

Modellering van de sluis

Overzicht van Q-h relaties in WAQUA en
herziening 3D sluisformulering met testberekening

Project: NAUTILUS

Werkdocument: RIKZ/OS-99.145X



In opdracht van:

Directie Noordzee
Directie Zuid-Holland
Directie Zeeland
Directie Noord-Holland
Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 Varianten
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
Meetstrategie 2000+

Modellering van de sluis

Overzicht van Q-h relaties in WAQUA en herziening
3D sluisformulering met testberekening

Project: NAUTILUS
Werkdocument: RIKZ/OS-99.145X
Datum: september 1999
Auteur: M. Zijlema



Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Inhoudsopgave

1 Inleiding 4

1.1 Achtergrond 4

1.2 Doelstelling 5

1.3 Opzet rapport 5

2 2DH-modellering van de sluis 6

2.1 Overzichts- en detailmodellering van de sluis 6

2.2 Berekening van het energieverlies en afleiding 2D barrierformulering 7

2.3 Stromingscondities en Q-h relaties 10

3 3D-modellering van de sluis 15

3.1 3D barrierformulering op basis van overzichtsmodel-benadering 15

3.2 3D barrierformulering op basis van detailmodel-benadering 17

3.3 Noodzakelijke aanpassingen in detailmodel-benadering t.a.v. reproductie van debiet en verval 19

3.4 Samenvatting 23

4 Numerieke experimenten 25

4.1 Berekeningen met het 2DV model 25

4.2 Simulaties met het MOHA model 36

5 Conclusies en aanbevelingen 44

Literatuur 46

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Ten behoeve van het project MER Beheer Haringvlietsluizen is in het verleden een onderzoek gedaan naar het opstellen van een 3D sluisformulering die het grootschalige effect van het Haringvlietsluizencomplex op de stroming beschrijven [4]. De uit dat onderzoek opgestelde 3D sluisformulering is geïmplementeerd in een TRIWAQ versie die op de Cray machine van SARA beschikbaar is. Met deze versie zijn enkele berekeningen uitgevoerd met het RIJMAMO 3D (v1) model voor het onderzoek naar alternatief beheer van de Haringvlietsluizen [10]. Dit model behelst de simulatie van de drie-dimensionale structuur van de waterbeweging en het zouttransport op basis van de schematisatie van de Voordelta, het mondingsgebied van de Waterweg en een groot gedeelte van het Haringvliet. De resultaten van de berekeningen bleken niet bevredigend te zijn in die zin dat het RIJMAMO model de werkelijkheid niet optimaal reproduceert. Het blijkt dat de zoutindringing door de Haringvlietsluizen in het Haringvliet met een factor 1.5 à 2 wordt onderschat.

In het kader van het NAUTILUS project is een nieuw modelschematisatie ontwikkeld van het Rijnmaasmond gebied, te weten RIJMAMO 3D (v2) [1]. Het simuleren met dit model heeft tot doel om onder andere de geconstateerde tekortkomingen zoals de reproductie van de zoutindringing te verbeteren. Recentelijk zijn er aantal berekeningen uitgevoerd met dit model waarbij het aantal lagen zijn gevarieerd; zie [11]. Hiervoor zijn zowel de Cray versie als de huidige B+O versie van TRIWAQ waarin een verbeterde sluisformulering is geïmplementeerd gebruikt [8]. Deze verbetering betreft het corrigeren van een (numerieke) fout in doorstroomopening in de sluis welke ontstaat ten gevolge van de verticale resolutie. Er zijn opvallende verschillen geconstateerd tussen de modellen onderling en tussen de modellen en de metingen. Deze verschillen komen tot uiting in onder andere de tijdreeksen van het debiet door de Haringvlietsluizen en het waterstands-verval over de sluisen.

Op basis van de resultaten van de bovengenoemde berekeningen blijkt dat zowel de niet optimale reproductie van de zoutindringing als het afwijkende gedrag van de debiet-verval relatie, ook wel Q-h relatie genoemd, nauw samenhangt met onder andere de gebruikte sluisformuleringen. Om beter inzicht in dit probleem te verkrijgen gaat dit werkdocument nader in op de 3D modellering van de sluis. Op grond van de fysica wordt een 3D sluisformulering afgeleid. Onder bepaalde aannames kunnen de eerder gebruikte sluisformuleringen, zoals beschreven in [4] en [8], hiervan worden afgeleid. Voor de volledigheid wordt eveneens de modellering van de sluis in 2D modellen beschreven waarbij een overzicht van stromingscondities rond de sluis wordt gegeven. Dit is mede gedaan omdat in de WAQUA-gebruikershandleiding [7] enkele onjuistheden bevatten.

De sluisformuleringen zijn semi-empirische relaties welke een calibratie-parameter bevatten, de zg. afvoercoëfficiënt. Voor de goede reproductie van de Q-h relatie is het daarom noodzakelijk om voldoende meetgegevens van waterstanden en debieten te verwerven voor corresponderende numerieke berekeningen. De onderliggende gedachte is dat uit vele meetsessies, die om en nabij het Haringvlietsluizencomplex hebben plaatsgevonden, blijkt dat voor de

Haringvlietsluizen een eenduidige Q-h relatie lijkt te gelden, dat wil zeggen de lokale stroming is semi-permanent [3,9]. Dit impliceert dat voor de calibratie van de afvoercoëfficiënt de Q-h formulering volstaat en derhalve relatief goedkoop en efficiënt uitvoerbaar. Voorwaarde is echter wel dat de 3D modellen de reproductie van de Q-h relatie in kwantitatieve zin dienen te realiseren, waarbij de berekende afvoercoëfficiënt gelijk moet zijn aan de gecalibreerde waarde. Deze voorwaarde is tevens noodzakelijk voor de goede reproductie van de zoutindringing. Dit werkdocument beschrijft de mogelijke verbeteringen in de 3D sluisformulering waarbij de nadruk wordt gelegd op het reproduceren van de Q-h relatie. Dit zal worden geïllustreerd aan de hand van enkele testberekeningen met 2DV en MOHA modellen.

1.2 Doelstelling

De onderhavige studie heeft tot doel om enerzijds een beschrijving van twee- en drie-dimensionale sluisformuleringen en een compleet overzicht van de gebruikte Q-h relaties in WAQUA te geven, anderzijds om op grond van de beschrijving aan te geven hoe de drie-dimensionale sluisformulering kan worden verbeterd ten behoeve van de reproductie van de Q-h relatie.

1.3 Opzet rapport

In Hoofdstuk 2 wordt een afleiding van de 2D sluisformulering gegeven. Vervolgens wordt een overzicht van de stromingscondities en bijbehorende Q-h relaties gepresenteerd.

Hoofdstuk 3 behandelt een afleiding van de 3D sluisformulering. Tevens worden enkele mogelijke verbeteringen in de formulering besproken. Deze verbeteringen behelzen de nauwkeurige reproductie van de Q-h relatie.

In Hoofdstuk 4 worden de resultaten van testproblemen beschreven. Eerst worden een aantal 2DV modelberekeningen uitgevoerd waarmee de reproductie van de Q-h relatie wordt getest. Dit geschiedt door middel van vergelijking van de door het model berekende afvoercoëfficiënt met de opgegeven afvoercoëfficiënt. Tot slot wordt als testprobleem een praktijksituatie beschouwd, te weten het MOHA model welke een uitsnede is van het RIJMAMO model.

Geëindigd wordt in Hoofdstuk 5 met samenvattende conclusies en aanbevelingen.

2 2DH-modellering van de sluis

In dit hoofdstuk leiden we enkele formules af welke nodig zijn voor het beschrijven van de effecten van de sluis, ook wel barrier genoemd, op de stroming in 2D-modellen. Ten behoeve hiervan wordt in Paragraaf 2.1 het onderscheid tussen groot- en kleinschalige modellering van de sluis besproken. In Paragraaf 2.2 behandelen we de sluisformulering welke geschikt is voor WAQUA-modellen. Tot slot wordt in Paragraaf 2.3 een overzicht van stromingscondities rond de barrier gegeven.

2.1 Overzichts- en detailmodellering van de sluis

Een sluis vormt een obstructie in de stroming die niet zonder meer te modelleren valt met ondiepwater-modellen zoals WAQUA en TRIWAQ. De oorzaken hiervan zijn vaak te grove roosterafstanden om een dergelijk oneffenheid te kunnen weergeven, of onvoldoende fysica in de ondiepwatervergelijkingen om de vaak zeer turbulente verschijnselen rond zo'n sluis goed weer te kunnen geven. Echter, met behulp van een globale relatie tussen het debiet en het waterstandsverschil over de sluis (zg. Q-h relatie) kan de effect van de sluis op de stroming in globale zin worden beschreven. In de volgende twee paragrafen wordt dit uitgebreid besproken.

De meeste twee- en drie-dimensionale modellen bevatten grovere roosters van 50 - 250 meter. Over het algemeen zijn WAQUA-roosters grover dan TRIWAQ-roosters. Afhankelijk van de grootte van de roosterafstanden kunnen de aanwezigheid van de sluisen al dan niet "fysiek" worden gemodelleerd. Ten gevolge van de veelal relatief fijne resolutie van TRIWAQ-rooster is de grootte van barrier van dezelfde orde als die van de maaswijdte van het model. Bijvoorbeeld voor het rooster van het RIJMAMO model [1] vallen elk van de 17 Haringvlietsluizen samen met één roostercel. Op deze wijze is het mogelijk om de schuiven en drempels te modelleren met behulp van (vertikale) schotjes. Hierdoor wordt de snelheid ter plaatse van de barrier veel groter dan in de rest van de omgeving. Bovendien kan voor wat betreft de drempel als alternatief de bodem ter plaatse van de barrier worden aangepast. De grofheid van WAQUA-rooster daarentegen is over het algemeen dusdanig dat de barrier relatief klein is ten opzichte van de roostercel. Om die reden wordt de aanwezigheid van de schuif en drempel veelal genegeerd in het model. Er is dan ook geen sprake van lokale snelheidsverhoging door de barrier.

Op grond van het bovenstaande worden twee benaderingen onderscheiden (zie ook [5]):

- **Overzichtsmodel:** hierbij wordt gerekend met de omgevingsnelheid, d.w.z. de over de vertikaal gemiddelde snelheid op basis van de fictieve doorsnede betrekking hebbend op de actuele waterstand en de bodemligging bij afwezigheid van de sluis en drempel;
- **Detailmodel:** hierbij wordt gerekend met de werkelijke optredende snelheid in de barrier.

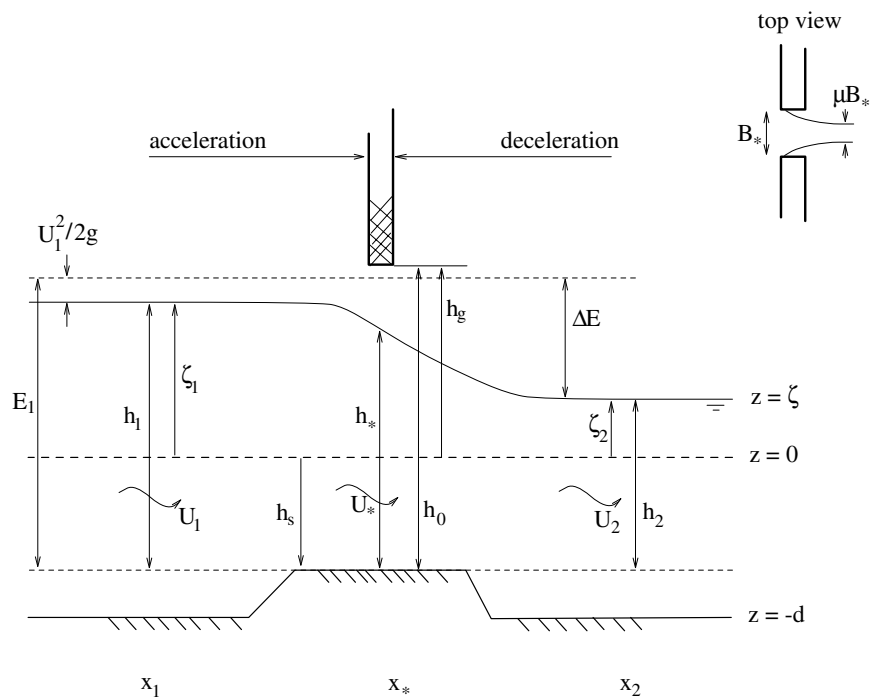
In de praktijk wordt dus in WAQUA alleen de overzichtsmodel-benadering gehanteerd. Niettemin kan men in bepaalde WAQUA modellen de detailmodel-benadering toepassen waarbij bijvoorbeeld de schuiven volledig geheven zijn,

terwijl de drempel gemodelleerd is door lokaal de diepte te wijzigen. Overigens is de deze benadering nog niet in WAQUA geïmplementeerd. In TRIWAQ zijn beide benaderingen mogelijk. Een voordeel van de detailmodel-benadering is dat het natte doorstroomoppervlak overeenkomt met de werkelijkheid. Er zijn dan geringe verschillen tussen de fysische snelheid en de modelsnelheid, terwijl ook het debiet correct blijft. Het verticale snelheidsprofiel in en voorbij de sluis wordt hierdoor zo correct mogelijk weergegeven. Dit is vooral van belang voor de zouttransport.

Afhankelijk van de bovengenoemde benaderingen kan een barrierformulering op relatief grove roosters worden opgesteld zodanig dat, gegeven een bepaald verhang, het juiste debiet door de sluisen wordt gegenereerd. Echter, drie-dimensionale aspecten zoals de verticale structuur van de stroming dient men eveneens mee rekening te houden. Dit wordt behandeld in Hoofdstuk 3. In de volgende paragraaf wordt de 2D barrierformulering beschreven. We merken op dat er vele manieren zijn om deze barrierformulering af te leiden; zie ook bijvoorbeeld [13].

2.2 Berekening van het energieverlies en afleiding 2D barrierformulering

Rond het sluisencomplex wordt de stroming belemmerd door de schuiven en drempels. Figuur 2.1 toont een schematische weergave van de stroming rond de sluis. De barrier leidt lokaal tot stroomversnellingen en stroomvertragingen. In het versnellingsgebied treedt er geen energieverlies op. Echter, stroomvertraging leidt tot een verhoging van de turbulentie die op haar beurt



Figuur 2.1 Schematische weergave van stroming door een sluis.

weer tot grotere energieverliezen leidt. In de ondiepwatervergelijkingen wordt met dit extra verliezen geen rekening gehouden. Op grovere roosters is een parametrisatie nodig, op basis van semi-empirische relaties, om het energieverlies ten gevolge van een barrier in rekening te brengen.

De weerstand die de sluis ondervindt is gelijk aan het drukverschil dat nodig is om de stroming door de barrier te stuwen, waarin zowel horizontale contractie (door de pijlers) als verticale contractie (door de drempel en eventueel schuif) plaatsvindt. De effecten van de weerstand, zoals de vormweerstand en de wrijving langs de peilers, worden gemodelleerd met behulp van de zg. afvoercoëfficiënt μ . De afvoercoëfficiënt zal aan de hand van metingen moet worden afgeregeld.

We beschouwen aldus de situatie zoals geschetst in Figuur 2.1 en de volgende vergelijking:

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

waarin ζ de waterstand is en E is de mechanische energie. De stroming vindt plaats langs de x-as. De discrete vorm van vergelijking (2.1) in het punt x . luidt ($\Delta x = x_2 - x_1$):

$$g \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} + g \frac{E_1 - E_2}{\Delta x} = 0 \quad (2.2)$$

met ζ_1 , ζ_2 respectievelijk de boven- en benedenwaterstanden en E_1 en E_2 zijn respectievelijk de energiehogtes bovenstrooms en benedenstrooms. Voor de stroming in het versnellingsgebied geldt behoud van energie (Bernoulli):

$$E_1 = E_* \Rightarrow \frac{U_1^2}{2g} + h_1 = \frac{U_*^2}{2g} + h_* \quad (2.3)$$

met U . de diepte-gemiddelde snelheid in de barrier, h_* is de waterdiepte t.o.v. de drempel in de keel van de barrier en U_1 en h_1 zijn respectievelijk de bovenstroomse snelheid en waterdiepte t.o.v. de drempel. Uit vergelijking (2.3) leiden we de zg. overlaatformule of Q-h relatie:

$$Q = \mu h_* B_* U_* = \mu h_* B_* \sqrt{2g(E_1 - h_*)} \quad (2.4)$$

met Q het debiet door de barrier en B_* de breedte van de opening. Voor een subkritische stroming (relatief lage Froude getallen) wordt in de praktijk de kinetische energie bovenstrooms van de barrier verwaarloosd. Dit is mede ingegeven door het feit dat bij meetproeven de afvoercoëfficiënt μ wordt bepaald uit het verval tussen de waterdiepte h_1 en h_2 in plaats van uit het verval tussen de energiehogte E_1 en de waterdiepte h_2 . Aldus:

$$h_1 = E_* \Rightarrow h_1 = h_* + \frac{U_*^2}{2g} \Rightarrow E_1 = E_* + \frac{U_1^2}{2g} \quad (2.5)$$

Uit (2.5) volgt de Q-h relatie:

$$Q = \mu h_* B_* \sqrt{2g(h_1 - h_*)} \quad (2.6)$$

Door invoering van een parameter e kunnen de energiebalansen (2.3) en (2.5) als volgt worden samengevat:

$$E_1 = \frac{U_*^2}{2g} + h_* + \frac{(1-e)U_1^2}{2g}, \begin{cases} e = 0, \text{ als subkritische stroming} \\ e = 1, \text{ als superkritische stroming} \end{cases} \quad (2.7)$$

We bereken nu het energieverlies ΔE :

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{U_*^2}{2g} + h_* + \frac{(1-e)U_1^2}{2g} - \frac{U_2^2}{2g} - h_2 \quad (2.8)$$

Om formule (2.8) toepasbaar te maken in de computermodellen voeren we de aanname in dat in het vertragingsgebied alle kinetische energie vernietigd wordt, of met andere woorden dat er alleen behoud van potentiële energie is, waardoor $h_2 = h_*$. Aldus:

$$\Delta E = \frac{U_*^2 + (1-e)U_1^2 - U_2^2}{2g} \quad (2.9)$$

We beperken ons tot overzichtsmoedellen (zie Paragraaf 2.1). Dit betekent dat de barrier relatief klein is ten opzichte van de maaswijdte van de rekencel, zodat de aanwezigheid van de schuif en drempel genegeerd wordt. We vertalen de formule (2.9) naar de omgevingsnelheid U_b (niet in Figuur 2.1 weergegeven) op basis van de fictieve doorsnede, $h_b B_b$, betrekking hebbend op de actuele waterstand en de bodemligging alsook de breedte bij afwezigheid van de sluis en drempel. Er geldt:

$$Q = \mu h_* B_* U_* = h_b B_b U_b \quad (2.10)$$

In verband hiermee introduceren we een coëfficiënt M die de verhouding tussen netto doorsnede in de keel van de barrier en fictieve doorsnede weergeeft:

$$M = \frac{\mu h_* B_*}{h_b B_b} \quad (2.11)$$

Uit (2.10) en (2.11) volgt:

$$U_* = \frac{U_b}{M} \quad (2.12)$$

Tot slot zijn de boven- en benedenstroomse snelheden qua orde grootte gelijk aan de omgevingsnelheid:

$$U_1 \approx U_2 \approx U_b \quad (2.13)$$

Substitutie van (2.12) en (2.13) in (2.9) geeft:

$$\Delta E = \frac{U_b^2}{2g} \left(\frac{1}{M^2} - e \right) \quad (2.14)$$

Opmerkingen:

1. voor subkritische stroming geldt vaak $M \ll 1$, zodat in WAQUA de verliesterm (2.14) met $e = 1$ is geïmplementeerd;

2. in WAQUA wordt de fictieve hoogte h_b onjuist berekend: $h_b = \bar{d} + \zeta_1$ met \bar{d} de geïnterpoleerde diepte in het barrierpunt x_* . Hierbij is de stroming gericht van x_1 naar x_2 . De correcte berekening moet zijn:
- $$h_b = \bar{d} + \frac{1}{2}(\zeta_1 + \zeta_2).$$

De vereenvoudigd impulsbalans ter plaatse van de barrier in discrete vorm luidt (rekening houdend met de stroomrichting):

$$g \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} + \frac{U_b |U_b|}{2\Delta x} \left(\frac{1}{M^2} - e \right) = 0 \quad (2.15)$$

In WAQUA worden ter plaatse van de barrier de impulsvergelijkingen gehandhaafd en wordt het effect van de barrier op de stroming als een extra verlies (2.14) toegevoegd. Op grond van vergelijking (2.15) ligt het voor de hand om de barrier te plaatsen in het snelheidspunt. Naar keuze kan daarbij een barrier in een U- of V-punt ondergebracht worden. Ook het plaatsen van de barrier onder 45° behoort tot de mogelijkheden in WAQUA (zie [7,14]).

