

De modellering van golven en stroming op de Plaat van Baarland in de Westerschelde

Werkdocument RIKZ/OS-97.832x

13 juli 1997

Kaj van Doorn
vakgroep Fysische Geografie
faculteit Ruimtelijke Wetenschappen
Universiteit Utrecht

in opdracht van:
Rijksinstituut voor Kust en Zee
project: DYNASTAR*ECOMOR

VOORWOORD:

Bij het uitvoeren van deze stage-opdracht heb ik van vele mensen hulp gekregen. Ik wil alle medewerkers van het RIKZ Middelburg en het RIKZ Den Haag, met wie ik te maken heb gehad, bedanken voor hun bijdrage. Een aantal mensen wil ik speciaal bedanken.

Allereerst wil ik mijn stagebegeleiders Marco Duiker (Universiteit Utrecht), Harm Verbeek (RIKZ) en Aart Kroon (Universiteit Utrecht) bedanken voor de enthousiaste begeleiding en de vele nuttige tips. Voorts wil ik Maarten Jansen (Ingenieursbureau Svasek) hartelijk bedanken voor de discussies, tips en steun. Kees v/d Male (RIKZ) wil ik bedanken voor de overdracht van kennis op het gebied van WAQUA en het schrijven van een aantal programma's. Michiel Schaap (Hogeschool Zeeland) wil ik bedanken voor de introductie tot WAQUA. Fred Tank (Universiteit Utrecht) wil ik bedanken voor zijn hulp bij het maken van een aantal GIS-plaatjes.

Jeroen de Jong (RIKZ-Den Haag) wil ik hartelijk bedanken voor de hulp met het golfmodel SWAN. Ik wil Ard Kamsteeg (RIKZ-Den Haag) bedanken voor het schrijven van een aantal Matlab-programma's. Renée de Boer (RIKZ-Den Haag) wil ik bedanken voor haar introductie tot SWAN. Joska Andorka Gal (RIKZ-Den Haag) wil ik bedanken voor zijn hulp met betrekking tot SWAN.

Middelburg, 9 juli 1997.

INHOUDSOPGAVE

Lijst van figuren

Lijst van tabellen

Lijst van bijlagen

Lijst van symbolen

<u>1. INLEIDING</u>	1
1.1: Kader.....	1
1.2: Probleemstelling en doelstelling.....	2
1.3: Opbouw van het rapport.....	2
<u>2. TOELICHTING BIJ MODELLEN WAQUA EN SWAN</u>	3
2.1: Het waterbewegingsmodel WAQUA.....	3
2.1.1: Kenmerken.....	3
2.1.2: Reden van gebruik van WAQUA.....	5
2.1.3: Werking van WAQUA.....	5
2.2: Het golfmodel SWAN.....	6
2.2.1: Kenmerken.....	6
2.2.2: Reden van gebruik van SWAN.....	7
2.2.3: Werking van SWAN.....	7
<u>3. WERKWIJZE</u>	9
3.1: Onderzoeksgebied.....	9
3.2: Metingen in het veld.....	12
3.3: Selectie van te modelleren dagen.....	12
3.4: Verwerking van drukdoosdata tot waterstanden, waterdieptes en golfparameters.....	13
3.5: Omrekening gemeten stroomsnelheden naar diepte-gemiddelde stroomsnelheden.....	14
3.6: Toepassing van de modellen.....	15
3.6.1: WAQUA.....	15
3.6.2: SWAN.....	16
<u>4. RESULTATEN: METINGEN EN MODELUITKOMSTEN</u>	18
4.1: Metingen dag 330 en 331.....	18
4.2: Modeluitkomsten.....	19
4.2.1: WAQUA-runs 330-3 en 330-4.....	19
4.2.1.1: Stromingsvelden.....	19
4.2.1.2: Waterstanden, stroomsnelheid en stroomrichting.....	20
4.2.2: SWAN-runs.....	24
4.2.2.1: Vergelijking golfparameters uit metingen en SWAN-runs op de meetpunten.....	24
4.2.2.2: Vergelijking absolute variantiespectra op de meetpunten.....	26
4.2.2.3: Ruimtelijke patronen op tijdstip 1:30 uur.....	27
4.2.2.4: Ruimtelijke patronen op tijdstip 2:00 uur.....	29
4.2.2.5: Ruimtelijke patronen op tijdstip 3:30 uur.....	31
4.2.2.6: Vergelijking relatieve golfhoogte SWAN met metingen.....	32
4.2.3: Integratie stroming en golven ten behoeve van substraatdynamiek.....	33

<u>5. DISCUSSIE</u>	35
<u>6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</u>	37
<u>7. LITERATUURLIJST</u>	39

Bijlagen 1 t/m 72.

LIJST VAN FIGUREN:

- figuur 1: Verspringend rooster van WAQUA.
figuur 2: Locatie van de Plaat van Baarland in de Westerschelde, Zuidwest-Nederland.
figuur 3: Hoogteligging Plaat van Baarland en ligging van meetpunten.
figuur 4: Rekenroosters en invoerroosters in het model SWAN.
figuur 5: Wind, waterstand en stroomsnelheid dag 330 en 331 op punt Q.
figuur 6: Vergelijking gemeten en gemodelleerde stroomsnelheden en stroomrichtingen op punt Q voor de ochtend van dag 330.
figuur 7: Absolute spectra op punt S op dag 330 om 2:00 uur: meting en model.
figuur 8: Gemodelleerde relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) op dag 330, 1:30 uur.
figuur 9: Gemodelleerde relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) op dag 330, 2:00 uur.
figuur 10: Gemodelleerde relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) op dag 330, 3:30 uur.

LIJST VAN TABELLEN:

- tabel 1: Rijksdriehoeks-coördinaten van meetpunten P t/m S.
tabel 2: De gemiddelde en maximale absolute afwijking van de waterstanden t.o.v. NAP uit WAQUA van de gemeten waterstanden bij meetpunten P, Q en R.
tabel 3: Vergelijking van golfparameters verkregen uit metingen en uit modellering met SWAN.
tabel 4: Vergelijking relatieve golfhoogtes meting en SWAN.

LIJST VAN BIJLAGEN:

- Bijlage 1: De ondiep-water-vergelijkingen van WAQUA.
- Bijlage 2 t/m 14: Stromingsvelden uit WAQUA-run 330-3 van 0:00 t/m 6:00 uur.
Bijlage 15 t/m 17: Vergelijking gemodelleerde waterstanden (run 330-3; kritische waterdiepte= 0.10 m) en gemeten waterstanden voor P, Q en R
Bijlage 18 t/m 20: Vergelijking gemodelleerde waterstanden (run 330-4; kritische waterdiepte= 0.15 m) en gemeten waterstanden voor P, Q en R
Bijlage 21: Vergelijking gemodelleerde waterstanden bij verschillende kritische waterdieptes (runs 330-3 en 330-4)
Bijlage 22: Vergelijking gemodelleerde stroomsnelheden bij verschillende kritische waterdieptes (runs 330-3 en 330-4)
- Bijlage 23: Golfspectrum op basis van metingen op punt P, 1:30 uur.
Bijlage 24: Golfspectrum uit SWAN-run op punt P, 1:30 uur.
Bijlage 25: Golfspectrum op basis van metingen op punt Q, 1:30 uur.
Bijlage 26: Golfspectrum uit SWAN-run op punt Q, 1:30 uur.
Bijlage 27: Golfspectrum op basis van metingen op punt R, 1:30 uur.
Bijlage 28: Golfspectrum uit SWAN-run op punt R, 1:30 uur.
Bijlage 29: Golfspectrum op basis van metingen op punt P, 2:00 uur.
Bijlage 30: Golfspectrum uit SWAN-run op punt P, 2:00 uur.
Bijlage 31: Golfspectrum op basis van metingen op punt Q, 2:00 uur.
Bijlage 32: Golfspectrum uit SWAN-run op punt Q, 2:00 uur.
Bijlage 33: Golfspectrum op basis van metingen op punt R, 2:00 uur.
Bijlage 34: Golfspectrum uit SWAN-run op punt R, 2:00 uur.
Bijlage 35: Golfspectrum op basis van metingen op punt P, 3:30 uur.
Bijlage 36: Golfspectrum uit SWAN-run op punt P, 3:30 uur.
Bijlage 37: Golfspectrum op basis van metingen op punt Q, 3:30 uur.
Bijlage 38: Golfspectrum uit SWAN-run op punt Q, 3:30 uur.
Bijlage 39: Golfspectrum op basis van metingen op punt R, 3:30 uur.

Bijlage 40: Golfspectrum uit SWAN-run op punt R, 3:30 uur.

Bijlage 41: Golfspectra op basis van metingen op punt S, 3 verschillende tijdstippen.

Bijlage 42: Golfspectra uit SWAN-runs op punt S, 3 verschillende tijdstippen.

Bijlage 43: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t1c1 (1:30 uur, grove run)

Bijlage 44 t/m 46: Kaartjes van resultaten run t1c1: H_{m0} , waterdiepte, golfvoortplantingsrichting

Bijlage 47: Invoer waterstanden uit WAQUA-run 330-3 op 1:30 uur

Bijlage 48: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t1n1 (1:30 uur, nest-run)

Bijlage 49 t/m 51: Kaartjes van resultaten run t1n1: H_{m0} , waterdiepte, golfvoortplantingsrichting

Bijlage 52: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run KD22 (2:00 uur, grove run)

Bijlage 53 t/m 55: Kaartjes van resultaten run KD22: H_{m0} , waterdiepte, golfvoortplantingsrichting

Bijlage 56: Invoer waterstanden uit WAQUA-run 330-3 op 2:00 uur

Bijlage 57: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run n22 (2:00 uur, nest-run)

Bijlage 58 t/m 60: Kaartjes van resultaten run n22: H_{m0} , waterdiepte, golfvoortplantingsrichting

Bijlage 61: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t3c1 (3:30 uur, grove run)

Bijlage 62 t/m 64: Kaartjes van resultaten run t3c1: H_{m0} , waterdiepte, golfvoortplantingsrichting

Bijlage 65: Invoer waterstanden uit WAQUA-run 330-3 op 3:30 uur

Bijlage 66: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t3n1 (3:30 uur, nest-run)

Bijlage 67 t/m 69: Kaartjes van resultaten run t3n1: H_{m0} , waterdiepte, golfvoortplantingsrichting

Bijlage 70: Golfhoogtes op basis van gecorrigeerde en ongecorrigeerde golfspectra (van metingen) op punten P, Q en R.

Bijlage 71: Gedeelte van de Westerschelde met de bodem van 1996 als invoer bij WAQUA-runs.

Bijlage 72: Verantwoording gebruikte parameters bij WAQUA- en SWAN-runs.

LIJST VAN SYMBOLEN:

h	=	waterdiepte	(m)
H_{m0}	=	golfhoogte, gebaseerd op het golfspectrum	(m)
T_{piek}	=	piekperiode	(s)
L	=	golflengte	(m)
T_{m01}	=	gemiddelde absolute periode, gebaseerd op het golfspectrum	(s)
RT_{m01}	=	gemiddelde relatieve periode, gebaseerd op het golfspectrum	(s)
Q_b	=	fractie brekende golven	(-)
$TDir$	=	richting van energietransport t.o.v. de x-as van het 'problem coordinate system' in SWAN	(°)
$U_{rms,bodem}$	=	'root-mean-square'-waarde van de orbitaalsnelheid aan de bodem	(m/s)
m_0	=	totale golfenergie over alle frequentiebanden	(m ²)
f	=	frequentie	(Hz)
f_{piek}	=	piekfrequentie	(Hz)
u	=	stroomsnelheid	(m/s)

1. INLEIDING:

1.1: Kader.

De opdracht, die in dit rapport wordt besproken, past in het RIKZ-project DYNASTAR*ECOMOR. Nauw verbonden met dit project is het RIKZ-project INGE (INrichting*GEneriek). Het onderzoek in het kader van de 2 bovengenoemde projecten is een samenwerkingsverband tussen het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), de Universiteit Utrecht (UU), de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) en het Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek (NIOO). De opdrachtgever is het Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Doelstellingen van het project DYNASTAR*ECOMOR zijn:

1. het bepalen van de relatie tussen substraatdynamiek en -samenstelling en de ruimtelijke en temporele spreiding van het macrobenthos in het intergetijdegebied van de Westerschelde;
2. het bepalen van het verband tussen substraatdynamiek en -samenstelling en de sturende factoren stroming, golfwerking en bioturbatie;
3. voorspellen van het effect van morfologische veranderingen door inrichting- en beheersmaatregelen op de ecologie van het benthos (Duiker, 1996).

Als eerste studie-object is de Plaat van Baarland gekozen (zie figuur 2, § 3.1). Binnen DYNASTAR*ECOMOR ligt het accent op de fysische kant van het onderzoek. Binnen INGE wordt meer aandacht besteed aan de biotische kant van het onderzoek: inhoudelijk wordt er samengewerkt aan doelstelling 1. Verder wordt binnen INGE aandacht besteed aan het bepalen van het verband tussen substraatdynamiek en -samenstelling en bioturbatie (deel van doelstelling 2). Hieraan zal binnen DYNASTAR*ECOMOR minder aandacht gegeven worden (Duiker, 1996).

De opdracht, die in dit rapport centraal staat, vormt een stap in de richting van het bereiken van doelstelling nummer 2.

De werkwijze van de bovengenoemde projecten is als volgt. In het onderzoeksgebied worden gegevens van de bodemdieren (het macrobenthos) verzameld, zowel van aantallen als van soorten. Daarnaast worden metingen verricht van stroomsnelheid en -richting, waterstanden, troebelheid van het water, windsnelheid en -richting, watertemperatuur, saliniteit en bodemhoogtes. Er wordt getracht een relatie te bepalen tussen het voorkomen van bodemdieren en de dynamiek van het substraat (=de mate van beweging van het bodemoppervlak). Om een *ruimtelijk* beeld van de substraatdynamiek, uitgesplitst in substraatdynamiek door stroming en substraatdynamiek door golfwerking, te krijgen, en om de substraatdynamiek te kunnen voorspellen voor omstandigheden waarin *geen* metingen voorhanden zijn, wordt getracht de stroming en golfwerking te modelleren. Op die manier kan uiteindelijk het effect van ingrepen in de Westerschelde op de verspreiding van bodemdieren worden ingeschat.

1.2: Probleemstelling en doelstelling.

De *probleemstelling* van deze stage-opdracht luidt: wat is de geschiktheid van een gekozen modelinstrumentarium voor het modelleren van hydrodynamiek en substraatdynamiek op de Plaat van Baarland?

De doelstelling van deze opdracht is **het opzetten en testen van een modelleninstrumentarium voor het voorspellen van substraatdynamiek op de Plaat van Baarland uit hydrodynamiek**. Deze doelstelling is uit te splitsen in 2 deeldoelstellingen:

1. *het opzetten, testen en afregelen van een model voor stroming (WAQUA) en een model voor golven (SWAN);*
2. *het modelleren van substraatdynamiek uit hydrodynamiek.*

WAQUA is een 2-dimensionaal waterbewegingsmodel, dat veel binnen Rijkswaterstaat wordt gebruikt. SWAN is een numeriek golfmodel, ontwikkeld door de TU Delft, dat wordt gebruikt voor het schatten van golfparameters (zoals golfhoogte) in kustgebieden, estuaria en meren.

Om de eerste deeldoelstelling te bereiken, wordt eerst getracht om de modellen te draaien en betrouwbare uitvoer te krijgen. De modelresultaten worden vergeleken met metingen op de plaat. Door wijzigingen in de invoer van de modellen (coëfficiënten e.d.) door te voeren, wordt getracht de meetresultaten zo dicht mogelijk te benaderen, het zogenaamde afregelen van de modellen. Dit afregelen is door tijdgebrek nog niet goed aan bod gekomen.

De tweede deeldoelstelling is niet aan bod gekomen. Dit komt voort uit de keuze om veel aandacht te besteden aan de kwaliteit van de modellering van de waterbeweging alvorens aan substraatdynamiek-modellen te gaan beginnen. In een volgend stadium kan een sedimenttransportmodel worden toegepast op de Plaat, gebaseerd op de gegevens uit de hydrodynamische modellen.

1.3: Opbouw van het rapport.

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 worden de gebruikte modellen toegelicht. In hoofdstuk 3 wordt de werkwijze besproken. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de gemeten waarden en de modelresultaten (zowel voor stroming als voor golven) gepresenteerd en vergeleken. De discussie en conclusies en aanbevelingen volgen in hoofdstuk 5 en 6.

2. TOELICHTING BIJ MODELLEN WAQUA EN SWAN:

2.1: Het waterbewegingsmodel WAQUA.

2.1.1. Kenmerken:

WAQUA-in-SIMONA is een 2-dimensionaal, horizontaal, numeriek waterbewegingsmodel. Het behoort tot de SIMONA-modellengroep (SIMONA= SIMulatie MOdellen NAtte waterstaat). Dit is een verzameling modellen binnen Rijkswaterstaat, die een gemeenschappelijke structuur bezitten zodat ze gemakkelijk gekoppeld kunnen worden.

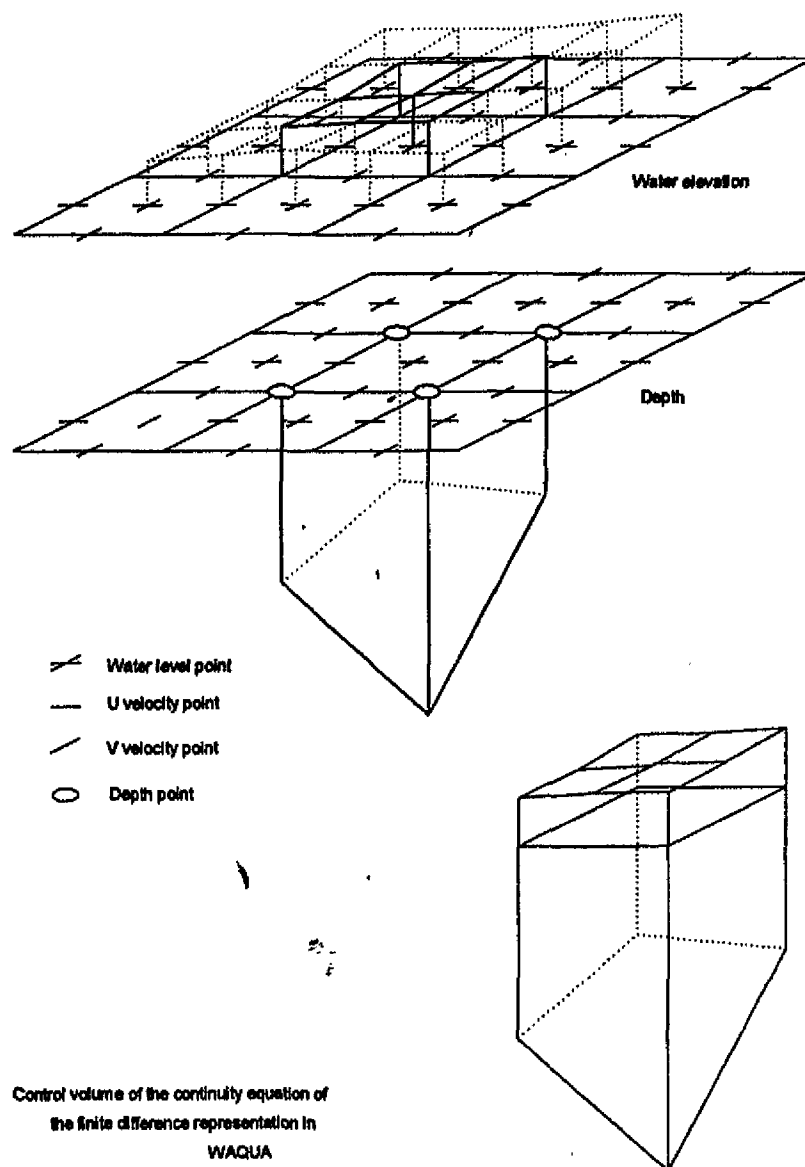
WAQUA is gebaseerd op de **ondiep-water-vergelijkingen**, die de relatie weergeven tussen U (=diepte-gemiddelde stroomsnelheid in de x-richting), V (=diepte-gemiddelde stroomsnelheid in de y-richting) en ζ (=waterstand). De vergelijkingen zijn te vinden in bijlage 1. De ondiep-water-vergelijkingen beschrijven de stroming van water in een gebied waarvan de afmetingen in horizontale richting vele malen groter zijn dan die in verticale richting.

De ondiep-water-vergelijkingen zijn partiële differentiaal-vergelijkingen, die beschrijven hoe U , V en ζ in de tijd veranderen op elk punt in het beschouwde gebied. Om U , V en ζ te berekenen, moeten deze wel bekend zijn op tijdstip t_0 , de starttijd van de berekening. Dit zijn de 'beginvoorwaarden'. Bovendien moeten op de rand van het gebied randvoorwaarden van waterstand bekend zijn en moeten f (=de Coriolis-parameter), g (=de zwaartekrachtsversnelling), h (=waterdiepte), C (=de Chézy-coëfficiënt), ρ (=dichtheid van het water), $\tau_{x,wind}$ en $\tau_{y,wind}$ (= windschuifspanning in x- en y-richting) en ν (=viscositeitscoëfficiënt) bekend zijn. Voor eenheden: zie bijlage 1.

Er zijn 2 soorten **randen** in het model: open randen en dichte randen. Een open rand is een grens van het gebied waar wel water doorheen kan stromen en is dus eigenlijk een denkbeeldige rand. De randvoorwaarden voor open randen volgen uit metingen of uit het astronomische getij. Een dichte rand is een rand waar geen water doorheen kan stromen, het gebied van interesse grenst hier aan het land. Een snelheidscomponent van nul loodrecht op de dichte rand wordt aangenomen.

Om U , V en ζ te kunnen berekenen, moeten de ondiep-water-vergelijkingen worden beschreven door een stelsel numerieke vergelijkingen. Dit heet **discretisatie** en bestaat uit 2 delen: ruimtelijke en mathematische discretisatie (Schaap, 1997). WAQUA geeft een benadering van de ondiep-water-vergelijkingen in het gebied van interesse op een aantal discrete tijdstippen. Om tot deze benadering te komen, is het gebied weergegeven door een rooster (ruimtelijke discretisatie).

De ruimtelijke discretisatie in WAQUA zit als volgt in elkaar. Het rekengebied wordt beschouwd als een groot aantal, met elkaar verbonden, kolomvormige watervolumes. De hoeken van deze volumes zijn de waterdieptepunten van het grid, d.w.z. de punten waarop de **waterdiepte** gedefinieerd is. De waterdieptepunten zijn namelijk de punten waar de bodemligging is gedefinieerd. Elke kolom water heeft 4 zijden waardoor water in en uit het volume kan stromen. Het netto effect van de stroming door de 4 zijden gedurende een tijdstap is een stijging of daling van de **waterstand** in het volume, die is gedefinieerd in het **middelpunt** van het volume. Er zijn ook nog aparte punten waar de snelheid U is gedefinieerd en aparte punten waar de snelheid V is gedefinieerd. Het rooster dat aldus ontstaat heet een 'staggered grid', d.w.z. een verspringend rooster, omdat de waterstand en de waterdiepte in verschillende punten bekend zijn. Dit wordt geïllustreerd in figuur 1.



figuur 1: Verspringend rooster van WAQUA (Bron: User's Guide WAQUA , 1992).

Het omschrijven van de ondiep-water-vergelijkingen tot vergelijkingen die de relatie beschrijven tussen waterstanden en snelheden in *roosterpunten* wordt de 'mathematische discretisatie' genoemd. De numerieke oplossing van de partiële differentiaalvergelijkingen vindt plaats met behulp van de ADI-methode (ADI='Alternating Direction Implicit'), waarbij een tijdstap in 2 halve tijdstappen wordt onderverdeeld. Per halve tijdstap wordt de

berekening in één richting (eerst in de richting van U, daarna in de richting van V) uitgevoerd.

2.1.2. Reden van gebruik van WAQUA:

WAQUA is gekozen omdat er binnen het RIKZ veel ervaring mee is opgedaan. Er was al een afgeregelde toepassing van WAQUA voor de Westerschelde voorhanden, namelijk 'SCALDIS100'. De met behulp van SCALDIS100 berekende waarden van HW- en LW-standen wijken maximaal 10 cm af van de werkelijke waarden in de geulen van de Westerschelde (Dekker et al., 1994).

2.1.3. Werking van WAQUA:

WAQUA-in-SIMONA bestaat in grote lijnen uit 3 delen: WAQPRE, WAQPRO en SIMVIEW. WAQPRE is bedoeld voor het inlezen en controleren van de invoergegevens: randvoorwaarden, beginvoorwaarden, geometrie. WAQPRO is het rekengedeelte, dat waterstanden, snelheden en zoutconcentraties berekent en de resultaten naar de SDS-file (= SIMONA DATA STORAGE-file) schrijft. Met SIMVIEW kunnen de resultaten uit de SDS-file worden gevisualiseerd.

- In praktijk werkt WAQUA als volgt. Allereerst wordt een invoerfile geschreven, waarin:
- (1) het gebied van interesse wordt gekarakteriseerd door: oriëntatie van het rooster t.o.v. het noorden, afmetingen van het rooster, gridcelgrootte e.d.;
 - (2) de randen worden gedefinieerd van het rekengebied, d.w.z. het gebied waarover de berekening wordt uitgevoerd;
 - (3) de randvoorwaarden worden gedefinieerd voor de open randen;
 - (4) de beginvoorwaarden worden gedefinieerd;
 - (5) de uitvoer wordt gedefinieerd;
 - (6) de tijdstap van de berekening wordt gedefinieerd.

Dit gebeurt door middel van 'keywords'. Een keyword wordt gevolgd door informatie over het item waar het keyword voor staat, b.v. de waarde van een coëfficiënt.

Vervolgens wordt WAQPRE gerund op de invoerfile. Als er onjuistheden in de invoerfile staan, geeft WAQPRE een foutmelding met een toelichting. De invoerfile moet dan worden verbeterd en WAQPRE moet opnieuw worden gedraaid. Als WAQPRE met succes heeft gedraaid, kan de eigenlijke berekening plaatsvinden m.b.v. WAQPRO. De resultaten van de berekening zijn te vinden in de SDS-file. Met SIMVIEW zijn deze resultaten rechtstreeks toonbaar. SIMVIEW is bij deze opdracht overigens slechts gebruikt voor een eerste inventarisatie van de resultaten. Voor de daadwerkelijke presentatie is gebruik gemaakt van het programma ANIMATE voor kaartjes en van de spreadsheet LOTUS1-2-3 voor het verloop van parameters in de tijd.

2.2: Het golfmodel SWAN.

2.2.1. Kenmerken:

SWAN (= 'Simulation WAVes Nearshore') is een numeriek golfmodel dat bedoeld is om golfparameters te schatten in kustgebieden, meren en estuaria uit gegeven wind-, bodem- en stromingscondities. SWAN is gebaseerd op de 'actie-balans-vergelijking', waarin de verandering van *actiedichtheid* (*actiedichtheid* = energiedichtheid gedeeld door de relatieve frequentie) gelijk is aan het netto effect per tijdseenheid van golfgroei door wind, dissipatie door bodemwrijving en dissipatie door het breken van golven, refractie, energieverlies door 'white-capping' en golf-golf-interacties. Relatieve frequentie is de frequentie van golven, gemeten in een coördinatensysteem dat meebeweegt met de aanwezige stroming (b.v. stroming als gevolg van getij) (van Rijn, 1990). Als er geen stroming is, is de actie-balans gelijk aan de energie-balans (Ris et al., 1997). Golven worden in SWAN beschreven door het twee-dimensionaal energie- of actie-spectrum, dat de verdeling van energie/actie over de verschillende frequenties en golfvoortplantingsrichtingen weergeeft. SWAN berekent eigenlijk de *ontwikkeling van het golfspectrum in ruimte en tijd*.

De ontwikkeling van een golfspectrum wordt beschreven door de actie-balans-vergelijking, die in een cartesisch coördinatenstelsel als volgt luidt:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)N + \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)(c_x * N) + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)(c_y * N) + \left(\frac{\partial}{\partial \sigma}\right)(c_\sigma * N) + \left(\frac{\partial}{\partial \theta}\right)(c_\theta * N) = \frac{S}{\sigma}$$

waarin:

t =	tijd (s)
N =	actiedichtheid (Joule/m ² /Hz)
c _{x/y} =	voortplantingssnelheid van 'actie' in de x- of y-richting (m/s)
σ =	relatieve frequentie (Hz)
c _σ =	snelheid van verandering van de relatieve frequentie σ (Hz/s)
c _θ =	snelheid van verandering van de golfvoortplantingsrichting θ (°/s)
S =	een bronterm die het netto effect (in energiedichtheid uitgedrukt) voorstelt van de effecten van golfgroei, dissipatie en niet-lineaire interacties tussen golven (Joule/m ²)

De eerste term aan de linkerkant stelt de mate van verandering van actiedichtheid in de tijd voor, de tweede en derde term staan voor de voortplanting van de actie in de geografische ruimte. De vierde term staat voor het veranderen van de relatieve frequentie door variaties in diepte en stroming. De vijfde term staat voor de refractie van golven door variaties in diepte en stroming (Ris et al., 1997).

SWAN rekent met *discrete* spectrale en directionele stappen, d.w.z. discrete stappen van frequentie en richting. De berekeningen worden uitgevoerd op een grid van afzonderlijke punten. Er is geen sprake van een verspringend rooster zoals bij WAQUA. In deze stageperiode was SWAN alleen nog te gebruiken als een *stationair* model, dus een berekening wordt gedaan voor één bepaald tijdstip. In principe mag het model alleen stationair draaien bij golven met een relatief korte verblijftijd in het gebied vergeleken met de tijdschaal van golfrandvoorwaarden, wind, getij en verhoging door storm.

De processen die door SWAN worden meegenomen in de berekeningen zijn:

- voortplanting van golven in de ruimte
- refractie door variatie in bodemdiepte en stroming
- 'shoaling' door variatie in bodemdiepte en stroming
- blokkeren en reflectie van golven door stroming in een richting, tegengesteld aan die van de golven
- golfgroei door wind
- dissipatie van golfenergie door 'whitecapping' op diep water
- dissipatie van golfenergie door het breken van golven als gevolg van een te gering wordende waterdiepte (d.w.z. een te grote waarde van de verhouding H/h , golfhoogte gedeeld door waterdiepte)
- dissipatie van golfenergie door bodemwrijving
- herverdeling van golfenergie over het spectrum door niet-lineaire interacties tussen golven.

Het model heeft een aantal beperkingen: *diffRACTIE* wordt niet door het model meegenomen en dus zal het model direct achter obstakels onbetrouwbare resultaten geven. *Set-up of stroming als gevolg van golven* wordt niet door het model berekend.

2.2.2. Reden van gebruik van SWAN:

SWAN is de opvolger van het golfmodel HISWA, dat in de tachtiger jaren op de TU Delft werd ontwikkeld. Toentertijd werd HISWA met succes toegepast, maar de opvolger SWAN is numeriek geavanceerder en nauwkeuriger (Van Endt & Gautier, 1997). HISWA rekent bijvoorbeeld met een *geparametriseerd spectrum*, d.w.z. het spectrum is gekarakteriseerd door de totale energiedichtheid van het spectrum en een gemiddelde frequentie, terwijl SWAN met een spectrum rekent waarin de verdeling van de energie over de verschillende frequentiebanden wordt beschouwd. Verder kunnen in HISWA alleen golven worden meegenomen, die een hoek van minder dan 90° maken met de rekenrichting. Deze rekenrichting wordt bepaald door de hoofd-golfvoortplantingsrichting (bijvoorbeeld richting noorden, wanneer de wind uit het zuiden komt). Als gevolg van enkele stabiliteitscondities in HISWA is de totale range van golfvoortplantingsrichtingen uiteindelijk minder dan 120° (Van Endt & Gautier, 1997). SWAN heeft deze beperking niet en kan in alle richtingen rekenen, waardoor alle voorkomende golfvoortplantingsrichtingen worden meegenomen in de berekening.

Op grond van de bovengenoemde feiten is het gebruik van SWAN verkozen boven dat van HISWA.

2.2.3. Werking van SWAN:

Uitgangspunt is een invoerfile die de informatie bevat over wind, bodem, waterstanden, eventueel aanwezige stroming, rekengrid, wrijving, processen die meespelen, randvoorwaarden, eigenschappen van de berekening en uitvoer. Net als bij WAQUA is de invoerfile opgebouwd uit keywords, in SWAN commando's genaamd. Bij elk commando wordt informatie gegeven, die van belang is voor de uit te voeren berekening.

Fouten in de formulering van de invoerfile kunnen worden gedetecteerd door SWANCHECK te draaien, wat weinig tijd in beslag neemt. Als de fouten in de formulering zijn verwijderd, wordt de echte berekening uitgevoerd.

Belangrijk om te weten is dat SWAN **richtingen** volgens de **cartesische** conventie definieert, d.w.z.:

- (1) de hoek geeft de richting aan **waarheen** de wind beweegt of de golven bewegen;
- (2) hoeken worden gemeten ten opzichte van de positieve x-as van het 'problem coordinatesystem' (=stelsel dat de gebruiker heeft gedefinieerd, bijvoorbeeld het Rijksdriehoeksstelsel), *tegen* de klok in.

De resultaten van SWAN zijn ASCII-data.

3. WERKWIJZE:

3.1: Onderzoeksgebied.

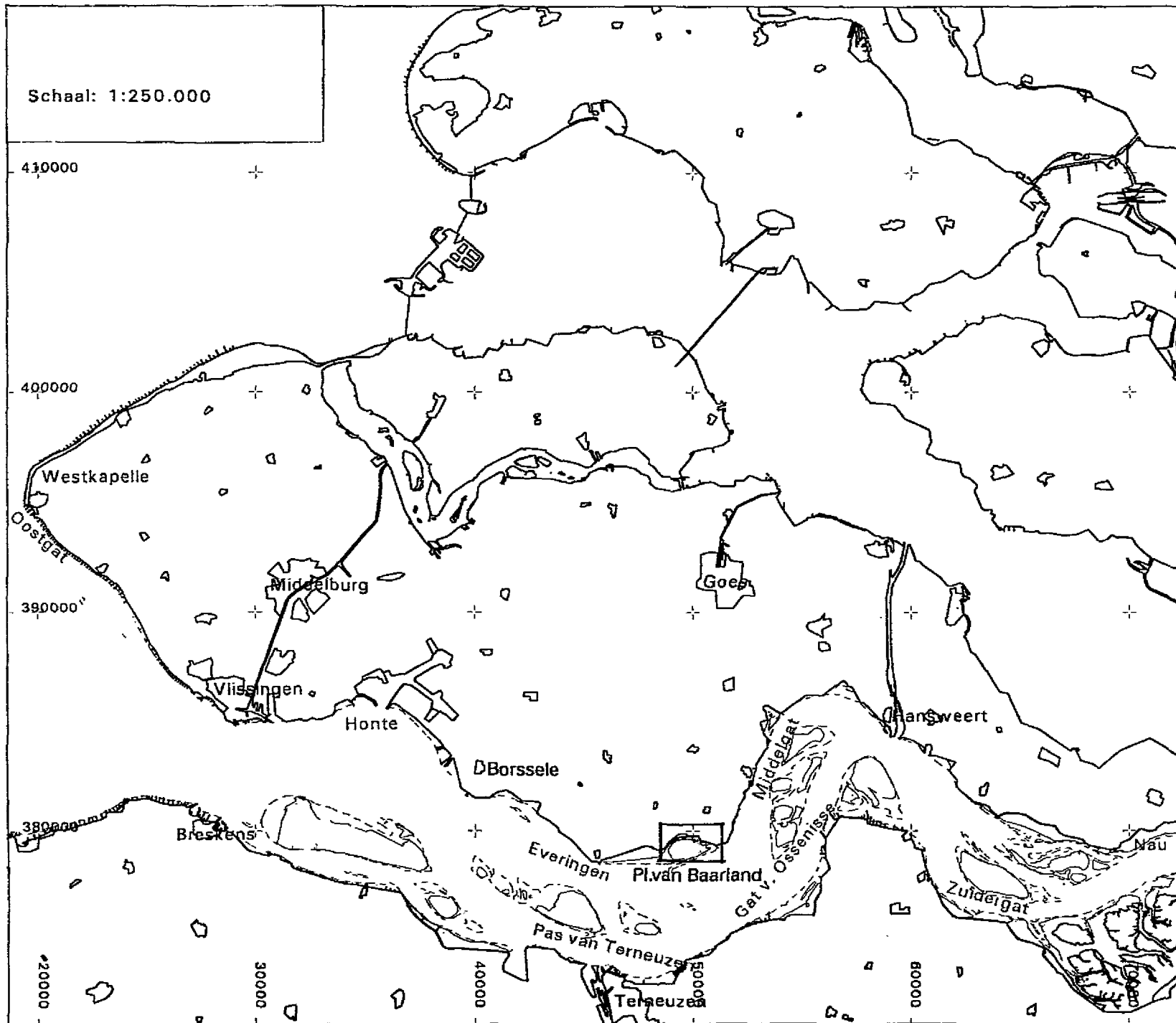
Het onderzoeksgebied is de Plaat van Baarland, een inter-getijden-gebied in de Westerschelde in het zuidwesten van Nederland (zie figuur 2). De Plaat ligt ten noorden van de vaargeul op 51 graden Noorderbreedte en 23 graden Oosterlengte (Duiker & Bos, 1996). De afmetingen van het gedeelte van de plaat, dat boven NAP ligt, zijn ± 1800 m in Oost-West-richting en ± 900 m in Noord-Zuid-richting (zie figuur 3). Op de plaat bevinden zich 3 meetpunten, waar golf- en stromingsmetingen plaatsvinden: punten P, Q en R. Daarnaast zijn er metingen gedaan door een 'wave rider' (=golfboei) ten zuiden van de plaat, op punt S. De coördinaten van de punten P, Q, R en S zijn te zien in tabel 1.

Tabel 1: Rijksdriehoekskoördinaten van meetpunten P t/m S.

Meetpunt	X-coördinaat (in meters)	Y-coördinaat (in meters)
P	48979.202	379102.558
Q	49397.951	379353.335
R	49145.386	378878.179
S	49290	377680

De hoogteligging van de plaat en de ligging van de meetpunten zijn afgebeeld in figuur 3. Bij Gemiddeld Hoog Water ligt de gehele plaat onder water. De geul ten noorden van de Plaat is het **Boerengat**, dat sinds tientallen jaren aan het verzanden is (Duiker & Bos, 1996).

De Westerschelde is een estuarium, dat het zeewaartse uiteinde vormt van de rivier de Schelde. Ruwweg strekt de Westerschelde zich uit tussen Westkapelle en Bath. Bij Vlissingen is het verschil tussen Gemiddeld Laag Water en Gemiddeld Hoog Water 3.85 m. Bij Bath is het verschil tussen Gemiddeld Laag Water en Gemiddeld Hoog Water ± 4.9 m. Het getij is de belangrijkste factor voor de estuariene processen in de Westerschelde. Het getij zorgt ervoor dat het in het estuarium twee maal per dag hoog water is en twee maal per dag laag water. Bij het vullen en legen van het estuarium stroomt per keer ter hoogte van Vlissingen circa 1 miljard m³ water de Westerschelde in en weer uit (Vroon et al., 1997). De gemiddelde rivierafvoer is circa 5 miljoen m³ per getijcyclus van $\pm 12,5$ uur (Pieters, 1993). De invloed van de rivier de Schelde op processen in het estuarium is dus relatief gering, het estuarium wordt gedomineerd door het getij.

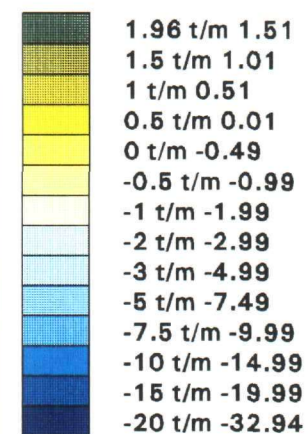


Figuur 2: Locatie van de Plaat van Baarland in de Westerschelde, Zuidwest-Nederland.

Plaat van Baarland

Bodem 1996 en meetpunten

Legenda meters

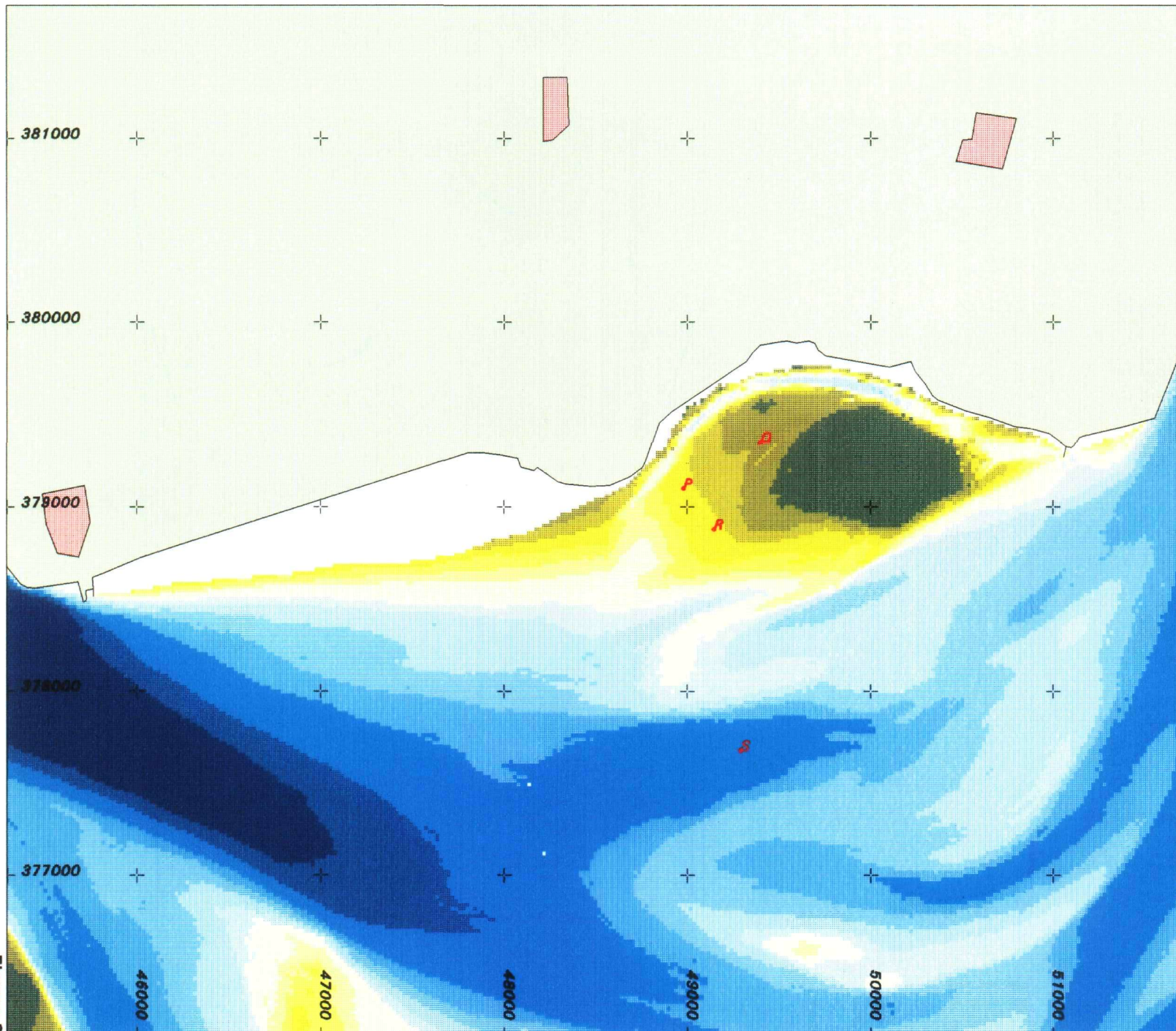


Schaal: 1:30.000

DYNASTAR*ECOMOR



Rijksinstituut voor Kust en Zee
Rijkswaterstaat



Figuur 3: Hoogteligging Plaat van Baarland en ligging van meetpunten (Bron: bodemligging van de Westerschelde op een grid van 20*20 m, gemeten in 1996).

3.2: Metingen in het veld.

Van eind juni 1996 t/m begin januari 1997 zijn metingen in het veld gedaan. Op de plaat zijn metingen gedaan van:

1. waterdruk (met behulp van drukdozen)
2. stroomsnelheid in de X- en Y-richting (met behulp van een 'ElectroMagnetic Flowmeter'= EMF)
3. windsnelheid en windrichting
4. troebelheid van het water
5. watertemperatuur
6. saliniteit

Deze metingen zijn steeds op 1 meetpunt gedaan door de Meetdienst Zeeland. Om de 1 à 2 maanden is de hele set meetinstrumenten naar een ander meetpunt (1 van de overige 2 op de Plaat) verplaatst. Zo heeft de set meetinstrumenten over de punten P, Q en R gerouleerd. Er zijn alleen metingen gedaan wanneer een meetpunt onder water stond, dit geldt ook voor windsnelheid en -richting. Van windsnelheid, windrichting, waterdruk, stroomsnelheid en troebelheid zijn om de 5 minuten **gemiddelden** geregistreerd (parameter gemiddeld over 4 minuten). Bovendien zijn elk kwartier gedurende 5 minuten metingen gedaan van waterdruk en stroomsnelheid, met een frequentie van 4 Hz. Zo'n periode van 5 minuten, waarin 4 maal per seconde is gemeten, heet een **'burst'**.

Eens per maand is er een **aanvullende** meting gedaan, waarbij (gelijktijdig met de bovenstaande metingen) de snelheid op verschillende hoogtes in de waterkolom is gemeten en op diezelfde hoogtes watermonsters (water+gesuspendeerd materiaal) zijn genomen.

Van half november t/m half december 1996 zijn op de 2 punten, waar op dat moment geen set met meetinstrumenten stond, tegelijkertijd **drukdoosmetingen** gedaan; om het kwartier een burst van 5 minuten met 4 Hz en om de 5 minuten een gemiddelde over 1 minuut (van de waterdruk). Zodoende is in die periode steeds op 3 punten informatie over de waterstand (en zodoende ook over golven), die berekend kan worden aan de hand van de drukdoosmetingen.

