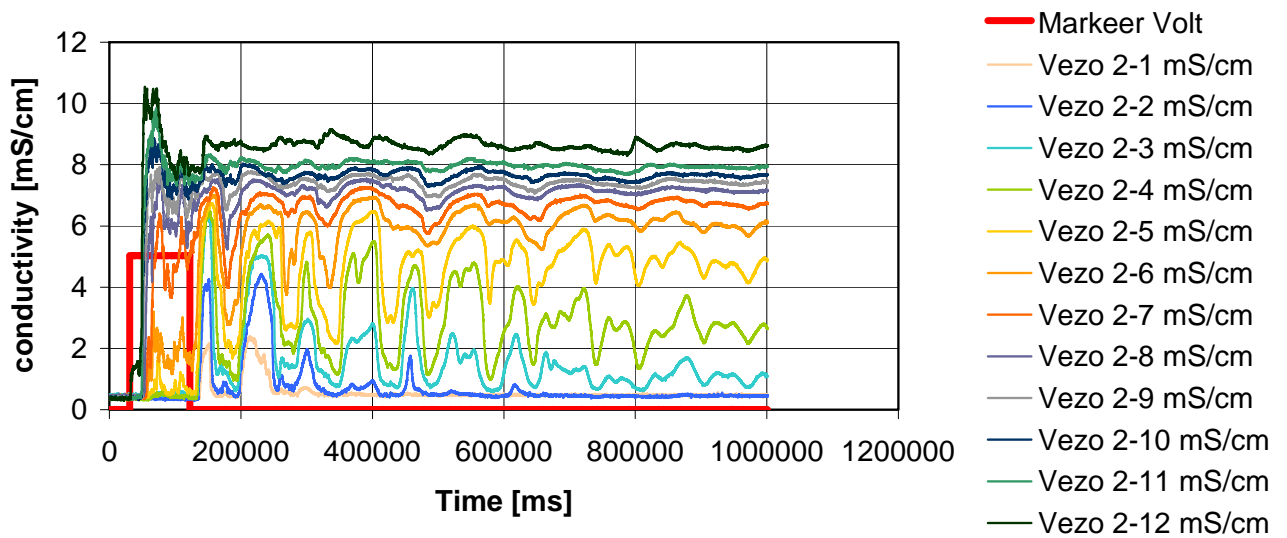
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #012



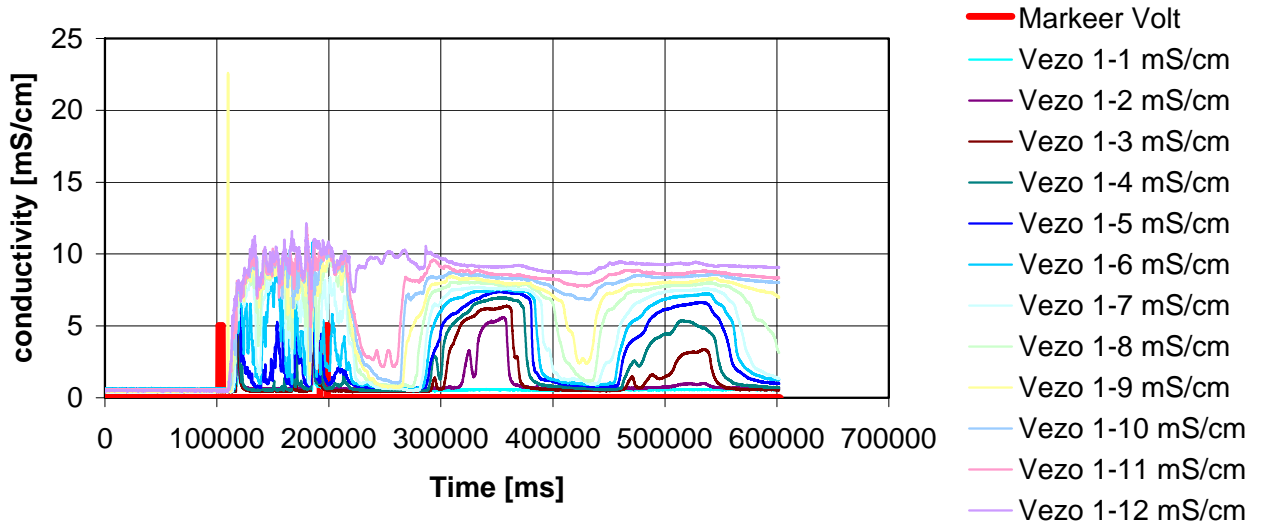
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #013



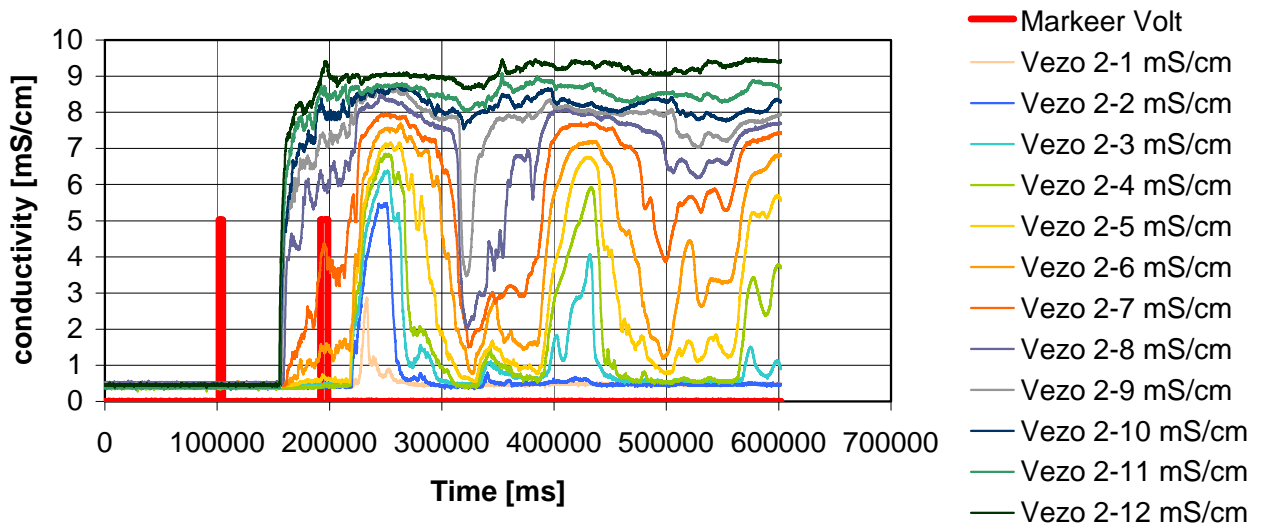
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #013



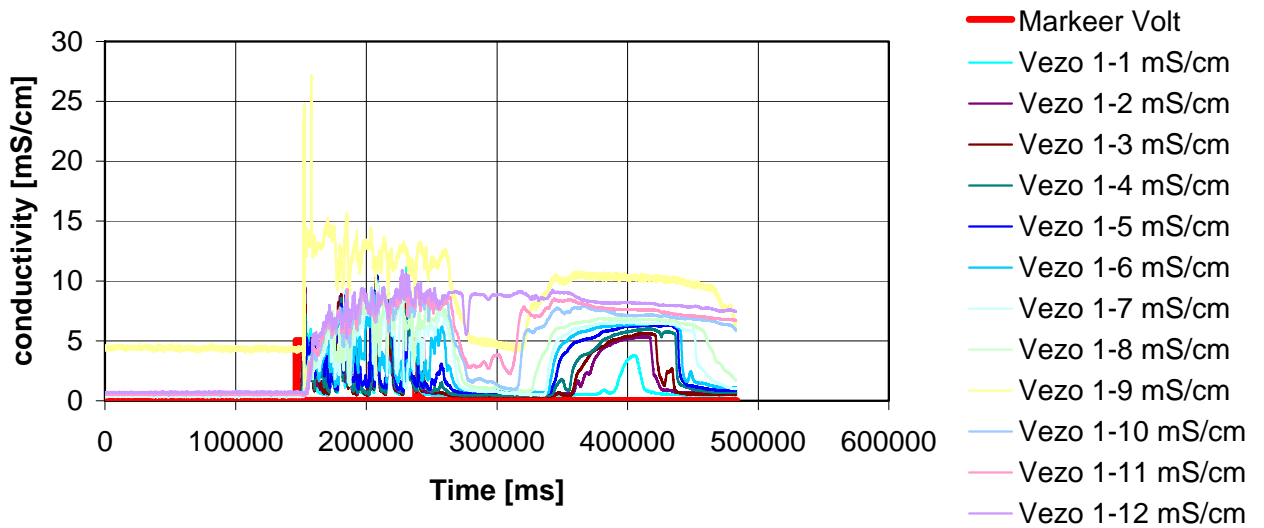
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #014



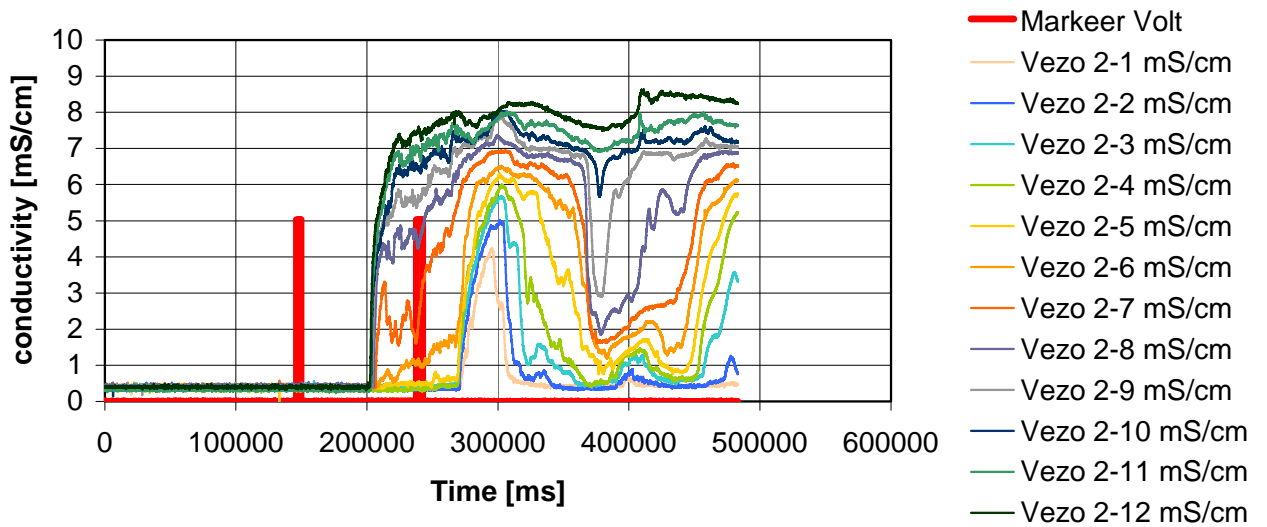
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #014



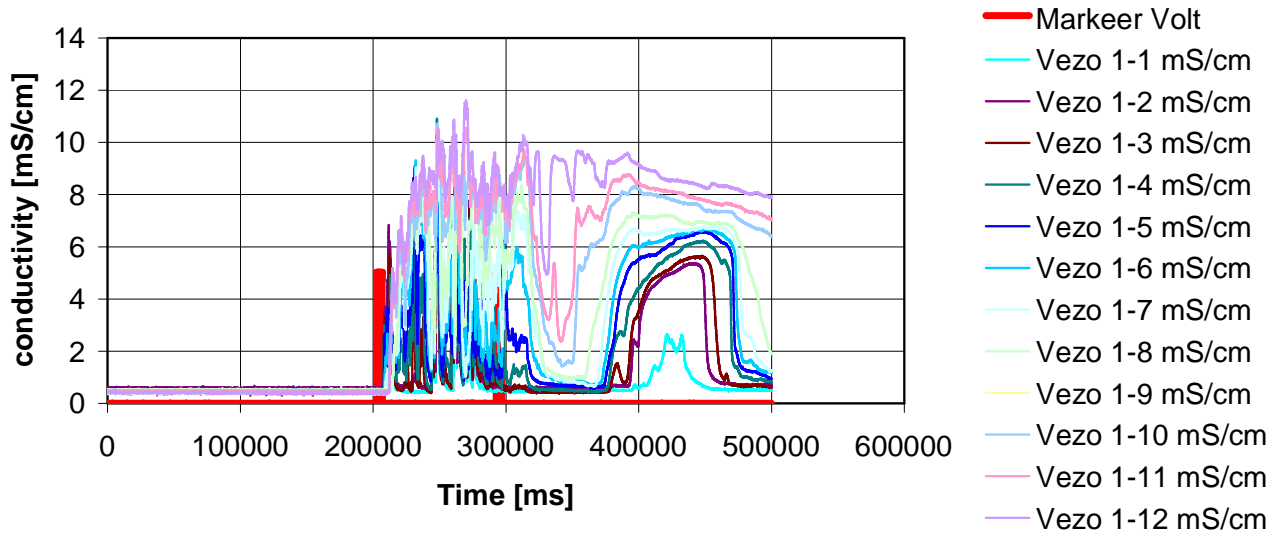
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #015



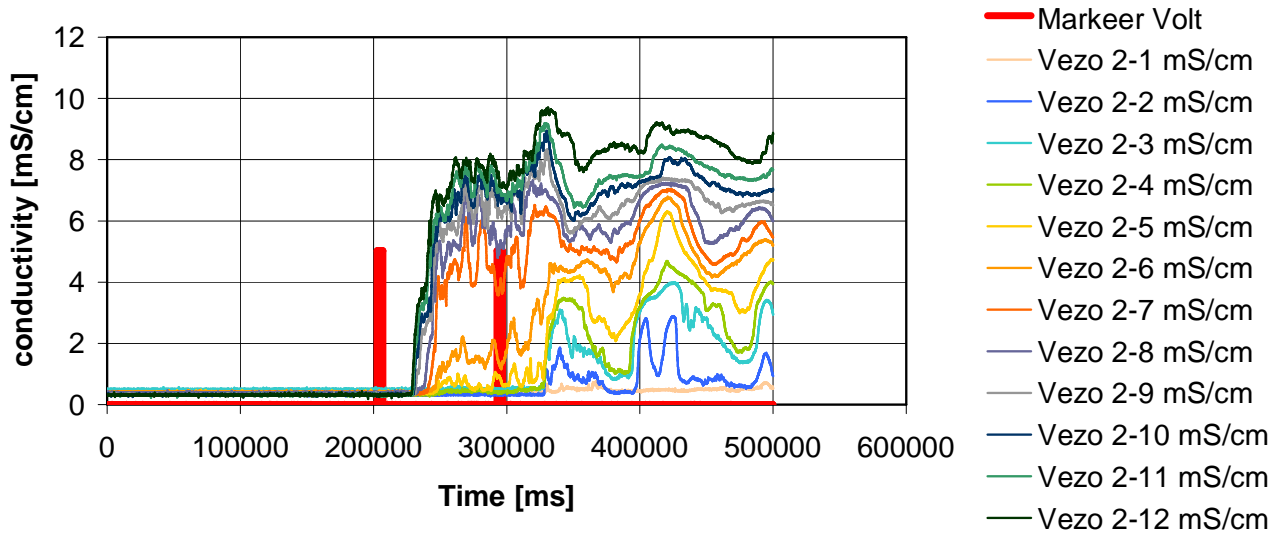
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #015



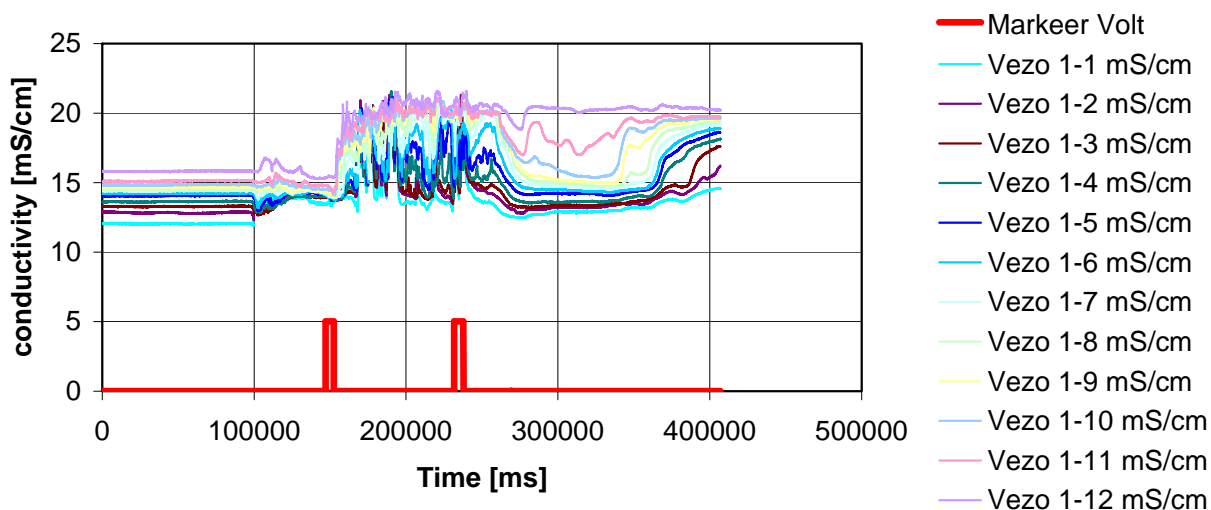
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #016



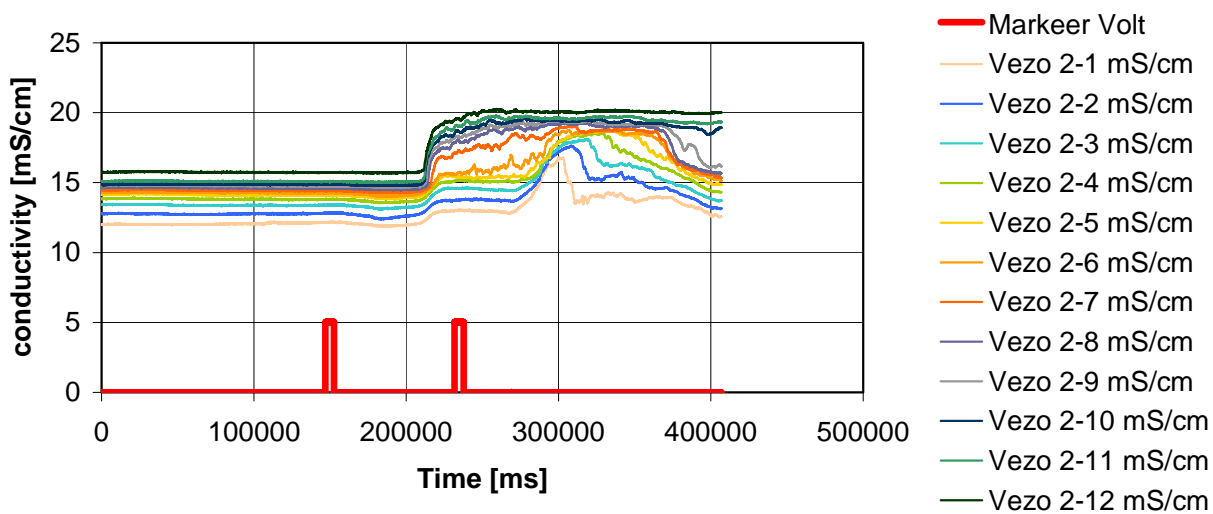
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #016



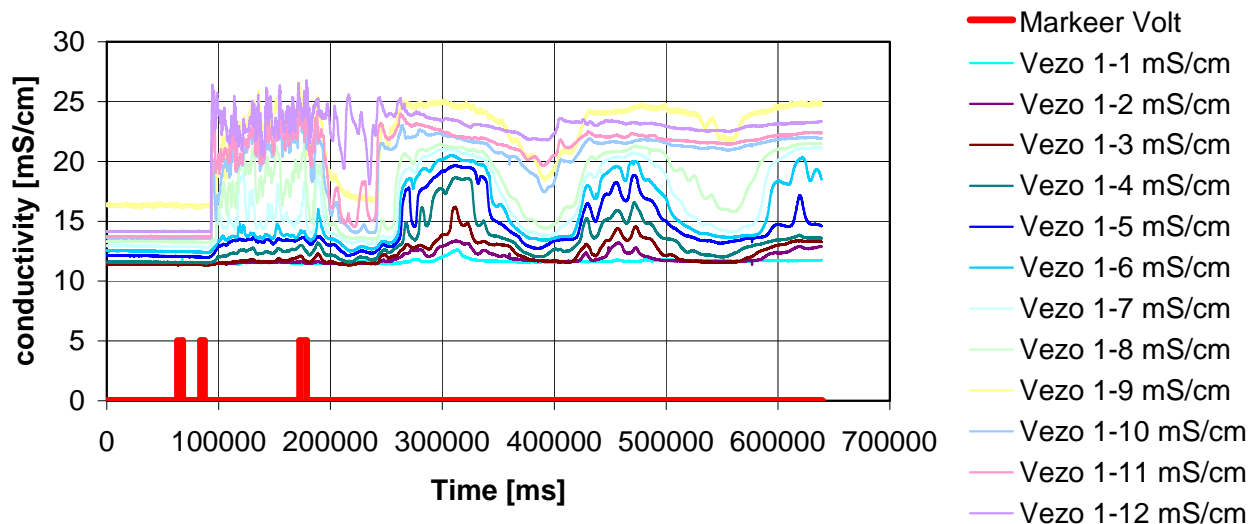
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #017



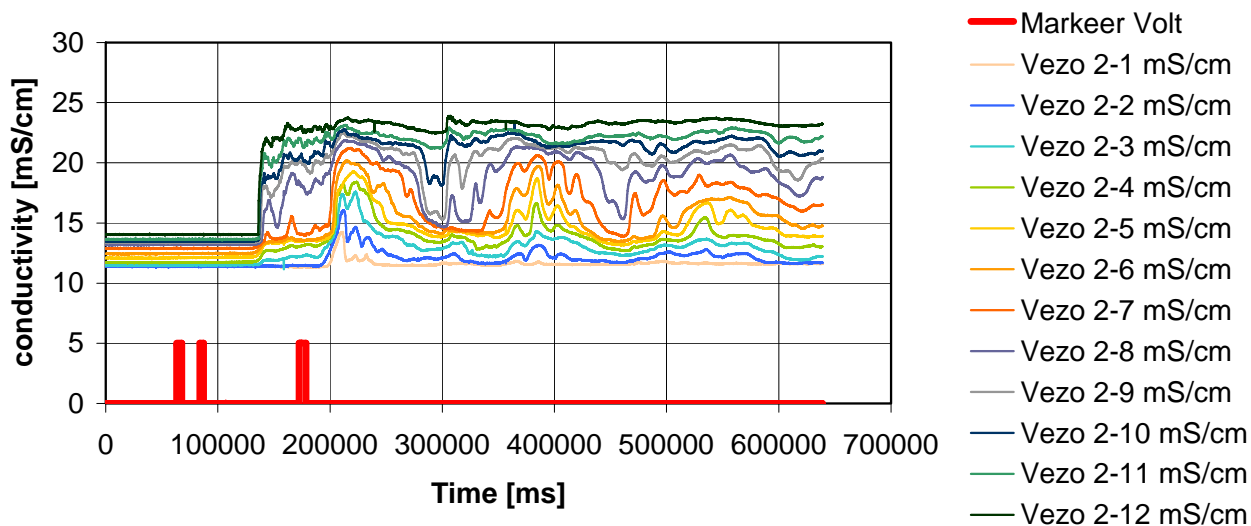
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #017



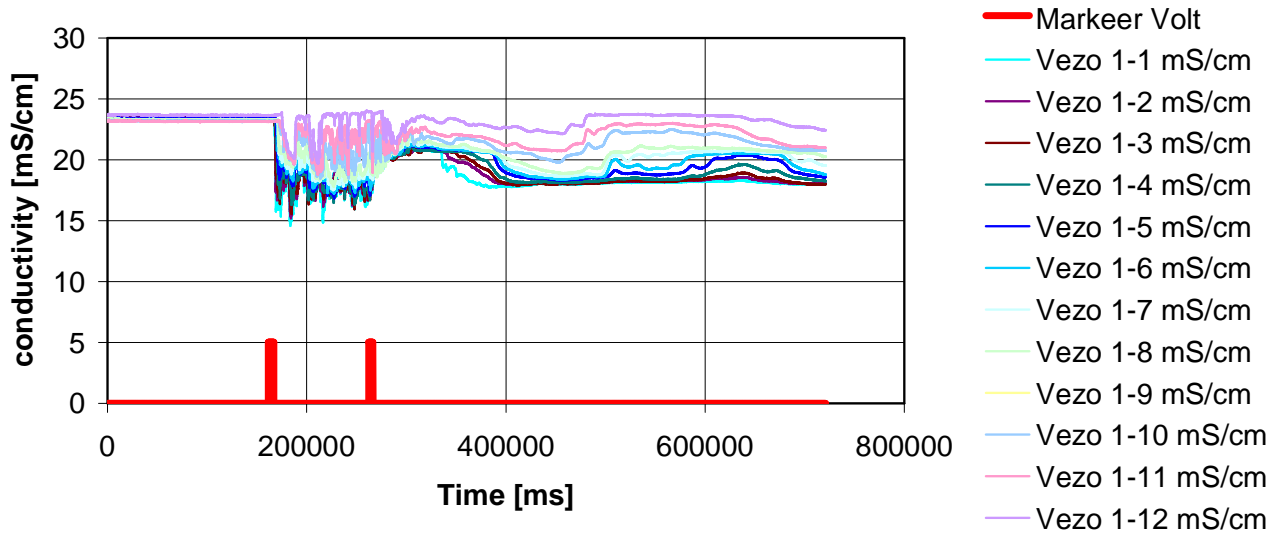
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #018



