

STUREN OP ZOUT




University of Twente
Enschede - The Netherlands

Witteveen + Bos

Marcel van den Berg (s0004731)
2 april 2009
eindrapport

Universiteit Twente
Prof. ir. E. van Beek
Dr. ir. D.C.M. Augustijn

Witteveen+Bos
Ir. E.S.J. van Tuinen
Ir. E.P. de Bruine
Dr. ir. J.L. Korving

STUREN OP ZOUT

Afstudeeronderzoek naar de beperking van de zoutindringing in de Mark-Vliet boezem als gevolg van een zout Volkerak-Zoommeer door gebruik te maken van Real Time Control.

Samenvatting

Het Volkerak-Zoommeer is in de huidige situatie een zoetwatermeer. Vanwege waterkwaliteitsproblemen op het Volkerak-Zoommeer is Rijkswaterstaat voornemens om het Volkerak-Zoommeer zout te maken en peilfluctuaties op het meer in te voeren. Hierdoor krijgt het Mark-Vliet systeem in West-Brabant te maken met zoutindringing. De landbouw in West-Brabant is afhankelijk van de zoetwatervoorziening via het Mark-Vliet systeem.

Het doel van deze studie is: "Onderzoeken of de verhoging van de chlorideconcentraties in het Mark-Vliet systeem vanwege het zout worden van het Volkerak-Zoommeer, beperkt kan worden door verschillende Real Time Control strategieën te implementeren en te optimaliseren in Sobek, waardoor de systeemcapaciteiten van het Mark-Vliet systeem beter benut worden en er geen achteruitgang in de zoetwatervoorziening van de polders in West-Brabant t.o.v. de huidige situatie met een zoet Volkerak-Zoommeer plaatsvindt." In dit rapport wordt dus beschreven hoe de zoutindringing in het Mark-Vliet systeem kan worden beperkt door gebruik te maken van Real Time Control. Real Time Control is het ingrijpen op het verloop van de processen in een watersysteem op basis van actuele metingen door middel van het besturen van regelbare kunstwerken.

Het Mark-Vliet systeem is een boezemsysteem met een vast peil, het systeem mondt op twee verschillende locaties uit op het Volkerak-Zoommeer. Via de Dintel bij Dintelsas en via de (Steenbergse) Vliet bij Benedensas. De mate van beperking van de zoutindringing wordt bepaald door de chlorideconcentraties bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten naar de polders van het Mark-Vliet systeem in de Dintel en in de Vliet. Voor de polders achter deze inlaatpunten is bepaald wat de grenswaarde van de toelaatbare chlorideconcentratie is afhankelijk van het grondgebruik in de polders.

De zoutindringing in het Mark-Vliet systeem is afhankelijk van 6 factoren. Dit zijn de stroomsnelheid, de dispersiecoëfficiënt, de duur van een droge periode, de chloride vracht per schutting, het aantal schuttingen en de uiteindelijke variant van het Volkerak-Zoommeer. Omdat in 1996 sprake is geweest van een lange droge periode, waarin bijna geen natuurlijke afvoer in het Mark-Vliet systeem aanwezig is, is gekozen om van het jaar 1996 uit te gaan.

De zoutindringing wordt tegen gegaan door het Mark-Vliet systeem door te spoelen. Hiervoor is het nodig om zoet water in te laten. Er zijn verschillende mogelijkheden om zoetwater naar het Mark-Vliet systeem aan te voeren. Zo kan via de inlaatduiker bij Oosterhout, via de Roode Vaart of door het bergen van water in het bovenstrooms gelegen deel van het stroomgebied zoetwater worden aangevoerd om de zoutindringing tegen te gaan.

Verschillende Real Time Control strategieën om het Mark-Vliet systeem door te spoelen zijn onderzocht. In eerste instantie is onderzocht of het mogelijk is om de zoutindringing te beperken door het inlaten van water afhankelijk van de gemeten chlorideconcentraties. Een bepaalde overschrijding van het peil levert dan een openingshoogte van de spuisluizen bij Benedensas en Dintelsas op. Een bepaalde overschrijding van de chlorideconcentraties levert een steeds grotere openingshoogte van de kleppen van de inlaatduiker op. Zo wordt het systeem doorgespoeld afhankelijk van het peil en de chlorideconcentraties.

Daarna is onderzocht of de zoutindringing beperkt kan worden door een constante afvoer op de twee takken van het Mark-Vliet systeem te zetten. De optimale afvoer voor deze takken is bepaald en de openingshoogte van de spuisluizen wordt daarna bepaald afhankelijk van het peilverschil bij de spuisluizen zodat de gevonden optimale afvoer continu op deze takken zal blijven staan.

Dit is daarna uitgebreid met een besturing op de chlorideconcentraties. Daarvoor is de optimale locatie om de chlorideconcentraties te meten bepaald. Het systeem heeft namelijk een bepaalde reactietijd op de zoutindringing beperkende maatregelen. Als een hoge chlorideconcentratie wordt gemeten duurt het een bepaalde tijd voordat het ingelaten zoete water bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten is. De inlaat en de afvoer bij de spuisluizen worden bepaald afhankelijk van de metingen van de chlorideconcentraties. Als de chlorideconcentratie bij de inlaatpunten in de buurt van de grenswaarde komt, wordt de inlaat vergroot tot maximaal het optimale totale doorspoeldebiet en de afvoer door de twee verschillende takken wordt vergroot tot het gevonden optimale doorspoeldebiet van de verschillende takken van het systeem.

Door Real Time Control te gebruiken, en het beschikbare water slim te verdelen over de twee verschillende takken van het systeem, worden de systeemcapaciteiten van het Mark-Vliet systeem beter benut. Door het water slim te verdelen is een minder groot doorspoeldebiet noodzakelijk t.o.v. 'normaal' doorspoelen. Doordat het water nu slim gestuurd wordt, wordt het hele doorspoeldebiet optimaal benut. In het oorspronkelijke doorspoelscenario bleef een deel van dit doorspoeldebiet namelijk onbenut. Dit deel werd ingezet in de Dintel terwijl daar met een veel kleiner debiet kon worden volstaan. Door de sluizen zo in te stellen dat deze precies de goede afvoer verwerken kan dat onbenutte deel van het doorspoeldebiet op de Vliet worden ingezet waar het wel nodig is.

Sturen op zout is dus een nuttige toevoeging voor het Mark-Vliet systeem. Er wordt op de totale inlaat bespaard door de chlorideconcentratie in het systeem te meten. Afhankelijk van deze metingen wordt water ingelaten. De waterbesparing is op deze manier ongeveer 100 miljoen m³ groot ten opzichte van doorspoelstrategieën waarbij geen rekening wordt gehouden met de waterkwaliteit (met een totale inlaat van 220 miljoen m³ water). Door te sturen op de waterkwaliteit wordt alleen water ingelaten op de momenten dat dit noodzakelijk is.

Gegeven de aangenomen dispersiecoëfficiënt, kan in het jaar 1996 worden volstaan met een doorspoeldebiet van 10 m³/s. In het oorspronkelijke doorspoelscenario zonder gebruik te maken van Real Time Control moet worden doorgespoeld met 15 m³/s. Verder blijven de chlorideconcentraties bij doorspoelen met Real Time Control onder de grenswaarde bij beide inlaatpunten, de landbouw kan dus water blijven innemen. In het oorspronkelijke doorspoelscenario zonder Real Time Control ging dit niet voor alle inlaatpunten op.

De grootste onzekerheid in de resultaten zit in de dispersiecoëfficiënt. Omdat de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer nog niet bestaat kan de dispersiecoëfficiënt niet op deze situatie gecalibreerd worden. Een verhoging van de dispersiecoëfficiënt van 3 m²/s naar 12 m²/s heeft als gevolg dat, wanneer er wordt doorgespoeld met 10 m³/s, de maximale chlorideconcentratie bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten van 300 mg/l stijgt naar bijna 2000 mg/l. Er is dan dus een groter doorspoeldebiet nodig om de zoutindringing tegen te gaan.

Om de zoutindringing tegen te gaan is het nodig om de inlaatcapaciteit naar het Mark-Vliet systeem te vergroten. Vanwege de onzekerheid in de resultaten is het verstandig een bepaalde marge te gebruiken bovenop het gevonden maximale inlaatdebiet van 10 m³/s. Deze marge is beter te realiseren wanneer de Roode Vaart wordt gebruikt om het zoete water aan te voeren. Bovendien spelen waterkwaliteitsproblemen op het Wilhelminakanaal een rol bij de afweging tussen de aanleg van de Roode Vaart en de uitbreiding van de inlaatduiker bij Oosterhout. Het Wilhelminakanaal is namelijk de bron van het water wat via de inlaatduiker bij Oosterhout wordt ingelaten. Een andere factor die van belang is bij deze afweging zijn de kosten van de alternatieven, de aanleg van de Roode Vaart kost beduidend meer dan de uitbreiding van de inlaatduiker. Deze afweging wordt verder aan de belanghebbenden overgelaten.

Real Time Control en het sturen op zout zijn waardevolle maatregelen gebleken om de zoutindringing in het Mark-Vliet systeem tegen te gaan. In deze studie is aangetoond dat de beperking van de zoutindringing in het Mark-Vliet systeem door Real Time Control te gebruiken aanzienlijk is. Hiermee is het doel van de studie behaald.

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerrapport waar ik het afgelopen half jaar mee bezig ben geweest. In dit rapport beschrijf ik het onderzoek wat ik heb gedaan naar het beperken van de zoutindringing in de Mark-Vliet boezem. Dit is gedaan door een Real Time Control besturing op de kunstwerken in dit systeem te ontwerpen. Dit onderzoek is uitgevoerd op het kantoor van Witteveen+Bos in Deventer. Met dit onderzoek rond ik mijn studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente af.

Tijdens het onderzoek heb ik veel ervaring met het werken met Sobek opgedaan. Een heel nuttige ervaring waar ik hopelijk nog veel aan zal hebben in de toekomst. Het onderzoek is niet zonder de gebruikelijke haken en ogen tot stand gekomen. Het bleek erg moeilijk om met het model aan de slag te kunnen, hier is een groot deel van de tijd aan besteed. Maar na een lange periode is het dan toch gelukt om het model aan de praat te krijgen en konden eindelijk resultaten worden verkregen. De ervaringen die ik heb opgedaan met Sobek zijn een goede voorbereiding geweest voor het werken met modellen in de toekomst. Dit is iets wat ik ondanks de moeizame start toch vaker zou willen doen. Wat mij betreft was het dus een erg leerzame periode.

Op het kantoor van Witteveen+Bos heb ik het goed naar mijn zin gehad. Ik wil daarvoor mijn 2 kamergenoten, Sjoerd van der Wielen en Paul Roeleveld bedanken. Naast dat ze me altijd hebben geholpen was het ook altijd erg gezellig. Verder wil ik natuurlijk prof. ir. Eelco van Beek, ir. Ebbing van Tuinen en dr. ir. Hans Korving bedanken voor alle ondersteuning tijdens het onderzoek. In het bijzonder wil ik dr. ir. Denie Augustijn en ir. Erik de Bruine bedanken omdat zij mij het meest intensief hebben begeleid.

Natuurlijk wil ik ook graag mijn ouders, Karin en Rene bedanken voor alle ondersteuning tijdens mijn studie. Zonder die steun was het niet gelukt om zo ver te komen. En als laatste wil ik mijn vriendin Marieke Sloots bedanken voor alle ondersteuning tijdens mijn afstuderen, ik ben bijna klaar hoor!

Marcel van den Berg

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Problemen bij een zout Volkerak-Zoommeer	8
1.3	Doel.....	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Het Mark-Vliet Systeem.....	11
2.1	Stroomgebied en oppervlaktewater	11
2.2	Bodem en grondwater	12
2.3	Watervoorziening polders	14
2.4	Waterbalans	17
3	Zoutindringing	19
3.1	Zoutindringing bij schutsluizen.....	19
3.2	Maatgevend jaar.....	21
3.3	Doelcriteria	22
4	Sobek Model Beschrijving Model Witteveen+Bos (2008).....	24
4.1.1	Uitgangspunten en randvoorwaarden	24
4.1.2	Calibratie.....	27
4.2	Aanpassingen aan het model	27
4.2.1	Uitgangspunten en randvoorwaarden aangepaste model	28
5	Real Time Control	29
5.1	Definitie van Real Time Control	29
5.2	Sturingsopties	30
5.3	Real Time Control strategieën	32
5.3.1	Strategie 1: Geleidelijk openen van de sluizen en inlaat	32
5.3.2	Strategie 2: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet	33
5.3.3	Strategie 3: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet en sturen op zout	34
6	Modelresultaten	36
6.1	Uitgangssituatie.....	36
6.2	Referentie situatie	39
6.3	Real Time control strategieën	41
6.3.1	Strategie 1: Geleidelijk openen van de sluizen en inlaat	41
6.3.2	Strategie 2: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet	43
6.3.3	Strategie 3: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet en sturen op zout	45
6.4	Conclusies modelresultaten.....	48
7	Discussie	51
7.1	Modelonzekerheden	51
7.1.1	Discretisatie en calibratie model	51
7.1.2	Beperkingen model.....	51
7.1.3	Polderinlaat	52
7.1.4	(Numerieke) dispersie.....	52
7.2	Maatgevende factoren voor de zoutindringing	54
7.3	Evaluatie overige maatregelen	55
7.3.1	Peilbeheer Mark-Vliet systeem	55
7.3.2	Maatregelen bij de schutsluizen.....	56
7.3.3	Afvoer bovenstrooms meenemen	57
7.3.4	Verplaatsen inlaatpunten	57
7.3.5	Sluis bovensas	58
7.3.6	Stroomsnelheidsverhogende maatregelen bij Benedensas	58
7.3.7	Berging bovenstrooms.....	59
7.3.8	Model Predictive Control.....	59
7.3.9	Effecten van de overige maatregelen.....	60
7.4	Uitvoering en kosten.....	61
7.5	Inlaat Oosterhout of de Roode Vaart	62
7.6	Conclusies.....	63
8	Conclusies en aanbevelingen.....	64
8.1	Conclusies.....	64
8.2	Aanbevelingen.....	66
	Referenties	67
	Bijlagen.....	68
	Bijlage 1: Analytische oplossing zoutindringing (volledige menging).....	68
	Bijlage 2: Numerieke dispersie	69
	Bijlage 3: Rekenschema	72
	Bijlage 4: Dispersie coëfficiënt	73
	Bijlage 5: Berekening setpoints in Matlab strategie 2	74
	Bijlage 6: Chloride concentratie en peil Volkerak-Zoommeer.....	75
	Bijlage 7: Tabellen strategie 1.....	77
	Bijlage 8: Berekening setpoint in Matlab strategie 3	78
	Bijlage 9: Periodiciteit in de resultaten.....	79
	Bijlage 10: Neerslag en (werkelijke) verdamping in 1996	80
	Bijlage 11: Kwel- en wegzijgingskaart	81
	Bijlage 12: Inlaatdebieten naar de meest benedenstroomse polders	82
	Bijlage 13: Topografische kaart West-Brabant met belangrijke locaties.....	83

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Volkerak-Zoommeer heeft al jaren last van blauwalgen en waterkwaliteitsproblemen. Deze problemen hebben onder meer gevolgen voor de zoetwatervoorziening van West-Brabant en voor de recreatie op het meer. Juist in de zomer als er veel zoetwater nodig is, bloeien de algen in het meer op. De blauwalgen veroorzaken veel overlast, zeker als ze aan het eind van de zomer, als de temperatuur afneemt, beginnen af te sterven. Ze veroorzaken stankoverlast en scheiden giftige stoffen af. Hierdoor sterven vogels en vissen en is het water niet meer geschikt om voor de bereiding van drinkwater te gebruiken en minder geschikt als zoetwatervoorziening voor de landbouw. Ook is de positie van recreatie verslechterd omdat de blauwalgen schadelijk zijn voor de mens.

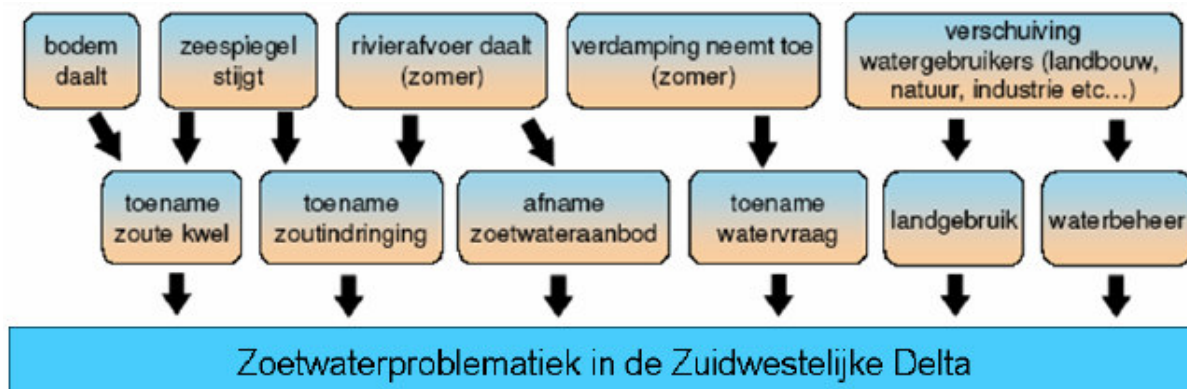
Om de blauwalgen problematiek op te lossen, is het Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak (BOKV) het Project Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer gestart, waarin verschillende oplossingsmogelijkheden zijn onderzocht. In het BOKV zitten het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselveiligheid, de provincies Zuid-Holland, Zeeland en Brabant, de waterschappen Brabantse Delta, Zeeuwse eilanden en Hollandse Delta en de gemeentes Tholen, Oostflakkee, Moerdijk, Reimerswaal, Schouwen-Duiveland, Bergen op Zoom en Steenbergen. Het doel van het project is de waterkwaliteit op de middellange termijn (2015) zodanig te verbeteren dat deze geen negatieve effecten meer heeft op de gebruiksfuncties van het meer. Dit is een vereiste vanwege de Kader Richtlijn Water. Op de lange termijn (2040) zal het Volkerak-Zoommeer zich moeten ontwikkelen tot een duurzaam, gezond functionerend ecosysteem.

De oplossing voor het blauwalgen probleem worden gezocht in twee verschillende richtingen, namelijk zoete en zoute alternatieven: (Projectorganisatie Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer (POWVZM), 2007):

- Doorspoelen: het doorspoelen van het meer vergroot de stroming en verkort de verblijftijd van het water waardoor er geen blauwalgen meer kunnen leven. Uit nader onderzoek is gebleken dat het doorspoelen van het Volkerak-Zoommeer met zoet water het probleem niet oplost (POWVZM, 2007).
- Zout Volkerak-Zoommeer: de blauwalgen kunnen niet leven in zout water en zullen dus verdwijnen waardoor de waterkwaliteit flink toeneemt. Om te voorkomen dat er andere algensoorten in het Volkerak-Zoommeer komen is het nodig om getijdendynamiek te introduceren. De waterkwaliteit zal nog iets toenemen omdat het nu voedselrijke Volkerak-Zoommeer zal worden doorgespoeld met voedselarm water vanuit het Hollands Diep.

Het zout maken van het Volkerak-Zoommeer is dus een kansrijke oplossing en deze oplossing sluit aan bij het huidige beleid. Projecten, zoals het Kierbesluit (Alterra, 2006), waarin de Haringvlietsluizen op een kier worden gezet, zijn erop gericht de natuurlijke zoet-zout overgangen in de Nederlandse delta te herstellen. Ook zal, afhankelijk van de grootte van de kier, de getijdendynamiek weer voor een gedeelte terugkeren in het Haringvliet. In het kader van de Integrale visie Deltawateren 'De delta in zicht' (Integrale visie Deltawateren, 2009) is het Volkerak-Zoommeer van cruciaal belang om de estuariene dynamiek te herstellen als overgangswater van rivier naar zee. Deze projecten zijn gestart naar aanleiding van de Kader Richtlijn Water, die Europese lidstaten verplicht om een goede ecologische en chemische toestand te bereiken voor alle oppervlaktewateren, uiterlijk 2015. De zoute varianten lossen de problemen voor de drinkwatervoorziening en de landbouw niet op.

Op het Volkerak-Zoommeer zal dus waarschijnlijk getijdendynamiek worden ingevoerd, waardoor het peil van het Volkerak-Zoommeer een veel grotere variatie dan nu zal gaan vertonen. Dit heeft natuurlijk ook gevolgen voor het Mark-Vliet systeem dat uitmondt op het Volkerak-Zoommeer. Het Volkerak-Zoommeer en het Mark-Vliet systeem zijn door sluisen van elkaar gescheiden. Hierdoor dringt het water van het zoute Volkerak-Zoommeer niet direct het Mark-Vliet systeem in. Vanwege de scheepvaart kan bij de schutsluisen zout water het Mark-Vliet systeem binnen dringen. Bij een (tijdelijk) hoger peil op het Volkerak-Zoommeer door het getij dan het peil in de boezem is spuien niet meer mogelijk. Zonder spuien is het terugdringen van de zoutindringing erg lastig. Door Deltares (2008) is onderzoek gedaan naar verschillende getijdenslagen, deze getijdenslagen kunnen gebruikt worden als uitgangspunt voor het Volkerak-Zoommeer bij deze studie. Verder spelen op de achtergrond andere problemen een rol bij de problematiek rondom zoutindringing. De klimaatverandering, de bodemdaling en de stijging van de zeespiegel zijn hier een voorbeeld van. In figuur 1 is te zien aan welke problemen gedacht kan worden en hoe deze een rol spelen in het grotere geheel van de zoetwaterproblematiek in de Zuidwestelijke Delta.



Figuur 1: oorzaken zoetwaterproblematiek in de Zuidwestelijke delta (Royal Haskoning, 2004).

1.2 Problemen bij een zout Volkerak-Zoommeer

Door de aanleg van de deltawerken is in 1987 het Volkerak-Zoommeer ontstaan, het meer ligt tussen de Volkerakdam, de Philipsdam en de Oesterdam in, zie figuur 2. Op dit moment is het Volkerak-Zoommeer een belangrijke zoetwaterbron, sinds de afdamming van het meer heeft het meer een functie als zoetwatervoorziening voor de landbouw in onder meer West-Brabant gekregen.

Indien het besluit wordt genomen om het Volkerak-Zoommeer opnieuw zout te maken, krijgen de rivieren in West-Brabant in de nabije toekomst te maken met zoutindringing. De landbouw is hier verontrust over want zij voorziet problemen met de zoetwatervoorziening. De boeren vrezen verliezen te leiden door de zoutindringing op het Mark-Vliet systeem. Zij willen dat het huidige voorzieningenniveau gehandhaafd wordt door het waterschap Brabantse Delta. Indien de maatregelen om het voorzieningenniveau op peil te houden aanzienlijke kosten met zich meebrengen is het de vraag wie voor deze kosten op moet draaien.



Figuur 2: Deltawerken in de Zeeuwse delta (bron: www.deltawerken.com)

Uit onderzoek is gebleken dat de chlorideconcentraties in de boezem net bovenstrooms van de sluizen bij een zout Volkerak-Zoommeer voor verschillende hydrologische jaren zullen variëren tussen de 2.000 en 9.000 mg/l (Witteveen+Bos, 2008). Zoutindringing kan leiden tot een overschrijding van de toelaatbare chlorideconcentraties bij de verschillende inlaatpunten van de polders langs het Mark-Vliet systeem. Uit hetzelfde onderzoek is gebleken dat de zoutindringing vooral bepaald wordt door de mate van doorstroming in het Mark-Vliet systeem. Dit is logisch omdat er zonder afvoer meer gelegenheid wordt geboden aan het zout om in te dringen. In het Mark-Vliet systeem zijn in de (droge) zomers vaak langere periodes aanwezig waarin het Mark-Vliet systeem bijna geen aanvoer van zoetwater heeft en de afvoer dus ook nagenoeg gelijk is aan nul, of zelfs de andere kant opstroomt.

Om de zoutindringing op het Mark-Vliet systeem en de daaraan gekoppelde problemen met de zoetwatervoorziening voor de polders op te lossen, is het noodzakelijk om het Mark-Vliet systeem door te spoelen met zoet water. Andere alternatieven om de zoutindringing tegen te gaan, zoals maatregelen bij de sluizen ter reductie van de chloride vracht, hebben op zichzelf onvoldoende effect (Witteveen+Bos, 2008). Verder is in hetzelfde onderzoek gebleken dat het overbruggen van de zoute periodes niet voor alle inlaatpunten een mogelijkheid is. Berging in de ondergrond is een optie, maar zal verder onderzocht moeten worden. Doorspoelen met zoetwater is dus waarschijnlijk de meest realistische compensatiemaatregel. Om het systeem voldoende door te kunnen spoelen is een extra aanvoer van zoetwater bovenstrooms van de inlaatpunten nodig. Door Witteveen+Bos (2008) is hier onderzoek naar gedaan, er is gebleken dat naast de al aanwezige inlaat bij Oosterhout een extra inlaat nodig is, voorgesteld wordt om deze te realiseren via de Roode Vaart bij Zevenbergen.

De onderzochte inlaat in de boezem via de Roode Vaart door Witteveen+Bos (2008) is misschien niet optimaal. Door slim te sturen en de mogelijkheden van het systeem optimaal te benutten kan er waarschijnlijk op de aanvoer van zoetwater bespaard worden. Er zou dan bijvoorbeeld op de dimensies van de benodigde aanvoerwegen bespaard kunnen worden waardoor de kosten van de aanvoer van de benodigde hoeveelheid zoetwater lager kunnen worden.

Een maatregel om de doorspoeling te optimaliseren en daarmee de zoutindringing te beperken is het gebruik van Real Time Control (RTC) bij de bediening van de kunstwerken in het systeem. Dit is tevens het onderwerp van dit onderzoek.

1.3 Doel

Het geschetste probleem levert het volgende doel op voor het afstudeeronderzoek:

Onderzoeken of de verhoging van de chlorideconcentraties in het Mark-Vliet systeem vanwege het zout worden van het Volkerak-Zoommeer, beperkt kan worden door verschillende Real Time Control strategieën te implementeren en te optimaliseren in Sobek, waardoor de systeemcapaciteiten van het Mark-Vliet systeem beter benut worden en er geen achteruitgang in de zoetwatervoorziening van de polders in West-Brabant t.o.v. de huidige situatie met een zoet Volkerak-Zoommeer plaatsvindt.

De hoofdvraag die beantwoord moet worden is of de systeemcapaciteiten van het Mark-Vliet systeem beter benut kunnen worden, zodat de chlorideconcentraties nabij de inlaatpunten van de polders, als gevolg van het zout worden van het Volkerak-Zoommeer, niet boven de vastgestelde grenswaarden komen, door gebruik te maken van Real Time Control sturing?

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het Mark-Vliet systeem beschreven. De peilen en afvoeren die over het algemeen op in het systeem voorkomen worden gegeven. De situatie betreffende de bodem en het grondwater in het stroomgebied van het systeem worden beschreven.

In hoofdstuk 3 wordt de zoutindringing besproken die optreedt als gevolg van het schutten. De sluizen die het Volkerak-Zoommeer van het Mark-Vliet systeem scheiden zijn de voornaamste bron van chloride in het systeem. Tevens wordt het meest maatgevende jaar voor de zoutindringing in de Mark-Vliet boezem bepaald en wordt besproken hoe de verschillende oplossingen met elkaar vergeleken kunnen worden.

In hoofdstuk 4 wordt het model besproken. Eerst worden de uitgangspunten en randvoorwaarden die bij deze modelstudie zijn gebruikt genoemd. Daarna worden de aanpassingen die aan het model zijn gedaan om de zoutindringing te kunnen modelleren en de Real Time Control module te kunnen gebruiken besproken. Onzekerheden die optreden bij het gebruik van een model om de zoutindringing te bepalen worden onderzocht.

In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op Real Time Control. Als eerst worden de mogelijkheden om te sturen gegeven. Daarna wordt de aanpak om de verschillende strategieën die zullen worden gebruikt te optimaliseren besproken. Daarna zal dieper op de verschillende strategieën worden ingegaan.

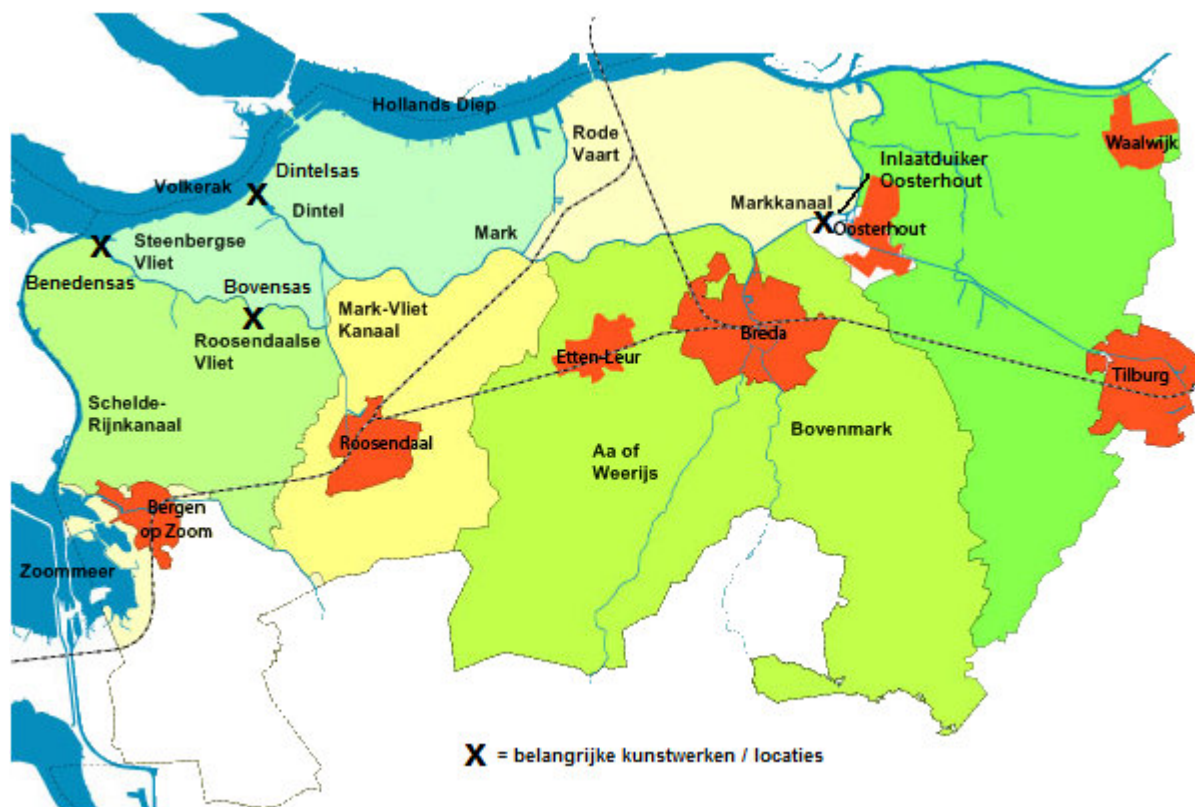
In hoofdstuk 6 worden de resultaten van de modelstudie gegeven en besproken. De chloride concentraties, peilen en afvoeren in de uitgangssituatie (geen maatregelen) en de referentie situatie (zoet water via de Roode Vaart) worden gegeven. Hiermee worden de strategieën onderling vergeleken.

In hoofdstuk 7 is de discussie over de onzekerheden in de resultaten te vinden. De verschillen tussen de strategieën worden besproken. Daarnaast worden andere alternatieve oplossingen bediscussieerd.

In hoofdstuk 8 zijn uiteindelijk de conclusies en aanbevelingen te vinden.



Figuur 3a: Volkerak-Zoommeer



Figuur 3b: Volkerak-Zoommeer, het Mark-Vliet systeem en aanliggende wateren (Waterschap Brabantse Delta, 2008)

2 Het Mark-Vliet Systeem

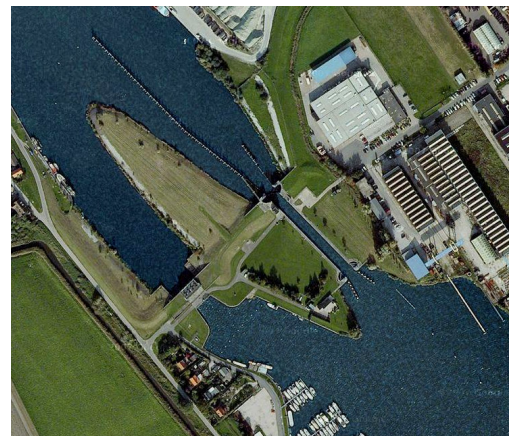
2.1 Stroomgebied en oppervlaktewater

Het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem is 140.000 ha groot. Het totale inlaatgebied van de Mark-Vliet boezem heeft een oppervlak van ca. 20.000 ha. Het grootste deel van dit inlaatgebied bestaat uit polders die worden gebruikt voor akkerbouw en veeteelt, verder is er veel fruitteelt en vollegrondstuinbouw aanwezig in het inlaatgebied.

Het Mark-Vliet systeem mondt uit in het Volkerak-Zoommeer, te zien in figuur 3a. Het Volkerak-Zoommeer bestaat uit 3 delen: het Volkerak (vroeger onderdeel van het Grevelingen), het Zoommeer (vroeger onderdeel van de Oosterschelde) en het Schelde-Rijnkanaal. De laatste verbindt het Volkerak met het Zoommeer. Het Mark-Vliet systeem mondt uit via de Steenbergse Vliet en de Dintel in het Volkerak, dit is te zien in figuur 3b. De Steenbergse Vliet heet bovenstrooms de Roosendaalse Vliet. De Dintel heet verder bovenstrooms de Mark. De Dintel (en de Mark) is met de (Steenbergse en Roosendaalse) Vliet verbonden via het Mark-Vliet kanaal. De Mark begint bij de grachtengordel van Breda, en ontstaat uit de Bovenmark en de Aa of Weerij die vanuit België komen. Ook is het mogelijk om via het Markkanaal water door de inlaatduiker bij Oosterhout vanuit het Wilhelminakanaal naar de Mark te voeren, zie figuur 4c. Het water uit het Wilhelminakanaal heeft vaak last van blauwalgen en bruinrot. Bruinrot is een ziekte die wordt veroorzaakt door een bacterie, de ziekte komt in Nederland meestal voor bij aardappelen. Blauwalgen en bruinrot maken het water minder geschikt om in te laten. Deze waterlopen zijn te zien in figuur 3b. Het geheel van deze rivieren vormt de boezem die de polders in West-Brabant voorziet van zoetwater. Een topografische kaart met de verschillende waterlopen en een aantal belangrijke locaties / kunstwerken is gegeven in bijlage 13.

De Steenbergse Vliet en de Dintel zijn respectievelijk bij Benedensas en Dintelsas aangesloten op het Volkerak. Meest zuidelijk mondt het systeem uit via de Steenbergse Vliet bij Benedensas en meer noordelijk via de Dintel bij Dintelsas. Deze locaties zijn weergegeven in figuur 3b. Er zijn 2 sluizen aanwezig op beide locaties, een spuisluis en een schutsluis. Bij Dintelsas de Vierlinghsluis en de Manderssluis, te zien in figuur 4a, bij Benedensas de Spuisluis Benedensas en de Schutsluis Benedensas, te zien in figuur 4b.

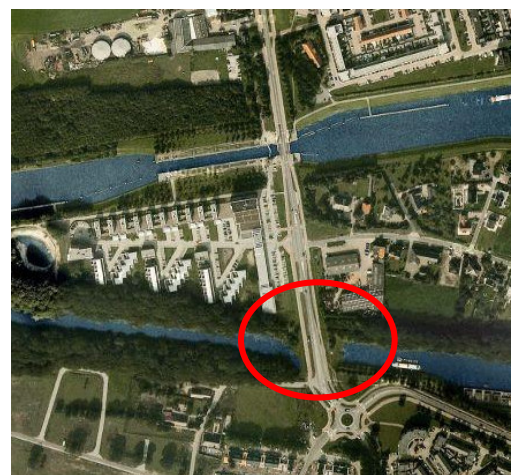
Verder bevindt zich nog een oude sluis bij Bovensas in de Roosendaalse Vliet. Deze sluis staat continu open maar heeft beperkte afmetingen. Het natte profiel van de sluis is veel kleiner dan het natte profiel van de Roosendaalse Vliet. Daarom is deze sluis van invloed op de waterstanden die optreden in de Vliet en het Mark-Vliet kanaal. In tabel 2 is de afvoer van de verschillende takken van het systeem en het peil dat in het systeem gehanteerd wordt weergegeven.



Figuur 4a: Spuisluis en schutsluis bij Dintelsas (bron: Google Earth Pro)



Figuur 4b: Spuisluis en schutsluis bij Benedensas (bron: Google Earth Pro)



Figuur 4c: Sluis en inlaatduiker bij Oosterhout, de inlaatduiker is rood omcirkeld (bron: Google Earth Pro)

2.2 Bodem en grondwater

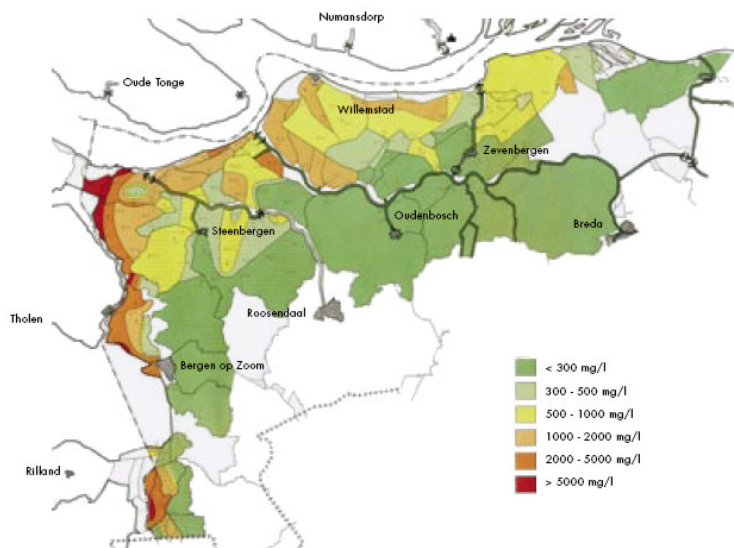
Het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem kan in 2 delen worden opgedeeld, een zandgebied en een zeekleigebied. De gebieden worden gescheiden door 'de naad van Brabant', die ongeveer begrensd wordt door de lijn Tilburg, Breda, Roosendaal en Bergen op Zoom.

In figuur 7 is te zien dat het zandgebied ten zuiden ligt van 'de naad van Brabant'. Het is een relatief hooggelegen en hellend gebied wat erg afhankelijk is van de regen. Het water wordt hier vastgehouden met stuwen in de beken. De aanvoer van bovenstrooms levert dus een belangrijke bijdrage aan de zoetwatervoorziening voor de polders in West-Brabant. De laatste tijd zijn er vooral bovenstrooms in de rivieren vanuit België veel stuwen bij geplaatst om het water langer vast te kunnen houden.

Ten noorden van 'de naad van Brabant' ligt een vlak klei gebied. In dit gebied is het moeilijk water aan te voeren, maar dat was sinds de komst van het Volkerak-Zoommeer geen probleem meer. Bij tekorten aan water in het systeem, wordt het water uit het meer gebruikt om de boezem op peil te houden, anders zou het peil in droge jaren behoorlijk kunnen zakken (Alterra, 2006).

In figuur 6 is te zien welke verschillende typen kwel aanwezig zijn in West-Brabant en welke richting deze hebben. Hieruit blijkt dat er vanuit het Volkerak kwel naar de polders in West-Brabant is, een zout Volkerak-Zoommeer zal dus gevolgen kunnen hebben in de vorm van (zoutere) kwel naar de aanliggende polders. Aangezien het Volkerak-Zoommeer in 1987 is ontstaan en daarna meteen zoet is geworden zal er nog zout water in de bodem aanwezig zijn. Het grondwater zal ondertussen een stuk zoeter zijn geworden maar dit zal langzaam weer zouter worden vanwege de infiltratie van water in de bodem vanuit het Volkerak-Zoommeer. De chloride concentraties in de polders net naast het zoute Volkerak-Zoommeer zullen dus waarschijnlijk toenemen. In hoeverre deze toenemen, is moeilijk in te schatten.

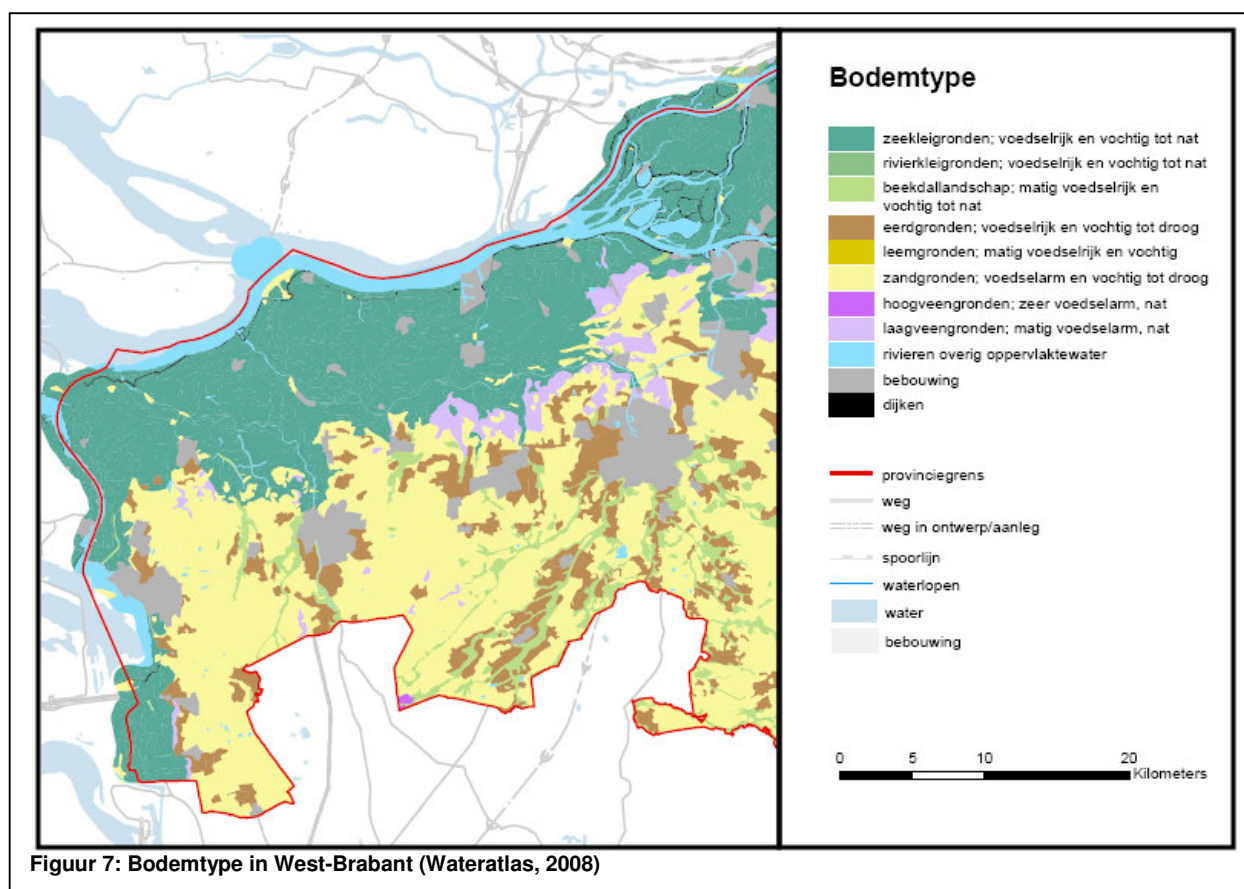
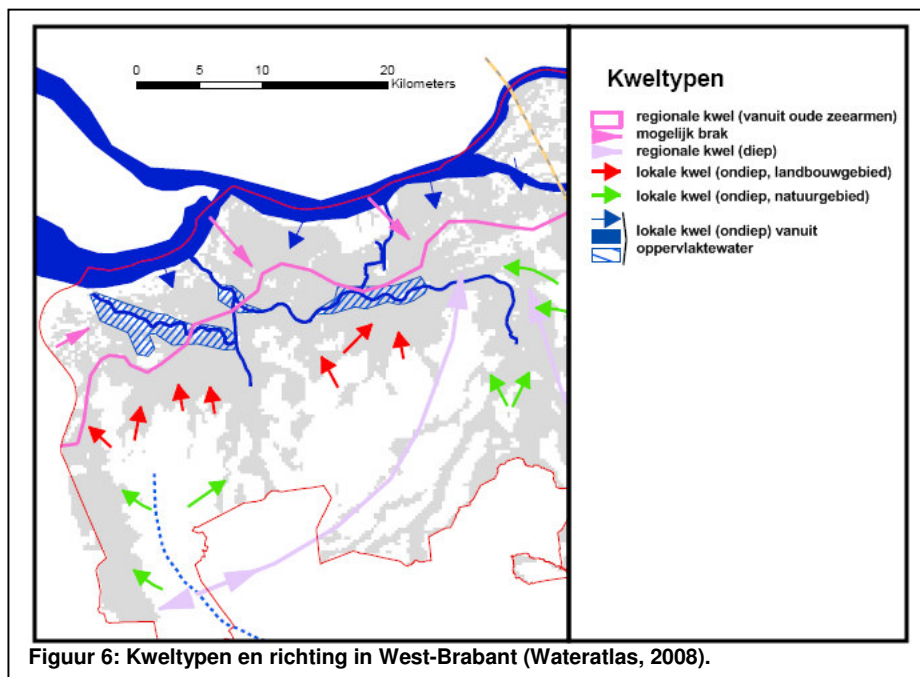
De Wateratlas (2008) geeft een overzicht van de chlorideconcentraties in de polders omstreeks 1950. Het beeld laat zien dat er een significante chlorideconcentratie aanwezig was in de polders tot bij inlaatpunt Kaas&Brood. In het geval het Volkerak-Zoommeer weer zout wordt kan een vergelijkbare situatie optreden.

