Technische Universiteit Delft Faculteit der Civiele Techniek Vakgroep Waterbouw Sectie Vloeistofmechanica

Gemeentewaterleidingen Amsterdam Afdeling Procesontwikkeling Sector Hydrologie -0-0-0-

3D-modellering van de waterbeweging en verblijftijdsspreiding ten behoeve van de inrichting van de Loenderveensche Plas als Waterleidingplas

Tekst





Astudeerverslag: D.R.Hoornstra

Afstudeercommissie: Prof.dr.ir.J.A.Battjes (TU-Delft) Prof.dr.ir.G.S.Stelling (TU-Delft) Dr.Ir.C.Kranenburg (TU-Delft) Ir.T.N.Olsthoorn (GW-Amsterdam)

April 1996



### Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerverslag "3D-modellering van de waterbeweging en verblijftijdsspreiding ten behoeve van inrichting van de Loenderveensche Plas als Waterleidingplas". Dit verslag is geschreven in het kader van mijn afstudeeropdracht aan de Faculteit der Civiele Techniek van de Technische universiteit Delft en de vragen die bij de Gemeentewaterleidingen Amsterdam leefden over de modellering van de stroming in de toekomstige Waterleidingplas.

Ir. T.N. Olsthoorn wil ik bedanken voor het gestelde vertrouwen, enthousiasme en het kritisch volgen van het onderzoek. Ook de bijdrage van de andere leden van de Werkgroep Hydrologie MER Loenderveen (ir. N. Straathof, ir. F. van Pruissen, ing. J.H.N. Moorman, ir. P. Salverda en ing. A. Bosch) hebben me regelmatig tot denken gezet en hier wil ik ze dan ook voor danken.

Prof. dr. ir. G.S. Stelling wil ik bedanken voor de aanpassingen die gedaan zijn in de computercode van de gebruikte programmatuur en de sturing tijdens het afstudeerwerk. Tevens werkzaam bij het Waterloopkundig Laboratorium zijn ir. D.K. Vatvani en ir. T. van der Kaaij en zij hebben respectievelijk zorg gedragen voor de hulp bij het programma TRISULA en het opstellen van het kromlijnige rooster en hier wil ik ze dan ook voor bedanken.

Daarnaast bedank ik de collega-stagiares in het 'Pomphuis 1853', hun belangstelling heb ik op prijs gesteld, in het bijzonder van Frans Schaars die in dezelfde periode aan zijn afstudeerwerk heeft gewerkt.

Tenslotte wil ik mijn begeleiders Prof. dr. ir. J.A. Battjes en Dr. ir. C. Kranenburg bedanken voor hun bijdrage aan het afstudeerwerk.

Douwe Hoornstra Vogelenzang, april 1996



## Samenvatting

Gemeentewaterleidingen Amsterdam produceert en levert drinkwater aan Amsterdam en omstreken. Het zuiveringsproces van water vindt plaats in twee produktiebedrijven, de rivierduinwaterleiding en de rivier-plassenwaterleidingen. De rivier-duinwaterleidingen krijgt het ruwe water aangeleverd door de Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK). Dit water wordt door de Amsterdamse Waterleidingduinen gevoerd en verblijft daar 50 tot globaal 400 dagen. Door het verschil in verblijftijd in het duin wordt het water gemengd en is de kwaliteit van dit water uitermate constant. Dit terwijl de bron, het Lekkanaal, een sterk varierende waterkwaliteit heeft. Na het verblijf in het duin wordt het water te Leiduin gezuiverd tot drinkwater. De rivier-plassenwaterleiding betrekt water van de Bethunepolder en van het Amsterdam-Rijnkanaal waarna het na een voorzuivering in de Eerste Waterleidingplas stroomt. In de plas vindt menging door de invloed van de wind en zelfreiniging plaats. In Weesperkarspel volgt daarna de zuivering van het water tot drinkwater. In de toekomst zal de drinkwatervraag van Amsterdam en omstreken waarschijnlijk stijgen, waardoor capaciteitsuitbreiding noodzakelijk is.

Deze capaciteitsuitbreiding komt deels voor rekening van de rivier-plassenwaterleidingen. In dit zuiveringsproces zal op termijn de capaciteit vergroot worden van 31 miljoen m<sup>3</sup> per jaar tot 61 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (startnotitie MER 1994). De consequentie hiervan is dat het volume van de Eerste Waterleidingplas niet groot genoeg is om bij de verhoogde doorstroming voldoende afvlakking en zelfreiniging te garanderen. De gehanteerde eis voor de Eerste Waterleidingplas is een gemiddelde verblijftijd van minimaal 100 dagen. In de toekomst betekent dit verdieping van de Eerste Waterleidingplas of de aanleg van een Tweede Waterleidingplas om aan de drinkwatervraag te kunnen voldoen.

De Eerste Waterleidingplas vervult zijn functie van doorstroombekken over het algemeen goed. Dit betekent dat het water na het verlaten van de plas de volgende kwaliteitsparameters heeft:

- 1. de pieken in de chloride-concentratie zijn afgevlakt en blijven onder de 100 mg/l,
- 2. de ammonium-concentratie wordt tijdens het verblijf in de plas verlaagd en de uiteindelijke waarde is niet hoger dar 1 mg/l.

Afvlakking van de chloride-concentratie en andere waterkwaliteitsparameters treden op doordat het onttrokken water samengesteld is uit water met verschillende verblijftijden. De grootste spreiding in de verblijftijden vindt plaats in een volledig gemengd bekken. De afbraak van stoffen (punt 2) kost tijd en naarmate het water langer in de plas aanwezig is, is de zelfreiniging groter. Onbekend is de invloed van de inrichting van de Eerste Waterleidingplas op de afvlakking en zelfreiniging.

Dit onderzoek geeft aan wat de invloed van de inrichting is op de menging in de plassen en dit heeft direkt invloed op de vervulling van de twee hoofdfuncties: afvlakking en zelfreiniging. Dit is gedaan door voor meerdere ontwerpen van de Tweede Waterleidingplas de waterbeweging en verblijftijdsspreiding te berekenen. Er zijn vijf ontwerpen gemaakt voor de inrichting van de plas Loenderveen oost. De ontwerpen verschillen in de situering van het veen en de meermolm in de plas en de lengte van de dam. De ontwerpen hebben elk een volume van ongeveer 8.2 miljoen m<sup>3</sup>. Bij een volumestroom van 0.95 m<sup>3</sup>/s komt dit overeen met een waterproduktie van 30 miljoen m<sup>3</sup> op jaarbasis met een gemiddelde verblijftijd van 100 dagen. Het Waterloopkundig Laboratorium in Delft heeft het computerprogramma TRISULA ontwikkeld, hiermee is het mogelijk de stromingen in de plas bij verschillende windvelden te simuleren (TRISULA 1994). In deze drie-dimensionale modellering van de waterbeweging is zichtbaar dat de stroming aan de oppervlakte altijd met de wind mee is gericht, terwijl de retourstroom (stroming tegen de wind in) via de diepere delen van de plas plaatsvindt. Het toevoegen van een afbreekbare tracer aan het ingelaten water maakt zichtbaar waar het water zich bevindt en geeft een waarde voor de mate van menging in de gemodelleerde plas. Het is nu mogelijk de Eerste Waterleidingplas en de toekomstige Tweede Waterleidingplas ten aanzien van hun functioneren als meng- en/of verdringingsbekken te vergelijken.

\*\*

De vergelijking van de bekkens kan gebeuren door de afbraak van de gemodelleerde tracer in de plas te vergelijken met een aantal achter elkaar geschakelde volledig gemengde bekkens. Een aantal van 1 geeft aan dat het bekken volledig gemengd is en oneindig veel komt overeen met een verdringingsbekken. Uit de berekeningen volgt dat naarmate de strekdam langer is het bekken meer op een verdringingsbekken gaat lijken.

De capaciteitsuitbreiding van de Plassenwaterleidingen verdubbelt de op termijn te zuiveren volumestroom. Het water is nu afkomstig uit de Bethunepolder, aangevuld met enig Amsterdam-Rijnkanaalwater (ARK-water). Vergroting van de volumestroom betekent een verandering van de herkomst van het water. Het te zuiveren water zal dan voor de helft afkomstig zijn uit de Bethunepolder en voor de andere helft van het Amsterdam-Rijnkanaal. Het ARK-water heeft een relatief hoge chloride-concentratie en een lagere ammonium-concentratie ten opzichte van het water uit de Bethunepolder. In de toekomst wordt hierdoor afvlakking in de plas belangrijker dan de afbraak van ammonium.

Er wordt aangeraden om een korte strekdam aan te leggen omdat kortsluitstromen tussen het onttrekkingspunt en inlaatpunt dan voorkomen worden en de menging groot is.

 $\cap$  $\square$  $\bigcirc$  $\supset$  $\rightarrow$ = --7 J à Ì

£8.,

Samenvatting

•



.

# INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	i
Samenvatting	. 111
Inhoudsopgave	vii
1 Inleiding	. 1
1.1 Gemeentewaterleidingen Amsterdam	1
1.2 Onderzoeksgebied	1
1.3 Kader van het onderzoek	2
1.4 Probleemstelling	2
1.5 Opbouw van het rapport	3
2 Functie van de Waterleidingplas	. 5
2.1 Het zuiveringsproces	5
2.2 Doorstroombekken	5
2.3 Theorie verblijftijdsspreiding, afbraak en menging	6
2.3.1 Verblijftijden in een bekken	6
2.3.2 Verband tussen zelfreiniging en verblijftijdsspreiding	9
2.4 Achter elkaar schakelen van bekkens	11
2.5 Eisen ten aanzien van ammonium	14
2.6 Eisen ten aanzien van chloride	14
3 Modelleren van de waterbeweging	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Navier-Stokes en Reynolds vergelijkingen	15
3.3 Randvoorwaarden	18
3.3.1 Bodemwrijving	18
3.3.2 Windschuifspanning	19
3.4 Turbulentiemodellering	19
4 Keuze van een model	23
4.1 Aantal dimensies	23
4.2 Eindige elementen- of eindige differentiemethode	23
4.3 Roosters voor de eindige differentiemethode	24
4.3.1 Uniform rechthoekig rooster	24
4.3.2 Telescopisch rooster	24
4.3.3 Genesteld rooster	25
4.3.4 Kromlijnig rooster	25
4.4 Vertikale schematisatie	26
4.5 Keuze van een bestaand model	27

5 Toepassing van TRISULA	33
5.1 Inleiding	33
5.2 Numerieke parameters	34
5.2.1 Roosterafstand	34
5.2.2 Tijdstap	35
5.2.3 Keuze numerieke parameters	36
5.3 Fysische parameters	37
5.3.1 Horizontale en vertikale turbulentieviscositeit	37
5.3.2 Windschuifspanning	10
5.3.3 Bodemschuifspanning	11
5.4 Gevoeligheidsanalyse rechthoekig model 4	12
5.5 Kromlijnig versus rechtlijnig rooster	14
6 Waterbeweging en verblijftijdsspreiding Eerste Waterleidingplas	17
6.1 Vertikale verdeling van de waterbeweging	17
6.2 Dieptegemiddelde waterbeweging	18
6.3 Vier windrichtingen en het effect op de dieptegemiddelde stromingen	50
6.4 Berekening van de verblijftijdsspreiding	51
6.5 Verblijftijdsspreiding 5	6
7 Ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas	59
7.1 Inleiding	9
7.2 Programma van eisen 5	9
7.3 Alternatieve ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas	0
9 Waterberreging en verblikkiideenreiding voor de verschillende entwernen	5
8 waterbeweging en verbijttijdsspreiding voor de verschillende ontwerpen	5
8.1 Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden	7
8.2 Konte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden	0
8.3 Lange strekdam, opsiag veen en meermolm in het noorden	0
8.4 Geen strekdam, opsiag veen en meermolm in het wideesten	19
8.5 Strekdam, opslag veen en meermonn in het zuidoosten /	1
9 Conclusies en aanbevelingen	'3
9.1 Conclusies 7	3
9.2 Aanbevelingen 7	6

1

SYMBOLENLIJST	79
LIJST VAN FIGUREN	81
LITERATUURLIJST	85

## APPENDICES

A. Versheld tekenen haar een stationalle toestand voor de concentratieverd	A:	Versneld rekenen	naar een stationai	re toestand voor d	e concentratieverdeling
--	----	------------------	--------------------	--------------------	-------------------------

- B: Aanpassen bodemfile voor TRISULA en berekenen van volume
- C: Menging door inlaten in circulerende stroming
- D: Mate van menging in de Eerste Waterleidingplas en de ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas
- E: Metingen in de Eerste Waterleidingplas
- F: Windklimaat van Nederland
- G: Drinkwater uit de plas



## **1** Inleiding

## 1.1 Gemeentewaterleidingen Amsterdam

Gemeentewaterleidingen Amsterdam (GWA) beschikt over twee produktiebedrijven, de rivierduinwaterleiding nabij Vogelenzang en de rivier-plassenwaterleiding bij Weesp. De totale levering van drinkwater bedraagt circa 92 miljoen m<sup>3</sup> per jaar aan Amsterdam en omstreken.

De rivier-duinwaterleiding maakt gebruik van ruw water uit het Lekkanaal dat geleverd wordt door de Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK). De kwaliteit van het rivierwater wordt continu gecontroleerd. Als de waterkwaliteit onder de norm komt wordt de inlaat van rivierwater stopgezet. De WRK zorgt voor de eerste zuiveringstrap van het water voordat het getransporteerd wordt naar de Amsterdamse Waterleidingduinen. De duinen hebben een buffercapaciteit van 2 maanden. Het verblijf van water in de duinen zorgt voor een kwaliteitsverbetering door afbraak van stoffen, bacteriën en virussen. Door de variatie in verblijftijd in het duin van tussen de 50 en globaal 400 dagen worden kwaliteitsfluctuaties afgevlakt. In Leiduin wordt het water verder gezuiverd en vindt het transport naar de consument plaats.

De rivier-plassenwaterleiding gebruikt als grondstof water uit de Bethunepolder en water uit het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK-water). Dit is uitgebreid beschreven in appendix G. In het Waterleidingkanaal komen de twee soorten ruw water bij elkaar en worden na de coagulatie en bezinking via een overstort de Waterleidingplas ingelaten. Het water verblijft gemiddeld 100 dagen in de Waterleidingplas, zodat de menging en de zelfreiniging worden bevorderd. Deze zelfreiniging houdt in de afbraak van ammoniak, organische stoffen en bacteriën. De zuivering tot drinkwater vindt in Weesperkarspel plaats.

## 1.2 Onderzoeksgebied

De plas Loenderveen oost, verder Loenderveense plas genoemd, en de huidige Eerste Waterleidingplas liggen in het Vechtplassengebied. Figuur 1.1 geeft het onderzoeksgebied weer. De Eerste Waterleidingplas is omringd door een dijk en in het noorden van de plas ligt een strekdam. Deze strekdam is aangelegd om een minimale verblijftijd van het water in de plas te garanderen door vermijding van kortsluitstromen. De plas heeft een oppervlakte van ongeveer 115 hectare met een gemiddelde diepte van 6 m. De Loenderveense plas is sinds 1955 niet meer in gebruik als drinkwaterbekken. Deze plas heeft een oppervlakte van ongeveer 215 hectare en een gemiddelde diepte van 2 m. De waterstand in de beide plassen varieert rond de NAP -1.2 m. Gemeentewaterleidingen heeft het voornemen de Loenderveense plas te verdiepen en in te richten tot Tweede Waterleidingplas.

# 1.3 Kader van het onderzoek

Om aan de verwachte toename van de vraag naar drinkwater te voldoen heeft Gemeentewaterleidingen het voornemen om de capaciteit van de drinkwatervoorziening te vergroten. Voor de rivier-plassenwaterleiding betekent dit op termijn een verdubbeling van de leveringscapaciteit van 31 miljoen m<sup>3</sup>/jaar naar 61 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (Drinkwater voor nu en later 1989). Om dit te kunnen realiseren en te voldoen aan de eis ten aanzien van de minimaal gemiddelde verblijftijd in de plas is een groter volume van het doorstroombekken nodig. Een onderdeel van de vergroting van de leveringscapaciteit zal dan ook de verdieping en ingebruikname van de Loenderveense plas zijn (startnotitie MER, 1994).

Bij een besluit over de ontgronding van deze grootte, groter dan 100 hectare, is een milieueffect-rapportage (MER) verplicht. Gezien besluiten die in het verleden zijn genomen en o.a. zijn vastgelegd in het Waterhuishoudingsplan van Utrecht (1992) heeft de Loenderveense plas reeds de bestemming drinkwater. De MER betreft daarom slechts de inrichting van de plas tot doorstroombekken. De probleemstelling is door GWA voor de inrichtings-MER als volgt geformuleerd:

"Stel een ontgrondings-, inrichtings- en beheersplan vast voor de Tweede Waterleidingplas waarbij het drinkwaterbekken de functie kan vervullen die nodig is in het kader van de uitbreiding van de capaciteit van de rivier-plassenwaterleiding en waarbij tegelijkertijd de plas een positieve bijdrage heeft op het watermilieu, het landschap en de omgeving (startnotitie MER 1994)."

Het onderhavige onderzoek naar de stroming in de toekomstige Tweede Waterleidingplas, dit is de ingerichte Loenderveense plas, is in dit kader uitgevoerd. Het geeft richting aan het verband tussen de inrichting, het bodemprofiel van de plas en de eisen die aan het functioneren van de plas worden gesteld.

## **1.4 Probleemstelling**

De probleemstelling voor het onderzoek kan als volgt worden geformuleerd:

"Ontwerp op basis van de waterbeweging de zogenoemde Tweede Waterleidingplas met een capaciteit equivalent aan 100 dagen doorlooptijd bij 30 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. In de plas moet i.v.m. afvlakking van verschillen in innamewater menging plaatsvinden en i.v.m. de afbraak van stc ffen een zekere verblijftijd gewaarborgd zijn. Dit om te garanderen dat de waterkwaliteit aan het onttrekkingspunt voldoet aan de eisen die gesteld worden aan het ruwe water voor het produktiebedrijf Weesperkarspel."

# 1.5 Opbouw van het rapport

Het rapport bestaat uit een tekstdeel met daarin figuren en een figurendeel. De nummering in het figurendeel sluit aan op die in het tekstdeel. Hieronder volgt de opbouw van het tekstdeel van het rapport.

In hoofdstuk 2 is de functie van de Waterleidingplas beschreven. De theoretische werking van een verdringings- en volledig gemengd bekken ten aanzien van een nulde-orde en eerste-orde afbraakproces wordt behandeld. Vervolgens blijkt dat het menggedrag van een willekeurige plas tussen volledige verdringing en menging in ligt en theoretisch te vergelijken is met een aantal achter elkaar geschakelde volledige mengbekkens.

In hoofdstuk 3 is de theorie van de ondiepwaterstroming beschreven die voor de plassen geldig is. Ook wordt de mogelijke modellering van de bodemschuifspanning, windschuifspanning en turbulentie beschreven.

In hoofdstuk 4 wordt een keuze gemaakt voor de programmatuur waar het onderzoek mee uitgevoerd zal worden. Deze keuze is gebaseerd op het aantal dimensies dat gemodelleerd kan worden, de turbulentiemodellering en het rooster in het horizontale vlak. Na afweging is gekozen voor TRISULA van het Waterloopkundig Laboratorium.

In hoofdstuk 5 wordt de toepassing van TRISULA voor de Eerste Waterleidingplas beschreven. Er worden keuzes gemaakt voor de in te voeren parameters en er wordt gekeken hoe gevoelig het model is voor verandering van deze parameters. De horizontale turbulentieviscositeit heeft een grote invloed op de berekende snelheden. De keuzes die voor de Eerste Waterleidingplas gemaakt worden, worden ook aangehouden bij de modellering van de Tweede Waterleidingplas.

In hoofdstuk 6 zijn de resultaten van de berekening met het kromlijnige rooster voor de Eerste Waterleidingplas beschreven. Dit is tevens de opzet voor de beschrijving van de Tweede Waterleidingplas. Naast de waterbeweging van de plas wordt ook behandeld hoe de vertaling van de afbreekbare tracer naar een verblijftijdsspreiding plaatsvindt. De verblijftijdsspreiding en de totale kwaliteitsverbetering in de Eerste Waterleidingplas worden beschreven.

In hoofdstuk 7 worden de ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas gepresenteerd. Tevens wordt beschreven welke eisen er aan de plas gesteld worden en hoe de ontwerpen tot stand zijn gekomen.

In hoofdstuk 8 worden de resultaten uit de berekeningen van de verschillende alternatieven voor de Tweede Waterleidingplas beschreven. Dit wordt gedaan met behulp van de figuren met de dieptegemiddelde snelheidsvectoren en de verblijftijdsspreiding.

In hoofdstuk 9 worden de conclusies en aanbevelingen besproken. De bekkens worden met elkaar vergeleken bij verschillende windrichtingen en windsnelheden.

**۱** 

# 2 Functie van de Waterleidingplas

# 2.1 Het zuiveringsproces

Het grootste deel van het water dat door de rivier-plassenwaterleiding gezuiverd wordt is nu nog uitslagwater uit de Bethunepolder. Dit wordt sinds 1983 aangevuld met water uit het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK-water). De eerste drie zuiveringsstappen vinden plaats bij Loenderveen waarna het bereidingsproces wordt afgerond in Weesperkarspel. Het doorlopen zuiveringsproces ziet er als volgt uit (appendix G):

- coagulatie (uitvlokking) en sedimentatie te Loenderveen
- opslag in de Eerste Waterleidingplas t.b.v. afvlakking van kwaliteitsfluctuaties, afbraak van ammoniak, bacteriën en virussen
- snelfiltratie te Loenderveen
- ozonisatie te Weesperkarspel
- ontharding te Weesperkarspel
- koolfiltratie te Weesperkarspel
- langzame zandfiltratie te Weesperkarspel

Daarna wordt het (drinkwater) na het passeren van twee reinwaterkelders geleverd aan huishoudens en bedrijven in en om Amsterdam.

# 2.2 Doorstroombekken

De functie van de waterleidingplas wordt die van menger en verblijftijdsbekken. De plas speelt hiernaast een beperkte rol als voorraadbekken. Onder een doorstroombekken wordt verstaan, een bekken waarvan het waterpeil niet varieert en de toevoer is gelijk aan de afvoer. Dit geldt in de toekomst globaal ook voor de in te richten Loenderveense plas. De waterstand in deze plas mag om hydrologische redenen slechts weinig variëren waardoor hij nauwelijks geschikt is voor waterberging. Alleen in het geval van calamiteiten in een van de twee plassen of m.b.t. de toevoer van geschikt inlaatwater zal er gebruik gemaakt worden van waterberging. Er is een aantal redenen voor het in gebruik nemen van een doorstroombekken:

- zelfreinigingsbekken: om door zelfreiniging (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, organische stoffen, microorganismen) de kwaliteit van het ingenomen water zoveel mogelijk te verbeteren.
- afvlakkingsbekken: om de grote kwaliteitswisselingen (Cl<sup>-</sup> concentratie) van het ingenomen oppervlaktewater af te vlakken
- calamiteitsbekken: om onder bijzondere omstandigheden de tijd van een calamiteit te overbruggen
- analysebekken: om de tijd tussen bemonsteren en analyseren van het te zuiveren water te overbruggen

In het algemeen zal, afhankelijk van de functie van het bekken de noodzakelijke verblijftijd varieren tussen ongeveer een week (analyse- en calamiteitsbekken) en enkele maanden (afvlakkings- en zelfreinigingsbekken). De twee hoofddoelen van het doorstroombekken van de Eerste Waterleidingplas zijn afvlakking en zelfreiniging, de noodzakelijke gemiddelde verblijftijd wordt daarvoor gesteld op minimaal 100 dagen. Ook voor de toekomstige Tweede Waterleidingplas gelden deze twee hoofddoelen. Om te voorspellen hoe het bekken zich zal gaan gedragen is het belangrijk om de spreiding van de verblijftijden in het toekomstige bekken te kennen. De keuze van de gewenste verblijftijd is gebaseerd op de verschillende meng- en afbraakprocessen in de plas. Afvlakking van kwaliteitsverschillen is het grootst bij volkomen menging. Indien afvlakking het enige hoofddoel zou zijn, zou men dus streven naar een volledig gemengd bekken. Over het algemeen verloopt de zelfreiniging het beste wanneer de verblijftijden van alle deeltjes even groot is. Hiervoor zou men een bekken ontwerpen waarbij de verblijftijdsspreiding het best overeenkomt met een volledig verdringingsbekken. Dit zijn feitelijk twee tegenstrijdige eisen voor het ontwerp van de Tweede Waterleidingplas. De genoemde periode van 100 dagen wordt geacht het beste compromis te zijn uitgaande van de maatgevende waarden voor afbraak van ammonium en de afvlakking van chloride.

## 2.3 Theorie verblijftijdsspreiding, afbraak en menging

De twee uitersten voor de verblijftijdsspreiding in het bekken, een verdringingsbekken en een volledige menger worden beschreven Hieruit blijkt dat de totale afbraak in een bekken bij een eerste-orde afbraakproces het grootst is in een verdringingsbekken (propstroming). Afvlakking van waterkwaliteitsfluctuaties is maximaal in een volledige menger.

## 2.3.1 Verblijftijden in een bekken

Het is mogelijk om met behulp van een tracer de verblijftijdsspreiding te meten, met name in modelproeven. Bij een tracerproef wordt aan het water dat het bekken instroomt momentaan een kenmerkende en detecteerbare stof (tracer) toegevoegd. Bij het punt waar het water het bekken weer verlaat worden periodiek monsters genomen om te kijken hoeveel tracer er in het water zit en aan de hand hiervan is de verblijftijdsspreiding te bepalen. Dezelfde proef is tevens mogelijk in een numeriek model van het bekken. Ook hierin kunnen gemerkte deeltjes toegevoegd en gedetecteerd worden. De cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden voor een verdringingsbekken en een volledig gemengd bekken zijn eenvoudig analytisch te berekenen. In de natuur echter zal de frequentieverdeling, aangenomen dat het gehele bekken meedoet in het systeem, tussen deze twee uitersten liggen.

#### Volkomen verdringing

Als in een bekken volkomen propstroming optreedt zijn de verblijftijden van alle deeltjes gelijk aan de gemiddelde verblijftijd T [s]. Er geldt dat T = V/Q met V [m<sup>3</sup>] de bekkeninhoud en Q [m<sup>3</sup>/s] de volumestroom. Volkomen propstroming zal in de praktijk nooit bereikt worden, omdat er steeds een zekere spreiding optreedt van de verblijftijden door verschillen in stroomsnelheid in het bekken. Langs de bodem zal door wrijving de stroomsnelheid lager zijn dan aan het oppervlak, ook zullen door andere aandrijvende krachten (wind en temperatuurverschillen) stromingsvariaties optreden. Hierdoor zal een deel van het water sneller dan gemiddeld het bekken verlaten en een ander deel daar meer tijd voor nodig hebben. Dit is weer te geven in een frequentieverdeling voor de verblijftijden. De cumulatieve frequentieverdeling voor propstroming oftewel een volledig verdringingsbekken is weer te geven door een stapfunctie. Deze frequentieverdeling geeft weer welk deel van het water een verblijftijd heeft die korter is dan de verblijftijd op de x-as. Deze uitgezette verblijftijd is weergegeven als een fractie van de gemiddelde verblijftijd van het bekken.



Figuur 2.1 Cumulatieve verblijftijdsverdeling volledig verdringingsbekken

In figuur 2.1 is te zien dat elk deeltje water na een verblijftijd T in het bekken aanwezig te zijn geweest het bekken weer verlaat.

#### Volledige menging

Voor de volledige menging zal gelden dat de gemiddelde verblijftijd tevens gelijk is aan T [s]. Theoretisch zal het water nadat het het bekken instroomt onmiddelijk verdeeld worden over het gehele bekken. In dit geval geldt dat de concentratie in het bekken gelijk is aan de afgevoerde concentratie, de continuïteitsvergelijking wordt dan:

toevoer = afvoer + berging

$$Q dt c_{p} = Q dt c_{p} + V dc_{p}$$

$$(2.1)$$

Q = Volumestroom [m<sup>3</sup>/s]t = tijdsduur [s] c<sub>o</sub> = concentratie inlaatwater [kg/m<sup>3</sup>] c<sub>b</sub> = concentratie in het bekken [kg/m<sup>3</sup>] V = Volume [m<sup>3</sup>]

Deze vergelijking kan met Q=V/T [m<sup>3</sup>/s] geschreven worden als:

$$\frac{dt}{T} = \frac{dc_b}{c_o - c_b} \tag{2.2}$$

T = gemiddelde verblijftijd [s]

geïntegreerd geeft dit:

$$\frac{t}{T} = -\ln(c_o - c_b) + A \tag{2.3}$$

#### A = integratieconstante

De cumulatieve verblijftijdsspreiding verkrijgt men door te starten met een bekken waar de concentratie nul is en vanaf t=0 water met een conservatieve stof toe te voegen met een vaste concentratie  $c_o$ . Indien er op t=0 gestart wordt met een bekken waarvan de concentratie nul is  $(c_b = 0)$  leveren de concentraties in het bekken de cumulatieve verblijftijdsspreiding p op. Dit zijn vanwege de volledige menging dan ook de verblijftijden in het onttrekkingspunt. Dit geeft de randvoorwaarde  $c_b = 0$ , op t = 0, hieruit volgt dan A= ln  $c_o$ . Substitutie van deze randvoorwaarde en omwerken levert:

$$p = \frac{c_b}{c_o} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$
(2.4)

p = cumulatieve verblijftijdsspreiding

8

Deze cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden p levert de volgende grafische afbeelding op:



Figuur 2.2 Verblijftijden in een volledig gemengd bekken

De propstroming (de verblijftijdsspreiding is weergegeven in figuur 2.1) kan worden benaderd door verscheidene mengbekkens achter elkaar te plaatsen, het gezamenlijke volume van deze bekkens blijft gelijk (Huisman 1986).

### 2.3.2 Verband tussen zelfreiniging en verblijftijdsspreiding

De zelfreiniging van het water is gebaseerd op de afbraak van stoffen, bacteriën en virussen. Het is hierbij echter niet voor alle stoffen en organismen duidelijk hoe de afbraak in de plas precies plaatsvindt. Om te bepalen of een verdringingsbekken of een volledig gemengd bekken waardevoller is, is het van belang om te weten hoe de beoogde afbraak plaatsvindt. Hieronder zullen een nulde-orde afbraakproces en een eerste-orde afbraakproces nader bekeken worden.

#### Het nulde-orde afbraakproces

Een nulde-orde afbraakproces wil zeggen dat de afbraak van de stof per tijdseenheid constant is, ongeacht de concentratie. In formulevorm geeft dit:

$$\frac{dc}{dt} = -k \quad (met \ k \ een \ konstante) \tag{2.5}$$

c = concentratie [kg/m<sup>3</sup>]

t = tijdsduur [s]

k = afbraakcoëfficiënt [kg/m<sup>3</sup>s]

Oplossen van deze differentiaalvergelijking met de randvoorwaarde c=co, op t=0 geeft:

$$c = c_o - kt \tag{2.6}$$

De kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken wordt dan:

$$R = \frac{c_T}{c_o} = \frac{c_o - kI}{c_o}$$
(2.7)

100

R = kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken  $c_T =$  concentratie op tijdstip T [s] T = gemiddelde verblijftijd [s]

Voor een volledig gemengd bekken wordt de verdeling voor de verblijftijden gegeven door formule (2.4) dit geeft voor dp:

$$dp = \frac{1}{T}e^{-\frac{T}{T}}dt \qquad (2.8)$$

De kwaliteitsverbetering van het geheel wordt dan:

$$R' = \frac{\int_{o}^{1} (c_{o} - kt) dp}{\int_{o}^{1} c_{o} dp}$$
(2.9)

R' = kwaliteitsverbetering in een volledig gemengd bekken

Combineren van (2.8) en (2.9) levert dat R=R', dit betekent dat het voor het nulde-orde afbraakproces geen verschil maakt of het bekken gemengd is of dat er sprake is van een volledig verdringingsbekken.

#### Het eerste-orde afbraakproces

Uit onderzoek naar de afbraak van ammonium in de Eerste Waterleidingplas blijkt uit het analyseren van het ammonium-gehalte van 1984-1993 dat de afbraak van ammonium zich globaal gedraagt als een eerste-orde afbraakproces (deze afbraak geeft de beste benadering met de gemeten waarden). Dat wil zeggen dat de afbraak evenredig is aan de concentratie in het bekken:

$$\frac{dc}{dt} = -kc \qquad (2.10)$$

k = afbraakcoëfficiënt [1/s]

Integratie van deze vergelijking met als voorwaarde  $c=c_o$ , op t=0 geeft:

 $c = c_o e^{-kt}$  (2.11)

Voor de kwaliteitsverbetering R in een volledig verdringingsbekken met een verblijftijd T geldt dan:

$$R = \frac{c_T}{c_o} = e^{-kT} \qquad (2.12)$$

R = kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken

Indien nu sprake is van volledige menging met T als gemiddelde verblijftijd dan is deze kwaliteitsverbetering:

$$R' = \frac{\int_{o}^{1} c_{o} e^{-kt} dp}{\int_{0}^{1} c_{o} dp}$$
(2.13)

R' = kwaliteitsverbetering in een volledig gemengd bekken

Met de formulering voor de dp (2.8) en delen door c<sub>o</sub> levert dit:

$$R' = \frac{\frac{1}{T} \int_{o}^{\infty} e^{-kt} e^{-\frac{t}{T}} dt}{1} = \frac{1}{1+kT}$$
(2.14)

Het blijkt uit 2.12 en 2.14 dat een verdringingsbekken bij een eerste-orde afbraakproces in de regel een veel grotere kwaliteitsverbetering geeft dan een volledig gemengd bekken. Dit effect is verder uitgewerkt en terug te zien in figuur 2.4.

#### 2.4 Achter elkaar schakelen van bekkens

Het is zowel theoretisch als praktisch interessant een bekken samen op te vatten als een systeem van achter elkaar geschakelde volledig gemengde bekkens met een totaal gesommeerd volume V. De uiteindelijke afbraak van een eerste-orde proces in n achter elkaar geschakelde bekkens is gelijk aan de vermenigvuldiging van de kwaliteitsverbetering in elk afzonderlijk bekken:

$$R_{n} = \frac{c_{T}}{c_{o}} = \frac{1}{(1+k\frac{T}{n})^{n}}$$
(2.15)

 $R_n =$  kwaliteitsverbetering bij n bekkens achter elkaar n = aantal bekkens T = gesommeerde gemiddelde verblijftijd van n bekkens [s] De volkomen menger bestaat dan uit één bekken (gemiddelde verblijftijd T). De volkomen verdringing komt overeen met oneindig veel achter elkaar geschakelde mengbekkens (gesommeerde gemiddelde verblijftijd van T). Dit is te bewijzen door n te laten naderen tot oneindig,  $R_{\infty}$  levert:

 $\bigcirc$ 

 $\cap$ 

 $\bigcirc$ 

0

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

6

 $\bigcirc$ 

 $\oplus$ 

0

 $\Theta$ 

e

Θ

 $(\Box$ 

⊜

 $\bigcirc$ 

€

0

 $\bigcirc$ 

 $\subseteq$ 

0

$$\lim_{n \to \infty} \frac{1}{(1+k\frac{T}{n})^n} = e^{-kT}$$
 (2.16)

En dit is gelijk aan de uitkomst van vergelijking 2.12, daarmee geldt: R\_=R.

Figuur 2.3 laat de cumulatieve verblijftijd zien van verschillende bekkenconfiguraties. Naarmate het aantal achter elkaar geschakelde bekkens groter is verandert de vorm van de verblijftijdsspreiding van die van een volkomen menger naar die van een volkomen verdringingsbekken.



Figuur 2.3 Spreiding van verblijftijden in serie geschakelde mengbekkens.

Het gedrag van de plas is te beschrijven als dat van n achter elkaar geschakelde volledig gemengde bekkens. Dit is te doen door de totale afbraak van de stof (kwaliteitsverbetering) in de bekkenconfiguratie te meten bij een eerste-orde afbraakproces.