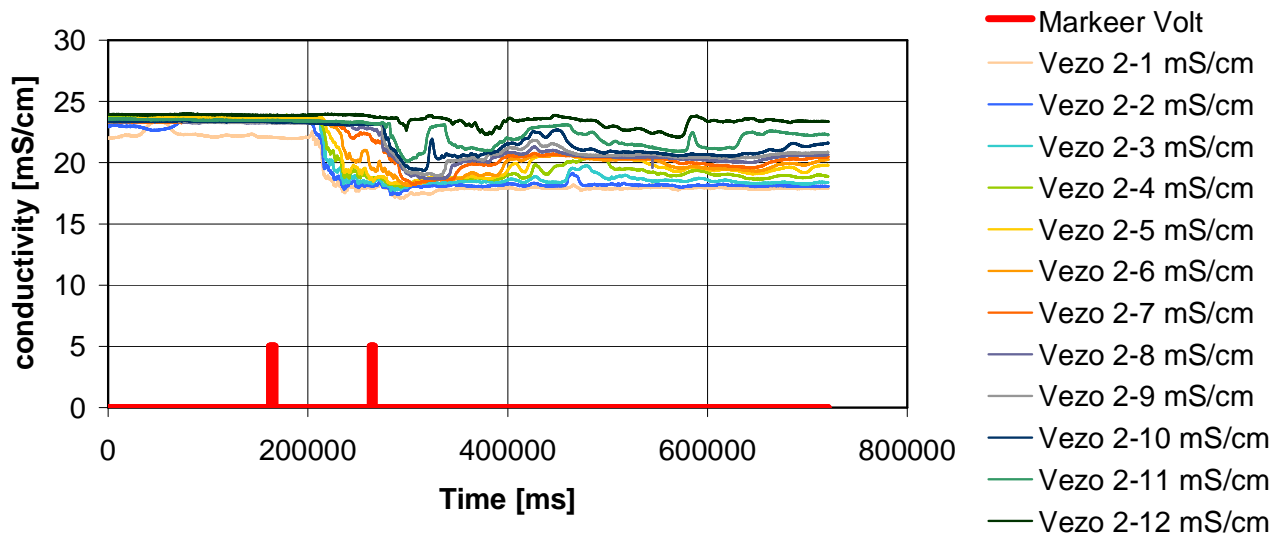
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #018

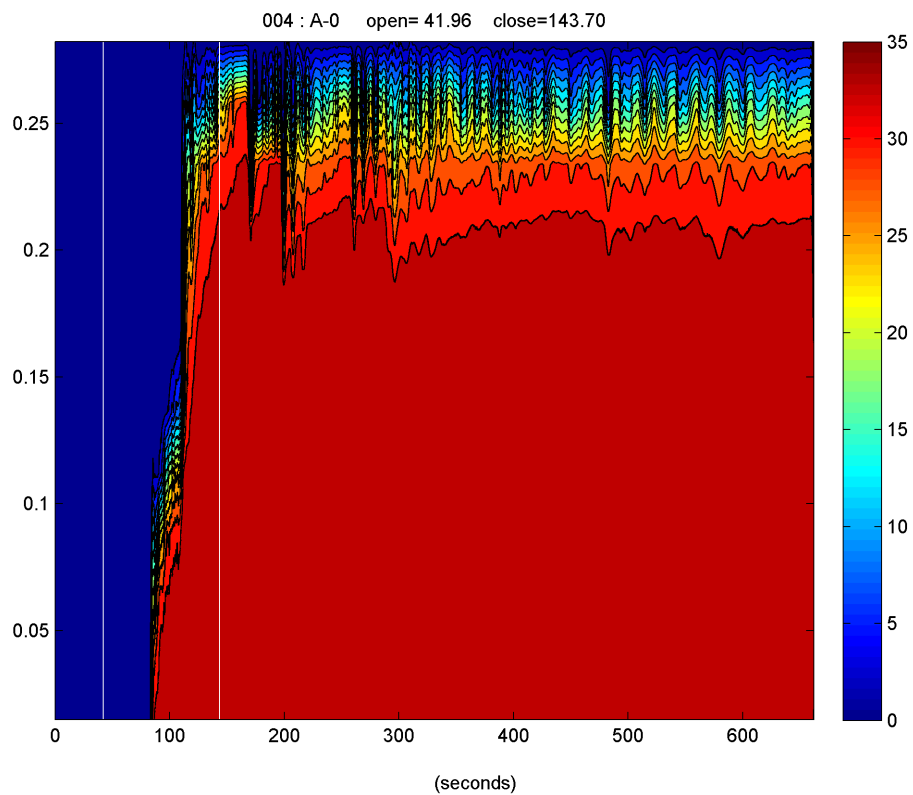
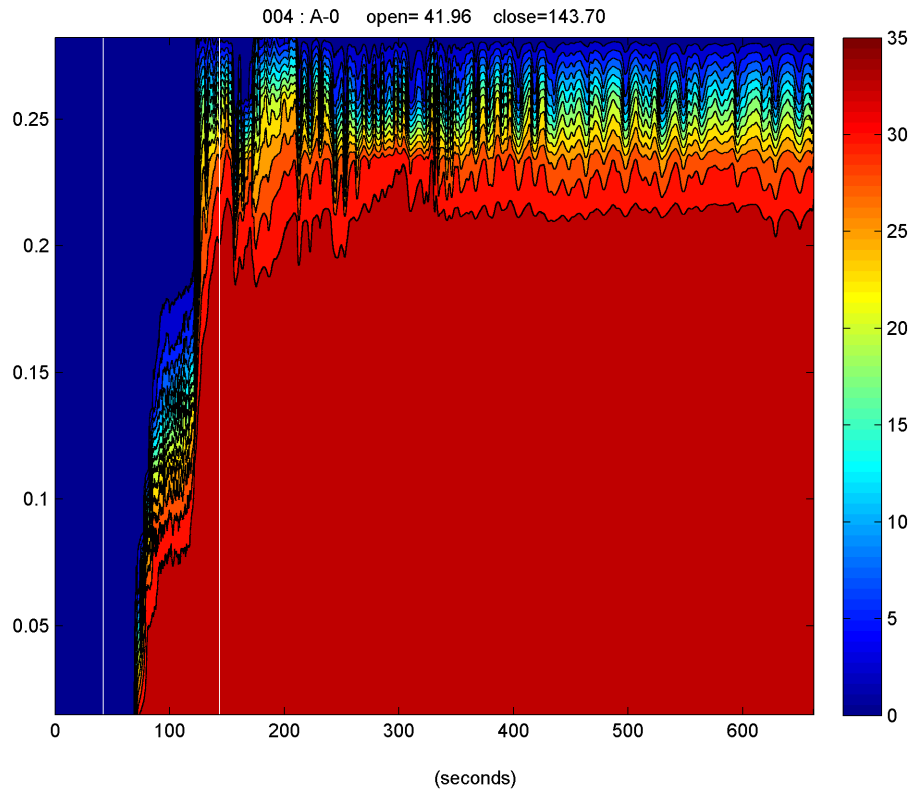


Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #019



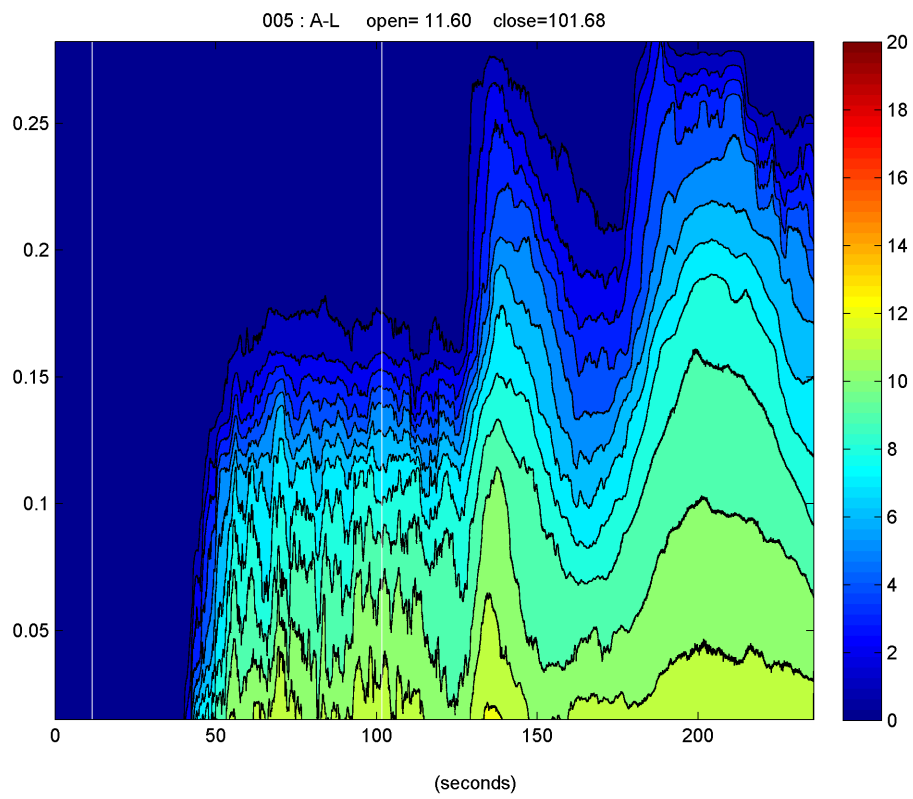
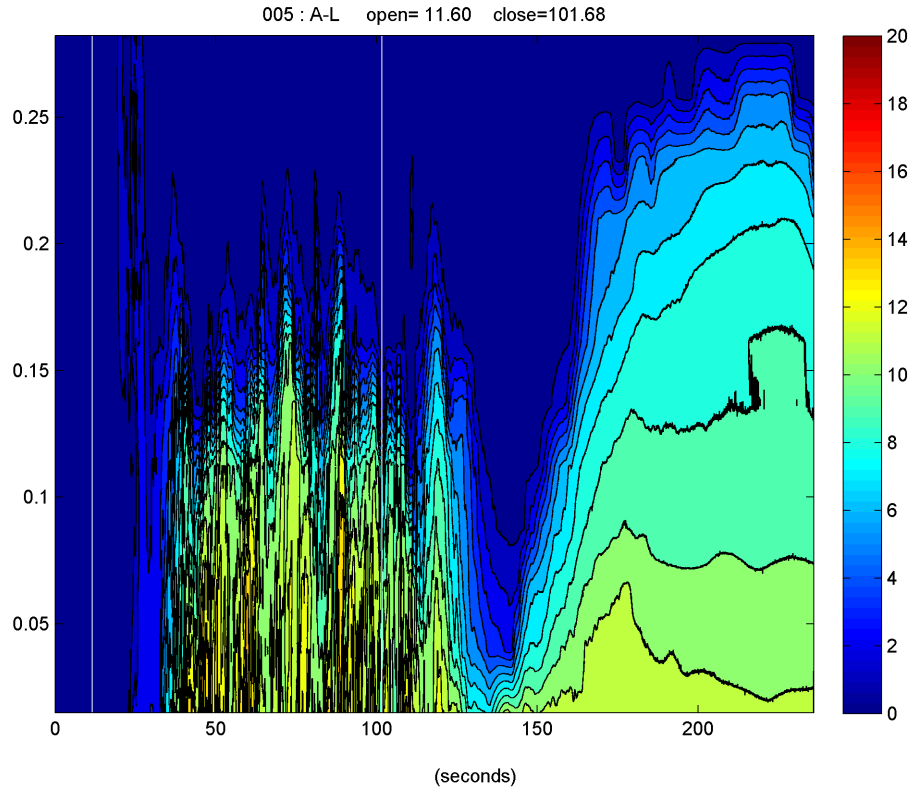
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #019

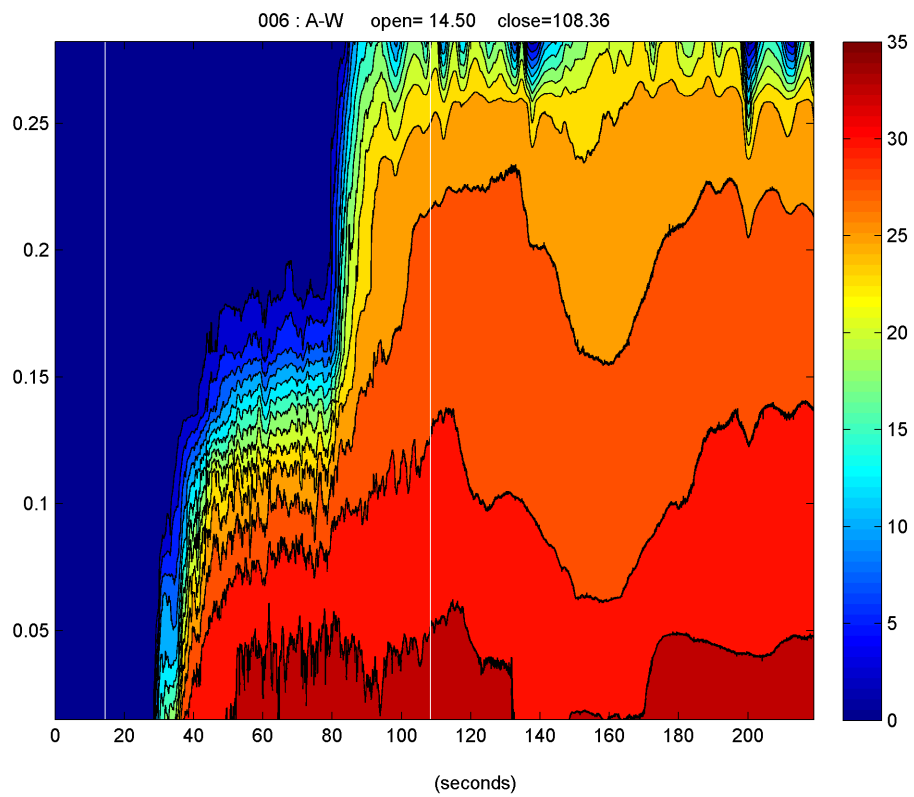
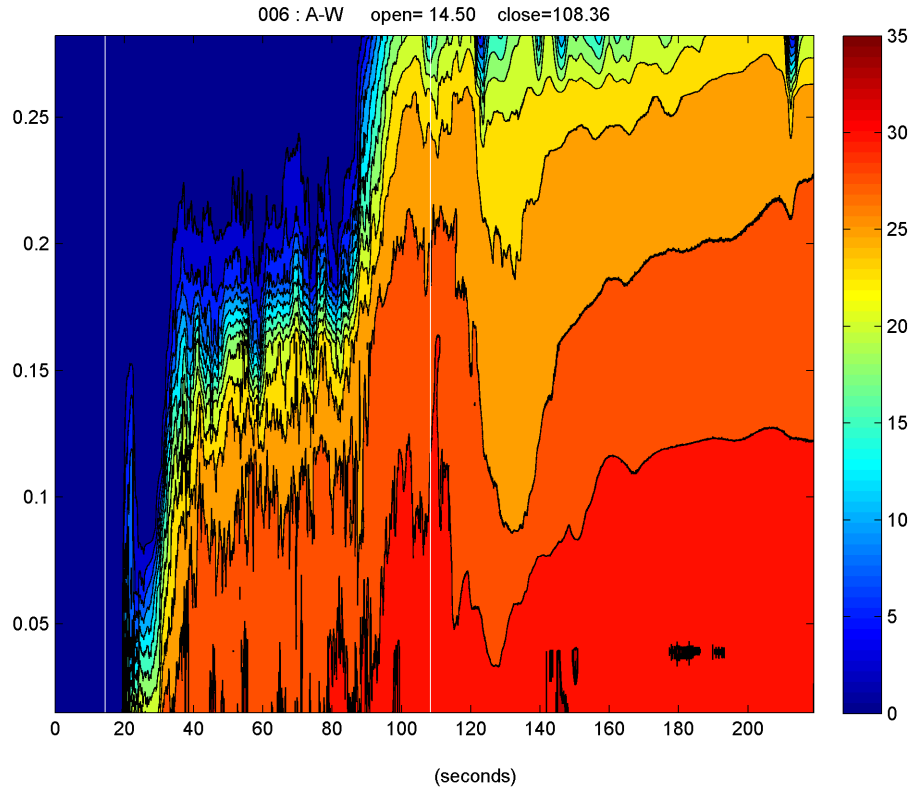


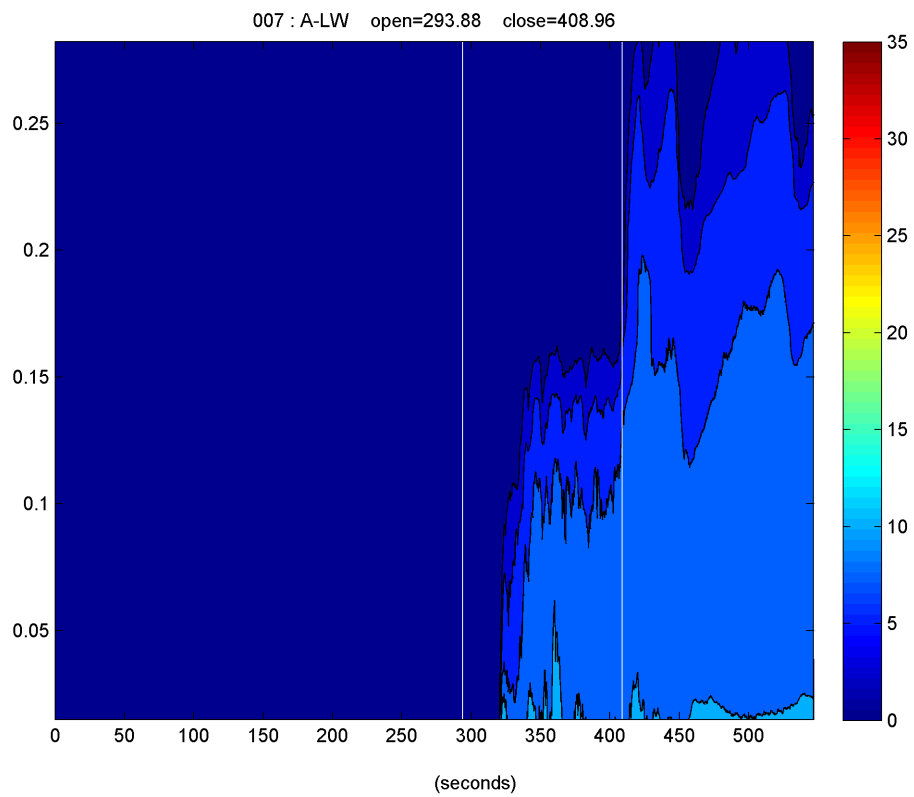
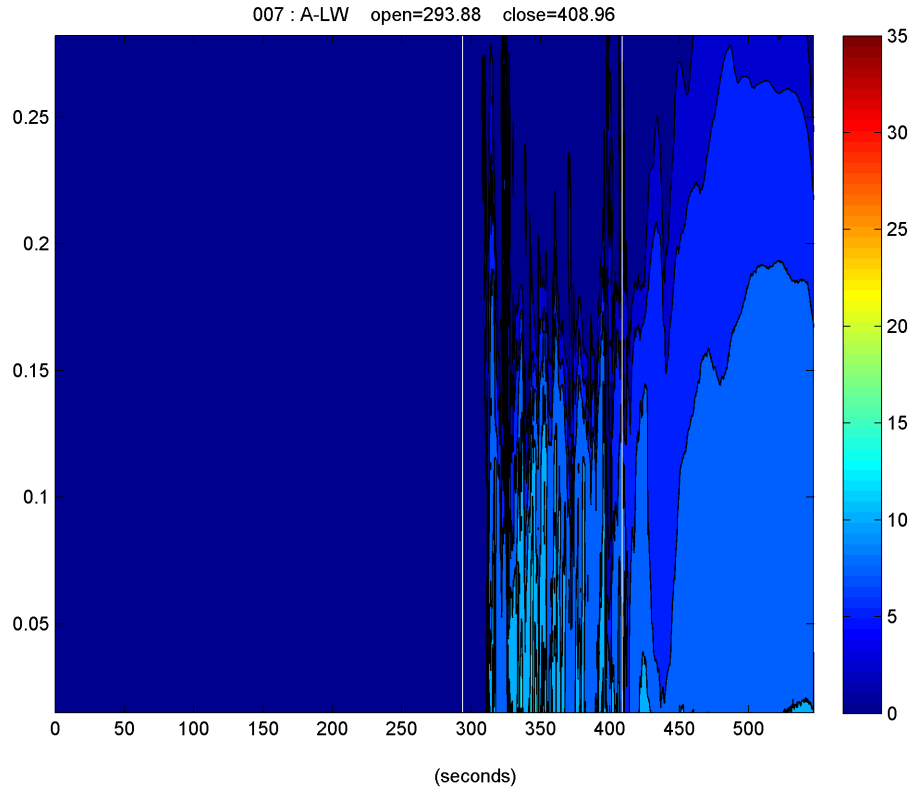


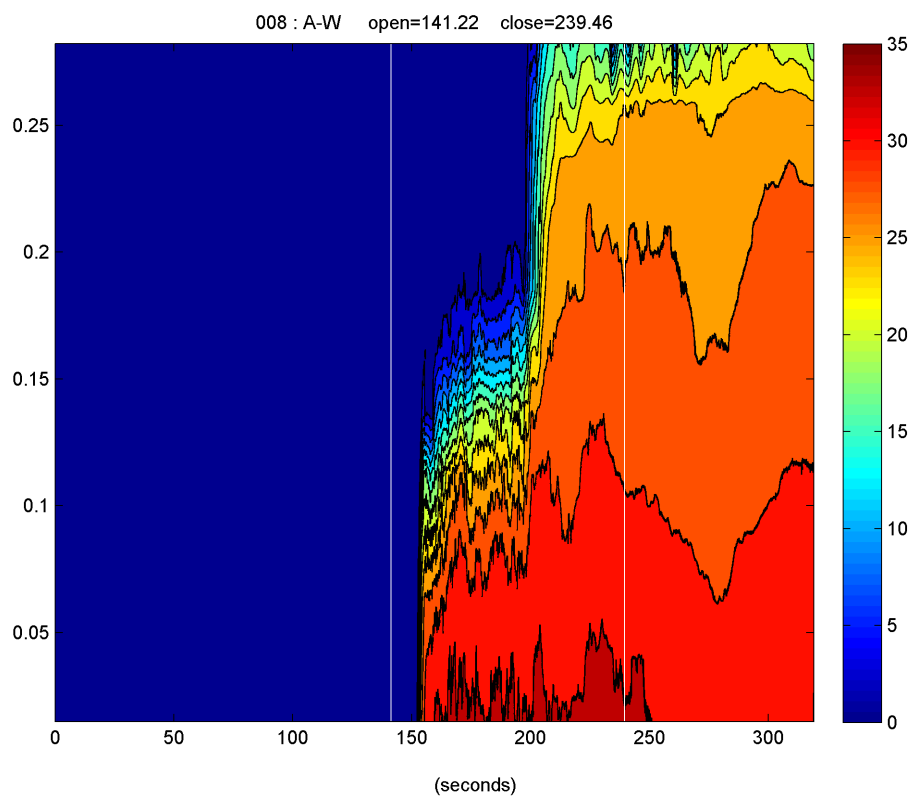
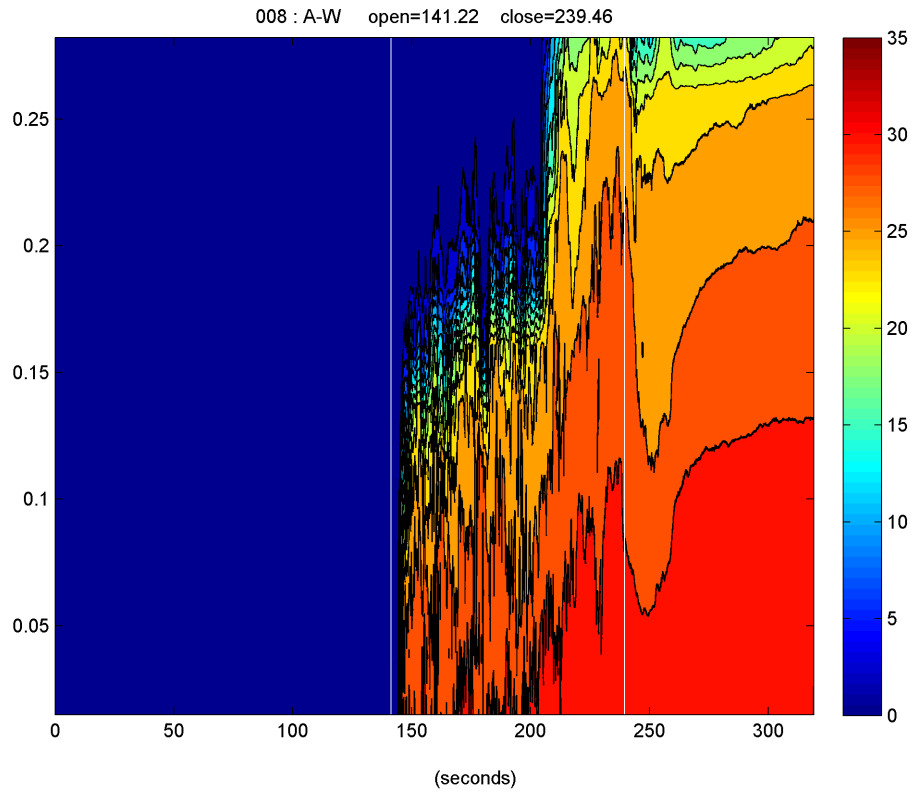
Toelichting:

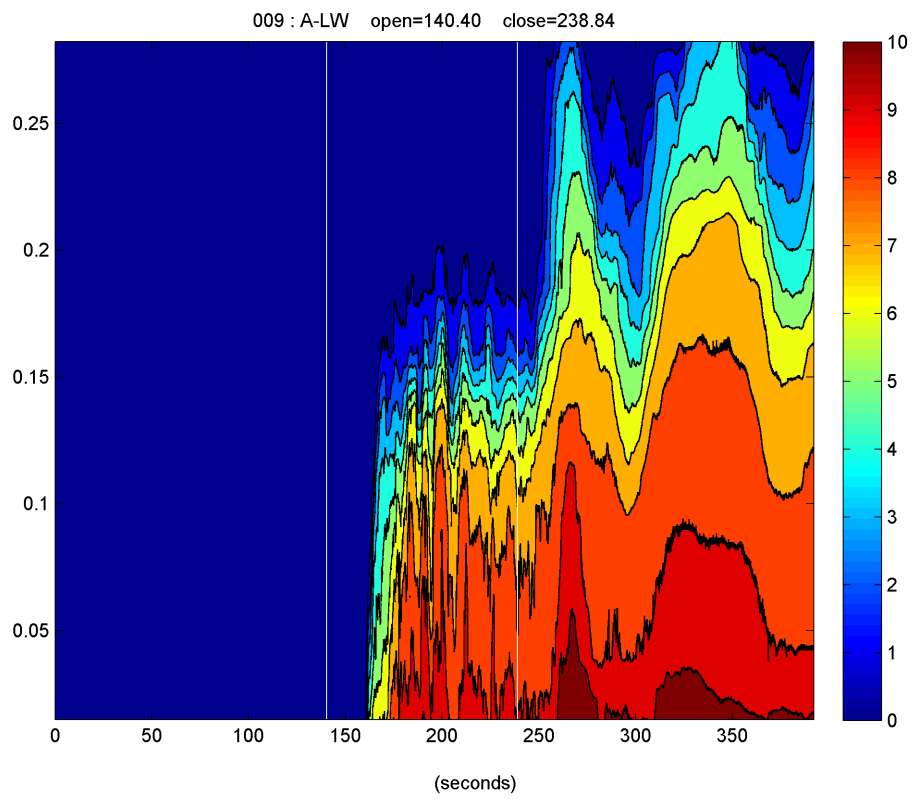
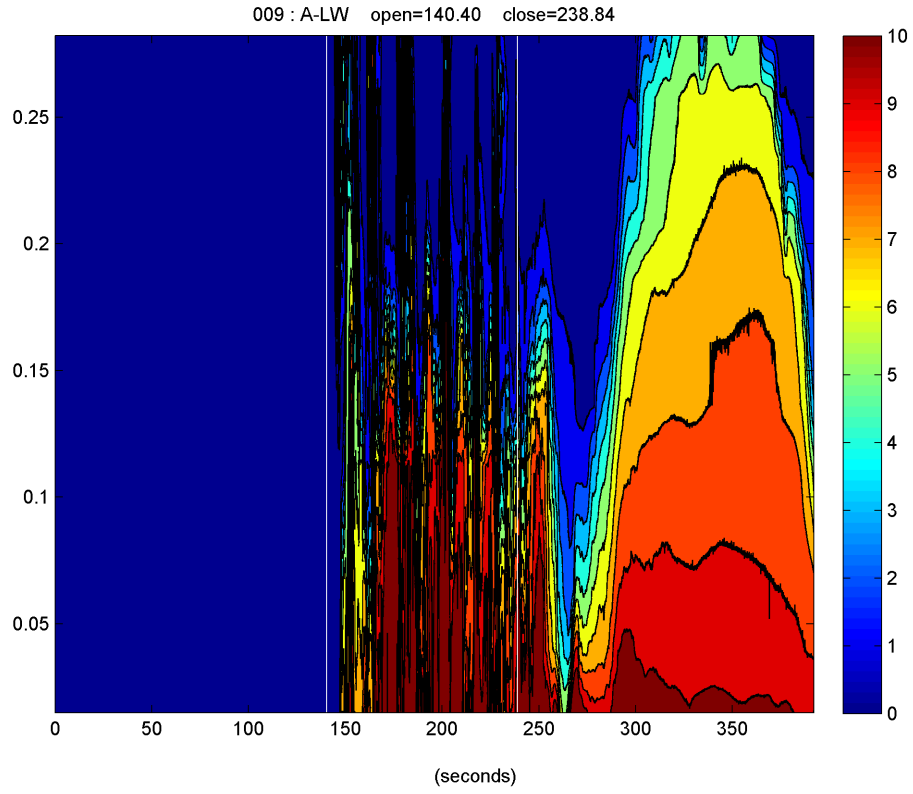
Proefnummer met code, deur-open en deur-dicht tijdstip in [sec] (verticale lijnen in figuur), verticale as: waterdiepte in [m], horizontale as: tijd in [sec]
kleurcontourenlegenda: saliniteit in [ppt], VEZO1 boven, VEZO2 onderste figuur.

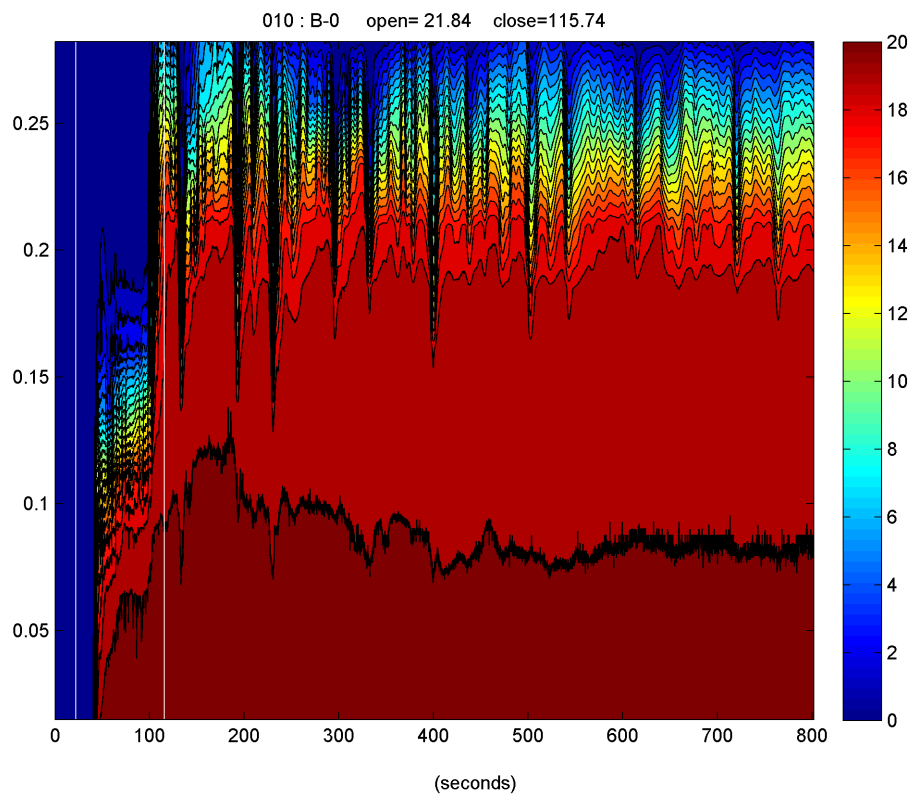
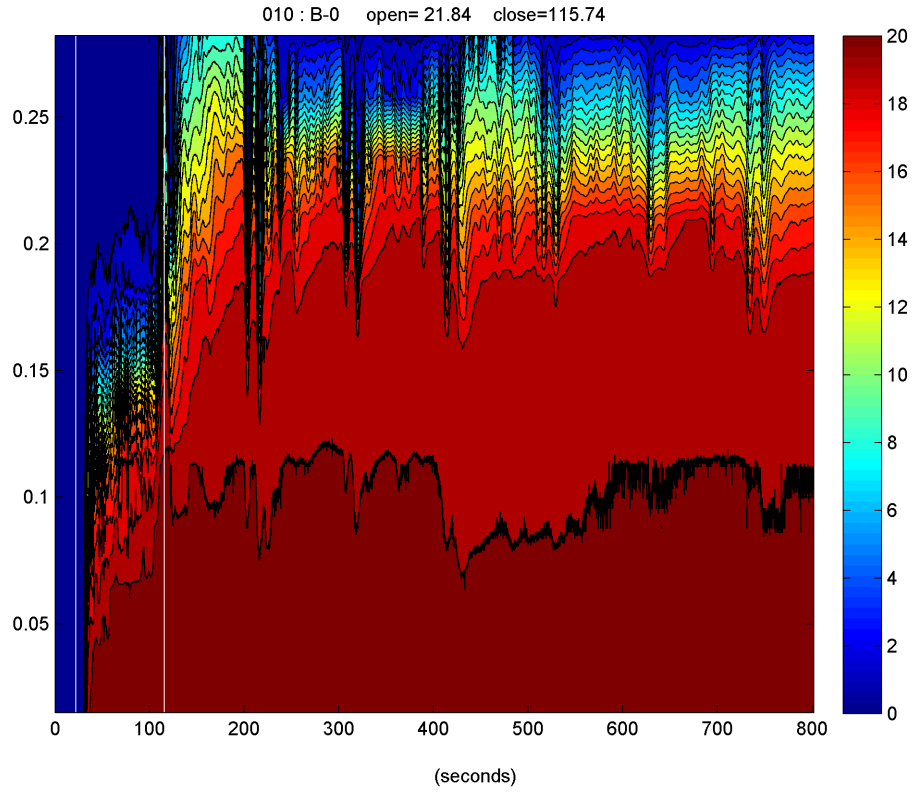


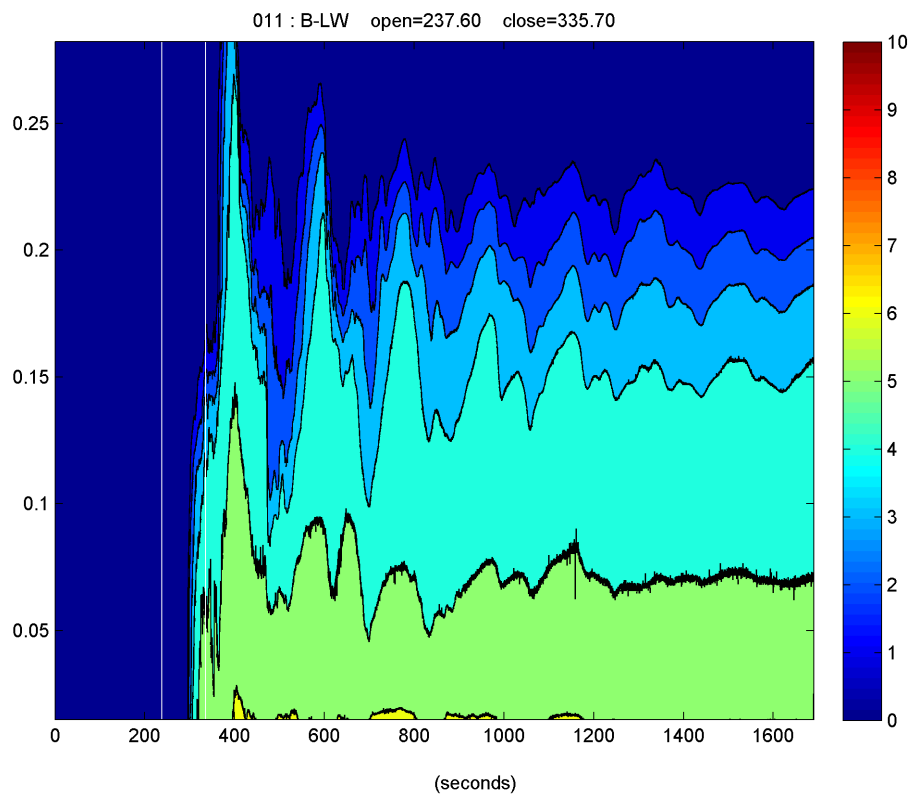
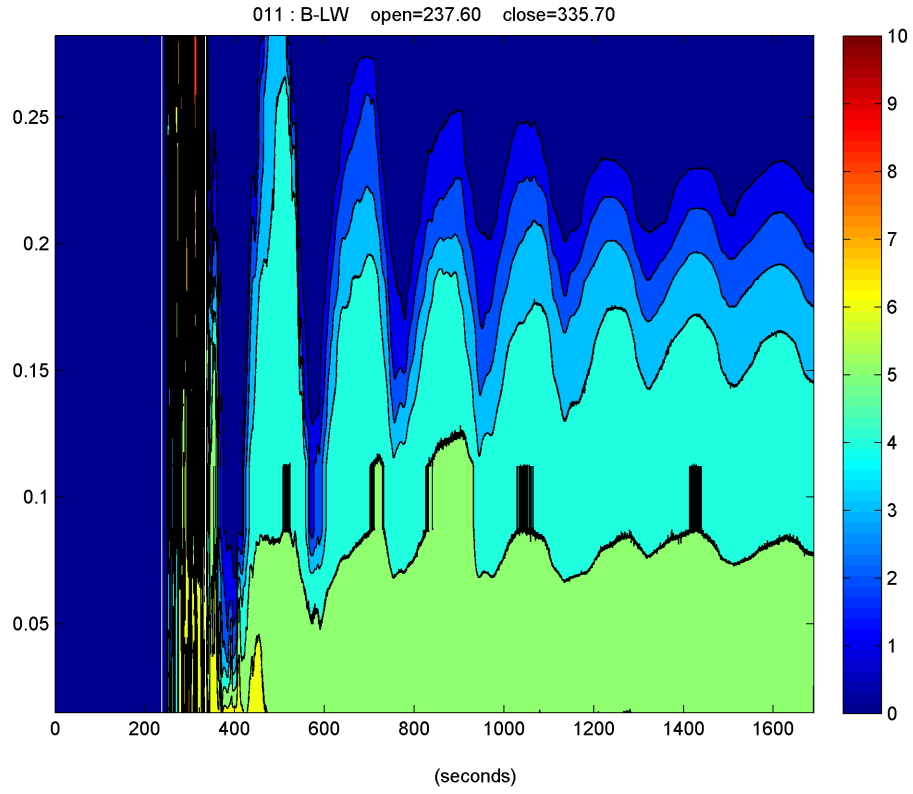


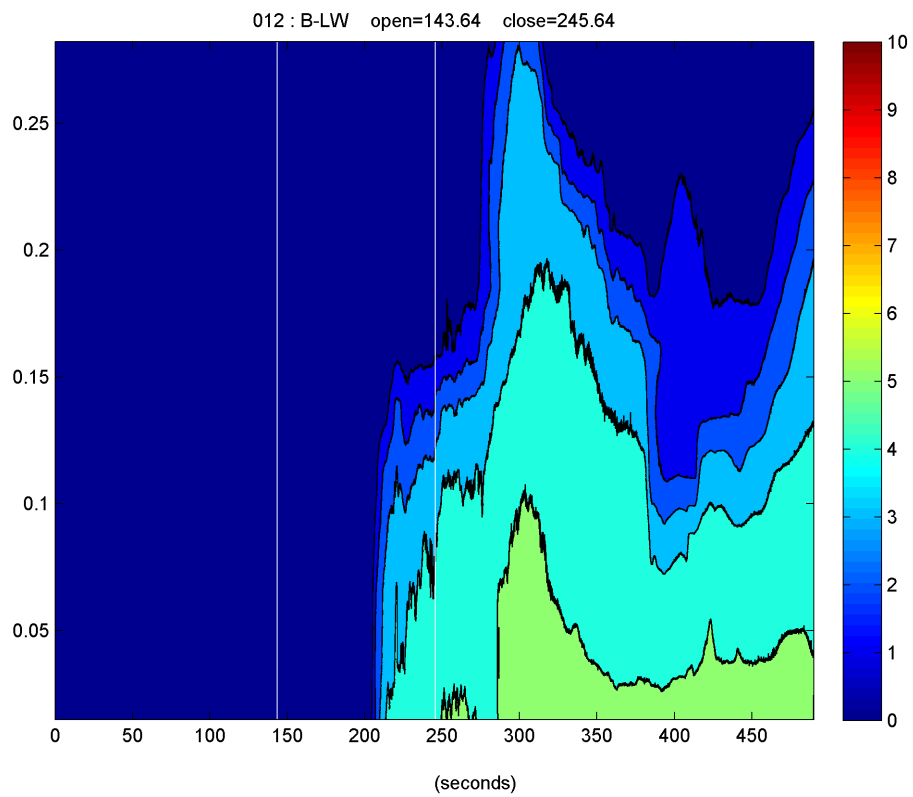
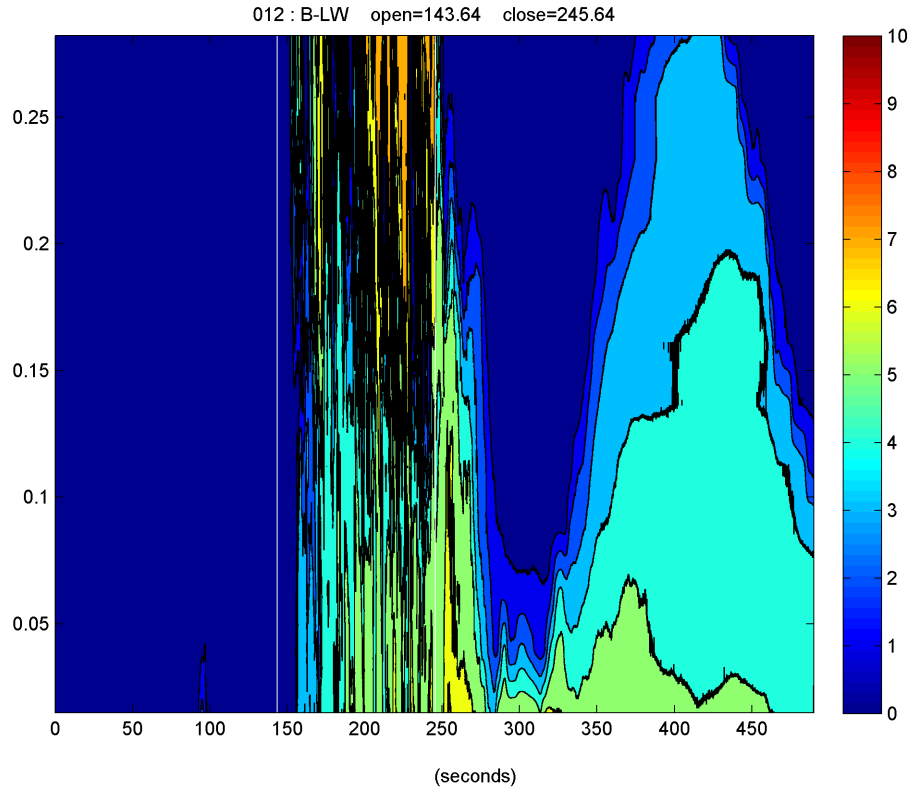


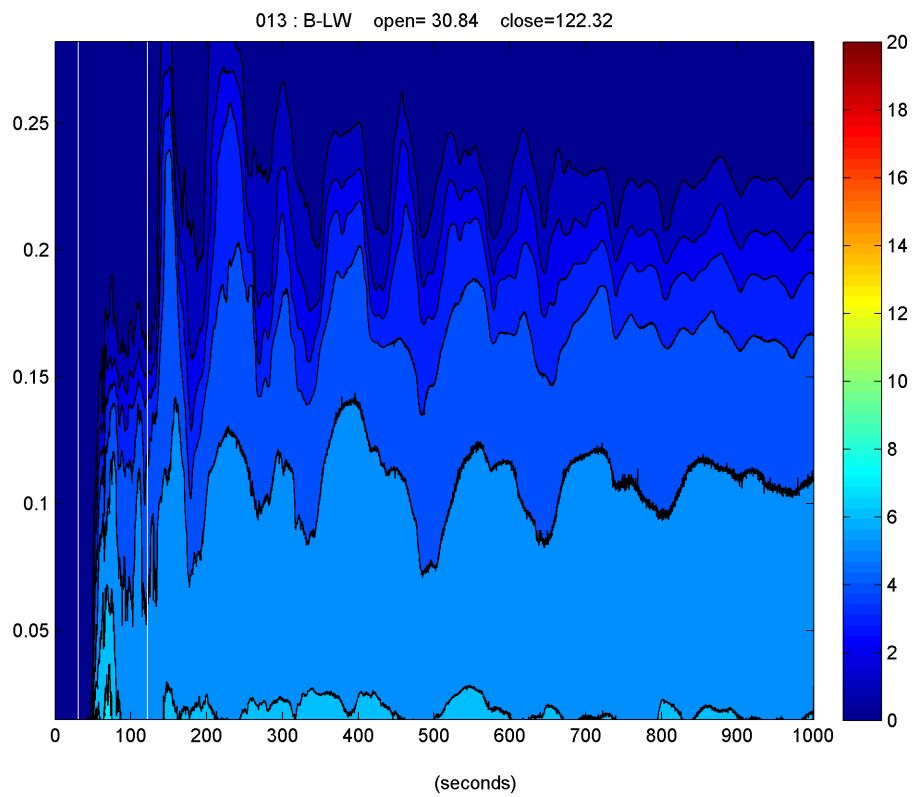
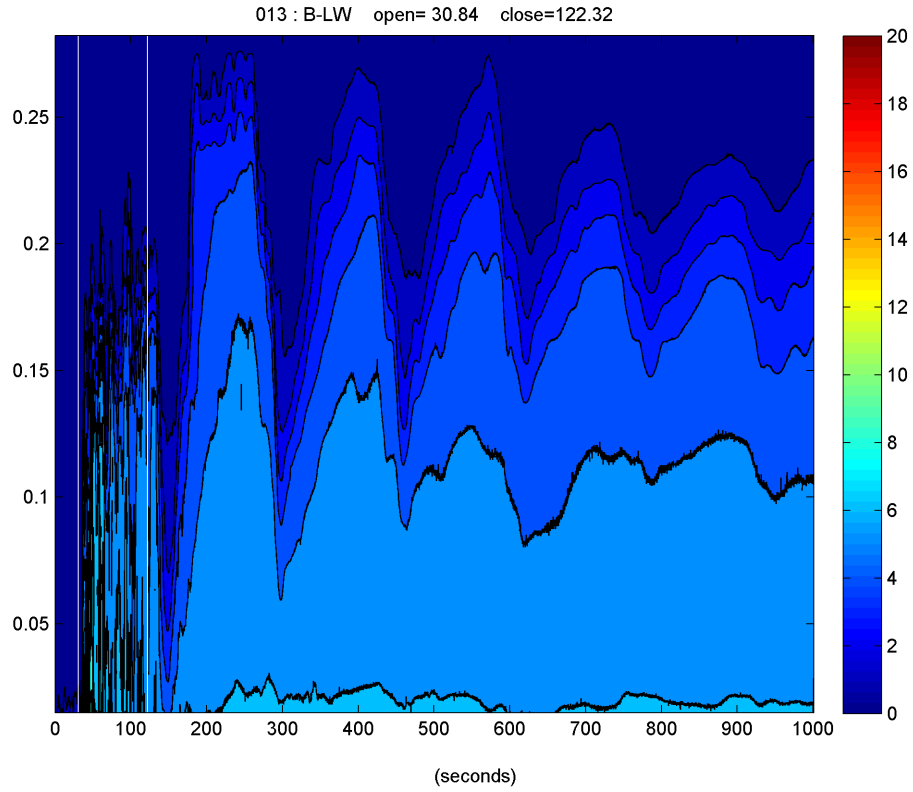