Op punt S zijn van half oktober 1996 t/m half januari 1997 metingen gedaan door een 'wave rider'. Parameters als golfhoogte en golfperiode en ook de energieverdeling over de verschillende frequentiebanden zijn gemeten.

3.3: Selectie van te modelleren dagen.

Op grond van een eerste verkenning van de dataset, wordt een selectie gemaakt van dagen die interessant zijn om te modelleren. De criteria, die bij de keuze van deze dagen worden gehanteerd, zijn de volgende:

- (1) Er moet zoveel mogelijk vergelijkmateriaal voor de modeluitkomsten zijn.
- (2) Naast de getijstroming moeten er ook golven aanwezig zijn, die hoog genoeg zijn om invloed op de substraatdynamiek te hebben.

Op basis van deze criteria worden de dagen 25 en 26 november 1996 (dagnummers: 330 en 331) geselecteerd om te modelleren (zie § 4.1). De gegevens van de geselecteerde dagen worden vervolgens verder verwerkt.

3.4: Verwerking van drukdoosdata tot waterstanden, waterdieptes en golfparameters.

Door de drukdozen wordt een druksignaal gemeten. Dit is door de Meetdienst Zeeland omgezet naar *centimeters waterkolom boven de drukdoos* door de atmosferische druk van het druksignaal af te trekken en de overgebleven druk met een constante waarde te vermenigvuldigen; 1 bar waterdruk = 10 meter waterkolom.

De **waterstand ten opzichte van NAP** wordt berekend door de waterkolom boven de drukdoos (aantal centimeters) op te tellen bij de hoogte van de drukdoos t.o.v. NAP (die ook bekend is).

De **waterdiepte** wordt berekend door de waterkolom boven de drukdoos (aantal centimeters) op te tellen bij de hoogte van de drukdoos t.o.v. de bodem.

Om de resultaten van het model SWAN te kunnen vergelijken met de situatie in het veld, dienen **golfparameters** bekend te zijn van de werkelijk in het veld voorkomende golven. Om H_{m0} en T_{pick} te weten te komen, moeten golfspectra worden gemaakt. Uitgangspunt is een burst met drukdoosdata, die zijn omgerekend naar centimeters waterkolom. Als nu een spectrum wordt berekend uit een burst met cm's waterkolom, wordt de energiedichtheid in de hogere frequenties onderschat. Dit is een gevolg van het feit dat de druk onder een golf niet hydrostatisch is, maar dat er ook een *dynamische* drukcomponent is.

De druk van de waterkolom op de drukdoos bestaat uit 2 componenten: de hydrostatische druk (veroorzaakt door de waterdiepte van de sensor tot aan het wateroppervlak) en de dynamische druk (veroorzaakt door de beweging van golven). Deze 2 componenten leveren samen de volgende uitdrukking voor de gemeten druk op (van Rijn, 1990):

$$P = -\rho g(h-z) + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh(kz)}{\cosh(kh)} \cos(\omega t - kx)$$

waarin:

P = druk (N/m^2)

ρ = dichtheid van water (kg/m^3)

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)

h = totale waterdiepte tot aan bodem (m)

z = hoogte sensor boven bodem (m)

H = golfhoogte (m)

k = golfgetal ($2\pi/L$) (m^{-1})

ω = (hoek-)frequentie (rad/s)

De eerste term rechts is de hydrostatische druk, de tweede term de dynamische druk. De dynamische druk neemt af met toenemende waterdiepte, met een veel grotere mate van afname bij hoog-frequente golven (Kamsteeg, 1997). Als gevolg van de dynamische druk kan het vermenigvuldigde drukdoossignaal niet direct een golfspectrum van waterstand opleveren, daar het vermenigvuldigde signaal *niet* precies gelijk is aan de waterkolom boven de drukdoos. Eerst moet een **correctiefactor** worden toegepast op het spectrum van het vermenigvuldigde drukdoossignaal. Dit kan worden gedaan door de lineaire golftheorie toe te passen. Gezegd moet worden dat golven bij geringe waterdieptes niet-lineair zijn, dus dat de methode bij geringe waterdieptes niet 100% correct is. Op de plaat *is* sprake van geringe

waterdieptes. Er moet dus rekening gehouden worden met een foutenmarge in de correctiefactor op meetpunten op de Plaat van Baarland..

Het 'drukspectrum' (=spectrum van vermenigvuldigde drukdoossignaal) kan worden omgezet naar een 'wateroppervlakte-spectrum' (=spectrum van werkelijke waterstandsvariaties) door met een, frequentie-afhankelijke, correctiefactor te vermenigvuldigen (Ruessink, 1995):

$$S_{\eta\eta}(f) = \left[\frac{\cosh(kh)}{\cosh(kz)} \right]^2 * S_{pp}(f)$$

waarin:

$S_{\eta\eta}(f)$ = spectrale energiedichtheid van frequentie f van het wateroppervlaktespectrum ($m^2/Hz = m^2/s$)

$S_{pp}(f)$ = spectrale energiedichtheid van frequentie f van het drukspectrum ($m^2/Hz = m^2/s$)

De moeilijkheid bij deze correctie is het *hoog-frequente* deel van het spectrum. De correctiefactor neemt toe met toenemende frequentie. Boven een bepaalde frequentie wordt de correctiefactor zo groot dat de *energie* snel toeneemt met de frequentie. Vergelijking met metingen door een ander soort meetinstrument hebben aangetoond dat deze toename niet realistisch is. Daarom wordt bij een bepaalde frequentie de functie van de correctiefactor **afgekapt**, d.w.z. boven die frequentie wordt geen correctie meer toegepast en wordt de oorspronkelijke waarde van het spectrum gehandhaafd. Meestal ligt de afkapfrequentie (Engels: cut-off-frequency) tussen 0.3 en 0.5 Hz (Kamsteeg, 1997). De functie van de correctiefactor moet worden afgekapt bij een frequentie, waarbij de correctiefactor tussen 3 en 10 ligt (Bram Roskam, pers.comm.). Voor deze dataset is een **afkapfrequentie van 0.5 Hz** gehanteerd, daar veel energie zich bevindt tussen 0.3 en 0.5 Hz. Er is daarbij wel gekeken of de correctiefactor bij $f=0.5$ Hz kleiner dan 10 is. In bijlagen 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37 en 39 zijn voorbeelden van gecorrigeerde spectra te zien. De dikke lijn is het gecorrigeerde spectrum bij het hanteren van een afkapfrequentie van 0.4 Hz. Bij het hanteren van een afkapfrequentie van 0.45 Hz, wordt het spectrum voorgesteld door de dikke lijn en de stippellijn. Deze laatste vervangt in die frequenties de dikke lijn. Bij het hanteren van een afkapfrequentie van 0.5 Hz, wordt het spectrum gevormd door de dikke lijn en de 2 stippellijnen, die in hun frequentiebanden de dikke lijn vervangen.

Op basis van het gecorrigeerde spectrum wordt H_{m0} ($=4\sqrt{m_0}$; m_0 = totale golfenergie = oppervlakte onder het spectrum) bepaald. Deze wordt vergeleken met de modelresultaten op de meetpunten. In bijlage 70 is een overzicht te zien van berekende golfhoogtes op basis van gecorrigeerde en ongecorrigeerde golfspectra.

Op punt S meet de meetboei de energieverdeling over de verschillende frequentiebanden en de totale energie, namelijk de oppervlakte onder het spectrum. H_{m0} wordt hieruit bepaald ($=4\sqrt{m_0}$).

3.5: Omrekening gemeten stroomsnelheden naar diepte-gemiddelde stroomsnelheden.

De snelheid die WAQUA als output geeft, is een diepte-gemiddelde stroomsnelheid. De meting van de snelheid gebeurt op één bepaalde hoogte boven de bodem. Om de

stroomsnelheden van model en metingen te kunnen vergelijken, worden de gemeten snelheden omgerekend naar diepte-gemiddelde snelheden. Dit gebeurt met behulp van de meetgegevens van een aanvullende meting (snelheden op een aantal verschillende hoogtes) die rond de dag valt waarvan de stroomsnelheden moeten worden omgerekend.

De gebruikte methode is als volgt:

1. Eerst wordt lineair geïnterpoleerd tussen de hoogtes waarop de stroomsnelheid is gemeten tijdens de aanvullende meting. Dit gebeurt apart voor alle tijdstippen waarop is gemeten.
2. De diepte-gemiddelde snelheid wordt bepaald en de snelheid op de hoogte van de EMF (boven de bodem) op de dag waarvoor de snelheden moeten worden omgezet.
3. Vervolgens wordt voor alle verschillende tijdstippen tijdens de aanvullende meting de verhouding tussen de diepte-gemiddelde snelheid en de snelheid op de hoogte van de EMF (boven de bodem) op de dag waarvoor de snelheden moeten worden omgezet, bepaald: $u_{\text{diepte-gemiddeld}}/u_{\text{hoogte EMF boven bodem}}$.
4. De stroomsnelheid op een zekere hoogte boven de bodem op de dag waarvoor de snelheden moeten worden omgezet, wordt vermenigvuldigd met de bij punt 3 berekende verhouding. Dit gebeurt apart voor verschillende tijdstippen. De gebruikte verhoudingen passen zo veel mogelijk bij het tijdstip waarop de correctie wordt toegepast. Dit is bewerkstelligd door voor de omrekening op een tijdstip, dat een bepaalde tijd voor of na Hoog water valt, telkens een waarde van de verhouding te nemen die even ver voor of na het tijdstip van Hoog Water ligt op de dag van de aanvullende meting.

In werkelijkheid is het verloop van de stroomsnelheid tussen de hoogtes, waarop gemeten is, niet lineair. De fout die gemaakt wordt door zo'n lineair verloop aan te nemen, is echter betrekkelijk gering en het voordeel van de bovenstaande methode is dat deze betrekkelijk snel uit te voeren is.

3.6: Toepassing van de modellen.

3.6.1: WAQUA.

De toepassing van WAQUA voor de Westerschelde die tijdens deze stage is gebruikt, heet 'SCALDIS100'. Voor meer informatie over SCALDIS100, zie Dekker et al., 1994. Het gebruikte rechthoekige grid heeft vierkante cellen van 100*100 meter. SCALDIS100 is afgeregeld op de geulen met gebruikmaking van de bodemligging van 1988, voor platen wordt dus met minder goede resultaten rekening gehouden. Het bodemgrid is ook 100*100m.

De bodemligging van 1988 is gebruikt voor de Westerschelde met uitzondering van de Plaat van Baarland en omgeving, waarvoor de bodem van 1996 is gebruikt. In het gebied, begrensd door de lijnen $X=48050$ m, $X=51750$ m, $Y=378150$ m en $Y=379850$ m (zie bijlage 71), is de bodem van 1996 gedefinieerd. De overgang tussen de 2 bodemliggingen is vloeiend, op de overgang tussen de 2 bodemliggingen is daarom geen correctie of interpolatie toegepast.

De sommen die gemaakt zijn, zijn gemaakt voor de gehele Westerschelde. Er is gekeken naar de het beeld van stroming en waterstand over de gehele Westerschelde om een idee te krijgen van de juistheid van de modellering. Vervolgens zijn de resultaten van de Plaat van Baarland en omgeving nader bekeken.

Van 2 WAQUA-runs worden de resultaten in hoofdstuk 4 besproken: run 330-3 en run 330-4, beide gericht op modellering van dag 330.

WAQUA-runs 330-3 en 330-4 starten met rekenen op 24 november 1996, om 0:00 uur. 24 november 1996 is, in dagnummers uitgedrukt, dag 329 van het jaar 1996. De tijdstap van de berekening is 0.5 minuten. De berekening stopt aan het begin van dag 331, dus op 26 november 1996, 0:00 uur. De resultaten van dag 329 zijn niet van belang; de start op dag 329 is bedoeld om het model een etmaal te laten 'inspelen'.

Het enige verschil tussen de 2 runs is de waarde van de kritische waterdiepte (DEPCRT in invoerfile). De betekenis van de kritische waterdiepte is als volgt: we beschouwen een gridcel die droog staat. Na verloop van tijd heeft het water de gridcel bereikt. Nu moet het water stijgen tot boven de kritische waterdiepte alvorens WAQUA een stroomsnelheid aan de gridcel toekent. **De DEPCRT is voor run 330-3 op 0.10 m gezet en voor run 330-4 op 0.15 m.** De reden voor het toepassen van 2 verschillende waarden is dat zo kan worden uitgetoetst of het variëren van de kritische waterdiepte verschil maakt voor de modelresultaten.

Overigens leidt het verlagen van DEPCRT tot nauwkeuriger resultaten, maar het kan ook leiden tot instabiliteit van het model, als de verlaging te ver wordt doorgezet.

In bijlage 72 zijn de in de WAQUA-runs gebruikte parameters getoond.

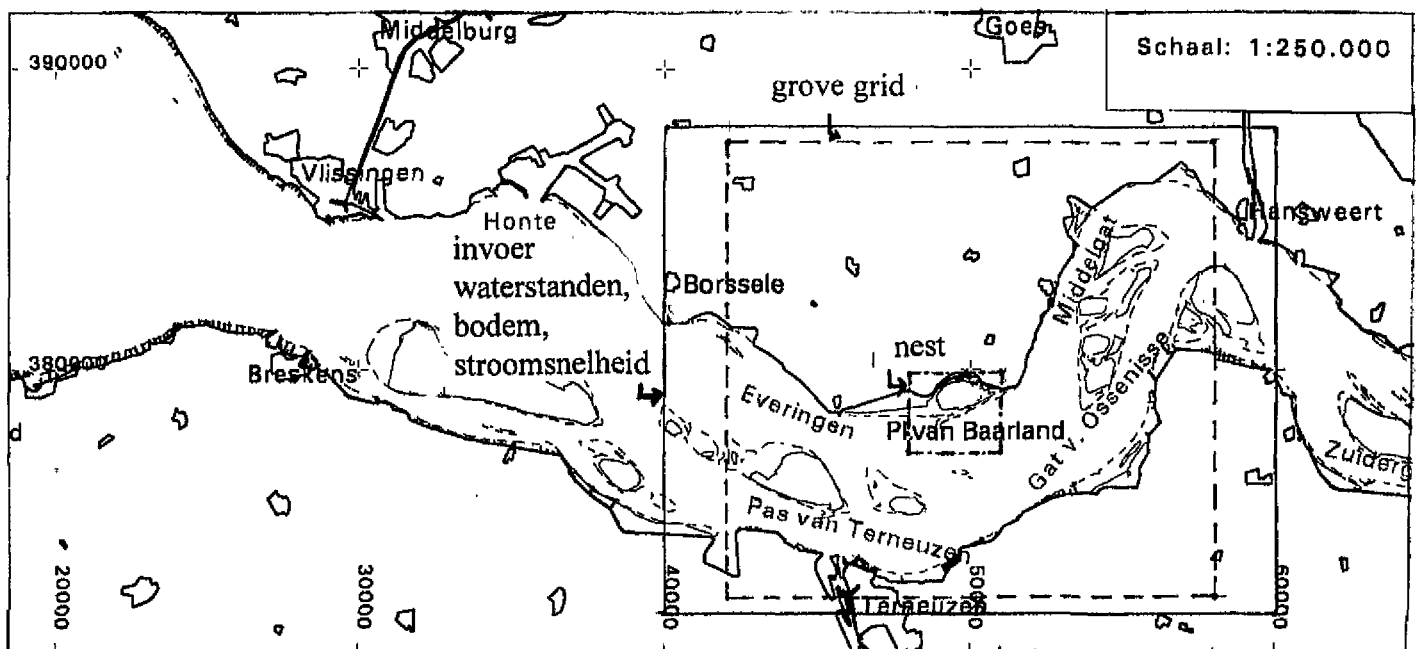
3.6.2: SWAN.

De SWAN-sommen zijn voor 3 verschillende tijdstippen op 25 november 1996 (=dag 330) gedaan. Voor elk tijdstip is eerst een run gedraaid met een grof rekengrid dat het deel van de Westerschelde tussen Borssele en Hansweert beslaat, waarbij de onderlinge afstand tussen gridpunten zowel in de X- als in de Y-richting **200 m** is. Het grove rekengrid heeft als grenzen de lijnen $X=42.000$, $X=58.000$, $Y=372.500$ en $Y=377.500$ (zie figuur 4).

In de run met het grove grid, die zal worden aangeduid als de '**grove**' run, worden randvoorwaarden berekend voor een tweede run, de '**nest**'-run. Deze tweede run beslaat een veel kleiner gebied, het zogenaamde '**nest**', waar ook de Plaat van Baarland deel van uitmaakt. De grenzen van het nest zijn de lijnen $X=48.000$, $X=51.000$, $Y=377.200$ en $Y=379.800$ (zie figuur 4). De afstand tussen de punten in dit rekengrid is **20 m** in X- én Y-richting.

Voor beide runs is het gebruikte bodemgrid 20×20 m. De bodemligging van 1996 is gebruikt. Het waterstandsgrid en het stroomsnelheidsgrid komen uit een WAQUA-run. In beide grids is de afstand tussen punten 100 meter. De wind is uniform genomen over het hele rekengebied. De gemeten windsnelheid en -richting op de Plaat van Baarland zijn gebruikt als invoer. De invoer van wind is uiteraard voor elk tijdstip anders.

Het Rijksdriehoeksstelsel is gebruikt als coördinatenstelsel om locaties in op te geven.



Figuur 4: Rekenroosters en invoerroosters in het model SWAN.

In hoofdstuk 4 worden 6 SWAN-runs besproken:

- run **t1c1**: run voor tijdstip 1:30 uur op dag 330, **grove grid**
- run **t1n1**: run voor tijdstip 1:30 uur op dag 330, **nest**
- run **KD22**: run voor tijdstip 2:00 uur op dag 330, **grove grid**
- run **n22**: run voor tijdstip 2:00 uur op dag 330, **nest**
- run **t3c1**: run voor tijdstip 3:30 uur op dag 330, **grove grid**
- run **t3n1**: run voor tijdstip 3:30 uur op dag 330, **nest**

Eén SWAN-run is een berekening voor 1 tijdstip. De runs zijn op dezelfde manier opgezet, d.w.z. de invoerfiles verschillen alleen op punten die specifiek voor een bepaald tijdstip gelden, nl.:

- 1) windsnelheid en -richting
- 2) waterstanden in het rekengebied
- 3) stroomsnelheden in het rekengebied.

Het opleggen van een randvoorwaarde aan de zuidkant van het rekengebied van de grove run, d.w.z. de zuidrand van de Westerschelde, blijkt essentieel voor het verkrijgen van realistische resultaten. De toegepaste randvoorwaarde is: $H_{m0,rand} = 0,10$ m en $f_{piek,rand} = 0,91$ Hz ($T_{piek,rand} = 1,1$ s).

In bijlage 72 zijn de in de SWAN-runs gebruikte parameters getoond.

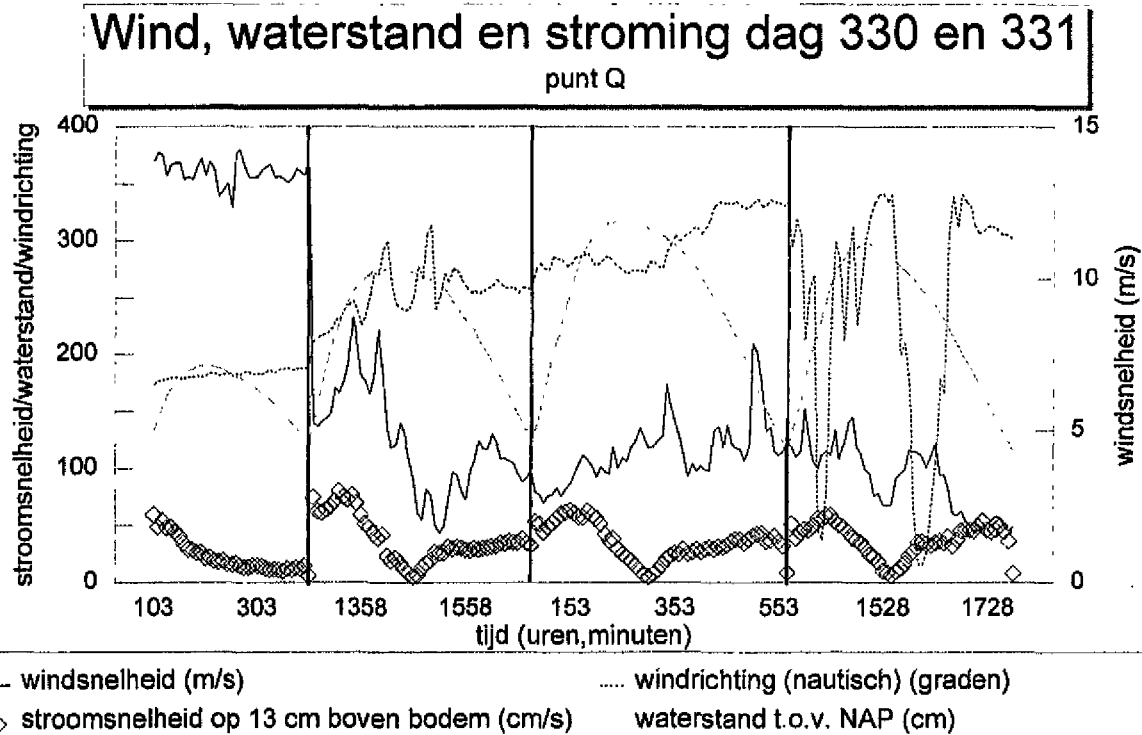
4. RESULTATEN: METINGEN EN MODELUITKOMSTEN:

4.1: Metingen dag 330 en 331.

In eerste instantie is de periode geselecteerd, waarin op de 3 punten op de plaat tegelijk drukdoosmetingen zijn gedaan, namelijk half november t/m half december 1996. Dit biedt de meeste mogelijkheden bij het controleren van de modelresultaten. Daarna is een keuze gemaakt voor de dagen 25 en 26 november 1996, in dagnummers uitgedrukt: dagen **330 en 331**. In de ochtend van dag 330 komt de wind uit het zuiden en bereikt de windsnelheid waarden van 14 m/s, dat staat gelijk aan windkracht 7 (zie figuur 5). In verband met de ligging van de Plaat van Baarland worden daar bij wind uit zuidelijke richtingen de hoogst mogelijke golven verwacht. Verder is het rond dag 330 en 331 springtij, zodoende zijn de stroomsnelheden maximaal. Bovendien zijn er op dag 331 data van bodemhoogteverandering en is er op diezelfde dag een 'aanvullende meting' (zie § 3.2) gedaan.

Dagen 330 en 331 zijn dus geselecteerd voor het modelleren van golven en stroming. Op deze dagen heeft op punt Q de hele set meetinstrumenten gemeten en op punten P en R zijn alleen drukdoosmetingen gedaan. In figuur 5 is een overzicht gegeven van verschillende gemeten parameters op dag 330 en 331 op punt Q. Vermeld dient te worden dat de gemeten windrichting is uitgedrukt in graden volgens de *nautische* conventie, d.w.z. 0 graden= wind uit het noorden, hoeken worden ten opzichte van het geografische noorden gedefinieerd; met de klok mee neemt de hoek toe van 0 tot 360 graden. Tevens moet vermeld worden dat de periodes, waarin geen metingen gedaan zijn, daar punt Q droog stond, niet zijn getoond. Zodoende worden er op de x-as sprongen in de tijd gemaakt.

De aandacht is in eerste instantie gevestigd op de ochtend van dag 330 vanwege de combinatie van stroming en harde wind. Deze ochtend wijkt overigens af van de andere dagdelen in figuur 5 door een lagere waterstand en door het feit dat de snelheid tijdens eb niet toeneemt, maar blijft dalen. Dit zou te maken kunnen hebben met de krachtige wind uit het zuiden.



Figuur 5: Wind, waterstand en stroomsnelheid dag 330 en 331 op punt Q.

4.2: Modeluitkomsten.

4.2.1. WAQUA-runs 330-3 en 330-4:

4.2.1.1: STROMINGSVELDEN.

Allereerst worden de **stromingsvelden** besproken, die WAQUA-run 330-3 (kritische waterdiepte= 0,10 m) als output geeft (zie bijlagen 2 t/m 14). Hiervoor is geen vergelijkmateriaal (in de vorm van metingen) beschikbaar, maar het is wel mogelijk om een inschatting te maken van de juistheid van de stromingsvelden. Bovendien geven de stromingsvelden enig inzicht in hoe het onder water komen en droogvallen van de Plaat van Baarland verloopt. Ter vergelijking is het handig figuur 5 te bekijken.

Om 0:00 uur (ca. 2 uur voor Hoog Water in de metingen) is de plaat nog niet ondergelopen en het water heeft ook het Boerengat nog niet gevuld. Enkele depressies staan nog onder water en de waterbeweging hierin (met geringe snelheden) wordt veroorzaakt door de wind. Het is vloed.

Om 0:30 uur zijn de snelheden overal toegenomen t.o.v. 0:00 uur. Het Boerengat is nog niet in zijn geheel onder water. De Plaat staat nog droog, op één depressie na. Overigens

is het de vraag of deze 'depressie' in werkelijkheid aanwezig is. Waarschijnlijk is op deze plaats de bodemschematisatie niet overeenkomstig de werkelijke situatie.

Om 1:00 uur is het Boerengat geheel gevuld en begint de Plaat onder te lopen. Het Boerengat loopt zowel vanaf de westkant als vanaf de oostkant vol.

Om 1:30 uur is bijna de gehele plaat onder water. De snelheden in het Boerengat zijn al weer afgenomen; in het gehele Boerengat is de stroming nu van west naar oost. Aan de westkant van de plaat stroomt het water richting noordoosten, aan de oostkant is de richting variabel.

Om 2:00 uur (rond HW) is de gehele plaat onder water; de stroomsnelheden in het Boerengat en aan de zuidwestkant van de plaat zijn afgenomen. Aan de westkant van de plaat is de stroming nog steeds richting noordoosten. Aan de oostkant meer richting noorden. De stroomsnelheden zijn vrij gering en zijn ook in de diepere gedeelten ten zuiden van de plaat over hun hoogtepunt heen.

Om 2:30 uur is de stroomrichting op de plaat meer richting westen gedraaid. Aan de westkant van het Boerengat is de stroming omgekeerd; deze is nu van oost naar west. De plaat watert af op het Boerengat.

Om 3:00 uur is de stroomsnelheid in het Boerengat en ten zuiden van de plaat toegenomen. Op de plaat zelf is een stukje drooggevallen en daaromheen zijn de snelheden afgenomen. Aan de westkant van de plaat is de stroming nu duidelijk naar het westen gericht.

Om 3:30 uur is weer een deel van de plaat drooggevallen.

Om 4:00 uur zijn de stroomrichtingen en -snelheden vrijwel hetzelfde als om 3:30 uur, een groter gedeelte van de Plaat is drooggevallen.

Om 4:30 uur zijn aan de oostzijde van het Boerengat de stroomsnelheden toegenomen vergeleken met het vorige tijdstip.

Vanaf 5:30 uur staat het Boerengat niet meer in verbinding met de diepere gedeeltes van de Westerschelde aan de zuidkant van de Plaat van Baarland.

Om 6:00 uur staat een bijna even groot gedeelte van de Plaat droog als om 0:00 uur.

4.2.1.2: WATERSTANDEN, STROOMSNELHEID EN STROOMRICHTING.

Het gemodelleerde verloop in de tijd van de waterstanden op punten P, Q en R en van de stroomsnelheid en stroomrichting op punt Q kan wel worden vergeleken met metingen. In bijlagen 15 t/m 20 zijn voor de punten P, Q en R de gemeten waterstanden t.o.v. NAP en gemodelleerde waterstanden t.o.v. NAP uit runs 330-3 (kritische waterdiepte= 0.10 m) en 330-4 (kritische waterdiepte= 0.15 m) getoond. In tabel 2 is de gemiddelde en maximale afwijking van de waterstanden uit WAQUA van de gemeten waterstanden bij meetpunten P, Q en R getoond.

Tabel 2: De gemiddelde en maximale absolute afwijking van de waterstanden t.o.v. NAP uit WAQUA van de gemeten waterstanden bij meetpunten P, Q en R.

punt	kritische waterdiepte= 0.10 m		kritische waterdiepte= 0.15 m	
	gemiddelde afwijking, model min meting (m)	maximale afwijking, model min meting (m)	gemiddelde afwijking, model min meting (m)	maximale afwijking, model min meting (m)
P	-0.108	-0.194	-0.110	-0.246
Q	-0.063	-0.163	-0.058	-0.145
R	-0.111	-0.212	-0.108	-0.213

Twee zaken vallen op bij het bekijken van bijlagen en tabel:

- (1) de overeenstemming tussen metingen en modeluitkomsten is goed;
- (2) het verschil tussen de modelruns 330-3 en 330-4 is zeer gering.

De waterstanden uit de modelruns zijn bijna altijd lager dan de gemeten waterstanden. Een verklaring hiervoor kan wellicht in de stroomsnelheid en -richting gevonden worden. In de vergelijkingen op punt Q en punt R valt tevens op dat in het model de plaat *net iets te vroeg droog lijkt te vallen*. Dit is ook terug te zien in figuur 6A en 6B, waar de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheden en stroomrichtingen op punt Q zijn getoond voor de ochtend van dag 330. Wanneer de kritische waterdiepte 0.10 m (run 330-3) is, is dit iets minder sterk het geval, hoewel het verschil gering is: een iets later tijdstip (3:50 tegenover 3:45 bij $h_{\text{kritisch}}=0.15$ m) van het bereiken van snelheid 0.

In bijlagen 21 (waterstand) en 22 (snelheid) zijn de verschillen tussen runs 330-3 en 330-4 afgebeeld. Bij de stroomsnelheden is te zien dat bij het onderlopen en afstromen het grootste verschil tussen de 2 runs optreedt.

Het schijnbaar te vroeg droogvallen van de plaat kan voor een deel verklaard worden door het gebruik van een **kritische waterdiepte** in WAQUA. Wanneer een roosterpunt droogvalt (d.w.z. wanneer de waterdiepte kleiner wordt dan de kritische waarde), wordt de stroomsnelheid in dat punt 0. Hoe hoger de kritische waterdiepte, des te eerder valt het punt droog (en des te later loopt het onder). In figuur 6 is te zien dat op punt Q in werkelijkheid de plaat eerder onderloopt en later droogvalt dan in het model. Stel nu dat de kritische waterdiepte in het model 0 zou zijn, dan zou het laatste tijdstip, waarop het model nog een snelheid groter dan 0 zou geven, iets *later* vallen dan nu in figuur 6 het geval is. Dan nog is in het model de plaat te vroeg droog, daar in de metingen de waterdiepte ook eerst een bepaalde grens moet overschrijden voordat de eerste meting van drukdoos en EMF wordt gedaan.

De verklaring voor het te vroeg droogvallen van de plaat in het model is wellicht te vinden in de te hoge snelheid van afstromen tussen 3:00 en 3:40 uur (zie figuur 6). Hierop wordt in het vervolg verder ingegaan.

In figuur 6 valt op dat bij het onderlopen van punt Q (tot ca. 1:30 uur) de gemodelleerde stroomsnelheden *lager* zijn dan de gemeten snelheden en bij het afstromen (vanaf ca. 3:00 uur) juist *hoger*. Dit is niet te verklaren door het gebruik van een kritische waterdiepte, maar door een verschil in *stroomrichting* tussen model en meting. Tussen de gemeten en gemodelleerde stroomrichting zijn flinke verschillen. Als voorbeeld voor de

bespreking van de verschillen is de modelrun met een kritische waterdiepte van 0.10 m genomen, maar bij de run met een kritische waterdiepte van 0.15 m is de stroomrichting vrijwel hetzelfde. In figuur 6 is overigens de hoek getoond van de richting waar het water naar toe stroomt.

In grote lijnen is de stroming *in het model* tijdens vloed richting noorden/noordoosten en tijdens eb (vanaf ca. 2:15 uur) richting noordwesten/westen; de *gemeten* stroming is tijdens vloed richting zuiden en tijdens eb eerst richting zuidwesten, daarna geleidelijk draaiend naar richting noordwesten. Afgaand op de metingen, is **in werkelijkheid** het volgende gebeurd:

- (1) Om ca. 1:00 uur is punt Q onder water gekomen, het water stroomt richting het zuidzuidoosten en komt dus *uit* het noordnoordwesten (hoek $\approx 150^\circ$), dus uit de richting van het Boerengat.
- (2) In de loop van de vloed (tot ca. 2:15 uur) draait de stroming geleidelijk bij tot richting het zuidzuidwesten, het water komt dus nog steeds *uit* de richting van het Boerengat.
- (3) Tussen 2:15 uur en 3:30 uur (het is eb!) draait de stroomrichting geleidelijk van 200 tot 270 graden, punt Q watert dus af richting zuidwesten tot westen, op de lager gelegen delen van de plaat dus (zie figuur 3).
- (4) Na 3:30 uur draait de richting geleidelijk naar het noordwesten, punt Q watert dus af op het Boerengat.

Volgens het **model** gebeurt er het volgende:

- (1) Om ca. 1:00 uur komt Q onder water ($h > 0.10$ m), tot ca. 2:15 uur stroomt het water richting noordnoordoosten, het water komt dus *uit* het zuidzuidwesten, dus *van* de lagere delen van de Plaat.
- (2) Van ca. 2:15 uur tot 3:00 uur (eb!) draait de richting van noordnoordwest naar west, punt Q watert dus eerst af op het Boerengat en rond 3:00 uur op de lagere delen van de Plaat aan de westkant van punt Q.
- (3) Van 3:00 uur tot 3:36 uur is de richting ongeveer westnoordwest (hoek $\approx 300^\circ$), dus punt Q watert meer richting Boerengat af.
- (4) Na 3:36 uur geeft het model nog slechts 2 maal (=10 minuten) een stroomrichting, deze is richting westen, dus richting lagere delen van de plaat.

De 2 grote verschillen tussen model en werkelijkheid zijn:

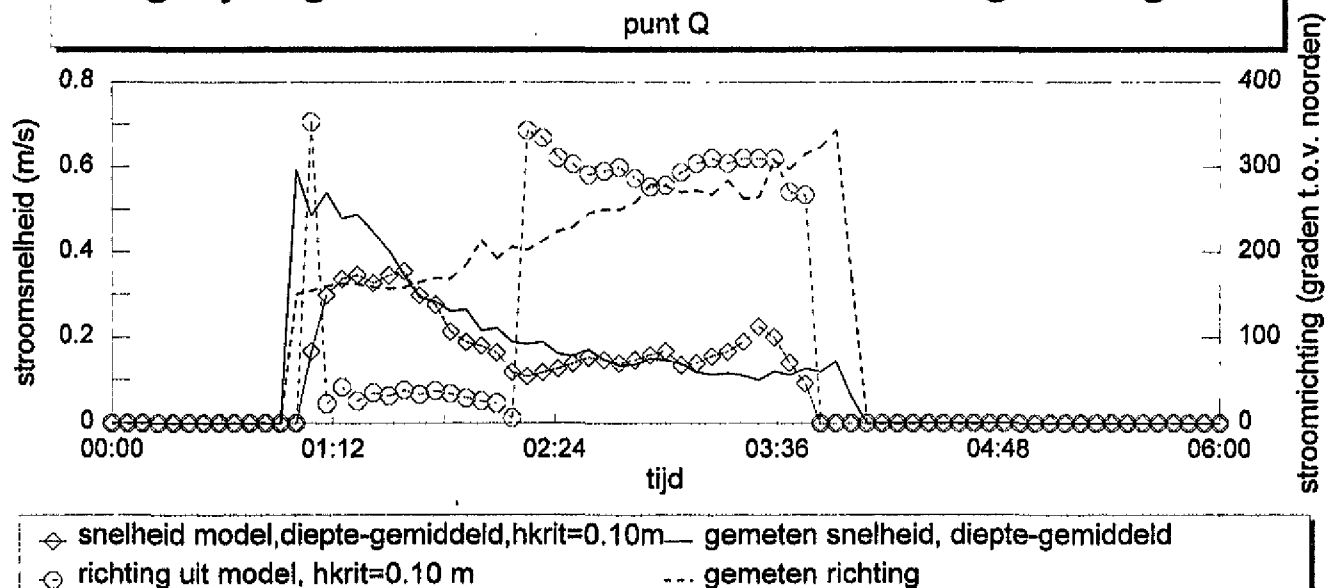
- a) tijdens vloed laat het model punt Q vanaf de lagere delen van de plaat onderlopen, terwijl het water in werkelijkheid uit de richting van het Boerengat (=kortere weg!) komt;
- b) tijdens eb (tot 3:36 uur) laat het model punt Q afwateren richting het Boerengat, terwijl punt Q in werkelijkheid afwatert op de lagere delen van de plaat, d.w.z. richting westen; alleen rond 3:00 uur is er nauwelijks verschil in stroomrichting tussen model en werkelijkheid; na 3:36 uur laat het model punt Q nog 10 minuten afwateren op de lagere delen van de plaat.

Het feit dat de gemodelleerde snelheid tijdens vloed *kleiner* is dan de gemeten snelheid komt voort uit het feit dat het water in het model een veel langere weg *over de plaat* aflegt richting punt Q dan in werkelijkheid het geval is. De weerstand in het Boerengat is relatief gering vergeleken met de weerstand op de plaat en een kortere weg over de plaat levert dus hogere stroomsnelheden op.

(A)

Vergelijking stroomsnelheden en -richtingen dag 330

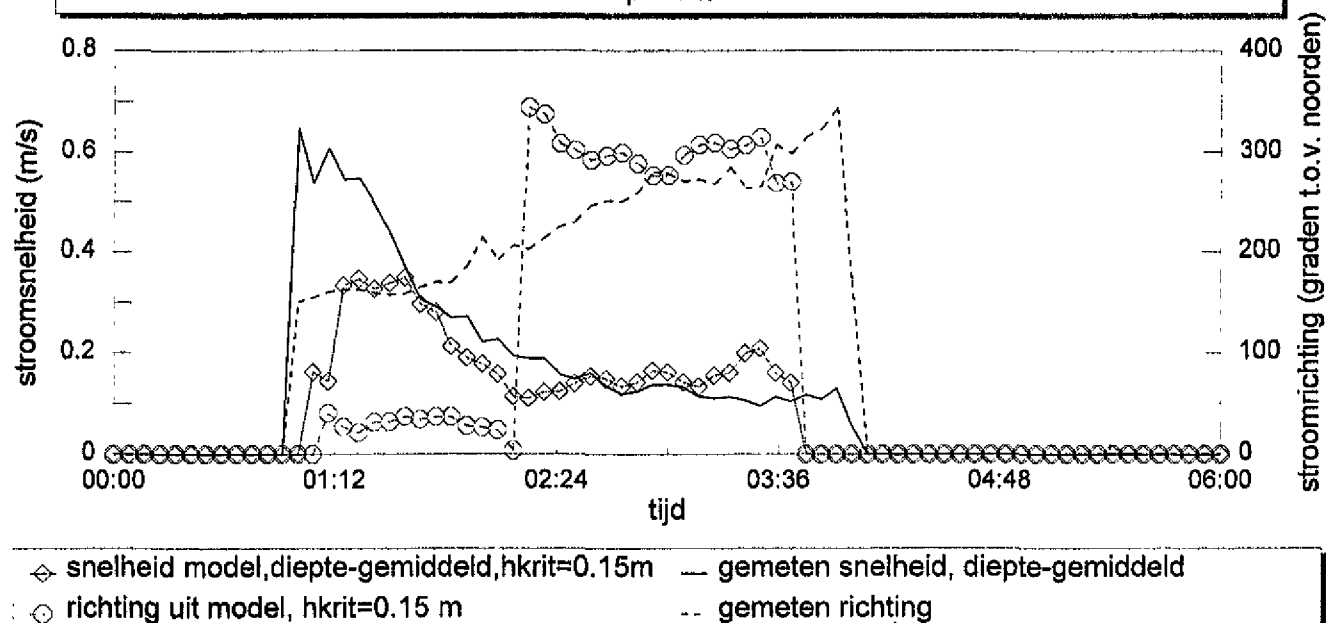
punt Q



(B)

Vergelijking stroomsnelheden en -richtingen dag 330

punt Q



Figuur 6: Vergelijking gemeten en gemodelleerde stroomsnelheden en stroomrichtingen op punt Q voor de ochtend van dag 330;
 (A) vergelijking gemeten snelheden en modelrun met kritische waterdiepte van 0.10 m (run 330-3);
 (B) vergelijking gemeten snelheden en modelrun met kritische waterdiepte van 0.15 m (run 330-4).

Het feit dat de gemodelleerde snelheid tussen 3:00 en 3:36 uur *groter* is dan de gemeten snelheid komt voort uit het feit dat punt Q in het model meer rechtstreeks richting het Boerengat afwatert dan in werkelijkheid het geval is.

Het feit dat de waterstanden in het model iets te laag zijn, zou te maken kunnen hebben met de te lage stroomsnelheid tijdens het onderlopen van de plaat in het model. Daardoor bereikt de waterstand in het model niet de werkelijke waarde.

De *oorzaak* van de afwijkende stroomrichtingen zou voor een deel in de bodemschematisatie in SCALDIS100 kunnen liggen, die voor de Plaat wellicht niet helemaal klopt. Dit zou te wijten kunnen zijn aan het feit dat de schematisatie te grof is.

Op de punten P, Q en R is nagegaan wat de werkelijke bodemligging (op 25-11-1996) is en wat de bodemligging in SCALDIS100 is. Bij punt P is het verschil 0.139 m (modelligging te hoog), bij punt Q 0.193 m (model te hoog) en bij punt R 0.113 m (model te hoog). Daar de plaat door betrekkelijk weinig cellen is geschematiseerd, kunnen kleine verschillen de stroming zodanig beïnvloeden dat er afwijkingen t.o.v. de werkelijke situatie optreden.

Bij het bovenstaande moet worden aangetekend dat de punten, waarop de bodemligging in SCALDIS100 is gedefinieerd voor P, Q en R, niet precies liggen op de **exacte locaties P, Q en R in het veld!** Bij punt P is de afstand tot het bodempunt 55 m, bij punt Q 48 m en bij punt R 28 m. De snelheidspunten liggen ook nog eens 50 meter van het bodempunt verwijderd. Dit zou ook een oorzaak kunnen zijn van de boven genoemde verschillen.

Een oplossing zou kunnen zijn om een fijner bodemgrid te gebruiken.

Daar de resultaten bij een kritische waterdiepte van 0.10 m (run 330-3) net iets realistischer zijn dan die bij een kritische waterdiepte van 0.15 m (run 330-4), zijn de snelheids- en waterstandsvelden van de eerstgenoemde run (run 330-3) gebruikt als invoer in SWAN.

4.2.2. SWAN-runs:

4.2.2.1. VERGELIJKING GOLFPARAMETERS UIT METINGEN EN SWAN-RUNS OP DE MEETPUNTEN:

In tabel 3 zijn de golfhoogte, waterdiepte en golfvoortplantingsrichting, afkomstig van respectievelijk metingen en modelruns, naast elkaar gezet voor de 3 tijdstippen waarvoor is gemodelleerd. Daarnaast zijn voor de duidelijkheid de windsnelheid en -richting getoond, die gemeten zijn en in SWAN ingevoerd.

Om 2:00 uur wijken de gemodelleerde golfhoogtes weinig af van de 'gemeten' golfhoogtes op de punten P, Q en R. Om 1:30 en 3:30 uur is de afwijking veel groter dan bij 2:00 uur. De golfhoogte van **punt S** wordt voor alle tijdstippen door SWAN flink overschat. Dit zou erop kunnen duiden dat SWAN de golven in de diepere gedeeltes van het gebied te hoog berekent. De afwijkingen van de SWAN-golfhoogtes ten opzichte van de metingen zijn *niet* te wijten aan meetfouten. De onnauwkeurigheid van de golfhoogtemeting door de wave rider op punt S is veel geringer dan de afwijking van de SWAN-golfhoogtes ten opzichte van de gemeten golfhoogtes. De standaarddeviatie van golfhoogtes, gemeten door wave riders, is namelijk $\pm 3\%$ van de gemeten waarde (Bram Roskam, pers.comm.).

Opvallend is ook dat de golfhoogte op punt Q consequent wordt overschat door SWAN, terwijl de golfhoogte op punt R consequent wordt onderschat door SWAN.

Tabel 3: Vergelijking van golfparameters verkregen uit metingen en uit modellering met SWAN:

1:30 uur	windsnelheid= 13.81 m/s		windrichting= 90.3°, cartesisch					
meet- punt	H_{m0} , me- ting (m)	H_{m0} , SWAN (nest) (m)	afwij- king H_{m0} , SWAN in % t.o.v. meting	gemid- delde water- diepte meting (m)	water- diepte SWAN (nest) (m)	afwij- king h_{gem} , SWAN in % t.o.v. meting	golfrich- ting, meting (°)	golfrich- ting, SWAN (nest) (°)
P	0.401	0.460	+14.7	1.65	1.34	-18.8	-	76
Q	0.148	0.186	+25.7	0.90	0.60	-33.3	80.1	59
R	0.510	0.482	-5.5	1.61	1.38	-14.3	-	81
S	0.523	0.628	+20.1	ca. 13	15.12	-	-	86
2:00 uur	windsnelheid= 13.95 m/s		windrichting= 89.9°					
P	0.489	0.492	+0.6	1.73	1.47	-15.0	-	77
Q	0.238	0.244	+2.5	1.01	0.77	-23.8	79.2	63
R	0.550	0.525	-4.5	1.70	1.52	-10.6	-	82
S	0.526	0.658	+25.1	ca. 13	15.24	-	-	83
3:30 uur	windsnelheid= 13.36 m/s		windrichting= 83.4°					
P	0.387	0.324	-16.3	1.27	0.90	-29.1	-	69
Q	0.066	0.082	+24.2	0.59	0.25	-57.6	70.9	55
R	0.493	0.329	-33.3	1.24	0.94	-24.2	-	65
S	0.503	0.658	+30.8	ca. 13	14.64	-	-	72

Het valt op dat op het tijdstip waar de SWAN-waterdieptes het minst afwijken van de gemeten waterdieptes (2:00 uur), de voorspelde golfhoogtes het minst afwijken van de gemeten golfhoogtes. De grootste afwijkingen van de SWAN-waterdiepte ten opzichte van de gemeten waterdiepte zijn te zien om 3:30 uur en daar is ook de afwijking van H_{m0} het grootst op punten P en R.