Figuur 2.4 Kwaliteitsverbetering bij een eerste-orde afbraakproces

De concentratie in het onttrekkingspunt hangt af van de kwaliteitsverbetering in het bekken en de ingelaten concentratie volgens vergelijking 2.15. In figuur 2.4 is de afbraakcoëfficiënt k maal de gemiddelde gesommeerde verblijftijd T tegen de kwaliteitsverbetering in de bekkenconfiguratie uitgezet. De waarde kT = 1 is te vergelijken met een bekkensysteem met T = 100 dagen en k=0.01 1/dagen. Een aantal van 1000 achter elkaar geschakelde bekkens komt in dit voorbeeld vrijwel overeen met volkomen verdringing.

13

# 2.5 Eisen ten aanzien van ammonium

De benodigde zelfreiniging van de plas komt tot uitdrukking in de eis van een maximaal toegestane ammonium-concentratie van 1 mg/l in het effluent van de plas, vóór de snelfilters. Wordt deze waarde hoger dan is tijdens de snelfiltratie de omzetting van ammonium in nitraat niet volledig te garanderen en bestaat het gevaar dat er ongewenst nitriet wordt gevormd. De afbraak door het verblijf in de Eerste Waterleidingplas en de toekomstige Tweede Waterleidingplas moet ervoor zorgen dat het ammonium-gehalte van ongeveer 2 mg/l teruggebracht wordt naar 1 mg/l. De afbraak is echter sterk temperatuurafhankelijk. De gemiddelde verblijftijd in het bekken moet volgens de ervaring van Gemeentewaterleidingen 100 dagen zijn om in de winterperiode een verlaging van de ammonium-concentratie in de plas van 1 mg/l te bewerkstelligen.

### 2.6 Eisen ten aanzien van chloride

Omdat chloride niet afbreekt is het een goede maat om te constateren hoe groot de afvlakking in de plas is. Hoge Cl<sup>-</sup>-concentraties kunnen door de waterleidingplas alleen verlaagd worden door afvlakking. Afvlakking is ook te analyseren met in seriegeschakelde volledig gemengde bekkens, deze is echter sterk afhankelijk van de periode van de veranc'ering van de concentratie ten opzichte van de gemiddelde verblijftijd. Er wordt aangenomen dat de afvlakking groter is naarmate het bekken te vergelijken is met minder achter elkaar geschakelde volledig gemengde bekkens.

Verlaging van de gemiddelde Cl<sup>-</sup>-concentratie is alleen mogelijk door een selectieve inname van ARK-water. Hierdoor gaat echter het waterniveau in de plassen fluctueren hetgeen o.a. kwel en wegzijging in de omgeving beinvloedt.

De eisen ten aanzien van het chloride-gehalte zijn door GWA zelf geformuleerd, met het oog op bestrijding van corrosie van de circa 1000 km gietijzeren leidingen in de hoofdstad en de risico's van bruinkleuring van het drinkwater hierdoor. Een Cl<sup>-</sup>-concentratie boven de 80 mg/l vergroot de kans op corrosie van de gietijzeren leidingen.

## 3 Modelleren van de waterbeweging

## 3.1 Inleiding

De Waterleidingplas kan fungeren als een verdringingsbekken of een volledige menger en alles wat tussen deze twee uitersten ligt. In het verleden is aangenomen dat de menging in de Eerste Waterleidingplas volledig is. De mate van menging, meer propstroom of volledige menger, zal afhangen van de stroming in de plas. De waterbeweging in de plas is afhankelijk van:

- windveld
- doorstroomdebiet
- dichtheidsverschillen
- coriolis kracht
- geometrie van de plas

Deze grootheden beinvloeden de menging in meerdere of mindere mate. Bij een meer van deze afmetingen heeft de coriolis kracht nauwelijks invloed op de stroming. De wind bepaalt in samenspel met de geometrie van de plas voor een belangrijk deel de waterbeweging.

De beschrijving van de waterbeweging vindt het meest fundamenteel plaats met de Navier-Stokes (N-S) vergelijking. Deze bestaat uit een impulsbalans en de continuïteitsvergelijking. Om tot praktisch oplosbare vergelijkingen te komen moeten er voor verschillende vraagstukken benaderingen en aannamen gedaan worden. In dit hoofdstuk zal besproken worden welke benaderingen gedaan moeten worden om tot een werkbare oplossing te komen voor de waterbeweging. Het zal blijken dat de stroming in een meer goed te beschrijven is met de ondiepwatervergelijking waarbij de vertikale versnellingen verwaarloosd worden.

# 3.2 Navier-Stokes en Reynolds vergelijkingen

De beschrijving van de waterbeweging gebeurt aan de hand van de impulsbalans en de continuïteitsvergelijking. Er wordt uitgegaan van een onsamendrukbare vloeistof. Dit betekent dat de dichtheid van de vloeistof onafhankelijk is van de druk p. Door dichtheidsverschillen kan de waarde van  $\rho$  wel varieren.

De N-S vergelijkingen voor een onsamendrukbare vloeistof zijn:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} - \rho f v + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \qquad (3.1a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} + \rho f u + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \qquad (3.1b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = 0 \qquad (3.1c)$$

 $f = 2\Omega sin\phi$  is de coriolis kracht [rad/s]  $\Omega = omwentelingssnelheid van de aarde [rad/s]$  $<math>\phi = breedtegraad$  (Loenderveense plassen 52.2 °NB) u,v,w = drie snelheidscomponenten [m/s] x,y,z = drie coördinaten [m]  $p = druk [kg/ms^2]$  $\rho = dichtheid [kg/m^3]$ 

De continuïteitsvergelijking voor een onsamendrukbare vloeistof kan geschreven worden als:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (3.2)$$

Door de aanwezigheid van de moleculaire viscositeit verzet de vloeistof zich tegen voortgaande vervormingen, dit resulteert in viskeuze schuifspanningen  $\tau_{ii}$  in vergelijking 3.1.

$$\tau_{ij} = \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \qquad (3.3)$$

 $\tau_{ij}$  = schuifspanning in i-richting en op het vlak loodrecht op j-as [kg/ms<sup>2</sup>]  $\eta$  = moleculaire viscositeit [kg/ms]

Hierbij zijn indices i,j de richtingen x,y,z of de snelheden u,v,w. De N-S vergelijkingen worden hanteerbaar gemaakt door gebruik te maken van gemiddelden. De snelheidscomponenten u, v, w en de druk p worden opgesplitst in een gemiddeld deel (overstreept) en een fluctuerend deel (accent) volgens:

$$u = \overline{u} + u', \quad v = \overline{v} + v', \quad w = \overline{w} + w', \quad en \quad p = \overline{p} + p'$$
 (3.4)

Door het invullen van deze termen in de N-S vergelijking en deze te middelen ontstaan nieuwe vergelijkingen. Hierbij wordt nu uitgegaan van gemiddelden en er komt een extra schuifspanning bij.

Deze extra schuifspanning, die veroorzaakt wordt door de turbulentie, is de Reynoldsspanning en is samen met de viskeuze schuifspanning als volgt te schrijven:

$$\tau_{ij} = \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \qquad (3.5)$$

Vervolgens kunnen de Boussinesq-benadering en de aanname van een hydrostatische drukverdeling gedaan worden.

- Boussinesq-benadering: de dichtheidsverschillen in een massa water zijn veel kleiner dan de dichtheid zelf. In dat geval kan een constante dichtheid aangenomen worden in de bewegingsvergelijking, behalve in de zwaartekrachtsterm.
- Hydrostatische drukverdeling: In meren geldt dat de vertikale versnelling verwaarloosd kan worden ten opzichte van de zwaartekrachtversnelling. Dit kan aangetoond worden door een dimensieanalyse (Jin 1993).

De aanname van een hydrostatische drukverdeling in een meer is geoorloofd als er sprake is van een ondiep-waterstroming. Deze stromingen komen in de natuur regelmatig voor, al zullen ze niet zuiver twee-dimensionaal zijn door de invloed van de bodemwrijving en/of dichtheidsverschillen. Om te bepalen of een stroming bijna alleen horizontaal georiënteerd is moet naar een aantal schalen gekeken worden.

Vertikale schalen:

- waterdiepte
- dikte van grenslagen (Voor rivieren, meren en kustzones is de grenslaag meestal dikker dan de waterdiepte. In dat geval is de diepte de relevante vertikale schaal.)
- vertikale variatie in het bodemprofiel (diepte van kanalen, hoogte van zandbanken)
- variatie in waterpeilniveau

Horizontale schalen:

- variatie in de oppervlakte (breedte van een bekken, lengte van een meer)
- horizontale variatie in het bodemprofiel (dimensies van zandbanken)
- afstand waarover externe krachten aanzienlijk veranderen (variatie van windschuifspanning)

Het gemeenschappelijke kenmerk van een ondiepwaterstroming is dat de vertikale dimensie veel kleiner is dan een typische horizontale schaal. Deze aanname geldt voor een doorstroombekken als de Eerste Waterleidingplas en de in te richten Tweede Waterleidingplas. Om de ondiepwatervergelijking die onder deze aanname is ontstaan op te lossen, zijn randvoorwaarden nodig. Verder zijn door de introductie van de fluctuerende beweging in de impulsbalans, meer onbekenden dan vergelijkingen. Het probleem van meer onbekenden dan vergelijkingen wordt ook wel het sluitingsprobleem genoemd en de oplossing wordt benaderd met behulp van een turbulentiemodel.

### 3.3 Randvoorwaarden

Aan de bodem wordt de stroming van water afgeremd en er vindt geen stroming door de bodem plaats, dit wordt opgelegd door randvoorwaarden. Ook zijn er randvoorwaarden aan het wateroppervlak nodig om de windinvloed in het model te simuleren.

### 3.3.1 Bodemwrijving

De bodemwrijving in een twee-dimensionale modellering kan afhankelijk genomen worden van de dieptegemiddelde stroming. De meest gebruikte uitdrukking voor de bodemschuifspanning is in dat geval afhankelijk van de gemiddelde stroomsnelheid en de Chézy-coëfficiënt.

$$\tau_b = \rho \frac{g}{C^2} |\overline{U}|^2 \qquad (3.6)$$

 $\tau_{b}$  = bodemschuifspanning [kg/ms<sup>2</sup>] C = Chézy-coëfficiënt [m<sup>1/4</sup>/s]  $\overline{U}$  = dieptegemiddelde snelheid [m/s]

Als de snelheidsverdeling in de vertikaal bekend is kan de bodemschuifspanning afhankelijk genomen worden van de snelheid net boven de bodem. Bij een turbulente stroming is er sprake van een logaritmische snelheidsverdeling en kan de bodemschuifspanning opgelegd worden door de zogenoemde 'Wandwet'. De bodemschuifspanning is afhankelijk van de schuifspanningssnelheid volgens:

$$\tau_b = \rho u_*^2$$
 (3.7)

 $u_{\star} =$  schuifspanningssnelheid [m/s]

Waarbij de schuifspanningssnelheid berekend wordt uit de logaritmische snelheidsverdeling boven de bodem volgens:

$$u_b = \frac{u_*}{\kappa} \ln(\frac{z_u}{z_o}) \qquad (3.8)$$

 $u_b = stroomsnelheid op diepte z_u [m/s]$   $\kappa = Von Karman constante (\approx 0.4)$   $z_u = diepte bij stroomsnelheid u_b [m]$  $z_o = wandruwheidshoogte [m]$ 

De achtergrond van deze 'Wandwet' is fysisch correct terwijl de Chézy formulering minder goed onderbouwd is.

## 3.3.2 Windschuifspanning

De oppervlakteschuifspanning,  $\tau_s$  wordt veroorzaakt door de wind. Het is een aandrijvende spanning voor de waterbeweging. De windsnelheid wordt meestal op 10 m hoogte gemeten en dan omgeschreven naar een schuifspanning aan het wateroppervlak. Het is algemeen geaccepteerd dat de windschuifspanning afhangt van de windsnelheid volgens (Vreugdenhill 1994):

$$|\tau_s| = \rho_a C_d (U_{10}) U_{10}^2$$
 (3.9)

$$\begin{split} \tau_s &= \text{windschuifspanning [kg/ms^2]} \\ \rho_a &= \text{dichtheid van lucht [kg/m^3]} \\ \text{Cd}(U_{10}) &= \text{schuifspanningsparameter} \\ U_{10} &= \text{windsnelheid op 10 m hoogte [m/s]} \end{split}$$

Waarbij de  $Cd(U_{10})$ -waarde licht afhankelijk is van de windsnelheid.

### 3.4 Turbulentiemodellering

Voorspellingen voor de turbulentie worden gebaseerd op gemiddelden omdat de details van de turbulente beweging, die zich in de orde van 0,1 mm afspelen, er tot de waterdiepte niet toe doen. We kunnen voorspellingen dan ook baseren op balansvergelijkingen, waarin slechts gemiddelde eigenschappen van de turbulentie een rol spelen. Het middelingsproces zorgt ervoor dat er termen in de vergelijking optreden waarin correlaties tussen turbulente grootheden voorkomen. Deze termen vereisen extra betrekkingen om tot een sluitend systeem te komen. Dit wordt het sluitingsprobleem van de turbulentie genoemd. Het gaat er bij deze extra betrekkingen om, de correlatietermen te benaderen en zo het stromingsmodel oplosbaar te maken. Deze extra termen voor het stromingsmodel kunnen gegenereerd worden door een turbulentiemodel.

De praktisch bruikbare modellen gaan uit van gradiënt-type transporten, er vindt hierbij overdracht van impuls plaats door een snelheidsverschil. Turbulentie is een eigenschap van stromen in de vloeistof en niet van de vloeistof zelf. Dit betekent dat de aanname gedaan wordt dat de turbulente transporten afnankelijk zijn van snelheidsgradiënten in de hoofdstroming (gradiënt-type transporten). In het geval van bijna horizontale stromingen is de verandering van de horizontale turbulentieviscositeit veel kleiner dan de verandering van de vertikale turbulentieviscositeit. De horizontale turbulentieviscositeit wordt dan ook meestal constant genomen. Voor de vertikale turbulentieviscositeit is het aannemen van een ruimtelijk constante turbulentieviscositeit een te grove benadering en moet er gebruik gemaakt worden van een turbulentiemodel. De vertikale turbulentieviscositeit is sterk diepteafhankelijk. De turbulentieviscositeit is voor het hier beschreven probleem veel groter dan de moleculaire viscositeit. De Reynoldsspanning bij een gradiënt-type transport met verwaarlozing van de viskeuze schuifspanning wordt dan:

$$\tau_{ij} = \rho v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \qquad (3.10)$$

 $v_t$  = turbulentieviscositeit [m<sup>2</sup>/s]

Waarbij  $v_t$  [m<sup>2</sup>/s] de transportcoëfficiënt is van impuls oftewel de turbulentieviscositeit. Er zullen twee soorten modellen worden beschreven waarmee  $v_t$  bepaald kan worden die beide afhankelijk zijn van de gradiënten in de stroming, dit zijn:

-Algebraïsche-turbulentiemodellen

-Differentiaal-turbulentiemodellen

Hieronder worden de twee modellen beschreven.

#### Algebraïsche-turbulentiemodellen

In deze modellen komen alleen onbekenden voor die direct afhankelijk zijn van de plaatselijk gemiddelde snelheid. Voor het mengweglengtemodel stelt Prandtl (1925) voor om de turbulentieviscositeit op de volgende manier van de gemiddelde snelheidsgradiënt af te laten hangen:

$$v_t = l_m^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.11)$$

 $l_m = mengweglente [m]$ 

De waarde  $l_m$  moet empirisch worden bepaald en dat is voor een recirculerende stroming niet eenvoudig. Het model rekent niet met transport van turbulentie in de tijd en over een afstand door de gemiddelde stroming. Dit betekent dat een opgewekte turbulentie niet verplaatst wordt naar een andere locatie en ook niet naar een tijdstip in de toekomst.

Bij een getijstroming zal bij de omslag van eb naar vloed de stroming nul zijn, maar de turbulentie die eerder opgewekt is zal in werkelijkheid nog aanwezig zijn, in deze vorm van turbulentiemodellering wordt hier geen rekening mee gehouden.

Bij wind is sprake van een recirculerende stroming en dit betekent dat de snelheidsgradiënt op deze diepte nul zal zijn. In werkelijkheid zal op deze diepte de turbulentieviscositeit niet gelijk zijn aan nul. Dit is dan ook niet weer te geven met behulp van het mengweglengtemodel, hierin is de turbulentieviscositeit nul indien de snelheidsgradiënt nul is.

#### Differentiaal-turbulentiemodellen

De oplossing van de turbulentieviscositeit wordt bepaald door gebruik te maken van een differentiaalvergelijking. Hierbij zijn te onderscheiden de één-vergelijkingmodellen en de tweevergelijkingmodellen. In een één-vergelijkingmodel vindt er transport van turbulente kinetische energie plaats. De turbulentieviscositeit is dan van de vorm:

$$v_t = c_v k^{\frac{1}{2}} l_t$$
 (3.12)

Waarin c<sub>v</sub> een bepaalde constante is.

Voor de turbulente kinetische energie k geldt:

$$k = \frac{1}{2} \left[ \overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right] \qquad (3.13)$$

Voor de vergelijking van de turbulente kinetische energie geldt (Rodi 1980) in de vorm van een grenslaagstroming:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} (D_k \frac{\partial k}{\partial z}) = \frac{\tau_{xz}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{gK_v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} - \varepsilon$$
(3.14)

Aan de linkerzijde van het gelijkteken staan de advektie en diffusie van turbulente kinetische energie,  $D_k$  is een waarde voor de diffusie van kinetische turbulente energie. Aan de rechterzijde staat de produktie van energie door schuifspanningen, de omzetting van kinetische in potentiele energie en  $\varepsilon$ , die de dissipatie van energie voorsteld. Voor  $\varepsilon$  wordt aangenomen:

$$\varepsilon = c_{\varepsilon} \frac{k^{3/2}}{l_t} \qquad (3.15)$$

Bij dit één-vergelijkingmodel moet nog steeds een lengteschaal opgegeven worden.

Bij het twee-vergelijkingmodel, het  $\kappa$ - $\epsilon$  model, wordt naast het transport voor de turbulente kinetische energie ook een vergelijking gegeven voor de turbulente energie dissipatie.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} (D_{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) = \frac{c_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} (\frac{\tau_{xz}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g D_{v}}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(3.16)

In deze vergelijking wordt een aantal constanten geïntroduceerd; deze zijn in Launder en Spaulding (1974) beschreven. Dit is het meest gebruikte twee-vergelijkingmodel om de turbulentieviscositeit te bepalen. Het k- $\varepsilon$  model kost de meeste rekentijd; maar is ook het meest elegant voor de ingenieurspraktijk.



## 4 Keuze van een model

## 4.1 Aantal dimensies

Er zijn verscheidene modellen om de waterbeweging te beschrijven. Een van de kenmerken van een model is in hoeveel dimensies de waterbeweging voorspeld kan worden:

- één-dimensionale modellen (1D)
- twee-dimensionale horizontale modellen (2DH)
- twee-dimensionale vertikale modellen (2DV)
- quasi drie-dimensionale modellen (Q3D)
- drie-dimensionale modellen (3D)

De 1D-modellen bestaan uit kanalen met een uniforme doorsnede of uit netwerken van deze kanalen. De 1D-modellen worden in het algemeen gebruikt voor het beschrijven van de stroming in rivieren en kanalen. Een 2DH-model voorspelt in het horizontale vlak de dieptegemiddelde stroming. De vertikale verdeling van de stroming kan bepaald worden door gebruik te maken van een 2DV-model. Dat is alleen mogelijk bij een horizontaal uniform stromingsveld. De 1D-, 2DH- en 2DV-modellen zijn relatief simpel en daarom ook goedkoop. Bij veel vraagstukken kunnen deze modellen gebruikt worden om tot een goede oplossing van het probleem te komen. Voor het voorspellen van waterstanden onder invloed van bijvoorbeeld opwaaiing zijn 2DH-modellen heel geschikt.

In de natuur zijn er heel duidelijk drie-dimensionale structuren in de waterbeweging te zien. Zo is in een meer de stroming aan het oppervlak vaak tegengesteld aan die bij de bodem. Dit betekent dat op sommige plaatsen de dieptegemiddelde snelheid nul is terwijl het daar in werkelijkheid wel stroomt. Bij een Q3D- en een 3D-model is deze informatie wel terug te vinden in het model. In het geval van een Q3D-model wordt eerst de dieptegemiddelde stroming berekend en aan de hand hiervan wordt de vertikale verdeling van de snelheden bepaald. Het model wordt opgesplitst in twee verschillende rekenmodules die aan elkaar gekoppeld worden. Het grote voordeel hiervan is dat de rekensnelheid groter is dan van een 3D-model. In een 3D-model wordt de waterbeweging voor elke laag opgelost, de randvoorwaarden voor elke laag worden gehaald uit de interactie tussen de verschillende lagen die wordt overgedragen door schuifspanningen.

# 4.2 Eindige elementen- of eindige differentiemethode

Voor het discretiseren van de vergelijkingen zijn twee verschillende oplossingen mogelijk de eindige elementenmethode en de eindige differentiemethode.

Bij de eindige elementenmethode wordt het rooster gekenmerkt door de variërende roosterafstanden. Doordat het rooster zo flexibel aan de ruimtelijke vorm van het vraagstuk aangepast kan worden, wordt het oplossen van de vergelijkingen lastiger. Het kost over het algemeen meer computertijd om dit stelsel van vergelijkingen op te lossen. De eindige differentiemethode maakt gebruik van vaste stapgrootten in het rooster, dit is de kracht en ook meteen de beperking van de methode. Door de vaste roosterafstanden gaat het oplossen van de vergelijkingen sneller. De schematisering van de werkelijkheid wordt lastiger omdat er met deze vaste roosterafstanden gewerkt moet worden. In het verleden zijn dan ook verschillende oplossingen bedacht om het rooster flexibeler te maken.

### 4.3 Roosters voor de eindige differentiemethode

Er zijn drie mogelijkheden gevonden om het uniforme rechthoekige rooster aan te passen aan de onregelmatige vorm van oevers. Dit zijn, het telescopische, genestelde en kromlijnige rooster. Hiermee wordt de mogelijkheid geboden de rekentijd beperkt te verkorten door het rooster fijn te nemen waar dat nodig is en grof te maken waar dat mogelijk is.

### 4.3.1 Uniform rechthoekig rooster

Onder een uniform rechthoekig rooster wordt een rooster verstaan dat vaste roosterafstanden in de x-richting en in de y-richting heeft. Het is niet noodzakelijk dat deze roosterafstanden in de verschillende richtingen dezelfde afstand hebben. Het grote nadeel van dit rooster is dat je de open zee hetzelfde rooster meegeeft als het rooster aan de kust met het noodzakelijke detail van havens en uitmondende rivieren.

### 4.3.2 Telescopisch rooster

Dit is een vrij eenvoudige methode om de randen van het model beter te kunnen volgen. Er wordt gebruik gemaakt van een variërende roostergrootte. Verder van de randen geeft deze methode een vreemdogend rooster en kan voor de nodige problemen zorgen bij het voorspellen van de stroming. Dit rooster wordt eigenlijk alleen gebruikt voor het voorspellen van waterstanden.




#### 4.3.3 Genesteld rooster

Om flexibeler met het rooster om te gaan is er de mogelijkheid om op verschillende plaatsen een verfijning van het rooster toe te passen. Dit maakt een veel fijnere schematisatie van de kust of kuststreek mogelijk terwijl de open zee veel grover geschematiseerd wordt en voor de randvoorwaarden van het genestelde gebied zorgt. Het overgaan van het grove in het fijne rooster kan op twee manieren plaatsvinden. Er kan gebruik gemaakt worden van een ongekoppelde en een gekoppelde overgang. Ongekoppeld betekent dat eerst de waterbeweging voor het grove rooster wordt berekend voor de gehele simulatieperiode en deze waarden worden gebruikt als randvoorwaarde voor het fijne rooster. Het nadeel hierbij is dat het fijne rooster geen invloed heeft op de randvoorwaarde. Dit betekent dat de invloed van de fijnere schematisatie niet meer op de randen merkbaar moet zijn en er dus een groot gebied voorzien moet worden van een fijn rooster. Het voordeel van het genestelde rooster gaat hierbij dan ook grotendeels verloren. Een gekoppeld rooster lost elke tijdstap de vergelijkingen op voor het grove en het fijne rooster. Waarbij op de overgang van grof naar fijn een interpolatie plaatsvindt van de randvoorwaarden.

#### 4.3.4 Kromlijnig rooster

Dit rooster wordt steeds vaker gebruikt. Het basisprincipe is dat het probleem van de resolutie, fijn waar veel verandering is en anders grof, gescheiden wordt van de computerberekening. Het fysische rooster waar de schematisatie van de werkelijkheid op plaatsvindt heeft een variërende roosterafstand. Hierdoor kan de schematisatie van de oever beter plaatsvinden en het aantal rekencellen kleiner worden. Dit rooster wordt dan getransformeerd naar een rechthoekig rekenrooster met vierkante cellen waardoor het voordeel van de snelle rekenschema's van de eindige differentiemethode behouden kan blijven. Voor deze transformatie zijn wel extra termen nodig in de vergelijkingen, vooral wanneer er gebruik wordt gemaakt van een nietorthogonaal kromlijnig rooster. Als het kromlijnige rooster niet vloeiend is zal dit fouten introduceren. Deze fouten zullen in de berekening doorwerken ondanks de nauwkeurigheid van de gebruikte numerieke berekening. Het is dus van belang een kromlijnig rooster nauwkeurig op te zetten.

### 4.4 Vertikale schematisatie

Dit is alleen van belang bij het quasi drie-dimensionaal of drie-dimensionaal modelleren van de waterbeweging omdat er in het geval van een dieptegemiddelde modellering maar één laag aanwezig is.

Bij het drie-dimensionaal modelleren is de sigma-transformatie (Philips 1957) de meest gebruikte methode om het vertikale rooster weer te geven. Indien je gebruik maakt van een gefixeerd rooster, varieert de dikte van de bovenste laag. Dat is geen probleem totdat de waterstand variaties groter worden dan de laagdikte van de bovenste laag. In dat geval zal de bovenste laag verdwijnen en de tweede laag een variërende dikte krijgen. Een oplossing is om een  $\sigma$ -transformatie te gebruiken. Het idee daarvan is om de vertikale dimensies evenredig te verdelen over de vertikaal.

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{\zeta + d} \qquad (4.1)$$

 $\sigma$  = sigma-transformatie  $\zeta$  = niveau waterspiegel [m] d = waterdiepte [m]

De sigma-transformatie betekent dat het getransformeerde waterniveau overeenkomt met  $\sigma = 0$ , terwijl het bodemprofiel overeenkomt met een waarde van  $\sigma = -1$ . Hierdoor wordt de differentiaalvergelijking wel enigszins gecompliceerder. Er ontstaan moeilijkheden als de waterdiepte naar nul toe gaat. De diepte moet dan ook groot genoeg blijven zodat de roostergrootte geen numerieke moeilijkheden veroorzaakt. Voor de schematisatie van dichtheidsverschillen is een vertikale sigma-transformatie nadelig. Dichtheidsstromen zijn meestal horizontaal georiënteerd en er zal dan telkens een doorsnijding van een laag plaatsvinden met een variatie in het bodemprofiel. Een voordeel van de sigma-transformatie is dat de kinematische randvoorwaarden aan het oppervlakte en aan de bodem erg simpel worden. Ook het aantal lagen over de hele watermassa blijft hetzelfde.



Figuur 4.2 sigma-transformatie van de bodemligging

#### 4.5 Keuze van een bestaand model

Op veel universiteiten zijn modellen ontwikkeld in het kader van onderzoeksprojecten. Dit betekent dat deze modellen goed toepasbaar en getest zijn voor dat project maar voor andere gevallen niet goed getest zijn en moeilijk implementeerbaar zijn. Er zijn ook instituten die programmatuur ontwikkeld hebben, bijvoorbeeld het Waterloopkundig Laboratorium en het Danish Hydraulic Institute.

Voor dit onderzoek zijn programma's voor waterstroming bekeken om daarna een definitieve keuze te maken. De programmatuur verschilt onderling in roosteraanpak, turbulentiemodellering en het aantal dimensies dat oplosbaar is. Voor hier nader op in te gaan worden de nader onderzochte programma's kort besproken:

#### MIKE 21

Het model MIKE 21 is een 2DH model en is ontwikkeld door het Danish Hydraulic Institute (DHI) en wordt door veel bedrijven gebruikt om voorspellingen te doen. De meeste toepassingen bevinden zich op het gebied van kusten en estuaria's. Dit model is dus uitgebreid getest en op vele praktijksituaties toegepast. Het aangename van dit model is de gebruiksvriendelijkheid van het programma en het op vele manieren kunnen bekijken van de verkregen resultaten. Ook kunnen er veel extra toepassingen aan het stromingsmodel gekoppeld worden om effecten op het milieu te kunnen berekenen, zoals het transport van sediment en concentraties van verschillende stoffen (Warren 1993).

#### DUTRID

Het model DUTRID is het drie-dimensionale model dat gebaseerd is op het twee-dimensionale model DUCHESS. De ontwikkeling van de drie-dimensionale uitbreiding is gedaan aan de TU Delft. Er wordt gebruik gemaakt van twee modules, een horizontale en een vertikale module. Eerst worden de dieptegemiddelde stromingen berekend in een twee-dimensionaal rooster. Daarna wordt in de vertikale module de vertikale snelheidsverdeling bepaald voor iedere vertikaal in dat rooster. De bodemwrijving wordt in de vertikale module berekend en gebruikt in de horizontale module om daar de dieptegemiddelde stroming mee uit te rekenen. In de modellering is tevens een keuze gemaakt voor een deeltjesvolgend model om een bepaalde stof te volgen. Het model is toegepast op het IJsselmeer door een conservatieve stof te volgen die via de rivier de IJssel in het IJsselmeer stroomde (Jin 1993).

#### LMS (Lake Modelling System)

Dit model is ontwikkeld aan de McMaster University in Ontario, Canada voor meren en kuststreken. De programmatuur LMS (afkorting van Lake Modelling System) is een geïntegreerd systeem en bestaat uit een meercirculatie model, een stofverspreidings model en een deeltjesvolgend model. Om een betere resolutie te krijgen in een karakteristiek gebied is gebruik gemaakt van een genesteld ongekoppeld rooster. Om het model te testen is er een praktijk studie verricht naar de Hamilton Harbour aan de westpunt van het meer Ontario. De haven heeft ongeveer een oppervlakte van 8 km bij 5 km en een gemiddelde diepte van 13 m (Ioannis 1994).

#### TRISULA

Dit model is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium (WL) te Delft en maak<sup>+</sup> gebruik van meerdere lagen om de drie-dimensionale situatie weer te geven. Het model maakt gebruik van een kromlijnig orthogonaal assenstelsel, om de randen van het gebied goed te kunnen volgen en een verfijning van het grid te krijgen op die plaatsen waar dat noodzakelijk is. Dit model is onder meer toegepast op de Breukeleveense plassen die een vergelijkbare grootte hebben met de Loenderveense plassen (Trisula handleiding 1994).

### FL-3

Hierbij wordt uitgegaan van de volledige drie-dimensionale oplossing van de N-S vergelijking, dit wil zeggen dat de vertikale versnellingen niet worden verwaarloosd. Het model is ontwikkeld door SVASEK in samenwerking met de Stichting Technische Wetenschappen (STW) en TU-Delft. Om tot een goede benadering van het bodemprofiel te komen zonder heel veel roosterpunten te genereren is gekozen voor het toepassen van de porositeitsmethode. Deze methode houdt in dat de blokken op de bodem een bepaalde doorlatendheid gegeven kan worden zodat aangegeven kan worden dat een blok doorsneden wordt (Versteegh 1990).

Model	MIKE 21	DUTRID	LMS	TRISULA	FL-3
Dimensies	2D	Q3D	Q3D	3D	3D (zuiver)
Methode	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM
Horizontaal rooster	uniform	uniform	uniform, genesteld rooster	kromlijnig	uniform
Vertikaal rooster	geen	σ-rooster	σ-rooster	σ-rooster	uniform, porositeits- methode
Theorie	SWE	SWE	SWE	SWE	AC N-S
stationair/ niet stationair	niet stationair	stationair	niet stationair	niet stationair	stationair
Turbulentie modellering	v <sub>h</sub> is constant	$v_h$ is constant $v_v$ , Algebraïsch turbulentie viscositeit model	$v_h$ is constant $v_v$ , Algebraïsch turbulentie viscositeit model	$v_h$ is constant $v_v$ , 3 modellen onder andere $\kappa$ - $\epsilon$ model	$v_h$ is constant $v_v$ is constant
Numerieke techniek	ADI	ADI VHS	VHI	ADI	ADI
Deeltjes volgend model	*	*	*	*	
concentratie volgend	*		*	*	*

Tabel 4.1 Verschillende modellen en de karakteristieken vergeleken

SWE - Shallow Water Equation

AC N-S - Artificial Compressibele Navier Stokes

v<sub>h</sub> - Horizontale turbulentie viscositeit

 $v_v$  - Vertikale turbulentie viscositeit

ADI - Alternating Direction Implicit

VHS - Vertical Horizontal Splitting

VHI - Vertical/Horizontal Integrating

De windschuifspanning op het wateroppervlak in combinatie met het bodemprofiel veroorzaakt

een drie-dimensionale stroming. Indien men alleen geïnteresseerd is in de dieptegemiddelde stroming of de voorspelling van waterstanden, kan men volstaan met een twee-dimensionale modellering, ook al is de echte waterbeweging drie-dimensionaal. Indien men ook geïnteresseerd is in de verschillen in stroming aan het wateroppervlak en vlakbij de bodem moet de vertikale snelheidsverdeling bepaald worden. Dit is mogelijk door gebruik te maken van een drie-dimensionaal model.

Voor het ontwerp van de Tweede Waterleidingplas, is het van belang de drie-dimensionale waterbeweging te kennen. Voor de verdeling van het inlaatwater in de plas is het belangrijk om te weten hoe snel het water op verschillende diepten stroomt. Een dieptegemiddelde stroming zal lagere extreme snelheden te zien geven dan een drie-dimensionale. In een 2DH-model is het mogelijk om het transport van stoffen door de te vergroten door het opleggen van een dispersiecoëfficiënt. In een 3D-model is de vertikale verdeling van de snelheden ook berekend en het is dan ook realistischer om het stoftransport hiermee te berekenen. Ook is in een 3Dmodel de bodemwrijving fysisch meer realistisch op te leggen. De bodemschuifspanning wordt bepaalt uit de stroomsnelheid aan de bodem door een logaritmisch snelheidsprofiel aan te nemen. In een 2DH-model wordt over het algemeen met de Chézy-waarde gewerkt, de bodemwrijving is daarbij afhankelijk van de dieptegemiddelde snelheid.

Op het gebied van drie-dimensionale programmatuur zijn twee fundamentele verschillen van aanpak te onderscheiden, in de manier waarop de Navier-Stokes vergelijking opgelost wordt. Het is mogelijk om de N-S vergelijking in drie richtingen gelijkwaardig op te lossen. Er kan echter ook gebruik gemaakt worden van de hydrostatische drukaanname, waardoor de vergelijking in de z-richting (diepte) vereenvoudigd wordt. Er is sprake van een ondiepwaterstroming als elke horizontale schaal veel groter is dan elke karakteristieke vertikale schaal. Het is dan mogelijk om de vertikale versnellingen te verwaarlozen ten opzichte van de zwaartekrachtsversnellling. Bij de beschouwing van de drinkwaterplas geldt dit: de breedte van het meer is van de orde van grootte van een kilometer, terwijl de diepte uiteindelijk rond de 7.5 m zal liggen. Ook zal er gebruik gemaakt worden van redelijk flauwe oevers, ongeveer 1:4, 1:8 of nog flauwer. Dit betekent dat de aanname van een ondiepwaterstroming gemaakt mag worden.

Bij het drie-dimensionaal modelleren gaat de vertikale turbulentieviscositeit ( $v_v$ ) een belangrijke rol spelen. Het model dat dit het meest realistisch weergeeft, is het  $\kappa$ - $\epsilon$  model.

