

Z3078

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, RIKZ

Verificatie van het cellen-concept
Westerschelde op basis van historische
gegevens

Maart 2001

WVW	107-2000-001
EL	62038
WVL	Z 3078
EXPL	WL Delft Hydraulics



C 145136

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, RIKZ

Verificatie van het cellen-concept Westerschelde op basis van historische gegevens

C. Jeuken

Maart 2001



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER:	Rijks Instituut voor Kust en Zee Postbus 8093 4330 EA Middelburg									
TITEL:	Verificatie cellen-concept Westerschelde op basis van historische gegevens Definitief rapport									
SAMENVATTING:										
In de studie voor de Lang Termijn Visie Schelde-estuarium (LTV) is een morfologisch cellenconcept ontwikkeld, waarmee de grenzen van de stortcapaciteit in de Westerschelde bepaald kunnen worden (Winterwerp e.a., 2000). Volgens dit concept kan in ieder stelsel van twee parallelle geulen (een cel) netto 5-10 % van de bruto sediment transportcapaciteit in een van beide geulen worden gestort zonder dat deze geul degenereert. Het 5-10%- stortcriterium is in de huidige studie geverifieerd op basis van gemeten erosie en sedimentatietendensen in de grote geulen van de <i>macro</i>-cellen over de periode 1955-1999. Op basis van de uitkomst van de verificatie is vervolgens nagegaan in hoeverre de stortcapaciteit in 6 macrocellen is/wordt overschreden en waar er nog ruimte is voor het storten van sediment. Uit de analyses is gebleken dat het theoretisch stortcriterium redelijkerwijs kan worden toegepast op de <i>macro</i>-cellen. Dit betekent dat 5-10% van de totale bruto transportcapaciteit in een van de twee geulen van een macro-cel kan worden gestort zonder dat het geulsysteem gaat degenereert als gevolg van het storten en baggeren. Het precieze percentage is afhankelijk van de hoeveelheden en wijze waarop er gebaggerd en gestort wordt en waarschijnlijk van de autonome ontwikkeling. Dit laatste vraagt nadere studie. De toepasbaarheid van het theoretisch stortcriterium impliceert dat met het huidige bagger- en stortbeleid (sinds 1997-1999): a) de maximale stortcapaciteit van de totale Westerschelde gebruikt wordt en, b) dat deze stortcapaciteit zo optimaal mogelijk moet worden benut om ongewenste verondiepingen van de geulen waar gestort wordt te voorkomen. Op basis van de observaties en het theoretisch stortcriterium is gebleken dat stortcapaciteit van de cellen in het oostelijk deel in het verleden is overschreden. Sinds de laatste verdieping (1997/1998) wordt de stortcapaciteit van de cellen in het westelijk deel van de Westerschelde overschreden. Enige ruimte voor storten is nog aanwezig in het middendeel en het oostelijk deel. Een verdere optimalisering van het stortbeleid lijkt wel mogelijk. De resultaten van deze studie geven aanleiding tot verschillende typen aanbevelingen.										
REFERENTIES:										
VER.	AUTEUR		DATUM		OPMERK.		REVIEW		GOEDKEURING	
1.0	C. Jeuken		28/2/2001				Z.B. Wang			
2.0	C. Jeuken		6/3/2001				M. Stive		T. Schilperoort	
PROJECTNUMMER:			Z3078							
TREFWOORDEN:			Westerschelde, morfologie, baggeren, storten							
INHOUD:	TEKST		37	TABELLEN	18	FIGUREN	9	APPENDICES	2	

Inhoud

1	Inleiding.....	1-1
1.1	Achtergrond	1-1
1.2	Doel en aanpak	1-1
1.3	Opzet rapportage.....	1-2
2	Het cellen-concept.....	2-1
2.1	Wat is het cellen-concept?	2-1
2.2	Berekende transport- en stortcapaciteiten	2-6
3	Beschikbare historische gegevens en analyses	3-1
3.1	Beschikbare historische gegevens	3-1
3.2	Analyse van de historische gegevens	3-2
4	Morfologische ontwikkelingen en ingrepen gedurende de periode 1955-1999	4-1
4.1	Inleiding.....	4-1
4.2	Het geulsysteem Honte en Schaar van de Spijkerplaat (cel 1).....	4-2
4.3	Het geulsysteem Pas van Terneuzen en Everingen (cel 3)	4-5
4.4	Het geulsysteem Middelgat en Gat van Ossenissee / Overloop van Hansweert (cel 4).....	4-8
4.5	Het geulsysteem Zuidergat / Overloop van Valkenisse en Schaar van Valkenisse / Waarde (cel 5)	4-10
4.6	Het geulsysteem Nauw van Bath en Schaar van de Noord (cel 6)	4-13
4.7	Het geulsysteem Vaarwater boven Bath en Appelzak (cel 7).....	4-16
4.8	Conclusies.....	4-17
5	Verificatie van het stortcriterium - discussie	5-1
5.1	Evaluatie en geldigheid van het stortcriterium.....	5-1

5.2	Morfologische mogelijkheden en beperkingen voor het storten in de Westerschelde	5-3
6	Conclusies en aanbevelingen.....	6-1
6.1.1	Inleiding.....	6-1
6.1.2	Conclusies.....	6-1
6.1.3	Aanbevelingen voor het beheer	6-3
6.1.4	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	6-3
7	Referenties.....	1

Bijlagen

A	Diepte-kaarten	A-1
B	Erosie en sedimentatie kaarten	B-Error! Bookmark not defined.

I Inleiding

I.1 Achtergrond

In de studie voor de Lang Termijn Visie Schelde-estuarium (LTV) is door WL|Delft Hydraulics een morfologisch cellen-concept ontwikkeld, waarmee de grenzen van stortcapaciteit van de geulen in de Westerschelde bepaald kunnen worden, zonder dat het meergeulensysteem degenereert als gevolg van het storten (Winterwerp e.a., 2000, zie ook hoofdstuk 2). Uit dit cellen-concept volgt het zogenaamde 10% criterium: in iedere stelsel van twee parallelle geulen (cel) kan netto 5-10 % van de bruto sediment transportcapaciteit van die cel in een van beide geulen worden gestort zonder dat deze geul en dus het tweegeulensysteem degenereert. Dit stortcriterium is destijds grofstoffelijk geverifieerd op basis van kwantitatieve en kwalitatieve veldobservaties over de periode 1985-1997. Hierbij is tevens geconstateerd dat sinds de laatste verdieping in 1997-1998 (48'/43') de 10%-grens genaderd is en in sommige gebieden (cellen) overschreden wordt.

Vanuit LTV zijn vervolgens aan de projectgroep MOVE vragen gesteld over de effecten van de verruiming 48'/43'. RIKZ wil nu onderzoeken wat de mogelijkheden zijn om het cellen-concept te gebruiken bij beheer om de stortcapaciteit in de Westerschelde optimaal te benutten. Een eerste stap hierin is om het stortcriterium zoals dat volgt uit het cellen-concept, nader te verifiëren. Naar aanleiding van de offerte (MCM 704/Z3078.95/MB) heeft het RIKZ WL|Delft Hydraulics opdracht gegeven om deze verificatie uit te voeren op basis van historische veldobservaties over de periode 1955-1999 en tevens om een overzicht te maken van de stortcapaciteit in de verschillende cellen, waarbij aangegeven wordt waar deze capaciteit is/wordt overschreden en waar eventueel nog meer ruimte is om te storten.

I.2 Doel en aanpak

Het doel van het project is tweeledig:

- Het verifiëren van het 5-10%-criterium voor de stortcapaciteit van de geulen in de Westerschelde, op basis van historische veldobservaties over de perioden 1955-1970, 1970-1975, 1975-1996, 1997-1999.
- Het maken van een overzicht van de stortcapaciteit in de verschillende cellen en daarbij aangeven waar deze capaciteit is / wordt overschreden en waar eventueel nog ruimte is om te storten.

De verificatie wordt uitgevoerd op basis van een analyse van historische gegevens (inhoudsveranderingen, overzichten van baggeren en storten) over de periode 1955-1999 en de transportcapaciteiten zoals bepaald door Winterwerp e.a. (2000). De analyse van de historische gegevens is er op gericht om na te gaan in hoeverre ingrepen als storten en baggeren bepalend zijn geweest voor de waargenomen erosie- en sedimentatietendensen. De bevindingen die uit deze analyse naar voren komen zullen worden gebruikt voor het evalueren van het theoretisch stortcriterium.

Het project is uitgevoerd door dr. C. Jeuken in nauw overleg met dr. Z.B. Wang.

I.3 Opzet rapportage

De opzet van deze rapportage is als volgt. In hoofdstuk twee wordt ingegaan op het cellen-concept: wat is het, wat zijn de aannamen en beperkingen, hoe groot zijn de theoretische stortcapaciteiten. Een overzicht van de gebruikte gegevens en toegepaste analyses wordt gegeven in hoofdstuk drie, waarna in hoofdstuk vier de morfologische veranderingen en ingrepen per cel worden behandeld. De observaties uit hoofdstuk vier vormen de basis voor de evaluatie van de geldigheid van het 10%-criterium en het maken van een overzicht van de stortcapaciteit (Hoofdstuk 5). Tot slot worden in hoofdstuk 6 de belangrijkste bevindingen samengevat en worden enkele aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan.

2 Het cellen-concept

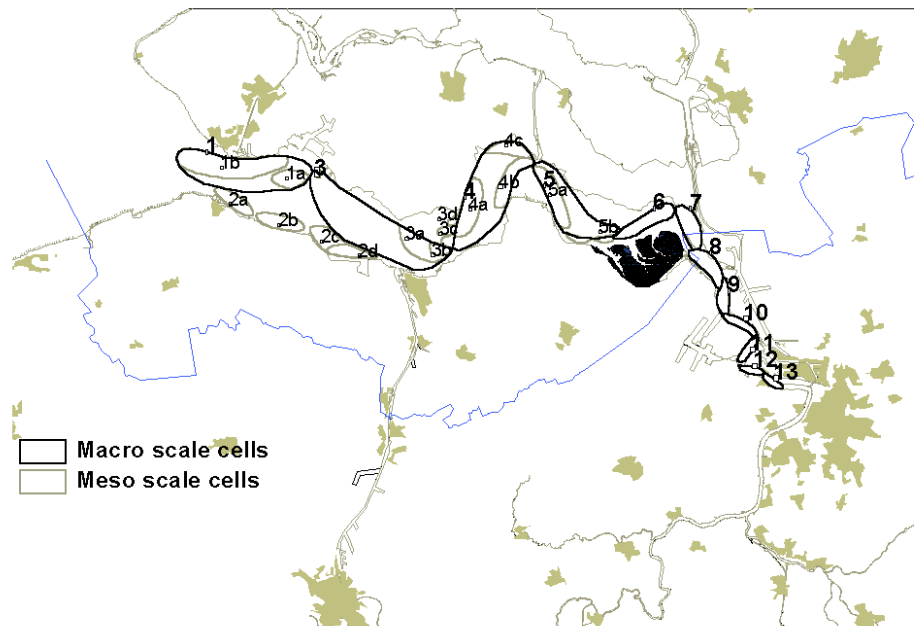
2.1 Wat is het cellen-concept?

Het cellen-concept voor de Westerschelde bestaat uit twee onderdelen: een schematisatie van het systeem van geulen en platen en een stabiliteitsanalyse van het geschematiseerde geulsysteem. Beiden zullen in de volgende paragrafen kort worden toegelicht.

Schematisatie van het geul-plaat systeem

De Westerschelde wordt gekenmerkt door een mooi regelmatig patroon van geulen en platen. Morfologisch gezien, kunnen deze geulen worden onderverdeeld in eb- en vloedgeulen. Het onderscheid tussen eb- en vloedgeulen is gebaseerd op de ligging van de drempel (ondiepte) in de geulen: vloedgeulen hebben landwaarts een drempel, ebgeulen hebben zeewaarts een drempel (Van Veen, 1950). Daarnaast kunnen de geulen, in deelgebieden van de Westerschelde, worden onderverdeeld in grote hoofdgeulen en kleinere kortsluitgeulen. Deze hoofdgeulen en kortsluitgeulen vormen samen een regelmatig repeterend patroon dat wordt aangeduid als estuariene sectie of bochtgroep (Jeuken, 2000). Een estuariene sectie bestaat uit een grote gekromde ebgeul met daarnaast een rechte vloedgeul. Deze geulen worden meestal gescheiden door langgerekte plaatgebieden en met elkaar verbonden door de kleinere kortsluitgeulen. Iedere sectie wordt gekenmerkt door een eigen gedrag. Dit betekent dat de bochtgroep als een aparte morfologische eenheid kan worden beschouwd (Jeuken, 2000).

Op deze manieren van het schematiseren van het systeem van geulen en platen is in het kader van de LTV-studie voortgeborduurd (Winterwerp e.a., 2000). Op basis van berekende getij-gemiddelde zandtransporten en het onderscheid tussen grote en kleine eb- en vloedgeulen is het systeem van geulen geschematiseerd als een ketting van morfologische cellen (Fig. 2.1). Iedere cel bestaat uit een ebgedomineerde (eb)geul, een vloedgedomineerde (vloed)geul met daar tussen een plaat. De grote geulen (hoofdgeulen) vormen de macro-cellen. De meso-cellen zijn geassocieerd met de kleinere geulen of inscharingen. Een aantal van deze meso-cellen valt samen met de eerder genoemde kortsluitgeulen (cel 1, 3a-d, Fig. 2.1). Een belangrijke basis hypothese in dit cellen-concept is dat het meergeulensysteem gehandhaafd blijft zolang de macro-cellen in stand blijven. De namen van de belangrijkste geulen zijn weergegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.1 Macro- en mesocellen in de Westerschelde (Winterwerp e.a., 2000).

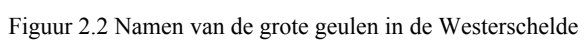
Geulen in de macro-cellen: Cel 1= Honte, uitloop Wielingen en (Eb)Schaar van de Spijkerplaat, cel 3 = Everingen, Pas van Terneuzen, cel 4= Middelgat, Gat van Ossensisse, cel 5= Zuidergat / Overloop van Valkenisse, Schaar van Waarde/Valkenisse/Zimmermangeul, cel 6= Nauw van Bath, Schaar van de Noord, cel 7= Vaarwater boven Bath, Appenzak.

Stabiliteits-analyse

De stabiliteit van de morfologische cel vertoont veel overeenkomsten met een riviersplitsing, waarbij een geul zich splitst in twee kleinere geulen: tijdens eb is het landwaartse deel van de cel een splitsing en het zeewaartse deel een samenvloeiing. Tijdens vloed treedt de tegenovergestelde situatie op. De stabiliteit van dergelijke splitsingen wordt bepaald door de verdeling van het sedimenttransport als gevolg van lokale drie-dimensionale stroomverschijnselen. In 1D-modellen wordt de verdeling van het sediment transport en de stabiliteit van een splitsingspunt gemodelleerd door middel van een zogenaamde knooppuntrelatie, bijvoorbeeld:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \quad (2.1)$$

met k een dimensieloze coëfficiënt S_1 , S_2 het sedimenttransport in de geulen 1 en 2, B_1 , B_2 de breedte van de geulen en Q_1 en Q_2 de waterafvoer door de twee geulen. In het verleden zijn verschillende studies uitgevoerd naar de stabiliteit van riviersplitsingen (zie bijv. Wang e.a., 1995, Wang en Van der Kaaij, 1994). Uit deze studies is gebleken dat de



knooppuntrelatie een grote invloed heeft op de stabiliteit van de splitsing: voor grote waarden van k ($k > 5/3$ in geval van de Engelund-Hansen transportformulering) is de splitsing stabiel, d.w.z. dat beide geulen open blijven. Voor kleine waarden is de splitsing instabiel: een van de geulen verzandt. Dit blijkt ook voor een getijsysteem met eb- en vloedgeulen het geval te zijn (Van Kerckhoven, 1995; Wang e.a., 1997).

In het kader van de Milieu Aspecten Studie (RWS, 1998) en de LTV studie zijn stabiliteitsanalyses uitgevoerd die vergelijkbaar zijn met de theoretische analyses voor riviersplitsingen. Belangrijkste verschil is dat de invloed van baggeren en storten is meegenomen door het toevoegen van bron- en puttermen in de morfodynamische vergelijkingen (Wang e.a., 1997; Winterwerp e.a., 2000). Tijdens de LTV studie is tevens de interactie tussen geulen en platen op een vereenvoudigde manier gemodelleerd. Het doel van deze analyses was tweeledig:

- Nagaan of baggeren en storten de stabiliteit van een morfologische cel beïnvloedt.
- Als dat het geval is, nagaan bij welke omvang van baggeren en storten het geulsysteem van de cel instabiel wordt en tendeeft naar een een-geul-systeem.

De stabiliteit van een cel voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de transportcapaciteit van elk van de geulen onderling en van het geulsysteem als geheel. Een kleine verondieping (storting) in één van de geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping geërodeerd wordt. Dit is dus een stabiele situatie. Indien echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid van die geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds ondieper en degenereert. Dit is dus een instabiele situatie. Een stabiliteitsanalyse kan dit proces kwantificeren. De analyse wordt in detail beschreven door Winterwerp e.a. (2000). Met behulp van deze analyse is onderzocht wanneer een verstoring, in de vorm van baggeren en/of storten, in de geulen uitdempt (stabiele situatie) of groeit (instabiele situatie). De groei van een verstoring wordt geïnterpreteerd als de aanzet tot een degeneratie van het geul-plaatsysteem.

In het morfodynamisch model waarmee de stabiliteitsanalyses zijn uitgevoerd wordt elk van twee geulen geschematiseerd door middel van een lengte en een uniforme breedte en diepte. Dus de morfologische kenmerken van eb- en vloedgeulen (zie boven) worden niet expliciet gemodelleerd. De waterbeweging wordt quasi-stationair beschouwd. Voor de sediment transporten is uitgegaan van de formulering van Engelund-Hansen. De D_{50} van het bodemmateriaal is gesteld op $220\mu\text{m}$. Opgemerkt wordt dat gekozen korrelgrootte van invloed is op de absolute grootte van transport, maar niet op de relatieve grootte van het stortcriterium. De constante k in de knooppuntrelatie is 2.

Uit de analyses en de interpretatie zijn de volgende conclusies getrokken (Winterwerp e.a. 2000):

1. Een tweegeulsysteem kan zich ontwikkelen tot een beperkt aantal (meestal drie) evenwichtssituaties, namelijk één van de geulen dicht en de andere open (twee evenwichtssituaties, 1-geulsysteem) en beide geulen open (2-geulsysteem).

2. Het netto baggeren in één van de geulen heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem; de tussenliggende plaat zal naar verwachting echter een paar cm per jaar eroderen via de plaat-geulinteractie. Wanneer in één geul gebaggerd en gestort wordt, is de netto stort- of baggerhoeveelheid van belang voor de stabiliteit van het systeem.
3. Het netto storten in een geul kan leiden tot een onomkeerbare degeneratie van het twee-geulsysteem. De stortcapaciteit van een geul mag tijdelijk overschreden worden. Hoe lang dit precies is, is afhankelijk van de grootte van de geulen en de omvang van de ingrepen (zie Intermezzo Tijdschalen). Echter, een overschrijding over een te lange periode leidt *waarschijnlijk* tot een irreversibele degeneratie.
4. Indien in één van de geulen een hoeveelheid sediment gestort wordt, afkomstig uit een andere cel, die groter is dan 10 % van de bruto sedimenttransportcapaciteit van het geul-plaatsysteem, zal de daardoor veroorzaakte verstoring groeien en kan een oorspronkelijk stabiel systeem degenereren tot een ééngeulsysteem; de tussenliggende plaat zal naar verwachting een paar cm per jaar aangroeien (zie ook paragraaf 5.1).
5. In één geul van het geulsysteem kan minimaal 5% van de bruto transportcapaciteit worden gestort. Dit criterium is van toepassing wanneer in de ene geul gestort wordt en in de andere geul effectief in de gehele geul gebaggerd wordt (zie ook paragraaf 5.1).

Intermezzo - Tijdschalen

De tijdschaal waarop het verondiepen van een geul ten gevolge van storten zichtbaar wordt kan worden afgeschat met

$$T_1 = \frac{BHL}{S}$$

B=de gemiddelde breedte van de geul waar gestort wordt, H=de gemiddelde diepte van de geul waar gestort, L= de lengte van de geul waar gestort wordt. S= de bruto transportcapaciteit van de cel (in m³/jr).

Getallen voorbeeld: Stel B=2000, H=7m, L=6000m, S=15*10⁶m³/jr dan wordt het kantelen zichtbaar op een tijdschaal van ongeveer 5 jaar.

De tijdsduur van de totale degeneratie van een verondiepende geul ligt tussen de T₂ en T₃:

$$T_2 = \frac{BHL}{I - I_{cr}}$$

$$T_3 = \frac{BHL}{I}$$

waarbij I= de stortomvang en I_{cr} de kritische stortomvang waarbij een geul gaat verondiepen. Stel dat in het bovenstaande getallen voorbeeld I=2,7 *10⁶m³/jr en I_{cr}=0,9 *10⁶m³/jr dan duurt het totale degeneratieproces, waarbij het twee-geulsysteem overgaat in een ééngeul-systeem, 30 à 50 jaar (bij continu storten van 2.7Mm³/jr).

De huidige uitwerking van het cellen-concept kent een aantal aannamen en beperkingen:

- Het geul-plaatsysteem in de cellen en de Westerschelde als geheel wordt verondersteld in evenwicht te zijn. Autonome ontwikkelingen, waarbij geulen van nature eroderen of sedimenteren, worden nu dus niet door het concept beschreven.
- Het gedrag van de kortsluitgeulen kan niet met het cellen-concept worden bestudeerd.
- Het eb-vloedschaar karakter, de niet uniforme geometrie van de geulen in langsrichting, wordt niet expliciet gemodelleerd (zie boven).
- De waterbeweging wordt quasi-stationair beschouwd. Stroom-asymmetrie en reststroming worden niet meegenomen.
- In de stabiliteitsanalyse wordt de locatie van baggeren of storten in een geul niet gespecificeerd. Baggeren op een drempel wordt beschreven als baggeren in de gehele geul.
- Het cellen-concept geeft geen inzicht in de stabiliteit van het gehele estuarium of in de interactie tussen de diverse cellen. Ook de sedimentuitwisseling(scapaciteit) tussen Westerschelde en voordelta worden niet met het cellen-concept beschreven.

In hoeverre deze aannamen en beperkingen invloed hebben op de grootte van het 5-10% stortcriterium is niet bekend; dit vraagt nader onderzoek. Deze beperkingen kunnen in de toekomst waarschijnlijk wel worden opgeheven door het concept, met name de stabiliteitsanalyses verder uit te werken.

2.2 Berekende transport- en stortcapaciteiten

De transport- en stortcapaciteiten zoals gepresenteerd in Winterwerp e.a. (2000) zijn bepaald voor een zogenaamd morfologisch, representatief getij (zie Latteux, 1995 voor methodiek). Dit getij is circa 10% sterker dan het gemiddelde getij. In de sedimenttransportberekeningen (met Delft3D) is gebruik gemaakt van de transport formulering van Engelund-Hansen. De D_{50} waarde van het bodemmateriaal is uniform verondersteld en gesteld op $240\mu\text{m}$. Merk op dat dit de waarde is die in de transportberekeningen met Delft3D is gebruikt en niet de korrelgrootte zoals die in de stabiliteitsanalyse is toegepast. De keuze van de korrelgrootte beïnvloedt de absolute grootte van de bruto transportcapaciteit, maar niet de relatieve grootte van het stortcriterium (5-10% van de transportcapaciteit). De berekende transport- en stortcapaciteiten zijn vervolgens allemaal uitgedrukt in Mton/jr (zie Tabel 2.1). Deze berekende waarden zijn voor de huidige studie op een aantal manieren bewerkt / aangepast:

- De korrelgrootte van het bodemmateriaal in de macro-cellen is gemiddeld fijner dan $240\mu\text{m}$: de D_{50} neemt van de monding richting de grens Nederland België geleidelijk af (zie Tabel 2.1). Voor deze variatie is gecorrigeerd: in geval van de Engelund-Hansen formulering betekent dit het vermenigvuldigen van de transporten met een factor ($D_{50}=240/\text{werkelijke } D_{50}$). Voor ieder cel zijn twee korrelgrootten beschouwd: de gemiddelde D_{50} in het systeem van geulen en platen in een macro-cel en de D_{50} in alleen de geulen.

- De transport- en stortcapaciteiten zijn uitgedrukt in profielkuub en beunkuub. De beheerder heeft veelal met de beunkuub te maken als het gaat bagger- en stortgegevens en vergunningen. De profielkuub wordt meestal gebruikt bij het maken van zandbalansen. De conversie Mton naar profielkuub betekent een vermenigvuldiging met een factor $((\text{dichtheid water}/\text{dichtheid zand}) \cdot (1/(1-\text{porositeit}))) = (1000/2650) \cdot (1/0.6) = 0.6289$. De porositeit is gesteld op 0.4. De profielkuub wordt naar beunkuub vertaald door vermenigvuldiging met een factor 1.1.
- Op basis van de variatie in de stortcapaciteit ten gevolge korrelgrootte-effecten en de verschillen tussen de situatie 1996 en 1999 is een bereik van de theoretische stortcapaciteit bepaald (in plaats van een enkel getal). De aldus verkregen onder- en bovengrens van de stortcapaciteit in iedere macro-cel zijn samengevat in Tabel 2.1. De ondergrens is de combinatie de maximale korrelgrootte met het minimale transport (in 1996 of 1999). De bovengrens is de tegenovergestelde combinatie: kleinste korrelgrootte met grootste transport.

Volgens de gegevens en variaties zoals die in deze studie worden gehanteerd (Tabel 2.1) varieert de stortcapaciteit in de totale Westerschelde tussen de 4 en 9 Mm^3/jaar , respectievelijk in het geval van het 5% en het 10%-criterium (= *profielkuubs* = 4-10 Mm^3/jaar *beunkuubs*). Tellen we hierbij de jaarlijkse zandwinning van ongeveer 2.4 Mm^3 bij op dan betekent dat een totale stortcapaciteit in de Westerschelde die varieert tussen de 6.4 en 11.4 Mm^3 (= 7-12.5 Mm^3 *beunkuubs*)¹, afhankelijk van de wijze/plaats waarop er gebaggerd en gestort wordt. Gemiddeld is er in periode 1997-1999 11.4 Mm^3/jr . (profielkuubs) gestort en 11.7 Mm^3/jr . gebaggerd (0.3 Mm^3/jr is onttrokken als zandwinning door de Belgen, RWS 2000). Als het stortcriterium juist is, hetgeen in deze studie wordt onderzocht, betekent dit,

- dat met het huidige baggeren en storten (sinds 1997-1999) de maximale stortcapaciteit van de totale Westerschelde gebruikt wordt en,
- dat deze stortcapaciteit zo optimaal mogelijk moet worden benut om ongewenste verondiepingen van geulen te voorkomen.

De meso-cellen worden in deze studie niet beschouwd omdat informatie over de erosie- en sedimentatiesnelheden in de individuele geulen van deze cellen niet beschikbaar is.

¹ In de LTV-studie van Winterwerp et al. (2000) wordt de totale stortcapaciteit, inclusief zandwinning, begroot op 5.5-8.6 Mm^3 (profiel, =6,0-9.5 Mm^3 in het beun).

Tabel 2.1 Transport- en stortcapaciteiten in de macro-cellen zoals berekend in het kader van LTV en de aangepaste capaciteiten zoals gehanteerd in deze studie.

	cel 1	cel 3	cel 4	cel 5	cel 6	cel 7
<u>Gegevens LTV Winterwerp e.a., 2000</u>						
LTV-transport capaciteit, 1996						
in Mton/jr	18	24	23	21	8	5
in Mm ³ /jr, profiel	11.3	15.1	14.5	13.2	5.0	3.1
in Mm ³ /jr, beun	12.6	16.8	16.1	14.7	5.6	3.5
LTV-transport capaciteit, 1999						
in Mton/jr	19	26	22	17	8.5	4
in Mm ³ /jr, profiel	11.9	16.4	13.8	10.7	5.3	2.5
in Mm ³ /jr, beun	13.3	18.2	15.4	11.9	5.9	2.8
<u>Gegevens deze studie</u>						
D ₅₀ bodemmateriaal (in µm) ^a						
Geulen & platen, gemiddeld	190	190	170	160	160	145
Geulen	210	210	190	170	170	150
Transport en stortcapaciteit, Mton/jr						
minimum transportcapaciteit ^b	20.6	27.4	27.8	24.0	11.3	6.4
maximum transportcapaciteit	24.0	32.8	32.5	31.5	12.8	8.3
5%-stortcriterium (minimum)	1.0-1.2	1.4-1.6	1.4-1.6	1.2-1.6	0.6	0.3-0.4
10%-stortcriterium (maximum)	2.1-2.4	2.7-3.3	2.8-3.2	2.4-3.2	1.1-1.3	0.6-0.8
Transport en stortcapaciteit, Mm ³ /jr- profielkuubs						
minimum transportcapaciteit ^b	12.9	17.3	17.5	15.1	7.1	4.0
maximum transportcapaciteit	15.1	20.7	20.4	19.8	8.0	5.2
5%-stortcriterium (minimum)	0.6-0.8	0.9-1.0	0.9-1.0	0.8-1.0	0.4	0.2-0.3
10%-stortcriterium (maximum)	1.3-1.5	1.7-2.1	1.7-2.0	1.5-2.0	0.7-0.8	0.4-0.5
Transport en stortcapaciteit, Mm ³ /jr- beunkuubs						
minimum transportcapaciteit ^b	14.2	19.0	19.3	16.6	7.8	4.4
maximum transportcapaciteit	16.6	22.8	22.4	21.8	8.8	5.7
5%-stortcriterium (minimum)	0.7-0.8	1.0-1.1	1.0-1.1	0.8-1.1	0.4	0.2-0.3
10%-stortcriterium (maximum)	1.4-1.7	1.9-2.3	1.9-2.3	1.7-2.2	0.8-0.9	0.4-0.6

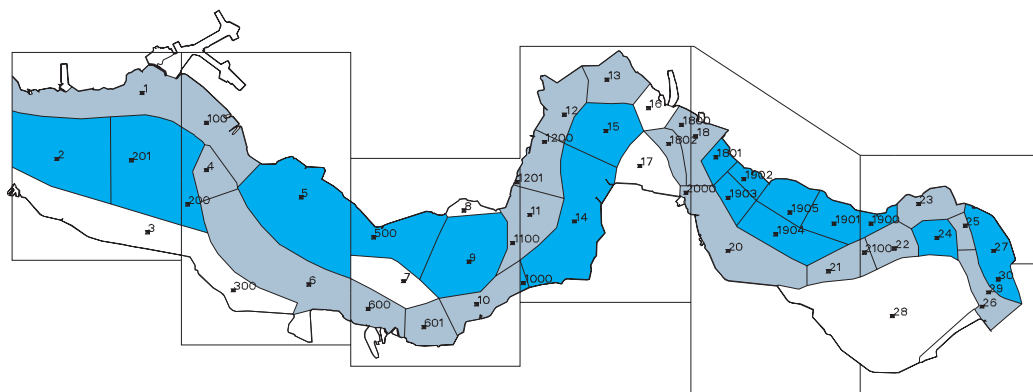
^a Gegevens ontleend aan Jeuken, 2000 (tabel 1.1, analyse 'McLaren bemonstering')

^b De minimum en maximum waarden komen voort uit de variatie in berekende transportcapaciteit voor 1996 en 1999 en de korrelgrootte variatie onder het kopje D₅₀ bodemmateriaal.

3 Beschikbare historische gegevens en analyses

3.1 Beschikbare historische gegevens

De morfologische basisgegevens voor deze studie zijn ontleend aan en geleverd door Van der Male (2001). Van der Male beschrijft de inhoudsveranderingen van de grote geulen in de macro-cellen en de platen en slikken in de Westerschelde op basis van vaste morfologische vakindelingen voor de periode 1955-1999. De inhoudsveranderingen voor de diverse vakken zijn berekend met behulp van de Arc-Info applicatie *Vakgis*. De verkregen inhoud, 21-29 observaties jaren per lodingsvak, zijn lineair in de tijd geïnterpoleerd naar 1 januari van elk jaar tussen 1955 en 1999. In deze studie zijn met name de door Van der Male (2000) bepaalde inhoudsveranderingen van de diverse geulvakken (Arc-Info coverage 'rvaksas3', zie Figuur 3.1) nader geanalyseerd.