Opmerking: in de barrierformulering worden dichtheidseffecten niet meegenomen daar ze in het algemeen verwaarloosbaar zijn. Bovendien wordt de barocliene drukgradient ter plaatse van de barrier verwaarloosd.

In WAQUA worden allerlei stromingscondities onderscheiden, zoals volkomen en onvolkomen overlaat, vrij oppervlak- en schuifstroming, etc., waarbij voor iedere conditie de Q-h relatie wordt opgesteld. Elk van deze stromingscondities leidt tot een andere waarde voor μ en daarmee voor M . Deze onderwerpen worden in de volgende paragraaf behandeld.

2.3 Stromingscondities en Q-h relaties

In de vorige paragraaf hebben we de Q-h relaties (2.4) en (2.6) afgeleid voor respectievelijk een superkritische stroming (volkomen overlaat) en subkritische stroming (onvolkomen overlaat). Daarnaast worden de stromingscondities onderscheiden die betrekking hebben op een combinatie van een drempel en een schuif, die zich gedeeltelijk in het water of boven de waterspiegel bevindt. Er worden echter ook enige overgangssituaties onderscheiden. Dit zijn situaties, waarbij de positie van de schuif in het water een grote invloed heeft op de stromingsconditie, of kan hebben op het moment dat de schuif in het water begint te komen. In een numerieke proces zal dit tot soortgelijke verschijnselen leiden, die uiteindelijk kunnen resulteren in het afbreken van het programma.

In het geval van subkritische stroming wordt de berekening met de barrierformulering uitgevoerd met na de barrier een horizontale waterstand, aldus $h_* = h_2$. Dit laatste geldt vanwege de aanname dat in het verdragingsgebied alle kinetische energie vernietigd wordt. We beschouwen de situatie van de schuif boven het water. Men spreekt van vrije oppervlakstroming ("free surface flow"). De voorwaarde hiervoor luidt: $h_1 < h_0$ (zie Figuur 2.1). Het natte doorstroomoppervlak ter plaatse van de barrier is dan gelijk aan $B \cdot h_* = B \cdot h_2$. De voorwaarde voor de schuif onder het water, ook wel schuifstroming genoemd ("gate flow"), is $h_1 \geq \frac{3}{2} h_0$. In dit geval is het natte doorstroomoppervlak ter plaatse van de barrier gelijk aan $B \cdot h_0$. Het gebied $h_0 \leq h_1 < \frac{3}{2} h_0$ vormt een overgangsgebied welke om de reden genoemd in de vorige alinea is ingevoerd.

Bij superkritische stroming moeten, voor een goede weergave van de fysica, de waterstanden boven- en benedenstrooms worden losgekoppeld. Dit houdt in dat de waterstand ter plaatse van de barrier h_* dwingend moet worden opgelegd. Voor meer details, zie [5]. In het geval van schuifstroming is dat $h_* = h_0$ en is het natte doorstroomoppervlak gelijk aan $B \cdot h_0$. Voor een vrije oppervlakstroming geldt: $h_* = \frac{2}{3} E_1$, waarbij het natte doorstroomoppervlak wordt berekend als $\frac{2}{3} B \cdot E_1$. Bovendien geldt voor de benedenwaterstand de volgende conditie: $h_2 \leq h_*$. We merken op dat dit tevens de conditie is voor de overgang tussen sub- en superkritische stroming.

Opmerking: in de implementatie van WAQUA wordt bij een superkritische stroming een interne randconditie opgelegd en worden de roosterrij of -kolom in twee gedeelten behandeld. Bij een subkritische stroming wordt de rij of kolom als één geheel behandeld.

In het verleden is op basis van testberekeningen vastgesteld dat bij de vrije oppervlakstroming in opeenvolgende tijdstappen subkritische en superkritische stroomtoestanden elkaar kunnen afwisselen. Dit is ondervangen door, indien een superkritische stromingsituatie optreedt, de volgende tijdstap toe te staan dat de test voor de bepaling van de stroomtoestand "iets subkritisch" mag uitvallen en dat vervolgens toch de berekening voor superkritische stroming wordt uitgevoerd. De conditie voor subkritische vrije oppervlakstroming luidt dan:

$$h_2 > \frac{2}{3} E_1 + \varepsilon \quad \text{met} \quad \varepsilon = \frac{1}{10} \frac{U_1^2}{2g} \quad (2.16)$$

indien in de vorige tijdstap de stroming superkritisch is, en anders $\varepsilon = 0$.

De Q-h relatie (2.4) of (2.6) bevat een afvoercoëfficiënt μ . De waarde van de afvoercoëfficiënt zal sterk afhangen van de vormgeving van het sluisencomplex en de daarmee samenhangend aanstroomrichting. Bijvoorbeeld de vormgeving van de sluisdeuren van Haringvlietsluizen is zodanig dat bij het laten zakken van de sluisdeur aan de zeezijde in het geval van spuien (ebstroming) de vormweerstand hoger is dan voor vloedstroming. Wijzigt de stromingsrichting door het kenteren van het getij en blijft de schuif aan de zeezijde in het water, dan wordt de vormweerstand dus verlaagd. Om de afhankelijkheid van de aanstroomrichting aan te geven wordt de coëfficiënt $\mu_{l,r}$ met subindices l, r weergegeven, waarbij l en r de stroming van links naar rechts respectievelijk rechts naar links voorstellen. Bovendien hangt μ tevens af van de stromingsconditie. Bij vrije oppervlakstroming wordt het effect van de horizontale vernauwing en verticale vernauwing via de afvoercoëfficiënt verdisconteerd, welke verschillend zijn bij sub- en superkritische stroming. In het eerste geval wordt de coëfficiënt genoteerd als $\mu_{1,2}$ en in het tweede geval $\mu_{3,4}$. In het geval van schuifstroming wordt ook het effect van de extra verticale vernauwing ten gevolge van de schuif gemodelleerd via de afvoercoëfficiënt $\mu_{5,6}$. Derhalve kunnen maximaal 6 verschillende afvoercoëfficiënten worden opgegeven.

Ter wille van het overzicht staan in Tabel 2.1 de Q-h relaties en uitdrukkingen van M vermeld voor vier onderscheiden stroomtoestanden onder bepaalde condities (zie ook [5]). Bij de hantering van de overlaatformules wordt soms uitgegaan van het energieniveau bovenstrooms en soms van de waterstand bovenstrooms. Om hiermee rekening te houden is in de barrierformulering (2.15) een coëfficiënt (e) ingevoerd, die op 0 of 1 kan worden gezet.

Tabel 2.1 Overzicht stromingscondities en Q-h relaties.

positie schuif	subkritisch ($e = 0$)				superkritisch ($e = 1$)				
	nr.	voorwaarde voor conditie	Q-h relatie	M	nr.	voorwaarde voor conditie	Q-h relatie	M	h .
boven water	4	$h_1 < h_0$ $\frac{2}{3}E_1 + \varepsilon < h_2$	$Q = \mu_{1,2} B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$	$\frac{\mu_{1,2} B h_2}{h_b B_b}$	3	$h_1 < h_0$ $h_2 \leq \frac{2}{3}E_1 + \varepsilon$	$Q = \frac{2}{3} \mu_{3,4} B E_1 \sqrt{\frac{2}{3} g E_1}$	$\frac{\frac{2}{3} \mu_{3,4} B E_1}{h_b B_b}$	$\frac{2}{3} E_1$
onder water	7	$\frac{3}{2}h_0 \leq h_1$ $h_0 < h_2$	$Q = \mu_{5,6} B h_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$	$\frac{\mu_{5,6} B h_0}{h_b B_b}$	1	$\frac{3}{2}h_0 \leq h_1$ $0 \leq h_2 \leq h_0$	$Q = \mu_{5,6} B h_0 \sqrt{2g(E_1 - h_0)}$	$\frac{\mu_{5,6} B h_0}{h_b B_b}$	h_0

Opmerkingen:

1. de conditienummers zoals in Tabel 2.1 zijn weergegeven zijn conform het WAQUA programma [7];
2. bij stromingsconditie 1 kan de waterstand benedenstreams niet lager zijn dan de drempel, aldus $h_2 \geq 0$;
3. in WAQUA kan de verhouding $B./B_b$ door de gebruiker worden opgegeven;
4. in WAQUA kan men de schuifhoogte h_g en dorpelhoogte h_s opgeven (zie Figuur 2.1). Op deze manier kunnen de waterdieptes t.o.v. de drempel worden bepaald: $h_1 = \zeta_1 + h_s$, $h_2 = \zeta_2 + h_s$ en $h_0 = h_g + h_s$.

Om de numerieke stabiliteit van de oplossing te bevorderen worden in de barriërfomulering ook enige overgangssituaties onderscheiden. In dit geval bevindt de bovenwaterstand h_1 zich tussen h_0 en $3h_0/2$. Voor deze overgangssituaties wordt in WAQUA uitgegaan van aangepaste overlaatformuleringen, zodat er sprake is van continue overgang in de Q-h relatie bij de overgangen van stromingscondities. De berekening vindt in principe plaats als in het voorgaande is beschreven, zij het met een meer ingewikkelde afvoercoëfficiënt. Bij subkritische stroming geven condities 5 en 6 de overgangssituaties weer bij respectievelijk vrije oppervlakstroming en schuifstroming. De bijbehorende afvoercoëfficiënten zijn gelijk aan die van respectievelijk condities 4 en 7 vermenigvuldigd met factor γ :

$$\gamma = 1 + 2 \left(\frac{h_1}{h_0} - 1 \right) \left(\frac{\mu_{5,6} h_0}{\mu_{1,2} h_2} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Hetzelfde geldt voor de superkritische stroming, waar conditie 2 een overgangssituatie weergeeft. De bijbehorende afvoercoëfficiënt is gelijk aan die van conditie 3 vermenigvuldigd met factor $\tilde{\gamma}$:

$$\tilde{\gamma} = 1 + 2 \left(\frac{h_1}{h_0} - 1 \right) \left(\frac{\mu_{5,6} h_0 \sqrt{E_1 - h_0}}{\frac{2}{3} \mu_{3,4} E_1 \sqrt{\frac{1}{3} E_1}} - 1 \right) \quad (2.18)$$

In Tabel 2.2 staan de Q-h relaties en de uitdrukkingen van M weergegeven voor de overgangssituaties. Zie voor meer details [5].

Tabel 2.2 Overzicht stromingscondities en Q-h relaties bij overgangssituaties.

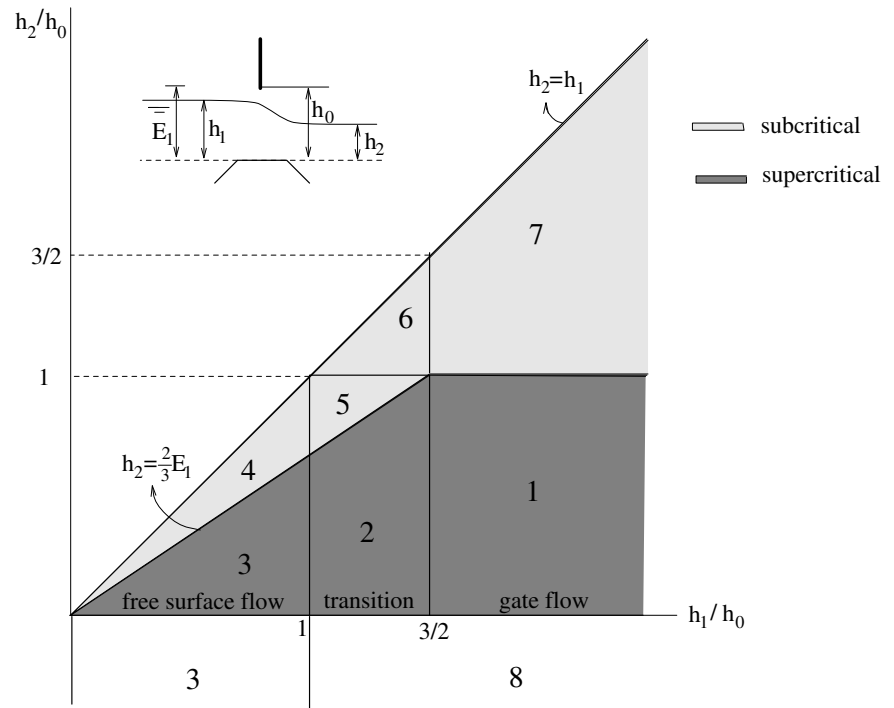
positie schuif	subkritisch (e = 0)				superkritisch (e = 1)				
	nr.	voorwaarde voor conditie	Q-h relatie	M	nr.	voorwaarde voor conditie	Q-h relatie	M	h.
boven water	5	$h_0 \leq h_1 < \frac{3}{2}h_0$ $\frac{2}{3}E_1 - \varepsilon < h_2 \leq h_0$	$Q = \mu_{1,2}\gamma B_b h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$	$\frac{\mu_{1,2}\gamma B_b h_2}{h_b B_b}$	2	$h_0 \leq h_1 < \frac{3}{2}h_0$ $0 \leq h_2 \leq \frac{2}{3}E_1 - \varepsilon$	$Q = \frac{2}{3}\tilde{\gamma}\mu_{3,4}B_b E_1 \sqrt{\frac{2}{3}gE_1}$	$\frac{\frac{2}{3}\tilde{\gamma}\mu_{3,4}B_b E_1}{h_b B_b}$	$\frac{2}{3}E_1$
onder water	6	$h_0 \leq h_1 < \frac{3}{2}h_0$ $h_0 < h_2$	$Q = \mu_{5,6}\gamma B_b h_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$	$\frac{\mu_{5,6}\gamma B_b h_0}{h_b B_b}$					

Merk op dat bij de vrije oppervlakstroming de benedengrens en bovengrens van h_2 bij respectievelijk subkritische en superkritische stroming zijn aangepast om te voorkomen dat in opeenvolgende tijdstappen subkritische en superkritische stroomtoestanden (condities 2 en 5) elkaar kunnen afwisselen.

Tot slot hebben we nog een speciale stromingsconditie welke in de Nederlandse wateren kan voorkomen namelijk een constructie, waarbij het water door een gleuf ("slot") stroomt en de benedenwaterstand lager is dan de gleuf zelf. De condities hiervoor zijn aldus: $h_1 \geq h_0$ en $h_2 < 0$. De boven- en benedenwaterstand worden losgekoppeld en de waterstand ter plaatse van de barrier wordt dwingend voorgeschreven volgens: $h_* = \frac{1}{2}h_0$. Tot slot wordt de bovenstroomse kinetische energie verwaarloosd, zodat $e = 0$. De bijbehorende Q-h relatie en de waarde voor M zijn dan:

$$Q = \mu_{5,6} B_b h_0 \sqrt{2g \left(h_1 - \frac{1}{2}h_0 \right)}, \quad M = \frac{\mu_{5,6} B_b h_0}{h_b B_b} \quad (2.19)$$

Figuur 2.2 geeft een overzicht van de gebieden waarvoor de besproken stromingscondities van toepassing zijn.



Figuur 2.2 Deelgebieden waarvoor de stromingscondities toepasbaar zijn.

3 3D-modellering van de sluis

Voor een goede beschrijving van de zoutindringing via de Haringvlietsluizen wordt gebruik gemaakt van drie-dimensionale modellen, zoals RIJMAMO [1], waarmee de verticale beweging van het zout kan worden weergegeven. Het is van groot belang om in dergelijke modellen de sluizen en hun effecten op de waterbeweging en zoutindringing goed worden weergegeven. Het modelleren van het sluisencomplex in een 3D model zal eveneens met behulp van semi-empirische relaties geschieden aangezien de roosterafstanden te grof zijn om de turbulentie ter plaatse van de sluizen te beschrijven. Het ligt voor de hand om gebruik te maken van de Q-h relaties. Echter, deze hebben betrekking op diepte-gemiddelde grootheden en gebruiken geen informatie van de verticale structuur van de stroming. Gegeven de gecompliceerde stromingssituaties rond barriërs mag worden verwacht dat een expliciete inbreng van die verticale structuur tot een aanzienlijk verbeterde procesbeschrijving en daarmee verbeterde simulaties zal leiden. In dit hoofdstuk zal duidelijk worden dat dit met behulp van de detailmodel-benadering mogelijk gemaakt kan worden (zie Paragraaf 2.1).