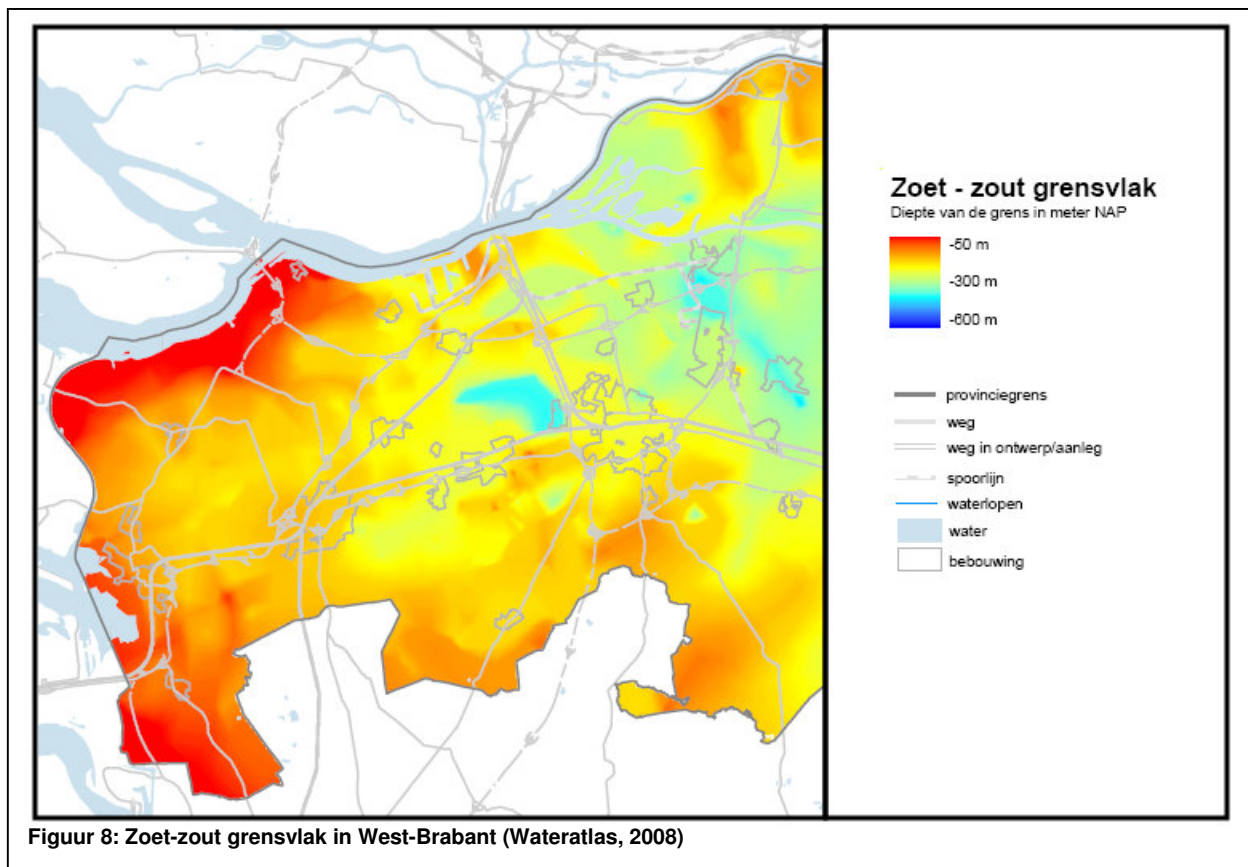


Figuur 5: Chloridegehalten in de polders in West-Brabant omstreeks 1950 (Wateratlas, 2008).

In sommige polders in West-Brabant komen gebieden voor met brak grondwater. De zoutbelasting door kwel naar het oppervlakte water is groter dan in bijvoorbeeld het Groene Hart. Hoeveel de brakke kwel in de polders toe zal nemen is erg afhankelijk van het besluit dat wordt genomen over de toegestane peilverschillen op het Volkerak-Zoommeer. In de situatie voor 1987, toen het Volkerak-Zoommeer nog zout was, kwam de brakke kwel voor in de polders gelegen westelijk van inlaatpunt Kaas&Brood, zoals te zien in figuur 5. De brakke kwel werd toen tegengegaan door het peil in de boezem op te zetten en de polders door te spoelen. Dit was een redelijk effectieve maatregel om deze brakke kwel tegen te gaan (Alterra, 2006).

In figuur 8 is de diepte te zien waarop het zoute water zit (zout is hier meer dan 1000 mg/l chloride). Het grensvlak ligt tussen de enkele tientallen en honderden meters diep. In het noordwesten komt het ongeveer tot aan de oppervlakte. Boven het grensvlak ligt nog een laag met brak grondwater, met chloride concentraties tussen de 150 en 1000 mg/l, deze laag is gemiddeld 60 meter dik. Hieruit blijkt dat in het meest Noordwestelijke deel van Brabant brak tot zout grondwater voor kan komen.





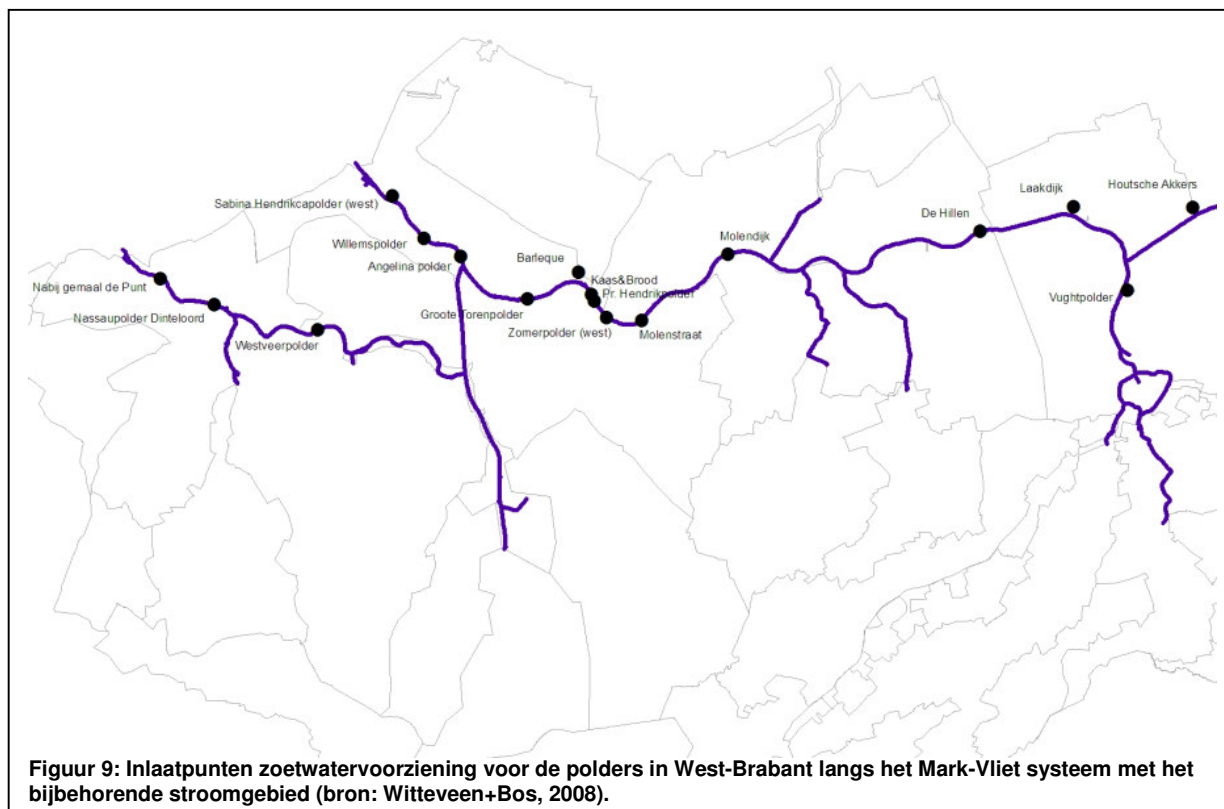
Figuur 8: Zoet-zout grensvlak in West-Brabant (Wateratlas, 2008)

2.3 Watervoorziening polders

De polders, die voornamelijk liggen in het zeekleigebied, hebben in de winter een grondwaterpeil dat meestal lager is dan dat van de omliggende gebieden die geen polders zijn. In de zomer wordt een hoger zomerpeil gehanteerd. In de zomer is het vaak nodig water in te laten, het neerslag tekort moet worden aangevuld om het hogere zomerpeil te kunnen handhaven. Om dit water naar de polders aan en af te kunnen voeren wordt de Mark-Vliet boezem gebruikt.

Er vindt onttrekking van zoetwater uit de boezem plaats via de inlaatpunten van de polders, deze zijn te zien in figuur 9. Dit water wordt gebruikt om de achterliggende polders van water te voorzien. Bij deze inlaatpunten is het dus van belang om de waterkwaliteit op orde te hebben. De hoeveelheid water en de kwaliteit daarvan die nodig is hangt af van het grondgebruik van de achterliggende polders. De grootte van de polders is bepalend voor de hoeveelheid water die gebruikt wordt, de oppervlakte van de polders is gegeven in tabel 1.

Door het Waterschap Brabantse Delta (Witteveen+Bos, 2008) is bepaald welke chlorideconcentraties acceptabel worden geacht voor de verschillende inlaatpunten. Elk inlaatpunt levert het water voor een achterliggende polder, van deze polders is bekend welk type landgebruik aanwezig is. Voor elk type landgebruik is bepaald welke chlorideconcentraties kunnen worden geaccepteerd. Het landgebruik met de laagste grenswaarde levert de grenswaarde kritisch grondgebruik op. De grenswaarde voor het overwegend grondgebruik kan hoger zijn in het geval dat de grenswaarde kritisch grondgebruik slechts voor een klein gedeelte van het oppervlak achter het betreffende inlaatpunt geldt. De waarden zijn gegeven in tabel 1.



Inlaatpunt	oppervlak (ha)	grenswaarde kritisch grondgebruik / overwegend grondgebruik (mg/l)	Gemiddelde inlaat zomer (1.000 m ³ /maand)	huidige chlorideconcentraties (mg/l)
Sabina Henricapolder	onbekend	250 / onbekend	140	300
Willemspolder	237	300 / 600	25	430
Angelina polder	46	300 / 600	4	300
Nabij gemaal de Punt	5017	300 / 600	212	430
Nassaupolder Dinteloord	78	300 / 600	8	350
Westveerpolder	91	300 / 600	11	430
Groote Toren polder	91	250 / 600	26	300
Barleque	560	300 / 600	44	300
Kaas & Brood	2755	250 / 600	598	70
Prins Hendrikspolder	3756	250 / 600	371	300
Zomerpolder	918	250 / 600	91	120
Molenstraat	21	250 / 250	1	50
Molendijk	81	250 / 600	7	50
De Hillen	2087	250 / 600	290	50
Laakdijk	2156	250 / 600	93	50
Vughtpolder	1717	250 / 1000	62	50
Houtsche akkers	1081	250 / 1000	171	50
Totaal	> 20692		2154	

Tabel 1: Voor de verschillende inlaatpunten: de oppervlakte van de achterliggende polders, de grenswaarde voor het kritisch grondgebruik (grondgebruik waarvan de acceptabele chlorideconcentratie het laagst is), het overwegend grondgebruik (grootse deel van het grondgebruik), de huidige chlorideconcentraties en de gemiddelde inlaat in de zomermaanden (Witteveen+Bos, 2008).

Oppervlakte water	Peil (min/max) [m +NAP]	Debiet [m ³ /s]
Volkerak-Zoommeer (zout met getijden dynamiek)	één variant van het peilbeheer is voornamelijk gebruikt in onderzoek Witteveen+Bos (2008), met een peil tussen –0,3 m +NAP en 0,3 m +NAP.	-
Volkerak-Zoommeer (huidige variant)	Rond NAP	-
Mark	Normaal minimaal -0,05 m +NAP en maximaal +0,25 m + NAP. Het streefpeil voor het systeem ligt rond NAP. Het hele Mark-Vliet systeem staat nog in open verbinding met huidige Volkerak-Zoommeer.	Het gemiddelde debiet in een droge zomer (met gebruik van inlaat bij Oosterhout) is 2,9 m ³ /s, in natte perioden kan dit oplopen tot boven de 100 m ³ /s.
Steenbergse / Roosendaalse Vliet	Ongeveer tussen de 0,05 m + NAP en 0,10 m + NAP.	Het gemiddelde debiet in de zomer met gebruik van inlaat bij Oosterhout is 1,2 m ³ /s
Dintelsas (Dintel)	Ongeveer NAP. Meestal net iets hoger. Streefpeil (iets boven NAP) van het systeem wordt hier ook gehanteerd.	In droge periodes geen afvoer. In natte periodes pieken van 100 m ³ /s of meer.
Aa of Weerij (voor de grachtengordel in Breda)	Peil beheert met stuwen, geen onderdeel van de boezem. De afvoer van deze rivier is de zoetwateraanvoer voor het boezemsysteem. De waterstand kan oplopen tot boven de 2m +NAP, maar het grootste deel van de tijd ligt deze rond 1m +NAP.	In droge periodes geen afvoer. In natte jaren kan de afvoer oplopen tot meer dan 35 m ³ /s.
Bovenmark (voor de grachtengordel in Breda)	zie Aa of Weerij	Droge periodes een hele lage afvoer (< 1 m ³ /s). In natte jaren kan het oplopen tot ongeveer 35 m ³ /s

Tabel 2: Debieten en peilen boezemsysteem en aangrenzende rivieren voor droge en natte periodes (Witteveen+Bos, 2008).

2.4 Waterbalans

Figuur 10 laat de waterbalans van het systeem zien. Het boezemsysteem is aangelegd om er voor te zorgen dat de polders van water kunnen worden voorzien door water in te laten. Dit water wordt gebruikt voor het peilbeheer van de polders of om de polders door te spoelen. In de waterbalans is de boezem als 1 bak geschematiseerd. Het peil van het Mark-Vliet systeem wordt beïnvloedt door de neerslag en de verdamping, de afvoer vanaf het bovenstrooms gelegen gedeelte van het stroomgebied en de inlaat vanuit Oosterhout en eventueel de inlaat vanuit de Roode Vaart.

Voor de waterbalans is van de neerslag en werkelijke verdamping gegeven in tabel 3 uitgegaan. De debieten van de neerslag en verdamping naar de verschillende bakjes zijn bepaald met de oppervlakte van de deelgebieden en de dagwaarden van de neerslag en verdamping. De kwel / wegzijging is vastgesteld in het Waterdoelenmodel West Brabant (Stroet et al., 2002) voor de verschillende deelstroomgebieden. Samen met de oppervlakte van deze deelstroomgebieden kan dan de totale kwel of wegzijging bepaald worden. Om de kwel naar de polders in het inlaatgebied te schatten is gebruik gemaakt van de kwel- en wegzijgingskaart in bijlage 11. Er is een inschatting gemaakt van de ligging van het inlaatgebied en de gemiddelde kwel in dat gebied is gebruikt voor de berekening van de kwel naar het inlaatgebied. Er is in bijlage 11 te zien dat er in de polders in West-Brabant duidelijk sprake is van kwel en dat er vooral veel wegzijging is in het gebied grofweg onder de lijn van Bergen op Zoom naar Breda.

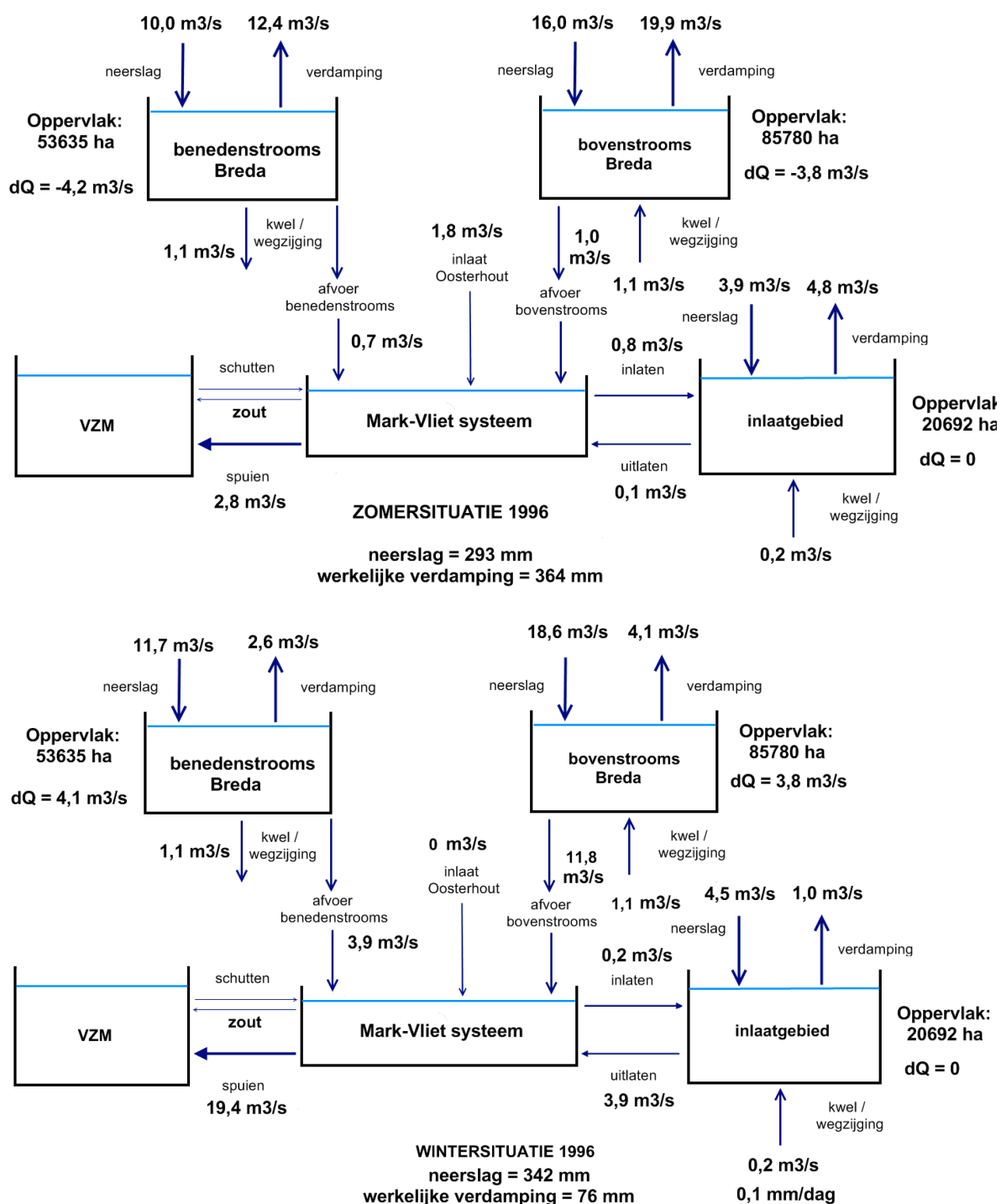
	zomer	winter	totaal
neerslag	293.4 mm	341.9 mm	635.3 mm
werkelijke evapotranspiratie	364.2 mm	75.7 mm	439.9 mm
potentiële evapotranspiratie	451.2 mm	94.1 mm	650 mm

Tabel 3: Neerslag en potentiële en werkelijke evapotranspiratie in 1996, de neerslag en potentiële evapotranspiratie zijn verkregen uit meetreeksen. De werkelijke evapotranspiratie is verkregen uit de resultaten van het model.

De inlaat bij Oosterhout is een meetreeks aangeleverd door het Waterschap. De inlaat en uitlaat naar het inlaatgebied, de afvoer van bovenstrooms en het debiet bij de spuisluizen zijn verkregen uit de resultaten van het model van het Mark-Vliet systeem. De gegevens in het model zijn gebaseerd op metingen en inschattingen van het Waterschap Brabantse Delta. Voor de afvoer van bovenstrooms is aangenomen dat het verschil tussen de in- en uitgaande debieten van het bakje Mark-Vliet systeem verklaard moet worden door deze afvoer.

Daarna is de stijging of daling van het grondwaterpeil in de bodem van de verschillende gebieden berekend, hierbij is rekening gehouden met de oppervlakte van de gebieden en de porositeit. Voor de porositeit is een waarde van 30% aangenomen. Voor het inlaatgebied, waarin het peil beheerst wordt is uitgegaan van een constant peil in de hele zomer of winter. In de andere gebieden stijgt het grondwaterpeil in de winter en daalt het in de zomer. In het gebied benedenstrooms van Breda daalt het grondwaterpeil gemiddeld iets meer dan 40 cm in de zomer, in de winter van 1996 stijgt het grondwaterpeil weer met ongeveer 40 cm. In het gebied bovenstrooms van Breda stijgt en daalt het grondwaterpeil 23 cm in respectievelijk de winter en de zomer.

De gevonden waarde voor de inlaat naar het inlaatgebied is een belangrijke post in de waterbalans. Deze is daarom vergeleken met de schattingen van het Waterschap Brabantse Delta. Het waterschap heeft de inlaat bij 4 van de 17 inlaatpunten bemeten, maar de data is zeer summier en onzeker. Het is dus moeilijk om met zekerheid te kunnen zeggen of het berekende inlaatdebiet bij de inlaatpunten correct is. De gevonden waarde komt in ieder geval goed overeen met de inschatting van het waterschap van $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ voor het gehele inlaatgebied. Uit tabel 1 blijkt dat de totale inlaat naar de polders van de inlaatgebieden gelijk is aan $2.154.000 \text{ m}^3/\text{maand}$. Dat komt ook neer op $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 10: Waterbalans van het Mark-Vliet systeem in een zomersituatie en een wintersituatie. In deze waterbalans is het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem opgedeeld in drie verschillende deelgebieden. 1 gebied van het stroomgebied bevindt zich bovenstrooms van de grachtengordel van Breda, de andere twee deelgebieden bevinden zich benedenstrooms van Breda. Dit gebied benedenstrooms van Breda is opgesplitst, 1 deel is het inlaatgebied van de boezem, het andere deel is de rest van het stroomgebied benedenstrooms van Breda. Het bakje genaamd Mark-Vliet systeem bestaat alleen uit de waterlopen van het systeem en daarom is de neerslag en verdamping op dit gebied verwaarloosd. De andere getallen uit deze waterbalans worden in deze paragraaf verder toegelicht.

3 Zoutindringing

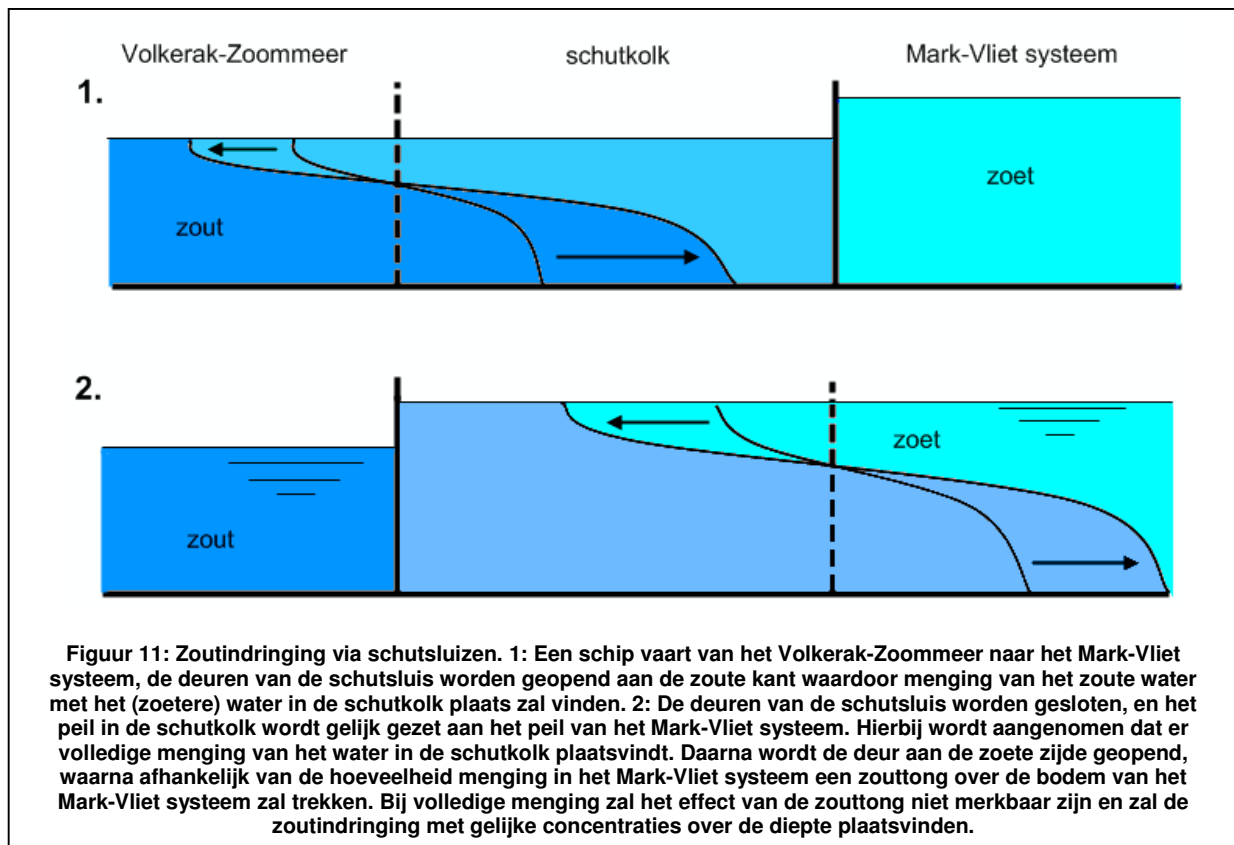
3.1 Zoutindringing bij schutsluizen

De zoutindringing in het Mark-Vliet systeem zal voornamelijk plaatsvinden doordat tijdens het schutten een hoeveelheid zout water het Mark-Vliet systeem binnenkomt. Een aantal zaken spelen een rol bij de zoutindringing en de modellering hiervan. Ten eerste speelt het schutregime een rol. Hoe vaak er wordt geschut, hoe lang daarbij de deuren openstaan en wat de afmetingen zijn van de schutsluis is van belang voor de mate van menging en de hoeveelheid zout die het systeem binnen komt. Ten tweede zal er enige mate van gelaagdheid optreden doordat zout water een andere dichtheid heeft dan zoet water, de mate van menging bepaalt of er nog gelaagdheid is. Ten derde speelt de (numerieke) dispersie vooral een belangrijke rol bij de modellering van de zoutindringing, deze bepaalt hoe snel en hoe ver het zout in het systeem dringt. Op deze zaken zal in deze paragraaf worden ingegaan.

Gedurende een schutting zal het water in de schutkolk worden gemengd met het zoutere water uit het Volkerak-Zoommeer. Wanneer de sluisdeuren aan de zijde van het Mark-Vliet systeem worden geopend zal het zoutere water uit de schutkolk mengen met het water uit het Mark-Vliet. Daarna zal afhankelijk van de hoeveelheid menging een zouttong over de bodem van het Mark-Vliet systeem trekken (Steenkamp, B.P.C et al., 2001). Dit proces is weergegeven in figuur 11.

De spui- en schutsluizen tussen het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer staan over het algemeen dicht. De spuisluizen worden gebruikt om het peil te reguleren en de schutsluizen staan alleen open als ze worden gebruikt voor de scheepvaart of als de spuisluizen niet voldoende afvoer kunnen genereren om het peil te reguleren. Dit komt heel over het algemeen voor in erg natte periodes in het voorjaar. De zoutindringing in het Mark-Vliet systeem vanuit het Volkerak-Zoommeer vindt voornamelijk plaats door te schutten. Aangezien er behoorlijk veel scheepvaart plaatsvindt op het systeem is het aantal schuttingen per dag vrij hoog. Het gaat vooral om recreatievaart, het aantal schuttingen in de zomerweekenden is dus het hoogst met 56 schuttingen per dag gemiddeld.

De chloride vracht op het systeem kan per schutting worden berekend door de totale vracht chloride in een schutsluis te vermenigvuldigen met een uitwisselingspercentage. Deze chloride vracht is bij Dintelsas het hoogst. De vracht kan berekend worden door de afmetingen van de schutkolk en de concentratie chloride in de schutkolk met elkaar te vermenigvuldigen. Als wordt uitgegaan van een gemiddelde concentratie van



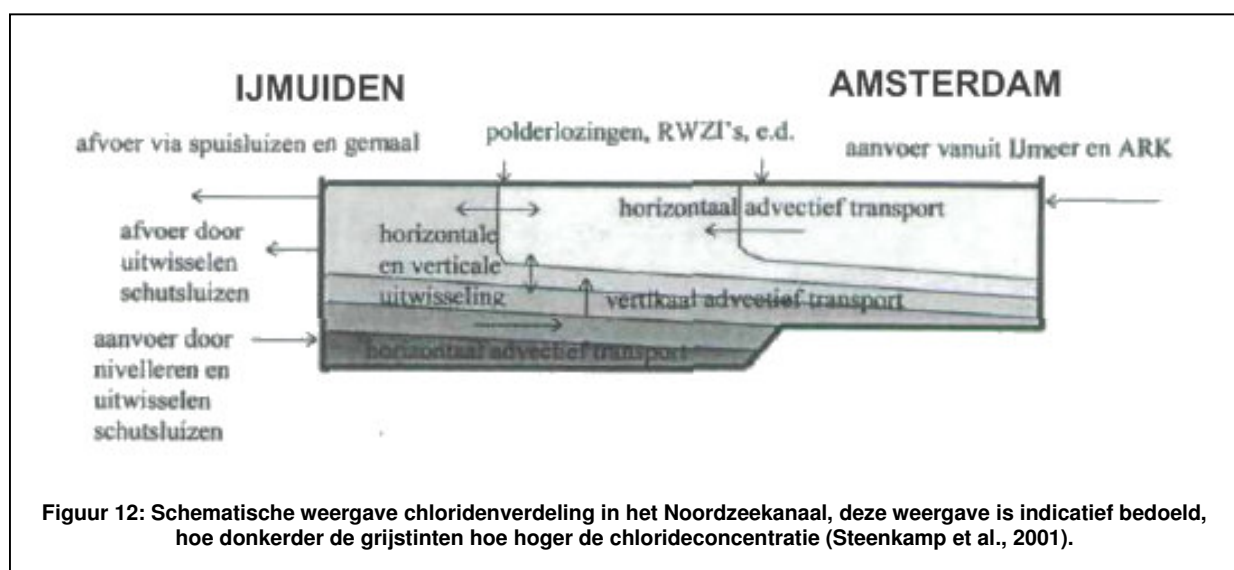
12.500 mg/l in de schutkolk, kan afhankelijk van de inhoud van de schutkolk de chloride vracht worden berekend. De schutkolk van de Manderssluis heeft een diepte van ongeveer 5 m, een breedte van 12 m en een lengte van 100 m, de inhoud is dus gelijk aan $5 \times 12 \times 100 = 6.000 \text{ m}^3$. Afhankelijk van de uitwisseltijd kan dan een uitwisselingspercentage worden bepaald. Voor de twee schutsluizen is dit uitwisselingspercentage bepaald door Deltares (Jongeling, 2007). Voor de Manderssluis in de Dintel is het uitwisselingspercentage vastgesteld op 54%, voor de Vierlingsluis in de Vliet is het uitwisselingspercentage vastgesteld op 12,5%. Dan is de chloride vracht per schutting van de Manderssluis (Dintel) dus gelijk aan $6.000 \text{ m}^3 \times 12,5 \text{ kg/m}^3 \times 0,54 = 40.500 \text{ kg}$. De Vierlingsluis (Vliet) heeft een inhoud van 10.000 m^3 , daarmee komt de totale chloride vracht per schutting uit op 15.625 kg. Het aantal schuttingen, van beide sluizen, is in de zomerweekenden gelijk aan 56 per dag, en doordeweeks in de zomer gelijk aan 15-25 per dag. In de winter wordt bij de Manderssluis vaker gesloten dan bij de Vierlingsluis, respectievelijk 10 en 1 keer per dag.

Afhankelijk van de hoeveelheid menging zal er gelaagdheid optreden tijdens het proces van de zoutindringing bij de schutsluizen. Doordat het zwaardere zoute water naar de bodem zakt, zal een laag met zouter water als een tong over de bodem van het Mark-Vliet systeem trekken. Deze gelaagdheid wordt ook wel stratificatie genoemd. In het Noordzeekanaal vindt ook zoutindringing plaats ten gevolge van schutten. Het inzicht in deze processen is verkregen door metingen (Steenkamp et al., 2001).

Drie processen spelen een rol bij het transport van chloride, namelijk advectie, dispersie en diffusie. Advectief transport is het transport veroorzaakt door de stroming van het water. Dispersief transport wordt veroorzaakt door verschillen in de stroomsnelheid (turbulentie). Diffusie vindt plaats als gevolg van concentratie verschillen, het transport als gevolg van diffusie in stromend water is over het algemeen gering ten opzichte van dispersief transport. Advectief transport is in stromend water over het algemeen het belangrijkste.

Op de bodem van het Noordzeekanaal vindt, vanwege de gelaagdheid, horizontaal advectief transport plaats van het zout. Bij zoutindringing is sprake van stroming in twee richtingen. Onderin beweegt de zouttong het Noordzeekanaal in (vanuit de zee). Bovenin stroomt het zoetere water in de richting van de zee. De zouttong komt op een gegeven moment tot stilstand omdat de helling van de tong te gering wordt en de component van de zwaartekracht die de tong om beweging zet gelijk is aan de kracht van de stroming waar de zouttong tegenin moet bewegen.

Onder de waterspiegel vindt horizontaal advectief transport van zout plaats in de richting van de waterstroming. Vanwege menging zal het zout zich ook verticaal over de waterkolom verspreiden. Deze verticale menging is een vorm van dispersief transport. Verder kan er nog horizontaal dispersief transport (ten gevolge van dispersie) en verticaal advectief transport worden onderscheiden. De chloride verdeling is weergegeven in figuur 12. Door verticale dispersieve menging neemt het zoutgehalte in de diepere delen van het Noordzeekanaal stroomopwaarts af. Verder wordt opgemerkt dat als gevolg van mengprocessen door bijvoorbeeld de scheepvaart en windschering de chloride verdeling in de bovenlaag nagenoeg homogeen is (Steenkamp et al., 2001).



Soortgelijke processen spelen ook een rol in het Mark-Vliet systeem, hoewel dit systeem veel minder diep is. Ter vergelijking, het Noordzeekanaal is ongeveer 16 meter diep bij IJmuiden en ongeveer 11 m diep bij Amsterdam. Het Mark-Vliet systeem is ongeveer 3 tot 5 meter diep. Verder is het Noordzeekanaal veel breder, namelijk ongeveer 250 tot 300 m breed. Het Mark-Vliet systeem is tot 50 m breed. In het Noordzeekanaal vindt veel scheepvaart plaats, daardoor is de menging in de bovenste laag tot ongeveer 6-8 m diep behoorlijk groot. Omdat de menging in deze laag behoorlijk groot is variëren de chlorideconcentraties niet veel over de diepte. Het Mark-Vliet systeem is minder diep en hier vindt ook veel scheepvaart plaats, maar wel minder dan in het Noordzeekanaal. Het is daarom aannemelijk te maken dat de invloed van de scheepvaart in het Mark-Vliet systeem dus tot de bodem zou kunnen reiken. In dat geval kan van volledige menging worden uitgegaan.

Het is dus van belang te onderzoeken wat voor scheepvaart op het Mark-Vliet systeem plaatsvindt zodat duidelijk wordt of de invloed van deze scheepvaart ook echt tot de bodem reikt. De scheepvaart op het Mark-Vliet systeem mag niet breder zijn dan maximaal 11,5 m en mag een diepgang hebben van maximaal 3 m. Verder bovenstrooms op de Mark mag de diepgang niet meer zijn 2,6 m en op de Dintel zelfs maar 1,4 m. Op het Mark-Vliet systeem vindt voornamelijk recreatievaart plaats met geringe diepgang en in mindere mate beroepsscheepvaart met een grotere diepgang. Gezien de geringe diepgang van de recreatievaart is het niet te garanderen dat er van volledige menging over de gehele waterkolom uitgegaan kan worden.

Voor dit onderzoek zal toch worden uitgegaan van volledige menging. Het model wat gebruikt wordt is een 1-dimensionaal model, het kan deze 2-dimensionale effecten niet modelleren. Daarom zal voor deze modelstudie wel moeten worden uitgegaan van volledige menging. Maar er kan niet stellig beweerd worden dat er van volledige menging uitgegaan kan worden. In het geval er geen volledige menging plaatsvindt, bevinden de hogere chloride concentraties zich onderin de waterkolom. Daarom is het aan te raden bij de inlaatpunten het water bovenin de waterkolom te gebruiken voor de zoetwatervoorziening. Bovenin de waterkolom zal het water waarschijnlijk zoeter zijn dan onderin de waterkolom.

3.2 Maatgevend jaar

De grootte van de zoutindringing die in het Mark-Vliet systeem plaats zal vinden wordt voornamelijk bepaald door 4 factoren. Het zijn de stroomsnelheid in de watergangen van het Mark-Vliet systeem (1), het aantal schuttingen van de sluizen (2) en de totale vracht per schutting (3) en de dispersie coëfficiënt (4) die voornamelijk van belang zijn voor de mate van zoutindringing in het systeem. Het aantal schuttingen, de totale vracht per schutting en de dispersiecoëfficiënt zijn gelijk door de jaren heen. De enige factor die variabel is, is dus de stroomsnelheid in het Mark-Vliet systeem, en deze is vooral afhankelijk van de weersomstandigheden. De (toekomstige) zoutindringing in het Mark-Vliet systeem en andere vergelijkbare systemen in Nederland varieert daarom sterk over de verschillende jaren.

Om het meest maatgevende jaar voor de zoutindringing te bepalen zullen verschillende 'verziltingsjaren' worden beoordeeld. Het jaar waarin de zoutindringing het hoogst is wordt het meest maatgevende verziltingsjaar genoemd. Bij de bepaling van het meest maatgevende jaar speelt de herhalingsstijd van verschillende gebeurtenissen een rol. Beersma et al. (2005) hebben in hun onderzoek deze zogenaamde verziltingsjaren bepaald, te zien in tabel 4. Voor deze verziltingsjaren zijn tevens de herhalingsstijden bepaald.

Verziltingsjaar	Karakteristiek	Herhalingsstijd (jaren)	
		Huidig (2005)	Toekomst (2050)
1976/1990	extreem zout	32.1	17.6
2003	zout	11.1	6.95
1996	gemiddeld zout	3.33	2.51
1994	brak	1.64	1.43
2002	matig brak	1.19	1.12

Tabel 4: Verziltingsjaren naar Beersma (2005).

Het door Beersma et. al. (2005) onderzochte gebied betreft de Rijn-Maas monding. In dit gebied is de chlorideconcentratie gemeten bij de Lekhaven in Rotterdam. De afvoer van de Rijn bij Lobith en de hoogwaterstanden bij Hoek van Holland zijn ook gebruikt voor het onderzoek. De verzilting bij de Lekhaven is ook afhankelijk van het getij, wat een verschil oplevert met de situatie in het Mark-Vliet systeem. Doordat er in het Mark-Vliet systeem schutsluizen aanwezig zijn is het peil van het Volkerak-Zoommeer niet van direct belang voor de mate van zoutindringing in het Mark-Vliet systeem.

Uit onderzoek door Witteveen+Bos (2008) is gebleken dat de verziltingsjaren weliswaar een belangrijke rol spelen voor de mate van zoutindringing, maar dat de duur van de droge periode vooral maatgevend is. De verziltingsjaren zijn maatgevend voor de chloride concentraties in het toekomstige zoute Volkerak-Zoommeer. Voor het Mark-Vliet systeem is de duur van een droge periode maatgevend voor de zoutindringing. Dit is logisch omdat er in een droge periode geen afvoer is door het Mark-Vliet systeem en dus ook een hele lage stroomsnelheid om de zoutindringing te beperken. Zo is gebleken dat voor de zoutindringing het gemiddeld zoute verziltingsjaar 1996 maatgevend zou zijn. In 1996 is er sprake van een lange relatief droge periode waarin er bijna geen afvoer is in het Mark-Vliet systeem. Daar komt bij kijken dat in 1996 de inlaat bij Oosterhout een behoorlijke periode niet is gebruikt. Er is dus lange tijd nagenoeg geen afvoer door het systeem waardoor de zoutindringing in dit jaar het grootst zou zijn. Daarom is gekozen om voor dit onderzoek uit te gaan van het jaar 1996.

3.3 Doelcriteria

Doelcriteria:

1. Zoutvracht naar de polders bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten (kg CL)
2. Maximale inlaatdebiet (m^3/s)
3. Totale hoeveelheid in te laten water (10^6 m^3)

De hierboven genoemde doelcriteria worden gebruikt om de verschillende alternatieven onderling af te wegen. Het doel van het onderzoek is het terugbrengen van de chloride concentraties nabij de inlaatpunten tot onder de grenswaarde door gebruik te maken van Real Time Control. Hiervoor zal het nodig zijn zoet water aan te voeren. Omdat er geen zoet water beschikbaar is zal dit water van buiten het systeem moeten worden aangevoerd. Dit brengt aanzienlijke eenmalige kosten met zich mee, die afhankelijk van de gekozen variant om het water aan te voeren kunnen oplopen tot 72 miljoen euro (Witteveen+Bos, 2008). Deze kosten kunnen lager uitvallen als blijkt dat door Real Time Control te gebruiken een kleinere hoeveelheid water nodig is. Op de exacte kosten in euro's voor de invoering van een Real Time Control besturing wordt niet ingegaan, daarom is het belangrijk om doelcriteria te vinden die maatgevend zijn voor deze kosten.

Het onderzoek gaat over de beperking van de zoutindringing in het Mark-Vliet systeem, met deze beperking moet de zoetwatervoorziening van de polders gegarandeerd kunnen blijven. Dit betekent concreet dat de chloride concentraties bij de inlaatpunten tot onder de grenswaarde moet worden gebracht. De vracht chloride naar de polders bij de meest benedenstroomse inlaatpunten is dus een belangrijke maat voor de effectiviteit van een oplossing. Dit is daarom een onderdeel van de doelcriteria. Er is gekozen om alleen de vracht chloride boven de 300 mg/l mee te nemen. Op deze manier wordt een beter onderscheid gemaakt tussen strategieën waarbij de chlorideconcentratie altijd beneden de 300 mg/l blijft en strategieën met kortstondige overschrijdingen van deze grenswaarde. Voor iedere tijdstap t en de 2 inlaatpunten i wordt, wanneer de chloride concentratie $Cl_i(t)$ groter is dan 300 mg/l, het inlaatdebiet $Q_{inlaat,i}(t)$ vermenigvuldigd met de concentratie chloride $Cl_i(t)$. De hieronder gegeven formule geeft dus het totaal van de chloridevracht boven de 300 mg/l van de 2 inlaatpunten.

$$Vracht_{CL} = \sum_{i=1}^{i=2} \sum_{t=20\text{ feb}}^{t=31\text{ sep}} (Cl_i(t) - 300) \cdot Q_{inlaat,i}(t) \quad \text{met } Cl_i(t) \begin{cases} = Cl_i(t) & \text{als } Cl_i(t) \geq 300 \text{ mg/l} \\ = 300 & \text{als } Cl_i(t) < 300 \text{ mg/l} \end{cases}$$

Hierin is $Vracht_{CL}$ de totale chloride (zout) vracht van alle chloride concentraties boven de 300 mg/l, $Cl_i(t)$ de concentratie chloride bij het betreffende inlaatpunt in mg/l en $Q_{inlaat,i}(t)$ het inlaatdebiet bij het betreffende inlaatpunt in l/dag. De vracht chloride met een concentratie beneden de 300 mg/l wordt in deze berekening niet meegeteld. Op deze manier wordt elke kg chloride die teveel wordt ingelaten naar de polders bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten meegeteld. Het is alleen schadelijk als water wordt ingelaten

met een chlorideconcentratie van boven de 300 mg/l. De totale vracht chloride zoals hierboven beschreven is dus een criterium dat maatgevend is voor de kosten van de landbouw.

Een andere onderdeel van de doelcriteria is de maximale hoeveelheid water die moet worden ingelaten (in m^3/s). Dit criterium is namelijk maatgevend voor de dimensies van de aan te leggen aanvoerroute van het zoete water en dus indirect ook voor de kosten van de aanleg hiervan. De waarde van de maximale inlaat kan uit het model worden verkregen nadat de verschillende te onderzoeken strategieën zijn doorgerekend. Via de inlaatduiker bij Oosterhout kan $7 \text{ m}^3/\text{s}$ gebiedsvreemd water worden ingelaten op dit moment. De inlaatduiker kan uitgebreid worden als daar behoefte aan is maar dat brengt kosten met zich mee. Als er dus een strategie is gevonden waarbij het nodig is om $15 \text{ m}^3/\text{s}$ water aan te voeren, dan is deze $15 \text{ m}^3/\text{s}$ maatgevend voor de kosten van de uitbreiding van de capaciteit. Er kan ook gedacht worden aan een uitbreiding van de capaciteit via een andere aanvoerroute, bijvoorbeeld de Roode Vaart.

Verder is de totale hoeveelheid gebiedsvreemd water die moet worden ingelaten een belangrijke maat voor de kosten en effectiviteit van de onderzochte strategieën. Dit criterium is een belangrijke maat voor de operationele kosten van het systeem.

Deze drie criteria zullen dus gebruikt worden als doelcriteria om de verschillende strategieën tegen elkaar af te wegen. Samen geven ze een beeld van de kosten voor de landbouw, de kosten om een strategie te implementeren (eenmalige uitvoeringskosten) en de operationele kosten. De beste strategie zal het laagst scoren op de verschillende criteria.