Uit tabel 4.1. blijkt dat er drie modellen zijn die aan de voorwaarde van drie-dimensionaal en ondiepwatervergelijking voldoen. Het nadeel van een zuiver drie-dimensionaal model is dat de rekentijd veel groter wordt, terwijl het voor het oplossen van dit probleem niet nodig is. Dit komt doordat er veel meer roosterpunten nodig zijn omdat anders  $\Delta z$  te klein is ten opzichte van  $\Delta x$ . Verder werkt de FL-3 programmatuur met een constante laagdikte en varieert het aantal lagen met de bodemligging. De vertikale schematisatie vindt het eenvoudigst plaats met een sigma-transformatie, mits niet met dichtheidsverschillen gerekend wordt. Voor de horizontale schematisatie is er de keuze uit een rechthoekig, rechthoekig genesteld of kromlijnig rooster. Een genesteld rooster heeft in de plas geen nut omdat de mate van detaillering niet zulke grote sprongen nodig maakt. Het voordeel van kromlijnig boven rechtlijnig is dat er met minder rekenpunten dezelfde modellering mogelijk is en de numerieke viscositeit langs de dam en de oevers is kleiner.

Na deze overwegingen is geconcludeerd dat het beste gekozen kan worden voor de programmatuur van het Waterloopkundig Laboratorium. Dit programma, genaamd TRISULA, kan een drie-dimensionale waterbeweging simuleren, gebruik makend van de vertikale turbulentieviscositeit berekend volgens het  $\kappa$ - $\epsilon$  model. Ook is het mogelijk om een kromlijnig model op te zetten en is bij de vertikale schematisering het aantal lagen overal gelijk (door toepassing van de sigma-transformatie). Voor de simulatie van de waterbeweging in de Eerste Waterleidingplas en de in te richten Tweede Waterleidingplas is uiteindelijk gebruik gemaakt van TRISULA, dit is de programmatuur van het Waterloopkundig Laboratorium.



## **5** Toepassing van TRISULA

## 5.1 Inleiding

Voor het opzetten van het model van de Eerste Waterleidingplas en de toekomstige Tweede Waterleidingplas is een aantal fysische en numerieke parameters nodig. In dit hoofdstuk zal een keuze gemaakt worden voor deze parameters. Bovendien zal worden onderzocht hoe gevoelig het model is voor parameterwaarden die tussen realistische grenzen veranderd worden.

De uitkomsten van de modellering kunnen op meerdere manieren met elkaar vergeleken worden. Het is mogelijk om in het horizontale of het vertikale vlak snelheidsvectoren en isolijnen te laten tekenen op een bepaald tijdstip. Het is ook mogelijk door het opgeven van 'controlestations' een verandering in de tijd te registreren. In figuur 5.1 zijn de zes verschillende 'controlestations' en het bodemprofiel weergegeven die bij de modellering van de Eerste Waterleidingplas met een roosterafstand van 50 m zijn gebruikt.



Figuur 5.1 Controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas

Bij het inlaatpunt wordt een debiet van 0.87 m<sup>3</sup>/s op de plas gelaten en een gelijk debiet wordt ook onttrokken. Dit komt overeen met een jaarproduktie van 27.4 miljoen m<sup>3</sup> en een gemiddelde verblijftijd van 90 dagen. De gemiddelde verblijftijd is minder dan 100 dagen en dit zorgt ervoor dat de volumestroom door inlaten en onttrekken aan de hoge kant is t.o.v. de door de wind opgewekte stroming. Daardoor zal deze lagere gemiddelde verblijftijd zorgen voor minder menging in de plas. Dit is daarmee een veilige waarde, ook kortsluitstromen zullen hierdoor meer optreden.

### 5.2 Numerieke parameters

Onder numerieke parameters worden de roosterfijnheid en de tijdstap verstaan. De roosterafstand is afhankelijk van de schematisering van het probleem en het onderzoeksgebied. De tijdstap is vooral afhankelijk van de roosterafstand, indien de roosterafstand groter wordt kan de tijdstap ook groter genomen worden.

## 5.2.1 Roosterafstand

De roosterafstand wordt bepaald door de details die nog weergegeven moeten kunnen worden in het model en door de vereiste voorspelling van de waterbeweging. Van wezenlijk belang voor de stroming zijn: de strekdam, het inlaatpunt, het onttrekkingspunt en de oevers. Verder is de weergave van het bodemprofiel van belang omdat deze een grote invloed heeft op de stroming. Om te onderzoeken wat het effect is van de roosterafstand zijn, voor de Eerste Waterleidingplas, twee rechthoekige roosters opgesteld met een roosterafstand van respectievelijk 50 m en 25 m. Het bodemprofiel is bepaald uit dieptemetingen die in de Eerste Waterleidingplas gedaan zijn.

In het algemeen geldt dat als eenmaal een keuze is gemaakt voor een bepaald rooster dat je daar later niet meer aan gaat sleutelen. In deze studie is daarom van te voren gekeken naar de invloed van het rooster op de voorspelling van de waterbeweging. In figuur 5.7 en 5.8 zijn de twee schematisaties van het bodemprofiel en de randen weergegeven. De dieptes voor de bodemfile komen uit de interpolatie die in het GIS is uitgevoerd. Het volume verschilt iets in de twee schematisaties: -rooster-50 m: V = 6.7 miljoen m<sup>3</sup>

rooster-25 m: 
$$V = 7.0$$
 miljoen m<sup>3</sup>

De figuren met de isolijnen laten zien dat de oevers bij het grove rooster een flauwere helling hebben. Dit verklaart het kleinere volume van het grove rooster. In deze modellen zal onderzocht worden wat de invloed van de tijdstap is en er wordt een keuze gemaakt voor de roosterafstand waarmee het onderzoek zal plaatsvinden.

#### 5.2.2 Tijdstap

Er is een aantal verschillende tijdstappen uitgeprobeerd om te kijken hoe lang de rekentijd wordt voor het model en hoe groot de toelaatbare tijdstap mag zijn bij een bepaalde roosterafstand. Eerst moet bepaald worden wanneer het model een stationaire toestand heeft bereikt. Deze toestand blijkt binnen een simulatieperiode van 8 uur nagenoeg bereikt te zijn, de berekeningen worden stopgezet na 33 uur, want dan is de waterbeweging compleet stationair. In figuur 5.8 is te zien dat de snelheden vanuit de initiële situatie, zonder stroming, in vier uur helemaal in beweging is. Daarna schommelen de stroomsnelheden licht en gaan naar een stationaire toestand toe.

Bij het bepalen van de tijdstapgrootte die nog geoorloofd is wordt gebruik gemaakt van het Courantgetal. Voor de berekening geldt dat het Courantgetal niet veel groter mag zijn dan 10 omdat anders de modellering te onnauwkeurig wordt. Het Courantgetal is op de volgende manier berekend met een gemiddelde diepte van 7.5 m.

$$C = \sqrt{gH} \frac{\Delta t}{\Delta x} \qquad (5.1)$$

Eigenlijk is deze  $\Delta x$  bij het toepassen van een rooster waar de berekening van u,v en het waterniveau ten opzichte van elkaar verplaatst zijn en een onderlinge roosterafstand van  $\frac{1}{2} \Delta x$  hebben groter, "gestaggered" rooster. De kortste afstand waarover een golf zich dan voort kan planten is  $\Delta x'$  zoals in figuur 5.2 weergegeven is:



Figuur 5.2 Afstand waarover een golf zich voort kan planten

Waarbij voor deze kortste afstand geldt:

$$\Delta x' = \frac{1}{4}\sqrt{2} \Delta x \qquad (5.2)$$

Dit betekent dat het courantgetal dan een factor  $4/\sqrt{2}$  groter wordt. In tabel 5.1 is het Courantgetal volgens formulering 5.1 weergegeven.

	0
	0
	ė
	0
	Q
	Θ
9	Ô
	0
	0
	0
	0
1	0
9	0
1	
	0
	Θ
1	
	Θ
	0
	0
	Θ
	0
	0
	•
	0
	0

tijdstap ∆t	roosterafstand $\Delta x$	Courant getal	convergerend	rekentijd van model *
6 sec	50 m	1.0	ja	71 min
6 sec	25 m	2.1	ja	180 min
15 sec	50 m	2.6	ja	23 min
15 sec	25 m	5.1	ja	72 min
30 sec	50 m	5.1	ja	15 min
30 sec	25 m	10.3	ja	40 min
1 min	50 m	10.3	ja	11 min
1 min	25 m	20.6	ja	24 min
5 min	50 m	51.5	nee	10 min
5 min	25 m	102.9	nee	7 min

\*-Voor een simulatieperiode van acht uur op een PC DX486 66MHz

De onnauwkeurigheid die door de tijdstap wordt beïnvloed blijkt zoals in figuur 5.9 te zien is klein te zijn.

### 5.2.3 Keuze numerieke parameters

Er is gekozen voor een tijdstap van 30 seconden om de rekentijd van het model laag en de nauwkeurigheid hoog te houden. Dit is vooral belangrijk als in het drie-dimensionale geval met meerdere lagen gerekend gaat worden. In figuur 5.10 is te zien dat voor beide roosterafstanden de grote neren hetzelfde worden weergegeven. Voor de voorspelling van deze dieptegemiddelde neren is het mogelijk om een relatief grote roosterafstand te kiezen. Uiteindelijk is voor een roosterafstand van 50 m gekozen omdat er drie-dimensionaal gerekend moet worden en een lange simulatieperiode wordt voorzien.

Er zijn drie verschillende schematisaties in de vertikaal toegepast. De berekeningen met een verschillende horizontale turbulentieviscositeit zijn twee-dimensionaal uitgevoerd. Voor de gevoeligheidsanalyse is bij de berekeningen met een ruwheidshoogte voor de bodemschuifspanning het model opgedeeld in twintig lagen met verschillende diktes. De diktes van de lagen zijn in het midden voor de berekening van de waterbeweging relatief dikker dan aan het wateroppervlak en bij de bodem. Dit is gedaan omdat de snelheidsgradiënten daar groter zijn en dit beter zichtbaar wordt door lokaal meerdere lagen toe te passen en het aantal lagen efficiënt te gebruiken. Bij de latere berekeningen van de verblijftijden zijn vijf lagen gebruikt dit om de rekentijd te verkorten.



Figuur 5.3 De drie verschillende schematisaties van de diepte

Bij het vergelijken van de dieptegemiddelde snelheden in het twintig lagen model en in het vijf lagen model treden geen zichtbare verschillen op. Dan kan aangenomen worden dat het vijf lagen model de waterbeweging ook goed weergeeft. Het opsplitsen van de diepte in een ander aantal lagen betekent een andere middeling van de stroming en daarmee een ander stromingsveld in een laag.

## 5.3 Fysische parameters

De fysische parameters 'bodemwrijving' en 'windschuifspanning' zijn bepaald uit metingen die in de natuur en/of in modelproeven gedaan zijn en in de literatuur zijn terug te vinden. De bepaling van de turbulentie komt voort uit de schematisering in de tijd en de ruimte, maar wordt ook fysisch bepaald door de turbulentie die aan het wateroppervlak en de bodem opgewekt wordt.

## 5.3.1 Horizontale en vertikale turbulentieviscositeit

Voor de berekening is een horizontale en een verticale turbulentieviscositeit vereist. De verticale turbulentieviscositeit wordt bepaald door het k- $\epsilon$  model. De horizontale turbulentieviscositeit wordt constant genomen en wordt in andere studies ook wel gebruikt om het model mee te calibreren. De horizontale turbulentieviscositeit wordt evenals de verticale turbulentieviscositeit gebruikt om niet expliciet gemodelleerde processen, toch in het model in te voeren.

Deze processen zijn te verdelen in vier schalen, namelijk:

- 1. moleculaire beweging
- 2. turbulente beweging
- 3. dieptegemiddelde beweging
- 4. horizontale middeling van de beweging

In het geval dat de horizontale roosterafstand van dezelfde orde van grootte is als de waterdiepte moeten de schalen 3 en 4 voor de horizontale turbulentieviscositeit bekeken worden. De schalen 1 en 2 zijn dan zo klein ten opzichte van de schalen 3 en 4 dat deze verwaarloosd kunnen worden.

#### Schaal 3, dieptegemiddelde beweging

De turbulentieviscositeit, die bepaald wordt door met de dieptegemiddelde snelheid te rekenen, is door Elder (1959) geschat met de volgende betrekking:

$$E=K_{\nu}hu_{\star}$$
 met  $K_{\nu}\approx 6$  en  $u_{\star}=\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}=\sqrt{g}\frac{u}{C}$  (5.3)

E = Elder turbulentiecoëfficiënt [m<sup>2</sup>/s] K<sub>v</sub> = constante

Voor de modellering van de plassen geeft dit ongeveer de volgende waarde:

$$E \approx 6 * 7.5 * \sqrt{9.81} * \frac{0.1}{55} \approx 0.3 \ m^2/s$$

Uit calibraties van modellen blijkt dat deze waarde aan de lage kant is en dat naarmate de roosterafstand groter wordt de verschillen tussen de Elder turbulentiecoëfficiënt en de gecalibreerde coëfficiënt groter worden.

#### Schaal 4, horizontale middeling van de waterbeweging

Voor verschillende modellen zal de schaal van het rooster anders zijn en dit heeft invloed op de neren die nog gemodelleerd kunnen worden. Wat voor het ene model niet meer te modelleren is en wordt gezien als processen die tussen de roosterafstanden plaatsvinden vallen daarmee onder de noemer turbulentie. In een ander model dat gebruik maakt van kleinere roosterafstanden kunnen deze processen wel beschreven worden door de gemiddelde snelheden. Hoe groter de roosterafstand is hoe groter de rol van schaal 4. Uit de literatuur (P.A. Madsen et al. 1988) blijkt de turbulentieviscositeit voor een roosterafstand van 50 m en een tijdstap van 30 seconden tussen de waarde 1 - 5 m<sup>2</sup>/s te liggen. Er is ook een ander voorbeeld in de literatuur gevonden en deze waarde komt overeen met de waarde die P.A. Madsen et al. voorstelt.

In het drie-dimensionale model van Los Angeles-Beach Harbors waar de waterbeweging aangedreven wordt door het getij en de wind, is de gecalibreerde horizontale turbulentie viscositeit 2 m<sup>2</sup>/s. De roosterafstand is minimaal 71.6 m en er is een tijdstap van 60 sec toegepast (Seabergh 1992).

Voor het modelleren van de waterbeweging in de Breukeleveense plassen door het Waterloopkundig Laboratorium is gevarieerd met de horizontale turbulentieviscositeit tussen een aantal tienden en één m<sup>2</sup>/s.

#### Bepalen horizontale turbulentieviscositeit

De meest realistische waarde ligt tussen de 1 en 3 m<sup>2</sup>/s, een waarde van 5 m<sup>2</sup>/s is aan de hoge kant voor de lage stroomsnelheden die in de plas aanwezig zijn. Er is gekeken naar de gevoeligheid van de verandering van de turbulentieviscositeit. Uit figuur 5.11 en 5.12 blijkt dat de turbulentieviscositeit een grote invloed heeft op de dieptegemiddelde stroomsnelheden. Dit is ook te zien in de grafieken van de controlestations. Hoe kleiner de turbulentieviscositeit wordt, hoe groter de dieptegemiddelde stroming. Deze kunnen een factor twee verschillen. Ook is te zien dat de verandering van de turbulentieviscositeit geen invloed heeft op de grootte en de ligging van de dieptegemiddelde neren. Voor zuiden- en westenwind is dit gedaan door isolijnen te tekenen door punten met een gelijke stroomrichting. In deze figuren, 5.13 en 5.14, zijn de isolijnen bijna identiek aan elkaar, dat wil zeggen dat de neren er hetzelfde uit zien en dat er alleen een duidelijke vermindering in stroomsnelheid waar te nemen is door een verhoging van de horizontale turbulentieviscositeit.













Figuur 5.4 De dieptegemiddelde snelheid in de stations bij een variërende turbulentieviscositeit (E in  $m^2/s$ )

Dit betekent dat er voor één waarde van de turbulentieviscositeit gekozen kan worden, waarmee de rest van de simulaties dan uitgevoerd wordt. Gekozen is voor een horizontale turbulentieviscositeit van 1 m<sup>2</sup>/s. Door het verlagen van de turbulentieviscositeit zullen de stroomsnelheden toenemen en zal de menging door snelheidsverschillen en richtingsveranderingen in de plas toenemen. De voorspellingen zullen voor de mate van menging van verblijftijden dan ook aan de hoge kant zijn, aangezien er alleen naar de stroomsnelheden u, v en w gekeken wordt.

## 5.3.3 Windschuifspanning

Voor de grootte van de windschuifspanning is naast de windsnelheid de bepaling van de Cdparameter vereist. De Cd-parameter is afhankelijk van de diepte en de oppervlakte (strijklengte) van de watermassa, maar is vooral afhankelijk van de grootte van de windsnelheid. Hoe hoger de windsnelheid is, hoe hoger ook de Cd-waarde wordt. Dit gaat op voor oceanen tot een windsnelheid van 15 m/s, waarboven de Cd-parameter constant verondersteld kan worden.

Uit het onderzoek van J. Wu (1969) blijkt dat voor oceanen een relatie tussen de windsnelheid en de Cd(10)-waarde gevonden wordt volgens:

> $Cd(U_{10})=0.0005*\sqrt{U_{10}}$  voor  $1m/s < U_{10} < 15m/s$  (5.4a)  $Cd(U_{10})=0.0026$  voor  $U_{10} > 15m/s$  (5.4b)

Bij de inregeling van het CSM-16 (Coastal Shelf Model) is tot een windsnelheid van 10 m/s voor een waarde van  $Cd(U_{10})=0.0009$  en na 15 m/s een waarde van  $Cd(U_{10})=0.0027$  gekozen (Boogaard 1993). Tussen een windsnelheid van 10 m/s en 15 m/s is het verloop lineair gekozen. Uit onderzoek (B.B. Hicks 1972) blijkt dat de metingen van Bass Strait niet significant anders zijn dan de metingen gedaan voor Lake Michigan. In beide gevallen neemt de Cd-waarde langzaam toe met toenemende wind, en wordt, een gemiddelde waarde voor de Cd-parameter van 0.0014 gegeven. Deze metingen zijn gedaan bij windsnelheden tot 10 m/s (windsnelheden 10 m/s op 10 m boven het wateroppervlak).

Voor de Cd-waarde in de simulaties is bij een windsnelheid van 6 m/s gekozen voor een waarde van 0.0011. Hiervoor is naar de metingen van Lake Michigan gekeken ook al zijn de afmetingen van dit meer veel groter. Uit het onderzoek van B.B. Hicks is voor dit meer en de Bass Strait weinig verschil gevonden ondanks de verschillen in strijklengte. De fout door een kleinere strijklengte in de Eerste Waterleidingplas en de in te richten Tweede Waterleidingplas is in deze metingen kleiner dan de experimentele fout (B.B. Hicks). Om bij 6 m/s aan de veilige kant te zitten voor de menging is binnen de experimentele fout van 10 % gekozen voor een Cd(U<sub>10</sub>)-waarde van 0.0011 in plaats van de 0.0012 volgens formulering 5.4a. Voor een windsnelheid van 15 m/s is gekozen voor een waarde van 0.0014 en dat is het gemiddelde uit het onderzoek van B.B. Hicks en laag voor deze windsnelheid, maar er is geen andere goede waarde gevonden voor een meer met een strijklengte van maximaal 2 km.

#### 5.3.4 Bodemschuifspanning

Voor de bodemschuifspanning is in de dieptegemiddelde situatie gekozen voor een waarde van de Chézy-coëfficiënt van  $C = 55 \text{ m}^{\frac{14}{5}}$ . De bodemschuifspanning wordt aan de hand van de volgende formule bepaald.

$$\tau_b = \rho \frac{g}{C^2} |\overline{U}|^2 \qquad (5.5)$$

In de drie-dimensionale situatie wordt de bodemschuifspanning bepaald aan de hand van de stroomsnelheid in de onderste laag, in dit geval laag 5 en laag 20. Hierbij is een logaritmische snelheidsverdeling aangenomen tot het midden van de onderste laag. De volgende logaritmische verdeling is hierop van toepassing:

$$u_b = \frac{u_*}{\kappa} \ln(\frac{1/2\Delta z_b}{z_o}) \qquad (5.6)$$

 $\Delta z_b =$ laagdikte van de onderste laag [m]

Dit is een goede benadering voor een turbulente grenslaagstroming. Om een vergelijking te kunnen maken met een twee-dimensionale stroming moet de Chézy-waarde vertaald worden naar een gelijkwaardige ruwheidshoogte,  $z_o$ -waarde. Dit wordt gedaan door aan te nemen dat de bodemwrijving en de dissipatie gelijk is en onder de aanname dat  $z_o \ll H$ . In dat geval is de Chézy-coëfficiënt te schrijven in een  $z_o$ -waarde.

$$z_o = H.\exp(-(1 + \frac{\kappa}{\sqrt{g}}C)) \qquad (5.7)$$

Met een Chézy-waarde van 55 m<sup>½</sup>/s levert dit  $z_0 = H * 3.27*10^{-4}$ . Dit betekent voor een gemiddelde waterdiepte H van 7.5 m een  $z_0$  van 2 tot 3 mm. Gekozen is voor een  $z_0$ -waarde van 3 mm.

## 5.4 Gevoeligheidsanalyse rechthoekig model Eerste Waterleidingplas

In dit hoofdstuk zal gekeken worden naar de invloed van de verandering van de oppervlakteschuifspanning en de bodemschuifspanning bij de drie-dimensionale modellering van de waterbeweging.

In figuur 5.15 en 5.16 zijn vectorenplaatjes opgenomen van de dieptegemiddelde stroming in de plas bij variatie van de windschuifspanning en bodemwrijving. Hieruit is af te lezen dat de verandering van deze parameters geen invloed hebben op de richting waarin de stroming zich beweegt. Als de stroming bij een Chézy-waarde van  $C=55 \text{ m}^{14}/\text{s}$  vergeleken wordt met de stroming bij een ruwheidshoogte van  $z_0=3 \text{ mm}$  dan is het grootste verschil te zien in het zuiden van de plas. De neer in het zuidoosten is in het geval van de twee-dimensionale berekening iets langgerekter en groter.



Figuur 5.5 Verandering van de dieptegemiddelde snelheid door verandering van de windsnelheid.

Bij vergelijking van de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de zes controlestations is een groot verschil in snelheid zichtbaar ten gevolge van de windschuifspanning. Hoe groter de windschuifspanning hoe groter ook de dieptegemiddelde snelheid. In de drie-dimensionale berekeningen is te zien dat bij een toenemende windsnelheid de stroomsnelheid op elke diepte toeneemt. Dit betekent dat er een veel grotere watermassa verplaatst wordt bij een toenemende 0

0

 $\bigcirc$ 

 $\square$ 

0

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $(\Box)$ 

 $\bigcirc$ 

e

Θ

 $\bigcirc$ 

( )

0

 $\bigcirc$ 

0

Ô

C

ê

Q

e



windsnelheid. De dieptegemiddelde snelheden nemen bijna rechtevenredig toe met de windsnelheid.

Figuur 5.6 Veranderen van de bodemwrijving en de invloed op de dieptegemiddelde stroming

De dieptegemiddelde snelheid blijkt veel minder gevoelig voor verandering van de bodemwrijving. Er moet dan gedacht worden aan snelheidsverschillen in de orde van grootte tienden van cm/s ten opzichte van cm/s bij een windsnelheidsverandering. De verandering van de bodemruwheid heeft minder invloed op de snelheid op elke diepte in het water. Een verandering van de bodemruwheid geeft een groot verschil in de snelheid vlak boven de bodem en hoe meer je naar het wateroppervlak gaat hoe kleiner de invloed wordt. Het verschil in de verplaatste watermassa is veel minder dan door de invloed van de wind. In de stations twee en drie is een groot verschil meetbaar tussen de drie-dimensionale berekening en de dieptegemiddelde berekening met een Chézy-waarde van 55 m<sup>1/2</sup>/s. In de figuren 5.17 en 5.18 is te zien dat vooral op de plaatsen van deze stations de stroomrichtingen de grootste verschillen vertonen. De ruwheidshoogte is een realistischer weergave van de bodemwrijving dan de Chézy formulering en hiermee zal verder gerekend worden.

Het grote verschil tussen het aanpassen van de windschuifspanning en de bodemruwheid is dat in het eerste geval de schuifspanning verandert en daarmee de impulstoevoer aan het systeem vergroot of verkleind wordt terwijl deze bij de verandering van de bodemwrijving gelijk blijft. De grootste neren houden dezelfde vorm alleen de snelheden worden veel hoger. De aanpassing van de windschuifspanning heeft op elke diepte een grote invloed, zie figuur 5.19 Bij het aanpassen van de bodemruwheid blijft de schuifspanning gelijk maar verandert de stroomsnelheid in de onderste laag. Dit effect wordt minder naarmate de stroming verder van de bodem verwijderd is.

## 5.5 Kromlijnig versus rechtlijnig

Er is een kromlijnig en een rechthoekig model gemaakt van de Eerste Waterleidingplas. Het is interessant om te zien of de twee modellen dezelfde voorspellingen geven voor de waterbeweging. Om deze vergelijking te maken zijn er twee berekeningen uitgevoerd voor de twee modellen. De ene berekening is de simulatie van een noordenwind met een windsnelheid van 6 m/s en daarna is een simulatie voor beide modellen uitgevoerd voor een zzw-wind. De berekening met noordenwind is gemaakt omdat het vooral bij deze wind zo was dat het trapjes-effect bij de dam goed zichtbaar is. De vergelijking van de zzw-wind is gemaakt omdat dit de overheersende windrichting is en de dam ook in het verlengde van deze richting ligt. Door de schematisering van de dam tot rechte trapjeslijnen is de kans groot dat hier extra wrijving wordt geïntroduceerd die er in werkelijkheid niet is. Dit komt doordat de stroming niet vrij langs de dam kan stromen maar continue opzij en dan weer omhoog wordt geduwd. Er is vooral gekeken naar de dieptegemiddelde snelheden. De stroming in de bovenste laag blijft nagenoeg gelijk, hetgeen verwacht mocht worden.

In het geval van een noordenwind ontstaan de volgende overeenkomsten en verschillen (figuur 5.20):

overeenkomsten in het stroombeeld tussen kromlijnig en rechtlijnig:

- ten noordoosten van de dam is een flinke neer te zien terwijl het beeld ten noordwesten warrig is.
- in het zuiden van de plas ontstaan twee neren die in de kromlijnige en rechtlijnige situatie vrijwel identiek zijn, alleen stroomt het langs de zuidoever in het kromlijnige model sneller.
- er worden grote dieptegemiddelde stroomsnelheden in het zuidoosten van de plas gemeten.

verschillen in het stroombeeld tussen kromlijnig en rechtlijnig:

ten oosten en westen van de dam is er in het kromlijnige model een stroming met de wind mee langs de randen en door het midden weer terug. Bij het rechthoekig model is deze stroming met wat goede wil ook te ontdekken maar het beeld is veel 'rommeliger'. In het geval van een zzw-wind ontstaan de volgende overeenkomsten en verschillen tussen de berekende stroombeelden in de twee modellen (figuur 5.21).

overeenkomsten in het stroombeeld tussen kromlijnig en rechtlijnig:

- in het noorden van de plas boven de dam ontstaan twee neren
- in het zuidoosten van de plas is er een grote stroomsnelheid in de richting van het noorden
- in het zuiden van de plas ontstaan twee neren

verschillen in het stroombeeld tussen kromlijnig en rechtlijnig:

- tussen de dam en de oostoever van de plas ontstaat in het rechtlijnige model een
  'warrig' beeld, terwijl in de kromlijnige situatie de stroming 'mooi' langs de oever met de wind mee stroomt en in het midden tegen de wind in stroomt.
- in het zuidwesten van de plas is de neer in het kromlijnig model veel langgerekter en ligt ook meer in het zuiden van de plas.

Over het geheel genomen is het aantal neren even groot. Het grote verschil is echter te zien op de plaatsen waar de oever een sterke kromming heeft ten opzichte van het rechthoekige rooster. Dit is goed zichtbaar tussen de dam en de beide oevers, waar de schematisering gepaard gaat met stapvormige randen. De dieptegemiddelde stroming in het kromlijnige model geeft een veel natuurlijkere stroming dan het rechthoekige model, waar het beeld 'warriger' is. Er is bij het kromlijnig model gebruik gemaakt van minder rekencellen. Dit reduceert de rekentijd met een factor twee. De voornaamste reden om met het kromlijnige rooster verder te werken is dat met minder roosterpunten de plas even goed gemodelleerd kan worden.



# 6 Waterbeweging en verblijftijdsspreiding in de Eerste Waterleidingplas

## 6.1 Niet-stationaire berekening

De stroming in de Eerste Waterleidingplas begint na 4 uur waaien goed op gang te komen vanuit een initiële situatie waarin de stroomsnelheden nul zijn (figuur 5.9). Na een simulatie van 8 uur is de gehele waterbeweging bijna stationair geworden. Bij een windsnelheid van 6 m/s duurt het anderhalf etmaal voordat de beweging helemaal stationair is.

Het bekken reageert snel op een veranderde windkracht en windrichting. In figuur 6.4 zijn de snelheden in de verschillende stations weergegeven bij een simulatie van een westenwind van 6 m/s, daarna een noordenwind van 6 m/s en dan zonder wind. De windvelden zijn telkens voor een periode van 5000 minuten constant gehouden. Een veranderde situatie heeft een inspeeltijd nodig waarbij het niet uitmaakt of er eerst uitgegaan wordt van geen wind en daarna een stroomsnelheid bij een windsnelheid van 6 m/s of andersom. Geen wind laat de stroomsnelheden in de controlestations zien die het gevolg zijn van het inlaten en onttrekken van water.

Te zien is dat de stroomsnelheden in de dieptegemiddelde situatie ten gevolge van de wind een factor 20 groter zijn dan de stroomsnelheden van het inlaatpunt naar het onttrekkingspunt zonder wind. In de drie-dimensionale berekening zijn deze verschillen nog groter. De stroming door de wind heeft aan het wateroppervlak vaak een andere richting dan aan de bodem en dit geldt niet voor de situatie zonder wind. Een middeling van de stroomsnelheden geeft dan een niet vergelijkbare stroomsnelheid omdat er ook een richtingsverandering plaatsvindt en daardoor wordt de middeling van de stroming die wordt veroorzaakt door de wind relatief lager.

In de gehele beschrijving van de stromingen en de verblijftijden in de plassen wordt uitgegaan van de stationaire situatie. Deze stationaire situatie is gesimuleerd voor een windsnelheid van 6 m/s en dit is globaal de gemiddelde windsnelheid in een jaar indien alle windrichtingen bij elkaar gevoegd worden en de windsnelheden gemiddeld worden.

## 6.1 Vertikale verdeling van de waterbeweging

De waterbeweging in een plas heeft een drie-dimensionaal karakter. Dit blijkt ook uit de berekeningen die gemaakt zijn voor de Eerste Waterleidingplas, in figuur 6.5 is het kromlijnig model weergegeven. In elke laag van het model met 20 lagen is de stroming anders. Om inzicht te krijgen in de vertikale waterbeweging zijn er twee doorsneden in de plas gemaakt, één in oost-westrichting (bij een oostenwind van 6 m/s) en één in de noord-zuidrichting (bij een zuidenwind van 6 m/s, figuur 6.6).

Voor de oostenwind is deze doorsnede gemaakt langs de lijn N = 12 van het kromlijnige rooster. In figuur 6.6 is de stroming in de eerste laag (3% van de diepte) te zien. Langs deze dwarsdoorsnede is de dieptegemiddelde stroming tegen de windrichting in. Dit is de netto of reststroom van de drie-dimensionale waterbeweging. De stroming in de eerste laag wordt grotendeels door het opleggen van de oostenwind bepaald. De oriëntatie van de oevers en de dam ten opzichte van de windrichting bepalen plaatselijk de stroming. Dit is vooral goed zichtbaar aan de oostzijde van de dam, waar de stroming door de wind naar het westen wordt gestuwd maar tevens door de dam naar links afgebogen wordt.

In figuur 6.7 is te zien dat over de bodem een stroming tegen de windrichting aanwezig is. In deze doorsnede is op een diepte van 2/3 vanaf de bode:n een omslag in de stroomrichting waar de stroming dan ook nul is. Bij deze doorsnede en de vlakke bodem is de circulerende stroming goed zichtbaar. De stroomsnelheid in de bovenste laag bij een windsnelheid van 6 m/s is ongeveer 3 cm/s. Dit betekent dat een deeltje water bij een windkracht 4 (windsnelheid 5.5 tot 7.9 m/s) een afstand van 1 km aflegt binnen 10 uur. In een etmaal is de stroming bovenlangs dan al drie keer de breedte van de plas overgestoken.

In de noord-zuidrichting is een doorsnede gemaakt over de lijn M = 9 van het kromlijnige rooster (figuur 6.6). Bij een zuidenwind betekent dit dat de stroming grotendeels in het vlak van de tekening plaatsvindt zij is dan goed zichtbaar te maken in een plat vlak (figuur 6.7). De doorsnede volgt het kromlijnige rooster maar ligt toch praktisch in het verlengde van de windrichting. De dieptegemiddelde stroming is over de hele lijn tegen de wind in gericht. De retourstroming is sterk aanwezig. Het beeld van een stroming in de bovenste lagen met de wind mee en in de onderste lagen tegen de wino in wordt zichtbaar. Ook hier is de stroming in de eerste laag ongeveer 3 cm/s. In een etmaal zal de stroming zeker een keer bovenlangs de plas zijn overgestoken. Door de invloed van het diepteprofiel ontstaan in deze doorsnede meer neerstructuren. De diepte waar de stroming nul is verandert dan ook met de verandering van het bodemprofiel. Bij het ondiepe deel naast de dam gaat een deel van het water met de wind mee, maar een ander deel stroomt echter iets naar beneden om langs het diepe deel van de plas terug te stromen. De weerstand om met de wind mee te stromen wordt daar groter, omdat er ook een retourstroom naast de dam plaatsvindt die zich veel ondieper afspeelt. Ter plaatse zijn geen diepere delen waarlangs terugstroming mogelijk is.

## 6.2. Dieptegemiddelde waterbeweging

De beschrijving van de dieptegemiddelde waterbeweging wordt gedaan voor de vier windrichtingen; noord, oost, zuid, en west bij een windsnelheid van 6 m/s. De waterbeweging kan worden beschreven in het twee-dimensionale vlak. Het voordeel hiervan is dat bij het presenteren geen afhankelijkheid is van het aantal lagen en één figuur volstaat. Bij het analyseren van deze stroming worden vier karakteristieken van de waterbeweging beschreven:

- stroming met de wind mee
- retourstroming
- aantal en vorm van de neren
- kans op het ontstaan van kortsluitstromen

Stroming met de wind mee: Deze domineert op plaatsen in de plas waar de stroming die wordt opgewekt door de windschuifspanning groter is dan de stroming die veroorzaakt wordt door opwaaiing. In de ondiepere delen van de plas zal de windschuifspanning het ook bij de bodem winnen van de aandrijvende kracht van de waterspiegelhelling. Dit betekent dat de stromingsrichting op die plaatsen in de hele vertikaal gelijk is aan de windrichting.

Retourstroming: Deze domineert in het grootste deel van de plas nabij de bodem. Hoe dieper onder het water, hoe minder invloed van de wind, des te meer wordt de stroming aangedreven door de helling van de waterspiegel. Bij de beschrijving van de twee-dimensionale horizontale waterbeweging wordt de dieptegemiddelde stroming tegen de wind in de retourstroming genoemd. Op andere plaatsen is er ook een stroming over de bodem tegen de wind, in maar deze is niet de overheersende richting bij middeling over de diepte.