Voor de volledigheid zullen zowel de overzichtsmoedel- als detailmoedel-benadering ten behoeve van een 3D barriërfomulering voor gedeeltelijk geopende sluizen worden behandeld. Zie respectievelijk Paragraaf 3.1 en 3.2. In Paragraaf 3.3 stippen we enkele problemen aan met de detailmoedel-benadering, waarbij de mogelijke oplossingen hiervoor zullen worden besproken. Paragraaf 3.4 vat de karakteristieken van de nieuwe en bestaande barriërfomuleringen, zoals beschreven in [4] en [8], samen.

3.1 3D barriërfomulering op basis van overzichtsmoedel-benadering

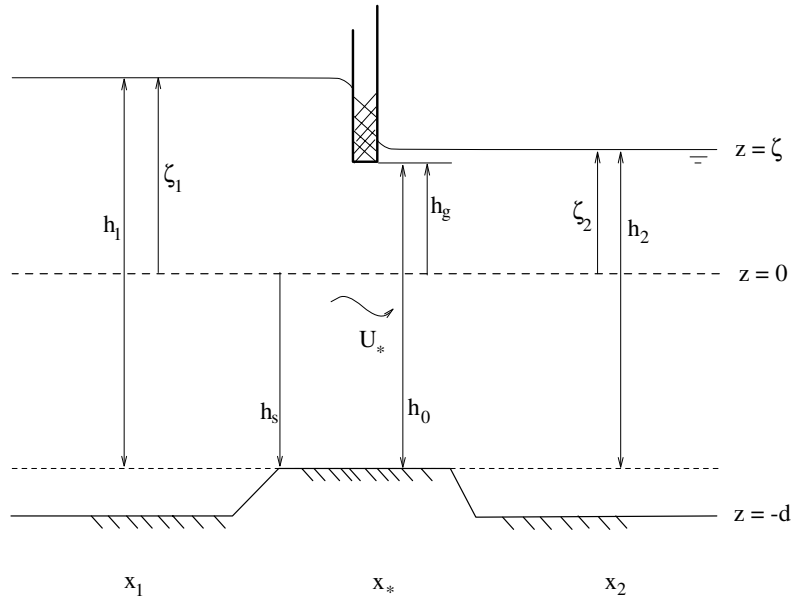
In de overzichtsmoedel-benadering wordt de aanwezigheid van de schuif en drempel in het moedel genegeerd. Ten gevolge hiervan zal de snelheid ter plaatse van de barriër zich niet aanpassen. Echter, om het verval over de barriër te creëren dient het debiet gecorrigeerd te worden. Dit kan worden bewerkstelligd door de toevoeging van een extra verliesterm aan de impulsvergelijkingen ter plaatse van de barriër.

In het vorige hoofdstuk zijn er verschillende stromingscondities rond de barriër behandeld. Ten tijde van het project MER Beheer Haringvlietsluizen werd besloten om bij de implementatie van een 3D barriërfomulering te beperken tot de toestand waarbij zowel boven- als benedenwaterstanden hoger liggen dan het onderste punt van de sluisdeur (cf. conditie 7 in Tabel 2.1); zie [12]. We beschouwen aldus de subkritische schuifstroming met één laag (zie Figuur 3.1). Voor deze situatie is de Q-h relatie gegeven door:

$$Q = \mu_{s,6} B_s h_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (3.1)$$

Met $Q = h_b B_b U_b$, $h_1 = \zeta_1 + h_s$ en $h_2 = \zeta_2 + h_s$ volgt hieruit:

$$g \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} + \frac{1}{2M^2} \frac{U_b |U_b|}{\Delta x} = 0 \quad (3.2)$$



Figuur 3.1 Schematisatie van de subkritische schuifstroming.

met

$$M = \frac{\mu_{5,6} B_* h_0}{h_b B_b} \quad (3.3)$$

Hierbij is rekening gehouden met de aanstroomrichting. De extra verliesterm welke aan de gediscretiseerde bewegingsvergelijkingen wordt toegevoegd is:

$$\frac{1}{2M^2} \frac{U_b |U_b|}{\Delta x} \quad (3.4)$$

We beschouwen nu de situatie met K lagen. De interface tussen twee lagen is gegeven door $z_k(x, y, t)$ met $0 \leq k \leq K$ de laagindex. De lagen kunnen worden verdeeld volgens de sigma-lagen aanpak, waarbij de laagdikte $h_k \equiv z_{k-1} - z_k$ een percentage is van de totale diepte of volgens de aanpak waarbij de laagdikte constant is over het gehele horizontale vlak (zie [8]). In [12] wordt voorgesteld om ter plaatse van de barrier aan het model per laag een extra kwadratische verliesterm toe te voegen met een verliescoëfficiënt $\lambda_{*,k}$, analoog aan (3.2). De laag-gemiddelde impulsvergelijking voor laag-gemiddelde snelheid $u_{*,k}$ wordt dan

$$\frac{\partial u_{*,k}}{\partial t} + \text{adv} + g \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} + \dots + \lambda_{*,k} \frac{u_{*,k} |u_{*,k}|}{\Delta x} = \text{visc} + \dots \quad (3.5)$$

Bij verwaarlozing van de dynamiek rond de barrier krijgen we:

$$g \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} + \lambda_{*,k} \frac{u_{*,k} |u_{*,k}|}{\Delta x} = 0 \quad (3.6)$$

Combineren met (3.2) geeft:

$$\lambda_{*,k} = \frac{1}{2M^2} \frac{U_b |U_b|}{u_{*,k} |u_{*,k}|} \quad (3.7)$$

De diepte-gemiddelde snelheid U_b ter plaatse van de barrier is gegeven door:

$$U_b = \frac{1}{h_b} \sum_{k=1}^K h_{*,k} u_{*,k}, \quad h_b = \sum_{k=1}^K h_{*,k} \quad (3.8)$$

Voor $K = 1$ is vergelijking (3.6) equivalent met vergelijking (3.2).

Hiermee hebben we een 3D barrierformulering afgeleid op basis van de overzichtsmodeel-benadering. In de huidige SIMONA-versie van TRIWAQ is het gebruik van deze aanpak mogelijk. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er een andere terminologie wordt gehanteerd. Er wordt dan gesproken over een "uniform verhoogde ruwheid" (zie [4]). Bovendien wordt in deze versie een relatief eenvoudiger formule voor de verliescoëfficiënt toegepast. Deze kan worden afgeleid uit (3.7) door te veronderstellen dat er ter plaatse van de barrier een blokvormig snelheidsprofiel geldig is, dat wil zeggen $u_{*,k} = \text{constant}$, $\forall k$, zodat

$$\lambda_{*,k} = \frac{1}{2M^2} = \frac{1}{2\mu_{5,6}^2} \left(\frac{h_b}{h_0} \right)^2 \quad (3.9)$$

Echter, vanwege de overzichtsmodeel-benadering is, net als in de rest van het gebied, het snelheidsprofiel ter plaatse van de barrier logaritmisch. Met andere woorden, de bovengenoemde veronderstelling is onjuist. Bovendien blijkt uit de testberekeningen dat het toepassen van formule (3.7) ten opzichte van formule (3.9) een lichte verbetering geeft in het reproduceren van de Q-h relatie.

Opmerkingen:

1. in (3.9) wordt de fictieve breedte B_b gelijk verondersteld aan de werkelijke breedte van de sluisopening B_* ; dit is een beperking in de huidige TRIWAQ versie;
2. in de huidige TRIWAQ versie dient de verliescoëfficiënt te worden opgegeven, bijvoorbeeld $\lambda_{*,k} = 1/2\mu_{5,6}^2$ (zie ook [4,12]), en intern wordt het gecorrigeerd door de vermenigvuldiging met $(h_b/h_0)^2$. Omwille van consistentie met WAQUA zou het beter zijn geweest om in plaats van verliescoëfficiënt de afvoercoëfficiënt $\mu_{5,6}$ op te geven en vervolgens intern de verliescoëfficiënt te berekenen op basis van (3.9);
3. in de oorspronkelijke implementatie van de 3D barrierformulering (zie [4]) wordt voor de situatie met één laag ten onrechte de detailmodel-benadering toegepast (zie Paragraaf 3.2). Hierdoor wordt de laag ter plaatse van de barrier óf dichtgezet óf geheel geopend. Beide situaties zijn ongewenst. Dit is inmiddels in de huidige TRIWAQ-versie gecorrigeerd, dat wil zeggen voor $K = 1$ wordt de overzichtsmodeel-benadering gehanteerd.

3.2 3D barrierformulering op basis van detailmodel-benadering

Door het toevoegen van de extra verliesterm op basis van de overzichtsmodeel-benadering, zoals in de vorige paragraaf is besproken, blijft het debiet door de sluis correct. Echter, de lokale snelheidsverdeling in de sluis is niet correct. Door de snelle opmenging van impuls in verticale richting zal deze lokale fout maar een gering effect hebben op de rest van de stroming. Bij sterke verticale

gelaagdheid zullen de advectieve zoutfluxen niet correct berekend worden. Bij een dergelijke situatie dient een 3D barrierformulering het effect van de sluis in rekening te brengen zodanig dat de verticale snelheids- en zoutprofielen op enige afstand van de sluis goed beschreven worden. Op basis van de detailmodel-benadering kan een dergelijke formulering worden gerealiseerd.

In deze benadering zijn de schuiven en drempels "fysiek" aanwezig in het model. Het natte doorstroomoppervlak komt dan overeen met de werkelijkheid. Er zijn dan geringe verschillen tussen de werkelijke diepte-gemiddelde snelheid en de modelsnelheid. Bovendien wordt hierdoor het verticale snelheidsprofiel in de barrier zo correct mogelijk weergegeven. De opening van de sluis wordt bepaald aan de hand van de stand van de schuif en dorpelhoogte.

Opmerking: zowel de schuifhoogte h_g als dorpelhoogte h_s worden vanaf $z = 0$ gerekend waarbij ze respectievelijk positief naar boven en positief naar beneden zijn gericht (zie Figuur 3.1). Deze afspraak geldt echter alleen in WAQUA. In de huidige TRIWAQ versie wordt met de drempelhoogte gewerkt die vanaf de bodem wordt gerekend en positief naar boven is gericht. Dit zou moeten worden aangepast.

Via een opgegeven tijdreeks wordt de op en neer gaande beweging van de schuif gesimuleerd. De drempel van de barrier kan op de wijze analoog aan die van de schuif worden gemodelleerd. Echter, de drempel kan ook gemodelleerd worden door middel van aanpassing van de bodemschematisatie ter plaatse van de barrier. Op grond van de waterstand, schuifhoogte, dorpelhoogte en diepte kan worden vastgesteld welke lagen dichtgezet moeten worden, dat wil zeggen de betreffende laag-gemiddelde snelheden tot nul reduceren. Dit aantal kan per tijdstap variëren. Lagen kunnen hetzij volledig hetzij niet dichtgezet worden. Het dichtzetten van een laag kan worden bewerkstelligd door de verliescoëfficiënt $\lambda_{*,k}$ in vergelijking (3.5) te verhogen naar 10^8 . Om deze reden is de verliescoëfficiënt afhankelijk van de laagindex k . Echter, de nadruk moet worden gelegd op het feit dat $\lambda_{*,k}$ *onafhankelijk is van de verticale laagverdeling*. Voor de lagen die niet dichtgezet zijn wordt de extra verliesterm in vergelijking (3.5) berekend op basis van de Q-h relatie.

Ter plaatse van de barrier is de diepte-gemiddelde snelheid hoger dan de omgevingsnelheid. Deze lokale snelheid volgt uit de Q-h relatie (3.1):

$$U_* = \frac{Q}{\mu_{5,6} B_* h_0} = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (3.10)$$

Rekening houdend met de stroomrichting en $h_1 = \zeta_1 + h_s$ en $h_2 = \zeta_2 + h_s$ volgt hieruit:

$$g \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} + \frac{U_* |U_*|}{2\Delta x} = 0 \quad (3.11)$$

De verliesterm in (3.11) moet als het ware worden verdeeld over de "open" lagen. Dit geschiedt door de vergelijkingen (3.6) en (3.11) als equivalent te beschouwen, zodat

$$\lambda_{*,k} = \frac{1}{2} \frac{U_* |U_*|}{u_{*,k} |u_{*,k}|} \quad (3.12)$$

Voor de bepaling van de diepte-gemiddelde snelheid U_* moet het debiet door de barrier worden berekend. Dit debiet is gerelateerd aan de door het model berekende doorstroomoppervlak welke om twee redenen kan afwijken van het werkelijke doorstroomoppervlak. In de eerste plaats hoeft de breedte van de barrier niet gelijk te zijn aan de breedte van de rooster cel. In de tweede plaats kunnen er in het model géén gedeeltelijk geopend lagen voorkomen. Een gedeeltelijk geopend laag wordt beschouwd als geheel geopend, indien deze laag meer dan 50% open is en anders gesloten. Dit geeft uiteindelijk een andere doorstroomopening. Deze wordt in het barrierpunt berekend als

$$B_b \sum_{\text{open laag } k} h_{*,k} \equiv B_b h_b \quad (3.13)$$

met B_b de breedte van de lokale rooster cel. Merk op dat h_b hier een iets andere betekenis heeft dan in Paragraaf 2.2; het betreft de actuele opening per breedte-eenheid bij aanwezigheid van de sluis en drempel. De diepte-gemiddelde snelheid ter plaatse van de barrier is dan gegeven door:

$$U_* = \frac{Q}{\mu_{5,6} B_* h_0} = \frac{B_b}{\mu_{5,6} B_* h_0} \sum_{k=1}^K h_{*,k} u_{*,k} \quad (3.14)$$

Merk op dat in gesloten lagen $\lambda_{*,k} = 10^8$ zodat $u_{*,k} \approx 0$. De verliescoëfficiënt voor de open laag is gelijk aan

$$\lambda_{*,k} = \frac{B_b^2}{2(\mu_{5,6} B_* h_0)^2} \frac{\sum_{j=1}^K h_{*,j} u_{*,j} \left| \sum_{j=1}^K h_{*,j} u_{*,j} \right|}{u_{*,k} \left| u_{*,k} \right|} \quad (3.15)$$

De uitdrukking (3.15) kan worden vereenvoudigd door te veronderstellen dat in de keel van de barrier het snelheidsprofiel blokvormig is. Met andere woorden $u_{*,k} = \text{constant}$ voor alle open lagen k . Hiermee verkrijgen we:

$$\lambda_{*,k} = \frac{B_b^2}{2(\mu_{5,6} B_* h_0)^2} \left(\sum_{\text{open laag } j} h_{*,j} \right)^2 = \frac{1}{2\mu_{5,6}^2} \left(\frac{B_b h_b}{B_* h_0} \right)^2 = \frac{1}{2M^2} \quad (3.16)$$

In de detailmodel-benadering wordt op basis van (3.16) de extra verliesterm in de bewegingsvergelijking (3.5) voor open lagen berekend. In de huidige TRIWAQ versie is de toepassing van deze benadering mogelijk, met dien verstande dat $B_*/B_b = 1$ (zoals eerder is opgemerkt).

Opmerking: in de oorspronkelijke implementatie van de 3D barrierformulering (zie [4]) wordt de verliescoëfficiënt **niet** gecorrigeerd in verband met de afwijkende doorstroomopening. Dat wil zeggen $\lambda_{*,k}$ wordt als een constante opgegeven, bijvoorbeeld $\lambda_{*,k} = 1/2\mu_{5,6}^2$. Bij de schuifopening kan dit leiden tot een fout in de doorstroomopening. Hoe grover de verticale resolutie van de lagenverdeling, hoe groter de fout.

3.3 Noodzakelijke aanpassingen in detailmodel-benadering t.a.v. reproductie van debiet en verval

In de vorige paragraaf is de barrierformulering voor een 3D detailmodel afgeleid met behulp van een Q-h relatie. Zoals in Inleiding is besproken dient het 3D model de Q-h relatie met de bijbehorende afvoercoëfficiënt te reproduceren

waarbij de waarde van die coëfficiënt ongeveer gelijk moet zijn aan de opgegeven (gecalibreerde) waarde. Op deze wijze wordt het energieverlies correct berekend. Echter, een deel van het energieverlies worden reeds door de bodemwrijving en advectieve termen in rekening gebracht, zodat de opgegeven afvoercoëfficiënt verhoogd moet worden waardoor de extra verliesterm kleiner wordt om zodoende het juiste verval te realiseren. In deze paragraaf zullen enkele oplossingen worden aangedragen voor dit probleem.

In een 3D model komt de bodemwrijvingsterm uitsluitend voor in de laag-gemiddelde impulsvergelijkingen behorende bij de bodemlaag. Wanneer de drempel gemodelleerd wordt door middel van verticale schotjes dan speelt de bodemwrijving geen rol, aangezien de betreffende bodemlaag dichtgezet wordt. Dit geldt echter niet wanneer de bodem ter plaatse van de barrier wordt aangepast om de drempel te modelleren. Door de aanwezigheid van de schuif en drempel treden er bij de barrier veel hogere snelheden op. Sinds de bodemwrijving kwadratisch afhankelijk is van de snelheid wordt hierdoor de wrijving te groot waardoor de bijdrage aan het energieverlies te groot wordt. In de notitie van Langerak is voorgesteld om in een 2D detailmodel de snelheid in de bodemwrijvingsterm te betrekken op de omgevingsnelheid, zodat daarvoor een correctie kan worden aangebracht [5]. De x-component van de bodemwrijving is gegeven door

$$\tau_{b,x} = \frac{\rho g U}{C^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3.17)$$

waarin C de Chézy coëfficiënt is en V is de snelheidscomponent in de dwarsrichting. Ter plaatse van de barrier wordt U in (3.17) geïnterpreteerd als de omgevingsnelheid U_b zodat met (2.12) volgt:

$$\tau_{b,x} = \frac{\rho g M U_*}{C^2} \sqrt{M^2 U_*^2 + V^2} \quad (3.18)$$

Daar $M < 1$ is wordt op deze wijze de ruwheid ter plaatse van de barrier verlaagd. Testberekeningen laten inderdaad een verbetering zien voor wat betreft het correct berekenen van het debiet en het verval indien de bodemwrijving wordt verlaagd volgens (3.18). Echter, dezelfde berekeningen laten ook zien dat bij relatief grote sluisopeningen de reproductie van de Q-h relatie minder nauwkeurig wordt. De oorzaak hiervan is dat bij dergelijke situaties het extra energieverlies kleiner is dan het verlies ten gevolge van de ruwheid.

