

Opdrachtgever:

RIKZ Rijkswaterstaat

Onderbouwing van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer

Toetsing aannames met SOBEK berekeningen

Zheng Bing Wang

Pauline Thoolen

Ilka Tanczos

Verslag

augustus 2002



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER:	RIKZ Rijkswaterstaat				
TITEL:	Onderbouwen van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer				
SAMENVATTING: Tijdens de studie voor de Lange-termijn visie Schelde estuarium (LTV-SE) is het cellenconcept Westerschelde ontwikkeld. Met behulp van dit concept kan worden nagegaan hoe groot de theoretische stortcapaciteit van het meergeulensysteem in de Westerschelde is, zonder dat dit geulensysteem degenereert naar een één-geulensysteem. Het cellenconcept is gebaseerd op verschillende aannamen met als gevolg onzekerheden in de grootte van het stortcriterium. In de huidige studie zijn deze aannamen getoetst met behulp van een 1D netwerk morfologisch model voor de Westerschelde dat is opgezet met SOBEK. De volgende belangrijkste aanname onderliggende aan het cellenconcept is juist: de conclusies van de stabiliteit analyse voor rivieren zijn ook van toepassing voor getij situaties. De stortcapaciteit van de beschouwde macrocel is inderdaad ongeveer 10% van het bruto sedimenttransport door de cel. Wel is er een belangrijk verschil tussen de getijsituatie en de riviersituatie naar voren gebracht. In tegenstelling tot de rivier situatie hebben ingrepen in een estuarium wel invloed op het sedimentaanbod naar de cel. De 10% regel voor het stortcriterium is van toepassing voor het geval dat er op mega-schaal geen netto ingreep is: in de cel en de directe omgeving houden baggeren en storten elkaar in evenwicht. Een belangrijke consequentie hiervan is dat de verschillende bochtgroepen binnen het estuarium niet geïsoleerd kunnen worden beschouwd bij het evalueren van effecten van baggeren en storten. Niet alle aannamen zijn correct. Vooral de autonome ontwikkeling blijkt invloed te hebben op de stortcapaciteit. Voor de praktische toepassing van het cellenconcept betekent dit dat de stortcapaciteit van het estuarium kan worden beïnvloed door de stortstrategie. Voor de monitoring van de effecten van baggeren en storten op de stabiliteit van het meergeulen systeem moet men er rekening mee houden dat de relevante morfologische tijdschaal groot kan zijn. Dit betekent dat het lang kan duren voordat men de relevante veranderingen waarneemt.					
REFERENTIES:					
VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	Z.B. Wang	28 augustus 2002		C. Kuijper	T. Schilperoort
PROJECTNUMMER Z3325					
TREFWOORDEN: Westerschelde, morfologie, baggeren/storten, cellenconcept, stabiliteit, meergeulensysteem					
AANTAL BLADZIJDEN					
VERTROUWELIJK ☐ JA, tot (datum) ☒ NEE					
STATUS: ☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF					

Inhoud

1	Inleiding	1-1
1.1	Achtergrond	1-1
1.2	Probleemstelling	1-1
1.3	Doelstelling	1-2
1.4	Leeswijzer	1-3
2	Aanpak studie	2-1
2.1	Te onderbouwen aannames	2-1
2.2	Aanpak studie	2-2
3	Opzet model	3-1
3.1	Algemeen	3-1
3.2	Calibratie waterbeweging en sediment transport	3-2
3.3	Opzet morfologische berekeningen	3-5
4	Analyse resultaten	4-1
4.1	Inleiding	4-1
4.2	Toepasbaarheid rivier analyse op estuaria	4-1
4.3	Invloed eb- en vloedgeul karakter	4-6
4.4	Invloed autonome ontwikkeling wisselwerking tussen macrocellen	4-8
4.5	Invloed verdeling storten	4-10
4.6	Invloed zeespiegelrijzing	4-11
5	Conclusies en aanbevelingen	5-1
5.1	Samenvatting en conclusies	5-1
5.2	Toetsing per aanname	5-2

5.3	Relevantie voor toepassing cellenconcept	5-4
5.4	Aanbevelingen	5-5
6	Referenties	6-1
7	Figuren	7-1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

De beheerder van de Westerschelde, RWS Directie Zeeland, is verantwoordelijk voor de Veiligheid, Natuurlijkheid en Toegankelijkheid in het Schelde estuarium. De streefbeelden, ontwikkelingsschetsen en beleidsdoelen op deze drie gebieden zijn verwoord in de Lange-Termijn Visie Schelde-estuarium (RWS&MVG, 2001), hierna aangeduid als LTV-SE. Belangrijk uitgangspunt hierbij is de instandhouding van het open en natuurlijke mondingsgebied, een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende platen en ondiepwatergebieden (een meergeulensysteem) in de Westerschelde en een riviersysteem met een meanderend karakter in de Zeeschelde.

Tijdens het morfologisch onderzoek, dat in het kader van de LTV-SE is uitgevoerd, is het zogenaamde cellenconcept Westerschelde ontwikkeld. Dit concept omvat een schematisatie van het systeem van geulen en platen waarop een stabiliteitsanalyse wordt uitgevoerd. Uit dit cellenconcept blijkt dat een zeer zorgvuldig bagger-, stort- en zandwinbeheer nodig is om het meergeulensysteem in de Westerschelde duurzaam in stand te houden. Met name het stortbeleid is cruciaal. Dit wordt bevestigd door de waargenomen historische ontwikkelingen in het oostelijk deel van de Westerschelde en recente ontwikkelingen in het westelijk deel sinds de laatste vaargeulverdieping (Jeuken, 2001): omvangrijke sedimentstortingen gaan gepaard met locale verondiepingen in de nevengeulen/vloedgeulen en hebben mogelijk al geleid tot ongewenste morfologische veranderingen in de nabije omgeving.

I.2 Probleemstelling

Uit een verificatie van het cellenconcept op basis van historische gegevens over de periode 1955-1999 blijkt dat het cellenconcept redelijkerwijs kan worden toegepast op de macro-cellen. Dit betekent tevens dat met het huidige stort- en zandwinbeleid de grenzen voor het storten van sediment in de Westerschelde bereikt zijn. De analyses geven echter ook aan dat het stort- en zandwinbeleid niet optimaal is ingevuld (Jeuken, 2001). Er wordt in het systeem gestort terwijl op andere locaties zandwinning plaatsvindt. Dit geldt ook voor de onlangs afgegeven nieuwe stortvergunningen en het in werking getreden nieuwe zandwinbeleid (Jeuken en Wang, 2001). De belangrijkste vraag op dit gebied vanuit beleid en beheer is dan ook:

Wat is de optimale strategie (op een tijdschaal van jaren) voor baggeren, storten en zandwinning in het Schelde-estuarium, waarbij het meergeulensysteem gehandhaafd blijft, en bevaarbaarheid en veiligheid tegen overstromen gewaarborgd blijven?

Zowel de LTV-SE als deze beleidsvraag geven aan dat een duurzame instandhouding van het meergeulensstelsel een belangrijk uitgangspunt (doel) vormt voor het beleid en beheer. Bij het formuleren en uitvoeren van een nieuw beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning kan een 'veerkracht strategie' een middel zijn. Dit betekent het zoveel mogelijk meewerken met natuurlijke processen en het inspelen op het vermogen van het systeem om zich zodanig te herstellen na veranderende omstandigheden en/of verstoringen dat de essentiële kenmerken (het meergeulensysteem) behouden blijven. Voor het beheer van het Westerschelde estuarium betekent dit een grote verandering. De huidige vorm van de Westerschelde is het resultaat van een eeuwenlange strijd tegen het water (weerstandstrategie). Het is echter denkbaar dat een meer op weerstand gebaseerde strategie tijdelijk en/of lokaal noodzakelijk is voor een duurzaam behoud van het meergeulensysteem.

Het cellenconcept en het daaruit volgende stortcriterium hebben de potentie om te worden ingezet als instrument voor het ontwikkelen van nieuwe geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning (zandbeheer) in de Westerschelde. Dit vraagt echter om een verdere onderbouwing van de meest cruciale aannamen (onzekerheden) in het concept en een operationalisering van het concept voor beleid en beheer. De operationalisering van het concept bestaat uit: 1) een vertaling van het concept naar een set eenduidige, samenhangende (morfologische) indicatoren die de achterliggende ingreep-effect relaties kwantificeren, en 2) het opstellen van richtlijnen en voorbeelden hoe de set indicatoren moet worden gebruikt om nieuwe beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud te ontwikkelen en evalueren. Een belangrijk aspect bij het operationaliseren van het concept bestaat uit het inzichtelijk maken van de implicaties van onzekerheden (waaronder kennisleemten) voor beleidsmakers.

1.3 Doelstelling

In 2001 is in het kader van het doelsubsidieproject 'Veerkracht' een aanvang gemaakt met de onderbouwing van het cellenconcept, hetgeen geleid heeft tot

- (1) het plaatsen van het cellenconcept in de bredere context van beleid en beheer,
- (2) het opzetten en valideren van een Sobekmodel t.b.v. het onderbouwen van de meest cruciale aannamen in het cellenconcept, en
- (3) het maken van een plan van aanpak 'hoe om te gaan met natuurwetenschappelijke onzekerheden'.

De resultaten van deze drie punten zijn vermeld in Jeuken et al. (2002). Het RIKZ-Middelburg en WL | Delft Hydraulics zijn overeengekomen dat de onderbouwing van de meest cruciale aannamen in het cellenconcept gedeeltelijk zullen worden gefinancierd door RIKZ-Middelburg. Dit heeft geleid tot het huidige project.

De doelstelling van het project luidt:

Het onderbouwen, van de meest cruciale aannamen in het cellenconcept met als doel het operationaliseren en toepassen van 'het cellenconcept Westerschelde'. Het concept kan dienen als instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud (zandbeheer) in de Westerschelde.

I.4 Leeswijzer

Het cellenconcept Westerschelde is gebaseerd op verschillende typen (o.a. technische en methodologische) modelaannames. Deze aannames zijn geïnventariseerd door Jeuken e.a. (2002) en nader beschreven in hoofdstuk 2. Om de geldigheid van deze aannames te onderbouwen wordt een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd met een 1D-netwerkmodel gebaseerd op Sobek. In Hoofdstuk 2 zijn de berekeningen, uitgevoerd voor de gevoeligheidsanalyse, gedefinieerd. De opzet van het model is beschreven in hoofdstuk 3. De resultaten van de berekeningen zijn beschreven en geanalyseerd in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 zijn de bevindingen van de analyse samengevat in conclusies.

2 Aanpak studie

2.1 Te onderbouwen aannames

Tijdens de studie voor de Lange-termijn visie Schelde estuarium (LTV-SE) is het cellenconcept Westerschelde ontwikkeld. Met behulp van dit concept kan worden nagegaan hoe groot de theoretische stortcapaciteit van het meergeulensysteem in de Westerschelde is, zonder dat dit geulenstelsel degenereert naar een één-geulsysteem.

Het cellenconcept is gebaseerd op verschillende aannames met als gevolg onzekerheden in de grootte van het stortcriterium. Concreet gaat het om de volgende aannames:

1. *De stabiliteitrelatie zoals die is afgeleid voor rivieren is van toepassing op getijgebieden.*
Deze aanname bestaat in feite uit drie sub-aannames die getoetst moeten worden:
1a. De relatie zegt dat voor grote waarden van de coëfficiënt k in de knooppuntrelatie (zie 4.2) het geulsysteem stabiel is en voor kleine waarden instabiel. Voor de kritische waarde van k geldt $k = n/3$, waarbij n de macht van de snelheid in de transportrelatie is.
1b. Een hiermee samenhangende aanname is dat de totale sediment transportcapaciteit over één representatief getij (som van het absolute transport tijdens eb en vloed) bepalend is voor de stabiliteit van het geulsysteem en niet de residuele transportcapaciteit. Het netto stortcriterium bedraagt dan circa 10% van die totale transportcapaciteit.
1c. Baggeren heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem.
2. *Het eb- vloedgeul karakter van het geulsysteem heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium.* De bruto en ook de residuele sediment transportcapaciteit vertonen ruimtelijke variaties die samenvallen met variaties in de geometrie in de lengterichting van de geul: in de ondiepere maar bredere drempelgebieden van de geulen is de transportcapaciteit vaak groter dan in de diepere inloop van de geul. Deze ruimtelijke variatie wordt verondersteld geen invloed te hebben op het stortcriterium.
3. *De autonome ontwikkeling van het geulenstelsel heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium.* Het geul-plaatsysteem in de cellen wordt verondersteld in evenwicht te zijn (niet te veranderen). Ontwikkelingen waarbij geulen van nature eroderen of sedimenteren worden dus (nog) niet door het concept beschreven; er wordt verondersteld dat deze ontwikkelingen geen invloed hebben op de grootte van het stortcriterium. Dergelijke tendensen, waarbij de ene geul van nature erodeert en de andere sedimenteert, zijn echter wel waargenomen (Jeuken, 2000, 2001).
4. *Voor de grootte van het stortcriterium maakt het niet uit of er gelijkmatig in de gehele geul of in een klein vak binnen de geul wordt gestort.* Deze aanname hangt waarschijnlijk samen met de tweede en derde aanname. In de analyses tot dusverre worden de ingrepen (storten, baggeren en zandwinnen) uitgesmeerd over de gehele lengte van de geul. In de praktijk gebeurt dit lokaal: baggeren en storten vindt plaats in specifieke bagger- en stortvakken binnen een geul.

5. *De sedimentuitwisseling tussen cellen / bochtgroepen heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium.* Deze aanname hangt samen met aanname 3. Het cellenconcept richt zich expliciet op individuele morfologische cellen. De sedimentuitwisseling tussen macrocellen, en de eventuele rol van mesocellen daarin (Jeuken, 2000), worden niet door het concept beschreven. Achterliggende gedachte c.q. aanname is dat de instandhouding van het gehele meergeulenstelsel gewaarborgd is als individuele macrocellen kunnen worden gehandhaafd.
6. *Zeespiegelstijging heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium.* Deze aannamen kan niet met het 1D morfologische model worden geverifieerd. Wel is het mogelijk om het effect van deze aanname te onderzoeken met behulp van de theoretische stabiliteitanalyses.
7. *De invloed van de plaat-geul interactie op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium is klein.* Dit volgt uit eerdere stabiliteitsanalyses waarin vereenvoudigende aannamen zijn gemaakt voor de formulering van de plaat-geulinteractie (Winterwerp e.a., 2000; Torenga, 2001). Uit deze vereenvoudigende aannamen blijkt dat platen een licht destabiliserende werking hebben. Grootste onduidelijkheid is echter de juiste formulering van de plaat-geulinteractie; hierover is nog zeer weinig bekend (is onderwerp van lopend promotieonderzoek).

2.2 Aanpak studie

De onderbouwing van het cellenconcept impliceert het uitvoeren van berekeningen met een 1D-morfologisch model van de Westerschelde en het uitvoeren van nieuwe wiskundige stabiliteitsanalyses.

In het kader van het doelsubsidieproject Veerkracht is een 1-dimensionaal morfologisch Sobek-model van de Westerschelde met bodem 1994 opgezet en gekalibreerd (zie Jeuken et al., 2002). In dit model wordt de bochtgroep/macrocél van Hansweert expliciet gemodelleerd, d.w.z. dat zowel de ebgeul als vloedgeul worden gedefinieerd. Voor het aangrenzende geulsysteem zijn enkelvoudige takken gedefinieerd die gebaseerd zijn op de kombergingsgrafieken van de lodingsvakken 1, 2, 4, 5 en 6 (Fig.2.1). Voor de schematisatie van de Schelde is uitgegaan van het model van Schoeman (2000). Het model is gekalibreerd op waterstanden, getijvolumina, reststroomsnelheden en bruto en residuele sediment transporten. Dit gekalibreerde model, met morfologische getijrandvoorwaarden uit begin jaren 70, wordt gebruikt om de implicaties van de aannamen 1 t/m 5 voor de grootte van het stortcriterium te verkennen en te kwantificeren.

De huidige studie richt zich op het onderbouwen van de eerste zes aannamen. Aandachtspunt hierbij is de te kiezen referentiesituatie: 1968 of 1994. In situatie van 1968 (of eventueel 1955) is er nog sprake van een klassiek eb- vloedgeul systeem. In de situatie van 1994 is de drempel in de vloedgeul volledig geërodeerd en is de vloedgeul gemiddeld dieper dan de ebgeul. Het huidige gekalibreerde model heeft betrekking op de situatie van 1994 en kan worden gebruikt voor het onderbouwen van de aannamen 1, 2 en 4. Voor het onderbouwen van de aannamen 3 en 7 verdient het de voorkeur om ook te beschikken of een gekalibreerd model van de situatie 1968 en/of 1955.

Het onderbouwen dan wel verkennen van de aannamen op basis van Sobek-berekeningen, met het model zoals beschreven in Jeuken et al (2002), impliceert de volgende werkzaamheden:

0. *Modelvalidatie*

- 0a) Laatste fine-tuning van het model 1994 met betrekking tot het reproduceren van de bruto sedimenttransporten en de residuele circulaties van water en zand voor de situatie 1994.
- 0b) De modelopzet voor 1968 maken (zie boven) en deze valideren door te kijken naar waterstanden en verandering in debietverdeling. Daarnaast restcirculaties en bruto sedimenttransporten bepalen.

1. *Opzetten en uitvoeren van vier Sobek berekeningen ter onderbouwing van aanname 1*

- 1a) morfologische berekening met een k-waarde $k=2$.
- 1b) morfologische berekening met een k-waarde $k=1$
- 1c) 2 runs ter verificatie dat het stortcriterium van ca. 10% van de bruto transportcapaciteit is. Dit betekent het inbrengen van storten (5% en 15%; eventueel in combinatie met baggeren) in de situatie waarbij het geulsysteem stabiel is ($k=2$). Hierbij wordt er morfologische gerekend over een periode van enkele decennia.
- 1d) 1 dynamische morfologische berekening ter verificatie dat alleen baggeren geen invloed heeft op de stabiliteit van het geulsysteem.

2. *Opzetten en uitvoeren van drie clusters modelberekeningen (in totaal 6 simulaties) waarbij de modelschematisatie van 1994 of 1968 (met asymmetrische cel en een niet-uniforme geometrie in geullangsrichting) op drie wijzen wordt aangepast ter onderbouwing van aanname 2:*

- 2a) 1c herhalen met een cel met een asymmetrische en uniforme geulgeometrie in langsrichting. Hiertoe worden de ruimtelijk gemiddelde geulprofielen, d.w.z. het gemiddelde profiel van de ebgeul en het gemiddelde profiel van de vloedgeul worden op de drie knooppunten langs de geulen voorgeschreven.
- 2b) Een symmetrische macrocel met een niet-uniforme geometrie in langsrichting. De profielen van de eb- en vloedgeul in ieder knooppunt worden samengenomen in tweeën gedeeld. Hiermee 1c herhalen.
- 2c) Een symmetrische macrocel met een uniforme geometrie in langsrichting. Hiertoe wordt het ruimtelijk gemiddeld profiel van de eb- en vloedgeul samengenomen en in twee symmetrische geulen gedeeld. Hiermee 1c herhalen.

3. *Opzetten en uitvoeren van twee morfologische berekening voor de situatie van 1968 (of eventueel 1955) ter onderbouwing van de aannamen 3 en 5. Voorwaarde voor het slagen van deze onderbouwing is dat de voor 1968 berekende morfologische veranderingen en sedimentuitwisseling tussen de macrocel en het aangrenzende geulsysteem duidelijk verschillen van de situatie van 1994.*

- 3a) run waarbij $k=2$ en er 5% gestort wordt.
- 3b) run waarbij $k=2$ en er 10% gestort wordt.

4. *Opzetten en uitvoeren van vier modelberekeningen ten behoeve van het onderbouwen van aanname 4*
 - 4a) 1c herhalen waarbij er lokaal in de inloop van de vloedgeul wordt gestort. Run 1c herhalen.
 - 4b) 1c herhalen waarbij lokaal in het drempelgebied van de vloedgeul wordt gestort.
5. *Het effect van zeespiegelstijging in het modelconcept (aanname 6) onderzoeken*
 - 5a) het checken of aanname 6 klopt m.b.v. de bestaande software/modelaanpak en expert judgement van de deskundigen van WL|Delft Hydraulics.

3 Opzet model

3.1 Algemeen

De opzet van het netwerk model op basis van SOBEK is begonnen in 2001. De eerste opzet van het model als mede de validatie van de waterbeweging is beschreven in Jeuken (2001). Daarbij zijn de geometrische en bathymetrische gegevens uit 1994 gebruikt. De opzet van het model is in twee stappen gedaan. In de eerste stap is een één-tak model gebouwd en daarmee zijn de algemene karakteristieken van zowel het verticale als horizontale getij gereproduceerd. In de tweede stap wordt het celmodel opgezet door het geulsysteem Middelgat en Gat van Ossenise (Iodingsvak 3 in Fig.3.1) te schematiseren in twee takken. Deze macro-cel bevindt zich tussen km24 en km34.6 vanaf de monding. De basiskkenmerken van de geometrie van het geulsysteem in de macrocel zijn samengevat in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Geometrische eigenschappen van het eb- vloedgeulsysteem in het celmodel 1994

afstand tot monding (km)	A (m ²)		B(m)		R (m)	
	vloedgeul	ebgeul	vloedgeul	ebgeul	vloedgeul	ebgeul
27	28065	19171	1841	2557	15,2	7,5
29	25907	18165	1768	2456	14,7	7,4
31	21419	18794	2230	1721	9,6	10,9
33	20108	16804	2289	1479	8,8	11,4
34,6	19118	15830	2217	1432	8,6	11,1

A= dwarsoppervlakte, B= breedte en R = hydraulische straat = A/ (natte omtrek)

Het celmodel bleek, net als het één-tak model, het verticale getij goed te reproduceren. Met betrekking tot het horizontale getij wordt het debiet door het hele estuarium goed gereproduceerd maar de verdeling door de twee takken in de macro-cel is niet goed weergegeven. De richting van de horizontale circulatie en daarmee ook de richting van het resttransport, is tegengesteld aan die is waargenomen.

Het celmodel zoals beschreven in Jeuken e.a. (2002) is gebruikt als uitgangspunt. Voordat het model kan worden ingezet voor de analyse zijn de volgende verbeteringen/uitbreidingen aan het model gedaan:

- Fine-tuning van het model met betrekking tot de restcirculatie van zowel waterbeweging als sedimenttransport in de macro-cel.
- Het model geschikt maken voor morfologische berekeningen.

Deze verbeteringen/uitbreidingen van het model zijn in de volgende twee paragrafen beschreven.

3.2 Calibratie waterbeweging en sediment transport

De restcirculatie (RV) in het celmodel, zoals beschreven in Jeuken e.a. (2002), is tegengesteld gericht aan de circulatie volgens het 2D model en de metingen. Zoals Tabel 3.2 (Tabel 3.5 in Jeuken e.a., 2002) laat zien wordt de ebgeul gekenmerkt door een vloedgedomineerd restdebiet en de vloedgeul kenmerkt zich door een ebgedomineerd restdebiet.

Tabel 3.2 Berekende water beweging in de macrocel met het bestaande model. Observaties gebaseerd op metingen van 1988 die herleid zijn naar het morfologisch getij van de berekening (gemiddeld tij+8-9%). TV=getijvolume, (ebvolume+vloedvolume), EV=ebvolume, VV=vloedvolume, RV=restvolume, VV-EV. een positief RV betekent vloedgedomineerd, een negatief RV betekent een ebgedomineerde transport van water. Gegevens 2d-model ontleend aan Jeuken (2000).

	Ebgeul			Vloedgeul		
	Sobek	2d-model	observatie	Sobek	2d-model	observatie
TV	381	488	522	613	632	593
EV	180 (36%)	264 (47%)	280 (51%)	317	301	272*
VV	201 (40%)	224 (40%)	242 (43%)	296	331	321
RV	21	-40	-42	-21	30	49

*De debietverdeling in het geulsysteem is sinds 1988 nog wel veranderd (debieten door de vloedgeul zijn nog toegenomen, Jeuken, 2000).

Na een analyse van de verschillende mechanismen die tot restcirculatie in de macrocel kunnen leiden is aanbevolen door Jeuken e.a. (2002) het model af te regelen door een richting afhankelijke Chezy coëfficiënt te gebruiken. Dit betekent dat voor de ebrichting een gladdere bodem en dus grotere Chezy waarde wordt gekozen dan in de vloed richting. De oorspronkelijke Chezy waarde bedraagt $C=50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. In de eb richting wordt nu $C=56$ en in de vloedrichting $C=44$ gebruikt. De berekende resultaten worden opnieuw vergeleken met de metingen en het 2D model in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Berekende water beweging in de macrocel, na introductie van richting afhankelijk Chezy coëfficiënt met ΔC van $6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

	Ebgeul			Vloedgeul		
	Sobek	2d-model	observatie	Sobek	2d-model	observatie
TV	398	488	522	612	632	593
EV	219 (43%)	264 (47%)	280 (51%)	286	301	272*
VV	179 (35%)	224 (40%)	242 (43%)	326	331	321
RV	-40	-40	-42	40	30	49

De richting van de rest circulatie (RV) komt nu overeen met het 2D model en met de waarnemingen. Ook de grootte van de RV komt redelijk tot goed overeen..

Er is echter nog een complicatie m.b.t. het sedimenttransport. Het op dit manier gecalibreerde model hoeft niet meteen ook de restcirculatie in het sediment transport goed weergeven. In het model zoals beschreven in Jeuken e.a. (2002) is de transportformule van Engelund-Hansen gebruikt.

$$s = \frac{0.05u^5}{(1 - \varepsilon)\sqrt{g}C^3\Delta^2D_{50}} \quad (3.1)$$

Herein

s	=	sediment transport inclusief poriën per eenheid van breedte (m ² /s)
u	=	stroomsnelheid (m/s)
ε	=	poriën gehalte in de bodem
g	=	zwaartekracht versnelling (m/s ²)
C	=	Chezy coëfficiënt (m ^{1/2} /s)
Δ	=	relatieve dichtheid van sediment (-)
D ₅₀	=	median korrelgrootte sediment (m)

Volgens deze formule is het sedimenttransport omgekeerd evenredig met de Chezy coëfficiënt. Een vergroting van C in de eb-richting zorgt voor een ebgedomineerd debiet in de ebgeul maar geeft een omgekeerd effect voor het sedimenttransport. Het resttransport en het bruto transport in de macrocel berekend door het model zijn gepresenteerd in Fig. 3.2. Het rest- en bruto transport zijn respectievelijk als volgt berekend:

$$T_{rest} = \frac{1}{T} \int_0^T S dt \quad (3.2)$$

$$T_{bruto} = \frac{1}{T} \int_0^T |S| dt \quad (3.3)$$

S	=	momentaan sedimenttransport
T	=	getijperiode
t	=	tijd.

Figuur 3.2 laat zien dat de richting van het resttransport in de ebgeul goed is maar in de vloedgeul niet. Dit probleem kan worden opgelost door een transportformule te kiezen waarin de gebruikte Chezy coëfficiënt geen invloed heeft op het transport. De formule van Van Rijn is er zo één omdat daarin alleen de bodemschuifspanning t.g.v. de korrel gerelateerde ruwheid wordt gebruikt bij het berekenen van sedimenttransport¹.

¹ De optie in SOBEK om een door de gebruiker te definiëren formule te gebruiken biedt geen oplossing omdat daarin alleen de Shields parameter wordt gebruikt.

$$\begin{aligned}
 S &= S_b + S_s \\
 S_b &= 0.005 \frac{uh}{1-\varepsilon} \left(\frac{u-u_c}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \right)^{2.4} \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2} \\
 S_s &= 0.012 \frac{uh}{1-\varepsilon} \left(\frac{u-u_c}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \right)^{2.4} \left(\frac{D_{50}}{h} \right) \left(\frac{D_{50} g^{\frac{1}{3}} \Delta^{\frac{1}{3}}}{\nu^{\frac{2}{3}}} \right)^{-0.6}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Herein

- h = waterdiepte (m)
 u_c = kritische stroomsnelheid (m/s)
 ν = kinetische viscositeit van water (m²/s)

Het berekende rest- en bruto transport met de Van Rijn formule i.p.v. Engelund-Hansen zijn weergegeven in Fig. 3.3. De richting van de restcirculatie in het sedimenttransport is nu wel goed.

Na dat het '1994-model' is gecalibreerd wordt ook een model opgezet voor de situatie in 1968. Dit wordt gedaan door alle dwarsprofielen in het model te vervangen door profielen afgeleid uit de gegevens uit 1968. Dit is gedaan omdat de vloedgeul in 1968 gemiddeld ondieper was dan de ebgeul, in tegenstelling tot de situatie in 1994. De berekende getijvolumes in de macrocel voor de 1968 situatie zijn gegeven in tabel 3.4. Vergeleken met de 1994 situatie (tabel 3.3) is er geen wezenlijk verschil in de restcirculatie van de waterbeweging. Dit komt overeen met de uitkomst de analyse van Jeuken e.a. (2002) die aangeeft dat de richting afhankelijke Chezy domineert over de andere mechanismen.

Tabel 3.4 Berekende water beweging in de macrocel, met het 1968 model.

	Ebgeul			Vloedgeul		
	Sobek	2d-model	observatie	Sobek	2d-model	observatie
TV	465	488	522	497	632	593
EV	254 (53%)	264 (47%)	280 (51%)	227	301	272*
VV	211 (44%)	224 (40%)	242 (43%)	270	331	321
RV	-43	-40	-42	43	30	49

Het berekende rest- en bruto sedimenttransport uit het 1968 model zijn gepresenteerd in fig. 3.4. Ook hier geldt dat er weinig verschil is t.o.v. de 1994 situatie (fig. 3.3). Daarom wordt besloten alleen het 1994 model te gebruiken in de rest van de studie. Zoals in paragraaf 4.4 nader zal worden uitgelegd, wordt activiteit 3 zoals beschreven in 2.2 dan anders uitgevoerd. De invloed van de autonome ontwikkeling wordt onderzocht door gebruik te maken van het feit dat de ontwikkelingen in de eb- en de vloedgeul tegenovergesteld van elkaar zijn. De invloed van de wisselwerking tussen de macrocellen wordt onderzocht door gebruik te maken van het feit dat naast storten de locatie van baggeren in het estuarium van belang is.

3.3 Opzet morfologische berekeningen

Het model is voor waterbeweging en sedimenttransport opgezet en gevalideerd. Maar voor de analyses in deze studie moeten lange-termijn morfologische berekeningen worden uitgevoerd. Om het model geschikt te maken voor de morfologische berekeningen zijn een aantal aanpassingen aan het model gedaan.