Figuur 3.1 Vakkenindeling geulen ('rvaksas3') met de samenvoeging van geulvakken. Blauw (turkoois) is vloedgeul, grijsblauw is ebgeul.

Aan het begin van deze studie was alleen informatie over de netto inhoudsveranderingen in de geulvakken beschikbaar. De hoeveelheden gebaggerd, gestort en gewonnen zand in ieder rekenvak waren nog niet eerder bepaald. Deze analyse is alsnog uitgevoerd door C. van der Male (RIKZ) met behulp van losse modules uit de *Zandbalans*-applicatie onder Arc-Info. De zandwingegevens (concessiehouders) vanaf 1993 waren niet compleet. De ontbrekende gegevens zijn door de afdeling NWL van Directie Zeeland aangeleverd. Een deel van de gewonnen zandwinvolumina (domeinen) en de zogenaamde 'terugstort' in de rekenvakken is 'handmatig' bepaald.

Naast deze 'berekende' historische gegevens is gebruik gemaakt van animaties van de geulontwikkeling (afkomstig van C. van der Male). A. Schouwenaar (RIKZ) heeft voor deze studie een aantal diepte- en erosie en sedimentatiekaarten, Figuur 2.2 en 3.1 gemaakt met behulp van Arc-Info (Bijlage A en B). Daarnaast zijn de in tijd variërende locatie en

vorm van de bagger en stortvakken op dezelfde schaal en op (12) overheadsheets aangeleverd (niet bijgesloten in dit rapport).

Van de meso-cellen zijn de hierboven beschreven gegevens niet beschikbaar. Daarom beperkt deze studie zich, na overleg met de opdrachtgever, tot een analyse van de macro-cellen zoals weergegeven in Figuur 2.1.

3.2 Analyse van de historische gegevens

De morfologische analyse van de macrocellen richt zich op aangeven/classificeren van het belang van ingrepen (baggeren, storten) in de morfologische ontwikkeling van het geulplaat systeem in ieder cel. Hierbij wordt gekeken naar de tendensen van netto erosie/sedimentatie in relatie tot de netto omvang van de ingrepen in iedere geul, zoals dat eerder door Jeuken (2000) is gedaan. Deze analyse, samen met de beschikbare erosie- en sedimentatiekaarten (Bijlage B), vormt de basis voor het traceren van grenzen voor het storten van sediment in de diverse cellen volgens de waarnemingen. Deze waargenomen grenzen zullen in hoofdstuk 5 worden gebruikt om de theoretische stortcapaciteiten in de cellen (Tabel 2.1) te verifiëren.

Deze aanpak impliceert de volgende bewerkingen van de aangeleverde basisgegevens (zie ook tabel 3.2 voor definities):

- 1 Bepalen van de instantane (V_{netto}) en cumulatieve ($V_{netto,cum}$) netto erosie en sedimentatie (E/S) in de diverse geulvakken.
- 2 Bepalen van de instantane (V_I) en cumulatieve ($V_{I,cum}$) netto ingrepen in de diverse geulvakken. Hierbij wordt een uitleveringspercentage van 10% gehanteerd (fijn zand, Bray e.a, 1997).
- 3 Bepalen van de instantane (V_{nat}) en cumulatieve ($V_{nat, cum}$) natuurlijke erosie en sedimentatie door de waterbeweging in ieder geulvak.
- 4 Samenvoegen van verschillende geulvakken volgens Tabel 3.1.
- 5 Maken van grafieken met de cumulatieve netto E/S ($V_{net, cum}$), de ingrepen ($V_{I, cum}$) en het zogenaamde ‘natuurlijke effect’ in iedere geul ($V_{nat, cum}$, voor een theoretisch voorbeeld zie Fig. 3.2).
- 6 Het bepalen van gemiddelde erosie- en sedimentatiesnelheden in de eb- en vloedgeulen van iedere cel gedurende karakteristieke perioden (op basis van 5).

De eindresultaten van deze bewerking (5 en 6) zullen worden gepresenteerd en besproken in het volgende hoofdstuk. Als leidraad voor de interpretatie is in Figuur 3.2 een theoretisch voorbeeld gegeven. In dit figuur staan als functie van de tijd: de cumulatieve netto erosie en sedimentatie, de cumulatieve ingrepen en het ‘natuurlijk’ effect, allen in miljoenen profielkuub. Een stijgende lijn (positieve richtingscoëfficiënt) duidt op sedimentatie. Een dalende lijn is indicatief voor erosie. Voor het aangeven/classificeren van het belang van ingrepen wordt vooral gekeken naar het verloop van de netto en natuurlijke erosie en sedimentatie (zie Fig. 3.2 en Tabel 3.3) en knippunten in deze verlopen. Als deze lijnen nagenoeg samenvallen is baggeren of storten van weinig betekenis geweest. Hebben deze lijnen een tegengesteld verloop dan betekent dat, dat de ingrepen sturend zijn geweest in de waargenomen geulontwikkeling. Voor het traceren van grenzen in de stortcapaciteit zijn met name de situaties ‘3’ in Figuur 3.2 van belang.

Tabel 3.1 Overzicht van de geulen in de macro-cellen en de samenvoeging van geulvakken zoals weergegeven in Figuur 3.1. *EG* = ebgeul, *VG* = vloedgeul

Cel	Geul	Samenvoeging van vakken
1	Honte (<i>EG</i>)	1, 100
	Schaar van de Spijkerplaat (<i>VG</i>)	2, 201, 200
3	Pas van Terneuzen (<i>EG</i>)	4, 6, 600, 601, 10
	Everingen (<i>VG</i>)	5, 500, 9
4	Middelgat (<i>EG</i>)	1100, 11, 1201, 1200, 12, 13
	Gat van Ossensisse (<i>VG</i>)	1000, 14, 15
5	Zuidergat / Overloop Valkenisse (<i>EG</i>)	18, 1800, 1802, 2000, 20, 21, 2100
	Schaar van Valkenisse en Waarde (<i>VG</i>)	1801, 1903, 1904, 1902, 1905, 1901, 1900
	Stortgebied VG	1801, 1903, 1903
6	Nauw van Bath (<i>EG</i>)	22, 23
	Schaar van de Noord (<i>VG</i>)	24
7	Vaarwater boven Bath (<i>EG</i>)	25, 26
	Appelzak (<i>VG</i>)	27

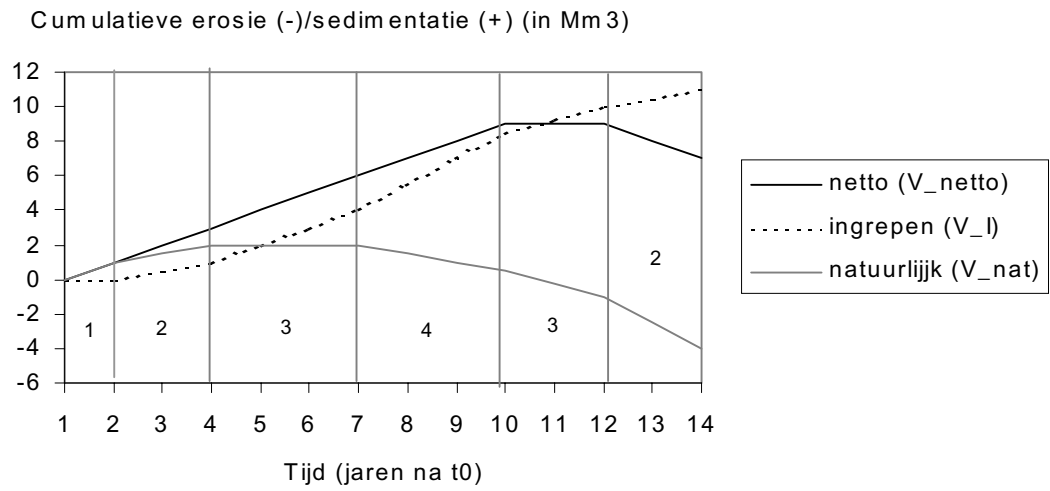
Tabel 3.2 Definitie van parameters, zoals weergegeven in grafieken en samenvattende tabellen

Parameter	Definitie en omschrijving
V_{netto}	(Waterinhoud in jaar 1 - waterinhoud in jaar 2) / aantal jaren = de netto erosie (-) of sedimentatie (Mm^3/jr).
V_I	Som van baggeren (-), storten (+) en zandwinning (-) per jaar.
V_{nat}	$V_{\text{netto}} - V_I$, het door de waterbeweging per jaar aan- of afgevoerde volume sediment.
$V\#, \text{cum}$	Sommeren van V_{netto} , V_I , V_{nat}
$E/S-T$	Netto erosie- en sedimentatiesnelheid beneden NAP+3.5m (Mm^3/jr)
I	Netto effect van ingrepen (Mm^3/jr)
N	Natuurlijk effect, erosie of sedimentatie door de waterbeweging ^a .

^a Of dit echt het natuurlijk effect is zullen we nooit weten.

Tabel 3.3 Classificatie van de invloed van menselijke ingrepen aan de hand van de cumulatieve erosie- en sedimentatiecurven (zie ook Figuur 3.2).

	Belang van ingreep	Criterium
1	Geen invloed	Netto en 'natuurlijke' erosie / sedimentatie zijn even groot en hebben hetzelfde teken (geen ingreep).
2	Invloed	Netto en 'natuurlijke' ontwikkeling hebben het zelfde teken maar zijn niet even groot.
3	Kritische invloed	Netto en 'natuurlijke' ontwikkeling zijn net niet tegengesteld aan elkaar.
4	Sturend	Netto en 'natuurlijke' erosie / sedimentatie hebben een tegengesteld teken.



Figuur 3.2 Cumulatieve erosie en sedimentatie en de classificatie van het effect van ingrepen. Voor betekenis code 1-4 zie tabel 3.2. In dit voorbeeld sedimenteert een geul al dan niet als gevolg van netto storten, waarna een periode van erosie volgt waarbij storten een geringe invloed heeft gehad.

4 Morfologische ontwikkelingen en ingrepen gedurende de periode 1955-1999

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt per macro-cel een kwantitatief overzicht gegeven van de waargenomen morfologische veranderingen en ingrepen gedurende de periode 1955 tot 1999. Hierbij wordt voornamelijk gekeken naar de erosie- en sedimentatietendensen en -snelheden. Voor aanvullende informatie over de morfologische ontwikkelingen van de macro- en meso-cellen, zie Jeuken (2000). Het doel van de analyses is tweeledig:

- Per cel aangeven / classificeren hoe belangrijk menselijke ingrepen zijn geweest in de waargenomen ontwikkeling van het geul-plaat systeem. Hierbij ligt de nadruk op het evalueren van de effecten van storten op de geulontwikkeling al dan niet in combinatie met baggeren in de andere geul.
- Het traceren van grenzen voor het storten van sediment op basis van de waarnemingen. Het zijn vooral deze grenzen die de basis vormen voor het evalueren van de geldigheid van het theoretische stortcriterium (hoofdstukken 2 en 5).

Deze analyses worden gebaseerd op grafieken van de cumulatieve erosie- en sedimentatie in de geulen, overzichtstabellen met voor iedere geul de erosie- en sedimentatiesnelheden gedurende karakteristieke perioden en het classificatieschema volgens Tabel 3.3 (paragraaf 3.2). Een stijgende lijn (positieve richtingscoëfficiënt) in de grafieken duidt op sedimentatie, een dalende lijn is indicatief voor erosie (zie ook paragraaf 3.2). In de tabellen worden minimaal vier verschillende perioden onderscheiden (deze worden in de figuren gemarkeerd door middel van verticale lijnen):

- 1955-1970, de periode vóór de eerste grootschalige verdieping van de vaargeul,
- 1970-1975, de eerste verdieping,
- 1975-1997, periode na de eerste verdieping,
- 1997-1999, de periode waarin de drempels in de vaargeul in de Westerschelde opnieuw zijn verdiept conform het verdrag 48'/43' (verdiepingsfase).²

Naast deze ingreep-gerelateerde perioden worden de totale periode 1955-1999 en een aantal aanvullende deelperioden onderscheiden op basis van de waargenomen erosie- en sedimentatietendensen. Alle erosie- en sedimentatiegetallen in de figuren en tabellen in dit hoofdstuk zijn uitgedrukt in *profiel*/kuubs per jaar (uitlevering is gesteld op 10%, zie hoofdstuk 3). In de titel van de overzichtstabellen wordt de theoretische stortcapaciteit (in

² Deze verdieping is gerealiseerd in een tijdsbestek van ongeveer een jaar (zomer 1997-zomer 1998). De drempel van Vlissingen en de Wielingen (delta) zijn in het voorjaar van respectievelijk 1999 en 2000 verdiept. Na de initiële verdieping van de drempels is in de zomer van 2000 gestart met de verruiming (verbreiding) van de vaargeul. Deze verruiming is nu (maart 2001) bijna gereed (van Westenbrugge pers.com.).

profielkuubs, hoofdstuk 2) volledigheidshalve vermeld. De geldigheid van deze capaciteit wordt in hoofdstuk 5 geëvalueerd aan de hand van de observaties in dit hoofdstuk.

Ter ondersteuning van de interpretaties is gebruik gemaakt van animaties van de geulontwikkeling, van erosie/sedimentatiekaarten en dieptekaarten met de ligging van de geulvakken (bijlagen A en B) en de bagger- en stortvakken (12 overheadsheets, niet bijgesloten).

4.2 Het geulsysteem Honte en Schaar van de Spijkerplaat (cel I)

Algemeen beeld

De ontwikkeling van het geul-plaat systeem over de gehele periode 1955-1999 wordt gekenmerkt door een netto erosie in de vloedgeul van ongeveer $0.5\text{Mm}^3/\text{jr}$ en een geringe sedimentatie in de ebgeul (Tabel 4.1 en Fig. 4.1). In de vloedgeul is gemiddeld een geringe hoeveelheid sediment netto gestort. In de ebgeul is gebaggerd, hoewel de hoeveelheden klein zijn. Dus ondanks het netto storten van sediment is de vloedgeul geërodeerd, terwijl in de gebaggerde ebgeul een netto sedimentatie is opgetreden. Dit geeft aan dat het geulsysteem van nature een tendens tot kantelen (de ene geul erodeert terwijl de andere sedimenteert) vertoont en slechts weinig door het baggeren en storten is beïnvloed.

Vloedgeul

De erosie van de vloedgeul manifesteert zich met name in de periode 1960-1997, met een kleine onderbreking van het proces tussen 1976 en 1978. De inloop van de vloedgeul erodeert enigszins, met name sinds 1990 (Fig. 4.1c). Een vergelijking tussen figuur 4.1c en 4.1e leert dat de lange-termijn erosie voornamelijk heeft plaatsgevonden in het drempelgebied van de vloedgeul (fig. 4.1e). In dit gebied vallen de lijnen van netto en 'natuurlijke' erosie en sedimentatie nagenoeg samen. De netto stortingen van gemiddeld $0.4\text{Mm}^3/\text{jr}$ tussen 1981 en 1997 veroorzaken slechts kleine verschillen tussen beide lijnen. Dit betekent dat het storten tijdens deze periode de ontwikkeling van het drempelgebied als geheel nauwelijks heeft beïnvloed en dat de stortcapaciteit van de macrocel duidelijk groter is dan $0.4\text{Mm}^3/\text{jr}$. Rond 1996 slaat de erosie van de drempel om in een netto sedimentatie. Dit proces zal zijn versterkt door de plotseling toegenomen stortintensiteit (zie Tabel 4.1). De netto sedimentatie is echter duidelijk groter dan de hoeveelheid gestort materiaal. Dit geeft aan dat het niet waarschijnlijk is dat de netto sedimentatie is veroorzaakt door het storten. De stortingen van gemiddeld $1.5\text{Mm}^3/\text{jaar}$ lijken de grens van de stortcapaciteit in de macrocel echter wel te naderen: de richtingscoëfficiënt van de lijn met de natuurlijke en netto sedimentatie gaan steeds meer uit elkaar lopen. Om meer zicht op het overschrijden van de stortcapaciteit te krijgen, verdient het aanbeveling om de netto sedimentatie en erosie/sedimentatiesnelheden sinds 1999 te bepalen en deze te vergelijken met de sterke toename van het stortvolume (3.3Mm^3 in 1999 / na 1 januari 1999). Zodra de netto en natuurlijke erosie- en sedimentatietendensen een tegengesteld verloop beginnen te krijgen is het waarschijnlijk dat de stortcapaciteit van de macrocel is overschreden.

In het drempelgebied van de vloedgeul komen kortsluitgeulen voor met een quasi-cyclisch gedrag: de overwegend ebgedomineerde geulen ontstaan langs de noordkant van de Hoge Platen, expanderen en migreren naar het Noorden waar ze uiteindelijk weer verzanden (tijdschaal varieert tussen de 10 en 35 jaar, Jeuken 2000). Deze kleine geulen vormen de mesocellen zoals cel 1a in Figuur 2.1. De grootste ebgeul in deze cel is rond 1960 ontstaan, geëxpandeerd en lateraal verplaatst naar het Noorden. De geul degenereert van nature sinds ca. 1980 (zie ook dieptekaarten Bijlage A). Dit proces kan zijn versterkt door het storten. Ook is het denkbaar dat de stortcapaciteit van deze mesocel gedurende de laatste paar jaar is overschreden. Deze vermoedens kunnen echter niet worden geverifieerd door het ontbreken van informatie over de erosie- en sedimentatiesnelheden in de kortsluitgeulen.

Ebgeul

Meest opvallend in de ontwikkeling van de ebgeul zijn de periode 1970-1989, waarin de geul netto verondiept en de periode 1997-1999, waarin de geul weer erodeert. De verondieping manifesteert zich in een vrij groot deel van de geul (zie ook Bijlage B). Deze is waarschijnlijk het gevolg van de erosie en verdieping van de drempel in de vloedgeul die in de voorgaande periode 1955-1969 is begonnen met / door het ontstaan van een nieuwe kortsluitgeul (Bijlagen B,C, en Fig. 4.1e). Door de verdieping van de drempel treedt een herverdeling van de eb- en vloeddebieten op ten koste van de grote ebgeul. Dit gaat gepaard met een netto sedimentatie in de ebgeul. De debietmetingen in raai 9 geven hierover geen informatie omdat het gemeten getijvolume nooit werd opgesplitst in een volume door de ebgeul (Honte) en door de vloedgeul. Enkele modelberekeningen, bij voorkeur initiële morfologische berekeningen, kunnen duidelijkheid verschaffen over deze vermoede samenhang in geulontwikkeling. De erosie in de periode 1997-1999 wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de verzandende kortsluitgeul in het laatste stadium van geulontwikkeling de grote ebgeul 'inloopt' (vak 100 bijlagen A, B).

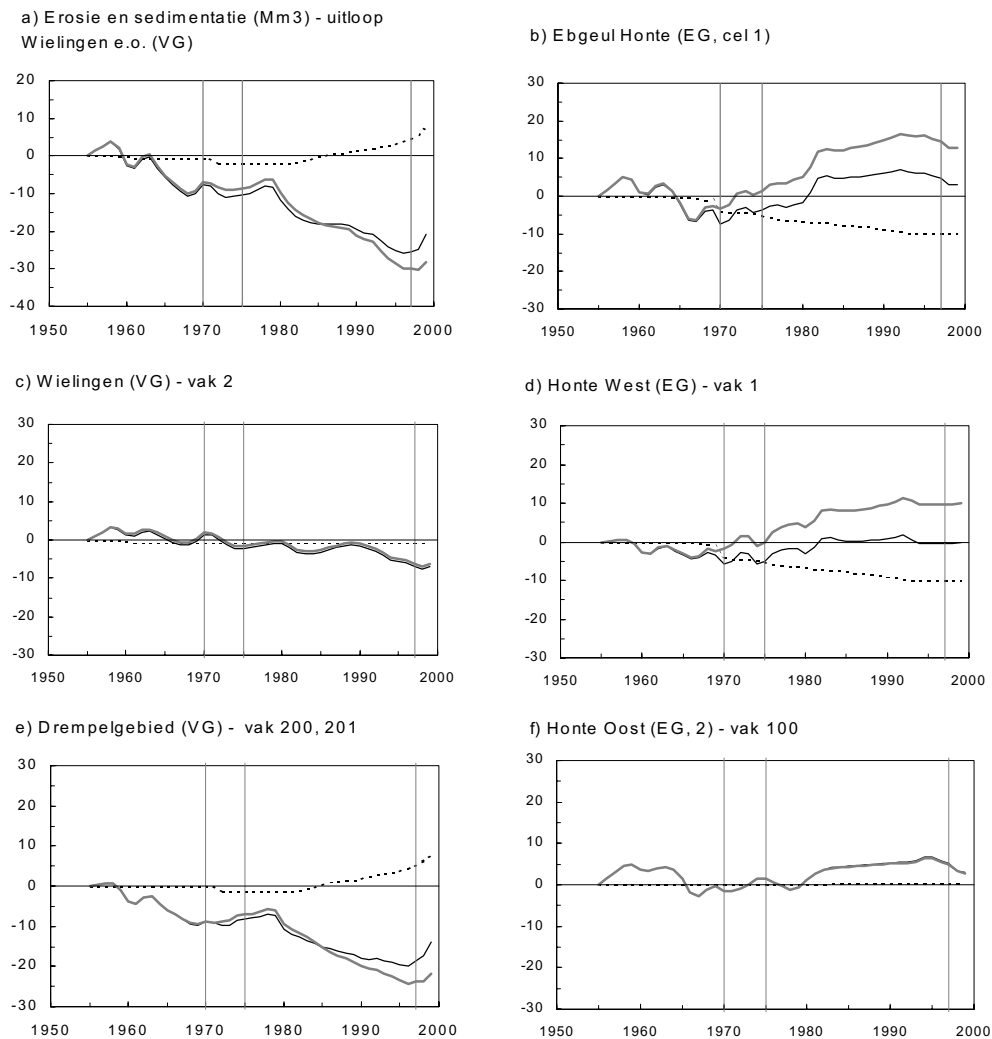
Tabel 4.1 Erosie en sedimentatie (in $10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 1. Voor toelichting afkortingen zie tabel 4.2. Voor precieze samenstelling van de geulen zie Tabel 3.1 en Figuur 3.1. De theoretisch stortcapaciteit in cel 1 varieert tussen de 0.6 en $1.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (Tabel 2.1).

Periode ^a	VG					EG				
	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G
1955-1999	-0,5	0,2	-0,7	0,2	-0,6	0,1	-0,2	0,3	0,1	-0,1
1956-1970	-0,5	0	-0,5	0,1	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	0,1	-0,6
1970-1976	-0,6	-0,3	-0,3	0,0	-0,6	0,7	-0,2	0,9	0,0	0,7
1976-1997	-0,7	0,3	-1,0	0,3	-0,9	0,4	-0,2	0,6	0,2	0,2
1976-1978	0,8	0	0,8	0,5	0,3	0,2	-0,4	0,7	0,5	-0,2
1978-1989	-0,9	0,3	-1,2	0,3	-1,2	0,8	-0,2	1,0	0,2	0,6
1989-1997	-0,9	0,4	-1,3	0,1	-1,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1
1997-1999	2,4	1,5	0,9	0,0	2,4	-0,9	0,0	-0,9	0,0	-0,9

^a Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 4.2 Betekenis van de afkortingen in de overzichtstabellen met de erosie-sedimentatiesnelheden.

E/S-T	Totale netto erosie(-) / sedimentatie (+) beneden NAP+3.5m
P	Platen, het volume zand boven NAP-2m
G	Geulen, het gebied beneden NAP-2m
I	Netto ingrepen (-=baggeren, +=storten)
N	'Natuurlijk' effect $(=(E/S-T)-I)$, af- of aanvoer van sediment door de waterbeweging



Figuur 4.1 Cumulatieve erosie / sedimentatie (E/S) in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 1 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = totale netto E/S beneden NAP+3.5m, zwarte gestippelde lijn = E/S ten gevolge van netto ingrepen, dikke grijze lijn = 'natuurlijke' E/S.

4.3 Het geulsysteem Pas van Terneuzen en Everingen (cel 3)

Algemeen beeld

De lange-termijn ontwikkeling van de grote eb- en vloedgeul in deze cel wordt gekenmerkt door een erosie van de vloedgeul, waar overwegend gestort wordt, en een kleine netto erosie van de ebgeul waar gebaggerd wordt (Fig. 4.2, Tabel 4.3). Het geulsysteem als geheel erodeert over de totale periode 1955-1999. De lijnen van 'natuurlijke' en netto sedimentatie in de vloedgeul vertonen eenzelfde verloop, maar vallen niet samen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het storten de erosie van de vloedgeul wel heeft beïnvloed, maar zeker niet sturend is geweest. In de ebgeul hebben deze twee lijnen een tegengestelde richting, wat aangeeft dat baggeren een belangrijke factor is geweest in de netto erosie van de ebgeul. Een nadere analyse leert echter dat dit een lokaal verschijnsel is (zie onder).

Vloedgeul

Net als in de vloedgeul van cel 1, manifesteert het erosieproces zich vooral in het drempelgebied van de vloedgeul (verg. Fig. 4.2a,c,e,f). Tussen 1960 en 1990 erodeert de drempel onder invloed van het gedrag van de kortsluitgeulen (Jeuken, 2000). Daarna volgt een periode van een beperkte netto sedimentatie. De netto stortingen van sediment in dit gebied, variërend van 0.1 tot 0.6 Mm^3/jr tussen 1970 en 1999 (0.3 Mm^3/jr gemiddeld), hebben deze ontwikkelingen slechts weinig beïnvloed (zie tendens netto en natuurlijke erosie, Fig. 4.3f). Ook de ontwikkeling van de individuele kortsluitgeulen in de meso-cellen hebben weinig hinder ondervonden van het storten (Jeuken, 2000). Dit betekent ook dat de stortcapaciteit van de meso-cel 3a (Fig. 2.1) groter is dan 0.3 Mm^3/jr .

De netto erosie en sedimentatietendensen in de inloop (Fig. 4.2c) van de vloedgeul tot 1997 is weinig beïnvloed door stortingen. Ook de wat grotere stortingen in de periode 1975-1980 (0.8 Mm^3/jr) gaan niet gepaard met een netto sedimentatie in het stortgebied (Fig. 4.2c, Bijlage A). Vanaf 1997 wordt de invloed van storten in de inloop van de geul belangrijker. Dit blijkt nog niet uit figuur 4.2c, maar wel uit de erosie-sedimentatiekaart over de periode 1997-1999 (bijlage B) en Figuur 4.2e. De grote sedimentatie zones vallen precies samen met de stortvakken. Net naast deze stortgebieden is sprake van erosie: de getijstroom versnelt en erodeert in het gebied er naast. In de periode 1997-1999 is gemiddeld extreem veel gestort (4.9 Mm^3/jr , Tabel 4.3). Kijken we alleen naar het centrale geuldeel (Fig. 4.2e) dan blijkt dat de lokale storting van 2.4 Mm^3 in 1997 gepaard is gegaan met een netto sedimentatie in het geulvak van 1.4 Mm^3 . In de inloop van de geul (Fig. 4.2c) is de balans van sedimentatie en erosie in 1997 net nul. Deze getallen geven aan dat de maximale stortcapaciteit in de vloedgeul groter is dan 0.8 Mm^3/jr (1978-1989, Tabel 4.3) maar kleiner is dan 3.9 Mm^3/jr (1997).

Na de omvangrijke stortingen in 1997 en 1998 is er in het centrale geuldeel niet meer gestort. Peilingen uit 2000 laten zien dat de getijstroom het sediment langzaam begint op te ruimen (pers. com. van Westenbrugge). De stortingen in de inloop van de geul bedroegen in 1999 2.8Mm^3 (3Mm^3 in gehele geul). Dieptelijnenkaarten van 1999 en 2000 (niet bijgesloten, gezien bij Directie Zeeland) tonen ook over deze periode een duidelijke sedimentatie in het stortvak. Dit geeft aan dat de stortcapaciteit in de vloedgeul nog iets preciezer begrensd kan worden: $0.8\text{-}3.0\text{Mm}^3/\text{jr}$.

Ebgeul

De lang-termijn erosie van de ebgeul manifesteert zich vooral in het drempelgebied (drempel van Borsele) waar sinds 1970 gebaggerd wordt. De geringe netto erosie in vak 6 is vooral het gevolg van zandwinning (8.6Mm^3 sinds 1955) en in mindere mate het gevolg van baggeren ten behoeve (2.2Mm^3) van het vaargeulonderhoud (fig. 4.2f). Het verdiepen van de drempel in de ebgeul is dus niet gepaard gegaan met een duidelijke erosie van de aangrenzende geuldelen. Dit betekent dat het baggeren in de ebgeul tot 1999 slechts lokaal van invloed is geweest.

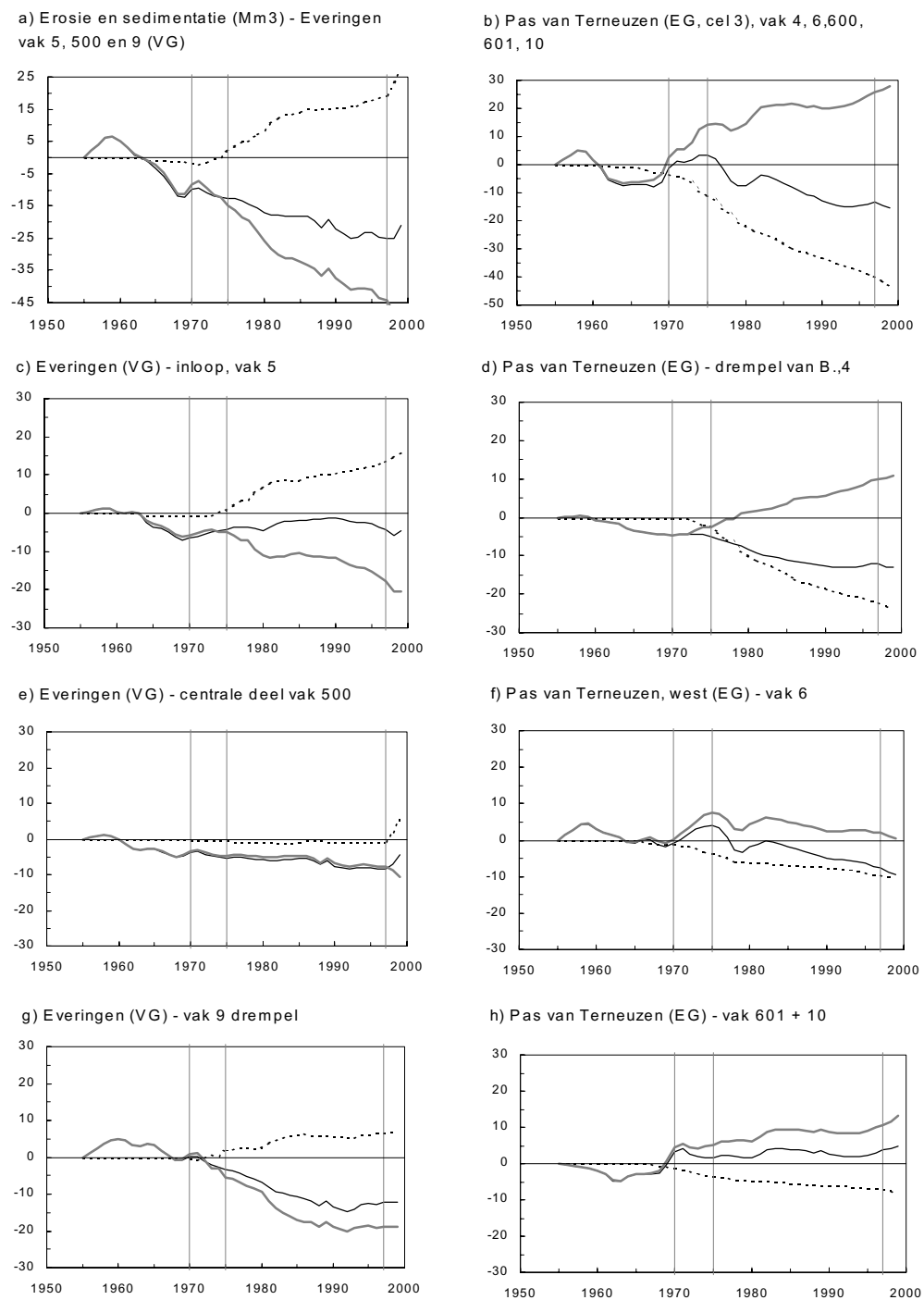
Opvallend is verder de kortdurende periode van forse sedimentatie in bijna de gehele ebgeul tussen 1966 en 1976 (tabel 4.3). Dit proces hangt samen met de verdieping van de drempel in de vloedgeul en het gedrag van de kortsluitgeulen in deze drempel (zie ook Jeuken, 2000). Net zoals in cel 1 vermoedelijk het geval is geweest, is de verdieping van de drempel (t.o.v. NAP) in de vloedgeul gepaard gegaan met een herverdeling van de debieten ten kosten van de grote ebgeul waar sedimentatie plaatsvond.