4 Sobek Model Beschrijving Model Witteveen+Bos (2008)

De huidige schematisatie van het Mark-Vliet systeem ontwikkeld door Witteveen+Bos is gebruikt als uitgangspunt voor de modelberekeningen. In Witteveen+Bos (maart, 2008) is een uitgebreide beschrijving van het model gegeven. Daarom zal het model in deze paragraaf alleen in hoofdlijnen worden besproken.

Het Mark-Vliet systeem is geschematiseerd in Sobek versie 2.10. Voor dit onderzoek zijn de verschillende strategieën doorgerekend met Sobek versie 2.11c. Het Sobek model bestaat uit een aantal verschillende modules. De modules die gebruikt worden in dit onderzoek zijn: de Rainfall Runoff (RR) module, de Channel Flow (CF) Module en de Water Quality (WQ) module. De Channel Flow module berekent de hydraulische condities van de waterlopen. Gedacht kan worden aan de waterdiepte, de stroomsnelheid en de afvoer. De RR module berekent de afwatering van de neerslag naar de waterlopen. De WQ module berekent de waterkwaliteit in de waterlopen afhankelijk van de hydraulische omstandigheden. De volledige schematisatie van het Mark-Vliet systeem is weergegeven in figuur 13a. Een gedeelte van de schematisatie is weergegeven in figuur 13b, de belangrijkste onderdelen van het model zijn hier beter te zien.

4.1.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden

Voor de studie wordt van de volgende uitgangspunten en randvoorwaarden uitgegaan, enkele hiervan worden na de opsomming toegelicht:

Uitgangspunten:

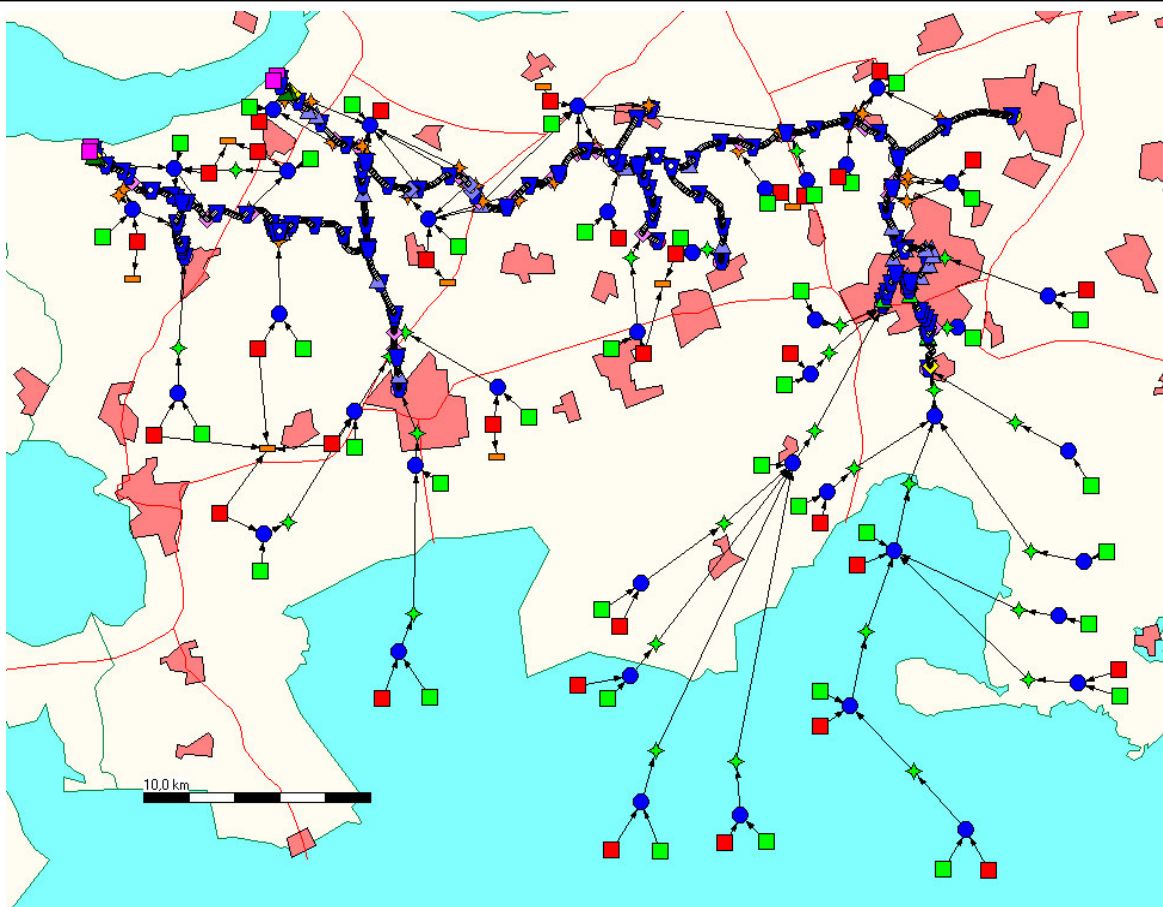
- Het model van Witteveen+Bos (2008) zal worden gebruikt als uitgangspunt van de studie, aan dit model zijn wel enkele aanpassingen gedaan die verderop in dit hoofdstuk zullen worden beschreven, de Sobek versie die gebruikt is bij het maken van het model is versie 2.10.
- Het jaar dat wordt onderzocht is het jaar 1996, de dagwaarden van de neerslag en de verdamping van dit jaar worden als randvoorwaarde aan het model opgelegd.
- Er wordt gekozen voor een tijdstap van 5 minuten in de model berekeningen van de Channel Flow module, en een ruimte stap van 50m. Voor de berekeningen met de waterkwaliteitsmodule is een tijdstap van 30 seconden gebruikt.
- Het gebruik van de schutsluizen voor de scheepvaart zal niet worden aangepast. De scheepvaart is een randvoorwaarde en het aantal schuttingen / schutmomenten worden dus niet aangepast.
- De dispersiecoëfficiënt is gelijk gesteld aan $3 \text{ m}^2/\text{s}$, zoals door Witteveen+Bos (2008) bepaald.
- Het scenario voor het Volkerak-Zoommeer is het scenario N15, variant1_100% (Deltares, 2008).
- Als rekenschema voor het model is gekozen voor de 'fully implicit iterative method'.
- Vanuit België stromen de Aa of Weerij en de Bovenmark Nederland binnen. Door middel van een neerslag-afvoer modellering worden ook de randvoorwaarden van de instroming vanuit België bepaald.

Bovenstroomse randvoorwaarden:

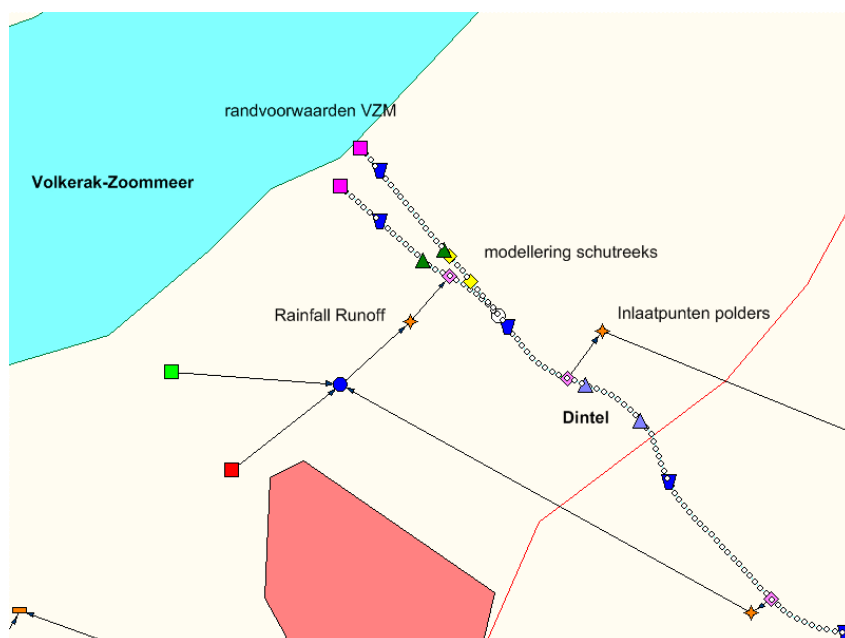
- De inlaat bij Oosterhout is gemeten (in het jaar 1996) en deze is voor de uitgangssituatie aan het model opgelegd. Ook de chloride concentratie is gemeten en als randvoorwaarde opgelegd. Zie verder in paragraaf 4.2.5.

Benedenstroomse randvoorwaarden:

- Volkerak-Zoommeer; de chlorideconcentraties van het VZM zoals berekend door Deltares (2008) worden als randvoorwaarde opgelegd, deze variëren door het jaar heen maar hebben in de zomer een waarde van maximaal 13.000 – 14.000 mg/l. Het peil van het Volkerak Zoommeer bij de monding van de Dintel varieert tussen de $-0,3 \text{ m} + \text{NAP}$ en $0,3 \text{ m} + \text{NAP}$, bij de monding van de Vliet tussen de $-0,35 \text{ m} + \text{NAP}$ en $0,35 \text{ m} + \text{NAP}$.
- De vracht chloride die per schutting in systeem komt is afgeleid door Witteveen+Bos (2008). Zie paragraaf 3.1.



Figuur 13a: Volledige schematisatie van het model



Figuur 13b Belangrijke onderdelen in de Sobek modellering. Het Volkerak-Zoommeer bevindt zich linksboven. De groene driehoeken zijn de sluizen. De roze vierkanten zijn de randvoorwaarden van het Volkerak-Zoommeer opgelegd aan het model. De Rode en groene vierkanten stellen respectievelijk de verharde en onverharde oppervlaktes voor. Een oranje ster is een pompstation (gebruikt door de Rainfall Runoff module) en een blauwe cirkel stelt open water voor. Een roze (maar nu gekanteld) vierkant is een connection node, waar de waterloop en de neerslag afvoer module bij elkaar komen. De gele vierkanten zijn de laterale in- en afstromingen gebruikt om de schuttreksen te modelleren.

Neerslag en verdamping

Voor de neerslag zijn meetreeksen gebruikt van de werkelijke neerslag in de verschillende jaren bij het meetstation in Oudenbosch. Deze meetreeksen worden toegepast op het hele stroomgebied. Voor de verdamping zijn ook meetreeksen met dagwaarden gebruikt. Het model houdt rekening met het verschil tussen werkelijke en potentiële verdamping. In bijlage 10 is een grafiek te zien met de dagwaarden voor de neerslag en de (werkelijke) evapotranspiratie.

Schutreeksen

Voor de twee schutsluizen zijn schutreeksen opgesteld. Hiervoor zijn verschillende aannames gedaan. Bij ieder schutting staan de deuren 5 minuten open. Dit heeft niet te maken met de gekozen tijdstap in het model maar dit bepaald het uitwisselingspercentage. Het aantal schuttingen per dag is bepaald voor de verschillende seizoenen, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de weekenden en werkdagen. Met de uren waarin de schutsluis operationeel is, is ook rekening gehouden.

Omdat een schutsluis niet een standaard object is in Sobek is een schutting gemodelleerd door een laterale instroming met een bepaalde chlorideconcentratie. De chlorideconcentratie is gelijk aan de chlorideconcentratie van het Volkerak-Zoommeer. Het debiet is zo bepaald dat de totale vracht aan chloride die het systeem binnenkomt per schutting overeen komt met de berekende vracht. Bij de berekende werkelijke vracht is rekening gehouden met het volume water in de schutsluis en een uitwisselingspercentage aan de hand van de uitwisseltijd. Het uitwisselingspercentage beïnvloedt de hoeveelheid chloride die uitgewisseld wordt met het water uit het Mark-Vliet systeem bij een schutting.

Omdat de totale hoeveelheid water toe zou nemen, als alleen een laterale instroming in het model zou worden ingevoerd, is er ook een laterale uitstroming met hetzelfde debiet in het model meegenomen. Deze uitstroming is ongeveer 200m benedenstrooms van de instroming geplaatst. Hierdoor blijft de totale hoeveelheid water in balans terwijl de uitwisseling van zout wel wordt gemodelleerd. De laterale instromingen en uitstromingen zijn te zien in figuur 13b, de gele ruiten geven de locaties aan.

Volkerak-Zoommeer

Het Volkerak-Zoommeer heeft door de jaren heen een verschillende concentratie chloride en een verschillend peil. Voor de jaren tussen 1990 en 2006 zijn reeksen met het peil en de chloride concentraties opgesteld door Deltares. De reeksen bestaan uit waterstanden (ieder uur) van het Volkerak-Zoommeer en chlorideconcentraties (over het algemeen voor iedere 6 uur)

Omdat het Volkerak-Zoommeer op twee plaatsen is verbonden met het Mark-Vliet systeem, namelijk bij Dintelsas en Benedensas, zullen twee verschillende randvoorwaarden opgelegd worden aan het model. Eigenlijk worden deze randvoorwaarden zelfs vier maal opgelegd omdat het Volkerak-Zoommeer op de 2 verschillende locaties via een schut- en een spuisluis is verbonden met het Volkerak-Zoommeer. Opgemerkt wordt dat de chlorideconcentraties (en in lichtere mate het peil) van het Volkerak-Zoommeer verschillen tussen de locaties Dintelsas en Benedensas, hiermee is rekening gehouden in het model.

Rekenschema

Om te kunnen sturen op waterkwaliteit zullen de gegevens van de waterkwaliteitsmodule tijdens het doorrekenen beschikbaar moeten zijn. Daarom zal de waterkwaliteits module parallel aan de andere modules moeten worden doorgerekend.

Wanneer de verschillende Sobek modules parallel worden doorgerekend zijn er slechts twee rekenschema's beschikbaar. Dit zijn de 'fully implicit iterative method' en de 'fully implicit direct method'. Vanwege de effectiviteit van de 'fully implicit iterative method' wordt voor deze methode gekozen. De rekentijd is namelijk aanzienlijk korter bij gebruik van deze methode in plaats van de 'fully implicit direct method'.

Inlaat bij Oosterhout

Voor de verschillende jaren zijn de meetreeksen van de inlaat bij Oosterhout gebruikt. Voor nu is de inlaat een randvoorwaarde van het model. De inlaat is ook gemodelleerd als een laterale instroming. De meetreeks van de instroming bestaat uit gemiddelde waarden voor iedere dag van het jaar.

4.1.2 Calibratie

Het model is gecalibreerd door Witteveen+Bos (2008-2) op de volgende parameters:

- weerstand waterlopen: Manning coefficient van $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- afvoercoëfficiënt stuwen: afvoercoëfficiënt 1,1 [-]
- drainagefactoren onverhard gebied: verschillend [dag]
- bergingsfactoren onverhard gebied: afhankelijk van bodem type
- drooglegging hellend gebied: 1,5m
- kweldruk Belgisch gebied: 1,0 - 1,1mm/dag

Het model is gecalibreerd voor de jaren 2003, 2006 en 1994. Het model bleek vooral geschikt voor droogtestudies, de waterstanden en peilen worden goed berekend tot aan het eind van de zomer de verschillende jaren waarop de calibratie is gebaseerd. Na de zomer worden de afvoeren en peilen overschat. De grove modellering van het Belgische deel van het stroomgebied leidt tot deze grote afwijkingen in het najaar. De zoutindringing is vooral een probleem in droge periodes, waardoor het model dus geschikt is voor deze studie.

4.2 Aanpassingen aan het model

Een aantal aanpassingen zijn noodzakelijk geweest voor het goed functioneren van het model met de RTC- en waterkwaliteitsmodule parallel aan elkaar. Alle aanpassingen die aan het model zijn gedaan, zijn in deze paragraaf beschreven.

Begrenzing model

De grenzen van het model worden aangepast, alle onderdelen van het model net bovenstrooms van de grachtengordel van Breda worden verwijderd.

Verwijderen Rainfall Runoff Module

Om het model sneller te laten rekenen is als eerste de Rainfall Runoff (RR) module verwijderd. Aangezien de RR module de afwatering van de neerslag op het stroomgebied naar het boezemsysteem toe modelleert zal dit op een andere manier moeten worden verwerkt. Op verschillende locaties komen de takken van de RR module op de boezem uit. Op al deze locaties is de 5 waarde van de afvoer van deze takken opgeslagen. De debieten berekend door de RR module zijn als laterale instromingen, op de locaties waar de takken van de RR module op de boezem uitkomen, gemodelleerd. Zo wordt de neerslag/verdamping en de inlaat/uitlaat naar de polders gemodelleerd. Het voordeel van deze stap is dat het model een module minder nodig heeft. Er wordt aangenomen dat bij een constant peil de afwatering van de Rainfall Runoff module en de inlaat naar de polders gelijk blijft. Hierdoor hebben maatregelen op bijvoorbeeld de afvoer in het systeem geen effect op de inlaat en uitlaat naar de polders of de afwatering van de neerslag naar het systeem.

Omdat het model is verkleind tot alleen het gedeelte bovenstrooms van de grachtengordel van Breda moeten hier enkele aanpassingen worden gedaan. De neerslag en verdamping op de deelstroomgebieden in België leveren de randvoorwaarden voor de afvoer vanuit België op. De totale afvoer van de takken van de RR module die uitkwamen op het deel van het Mark-Vliet systeem wat is verwijderd is als randvoorwaarde voor de afvoer genomen.

Dispersie sluizen

Tijdens het onderzoek is gebleken dat in de het oorspronkelijke model de schut- en spuisluizen geen volledige barrière voor de zoutindringing zijn, terwijl ze wel een volledige barrière voor het water zijn. Bij het bekijken van de resultaten bleken de chloride concentraties aan beide kanten van een sluis altijd nagenoeg gelijk te zijn terwijl bij de gesloten schutsluizen toch grote verschillen in de chloride concentratie verwacht mag worden. Door de werking van de waterkwaliteitsmodule, heeft chloride een dispersieve uitwisseling door de sluizen heen, zelfs als de sluizen dicht zijn.

De waterkwaliteitsmodule van Sobek maakt voor de berekeningen van de chloride concentraties gebruik van zogenaamde Controle Volumes. Een Controle Volume ligt tussen twee rekenpunten van het model, en heeft een inhoud gelijk aan de inhoud van het stuk van de waterloop dat is geschematiseerd. Het water in een Controle Volume wordt volledig gemengd verondersteld. Het is niet mogelijk een structure (een sluis is een bepaald type structure in Sobek) op de rand van deze Controle Volumes te zetten. Hierdoor wordt al het water in een Controle Volume (met de sluis ergens in het midden) dus gemengd. Dit heeft als gevolg dat een structure geen volledige barrière is voor zoutindringing (voor het water zelf is de sluis wel een barrière,

aan beide zijden van de sluis worden verschillende peilen berekend). Om dit probleem op te lossen is de dispersie lokaal op nul gezet rond de sluizen. Het effect van de aanpassing bleek overigens mee te vallen omdat de verspreiding van zout door de stroming van het water vele malen groter is dan de verspreiding van zout door dispersief transport. Ook is er sprake van dispersief transport in twee richtingen, het chloride zal dus niet alleen door de sluizen het systeem intrekken, het zal ook door de sluizen het systeem verlaten.

Zijtakken

Enkele zijtakken van het Mark-Vliet systeem zijn verwijderd om het model iets sneller te maken. De Leursche Haven en de Laaksche Vaart zijn hier voorbeelden van. Hierdoor heeft het model een flink aantal rekenpunten minder en wordt de berekening sneller. Wanneer een of meerdere takken van de RR module op deze zijtakken uitkomen is het debiet van de RR module als laterale instroming ter plaatse van waar deze zijtakken op het systeem uitkomen genomen.

Inlaat bij Oosterhout

De inlaat bij Oosterhout is in de oorspronkelijke versie van het model een randvoorwaarde. Deze randvoorwaarde is gedefinieerd door middel van een reeks met de werkelijke waarden van de inlaat voor het jaar 1996. Omdat de inlaat bestuurbaar moet worden is deze aangepast. Er is gekozen om hiervoor een sluis te gebruiken. De openingshoogte van de sluis kan naar behoefte bestuurd worden en zo kan een afvoer worden gegenereerd. Aan de kant van het Wilhelmina Kanaal is er gekozen voor een voldoende hoog peil van 1 m +NAP zodat er gegarandeerd van deze inlaat gebruik gemaakt kan worden. In werkelijkheid is het peil lager maar omdat er eventueel voor gekozen kan worden om een gemaal te gebruiken is er gekozen voor een voldoende hoog peil.

RTC module en Matlab koppeling

Als laatste is de Real Time Control Module toegevoegd. Deze zal in het volgende hoofdstuk worden besproken. In Sobek is het mogelijk om een eenvoudige Real Time Control besturing in te voeren maar deze mogelijkheden zijn beperkt. Voor een nauwkeurige besturing van de kunstwerken is het aan te raden om de koppeling tussen Sobek en Matlab te gebruiken, behalve als heel simpele besturingsregels bedacht kunnen worden. Matlab geeft de flexibiliteit die noodzakelijk is bij de berekening van de setpoints voor ingewikkeldere besturingsalgoritmes.

4.2.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden aangepaste model

Omdat er een aantal nieuwe uitgangspunten en randvoorwaarden gelden vanwege de aanpassingen aan het model zullen deze hieronder worden gegeven.

Uitgangspunten:

- Er wordt gekozen voor een tijdstap van 5 minuten in de model berekeningen van de Channel Flow module, en een ruimte stap van 50m. Omdat de berekeningen van de waterkwaliteitsmodule parallel lopen met de berekeningen van de Channel Flow module moet voor dezelfde worden gekozen. Voor de berekeningen met de waterkwaliteitsmodule is dus ook een tijdstap van 5 min gebruikt. Deze grotere tijdstap heeft nauwelijks invloed op de resultaten van het model.
- De dispersie coëfficiënt is gelijk aan $3 \text{ m}^2/\text{s}$ voor het gehele model, behalve bij de spui- en schutsluizen, daar is de dispersie lokaal op 0 gezet.
- De inlaat en uitlaat naar het inlaatgebied blijft hetzelfde bij de verschillende te implementeren strategieën. Er wordt aangenomen dat het peil constant blijft en dat daarom de inlaat en uitlaat niet zal veranderen.
- De inlaat bij Oosterhout is geen randvoorwaarde meer, er zal gestuurd worden met deze inlaat.

Bovenstroomse randvoorwaarden:

- Het meest bovenstroomse punt van het model, tussen de plaats waar de Mark en het Markkanaal bij elkaar komen en de grachtengordel van Breda, heeft als randvoorwaarde het debiet gekregen van de Rainfall Runoff module van alle verder bovenstrooms gelegen Rainfall–Runoff bakjes. Voor de zijtakken die zijn verwijderd in het aangepaste model is hetzelfde aangenomen.
- De chlorideconcentratie bovenstrooms van Breda is gelijk aan de chlorideconcentratie bepaald aan de hand van de maandwaarden van de chlorideconcentratie van de Bovenmark en de Aa of Weerij.
- De RWZI bij Chaam is verwaarloosd, deze had een heel lage afvoer naar het systeem met een relatief lage chloride concentratie.

5 Real Time Control

In dit hoofdstuk wordt Real Time Control nader toegelicht en zullen de verschillende mogelijkheden om te sturen worden besproken. Er zal ook worden ingegaan op de verschillende Real Time Control strategieën die gebruikt kunnen worden en de aanpak om deze te optimaliseren.

5.1 Definitie van Real Time Control

Volgens de Technische Commissie Real Time Control (TC-RTC, g.d.) is Real Time Control (RTC) het ingrijpen op het verloop van de processen in een watersysteem door middel van de regelbare kunstwerken in dat watersysteem. Letterlijk betekent RTC het regelen van een grootte op basis van actuele gemeten informatie. Een RTC-systeem is de hard- en software die nodig is om de instellingen van de regelkunstwerken te bepalen en te realiseren.

Volgens Brouwer (2005) zijn er meerdere methoden in het operationele waterbeheer om een (water)systeem te beheersen, waarvan feedforward en feedback control de belangrijkste zijn. Een feedforward beheers systeem baseert de te ondernemen acties op een gemeten verstoring. Bijvoorbeeld de regen op een bepaald watersysteem of de inkomende afvoer van een watersysteem. Voordeel is dat feedforward anticipeert op veranderingen en snel reageert. Nadeel van deze methode is dat feedforward control alleen op bekende verstoringen anticipeert, en dat het erg gevoelig is voor systeemveranderingen. Een aanpassing van het systeem zal grote gevolgen hebben, ook een niet bekende verstoring, bijvoorbeeld inlaat van water uit een stroomgebied wat niet is gemodelleerd bij het implementeren van het feedforward systeem, zal geen reactie van het feedforward systeem opleveren. Het houdt geen rekening met wat er in werkelijkheid gebeurt (wat er wordt gemeten) in het systeem.

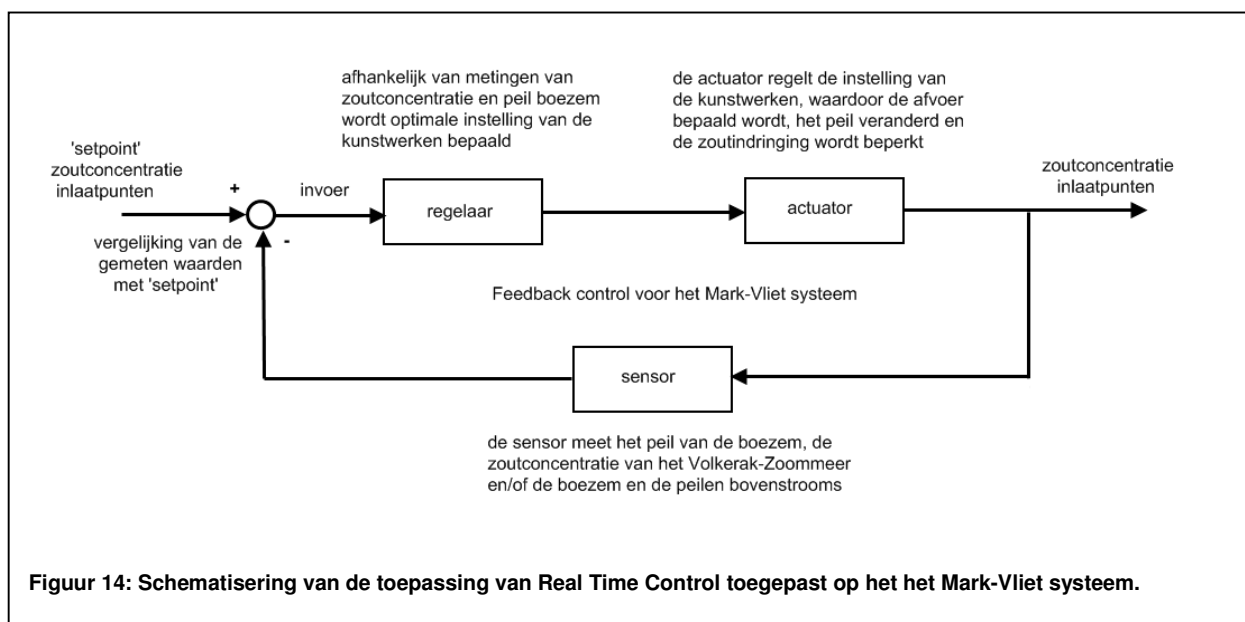
Een andere beheersmethode is feedback beheersing. In dit geval worden de te ondernemen acties gebaseerd op wat er in werkelijkheid gebeurt in het systeem. Feedback control wordt ook Real Time Control genoemd. Wat er gebeurt in het systeem wordt gemeten, en dat wordt vergeleken met 'set point', de gewenste situatie. Hierop worden de regelacties gebaseerd, waarna de uitvoer weer gemeten wordt en vergeleken. Een simpel voorbeeld van een Real Time Control systeem is de thermostaat van de kamertemperatuur, met de gewenste temperatuur je set point, deze wordt vergeleken met de echte temperatuur en als het te koud is slaat de verwarming aan. Voordeel van Real Time Control is dat er vrij precies gestuurd kan worden, omdat het niet gevoelig is voor veranderingen in het systeem en omdat elke verandering, ongeacht zijn oorzaak, gecorrigeerd kan worden. Nadeel is dat er niet wordt geanticipeerd op veranderingen en dat er soms instabiliteit optreedt. Als blijkt dat er niet goed geregeld kan worden met alleen Real Time Control (feedback control) kan dit gecombineerd worden met feedforward control (Brouwer, 2005).

De definitie van Real Time Control die in dit onderzoek aangehouden zal worden is:

Real Time Control in het operationele waterbeheer is het ingrijpen op het verloop van de processen in een watersysteem op basis van actuele metingen door middel van het besturen van regelbare kunstwerken.

In figuur 14, waarin het begrip Real Time Control wordt toegepast op het Mark-Vliet systeem, komen een aantal begrippen naar voren. Eén daarvan is al genoemd, namelijk setpoint. Setpoint geeft de gewenste situatie aan. Stel dat er gestuurd wordt op het peil dan is het streefpeil je setpoint. Een ander begrip is regelaar. Een regelaar bepaalt de instelling van de kunstwerken afhankelijk van de metingen en je setpoints. Wanneer een afwijking wordt geconstateerd tussen de metingen en setpoint bepaalt de regelaar de nieuwe instelling van de kunstwerken om de verschillen te minimaliseren. De regelaar gebruikt een bepaald algoritme om, bijvoorbeeld, de openingshoogte van een spuisluis te bepalen. Deze gegevens worden doorgestuurd naar de actuator. De actuator is het apparaat dat de instelling van de kunstwerken regelt. Stel dat een bepaalde openingshoogte van de spuisluizen is gevonden, dan regelt de actuator dat de spuisluizen ook daadwerkelijk zo ver open gaan staan. Het laatste begrip is sensoren. Dit zijn de apparaten die de metingen verrichten. In het geval van het Mark-Vliet systeem zal de chloride concentratie bij bepaalde inlaatpunten in het model gemeten worden. Een sensor meet deze gegevens en stuurt deze naar de regelaar.

Er wordt verwacht dat door gebruik te maken van Real Time Control de mogelijkheden van het Mark-Vliet systeem beter benut kunnen worden. Hierdoor kan de zoutindringing effectiever worden beperkt.



5.2 Sturingsopties

In principe zijn er 4 belangrijke opties beschikbaar waarmee water aangevoerd of afgevoerd kan worden. Deze kunnen uit de waterbalans in figuur 4 worden afgeleid. De opties zijn:

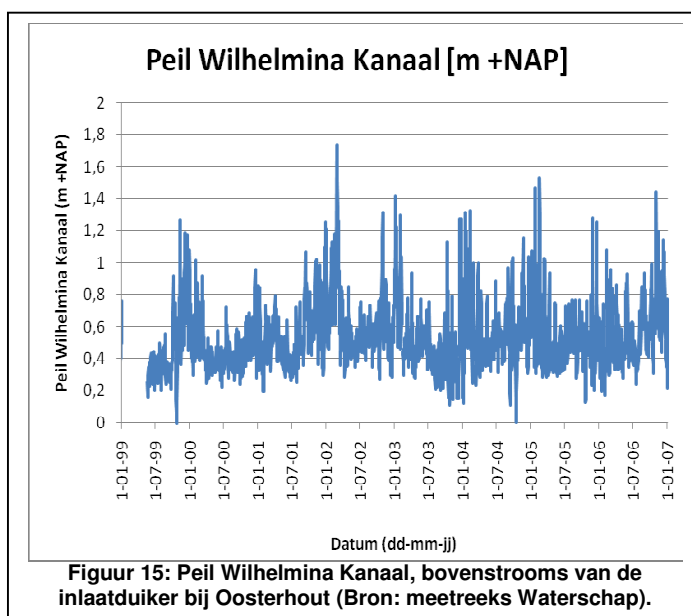
1. Inlaat bij Oosterhout
2. Inlaat via de Roode Vaart
3. Spuisluizen bij Dintelsas en Benedensas
4. Bovenstrooms bergen van water

Door gebruik te maken van deze vier sturingsopties kan het peil en de afvoer door het systeem beheerst worden. Vooral de afvoer heeft een grote invloed op de waterkwaliteit, zoals blijkt uit bijlage 1 en 2. De andere mogelijkheden om te sturen, zoals de inlaat en uitlaat bij de polders en de stuwen in België zijn gedefinieerd als randvoorwaarde of vallen buiten de afbakening van het systeem.

Inlaat bij Oosterhout

De inlaat bij Oosterhout heeft een maximale capaciteit van $7\text{m}^3/\text{s}$. Het water dat wordt ingelaten bij deze inlaat komt van het Wilhelmina kanaal. In figuur 15 is het peil op het Wilhelmina Kanaal weergegeven voor de periode 1999-2006. Het peil op het Wilhelmina Kanaal is van belang voor het Mark-Vliet systeem omdat het water onder vrij verval naar de boezem stroomt.

Uit figuur 15 wordt duidelijk dat bij een gereguleerd peil van $0,2\text{ m +NAP}$ op het Mark-Vliet systeem (en dus ook bij Oosterhout) het over het algemeen mogelijk is om water in te laten. Wel zijn er periodes dat dit niet mogelijk is. In de jaren 1999-2006 is de periode dat het peil op het Mark-Vliet systeem hoger is dan het peil op het Wilhelmina Kanaal niet langer dan 2 dagen en valt buiten de cruciale zomerperiode. Er moet wel worden opgemerkt dat in 1996 een periode van ca. 2 weken geen inlaat via Oosterhout mogelijk was en dat er in 1996 meerdere korte periodes zijn waarin het peil van het Wilhelmina Kanaal beneden de $0,2\text{ m +NAP}$ komt. Maar er kan in de cruciale zomermaanden wanneer de zoutindringing het



grootst is over het algemeen vanuit worden gegaan dat het mogelijk is om water in te laten. Alleen kan er niet onvoorwaardelijk vanuit worden gegaan omdat het peil op het Wilhelmina Kanaal soms geen inlaat onder vrij verval toelaat. Verder is er op het Wilhelmina Kanaal soms sprake van blauwalgen en/of bruinrot. Dit kan schadelijk zijn voor de landbouw waardoor het niet altijd mogelijk is om dit water te gebruiken.

Inlaat via de Roode Vaart

De Roode Vaart zoals voorgesteld in Witteveen+Bos (2008) is ontworpen om een aanvoer van maximaal $30\text{ m}^3/\text{s}$ te kunnen verwerken. De Roode Vaart bestaat nu al wel maar moet uitgebreid worden om voldoende zoet water aan te kunnen voeren. Het water komt beschikbaar vanuit het Hollands Diep. Omdat het peilverschil tussen het Hollands Diep en de Noordelijke Roode Vaart te gering is (meestal kleiner dan 10cm), is bij het ontwerp gekozen voor een pompinstallatie zodat het debiet gegarandeerd kan worden. Het water vanuit het Hollands Diep is ook van voldoende kwaliteit om voor de landbouw gebruikt te worden.

Spuisluizen bij Dintelsas en Benedensas

De capaciteit van de spuisluizen zijn niet beperkend voor het totale debiet van het Mark-Vliet systeem. Bij voldoende peilverschil tussen het Volkerak-Zoommeer en het Mark-Vliet systeem is er ruim voldoende capaciteit om afvoeren van $100\text{ m}^3/\text{s}$ te kunnen garanderen. De spuisluizen zorgen dus niet voor problemen met de zoutindringing. Wel moet worden opgemerkt dat op het toekomstige zoute Volkerak-Zoommeer peilfluctuaties zal worden geïntroduceerd, hierdoor zal de afvoer bij de sluisen niet continu gegarandeerd kunnen worden. In bijlage 6 zijn de chloride concentraties en het peil van het Volkerak-Zoommeer ter hoogte van Dintelsas en Benedensas weergegeven.

Bovenstrooms bergen van water

Een andere sturingsoptie is bovenstrooms bergen van water, wat hier de mogelijkheden van zijn zal hieronder worden toegelicht.

	L	b	dh	Berging
Bovenmark	8.500m	20m	0,2m	34.000 m^3
Aa of Weerij	20.000m	15m	0,2m	60.000 m^3
Turfvaart Bijloop	20.000m	10m	0,2m	40.000 m^3
Chaamse beken	10.000m	5m	0,2m	10.000 m^3
Totaal				144.000 m^3

Tabel 5: Mogelijkheid om bovenstrooms te bergen in de waterlopen, L is de lengte van de waterloop, b is de gemiddelde breedte, dh is de opzet in het peil.

Uit tabel 5 blijkt dat, wanneer water in de bovenstroomse waterlopen wordt geborgen, er ongeveer 144.000 m^3 geborgen kan worden. Met deze hoeveelheid water kan er 1 dag lang met minder dan $2\text{ m}^3/\text{s}$ worden doorgespoeld. Dit is niet voldoende om de zoutindringing tegen te gaan, zeker niet in verhouding met de $7\text{ m}^3/\text{s}$ en $30\text{ m}^3/\text{s}$ die (continu) beschikbaar zijn via de inlaat bij Oosterhout en de inlaat bij de Roode Vaart.

Met de berging in de waterlopen vindt ook berging in de bodem plaats, door het peil op te zetten in de waterlopen zal ook het grondwaterpeil stijgen. Hier zit wel een factor tussen, de verhoging van het waterpeil is niet 1 op 1 te vergelijken met een verhoging van het peil in het grondwater. Een factor 4 verschil wordt hiervoor aangenomen. Verder heeft de bodem een bepaalde porositeit waar rekening mee moet worden gehouden. Niet alle ruimte in de bodem kan gebruikt worden om water te bergen. Een porositeit van 30% wordt aangenomen. Tevens wordt aangenomen dat in 80% van het totale oppervlak een peilstijging gerealiseerd kan worden. De resultaten staan in tabel 6.

	Oppervlak	peil	grondwaterpeil	porositeit	berging
Bovenmark	45.065 ha	+0,2m	+0,05m	30%	$5.407.800\text{ m}^3$
Aa of Weerij	40.715 ha	+0,2m	+0,05m	30%	$4.885.800\text{ m}^3$
Totaal					$10.293.600\text{ m}^3$

Tabel 6: Mogelijkheid om bovenstrooms te bergen in oppervlaktewater en grondwater, van de gegeven oppervlakttes wordt aangenomen dat er in 80% van de oppervlakte geborgen kan worden.

Met $10.293.600\text{ m}^3$ kan er bijvoorbeeld bijna 5 weken en 5 dagen lang met $3\text{ m}^3/\text{s}$ worden doorgespoeld. Dit is een significante hoeveelheid. Het is verder belangrijk te beseffen dat dit water vertraagd uit de bodem beschikbaar komt.

5.3 Real Time Control strategieën

De Real Time Control strategieën die gebruikt worden om de zoutindringing te beperken worden in deze paragraaf besproken. Iedere strategie zal afzonderlijk worden geoptimaliseerd door verschillende besturingen van de inlaat en de spuisluizen te onderzoeken.

Er is bij de onderstaande strategieën gekozen om alle sturingsopties, zoals de inlaat bij Oosterhout, het bergen van water in het bovenstrooms gelegen deel van het stroomgebied en de Roode Vaart, te combineren tot één grote fictieve inlaat ter plaatste van de inlaat bij Oosterhout. Dit heeft twee redenen, ten eerste is het vanwege de rekentijd van het model praktisch om het aantal runs te beperken. Door deze sturingsopties samen te voegen is het niet meer nodig of ze afzonderlijk te beschouwen en zijn er minder modelberekeningen nodig. De tweede reden om ze samen te voegen is dat de bovengenoemde sturingsopties eenvoudig te combineren zijn. De inlaat bij Oosterhout, de Roode Vaart en het bovenstrooms bergen van water zijn allemaal sturingsopties die een bepaalde aanvoer van zoet water kunnen realiseren. Het is daarom gemakkelijk om één grote inlaat, in dit geval ter plaatste van de inlaat bij Oosterhout, te gebruiken. Achteraf kunnen dan conclusies met betrekking tot de verdeling van de benodigde aanvoer van zoet water worden getrokken. Er kan dan beslist worden welke aanvoerroute gebruikt gaat worden.

5.3.1 Strategie 1: Geleidelijk openen van de sluizen en inlaat

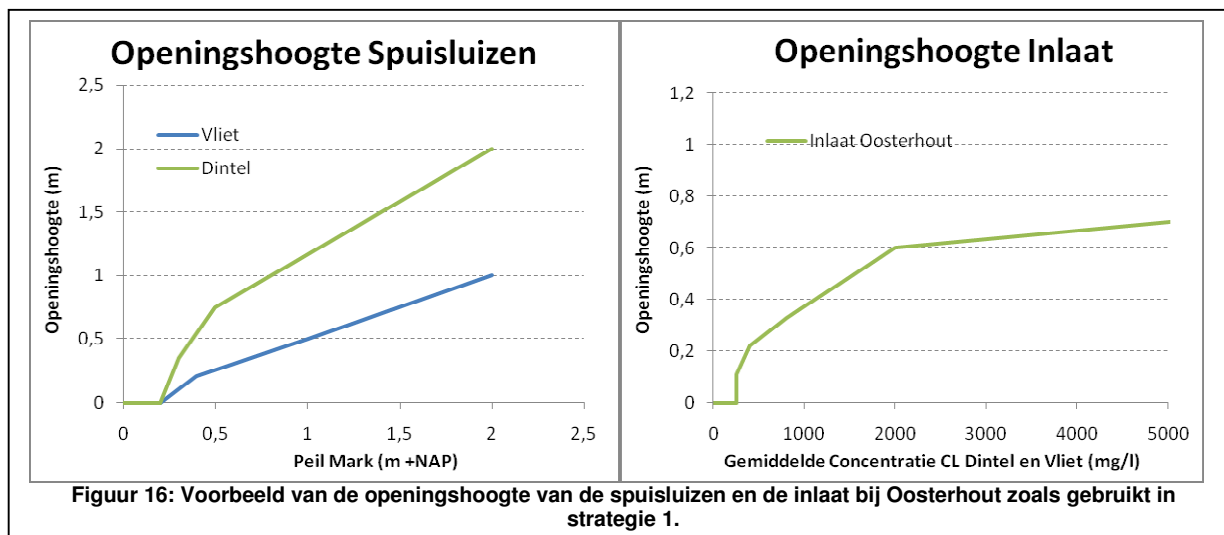
In deze strategie wordt de openingshoogte van de spuisluizen bepaald afhankelijk van de meetwaarde van het peil op de Mark. Een grotere overschrijding van het peil levert een grotere openingshoogte van de schuiven van de spuisluizen op. De inlaatduiker wordt op dezelfde manier bestuurd als de spuisluizen, alleen is deze inlaatduiker afhankelijk van meetwaarden van de chlorideconcentratie in de Dintel en de Vliet. Hoe verder de gemiddelde chlorideconcentratie op deze twee takken boven de 250 mg/l komt hoe groter de openingshoogte van de schuif van de inlaat is.

In strategie 1 is onderzocht wat het effect van een eenvoudige Real Time Control besturing op de chlorideconcentraties in het Mark-Vliet systeem is. Het voornaamste doel van deze strategie is onderzoeken of een eenvoudige besturing werkt en hoe deze het beste in het model geïmplementeerd kan worden. Als blijkt dat deze besturing niet werkt, wordt onderzocht op welke manier beter met de besturing van de kunstwerken in het Mark-Vliet systeem omgegaan moet worden.

In deze strategie is een Real Time Control besturing die de schuiven van de spuisluizen opent wanneer een bepaald peil wordt overschreden geïmplementeerd. De inlaat zal ook open en dicht worden gezet afhankelijk van metingen, in dit geval van metingen van de chlorideconcentratie. Deze besturing zal worden geoptimaliseerd door de spuisluizen en de inlaat geleidelijk te openen bij overschrijding van het gewenste peil of de grenswaarde van de chlorideconcentratie om grote schommelingen in de afvoer te voorkomen.

In deze strategie is het huidige peilbeheer licht aangepast en zal de inlaat bij Oosterhout worden gebruikt als extra aanvoer van water wanneer te hoge chlorideconcentraties worden gemeten. De spuisluizen gaan open wanneer het gemiddelde peil op de Dintel en de Vliet hoger wordt dan 0,20m +NAP. Wanneer de gemiddelde chlorideconcentratie bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten van de Dintel en de Vliet boven de 250 mg/l uitkomt zal de inlaat bij Oosterhout open gaan en het systeem doorgespoeld worden. De spuisluizen worden afhankelijk van de overschrijding van het peil steeds iets verder geopend. Omdat het systeem op deze manier een bepaalde reactietijd heeft is gekozen voor een lagere waarde (250 mg/l) van de chlorideconcentratie dan de grenswaarde van de chlorideconcentratie van 300 mg/l bij de inlaatpunten.

Deze strategie is geoptimaliseerd door het open van de spuisluizen en het openen van de inlaat steeds geleidelijker plaats te laten vinden. Wanneer het gemiddelde peil op de Dintel en op de Vliet lichtelijk hoger is dan 0,20 m +NAP zullen de spuisluizen slechts enkele centimeters worden open gezet zodat een kleine afvoer wordt gegenereerd, hoe groter de overschrijding hoe groter de opening van de spuisluizen. Bij een lichte overschrijding van de gemiddelde chlorideconcentratie bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten van de Dintel en de Vliet zal een lage afvoer via de inlaat Oosterhout worden gerealiseerd. Bij een hogere overschrijding van de chlorideconcentraties zal deze inlaat steeds worden vergroot. Verschillende instellingen van de schuiven zijn onderzocht. Een voorbeeld van de instelling van de kunstwerken is te zien in figuur 16. Duidelijk is dat de openingshoogte afhankelijk is van de meetwaarden.



5.3.2 Strategie 2: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet

In deze strategie is het doorspoelen van het Mark-Vliet systeem geoptimaliseerd. Een optimaal doorspoeldebiet voor de Dintel en de Vliet is bepaald. Dit optimale doorspoeldebiet wordt constant afgevoerd bij de spuisluizen. Omdat het peil van het Volkerak-Zoommeer fluctueert, is onderzocht of het een voordeel oplevert om de openingshoogte van de spuisluizen afhankelijk te maken van het peil boven- en benedenstrooms bij de spuisluizen. Door iedere tijdstap de precieze openingshoogte van de schuiven te berekenen wordt het gevonden optimale doorspoeldebiet constant gerealiseerd. De inlaat bij Oosterhout wordt op dezelfde manier bestuurd, de openingshoogte van de schuif van de duiker is zo groot dat er precies het doorspoeldebiet wordt ingelaten.

