

MINISTERIE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP
DEPARTEMENT LEEFMILIEU EN INFRASTRUCTUUR
ADMINISTRATIE WATERWEGEN EN ZEEWEZEN
AFDELING ZEESCHELDE



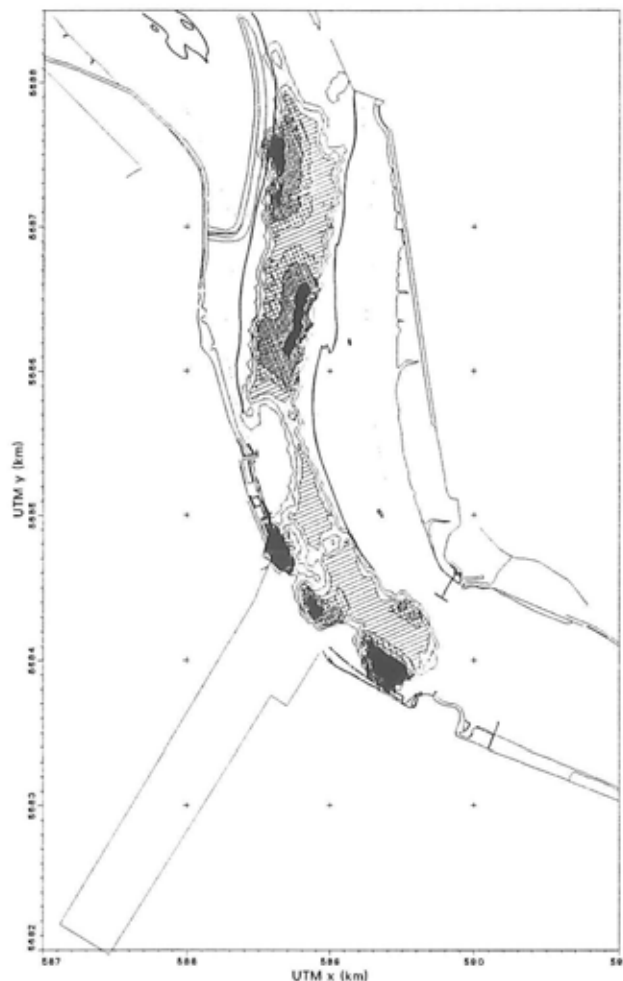
**CONTAINERDOK WEST
HYDRAULISCH - SEDIMENTOLOGISCH ONDERZOEK**

**DEELRAPPORT 6
ONDERZOEK DREMPEL VAN FREDERIK**

Juli 1998

I/R/11128/97.034/MFE

MINISTERIE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP
DEPARTEMENT LEEFMILIEU EN INFRASTRUCTUUR
ADMINISTRATIE WATERWEGEN EN ZEEWEZEN
AFDELING ZEESCHELDE



**CONTAINERDOK WEST
HYDRAULISCH - SEDIMENTOLOGISCH ONDERZOEK**

**DEELRAPPORT 6
ONDERZOEK DREMPEL VAN FREDERIK**

Juli 1998

I/R/11128/97.034/MFE

DREMPEL VAN FREDERIK DEELRAPPORT 6

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING.....	1
1.1. DE OPDRACHT	1
1.2. METHODOLOGIE VAN HET ONDERZOEK DREMPEL VAN FREDERIK.....	1
1.3. OVERZICHT VAN HET RAPPORT	2
2. DE NUMERIEKE MODELLEN.....	3
2.1. HET 3D HYDRODYNAMISCH MODEL	3
2.2. HET 3D SLIBTRANSPORTMODEL.....	4
2.2.1. <i>Wiskundige beschrijving van het model</i>	4
2.2.2. <i>Bodemschuifspanning</i>	5
2.2.3. <i>Valsnelheid van slibdeeltjes</i>	5
2.2.4. <i>Sedimentatie van slib</i>	6
2.2.5. <i>Erosie van slib</i>	7
2.3. HET 2D ZANDTRANSPORTMODEL	8
2.3.1. <i>Zandtransport in estuaria</i>	8
2.3.2. <i>Beschrijving van het zandtransportmodel FINTRA-FD</i>	8
2.3.3. <i>Berekening van het zandtransport</i>	9
2.3.4. <i>Zandtransportformule</i>	9
3. KARAKTERISATIE VAN DE BODEMSEDIMENTEN IN DE BENEDEN ZEESCHELDE	12
3.1. LITHOLOGIE.....	12
3.2. KORRELGROOTTE EN -VERDELING	13
3.3. RUWHEDEN	14
3.4. SEDIMENTATIE EN EROSIEGEGEVENS	15
3.5. BAGGERGEGEVENS	16
4. HET SCHELDEMODEL EN DE UITGEVOERDE SIMULATIES.....	18
4.1. HET SCHELDEMODEL.....	18
4.1.1. <i>Modelgrenzen</i>	18
4.1.2. <i>Modelrooster</i>	18
4.1.3. <i>Bathymetrie</i>	18
4.1.4. <i>Hydraulische randvoorwaarden</i>	18
4.1.5. <i>Slibconcentratierandvoorwaarden en slibparameterwaarden</i>	19
4.1.6. <i>Zandtransportparameterwaarden</i>	20
4.1.6.1. <i>Porositeit</i>	20
4.1.6.2. <i>Bodemruwheid</i>	20
4.1.6.3. <i>Maatgevende korreldiameter</i>	20
4.2. UITGEVOERDE SIMULATIES	21
4.3. AANLEGBAGGERWERKEN.....	21
5. NUMERIEKE SIMULATIE VAN DE HYDRODYNAMICA	23
5.1. HET STROOMBEELD, HET SNELHEIDSPROFIEL EN DE ZOUTVERDELING IN DE BENEDEN ZEESCHELDE.....	23
5.2. INVLOED VAN EEN VERDIEPING OP HET STROOMBEELD	23
5.2.1. <i>Verdieping tot -13.74 m TAW</i>	23
5.2.2. <i>Verdieping tot -14.44 m TAW</i>	24
5.3. BESLUITEN.....	24
6. NUMERIEKE SIMULATIE VAN HET SLIBTRANSPORT	25

6.1. BESCHRIJVING VAN DE SLIBAFZETTING EN DE SLIBCONCENTRATIE TER HOOGTE VAN DE DREMPEL VAN FREDERIK	25
6.2. ANALYSE VAN DE AANSLIBBING	25
6.2.1. Invloed van een verdieping op de slibafzetting in de Schelde	26
6.2.2. Invloed van een verdieping op de slibafzetting in het tijdok	27
6.3. BESLUITEN	27
7. NUMERIEKE SIMULATIE VAN HET ZANDTRANSPORT	28
7.1. CALIBRATIE VAN HET ZANDTRANSPORTMODEL	28
7.1.1. Gevoeligheidsberekeningen zonder tijdok	28
7.1.2. Gevoeligheidsberekeningen met tijdok	29
7.1.3. Invloed van het rooster	29
7.2. BESCHRIJVING VAN DE EROSIE/SEDIMENTATIE VAN ZAND IN HET MODELGEBIED	30
7.2.1. Huidige Toestand (HT)	30
7.2.1.1. Vergelijking met metingen	30
7.2.1.2. Vergelijking met baggergegevens	31
7.2.2. Simulaties van toestanden met tijdok	31
7.3. INVLOED VAN EEN VERDIEPING OP HET ZANDTRANSPORT	32
7.4. SCHATTING VAN DE ONDERHOUDSBAGGERWERKEN OP DE DREMPEL VAN FREDERIK	34
7.4.1. Volume zand	35
7.4.2. Volume slib	35
7.4.3. Totaal volume onderhoudsbaggerwerken	35
7.5. BESLUITEN	35
8. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	37
8.1. SITUERING VAN HET ONDERZOEK	37
8.2. KARAKTERISATIE VAN DE BODEMSEDIMENTEN	38
8.3. AANLEGBAGGERWERKEN VOOR EEN VERDIEPING VAN DE VAARGEUL	38
8.4. HYDRODYNAMICA	38
8.5. SLIBTRANSPORT	38
8.6. ZANDTRANSPORT	39
9. LITERATUURLIJST	40

LIJST VAN TABELLEN

TABEL 3.1: DEFINITIE VAN DE LITHOLOGISCHE EENHEDEN VOLGENS KAART BASTIN (1986).....	12
TABEL 3.2: GRANULOMETRISCHE KARAKTERISTIEKEN VAN DE SEDIMENTEN OP DE DREMPELS IN DE ZEESCHELDE VANAF 1985.....	13
TABEL 3.3: PHI SCHAAL EN KORRELGROOTTE.....	14
TABEL 3.4: BODEMVORMEN OP ENKELE PLAATSEN IN DE ZEESCHELDE.....	15
TABEL 3.5: VOLUMES GEBAGGERD IN DE ZEESCHELDE 1980 - 1989.....	16
TABEL 3.6: VOLUMES GEBAGGERD OP DE DREMPEL VAN FREDERIK 1991 - 1996.....	17
TABEL 4.1: VOLUME AANLEGBAGGERWERKEN VOOR VERDIEPING VAN DE VAARGEUL TOT -13.74 M TAW EN -14.44 M TAW.....	22
TABEL 6.1: SLIBAFZETTING.....	26
TABEL 7.1: GEVOELIGHEIDSONDERZOEK ZANDTRANSPORTMODEL (D_{50} EN K_N).....	29
TABEL 7.2: GEVOELIGHEIDSONDERZOEK ZANDTRANSPORTMODEL (GETIJ EN SALINITEIT).....	29
TABEL 7.3: EROSIE VAN ZAND.....	32
TABEL 7.4: SEDIMENTATIE VAN ZAND.....	33
TABEL 7.5: SOM EROSIE EN SEDIMENTATIE VAN ZAND.....	34

LIJST VAN BIJLAGEN

BIJLAGE 1: BODEMSEDIMENTEN BENEDEN ZEESCHELDE
BIJLAGE 2: FIGUREN HOOFDSTUK 4
BIJLAGE 3: HYDRODYNAMICA HUIDIGE TOESTAND
BIJLAGE 4: HYDRODYNAMICA T01-SP
BIJLAGE 5: HYDRODYNAMICA T01-14.4
BIJLAGE 6: VERSCHIL HYDRODYNAMICA TUSSEN T01-SP - HT
BIJLAGE 7: VERSCHIL HYDRODYNAMICA TUSSEN T01-SP - T01-14.4
BIJLAGE 8: FIGUREN SLIBTRANSPORTSIMULATIES
BIJLAGE 9: FIGUREN ZANDTRANSPORTSIMULATIES

LIJST VAN FIGUREN

BIJLAGE 1

BODEMSEDIMENTEN BENEDEN ZEESCHELDE

- 3.1 Lithologische kaart van Bastin uit 1986 van de Beneden Zeeschelde.
- 3.2 Lithologische kaart uit 1993 van de Beneden Zeeschelde.
- 3.3 Zandpercentage bodemsediment in Beneden Zeeschelde.
- 3.4 Mediane korrelgrootte (D_{50}) bodemsediment in Beneden Zeeschelde.
- 3.5 Mediane korrelgrootte (D_{50}) bodemsediment in Beneden Zeeschelde.
- 3.6 Mediane korrelgrootte (D_{50}) zandfractie in Beneden Zeeschelde.
- 3.7 Mediane korrelgrootte (D_{50}) zandfractie in Beneden Zeeschelde.
- 3.8 Gemiddelde korrelgrootte bodemsediment in Beneden Zeeschelde.
- 3.9 Sortering korrelgrootteverdeling bodemsediment in Beneden Zeeschelde.
- 3.10 Scheefheid korrelgrootteverdeling bodemsediment in Beneden Zeeschelde.
- 3.11 Amplitude bodemvormen in het noordelijk deel van het modelgebied.
- 3.12 Gemeten erosie en sedimentatie op de Drempel van Zandvliet 1980-1983.

BIJLAGE 2

- 4.1 De Schelde met aanduiding van de modelgrenzen.
- 4.2 Modelrooster T01.
- 4.3 Bathymetrie volledig model Huidige Toestand.
- 4.4 Bathymetrie volledig model T01.
- 4.5 Bathymetrie volledig model T01-14.4.
- 4.6 Isolijnen gelijke baggerdiepte voor een verdieping tot -13.3 m GLLWS.
- 4.7 Isolijnen gelijke baggerdiepte voor een verdieping tot -14.0 m GLLWS.

BIJLAGE 3

HYDRODYNAMICA HUIDIGE TOESTAND

- 5.1 Ligging van enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.2 Snelheid i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.3 Saliniteit i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.4-15 Uurlijks stroombeeld voor model HT.

BIJLAGE 4

HYDRODYNAMICA T01-SP

- 5.16 Snelheid i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.17 Saliniteit i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.18-29 Uurlijks stroombeeld voor model T01-sp.

BIJLAGE 5

HYDRODYNAMICA T01-14.4

- 5.30 Snelheid i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.31 Saliniteit i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik.
- 5.32-43 Uurlijks stroombeeld voor model T01-14.4.

BIJLAGE 6

VERSCHIL TUSSEN T01-SP - HT

- 5.44-55 Uurlijks verschil in stroombeeld tussen model T01-sp en HT (T01-sp - HT).

BIJLAGE 7*VERSCHIL TUSSEN T01-SP - T01-14.4*

5.56-67 Uurlijks verschil in stroombeeld tussen model T01-sp en T01-14.4 (T01-sp - T01-14.4).

BIJLAGE 8*FIGUREN SLIBTRANSPORTSIMULATIES*

- 6.1 Slibafzetting huidige toestand (HT).
- 6.2 Slibafzetting toestand T01-sp.
- 6.3 Slibafzetting toestand T01-14.4.
- 6.4 Slibconcentratie i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik voor HT.
- 6.5 Slibconcentratie i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik voor T01-sp.
- 6.6 Slibconcentratie i.f.v. de tijd in enkele punten op de Drempel van Frederik voor T01-14.4.

BIJLAGE 9*FIGUREN ZANDTRANSPORTSIMULATIES*

- 7.1 HT: Erosie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.2 HT: Sedimentatie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.3 HT: Erosie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.4 HT: Sedimentatie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.5 T01-sp: Erosie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.6 T01-sp: Sedimentatie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.7 T01-sp: Erosie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.8 T01-sp: Sedimentatie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.9 T01-np: Erosie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.10 T01-np: Sedimentatie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.11 T01-np: Erosie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.12 T01-np: Sedimentatie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.13 T01-14.4: Erosie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.14 T01-14.4: Sedimentatie van zand in mm/getij voor het volledig modelgebied.
- 7.15 T01-14.4: Erosie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.16 T01-14.4: Sedimentatie van zand in mm/getij ter hoogte van de Drempel van Frederik.
- 7.17 Opdeling van het modelgebied in zones voor sedimentatie-/erosieberekeningen (slib of zand).
- 7.18 Verschilkaart T01sp - HT.
- 7.19 Verschilkaart T01sp - T01-14.4.

1. INLEIDING

1.1. De opdracht

In juni 1995 gaf de Technische Dienst van het Havenbedrijf Antwerpen aan het studieconsortium IMDC-WLB de opdracht om een oriënterend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek uit te voeren met het oog op de realisatie van containerkaaien langs de linker Scheldeoever. Uit dit onderzoek werden een aantal (voorlopige) besluiten getrokken in verband met de bouw van een tijdok aan de linkeroever, zie IMDC-WLB (1995a-c), er bleven echter een aantal vragen onbeantwoord, met name hoe het onderhoudsbaggerwerk in het tijdok kan worden beperkt en wat de gevolgen zijn van de verdieping van de Drempel van Frederik op het hydraulisch-sedimentologisch regime. Om een antwoord te kunnen geven op deze vragen en ook om de onzekerheidsmarge rond de vroegere resultaten en besluiten te verkleinen werd in december 1996 door de afdeling Zeeschelde aan IMDC de opdracht verleend voor het uitvoeren van een bijkomend hydraulisch-sedimentologisch detailonderzoek.

In dit deelrapport worden de gevolgen van de verdieping van de Drempel van Frederik en de bouw van het tijdok op het hydraulisch-sedimentologisch regime van de Beneden Zeeschelde onderzocht. Het doel van dit onderzoek is om met behulp van numerieke modellen (3D hydrodynamisch, 3D slibtransport en 2D zandtransport) na te gaan wat het effect van een verdieping van de vaargeul is op het stroombeeld, het slibtransport en het zandtransport ter hoogte van de Drempel van Frederik.

1.2. Methodologie van het onderzoek Drempel van Frederik

De globale aanpak van het onderzoek 'Drempel van Frederik' is als volgt:

1. Karakterisatie van de bodemsedimenten op basis van literatuurgegevens.
2. Het inschatten van het volume aanlegbaggerwerken voor een verdieping tot -13.3 en -14.0 m GLLWS.
3. Het implementeren van de verdieping van de vaargeul tot -14.0 m GLLWS in het numeriek model en het uitvoeren van de simulaties. Het bepalen van de stroombeelden en stroomsnelheden voor een verdieping tot -13.3 en -14.0 m GLLWS.
4. De schatting van de onderhoudsbaggerwerken ter hoogte van de Drempel van Frederik op basis van de modelsimulaties, zowel inzake slib- als zandtransport.

Het onderzoek van de Drempel van Frederik is uitgevoerd met behulp van het 3D hydrodynamisch, het 3D slibtransport- en het zandtransportmodel (FINTRA-FD), die opgesteld werden tijdens het oriënterend onderzoek van het tijdok (zie IMDC-WLB, 1995a-c; Fettweis en Sas, 1996) en aangepast tijdens het detailonderzoek tijdok (IMDC, 1998c). De modelstudie omvat de simulatie van het stromingspatroon, van het slibtransport en van het zandtransport in de Beneden Zeeschelde, met name het deel gelegen tussen de grens en een raai ter hoogte van Meestoef. Om binnen de gevraagde termijn en het budget en ook tengevolge van beperkingen inherent aan het gebruik van numerieke modellen een antwoord te kunnen geven op de gestelde vragen moet rekening gehouden worden met volgende beperkingen:

1. Het gebruik van numerieke sedimenttransportmodellen en de interpretatie van de resultaten vereist een goede kennis van de sedimentkarakteristieken in het modelgebied. De keuze van representatieve waarden voor de parameters is belangrijk. Om een goede keuze te kunnen maken is het nodig om te beschikken over een uitgebreid dataset.

2. Er is gerekend met een homogene bodem, er wordt dus geen interactie beschouwd tussen zand en slib bij het simuleren van de erosie en sedimentatie van zand en slib. De consolidatie van slib wordt niet in rekening gebracht.
3. Omdat de modelstudies vóór de 13-uursmetingen, de langdurige metingen en de erosiegevoeligheidsmetingen begonnen zijn, werden dezelfde randvoorwaarden en parameterwaarden gebruikt als voor het oriënterend onderzoek (i.e. getij van 27/09/1990 en 04/10/1990). Er wordt gerekend met dezelfde waarden voor de slibparameters als bij het oriënterend onderzoek, dit omdat de metingen in situ en in het laboratorium voor het meten van de erosie nog niet beschikbaar waren op het moment dat de modelstudie uitgevoerd werd.
4. Er wordt gerekend met een constante randvoorwaarde van slibconcentratie. Deze waarde geeft eerder een maximum weer van de langdurige variaties in slibconcentratie die optreden in de Beneden Zeeschelde.

Een beschrijving van de meetresultaten bekomen in het kader van dit hydraulisch-sedimentologisch onderzoek kunnen gevonden worden in IMDC (1997a-b), zijnde de 13-uursmetingen van 23/04/1997 en in IMDC (1998a-b), i.e. de erosiemetingen in situ en in het labo.

1.3. Overzicht van het rapport

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de gebruikte numerieke modellen, dit zijn het 3D hydrodynamisch model, het 3D slibtransportmodel en het 2D zandtransportcapaciteitenmodel. Tevens wordt beschreven hoe het sedimentatie- en erosieproces gemodelleerd wordt.

In hoofdstuk 3 worden de beschikbare gegevens over de bodemsedimenten in de Beneden Zeeschelde bijeengebracht, hierbij wordt nader ingegaan op zowel lithologie, korrelgrootte van de sedimenten, bodemruwheden, sedimentatie-, erosie- als baggergegevens

In hoofdstuk 4 wordt het Scheldemodel beschreven (modelgrenzen, rooster, bathymetrie randvoorwaarden, parameterwaarden) en wordt een overzicht gegeven van de (bijkomende) uitgevoerde simulaties. In dit hoofdstuk wordt ook een beschrijving gegeven van de geschatte hoeveelheid aanlegbaggerwerken voor een verdieping van de vaargeul tot -13.3 en -14.0 m GLLWS.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de hydrodynamische simulaties voorgesteld die betrekking hebben op een verdieping van de vaargeul. Tevens zal ingegaan worden op de effecten van de verdieping van de vaargeul en de bouw van het tijdok op de stroming.

In hoofdstuk 6 worden de resultaten van de slibtransportsimulaties getoond. Er wordt vooral aandacht besteed aan de aanslibbing ten gevolge van de verdieping van de vaargeul. Naast een beschrijving van de slibafzetting wordt de aanslibbing in het modelgebied kwantitatief geanalyseerd.

In hoofdstuk 7 worden de resultaten van de zandtransportsimulaties voorgesteld, beschreven en geïnterpreteerd voor de Beneden Zeeschelde. De aandacht gaat vooral naar een kwalitatieve en kwantitatieve analyse van erosie of sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Frederik.

In hoofdstuk 8 tenslotte wordt een overzicht van het rapport gegeven en worden de belangrijkste besluiten bijeengebracht.

2. DE NUMERIEKE MODELLEN

2.1. Het 3D hydrodynamisch model

De hydrodynamische simulaties werden uitgevoerd met het HR Wallingford Tideflow 3D model. Het gecombineerde 3D stromings- en zouttransportmodel is gebaseerd op de behoudsvergelijkingen voor massa, momentum en zout, rekening houdend met het drijfvermogen, de dichtheitsstromingen en de onderdrukking van verticale turbulente menging door gelaagdheid. Dit laatste is essentieel om een verticale saliniteitsgradiënt te kunnen vormen. Het model veronderstelt dat de druk hydrostatisch is, wat voor deze toepassing zeker geldig is. Volgende vergelijkingen worden door het model opgelost:

Continuïteitsvergelijking voor het watervolume:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Continuïteitsvergelijking voor momentum in x- en y-richting:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = fv + A_h \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -fu + A_h \nabla^2 v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2.3)$$

Hydrostatische vergelijking:

$$p = -g \int_z^{\eta} \rho \, dz \quad (2.4)$$

Continuïteitsvergelijking voor zout:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(us) + \frac{\partial}{\partial y}(vs) + \frac{\partial}{\partial z}(ws) = K_h \nabla^2 s + \frac{\partial f_{sz}}{\partial z} \quad (2.5)$$

De gebruikte symbolen betekenen:

x, y, z :	Cartesische coördinaten [m],
u, v, w :	snelheidscomponenten in x-, y- en z-richting [m/s],
t :	tijd [s],
ρ :	densiteit [kg/m ³],
p :	druk [Pa],
g :	de versnelling t.g.v. de zwaartekracht [9.81 m/s ²],
f :	Coriolis parameter [1/s],
∇^2 :	$\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$,
η :	z aan het vrij oppervlak [m],
A_h :	horizontale eddy viscositeit [m ² /s],
τ_x, τ_y :	horizontale componenten v/h verticale turbulente momentumtransport [Pa],
s :	saliniteit [kg/m ³],
K_h :	horizontale eddy diffusiviteit [m ² /s],
f_{sz} :	verticale turbulente zoutflux [kg/m ² s].

De partiële differentiaalvergelijkingen worden opgelost met behulp van een eindige differenties techniek. Het horizontale rooster is equidistant en rechthoekig. Waterstanden en saliniteiten worden in het midden, u-snelheden aan de oostzijde en v-snelheden aan de zuidzijde van elke cel berekend (Arakawa C-rooster). De verticale structuur wordt bekomen door meerdere horizontale vlakken boven elkaar te leggen. Op elke tijdstap worden de horizontale termen voor elke laag in de vergelijkingen expliciet opgelost terwijl de verticale advection en diffusie termen impliciet opgelost worden.

Er wordt verondersteld dat de densiteit een lineaire functie is van de saliniteit. Het model gebruikt een menglengte (mixing length) formulering voor turbulentie. De beschrijving van de menglengte en de reductie van de verticale turbulente uitwisseling door een stabiele gelaagdheid kan gevonden worden in Odd en Rodger (1978).

2.2. Het 3D slibtransportmodel

Slib is een mengsel van zand, silt, klei, organische bestanddelen en organismen dat gekarakteriseerd kan worden door een reeks van fysico-chemische eigenschappen, zie EC-MAST (1993). Slib wordt hier gedefinieerd als de sedimentfractie met een korrelgrootte kleiner dan 63 μm . Alhoewel de korrelgrootte van slibdeeltjes veel groter kan zijn dan 63 μm wordt deze definitie aangehouden omdat de bindingen tussen de verschillende componenten verbroken worden door het nemen van stalen in situ en door het analyseren door zieving. Deze technieken werden gebruikt voor het afijken van de meettoestellen die gebruikt werden voor het meten van de slibconcentratie in de Schelde. De resultaten van deze metingen werden gebruikt voor het opstellen van de slibconcentratierandvoorwaarden.

Het slibtransportmodel maakt gebruik van de stromingen en de waterstanden berekend met het 3D hydrodynamisch model om het transport, de sedimentatie en de erosie van het slib te berekenen. De slibtransportsimulaties werden uitgevoerd met het HR Wallingford 3D Mudflow model. In dit hoofdstuk zal een korte beschrijving van het model gegeven worden.

2.2.1. Wiskundige beschrijving van het model

Het model lost de 3 dimensionale continuïteitsvergelijking voor slibconcentratie op. De vergelijking is analoog aan deze voor zout (2.5) met dat verschil dat er enkele termen die de erosie, sedimentatie en het uitzakken van het slib beschrijven toegevoegd zijn. De vergelijking kan als volgt weergegeven worden:

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} + u \frac{\partial c_l}{\partial x} + v \frac{\partial c_l}{\partial y} + w \frac{\partial c_l}{\partial z} = D \nabla^2 c_l + \frac{\partial}{\partial z} (D_w \frac{\partial c_l}{\partial z}) + S - E \quad (2.6)$$

waarbij

x, y, z :	Cartesische coördinaten [m],
u, v, w	: snelheidscomponenten in x-, y- en z-richting [m/s],
c_l	: $c \cdot d$ [kg/m ²], met c de slibconcentratie [kg/m ³] en d een verticale afstand [m],
t	: tijd [s],
D	: longitudinale en laterale dispersiecoëfficiënt [m ² /s],
D_w	: verticale dispersiecoëfficiënt [m ² /s],
S	: bronterm voor sedimentatie [kg/m ² s],
E	: bronterm voor erosie [kg/m ² s].

Een expliciete eindige differenties methode wordt gebruikt om de vergelijking op te lossen. De advectione termen worden benaderd met een opwaarts eindige differentiesschema. De verge-

lijking wordt gediscretiseerd op een rechthoekig rooster. De afstand d wordt in de eindige differentiesbenadering de laagdikte van het model. De longitudinale en de transversale diffusiecoëfficiënten zijn niet strikt gedefinieerd en hangen af van de roosterafstand. Zij hebben echter een ondergeschikte invloed op de rekenresultaten. Met toenemende roosterafstand speelt de diffusie een grotere rol. De diffusiecoëfficiënten worden in het model zelf berekend afhankelijk van de lokale diepte en snelheid.

2.2.2. Bodemschuifspanning

De erosie en sedimentatie processen worden berekend met formules die gebruik maken van de bodemschuifspanning. De bodemschuifspanning wordt gedefinieerd als een kwadratische functie van de snelheid:

$$\tau_b = \rho k U^2 \quad (2.7)$$

waarbij

- τ_b : de bodemschuifspanning [Pa],
- ρ : de waterdensiteit [kg/m³],
- k : de wrijvingsfactor,
- U : de snelheidsvector [m/s].

De wrijvingsfactor k kan geschreven worden als:

$$k = \frac{g}{C^2} = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (2.8)$$

met

- g : de versnelling t.g.v. de zwaartekracht [9.81 m/s²],
- C : de Chézy-coëfficiënt [m^{0.5}/s],
- n : de Manning-coëfficiënt [s/m^{1/3}],
- h : de waterdiepte [m].

2.2.3. Valsnelheid van slibdeeltjes

De valsnelheid is een van de belangrijkste parameters bij het transport van cohesieve sedimenten en wordt gebruikt bij de berekening van de sedimentatie, zie § 2.2.4., vgl (2.11). Slibdeeltjes kennen een grote spreiding in valsnelheid gaande van 10⁻⁴ tot enkele mm/s tengevolge van de vorming van aggregaten en vlokken (flocculatie). Zonder deze vlokvorming, die zorgt voor relatief grote valsnelheden, zouden de slibdeeltjes voortdurend in suspensie blijven. De vorming van slibvlokken is een functie van de slibconcentratie, de samenstelling van het sediment, de fysico-chemische eigenschappen en het stromingsveld. De valsnelheid neemt toe i.f.v. de concentratie, omdat het aantal deeltjes aanwezig in het water toeneemt en daardoor ook de botsingen tussen deeltjes wat de vorming van aggregaten en vlokken beïnvloedt. Bij lagere concentraties is de valsnelheid nagenoeg constant omdat er weinig botsingen zijn tussen de slibdeeltjes. Bij heel hoge concentraties treedt er een actieve interactie op tussen de deeltjes waardoor de bezinking gehinderd wordt en vloeibaar gevormd kan worden.

De valsnelheid van slibdeeltjes kan enkel bepaald worden door het uitvoeren van metingen. De neerslag van slib wordt bepaald door de beweging van de slibdeeltjes onder invloed van de zwaartekracht, de visceuze schuifspanningen, de interactie tussen slibdeeltjes en door Brownse bewegingen. De grootte van de slibvlokken of aggregaten is afhankelijk van de frequentie van botsingen tussen slibdeeltjes en door de grootte van de cohesieve krachten. Deze krachten zijn

een complexe functie van de fysico-chemische eigenschappen van het sediment en de omgevingsvloeistof, daarom is aan te raden om de valsnelheid van het slib in situ te meten.

De slibconcentratie wordt aanzien als een zeer belangrijke parameter voor de valsnelheid van slibvlokken. Dit is vooral het geval bij lage turbulentie-niveaus, bij hoge turbulentie-niveaus zijn de afmetingen van de kleinste wervels bepalend voor de vloggrootte en dus de bezinksnelheid (Van Leussen, 1994). De valsnelheid w_s [m/s] wordt dikwijls uitgedrukt door volgende formule met c de slibconcentratie en K een empirische constante (zie b.v. Krone, 1962):

$$w_s = K c^{4/3} \quad (2.9)$$

Vanaf een concentratie van 10 g/l treedt 'hindered settling' op en kan deze formule niet meer gebruikt worden. In de Schelde zijn de slibconcentraties gering (gewoonlijk < 1 g/l) zodat de valsnelheid als een eenvoudige functie van de concentratie uitgedrukt wordt:

$$w_s = \text{maximum}(c w; w_{smin}) \quad (2.10)$$

met w [$m^4/(kg \cdot s)$] een empirische constante en w_{smin} [m/s] een minimum waarde voor de valsnelheid. Formule (2.10) wordt toegepast in het slibtransportmodel.

Er bestaan voor de Zee- en de Westerschelde weinig data over de valsnelheid van slibdeeltjes. De valsnelheid van slib in de Schelde is volgens Manni (1986) beperkt tot 0.3 mm/s. Metingen met behulp van de Owen tube in de toegangsgoel van de Kallosluis gaven waarden gelegen tussen 0.1 en 1.5 mm/s (IMDC, 1988a). Winterwerp (1997) vermeld waarden voor de valsnelheid in de Beneden Zeeschelde van 0.1 tot 1 mm/s. Omdat de slibvlokken en slibaggregaten gedeeltelijk vernietigd worden door de meting, kan verwacht worden dat de valsnelheden van het geflocculeerde slib hoger liggen. Uit de meetresultaten van de 13-uursmeting ter hoogte van de Drempel van Zandvliet op 27/09/1990 en 04/10/1990 werd de effectieve valsnelheid berekend (Fettweis, 1995). De effectieve valsnelheid is geen eigenschap van het sediment omdat in de waarde ook de verticale fluxen tengevolge van turbulente menging meegerekend worden. De gevonden waarden liggen tussen 0 en 5 mm/s en geven een indicatie voor de grootte van de valsnelheid.

2.2.4. Sedimentatie van slib

Afzetting is het proces waarbij slibdeeltjes zich vasthechten aan de bodem. Voor een cohesief sediment in suspensie bestaat er een kritische waarde van de bodemschuifspanning onder welke al het sediment in suspensie afgezet kan worden, dit is de kritische schuifspanning voor sedimentatie. Terwijl voor een uniform sediment alle sedimentdeeltjes in suspensie blijven boven deze kritische waarde van de bodemschuifspanning, kunnen bij een heterogeen sediment ook de grotere en zwaardere deeltjes afgezet worden boven deze kritische schuifspanningswaarde. De kritische schuifspanning voor sedimentatie bepaald of het sediment in suspensie blijft en dus ook hoeveel sediment beschikbaar is voor transport. De vergelijking voor sedimentatie kan als volgt geschreven worden (Krone, 1962):

$$S = w_s c (\tau_{cd} - \tau_b) / \tau_{cd} \quad (2.11)$$

waarbij

- S: de bronterm voor sedimentatie [$kg/m^2 \cdot s$],
- c: de slibconcentratie [kg/m^3],
- w_s : de valsnelheid van het slib [m/s],
- τ_b : de bodemschuifspanning [Pa],
- τ_{cd} : de kritische schuifspanning voor sedimentatie [Pa].

Voor $\tau_b = \tau_{cd}$ is de sedimentatie van de sedimentdeeltjes in evenwicht met de verticale diffusie. Bij een verdere afname van de stroming neemt zowel de bodemschuifspanning als de verticale diffusie af zodat de slibpartikels zich kunnen vasthechten aan de bodem. Waarden voor τ_{cd} en w_s dienen experimenteel (labo of natuurmeting) of via calibratie bepaald te worden. De kritische schuifspanning voor sedimentatie ligt gewoonlijk tussen 0.05 en 0.2 Pa (EC-MAST, 1993). Voor de Schelde worden waarden van 0.07 (HR, 1980) en 0.2 Pa (Mulder en Udink, 1990) vermeld.

2.2.5. Erosie van slib

Erosie van slib wordt gedefinieerd als de som van de processen die maken dat afgezette slibdeeltjes terug in suspensie gebracht worden en getransporteerd kunnen worden (Teeter, 1992). Eenmaal in suspensie gebracht, kunnen de slibdeeltjes gedurende een lange tijdspanne en over een grote afstand getransporteerd worden. De erosie van cohesief materiaal is afhankelijk van de cohesieve banden tussen de partikels en van de veranderingen die kunnen optreden in de sedimentstructuren door consolidatie. De bodemschuifspanning is de belangrijkste hydrodynamische factor die het opwervelen van slibdeeltjes beheerst. De weerstand tegen erosie is afhankelijk van onder meer de sedimentsamenstelling, de eigenschappen van het poriënwater (saliniteit, Sodium Adsorption Ratio, pH en temperatuur), de wijze waarop het sediment werd afgezet en de consolidatiegraad. Er kunnen drie soorten van erosie worden onderscheiden (Mehta et al., 1989): *oppervlakte-erosie* waarbij de slibvlokken op successieve wijze in suspensie komen, *massa-erosie* waarbij grote gedeelten van de bodem losgerukt worden als gevolg van hoge bodemschuifspanningen en *opwervelen* van een stationaire slibsuspensie waarbij vloeibaar slib aan hoge snelheden in de waterkolom geresuspendeerd wordt.

De hoeveelheid slib die erodeert is een functie van de bodemschuifspanning en de kritische schuifspanning voor erosie. De erosiesnelheid wordt uitgedrukt als een massa van sediment per eenheidsoppervlakte en tijd. De erosiesnelheid bepaald de lokale slibconcentratie en aldus ook de hoeveelheid slib die beschikbaar is voor transport en sedimentatie op andere plaatsen. Algemeen wordt aangenomen dat de erosiesnelheid onafhankelijk is van de sedimentconcentratie in de eroderende stroming (Odd en Owen, 1972). Voor een slibbodem wordt de kritische schuifspanning voor erosie, τ_{ce} , gedefinieerd als de waarde vanaf dewelke het sediment begint te eroderen. Deze waarde is een functie van de dichtheid van het materiaal. De erosiesnelheid wordt gewoonlijk voorgesteld als een functie van het overschot aan schuifspanning. De erosiesnelheid (voor $\tau_b \geq \tau_{ce}$) kan als volgt geschreven worden (voor $\tau_b < \tau_{ce}$ is $E = 0$):

$$E = \frac{dm}{dt} = M_e (\tau_b - \tau_{ce}) \quad (2.12)$$

waarbij

E	:	erosiesnelheid [kg/m ² s],
m	:	massa aan sediment per eenheidsoppervlakte [kg/m ²]
M_e	:	erosieconstante [(kg/m ² s)/Pa],
τ_b	:	bodemschuifspanning [Pa],
τ_{ce}	:	kritische schuifspanning voor erosie [Pa].

Indien de kritische schuifspanning voor erosie en de erosieconstante gekend zijn dan kan de erosie berekend worden.

2.3. Het 2D zandtransportmodel

2.3.1. Zandtransport in estuaria

Zandkorrels kunnen ten gevolge van de plaatselijke bodemschuifspanning, de turbulentie van het water en de zwaartekracht getransporteerd worden. Men onderscheidt twee soorten van sedimenttransport: bodemtransport (bedload) en suspensietransport (suspended load). Het bodemtransport bevat voornamelijk de grotere korrelgrootten en is beperkt tot een relatief dunne laag boven de bodem. Het suspensietransport bevat het fijnere materiaal (D_{50} van 0.063 - 0.25 mm), dat relatief evenwichtig en met een lage concentratie verdeeld is over de waterkolom. Bij het suspensietransport worden de sedimentkorrels gedragen door de schuifspanningen ten gevolge van de turbulentie van de stroming.

De studie van zandtransport in estuaria is over het algemeen moeilijk, omdat in estuaria de stroming niet permanent is tengevolge van het getij en omdat er een grote verscheidenheid aan sedimenten aanwezig is op de bodem. Deze factoren maken dat in estuaria meestal geen evenwichtstransporten bereikt kunnen worden. Het samengaan van zowel zand- als slibtransport in getijdewateren kan resulteren in een typische afwisseling van zand en sliblaagjes op de bodem. Zandtransport en dus ook sedimentatie van zand treedt pas op wanneer een kritische bodemschuifspanning overschreden wordt, terwijl de slibdeeltjes zich pas aan de bodem hechten bij een schuifspanning lager dan een kritische waarde. De hieruit mogelijks resulterende afwisseling van zand- en sliblaagjes is afhankelijk van de duur dat, gedurende eb en vloed, de kritische bodemschuifspanning voor de erosie van zand en slib wordt overschreden en de duur dat slib in suspensie afgezet kan worden. Deze interactie tussen zowel cohesief als niet cohesief sediment op het sedimenttransport wordt in dit model niet in rekening gebracht, de berekening van erosie en sedimentatie van zand steunt dus op de aanname dat de bodem enkel uit zand bestaat (gedefinieerd als een sediment met een korrelgrootte tussen 0.063 tot 2 mm). De belangrijkste sedimenteigenschappen voor de berekening van het zandtransport zijn de korrelgrootte en de vorm van de partikels en de porositeit, de valsnelheid en het soortelijk gewicht van het sediment.

2.3.2. Beschrijving van het zandtransportmodel FINTRA-FD

Het FINTRA-FD model is een zandtransportcapaciteitenmodel. Uitgaande van een numeriek rooster en van waterstands- en snelheidsvelden, afkomstig van een hydrodynamisch model, worden transportcapaciteiten berekend. Hieruit wordt per rooster cel een sedimentbalans opgesteld, waaruit per cel erosie of sedimentatie berekend kan worden. Erosie en sedimentatie zijn een gevolg van verschillen in transportcapaciteit en dus niet rechtsstreeks het gevolg van de grootte ervan. Gesommeerd over de tijd geeft dit de erosie of sedimentatie per beschouwde periode (volledig getij, eb of vloed). Belangrijk hierbij zijn de wijze waarop het transport berekend wordt en de gebruikte zandtransportformule, zie § 2.3.3. en 2.3.4.

Het programma is gebaseerd op het zandtransportcapaciteitenmodel FINTRA dat gebruikt werd bij o.a. het oriënterend onderzoek van het tijdok (IMDC-WLB, 1995a) en het onderzoek van de Containerkaai Noord (IMDC-WLB, 1992b). Het hier gebruikte model FINTRA-FD (FD staat voor Finite Difference) werd aangepast om de invoer (u -, v -snelheden, waterstand en rechthoekig Arakawa-C rooster) afkomstig van het 3D hydrodynamisch model (HR-Tideflow, zie § 2.1) in te kunnen lezen en om te rekenen naar dieptegemiddelde snelheden op de randen van elke rooster cel. Dit had als consequentie dat bijna heel het programma diende herschreven te worden, maar biedt als voordeel dat gerekend kan worden met dezelfde hydrodynamica als voor de slibtransport simulaties en dat een rechthoekig rooster met gelijke celgrootte gebruikt kan worden, wat de numerieke effecten die door het rooster gegenereerd kunnen worden, vermindert, zie IMDC-WLB (1992b)

Het model heeft geen open randvoorwaarde in de vorm van een sedimentconcentratie nodig. Er wordt vanuit gegaan dat heel het modelgebied uit zand bestaat met dezelfde D_{50} en eenzelfde bodemruwheid. Dit toont het belang aan van het kiezen van een representatieve korrelgrootte en bodemruwheid voor heel het modelgebied.

2.3.3. Berekening van het zandtransport

De berekening van transporten dient principieel te gebeuren door eerst de transporten te bepalen in de roosterpunten (hoekpunten van cel) en daarna de transporten tussen de roosterpunten te middelen om het transport door de celzijden te bepalen (*evenwichtstransport*). In de praktijk echter kunnen sterke discontinuïteiten optreden in de resultaten, die veroorzaakt worden doordat het transport, dat evenredig is met de snelheid volgens een 5^{de} macht, zeer sterk op snelheidsveranderingen reageert. Hierdoor kan de erosie of sedimentatie sterk overschat worden. Een andere methode bestaat erin om eerst de snelheden te middelen op de celzijden en dan het transport te berekenen, waardoor de extreme snelheden uitgemiddeld worden en de erosie of sedimentatie verkleind wordt.

Het gebruik van evenwichtstransporten (i.e. berekening van transporten in de hoekpunten en dan middeling) is gerechtvaardigd indien de aanpassing van de sedimentverticaalvorm bij niet uniforme stroming binnen één gridcel plaatsvindt, dus in het algemeen slechts in lange regelmatige waterlopen. Het evenwichtstransport wordt bepaald door het opwervelend vermogen van het stromend water, de turbulentie in het water en door het uitzakken van het zand veroorzaakt door de zwaartekracht. Uitgaande van de berekeningen volgens van Rijn (1987) hoort bij een $w_s/V = 0.25$ een aanpassingslengte van $L = 100 h$ tot $200 h$. Hier is w_s de valsnelheid (± 0.013 m/s), V de schuifspanningssnelheid ($V = g^{0.5} V/C$), V de snelheid (± 1 m/s), C de Chézy ruwheidscoëfficiënt (± 60 m^{0.5}/s) en h de diepte. Bij een diepte van 15 m bedraagt de aanpassingslengte 1.5 tot 3 km. Om erosie en sedimentatie zo nauwkeurig mogelijk te kunnen berekenen dient het rooster dus te bestaan uit cellen die ongeveer even lang zijn als de evenwichtslengte van de sedimentverticaalvorm. Met een grofmazig rooster is de berekende snelheid echter onnauwkeurig wat ook tot onnauwkerigheden in de erosie- en sedimentatieberekeningen tot gevolg heeft.

Rekenen met evenwichtstransporten leidt bij een fijnmazig rooster (voor het Scheldemodel bedraagt de roosterafstand 50 x 50 m, zie § 4.1.2) dus zeker tot een overschatting van de berekende erosie en sedimentatie. Een soort van "smoothing" of vermindering van de extreme erosie en sedimentatie is dan nodig. In het model FINTRA-FD is daartoe de mogelijkheid ingebouwd om de snelheden op de celzijden te middelen en dan pas de transporten te berekenen. Hierbij wordt de erosie of sedimentatie verkleind. Het effect is niet lineair, bij grotere snelheidsverschillen werkt de middeling sterker door in de transporten dan bij kleinere, immers er geldt:

$$T \sim (\bar{U}^5) \text{ versus } T \sim (\bar{U})^5 \quad (2.13)$$

Worden twee toestanden met elkaar vergeleken is het belangrijk, indien de evenwichtslengte niet bereikt wordt, dat de cellen van het rooster identiek zijn. Indien we met dezelfde zandtransportformule en dezelfde parameters werken voor de verschillende simulaties, is het mogelijk om de oplossingen onderling te vergelijken.

2.3.4. Zandtransportformule

In de literatuur kan men heel wat zandtransportformules terugvinden tezamen met een evaluatie van hun betrouwbaarheid. In het algemeen kan elke zandtransportformule worden toegepast mits de waarden van de lokale parameters binnen het geldigheidsgebied van de formule vallen. Vaak dienen hierbij ijkingsparameters te worden bepaald. In FINTRA-FD wordt de zand-

transportformule van Engelund-Hansen gebruikt. Het is een "total load" formule, er wordt geen onderscheid gemaakt tussen bodem- en suspensietransport. Naast het feit dat deze formule reeds haar geschiktheid voor de Schelde bewezen heeft (IMDC-WLB, 1992b en 1995a), is het voordeel van deze formule dat:

- de formule onder zeer veel omstandigheden één van de betrouwbaarste is, zie b.v. Van Rijn (1987) of WL (1985);
- de in de formule gebruikte ijkingsconstanten een breed geldigheidsgebied hebben;

Voor grote stroomsnelheden (> 1.5 m/s) overschat deze formule het zandtransport, zie Voogt et al. (1991). De maximale stroomsnelheden in de Beneden Zeeschelde zijn kleiner dan 1.5 m/s. In zijn algemene vorm luidt de formule van Engelund en Hansen (1967) als volgt:

$$f \Phi = 0.1 \Theta^{5/2} \quad (2.14)$$

met f de weerstandscoefficiënt, Φ de transportparameter en Θ de stromingsparameter:

$$f = 2 / (g C^2) \quad (2.15)$$

$$\Phi = \frac{T}{\sqrt{\Delta g d^2}} \quad (2.16)$$

$$\Theta = \frac{V^2}{C^2 \Delta d} = \frac{V^2}{\Delta g d} \quad (2.17)$$

Verder worden als symbolen gebruikt:

C	:	Chézy coëfficiënt [$m^{0.5}/s$],
T	:	sedimenttransport in volume vaste stof [m^2/s],
S	:	sedimenttransport in volume zand met poriën [m^2/s],
d	:	equivalente boldiameter [m],
Δ	:	$(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ [-],
g	:	versnelling t.g.v. de zwaartekracht [$9.81 m/s^2$],
τ_0	:	bodemschuifspanning [Pa],
V	:	gemiddelde stroomsnelheid [m/s],
\hat{V}	:	schuifspanningsnelheid [m/s],
ρ_s	:	densiteit van het sediment [kg/m^3],
ρ_w	:	densiteit van water [kg/m^3],
ε	:	poriëngehalte van het sediment [-].

Formule (2.14) is geldig indien aangenomen wordt dat de gemiddelde deeltjessnelheid evenredig is met de schuifspanningsnelheid. Deze formule kan herschreven worden door het aanbrengen van de ribbelfactor $\mu = (C^2/g)^{2.5}$. Uitgewerkt en omgerekend in S , met $T = S(1-\varepsilon)$, levert dit op:

$$S = \frac{0.05 V^5}{(1-\varepsilon) g^{0.5} C^3 \Delta^2 d} \quad (2.18)$$

De onbekenden in de zandtransportformule van Engelund en Hansen zijn:

- het poriëngehalte (orde 0.4)
- de verticaal gemiddelde snelheid
- het relatieve dichtheidsverschil tussen het sediment en het water (1.65 voor zand)
- de weerstandscoefficiënt

- de equivalente boldiameter.

Gebruikelijk is de weerstandscoefficiënt te bepalen volgens $C = 18 \log(12h/k_n)$ met k_n de ruwheidslengte volgens Nikuradse. Voor de equivalente boldiameter wordt de mediane korreldiameter van het sediment gebruikt (D_{50}).

3. KARAKTERISATIE VAN DE BODEMSEDIMENTEN IN DE BENEDEN ZEESCHELDE

Met als doel het uitvoeren van zandtransportberekeningen voor de Beneden Zeeschelde om de invloed van een verdieping van de Drempel van Frederik op de morfologie te onderzoeken, is naast de aanwezigheid van bathymetrische- en snelheidsgegevens - die afkomstig zijn van het 3D hydrodynamisch model - een grondige kennis nodig over de bodemsedimenten in het modelgebied. Deze gegevens dienen om aan de parameters uit de formule van Engelund en Hansen (zie vgl. 2.18) een waarde toe te kennen: het poriëgehalte (orde 0.4), sedimentsamenstelling, korrelgrootteverdeling en bodemruwheid. Om de modelresultaten te kunnen verifiëren zijn bovendien metingen betreffende erosie- en sedimentatiehoeveelheden van zand in het modelgebied nodig, deze zijn haast onbestaande en kunnen enkel (benaderend) afgeleid worden uit de baggergegevens.

Tijdens het hydraulisch-sedimentologisch onderzoek van de Containerkaai Noord (zie IMDC-WLB, 1992b) werd een overzicht gemaakt van de op dat ogenblik beschikbare gegevens over de bodemgesteldheid, de ruwheden en de sedimentatie/erosie in de Beneden Zeeschelde, met nadruk op de Drempel van Zandvliet. In dit hoofdstuk wordt hiervan een samenvatting gegeven en waar mogelijk aangevuld met de specifieke data van de Drempel van Frederik.

De meest belangrijke en recente aanvulling van gegevens over de bodemsedimenten in het Scheldeëstuarium is de dataset die door McLaren (1994) in opdracht van de AMS en het RIKZ verzameld werd in het kader van de studie van de sedimenttrendanalyse voor de Wester- en Zeeschelde.

3.1. Lithologie

Voor een kwalitatieve beschrijving van de bodemgesteldheid in de Beneden Zeeschelde wordt beroep gedaan op de lithologische kaart van Bastin uit 1986 (Bastin en Belmans, 1988) en op de bodemstalen genomen in juli 1993 in de Beneden Zeeschelde (McLaren, 1994).

De kaart van Bastin wordt weergegeven in figuur 3.1. Deze figuur is overgenomen uit Otter (1996), die in opdracht van het RIKZ een vergelijking van de lithologische kaarten van de Zeeschelde uitvoerde. De lithologische eenheden gebruikt door Bastin worden in tabel 3.1 gedefinieerd.

Tabel 3.1: Definitie van de lithologische eenheden in slibpercentages volgens de kaart van Bastin (1986): gemiddelde, standaarddeviatie, minimum en maximum slibpercentage.

	gemiddeld slib %	standaarddeviatie % slib	minimum slib %	maximum slib %
klei	73	13	51	92
slib	56	18	33	76
zand en slib	33	14	9	47
zand	15	8	6	40

De bodemgegevens van McLaren (1994) werden verwerkt tot een lithologische kaart, zie figuur 3.2 en een kaart met, in elk monsterpunt, de zandpercentages uitgedrukt in getalwaarden, zie figuur 3.3.

De beschikbare gegevens tonen aan dat de zandrijke sedimenten aangetroffen worden in de vaargeul en op de platen en dat de slibrijke sedimenten vooral gesitueerd zijn langsheen de oevers en in de toegangseulen. De kaarten tonen aan dat naar opwaarts toe de sedimenten in de Zeeschelde slib- (of klei-) rijker worden.

3.2. Korrelgrootte en -verdeling

In IMDC (1988c) zijn de analyses van een aantal bodemmonsters van de Drempel van Zandvliet te vinden die door de Antwerpse Zeehavendienst in januari 1985 genomen werden. De D_{50} van de stalen met meer dan 95% zand is gelegen tussen 123 en 167 μm , dit is dus fijn zand.

In IMDC (1990) wordt een overzicht gegeven van de resultaten van de monsters genomen na 1985 op de drempels van de Zeeschelde vanaf de Drempel van Zandvliet tot aan de Drempel van Krankeloon, zie ook tabel 3.2. Uit de tabel blijkt dat het slibgehalte van de sedimenten op de drempels langzaam stijgt in stroomopwaartse richting van $\pm 10\%$ op de Drempel van Zandvliet tot $\pm 50\%$ op de Drempel van Lillo. Nog verder stroomopwaarts daalt het slibgehalte opnieuw. Op te merken valt dat het kalk- en humusgehalte parallel evolueren met het slibgehalte.

Tabel 3.2 Granulometrische karakteristieken van de sedimenten op de drempels in de Zeeschelde vanaf 1985 (IMDC, 1990).

	Humus %	Kalk %	Fracties (%)				
			<2 μm	<20 μm	<63 μm	<120 μm	<200 μm
Drempel van Zandvliet	1	11	-	7	12	23	96
Drempel van Frederik	2	13	-	18	24	34	97
Drempel van Lillo	3	17	-	27	50	67	99
Drempel van De Parel	2	15	-	7	14	24	90
Drempel van Krankeloon	1	3	-	1	2	5	89

In figuren 3.4 en 3.5 wordt een kaart getoond met de mediane korrelgrootte (D_{50}) van het bodemsediment (McLaren, 1994). De reeds boven genoemde trend van het fijner worden van de sedimenten naar opwaarts toe, kan ook duidelijk uit de D_{50} - verdeling waargenomen worden. De mediane korrelgrootte ter hoogte van de Drempel van Frederik is gelegen tussen 14 en 120 μm . Op de Plaat van Lillo is het bodemsediment zandrijker, de D_{50} is hier gelegen tussen 104 en 175 μm .

De mediane korrelgrootte van het zand uit het bodemsediment (dus enkel de fractie van het sediment met een korrelgrootte groter dan 63 μm) wordt getoond in figuren 3.6 en 3.7 (McLaren, 1994). Op de slibrijke plaatsen (zie vorige figuren) is ook de (mediane) korrelgrootte van de zandfractie klein (<100 μm , zeer fijn zand). Ten opzichte van de Drempel van Zandvliet, waar de mediane korrelgrootte 100 - 200 μm bedraagt (fijn zand), bestaat de zandige fractie op de Drempel van Frederik uit zeer fijn tot fijn zand met een D_{50} gelegen tussen 100 - 140 μm .

In figuren 3.8 - 3.10 wordt de gemiddelde korrelgrootte, de sortering (variantie) en de scheefheid van de korrelgrootteverdeling weergegeven. De korrelgrootte wordt uitgedrukt volgens de Phi-schaal, die gedefinieerd is als $\Phi = -\log_2 D$, met D de korrelgrootte in mm, zie ook tabel 3.3. De variantie (σ^2) van de verdeling is een maat voor de spreiding van de korrelgrootte rondom de

gemiddelde waarde, een lage waarde van σ^2 geeft aan dat de grootte van de korrels sterk geconcentreerd is rond de gemiddelde waarde. De scheefheid is een maat voor de asymmetrie van de korrelgrootteverdeling. De scheefheidscoëfficiënt kan positief of negatief scheef zijn. Uit figuur 3.10 blijkt dat de korrelgrootteverdeling van de zandrijke sedimenten (> 75% zand) duidelijk positief scheef is (relatief weinig korrels met een grote phi-waarde), dat deze van de slibrijke sedimenten (> 75% slib) duidelijk negatief scheef is (relatief weinig korrels met een kleine phi-waarde) en dat de tussenliggende sedimenten gekarakteriseerd zijn door een (meestal) lage positieve of negatieve scheefheidscoëfficiënt.

Tabel 3.3 Phi schaal en korrelgrootte in μm .

	korrelgrootte in μm	Phi waarde
zeer grof zand	1000 - 2000	0 tot -1
grof zand	500 - 1000	1 tot 0
medium zand	250 - 500	2 tot 1
fijn zand	125 - 250	3 tot 2
zeer fijn zand	63 - 125	4 tot 3
silt	31 - 63	5 tot 4
silt	16 - 31	6 tot 5
silt	8 - 16	7 tot 6
silt	2 - 8	9 tot 7
klei	< 2	> 9

3.3. Ruwheden

In IMDC (1988b) zijn de resultaten vermeld van eerder uitgevoerde berekeningen met het 2D morfologisch model ZANDLIEF. Dit model is gecalibreerd met behulp van stroom- en sedimentmetingen. Voor de hierbij gebruikte ruwheidswaarden volgens Chézy:

$$C = 18 \log(12 h / k_n) \quad (3.1)$$

met h [m] de waterdiepte en k_n [m] de effectieve bodemruwheid volgens Nikuradse, is k_n bepaald uit een empirisch verband met de stroomsnelheid volgens van Rijn (1982). Uitgaande van de gemeten stroomsnelheden werd voor eb $k_n = 0.05$ m en voor vloed $k_n = 0.01$ m genomen. In IMDC (1988b) worden bovendien volgende ruwheidswaarden gegeven welke gebruikt zijn in andere modellen van de Schelde: $n = 0.028 - C = 53$ en $n = 0.0325 - C = 46$.

In IMDC (1989) wordt het 2D hydraulisch model FINEL afgeregeld op metingen, gebruikt werd een Manning ruwheid van 0.020.

In de zandribbelatlas Westerschelde (RWS-DGW, 1991) worden voor het Schelde estuarium langs de vaargeul de bodemvormen weergegeven als amplitude en golflengte. In figuur 3.11 wordt voor het noordelijk deel van het modelgebied de amplitude van de bodemvormen gepresenteerd.

Bij het loden (echolood) ter hoogte van de Drempel van Zandvliet (mondelijke informatie AMS) wordt een spreiding van orde 0.05 m waargenomen. Deze wordt toegeschreven aan het gecombineerd effect van bodemvormen en lodingsfouten. Waarschijnlijk betreft het hier kleine

ribbels (< 0.1 m) met golflengten kleiner dan 1 m. Daar in principe loodrecht op de as van de rivier gelood wordt is informatie over de bodemvormen niet direct beschikbaar. Toch zijn op echoloodrollen, opgenomen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet, vrij duidelijk ribbels waarneembaar met een amplitude van 0.4 tot 0.6 m.

In RWS-DGW (1991) en Wartel (1972) worden voor een aantal locaties in het modelgebied de amplitude en de golflengte van de bodemvormen gegeven. In onderstaande tabel 3.4 is deze informatie verzameld. Tevens opgenomen in de tabel is de daarbij horende ruwheidsfactor k_n , die berekend werd volgens onderstaande formule, met D_{90} de korreldiameter (90% kleiner), h de amplitude en L de golflengte van de bodemvorm (van Rijn, 1982).

$$k_n = 3 D_{90} + 1.1 h (1 - e^{-25 h/L}) \quad (3.2)$$

Tabel 3.4 Bodemvormen op enkele plaatsen in de Zeeschelde (RWS-DGW, 1991 en Wartel, 1972), er is een D_{90} van 170 μm aangenomen.

Plaats	Amplitude h [m]	Golflengte L [m]	h/L	k_n [m]
Bath	0 - 1	3 - 20	0 - 0.05	0.8
Saeftinghe	0 - 0.5	6 - 10	0 - 0.08	0.07
B/NI grens	0 - 0.75	8 - 14	0 - 0.09	0.7
Saeftinge	0.12	6	0.02	0.05
Ketelplaat	0.5	3	0.17	0.5
Strekdam (Doel)	0.5 - 0.6	-	-	-
Ballastplaat	> 1	-	-	-

In Voogt et al. (1991) worden bodemvormen opgesomd die van toepassing zijn voor de Westeren Oosterschelde, de juiste plaatsaanduiding is niet gegeven. De waarden voor k_n variëren tussen 0.25 en 0.55 m.

3.4. Sedimentatie en erosiegegevens

In IMDC (1986) is voor de Drempel van Zandvliet de sedimentatie en erosie bepaald rekening houdend met de eventueel gebaggerde en/of gestorte hoeveelheden voor de periode 1980-1983. Beschikbaar zijn de gemiddelde wekelijkse sedimentatie gegevens per jaar en als gemiddelde over de gehele periode. Deze gegevens werden als basis gebruikt voor de calibratie van het zandtransportmodel dat opgesteld werd voor de studie van de invloed van de bouw van de Containerkaai Noord en de verdieping van de vaargeul op de Drempel van Zandvliet (IMDC-WLB, 1992b). Omdat deze studie vooral gericht is op de Drempel van Frederik en omdat de mediane korrelgrootte van het sediment op deze drempel kleiner is dan op de Drempel van Zandvliet en dus de gekozen D_{50} voor het numeriek model ook kleiner is, zullen deze gemeten erosie en sedimentatiegegevens enkel kwalitatief gebruikt worden. De gemeten erosie en sedimentatie wordt getoond in figuur 3.12 (uit IMDC, 1986). Volgende opmerkingen worden vermeld:

- De datadichtheid, waarmee de gemiddelde diepteverandering berekend werd, is niet dezelfde over heel het gebied. Aan de randen van het peilgebied zijn veel minder gegevens beschikbaar als in het midden (vaargeul). De betrouwbaarheid is daar dan ook veel lager.

- In figuur 3.12 is de lokale sedimentatie en erosie van zand en slib tezamen getoond. Uit de lithologische kaarten (figuren 3.1-3.2) is duidelijk te zien dat de vaargeul in zijn geheel en de randgebieden vrijwel geheel in het als zand aangegeven gebied liggen. Er kan dus aangenomen worden dat figuur 3.12 de erosie en sedimentatie van zand vertegenwoordigt met een verwaarloosbaar klein percentage slib.
- In de vaargeul bedraagt de gemiddelde wekelijkse sedimentatie 3 cm, hetgeen overeenkomt met een sedimentatie van 2.1 mm/getij of 1.6 m/jaar.
- Op de drempel zelf is de sedimentatie iets hoger, met name 3 tot 5 cm/week (2.1 - 3.6 mm/getij of 1.6 - 2.6 m/jaar).

3.5. Baggergegevens

Een benaderende waarde voor de sedimentatie kan gehaald worden uit de jaarlijkse bagger volumes in de beschouwde zone. De baggergegevens worden opgesteld door de afdeling Maritieme Schelde, er wordt geen onderscheid gemaakt tussen zand of slib.

Uit deze gegevens blijkt dat er gedurende de periode 1980 - 1989 jaarlijks gemiddeld 0.26×10^6 m³ en gedurende de periode 1991 - 1996 0.29×10^6 m³ sediment gebaggerd werd op de Drempel van Frederik. De gemiddelde hoeveelheid zand op deze drempel bedraagt 95% tot 50%, zie figuur 3.3. De baggerhoeveelheden voor de baggerzones in de Zeeschelde voor de periode 1980-1989 zijn samengebracht in tabel 3.5. De gebaggerde volumes voor de periode 1991-1996 op de Drempel van Frederik kunnen gevonden worden in tabel 3.6.

Tabel 3.5 Volumes gebaggerd in de Zeeschelde in 1000 m³ (data afkomstig van AMS). ⁽¹⁾
slibvolumes herleid tot een equivalent volume met een densiteit van 2 t/m³.

Zone/Jaar	Zandvliet	Frederik	Lillo ¹	De Parel	Diverse ¹
1980	1352	-	319	-	154
1981	1483	338	549	346	517
1982	1038	679	283	83	442
1983	1016	-	210	263	1012
1984	1015	500	504	1	1041
1985	1099	165	763	139	632
1986	1267	163	424	269	669
1987	1300	353	372	37	221
1988	1032	288	480	133	1140
1989	1187	110	-	104	194
gemiddeld	1179	260	435	137	602

Steunend op de data van de gebaggerde hoeveelheden op de Drempel van Frederik kan een raming gemaakt worden van de natuurlijke sedimentatiesnelheid. Indien aangenomen wordt dat de densiteit in situ 1.35 t/m^3 (550 kg vaste stof per m³) en in het beun 1.2 t/m^3 (325 kg vaste stof per m³) bedraagt, dan is 1 m³ in het beun gelijk aan 0.6 m³ in situ. Uitgaande van een oppervlakte van de baggerzone op de Drempel van Frederik van ca. 600000 m² (zie brief van AMS van 15/10/1997), kan de sedimentatiesnelheid berekend worden. Deze is gelegen tussen ongeveer 0.16 en 1.0 mm/getij (0.1 - 0.7 m/jaar) met een gemiddelde waarde van ca. 0.4 mm/getij (0.3 m/jaar). Deze waarde houdt geen rekening met de effectieve baggerplaatsen op de

drempel (deze zijn kleiner dan de totale oppervlakte van de drempel), zodat bovengenoemde getallen een minimale grenswaarde vertegenwoordigen.

Ter vergelijking, op de Drempel van Lillo werd uitgaande van de baggergegevens van 1985 - 1987 een aanzandingssnelheid berekend van 1.5 - 2.0 mm/getij of 1 - 1.4 m/jaar (IMDC, 1988b).

Tabel 3.6 Volumes gebaggerd op de Drempel van Frederik in 1000 m³ (data afkomstig van AMS).

Maand	1991	1992	1993	1994	1995	1996
januari	0	0	40	0	0	0
februari	1	0	0	34	0	0
maart	0	65	27	72	0	0
april	7	25	0	0	0	0
mei	55	0	0	34	130	47
juni	0	12	150	66	0	0
juli	0	40	0	0	0	0
augustus	0	0	0	0	0	0
september	3	0	0	0	73	37
oktober	142	38	0	51	54	80
november	0	139	0	135	0	168
december	0	0	0	0	0	43
Totaal	208	319	217	392	257	375

4. HET SCHELDEMODEL EN DE UITGEVOERDE SIMULATIES

4.1. Het Scheldemodel

4.1.1. Modelgrenzen

Het model omvat een deel van de Schelde van nagenoeg 12 km, zie figuur 4.1. De Lambert coördinaten van de raai aan de opwaartse rand zijn (146175 m, 219431 m) en (146913 m, 219742 m) en van de raai aan de afwaartse rand zijn (138832 m, 229416 m) en (141183 m, 230404 m).

4.1.2. Modelrooster

Het modelgebied is gediscrèteerd op een vierkant rooster met een cellengte van 50 m, zie figuur 4.2. De oriëntatie van het rooster is zodanig dat de Europaterminal parallel is met de y-richting, daarvoor werd het rooster met 22.8° t.o.v. het noorden in tegenuurwijzerzin gedraaid. Voor het Scheldemodel werden vijf lagen geïmplementeerd, elk van 3 m dikte. De bovenlaag is gelegen tussen 0 en -3 m TAW, de tweede laag tussen -3 en -6 m TAW enz. Daar waar de waterdiepte groter is dan -15 m TAW heeft de onderste (vijfde) laag een dikte die van -12 m TAW tot aan de bodem reikt. Op plaatsen die ondieper zijn dan -15 m TAW worden de onderste lagen stelselmatig uitgeschakeld indien zij dunner worden dan de minimale laagdikte van 3 m, de nieuwe bodemlaag vergroot dan om de juiste diepte te behouden. De dikte van de bovenlaag verandert met het getij en kan dus een dikte hebben van ongeveer 3 tot 8 m. Deze relatief grove verticale resolutie is voldoende voor rivieren zoals de Schelde, waar er geen scherp gedefinieerde grens tussen zoet en zout water bestaat.