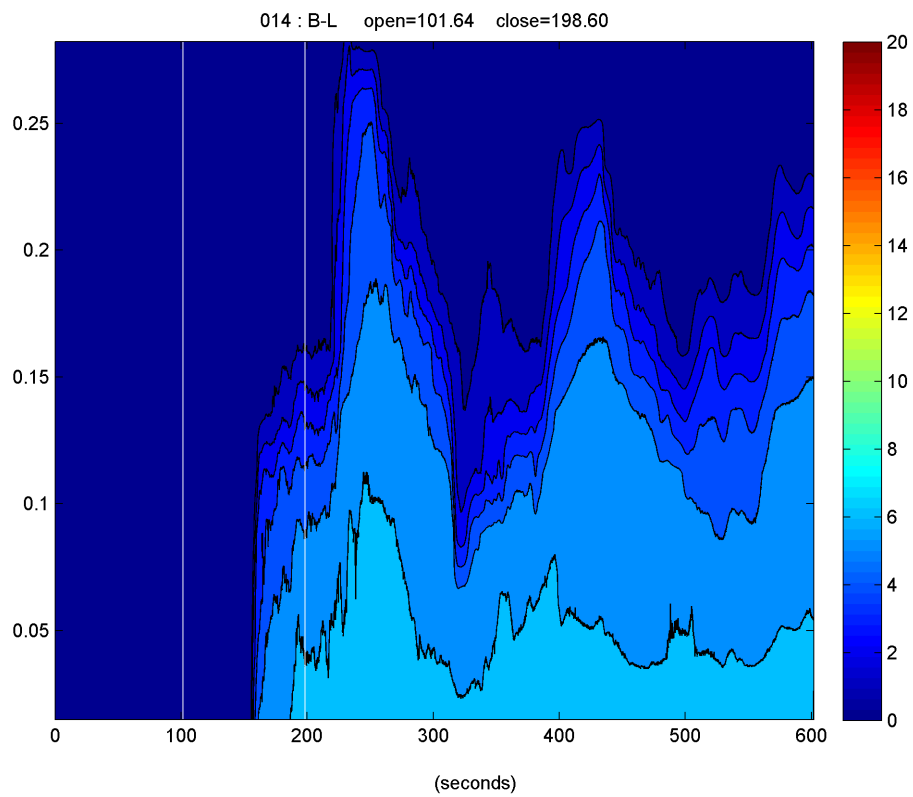
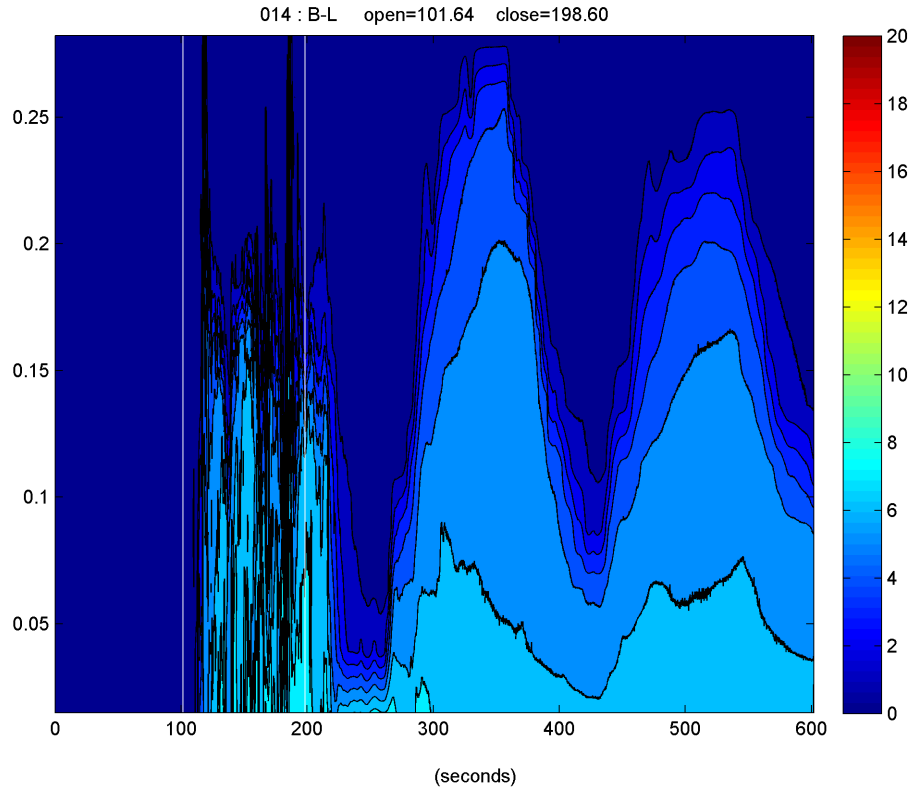


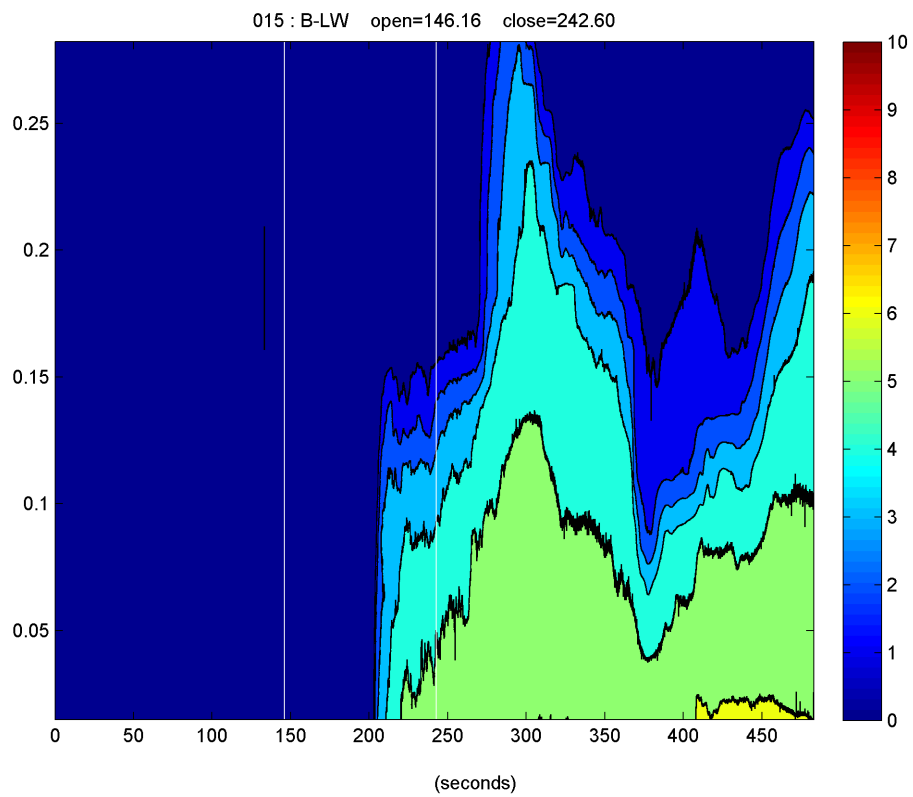
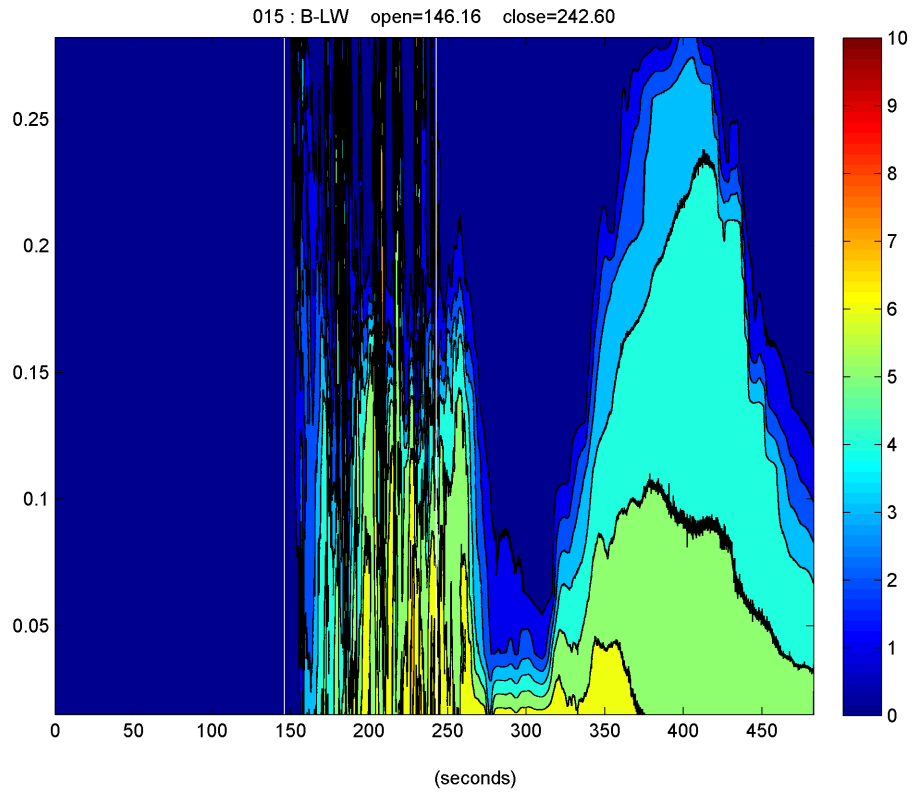


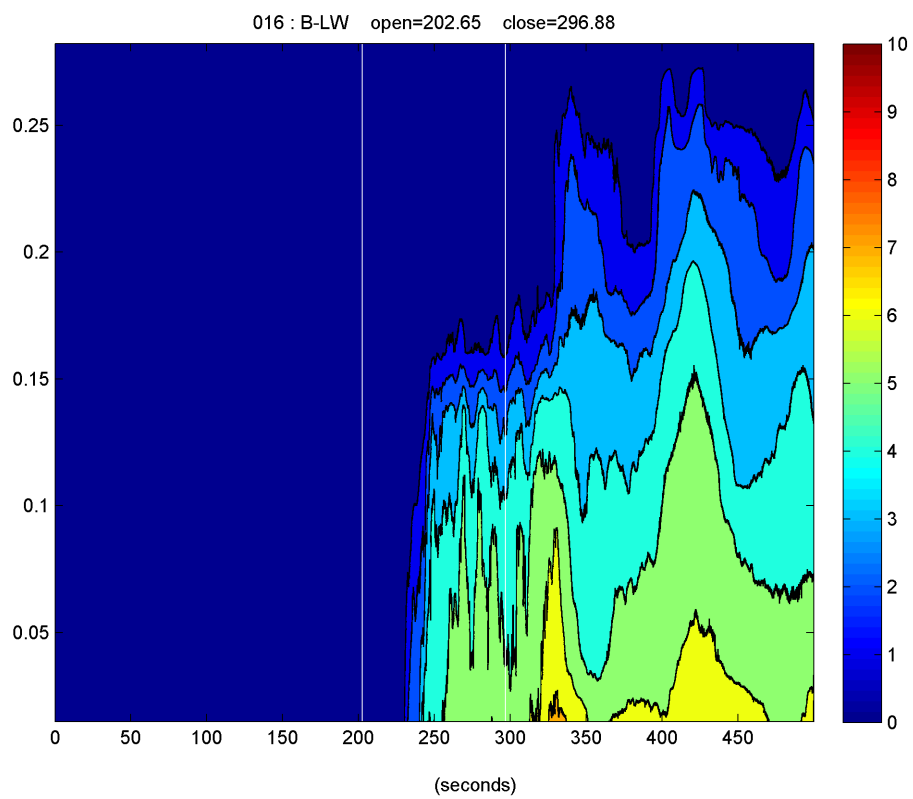
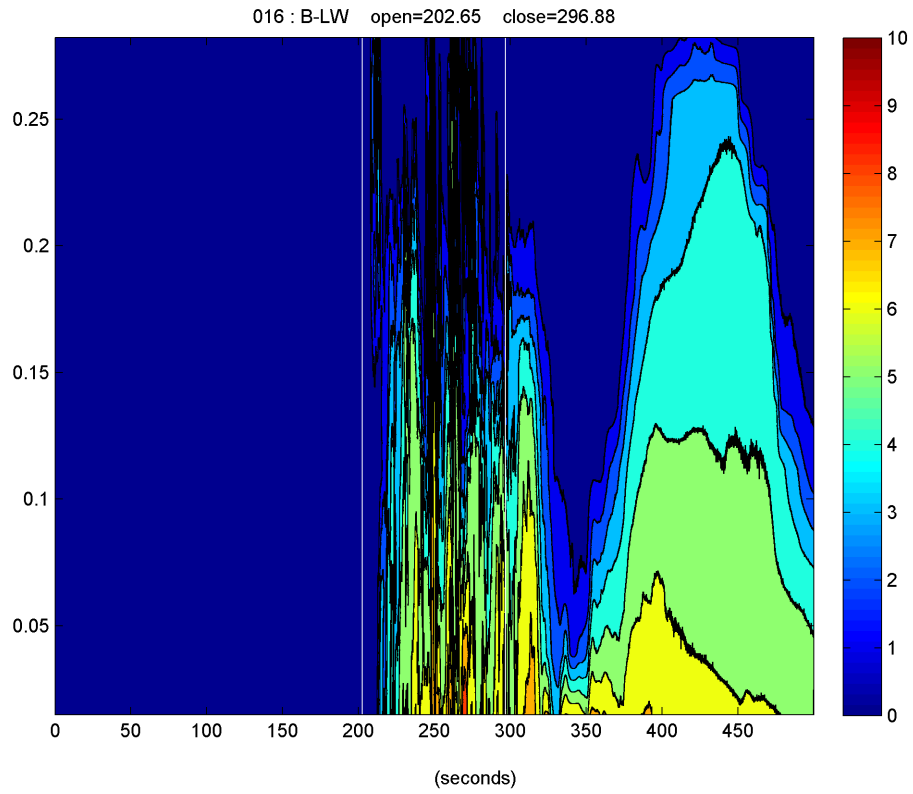


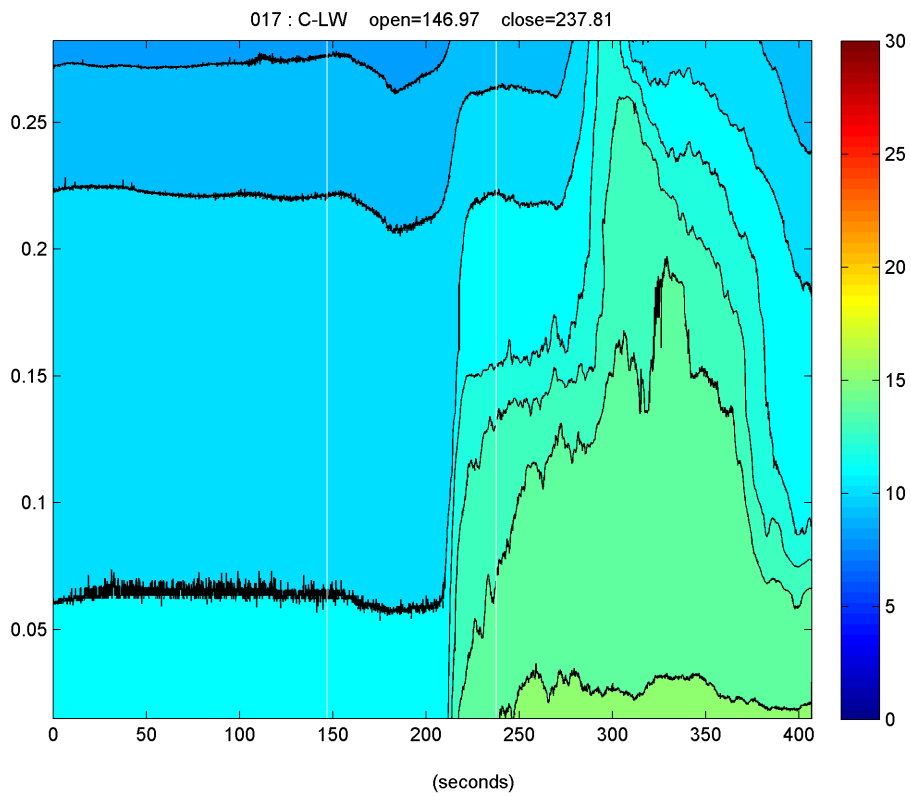
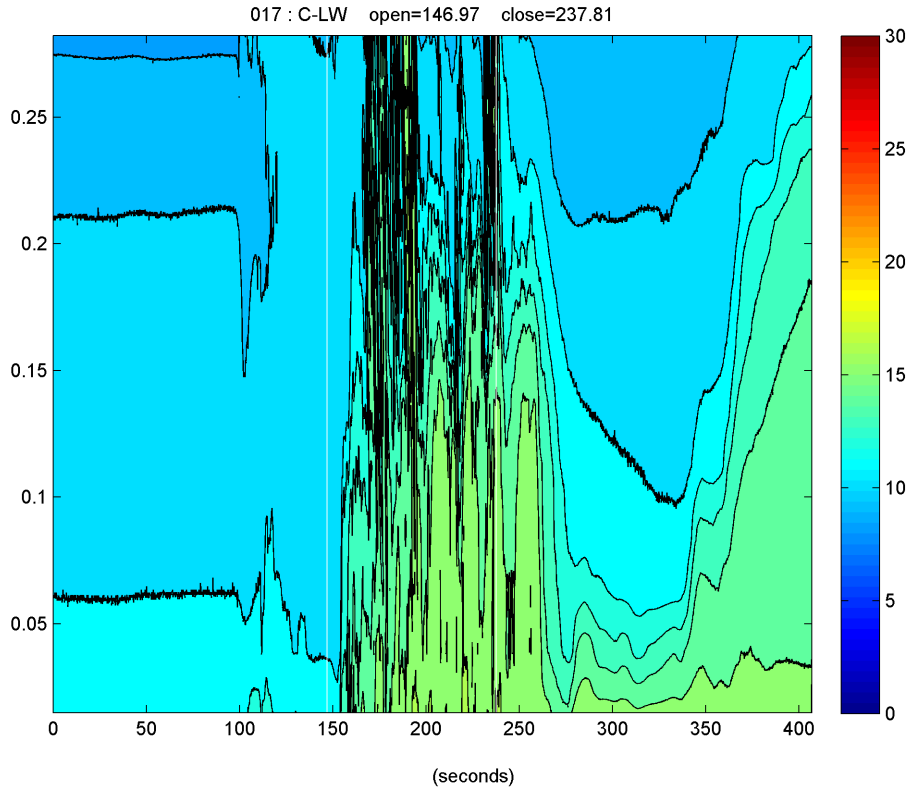


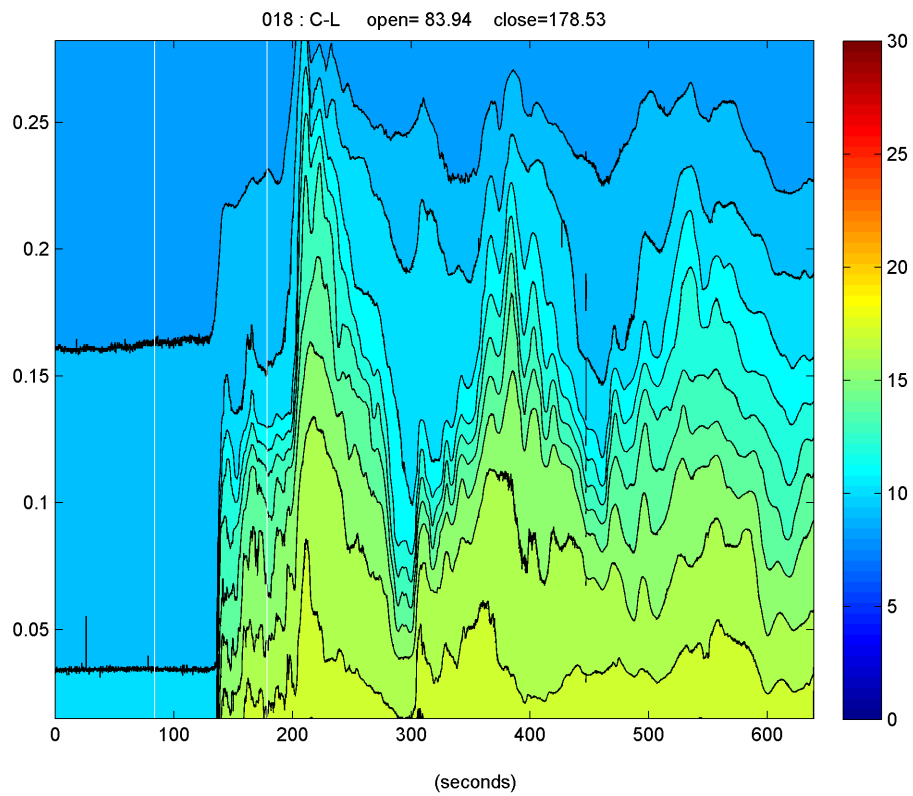
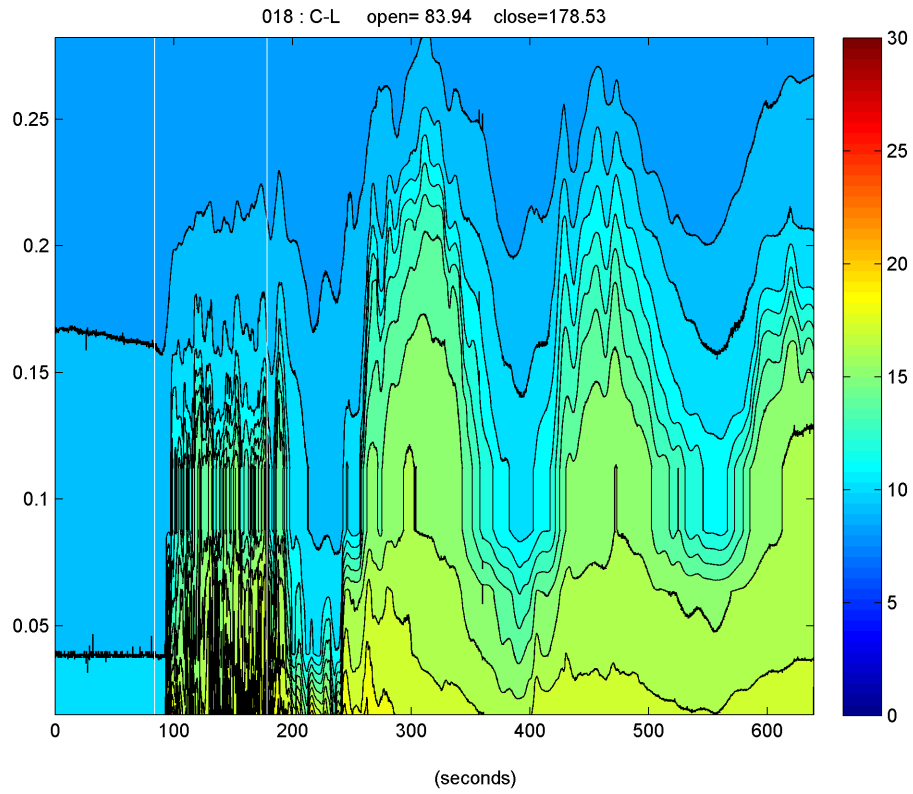