Omdat de spuisluizen in dit geval alleen afvoeren wat er ingelaten wordt bij Oosterhout – de schuiven staan nu immers zo ver open zodat precies het optimale doorspoeldebiet wordt afgevoerd – wordt een extra debiet bij het doorspoeldebiet opgeteld (zie figuur 17). Het peil zou immers blijven stijgen als alleen het ingelaten water wordt afgevoerd. Dit extra debiet is afhankelijk van de overschrijding van het peil op de Mark. De openingshoogte van de spuisluizen is in deze strategie dus afhankelijk van het totaal van het optimale doorspoeldebiet en het debiet om het peil te handhaven.

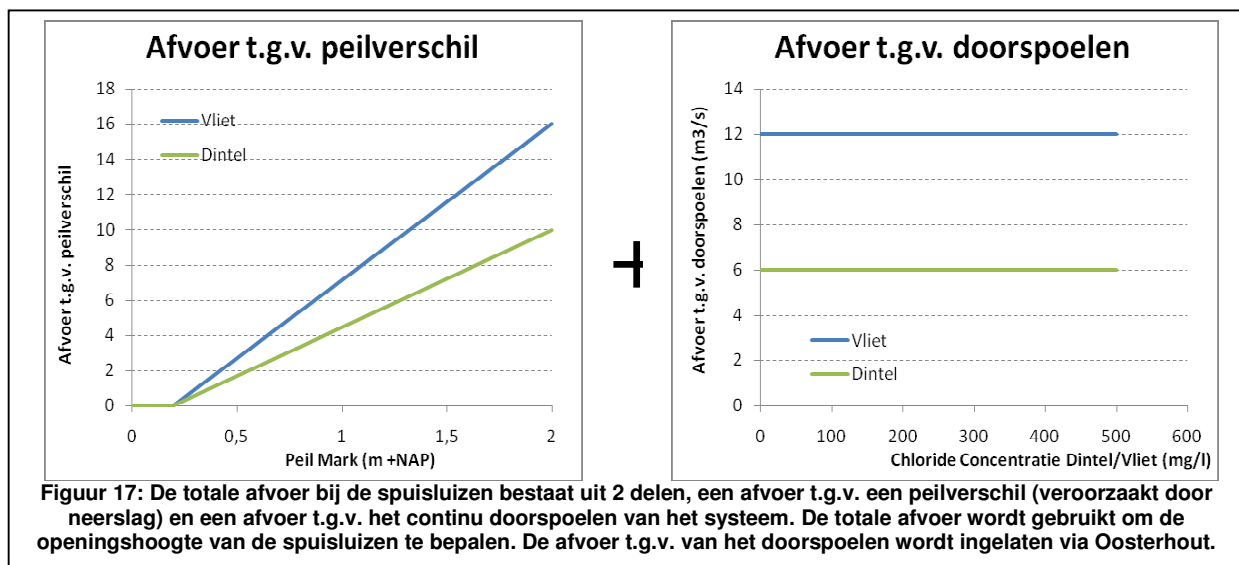
Bij deze strategie is bepaald wat de optimale afvoer is om de chloride concentraties bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten van de Dintel en de Vliet onder de grenswaarde te houden. De gevonden optimale afvoeren voor de twee takken is bij elkaar worden opgeteld. Deze totale afvoer zal continu op de inlaat bij Oosterhout worden gezet. Een besturing van de spuisluizen die deze optimale afvoer over de twee verschillende takken verdeeld zal worden ontwikkeld. Een optimalisatie van deze strategie levert op hoe groot de inlaat bij Oosterhout minimaal moet zijn om de zoutindringing bij de inlaatpunten onder de grenswaarde te houden.

Door de takken van de Dintel en de Vliet afzonderlijk te beschouwen is het optimale doorspoeldebiet voor de twee takken van het Mark-Vliet systeem worden gevonden. Er moet worden opgemerkt dat bij de bepaling van dit optimale debiet de afvoer van bovenstrooms niet is meegenomen. Omdat deze afvoer in de maatgevende periode vrijwel gelijk is aan nul worden geen grote verschillen verwacht in vergelijking met wanneer deze afvoer wel zou worden meegenomen.

Naast het doorspoeldebiet zal het Mark-Vliet systeem ook de neerslag die op het stroomgebied valt moeten verwerken. Als hier geen rekening mee wordt gehouden zou het peil na verloop van tijd stijgen omdat er precies evenveel wordt uitgelaten als ingelaten. Er wordt zelfs minder uitgelaten dan ingelaten omdat de afvoer niet altijd gegarandeerd kan worden vanwege te kleine peilverschillen tussen het Mark-Vliet systeem en het Volkerak-Zoommeer. Om de neerslag te verwerken zal bij de gevonden optimale afvoer voor het doorspoelen een extra afvoer t.g.v. een peilverschil worden opgeteld. Dit is te zien in figuur 17. De afvoer t.g.v. het peilverschil wordt berekend door de afwijking in het peil te vermenigvuldigen met een bepaalde

factor. Deze factor kan verschillend zijn voor de Dintel en de Vliet en zal vermoedelijk tussen 20 en 200 in liggen. Een factor van 100 voor de Dintel betekent dat, 0,01 m peilverschil op de Mark, een extra afvoer t.g.v. dit peilverschil van $100 * 0,01 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ oplevert. De twee verschillende componenten van de debieten die de openingshoogte van de spuisluizen bepalen zijn weergegeven in figuur 17.

Om de afvoer bij de spuisluizen constant te houden zal de openingshoogte bepaald moeten worden afhankelijk van het peilverschil boven- en benedenstrooms van deze sluizen en de gewenste totale afvoer. Een voorbeeld van de waarde van de openingshoogte van een spuisluis, afhankelijk van het peilverschil bij deze spuisluis, is gegeven in figuur 19 op de volgende pagina. Voor verschillende totale afvoeren is te zien wat de gevonden openingshoogte is van deze fictieve spuisluis. De berekening van de exacte openingshoogte is niet mogelijk wanneer alleen gebruik gemaakt wordt van Sobek, daarom zal Sobek gekoppeld worden aan Matlab. Matlab neemt dan de berekening van de setpoints over. Een laatste opmerking betreft het feit dat er bij deze strategie nog niet gestuurd wordt op de waterkwaliteit.



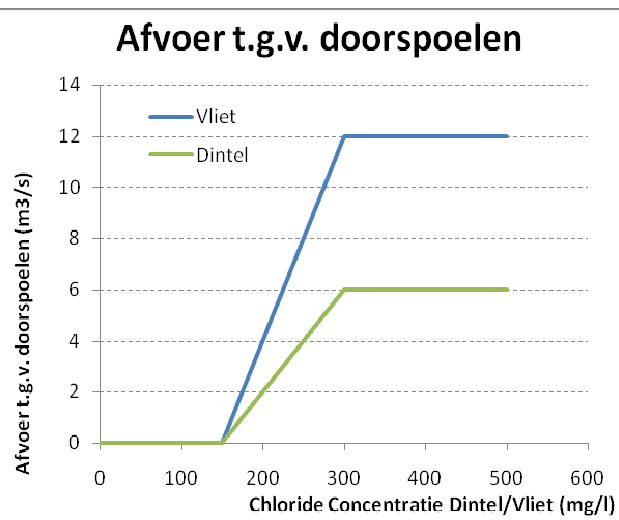
5.3.3 Strategie 3: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet en sturen op zout

Deze strategie is een uitbreiding van strategie 2. De uitbreiding betreft het feit dat het gevonden optimale doorspoeldebiet afhankelijk is gemaakt van de gemeten chloride concentratie in de Dintel of de Vliet. Als in de Vliet een te hoge chloride concentratie is gemeten worden de spuisluizen open gezet, dit vindt tegelijkertijd plaats met het openen van de schuiven van de inlaatduiker. Zo is voor de Vliet een bepaald doorspoeldebiet bepaald afhankelijk van gemeten chloride concentratie in de Vliet. Hetzelfde gebeurt voor de Dintel (zie figuur 18). De twee gevonden doorspoeldebieten zijn bij elkaar opgeteld, het totaal wordt ingelaten via de inlaatduiker bij Oosterhout. Op deze manier wordt voorkomen dat er teveel water wordt ingelaten, zeker als het niet nodig is om in te laten. Let op dat bij de gevonden doorspoeldebieten een extra debiet wordt opgeteld om het peil te beheersen, zoals ook in strategie 2 is gebeurd.

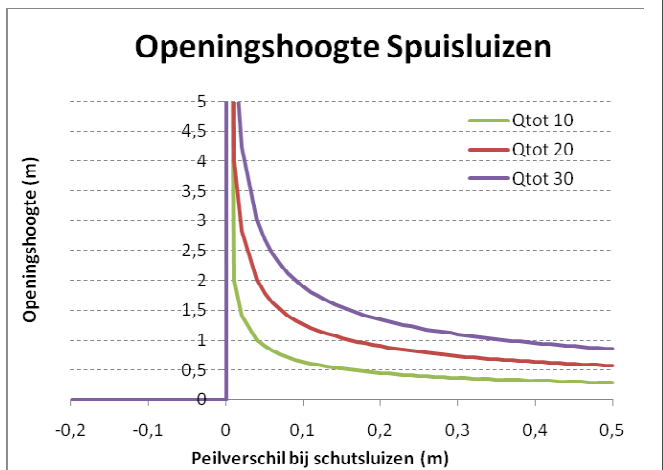
Deze strategie heeft als uitgangspunt de geoptimaliseerde variant van strategie 2. Bij deze strategie is het belangrijk de optimale locatie van het meetpunt waterkwaliteit te vinden. Waar kan het beste gemeten kan worden om de zoutindringing bij de inlaatpunten te beperken tot onder de grenswaarde? Het duurt namelijk een bepaalde tijd voordat het zoete water wat bij de inlaat Oosterhout het systeem inkomt bij het meest benedenstrooms gelegen inlaatpunt is. Ook trekt het zout met een bepaalde snelheid het systeem in. Daarom is er sprake van een reactietijd. Wanneer een te hoge chloride concentratie gemeten wordt zal deze eerst nog kunnen stijgen voordat het zoete water de chlorideconcentraties verlaagt. Met deze reactietijd dient rekening te worden gehouden. De optimale meetlocatie wordt daarom onderzocht door verschillende locaties uit te proberen en de resultaten te analyseren.

De gevonden optimale afvoerverdeling in strategie 2 en de gevonden optimale meetlocatie worden gebruikt in deze strategie. Een besturing van de inlaat afhankelijk van de waterkwaliteit wordt toegevoegd om de totale hoeveelheid water die wordt ingelaten te beperken. De inlaat zal afhankelijk van de gemeten chlorideconcentraties worden verhoogd tot maximaal het totaal van de gevonden optimale afvoer voor de twee takken. Stel dat de grenswaarde van de chloride concentratie om water in te laten 300 mg/l is, dan zal vanaf de helft (150 mg/l) begonnen worden met doorspoelen. Het maximale doorspoeldebiet wordt bereikt als de grenswaarde chloride is bereikt. Dit is te zien in figuur 18.

Verder moet worden opgemerkt dat dit doorspoeldebiet voor beide takken afzonderlijk berekend is. Het kan dus zijn dat er op de Dintel het maximale doorspoeldebiet nodig is terwijl er op de Vliet geen doorspoeldebiet nodig is. De inlaat bij Oosterhout is gelijk aan de som van het berekende doorspoeldebiet van de twee afzonderlijke takken. Door de schuiven van de spuisluizen precies zo ver te openen, zodat bij de sluis precies het berekende doorspoeldebiet wordt afgevoerd (figuur 19), is het gevonden optimale doorspoeldebiet over de twee takken van het Mark-Vliet systeem verdeeld. Bij dit debiet wordt, net zoals bij strategie 2, een extra debiet opgeteld om de neerslag te verwerken.



Figuur 18: Afvoer t.g.v. doorspoelen voor strategie 3.



Figuur 19: Voorbeeld van de openingshoogte van de spuisluizen afhankelijk van de gewenste totale afvoer bij de spuisluis en het peilverschil bij de sluizen.

6 Modelresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de uitgangssituatie (geen maatregelen), de referentiesituatie (continu doorspoelen met $15 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit de Roode Vaart) en de verschillende Real Time Control strategieën besproken.

6.1 Uitgangssituatie

Een aantal inlaatpunten is gekozen om de resultaten te presenteren (zie voor de ligging van deze inlaatpunten figuur 9). Nabij Dintelsas is het inlaatpunt van de Sabina Hendricka polder gekozen, deze ligt net bovenstrooms van de schutsluis in de Dintel. Verder bovenstrooms van deze schutsluis is gekozen voor het inlaatpunt Willemspolder en inlaatpunt Angelina polder. In de Vliet is gekozen voor het inlaatpunt nabij gemaal de Punt, deze ligt ook net bovenstrooms van de schutsluis in de Vliet. Verder bovenstrooms in de Vliet is gekozen voor het inlaatpunt Nassaupolder Dinteloord en inlaatpunt Westveerpolder. Verder is nog een inlaatpunt in de Mark gekozen, namelijk inlaatpunt Kaas en Brood. Deze 7 inlaatpunten geven samen een goed beeld van de verspreiding van de zoutindringing over het gehele systeem.

De uitgangssituatie is de situatie zonder maatregelen, met een zout Volkerak-Zoommeer, en wanneer het huidige spuibeheer van het Mark-Vliet systeem wordt toegepast. Dit is een worstcase scenario te noemen omdat er geen maatregelen worden getroffen om de zoutindringing tegen te gaan, behalve het dichtzetten van de schutsluizen. Er wordt dus ook geen water ingelaten vanuit het Volkerak-Zoommeer, dit zou ook lastig zijn vanwege de slechte waterkwaliteit. Het peil wordt nog steeds beheerst zoals in de situatie zonder een zout Volkerak-Zoommeer, de spuisluizen gaan open als het peil boven het streefpeil van $0,15 \text{ m} + \text{NAP}$ komt. De inlaat bij Oosterhout wordt ook op dezelfde momenten ingezet als eerder. Deze situatie geeft dus de omvang van het probleem aan wanneer er geen extra maatregelen worden genomen.

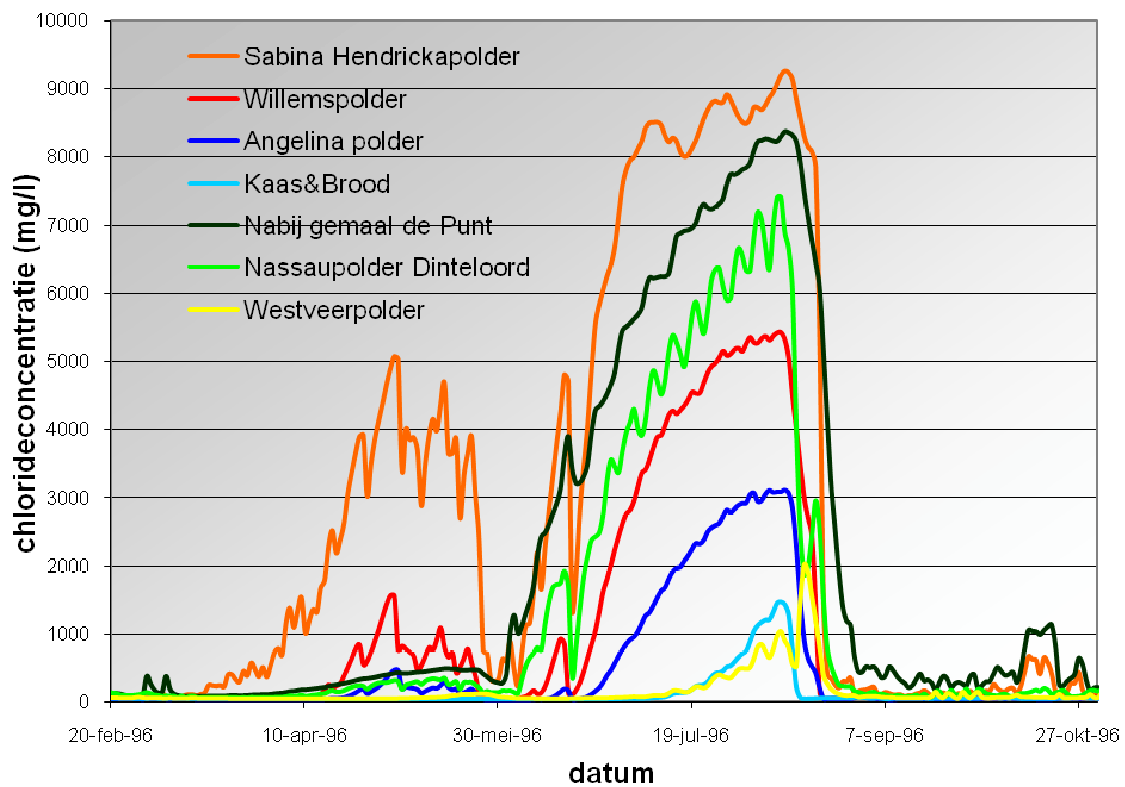
In figuur 18 is te zien dat de chlorideconcentraties bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten het hoogst zijn. Dit zijn inlaatpunt Sabina Hendricka polder in de Dintel en inlaatpunt Nabij gemaal de Punt in de Vliet. In het geval dat er niets tegen de zoutindringing wordt gedaan zullen zelfs de verder bovenstrooms gelegen inlaatpunten te maken krijgen met onacceptabel hoge chloride concentraties. Dit geeft aan dat maatregelen noodzakelijk zijn voor de landbouw in West-Brabant.

De grote piek in de chlorideconcentraties in de periode van half juni tot eind augustus komt voor in een droge periode. In deze periode is er bijna geen afvoer door het systeem. Om deze reden is 1996 ook een maatgevend jaar voor de zoutindringing. In deze droge periode is er grotendeels ook geen inlaat via Oosterhout, zoals te zien in de figuur 19.

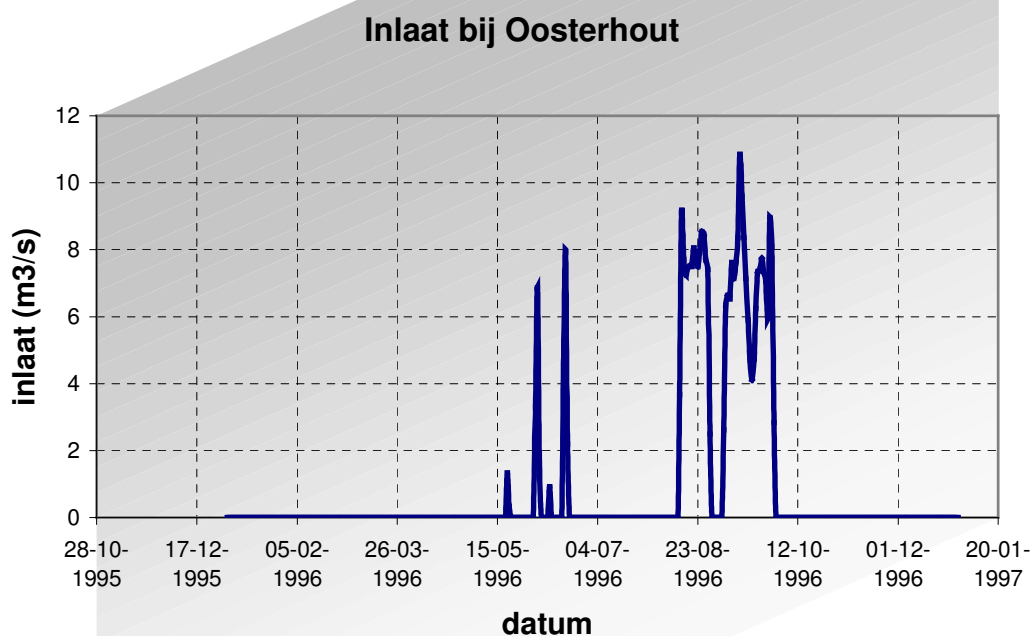
Zodra half augustus de inlaat weer open staat beginnen de chloride-concentraties snel te dalen. In het natte najaar valt er weer regen en is er meestal voldoende afvoer om de zoutindringing tegen te gaan. Dit is te zien in figuur 21. In figuur 20 is te zien dat het peil in deze lange droge periode wegzakt tot zelfs meer dan een meter beneden NAP. Dit geeft aan dat het Mark-Vliet systeem kampt met een groot tekort aan water in lange droge periodes. In de oorspronkelijke situatie stond het Mark-Vliet systeem nog in open verbinding met het Volkerak-Zoommeer en zakte het peil niet weg.

In de periode van maart tot en met september wordt in totaal 28 miljoen m^3 water ingelaten via de inlaatduiker bij Oosterhout. Het maximale debiet bij deze inlaatduiker is $10,8 \text{ m}^3/\text{s}$. De totale zoutvracht wordt berekend met de inlaatdebieten naar de meest benedenstrooms gelegen polders, deze zijn weergegeven in de figuur in bijlage 12. De totale vracht chloride die teveel wordt ingelaten (de totale vracht chloride met een concentratie van meer dan 300 mg/l) bedraagt ruim 7 miljoen kg .

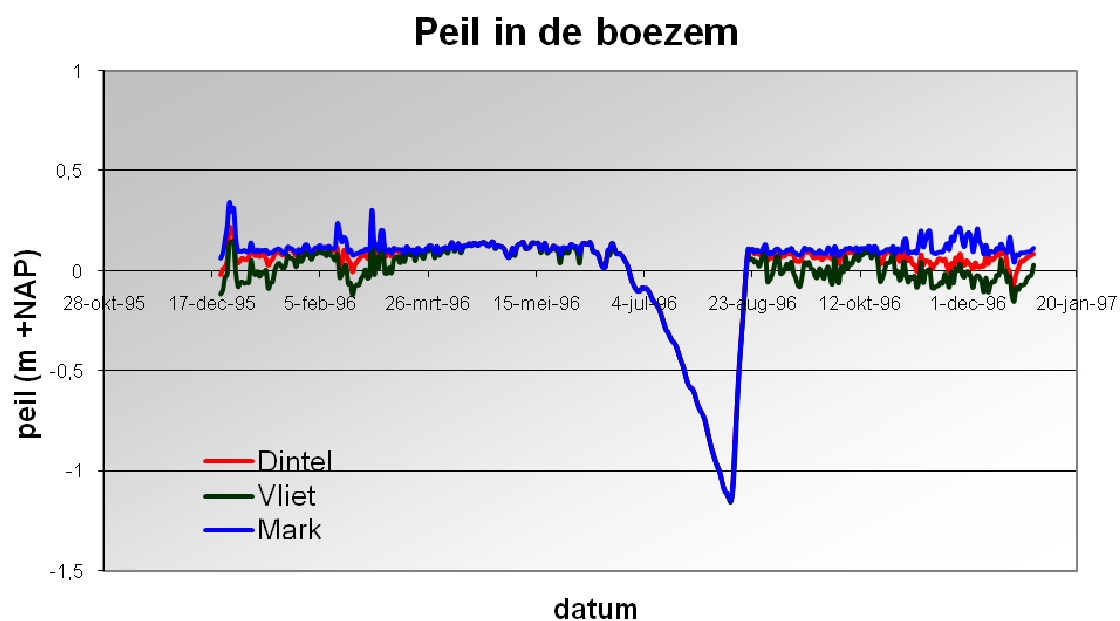
Chlorideconcentratie in de boezem bij de inlaatpunten



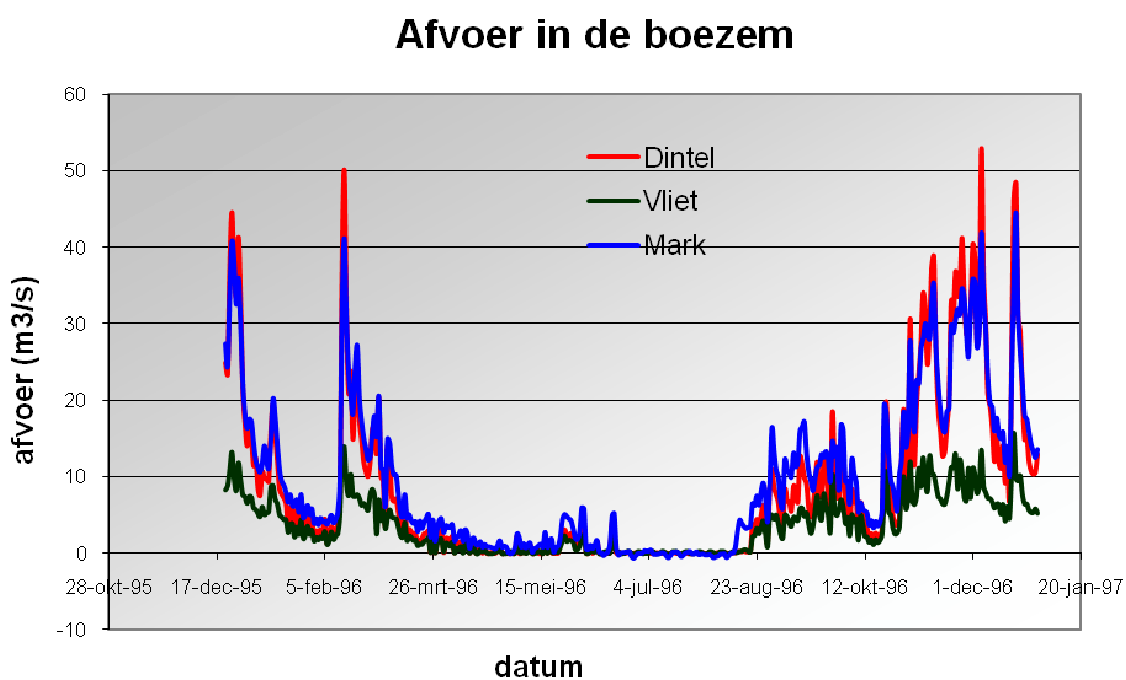
Figuur 18: Chlorideconcentratie (daggemiddelde waarden) in de uitgangssituatie.



Figuur 19: Inlaat debiet inlaat Oosterhout in 1996



Figuur 20: Peil (daggemiddelde waarden) bij de inlaatpunten in de uitgangssituatie.



Figuur 21: Afvoer (daggemiddelde waarden) bij de inlaatpunten in de uitgangssituatie.

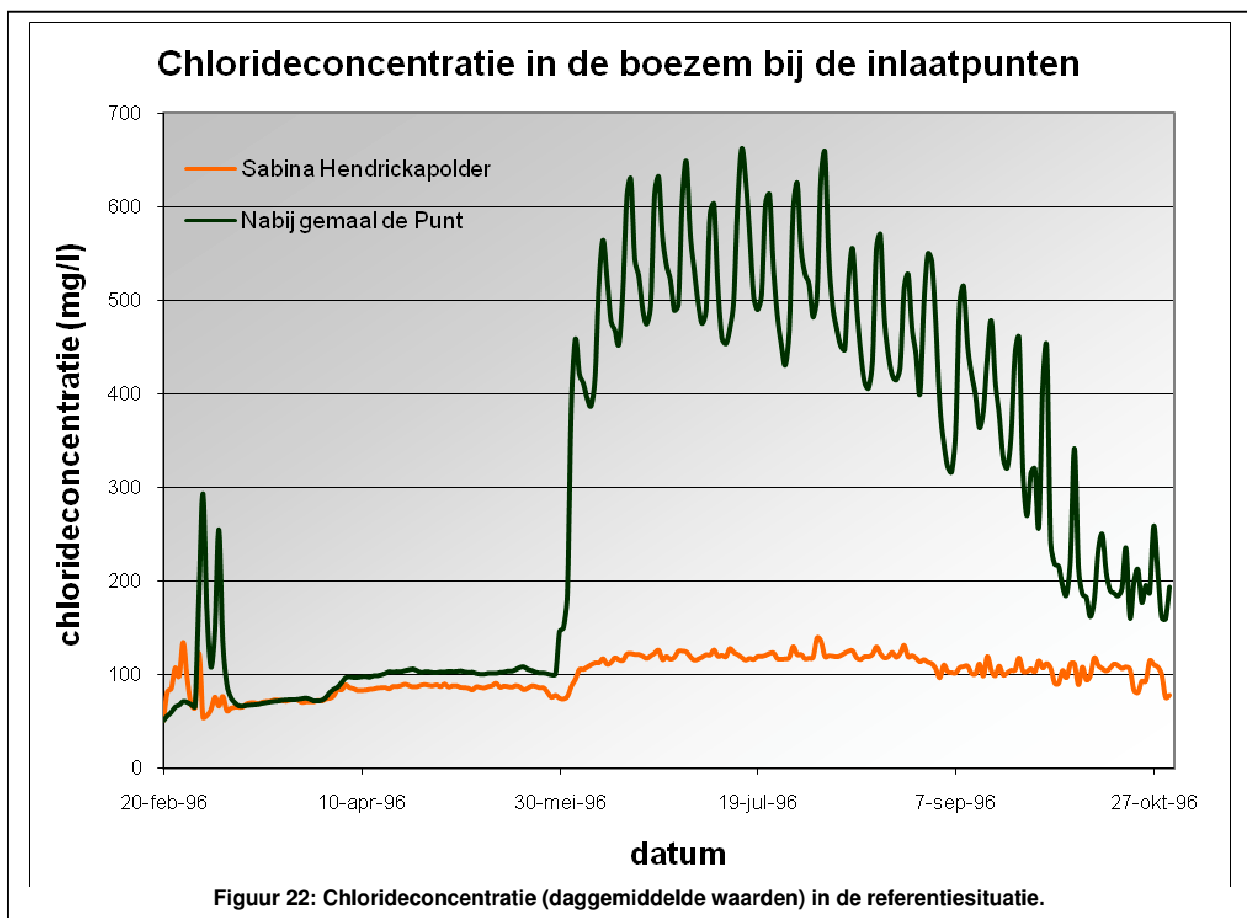
6.2 Referentie situatie

De referentie situatie is de situatie met de Roode Vaart als inlaat voor de zoetwatervoorziening. Er wordt vrijwel continu 15 m³/s zoet water ingelaten. Alleen wanneer de afvoer van het Mark-Vliet systeem zelf hoog genoeg is, zal de inlaat van zoet water stoppen. De referentie situatie is de oplossing voor het probleem zoals aangeraden door Witteveen+Bos (2008).

In figuur 22 is te zien dat de chloride concentraties bij de Sabina Hendricka polder tot onder de 150 mg/l zakken. De afvoer over de Dintel is ongeveer 8 m³/s. Op de Steenbergse Vliet komen nog chloride concentraties voor van boven de 700 mg/l met een daggemiddelde afvoer van ongeveer 4 m³/s. In figuur 18 is niet zichtbaar dat de chlorideconcentratie boven de 700 mg/l komt, omdat daar de daggemiddelde waarden worden weergegeven. De chlorideconcentraties, het peil en de afvoer zijn berekend per tijdstap van 5 minuten, de fluctuatie binnen een dag kunnen redelijk groot zijn. Opgemerkt moet dus worden dat er in de chloride concentraties en in de afvoer kortstondige afwijkingen van ongeveer 25% naar boven en naar beneden van de daggemiddelde waarden voor kunnen komen.

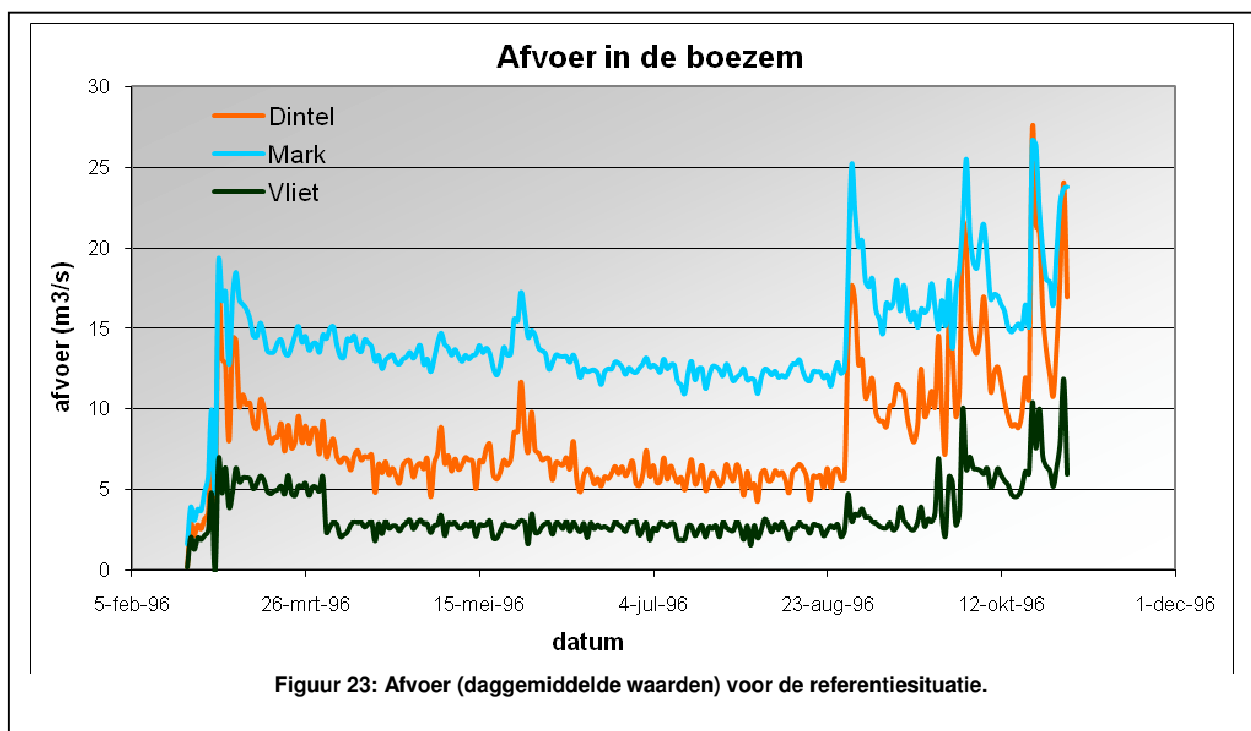
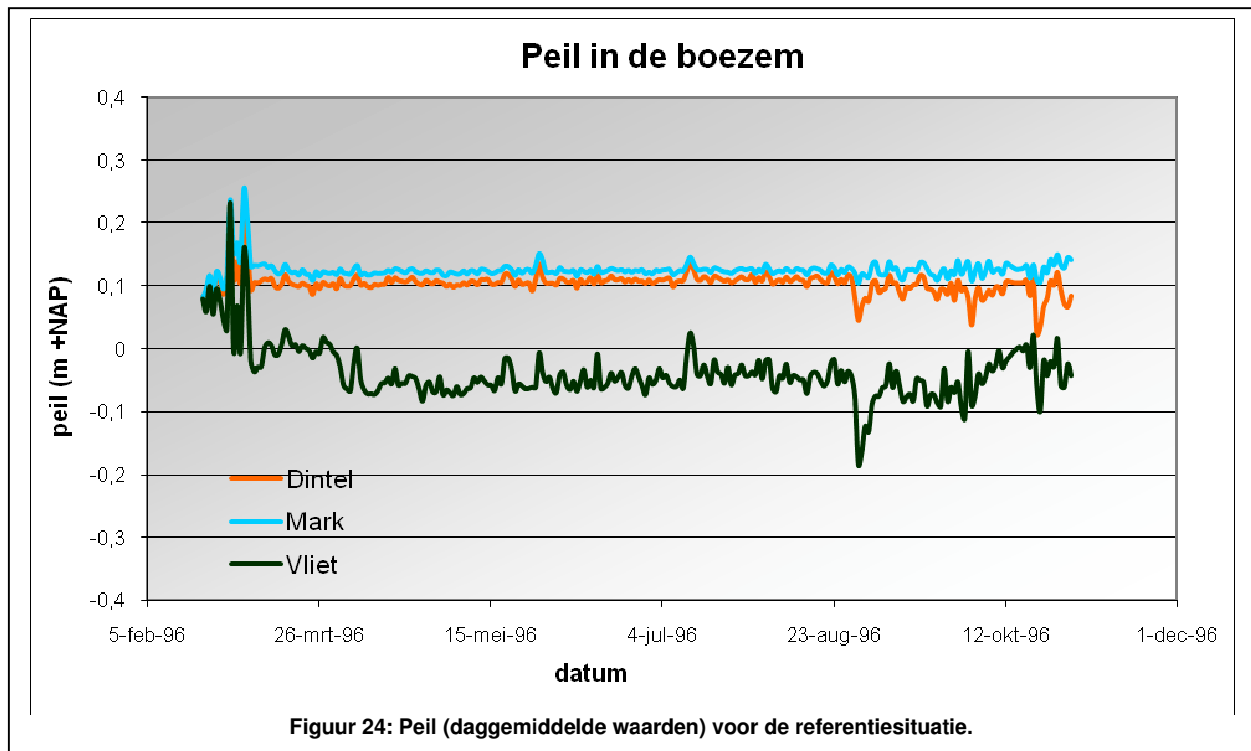
Via de Roode Vaart wordt in de betreffende periode in totaal 255 miljoen m³ water aangevoerd met een maximum van 15 m³/s. Er wordt aangenomen dat in de referentiesituatie (en in de hierna volgende RTC strategieën) net zoveel water wordt ingelaten bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten als in de uitgangssituatie. De totale vracht chloride die teveel wordt ingelaten komt dan op bijna 221.000 kilogram uit.

Wanneer het peil en de afvoer, in respectievelijk figuur 23 en 24, wordt bekeken, valt op dat het en de afvoer op de Vliet een behoorlijk stuk lager liggen dan op de Mark en de Dintel. Hier zijn meerdere redenen voor. Wanneer gekeken wordt naar de plattegrond van het Mark-Vliet systeem in de figuur in bijlage 13 is te zien dat de Mark en de Dintel in elkaars verlengde liggen. Om de Vliet door te spoelen zal het ingelaten water via de Mark, door het Mark-Vlietkanaal, naar de Vliet moeten stromen. In deze richting zal het water een bocht van ongeveer 120° moeten maken om het Mark-Vlietkanaal in te stromen. Het gevolg is dat het ingelaten water de makkelijkste weg zal volgen en dus rechtdoor zal stromen naar de Dintel. Verder is de stroomrichting in het Mark-Vlietkanaal normaal gesproken precies de tegenovergestelde richting dan nodig



is om de Vliet door te spoelen vanuit de Mark. Het is dus moeilijk om water in de richting van de Vliet te sturen.

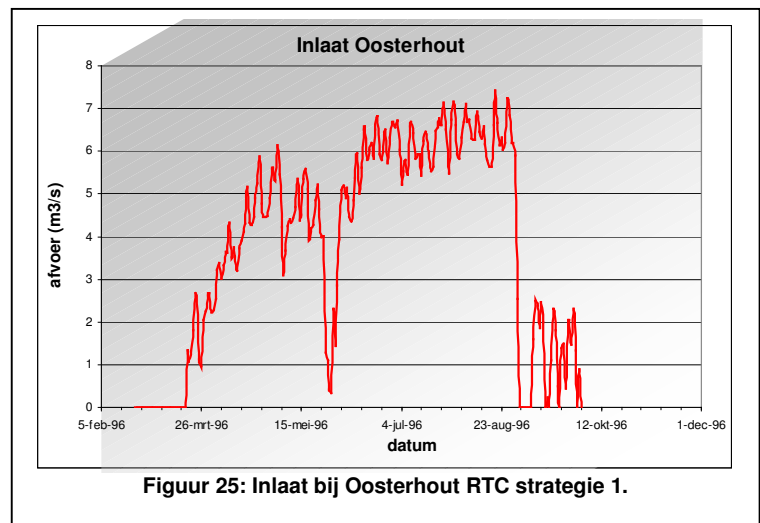
Een nog belangrijkere reden voor het wegzakken van het peil op de Vliet is de Sluis bij Bovensas. Voor de locatie van deze sluis wordt verwezen naar figuur 3b. Deze sluis is door zijn relatief kleine afmetingen beperkend voor de afvoer. Hierdoor zal bovenstrooms van deze sluis een hoger peil worden gevonden dan benedenstrooms, er ontstaat dus een relatief groot verhang op de Vliet. Hierdoor zal op een groot deel van de Vliet, ook bij de spuisluis bij Benedensas, een ongeveer 15 cm lager peil optreden dan het streefpeil wat wel op de Dintel en op de Mark gehandhaafd blijft. Hierdoor ontstaan problemen met de afvoermogelijkheden bij deze spuisluis wat weer terug te zien is in het grilligere verloop van het peil op de Vliet.



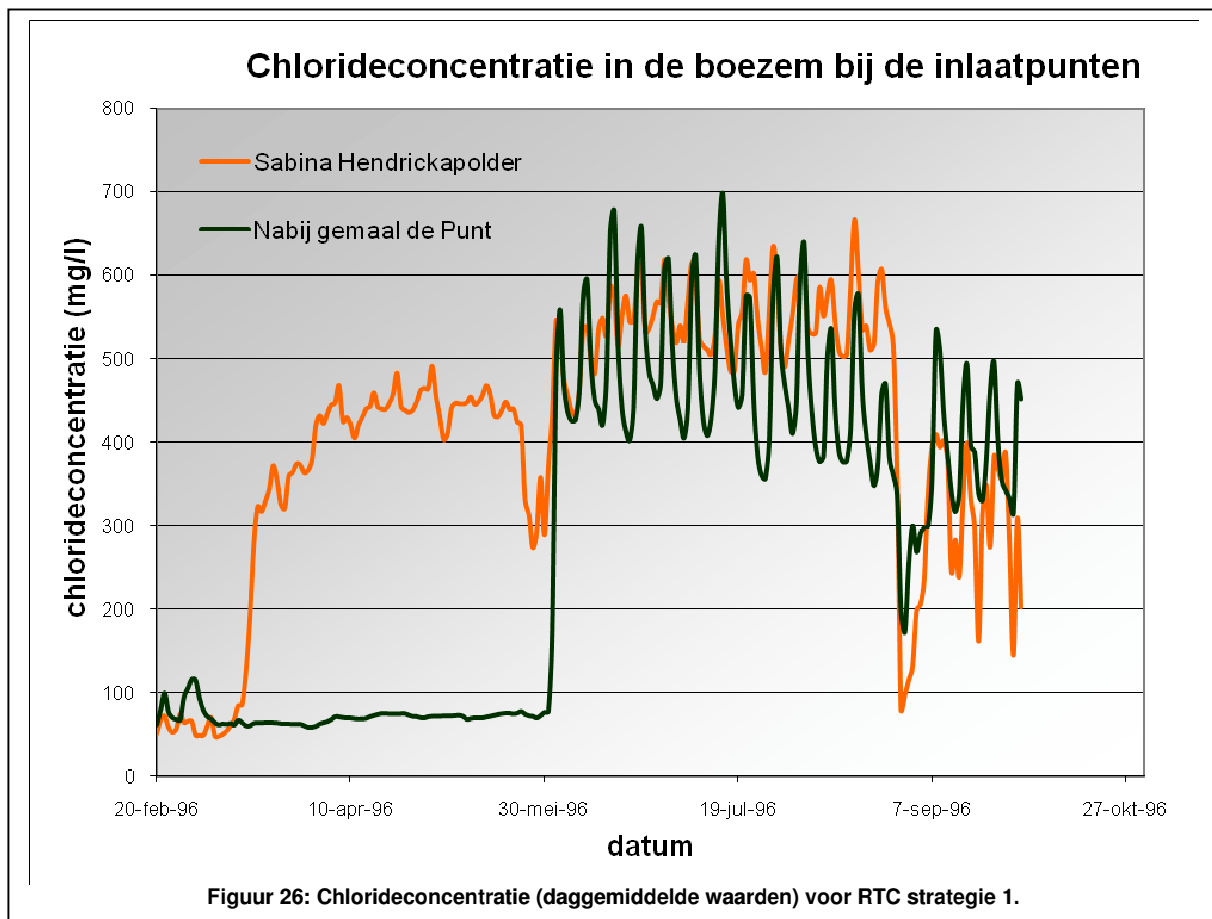
6.3 Real Time control strategieën

6.3.1 Strategie 1: Geleidelijk openen van de sluizen en inlaat

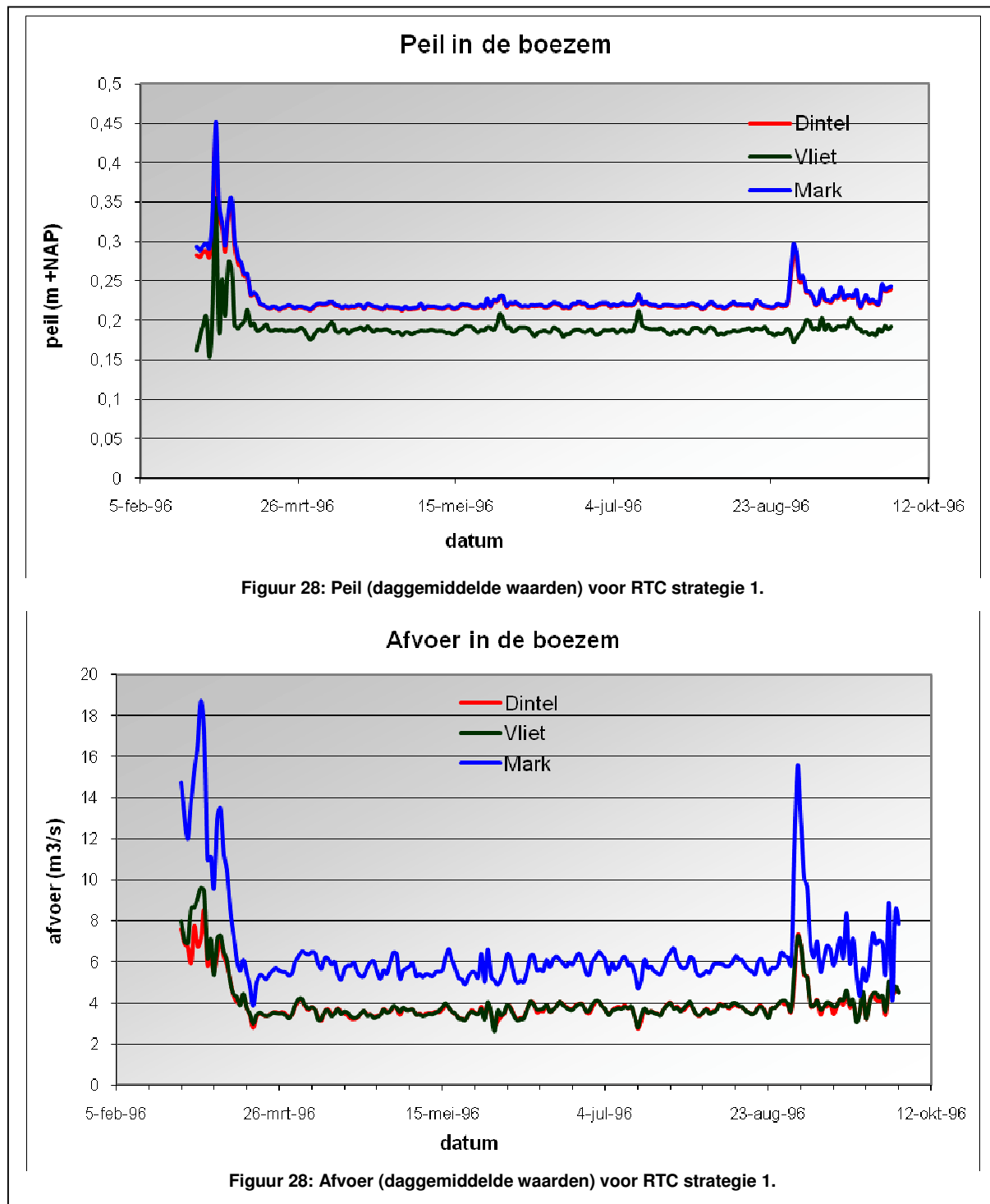
Bij deze strategie wordt er gespuid bij een peil op de Mark van meer dan 0,20 m +NAP en wordt er water ingelaten als de gemiddelde chlorideconcentratie bij het inlaatpunt Sabina Hendricka polder en Nabij gemaal de Punt boven de 250 mg/l komt. De spuisluizen worden steeds verder geopend bij een grotere overschrijding van het peil. De afvoer bij de inlaatduiker bij Oosterhout wordt ook in stappen verhoogd, afhankelijk van de mate van overschrijding van de chlorideconcentraties van 250 mg/l. Dit is in Sobek opgegeven door, afhankelijk van de meetwaarde van het peil of de chlorideconcentratie, een setpoint voor de spuisluizen en de inlaat op te geven in een tabel. De tabellen met de instelling van de openingshoogte afhankelijk van het peil en de chlorideconcentratie die de meest optimale resultaten opleverden zijn weergegeven in bijlage 7.