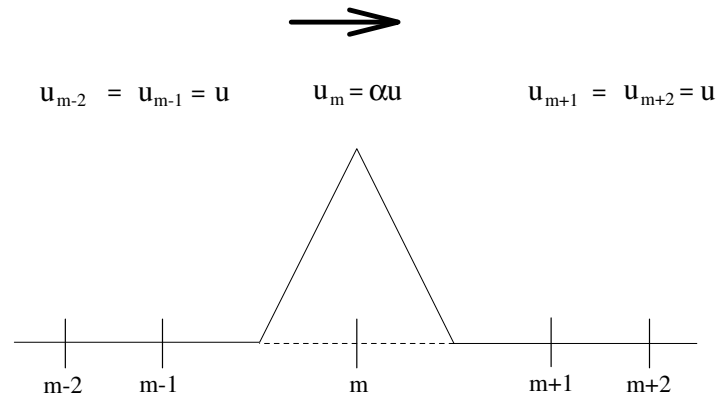
In de 3D-modellering kan de bodemwrijving worden beschouwd als een randvoorwaarde bij de bodem. Ter plaatse van de barrier is het beter om aan de bovenzijde van de drempel een free-slip voorwaarde op te drukken, zodat er geen extra wrijving wordt gegenereerd (zie ook [4,12]). Deze voorwaarde luidt:

$$v_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=-h_s} = 0 \quad (3.19)$$

met v_v de verticale eddy-viscositeit. De voorwaarde (3.19) vervangt aldus de bodemwrijving in het barrierpunt. Eveneens wordt aan de onderzijde van de schuif de free-slip voorwaarde opgedrukt. Merk op dat het opleggen van de free-slip voorwaarde bij de drempel consistent is met de wijze waarop de drempel gemodelleerd wordt. Bovendien heeft de free-slip voorwaarde geen invloed op het verticale snelheidsprofiel.

Opmerking: in de oorspronkelijke implementatie [4] en in de huidige TRIWAQ versie [8] is de bodemwrijving ter plaatse van de barrier niet aangepast.

Ook advection termen nemen een deel van het verlies voor hun rekening. De grootte van dit extra deel zal vooral afhangen van de discretisatie van de advectionsterm die wordt toegepast [6]. Ter illustratie beschouwen we een 2DV stroming over een drempel. De snelheid $u > 0$ is uniform behalve ter plaatse van de drempel waar de snelheid een factor $\alpha > 1$ groter is. Zie Figuur 3.2. We



Figuur 3.2 Schematische weergave van 2DV stroming over een drempel.

beschouwen de stationaire impulsvergelijking in x-richting met verwaarlozing van viscositeit en Coriolis-kracht:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (3.20)$$

Integreren van een punt vóór de drempel (x_v) naar een punt ná de drempel (x_n) geeft:

$$\zeta_v = \zeta_n + \frac{1}{g} \int_{x_v}^{x_n} u \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (3.21)$$

In de hier beschouwde situatie geldt:

$$\int_{x_v}^{x_n} u \frac{\partial u}{\partial x} dx = 0 \quad (3.22)$$

zodat er geen waterstandsverval over de drempel is en derhalve is er geen sprake van energieverlies. We benaderen de advectionsterm in (3.20) met een 2^e orde centrale differentie in punten $m-1$, m en $m+1$ en vervolgens bepalen we de som (we stellen voor het gemak $\Delta x=1$):

$$\begin{aligned}
m-1: \quad & \frac{u_{m-1}}{2}(u_m - u_{m-2}) = \frac{u}{2}(\alpha u - u) = \frac{\alpha-1}{2}u^2 \\
m: \quad & \frac{u_m}{2}(u_{m+1} - u_{m-1}) = \frac{\alpha u}{2}(u - u) = 0 \\
m+1: \quad & \frac{u_{m+1}}{2}(u_{m+2} - u_m) = \frac{u}{2}(u - \alpha u) = \frac{1-\alpha}{2}u^2
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Met andere woorden: met het centrale schema ontstaat er geen verval over de drempel. Veronderstel nu dat de advectieterm in (3.20) in punten m , $m+1$ en $m+2$ met het 2^e orde upwind schema wordt benaderd zoals in TRIWAQ [8]:

$$\begin{aligned}
m: \quad & \frac{u_m}{2}(3u_m - 4u_{m-1} + u_{m-2}) = \frac{3(\alpha^2 - \alpha)}{2}u^2 \\
m+1: \quad & \frac{u_{m+1}}{2}(3u_{m+1} - 4u_m + u_{m-1}) = 2(1-\alpha)u^2 \\
m+2: \quad & \frac{u_{m+2}}{2}(3u_{m+2} - 4u_{m+1} + u_m) = \frac{\alpha-1}{2}u^2 + \frac{3}{2}(\alpha-1)^2u^2
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Daar $\alpha > 1$ betekent dit dat er extra advectieve transport zal plaatsvinden, welke zal bijdragen aan een foutief waterstandsverval over de drempel.

Om tot een goede reproductie van de Q-h relatie te komen zou in het gehele veld het 2^e orde upwind schema door de centrale differentie moet worden vervangen [6]. Niettemin kunnen we op grond van (3.23) en (3.24) concluderen dat door ter plaatse van de barrier (m) en het punt na de barrier ($m+1$; bij stroming van de barrier af) het 2^e orde upwind schema te vervangen door 2^e orde centrale schema, de foutieve bijdrage aan het energieverlies zal worden gereduceerd. Echter, uit het in [4] beschreven onderzoek is geconstateerd dat realistische stroomsnelheden rond de barrier slechts verkregen kunnen worden door in het differentiemolecuul voor advectie geen snelheid ter plaatse van de barrier in beschouwing te nemen. Dit impliceert dat in het eerste roosterpunt na de barrier ($m+1$) de advectieterm geheel moet worden verwaarloosd. Om de balans echter kloppend te maken dient in het tweede roosterpunt na de barrier ($m+2$) de 1^e orde upwind of 2^e orde centrale differentie te worden toegepast. Op grond van nauwkeurigheid ligt de keuze voor het centrale schema voor de hand. Samenvattend: indien $m = m_b$ het barrierpunt is, dan wordt de advectieterm in (3.20) in het gehele veld als volgt benaderd ($u > 0$):

$$\begin{aligned}
\forall m \neq m_b, m_b + 1, m_b + 2: \quad & u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_m}{2\Delta x}(3u_m - 4u_{m-1} + u_{m-2}) \\
m = m_b: \quad & u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_m}{2\Delta x}(u_{m+1} - u_{m-1}) \\
m = m_b + 1: \quad & u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\
m = m_b + 2: \quad & u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_m}{2\Delta x}(u_{m+1} - u_{m-1})
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Merk op dat in het ADI raamwerk de aangepaste discretisatie van de advection rond de barrier uitsluitend in één van twee halve tijdstappen wordt toegepast, aangezien in de andere halve tijdstap het centrale schema wordt gehanteerd [8].

Opmerkingen:

1. de discretisatie van de overige advectionstermen in x-richting blijft ongewijzigd;
2. de bij de advectionsterm in (3.20) behorende krommingstermen worden ter plaatse van de barrier verwaarloosd;
3. ondanks de toepassing van centrale differenties in (3.25) zijn er mogelijk geen stabiliteitsproblemen te verwachten, aangezien de advectionsterm in dwarsrichting ($v\partial u/\partial y$) met het 2^e orde upwind schema wordt benaderd welke voor voldoende stabiliteit zorgt;
4. in de oorspronkelijke implementatie [4] en in de huidige TRIWAQ versie [8] wordt ter plaatse van de barrier in de ene halve tijdstap een 1^e orde conservatieve upwind schema toegepast voor de advectionsterm in (3.20), terwijl de bijbehorende krommingstermen worden verwaarloosd. In de andere halve tijdstap wordt de advectionsterm in (3.20) geheel verwaarloosd, echter de krommingstermen niet. Deze aanpak zal eveneens bijdragen tot te grote energieverlies. Merkwaardigwijs wordt in [4] gesteld dat de advection op de barrier in beide halve tijdstappen op dezelfde wijze moet worden gediscrèteerd. Dit blijkt noodzakelijk te zijn om de oscillaties in de tijd te voorkomen.

3.4 Samenvatting

In [4] is de implementatie van de 3D barrierformulering voor gedeeltelijk geopende sluisen in TRIWAQ gerapporteerd. Dit betreft de implementatie in een gevectoriseerde versie van TRIWAQ welke op de Cray C90 bij SARA beschikbaar is én is toegepast ten behoeve van het project MER Beheer Haringvlietsluisen. In het kader van het geïntegreerde-opname project TRIVER03 zijn er tweetal verbeteringen doorgevoerd in de formulering (zie [8]). In de eerste plaats dient de barrierformulering correct te werken voor modellen met één laag en in de tweede plaats dient de verliescoëfficiënt te worden gecorrigeerd in verband met de berekening van de doorstroomopening afhankelijk van aantal lagen. De verbeterde barrierformulering is opgenomen in de huidige B+O versie van TRIWAQ. Inmiddels is de versie op een aantal punten aangepast naar aanleiding van de herziende barrierformulering behandeld in de voorgaande paragrafen. Deze aanpassingen zijn zowel in de pre-processing (wijze van opgave van gegevens kenmerkend voor het sluisencomplex zoals afvoercoëfficiënten, breedte van sluisopeningen en dorpelhoogtes) als in het rekenhart (verwaarlozing van de bodemwrijving en aanpassing van de discretisatie van advection ter plaatse van de barrier) gerealiseerd. De genoemde aanpassingen zijn momenteel **niet** in de B+O versie geïntegreerd. Ter wille van het overzicht staan in Tabel 3.1 de kenmerken van de behandelde en bestaande 3D barrierformuleringen welke in verschillende versies van TRIWAQ zijn geïmplementeerd.

Tabel 3.1 Overzicht kenmerken van 3D barrierformulering in verschillende TRIWAQ versies.

kenmerken 3D barrierformulering	"MER" versie [4]	B+O versie [8]	B+O versie met aanpassingen (§3.1 en 3.2)
opgave afvoercoëfficiënt	nee	nee	ja
opgave breedte-opening	nee	nee	ja
opgave dorpelhoogte conform WAQUA	nee	nee	ja
verlies- of afvoercoëfficiënt aanstroomrichting afhankelijk	nee	nee	ja
toepassing schaalbenadering voor één laag	detailmodel-benadering	overzichtsmodel-benadering	overzichtsmodel-benadering
toepassing schaalbenadering voor meerdere lagen	overzichtsmodel- of detailmodel-benadering	overzichtsmodel- of detailmodel-benadering	overzichtsmodel- of detailmodel-benadering
correctie verliescoëfficiënt i.v.m. afwijkende doorstroombenadering	nee	ja	ja
r.v.w. bij schuif en drempel	free-slip	free-slip	free-slip
bodemwrijving t.p.v. barrier	niet aangepast	niet aangepast	= 0
discretisatie advectie in u -vgl op $t + \frac{1}{2}\Delta t$ t.p.v. barrier	advectie verwaarloosd	advectie verwaarloosd	2 ^e orde centrale schema
verwaarlozing krommings-termen op $t + \frac{1}{2}\Delta t$ t.p.v. barrier	nee	nee	ja
discretisatie advectie in u -vgl op $t + \Delta t$ t.p.v. barrier	1 ^e orde upwind schema (conservatief)	1 ^e orde upwind schema (conservatief)	2 ^e orde centrale schema
verwaarlozing krommings-termen op $t + \Delta t$ t.p.v. barrier	ja	ja	ja

4 Numerieke experimenten

In dit hoofdstuk worden de resultaten besproken van de toepassing van de sluisformuleringen welke in het vorige hoofdstuk zijn behandeld, in 2DV en MOHA modellen. De testberekeningen zijn uitgevoerd met drie verschillende versies met de volgende kenmerken:

1. de implementatie van de sluisformulering zoals voorgesteld in [4]. Deze formulering is opgesteld ten behoeve van het project MER Beheer Haringvlietsluizen ("**MER**" versie);
2. de implementatie van de sluisformulering zoals beschreven in [8]. Deze is geïmplementeerd in de B+O versie van TRIWAQ (**B+O** versie);
3. de implementatie van de verbeterde sluisformulering zoals behandeld in Hoofdstuk 3 van dit verslag. Hiervoor is de B+O versie aangepast (**aangepaste TRIWAQ versie**).

De verschillen tussen de bovengenoemde implementaties zijn weergegeven in Tabel 3.1. Tot slot zijn er enkele 2DH berekeningen uitgevoerd met WAQUA en de aangepaste TRIWAQ versie met één laag.

4.1 Berekeningen met het 2DV model

Er is een 2DV model opgezet om de stroming door één sluis te simuleren. Een dergelijke model is in het verleden toegepast ten behoeve van de toetsing van 3D sluisformulering (zie [4,12]). In dit verslag onderzoeken we de drie bovengenoemde implementaties van de 3D sluisformulering en de barrierformulering van WAQUA ten aanzien van de reproductie van de Q-h relatie ter plaatse van de sluis. Alle berekeningen zijn uitgevoerd onder homogene condities.

Het gemodelleerde gebied strekt zich uit tot drie kilometer aan weerszijden van de sluis. De diepteschematisatie is vergelijkbaar met die van het MOHA model welke in Paragraaf 4.2 zal worden besproken; zie ook Figuur 4.1. Bij de open randen is de bodem uniform NAP –10 m. De sluisvloer is driehoekvormig gemodelleerd met één dieptepunt op NAP –5.5 m. Er zijn tevens berekeningen uitgevoerd waarbij de drempel is gemodelleerd door middel van schotjes, dat wil zeggen door het lokaal toevoegen van een oneindig grote verliesterm. De bodem ter plaatse van de barrier is dan NAP –11.5 m.

Het 2DV model heeft een roosterafstand van 250 m en het aantal equidistante lagen is 20. Ten behoeve van het gevoeligheidsonderzoek met de sluisformuleringen zijn er eveneens berekeningen uitgevoerd met 10 equidistante lagen.

Het 2DV model heeft twee open randen. Op de zeerand wordt een waterstand opgedrukt van 0 m en op de rivierrand een afvoerdebiet van 3000 m³/s. De randvoorwaarden zijn stationair. De bodemruwheid wordt berekend volgens Manning en de Manning-constante is gelijkgesteld aan 0.026 s/m^{1/3}. Het tijdstap is 1 minuut en de simulatieperiode is 600 minuten waarmee dan de stationaire oplossing is bereikt.

Er zijn drie situaties beschouwd:

1. de schuif is gezakt tot NAP –4.1 m; de hoogte van de opening bedraagt dan ± 25% van de diepte (hefhoogte = 1.4 m);

2. de schuif is gezakt tot NAP -2.8 m; de hoogte van de opening bedraagt dan $\pm 50\%$ van de diepte (hefhoogte = 2.7 m);
3. de schuif is gezakt tot NAP -1.4 m; de hoogte van de opening bedraagt dan $\pm 75\%$ van de diepte (hefhoogte = 4.1 m).

Van de uitgevoerde simulaties is de volgende uitvoer gegenereerd:

- het debiet Q_{berekend} ter plaatse van de sluis en
- de waterstanden vóór en ná de sluis, respectievelijk ζ_{boven} en ζ_{beneden} . Deze zijn genomen op 250 m aan weerszijden van de sluis. Deze keuze is toegestaan aangezien in de numerieke experimenten is geconstateerd dat de waterstanden vóór en ná de sluis vrijwel constant zijn; zie ook bijvoorbeeld Figuur 4.1.

Uit het berekende debiet en verval over de sluis $\zeta_{\text{boven}} - \zeta_{\text{beneden}}$ wordt de afvoercoëfficiënt bepaald volgens:

$$\mu = \frac{Q_{\text{berekend}}}{\Delta y h_0 \sqrt{2g(\zeta_{\text{boven}} - \zeta_{\text{beneden}})}} \quad (4.1)$$

met Δy (= 250 m) het roosterafstand in de dwarsrichting en h_0 de hefhoogte. Ter plaatse van de sluis wordt de stroming versneld en daalt volgens Bernoulli de waterstand. Na de sluis zal afhankelijk van de lokale energieverliezen de waterstand zich weer herstellen. Sinds dergelijke verliezen in de afvoercoëfficiënt zijn verdisconteerd is het van belang dat de implementatie van 3D sluisformulering moet leiden tot de correcte waarde voor deze coëfficiënt. Normaliter wordt de afvoercoëfficiënt afgeregeld op basis van de gemeten afvoerrelatie. Een voorbeeld van een dergelijke afregeling staat beschreven in [3]. In het algemeen zal de afvoercoëfficiënt afhangen van de aanstroomrichting én van de hefhoogte. Echter, bij de 2DV simulaties is slechts één waarde gekozen, te weten $\mu = 0.60$. Deze waarde is overigens veelal terug te vinden in de literatuur (zie voor overzicht [3]) en is gerelateerd aan de vormgeving van de opening (in dit geval een rechthoekige opening).

Ter bespreking van de resultaten van de uitgevoerde simulaties bestuderen we de effecten van

- de schaalbenadering, d.w.z. overzichtsmodel- of detailmodel-benadering en
- de modellering van de drempel, d.w.z. door middel van aangepaste diepte of schotjes

op de stroming door de sluis. Hierbij wordt tevens de gevoeligheid voor het aantal lagen onderzocht.