4.1.3. Bathymetrie

De bathymetrie van het model dat gebruikt werd voor het oriënterend onderzoek (IMDC-WLB, 1995a-c) is gebaseerd op volgende drie gedigitaliseerde sectiekaarten van de Antwerpse Zeehavendienst (nu afdeling Maritieme Schelde): Bath/Saeftinge (maart 1990 Nr. C3.137), Saeftinge /Doel (juni 1990 Nr. C3.245) en Doel/Filip (juni 1990 Nr. C3.246). De leidammen op de Plaat van Doel en de Ballastplaat werden ingevoerd op basis van de algemene beschrijving gegeven in het rapport van de Technische Scheldecommissie (1984) en de ontwerp- en controle plannen van de afdeling Maritieme Schelde (C3.4120, 4120B, 4120C, 4120D, 6595D).

Deze bodemconfiguratie werd vergeleken met de meest recente beschikbare toestand (i.e. maart 1996). Uit de vergelijking kan worden opgemaakt dat er geen significant verschil is in bodemligging tussen de twee toestanden, zie WLB (1997). Er werd daarom besloten om de "1990" bathymetrie verder te gebruiken voor de numerieke en de fysische modelstudie van het tijdok mits het inbouwen van het tijdok, het verdiepen van de vaargeul tot opwaarts van het tijdok en het voorzien van een zone van 80 m breedte en een diepte van -14.4 m TAW langsheen de Noordzee- en de Europaterminal en in het tijdok. In eerste instantie werd de vaargeul verdiept tot een diepte van -13.74 m TAW (= -13.3 m GLLWS) later werd een verdieping tot -14.4 m TAW (-14.0 m GLLWS) ingebouwd. In figuren 4.3 - 4.5 wordt een beeld van de bathymetrie voor de huidige toestand, de toestand T01-sp (tijdok en verdieping tot -13.74 m TAW) en T01-14.4 (tijdok en verdieping tot -14.44 m TAW) getoond.

4.1.4. Hydraulische randvoorwaarden

Aan de afwaartse rand wordt een waterstand opgelegd terwijl aan de opwaartse rand het model aangedreven wordt door snelheden (debiet). Alle simulaties gebeurden met het springtij van

04/10/1990 (getijcoëfficiënt 1.09-1.13). Enkel voor het gevoeligheidsonderzoek werd ook gebruik gemaakt van het doortij van 27/09/1990 (getijcoëfficiënt 0.81). De simulaties starten bij hoogwater en gaan tot het volgende hoogwater. Het getij is zodanig aangepast dat beide hoogwaters identiek zijn. De getijamplitude tijdens springtij is 5.27 m en tijdens doortij 3.93 m.

Het model werd gecalibreerd door het springtij van 04/10/1990 te simuleren en gevalideerd met het doortij van 27/09/1990, zie IMDC-WLB (1993a, 1993c, 1995b), Fettweis en Sas (1994). De twee datasets van de 13-uursmetingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet op bovenvermelde dagen werden hiervoor gebruikt, een beschrijving van deze metingen wordt gegeven in Fettweis et al. (1994). Aangezien de gegevens (bathymetrie, getij, zoutgradiënt) gebruikt voor het opzetten van het model niet verschillen met deze gebruikt voor het model uit het oriënterend onderzoek en aangezien de bijkomende metingen nog niet beschikbaar waren op het moment dat het model gebruikt werd, werden er geen bijkomende calibratie en/of validatie simulaties uitgevoerd.

Uit de metingen ter hoogte van de Drempel van Zandvliet op 27/09/1990 en 04/10/1990 werd een saliniteitsgradiënt berekend van 0.42 ppt/km tijdens springtij en 0.35 ppt/km tijdens doortij (Fettweis et al., 1994). Deze gradiënten werden weerhouden voor de calibratie- en validatiesimulaties en zijn dus ook toegepast voor de hier besproken modelsimulaties. Voor het gevoeligheidsonderzoek is tevens een simulatie uitgevoerd zonder zoutgradiënt. De saliniteitsrandvoorwaarde aan de afwaartse rand werd opgesteld met behulp van een 1D model (Jabbari, 1994; Fettweis en Sas, 1994; IMDC-WLB 1993a en 1993c). De waarden aan de opwaartse rand werden zodanig aangepast dat een longitudinale saliniteitsgradiënt van 0.42 (of 0.35) ppt/km bekomen werd. Deze waarde komt overeen met een situatie met gemiddelde tot eerder hoge horizontale saliniteitsgradiënt in de Schelde. Voor een uitvoerige beschrijving van de saliniteitsvariaties in de Schelde word verwezen naar Fettweis (1995).

Volgende parameterwaarden werden gebruikt: de bodemruwheid voor de berekening van de wrijvingscoëfficiënt is $k_1 = 0.05$ m met limietwaarden voor dieptes groter dan 20 m en kleiner dan 1.5 m. De horizontale diffusie is 5.0 m²/s en het Richardson-getal en het getal voor de onderdrukking van de menging zijn 0.0007 en 1 respectievelijk (zie Odd en Rogers, 1972).

4.1.5. Slibconcentratierandvoorwaarden en slibparameterwaarden

Ook aan de slibrandvoorwaarden werden geen veranderingen aangebracht: Aan de opwaartse rand wordt een constante waarde van 200 mg/l en aan de afwaartse rand een constante waarde van 100 mg/l opgelegd (IMDC-WLB 1992a 1993b, 1995b-c).

In overeenkomst met de vorige studies en ook met de data afkomstig uit de metingen werd een minimale valsnelheid, w_{smin} , zie formule 2.10, van 0.0005 m/s gekozen. De empirische constante w (vgl. 2.10) bedraagt 0.002 [m⁴/(kg s)]. Ervaring heeft geleerd dat door een kleine waarde voor de valsnelheid te nemen (grootte orde 0.1-0.2 mm/s) zoals dikwijls gemeten wordt, de sedimentatie onderschat wordt. Door een relatief hoge waarde voor de minimale valsnelheid te kiezen, zoals is gebeurd voor het Schelde model, kan rekening gehouden worden met de vorming van vlokken en aggregaten en ook met turbulente menging.

In overeenkomst met de calibratieprocedure voor de studie van de Containerkaai-Noord (IMDC-WLB, 1992a 1993b-c) en van het oriënterend tijdok onderzoek (IMDC-WLB, 1995b-c) werd voor kritische schuifspanning voor sedimentatie, τ_{cd} , een waarde van 0.2 Pa, voor de kritische schuifspanning voor erosie, τ_{ce} , een waarde van 0.4 Pa en voor de erosieconstante, M_e , een waarde 0.00005 (kg/m²s)/Pa gebruikt.

Om een schatting mogelijk te maken van de afgezette hoeveelheid slib, dient een veronderstelling te worden gesteld betreffende de in situ densiteit van het slib. Het model rekent enkel met

'recent afgezet slib', omdat de consolidatie van de sliblaag niet gesimuleerd wordt. Om echter toch een schatting te kunnen geven van de hoeveelheid gesedimenteerde slib uitgedrukt in m^3 over een lange periode, dus om effecten van consolidatie op de densiteit in rekening te brengen, werd een gemiddelde waarde van de densiteit van 1.15 kg/l gekozen. Dit stemt overeen met een hoeveelheid droge stof van 244 kg/ m^3 .

4.1.6. Zandtransportparameterwaarden

Om het zandtransportmodel te kunnen calibreren of valideren (zie hoofdstuk 7) moet de waarde van de parameters uit de zandtransportformule van Engelund en Hansen gekend zijn. Omdat de waarde van de bodemruwheid dikwijls slecht gekend is in getijdewateren en omdat zowel de korrelgrootte als de ruwheid sterk varieert van plaats tot plaats, kan de parameterwaarde enkel benaderend geschat worden of dient er een compromiswaarde gekozen te worden. Om dit te doen is gebruik gemaakt van de gegevens die verzameld werden in hoofdstuk 3.

4.1.6.1. Porositeit

Gegevens over de porositeit in het modelgebied zijn niet beschikbaar, er werd een waarde van 0.42 aangehouden, overeenkomstig IMDC-WLB (1992b en 1995a).

4.1.6.2. Bodemruwheid

Van groot belang is de juiste bepaling van de ruwheid. Voor rivieren is er veelal een evenwicht tussen de stroming en de beddingvormen, waarbij de ruwheid vrij éénduidig kan worden vastgesteld. Voor getijrivieren, zoals de Zeeschelde, treedt een duidelijke naijling van het zandtransport en de beddingvorm op ten opzichte van de stroming, zodat de ruwheid afhankelijk is van de stroomsnelheden, de grootte van de maximale snelheid, de grootte van dV/dt en de vorm van het snelheidsverloop in de tijd. In Bakker (1975) wordt uitgaande van de zandtransportformule van Bijker en gemeten zandconcentraties, snelheden en korreldiameters, de schijnbare ribbelhoogte berekend voor o.a. een meetpunt in het Nauw van Bath. De schijnbare ribbelhoogte varieerde tussen 0.02 en 27 m. Het naijlingseffect van de bodemvormen op de stroming was duidelijk zichtbaar, bodemvormen aangepast aan de lage stromingen bij kentering treden pas 2 tot 3 uur na kentering op. Deze bevindingen benadrukken de moeilijkheid om een representatieve ribbelhoogte en dus ruwheid te bepalen voor zandtransportmodellen in getijdewateren.

De metingen samenvattend (zie hoofdstuk 3) lijkt een ruwheid van $0.10 \text{ m} < k_n < 0.25 \text{ m}$ het meest waarschijnlijk. Gekozen is voor $k_n = 0.10 \text{ m}$, zie ook IMDC (1992b), alhoewel deze waarde aan de onderkant ligt van de volgens de beschikbare data waarschijnlijke waarde. De redenen hiervoor zijn dat de metingen volgens (RWS-DGW, 1991) een grote spreiding vertonen, dat vrijwel alle metingen genomen zijn in de diepere gedeelten (vaargeul) en dus verwacht mag worden dat de ondiepere gedeelten gladder zijn en dat voor getijrivieren er geen relatie bestaat tussen de k_n -waarde die het best in een transportformule kan worden gebruikt en de effectieve ruwheid zoals die door de bodemvormen gesuggereerd wordt.

Voor het gevoeligheidsonderzoek, zie § 7.1 is de ruwheid gevarieerd tussen 0.01, 0.05, 0.10, 0.20 en 0.50 m. Met $h = 2k_n$ (h is de amplitude van de bodemvorm) betekent dit dat een variatie van ribbelhoogten tussen 0.02 en 1 m is onderzocht.

4.1.6.3. Maatgevende korreldiameter

In § 3.1 - 3.2 werd een overzicht gegeven van de bestaande gegevens inzake lithologie en korrelgrootteverdeling. Van belang van deze studie zijn vooral de resultaten ter hoogte van het tijdok en de Drempel van Frederik. De Drempel van Zandvliet is ook van belang, omdat dit het kerngebied was van vroegere morfologisch numerieke studies (IMDC-WLB, 1992b en 1995a).

Uit figuren 3.6 - 3.7 blijkt dat de mediane korrelgrootte van de zandfractie van het bodemsediment in het modelgebied sterk varieert. In de vaargeul treft men over het algemeen fijnere sedimenten aan, terwijl op de platen de D_{50} groter is. Uit de figuren blijkt ook dat de D_{50} van de zandfractie van het bodemsediment ter hoogte van de Drempel van Frederik kleiner is dan ter hoogte van de Drempel van Zandvliet, dit blijkt ook uit tabel 3.2 (34% t.o.v. 23% < 120 μm). De D_{50} in de vaargeul op beide drempels is meer uniform en gelegen tussen ongeveer 100 en 120 μm met enkele uitschieters tot 150 μm . Op de platen is de mediane korrelgrootte groter: 100 - 190 μm (Plaat van Lillo, ter hoogte van de haven van Doel) en 100 - 220 μm (Plaat van Doel, Schaar van Ouden Doel).

Samenvattend lijkt het voor de maatgevende korreldiameter d (D_{50} in de zandtransportformule van Engelund en Hansen) het meest representatieve 115 μm te kiezen als een gemiddelde korrelgrootte in de vaargeul. Naast deze gemiddelde waarde is ten behoeve van het gevoeligheidsonderzoek ook gerekend met een D_{50} van 100 en 130 μm .

4.2. Uitgevoerde Simulaties

Om de invloed van de verdieping van vaargeul te bestuderen werden volgende simulaties uitgevoerd.

1. Simulatie van een referentietoestand of Huidige Toestand (HT), zonder tijdok, verdieping en Noordzeeterminal, zie figuur 4.3). De resultaten van deze simulatie werden reeds gerapporteerd voor hydrodynamica en slibtransport, zie IMDC (1998c) en zullen hier enkel nog ter vollediging behandeld worden.
2. Twee simulaties voor een gevoeligheidsonderzoek met tijdok waarin nagegaan wordt wat de invloed is van de gebruikte hydraulische randvoorwaarden (getij) op het zandtransport: **T01-sp**, **T01-np**. De resultaten werden in detail besproken in deelrapport 5 (IMDC, 1998c) voor wat betreft hydrodynamica en slibtransport en zullen hier enkel nog summier behandeld worden.
3. Twee simulaties voor het uitvoeren van de verdiepingswerken (-13.74 en -14.44 m TAW) en het te verwachten effect naar sedimentatie en erosie van slib en zand. De simulatie '-13.74 m' komt overeen met de simulatie **T01-sp** (zie boven). De simulatie '-14.44 m' is **T01-14.4**.

Alle simulaties met tijdok werden uitgevoerd voor de toestand T01. Voor de naamgeving van de simulaties werd het systeem van het WLB voor hun simulaties op schaalmodel gevolgd (WLB, 1997), b.v. T01 (toestand 1) is identiek bij het mathematisch en het schaalmodel. Deze basis-toestand is weergegeven op het plan B4 10.001 van de afdeling Zeeschelde.

4.3. Aanlegbaggerwerken

De volumes aanlegbaggerwerken werden bekomen door de bathymetrie van de ene toestand af te trekken van de andere. Er werd gekeken naar het volume baggerwerken voor de verdieping van de vaargeul tot -13.74 m TAW uitgaande van de huidige toestand en naar het volume voor een bijkomende verdieping tot -14.44 m TAW (uitgaande van -13.74 m TAW).

De volumes werden berekend voor heel het modelgebied. Om de verdeling ervan te kennen, werd het modelgebied ingedeeld in een aantal zones en werd voor elke zone de volumes afzonderlijk bepaald, zie tabel 4.1. Verder werd de hoeveelheden grafisch voorgesteld in figuren 4.6 en 4.7. De zones komen overeen met deze gebruikt bij de analyse van de zandtransportberekeningen, zie figuur 7.17. Vermits hier echter alleen de vaargeul verdiept wordt, werden enkel volgende zones beschouwd:

0. Vaarwater boven Bath
2. Drempel van Zandvliet
5. Vaarwater Europaterminal
7. Vaarwater Drempel van Frederik
10. Vaarwater Drempel van Lillo

Om de vaargeul te verdiepen tot -13.74 m TAW dient een volume van 4 miljoen m³ gebaggerd te worden, waarvan nagenoeg 1 miljoen m³ op de Drempel van Frederik en 1 miljoen m³ opwaarts van de Drempel van Frederik (Vaarwater Plaat van Lillo), d.i. ter hoogte van het tijdok en houdt ook het aanleggen van de zwaaicirkel in.

Een bijkomende verdieping tot -14.44 m TAW is minder 'volumineus': ongeveer 0.3 miljoen m³ op de Drempel van Frederik en 0.4 miljoen m³ opwaarts ervan (Vaarwater Plaat van Lillo).

Tabel 4.1: Volumes aanlegbaggerwerken (in 1000 m³) nodig voor een verdieping van de vaargeul tot -13.74 m TAW (uitgaande van de huidige toestand) en tot -14.44 m TAW (uitgaande van een diepte van -13.74 m TAW).

	Verdieping tot -13.74 m TAW	Verdieping tot -14.44 m TAW
0. Vaarwater boven Bath	360	248
2. Drempel van Zandvl.	1198	373
5. Vaarwater Europaterminal	494	333
7. Vaarw. Drempel v. Frederik	986	337
10. Vaarwater Plaat van Lillo	997	399
Σ 0+2+5+7+10	4035	1690

5. NUMERIEKE SIMULATIE VAN DE HYDRODYNAMICA

In dit hoofdstuk worden de resultaten voorgesteld van de hydrodynamische simulaties die uitgevoerd werden in het kader van de effecten van een inplanting van een tijdok en een verdieping van de vaargeul op het stroombeeld ter hoogte van de Drempel van Frederik. De resultaten van deze simulaties vormen de basisgegevens voor de sedimenttransportberekeningen waarvan de resultaten in hoofdstukken 6 en 7 worden besproken.

Een beschrijving van de bathymetrie werd gegeven in § 4.1.3. In § 4.1.4 en § 4.2 wordt een beschrijving van de gebruikte randvoorwaarde en van de simulaties gegeven.

5.1. Het stroombeeld, het snelheidsprofiel en de zoutverdeling in de Beneden Zeeschelde

Een gedetailleerde beschrijving van het stroombeeld, het snelheidsprofiel en de zoutverdeling in de Beneden Zeeschelde werd reeds gegeven in deelrapport 5 (IMDC, 1998c) en zal hier niet meer worden herhaald.

Ter volledigheid worden de uurlijkse stroombeelden voor de huidige toestand (zonder tijdok en zonder verdieping, figuren 5.4 - 5.15), voor de toestand T01-sp (verdieping Drempel van Frederik tot -13.74 m TAW, figuren 5.18-5.29) en voor de toestand T01-14.4 (verdieping Drempel van Frederik tot -14.44 m TAW, figuren 5.32-5.43) getoond.

5.2. Invloed van een verdieping op het stroombeeld

5.2.1. Verdieping tot -13.74 m TAW

Het effect van de bouw van een tijdok én de verdieping van de vaargeul tot -13.74 m TAW op de stroming in de Schelde wordt geïllustreerd in figuren 5.44 - 5.55. De snelheidsvelden in deze figuren werden bekomen door de snelheidsvectoren voor de huidige toestand af te trekken van deze van de toestand T01-sp. Uit de figuren blijkt dat de grootste verschillen optreden in het dok (het dok is niet aanwezig in de huidige toestand), ter hoogte van het dok in de Schelde (uiteraard) en op de Drempel van Frederik. Op de Drempel van Frederik zijn de verschillen het grootst in de onderlaag. Deze verschillen zijn het gevolg van het feit dat voor HT de drempel te ondiep is om een vierde laag te bevatten. De getoonde snelheden in laag 4 geven dus de bodemsnelheid voor T01-sp weer, zie ook de uurlijkse stroombeelden voor HT (figuren 5.4-5.15) en T01-sp (figuren 5.18-5.29).

Gedurende de vloed kan waargenomen worden dat de stroming in de bovenlaag ter hoogte van de Drempel van Frederik tot maximaal 10 cm/s lager is bij T01-sp dan bij HT, terwijl er een toename van de snelheid zichtbaar is in de onderlaag. Langs de linkeroever is er tengevolge van de bouw van het tijdok en de zwaaicirkel een belangrijkere verandering zichtbaar in het stroombeeld: gedurende het begin van de vloed neemt de snelheid af in de bovenlaag en toe in de onderlaag, gedurende de tweede helft van de vloed keert het stroombeeld in het tijdok zich om, dit heeft ook een invloed op het stroombeeld in de rivier.

Tijdens hoogwaterkentering is duidelijk de sterke invloed van het tijdok op de stroming zichtbaar. Deze invloed zal gedurende het begin van eb zichtbaar blijven. Tijdens eb kan een analoge effect op de stroming waargenomen worden ter hoogte van de Drempel van Frederik dan gedurende vloed, m.n. een toename van de snelheid in de onderlaag en een afname in de bovenlaag.

5.2.2. Verdieping tot -14.44 m TAW

Het effect van het verdiepen van de Drempel van Frederik van -13.74 m TAW tot -14.44 m TAW op de stroming in de Schelde wordt geïllustreerd in figuren 5.56 - 5.67. De snelheidsvelden in deze figuren werden bekomen door de snelheidsvectoren voor de toestand T01-14.4 af te trekken van deze van de toestand T01-sp.

Uit de figuren blijkt dat een verdieping met 0.70 m tot -14.44 m TAW enkel een geringe verandering in het stroombeeld teweeg brengt en maximaal ongeveer 5 cm/s bedraagt. Zowel tijdens eb als tijdens vloed neemt de snelheid af in de bovenlaag bij T01-14.4 t.o.v. T01-sp terwijl in de onderlaag een toename waarneembaar is.

5.3. Besluiten

In dit hoofdstuk werden de resultaten voorgesteld van de hydrodynamische simulaties die uitgevoerd werden in het kader van de effecten van een inplanting van een tijdok en een verdieping van de vaargeul op het stroombeeld ter hoogte van de Drempel van Frederik. Deze simulaties vormen de basisgegevens voor de sedimenttransportberekeningen.

De simulaties tonen aan dat de invloed van een verdieping van de vaargeul ter hoogte van de Drempel van Frederik op het stroombeeld klein is. Het is vooral door de bouw van het tijdok dat de grootste veranderingen in het stroombeeld t.o.v. de huidige toestand mogen verwacht worden.

6. NUMERIEKE SIMULATIE VAN HET SLIBTRANSPORT

Uit figuren 3.1, 3.2 en 3.4 blijkt dat ter hoogte van en op de Drempel van Frederik het sediment een belangrijke fijne fractie bevat. Om de effecten van de bouw van een tijdok en de verdieping van de vaargeul op de onderhoudsbaggerwerken te bestuderen, is het dus nodig om naast de zandtransportberekeningen ook slibtransportberekeningen uit te voeren.

6.1. Beschrijving van de slibafzetting en de slibconcentratie ter hoogte van de Drempel van Frederik

In figuren 6.1 (HT), 6.2 (T01-sp) en 6.3 (T01-sp) wordt de slibafzetting getoond. De figuren illustreren dat de slibsedimentatie vooral plaatsgrijpt langsheen de oevers (slikken, schorren), op de Plaat van Lillo, op de Drempel van Frederik, op de Plaat van Doel, in de Schaar van Ouden Doel, op de Drempel van Zandvliet, op de Ballastplaat, in de toegangseul naar de Zandvliet en Berendrechtsluis.

Merk op dat tussen de simulatie van de huidige toestand (zonder tijdok) en toestand T01-sp en T01-14.4 de verschillen voornamelijk geconcentreerd zijn in de vaargeul en (uiteeraard) ter hoogte van het dok: door de verdieping van de vaargeul (simulaties T01-sp, T01-14.4) vergroot de slibafzetting. Zie figuren 3.1 en 3.2 waar het gemeten slibgehalte in het bodemsediment wordt weergegeven voor een kwalitatieve vergelijking met de modelresultaten.

In figuren 6.4 - 6.6 wordt de sliconcentratie i.f.v. de tijd getoond in een aantal punten op de Drempel van Frederik (ligging van de punten zie figuur 5.1). De verschillen tussen toestand T01-sp en T01-14.4 zijn klein. De invloed van een verdieping van de vaargeul (HT, T01-sp) uit zich in een afname van de concentratie. De grootste veranderingen zijn het gevolg van het tijdok, zoals is te zien in punt 5: gedurende eb is bij de toestanden met tijdok een lagere concentratie waarneembaar in de bodemlaag dan hoger in de waterkolom.

6.2. Analyse van de aanslibbing

Om een kwantitatieve analyse van de aanslibbing en de invloed van een bouw van een tijdok en een verdieping van de vaargeul op de aanslibbing te kunnen maken, werd het modelgebied opgedeeld in een aantal zones (zie figuur 7.17). Voor elke zone werd de afgezette hoeveelheid slib berekend en samengebracht in tabel 6.1. Om de resultaten juist te kunnen interpreteren is het nodig om tabel én figuur samen te consulteren. Deze analyse heeft vooral tot doel de kwantitatieve en/of procentuele wijzigingen vast te stellen tussen de verschillende simulaties, eerder dan de absolute hoeveelheden te interpreteren. Volgende zones werden gebruikt:

1. Plaat van Doel
2. Drempel van Zandvliet
3. Toegangseul Zandvliet-Berendrechtsluis
4. Schaar van Ouden Doel
5. Vaarwater ter hoogte van de Europaterminal
6. Linkeroever Drempel van Frederik
7. Vaarwater Drempel van Frederik
8. Rechteroever Drempel van Frederik
9. Linkeroever Plaat van Lillo
10. Vaarwater Plaat van Lillo
11. Rechteroever Plaat van Lillo
12. Begin van tijdok (rivierkant)

13. Midden van tijdok
14. Einde van tijdok

Er werd naast de door het model berekende afzettingshoeveelheden, die uitgedrukt zijn in kg droge stof per m² en per getijcyclus, ook een omrekening gemaakt van deze waarden naar een sliblaagdikte. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van de in § 4.1.5. gedefinieerde densiteit van het slib. Bij de interpretatie van sliblaagdiktes afgezet over langere perioden (maand, jaar), die bekomen worden door de per getij afgezette hoeveelheden te extrapoleren, dient men rekening te houden met de beperkte nauwkeurigheid van de bekomen waarden, dit omdat geen rekening gehouden werd (en kan worden) met o.a. consolidatie van het slib, effecten van verondieping op de hydrodynamica en variaties in slibafzetting t.g.v. externe factoren.

Tabel 6.1: Slibafzetting in t/getij, in 10⁶ m³/jaar en in % verschil t.o.v. referentiesimulatie. Voor T01-sp is de referentiesimulatie de simulatie HT. Voor simulaties T01-14.4 is dit T01-sp.

	HT		T01-sp			T01-14.4		
	t/getij, 10 ⁶ m ³ /jaar		t/getij, 10 ⁶ m ³ /jaar en % verschil % t.o.v. HT			% t.o.v. T01-sp		
1. Plaat van Doel	182	0.52	163	0.47	-10	163	0.47	0
2. Drempel van Zandvl.	578	1.66	478	1.37	-17	485	1.39	+1
3. Zandvliet - Berendrecht	710	2.04	727	2.09	+2	692	1.99	-5
4. Schaar van Ouden Doel	378	1.08	346	0.99	-8	341	0.98	-1
5. Vaarwater Europaterminal	153	0.44	121	0.35	-21	119	0.34	-2
6. LO Drempel van Frederik	230	0.66	243	0.70	+6	236	0.68	-3
7. Vaarw. Drempel v. Frederik	71	0.20	142	0.41	+100	134	0.38	-6
8. RO Drempel van Frederik	227	0.65	224	0.64	-1	226	0.65	+1
9. LO Plaat van Lillo	46	0.13	123	0.35	+167	123	0.35	0
10. Vaarwater Plaat van Lillo	78	0.22	190	0.55	+144	188	0.54	-1
11. RO Plaat van Lillo	250	0.72	244	0.70	-2	232	0.67	-5
Σ 1+2+4+...+11 (zonder 3.)	2193	6.29	2274	6.53	+4	2247	6.45	-1
12 Begin van het tijdok	-	-	694	1.99	-	683	1.96	-2
13. Midden van het tijdok	-	-	628	1.80	-	614	1.76	-2
14. Einde van het tijdok	-	-	407	1.17	-	368	1.06	-10
Totaal tijdok	-	-	1730	4.97	-	1665	4.78	-4

6.2.1. Invloed van een verdieping op de slibafzetting in de Schelde

Uit tabel 6.1 blijkt dat in het afwaartse deel van het model (zones 1, 2, 4, 5) de slibafzetting na de bouw van een tijdok en de verdieping van de vaargeul tot -13.74 m TAW (T01-sp) met 10-20% vermindert t.o.v. de huidige toestand, terwijl in het opwaartse deel (zones 6, 7, 9, 10) de aanslibbing toeneemt. Globaal gezien wordt er nagenoeg evenveel slib afgezet in de Schelde voor beide toestanden.

In zones 7 (Drempel van Frederik), 9 (LO Plaat van Lillo) en 10 (Vaarwater Plaat van Lillo) is er een significant toename zichtbaar in aanslibbing na de bouw van het tijdok en de verdieping van de vaargeul (-13.74 m TAW). Deze toename is in zones 9 en 10 grotendeels te wijten aan de bouw van het tijdok zelf en in mindere mate aan de verdieping. Op de Drempel van Frederik (zone 7) is de toename echter voornamelijk het gevolg van de verdieping van de vaargeul die op die plaats belangrijk is (tot meer dan 3 m verdieping), zie figuur 4.6.

Uit de simulatieresultaten blijkt dat door de verdieping van de vaargeul (en de bouw van het tijdok) de sedimenten op de Drempel van Frederik (nog) slibrijker zullen worden. Meer naar opwaarts toe (zones 9 en 10) zijn de veranderingen in bodemsamenstelling minder uitgesproken.

Door de vaargeul in de Beneden Zeeschelde bijkomend te verdiepen met 0.70 m tot -14.44 m TAW (T01-14.4) zullen de aanslibbingspatronen en -hoeveelheden nauwelijks veranderen.

6.2.2. Invloed van een verdieping op de slibafzetting in het tijdok

De slibafzetting in een drietal gebieden (zones 12-14) in het tijdok is bijeengebracht in tabel 6.1. De oppervlakte van deze drie gebieden, met name het begin-, midden- en einddeel van het tijdok, is nagenoeg gelijk en bedraagt 44.75, 45.25, en 44.25 ha respectievelijk. De totale oppervlakte van de zones "tijdok" is aldus 134.25 ha.

In het dok wordt er tijdens een springtij met hoge saliniteitsgradiënt (T01-sp) 1730 ton/getij afgezet. Door de Schelde bijkomend te verdiepen neemt de aanslibbing in het dok af met ongeveer 4% tot 1665 ton/getij (T01-14.4). De grootste afname is gelegen aan het einde van het dok (zone 14). Deze afname is vermoedelijk het gevolg van de afname in snelheid die opgemerkt werd in het tijdok T01-14.4 gedurende eb, zie figuren 5.62-5.65.

6.3. Besluiten

Uit de simulaties kan het volgende afgeleid worden met betrekking tot de gevolgen van de verdieping van de vaargeul op de aanslibbing:

- Door de verdieping van de vaargeul (en de bouw van het tijdok) zullen de sedimenten op de Drempel van Frederik (nog) slibrijker worden, terwijl meer naar opwaarts toe ter hoogte van het tijdok (zone 9 en 10) de te verwachten veranderingen in bodemsamenstelling gering zijn.
- Door de vaargeul in de Beneden Zeeschelde bijkomend te verdiepen met 0.70 m tot -14.44 m TAW (T01-14.4) zullen de aanslibbingspatronen en -hoeveelheden nauwelijks veranderen.
- Door de Schelde te verdiepen tot -14.44 m TAW (uitgaande van -13.74 m TAW) neemt de aanslibbing in het tijdok met ongeveer 4% af. Deze afname is het grootst aan het uiteinde van het dok.

7. NUMERIEKE SIMULATIE VAN HET ZANDTRANSPORT

7.1. Calibratie van het zandtransportmodel

Calibratie van het zandtransportmodel omhelst de inschatting van de parameters uit de zandtransportformule van Engelund en Hansen, zoals is te zien in § 4.1.6, en het uitvoeren van gevoeligheids simulaties. Een zandtransportmodel kan over het algemeen moeilijk rechtstreeks gecalibreerd of gevalideerd worden omdat de door het model berekende erosie en/of sedimentatie meestal te klein is om in situ meetbaar te zijn. De gevolgen van de erosie- en sedimentatieprocessen zijn in de natuur enkel meet- of zichtbaar na een langere periode. Baggergegevens of historische kaarten geven een kwantitatieve aanduiding van wat zich afspeelt in een bepaald gebied gedurende een bepaalde periode.

De validiteit van het model steunt voor een deel op de geldigheid van de zandtransportformule, zoals in laboratorium experimenten werd vastgesteld. Het (juiste) gebruik van zandtransportmodellen en de interpretatie van de resultaten steunt ook voor een ander deel op de beschikbaarheid van (relevante) meetgegevens (bodemstalen, etc.).

Bij het gebruik van het model moet de gebruiker rekening houden met het feit dat de resultaten van het model geen exacte weergave van de realiteit zijn (wat deze ook mogen zijn, zie metingen) en gemakkelijk een factor twee kunnen verschillen met gemeten waarden, zoals in Voogt et al. (1991) wordt vermeld. Het uitvoeren van gevoeligheidsberekeningen is daarom noodzakelijk om de spreiding van de resultaten te kunnen bepalen. Op die manier is het mogelijk het model als een instrument te kunnen gebruiken om verschillende scenario's te evalueren en te interpreteren.

7.1.1. Gevoeligheidsberekeningen zonder tijdok

De simulaties voor het gevoeligheidsberekeningen van het model zijn uitgevoerd voor een referentietoestand (HT) zijnde een toestand van de Schelde zonder tijdok, verdieping en Noordzeeterminal.

De gevarieerde parameters voor de gevoeligheidsberekeningen zijn:

- maatgevende korreldiameter: 100, 115, 130 μm
- k_n -ruwheid: 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50 m
- getij: springtij

Als basis voor de vergelijking dient het resultaat van de berekening met een springtij, een maatgevende korreldiameter van 115 μm en een ruwheid van 0.10 m. De resultaten zijn weergegeven onder de vorm van erosie in m^3 per getij en de bodemverandering (verdieping) in mm per getij voor het hele modelgebied. De erosie wordt berekend door de som te nemen van alle roostercellen van het model met een netto erosie per getij. De zo berekende 'totale' erosie is nagenoeg in evenwicht met de 'totale' sedimentatie in het modelgebied (verschil <1%) zodat het weinig zinvol is om beide getallen te vermelden in de tabel. In tabel 7.1 is het effect van de variatie van de maatgevende korrelgrootte (D_{50}) en de ruwheid (k_n) getoond. Uit de tabel blijkt dat de hoeveelheid erosie en sedimentatie in het modelgebied bijzonder hoog is en voor de basissimulatie een gemiddelde laagdikte van nagenoeg 9 mm/getij per m^2 betekent. Dit is het gevolg van het feit dat het modelrooster fijnmazig is wat op plaatsen met grote gradiënten tot een onrealistische overschatting van de sedimentatie of erosie leidt. In § 7.1.3. wordt hierop nader ingegaan. Uit tabel 7.1 kan het volgende worden afgeleid:

- Een verkleining van de mediane korrelgrootte heeft een grotere erosie of sedimentatie tot gevolg en omgekeerd. De mate van verandering is omgekeerd evenredig met de boldiame-

ter, d of D_{50} in transportformule (2.18). Binnen de vooropgestelde variatie van de mediane korrelgrootte verandert de erosie en de sedimentatie met een factor 0.87 tot 1.13.

- Een verkleining van de ruwheid, k_n , heeft een kleinere erosie tot gevolg en omgekeerd. De mate van verandering is omgekeerd evenredig met C^3 (Chézy-coëfficiënt) en C is op zijn beurt een logaritmische functie van $1/k_n$. Uitgaande van de berekende waarden resulteert een variatie van k_n tussen 0.01 en 0.5 m in een variatie van de erosie tussen 0.31 en 1.38.

Tabel 7.1: Gevoeligheidsonderzoek zandtransportmodel (D_{50} en k_n , springtij).

Gevarieerde Parameter	D_{50} (μm)	k_n (m)	Erosie/getij		Variatie t.o.v. Basis	
			(m^3)	(mm)	Parameter	Resultaat
Mediane Korrelgrootte D_{50}	100	0.10	187551	9.46	0.870	1.150
	115		171242	8.63	1.000	1.000
	130		151483	7.64	1.130	0.885
Bodemruwheid k_n	115	0.01	53629	2.70	0.100	0.313
		0.05	127763	6.44	0.500	0.746
		0.10	171242	8.63	1.000	1.000
		0.20	202811	10.23	2.000	1.184
		0.50	237004	11.95	5.000	1.384

7.1.2. Gevoeligheidsberekeningen met tijdok

De gevarieerde parameters voor de gevoeligheidsberekeningen zijn:

- maatgevende korreldiameter: 115 μm
- k_n -ruwheid: 0.10 m
- getij: springtij (met saliniteit en zonder saliniteit), doodtij

Uit tabel 7.2 blijkt dat het verschil tussen spring- en doodtij groot is. Een afname van de snelheden met ongeveer 25% geeft een reductie van de erosie of sedimentatie van ongeveer 80%. Om een inschatting van de jaarlijkse erosie of sedimentatie aan de hand van springtij-simulaties te kunnen maken is het noodzakelijk om de resultaten te vermenigvuldigen met een coëfficiënt die representatief is voor de spring-doodtij cyclus. Indien we aannemen dat spring- en doodtij elk representatief is gedurende 50% van de tijd dan is deze coëfficiënt gelijk aan 0.60.

Tabel 7.2 Gevoeligheidsonderzoek zandtransportmodel (getij en saliniteit).

Gevarieerde Parameter	Getij	Erosie/getij		Variatie t.o.v. Basis	
		(m^3)	(mm)	Parameter	Resultaat
Getij	spring	186301	9.39	1.000	1.000
	dood	35931	1.77	0.730	0.190

7.1.3. Invloed van het rooster

Uit tabellen 7.1 en 7.2 blijkt dat de totale hoeveelheid erosie en sedimentatie in het modelgebied bijzonder hoog is en voor de basissimulatie een gemiddelde laagdikte vertegenwoordigt van nagenoeg 9 mm/getij per m^2 - wat natuurlijk niet realistisch is. De totale erosie of sedimentatie in het modelgebied tijdens een springtij bedraagt $\pm 171000 - 186000 \text{ m}^3$, dit is bijna 10 keer meer

dan de resultaten van gelijkaardige zandtransportberekeningen tijdens de studie van de Containerkaai Noord (CKN) gaven (IMDC-WLB, 1992b). Een belangrijk verschil tussen het tijdok- en het CKN-model is gelegen in het rekenrooster, dat veel fijner is bij het tijdokmodel.

In paragraaf 2.3.3 werd het belang van de grootte van de roosterafstand bij berekeningen van de transportcapaciteit en de daaruit afgeleide erosie of sedimentatie uitgelegd. Een kleinere roosterafstand leidt - vanuit hydraulisch oogpunt - tot nauwkeurigere resultaten, maar kan bij zandtransportcapaciteitsberekeningen grote spreidingen in de resultaten veroorzaken. De reden hiervoor is dat bij evenwichtstransporten de aanpassingslengte van de sedimentverticaalvorm binnen één gridcel dient te gebeuren. Indien de roostercel kleiner is dan de aanpassingslengte, wat hier zeker het geval is (zie § 2.3.3), dan is een uitmiddeling van de extreme waarden voor erosie en sedimentatie vereist. Dit gebeurt in FINTRA-FD door de transporten te berekenen uit over een zijde gemiddelde snelheden.

Uit de modelresultaten blijkt echter dat enkel een uitmiddeling van de snelheden niet overal in het modelgebied voldoende is. Kleine roosterafstanden, indien gepaard met grote variaties in snelheden en waterdiepten, kunnen immers tot een sterke overschatting van erosie en sedimentatie leiden. In het modelgebied zijn enkele zones waar de bathymetrie en dus ook de stroomsnelheden sterk variëren over een kleine afstand, de twee voornaamste zijn de strekdam aan de Ballastplaat en de strekdam langsheen de Plaat van Doel. De modelresultaten voor de basissimulatie tonen aan dat ongeveer 75% van de erosie en sedimentatie zich op die plaatsen situeert, terwijl deze gebieden minder dan 2% van de totale modeloppervlakte vertegenwoordigen.

Uit de resultaten blijkt verder dat op de plaatsen waar de snelheids- en de waterdieptegradiënten relatief klein zijn (dit is bijna overal het geval behalve langsheen de strekdammen en op enkele andere kleine plekjes) het model zinvolle resultaten levert.

7.2. Beschrijving van de erosie/sedimentatie van zand in het modelgebied

7.2.1. Huidige Toestand (HT)

De resultaten van de zandtransportcapaciteitsberekeningen voor de huidige toestand worden weergegeven in figuren 7.1 -7.4:

- hele modelgebied, figuren 7.1 (erosie), 7.2 (sedimentatie) in mm/getij.
- detail ter hoogte van de Drempel van Frederik, figuren 7.3 (erosie), 7.4 (sedimentatie).

Opvallend aan figuren 7.1-7.4 is de sterk afwisselende erosie en sedimentatiepatronen. De figuren tonen verder de erosie in het vaarwater ter hoogte van de Ballastplaat, de afwisselende erosie en sedimentatiepatronen op de Plaat van Doel en in de Schaar van Ouden Doel, de erosie ter hoogte van de Europaterminal en de sedimentatie op de Drempel van Frederik. De afwisselende erosie en sedimentatie wordt mede veroorzaakt en versterkt door het feit dat het model uitgaat van evenwicht, zodat het model direct reageert zonder aanpassingslengten, zie § 2.3.3.

Opvallend ook is de grote erosie en sedimentatie die optreedt langsheen en op de strekdammen. Deze waarden zijn niet realistisch en komen voort uit de veronderstelling in het model dat de bodem uit zand bestaat.

7.2.1.1. Vergelijking met metingen

Wanneer de berekende erosie en sedimentatie vergeleken wordt met de metingen op de Drempel van Zandvliet (figuur 3.12) is het volgende waarneembaar:

- de berekende erosie/sedimentatie is over het algemeen groter dan de gemeten.
- gemeten erosieplek in kwadrant Ib (vaargeul) kan ook teruggevonden worden in de berekeningen,
- erosieplek in kwadrant Ib (vloedschaar) B is weinig uitgesproken in de berekeningen,
- erosieplek in kwadrant IIa eveneens duidelijk te zien, de gemeten erosie is gelegen tussen 0 en 3 mm/getij (model: 0-6 mm/getij),
- erosieplek tussen kwadrant IIIa en IIa is terug te vinden, de berekende erosie is ook hier iets overschat.
- sedimentatiegebieden in kwadrant Ib, worden teruggevonden op de Plaat van Doel en de Schaar van Ouden Doel in het model.
- sedimentatieplek in vaargeul van kwadrant IIa kan teruggevonden worden in het model.
- de sedimentatie in de vaargeul (IIb en IIIa) is zowel in het model als in de metingen zichtbaar. De sedimentatie afkomstig uit het model (1 tot 3 mm per getij) is wat minder als de uit de metingen gevonden waarden (1 tot 4 mm/getij).

Samenvattend kan gesteld worden dat de overeenkomst redelijk is, zowel de ligging als de grootte komt in de modelberekeningen en de werkelijkheid binnen de grenzen van nauwkeurigheid redelijk overeen. Afwijkingen tussen metingen en berekeningen zijn vermoedelijk het gevolg van het model zelf (zandtransportberekening, parameterwaarden) en het feit dat de metingen (1980-1983) niet in dezelfde periode vallen als de gebruikte bathymetrie voor het model (1990).

7.2.1.2. *Vergelijking met baggergegevens*

Uit tabel 7.2 blijkt dat er op de Drempel van Zandvliet 1702 m^3 sedimenteert per springtij of $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. Dit is een getal dat van dezelfde grootte orde (zij het iets kleiner) is als de gebaggerde hoeveelheden gerapporteerd in tabel 3.5.

Op de Drempel van Frederik sedimenteert (volgens modelberekeningen) 870 m^3 per springtij of $0.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. Vergelijking met baggerhoeveelheden toont aan dat de berekende hoeveelheden kwantitatief correct zijn. De gemiddelde gebaggerde hoeveelheden op de Drempel zijn gelegen tussen 0.2 en $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar (zie tabel 3.6).

7.2.2. **Simulaties van toestanden met tijdok**

De resultaten van de simulaties na inbouw van het tijdok en na verdieping van de vaargeul worden weergegeven in een aantal figuren:

- T01-sp: figuren 7.5-7.6 (erosie en sedimentatie volledig model) en figuren 7.7-7.8 (erosie en sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Frederik).
- T01-np: figuren 7.9-7.10 (erosie en sedimentatie volledig model) en figuren 7.11-7.12 (erosie en sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Frederik).
- T01-14.4: figuren 7.13-7.14 (erosie en sedimentatie volledig model) en figuren 7.15-7.16 (erosie en sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Frederik).

Simulaties T01-sp en T01-np beschrijven alle twee een toestand met een tot -13.3 m GLLWS verdiepte vaargeul. Het verschil tussen beide simulaties is gelegen in de randvoorwaarde (getij is spring- respectievelijk doodtij). In T01-14.4 wordt de vaargeul verdiept tot -14.0 m GLLWS en wordt een springtij gesimuleerd.

De figuren tonen aan dat de veranderingen in erosie en sedimentatie tengevolge van de bouw van een tijdok beperkt zijn tot de onmiddellijke omgeving van het dok. Verder kan uit een onderlinge vergelijking van de figuren met deze van de huidige toestand, afgeleid worden dat door de

verdieping van de vaargeul en de bouw van het dok de erosie zal afnemen en de sedimentatie zal toenemen op de Drempel van Frederik.

7.3. Invloed van een verdieping op het zandtransport

In de vorige paragraaf werden de resultaten van het zandtransportmodel voor de huidige toestand kwalitatief beschreven en waar mogelijk vergeleken met metingen. Verder werden de resultaten van drie simulaties met tijdok en verdieping voorgesteld. In deze paragraaf zullen de simulaties onderling met elkaar vergeleken worden door de erosie en sedimentatie in een aantal te zones te berekenen. Dit laat toe om de invloed van de verdieping van de vaargeul op het zandtransportregime kwantitatief te bepalen.

Het modelgebied wordt hiervoor ingedeeld in een aantal gebieden (zie figuur 7.17). Voor elke zone werd de geërodeerde en afgezette hoeveelheid zand gesommeerd en in tabellen 7.3 tot 7.5 bijeengebracht. Om de resultaten juist te kunnen interpreteren is het nodig om tabel én figuur samen te consulteren. Deze analyse heeft vooral tot doel de kwantitatieve en/of procentuele wijzigingen vast te stellen tussen de verschillende simulaties, eerder dan de absolute hoeveelheden te interpreteren. Volgende zones worden gebruikt:

1. Plaat van Doel
2. Drempel van Zandvliet
4. Schaar van Ouden Doel
5. Vaarwater ter hoogte van de Europaterminal
6. Linkeroever Drempel van Frederik
7. Vaarwater Drempel van Frederik
8. Recheroever Drempel van Frederik
9. Linkeroever Plaat van Lillo
10. Vaarwater Plaat van Lillo
11. Recheroever Plaat van Lillo

Tabel 7.3: Erosie van Zand in m³/getij en in % verschil t.o.v. de referentiesimulatie. Voor T01-sp en T01-14.4 is dit de simulatie HT. Voor simulaties T01-np is dit simulatie T01-sp.

	HT m ³ /getij	T01-sp, T01-144, T01-np					
		T01-sp m ³ /getij en % verschil t.o.v. HT		T01-144 m ³ /getij en % verschil t.o.v. HT		T01-np m ³ /getij en % verschil t.o.v. T01-sp	
1. Plaat van Doel	1906	2675	+40	2495	+31	1813	-32
2. Drempel van Zandvli.	1499	1334	-11	1224	-18	277	-79
4. Schaar van Ouden Doel	2023	2435	+20	2319	+15	744	-69
5. Vaarwater Europaterminal	1914	2047	+7	1803	-6	740	-64
6. LO Drempel van Frederik	1326	1200	-10	1216	-8	426	-65
7. Vaarw. Drempel v. Frederik	1724	1677	-3	1644	-5	610	-64
8. RO Drempel van Frederik	656	687	+5	639	-3	223	-68
9. LO Plaat van Lillo	429	305	-29	287	-33	129	-58
10. Vaarwater Plaat van Lillo	1545	1414	-8	1366	-12	499	-65
11. RO Plaat van Lillo	1437	1185	-18	1088	-23	367	-69
Σ 1+2+4+5+...+11	14459	14959	+3	14081	-3	5828	-61

Tabel 7.4: Sedimentatie van Zand in m³/getij en in % verschil t.o.v. de referentiesimulatie. Voor T01-sp en T01-14.4 is dit de simulatie HT. Voor simulaties T01-np is dit simulatie T01-sp.

	HT m ³ /getij	T01-sp		T01-144		T01-np	
		m ³ /getij en % verschil t.o.v. HT					
1. Plaat van Doel	3115	3787	+22	3562	+14	1596	-58
2. Drempel van Zandvl.	1702	1461	-14	1313	-23	430	-70
4. Schaar van Ouden Doel	2375	2749	+16	2662	+12	926	-66
5. Vaarwater Europaterminal	1123	1001	-11	900	-20	247	-75
6. LO Drempel van Frederik	1062	822	-27	807	-28	341	-59
7. Vaarw. Drempel v. Frederik	867	983	+13	1002	+16	404	-59
8. RO Drempel van Frederik	836	818	-2	737	-12	320	-61
9. LO Plaat van Lillo	263	230	-13	214	-19	136	-48
10. Vaarwater Plaat van Lillo	2172	2207	+2	2103	-3	726	-67
11. RO Plaat van Lillo	2081	2029	-2	1920	-8	609	-70
Σ 1+2+4+...+11	15569	16087	+3	15220	-2	5735	-64

Tabel 7.5: Som erosie (-) en sedimentatie (+) van Zand in m³/getij en in % verschil t.o.v. de referentiesimulatie. Voor T01-sp en T01-14.4 is dit de simulatie HT. Voor simulaties T01-np is dit simulatie T01-sp.

	HT m ³ /getij	T01-sp		T01-144		T01-np	
		m ³ /getij en % verschil t.o.v. HT					
1. Plaat van Doel	1209	1112	-8	1067	-12	-217	-
2. Drempel van Zandvl.	203	127	-37	89	-56	153	+20
4. Schaar van Ouden Doel	352	314	-11	343	-3	182	-42
5. Vaarwater Europaterminal	-791	-1046	+32	-903	+14	-493	-53
6. LO Drempel van Frederik	-264	-378	+43	-409	+55	-85	-78
7. Vaarw. Drempel v. Frederik	-857	-694	-19	-642	-25	-206	-70
8. RO Drempel van Frederik	180	131	-27	98	-46	97	-26
9. LO Plaat van Lillo	-166	-75	-55	-73	-56	7	-
10. Vaarwater Plaat van Lillo	627	793	+26	737	+18	227	-71
11. RO Plaat van Lillo	644	844	+31	832	+29	242	-71
Σ 1+2+4+...+11	1110	1128	+2	1139	+3	-93	-

Het verdiepte gebied ter hoogte van de Drempel van Frederik strekt zich uit over zones 6 (Vaarwater Drempel van Frederik) en een deel van zone 9 (Vaarwater plaat van Lillo). Uit bovenstaande tabellen blijkt dat ten gevolge van de verdieping van de vaargeul de erosie gaat afnemen terwijl de sedimentatie toeneemt of constant blijft. Ter hoogte van de Drempel van Frederik neemt de sedimentatie toe met 13% (-13.74 m TAW) tot 16% (verdieping tot -14.40 m TAW), terwijl de erosie iets afneemt (3-5%). Ter hoogte van het dok (zone 9) is er een belangrijke afname in erosie (8-12%) terwijl de sedimentatie nagenoeg onveranderd blijft.

FINTRA is een evenwichtsmodel, erosie en sedimentatie reageren direct op veranderingen in transportcapaciteit. Doordat de vaargeul verdiept is, zal de snelheid verminderen, met als gevolg een verminderde transportcapaciteit. De gradiënt van het transport neemt echter toe aan de grens van het verdiepte gedeelte, zodat aan één rand van de verdiepte zone een grotere sedimentatie en een kleinere erosie te verwachten is en aan de andere rand een toename van de erosie en een afname van de sedimentatie.

De effecten tengevolge de verdieping van de vaargeul en de bouw van het tijdok worden weergegeven in de verschilkaarten in figuren 7.18 en 7.19. Deze figuren werden bekomen door de resultaten van de ene simulatie (HT of T01-14.4) af te trekken van de referentiesimulatie (i.c. T01-sp). Met het zandtransportmodel wordt er vanuit gegaan dat heel de rivierbodem uit zand bestaat zodat zowel een verdieping (erosie) als een verondieping (sedimentatie) berekend kan worden. Een verondieping t.o.v. de referentiesimulatie (Ref. dieper) wijst op gebieden waarbij in de referentietoestand een kleinere sedimentatie ofwel een grotere erosie optreedt. Een verdieping t.o.v. de referentietoestand (Ref. ondieper) betekent dan een grotere sedimentatie of een kleinere erosie bij de referentietoestand vergeleken met de beschouwde simulatie. Om de verschilkaarten juist te interpreteren is het noodzakelijk om ook de boven vermelde erosie- en sedimentatiekaarten te beschouwen.

Uit de verschilkaarten (figuren 7.18-7.19) kan het volgende opgemaakt worden:

- de verschillen tussen de Huidige Toestand (HT) en T01sp zijn voornamelijk gesitueerd in de vaargeul. Er treedt daar een grillig patroon van erosie-(sedimentatie-) toename of afname op.
- de sedimentatie in de vaargeul kan plaatselijk met meer dan 2 mm per springtij toenemen (dit zijn 1.4 m/jaar) door de bouw van het tijdok en de verdieping van de vaargeul tot -13.74 m TAW.
- tengevolge van de bouw van het tijdok en de verdieping van de vaargeul neemt de sedimentatie toe ter hoogte van de insteek van het dok en iets opwaarts ervan (zwaaicirkel).
- de effecten van een verdieping van de vaargeul tot -14.44 m TAW t.o.v. de toestand T01sp (-13.74 m TAW) zijn klein (zie figuur 7.19)

7.4. Schatting van de onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik

Het gemiddelde jaarlijkse volume onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik gedurende de periode 1991 - 1996 bedroeg 295000 m³, zie tabel 3.6. Indien uitgegaan wordt van een gemiddeld zandpercentage van 75% op de Drempel van Frederik, zie figuren 3.2 en 3.3 en tabel 3.2, betekent dit dus een jaarlijks (gemiddeld) gebaggerd volume van 221000 m³ zand en 74000 m³ slib. Om een schatting te kunnen maken van de onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik na het uitvoeren van de geplande werken is het nodig om een onderscheid te maken tussen het zand- en het slibdeel van de sedimenten.

7.4.1. Volume zand

Uit de modelberekeningen blijkt dat door de bouw van een tijdok én de verdieping van de vaargeul het gemiddelde jaarlijkse volume aan zand dat gebaggerd moet worden zal toenemen met 38000 m³ tot een volume van 259000 m³ (-13.3 m GLLWS) en met 47000 m³ tot een volume van 268000 m³ (-14.0 m GLLWS). Dit zijn toenames met respectievelijk 13% en 16% t.o.v. het totale gebaggerde volume. Deze getallen steunen enkel op springtijresultaten. De zandtransportresultaten voor doodtij zijn beduidend (50-70%) kleiner dan voor springtij, de jaarlijkse toename van het zand in de onderhoudsbaggerwerken is dus mogelijk beperkter als boven aangegeven.

7.4.2. Volume slib

Uit tabel 6.1 blijkt dat de aanslibbing tijdens een springtij op de Drempel van Frederik na de bouw van het dok en de verdieping tot -13.3 m GLLWS toeneemt met 100% (dit zijn 70 t/getij). De hoeveelheid aanslibbing bedraagt ongeveer 140 t/getij (T01-sp), terwijl er tijdens een doodtij (T01-np) ongeveer 400 t/getij slib wordt afgezet, zie IMDC (1998c). Bij een verdieping van de vaargeul met bijkomend 0.70 m (tot -14.0 m GLLWS) zal de aanslibbing nauwelijks wijzigen.

Rekening houdend met de variaties in aanslibbing gedurende een doodtij-springtij cyclus en gedurende de seizoenen wordt de jaarlijkse hoeveelheid aanslibbing op de Drempel van Frederik (zone 7) geschat op 0.79x10⁶ m³. Dit is een factor 10 meer dan de boven geschatte jaarlijks gebaggerde hoeveelheid. Het verschil wordt verklaard door het feit dat een groot deel van de aanslibbing zich situeert op andere plaatsen dan de aanzanding. Bij de inschatting van de toename aan onderhoudsbaggerwerken zal daarom enkel met de relatieve verandering in aanslibbing gerekend worden. Dit betekent dan dat door de verdieping van de vaargeul en de bouw van het dok er jaarlijks 74000 m³ meer slib gebaggerd zal moeten worden. De totale hoeveelheid gebaggerd slib bedraagt dan 128000 m³.

7.4.3. Totaal volume onderhoudsbaggerwerken

De totale jaarlijks gemiddelde hoeveelheid onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik wordt geschat op 387000 m³ (verdieping tot -13.3 m GLLWS) en 396000 m³ (verdieping tot -14.0 m GLLWS). Dit betekent een toename met 31% en 34% t.o.v. jaarlijks gemiddelde gebaggerde hoeveelheid gedurende de periode 1991 - 1996.

Het slibgehalte van de baggerspecie op de Drempel van Frederik zal na het uitvoeren van de geplande infrastructuurwerken toenemen (zie ook § 6.2.1). Het voorspelde slibgehalte van het bodemsediment na verdieping en na de bouw van het tijdok is ongeveer 33% (t.o.v. 25% nu).

7.5. Besluiten

Het zandtransportmodel FINTRA werd gecalibreerd voor de huidige toestand door het uitvoeren van gevoeligheidssimulaties. Deze simulaties laten toe om de spreiding van de resultaten te kwantificeren, die het gevolg zijn van de (natuurlijk) optredende variaties in parameterwaarden (e.g. maatgevende korreldiameter, getij, ruwheid). Uitgaande van een gemiddelde waarde voor de parameters (en bij springtij) kan een variatie van de resultaten verwacht worden die gelegen is tussen 0.2 en 1.4.

Na het "calibreren" van het model werd het model toegepast om het zandtransport voor de toestanden met tijdok (T01-sp, T01-np en T01-14.4) te berekenen. Uit deze simulaties kan het volgende afgeleid worden:

- Door de verdieping van de vaargeul en de bouw van een tijdok gaat het zandtransportregime gewijzigd worden. De grootste wijzigingen in sedimentatie en erosie van zand doen zich voor

op de Drempel van Frederik en ter hoogte van de geplande ingang van het tijdok. De rest van het onderzochte gebied ondergaat geringe wijzigingen.

- Door de bouw van een tijdok en de verdieping van de vaargeul tot -13.3 m GLLWS (-14.0 m GLLWS) gaat de sedimentatie van zand op de Drempel van Frederik toenemen met 13% (16%) t.o.v. de huidige toestand. De erosie vermindert met 3% (5%) t.o.v. de huidige toestand.

Het gemiddelde jaarlijkse volume onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik gedurende de periode 1991 - 1996 bedroeg 295000 m³, waarvan ongeveer 221000 m³ (75%) zand en 74000 m³ (25%) slib. De totale jaarlijks gemiddelde hoeveelheid onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik worden geschat op 387000 m³ na een verdieping van de vaargeul tot -13.3 m GLLWS en op 396000 m³ na een verdieping tot -14.0 m GLLWS, dus een toename met respectievelijk 31% en 34% t.o.v. de jaarlijks gemiddeld hoeveelheid baggerwerken gedurende de periode 1991 - 1996.

Het slibgehalte van de baggerspecie op de Drempel van Frederik zal na het uitvoeren van de geplande infrastructuurwerken toenemen tot ongeveer 33% (t.o.v. 25% nu).

8. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

8.1. Situering van het onderzoek

De voorlopige besluiten die getrokken werden uit het oriënterend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek in verband met de bouw van een tijdok aan de linkeroever, zie IMDC-WLB (1995a-c), lieten een aantal vragen onbeantwoord, met name hoe het onderhoudsbaggerwerk in het tijdok zou kunnen worden beperkt en wat de gevolgen zijn van de verdieping van de vaargeul op het hydraulisch-sedimentologisch regime. Om een antwoord te kunnen geven op deze vragen en ook om de onzekerheidsmarge rond de vroegere resultaten en besluiten te verkleinen werd in december 1996 door de afdeling Zeeschelde aan IMDC de opdracht verleend voor het uitvoeren van een bijkomend hydraulisch-sedimentologisch detailonderzoek.

In dit deelrapport wordt het onderzoek 'Drempel van Frederik' besproken. Het doel van dit onderzoek is om met behulp van numerieke modellen na te gaan wat het effect van een verdieping van de vaargeul is op de hydrodynamica, het slibtransport en het zandtransport ter hoogte van de Drempel van Frederik. Volgende acties werden ondernomen:

1. De karakterisatie van de bodemsedimenten op basis van literatuurgegevens.
2. Het implementeren van de verdieping van de vaargeul tot -14.0 m GLLWS en het uitvoeren van de simulaties voor hydrodynamica en slibtransport.
3. Het bepalen van het volume aanlegbaggerwerken voor een verdieping tot -13.3 en -14.0 m GLLWS.
4. Het opzetten, calibreren en valideren van het zandtransportmodel. Het uitvoeren van zandtransportberekeningen voor een viertal toestanden. Dit zijn de Huidige Toestand (HT, zonder verdieping, zonder tijdok en zonder Noordzeeterminal) en drie toestanden met tijdok en verdieping: T01-sp (springtij verdieping tot -13.3 m GLLWS), T01-np (doodtij en verdieping tot -13.3 m GLLWS) en T01-14.4 (idem T01-sp maar met een verdieping tot -14.0 m GLLWS).
5. Het interpreteren van de resultaten van de simulaties met het oog op de effecten van de verdieping en de bouw van het tijdok op de hydrodynamica, het slibtransport en het zandtransport ter hoogte van de Drempel van Frederik.
6. Het schatten van de onderhoudsbaggerwerken ter hoogte van de Drempel van Frederik op basis van slib- en zandtransportresultaten.

De studie is uitgevoerd met behulp van de 3D numerieke modellen die opgesteld werden tijdens het oriënterend onderzoek zie IMDC-WLB (1995b en c) en Fettweis en Sas (1996). Bijkomend werd gebruik gemaakt van het 2D zandtransportmodel FINTRA, dat in het kader van dit project aangepast werd om data uit het 3D HN model te gebruiken. De modelstudie omvat de simulatie van het stromingspatroon en van het sedimenttransport in de Beneden Zeeschelde, met name het deel gelegen tussen de grens en een raai ter hoogte van Meestoof. Met volgende beperkingen dient men rekening te houden:

1. Voor de Schelde is enkel een beperkt aantal metingen beschikbaar die een gefundeerde keuze van sedimentparameters zou toelaten.
2. Er is gerekend met een homogene bodem, er wordt geen interactie beschouwd tussen zand en slib bij de erosie of sedimentatie van zand en slib. Consolidatie van slib wordt niet gesimuleerd.
3. Omdat de modelstudies vóór de in het kader van het onderzoek geplande metingen begonnen zijn, werden dezelfde randvoorwaarden en parameterwaarden gebruikt als voor het oriënterend onderzoek.

8.2. Karakterisatie van de bodemsedimenten

Met als doel het uitvoeren van zandtransportberekeningen voor de Beneden Zeeschelde om de invloed van een verdieping van de vaargeul op de morfologie te onderzoeken, is naast de aanwezigheid van bathymetrische- en snelheidsgegevens - die afkomstig zijn van het 3D hydrodynamisch model - een grondige kennis nodig over de bodemsedimenten in het modelgebied. Hiertoe werd de aanwezige literatuur doorgenomen en de belangrijkste data samengevat in het rapport. Het betreft gegevens over lithologie, korrelgrootte van de bodemsedimenten, bodemvormen, sedimentatie en erosie en baggerhoeveelheden. De gegevens dienen om de waarde van de parameters uit het zandtransportmodel in te schatten en om de zandtransportberekeningen te valideren.

8.3. Aanlegbaggerwerken voor een verdieping van de vaargeul

Om de vaargeul te verdiepen tot -13.74 m TAW (uitgaande van een toestand zonder Noordzeeterminal) dient een volume van 4 miljoen m³ gebaggerd te worden, waarvan nagenoeg 1 miljoen m³ op de Drempel van Frederik en 1 miljoen m³ opwaarts ervan (Vaarwater Plaat van Lillo), d.i. ter hoogte van het tijdok en houdt ook het aanleggen van de zwaaicirkel in. De rest van de baggerwerken situeren zich afwaarts van de Drempel van Frederik (0.5 miljoen m³ ter hoogte van het vaarwater Europaterminal, 1.2 miljoen m³ op de Drempel van Zandvliet en 0.4 miljoen m³ afwaarts van de Drempel van Zandvliet).

Een bijkomende verdieping met 0.70 m tot -14.44 m TAW is minder 'volumineus': 0.34 miljoen m³ op de Drempel van Frederik en 0.4 miljoen m³ opwaarts ervan (Vaarwater Plaat van Lillo). Afwaarts van de Drempel van Frederik zijn de hoeveelheden gelijk aan 0.33 miljoen m³ (Vaarwater Europaterminal) 0.37 miljoen m³ (Drempel van Zandvliet) en 0.25 miljoen m³ (afwaarts van de Drempel van Zandvliet).

8.4. Hydrodynamica

Een gedetailleerde beschrijving van het stroombeeld, het snelheidsprofiel en de zoutverdeling in de Beneden Zeeschelde werd gegeven in deelrapport 5 (IMDC, 1998c). In dit rapport werden de enkel de resultaten voorgesteld van de hydrodynamische simulaties die uitgevoerd werden in het kader van de effecten van een inplanting van een tijdok en een verdieping van de vaargeul op het stroombeeld ter hoogte van de Drempel van Frederik. Deze simulaties vormen de basisgegevens voor de sedimenttransportberekeningen.

De simulaties tonen aan dat de invloed van een verdieping van de vaargeul ter hoogte van de Drempel van Frederik op het stroombeeld klein is. Het is vooral door de bouw van het tijdok dat de grootste veranderingen in het stroombeeld t.o.v. de huidige toestand mogen verwacht worden.

8.5. Slibtransport

Omdat de sedimenten op de Drempel van Frederik een belangrijk gehalte aan fijn materiaal (slib) bevatten is het nodig om bij het bestuderen van de effecten van de bouw van een tijdok en de verdieping van de vaargeul op de onderhoudsbaggerwerken naast de zandtransportberekeningen ook slibtransportberekeningen uit te voeren. Hiervoor werden een drietal simulaties beschouwd: HT, T01-sp en T01-14.4. Uit de simulaties kan het volgende afgeleid worden met betrekking tot de gevolgen van de verdieping van de vaargeul op de aanslibbing:

- Door de verdieping van de vaargeul (en de bouw van het tijdok) zullen de sedimenten op de Drempel van Frederik (nog) slibrijker worden, terwijl meer naar opwaarts toe ter hoogte van het tijdok (zone 9 en 10) de te verwachten veranderingen in bodemsamenstelling gering zijn.
- Door de vaargeul in de Beneden Zeeschelde bijkomend te verdiepen met 0.70 m tot -14.44 m TAW (T01-14.4) zullen de aanslibbingspatronen en -hoeveelheden nauwelijks veranderen.
- Door de Schelde te verdiepen tot -14.44 m TAW (uitgaande van -13.74 m TAW) neemt de aanslibbing in het tijdok met ongeveer 4% af. Deze afname is het grootst aan het uiteinde van het dok.