Opvallend is verder dat de *waterdieptes op de plaat in alle gevallen kleiner zijn dan in werkelijkheid*. Voor een deel is dit te wijten aan het feit dat de ingevoerde waterstanden (=WAQUA-resultaten) lager zijn dan de gemeten waterstanden (zie § 4.2.1.2); voor een deel aan het feit dat de bodem in het model in ieder geval ter plaatse van de punten P, Q en R hoger ligt dan in werkelijkheid (P: ± 24 cm te hoog; Q: ± 20.5 cm te hoog; R: ± 16 cm te hoog). De afwijking van de SWAN-waterdieptes levert geen duidelijke verklaring op voor het feit dat de golfhoogte op punt Q consequent wordt *overschat* door SWAN en dat de golfhoogte op punt R consequent wordt *onderschat*. Dissipatie vindt zowel bij Q als bij R plaats. De waterdiepte wordt onderschat en daarom zou een onderschatting van H_{m0} zowel bij punt Q als bij punt R logisch zijn. Naar een oorzaak voor de overschatting op punt Q moet nog verder worden gezocht.

Wat betreft de *golf(voortplantings-)richting*, valt op dat SWAN op punt Q kleinere hoeken voorspelt dan de gemeten hoeken. Daar de hoeken gedefinieerd zijn t.o.v. de X-as van het Rijksdriehoeksstelsel (zie § 2.2.3 en 3.6.2), betekent dit dat de golven volgens SWAN iets meer in *oostelijke* richting bewegen dan in werkelijkheid, d.w.z. dat de refractie extremer is dan in werkelijkheid. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat de door SWAN gebruikte waterdieptes kleiner zijn dan in werkelijkheid.

Overigens moet met de onderschatting van de waterdieptes rekening worden gehouden bij het bekijken van kaartjes van de relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) in § 4.2.2.3, 4.2.2.4 en 4.2.2.5.

4.2.2.2: VERGELIJKING ABSOLUTE VARIANTIESPECTRA OP DE MEETPUNTEN.

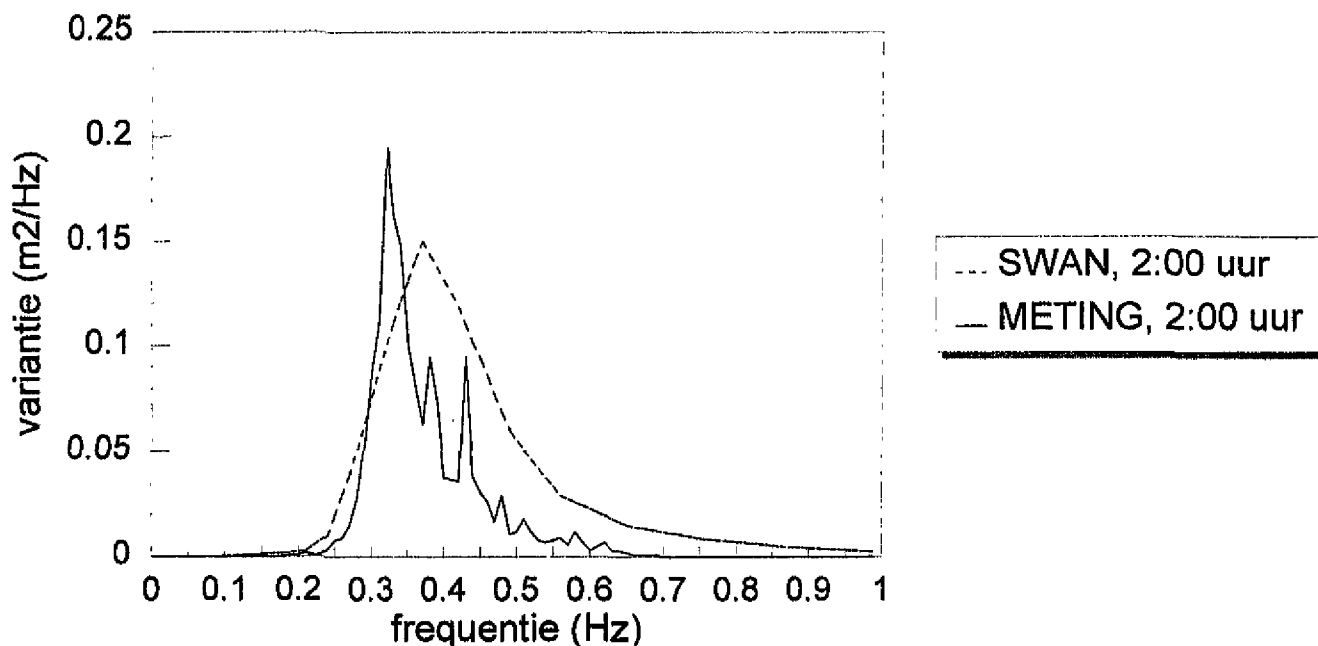
In bijlagen 23 t/m 42 zijn de golfspectra op basis van metingen en de golfspectra, verkregen uit de SWAN-runs, te zien.

De eenheid op de Y-as is de 'variantie', uitgedrukt in m^2 . Deze geeft een indicatie van de golfenergie. Bij het vergelijken van de spectra, moet er rekening mee worden gehouden dat de gemeten spectra van punten P, Q en R een waarde van variantie hebben om de 0.02 Hz. Bij de gemeten spectra van punt S is dit 0.01 Hz. Bij de SWAN-spectra is dit 0.05 Hz. De totale energie wordt bepaald door de oppervlakte onder het spectrum. In de getoonde spectra is op de x-as de *absolute* frequentie afgebeeld, d.w.z. dat de energieverdeling is bepaald op een vast punt en niet meebewegend met de stroming.

Op alle 4 de meetpunten en alle 3 de tijdstippen valt 1 ding vooral op: SWAN *overschat* de energie in de *hogere frequenties*, van 0.40-0.50 Hz t/m 1 Hz. Verder is te zien dat bij punten P, Q en R deze *overschatting* meestal wordt gecompenseerd door een *onderschatting* van de energie in de frequenties tussen 0.25 en 0.40 Hz, terwijl bij punt S de energie tussen 0.25 en 0.40 Hz *vergelijkbaar* is (zie bijvoorbeeld figuur 7). Dit laatste maakt duidelijk waarom de golfhoogte bij punt S zo wordt overschat: dit is volledig te wijten aan een overschatting van de energie in de frequenties tussen 0.40 en 1 Hz!

Absolute variantiespectra op punt S

dag 330, op basis van METINGEN en SWAN



figuur 7: Absolute spectra op punt S op dag 330 om 2:00 uur: meting en model.

De oorzaak van de consequente overschatting van de energie in de hogere frequenties zou kunnen liggen in de opgegeven randvoorwaarde aan de zuidrand van de Westerschelde. Hier is een golfhoogte van 0.10 m opgegeven en een piekfrequentie van het spectrum van 0.91 Hz. Het is ook mogelijk dat de golfgroei door de wind wordt overschat. Het weglaten van een, hier toegepaste, extra term voor de golfgroei door wind zou wellicht betere resultaten opleveren.

Zoals eerder vermeld, wordt op de punten op de plaat de overschatting in de hogere frequenties gecompenseerd door een onderschatting in de lagere frequenties. Dit duidt erop dat SWAN de dissipatie van golfenergie in de frequentieband 0.25-0.40 Hz overschat.

4.2.2.3: RUIMTELIJKE PATRONEN OP TIJDSTIP 1:30 UUR.

In de paragrafen 4.2.2.3 t/m 4.2.2.5 worden de ruimtelijke patronen van de parameters H_{m0} , h , golfrichting en relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) op de afzonderlijke tijdstippen besproken.

In bijlagen 44 t/m 46, 49 t/m 51, 53 t/m 55, 58 t/m 60, 62 t/m 64 en 67 t/m 69 zijn de ruimtelijke patronen van respectievelijk H_{m0} , h en golfrichting afgebeeld in het deel van het rekengrid (groeve of fijne grid), waarin de Plaat van Baarland ligt. In bijlagen 43, 48, 52, 57, 61 en 66 zijn de tabellen gegeven met de waarden van golfparameters op de meetpunten. Een algemene opmerking dient hier gemaakt te worden: in de kaartjes van de ruimtelijke patronen

vallen land en droogvallende plaatdelen overal in de laagste klasse, daar hier een default-waarde optreedt, die negatief is.

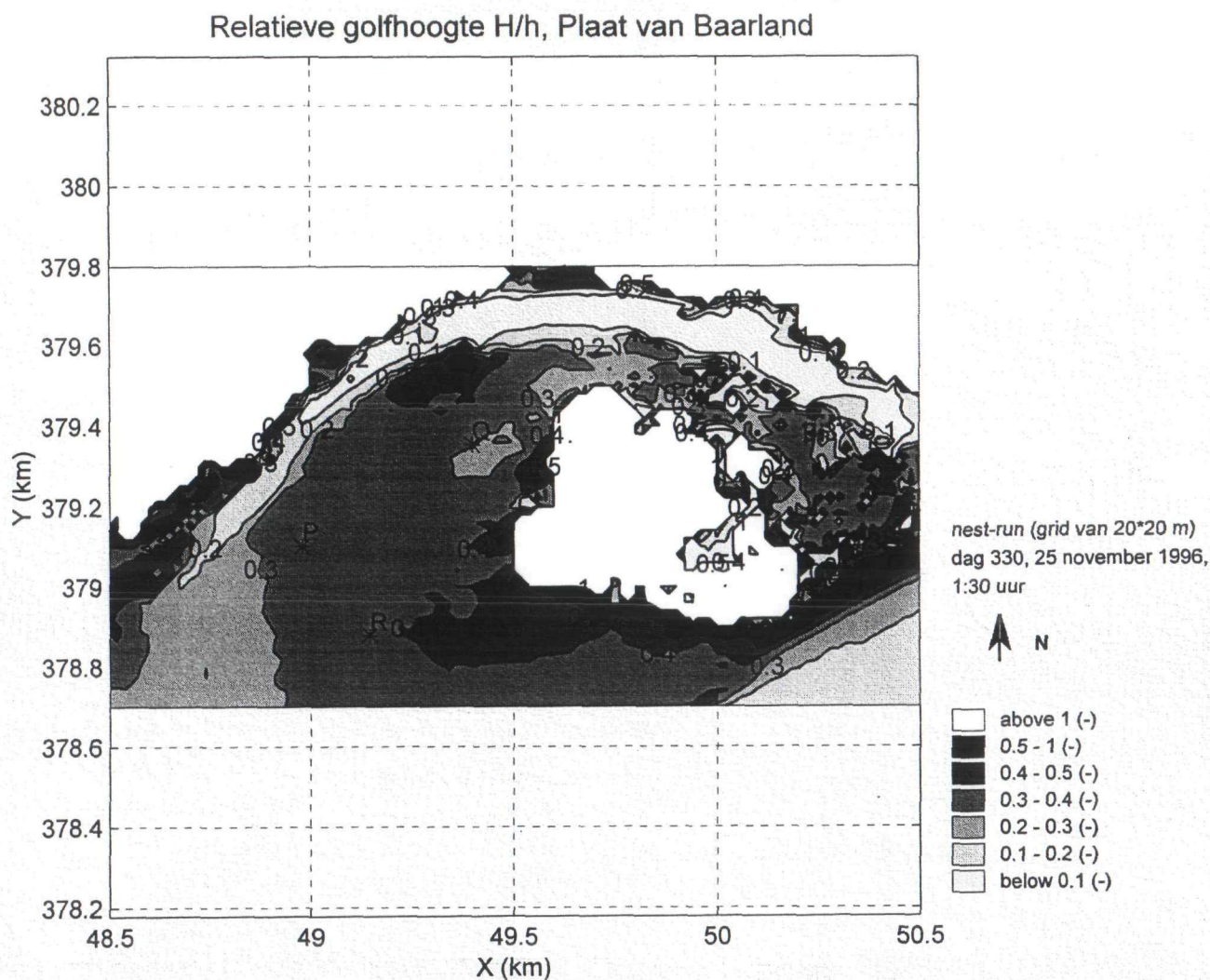
In het kaartje van de verdeling van H_{m0} bij de **grove run** valt op dat er vanaf het zuiden golfgroei plaatsvindt, die midden op de Westerschelde alleen wordt onderbroken door een plaat aan de westkant van de kaart. Opvallend is dat aan de oostkant van deze plaat afname van de golfhoogte plaatsvindt, terwijl aan de westkant juist groei plaatsvindt. Wellicht speelt 'shoaling' aan de westkant hierbij een rol. Rond de Plaat van Baarland neemt de golfhoogte duidelijk af met afnemende waterdiepte als gevolg van bodemwrijving.

Opvallend is verder dat aan de zuidrand tussen $X \approx 49500$ m en $X \approx 51000$ m de golfhoogte meteen groter dan 0.2 m is, in tegenstelling tot het stuk ten westen hiervan. Dit kan 2 redenen hebben: (1) de waterdiepte is vanaf de rand meteen groot, dus er is sterke golfgroei; (2) de golven bewegen zich vanuit het westen richting dit gebied door refractie, dit is te zien in het plaatje van de golfrichting. Golven komen in het diepere gedeelte terecht en draaien door refractie bij richting het oosten/noordoosten (delen met golfrichting=0-60 graden).

Opvallend in het kaartje van de golfhoogtes bij de **nest-run** is dat de golven op de Plaat snel in hoogte afnemen, terwijl de golfhoogte in het Boerengat minder snel afneemt door de grotere waterdiepte. In de golfrichting is duidelijk de refractie op de Plaat te zien: aan de westkant van de plaat bewegen de golven in oostelijke/noordoostelijke richting en aan de oostkant in westelijke/ noordwestelijke richting.

Een relevante parameter in verband met substraatdynamiek is de **relatieve golfhoogte**: H/h (golfhoogte gedeeld door waterdiepte). Wanneer $H/h > 0.1$, dringt de orbitaalbeweging van de golven door tot aan de bodem. Wanneer $H/h > 0.3$, hebben de golven forse invloed op de bodem en wordt er dus veel sediment opgewoeld (Kroon, pers.comm.). In figuur 8 is te zien dat op de plaat om 1:30 uur de relatieve golfhoogte bijna overal groter dan 0.3 is. Waar $H/h > 1$ (fysisch onmogelijk), staat overigens geen water, in deze figuur is dat op het land en op een droogliggend deel van de plaat. Over vrijwel de gehele plaat woelen de golven dus sediment op, afgaande op de modelresultaten. De gebieden met de grootste H/h -waarden zijn de gebieden waar de waterdiepte gering is en ten zuiden waarvan de waterdiepte over korte afstand sterk is afgenomen.

Overigens moet worden vermeld dat de waarden van H/h waarschijnlijk overal enigszins zijn **overschat** a.g.v. onderschatting van de waterdiepte, zoals eerder is besproken. Dit is in ieder geval op punten P, Q en R het geval! Bij P en Q zijn de golfhoogtes ook nog eens overschat, waardoor H/h extra wordt overschat.



Figuur 8: Gemodelleerde relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) op dag 330, 1:30 uur.

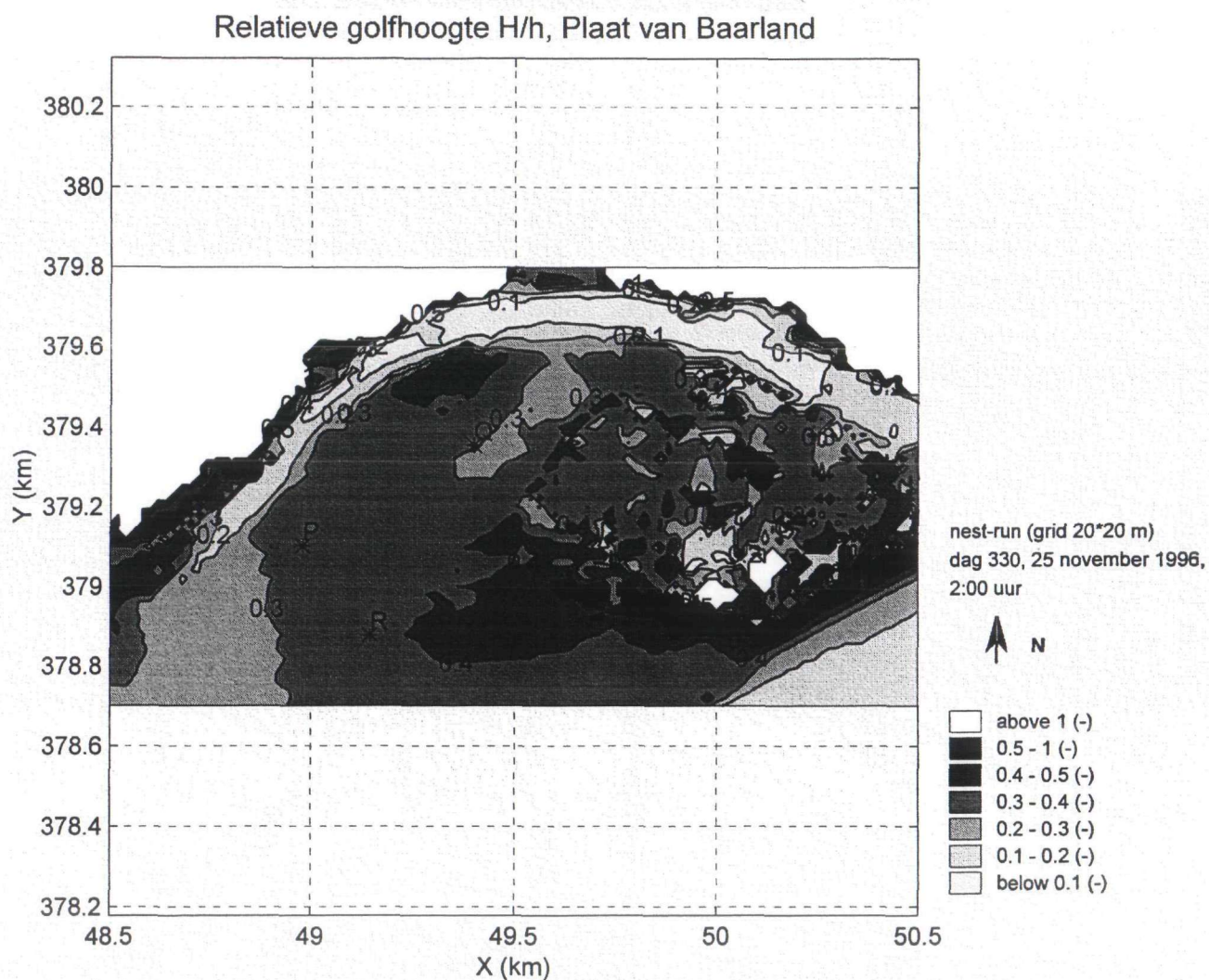
4.2.2.4. RUIMTELIJKE PATRONEN OP TIJDSTIP 2:00 UUR.

De golfhoogteverdeling uit de **grove run** toont hetzelfde patroon als om 1:30 uur. Rond de Plaat van Baarland zijn de golfhoogtes iets groter dan om 1:30 uur waarschijnlijk als gevolg van een iets grotere waterdiepte. Het verschil in windsnelheid is immers zeer gering en aan de zuidkant van de Westerschelde is geen verschil tussen de golfhoogtes op de 2 tijdstippen. De golfrichting vertoont hetzelfde patroon als om 1:30 uur.

Bij de **nest-run** is te zien dat bijna de gehele plaat onder water staat. De golfhoogte is in het Boerengat toegenomen, op de plaat zijn de golfhoogtes op een aantal plekken iets toegenomen, bijvoorbeeld rond punt Q. In figuur 9 is het gevolg voor de relatieve golfhoogte te zien. De relatieve golfhoogteverdeling is vrijwel hetzelfde als om 1:30 uur, doordat zowel de golfhoogte als de waterdiepte iets zijn toegenomen. Het grootste verschil tussen de 2

tijdstippen is dat er een gedeelte van de plaat tussen 1:30 en 2:00 uur onder water is gekomen.

Het grootste deel van de plaat heeft ook nu H/h -waarden, groter dan 0.3, sterke opwoeling van sediment door golven zou dus op basis van de SWAN-resultaten plaatsvinden. Ook op dit tijdstip echter, is de waterdiepte onderschat en daardoor H/h overschat door SWAN.



Figuur 9: Gemodelleerde relatieve golfhoogte (H_m/h) op dag 330, 2:00 uur.

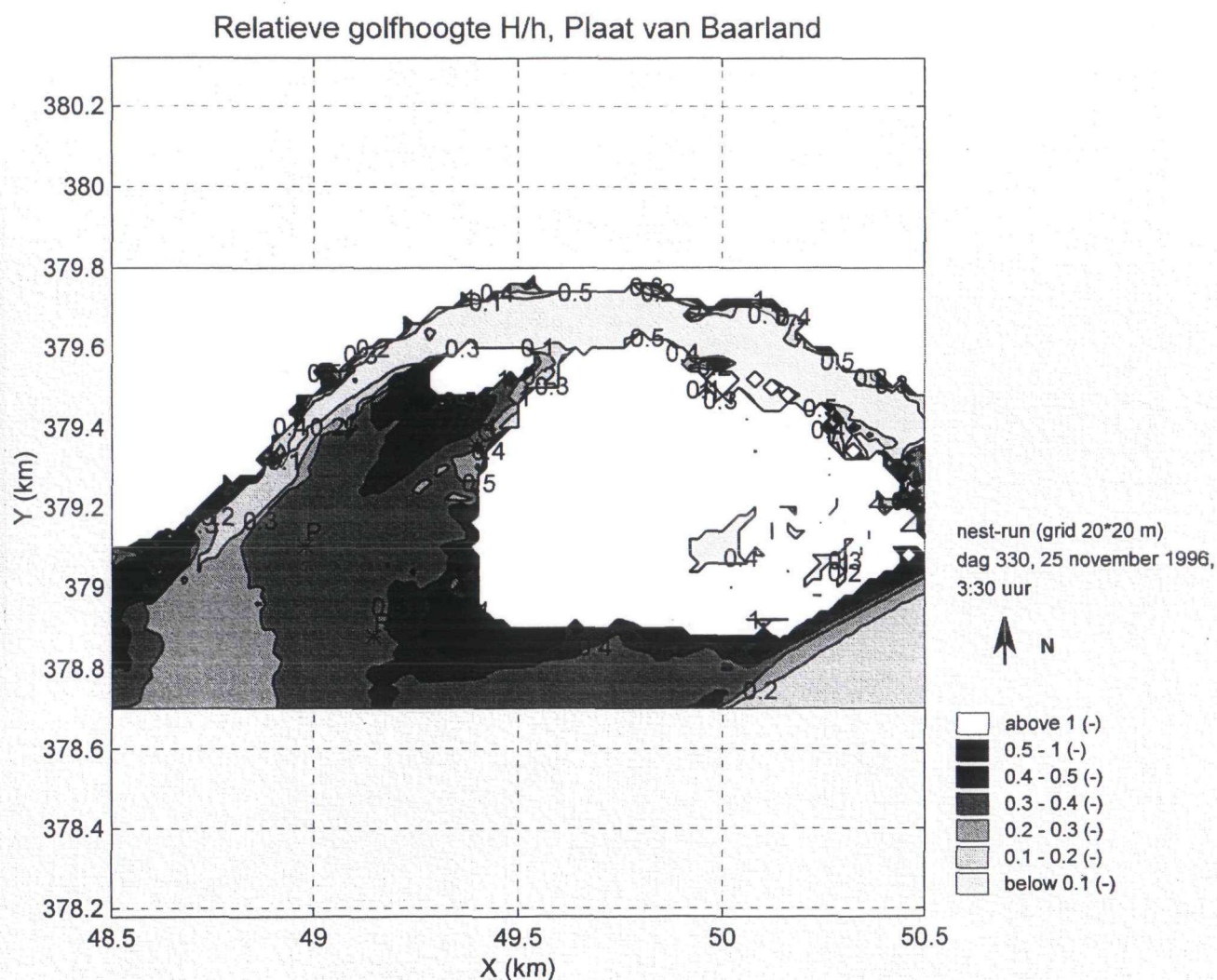
4.2.2.5. RUIMTELIJKE PATRONEN OP TIJDSTIP 3:30 UUR:

Bij de **grove run** is te zien dat de waterdiepte op de Plaat is afgenomen ten opzichte van 2:00 uur. De golfhoogtes zijn overal iets geringer als gevolg van afgenomen waterdieptes. De golfrichtingen aan de zuidkant vertonen een ander patroon dan om 1:30 en 2:00 uur en zijn niet goed te verklaren.

Opvallend in de tabel van de meetpunten (bijlage 61) is dat voor de golfhoogte op punten P en Q 0 is berekend, terwijl de metingen wel de aanwezigheid van golven aantonen. De reden hiervoor is dat in de berekening een puntengrid van 200*200 m wordt gebruikt. P en Q liggen waarschijnlijk dicht bij punten waar een golfhoogte 0 is berekend. Overigens worden in de nest-run op dit tijdstip de golfhoogtes op punten P en R *wel* redelijk ingeschat.

Bij de **nest-run** is te zien dat de golfhoogtes overal op de plaat zijn afgenomen. Dit is het gevolg van de afgenomen waterdiepte. Een groot deel van de plaat is drooggefallen. In figuur 10 is te zien dat op de gedeeltes van de plaat die niet zijn drooggefallen, de relatieve golfhoogte *niet* is afgenomen t.o.v. 2:00 uur! Ten noordwesten van punt Q en ten oosten van punt R zijn zelfs twee gebieden waar H/h is *toegenomen*. Rond punt Q zijn de getoonde waarden overigens fors overschat (zie tabel 3). Bij punten P en R zijn zowel H als h onderschat en is de voorspelling van H/h dus realistischer.

Ook wanneer de waterdiepte dus geringer wordt, hebben de golven nog steeds veel invloed op het sediment, immers de verhouding H/h bepaalt de mate van opwoeling.



Figuur 10: Gemodelleerde relatieve golfhoogte (H_{m0}/h) op dag 330, 3:30 uur.

4.2.2.6. VERGELIJKING RELATIEVE GOLFHOOGTE SWAN MET METINGEN:

In tabel 4 zijn de relatieve golfhoogtes uit de metingen en uit de SWAN-runs naast elkaar gezet.

Tabel 4: Vergelijking relatieve golfhoogtes meting en SWAN.

1:30 uur	relatieve golfhoogte H/h, meting	relatieve golfhoogte H/h, SWAN
MEETPUNT		
P	0.24	0.34
Q	0.16	0.31
R	0.32	0.35
2:00uur		
P	0.28	0.33
Q	0.24	0.32
R	0.32	0.35
3:30 uur		
P	0.30	0.36
Q	0.11	0.33
R	0.40	0.35

Overal, behalve bij punt R om 3:30 uur, wordt H/h overschat. Sterke overschatting vindt vooral op punt Q plaats. Om 1:30 uur en 3:30 uur levert dit een totaal verkeerd beeld op van de golfwerking. De waarden van H/h zitten hier in de metingen in het bereik, waarin de golven wel sediment opwoelen, maar in veel mindere mate dan de modeluitkomsten doen vermoeden. Rondom punt Q moet aan de H/h-waarden dus weinig waarde worden gehecht.

Op punten P en R vindt weliswaar overschatting door SWAN plaats, maar het verschil is niet zodanig dat het voorspelde karakter van de golfwerking, namelijk sterke opwoeling van sediment, in werkelijkheid heel anders is.

4.2.3. Integratie stroming en golven ten behoeve van substraatdynamiek:

Zoals in de inleiding genoemd, is de substraatdynamiek uit te splitsen in substraatdynamiek door golven en substraatdynamiek door stroming. De golven woelen sediment op en de stroming transporteert dit.

Ervan uitgaand dat $H/h > 0.3$ op grote delen van de plaat op alle drie de tijdstippen, woelen de golven vrijwel overal veel sediment op. De ruimtelijke spreiding van de substraatdynamiek op de plaat wordt dus bepaald door de ruimtelijke verdeling van de stroomsnelheid. Dit geldt in dit specifieke geval, bij springtij en een zuidenwind met windkracht 7. Bij andere windrichtingen en windsnelheden kan een totaal ander patroon optreden. Daarom moeten ook andere omstandigheden worden gemodelleerd.

Het analyseren van de relatie substraatdynamiek-hydrodynamiek kan vanaf hier in eerste instantie kwalitatief worden benaderd door de hydrodynamische parameters $u^{\text{diepte-gemiddeld}}$ en H/h in klassen in te delen en op basis van een idee van de te verwachten processen een combinatie te maken van de 2 parameters tot 1 kaart. Deze kan dan worden vergeleken met een kaart van gemeten substraatdynamiek. Hierna kan een eerste uitspraak worden gedaan over de relatie substraatdynamiek-hydrodynamiek en over de geschiktheid van de hydrodynamische modellen.

5. DISCUSSIE:

Allereerst dient gezegd te worden dat de dataset van de Plaat van Baarland, waaruit geput is voor de controle van de resultaten van SWAN en WAQUA, een unieke ondiep-water-dataset is. De dataset kan in de toekomst ook voor andere projecten die met de Westerschelde te maken hebben, nuttig gebruikt worden.

Een aantal punten in de analyse van de modelresultaten in samenhang met de metingen roepen vragen op. Allereerst de uitkomsten van WAQUA.

De stroomrichting lijkt de oorzaak van de geringe stroomsnelheden, voorspeld door WAQUA, bij het onderlopen van de plaat. De verklaring voor de afwijkende stroomrichting ligt waarschijnlijk in het feit dat de bodem niet helemaal klopt voor de plaat van Baarland. Het feit dat de bodem van 1988 is gebruikt voor de rest van de Westerschelde, zou niet veel invloed moeten hebben op de stroming op de plaat. Het 'ingeplakte' gebied met de bodem van 1996 is immers ruim groter dan de plaat alleen. Er zou misschien gekeken kunnen worden of de bodem sterk is veranderd gedurende het jaar 1996. Wellicht is het ook mogelijk om een fijner bodemgrid te gebruiken om de stroming op de plaat van Baarland goed te kunnen modelleren. Het kromlijng model SCALWEST voor de Westerschelde, de opvolger van SCALDIS100, heeft op de plaat van Baarland kleinere gridcellen dan SCALDIS100. Er zou getest kunnen worden wat voor resultaten SCALWEST geeft onder de tot nu toe gemodelleerde omstandigheden.

Mogelijkheden om de metingen dichter te benaderen, zijn het verlagen van de kritische waterdiepte in de invoerfile en wellicht het kiezen van een andere droogvalprocedure in WAQUA.

Wat betreft SWAN, lijkt de waterdiepte de belangrijkste factor voor de afwijking van de modelresultaten ten opzichte van de metingen. De waterdiepte in de SWAN-runs is bij alle punten op de plaat en op alle tijdstippen lager dan in werkelijkheid. Dit is overigens voor een deel het gevolg van de invoer van waterstanden uit WAQUA-run 330-3 (kritische waterdiepte = 0.10 m), die lager zijn dan in werkelijkheid. De andere factor is de bodemligging die te hoog is op de punten P, Q en R. Het is overigens niet zeker dat de situatie op de meetpunten voor de hele plaat geldt.

Opvallend is dat de te lage waterdiepte niet voor alle drie de punten op de plaat dezelfde gevolgen heeft. Op punt Q wordt de golfhoogte consequent overschat, op punt R wordt deze consequent onderschat en op punt P wisselt het. Een potentiële reden voor het verschil tussen Q en R is dat de te lage waterdiepte op punt R sterkere dissipatie van golfenergie als gevolg heeft, terwijl op punt Q de golfhoogte al zover is afgenomen dat de dissipatie relatief gering is en stijging van de golfhoogte door 'shoaling' een belangrijker proces is. Hoe het proces van 'shoaling' in SWAN is opgenomen, moet nader worden bekeken.

Overigens is bij het analyseren van de SWAN-resultaten de invloed van de stroming op de golven nog te weinig aan bod gekomen. Deels is dit omdat eerst naar meer basale parameters als waterdiepte is gekeken. Bij een vervolg van modellering en analyse moet gekeken worden of de invloed van de stroming goed wordt meegenomen door SWAN.

Bij het beschouwen van de resultaten is het van belang te bedenken dat slechts één ochtend met specifieke omstandigheden is gemodelleerd. De modellen zullen ook met andere omstandigheden toegepast moeten worden om een goed beeld van de substraatdynamiek op de plaat gedurende een langere periode te krijgen. Voor de modellering van

substraatdynamiek in een latere fase is het van belang te weten of de substraatdynamiek op de Plaat van Baarland wordt gedomineerd door omstandigheden met hoge energie (b.v. stormen), die niet frequent voorkomen, of door omstandigheden met minder energie die met een hogere frequentie optreden of door een combinatie van die twee. Het is van belang hier een goed beeld van te hebben wanneer een keuze gemaakt wordt voor te modelleren dagen.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN:

De volgende **conclusies** kunnen worden getrokken:

- De modellen voor hydrodynamiek zijn opgezet en getest voor 1 combinatie van wind en getij. Beide modellen lijken geschikt voor het modelleren van hydrodynamiek op de Plaat van Baarland, hoewel wijzigingen in de invoer wel gewenst zijn (zie hieronder bij aanbevelingen). Een eerste aanknopingspunt naar substraatdynamiek is het vergelijken van de ruimtelijke verdeling van gemeten substraatdynamiek met de ruimtelijke verdeling van gemodelleerde stroomsnelheid en relatieve golfhoogte.
- De WAQUA-resultaten van de ochtend van dag 330 zijn redelijk, in vergelijking met de metingen. De waterstanden op de plaat wijken gemiddeld ± 10 cm af van de werkelijk voorkomende waarden. De grootste afwijking zit in de stroomrichting en stroomsnelheid bij het onderlopen van de plaat. De stroomrichting wordt dan door WAQUA voorspeld richting noorden, terwijl de stroming in werkelijkheid naar het zuiden is. De stroomsnelheid is te laag, maximaal 0.3 m/s te laag (wanneer we alleen de periode beschouwen dat het model een snelheid groter dan 0 heeft). Deze afwijkingen zijn mogelijk een gevolg van afwijkingen van de gebruikte bodemschematisatie ten opzichte van de werkelijke situatie.
- De resultaten van SWAN zijn redelijk, gezien het feit dat er nog betrekkelijk weinig verschillende randvoorwaarden zijn getest. De golfhoogtes wijken in de meeste gevallen minder dan 25 % af van de gemeten waarden. De relatieve golfhoogte, golfhoogte gedeeld door waterdiepte, op de plaat wijkt slechts op één punt (punt Q) zodanig af dat de substraatdynamiek door golven daar verkeerd zou worden ingeschat.
- De SWAN-resultaten zijn erg gevoelig voor afwijkingen in waterdiepte, het is in het vervolg van belang dat de waterstanden en de bodemligging, die in SWAN worden ingevoerd, beter overeenkomen met de werkelijkheid. De waterstanden uit de WAQUA-runs wijken tot nu toe, voor invoer in SWAN, teveel af van de werkelijke waterstanden.
- SWAN overschat de energie in de frequenties hoger dan 0.40 Hz op de meetpunten op de plaat en op meetpunt S, ten zuiden van de Plaat van Baarland op diep water. De overschatting is waarschijnlijk te wijten aan het opgeven van golven met een frequentie van 0.91 Hz als randvoorwaarde aan de zuidrand van de Westerschelde. Op de plaat wordt dit gecompenseerd door een onderschatting van de energie tussen 0.25 en 0.40 Hz. Dit is waarschijnlijk het gevolg van te sterke dissipatie van golfenergie in deze frequentieband door de te lage waterdiepte in de SWAN-runs.
- Onder de gemodelleerde omstandigheden, springtij en zuidenwind met windkracht 7, zou, op basis van de SWAN-resultaten van relatieve golfhoogte, op een groot deel van de plaat sterke opwoeling van sediment door golven plaatsvinden. Waarschijnlijk zijn de relatieve golfhoogtes enigszins overschat. Zelfs als dat het geval is, is er waarschijnlijk ook in werkelijkheid sprake van sterke opwoeling, de overschatting is namelijk niet erg extreem en de werkelijke relatieve golfhoogtes liggen ook in de buurt van 0.3.

De volgende **aanbevelingen** voor vervolgonderzoek worden gedaan:

- Mogelijkheden voor het verkrijgen van betere resultaten bij het toepassen van WAQUA zijn het gebruiken van een lagere kritische waterdiepte en een andere droogvalprocedure. Het verschil tussen model en metingen zou op die manier verkleind worden.
- Mogelijkheden voor het verkrijgen van betere resultaten bij het toepassen van SWAN zijn het verlagen van de piekfrequentie en golfhoogte van de opgegeven randvoorwaarde aan de zuidrand van de Westerschelde. Een mogelijkheid is het verlagen van de piekfrequentie tot 0.5 Hz en van de golfhoogte tot 0.05 m. De overschatting van energie in de hogere frequenties zou daarmee moeten verdwijnen.
- Bij het vervolgen van de modellering van golven op de Plaat van Baarland moet aandacht worden geschonken aan de invloed van stroming op golfhoogte en andere golfparameters (b.v. golfvoortplantingsrichting). Een mogelijkheid is onder andere het draaien van een SWAN-run *zonder* stroming, waarna de resultaten vergeleken kunnen worden met een (voor de rest gelijksoortige) run met *stroming*.
- Een voorstel voor het vervolg van de modellering van de Plaat van Baarland:
 - stap 1. Voortzetten van de modellering van de hydrodynamiek, andere invoerfiles voor deze tijdstippen toepassen. Tegelijkertijd runs voor andere omstandigheden (andere dagen) draaien, op die manier kan meer kennis van de modellen (vooral SWAN) worden opgedaan.
 - stap 2. Indelen van relatieve golfhoogte en stroomsnelheid in klassen en combineren tot 1 kaart. De gemeten substraatdynamiek vergelijken met zo'n combinatiekaart om te zien of de patronen overeenstemmen en hoe waardevol de modeluitkomsten zijn.
 - stap 3. Mogelijkheden onderzoeken voor modelleren van substraatdynamiek, bijvoorbeeld de WAMORF-transportroutines in WAQUA.
- Het meten met een EMF (stromingsmeter) op meerdere punten op de Plaat tegelijkertijd zou meer mogelijkheden bieden voor het vergelijken van stroming uit WAQUA met de stroming in werkelijkheid.

LITERATUURLIJST:

- Dekker, L., Lieveense, P. & van der Male, K., 1994. Calibratie en verificatie SCALDIS100. Werkdocument RIKZ/AB-94.839x.
- Duiker, J.M.C., 1996. Meetprogramma substraatdynamiek als schakel tussen morfologie en ecologie. Rapport meetplan veldonderzoek DYNASTAR*ECOMOR voor de periode april 1996-maart 1997. IMAU R96.04, Universiteit Utrecht.
- Duiker, J.M.C. & Bos, D., 1996. Substraat-benthos-vogels. Pilot-studie Plaat van Baarland. Werkdocument RIKZ/OS-96.833x.
- van Endt, M.J. & Gautier, C., 1997. Wave computations with SWAN and HISWA in Dutch tidal basins during extreme storm conditions. Work document RIKZ/OS-97.120x.
- Kamsteeg, A.T., 1997. Repairing capwire time series with pressure sensor data. RIKZ, Utrecht University.
- Pieters, T., 1993. Het Schelde-estuarium, beheren of beheersen? Rapport DGW-93.032. Dienst Getijdewateren, Middelburg.
- van Rijn, L.C., 1990. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Aqua Publications, Oldemarkt, 335 pp..
- Ris, R.C., Booij, N., Holthuijsen, L.H. & Padilla-Hernandez, R., 1997. SWAN Cycle 2 USER MANUAL for SWAN version 30.50. Delft University of Technology.
- Ruessink, B.G., 1995. Calculation of wave heights from pressure time series, IMAU, Utrecht University, January 1995.
- Schaap, M., 1997. Testen en verbeteren van de WAMORF-routines voor de berekening van sedimenttransport in WAQUA. Werkdocument RIKZ/OS-97.802x.
- User's Guide WAQUA, 1992. SIMONA Report 92-10. ICIM-EDS Spijkenisse.
- Verbeek, H., van Zetten, J. & Ludikhuizen, D., 1995. Vergelijking 1D- en 2D-slibtransportmodellen voor de zuidrand van het Noordelijk Deltabekken. RIZA-werkdocument 95.107x, RIZA-Rijkswaterstaat.
- Vroon, J., Storm, C. & Coosen, J., 1997. Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rapport RIKZ-97.023.