Als referentie wordt allereerst de met WAQUA verkregen resultaten behandeld. Ze zijn in Tabel 4.1 weergegeven. Hierbij is het effect van de aangepaste bodem ter plaatse van de barrier eveneens in beschouwing genomen. In deze berekeningen is geconstateerd dat uitsluitend conditie 7 (subkritische schuifstroming cf. Tabel 2.1) is opgetreden. In WAQUA wordt slechts de overzichtsmodel-benadering gehanteerd. Het ligt daarom niet voor de hand om de bodem ter plaatse van de barrier aan te passen, aangezien dan de bodemwrijving lokaal wordt verhoogd hetgeen leidt tot meer energieverlies. Dit effect zal toenemen bij toenemende openingen waarbij het energieverlies ten gevolge van contractie kleiner wordt. Dit wordt duidelijk weergegeven in Tabel 4.1. Voor de situatie waarbij de drempel niet "fysiek" aanwezig is, d.w.z. de bodem ter plaatse van de barrier is niet aangepast, resulteren de berekende waterstandsverschillen in een afvoercoëfficiënt gelijk aan de opgegeven waarde.

Tabel 4.1 Berekende afvoerrelaties met WAQUA.

opening	aanpassing bodem	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25 %	wel	2999.3	10.5989	0.1314	0.598
	niet	2999.4	10.5627	0.1531	0.600
50 %	wel	3000.0	3.0855	0.0988	0.581
	niet	3000.0	2.9530	0.1417	0.598
75 %	wel	3000.0	1.5492	0.0873	0.546
	niet	3000.0	1.3647	0.1384	0.597

In Tabel 4.2 worden de TRIWAQ resultaten voor de situatie met één laag gepresenteerd verkregen met de drie verschillende implementaties van de 3D sluisformulering. Hierbij is de bodem ter plaatse van de barrier niet aangepast. Zowel bij de "MER" versie als de B+O versie dient een verliescoëfficiënt te worden opgegeven zodanig dat het resulteert in de afvoercoëfficiënt $\mu = 0.60$. De verliescoëfficiënt is dan gelijk aan $1/(2 \cdot 0.6^2) = 1.3889$ (zie opmerking 2 van blz. 17).

Opmerking: doordat de diepte ter plaatse van de barrier NAP –11.5 m is, dient zowel met "MER" als met B+O versie een drempelhoogte te worden opgegeven van 6.0 m, zodat de sluisvloer op NAP –5.5 m ligt. Met de aangepaste versie is een dorpelhoogte van NAP –5.5 m opgegeven (conform WAQUA).

Opvallend zijn de afwijkende resultaten verkregen met de "MER" versie. Deze zijn ten gevolge van de onjuiste toepassing van de schaalbenadering, namelijk de detailmodel-benadering (zie opmerking 3 op blz. 17). Bij zowel de B+O versie als de aangepaste versie wordt de overzichtsmoedel-benadering gehanteerd. De aangepaste versie berekent het debiet nauwkeuriger dan de B+O versie. In de B+O versie wordt formule (3.9) toegepast voor de bepaling van het verlies die kennelijk minder is dan die van de aangepaste versie welke formule (3.7) gebruikt.

Tabel 4.2 Berekende afvoerrelaties met drie TRIWAQ versies (1 laag). De bodem t.p.v. de barrier is niet aangepast.

opening	versie	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25 %	"MER"	1040.3	1.3913	2.6666	–
	B+O	3004.1	10.5576	0.1272	0.600
	aangepast	3000.0	10.5465	0.1240	0.599
50 %	"MER"	–2984.2	3.6062	–0.3080	–0.504
	B+O	3003.2	2.9426	0.1272	0.599
	aangepast	3000.9	2.9383	0.1239	0.598
75 %	"MER"	–2984.2	3.6062	–0.3080	–0.332
	B+O	3004.8	1.3555	0.1271	0.597
	aangepast	3003.0	1.3519	0.1238	0.597

Net als in WAQUA is het niet aan te raden om in een TRIWAQ model de bodem ter plaatse van de barrier aan te passen wanneer één laag wordt beschouwd óf wanneer de overzichtsmoedel-benadering wordt toegepast voor de situatie met meerdere lagen. In Tabel 4.3 staan de resultaten van TRIWAQ met één laag (aangepaste versie) waarbij de bodem ter plaatse van de barrier is aangepast.

Tabel 4.3 Berekende afvoerrelaties met aangepaste TRIWAQ versie (1 laag) waarbij bodem t.p.v. de barrier is aangepast.

opening	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25%	2984.1	10.5082	0.1238	0.597
50%	2900.0	2.9348	0.1235	0.578
75%	2837.9	1.4282	0.1235	0.547

Om de keuze van aantal lagen vast te stellen wordt de gevoeligheid van het aantal lagen onderzocht. Hiervoor is met de aangepaste TRIWAQ versie gerekend met 10 en 20 lagen, waarbij de laagverdeling equidistant gekozen is. We beschouwen uitsluitend de detailmoedel-benadering en de drempel wordt gemodelleerd door lokaal de diepte te wijzigen. De resultaten zijn in Tabel 4.4 gepresenteerd. Uit dit tabel kan worden geconcludeerd dat het effect van aantal lagen vrijwel nihil is. Om een indruk te krijgen van de verticale snelheidsverdeling langs de stroomlijn verkregen met de aangepaste versie zijn in Figuren 4.1 tot en met 4.3 vectorplots van de snelheden bij verschillende openingen weergegeven. Duidelijk te zien is de lokale toename van de snelheid ter plaatse van de barrier. De profielen nemen aan de zeezijde op enige afstand van de sluis een logaritmische vorm aan.

Tabel 4.4 Berekende afvoerrelaties met aangepaste TRIWAQ versie op basis van detailmoedel-benadering, waarbij drempel is gemodelleerd door lokale aanpassing van diepte. Gevoeligheid van aantal lagen.

opening	# lagen	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25%	10	2999.4	10.6844	0.1556	0.596
	20	2999.4	10.6479	0.1556	0.597
50%	10	3000.0	2.9893	0.1452	0.595
	20	3000.0	2.9890	0.1467	0.595
75%	10	3000.0	1.3788	0.1408	0.594
	20	3000.0	1.3816	0.1425	0.594

In de hierna volgende berekeningen wordt het aantal lagen op 20 gesteld. Zoals eerder is opgemerkt is de combinatie van overzichtsmoedel-benadering en aangepaste diepte ter plaatse van de barrier niet geschikt voor praktische toepassingen. Dit wordt geïllustreerd in Tabel 4.5 (vergelijk tevens met Tabellen 4.1 en 4.3). Voor de beschouwde situaties worden in Figuren 4.4, 4.5 en 4.6 2DV vectorvelden van de snelheid weergegeven. Uit deze figuren blijkt dat de snelheid ter plaatse van de barrier relatief te groot is.

Tabel 4.5 Berekende afvoerrelaties met aangepaste TRIWAQ versie op basis van overzichtsmoedel-benadering (20 lagen), waarbij bodem ter plaatse van barrier is aangepast.

opening	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25%	2983.9	10.5261	0.1377	0.597
50%	2898.1	2.9587	0.1380	0.577
75%	2837.0	1.4567	0.1380	0.544

In Tabel 4.6 zijn de resultaten, verkregen met de versies "MER", B+O en aangepaste TRIWAQ, weergegeven. De toegepaste sluisformuleringen zijn op basis van de detailmodel-benadering, terwijl de diepte in de barrierpunt op NAP -5.5 m ligt. De "MER" en B+O versies geven aanmerkelijk lagere afvoercoëfficiënten, hetgeen duidt op te veel energieverlies. We schrijven dit extra verlies toe aan de aan de impulsvergelijkingen toegevoegde bodemwrijvingsterm ter plaatse van de sluis en aan de onjuiste discretisatie van de advectieterm in de omgeving van de sluis. Een te hoge energieverlies uit zich in een te laag debiet door de sluis en/of te groot verval over de sluis. In vergelijking met de resultaten van WAQUA (zie Tabel 4.1) blijkt beiden het geval te zijn. De resultaten van de aangepaste TRIWAQ versie zijn vergelijkbaar met die van WAQUA. Opvallend is dat bij een opening van 25% de door B+O versie berekende afvoercoëfficiënt kleiner is dan die van de "MER" versie, terwijl bij de overige openingen vertonen ze onderling een grote overeenkomst. Dit is als volgt te verklaren. De waterdiepte is bij een heffhoogte van 1.4 m ongeveer 10 m en is equidistant verdeeld in 20 lagen met een dikte van ± 50 cm. Derhalve zijn de onderste twee lagen volledig open, terwijl de derde laag voor 80% open staat. Echter, in het model wordt deze laag als 100% open beschouwd, zodat de totale opening te groot is. In tegenstelling tot de "MER" versie wordt deze fout door de B+O versie (evenals de aangepaste TRIWAQ versie) gecorrigeerd door de verliescoëfficiënt aan te passen volgens (3.16). Deze coëfficiënt wordt vergroot hetgeen leidt tot een lagere afvoercoëfficiënt.

Tabel 4.6 Berekende afvoerrelaties met drie TRIWAQ versies op basis van detailmodel-benadering (20 lagen). De drempel is gemodelleerd door lokaal de diepte te wijzigen.

Opening	versie	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25%	"MER"	2449.2	11.0372	0.1577	0.479
	B+O	2351.9	16.5322	0.1610	0.375
	aangepast	2999.4	10.6479	0.1556	0.597
50%	"MER"	2648.1	4.0791	0.1502	0.447
	B+O	2647.2	4.0187	0.1502	0.450
	aangepast	3000.0	2.9890	0.1467	0.595
75%	"MER"	2782.9	1.6851	0.1452	0.494
	B+O	2783.1	1.7218	0.1452	0.488
	aangepast	3000.0	1.3816	0.1425	0.594

Tot nu toe zijn de resultaten besproken waarbij de drempel is gemodelleerd door lokaal de bodem aan te passen. Hierna beschouwen we de situaties waarbij de bodem ter plaatse van de barrier niet is aangepast. Derhalve wordt bij de detailmodel-benadering de drempel geschematiseerd door middel van

schotjes net als bij de schuif. Voor de barriermodellering passen we zowel overzichtsmo- als detailmodel-benadering toe. Tabel 4.7 bevat de resultaten voor de hier beschouwde situaties. Deze zijn verkregen met de aangepaste

Tabel 4.7 Berekende afvoerrelaties met aangepaste TRIWAQ versie (20 lagen) waarbij de bodem niet is aangepast en eventueel is de drempel gemodelleerd d.m.v. schotjes.

Opening	benadering	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25%	overzichtsmoedel	3000.0	10.5612	0.1379	0.599
	detailmoedel	2999.3	10.7405	0.1387	0.594
50%	overzichtsmoedel	3001.0	2.9539	0.1381	0.598
	detailmoedel	3000.0	3.0058	0.1365	0.592
75%	overzichtsmoedel	3003.0	1.3675	0.1381	0.597
	detailmoedel	3028.0	1.4024	0.1436	0.594

TRIWAQ versie. Voor iedere sluisopening is het verschil onderling relatief klein. Een uitzondering vormt de opening van 75% waarin de detailmoedel-benadering een grotere debiet berekent ten opzichte van de overzichtsmoedel-benadering. Voor de situatie waarbij de bodem niet is aangepast geeft de detailmoedel-benadering iets lagere afvoercoëfficiënten dan de overzichtsmoedel-benadering. Wanneer we de resultaten van de detailmoedel-benadering vergelijken met die van de situatie waarbij de bodem ter plaatse van de barrier is aangepast (zie Tabel 4.6), dan zien we eveneens relatief lagere afvoercoëfficiënten. De verklaring hiervoor is dat zonder bodemaanpassing de laagdiktes lokaal toenemen, zodat de correctiefactor h_b/h_0 in (3.16) eveneens toeneemt. Hierdoor wordt de verliescoëfficiënt verder vergroot en derhalve neemt de afvoercoëfficiënt verder af ten opzichte van de situatie met bodemaanpassing. De resultaten met de overzichtsmoedel-benadering laten een grote overeenkomst zien met die van WAQUA. Ter illustratie zijn in Figuren 4.7 tot en met 4.12 de verticale snelheidsverdeling bij verschillende openingen rondom de sluis geplot. Hierbij zijn tevens de effecten van schaalbenadering weergegeven.

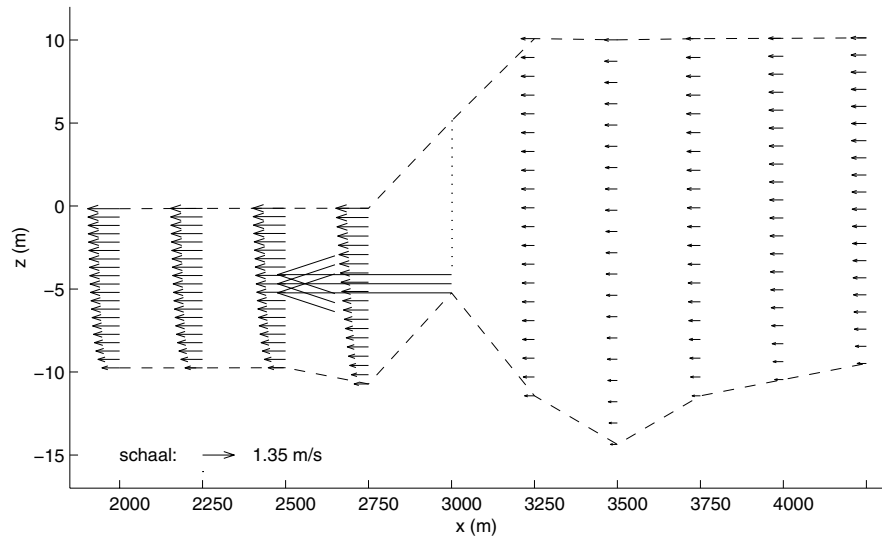
Tot slot wordt in Tabel 4.8 de resultaten gepresenteerd welke zijn verkregen met de "MER" versie op basis van de overzichtsmoedel-benadering. Overgens blijkt dat de resultaten van de B+O en "MER" versies op dat punt identiek zijn. De berekende debieten zijn hoger dan die van de aangepaste versie (vgl. Tabel 4.7). In de "MER" versie wordt formule (3.9) toegepast voor de bepaling van het verlies die kennelijk minder is dan die van de aangepaste versie welke formule (3.7) gebruikt.

Tabel 4.8 Berekende afvoerrelaties met "MER" versie op basis van overzichtsmoedel-benadering (20 lagen) waarbij bodem niet is aangepast.

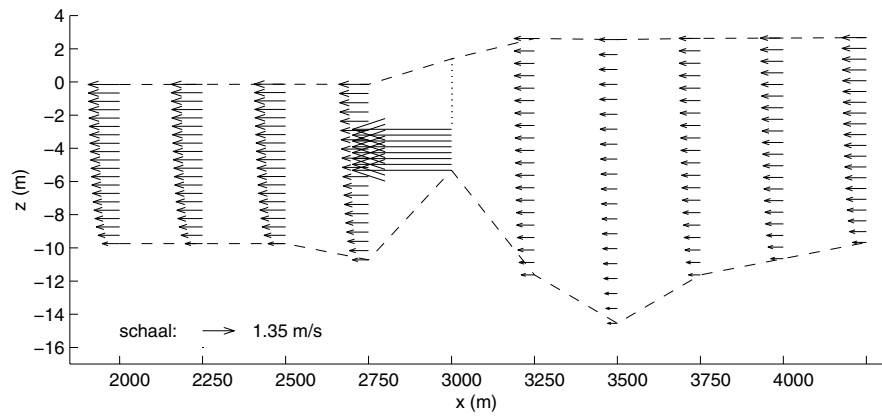
opening	Q_{berekend}	ζ_{boven}	ζ_{beneden}	μ
25%	3004.0	10.5749	0.1419	0.599
50%	3002.9	2.9647	0.1422	0.598
75%	3006.2	1.3783	0.1422	0.596

De conclusies van het voorgaande beschreven onderzoek zijn:

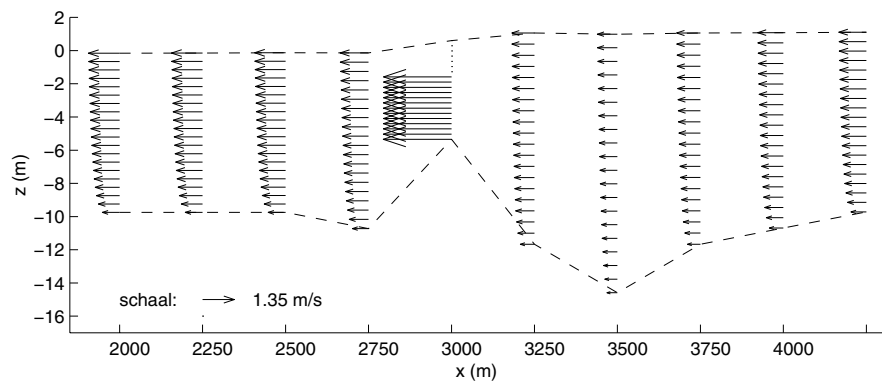
- indien de effecten van de sluis op de stroming wordt gemodelleerd op basis van overzichtsmiddel-benadering, dan dient de bodem ter plaatse van de barrier niet te worden aangepast;
- indien de effecten van de sluis op de stroming wordt gemodelleerd op basis van detailmodel-benadering, dan is het aan te bevelen om de drempel te modelleren door lokaal de diepte te wijzigen;
- voor een goede reproductie van de afvoerrelatie door het model is het noodzakelijk dat
 1. het gerekend wordt met de correcte doorstroomopening,
 2. de bodemwrijving ter plaatse van de barrier wordt verwaarloosd én dat een free-slip voorwaarde op de rand van zowel schuif als drempel moet worden opgedrukt en
 3. de horizontale advection in stroomrichting rondom de barrier met centrale differenties wordt benaderd.



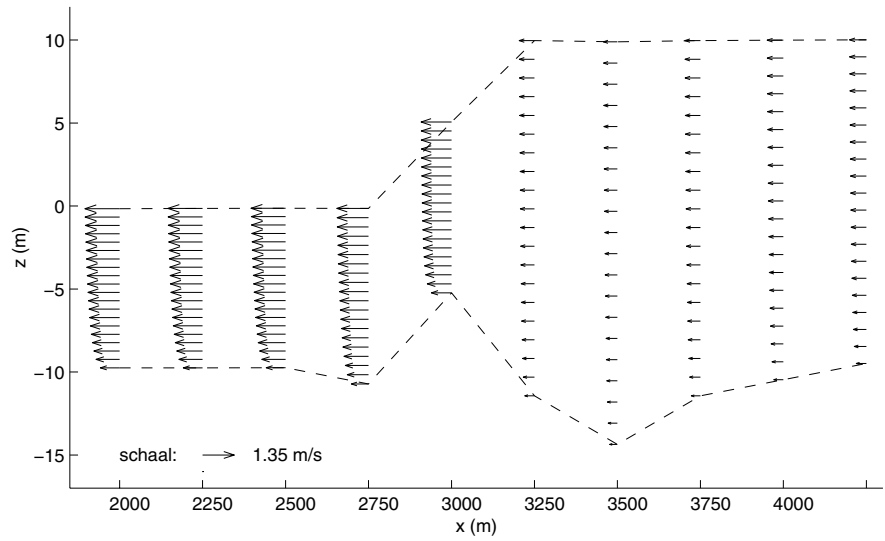
Figuur 4.1 2DV snelheidsveld bij 25% open sluis op basis van detailmodelbenadering; drempel gemodelleerd d.m.v. aangepaste bodem.