Aantal en vorm van de neren: Deze worden vooral bepaald door de gradiënt in de bodemhelling die evenwijdig loopt met de windrichting. Dit is het best in te zien aan de hand van een rechthoekige bak met schuine bodem bij twee verschillende windrichtingen. In het ene geval is de windrichting loodrecht op de gradiënt in de bodemhelling en zullen er in het horizontale vlak geen verschillen optreden in de stroming. Elke doorsnede levert dezelfde stroming op en een vertikaal twee-dimensionaal model zal deze stroming goed weer kunnen geven. In het andere geval waait de wind uit de richting die evenwijdig ligt aan de bodemhelling. Dat levert een sterk wisselend beeld op in het horizontale vlak en is dan ook heel goed terug te zien in een twee-dimensionaal horizontaal model. Naarmate de neer groter is zal de horizontale verplaatsing ook groter zijn. Indien de snelheden in een neer hoger zijn zal de verplaatsing sneller optreden. In een neer zal het water beter gemengd zijn in het horizontale vlak door de uitwisseling van water met andere kwaliteitsparameters, dit zal bij de behandeling van de verblijftijdsspreiding blijken.

De kans op het ontstaan van kortsluitstromen stijgt naarmate het water minder mengt met water in de plas in het traject tussen inlaten en onttrekken van water. Een voorbeeld hiervan is een inlaatpunt dat precies ten zuiden van het onttrekkingspunt is gelegen. Door dichtheidsverschillen kan bij een zwakke zuidenwind het water dan binnen een dag bij het onttrekkingspunt arriveren zonder dat het zojuist ingelaten water gemengd is met water dat al veel langer in de plas aanwezig is. In dit geval is er een kortsluitstroom ontstaan. De kans op kortsluitstromen wordt bepaald door de afstand van inlaatpunt naar onttrekkingspunt en de richtingsverandering die het water maakt om deze afstand te overbruggen. De snelheid waarmee deze afstand wordt afgelegd is hierbij ook van belang en daarmee ook de windsnelheid.

### 6.3 Vier windrichtingen en het effect op de dieptegemiddelde stromingen

Op de figuren 6.8 en 6.9 is de dieptegemiddelde waterbeweging in de Eerste Waterleidingplas weergegeven die bepaald wordt door de vier windrichtingen noord-, oost-, zuid, en west. Een noorden en een zuidenwind komen sterk overeen met elkaar alleen de draairichting van de neren is de andere kant om. Ook de oosten- en westenwind geven zo goed als gelijke stroombeelden. Hier is de draairichting van de neren ook weer tegengesteld.

Stroming met de wind mee: in de situatie van een noordenwind ontstaat aan beide zijden van de dam een stroming met een richting gelijk aan deze windrichting. Deze stroming is aan de oostoever en de westoever in het zuidelijk deel waar te nemen bij een noorden- en zuidenwind. Het verschil is zichtbaar bij de dam waar bij een zuidenwind aan de benedenwindse zijde van de dam de stroming erg klein is. Bij een noordenwind is dit verschijnsel aan de westoever in het noordelijk deel van de plas waar te nemen. Bij een oostenwind ontstaan alleen oostelijk van de dam en langs de oostoever stromingen met de wind mee. In de situatie van een westenwind ontstaan deze stromingen aan de beide zijden van de dam. Een wind waaiende uit het westen zorgt voor kleine dieptegemiddelde stromingen.

Retourstromen in de plas ontstaan in hoofdzaak in de diepere delen van de plas. Bij een noorden- en zuidenwind is een retourstroom zichtbaar in het midden van het zuidelijk deel van de plas. In het noordelijk deel vindt deze stroming plaats in het midden tussen de oever en de dam en tussen de dam en de oever. Bij een oostenwind en westenwind is een retourstroom waar te nemen in het midden van het zuidelijk deel van de plas, waarbij de richting van de retourstroom ook bepaald wordt door de richting van het diepe deel in het bodemprofiel.

Aantal en vorm van de neren: de twee grootste neren zijn bij een noorden- en zuidenwind te vinden in het zuiden van de plas. De twee neren zijn langgerekt en liggen oostelijk en westelijk van elkaar. Bij een oosten en westenwind liggen deze twee neren noordelijk en zuidelijk van elkaar en de vorm is bijna rond. Bij de westenwind zijn de stroomsnelheden heel erg klein en zijn de neren niet meer goed te onderscheiden.

De kans op het ontstaan van kortsluitstromen wordt verkleind door de minimale afstand die het water moet overbruggen om de kop van de strekdam heen en dat is 1.5 maal de lengte van de plas, ongeveer 3 km. Hierbij moet de stroming ook nog een bocht van 180° maken om bij het onttrekkingspunt te komen. Door de wind wordt deze weg langer gemaakt. Een ZZOwind zou de meest ongunstige situatie voor het ontstaan van een kortsluitstroom vormen. In het geval van deze windrichting kan het water snel naar het noordelijk deel van de plas stromen. Daar zal het water onderlangs naar het onttrekkingspunt moeten stromen wat betekent dat er menging op zal treden met water dat bovenlangs aan komt stromen vanuit de richting van het onttrekkingspunt. De kans op kortsluitstromen is niet aanwezig doordat er geen windrichting te bepalen is waarbij het water met de wind mee in één keer naar het onttrekkingspunt kan stromen en de afstand die het water door de plas moet afleggen is lang ten opzichte van de lengte en breedte van de plas.

#### 6.4 Berekening van de verblijftijdsspreiding

De theoretische achtergrond van het bepalen van de verblijftijden in de stationaire situatie wordt beschreven aan de hand van een lange bak, deze dient tevens als test voor de geldigheid van de verblijftijdsberekening. Daarna volgt de toepassing van deze methode op de Eerste Waterleidingplas en de alternatieven voor de Tweede Waterleidingplas. Er is gekozen voor een stationaire situatie omdat dit de rekentijd van een simulatie, na een aantal aanpassingen (zie appendix A), 350 maal reduceert waarbij het stationaire rekenen een grote bijdrage levert. Eerst wordt het driedimensionale snelheidsveld berekend en daarna wordt deze berekening stilgezet. Op deze waterbeweging wordt de concentratieverdeling berekend die sneller tot stand kan komen door in elke computercel een maximale tijdstap toe te passen die afhankelijk is van de u-, v- en w-snelheid. Dat maakt de berekening voor deze modellen praktisch uitvoerbaar.

#### Testmodel

De berekening van de verblijftijdsspreiding vindt plaats door het inlaten van een afbreekbare tracer met het water in het numerieke model. Deze tracer wordt vanaf de start van de simulatie continu en met een constante concentratie c<sub>o</sub> toegevoegd. Deze tracer breekt af volgens het eerste-orde proces dat in hoofdstuk 2 beschreven is. In dat hoofdstuk wordt er uitgegaan van een momentaan toegevoegde conservatieve tracer waarbij gekeken wordt wanneer de tracer aanwezig is bij het onttrekkingspunt (niet-stationaire berekening). Echter de afbraak van de gebruikte tracer in het numerieke model vindt plaats langs een stroomlijn, meebewegende afgeleide, en is te schrijven als:

$$\frac{Dc(t,x(t),y(t),z(t))}{Dt} = -kc \qquad (6.1)$$

Naarmate de tracer een langere tijdsduur in de stroombaan aanwezig is, des te lager wordt de concentratie. Omschrijven van de meebewegende vorm naar een vast asssenstelsel levert:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = -kc \qquad (6.2)$$

De resultaten van de simulatie worden geanalyseerd indien deze stationair is. De volgende vergelijking wordt dan verkregen:

$$u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = -kc \qquad (6.3)$$

u<sub>i</sub> = snelheid in i-richting [m/s] x<sub>i</sub> = i-coördinaat [m] Integratie van deze vergelijking levert:

$$c(x_i) = c(0)e^{-\frac{k}{u_i}x_i}$$
 (6.4)

Omschrijven en de natuurlijke logaritme van beide zijden levert:

$$t_i = \frac{x_i}{u_i} = -\frac{1}{k} \ln(\frac{c(x_i)}{c(0)})$$
(6.5)

t<sub>i</sub> = tijdsduur in i-richting [s]

Om te onderzoeken of deze tijdsduur overeenkomt met de concentratievermindering is eerst een model van een lange bak opgesteld, waarvan de stroombaan in het numerieke model eenduidig van instroom naar uitstroom is (rivier). De lange bak heeft een breedte van 4.2 km (2 computercellen) en een lengte van 212.1 km (101 computercellen). De 'controlestations' in figuur 6.7 hebben een onderlinge afstand van 31.5 km. Aan de linkerzijde wordt een volumestroom van 0.02 m<sup>3</sup>/s opgelegd en aan de rechterzijde wordt de waterdiepte vastgelegd op 6 m (h = 0 m).



Figuur 6.1 Modellering lange bak met zes 'controlestations'

In figuur 6.10 zijn de resultaten van de lange bak gepresenteerd, er is een afbreekbare tracer aan het water toegevoegd met een beginconcentratie van 100 kg/m<sup>3</sup>. De tijd in de tekening is berekend uit de concentratie volgens vergelijking 6.4. De gemiddelde verblijftijd tussen twee stations is 18.1 dagen. De gemiddelde snelheid waarmee het water in de x-richting stroomt is dan 31500/1563840  $\approx$  2 cm/s en dit komt overeen met de snelheden die in de simulatie met TRISULA berekend zijn. Er zijn een drietal verschillende numerieke schema's toegepast om te onderzoeken of dit invloed heeft op de verblijftijdsberekening. De mogelijke numerieke diffusie bleek niet te resulteren in een andere verblijftijdsberekening waaruit geconcludeerd is dat door de kleine concentratieverschillen de numerieke diffusie verwaarloosbaar is.

#### De berekening van de verblijftijdsspreiding in de modellering van de Eerste Waterleidingplas en de toekomstige Tweede Waterleidingplas.

In deze modellering vindt een recirculerende stroming plaats (hoofdzakelijk veroorzaakt door de wind) waardoor er menging van water optreedt met verschillende concentraties, zie appendix C. De lange bak is te vergelijken met een verdringingsbekken en de menging is dan verwaarloosbaar. Deze lange bak is dan ook niet direct te vergelijken met de modellering van de plas.

Verder vindt ook menging plaats door het toepassen van een rooster waarop de berekening uitgevoerd wordt. In elke computercel heeft de concentratie (verblijftijd) dezelfde waarde, terwijl er theoretisch grote verschillen in één cel mogelijk zijn afhankelijk van de weg die gevolgd is. De extreme situatie is het gebruik van één cel met doorstroming van het opgegeven debiet waaruit altijd zal volgen dat het bekken volledig gemengd is. Voor de waterbeweging geldt hetzelfde. Bij het gebruik van één cel is de windinvloed niet te modelleren en is alleen de stroming ten gevolge van het doorstroomdebiet zichtbaar te maken. De middeling van de waterbeweging en de verblijftijdsspreiding zijn een gevolg van het numeriek oplossen van de vergelijkingen en hoe gedetailleerder de waterbeweging berekend wordt des te gedetailleerder kan de verblijftijdsspreiding berekend worden.

De berekening van de verblijftijd gebeurt volgens het volgende principe; Een beginconcentratie  $c_o$  in een vat doen, een bepaalde tijdsduur wachten en dan de concentratie in dat vat meten. De nieuwe concentratie is dan een maat voor de tijdsduur dat het water in het vat aanwezig is geweest. In figuur 6.1 is op deze manier de halfwaardetijd weergegeven bij een afbraak van k=0.01 1/dagen.



Figuur 6.2 Berekenen van de verblijftijd

Deze afbraak komt overeen met de behandelde theorie in hoofdstuk 2 van een volledig

verdringingsbekken. Er is ook beschreven dat de afbraak in een volledig gemengd bekken bij een eerste-orde afbraakproces lager is. Bij een gelijkblijvende omschrijving naar een tijdsduur levert dit een lagere gemiddelde tijdsduur door een hogere meting van de concentratie op. In figuur 6.3 is dit principe grafisch weergegeven



Figuur 6.3 Eerste-orde afbraakproces en concentratieberekening

T = gemiddelde verblijftijd

t = tijdsduur

 $C_{g}$  = concentratie door middeling van verblijftijden [kg/m<sup>3</sup>]

 $C_v = \text{concentratie verdringingsbekken [kg/m<sup>3</sup>]}$ 

De concentratie die in het onttrekkingspunt in het bekken gevonden wordt is door dit effect afhankelijk van de verschillende stroombanen die het water gevolgd heeft voordat het onttrokken wordt. Hoe groter het verschil in de afgelegde stroombaan (meer menging) des te minder is de totale afbraak in de plas.

Er wordt bij een stationair snelheidsveld berekend wat de verblijftijdsspreiding in de plas is en de totale afbraak van de concentratie door deze ruimtelijke spreiding wordt berekend, dit alles hangt af van de menging.

 $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $(\Box)$  $( \exists$ e 0 O  $(\Box)$ ( ) $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$ 0 0 De negen verschillende berekeningen die gedaan zijn met toevoeging van een afbrekende tracer voor de Eerste Waterleidingplas en de toekomstige Tweede Waterleidingplas zijn:

- geen wind en k=0.0001 [1/dag]
- geen wind en k=0.01 [1/dag]
- noordenwind van 6 m/s en k=0.01 [1/dag]
- oostenwind van 6 m/s en k=0.01 [1/dag]
- zuidenwind van 6 m/s en k=0.01 [1/dag]
- westenwind van 6 m/s en k=0.01 [1/dag]
- ZZW-wind van 6 m/s en k=0.01 [1/dag]
- ZZO-wind van 6 m/s en k=0.01 [1/dag]
- ZZO-wind van 15 m/s en k=0.01 [1/dag]

Een situatie zonder wind bij twee verschillende afbraakcoëfficiënten, k=0.0001 1/dagen en k = 0.01 1/dagen worden respectievelijk gebruikt om het volume mee vast te stellen en om de mate van menging te analyseren bij dit snelheidsveld. Uit appendix C (figuur C1) blijkt dat bij een kleine afbraak (k=0.0001 1/dagen) de eindtijd verwaarloosbaar afwijkt, bij volledige menging 0.5 dag, van de gemiddelde verblijftijd van het bekken. Ook zijn de vier hoofdwindrichtingen (noord, oost, zuid en west) uitgerekend. Verder is de situatie bij een ZZW-wind berekend, omdat dit de veel voorkomende windrichting is en de strekdam in de Eerste Waterleidingplas in deze richting ligt. Bij een ZZO-wind kan de stroming makkelijk langs de kop van de dam stromen en dit is waarschijnlijk ook een bepalende windrichting. Een benadering van de volledige menging is gegeven door de wind met 15 m/s uit een ZZO-richting te laten waaien en dan is ook zichtbaar te maken wat de invloed is van een krachtigere wind.

De afbraak van de tracer is voor de berekening met de verblijftijdsspreiding vastgehouden op k=0.01 [1/dag]. De onderschatting van de gemiddelde verblijftijd is een maat voor de menging waar gebruik van gemaakt wordt. De gradiënt in de verblijftijd hangt eenduidig af van de menging in de plas, dit wil zeggen dat het verschil onafhankelijk is van de beginconcentratie waarmee gerekend wordt. Bij de beschrijving van de verblijftijdsspreiding in de zeven verschillende windsituaties en bij verschillende ontwerpen worden vier zaken bekeken:

- horizontale menging
- vertikale menging
- verband tussen menging en neren
- totale menging in de plas

Horizontale menging: de isolijnen in de figuren zijn met een interval van 2.5 dagen getekend, behalve in de situatie zonder wind, daar is een interval van 5 dagen aangehouden. Voor de figuren met de verblijftijdsisolijnen geldt dat als er een grote gradiënt in de gemiddelde verblijftijd optreedt er weinig menging heeft plaatsgevonden en hoe minder isolijnen getekend zijn des te groter is de menging. Vertikale menging: in de figuren met de isolijnen van de tijd zijn de onderste en de bovenste laag in de plas weergegeven. Indien de verschuiving van de isolijn met dezelfde waarde voor de tijd tussen laag 1 en laag 5 klein is, is de vertikale menging groot. Het is ook mogelijk dat de isolijnen in de eerste laag een andere vorm en waarde hebben dan in de bovenste laag en dan is de vertikale uitwisseling van water veel minder.

Verband tussen menging en neren: door naar de dieptegemiddelde neren te kijken en naar de effecten op de verblijftijdsspreiding wordt het inzicht verkregen hoe het ontwerp de verblijftijdsspreiding beïnvloed.

Totale menging in de plas: door de onderschatting van de gemiddelde verblijftijd is de tijd die het water bezit bij het onttrekken een maat voor de menging die in de plas heeft plaatsgevonden. De grootste tijd wordt gevonden indien er geen menging in de plas plaats heeft gevonden en de laagste tijdsduur bij een volledig gemengd bekken.

## 6.5 Verblijftijdsspreiding

In de figuren 6.11 t/m 6.18 is de verblijftijdsspreiding van de Eerste Waterleidingplas weergegeven. De andere plassen zijn ook onder deze condities bekeken. De verschillen in de verblijftijdsspreiding van de plassen wordt bepaald door de stroming in de plas. En zal bekeken worden voor de vier hoofdwindrichtingen en voor een situatie zonder wind.

Horizontale menging: deze vindt bij een noorde - en zuidenwind vooral in het zuiden van de plas plaats. Bij een oosten- en westenwind is de menging groot in de oost-west richting. Bij een noordenwind is de menging in de oppervlaktelaag veel groter dan in de onderste laag. Bij een zuidenwind is het omgekeerde nog duidelijker zichtbaar. Daar is de gemiddelde verblijftijd in de onderste laag bijna overal gelijk en in de bovenste laag treden veel grotere verschillen op. Bij een zuidenwind stroomt het inlaatwater eerst bovenlangs en verspreidt zich dan over de plas. Bij een noordenwind duikt het inlaatwater naar beneden, het diepe deel van de plas in. Hoe harder de wind waait, hoe meer menging er optreedt zoals in figuur 6.18 bij een ZZOwind van 15 m/s (windkracht 7) te zien is.

Vertikale menging: een oosten- en westenwind zorgen voor een bijna volledige menging in het vertikale vlak. Bij een noorden- en zuidenwind zijn de verschillen tussen de eerste en vijfde laag veel groter, dit is te verklaren door de grotere strijklengte waardoor het water langer onderweg is met de stroming wind mee, maar ook met de retourstroom. Als het niet waait liggen de verblijftijden ver uiteen. Het verschil tussen laag 1 (bovenste 20%) en laag 5 (onderste 20%) is klein, de tijden in de onderste laag lopen iets achter op die in de bovenste laag. Dit verschil draait na het passeren van de kop van de dam om, dan zit er relatief jonger water in de onderste laag en is het water in de bovenste laag ouder. Het effect van het diepe onttrekkingspunt in laag 4 wordt dan al merkbaar.

Verband tussen de menging en dieptegemiddelde neren: deze is niet eenduidig aanwezig. Het

is wel zo dat de horizontale menging groter is als de snelheden in de dieptegemiddelde neren groter zijn. Dit is in het zuiden van de plas goed te zien bij een noorden- en zuidenwind.

Totale menging in de plas: deze is af te lezen aan de tijd die voor het onttrokken water berekend wordt. Hoe hoger deze berekende tijd bij dezelfde afbraak is des te meer lijkt het bekken op een verdringingsbekken. De tijden in de verschillende situaties zijn in tabelvorm uitgezet. Ook in de tabel is uitgezet hoe de menging te vergelijken is met n (zelfde gemiddelde verblijftijd) achter elkaar geschakelde bekkens (zie ook figuur 2.4).

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
geen wind	0.0001	86.3	∞ (aangenomen)
geen wind	0.01	82.8	9.93
noordenwind 6 m/s	0.01	67.0	1.38
oostenwind 6 m/s	0.01	71.7	1.99
zuidenwind 6 m/s	0.01	66.8	1.36
westenwind 6 m/s	0.01	72.6	2.16
ZZW wind 6 m/s	0.01	68.3	1.53
ZZO wind 6 m/s	0.01	70.7	1.82
ZZO wind 15 m/s	0.01	65.6	1.25
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)	0.01	89.0	
Volledige menging (berekend)	0.01	62.2	1 (volgt uit aanname)

Tabel 6.1. Mate van menging in de Eerste Waterleidingplas

\* Deze berekende tijd in het onttrekkingspunt is afhankelijk van de kwaliteitsverbetering die plaastvindt in de plas, hoe hoger de tijd des te groter de kwaliteitsverbetering in het bekken.

Uit de tabel is af te lezen dat zelfs een situatie zonder wind zorgt voor menging in het bekken. Bij een wind waaiende uit het westen is de menging het laagst, het onttrokken water heeft de hoogste gemeten tijd bij een windsnelheid van 6 m/s. De noorden en zuidenwind blijken voor de meeste menging in de Eerste Waterleidingplas te zorgen. Door de geringe breedte in de windrichting is de menging bij een oosten- en westenwind kleiner, het water wordt minder ver verplaatst voordat het water onderlangs terugstroomt.



# 7 Ontwerp van de Tweede Waterleidingplas

# 7.1 Inleiding

De Tweede Waterleidingplas zal aangelegd worden op de locatie van de plas Loenderveen oost. De oppervlakte die nu beschikbaar is in de plas (215 ha) zal bij de inrichting tot Tweede Waterleidingplas afnemen met 20 ha. Het veen en meermolm dat in de plas aanwezig is en een langdurige negatieve invloed heeft op de bereiding van drinkwater zal verwijderd worden. Uit onderzoek naar de opslag van dit veen en meermolm is de toekomstige Tweede Waterleidingplas gekozen voor de opslag. Het ruimtebeslag van de opslag heeft een oppervlakte van 20 ha. Voor de inrichting van de toekomstige Tweede Waterleidingplas moeten de volgende keuzes gedaan worden:

- strekdam, lengte en locatie
- locatie opslag veen en meermolm in de plas
- plaats inlaat en onttrekkingspunt

Ook de bodemgeometrie is vrij te kiezen, bijvoorbeeld de plaatsen waar de diepere delen komen. Het genereren van de ontwerpen gebeurt aan de hand van het programma van eisen die aan de in te richten Tweede Waterleidingplas gesteld worden.

## 7.2 Programma van eisen

De eisen die aan het ontwerp gesteld worden zijn ingedeeld in drie groepen. Deze drie groepen zijn hydrologie, civiele-techniek en ecologie. De eisen lopen uiteen van zaken als een minimale verblijftijd van 100 dagen tot een eis dat golfslag zoveel mogelijk voorkomen dient te worden. Daar zal respectievelijk niet vanaf geweken worden en verder geen rekening mee worden gehouden

## Hydrologische eisen

- De doorlooptijd van de waterleidingplas moet gemiddeld minimaal 100 dagen bedragen. Dit betekent bij een produktiecapaciteit van 30 miljoen m<sup>3</sup> per jaar een minimale inhoud van 30\*10<sup>6</sup>\*(100/365) = 8.2 miljoen m<sup>3</sup>.
- Het bergend oppervlak van de waterleidingplas moet zo groot mogelijk gekozen worden. Dit om grote waterpeilvariaties tijdens het aanspreken van de plas als buffervoorraad te voorkomen.
- Er mag geen seizoen-stratificatie in de plas optreden, dit stelt beperkingen aan de diepte van de plas tenzij maatregelen genomen worden om stratificatie te voorkomen. De diepte van de plas mag in verband met voorkoming van seizoen-stratificatie niet veel groter zijn dan 8 à 10 m.

 $\bigcirc$ 0  $\cap$ 0  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $(\Box)$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\square$ 6 6  $\ominus$ ē Q e

- De functie van de plas afvlakking van kwaliteitsverschillen en zelfreiniging moeten gewaarborgd worden. Er mogen geen directe kortsluitstromen ontstaan tussen het inlaatpunt en het onttrekkingspunt.
- Bij het innamepunt van het ruwe water voor Weesperkarspel moet de diepte gevarieerd kunnen worden tot een diepte van ongeveer 15 m. Dit ter voorkoming van mogelijke vorming van ijskristallen in de leidingen in de winterperiode.

#### Civiel-technische eisen

- De taluds worden boven de bestaande zandbodem opgezet onder een helling 1:8 en onder bestaande zandbodem onder een helling van 1:4.
- · Het meermolm en veen dient in de plas opgeslagen te worden.

#### **Ecologische eisen**

- De strekdam het liefst niet zichtbaar of zo geplaatst dat het vrije uitzicht over de plas niet verloren gaat.
- Tot een diepte van 3 m bevindt zich het ecologisch meest interessante milieu. Het is daarom gewenst ondieptes in de plas te hebben waar de waterdiepte niet groter is dan deze 3 m.
- In het westen van de plas terrassen op twee à drie meter onder water. Op die plaats van de plas is het leefmilieu het meest ongestoord en daar kan de natuur dan goed tot ontwikkeling komen.
- Oeverhelling van circa 1:10 (flauwe helling gewenst) na een snelle daling bij het grensvlak van land en water tot 50 cm onder het waterniveau.
- · Golfslag dient zoveel mogelijk voorkomen te worden.

## 7.3 Alternatieve ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas

Voor de Tweede Waterleidingplas zal een vijftal ontwerpen bekeken worden op het functioneren onder invloed van de waterbeweging in de plas. De hoofdgedachte voor het beperken van een kortsluitstroming is het aanleggen van een strekdam. Indien er geen wind waait zal de stroming minimaal de afstand om de dam af moeten leggen. Dit garandeert dat een deel van het bekken altijd doorlopen moet worden voordat het ingelaten water het bekken weer verlaat.


Figuur 7.1 Principe van de invloed van de strekdam

De stroming zal zonder de invloed van de wind langs de kop van de dam van het inlaatpunt naar het onttrekkingspunt plaatsvinden. Bij een oosten- en westenwind wordt de stroming in twee neren opgesplitst en zal weinig met elkaar mengen, in het theoretische geval van een vlakke bodem en wrijvingsloze wanden. Het water zal snel van oost naar west stromen en in deze richting goed gemengd zijn. Bij een noorden- en zuidenwind zullen drie neren in het vertikale vlak ontstaan. Een neer ten noorden en zuiden van de dam en een neer in het oostelijk deel van het bekken. De uitwisseling in noord-zuid richting zal groot worden, maar door de werking van de dam in het westen van de plas niet voor een stroming zorgen die direkt langs het inlaatpunt en onttrekkingspunt stroomt. De dieptegemiddelde stroming zal in hoofdzaak bepaald worden door de bodemgeometrie.

In figuur 7.2 zijn de bovenaanzichten van de Eerste Waterleidingplas en de vijf alternatieven voor de Tweede Waterleidingplas afgebeeld. De bodemprofielen van de alternatieven zijn in de figuren 7.3 t/m 7.7 weergegeven. Het inlaatpunt ligt in alle gevallen in de hoek van de plas naast de huidige coagulatiebassins, omdat dan de kosten voor het leidingwerk het laagst zijn. In de situatie van het meermolm in het noorden zijn de drie ontwerpen opgesteld om het effect van de strekdam waar te nemen:

- geen strekdam
- korte strekdam
- lange strekdam

Door het niet plaatsen van de strekdam verandert plaatselijk, rond de strekdam, het bodemprofiel. Deze strekdam sluit aan op de dijk tussen de Eerste Waterleidingplas en de toekomstige Tweede Waterleidingplas en gaat na 500 m evenwijdig aan deze dijk lopen. Het vrije uitzicht over de plas wordt hiermee vanaf de Bloklaan, Veendijk en Horndijk zo groot mogelijk gehouden. Het volume van het ontwerp is zo constant mogelijk rond de 8.2 miljoen m<sup>3</sup> gehouden, met een volumestroom van 0.95 m<sup>3</sup>/s staat dit gelijk aan een gemiddelde verblijftijd van 100 dagen.

Het effect van de plaats van het veen en meermolm kan vergeleken worden in de ontwerpen:

- lange strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden
- geen strekdam, opslag veen en meermolm in het westen
- strekdam, opslag veen en meermolm in zuidoosten

Bij de schematisering van de bodem hangt het bodemprofiel sterk af van de oevers. Een onderzoek naar het aanleggen van ondieptes is achterwege gelaten en zal moeten gebeuren op een fijner rooster dan dat hier toegepast is. Het effect op de menging zal merkbaar zijn als een ondiepte de breedte of lengte van de plas beslaat en dat is ook met een grover rooster te onderzoeken. Het effect hiervan is zichtbaar samen met de lengte van de strekdam in het alternatief met een lange strekdam in vergelijking met de korte strekdam.

Bij de locatie van het veen en meermolm in het westen is het onttrekkingspunt verplaatst naar het noorden. Hiermee wordt voorkomen dat er kortsluitstromen op zullen treden, bovendien wordt dan het hele volume van de plas gebruikt. Bij het laatste ontwerp is het veen en meermolm verplaatst naar het zuidoosten en een dam is tussen inlaat en onttrekkingspunt geplaatst.

## Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden (figuur 7.3)

Bij dit ontwerp bestaat de geometrie van de plas uit het verwijderen van het veen en meermolm en in het noorden deponeren en het uitdiepen van de plas tot het gewenste volume. Het volume is iets groter geworden dan 8.2 miljoen m<sup>3</sup>, en wel 8.8 miljoen m<sup>3</sup>, omdat door bij het volgende ontwerp de strekdam aan te leggen dit bodemprofiel de grootste gelijkenis vertoont en daarmee de invloed van de dam goed zichtbaar wordt.

Het inlaatpunt ligt nu zonder de scheiding van een strekdam op 750 m van het onttrekkingspunt en er is sprake van een groot vrij zicht over de plas.

## Korte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden (figuur 7.4)

Een korte strekdam gelegen in het westelijk deel van de plas vormt de fysieke scheiding tussen het inlaatpunt en het onttrekkingspunt. Deze dam ligt om de oorspronkelijke diepe gaten van het veen en meermolm uit de Eerste Waterleidingplas heen. Bij de kop van de circa 1150 m lange strekdam is een vrij diep deel aanwezig. Deze plas heeft een diep deel in het noorden en aftakkingen naar het inlaatpunt en het onttrekkingspunt in het zuidwesten.

De bodemvariatie is over de hele plas minimaal gehouden met een plasvolume V = 8.3 miljoen m<sup>3</sup>. Zoals de naam aangeeft is hetzelfde rooster toegepast als voorgaand ontwerp en ligt het veen en meermolm in het noorden van de plas.

# Lange strekdam, opslag veen en meermolm in westen (figuur 7.5)

Identiek rooster aan de vorige twee ontwerpen alleen heeft de strekdam een lengte van ongeveer 1500 m gekregen. Dit ontwerp lijkt veel op de Eerste Waterleidingplas met het verschil dat het inlaatpunt veel dichter bij het onttrekkingspunt ligt, gescheiden door een dam. Dit is gedaan omdat de kosten voor het leidingwerk dan lager zijn en de produktiewerkzaamheden in het zuidwesten van de plas geconcentreerd zijn.

De bodemdiepte voor de kop van de dam is ongeveer 4 m en daarmee ondieper dan bij de korte strekdam. Deze ondiepte zal het bekken globaal in twee delen splitsen. Een deel waar het water direkt vanuit het inlaatpunt instroomt en een dieper deel waar het water onttrokken wordt. Ten oosten van de strekdam is de diepte 6 à 7 m en ten westen loopt de diepte van 6 m tot 12 m. Het plasvolume V = 8.3 miljoen m<sup>3</sup> en dit komt overeen met een gemiddelde verblijftijd van 101 dagen.

## Geen strekdam, opslag veen en meermolm in westen (figuur 7.6)

De aanleg van een strekdam beïnvloedt de menging in het bekken, maar ook de plaats van het veen en meermolm kan de werking van de strekdam overnemen. Dit ontwerp is opgenomen om te onderzoeken wat de mogelijkheden zijn om de strekdam niet aan te leggen, maar door de plasvorm te wijzigen een goede werking van de plas te verkrijgen.

De opslag van het veen en meermolm uit de Loenderveense plas vindt plaats in het westen en verkleint de afstand naar de andere oever met 600 m, de helft van de breedte. Dit is gedeeltelijk de plaats van de opslag van het veen en meermolm dat uit de Eerste Waterleidingplas afkomstig is. De scheiding tussen het noordelijk en het zuidelijk wordt nog meer benadrukt door het aanleggen van een ondiepte tussen beide delen. Voor een goede werking van het bekken wordt het onttrekkingspunt naar het noordelijk deel van de plas verplaatst worden. De zekerheid dat het gehele bekken meedoet in het functioneren wordt hiermee vergroot.

Het onttrekkingspunt is nu ook weer gelegen in een dieper deel van de plas. Het plasvolume V = 8.3 miljoen m<sup>3</sup> en daarmee even groot als de twee vorige ontwerpen.

## Strekdam, opslag veen en meermolm in zuidoosten (figuur 7.7)

Een strekdam en de verplaatsing van de opslaglocatie van veen en meermolm levert het laatste ontwerp. Dit alternatief is te vergelijken met de Eerste Waterleidingplas en de lange strekdam met de opslag van veen en meermolm in het noorden. Deze strekdam is korter, circa 1050 m, en sluit meer noordelijk op de dijk aan. De minimale weg van het inlaatpunt wordt hiermee even groot gehouden met het ontwerp met de lange strekdam. De slechte ondergrond van veen en meermolm zal voor de aanleg van de strekdam verbeterd moeten worden.

Het bodemprofiel is nauwelijks geaccidenteerd en wordt in hoofdzaak bepaald door de oevers de dam en het onttrekkingspunt. Voor de kop van de strekdam is de diepte ongeveer 4 m. Dit ontwerp is tevens opgedeeld in twee delen met een diepte van 6 à 7 m, waar in het ene deel het inlaatpunt en in het andere het onttrekkingspunt gelegen is.

Het plasvolume V = 8.7 miljoen m<sup>3</sup> en dat komt overeen met een gemiddelde verblijftijd van 106 dagen bij de gegeven volumestroom van 0.95 m<sup>3</sup>/s.

Deze alternatieven zullen onderzocht en met elkaar vergeleken worden ten aanzien van de mate van menging en de kans op kortsluitstromen.

# 8 Waterbeweging en verblijftijdsspreiding voor de verschillende ontwerpen

De dieptegemiddelde waterbeweging wordt beschreven. Op deze manier wordt snel veel informatie over het stroombeeld in de plas verkregen. De verblijftijdsspreiding is driedimensionaal beschreven en hiermee wordt een goed beeld gegeven hoe de stof zich over de plas verplaatst, bovenlangs of onderlangs. Ook is in dit geval het een en ander te zeggen over het vertikale verschil van verblijftijden in de plas.

# 8.1 Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

De stroming bij een ontwerp zonder strekdam wordt grotendeels bepaald door lokale oneffenheden in het bodemprofiel. Dit ontwerp is ontstaan door het weghalen van de strekdam en dit is nog zichtbaar in het bodemprofiel en heeft daarmee ook invloed op de stroming.

# Waterbeweging (figuur 8.1 en 8.2)

Stroming met de wind mee: deze vindt bij een noorden- en zuidenwind in hoofdzaak plaats langs de oostoever van de in te richten plas. Bij een oosten- en westenwind is deze stroming aan de noord- en zuidoever terug te vinden.

De retourstroming: deze vindt bij een noorden- en zuidenwind vooral iets ten westen van het midden van de plas plaats. Bij een noordenwind wordt deze stroming in het midden van de plas door de ondiepte gesplitst in twee delen. Bij de oosten- en westenwind is de stroomrichting voor het grootste deel loodrecht op de windrichting. Dit wordt veroorzaakt door de lengte en breedte verhouding van de plas waardoor de retourstroming breder wordt, maar minder lang is.

Aantal en vorm van de neren: bij een noordenwind is sprake van twee neren die de plas in de lengterichting beslaan. De dieptegemiddelde stroomsnelheden zijn relatief hoog in deze situatie. Bij een zuiden- en westenwind ontstaan drie neren. Een oostenwind levert een grote dieptegemiddelde neer in het zuiden van de plas en een kleinere in het noorden op.

Kans op het ontstaan van kortsluitstromen: dit is in dit ontwerp groot omdat het water direkt van het inlaatpunt langs het onttrekkingspunt kan stromen. Dit zal vooral plaatsvinden bij een zuidenwind. Bij dit inrichtingsalternatief zijn geen maatregelen genomen om kortsluitstromen te beperken.