Bij het gebruik van deze strategie wordt in totaal 74 miljoen m³ water ingelaten via Oosterhout. Er wordt maximaal 9,4 m³/s ingelaten. Het is moeilijk om goede waarden te vinden voor de openingshoogte van de spuisluizen en de inlaatduiker. Het peil op het Volkerak-Zoommeer vertoont grote variaties en de afvoer die wordt gegenereerd bij een openingshoogte van bijvoorbeeld 10cm is dus ook variabel. Verder reageert het systeem traag op de extra inlaat van zoetwater via de Inlaatduiker bij Oosterhout. Het duurt een bepaalde tijd voordat het peil zal gaan stijgen op de Mark, pas als het peil op de Mark is gestegen zullen de



spuisluizen verder open gaan. Dit wekt daarna een bepaalde afvoer op. Door deze afvoer neemt de stroomsnelheid in de boezem bij de inlaatpunten toe, en wordt de zoutindringing tegengegaan. Het duurt even voordat de stroomsnelheid in de boezem bij de inlaatpunten toeneemt nadat de spuisluizen zijn gaan afvoeren. Door deze opeenvolging van sturingsacties om de zoutindringing tegen te gaan zit er een behoorlijke vertraging in de reactie op hoge chlorideconcentraties. Hierdoor is het heel moeilijk om de chlorideconcentraties in de boezem bij de inlaatpunten te beperken. Dit effect kan worden tegengegaan door bij lagere chlorideconcentraties te beginnen met inlaten en door de chlorideconcentraties een bepaalde afstand benedenstrooms van de inlaatpunten te meten. Dit is de reden waarom een grenswaarde van 250 mg/l is aangehouden in plaats van de gevonden grenswaarde van 300 mg/l. De fluctuerende afvoer bij de spuisluizen en bij de inlaatduiker maakt het erg moeilijk om optimale waarden voor de openingshoogte afhankelijk van het peil en de chlorideconcentratie te vinden.



6.3.2 Strategie 2: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet

Bij deze strategie is er nog niet gestuurd worden op zout. Er wordt namelijk continu water ingelaten. Door enige modelruns uit te voeren met alleen de afzonderlijke takken is gebleken dat bij een afvoer van ongeveer 3 m³/s, de chlorideconcentraties in de boezem, bij het inlaatpunt Sabina Hendricka polder, onder de grenswaarde van 300 mg/l blijven. Voor de afvoer bij het inlaatpunt 'Nabij gemaal de Punt' in de Vliet wordt een waarde van ongeveer 7 m³/s gevonden. In totaal moet er dus 10 m³/s worden ingelaten via de fictieve inlaatduiker bij Oosterhout.

De gevonden optimale afvoer op de Vliet, om de chlorideconcentraties onder grenswaarde te houden, is hoger dan de optimale afvoer op de Dintel. Dit terwijl in paragraaf 3.1 is gebleken dat de vracht per schutting daar groter is. Het aantal schuttingen is ook gelijk in de zomer periode, zowel doordeweeks als in de weekenden. De inlaatpunten liggen bovendien ongeveer op gelijke afstand van de schutsluizen. Toch is er een grotere afvoer nodig op de Vliet omdat het meeste benedenstrooms gelegen deel van de Vliet een veel groter doorstroomprofiel heeft dan de Dintel. Hierdoor is de stroomsnelheid in de Vliet lager. De stroomsnelheid is uiteindelijk het meest bepalend voor de terugdringing van het zout. Ter vergelijking, in het model heeft de Dintel een doorstroomprofiel met een oppervlak van ongeveer 180 m². De Vliet heeft bovenstrooms een doorstroomprofiel met een oppervlak van ongeveer 110 m² maar benedenstrooms (de laatste 2 km van de Steenbergse Vliet) een oppervlak van 730 m². Dit veroorzaakt een drastische verlaging van de stroomsnelheid. Aangezien het meest benedenstrooms gelegen inlaatpunt, inlaatpunt Nabij gemaal de Punt, in dit deel van het traject ligt, is een veel grotere afvoer nodig op de Vliet.

Met formule (1) kan berekend worden welke afvoer wordt opgewekt bij een bepaalde hoogte van de opening van de schuiven van de spuisluizen. Hetzelfde geldt voor de inlaatduiker bij Oosterhout. Om de gevonden afvoer over de Dintel en de Vliet te verdelen is het nodig om de spuisluizen precies zo ver te openen dat deze afvoer wordt gegenereerd. Afhankelijk van het peilverschil aan beide kanten van de spuisluis kan de afvoer berekend worden. Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt:

$$Q = c_w * w_s * \mu * d_g * \sqrt{(2 * g * (h_1 - h_2))} \quad (1)$$

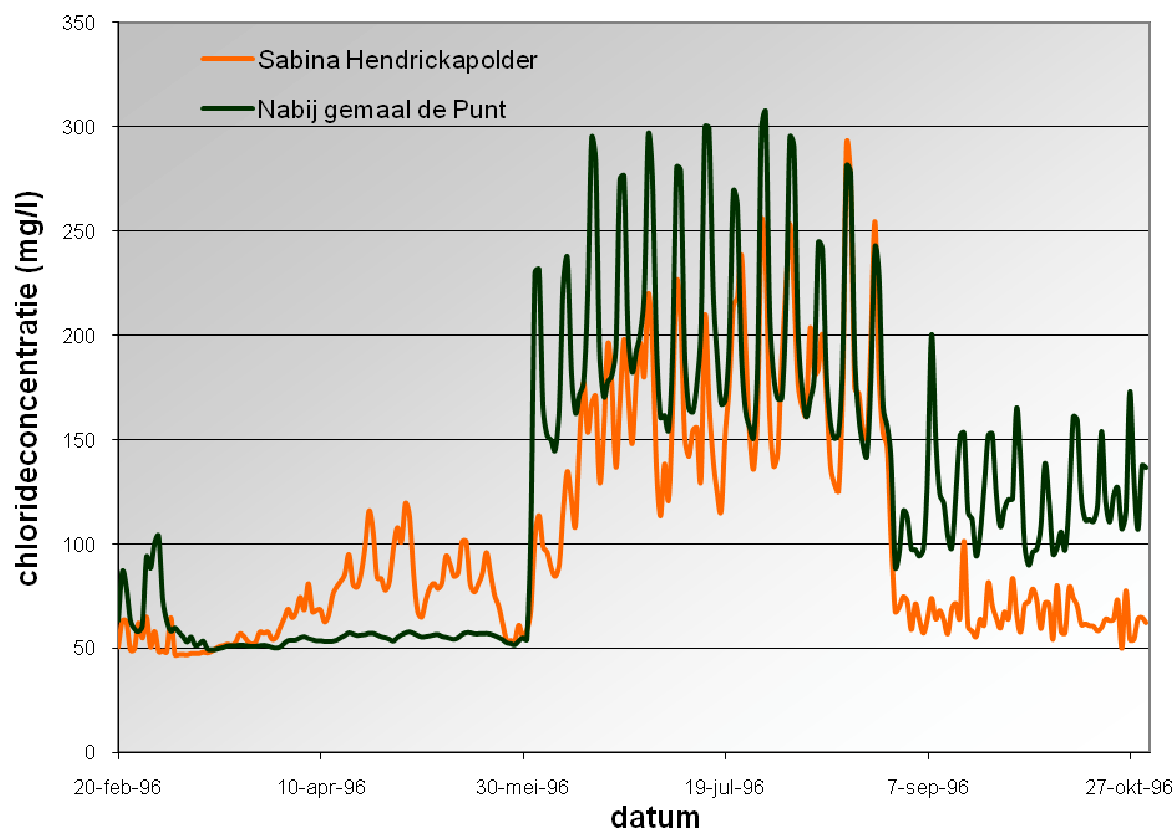
Hierin is c_w de laterale contractie coëfficiënt, w_s de breedte van de sluis, μ de contractie coëfficiënt, d_g de hoogte van de opening van de sluis, g de zwaartekrachtsconstante en $h_1 - h_2$ het verschil tussen het peil bovenstrooms en benedenstrooms. Met behulp van formule (1) kan afgeleid worden welke openingshoogte nodig is om een bepaalde afvoer te genereren. Door de openingshoogte van de sluizen iedere tijdstap in te stellen op precies de goede afvoer is het mogelijk om de gevonden afvoeren over de Dintel en de Vliet te verdelen. Hierdoor wordt de hoeveelheid water die beschikbaar is zo nuttig mogelijk ingezet.

Behalve het ingelaten water moet ook de normale afvoer, als gevolg van de neerslag op het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem, via de spuisluizen worden afgevoerd. Voor een toelichting hierop, zie figuur 17 in paragraaf 5.3.2. Door middel van een vermenigvuldigingsfactor voor zowel de Dintel als de Vliet is deze extra afvoer zo goed mogelijk verdeeld. Verschillende factoren zijn onderzocht en het blijkt dat een vermenigvuldigingsfactor van ongeveer 60 à 80 voor zowel de Dintel als de Vliet de beste resultaten oplevert. Dit komt erop neer dat er per centimeter peilverschil op de Mark een extra afvoer van 0,6 – 0,8 m³/s bovenop het gevonden optimale doorspoeldebiet wordt opgeteld. De openingshoogte van de schuiven van de sluizen wordt precies zo bepaald dat het totaal van het gevonden doorspoeldebiet en het debiet om het peil te handhaven wordt afgevoerd.

Om deze besturing te kunnen implementeren is het nodig om Sobek aan Matlab te koppelen. Door gebruik te maken van Matlab kunnen de setpoints voor de sluizen en de inlaat precies bepaald worden. In Bijlage 5 is te zien hoe de verschillende setpoints in Matlab worden berekend. Het algoritme van de besturing wordt uitgelegd in paragraaf 5.3.2.

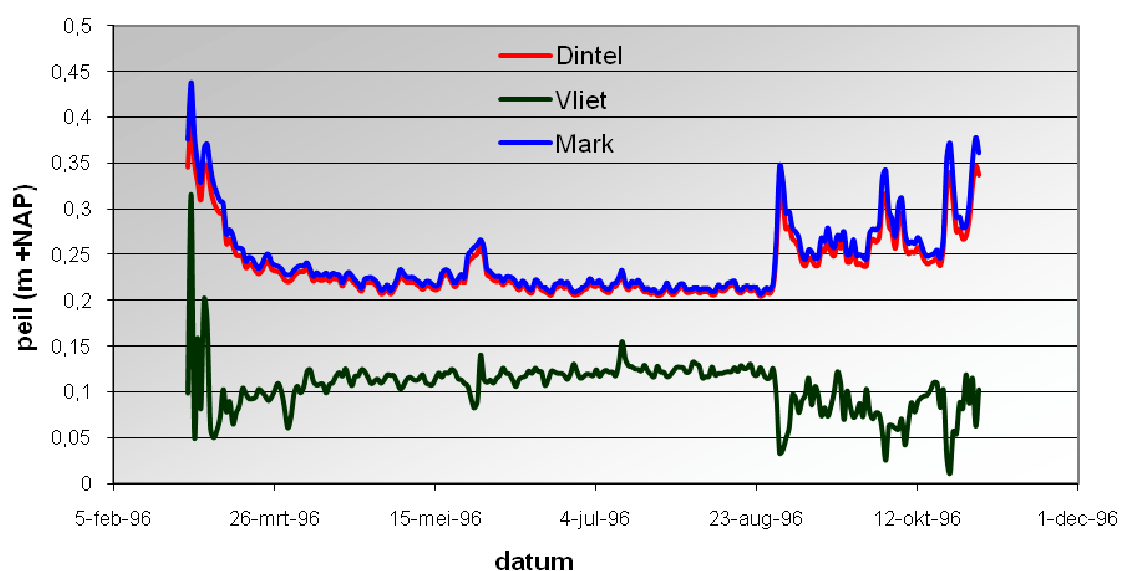
Bij deze strategie wordt in totaal 220 miljoen m³ water ingelaten met een constant debiet van 10 m³/s. Voor het eerst blijven de daggemiddelde waarden van de chloride concentratie beneden de grenswaarde van 300 mg/l. Opgemerkt moet worden dat er wel kortstondige overschrijdingen van de grenswaarde plaats vinden, maar dat deze kortdurend zijn (meestal minder dan 2 uur lang). Het peil op de Vliet ligt nog steeds een behoorlijk stuk lager dan het peil op de Dintel. De chloride concentraties op beide takken blijven nu vrijwel continu onder de grenswaarde. Verder is er minder water nodig dan bij de referentie situatie maar niet heel veel minder, slechts 13%. Het maximale inlaat debiet neemt wel flink af van 15 naar 10 m³/s.

Chlorideconcentratie in de boezem bij de inlaatpunten

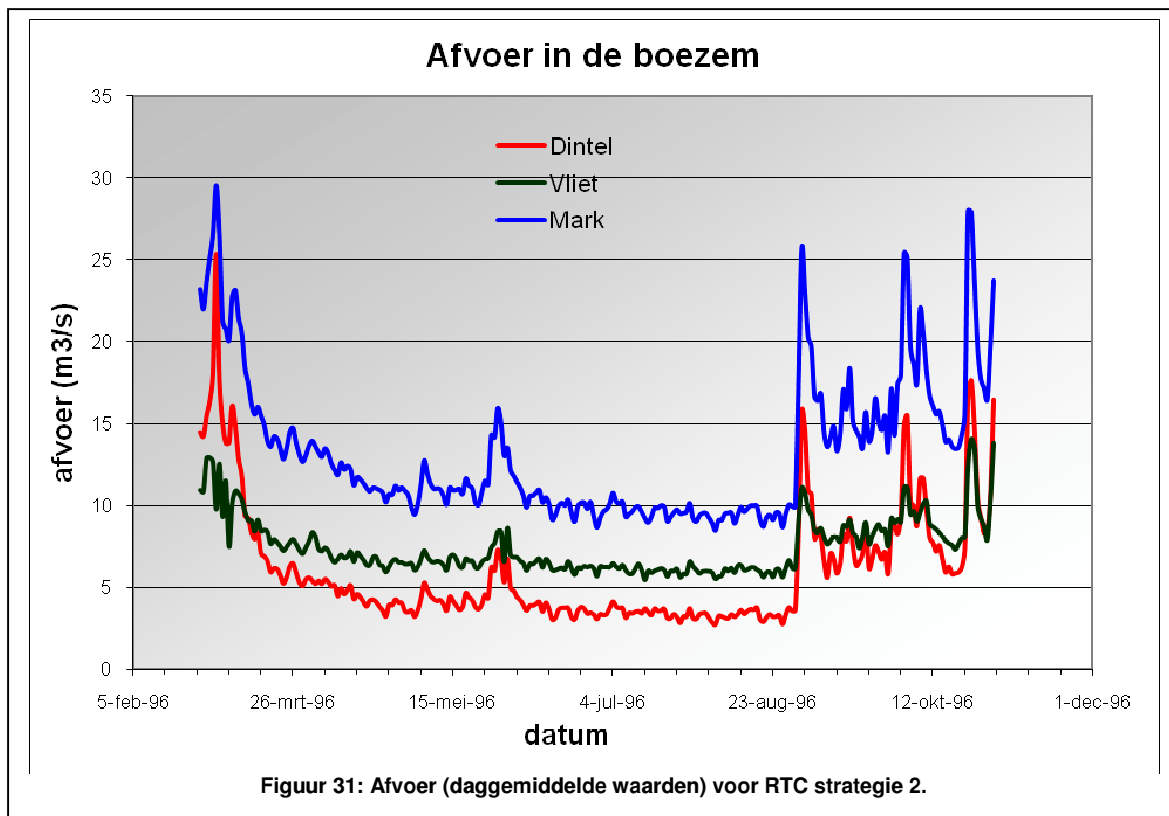


Figuur 29: Chlorideconcentratie (daggemiddelde waarden) voor RTC strategie 2.

Peil in de boezem



Figuur 30: Peil (daggemiddelde waarden) voor RTC strategie 2.



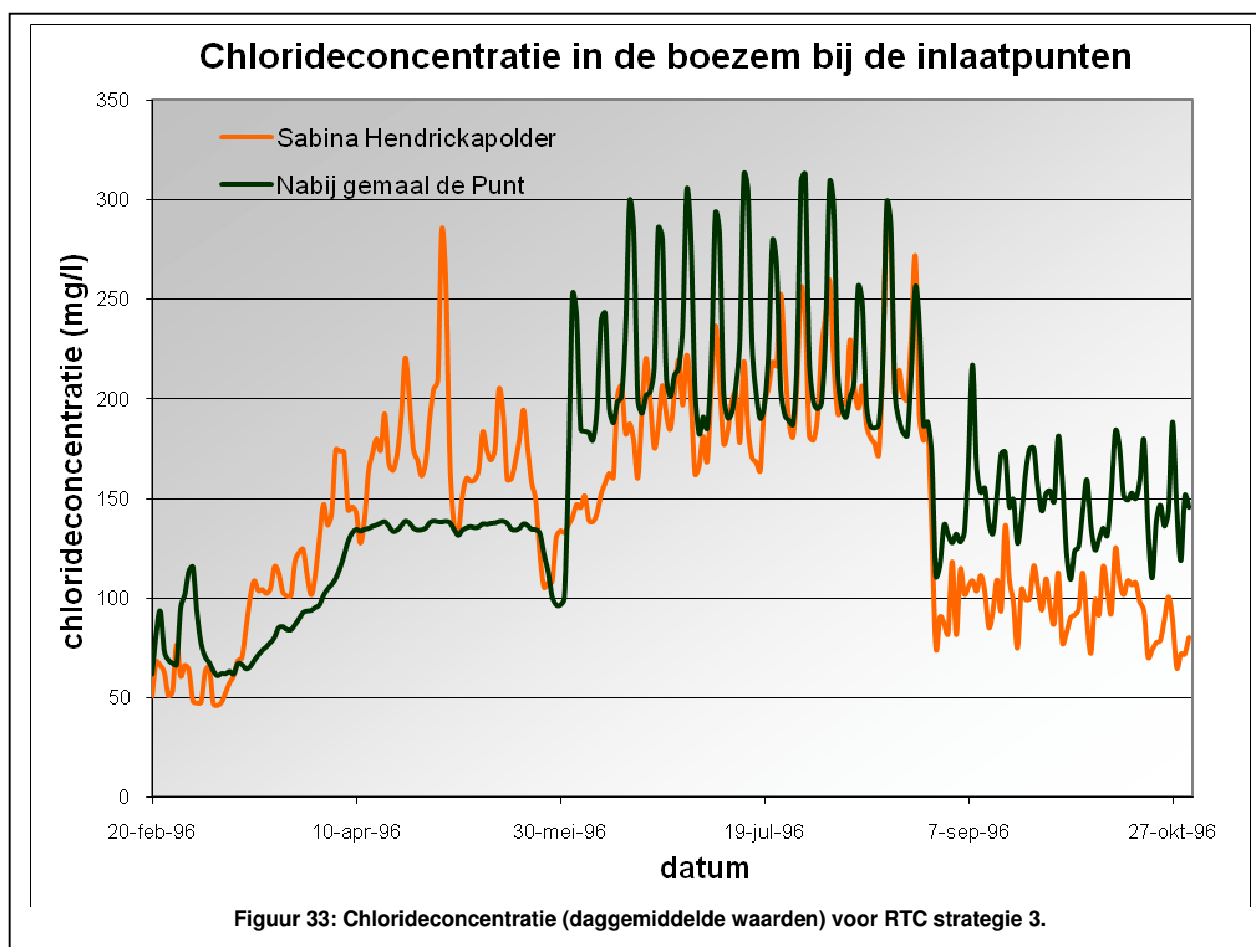
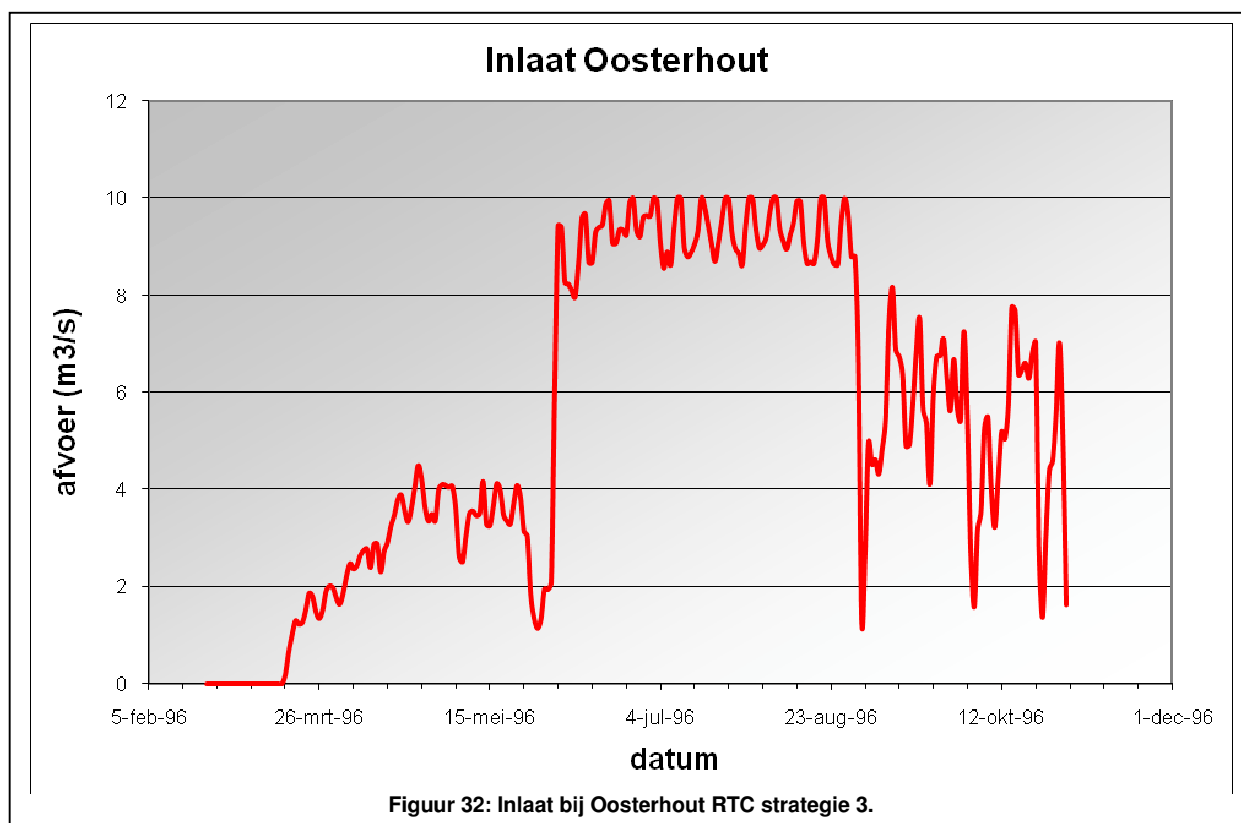
6.3.3 Strategie 3: Sturen op de afvoer van de Dintel en de Vliet en sturen op zout

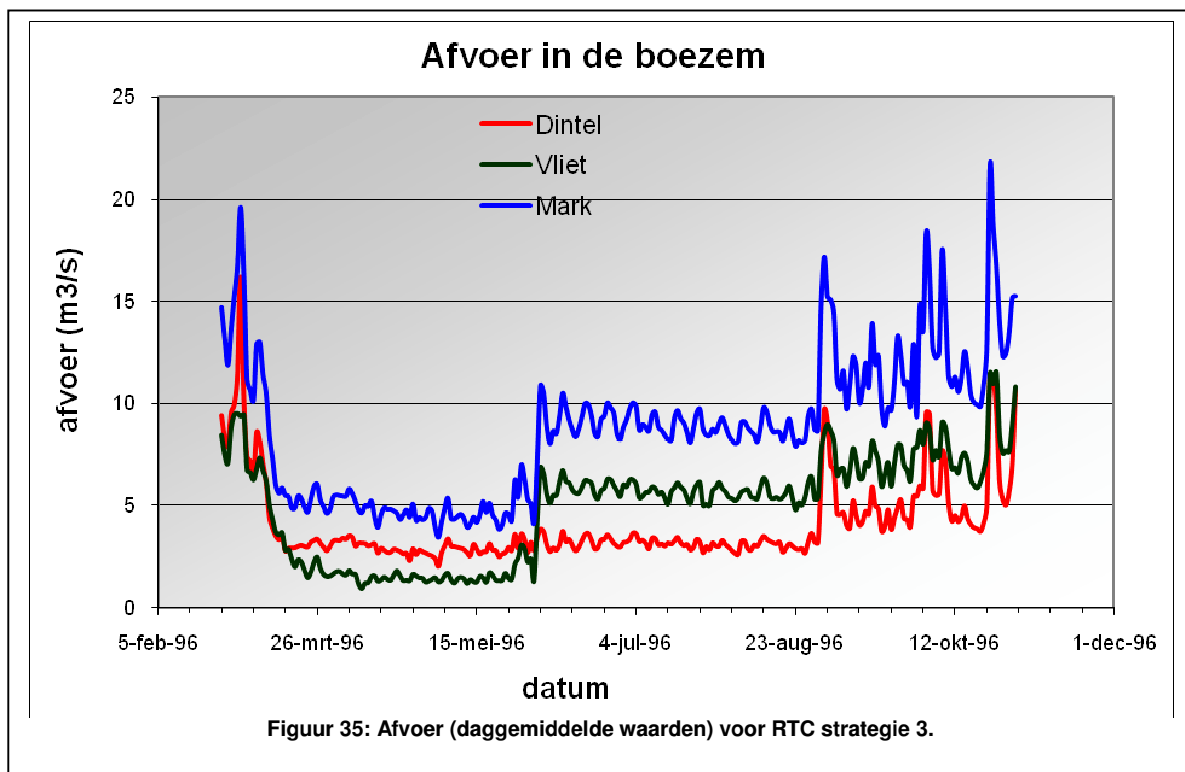
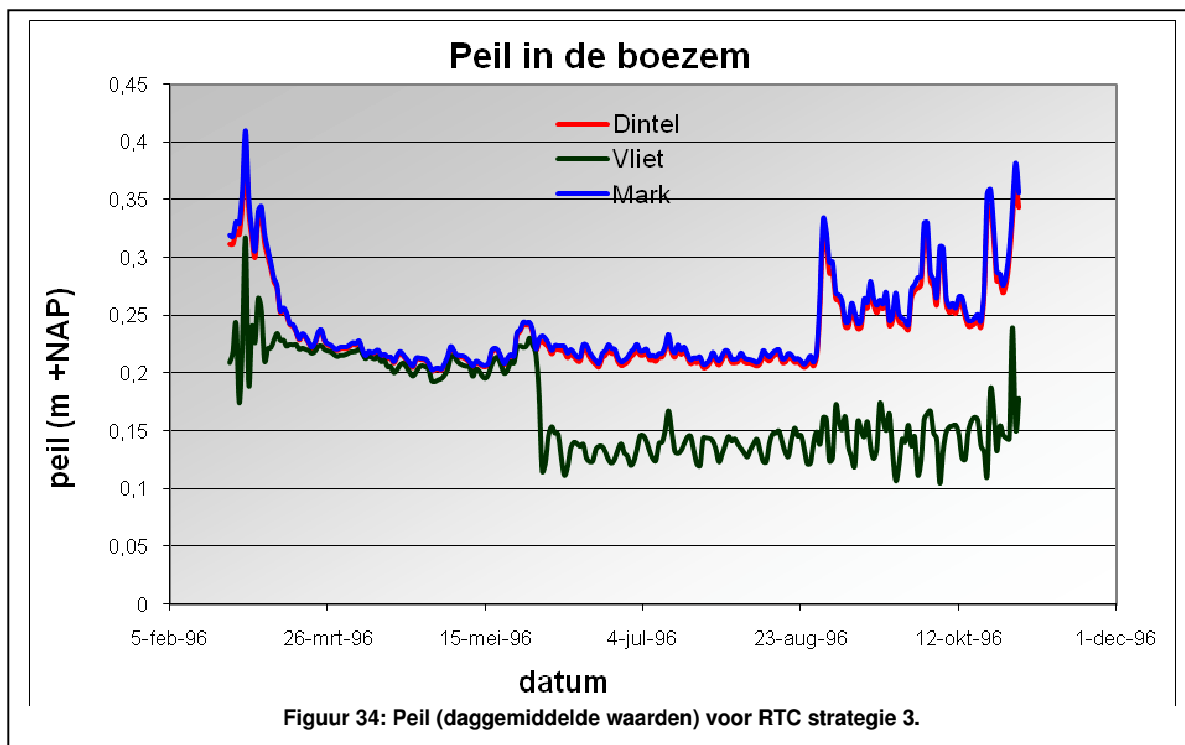
Strategie 3 is een uitbreiding van strategie 2, de fictieve inlaat bij Oosterhout wordt nu afhankelijk van de gemeten chlorideconcentratie in de Dintel en de Vliet bestuurd. Door verschillende meetlocaties van de waterkwaliteit te onderzoeken is een optimale locatie bepaald, deze locatie ligt ongeveer 200 m benedenstrooms van de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten. Als de chlorideconcentratie daar boven de helft van de grenswaarde komt worden de spuisluizen open gezet. Hetzelfde geldt voor de inlaat. Omdat de spuisluizen nu tegelijkertijd met het openen van de inlaatduiker worden geopend, komt de afvoer bij de inlaatpunten sneller op gang. Daarom is de reactietijd van deze besturing lager dan de reactietijd bij strategie 1. Daar moest de extra inlaat van zoet water eerst een peilverhoging veroorzaken om een afvoer te genereren.

Als de chloride concentratie in de Dintel of de Vliet stijgt van 150 mg/l naar 300 mg/l neemt de het doorspoeldebiet op deze takken lineair toe van 0 m³/s naar de maximale waarde van de afvoer om door te spoelen. Dus als in de Dintel een concentratie van 225 mg/l wordt gemeten, op 200m benedenstrooms van inlaatpunt Sabina Hendricka polder, zal de spuisluis precies zo ver open worden gezet dat $(300 \text{ mg/l} - 225 \text{ mg/l}) / (300 \text{ mg/l} - 150 \text{ mg/l}) = 0,5$ * het maximale doorspoel debiet wordt gegenereerd. In dit geval dus de helft van 3 m³/s, het optimale doorspoeldebiet op de Dintel. Voor de Vliet gebeurt hetzelfde. De openingshoogte van de spuisluis wordt in de Vliet onafhankelijk van de meetwaarde van de chlorideconcentratie van de Dintel berekend. De precieze bepaling van de setpoints in Matlab is weergegeven in bijlage 8, de toelichting op het algoritme is gegeven in paragraaf 5.3.3.

Bij deze strategie wordt in totaal over de gehele periode 120 miljoen m³ water ingelaten, dit is afgeleid uit de grafiek in figuur 32. Dit is bijna de helft van de inlaat bij het referentie alternatief. Een maximum inlaatdebiet van 10m³/s is gebruikt, deze wordt zoals te zien is in de figuur niet overschreden. Aan de eisen voor de waterkwaliteit wordt net voldaan, wel moet worden opgemerkt dat er kortstondige overschrijdingen van de grenswaarde voorkomen. Door de maximale inlaat te verhogen kan dit effect worden beperkt maar er wordt aangenomen dat dergelijke kortstondige en kleine overschrijdingen geen probleem zijn.

Het is duidelijk zichtbaar in de grafiek in figuur 35 dat er in de periode maart, april, mei 1996 met een lager afvoer kan worden volstaan. Vooral op de Vliet is kleinere afvoer nodig, op de Dintel is eigenlijk de gehele periode een behoorlijke afvoer noodzakelijk. Door in deze periode minder water in te laten, afhankelijk van de metingen van de chlorideconcentraties, wordt 100 miljoen m³ water bespaard. Ten opzichte van de referentie situatie is de besparing zelfs 135 miljoen m³.





6.4 Conclusies modelresultaten

De modelresultaten op de doelcriteria kunnen als volgt worden samengevat:

	<i>Uitgangs- situatie</i>	<i>Referentie- situatie</i>	<i>Strategie 1</i>	<i>Strategie 2</i>	<i>Strategie 3</i>
Chloride vracht (10^3 kg Cl)	7202	221	254	0,2	0,8
Totale inlaat (10^6 m ³)	28	255	74	220	120
Maximale inlaat (m ³ /s)	10,8	15	9,4	10	10

Tabel 7: Modelresultaten

In deze paragraaf zullen eerst de resultaten van de verschillende strategieën en situaties worden besproken. Daarna zal met een Multi Criteria Analyse worden afgewogen welke oplossing uit dit onderzoek het beste uit de bus komt.

Uitgangssituatie

Er is duidelijk te zien dat in de uitgangssituatie het probleem van de zoutindringing bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten erg groot is. Er wordt meer dan 7 miljoen kg chloride met een concentratie boven de grenswaarde van de chloride concentratie ingelaten naar de achterliggende polders. Er treden ook zeer hoge chloride concentraties op in het Mark-Vliet systeem als geen passende maatregelen worden genomen. Bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten is de concentratie soms zelfs hoger dan 8.000 mg/l.

In de uitgangssituatie wordt weinig water ingelaten via de inlaatduiker bij Oosterhout. In 1996 stond het Mark-Vliet systeem oorspronkelijk nog in open verbinding met het Volkerak-Zoommeer, in de uitgangssituatie is, om de zoutindringing tegen te gaan, gekozen om de schutsluizen gesloten te houden. Er wordt dus geen water ingelaten in het Mark-Vliet systeem vanuit het Volkerak-Zoommeer terwijl dit in de oorspronkelijke situatie wel zou gebeuren. Hierdoor kan minder zijn ingelaten via de inlaatduiker bij Oosterhout dan werkelijk zou zijn gebeurd als deze situatie zich voor zou doen. De keuze om de schutsluizen gesloten te houden was nodig om de zoutindringing, zoals die in de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer op zal gaan treden, te kunnen modelleren. Maar hierdoor ontstaat een minder realistische situatie, een soort worstcase scenario wat betreft het zoetwater aanbod. De maximale inlaat via de inlaatduiker bij Oosterhout bedraagt 10,8 m³/s.

Referentiesituatie

In de referentiesituatie is de chloride vracht al behoorlijk afgenomen naar 221.000 kg. Bij het inlaatpunt Sabina Hendricka polder in de Dintel komen zelfs helemaal geen problemen meer voor met te hoge chloride concentraties. Bij het inlaatpunt Nabij gemaal de Punt in de Vliet blijven de chloride concentraties nog wel een probleem. Dit komt omdat de stroomsnelheid in het meest benedenstrooms gelegen deel van de Vliet snel afneemt en er dus hogere chloride concentraties voorkomen. Daarom is er een grotere afvoer nodig op de Vliet.

Strategie 1

In strategie 1 wordt een relatief eenvoudige besturing van de sluizen geïmplementeerd om te sturen op zout. Er wordt water ingelaten via de inlaatduiker bij Oosterhout als de chlorideconcentratie bij de inlaatpunten hoger wordt dan 250 mg/l. Het zal enige tijd duren voordat een hoger peil op de Mark gemeten kan worden. Pas dan zullen de spuisluizen verder open gaan en zal er een afvoer door de Dintel of de Vliet worden opgewekt en de chloride concentraties bij de inlaatpunten worden beperkt. Het kost enige tijd voordat er dus gereageerd kan worden op (te) hoge chloride concentraties. Een besturing die sneller kan reageren is dus noodzakelijk voor het effectief terugdringen van de zoutindringing.

Verder ontstaan er moeilijkheden doordat het peil op het Volkerak-Zoommeer niet constant is. Een bepaalde overschrijding van het peil levert iedere keer dezelfde openingshoogte op voor de spuisluizen. De afvoer die wordt gegenereerd bij deze openingshoogte varieert omdat de drijvende kracht achter deze afvoer het peilverschil tussen het peil boven- en benedenstrooms van de sluis. Soms is er zelfs geen afvoer mogelijk. Het is moeilijk om op deze manier een optimale instelling van de kunstwerken te vinden. De optimale

instelling varieert namelijk met het peilverschil mee. Een besturing die hier rekening mee houdt is dus noodzakelijk om de systeem mogelijkheden optimaal te benutten.

Bij het gebruik van strategie 1 wordt desondanks een besparing op de totale inlaat en op het maximale inlaatdebiet gerealiseerd. Maar er wordt wel een grotere zoutvracht naar de polders berekend. Vanwege de hierboven genoemde problemen met de reactietijd van het systeem en het variabele peil op het Volkerak-Zoommeer, gaat de situatie bij de inlaatpunten er op achteruit.

Strategie 2

Strategie 2 lost één van de problemen met strategie 1 op en benut de mogelijkheden van het systeem beter. Er wordt namelijk rekening gehouden met het variabele peil op het Volkerak-Zoommeer en het beschikbare water wordt optimaal verdeeld over de Dintel en de Vliet. Deze strategie heeft geen reactietijd omdat er continu wordt doorgespoeld. Er is rekening gehouden met het fluctuerende peil op het Volkerak-Zoommeer. De afvoer door het systeem is veel constanter. In de grafiek van de afvoer in figuur 31, is dit niet heel duidelijk te zien. In de grafiek is namelijk de daggemiddelde waarden van de afvoer gegeven. De afvoer is iedere 5 minuten berkeend, wanneer naar de exacte waarde van de afvoer wordt gekeken valt direct op dat de afwijkingen t.o.v. de daggemiddelde waarden veel kleiner zijn dan in de referentie situatie en in strategie 1. Omdat deze afvoer veel constanter is kan deze ook effectiever worden ingezet om de zoutindringing tegen te gaan.

De chlorideconcentraties komen nauwelijks meer boven de grenswaarde uit wanneer gebruik gemaakt wordt van deze strategie. Het ingelaten water wordt continu verdeeld over de twee takken door de sluizen precies op de goede openingshoogte in te stellen. Hierdoor is altijd een voldoende grote afvoer aanwezig om de zoutindringing te beperken tot onder de grenswaarde. De totale vracht aan chloride boven de 300 mg/l neemt hierdoor af naar minder dan 200 kilo. Een flinke verbetering t.o.v. de eerdere strategieën of situaties. Hiervoor moet continu 10 m³/s worden ingelaten. De totale inlaat in deze periode komt daarmee uit 220 miljoen m³. Dit is net iets minder dan in de referentiesituatie, maar omdat de systeem mogelijkheden beter benut worden kan met minder water voldoende tegen de zoutindringing worden gedaan.

Verder valt op dat de peilverschillen tussen de Dintel en de Vliet zijn afgenomen. Doordat een groter deel van de afvoer over de Vliet wordt gestuurd zal het peil hier relatief minder afnemen t.o.v. het peil op de Dintel. Dit heeft als voordeel dat de spuisluis bij Benedensas (in de Vliet) een groter deel van de tijd gebruikt kan worden. Strategie 2 is dus een erg effectief. Er wordt alleen nog niet gestuurd op waterkwaliteit, waardoor teveel water wordt ingelaten over gehele periode. Strategie 3 gaat hiermee verder.

Strategie 3

Strategie 3 is een uitbreiding van strategie 2, de totale inlaat is nu afhankelijk gemaakt van de metingen van de chlorideconcentraties net benedenstrooms van de inlaatpunten. Er is gekozen om net benedenstrooms van de inlaatpunten te meten omdat de besturing op de waterkwaliteit een bepaalde reactietijd met zich meebrengt. Bij strategie 1 bleek deze reactietijd een probleem. Dit wordt in deze strategie ondervangen door tegelijkertijd met de inlaat de spuisluizen te openen. Wanneer een te hoge chlorideconcentratie in de Dintel of de Vliet wordt gemeten wordt het debiet bij de fictieve inlaat bij Oosterhout verhoogd, net zoals de afvoer bij de betreffende spuisluis. Omdat er nu meteen een afvoer bij de spuisluizen wordt gegenereerd is de reactietijd van deze besturing veel lager. Er hoeft nu immers niet meer op een peilverhoging te worden gewacht.

Deze besturing zal dus een besparing opleveren in de totale hoeveelheid water die wordt ingelaten t.o.v. strategie 2. Het gaat om een besparing van 100 miljoen m³ water, dit is een besparing van 45% t.o.v. continu inlaten met het maximale debiet. Wel wordt er weer een kleine reactie tijd geïntroduceerd waardoor de totale vracht chloride boven de grenswaarde net iets hoger uitkomt dan bij strategie 2. In totaal is de vracht chloride boven de 300 mg/l nu 800 kg groot. Nog steeds een relatief grote verbetering t.o.v. strategie 1 of de referentie situatie.

Multi Criteria Analyse

Met een Multi Criteria Analyse kan bepaald worden welke strategie de beste is. Hiervoor krijgen de verschillende doelcriteria een eigen gewicht. Het meest belangrijk is de zoutvracht aangezien het waterschap geen verslechtering van de situatie met een zoet Volkerak-Zoommeer wil accepteren. Daarna is de maximale hoeveelheid water die moet worden ingelaten een belangrijke maat voor de eenmalige kosten. De totale hoeveelheid water die wordt ingelaten is een belangrijke maat voor de operationele kosten. Het is moeilijk in te schatten in welke verhouding de operationele kosten tot de eenmalige kosten staan. Verwacht wordt dat de operationele kosten een stuk lager zullen zijn waardoor gekozen wordt om de totale hoeveelheid ingelaten water een kleiner gewicht te geven dan het maximale inlaatdebiet. De volgende gewichten worden aangenomen, een gewicht van 0,5 voor de zoutvracht, een gewicht van 0,2 voor de totale inlaat en een gewicht van 0,3 voor het maximale inlaatdebiet.

In de Multi Criteria Analyse worden de resultaten van de uitgangssituatie weggelaten omdat anders de zoutvracht van de overige strategieën niet meer vergeleken kan worden. Deze zijn in alle gevallen namelijk heel erg laag t.o.v. de zoutvracht in de uitgangssituatie. Deze zoutvracht is een belangrijke maat voor de effectiviteit van de oplossing en moet zodoende beter afgewogen kunnen worden tussen de verschillende strategieën. Verder kunnen alle drie de onderdelen van de doelcriteria als kostenpost worden beschouwd, waardoor ze een negatieve score krijgen.

Er is gekozen om het beste alternatief de hoogste score (namelijk 1) te geven en het slechtste alternatief de laagste score (namelijk 0). De andere scores worden geïnterpoleerd tussen deze waarden. Dit wordt ook wel intervalstandaardisatie genoemd. Dit levert de scores in tabel 8 op.

	Referentiesituatie	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3
Zoutvracht (kg CL)	0,13	0,00	1,00	1,00
Totale inlaat (m3)	0,00	1,00	0,19	0,75
Maximale inlaat (m3/s)	0,00	1,00	0,89	0,89

Tabel 8: Scores op de verschillende onderdelen uit de doelcriteria.

Wanneer de weging wordt uitgevoerd levert dit de volgende scores op:

	gewicht:	Referentiesituatie	Strategie 1	Strategie 2	Strategie 3
Zoutvracht (kg CL)	0,5	0,07	0,00	0,50	0,50
Totale inlaat (m3)	0,2	0,00	0,20	0,04	0,15
Maximale inlaat (m3/s)	0,3	0,00	0,30	0,27	0,27
Totaal	1	0,07	0,50	0,81	0,92

Tabel 9: Weging van de alternatieven met de totale score voor deze alternatieven.