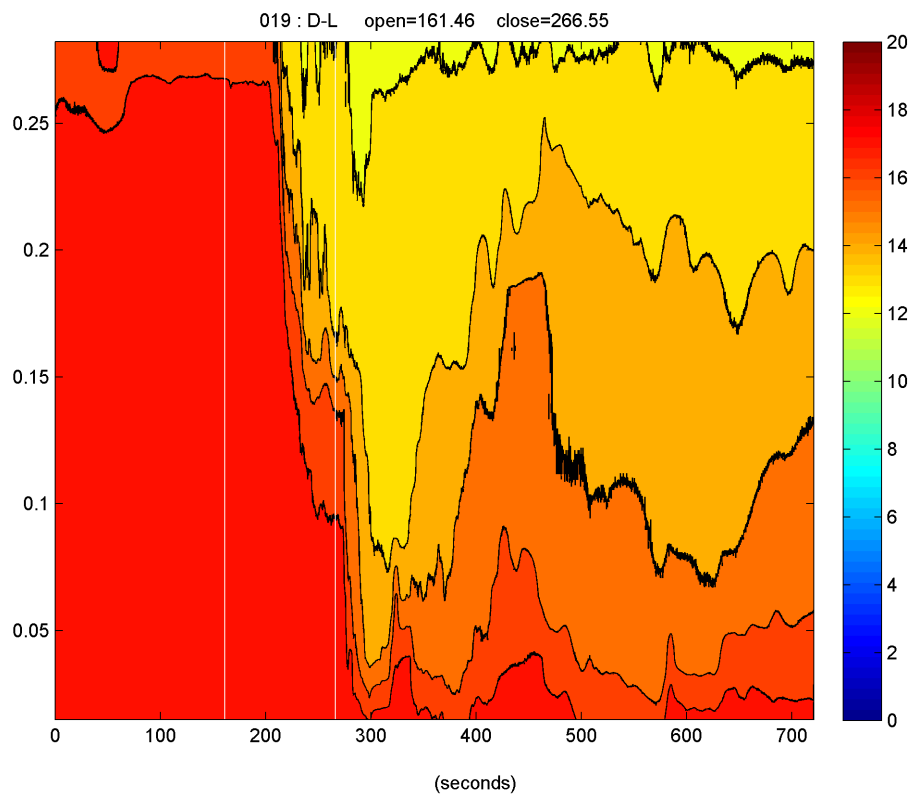
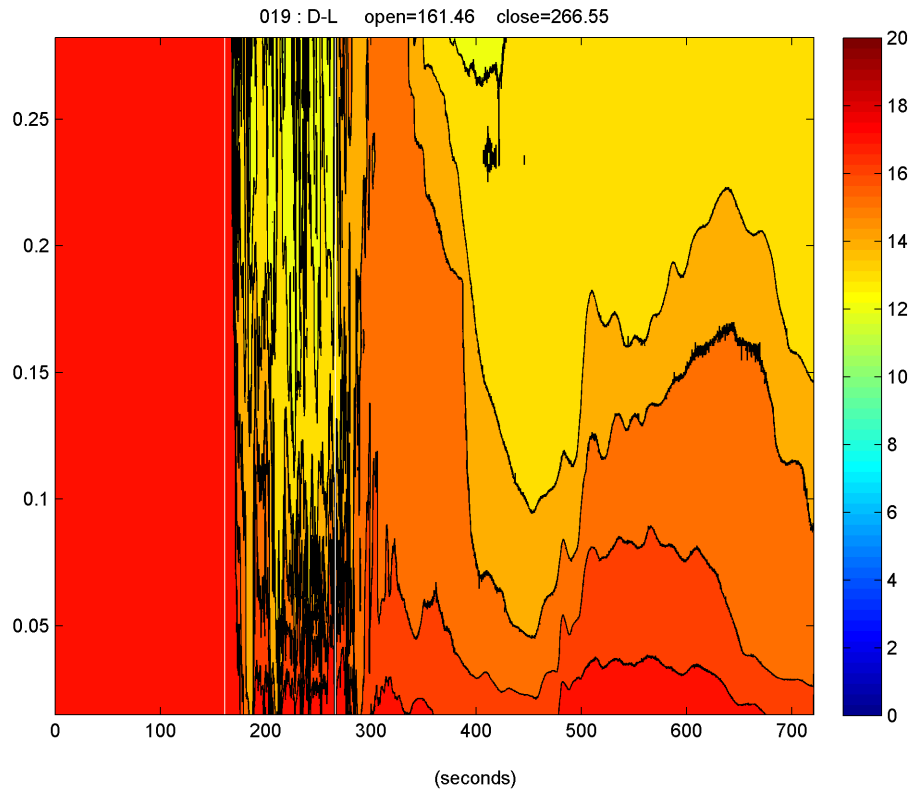




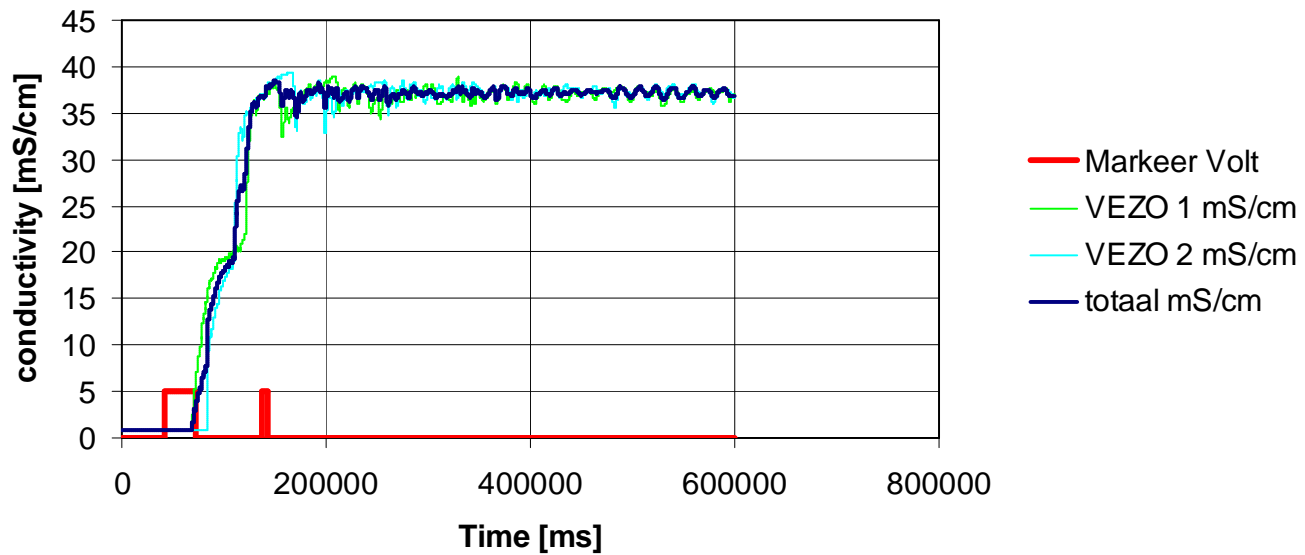








Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #004

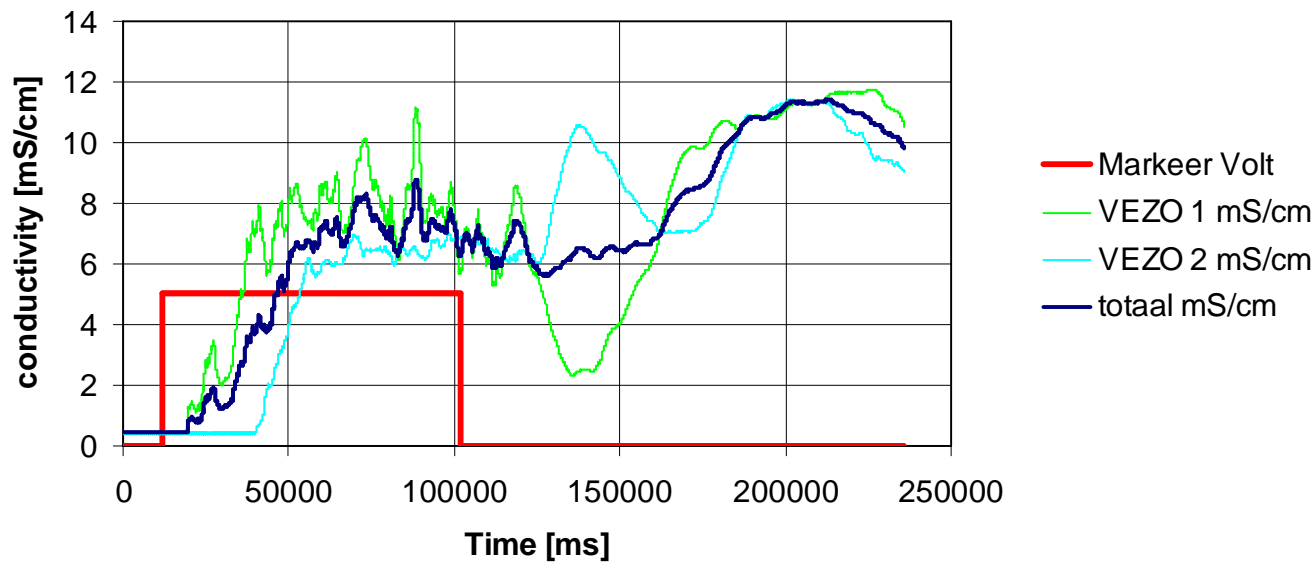


Toelichting:

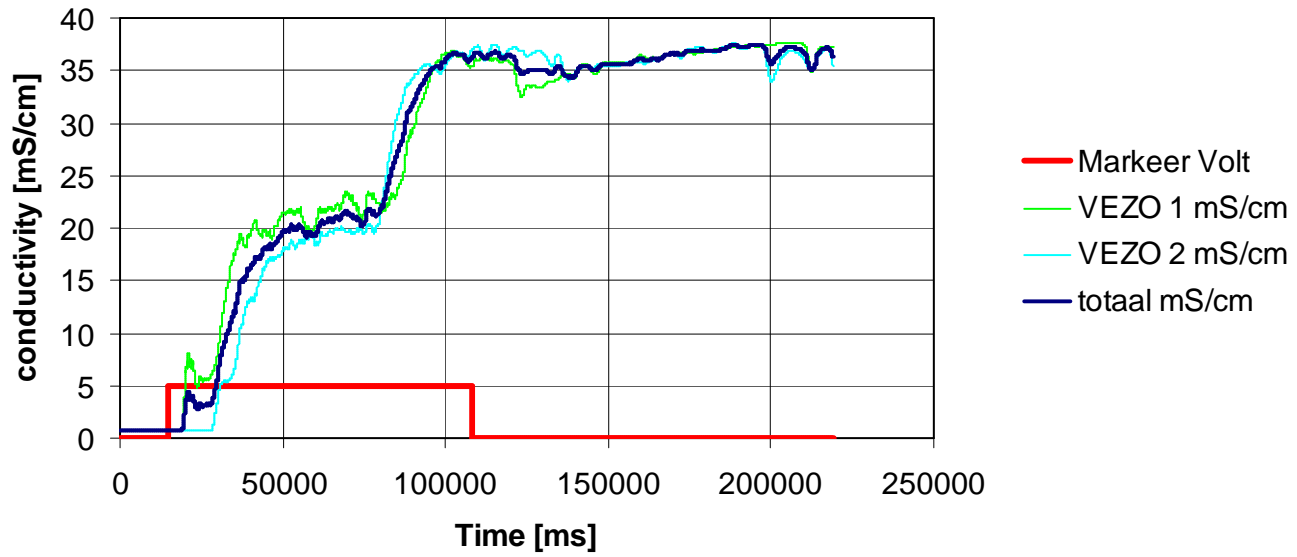
Dieptegemiddelde meetwaarden Vezo1 en Vezo2 en totaal gemiddelde als functies van de tijd per proef.

Markeersignaal (rood) (in Volt) geeft opening resp. sluiting schuif aan.

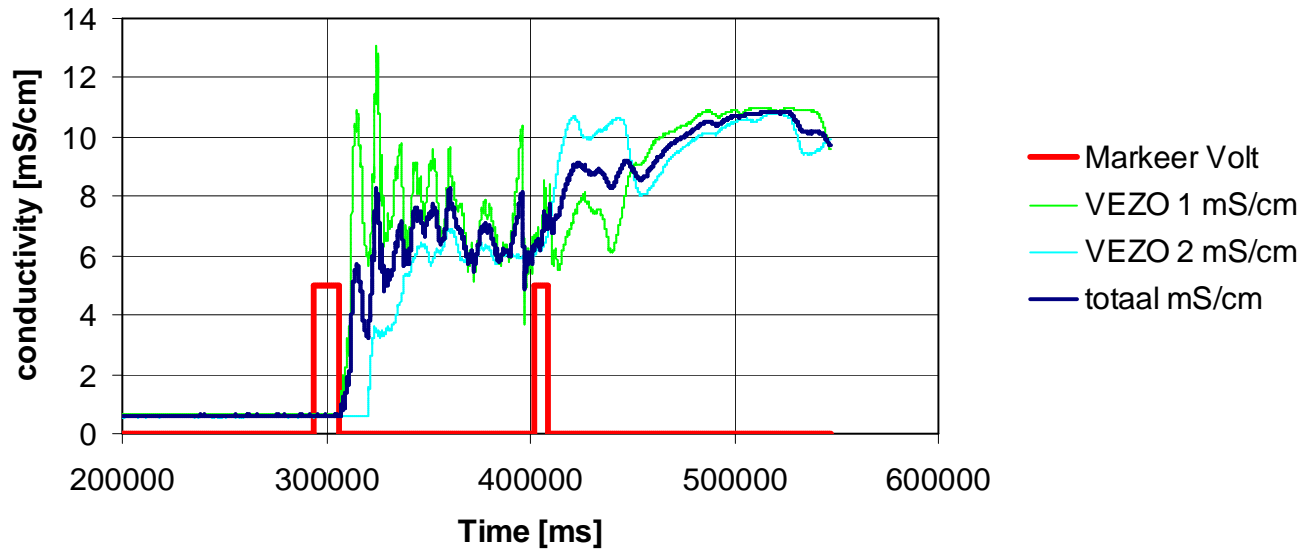
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #005



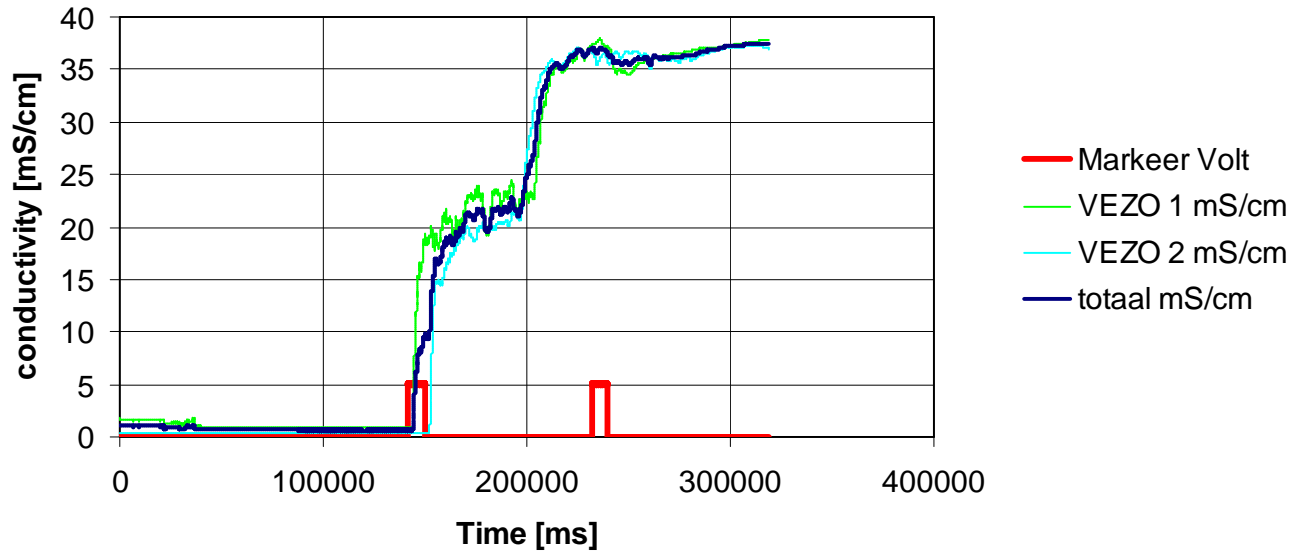
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #006



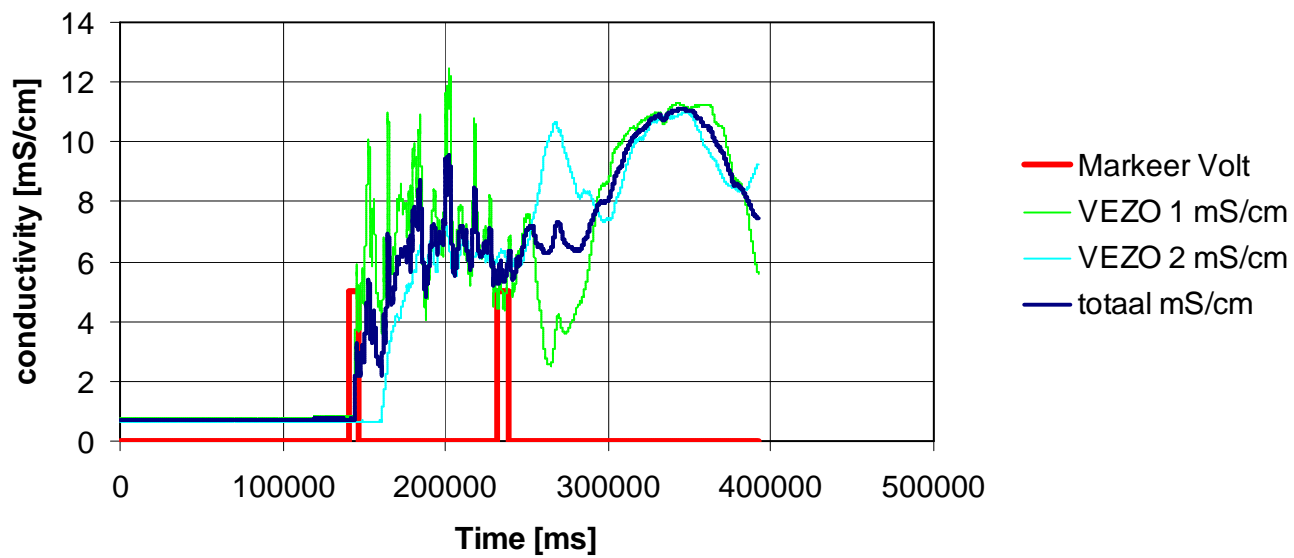
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #007



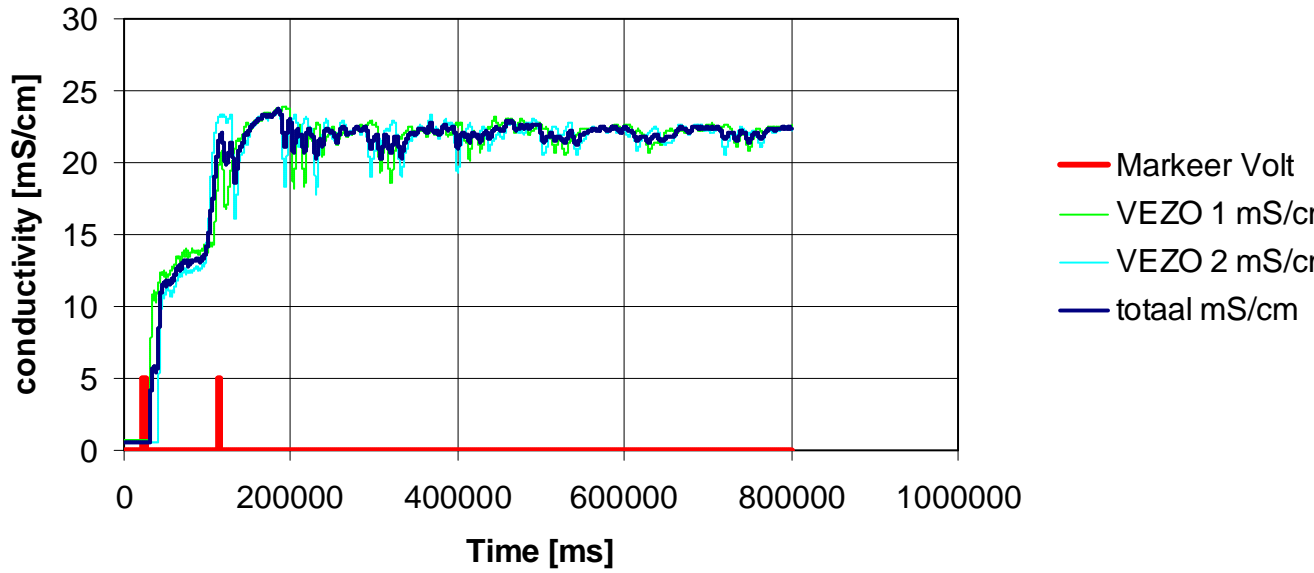
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #008



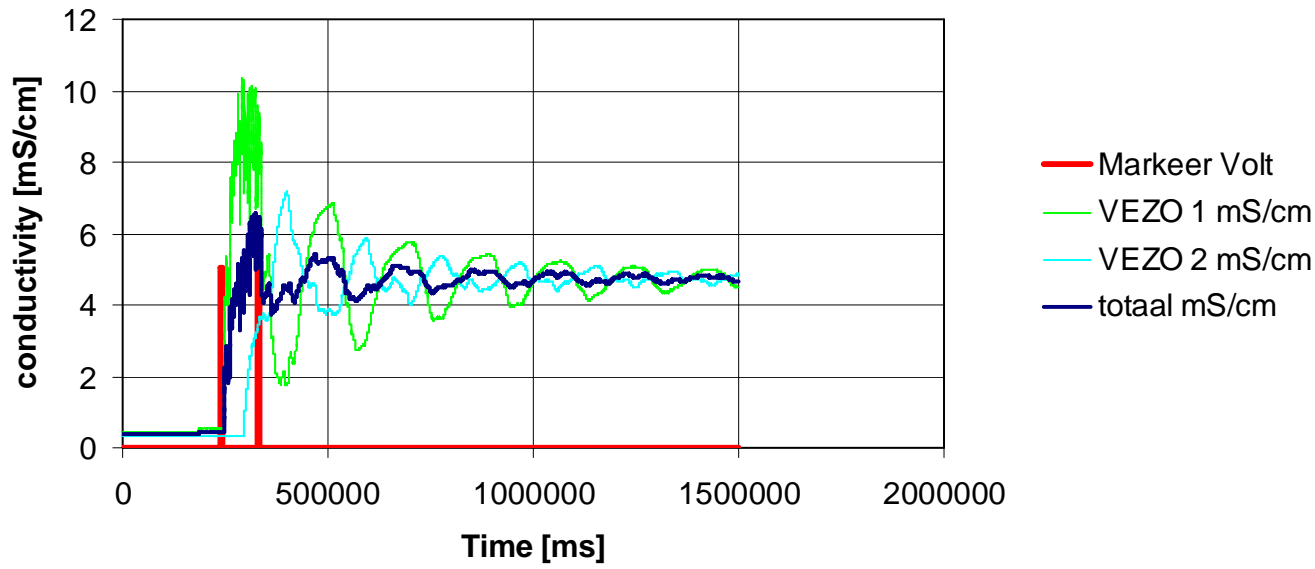
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #009



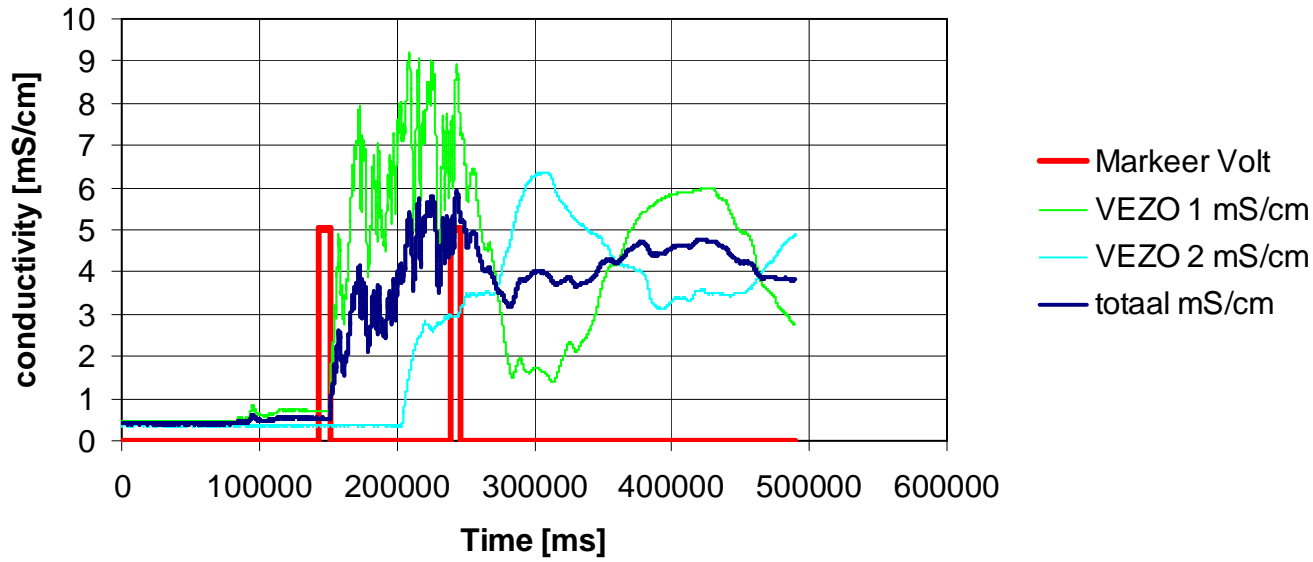
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #010