# Verblijftijdsspreiding (figuur 8.3 t/m 8.10)

Horizontale menging: bij het alleen onttrekken en inlaten van water ontstaan rond het onttrekkingspunt grote gradiënten in de verblijftijd. Dit wordt veroorzaakt doordat het water dat daar onttrokken wordt niet gemengd is met water dat zich al veel langer in de plas bevindt. De grootste volumestroom is dan ook afkomstig uit de richting van het inlaatpunt. Een noorden- en zuidenwind geven in het hele oosten van de plas een gelijke gemiddelde verblijftijd die hoger is dan die in het onttrekkingspunt. Rond de inlaat is sprake van weinig menging van verblijftijden, het ingelaten water komt niet direct in een circulerende stroming in de plas terecht. Een oosten- en westenwind zorgen voor eenzelfde gemiddelde verblijftijd in de oostwestrichting en een afzondering van het noordelijk deel van de plas waar de gemiddelde verblijftijd hoger is.

Vertikale menging: bij een noordenwind is het water in de onderste laag, in het oosten van de plas ouder en in het westen jonger dan in de bovenste laag. Bij een zuidenwind stroomt het water eerst bovenlangs de plas op en krijgt daar langzaam dezelfde gemiddelde verblijftijd als de onderste laag. Een westenwind zorgt ervoor dat het water vanuit het inlaatpunt boven langs de zuidoever stroomt en daarna pas in de noord-zuidrichting onderlangs over de plas wordt verspreid. De gemiddelde verblijftijd in de bovenste laag is bijna overal gelijk. Bij een oostenwind wordt het inlaatwater eerst bovenlangs verspreid en in de onderste laag is de gemiddelde verblijftijd vrijwel constant.

Verband tussen de menging en dieptegemiddelde neren: bij een noordenwind zorgt de westelijke neer voor een goede menging en de plas wordt in een oostelijk en westelijk deel gesplitst. Een oosten- en een zuidenwind zorgen ervoor dat het bekken qua verblijftijden in een noordelijk en zuidelijk deel gesplitst worden.

Totale menging in de plas: de totale afbraak is kleiner bij een gemengd systeem en bij alle windsituaties ongeveer gelijk aan een volledig gemengd systeem, alleen bij windstilte gaat het gedrag meer op dat van een verdringingsbekken lijken (tabel 8.1). Naarmate de totale afbraak in het bekken groter is, is de berekende tijd in het onttrekkingspunt hoger en is er meer sprake van propstroming geweest.

Tabel 8.1	Berekende tij	d in onttrekk	ingspunt, j	geen strekc	lam opslag v	een en meerm	olm in het
noorden			DANG 124 USENSE	10	047 9442		

Geen wind (dagen)	noorden wind, 6 m/s (dagen)	oosten wind, 6 m/s (dagen)	zuiden wind, 6 m/s (dagen)	westen wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 6 m/s (dagen)	ZZW- wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 15 m/s (dagen)
94.3	71.5	71.7	73.9	72.8	72.3	74.3	73.5

Bij een noorden-, oosten-, westen-, en een ZZO-wind van 6 m/s is er een kortsluitstroom ontstaan, de berekende tijd is lager dan in een volledig gemengd bekken (72.9 dagen), dit wil zeggen dat een deel van het bekken niet volledig meedoet in het systeem. Dit is ook te zien in de figuren van de verblijftijdsspreiding waar het water in het onttrekkingspunt niet het oudste water is dat in de plas aanwezig is. Op de plaatsen waar het water gemiddeld ouder is, is de doorstroming met water van het inlaatpunt naar het onttrekkingspunt te klein en daardoor wordt het water daar te weinig met jong water gevoed.

# 8.2 Korte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

Ook een korte strekdam heeft een aanzienlijke invloed op de stroming en verblijftijdsspreiding door het dwingende karakter.

# Waterbeweging (figuur 8.11 en 8.12)

Stroming met de wind mee: bij een noorden- en zuidenwind vindt deze stroming plaats aan weerszijden van de dam en langs de oost- en westoever. Een oosten- en westenwind zorgen voor veel stroming lans de kop van de dam en de opslag van veen en meermolm.

Retourstroming: deze vindt voor de vier windrichtingen vooral ten noorden van de dam plaats. Dit water is bij een noordenwind afkomstig van de diepere delen naast de dam en komt hier samen. Bij een zuidenwind wordt de retourstroom gesplitst in twee delen naast de dam. De retourstroom stroomt bij een oostenwind ongeveer onder een hoek van 45 graden tegen de windrichting in.

Aantal en vorm van de neren: een noordenwind laat twee grote neren ontstaan en dit is ook globaal terug te zien bij een zuidenwind. Een westenwind levert een neer op in het noorden van de plas en in de rest van de plas zijn de stromingen relatief laag.

Kans op het ontstaan van kortsluitstromen: de kortste afstand die het water moet overbruggen is ongeveer 2 km en daarbij moet er ook een bocht van 180 graden gemaakt worden. Dit betekent dat de kans op kortsluitstromen klein wordt.

# Verblijftijdsspreiding (figuur 8.13 t/m 8.20)

Horizontale menging: deze is in een situatie zonder wind erg klein en het water wordt langzaam ouder naarmate het vanuit het inlaatpunt meer naar de kop van de dam stroomt. Bij een noordenwind krijgt het water ten oosten van de dam een gemiddelde verblijftijd ongeveer gelijk aan 70 dagen, bij een zuidenwind is dit ook het geval. Een oosten- en westenwind laten veel duidelijker een verschil zien in gemiddelde verblijftijd aan weerszijden van de dam, ten noorden van de dam is de menging van verblijftijden veel groter en ligt daar rond de 70 dagen. Bij het inlaatpunt wordt het water direkt door de invloed van de wind gemengd met relatief oud water.

Vertikale menging: deze vertikale menging is in de vier windrichtingen, noord, oost, zuid en west groot. Bij een noorden- en zuidenwind is te zien dat de wind pas goed vat krijgt op de stroming als de dam een bocht maakt richting het noorden. Bij een noordenwind stroomt het water dan onderlangs de plas op en bij een zuidenwind stroomt het water bovenlangs de plas op wat te zien is aan het gemiddeld ouder worden van het water respectievelijk in de bovenste en onderste laag.

Verband tussen menging en dieptegemiddelde neren: bij een noorden- en zuidenwind is dit verband duidelijk aanwezig waarbij de oostelijke neer voor een gelijkmatige gemiddelde verblijftijd in dat gebied zorgt. Een oosten- en westenwind veroorzaken een grote neer in het noorden en hier is de gemiddelde verblijftijd constant, in de rest van het bekken zijn de dieptegemiddelde snelheden lager en de menging ook.

Totale menging in de plas: de berekende tijd in het onttrekkingspunt is het grootst indien er geen wind waait (tabel 8.2). De menging in de plas is dan het kleinst geweest. Een noorden- en zuidenwind geven een iets kleinere afbraak in het bekken dan de oosten- en westenwind. Naarmate de wind harder gaat waaien neemt de afbraak, berekende tijd, af en gaat het bekken meer op een volledig gemengd bekken lijken.

Tabel 8.2 Berekende tijd in onttrekkingspunt, korte strekdam opslag veen en meermolm in het noorden

Geen wind (dagen)	noorden wind, 6 m/s (dagen)	oosten wind, 6 m/s (dagen)	zuiden wind, 6 m/s (dagen)	westen wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 6 m/s (dagen)	ZZW- wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 15 m/s (dagen)
93.8	74.0	78.1	73.2	76.9	72.9	73.3	71.0

# 8.3 Lange strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

Een lange strekdam heeft het effect van het opsplitsen van het bekken in twee afzonderlijke bekkens waarbij de uitwisseling tussen de twee bekkens sterk afhankelijk is van de windrichting.

## Waterbeweging (figuur 8.21 en 8.22)

Stroming met de wind mee: deze vindt bij een noorden- en zuidenwind heel duidelijk plaats langs de strekdam en de oost- en westoever van de plas. Bij de oosten- en westenwind vindt deze stroming vooral plaats langs de opslag van veen en meermolm en de zuidoever van de plas.

Retourstroming: deze vindt bij een noorden- en een zuidenwind plaats midden tussen de strekdam en de oever. Een oosten- en westenwind zorgt voor een grote stroming langs de kop van de strekdam en in de andere delen van het bekken kan deze stroming zich niet ontwikkelen. Doordat het bodemprofiel weinig geaccidenteerd is loodrecht op de windrichting.

Aantal en vorm van de neren: er ontstaan hele lange en smalle neren in het geval van een noorden- en een zuidenwind. Er zijn twee neren die de hele lengterichting van de plas beslaan en dan zijn er nog twee kleinere neren die naast de strekdam ontstaan. Een oosten- en zuidenwind zorgen voor een neer in het noorden van het bekken.

De kans op het ontstaan van kortsluitstromen is nihil door de lange strekdam. Van de drie ontwerpen met het veen en meermolm in het noorden zal deze dam de minste kans geven op kortsluitstromen.

68

# Verblijftijdsspreiding (figuur 8.23 t/m 8.30)

Horizontale menging: een noorden- en een zuidenwind zorgen ervoor dat er weinig uitwisseling is tussen de verblijftijden aan weerszijden van de dam. Boven de dam is dan ook een verschil in verblijftijd te zien van globaal 7.5 dagen, bij een ZZW-wind zelfs 12.5 dagen, terwijl deze bij een oosten- en westenwind niet aanwezig is, in deze situatie is de menging van verblijftijden aan weerszijden van de strekdam veel kleiner. Bij een oosten- en zuidenwind is de menging van verblijftijden aan de oostzijde van de strekdam hoofdzakelijk in de oostwestrichting.

Vertikale menging: deze is zonder wind groot en er is dan ook nauwelijks een verschil in verblijftijd zichtbaar tussen de bovenste en de onderste laag. Bij de lange strekdam geldt voor de vertikale menging hetzelfde als voor de korte strekdam, er is ook hetzelfde beeld zichtbaar bij de kop van de strekdam.

Verband tussen menging en dieptegemiddelde neren: de twee langgerekte neren bij een noorden- en een zuidenwind veroorzaken de grote gradiënt in de verblijftijd ten noorden van de strekdam. Dit betekent ook dat de lange neren zorgen voor een constante gemiddelde verblijftijd aan weerszijden van de strekdam. Bij een oosten- en westenwind zijn de dieptegemiddelde snelheden in de plas niet groot, aan de vertikale menging is te zien dat er wel een grote stroming in de oost-westrichting is. De verblijftijden worden door de neren in het vertikale vlak met elkaar gemengd.

Totale menging in de plas: ook hier geldt dat de noorden- en zuidenwind een grotere menging van verblijftijden oplevert in het onttrekkingspunt dan de oosten- en westenwind (tabel 8.3). In de figuren van de verblijftijdsspreiding is te zien dat de oppervlakte met dezelfde gemiddelde verblijftijd door de ligging van de strekdam bij een noorden- en zuidenwind groter is. Dit komt doordat de afstanden waarover het water verplaatst door de grotere dieptegemiddelde neren veel groter is.

Geen wind (dagen)	noorden wind, 6 m/s (dagen)	oosten wind, 6 m/s (dagen)	zuiden wind, 6 m/s (dagen)	westen wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 6 m/s (dagen)	ZZW- wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 15 m/s (dagen)
94.5	75.5	79.0	75.8	78.7	76.5	77.6	72.2

Tabel 8.3 Berekende tijd in onttrekkingspunt, lange strekdam opslag veen en meermolm in het noorden

# 8.4 Ontwerp, geen strekdam opslag veen en meermolm in het westen

De opslag van veen en meermolm zorgt in dit ontwerp voor een totaal andere geometrie van de plas en de invloed op de waterbeweging en de verblijftijdsspreiding wordt onderzocht.

## Waterbeweging (figuur 8.31 en 8.32)

Stroming met de wind mee: deze vindt bij een noorden- en een zuidenwind voor het grootste deel langs de oostoever plaats. Dit komt doordat de oever zo goed als evenwijdig loopt aan de windrichting. Bij een oosten- en westenwind is de stroming met de wind mee op drie plaatsen zichtbaar en wel langs de noord- en zuidoever en over de ondiepte in het midden van de plas.

Retourstroming: bij een noorden- en zuidenwind volgt de retourstroming de westoever en dat betekent een langere weg van noord naar zuid of andersom dan de wind mee gerichte stroming. Een oosten- en westenwind zorgt voor een stroming door het midden van de twee bekkens, de scheiding tussen de bekkens is een ondiepte.

Aantal en vorm van de dieptegemiddelde neren: bij een noorden- en zuidenwind is één grote neer zichtbaar die door de hele plas loopt en daarbij zijn er nog een aantal kleinere plaatselijke neren te onderscheiden. Bij een oosten- en westenwind zijn in het noordelijk en zuidelijk bekken twee neren zichtbaar waarbij de ondiepte de scheiding vormt.

Kans op het ontstaan van kortsluitstromen: voor dit ontwerp geldt dat er sprake is van twee even grote bekkens, door deze opsplitsing in twee bekkens wordt de kans op kortsluitstromen kleiner. Eerst moet het eerste bekken doorlopen worden en daarna kan het water in het andere bekken onttrokken worden.

#### Verblijftijdsspreiding (figuur 8.33 t/m 8.40)

Horizontale menging: zonder wind passeert de stroming het inlaatpunt eerst oostelijk en wordt pas daarna onttrokken. Ook bij een noorden- en zuidenwind ontstaan gradiënten in de gemiddelde verblijftijd van de bovenste laag over de ondiepte heen en dit is opvallend omdat de dieptegemiddelde stroming daar groot is. Bij een oosten- en westenwind is de gradiënt over de ondiepte in het midden van de plas 15 dagen en dat betekent dat de menging van verblijftijden tussen de twee bekkens heel laag is.

Vertikale menging: bij een noorden- en een zuidenwind is het grootste verschil te vinden in het zuidelijke deel van de plas. Bij een noordenwind stroomt het inlaatwater daar onderlangs de plas op en bij een zuidenwind bovenlangs. Bij een zuidenwind wordt een deel van het instromende water niet direkt gemengd met ouder water maar blijft in een dieper deel rond het inlaatpunt aanwezig. Bij een oosten- en westenwind is de vertikale menging van verblijftijden groot, wel duidelijk zichtbaar is het instromen van relatief jong water vanuit het inlaatpunt.

Verband tussen menging en dieptegemiddelde neren: bij een noorden- en zuidenwind is aan de oostelijke oever de constante gemiddelde verblijftijd te zien die veroorzaakt wordt door de stroming die met de wind mee gericht is. Een oosten- en westenwind zorgen ervoor dat elk afzonderlijk deel, noordelijk en zuidelijk, goed gemengd door de twee neren die in elk deel ontstaan. En natuurlijk daarnaast nog eens het driedimensionale karakter van de neren.

Totale menging: ook hier geven de noorden- en zuidenwind meer menging van verblijftijden in het bekken dan de oosten- en westenwind (tabel 8.4). De verschillen in de berekende

verblijftijden zijn klein en dit is te verklaren door de ronde vorm van de twee bekkens waardoor een verandering van de windrichting geen grote gevolgen heeft. Het transport dat over de ondiepte plaatsvindt verschilt en is bij een noorden- en zuidenwind groter.

Geen wind (dagen)	noorden wind, 6 m/s (dagen)	oosten wind, 6 m/s (dagen)	zuiden wind, 6 m/s (dagen)	westen wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 6 m/s (dagen)	ZZW- wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 15 m/s (dagen)
93.3	72.8	74.5	73.1	76.3	72.9	71.7	70.9

Tabel 8.4 Berekende tijd in onttrekkingspunt, geen strekdam opslag veen en meermolm in het westen

# 8.5 Ontwerp, strekdam opslag veen en meermolm in het zuidoosten

Hieronder volgt een beschrijving van de dieptegemiddelde stroming en verblijftijdsspreiding in dit ontwerp.

## Waterbeweging (figuur 8.41 en 8.42)

Stroming met de wind mee: bij een noorden- en zuidenwind vindt deze stroming bij alle oevers plaats met uitzondering van de korte noord- en zuidoever. Tevens is er een grote stroming met de wind mee aan weerszijden van de dam. Bij een wind waaiende uit het oosten en westen vindt deze stroming hoofdzakelijk bij het begin van de dam plaats, daar waar de richting van de dam evenwijdig is aan de windrichting. Ook in het uiterste noorden van de plas wordt de dieptegemiddelde stroming gedomineerd door de windrichting. De stroming langs de oevers die onder een hoek van 45 graden met de hoofdwindrichting liggen wordt bepaald door de wind mee stroming en de richting van de oever.

Retourstroming in de plas: bij een wind waaiende uit het noorden en zuiden ontstaat er een retourstroom aan beide zijden van de dam die erg langgerekt is. Bij een oosten- en westenwind is de grootste retourstroom te vinden aan de kop van de dam. Door de ligging van de plas ten opzichte van de windrichting is deze retourstroom veel korter.

Aantal neren en vorm: als de wind uit het noorden of zuiden waait zijn er twee langgerekte neren aan weerszijden van de dam te zien die bijna de gehele plas beslaan. Bij een oosten en westenwind ontstaat er één grote neer ten noorden van de dam. Er ontstaat ook een neer bij het onttrekkingspunt die veroorzaakt wordt door de geaccidenteerde bodem. Ter plaatse van het inlaatpunt ontstaan twee neren met kleine dieptegemiddelde stroomsnelheden.

Kans op kortsluitstromen: de kortste weg die het water af kan leggen van inlaatpunt naar onttrekkingspunt is de lengte van de plas in noord-zuid richting en dat is ongeveer 2 km. Hiervoor zal de stroming wel 180° moeten draaien om de punt van de dam te ronden en dat heeft een gunstig effect op de menging. Voor deze plas geldt dat de kans op kortsluitstromen nihil is. De minimale weg die het water moet afleggen om van het inlaatpunt naar het onttrekkingspunt te komen is lang. En deze weg zorgt ervoor dat de hele plas wel mee moet doen in het systeem.

#### Verblijftijdsspreiding (figuur 8.43 t/m 8.50)

Horizontale menging: bij een noorden- en zuidenwind is aan weerszijden van de strekdam, evenwijdig aan de windrichting, de gemiddelde verblijftijd constant van 70 dagen tot 77.5 dagen waarbij het verschil in verblijftijd optreedt ten noorden van de strekdam. Rond het inlaatpunt is de menging van verblijftijden klein, de menging van jong met relatief oud water vindt plaats als de dam een bocht naar het noorden maakt. Bij een oosten- en westenwind treedt ten oosten van de kop van de strekdam een groot verschil in verblijftijd op, hierna wordt het jongere en oudere water ten noorden van de strekdam met elkaar gemengd.

Vertikale verdeling: bij een noorden- en zuidenwind zijn de gemiddelde verblijftijd in de bovenste en onderste laag vrijwel aan elkaar gelijk en de vertikale menging is dan ook groot. Bij een oosten- en westenwind vertonen de gemiddelde verblijftijden ten noorden van de strekdam een klein verschil, waarbij een oostenwind de bovenste laag jonger is en bij een westenwind in de onderste laag relatief jong water langs de kop van de dam stroomt.

Verband tussen menging en dieptegemiddelde neren: de langgerekte neren bij een noorden- en zuidenwind zorgen voor een goede menging van verblijftijden in deze neren. Een oosten- en zuidenwind leveren een grote neer op ten noorden van de strekdam en hier is de menging dan ook groot. Vooral ten oosten van de kop van de dam zijn de dieptegemiddelde snelheden laag en in de verblijftijdsspreiding is ter plaatse een groot verschil in verblijftijden waar te nemen.

Totale menging: opvallend in vergelijking met de andere ontwerpen is dat de noordenwind voor minder menging in het bekken zorgt dan de oosten- en westenwind (tabel 8.5). Dit komt doordat het inlaatwater bij een noordenwind pas laat wordt gemengd met ouder water. Met andere woorden, het duurt lang voordat het water in een recirculerende stroming in het bekken terecht komt (zie Appendix C).

Tabel 8.5 Berekende tijd in onttrekkingspunt,	strekdam opslag v	veen en meermolm in het
zuidoosten		

Geen wind (dagen)	noorden wind, 6 m/s (dagen)	oosten wind, 6 m/s (dagen)	zuiden wind, 6 m/s (dagen)	westen wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 6 m/s (dagen)	ZZW- wind, 6 m/s (dagen)	ZZO- wind, 15 m/s (dagen)
,	× • /						
100.3	79.0	74.5	73.1	76.3	72.9	71.7	70.9

# 9. Conclusies en aanbevelingen

# 9.1 Conclusies

De conclusies worden gebaseerd op het aantal achter elkaar geschakelde gemengde bekkens waar het systeem mee te vergelijken is. Dit aantal is een maat voor de verblijftijdsspreiding in het bekken. De concentratieverlaging die in het onttrekkingspunt berekend wordt is groter als het bekken meer op een verdringingsbekken gaat lijken en minder op een volledig gemengd bekken. Een verdringingsbekken is theoretisch te vergelijken met een oneindig aantal achter elkaar geschakelde volledige mengers. De mate van menging in de Eerste Waterleidingplas en de ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas zijn dan weer te geven als n achter elkaar geschakelde bekkens, zie figuur 2.4. Het is dan mogelijk om verschillende bekkens met een andere gemiddelde verblijftijd met elkaar te vergelijken. In figuur 9.1 is voor verschillende windrichtingen en windsnelheden en voor alle doorgerekende alternatieven de vergelijking gemaakt met een aantal achter elkaar geschakelde mengbekkens (appendix D).

#### Kortsluitstromen

Er treden kortsluitstromen op indien op de figuren van de verblijftijdsspreiding gebieden te vinden zijn waar de gemiddelde verblijftijd hoger is dan in het onttrekkingspunt. Zolang dit het kleine gebied is tussen het onttrekkingspunt en de oever wordt dit niet als een probleem gezien omdat deze situatie bij een ander windveld direkt opgeheven is en het om een klein volume gaat.

In figuur 9.1 wordt nog een ontwerp voor de Tweede Waterleidingplas gepresenteerd (bordeaux rood) waarvan het bodemprofiel is weergegeven in figuur 9.2 en de verblijftijdsspreiding bij een windstilte in figuur 9.3. Dit ontwerp is niet realistisch om als Waterleidingplas te dienen omdat het onttrekkingspunt ten zuiden van de onderwaterdam ligt aan dezelfde zijde als het inlaatpunt, het laat echter wel duidelijk zien hoe een kortsluitstroom kan ontstaan bij een situatie zonder wind. In figuur 9.1 is te zien dat het bekken bij windstilte dan te vergelijken is met n = 0.27 en in deze situatie wordt minder dan 1/3 deel van deze Waterleidingplas gebruikt.

Ook bij een noorden-, oosten-, westen-, en ZZO-wind van 6 m/s voor het ontwerp zonder strekdam en met de opslag van veen en meermolm in het noorden (groen in figuur 9.1) is dit systeem te vergelijken met minder dan één gen engd bekken. Dit betekent dat in dit geval ook kortsluitstromen zijn opgetreden en in een situatie met wind is dat een opvallend verschijnsel omdat de stroming een aantal keer langs het onttrekkingspunt stroomt voordat het onttrokken wordt en daarmee is dan al een menging van verblijftijden bereikt (appendix C). In figuur 8.4, verblijftijdsspreiding bij een noordenwind, is te zien dat in het oostelijk deel van het bekken het water ouder is (77.5 dagen) dan het water dat onttrokken wordt (71.5 dagen) en dit geeft weer dat het bekken daar minder wordt doorstroomd met water van het inlaatpunt naar het onttrekkingspunt om het water zover te verversen dat het een lagere gemiddelde verblijftijd heeft dan in het onttrekkingspunt. Dit betekent dat niet alle mogelijkheden tot afbraak en menging van het volume van het bekken benut worden.

 $\bigcirc$ Q  $\bigcirc$  $\bigcirc$ Ô  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\ominus$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\Theta$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$ Õ ⊜  $\bigcirc$  $\bigcirc$ 



 $\ominus$  $\bigcirc$  $\bigcirc$ 0  $\overline{\bigcirc}$  $\bigcirc$  $\bigcirc$ C  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  Bij een goed werkende plas zal bij een verandering van de windrichting eerst een verlaging van de kwaliteitsverbetering optreden, doordat de concentratie in andere delen van de plas groter is dan in het onttrekkingspunt. Maar daarna zal de waarde langzaam naar de volgende windsituatie toegaan doordat het water gaat mengen met water dat al in de plas aanwezig is. Door de menging van verblijftijden kunnen ook in deze situatie geen kortsluitstromen ontstaan.

#### **Eerste Waterleidingplas**

De Eerste Waterleidingplas geeft bij een windsnelheid van 6 m/s een mate van menging dat vergelijkbaar is met twee achter elkaar geschakelde bekkens (rood in figuur 9.1). Verder is in figuur 9.1 te zien dat de verdringing in de Eerste Waterleidingplas groter is dan in de ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas. Dit wordt verklaard door de tweemaal kleinere oppervlakte en de strekdam in de Eerste Waterleidingplas. Te zien is dat de windrichting bij de Eerste Waterleidingplas een veel grotere rol speelt dan bij de Tweede Waterleidingplas, dit komt door de grote lengte/breedte verhouding van de Eerste Waterleidingplas. Dit geeft aan dat de lengte waarover de wind vrij spel heeft op het wateroppervlak (strijklengte) een grote invloed heeft op de menging van verblijftijden.

#### Lengte van de strekdam

In figuur 9.1 is te zien dat voor elke situatie geldt dat hoe langer de strekdam is des te meer er sprake is van propstroming. Verder is te zien dat de resultaten van de korte en lange strekdam weinig verschillen. Een echt verdringingsgedrag is met een lange strekdam ook niet mogelijk (geel in figuur 9.1). De twee afzonderlijke bekkens die in de ideale situatie dan ontstaan zijn nog steeds goed gemengd door de invloed van de wind. De strekdam is ter voorkoming van kortsluitstromen noodzakelijk, maar de bijdrage tot verdringing is klein.

#### **Opslag veen en meermolm**

De ontwerpen met een lange strekdam met de opslag van veen en meermolm in het noorden en de strekdam met de opslag in het zuidoosten leveren een bijna gelijke mate van menging als de Eerste Waterleidingplas. Deze alternatieven voor de opslag van veen en meermolm hebben dan ook weinig invloed op de mate van menging. De opslag van veen en meermolm in het westen van de plas (paars in figuur 9.1) lijkt het meest op het ontwerp met de korte strekdam (blauw in figuur 9.1) en geeft een goede menging van verblijftijden in het bekken.

#### Risico's ten aanzien van dichtheidsverschillen

Deze zijn aanwezig als warmer water de plas ingelaten wordt dat lichter is dan het water in het bekken of kouder water dat zwaarder is. Het warme water zal bij een zwakke wind langs het wateroppervlak snel naar andere plaatsen in de plas verplaatst worden. Bij een inlaatpunt en onttrekkingspunt dat in een lijn ligt met de windrichting zal de stroming direkt van het inlaatpunt naar het onttrekkingspunt kunnen stromen en dan functioneert de Waterleidingplas niet naar behoren. Indien er kouder water de plas ingelaten wordt zal het water naar de bodem duiken. Bij een zwakke wind zullen de stromingen bij de bodem heel laag zijn dit wordt versterkt door het effect van de gelaagdheid. Bij een harde wind zullen de stroomsnelheden hoog zijn, maar dan zal de gelaagdheid opgeheven worden door de invloed van de wind.

Ijsvorming in de Waterleidingplas zal ervoor zorgen dat de aandrijvende kracht, de wind, wegvalt voor de periode dat het ijs aanwezig is. In plaats daarvan zal er een schuifspanning ontstaan aan de onderzijde van het ijs die voor afremming van de waterbeweging zorgt. De invloed van de wind zal na ongeveer 4 uur niet meer merkbaar zijn en dan zal het bekken op een verdringingsbekken gaan lijken dat vergelijkbaar is met een situatie waarin deze periode geen wind waait.

# 9.2 Aanbevelingen

#### Aanleg van een ontwerp met een korte strekdam

Het ontwerp zonder strekdam en met de opslag van veen en meermolm in het noorden (groen in figuur 9.1) voldoet niet aan de eisen die aan de Tweede Waterleidingplas gesteld worden, er ontstaan bij verschillende windsituaties kortsluitstromen. De andere ontwerpen voldoen goed, waarbij de opslag van veen en meermolm weinig invloed heeft, behalve bij het verplaatsen van het inlaatpunt naar het nocrden en de opslag van veen en meermolm in het westen waar de functie van de strekdam door deze opslag wordt overgenomen. Bij menging als hoofddoel zal een korte strekdam voldoende zijn en de risico's ten aanzien van kortsluitstromen zijn weggenomen.

Bij dichtheidsverschillen kan het onttrekkingspunt in diepte gevarieerd worden zodat het water met de juiste kwaliteitsparameters wordt ingenomen. Bij het inlaten van kouder water kan het onttrekkingspunt in de bovenste laag gebracht worden en bij het inlaten van warmer water kan er dieper onttrokken worden. Deze verschillen zullen alleen tijdelijk optreden bij een zwakke wind of windstilte. Als het weer harder gaat waaien worden de dichtheidsverschillen opgeheven. Het aanbrengen van een ondiepte tussen het inlaatpunt en het onttrekkingspunt is niet noodzakelijk omdat de diepte van het onttrekkingspunt variabel is.

#### Verder onderzoek

Verder onderzoek om de mate van menging te bekijken onder een variërend windveld is nuttig, omdat de schematisering van de modellering tot een niet-stationaire berekening het werkelijke gedrag van de plas beter kan benaderen. Hiermee kan ook inzicht worden verkregen in de kwaliteitsverbetering bij een variërend windveld.

Onderzoek naar dichtheidsverschillen kan gefundeerde uitspraken opleveren over het effect hiervan op het ontstaan van kortsluitstromen. Dit zal gepaard moeten gaan met een nietstationaire berekening omdat de dichtheidsverschillen een tijdelijk karakter hebben, dagelijkse stratificatie in de zomer. Door de geringe diepte, 6 à 7 m, en de grote invloed van de wind zal er geen seizoen-stratificatie in de plas op kunnen treden.

Het is zinvol om het computermodel te calibreren met behulp van snelheidsmetingen in een van de plassen. De berekende stroomsnelheden zijn gevoelig voor het veranderen van de horizontale turbulentieviscositeit, dit kan een factor twee voor de stroomsnelheden zijn en voor een betere afstemming op de windsnelheid is calibratie noodzakelijk.

Er is geen verder onderzoek nodig naar lokale ondieptes ter voorkoming van kortsluitstroming, omdat zoals in figuur 9.1 te zien is een verlenging van de strekdam relatief weinig effect heeft en dit is een extreme vorm van een ondiepte.



**`**20

# SYMBOLENLIJST

0

 $\exists$ 

0

) )

٢

Ð

D

Э

2

-

-

Þ

0

 $\rightarrow$ 

12

٢

127

\_

c: concentratiekg/m³ $c_b$ : concentratie in het bekkenkg/m³ $c_o$ : concentratie inlaatwaterkg/m³ $c_T$ : concentratie op tijdstip Tkg/m³C: Chézy coëfficiëntm <sup>15</sup> /sCd(U_{10}): schuifspanningsparameter-d: waterdieptemf: coriolis krachtrad/sg: zwaartekrachtsversnellingm/s²k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)l/sl_m: mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q <td: td="" volumestroom<="">m³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduursst_e: cumulatieve verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/s</td:>
c_b: concentratie in het bekkenkg/m³ $c_o$ : concentratie inlaatwaterkg/m³ $c_T$ : concentratie op tijdstip Tkg/m³C: Chézy coëfficientm' <sup>5</sup> /sCd(U_{10}): schuifspanningsparameter-d: waterdieptemf: coriolis krachtrad/sg: zwaartekrachtsversnellingm/s²k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)1/sl_m: mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/m²sp: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q <td: td="" volumestroom<="">m³/sR<td: een="" in="" kwaliteitsverbetering="" td="" verdringingsbekken<="">-R^n: Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduursst_c: cumulatieve verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su: stroomsnelheid op diepte <math>z_u</math>m/s</td:></td:>
$c_0$ : concentratie inlaatwaterkg/m³ $c_T$ : concentratie op tijdstip Tkg/m³ $C$ : Chézy coëfficiëntm <sup>14</sup> /s $Cd(U_{10})$ : schuifspanningsparameter-d: waterdieptemf: coriolis krachtrad/sg: zwaartekrachtsversnellingm/s²k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)l/sl_m: mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q <td: td="" volumestroom<="">m³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduursst_c: cumulatieve verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su: stroomsnelheid op diepte <math>z_u</math>m/s</td:>
$c_{T}$ : concentratie op tijdstip Tkg/m³ $C_{T}$ : concentratie op tijdstip Tkg/m³ $C$ : Chézy coëfficiëntm <sup>14</sup> /s $Cd(U_{10})$ : schuifspanningsparameter-d: waterdieptemf: coriolis krachtrad/sg: zwaartekrachtsversnellingm/s²k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)1/sl_m: mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduursst_c: cumulatieve verblijftijdsU: snelheid in de x-richtingm/su: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
C: Chézy coëfficiënt $m^{4/s}$ Cd(U10): schuifspanningsparameter-d: waterdieptemf: coriolis krachtrad/sg: zwaartekrachtsversnellingm/s²k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)l/sl_m: mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduursst_c: cumulatieve verblijftijdsU: snelheid in de x-richtingm/su: stroomsnelheid op diepte zum/s
$\begin{array}{cccc} Cd(U_{10}) & \text{ischuifspanningsparameter} & - & & & & \\ d & & \text{waterdiepte} & & m & & \\ f & & \text{coriolis kracht} & & rad/s & & \\ g & & zwaartekrachtsversnelling & & m/s^2 & & \\ k & & afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces) & & kg/m^3s & \\ k & & afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces) & & kg/m^3s & \\ k & & afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces) & & 1/s & \\ l_m & & mengweglente & m & & \\ n & & aantal bekkens & - & \\ p & & druk & & kg/ms^2 & \\ p & & cumulatieve verblijftijdsspreiding & - & \\ Q & & Volumestroom & m^3/s & \\ R & & Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken & - & \\ R' & & Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers & - & \\ t & & tijdsduur & s & \\ t_c & cumulatieve verblijftijd & s & \\ T & & Gemiddelde verblijftijd & s & \\ u & snelheid in de x-richting & m/s & \\ u_b & & stroomsnelheid op diepte z_u & & m/s & \\ \end{array}$
d : waterdiepte m f : coriolis kracht rad/s g : zwaartekrachtsversnelling m/s <sup>2</sup> k : afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces) kg/m <sup>3</sup> s k : afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces) 1/s l <sub>m</sub> : mengweglente m n : aantal bekkens - p : druk kg/ms <sup>2</sup> p : cumulatieve verblijftijdsspreiding - Q : Volumestroom m <sup>3</sup> /s R : Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken - R' : Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken - R' : Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers - t : tijdsduur s t <sub>c</sub> : cumulatieve verblijftijd s T : Gemiddelde verblijftijd s u : snelheid in de x-richting m/s u <sub>b</sub> : stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
f: coriolis krachtrad/sg: zwaartekrachtsversnelling $m/s^2$ k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces) $kg/m^3s$ k: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces) $1/s$ $l_m$ : mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
g: zwaartekrachtsversnelling $m/s^2$ k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces) $1/s$ $l_m$ : mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken-R_n: Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst_c: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su_b: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
k: afbraakcoëfficiënt (nulde-orde afbraakproces)kg/m³sk: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)1/slm: mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken-R_n: Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst_c: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su_b: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
k: afbraakcoëfficiënt (eerste-orde afbraakproces)1/s $l_m$ : mengweglentemn: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken-R_n: Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst_c: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su_b: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
n: aantal bekkens-p: drukkg/ms²p: cumulatieve verblijftijdsspreiding-Q: Volumestroomm³/sR: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken-R_n: Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst_c: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su_b: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
Q: Volumestroom $m^3/s$ R: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken-R_n: Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst_c: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su_b: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
R: Kwaliteitsverbetering in een verdringingsbekken-R': Kwaliteitsverbetering in een volledige gemengd bekken- $R_n$ : Kwaliteitsverbetering in n achter elkaar volledige mengers-t: tijdsduurst_c: cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/su_b: stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$
t: tijdsduurs $t_c$ : cumulatieve verblijftijdsT: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richtingm/s $u_b$ : stroomsnelheid op diepte $z_u$ m/s
$ \begin{array}{ccc} t_c & : \mbox{ cumulatieve verblijftijd} & s \\ T & : \mbox{ Gemiddelde verblijftijd} & s \\ u & : \mbox{ snelheid in de x-richting} & m/s \\ u_b & : \mbox{ stroomsnelheid op diepte } z_u & m/s \end{array} $
T: Gemiddelde verblijftijdsu: snelheid in de x-richting $m/s$ $u_b$ : stroomsnelheid op diepte $z_u$ $m/s$
u: snelheid in de x-richting $m/s$ $u_b$ : stroomsnelheid op diepte $z_u$ $m/s$
u <sub>b</sub> : stroomsnelheid op diepte z <sub>u</sub> m/s
$u_{\star}$ : schuifspanningssnelheid m/s
$\overline{U}$ : dieptegemiddelde snelheid m/s
$U_{10}$ : windsnelheid op 10 m hoogte m/s
v : snelheid in de y-richting m/s
V : Volume van het bekken m <sup>3</sup>
w : snelheid in de z-richting m/s
x : x-coördinaat m
y : y-coördinaat m
z : z-coördinaat m
z <sub>o</sub> : wandruwheidshoogte m
$\Delta z_b$ : laagdikte van de onderste laag m
$z_u$ : diepte bij stroomsnelheid $u_b$ m
$v$ : kinematische viscositeit $m^2/s$
$v_t$ : turbulentieviscositeit $m^2/s$
$v_h$ : horizontale turbulentieviscositeit $m^2/s$

vvv	: vertikale turbulentieviscositeit	m²/s
ζ	: niveau waterspiegel	m
η	: moleculaire viscositeit	kg/ms
κ	:Von Karman constante	-
ρ	: dichtheid van water	kg/m <sup>3</sup>
ρ	: dichtheid van lucht	kg/m <sup>3</sup>
σ	: sigma-transformatie	
τ	: schuifspanning	kg/ms <sup>2</sup>
$\tau_{b}$	: bodemschuifspanning	kg/ms <sup>2</sup>
τ <sub>s</sub>	: windschuifspanning	kg/ms <sup>2</sup>
φ	: breedtegraad	graden
Ω	: omwentelingssnelheid van de aarde	rad/s