Hieruit blijkt dat, gegeven de bovengenoemde gewichten, strategie 3 qua realisatie van de doelcriteria de meest optimale strategie uit dit onderzoek is om het Mark-Vliet systeem door te spoelen.

7 Discussie

7.1 Modelonzekerheden

Het Sobek model is geschikt om de zoutindringing in het Mark-Vliet systeem te modelleren. Toch spelen enkele belangrijke beperkingen van het model een rol bij de modellering van deze zoutindringing. In het model worden bijvoorbeeld de 2 dimensionale effecten die een rol spelen bij zoutindringing niet meegenomen. De modellering van het Mark-Vliet systeem is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Hierdoor ontstaan afwijkingen t.o.v. wat er zich in werkelijkheid af zal spelen. Daar komt bij kijken dat het niet mogelijk is om het model te calibreren op de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer. Hierdoor kunnen de onzekerheden die optreden vanwege het gebruik van het model en de modellering van het Mark-Vliet systeem minder eenvoudig worden beperkt. In deze paragraaf wordt op deze onzekerheden ingegaan.

7.1.1 Discretisatie en calibratie model

Sobek is een numeriek model wat is gediscretiseerd in tijd en ruimte. Daarom is het nodig om een tijd- en ruimtestap op te geven in het model. Er is gekozen voor een ruimtestap van 50 m en een tijdstap van 5 minuten. In het oorspronkelijke model van Witteveen+Bos (2008) is een tijdstap van 5 minuten gebruikt in de Channel Flow module en een tijdstap van 30 seconden in de waterkwaliteitsmodule. Omdat de verschillende modules parallel aan elkaar moeten worden berekend wanneer er gestuurd wordt op waterkwaliteit moet dezelfde tijdstap worden opgegeven voor de verschillende modules. Om de rekentijd van het model te beperken is gekozen voor een tijdstap van 5 minuten voor de waterkwaliteitsmodule. De invloed op de resultaten met een tijdstap van 5 minuten in plaats van 30 seconden was zeer gering.

Het model is, ondermeer vanwege de discretisatie in ruimte en tijd, een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Daarnaast is er beperkt informatie beschikbaar over het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem en bijvoorbeeld het verloop van het profiel van de verschillende waterwegen. Het stroomgebied is namelijk opgedeeld in een aantal deelgebieden met een eigen bodemsamenstelling. Hierdoor ontstaan afwijkingen t.o.v. de werkelijkheid. De samenstelling van de bodem in het model komt nooit precies overeen met de werkelijkheid. Verder is bijvoorbeeld geen ruimtelijk verdeelde neerslag meegenomen in het model. Deze onzekerheden kunnen worden verkleind door het model te calibreren. Een probleem bij de calibratie van het model is dat er niet gecalibreerd kan worden op de toekomstige situatie, er zijn namelijk geen meetwaarden beschikbaar van deze situatie.

Het waterkwantiteitsmodel is gecalibreerd op basis van metingen van de afvoer en peilen. De resultaten van de calibratie van het model levert op dat het waterkwantiteitsmodel geschikt is voor droge jaren. Het waterkwaliteitsmodel is gecalibreerd op basis van chloride metingen in de bestaande situatie. Het model is niet gecalibreerd voor de dispersiecoëfficiënt. In de huidige situatie komen geen hoge chlorideconcentraties voor, het Volkerak-Zoommeer is immers nog zoet. In de toekomstige situatie komen wel hoge chloride concentraties voor in het systeem. Het zou het beste zijn als de calibratie op metingen van de toekomstige situatie gebaseerd kan worden. Dit is op dit moment nog niet mogelijk. Hierdoor blijven onzekerheden bestaan. Vooral de dispersiecoëfficiënt is een belangrijke onzekerheid. Hier zal in paragraaf 7.1.4 op worden teruggekomen.

7.1.2 Beperkingen model

Voor waterkwaliteitsstudies is het van belang te beseffen dat Sobek een 1 dimensionaal model is. Daarom zal uitgegaan moeten worden van volledige menging. Dit is een belangrijke aanname bij het modelleren van zoutindringing waarbij 2-dimensionale effecten een grote rol kunnen spelen. Doordat in deze studie gebruik gemaakt wordt van Sobek moet van volledige menging worden uitgegaan. Maar deze aanname kan worden verdedigd. Wanneer er veel geschut wordt vindt er ook veel scheepvaart plaats en is er dus ook meer turbulentie. Bij het doorspoelen van het systeem treden grotere stroomsnelheden op en dus meer turbulentie. En het Mark-Vliet systeem is een relatief ondiep systeem waardoor de ruimte voor deze twee dimensionale effecten klein is. Als er niet van volledige menging kan worden uitgegaan is het verstandig om water uit het bovenste deel van de waterkolom in te laten. Hier zal het water relatief zoeter zijn dan onderin de waterkolom.

In het model is ook de dispersie bij de schutsluizen aangepast. Het bleek namelijk dat vanwege de manier waarop in Sobek de berekeningen van de waterkwaliteitsmodule worden uitgevoerd, een sluis geen fysieke barrière is voor het in de waterlopen aanwezige chloride. Dit terwijl het wel een fysieke barrière is voor het

water zelf. Dit is opgelost door lokaal bij de schut- en spuisluizen de dispersiecoëfficiënt gelijk aan 0 te maken. Hierdoor wordt een fout gemaakt, de verbetering geeft meer vertrouwen in de resultaten.

Verder zijn een aantal aanpassingen aan het model gedaan. Ten eerste is de Rainfall Runoff verwijderd. Deze module is vervangen door laterale toestromingen ter plaatse van waar de Rainfall Runoff module in de waterlopen terecht kwam. Omdat het Mark-Vliet systeem een boezemsysteem is waarin het peil gehandhaafd wordt, zal dit niet tot grote afwijkingen in de resultaten leiden. De inlaat en uitlaat naar de polders en de boezem blijft in het onderzochte jaar namelijk gelijk als het peil in het systeem gelijk blijft.

In dit onderzoek worden 4 verschillende modules van Sobek gebruikt. Het gebruik van de Real Time Control module om te sturen op de waterkwaliteit heeft als gevolg dat al de verschillende modules parallel aan elkaar zullen moeten worden berekend. De rekentijd neemt aanzienlijk toe wanneer de verschillende modules parallel aan elkaar worden gedraaid. Het model van het Mark-Vliet systeem doet er 30 minuten over als de verschillende modules sequentieel worden berekend. In het geval dat de berekening parallel uitgevoerd worden, duurt de berekening 18 uur. Voor verdere modelstudie waarbij deze modules gebruikt worden is dit handig om te weten.

7.1.3 Polderinlaat

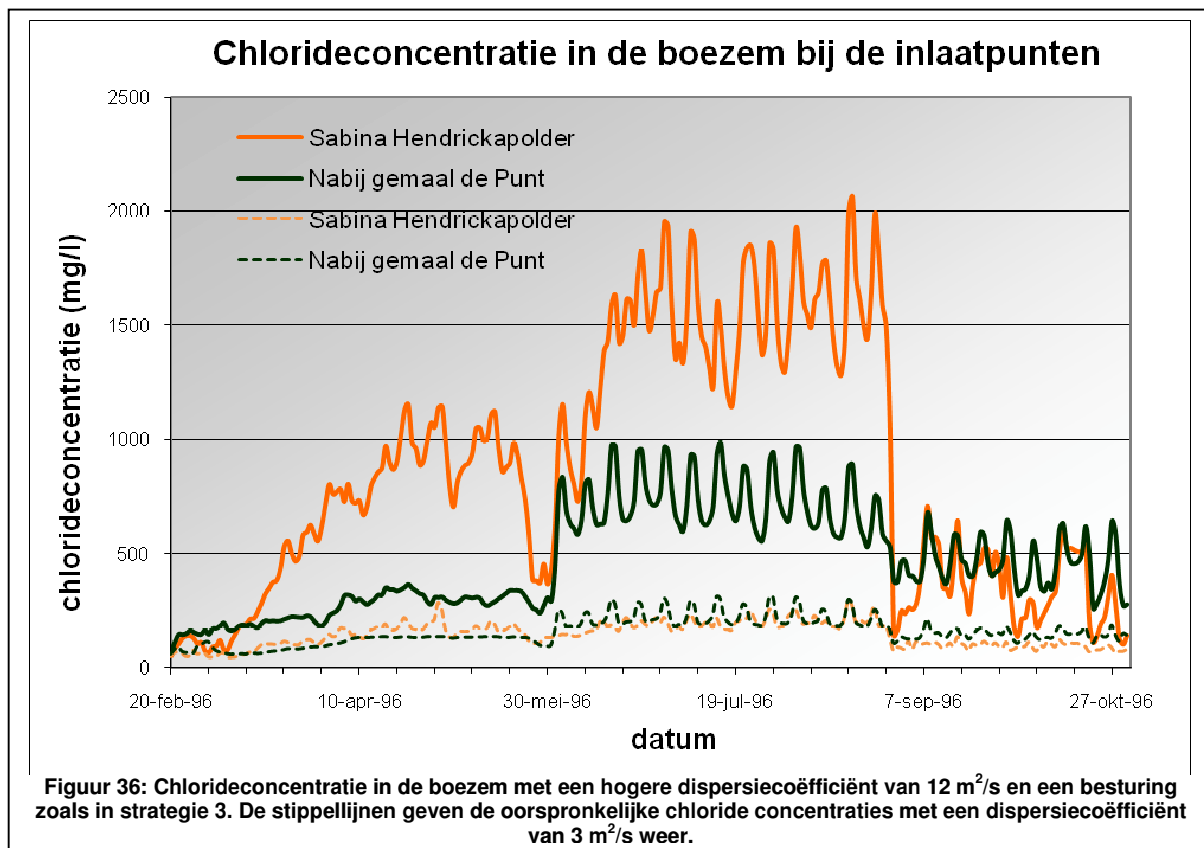
In de Rainfall Runoff module wordt de inlaat en uitlaat naar de polders van het inlaatgebied berekend. Dat gebeurt doordat een zomerpeil en winterpeil is gedefinieerd, dat peil wordt gehandhaafd en daarmee wordt de inlaat en uitlaat naar de polders berekend. De gevonden waarden voor de inlaat naar het inlaatgebied uit de waterbalans in figuur 10 lijkt aan de lage kant. Het inlaatdebiet is namelijk erg laag in vergelijking met de inlaat die nodig is om de zoutindringing tegen te gaan. Maar de berekeningen van het model komen goed overeen met de inschattingen van het Waterschap Brabantse Delta. Dit geeft vertrouwen in de correcte modellering van deze inlaat en uitlaat naar het inlaatgebied. Een verhoging van de inlaat naar het inlaatgebied zal als gevolg hebben dat het maximale inlaatdebiet via de fictieve inlaatduiker bij Oosterhout vergoot zal moeten worden. Anders zal namelijk het peil in het Mark-Vliet systeem dalen. Maar het is dus verstandig om rekening te houden met een marge in het maximale inlaatdebiet bij Oosterhout. Ook is het aan te bevelen om de inlaat naar het inlaatgebied goed te meten zodat de onzekerheid in de waarde van dit debiet kleiner is.

De inlaat naar de polders is relatief klein. Wanneer het water dat wordt ingelaten bij de inlaatpunten mengt met het water in de polders zal verdunning optreden. Het is de vraag of de totale inlaat naar de polders van $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ een significante stijging van de chloride concentraties in de polders zal veroorzaken. In de bodem van de polders bevindt zich namelijk een aanzienlijke hoeveelheid water met een bepaalde chloride concentratie. Daarom zou de grenswaarde van de chloride concentratie verhoogd kunnen worden. Wel is het dan belangrijk om te weten wat de chloride concentraties in de polders zijn in het geval van een zout Volkerak-Zoommeer. Wanneer het Volkerak-Zoommeer weer zout wordt zal de kwel naar de polders in West-Brabant ook zouter worden. De chloride concentraties in de polders worden op den duur waarschijnlijk weer vergelijkbaar met de concentraties in figuur 5. In sommige polders zal dan misschien zelfs water met een lagere chloride concentratie dan de grenswaarde moeten worden ingelaten omdat de chloride concentraties verdund moeten worden tot onder de grenswaarde.

7.1.4 (Numerieke) dispersie

De dispersie coëfficiënt is afhankelijk van de mate van menging. In een rivier met veel bochten of veranderingen in het profiel en een hoge stroomsnelheid is de dispersie coëfficiënt groter. De dispersiecoëfficiënt is ook afhankelijk van de diepte en de breedte van een rivier. De dispersie coëfficiënt die op dit moment gebruikt wordt in het model is gelijk aan $3 \text{ m}^2/\text{s}$. Dit komt overeen met de dispersiecoëfficiënt van een rivier van 4 meter diep en 40 meter breed (Lijklema, 1984). In de gebruikte bron wordt geen onderscheid gemaakt afhankelijk van de stroomsnelheid.

De resultaten zijn gevoelig voor de dispersie coëfficiënt. Het effect van een hogere dispersiecoëfficiënt op de resultaten van het model wordt duidelijk uit de figuur in bijlage 4. Een hogere dispersiecoëfficiënt levert benedenstrooms lagere pieken en bovenstrooms hogere pieken in de chloride concentratie op. Ten tweede trekt het chloride sneller het systeem in bij een hogere dispersie coëfficiënt, er vindt namelijk meer afvlakking van de pieken plaats waardoor het front van de chloride golf sneller het Mark-Vliet systeem intrekt. Dit wordt ook duidelijk als gekeken wordt naar de analytische oplossing van de zoutindringing voor verschillende dispersiecoëfficiënten, te zien in bijlage 2, figuur 45.



Uit figuur 46 in bijlage 4 wordt duidelijk dat de chloride concentratie afhankelijk is van de dispersiecoëfficiënt. Wanneer de chlorideconcentratie laag is (ongeveer beneden de 1000 mg/l), is een duidelijke verhoging zichtbaar bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten. Aangezien de chlorideconcentratie beneden de grenswaarde van 300 mg/l moet blijven is dit dus een belangrijk effect. Met een hogere dispersiecoëfficiënt is een grotere afvoer nodig om de chlorideconcentraties beneden de grenswaarde te houden. En bij een grotere afvoer is de dispersiecoëfficiënt ook weer groter.

Het effect van de numerieke dispersie op de totale dispersie neemt toe met de stroomsnelheid. Dit is te zien in figuur 43 in bijlage 2. Bij lage stroomsnelheden is de numerieke dispersie heel laag, bij hoge stroomsnelheden wordt de numerieke dispersie snel groter. Bij een verhoging van de stroomsnelheid van 0 m/s naar 0,1 m/s neemt de totale dispersie toe van 3 m²/s naar 7 m²/s (voor een ruimtestap van 50m, een tijdstap van 5 minuten en een dispersiecoëfficiënt van 3 m²/s). Doordat er een bepaalde stroomsnelheid aanwezig is nemen de chlorideconcentraties ook weer snel af. Het effect van de stroming op de verlaging van de chlorideconcentraties is groter dan het effect van de toename in de chloride concentraties vanwege numerieke dispersie. Het advectieve transport is bij lage stroomsnelheden veel groter dan het dispersieve transport. Bij een hogere stroomsnelheid zullen de chloride concentraties dus snel afnemen. Pas bij hele hoge stroomsnelheden neemt de numerieke dispersie dergelijke grote waarden aan dat deze een belangrijkere rol gaat spelen dan het effect van het doorspoelen. Dergelijke stroomsnelheden komen niet voor in het systeem bij de onderzochte strategieën. Het effect van numerieke dispersie is dus relatief klein.

In figuur 36 zijn de resultaten gegeven met als uitgangspunt een dispersie coëfficiënt van 12 m²/s en een besturing zoals in strategie 3. Het blijkt dat de chloride concentraties bij een hogere dispersie coëfficiënt snel toenemen voor de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten. Er is een veel grotere stroomsnelheid nodig, en dus ook een grotere afvoer, om de zoutindringing tegen te gaan. Er wordt in de berekening vanaf begin april vrijwel continu doorgespoeld met het maximale inlaatdebiet. Het maximale inlaatdebiet is niet verhoogd in deze berekening, en met deze afvoer is het dus niet mogelijk om de chloride concentratie bij de inlaatpunten beneden de grenswaarde te houden. De waarde van de dispersie coëfficiënt is dus van invloed op de hoogte van het maximale inlaatdebiet. Het valt dus aan te bevelen om de onzekerheid over de dispersiecoëfficiënt te minimaliseren door metingen uit te voeren in het Mark-Vliet systeem en aan de hand van de metingen de dispersie coëfficiënt te calibreren.

7.2 Maatgevende factoren voor de zoutindringing

De mate van zoutindringing in het Mark-Vliet systeem wordt bepaald door verschillende factoren, deze worden hieronder besproken.

Stroomsnelheid

Het belangrijkste mechanisme om zoutindringing tegen te gaan is het doorspoelen van het Mark-Vliet systeem, door het doorspoelen met een bepaalde afvoer wordt een stroomsnelheid opgewekt.

Dispersiecoëfficiënt en numerieke dispersie

Van grote invloed op de mate van zoutindringing is de dispersie coëfficiënt. Het maximale doorspoeldebiet is sterk afhankelijk van de dispersiecoëfficiënt.

Droogte

In een lange droge periode is de zoutindringing maatgevend, er is dan namelijk geen afvoer door het systeem en dus geen stroomsnelheid in het Mark-Vliet systeem.

Totale chloride vracht per schutting

Verder is de totale vracht die per schutting het systeem binnenkomt een belangrijke maat voor de zoutindringing. Het uitwisselingspercentage is een belangrijke factor voor de vracht per schutting.

Aantal schuttingen

Als laatste is het aantal schuttingen van belang voor de mate van zoutindringing.

Peil en chlorideconcentratie toekomstige Volkerak-Zoommeer

Het peil en de chlorideconcentratie op het toekomstige Volkerak-Zoommeer bepalen de chloride vracht per schutting en hebben invloed op de afvoer bij de spuisluizen.

De resultaten van de RTC-strategieën vertonen twee verschillende periodiciteiten waaruit afgeleid kan worden welke factoren van belang zijn voor de zoutindringing. Uit de grafieken van de chlorideconcentraties voor de verschillende RTC-strategieën blijkt dat er iedere 7 dagen een piek zit in de chlorideconcentratie. Deze pieken vinden plaats in de weekenden. In de weekenden is de zoutindringing groter omdat het aantal schuttingen groter is dan doordeweeks. Dit is het geval omdat het grootste deel van de scheepvaart op het Mark-Vliet systeem recreatievaart betreft. Hieruit blijkt dat het aantal schuttingen maatgevend is. Ook op dagbasis valt er een bepaalde periodiciteit op. Zoals te zien is in figuur 47 in bijlage 9 zit er iedere 12 uur een piek in de chlorideconcentraties, deze piek komt overeen met de pieken in het getij van het Volkerak-Zoommeer. Er is dan geen afvoer mogelijk bij de spuisluizen en de chloride concentraties in het Mark-Vliet systeem zullen toenemen.

In een lange droge periode, zoals die voorkomt in 1996, is geen natuurlijke afvoer door het Mark-Vliet systeem aanwezig. In deze periode zal het gehele maximale inlaatdebiet bij de fictieve inlaatduiker bij Oosterhout noodzakelijk zijn. Een langere of drogere periode dan in 1996, heeft een net zo lage natuurlijke afvoer. Dit zal geen gevolgen hebben voor het maximale inlaatdebiet. Daarom kan het jaar 1996 als maatgevend worden beschouwd voor het maximale inlaatdebiet.

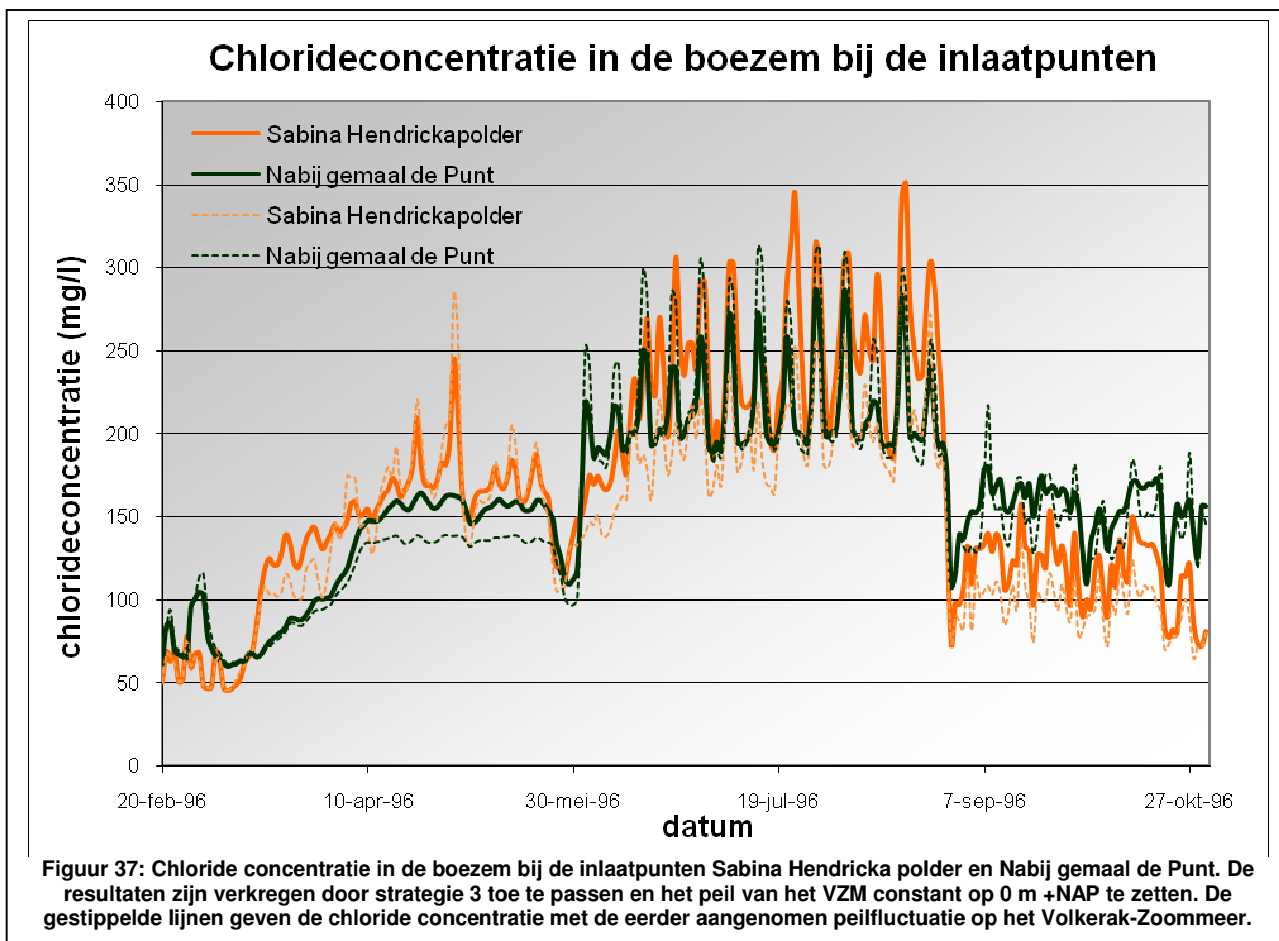
Toch zal in een droger jaar dan 1996 de inlaat naar de polders van het inlaatgebied groter kunnen zijn. Dit heeft als gevolg dat het peil in het Mark-Vliet systeem daalt en dat de afvoer benedenstrooms afneemt. Het water wordt namelijk gebruikt voordat het bij het meest benedenstrooms gelegen inlaatpunt terecht is gekomen. Daarom is minder water beschikbaar om de zoutindringing tegen te gaan. Dit zal dan gecompenseerd moeten worden met een grotere inlaat van zoetwater.

Aangenomen dat het jaar 1996 maatgevend is, en dat de zoutvracht per schutting gelijk blijft, is het aantal schuttingen per dag maatgevend voor de zoutindringing. Meer schuttingen betekent een grotere zoutindringing. Een verlaging van het aantal schutting, door alleen te schutten als de schutsluizen vol zijn valt dus aan te bevelen. Vooral een verlaging van het aantal schuttingen in de weekenden heeft een positief resultaat op de chloride concentraties.

7.3 Evaluatie overige maatregelen

7.3.1 Peilbeheer Mark-Vliet systeem

De resultaten zijn afhankelijk van het peil van de uiteindelijke variant van het Volkerak-Zoommeer. De afvoer bij de spuisluizen kan namelijk niet altijd gegarandeerd worden bij een hoog peil op het Volkerak-Zoommeer. Dit levert vooral voor inlaatpunt Nabij gemaal de Punt in de Vliet problemen op. Het peil op de Vliet ligt lager vanwege het verhang in het peil. De verwachting is dat een lager peil op het Volkerak-Zoommeer een aanzienlijke verbetering oplevert, vooral voor de Vliet. De uiteindelijk te implementeren variant van het Volkerak-Zoommeer is nog niet bekend. Wel is ondertussen bekend dat waarschijnlijk een variant gekozen gaat worden met een kleinere peilfluctuatie.



In figuur 37 valt op dat de chlorideconcentratie bij inlaatpunt 'Nabij gemaal de Punt' afneemt. Dit betekent dat, wanneer de afvoer door de Vliet via de spuisluis gegarandeerd kan worden, een doorspoeldebiet van 7 m³/s voor de Vliet ruim voldoende is om de zoutindringing tegen te gaan in de betreffende situatie. Op de Dintel, nabij inlaatpunt 'Sabina Hendricka polder' is een verhoging van de berekende chlorideconcentraties zichtbaar. De afvoer op de Dintel is iets lager dan in de eerdere situatie. Op de Dintel, waar het peil bij de verschillende strategieën hoger ligt dan op de Vliet, was veel minder sprake van belemmering van de afvoer door te kleine peilverschillen bij de spuisluis, dit wordt immers voornamelijk veroorzaakt door de grote verhanglijn in het peil op de Vliet. Het peilverschil bij de spuisluis op de Vliet is nu vaker voldoende groot om een afvoer te kunnen genereren. Hierdoor kreeg de Dintel in de oorspronkelijke situatie met een variabel peil op het Volkerak-Zoommeer een groter deel van de afvoer te verwerken omdat de spuisluis in de Vliet vaker niet ingezet kon worden dan de spuisluis op de Dintel. Het is dus aan te raden om in het geval van een lager peil op het Volkerak-Zoommeer een groter deel van het doorspoeldebiet via de Dintel te sturen.

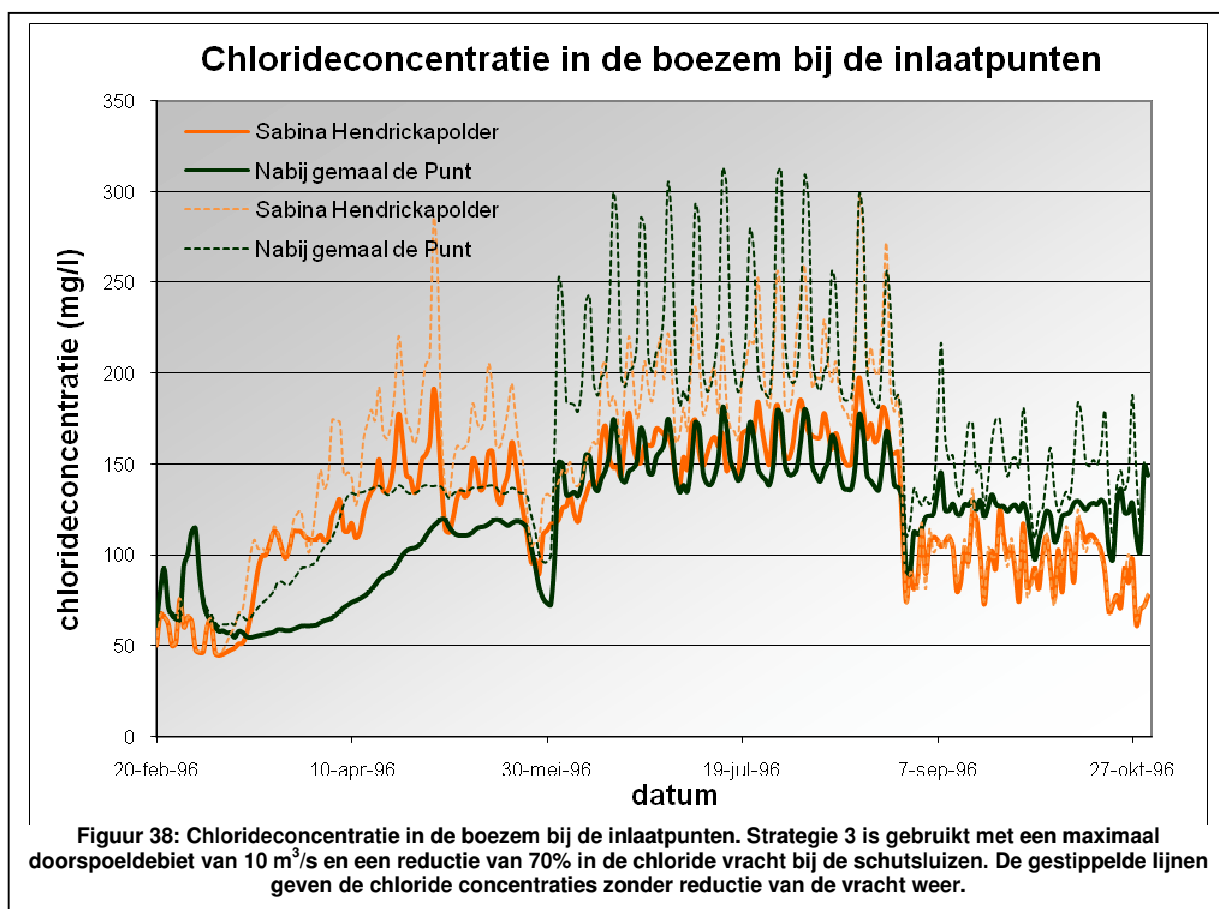
Met een lager peil op het Volkerak-Zoommeer wordt in totaal 107 miljoen m³ water ingelaten via de fictieve inlaatduiker bij Oosterhout en toepassing van strategie 3. Dit is een besparing van 13 miljoen m³ water in de

betreffende periode t.o.v. strategie 3. Dit geeft aan dat het effect van een groter peilverschil tussen het Mark-Vliet systeem positief is. De totale zoutvracht bedraagt nu 963 kg, de gehele vracht gaat naar de polders achter inlaatpunt Sabina Hendricka polder.

De resultaten zijn dus afhankelijk van het peil op het Volkerak-Zoommeer. Daarom is het nuttig om een aantal aanbevelingen te doen met betrekking tot het peilbeheer van het toekomstige Mark-Vliet systeem, en aangrenzende systemen. Het huidige streefpeil van het Mark-Vliet systeem ligt rond de 0,2 m +NAP, de variant van het peil op het toekomstige Volkerak-Zoommeer heeft een peilfluctuatie tussen de -0,3m +NAP en 0,3 m +NAP. Het is niet mogelijk om een afvoer door de spuisluizen te garanderen wanneer het peil van het Volkerak-Zoommeer (tijdelijk) hoger is dan het peil in het systeem. De aanvoer van zoet water via de inlaatduiker bij Oosterhout onder vrij verval naar het Mark-Vliet systeem kan niet gegarandeerd worden wanneer het streefpeil van het Mark-Vliet systeem boven de 0,2 m +NAP ligt. Bij dit streefpeil is het niet altijd mogelijk om water in te laten. Gezien het uitgangspunt dat het Volkerak-Zoommeer een peilfluctuatie krijgt tussen de -0,3 m +NAP en 0,3 m +NAP is het aan te raden om het peil van het Mark-Vliet systeem boven de 0,3 m +NAP te houden. Gezien het peil van het Wilhelmina kanaal is het aan te raden om het peil van het Mark-Vliet systeem onder de 0,2 m +NAP te houden. Van belang is dus dat er goed wordt nagedacht over de consequenties van het toekomstige peilbeheer op het Volkerak-Zoommeer. Een lager peil op het Volkerak-Zoommeer is gunstiger voor de afvoer bij de spuisluizen. Indirect is dit ook gunstiger voor de inlaat bij Oosterhout. Bij een hoger peil op het Mark-Vliet systeem dan 0,2 m +NAP is de inlaat via de inlaatduiker bij Oosterhout namelijk niet altijd te garanderen.

7.3.2 Maatregelen bij de schutsluizen

Het effect van veranderingen in de vracht chloride die per schutting het systeem binnen komt worden onderzocht door een zoutreductie van 70% bij de schutsluizen in te voeren in het model. Strategie 3 wordt toegepast met een maximaal doorspoeldebiet van 10 m³/s om de waterkwaliteit te sturen.

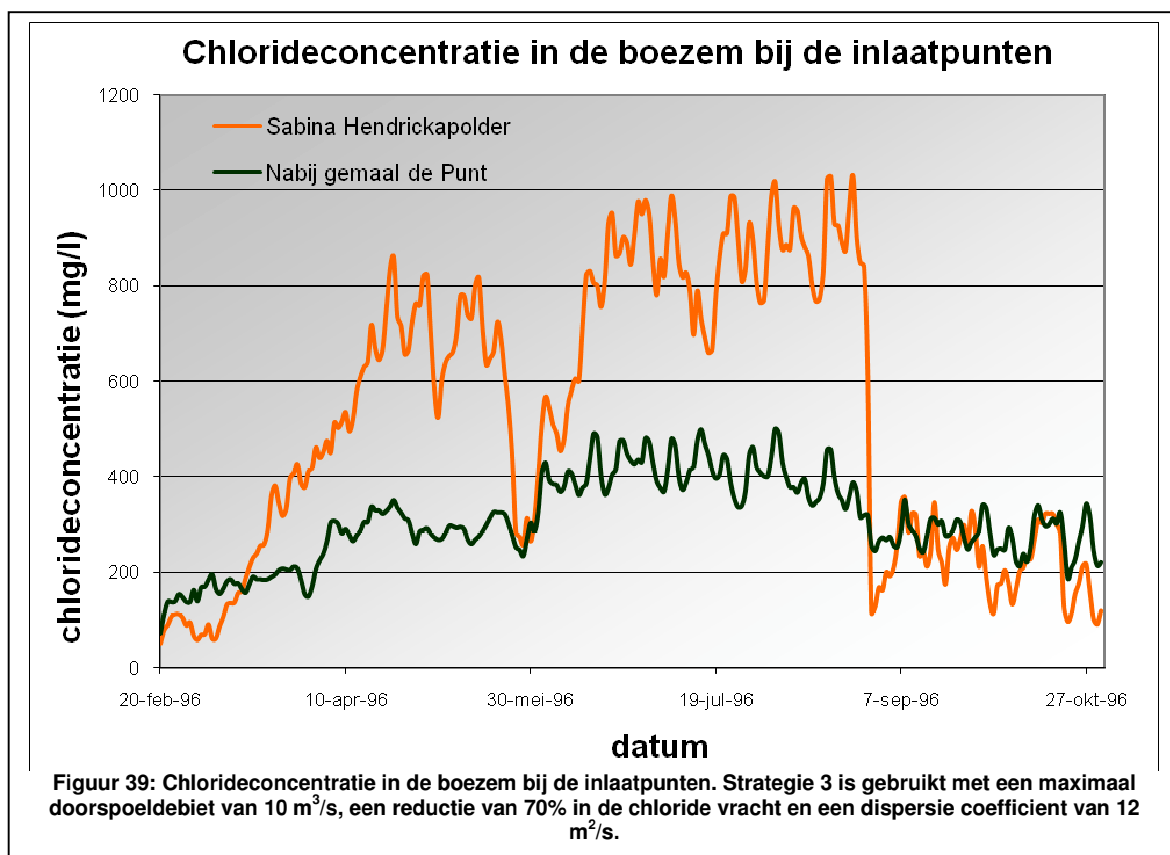


Een dergelijke reductie in de vracht kan bereikt worden door het plaatsen van drempels in de schutsluizen die de zouttong tegen houden. Er kan ook gedacht worden aan het plaatsen van bellenschermen. Het is de

vraag of een reductie van 70% in de vracht realistisch is, maar om het effect op de chloride concentraties in de boezem aan te tonen zal daar nu vanuit worden gegaan.

Uit figuur 38 blijkt dat een reductie van de vracht bij de schutsluizen een flinke verlaging van de chloride concentraties bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten veroorzaakt. Als rekening wordt gehouden met een achtergrondconcentratie van 50 mg/l bedraagt de reductie van de pieken in de chloride concentratie ongeveer 50%. Een 70% lagere vracht bij de schutsluizen heeft dus een verlaging van ongeveer 50% in de chloride concentraties bij de betreffende inlaatpunten als gevolg. Er wordt ook bijna geen gebruik van het maximale inlaatdebiet bij Oosterhout. Maximaal 9,9 m³/s wordt ingelaten. Een totale inlaat van 72 miljoen m³ wordt gevonden. De zoutvracht naar de polders bedraagt maar liefst 0 kg.

In figuur 39 is te zien wat de berekende chloride concentraties worden als er wordt doorgespoeld met 10 m³/s, er een zoutreductie van 70% bij de schutsluizen plaats vindt en als de dispersiecoëfficiënt verhoogd wordt naar 12 m²/s. Uit deze figuur blijkt dat de onzekerheid in de dispersie coëfficiënt groter is dan de winst die gehaald kan worden door de zoutvracht bij de schutsluizen flink te beperken. De stijging in de chloride concentraties vanwege een hogere dispersiecoëfficiënt is vele malen groter dan de daling als gevolg van de lagere zoutvracht. De dispersiecoëfficiënt is dus belangrijker voor het benodigde doorspoeldebiet dan de totale vracht per schutting. T.o.v. strategie 3 met een dispersiecoëfficiënt van 12 m²/s (figuur 35) nemen de chlorideconcentraties in het Mark-Vliet systeem af met ongeveer 50% bij een reductie van 70% in de chloride vracht. Dit getal is dus onafhankelijk van de dispersiecoëfficiënt.



7.3.3 Afvoer bovenstrooms meenemen

In de hoeveelheid water die wordt ingelaten, bijvoorbeeld bij het gebruik van strategie 3, zou ook de afvoer van bovenstrooms kunnen worden meegenomen. Hiermee kan een extra besparing op de totale hoeveelheid water die wordt ingelaten bereikt worden. De verwachting is dat het maximale inlaatdebiet niet lager uit zal vallen. In een droge periode is er nagenoeg geen afvoer door Mark-Vliet systeem waardoor geen besparing op het maximale inlaatdebiet te verwachten is.

7.3.4 Verplaatsen inlaatpunten

Het verplaatsen van de inlaatpunten naar een locatie verder bovenstrooms kan een heel nuttige oplossing zijn. De effecten van het doorspoelen zijn bovenstrooms veel beter merkbaar. Uit bijvoorbeeld figuur 42 in

bijlage 2 wordt duidelijk dat de chloride concentraties snel afnemen verder bovenstrooms van de schutsluizen. Het verplaatsen van de locaties van de inlaatpunten kan dus betekenen dat met een lagere afvoer doorgespoeld moet worden om de zoutindringing te beperken tot onder de grenswaarde. De voordelen van het verplaatsen van de inlaatpunten zijn dus erg groot. Het Waterschap heeft al besloten om deze maatregel uit te gaan voeren.

7.3.5 Sluis bovensas

De sluis bij Bovensas is zeer beperkend voor de afvoer van de Vliet. De sluis is weergegeven in figuur 40. De locatie van de sluis in het Mark-Vliet systeem is aangegeven in figuur 3b. De sluis bij Bovensas is de voornaamste reden voor het grote verhang in het peil op de Vliet en de grote peilverschillen tussen de Vliet en de Dintel. Het vergroten van het doorstroomprofiel, door bijvoorbeeld het slopen van de sluis, heeft als voordeel dat er een kleiner verhang in het peil van de Vliet aanwezig zal zijn. Hierdoor is het makkelijker om het streefpeil van het Mark-Vliet systeem in de Vliet te handhaven. Ook heeft dit als voordeel dat er betere afvoermogelijkheden zijn bij de spuisluis in de Vliet. Dit heeft als gevolg dat er een lagere zoutindringing in het systeem voor zal komen.



7.3.6 Stroomsnelheidsverhogende maatregelen bij Benedensas

Op de Vliet is een grotere afvoer nodig dan op Dintel terwijl de vracht chloride per schutting op de Vliet enkele malen kleiner is dan de vracht chloride op de Dintel. Er is een grotere afvoer nodig op de Vliet omdat het doorstroomprofiel in het meest benedenstrooms gelegen deel van de Vliet een grotere oppervlakte heeft. Bij een gelijke afvoer is er dus een lagere stroomsnelheid op de Vliet dan op de Dintel.

De oppervlakte van het doorstroomprofiel in het meest benedenstrooms gelegen deel van de Vliet is veel groter dan verder bovenstrooms, hierdoor neemt de stroomsnelheid af. Het meest benedenstrooms gelegen inlaatpunt in de Vliet, inlaatpunt Nabij gemaal de Punt, ligt zelfs in dit gedeelte van de Vliet. Plaatselijk zouden stroomsnelheidsverhogende maatregelen, zoals kribben, een flinke verhoging van de stroomsnelheid op kunnen leveren. Voor de scheepvaart worden geen grote problemen verwacht wanneer de oppervlakte van het doorstroomprofiel verkleind zou worden naar de oppervlakte van het doorstroomprofiel in het meest benedenstrooms gelegen deel van de Dintel. Dit zou wel betekenen dat de stroomsnelheid verhoogd wordt, en dat de afvoer die nodig is, om de zoutindringing in de Vliet bij het inlaatpunt Nabij gemaal de Punt tot onder de grenswaarde te beperken, veel lager uit kan vallen.

In de Dintel kan met een afvoer van $3 \text{ m}^3/\text{s}$ worden doorgespoeld om de zoutindringing te beperken. Het inlaatpunt Sabina Hendricka polder ligt ongeveer even ver van de schutsluis in de Dintel, als het inlaatpunt Nabij gemaal de Punt ligt van de schutsluis in de Vliet. Daar komt bij dat de zoutvracht per schutting lager is bij de schutsluis in de Vliet. Daarom kan verwacht worden dat met een doorspoeldebiet van minder dan $3 \text{ m}^3/\text{s}$ zou kunnen worden volstaan in de Vliet als de stroomsnelheid voldoende groot is. In totaal kan de maximale inlaat van water die nodig is hiermee flink worden beperkt. Het lijkt daarom de moeite waard om een dergelijke oplossing te overwegen.

7.3.7 Berging bovenstrooms

In paragraaf 5.2 is de mogelijkheid om bovenstrooms in het systeem water te bergen onderzocht. Een verhoging van het peil bovenstrooms, met als gevolg berging van water in de bodem van het bovenstrooms gelegen deel van het stroomgebied van het Mark-Vliet systeem. Met een verhoging van 20cm in het grondwaterpeil kan 10 miljoen m³ water worden geborgen. Als dit geleidelijk ingezet kan worden is het mogelijk om 40 dagen lang met 3 m³/s door te spoelen. Momenteel kan bij de inlaatduiker bij Oosterhout 7 m³/s worden ingelaten. In dit onderzoek wordt aanbevolen om door te spoelen met 10 m³/s. De 3 m³/s is precies het verschil tussen deze debieten. Toch wordt verwacht dat hiermee alleen bespaard kan worden op de totale inlaat. Het is namelijk moeilijk om een besparing op de maximale inlaat te realiseren door middel van het bovenstrooms bergen van water. Dit komt doordat de periode waarin het maximale doorspoel debiet noodzakelijk is, gebruik makend van strategie 3, enkele maanden bedraagt. Met retentie bovenstrooms is namelijk alleen mogelijk een korte droge periode te overbruggen. Ook is het de vraag of het mogelijk is om deze 3 m³/s geleidelijk beschikbaar te krijgen.

Daarnaast is het noodzakelijk om voorspellingen te hebben van de zoutindringing en de weersomstandigheden. Het is namelijk nodig om te weten wanneer deze 3 m³/s ingezet zou moeten worden. Daarom is het nodig andere Real Time Control technieken toe te passen zoals Model Predictive Control.

7.3.8 Model Predictive Control

Het gebruik van Model Predictive Control (Overloop, P.J., 2006) in plaats van Real Time Control kan een nuttige toevoeging zijn voor het Mark-Vliet systeem. Model Predictive Control is een uitbreiding op Real Time Control doordat naast de actuele gemeten waarden ook voorspellingen van bijvoorbeeld het aantal schuttingen of de verwachte meteorologische omstandigheden meegenomen kunnen worden. Verwacht wordt dat dit een besparing op kan leveren in de totale hoeveelheid ingelaten water. Gegeven dat het aantal schuttingen maatgevend is voor de zoutindringing en het benodigde maximale inlaatdebiet, mag verwacht worden dat de voorspellende eigenschappen van Model Predictive Control geen invloed hebben op deze maximale inlaat. Het maximale inlaatdebiet om de zoutindringing te beperken zal dus waarschijnlijk niet afnemen.

De systeem mogelijkheden kunnen beter benut worden door gebruik te maken van Model Predictive Control. Zo kunnen bijvoorbeeld de voorspellingen van de chlorideconcentratie in het Mark-Vliet systeem worden meegenomen in de beslissing om water in te laten. In de besturing van het systeem met strategie 3 wordt ook water ingelaten als de chloride concentraties al aan het dalen zijn. Dit terwijl er misschien geen water ingelaten hoeft te worden. Met voorspellingen van het aantal schuttingen of van de afvoer van bovenstrooms kan besloten worden om minder water in te laten, of juist om eerder te beginnen met doorspoelen.

Het lijkt niet aannemelijk dat met Model Predictive Control een grote besparing kan worden gerealiseerd t.o.v. Real Time Control. Over een groot deel van de onderzochte periode is namelijk het maximale inlaatdebiet van 10 m³/s noodzakelijk om de zoutindringing tegen te gaan. Door gebruik te maken van Real Time Control zal dit maximale inlaatdebiet nog steeds nodig zijn. Het aantal schuttingen is een randvoorwaarde, de afvoer van bovenstrooms kan groter worden maar de duur van de grotere afvoer zal de duur van de lange droge periode niet overtreffen. Wel kan winst gehaald worden met betrekking tot de duur van de periode waarin water wordt ingelaten. Er wordt geschat dat een besparing van maximaal 10% op de totale hoeveelheid ingelaten water mogelijk is.