Tot slot wordt opgemerkt dat uit de meer gedetailleerdere analyses van Jeuken (2000) blijkt dat de vloedgeul in deze cel sediment heeft geleverd aan de landwaarts aangrenzende cel 4. De kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul (de meso-cellen) hebben een belangrijke rol gespeeld in het erosieproces van de geul en de uitwisseling van zand tussen de cellen (bochtgroepen).

Tabel 4.3 Erosie en sedimentatie (in $10^6\text{m}^3/\text{jaar}$ of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 3. Voor toelichting afkortingen zie tabel 4.2. Voor precieze samenstelling van de geulen zie Tabel 3.1 en Figuur 3.1. De theoretisch stortcapaciteit in cel 4 varieert tussen de 0.9 en $2.1\text{Mm}^3/\text{jaar}$ (Tabel 2.1).

Periode ^a	VG					EG				
	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G
1955-1999	-0,5	0,7	-1,1	0,2	-0,6	-0,3	-1,0	0,6	0,1	-0,5
1956-1970	-0,7	-0,2	-0,5	0,1	-0,8	-0,1	-0,2	0,2	0,1	-0,2
1960-1966	-1,8	-0,1	-1,7	-0,3	-1,6	-1,4	-0,1	-1,3	0,0	-1,4
1966-1970	-1,0	-0,2	-0,8	0,7	-1,7	1,5	-0,6	2,1	0,4	1,0
1970-1976	-0,6	0,8	-1,4	0,0	-0,6	0,9	-1,5	2,4	0,0	0,9
1976-1997	-0,6	0,8	-1,3	0,3	-0,8	-0,8	-1,3	0,5	0,2	-0,9
1976-1978	-0,6	0,9	-1,5	0,5	-1,1	-3,1	-2,3	-0,8	0,5	-3,5
1978-1989	-0,4	0,9	-1,3	0,3	-0,7	-0,5	-1,3	0,8	0,2	-0,7
1989-1997	-0,7	0,5	-1,2	0,1	-0,8	-0,3	-0,9	0,6	0,0	-0,2
1997-1999	2,0	4,9	-2,9	0,0	2,0	-0,9	-1,9	1,0	0,0	-0,9

^a Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.



Figuur 4.2 Cumulatieve erosie / sedimentatie (E/S) in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 3 (in Mm³). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = totale netto E/S beneden NAP+3.5m, zwarte gestippelde lijn = E/S ten gevolge van netto ingrepen, dikke grijze lijn = 'natuurlijke' E/S.

4.4 Het geulsysteem Middelgat en Gat van Ossenis / Overloop van Hansweert (cel 4)

Algemeen beeld

De vloedgeul erodeert op een tijdschaal van decennia, terwijl de ebgeul aanzienlijk verondiept (tabel 4.3 en Fig. 4.3a en b). Dit proces hangt samen met het ontstaan van een ebgedomineerde kortsluitgeul in de drempel van de vloedgeul rond 1951 (Bijlage A). Na het ontstaan is deze kleine geul snel geëxpandeerd zonder zich veel te verplaatsen. De geringe migratie is vermoedelijk het gevolg van ruimtegebrek / bewegingsvrijheid en de toegenomen lengteverschillen tussen de grote eb en vloedgeul in de periode 1930-1951 (impliceert grotere verhangen in het drempelgebied, Jeuken 2000). Door de expansie van de kortsluitgeul is de drempel in de vloedgeul volledig geërodeerd: de gemiddelde diepte op de drempel is met meer dan een factor twee toegenomen tussen 1955 en 1999. De debieten in de vloedgeul namen toe ten koste van de ebgeul. Door dit proces is er een tendens tot bochtafsnijding van de ebgeul ontstaan, ook wel aangeduid als functiewisseling. Qua reststroomsnelheden en -transporten is de ebgeul een ebgeul gebleven en de vloedgeul een vloedgeul. Sinds 1970 wordt er in toenemende mate gestort in de eroderende vloedgeul. Het verloop van de netto en 'natuurlijke' sedimentatielijnen geeft aan dat het storten de netto ontwikkeling van de vloedgeul als geheel wel heeft beïnvloed, maar nog niet heeft gestuurd. Op de drempel in de ebgeul is tot 1980 gebaggerd. Nadat in 1981 de vloedgeul als hoofdvaarwater in gebruik is genomen, worden tot 1997 geringe hoeveelheden sediment gestort in de ebgeul. Na 1997 neemt de stortintensiteit in de ebgeul toe.

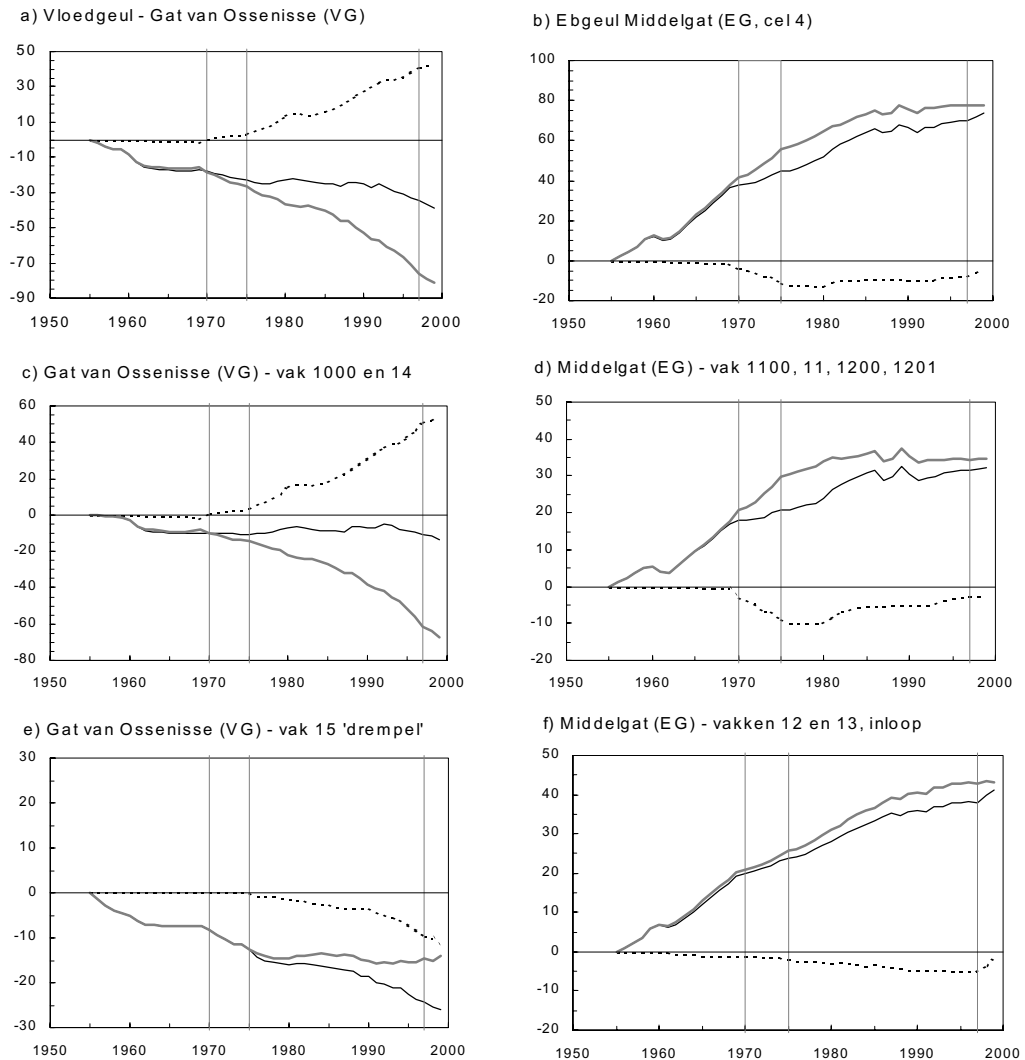
Vloedgeul

Met name het drempelgebied van de vloedgeul erodeert netto, tot 1975 als gevolg van natuurlijke processen (zie boven), na 1975 in toenemende mate als gevolg van lokale zandwinning (Fig. 4.3e). In de periode 1994-1999 is gemiddeld $1.3\text{Mm}^3/\text{jr}$ zand gewonnen. De grootste stortingen vinden plaats in de inloop van vloedgeul (Fig. 4.4c). Wat opvalt is dat zelfs de aanzienlijke stortingen tussen 1976 en 1997 niet leiden tot een netto verondieping. De getallen in Tabel 4.5 geven aan dat de stortcapaciteit van de vloedgeul circa $2.1\text{Mm}^3/\text{jr}$ is (periode 1976-1997). De waarnemingen over de perioden 1988-1997 en 1997-1999 suggereren zelfs dat zonder de stortingen de netto erosie van de vloedgeul groter zou zijn. Een gedetailleerdere analyse van erosie/sedimentatiekaarten over deze periode 1989-1999 kan dit vermoeden bevestigen.

Ebgeul

De sedimentatie manifesteert zich in de ebgeul (fig. b, d, f). De snelheid van dit proces neemt af in de tijd. De geul lijkt rond 1986-1990 een nieuw 'evenwicht' te hebben bereikt. De forse sedimentatie die volgt in de korte periode 1997-1999 is van dezelfde orde als de sedimentstortingen in de inloop van de geul (Tabel 4.4). De erosie-sedimentatiekaart (Bijlage B) in combinatie met de stortvakken (op sheet, niet bijgesloten) laat zien dat de getijstroom het sediment ($1.8\text{Mm}^3/\text{jr}$) niet afgevoerd krijgt. De sedimentatie in de ebgeul is slechts een fractie groter dan de hoeveelheid gestort materiaal. Dit suggereert dat de

toegenomen hoeveelheid zandwinning op de drempel in de vloedgeul (sinds 1994) weinig invloed op de sedimentatie in de ebgeul heeft gehad. Deze hypothese kan worden getoetst met een paar initiële morfologische sommen (zie ook Hoofdstuk 6).



Figuur 4.3 Cumulatieve erosie / sedimentatie (E/S) in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 4 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = totale netto E/S beneden NAP+3.5m, zwarte gestippelde lijn = E/S ten gevolge van netto ingrepen, dikke grijze lijn = 'natuurlijke' E/S.

Tabel 4.4 Erosie en sedimentatie (in $10^6 \text{m}^3/\text{jaar}$ of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 4. Voor toelichting afkortingen zie tabel 4.2. Voor precieze samenstelling van de geulen zie Tabel 3.1 en Figuur 3.1. De theoretisch stortcapaciteit in cel 4 varieert tussen de 0.9 en $2.0 \text{Mm}^3/\text{jaar}$ (Tabel 2.1).

Periode ^a	VG					EG				
	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G
1955-1999	-0,9	1,0	-1,9	0,2	-1,1	1,7	-0,1	1,8	0,1	1,5
1956-1970	-1,2	0,0	-1,2	0,1	-1,3	2,5	-0,3	2,8	0,1	2,4
1960-1966	-1,6	-0,2	-1,4	-0,3	-1,4	2,1	-0,2	2,3	0,0	2,1
1966-1970	-0,1	0,3	-0,4	0,7	-0,8	3,3	-0,6	3,9	0,4	2,9
1970-1976	-1,0	0,6	-1,6	0,0	-1,0	1,3	-1,4	2,7	0,0	1,3
1976-1997	-0,5	1,7	-2,2	0,3	-0,8	1,1	0,1	1,1	0,2	1,0
1976-1978	-0,5	1,5	-2,0	0,5	-1,1	1,2	-0,4	1,5	0,5	0,7
1978-1989	0,0	1,5	-1,5	0,3	-0,3	1,8	0,3	1,5	0,2	1,6
1989-1997	-1,3	2,1	-3,4	0,1	-1,4	0,2	-0,2	0,0	0,0	0,2
1997-1999	-2,3	0,4	-2,7	0,0	-2,2	2,0	1,8	0,2	0,0	2,0

^a Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 4.5 Erosie en sedimentatie (Mm^3/jr) in het stortgebied (vak 1000 en 14 samen) van de vloedgeul.

	VG		
	E/S-T	I	N
1955-1999	-0,3	1,2	-1,5
1956-1970	-0,7	0,0	-0,7
1960-1966	-1,2	-0,2	-1,1
1966-1970	0,1	0,3	-0,2
1970-1976	-0,2	0,6	-0,8
1976-1997	0,0	2,1	-2,1
1976-1978	0,4	1,8	-1,4
1978-1989	0,3	1,8	-1,5
1988-1997	-0,5	2,8	-3,3
1997-1999	-1,4	1,5	-2,9

4.5 Het geulsysteem Zuidergat / Overloop van Valkenisse en Schaar van Valkenisse / Waarde (cel 5)

Algemeen beeld

De ontwikkeling het geul-plaat systeem over de gehele periode 1955-1999 wordt gekenmerkt door een netto sedimentatie in de vloedgeul van ongeveer $0.6 \text{Mm}^3/\text{jr}$, waarvan $0.2 \text{Mm}^3/\text{jr}$ in het intergetijdegebied (boven NAP-2m, Tabel 4.6, Fig. 4.4a) sedimenteert. In de vloedgeul is gemiddeld circa $1.1 \text{Mm}^3/\text{jr}$ netto gestort. Dit betekent een totale ‘natuurlijke’ erosie door de waterbeweging in de geul van $0.5 \text{Mm}^3/\text{jr}$. De lange-termijn ontwikkeling van de ebgeul wordt gedomineerd door een totale netto erosie van gemiddeld circa $0.8 \text{Mm}^3/\text{jr}$ die van dezelfde orde is als de totale hoeveelheid gebaggerd sediment ($1 \text{Mm}^3/\text{jr}$, Fig. 4.4b). Deze getallen geven aan dat de lange termijn ontwikkeling van de geulen in deze cel in vrij sterke mate is beïnvloed door het baggeren en storten. Het storten

en baggeren is gepaard gegaan met een netto kantelen van het systeem: een netto erosie in de ebgeul waar gebaggerd wordt en sedimentatie in de vloedgeul waar gestort wordt. Opgemerkt wordt wel dat de hydrografische kaarten sinds 1900 een natuurlijke tendens tot kantelen van het systeem suggereren (Jeuken, 2000): de grote vloedgeul splitst op in twee kleinere geulen en de activiteit van kortsluitgeulen neemt af. Het zou dus kunnen zijn dat het baggeren en storten tijdens de periode 1955-1999 een dergelijke tendens heeft versterkt. Om hierover een uitspraak te kunnen doen zijn echter aanvullende analyses over de periode 1900-1955 nodig (zie ook paragraaf 6.2).

Vloedgeul

De vloedgeul verondiept reeds in de periode 1955-1970. De gemiddelde erosie- en sedimentatiesnelheden (E/S-T en I, Tabel 4.6) suggereren een sturende invloed van het storten. Echter, de getallen over de deelperioden 1960-1966 en 1966-1970 geven aan dat dit beeld iets genuanceerder en vooral gecompliceerder ligt: de relatief grote stortingen tussen 1960-1966 gaan gepaard met slechts een geringe netto sedimentatie, terwijl de geringe stortingen tussen 1966 en 1970 samenvallen met een forse netto sedimentatie in de geulen en op de platen. Deze sedimentatie kan samenhangen met de stortingen in de voorgaande periode (1960-1966), maar dat is niet met zekerheid te zeggen. Ook de morfologische veranderingen in de aangrenzende cellen (4 en 6) kunnen van invloed zijn geweest op de erosie- en sedimentatietendensen in de geulen van deze cel. Hierover is echter nog weinig bekend (zie ook paragraaf 6.2).

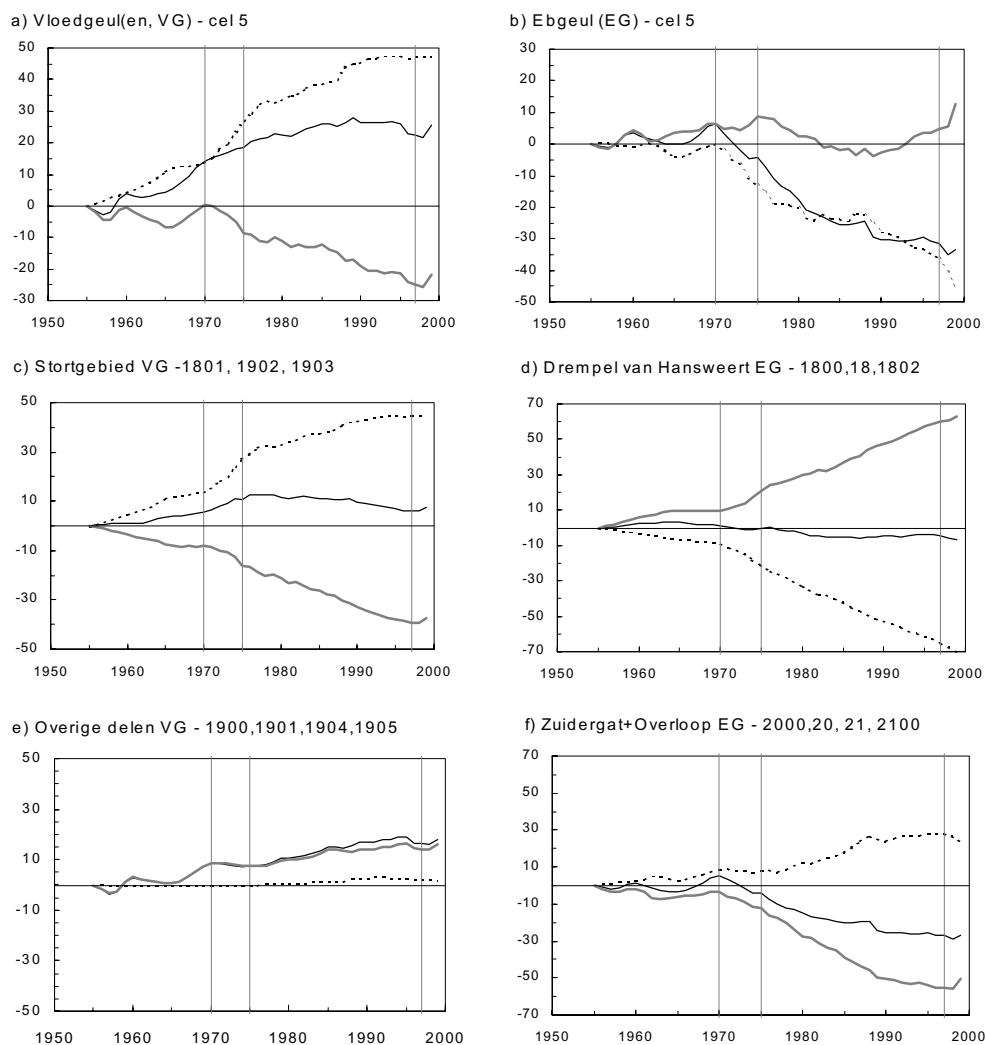
Voor de perioden 1970-1975 en 1975-1997 is een duidelijker relatie tussen de netto sedimentatie en de stortingen aanwezig. Met name wanneer de deelperioden tussen 1975 en 1997 ook worden beschouwd (zie Tabel 4.6). De geleidelijke afname van het storten ($2.7 \rightarrow 0.3 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) gaat tot 1997 gepaard met een afnemende netto sedimentatie in de vloedgeul, die in de laatste deelperiode (1989-1997) zelfs omslaat in een netto erosie. Deze erosie hangt vermoedelijk samen met het doorbreken van de drempel in de Schaar van Valkenisse, waar sinds 1988 weer kortsluitgeulen voorkomen. De waarnemingen over de perioden 1978-1989 en 1989-1997 geven aan dat er in de vloedgeul tussen de 0.3 en $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ per jaar kan worden gestort zonder dat een netto sedimentatie optreedt (Tabel 4.6). Een inventarisatie van de erosie en sedimentatiesnelheden in het stortgebied zelf (tabel 4.7) geeft aan dat de stortcapaciteit in dit gebied ongeveer $0.9 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ is.

De laatste paar jaar worden storten en zandwining in deze cel gecombineerd, met als netto resultaat een gering zandwinning. De geulontwikkeling gedurende de periode 1997-1999 is hierdoor niet beïnvloed: het vloedgeul-gebied ondervindt een netto sedimentatie.

Ebgeul

De morfologische veranderingen in de ebgeul manifesteren zich met name in de periode sinds 1970. Op de drempel van Hansweert wordt sindsdien jaarlijks $2.0\text{-}2.5 \text{ Mm}^3$ gebaggerd. Hoewel deze baggerinspanning in het drempelgebied zelf slechts tot een geringe netto erosie heeft geleid, heeft het een grote invloed gehad op de ontwikkeling van het aangrenzende deel van de ebgeul (vergelijk figuur d en f). Dit aangrenzende deel wordt gekenmerkt door een netto erosie van $1.4 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ in de periode 1970-1989. Dit geërodeerde

materiaal is vermoedelijk, samen met (een deel van) het in dit geuldeel netto gestorte sediment ($0.9\text{Mm}^3/\text{jr}$, fig. 4.5f), door de ebgedomineerde getijstroom getransporteerd naar de drempel van Hansweert waar het weer is weggebaggerd. De snelheid waarmee de ebgeul erodeert neemt af in de tijd ($3.0 \rightarrow 0.3\text{Mm}^3/\text{jr}$, Tabel 4.5). Het aantal beschikbare observaties sinds de laatste verdieping is nog gering. Opvallend is wel dat de laatste verdieping van de drempel niet direct gevolgd lijkt te worden door een erosie van het aangrenzende geuldeel. Toekomstige observaties moeten uitmaken of dit werkelijk het geval is.



Figuur 4.4 Cumulatieve erosie / sedimentatie (E/S) in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 5 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = totale netto E/S beneden NAP+3.5m, zwarte gestippelde lijn = E/S ten gevolge van netto ingrepen, dikke grijze lijn = 'natuurlijke' E/S.

Tabel 4.6 Erosie en sedimentatie (in $10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 5. Voor toelichting afkortingen zie tabel 4.2. Voor precieze samenstelling van de geulen zie Tabel 3.1 en Figuur 3.1. De theoretisch stortcapaciteit in cel 5 varieert tussen de 0.8 en $2.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (Tabel 2.1).

Periode ^a	VG					EG				
	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G
1955-1999	0,6	1,1	-0,6	0,2	0,4	-0,8	-1,1	0,3	0,1	-0,9
1956-1970	0,9	0,9	0,0	0,1	0,8	0,4	0,0	0,4	0,1	0,3
1960-1966	0,2	1,3	-1,1	-0,3	0,5	-0,6	-0,6	0,0	0,0	-0,5
1966-1970	2,2	0,3	1,8	0,7	1,4	1,5	0,9	0,6	0,4	1,1
1970-1976	0,9	2,7	-1,8	0,0	0,9	-2,1	-2,7	0,6	0,0	-2,2
1976-1997	0,2	0,9	-0,7	0,3	-0,1	-1,2	-1,1	-0,1	0,2	-1,4
1976-1978	1,1	2,1	-1,0	0,5	0,6	-3,0	-2,1	-0,9	0,5	-3,5
1978-1989	0,6	1,0	-0,4	0,3	0,3	-1,4	-0,6	-0,8	0,2	-1,6
1989-1997	-0,7	0,3	-1,0	0,1	-0,8	-0,3	-1,4	1,1	0,0	-0,3
1997-1999	1,6	-0,1	1,7	0,0	1,6	-0,9	-5,0	4,1	0,0	-0,9

^a Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 4.7 Erosie en sedimentatie (Mm^3/jr) in het stortgebied van de vloedgeul

Periode	E/S-T	I	N
1955-1999	0,2	1,1	-0,9
1955-1970	0,4	0,9	-0,5
1960-1966	0,5	1,3	-0,8
1966-1970	0,3	0,3	0,0
1970-1976	1,1	2,7	-1,6
1976-1997	-0,2	0,8	-1,0
1976-1978	0,7	1,9	-1,2
1978-1989	-0,1	0,9	-1,0
1989-1997	-0,7	0,3	-1,0
1997-1999	0,9	0	0,9

4.6 Het geulsysteem Nauw van Bath en Schaar van de Noord (cel 6)

Algemeen beeld

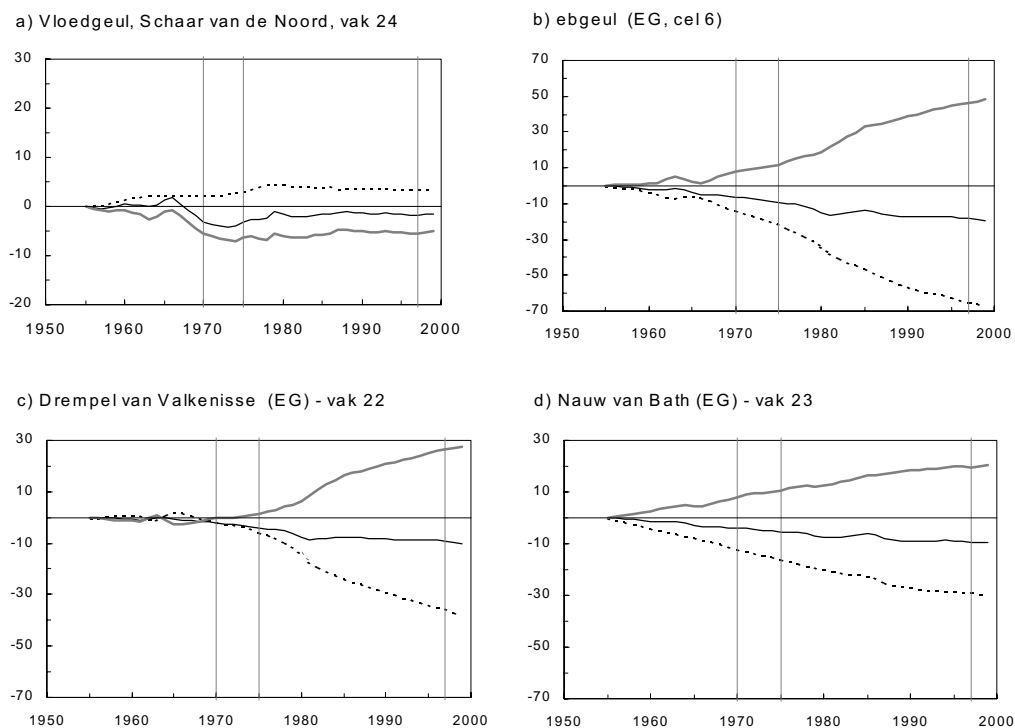
In dit relatief kleine geulsysteem nabij Bath wordt sinds 1922 gebaggerd ten behoeve van de scheepvaart. Beschouwen we de geulontwikkelingen sinds 1955, dan blijkt dat de vloedgeul gekenmerkt wordt door een geringe netto sedimentatie (Fig. 4.5). De ebgeul erodeert als gevolg van het baggeren. Aan dit geulsysteem en het landwaarts aangrenzende geul-plaat systeem zijn gedurende de periode 1968-1980 aanzienlijke hoeveelheden (orde 26 Mm^3) sediment onttrokken ten behoeve van de ophoging van kades in Antwerpen.

Vloedgeul

De vloedgeul wordt weergegeven door middel van vak 24 (zie Bijlage A). Opgemerkt wordt dat een deel van de inloop van de geul en tweederde van een stortvak in geulvak 22 vallen (drempel van Valkenisse in de ebgeul). Dit bemoeilijkt het beoordelen van het effect van

storten en baggeren op de geulontwikkeling. Om een indruk van de totale hoeveelheid gestort en gebaggerd materiaal te krijgen zijn in Tabel 4.9 voor enkele verschillende perioden de gemiddelde stort- en baggersnelheden in vak 22 en 24 samengevat.

Figuur 4.5a toont een periode van erosie tussen 1966 en 1972, die gevolgd werd door een periode van sedimentatie tussen 1972 en 1976/8. Tijdens de periode van sedimentatie zijn forse hoeveelheden sediment gestort in de inloop van de vloedgeul (Fig. 4.5a, Tabel 4.8 en 4.9, Bijlage B). Vooral de erosie en sedimentatiekaart geeft aan dat het storten van gemiddeld $1.2\text{--}1.6\text{ Mm}^3/\text{jr}$ in de inloop van de geul tussen 1972 en 1978 niet direct door de getijstroom kon worden opgeruimd. Opvallend is dat vergelijkbare stortingen in de periode 1956-1966 niet leidden tot een netto verondieping van de vloedgeul (Fig. 4.5a). De geringere stortingen in de periode 1978-1989 van gemiddeld $0.3\text{ Mm}^3/\text{jr}$ in het hele stortvak, gingen gepaard met een kleinere netto sedimentatie in het vak (24) van de vloedgeul. Het is echter niet duidelijk of deze sedimentatie het gevolg is van storten of een naijlingseffect van de grotere stortingen in de voorgaande periode. Op basis van bovenstaande gegevens kan worden afgeleid dat de stortcapaciteit van de vloedgeul, in combinatie met het baggeren van grote hoeveelheden sediment in de ebgeul, tussen de 0.3 en $1.6\text{ Mm}^3/\text{jr}$ ligt.



Figuur 4.5 Cumulatieve erosie / sedimentatie (E/S) in de vloedgeul (VG) en de ebgeul (EG) van cel 6 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = totale netto E/S beneden NAP+3.5m, zwarte gestippelde lijn = E/S ten gevolge van netto ingrepen, dikke grijze lijn = 'natuurlijke' E/S.

Tabel 4.8 Erosie en sedimentatie (in $10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 6. Voor toelichting afkortingen zie tabel 4.2. Voor precieze samenstelling van de geulen zie Tabel 3.1 en Figuur 3.1. De theoretisch stortcapaciteit in cel 6 varieert tussen de 0.4 en $0.8 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (Tabel 2.1).

Periode ^a	VG					EG				
	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G
1955-1999	0,0	0,1	-0,1	0,1	-0,1	-0,4	-1,5	1,1	0,0	-0,4
1956-1970	-0,2	0,2	-0,4	0,0	-0,2	-0,4	-0,9	0,5	-0,1	-0,4
1960-1966	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	-0,4	-0,5	0,1	-0,1	-0,3
1966-1970	-1,2	0,0	-1,2	-0,2	-1,0	-0,4	-1,8	1,5	0,0	-0,4
1970-1976	0,0	0,1	-0,2	0,0	0,0	-0,6	-1,5	0,8	-0,1	-0,6
1976-1997	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,4	-2,0	1,6	0,0	-0,4
1976-1978	0,3	0,4	-0,2	0,0	0,2	-0,6	-2,2	1,6	0,0	-0,6
1978-1989	0,1	-0,1	0,2	0,1	0,0	-0,5	-2,4	1,9	0,0	-0,5
1989-1997	-0,1	0,0	-0,1	0,1	-0,2	-0,2	-1,3	1,1	-0,1	-0,1
1997-1999	0,2	0,0	0,2	0,2	0,1	-0,6	-1,5	0,9	0,0	-0,6

^a Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 4.9 Baggeren en storten (Mm^3/jr) in geulvak 22 (drempel van Valkenisse) en 24 (Schaar van de Noord).

Periode	Netto ingreep in vak 22	Baggeren in vak 22	Storten in vak 22	Storten in vak 24
1955-1999	-1,6	-2,1	0,5	0,1
1956-1970	-0,9	-1,7	0,8	0,2
1960-1966	-0,5	-1,9	1,3	0,2
1966-1970	-1,8	-1,9	0,0	0,0
1970-1976	-1,5	-1,9	0,4	0,1
1976-1997	-2,1	-2,4	0,3	0,0
1976-1978	-2,2	-3,5	1,2	0,4
1978-1989	-2,4	-2,7	0,3	-0,1
1989-1997	-1,5	-1,5	0,0	0,0
1997-1999	-2,0	-2,0	0,0	0,0

Ebgeul

De ontwikkeling van de ebgeul is in sterke mate beïnvloed door het baggeren en onttrekken van sediment. Tijdens de verdieping van 1970-1975 is praktisch de hele geul verdiept. De grote invloed van het baggeren op de ontwikkeling van de ebgeul blijkt ook uit de getallen in tabel 4.8

4.7 Het geulsysteem Vaarwater boven Bath en Appelzak (cel 7)

Algemeen beeld

Het geulsysteem in deze cel nabij de grens Nederland-België wordt gekenmerkt door een netto erosie gedurende de periode 1955-1999 (Fig. 4.6 en Tabel 4.10). In de eroderende vloedgeul is gestort, terwijl er in ebgeul is gebaggerd. Begin jaren zeventig is een leidam geplaatst bovenstrooms van de vloedgeul.