•

•

## LIJST VAN FIGUREN

Fig. 1.1 Topografische ligging Eerste Waterleidingplas en Loenderveensche Plas

- Fig. 2.1 Cumulatieve verblijftijdsverdeling volledig verdringingsbekken (tekst deel)
- Fig. 2.2 Verblijftijden in een volledig gemengd bekken (tekst deel)
- Fig. 2.3 Verschillende spreiding van verblijftijden bij serie geschakelde mengbekkens (tekst deel)
- Fig. 2.4 Kwaliteitsverbetering bij een eerste-orde afbraakproces (tekst deel)
- Fig. 4.1 Benadering van een gekromde rand (tekst deel)
- Fig. 4.2 Sigma-transformatie van de bodemligging (tekst deel)
- Fig. 5.1 Controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas (tekst deel)
- Fig. 5.2 Afstand waarover een golf zich voort kan planten (tekst deel)
- Fig. 5.3 De drie verschillende schematisaties van de diepte (tekst deel)
- Fig. 5.4 De dieptegemiddelde snelheid in de stations bij een variërende turbulentieviscositeit, E in  $m^2/s$  (tekst deel)
- Fig. 5.5 Verandering van de dieptegemiddelde snelheid door verandering van de windsnelheid (tekst deel)
- Fig. 5.6 Veranderen van de bodemwrijving en de invloed op de dieptegemiddelde stroming (tekst deel)
- Fig. 5.7 Rechthoekig rooster-50 m, controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas
- Fig. 5.8 Rechthoekig rooster-25 m, controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas
- Fig. 5.9 Snelheidsverloop rooster-50 m en 25 m bij verschillende tijdstappen
- Fig. 5.10 Rooster-50 m en 25 m, snelheidsvectoren bij ZZW-wind van 15 m/s
- Fig. 5.11 Turbulentieviscositeit van 1 m<sup>2</sup>/s en 3 m<sup>2</sup>/s, zuidenwind
- Fig. 5.12 Turbulentieviscositeit van 1 m<sup>2</sup>/s en 3 m<sup>2</sup>/s, westenwind
- Fig. 5.13 Isolijnen bij turbulentieviscositeit van 1 m²/s en 3 m²/s, zuidenwind
- Fig. 5.14 Isolijnen bij turbulentieviscositeit van 1 m<sup>2</sup>/s en 3 m<sup>2</sup>/s, westenwind
- Fig. 5.15 Bodemschuifspanning  $z_0 = 1$  mm en  $z_0 = 15$  mm, zuidenwind
- Fig. 5.16 Windsnelheid is 4 m/s en 15 m/s, zuidenwind
- Fig. 5.17 Snelheidsvectoren, bodemwrijving  $z_0 = 3$  mm en C=55 m<sup>1/2</sup>/s bij ZZW-wind 6 m/s
- Fig. 5.18 Isolijnen, bodemwrijving  $z_0 = 3$  mm en C=55 m<sup>1/2</sup>/s bij ZZW-wind 6 m/s
- Fig. 5.19 Gevoeligheid vertikale snelheidsverdeling ten aanzien van windsnelheid en bodemwrijving
- Fig. 5.20 Rechthoekig en kromlijnig rooster, noordenwind
- Fig. 5.21 Rechthoekig en kromlijnig rooster, ZZW-wind

Fig. 6.1 Modellering lange bak met zes 'controlestations' (tekst deel) Fig. 6.2 Berekenen van de verblijftijd (tekst deel) Fig. 6.3 Eerste-orde afbraakproces en concentratieberekening (tekst deel) Fig. 6.4 Niet-stationaire berekening en het effect op de stroomsnelheden Fig. 6.5 Bodemprofiel Eerste Waterleidingplas, kromlijnig rooster Fig. 6.6 Snelheidsvectoren en plaats dwarsdoorsnede, bovenste laag (3%) Fig. 6.7 Oosten- en zuidenwind, dwarsdoorsnede Fig. 6.8 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming Fig. 6.9 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming Fig. 6.10 Lange bak, verblijftijdsspreiding en snelheden Fig. 6.11 Geen wind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.12 Noordenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.13 Oostenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.14 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.15 Westenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.16 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.17 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding Fig. 6.18 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding Fig. 7.1 Principe van de invloed van de strekdam (tekst deel) Fig. 7.2 Bovenaanzichten Eerste Waterleidingplas en ontwerpen Tweede Waterleidingplas Fig. 7.3 Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden Fig. 7.4 Korte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden Fig. 7.5 Lange strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden Fig. 7.6 Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het westen Fig. 7.7 Strekdam, opslag veen en meermolm in het zuidoosten Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden Fig. 8.1 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming Fig. 8.2 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming Fig. 8.3 Geen wind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.4 Noordenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.5 Oostenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.6 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.7 Westenwind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.8 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.9 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding Fig. 8.10 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Korte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

- Fig. 8.11 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.12 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.13 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.14 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.15 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.16 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.17 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.18 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.19 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.20 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

## Lange strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

- Fig. 8.21 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.22 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.23 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.24 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.25 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.26 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.27 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.28 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.29 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.30 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het westen

- Fig. 8.31 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.32 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.33 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.34 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.35 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.36 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.37 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.38 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.39 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.40 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Strekdam, opslag veen en meermolm in het zuidoosten

- Fig. 8.41 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.42 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.43 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.44 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.45 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.46 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.47 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.48 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.49 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.50 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding
- Fig. 9.1 Mate van menging (tekst deel)
- Fig. 9.2 Bodemprofiel met onderwaterdam
- Fig. 9.3 Onderwaterdam, geen wind verblijftijdsspreiding
- Fig. C. I Concept van de verlaging van de concentratie bij het toevoegen van een concentratie  $c_o$  (tekst deel)
- Fig. C.2 Verblijftijd afhankelijk van aandeel circulerende stroming (tekst deel)
- Fig. C.3 Cumulatieve verblijftijdsverdeling bij het concept (tekst deel)
- Fig. F.1 West-circulaties in Europa (tekst deel)
- Fig. F.2 Invloed van de stabiliteit op de windsnelheden (tekst deel)

## LITERATUURLIJST

Abbott, M.B., D.R. Basco, Computational Fluid Dynamics An Introduction for Engineers, Longman Scientific & Technical, UK, 1989

Abbott, M.B., W.A. Price, COASTAL, ESTUARIAL and HARBOUR ENGINEERS' reference book, E & FN Spon, Londen, 1994

Almering, Dr. J.H.J., e.a., ANALYSE, Delftse Uitgevers Maatschappij b.v., Delft, 1974

Boogaard, H.F.P. van den, Kalibratie van de Cd-koefficient in het CSM-16 model, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1993

Booij, R., Turbulentie in de waterloopkunde, dictaat b82 Tu Delft, 1992

Delvigne, G.A.L., Wind effect on the distrubition of velocity and temperature in stratified enclosed systems, waterloopkundig laboratorium delft, 1987

Dunsbergen, D.W., Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, proefschrift Tu Delft, 1994

Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Beleidsplan "Drinkwater voor nu en later", 1989

Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Ontgronding Loenderveenseplas Oost startnotitie MER, 1994

Golub, G.H., C.F. van Loan, Matrix Computations, The Johns Hopkins University Press, 1989

Graveland, Dr. ir. A.G., Oppervlaktewaterwinnig zonder voorraadvorming, H<sub>2</sub>O, 1985, nr. 13, blz. 280-285 en blz. 292

Hicks, B.B., 1972. Some evaluations of drag and bulk transfer coefficients over water bodies of different sizes, Boundary-Layer Meteorology, 1972, Vol. 3, blz. 201-213

Huisman, Prof. ir. L., ir. Th. G. Martijn, *Kwaliteitsverbetering in doorstroombekkens*,  $H_2O$ , 1986, nr. 3 en 4, respectievelijk blz. 64-71 en 86-93

Hutter, K., Hydrodynamics of lakes, Springer, Wien, 1984

Klein, ir. J.D., Inventarisatie Mengingsprincipes Spaarbekken Jannezand, Witteveen en Bos, 1995

Koppers, ir. H.M.M., ing. J.M. Faber, Deelnota Drinkwaterproduktie Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Witteveen en Bos, 1995

Madsen, P.A., M. Rugbjerg, I.R. Warren, Subgrid Modelling in Depth Integrated Flows, Proceedings of the Twenty-first Coastal Engeneering Conference, Malaga, 1988, blz. 505-511

Provincie Utrecht, Waterhuishoudingsplan provincie Utrecht, 1992

Raghunath, R., S. Sengupta, *Effects of Coastal Topografy on Lake Flows*, Measurement and Modelling of Environmental Flows, ASME 1992, blz. 185-199

Rijn, L. C. van, *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans,* Aqua Publications, Amsterdam, 1990

Rodi, W., Turbulence Models and their Application in Hydraulics, IAHR, Delft, 1980

Seabergh, W.C., S.R. Vemulakonda, *Effects of wind on circulation in Los Angeles-long Beach Harbors*, Estuarine and coastal modeling, American Society of Civil Engineers, New York, 1992

Thomann, R.V., J.A. Mueller, Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper Collins Publishers Inc., New York, 1987

Tsanis, I.K., J. Wu, *LMS-an integrated lake modelling system*, Environmental Software, 1994, Vol 9, nr 2, blz. 103-113

Trisula handleiding, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions, Delft, 1994

Versteegh, J., The Numerical Simulation of THREE-DIMENSIONAL FLOW through or around Hydraulic Structures, proefschrift Tu Delft, 1990

Vreugdenhill, C.B., Numerical Methods For Shallow-Water Flow, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht, 1994

Warren, I.R., H.K. Bach, MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas, Environmental Software, 1993, Vol 7, blz. 229-238

Wieringa, J., P.J. Rijkoort, Windklimaat van Nederland, KNMI de Bilt, 1983

Wu, J., Wind Stress and Surface Roughness at Air-Sea Interface, Journal of Geophysical Research, 1969, Vol. 74, nr. 2, blz. 444-455

Jin, X., Quasi-Three-Dimensional Numerical Modelling of Flow and Dispersion in Shallow Water, proefschrift Tu Delft, 1993

# Appendix A

Versneld rekenen naar een stationaire toestand voor de concentratieverdeling



#### APPENDIX A

#### Versneld rekenen naar een stationaire toestand voor de concentratieverdeling

Om de rekentijd van een simulatie sterk te verminderen zijn de volgende aanpassingen gedaan:

- Stopzetten van de berekening van de waterbeweging, daarna alleen oplossen van de transportvergelijking met behulp van de waterbeweging die stil is gezet.
- Snel toewerken naar een stationaire toestand in de transportvergelijking door in elke computercel de maximaal mogelijke tijdstap toe te passen.
- Aanpassen van het model, minder lagen en een grotere tijdstap

Na het stopzetten van de waterbeweging zijn de snelheden u, v en w bekend en deze snelheden worden gebruikt om de transportvergelijking ten opzichte van het vaste assenstelsel x, y en z op te lossen, dit is vergelijking A.1:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = -kc \qquad (A.1)$$

In de stationaire situatie geldt dat de afgeleide naar de tijd nul is. Het is van belang dat de waterbeweging stationair is bij het stopzetten, want anders is de stroming niet representatief voor het opgelegde windveld maar nog belangrijker is dat het systeem dan misschien niet massabehoudend is. Indien de waterbeweging niet massabehoudend is wordt er een fout gemaakt in de berekening van de concentratie. Dit is te zien door de massabalans op te stellen voor de concentratieverandering in een volume V.

$$\frac{\partial Hc}{\partial t} + \frac{\partial uHc}{\partial x} + \frac{\partial vHc}{\partial y} + \frac{\partial wHc}{\partial z} = -kcH \qquad (A.2)$$

H = waterdiepte(m)

Opsplitsen van de differentiaal vergelijking levert de volgende vergelijking op:

$$H\left(\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} + w\frac{\partial c}{\partial z}\right) + c\left(\frac{\partial H}{\partial t} + u\frac{\partial H}{\partial x} + v\frac{\partial H}{\partial y} + w\frac{\partial H}{\partial z}\right) = -kcH \qquad (A.3)$$

Daarna delen door V levert de volgende vergelijking op:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{c}{H} \left( \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + w \frac{\partial H}{\partial z} \right) = -kc \qquad (A.4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + w \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \qquad (A.5)$$

dan is het systeem massabehoudend. Indien deze term niet nul is wordt er een fout gemaakt in de berekening van de concentratie. Het is dus van belang om er zeker van te zijn dat het systeem massabehoudend oftewel volledig stationair is voordat de waterbeweging wordt stopgezet. Anders wordt er een fout gemaakt in de orde van grootte van één gedeeld door het volume V.

Voor elke computercel wordt de maximale tijdstap toegepast die bij de gegeven u, v en wsnelheid mogelijk is. Hierdoor kan de stationaire toestand voor de verdeling van de concentratie in de plas sneller bereikt worden en dit betekent een verkorting van de simulatieperiode en dan ook van de berekeningstijd. De gediscretiseerde transportvergelijking is hieronder weergegeven. Er is gekozen voor een eerste-orde upwind discretisatie om de rekensnelheid zo hoog mogelijk te houden.

$$\frac{c_{m,n,k}^{n+1} - c_{m,n,k}^{n}}{\Delta t(m,n,k)} + \frac{u(c_{m,n,k}^{n+1} - c_{m-L(u),n,k}^{n})}{\Delta x} + \frac{v(c_{m,n,k}^{n+1} - c_{m,n-L(v),k}^{n})}{\Delta y} + \frac{w(c_{m,n,k}^{n+1} - c_{m,n,k-L(w)}^{n})}{\Delta z} + kc_{m,n,k}^{n+1} = 0$$
 (A.6)  

$$L(u) = 1 \text{ voor } u > 0$$

$$L(u) = -1 \text{ voor } u < 0$$

In de berekening is de tijdstap t afhankelijk van de rekencel (m,n,k), er wordt voor elke rekencel de maximale waarde gekozen die mogelijk is voor de transport van stoffen. Dit gebeurt op basis van het Courantgetal voor de verplaatsing van de concentratie in die rekencel. De tijdstap t wordt hier gebruikt als een relaxatie parameter voor de Gauss-Seidel iteratie van de matrix met de vergelijkingen voor het stoftransport (H.Golub 1989).

Door het stopzetten van de waterbeweging en het sneller berekenen van de evenwichtssituatie is de grootste verkorting van de rekentijd bereikt. Ook zijn het aantal lagen in het model van 20 lagen eerst teruggebracht naar 5 lagen voor de berekening van de concentratieverdeling. De dieptegemiddelde stroming verandert niet door het verminderen van het aantal lagen. Ook de tijdstap is vergroot van 0.5 min naar 2.5 min en er is gebruik gemaakt van een snellere versie van TRISULA. Door deze ingrepen in het model en de programmatuur is het mogelijk de berekeningstijd van twee maanden terug te brengen naar ongeveer 4 uur. Het is nu alleen nog mogelijk de stationaire situatie te berekenen.

# Appendix B

Aanpassen bodemfile voor TRISULA en berekenen van volume



#### APPENDIX B

#### Aanmaken bodemfile voor Trisula en berekenen van volume

Met het computerprogramma MATLAB is een programma geschreven om een bodemprofiel op te stellen voor de toekomstige Tweede Waterleidingplas. Dit bodemprofiel is nodig in een file om als invoer te dienen voor de bodemligging in TRISULA. Voor het bepalen van de bodemligging is het totale volume van de plas van belang. Het volume is een ontwerpeis van het bodemprofiel in verband met de 100 dagen gemiddelde verblijftijd van het water in de plas. Bij het opstellen van de bodemfile is het volume van 8.2 miljoen m<sup>3</sup> aangehouden.

Het genereren van de bodemfile wordt gedaan door het aanpassen van de dieptematrix, waarbij in het begin de diepte overal nul is. Het 'uitdiepen' van de dieptematrix kan op één roosterpunt gebeuren maar het is ook mogelijk in een groter gebied in één keer de diepte aan te passen.

Bij het aanpassen van de diepte volstaat het een nieuwe diepte op te geven en met de muis het te veranderen roosterpunt te selecteren.

Bij het aanpassen van een heel gebied moet er eerst een invloedsstraal, als in figuur B.1, opgegeven worden en een nieuwe diepte. Met deze invloedsstraal bepaal je de grootte van het te veranderen gebied. Daarna kan met de muis een middelpunt geselecteerd worden. De oude diepte in het middelpunt wordt van de nieuwe diepte afgetrokken en deze diepteverandering wordt vermenigvuldigd met het invloedsgebied. Het invloedsgebied is een matrix met de Weibull-verdeling waarbij de waarde x de afstand tot het middelpunt is:

$$f(x) = 1 - e^{-x^{c}}$$
 (B.1)

x = straal tot middelpunt

c = constante, aangenomen is 3

In onderstaande figuur is deze verdeling in het twee-dimensionale vlak uitgezet met een waarde voor c van drie en een straal van 300.



Figuur B.1. Weibull-verdeling, c=3 en x=300

De waarde c=3 geeft een glooiend verloop van de bodem tussen de waarde één bij een straal nul en bijna nul bij een straal die twee keer de opgegeven straal tot het middelpunt is. Met deze methode is op een snelle manier en ook met realistische veranderingen het bodemprofiel aan te passen. Bij het aanpassen van de bodemfile wordt geen rekening gehouden met de bodemhelling. Bij het aanpassen van de bodem moeten de diepteveranderingen dan ook eerst globaal gebeuren en daarna gedetailleerder, opdat de diepteveranderingen geen onrealistische dieptewaarden voor de bodemfile gaat genereren. Daarna is het nog mogelijk om plaatselijk de bodem aan te passen door in een punt de diepte te veranderen.

De berekening van het volume van de plas is een benadering van het werkelijke volume. De bepaling van de oppervlakte van het kromlijnig rooster wordt benaderd door de oppervlaktes van de twee driehoeken ACD en BCD bij elkaar op te tellen.



Figuur B.2. Berekening van de oppervlakte

Het hierboven getekende rooster is extreem kromlijnig en daar gaat de berekening van de oppervlakte niet helemaal op. De roosters die voor de waterleidingplassen zijn opgesteld hebben minder kromming en daar zal de berekende oppervlakte dicht in de buurt komen van de werkelijke oppervlakte. Het watervolume wordt bepaald door de drie dieptes van de driehoek te middelen, te vermenigvuldigen met de oppervlakte van deze driehoek en deze over de plas te sommeren. De listings van het opstellen van het bodemprofiel en de berekening van het volume zijn hierna gegeven.
# %Aanpassen van de dieptematrix in een punt voor het opstellen van een %bodemprofiel voor de toekomstige Tweede Waterleidingplas

%Gemaakt en aangepast door D.R.Hoornstra november 1995 (idpunt.m)

 $\rightarrow$ 

-

-

-

1

3

3

۲

19

3

%Waarden die al beken	d en bepaald zijn in eer	n ander deel van het progra	amma
%	xmatrix, matrix me	et de x-waarden in het rijks	sdriehoeksnet
%	ymatrix, matrix me	et de y-waarden in het rijks	sdriehoeksnet
%	dipmatrix,	matrix met de z-waarden t.	.o.v. de waterspiegel
%		deze matrix wordt aangepa	ast in dit programma
%	ndiepte, dit is de d	liepte die op het middelpur	nt gewenst is
%opstellen van de matri invlmatrix=zeros(n,m);	x voor de beinvloeding	g van een punt	
%Bepalen door het selec [xpunt,ypunt]=ginput(1)	steren met de muis het	middelpunt van de dieptev	verandering
%Bepalen van de matrix for p=1 : m;	die voor elk punt de a	fstand tot het middelpunt b	perekent
for $i=1$ :n;			
afstand=((xmat invlmatrix(i,p)=	rix(i,p)-xpunt)^2+(yma =afstand;	atrix(i,p)-ypunt)^2)^0.5;	%berekenen afstand tot middelpunt%
end			
end			
%Bepalen van de minim	ale invloed, dit om te b	epalen welk roosterpunt h	et dichstbij
%het door de muis gesel	ecteerde punt ligt.		
%Het aanpassen van dit	ene punt in de dieptem	atrix (dipmatrix)	
mininvloed=1000;			
for $p=1:m$ ;			
for $i=1$ :n;			
if invlmatrix(i,p) <=	mininvloed		
matmi	nkolom=p;		
matmi	.nrij=i;		
minin	vloed=invlmatrix(i,p);		
end			
end			
end			
dipmatrix(matminrij,mat	minkolom)=ndiepte;		
dipmatrix(find(dipmatrix	<0))=zeros(size(find(d)	lipmatrix<0)));	

```
%Aanpassen van de dieptematrix met een invloedsgebied voor het opstellen van een
%bodemprofiel voor de toekomstige Tweede Waterleidingplas
%Gemaakt en aangepast door D.R.Hoornstra november 1995 (idbodem.m)
%Waarden die al bekend en bepaald zijn in een ander deel van het programma
%
                          xmatrix, matrix met de x-waarden in het rijksdriehoeksnet
%
                          ymatrix, matrix met de y-waarden in het rijksdriehoeksnet
%
                          dipmatrix,
                                           matrix met de z-waarden t.o.v. de waterspiegel
%
                                           deze matrix wordt aangepast in dit programma
%
                          nieuwestraal, dit is de straal die aangeeft hoe ver de invloed in de
%
                                           Weibull-verdeling werkt
%
                          ndiepte, dit is de diepte die op het middelpunt gewenst is
%opstellen van de matrix voor de beinvloeding van een punt
invlmatrix=zeros(n,m);
%Bepalen door het selecteren met de muis het middelpunt van de diepteverandering
[xpunt,ypunt]=ginput(1);
%Bepalen van de matrix die voor elk punt de afstand tot het middelpunt berekent
%en aan deze straal een waarde volgens de Weibull-verdeling tussen nul en 1 toekent
for p=1:m;
  for i=1 :n;
         afstand=((xmatrix(i,p)-xpunt)^2+(ymatrix(i,p)-ypunt)^2)^0.5; %berekenen afstand tot middelpunt%
        invlmatrix(i,p)=afstand;
  end
end
deling=invlmatrix./nieuwestraal;
machtver=deling.^3;
exponent=exp(-machtver);
%Bepalen van de minimale invloed, dit om te bepalen welk roosterpunt het dichstbij
%het door de muis geselecteerde punt ligt.
mininvloed=1000;
for p=1 : m;
  for i=1 :n;
    if invlmatrix(i,p) <= mininvloed
                 matminkolom=p;
                 matminrij=i;
                 mininvloed=invlmatrix(i,p);
        end
  end
end
%Bepalen van de diepteverandering en daarna aanpassen van de dieptematrix (dipmatrix)
oudediepte=dipmatrix(matminrij,matminkolom);
dieptever=ndiepte-oudediepte;
dipmatrix=dipmatrix+exponent.*dieptever;
dipmatrix(find(dipmatrix<0))=zeros(size(find(dipmatrix<0)));
```

h

# %Berekenen van het volume van de plas op een kromlijnig rooster

%Gemaakt en aangepast door D.R.Hoornstra november 1995 (volperd.m)

%Het nul steller	i van de totale	inhoud er	1 oppervlakte
totinhoud=0;			
totopp=0:			

%De waarden die al bekend zijn in een ander deel van het programma:

%	xmatrix, matrix met de x-waarden in het rijksdriehoeksnet
%	ymatrix, matrix met de y-waarden in het rijksdriehoeksnet
%	dipmatrix, matrix met de z-waarden t.o.v. de waterspiegel
%	debiet, getal dat het debiet van ingelaten en onttrokken
%	water aangeeft.

```
opa=[]; %oppervlakte driehoek ACD
opb=[]; %oppervlakte driehoek BCD
nuleneen=ones(size(xnan));
nuleneen(find(xnan~=1))=zeros(size(find(xnan~=1)));
```

%m is het totaal aantal kolommen, p is het kolomnummer %n is het totaal aantal rijen, i is het rijnummer %Berekenen van de inhoud van elke computercel

for p=1:m-1

```
for i=1:n-1
```

```
%berekenen van oppervlakte van driehoek in computercel
vectorxac=xmatrix(i+1,p)-xmatrix(i,p);
vectoryac=ymatrix(i+1,p)-ymatrix(i,p);
vectorxad=xmatrix(i,p+1)-xmatrix(i,p);
vectoryad=ymatrix(i,p+1)-ymatrix(i,p);
detmatrixa=[vectorxac vectorxad; vectoryac vectoryad];
deta=det(detmatrixa);
oppa=abs(0.5*deta);
        %berekenen van oppervlakte van andere driehoek in computercel
vectorxbc=xmatrix(i+1,p)-xmatrix(i+1,p+1);
vectorybc=ymatrix(i+1,p)-ymatrix(i+1,p+1);
vectorxbd=xmatrix(i,p+1)-xmatrix(i+1,p+1);
vectorybd=ymatrix(i,p+1)-ymatrix(i+1,p+1);
detmatrixb=[vectorxbc vectorxbd; vectorybc vectorybd];
detb=det(detmatrixb);
oppb=abs(0.5*detb);
        %berekenen gemiddelde diepte en vermenigvuldigen
        %met de oppervlakte van de twee driehoeken
gemdiepteA=(dipmatrix(i,p)+dipmatrix(i,p+1)+dipmatrix(i+1,p))/3;
gemdiepteB=(dipmatrix(i+1,p+1)+dipmatrix(i+1,p)+dipmatrix(i,p+1))/3;
inhoud=gemdiepteA*oppa+gemdiepteB*oppb;
        %optellen van inhoud computercel bij de totale inhoud
if inhoud > 200000 % in dat geval liggen de punten op de coordinaat (0,0) en doen niet mee
totinhoud=totinhoud;
totopp=totopp;
else
totinhoud=totinhoud+inhoud;
%totopp=totopp+nuleneen(i,p)*oppa+nuleneen(i+1,p+1)*oppb;
opa=[opa oppa];
opb=[opb oppb];
end
```

end

end

totinhoud

opa(find(opa>=20000))=zeros(find(opa>=20000));

%als de oppervlakte groter is dan 20000 m<sup>2</sup> dan is %het punt (0,0) meegenom en die oppervlaktes worden

%eruit gefilterd. opb(find(opb>=20000))=zeros(find(opb>=20000)); totopp=sum(opa)+sum(opb) gemtijd=totinhoud/debiet; gemtijd=gemtijd/(60\*60\*24)

# Appendix C

Menging door inlaten in circulerende stroming



### APPENDIX C

### Menging door inlaten in circulerende stroming

De veronderstelling is dat er bij het inlaatpunt een menging tussen oud en nieuw water plaatsvindt waardoor de daar berekende verblijftijd een gemiddelde waarde is voor het water wat zich daar bevindt. Analytisch wordt bekeken wat het effect is van het inlaten van water in een circulerende stroming op de concentratie en op de verblijftijdsberekening. Het volgende concept is daarop van toepassing.



Figuur C.1. Concept van de verlaging van de concentratie bij het toevoegen van een concentratie  $c_0$ 

Bij het inlaten van het water is de verblijftijd nul, maar dit water wordt direkt gemengd met water dat zich al een tijd T1 in de plas bevindt. Bij de simulatie met toevoeging van een afbreekbare stof is dan ook te zien dat rond het inlaatpunt de concentratie direkt relatief laag is door het bij elkaar voegen van twee verschillende concentraties. Vertaald naar verblijftijden betekent dit dat het water dat de plas instroomt een verblijftijd krijgt die ook afhankelijk is van de tijd T1.

Om greep te krijgen op dit fenomeen, is het proces dat zich volgens dit concept in de plas afspeelt hieronder beschreven. Zoals uit figuur C.1 is af te lezen, geldt voor de continuïteitsvergelijking:

$$q_{o}c_{o}+q_{1}c_{1}=(q_{o}+q_{1})c_{2} \qquad (C.1)$$

 $c_o = concentratie van inlaatwater [kg/m<sup>3</sup>]$ 

 $c_1 = concentratie van water na tijd T1 [kg/m<sup>3</sup>]$ 

 $c_2 = concentratie van gemengde inlaatwater [kg/m<sup>3</sup>]$ 

 $q_o = instroming bij de inlaat [m<sup>3</sup>/s]$  $q_1 = debiet door bekken 1 [m<sup>3</sup>/s]$ 

De afbraak die plaats vindt in de twee trajecten is te schrijven als een eerste-orde afbraakproces. Daarom geldt er:

$$c_1 = c_2 e^{-kT_1}$$
 (C.2a)

$$c_{3} = c_{2}e^{-kT_{2}}$$
 (C.2b)

 $c_3 = \text{concentratie van onttrokken water [kg/m<sup>3</sup>]}$   $T_1 = \text{verblijftijd in bekken 1 [s]}$  $T_2 = \text{verblijftijd in bekken 2 [s]}$ 

Dit impliceert een simulatie waarbij de diffusie in horizontale en verticale richting op nul is gesteld. Omschrijven van de drie vergelijkingen en invullen van C.1, C.2a en C.2b levert voor de concentratie  $c_3$ :

$$c_{3} = \frac{c_{o}}{1 + \frac{q_{1}}{q_{o}} - \frac{q_{1}}{q_{o}}e^{-kT_{1}}} *e^{-kT_{2}}$$
(C.3)

Er is in het model uitgegaan van een eerste-orde afbraakproces, dit betekent dat de verblijftijd beschreven kan worden met de volgende betrekking:

$$c_3 = c_o e^{-kT_s} \qquad (C.4)$$

 $T_s =$ schijnbare verblijftijd [s]

De schijnbare verblijftijd is de verblijftijd die volgt uit de berekening van de verblijftijd uit de concentratie van de afbreekbare stof in deze formulering en is schijnbaar omdat later blijkt dat deze tijd niet gelijk is aan de totale verblijftijd,  $T_1+T_2$ .

Invullen van C.4 in vergelijking C.3 levert dan op:

$$c_{o}e^{-kT_{s}} = \frac{c_{o}}{1 + \frac{q_{1}}{q_{o}} - \frac{q_{1}}{q_{o}}} *e^{-kT_{2}}$$
(C.5)

Herschrijven en delen door co van deze vergelijking levert:

$$T_{s} = T_{2} + \frac{1}{k} \ln(1 + \frac{q_{1}}{q_{o}} - \frac{q_{1}}{q_{o}}e^{-kT_{1}})$$
(C.6)

Verder is er ook een verband tussen  $q_1$  en  $T_1$  en  $q_2$  en  $T_2$  en het volume in de plas. Het totale

volume in de plas is gelijk aan  $V_1 + V_2$  en blijft altijd constant.  $V_1$  en  $V_2$  zijn te schrijven als:

$V_1 = q_1 T_1$	(C.7a)	
$V_2 = q_0 T_2$	(C.7b)	

 $V_1 =$  volume bekken 1 [m<sup>3</sup>]  $V_2 =$  volume bekken 2 [m<sup>3</sup>]

Vergelijking C.7a en C.7b invullen in vergelijking C.6 levert op:

ł

$$T_{s} = T_{2} - \frac{1}{k} \ln(1 + \frac{V_{1}}{T_{1}} \frac{T_{2}}{V_{2}} - \frac{V_{1}}{T_{1}} \frac{T_{2}}{V_{2}} e^{-kT_{1}})$$
(C.8)

Uit deze formulering blijkt dat de verblijftijden die in de simulaties gevonden worden afhankelijk van k zijn en ook afhankelijk van de grootte van  $V_1$  ten opzichte van  $V_2$ . In bekken 2 speelt de circulerende stroming geen rol en daar zal de afbraak gelijk zijn aan een volledig verdringingsbekken, eerste term rechterlid. De tweede term in het rechterlid wordt veroorzaakt door bekken 1, indien de verblijftijd T1 gelijk is aan nul wordt deze term ook nul. In onderstaande grafiek is de schijnbare verblijftijd uitgezet tegen de afbraak 1/k, hoe groter de waarde 1/k hoe langzamer de stof afbreekt. Ook is er gevarieerd met de grootte van de volumes  $V_1$  en  $V_2$ . Het totale volume van de plas is constant gehouden en  $q_o$  ook. Deze twee waarden zijn zo gekozen dat de gemiddelde verblijftijd 100 dagen is.



Figuur C.1. Verblijftijd afhankelijk van aandeel circulerende stroming

Naarmate de "schijnbare verblijftijd" lager is heeft er minder afbraak in de twee bekkens samen plaatsgevonden. Er treedt kortsluiting op, een deel van het water stroomt direkt langs het inlaatpunt en dat gebeurt hier in feite ook. Hoe meer dat het geval is, dus hoe kleiner V2, hoe korter de "schijnbare verblijftijd" (zie figuur C.1).

De verandering van de totale afbraak van de stof is te verklaren door het feit dat de theorie voor een volledig verdringingsbekken voor dit effect niet opgaat. Doordat er een stroming langs het inlaatpunt is zal er een spreiding in de verblijftijden optreden. Door deze spreiding wordt de totale afbraak van stof in het bekken kleiner en de daar aan gekoppelde schijnbare verblijftijd zal daardoor ook kleiner worden. Het optreden van deze spreiding kan het duidelijkst weergegeven worden door de verblijftijdsspreiding bij verschillende waarden van  $V_1$  en  $V_2$  uit te zetten in een grafiek.



Figuur C.2. Cumulatieve verblijftijdsverdeling bij het concept

Hoe groter  $V_1$  wordt ten opzichte van  $V_2$  hoe meer het bekken zich gaat gedragen als een volledig gemengd systeem en daarmee zal de afwijking van de schijnbare verblijftijd ten opzichte van de werkelijke verblijftijd ook groter worden.

Indien  $V_1 \gg V_2$  is er sprake van nagenoeg volledige menging. Het water gaat vele malen in de plas rond alvorens het wordt afgevoerd. Dit correspondeert met de plas die sterk door wind in beweging wordt gehouden.