Aanpassen schematisatie van dwarsprofielen

In SOBEK moet een dwarsprofiel worden gespecificeerd in de vorm van breedte als functie van hoogte $B(z)$. Deze informatie wordt afgeleid uit de lodingsgegevens. Bij de eerste opzet van het model zijn de meetgegevens als geheel gebruikt, en de functie $B(z)$ is gespecificeerd vanaf het diepste punt tot 7 m +NAP met een interval van ongeveer een decimeter. Echter, voor een 1D model is het exacte verloop van de functie $B(z)$ alleen van belang in het intergetijdegebied. Onder het laagwater zijn alleen de stroomvoerende oppervlakte en de hydraulische straal van belang. Voor een estuarium zoals de Westerschelde is de hydraulische straal ongeveer gelijk aan de gemiddelde diepte omdat de breedte-diepte verhouding erg groot is. Daarom is er onder laagwater alleen een niveau nodig waarop de breedte wordt gegeven. Wel moet de combinatie van het niveau en de breedte zodanig zijn dat het oppervlakte onder het laagwater goed is.

Met deze overwegingen zijn de profielen in de Westerschelde (tot de grens met België) als volgt geschematiseerd (zie als voorbeeld Fig.3.5):

- Onder NAP-3 m wordt het profiel geschematiseerd als een trapezium zodanig dat de oppervlakte van het profiel onder NAP-3 m goed is.
- Tussen NAP-3 m en NAP+3 m wordt het verloop van de breedte als functie van hoogte goed weergegeven. Een interval van 1 m blijkt klein genoeg te zijn.
- Boven NAP+3 m wordt nog maar een extra niveau gedefinieerd, i.e. NAP+7 m.

Door deze reductie in de invoergegevens is de vereiste rekentijd voor een morfologische run teruggebracht van 1 nacht tot minder dan een uur.

Verplaatsen bovenstrooms rand

De bovenstroomse rand van het model ligt bij Gent. De lange riviertak was meegenomen omdat dan de randvoorwaarde voor de waterbeweging makkelijk te definiëren is. Voor de morfologische berekeningen is de lange rivier tak eigenlijk lastig omdat het meer rekentijd veroorzaakt. Bovendien is gebleken dat het bovenstroomse deel van de rivier tak vaak stabiliteitsproblemen veroorzaakt. Omdat de waterdiepte daar gering is, leidt de morfologische ontwikkelingen vaak tot droogvallen wat niet toegelaten is in SOBEK. Daarom is besloten het model te verkorten door de bovenstroomse rand te verplaatsen.

Het interessegebied van het model is de beschouwde macrocel. De nieuwe rand moet wel nog ver genoeg van het interessegebied zijn. De nieuwe rand is uiteindelijk gekozen op 62 km vanaf de monding, ongeveer bij de grens. De afstand van deze rand tot het interessegebied is dan ongeveer hetzelfde als die tussen de benedenstroomse rand en het interessegebied. Voor de randvoorwaarde daar wordt het berekende debiet met het oorspronkelijke model gebruikt.

Rekenmethode

Voor morfologische berekeningen kan men in SOBEK kiezen tussen de 'river mode' en de 'estuarium mode'. De estuarium mode is speciaal ontworpen voor morfologische berekeningen onder invloed van getij. Daarbij wordt uitgegaan van een cyclisch getij. Morfologische veranderingen wordt niet na elke stap van de stromingsberekening berekend, maar eerst wordt het netto transport in een getijperiode bepaald. Aan de hand van het netto transport wordt dan de veranderingen van het bodemniveau in een morfologische tijdstap (gelijk aan een aantal keren de getijperiode) berekend.

Voor de hand liggend is om in de huidige studie de 'estuarium mode' te gebruiken voor de morfologische berekeningen. Echter, dit bleek niet goed te werken. Ten eerste treden er ernstige fluctuaties in het berekende bodemniveau op. Ten tweede komen de berekende morfologische veranderingen niet overeen met de verwachtingen. Het lijkt er op dat de massa-balans van sediment niet klopt. De oorzaak ligt in het gebruikte numerieke schema voor de morfologische berekening in SOBEK. Bij dit schema wordt het berekende sedimenttransport gecorrigeerd om ervoor te zorgen dat het schema tweede orde nauwkeurig in tijd is, de berekening stabiel blijft en dat fluctuaties worden gedempt. Echter, de gebruikte correctie is afgeleid voor rivier situaties met een quasi-stationaire stroming. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een debiet dat van het berekende transport is afgeleid. In het geval van de estuarium mode wordt het netto transport in de getijperiode gebruikt om dit debiet te bepalen. Blijkbaar leidt dit tot een onrealistische correctie van het transport.

Het probleem is opgelost door de 'rivier mode' te gebruiken, waarbij na elke stap van de stromingsberekening de morfologische veranderingen worden berekend. Om toch rekening te houden met het grote verschil tussen de morfologische en hydrodynamische tijdschalen en snel berekeningen te kunnen maken wordt het sedimenttransport met een factor $N \gg 1$ vermenigvuldigd. Na elke getijperiode is zo de morfologische ontwikkeling van N getijperiodes berekend. De keuze van de grootte van N gebeurt op dezelfde manier als bij de keuze van de morfologische tijdstap bij de estuarine mode.

Randvoorwaarden

Bij de open randen van het model aan beide kanten is een morfologische randvoorwaarde nodig. Er is gekozen om het bodemniveau voor te schrijven omdat er weinige informatie bekend is over het sedimenttransport door de randen. De randvoorwaarde wordt echter alleen gebruikt als instroming optreedt. Bij uitstroming is er geen randvoorwaarde vereist wordt het bodemniveau wel aangepast. Met de rekenmethode zoals hierboven beschreven, betekent dit dat in ongeveer helft van de tijd het bodemniveau aan de randen verandert en de andere helft van de tijd telkens weer teruggezet wordt naar het voorgeschreven niveau.

Bij het toepassen van de randvoorwaarde wordt het hele profiel op de rand naar boven of naar beneden verplaatst. Dit is anders dan het aanpassen van een profiel bij het verwerken van sedimentatie of erosie (zie hieronder). Op den duur kan dit tot problemen leiden. Om dit probleem te voorkomen wordt het profiel op de twee open randen rechthoekig gemaakt ($B(z)=\text{constant}$). De breedte is zodanig gekozen dat de oppervlakte onder NAP goed is.

Transportbreedte

Voor de sedimenttransportbreedte wordt de breedte op NAP-3 van de dwarsprofielen gebruikt. Deze breedte is van belang bij het berekenen van het sedimenttransport en bij het aanpassen van de dwarsprofielen bij sedimentatie-erosie.

Bij het berekenen van transport wordt deze breedte gebruikt tenzij de werkelijke breedte op een bepaald moment kleiner is. Aangezien het waterniveau in het estuarium niet lager dan NAP-3 komt wordt deze breedte altijd gebruikt.

De gekozen sedimenttransportbreedte houdt ook in dat alleen het deel onder NAP-3 van de dwarsprofielen worden aangepast als gevolg van morfologische veranderingen. Bij de aanpassing is de methode proportioneel gekozen. Dit houdt in dat de verandering evenredig met de diepte vanaf NAP-3 is verdeeld. Voor de gekozen schematisatie van de profielen betekent dit dat alleen het onderste niveau wordt aangepast.

4 Analyse resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de uitgevoerde berekeningen geanalyseerd om de aannames die aan het cellenconcept ten grondslag liggen te toetsen en/of te onderbouwen. In elke paragraaf wordt één van de aannames, zoals beschreven in hoofdstuk 2, behandeld. Alleen de laatste aanname, met betrekking tot plaat-geul interactie, wordt niet beschreven, omdat plaat-geul interactie niet goed kan worden beschreven in een 1D model.

4.2 Toepasbaarheid rivier analyse op estuaria

Achtergrond

Eerst wordt aanname 1, misschien wel de belangrijkste aanname beschouwd: *De stabiliteitrelatie zoals die is afgeleid voor rivieren is van toepassing op getijgebieden*. De stabiliteitrelatie uit de theoretische analyse houdt het volgende in:

- In een systeem zonder ingrepen hangt de stabiliteit van een twee-geulen systeem af van de knooppuntrelatie die de verdeling van sedimenttransport bij het splitsingspunt bepaalt. Veld- en laboratoriumonderzoek en analyses van 1D-netwerk modellen geven aan dat de volgende knooppuntrelatie het meest geschikt is voor het modelleren van dergelijke splitsingen (Wang e.a., 1995):

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \quad (4.1)$$

Hierin is 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 voor grote waarden van k de splitsing stabiel is waarbij beide geulen open blijven. Voor kleine waarden is de splitsing instabiel: een van de geulen verzandt. Wanneer het sedimenttransport evenredig is met een macht n van de snelheid is de kritische grens voor k gelijk aan $n/3$. Voor de Engelund-Hansen transportformulering betekent dit dat de kritische k -waarde gelijk is aan $5/3$.

- Het netto² storten van sediment beïnvloedt de stabiliteit van een twee-geulensysteem. Er is een kritische hoeveelheid voor het te storten sediment waarboven het geulsysteem instabiel wordt. Deze kritische hoeveelheid kan worden uitgedrukt in een fractie van het totale transport door het geulsysteem bij evenwicht. Voor een gebruikelijke waarde van k (rondom 2) voor een van nature stabiel systeem is dit ongeveer 10%.
- Baggeren alleen heeft geen negatieve invloed op de stabiliteit van het geulsysteem.

Er moeten dus drie sub-aannames worden getoetst: (1) aantonen dat de conclusie over de invloed van de waarde van k op de stabiliteit zonder ingreep ook geldt voor de getij situatie; (2) stortcriterium is ongeveer 10% van het bruto transport door het geulstelsel; (3) bij baggeren blijft het systeem altijd stabiel.

Invloed waarde van k op stabiliteit cel bij autonome ontwikkeling

Om de eerste sub-aanname te toetsen worden berekeningen uitgevoerd zonder baggeren/storten, en met verschillende waarden van k ($=1, 4, 2.2, 1.8, 1.5, 1.3$). Hierbij is afgeweken van het oorspronkelijke plan, omdat nu de transport formule van Van Rijn is gebruikt i.p.v. die van Engelund-Hansen (EH). Bij de EH-formule is de kritische waarde van k gelijk aan $5/3$ terwijl bij Van Rijn ligt de kritische waarde van k tussen $\frac{3.4}{3}$ en ∞ . De

macrocel die we onderzoeken is asymmetrisch en de beginsituatie is nog niet in morfologisch evenwicht. Als de conclusies van de theoretische analyse voor rivieren ook voor getijsituaties geldig zijn, dan moeten de resultaten van een berekening met een kleine waarde van k aangeven dat de langere geul afsluit. Voor grote waarden van k moeten de resultaten aangeven dat beide geulen open blijven.

De berekende bodemniveaus langs de twee geulen in de cel met $k=1$ zijn weergegeven in fig. 4.1. In de figuur is het bodemniveau op verschillende locaties langs de geulen uitgezet tegen de tijd. De resultaten geven duidelijk aan dat de langere ebgeul op den duur afsluit terwijl de kortere vloedgeul dieper wordt en alleen open blijft. Dezelfde resultaten van de berekening met $k=4$ zijn weergegeven in fig. 4.2. In tegenstelling tot het geval van $k=1$ blijven nu beide geulen open. Een morfologisch evenwicht wordt bereikt na verloop van tijd. Blijkbaar gelden de conclusies m.b.t. de invloed van de waarde van k op de stabiliteit van splitsingen, afgeleid voor rivier gevallen, ook voor getijgevallen. Hiermee is de eerste subaanname onderbouwd.

Vervolgens zijn er berekeningen uitgevoerd om de kritische grens van de waarde van k te bepalen. In tegenstelling tot de situatie met de transport formule van Engelund-Hansen is deze grens niet eenduidig te bepalen als de formule van Van Rijn wordt gebruikt (zie 3.2). Dit komt doordat er in de formule een kritische waarde voor de stroomsnelheid is gehanteerd, onder welke waarde geen sedimenttransport plaatsvindt. De macht van de snelheid in de transportformule is dan niet meer een constante maar afhankelijk van de snelheid zelf. Voor de formule van Van Rijn is de ondergrens van deze macht 3.4, geldend voor een relatief hoge stroomsnelheid. De kritische waarde van k zal dus groter dan

² Met netto wordt bedoeld de som van alle ingrepen in de geul waarbij storten en zandwinnen een negatief teken hebben.

$\frac{3.4}{3}$ zijn. De resultaten van de berekeningen met de verschillende waarden van k laten zien dat bij $k=1.5$ het nog stabiel is en bij $k=1.3$ instabiel wordt. Blijkbaar is de kritische waarde van k dicht bij $\frac{3.4}{3}$.

Het bepalen van de kritische waarde van k is van belang voor de keuze van k bij de verdere berekeningen. De afwijking van k t.o.v. de kritische waarde heeft grote invloed op de stortcapaciteit. De theoretische analyse (Wang en Winterwerp, 2001) hanteert als uitgangspunt dat cellen in de Westerschelde van nature stabiel zijn. Daarom is $k=2.2$ gekozen. Deze waarde ligt boven, maar niet ver van, de kritische waarde van k voor formule van Engelund-Hansen $k=5/3$ die gebruikt is voor de analyse. In de huidige berekeningen geeft $k=1.8$ een vergelijkbare afwijking t.o.v. de kritische waarde als in de theoretische analyse. De autonome ontwikkeling voor deze k waarde is gepresenteerd in fig. 4.3a en fig. 4.3b. Voor de verdere berekeningen geldt dat als er geen k -waarde wordt vermeldt $k=1.8$.

Interessant bij de autonome ontwikkeling is de eindtoestand wanneer het morfologische evenwicht is bereikt. Fig. 4.3b laat de bodemligging langs de twee geulen aan het begin van de berekening ($t=0$) en aan het eind van de berekening ($t=200$ jaar) zien. Opgemerkt wordt dat de bodemligging aan het begin wordt beïnvloed door de manier waarop de profielen geschematiseerd zijn. De berekening laat zien dat aan het eind de kortere vloedgeul dieper is dan de langere ebgeul. De vloedgeul is dieper aan de benedenstroomse zijde wat in overeenstemming is met de algemene kenmerk van vloedgeulen. De ebgeul aan het eind van de berekening is ook dieper benedenstrooms, wat niet overeenkomt met de algemene kenmerk van ebgeulen. Verder is de bodemhelling in de langsrichting kleiner in de ebgeul dan in de vloedgeul, wat wel overeenkomt met de kenmerken van een eb- en vloedgeulensysteem. Samengevat moet worden geconcludeerd dat het karakter van een eb- en vloedgeulensysteem niet geheel is gereproduceerd. Daarom mogen de resultaten van de berekeningen met het model niet in absolute zin worden gebruikt. Voor het doel van de studie, toetsing van de aannamen in het cellenconcept, is het model echter wel geschikt omdat de resultaten slechts relatief t.o.v. elkaar worden beschouwd.

De resultaten van de berekening laten verder zien dat de morfologische tijdschalen van het beschouwde systeem groot is. Daarom zijn de berekeningen voor een periode van 200 jaar uitgevoerd, in plaats van 30 jaar zoals in de offerte staat. De resultaten over een kortere periode kunnen nog niet duidelijk aangeven of het systeem stabiel of instabiel wordt. Voor de praktijk is dit een aanwijzing dat monitoren van het systeem met betrekking tot de stabiliteit van het meerengelsysteem moeilijk is omdat de effecten pas over een grote periode kenbaar worden.

Invloed van storten

Vervolgens worden berekeningen uitgevoerd om te toetsen of de afgeleide stortcapaciteit van ongeveer 10% het bruto transport door de cel geldt voor getijsituaties. Zoals fig. 3.3 laat zien is het bruto transport door de twee geulen in de cel niet constant, maar varieert langs de geulen. De gemiddelde waarde van de som van de bruto transporten door de twee geulen wordt bepaald en verder gebruikt. Deze waarde is gelijk aan 4.65 miljoen m^3 per jaar. Er is verder geen aandacht besteed aan het ijken van deze waarde aan de hand van

waarnemingen door de vermenigvuldigingsfactor in de transport formule te veranderen, omdat deze zelfde factor ook is gebruikt om de morfologische tijdstap t.o.v. de tijdstap van de stromingsberekening te regelen. Het gebruikte bruto transport is waarschijnlijk kleiner dan in werkelijkheid, wat inhoudt dat de morfologische tijdschaal in de berekening groter is dan in werkelijkheid. Dit heeft verder geen invloed op de conclusies van de berekeningen omdat de storthoeveelheid relatief t.o.v. het bruto transport wordt bepaald.

Eerst zijn berekeningen uitgevoerd waarbij alleen in de vloedgeul is gestort. De resultaten van de berekeningen laten zien dat voor deze situatie de stortcapaciteit veel hoger is dan 10%. Zelfs met 25% storten (met $k=2.2$) blijft het systeem stabiel, zoals fig.4.4 laat zien, en na verloop van tijd wordt een morfologische evenwicht bereikt.

Dit onverwachte resultaat wordt verklaard door een tot dusver verborgen verschil tussen riviersituaties en getij situaties. Bij de rivier situatie stroomt het water in één richting. Het storten in één van de riviertakken heeft geen invloed op het sedimentaanbod vanuit de bovenstroomse tak en het gestorte materiaal kan ook niet terechtkomen in de andere tak. In een getijsituatie stroomt het water echter in twee richtingen. Na verloop van tijd is een deel van het gestorte sediment verspreid over de boven- en benedenstroomse takken, waar een verondieping optreedt. Door het ondieper worden wordt de transportcapaciteit, en dus het aanbod van sediment naar de cel groter. Hierdoor komt een deel van het gestorte sediment in de andere (de eb-) geul terecht, wat de verdieping daar remt. Dit verklaart waarom de cel stabiel kan blijven bij een hoger niveau van storten in één van de geulen. Opgemerkt wordt dat ook de grotere k waarde in de berekening een hogere stortcapaciteit tot gevolg heeft, maar dat is niet de hoofdoorzaak.

Uit deze resultaten mag echter niet de conclusie getrokken worden dat de resultaten van de theoretische analyse niet van toepassing zijn voor de Westerschelde. De gesimuleerde situatie in de berekening komt namelijk niet overeen met de werkelijkheid. De berekende verondieping kan in de werkelijkheid niet plaats vinden door onderhoud baggeren. Op mega-schaal bekeken is er in de berekening netto sediment aan het systeem toegevoegd, wat in werkelijkheid niet optreedt. In werkelijkheid heeft men het stortmateriaal eerst uit het systeem gebaggerd en blijft de zandbalans dus intact.

De berekeningen zijn daarom opnieuw uitgevoerd waarbij naast het storten dezelfde hoeveelheid sediment wordt gebaggerd, de ene helft bovenstrooms van de cel en de andere helft benedenstrooms (zie fig.2.1). Hierdoor treedt er geen verondieping meer op buiten de cel. Verder is het storten van de vloedgeul verplaatst naar de ebgeul in de berekeningen, omdat in deze cel de vloedgeul dieper is en als vaargeul fungeert. De resultaten van berekeningen met 5% en 15%³ storten zijn gepresenteerd in respectievelijk fig. 4.5 en fig. 4.6. Duidelijk is te zien dat bij 5% storten de cel stabiel blijft terwijl 15% storten tot afsluiten van de geul leidt. Dit is in overeenstemming met de resultaten van de theoretische analyse. Omdat de gesimuleerde situatie in deze nieuwe berekeningen beter overeenkomt met de werkelijkheid, wordt geconcludeerd dat ook de tweede subaanname is gevalideerd: de stortcapaciteit is ongeveer 10% van het bruto transport door het cel.

³ Deze waarden zijn gebaseerd op de theoretische analyse van Wang en Winterwerp (2001)

De resultaten van alle berekeningen bij elkaar geven wel aan dat een cel eigenlijk niet geïsoleerd mag worden beschouwd. Baggeren of storten in een cel kan ook de stabiliteit van de cellen ernaast beïnvloeden door het veranderen in aanbod van sediment. Het baggeren en storten in het hele estuarium dienen integraal te worden beschouwd. Dit wordt vooral van belang in de nieuwe stortstrategie waarbij men overweegt het uit het oostelijke deel gebaggerd materiaal in het westelijke deel van het estuarium te storten. Dit wordt nader bekeken in 4.4.

Invloed van baggeren

Om de invloed van baggeren in de cel te onderzoeken, zijn twee sommen gedraaid: in de eerste som wordt 25% van de bruto transportcapaciteit gebaggerd (in de vloedgeul), zonder compensatie storten boven- en benedenstrooms van de cel. De resultaten van deze run zijn weergegeven in fig. 4.7a. In de tweede som wordt dezelfde hoeveelheid gebaggerd, maar nu met compensatie storten juist boven- en benedenstrooms van de cel. Deze resultaten zijn weergegeven in fig 4.7b.

Zonder compensatie storten bereiken niet alle delen van de geulen een evenwicht: benedenstrooms van de lokatie waar gebaggerd wordt erodeert de vloedgeul steeds sneller. De ebgeul sedimenteert en dit lijkt bij het knooppunt met de vloedgeul steeds sneller te gaan. Dat er aan het eind van de berekening (200 jaar) nog geen evenwicht is bereikt, is een gevolg van het feit dat de morfologische tijdschaal groter wordt door verlaagde sediment transport capaciteit in het systeem als gevolg van een verdieping door sediment onttrekking. het twee-geulen systeem wordt gehandhaafd en zal ook gedurende langere tijd stabiel blijven. Dit is te zien doordat de sedimentatiesnelheid in het ondiepste deel van de ebgeul afneemt in de tijd.

Met compensatie storten (buiten de macrocel) wordt geen netto sediment aan het systeem onttrokken en blijven eb- en vloedgeul stabiel: de vloedgeul erodeert, terwijl de ebgeul sedimenteert. Duidelijk is dat beide geulen open blijven en het systeem dus stabiel is. In beide gevallen blijft het systeem stabiel, zelfs met een relatief grote hoeveelheid baggeren (25% van het bruto transport). Hiermee is de derde aanname gevalideerd: alleen baggeren in één van de twee geulen heeft geen negatieve invloed op de stabiliteit van het systeem.

Opmerking: De resultaten van deze berekeningen houden niet in dat er onbeperkt in het estuarium kan worden gebaggerd. In werkelijkheid moet het terugstorten van sediment in hetzelfde of andere macrocellen gebeuren. Zelfs als men het sediment uit het systeem haalt (naar het mondinggebied bijvoorbeeld) zal het dan leiden tot verdieping van het systeem en verkleining de platen.

4.3 Invloed eb- en vloedgeul karakter

Achtergrond

De theoretische analyse gaat uit van de rivier situatie. Dit impliceert de tweede aanname: *het eb- vloedgeul karakter van het geulsysteem heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium*. De bruto- en ook de netto sedimenttransportcapaciteit vertonen echter ruimtelijke variaties die samenvallen met variaties in de geometrie in de lengterichting van de geul: in de ondiepere maar bredere drempelgebieden van de geulen is de transportcapaciteit vaak groter dan in de diepere inloop van de geul. Deze ruimtelijke variatie wordt verondersteld geen invloed te hebben op het stortcriterium.

Voor de toetsing van deze aanname zijn de volgende kenmerken van de eb- en vloedgeulen van belang:

- De geulgeometrie is niet uniform langs een geul.
- Een macrocel bestaande uit een eb- en een vloedgeul is niet symmetrisch in de zin dat de twee geulen niet hetzelfde zijn.

Een serie berekeningen wordt uitgevoerd waarbij eerst één van deze twee kenmerken wordt geëlimineerd en daarna allebei. Telkens wordt bij de analyse van de resultaten bekeken of het stortcriterium nog steeds hetzelfde is.

Invloed niet-uniform geulgeometrie

Om de invloed van de niet-uniforme geulgeometrie te onderzoeken wordt de modelschematisatie in de eb- en vloedgeulen aangepast. De profielen in de ebgeul worden ruimtelijk gemiddeld tot een constant profiel. Hetzelfde gebeurt voor de vloedgeul. De lengte van de eb- en vloedgeul blijft hetzelfde. De resultaten van deze som zijn gepresenteerd in figuren 4.8a,b,c,d.

Het uniform maken van de geulen houdt in dat de breedte van de geulen constant wordt langs de geulen. De breedte van de geulen blijven hetzelfde tijdens de berekening in tegenstelling tot het bodemniveau. Aan het eind van de berekening wordt een nieuw evenwicht bereikt waarbij de geulen niet meer uniform zijn in de zin dat het bodemniveau varieert langs de geulen. Het constant maken van de breedte heeft tot gevolg dat de bodemhelling in de langsrichting van de geulen groter wordt. Dit kan men zien door fig. 4.8a en fig. 4.8e (bovenste 2 grafieken) te vergelijken met respectievelijk fig. 4.3a en fig. 4.3b.

Zoals te zien in fig 4.8b en fig 4.8c blijven de eb- en vloedgeulen stabiel bij 5% storten, maar instabiel bij 15% storten. Het instabiel worden treedt eerder op dan bij de som met de niet-uniforme geulgeometrie (fig 4.5 en fig 4.6). Dit komt omdat de gemiddelde bruto transport capaciteit bij de uniforme geulgeometrie iets kleiner is ($4.25 \text{ Mm}^3/\text{jr}$, fig. 4.8d) dan bij de niet-uniforme geulgeometrie ($4.65 \text{ Mm}^3/\text{jr}$). De hoeveelheid gestort en gebaggerd sediment is in beide runs echter hetzelfde. Hieruit kan men concluderen dat in absolute zin het niet-uniforme karakter van de geulen wel invloed heeft op de stortcapaciteit. De invloed kan echter worden verklaard door de verandering van het bruto sedimenttransport in het systeem. In relatieve zin blijft de conclusie gehandhaafd dat de stortcapaciteit ongeveer 10% van het bruto transport is.

Invloed asymmetrie eb- en vloedgeul

Om de invloed van een asymmetrische cel te onderzoeken wordt de modelschematisatie in de eb- en vloedgeul als volgt aangepast: alle profielen van de eb- en vloedgeul worden paarsgewijs gemiddeld zodat steeds twee dezelfde profielen worden verkregen. Verder worden de roosterlengtes aan begin en eind van de eb- en vloedgeul aangepast, zodat beide geulen dezelfde lengte krijgen (deze lengte is gelijk aan het gemiddelde van oorspronkelijke lengtes van de eb- en vloedgeul). De aanpassingen van de Chezy coëfficiënt om de circulatie in de cel goed te krijgen (zie hoofdstuk 3) worden teruggedraaid. Hiermee is de macrocel volledig symmetrisch geworden: de twee geulen zijn identiek. De resultaten van de som zijn gepresenteert in figuren 4.9a,b,c,d.

Figuur 4.9a laat de autonome ontwikkeling zien: de eb- en vloedgeul (die beide dezelfde geometrie hebben) eroderen licht. Dat de veranderingen zo klein zijn is mede een gevolg van het feit dat de morfologische tijdschaal veel groter is geworden doordat het netto transport in de macrocel veel kleiner is geworden door het symmetrisch maken (vergelijk fig.4.9d met fig.3.3).

Bij 5% storten (gebaseerd op het oorspronkelijk bruto transport horend bij de asymmetrische cel) plus compensatie baggeren net voor en na de macrocel (fig. 4.9b) loopt de ebgeul waarin is gestort nog niet dicht, maar de trend is wel dat de ebgeul langzaam maar zeker sedimenteert ten gunste van de vloedgeul. Dit ligt in de lijn der verwachting, aangezien uit fig. 4.9d blijkt dat de bruto transportcapaciteit van de macrocel veel kleiner is (ca. $3.2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) dan de bruto transport capaciteit van de oorspronkelijke run met asymmetrische cel (ca $4.6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Een andere complicerende factor is dat de kritische waarde van k voor stabliteit bij een ongestoord systeem afhangt van de stroomsnelheden, omdat de formule van Van Rijn i.p.v. Engelund-Hansen is gebruikt. Bij lagere snelheid is het sediment transport kleiner en de kritische waarde van k hoger. Doordat de morfologische tijdschaal veel groter is geworden is het hier nog niet te zien of het systeem stabiel blijft of instabiel wordt. Zelfs als er een stabiele situatie gaat ontstaan na langere tijd, is de macrocel in de nieuwe situatie veel schever geworden: ebgeul veel ondieper en vloedgeul veel dieper. Men kan dus wel zeker concluderen dat het wegnemen van de asymmetrie invloed op het effect van storten heeft.

De bodemligging aan het eind van de berekeningen voor de autonome ontwikkeling en voor het geval met 5% storten is gepresteerd in Fig.4.9e. Opmerkelijk is dat de vorm van het langspiegel niet veel verandert door het storten.

Bij 15% (dit is van het oorspronkelijke bruto transport wat overeenkomt met 22% van het huidige) storten plus compensatie baggeren loopt de ebgeul sneller dicht en erodeert de vloedgeul steeds sneller. Na 200 jaar is de ebgeul echter nog niet helemaal dicht, terwijl dit bij de oorspronkelijke run, met a-symmetrische macrocel, wel het geval was. Dit heeft te maken met het feit dat door het paarsgewijs middelen van de eb- en vloedgeulprofielen de ebgeul profielen beneden NAP-3 in het algemeen ruimer zijn geworden. Niet alleen de gemiddelde transport capaciteit is veranderd maar ook de ruimtelijke verdeling langs de geulen.

Invloed combinatie van de twee kenmerken

Voor het testen van de combinatie van beide kenmerken zijn de profielen uit de uniforme geulgeometrie verder gemiddeld zodat eb- en vloedgeul nu dezelfde (constante) geometrie hebben. De lengte van de eb- en vloedgeul is weer hetzelfde, zoals in de voorgaande simulatie. De resultaten van deze som zijn gepresenteerd in figuren 4.10a, b, c, d, e. De gemiddelde bruto transportcapaciteit bedraagt ca 3.7 Mm³/jaar, iets meer dan de vorige simulatie, maar nog steeds een stuk minder dan de oorspronkelijke simulatie met een a-symmetrische cel en niet-uniforme geometrie. Ook in deze simulatie loopt de ebgeul al dicht bij een storing van 5% van de (oorspronkelijke) bruto transport capaciteit in de ebgeul (+ compensatie baggeren net voor en na de cel). Bij 15% storten in de ebgeul is deze dicht na ca. 125 jaar.