Vloedgeul

De vloedgeul erodeert langzaam gedurende de gehele periode ondanks de netto stortingen van sediment. Het verloop van de netto en natuurlijke erosietendens geeft aan dat het storten het erosieproces wel heeft beïnvloed. Echter met een gemiddelde stortsnelheid variërend van 0.1-0.6 Mm³/jr is er beneden de stortcapaciteit van de geul gestort (Tabel 4.10).

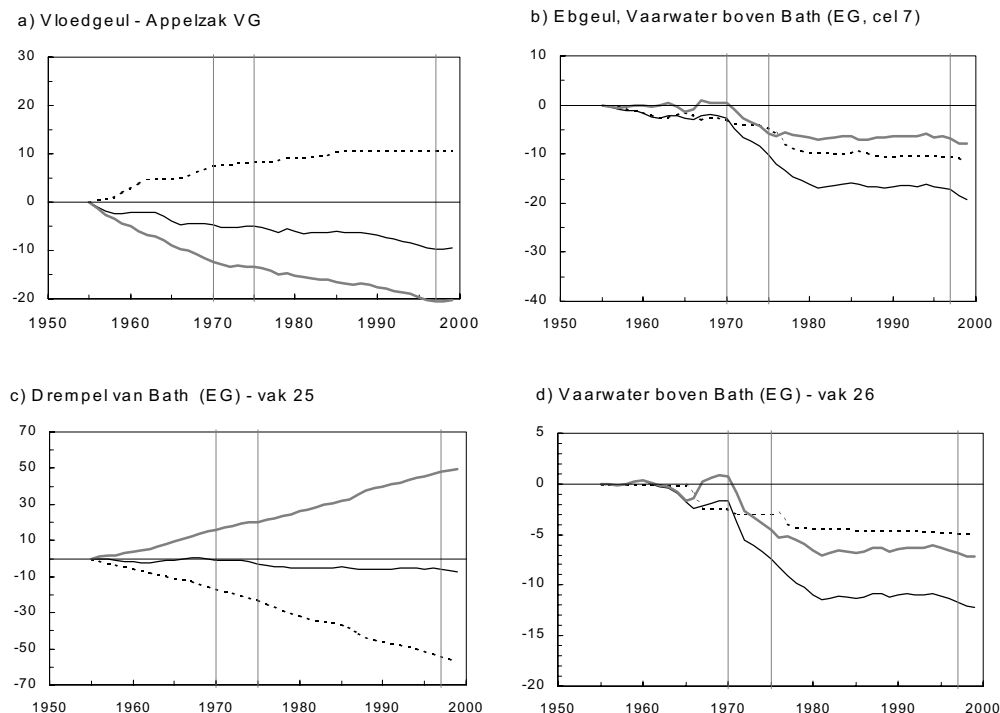
Ebgeul

De ebgeul vertoont eenzelfde tendens als de ebgeul in cel 5 (Fig. 4.6). In de periode tijdens en vlak na de verdieping van de drempel van Bath (1970-1980) is het aangrenzende deel van de ebgeul gaan uitruimen. Het geërodeerde materiaal is vermoedelijk afgezet op de drempel en daar weer weggebaggerd.

Tabel 4.10 Erosie en sedimentatie (in 10⁶m³/jaar of Mm³/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 7. Voor toelichting afkortingen zie tabel 4.2. Voor precieze samenstelling van de geulen zie Tabel 3.1 en Figuur 3.1. De theoretisch stortcapaciteit in cel 6 varieert tussen de 0.2 en 0.5 Mm³/jaar (Tabel 2.1).

Periode ^a	VG					EG				
	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G	E/S-T	I	N	E/S-P	E/S-G
1955-1999	-0,2	0,2	-0,5	0,0	-0,2	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	-0,4
1956-1970	-0,3	0,5	-0,8	0,0	-0,3	-0,2	-0,2	0,0	0,0	-0,2
1960-1966	-0,4	0,4	-0,8	0,1	-0,5	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	-0,3
1966-1970	0,0	0,6	-0,6	0,0	0,0	0,1	-0,2	0,3	0,0	0,1
1970-1976	-0,1	0,2	-0,3	0,0	-0,1	-1,5	-0,3	-1,2	-0,1	-1,5
1976-1997	-0,2	0,1	-0,3	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,1	0,0	-0,3
1976-1978	-0,4	0,1	-0,5	0,0	-0,3	-1,4	-1,3	-0,1	-0,1	-1,4
1978-1989	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	-0,2
1989-1997	-0,4	0,0	-0,4	0,0	-0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1997-1999	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	-1,0	-0,5	-0,5	0,0	-1,0

^a Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.



Figuur 4.6 Cumulatieve erosie / sedimentatie (E/S) in de vloedgeul (VG) en de ebgeul (EG) van cel 7 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = totale netto E/S beneden NAP+3.5m, zwarte gestippelde lijn = E/S ten gevolge van netto ingrepen, dikke grijze lijn = 'natuurlijke' E/S.

4.8 Conclusies

In de voorgaande paragrafen is per macro-cel nagegaan wat de netto erosie- en sedimentatietendensen zijn geweest en hoe deze zich verhouden tot de ingrepen. De belangrijkste resultaten en enkele kenmerkende getallen zijn samengevat in tabel 4.11.

Voor de overwegende vloedgedomineerde geulen in cel 3 (nabij Terneuzen), cel 5 (Valkenisse) en cel 6 (Bath, Tabel 4.11) is een kritische grens ten aanzien van het storten naar voren gekomen: het storten van sediment ging gedurende een korte of langere tijd gepaard met een netto verondieping van de geul. In een aantal ebgeulen bleek het baggeren slechts *lokaal* van invloed, (cellen 1, 3, 4) terwijl in de ebgeulen in het oostelijk deel (cellen 5,6,7), het baggeren op de drempels gepaard ging met een erosie van de gehele geul. In deze laatste gevallen was er dus spraken van een meer *globaal* effect van het baggeren.

Een netto erosie van de ene geul in combinatie met een (gelijktijdige) verondieping van de andere geul wordt aangeduid als '*het kantelen van het geulsysteem*'. Deze gelijktijdige veranderingen gaan gepaard met een herverdeling van de debieten tussen de twee geulen. Dit kantelen van geulsysteem kan van nature gebeuren, maar ook door baggeren en storten worden veroorzaakt, gestimuleerd of juist worden tegengewerkt. Wanneer een tendens tot kantelen zich op de lange-termijn (eeuw) doorzet kan het twee-geulensysteem degenereren tot een een-geulensysteem.

De resultaten laten zien dat de geulsystemen in de drie macro-cellen tussen Vlissingen en Hansweert min of meer van nature, een korter of langer durende tendens tot kantelen vertonen (tabel 4.11): de vloedgeulen eroderen, terwijl de ebgeulen gelijktijdig verondiepen. Deze tendens is door het baggeren en storten tegengewerkt (zie ook Jeuken, 2000). In de cellen in het oostelijk deel, tussen Hansweert en de grens Nederland-België, treedt een tegenovergestelde ontwikkeling op: de ebgeulen verruimen aanzienlijk als gevolg van het baggeren, terwijl vooral de vloedgeulen in cel 5 gemiddeld verondiepen. In dit gebied kantelt het geulsysteem dus de ander kant op en hebben baggeren en storten deze tendens op zijn minst versterkt, zo niet veroorzaakt.

De getallen in tabel 4.11 worden in het volgende hoofdstuk gebruikt om de geldigheid van het theoretische stortcriterium te evalueren.

Tabel 4.11 Getallen met betrekking tot de invloed van storten en baggeren op het geulsysteem in de macro-cellen en de netto diepteveranderingen in de cellen tijdens perioden van kantelen van het geulsysteem. *Let op:* in de cellen 1, 3, 4, 5 en 6 liggen meso-cellen die onder invloed van de maximale stortcapaciteit zoals afgeleid voor de macrocel wel *kunnen* degenereren. In de kop van de tabel is per cel een globale plaatsaanduiding meegegeven (bv. cel 1 ligt Vlissingen). Voor precieze locatie zie Figuur 2.1.

	cel 1 Vlissingen	cel 3 Terneuzen	cel 4 Hansweert	cel 5 Valkenisse	cel 6 Bath	cel 7 grens
Netto storten in (vloed)geul	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Geen probleem	0.4	0.8	<2.1	<0.6	<0.3	<0.6
Wel een probleem	> 1.5?	3.0	>2.1?	>0.9	1.2-1.6	?
Maximale stortcapaciteit	1.5?	0.8-3.0	2.1?	0.9	0.3-1.6	>0.6
gebaseerd op periode	'97-99	'97-99	'76-97	'78-97	'72-89	'55-99
Netto baggeren in andere (eb)geul ^c	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Lokaal effect	0.2-0.4	1.0-2.5	0.2-1.4	<0.6?	<0.5?	<0.3?
Globaal effect	?	?	?	0.9-2.7	1.5-2.0	0.3-1.3
Netto kantelen van geulsysteem?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee
Vooraf van nature	X	X	X			
Invloed baggeren en/of storten				X	X	
Periode ^a	'70-'90	'68-'76	'55-'99	'70-'90	'72-'90	-
Aantal jaren	20	8	44	20	17	
Netto diepteverandering VG (m) ^b						
Beneden NAP+3.5m	-0.33	-0.08	-1.67	0.66	0.97	-1.54
Beneden NAP-2m	-0.66	-0.18	-3.12	0.77	0.74	-2.26
Netto diepteverandering EG (m) ^b						
Beneden NAP+3.5m	0.48	0.23	3.21	-1.50	-1.33	-3.55
Beneden NAP-2m	0.30	0.24	3.82	-2.30	-1.95	-4.21

^a Periode waarin kanteling optreedt.

^b Totale diepteverandering in de periode van kantelen. De diepteverandering in cel 7 heeft betrekking op de hele periode 1955-1999.

^c Gebaseerd op de waarnemingen over de gehele 1955-1999.

Beschouwen we, als voorbeeld, cel 1 nabij Vlissingen dan is het volgende van toepassing (Tabel 4.11). De waarnemingen geven aan dat het netto storten van 0.4 Mm³/jr sediment in de vloedgeul niet gepaard gaat met een netto sedimentatie in de geul (geen probleem). Bij het storten van ongeveer 1.5Mm³/jr lijkt dit wel het geval te gaan zijn (? in tabel). Deze laatste observatie heeft betrekking op de periode 1997-1999. Een waargenomen baggeromvang van 0.2 tot 0.4 Mm³/jr in de ebgeul (Honte) gedurende de periode 1955-

1999, ging niet gepaard met een algehele erosie van de geul. De geul wordt zelfs gekenmerkt door een periode netto sedimentatie. Het baggeren heeft dus een lokaal effect gehad op de ontwikkeling van de ebgeul. De waarnemingen geven (nog) geen inzicht bij welke baggeromvang de gehele ebgeul netto gaat eroderen en er dus sprake is van een globaal effect (? in tabel). Beschouwen we het stelsel van de eb- en vloedgeul samen dan blijkt dat tijdens de periode 1970-1990 het geulsysteem van nature kantelt: de gehele ebgeul verondiept gemiddeld met 0.3-0.48m, terwijl de vloedgeul gelijktijdig verdiept met 0.33-0.66m (afhankelijk van het beschouwde referentie niveau).

5 Verificatie van het stortcriterium - discussie

5.1 Evaluatie en geldigheid van het stortcriterium

De resultaten van de waargenomen geulontwikkelingen, zoals omschreven in het voorgaande hoofdstuk en samengevat in paragraaf 4.8 en tabel 4.11, kunnen worden gebruikt om de geldigheid van het stortcriterium te evalueren. Deze evaluatie is samengevat in tabel 5.1. Voor het te hanteren criterium zijn drie waarden mogelijk:

- Het 10%-stortcriterium is van toepassing bij de volgende situaties:
 - In één van de geulen wordt netto gestort in de andere geul wordt netto niet ingegrepen.
 - In één van de geulen wordt netto gebaggerd in de andere geul wordt netto niet ingegrepen.
 - In één van de geulen wordt netto gestort in de andere geul wordt *lokaal* gebaggerd.
 - In beide geulen wordt netto gebaggerd.
 - In beide geulen wordt netto gestort.
- Het 5-10%-stortcriterium (tussen de 5 en 10%) is van toepassing als in geul 1 netto gestort wordt en het baggeren in geul 2 een *globaal* effect heeft (hele erodeert ten gevolge van baggeren). Echter, het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $B_{2, \text{globaal}}$ in geul 2 (met een globaal effect) is *groter* dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$:

$$SC_{10\%} - |B_{2, \text{globaal}}| > SC_{5\%}$$

- Het 5%-stortcriterium is van toepassing als in geul 1 netto gestort wordt en het baggeren in geul 2 een *globaal* effect heeft (hele erodeert ten gevolge van baggeren). Echter, het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $B_{2, \text{globaal}}$ in geul 2 (met een globaal effect) is *kleiner* dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$:

$$SC_{10\%} - |B_{2, \text{globaal}}| < SC_{5\%}$$

Baggeren heeft alleen in de cellen 5, 6 en 7 een sturende invloed gehad op de ontwikkeling van de ebgeul. Het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $B_{2, \text{globaal}}$ in geul 2 (met een globaal effect) is *kleiner* dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$. Dit betekent dat de minimum stortcapaciteit van 5% gehanteerd dient te worden. In de andere cellen zijn er (nog) geen aanwijzingen dat het baggeren in de vaar/ebgeul sturend is voor de ontwikkeling van de ebgeul. Daarom wordt voor deze cellen uitgegaan van het 10% criterium.

Table 5.1 Evaluatie geldigheid theoretisch stortcriterium op basis van historische gegevens. T=toepasbaar, O = onduidelijk: observaties sluiten te theorie niet uit doordat er onder de stortcapaciteit is gestort of de range van de waargenomen maximale stortcapaciteit is te groot $\geq$ werkelijke capaciteit is groter, $\leq$ werkelijke capaciteit is kleiner. Waarden in *profiel*kuubs.

	Cel 1	cel 3	cel 4	cel 5	cel 6	cel 7
Periode observaties	'97-99	'97-99	'76-97	'78-97	'72-89	'55-99
Maximale stortcapaciteit	1.5?	0.8-3.0	2.1?	0.9	0.3-1.6	>0.6
Omvang baggeren, globaal effect	?	?	?	0.9-2.7	1.5-2.0	0.3-1.3
Theoretische stortcapaciteit						
10%-criterium	1.3-1.5	1.7-2.1	1.7-2.0	1.5-2.0	0.7-0.8	0.4-0.5
5%-criterium, baggeren sturend	0.6-0.8	0.9-1.0	0.9-1.0	0.8-1.0	0.4	0.2-0.3
Toe te passen %	10	10	10	5	5	5
Evaluatie geldigheid theorie	O	O	T, $>?$	T	O	O, $>$

Uit tabel 5.1 blijkt het volgende:

- Het theoretisch stortcriterium is toepasbaar in cel 5 en waarschijnlijk in cel 4.
- Voor cel 7, nabij de grens Nederland - België is de stortcapaciteit groter dan de theoretische waarde. Dit heeft mogelijk te maken met het feit dat de geul erodeert en dus niet evenwicht is, hetgeen de theorie wel veronderstelt.
- Voor cel 1 is het nog onduidelijk hoe groot de stortcapaciteit is. De nabije toekomst zal dit moeten leren. Vooralsnog lijkt het verstandig om een maximale capaciteit van $1.5\text{Mm}^3/\text{jr}$ (profielkuub) te hanteren. De huidige problemen met het storten in dit gebied hebben vooral te maken met het quasi-cyclisch gedrag van de kortsluitgeulen in cel 1a: de kortsluitgeul Ebschaar van de Spijkerplaat degenereert al sinds 1980. De laatste paar jaar is de geul dermate ondiep geworden dat de baggerschepen niet meer in de geul kunnen komen. Een nadere analyse van waarnemingen in de meso-cel 1a zou kunnen uitwijzen in welke mate het storten deze geuldegeneratie heeft versterkt.
- Voor de cellen 3 en 6 is de toepasbaarheid van het stortcriterium nog onduidelijk doordat de bandbreedte van de waargenomen maximale stortcapaciteit groter is dan de theoretische waarde (10% in cel 3 en 5% in cel 6). De observaties sluiten de theorie echter ook niet uit. Daarom kan voor het bepalen van de stortmogelijkheden vooralsnog worden uitgegaan van de maximale waarde van theoretische capaciteit (totdat het tegendeel bewezen is). Verder geldt voor deze cellen hetzelfde als voor cel 7: de vloedgeulen eroderen van nature, een proces dat niet in de theoretische analyse is meegenomen.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het theoretisch stortcriterium redelijkerwijs kan worden toegepast op de macro-cellen. Dit betekent dat 5-10% van de totale bruto transportcapaciteit in een van de twee geulen van een macro-cel kan worden gestort zonder dat de geul waarin netto gestort wordt gaat verondiepen als gevolg van het storten. Het precieze percentage is afhankelijk van de hoeveelheden en wijze waarop er gebaggerd en gestort wordt (zie ook paragraaf 5.2).

5.2 Morfologische mogelijkheden en beperkingen voor het storten in de Westerschelde

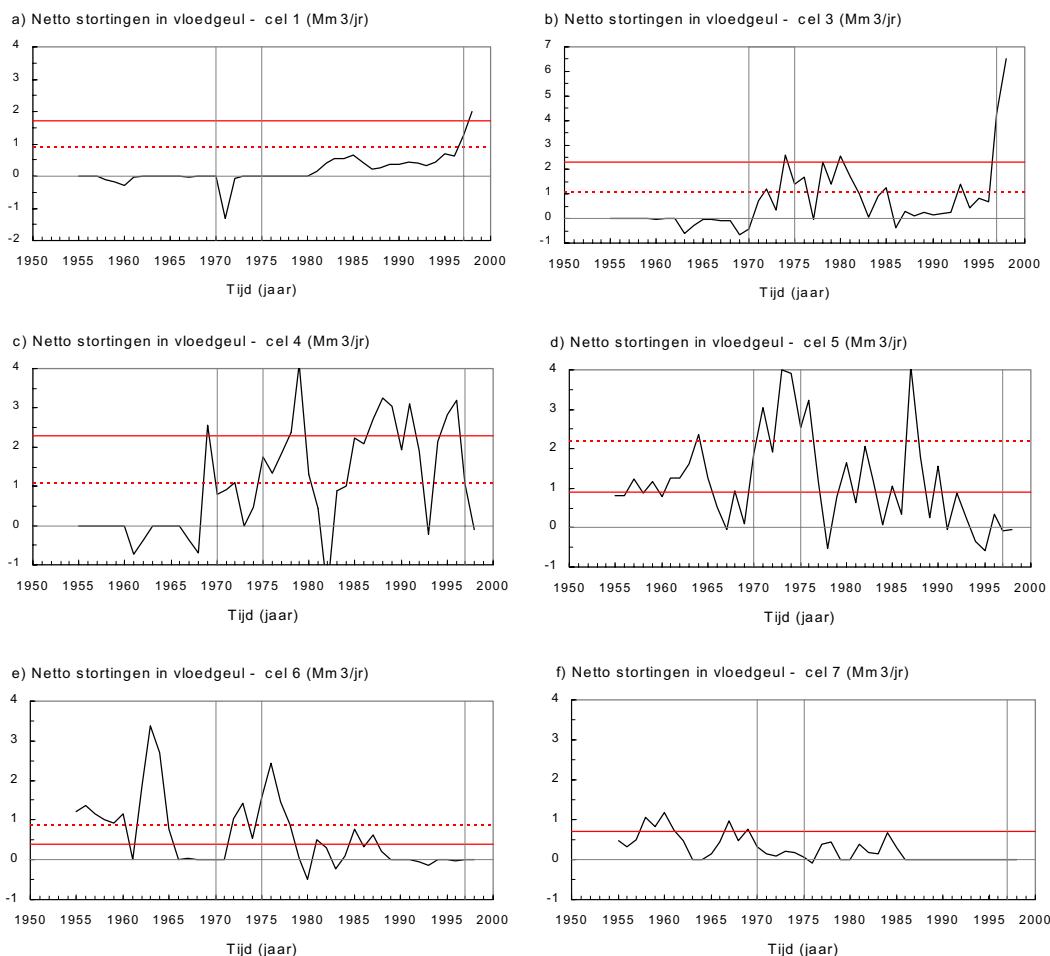
Op basis van de conclusie uit de voorgaande paragraaf kan worden nagegaan in hoeverre de stortcapaciteit van het geulsysteem in de cellen in het verleden is benut, onderschreden of overschreden. Hierbij wordt, behalve voor cel 7 waar de werkelijke capaciteit groter is, gebruik gemaakt van de maximale theoretisch transportcapaciteiten zoals die volgens tabel 5.1 van toepassing zijn. Deze getallen en de netto stortingen, zoals die in vloedgeulen hebben plaatsgevonden, zijn geconverteerd naar beunkuub (door ze te vermenigvuldigen met 1,1, zie ook Tabel 5.2) en uitgezet in Figuur 5.1. Hierin is de te hanteren stortcapaciteit weergegeven door middel van de doorgetrokken rode lijn. In deze paragraaf is bewust gekozen voor de beunkuub omdat de opgave van stort- en baggervolumina door de Belgen alsmede de verstrekking van vergunningen op de beunkuub is gebaseerd.

Figuur 5.1 laat in een oogopslag zien wanneer de capaciteit van het geulsysteem onder- of overschreden is. Een incidentele overschrijding betekent niet automatisch een aanzet tot kantelen van het systeem. Zoals beschreven in hoofdstuk 4, vertonen sommige geulen een netto erosie ondanks het storten van sediment. Kijken we naar figuur 5.1 dan kunnen we het volgende concluderen:

- Cel 1: de stortcapaciteit van de *macro*-cel is in het verleden onderschreden en wordt sinds 1998 waarschijnlijk overschreden (zie ook paragraaf 5.1).
- Cel 3: de stortcapaciteit is in het verleden onderschreden en wordt sinds 1997 overschreden. Deze overschrijding houdt verband met het tijdelijk noodzakelijke geringe storten in cel 4 (i.v.m. aanleg geulwandverdediging).
- Cel 4: de stortcapaciteit is in deze cel incidenteel overschreden zonder blijvende gevolgen. In de periode 1997-1999 is in de vloedgeul minimaal gestort in verband met de aanleg van geulwandverdedigingen (van Westenbrugge, pers.com.). De stortingen van gemiddeld $1.8 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ in de ebgeul tussen 1997-1999 waren echter te groot (Tabel 4.4).
- Cel 5: de stortcapaciteit in deze cel is in het verleden duidelijk overschreden. De theoretische stortcapaciteit is sinds 1992 nagenoeg volledig beschikbaar.
- Cel 6: de stortcapaciteit in deze cel is in het verleden eveneens duidelijk overschreden. De geringe totale stortcapaciteit is sinds 1989 beschikbaar.
- Cel 7: het is niet duidelijk hoe groot de maximale stortcapaciteit precies is. Duidelijk is wel dat deze niet is overschreden (de geul erodeert sinds 1955). De totale stortcapaciteit is sinds 1986 beschikbaar.

Dus in de twee meest westelijke cellen (1,3) bestaat sinds 1997/1998 een gebrek aan stortcapaciteit. Vooral de omvangrijke stortingen in de Everingen zijn veel te groot geweest. Het geulsysteem in deze cel heeft vermoedelijk een aantal jaren nodig om het overschot weer op te ruimen, afhankelijk van hoeveel er precies gestort gaat worden. Het lijkt verstandig om in ieder geval duidelijk onder de bovengrens van $2.3 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ (*beunkuub*) te blijven totdat de te grote sedimentophopingen weer verdwenen zijn. In de tussentijd kan meer gebruik worden gemaakt van stortcapaciteit in de vloedgeul van cel 4, het Gat van Ossensse. De ebgeul het Middellgat in deze cel kan beter worden ontzien, gelet op de recente ontwikkelingen. Verder bieden de vloedgeulen in de cellen 5,6 en 7 bieden nog ruimte, vooropgesteld dat daar stortvakken zijn/worden aangewezen. Het lijkt wel

verstandig om, voordat de stortvolumina in cel 5 eventueel weer worden opgevoerd, na te gaan wat de oorzaak van de sedimentatie gedurende de periode 1997-1999 is geweest.



Figuur 5.1 Netto stortingen (Mm^3/jr , dikke zwarte lijn) in de grote vloedgeulen van de cellen 1-7 tussen 1955 en 1999 in relatie tot de theoretische maximale stortcapaciteit. Voor cel 6 is uitgegaan van de stortingen in vak 22 en 24 samen. Voor cel 7 is de stortcapaciteit op basis van de waarnemingen aangehouden. Doorgetrokken rode lijn is de te hanteren stortcapaciteit. Gestippelde rode lijn is de stortcapaciteit bij een ander bagger en stortbeleid. *Let op: alles in beunkuub. Voor conversie zie Tabel 5.2*

Tabel 5.2 Waarden voor de stortcapaciteit zoals die in figuur 5.1 zijn weergegeven

	Cel 1	cel 3	cel 4	cel 5	cel 6	cel 7
10%-criterium (Mm^3), profielkuub	1.5	2.1	2.1	2.0	0.8	?
10%, beunkuub, lijn in Fig. 5.2	1.7	2.3	2.3	2.2	0.9	?
5%-criterium (Mm^3), profielkuub	0.8	1.0	1.0	0.8	0.4	>0.6
5%, beunkuub, lijn in Fig. 5.2	0.9	1.1	1.1	0.9	0.4	>0.7
Toe te passen % (rode doorgetrokken lijn in Fig. 5.2)	10	10	10	5	5	5

Enkele aanvullende opmerkingen

Zeker bij het toepassen van het theoretisch stortcriterium voor situaties in de toekomst, is het van belang een goede schatting te maken van het effect van het netto baggeren in de vaargeul. Immers, de stortcapaciteit bedraagt ongeveer 10% in geval van een lokaal effect en slechts 5% in het geval dat baggeren een verruiming van de gehele ebgeul veroorzaakt (=globaal effect). Een essentiële vraag is, bij welke baggeromvang het baggeren op de drempels in de ebgeulen van de cellen 1 en 3 gepaard gaat met een verruiming van de gehele ebgeul (zoals dat ook in de cellen 5-7 is gebeurd na de eerste verdieping). Op het moment dat dit gaat gebeuren is het waarschijnlijk nodig om een deel van het gebaggerde sediment terug te storten in de ebgeul omdat de stortcapaciteit in de vloedgeul(en) alleen dan niet meer toereikend zal zijn (zie ook laatste alinea).

De stortcapaciteit zoals geanalyseerd in deze studie heeft betrekking op de macro-cellen. Dit betekent dat het gebruiken van deze capaciteiten gepaard kan gaan met een degeneratie van de aanwezige meso-cellen. Om dit risico te kunnen inschatten wordt aanbevolen om de geldigheid van het stortcriterium ook voor de mesocellen te evalueren. Dit vraagt een nadere morfologische analyse van de kortsluitgeulen in de cellen 1, 5 en mogelijk 6, zoals dat ook door Jeuken (2000) is gedaan voor cel 3.

Naast het benutten van de geconstateerde ruimten, kan het gebruik van de stortcapaciteit in het geulensysteem van de Westerschelde wellicht nog verder worden geoptimaliseerd door rekening te houden met een tweetal zaken. In eerste plaats houdt de theorie, ten aanzien van de stortcapaciteit, geen rekening met natuurlijke tendensen van netto erosie en sedimentatie in de geulen. Het is echter denkbaar dat het storten boven de maximale stortcapaciteit in een eroderende geul minder kritisch is voor de handhaving van het twee-geulen systeem dan het storten in een stabiele of van nature verondiepende geul. Een tweede mogelijkheid om de stortcapaciteit te optimaliseren dan wel te vergroten, is het storten van sediment in zowel de vloedgeul als de ebgeul. In het verleden is dit in de ebgeul van cel 5 gebeurd. Het is denkbaar dat iets vergelijkbaars in de relatief stabiele ebgeul (Pas van Terneuzen) van cel 2 mogelijkheden biedt om de stortcapaciteit te vergroten. Het tijdelijk extra winnen van zand in gebieden waar recent te veel is gestort (cel 3), of waar anderszins problemen met storten zijn (cel 1), kan een serieuze optie zijn om op korte termijn meer ruimte voor het storten creëren. Voorwaarde is wel dat de vergunningen hiervoor ruimte bieden. Het daadwerkelijk optimaliseren van de stortcapaciteit op deze wijzen lijkt, met wat extra studie, wel haalbaar.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1.1 Inleiding

In de studie voor de Lang Termijn Visie Schelde-estuarium (LTV) is een morfologisch cellen-concept ontwikkeld, waarmee de grenzen van de stortcapaciteit in de Westerschelde bepaald kunnen worden, zonder dat het meergeulensysteem degenereert als gevolg van storten (Winterwerp e.a., 2000, zie ook hoofdstuk 2). Volgens dit concept kan in iedere stelsel van twee parallelle geulen (een cel) netto 5-10 % van de bruto sediment transportcapaciteit in een van beide geulen worden gestort zonder dat deze geul degenereert.

Het 5-10%- stortcriterium is in de huidige studie geverifieerd op basis van gemeten erosie en sedimentatietendensen in de grote geulen van de *macro*-cellen over de periode 1955-1999. Op basis van de uitkomst van de verificatie is vervolgens nagegaan in hoeverre de stortcapaciteit in 6 macrocellen is/wordt overschreden en waar er nog ruimte is voor het storten van sediment. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen worden in dit hoofdstuk samengevat.

6.1.2 Conclusies

Verificatie theoretische stortcapaciteit

Het theoretisch stortcriterium kan redelijkerwijs worden toegepast op de *macro*-cellen. Dit betekent dat 5-10% van de totale bruto transportcapaciteit in een van de twee geulen van een macro-cel kan worden gestort zonder dat het geulsysteem gaat kantelen als gevolg van het storten en baggeren. Het precieze percentage is afhankelijk van de hoeveelheden en wijze waarop er gebaggerd en gestort wordt, en waarschijnlijk van de autonome ontwikkeling. Dit laatste vraagt nadere studie.

Theoretische transport- en stortcapaciteit

De transport- en stortcapaciteit in de grote geulen van de macro-cellen, zoals beschreven door Winterwerp e.a. (2000) zijn aan de lage kant; de transportberekeningen zijn gebaseerd op een uniforme korrelgrootte van het bodemmateriaal die te groot is ($D_{50}=240\ \mu\text{m}$). In werkelijkheid is het sediment fijner. Hierdoor zijn het berekende sedimenttransport en de absolute stortcapaciteit groter. Bovendien neemt de D_{50} van de mond richting de grens Nederland - België geleidelijk af (van ca $210\ \mu\text{m}$ → $150\ \mu\text{m}$, in de geulen). Voor dit effect is in deze studie gecorrigeerd. Daarnaast is in de huidige studie uitgegaan van een (gebruikelijke) uitlevering van 10% voor fijn zand (in plaats van de 20% in Winterwerp e.a. 2000). Hierdoor is de invloed van storten en baggeren sneller zichtbaar in de waargenomen ontwikkelingen (het zijn meer in situ kuubs).

Beperkingen en mogelijkheden voor het storten

De toepasbaarheid van het theoretisch stortcriterium impliceert dat met het huidige bagger- en stortbeleid (sinds 1997-1999)

- 1 de maximale stortcapaciteit van de totale Westerschelde, zoals in deze studie gehanteerd (tabel 2.1) gebruikt wordt en,
- 2 dat deze stortcapaciteit zo optimaal mogelijk moet worden benut om ongewenste verondiepingen van de geulen waar gestort wordt te voorkomen.

De maximale stortcapaciteit van de vloedgeulen in de cellen 5 en 6, in het oostelijk van de Westerschelde, is in het verleden gedurende langere perioden (5 jr.) overschreden. Deze overschrijding gepaard met een netto verondieping van de vloedgeulen. Naar aanleiding van de Oostwest-studie (Vroon e.a., 1997) is besloten om meer baggerspecie te storten in het midden en westen van de Westerschelde. Echter, met namen in de vloedgeul Everingen (cel 3) is sinds de laatste verdieping (1997/1998) te veel gestort met ongewenste verondiepingen als gevolg. Daarnaast zijn de mogelijkheden voor het storten in cel 1 (1a) beperkt doordat de stortlocatie zich bevindt in een (van nature) verzandende kortsluitgeul (Ebschaar Spijkerplaat). Sinds 1997 wordt in dit gebied, met moeite, veel gestort.