8.6. Zandtransport

De zandtransportberekeningen werden uitgevoerd met het 2D zandtransportcapaciteitenmodel FINTRA. Het zandtransportmodel werd gecalibreerd voor de huidige toestand door het uitvoeren van gevoeligheidssimulaties. Deze simulaties laten toe om de spreiding van de resultaten te kwantificeren, die het gevolg zijn van de (natuurlijk) optredende variaties in parameterwaarden (e.g. maatgevende korreldiameter, getij, ruwheid). Uitgaande van een gemiddelde waarde voor de parameters (en bij springtij) kan een variatie van de resultaten verwacht worden die gelegen is tussen 0.2 en 1.4.

Na het "calibreren" van het model werd het model toegepast om het zandtransport voor de toestanden met tijdok (T01-sp, T01-np en T01-14.4) te berekenen. Uit deze simulaties kan het volgende afgeleid worden:

- Door de verdieping van de vaargeul en de bouw van een tijdok gaat het zandtransportregime gewijzigd worden. De grootste wijzigingen in sedimentatie en erosie van zand doen zich voor op de Drempel van Frederik en ter hoogte van de geplande ingang van het tijdok. De rest van het onderzochte gebied ondergaat geringe wijzigingen.
- Door de bouw van een tijdok en de verdieping van de vaargeul tot -13.3 m GLLWS (-14.0 m GLLWS) gaat de sedimentatie van zand op de Drempel van Frederik toenemen met 13% (16%) t.o.v. de huidige toestand. De erosie vermindert met 3% (5%) t.o.v. de huidige toestand.

Het gemiddelde jaarlijkse volume onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik gedurende de periode 1991 - 1996 bedroeg 295000 m^3 , waarvan ongeveer 221000 m^3 (75%) zand en 74000 m^3 (25%) slib. De totale jaarlijks gemiddelde hoeveelheid onderhoudsbaggerwerken op de Drempel van Frederik worden geschat op 387000 m^3 na een verdieping van de vaargeul tot -13.3 m GLLWS en op 396000 m^3 na een verdieping tot -14.0 m GLLWS, dus een toename met respectievelijk 31% en 34% t.o.v. de jaarlijks gemiddeld hoeveelheid baggerwerken gedurende de periode 1991 - 1996.

Het slibgehalte van de baggerspecie op de Drempel van Frederik zal na het uitvoeren van de geplande infrastructuurwerken toenemen tot ongeveer 33% (t.o.v. 25% nu).

9. LITERATUURLIJST

- Bastin A. en H. Belmans (1988). A new bottom composition map of the river Scheldt and the general use of a fast method to chart the composition of sea- and riverbottoms for the study of siltation problems. *KVIV, 9th Int. Harbour Congress.*
- EC-MAST (1993). On the methodology and accuracy of measuring physico-chemical properties to characterise cohesive sediments. *Report EC Marine Science & Technology I Research Programme.*
- Engelund F. en E. Hansen (1967). A monograph on sediment in alluvial streams. *TU Copenhagen, Teknisk Forlag.*
- Fettweis M., M. Sas en L. Meyvis (1994). Analyse van stroom- en sedimentmetingen ter hoogte van de drempel van Zandvliet (Schelde). *Water, nr. 76, 88-99.*
- Fettweis M. en M. Sas (1994). De complexe stroming in de toegangsgeul van de Zandvliet- en Berendrechtsluis: Inzicht via metingen en modellering. *Water, nr. 77, 109-116.*
- Fettweis M. (1995). Modelling currents and sediment transport phenomena in shelf seas and estuaries. *Doctoraatsthesis Katholieke Universiteit van Leuven,, 253p.*
- Fettweis M. en M. Sas (1996). Slibtransportmodellen en integraal waterbeheer - Toepassingen op de Beneden Zeeschelde. *Water, nr. 90, 249-256.*
- IMDC (1986). Optimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken in de Westerschelde, Drempel van Zandvliet. *IMDC Rapport.*
- IMDC (1988a). Optimalisatie van de baggerwerken in de toegangsgeul naar de Kallosluis - mathematisch model SLIBTRANS. *IMDC Rapport Nr. 908-88.01.02.*
- IMDC (1988b). Liefkenshoektunnel, onderzoek betreffende de morfologische factoren. Eindrapport. *IMDC Rapport Nr. 130-88.01.03.*
- IMDC (1988c). Een tweede containerterminal langs de Schelde. *IMDC Rapport Nr. 131-88.12.12.*
- IMDC (1989). Liefkenshoektunnel - Morfologisch Onderzoek, Deelrapport 1. *IMDC Rapport Nr. 132-89.04.04.*
- IMDC (1990). Rivierbodemsanering en landschapsbouw. Het nuttig gebruik van baggerspecie uit de Antwerpse regio. *IMDC Rapport Nr. 129-90.10.02.*
- IMDC (1997a). Containerdok West. Hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 1: Stroom- en sedimentmeting te Bath op 23 april 1997. *IMDC rapport I/R/11128/97.022/MFE.*
- IMDC (1997b). Containerdok West. Hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 2: Stroom- en sedimentmeting te Meestooft op 23 april 1997. *IMDC rapport I/R/11128/97.028/MFE.*
- IMDC (1998a). Containerdok West. Hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 3: In Situ Metingen van de Erosiegevoeligheid van slib in de Beneden Zeeschelde. *IMDC rapport I/R/11128/98.005/MFE.*
- IMDC (1998b). Containerdok West, Hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 4: Laboratoriummetingen van de Erosiegevoeligheid van slib uit de Beneden Zeeschelde. *IMDC rapport I/R/11128/98.030/.*

- IMDC (1998c). Containerdok West, Hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 5: Detailonderzoek Tijdok. *IMDC rapport I/R/11128/97.040/MFE*.
- IMDC-WLB (1992a). Containerkaai Noord - Hydraulisch en sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 6: Morfologisch onderzoek slib. *IMDC Rapport Nr. 1166-93.12.05*.
- IMDC-WLB (1992b). Containerkaai Noord - Hydraulisch en sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 7: Morfologisch onderzoek zand. *IMDC Rapport Nr. 1166-93.12.06*.
- IMDC-WLB (1993a). Containerkaai Noord - Hydraulisch en sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 11: Hydraulisch onderzoek toegangsgeul Zandvliet- en Berendrechtsluis. *IMDC Rapport Nr. 1166-93.12.11*.
- IMDC-WLB (1993b). Containerkaai Noord - Hydraulisch en sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 12: Morfologisch onderzoek slib - Toegangsgeul Zandvliet- en Berendrechtsluis. *IMDC Rapport Nr. 1166-93.12.12*.
- IMDC-WLB (1993c). Interactie tussen de Containerkaai Noord en de Toegangsgeul Zandvliet-Berendrecht. Hydraulisch - sedimentologisch onderzoek. Eindrapport. *IMDC Rapport Nr. 1166-93.12.13*.
- IMDC-WLB (1995a). Containerkaai-dok West. Oriënterend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 1: 2D modelonderzoek. *IMDC rapport I/R/11103/95.016/JMO*.
- IMDC-WLB (1995b). Containerkaai-dok West. Oriënterend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Deelrapport 2: 3D modelonderzoek. *IMDC rapport I/R/11103/95.023/JMO*.
- IMDC-WLB (1995c). Containerkaai-dok West. Oriënterend hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Eindrapport. *IMDC rapport I/R/11103/95.027/MFE*.
- Jabbari E. (1994). Modelling estuarine circulation. *Doctoraatsthesis Katholieke Universiteit van Leuven, 241p*.
- Krone R.B. (1962). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. *Final Report, Hydraulic Eng. Lab. & Sanitary Eng. Res. Lab, University of California, Berkeley*.
- Manni R.J. (1986). Slibtransport en slibbalans in de Westerschelde. *Studierapport Nr. 4, Westerschelde Studies, Rijkswaterstaat, Vlissingen*.
- McLaren P. (1994). Sediment transport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde. *Rapport Antwerpse Zeehavendienst*.
- Mehta A.J., E.J. Hayter, W.R. Parker, R.B. Krone en A.M. Teeter (1989). Cohesive sediment transport. I Process description and II Application. *ASCE J. Hydr. Eng., 115(8), 1076-1112*.
- Mulder H.P.J. en C. Udink (1990). Modelling of cohesive sediment transport. A case study: The Western Scheldt estuary. *Int. Conf. on Coastal Eng.*
- Odd N.V.M. en M. Owen (1972). A two-layer model of mud in the Thames estuary. *Proc. of the Institution of Civil Eng., Paper 7517S*.
- Odd N.V.M. en J.G. Rodger (1978). Vertical mixing in stratified flows. *J. Hydr. Div., ASCE, 104 (HY3)*.
- Otter L.C. (1996). Vergelijking van de lithologische kaarten van de Zeeschelde (België). *Werkdocument RIKZ/AB-96.870x*.

- RWS - DGW (1991). Zandribbelatlas Westerschelde. *Rapport Rijkswaterstaat en DGW Middelburg*.
- Teeter A.M. (1992). Erosion of cohesive dredged material in open-water disposal sites. *US Army Engineering Waterways Experiment Station, DRP-1-07, Vicksburg*.
- Van Leussen W. (1994). Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. *Doctoraatsthesis Universiteit van Utrecht, 477p*.
- van Rijn L.C. (1982). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. *Doctoraatsthesis TU Delft*.
- van Rijn L.C. (1987). The prediction of bed forms, alluvial roughness and sediment transport. *Rapport Waterloopkundig Laboratorium Delft, S487 III*.
- Voogt L., L.C. van Rijn en J.H. van den Berg (1991). Sediment transport of fine sands at high velocities. *ASCE J. Hydraulic Engineering, vol. 117*.
- Wartel S. (1972). Sedimentologisch onderzoek van de opbouw van het Schelde estuarium. *Doctoraatsthesis Katholieke Universiteit Leuven*.
- Winterwerp J.C. (1997). Slibtransport via zeesluizen; Zandvlietsluis en Berendrechtsluis. *Waterloopkundig Laboratorium, Rapport Z2320*.
- WLB (1997). Waaslandhaven, Containerdok West. Hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. *Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout Model 504/3*.
- WL (1985). Vergelijking zandtransportformules van Morra-Kalinske, Engelund-Hansen, Ackers-White en van Rijn. *Waterloopkundig Laboratorium Delft Rapport nr. R2142*.

BIJLAGE 1

Karakterisatie Bodemsedimenten Beneden Zeeschelde

Figuren 3.1 - 3.12

Zeeschelde

Lithologische kaart van Bastin 1986
met monsterpunten

Legenda:

-  zand
-  zand en slib
-  klei tot vast slib
-  los slib
-  veen (turfslib)
-  gegevens ontbreken
-  dijken e.d.
-  monsterpunt

Schaal: 1 : 75.000



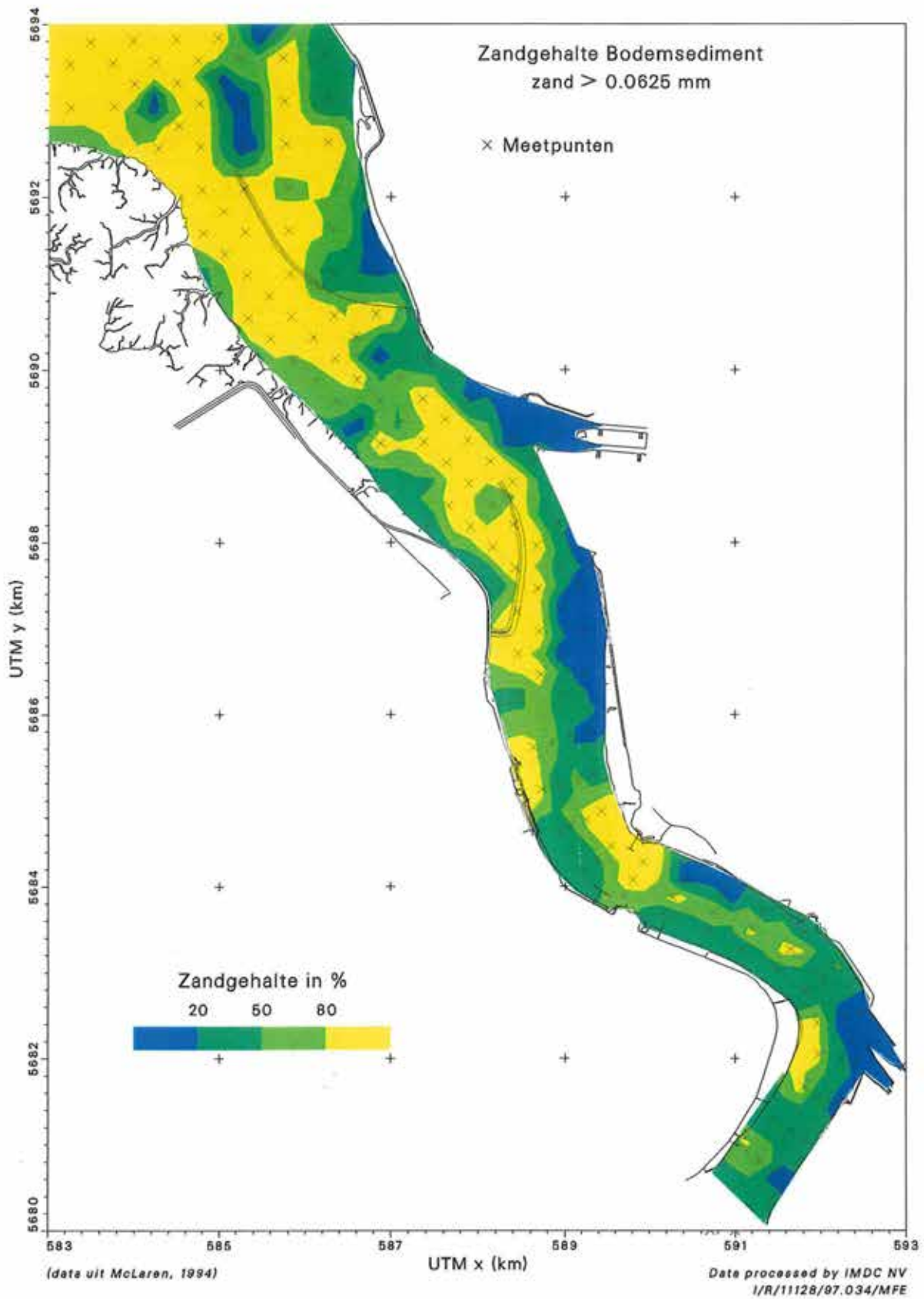
dra. L. Otter



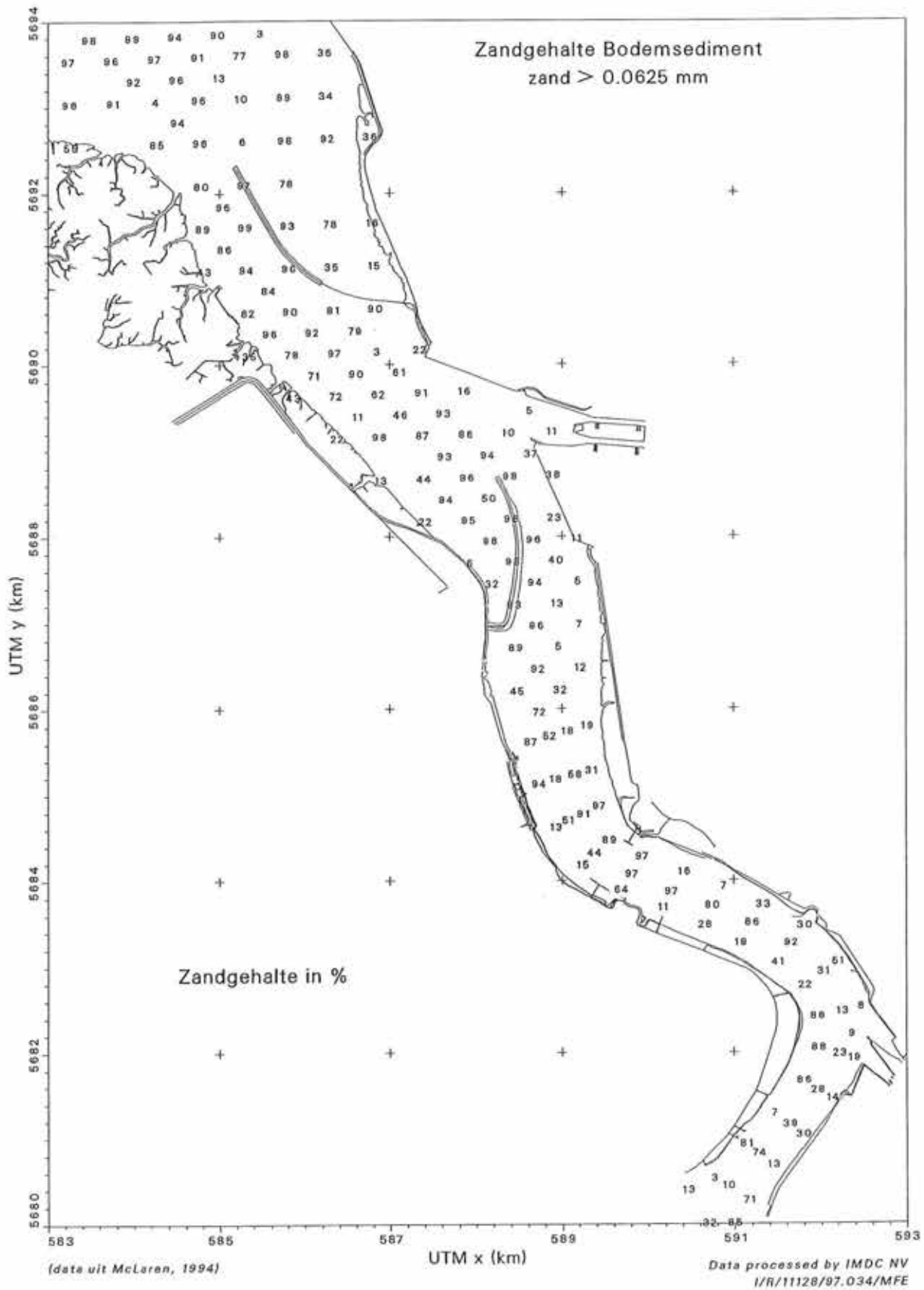
Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor
Kust en Zee



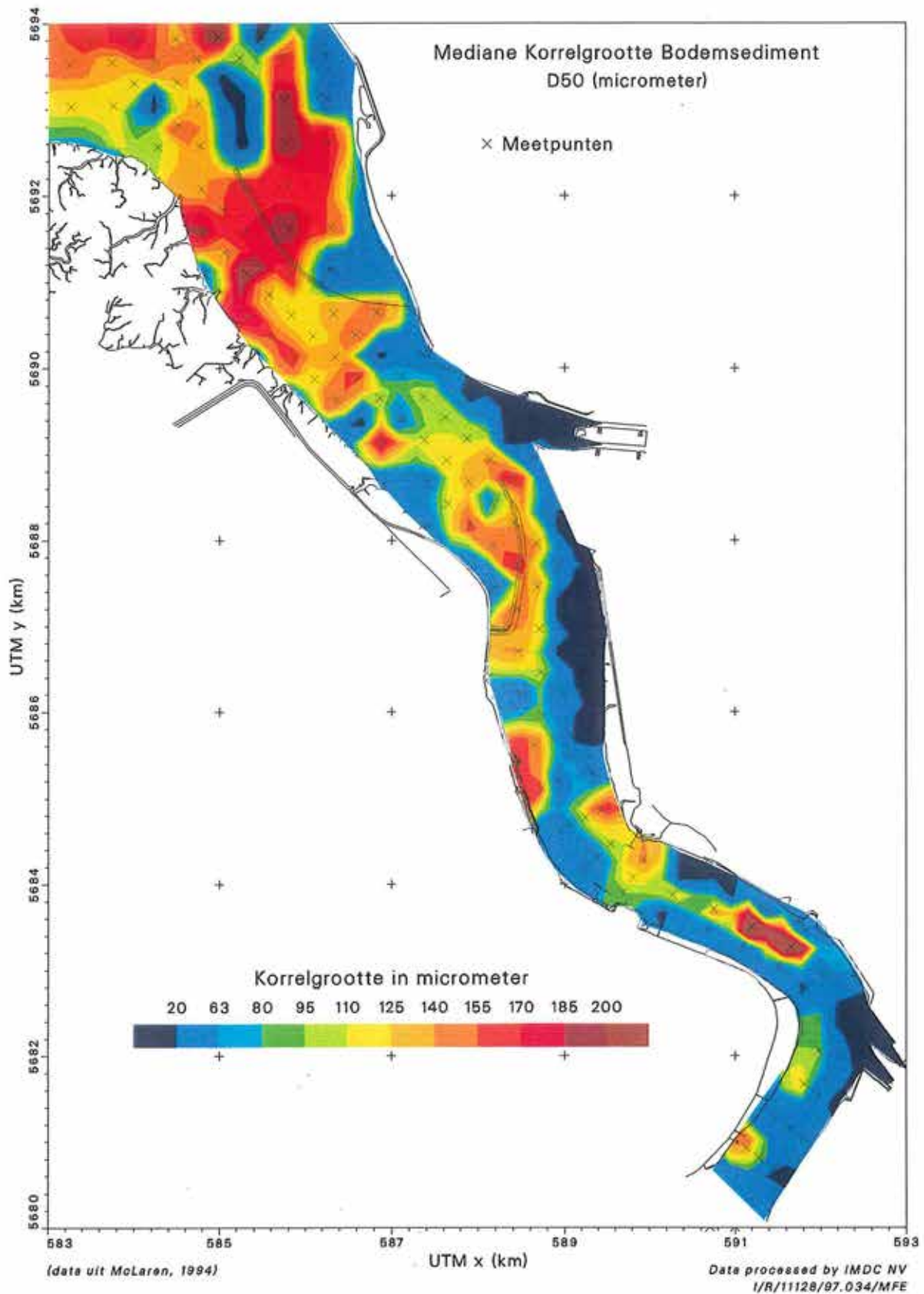
Figuur 3.1



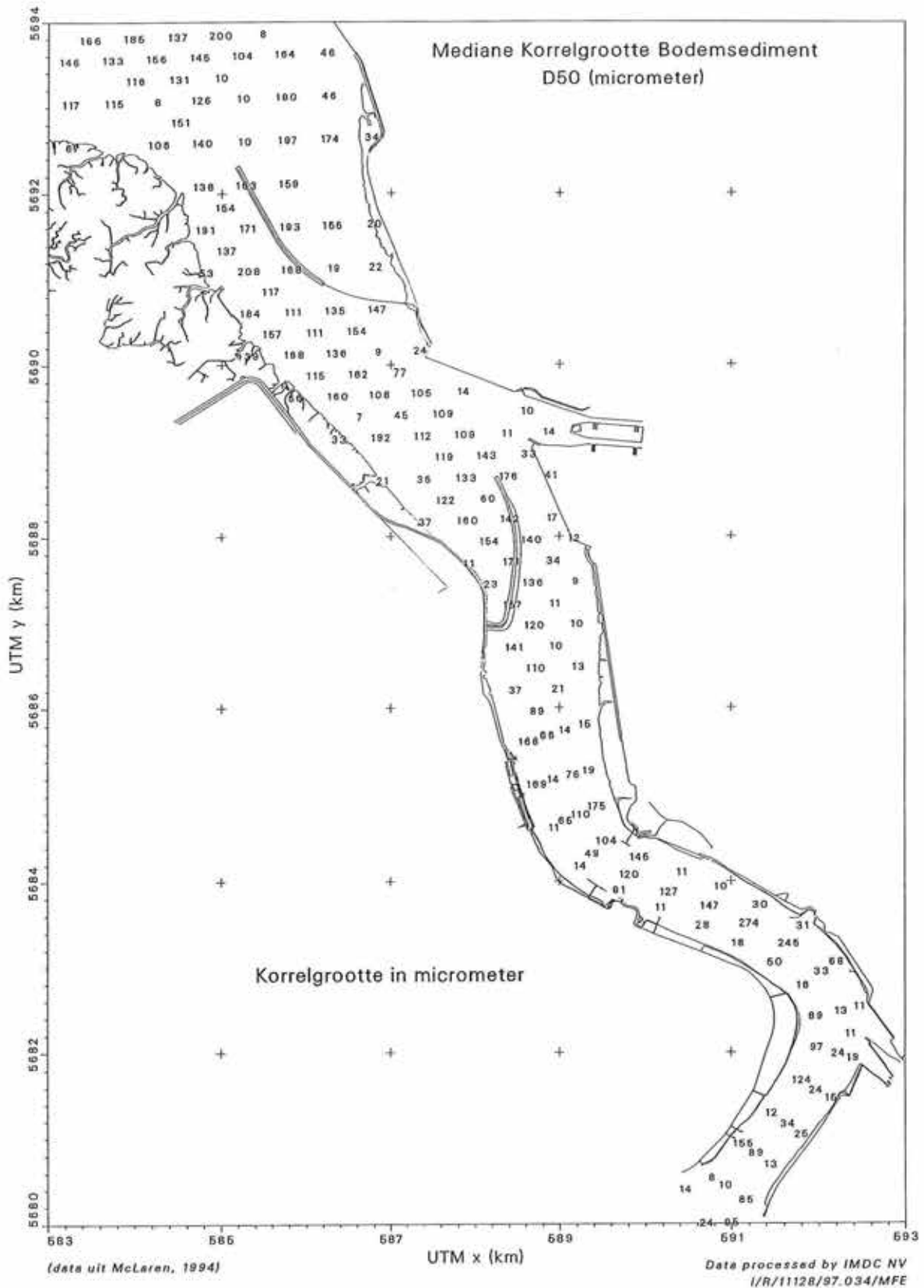
Figuur 3.2: Lithologische kaart Beneden Zeeschelde uit 1993 (data uit McLaren, 1994).



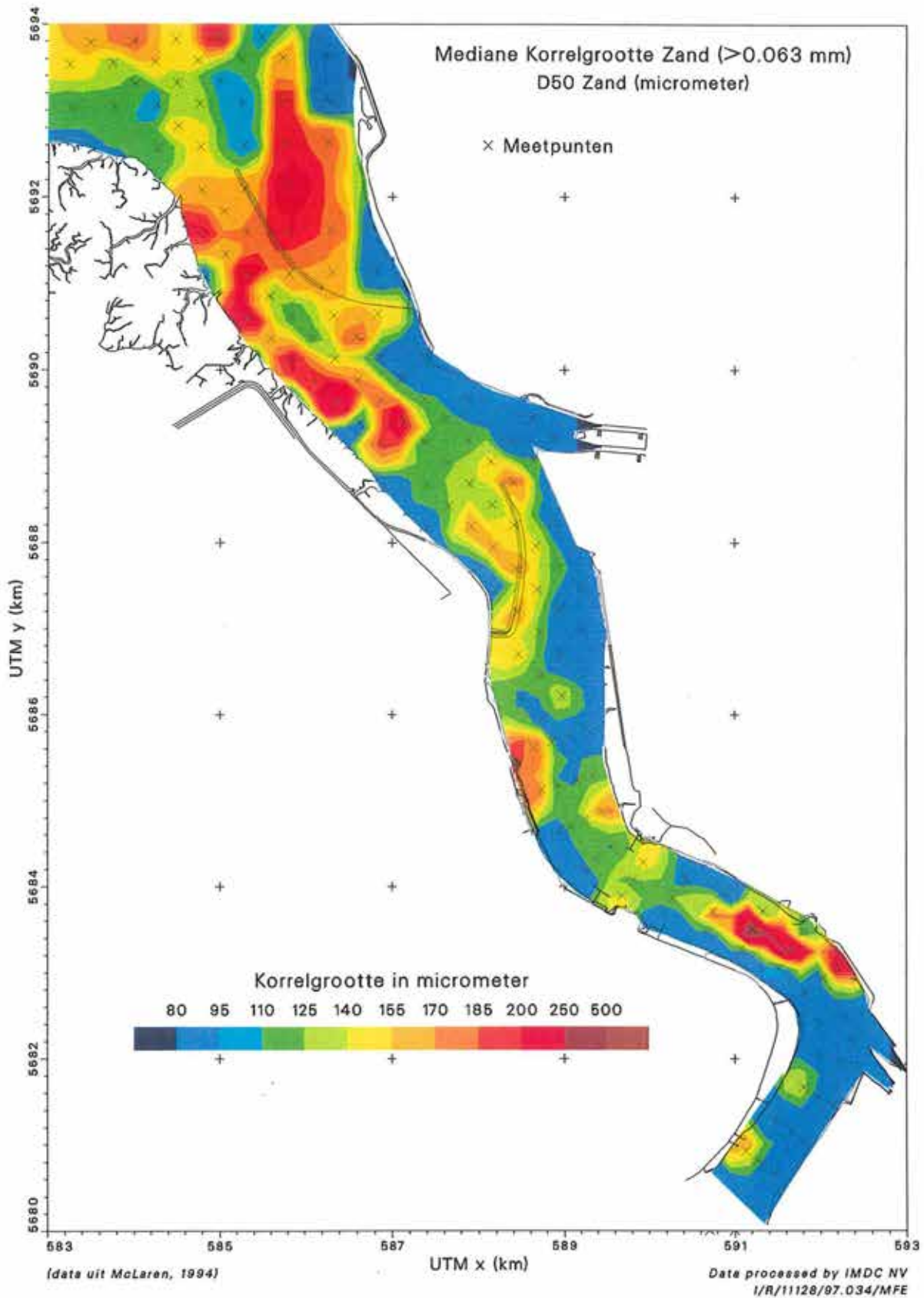
Figuur 3.3: Zandgehalte (in %) van bodemsedimenten in de eneden Zeeschelde.



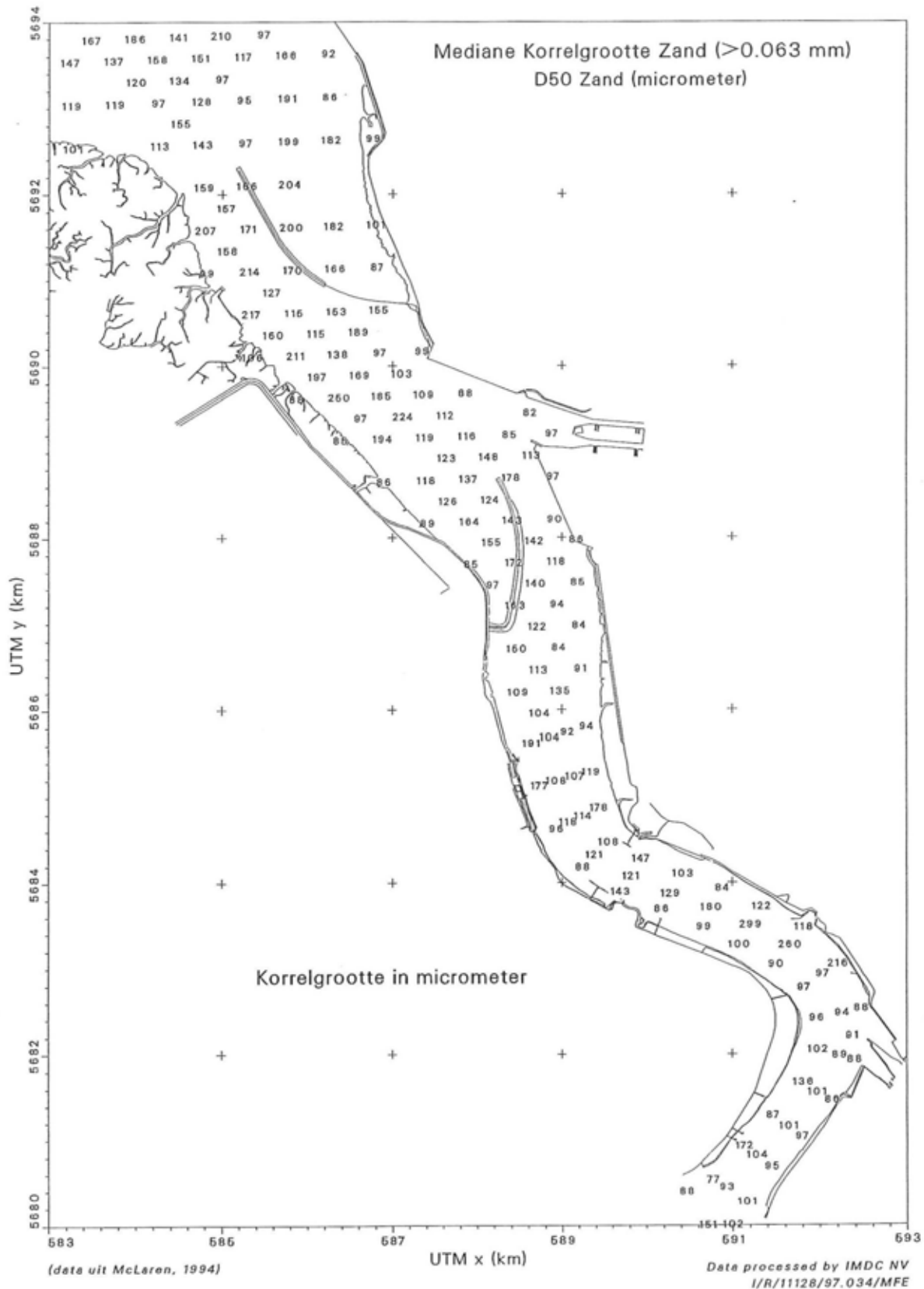
Figuur 3.4: Mediane korrelgrootte (D₅₀) bodemsediment in Beneden Zeeschelde.



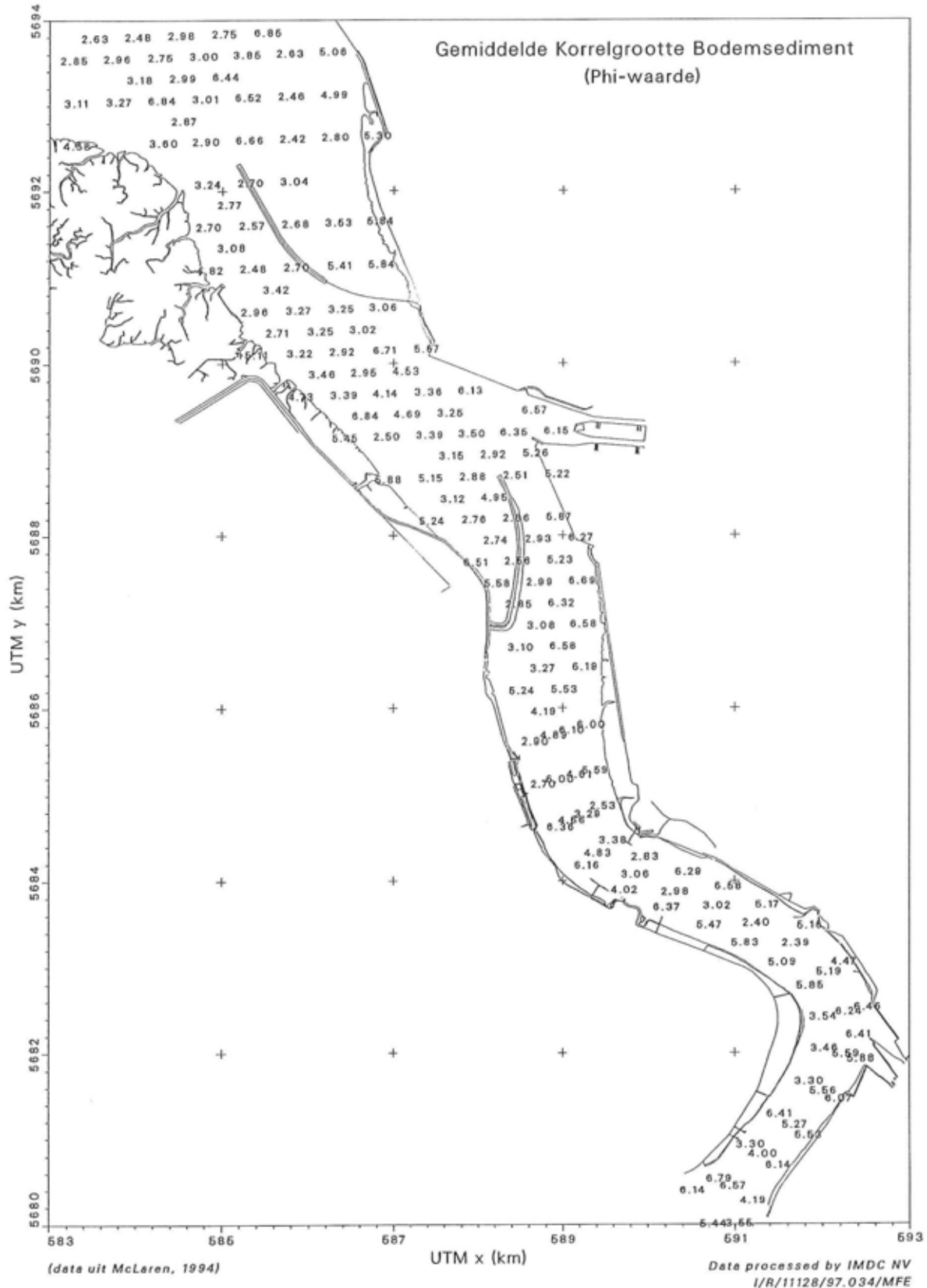
Figuur 3.5: Mediane korrelgrootte (D_{50}) bodemsediment in Beneden Zeeschelde.



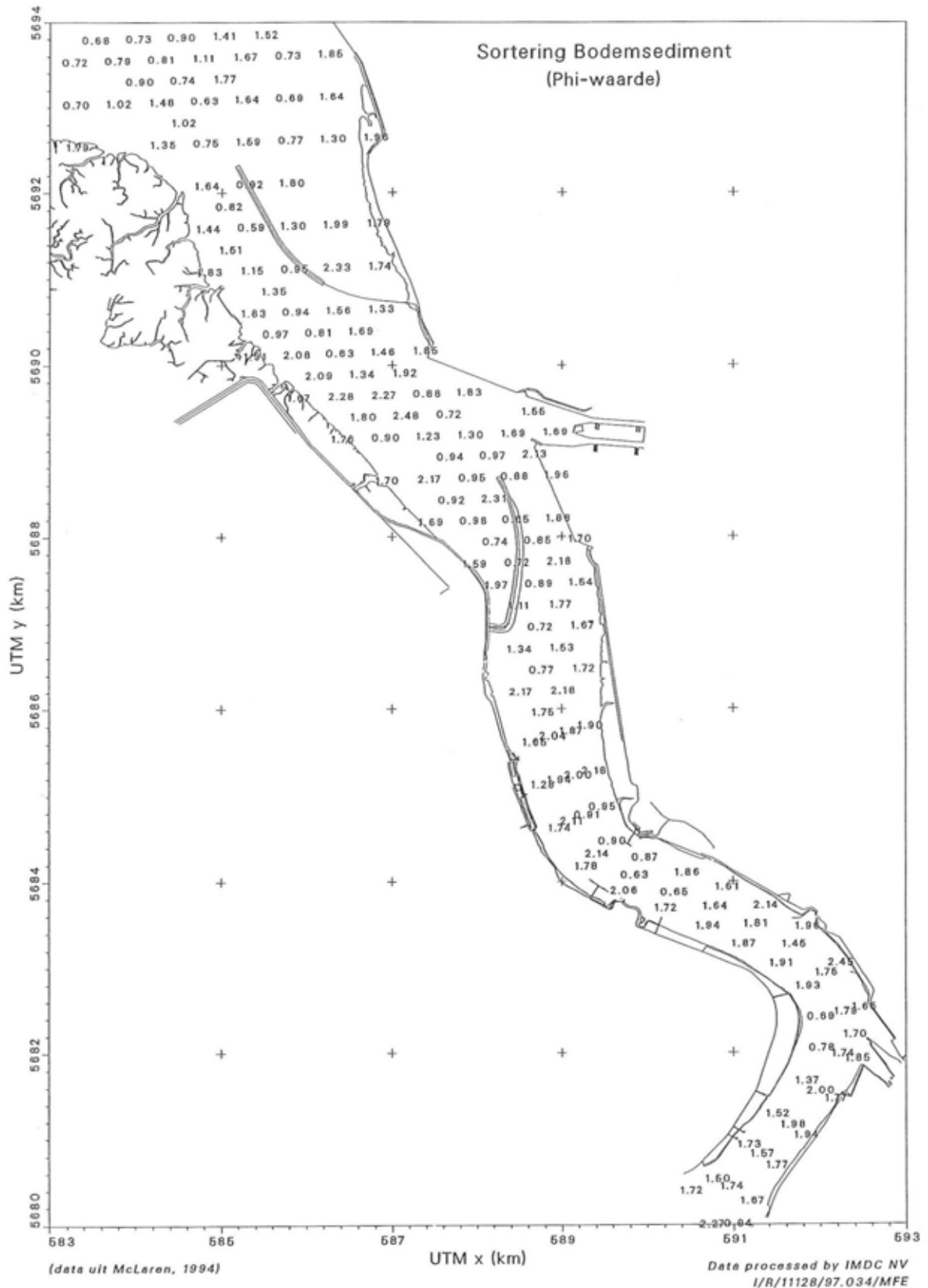
Figuur 3.6: Mediane korrelgrootte (D_{50}) van de zandfractie van het bodemsediment in de Beneden Zeeschelde.



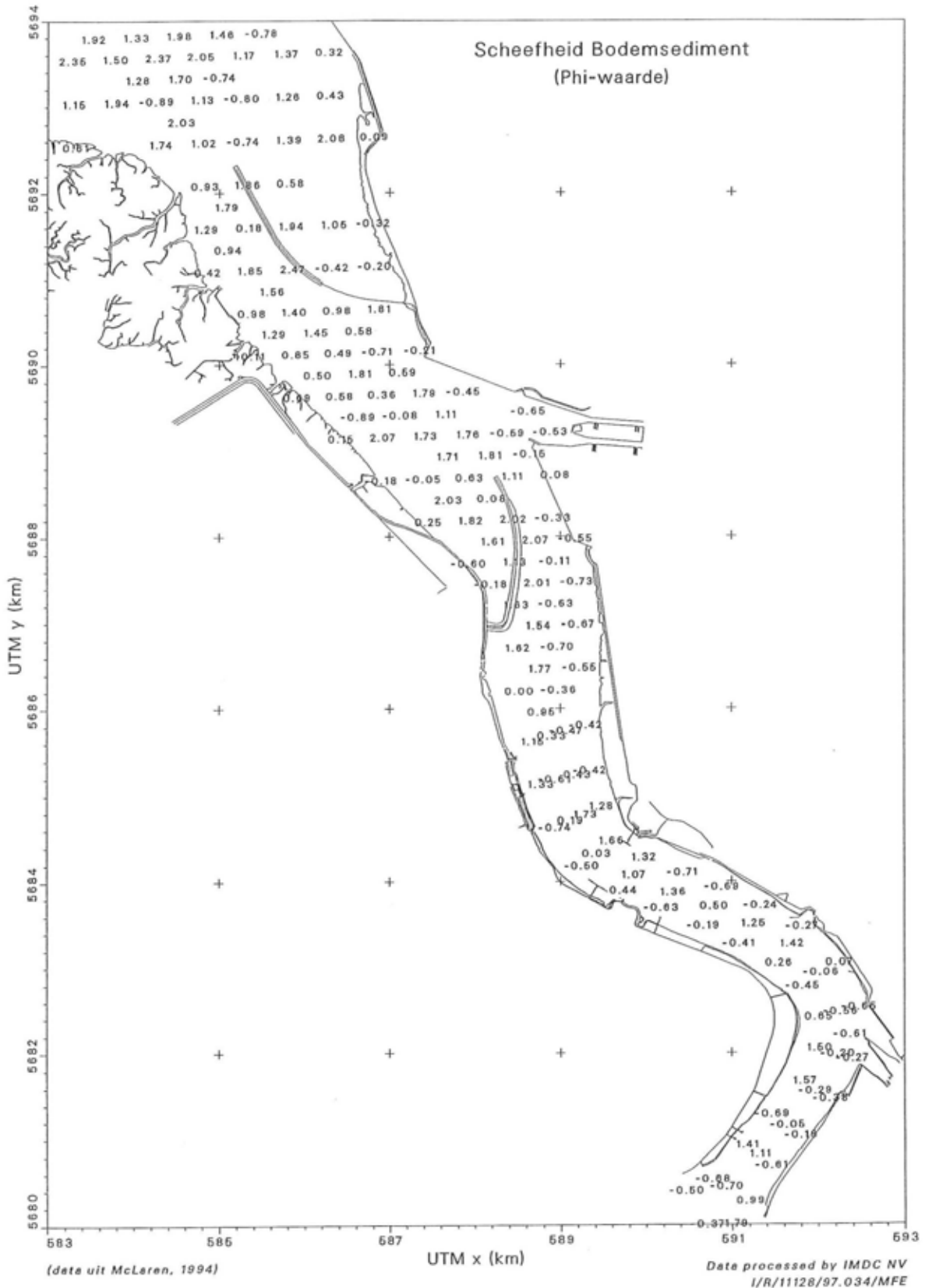
Figuur 3.7: Mediane korrelgrootte (D_{50}) van de zandfractie van het bodemsediment in de Beneden Zeeschelde.



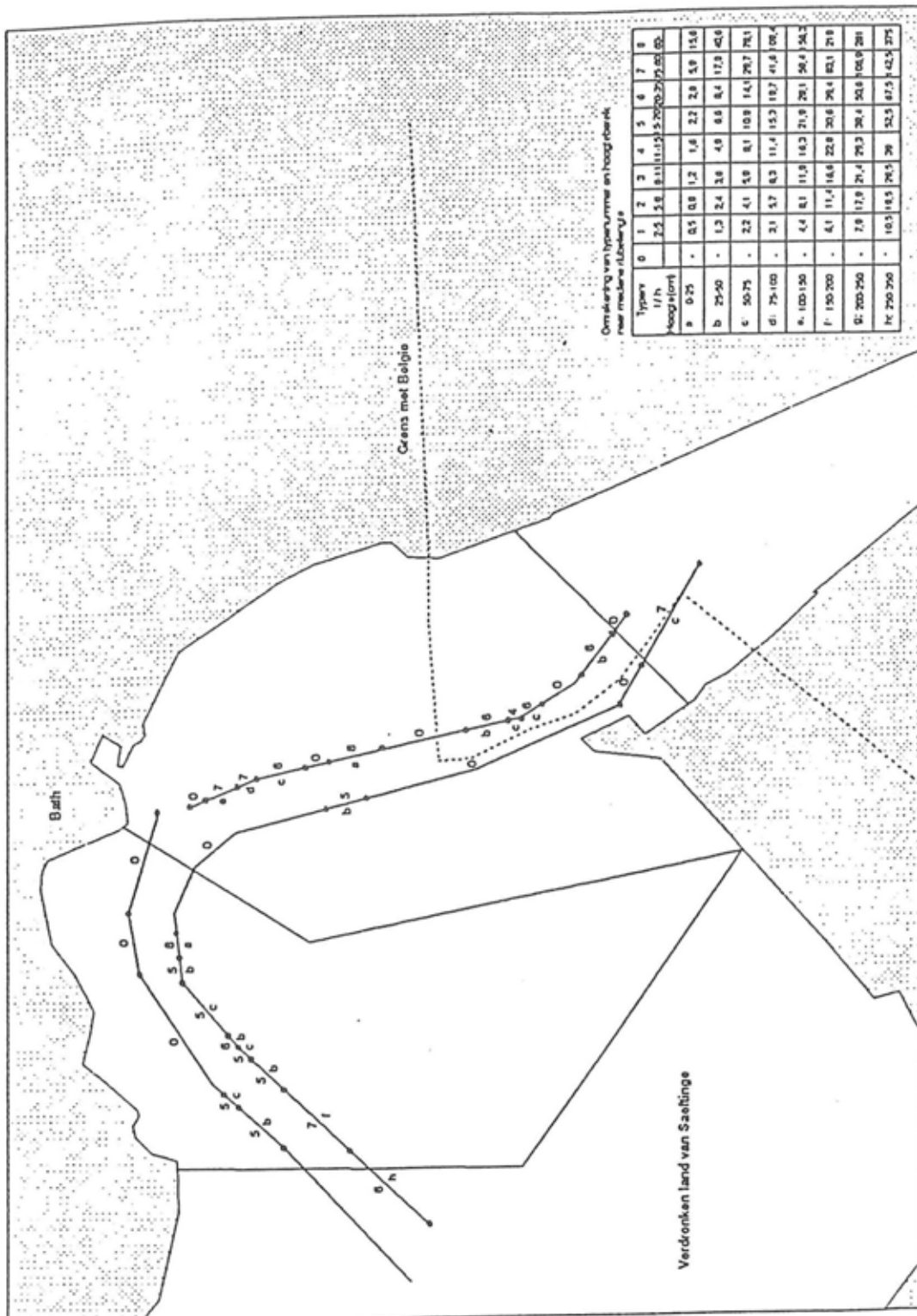
Figuur 3.8: Gemiddelde korrelgrootte van het bodemsediment in de Beneden Zeeschelde.



Figuur 3.9: Sortering van de korrelgrootteverdeling van het bodemsediment in de Beneden Zeeschelde.



Figuur 3.10: Scheefheid van de korrelgrootteverdeling van het bodemsediment in de Beneden Zeeschelde.

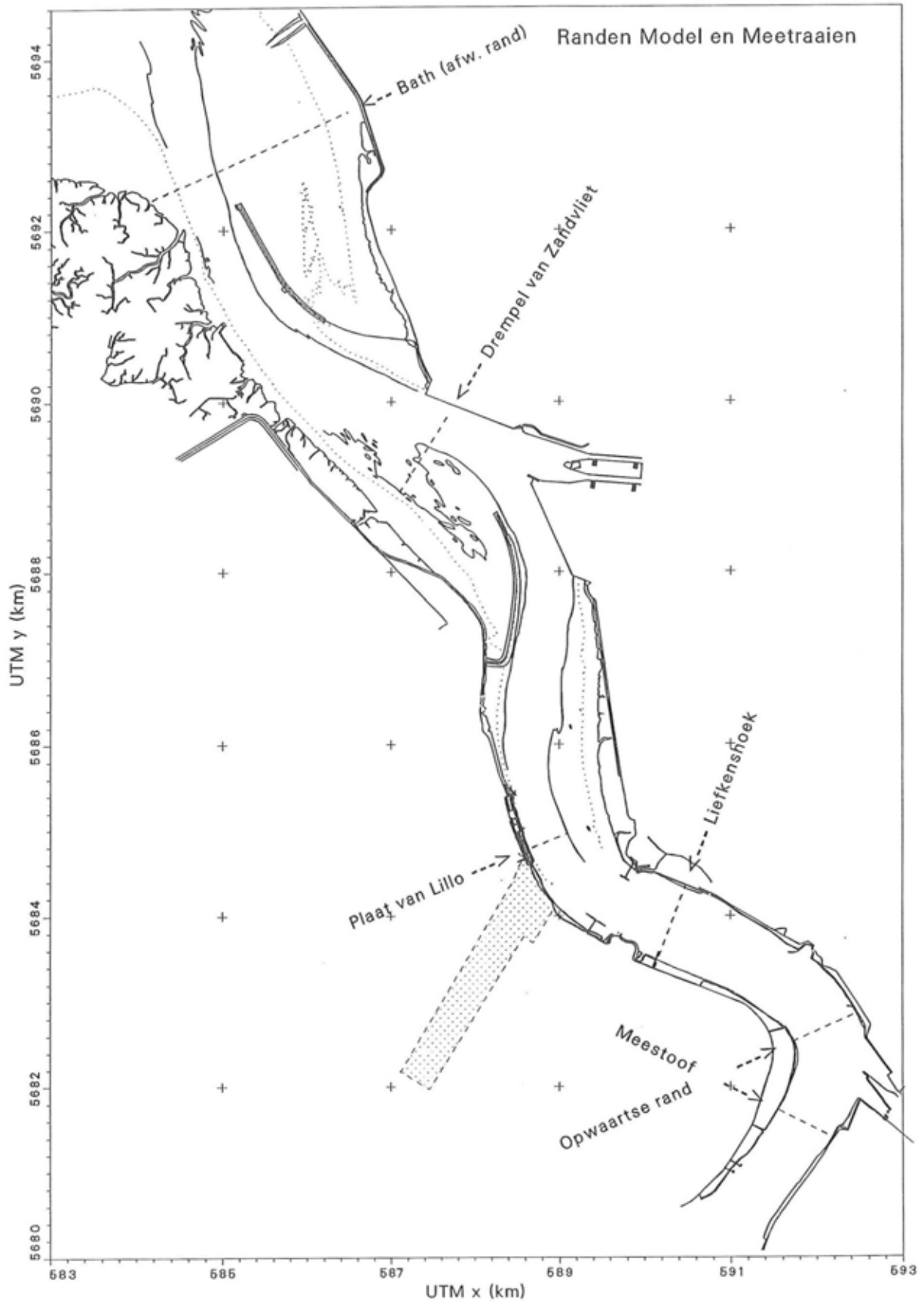


Figuur 3.11: Amplitude bodemvormen in het noordelijk deel van het modelgebied (uit RWS-DGW, 1991).

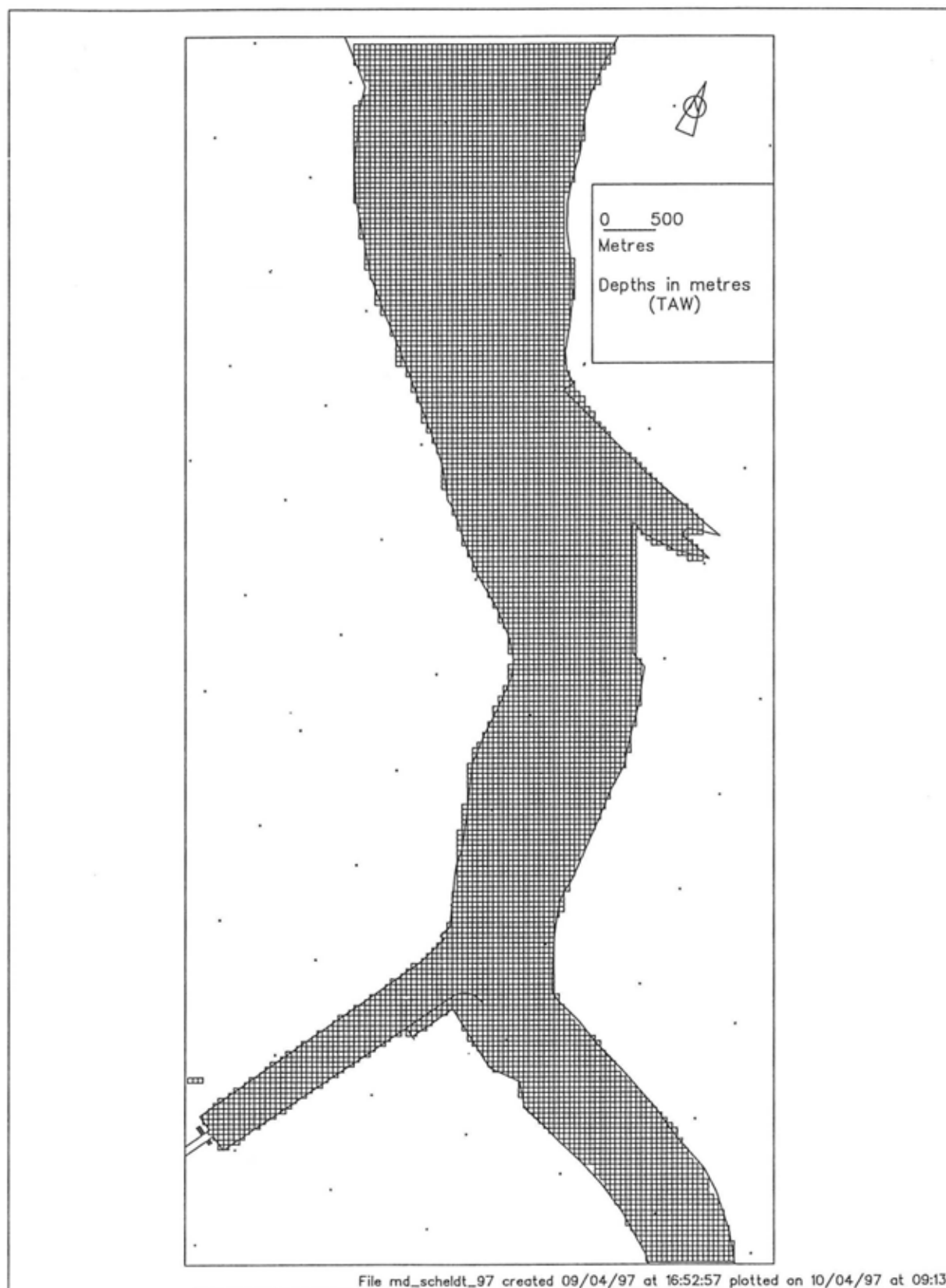
BIJLAGE 2

Het Scheldemodel en Aanlegbaggerwerken

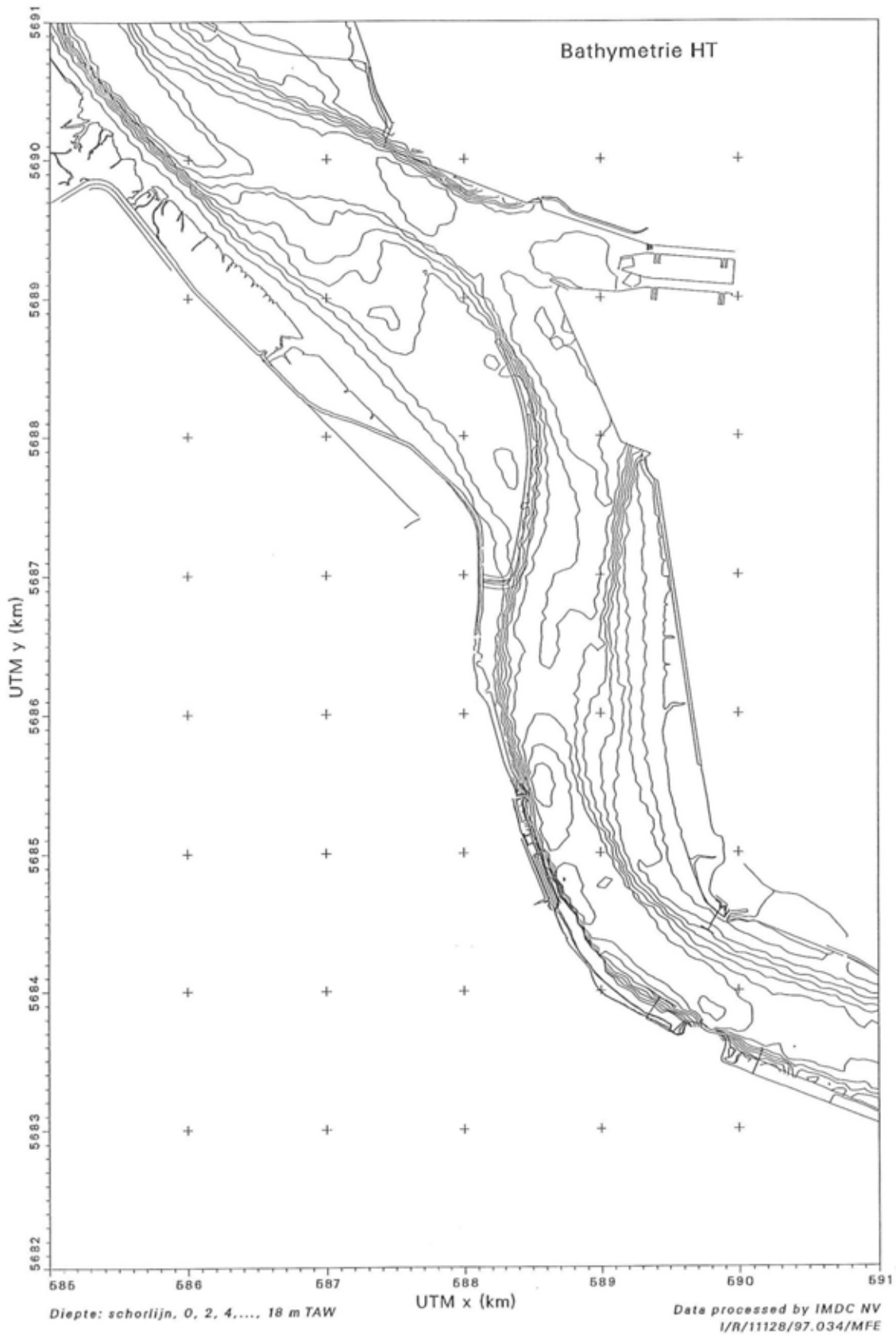
Figuren 4.1 - 4.7



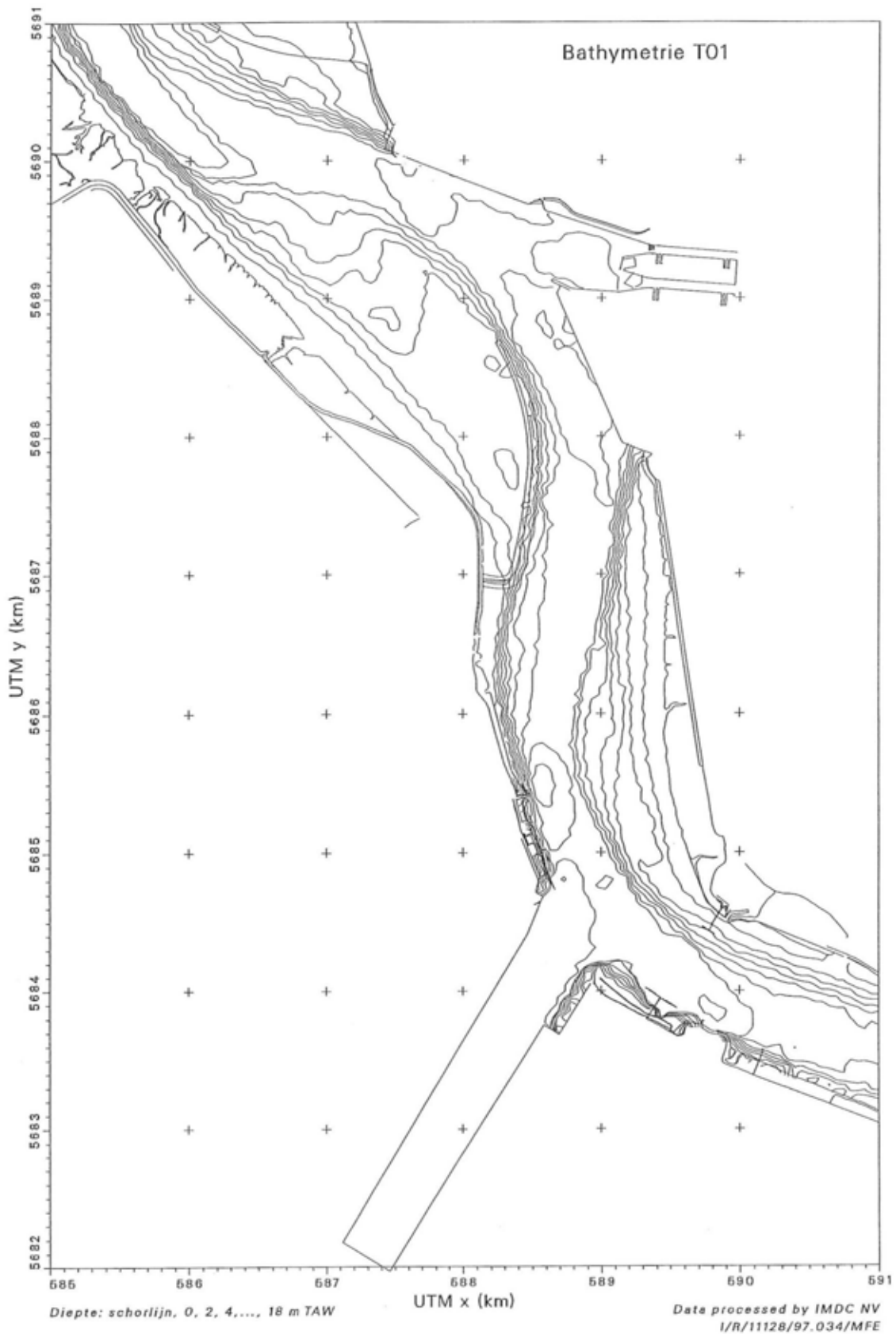
Figuur 4.1: Kaart van Beneden Zeeschelde met aanduiding van op- en afwaartse randen van het 3D hydrodynamisch-, 3D slibtransport- en zandtransportmodel en van de meetraaien van de 13-uursmetingen.



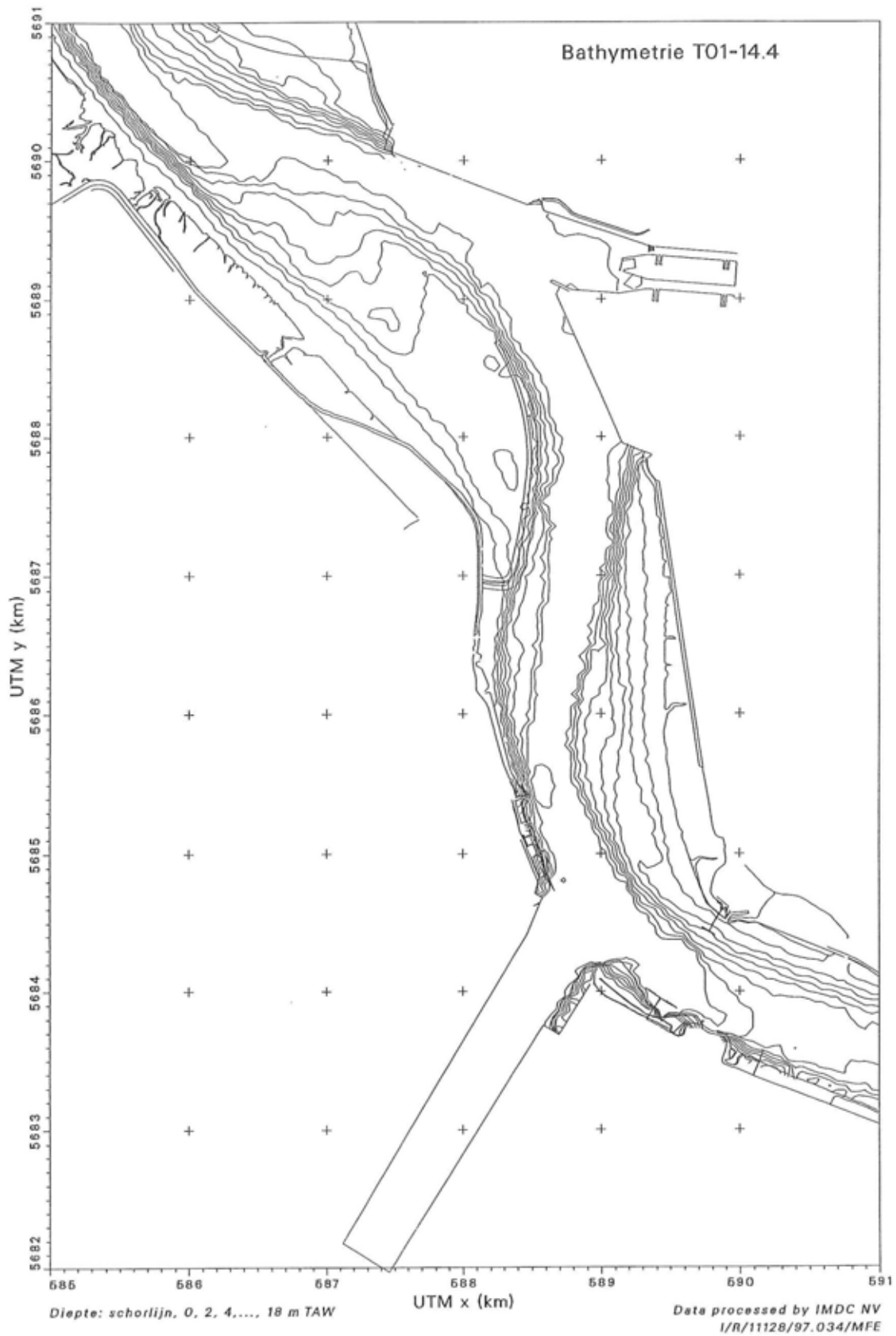
Figuur 4.2: Rooster T01 voor het volledig model, roosterafstand is 50 m x 50 m.