De conclusies die uit de resultaten van de sommen kunnen worden getrokken, en ook de bijbehorende verklaringen zijn verder hetzelfde als bij de vorige serie sommen. Een vraag die nog onbeantwoord is gebleven is wat de hoofdoorzaak is van het grotere effect van storten als de asymmetrie wordt weggenomen. Het bruto transport en de grootte van het netto transport zijn afgenomen en ook het verloop ervan is veranderd. Uit de resultaten van de berekeningen tot nu toe kan nog geen uitsluitsel worden gegeven welk van deze factoren maatgevend is. Later zal meer aandacht aan deze vraag worden besteed (zie 4.5).

4.4 Invloed autonome ontwikkeling wisselwerking tussen macrocellen

Achtergrond

Bij de theoretische analyse wordt gekeken naar evenwichtstoestanden en de stabiliteit ervan. Ontwikkelingen waarbij geulen van nature eroderen of sedimenteren worden dus (nog) niet door het concept beschreven. Dergelijke tendensen, waarbij de ene geul van nature erodeert en de andere sedimenteert, zijn echter wel waargenomen (Jeuken, 2000, 2001). Aan de hand van modelberekeningen kan men uitzoeken of deze autonome ontwikkelingen wel of geen invloed hebben op de stortcriterium.

Samenhangend met de autonome ontwikkeling kan ook de sedimentuitwisseling tussen de macrocellen onderling van belang zijn. Het cellenconcept richt zich expliciet op individuele morfologische cellen. De sedimentuitwisseling tussen macrocellen, en de eventuele rol van mesocellen daarin (Jeuken, 2000), worden niet door het concept beschreven. Achterliggende gedachte c.q. aanname is dat de instandhouding van het gehele meergeulenstelsel gewaarborgd is als individuele *macrocellen* kunnen worden gehandhaafd.

Autonome ontwikkelingen en uitwisseling van sediment tussen de cellen zijn van nature altijd aanwezig. Ook in het model dat in de huidige studie wordt gebruikt is dit het geval. Het is praktisch onmogelijk een model te maken voor een estuarium waarin helemaal geen morfologische verandering optreedt, hetgeen de strikte betekenis van een morfologisch evenwicht is. Daarom kan de invloed van de autonome ontwikkeling alleen worden onderzocht door verschillende situaties met elkaar te vergelijken. Oorspronkelijk wordt gedacht dit te doen door berekeningen voor de situatie van 1968 uit te voeren naast de situatie van 1994. Maar al tijdens de calibratiefase van het model (zie hoofdstuk 3) is geconcludeerd dat het verschil tussen de twee situaties niet groot genoeg is. Aan de andere kant is er bij de eerdere berekeningen geconstateerd dat het erg veel uitmaakt of alleen storten in het systeem plaats vindt of dat ernaast ook baggeren plaats vindt. De verklaring hiervan is de wisselwerking tussen de verschillende cellen. Daarom wordt besloten om de invloed van de wisselwerking te onderzoeken door nog een berekening uit te voeren waarin het compensatie baggeren op andere locaties plaatsvindt. Verder is ook geconstateerd dat de autonome ontwikkelingen van de twee geulen in de beschouwde macrocel van elkaar verschillen. Daarom kan de invloed van de autonome ontwikkeling worden onderzocht door berekeningen met storten in verschillende geulen met elkaar te vergelijken.

Wisselwerking tussen cellen

Om het effect te onderzoeken van baggeren vanuit andere macrocellen, en storten van het gebaggerd materiaal in de ebgeul van een enkele cel, is een simulatie uitgevoerd waarbij 15% van de brutotransport capaciteit werd gestort in de ebgeul, terwijl 7.5% werd gebaggerd 52.5 km van de monding, en de andere 7.5% 9 km van de monding (de macrocel is gelegen tussen 27 km en 34.3 km van de monding). Uit fig 4.11 blijkt dat op deze manier het tweegeulen systeem blijft bestaan, ook als de theoretische storthoeveelheid van 10% van het bruto transport wordt overschreden. Dit betekent dat macrocellen niet op zichzelf staan, maar in hun voortbestaan door elkaar worden beïnvloed.

Invloed van autonome ontwikkeling

Het effect van het op verschillende manieren storten van dezelfde hoeveel materiaal wordt duidelijk als fig.4.12 met fig.4.5 en fig.4.6 worden vergeleken. Figuur 4.12 laat de resultaten zien van de berekening met een storthoeveelheid in de vloedgeul van 15% van de gemiddelde bruto transportcapaciteit. Qua hoeveelheid is dit hetzelfde als de som gepresenteerd in fig.4.5 en fig.4.6 met 15% storten. Alleen het storten is nu van de ebgeul naar de vloedgeul verplaatst. Hoewel het na 200 jaar nog niet geheel te zien is of de cel stabiel blijft, kan men grote verschillen zien tussen de resultaten van de twee sommen. Met het storten in de vloedgeul blijven beide takken veel langer open. Waarschijnlijk is het stortcriterium in de vloedgeul hoger dan in de ebgeul. Dit betekent dat het storten in de eb-

of vloedgeul wel degelijk verschil maakt op de ontwikkeling van het twee geulen systeem. De autonome ontwikkeling van de cel is zodanig dat de vloedgeul erodeert en de ebgeul sedimenteert. Blijkbaar kan het stortcriterium hoger worden als er een erosie tendens is bij de autonome ontwikkeling. De conclusie is dus dat autonome ontwikkeling invloed heeft op het stortcriterium. Hierbij moet worden opgemerkt dat de geul met erosie tendens vaak de vaargeul is.

4.5 Invloed verdeling storten

Achtergrond

In de theoretische analyses wordt een geul in de cel als één morfologische element beschouwd. Dit houdt in dat de ingrepen (storten, baggeren en zandwinnen) worden uitgesmeerd over de gehele lengte van de geul. In de praktijk gebeurt dit lokaal: baggeren en storten vindt plaats in specifieke bagger- en stortvakken binnen een geul. In de berekeningen tot nu toe is het storten als puntbron opgegeven, midden in de geul. Meer berekeningen worden uitgevoerd om het effecten van uitsmeren van storten en van de locatie van storten te onderzoeken.

Effecten van gelijkmatig verdelen

Dat de sommen tot nu toe, allemaal uitgevoerd met een puntbron in plaats van gelijkmatig verdeelde bron, de meeste conclusies van de analyse bevestigen geeft al aan dat er waarschijnlijk geen verschil is tussen lokaal in het midden van een geul of gelijkmatig over de geul wordt gestort. Om dit nader te toetsen wordt de berekening met 15% storten in de ebgeul herhaald, maar nu wordt het gestorte materiaal gelijkmatig over de hele ebgeul verdeeld. De resultaten van de berekening zijn gepresenteerd in fig. 4.13. Vergeleken met de berekening met puntbron (fig. 4.5 en fig. 4.6) is er inderdaad weinig verschil te zien. Ingrenen in een gebied kan in het model dus blijkbaar goed worden geschematiseerd op een punt midden in het gebied.

Invloed locatie van storten

Vervolgens is een serie berekeningen uitgevoerd om de invloed van de locatie van het storten te onderzoeken. Het betreft herhalingen van de sommen met 5% en 15% storten, gepresenteerd in fig. 4.5 en fig. 4.6. Alleen wordt in de nieuwe berekeningen het storten niet opgegeven in het midden van de geul, maar aan het ene of het andere eind van de geul. In totaal zijn er dus vier nieuwe berekeningen uitgevoerd. De resultaten van de berekeningen zijn gepresenteerd in fig. 4.14 t/m fig. 4.17. De twee berekeningen met 5% storten geven aan dat de cel stabiel blijft. De berekening van 15% storten aan het bovenstroomse eind van de geul leidt tot instabiliteit. Tot zo ver zijn de conclusies hetzelfde als die uit de voorgaande berekeningen. Uit deze drie berekeningen kan men dus niet de invloed van de locatie van het storten vaststellen. Maar in tegenstelling tot de eerdere berekeningen blijft de cel bij de berekening met 15% storten aan het benedenstroomse eind stabiel. Hieruit moet worden geconcludeerd dat de locatie van storten wel invloed kan hebben op de stortcriterium.

De vraag is nu wat de verklaring is van de invloed. Dit hangt samen met de onbeantwoorde vraag bij paragraaf 4.3. Ook hier moet de oorzaak gezocht worden in het sedimenttransport. Op basis van fig. 3.3 kan men de volgende feiten constateren, die van belang kunnen zijn:

- Het netto transport in de ebgeul is in de ebrichting.
- Het bruto transport in de ebgeul is veel groter aan het benedenstroomse eind dan aan het bovenstroomse eind.
- De grootte van het netto transport in de ebgeul is veel groter aan het benedenstroomse eind dan aan het bovenstroomse eind.

Alle drie factoren kunnen een verklaring zijn van de waargenomen invloed van de locatie van het storten. In combinatie met de resultaten beschreven in 4.3 kan men concluderen dat het locale transport in ieder geval van belang is. Dit betekent dat men naast het gemiddelde transport in de cel ook naar het locale transport moet kijken. De resultaten van de berekeningen geven nog geen uitsluitsel of het bruto transport of het netto transport het belangrijkste is. In de beschouwde gevallen geldt dat het netto transport qua grootte sterk samenhangt met het bruto transport. Dit is waarschijnlijk in de praktijk ook vaak het geval.

4.6 Invloed zeespiegelrijzing

De invloed van zeespiegelrijzing wordt niet geanalyseerd met behulp van simulaties met het SOBEK model, omdat zeespiegelrijzing niet goed mee te nemen is in de berekeningen. De invloed van de zeespiegelrijzing kan echter kwalitatief goed worden beschouwd door gebruik te maken van de overeenkomst met baggeren. Aan de hand van de berekeningen uitgevoerd voor het bepalen van de invloed van baggeren kan zelfs ook iets kwantitatief worden gezegd over de invloed van de zeespiegelrijzing.

Zeespiegelrijzing heeft in eerste instantie tot gevolg dat de waterdiepte in het hele systeem groter wordt. Dit effect is hetzelfde als gelijkmatig baggeren in het hele gebied. In de analytische beschouwing kan de invloed van zeespiegelrijzing op dezelfde manier worden behandeld als baggeren. Eerder is geconcludeerd dat baggeren alleen geen invloed heeft op de stabiliteit van een meergeulensysteem. Gelijkmatig baggeren in beide geulen heeft zelfs een positieve invloed op het stortcriterium. Daarom kan worden geconcludeerd dat zeespiegelrijzing geen negatief, maar een positieve invloed op het kritische stortniveau heeft.

Voor een kwantitatieve beschouwing worden voor de kenmerkende afmetingen van de geulen in een macrocel in de Westerschelde aangenomen: lengte $L=10$ km, breedte $B=1.5$ km. Een zeespiegelrijzing van 20 cm per eeuw komt in zo'n geul dan overeen met het baggeren van 0.03 miljoen m^3 per jaar. Dit is een verwaarloosbare hoeveelheid vergeleken met de ingrepen in het systeem. Zelfs bij een versnelde zeespiegelrijzing hoeft men de invloed ervan niet mee te nemen.

Model berekeningen met storten alleen hebben laten zien dat netto storten de sedimenttransportcapaciteit beïnvloedt, en daarmee indirect de stortcapaciteit. Netto baggeren zal omgekeerde effecten geven: verkleining van de transportcapaciteit die tot een kleinere stortcapaciteit kan leiden. De analogie van zeespiegelrijzing met netto baggeren geldt echter niet meer. De verlaging van stroomsnelheid door netto baggeren zal

waarschijnlijk niet optreden om twee redenen. Ten eerste, zeespiegelrijzing gaat meestal samen met een verhoging van het getijverschil. Ten tweede, zeespiegelrijzing leidt tot grotere kombergingsoppervlakte in een estuarium. Het effect van de verruiming van het estuarium wordt dus tegengewerkt door een vergroting van het debiet in het geval van zeespiegelrijzing. Grote invloed op de stortcapaciteit wordt daarom niet verwacht.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Samenvatting en conclusies

Tijdens de studie voor de Lange-termijn visie Schelde estuarium (LTV-SE) is het cellenconcept Westerschelde ontwikkeld. Met behulp van dit concept kan worden nagegaan hoe groot de theoretische stortcapaciteit van het meergeulensysteem in de Westerschelde is, zonder dat dit geulensysteem degenereert naar een één-geulensysteem. Het cellenconcept is gebaseerd op verschillende aannamen met als gevolg onzekerheden in de grootte van het stortcriterium. In de huidige studie zijn deze aannamen getoetst met behulp van een 1D netwerk morfologisch model voor de Westerschelde opgezet met SOBEK.

Bij de opzet van het model is het SOBEK-model van de Westerschelde dat is opgezet in het kader van het doelsubsidieproject Veerkracht als basis gebruikt. Het model is gebaseerd op bodemgegevens van 1994. In dit model wordt de bochtgroep/macrocel van Hansweert expliciet gemodelleerd, d.w.z. dat zowel de ebgeul als de vloedgeul wordt gedefinieerd. Voor het aangrenzende geulensysteem zijn enkelvoudige takken gedefinieerd. Het bestaande model is eerst nader gecalibreerd m.b.t. circulatie van stroming binnen de macrocel door de ruwheidscoëfficiënt richtingsafhankelijk te maken. Vervolgens is het model geschikt gemaakt voor lange-termijn morfologische berekeningen, door de schematisatie van de dwarsprofielen aan te passen, de bovenstroomse rand van het model te verplaatsen, een geschikte rekenmethode te kiezen, morfologische randvoorwaarden te definiëren, etc. De volgende conclusies zijn getrokken m.b.t. het model en de opzet daarvan:

- De huidige 'estuarine mode' van SOBEK werkt niet goed. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het gebruikte numerieke rekenschema voor de bodemniveauevergelijking.
- Richtingsafhankelijk ruwheid is een efficiënt middel om reststroming in een macrocel te regelen in een 1D model. Dit blijkt het dominante mechanisme te zijn voor de restcirculatie, waardoor de berekende restcirculatie niet meer gevoelig is voor de morfologische veranderingen binnen de cel. De berekende circulatie voor de situatie van 1968 is niet wezenlijk anders dan die voor de 1994 situatie.
- Voor de circulatie van sedimenttransport in de macrocel is de keuze van de sedimenttransportformule belangrijk, wanneer een richtingsafhankelijke ruwheid wordt gebruikt voor de calibratie van de circulatie van stroming. Van de beschikbare formules binnen SOBEK zorgt alleen de formule van Van Rijn ervoor dat de circulatie van het sedimenttransport in dezelfde richting staat als die van de stroming.
- Het model is niet gecalibreerd m.b.t. lange-termijn morfologische ontwikkeling. De berekende autonome ontwikkeling in de macrocel toont erosie in de vloedgeul en sedimentatie in de ebgeul.
- De morfologische tijdschaal gerelateerd aan de ontwikkeling van de macrocel is relatief groot. Berekeningen van 200 jaar zijn nodig om de juiste conclusies te kunnen trekken over de stabiliteit van de cel.

Vervolgens zijn morfologische berekeningen met het model uitgevoerd om de geïnventariseerde aannamen te toetsen. De belangrijkste conclusies uit de toetsing zijn:

- De belangrijkste aanname m.b.t. het cellenconcept is juist: de conclusies volgend uit de stabiliteitsanalyse voor rivieren zijn ook van toepassing voor getij situaties. De stortcapaciteit van de beschouwde macrocel is inderdaad ongeveer 10% van het bruto sedimenttransport door de cel.
- Er is een belangrijk verschil tussen de getijsituatie en de riviersituatie aan het licht gebracht. In tegenstelling tot de riviersituatie hebben ingrepen in een estuarium wel invloed op het sedimentaanbod naar de cel. De 10% regel voor het stortcriterium is van toepassing voor het geval dat er op mega-schaal geen netto ingreep is. Een belangrijke consequentie hiervan is dat de verschillende bochtgroepen binnen het estuarium niet geïsoleerd kunnen worden beschouwd bij het evalueren van effecten van baggeren en storten.
- Niet alle aannamen zijn correct. Vooral autonome ontwikkeling blijkt invloed te hebben op de stortcapaciteit. Voor de praktische toepassing van het cellenconcept betekent dit dat de stortcapaciteit van het estuarium kan worden beïnvloed door de stortstrategie.

5.2 Toetsing per aanname

Hier worden de conclusies m.b.t. de toetsing van alle aannamen in detail besproken.

Aanname 1: De stabiliteitsrelatie zoals die is afgeleid voor rivieren is van toepassing op getijgebieden. Deze aanname kan als geverifieerd worden beschouwd. In detail zijn de volgende conclusies getrokken:

- Met betrekking tot de invloed van de knooppuntrelatie op de stabiliteit van de macrocel zonder ingrepen, zijn de conclusies afgeleid uit de analyse voor riviersplittingsen volledig van toepassing. Berekeningen met verschillende waarden van k zijn uitgevoerd. Resultaten van alle berekeningen komen overeen met de theorie.
- Voor het geval dat het stortmateriaal uit de directe omgeving van de macrocel is gebaggerd geldt dat de stortcapaciteit ongeveer 10% is van het bruto transport door de cel. Bij 5% storten blijft de cel stabiel en bij 15% storten wordt de cel instabiel.
- Baggeren alleen blijkt geen negatieve invloed te hebben op de stabiliteit van het systeem, zoals de theoretische analyse voorspelt.
- Met betrekking tot de invloed van ingrepen op de stabiliteit van de macrocel is gebleken dat voor getijgebieden netto ingrepen invloed hebben op de aanbod van sediment. Dit is een essentieel verschil met rivieren. Dit heeft een significante invloed op het effect van storten op de stabiliteit van de cel. Netto sedimenttoevoer naar een macrocel blijkt de stortcapaciteit te vergroten. Voor de praktijk geldt dat sediment dat gestort wordt uit ook hetzelfde estuarium is gebaggerd, maar dat hoeft niet perse uit de omgeving van dezelfde bochtgroep. Dit pleit er dus voor dat het hele estuarium integraal wordt beschouwd bij de toepassing van het cellenconcept.

Aanname 2: Het eb- vloedgeul karakter van het geulsysteem heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium. Deze aanname blijkt niet geheel juist te zijn:

- Het uniform maken van de geulgeometrie heeft geen grote invloed op de stabiliteit van de cel. Berekeningen met een asymmetrische cel maar uniforme geometrie langs elke

geul laat nog steeds zien dat de cel bij 5% storten stabiel blijft en bij 15% storten instabiel wordt. Hierbij zijn de percentages toegepast op het oorspronkelijk bruto transport. De geometrie uniform maken blijkt wel de grootte van het bruto transport te verkleinen. Dit verklaart dat de cel eerder afsluit bij 15% storten.

- Het symmetrisch maken van de cel heeft grote invloed. De cel wordt eerder (bij lagere storthoeveelheden) instabiel. Dit is ten dele, maar niet geheel, toe te schrijven aan het verlagen van het bruto transport door de cel. Ook als de cel stabiel blijft zijn de veranderingen in de cel relatief veel groter dan in het asymmetrische geval.
- Bij het symmetrisch maken van de cel is zowel het bruto transport als (en vooral) het netto transport kleiner geworden. Verder is ook het verloop van het transport langs de geulen veranderd. De resultaten van de berekeningen geven nog geen uitsluitsel welke van deze aspecten maatgevend is voor de invloed op de stortcapaciteit.

Aanname 3: De autonome ontwikkeling van het geulensysteem heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium. Deze aanname is niet juist. De conclusie is vooral gebaseerd op de volgende waarneming:

- Storten in de (autonoom) eroderende vloedgeul laat duidelijk een hogere hoeveelheid toe dan storten in de sedimenterende ebgeul. In de vloedgeul zou het stortcriterium ongeveer 15% zijn i.p.v. 10%.

Aanname 4: Voor de grootte van het stortcriterium maakt het niet uit of er gelijkmatig in de gehele geul of in een klein vak binnen de geul wordt gestort. Deze aanname is niet geheel juist. De volgende conclusies zijn getrokken:

- Het maakt voor het stortcriterium in de beschouwde cel niet uit of het stortmateriaal gelijkmatig over de geul is verdeeld of het als puntbron midden in de geul wordt gestort.
- In het geval dat het storten als een puntbron wordt beschouwd, heeft de exacte locatie wel invloed op het stortcriterium. Storten aan het benedenstroomse eind van de ebgeul blijkt een grotere hoeveelheid toe te laten: bij 15% storten blijft de cel nog stabiel. Storten aan de bovenstroomse eind blijkt hetzelfde stortcriterium te hebben als storten in het midden.
- Vermoed wordt dat de waargenomen invloed toe te schrijven is aan de variatie van het transport langs de geul, maar de exacte oorzaak is nog niet duidelijk.

Aanname 5: De sedimentuitwisseling tussen cellen / bochtgroepen heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium. Deze aanname is niet juist. De conclusie is gebaseerd op de volgende feiten:

- Sedimentuitwisseling tussen de cellen heeft een directe relatie met de autonome ontwikkeling. Er is al geconstateerd dat de autonome ontwikkeling invloed heeft.
- Het totale beeld van ingrepen op mega-schaalniveau is van belang voor de stabiliteit van de cel, wat al bij de verificatie van aanname 1 is geconstateerd. Een berekening waarbij in de cel wordt gestort en waarbij dezelfde hoeveelheid wordt gebaggerd op een locatie verder weg van de cel, laat zien dat bij 15% het systeem nog stabiel blijft (tenminste in de eerst 200 jaar).

Aanname 6: Zeespiegelstijging heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium. Deze aanname is juist. De conclusie is niet getoetst met modelberekeningen, maar met redeneringen met de volgende argumenten:

- Zeespiegelrijzing heeft soortgelijke effecten als gelijkmatig in het hele gebied baggeren. Eerder is al geconcludeerd dat baggeren alleen geen negatieve invloed heeft.
- Een simpele berekening laat zien dat de toename van het natte volume door de zeespiegelrijzing relatief klein is t.o.v. baggeren en storten in het systeem.

5.3 Relevantie voor toepassing cellenconcept

De belangrijkste toepassing van het cellenconcept is het bepalen van stortcapaciteiten in de bochtgroepen, waarbij het meergeulen systeem behouden moeten blijven. Voor deze toepassing kunnen de belangrijkste resultaten van de studie als volgt worden samengevat:

- De meest cruciale aannamen voor het cellenconcept zijn geverifieerd. Het cellenconcept kan als een belangrijk instrument worden gebruikt bij het beheer van het estuarium, vooral m.b.t. de bagger- en stortactiviteiten.
- Het estuarium met alle bochtgroepen dient integraal te worden beschouwd, i.p.v. iedere cel apart en onafhankelijk van elkaar. Een uitbreiding van het huidige model door alle bochtgroepen als macrocellen te schematiseren kan dit ondersteunen.
- Voor de monitoring moet men rekening houden dat de relevante morfologische tijdschaal groot kan zijn. Dit betekent dat het lang kan duren voordat men de relevante veranderingen waarneemt.
- Bij het kiezen van locaties voor storten moet men rekening houden met de autonome morfologische ontwikkelingen, lokaal bruto- en netto sedimenttransport, etc.. Door bijvoorbeeld te storten op locaties waar van nature erosie optreedt kan de stortcapaciteit worden vergroot.

Verder is het van belang na te gaan per aanname die niet of niet geheel waar zijn gebleken, wat het voor de toepassing van het cellenconcept voor beheer van het estuarium betekent.

- Aanname 2: Invloed eb- en vloedgeul karakter. Aangetoond is dat de eb- en vloedgeul karakter van het geulenstelsel wel invloed heeft op de stortcriterium. Praktisch gezien heeft dit echter geen belangrijke consequenties voor de toepassing van het cellenconcept, omdat alle cellen in het estuarium van natuur veel op elkaar lijken wat betreft dit aspect. De criterium zoals nu is gehanteerd heeft al rekening gehouden met deze algemene karakter. Wel is het interessant om na te gaan of het mogelijk is de theorie onderliggend aan het cellenconcept te verbeteren door expliciet deze invloed mee te nemen.
- Aanname 3: Invloed autonome ontwikkeling. Aangetoond is dat storten in geulen die van natuur eroderen gunstiger is dan storten in sedimenterende geulen. Bij keuze van stortlocaties kan men hiermee rekening houden om een grotere stortcapaciteit te verkrijgen.
- Aanname 4: Invloed exact locatie stortlokatie in de geul. Storten aan het benedenstroomse eind (kijkend in de richting van het netto transport) blijkt gunstiger te zijn dan storten aan het bovenstroomse eind. Bij aanwijzen van de stortlokaties kan de beheerder hiermee rekening houden.

- **Aanname 5:** Invloed sedimentuitwisseling tussen cellen. Aangetoond is dat cellen niet geïsoleerd van elkaar kunnen worden beschouwd, maar alle baggeren en storten in het hele systeem moeten integraal worden beschouwd. Deze conclusie heeft de belangrijkste consequentie voor de toepassing van het cellenconcept. Daarom wordt aanbevolen het model uit te breiden door alle bochtgroepen in cellen te schematiseren, zoals hierboven is al genoemd.

5.4 Aanbevelingen

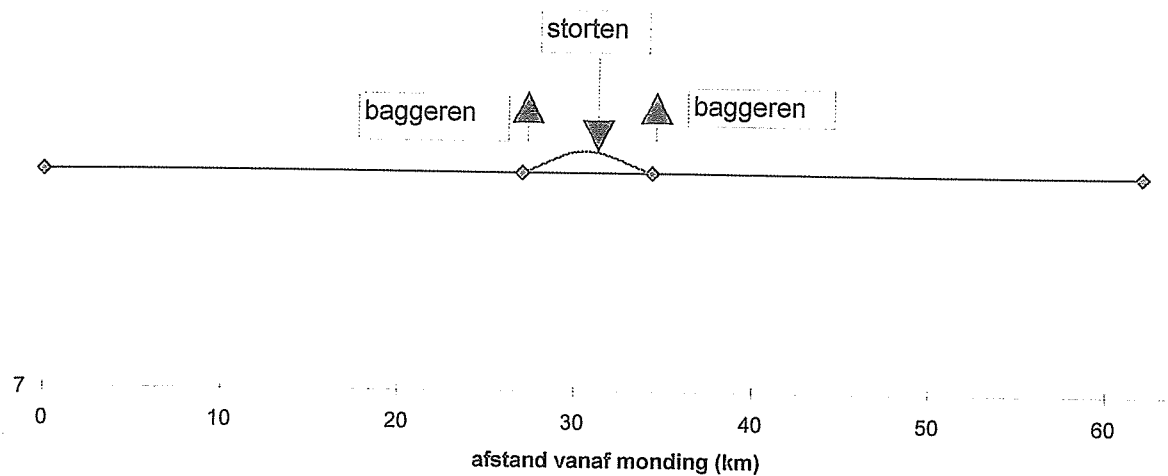
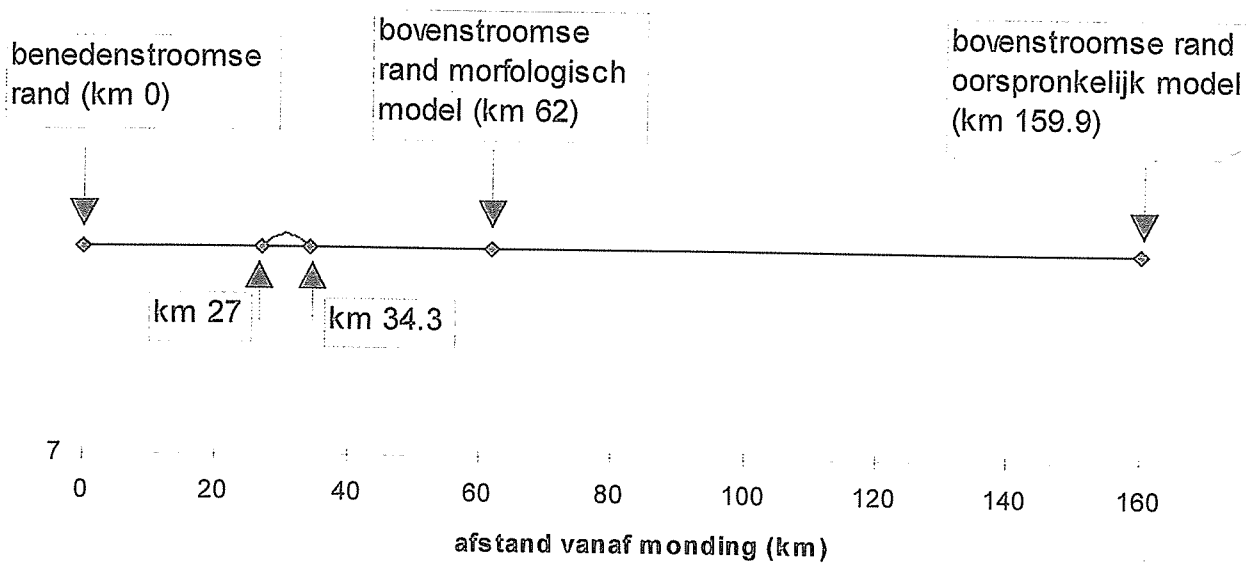
Voor de toepassing van en eventuele verbetering van het cellenconcept worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Opzetten van een netwerk model voor de Westerschelde waarin alle bochtgroepen als cellen zijn geschematiseerd. Aanbevolen wordt het model te calibreren voor de lange-termijn morfologische ontwikkelingen. Met behulp van dit model kan men de effecten van ingrepen in het hele estuarium integraal evalueren.
- Uitzoeken wat precies de oorzaak is van de geconstateerde invloeden van het eb- en vloedgeul karakter van het geulensysteem en van de locatie van storten. Vermoed wordt dat de oorzaak van deze invloeden hetzelfde is. Ook wordt vermoed dat de oorzaak te maken heeft met lokaal sedimenttransport. Uitgezocht moet worden of het netto transport dan wel het bruto transport maatgevend is.
- Onderzoeken hoe het cellenconcept te verbeteren is nadat de oorzaak van de geconstateerde invloeden is gevonden.
- Onderzoeken hoe de estuarine mode van SOBEK-MOR kan worden verbeterd.