In de vloedgeulen van de cellen 4 (sinds 1997), 5, 6 en 7 is nog ruimte voor het storten van sediment. Verdere optimalisatie lijkt mogelijk door het storten van sediment in de grote min of meer stabiele ebgeul Pas van Terneuzen (cel 3) en het winnen van (extra) zand op de stortlocaties in het westen waar te veel is gestort.

Waargenomen morfologische ontwikkelingen

Voor een aantal, overwegende vloedgedomineerde, geulen is een kritische grens ten aanzien van het storten naar voren gekomen: het storten van sediment in de vloedgeulen van de cellen 1 (nabij Vlissingen), 3, 4 (ebgeul), 5 en 6 (nabij Bath) ging gepaard met een netto verondieping van de geul. In de ebgeulen van de cellen 1, 3 en 4 (midden en westelijk deel) heeft het baggeren op de drempels slechts een lokale invloed gehad. In het oostelijk deel (cellen 5,6,7) ging het baggeren op de drempels gepaard met een erosie van de gehele geul (=globaal effect).

De geulsystemen in de drie macro-cellen tussen Vlissingen en Hansweert kantelen van nature gedurende kortere of langere perioden (tabel 4.11): de vloedgeulen eroderen, terwijl de ebgeulen gelijktijdig verondiepen. Deze ontwikkelingen zijn slechts in geringe mate beïnvloed door baggeren en storten. In de cellen tussen Hansweert en de grens Nederland-België (cellen 5,6 en 7), treedt een tegenovergestelde ontwikkeling op: de ebgeulen verruimen aanzienlijk als gevolg van het baggeren, terwijl vooral de vloedgeulen in cel 5 gemiddeld verondiepen. In dit gebied kantelt het geulsysteem dus de ander kant op en hebben baggeren en storten deze tendens op zijn minst versterkt, zo niet veroorzaakt.

6.1.3 Aanbevelingen voor het beheer

De resultaten van deze studie leiden tot een drietal aanbevelingen voor het beheer:

- 1 Analyseren op welke wijzen het stortbeleid het beste geoptimaliseerd kan worden. Er zijn aanwijzingen dat met het huidige stortbeleid (storten in vloedgeulen) deze capaciteit nog niet optimaal wordt benut (paragraaf 5.2). Daarnaast kan worden overwogen om te storten in grote stabiele of eroderende ebgeulen en tijdelijk (extra) zand te winnen op stortlocaties waar te veel is gestort (zie ook paragraaf 5.2).
- 2 Een zo flexibel mogelijk stortbeleid. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het aanwijzen van ‘slapende’ stortlocaties: stortlocaties die kunnen worden gebruikt in geval van een onverwachte overschrijding van de stortcapaciteit met ongewenste effecten elders.
- 3 Het nauwgezet monitoren van de morfologische ontwikkelingen van individuele (hoofd)geulen en delen daarvan (uitbreiden van de analyses in Hoofdstuk 4 met nieuwe gegevens). Belangrijke aspecten zijn de lokale ontwikkelingen in stortgebieden en de ontwikkeling van de ebgeulen waar gebaggerd wordt: wordt het in de vloedgeul gestorte sediment door de getijstroom opgeruimd? In hoeverre gaan de gehele ebgeulen na de verdieping van 1997/1998 uitruimen (zoals dat na de eerste verdieping in het oostelijk deel is gebeurd)? Beiden zijn van belang voor het verder evalueren en toepassen van het stortcriterium.

6.1.4 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

De aanbevelingen voor vervolgonderzoek kunnen worden onderverdeeld in aanbevelingen die betrekking hebben op het verbeteren van de theorie die ten grondslag ligt aan het cellen-concept en aanbevelingen die betrekking hebben op het analyseren en verklaren van morfologische ontwikkelingen. Deze laatste categorie aanbevelingen is ook van belang voor het beheer (invulling bagger- en stortbeleid, zandwinning etc.) en het verder onderbouwen en verbeteren van het cellen-concept.

Aanbevelingen voor het verbeteren van het cellen-concept

- 1 Het cellen-concept, zoals dat tot dusverre is uitgewerkt, kent een aantal beperkingen (paragraaf 2.1). Op basis van gevoeligheidsanalyses met behulp van het 1D-model Sobek kan worden nagegaan welke beperkingen het belangrijkste zijn. Hiermee kan het belang van verschillende processen en parameters voor de stabiliteit en ontwikkeling van een cel worden bestudeerd. Voor deze analyses kan worden gedacht aan het bestuderen van de invloed van:
 - Een variërende geometrie van de geulen in de cellen. Beide geulen in de cel even groot, de ene geul groter dan de ander, een cel met een eb-vloedschaar karakter (lengte verschillen, niet-uniforme afmetingen in de langsrichting van de geulen).
 - Natuurlijke erosie en sedimentatie van geulen. Deze processen zijn nog niet meegenomen in de theoretische analyse; deze veronderstelt een stabiele morfologie van het geul-plaat systeem in de cel (‘evenwicht’). Een uitbreiding van de theorie in deze richting is zeer wenselijk omdat de historische gegevens suggereren dat het storten in een eroderende geul (of geulsysteem) minder kritisch is dan het storten in een stabiele of verondiepende geul.

- De invloed van verschillende manieren van baggeren en storten (lokaal of globaal, ‘uitsmeren’ van stortingen).
 - Een niet-stationaire waterbeweging (getij), inclusief het belang van asymmetrien en reststromingen in de waterbeweging.
 - Invloed van korrelgrootte.
- 2 Op basis van deze gevoeligheidsanalyses, kan de theorie (stabiliteitsanalyse) worden uitgebreid en het cellen-concept worden verbeterd.

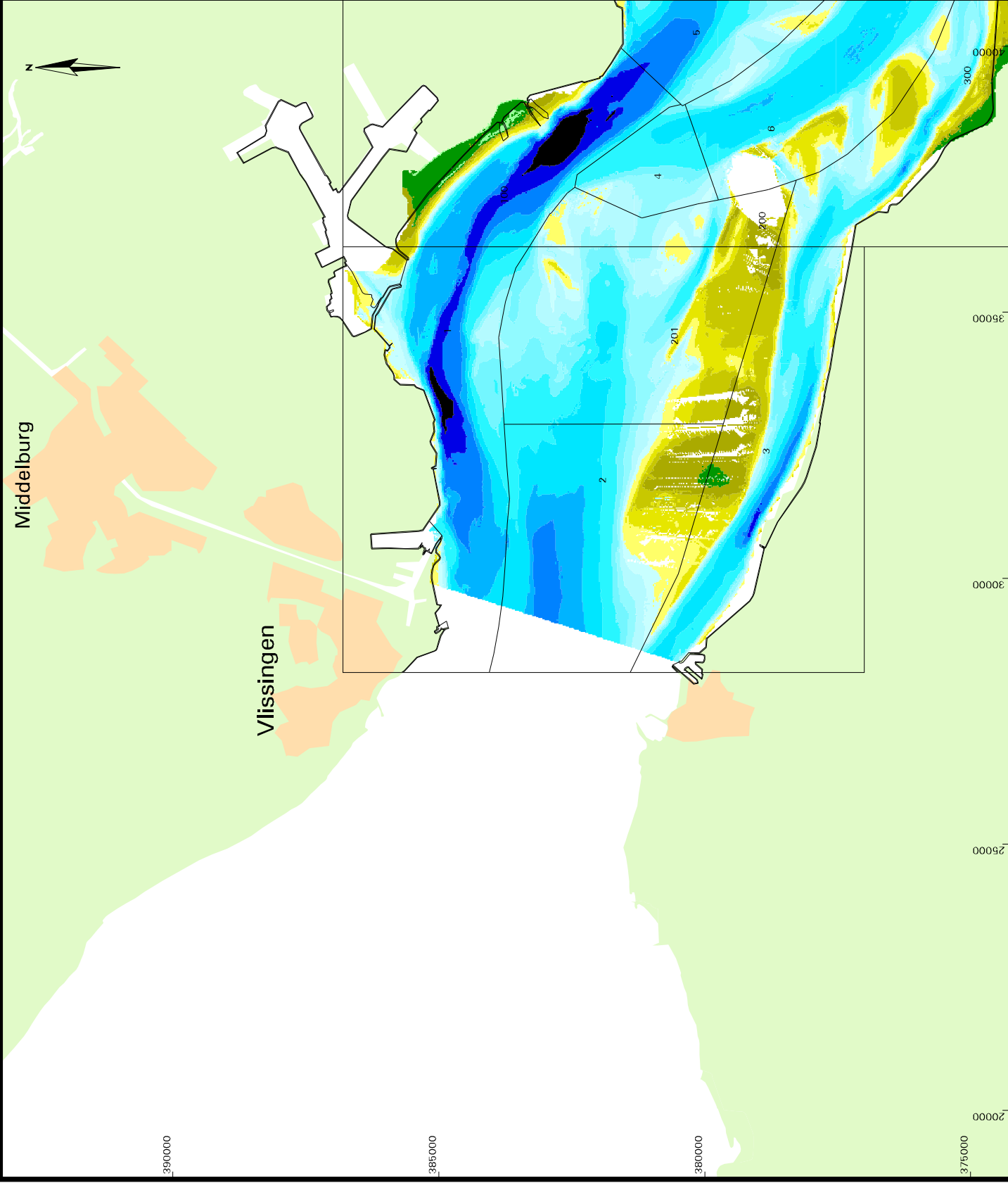
Aanbevelingen met betrekking tot waargenomen morfologische veranderingen

- 1 Verifiëren van het stortcriterium op basis van de ontwikkeling in de mesocellen, met namen de cellen 1a, 3b-d. De ontwikkeling van de meso-cellen 2a-2d, 4a,4b en 5a kunnen vrij snel in kaart worden gebracht door een paar kleine aanpassingen in de reken-coverage ‘rvaksas3’. Voor de cellen 1a en 3b-d vraagt dit meer werk, omdat het hier om verplaatsende kortsluitgeulen gaat (zie Jeuken, 2000 voor een analyse methode).
- 2 Gedetailleerde analyse van erosie- en sedimentatiekaarten gericht op het traceren van kritische grenzen voor storten. Hierbij gaat het concreet om:
- de vloedgeul Gat van Ossenis in cel 4 tussen 1988 en 1997.
 - de vloedgeul Schaar van de Noord in cel 6.
- 3 Op basis van initiële morfologische berekeningen met een 2DH model nagaan:
- in hoeverre de morfologische ontwikkelingen in cel 4 nabij Hansweert van invloed zijn geweest op de morfologische veranderingen in cel 5 (Valkenisse-gebied) gedurende de periode 1950-1980,
 - dat de sedimentatie in het Middelgat in de periode 1997-1999 het gevolg is van te grote stortingen en niet van de toegenomen zandwining in het drempelgebied van de vloedgeul in cel 4 (Overloop van Hansweert) sinds 1990,
 - de vermoede samenhang in de ontwikkeling van eb - en vloedgeul in cel 1 juist is (paragraaf 4.2).
- Dergelijke modelsommen helpen bij het verklaren van de samenhang in de morfologische ontwikkelingen van geulen binnen een cel en tussen aangrenzende cellen.
- 4 Analyseren van de ontwikkeling van geulen en platen in cel 5 gedurende de periode 1900-1955 in relatie tot de periode 1955-1999 (paragraaf 4.6). In hoeverre kantelt dit geulsysteem van nature en wat is daarbij de rol van cel 4 geweest (zie ook 2)? Is het mogelijk dat de erosie van de ebgeul (tussen 1970 en 1989) niet alleen door de verdieping in 1970-1975 is veroorzaakt, maar dat ook een grotendeels natuurlijke verondieping van de vloedgeul in de voorgaande perioden (1955-1970, 1900-1955?) hierin een rol heeft gespeeld?

7 Referenties

- Bray, R.N. A.D. Bates, J.M. Land (1997), *Dredging. A handbook for engineers*. New York, John Wiley.
- Jeuken, M.C.J.L. (2000), *On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary*. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Rijkswaterstaat (1998), *Milieuaspectenstudie Baggerspeciëstort Westerschelde*. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.
- Rijkswaterstaat (2000), *Zand in de Hand. Beleidsplan Zandwinning Westerschelde 2001-2011*, Nota NWL-00.50, Directie Zeeland.
- Van der Male, K. (2001), *Analyse van de inhouds- en oppervlakteontwikkeling van geulen, platen en slikken in de Westerschelde tussen 1955-1999*. Concept rapport. RIKZ
- Van Kerckhoven, J. D.M. (1995), *Morphological modelling of ebb and flood channel systems in estuaries*. Afstudeerrapport, Faculteit van Civiele Techniek, TU Delft.
- Wang, Z.B. en Th. van der Kaaij (1994), *Morphodynamic development of secondary channel systems along Rhine branches in The Netherlands*, Rapport Q1963, WL|Delft Hydraulics.
- Wang Z.B., M. de Vries, R.J. Fokkink, A. Langerak (1995), *Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models*. Journal of Hydraulic research, Vol 33, No 6.
- Wang Z.B. , P.M.C. Thoolen, R.J. Fokkink (1997), *Studie naar de morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde. Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal*, Rapport Z2310, WL|Delft Hydraulics.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuyper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen en Z.B. Wang (2000), *Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie (2 delen)*. WL|Delft Hydraulics.

A Diepte-kaarten



Bodemligging Westerschelde- westelijk gebied

Bodem: 1955

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



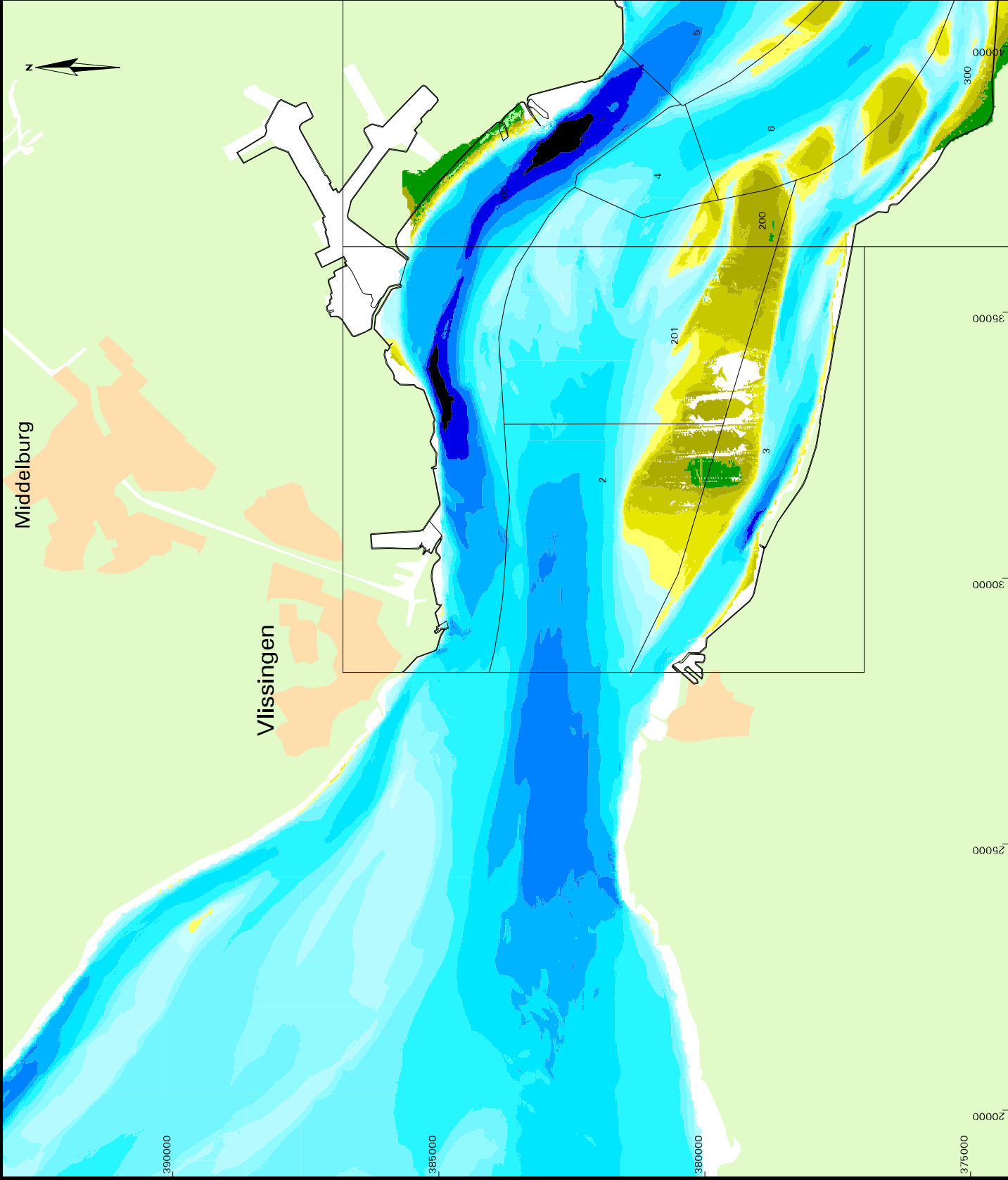
Bron: Vaklodngen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Bodemligging

Westerschelde-
westelijk gebied

Bodem: 1970

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Boven N.A.P. +4 m
+4 tot +3 m
+3 tot +2 m
+2 tot +1 m
+1 tot N.A.P.
N.A.P. tot -1 m.
-1 tot -2 m
-2 tot -3 m
-3 tot -5 m
-5 tot -7,5 m
-7,5 tot -10 m
-10 tot -15 m
-15 tot -20 m
-20 tot -25 m
-25 tot -35 m
-35 tot -45 m
Dieper dan -45 m



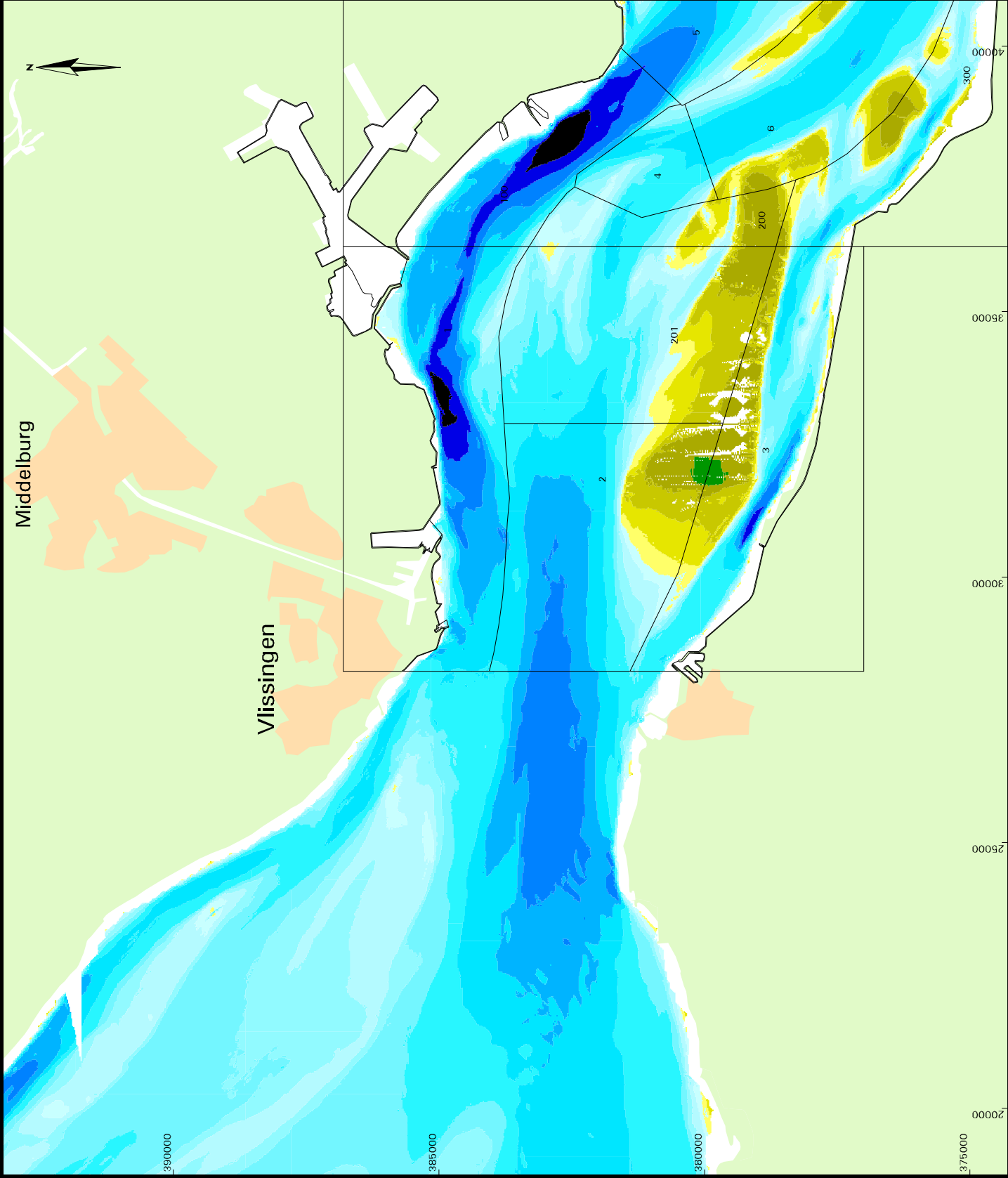
Bron: Vaklodngen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Bodemligging

Westerschelde-
westelijk gebied

Bodem: 1976

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Boven N.A.P. + 4 m
+ 4 tot + 3 m
+ 3 tot + 2 m
+ 2 tot + 1 m
+ 1 tot N.A.P.
N.A.P. tot -1 m.
-1 tot -2 m
-2 tot -3 m
-3 tot -5 m
-5 tot -7,5 m
-7,5 tot -10 m
-10 tot -15 m
-15 tot -20 m
-20 tot -25 m
-25 tot -35 m
-35 tot -45 m
Dieper dan -45 m

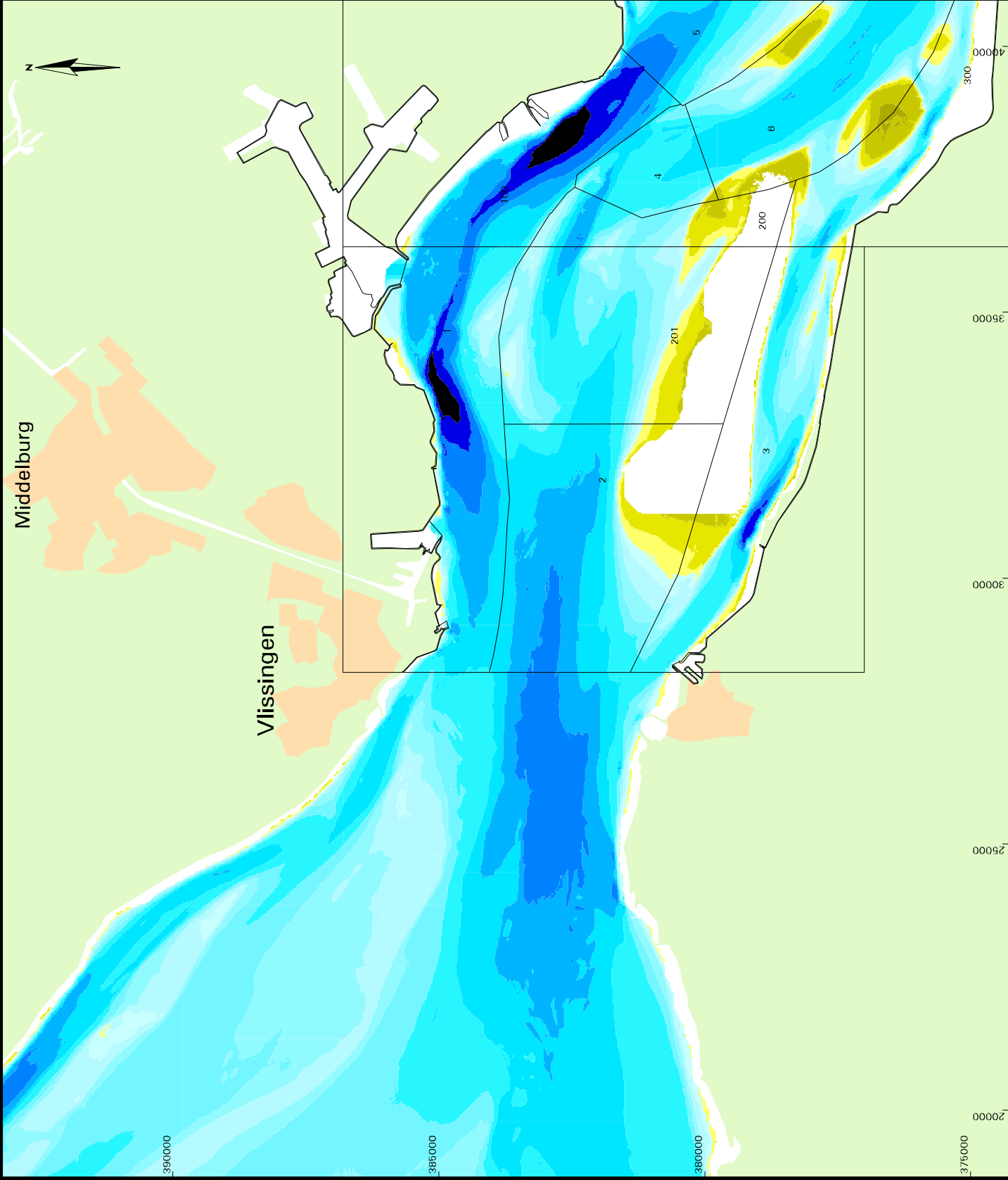


Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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



Bodemligging

Westerschelde- westelijk gebied

Bodem: 1990

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Boven N.A.P. + 4 m
+ 4 tot + 3 m
+ 3 tot + 2 m
+ 2 tot + 1 m
+ 1 tot N.A.P.
N.A.P. tot -1 m.
-1 tot -2 m
-2 tot -3 m
-3 tot -5 m
-5 tot -7,5 m
-7,5 tot -10 m
-10 tot -15 m
-15 tot -20 m
-20 tot -25 m
-25 tot -35 m
-35 tot -45 m
Dieper dan -45 m

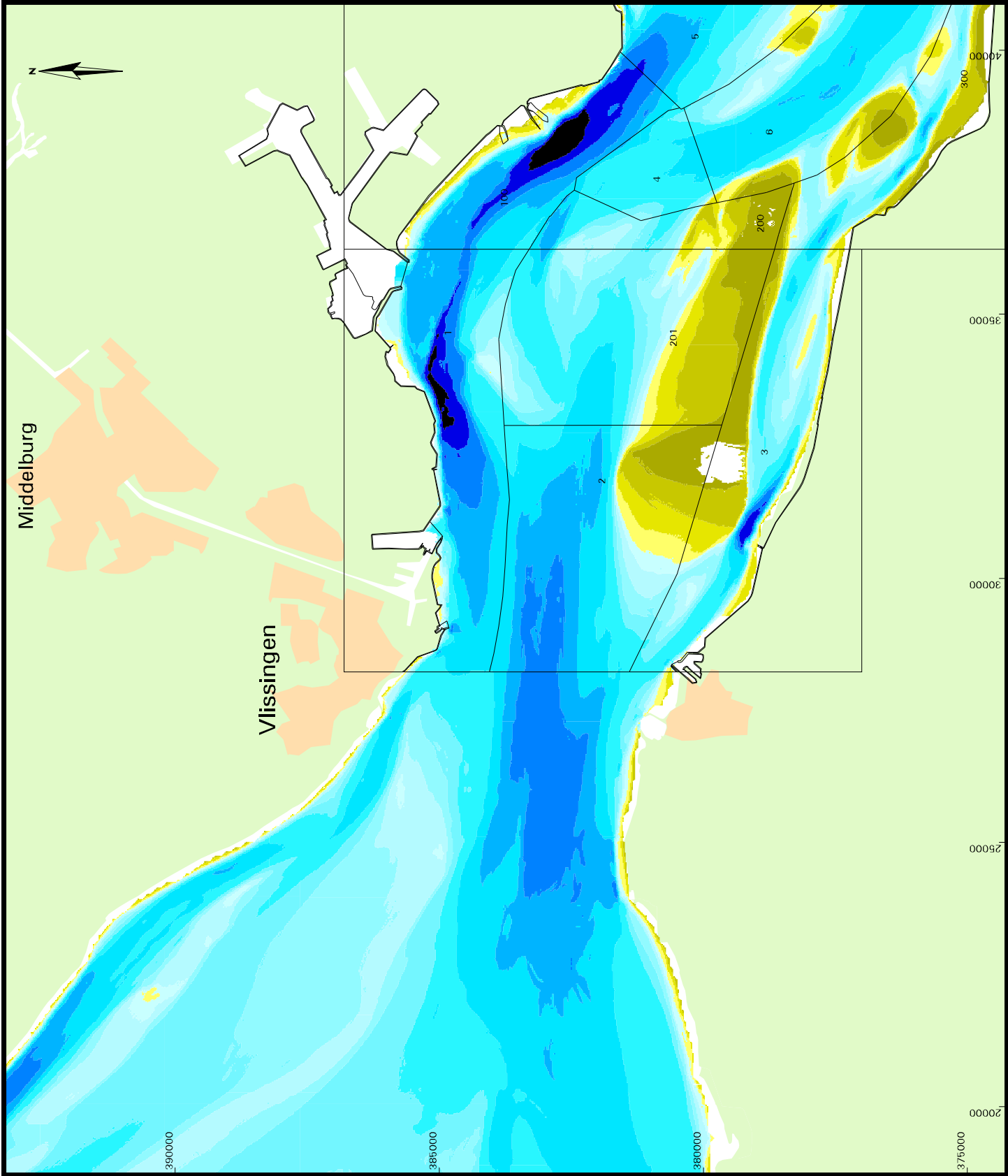


Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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



Bodemligging Westerschelde- westelijk gebied

Bodem: 1997

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



- Boven N.A.P. +4 m
- +4 tot +3 m
- +3 tot +2 m
- +2 tot +1 m
- +1 tot N.A.P.
- N.A.P. tot -1 m.
- 1 tot -2 m
- 2 tot -3 m
- 3 tot -5 m
- 5 tot -7,5 m
- 7,5 tot -10 m
- 10 tot -15 m
- 15 tot -20 m
- 20 tot -25 m
- 25 tot -35 m
- 35 tot -45 m
- Dieper dan -45 m



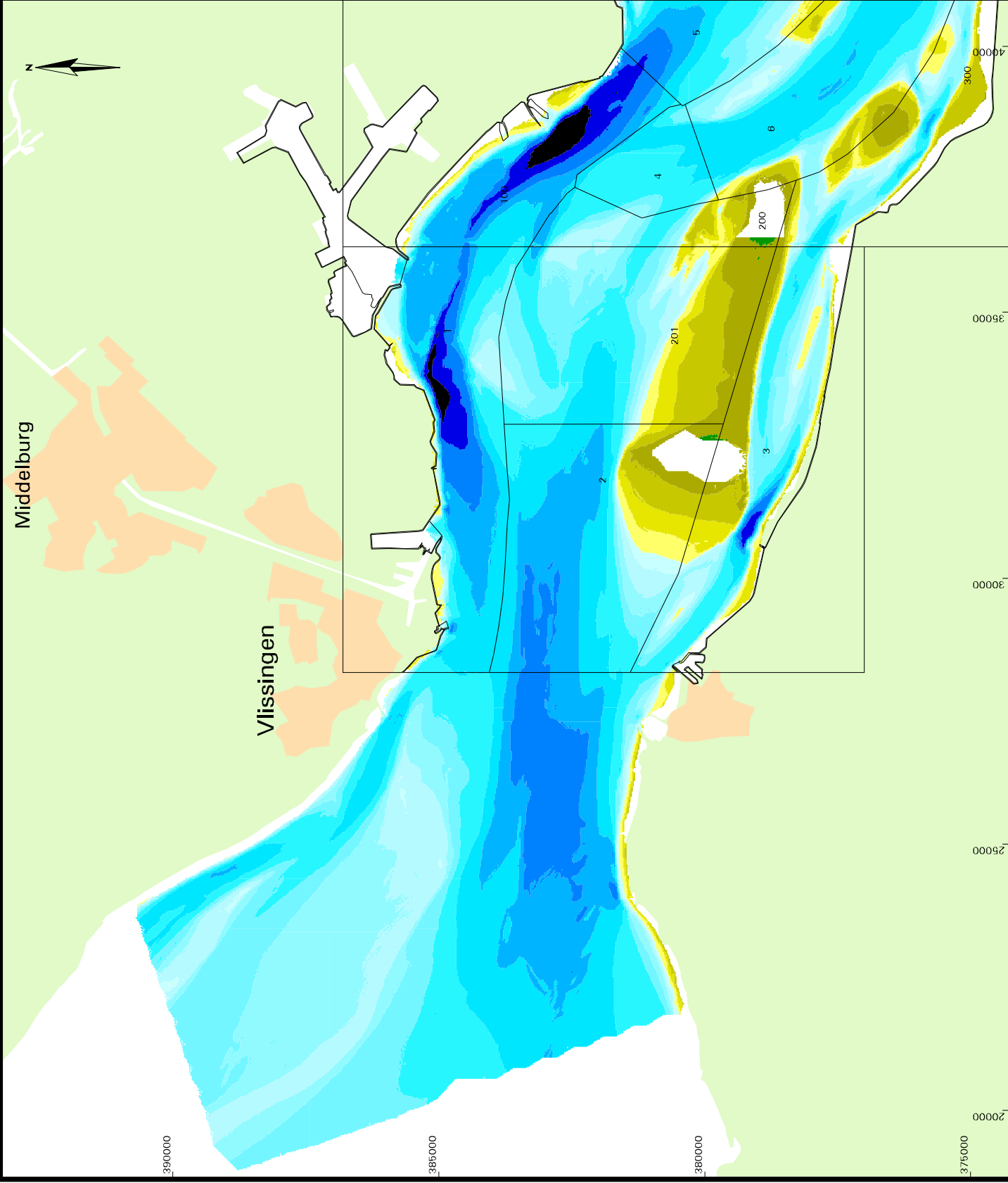
Bron: Vaklodngen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Bodemligging Westerschelde- westelijk gebied