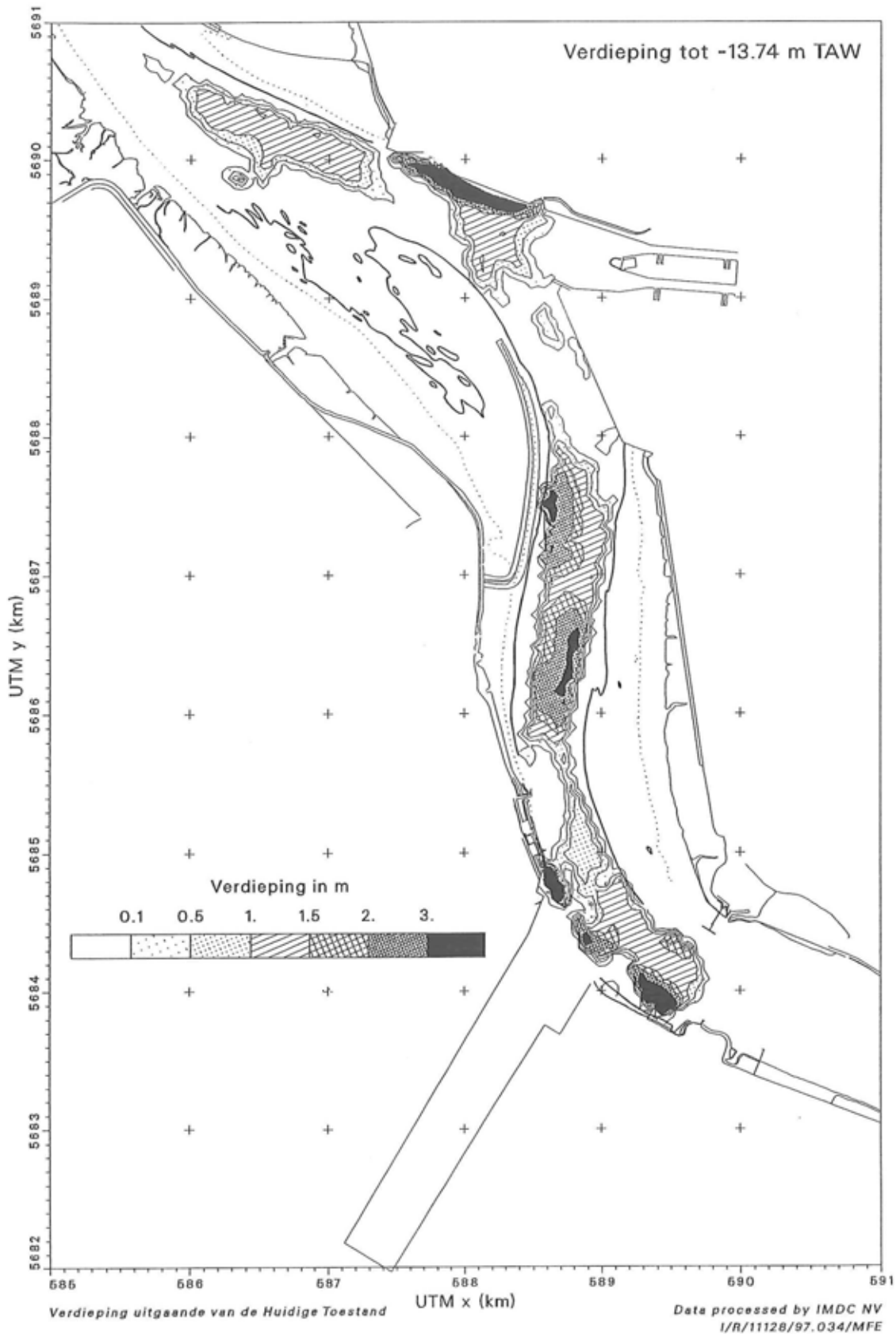
Figuur 4.3: Bathymetrie HT (huidige toestand) voor een deel van het model.



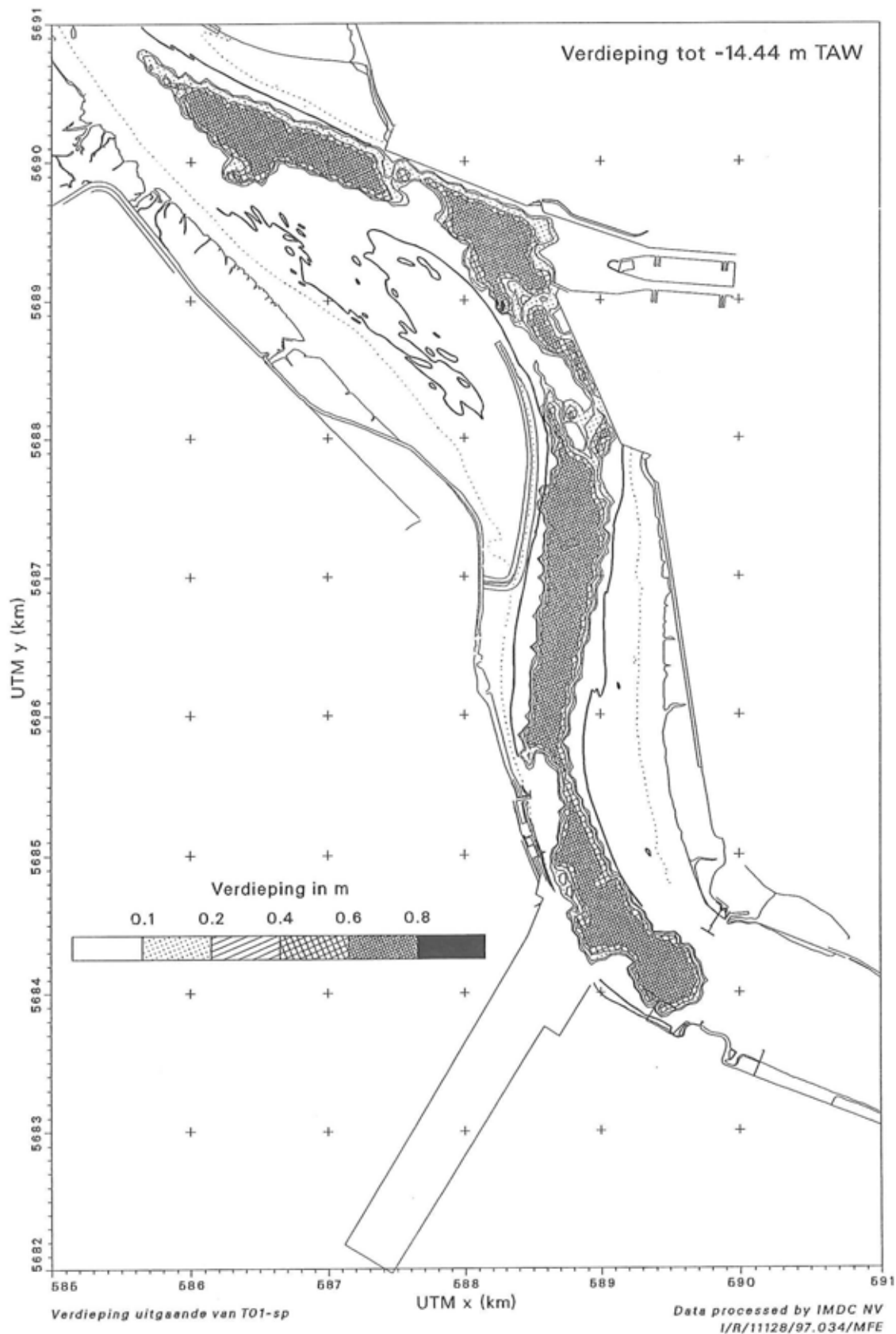
Figuur 4.4: Bathymetrie T01 voor een deel van het model.



Figuur 4.5: Bathymetrie T01-14.4 (verdieping tot -14.44 m TAW) voor een deel van het model.



Figuur 4.6: Isolijnen van gelijke baggerdiepte voor een verdieping tot -13.30 m GLLWS uitgaande van de huidige toestand (geen verdieping, tijdok en containerkaai). Ook aangeduid is de schorlijn, de 0 m en de -8 m GLLWS dieptelijn.

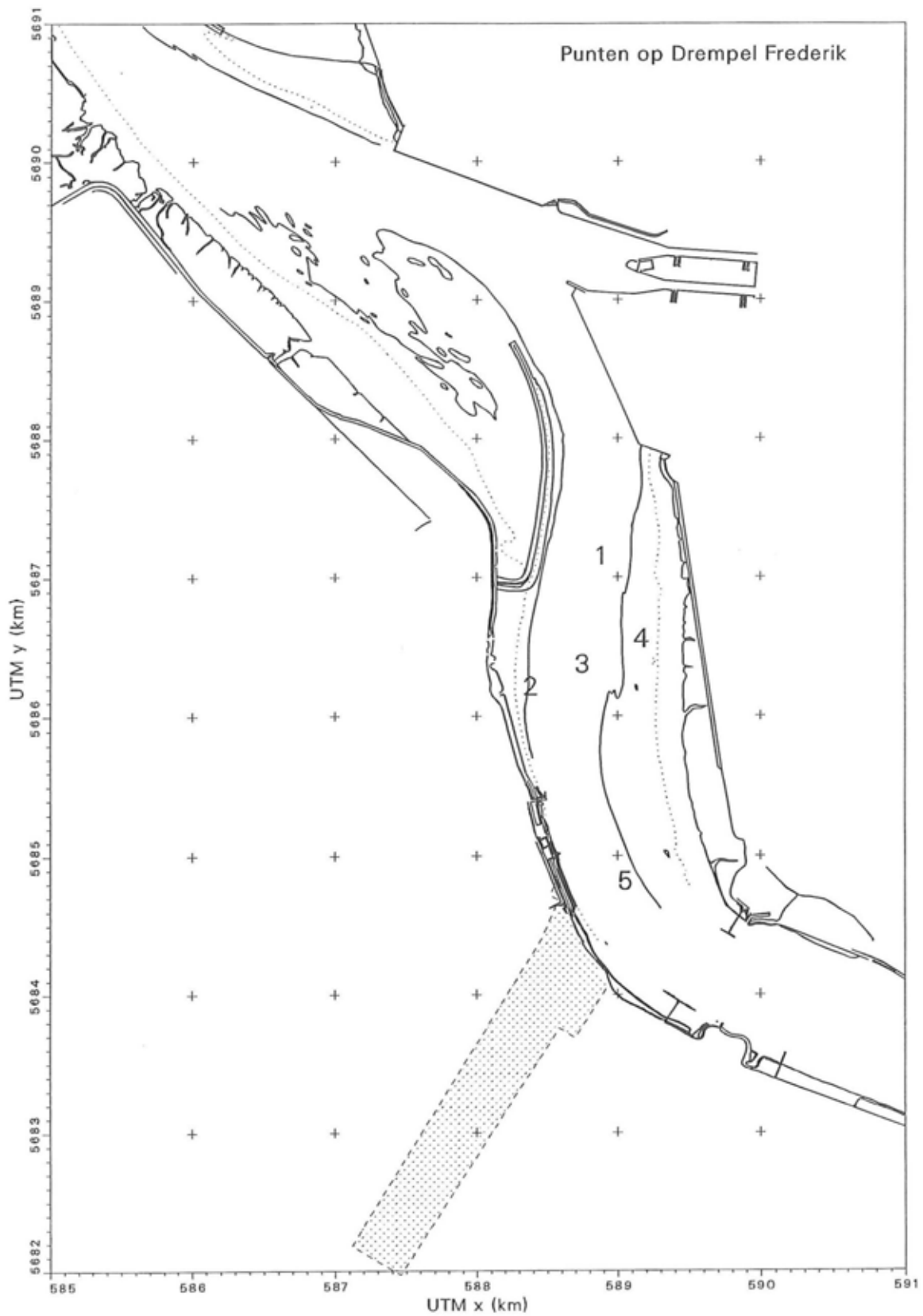


Figuur 4.7: Isolijnen van gelijke baggerdiepte voor een verdieping tot -14.0 m GLLWS uitgaande van T01-sp (verdieping van -13.3 m GLLWS). Ook aangeduid is de schorlijn, de 0 m en de -8 m GLLWS dieptelijn.

BIJLAGE 3

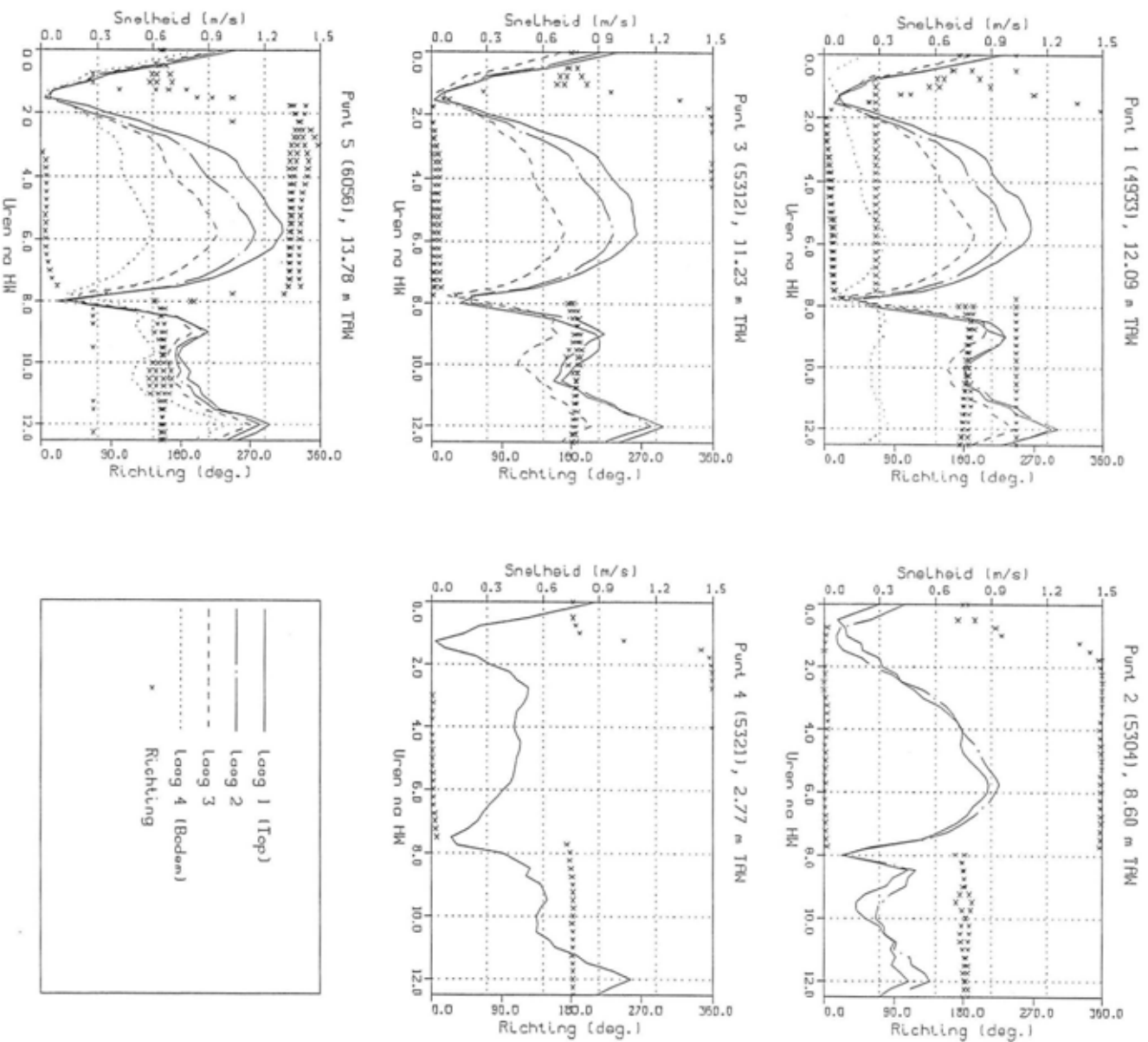
Hydrodynamica Huidige Toestand HT

Figuren 5.1 - 5.15

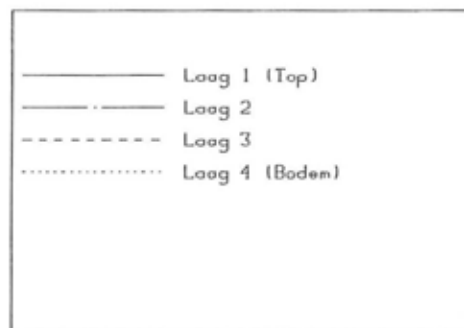
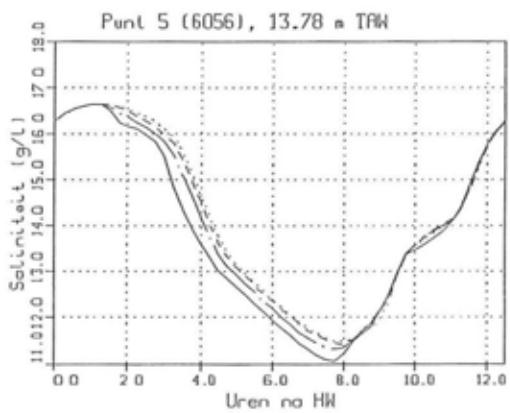
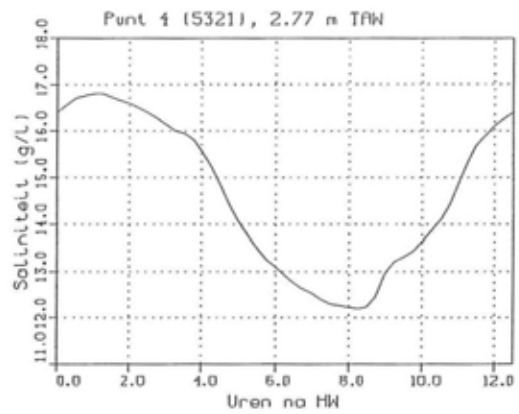
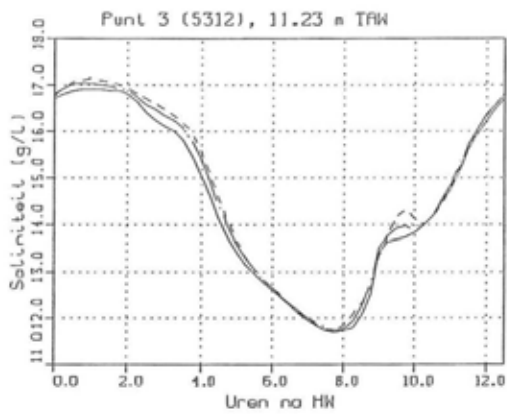
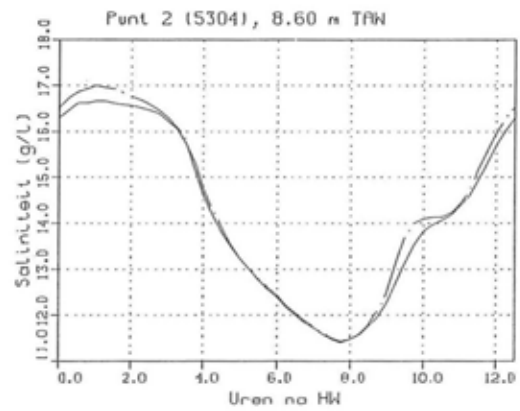
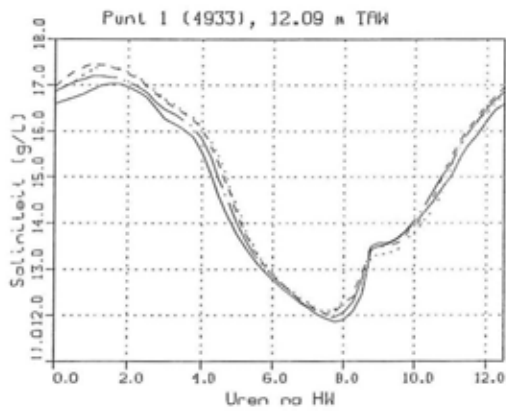


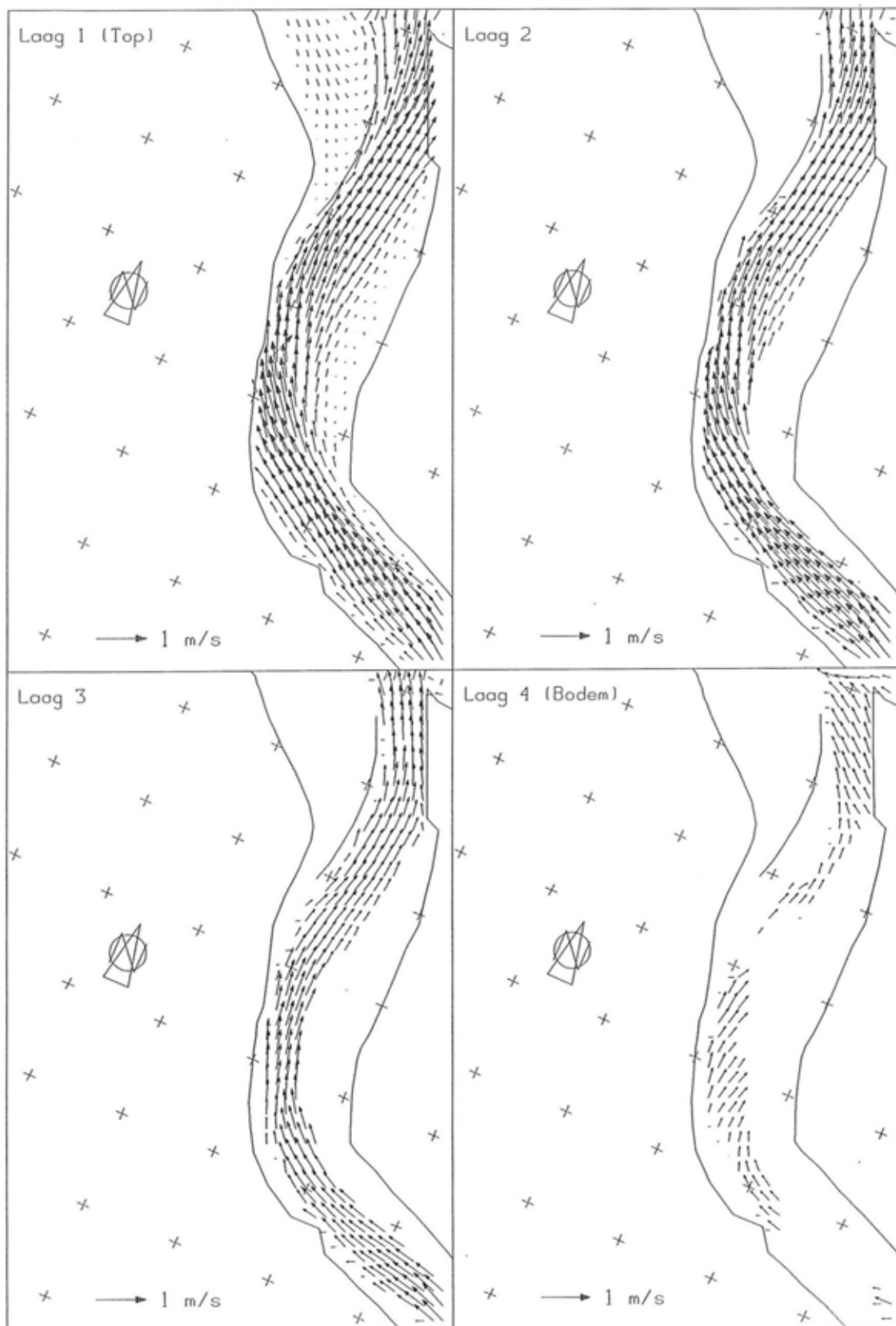
Figuur 5.1: Ligging van de punten op de Drempel van Frederik waar snelheid, saliniteit en slibconcentratie getoond worden i.f.v. de tijd.

Figuur 5.2: Huidige Toestand HT
Snelheden op de Drempel van Frederik



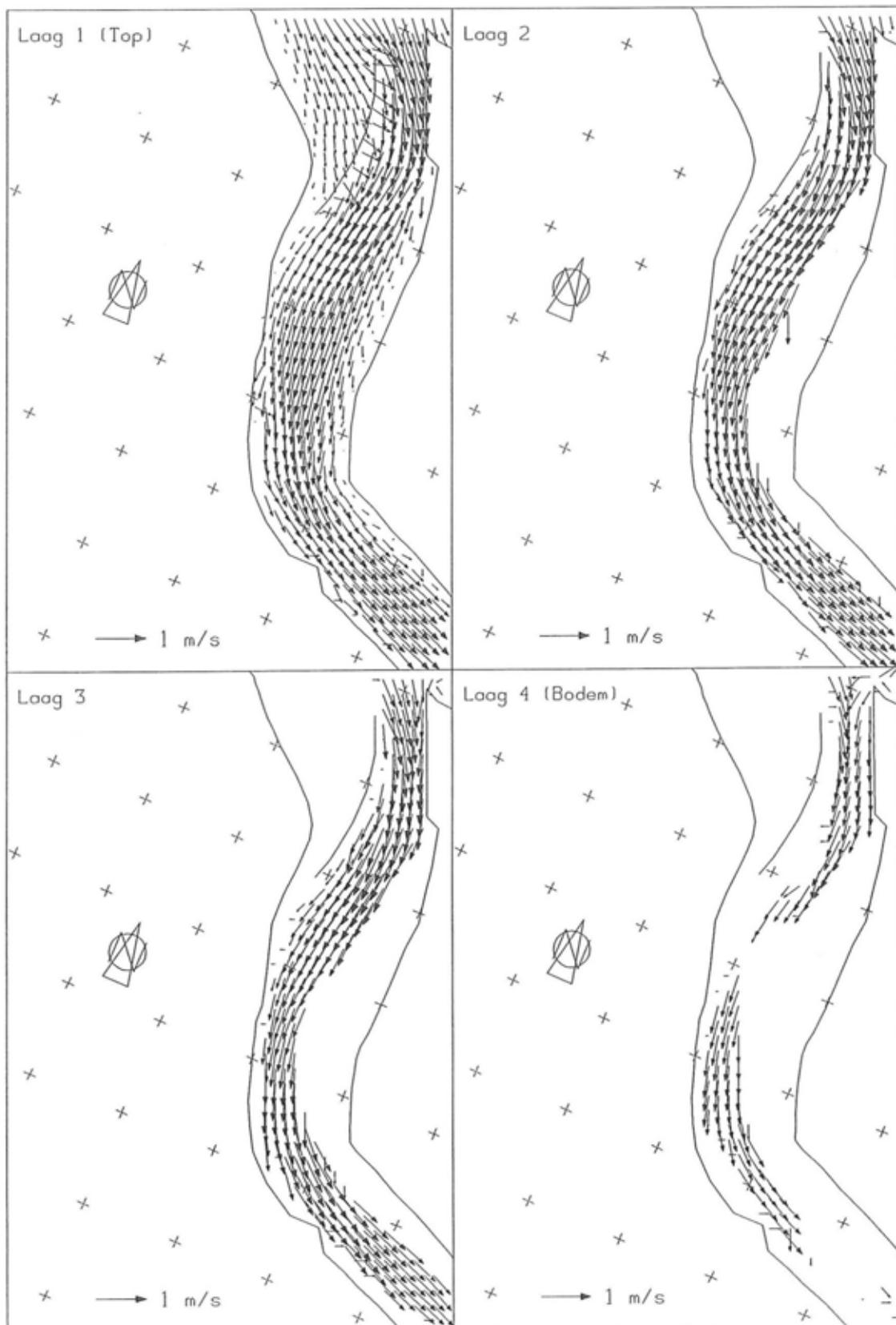
Figuur 5.3: Huidige Toestand HT
Saliniteit op de Drempel van Frederik





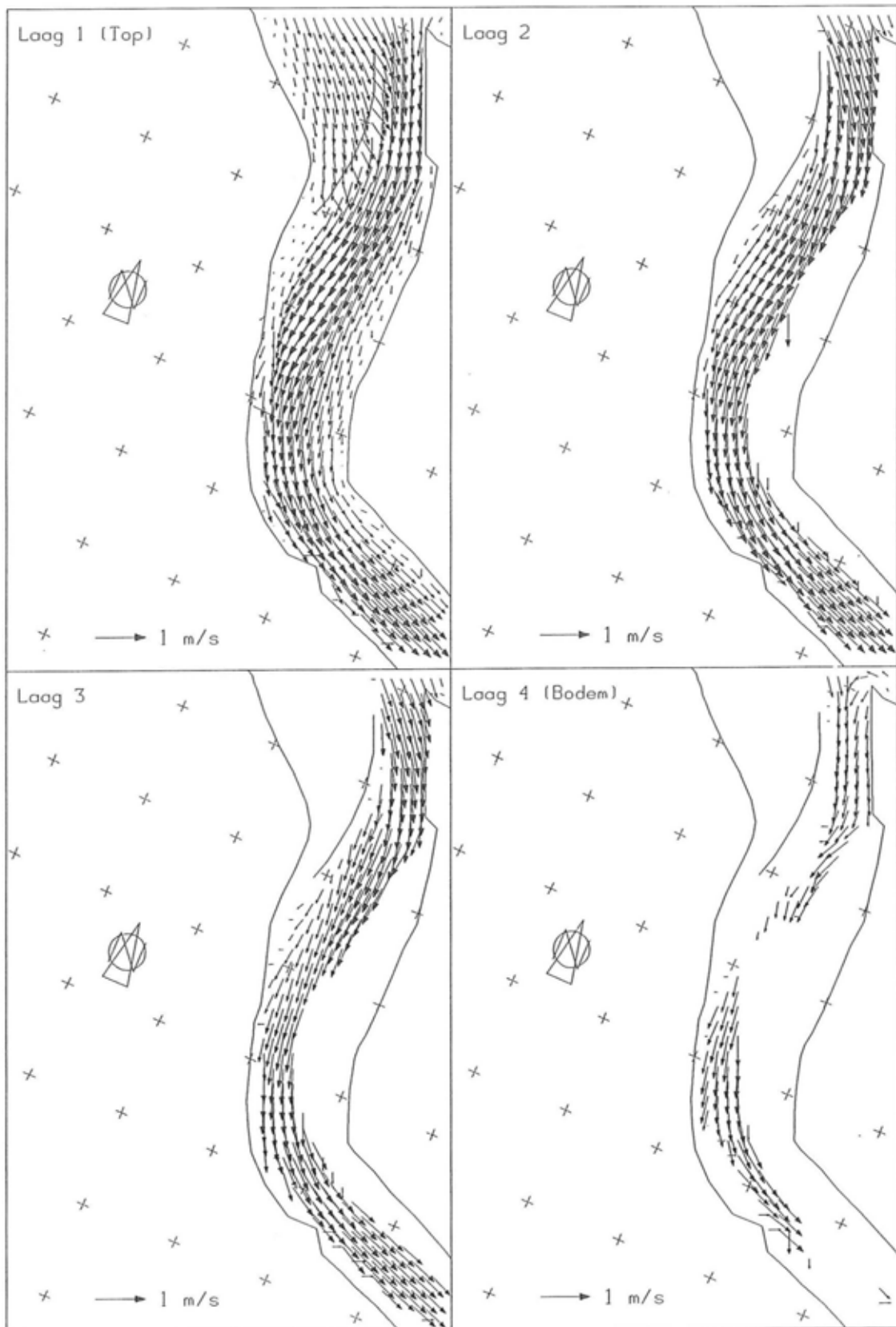
Figuur 5.4: HW - 5.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



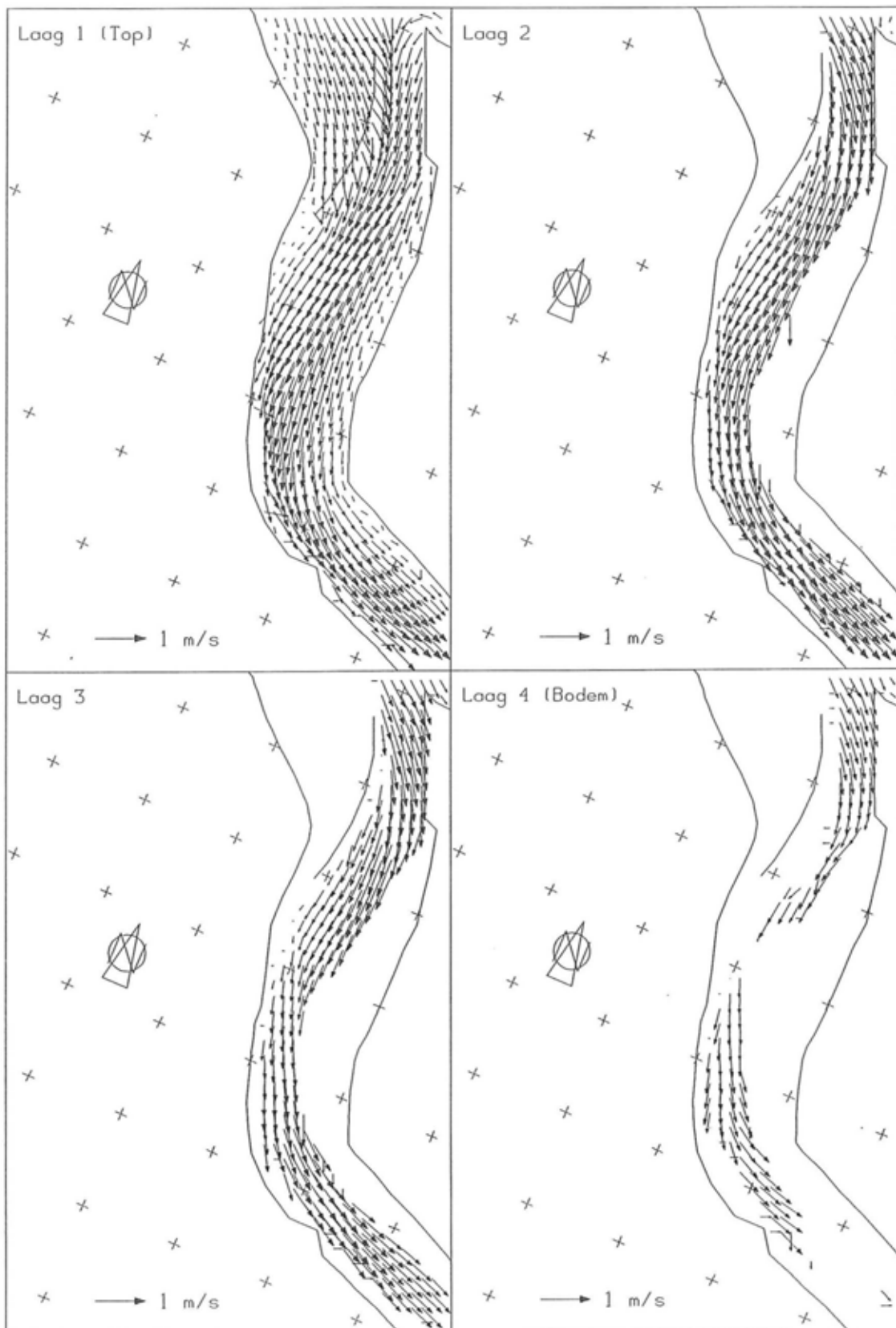
Figuur 5.5: HW - 4.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



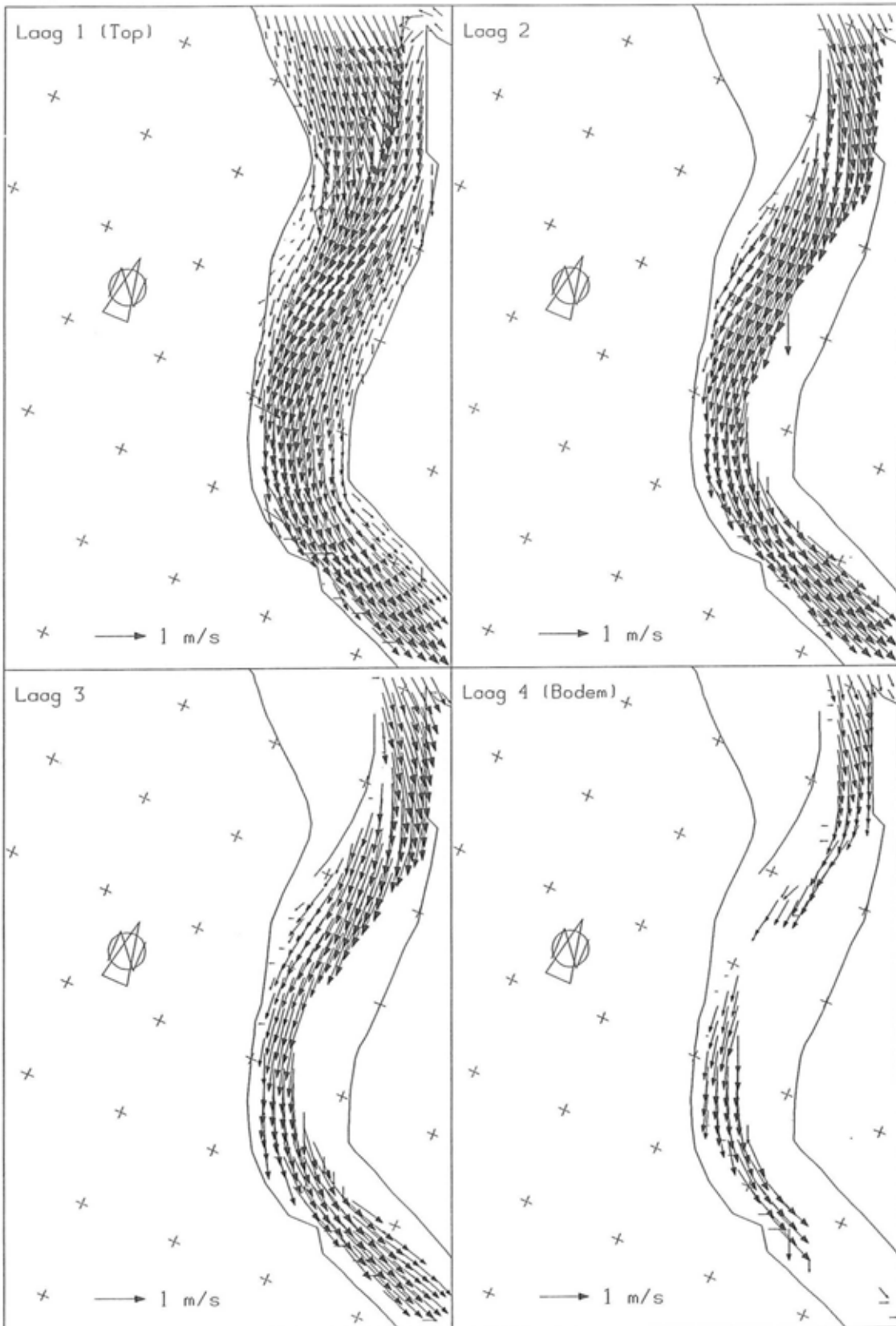
Figuur 5.6: HW - 3.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



Figuur 5.7: HW - 2.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)

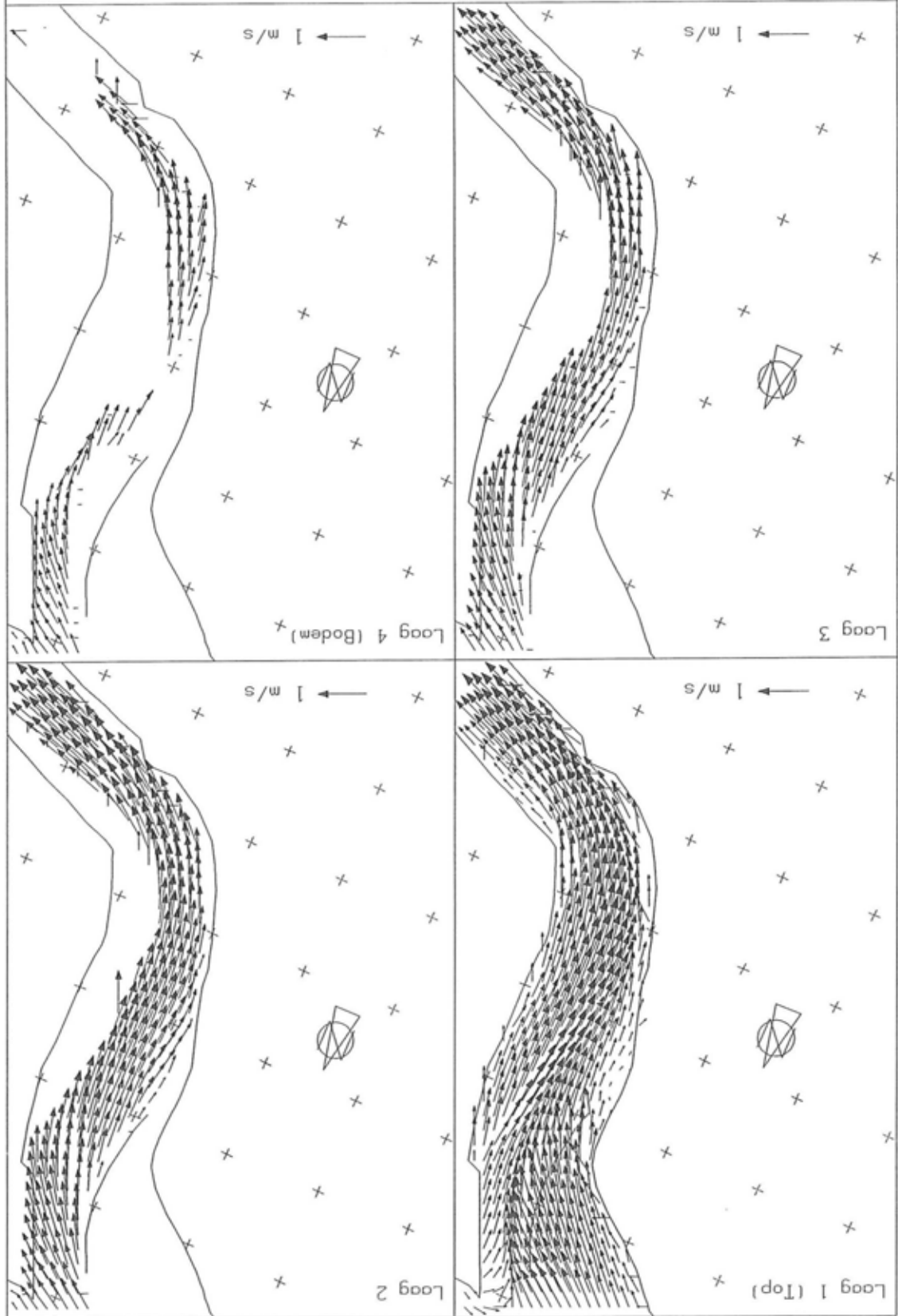


Figuur 5.8: HW - 1.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)

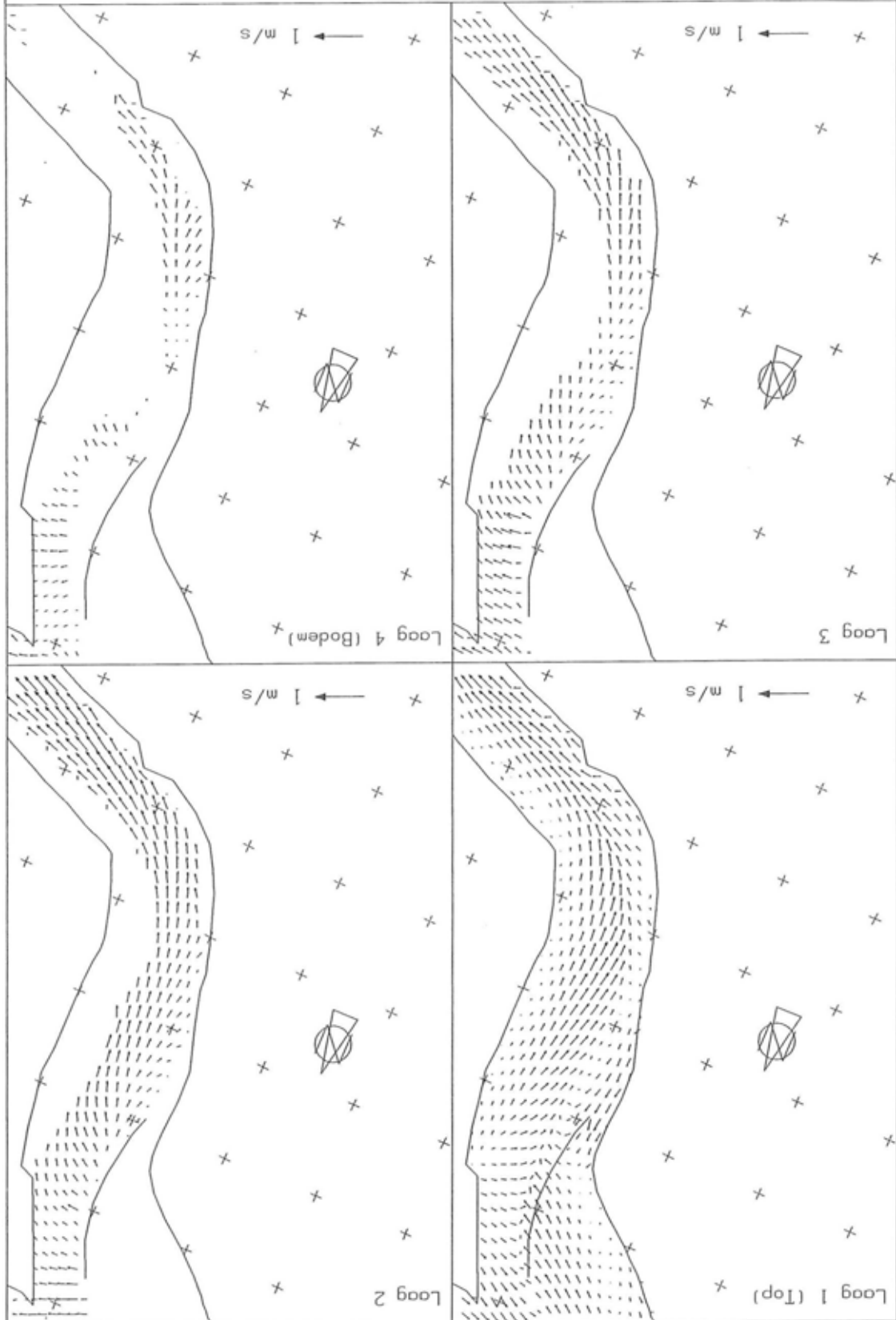
Stroombeeld HI (springtij, saliniteit)

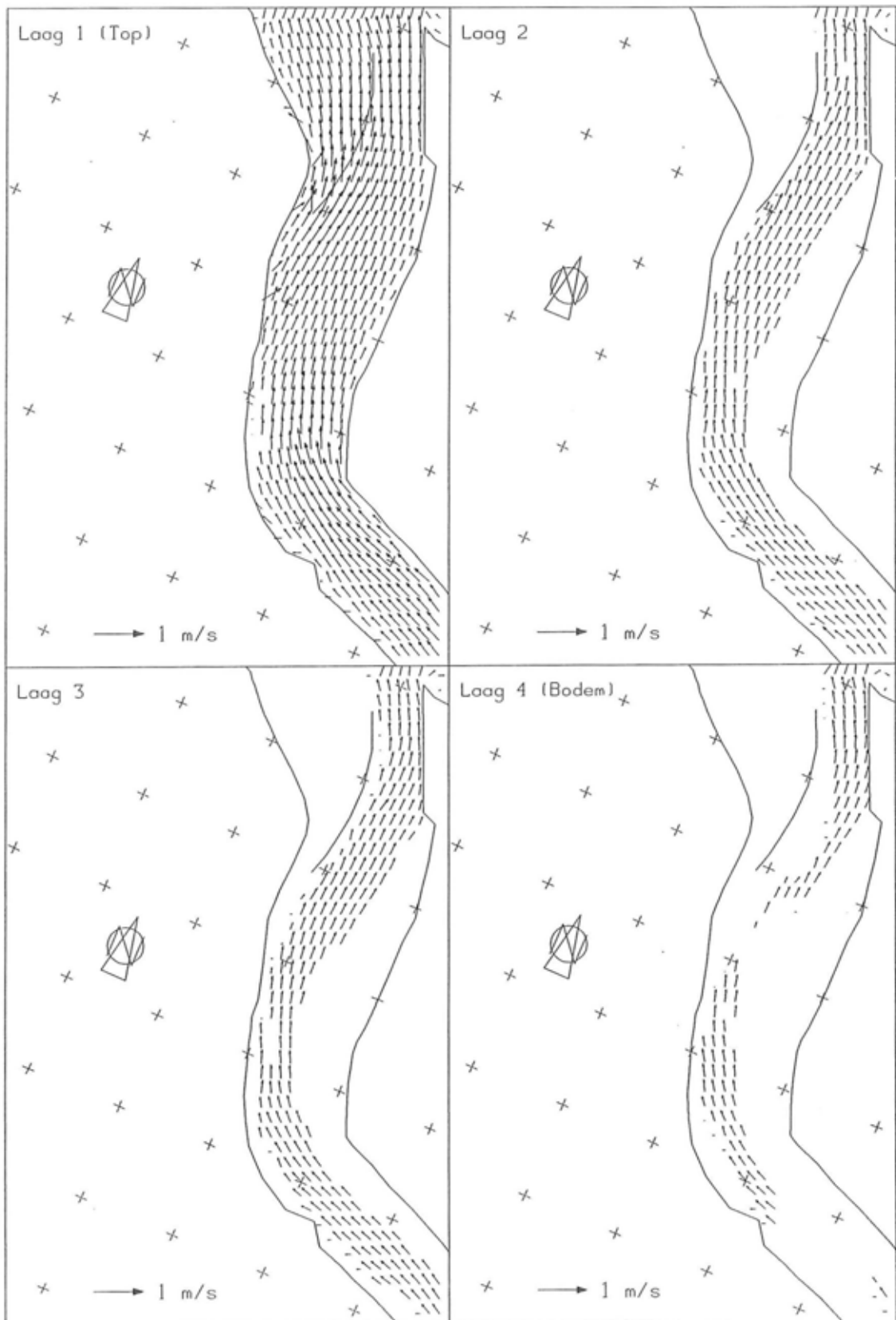
Figuur 5.9: MH



Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)

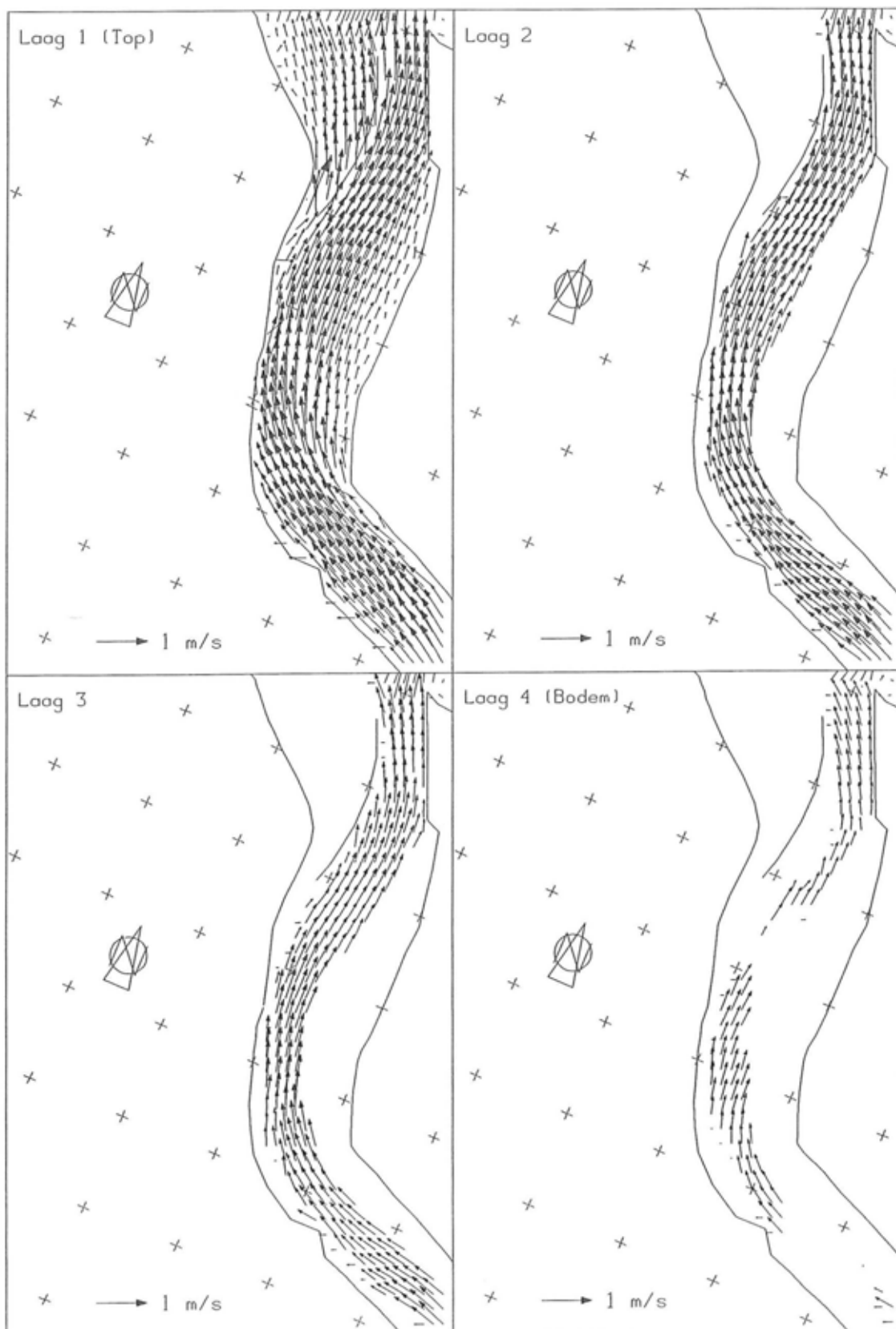
Figuur 5.10: HM + 1.0h





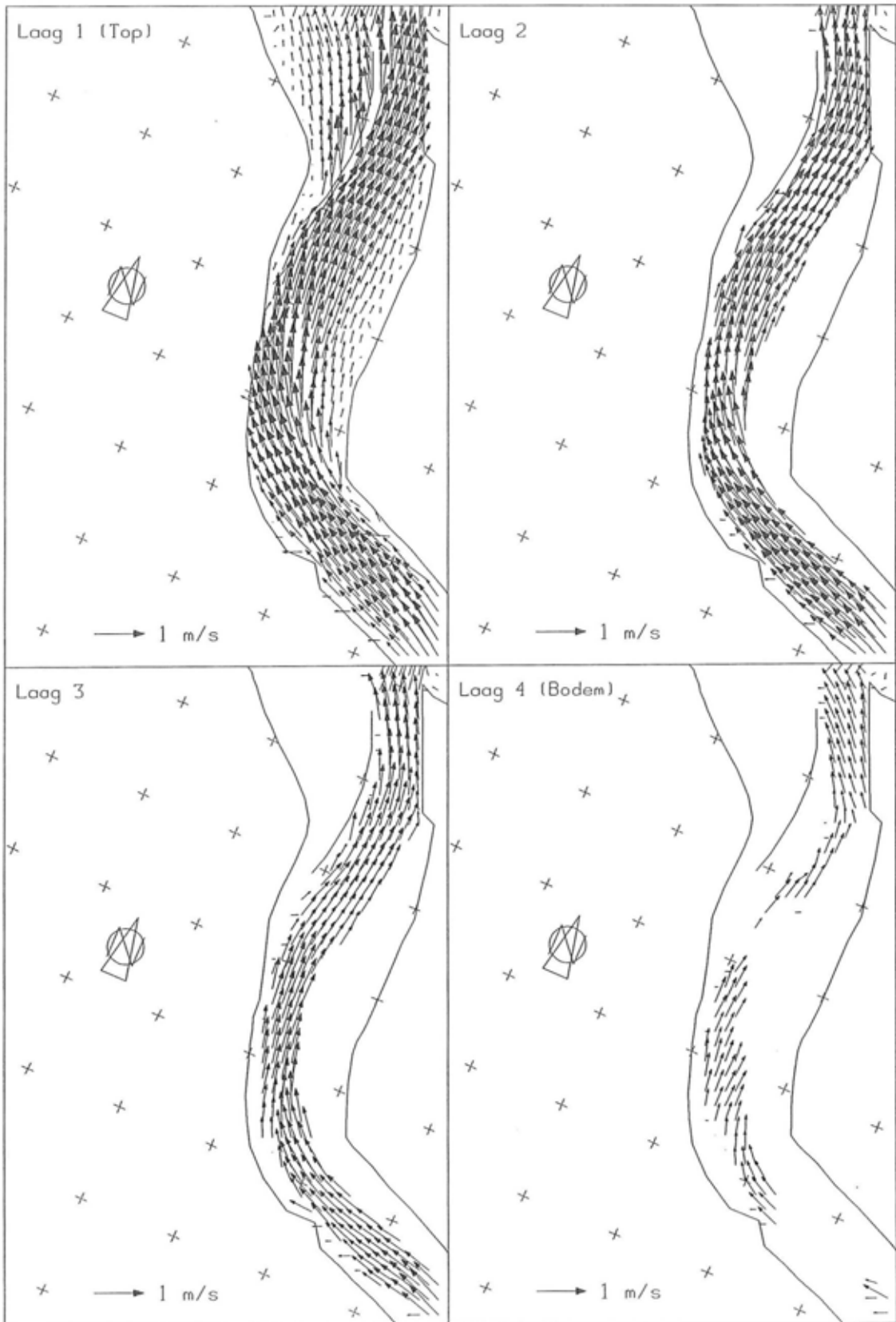
Figuur 5.11: HW + 2.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



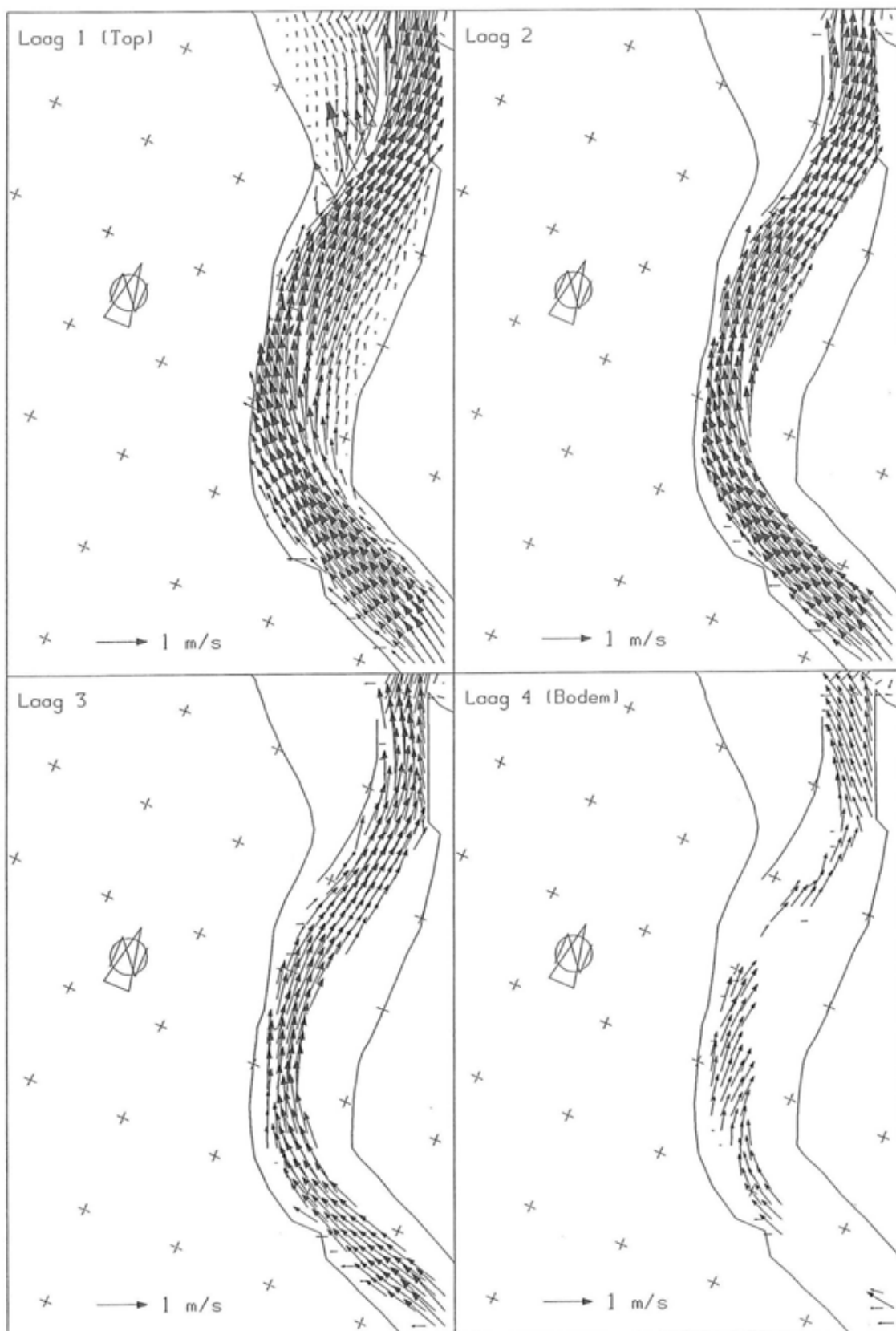
Figuur 5.12: HW + 3.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



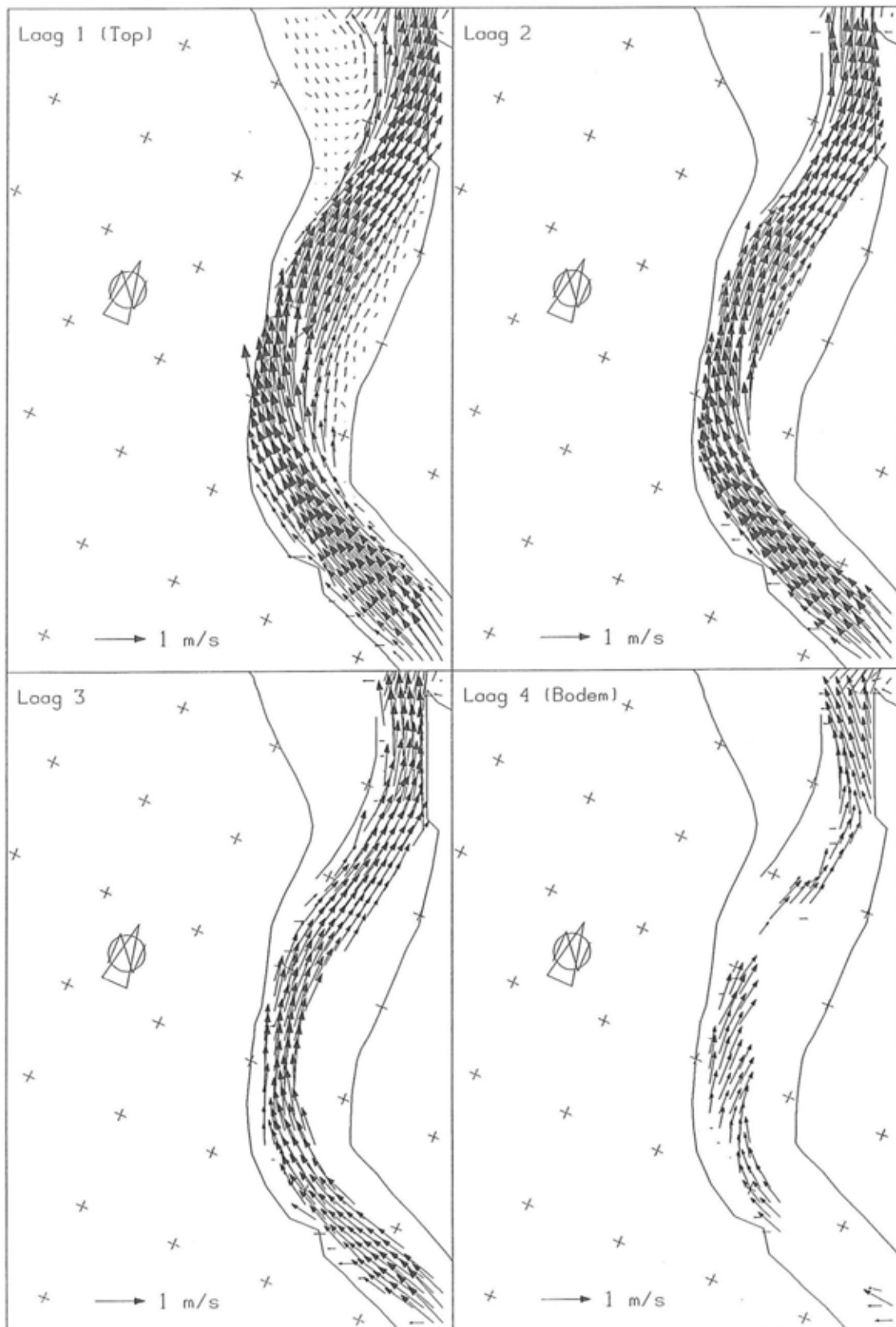
Figuur 5.13: HW + 4.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



Figuur 5.14: HW + 5.0h

Stroombeeld HT (springtij, saliniteit)