6 Referenties

- Fokkink, R.J., Karssen B., Wang Z.B., Van Kerckhoven J.D.M., and Langerak A.(1998), Morphological modelling of the Western Scheldt estuary. In: J. Dronkers & M. Scheffers, 1998, pp. 329-336.
- Jeuken, M.C.J.L., Tanczos, C., Thoolen, P., Van Helvert, M.A.G., Rozemeijer, M. en Wang Z.B., 2002, Onderbouwing van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z2838/Z3288.
- Jeuken, M.C.J.L., 2000, On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary, PhD thesis, UtrechtUniversity, 378 pp.
- Jeuken, M.C.J.L., 2001, Verificatie van het cellenconcept op basis van historische gegevens. WL | Delft Hydraulics, report Z3078.
- Jeuken, M.C.J.L. en Wang Z.B., 2001 Memo inzake maximaal verantwoorde stortingen in de Westerschelde, in opdracht van RWS Directie Zeeland.
- RWS, 1997, Milieuaspectenstudie baggerspeciestort Westerschelde, Werkdocument RIKZ, augustus 1997.
- RWS&MVG, 2001 Langetermijnvisie Schelde Estuarium, RWS Directie Zeeland en het ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Schoeman, P.K. (2000), Getij-asymmetrie in de Westerschelde. Master thesis, Delft University of Technology, Faculty of civil Engineering.
- Torenga, E. 2001., Stabiliteit van tweegeulensysteem in estuaria, Master thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Wang, Z.B. en Van der Kaaij T.H. (1994), Morphodynamic development of secondary channel systems along Rhine branches in The Netherlands, Rapport Q1963, WL | Delft Hydraulics.
- Wang Z.B., De Vries M., Fokkink R.J., Langerak A. (1995), Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models. Journal of Hydraulic research, Vol 33, no 6.
- Wang, Z.B. en Winterwerp J.C., 2001, Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems, Proceedings of the 2nd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine morphodynamics.
- Winterwerp, J.C., Jeuken M.C.J.L., Van Helvert M.A.G., Kuyper C., Van der Spek A., Stive M.J.F., Thoolen P.M.C. en Wang Z.B. (2000), Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie (2 delen). WL | Delft Hydraulics.

7 Figuren



Model schematisatie
Bochtgroep Hansweert is geschematiseerd in een cel
het rest van het estuarium in enkelvoudige takken

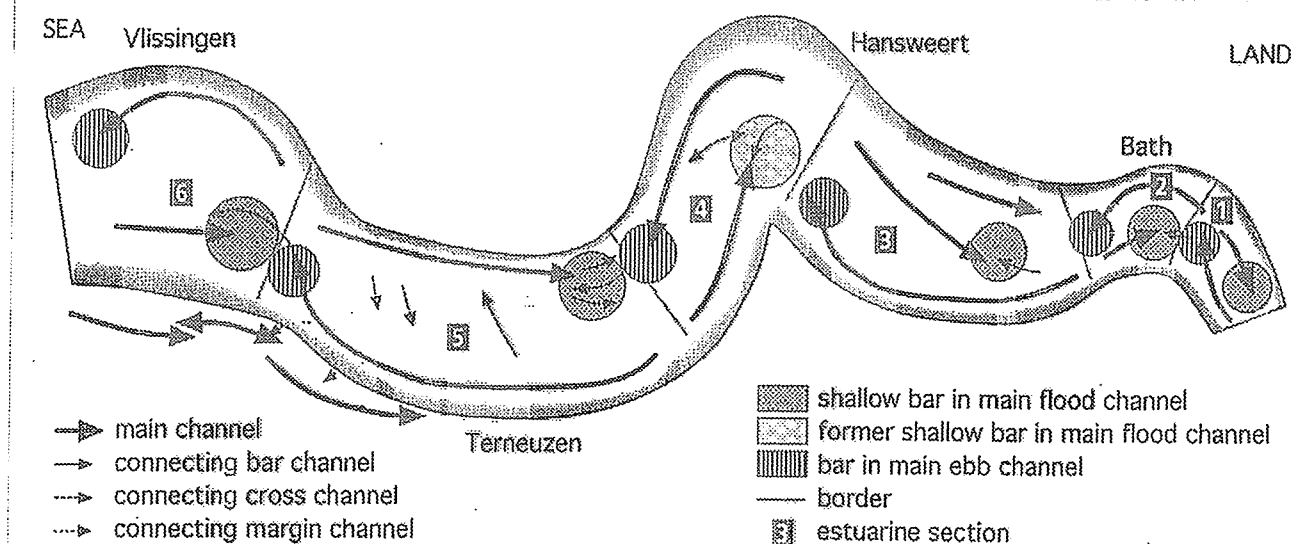
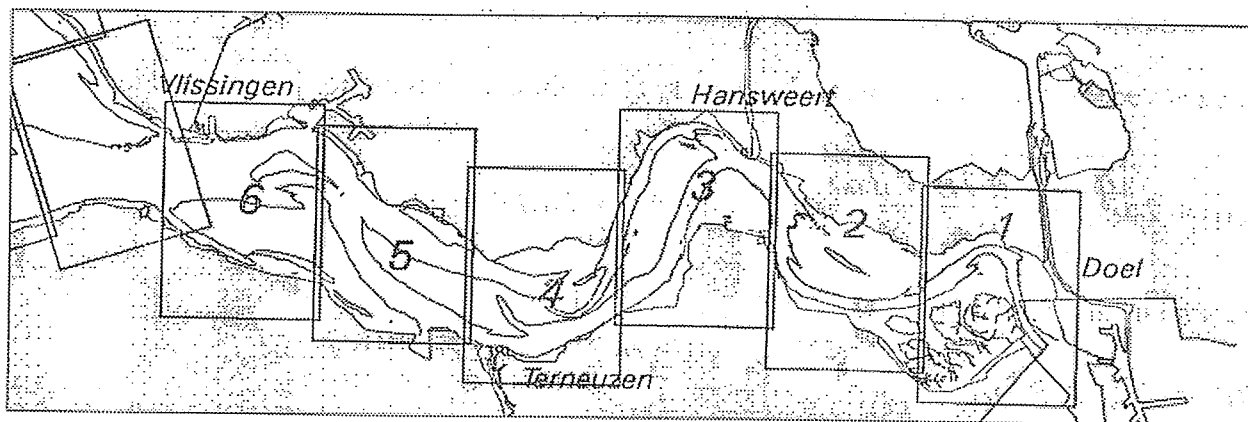
Z3325

IWW

2002

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig.2.1

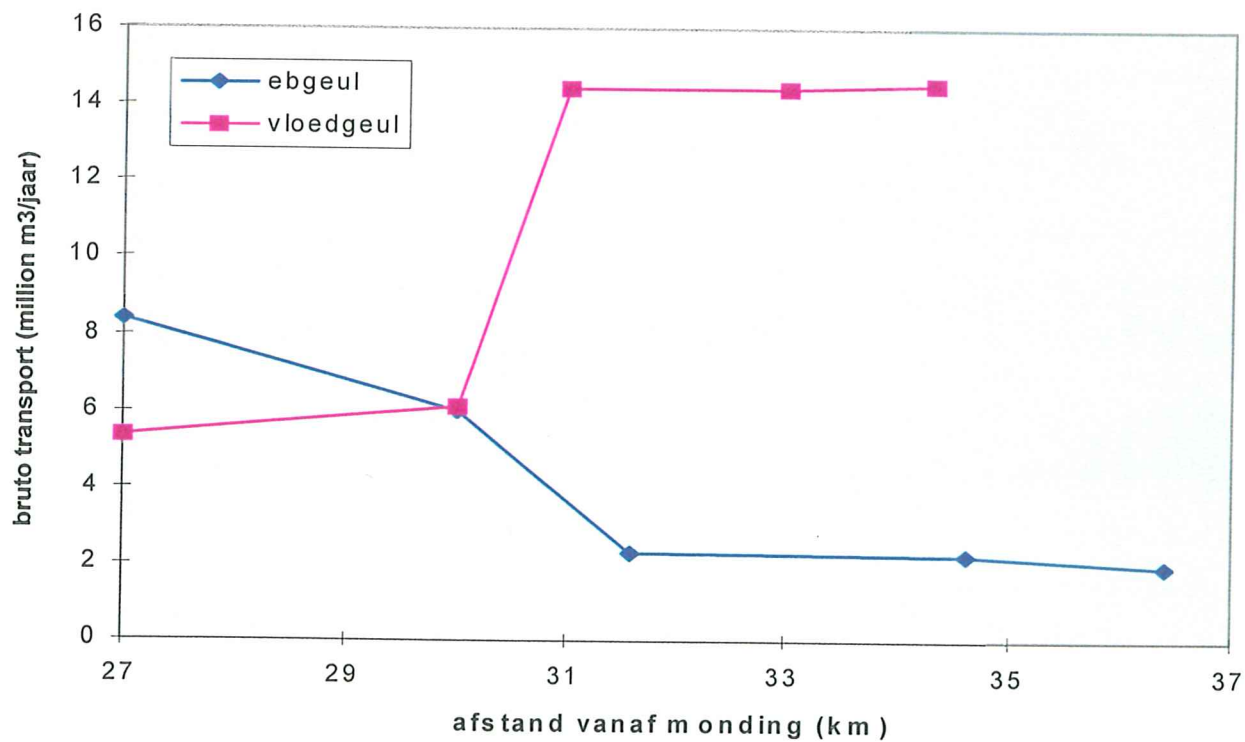
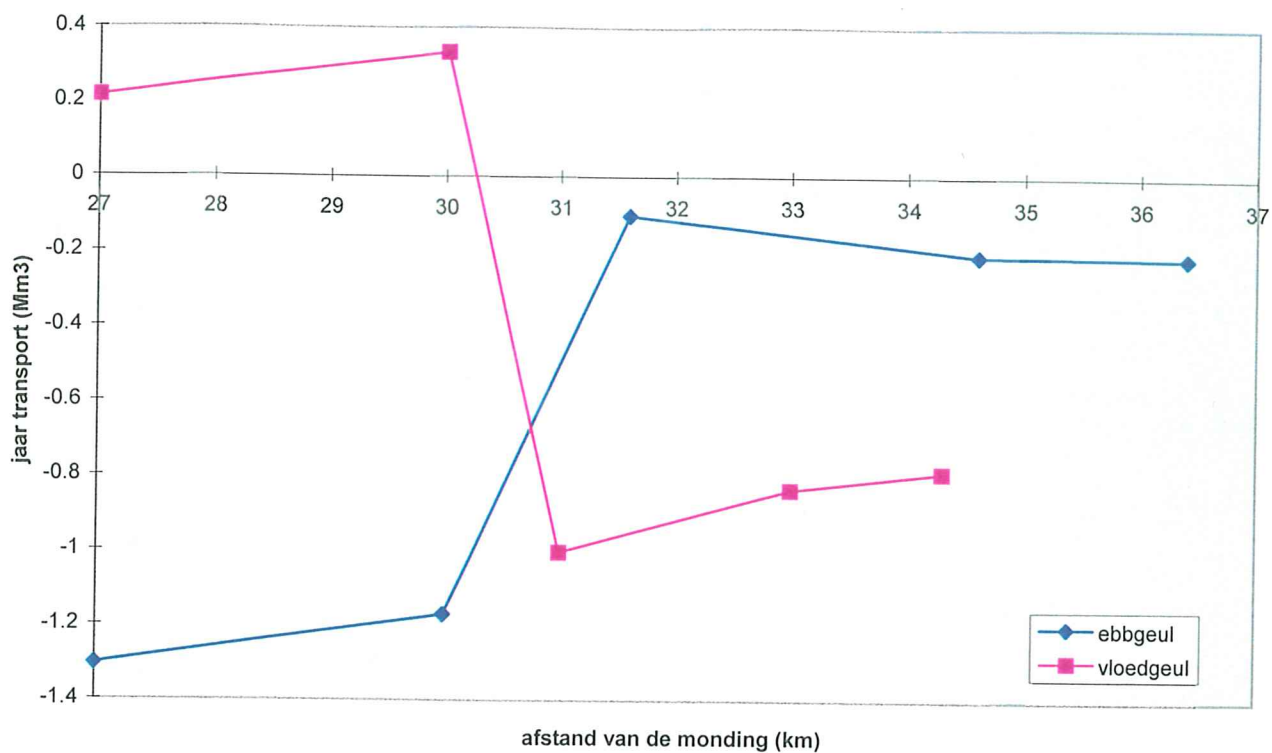


Boven: Westerschelde en de verdeling in zes lodingsvakken
Onder: Morfologische schematisatie van het geulsysteem in de Westerschelde (Jeuken, 2000).

Z3325

IWW

2002



Berekende rest en bruto sediment transport
 1994 model na introductie richting afhankelijk Chezy
 Transport formule: Englund-Hansen

Z3325

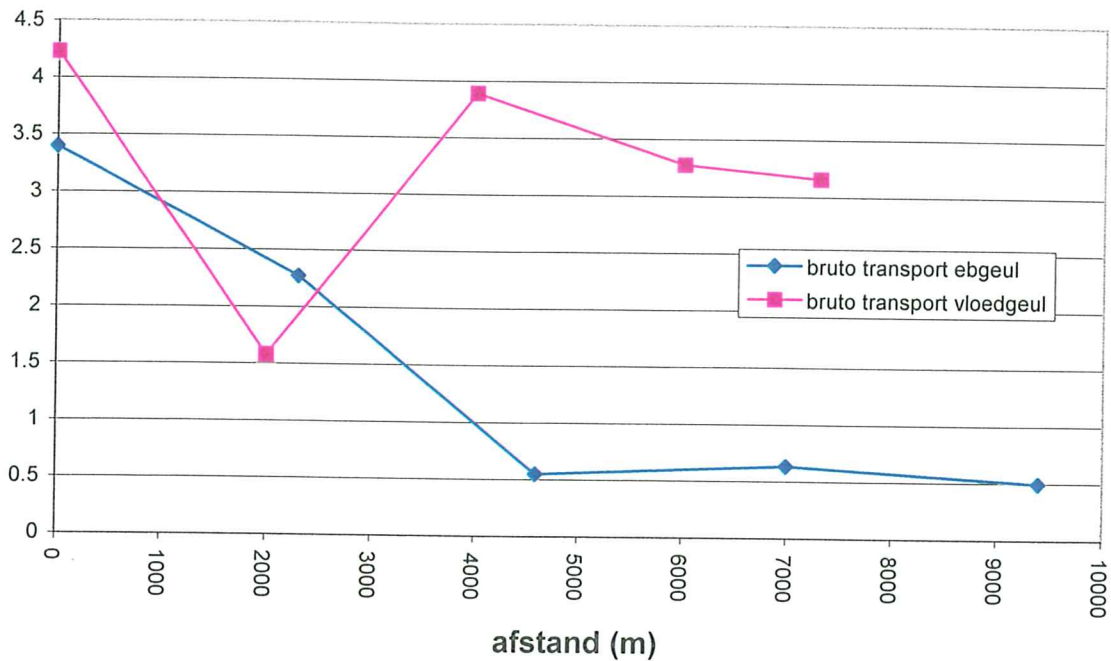
2002

IWW

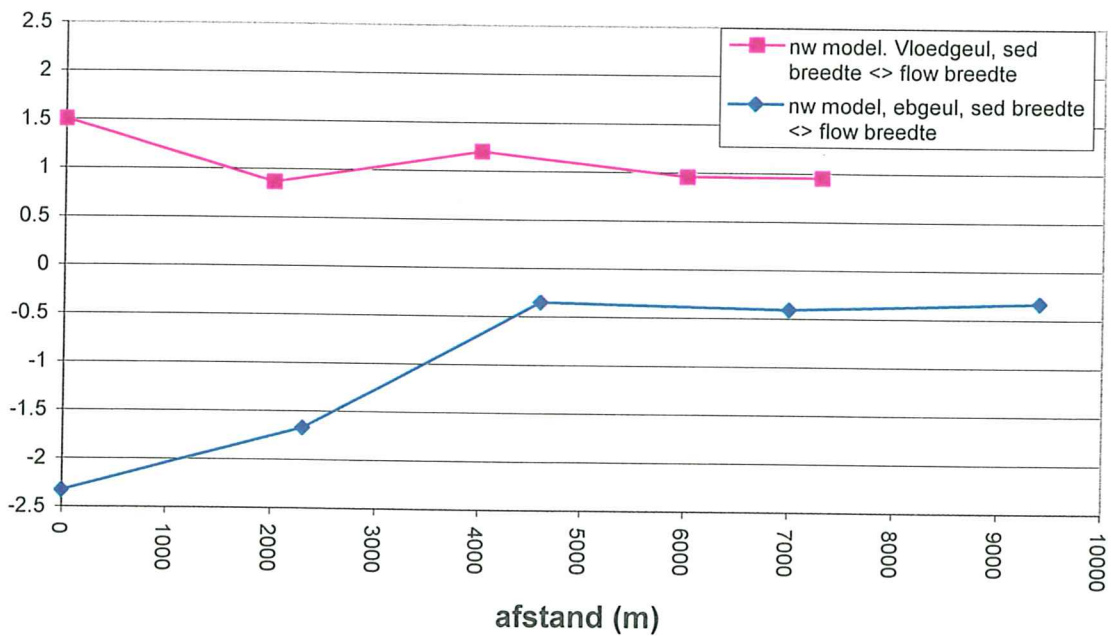
WL | DELFT HYDRAULICS

Fig.3.2

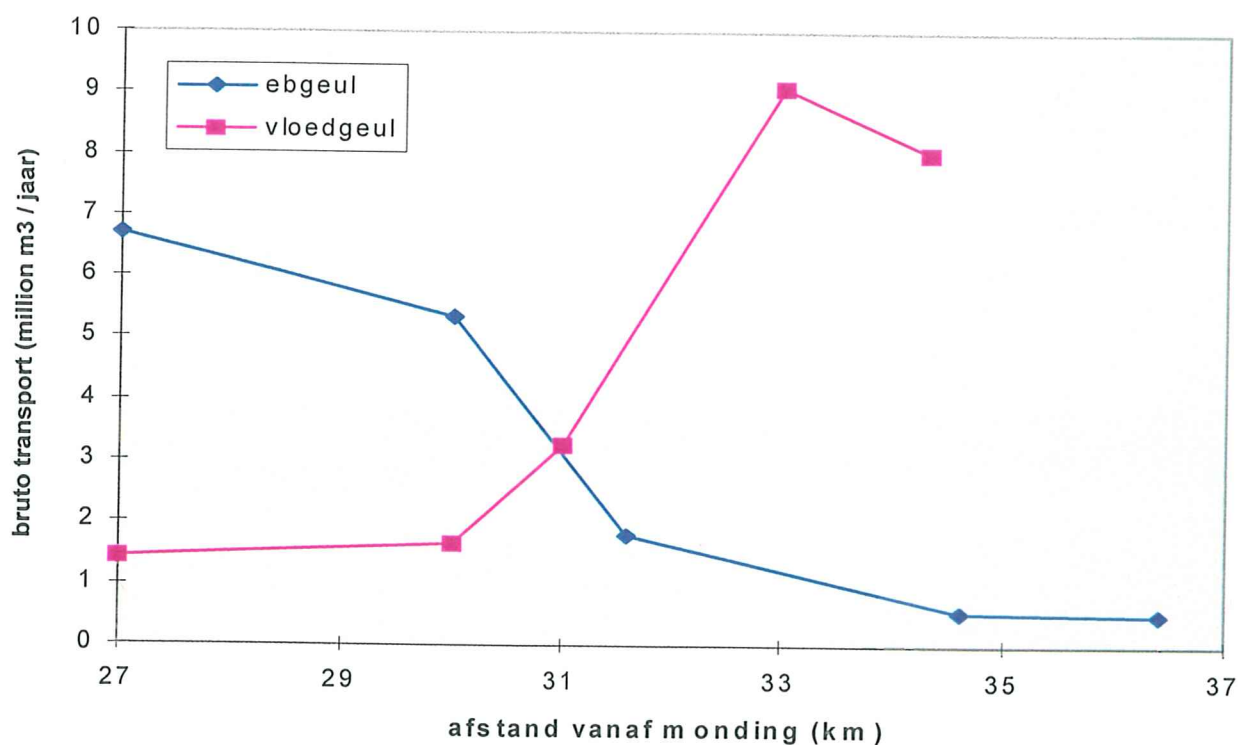
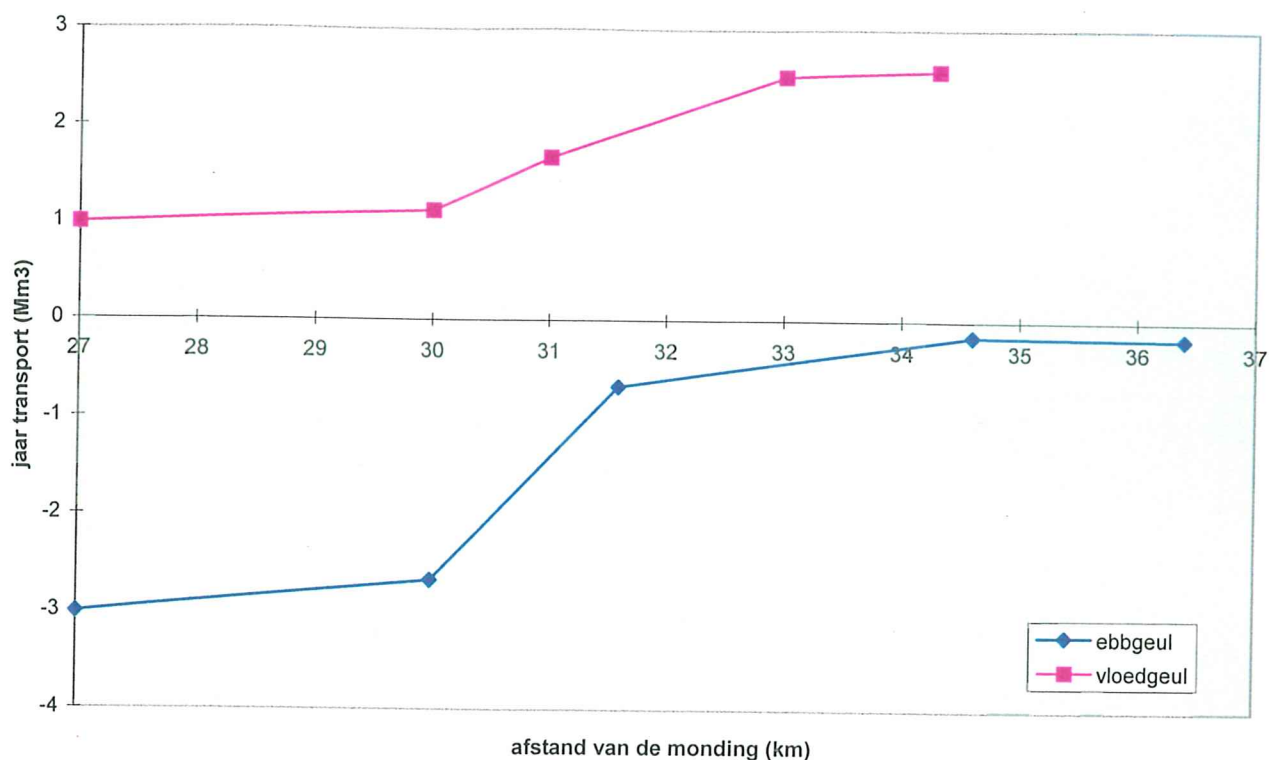
bruto transport Mm3/jr



netto transport Mm3/jr



Bruto en netto sedimenttransport door de ebgeul en door de vloedgeul



Berekende rest en bruto sediment transport
 1968 model na introductie richting afhankelijk Chezy
 Transport formule: Van Rijn

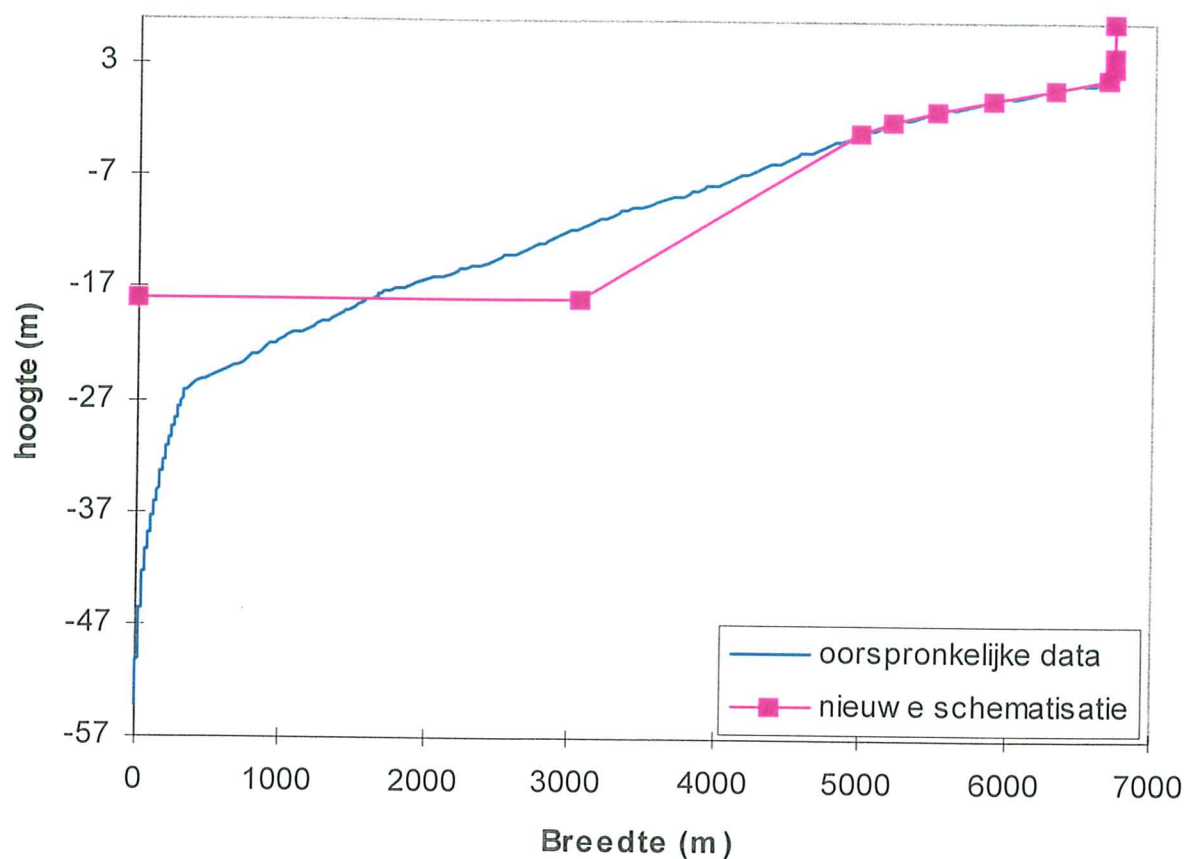
Z3325

2002

IWW

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig.3.4



Schematisatie van het dwarsprofiel
 onder NAP-3: juist dwarsoppervlakte
 vanaf NAP-3: goede weergave $B(z)$