Bijlagen

Het WAQUA-rekenschema

Het rekenschema is afgeleid uit de niet-lineaire ondiep-water vergelijking:

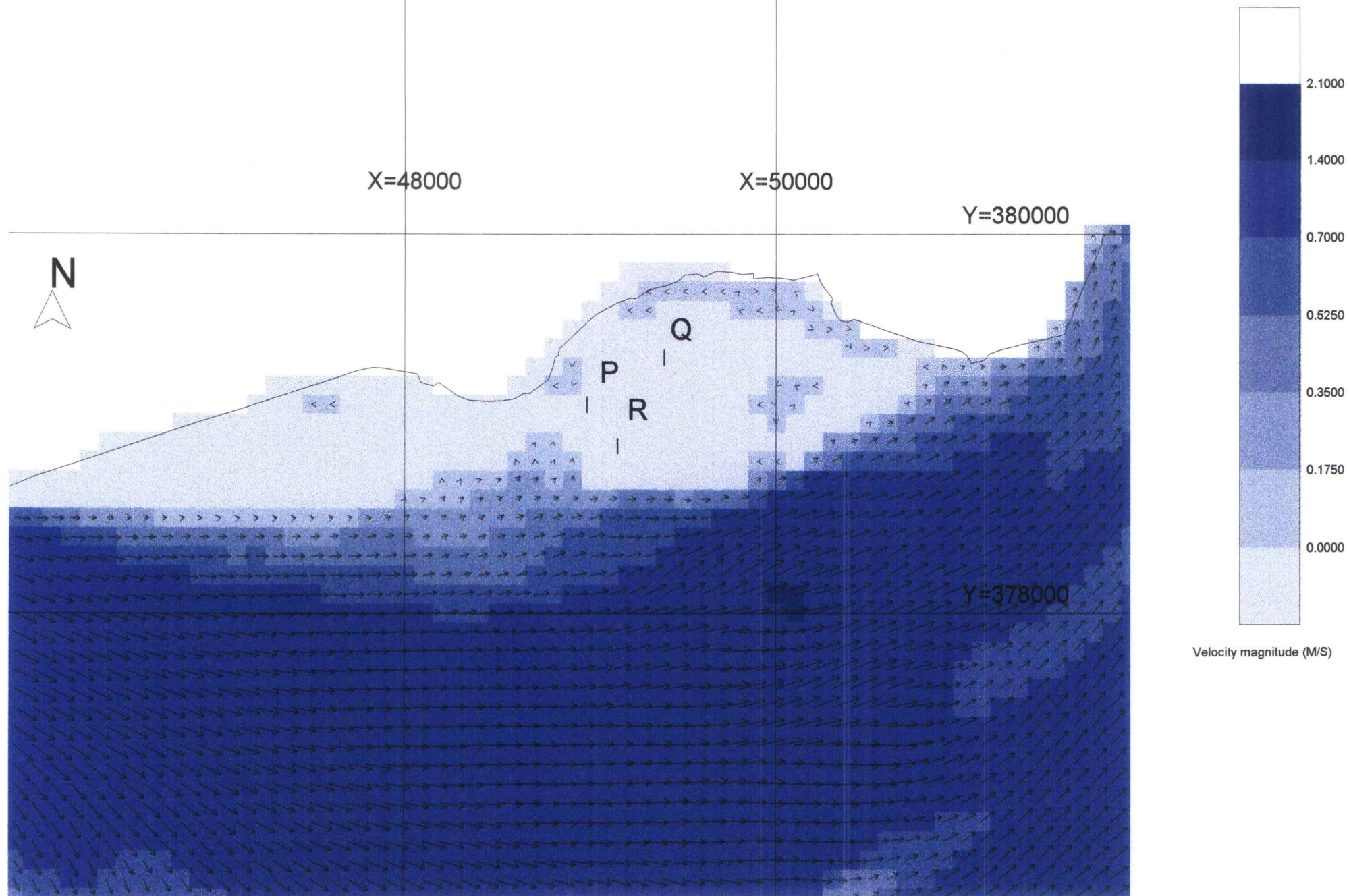
$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{\rho H} \tau_x^s + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{gH}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{\rho H} \tau_y^s + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{gH}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} &= 0 \quad (1) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (HU) + \frac{\partial}{\partial y} (HV) &= 0 \end{aligned}$$

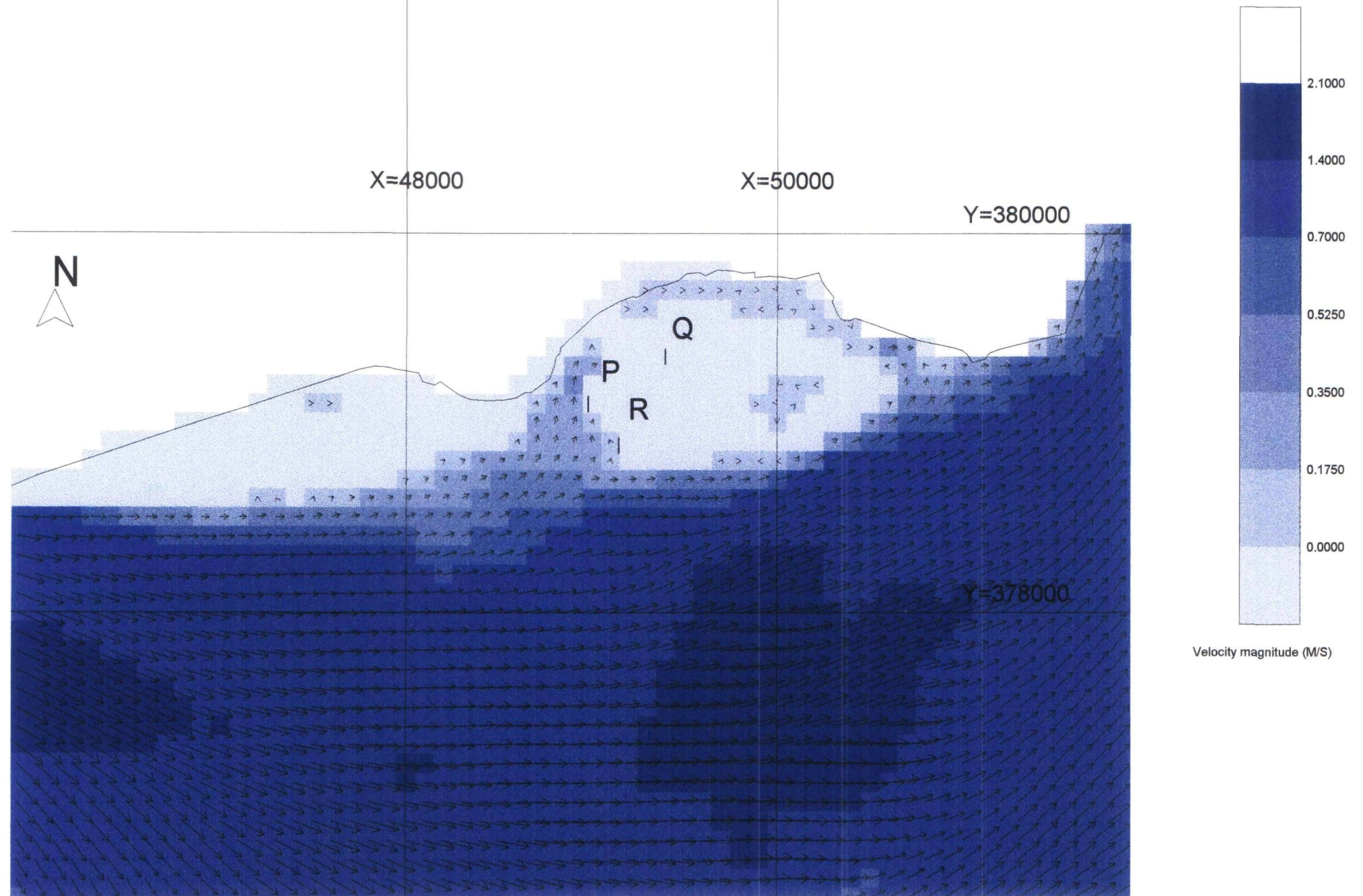
Hierin is:

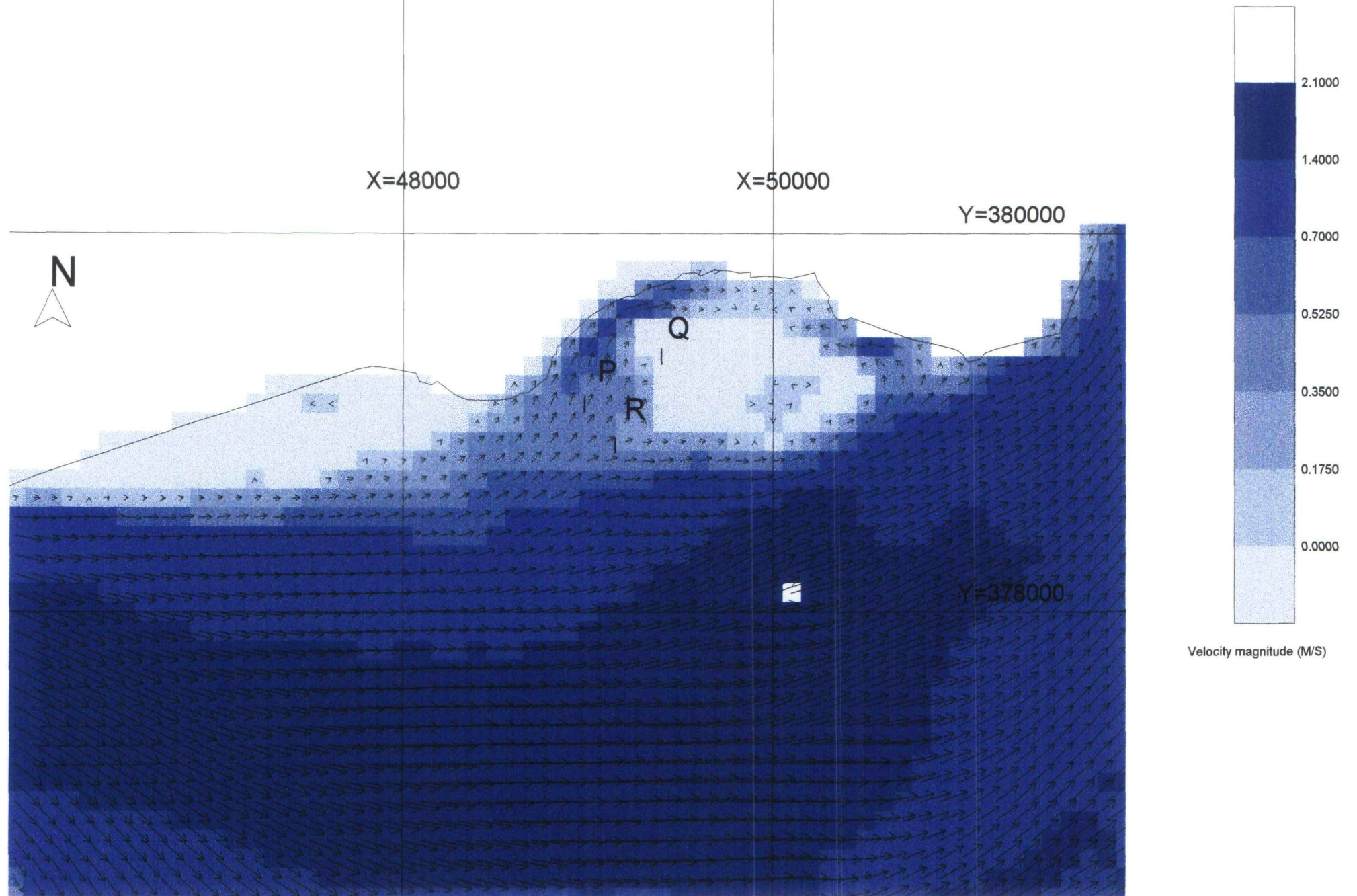
U, V	= verticaal gemiddelde stroomsnelheid in x,y-richting	[m/s]
f	= Coriolisparameter	[1/s]
g	= zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]
ζ	= waterstand ten opzichte van een referentie	[m]
h	= waterdiepte ten opzichte van een referentie	[m]
C	= Chézy-coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
H	= totale waterdiepte H = h+ζ	[m]
ρ	= dichtheid	[kg/m ³]
τ _x ^s , τ _y ^s	= windschuifspanning in x,y-richting	[-]
ν	= impuls-diffusie- of viscositeitscoëfficiënt	[m ² /s]

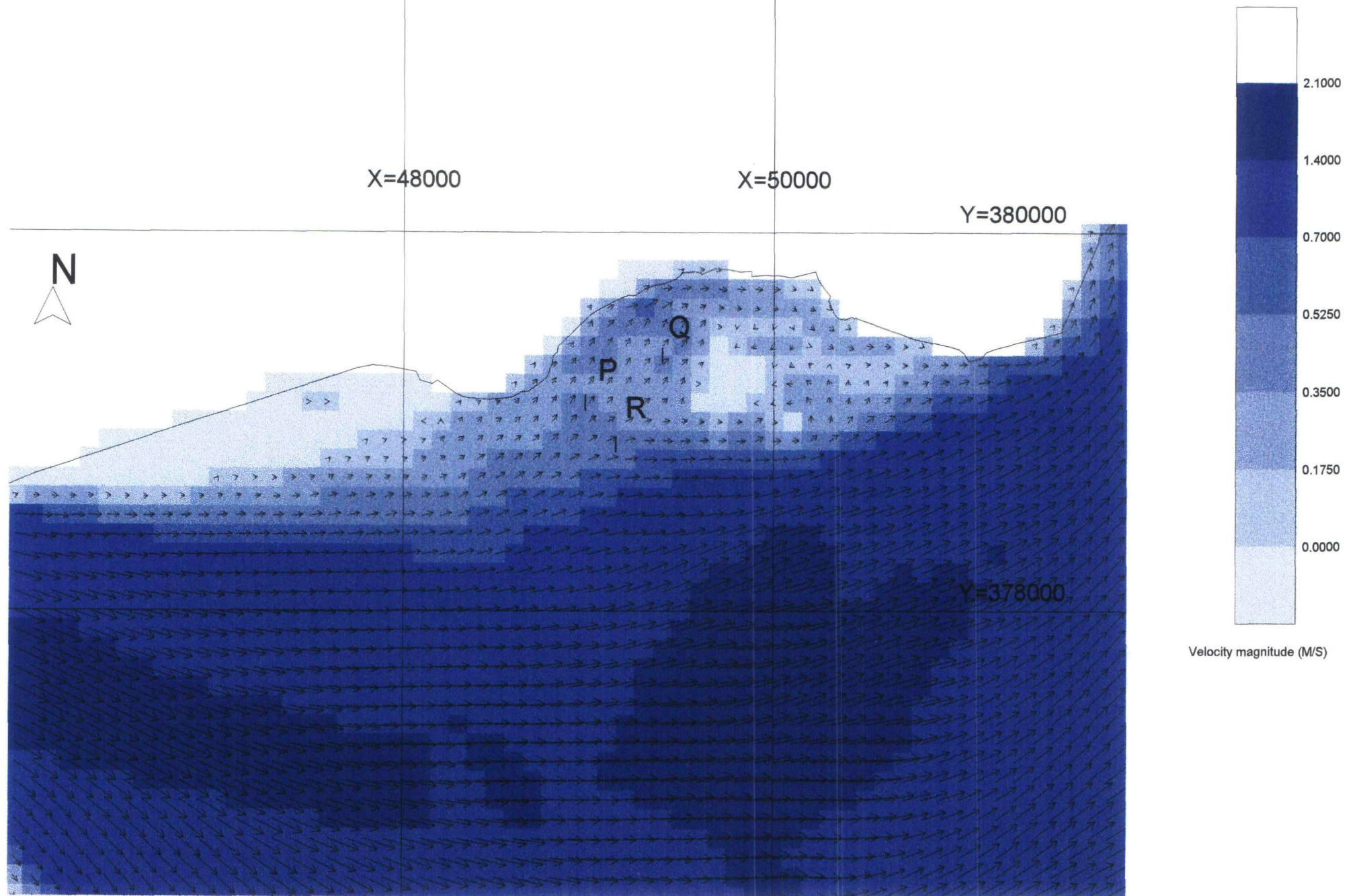
Bron: Verbeek et al., 1995 (zie literatuurlijst).

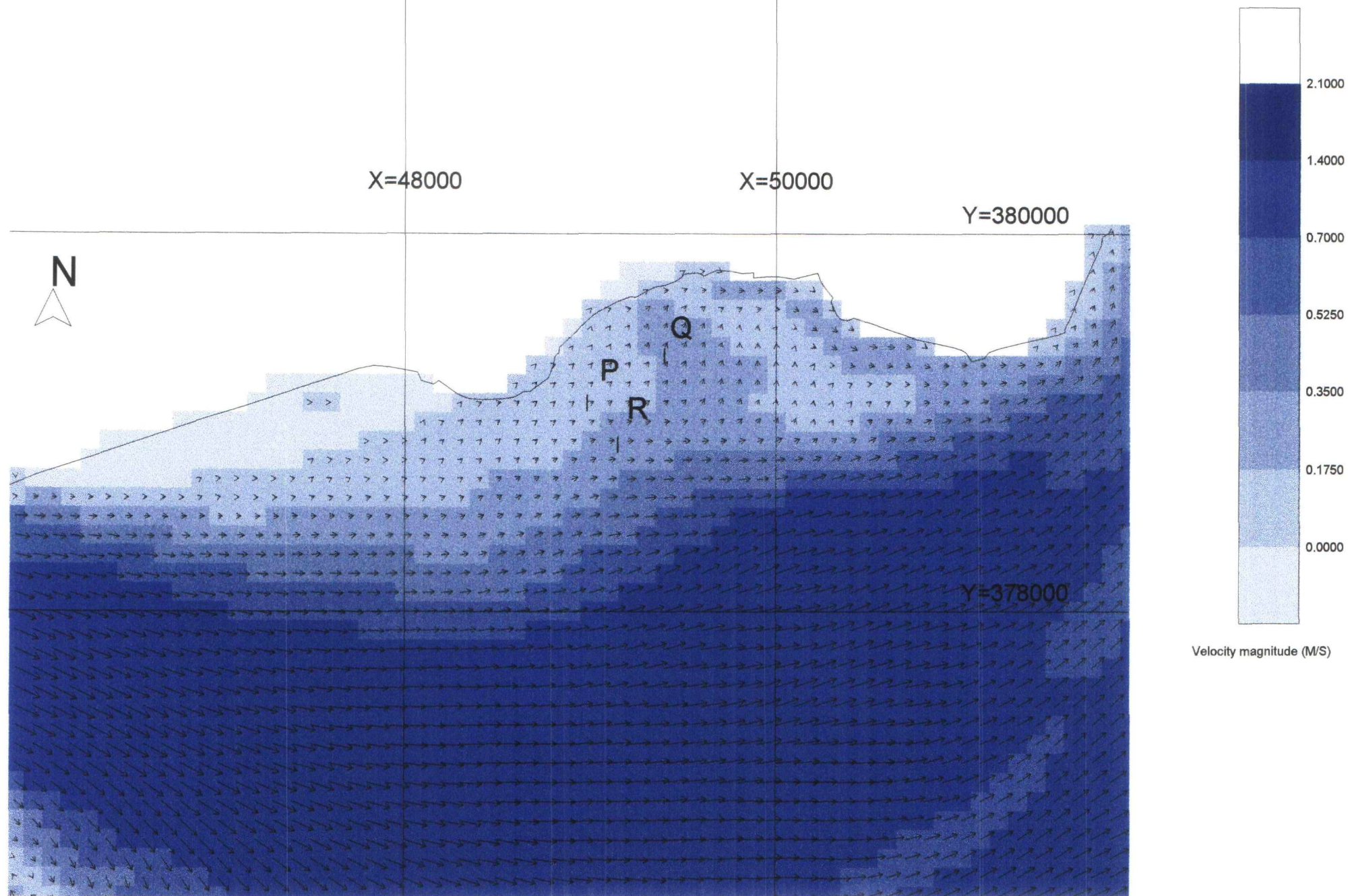
Bijlagen 2 t/m 14: Stromingsvelden uit
WAQUA-run 330-3 van 0:00 t/m 6:00 uur.