Figuur 5.15: HW + 6.0h

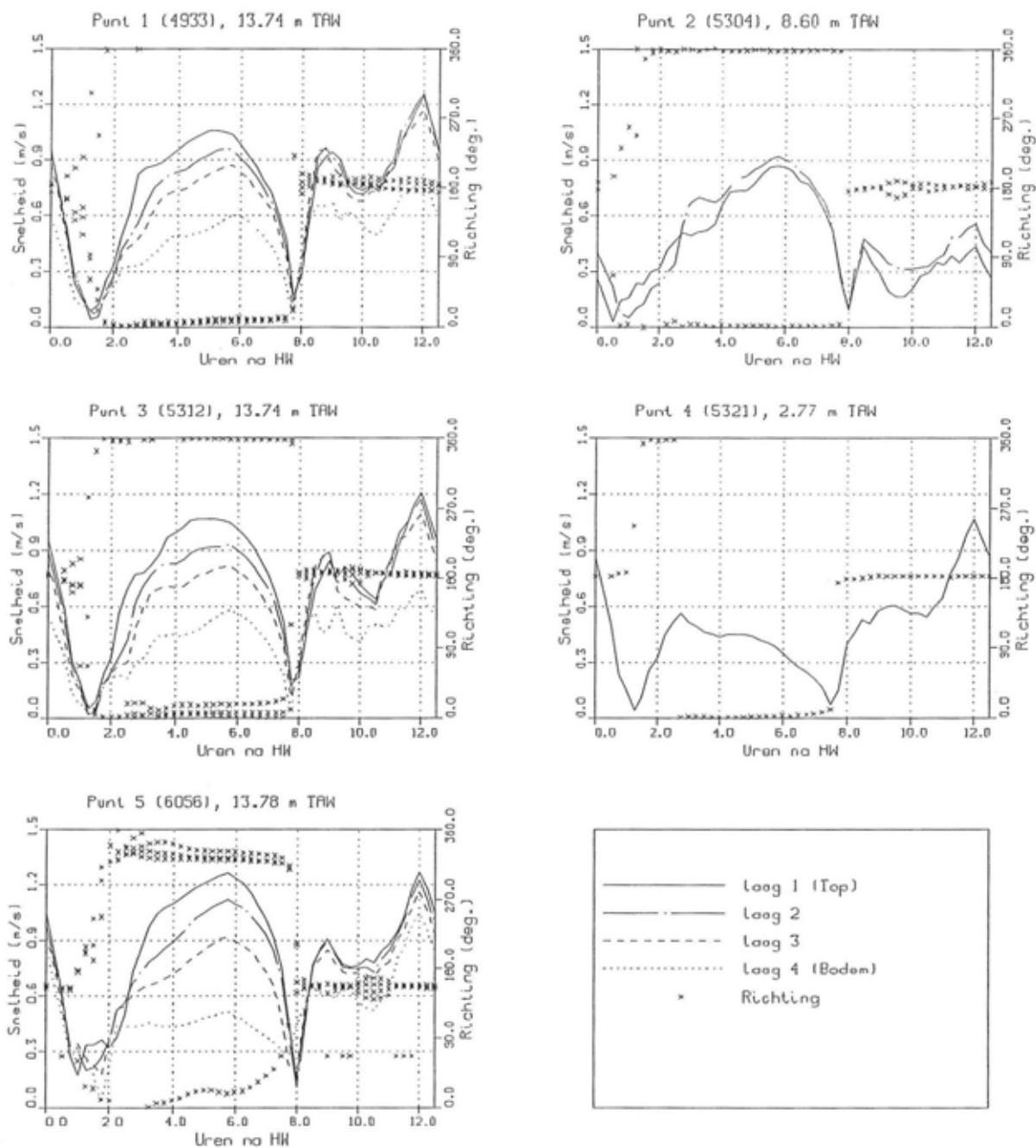
Stroombeeld HT (springtij, soliniteit)

BIJLAGE 4

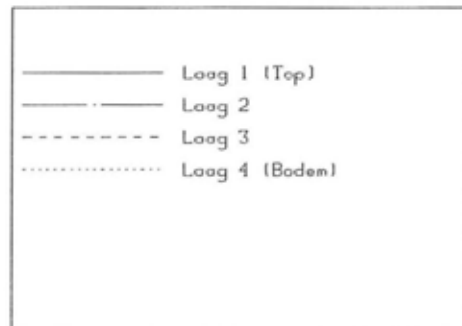
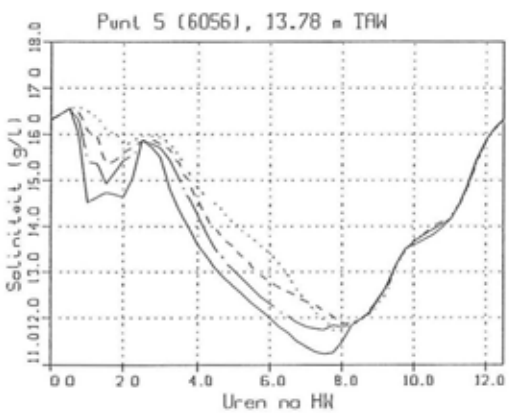
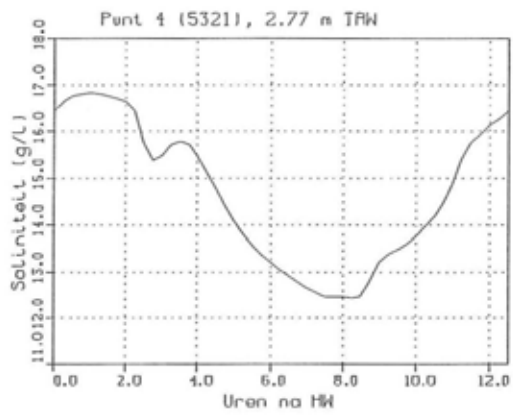
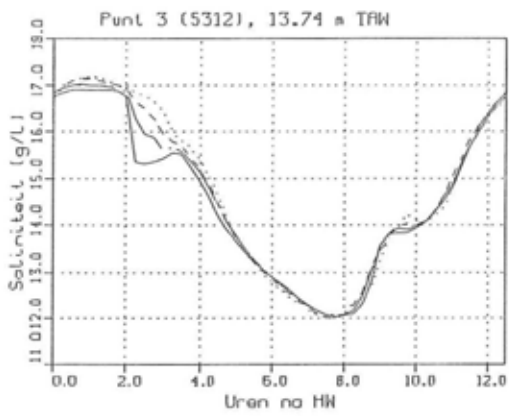
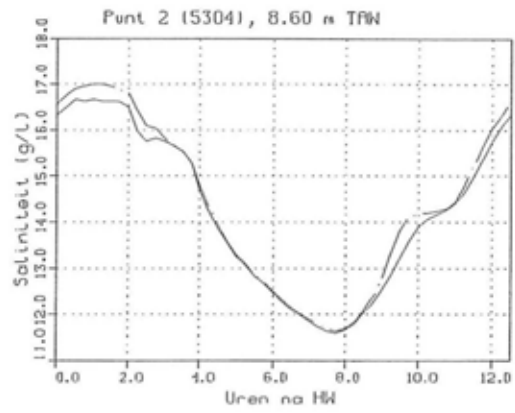
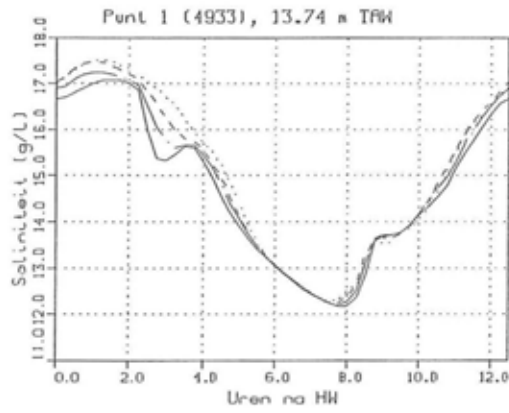
Hydrodynamica T01-sp

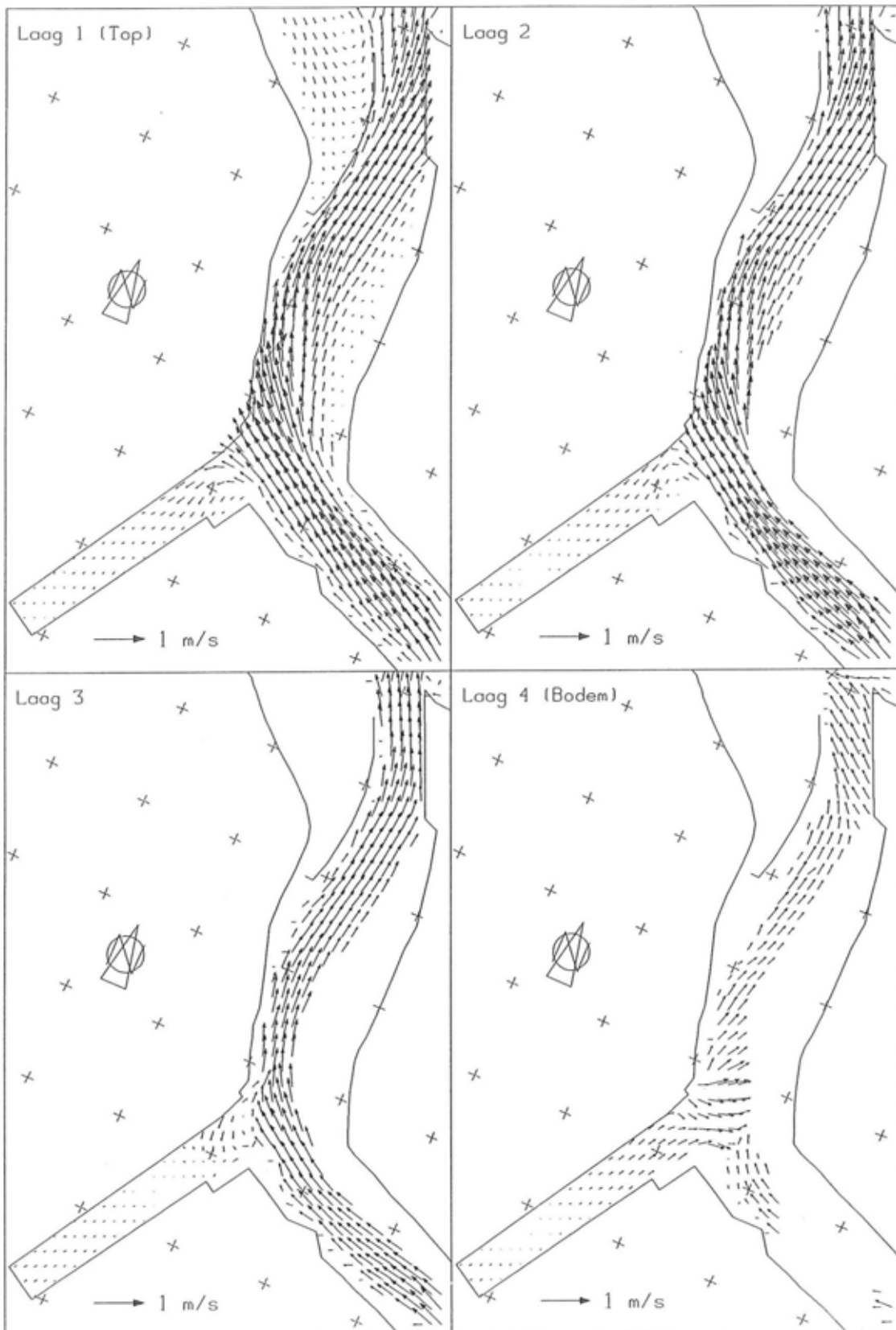
Figuren 5.16 - 5.29

Figuur 5.16: Toestand T01sp
Snelheden op de Drempel van Frederik



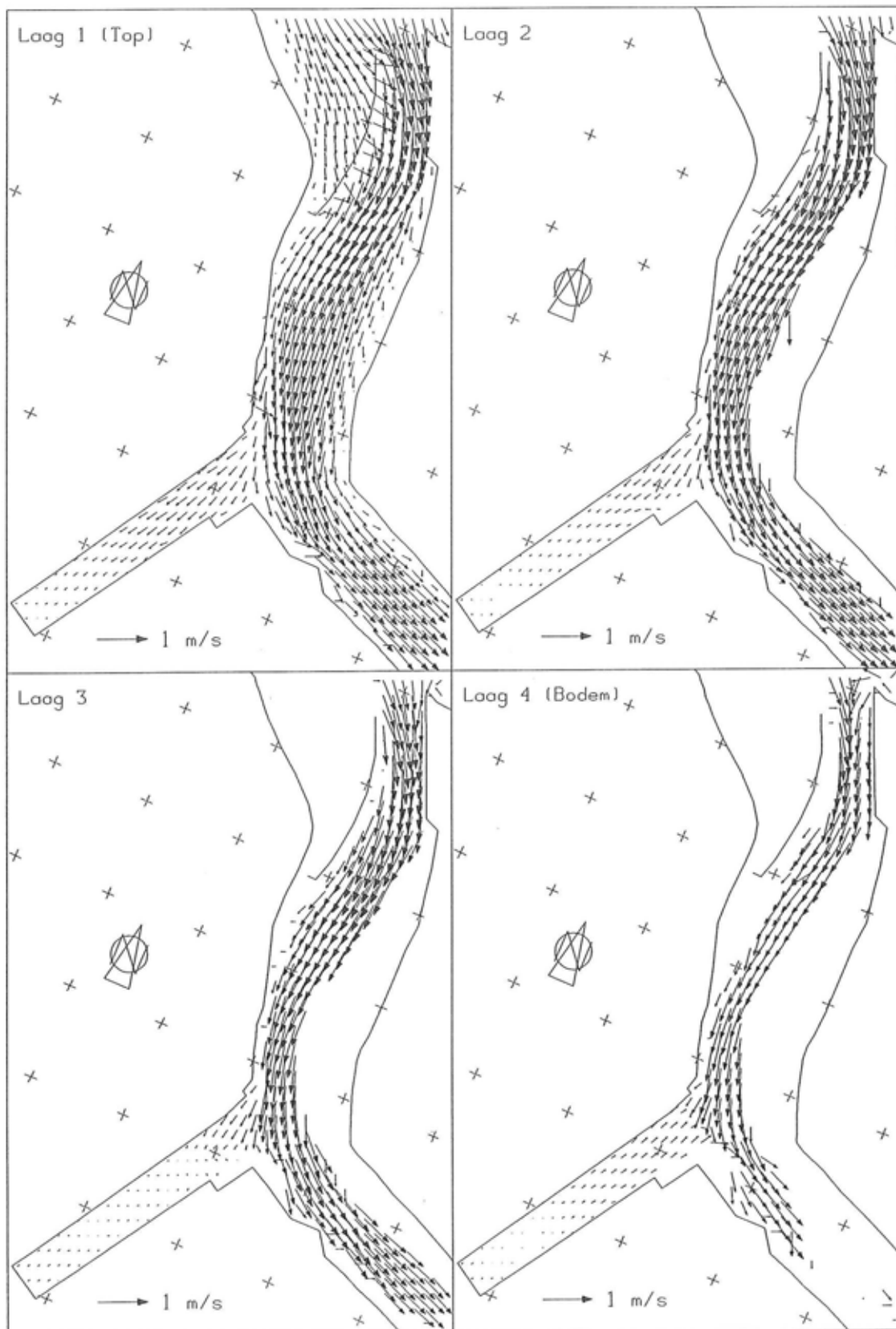
Figuur 5.17: Toestand T01-sp
Saliniteit op de Drempel van Frederik





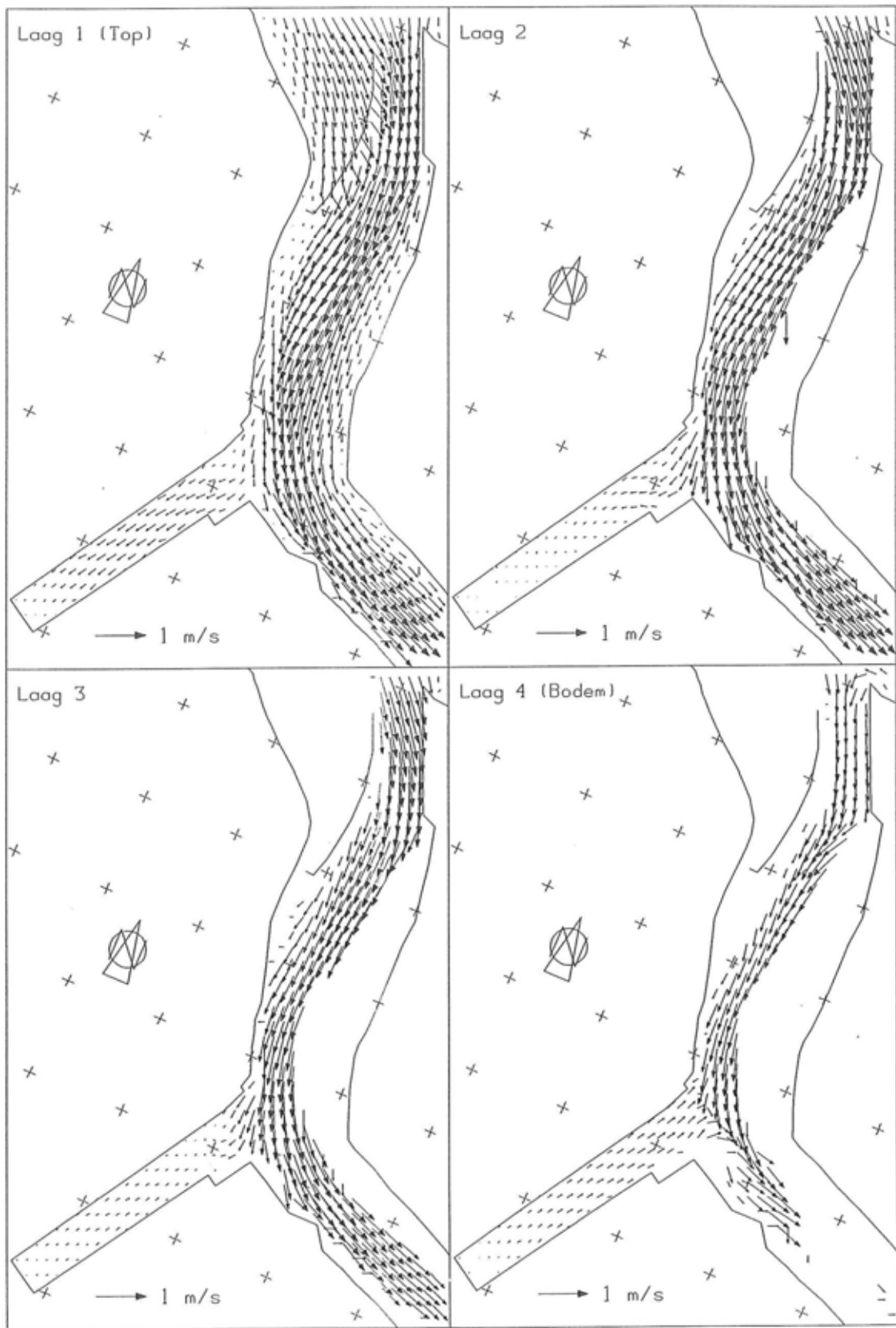
Figuur 5.18: HW - 5.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



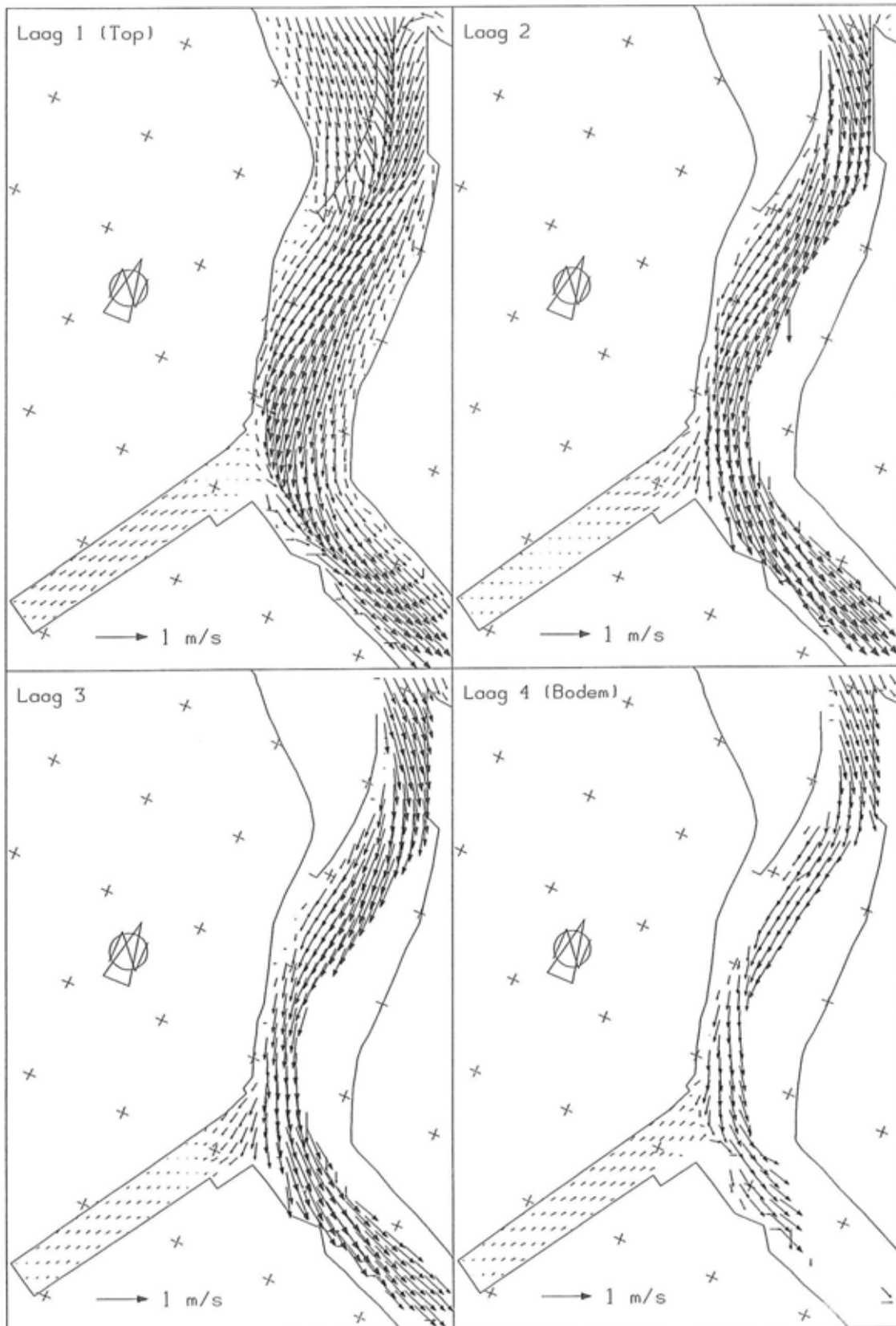
Figuur 5.19: HW - 4.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



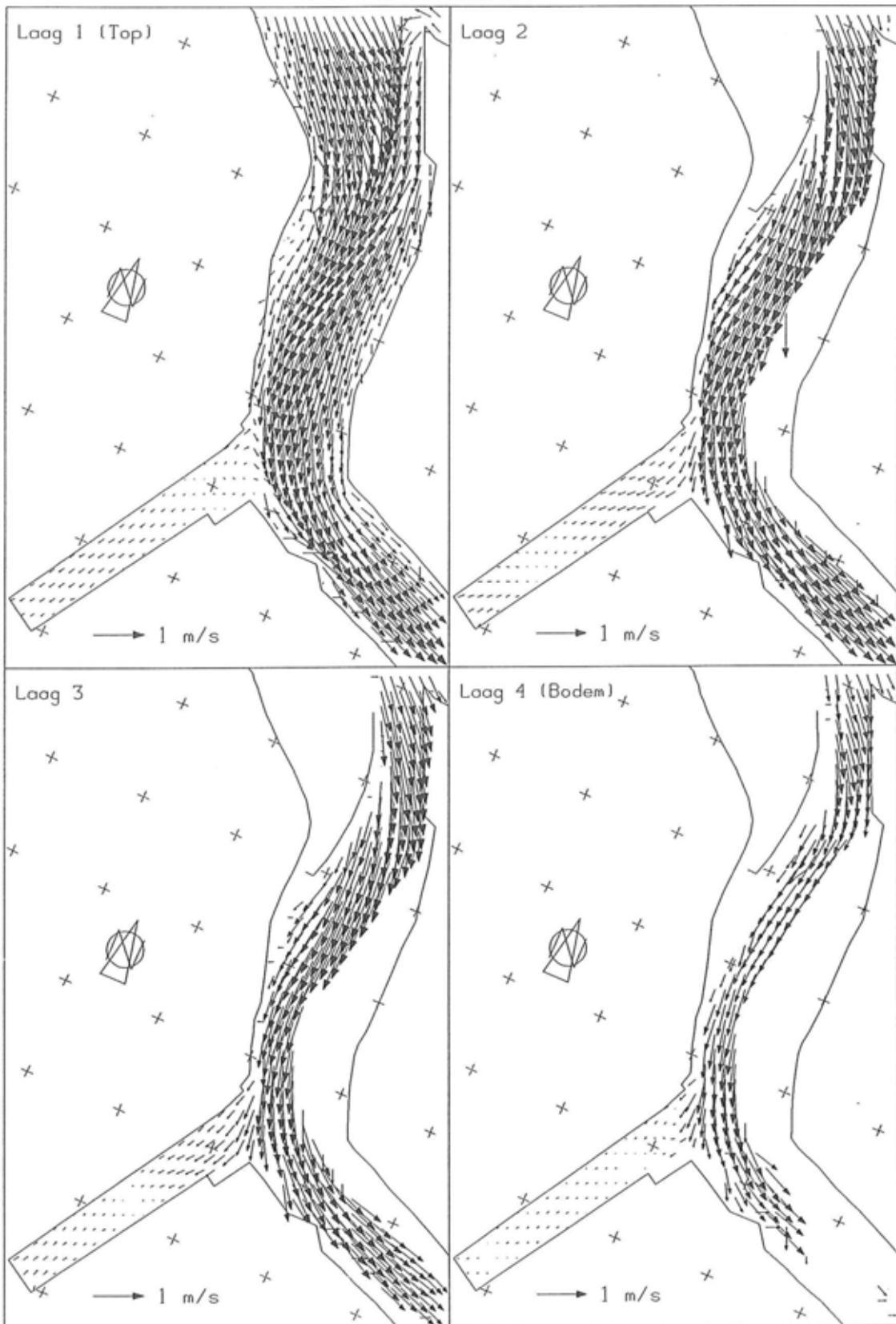
Figuur 5.20: HW - 3.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



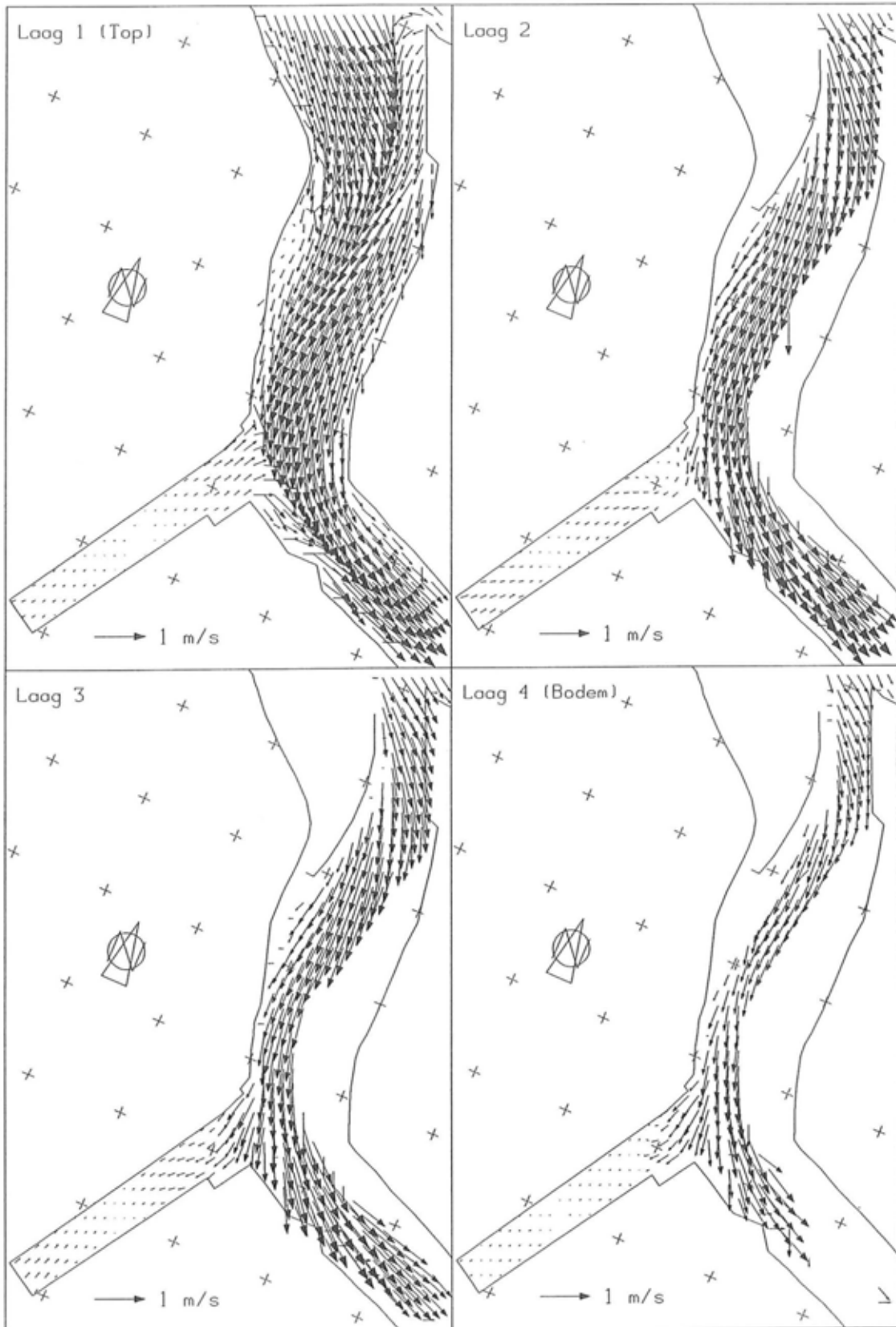
Figuur 5.21: HW - 2.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



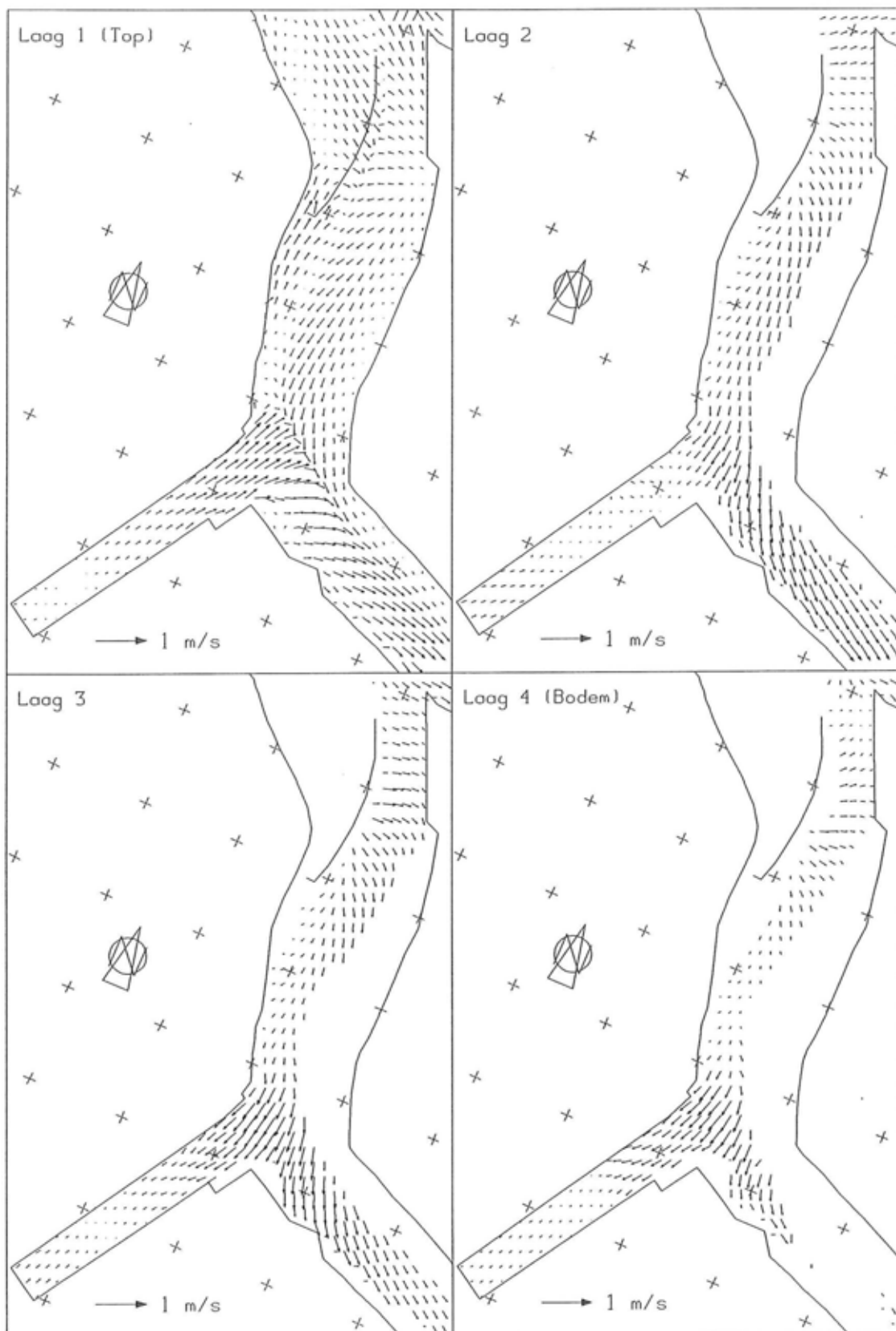
Figuur 5.22: HW - 1.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



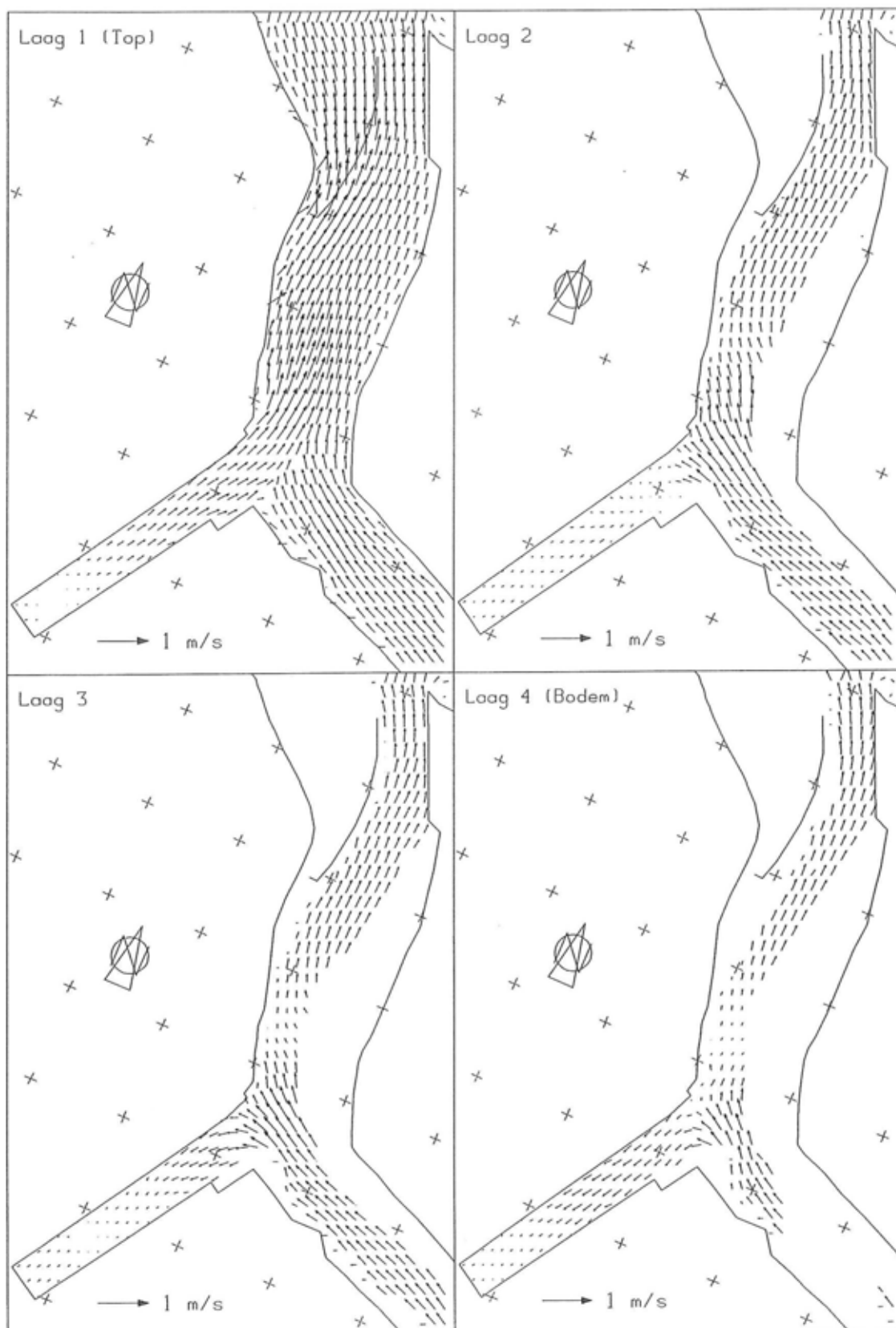
Figuur 5.23: HW

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



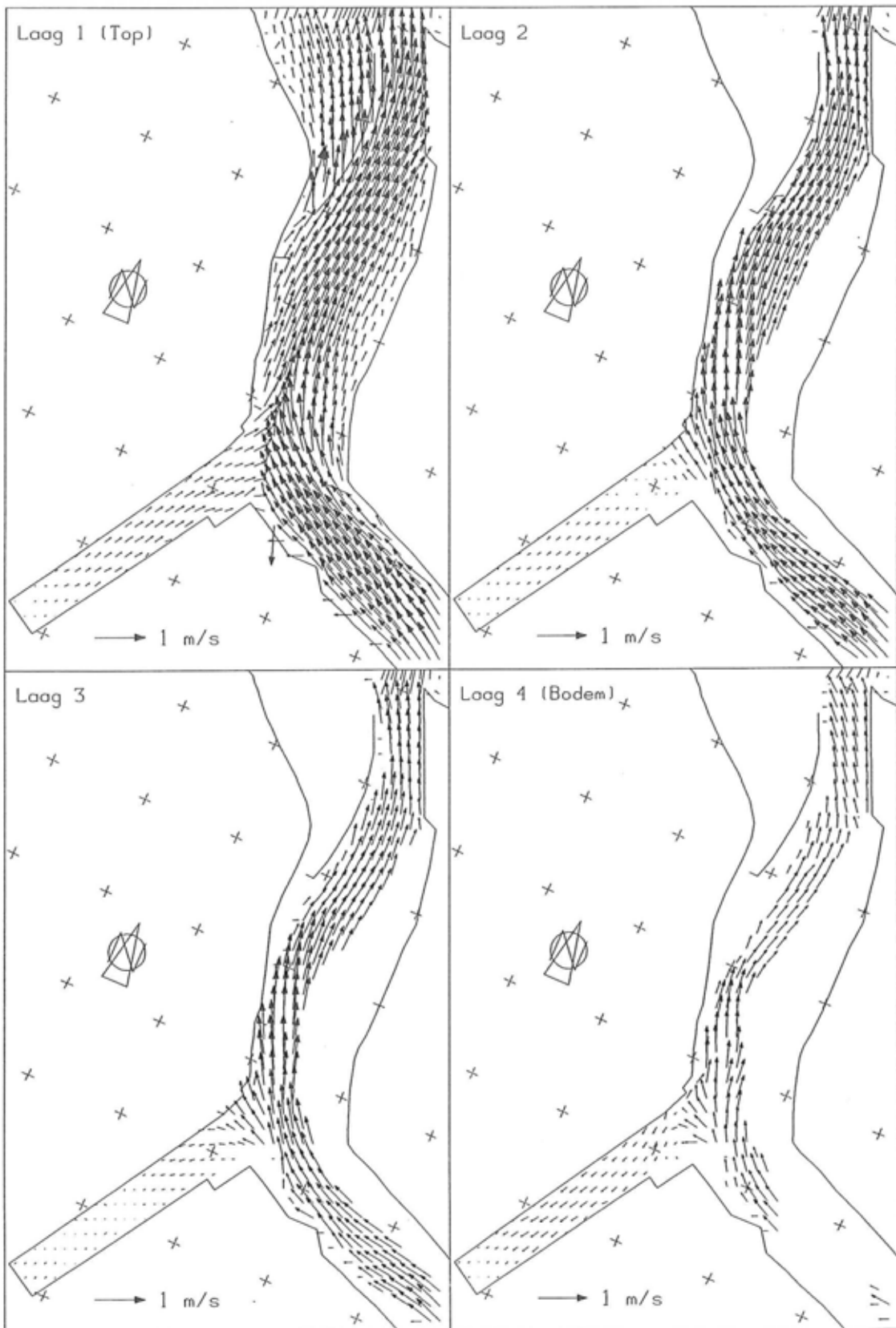
Figuur 5.24: HW + 1.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



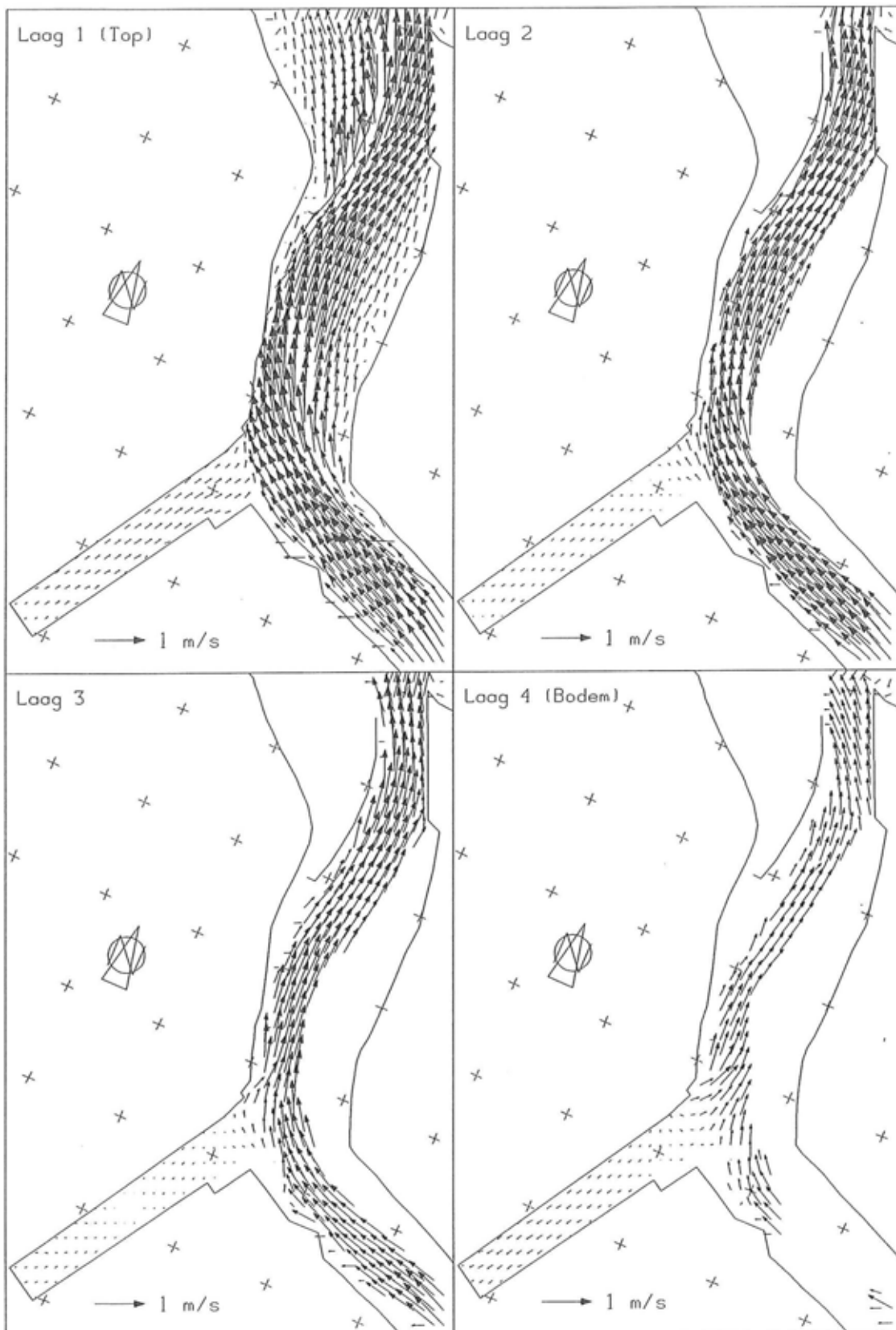
Figuur 5.25: HW + 2.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



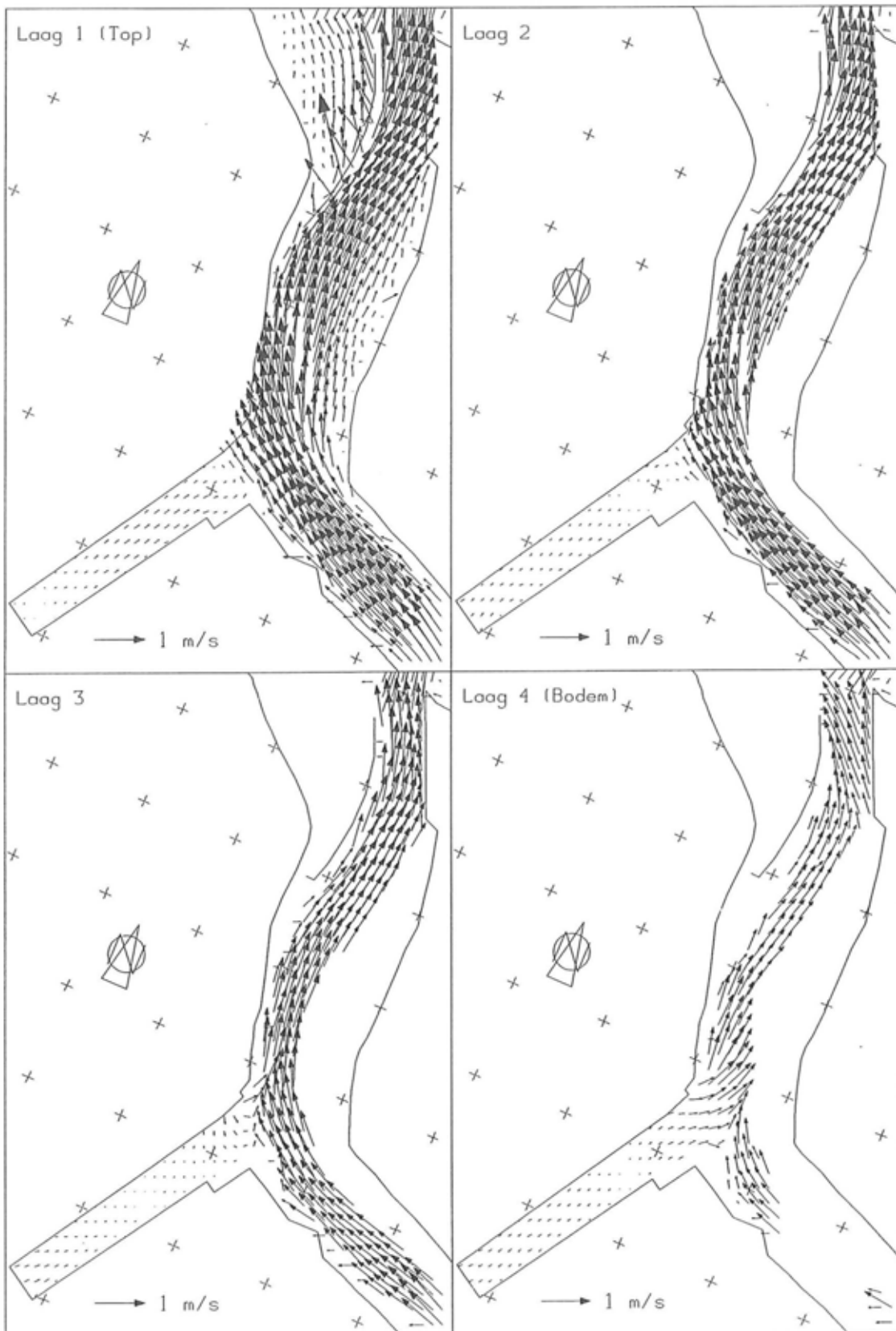
Figuur 5.26: HW + 3.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



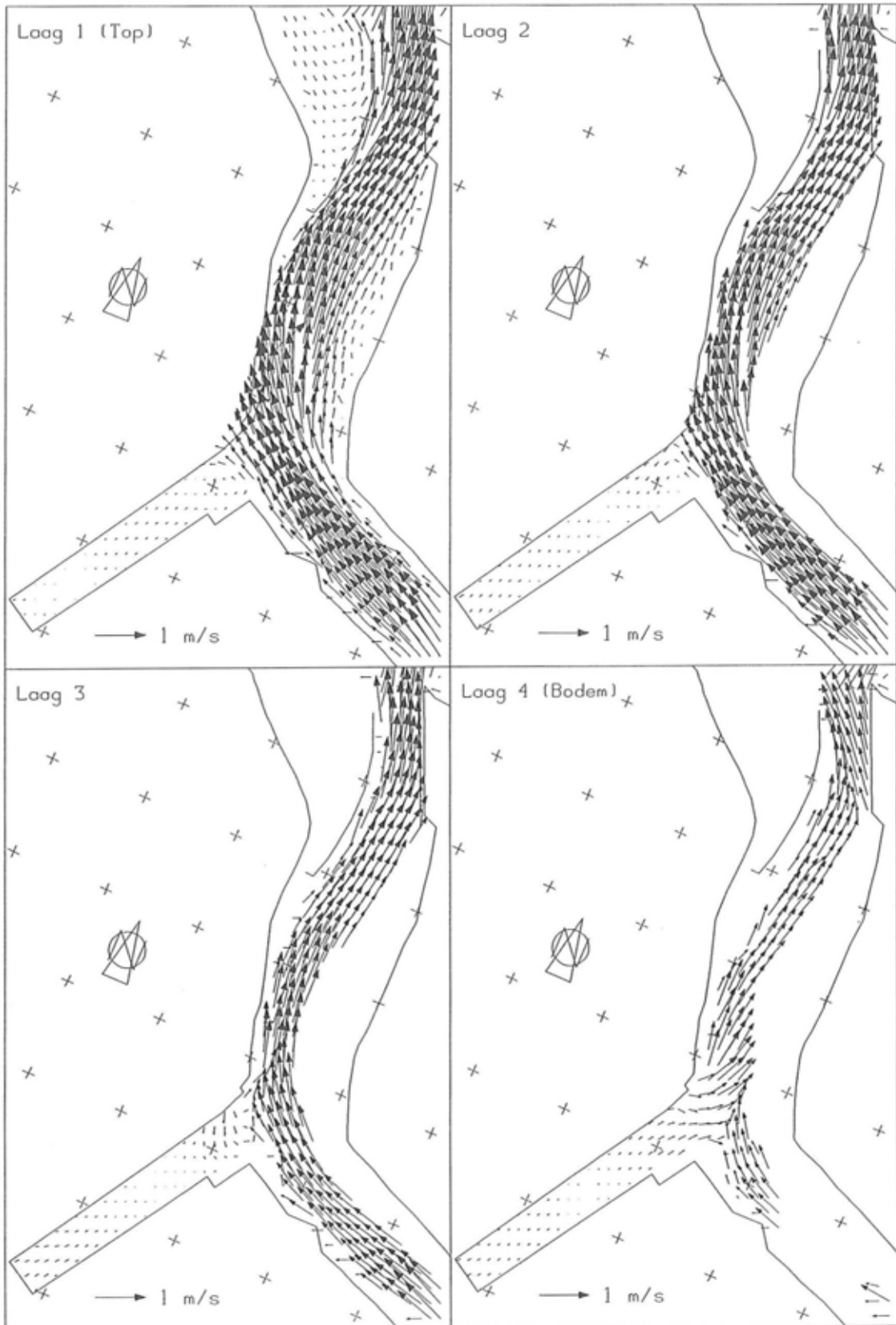
Figuur 5.27: HW + 4.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



Figuur 5.28: HW + 5.0h

Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)



Figuur 5.29: HW + 6.0h

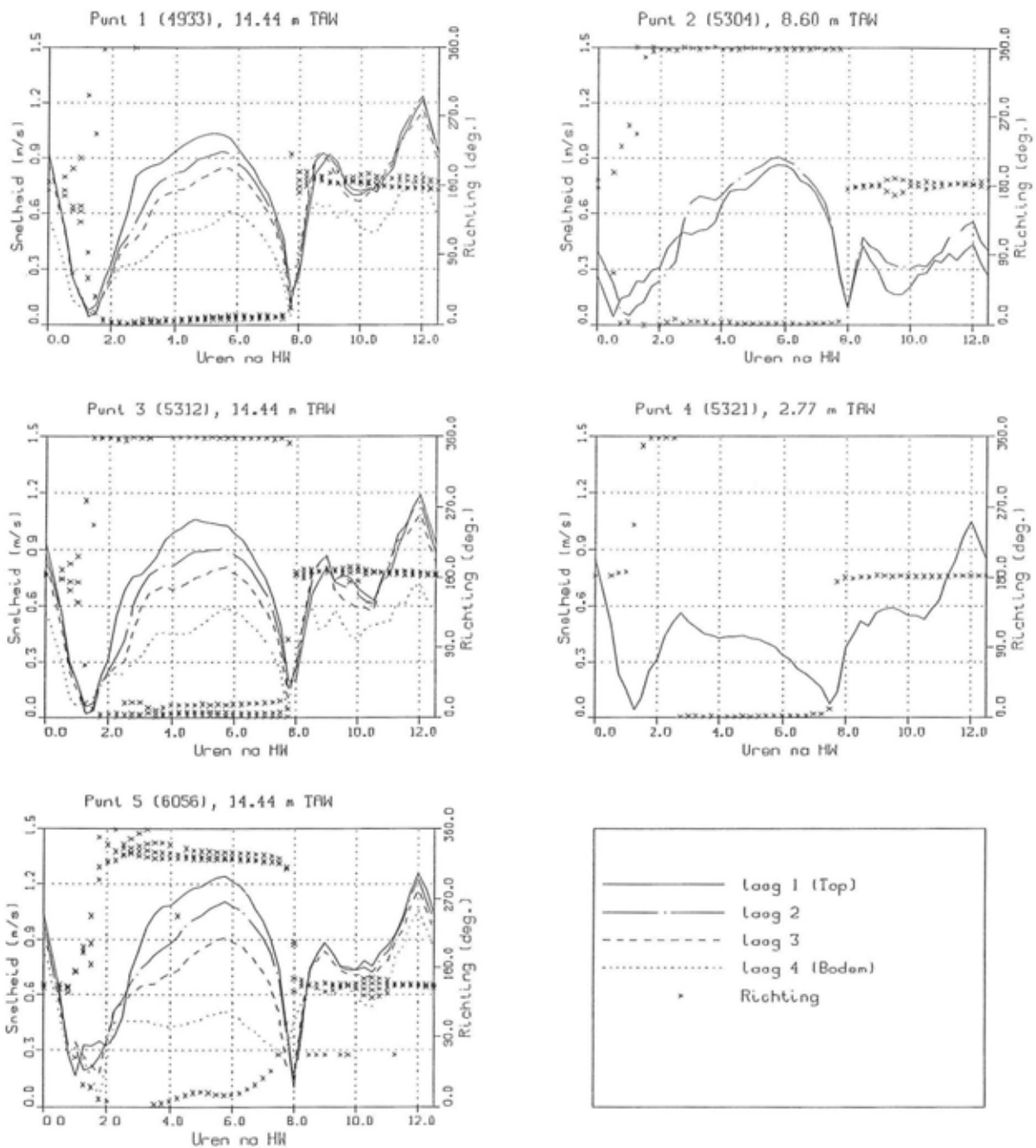
Stroombeeld T01 (springtij, saliniteit)

BIJLAGE 5

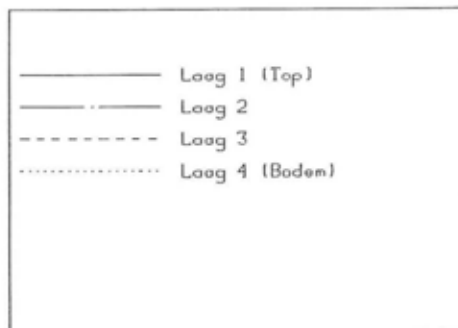
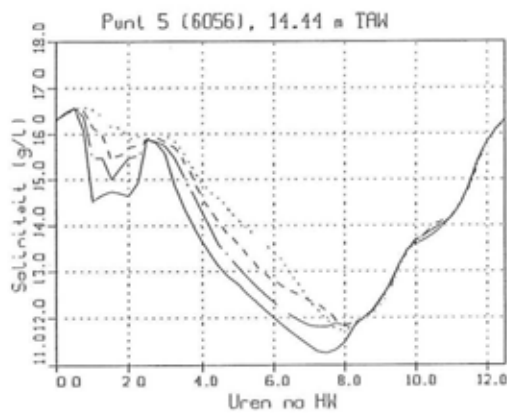
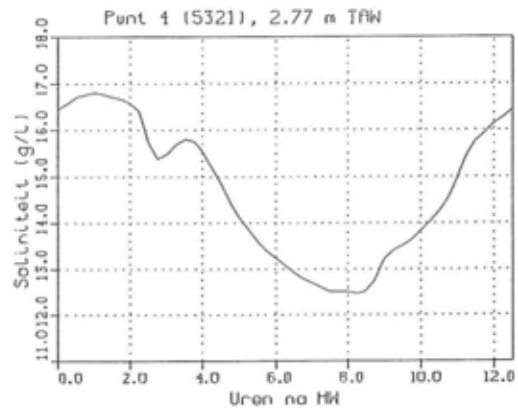
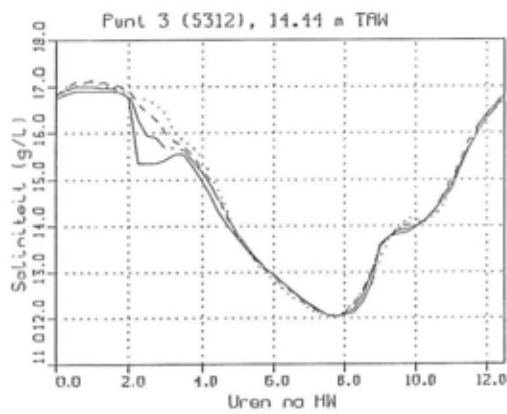
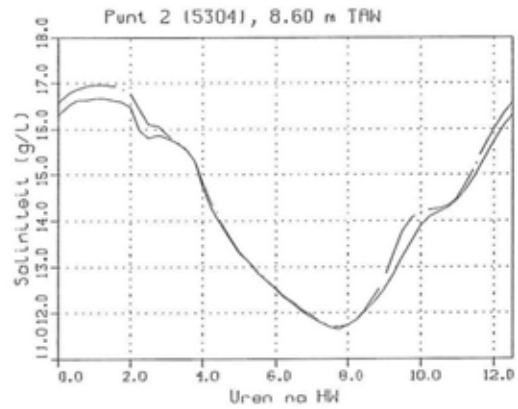
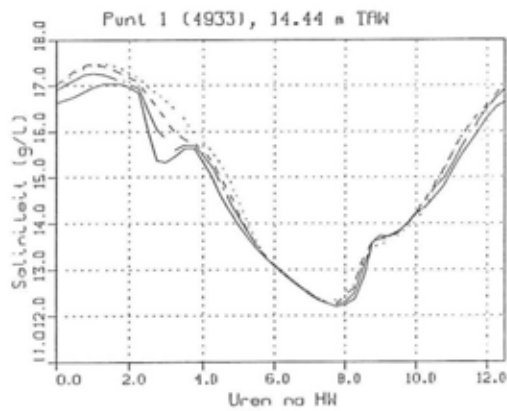
Hydrodynamica T01-14.4

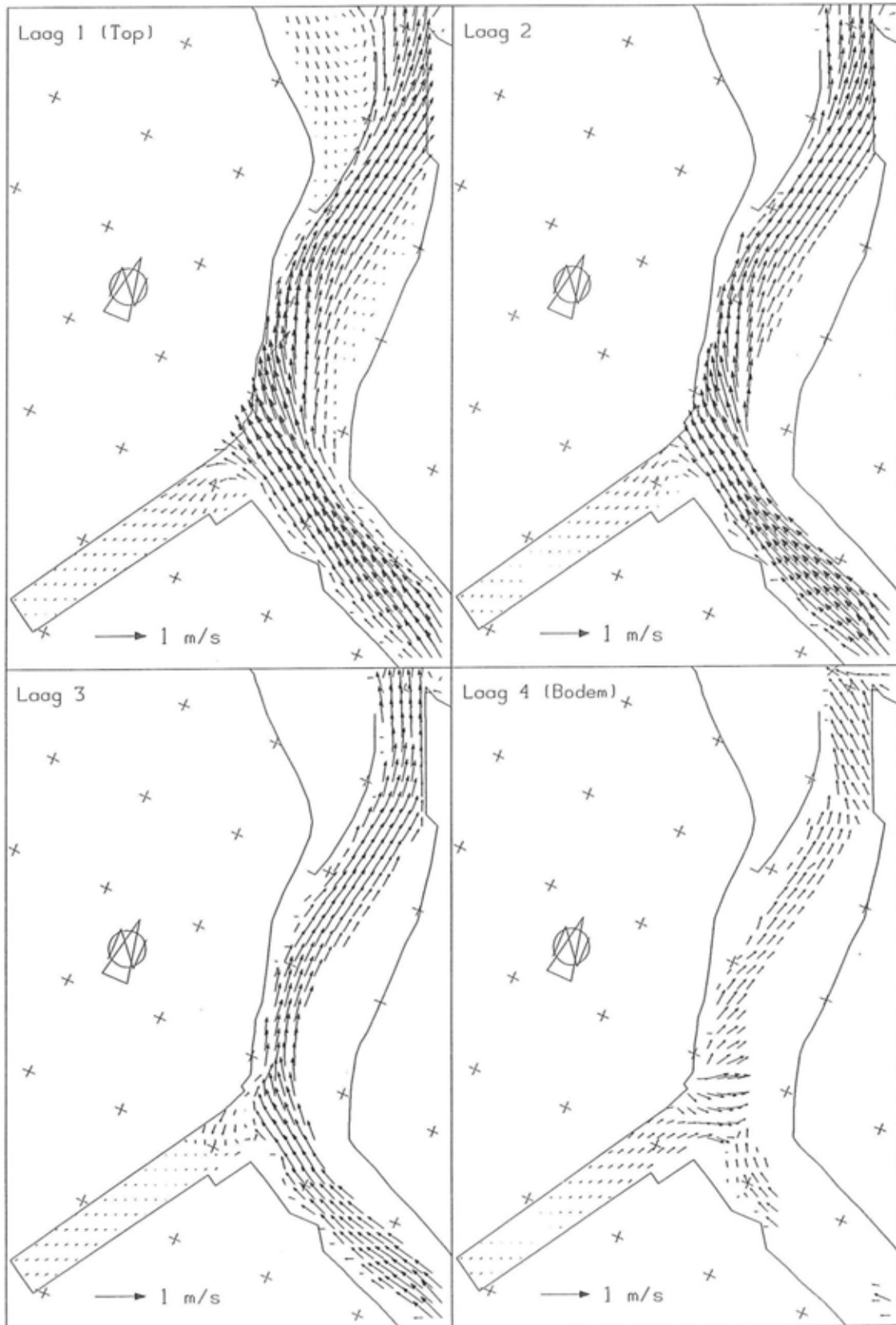
Figuren 5.30 - 5.43

Figuur 5.30: Toestand T01-14.4
Snelheden op de Drempel van Frederik



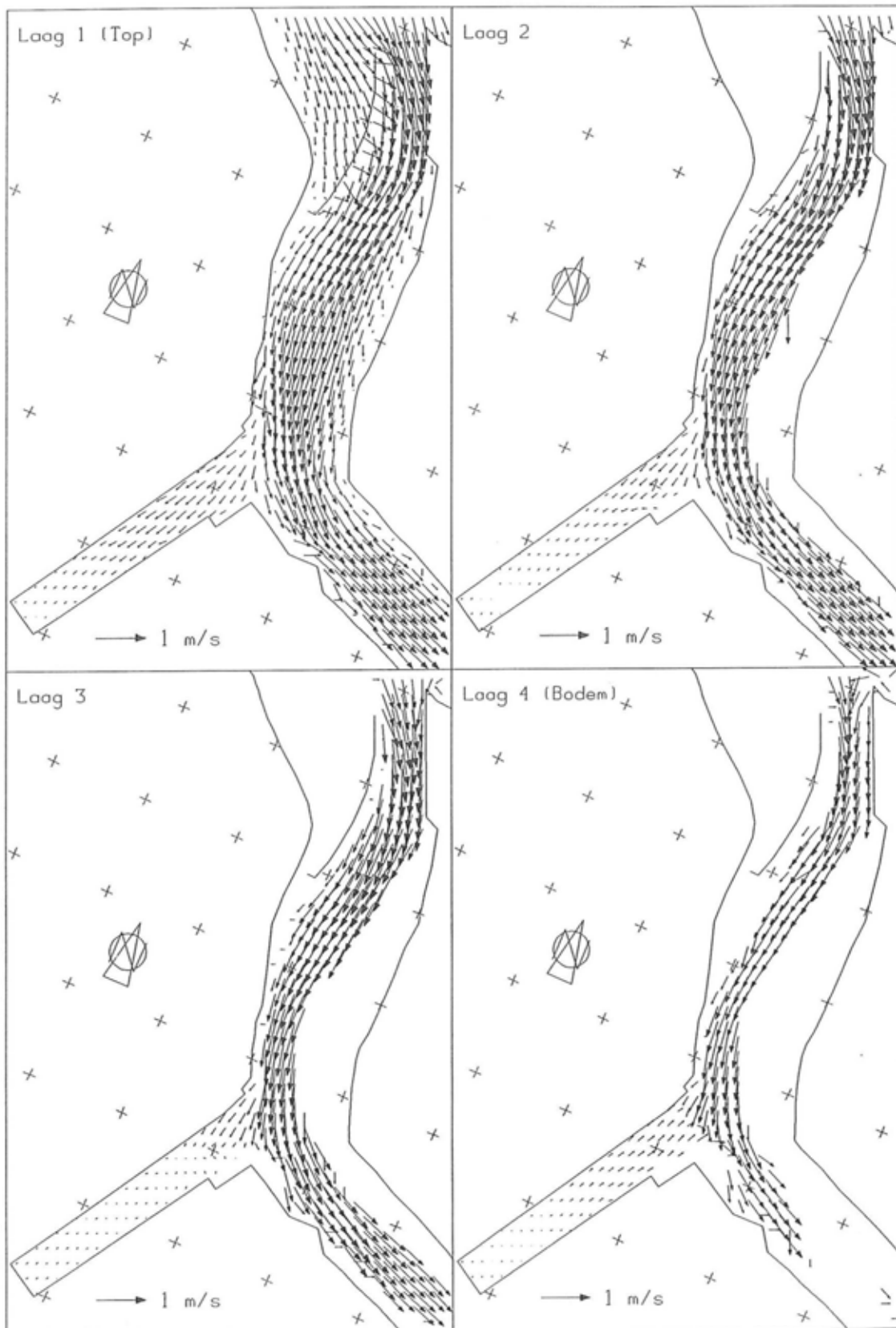
Figuur 5.31: Toestand T01-14.4
Saliniteit op de Drempel van Frederik