Z3325

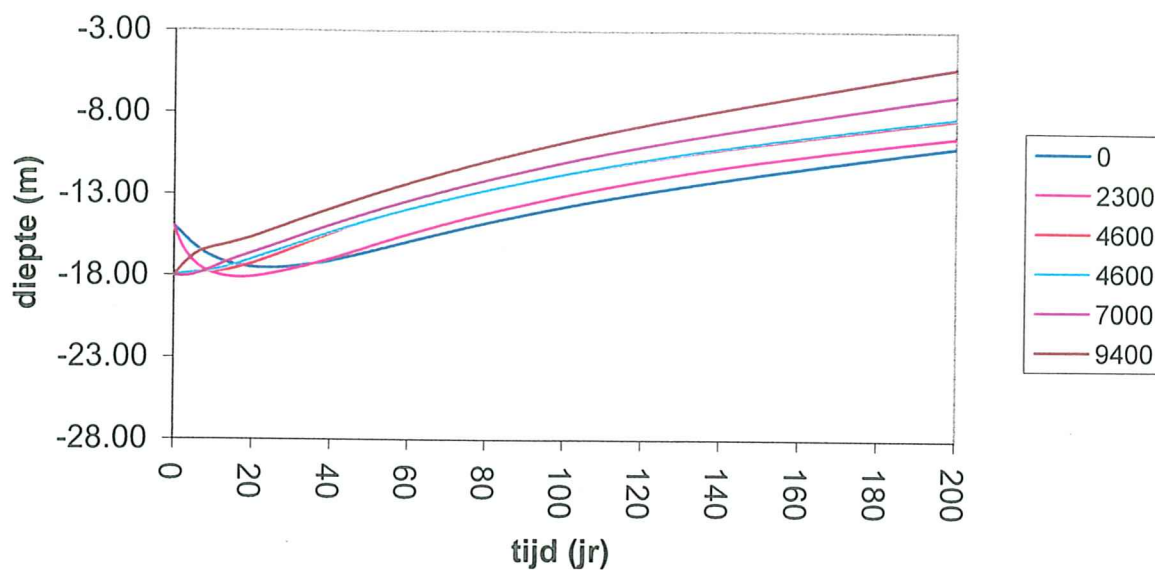
IWW

2002

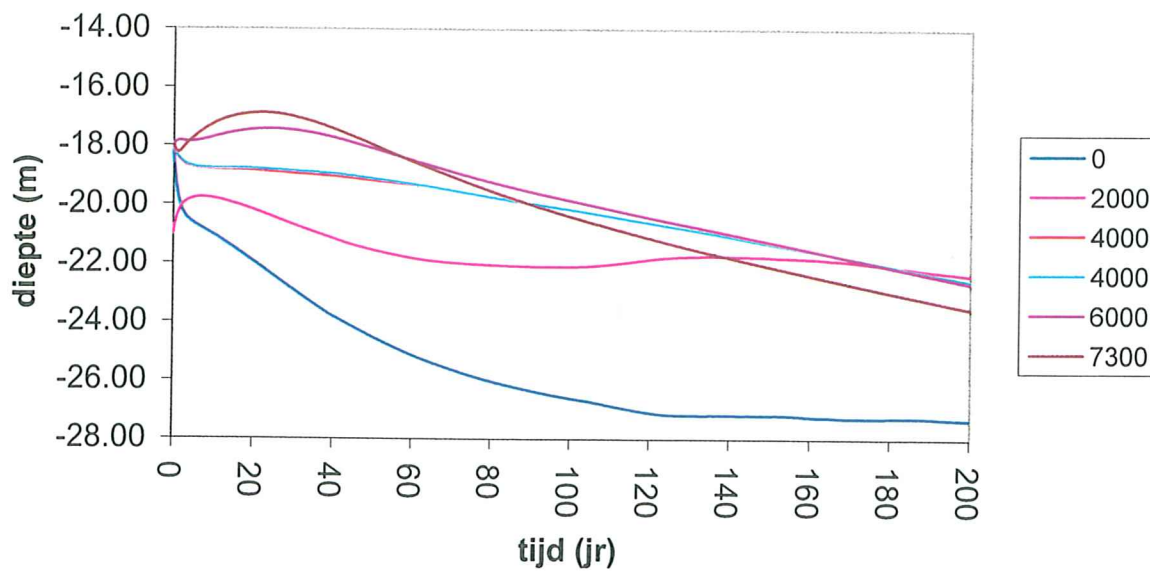
WL | DELFT HYDRAULICS

Fig.3.5

K = 1, EBGEUL

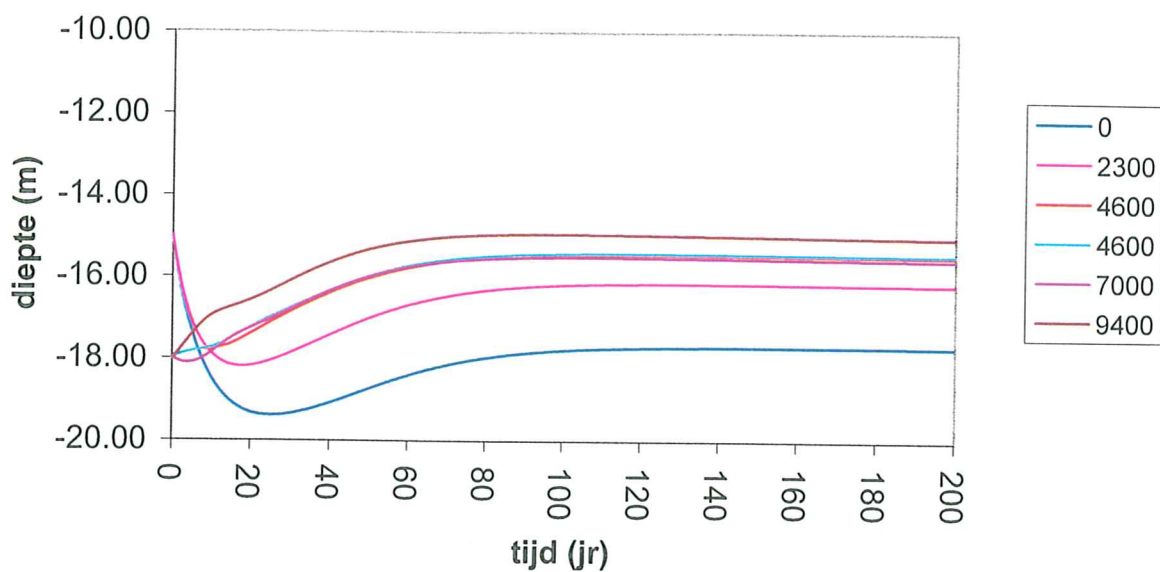


K = 1, VLOEDGEUL

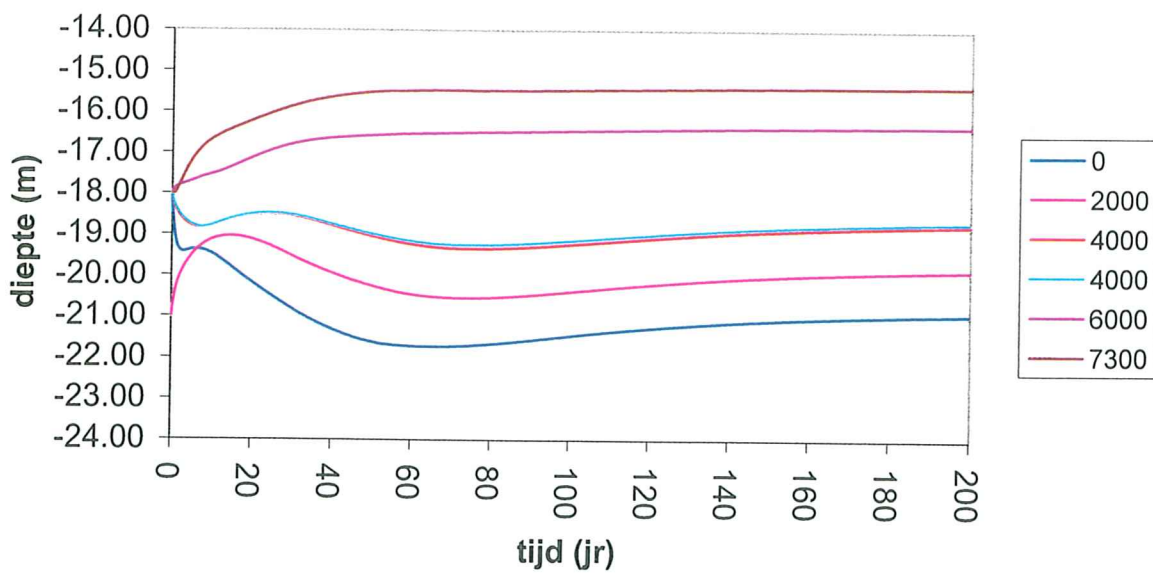


Berekende bodemniveau's ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, k = 1

K = 4, EBGEUL

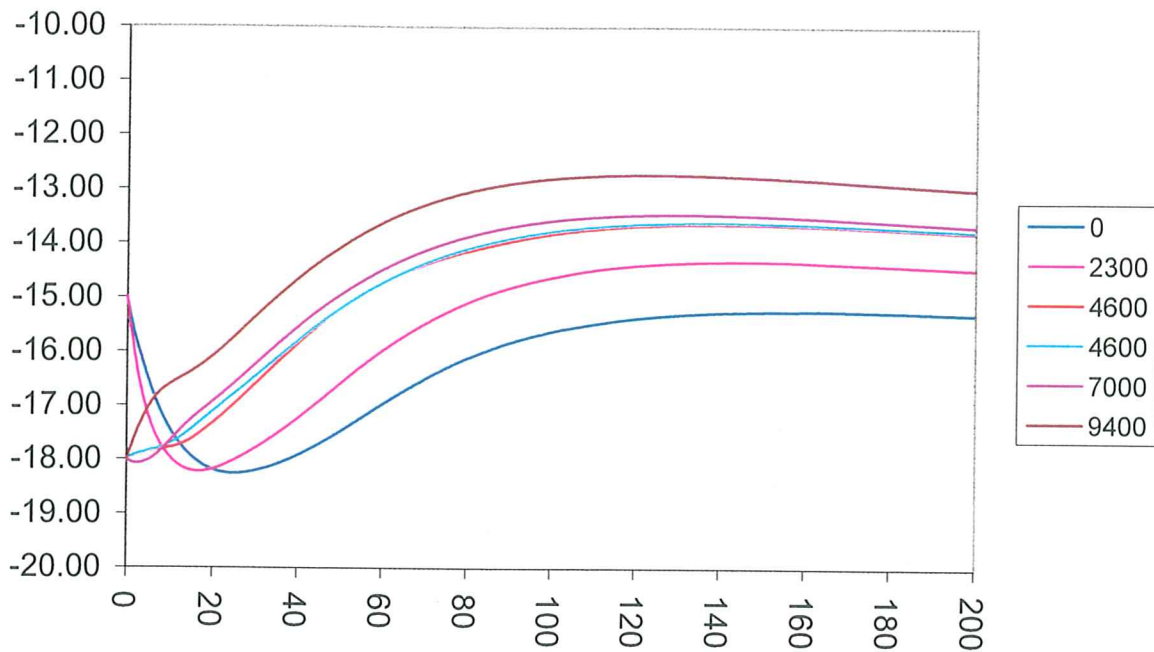


K = 4, VLOEDGEUL

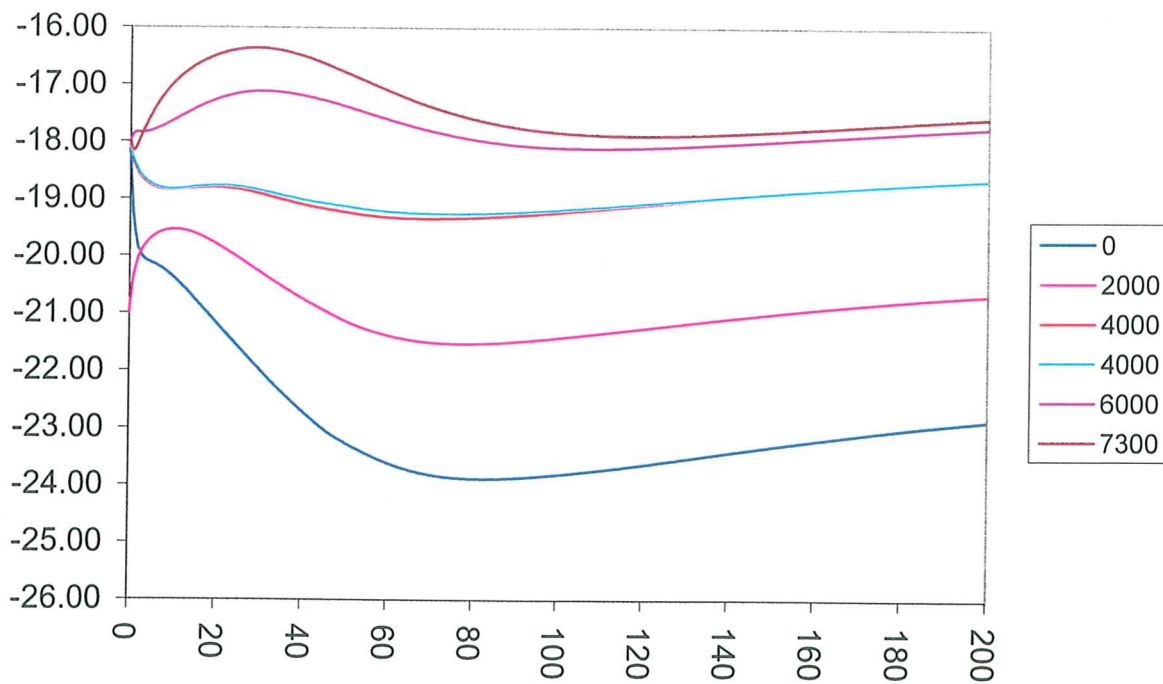


Berekende bodemniveau's ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, k = 4

K = 1.8, ebgeul

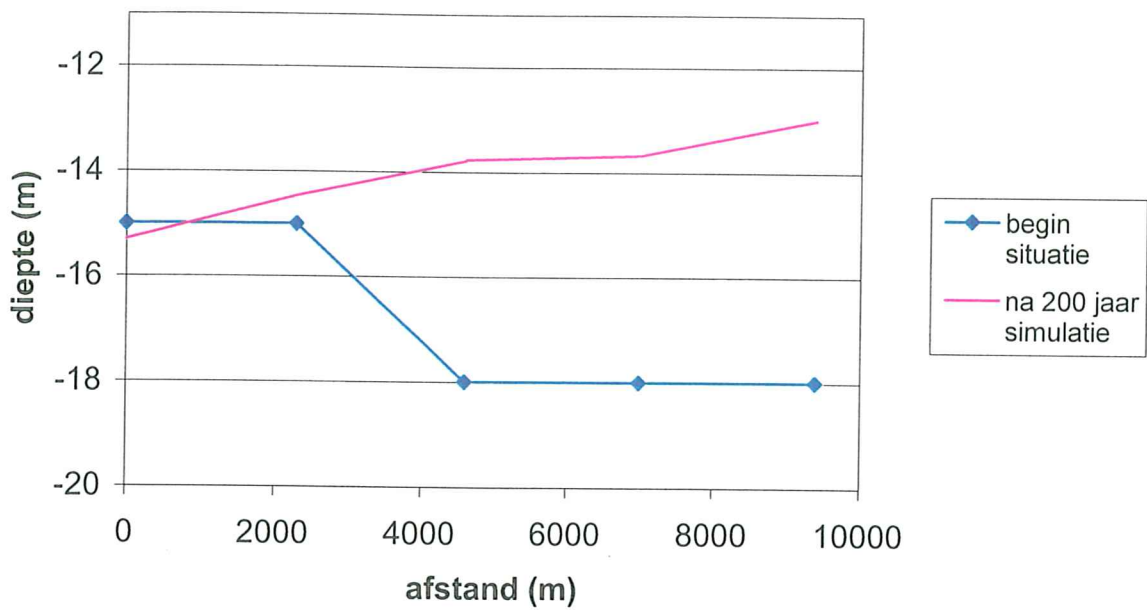


K = 1.8, vloedgeul

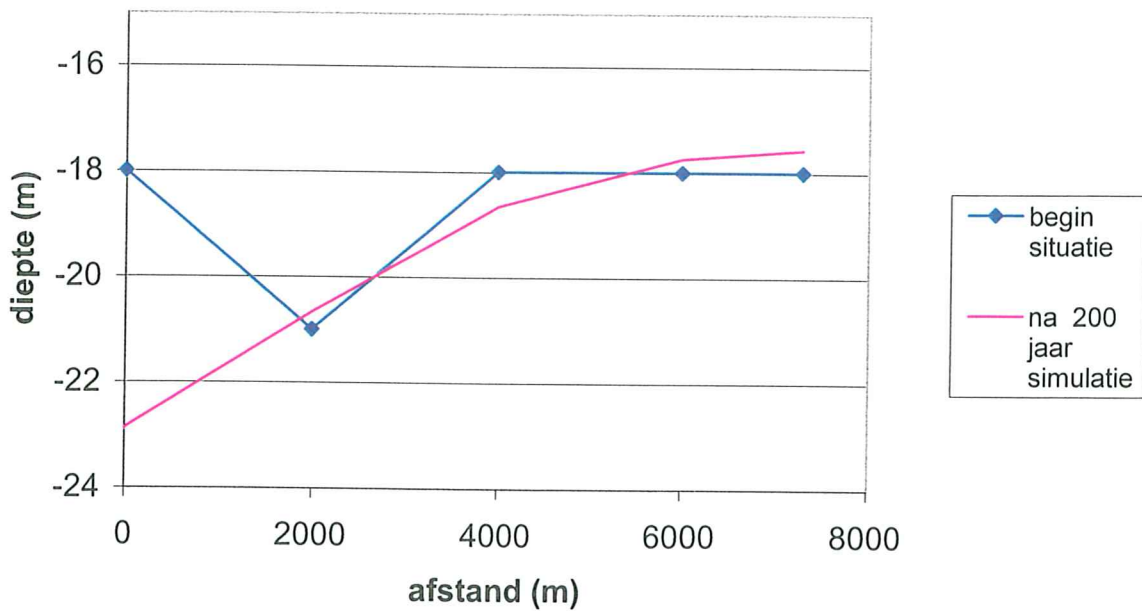


Berekende bodemniveau's ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, k = 1.8

$k = 1.8$, ebgeul, autonome ontwikkeling

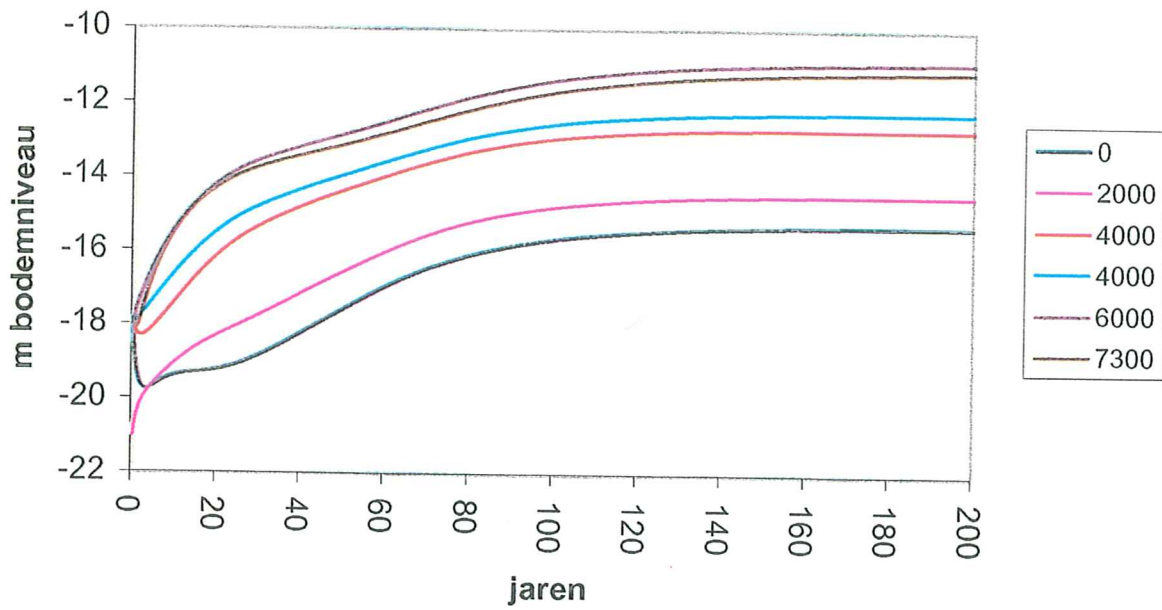


$k = 1.8$, vloedgeul, autonome ontwikkeling

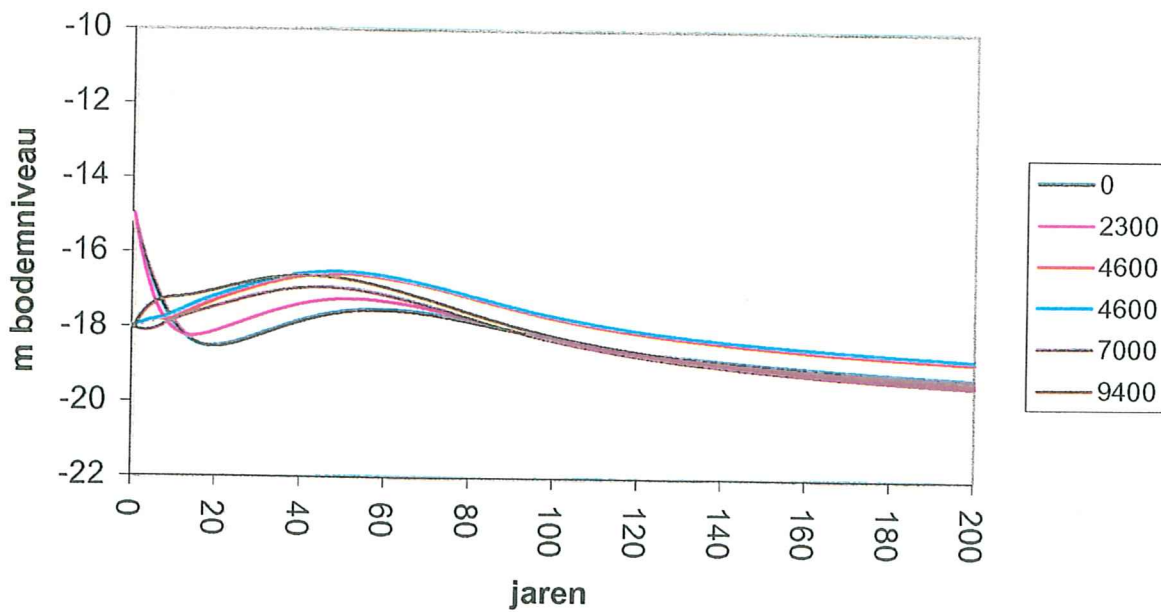


Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, $k = 1.8$

$k = 2.2$, ontwikkeling vloedgeul

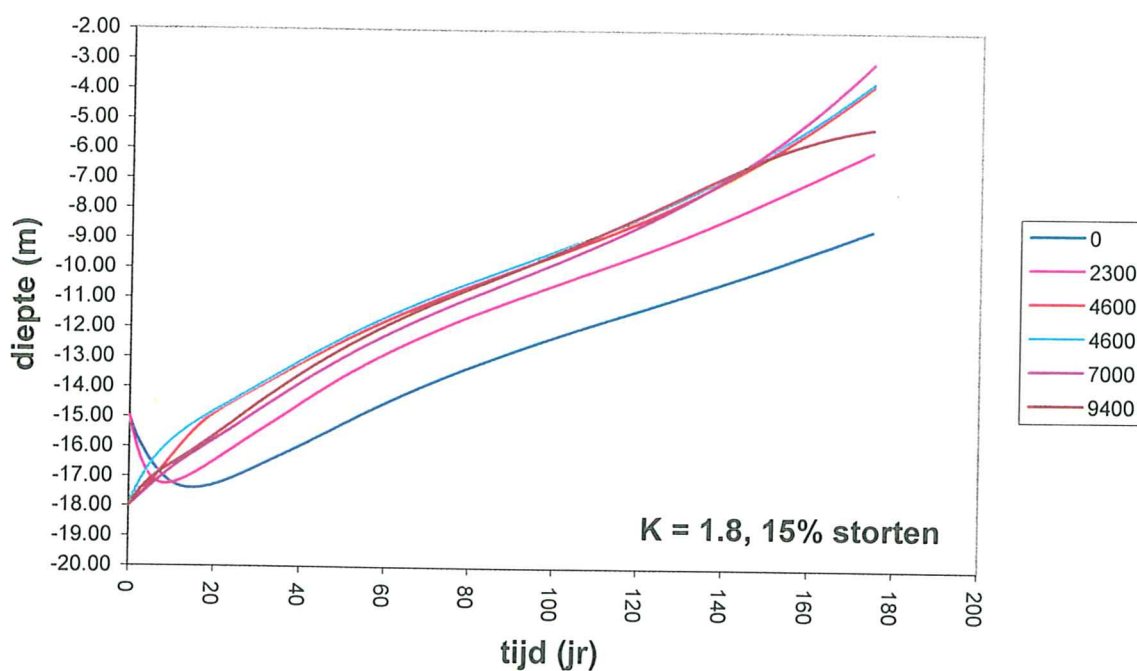
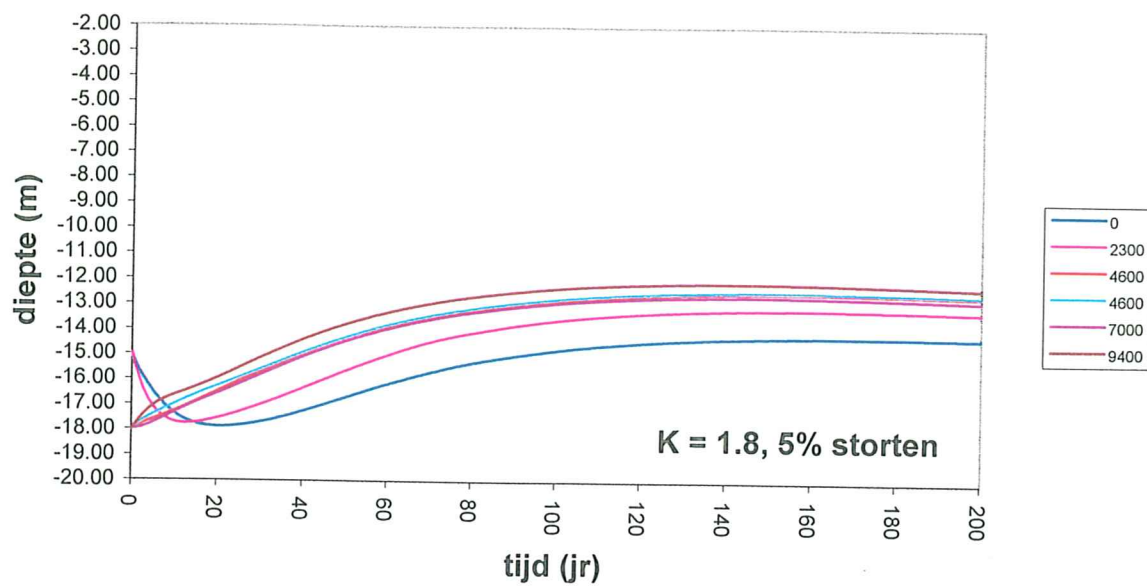


$k = 2.2$, ontwikkeling ebgeul



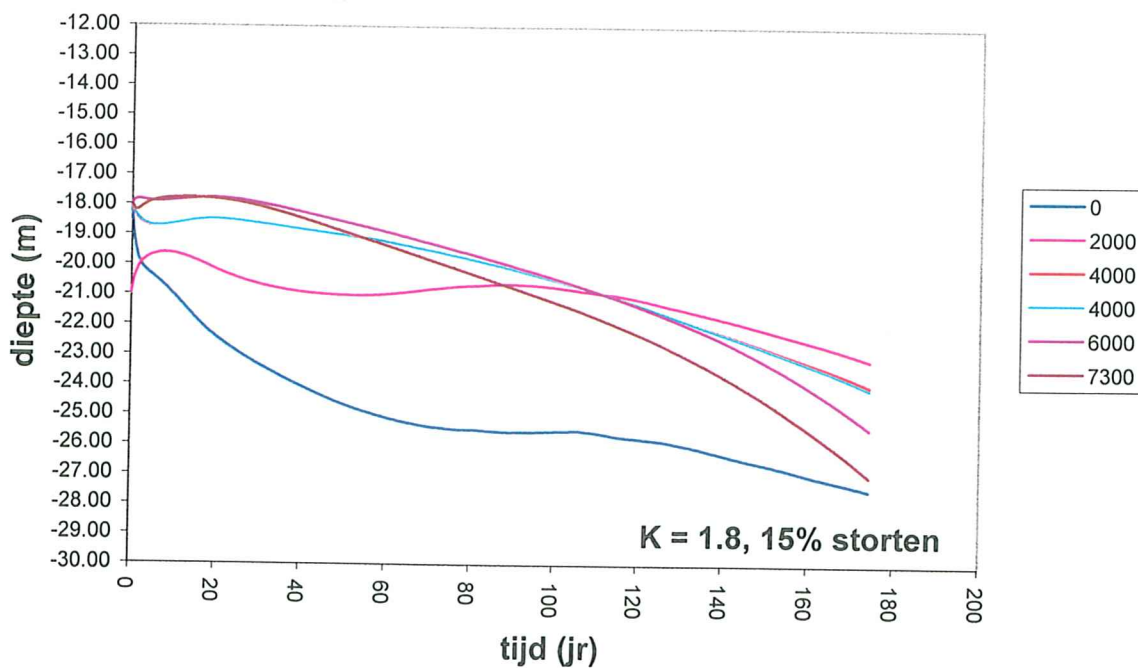
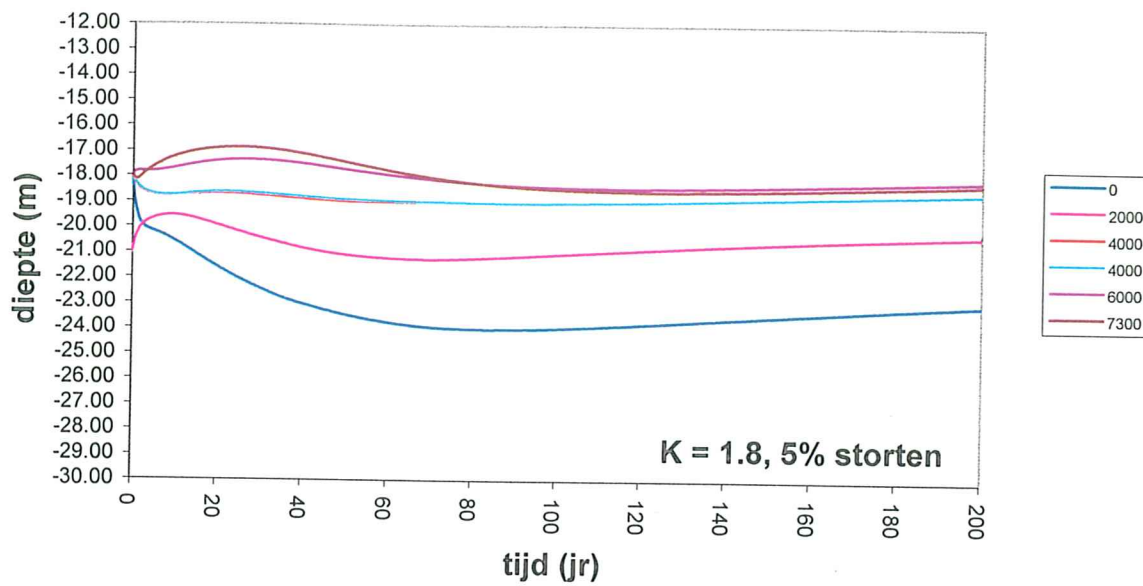
Ontwikkeling bodemniveau, $k = 2.2$, simulatieduur 200 jaar
25% storten in vloedgeul

FIG 4.4



Ontwikkeling ebgeul, storten in ebgeul met compensatie baggeren
beneden- en bovenstrooms van de macrocel