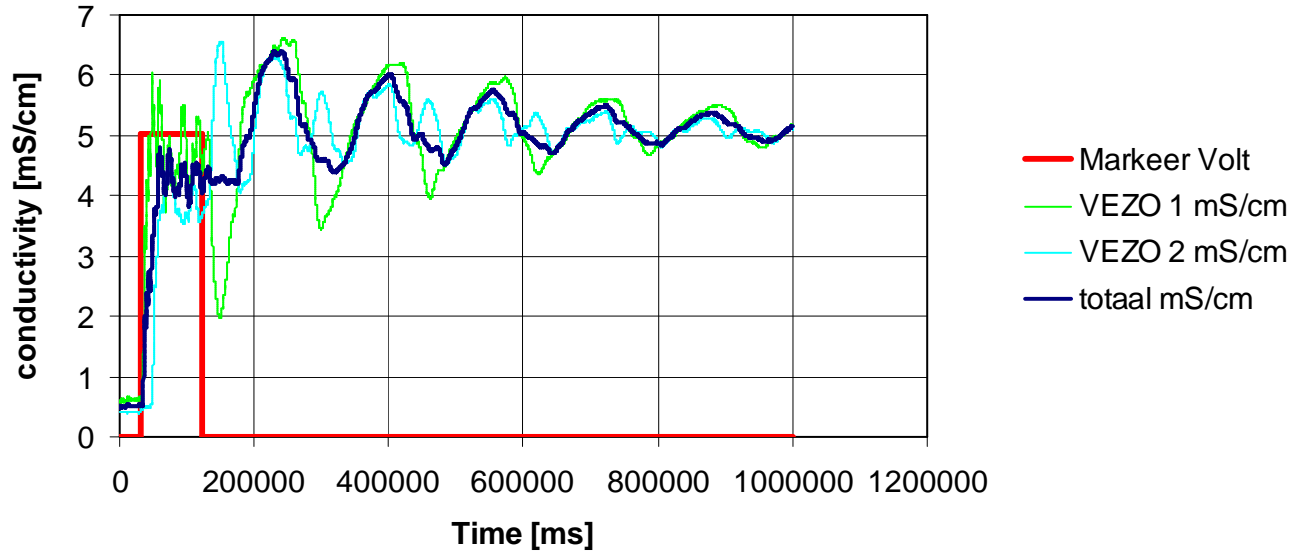
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #011



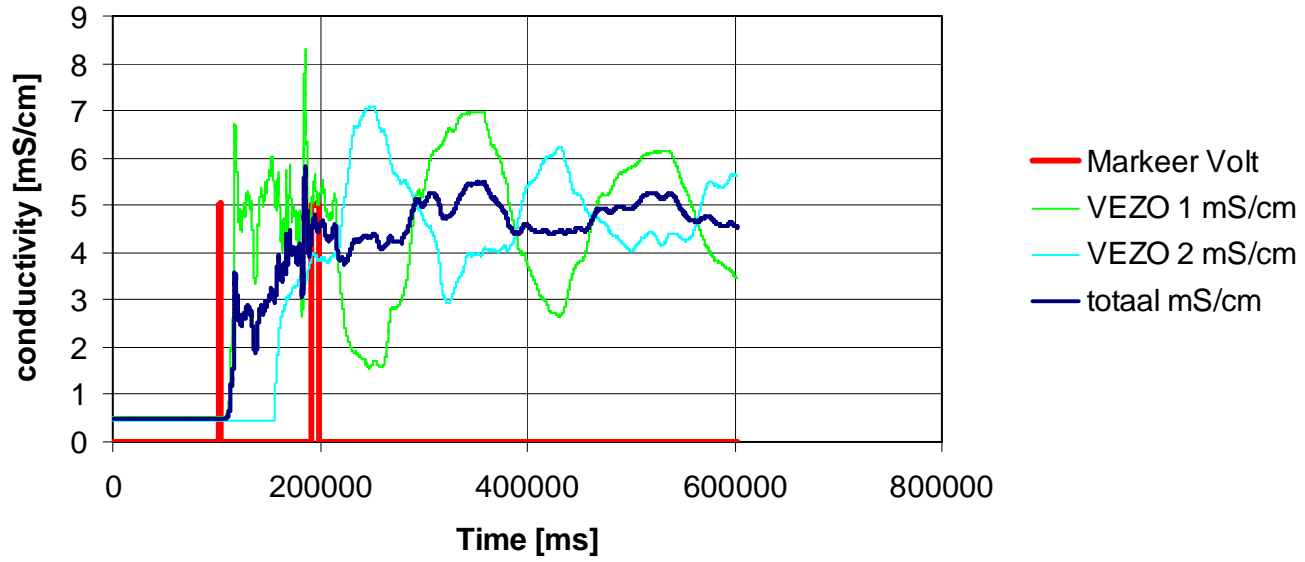
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #012



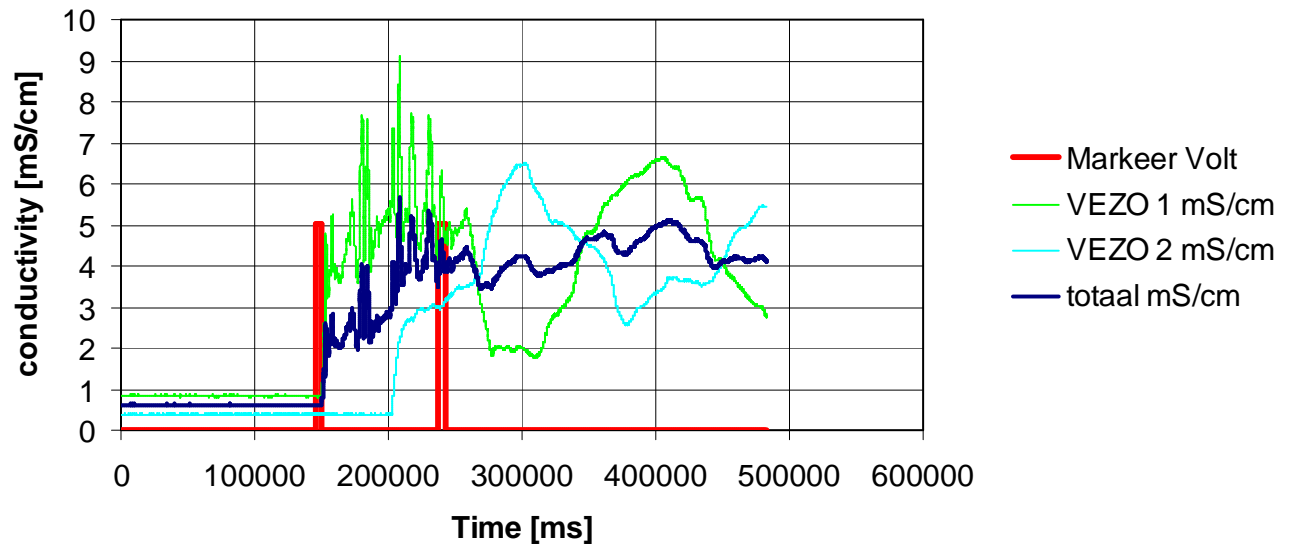
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #013



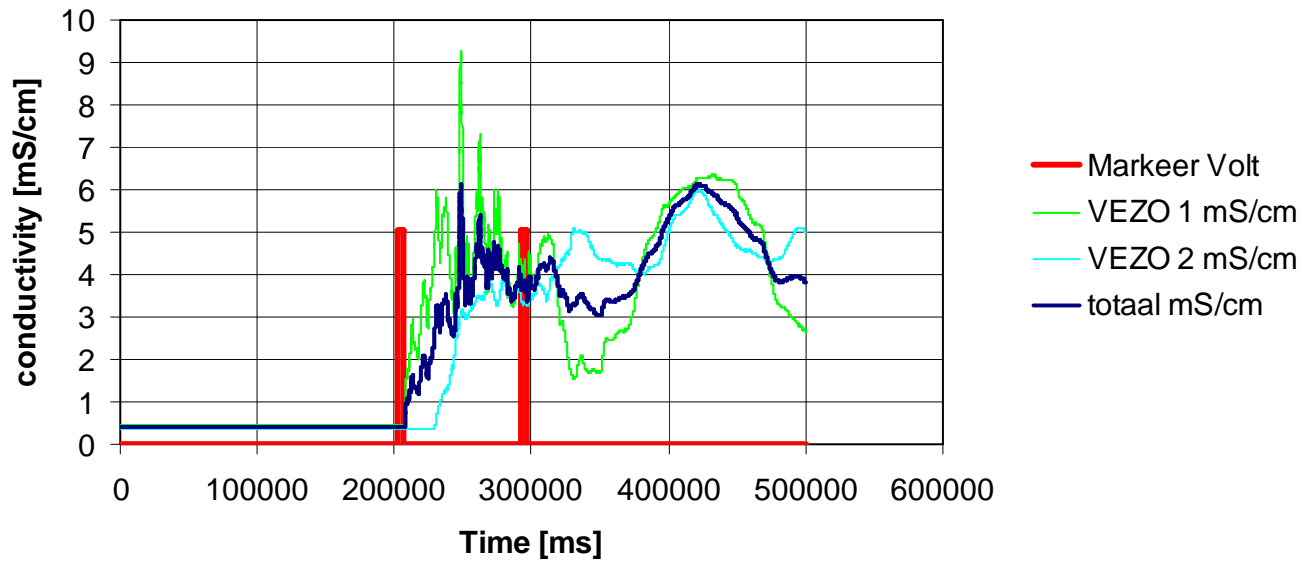
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #014



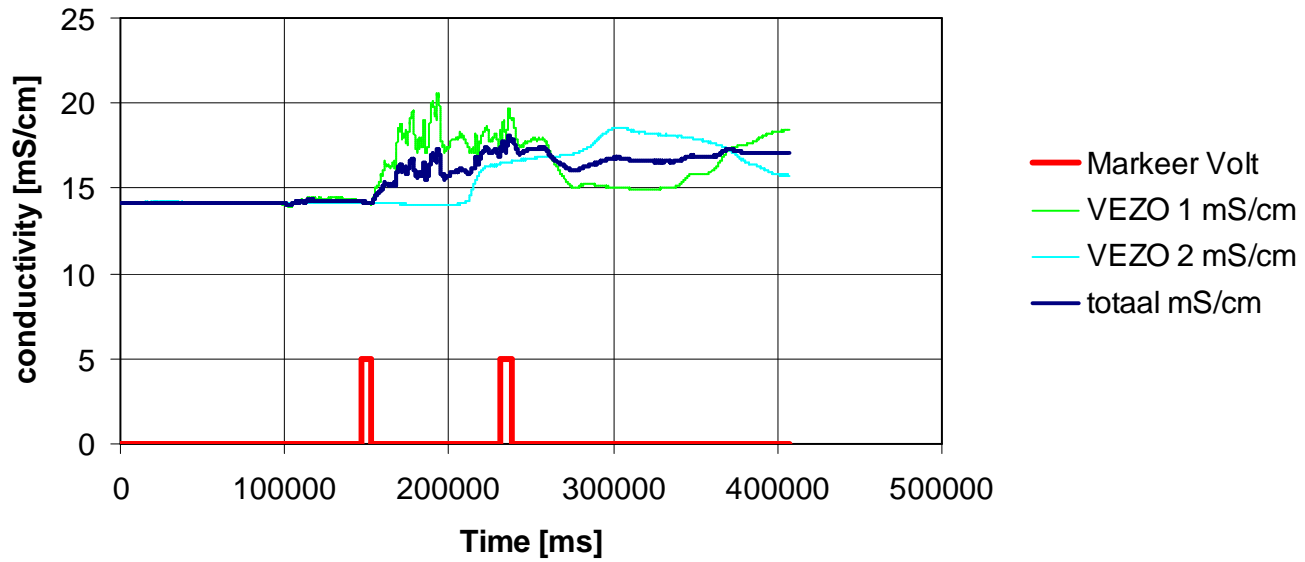
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #015



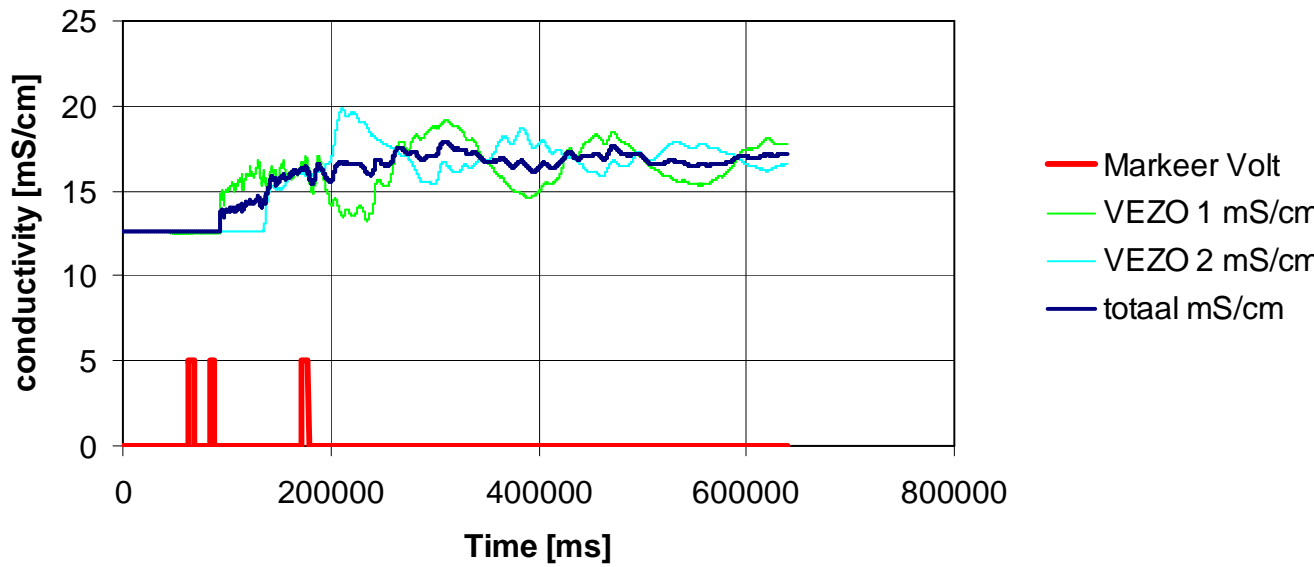
Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #016



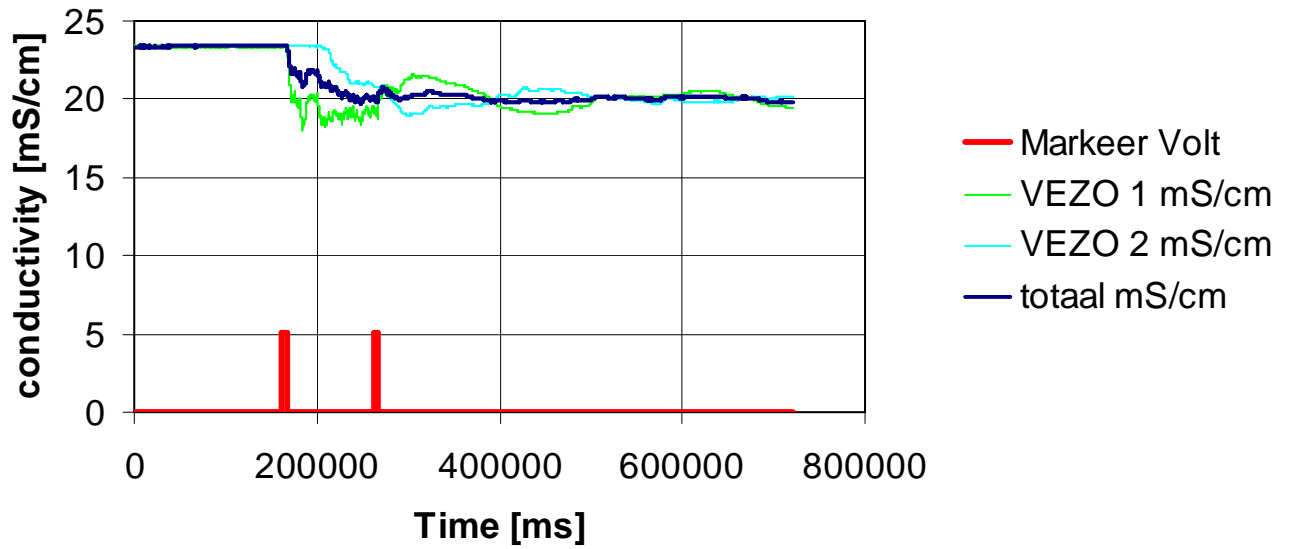
Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #017

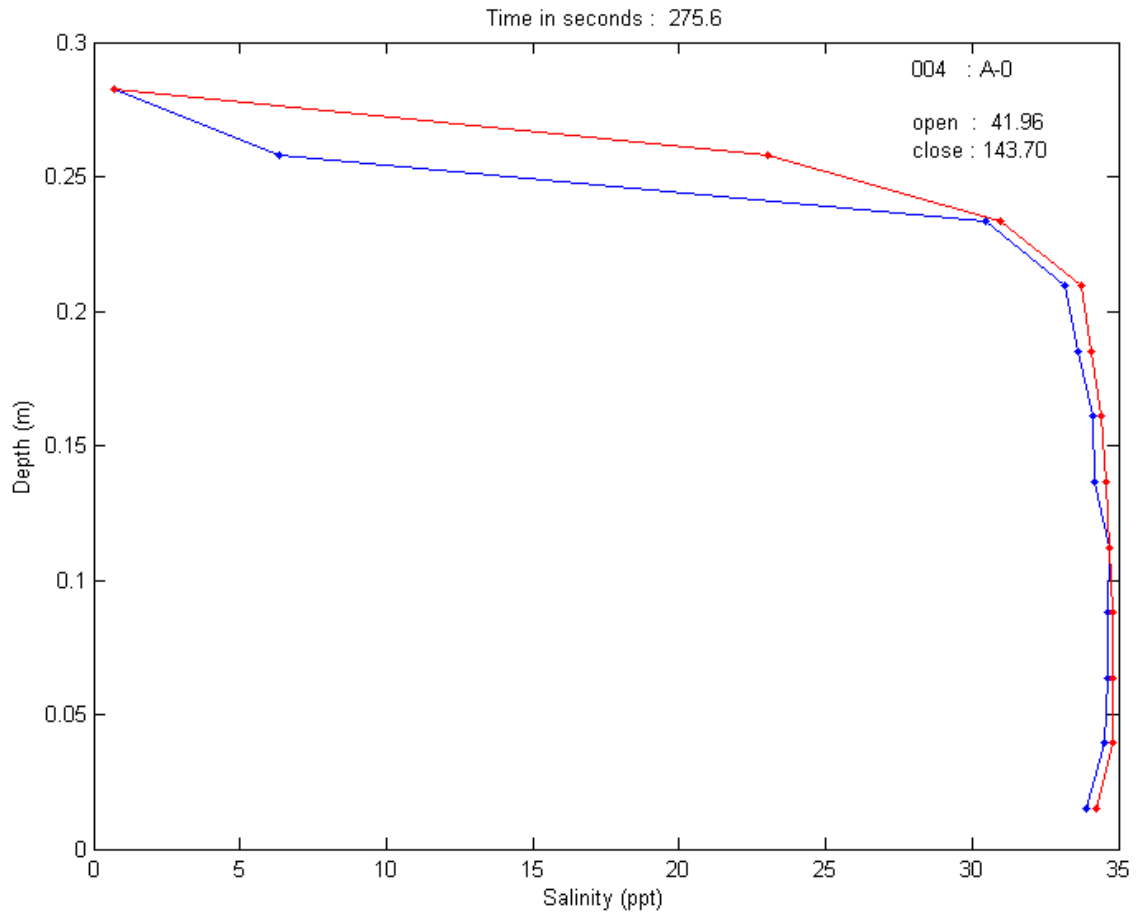


Volkerak Zoutlekbeperking Labproeven Test #018



Volkerak Zoutlekbeperving Labproeven Test #019





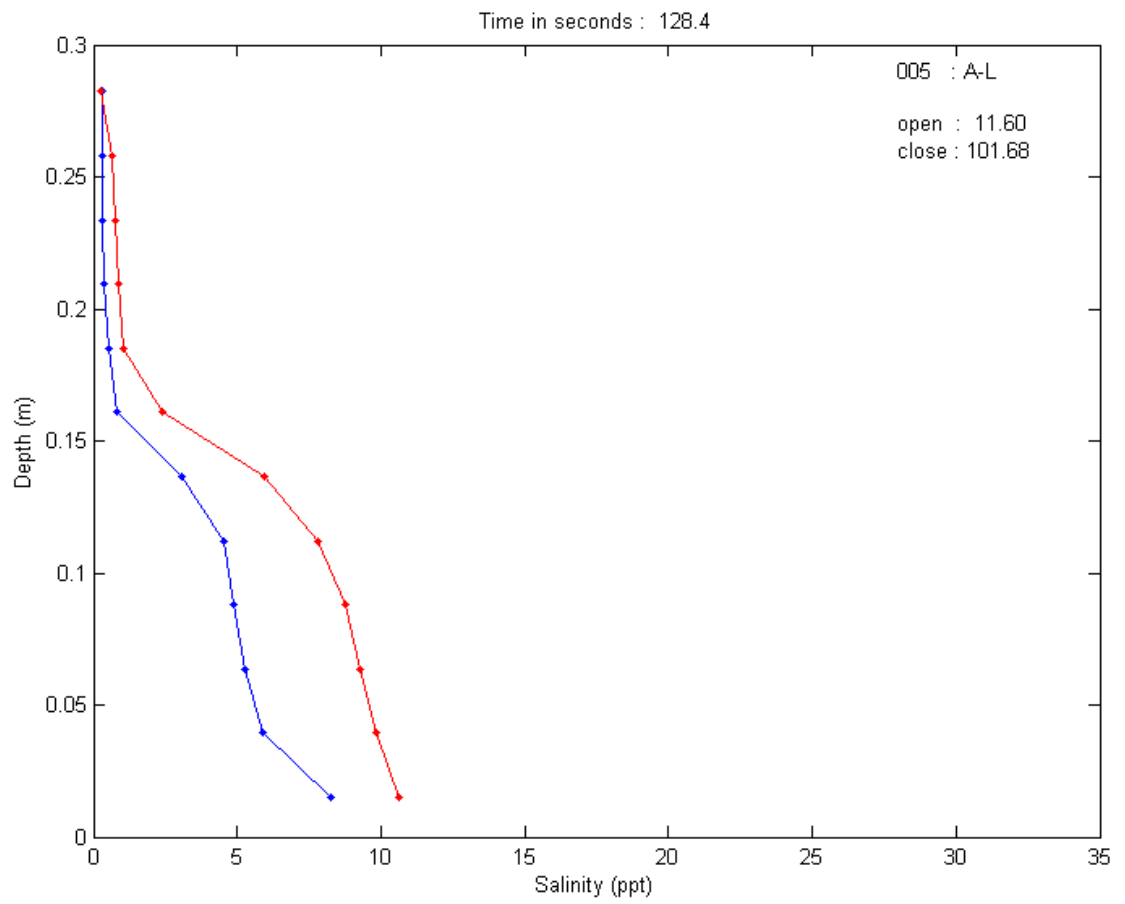
Toelichting:

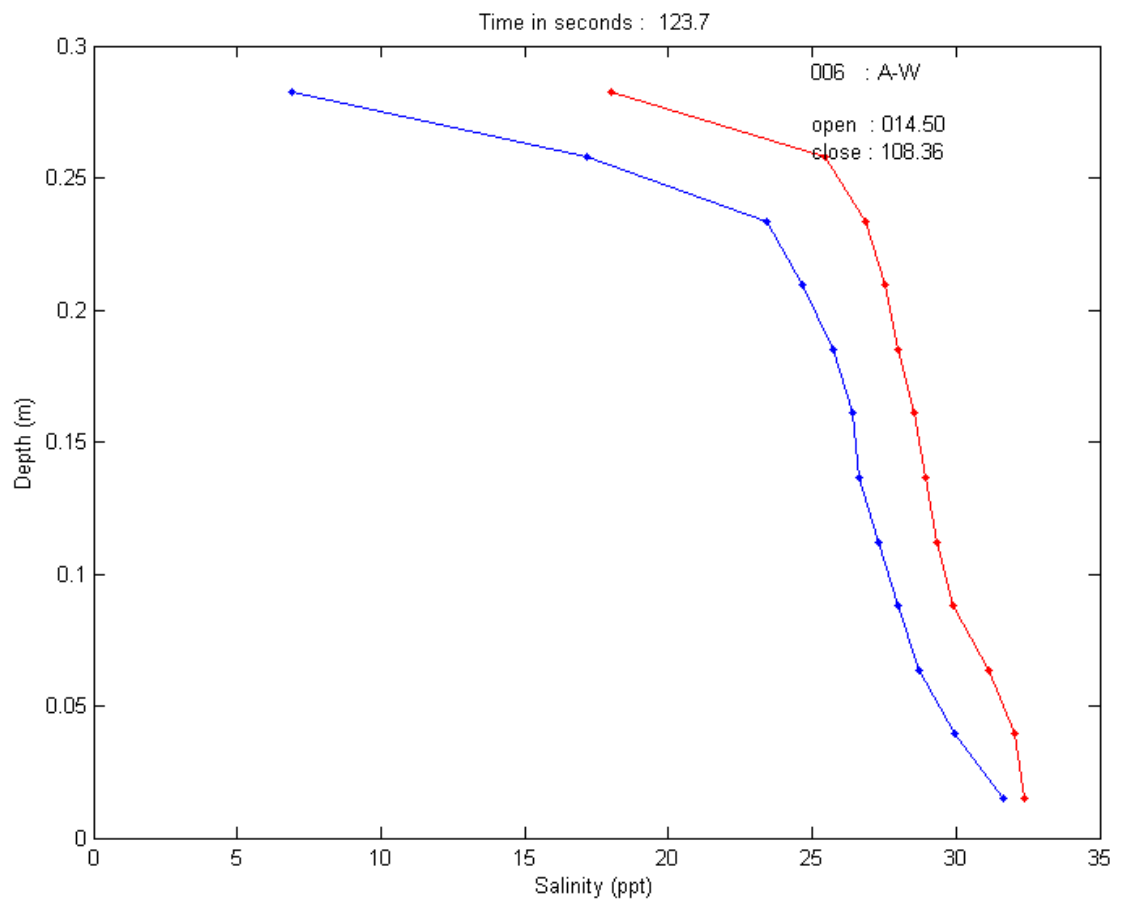
Gemeten zoutprofielen met twee Vezo's, saliniteit in [ppt] als functie van de diepte in [m], waterdiepte =0,29 m. met vermelding proefnummer en code, kolk open- en sluittijdstip en weergegeven tijdstip. De profielen zijn een momentopname van de animaties van de gehele meetduur.