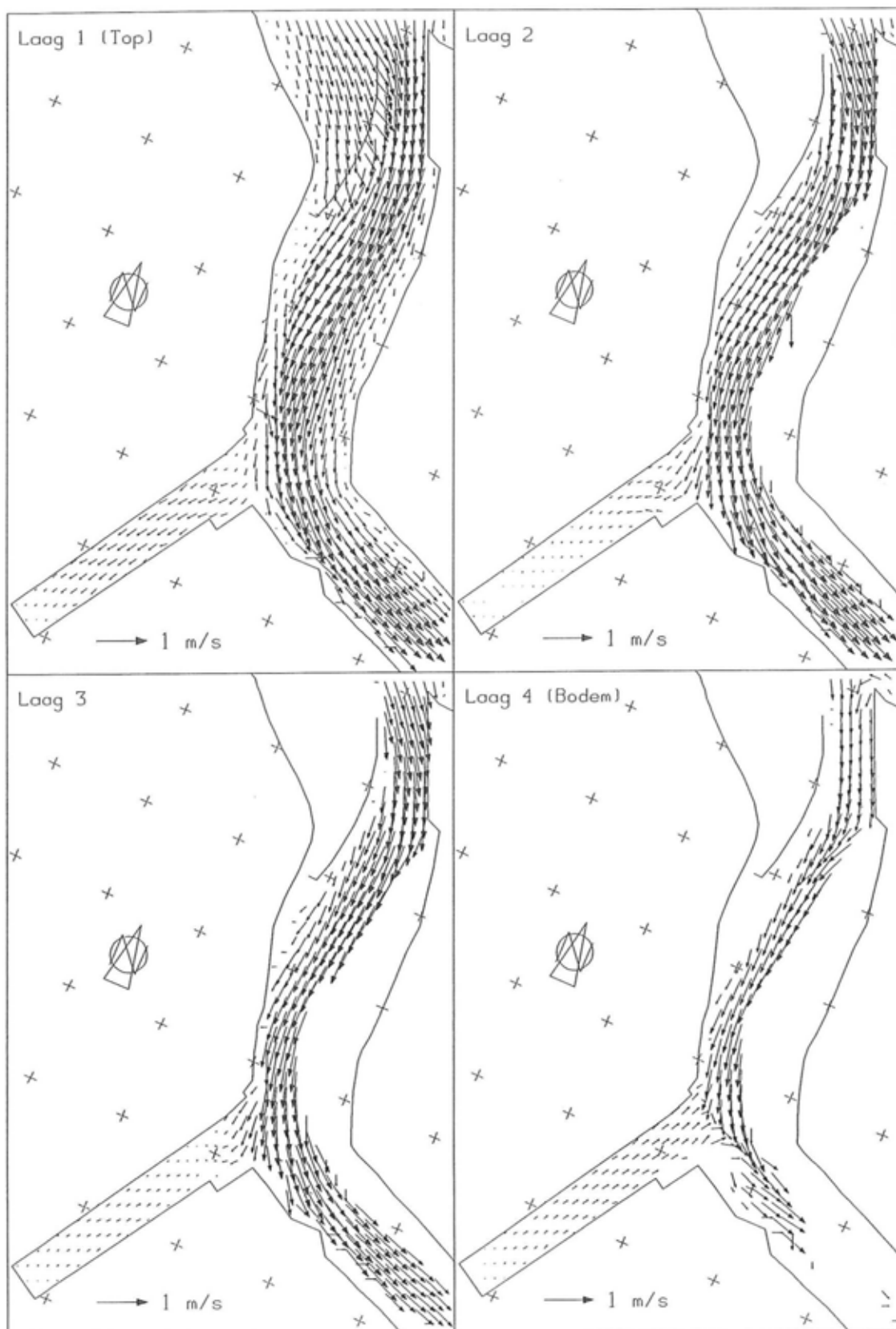
Figuur 5.32: HW - 5.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, soliniteit)



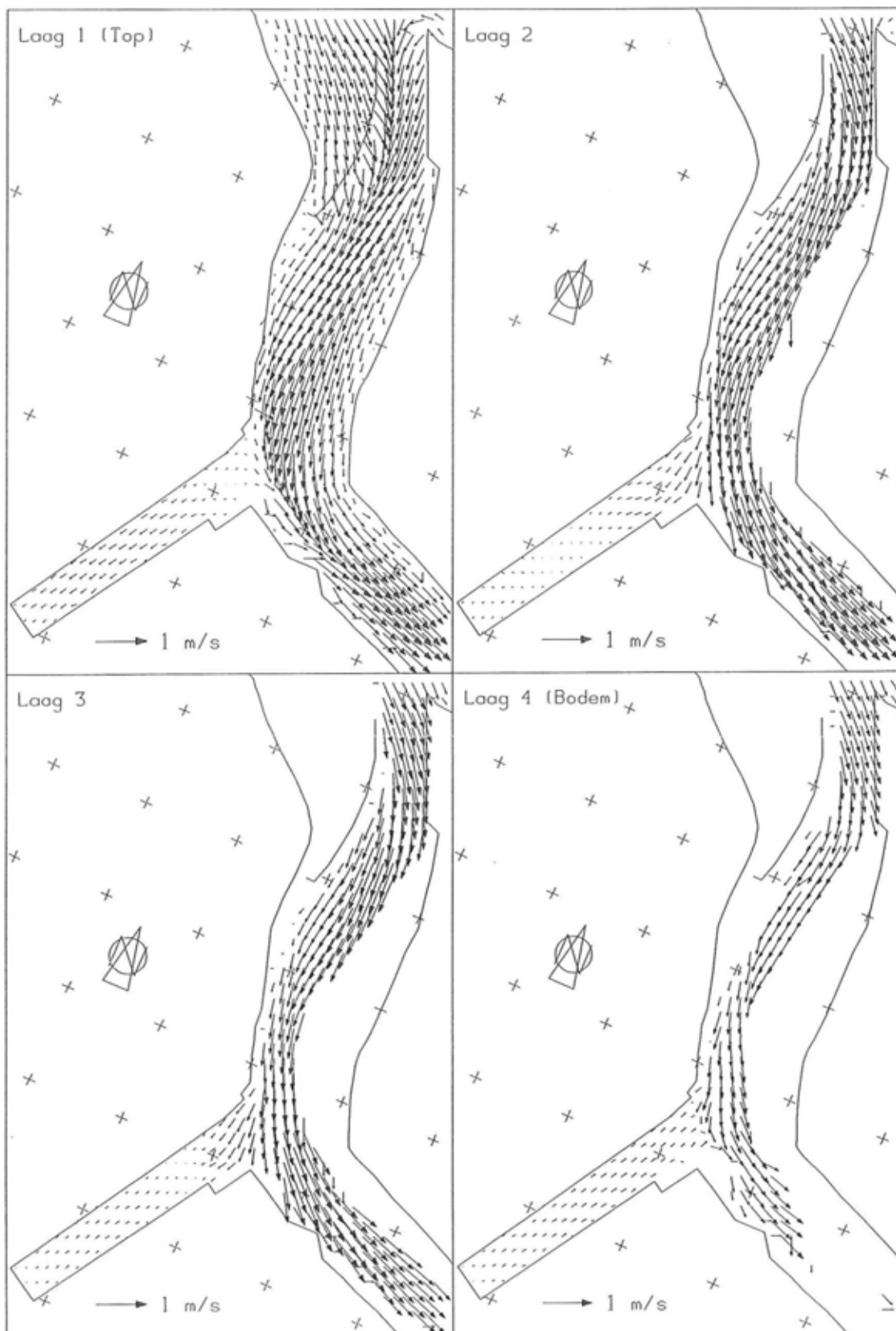
Figuur 5.33: HW - 4.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



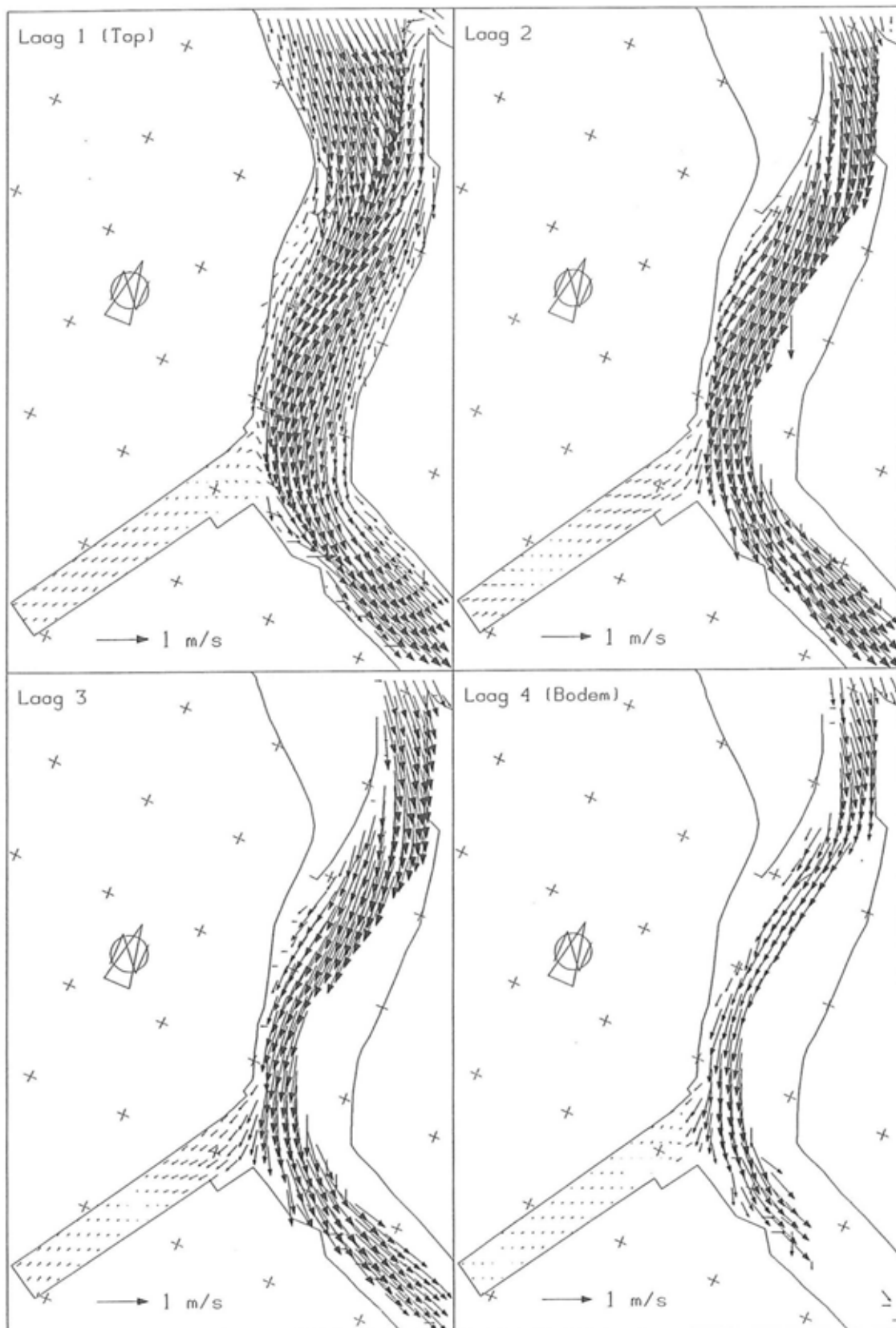
Figuur 5.34: HW - 3.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



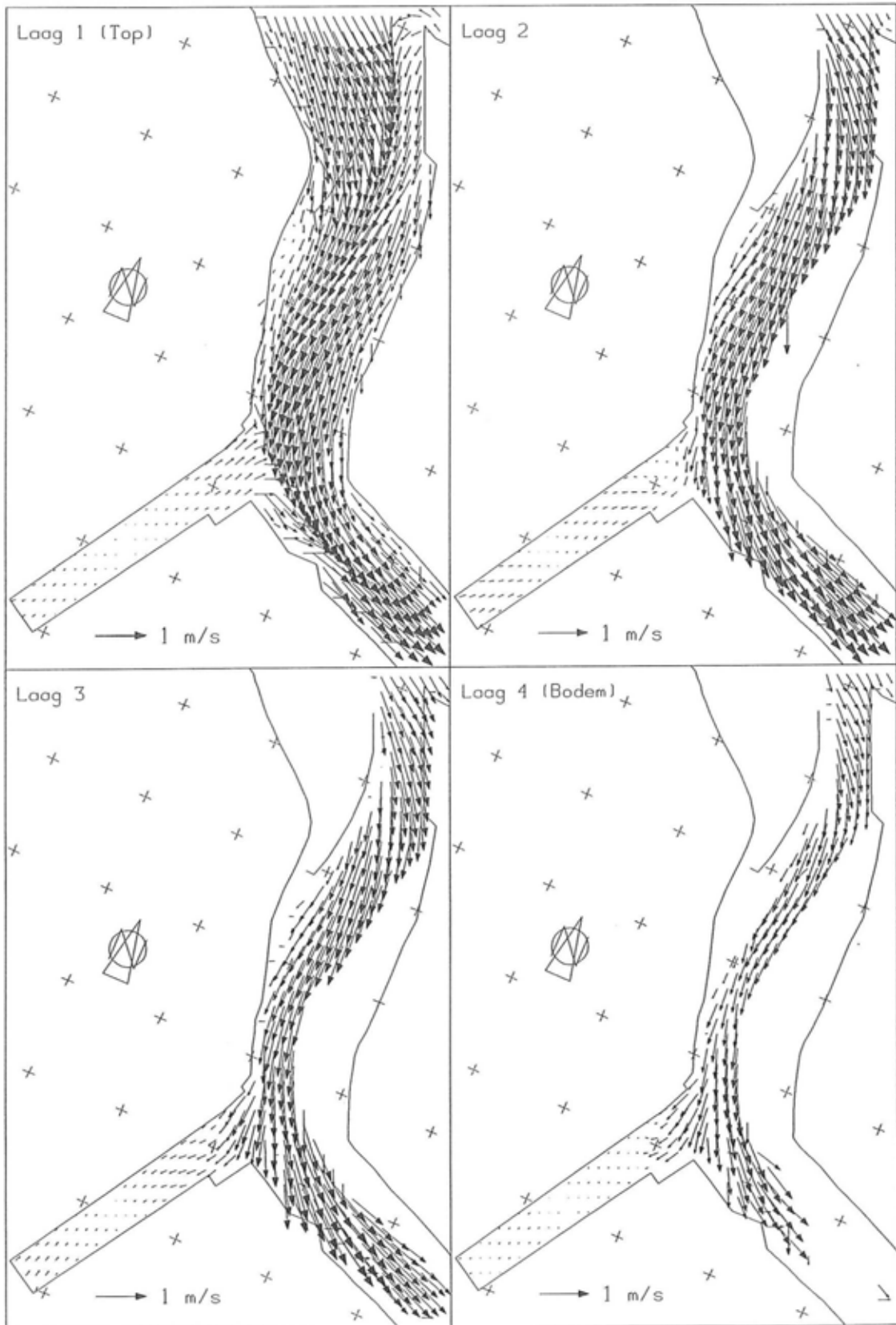
Figuur 5.35: HW - 2.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



Figuur 5.36: HW - 1.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)

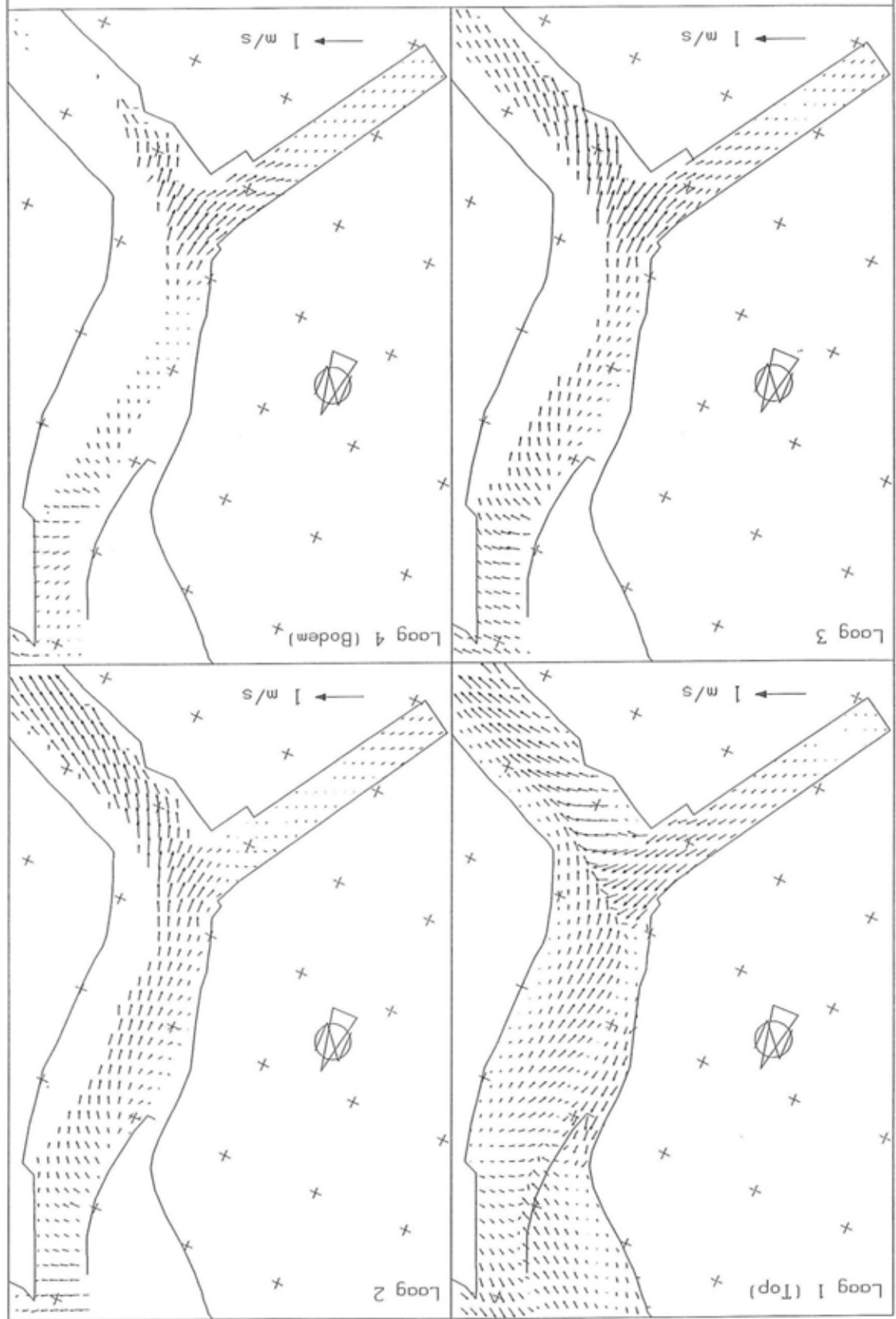


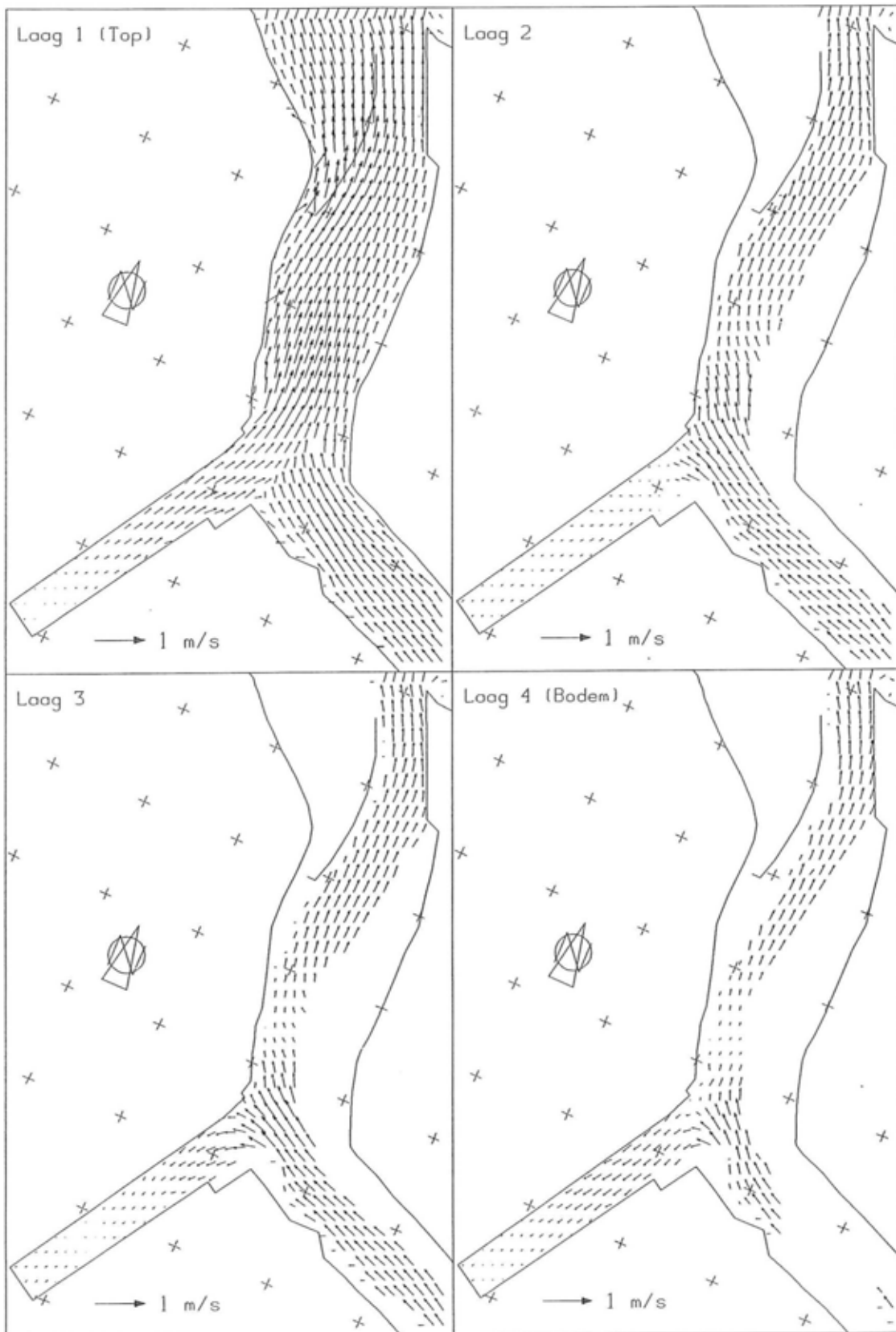
Figuur 5.37: HW

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, soliniteit)

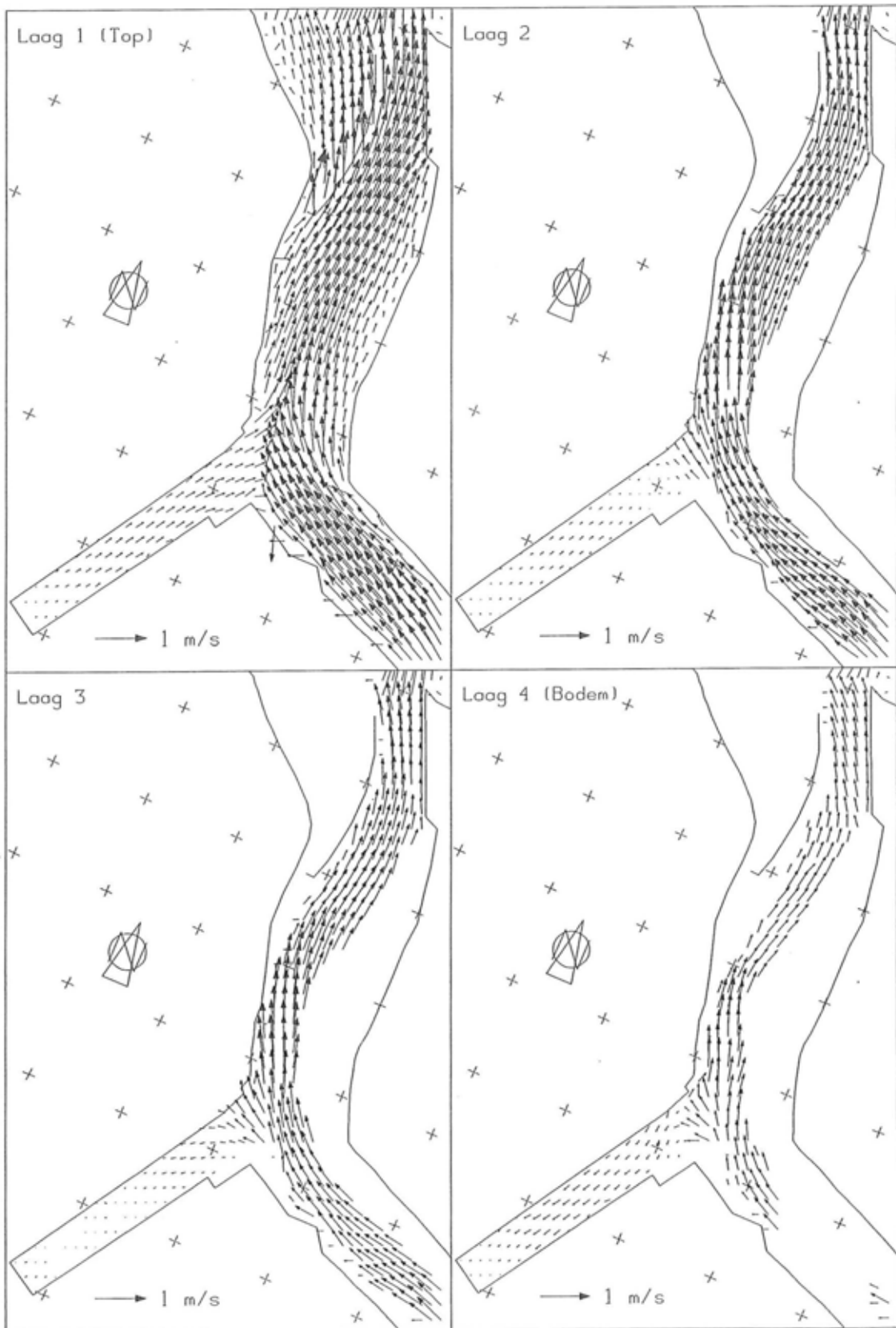
Figuur 5.38: HM + 1.0h





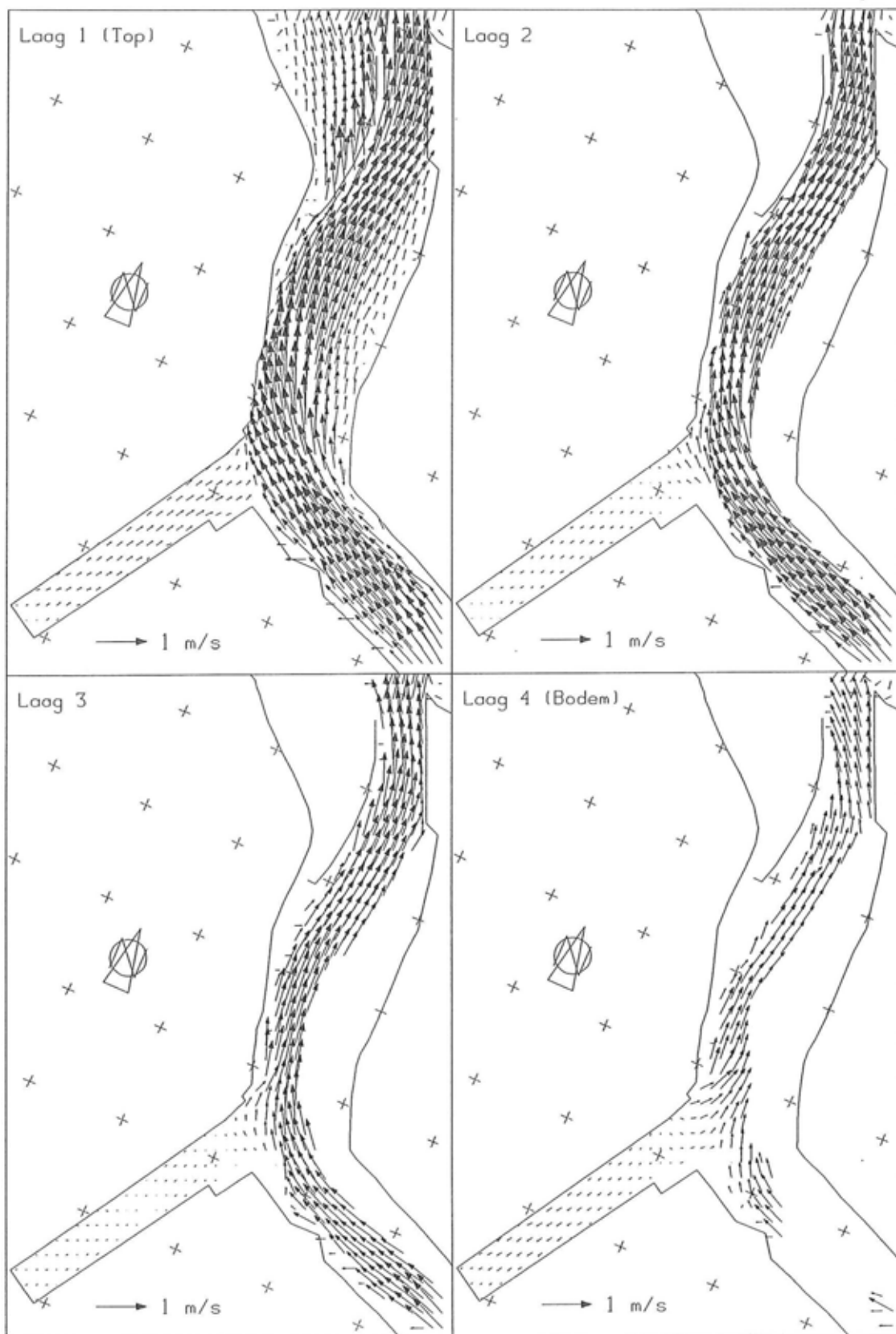
Figuur 5.39: HW + 2.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



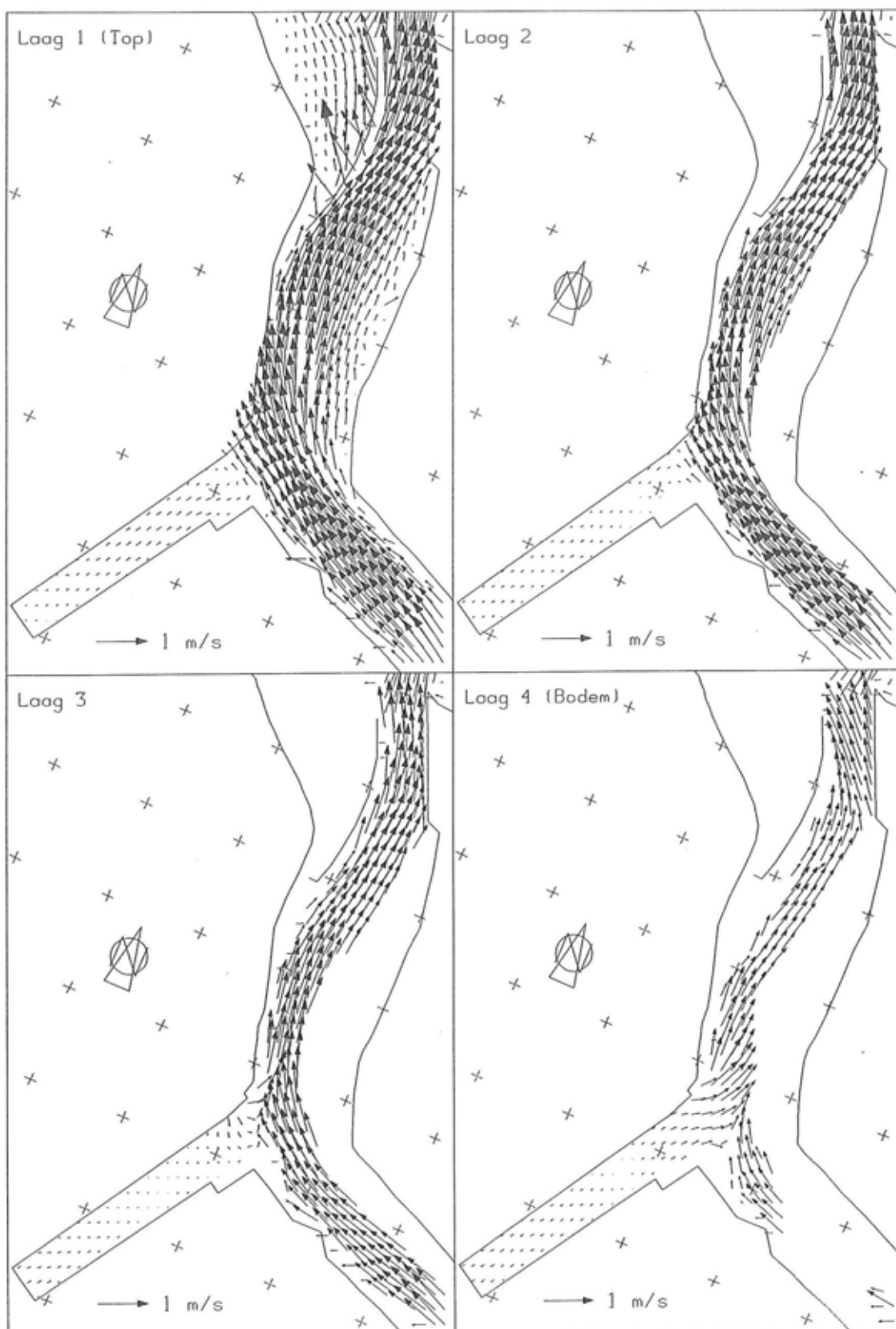
Figuur 5.40: HW + 3.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



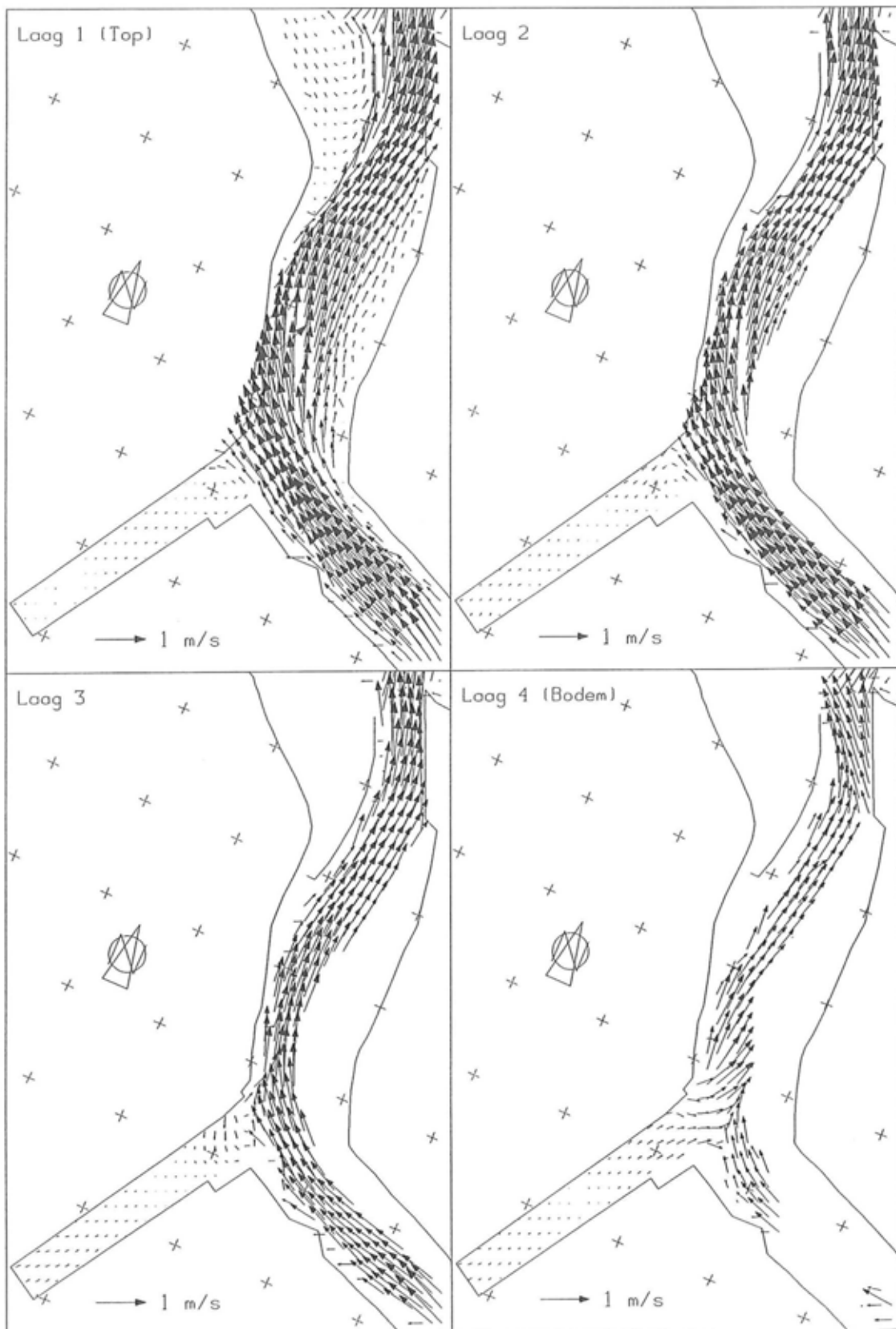
Figuur 5.41: HW + 4.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



Figuur 5.42: HW + 5.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)



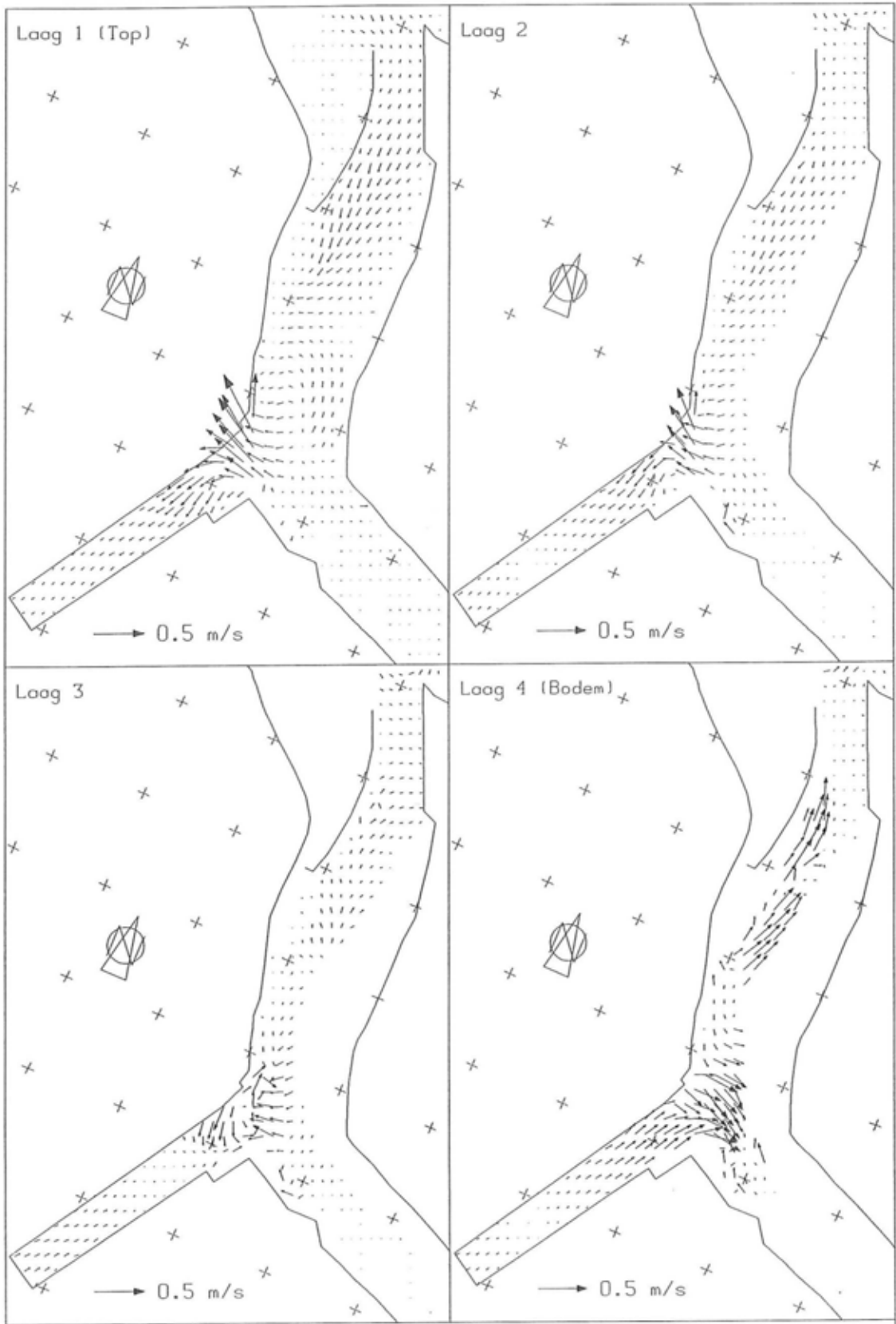
Figuur 5.43: HW + 6.0h

Stroombeeld T01-14.4 (springtij, saliniteit)

BIJLAGE 6

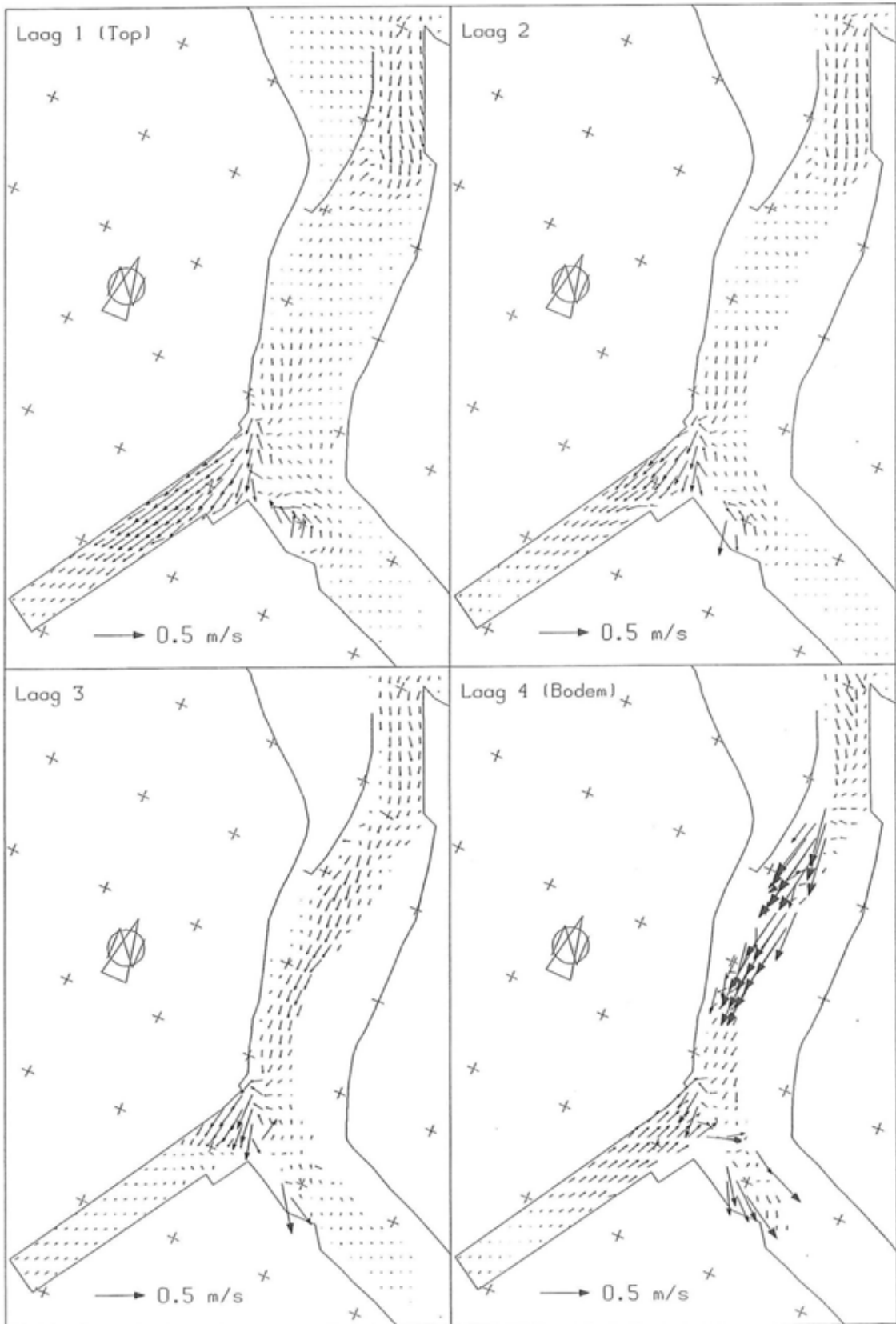
Vershil Snelheid T01-sp - HT

Figuren 5.44 - 5.55



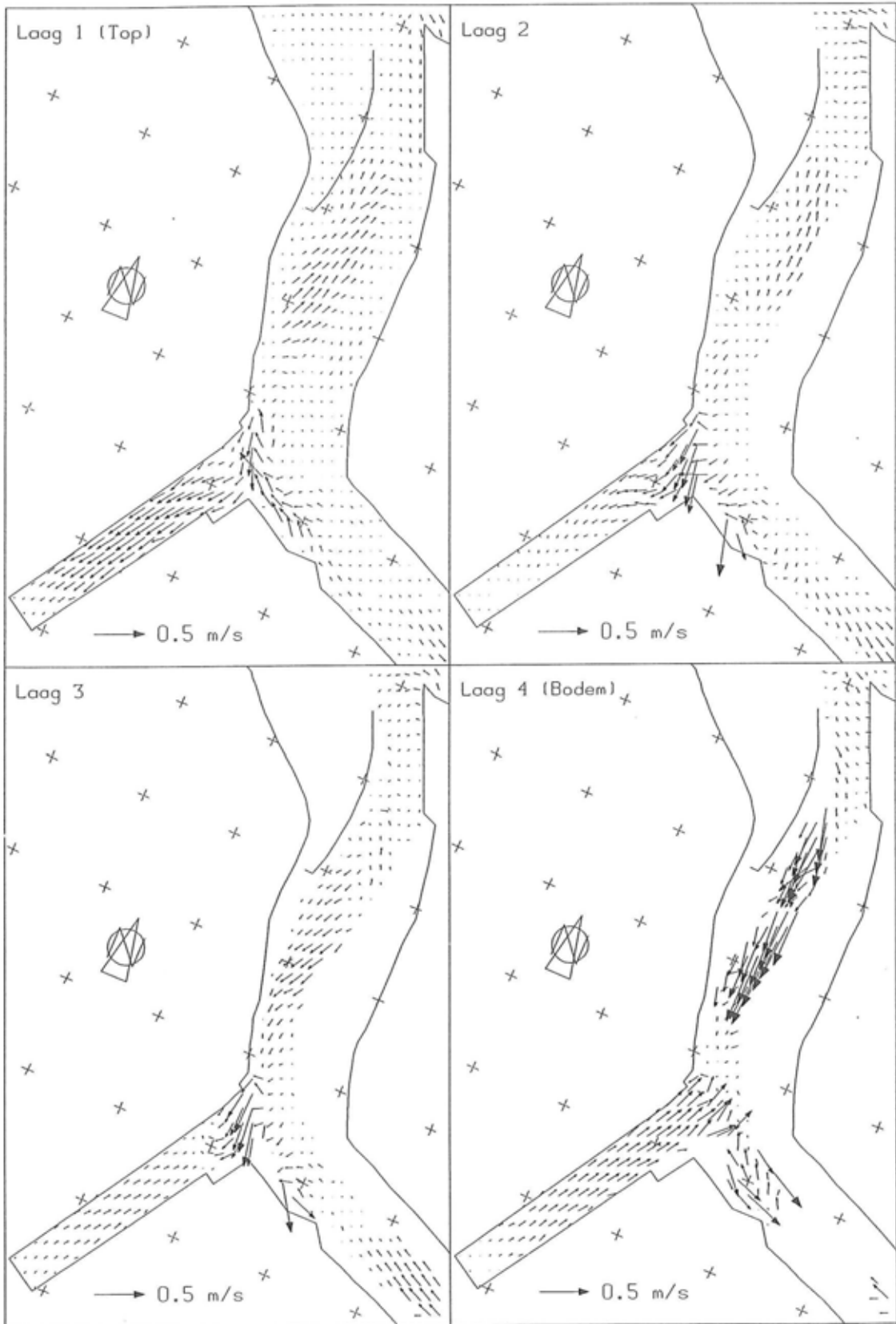
Figuur 5.44: HW - 5.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)



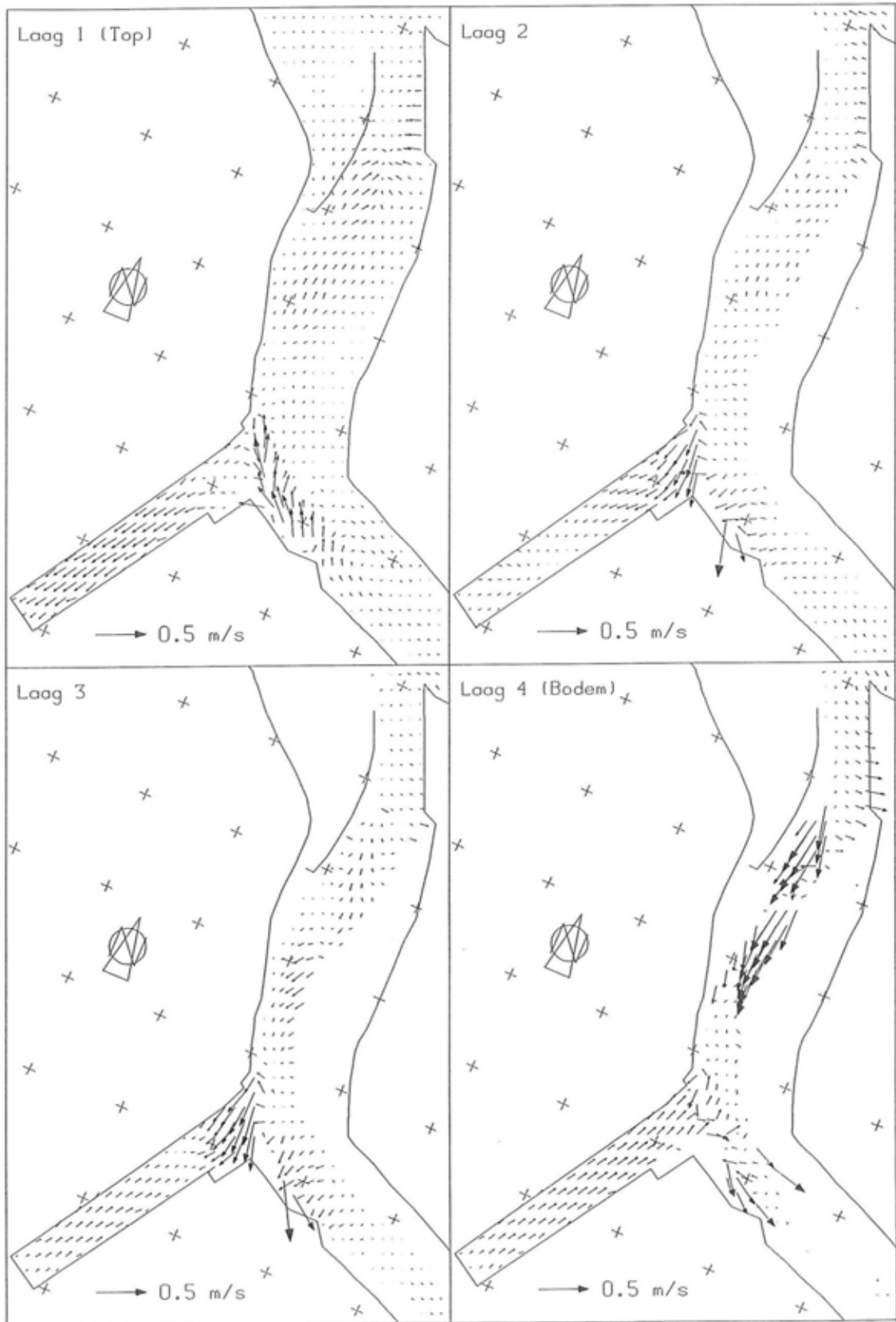
Figuur 5.45: HW - 4.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)



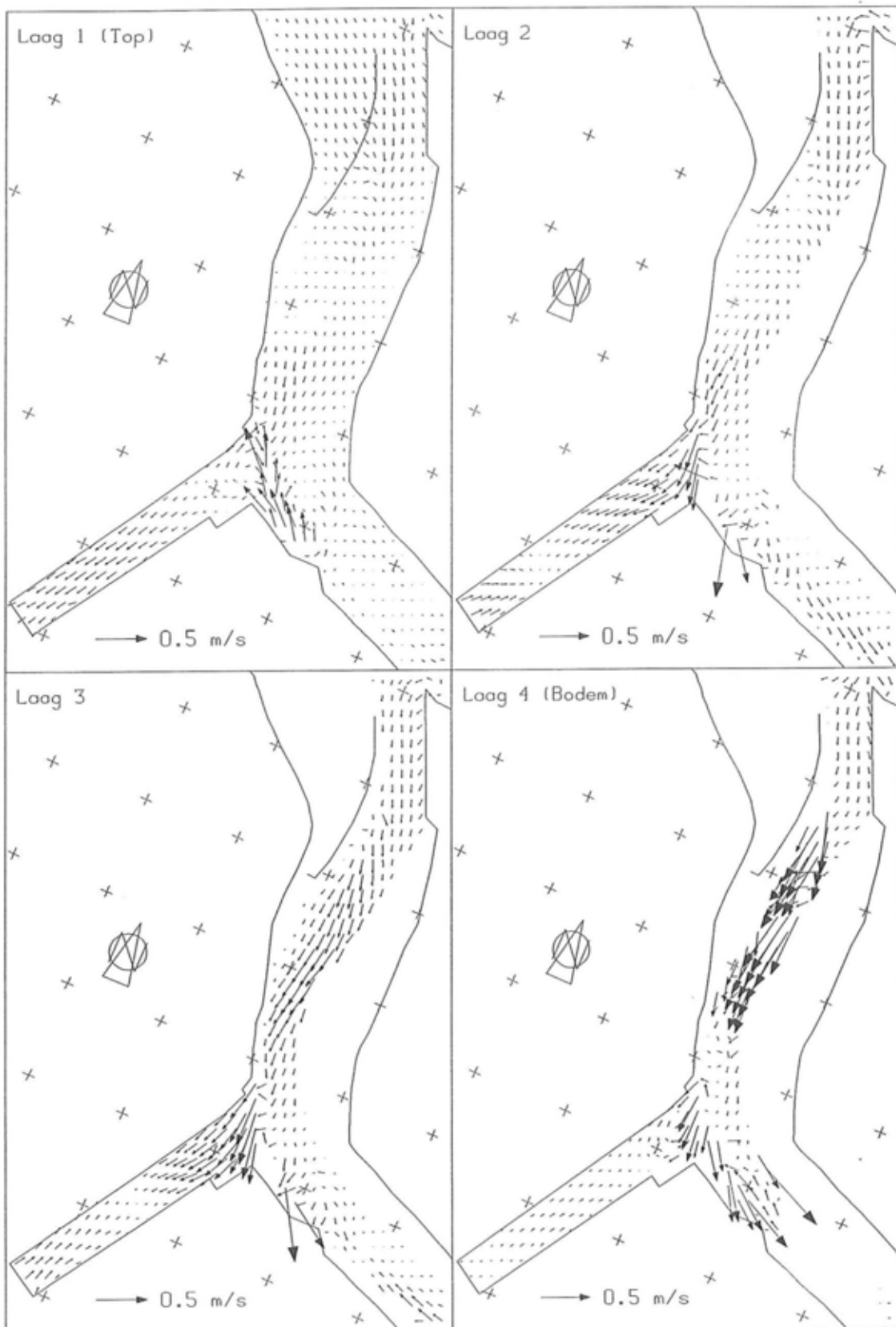
Figuur 5.46: HW - 3.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)



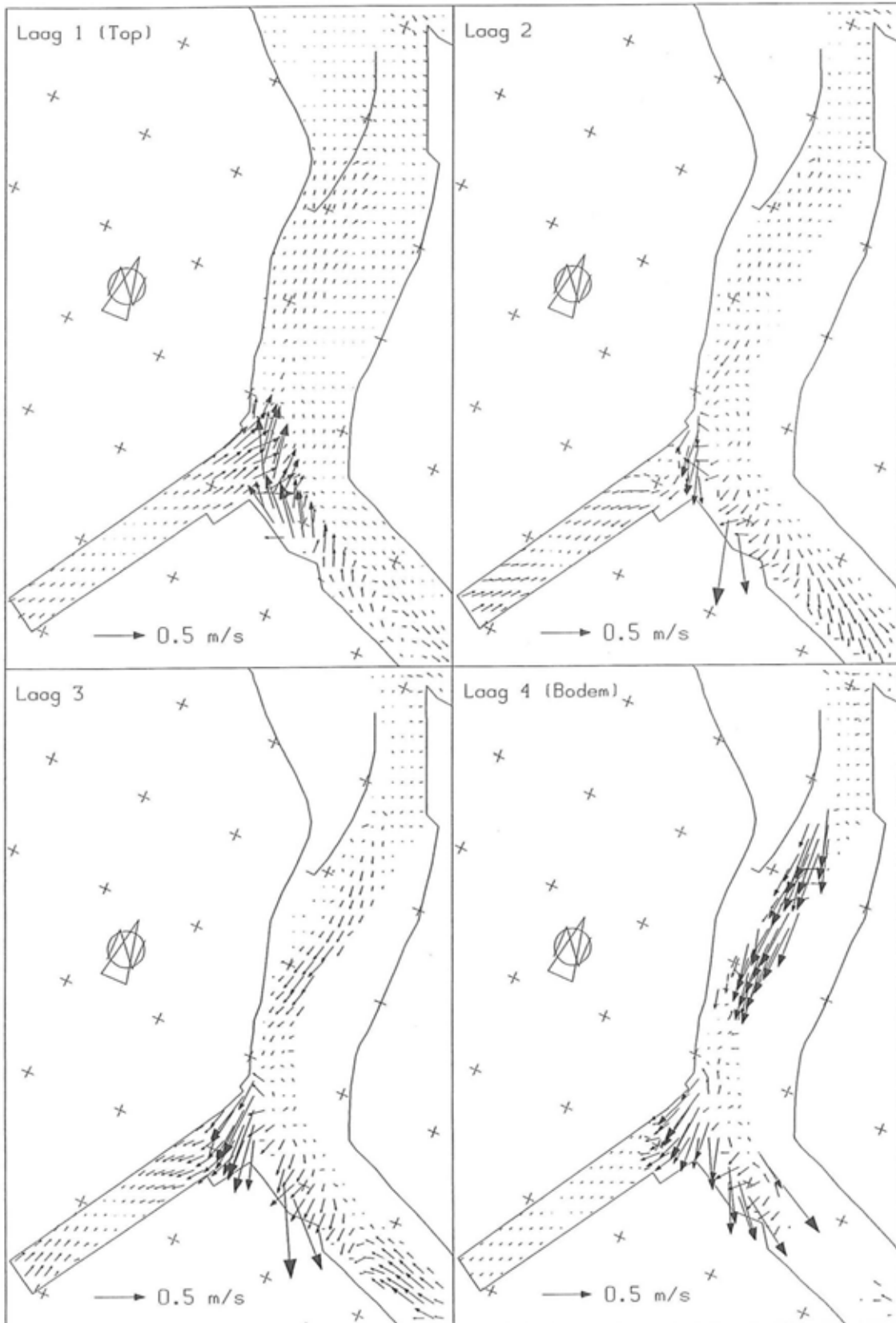
Figuur 5.47: HW - 2.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)



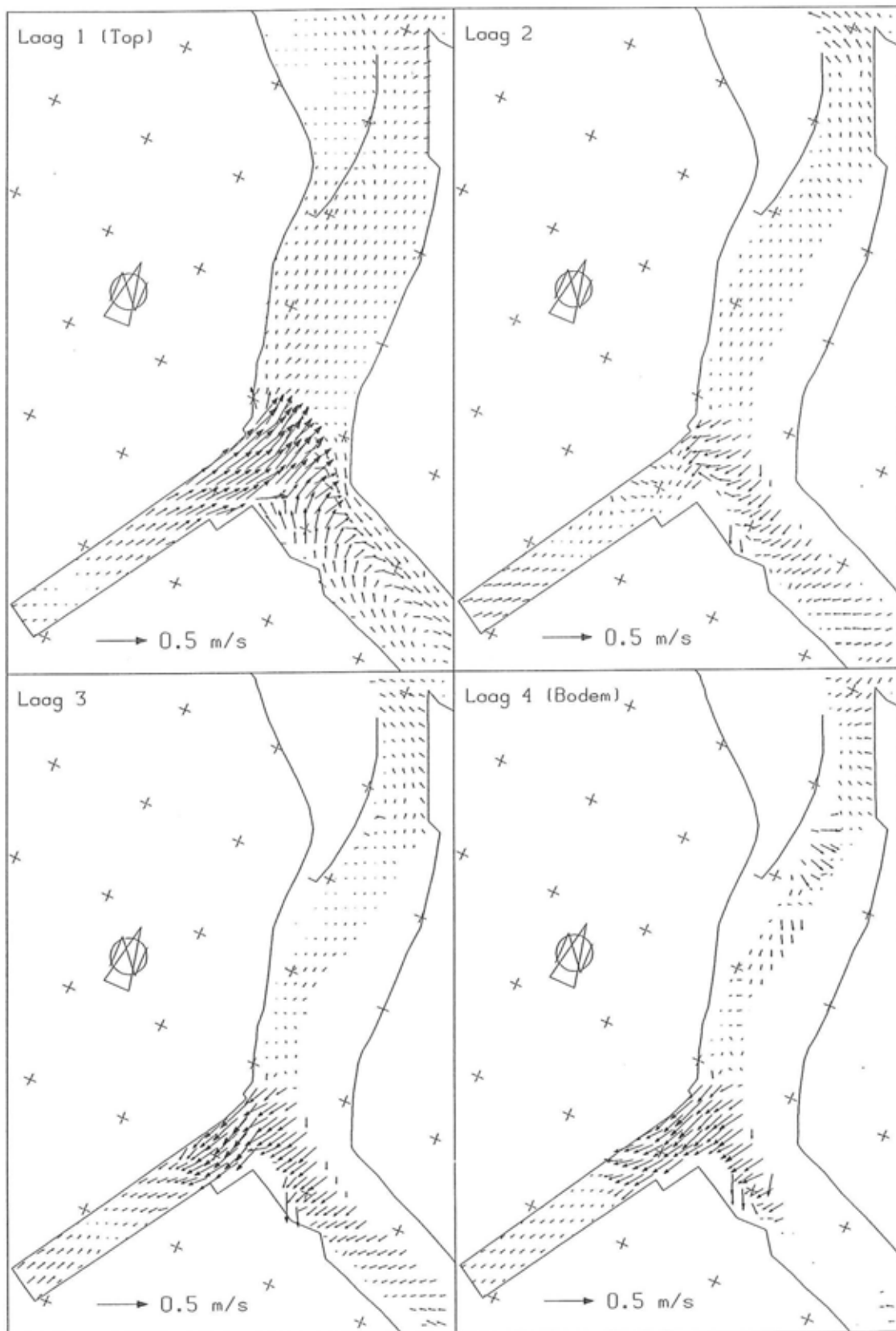
Figuur 5.48: HW - 1.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)



Figuur 5.49: HW

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)