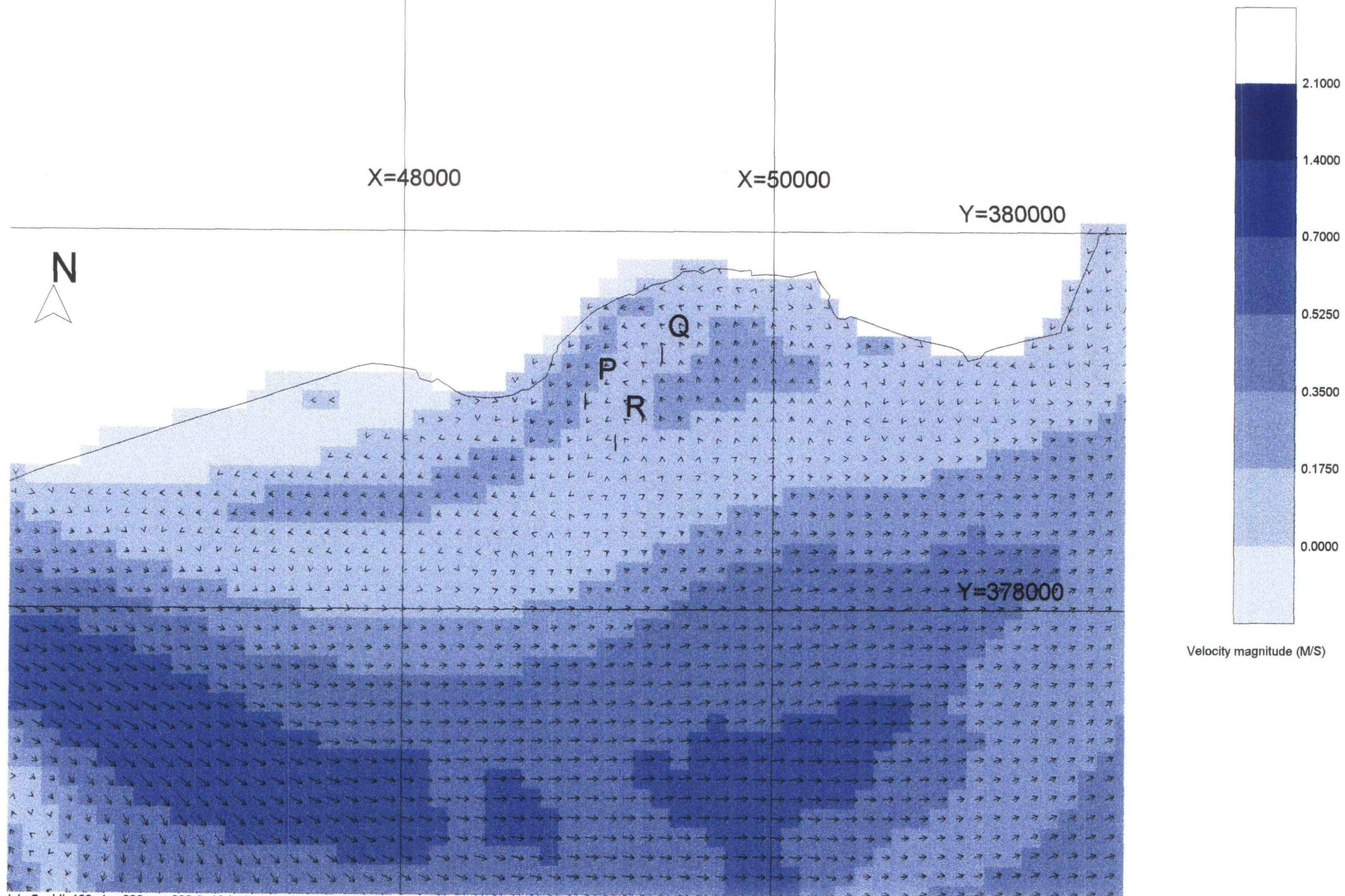


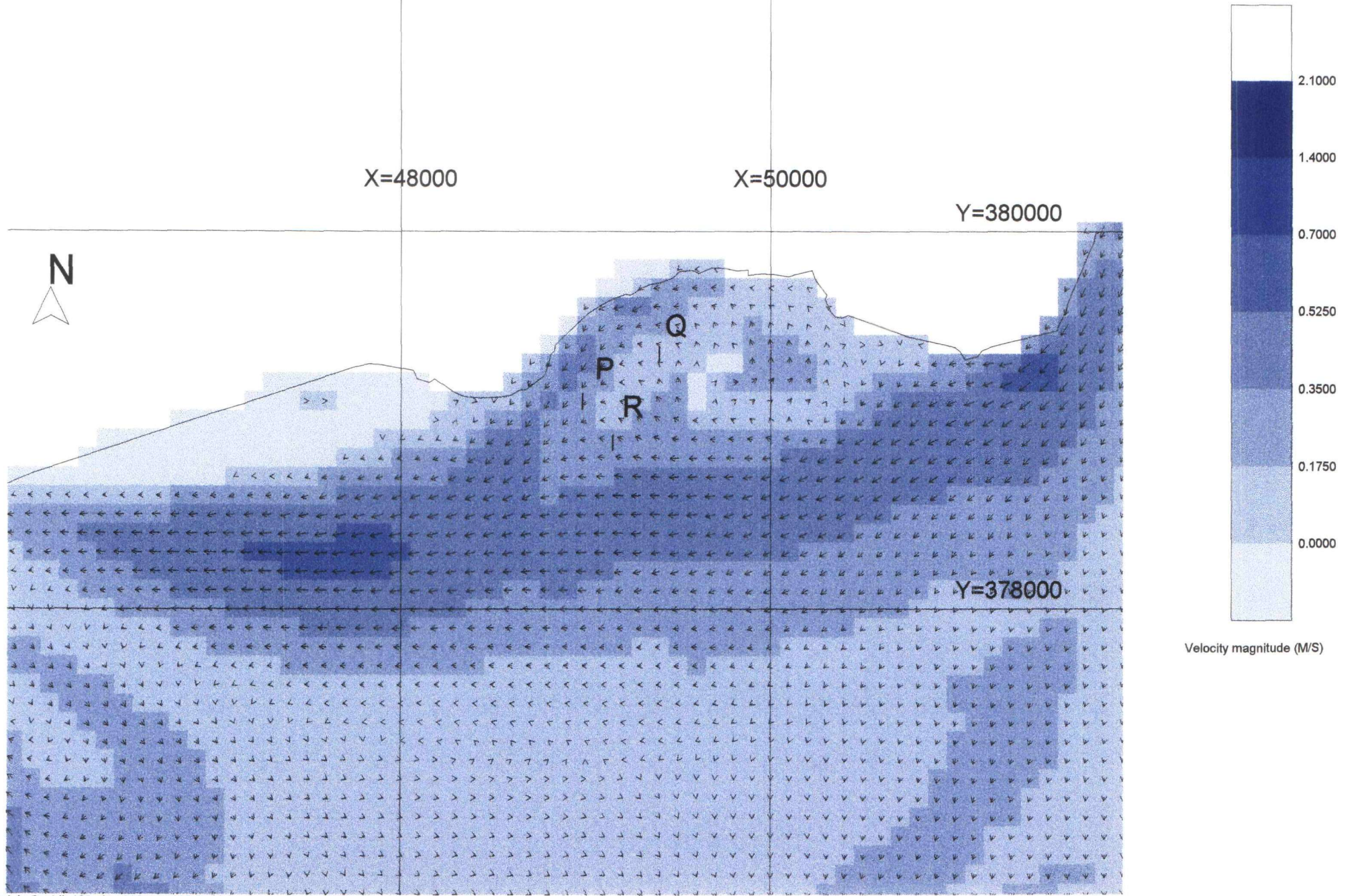


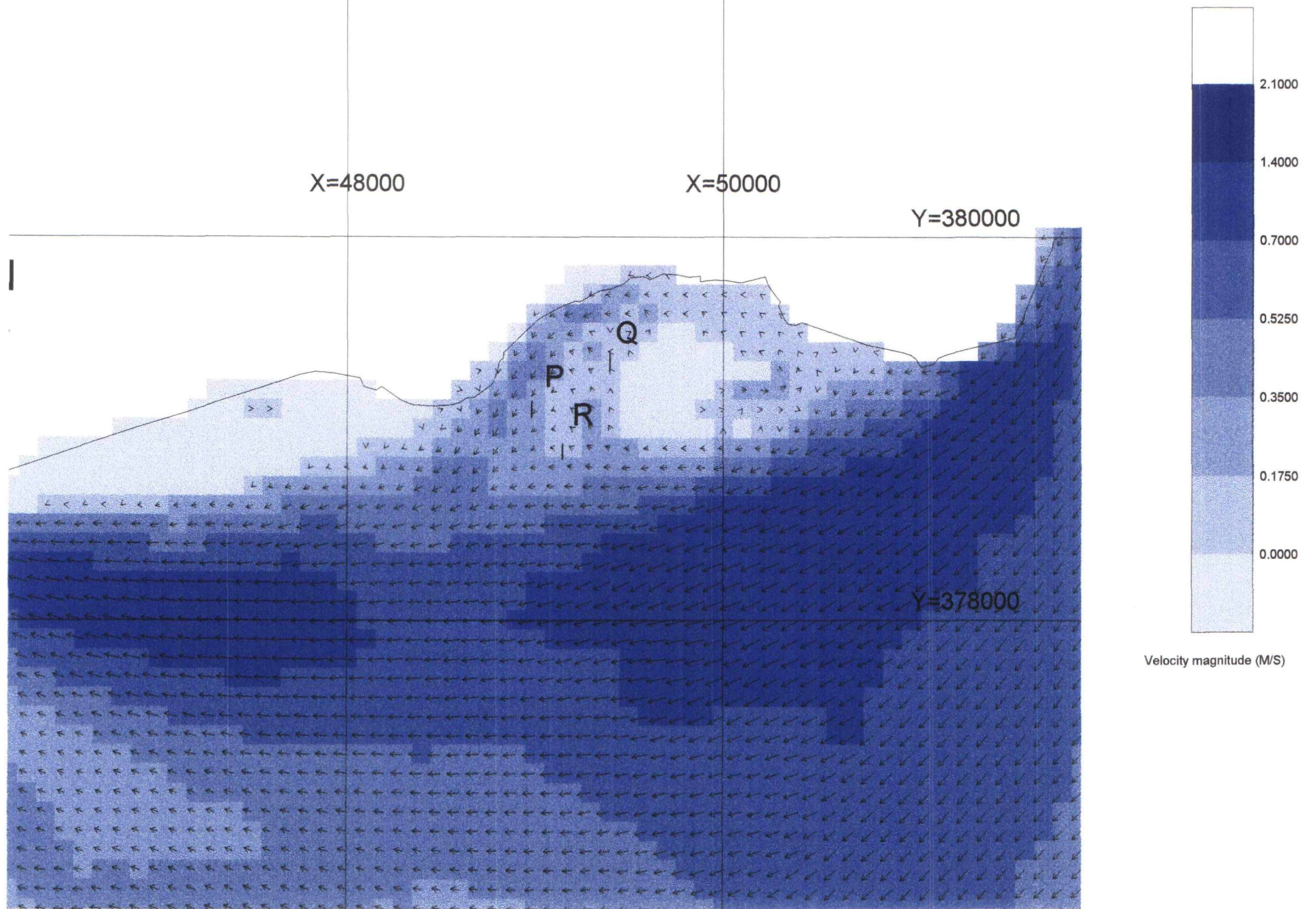


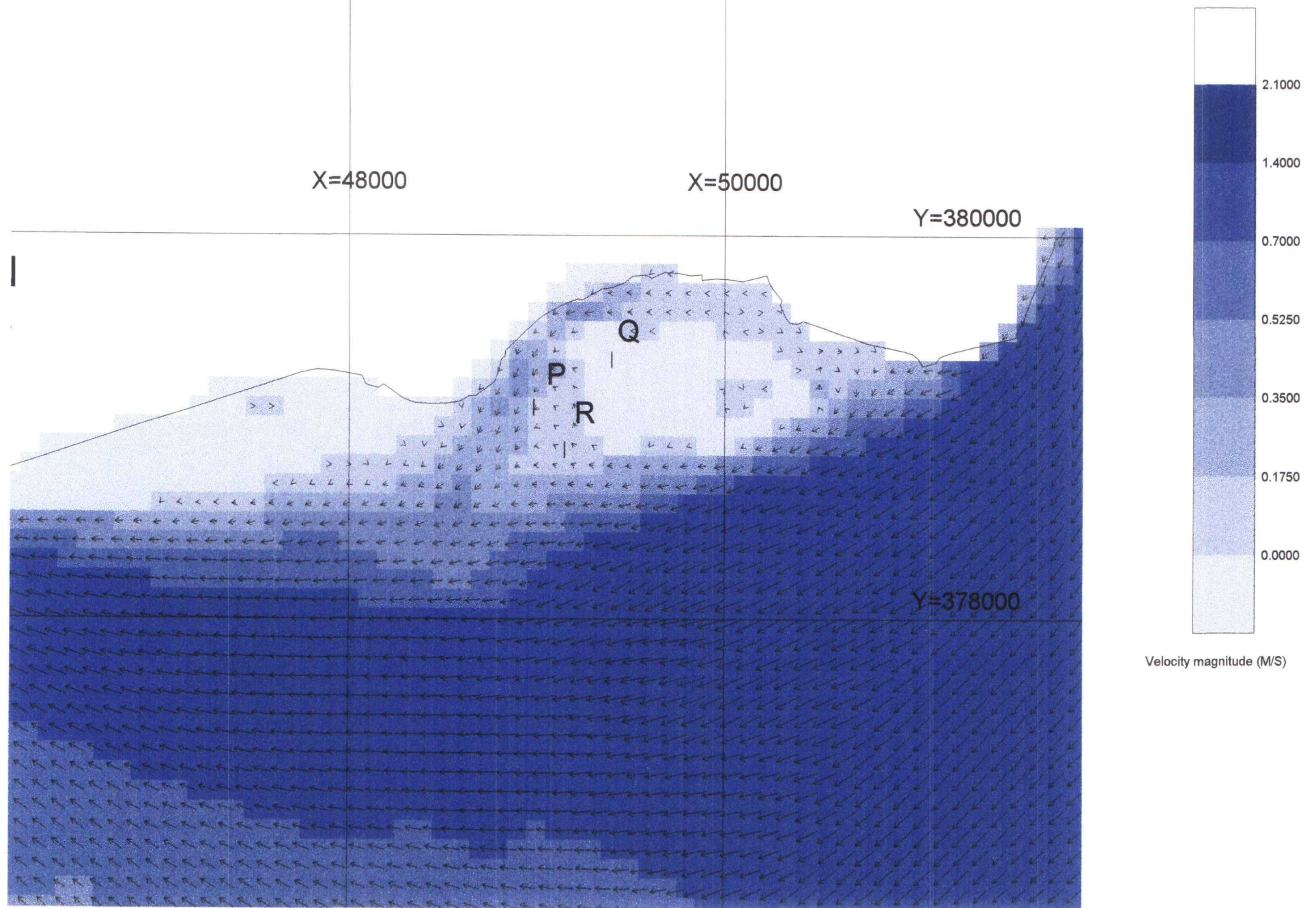


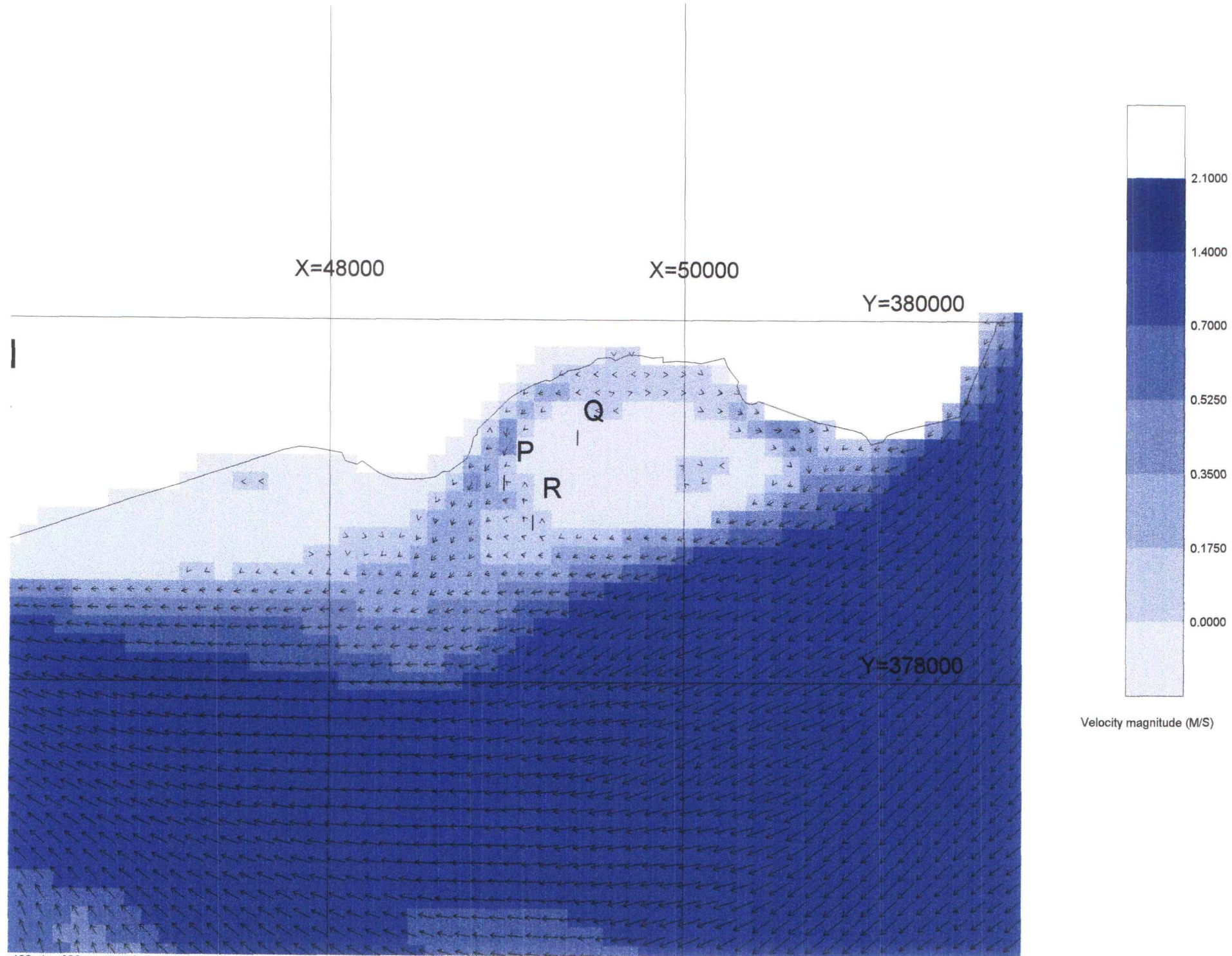


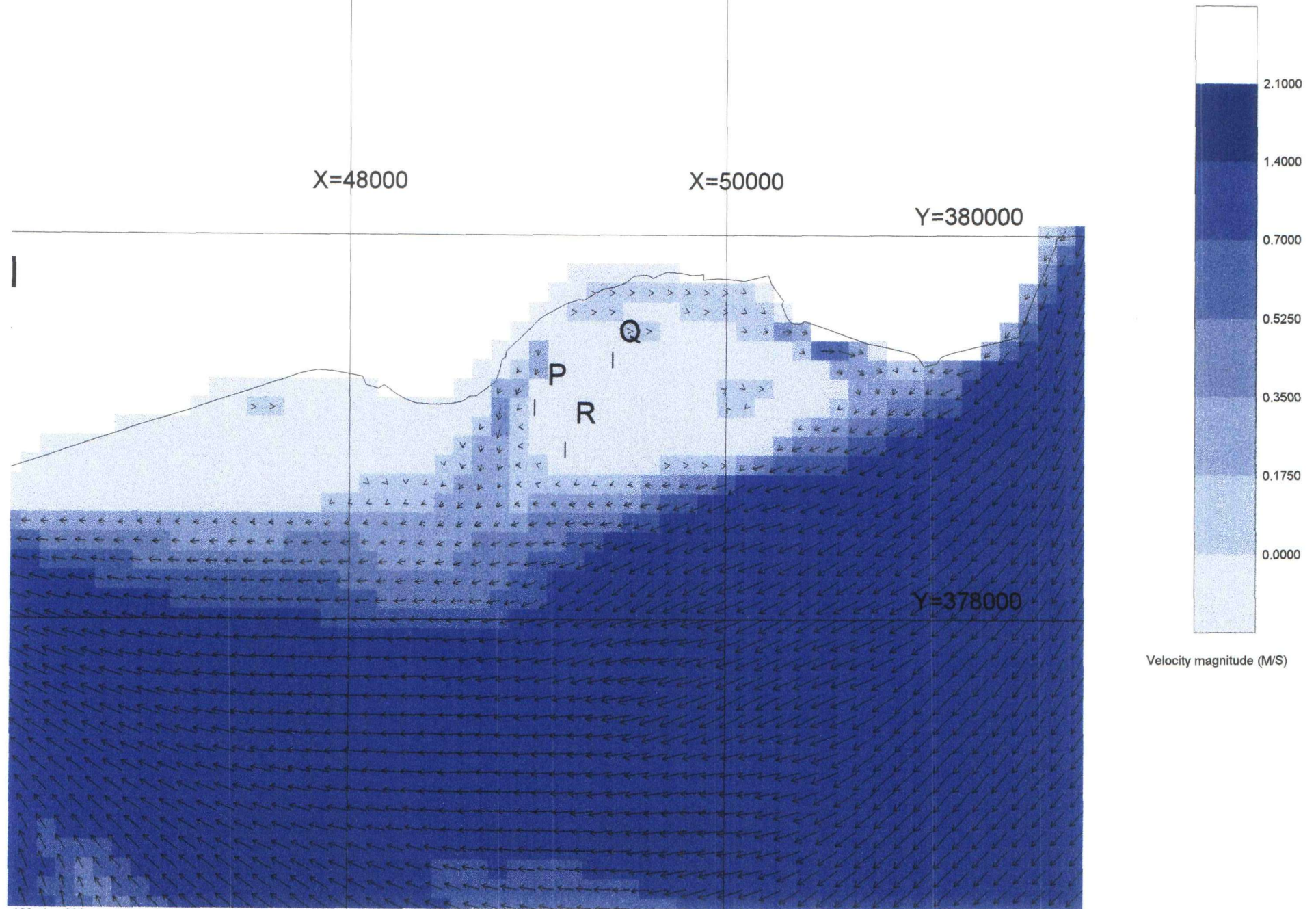


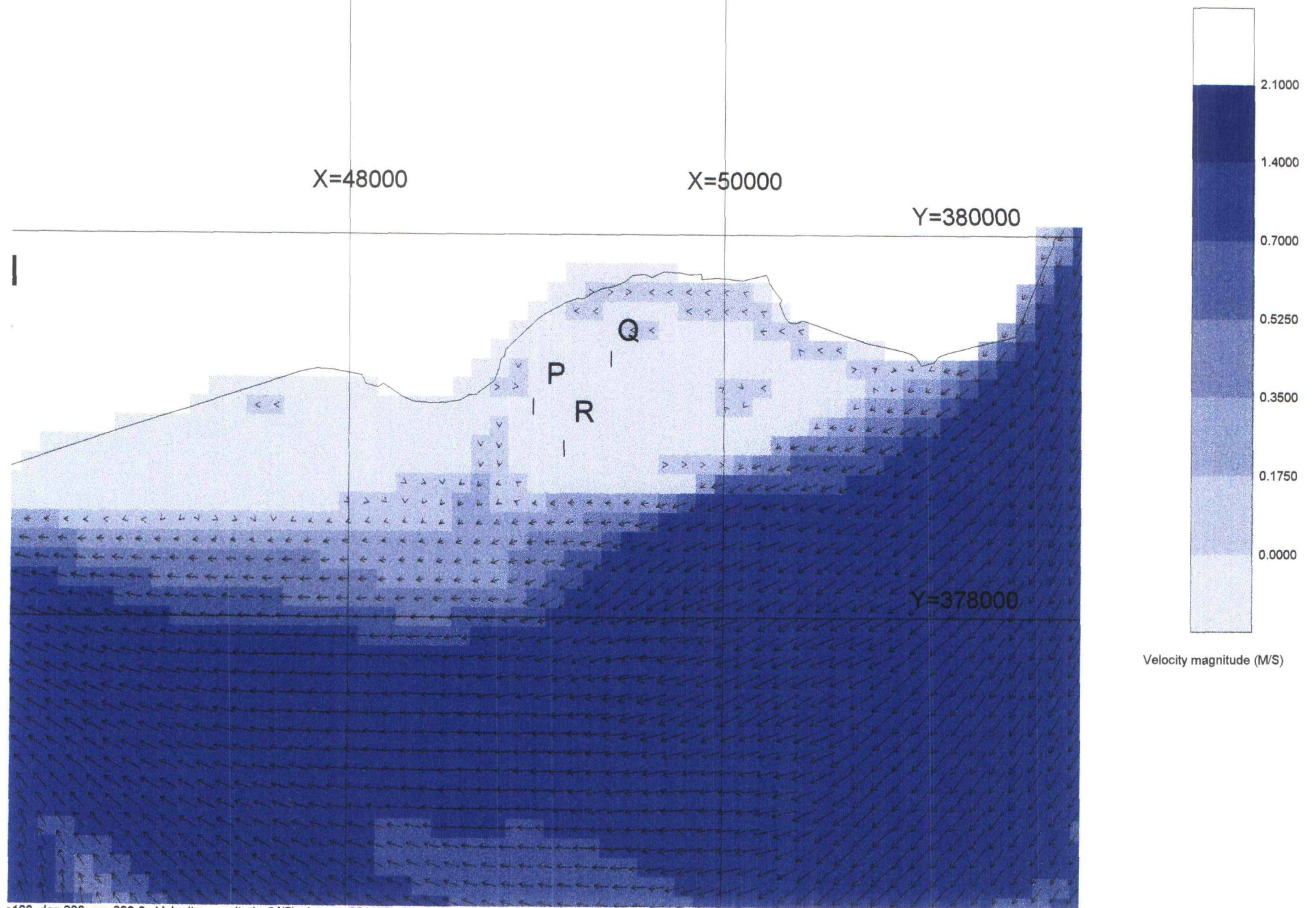


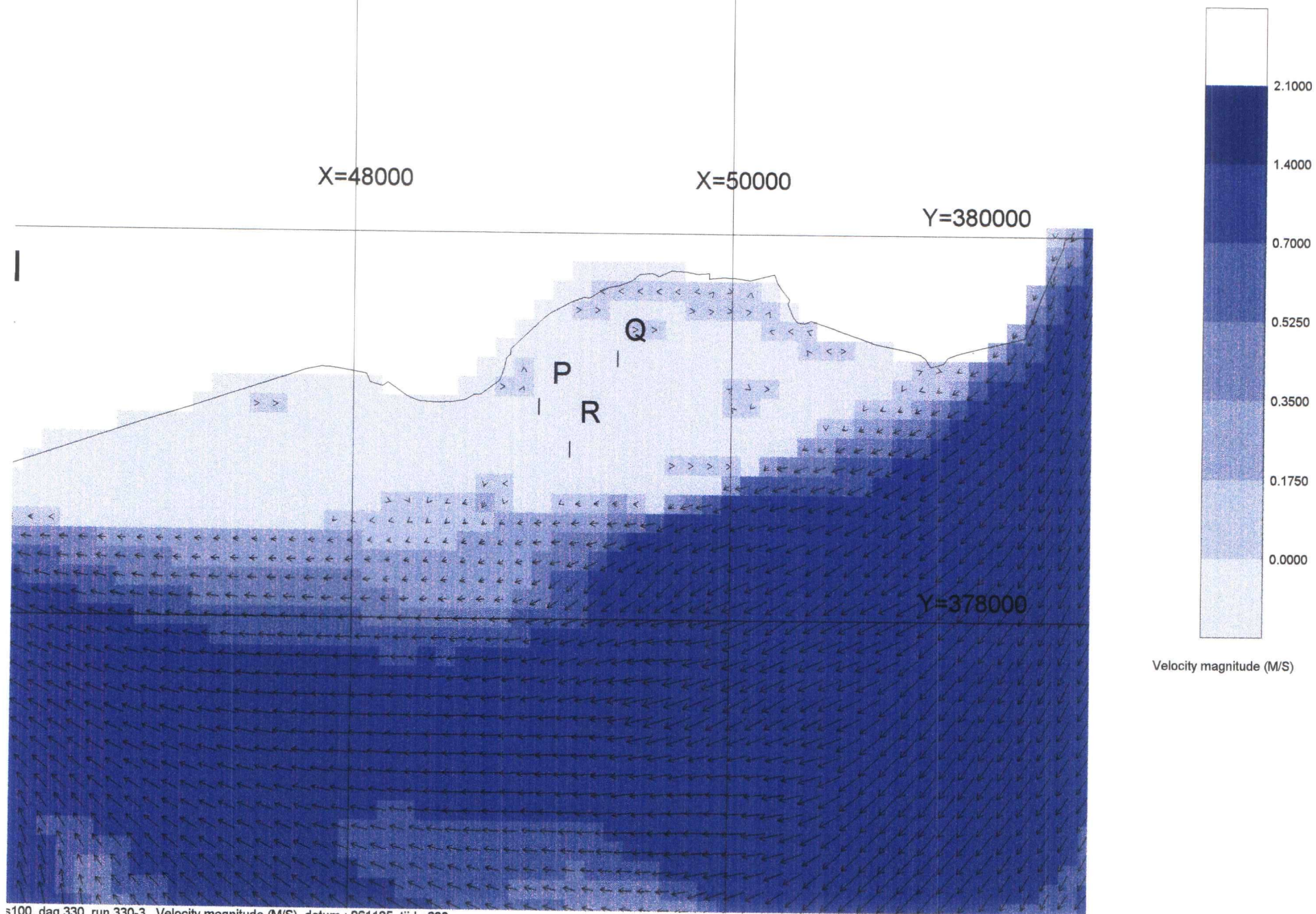




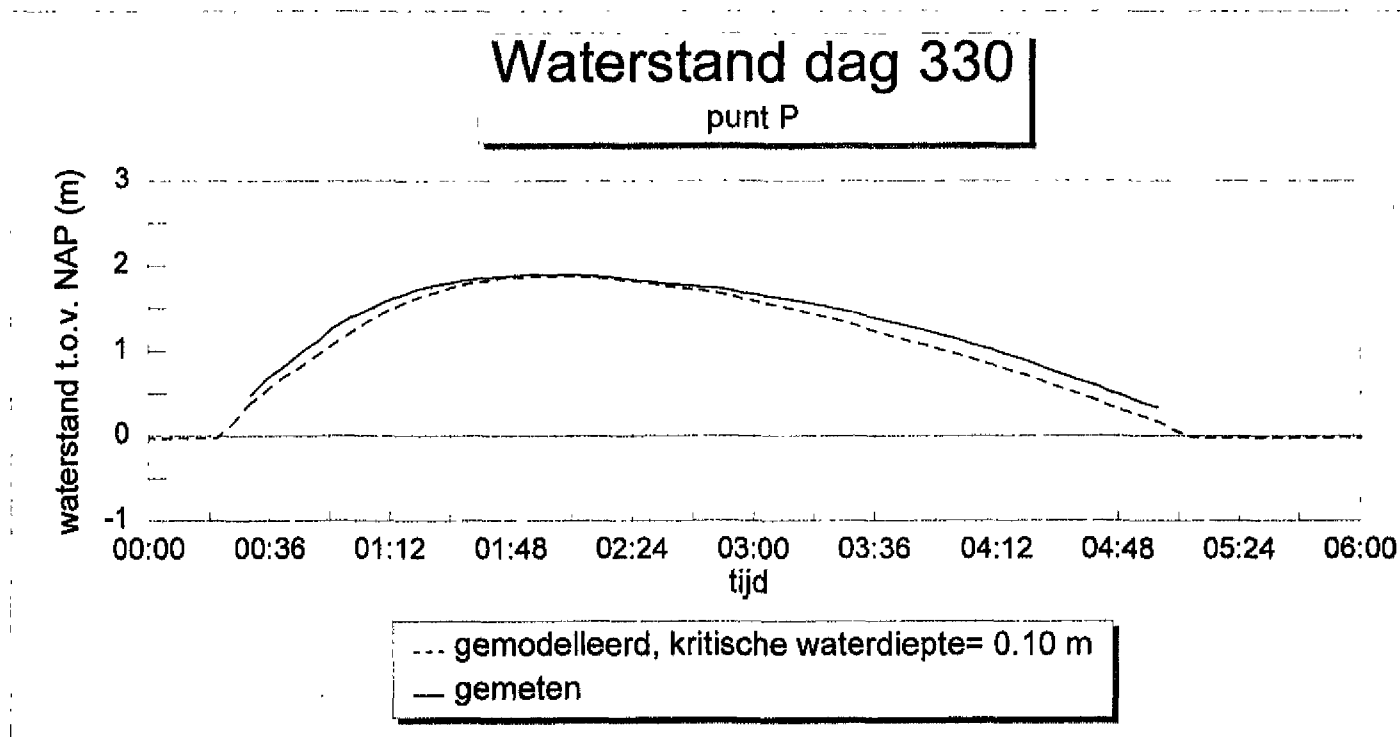




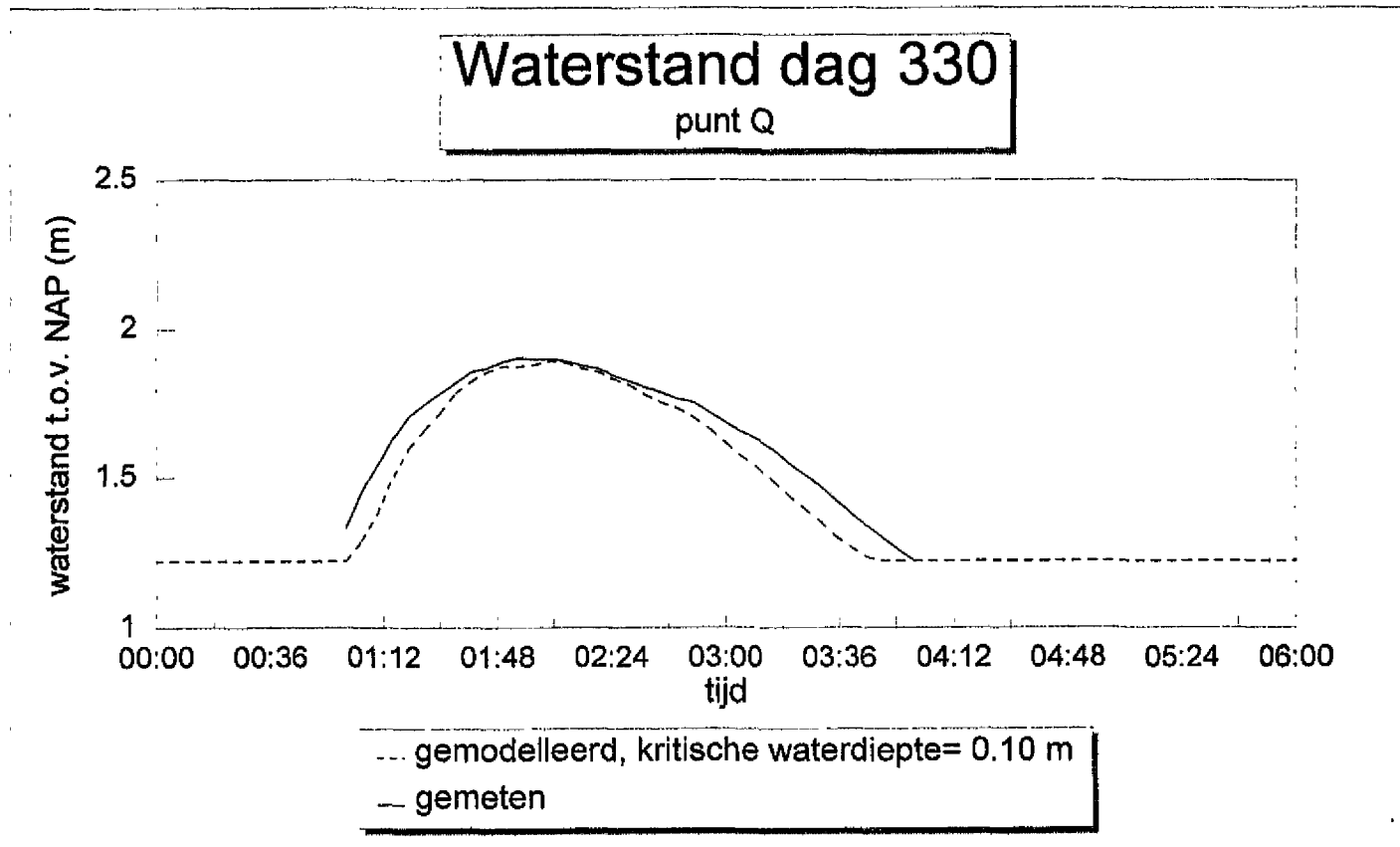




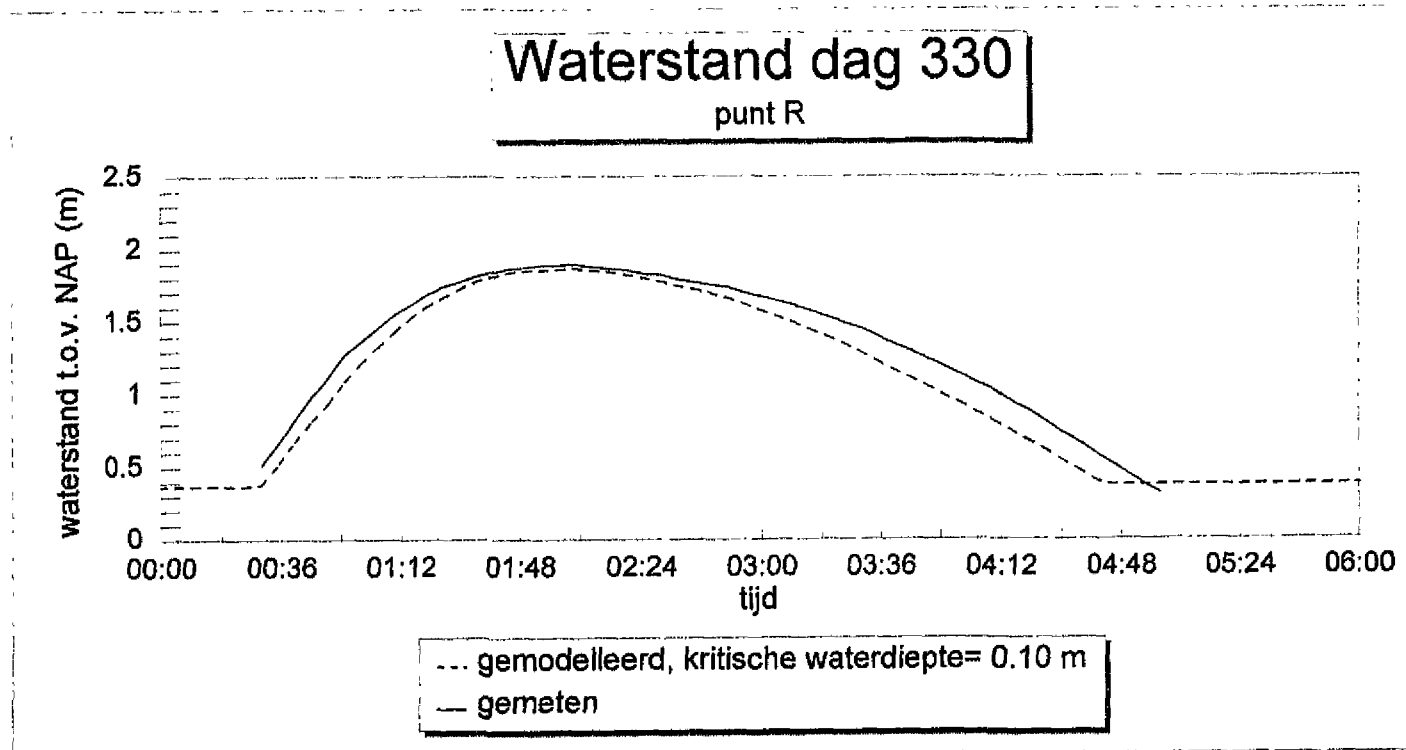
Bijlage 15: Vergelijking gemodelleerde waterstand (kritische waterdiepte van 0.10 m) en gemeten waterstand op punt P.



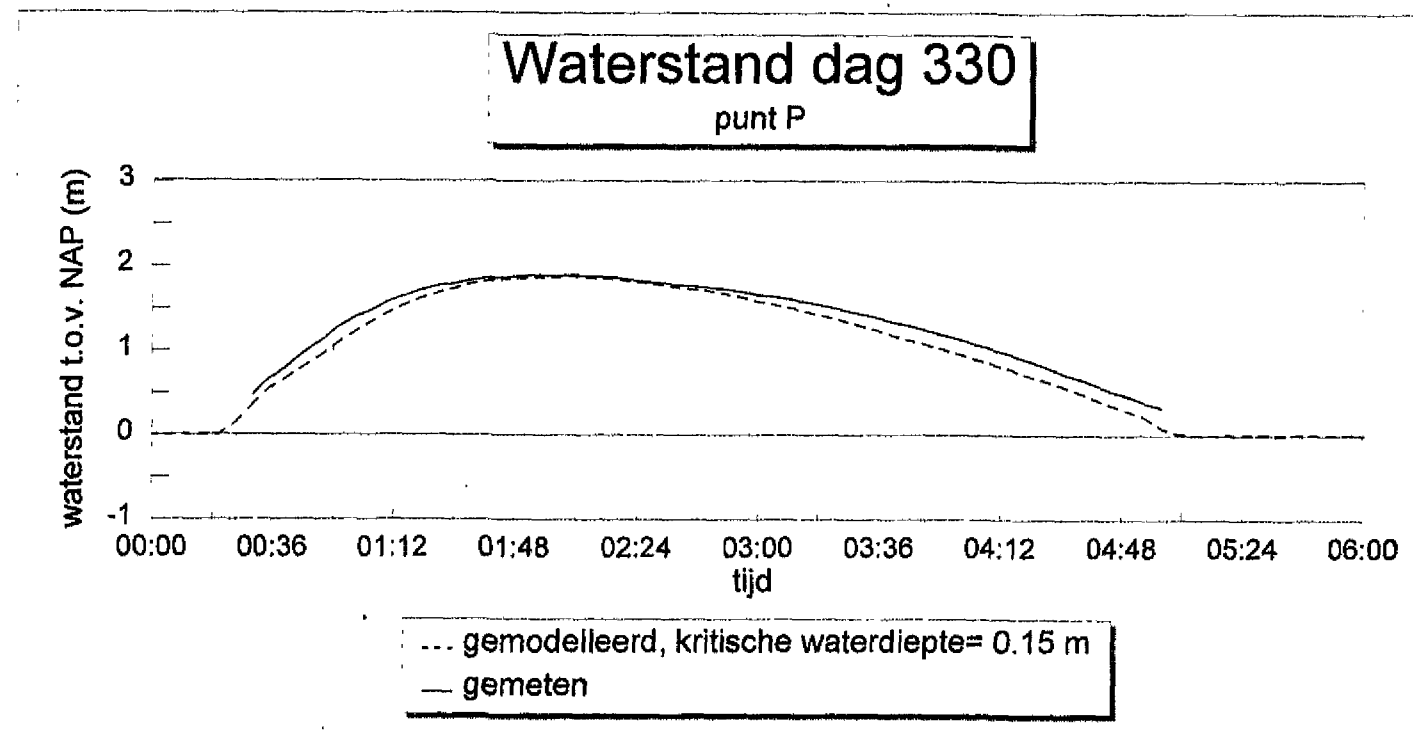
Bijlage 16: Vergelijking gemodelleerde waterstand (kritische waterdiepte van 0.10 m) en gemeten waterstand op punt Q.



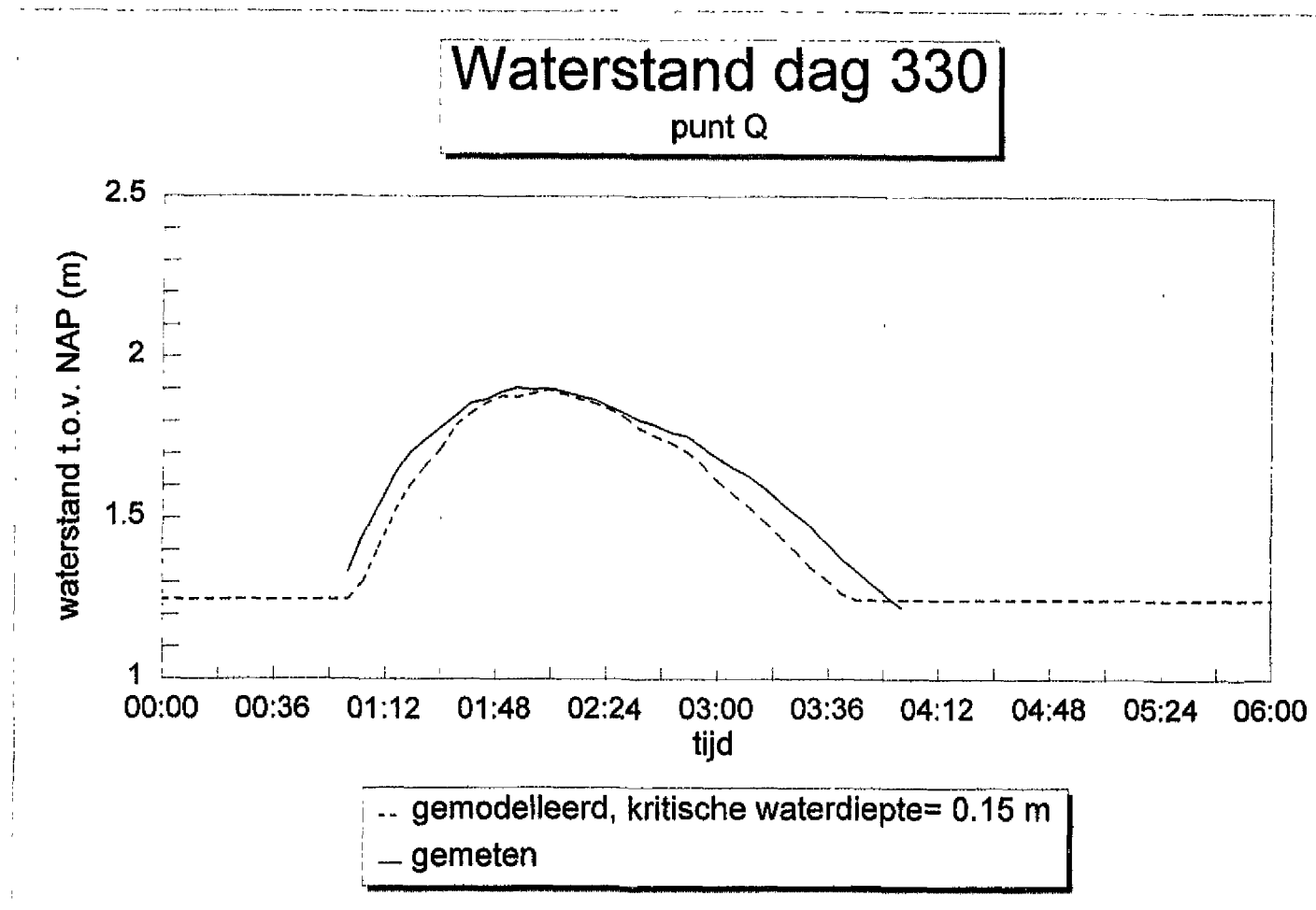
Bijlage 17: Vergelijking gemodelleerde waterstand (kritische waterdiepte van 0.10 m) en gemeten waterstand op punt R.



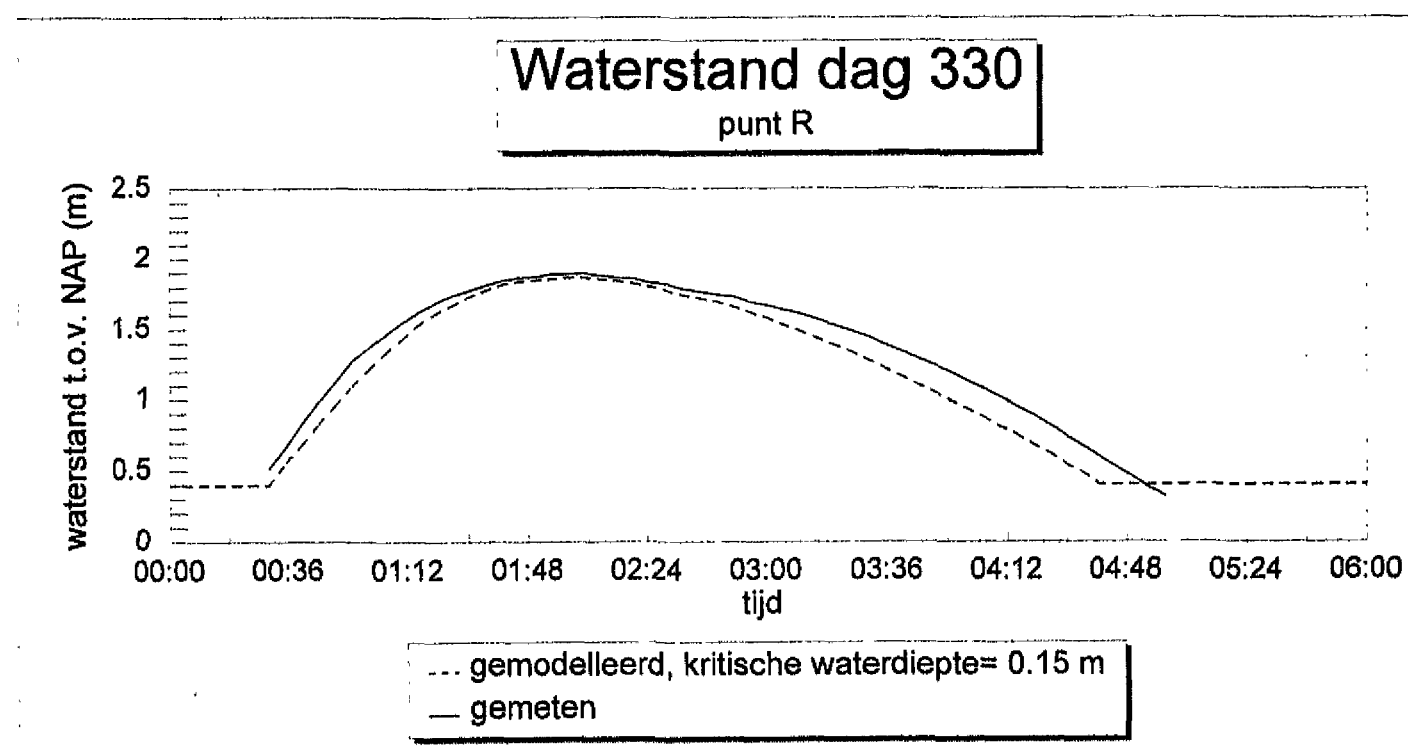
Bijlage 18: Vergelijking gemodelleerde waterstand (kritische waterdiepte van 0.15 m) en gemeten waterstanden op punt P.



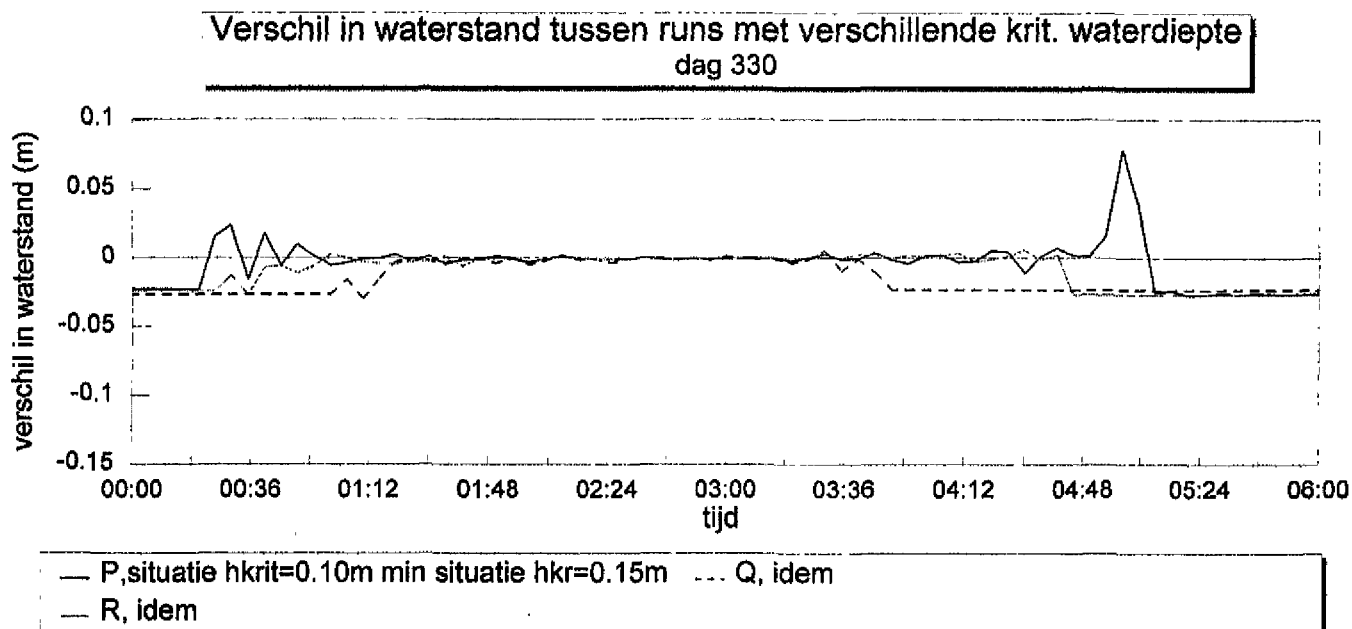
Bijlage 19: Vergelijking gemodelleerde waterstand (kritische waterdiepte van 0.15 m) en gemeten waterstanden op punt Q.



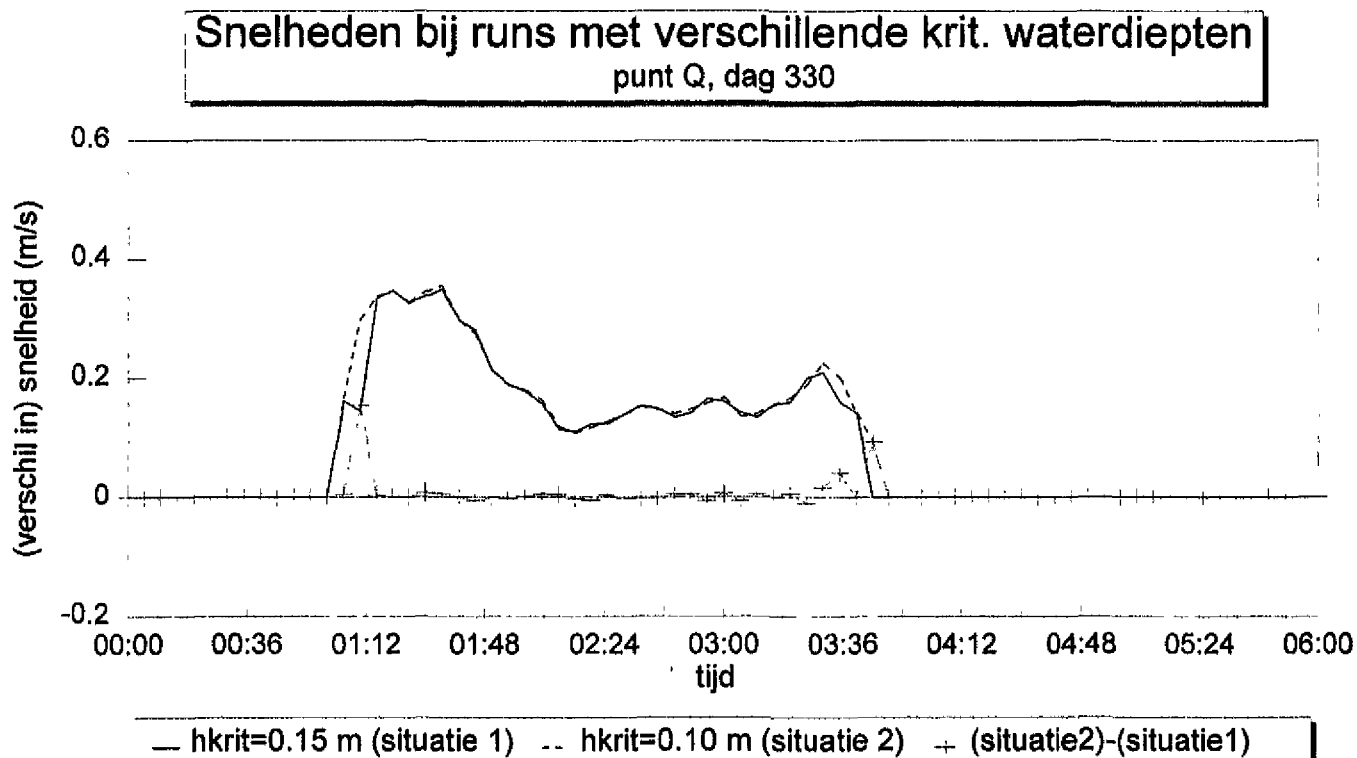
Bijlage 20: Vergelijking gemodelleerde waterstand (kritische waterdiepte van 0.15 m) en gemeten waterstanden op punt R.



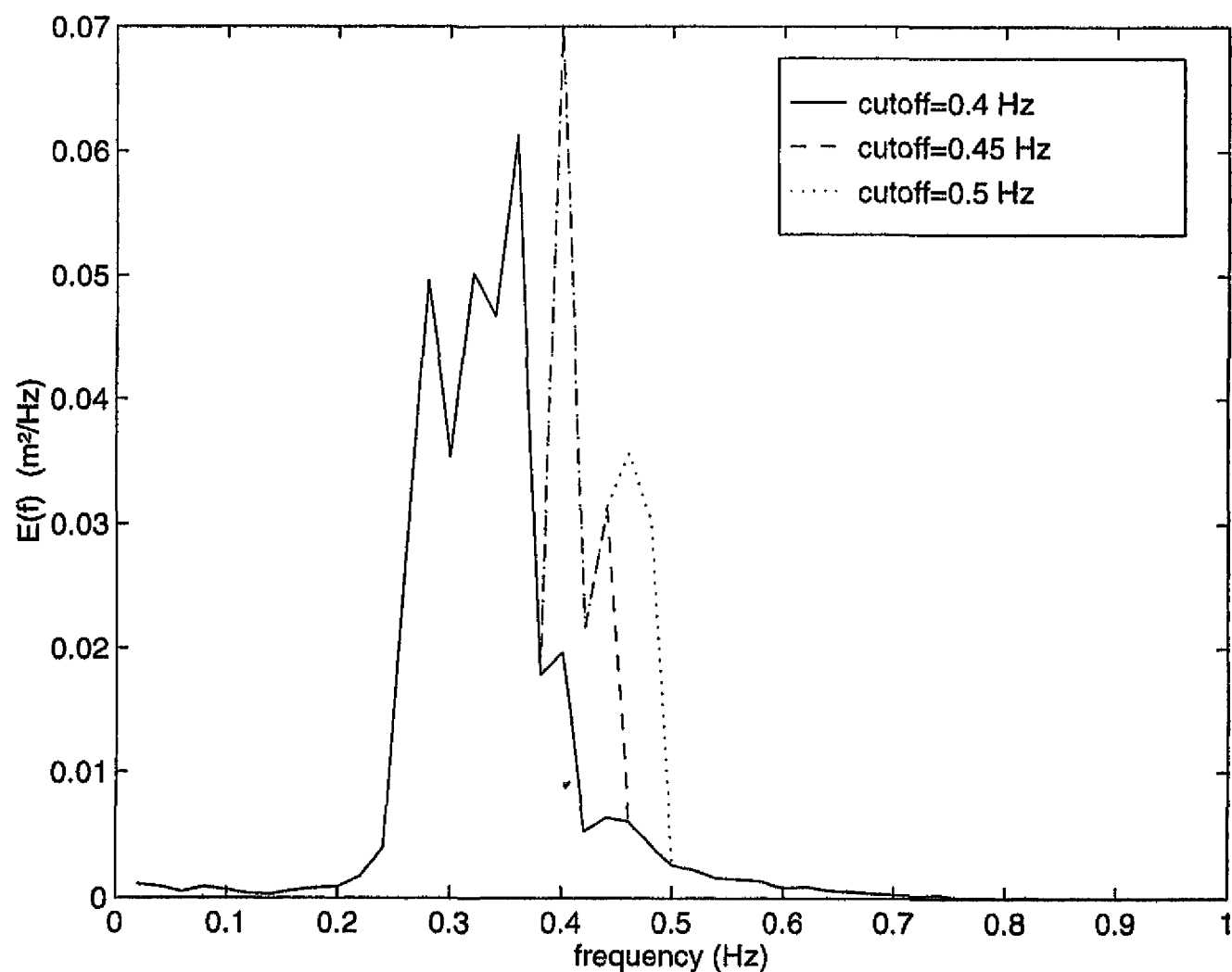
Bijlage 21: Vergelijking gemodelleerde waterstanden bij verschillende kritische waterdieptes (runs 330-3 en 330-4).



Bijlage 22: Vergelijking gemodelleerde stroomsnelheden bij verschillende kritische waterdieptes (runs 330-3 en 330-4).



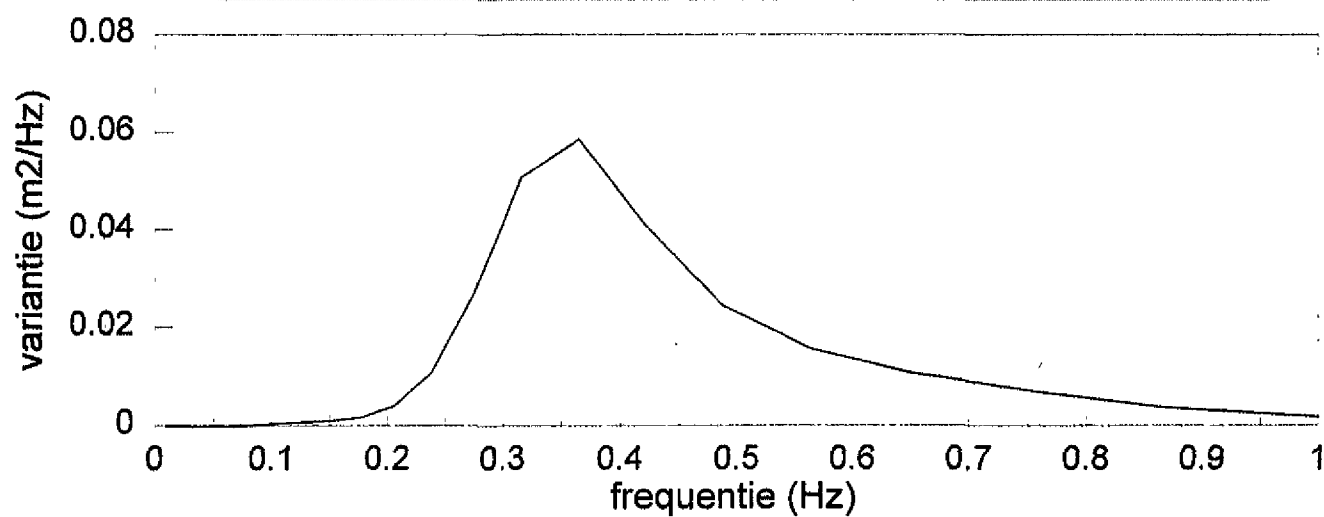
Bijlage 23: Golfspectrum op basis van metingen op punt P, 1:30 uur.



Bijlage 24: Golfspectrum uit SWAN-run op punt P, 1:30 uur.

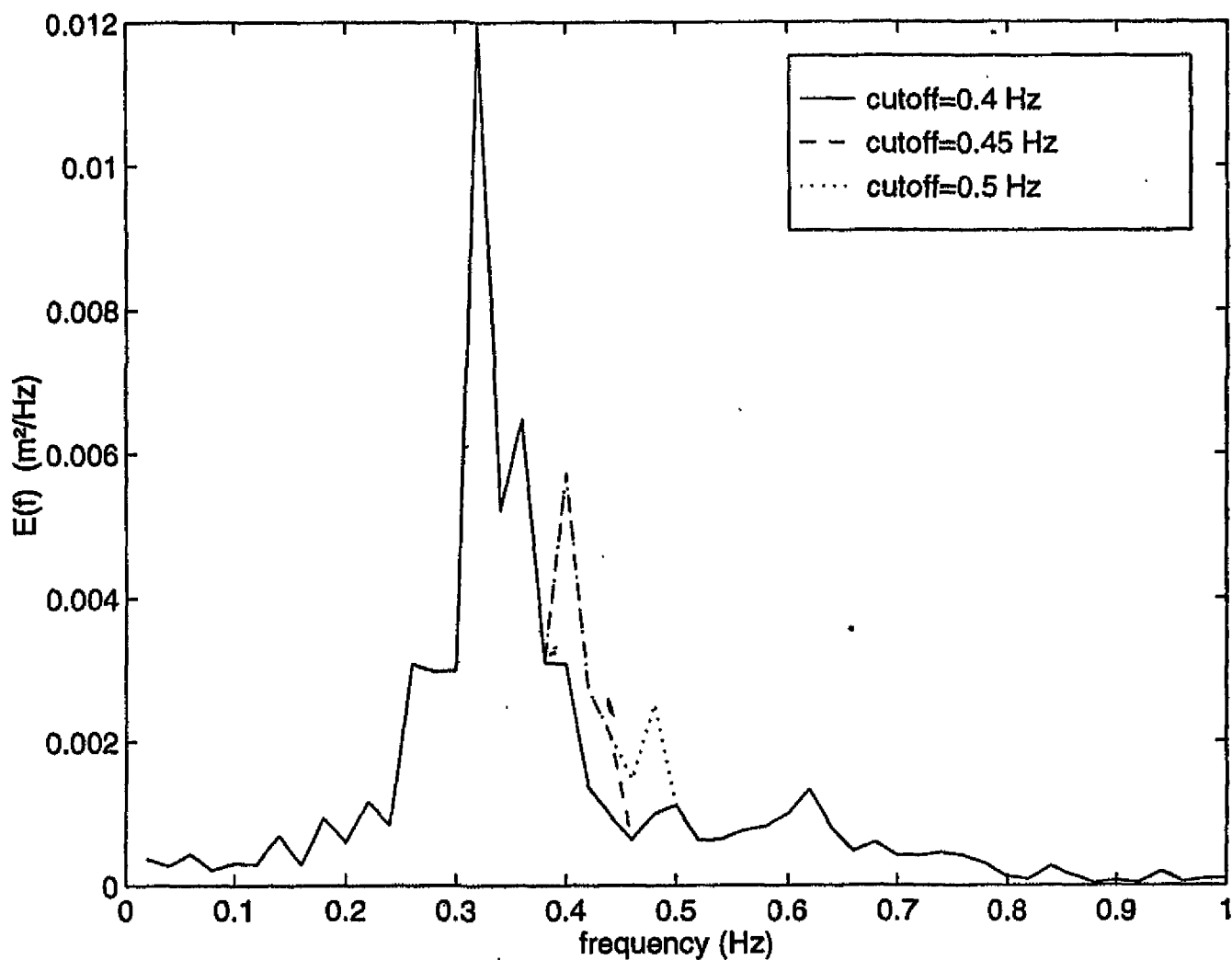
Absolute variantiespectrum punt P

dag 330, 1:30 uur, uit SWAN, nest-run

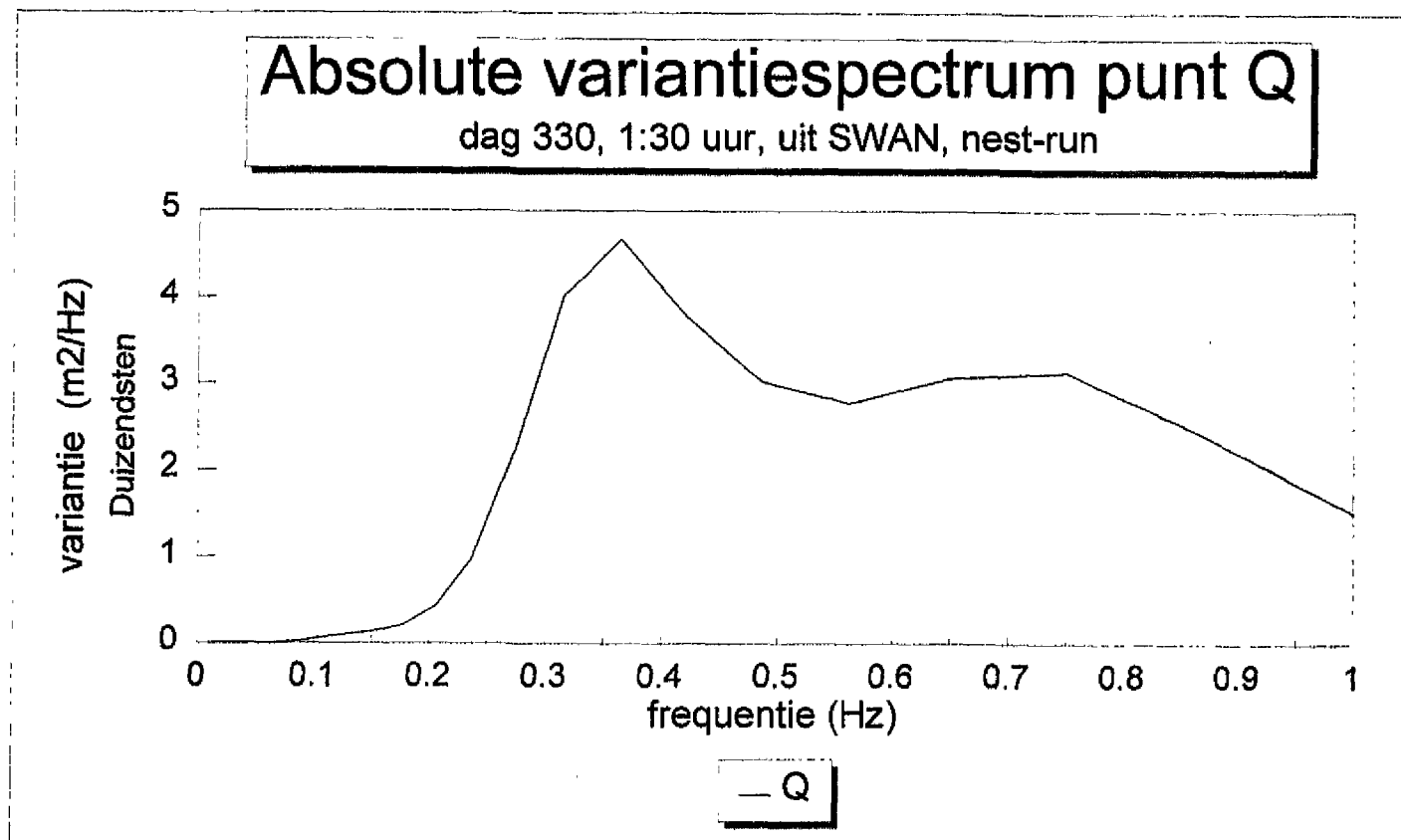


— P

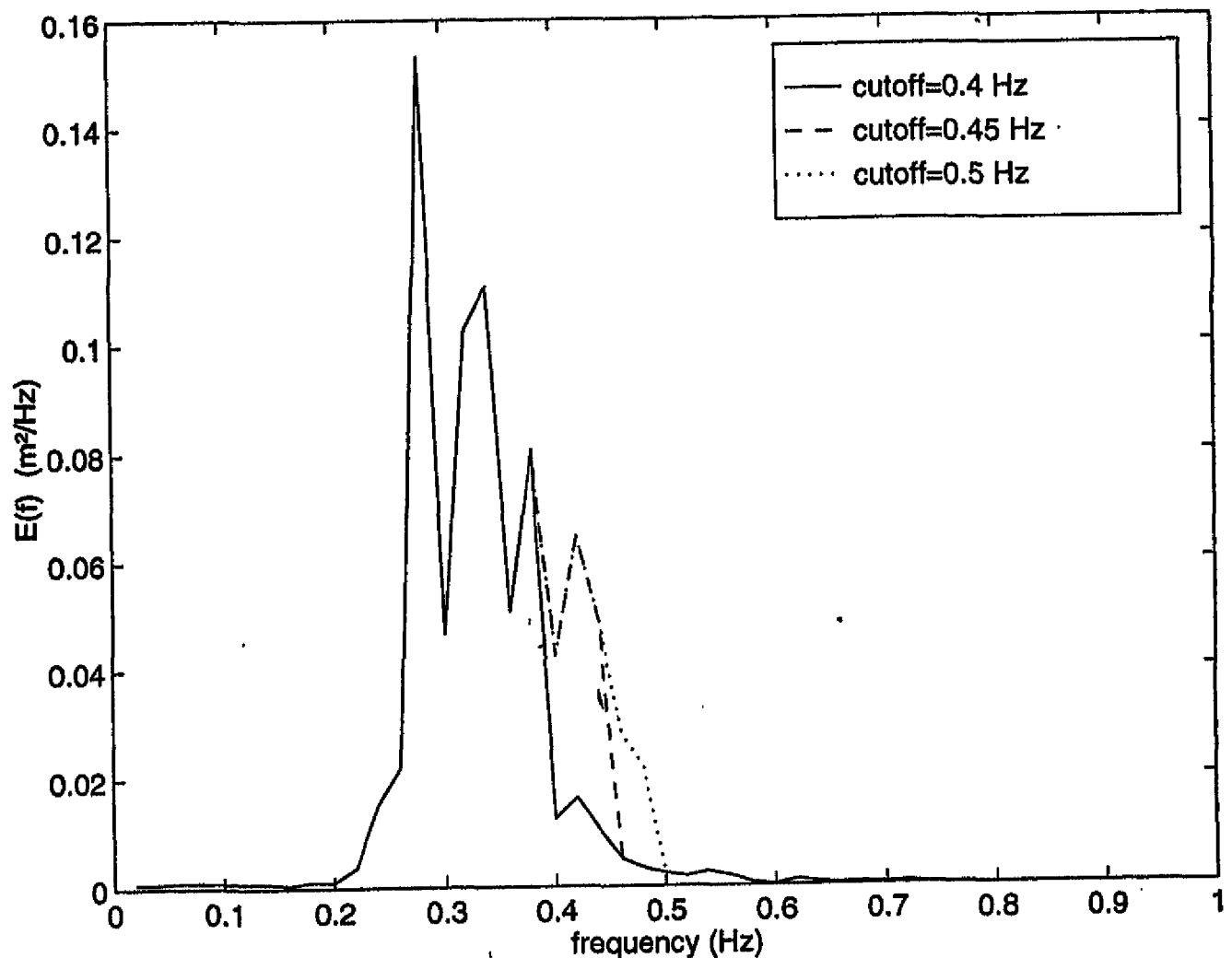
Bijlage 25: Golfspectrum op basis van metingen op punt Q, 1:30 uur.



Bijlage 26: Golfspectrum uit SWAN-run op punt Q, 1:30 uur.



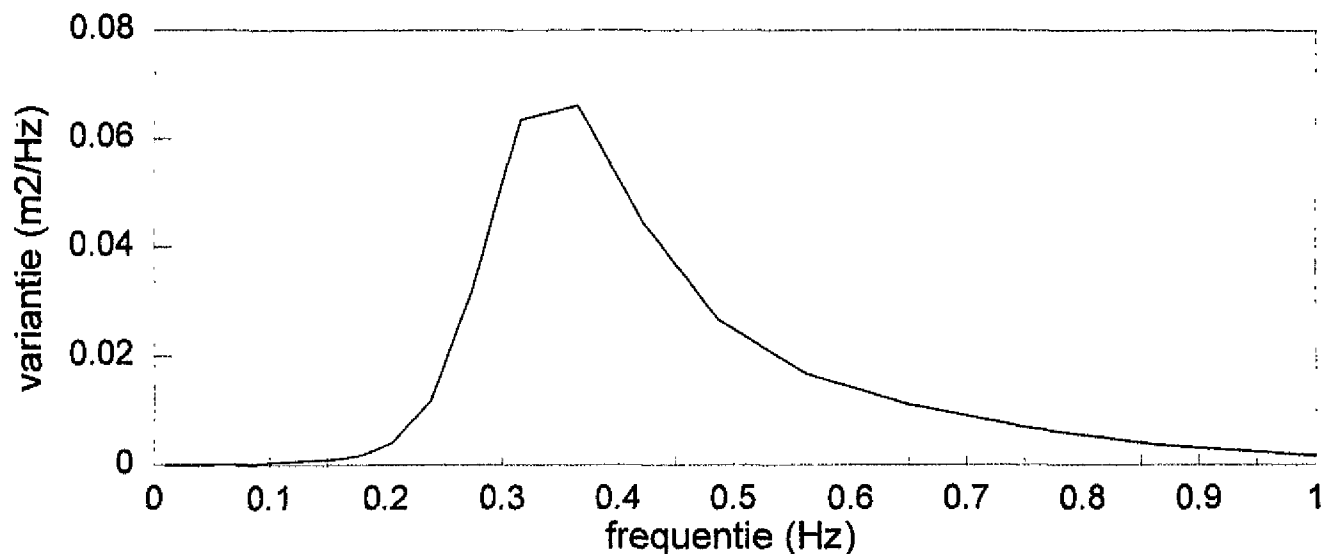
Bijlage 27: Golfspectrum op basis van metingen op punt R, 1:30 uur.



Bijlage 28: Golfspectrum uit SWAN-run op punt R, 1:30 uur.