Een andere optie is om Model Predictive Control te gebruiken om het bovenstrooms bergen van water in de bodem van het stroomgebied mogelijk te maken. Er moet dan voorspeld kunnen worden of er water geborgen moet worden in de bodem van het stroomgebied bovenstrooms van Breda. Wanneer voorspeld wordt dat er een droge periode aankomt, waarin langere tijd het maximale doorspoeldebiet noodzakelijk is, kan van te voren besloten worden om het peil in het bovenstrooms gelegen deel van het stroomgebied op te zetten. Alleen is het de vraag of de onzekerheid in de lange termijn weersvoorspellingen dit toelaat. Kan bijvoorbeeld ruim van te voren aangegeven worden dat er een droge periode aankomt, zodat er tijd is om water in de bodem te bergen en daarna in de droge periode uit te laten. Ook is het de vraag of het mogelijk is dit in de bodem geborgen geleidelijk beschikbaar te maken. Voor het Mark-Vliet systeem kan dus volstaan worden met een relatief eenvoudige Real Time Control besturing. Het uitbreiden van de besturing door Model Predictive Control toe te passen zal waarschijnlijk een relatief kleine winst opleveren.

7.3.9 Effecten van de overige maatregelen

De effecten van de in deze paragraaf genoemde maatregelen op de doelcriteria zijn geschat. In de onderstaande tabel zijn de resultaten gegeven. Voor de toelichting op de resultaten wordt verwezen naar de betreffende paragrafen. In deze paragraaf worden de scores als dat nodig is kort toegelicht.

	Chloride vracht	Totale Inlaat	Maximale inlaat
<i>Peilbeheer Mark-Vliet systeem</i>	0 / +	0 / +	0
<i>Maatregelen bij de schutsluizen</i>	++	+	+
<i>Afvoer bovenstrooms meenemen</i>	0	+	0
<i>Verplaatsen inlaatpunten</i>	++	++	++
<i>Sluis bovensas</i>	0 / +	0 / +	0
<i>Stroomsnelheidsverhogende maatregelen bij Benedensas</i>	++	++	++
<i>Berging bovenstrooms</i>	0	+	0
<i>Model Predictive Control</i>	0 / +	0 / +	0

Tabel 10: Inschatting van de effecten van de overige maatregelen op de doelcriteria. Legenda: -- = zeer negatief, - = negatief, 0 = neutraal, + = positief, ++ = zeer positief.

Een beter peilbeheer heeft een licht positief effect op de doelcriteria. Omdat de afvoer gegarandeerd kan worden zal de grenswaarde van de chloride concentratie minder makkelijk overschreden worden. Dit blijkt niet uit paragraaf 7.3.1 omdat de afvoer beter verdeeld moet worden over de verschillende takken. Het effect op de totale inlaat is ook licht positief.

Effectief zijn de maatregelen ter reductie van de vracht bij de schutsluizen. Uit paragraaf 7.3.2 blijkt dat de chloride vracht naar de polders bij de inlaatpunten flink af kan nemen. Daarom kan met een lager maximaal doorspoeldebiet en een kleinere totale inlaat worden volstaan.

Door de afvoer bovenstrooms mee te nemen wordt alleen een positief effect op de totale inlaat ingeschat. De maximale inlaat blijft gelijk. De chloride vracht zal ook gelijk blijven of misschien zelfs lichtelijk toenemen.

Het verplaatsen van de inlaatpunten lijkt een erg effectieve maatregelen. De chloride vracht bij de inlaatpunten zal veel lager uitvallen. Ook kan een lager maximaal doorspoeldebiet worden gebruikt en zal de totale inlaat flink afnemen.

Door het verwijderen van de sluis bij bovensas kan een zelfde effect worden bereikt als het effect van een beter peilbeheer. Het peil op de Vliet benedenstrooms van Bovensas zal toenemen. Hierdoor kan de afvoer van de Vliet beter gegarandeerd worden. Dit zal een positief effect op de chloride vracht en de totale inlaat hebben.

Een andere effectieve maatregel lijkt het nemen van stroomsnelheidsverhogende maatregelen bij Benedensas (Vliet). Op de Vliet zal de chloride vracht flink afnemen, er kan met een lagere (waarschijnlijk behoorlijk veel lager zelfs) maximale inlaat worden volstaan en de totale inlaat zal dus ook afnemen.

Berging van water bovenstrooms heeft een positief effect op de totale inlaat. De maximale inlaat zal niet worden beperkt omdat het water van bovenstrooms een beperkt aanbod heeft. Daarom kan niet onbeperkt van deze voorraad gebruik worden gemaakt. Een extreem droge periode duurt langer dan dat deze voorraad kan worden gebruikt.

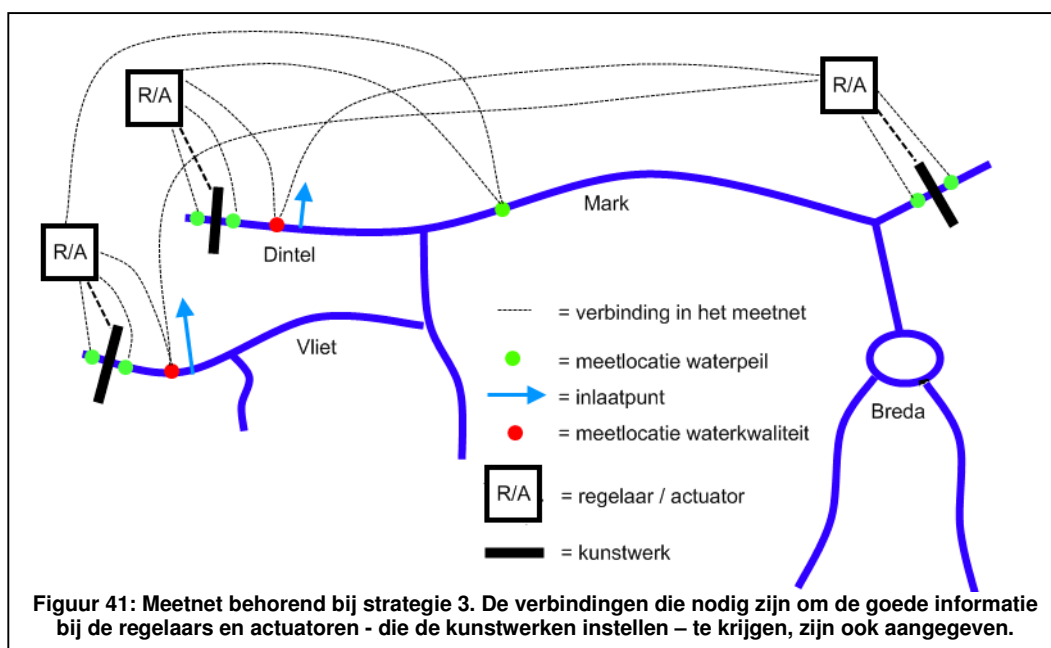
Met Model Predictive Control kan naar schatting een kleine winst worden gehaald met betrekking tot de chloride vracht en de totale inlaat omdat beter kan worden bepaald wanneer het nodig is om in te laten. Het maximale inlaatdebiet zal niet veranderen omdat dat afhankelijk is van het aantal schuttingen.

7.4 Uitvoering en kosten

Om een besturing zoals voorgesteld in strategie 3 in te voeren is het nodig om op 9 verschillende locaties te meten. Er zijn 7 locaties waar het waterpeil zal moeten worden gemeten. Één bovenstrooms en één benedenstrooms van de twee spuisluizen (4), één bovenstrooms en één benedenstrooms van de inlaatduiker bij Oosterhout (2) en één meetstation in de Mark (1). Verder zijn er 2 locaties om de waterkwaliteit te meten nodig. Één in de Dintel en één in de Vliet, net bovenstrooms van de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten (2). In totaal dus 9 meetlocaties.

Verder is er een meetnet nodig, waarmee de metingen verzameld kunnen worden. Dit meetnet bevat alle meetlocaties en alle verbindingen tussen de meetlocaties en de (centrale) regelaars en actuatoren. Een schema hiervan is weergegeven in figuur 41. In dit voorbeeld is gekozen om alleen de benodigde gegevens naar de drie verschillende regelaars te sturen. Deze regelaars berekenen de instellingen van de kunstwerken. De actuatoren stellen de kunstwerken in. Er kan ook gekozen worden om alle gegevens centraal te verzamelen, waarna centraal de instelling van alle kunstwerken wordt berekend. Deze instellingen worden dan doorgestuurd naar de actuatoren bij de kunstwerken.

In de modelberekeningen is gewerkt met een tijdstap van 5 minuten. Dit houdt in dat iedere 5 minuten nieuwe meetwaarden beschikbaar moeten zijn en dat de instelling van de kunstwerken hierop aangepast moet worden. Dit kan niet handmatig gebeuren. Aangezien het vrij forse kunstwerken betreft zullen de actuatoren hierop berekend moeten zijn. De verandering in de instelling van de kunstwerken zal niet heel groot zijn per tijdstap. Alleen wanneer het peilverschil tussen het Volkerak-Zoommeer en het Mark-Vliet systeem kleiner dan 0 wordt zullen de spuisluizen snel gesloten moeten worden. Vlak voordat het peilverschil 0 is zullen de spuisluizen ver open staan om met het kleine peilverschil een afvoer te kunnen genereren. Dit effect is goed te zien in figuur 19. Het is de vraag of het mogelijk is de sluizen zo snel te sluiten, waarschijnlijk zullen ze voordat het peilverschil te klein wordt langzaam al gesloten moeten worden. Voor de overige veranderingen in de instelling van de kunstwerken worden geen problemen verwacht. Het gaat dan over een verandering in de instelling van hooguit enkele cm per 5 minuten.



Toch zullen de actuatoren niet goedkoop zijn, het gewicht van de kunstwerken die bestuurd moeten worden is niet gering. Het is de vraag of de kosten van deze actuatoren opwegen tegen de winst die gehaald wordt door het systeem met Real Time Control te besturen. Omdat de winst in termen van het maximale inlaatdebiet en totale inlaat behoorlijk groot is mag verwacht worden dat de investering in een dergelijke besturing van de kunstwerken opweegt tegen de besparing op de kosten van een nieuwe inlaat via bijvoorbeeld de Roode Vaart. Het verdient de aanbeveling om hier verder onderzoek naar te doen.

Er wordt opgemerkt dat er kosten aan het onderhoud van het systeem verbonden zijn. Ook is er de mogelijkheid dat het systeem faalt. Het systeem moet dus ook uitgezet kunnen worden zodat weer overgestapt kan worden op bijvoorbeeld een handmatige besturing van de kunstwerken.

De kosten van het uitbreiden van de capaciteit van de inlaatduiker bij Oosterhout zijn door Witteveen+Bos (2008) geraamd op 2,5 miljoen Euro. De capaciteit wordt dan zelfs uitgebreid naar 30 m³/s. De kosten van de verschillende varianten van de aanvoer van zoetwater via de Roode Vaart liggen tussen de 42 en 72 miljoen Euro. De kosten van een Real Time Control besturing van de kunstwerken bestaan uit de kosten van het meetnet, de regelaars (dit kan een computer zijn die centraal de meetgegevens verzamelt en omrekent naar de juiste instelling van de kunstwerken) en de actuatoren. Het zwaartepunt van de kosten ligt vermoedelijk in de kosten van de actuatoren. Het meten van de chlorideconcentraties en de peilen in het systeem is relatief eenvoudig en goedkoop. De chlorideconcentratie kan gemeten worden door middel van bijvoorbeeld de geleidbaarheid. Uit navragen bij het Waterschap en Witteveen+Bos is gebleken dat het heel goed mogelijk is om het iedere 5 minuten het peil en de chlorideconcentratie te meten.

7.5 Inlaat Oosterhout of de Roode Vaart

De inlaat bij Oosterhout wordt gebruikt om water aan te voeren vanuit het Wilhelmina kanaal. Het peil op het Wilhelmina kanaal ligt hoger dan het streefpeil op het Mark-Vliet systeem maar het kan voorkomen dat het peilverschil te klein wordt om in te laten. Daar komt bij dat de waterkwaliteit op het Wilhelmina kanaal niet altijd aan de waterkwaliteitsnormen voldoet. Er is af en toe sprake van overlast door blauwalgen of bruinrot, waardoor het water minder geschikt is voor de landbouw.

Via de Roode Vaart is de aanbod van zoetwater uit het Hollands Diep vrijwel onbeperkt. Maar als de Rijnafvoer bij Lobith onder de 800 m³/s komt mag geen water meer worden ingelaten, dit om verzilting van de Rijnmond tegen te gaan. Dit komt nu circa 1 dag per jaar voor maar dit zal vanwege de klimaatverandering en de toenemende verzilting vaker voor gaan komen. Verder moet worden opgemerkt dat het peilverschil tussen het Hollands Diep en het Mark-Vliet systeem niet voldoende groot is om altijd water aan te kunnen voeren onder vrij verval. Dit is ook de reden waarom in het onderzoek van Witteveen+Bos gebruik gemaakt wordt van een gemaal bij het ontwerp van de Roode Vaart. De kosten komen wel een stuk hoger uit door een gemaal te gebruiken in plaats van het water onder vrij verval aan te voeren.

Het aanvoeren van zoetwater via de Roode Vaart, zoals aanbevolen door Witteveen+Bos (2008) verdiend dus zeker de voorkeur wat betreft de waterkwaliteit. Wat betreft de (gegarandeerde) aanvoer van voldoende zoetwater heeft de Rode Vaart lichtelijk de voorkeur, maar in het licht van de toenemende verzilting en klimaatverandering kan daar verandering in komen.

Daarnaast moet worden opgemerkt dat de onzekerheden in de resultaten relatief groot zijn. Daarom is het verstandig een marge in te bouwen met betrekking tot het maximale inlaatdebiet. Via Oosterhout is deze marge moeilijker te realiseren dan via de Roode Vaart, het waterakkoord met Rijkswaterstaat laat een kleine marge toe (tot 11 m³/s). Daarom is het verstandig de Roode Vaart in te zetten, in combinatie met de huidige inlaatduiker kan dan altijd voldoende worden ingelaten om de zoutindringing tegen te gaan.

De onzekerheid in de dispersiecoëfficiënt kan verlaagd worden door te deze te calibreren op metingen in de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer. Als daaruit ook blijkt dat deze rond de 3 m²/s ligt zou kunnen worden overwogen om een uitbreiding van de inlaatduiker bij Oosterhout te overwegen. In combinatie met de in paragraaf 7.3 genoemde overige maatregelen kan dan met een inlaatdebiet van 10 m³/s of minder worden volstaan. De kosten van een uitbreiding van de inlaatduiker bij Oosterhout zijn aanzienlijk lager dan de kosten van de uitbreiding van de Roode Vaart. Alleen blijft de waterkwaliteit op het Wilhelminakanaal een probleem.

7.6 Conclusies

De onzekerheid in de berekeningen vragen om een marge voor het maximale inlaatdebiet. Via de inlaatduiker bij Oosterhout kan deze marge minder eenvoudig gerealiseerd worden. De Roode Vaart laat een grotere marge toe in dit maximale inlaatdebiet.

Er zijn geen metingen beschikbaar van de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer. Gezien de redelijk grote onzekerheid in bijvoorbeeld de dispersie coëfficiënt, het uitgangspunt van volledige menging, de totale zoutvracht per schutting en de in- en uitlaat naar de polders van het inlaatgebied mag verwacht worden dat de werkelijke chloride concentraties afwijken van de berekende waarden. De grootste onzekerheid zit in de dispersiecoëfficiënt. Het effect van de numerieke dispersie is relatief klein binnen de marge van de in het Mark-Vliet systeem optredende stroomsnelheden. Daarom valt het aan te bevelen om, zodra er metingen van de toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer bekend zijn, het waterkwaliteitsmodel opnieuw te calibreren, en dan speciaal op de dispersiecoëfficiënt te letten. Een groot deel van de onzekerheid in de dispersiecoëfficiënt kan dan verkleind worden.

Het is van belang om te onderzoeken of er in deze toekomstige situatie met een zout Volkerak-Zoommeer, gescheiden van het Mark-Vliet systeem door schutsluizen, werkelijk van volledige menging sprake is. Dit is een aanname die vanwege het gebruik van het model gedaan moet worden maar waarvan niet zeker is of deze geldig is. Ook is het vanwege deze aanname aan te raden om water in te laten uit het bovenste deel van de waterkolom. Als er zich een zogenaamde zouttong voordoet, zal deze over de bodem trekken en het zoetere water bevindt zich dan bovenin de waterkolom. Verder is het verstandig om in droge periodes zoveel mogelijk 's nachts en doordeweeks in te laten vanwege het schutten wat vooral overdag en in de weekenden plaats vindt.

In 1996 is sprake van een relatief lange droge periode terwijl er geen sprake is van een extreem droog jaar. In een extreem droog jaar kan de inlaat naar de polders van het inlaatgebied veel groter zijn. Hierdoor kan in een droog jaar de inlaat naar de polders groter uitvallen dan voor 1996 is berekend door het model. Het is verstandig om hier een extra marge voor aan te nemen.

Overige effectieve maatregelen die aanbevolen kunnen worden zijn: het verplaatsen van de inlaatpunten, het nemen van maatregelen ter reductie van de chloride vracht bij de schutsluizen en stroomsnelheidsverhogende maatregelen (vooral bij Dintelsas in de Vliet). Deze drie maatregelen kunnen aanzienlijk bijdragen aan het terugdringen van de zoutindringing. Het doorspoelen van het systeem kan op deze manier worden geoptimaliseerd doordat een kleiner maximale inlaatdebiet nodig is en er minder water moet worden ingelaten.

De inlaat naar de polders in 1996 zoals berekend door het model bedraagt $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt goed overeen met de inschattingen van het Waterschap Brabantse Delta. Toch blijft de vraag staan of een dergelijke, relatief lage, inlaat naar de polders, een probleem oplevert in de betreffende polders. In deze polders zal het ingelaten water namelijk mengen met het al in de polders aanwezige water. Dit heeft gevolgen voor de toelaatbare grenswaarde van de chloride concentratie. Deze hangt af van de chloride concentraties die op zullen treden in de polders, met een zout Volkerak-Zoommeer. Als de concentratie in de polders beneden de grenswaarde ligt kan een hogere grenswaarde worden toegelaten. Als de concentratie hoger is zal een lagere grenswaarde worden gebruikt. De verwachting is dat de chloride concentraties in de polders zullen toenemen t.o.v. de huidige situatie. Deze kunnen in de buurt komen van de chloride concentraties zoals in figuur 5 te zien zijn. In dat geval zou zelfs een lagere grenswaarde voor de chloride concentratie in de boezem moeten worden gebruikt om de concentraties in de polders aan de huidige grenswaarde te laten voldoen.

8 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van de studie 'Sturen op zout' is onderzoeken of "de verhoging van de chlorideconcentratie in het Mark-Vliet systeem vanwege het zout worden van het Volkerak-Zoommeer, beperkt kan worden door verschillende Real Time Control strategieën te implementeren en te optimaliseren in Sobek, waardoor de systeemcapaciteiten van het Mark-Vliet systeem beter benut worden en er geen achteruitgang in de zoetwatervoorziening van de polders in West-Brabant t.o.v. de huidige situatie met een zoet Volkerak-Zoommeer plaats vindt".

Verschiedende Real Time Control besturingen zijn geïmplementeerd en de resultaten leveren interessante conclusies en aanbevelingen op. De waterkwaliteit bij de inlaatpunten kan worden gegarandeerd door het slim toepassen van een Real Time Control besturing. Hierdoor is er geen achteruitgang in de zoetwatervoorziening van de polders in West-Brabant meer. Het doel is dus bereikt. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen die uit de resultaten naar voren komen zullen in dit hoofdstuk worden besproken.

8.1 Conclusies

Door het beter benutten van de systeemcapaciteiten kan bespaard worden op het maximaal in te laten doorspoeldebiet en de totale inlaat. De belangrijkste besparing uit dit onderzoek, met toepassing van een Real Time Control besturing, is de besparing op het maximale inlaatdebiet. Door de afvoer van het systeem optimaal te verdelen over de Dintel en de Vliet is het in 1996 nodig om met maximaal 10 m³/s door te spoelen in plaats van 15 m³/s. Deze besparing wordt gerealiseerd doordat de systeem mogelijkheden beter benut worden. Wanneer de spuisluizen niet slim gestuurd worden, zal het grootste deel van de afvoer de natuurlijke weg via de Dintel volgen. Dit terwijl in de Dintel een minder grote afvoer nodig is dan in de Vliet om de zoutindringing tegen te gaan. Hierdoor blijft een groot deel van de afvoer via de Dintel onbenut. Om de chlorideconcentraties in de Vliet omlaag te krijgen is een verhoging van de totale inlaat van water nodig. Wanneer geen gebruik gemaakt wordt van Real Time Control zou slechts een klein deel van deze verhoging de Vliet ten goede komen. Door de spuisluizen slim te sturen en de afvoer optimaal over de verschillende takken van het Mark-Vliet systeem te verdelen kan ook een besparing op de totale inlaat gerealiseerd worden. De waterkwaliteit is in dit geval zelfs ook nog verbeterd. Een Real Time Control besturing levert dus een flinke besparing van het maximale inlaatdebiet op. Dit omdat het ingelaten water veel effectiever kan worden ingezet.

Sturen op zout is dus een nuttige toevoeging gebleken voor het Mark-Vliet systeem. Er kan op de totale inlaat bespaard worden door de chlorideconcentratie te meten. Afhankelijk van metingen wordt beslist hoeveel water er wordt ingelaten. De besparing over de periode van maart tot en met oktober kan oplopen tot ongeveer 100 miljoen m³ water ten opzichte van doorspoelstrategieën waarbij geen rekening wordt gehouden met de waterkwaliteit. Dit is een behoorlijke besparing aangezien er bij het continu doorspoelen van het systeem 220 miljoen m³ water wordt ingelaten over deze periode. Een besturing afhankelijk van de waterkwaliteit levert voor het Mark-Vliet systeem dus een waterbesparing op.

De beste methode om te sturen op zout is een besturing waarbij de spuisluizen gelijktijdig met de inlaat worden geopend. De reactietijd van het systeem op de zoutindringing beperkende maatregelen is dan aanzienlijk korter dan wanneer de spuisluizen alleen afhankelijk van het peil gestuurd worden. Als de spuisluizen niet gelijktijdig met de inlaat worden ingezet is deze reactietijd vrij groot. Het duurt namelijk een bepaalde tijd voordat het ingelaten water de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten bereikt.

De belangrijkste winst van een Real Time Control besturing zit in de mogelijkheid om heel precies te sturen. Zo worden grote schommelingen in de afvoer en in het peil verkleind en het beschikbare water zo optimaal mogelijk benut. In de oorspronkelijke situatie worden de sluizen handmatig bestuurd, wanneer het peil een bepaalde marge overschrijdt gaan de sluizen open. Hierdoor zal een flinke afvoer gegenereerd worden, deze afvoer wisselt afhankelijk van het peil van het Volkerak-Zoommeer. De spuisluizen voeren het water namelijk onder vrij verval af. Doordat de sluizen open gezet worden zal het peil snel dalen en de afvoer zal weer tot stilstand komen wanneer de sluizen dicht gaan. De situatie is op deze manier slecht beheersbaar. Door gebruik te maken van een Real Time Control besturing zijn deze schommelingen binnen redelijke marges te houden. De grootste schommelingen in het peil en de afvoer ontstaan dan alleen nog doordat het peil van het Mark-Vliet systeem soms hoger is dan dat van het Volkerak-Zoommeer en er geen afvoer bij de spuisluizen mogelijk is.

Aangezien de inlaatduiker bij Oosterhout een maximale capaciteit heeft van $7 \text{ m}^3/\text{s}$ is het niet mogelijk om al het benodigde water via deze inlaatduiker in te laten. Er is namelijk een inlaatdebiet van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig om de zoutindringing tegen te gaan, gegeven de in dit onderzoek gebruikte aannames en uitgangspunten. Er is dus een uitbreiding van de inlaatcapaciteit nodig.

Een uitbreiding van de capaciteit van de inlaatduiker bij Oosterhout lijkt in eerste instantie het meest voor de hand liggend. Dit is namelijk relatief goedkoop t.o.v. het aanvoeren van water via de Roode Vaart. In het onderzoek van Witteveen+Bos (2008) is geraamd dat het uitbreiden van de capaciteit van de inlaatduiker bij Oosterhout ongeveer 2,5 miljoen Euro kost. De uitbreiding van de Roode Vaart, die nodig is om voldoende zoetwater aan te kunnen voeren vanuit het Hollands Diep, kost tussen de 42 en 72 miljoen Euro. Bij beide opties zullen de kosten voor een Real Time Control besturing opgeteld moeten worden.

Maar met betrekking tot het zoetwater aanbod en de kwaliteit van het ingelaten water, heeft de aanvoer van zoetwater vanuit de Roode Vaart toch de voorkeur. Het zoetwater aanbod vanuit het Hollands Diep, via de Roode Vaart, is groter en laat een grotere marge toe dan via de inlaatduiker bij Oosterhout. Het zoetwater aanbod vanuit het Wilhelminakanaal kan namelijk niet altijd gegarandeerd worden. Dit geldt overigens ook voor de Roode Vaart, maar de waterkwaliteit op het Wilhelminakanaal (achter de inlaatduiker bij Oosterhout) speelt ook een rol bij deze afweging.

Daarbij komt kijken dat de onzekerheid in de dispersiecoëfficiënt, die bepalend is voor de hoogte van het maximale doorspoeldebiet, aangeeft dat er een marge nodig is in het maximale doorspoeldebiet. Om met de onderzochte strategieën, de zoutindringing bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten van het Mark-Vliet systeem, gegarandeerd te beperken tot onder de grenswaarde, kan een groter doorspoeldebiet nodig zijn dan de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ die voor de aangenomen dispersiecoëfficiënt geldt. Een afweging van de verschillende voor- en nadelen van de inlaatduiker bij Oosterhout t.o.v. de aanvoer van zoetwater via de Roode Vaart zal moeten worden gemaakt. Gezien de onzekerheid in de resultaten verdient de Roode Vaart de voorkeur doordat deze een grotere marge toe laat en over het algemeen vaker kan worden ingezet.

De hoofdvraag uit het onderzoek is: "of de systeemcapaciteiten van het Mark-Vliet systeem beter benut kunnen worden, zodat de chlorideconcentraties nabij de inlaatpunten van de polders, als gevolg van het zout worden van het Volkerak-Zoommeer, niet boven de grenswaarde komen, door gebruik te maken van Real Time Control sturing." Deze vraag kan positief beantwoord worden. Doordat de capaciteiten van het systeem beter benut worden kan een flinke besparing op zowel het maximale doorspoeldebiet als de totale inlaat gerealiseerd worden. En de chlorideconcentraties blijven bij de meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten net onder de grenswaarde door de kunstwerken in het systeem slim te sturen. Kortom: Real Time Control is effectieve methode gebleken om te sturen op zout in het Mark-Vliet systeem.

8.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek en de resultaten van de onderzochte strategieën worden de volgende aanbevelingen gedaan.

- Om de onzekerheid in de resultaten van het model te verkleinen wordt aanbevolen om meteen na het eventueel zout worden van het Volkerak-Zoommeer te beginnen met het meten van de chloride concentraties in de boezem. Hiermee kan de dispersie coëfficiënt gecalibreerd worden, waarmee een groot deel van de onzekerheid in de resultaten beperkt kan worden. Ook kan dan meteen onderzocht worden of er daadwerkelijk sprake is van volledige menging in het Mark-Vliet systeem. In het geval niet van volledige menging uitgegaan kan worden is het nuttig om de inlaatpunten zo in te richten dat het water zo hoog mogelijk uit de waterkolom gebruikt wordt.
- Een afweging tussen de Roode Vaart en het uitbreiden van de inlaatduiker bij Oosterhout zal moeten worden gemaakt. Een kosten-baten analyse van de kosten en de verschillende voor- en nadelen van deze alternatieven is bij deze afweging erg nuttig.
- Het is belangrijk om goed na te denken over de consequenties van het peilbeheer op het Volkerak-Zoommeer. Het Mark-Vliet systeem ligt ingesloten tussen het Wilhelminakanaal (of het Hollands Diep in het geval dat de Roode Vaart wordt geïmplementeerd) en het Volkerak-Zoommeer. De marge waarbinnen het peil van het Mark-Vliet systeem moet blijven om de inlaat van zoetwater en het spuien naar het Volkerak-Zoommeer te garanderen is erg klein.
- Het verder bovenstrooms plaatsen van de inlaatpunten kan een flinke besparing op het maximale doorspoeldebiet dat noodzakelijk is als gevolg hebben. De meest benedenstrooms gelegen inlaatpunten liggen nu tussen de 1 en 2 km van de schutsluizen af, dit is erg dicht bij de schutsluizen en hierdoor is de zoutindringing moeilijk te beperken. Voor de verder bovenstrooms gelegen inlaatpunten is het doorspoelen met 10 m³/s ruim voldoende om aan de waterkwaliteitsnormen te voldoen. Het verplaatsen van de inlaatpunten is dus erg effectief.
- Stroomsnelheid verhogende maatregelen, en dan met name in de meest benedenstrooms gelegen delen van de Vliet, zijn erg nuttig. De grote oppervlakte van het doorstroomprofiel benedenstrooms in de Vliet heeft een grote verlaging van de stroomsnelheid als gevolg waardoor een relatief grotere afvoer nodig is om de zoutindringing te beperken. Een verkleining van de oppervlakte van het doorstroomprofiel van de Vliet, door bijvoorbeeld het plaatsen van kribben, tot de oppervlakte gelijk is aan die van de Dintel heeft als gevolg dat er op de Vliet een maximaal doorspoeldebiet van minder dan 3 m³/s nodig zal zijn. Op de Dintel wordt namelijk met dit debiet volstaan terwijl daar de zoutvracht per schutting groter is (en het aantal schuttingen is gelijk).
- Een andere aanbeveling is het gebruik van een ruimtelijke verdeling in de neerslag bij de modelberekeningen. Nu is voor het hele stroomgebied de neerslag op het meetstation Oudenbosch aangenomen. Verwacht wordt dat het meenemen van een ruimtelijk verdeelde neerslag de calibratie van het model zal vereenvoudigen en een beter resultaat zal geven.
- De resultaten zijn afhankelijk van de inlaat naar de polders van het inlaatgebied. De berekende inlaat in het model komt goed overeen met de schattingen van het waterschap Brabantse Delta. Alleen is de data zeer summier en enigszins onzeker. Goede metingen van de inlaat naar het inlaatgebied zijn belangrijk om te bepalen of het model goede resultaten geeft. Dit is namelijk van belang om te kunnen bepalen of het inlaten van zout(er) water een probleem oplevert. Verdunning in de polders kan namelijk een rol spelen. Daarom is het ook belangrijk om de chloride concentratie in de polders te meten, omdat deze de grenswaarde van de chloride concentratie bij de inlaatpunten naar de polders bepaalt.
- Het verwijderen van de oude sluis bij Bovensas kan voordeel opleveren. Hiermee worden de peilverschillen tussen de Dintel en de Vliet, die ontstaan bij het doorspoelen van het systeem, verminderd. Het peil op de Vliet komt door deze sluis lager te liggen (ca 10 à 15 cm). De sluis is namelijk een beperking voor de afvoer. Daardoor zal een verhang in het peil op de Vliet optreden. Het verwijderen van de sluis heeft als gevolg dat er een kleiner verhang ontstaat en er dus een hoger peil op de Vliet kan worden gerealiseerd waardoor de afvoer bij de spuisluizen minder vaak een probleem is.
- Er wordt aanbevolen om in droge periodes zoveel mogelijk 's nachts en doordeweeks in te laten. Dit omdat het aantal schuttingen in de weekenden hoger is dan doordeweeks, en dat de schuttingen vooral overdag plaats hebben. De zoutindringing is direct gerelateerd aan het aantal schuttingen waardoor het verstandig is om water in te laten op de momenten dat er weinig geschut wordt.

Referenties

Alterra, 2006, Transitie en toekomst van Deltalandbouw, indicatoren voor ontwikkeling van de land- en tuinbouw in de Zuidwestelijke Delta van Nederland.

Beersma, J.J., Buishand, T.A., De Goederen, S., Jacobs, P., 2005, Zout, zouter, zoutst. Statistiek van de externe verzilting in Midden-West Nederland, KNMI-publicatie 119-III.

Brouwer, R., 2005, Operational Water Management, collegedictaat, TU Delft.

Jongeling, T.H.G., 2007, Memo: Volkerak-Zoommeer, Effectiviteit zoutbestrijdingsmaatregelen bij sluizen, Effect op capaciteit Volkeraksluizen, Deltares

Integrale visie Deltawateren, verkregen van <http://www.delta-wateren.nl/rapporten.php3>

Lijklema, L., 1984, Systeemanalyse in de waterkwaliteitsbeheer, Landbouwhogeschool Wageningen.

Overloop, P.J., 2006, Model Predictive Control on Open Water Systems, proefschrift, Technische Universiteit Delft, Nederland.

Projectorganisatie waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer, 2007, Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer, Aanvullende startnotitie in het kader van de procedure voor de milieueffectrapportage.

Provincie Noord-Brabant, 2007, Brabant Waterland, watersystemen in beeld.

Steenkamp, B.P.C., Driesprong, A., Zwolsman, J.J.G., 2001, Systeem- en procesbeschrijving Noordzeekanaal; een kennisinventarisatie, RIZA-WST.

Technische Commissie Real Time Control (TC-RTC), g.d., Er zit muziek in watersystemen, een raamwerk voor het ontwerpen van een RTC systeem.

Stroet, C.B.M. te, Meij, J.L. van der, Kremers, A.H.M., 2002, Modellerings 'waterdoelen' provincie Noord-Brabant, TNO.

Webwateratlas, verkregen op 12-11-08, van: <http://atlas.brabant.nl/wateratlas>

Witteveen+Bos, 2008, Effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op de West-Brabantse rivieren, vaststelling zoutindringing Mark-Vliet en mitigerende maatregelen.

Witteveen+Bos, 2008-2, Beschrijving Sobek-model West-Brabant, Deelrapport 1 in project 'Effect van een zout Volkerak-Zoommeer op de West-Brabantse rivieren'.

Bijlagen

Bijlage 1: Analytische oplossing zoutindringing (volledige menging)

Veronderstel een rivier die uitmondt in een zoutwatersysteem. Voor de zoutindringing speelt advection en dispersief transport een rol. De volgende formule geldt voor volledige menging bij sluizen en geeft een gemiddelde concentratie over de breedte en diepte. Voor een stationaire situatie ($\partial C/\partial t = 0$, D , u en h ook constant) kan het probleem als volgt worden beschreven:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

De oplossing kan op de volgende manier gevonden worden:

Stel $C = e^{\lambda x}$, dan is $\frac{\partial C}{\partial x} = \lambda e^{\lambda x}$ en $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \lambda^2 e^{\lambda x}$

Substitutie in vergelijking (1):

$$D \lambda^2 e^{\lambda x} - u \lambda e^{\lambda x} = (D \lambda^2 - u \lambda) e^{\lambda x} = 0$$

$$\text{want } e^{\lambda x} \neq 0 \rightarrow D \lambda^2 - u \lambda = 0$$

Deze vergelijking heeft twee oplossingen: $\lambda = 0$ or $\lambda = u/D$

De oplossing is dan dus:

$$C = a_1 e^0 + a_2 e^{ux/D} = a_1 + a_2 e^{ux/D}$$

a_1 en a_2 zijn integratie constanten die gevonden kunnen worden door randvoorwaarden op te leggen, een constante concentratie bovenstrooms (C_u at $x = -\infty$) en een constante concentratie benedenstrooms (C_d at $x = 0$).

$$C_u \text{ op } x = -\infty: C_u = a_1 + a_2 e^{-\infty} = a_1 + a_2 \cdot 0 = a_1 \rightarrow a_1 = C_u$$

$$C_d \text{ op } x = 0: C_d = C_u + a_2 e^0 = C_u + a_2 \rightarrow a_2 = C_d - C_u$$

Dit geeft:

$$C(x) = C_u + (C_d - C_u) e^{ux/D}$$

Bijlage 2: Numerieke dispersie

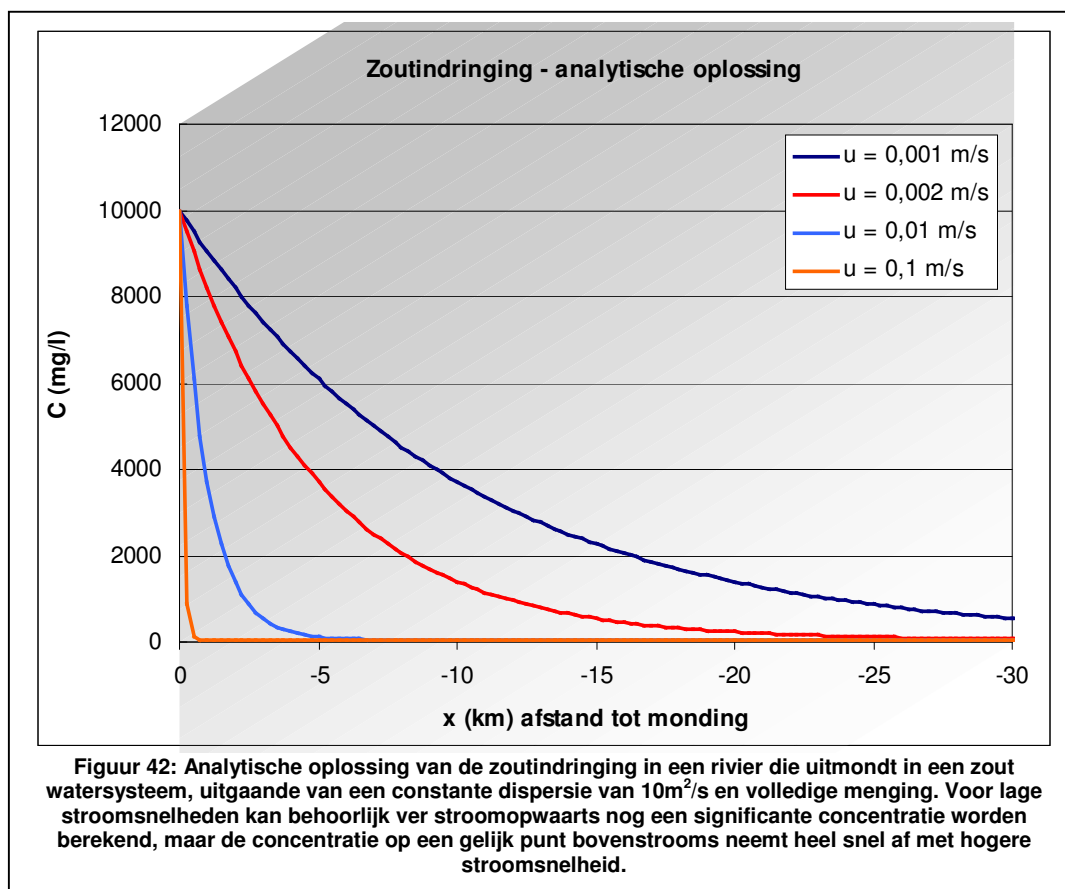
Dispersie is de verspreiding van een bepaalde stof in water. In dit geval gaat het om zout dat door turbulentie en verschil in stroomsnelheid zal verspreiden door het Mark-vliet systeem. Het effect is vergelijkbaar met diffusie, alleen het effect van diffusie is verwaarloosbaar. Deze dispersie wordt in het vervolg fysieke dispersie genoemd, om onderscheid te kunnen maken met numerieke dispersie. Voor waterlopen van bepaalde afmetingen kan deze fysieke dispersie geschat worden (Lijklema, 1984). In Sobek kan een constante waarde om deze fysieke dispersie te benaderen worden opgegeven. Deze in Sobek gedefinieerde dispersie zal verder de model dispersie worden genoemd. Hierbij wordt opgemerkt dat de fysieke dispersie afhankelijk is van de stroomsnelheid, en dat een constante model dispersie dus niet een perfecte weergave van de fysieke dispersie is.

Wanneer de analytische oplossing van de zoutindringing wordt bekeken blijkt dat de zoutindringing (bijlage 1) bij een constante dispersie snel afneemt met de stroomsnelheid, dit is te zien in figuur 42. De analytische oplossing voor de chlorideconcentratie in een rivier die uitmondt in een zout systeem is gelijk aan:

$$C(x) = C_u + (C_d - C_u)e^{ux/D}$$

Hierin is $C(x)$ de concentratie chloride [mg/l] op afstand x [km] van de monding (negatief). C_u is de concentratie bovenstrooms (upstream) [mg/l] en C_d is de concentratie benedenstrooms (downstream, het Volkerak) [mg/l], u is de stroomsnelheid [m/s] en D is de dispersie coëfficiënt [km^2/s]. De afleiding van deze formule is gegeven in Bijlage 1.

Numerieke dispersie wordt veroorzaakt doordat er benaderingsfouten ontstaan vanwege de gekozen tijdstap en ruimtestap in de modellering. De numerieke dispersie is afhankelijk van het gekozen rekenschema en de stroomsnelheid. Numerieke dispersie heeft hetzelfde effect als normale dispersie, alleen wordt het veroorzaakt door de benaderingsfouten vanwege de discretisatie van het model.



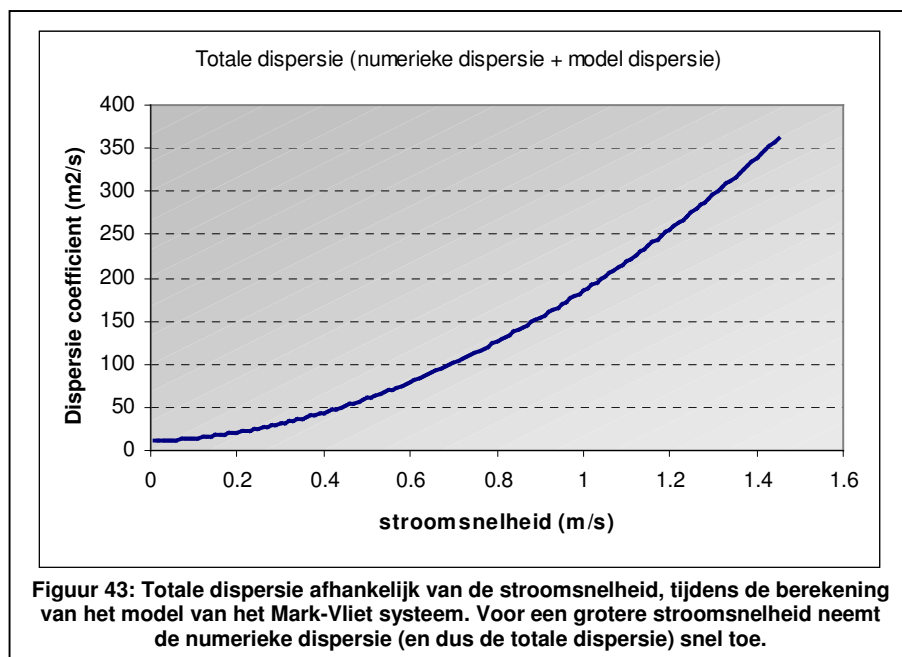
Wanneer een bepaald rekenschema is gekozen, kan de numerieke dispersie berekend worden. Voor het gekozen schema, de 'fully implicit iterative method' is de numerieke dispersie (D_{num}) gelijk aan:

$$D_{num} = \frac{1}{2}u(dx+u*dt)$$

In het model wordt een tijdstap (dt) en een afstand tussen de verschillende rekenpunten (dx) gekozen. Voor iedere tijdstap wordt dan voor elk rekenpunt de waterstand, de stroomsnelheid, de chlorideconcentratie, etc. berekend. De numerieke dispersie is dus afhankelijk van de stroomsnelheid u , die varieert over de tijdstappen, terwijl dx en dt gelijk blijven tijdens een modelrun. De grootte van de numerieke dispersie kan dus bepaald worden als functie van de stroomsnelheid, met de gekozen waarde voor dx en dt van het model. De totale dispersie (D_{tot}) in het model is dan gelijk aan de som van de opgegeven model dispersie (D_{model}) en de numerieke dispersie.

$$D_{tot} = D_{num} + D_{model}$$

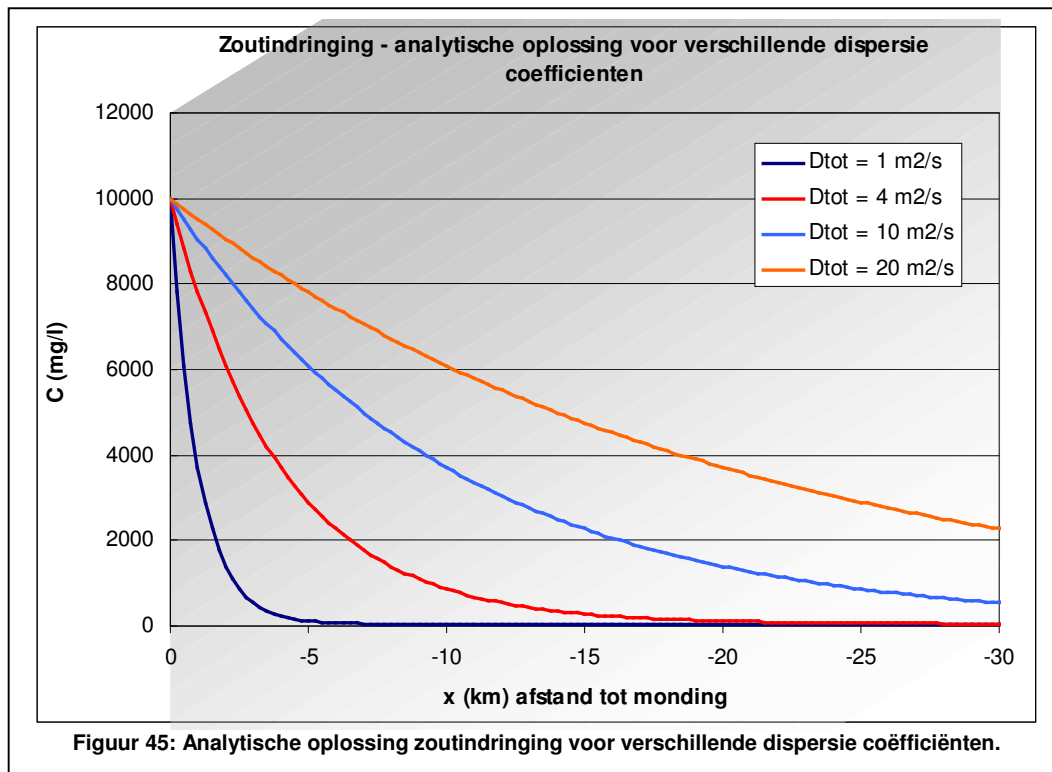
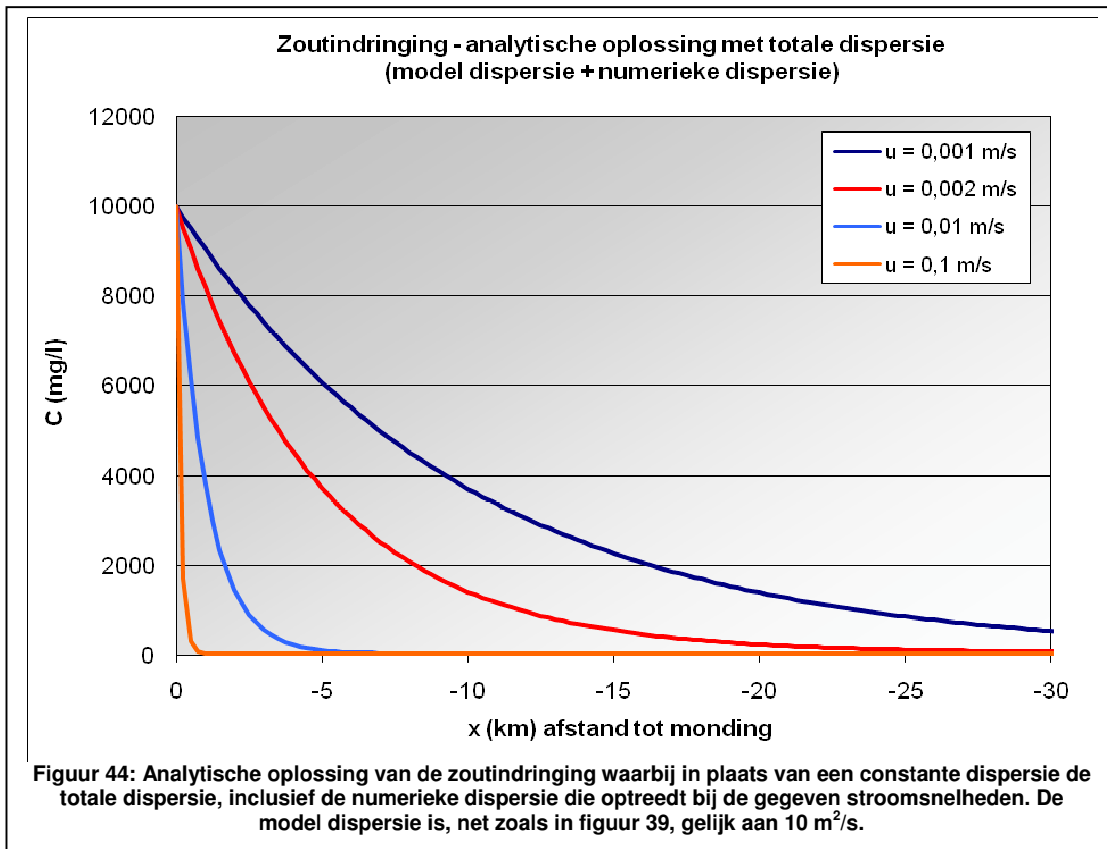
Voor een tijdstap van 5 minuten (300 seconden) en een ruimtestap van 50m, en een model dispersie van $10\text{m}^2/\text{s}$ levert dit de grafiek op in figuur 43.