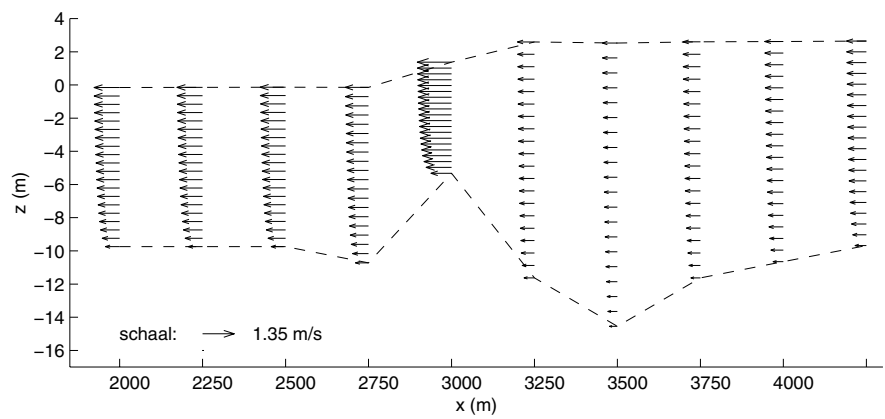
Figuur 4.2 2DV snelheidsveld bij 50% open sluis op basis van detailmodelbenadering; drempel gemodelleerd d.m.v. aangepaste bodem.



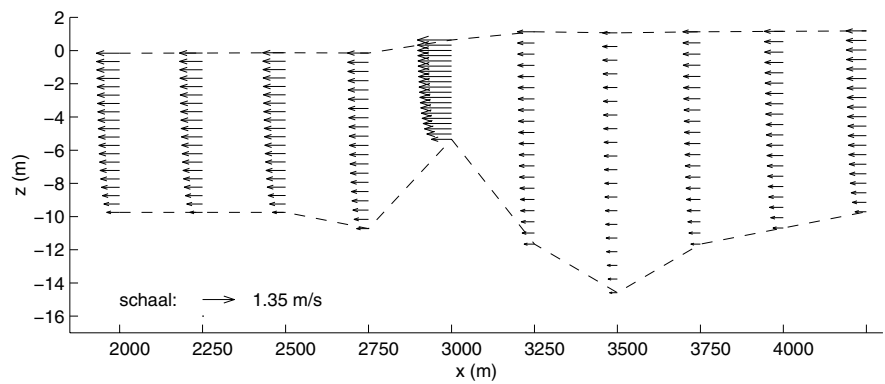
Figuur 4.3 2DV snelheidsveld bij 75% open sluis op basis van detailmodelbenadering; drempel gemodelleerd d.m.v. aangepaste bodem.



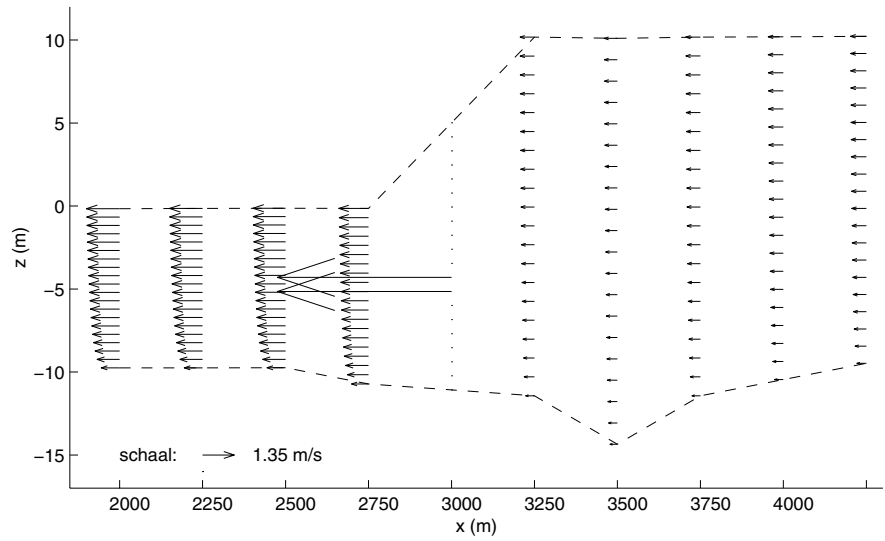
Figuur 4.4 2DV snelheidsveld bij 25% open sluis op basis van overzichtsmode- benadering; bodem t.p.v. de barrier aangepast.



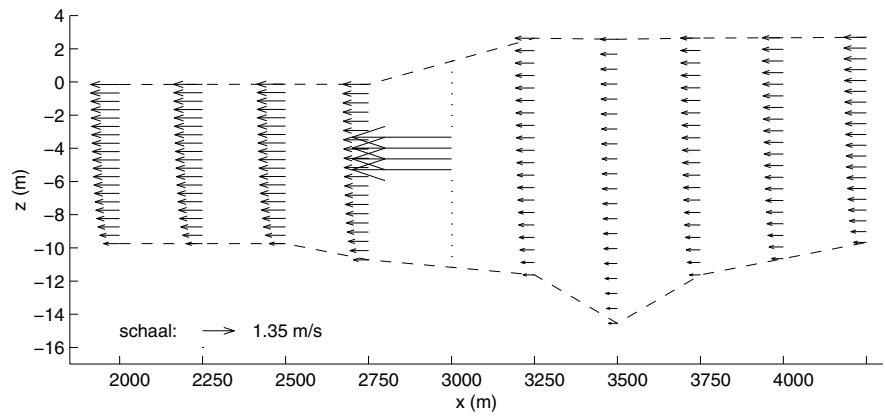
Figuur 4.5 2DV snelheidsveld bij 50% open sluis op basis van overzichtsmode- benadering; bodem t.p.v. de barrier aangepast.



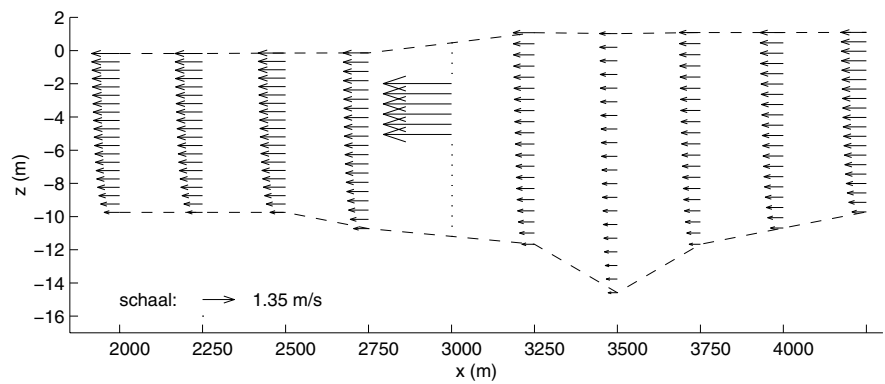
Figuur 4.6 2DV snelheidsveld bij 75% open sluis op basis van overzichtsmode- benadering; bodem t.p.v. de barrier aangepast.



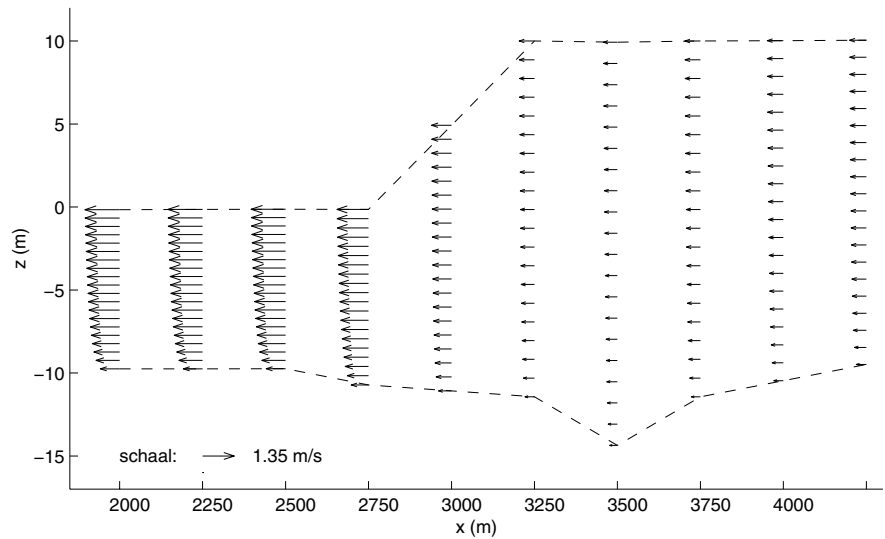
Figuur 4.7 2DV snelheidsveld bij 25% open sluis op basis van detailmodelbenadering; drempel gemodelleerd d.m.v. schotjes.



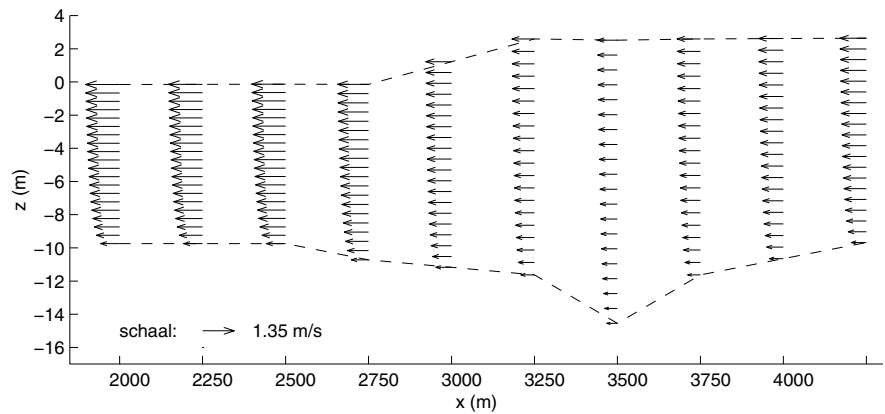
Figuur 4.8 2DV snelheidsveld bij 50% open sluis op basis van detailmodelbenadering; drempel gemodelleerd d.m.v. schotjes.



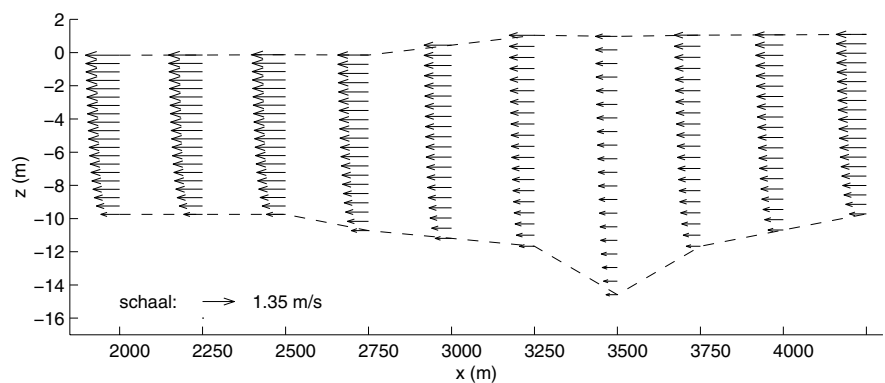
Figuur 4.9 2DV snelheidsveld bij 75% open sluis op basis van detailmodelbenadering; drempel gemodelleerd d.m.v. schotjes.



Figuur 4.10 2DV snelheidsveld bij 25% open sluis op basis van overzichtsmodeel-benadering; bodem t.p.v. de barriër niet aangepast.



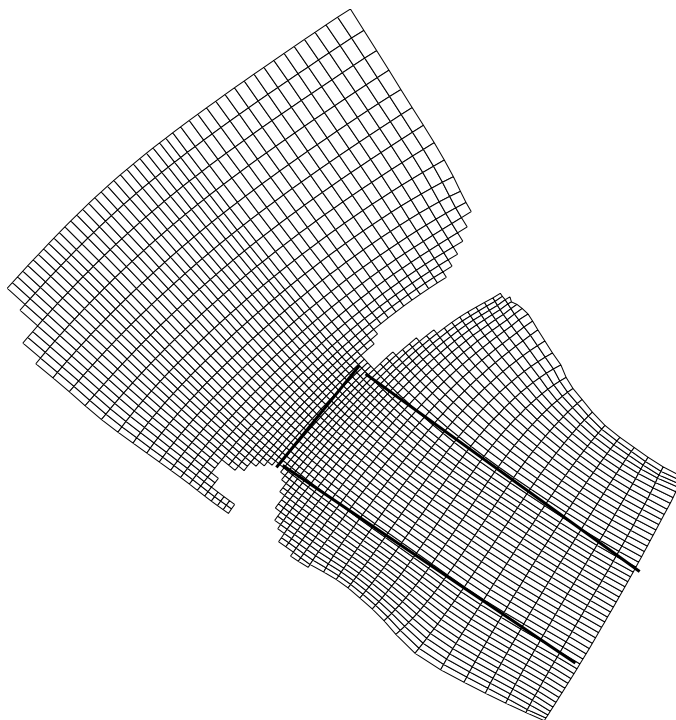
Figuur 4.11 2DV snelheidsveld bij 50% open sluis op basis van overzichtsmodeel-benadering; bodem t.p.v. de barriër niet aangepast.



Figuur 4.12 2DV snelheidsveld bij 75% open sluis op basis van overzichtsmodeel-benadering; bodem t.p.v. de barriër niet aangepast.

4.2 Simulaties met het MOHA model

In dit experiment is gebruik gemaakt van het MOHA (Monding HAringvliet) rooster welke in het verleden gebruikt is ten behoeve van het testen van de 3D barriërfomulering [4,9]. Zie Figuur 4.13. Voor dit rooster vallen elk van de 17 Haringvlietssluzen samen met één roostercel. Ter plaatse van de sluzen zijn de celbreedtes gemiddeld 57 m. en de cellengtes ongeveer 47 m. Het aantal roostercellen in het horizontale vlak bedraagt 50×54 . Het gemodelleerde gebied strekt zich uit tot 3 km. aan weerszijden van de sluzen.



Figuur 4.13 Rekenrooster van MOHA.

Op de zeerand en op de rivierand worden gemeten waterstanden in de vorm van tijdreeksen opgedrukt. Deze vaste metingen hebben plaatsgevonden op 10 maart 1994 en zijn beschikbaar in DONAR. Op die dag zijn metingen in het kader van de meetcampagne "Praktijk Visintrek" verricht [2]. Het betreft de metingen naar de zoutindringing bij geopende sluzen tijdens vloedperiode. Er zijn uitsluitend vertikaal- en oppervlaktemetingen van saliniteit uitgevoerd. Er zijn echter geen tijdreeksen van saliniteit beschikbaar. Om die reden worden stationaire zoutconcentraties opgelegd, te weten 0.2 ppt bij de rivierand en 18.0 ppt bij de zeerand. Het beginvoorwaarde voor de zoutconcentraties is 0.2 ppt.

Tijdens de meetproef (controlemeting A2) zijn de schuiven 11 en 12 met een hefhoogte van 2 m opengezet. In verband met te hoge stroomsnelheden bij de meetopstellingen is de totale opening na één uur verdeeld over de vier schuiven 10 t/m 13, met ieder een hefhoogte van 1 m. Het totale doorstroomoppervlak is gelijk aan 240 m^2 . De schuiven zijn gedurende de vloedperiode opengezet. In het numerieke experiment zijn de vier schuiven met 1.06 m opengezet van 12:10 uur tot 16:40 uur. De simulatieperiode bedraagt 2 dagen en het tijdstip van de start is 9 maart 0:00 uur.

De diepte is verdeeld in 10 equidistante lagen. De schuiven zijn gemodelleerd door middel van verticale schotjes. Ter plaatse van de drempel is de diepte aangepast en is gelijk aan NAP -5.5 m. De (m,n) -coördinaten van het sluisencomplex zijn gegeven door $\{(m,n) \in \mathbb{N} \mid m = 25, 18 \leq n \leq 34\}$. Bij gebrek aan meetgegevens van de afvoerrelatie, wordt de afvoercoëfficiënt gelijk gesteld aan 0.78. Deze veelvuldig gehanteerde waarde is bepaald op basis van metingen bij hoge rivierafvoer voor volledig geheven schuiven welke in diverse Rijkswaterstaatrapporten zijn gepresenteerd (zie ook [9]).