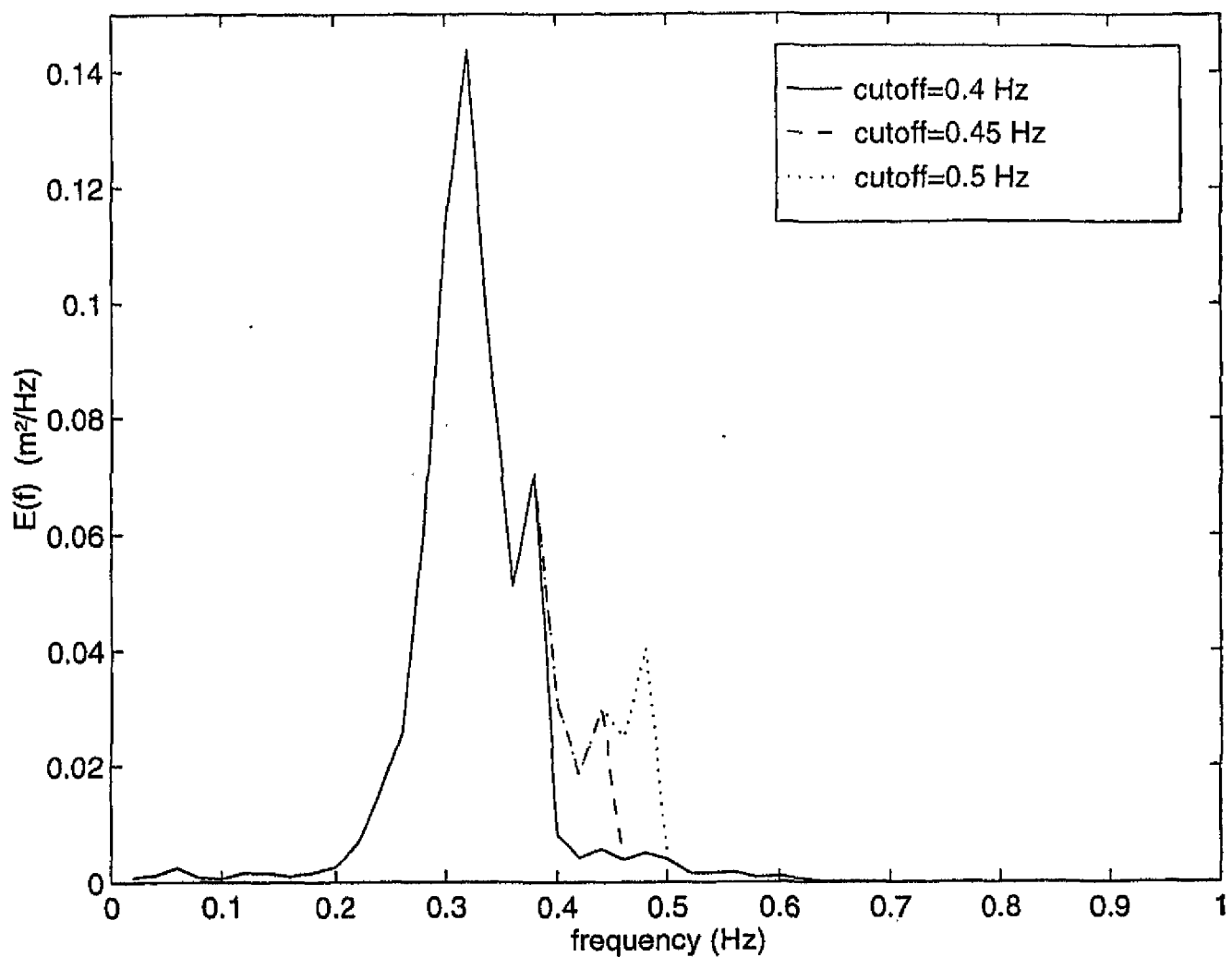
Absolute variantiespectrum punt R

dag 330, 1:30 uur, uit SWAN, nest-run



— R

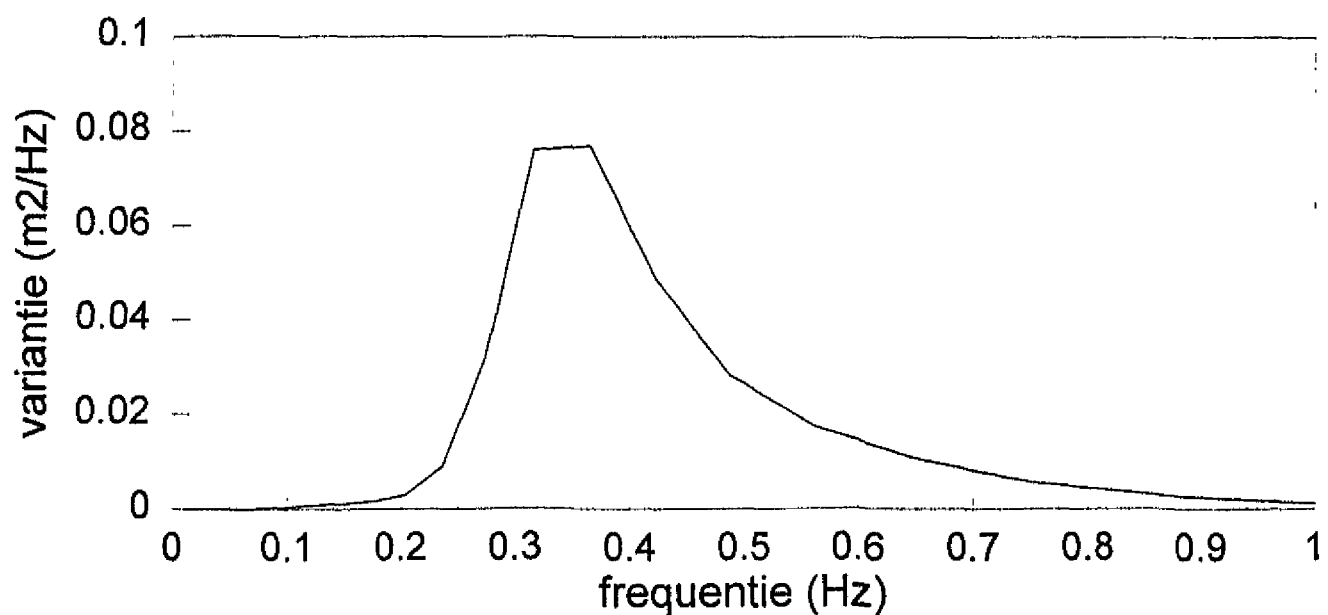
Bijlage 29: Golfspectrum op basis van metingen op punt P, 2:00 uur.



Bijlage 30: Golfspectrum uit SWAN-run op punt P, 2:00 uur.

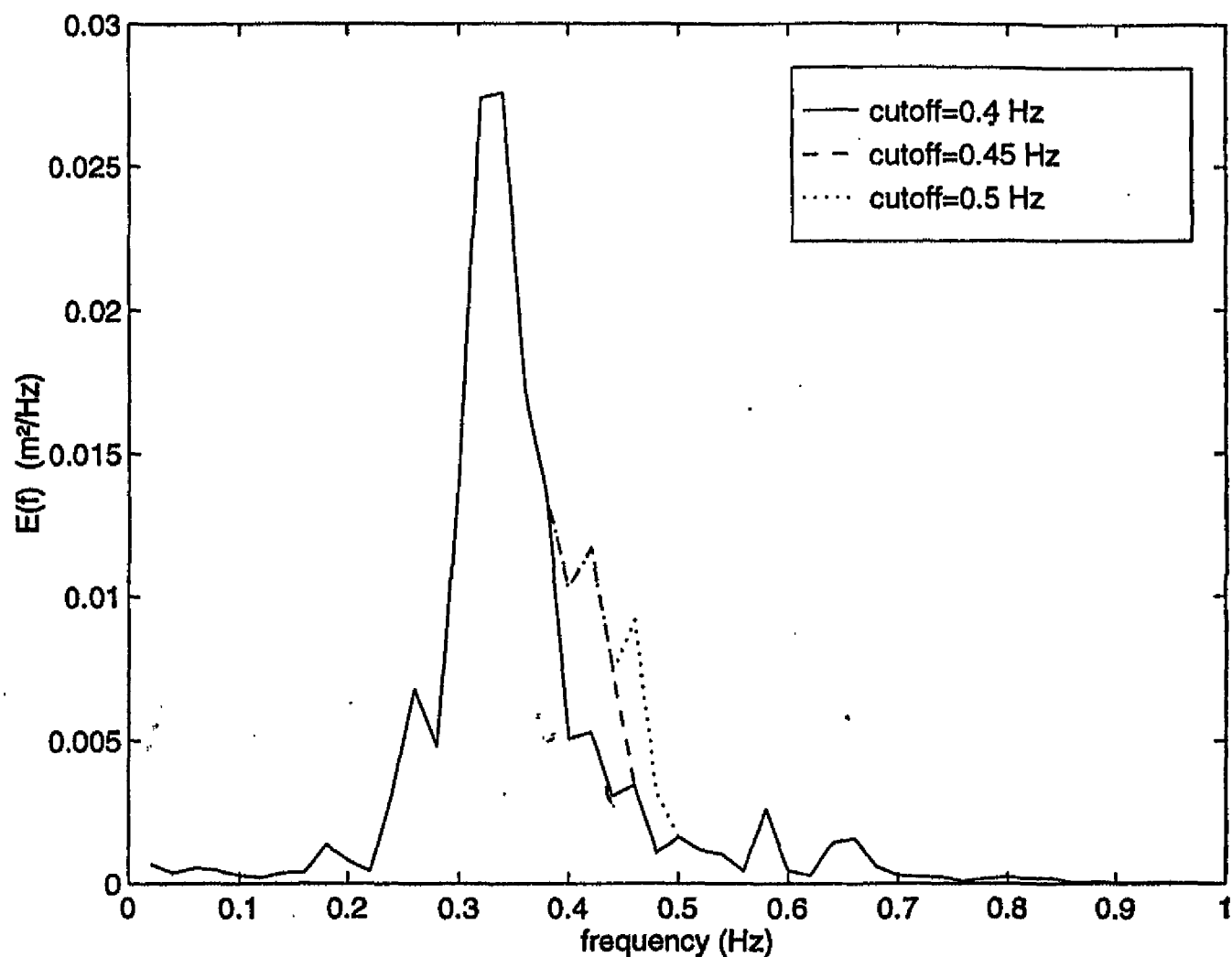
Absolute variantiespectrum punt P

dag 330, 2:00 uur, uit SWAN, nest-run



— P

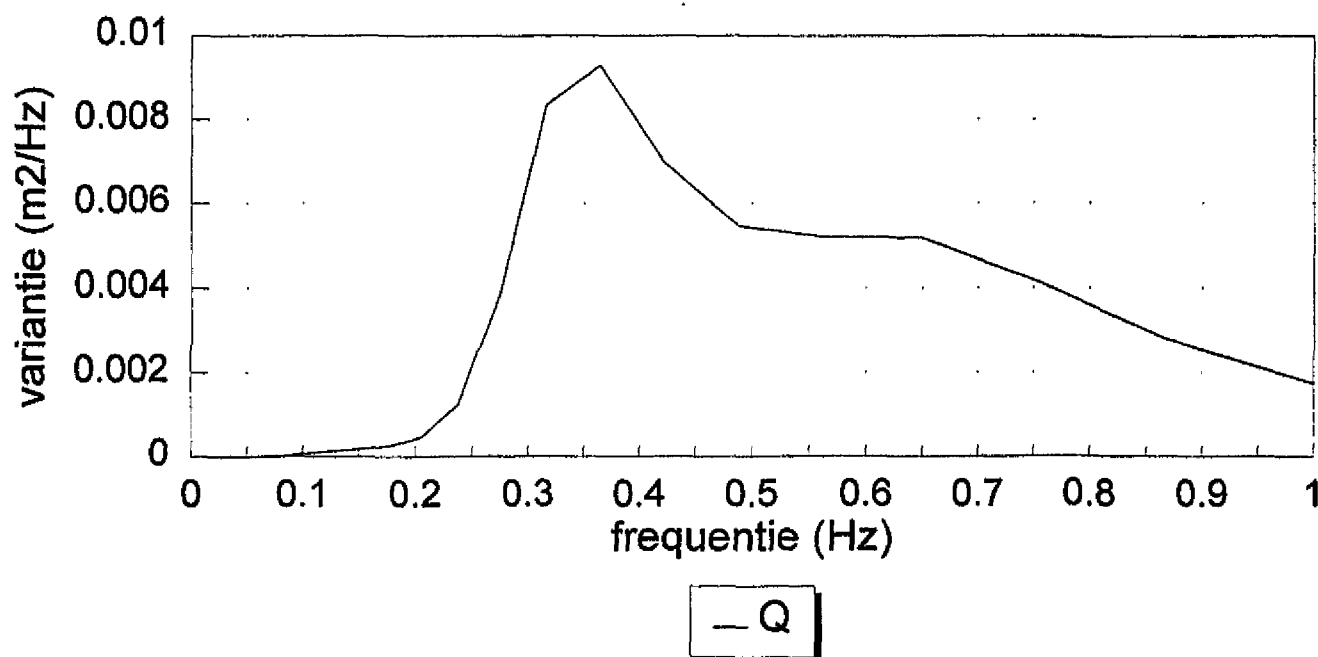
Bijlage 31: Golfspectrum op basis van metingen op punt Q, 2:00 uur.



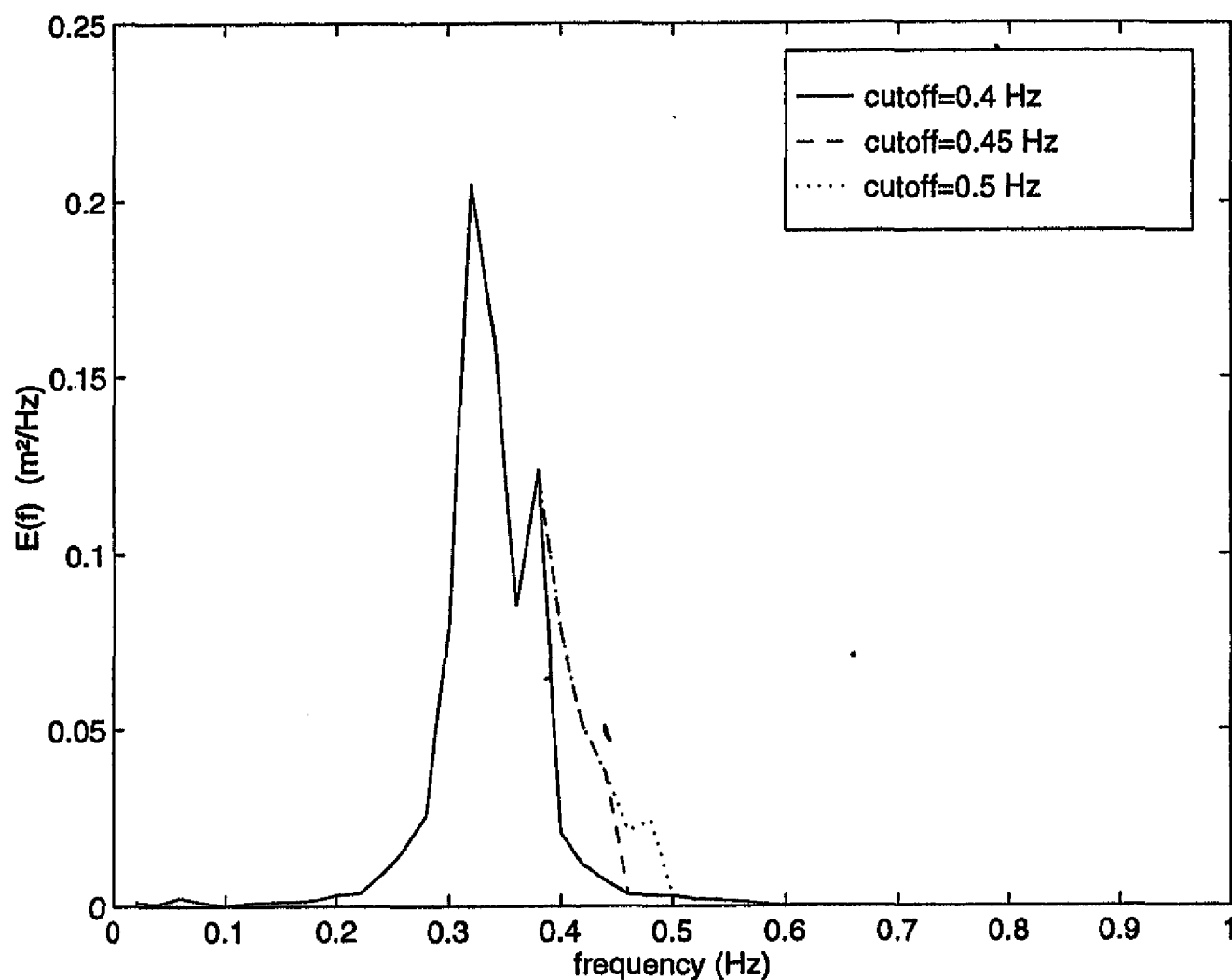
Bijlage 32: Golfspectrum uit SWAN-run op punt Q, 2:00 uur.

Absolute variantiespectrum punt Q

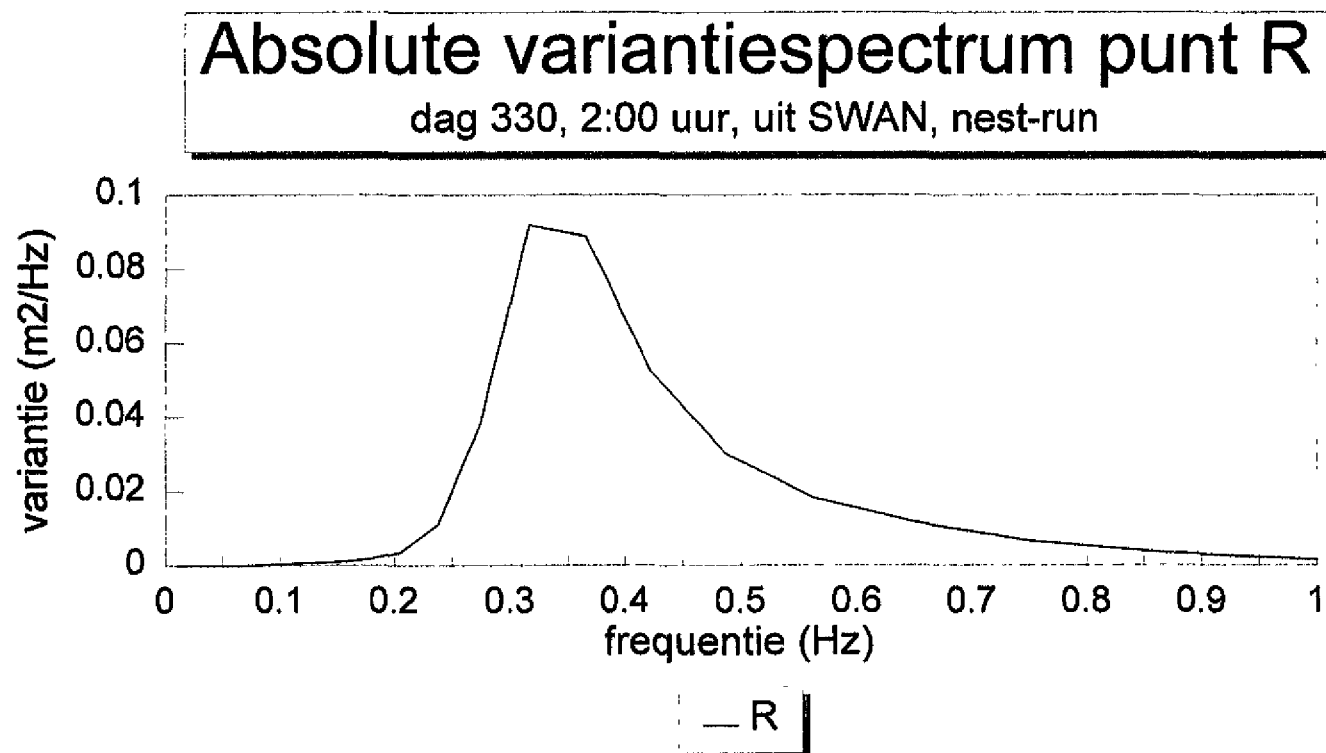
dag 330, 2:00 uur, uit SWAN, nest-run



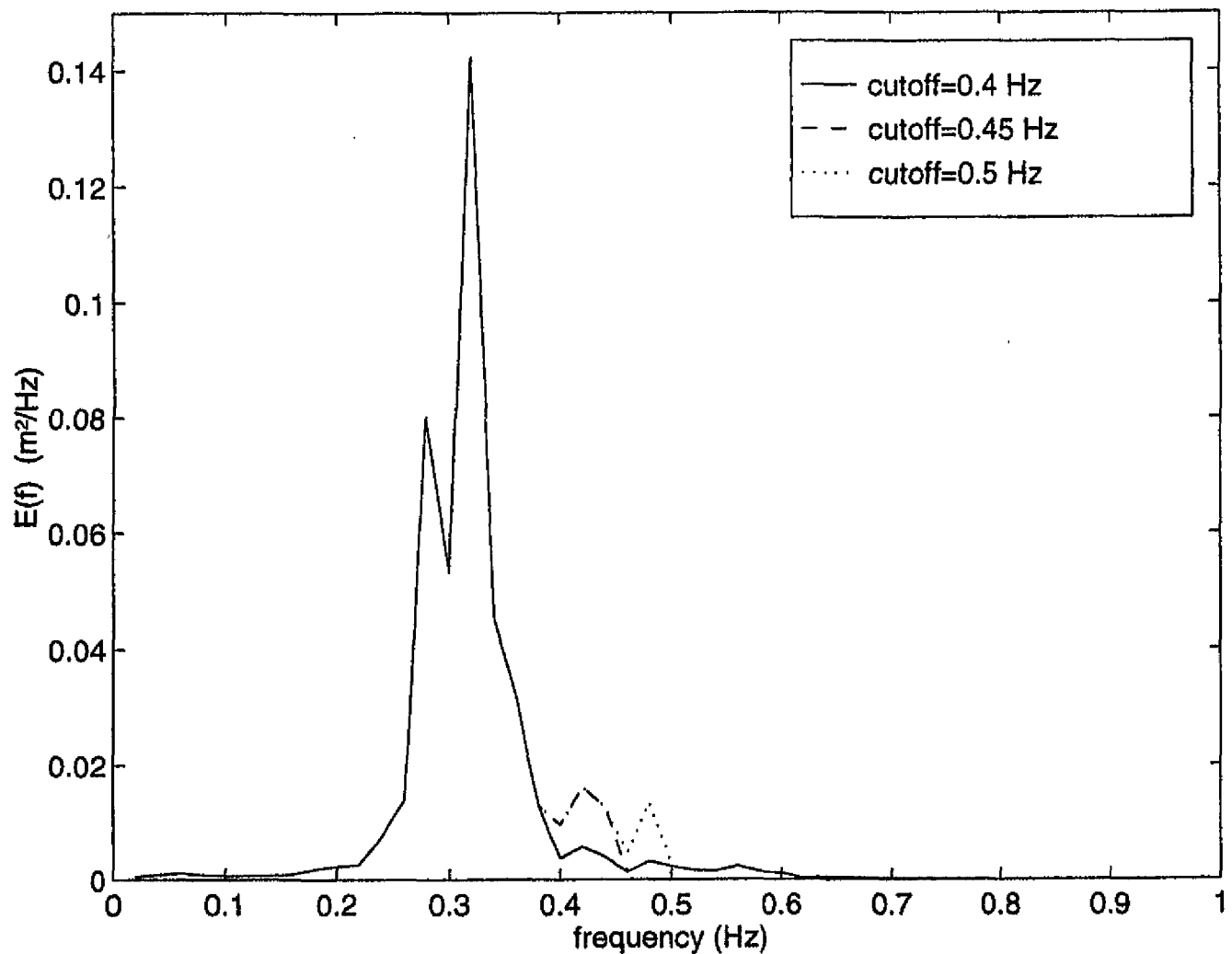
Bijlage 33: Golfspectrum op basis van metingen op punt R, 2:00 uur.



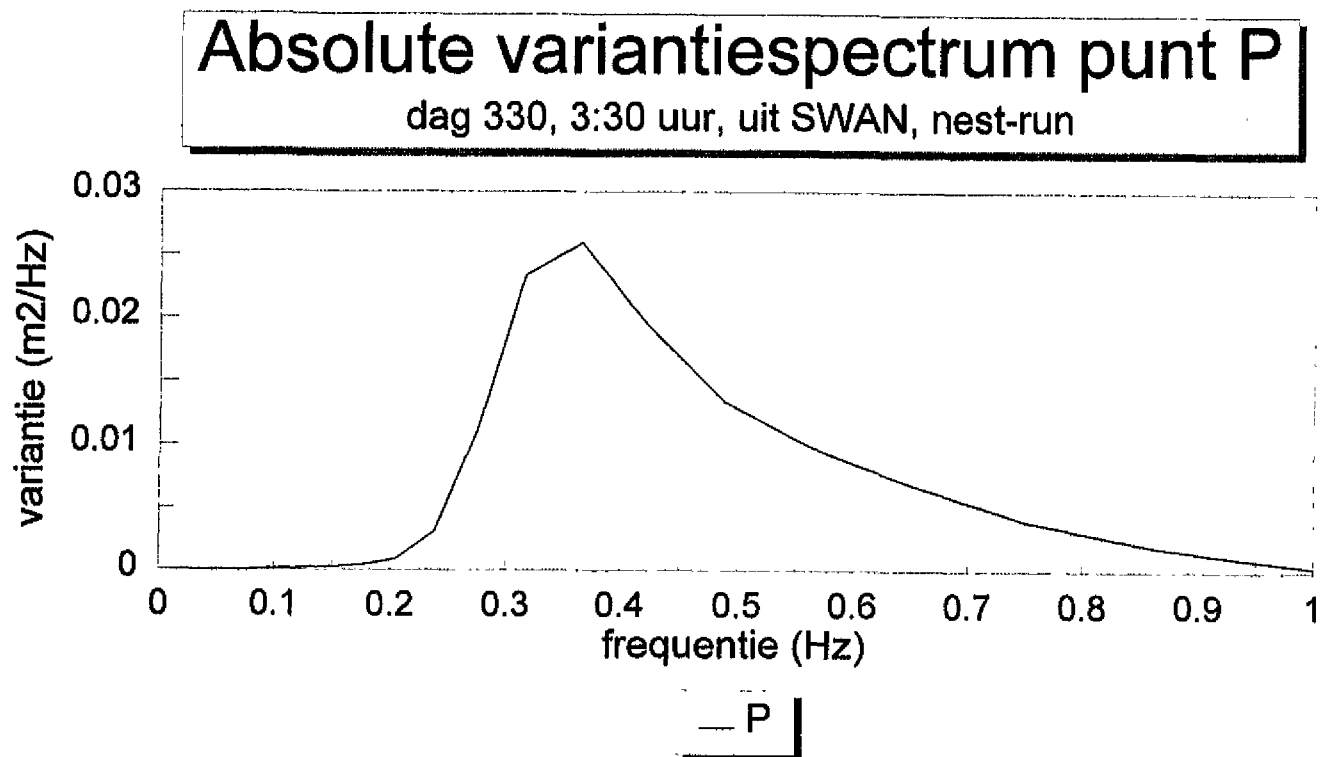
Bijlage 34: Golfspectrum uit SWAN-run op punt R, 2:00 uur.



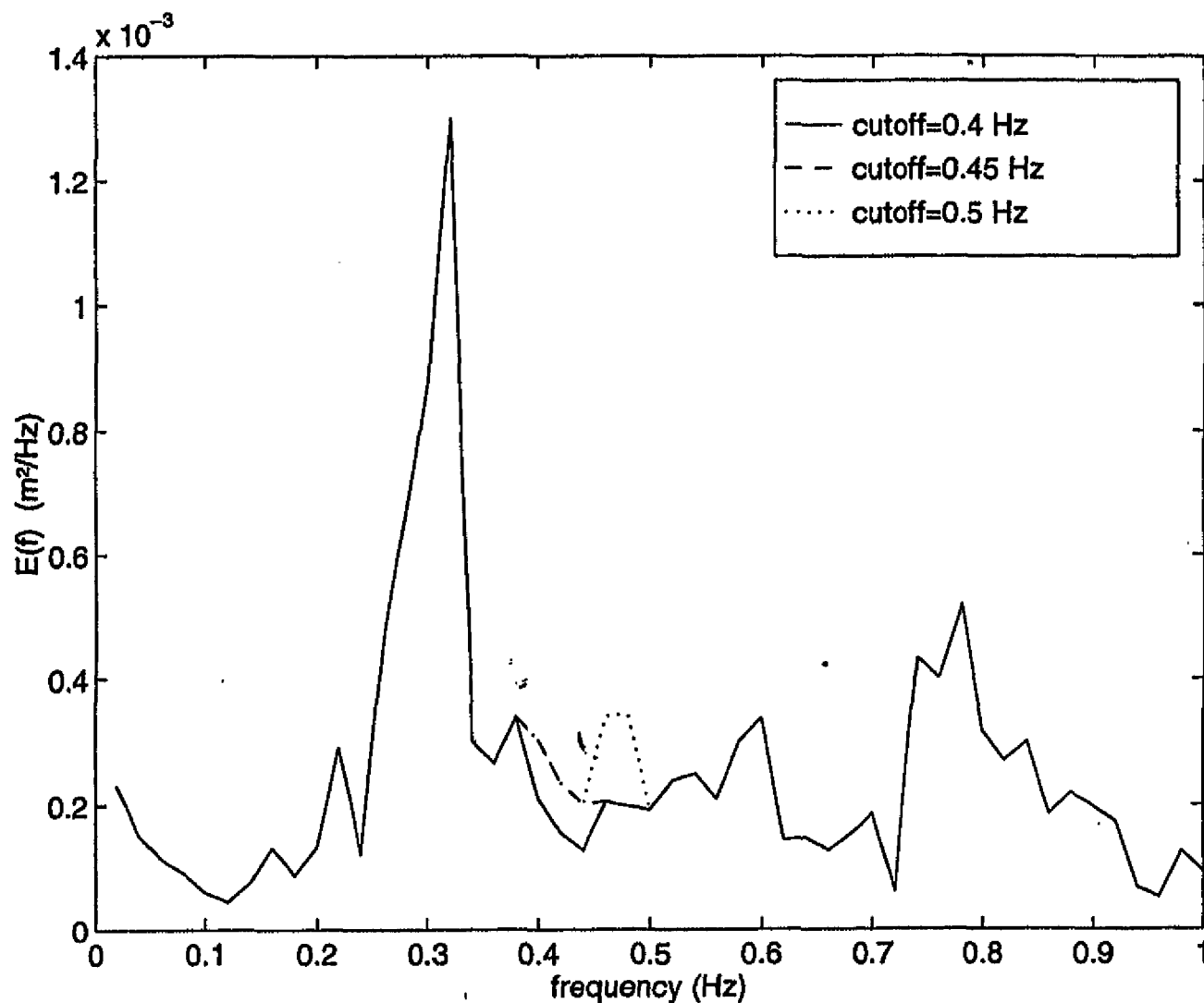
Bijlage 35: Golfspectrum op basis van metingen op punt P, 3:30 uur.



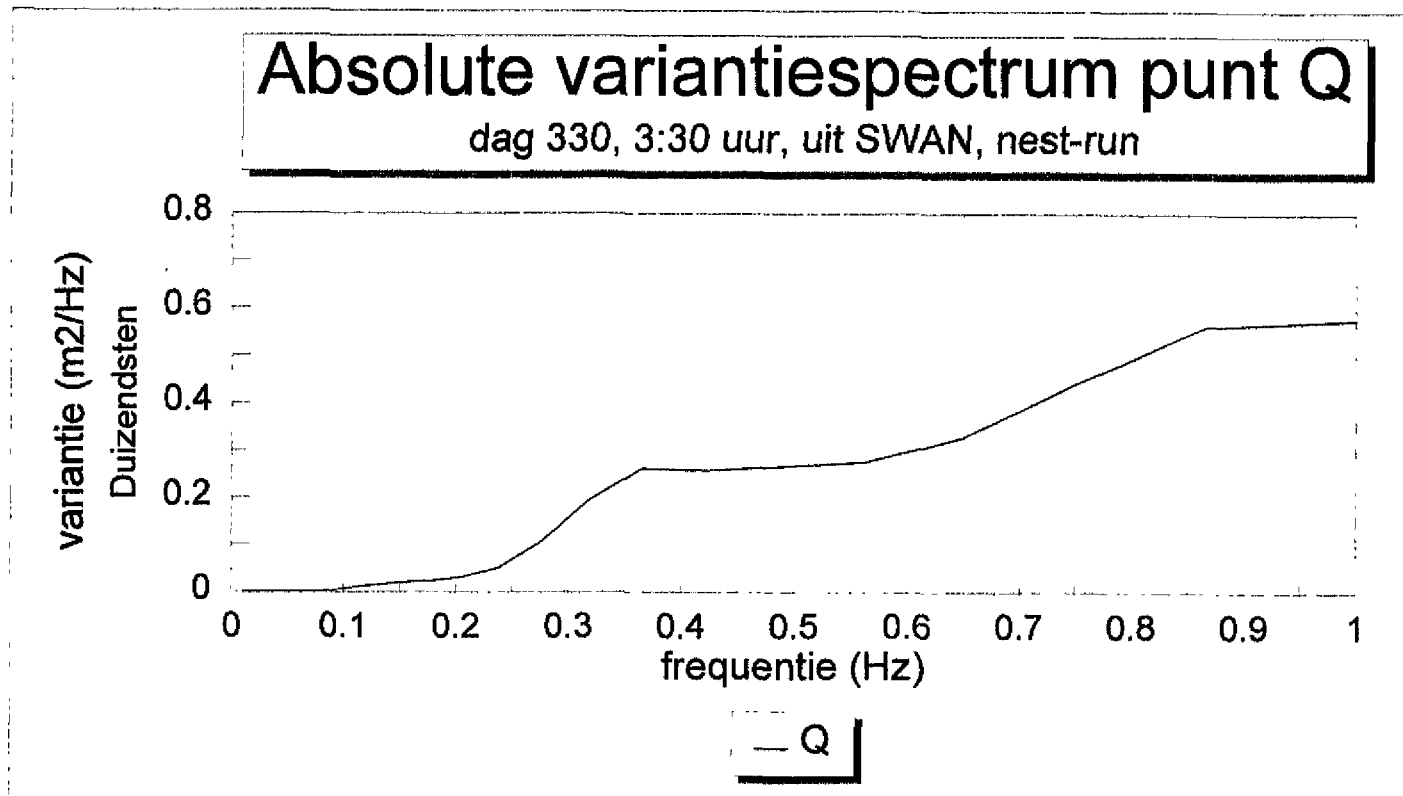
Bijlage 36: Golfspectrum uit SWAN-run op punt P, 3:30 uur.



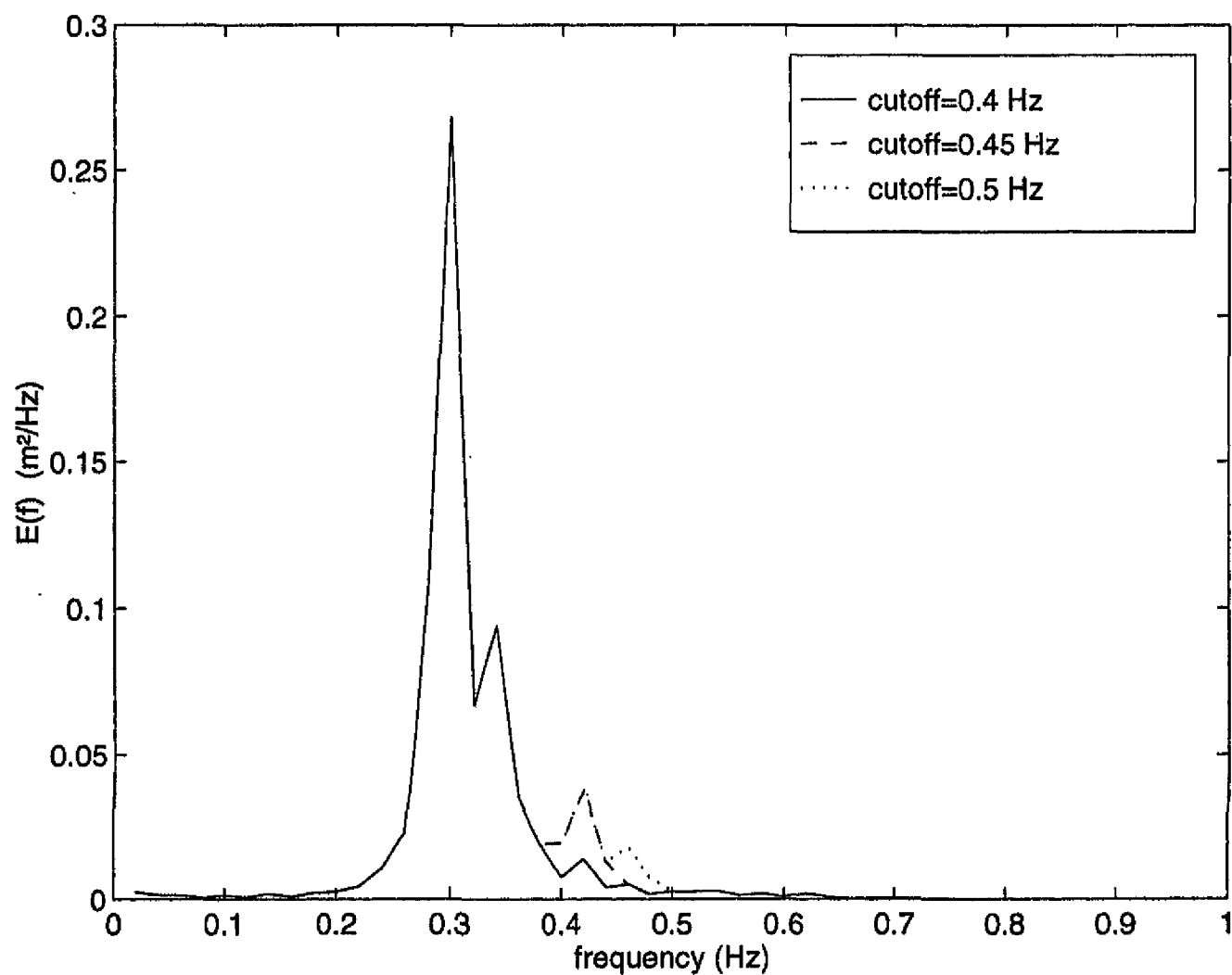
Bijlage 37: Golfspectrum op basis van metingen op punt Q, 3:30 uur.



Bijlage 38: Golfspectrum uit SWAN-run op punt Q, 3:30 uur.



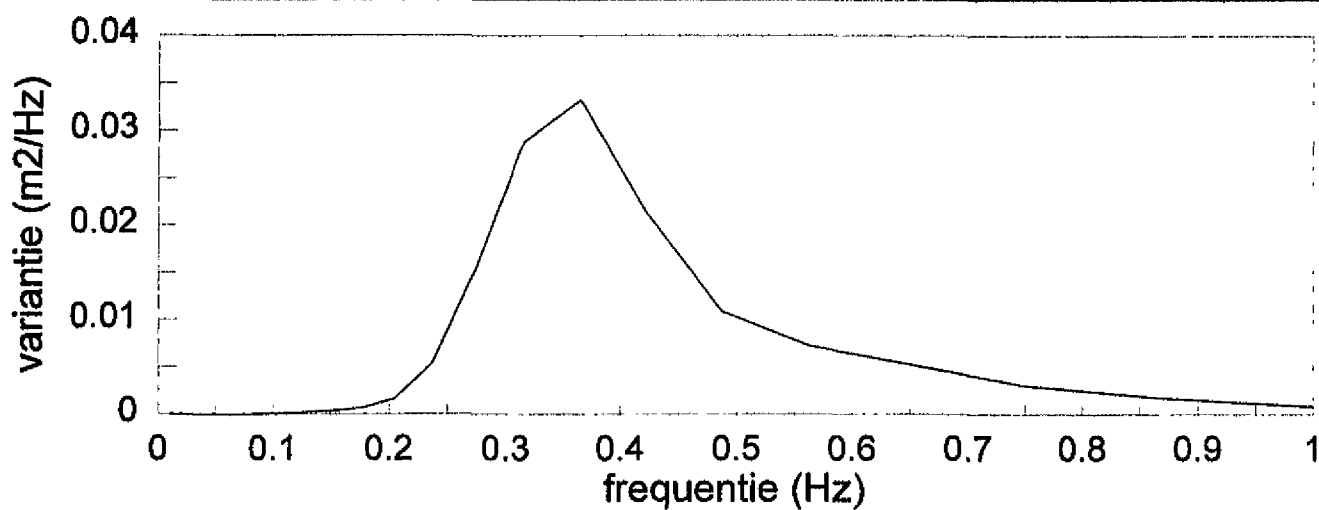
Bijlage 39: Golfspectrum op basis van metingen op punt R, 3:30 uur.



Bijlage 40: Golfspectrum uit SWAN-run op punt R, 3:30 uur.

Absolute variantiespectrum punt R

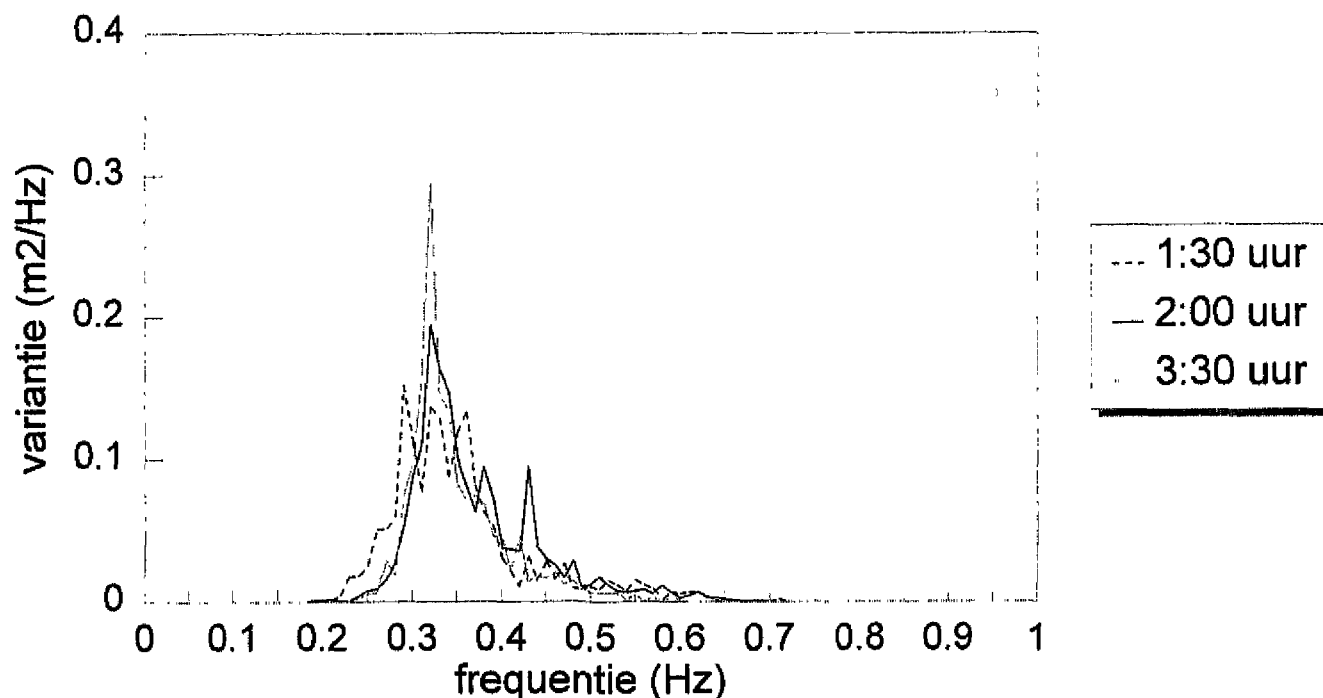
dag 330, 3:30 uur, uit SWAN, nest-run



— R

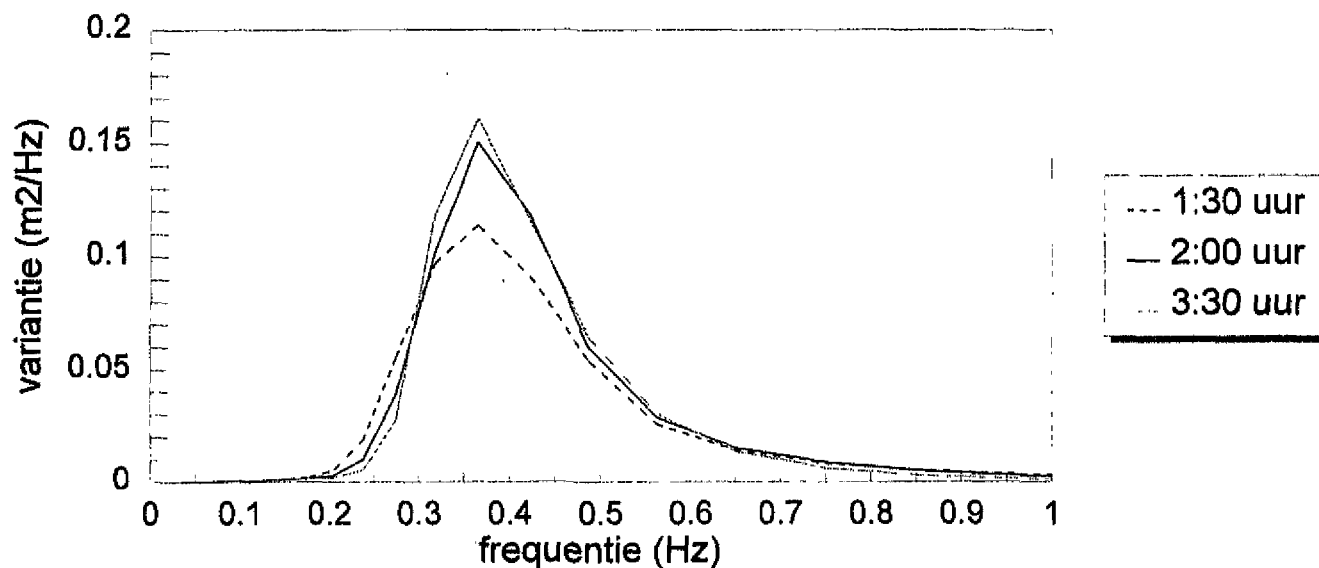
Absolute variantiespectra op punt S

dag 330, op basis van METINGEN



Absolute variantiespectra op punt S

dag 330, uit SWAN, nest-runs



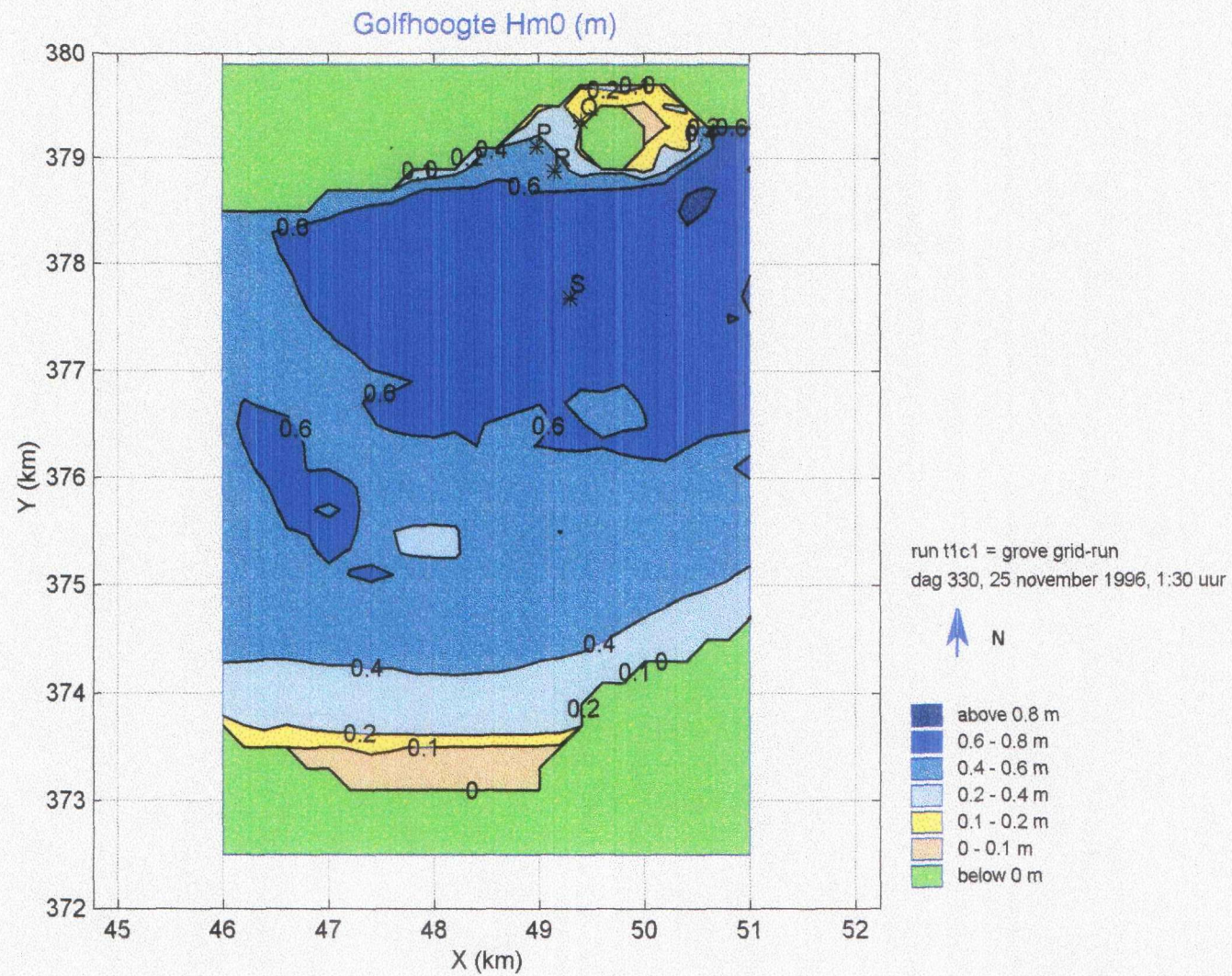
Bijlage 43: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t1c1 (1:30 uur, grove run).