Bodem: 1999

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodngen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar

Zuid Beveland

Bodemligging

Westerschelde-
middengebied

Bodem: 1955

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



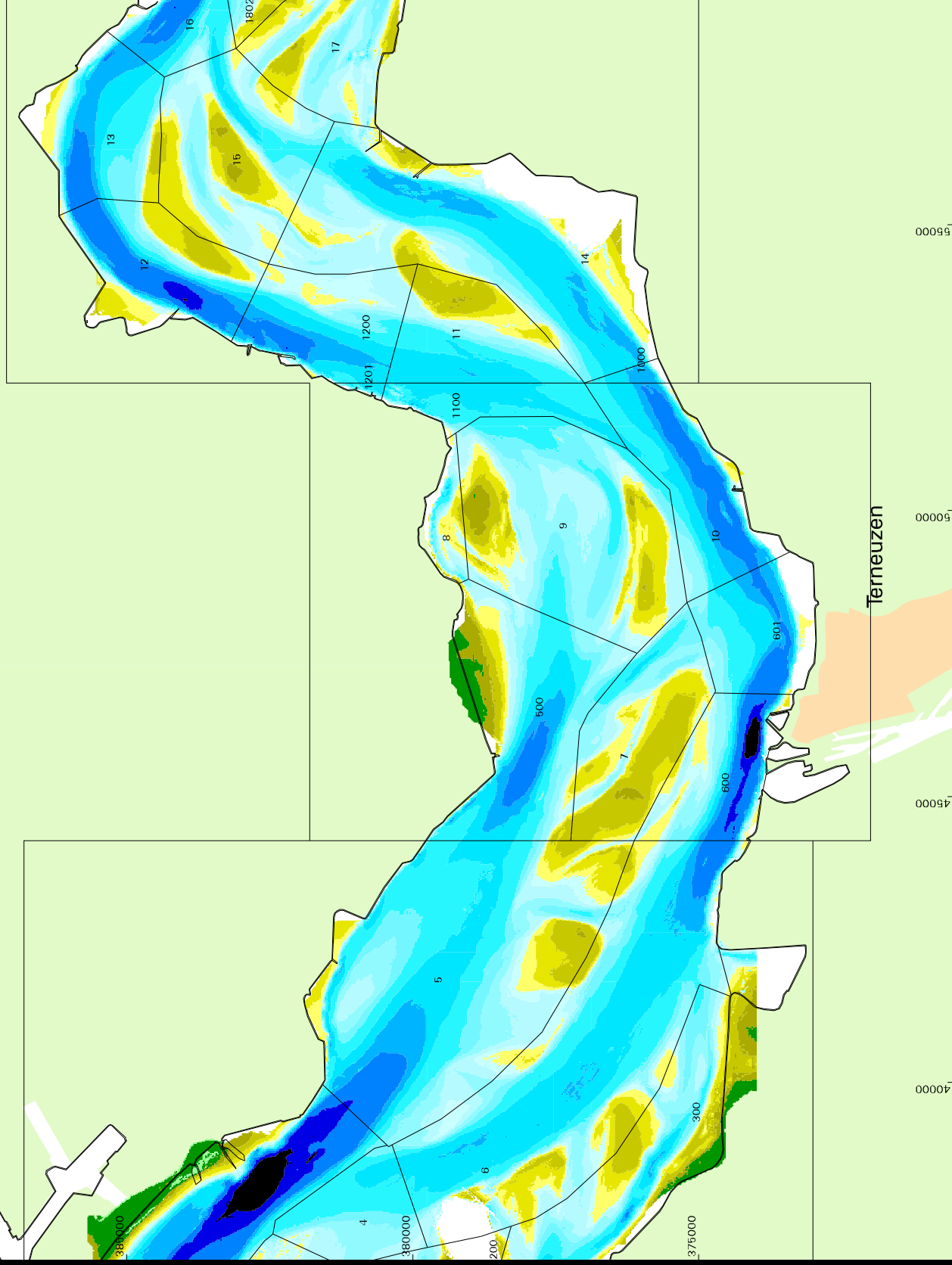
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Bodemligging

Westerschelde-
middengebied

Bodem: 1969 - 1970

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodingen RWS

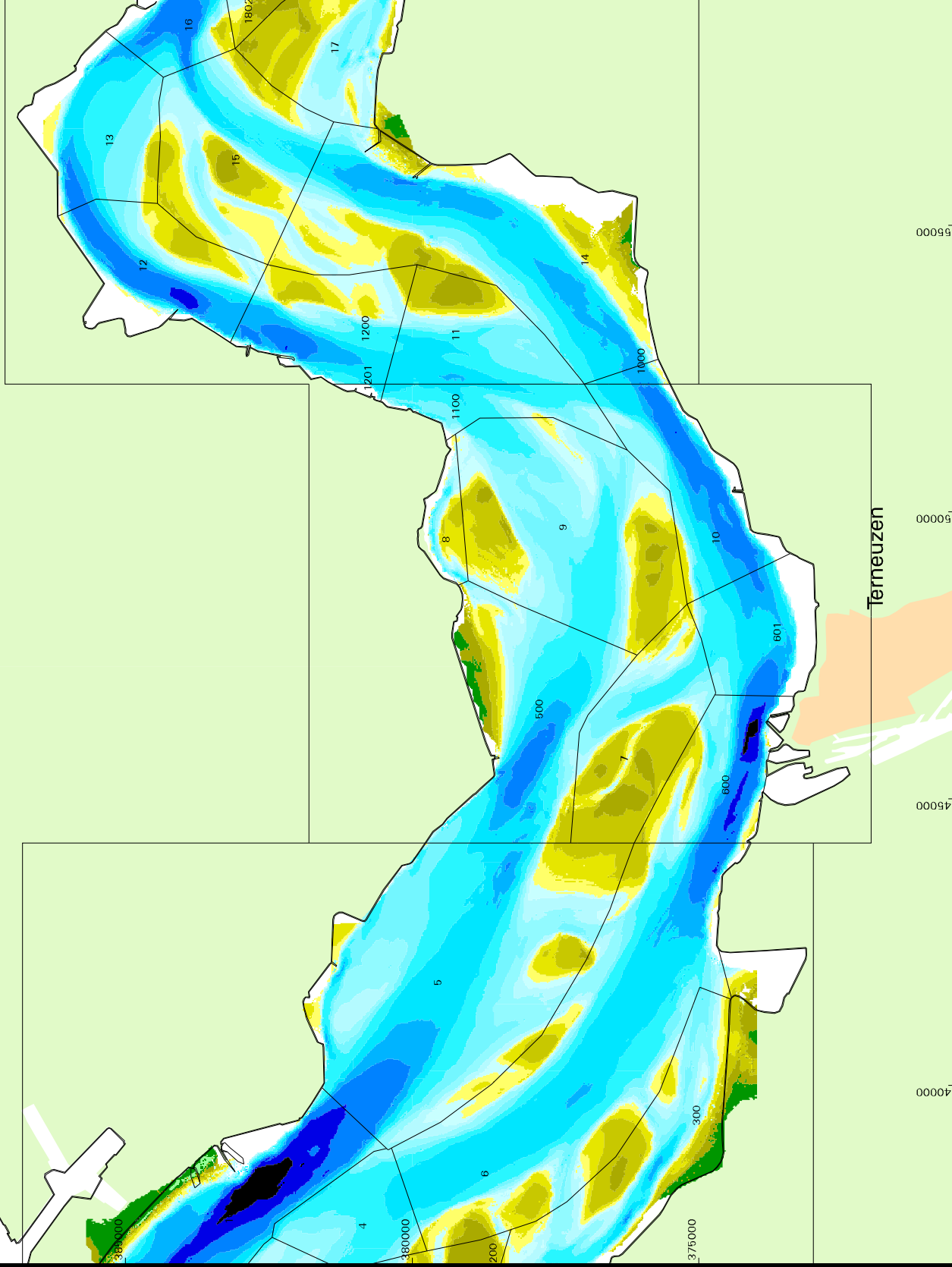
schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Bodemligging

Westerschelde-
middengebied

Bodem: 1975 - 1976

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar

Zuid Beveland

Bodemligging

Westerschelde-
middengebied

Bodem: 1990

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



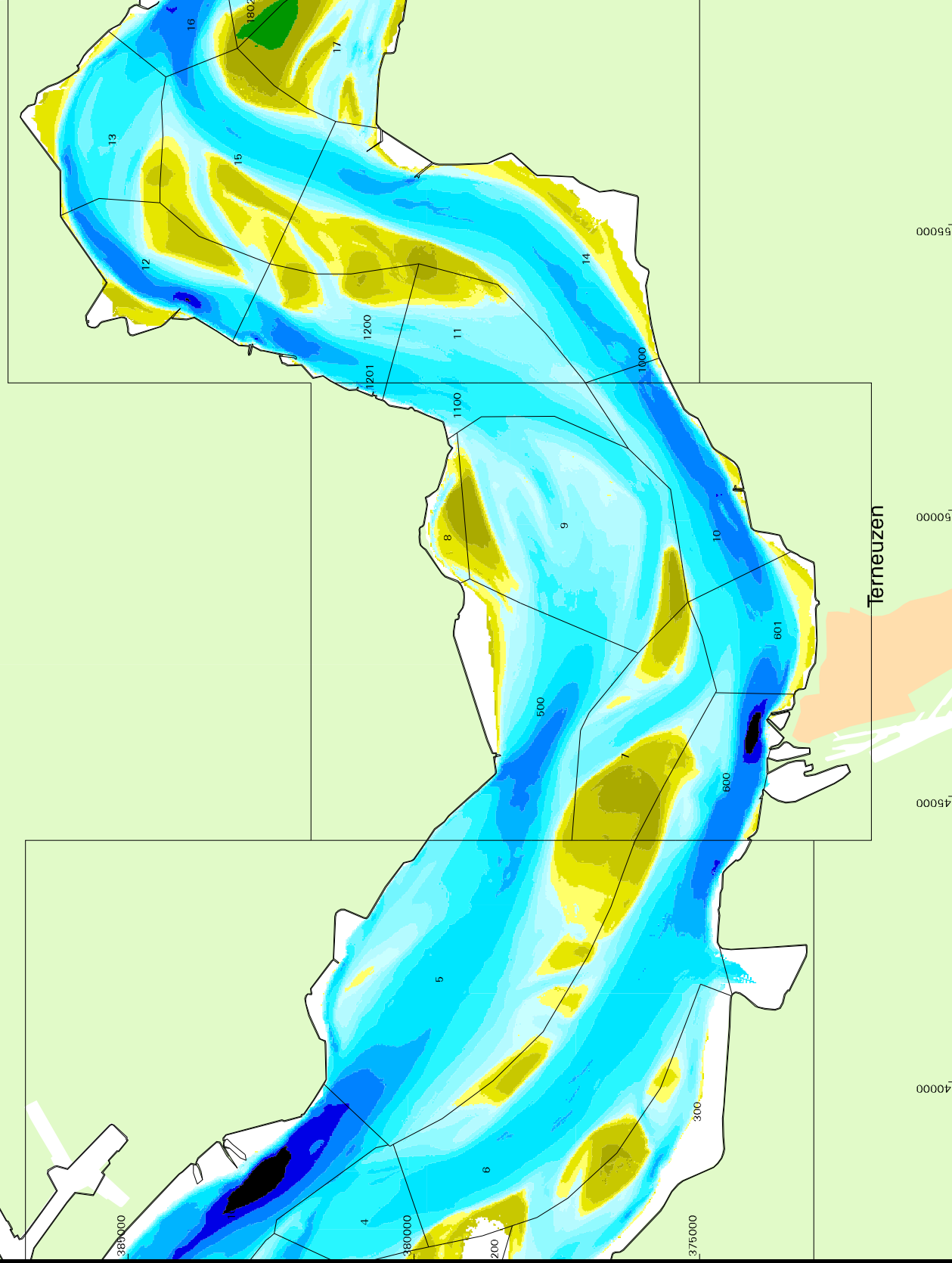
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Bodemligging

Westerschelde-
middengebied

Bodem: 1997

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodingen RWS

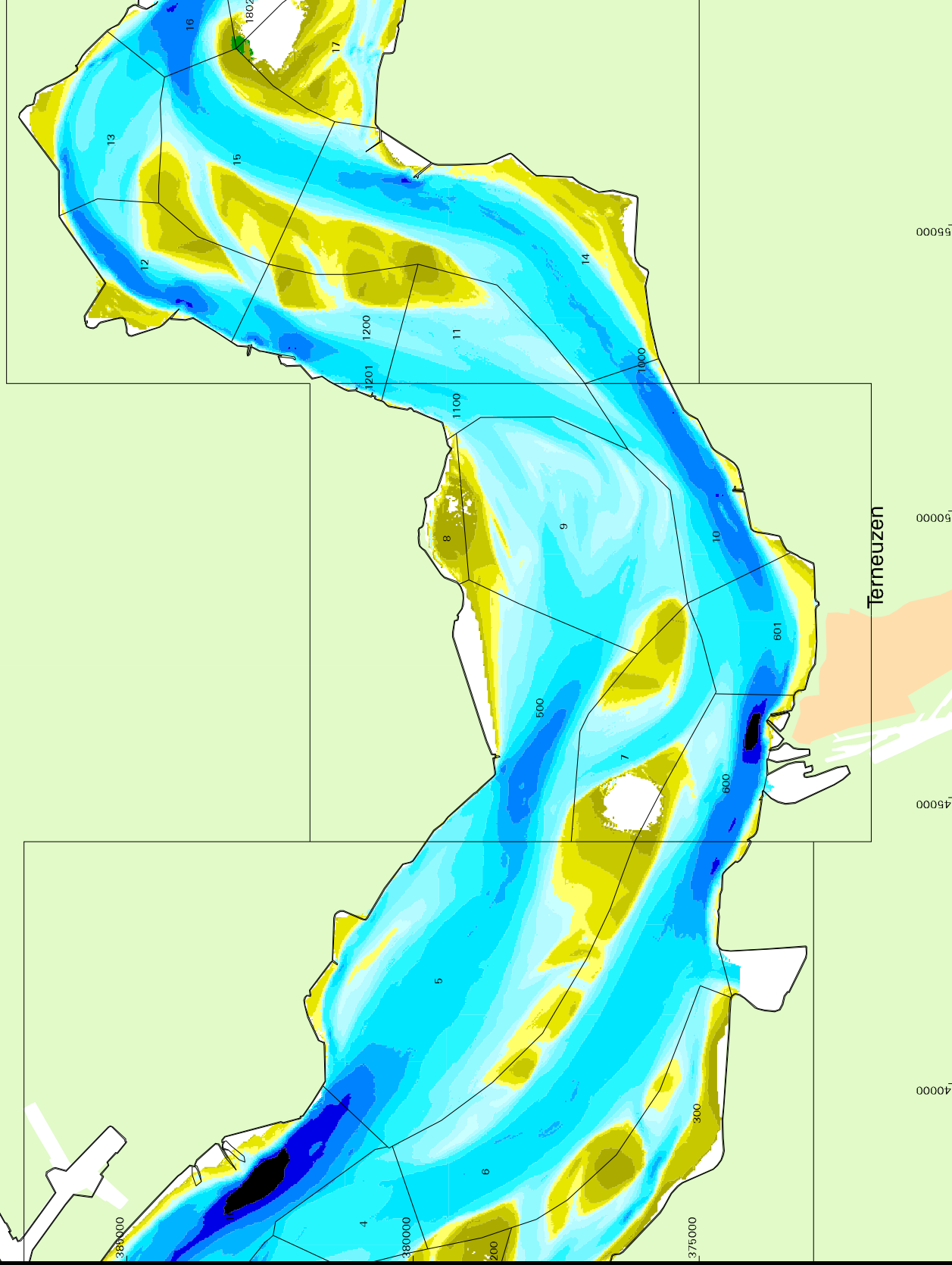
schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Bodemligging

Westerschelde-
middengebied

Bodem: 1999

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodingen RWS

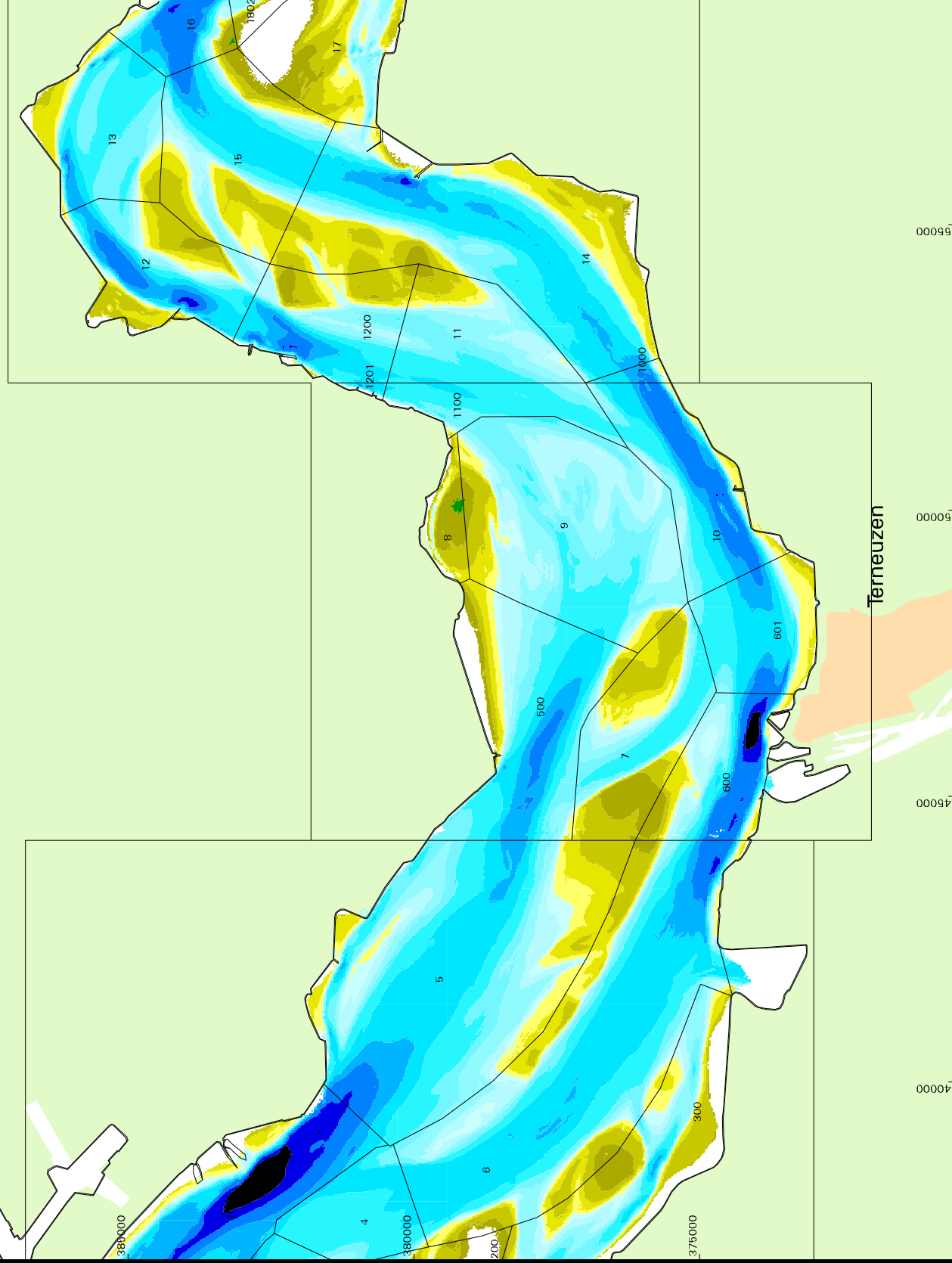
schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



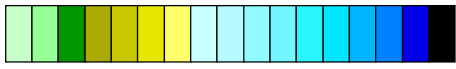
Bodemligging

Westerschelde-
oostelijk gebied

Bodem: 1955

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodngen RWS

schaal 1 : 100000

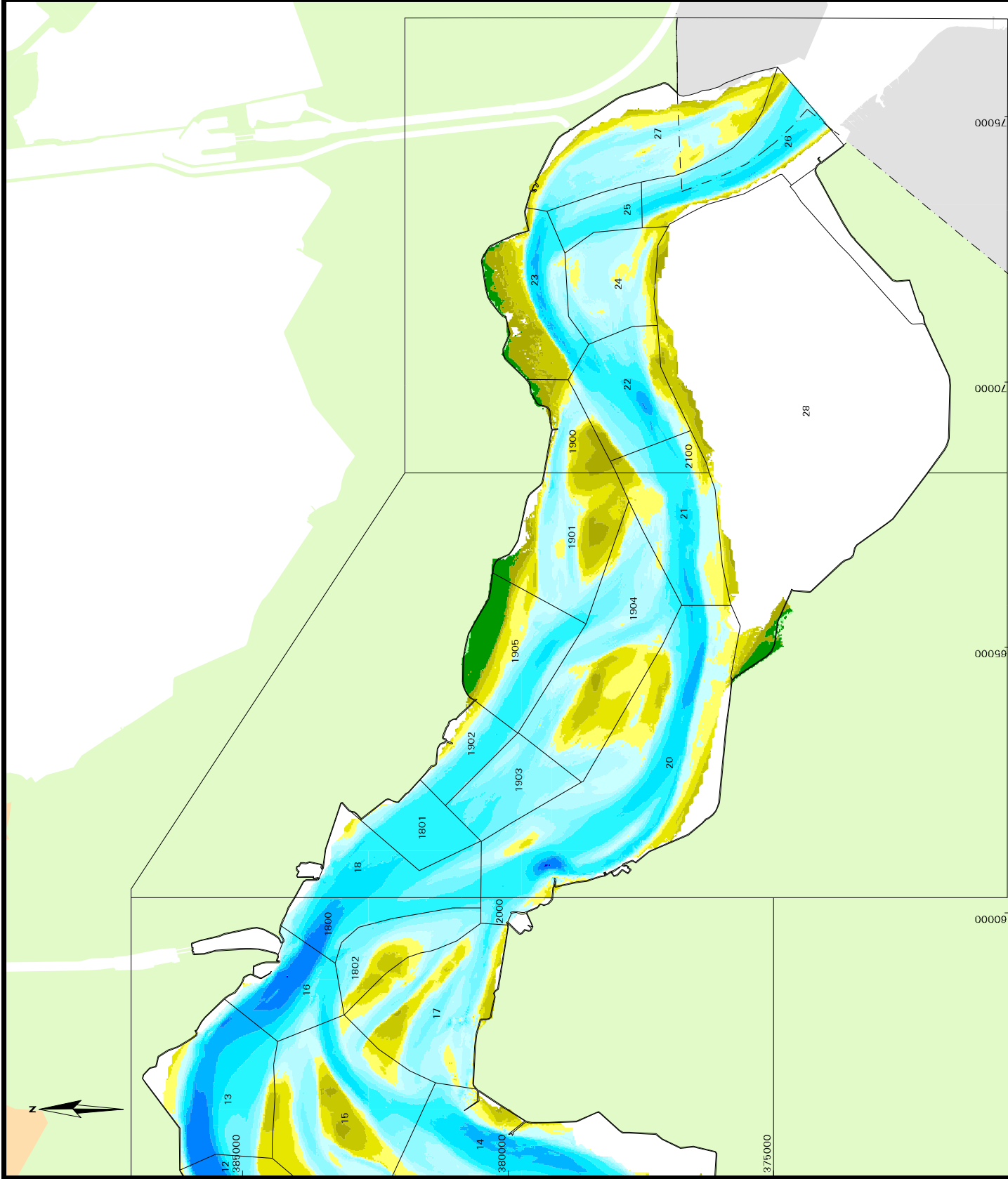


Ministerie van Verkeer
en Waterstaat

Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



Bodemligging

Westerschelde-
oostelijk gebied

Bodem: 1969

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodingen RWS

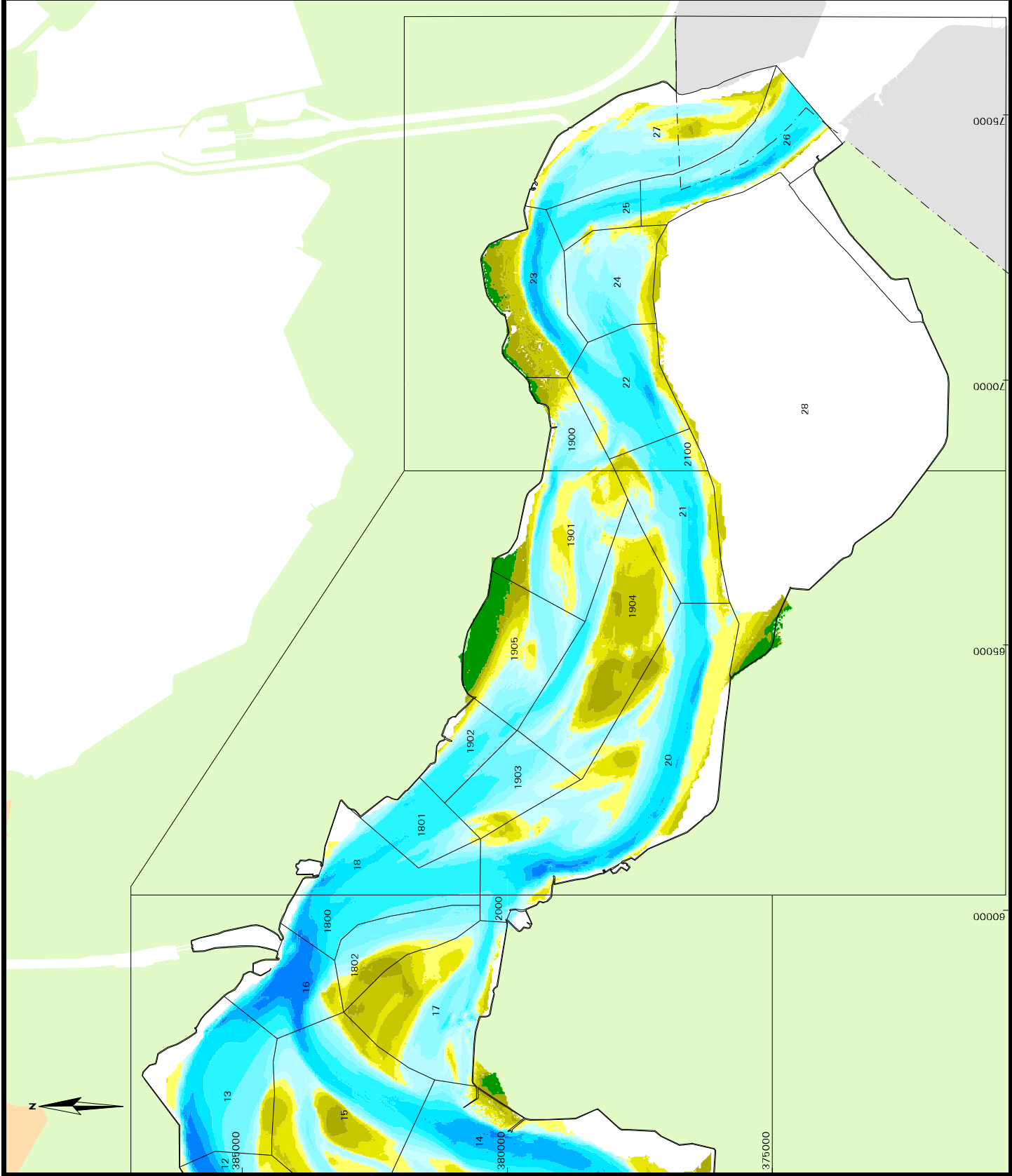
schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



Bodemligging

Westerschelde-
oostelijk gebied

Bodem: 1975

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodngen RWS

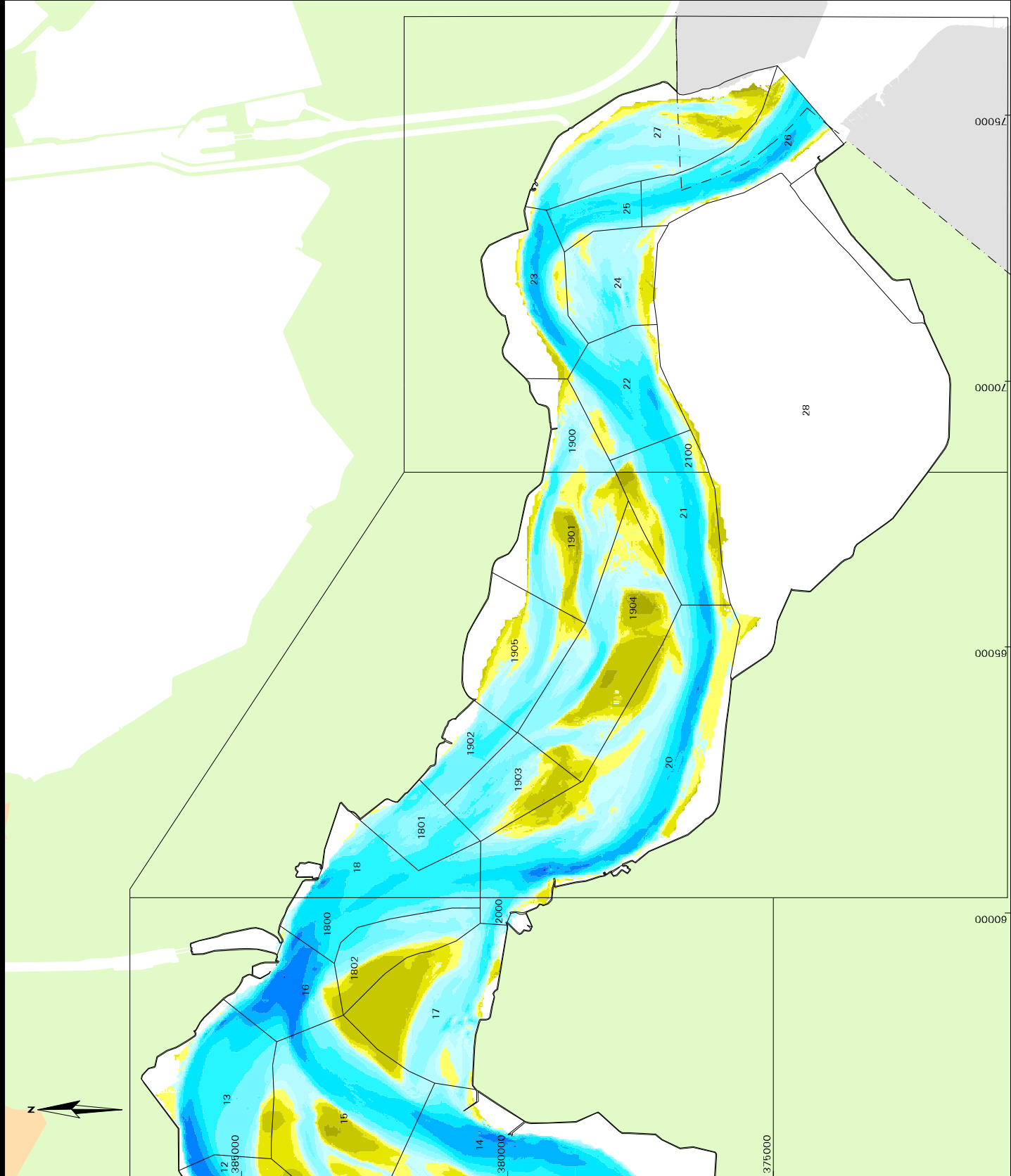
schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