Voor dit experiment zijn er in totaal zes berekeningen uitgevoerd, te weten:

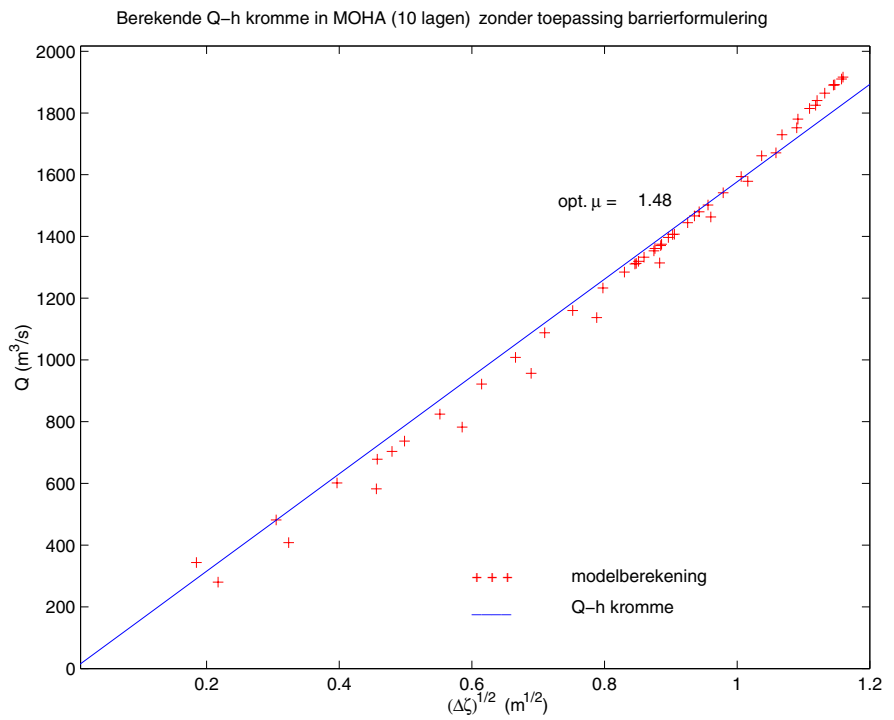
1. in deze berekening is de barrierformulering niet toegepast, dat wil zeggen de extra verliesterm als gegeven in (3.5) is **niet** toegevoegd aan de impulsvergelijkingen;
2. deze berekening is uitgevoerd met WAQUA. De afvoercoëfficiënt is opgegeven als 0.78. Als uitzondering is de bodem ter plaatse van de barrier niet aangepast en is gelijkgesteld aan NAP -13 m.;
3. in deze berekening, welke is uitgevoerd met de aangepaste TRIWAQ versie, is in plaats van 10 lagen één laag beschouwd. Eveneens is de bodem ter plaatse van de barrier ongewijzigd en is gelijk aan NAP -13 m; Verder is $\mu_{\text{invoer}} = 0.78$;
4. deze berekening is uitgevoerd met de "MER" versie waarbij de opgegeven verliescoëfficiënt gelijk is aan $\lambda = 1/(2 \cdot 0.78^2) = 0.822$;
5. deze berekening is uitgevoerd met de B+O versie en $\lambda_{\text{invoer}} = 0.822$;
6. deze berekening is uitgevoerd met de aangepaste TRIWAQ versie en $\mu_{\text{invoer}} = 0.78$.

Let op: de bij berekeningen 2., 3. en 6. opgegeven afvoercoëfficiënt correspondeert met de subkritische schuifstroming (i.e. conditie 7). Ter controle is geconstateerd dat in de WAQUA berekening slechts de genoemde stromingsconditie optreedt.

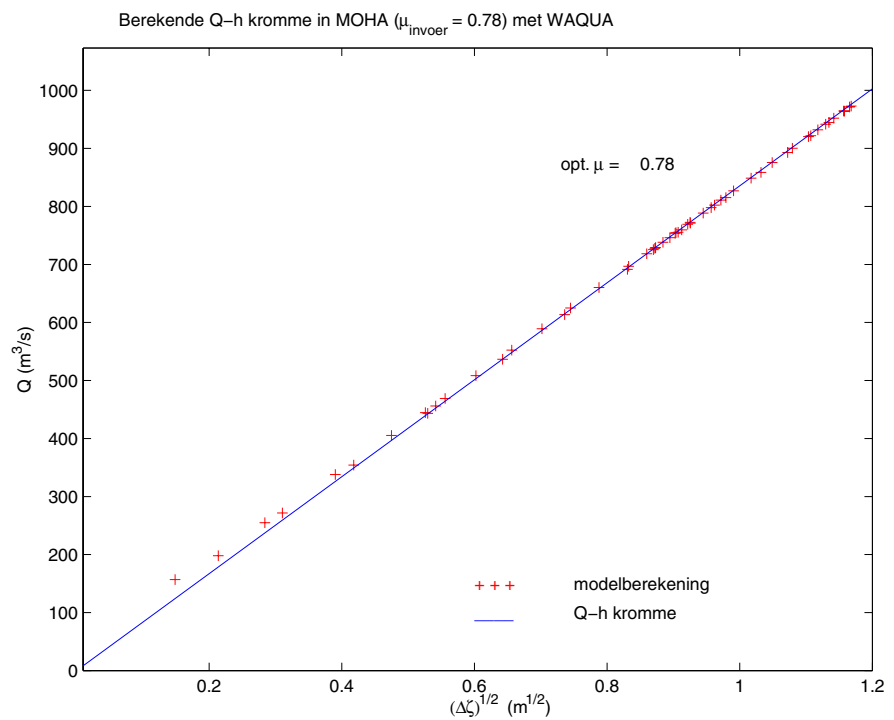
Het voornaamste doel van de berekeningen is te verifiëren in hoeverre het model de Q-h relatie met de bijbehorende afvoercoëfficiënt van 0.78 ter plaatse van de barrier reproduceert. Figuren 4.14 tot en met 4.19 geven de afvoerrelatie weer, waarbij de berekende afvoer $Q(t)$ ter plaatse van het sluisencomplex is uitgezet is tegen de wortel uit het berekende verval $\Delta\zeta$ over de sluisen. Ter bepaling van dit verval zijn de tijdreeksen van waterstanden ter plaatse van de naburige lokaties aan weerszijde van het sluisencomplex gekozen, te weten: $(m,n) = (24,24)$ aan zeezijde en $(m,n) = (26,24)$ aan rivierzijde. De lijn door deze twee punten staat loodrecht op sluis 11. In de numerieke experimenten is geconstateerd dat het verval over respectievelijk sluisen 10, 12 en 13 vrijwel gelijk is aan die van sluis 11. Tot slot is op basis van de kleinste kwadraten methode de optimale waarde voor de afvoercoëfficiënt bepaald. Deze is in alle figuren weergegeven waarbij tevens de theoretische Q-h kromme er aan toegevoegd is.

Figuur 4.14 laat duidelijk de noodzaak van de toepassing van een barrier-formulering in het model zien. Niet alleen de Q-h kromme wordt slecht gereproduceerd, er ontstaat tevens relatief te weinig energieverliezen ($\mu > 1$) met als gevolg relatief te hoge debiet door de sluisen.

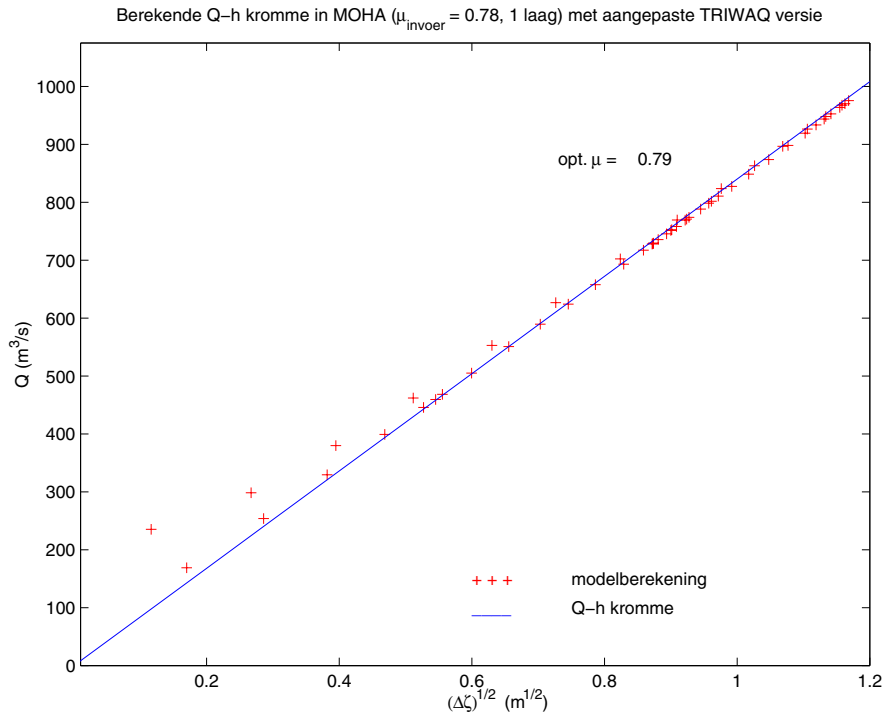
De Figuren 4.15 tot en met 4.19 tonen een kwadratisch verband tussen debiet en verval en aldus wordt de reproductie van de Q-h relatie goed weergegeven. Slechts de berekende afvoercoëfficiënten verschillen met de opgegeven waarde van 0.78, behalve die van WAQUA. Niettemin geven de berekeningen met de aangepaste TRIWAQ versie relatief kleinste afwijkingen: 1.3% in het geval van één laag en -2.6% in het geval van 10 lagen. Bijgevolg werken deze afwijkingen door in het berekende debiet door de sluisen (vergelijk het met het



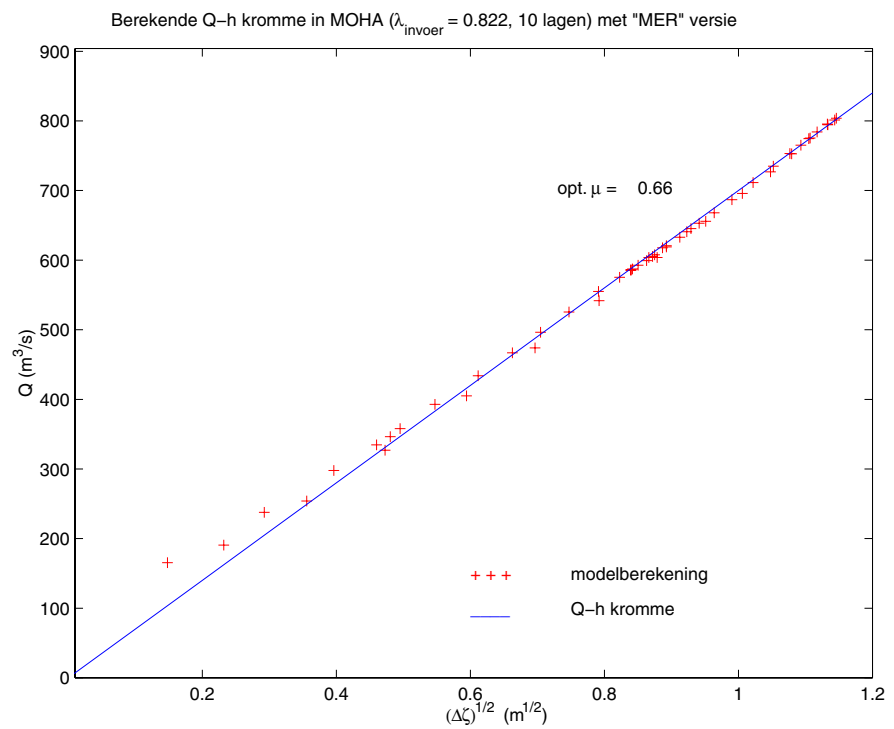
Figuur 4.14 Berekende afvoerrelatie volgens aangepaste TRIWAQ versie zonder toepassing van barrierformulering.



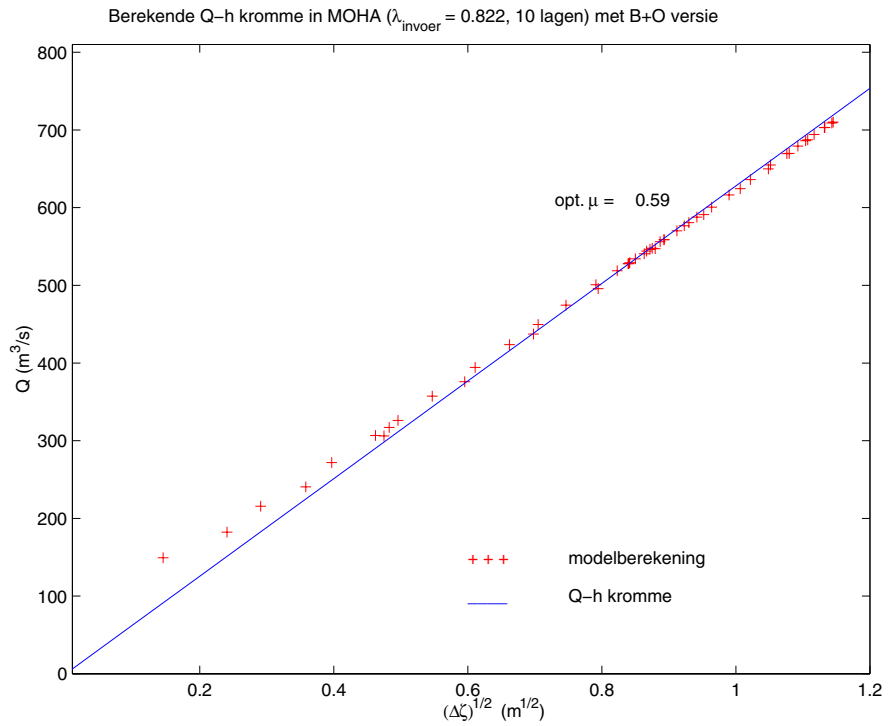
Figuur 4.15 Berekende afvoerrelatie volgens WAQUA.



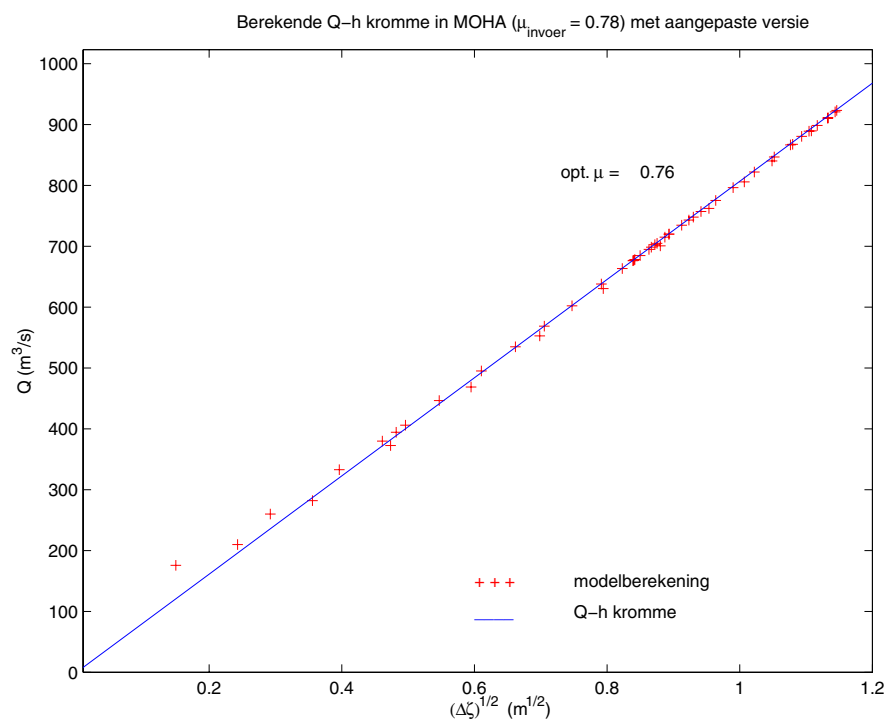
Figuur 4.16 Berekende afvoerrelatie volgens aangepaste TRIWAQ versie met één laag.



Figuur 4.17 Berekende afvoerrelatie volgens "MER" versie.



Figuur 4.18 Berekende afvoerrelatie volgens B+O versie.



Figuur 4.19 Berekende afvoerrelatie volgens aangepaste TRIWAQ versie.

door WAQUA berekende debiet). Zowel de "MER" versie als de B+O versie laten relatief grootste afwijkingen zien van respectievelijk -15.4% en -24.3% . Deze afwijkingen worden voor een belangrijk deel veroorzaakt door de onjuiste discretisatie van de advectietermen én het ten onrechte toevoegen van de bodemwrijving ter plaatse van de barrier.

In tegenstelling tot de verwachting toont de B+O versie een grotere afwijking dan de "MER" versie, terwijl de laatstgenoemde versie niet met de correcte doorstroomopening rekent. Dit kan als volgt worden verklaard. De diepte ter plaatse van de barrier is ongeveer 6 m en is equidistant verdeeld in 10 lagen. De gemiddelde laagdikte is aldus ± 60 cm. De schuifopening is 100 cm zodat de bodemlaag geheel open is, terwijl de tweede laag voor 67% open staat. Echter, in het model wordt de tweede laag als 100% open beschouwd. Zowel in de "MER" versie als in de B+O versie wordt zodoende met te grote opening gerekend, echter met dat verschil dat in de B+O versie de verliescoëfficiënt telkens wordt bijgesteld ter correctie van de doorstroomopening (zie formule (3.16)). Derhalve is het door de "MER" versie berekende debiet ten onrechte groter dan die van de B+O versie, hetgeen leidt tot een hogere afvoercoëfficiënt.

Om de invloed van de barrierformulering op het zouttransport te onderzoeken zijn de ruimtelijke saliniteitsverdelingen op 5 m beneden de waterspiegel, verkregen met de aangepaste TRIWAQ versie met en zonder toepassing van de barrierformulering, "MER" versie en B+O versie, weergegeven in respectievelijk Figuur 4.23, 4.20, 4.21 en 4.22. Het deelgebied waarin deze verdelingen voorkomen correspondeert met het door de lijnen omsloten gebied zoals geïllustreerd in Figuur 4.13. Het moment van deze verdelingen is 10 maart 15:30 uur. Merk op dat alleen de resultaten van de berekeningen met 10 lagen worden besproken. Om de modelresultaten te kunnen beoordelen worden de meetresultaten zoals weergegeven in Bijlage 3.5.17.1 in [2] als referentie genomen.

Opnieuw laat Figuur 4.20 zien dat zonder toepassing van een barrierformulering een onrealistisch zouttransport ontstaat in het model. De overige figuren vertonen relatief kleine verschillen tussen de verdelingen van zoutconcentraties berekend met de "MER" versie (Figuur 4.21), B+O versie (Figuur 4.22) en aangepaste TRIWAQ versie (Figuur 4.23).