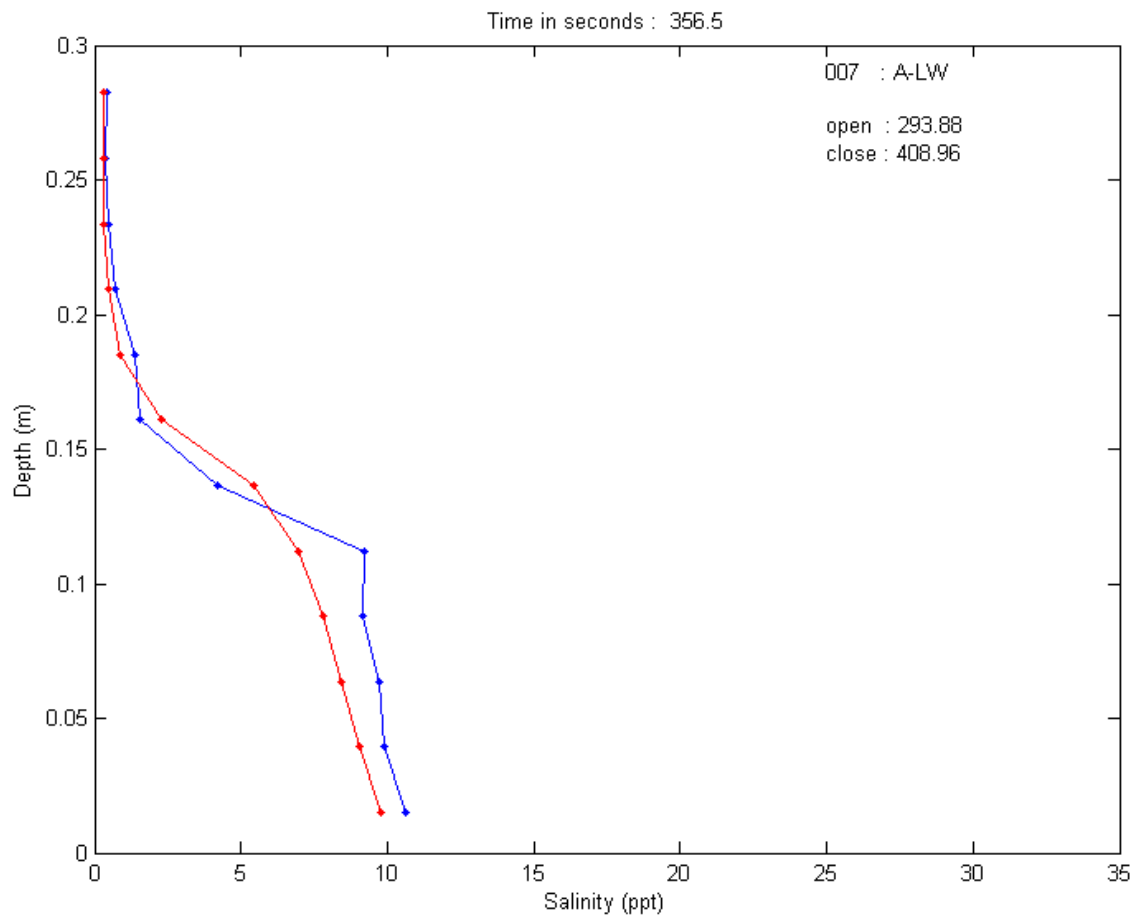
blauw = vezo 1, dicht achter schuif en bellenscherm

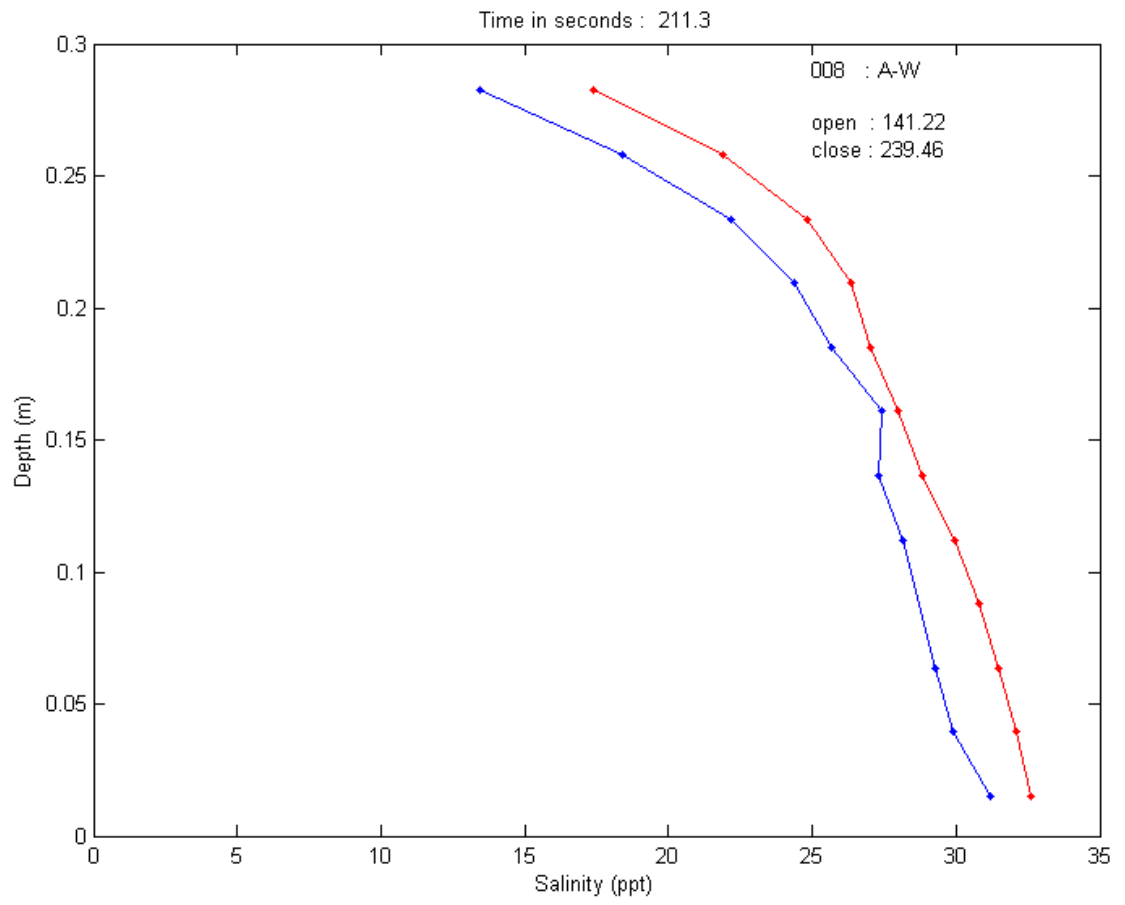
rood = vezo 2, iets verder in de kolk.

Bijlage D Zoutprofielen *Labproeven Volkerak Zoutlekbeperving, 1201226.002*

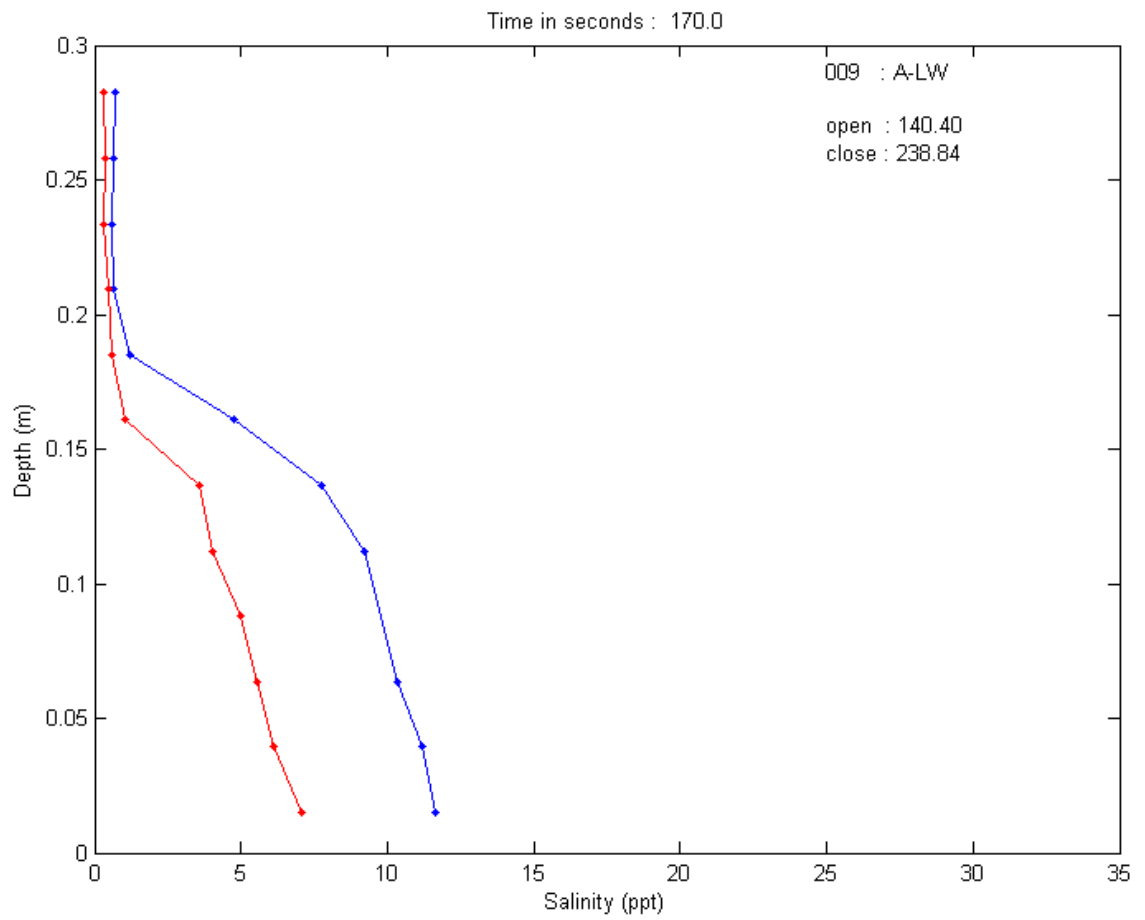




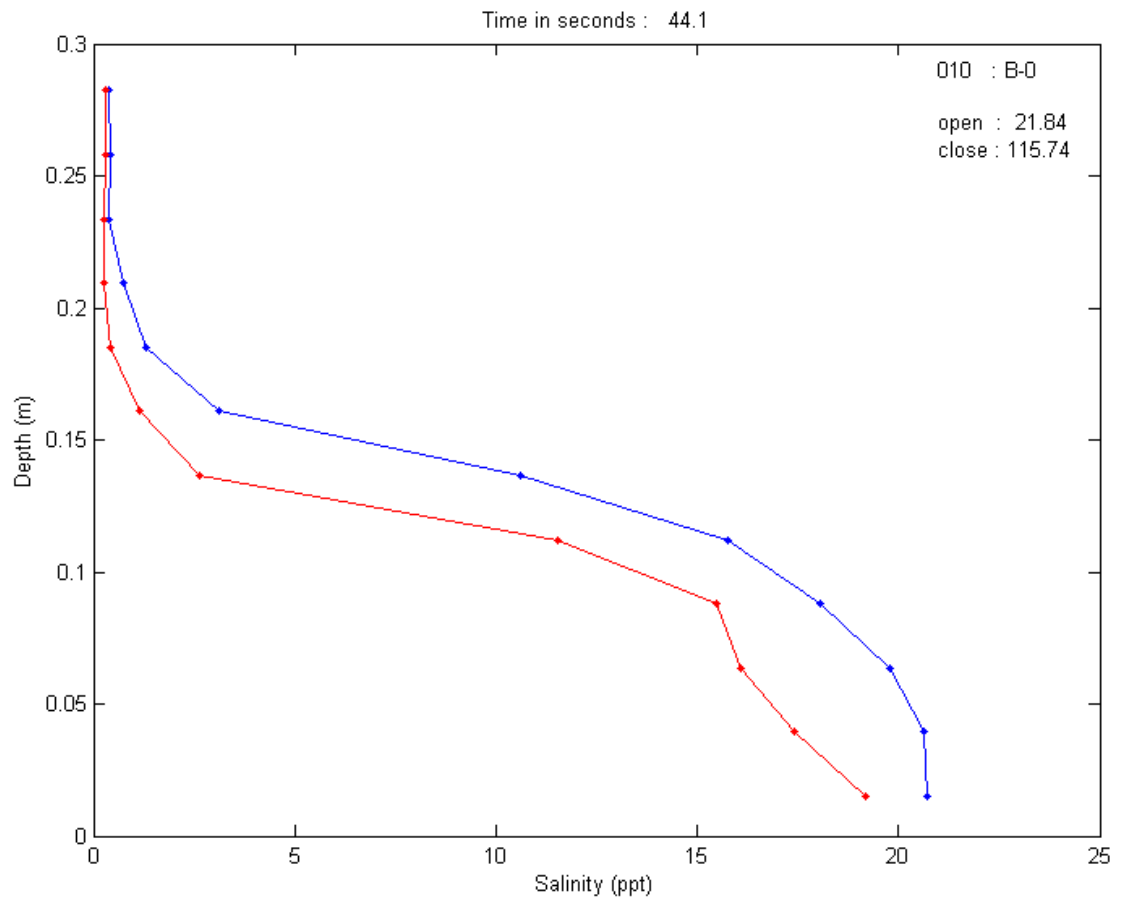




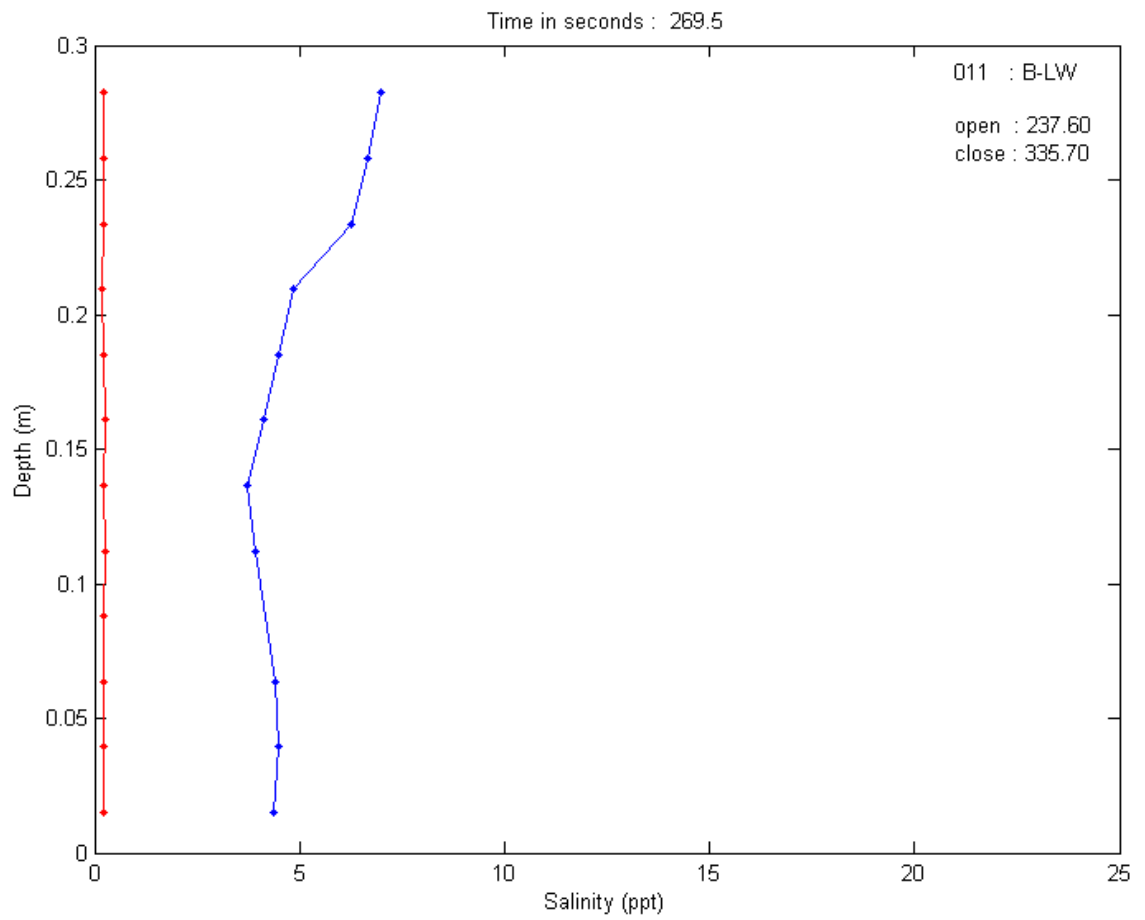
Bijlage D Zoutprofielen *Labproeven Volkerak Zoutlekbeperking, 1201226.002*