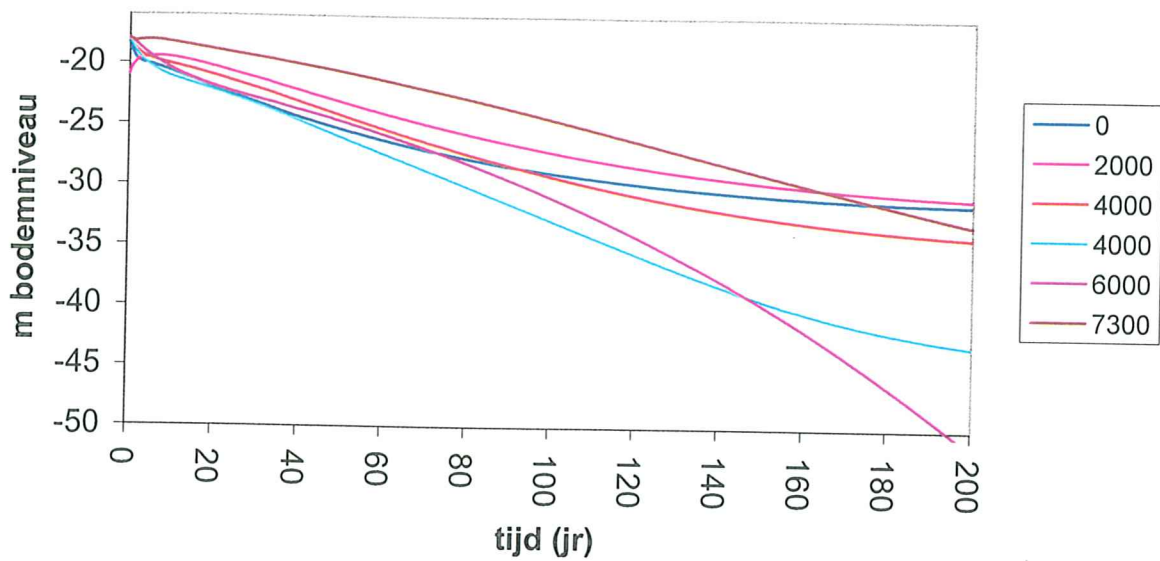
fig 4.5



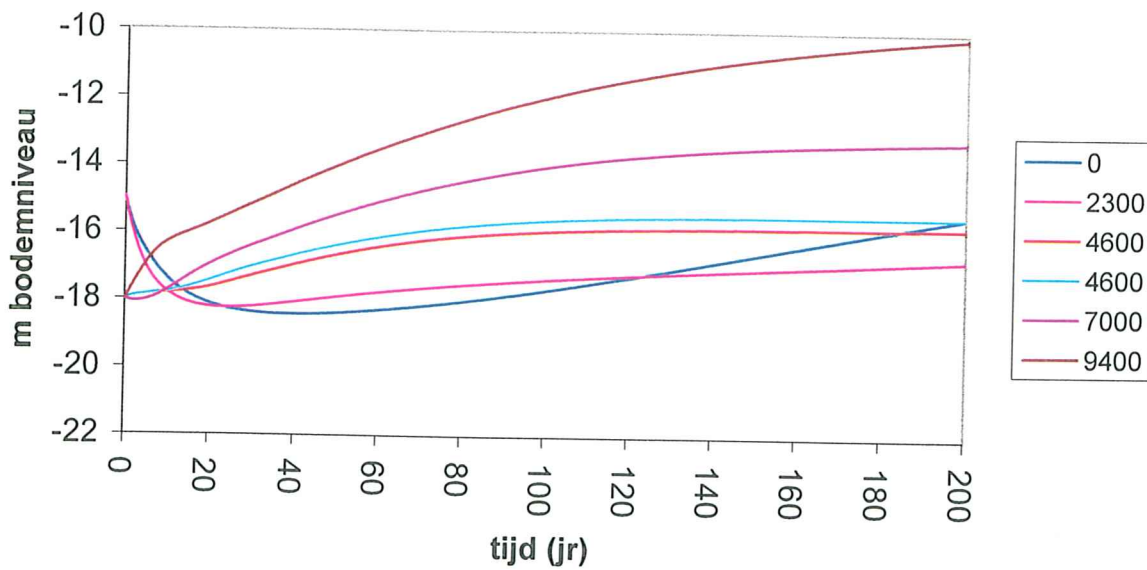
Ontwikkeling vloedgeul, storten in ebgeul met compensatie baggeren
beneden- en bovenstrooms van de macrocel

fig 4.6

$k = 2.2$, ontwikkeling vloedgeul

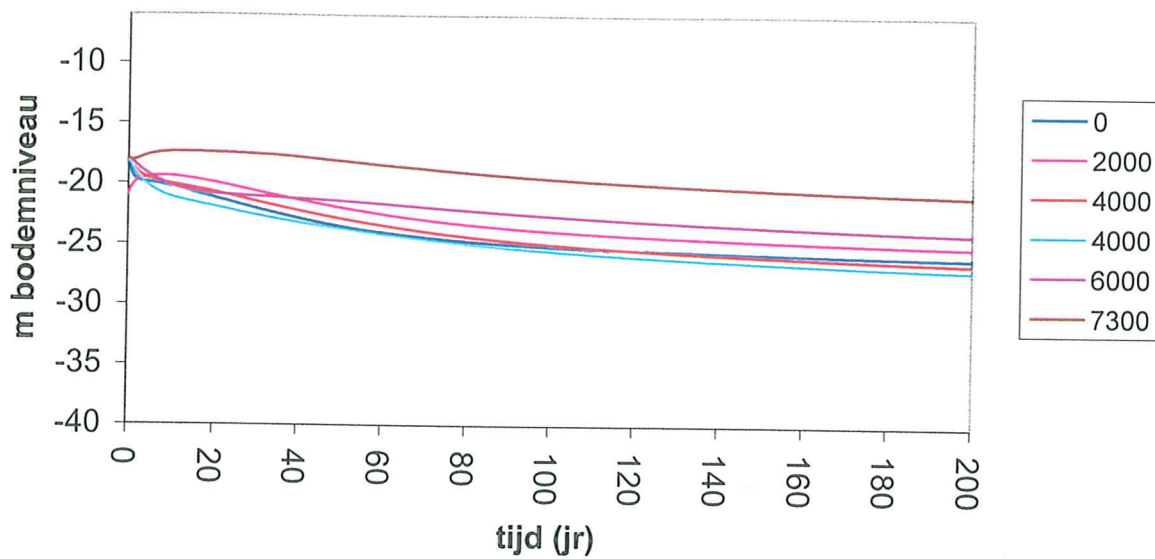


$k = 2.2$, ontwikkeling ebgeul

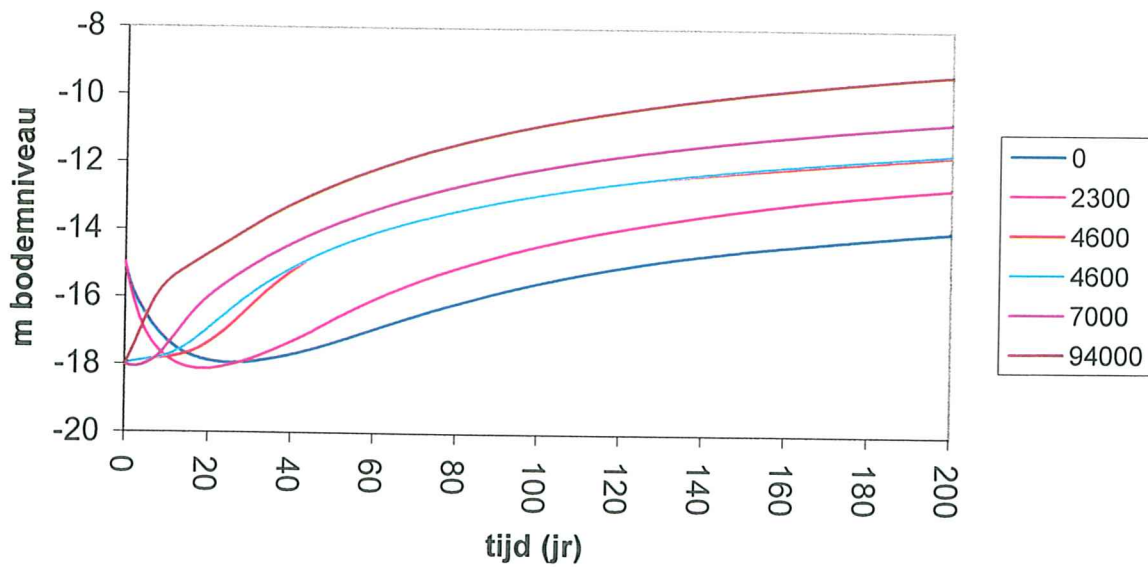


Ontwikkeling bodemniveau, $k = 2.2$, simulatieduur 200 jaar
25% baggeren in vloedgeul, zonder compensatie storten.

$k = 2.2$, ontwikkeling vloedgeul

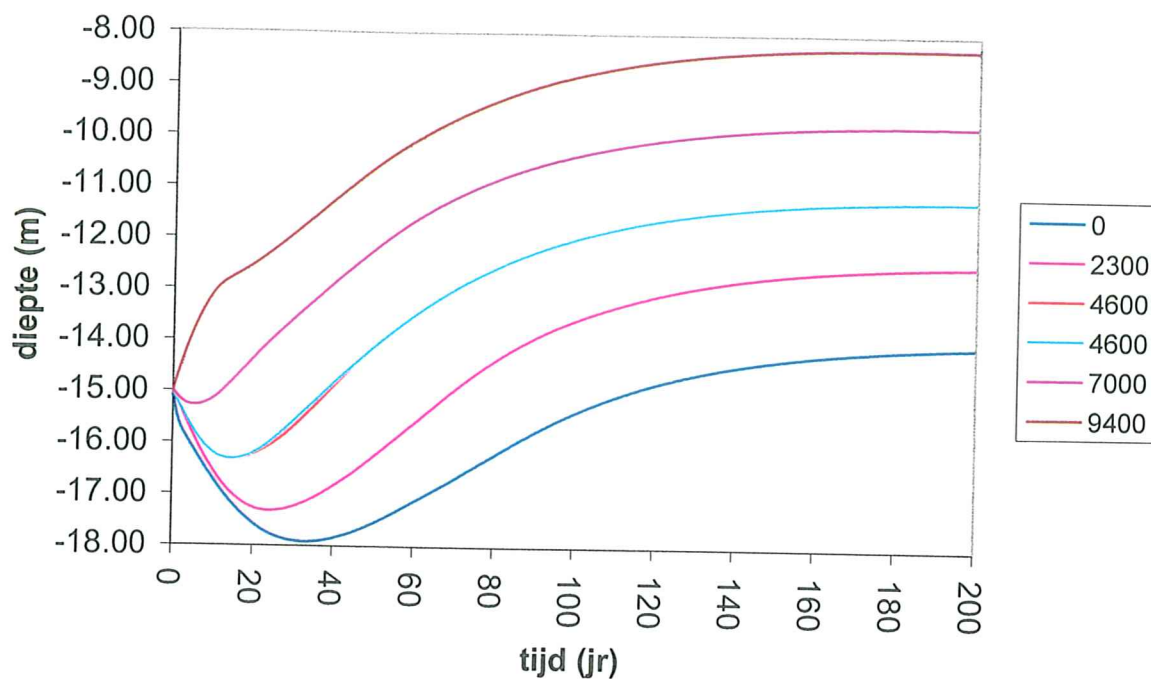


$k = 2.2$, ontwikkeling ebgeul

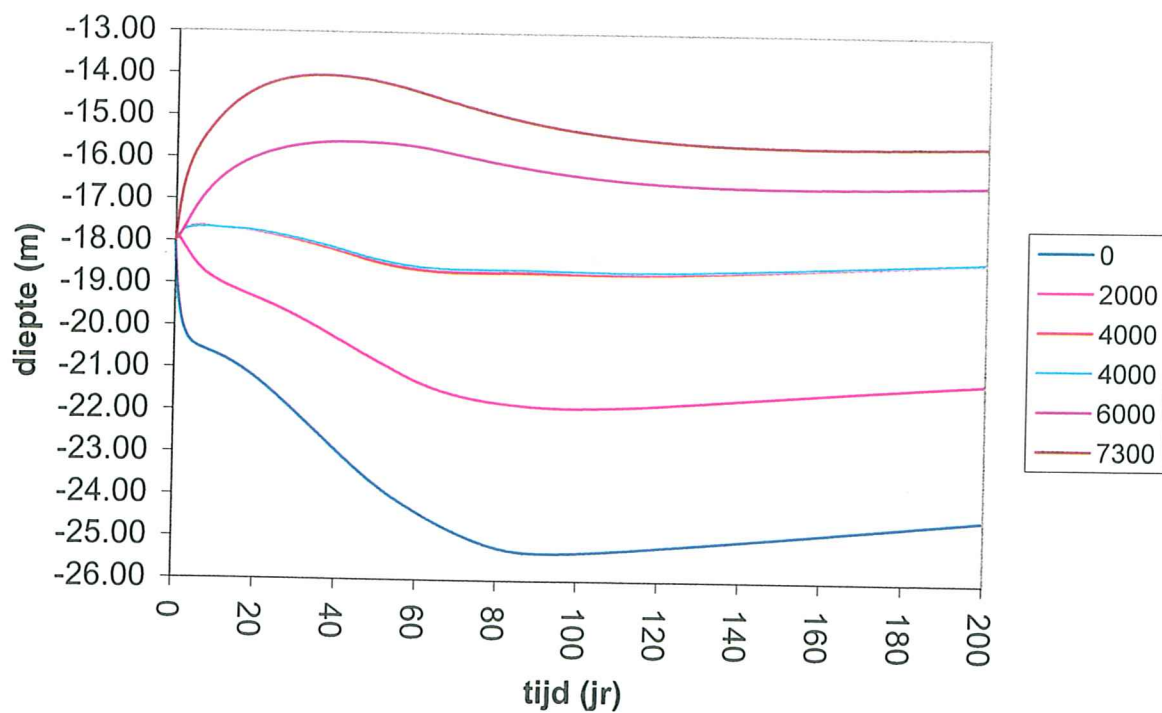


Ontwikkeling bodemniveau, $k = 2.2$, simulatieduur 200 jaar
25% baggeren in vloedgeul, met compensatie storten.

K = 1.8, ebgeul



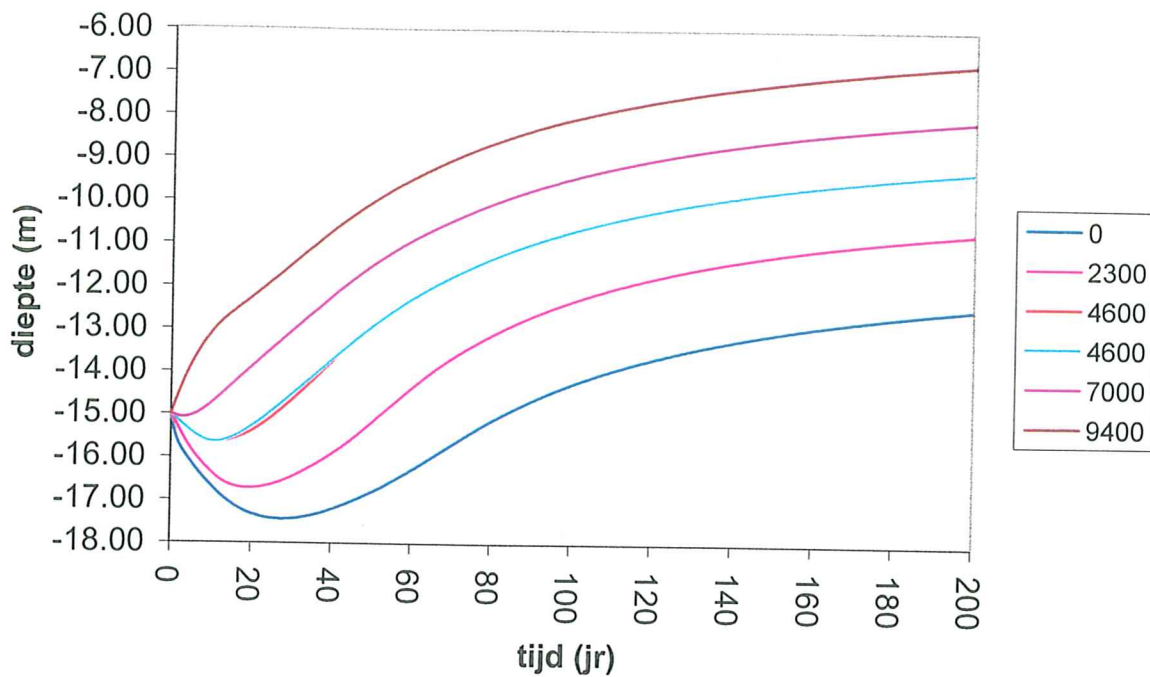
K = 1.8, vloedgeul



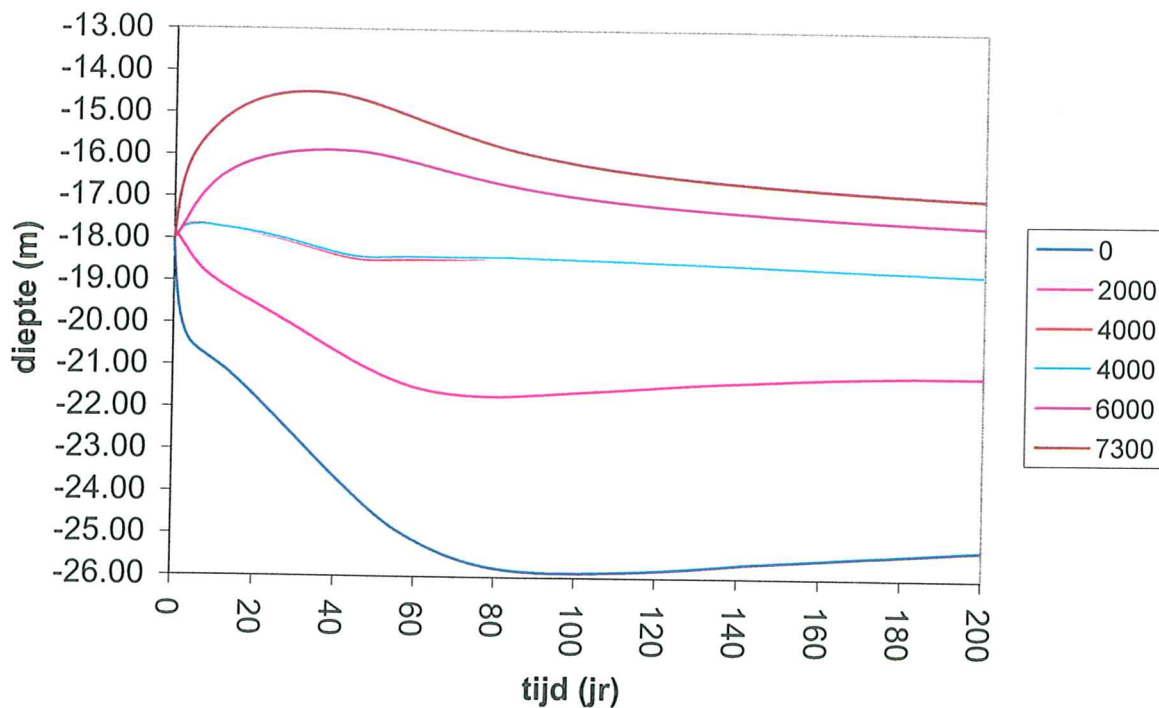
Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
 200 jaar simulatie, $k = 1.8$. Autonome ontwikkeling.
 A-symmetrische macrocel, uniforme geulgeometrie.

FIG 4.8a

$K = 1.8$, ebgeul



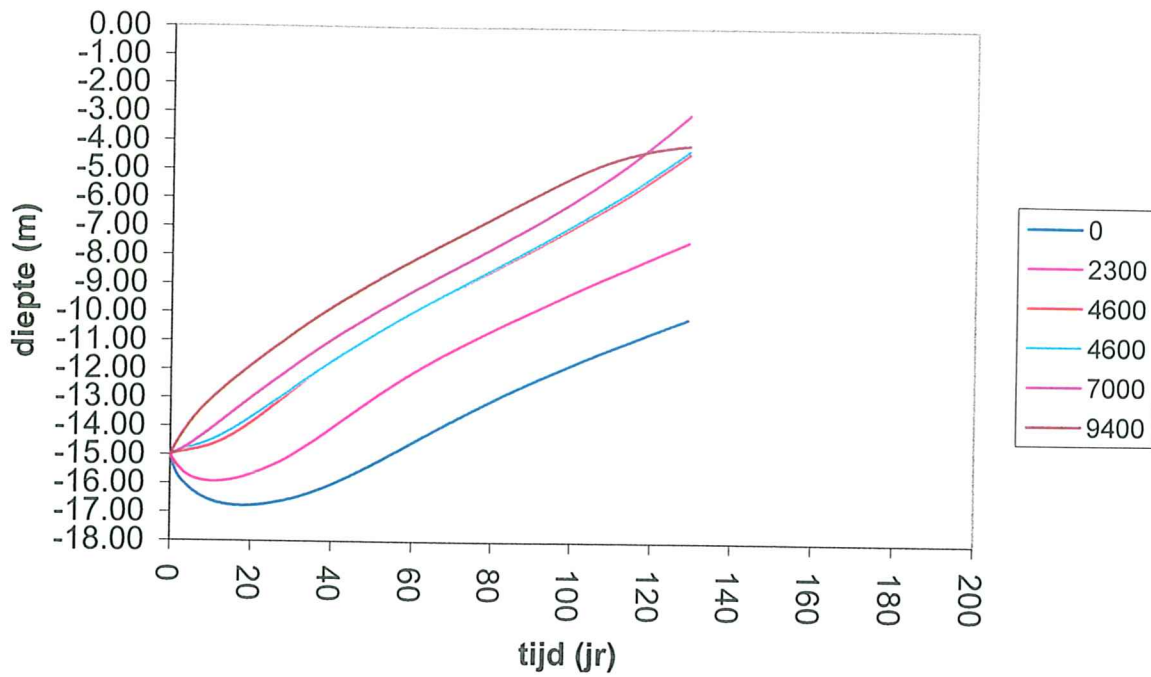
$K = 1.8$, vloedgeul



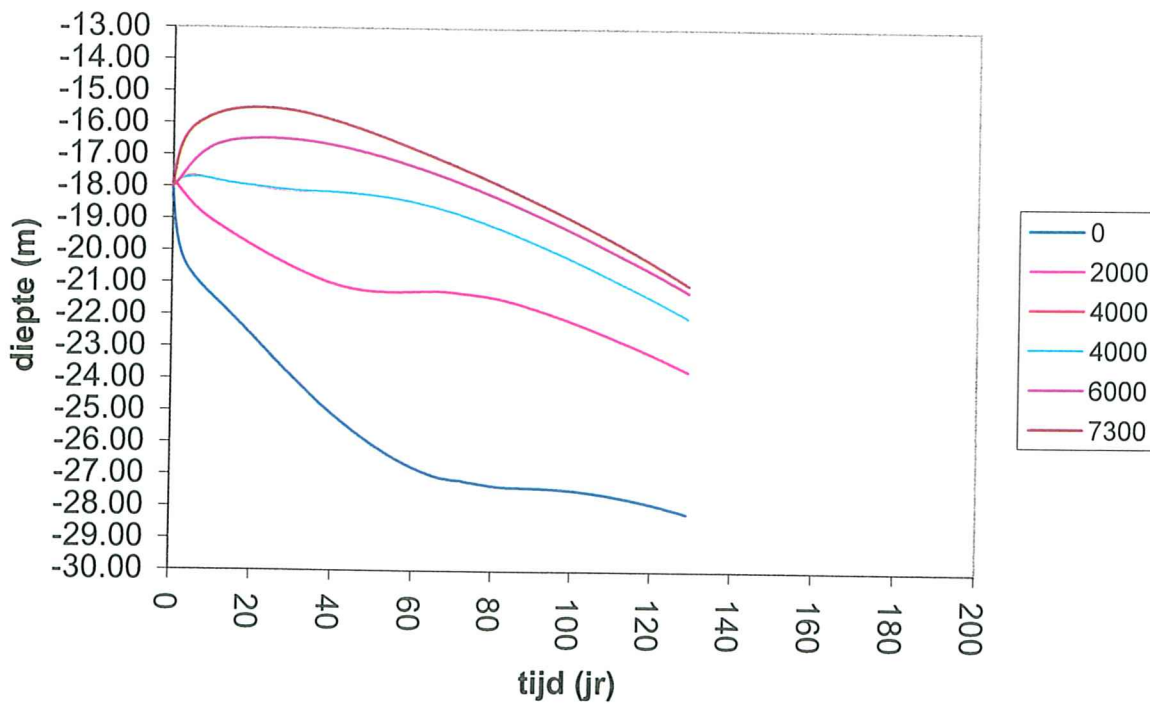
Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, $k = 1.8$. Autonome ontwikkeling.
A-symmetrische macrocel, 5% storten in ebgeul.

FIG 4.8b

K = 1.8, ebgeul



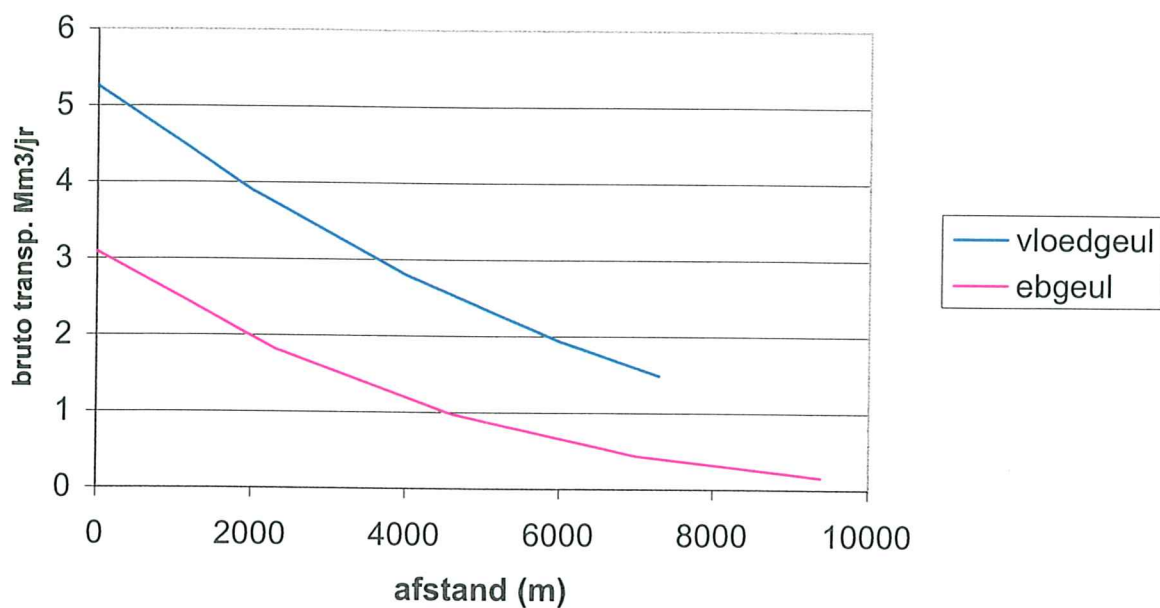
K = 1.8, vloedgeul



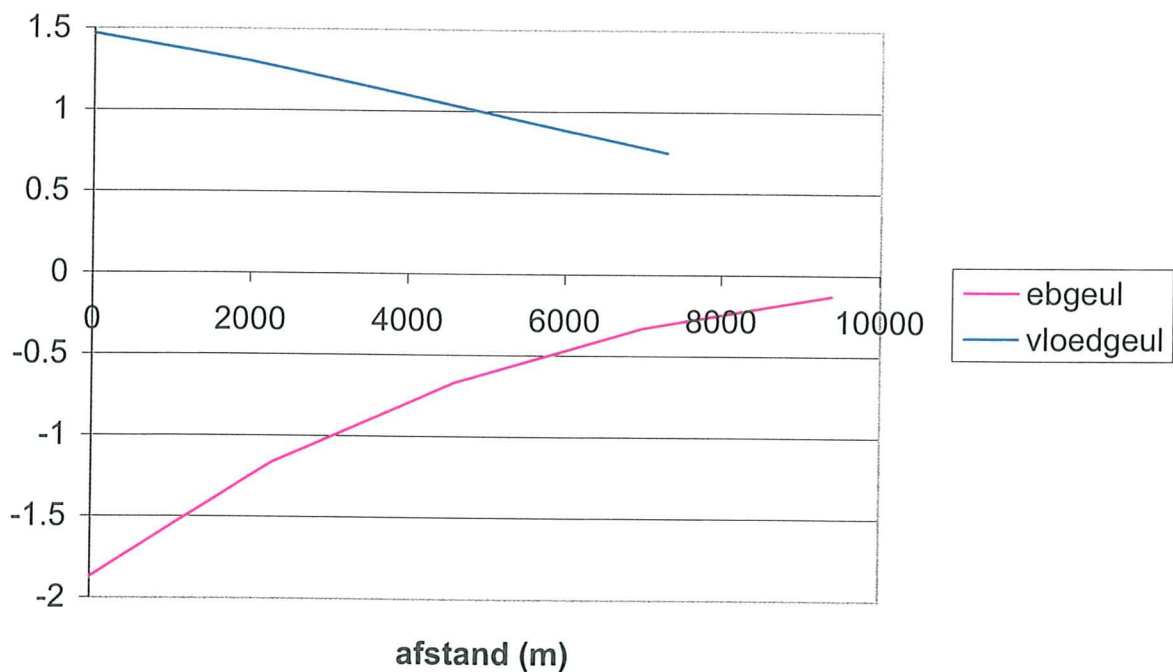
Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, $k = 1.8$. Autonome ontwikkeling.
A-symmetrische macrocel, 15% storten in ebgeul

FIG 4.8c

Bruto Transport, A-symm. Cel en uniforme geometrie

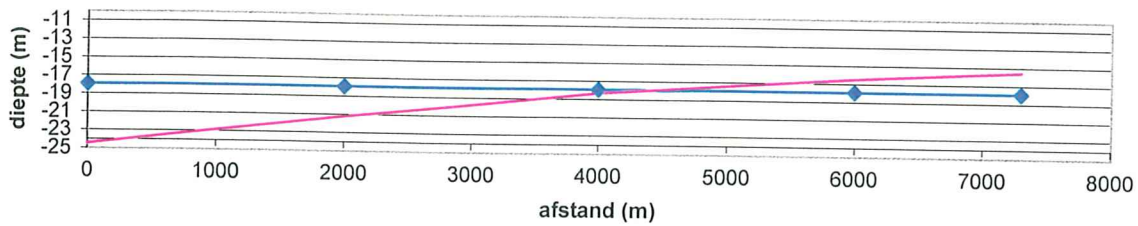


Netto transport in Mm3/jr

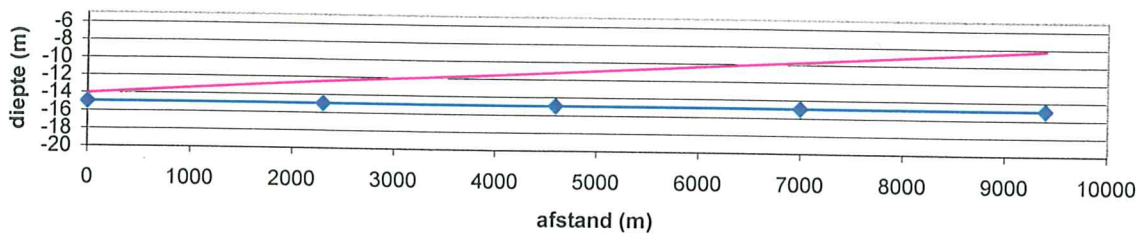


Netto en bruto transport capaciteit voor run met
A-symm. macrocel en uniforme geometrie in eb- en vloed geul

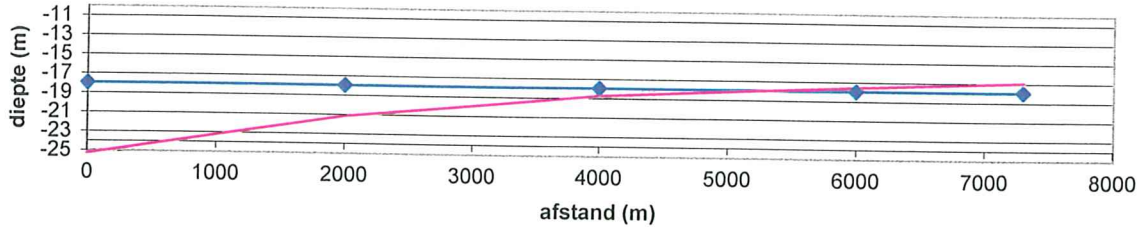
Vloedgeul, autonome ontwikkeling,
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.