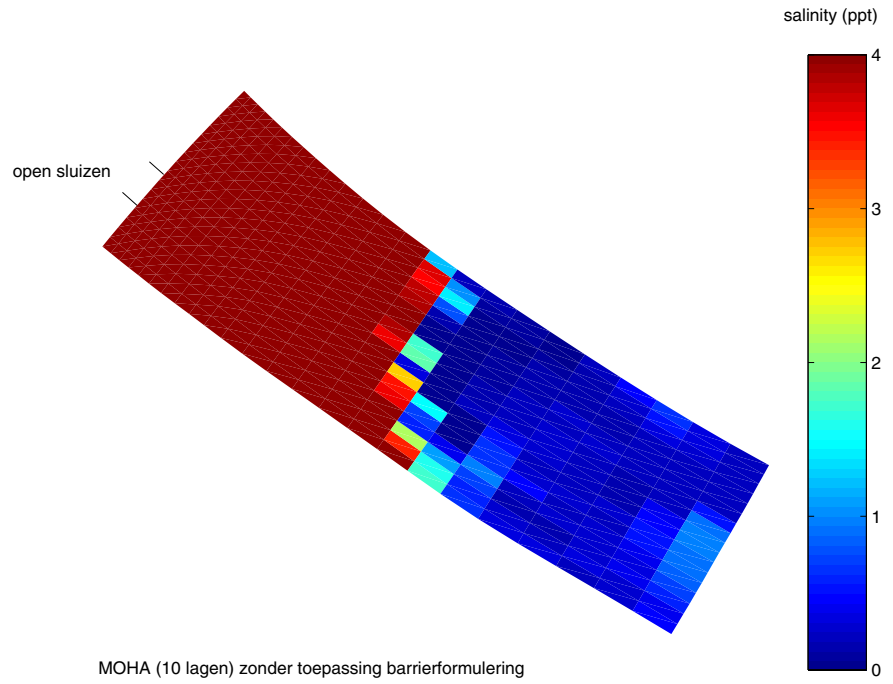
Voor wat betreft de mate van zoutindringing is die van de B+O versie het kleinst en die van de "MER" versie het grootst. Bovendien vindt met de "MER" versie een ietwat grotere zouttransport in de dwarsrichting plaats dan zowel met de B+O versie als met de aangepaste TRIWAQ versie. Ten aanzien van de verhouding tussen de zouttransport in de lengterichting en in de dwarsrichting vertoont het resultaat met de aangepaste TRIWAQ versie de beste overeenstemming met de metingen.

Qua orde grootte en ruimtelijke verdeling vertonen de modelresultaten redelijke overeenkomsten met de metingen (vergelijk met Bijlage 3.5.17.1 in [2]).

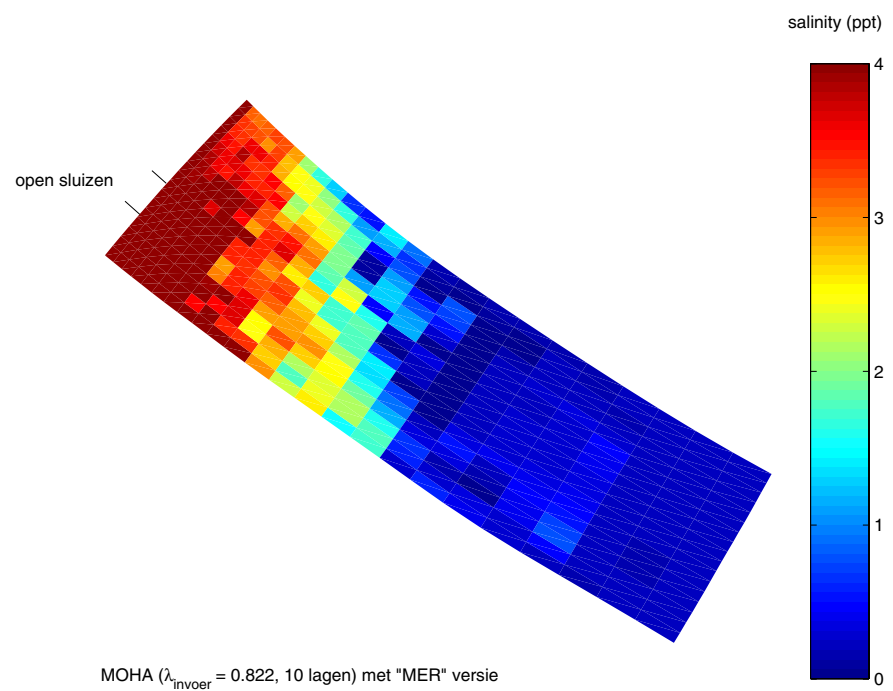
Wellicht kan de kwaliteit van deze berekeningen vergroot worden door:

- de inspeelperiode te vergroten óf de berekeningen te starten met een niet-uniforme saliniteitsverdeling verkregen uit een grotere model, bijv. het ZEEDELTA model;
- op de open randen de werkelijke verdeling van zout op te leggen;
- de waarde van de afvoercoëfficiënt op te geven dat correspondeert met de werkelijke situatie rond de Haringvlietsluizen.

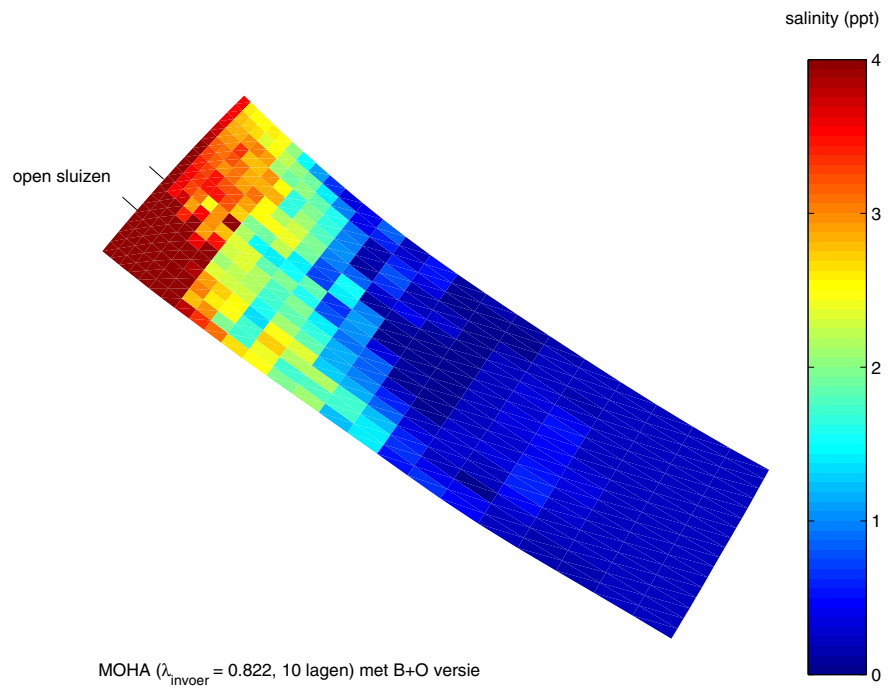
Hiervoor zijn echter aanvullende en gedetailleerde meetgegevens van de stroming rond het Haringvlietcomplex nodig.



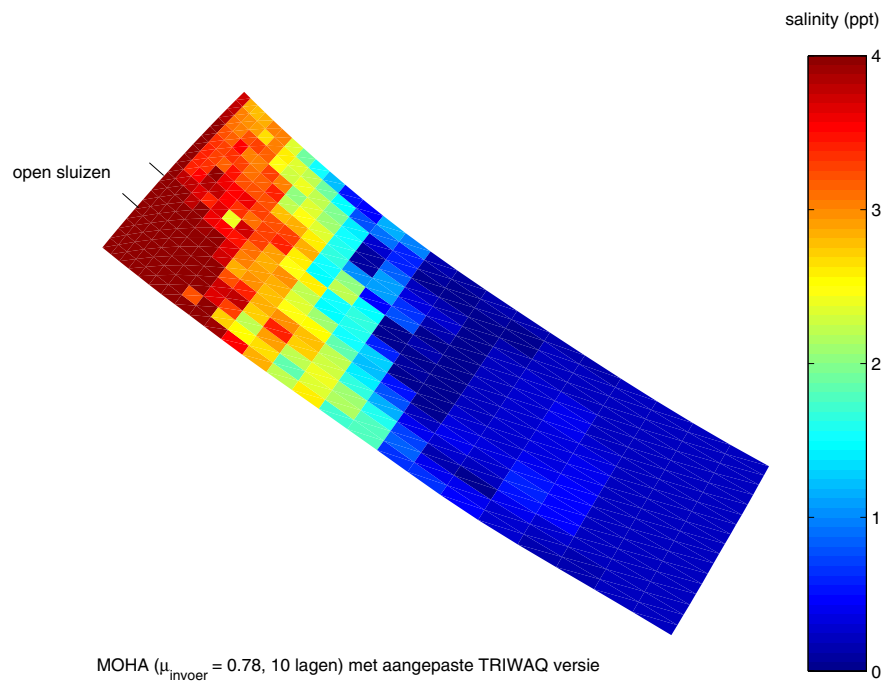
Figuur 4.20 Berekende saliniteitsveld op 5 m beneden waterspiegel, 10 maart 15:30 uur, volgens aangepaste TRIWAQ versie zonder toepassing van barrierformulering.



Figuur 4.21 Berekende saliniteitsveld op 5 m beneden waterspiegel, 10 maart 15:30 uur, volgens "MER" versie.



Figuur 4.22 Berekende saliniteitsveld op 5 m beneden waterspiegel, 10 maart 15:30 uur, volgens B+O versie.



Figuur 4.23 Berekende saliniteitsveld op 5 m beneden waterspiegel, 10 maart 15:30 uur, volgens aangepaste TRIWAQ versie.

5 Conclusies en aanbevelingen

Lokale stromingsverschijnselen leveren in ondiepwater-modellen problemen op als ze een schaal hebben die veel kleiner is dan de resolutie van het modelrooster. Dit is het geval bij stromingen door barri ers. Als oplossing voor het probleem voegt men de belangrijkste karakteristieken van de lokale stroming, zoals energieverliezen, via semi-empirische relaties aan het model toe. Bij verdere uitwerking wordt onderscheid gemaakt tussen modellen waarin de schuiven en drempels fysiek aanwezig zijn (detailmodellen) en modellen waarin ze niet aanwezig zijn (overzichtsmodellen). Een systematische beschrijving van de wijze waarop energieverlies in rekening wordt gebracht afhankelijk van de stromingscondities op basis waarvan de Q-h relaties worden toegepast is gegeven in Hoofdstuk 2. Ter wille van eenduidigheid en overzichtelijkheid is het wenselijk deze systematische beschrijving op te nemen in zowel de Technische documentatie als gebruikershandleiding van WAQUA [7,14].

De Q-h relaties hebben betrekking op diepte-gemiddelde grootheden en gebruiken geen informatie van de lokale verticale structuur van de stroming. Door de expliciete inbreng van die structuur op basis van de detailmodelbenadering worden het debiet en de zoutflux door de sluis zo nauwkeurig mogelijk bepaald, zonder dat het stroombeeld op enige afstand van het complex wordt verstoord. Hiervoor is in dit onderzoek een 3D wiskundig model ontwikkeld toegepast voor situaties waarbij de sluisen gedeeltelijk open zijn. Tevens is een sluisformulering afgeleid voor 3D overzichtsmodellen. In beide sluisformuleringen worden aan de bewegingsvergelijkingen ter plaatse van de barriër een extra kwadratische verliesterm toegevoegd. Deze verliesterm hangt voornamelijk af van de afvoercoëfficiënt en doorstroomopening. Hierbij is gebleken dat in de formulering zoals behandeld in [4] geen rekening wordt gehouden met het werkelijke doorstroomoppervlak. De (numerieke) fout die hierdoor ontstaat hangt af van de verticale resolutie. De 3D sluisformulering, welke in de huidige B+O versie is geïmplementeerd [8], rekent met de werkelijke doorstroomopening.

Naast de extra verliesterm nemen de bodemwrijving en advectieve termen, afhankelijk van de keuze van de discretisatie, een deel van het energieverlies voor hun rekening. Hierdoor zal de afvoercoëfficiënt doorgaans een lagere waarde hebben dan de met een Q-h relatie afgeregelde waarde. In de oorspronkelijke opzet zoals beschreven in [12] worden dergelijke fouten via de verliesterm gecompenseerd op basis van calibratie met het 3D model. Dit heeft onder andere tot gevolg dat de verliescoëfficiënt afhankelijk zal zijn van de horizontale roosterafstand. Het huidige verslag gaat nader in op de vraag hoe de Q-h relatie met een gegeven afvoercoëfficiënt kan worden gereproduceerd zonder dat een calibratieslag voor de afvoercoëfficiënt in de 3D-modellen is vereist. Dit heeft geleid tot een verdere verbetering van de 3D barri erformulering.

Ten behoeve van de verificatie van 3D modellen en het bepalen van de afvoercoëfficiënten in de Q-h relaties zijn aanvullende en gedetailleerde meetgegevens gewenst van de stroming rond het Haringvlietsluizencomplex, in het bijzonder de tijdreeksen van het debiet ter plaatse van de sluisen en waterstanden aan binnen- en buitenzijde van het complex. Het belang van deze wens is mede gebaseerd op het feit dat er ter plaatse van de Haringvlietsluizen en hun onmiddellijke omgeving de Q-h relaties geldig zijn. Op basis van de 3D

barrierformulering kunnen dergelijke relaties nauwkeurig worden gereproduceerd mits de opgegeven afvoercoëfficiënt is afgeregeld met debiet- en waterstandsmetingen. De meetcampagne uitgevoerd door de Meetdienst van de Directie Zuid-Holland in maart 1997 is in dat opzicht uniek. Tijdens deze meetsessie zijn de tijdreeksen van waterstanden, debieten én chlorideconcentraties in het Haringvliet en in de Voordelta verzameld. Deze gegevens zijn (en zullen) dan ook gebruikt (worden) in het NAUTILUS project ten behoeve van de verificatie en validatie van ZEEDELTA en RIJMAMO modellen; zie bijvoorbeeld [3].

In dit verslag zijn de resultaten van drie-dimensionale simulaties van 2DV en MOHA modellen besproken. Deze resultaten zijn verkregen met drie verschillende implementaties van de 3D barrierformulering, te weten:

1. de sluisformulering zoals voorgesteld in [4]. Deze formulering is ontwikkeld ten behoeve van het project MER Beheer Haringvlietsluizen ("MER" versie);
2. de sluisformulering zoals beschreven in [8] en is geïmplementeerd in de B+O versie van TRIWAQ (B+O versie);
3. de verbeterde sluisformulering zoals behandeld in Hoofdstuk 3 van dit verslag. Het is geïmplementeerd in de TRIWAQ programmatuur uitgaande van de B+O versie, doch momenteel niet geïntegreerd in de bedoelde versie (aangepaste TRIWAQ versie).

Daarnaast zijn er enkele 2DH berekeningen uitgevoerd met WAQUA en de aangepaste TRIWAQ versie met één laag.

Op grond van de resultaten van de 2DV simulaties kan geconcludeerd worden dat juiste afvoercoëfficiënten berekend kunnen worden met de verbeterde 3D barrierformulering. Op deze wijze kunnen in het model de gemeten afvoerrelaties worden gerealiseerd. Tevens levert de verbeterde 3D barrierformulering realistische stroombeelden rondom de barrier.

De berekeningen met het MOHA model laten het belang van de toepassing van een sluisformulering zien. Zonder het gebruik van deze formulering is een realistische zoutverspreiding in het Haringvliet niet mogelijk. Tevens bleken de opgegeven en de door WAQUA en aangepaste TRIWAQ versie berekende afvoercoëfficiënten met elkaar in overeenstemming te zijn. De opgegeven waarden van de afvoercoëfficiënten dienen echter door calibratie op basis van de gemeten afvoerrelaties bepaald te worden.

Het verdient aanbeveling om de verbeterde sluisformulering in de B+O versie van TRIWAQ te implementeren.

Literatuur

- [1] *Gereduceerd Zeedelta model; bouw en afregeling*, RIKZ/OS-99.133X (A442), Ingenieursbureau Alkyon - RIKZ/RWS, 1999
- [2] Bol, R. - *Een snuffje zout ...! Verslag van de metingen naar zoutindringing via de Haringvlietsluizen in het kader van de Praktijkproef Visintrek*, notanr. 94.051, RIZA/RWS, 1995
- [3] Cohen, P.F.D. - *Gevoeligheidsonderzoek met een numeriek getijmodel voor nauwkeurige reproductie van de waterbeweging in het Haringvliet; toetsing met meetgegevens uit 1997 bij gewijzigd beheer van de Haringvlietsluizen*, afstudeerverslag, RIKZ/OS-99.126X, RIKZ/RWS, 1999
- [4] De Goede, E.D. - *Het implementeren in TRIWAQ van een 3D barriërformulering voor gedeeltelijk geopende sluisen*, KEPS02, fase 2 en 3, nr. Z986, WL | Delft Hydraulics, 1996
- [5] Langerak, A. - *Aspekten Barriers Waqua-modellen*, GWA0-88.808, Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Projectbureau Zierikzee, 1988
- [6] Leendertse, J.J. - *Comments on draft report 3D-numerieke modellering Haringvlietsluizen*, fax 070594, 1994
- [7] *User's guide WAQUA*, SIMONA rapport, nr. 92-10, Rijkswaterstaat/ICIM B.V., 1992
- [8] *TRIWAQ - three-dimensional shallow water flow model*, Technical documentation, Version 1.1, RKZ-438, SEPRA B.V. - RIKZ/RWS, 1998
- [9] Stelling, G.S., J.A.Th.M. van Kester en L.J.M. Hulsen - *3D-numerieke modellering Haringvlietsluizen; Sluisformuleringen voor het Haringvlietcomplex en testberekeningen*, nr. Z686, WL | Delft Hydraulics, 1994
- [10] *Calibratie, validatie en berekeningen Rijmamo 3D t.b.v. MER Beheer Haringvlietsluizen*, Svasek B.V. (projectnr. 980), Rijkswaterstaat, 1996
- [11] *Het Rijmamo 3D₁₀ (v2) model versus het Rijmamo 3D₇ (v2) model, verificatie aan de hand van de meetset "doorgestoken Beerdam"*, RIKZ/OS-99.129X (99255-1072), Ingenieursbureau Svasek - RIKZ/RWS, 1999
- [12] Van Kester, J.A.Th.M en G.S. Stelling - *3D-numerieke modellering gedeeltelijk geopende Haringvlietsluizen; Sluisformuleringen en testberekeningen voor implementatie in TRIWAQ*, KEPS02, fase 1, nr. Z948, WL | Delft Hydraulics, 1996
- [13] Ven te Chow, Ph.D. - *Open-channel Hydraulics*, 1982
- [14] *Technical documentation WAQUA*, SIMONA rapport, nr. 98-01, WL | Delft Hydraulics, 1998