# Appendix D

Mate van menging in de Eerste Waterleidingplas en de ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas



## APPENDIX D

## Mate van menging in de Eerste Waterleidingplas en de ontwerpen voor de Tweede Waterleidingplas

De berekening van de mate van menging gebeurt door de kwaliteitsverbetering in het bekken te vergelijken met n achter elkaar geschakelde bekkens met dezelfde gesommeerde gemiddelde verblijftijd, hierbij is uitgegaan van de gemiddelde verblijftijd berekent bij een afbraak k=1/10000. Deze waarde wordt meer reprensatief voor het volume van het bekken veronderstelt dan de berekening met MATLAB. In de berekening met MATLAB is een aanname gedaan voor de kromlijnigheid van het rooster.

In onderstaande tabellen zijn de resultaten weergegeven van de berekening van de concentratie in het onttrekkingspunt en is de vergelijking gemaakt met achter elkaar geschakelde bekkens, in figuur 9.1 is dit in tabelvorm uitgezet.

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)		89.0	
geen wind	0.0001	86.3	∞ (aangenomen)
geen wind	0.01	82.8	9.93
noordenwind 6 m/s	0.01	67.0	1.38
oostenwind 6 m/s	0.01	71.7	1.99
zuidenwind 6 m/s	0.01	66.8	1.36
westenwind 6 m/s	0.01	72.6	2.16
ZZO-wind 6 m/s	0.01	70.7	1.82
ZZW-wind 6 m/s	0.01	68.3	1.53
ZZO-wind 15 m/s	0.01	65.6	1.25
Volledige menging (berekend)	0.01	62.2	1 (volgt uit aanname)

Tabel D.1 Eerste Waterleidingplas, mate van menging

	<u> </u>	-F	
Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)		107.1	
geen wind	0.0001	107.4	∞ (aangenomen)
geen wind	0.01	94.3	3.7
noordenwind 6 m/s	0.01	71.5	0.93
oostenwind 6 m/s	0.01	71.7	0.94
zuidenwind 6 m/s	0.01	73.9	1.05
westenwind 6 m/s	0.01	72.8	0.99
ZZO-wind 6 m/s	0.01	72.3	0.97
ZZW-wind 6 m/s	0.01	74.3	1.07
ZZO-wind 15 m/s	0.01	73.5	1.03
Volledige menging (berekend)	0.01	72.9	1 (volgt uit aanname)

Tabel D.2 Tweede Waterleidingplas, geen strekdam opslag veen en meermolm in het noorden

Tabel D.3 Tweede Waterleidingpla	, korte strekdam opslag	veen en meermolm in het noorden
----------------------------------	-------------------------	---------------------------------

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)		101.4	
geen wind	0.0001	101.3	∞ (aangenomen)
geen wind	0.01	93.8	6.16
noordenwind 6 m/s	0.01	74.0	1.23
oostenwind 6 m/s	0.01	78.1	1.56
zuidenwind 6 m/s	0.01	73.2	1.18
westenwind 6 m/s	0.01	76.9	1.46
ZZO-wind 6 m/s	0.01	72.9	1.17
ZZW-wind 6 m/s	0.01	73.3	1.19

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
ZZO-wind 15 m/s	0.01	71.0	1.05
Volledige menging (berekend)	0.01	70.0	1 (volgt uit aanname)

\*Berekende tijd, deze tijd is berekend uit de concentratie in het onttrekkingspunt uitgaande van een verdringingsbekken.

Tabel D.4 Tweede Waterleidingplas,	lange strekdam opslag veen	n en meermolm in het noorder
------------------------------------	----------------------------	------------------------------

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)		101.2	
geen wind	0.0001	101.2	∞ (aangenomen)
geen wind	0.01	94.5	7.04
noordenwind 6 m/s	0.01	75.5	1.35
oostenwind 6 m/s	0.01	79.0	1.66
zuidenwind 6 m/s	0.01	75.8	1.37
westenwind 6 m/s	0.01	78.7	1.63
ZZO-wind 6 m/s	0.01	76.5	1.43
ZZW-wind 6 m/s	0.01	77.6	1.52
ZZO-wind 15 m/s	0.01	72.2	1.13
Volledige menging (berekend)	0.01	69.9	1 (volgt uit aanname)

Tabel D.5 Tweede	Waterleidingplas,	geen strekdam	opslag veen en	meermolm in westen
------------------	-------------------	---------------	----------------	--------------------

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n		
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)		100.9			
geen wind	0.0001	100.7	∞ (aangenomen)		
geen wind	0.01	93.3	6.22		

$\bigcirc$
0
$\bigcirc$
_
e
Ō
T
$\bigcirc$
$\bigcirc$
-
C
-
$\bigcirc$
Ô
$\bigcirc$
Q
C
à
N
$\odot$
$\bigcirc$
€
0
⊖ ⊖
() () () ()

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd * T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n		
noordenwind 6 m/s	0.01	72.8	1.18		
oostenwind 6 m/s	0.01	74.5	1.29		
zuidenwind 6 m/s	0.01	73.1	1.20		
westenwind 6 m/s	0.01	76.3	1.44		
ZZO-wind 6 m/s	0.01	72.9	1.19		
ZZW-wind 6 m/s	0.01	71.7	1.11		
ZZO-wind 15 m/s	0.01	70.9	1.07		
Volledige menging (berekend)	0.01	69.7	1 (volgt uit aanname)		

۰.

\*Berekende tijd, deze tijd is berekend uit de concentratie in het onttrekkingspunt uitgaande van een verdringingsbekken.

Taber D.O. I weede waterieldingplas, strekualli opslag veen en meermonn in zuldoost	Tabel	D.C	57	Tweede	Waterleidingplas,	strekdam	opslag	veen er	n meermoli	m in	zuido	ost
---	-------	-----	----	--------	-------------------	----------	--------	---------	------------	------	-------	-----

Windveld	Afbraak k [1/dag]	Berekende tijd T <sub>s</sub> [dag]	Aantal achter elkaar geschakelde bekkens n
Gemiddelde verblijftijd (uit volumeberekening)		106.0	
geen wind	0.0001	106.0	∞ (aangenomen)
geen wind	0.01	100.3	9.20
noordenwind 6 m/s	0.01	79.0	1.40
oostenwind 6 m/s	0.01	74.5	1.29
zuidenwind 6 m/s	0.01	73.1	1.20
westenwind 6 m/s	0.01	76.3	1.44
ZZO-wind 6 m/s	0.01	72.9	1.19
ZZW-wind 6 m/s	0.01	71.7	1.11
ZZO-wind 15 m/s	0.01	70.9	1.07
Volledige menging (berekend)	0.01	72.3	1 (volgt uit aanname)

# %Bepalen mate van menging m.b.v. MATLAB %Schijnbare verblijftijd Ts van het onttrokken water ten opzichte %van de verblijftijd bij een verdringingsbekken

%Gemaakt door D.R. Hoornstra januari 1995

%Aantal achter elkaar geschakelde mengbekkens n lopend van 0.2 tot 100 met een interval van 0.01 nmatrix=0.2:0.01:100; %gtijd is de gemiddelde verblijftijd berekent bij een afbraak k=1/10000 gtijd=96.08;

%afbraak is de afbraak die afhankelijk is van het aantal n achter elkaar geschakelde mengbekkens afbraak=ones(size(nmatrix))./(1+((ones(size(nmatrix))\*(0.01\*gtijd))./nmatrix)); afbraak=afbraak.^nmatrix;

%Afbraak in een verdringingsbekken afbraakideaal=exp(-0.05\*gtijd)\*ones(size(nmatrix));

%verschil tussen n mengbekkens en een verdringingsbekken tijdverschil=log(afbraak)\*(-100); semilogx(nmatrix,tijdverschil)

%Bepalen van de mate van menging aan de hand van het aantal bekkens nbep=tijdverschil-70.627; %70.627 is de tijd van het onttrokken water nbep=abs(nbep); waarden=min(nbep); n=find(nbep==waarden); n=nmatrix(n)



Appendix E

Metingen in de Eerste Waterleidingplas



Appendix E

Gemeentewaterleidingen Afdeling Procesontwikkeling Sector Hydrologie -0-0-0-

-

۲

3

9

Ç

D

2

# Eerste Waterleidingplas

Meting geleidingsvermogen ter bepaling van het menggedrag in de plas

D. R. Hoornstra S. van Duyvenbode 31 oktober 1995

### 1. Opzet en doel van de meting

Op 31 oktober 1995 heeft in de Eerste Waterleidingplas een meting plaatsgevonden van de verdeling van het elektrisch geleidingsvermogen. Dit is gebeurd in het kader van het onderzoek naar het menggedrag van de in te richten Tweede Waterleidingplas. De metingen zijn op verschillende dieptes en meetlocaties in de plas gedaan. Ze zijn uitgevoerd nadat van eind juli t/m eind augustus twee maanden Amsterdam-Rijnkanaalwater (ARK-water) is ingelaten. Door het verschil in chloride-concentratie van het water uit de Bethunepolder en het ARK-water is het mogelijk uit het elektrisch geleidingsvermogen (EGV-waarde) van het plassenwater de verspreiding van dit ARK-water te meten.

### 2. Methode van meten

De 'solomat'

Met de 'solomat' kunnen verscheidene waterkwaliteitsmetingen gedaan worden, de apparatuur bestaat uit een sonde ('803PSB') aan een 7 m lange kabel met daaraan gekoppeld een computer ('WP4007'). Met de sondes die de sectie Hydrologie tot zijn beschikking heeft is het mogelijk vijf parameters van het water te meten, dit zijn:

-Temperatuur[°C]-Troebelheid[NTU]-Zuurstofgehalte[ppm]-Ph-waarde[pH]-EGV-waarde[μs/cm]

De waarde van de EGV-meting wordt voor het merendeel bepaald door het chloride-gehalte. In de periode van eind juli tot eind augustus was globaal 1/5 deel van het toegevoerde water afkomstig uit het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK-water) en 4/5 deel uit de Bethunepolder. In september en oktober is er alleen gebruik gemaakt van water uit de Bethunepolder met een lager chloride-gehalte dan het ARK-water. Opgemerkt zij dat het chloride-gehalte van het ruwe water steeds wordt verhoogd met ca. 15 mg/l door de coagulatie die het ondergaat voordat het de plas wordt ingelaten.

De metingen met de 'solomat' zijn al varend uitgevoerd vanaf de meetboot die in de Eerste Waterleidingplas aanwezig is. Tijdens het varen zijn om de twee minuten alle vijf de parameters bepaald (Appendix B). Dit is gedaan door de 'solomat' op een diepte van 0.5 m onder het wateroppervlak te houden. Op twaalf plaatsen is de boot vrijwel stil gelegd en zijn er afhankelijk van de locatie, op verschillende dieptes de metingen gedaan (figuur 2 en 4).

### De plaatsbepaling

Voor het bepalen van de positie van de meting is er gebruik gemaakt van dgps-apparatuur (differential global positioning system). Deze apparatuur bepaalt aan de hand van signalen die door satellieten uitgezonden worden en een FM-signaal vanuit Lopik de positie. Waarbij de aanduiding 'differential' aangeeft of er bij de positiebepaling gebruik wordt gemaakt van een bekend punt, in ons geval Lopik. De nauwkeurigheid van deze positiebepaling is hoofdzakelijk afhankelijk van:

-het aantal satellieten waarvan het signaal ontvangen wordt

-de plaats van deze satellieten

-corrigeren van de bereking van de positie met behulp van het FM-signaal

Gedurende de meetdag werd er voor de positiebepaling gebruik gemaakt van 5 à 6 satellieten. Ook was op de laptop zichtbaar dat de satellieten ver van elkaar verwijderd waren wat de nauwkeurigheid van de plaatsberekening ten goede komt. Onder deze omstandigheden is de afwijking van de gemeten positie kleiner dan 5 m.

### De vaarroute

In de ochtend van 31 oktober zijn de metingen in het zuidelijke deel van de Eerste Waterleidingplas gedaan en s'middags is er in het noordelijke deel gemeten. De vaarroute is weergegeven in fig. 1 en daarop is te zien dat er (door tijdsgebrek) geen metingen zijn gedaan in het zuidwesten en 'middenoosten' van de plas.



Figuur 1. Vaarroute en monsterpunten, 31 oktober 1995

### Bemonstering

....

Op een vijftal plaatsen, A t/m E (zie fig. 1.), in de plas zijn monsters genomen om de chlorideconcentratie en de EGV-waarde van te bepalen. Deze monsters zijn geanalyseerd in het labaratorium te Leiduin (Appendix C). De monsterpunten met posities en waarden zijn hieronder weergegeven.

meet- punt	x-coordinaat [m]	y-coordinaat [m]	diepte [m]	tempe- ratuur Solomat [°C]	EGV Solomat [µs/cm] bij 25 °C	EGV Lab [µs/cm] bij 20 °C	Cl <sup>-</sup> Lab [mg/l]
Α	131310	469077	0.5	11.2	614.6	54*10 <sup>1</sup>	70
В	131682	468871	8	11.2	614.2	54*10 <sup>1</sup>	70
С	131885	469652	0.5	11.2	611.8	54*10 <sup>1</sup>	70
D	131404	469603	0.5	12.2	609.9	54*10 <sup>1</sup>	70
Е	131410	469605	14	11.2	611.4	54*10 <sup>1</sup>	70

	Tabel	1.	Mee	etwaarden	ter	plaatse	en	anal	vse	van	de	monsters	in	het	labaratori	ım
--	-------	----	-----	-----------	-----	---------	----	------	-----	-----	----	----------	----	-----	------------	----

#### 3. Discussie en conclusie

De gemeten en opgevraagde waarden geven aanleiding tot de volgende opmerkingen:

- De EGV-waarden (Elektrisch Geleidings Vermogen) die gemeten zijn in de plas door de 'solomat' liggen rond de 610 à 620 µs/cm. Ondanks de kleine verschillen is er een duidelijke trend in de plas waar te nemen. Deze trend is onafhankelijk van de watertemperatuur, de 'solomat' rekent immers een EGV bij 25 °C uit, en ook onafhankelijk van het tijdstip, aangezien verschillende delen van de plas twee keer doorvaren zijn. In appendix A figuur 1 is te zien dat de plas, wat betreft de EGV-meting, op te delen is in drie delen:
  - -zuidelijk deel
  - -deel ten westen van de strekdam
  - -deel ten oosten van de strekdam

Waarbij het deel ten oosten van de dam een overgangsgebied vormt tussen het zuidelijk deel en het deel ten westen van de dam.

- De resultaten van de berekening van stroming en concentratie (zie toelichting fig. 5) met het programma TRISULA bij een zuidenwind, windkracht 4, zijn toegevoegd in figuur 5 en 6 in appendix A. Het beeld dat deze berekening laat zien is dat er een grote gradient is iets ten westen en ook ten oosten van de punt van de dam. Een grote gradient in de verblijftijd of concentratie wil zeggen dat het water daar minder gemengd is dan op plaatsen waar het verschil in concentratie veel kleiner is.
- De verschillen tussen de EGV-waarde van de monsters zijn te klein om in het labaratorium vast te stellen. De metingen die door de 'solomat' voor de EGV-waarde in de plas gedaan zijn geven wel verschillen daar zij één cijfer nauwkeuriger blijken dan de analyse in het labaratorium (zie appendix C).

- Het heeft in de periode van 23 oktober t/m 27 oktober flink gewaaid met een constante windkracht 4 uit de zuidelijke richting (zie appendix D).
- De chloride-concentratie van het instromende water is in de periode van eind juli tot eind augustus, tijdelijk 20 mg/l hoger geweest dan zonder inlaten van ARK-water en water uit de Bethunepolder (zie appendix E).

Geconcludeerd wordt dat de plas op 31 oktober 1995 blijkens de gekozen tracer, de EGVwaarde, goed gemengd was. De verklaring hiervoor is dat de tijdsduur tussen de meting en de verhoging van de Cl<sup>-</sup>-concentratie door toevoer van ARK-water twee maanden was en de plas in de tussentijd goed gemengd is.

Om het menggedrag van de plas beter vast te stellen zouden de metingen vaker uitgevoerd moeten worden ten tijde van en na inlaten van ARK-water met een duidelijk afwijkend chloride-gehalte. Op deze wijze ontstaat een beeld van de verandering van de EGV-waarde in de tijd. Deze EGV-waarde is afhankelijk van de wind, het toegevoerde water, het afgevoerde water en de meetlocatie in de plas. Het blijkt dat de toegepaste meetapparatuur de nauwkeurigheid heeft die nodig is voor de gewenste metingen. De Cl<sup>-</sup>-concentratie van het ingelaten water moet meer, dan nu het geval was, contrasteren met de waarde in de plas om een goede tracer te kunnen vormen.

### Appendices

Appendix A - Figuren

- Fig. 1. EGV-waarde die op een diepte van 0.5 m in de plas gemeten is.
- Fig. 2. EGV-waarde die op de twaalf meetlocaties is gemeten, waarbij het punt kleiner weergegeven is naarmate de diepte van het meetpunt toeneemt.
- Fig. 3. Temperatuur die op een diepte van 0.5 m in de plas is gemeten.
- Fig. 4. Temperatuur die op de twaalf meetlocaties is gemeten, waarbij het punt kleiner weergegeven is naarmate de diepte van het meetpunt toeneemt.
- Fig. 5. De concentratieverdeling van de bovenste laag (20% van de diepte) in de plas berekend met het opgezette model voor de Eerste Waterleidingplas (Hiervoor is gebruik gemaakt van het programma TRISULA van het waterloopkundig labaratorium). Bij de inlaat wordt een concentratie van 100 ingelaten en door de afbraak (k=1/20 [1/dag], volgens eerste ordeafbraakproces) is het mogelijk een concentratieverdeling in de plas te vinden die afhankelijk is van de verblijftijd van het water. Een grotere gradient in de verblijftijd betekent minder menging in de plas. Ook zijn de snelheidsvectoren bij deze zuidenwind van 6 m/s (op 10 m hoogte) van de bovenste laag weergegeven.
- Fig. 6. Dezelfde figuur als figuur 5 alleen is nu de onderste laag (onderste 20% van de diepte) in de plas weergegeven.
- Appendix B Meetgegevens op 31 oktober 1995
- Appendix C Analyse van de monsters
- Appendix D Windsnelheden en richting in oktober 1995
- Appendix E Volumestromen in en uit de Waterleidingplas met Cl-concentraties
- Appendix F Meetprogramma

Appendix A

-

-

Ģ

















## Appendix B

Alle metingen die met de dgps-apparatuur en de Solomat zijn gedaan in de plas. Met als begintijd 10:18:17 sec die overeenkomt met een GPS-tijd van 205987 sec. De GPS-tijd is het aantal seconden vanaf een 'bepaald' startpunt in de week.

GPS-tijd [sec]	X-coordinaat [m]	Y-coordinaat [m]	Temp [°C]	Troebelheid [NTU]	l zuurstof [ppm]	рН [рН]	EGV (25% [μs/cm]	C)	Nederlandse tijd [uur:min:sec]
significantie is									
seconden	meters	meters	1/10 ℃	NTU			µs/cm		
205987.000	131217.000	469156.000	14.100	800.000	0.110	4.210	9.800		10:18:17
206107.000	131217.000	469156.000	11.200	600.000	7.650	6.880	616.600		
206227.000	131217.000	469156.000	11.200	600.000	7.410	6.870	613.200		
206347.000	131217.000	469156.000	11.200	300.000	7.440	6.860	613.200		
206467.000	131217.000	469156.000	11.200	400.000	7.150	6.850	613.200		
206587.000	131217.106	469156.393	11.100	700.000	6.660	6.820	12.400		
206707.000	131216.866	469155.514	11.200	900.000	8.180	6.810	612.800		
206827.000	131240.772	469144.215	11.200	700.000	8.330	6.820	614.600		
206947.000	131264.233	469074.610	11.200	600.000	8.330	6.860	15.200		
207067.000	131310.499	469076.935	11.200	700.000	7.650	6.870	614.600	A	
207187.000	131349.124	469101.107	11.200	700.000	7.570	6.870	614.600		
207307.000	131357.127	469111.458	11.200	900.000	7.780	6.860	615.300		
207427.000	131359.048	469123.000	11.200	0.000	7.100	6.830	614 600		
207547.000	131305.505	409130.810	10.200	200,000	7.420	7.010	12 800		
207667.000	131309.887	409139.933	11 200	200.000	8 530	6.860	615 300		
207787.000	131377.201	469140.249	11.200	600.000	8.530	6 860	614 600		
207907.000	131418.207	469103.078	11.200	600.000	8.120	6 860	614.600		
208027.000	131466.020	469064 410	11.200	400.000	8 520	6.870	614.600		
208147.000	131582 087	469040 083	11.200	400.000	8 570	6 870	614 600		
208207.000	131635 727	469013 926	10 100	800.000	8 250	6 880	12 900		
208507.000	131680 424	468996 942	11.200	200,000	7.780	6.890	614.600		
208627.000	131689 080	469011.728	11.200	300.000	8.140	6.890	613.200		
208747 000	131689.490	469027.773	11.200	300.000	7.900	6.890	614.900		
208867.000	131697.710	469041.952	11.200	300.000	8.370	6.880	614.900		
208987.000	131698.687	469054.742	11.200	200.000	7.790	6.890	614.900		
209107.000	131705.560	469067.785	11.100	800.000	6.210	6.950	12.000		
209227.000	131712.967	469075.175	11.200	200.000	8.620	6.890	614.600		
209347.000	131727.410	469078.538	11.200	200.000	8.580	6.880	615.300		
209467.000	131733.888	469020.558	11.300	200.000	9.650	6.930	13.200		
209587.000	131764.103	468993.578	11.200	900.000	7.970	6.900	614.600		
209707.000	131779.750	468971.554	11.200	200.000	7.670	6.810	616.700		
209827.000	131785.803	468984.692	11.600	400.000	7.770	6.800	615.600		
209947.000	131789.251	469000.897	10.100	800.000	6.550	6.980	12.900		
210067.000	131799.353	469017.519	11.400	500.000	8.520	6.890	616.000		
210187.000	131804.727	469001.853	11.400	600.000	8.480	6.890	615.300		
210307.000	131758.976	468987.754	11.400	600.000	8.210	6.890	616.000		
210 127.000	131701.490	468985.660	11.400	600.000	8.530	6.890	614.200		
210547.000	131651.484	468938.923	11.400	300.000	8.400	6.900	616.600		
210667.000	131592.065	468957.763	11.300	300.000	9.930	6.870	13.500		
210787.000	131543.107	468943.545	11.200	300.000	8.570	6.910	616.000		
210907.000	131528.595	468960.498	11.200	400.000	8.080	6.900	614.600		
211027.000	131545.206	4689/0.670	11.200	300.000	8.130	6.900	12 700		
211147.000	131554.246	468986.789	10.100	800.000	0.220	6.010	13./00		
211267.000	131558.828	469020.192	11.500	0.000	0.750	6.910	614 000		
211387.000	131558.515	408982.043	11.300	200,000	8.730	6.020	614 200		
211507.000	131601.722	408952.012	11.200	400.000	8.620	6.920	615 500		
211627.000	131631.680	408839.212	11.200	300.000	8 520	6 010	614 000		
211/47.000	131002.878	408/80./33	11.200	900.000	10.060	6 960	13 300		
211867.000	131/23.3/3	408099.233	11 200	0.000	8 310	6 920	616 600		
211987.000	151/55.//8	400392.003	11.500	0.000	0.510	0.720	010.000		

212107 000	131753 603	468571,980	11,300	300.000	8,440	6.910	615,300		
212227 000	131768 300	468584 735	11 200	900.000	7 970	6 870	615 600		
212227.000	121700.000	400509.000	10.100	800.000	10 610	6 000	18 400		
212347.000	131/80.460	408598.890	10.100	800.000	10.610	0.900	18.400		
212467.000	131800.649	468626.857	11.800	400.000	8.810	6.920	623.200		
212587.000	131779.604	468712.646	11.800	500.000	8.770	6.920	614.200		
212707.000	131731.930	468797.687	11.100	900.000	10.030	6.960	15.300		
212827.000	131681.777	468870.929	11.200	700.000	6.230	6.900	614,200		
212947 000	131688 596	468887 036	11 200	700.000	8 150	6 940	615 500	R	
212947.000	121607 470	468005 255	11.200	200.000	8 410	6.020	616,000	Ъ	
213067.000	131697.470	408905.255	11.200	200.000	8.410	6.920	010.000		
213187.000	131711.104	468923.810	11.200	0.000	9.350	6.930	13.200		
213307.000	131730.252	468941.448	11.200	600.000	8.550	6.940	615.500		
213427.000	131620.170	469010.039	11.200	400.000	8.470	6.940	616.200		
213547.000	131217.000	469156.000	11.200	600.000	8.450	6.930	616.200		
213667.000	131217 000	469156 000	11 200	600,000	8 4 2 0	6 9 1 0	614 400		
213787 000	131217.000	469156 000	11 200	600.000	8 210	6 890	617,000		
213787.000	121217.000	460156.000	11.200	200,000	11 410	6 200	14 700		
213907.000	131217.000	469156.000	11.200	200.000	11.410	0.890	14.700		
214027.000	131217.000	469156.000	11.900	800.000	6.080	6.910	1051.900	)	
214147.000	131217.000	469156.000	12.700	800.000	4.520	6.920	1048.000	)	
214267.000	131217.000	469156.000	12.700	700.000	4.160	6.920	1045.000	)	
214387.000	131217.000	469156.000	12,700	300.000	4.030	6.910	1045.800	)	
214507.000	131217 000	469156 000	12 700	200 000	3 900	6 910	1046 400	)	
214507.000	121217.000	460156.000	12.100	400.000	2 770	6.010	1040.400	<u>`</u>	
214627.000	131217.000	409150.000	12.100	400.000	3.770	0.910	1044.000		
214747.000	131217.000	469156.000	12.700	600.000	3.730	6.910	1045.300	)	
214867.000	131217.000	469156.000	12.700	600.000	3.680	6.910	1043.700	)	
214987.000	131217.000	469156.000	12.700	500.000	3.700	6.910	1274.500	)	
215107.000	131217.000	469156.000	12.700	400.000	3.720	6.910	1274.600	)	
215227.000	131217.000	469156.000	12,700	300.000	3.740	6.910	1278.700	)	
215347.000	131217.000	469156 000	12 700	200,000	3 730	6 910	1280.000	)	
215347.000	131217.000	460156.000	12.700	200.000	3.730	6.010	1270.000	, ,	
215467.000	131217.000	409156.000	12.700	200.000	3.720	6.910	1279.000	<u></u>	
215587.000	131217.000	469156.000	12.700	200.000	3.750	6.910	1279.600	)	
215707.000	131217.000	469156.000	12.700	200.000	3.800	6.910	1280.300	)	
215827.000	131217.000	469156.000	12.700	200.000	3.850	6.910	1280.500	)	
215947.000	131217.000	469156.000	12.700	200.000	3.900	6.920	1279.500	)	
216067.000	131217.000	469156.000	12.700	100.000	3.910	6.920	1280.800	)	
216187 000	131217 000	469156 000	12 600	300 000	3 920	6 920	1282 900	)	
216307.000	131217.000	469156 000	13 600	300.000	3 900	6 920	1281 000		
210307.000	131217.000	409150.000	12.000	200.000	10.240	6.020	12 81.000		
216427.000	131220.023	409159.254	13.200	200.000	10.240	0.980	18.800		
216547.000	131269.393	4691/3.60/	12.300	300.000	8.770	6.900	615.400		
216667.000	131312.163	469187.980	11.200	600.000	8.560	6.890	616.500		
216787.000	131354.934	469202.353	11.200	600.000	8.760	6.900	617.700		
216907.000	131397.704	469216.725	11.200	600.000	8.730	6.900	617.000		
217027.000	131457.309	469239.265	11.200	300.000	11.020	6.870	14,700		
217147.000	131611 382	469345 523	11 100	300.000	7 830	6 940	615 500		
217147.000	121666 279	460295 152	11.100	400.000	8 300	6 050	614 600		
217267.000	131000.278	409383.133	10.200	400.000	8.500	0.930	15 000		
217387.000	131695.237	469434.616	10.200	200.000	11.890	6.670	15.000		
217507.000	131676.640	469429.219	11.200	300.000	8.890	6.960	614.900		
217627.000	131691.327	469451.844	11.200	200.000	8.850	6.990	615.300		
217747.000	131768.180	469511.564	11.200	300.000	8.990	7.020	613.800		
217867.000	131822.578	469576.862	11.200	200.000	10.150	6.950	15.500		
217987 000	131884 906	469651 919	11 200	700 000	8 750	7 100	611 800	C	
219107.000	121862 704	460604 865	11 200	0.000	8 860	7 070	613 200	-	
218107.000	131802.794	409094.803	11.200	200.000	8.300	7.070	614 200		
218227.000	131840.925	409083.893	11.200	300.000	8.740	7.020	014.300		
218347.000	131895.945	469635.615	11.200	300.000	11.490	6.880	13.400		
218467.000	131886.965	469648.435	11.200	0.000	9.500 7	.080 6	512.500		
218587.000	131919.036	469672.174	11.200	0.000	9.340 7	.080 6	511.800		
218707.000	131964.806	469778.878	11.200	0.000	9.150 7	.070 6	512.500		
218827.000	132009.261	469903.383	11.200	100.000	10.070	7.010	14,700		
218947 000	132106 454	469972 727	11 300	500.000	8 580	7 080	612 500		
210047.000	122100.454	460055 022	11 200	0.000	8 600 7	000 4	14 200		
219067.000	132133.300	409933.033	11.300	0.000	0.000 /	.090 0	(10 000		
219187.000	132114.073	469934.953	11.200	200.000	8.590	7.080	612.200		
219307.000	132153.551	469946.398	11.200	200.000	9.380	6.920	14.700		
219427.000	132172.893	469961.127	11.400	300.000	9.180	7.080	611.800		
219547.000	132184.190	470011.169	11.200	200.000	9.330	7.110	610.700		
219667.000	132022.071	470072.352	11.200	100.000	9.430	7.130	610.700		
219787 000	131832 533	470131,583	11,200	0.000	10.660	6.940	14,000		
219907.000	131826 445	470128 370	11 500	300 000	8 760	7 130	611 400		
219907.000	151020.445	410120.510	11.500	200.000	0.100	1.150	011.400		
	220027.000	131842.645	470117.570	11.200	400.000	8.540	7.130	611.400	
----	------------	------------	------------	--------	---------	--------	-------	---------	---
	220147.000	131858.845	470106.770	11.200	0.000	8.380	7.110	612.200	
	220267.000	131827.140	470060.125	11.200	300.000	10.870	6.790	14.100	
	220387.000	131757.540	469985.125	11.200	600.000	9.340	7.130	610.300	
	220507.000	131687.940	469910.125	11.200	700.000	9.370	7.140	609.900	
	220627.000	131618.340	469835.125	12.200	700.000	9.390	7.140	611.300	
	220747.000	131548.740	469760.125	12.300	0.000	9.310	7.140	610.600	
	220867.000	131479.140	469685.125	12.300	0.000	9.270	7.140	610.600	
	220987.000	131409.540	469610.125	11.200	200.000	11.080	6.940	14.000	
	221107.000	131403.529	469602.611	12.200	700.000	8.010	7.150	609.900	D
	221227.000	131405.243	469603.297	11.400	100.000	8.270	7.140	610.300	
	221347.000	131406.957	469603.983	11.100	900.000	7.940	7.140	610.300	
	221467.000	131408.671	469604.669	11.200	200.000	11.180	7.070	14.500	
	221587.000	131410.386	469605.354	11.200	0.000	7.460	7.160	611.400	Е
	221707.000	131427.050	469620.770	11.200	300.000	11.110	6.800	13.200	
	221827.000	131627.554	469817.900	12.200	400.000	9.110	7.150	609.500	
	221947.000	131630.015	469821.900	11.200	0.000	8.610	7.150	611.100	
	222067.000	131632.477	469825.900	11.100	900.000	8.650	7.100	612.500	
į.	222187.000	131634.938	469829.900	11.200	200.000	11.400	7.060	13.200	
	222307.000	131640.336	469836.492	12.200	300.000	9.400	7.150	608.500	
	222427.000	131726.255	469894.235	12.200	100.000	9.200	7.150	608.500	
	222547.000	131848.330	469965.120	11.200	0.000	9.380	7.110	610.000	
	222667.000	131919.771	469952.027	11.200	0.000	9.290	7.110	611.100	
	222787.000	131927.443	469903.094	11.200	0.000	9.320	7.110	610.500	
	222907.000	131894.448	469821.453	11.200	100.000	9.240	7.110	610.500	
	223027.000	131857.645	469757.364	11.100	900.000	9.220	7.060	613.200	
	223147.000	131845.695	469684.388	11.200	200.000	9.030	7.020	615.300	
	223267.000	131773.083	469583.617	11.200	200.000	8.960	6.980	614.200	
	223387.000	131724.657	469531.737	11.200	300.000	8.900	6.950	615.500	
	223507.000	131697.781	469493.306	11.200	600.000	8.720	6.900	615.200	
	223627.000	131647.746	469427.245	11.200	600.000	8.680	6.900	617.000	
	223747.000	131593.269	469363.882	11.200	600.000	8.670	6.900	616.200	
	223867.000	131532.149	469315.327	11.200	600.000	8.650	6.890	615.900	
	223987.000	131443.796	469222.493	11.200	100.000	11.090	6.620	16.100	

*** Comoontouctourl								
demeentewater le	idingen AMSTERI	JAM ***					Rapportnr. : R957713	16
>>> PO – Hydrologie	~~~					Gemeentewate Afdeling War Vogele 2114 E	erleidingen Amsterdam terkwaliteitsbewaking enzangseweg 21 3A Vogelenzang	n ]
( - = voorlonide method	le 2 - niet b	okonda mathad				tel.	(023) 233636	
( + = definitieve method	de. * = gecert	ificeerde met	bode)			fax.	(023) 294053	
( I = meerdere waarnem	ingen )		node j					
( V = voor doorstromen	)						Pagina : 1	
Kode 9531275 : Meetpur	it 6 A				(Diversen			1
9531276 : Meetpur	it 2 B				(Diversen			)
9531277 : Meetpur	t 11 C				(Diversen			,
9531278 : Meetpur	t 15,1 meter di	iep D			(Diversen			ý
9531279 : Meetpur	t 15, 14 meter	diep E			(Diversen			ý
Kode monster(pun	t)	9531275	9531276	9531277	9531278	9531279		
Datum monstername	1	01/11/95	01/11/95	01/11/95	01/11/95	01/11/95		
Bijzonderheden								
ANORGANISCHE MACRO-PARA	METERS							
EGV (elek. geleid.verm.	, 20oC) mS/m +	·····	5 <i>1</i>	 Бл			••••••	
Chloride (AA)	mg/1 C1 +	70	. 54	54 70	54	54	*	
		107	, ,	70	70	70		

 $\oplus$ ¢

 $\oplus$ 

 $\bigcirc$ 

0

0

0

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

0

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

C

 $\in$ 

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

O

 $\bigcirc$ 

 $\bigcirc$ 

 $\Box$ 

0

⊜

\_eiduin, 1 november 1995 \fdeling Waterkwaliteitsbewaking

Appendix C

#### Appendix D

.

Э

9

1

-

D

2

2

Windsnelheid en richting gemeten door het Waterloopkundig laboratorium ter plaatse van de Eerste Waterleidingplas op een hoogte van 5 m boven maaiveld. In de periode van 10 oktober tot 31 oktober 1995.



### Appendix E

Volumestromen en parameters van het water dat de Eerste Waterleidingplas instroomt en onttrokken wordt.