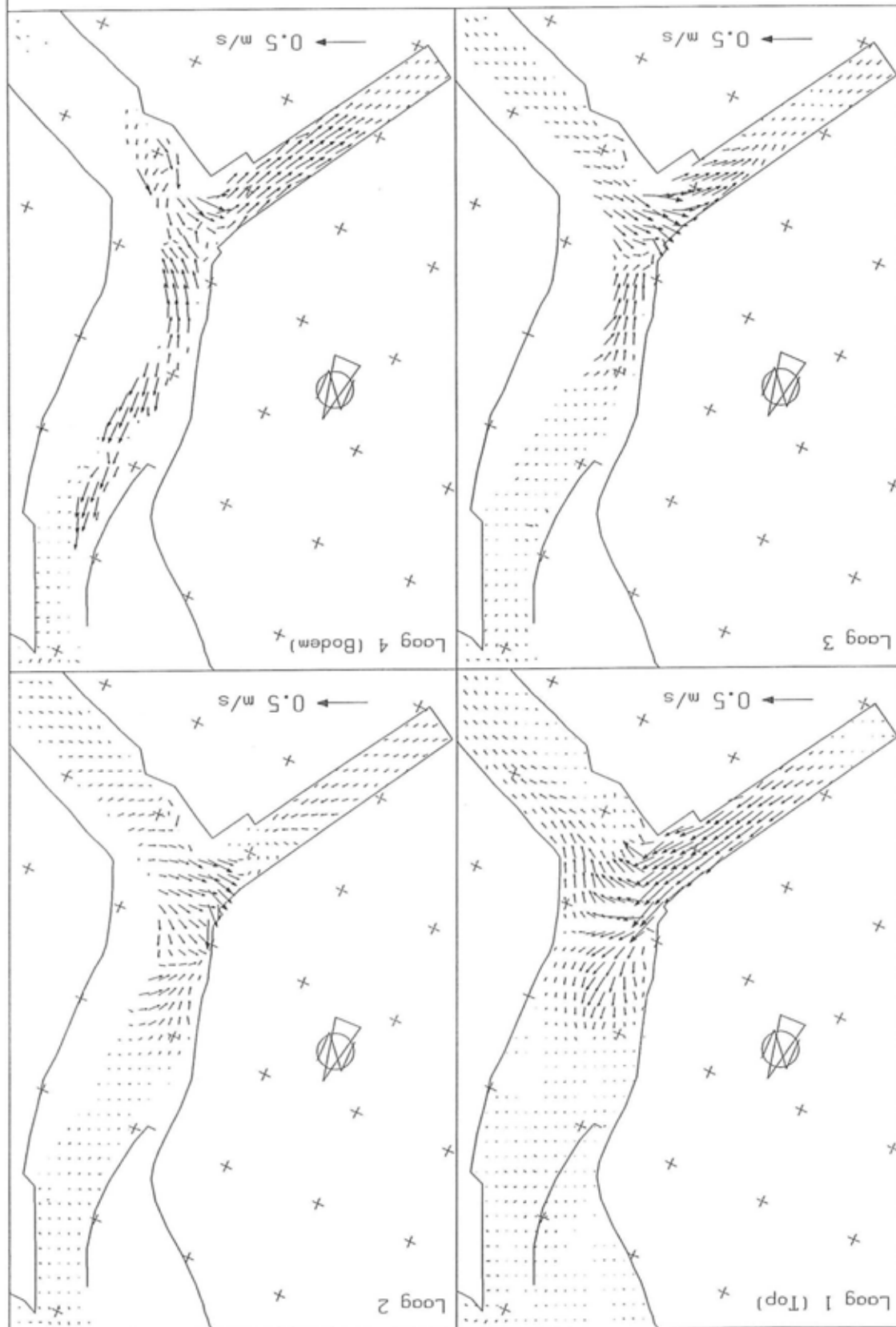


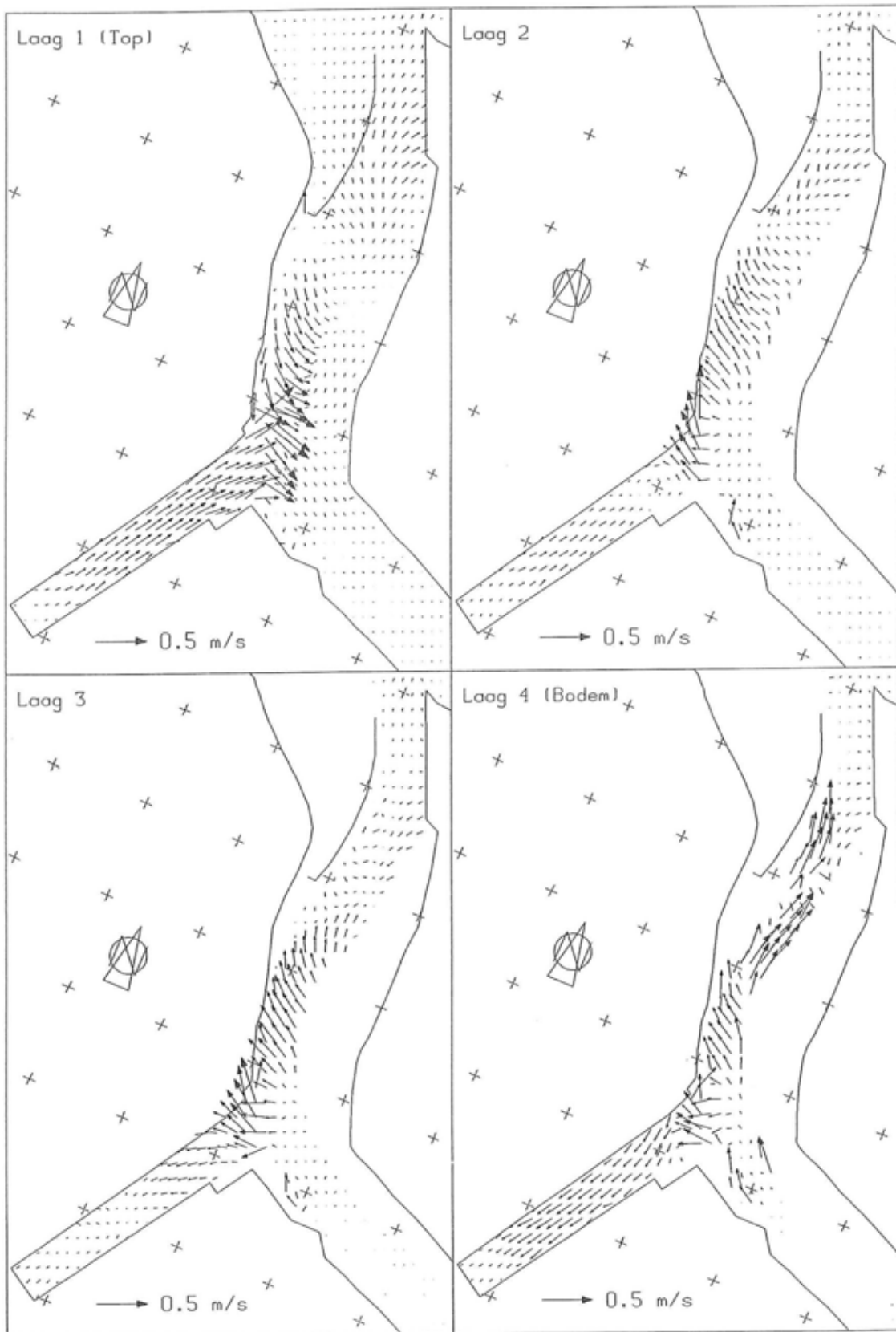
Figuur 5.50: HW + 1.0h

Vershil stroombeeld TO|sp - HT (springtij, saliniteit)

Verschild stroombeeld T01sp - HT (spronglij, soliniteit)

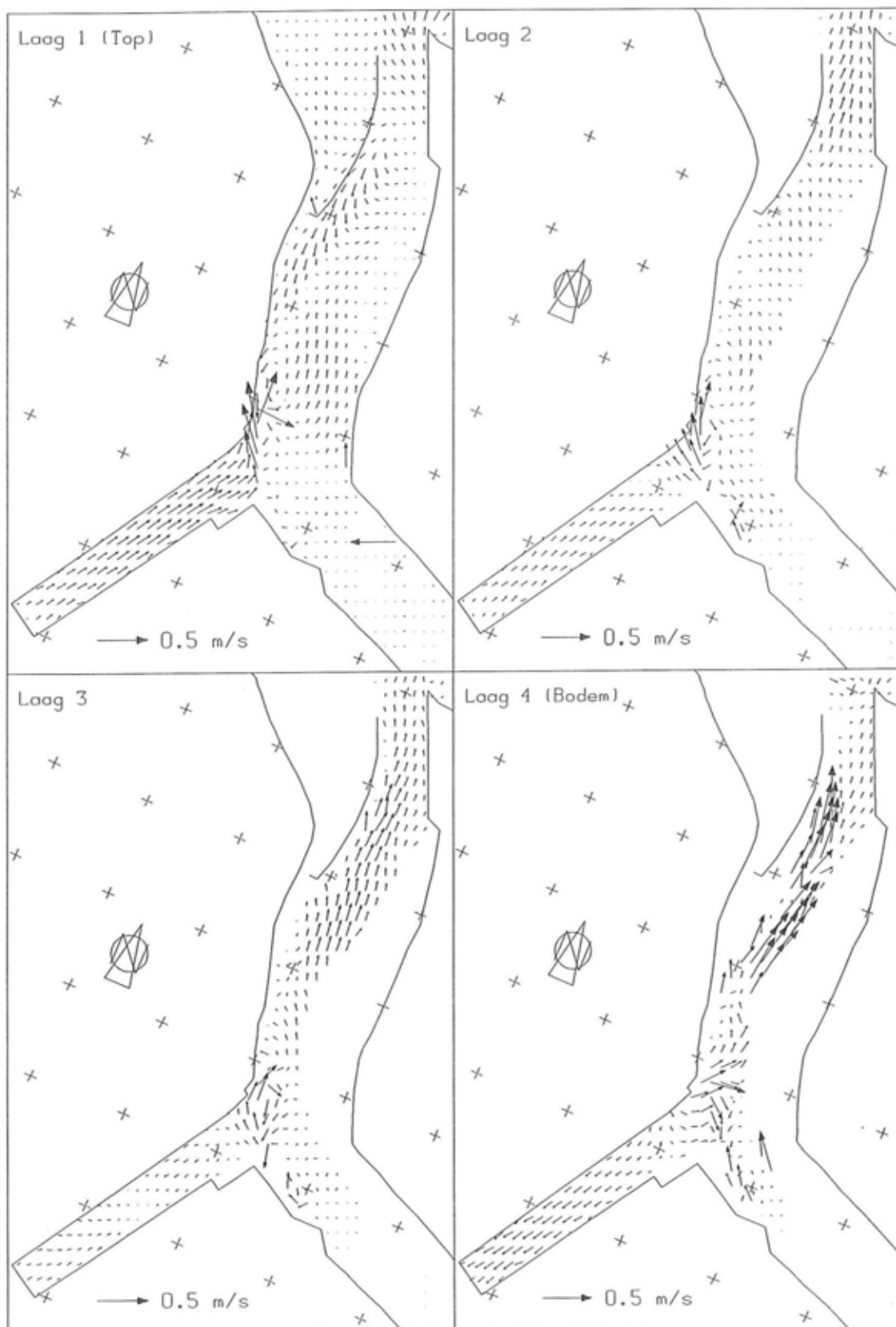
Figuur 5.51: HM + 2.0h





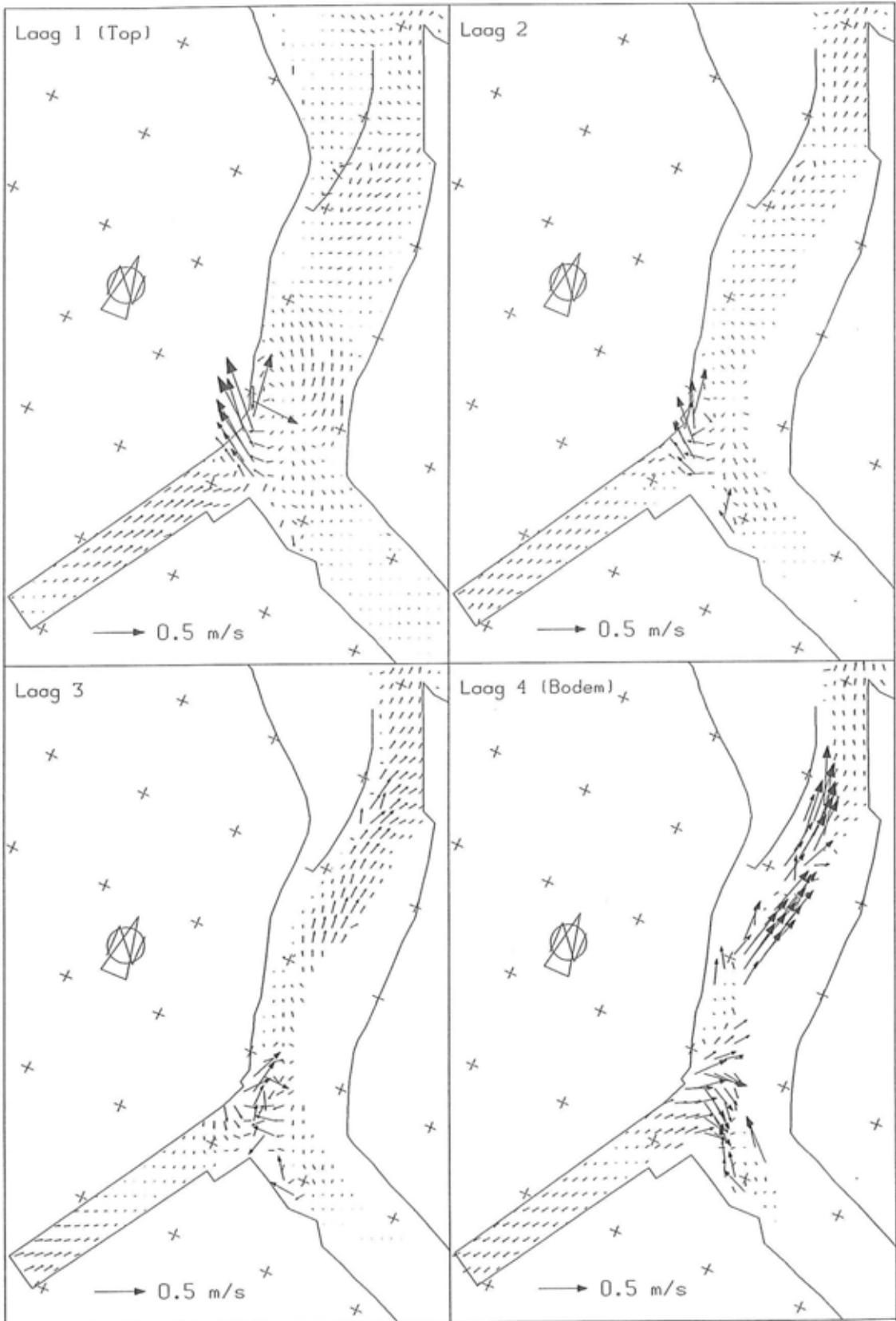
Figuur 5.52: HW + 3.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)



Figuur 5.53: HW + 4.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)

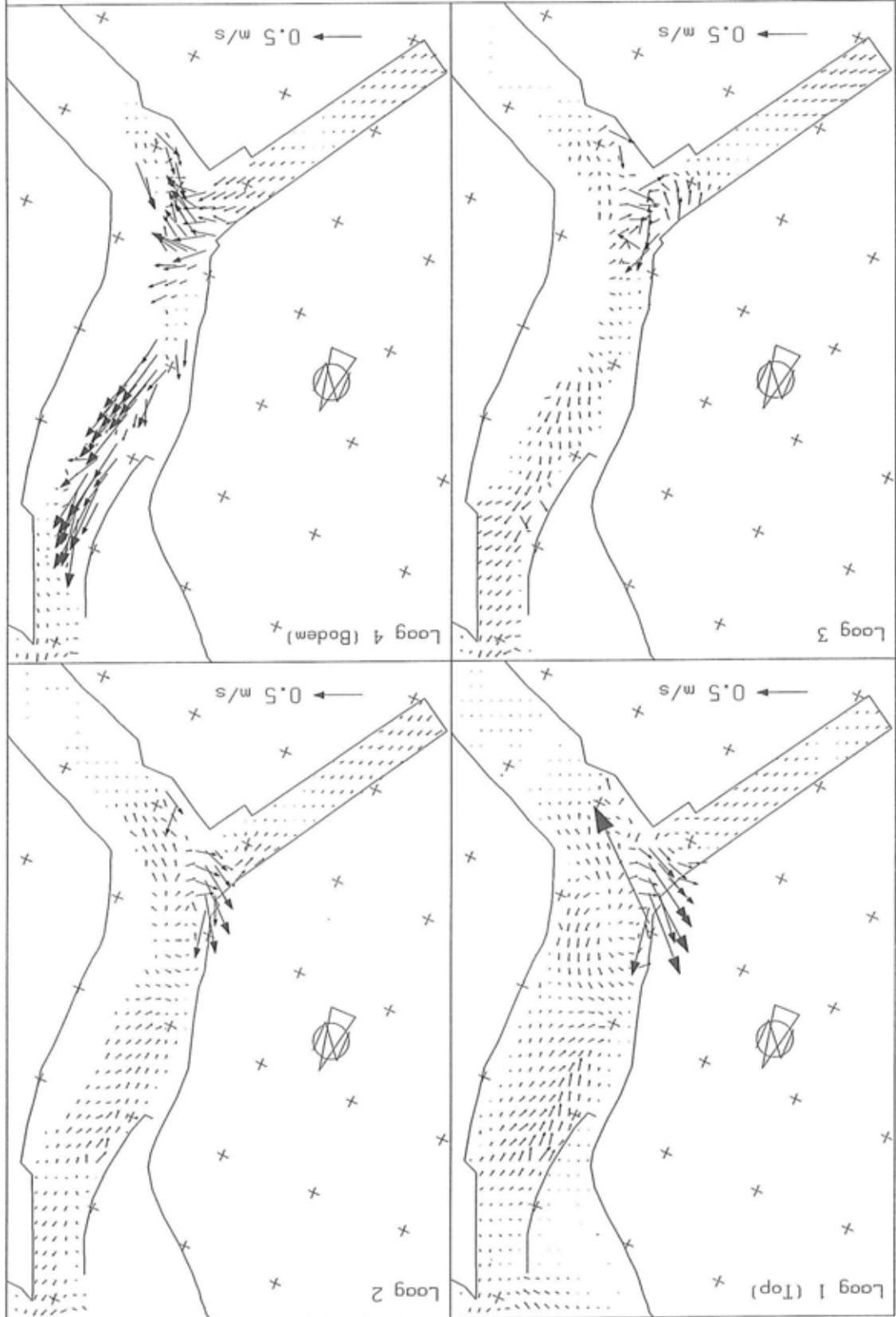


Figuur 5.54: HW + 5.0h

Vershil stroombeeld T01sp - HT (springtij, saliniteit)

Verschil stroombeeld T01sp - HT (sprongtij, soliniteit)

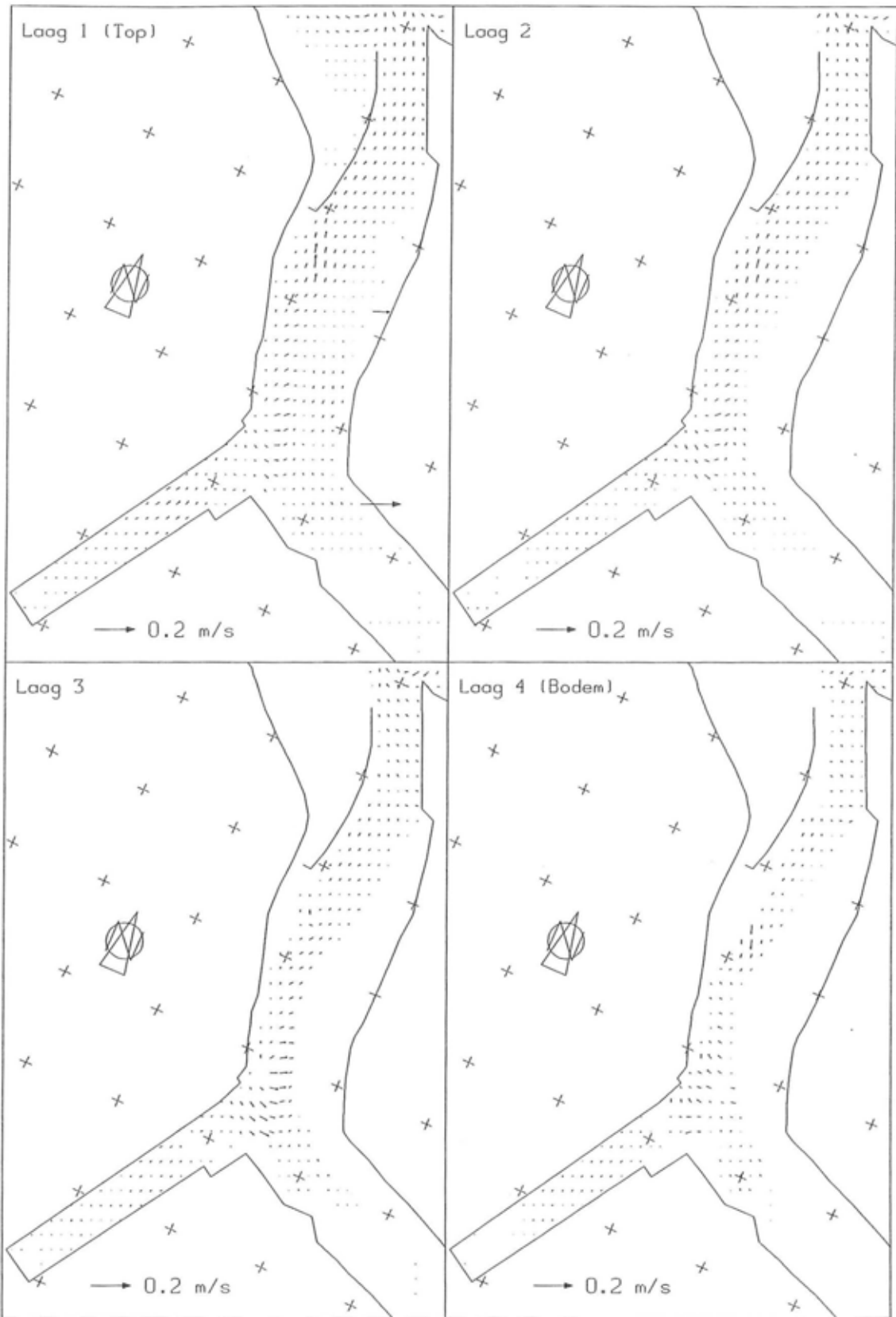
Figuur 5.55: HM + 6.0h



BIJLAGE 7

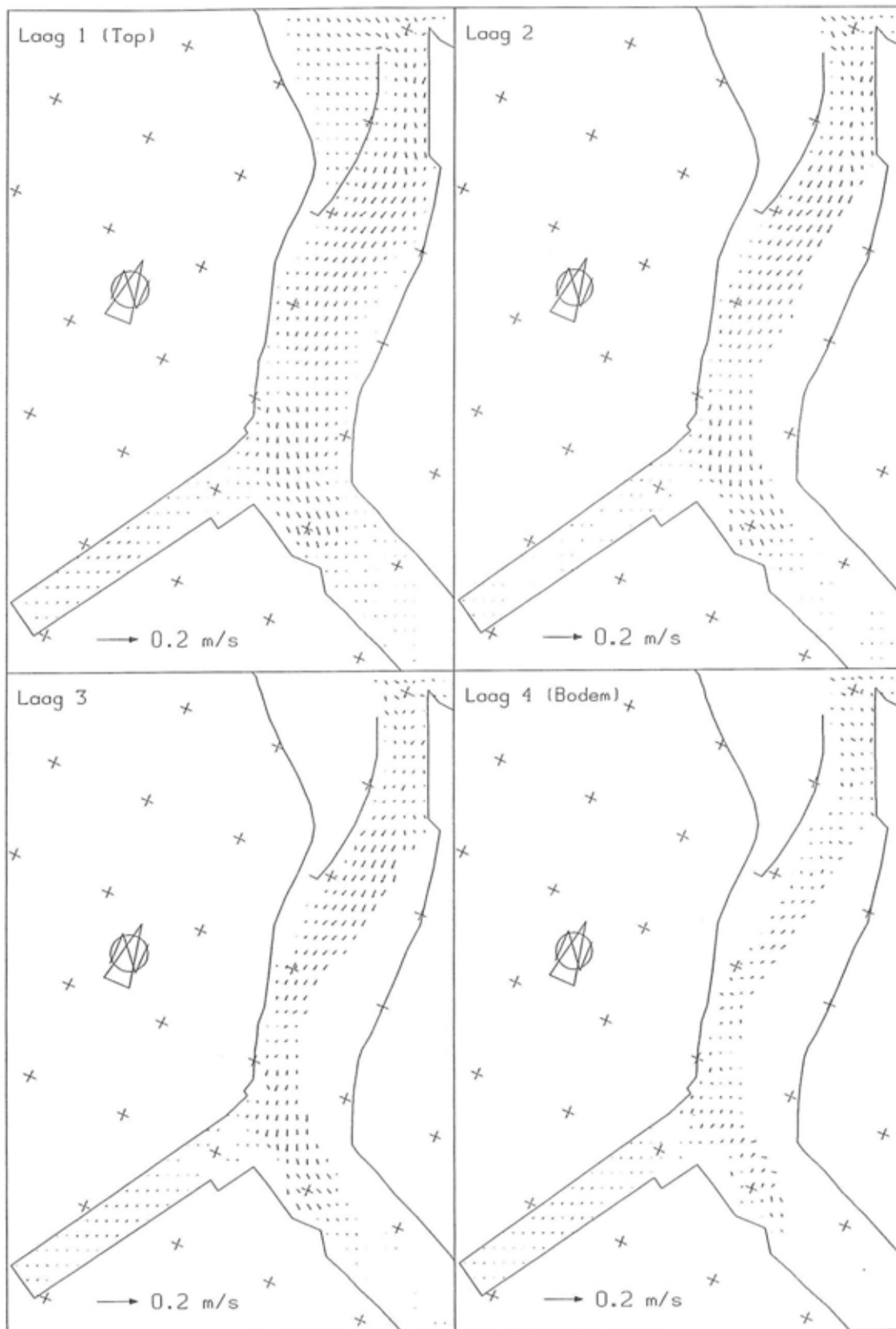
Vershil Snelheid T01-sp - T01-14.4

Figuren 5.56 - 5.67



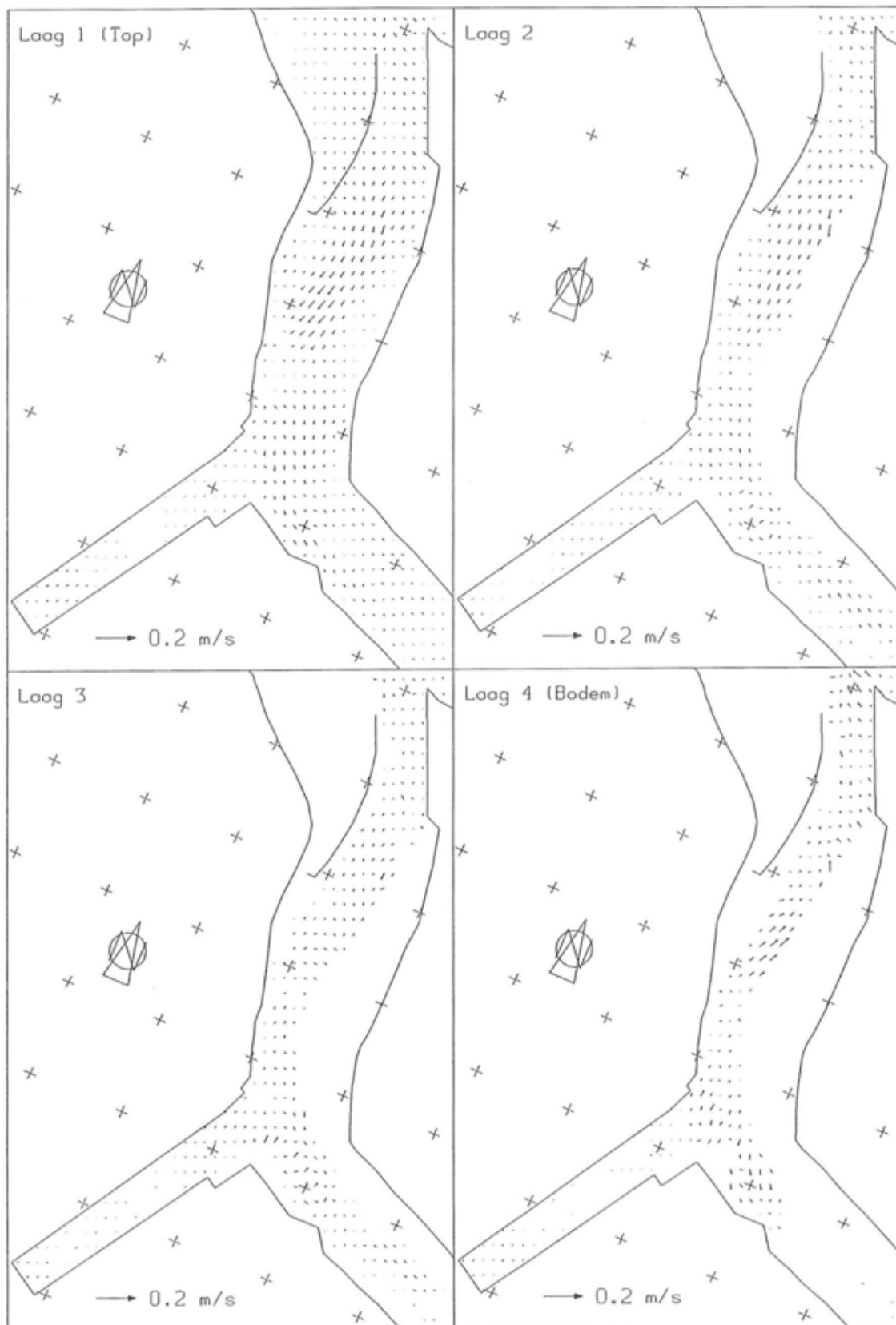
Figuur 5.56: HW - 5.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



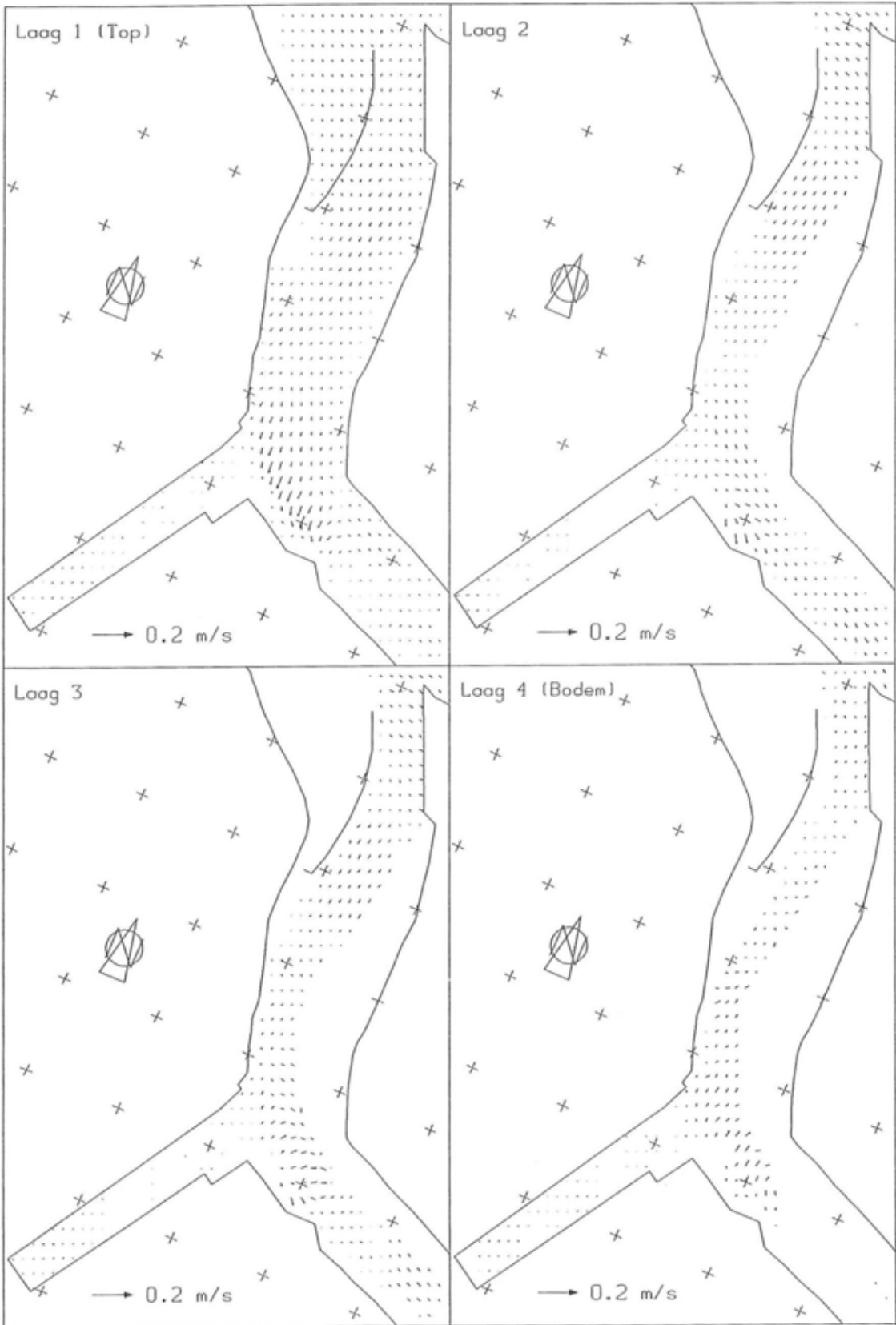
Figuur 5.57: HW - 4.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



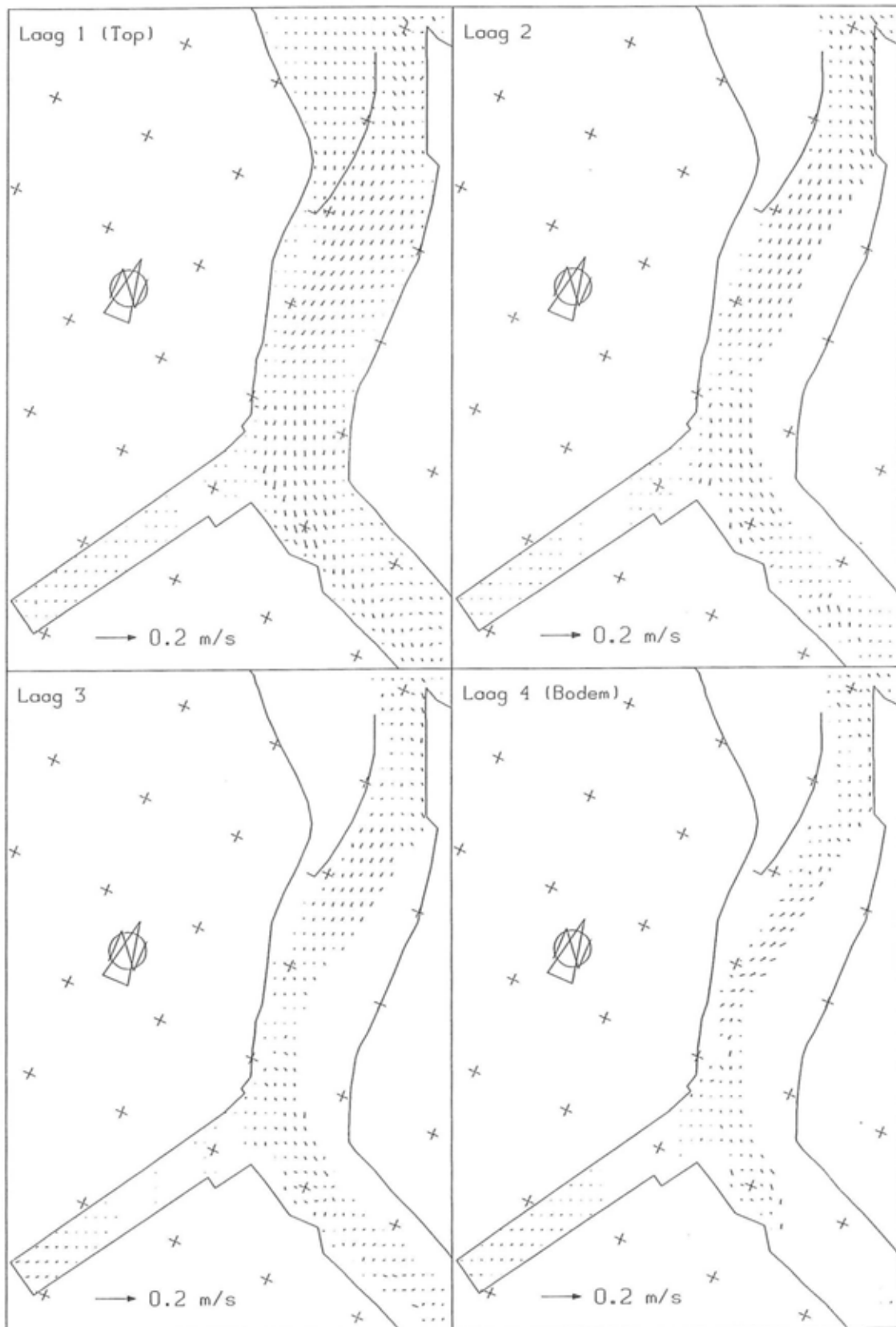
Figuur 5.58: HW - 3.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



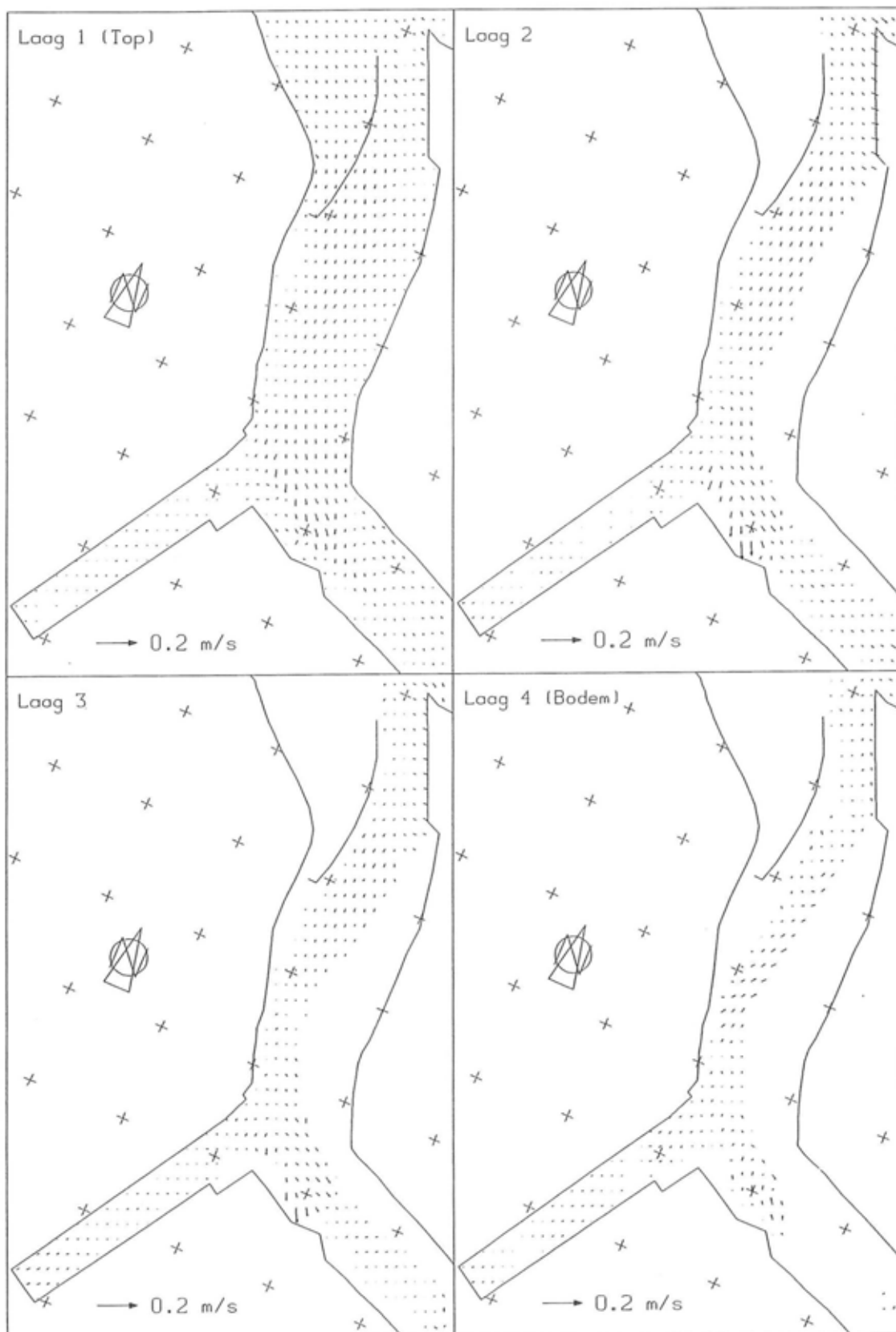
Figuur 5.59: HW - 2.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



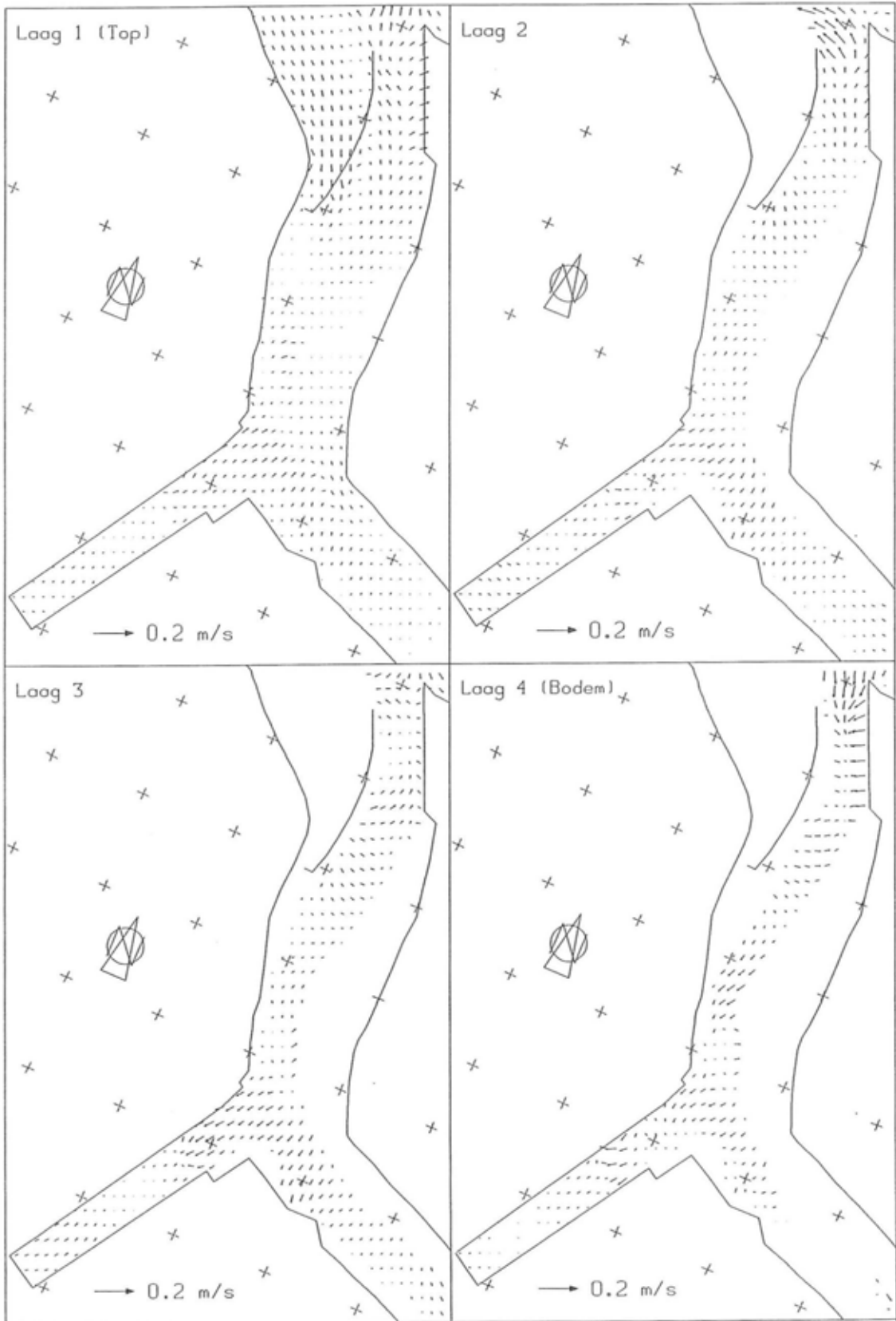
Figuur 5.60: HW - 1.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



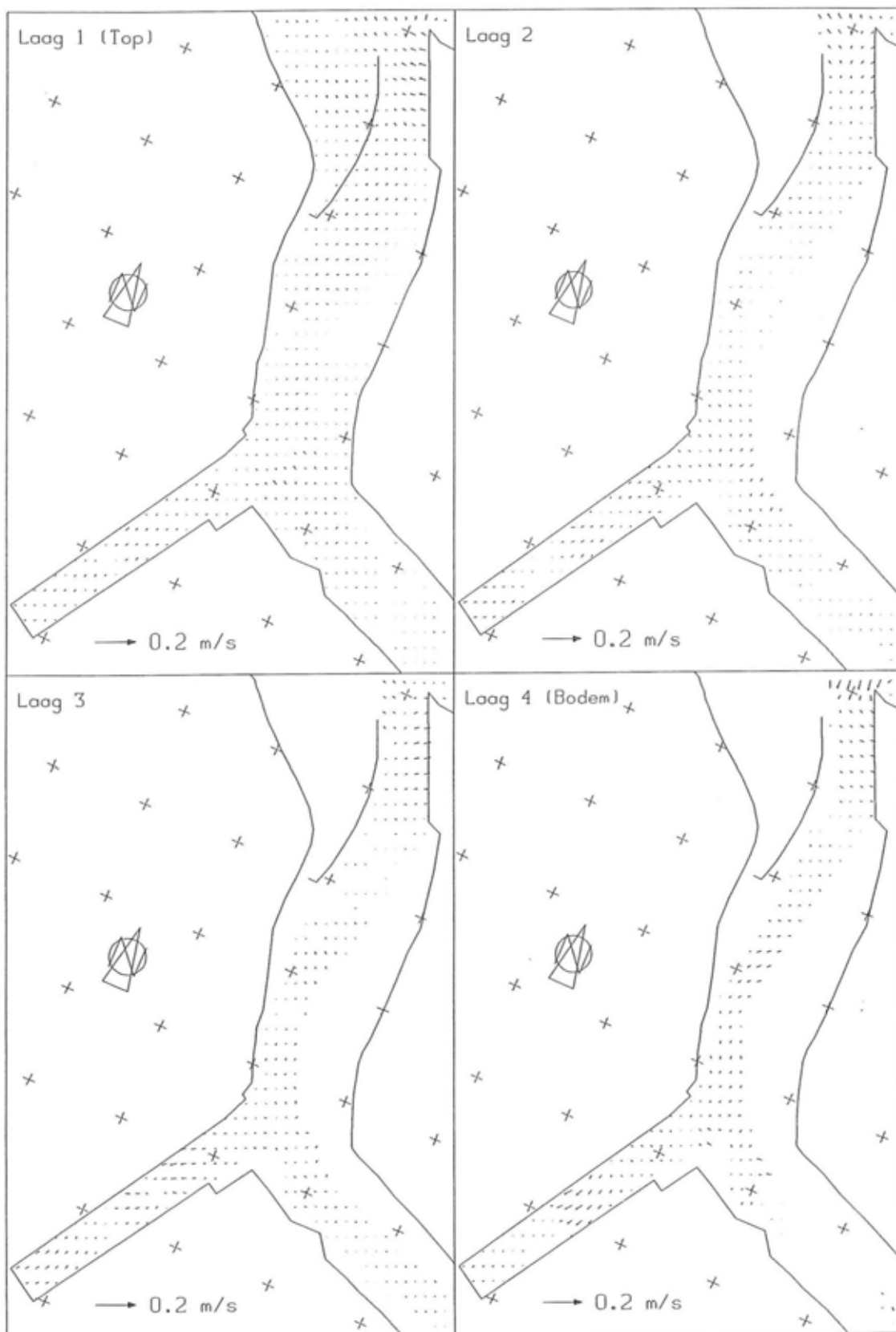
Figuur 5.61: HW

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



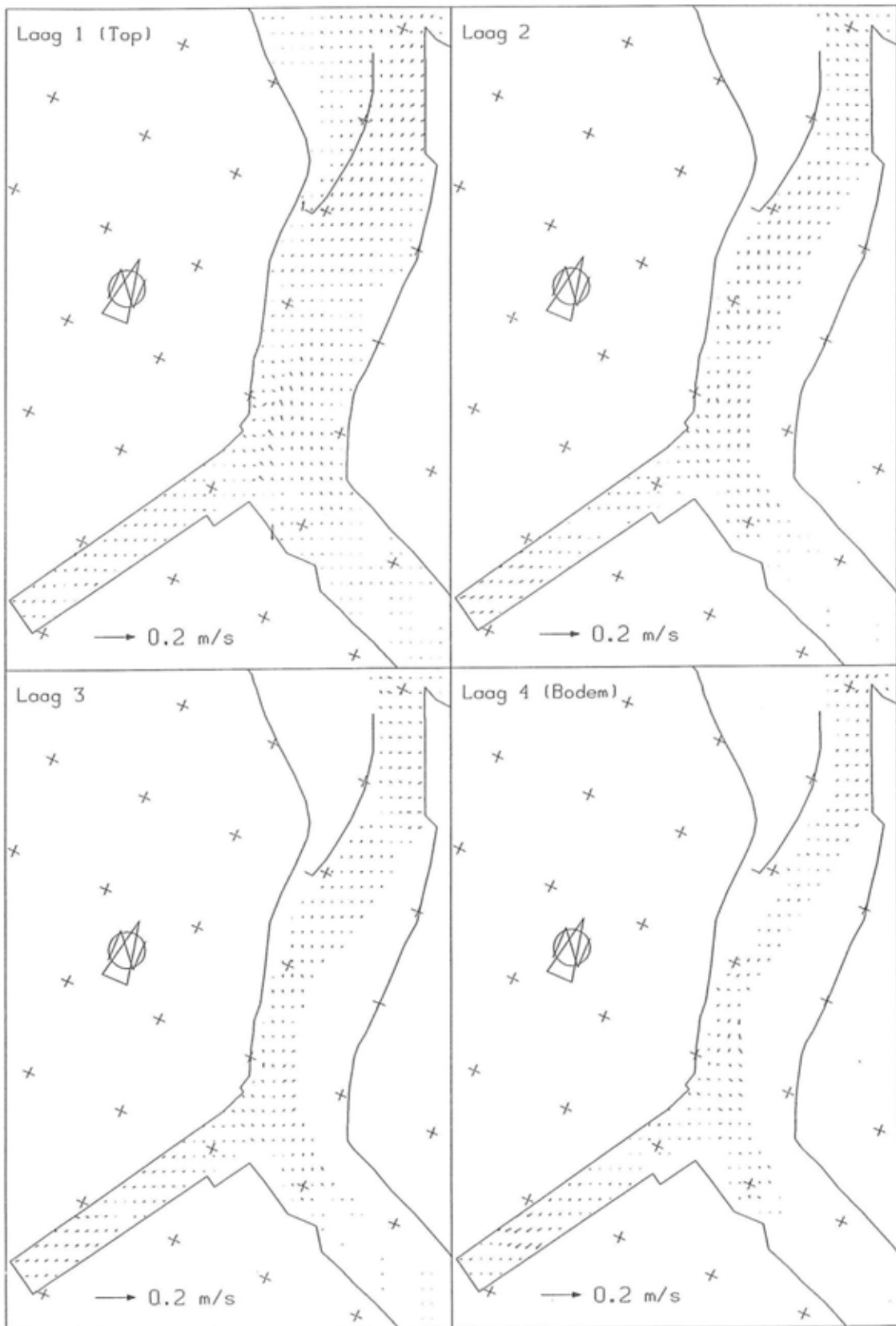
Figuur 5.62: HW + 1.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



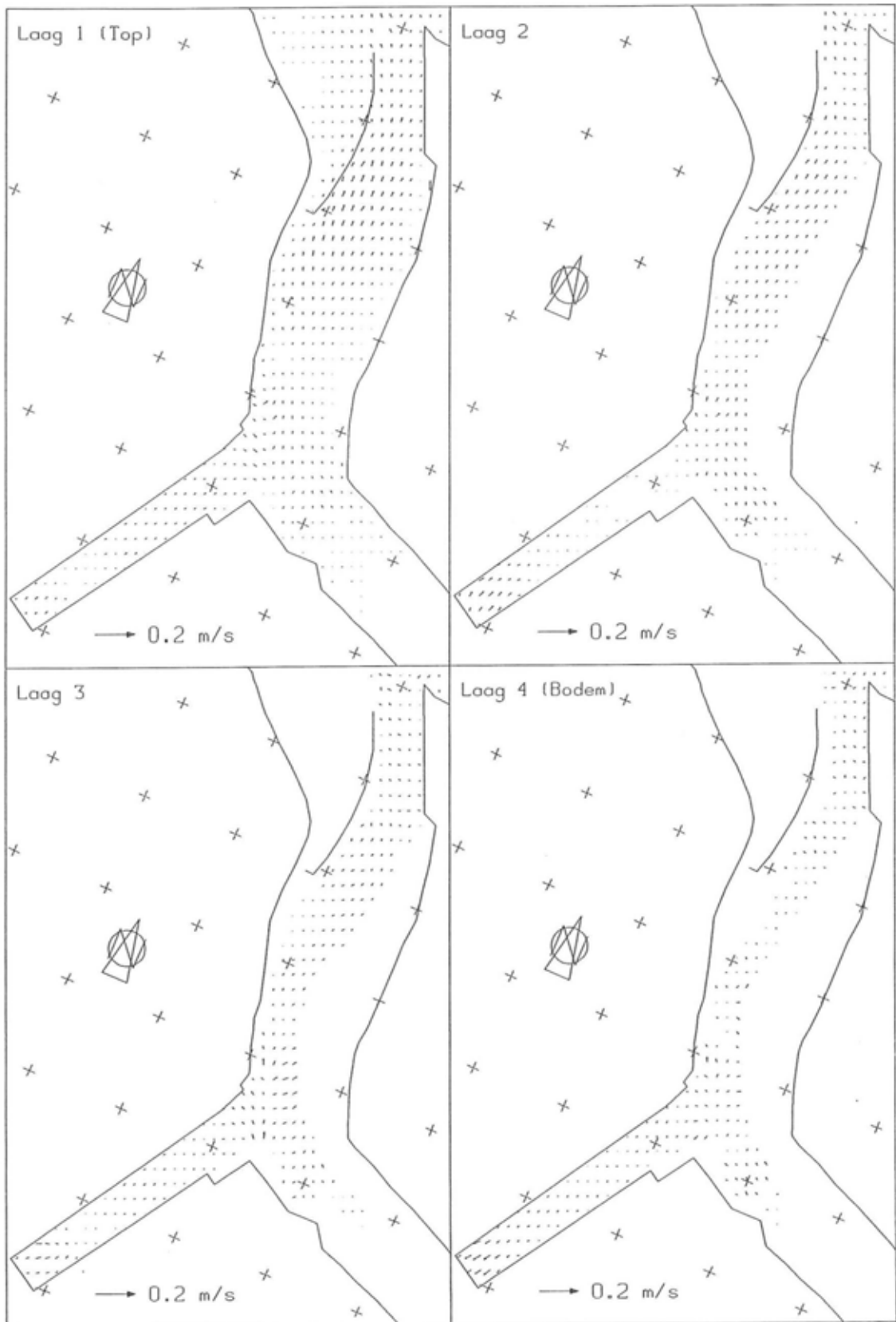
Figuur 5.63: HW + 2.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



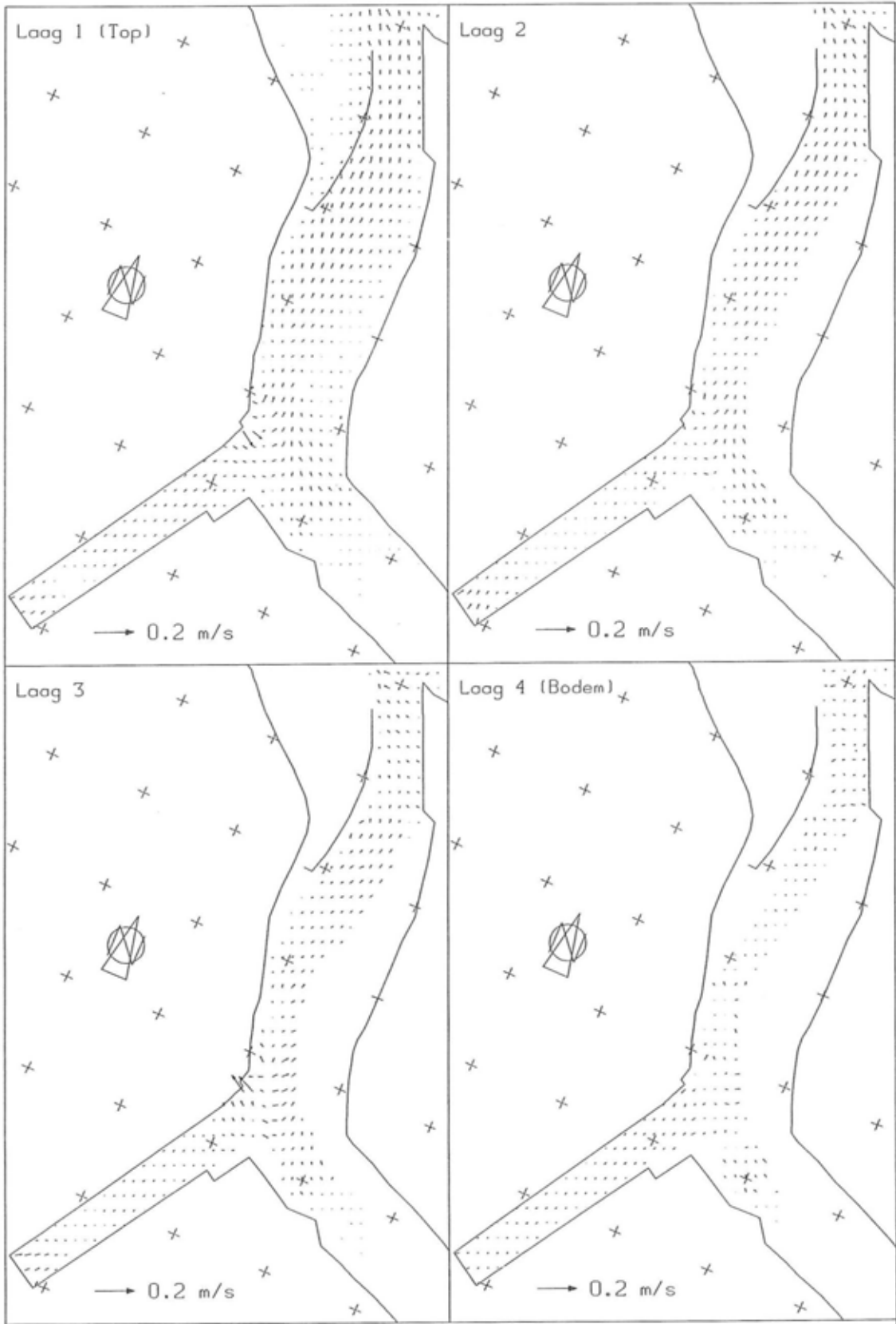
Figuur 5.64: HW + 3.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



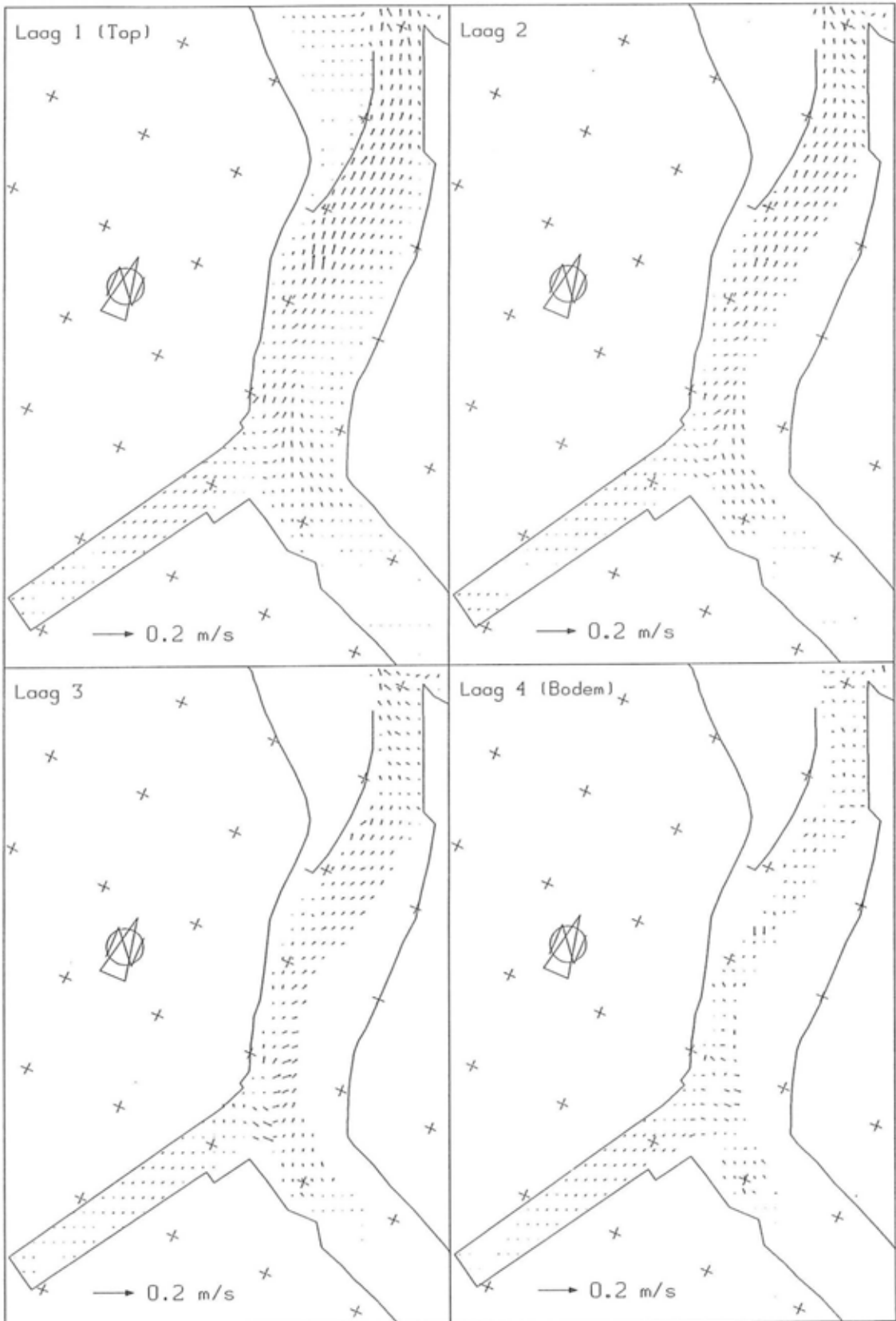
Figuur 5.65: HW + 4.0h

Vershil stroombeeld TO1sp - HT (springtij, saliniteit)



Figuur 5.66: HW + 5.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)



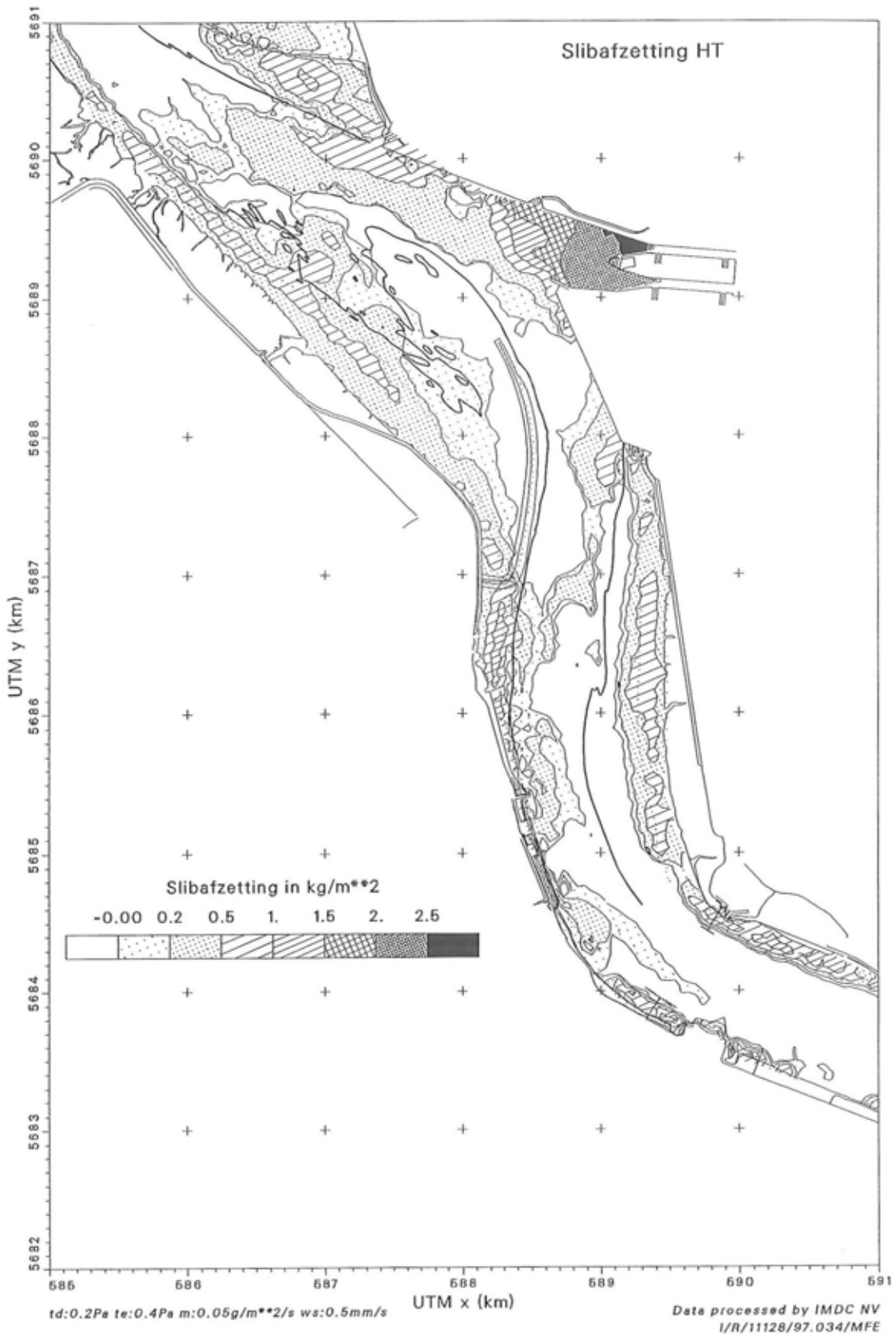
Figuur 5.67: HW + 6.0h

Vershil stroombeeld T01sp - T01-14.4 (springtij, saliniteit)

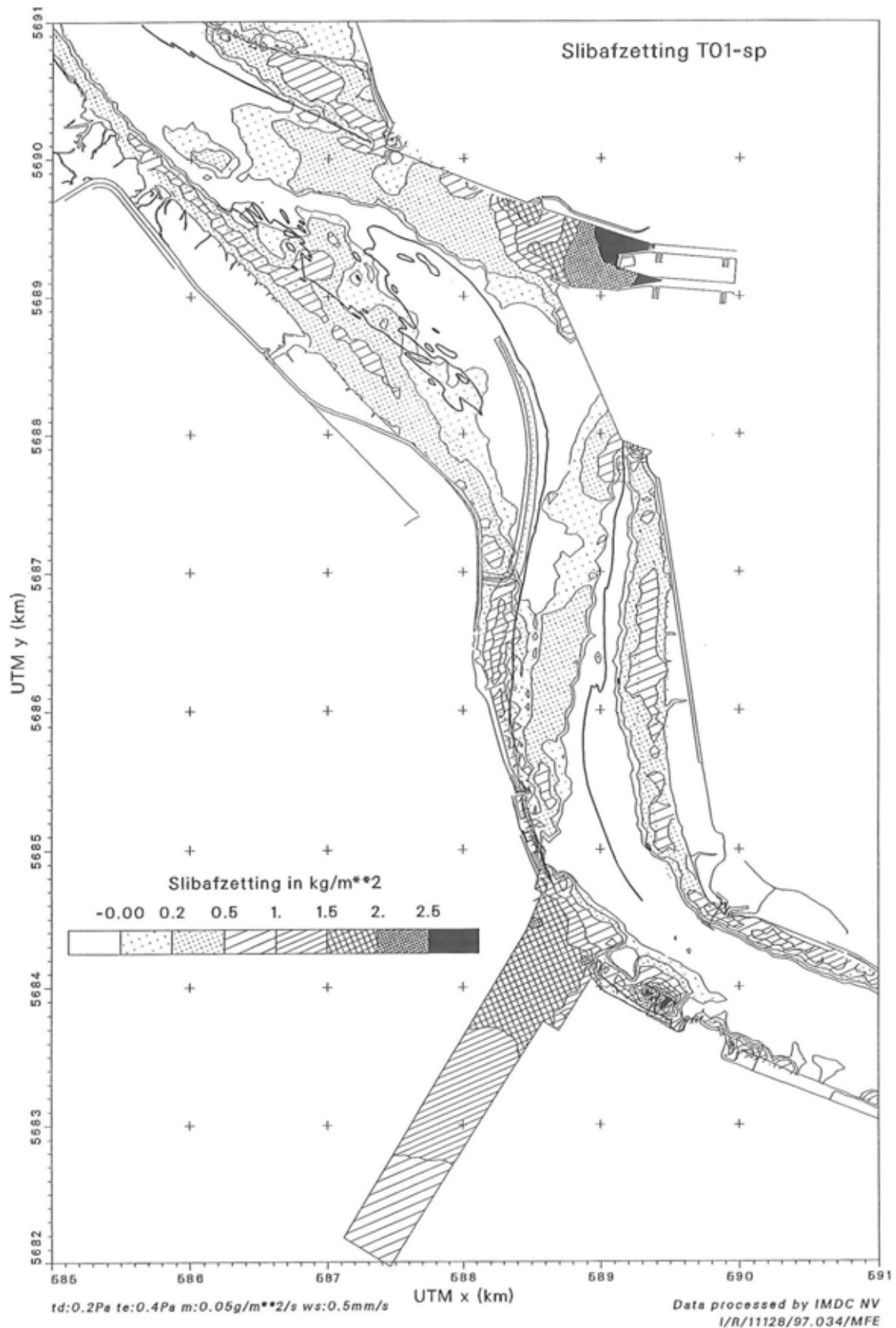
BIJLAGE 8

Slibtransportsimulaties

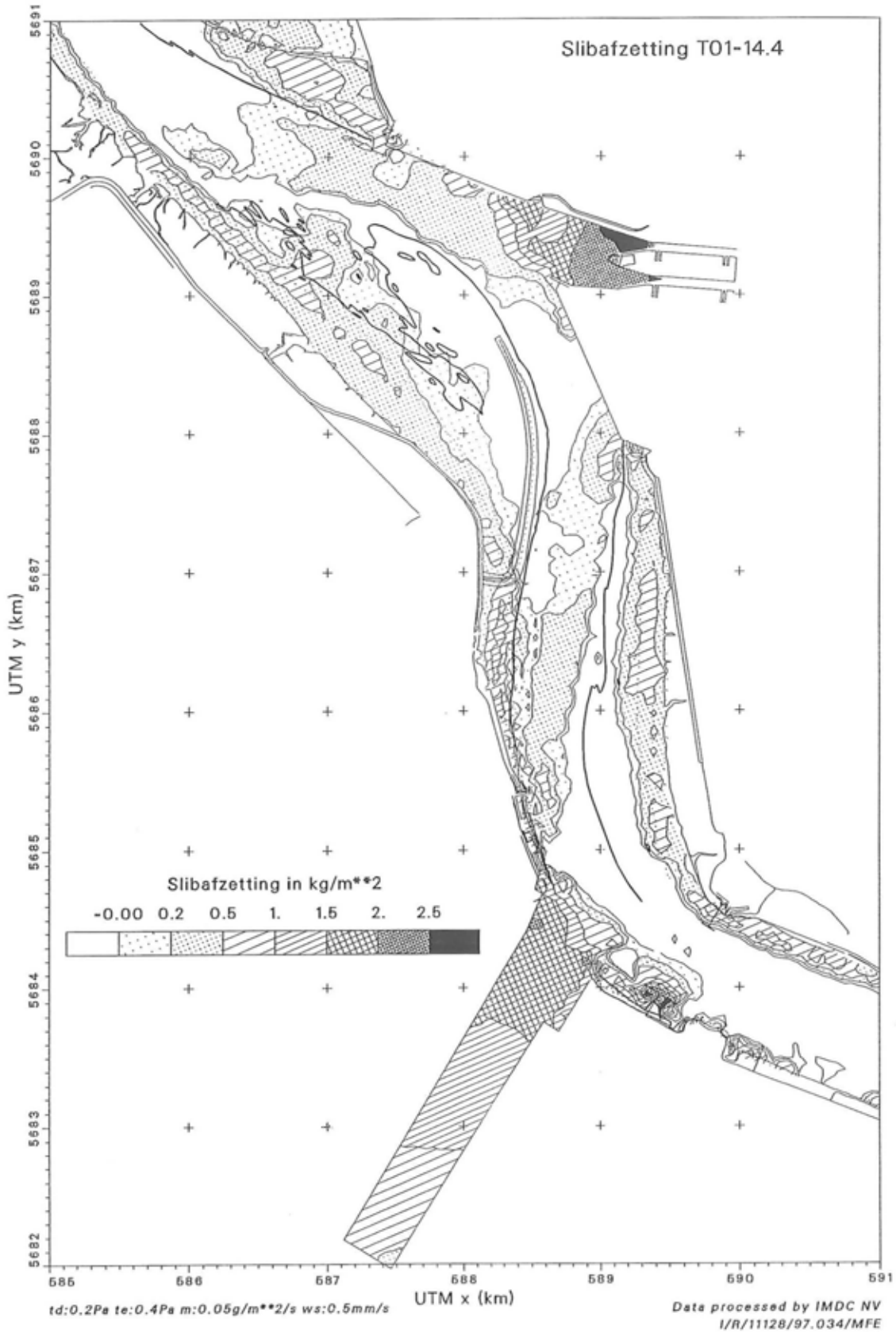
Figuren 6.1 - 6.6



Figuur 6.1: Slibafzetting voor de huidige toestand (HT).