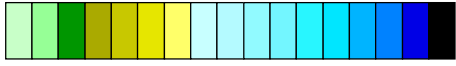
Bodemligging

Westerschelde-
oostelijk gebied

Bodem: 1990

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



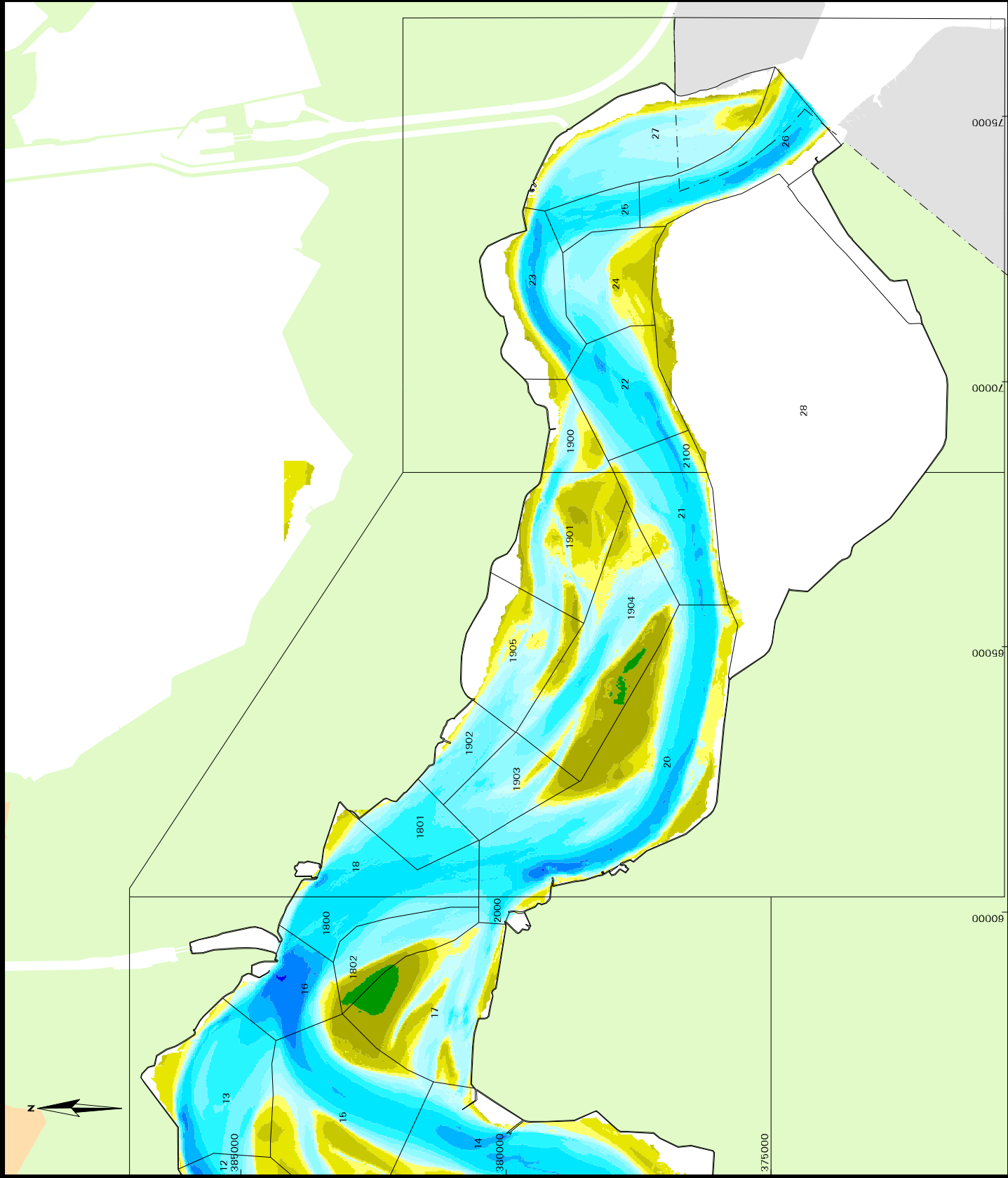
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Bodemligging

Westerschelde-
oostelijk gebied

Bodem: 1997

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



Bron: Vaklodngen RWS

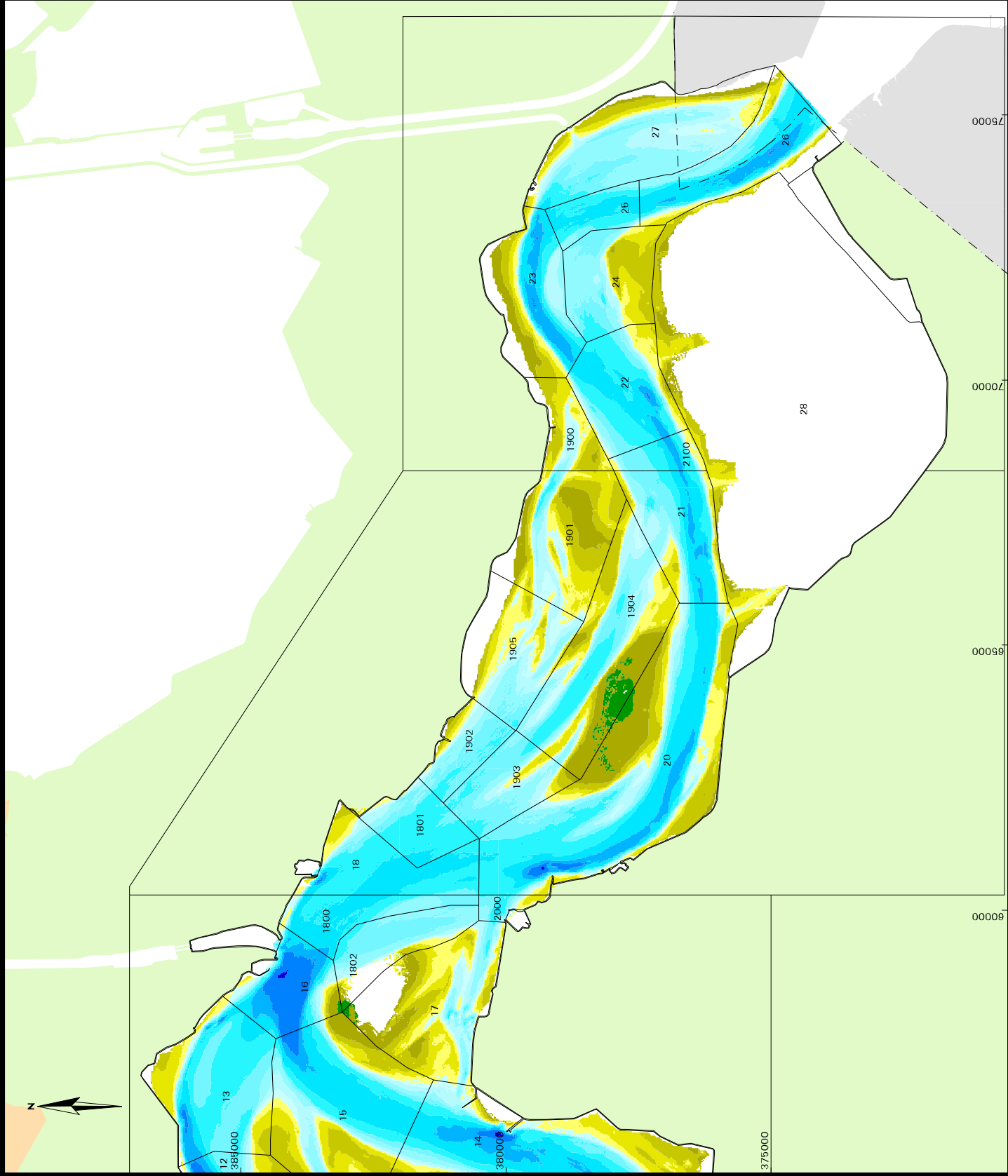
schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



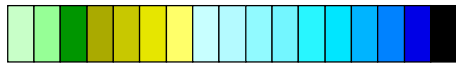
Bodemligging

Westerschelde-
oostelijk gebied

Bodem: 1999

Legenda

Diepte in m t.o.v. NAP



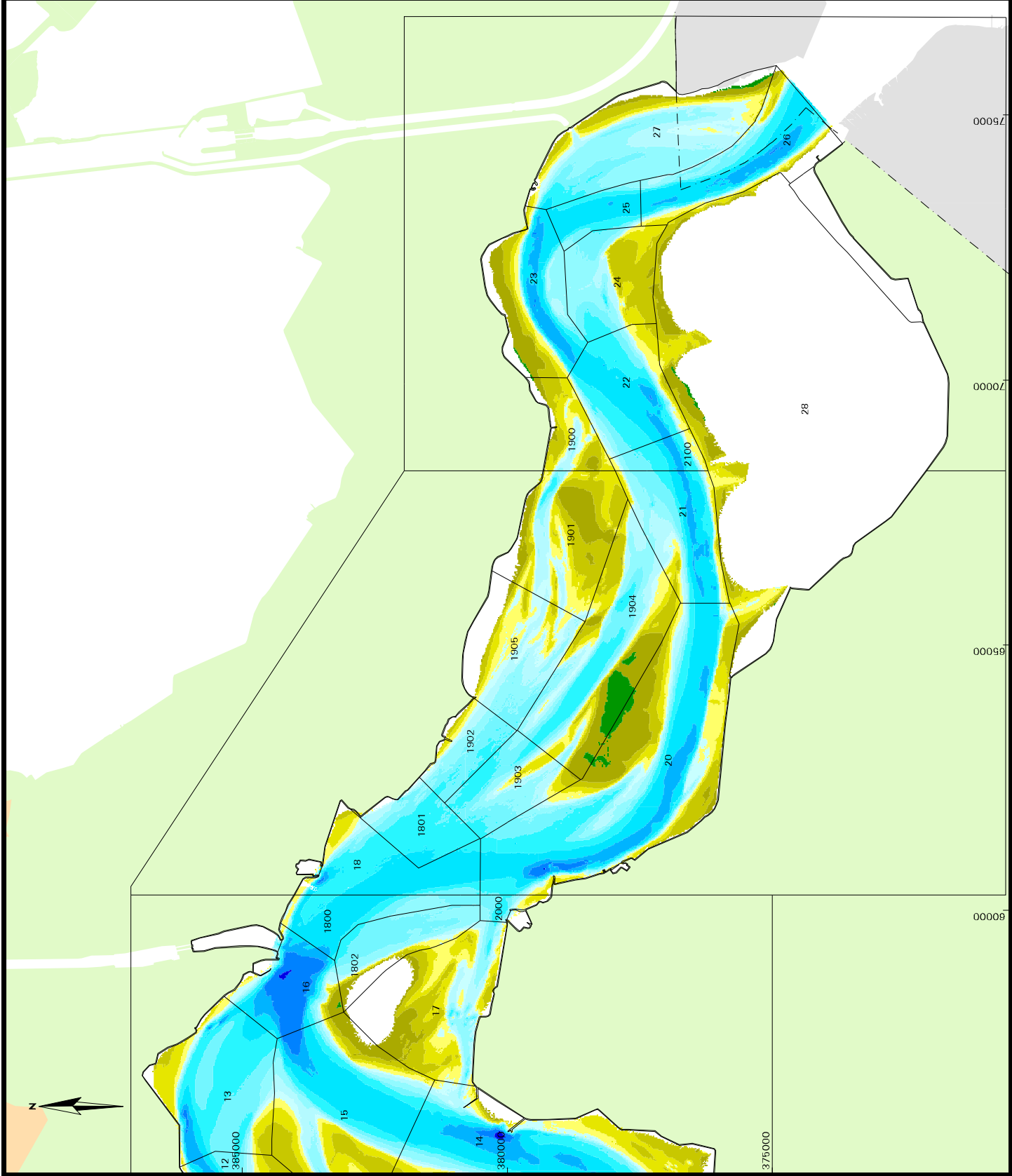
Bron: Vaklodngen RWS

schaal 1 : 100000

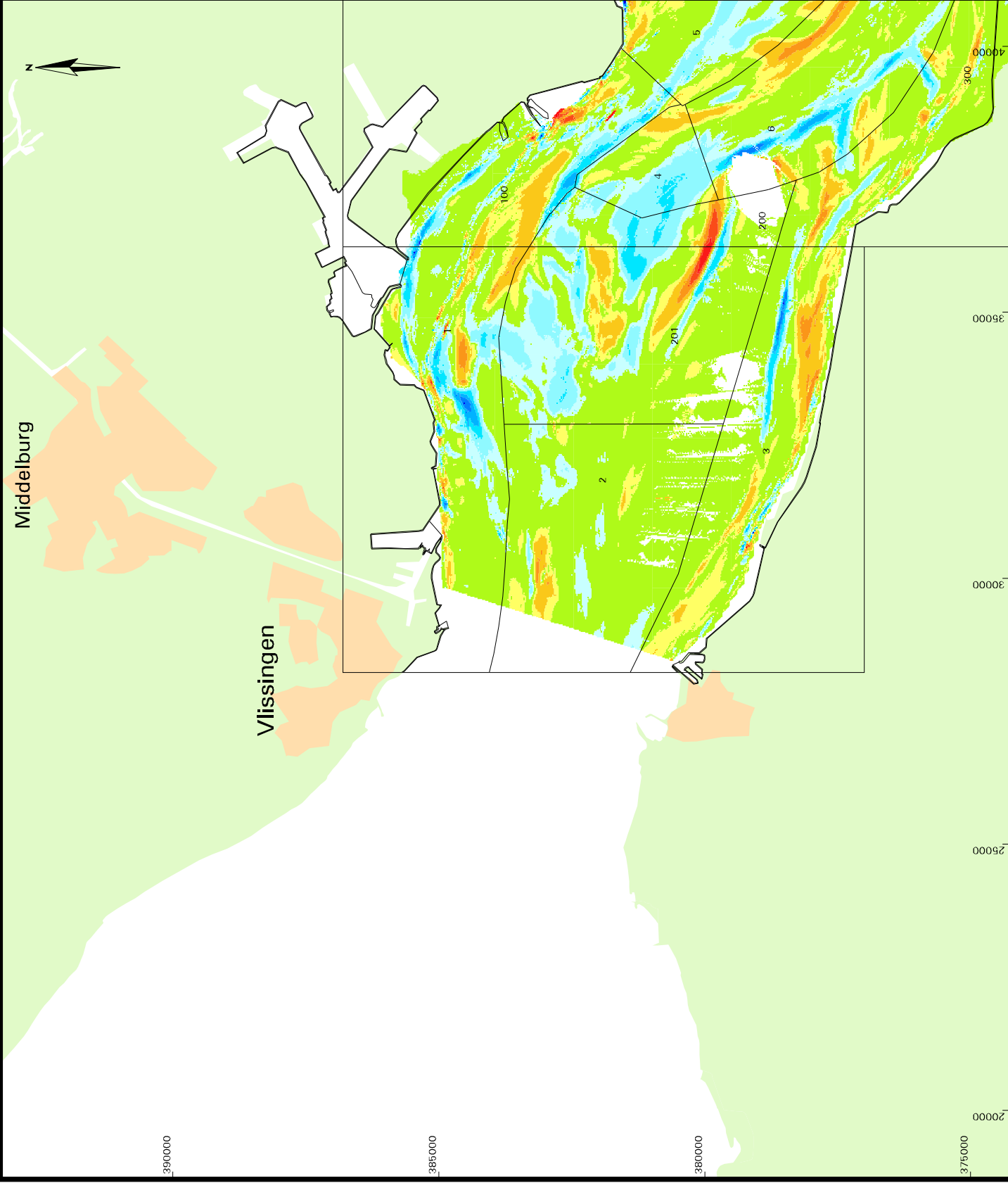


Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



B Erosie en sedimentatie kaarten



Verschilkaart

Westerschelde- westelijk gebied

Jaren: 1955 - 1970

Legenda

Verschil in m/jaar



verdieping meer dan 1 m
-1 tot -0.8 m
-0.8 tot -0.6 m
-0.6 tot -0.4 m
-0.4 tot -0.2 m
-0.2 tot -0.1 m
-0.1 tot 0.1 m
0.1 tot 0.2 m
0.2 tot 0.4 m
0.4 tot 0.6 m
0.6 tot 0.8 m
0.8 tot 1 m
Verondieping meer dan 1 m



sedimentatie / erosie

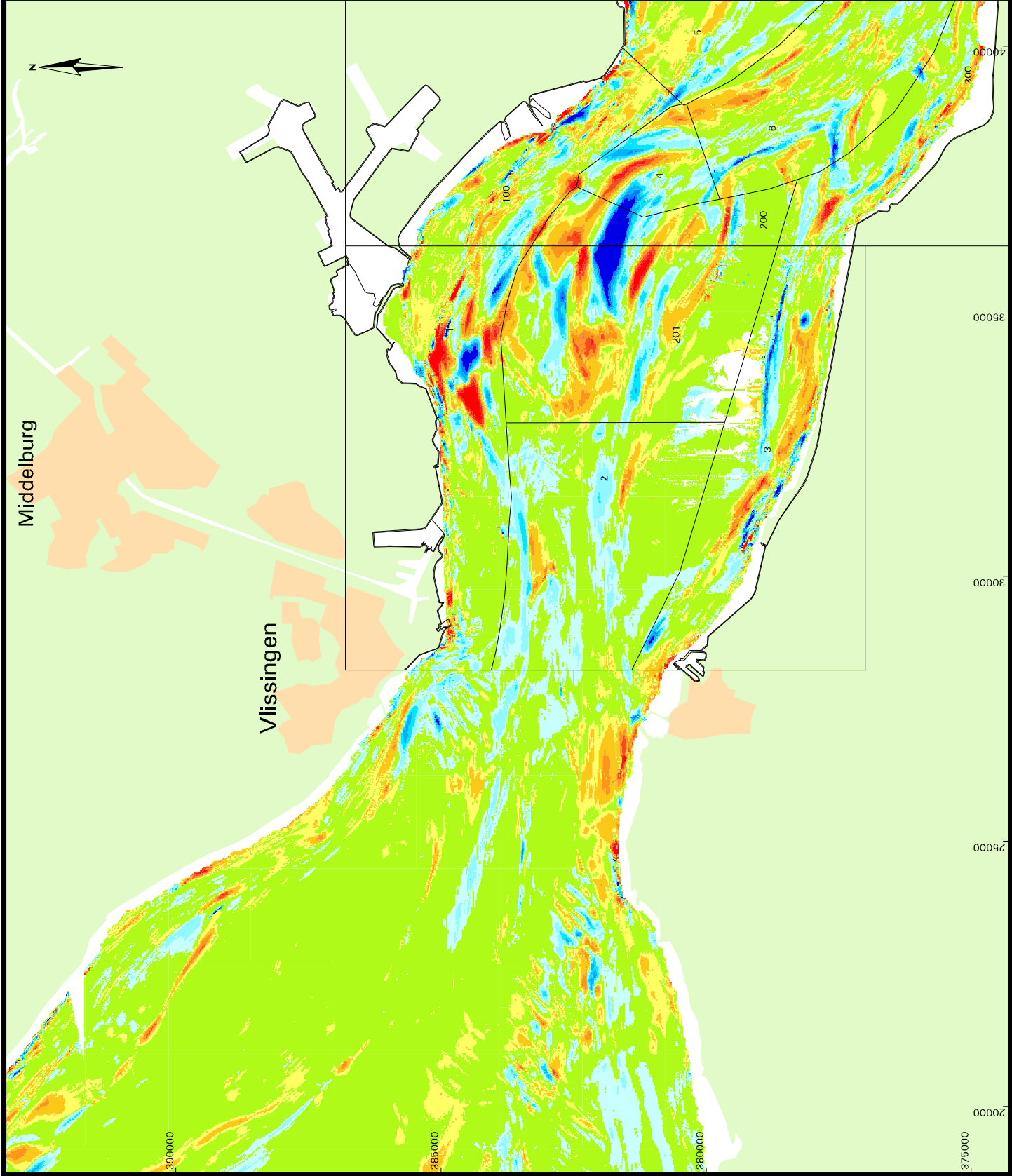
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Verschilkaart

Westerschelde- westelijk gebied

Jaren: 1970 - 1976

Legenda

Verschil in m/jaar



Verondieping meer dan 1 m



sedimentatie / erosie

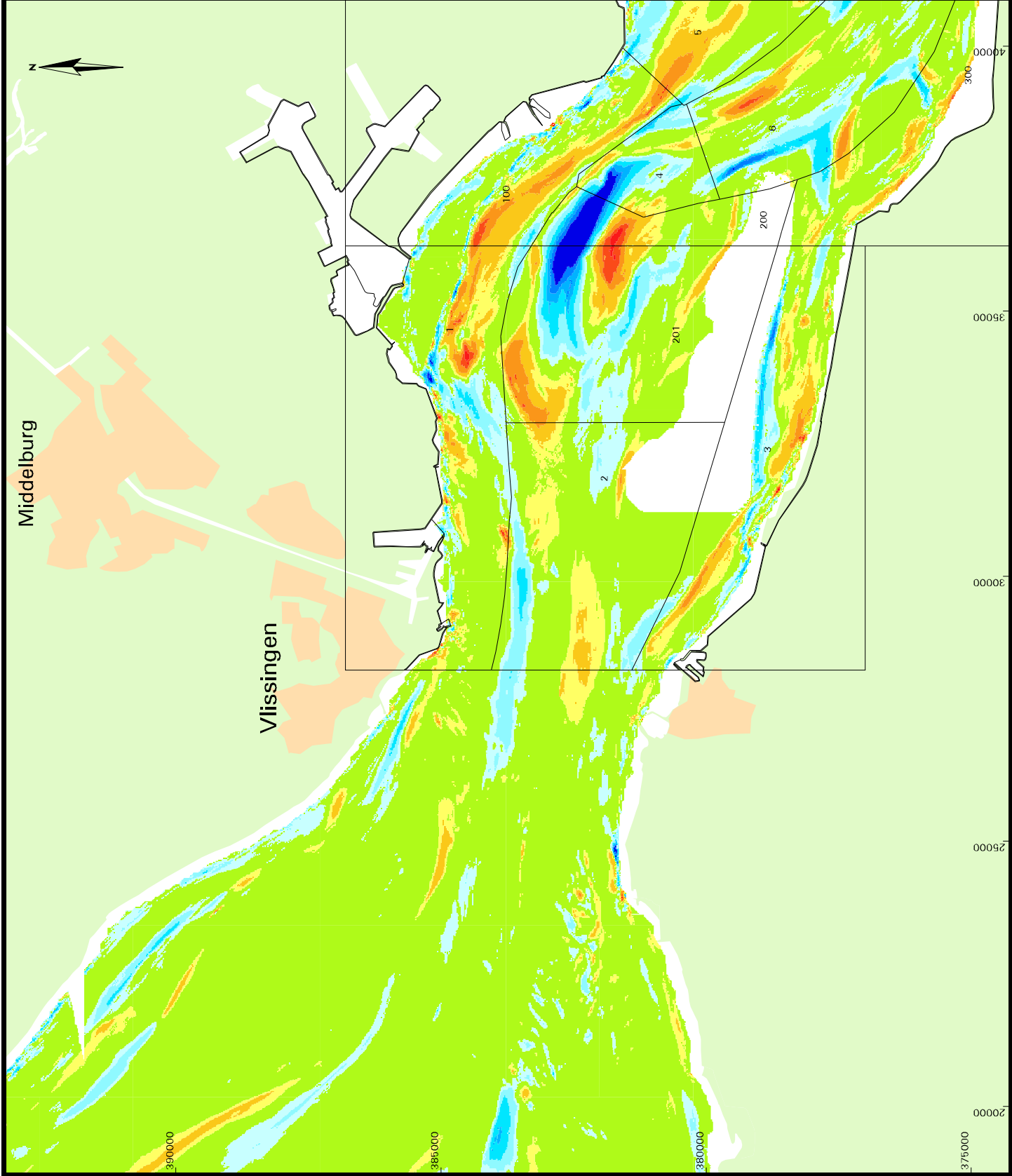
Bron: Vaklodgingen RWS

schaal 1 : 100000



Ministerie van Verkeer
en Waterstaat
Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar



Verschilkaart

Westerschelde- westelijk gebied

Jaren: 1976 - 1990

Legenda

Verschil in m/jaar



verdieping meer dan 1 m
-1 tot -0.8 m
-0.8 tot -0.6 m
-0.6 tot -0.4 m
-0.4 tot -0.2 m
-0.2 tot -0.1 m
-0.1 tot 0.1 m
0.1 tot 0.2 m
0.2 tot 0.4 m
0.4 tot 0.6 m
0.6 tot 0.8 m
0.8 tot 1 m
Verondieping meer dan 1 m



sedimentatie / erosie

Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar

Verschilkaart

Westerschelde-
westelijk gebied

Jaren: 1990 - 1997

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000

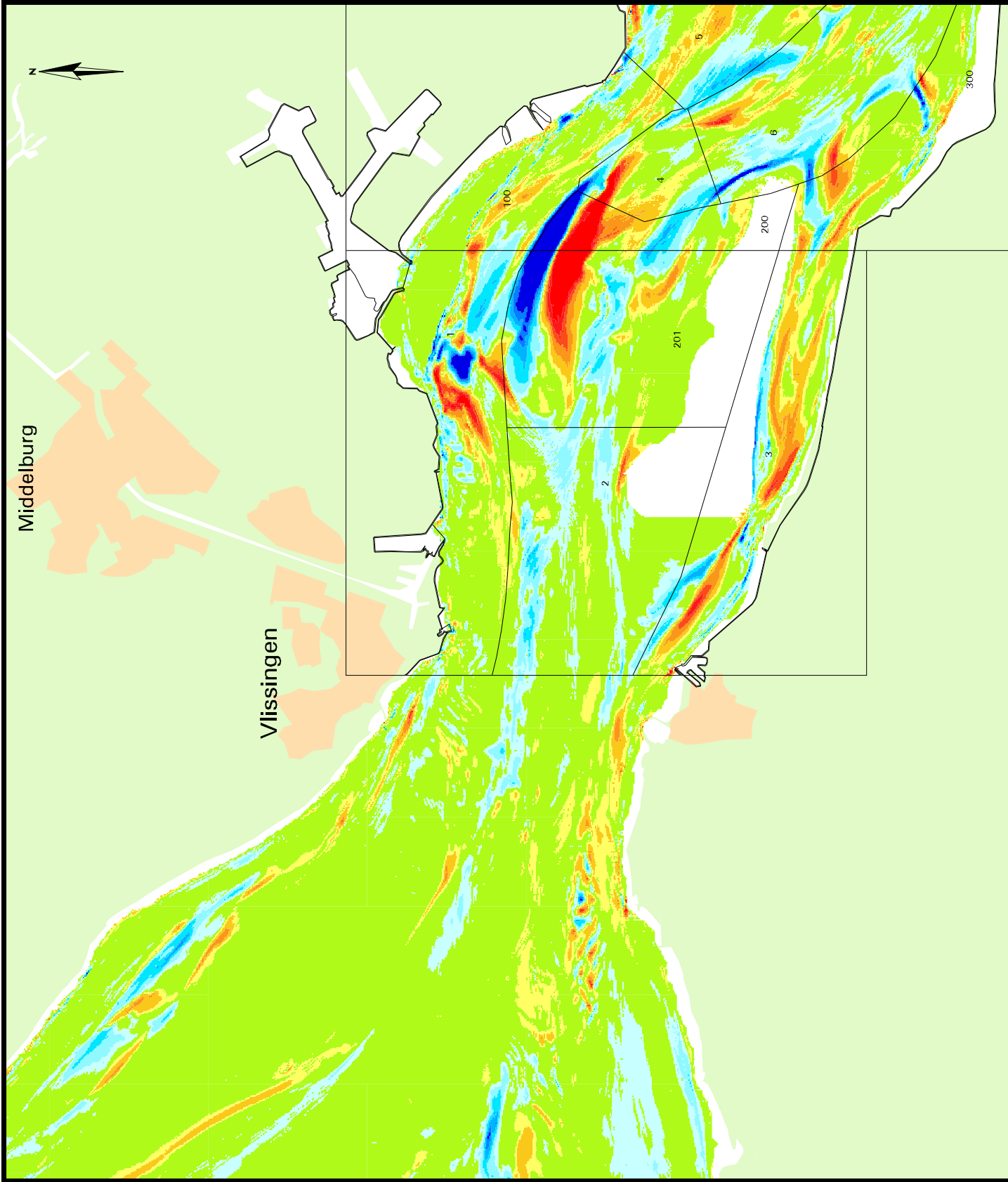


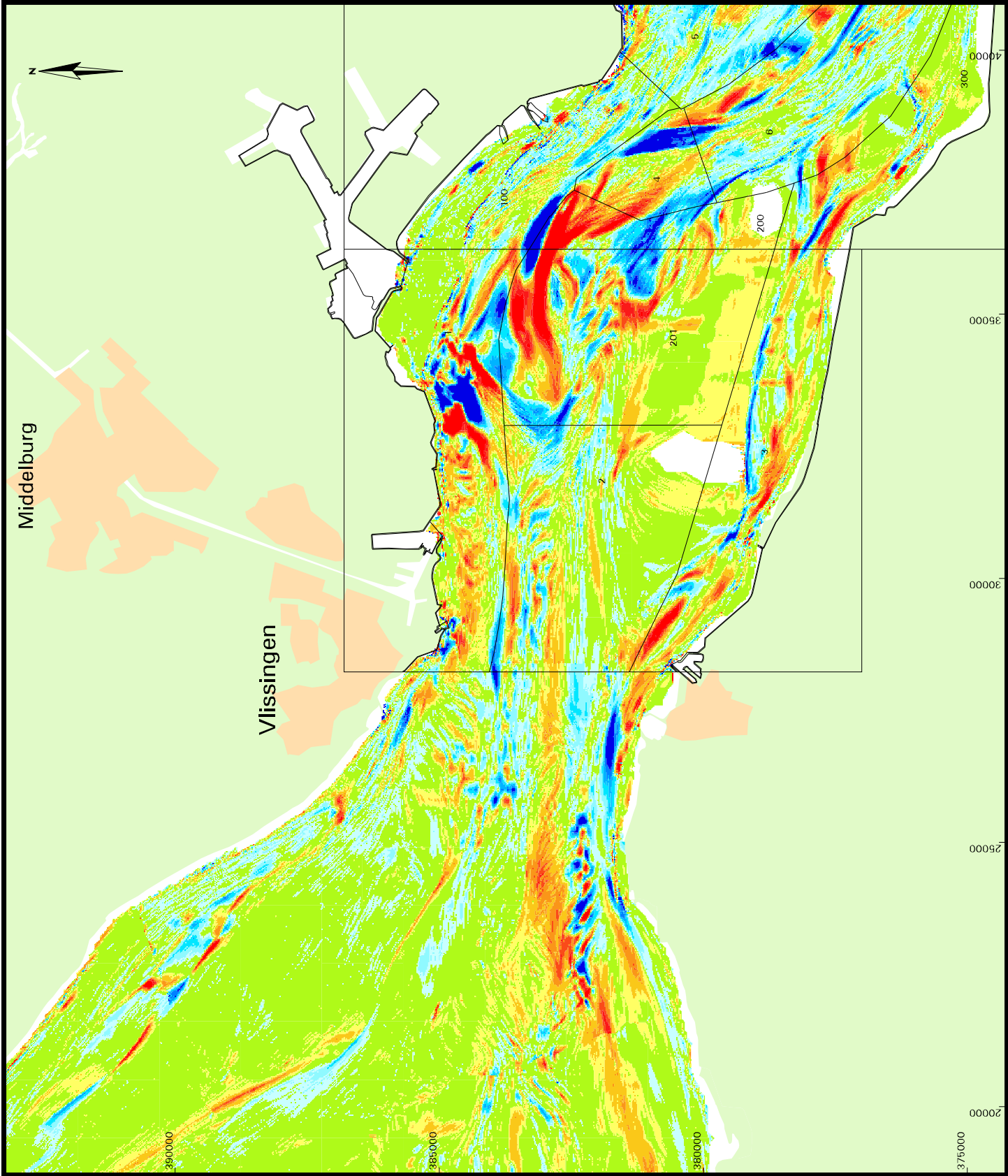
Ministerie van Verkeer
en Waterstaat

Directoraat-Generaal
Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ Middelburg