	Instroom Eerste	Waterleidingplas	
Datum (midden week)	Volumestroom [m <sup>3</sup> ] (één week)	EGV-waarde bij 20 °C	Cl <sup>-</sup> -concentratie [mg/l]
4-07-'95	524187		68
11-07-'95	535387		68
18-07-'95	521222		72
25-07-'95	560852		77
1-08-'95	692267		88
8-08-'95	584689		70
15-08-'95	519202		70
22-08-'95	649613		83
29-08-'95	633443		71
5-09-'95	599138		69
12-09-'95	615114		69
19-09-'95	578357		68
26-09-'95	604857		71
3-10-'95	562970		68
10-10-'95	533954		67
17-10-'95	514446		68
24-10-'95	492280		70
31-10-'95	300326 (4 dagen)		68

	Onttrekking	Eerste	Waterleidingplas	
Datum (midden week)	Volumestroom [m <sup>3</sup> ] (één week)	EGV-waarde bij 20 °C [µs/cm]	Cl <sup>-</sup> -concentratie [mg/l]	Cl <sup>-</sup> -conc. voor toevoeging HCl [mg/l]
4-07-'95	529726		72	62
11-07-'95	528315		75	65
18-07-'95	521689		81	71
25-07-'95	532511		79	69
1-08-'95	540845		76	66
8-08-'95	532006		78	68
15-08-'95	514986	550	80	69
22-08-'95	532195	520	80	69
29-08-'95	529586	550	82	71 <sup>1</sup>
5-09-'95	510210	560	83	74 <sup>1</sup>
12-09-'95	517773	550	80	73 <sup>1</sup>
19-09-'95	546022	550	81	75 <sup>1</sup>
26-09-'95	564465	550	83	76 <sup>1</sup>
3-10-'95	547871	550	79	72 <sup>1</sup>
10-10-'95	506039	550	78	70 <sup>1</sup>
17-10-'95	504671	550	80	72 <sup>1</sup>
24-10-'95	530993	550	81	74 <sup>1</sup>
31-10-'95	311256 (4 dagen)	550	81	74 <sup>1</sup>

De bepaling van de Cl<sup>-</sup>conc. verhoging uit de toevoeging van HCl bij het onttrekkingspunt

 $\frac{(HCl-to evoeging * \rho_{HCl})}{Volumestroom} * massaperc. Cl^-=Cl^-conc. verhoging$ 

zuiver HCl-toevoeging = 0.36\*dosering [l/dag]  $\rho_{HCl}$ = 1.18 [kg/m<sub>3</sub>] Volumestroom [m<sup>3</sup>/dag] massapercentage Cl<sup>-</sup>= 35.5/36.5 Cl<sup>-</sup> conc.verhoging [g/l]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Berekent met een schatting van de HCl-toevoeging bepaalt in Weesperkarspel

Appendix F

Leiduin 26 oktober 1995 Douwe Hoornstra

# Eerste Waterleidingplas

# Meetprogramma

ter bepaling van de chloride-concentratie (elektrische geleidbaarheid) en de temperatuur.

uitvoering metingen: rapportage en waarneming: 31 oktobber 1995 Steven Duivenbode en Douwe Hoornstra

#### Inhoudsopgave

1-Opzet en doel van de meting	2
2-Metingen met Solo-mat	
3-Plaatsbepaling (GPS meting)	6
4-Chloride-concentratie bepalen	
5-Aangeven van de meetpunten en de vaarroute (zie kaarten)	
6-Tijdsplanning	
8-Relevante telefoonnummers en adressen:	
9-Meetpunten	

#### 1-Opzet en doel van de meting

Er zal een bepaling van de elektrische geleidbaarheid en andere parameters die met de solo-mat zijn te meten plaatsvinden in de Eerste Waterleidingplas. Deze elektrische geleidbaarheid van het water zal voor het grootste deel afhangen van de chloride-concentratie in het water. Het doel van het onderzoek is om te kijken of er in de plas gebieden zijn met water met andere eigenschappen. Deze verschillen zullen onderzocht worden voor verschillende dieptes en meetlocaties in de plas. Dit wordt gedaan om te onderzoeken hoe groot de menging in de plas is. En als de plas niet homogeen gemengd is waar dan de grootste verschillen in de eigenschappen van het water optreden.

#### 2-Metingen met Solo-mat

Met de solo.mat zijn de onderstaande vijf waarden continue (interval 20 sec) te meten, wat dan ook gedaan zal worden. Deze metingen worden uitgevoerd door de meetapparatuur aan een 6.5 m lange kabel het water in te laten zakken, waar dan aan het einde van de kabel de opgegeven metingen uitgevoerr worden.

- Temperatuur
- Troebelheid
- Zuurstof gehalte
- Ph-waarde

Elektrische geleidbaarheid

#### **3-Plaatsbepaling (GPS meting)**

Er kan door het gebruik van een GPS ontvanger continue gekeken worden waar we ons op dat moment op de plas bevinden. De gegevens van de plaats worden om de twee a drie seconden opnieuw bepaald en dit gebeurt met een nauwkeurigheid van minimaal 5 m. Deze gegevens worden opgeslagen in een laptop en zijn na de meting dan ook naast de uitvoer van de solo-mat te leggen.

#### 4-Chloride-concentratie bepalen

Om het verband te leggen tussen de chloride concentratie en de egv-meting zullen er vijf water monsters genomen worden. Dit zal gebeuren op de meetlokaties 2, 6, 11, 13 en 15. Van deze monsters zullen door het labaratorium de chloride-concentraties bepaald worden.

#### 5-Aangeven van de meetpunten en de vaarroute (zie kaarten)

Kaart van de Eerste Waterleidingplas (bodemprofiel) Kaart met meetpunten en vaarroute

#### 6-Tijdsplanning

s'ochtends:

 7 punten 6 metingen doen op verschillende dieptes (met een interval van 1 m), per meetpunt 5 minuten om meting te doen.

tijdsduur 5 \* 7 = 35 minuten voor de meetpunten

- Het varen van en naar de meetpunten met een meting op een diepte van 1 m. tijdsduur = afstand\*snelheid = 3000 m / 1 m/s (≈3.5 km/uur) = 50 min
- Het varen van meetpunt 1 naar de aanlegsteiger is 1000 m / 2 m/s (~7 km/uur) = 10 min

Totale tijdsduur is 95 min

s'middags:

 8 punten 6 metingen doen op verschillende dieptes (met een interval van 1 m), per meetpunt 5 minuten om meting te doen

tijdsduur 5\*8 = 40 minuten voor de meetpunten

- Het varen van en naar de meetpunten met een meting op een diepte van 1 m.
  - Tijdsduur = 4000 m / 1m/s ( $\approx$ 3.5 km/uur) = 70 min
- Het varen van meetpunt 15 naar de aanlegsteiger is 2000 m / 2 m/s (≈7 km/uur) = 20 min

Totale tijdsduur is 130 min

-

Voor het nemen van vijf watermonsters op de meetpunten 2, 6, 11, 13 en 15 is ongeveer 10 minuten nodig.

#### Gehele dag:

De totale tijd op het water is dus ongeveer 235 min oftewel bijna vier uur. Dit is ook de globale tijd die er gemeten kan worden in het geval er een extra accu bij de laptop geleverd wordt. Hopelijk is hier nog een betere oplossing voor te vinden.

#### 7-Kosten

De instrumenten ter bepaling van de plaats op de plas moeten gehuurd worden bij een gespecialiseerd bedrijf. Hierbij is gekozen voor Geodan. De andere diensten worden ter beschikking gesteld door de Gemeentewaterleidingen Amsterdam. Voor de bepaling van het chloridegehalte van het water wordt door het labaratorium te Leiduin uitgevoerd.

#### Begroting:

PLaatsbepaling:

GPS-apparatuur Laptop met programmatuur (voor verwerking en opslaan van data) Extra accu

Chloridebepaling: Bepaling Cl<sup>-</sup>concentratie in het labatorium

#### 8-Relevante telefoonnummers en adressen:

Geodan Geodesie Overtoom 60 Amsterdam tel: 020-6125073 contactpersoon: dhr. Klomp

Arne Bosch (medewerker GW vestiging LOE) tel: 02943-4121

Douwe Hoornstra tel: 023-5233590 550,-380,-

# 9-Meetpunten

•

meet- punt	X-coordinaat	Y-coordinaat
1	131830.5	468565.9
2	131830.5	468565.9
3	131501.0	468614.0
4	131308.1	468773.1
5	131834.0	468847.2
6	131701.8	468918.3
7	131413.8	469048.5
8	131707.6	469181.2
9	131863.4	469430.5
10	131644.7	469523.6
11	131932.0	469729.0
12	132123.2	470080.3
13	131843.9	470080.3
14	131652.2	469857.5
15	131466.5	469622.0





 $\ominus$ ÷  $\bigcirc$  $\bigcirc$ 0  $\bigcirc$ 0  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$ Ó  $\bigcirc$  $\Theta$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$ Q  $\bigcirc$ 0 Ċ e  $\bigcirc$ ê  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\oplus$ O

# Appendix F

# Windklimaat van Nederland



Appendix F

#### Windklimaat van Nederland

#### F.1 Algemeen

Het windklimaat geeft een beschrijving van het gemiddelde windgedrag in afhankelijkheid van seizoen, tijdstip van de dag en omgeving. Er is een duidelijk dagelijkse gang van de wind te zien waarbij in de oppervlaktelaag (ongeveer eerste 100 m) gemiddeld de wind s'nachts zwakker is dan overdag. Dit is te verklaren door de temperatuursveranderingen in een etmaal die het stabiliteitsgedrag van de grenslaag beinvloeden. Boven land is de grenslaag s'nachts gemiddeld stabiel en de grenslaag overdag enigzins onstabiel. Hoe onstabieler de grenslaag is hoe effectiever de neerwaartse doorgave van de wind is (figuur F.2). De dagelijkse variaties in de wind zijn het grootst dichtbij de grond omdat daar de thermische invloed het grootst is. Deze dagelijkse gang is op een hoogte van 10 m boven de grond duidelijk zichtbaar. Ook voor verschillende periodes in het jaar zijn variaties in de gemiddelde windsnelheid en richting te constateren.

Voor een beschrijving van de wind over een jaar is de eenvoudigste en nuttigste onderverdeling in een zomer en een winter periode. Wil men een verdere opsplitsing maken dan wordt het beeld beter beschreven door het jaar op te splitsen in zes periodes van twee maanden.

#### Zomerseizoen:

-Mei en juni met rustig mooi weer met een grote kans op zeewinden aan de kust door het temperatuurverschil tussen het land en de zee.

-Midden juli tot eind augustus wordt gekenmerkt door een toenemende frequentie van westciculaties

-In september en oktober is de kans op zeewinden heel erg klein

#### Winterseizoen:

-November en december worden weer gekenmerkt door de karakteristieke westcirculaties en dit is op de Noordzee de stormachtigste periode.

-De perioden van januari en februari worden gekarakteriseerd door een relatief hoog percentage noordoostenwind.

-Begin maart tot eind april wordt gekenmerkt door een winderige periode waarin op het land de windmaxima bereikt worden.

Met westcirculaties worden de onderstaande karakteristieke stromingen die de depressies volgen bedoeld.



Figuur F.1 West-circulaties in Europa (pijlen zijn de banen van depressies en de gestippelde zone bevat het hogedrukgebied aan het aardoppervlak)

In het algemeen is het voldoende om een periode van drie tot vier jaar te bekijken om niet teveel last te hebben van toevallige variaties tussen opeenvolgende jaren. Waarbij de periodes die door de maanden gekenmerkt worden elk jaar natuurlijk weer iets anders zijn en op een ander tijdstip beginnen.

Voor het bepalen van de windsnelheid op een bepaalde hoogte tot ongeveer 60 m is de ruwheid van het oppervlak in grote mate bepalend voor de windsnelheid. Er zijn dan ook ruwheidsklassen opgesteld voor verschillende gebieden. Voor de Tweede Waterleidingplas geldt een ruwheidsklasse van 3, d.w.z. dat er sprake is van een zeer open landschap tot een tamelijk open landschap. Deze ruwheidsklasse wordt bepaald door de gehele omgeving die gekenmerkt wordt door de Loosdrechtse plassen Het Wijde Blik en polders. Er wordt aangenomen dat de windsnelheid boven de grond een mooi logaritmisch profiel heeft en over het algemeen geldt dit ook. Voor de beschrijving van het gemiddelde windprofiel geldt dan:

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln(\frac{z}{z_o}) \qquad (G.1)$$

U<sub>z</sub> = gemiddelde windsnelheid op hoogte z [m/s] u<sub>\*</sub> = wrijvingssnelheid [m/s] κ = Kármán-constante [κ≈0.4] z<sub>o</sub> = ruwheidslengte [m] z = hoogte gemiddelde snelheid [m]

Voor de Tweede Waterleidingplas geldt een ruwheidsklasse van 3 en dit komt overeen met een waarde voor  $z_0 \approx 0.05$  m.

Dit snelheidsprofiel is ook afhankelijk van de stabiliteit van de grenslaag zoals in onderstaande figuur is te zien. Z



Figuur F.2 Invloed van de stabiliteit

Er blijken in Nederland drie typen windklimaat te gelden:-zeeklimaat -kustklimaat en

-landklimaat

De meetstations De Bilt en Schiphol laten beiden een duidelijk landklimaat zien, dat wil zeggen dat de dagelijkse gang over het jaar genomen dezelfde vorm laat zien waarbij het polderstation Schiphol een hogere windgemiddelde snelheid heeft dan het bosrijke De Bilt. De Loenderveense plassen liggen hier geografisch gezien tussen dus de dagelijkse gang zal hetzelfde zijn waarbij het niet uitmaakt of er wordt gekozen voor de windgegevens van De Bilt of Schiphol. Er wordt aan de hand van de ruwheidsklassering een verschil gemaakt tussen het bosrijke gebied of het polderlandschap. Omdat Schiphol qua ruwheid het meeste lijkt op de Loenderveense plassen is dit het aangewezen station om de windgegevens van over te nemen.

#### F.2 Windgegevens van Schiphol

De windgegevens van Schiphol zijn bij de Gemeentewaterleidingen Amsterdam bekend van 1990 t/m 1994. Deze gegevens bestaan uit de uurgemiddelde waarden van de windrichting en de windsnelheid op 10 m hoogte. Omdat er zoals in het vorige hoofdstuk beschreven staat een verschil is tussen de zomer en winterperiode zijn deze twee perioden ook apart bekeken voor de gemiddelde waarden van de windgegevens.

	Zomer		Winter		Gehele	jaar
Richting	Percentage voorkomen (%)	Gemiddelde windsnelheid ( <sup>1</sup> / <sub>10</sub> m/s)	Percentage voorkomen (%)	Gemiddelde windsnelheid ( <sup>1</sup> / <sub>10</sub> m/s)	Percentage voorkomen (%)	Gemiddelde windsnelheid ( <sup>1</sup> / <sub>10</sub> m/s)
noord	8.9	37	4.8	42	6.9	38
NNO	7.6	45	4.6	51	6.1	47
ONO	6.5	48	5.0	57	5.8	52
oost	6.6	43	5.7	47	6.1	45
OZO	5.8	38	6.7	40	6.2	39
ZZO	4.5	42	6.6	47	5.5	45
zuid	7.0	44	11.2	56	9.0	52
ZZW	11.1	49	15.4	66	13.2	59
WZW	11.7	62	15.5	84	13.6	75
west	11.1	53	11.5	75	11.3	64
WNW	7.5	50	5.8	68	6.6	58
NNW	7.7	44	4.7	57	6.2	49
veranderlijk	4.2		2.7		3.5	

Tabel F.1 Gemiddelde windsnelheden en de frequenties van de windrichtingen

4.4

# Het zuiveringsproces in vogelvlucht

#### Winning

In 1888 startte Gemeentewaterleidingen met de levering van water, dat afkomstig was uit de Vecht. Het Vechtwater was niet geschikt als drinkwater. Hiervoor werd water uit de duinen gebruikt. Rond 1930 stapte Gemeentewaterleidingen voor de drinkwatervoorziening ook over op het kwelwater van de Bethunepolder, een drooggelegde Loosdrechtse plas waaruit het water omhoog kwelt. Dit kwelwater is een bijzonder goede grondstof. Lange tijd kon hiermee worden voldaan aan de vraag naar betrouwbaar drinkwater. Eind jaren tachtig was deze vraag echter zo groot, dat de produktiecapaciteit moest worden uitgebreid. Sindsdien wordt er ook water ingenomen uit het Amsterdam-Rijnkanaal.

Dit wordt in het waterleidingkanaal gemengd met het Bethunepolderwater. Het resultaat is een betrouwbare en stabiele grondstof voor de produktie van drinkwater.

#### Coagulatie en bezinking

Het ruwe water uit het Amsterdam-Rijnkanaal en de Bethunepolder moet worden gezuiverd. In de eerste plaats om verontreinigingen te verwijderen. Het gaat hierbij b.v. om zwevende en organische stoffen en zware metalen. Ook voedingsstoffen als fosfaten moeten worden verwijderd om ongewenste algengroei op de voorraadbekkens te voorkomen. Om het water te zuiveren wordt er ijzerchloride aan toegevoegd. De vervuilende deeltjes vormen met het ijzerchloride vlokken die samenklonteren en bezinken. Dit proces heet coagulatie. Het water dat aanvankelijk bruin van kleur is, is aan het eind van het coagulatiebassin veel helderder. Het 'dieptezicht' neemt met twee à drie meter toe. Afhankelijk van de gebruikte bronnen wordt in één of twee stappen gecoaguleerd.

# Waterleidingplas

Na de coagulatie en bezinking komt het water in de waterleidingplas terecht. Het oppervlak hiervan bedraagt c rca 130 hectare. De wind zorgt ervoor dat het water in de plas goed gemengd wordt. Om de ammoniak de organische stoffen en de bacteriën voldoende af te kunnen breken, blijft het water zo'n honderd dagen in de plas. Het zelfreinigingsproces dat zich hier voltrekt is geheel natuurlijk.

Via een in hoogte verstelbare zuigbuis wordt het water aan de plas onttrokken. Het niveau van de zuigbuismond is variabel. Het wordt afgestemd op de temperatuur, de zuurstofconcentratie en de troebelheid van het water op verschillende dieptes. Bi een onverwachte, noodzakelijke verhoging van de produktiecapaciteit dient de waterleidingplas ook als buffer.

Het water stroomt vanuit de waterleidingplas in een proefplas waar zoutzuur wordt gedoseerd om de zuurgraad van het water te regelen.

# Snelle zandfiltratie

(4

Bij de snelle zandfiltratie wordt het water verdeeld over 24 snelfilterbakken. Deze bakken zijn gevuld met een filterbed van zes lagen grind met steeds kleinere korrels. Bovenop ligt een 1.20 meter dikke filterlaag van grof zand. De nog in het water aanwezige ammoniak wordt geoxydeerd en een belangrijk deel van de zwevende en organische stoffen, bacteriën, algen en ijzer wordt eruit gefilterd. Het water stroomt in een filtraatkelder en wordt vervolgens naar Weesperkarspel gepompt.



Buffer

-

Via een tien kilometer lange, dubbele pijpleiding wordt het water vanuit Loenderveen vervoerd naar de ruwwaterverdeelbakken van Weesperkarspel (Amsterdam-Zuidoost). Deze staan in directe verbinding met een bufferreservoir (5b). In de ruwwaterverdeelbak worden aanwezige drukverschillen opgevangen. Met behulp van de beschikbare buffervoorraad kunnen kortstondige schommelingen in de watertoevoer overbrugd worden. Het resultaat is dat de wateraanvoer naar de volgende zuiveringsstappen zo gelijkmatig mogelijk is.

#### Ozonisatie

Ozonisatie is de volgende zuiveringsstap. Via poreuze, keramische buizen stroomt ozon (een gas met een sterk oxyderend vermogen en een doordringende geur) in het water, waarmee het intensief wordt gemengd. Het water verblijft vervolgens minimaal 20 minuten in de ozoncontactkelders. Organische stoffen, bestrijdingsmiddelen en ziekteverwekkers als virussen en bacteriën worden chemisch afgebroken, zodat ze in volgende fases weggefilterd kunnen worden. De kwaliteit van het water neemt hierdoor aanzienlijk toe. Ozon zorgt ook voor een neutrale smaak en een aanmerkelijke verbetering van geur en kleur van het water.

#### Ontharding

Op de ozonisatie volgt een hardheidsverlaging door een kristallisatieproces in een onthardingsreductor. Het calciumcarbonaat zet zich af op zandkorrels, doordat natronloog wordt toegevoegd. In de onthardingsinstallatie worden daardoor marmerachtige korrels gevormd.

De hoeveelheid kalk in het water wordt zo verminderd en de uiteindelijke hardheid van het water wordt teruggebracht tot 8,4 graden Duits (°D), dat is in moderne eenheden 1,5 millimol. Dit proces heeft een aantal belangrijke voordelen voor de consument. Het maakt het gebruik van huishoudelijke waterontharders overbodig. Er kan voor de was volstaan worden met de laagste dosering waspoeder. En het is dus beter voor het milieu en de portemonnee. Ook na de ontharding wordt een beetje zoutzuur gedoseerd om de zuurgraad van het water bij te stel en.

#### Koolfiltratie

8 In het koolfiltergebouw wordt het water gedurende veertig minuten in contact gebracht met actieve kool. Hierbij worden in het water zwevende stoffen gevangen in de nauwe poriën van kooldeeltjes. Nog belangrijker is het bindingsproces dat actieve kool met zich meebrengt. Ook biedt de koolfilter de gelegenheid voor bacteriën om zich te vermenigvuldigen en te hechten aan de kool. Deze drie processen zorgen ervoor dat alle resterende schadelijke bestanddelen worden verwijderd door middel van adsorptie en biologische afbraak. Het filtraat van de koolfilters wordt

# Spoelwaterverwerking

Bij het koolfiltratieproces wordt per uur circa 120 m<sup>3</sup> spoelwater gebruikt. Dit is zo'n vier procent van de totale hoeveelheid water. Met behulp van vier Dynasand-filters wordt al het spoelwater weer gezuiverd en wordt meer dan negentig procent er van teruggebracht in het zuiveringsproces. Deze wijze van recycling is niet alleen efficiënt, maar door het hergebruik van water ook goed voor het milieu. Vóór de filtratie wordt aan het water een minimale hoeveelheid ijzerchloride toegevoegd, waarna de gevormde vlokjes (zie

coagulatie) worden afgevangen in

# Lang zand

De laat langzame za snelheid str een filterbe De allerlaat zwevende o bacteriën d koolfilters, tegengehou taak van de het afvange Er treedt e Het produk helder en b baar drinkw

gedurende de zomer verrijkt met zuurstof. Een beetje natronloog wordt gedoseerd om te voorkomen dat het water agressief wordt en het leidingnet aantast. een zandfilter. Dit zand wordt door een luchtpomp continu in beweging gehouden en gereinigd. Het gereinigde spoelwater wordt teruggevoerd naar de ruwwaterverdeelbak en doorloopt met al het andere water de zuivering nogmaals.

GENIETEN VAN HET ZUIVERSTE WATER. NU, MAAR OOK LATER.

#### terleidingplas

22 coagulatie en bezinking vater in de waterleidingplas et oppervlak hiervan crca 130 hectare. De wind oor dat het water in de plas angd wordt. Om de k de organische stoffen en in voldoende af te kunnen lift het water zo'n honderd de plas. Het zelfreinigingst zich hier voltrekt is geheel

hoogte verstelbare zuighet water aan de plas h. Het niveau van de ond is variabel. Het wordt op de temperatuur, de oncentratie en de troebelhet water op verschillende i een onverwachte, noodverhoging van de produktiedient de waterleidingplas uffer.

r stroomt vanuit de waters in een proefplas waar wordt gedoseerd om de t van het water te regelen.



Bij de snelle zandfiltratie wordt het water verdeeld over 24 snelfilterbakken. Deze bakken zijn gevuld met een filterbed van zes lagen grind met steeds kleinere korrels. Bovenop ligt een 1.20 meter dikke filterlaag van grof zand. De nog in het water aanwezige ammoniak wordt geoxydeerd en een belangrijk deel van de zwevende en organische stoffen, bacteriën, algen en ijzer wordt eruit gefilterd. Het water stroomt in een filtraatkelder en wordt vervolgens naar Weesperkarspel gepompt.



Produktiebedrijf Weesperkarspel Provincialeweg 21 1108 AA Amsterdam telefoon 020 - 6510200 telefax 020 - 6976880



# ng

tie volgt een oor een krisn onthardingsmcarbonaat zet els, doordat oegevoegd. In latie worden htige korrels

t in het water rd en de uiteinhet water t tot 8,4 graden moderne ol.

n aantal belangde consument. uik van

# Koolfiltratie

In het koolfiltergebouw wordt het water gedurende veertig minuten in contact gebracht met actieve kool. Hierbij worden in het water zwevende stoffen gevangen in de nauwe poriën van kooldeeltjes. Nog belangrijker is het bindingsproces dat actieve kool met zich meebrengt. Ook biedt de koolfilter de gelegenheid voor bacteriën om zich te vermenigvuldigen en te hechten aan de kool. Deze drie processen zorgen ervoor dat alle resterende schadelijke bestanddelen worden verwijderd door middel van adsorptie en biologische afbraak. Het filtraat van de koolfilters wordt

# Spoelwaterverwerking

Bij het koolfiltratieproces wordt per uur circa 120 m<sup>3</sup> spoelwater gebruikt. Dit is zo'n vier procent van de totale hoeveelheid water. Met behulp van vier Dynasand-filters wordt al het spoelwater weer gezuiverd en wordt meer dan negentig procent er van teruggebracht in het zuiveringsproces. Deze wijze van recycling is niet alleen efficiënt, maar door het hergebruik van water ook goed voor het milieu. Vóór de filtratie wordt aan het water een minimale hoeveelheid ijzerchloride toegevoegd, waarna de gevormde vlokjes (zie coagulatie) worden afgevangen in

#### Langzame zandfiltratie

(10 De laatste zuiveringsstap is de langzame zandfiltratie. Met een lage snelheid stroomt het water door een filterbed van zeer fijn zand. De allerlaatste nog in het water zwevende deeltjes, bijvoorbeeld bacteriën die nog vrijkomen uit de koolfilters, worden door deze zeef tegengehouden; de belangrijkste taak van de langzame zandfilter is het afvangen van bacteriën. Er treedt een zekere "rijping" op. Het produkt van deze filters is helder en bacteriologisch betrouwbaar drinkwater.

# Opslag

Het drinkwater is nu klaar voor gebruik. Het wordt opgeslagen in twee reservoirs, reinwaterkelders geheten, met elk een inhoud van 15.000 m<sup>3</sup>. Deze opslag is nodig omdat het watergebruik sterk varieert, overdag veel, 's nachts weinig. Zo is het mogelijk om de produktie constant te houden en is er altijd voldoende water aanwezig. Het drinkwater kan nu als het "wonder uit de kraan" aan de consument worden aangeboden.

### Distributie

Na het zuiveringsproces wordt het drinkwater geleverd aan huishoudens en bedrijven in en om Amsterdam.

Dit gebeurt door middel van zeven distributiepompen en een leidingnet met een totale lengte van zo'n 2000 kilometer. Door het verblijf in het leidingnet zo kort mogelijk te houden blijft de kwaliteit van het drinkwater op peil en ontvangt de consument altijd vers drinkwater.

rontharders por de was et de laagste . En het is dus u en de porteontharding outzuur urgraad van en. gedurende de zomer verrijkt met zuurstof. Een beetje natronloog wordt gedoseerd om te voorkomen dat het water agressief wordt en het leidingnet aantast. een zandfilter. Dit zand wordt door een luchtpomp continu in beweging gehouden en gereinigd. Het gereinigde spoelwater wordt teruggevoerd naar de ruwwaterverdeelbak en doorloopt met al het andere water de zuivering nogmaals.

GENIETEN VAN HET ZUIVERSTE WATER. NU, MAAR OOK LATER.





Topografische Dienst Emme

Technische Universiteit Delft Faculteit der Civiele Techniek Vakgroep Waterbouw Sectie Vloeistofmechanica Gemeentewaterleidingen Amsterdam Afdeling Procesontwikkeling Sector Hydrologie -0-0-0-

2

3D-modellering van de waterbeweging en verblijftijdsspreiding ten behoeve van de inrichting van de Loenderveensche Plas als Waterleidingplas

Figuren





Astudeerverslag: D.R.Hoornstra

Afstudeercommissie: Prof.dr.ir.J.A.Battjes (TU-Delft) Prof.dr.ir.G.S.Stelling (TU-Delft) Dr.Ir.C.Kranenburg (TU-Delft) Ir.T.N.Olsthoorn (GW-Amsterdam)

April 1996



5

#### LIJST VAN FIGUREN

Fig. 1.1 Topografische ligging Eerste Waterleidingplas en Loenderveensche Plas

Fig. 2.1 Cumulatieve verblijftijdsverdeling volledig verdringingsbekken (tekst deel)

- Fig. 2.2 Verblijftijden in een volledig gemengd bekken (tekst deel)
- Fig. 2.3 Verschillende spreiding van verblijftijden bij serie geschakelde mengbekkens (tekst deel)

Fig. 2.4 Kwaliteitsverbetering bij een eerste-orde afbraakproces (tekst deel)

Fig. 4.1 Benadering van een gekromde rand (tekst deel)

Fig. 4.2 Sigma-transformatie van de bodemligging (tekst deel)

- Fig. 5.1 Controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas (tekst deel)
- Fig. 5.2 Afstand waarover een golf zich voort kan planten (tekst deel)
- Fig. 5.3 De drie verschillende schematisaties van de diepte (tekst deel)
- Fig. 5.4 De dieptegemiddelde snelheid in de stations bij een variërende turbulentieviscositeit, E in  $m^2/s$  (tekst deel)
- Fig. 5.5 Verandering van de dieptegemiddelde snelheid door verandering van de windsnelheid (tekst deel)
- Fig. 5.6 Veranderen van de bodemwrijving en de invloed op de dieptegemiddelde stroming (tekst deel)
- Fig. 5.7 Rechthoekig rooster-50 m, controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas
- Fig. 5.8 Rechthoekig rooster-25 m, controlestations en bodemprofiel Eerste Waterleidingplas
- Fig. 5.9 Snelheidsverloop rooster-50 m en 25 m bij verschillende tijdstappen
- Fig. 5.10 Rooster-50 m en 25 m, snelheidsvectoren bij ZZW-wind van 15 m/s
- Fig. 5.11 Turbulentieviscositeit van 1 m<sup>2</sup>/s en 3 m<sup>2</sup>/s, zuidenwind
- Fig. 5.12 Turbulentieviscositeit van 1 m²/s en 3 m²/s, westenwind
- Fig. 5.13 Isolijnen bij turbulentieviscositeit van 1 m²/s en 3 m²/s, zuidenwind
- Fig. 5.14 Isolijnen bij turbulentieviscositeit van 1 m²/s en 3 m²/s, westenwind
- Fig. 5.15 Bodemschuifspanning  $z_0 = 1$  mm en  $z_0 = 15$  mm, zuidenwind
- Fig. 5.16 Windsnelheid is 4 m/s en 15 m/s, zuidenwind
- Fig. 5.17 Snelheidsvectoren, bodemwrijving  $z_0 = 3$  mm en C=55 m<sup>1/2</sup>/s bij ZZW-wind 6 m/s
- Fig. 5.18 Isolijnen, bodemwrijving  $z_0 = 3$  mm en C=55 m<sup>1/2</sup>/s bij ZZW-wind 6 m/s
- Fig. 5.19 Gevoeligheid vertikale snelheidsverdeling ten aanzien van windsnelheid en bodemwrijving
- Fig. 5.20 Rechthoekig en kromlijnig rooster, noordenwind
- Fig. 5.21 Rechthoekig en kromlijnig rooster, ZZW-wind

Fig. 6.1 Modellering lange bak met zes 'controlestations' (tekst deel)

Fig. 6.2 Berekenen van de verblijftijd (tekst deel)

Fig. 6.3 Eerste-orde afbraakproces en concentratieberekening (tekst deel)

Fig. 6.4 Niet-stationaire berekening en het effect op de stroomsnelheden

Fig. 6.5 Bodemprofiel Eerste Waterleidingplas, kromlijnig rooster

Fig. 6.6 Snelheidsvectoren en plaats dwarsdoorsnede, bovenste laag (3%)

Fig. 6.7 Oosten- en zuidenwind, dwarsdoorsnede

Fig. 6.8 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming

Fig. 6.9 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming

Fig. 6.10 Lange bak, verblijftijdsspreiding en snelheden

Fig. 6.11 Geen wind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.12 Noordenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.13 Oostenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.14 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.15 Westenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.16 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.17 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding

Fig. 6.18 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Fig. 7.1 Principe van de invloed van de strekdam (tekst deel)

Fig. 7.2 Bovenaanzichten Eerste Waterleidingplas en ontwerpen Tweede Waterleidingplas

Fig. 7.3 Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

Fig. 7.4 Korte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

Fig. 7.5 Lange strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

Fig. 7.6 Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het westen

Fig. 7.7 Strekdam, opslag veen en meermolm in het zuidoosten

#### Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

Fig. 8.1 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming

Fig. 8.2 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming

Fig. 8.3 Geen wind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.4 Noordenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.5 Oostenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.6 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.7 Westenwind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.8 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.9 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding

Fig. 8.10 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Korte strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

- Fig. 8.11 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.12 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.13 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.14 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.15 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.16 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.17 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.18 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.19 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.20 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Lange strekdam, opslag veen en meermolm in het noorden

- Fig. 8.21 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.22 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.23 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.24 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.25 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.26 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.27 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.28 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.29 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.30 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Geen strekdam, opslag veen en meermolm in het westen

- Fig. 8.31 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.32 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.33 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.34 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.35 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.36 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.37 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.38 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.39 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.40 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding

#### Strekdam, opslag veen en meermolm in het zuidoosten

- Fig. 8.41 Noorden- en oostenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.42 Zuiden- en westenwind van 6 m/s, dieptegemiddelde stroming
- Fig. 8.43 Geen wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.44 Noordenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.45 Oostenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.46 Zuidenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.47 Westenwind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.48 ZZO-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.49 ZZW-wind, verblijftijdsspreiding
- Fig. 8.50 ZZO-wind van 15 m/s, verblijftijdsspreiding
- Fig. 9.1 Mate van menging (tekst deel)
- Fig. 9.2 Bodemprofiel met onderwaterdam
- Fig. 9.3 Onderwaterdam, geen wind verblijftijdsspreiding
- Fig. C.1 Concept van de verlaging van de concentratie bij het toevoegen van een concentratie  $c_o$  (tekst deel)
- Fig. C.2 Verblijftijd afhankelijk van aandeel circulerende stroming (tekst deel)
- Fig. C.3 Cumulatieve verblijftijdsverdeling bij het concept (tekst deel)

Fig. F.1 West-circulaties in Europa (tekst deel)

Fig. F.2 Invloed van de stabiliteit op de windsnelheden (tekst deel)







 $\bigcirc$ 



 $(\Box$ C e  $\bigcirc$ C  $\bigcirc$ e  $\bigcirc$ G O  $\Theta$ C C 0 0 0 C O 0 e



 $\bigcirc$ C  $\square$  $(\Box)$ 6  $\Theta$ 





- $\cup$ C




















-





-











 $\bigcirc$  $\bigcirc$ 0 0 C 6 0  $\bigcirc$  $\bigcirc$ ( 0 0 0  $\bigcirc$ C C O. C 0 C O 0 O C







9 3  $\odot$ C C U 0 0 0 G



C









 $\bigcirc$ 









0 0 0  $\bigcirc$  $\bigcirc$ 0 0 0 0 ( = )0 (  $\bigcirc$  $\Theta$  $( \cdot )$ C  $\Theta$ C  $\bigcirc$ 0 0 C  $\bigcirc$  $\bigcirc$ 



( ) $\bigcirc$ C 



 $(\square)$  $(\Box$ C C C C (-)C ( 0 0  $\Theta$ C 0 C  $\Theta$ C C C C C  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\Box$ 



) 1 0 C




































=











 $\left( - \right)$ 





 $\ominus$ 









 $(\Box$ 















J







 $(\Box$ 








e  $(\Box)$ 





 $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $\bigcirc$  $(\square$ e 0 C  $\bigcirc$ 0 O 0  $\bigcirc$  $\bigcirc$ Ô  $\in$ C C  $\bigcirc$  $\bigcirc$ C.  $\odot$ O  $\Theta$ C  $\bigcirc$  $\Theta$  $\left( -\right)$ 





 $(\bigcirc$ e C C. O 0 0 O e C .  $\bigcirc$ O C O Ó Θ  $\bigcirc$  $\Theta$ (----