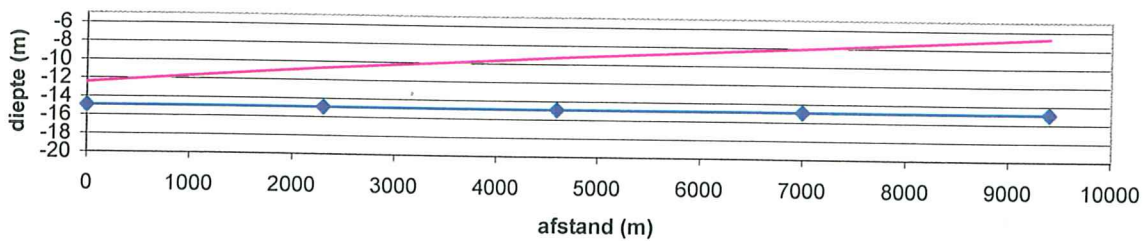
ebgeul, autonome ontwikkeling,
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.



vloedgeul, 5% storten in ebgeul + comp. baggeren buiten cel;
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie..

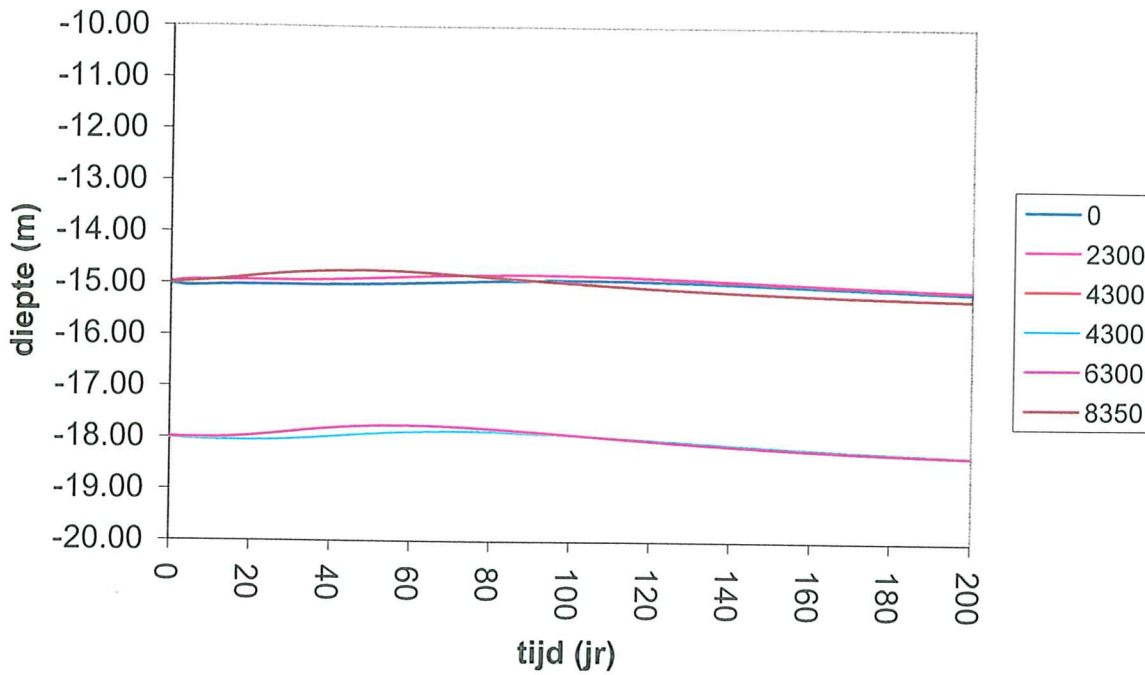


ebgeul, 5% storten in ebgeul + comp. baggeren buiten cel;
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.

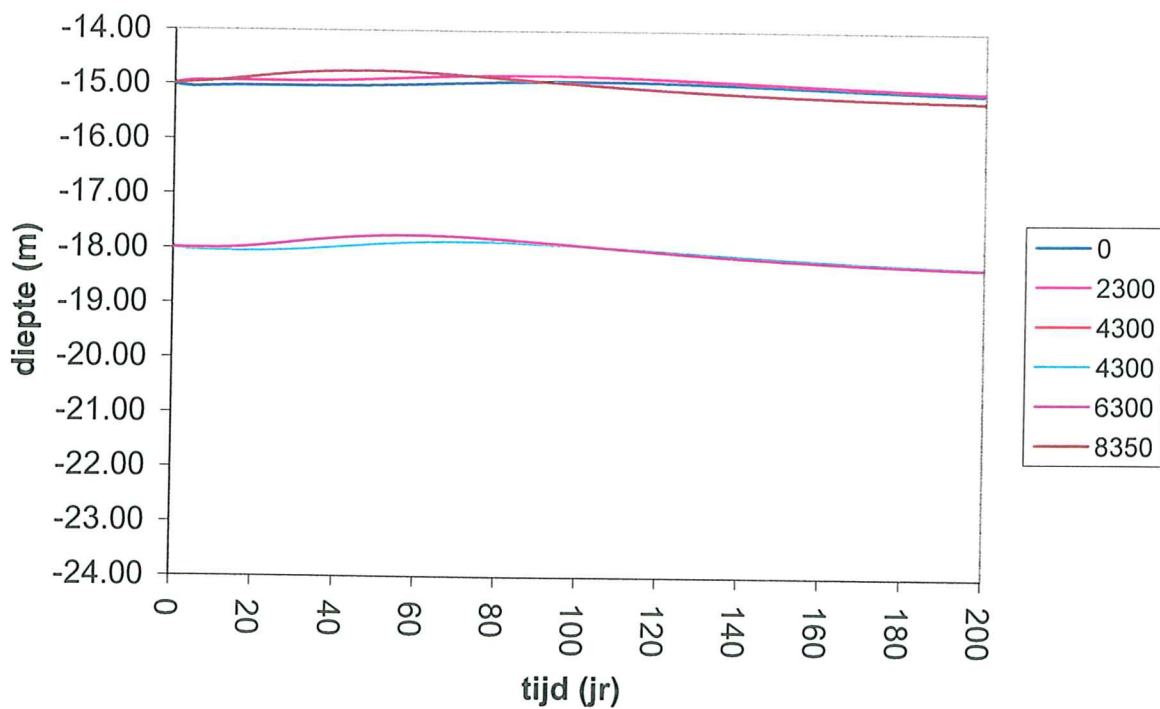


Bodemontwikkeling: beginsituatie en situatie na 200 jaar simuleren.
A-symmetrische cel en uniforme geulgeometrie

K = 1.8, ebgeul



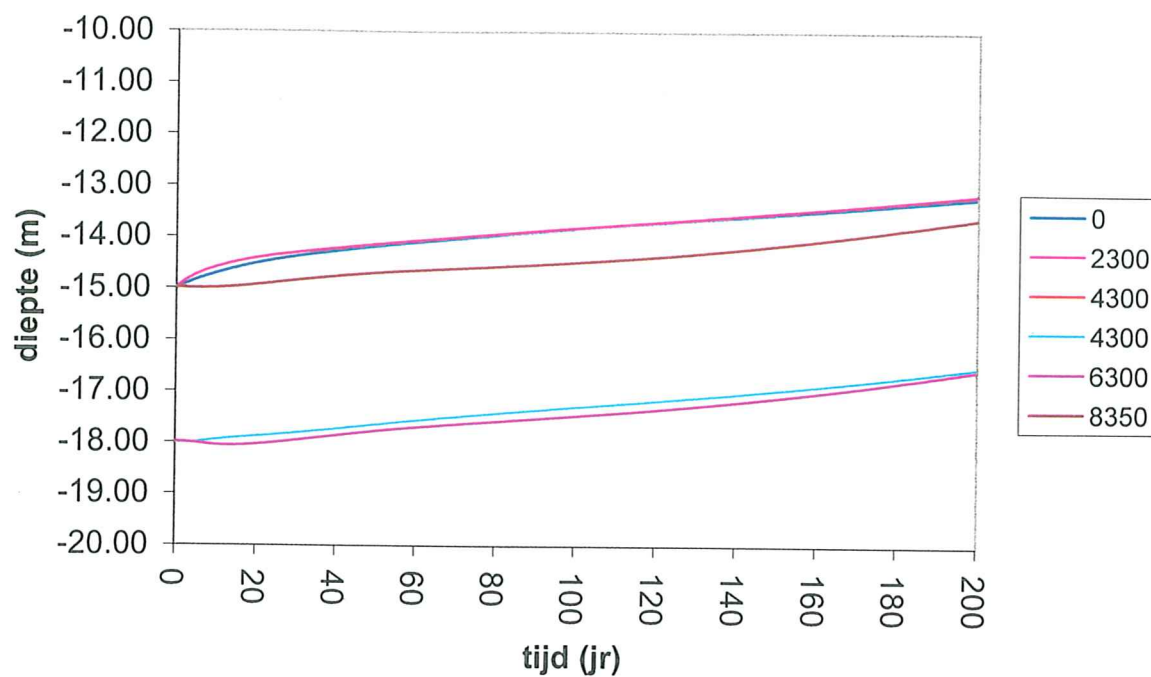
K = 1.8, vloedgeul



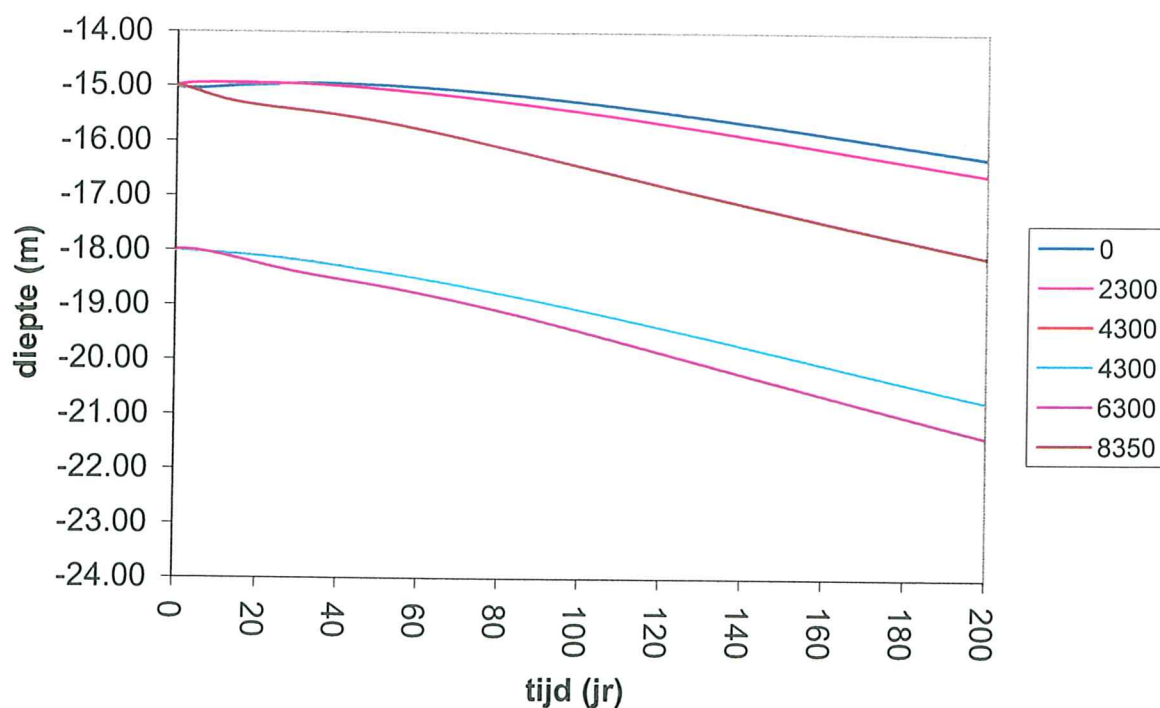
Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
 200 jaar simulatie, $k = 1.8$. Autonome ontwikkeling.
 Symmetrische macrocel, NIET uniforme geulgeometrie.

FIG 4.9a

K = 1.8, ebgeul



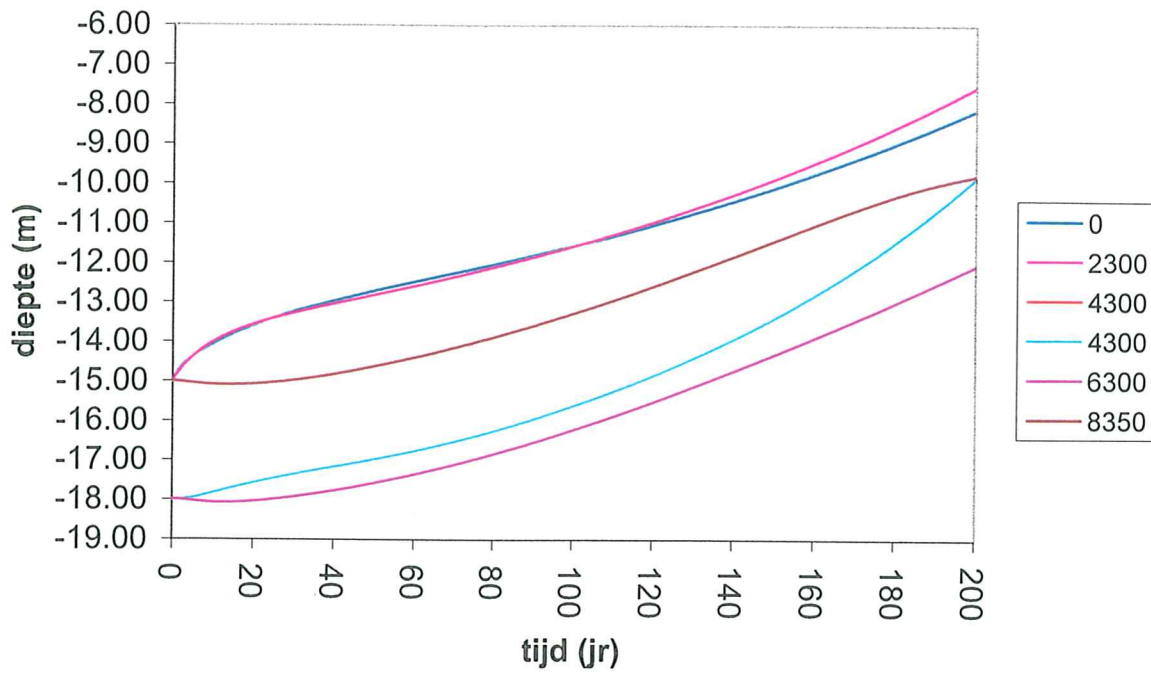
K = 1.8, vloedgeul



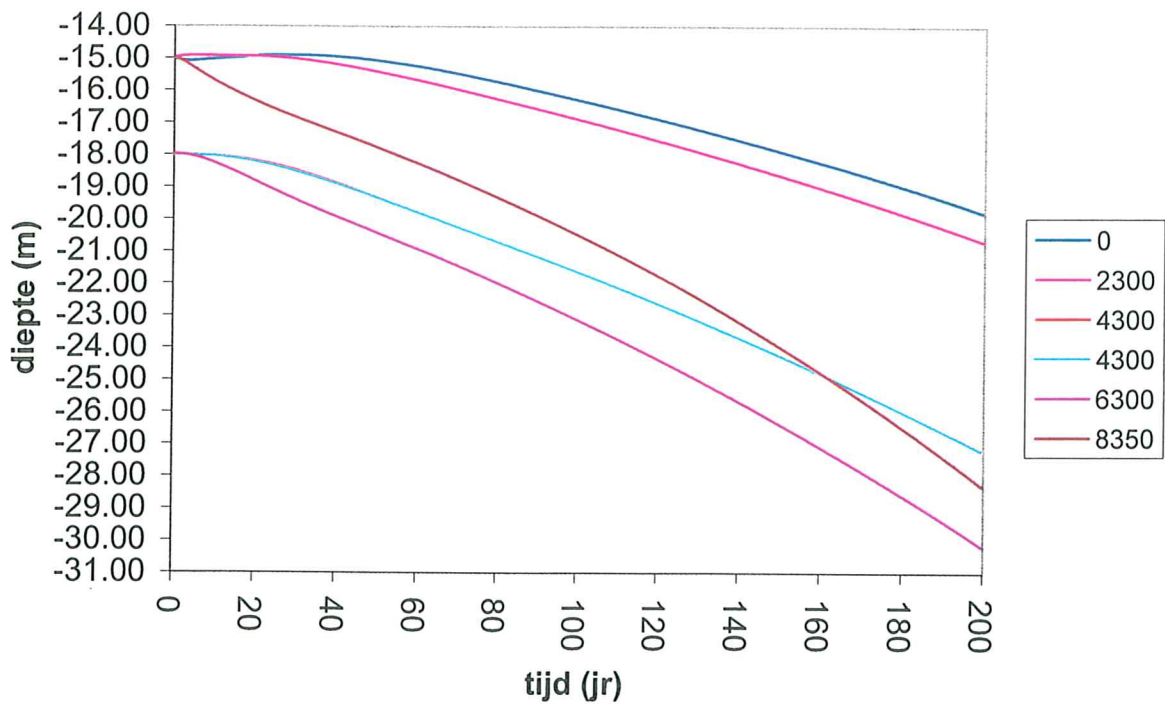
Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
 200 jaar simulatie, k = 1.8. 5% storten in ebgeul.
 Symmetrische macrocel, NIET uniforme geulgeometrie

FIG 4.9b

K = 1.8, ebgeul

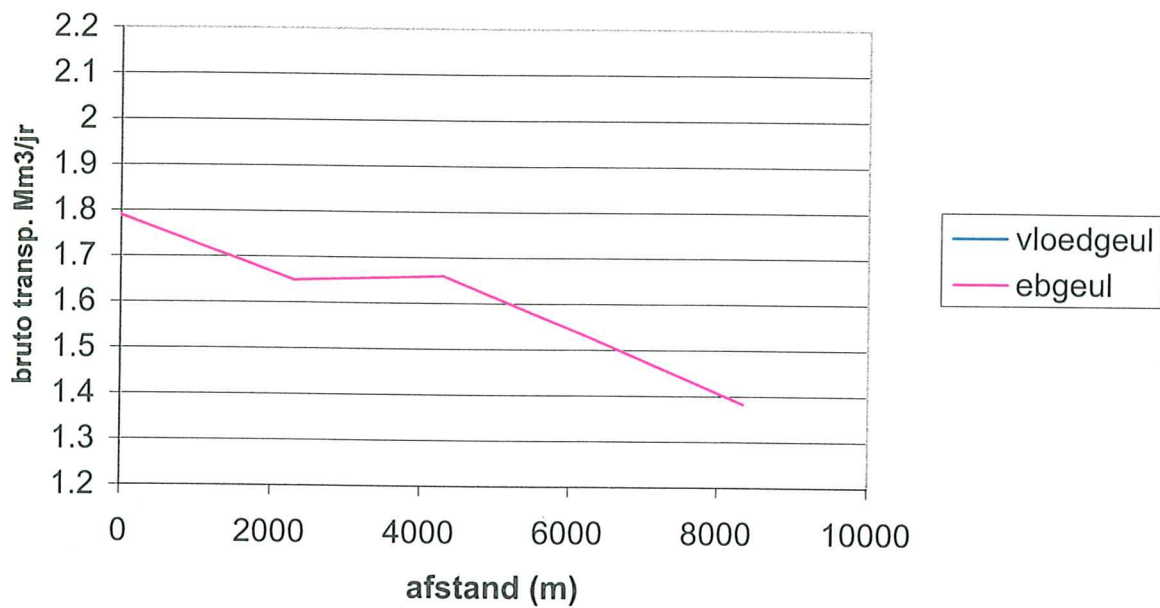


K = 1.8, vloedgeul

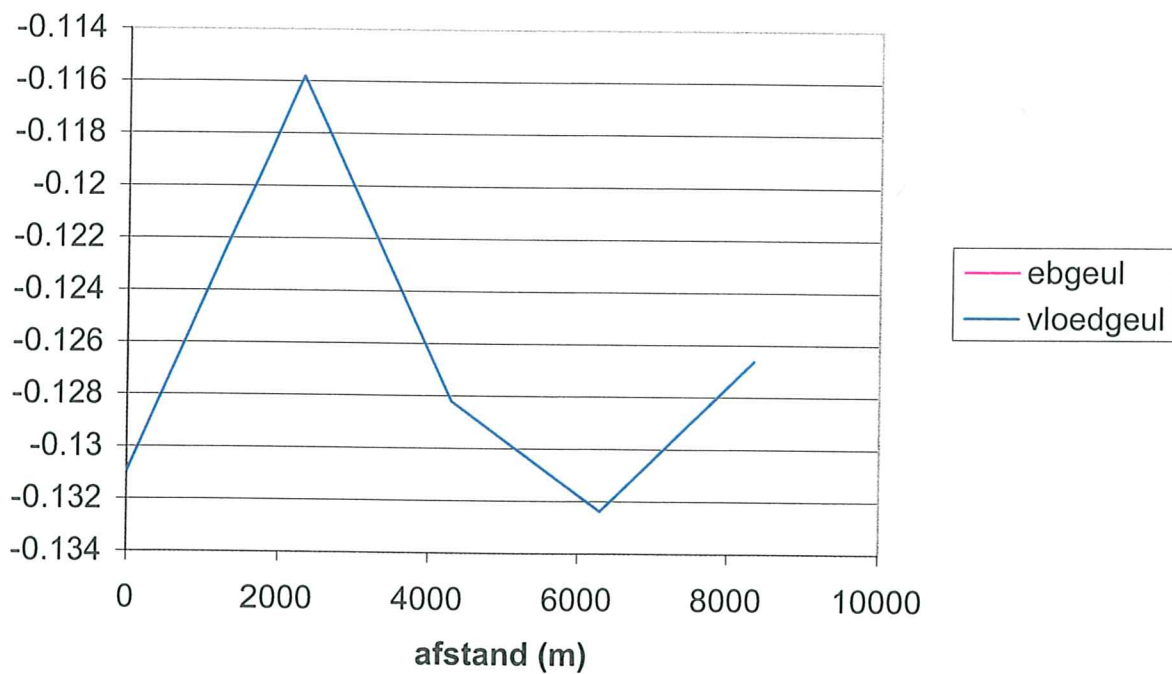


Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
200 jaar simulatie, $k = 1.8$. 15% storten in ebgeul.
Symmetrische macrocel, NIET uniforme geulgeometrie

Bruto Transport, symm. Cel en NIET uniforme geometrie

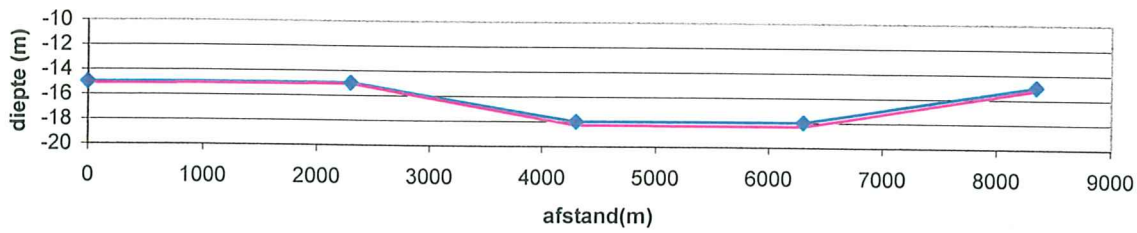


Netto transport in Mm3/jr

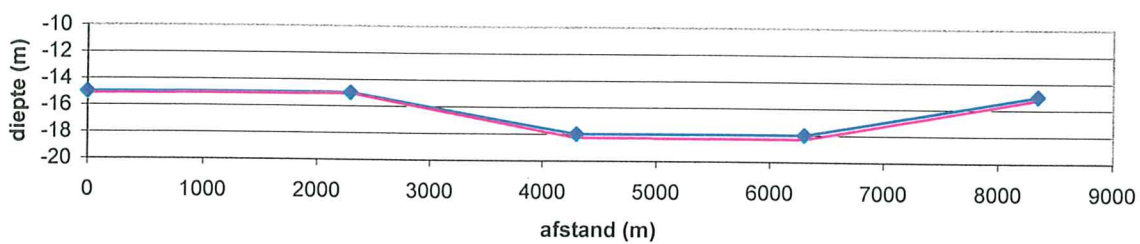


Netto en bruto transport capaciteit voor run met
symm. macrocel en NIET uniforme geometrie in eb- en vloed geul

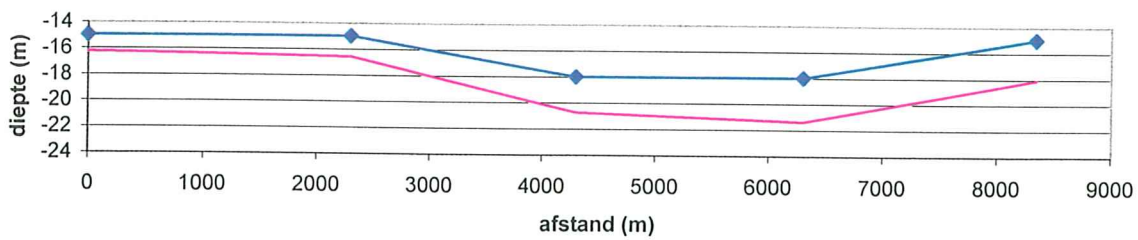
Vloedgeul, autonome ontwikkeling,
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.



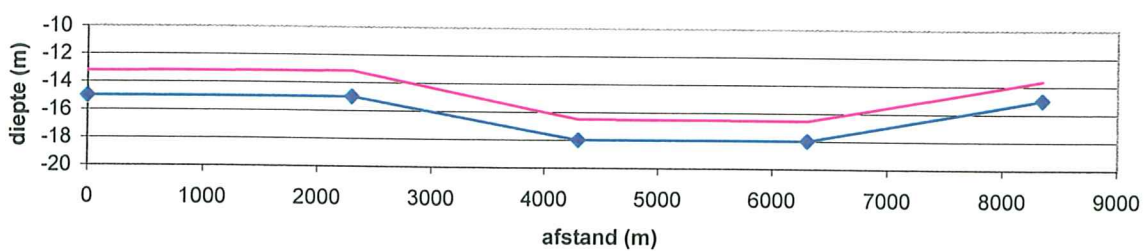
ebgeul, autonome ontwikkeling,
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.



Vloedgeul, 5% storten + comp. Baggeren,
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.



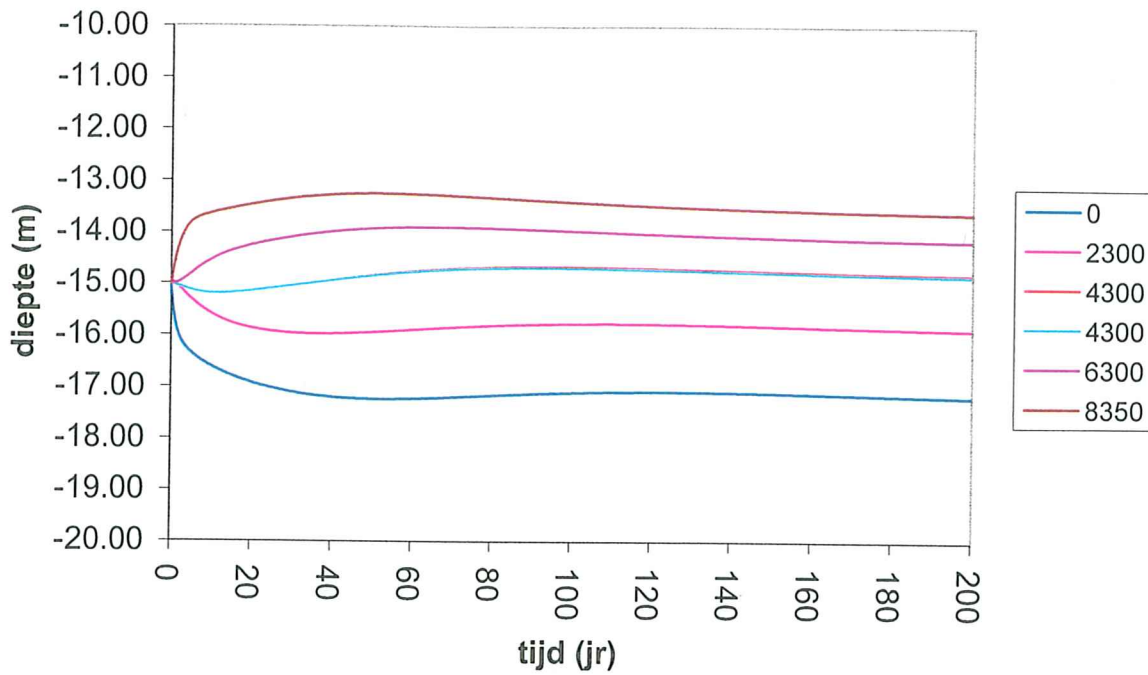
ebgeul, 5% storten + comp. Baggeren,
Symm. Cel, niet-uniforme geulgeometrie.