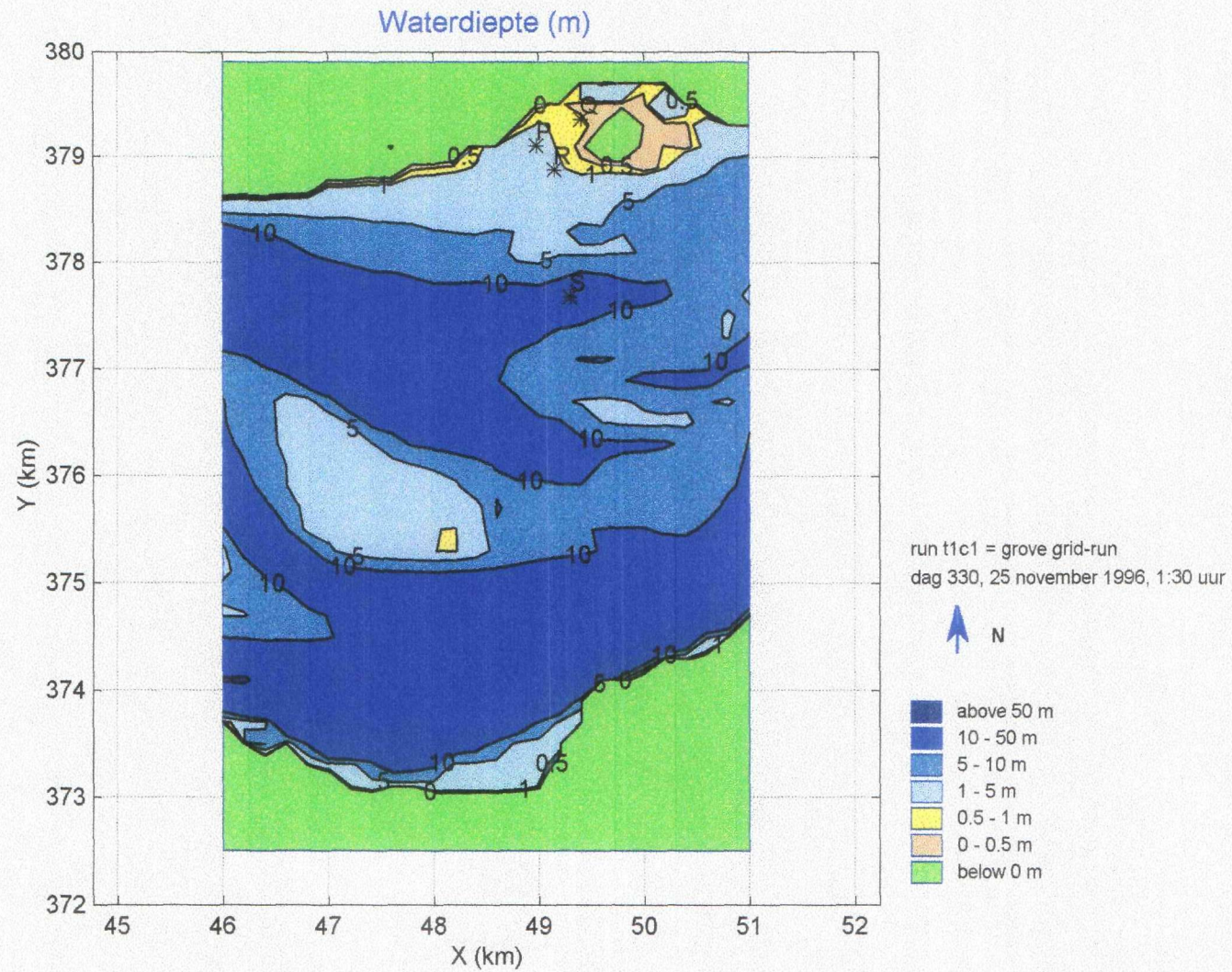
Run:t1c1 , grove run; Dag 330, 25-11-1996; Tijd: 1:30 uur

Punt	X	Y	h	Hm0	golfrichting	Tm01	Tpiek	Urms,bodem	Golfsteilheid
	[m]	[m]	[m]	[m]	[graden]	[s]	[s]	[m/s]	[-]
P	48979.	379103.	1.37	.460	80.	2.077	3.162	.21	.0890
Q	49398.	379353.	.63	.180	78.	1.281	2.738	.12	.0890
R	49145.	378878.	1.28	.488	84.	2.146	2.738	.24	.0978
S	49290.	377680.	14.57	.641	86.	2.067	2.738	.01	.1129

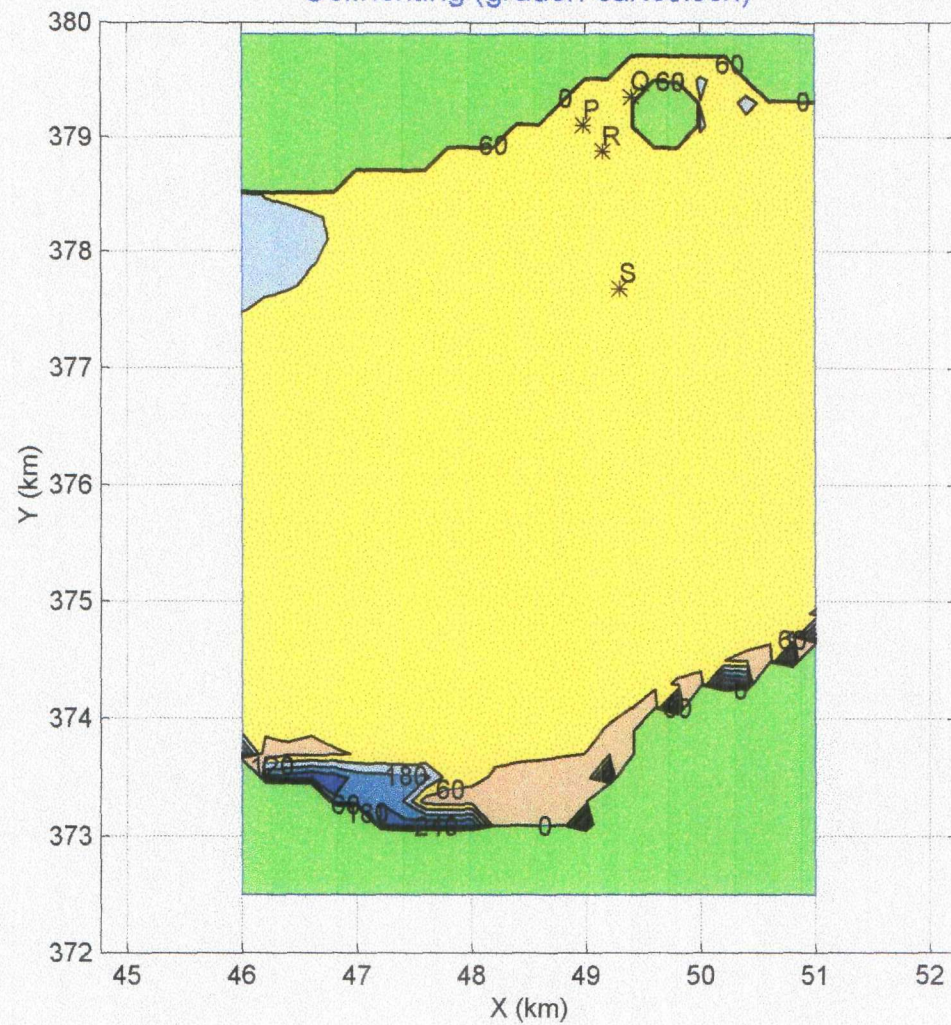
Punt	TDir	RTm01	Dissipatie	Qb
	[graden]	[s]	[m2/s]	[-]
P	75.	2.267	.000	.0002
Q	72.	1.461	.000	.0027
R	74.	2.241	.000	.0013
S	51.	2.214	.000	.0000

Bijlagen 44 t/m 46: Kaartjes van run t1c1
(1:30 uur, grove run): respectievelijk H_{m0} ,
waterdiepte en golfvoortplantingsrichting.





Golfrichting (graden-cartesisch)

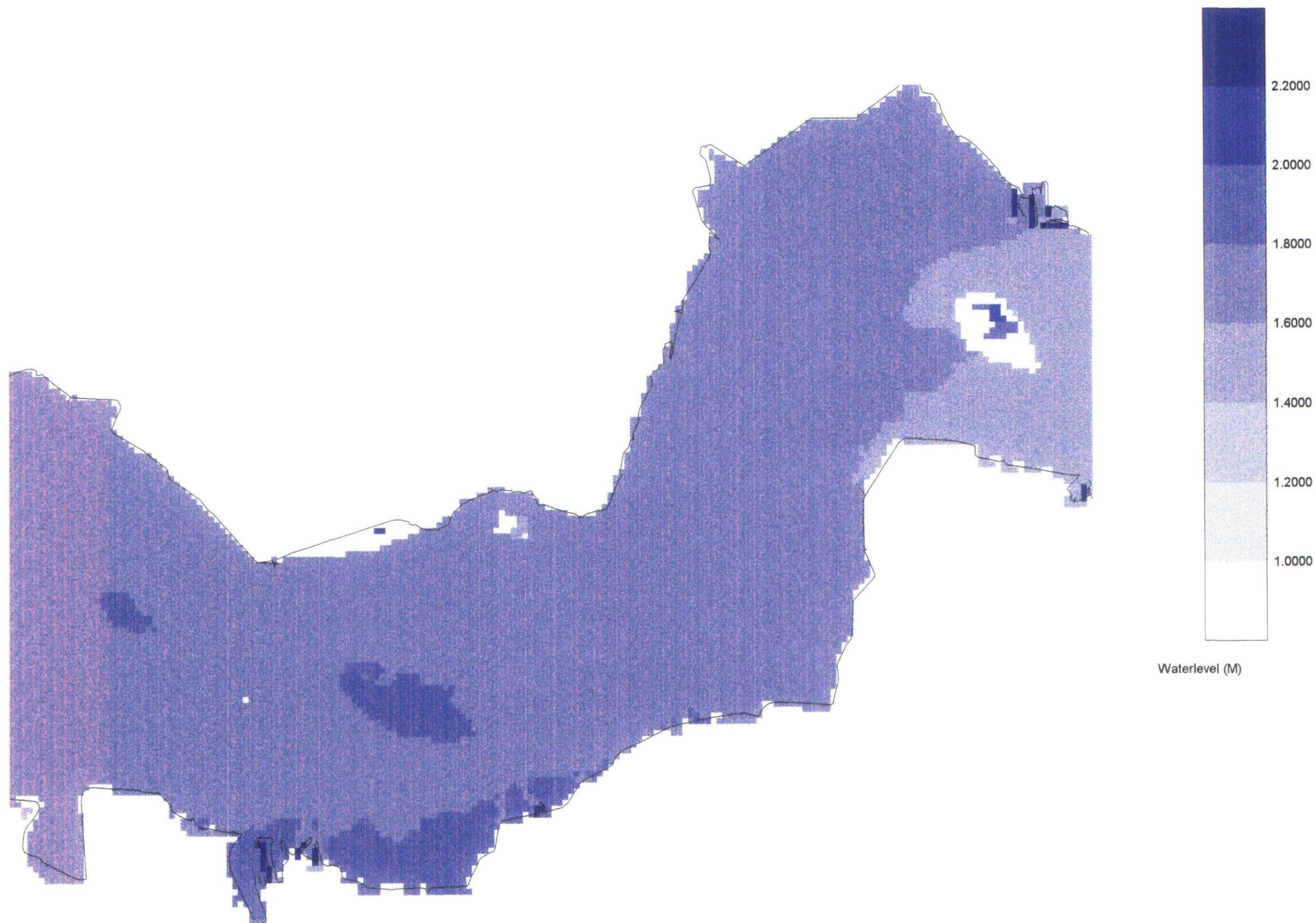


run t1c1 = grove grid-run
dag 330, 25 november 1996, 1:30 uur



- above 300 deg
- 240 - 300 deg
- 180 - 240 deg
- 120 - 180 deg
- 60 - 120 deg
- 0 - 60 deg
- below 0 deg

Bijlage 47: Invoer waterstanden uit
WAQUA-run 330-3 op 1:30 uur.



Bijlage 48: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run tln1 (1:30 uur, nest-run).

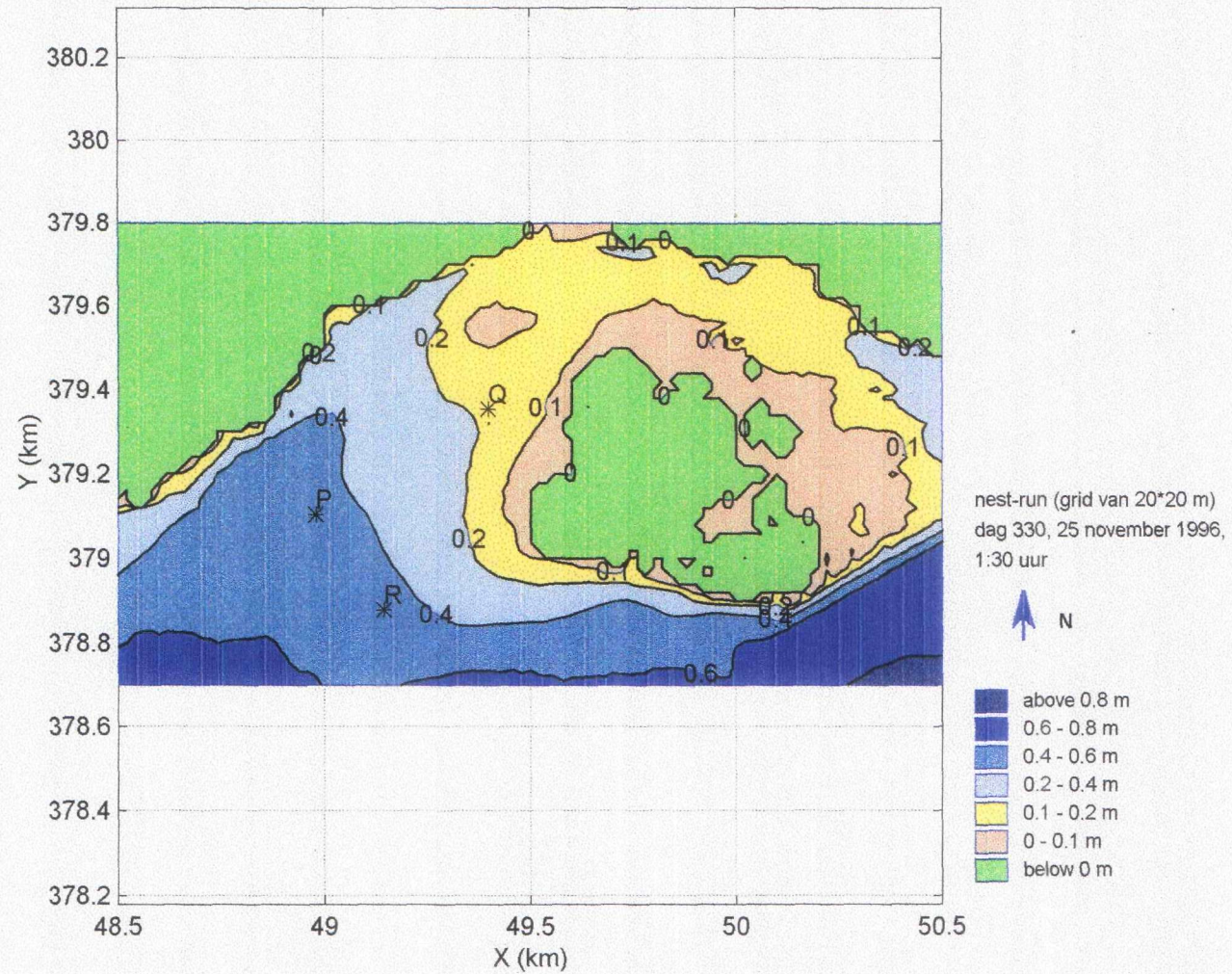
Run:tln1 , nest-run; Dag 330, 25-11-1996; Tijd: 1:30 uur

Punt	X	Y	h	Hm0	golfrichting	Qb	L	Golfsteilheid	Tm01
	[m]	[m]	[m]	[m]	[graden]	[-]	[m]	[-]	[s]
p	48979.	379103.	1.34	.460	76.	.0005	5.43	.0927	2.093
Q	49398.	379353.	.60	.186	59.	.0001	2.53	.0801	1.409
R	49145.	378878.	1.38	.482	81.	.0007	5.15	.1022	2.126
S	49290.	377680.	15.12	.628	86.	.0000	6.33	.1084	2.119

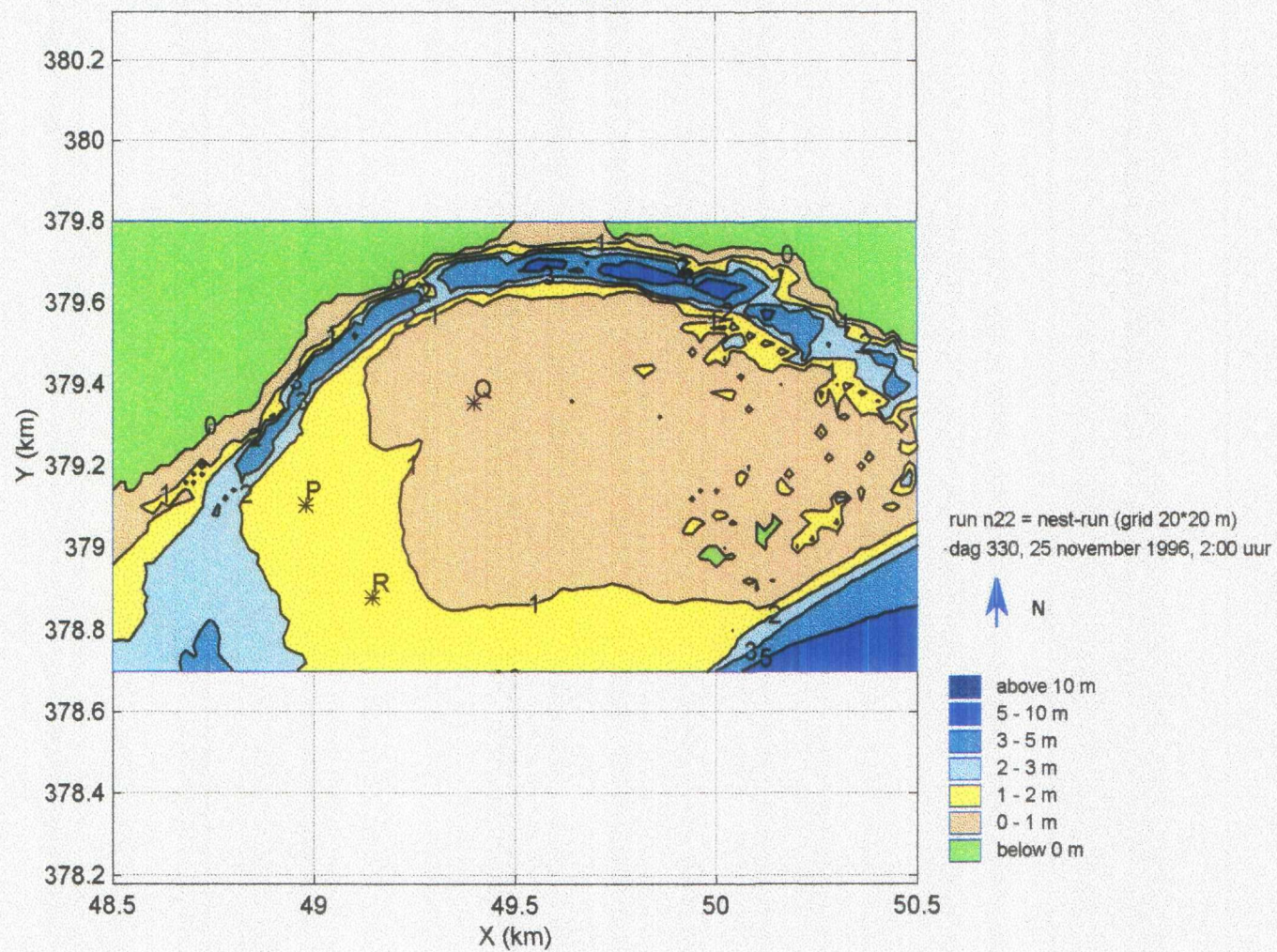
Punt	Tpiek	Urms,bodem	stroomsnelheid X	str.snelh. Y	Dissipatie
	[s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m2/s]
p	3.165	.24	.23	.26	.000
Q	3.165	.15	.22	.26	.000
R	3.165	.24	.41	.09	.000
S	2.740	.01	1.40	.28	.000

Bijlagen 49 t/m 51: Kaartjes van run t1n1
(1:30 uur, nest-run): respectievelijk H_{m0} ,
waterdiepte en golfvoortplantingsrichting.

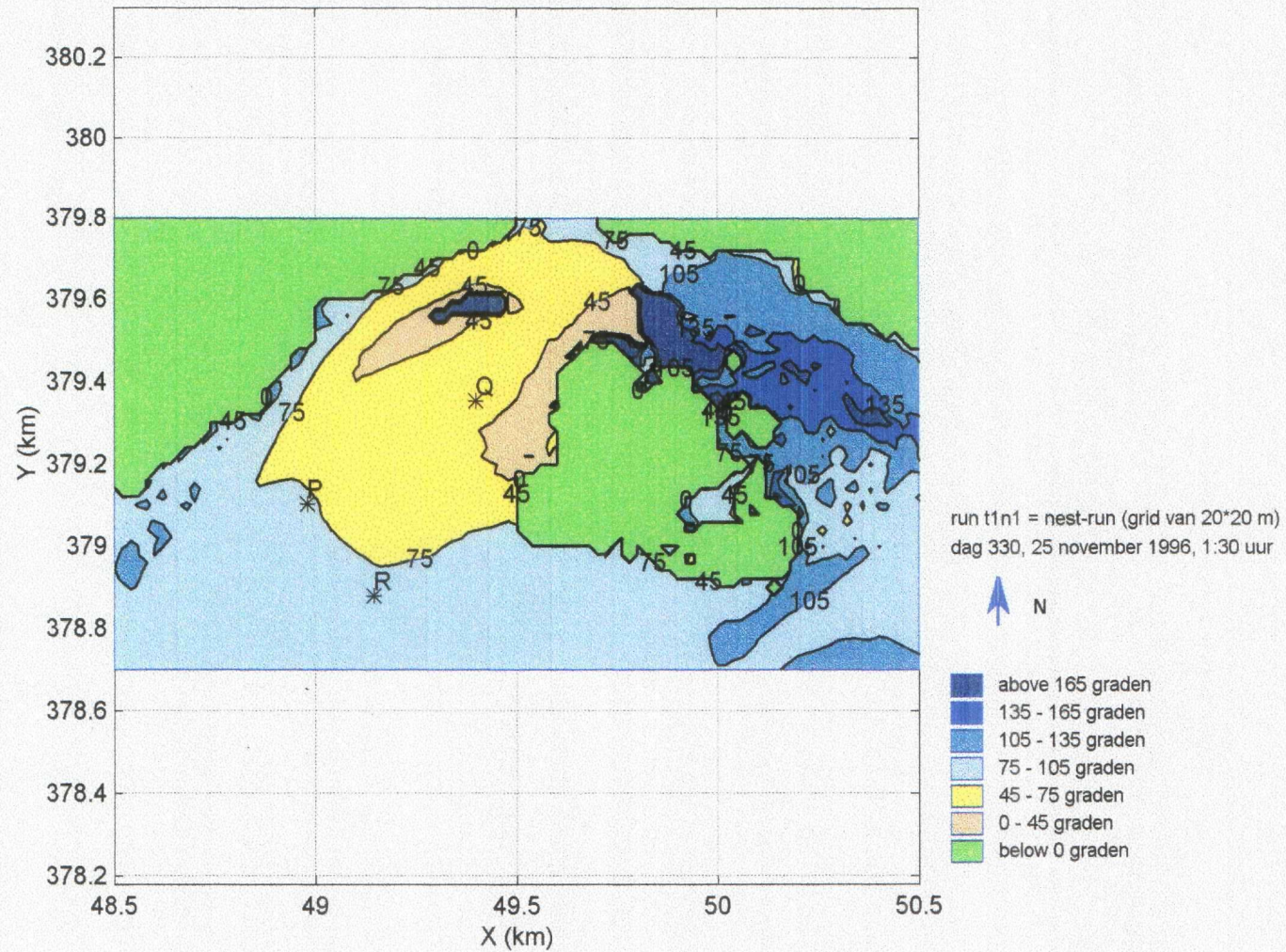
Golfhoogte Hm0 (m)



Waterdiepte (m)



Golfrichting (graden-cartesisch)



Bijlage 52: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run KD22 (2:00 uur, grove run).

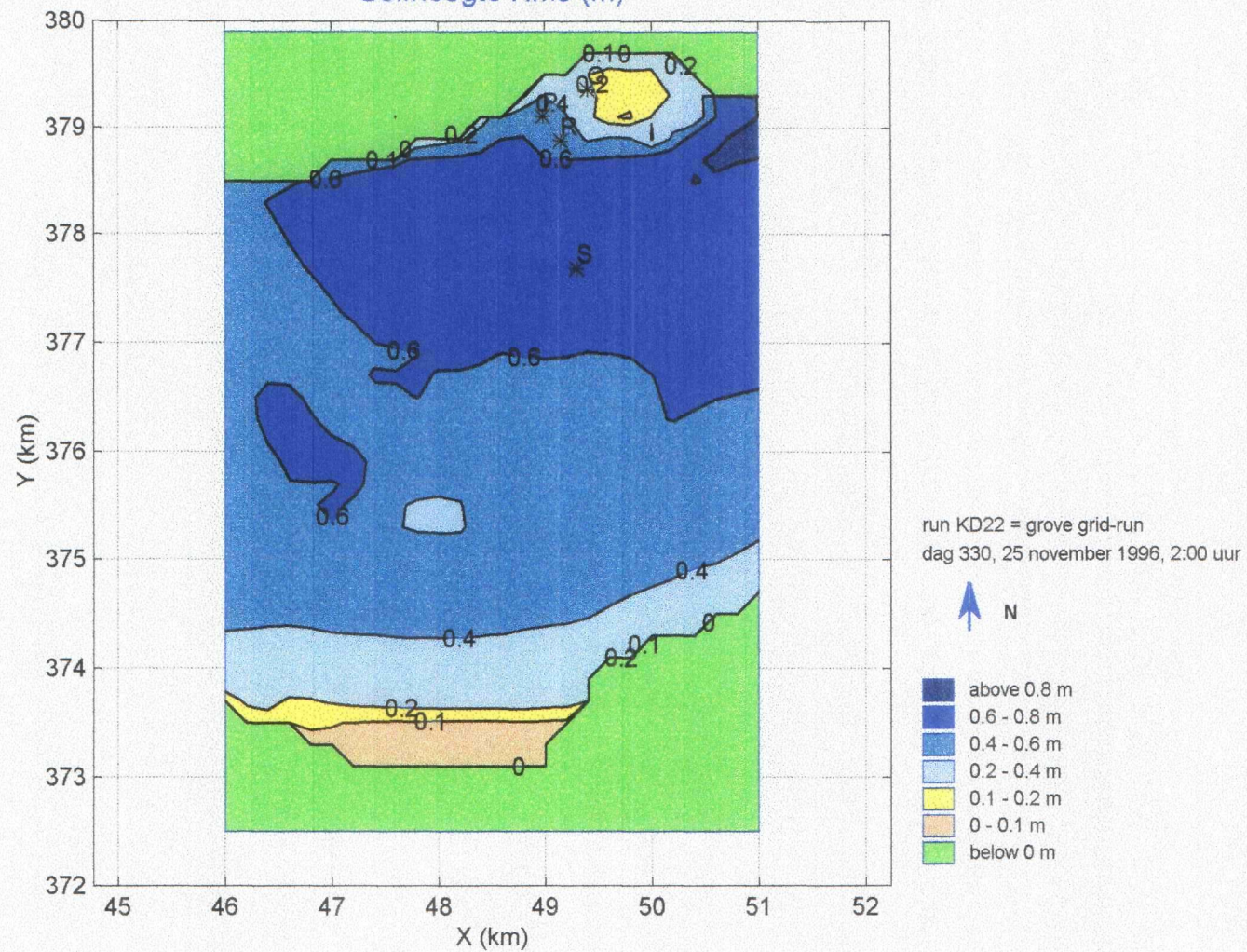
Run:KD22 ; grove run; Dag 330, 25-11-1996; Tijd: 2:00 uur

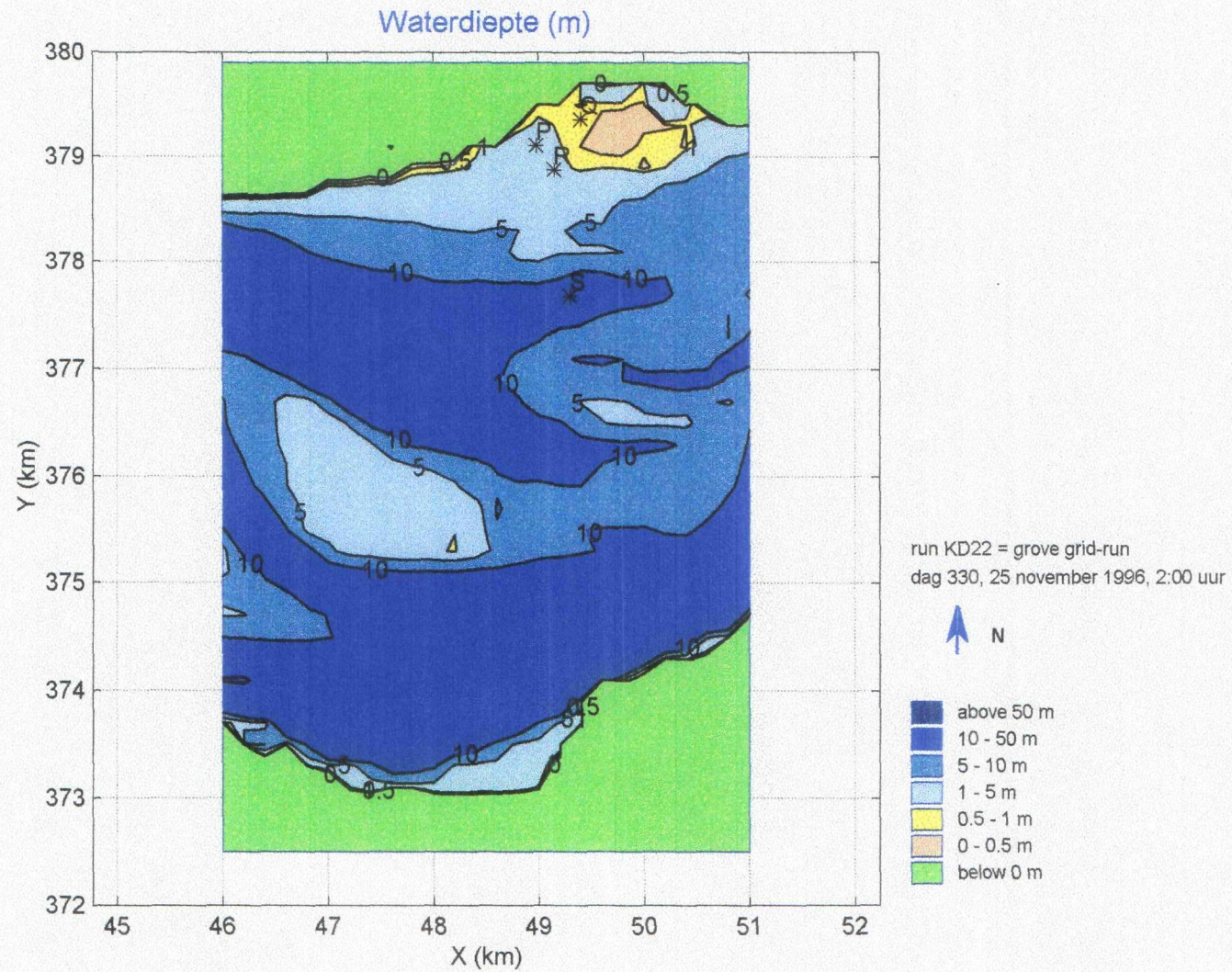
Punt	X	Y	h	Hm0	Golfrichting	Tm01	Tpiek	Urms,bodem	Golfsteilheid
	[m]	[m]	[m]	[m]	[graden]	[s]	[s]	[m/s]	[-]
P	48979.	379103.	1.50	.489	80.	2.224	2.738	.21	.0897
Q	49398.	379353.	.80	.253	79.	1.505	2.738	.15	.0999
R	49145.	378878.	1.41	.519	84.	2.229	2.738	.23	.0982
S	49290.	377680.	14.70	.671	82.	2.119	2.738	.01	.1104

Punt	TDir	RTm01	Dissipatie	Qb
	[graden]	[s]	[m2/s]	[-]
P	77.	2.283	.000	.0001
Q	76.	1.620	.000	.0022
R	77.	2.266	.000	.0009
S	57.	2.253	.000	.0000

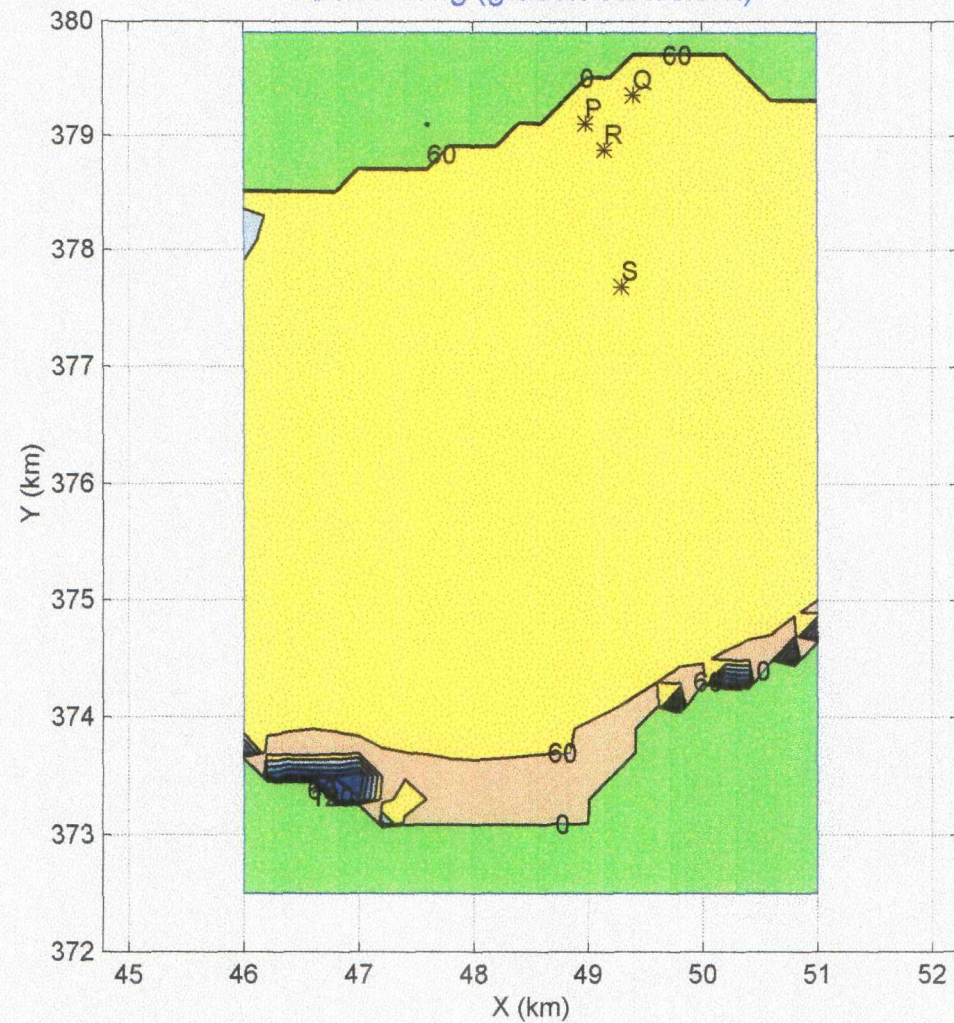
Bijlagen 53 t/m 55: Kaartjes van run KD22
(2:00 uur, grove run): respectievelijk H_{m0} ,
waterdiepte en golfvoortplantingsrichting.

Golfhoogte Hm0 (m)





Golfrichting (graden-cartesisch)

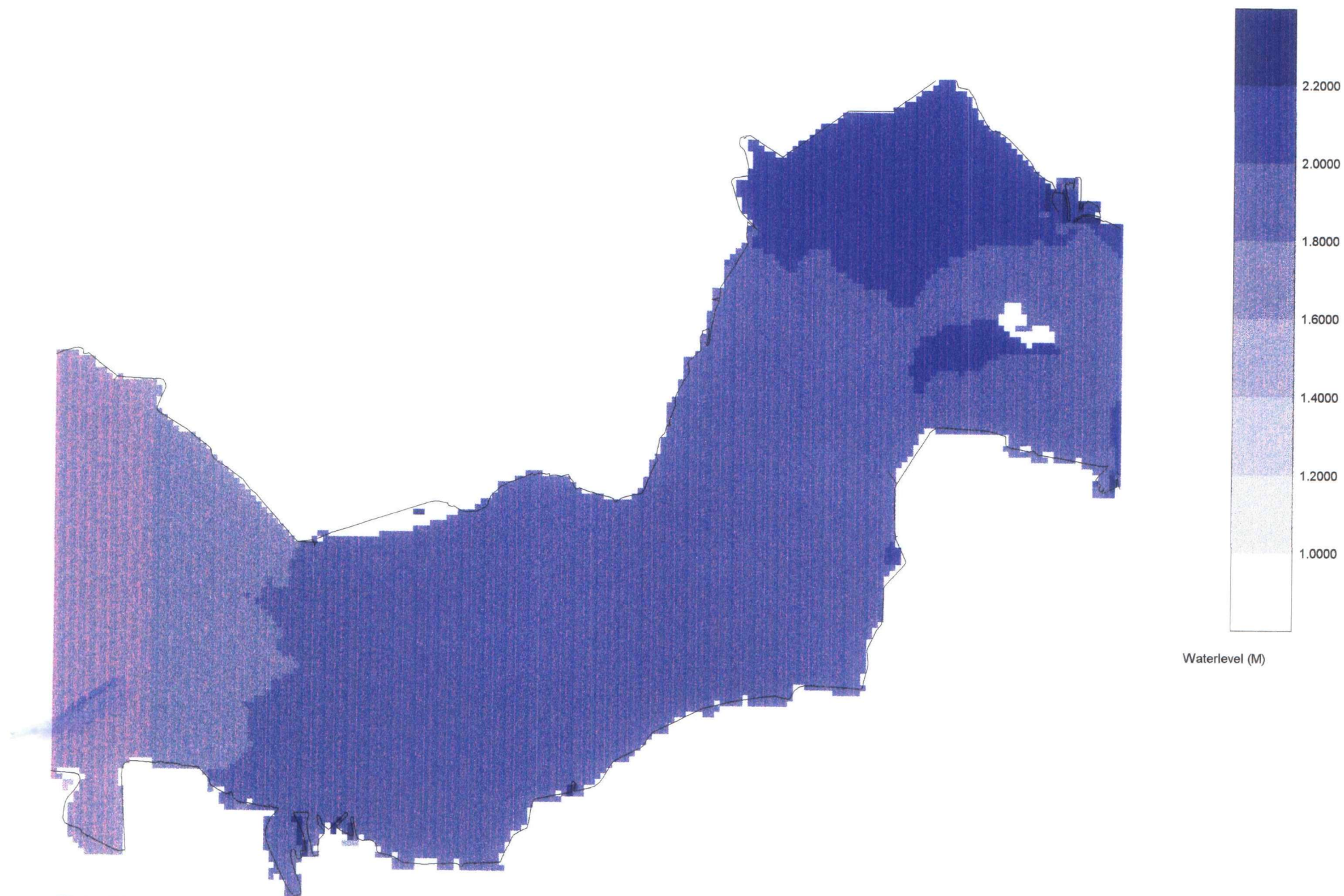


run KD22 = grove grid-run
dag 330, 25 november 1996, 2:00 uur



- above 300 deg
- 240 - 300 deg
- 180 - 240 deg
- 120 - 180 deg
- 60 - 120 deg
- 0 - 60 deg
- below 0 deg

Bijlage 56: Invoer waterstanden uit
WAQUA-run 330-3 op 2:00 uur.



s100, dag 330, poging 3, saliniteit meegenomen!, Waterlevel (M), datum : 961125, tijd : 200

Bijlage 57: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run n22 (2:00 uur, nest-run).