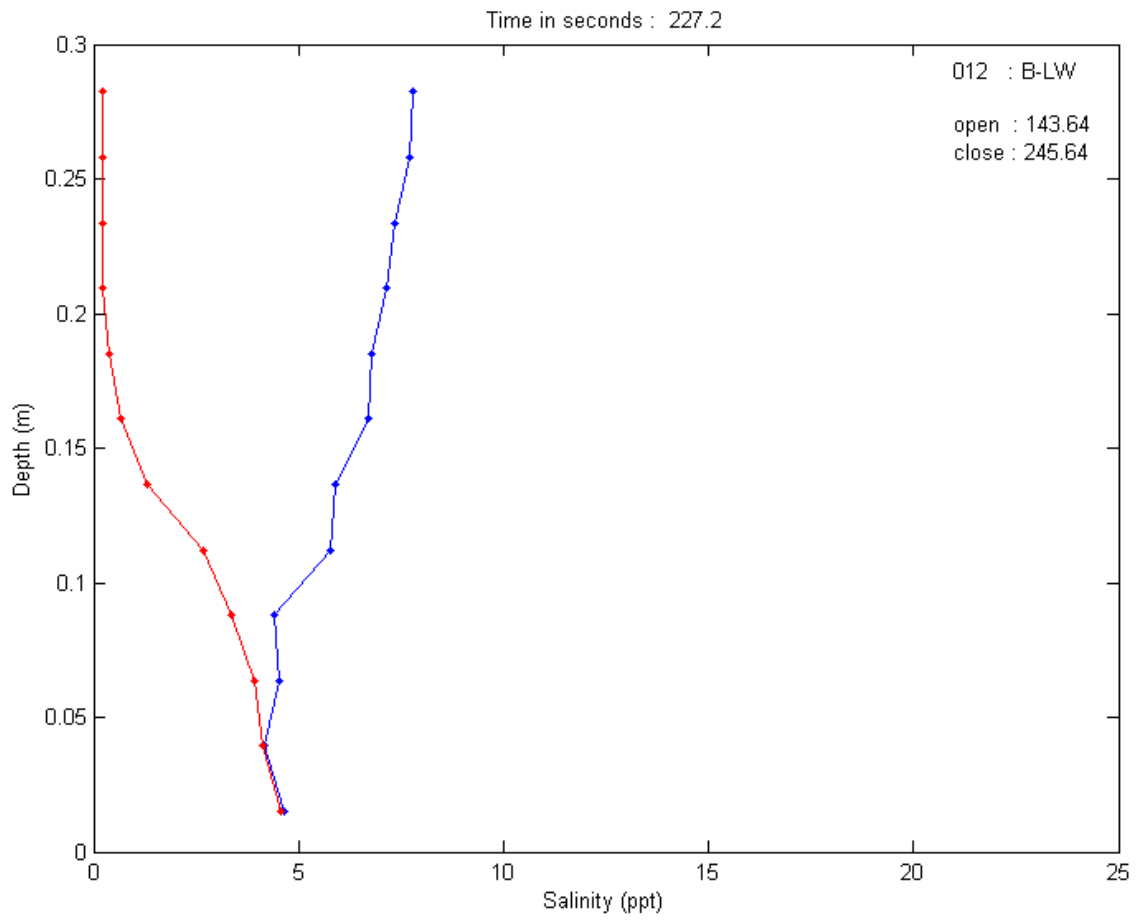


Bijlage D Zoutprofielen *Labproeven Volkerak Zoutlekbeperking, 1201226.002*

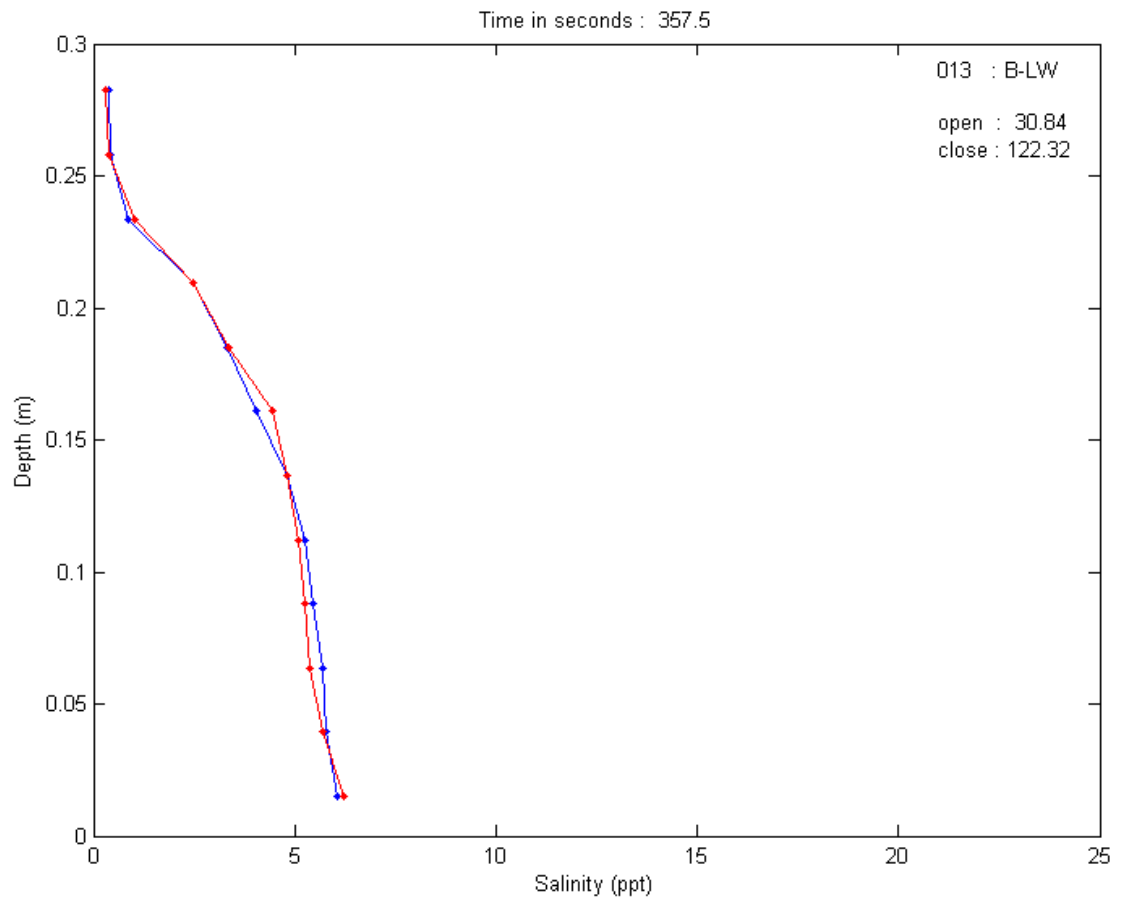


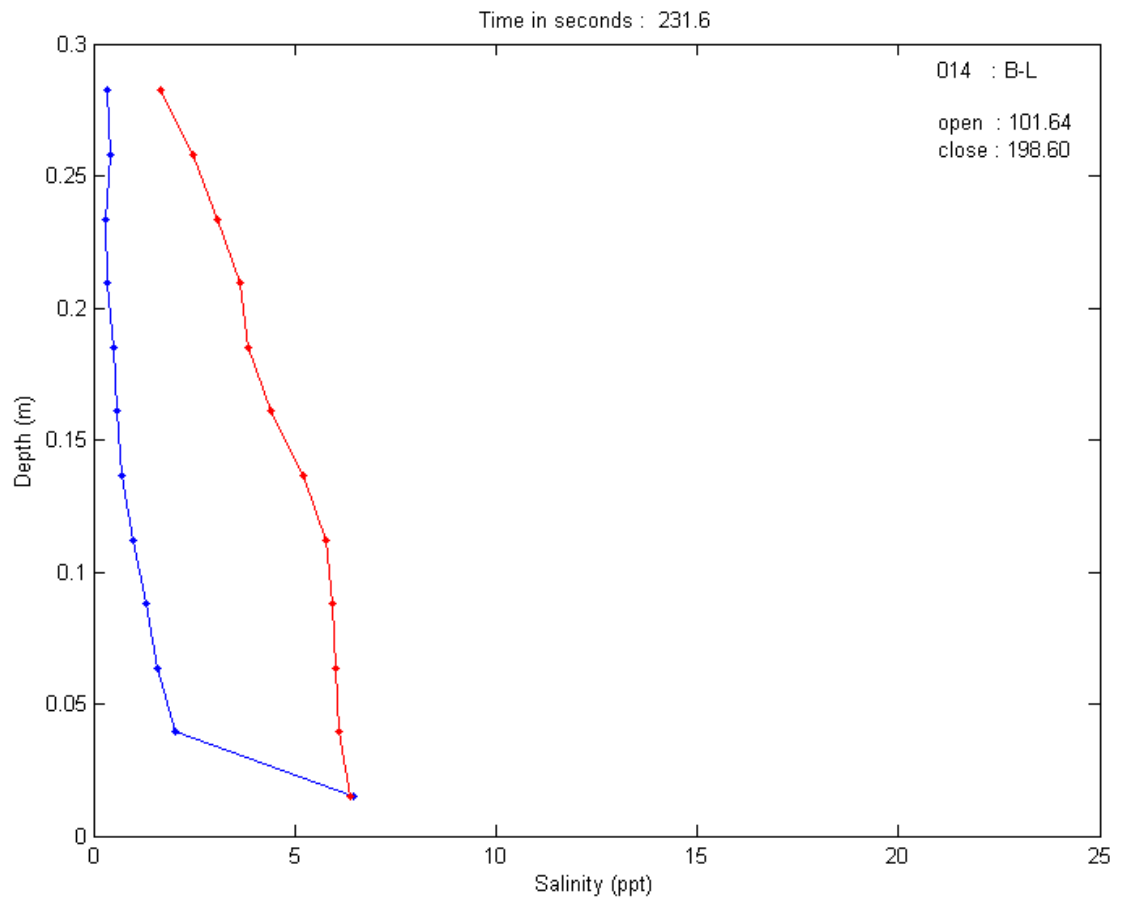
Bijlage D Zoutprofielen *Labproeven Volkerak Zoutlekbeperving, 1201226.002*

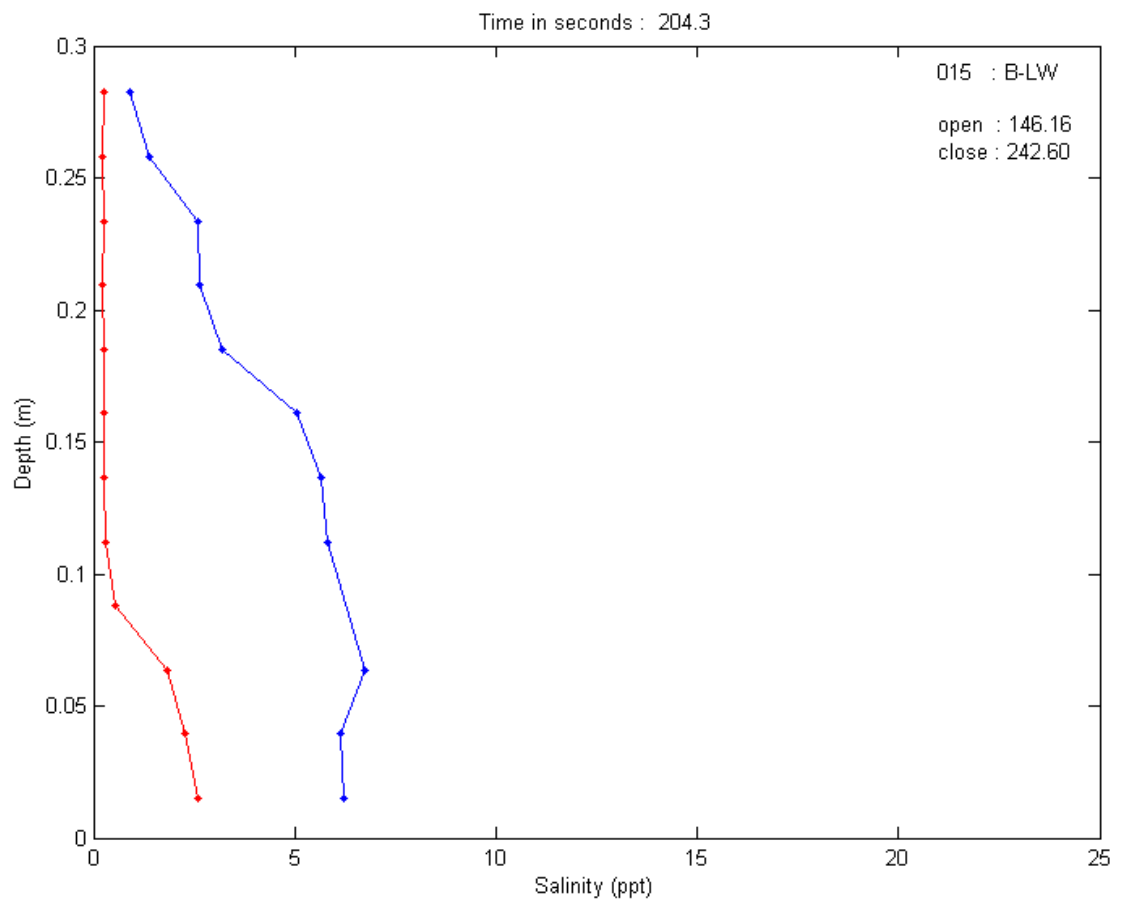


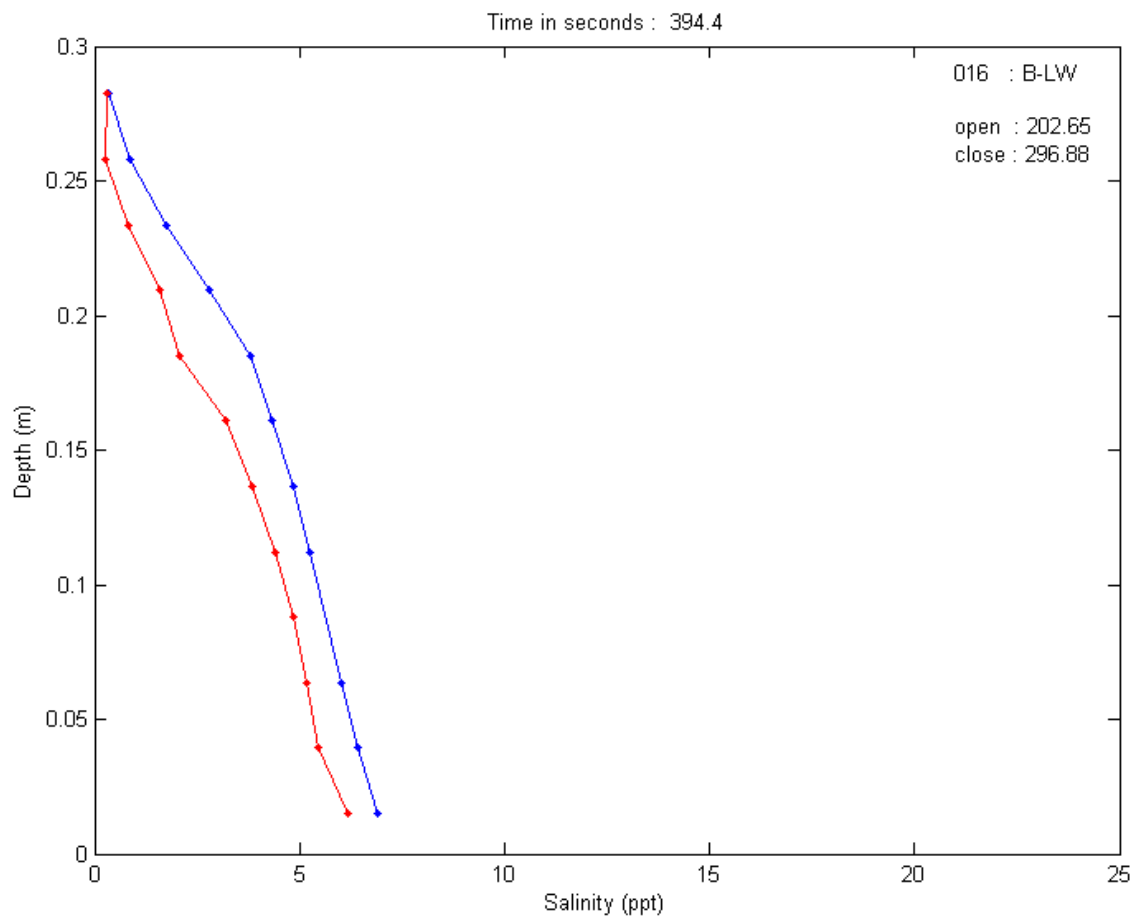


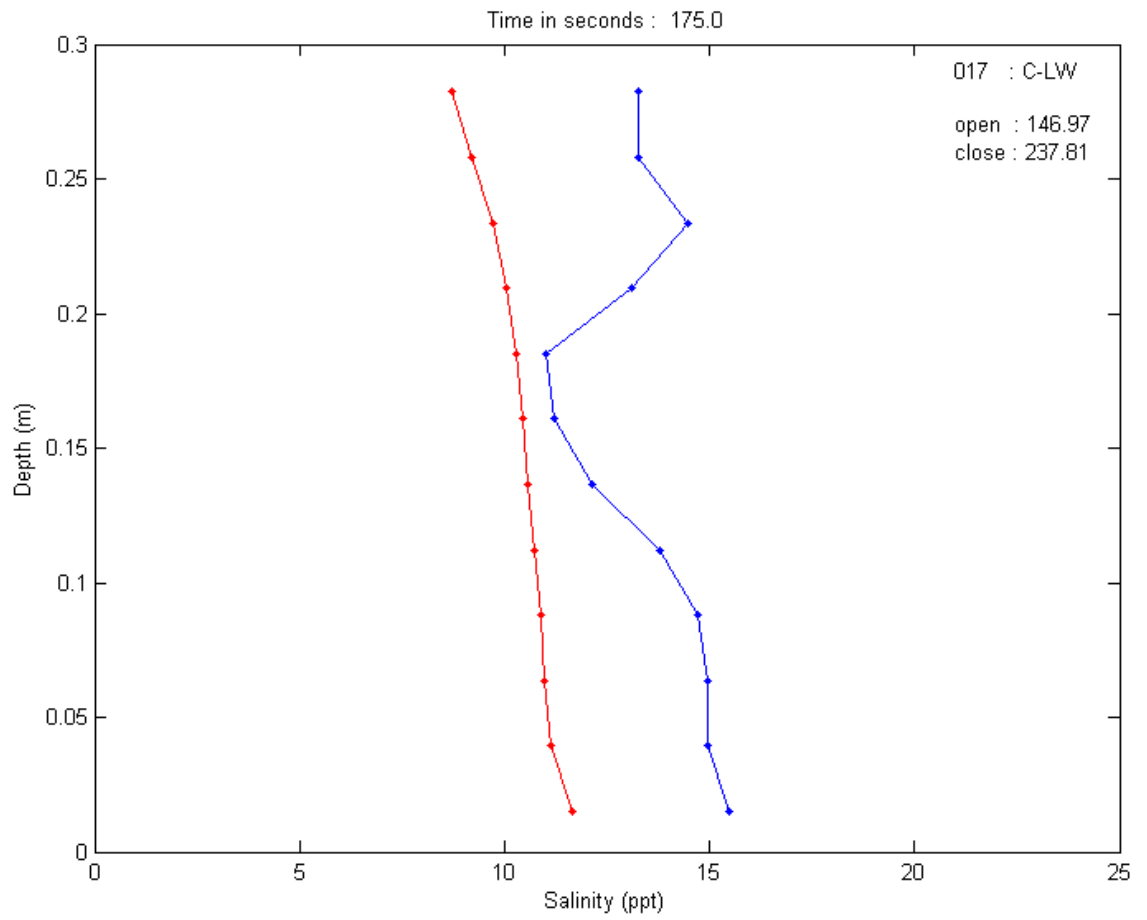
Bijlage D Zoutprofielen *Labproeven Volkerak Zoutlekbeperking, 1201226.002*

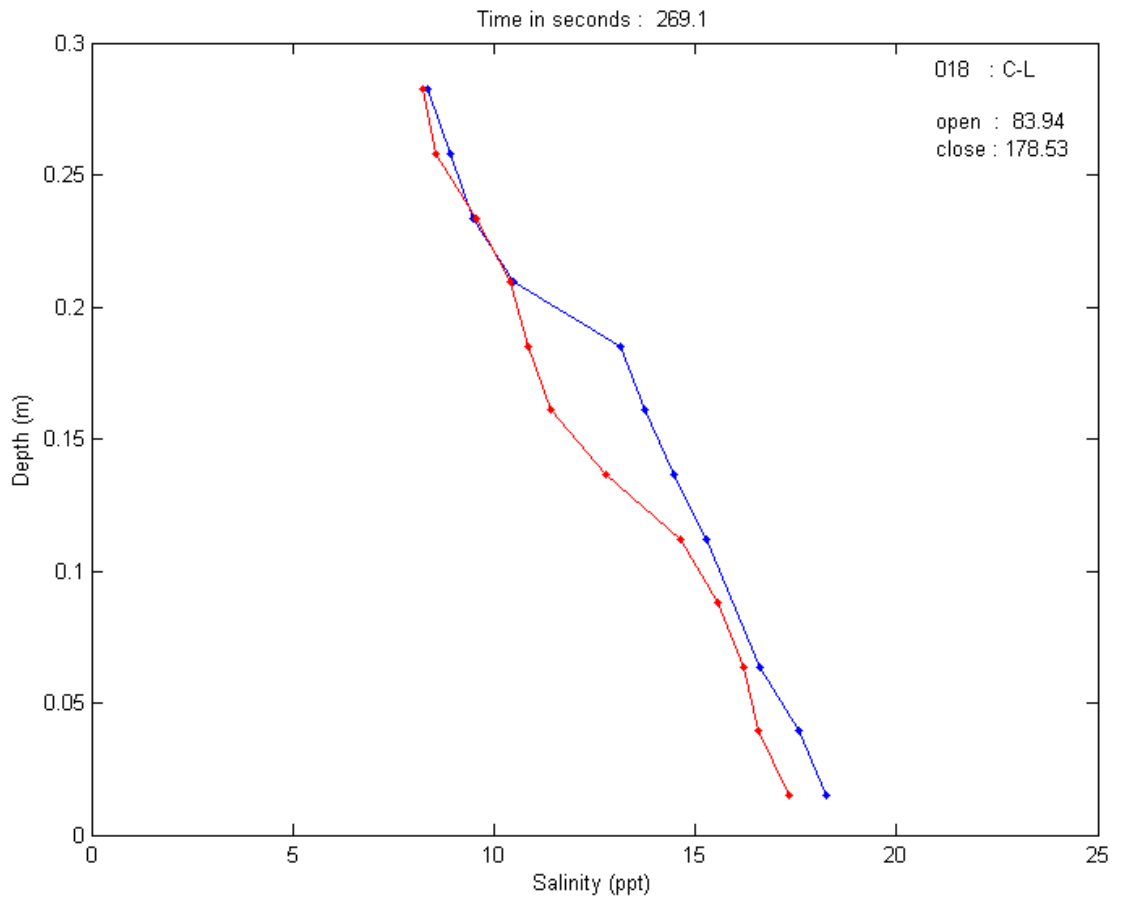




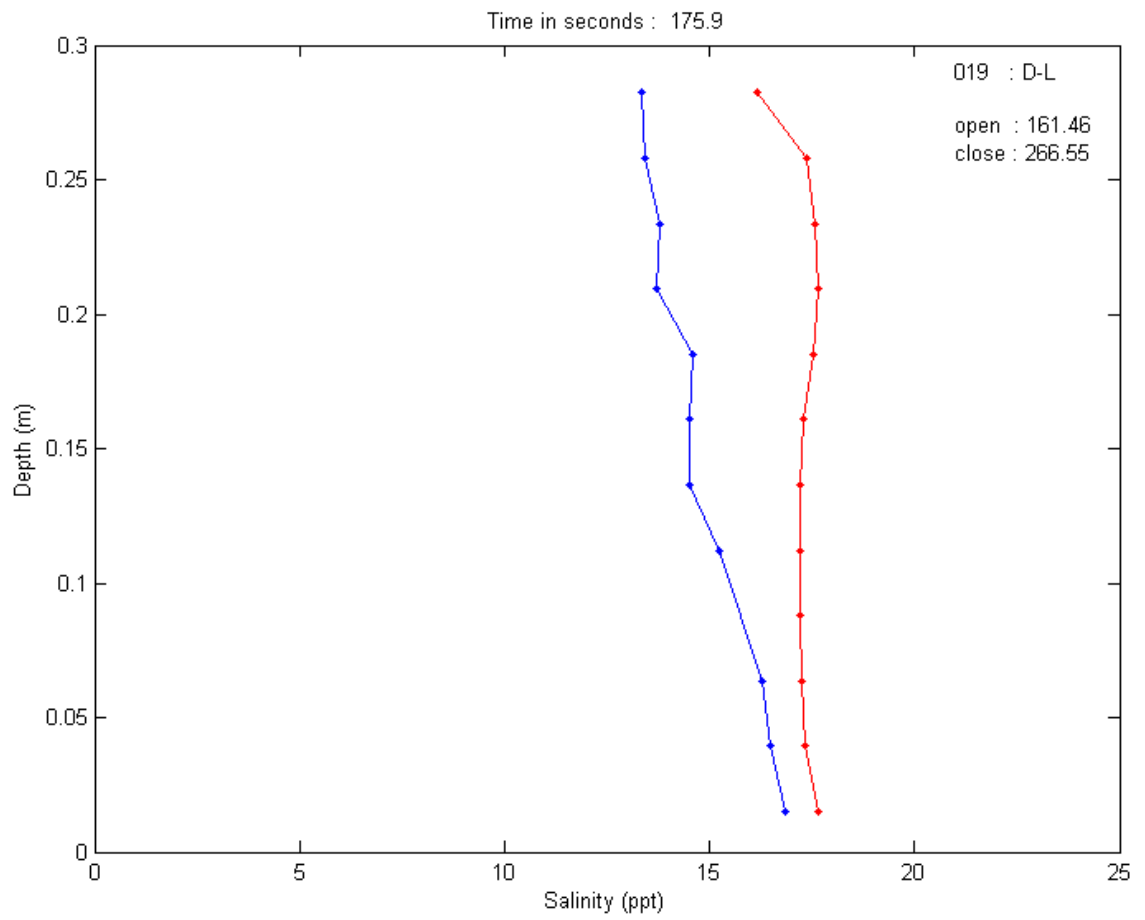








Bijlage D Zoutprofielen *Labproeven Volkerak Zoutlekbeperking, 1201226.002*



Aan : Team Volkerak
 Van : R.E. Uittenbogaard
 Betreft : bellengordijn, zwakke schaalwet.
 Datum : 27 januari 2009
 Kopie :
 Afhandeling: ter informatie

Meegezogen waterdebiet door bellengordijn

Voor de injectie van volumeflux Q_{air} lucht ingezogen bij atmosferische druk H_{atm} (uitgedrukt in waterhoogte) en geperst uit een lange geperforeerde buis met lengte L_{tube} op waterdiepte H_{inj} blijkt experimenteel de volgende formule te gelden voor de *entrainment* (mee sleuren) van water door dit bellenscherm:

$$Q_{ent} = 0.47 H_{atm} L_{tube}^{\frac{2}{3}} (gQ_{air})^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H_{atm}}{H_{atm} + H_{inj}} \right)^{\frac{1}{3}} \ln \left(\frac{H_{atm} + H_{inj}}{H_{atm}} \right) \quad (1)$$

De relatie is gebaseerd op experimenten met bellenschermen op prototype-schaal in een 10-15m diep scheepsdok, zie Bulson (1961).

Voor Stevinsluis gelden in (1) de volgende instellingen: injectiediepte H_{inj} ca. 4.7m, effectieve buislengte L_{tube} 15m, volumeflux Q_{air} lucht **1500 NL/s** bij H_{atm} van 10m. Dan geeft (1): $Q_{entr} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ gelijkmatig verdeeld over 15m luchtleverende buislengte.

Deze hoeveelheid water is vele malen groter dan wat we in de Stevinsluis met gehuurde pompen kunnen inbrengen als watgordijn nl. $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Zwakke schaalwet luchtdebiet bellengordijn

Met specifiek luchtdebiet q_l (m^2/s) per meter kolkbreedte in verhouding tot de voortplantingsnelheid $\frac{1}{2} \sqrt{g'H}$ van de zouttong in een kolk met diepte H en dichtheidsverschil $\Delta\rho$ volgens onderstaande formule:

$$F_l = \frac{(gq_l)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{g'H}} \quad ; \quad g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g \quad (2)$$

Uit theorie en experimenten blijkt dat de reductie in zoutindringing door het bellengordijn wordt bepaald door het verhoudingsgetal (2). Vaak wordt in het lab. hetzelfde dichtheidsverschil als in prototype gehanteerd. Dan volgt uit de schaalregel:

$$n_{q_l} = \beta (n_H)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

waarin n_H is de verhouding in waterdiepte in prototype en in model. Factor β zou gelijk één moeten zijn maar blijkt geringer door onvolkomenheden in deze schaalwet omdat de eigenschappen van bellen niet zijn meegenomen. Uit figuur 7 in (Mazijk e.a., 1971) volgt ruwweg $\beta \sim 0.5$. Voor de relatie tussen Stevinsluis (4.7m diep) en lab. proef (0.18m diep) volgt dan

$$n_H = \frac{4.7}{0.18} = 26 \quad ; \quad n_{q_l} \approx 66 \quad (3)$$

zodat bij max. 100 Nℓ/s.m in Stevinsluis in het lab. 1.5 Nℓ/s.m moet worden ingeblazen.

Referenties

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

Mazijk, A., P. de Jong, G. Abraham 1971 *Reproductie zouttoestand getijrivieren VIII Invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M896-VIII, juli.