Figuur 43: Totale dispersie afhankelijk van de stroomsnelheid, tijdens de berekening van het model van het Mark-Vliet systeem. Voor een grotere stroomsnelheid neemt de numerieke dispersie (en dus de totale dispersie) snel toe.

Om een overzicht te geven van het effect van de numerieke dispersie op de analytische oplossing van de zoutindringing zal in figuur 44 eenzelfde grafiek als in figuur 42 worden gepresenteerd, alleen in deze grafiek wordt rekening gehouden met de totale dispersie, afhankelijk van de stroomsnelheid, zoals te zien in figuur 43.

Ook al wordt de numerieke dispersie groter bij een grotere stroomsnelheid, dit effect weegt niet op tegen het effect van een grotere stroomsnelheid en dus meer advectief transport in de tegengestelde richting. Dit advectief transport is bij relatief hogere stroomsnelheden vele malen groter dan het (numerieke) dispersief transport in de tegenovergestelde richting. Bij hele hoge stroomsnelheden gaat dit niet meer op omdat de numerieke dispersie dan zo groot wordt dat het effect van de stroomsnelheid wordt overtroffen. Dit effect treedt niet op bij stroomsnelheden tot ongeveer 1 m/s. Bij een stroomsnelheid van 1 m/s is de chloride concentratie op een afstand van 1km vanaf de monding gelijk aan 86mg/l bij een D_{model} van $10\text{m}^2/\text{s}$. De stroomsnelheid in het Mark-Vliet systeem is over het algemeen niet groter dan 0,5 m/s. Het effect van de numerieke dispersie is dus heel erg beperkt binnen de marges van het systeem. De onzekerheid met betrekking tot de numerieke dispersie is dus relatief laag. De onzekerheid in de dispersiecoëfficiënt in het model is veel groter. In figuur 45 is de analytische oplossing van de zoutindringing te zien voor verschillende dispersiecoëfficiënten en een constante stroomsnelheid van 0,001m/s. Hieruit blijkt dat als de stroomsnelheid heel laag is de dispersiecoëfficiënt van groot belang is voor de resultaten.



Bijlage 3: Rekenschema

In Sobek zijn verschillende rekenschema's beschikbaar om te gebruiken. De verschillende methodes hebben elk zo hun eigen voordelen en nadelen. Er is gekozen om de 'fully implicit iterative method' te gebruiken. Afhankelijk van de keuze of de verschillende modules in sobek parallel of serieel worden doorerekend zijn meer of minder methodes beschikbaar.

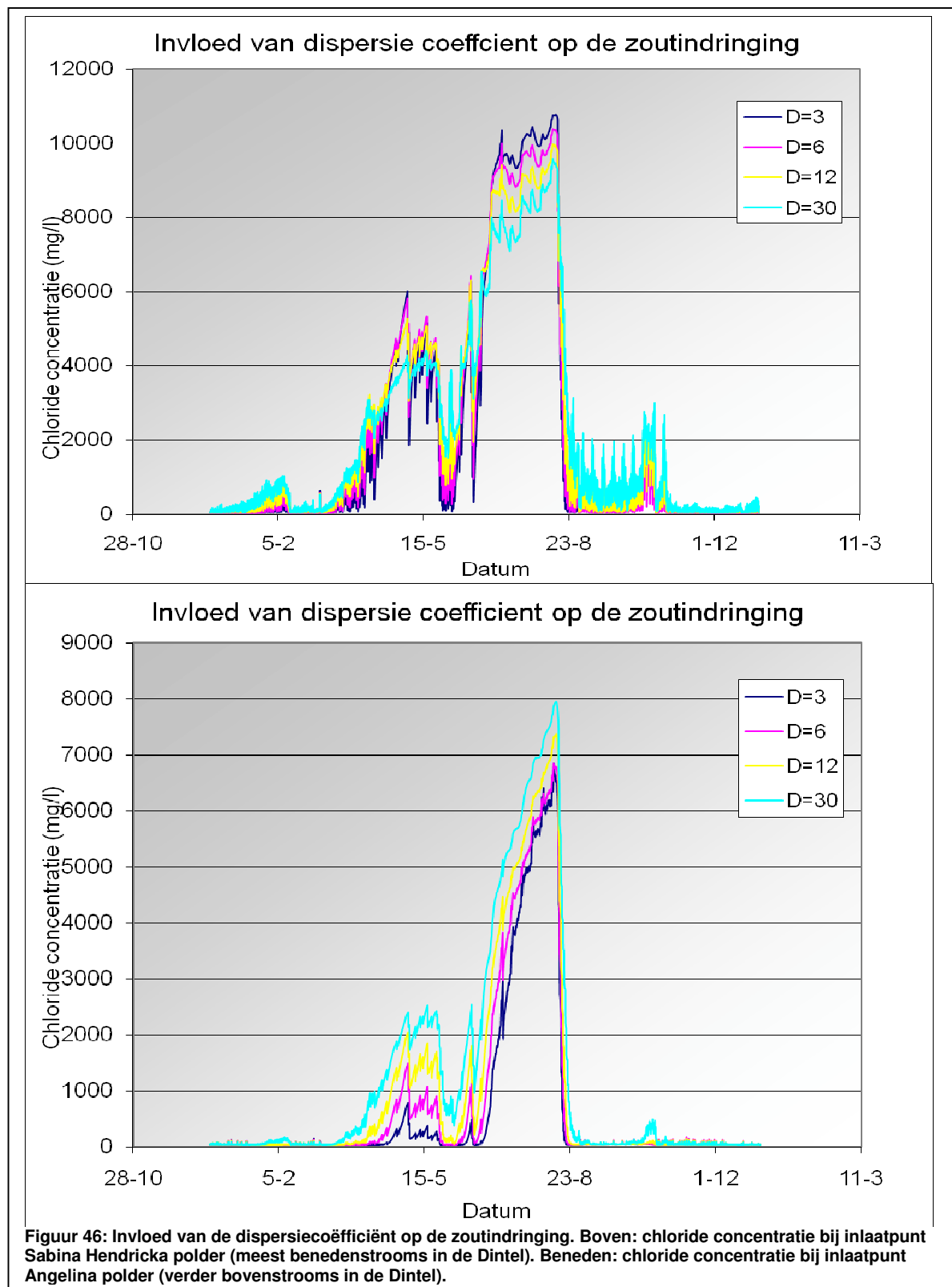
Om te kunnen sturen op waterkwaliteit zullen de gegevens van de waterkwaliteitsmodule tijdens het doorrekenen beschikbaar moeten zijn. Daarom zal de waterkwaliteitsmodule parallel aan de andere modules moeten worden doorerekend. Anders kan niet worden aangegeven dat bij een bepaalde waterkwaliteit diverse sturingsacties moeten worden uitgevoerd. Als de waterkwaliteitsmodule na de andere modules wordt doorerekend, zullen deze gegevens ook pas beschikbaar zijn nadat deze modules zijn doorerekend. Als er tegelijkertijd op waterkwantiteit (neerslag afvoer module en channel flow module) en op waterkwaliteit (waterkwaliteitsmodule) gestuurd moet worden kan de Real Time Control module dit alleen als al deze modules parallel worden doorerekend.

Wanneer de verschillende Sobek modules parallel worden doorerekend zijn er slechts twee rekenschema's beschikbaar. Dit zijn de 'fully implicit iterative method' en de 'fully implicit direct method'. Het voordeel van de eerste methode is dat deze heel erg effectief is bij complexe netwerken, de tweede methode is met name geschikt voor kleinere netwerken. De tweede methode is ook erg robuust, de eerste is wat minder robuust. Een rekenschema is robuust als deze altijd naar de juiste oplossing convergeert. Beide methodes zijn niet de meest nauwkeurige methodes zijn omdat de numerieke dispersie relatief groot is.

Impliciete methodes, zoals de twee methodes hierboven beschreven, kunnen een langere rekentijd hebben dan expliciete methodes. De impliciete methodes hebben allebei geen stabiliteitslimiet voor de tijdstap, maar een te grote tijdstap kan de nauwkeurigheid wel beïnvloeden. Een rekenschema is stabiel als de benaderingsfouten en afrondingsfouten het resultaat niet teveel beïnvloeden. Een ontstane fout zal verder propageren. Bij een te grote stap in de tijd of ruimte kunnen de gemaakte fouten zo groot worden dat de benadering van de oplossing niet goed meer is.

Vanwege de effectiviteit van de 'fully implicit iterative method' wordt voor deze methode gekozen. De rekentijd is namelijk aanzienlijk korter bij gebruik van deze methode in plaats van de 'fully implicit direct method'.

Bijlage 4: Dispersie coëfficiënt



Bijlage 5: Berekening setpoints in Matlab strategie 2

```
% Berekening van de Sobek setpoints

if SobekFirst == 1
    tijdstap=0;
    peil=[];
end
tijdstap=tijdstap+1;

%% invullen

Q_inlaat=10; % m3/s Oosterhout
Q_dintel=3; % m3/s Dintel
Q_vliet=7; % m3/s Vliet

gewenst_peil=0.2; % gewenst peil m+ NAP

verdeling=[100;100] % [factor dintel;factor vliet]

%% bepaling setpoints

peilverschil=SobekH_bi15lc00005222-gewenst_peil;

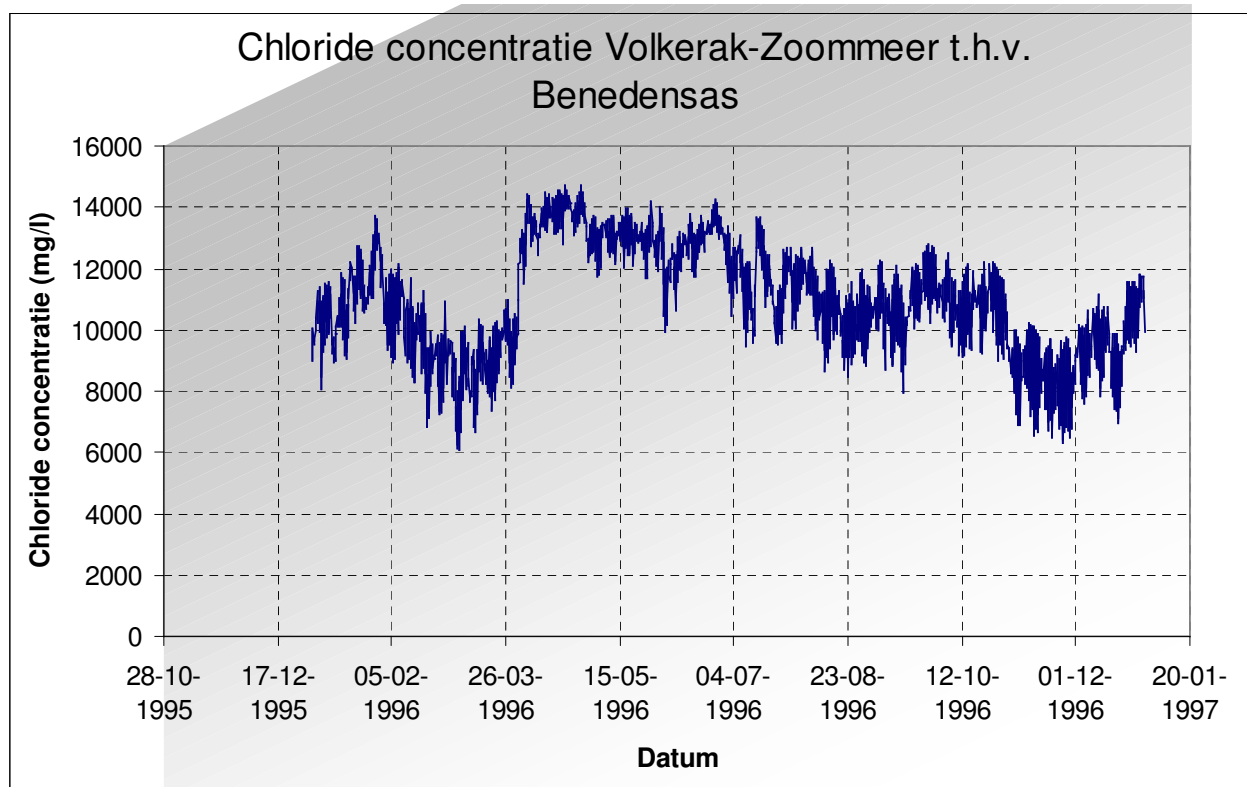
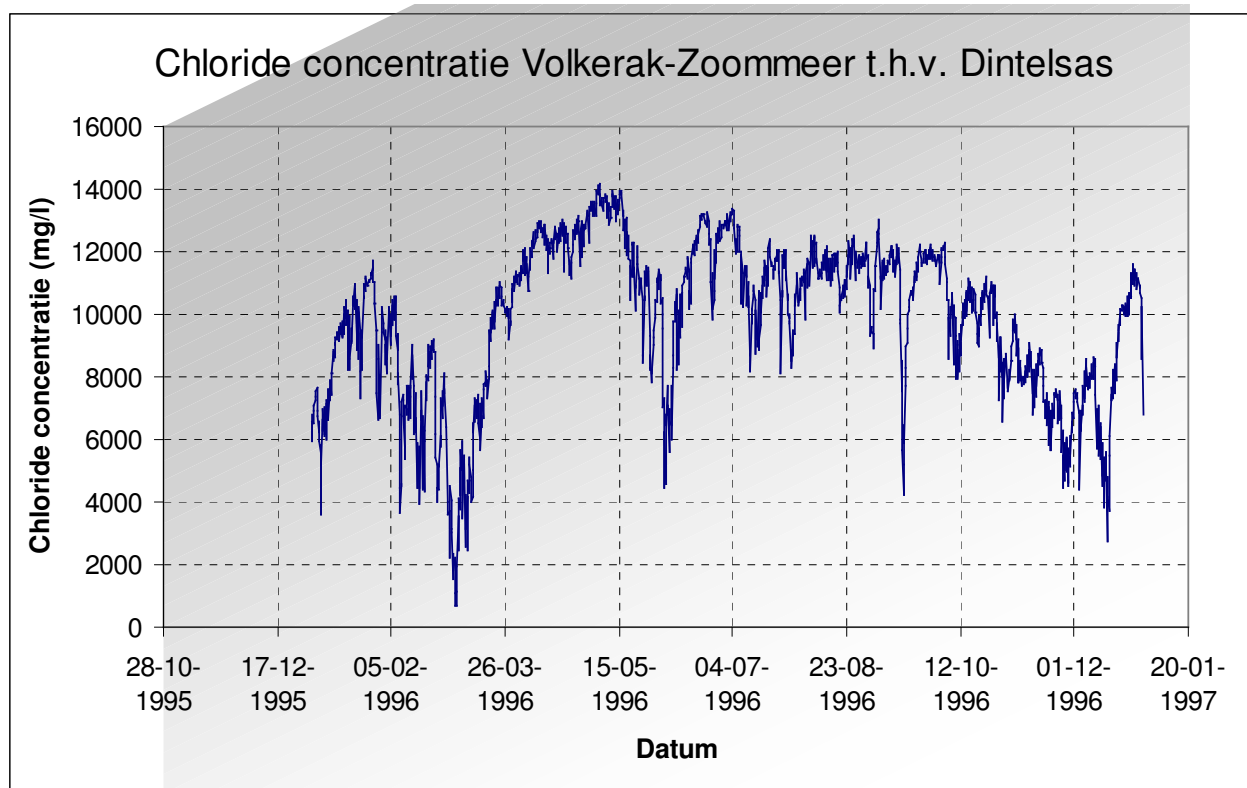
if peilverschil>=0
    Q_peil1=verdeling(1)*peilverschil;
    Q_peil2=verdeling(2)*peilverschil;
    if SobekHU_94>SobekHD_94
        Setpoint_dintel=-3+(Q_dintel+Q_peil1)/(63.78*sqrt(SobekHU_94-
SobekHD_94)); % setpoint dintel
    elseif SobekHU_94<=SobekHD_94
        Setpoint_dintel=-3;
    end
    if SobekHU_93>SobekHD_93
        Setpoint_vliet=-2.9+(Q_vliet+Q_peil2)/(53.15*sqrt(SobekHU_93-
SobekHD_93)); % setpoint vliet
    elseif SobekHU_93<=SobekHD_93
        Setpoint_vliet=-2.9;
    end
elseif peilverschil<0
    Setpoint_dintel=-3;
    Setpoint_vliet=-2.9;
end

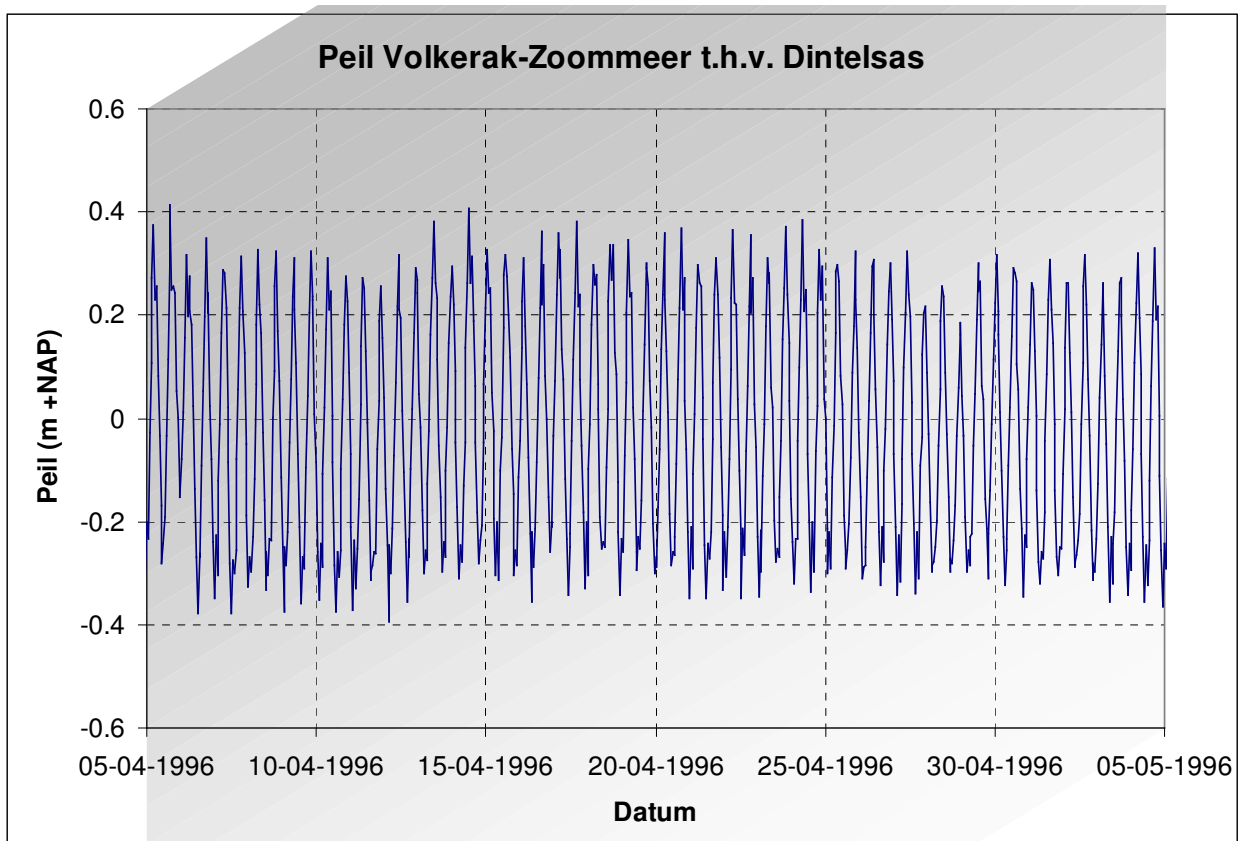
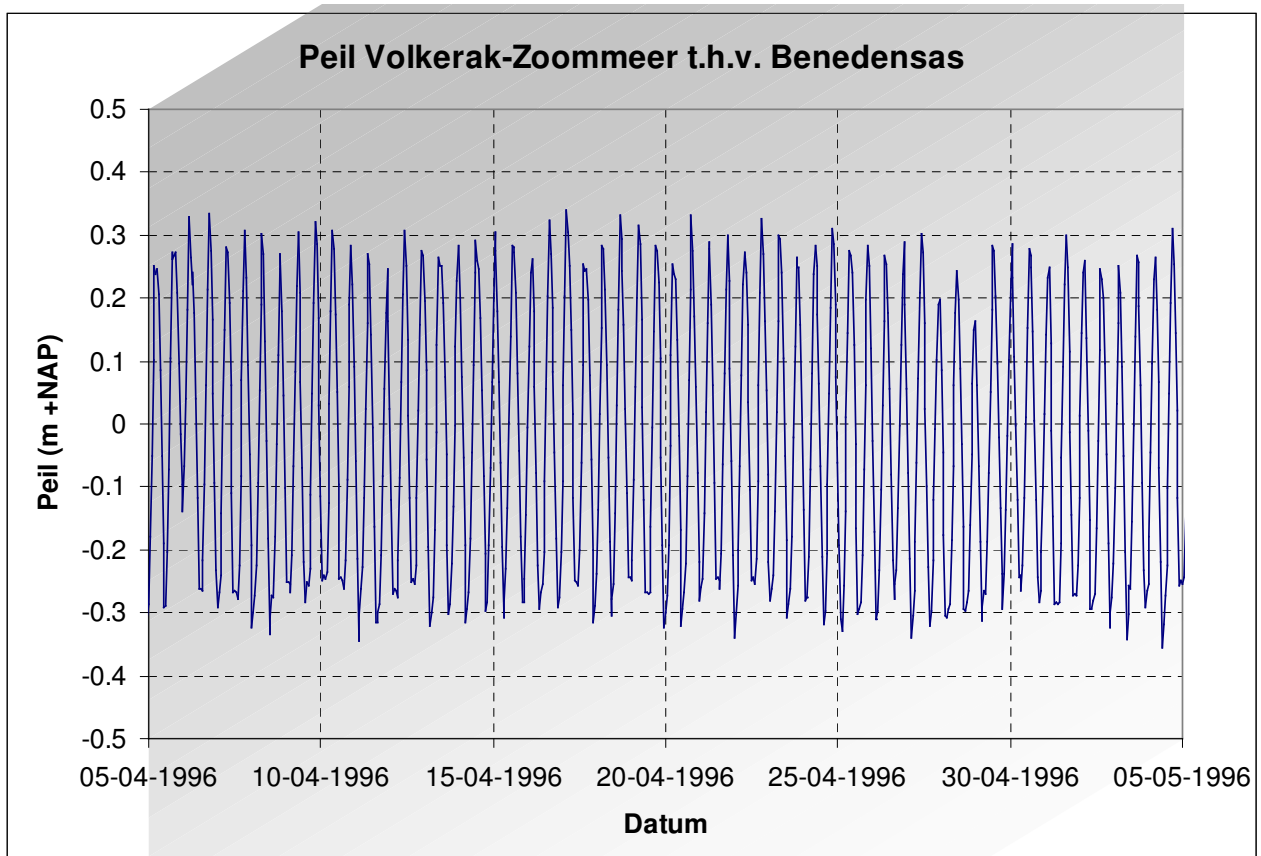
if SobekHU_92>SobekHD_92
    Setpoint_inlaat=-2+Q_inlaat/(39.87*sqrt(SobekHU_92-SobekHD_92)); % setpoint
inlaat
elseif SobekHU_92<=SobekHD_92
    Setpoint_inlaat=-2;
end

peil(tijdstap)=SobekH_bi15lc00005222;

SobekS_inlaat=Setpoint_inlaat;
SobekS_dintel=Setpoint_dintel;
SobekS_vliet=Setpoint_vliet;
```

Bijlage 6: Chloride concentratie en peil Volkerak-Zoommeer





Bijlage 7: Tabellen strategie 1.

Spuisluis Vliet

peil	setpoint
-10	-2,9
0,19	-2,9
0,2	-2,8
0,3	-2,5
0,4	-2,2
0,5	-1,8
2	-1

De drempel van de Spuisluis ligt op –2,9 m +NAP. Als de setpoint dus gelijk is aan –2,9 dan staat de spuisluis dicht. Bij een setpoint van –2,8 staan de schuiven van de sluis dus 10cm open.

Spuisluis Dintel

peil	setpoint
-10	-3
0,2	-3
0,25	-2,83
0,3	-2,65
0,5	-2,25
1	-2
3	0

De drempel van de Spuisluis in de Dintel ligt op –3 m +NAP.

Inlaat Oosterhout

CL	setpoint
0	-2
100	-2
250	-2
251	-1,89
400	-1,78
800	-1,67
2000	-1,4
14000	-1

De drempel van de inlaatduiker ligt op –2 m +NAP.

Bijlage 8: Berekening setpoint in Matlab strategie 3.

```
% Berekening van de Sobek setpoints

if SobekFirst == 1
    tijdstap=0;
    peil=[];
end
tijdstap=tijdstap+1; % t=1 dinsdag 20 februari 1996 00:00

%% invullen

Q_inlaat_max=10; % m3/s Oosterhout
Q_dintel_max=3; % m3/s Dintel
Q_vliet_max=7; % m3/s Vliet

gewenst_peil=0.2; % gewenst peil m+ NAP
grenswaardeCL=300; % grenswaarde chloride mg/l

verdeling=[80;80]; % [factor dintel;factor vliet]

%% bepaling setpoints
peilverschil=SobekH_bi15lc00005222-gewenst_peil;

CLvliet=WQ_Par_CL_Loc_Vliet;
CLdintel=WQ_Par_CL_Loc_Dintel;
if CLdintel<=(grenswaardeCL/2)
    Q_dintel=0*Q_dintel_max;
elseif CLdintel<=grenswaardeCL
    Q_dintel=CLdintel/grenswaardeCL*Q_dintel_max;
elseif CLdintel>grenswaardeCL
    Q_dintel=Q_dintel_max;
end
if CLvliet<(grenswaardeCL/2)
    Q_vliet=0*Q_vliet_max;
elseif CLvliet<grenswaardeCL
    Q_vliet=CLvliet/grenswaardeCL*Q_vliet_max;
elseif CLvliet>grenswaardeCL
    Q_vliet=Q_vliet_max;
end
Q_inlaat=Q_dintel+Q_vliet;

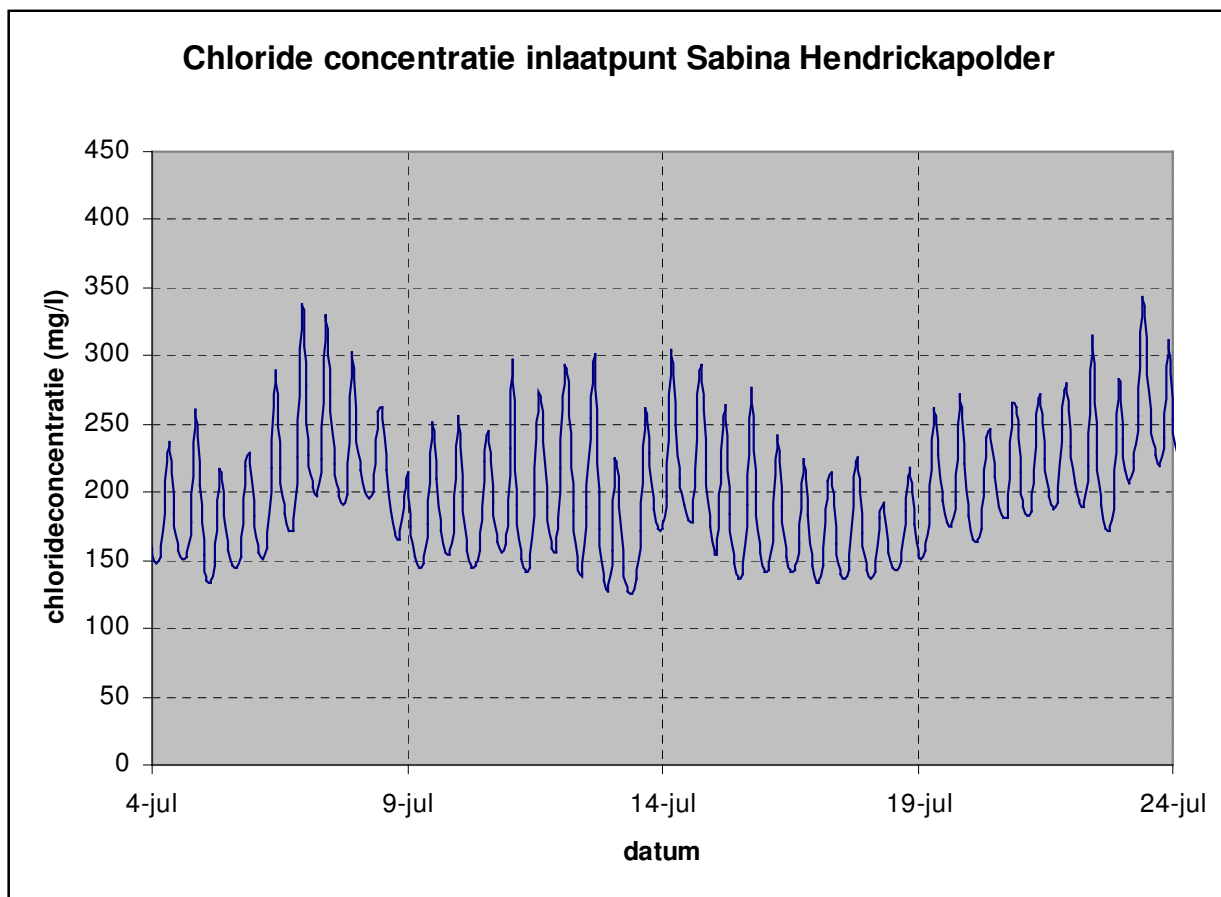
if peilverschil>=0
    Q_peil1=verdeling(1)*peilverschil;
    Q_peil2=verdeling(2)*peilverschil;
    if SobekHU_94>SobekHD_94
        Setpoint_dintel=-3+(Q_dintel+Q_peil1)/(63.78*sqrt(SobekHU_94-SobekHD_94)); % setpoint dintel
    elseif SobekHU_94<=SobekHD_94
        Setpoint_dintel=-3;
    end
    if SobekHU_93>SobekHD_93
        Setpoint_vliet=-2.9+(Q_vliet+Q_peil2)/(53.15*sqrt(SobekHU_93-SobekHD_93)); % setpoint vliet
    elseif SobekHU_93<=SobekHD_93
        Setpoint_vliet=-2.9;
    end
elseif peilverschil<0
    Setpoint_dintel=-3;
    Setpoint_vliet=-2.9;
end

if SobekHU_92>SobekHD_92
    Setpoint_inlaat=-2+Q_inlaat/(39.87*sqrt(SobekHU_92-SobekHD_92)); % setpoint inlaat
elseif SobekHU_92<=SobekHD_92
    Setpoint_inlaat=-2;
end

peil(tijdstap)=SobekH_bi15lc00005222;

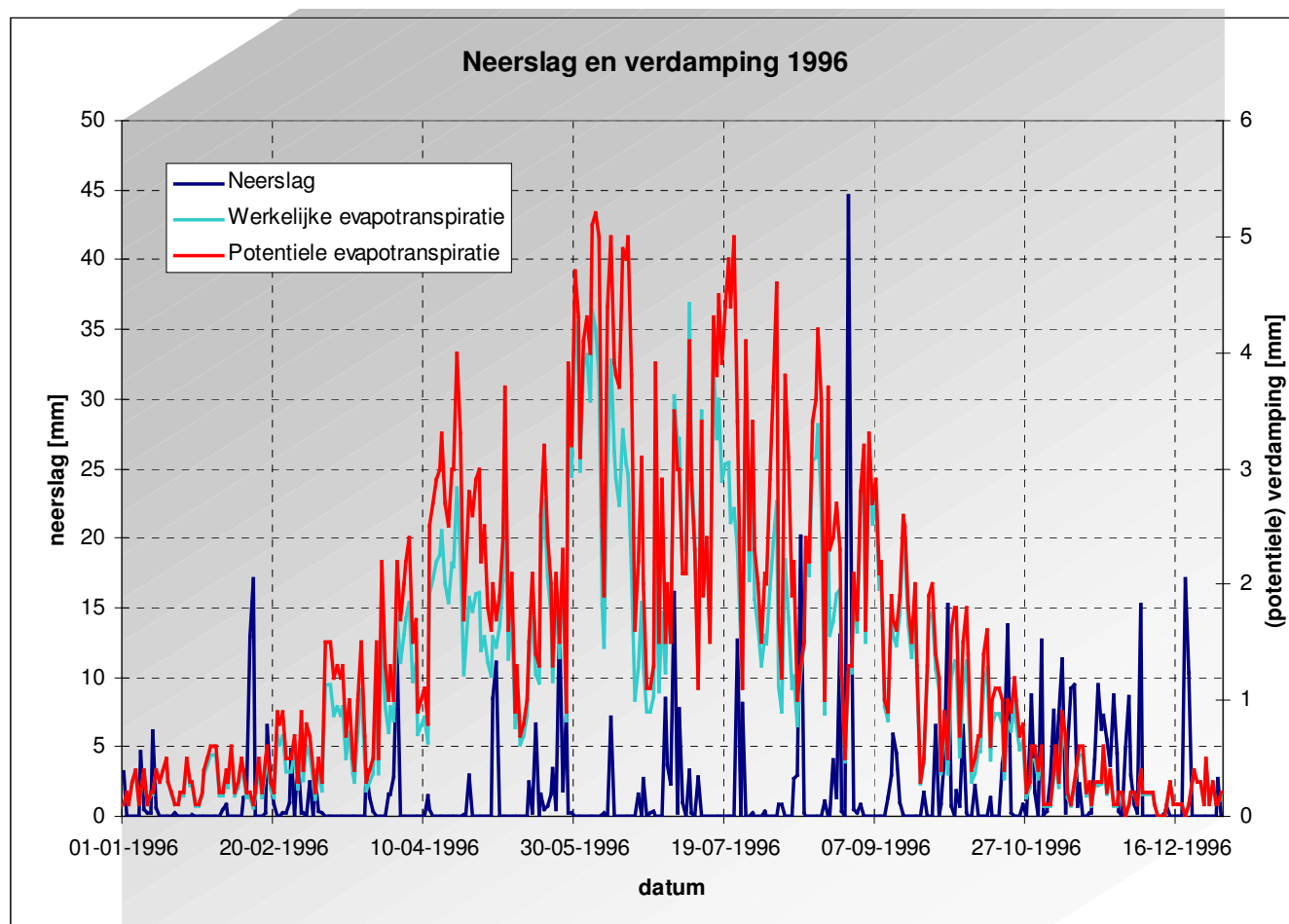
SobekS_inlaat=Setpoint_inlaat;
SobekS_dintel=Setpoint_dintel;
SobekS_vliet=Setpoint_vliet;
```

Bijlage 9: Periodiciteit in de resultaten



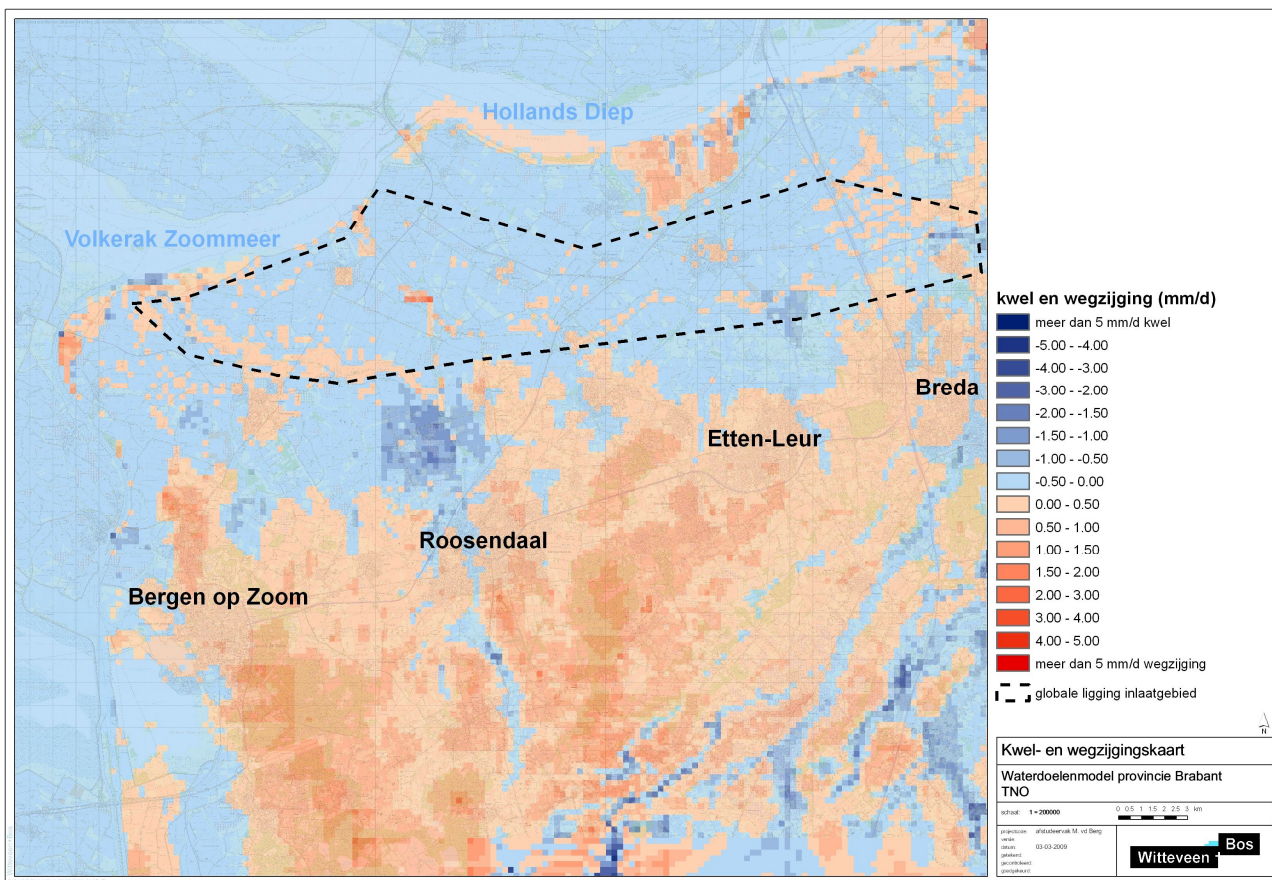
Figuur 47: 12-uurlijkse periodiciteit in de resultaten

Bijlage 10: Neerslag en (werkelijke) verdamping in 1996



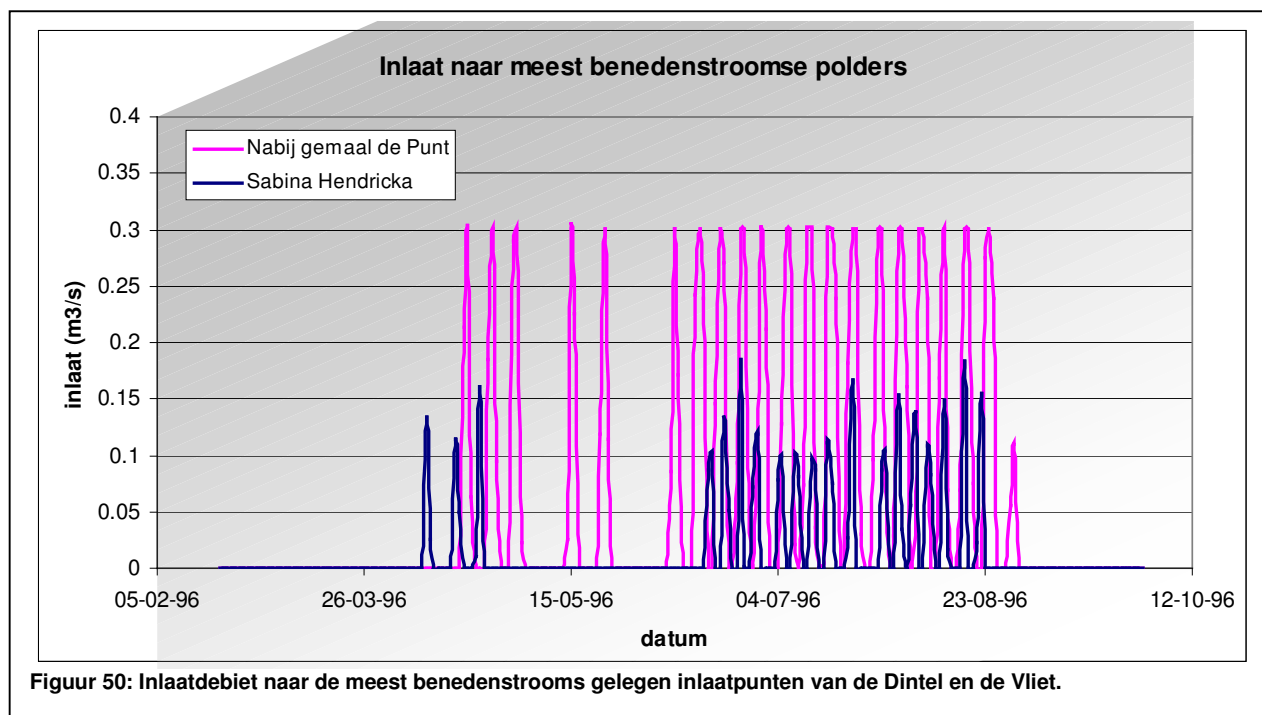
Figuur 48: Neerslag en (werkelijke) verdamping

Bijlage 11: Kwel- en wegzijgingskaart



Figuur 49: Kwel en wegzijging in West-Brabant, de globale ligging van het aangenomen inlaatgebied is aangegeven (TNO, 2008).

Bijlage 12: Inlaatdebieten naar de meest benedenstroomse polders



Bijlage 13: Topografische kaart West-Brabant met belangrijke locaties



Figuur 51: Topografische kaart West-Brabant met daarop de meeste belangrijke locaties uit dit onderzoek.