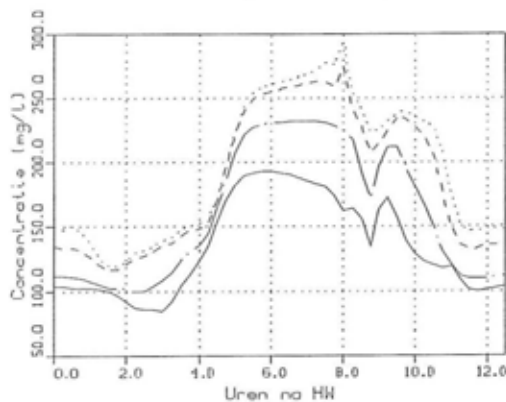
Figuur 6.2: Slibafzetting voor de toestand T01-sp (verdieping tot -13.74 m TAW).



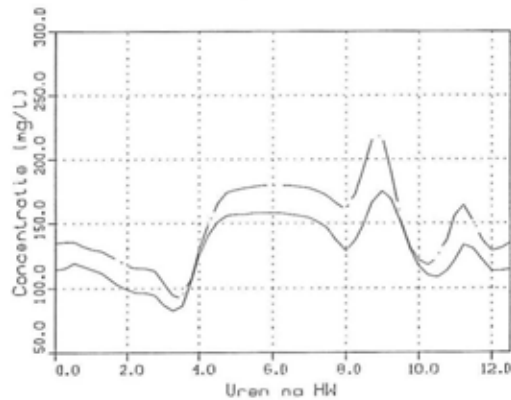
Figuur 6.3: Slibafzetting voor de toestand T01-14.4 (verdieping tot -14.44 m TAW).

Figuur 6.4: Huidige Toestand HT
Slibconcentratie op de Drempel van Frederik

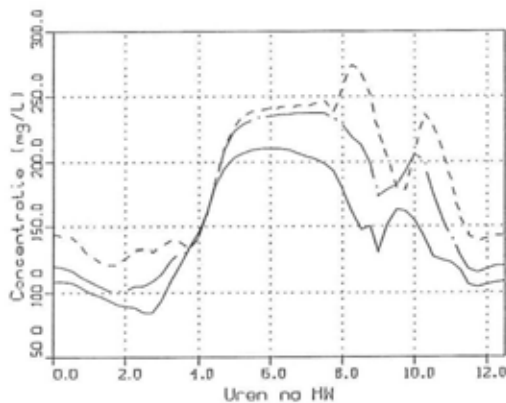
Punt 1 (4933), 12.09 m TAW



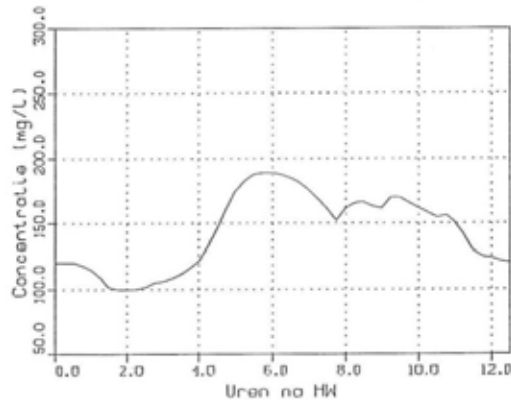
Punt 2 (5304), 8.60 m TAW



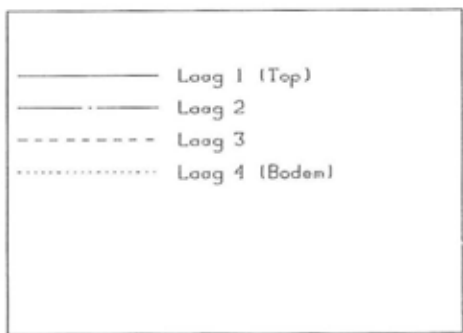
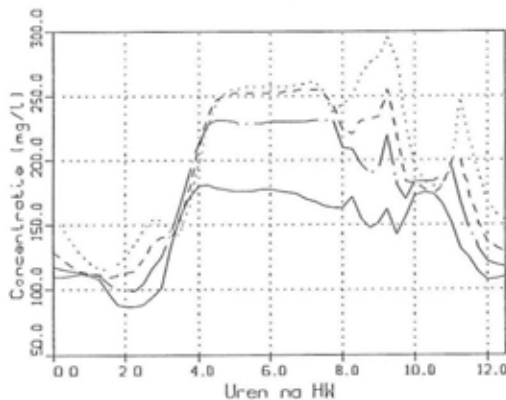
Punt 3 (5312), 11.23 m TAW



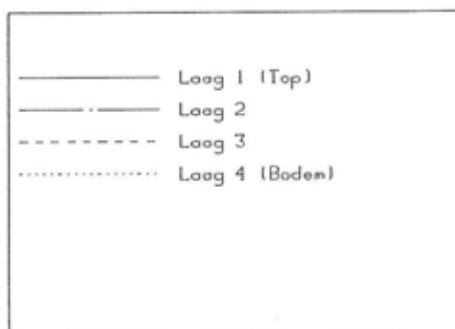
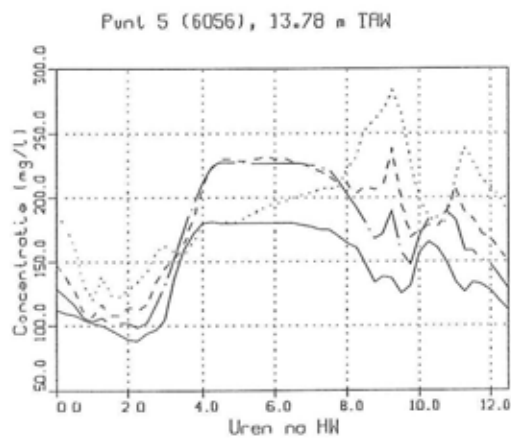
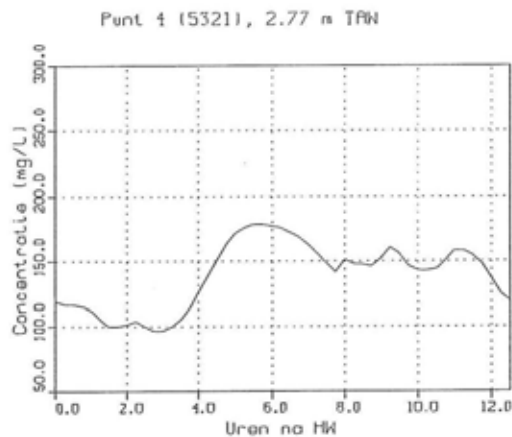
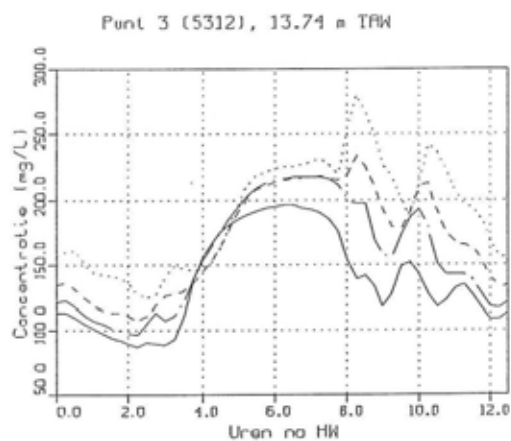
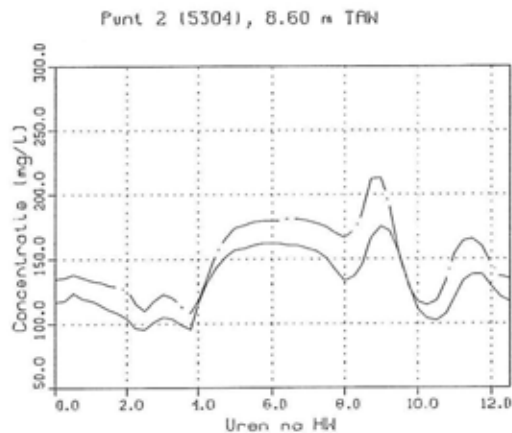
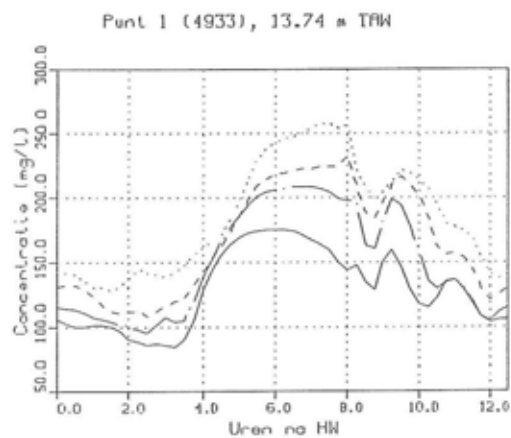
Punt 4 (5321), 2.77 m TAW



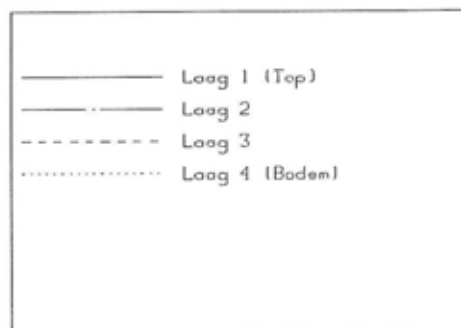
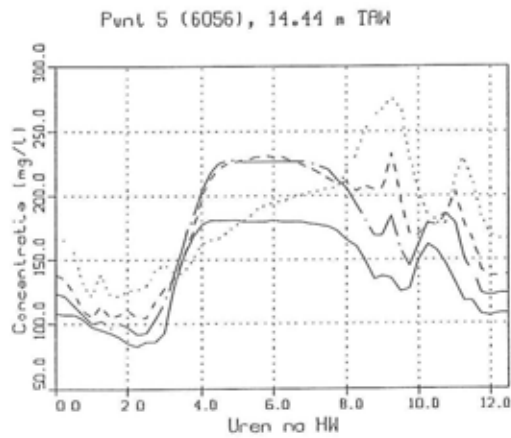
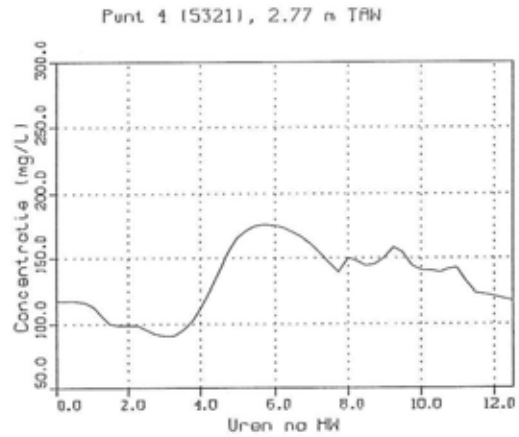
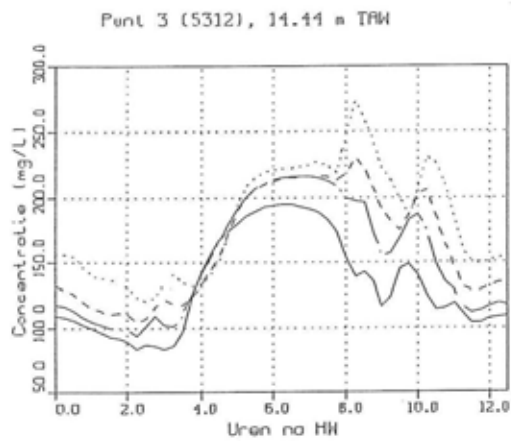
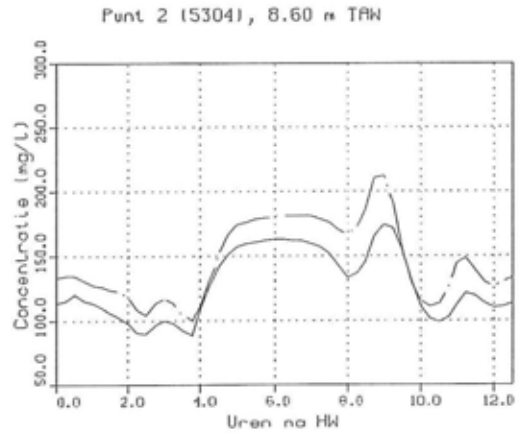
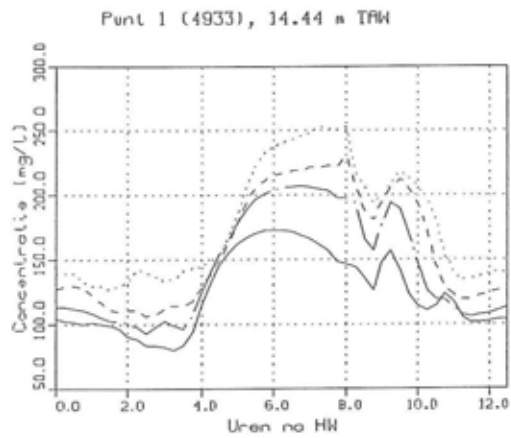
Punt 5 (6056), 13.78 m TAW



Figuur 6.5: Toestand T01-sp
Slibconcentratie op de Drempel van Frederik



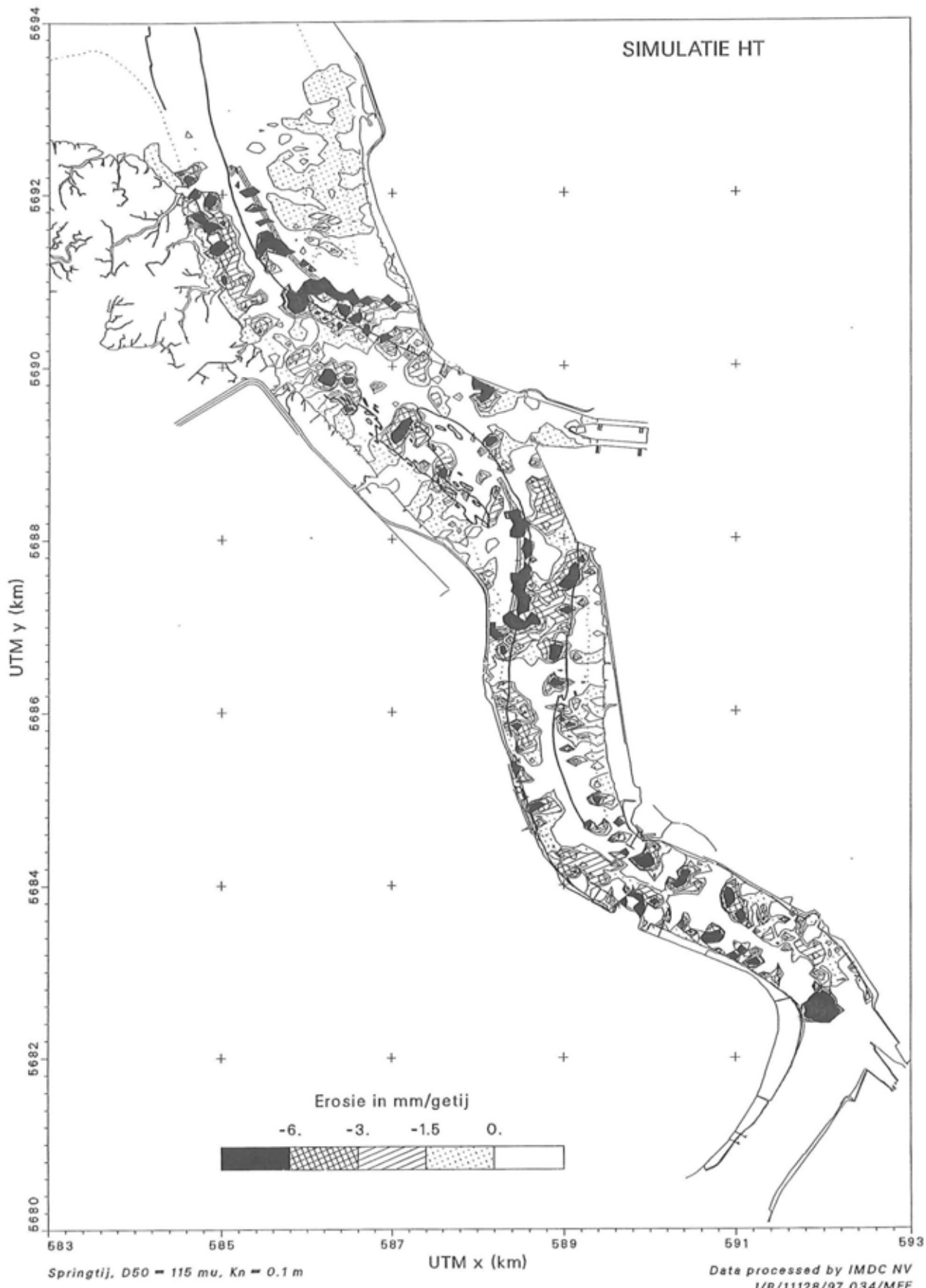
Figuur 6.6: Toestand T01-14.4
Slibconcentratie op de Drempel van Frederik



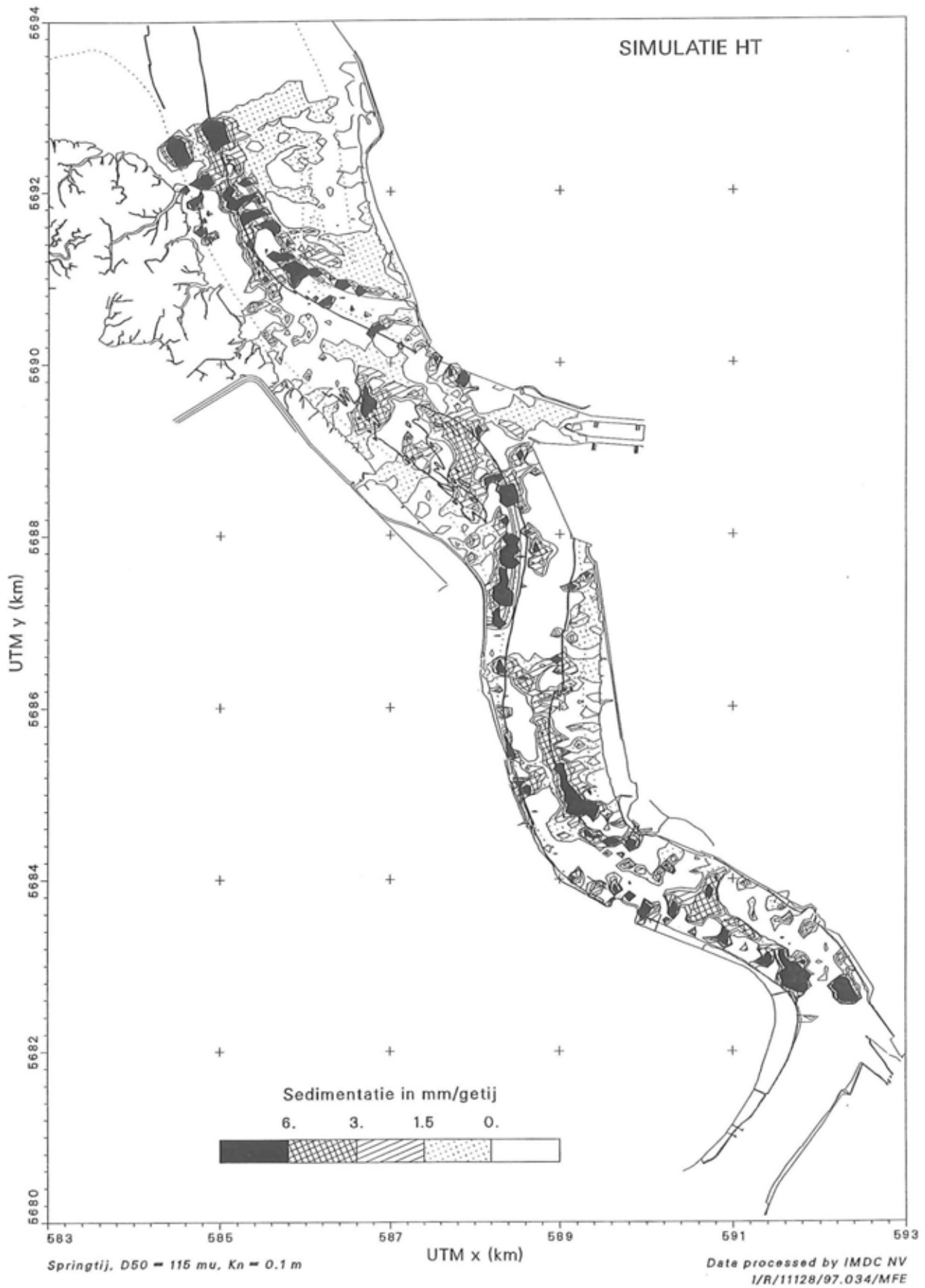
BIJLAGE 9

Zandtransportsimulaties

Figuren 7.1 - 7.19



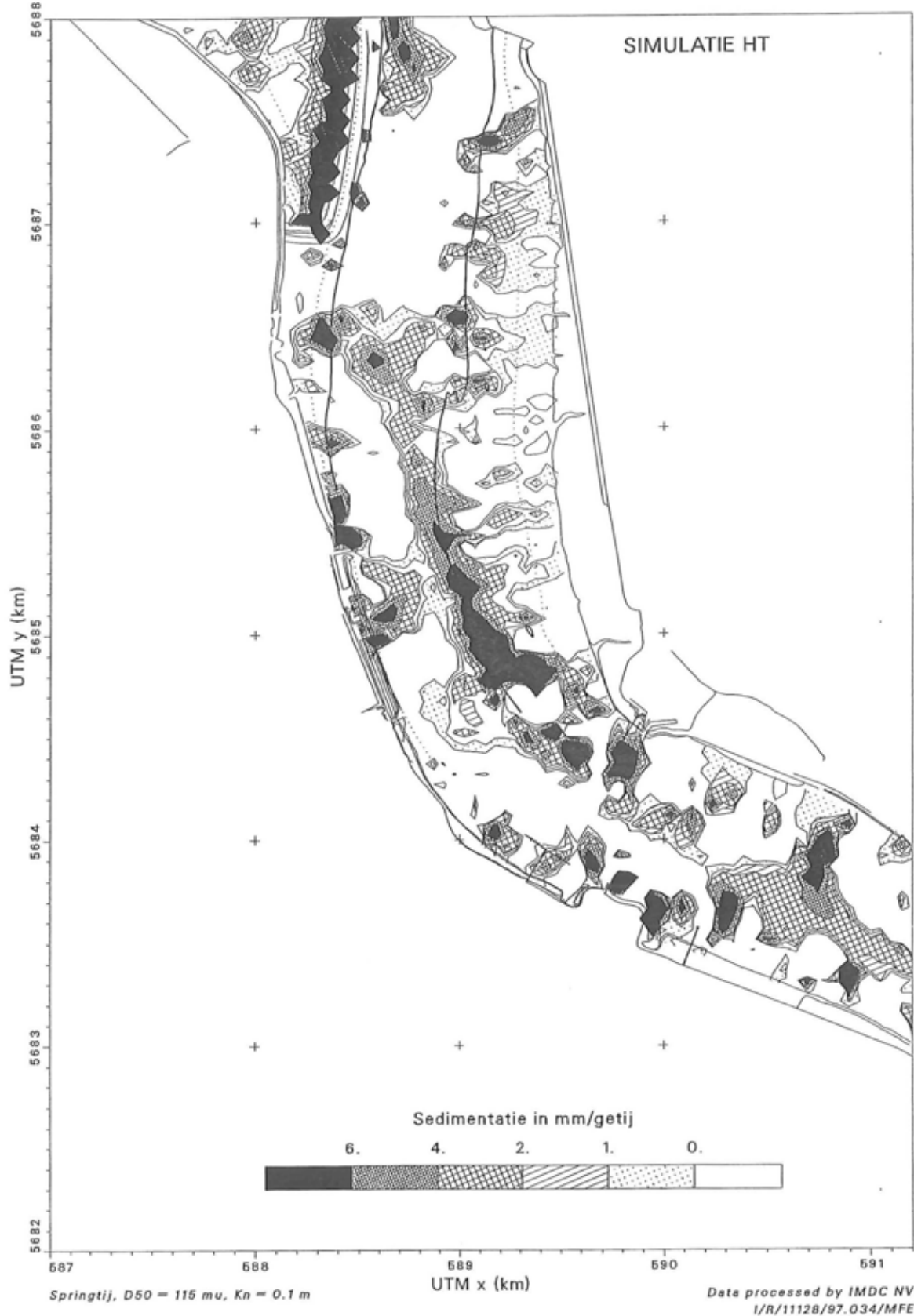
Figuur 7.1: Zandtransportsimulatie voor de Huidige Toestand: Erosie van zand in mm/getij



Figuur 7.2: Zandtransportsimulatie voor de Huidige Toestand: Sedimentatie van zand in mm/getij



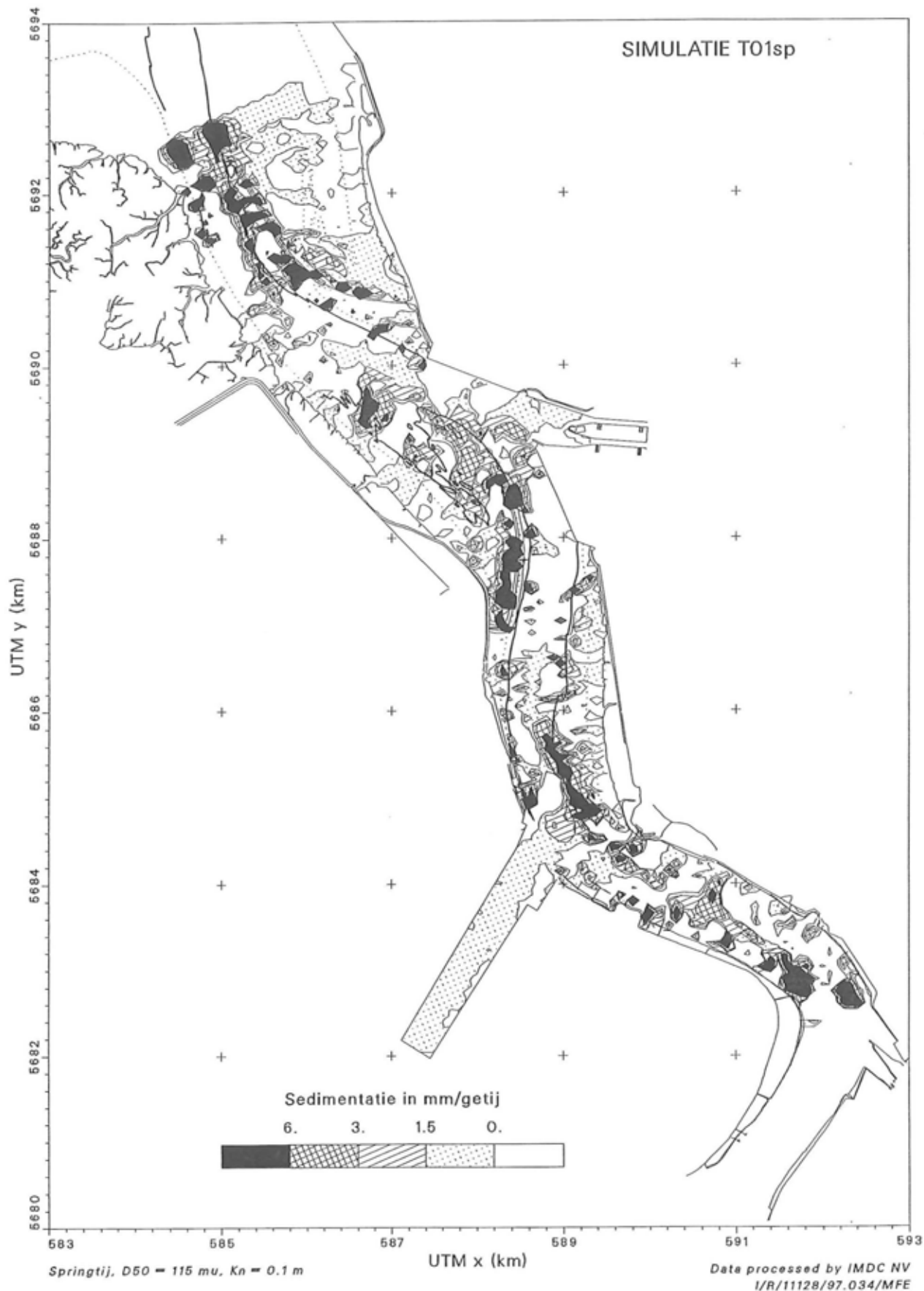
Figuur 7.3: Zandtransportsimulatie voor de Huidige Toestand ter hoogte van de Drempel van Frederik:
Erosie van zand in mm/getij



Figuur 7.4: Zandtransportsimulatie voor de Huidige Toestand ter hoogte van de Drempel van Frederik: Sedimentatie van zand in mm/getij.



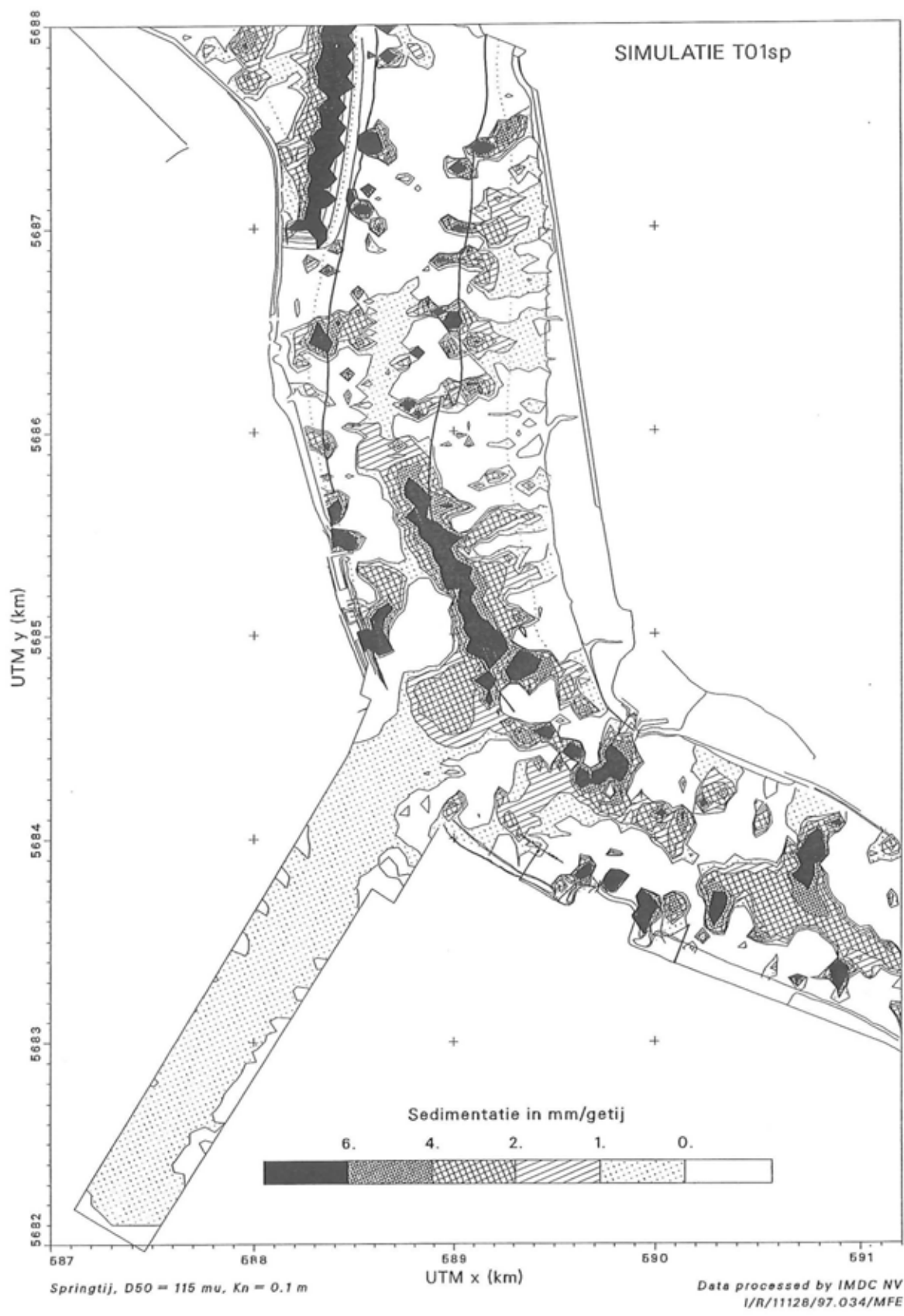
Figuur 7.5: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-sp: Erosie van zand in mm/getij



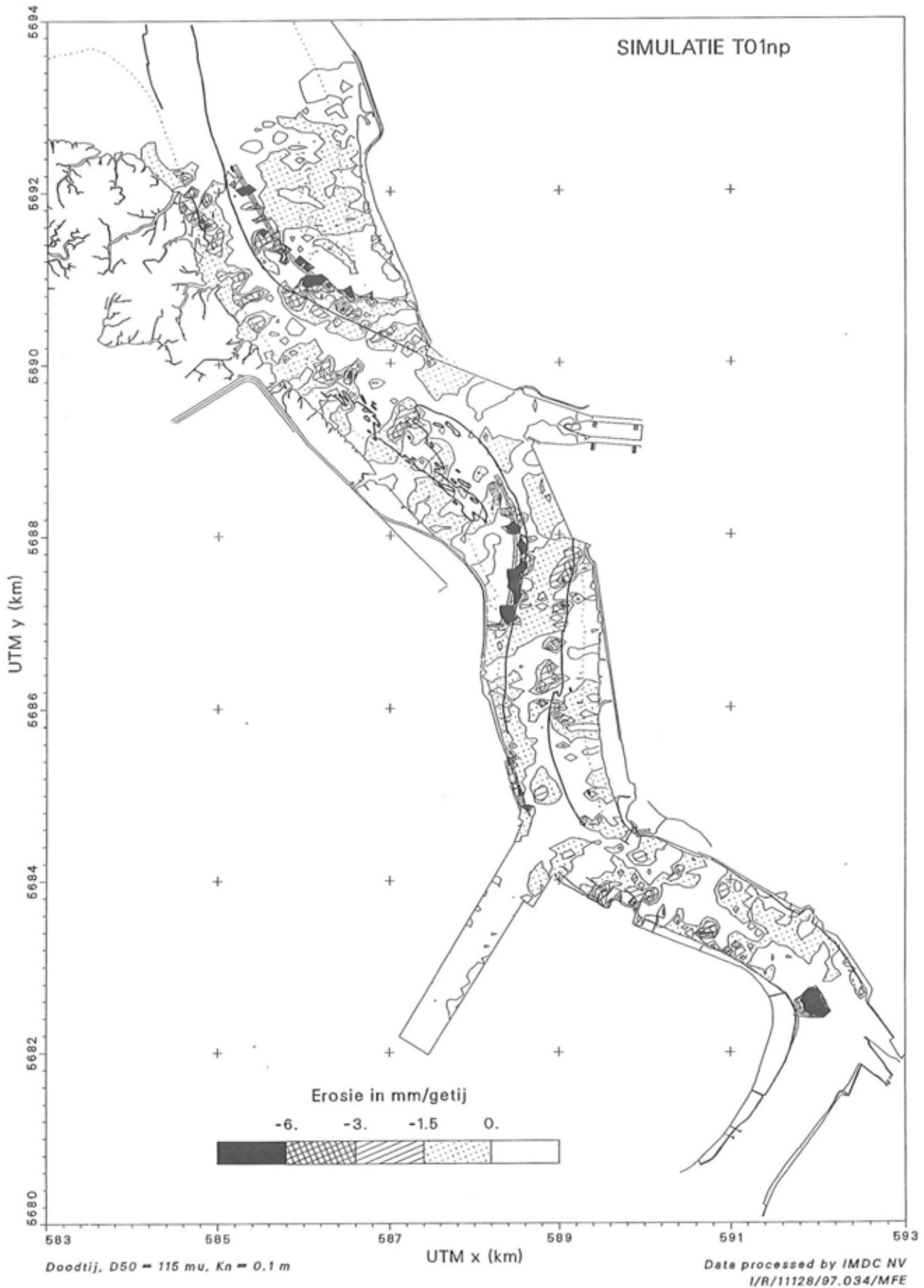
Figuur 7.6: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-sp: Sedimentatie van zand in mm/getij



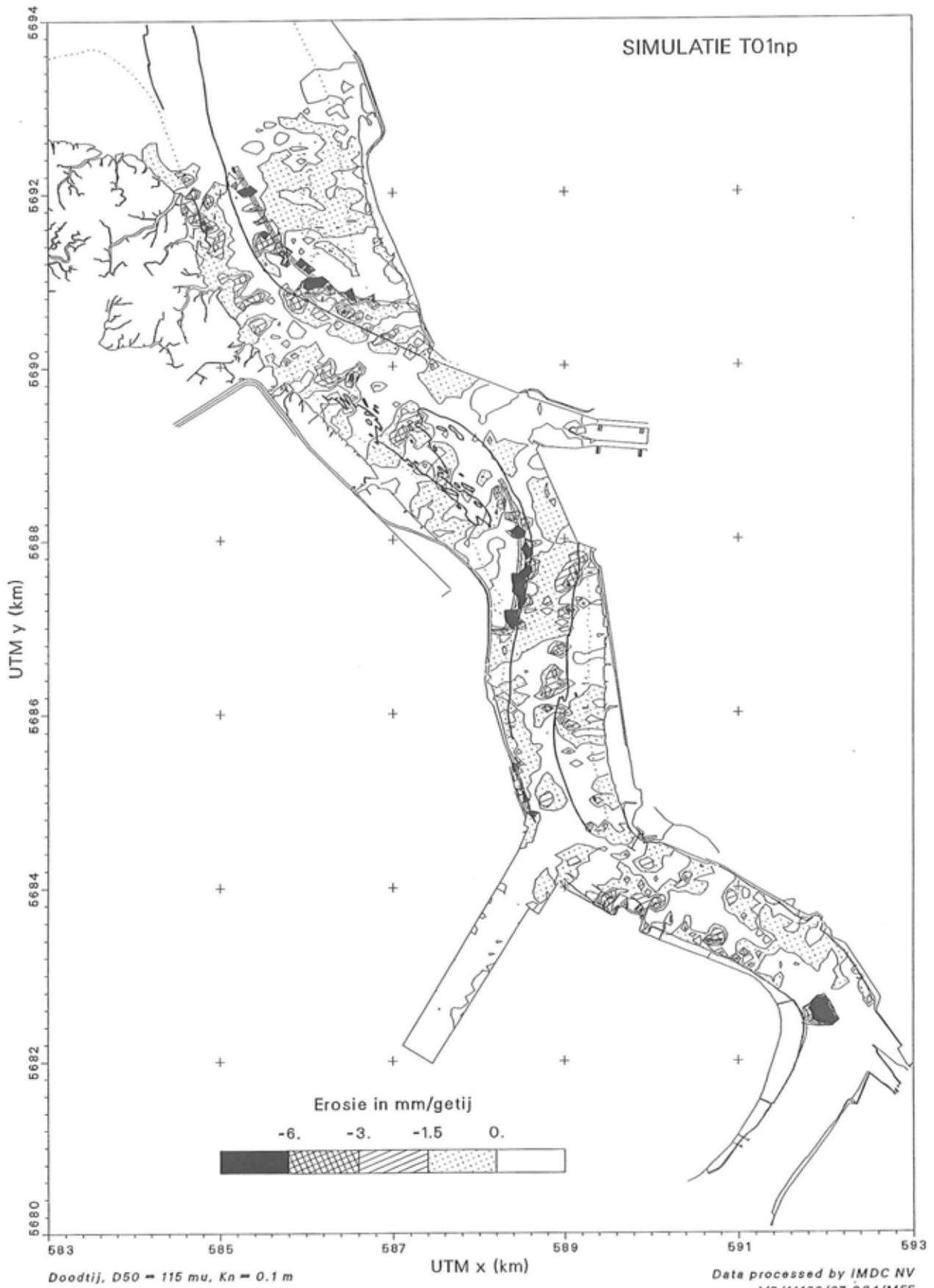
Figuur 7.7: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-sp ter hoogte van de Drempel van Frederik: Erosie van zand in mm/getij



Figuur 7.8: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-sp ter hoogte van de Drempel van Frederik: Sedimentatie van zand in mm/getij



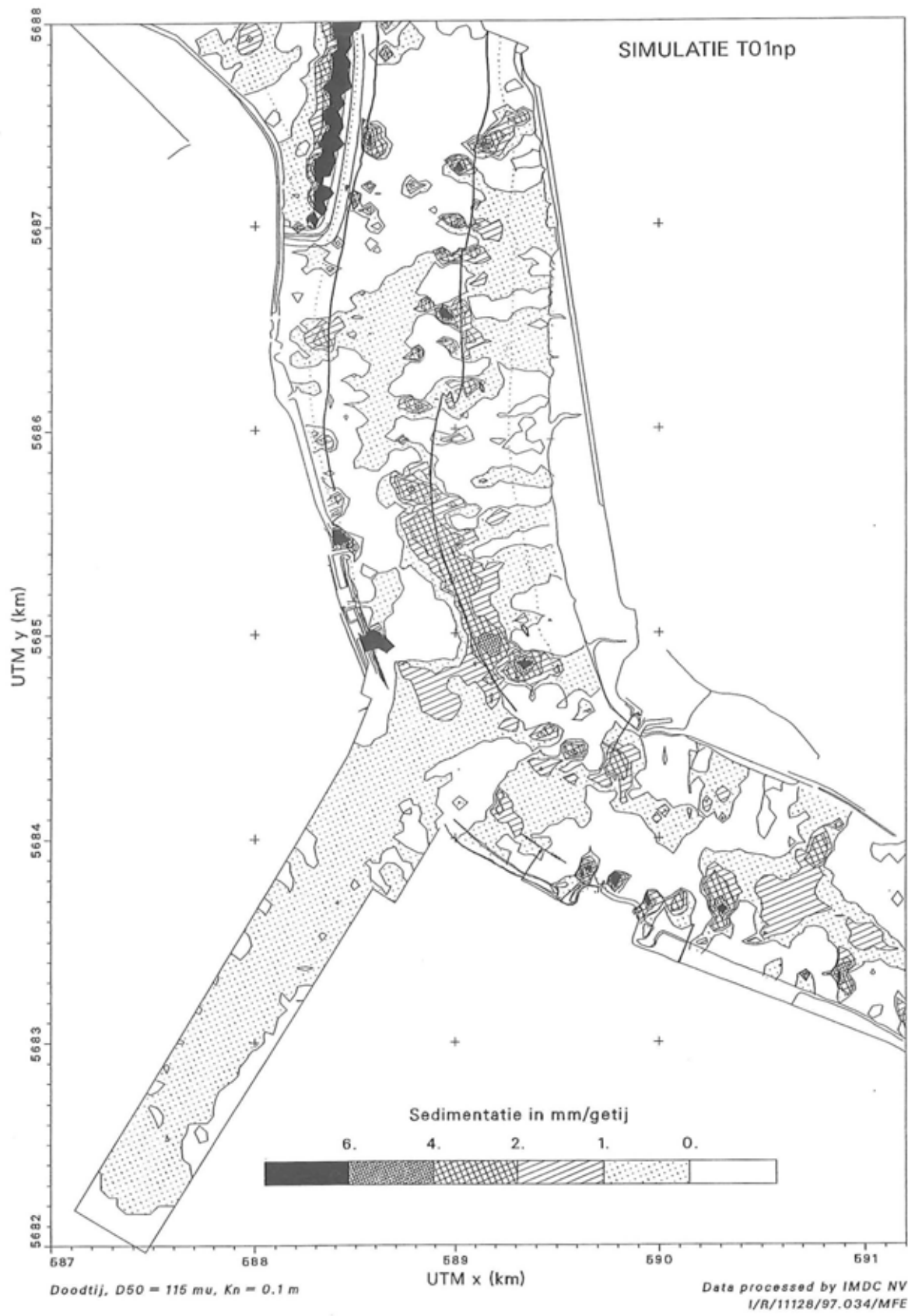
Figuur 7.9: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-np: Erosie van zand in mm/getij.



Figuur 7.10: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-np: Sedimentatie van zand in mm/getij



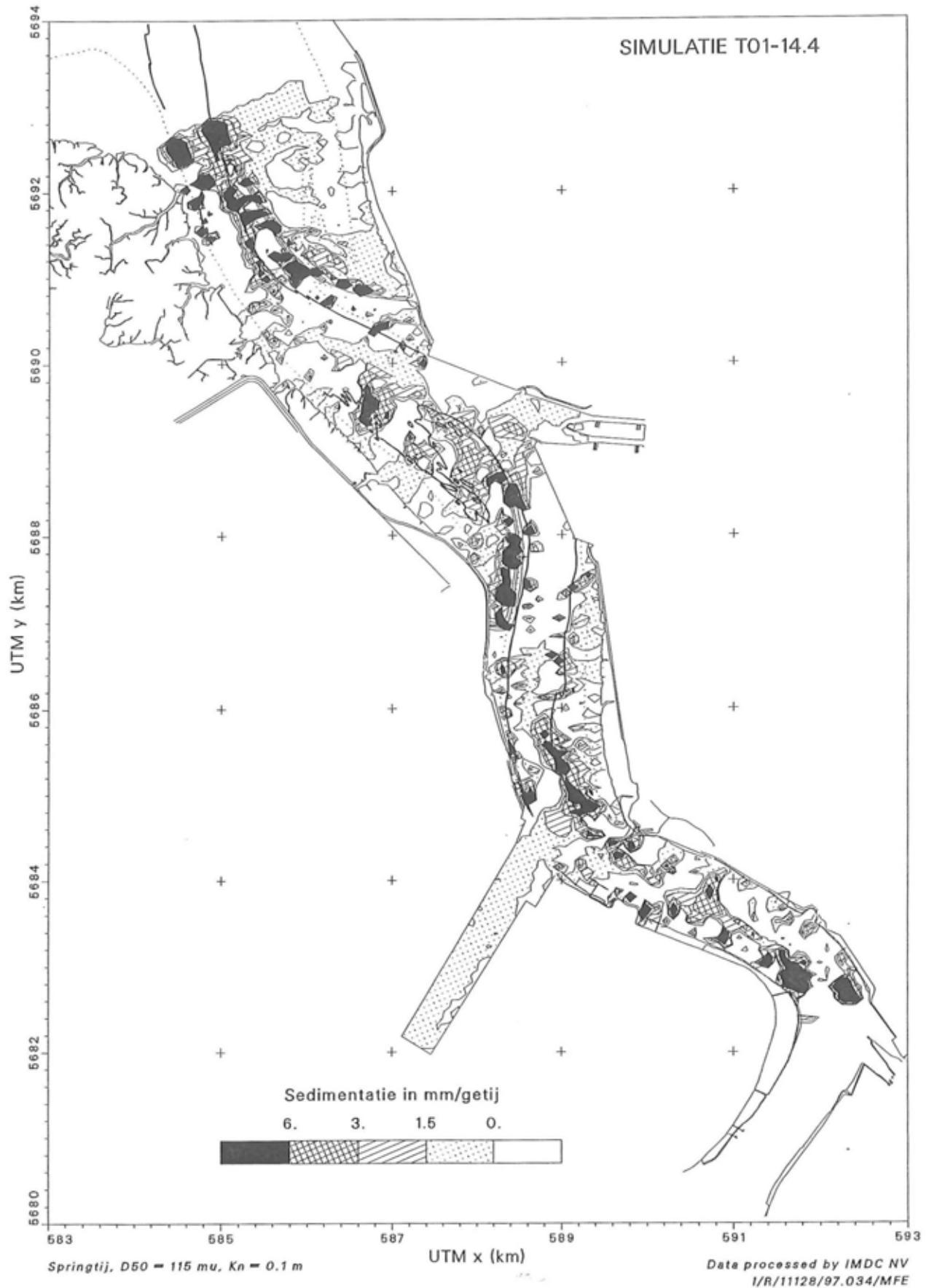
Figuur 7.11: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-np ter hoogte van de Drempel van Frederik: Erosie van zand in mm/getij.



Figuur 7.12: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-np ter hoogte van de Drempel van Frederik: Sedimentatie van zand in mm/getij



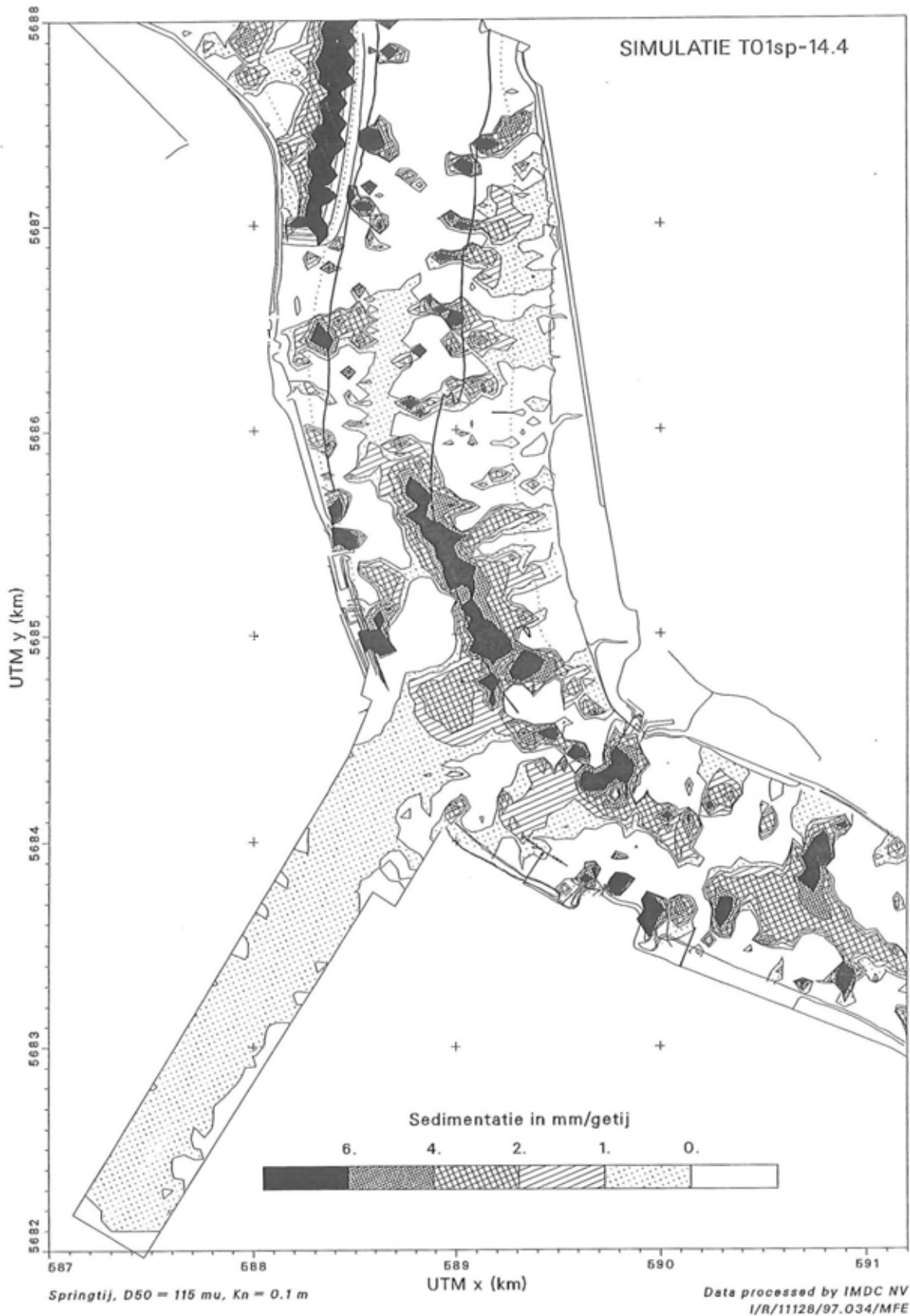
Figuur 7.13: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-14.4: Erosie van zand in mm/getij



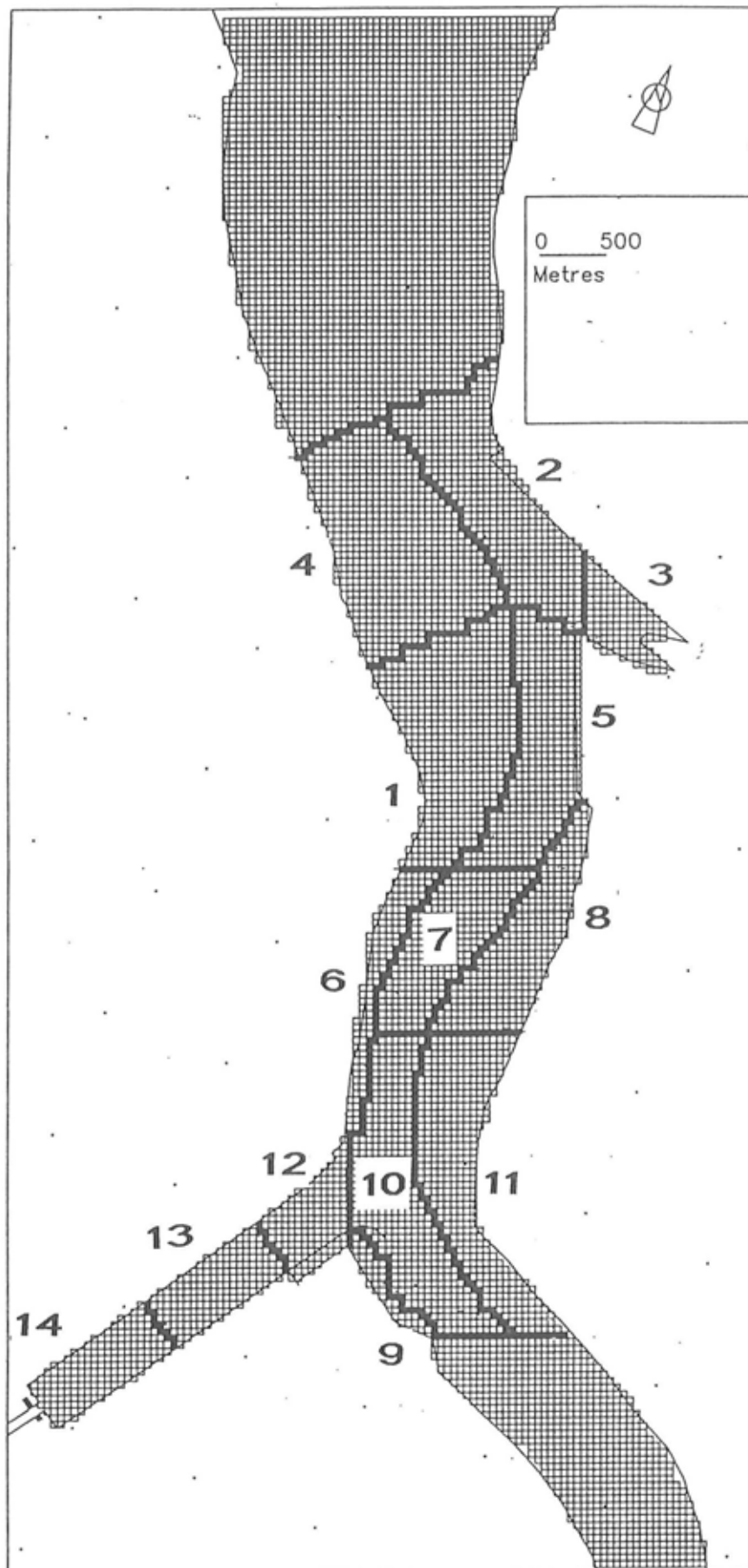
Figuur 7.14: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-14.4: Sedimentatie van zand in mm/getij



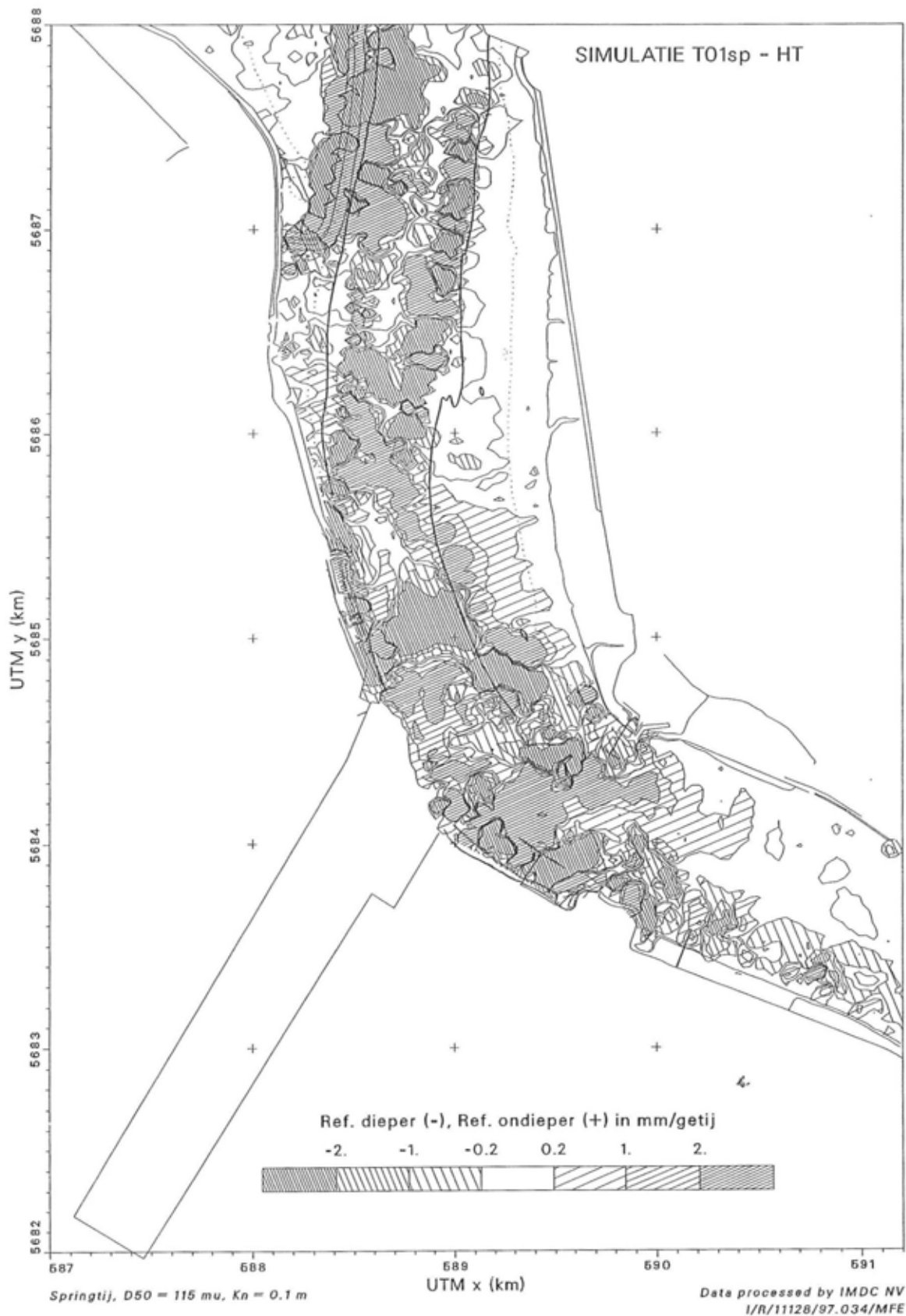
Figuur 7.15: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-14.4 ter hoogte van de Drempel van Frederik:
Erosie van zand in mm/getij



*Figuur 7.16: Zandtransportsimulatie voor de Toestand T01-14.4 ter hoogte van de Drempel van Frederik:
Sedimentatie van zand in mm/getij*



Figuur 7.17: Opdeling van het modelgebied in zones voor sedimentatie- en/of erosieberekeningen van zand en slib.



Figuur 7.18: Verschilkaart T01sp (=ref.) - HT, negatief T01sp dieper dan HT, positief T01sp ondieper dan HT.



Figuur 7.19: Verschilkaart T01sp (=ref.) - T01-14.4, negatief T01sp dieper dan T01-14.4, positief T01sp ondieper dan T01-14.4.