A. Schouwenaar





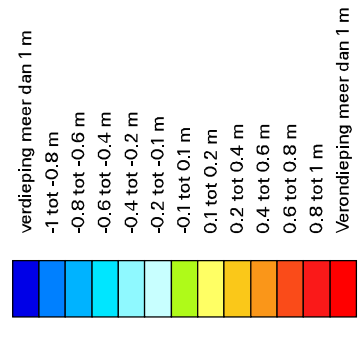
Verschilkaart

Westerschelde- westelijk gebied

Jaren: 1997 - 1999

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar

Zuid Beveland

Verschilkaart Westerschelde- middengebied

Jaren: 1955 - 1969/1970

Legenda

Verskil in m/jaar



sedimentatie / erosie

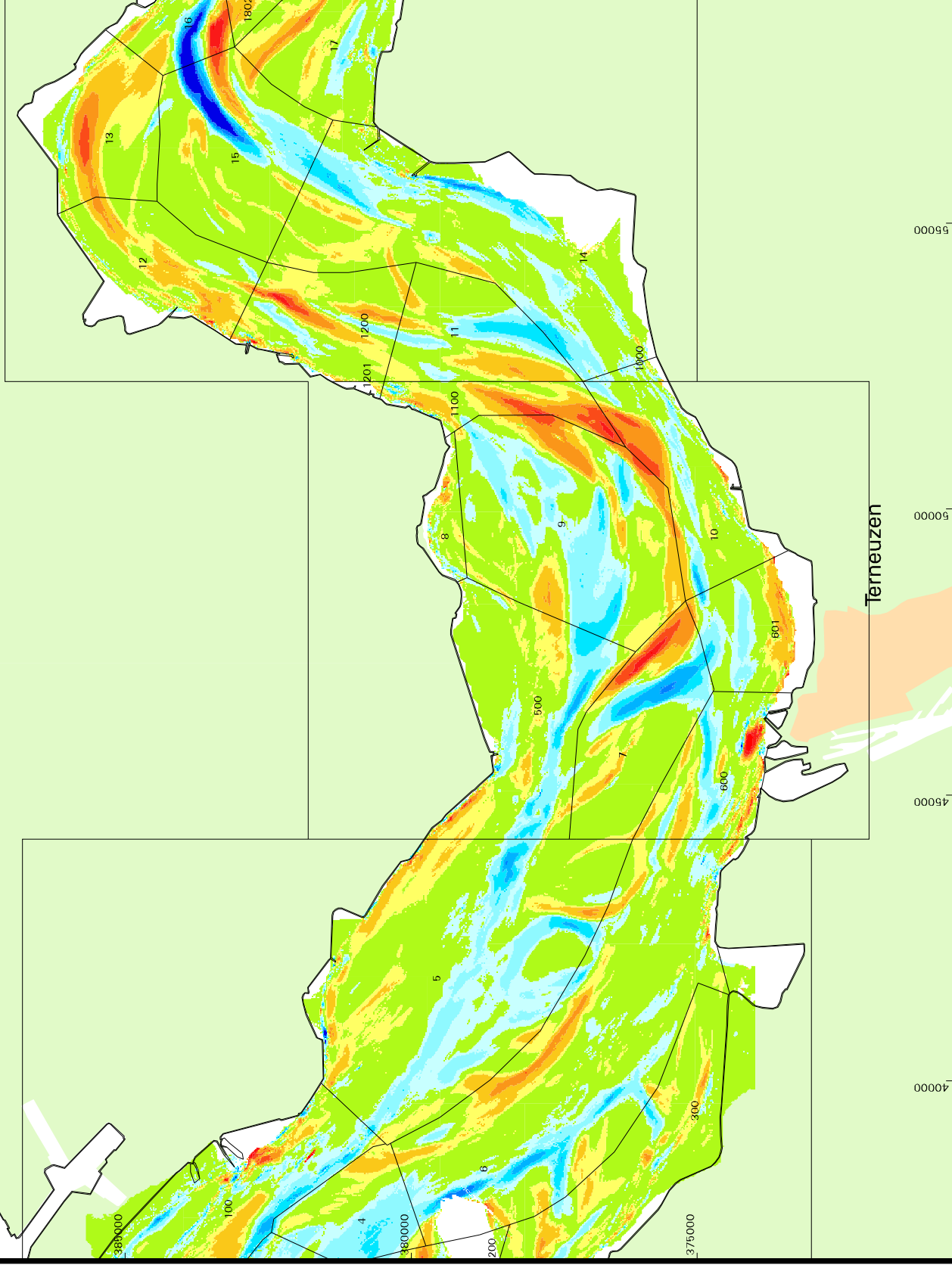
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Verschilkaart Westerschelde- middengebied

Jaren: 1969/1970 - 1975/1976

Legenda

Verskil in m/jaar



sedimentatie / erosie

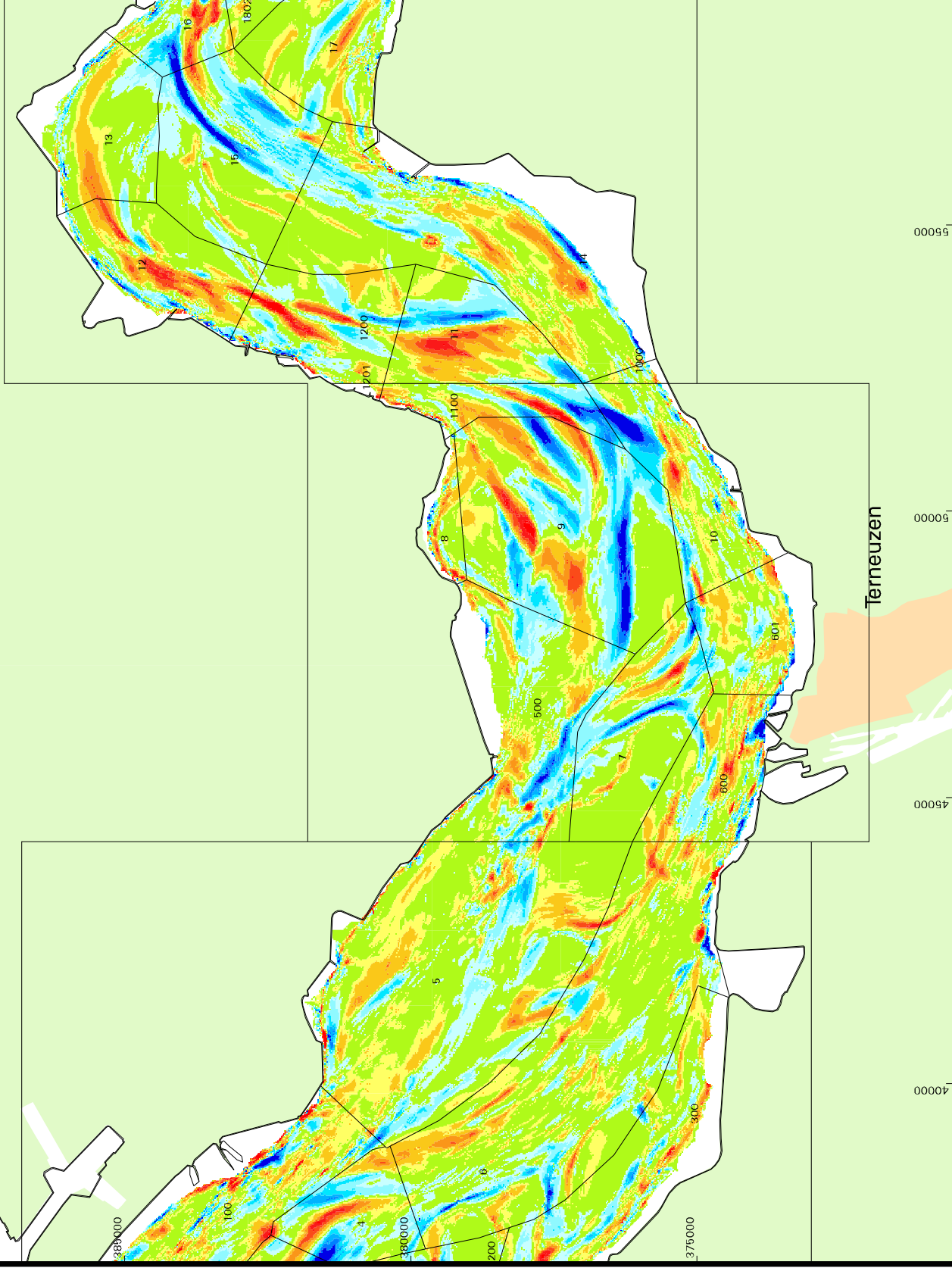
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Verschilkaart Westerschelde- middengebied

Jaren: 1975/1976 - 1990

Legenda

Verskil in m/jaar



sedimentatie / erosie

Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar

Zuid Beveland

Verschilkaart Westerschelde- middengebied

Jaren: 1990 - 1997

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

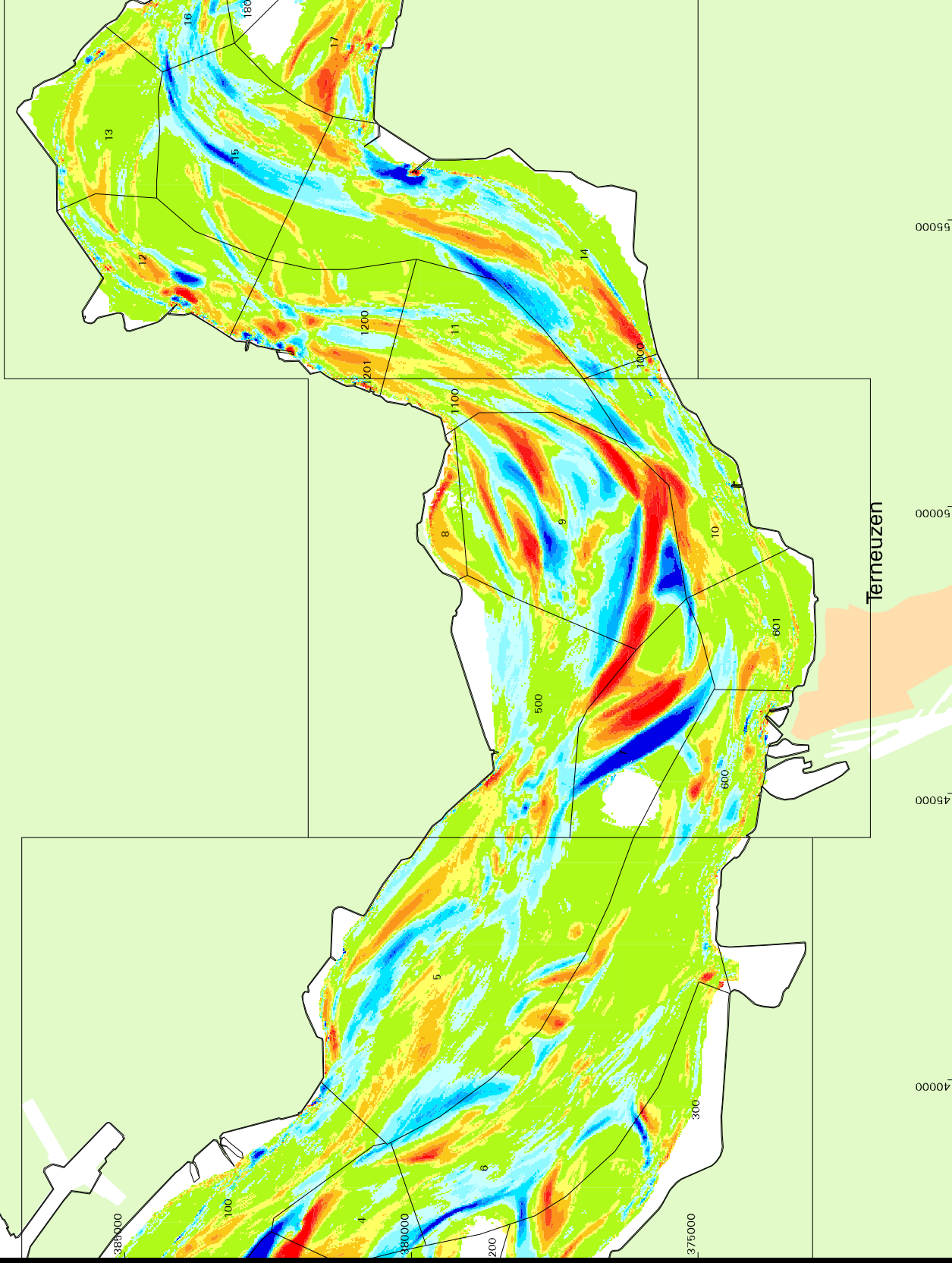
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Zuid Beveland

Verschilkaart Westerschelde- middengebied

Jaren: 1997 - 1999

Legenda

Verskil in m/jaar



sedimentatie / erosie

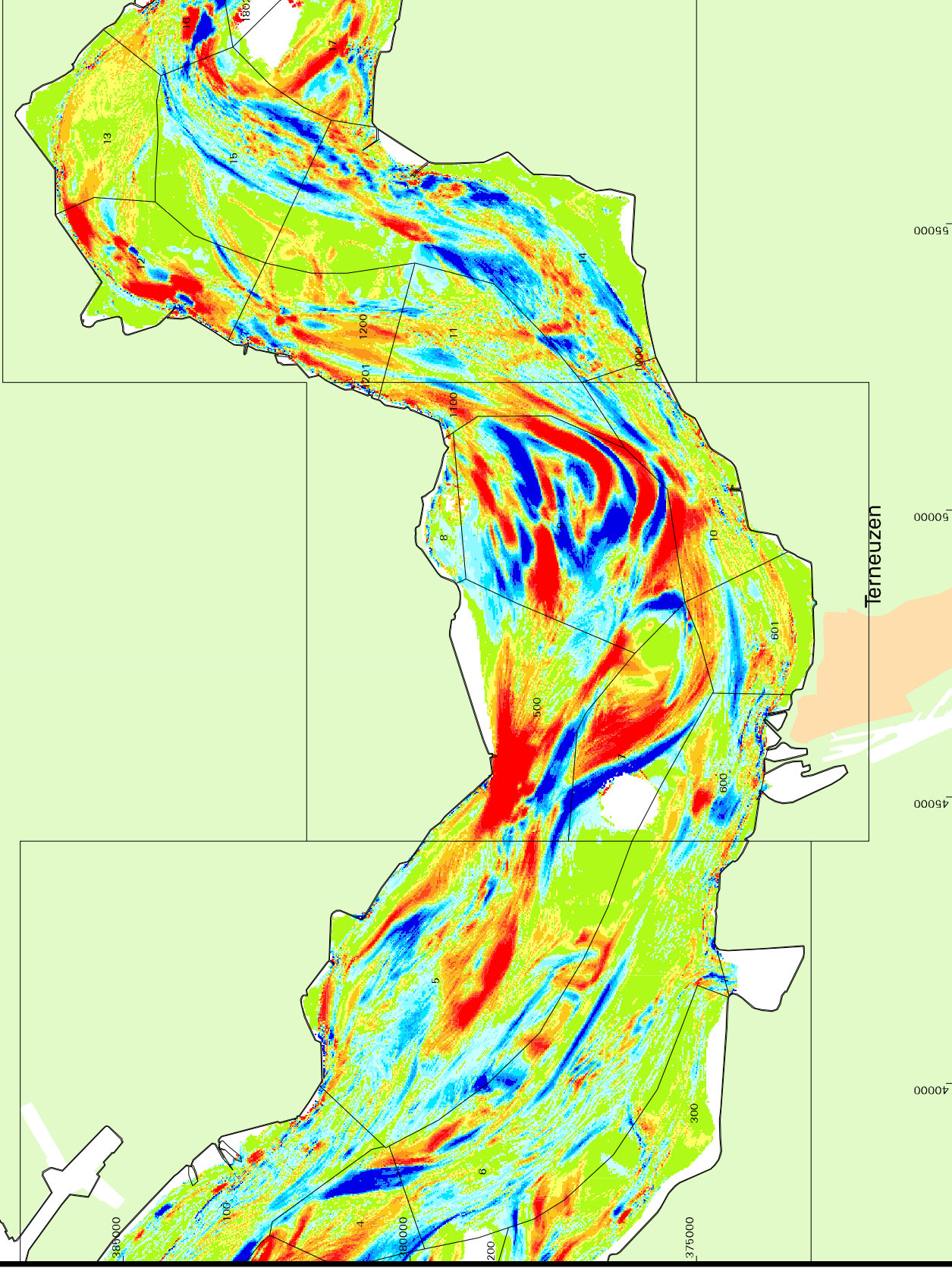
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Verschilkaart

Westerschelde-
oostelijk gebied

Jaren: 1955 - 1969

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

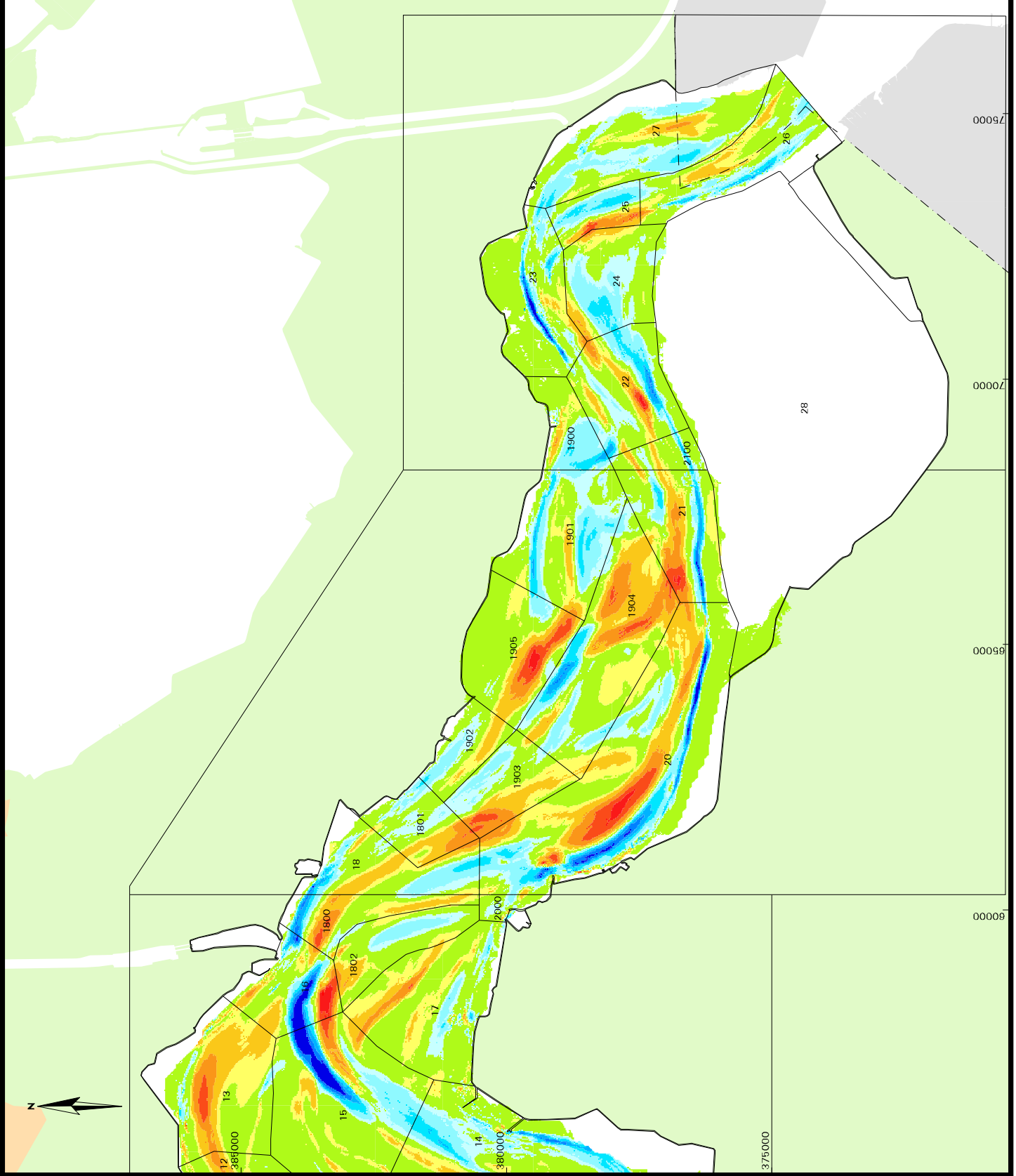
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Verschilkaart

Westerschelde-
oostelijk gebied

Jaren: 1969 - 1975

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar

Verschilkaart

Westerschelde- oostelijk gebied

Jaren: 1975 - 1990

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

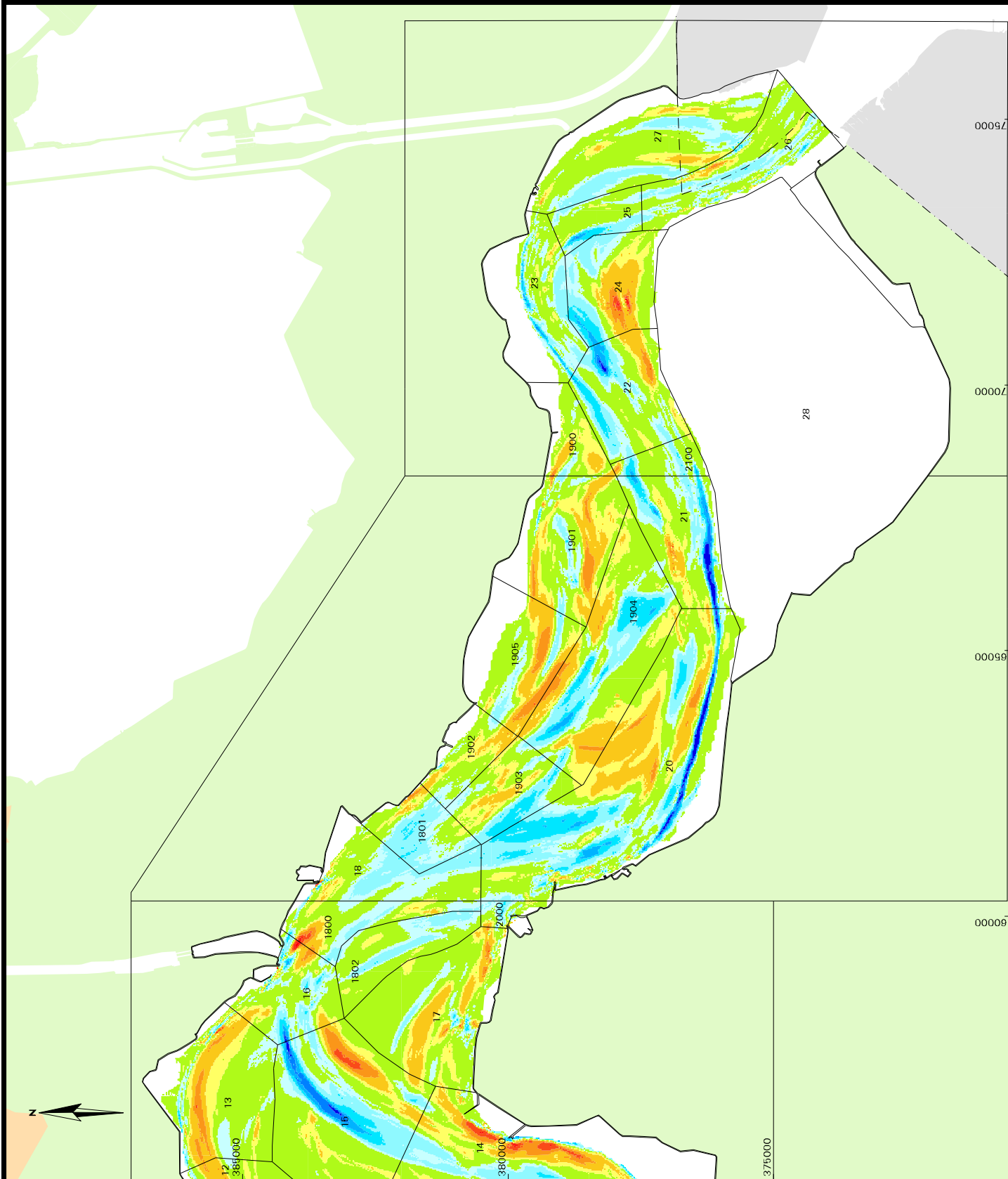
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Verschilkaart

Westerschelde-
oostelijk gebied

Jaren: 1990 - 1997

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

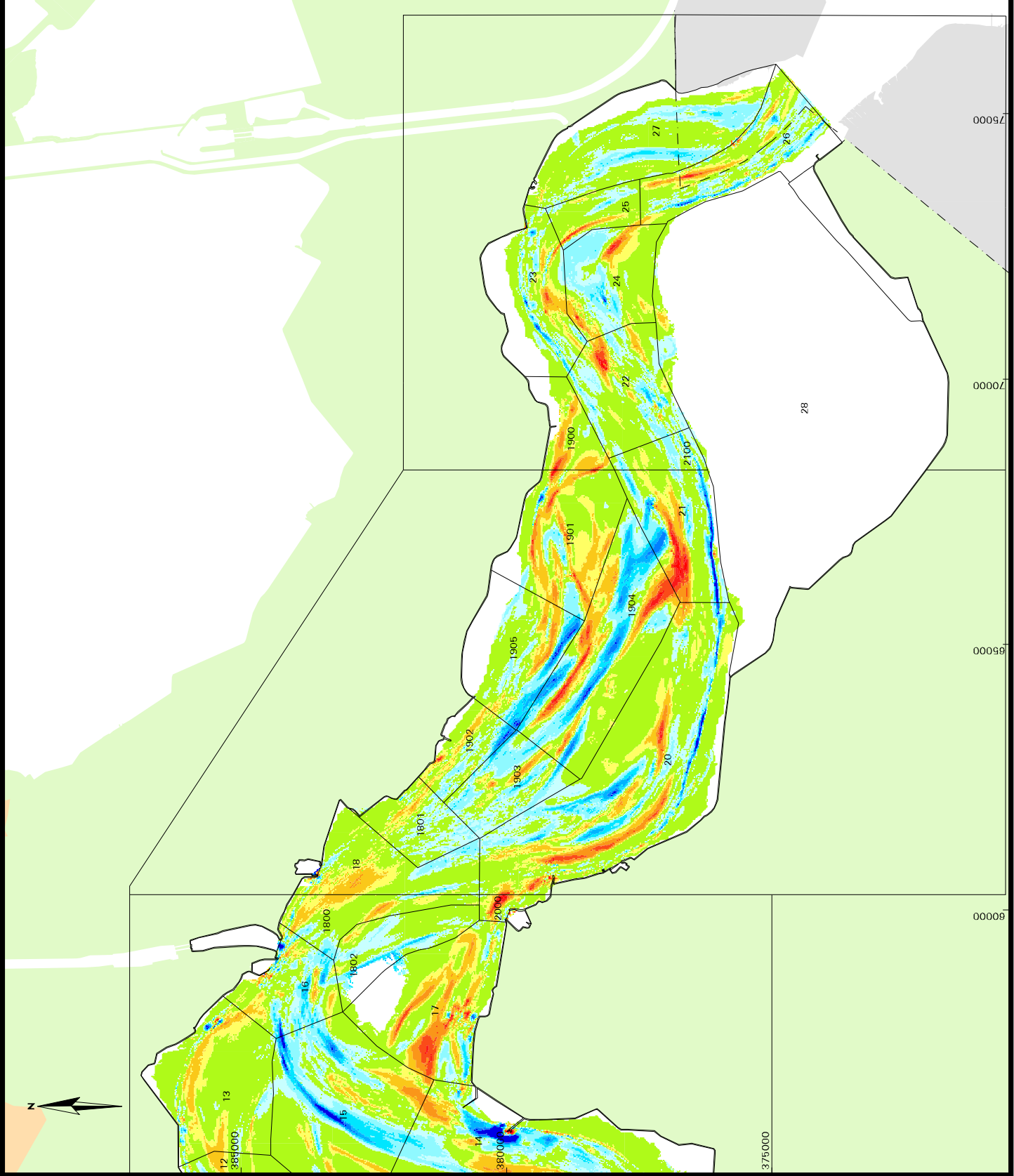
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar



Verschilkaart

Westerschelde-
oostelijk gebied

Jaren: 1997 - 1999

Legenda

Verschil in m/jaar



sedimentatie / erosie

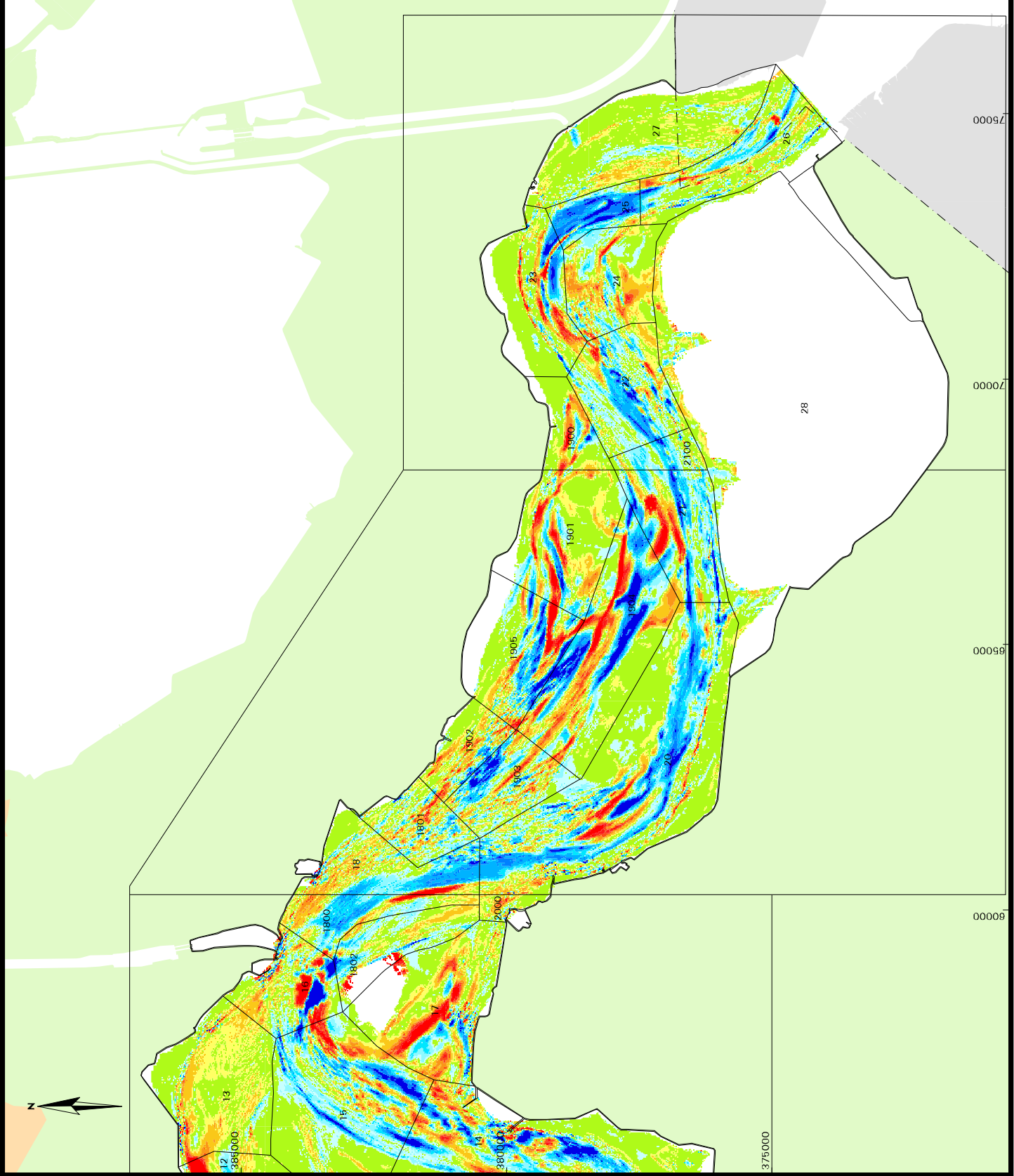
Bron: Vaklodingen RWS

schaal 1 : 100000



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

A. Schouwenaar





WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