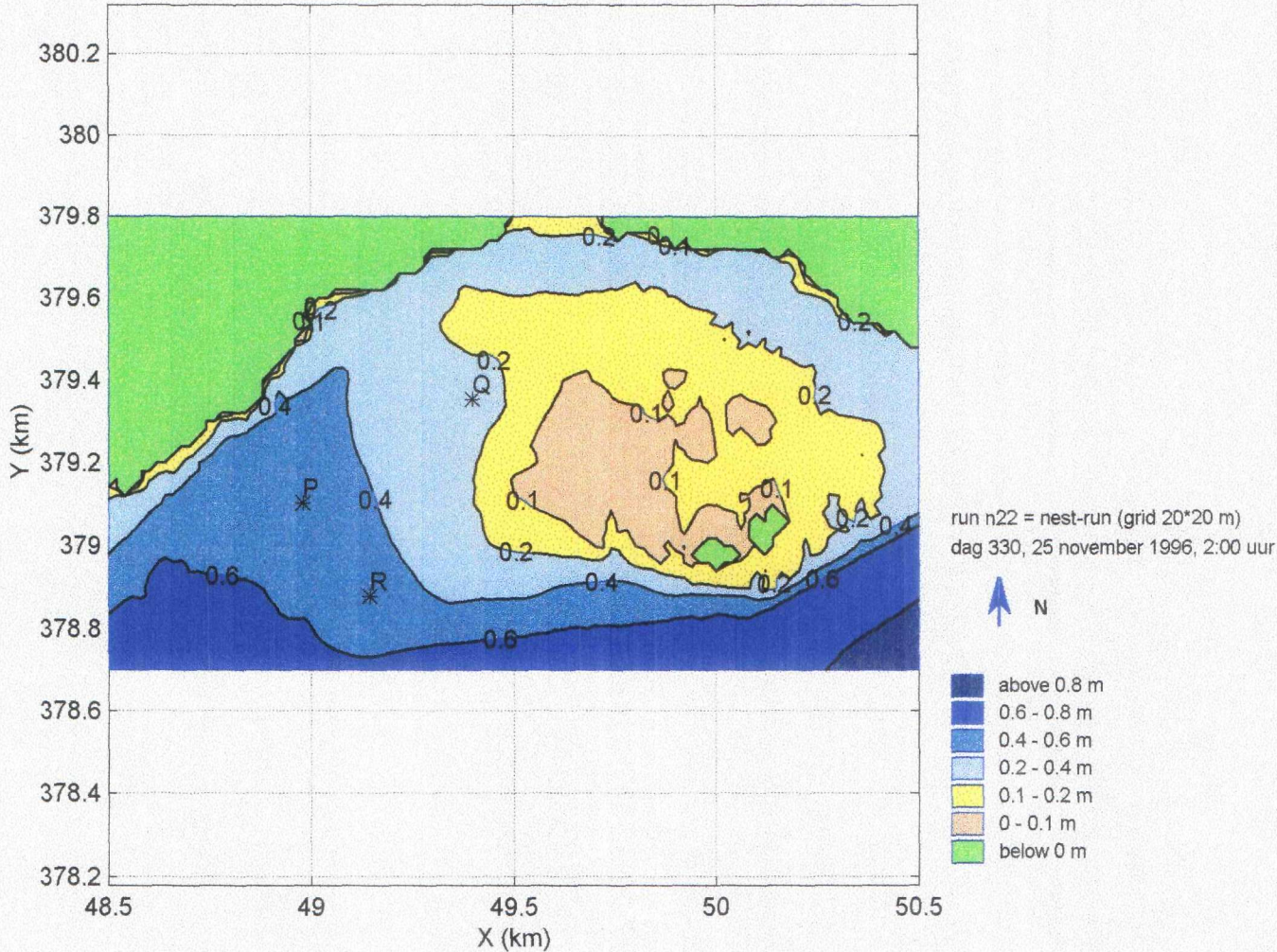
Run:n22 ; nest-run; Dag 330, 25-11-1996; Tijd: 2:00 uur

Punt	X	Y	h	Hm0	golfrichting	Qb	L	Golfsteilheid	Tm01
	[m]	[m]	[m]	[m]	[graden]	[-]	[m]	[-]	[s]
P	48979.	379103.	1.47	.492	77.	.0003	5.89	.0914	2.263
Q	49398.	379353.	.77	.244	63.	.0001	2.54	.1047	1.515
R	49145.	378878.	1.52	.525	82.	.0006	5.50	.1043	2.229
S	49290.	377680.	15.24	.658	83.	.0000	6.74	.1068	2.175

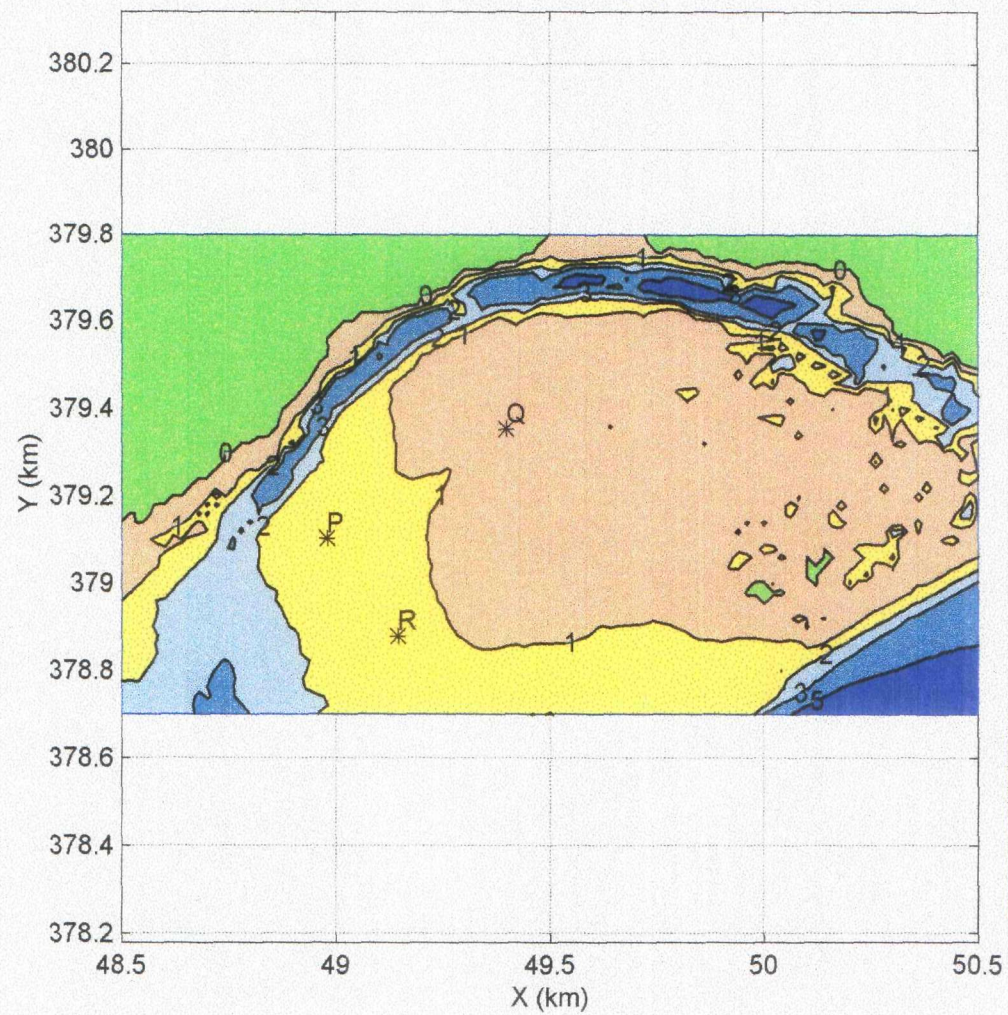
Punt	Tpiek [s]	Urms,bodem [m/s]	stroomsnelheid X [m/s]	str.snelh.Y [m/s]	Dissipatie [m2/s]
P	3.165	.23	.13	.07	.000
Q	3.165	.16	.09	.15	.000
R	3.165	.24	.25	.03	.000
S	2.740	.01	.93	.20	.000

Bijlagen 58 t/m 60: Kaartjes van run n22 (2:00 uur, nest-run): respectievelijk H_{m0} , waterdiepte en golfvoortplantingsrichting.

Golfhoogte Hm0 (m)



Waterdiepte (m)

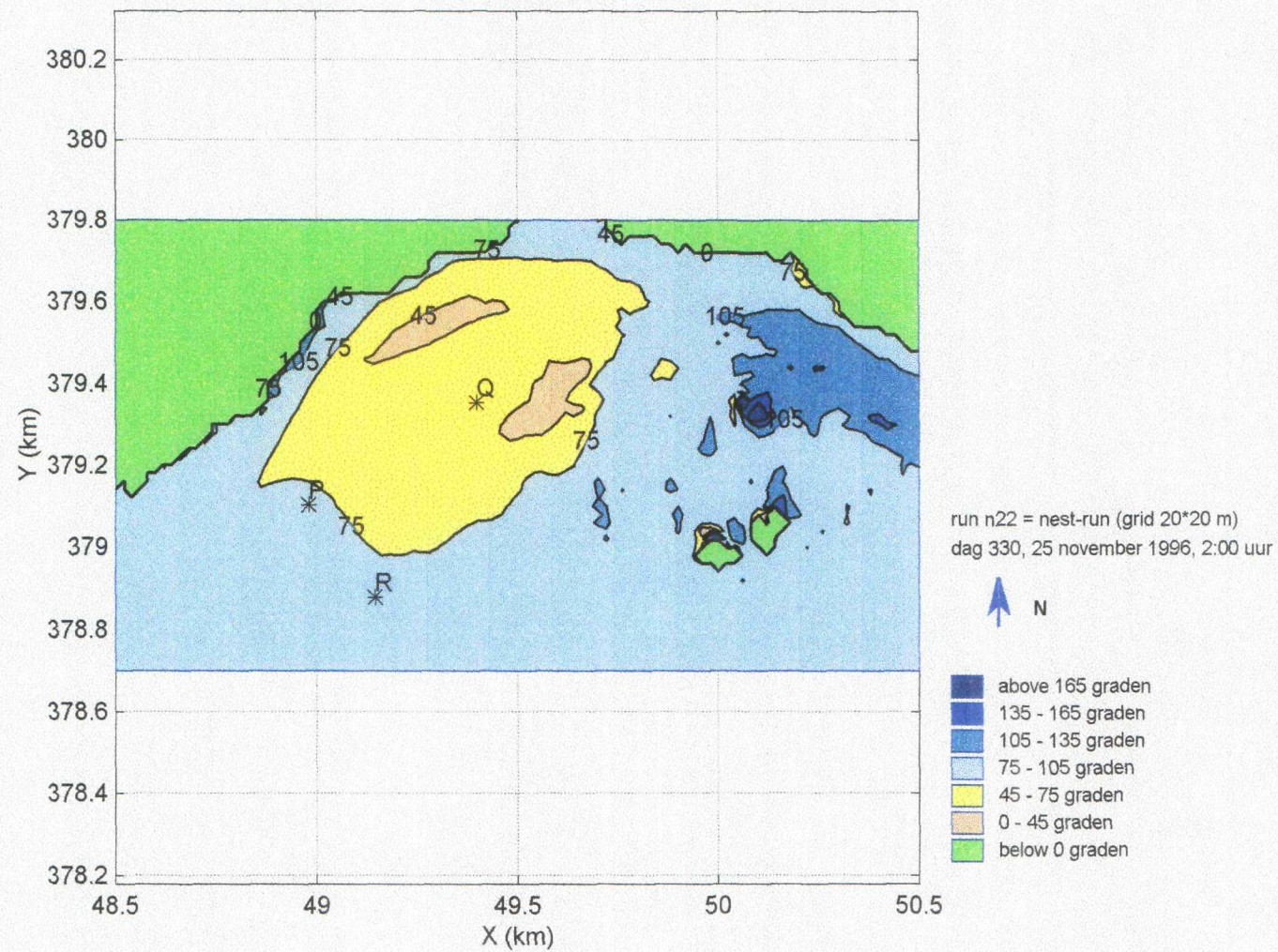


run n22 = nest-run (grid 20*20 m)
dag 330, 25 november 1996, 2:00 uur



- above 10 m
- 5 - 10 m
- 3 - 5 m
- 2 - 3 m
- 1 - 2 m
- 0 - 1 m
- below 0 m

Golfrichting (graden-cartesisch)



Bijlage 61: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t3c1 (3:30 uur, grove run).

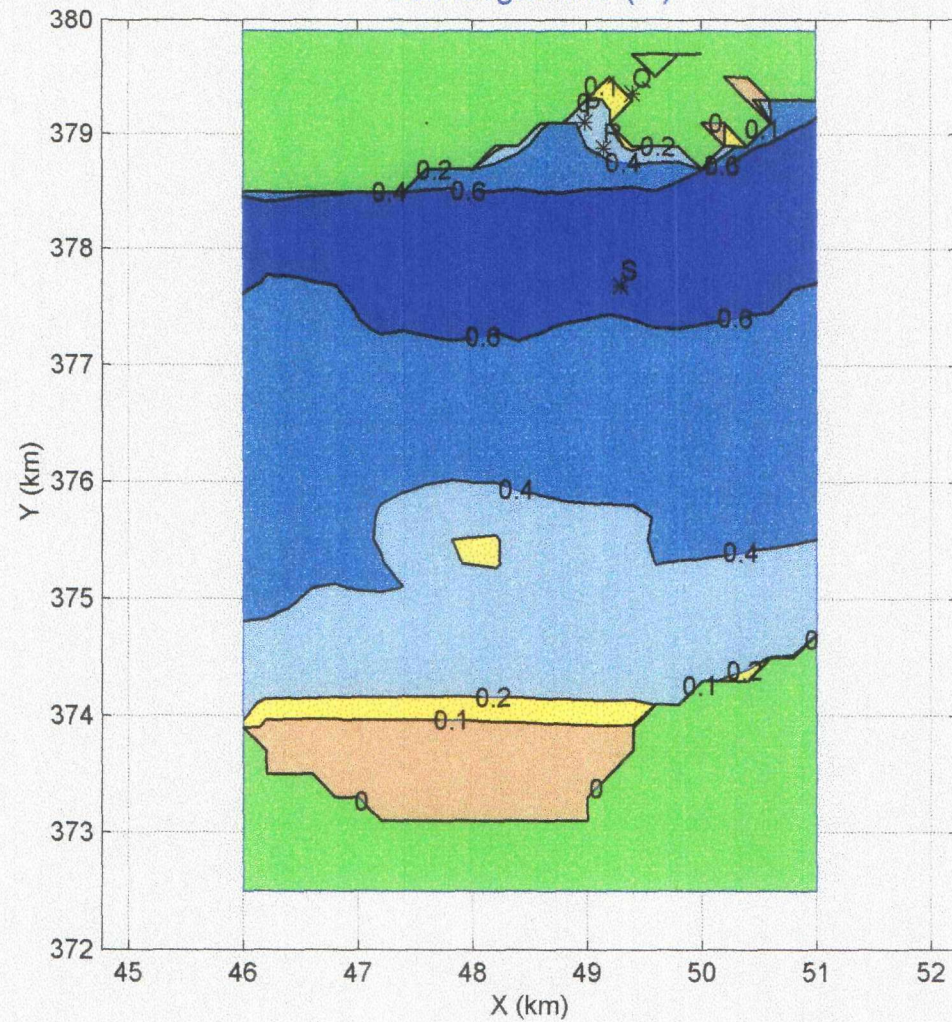
Run:t3c1, grove run; Dag 330, 25-11-1996; Tijd: 3:30 uur

Punt	X [m]	Y [m]	h [m]	Hm0 [m]	golfrichting [graden]	Tm01 [s]	Tpiek [s]	Urms,bodem [m/s]	Golfsteilheid [-]
p	48979.	379103.	.93	.000	-999.	-10.000	-10.000	.19	-1.0000
Q	49398.	379353.	.29	.000	-999.	-10.000	-10.000	.06	-1.0000
R	49145.	378878.	.84	.344	78.	1.982	2.738	.22	.0912
S	49290.	377680.	14.10	.636	73.	2.203	2.371	.00	.1254

Punt	TDir [graden]	RTm01 [s]	Dissipatie [m2/s]	Qb [-]
P	-999.	-10.000	.000	.0005
Q	-999.	-10.000	.000	.0003
R	83.	1.982	.000	.0036
S	99.	2.024	.000	.0000

Bijlagen 62 t/m 64: Kaartjes van run t3c1
(3:30 uur, grove run): respectievelijk H_{m0} ,
waterdiepte en golfvoortplantingsrichting.

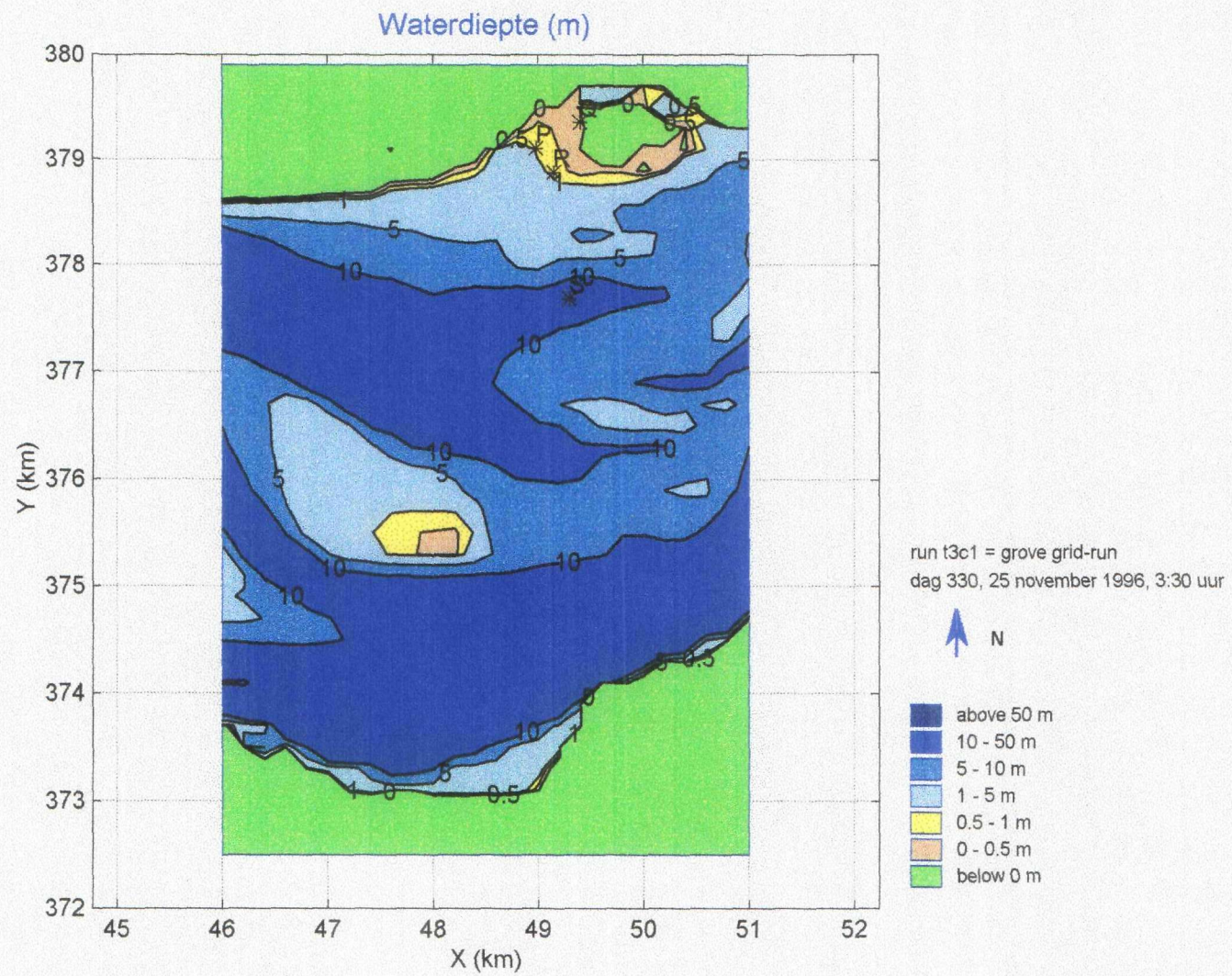
Golfhoogte Hm0 (m)



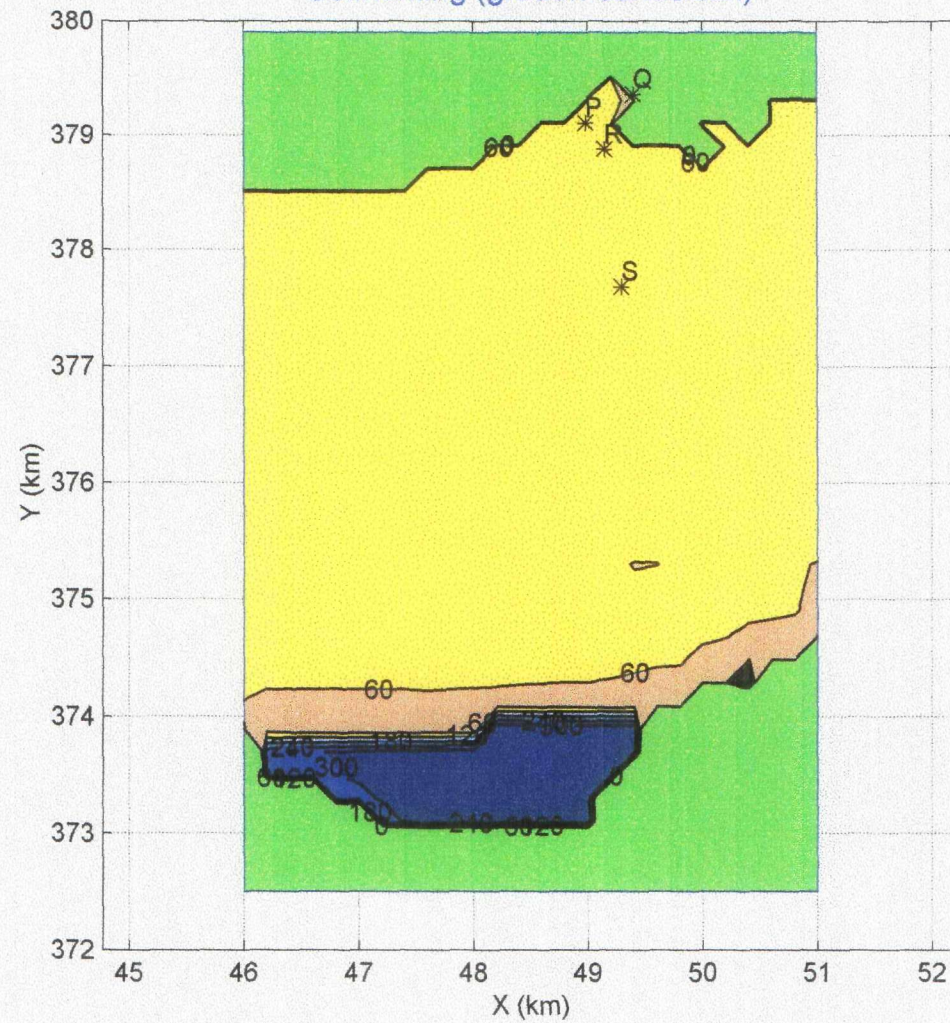
run t3c1 = grove grid-run
dag 330, 25 november 1996, 3:30 uur



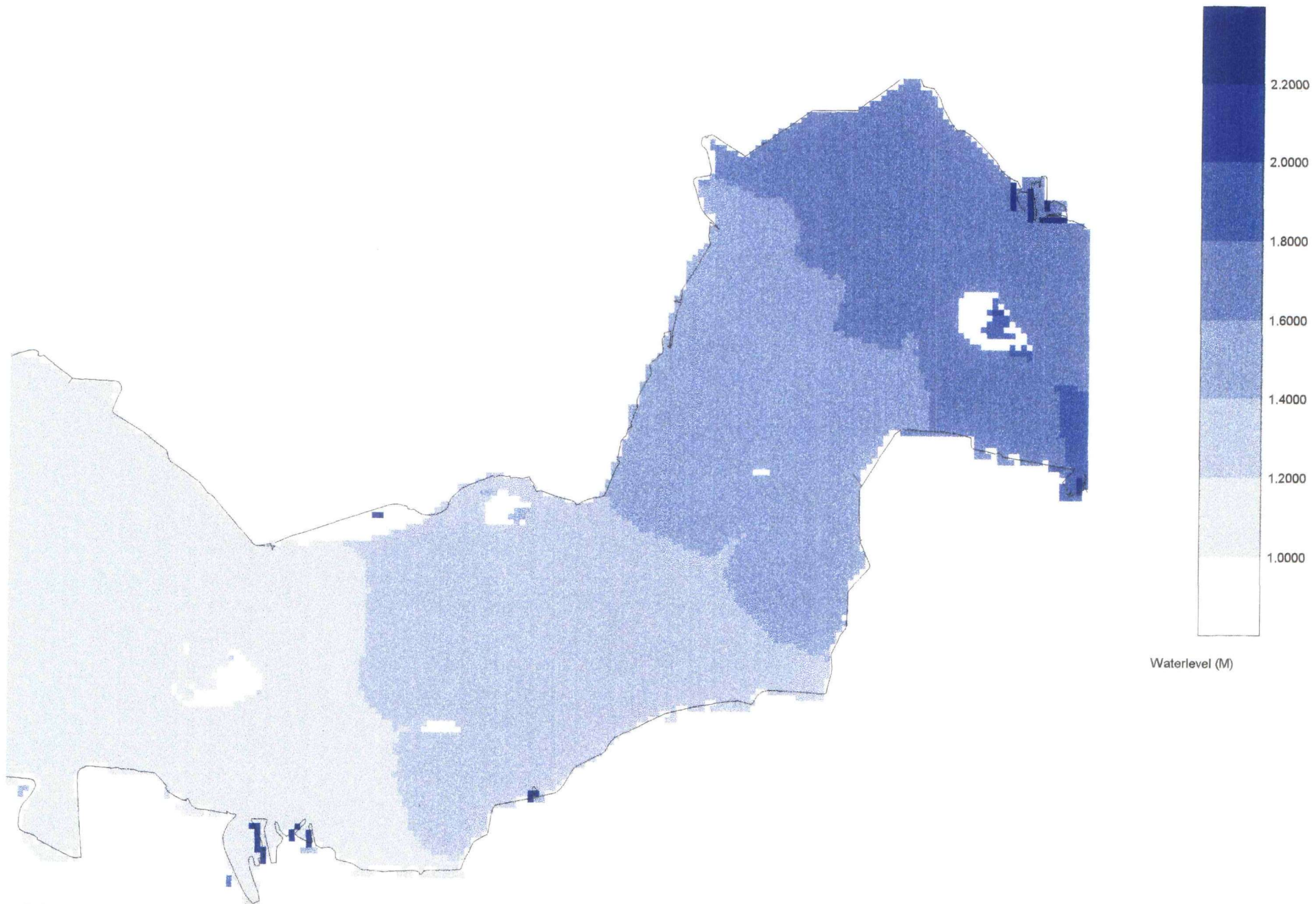
- above 0.8 m
- 0.6 - 0.8 m
- 0.4 - 0.6 m
- 0.2 - 0.4 m
- 0.1 - 0.2 m
- 0 - 0.1 m
- below 0 m



Golfrichting (graden-cartesisch)



Bijlage 65: Invoer waterstanden uit
WAQUA-run 330-3 op 3:30 uur.



Bijlage 66: Tabel resultaten op meetpunten van SWAN-run t3n1 (3:30 uur, nest-run).

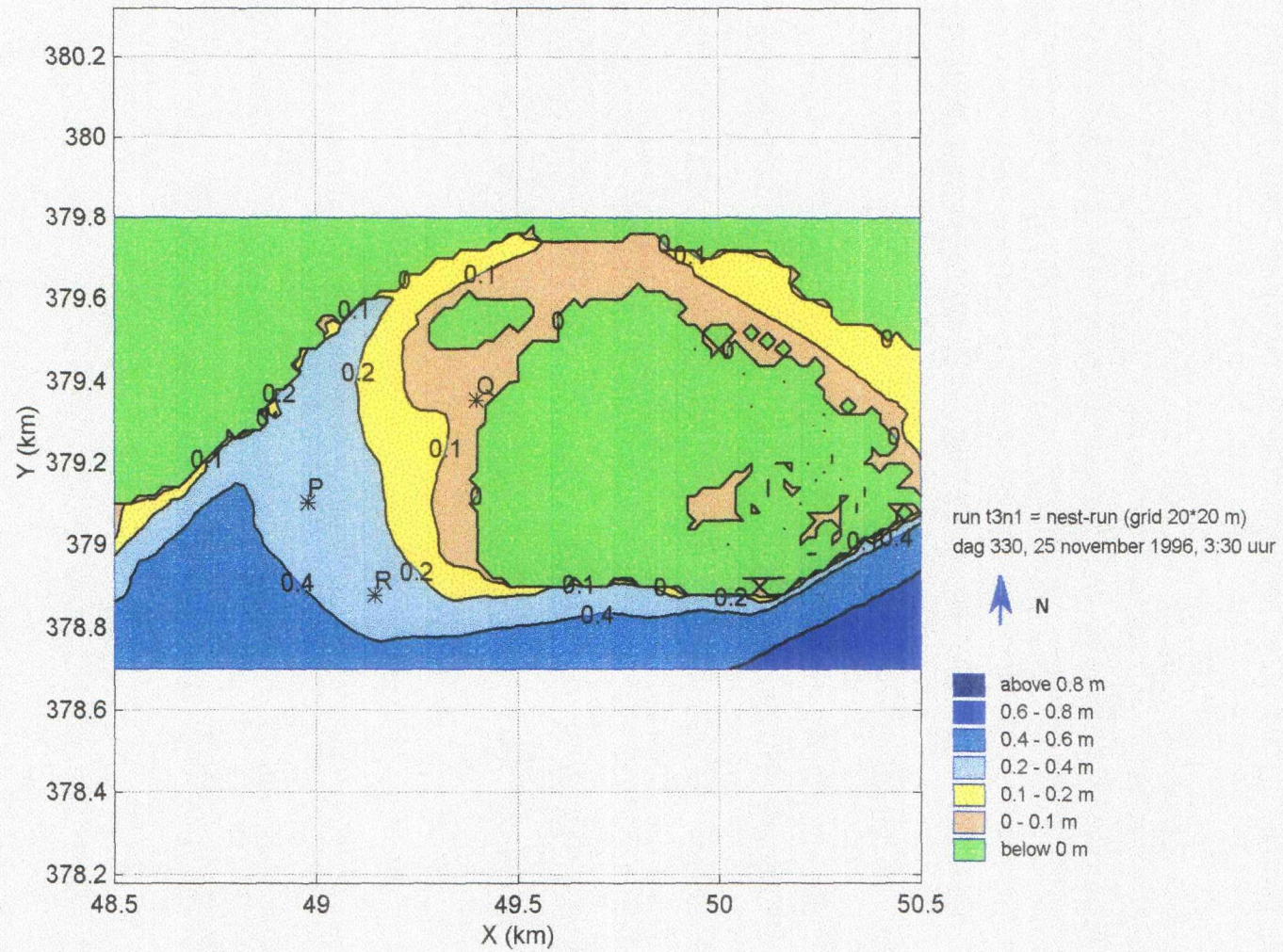
Run:t3n1, nest-run; Dag 330, 25-11-1996; Tijd: 3:30 uur

Punt	X	Y	h	Hm0	golfrichting	Qb	L	golfsteilheid	Tm01
	[m]	[m]	[m]	[m]	[graden]	[-]	[m]	[-]	[s]
P	48979.	379103.	.90	.324	69.	.0010	3.40	.1039	2.006
Q	49398.	379353.	.25	.082	55.	.0002	.88	.1002	.979
R	49145.	378878.	.94	.329	65.	.0007	4.16	.0864	2.104
S	49290.	377680.	14.64	.658	72.	.0000	5.43	.1325	2.261

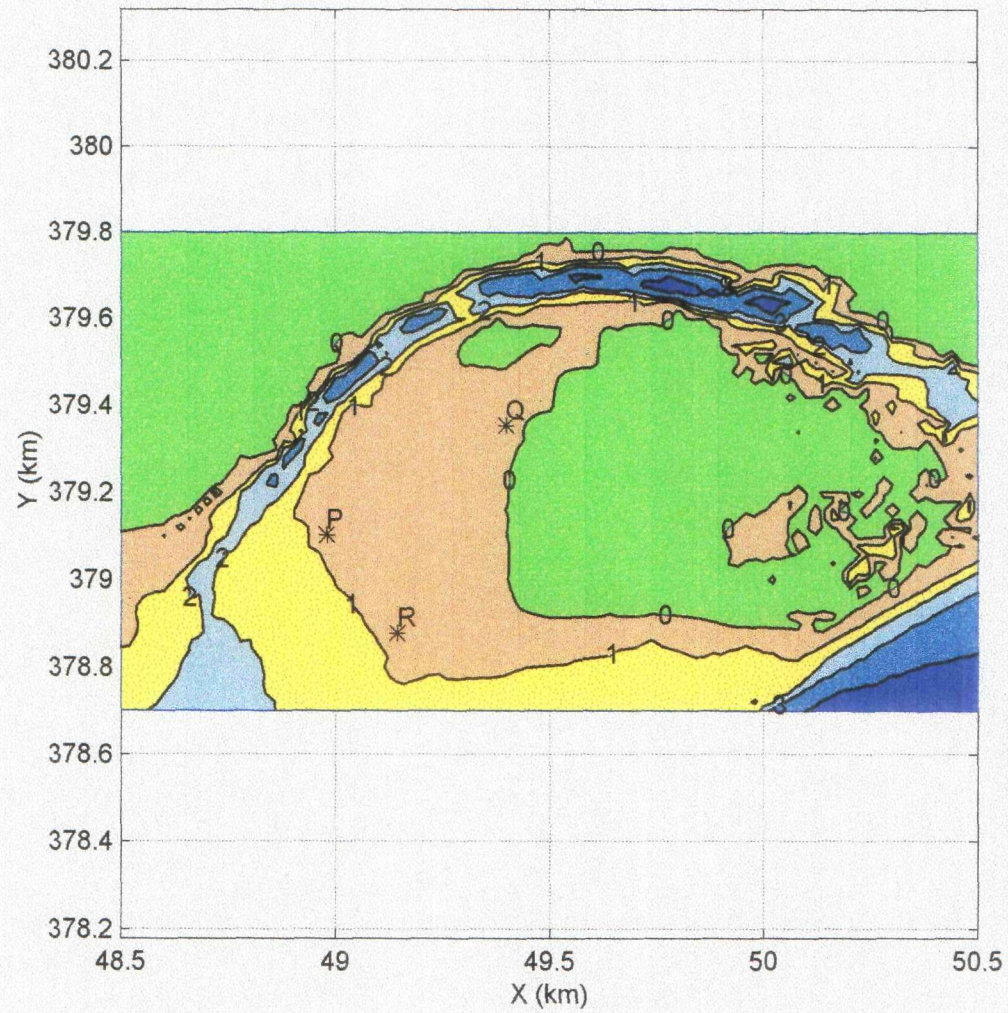
Punt	Tpiek [s]	Urms,bodem [m/s]	stroomsnelheid X [m/s]	str.snelh. Y [m/s]	Dissipatie [m2/s]
P	2.740	.20	-.13	-.18	.000
Q	1.155	.09	-.02	.06	.000
R	2.740	.21	-.17	.04	.000
S	2.740	.00	-.66	-.09	.000

Bijlagen 67 t/m 69: Kaartjes van run t3n1
(3:30 uur, nest-run): respectievelijk H_{m0} ,
waterdiepte en golfvoortplantingsrichting.

Golfhoogte Hm0 (m)



Waterdiepte (m)

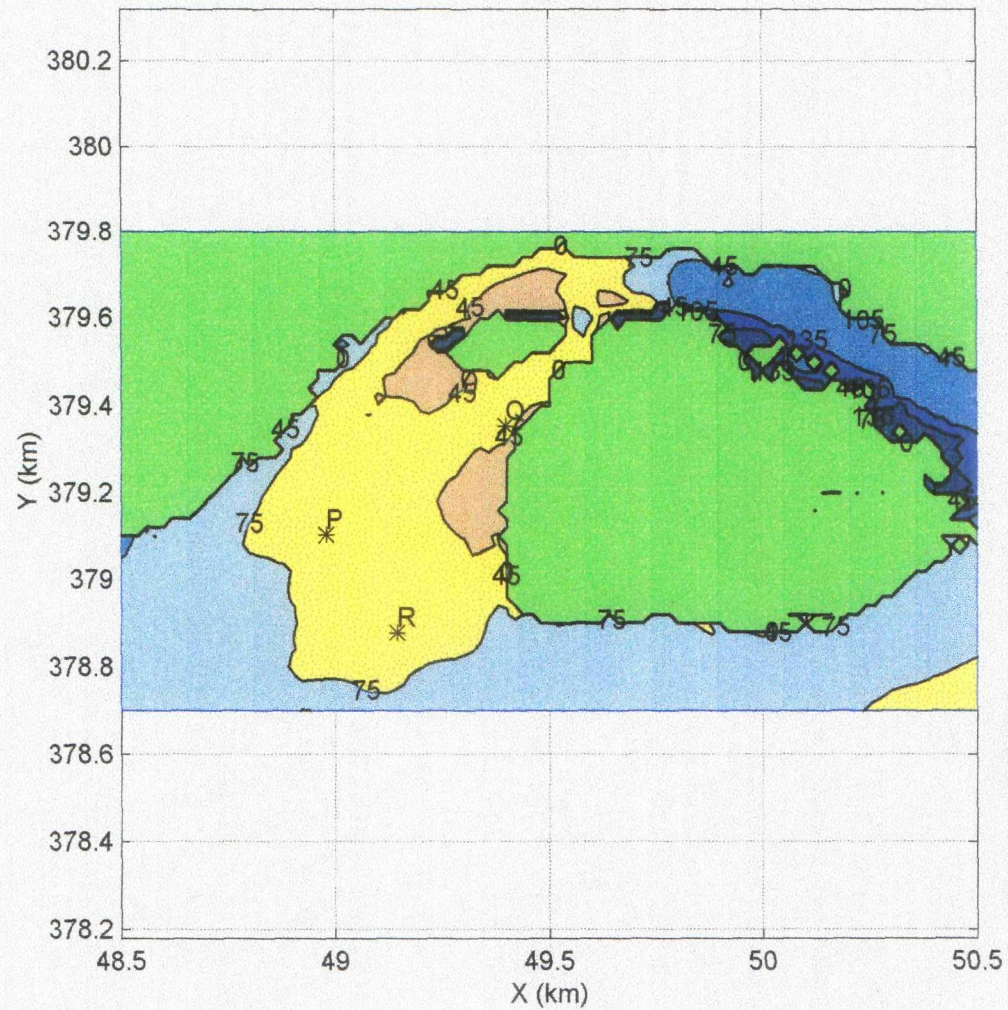


run t3n1 = nest-run (grid 20*20 m)
dag 330, 25 november 1996, 3:30 uur



- above 10 m
- 5 - 10 m
- 3 - 5 m
- 2 - 3 m
- 1 - 2 m
- 0 - 1 m
- below 0 m

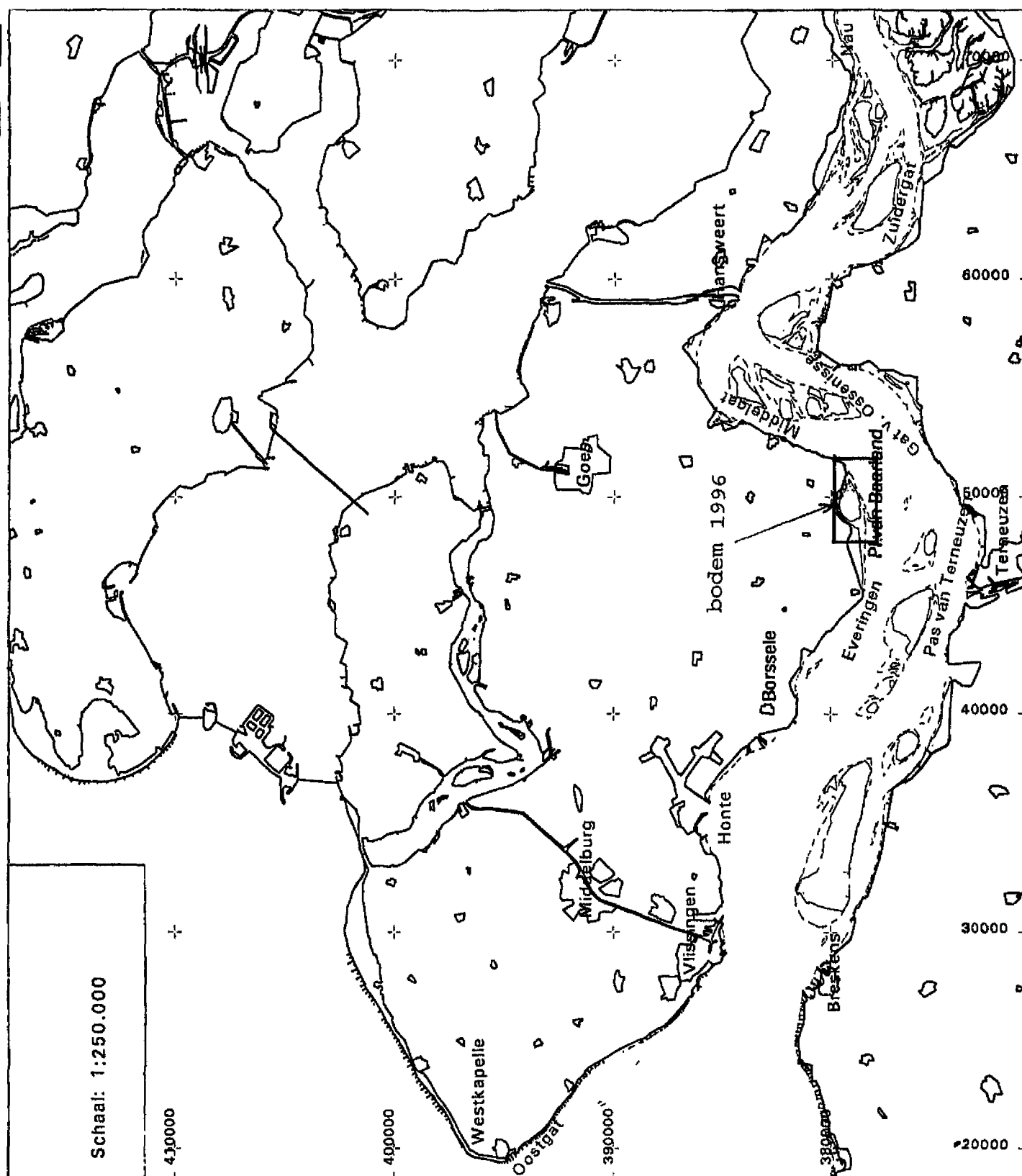
Golfrichting (graden-cartesisch)



Bijlage 70: Golfhoogtes op basis van gecorrigeerde en ongecorrigeerde golfspectra (van metingen) op punten P, Q en R.

1:30 uur	H_{m0} op basis van spectrum (m)		
meetpunt	ongecorrigeerde spectrum	spectrum met afkapfrequentie= 0.5 Hz	waarde correctiefactor bij $f= 0.5$ Hz
P	0.253	0.401	8.85
Q	0.125	0.148	2.79
R	0.336	0.510	8.25
2:00 uur	H_{m0} op basis van spectrum (m)		
meetpunt	ongecorrigeerde spectrum	spectrum met afkapfrequentie= 0.5 Hz	waarde correctiefactor bij $f= 0.5$ Hz
P	0.315	0.489	9.95
Q	0.188	0.238	3.26
R	0.344	0.550	9.70
3:30 uur	H_{m0} op basis van spectrum (m)		
meetpunt	ongecorrigeerde spectrum	spectrum met afkapfrequentie= 0.5 Hz	waarde correctiefactor bij $f= 0.5$ Hz
P	0.292	0.387	4.79
Q	0.062	0.066	1.83
R	0.377	0.493	4.63

Bijlage 71: Gedeelte van de Westerschelde met de bodem van 1996 als invoer bij WAQUA-runs.



Bijlage 72: Verantwoording gebruikte parameters bij WAQUA- en SWAN-runs.

N.B. Voor gedetailleerde informatie over de hieronder genoemde termen, zie User's Guide WAQUA (1992) en Ris et al. (1997) voor resp. WAQUA en SWAN.

WAQUA	
tijdstap berekening	0.5 minuut
bodemruwheid	Manning: 0.0155-0.0220 $\text{m}^{-1/3}\text{s}$
eddy-viscositeitscoëfficiënt	10 m^2s^{-1}
droogvalprocedure	1 (gemiddeld criterium voor waterstandspunt)

SWAN	
versie	SWAN-versie 30.50 ('cycle 2')
wind-input	3e generatie, volgens Komen; groeiterm van Cavaleri & Malanotte-Rizzoli (1981) geactiveerd; alle waarden default
'whitecapping'	idem
interacties tussen golven	'triads' en 'quadruplets' geactiveerd; alle waarden default
breken van golven door beperkende waterdiepte	default-waarden; $\alpha = 1$ en $\gamma = (H/h)_{\max} = 0.73$
bodemwrijving	JONSWAP, alle waarden default (JONSWAP=Hasselmann et al., 1973)
numerieke eigenschappen van het model	SWAN rekent door (met een maximum van 6 iteraties) totdat in meer dan 97% van de natte gridpunten: 1) de absolute verandering van H_{m0} tussen 2 iteraties kleiner is geworden dan 0.03 m óf de relatieve toename kleiner is geworden dan 0.03; én 2) de absolute verandering van RT_{m01} tussen 2 iteraties kleiner is geworden dan 0.3 s óf de relatieve toename kleiner is geworden dan 0.03.



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Aan
geadresseerde

Contactpersoon
drs. H. Verbeek

Datum
20 augustus 1997

Ons kenmerk
RIKZ/OS

Project
DYNASTAR-ECOMOR

Onderwerp
De modellering van golven en stroming op de Plaat van Baarland in de Westerschelde

Doorkiesnummer
0118 - 672.225

Bijlage(n)
1

Uw kenmerk
-

Geachte lezer,

Binnen het project DYNASTAR wordt er onderzoek gedaan naar de relaties tussen hydrodynamica, morfodynamica en de aanwezigheid van macrobenthos en vogels op een plaat in de Westerschelde. Het fysische gedeelte van dit onderzoek wordt uitgevoerd door de vakgroep Fysische Geografie van de Universiteit Utrecht. En in het kader van zijn afstudeeronderzoek heeft Kaj van Doorn een bijdrage geleverd aan het genoemde project.

Het bijgevoegde rapport beschrijft de modellering van golven en stroming op en rond de Plaat van Baarland in de Westerschelde. Hiervoor is gebruik gemaakt van het bestaande WAQUA-stromingmodel SCALDIS100. De toepassing van SWAN-golvenmodel is zelf opgezet en uitgevoerd.

De resultaten van het onderzoek laten zien dat het mogelijk is een redelijk betrouwbare weergave te maken van het stromings- en golvenveld op en rond een droogvallende plaat in de Westerschelde. Met behulp hiervan is een eerste schatting gemaakt ten aanzien van de substraat-dynamiek. Dit laatste wordt binnen het project verder uitgewerkt.

Met vriendelijke groet,

Harm Verbeek
projectbegeleider DYNASTAR-ECOMOR

Vestiging Middelburg
Postbus 8039, 4330 EA Middelburg
Bezoekadres Grenadierweg 31

Telefoon 01180-72200
Telefax 01180-16500

GEADRESSEERDEN:

RIKZ-Middelburg:

- Ad Langerak
- Bart Kornman
- Kees van der Male
- Maarten Jansen
- bibliotheek (2x)

RIKZ-Den Haag

- Jaap Voogt
- John de Ronde
- Joska Andorka Gal
- Jeroen de Jong
- Ard Kamsteeg

RWS-directie Zeeland

- Kees Storm

Universiteit Utrecht

- Kaj van Doorn
- Aart Kroon (2x)
- Marco Duiker (2x)