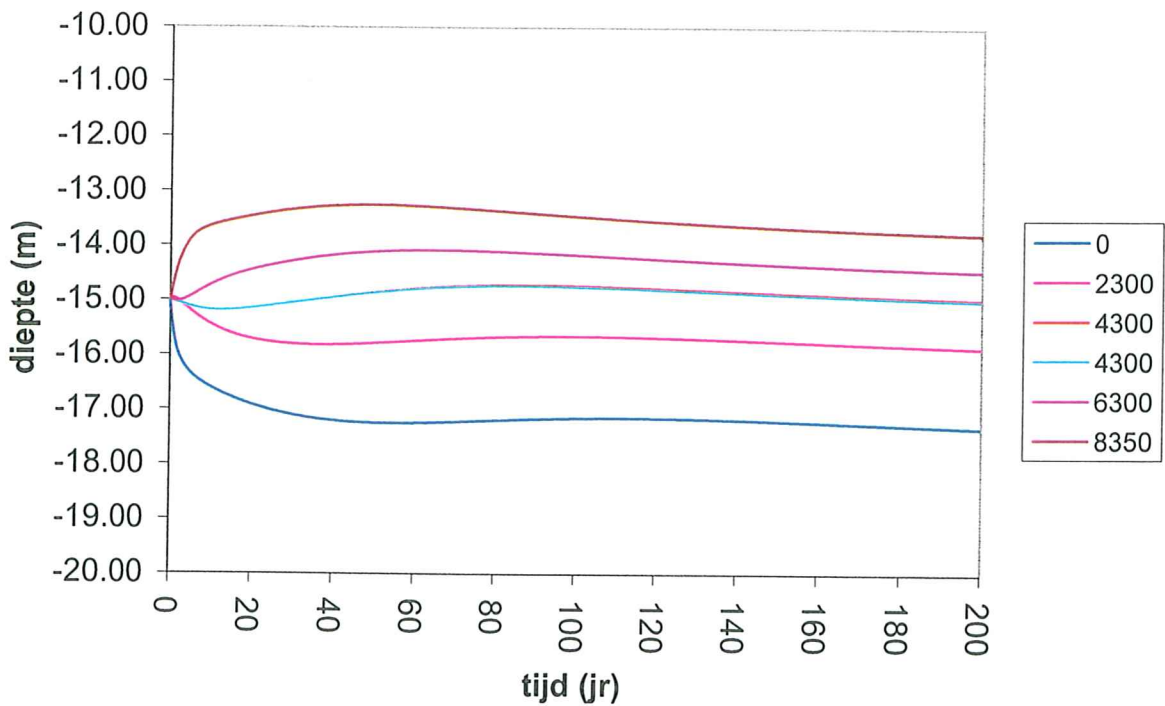
—◆— initial situation
— after 200 years simulation

Bodemontwikkeling: beginsituatie en situatie na 200 jaar simuleren.
Symmetrische cel en niet uniforme geulgeometrie

K = 1.8, ebgeul

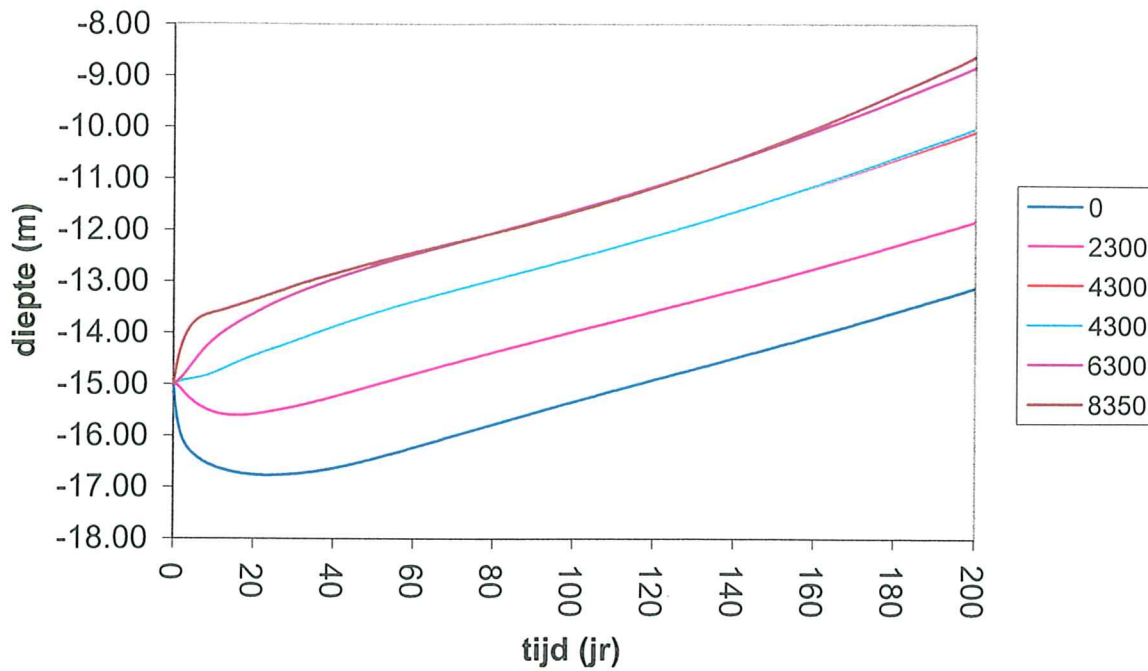


K = 1.8, vloedgeul

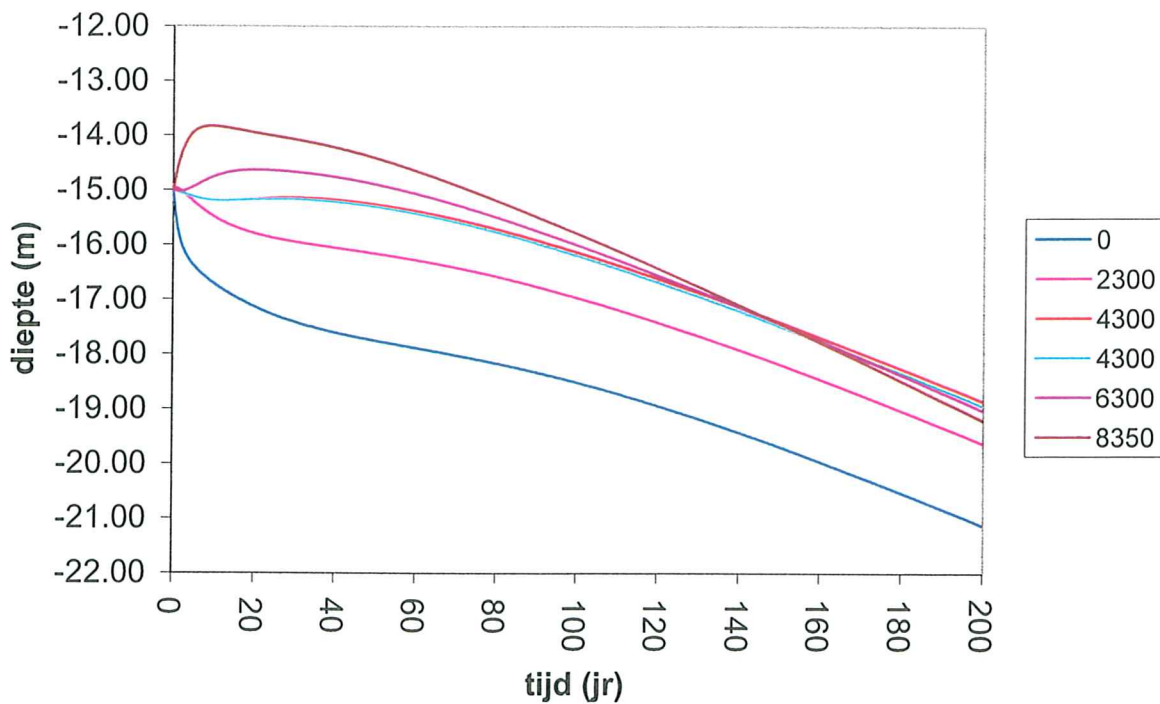


Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
 200 jaar simulatie, $k = 1.8$. Autonome ontwikkeling.
 Symmetrische macrocel, Uniforme geulgeometrie.

K = 1.8, ebgeul



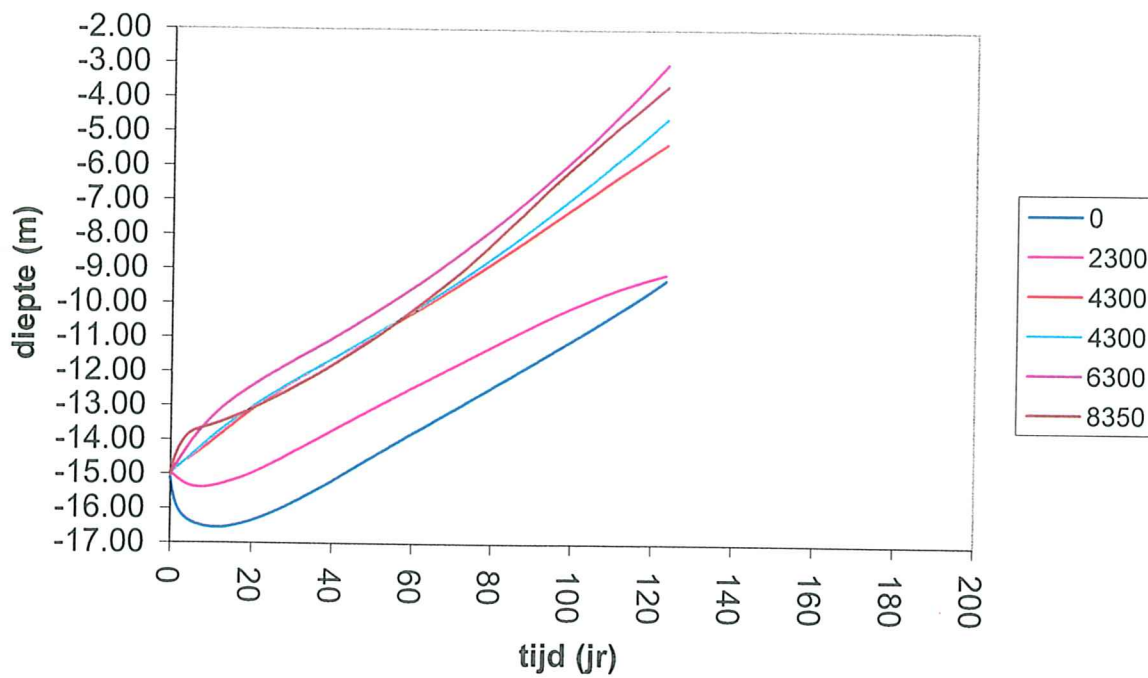
K = 1.8, vloedgeul



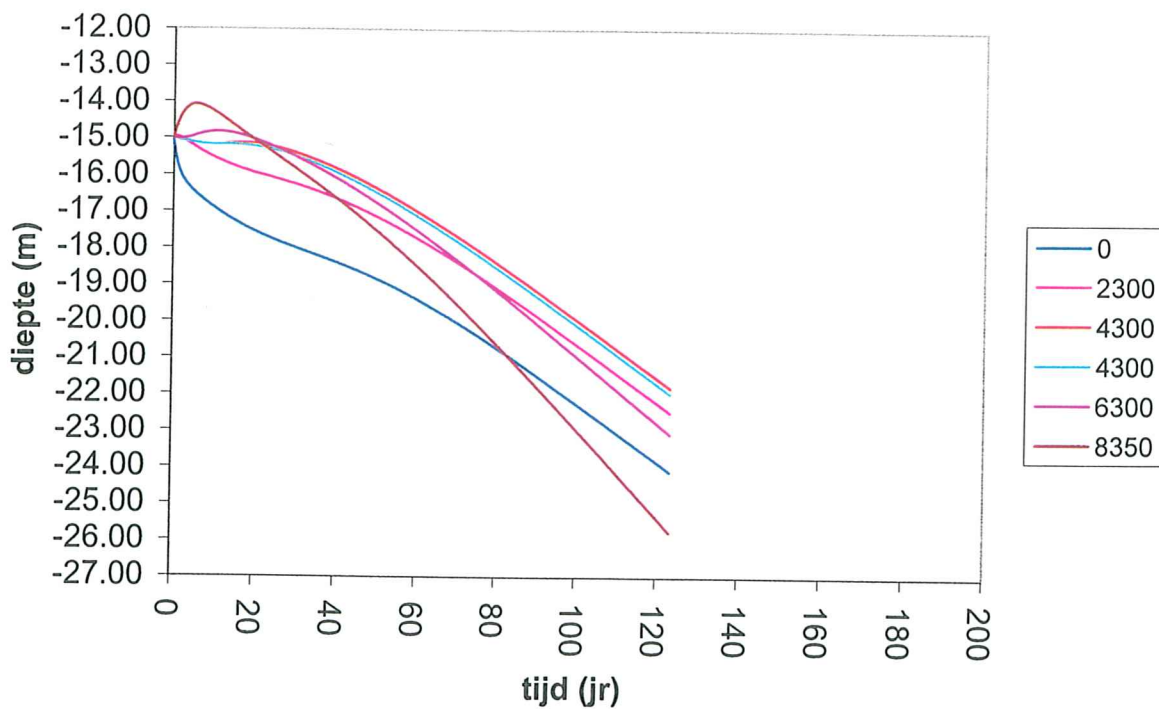
Berekende bodemniveau's ebgeul en vloedgeul
 200 jaar simulatie, $k = 1.8$. 5% storten in ebgeul.
 Symmetrische macrocel, Uniforme geulgeometrie

FIG 4.10b

K = 1.8, ebgeul



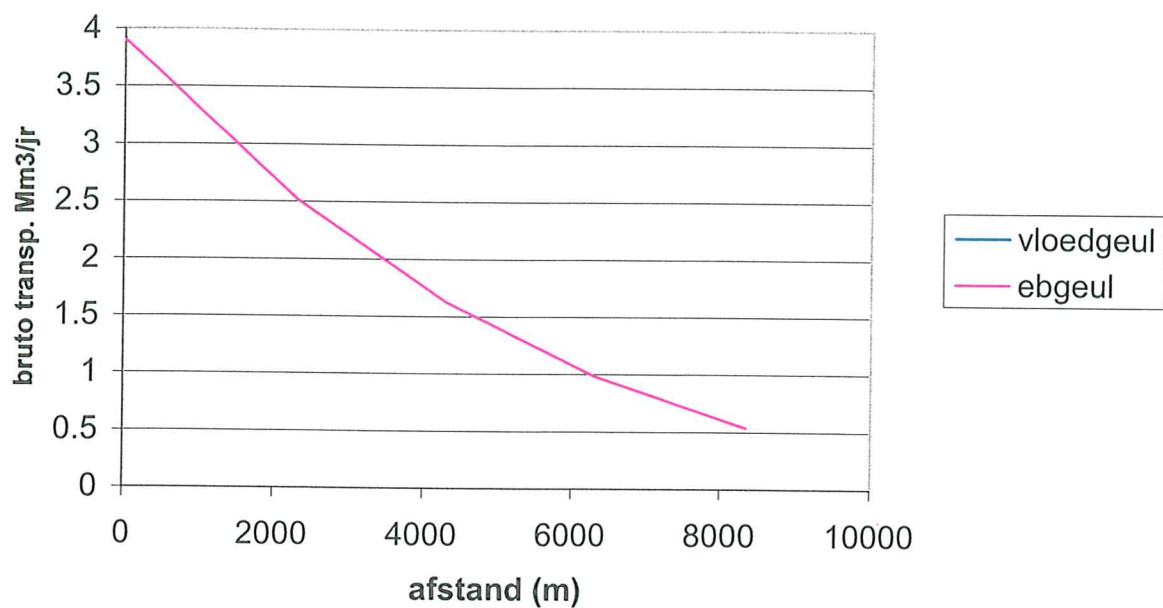
K = 1.8, vloedgeul



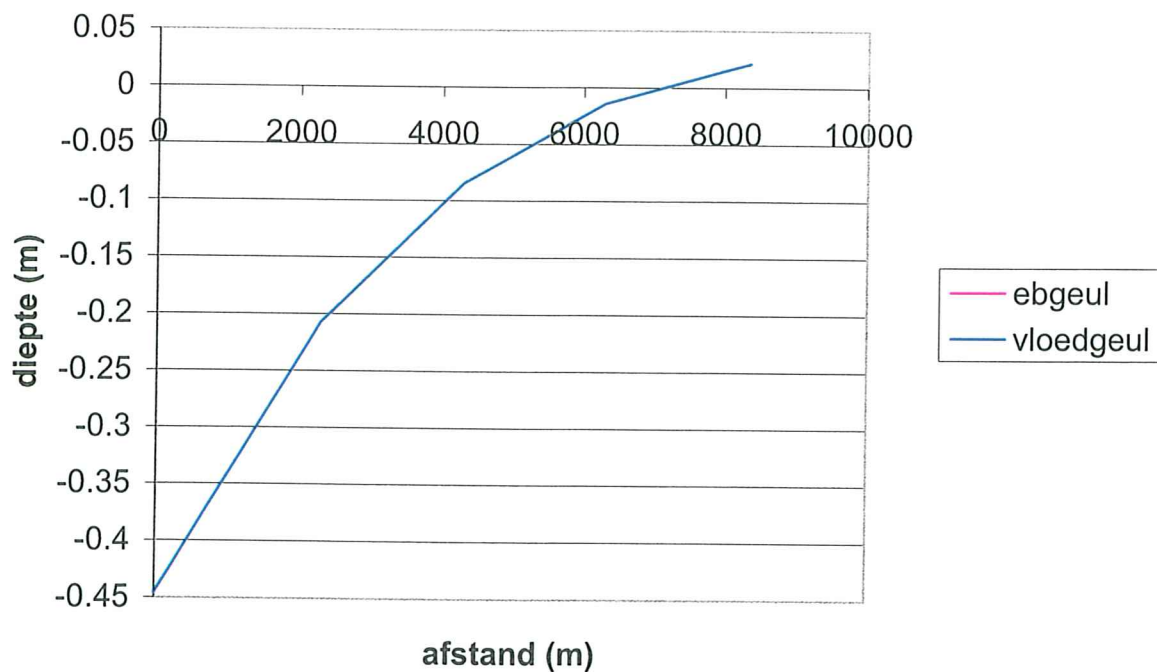
Berekende bodemniveaus ebgeul en vloedgeul
 200 jaar simulatie, $k = 1.8$. 15% storten in ebgeul.
 Symmetrische macrocel, Uniforme geulgeometrie

fig 4.10c

Bruto Transport, symm. Cel en uniforme geometrie

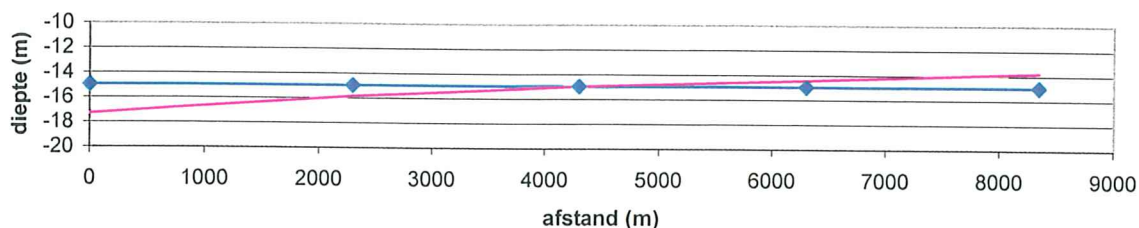


Netto transport in Mm3/jr

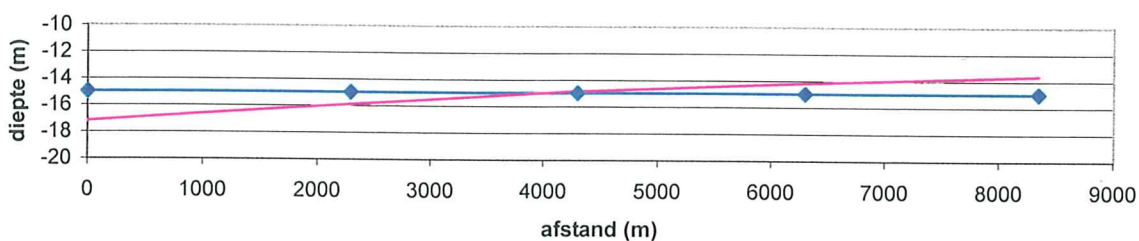


Netto en bruto transport capaciteit voor run met
symm. macrocel en uniforme geometrie in eb- en vloed
geul

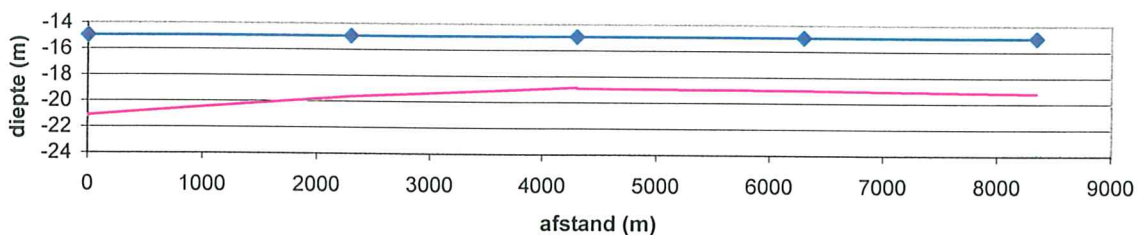
Vloedgeul, autonome ontwikkeling,
Symm. Cel, uniforme geulgeometrie.



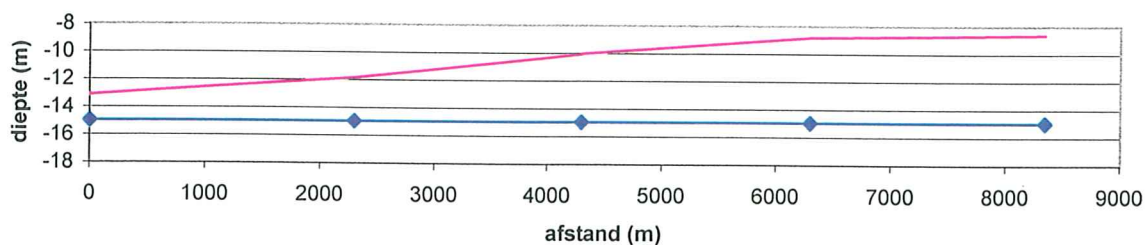
ebgeul, autonome ontwikkeling,
Symm. Cel, uniforme geulgeometrie.



Vloedgeul, 5% storten + comp. Baggeren,
Symm. Cel, uniforme geulgeometrie.



ebgeul, 5% storten + comp. Baggeren,
Symm. Cel, uniforme geulgeometrie.

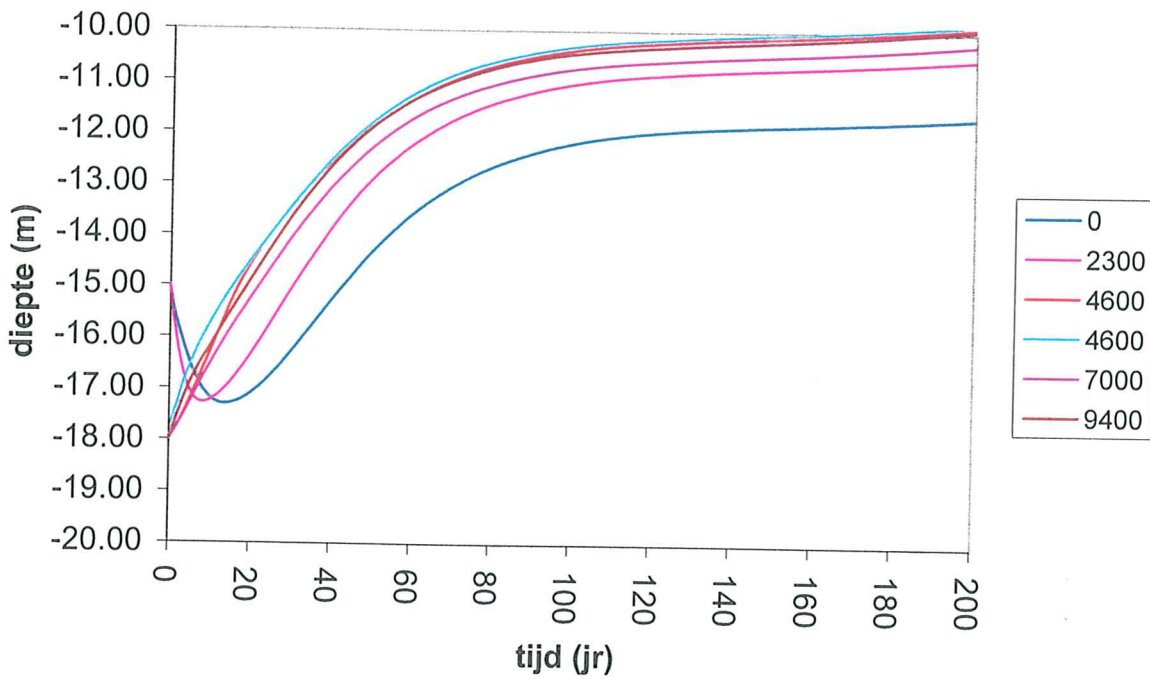


◆ initial situation
— after 200 years simulation

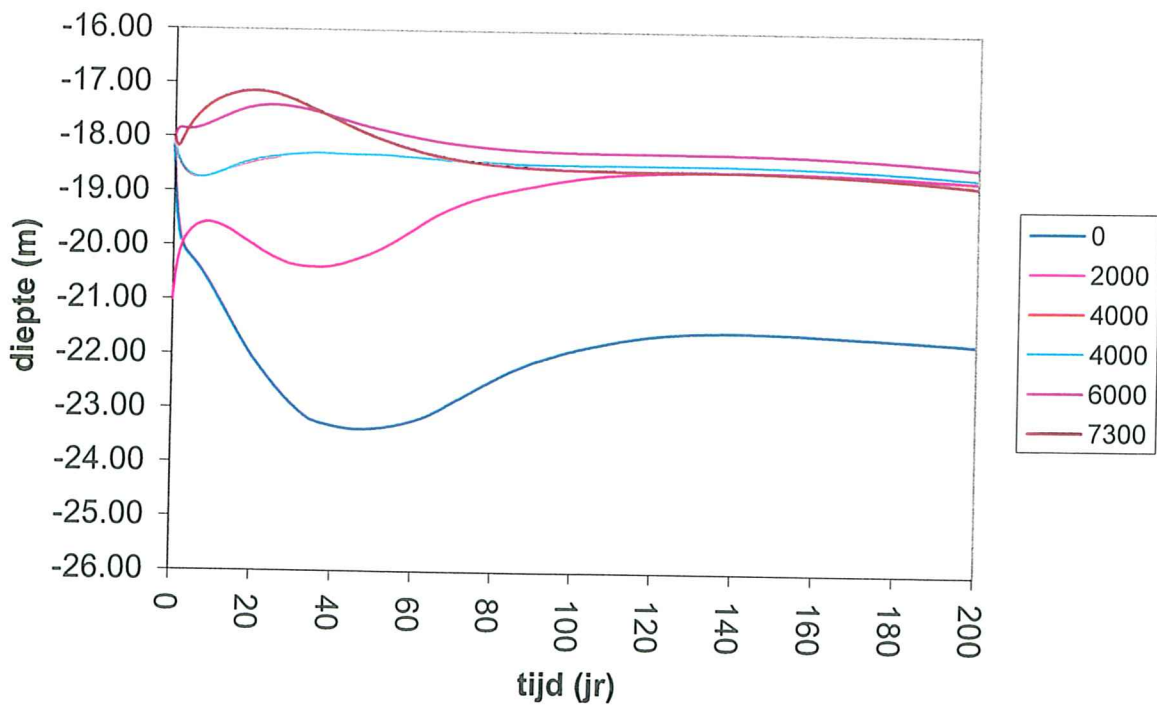
Bodemontwikkeling: beginsituatie en situatie na 200 jaar simuleren.
Symmetrische cel en uniforme geulgeometrie

fig 4.10e

K = 1.8, ebgeul

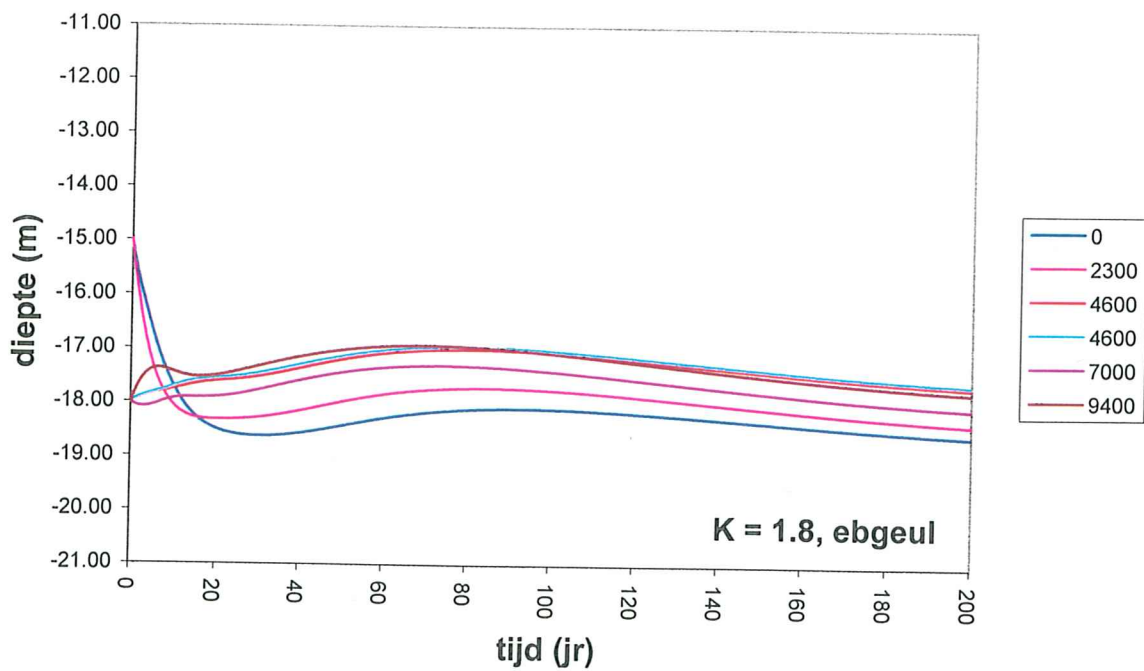
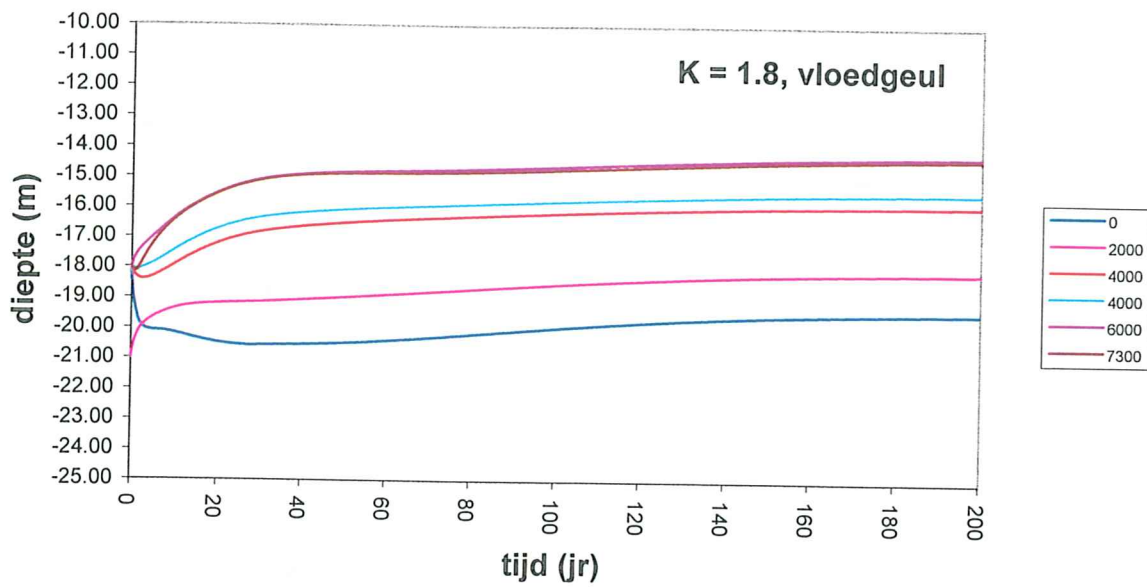


K = 1.8, vloedgeul



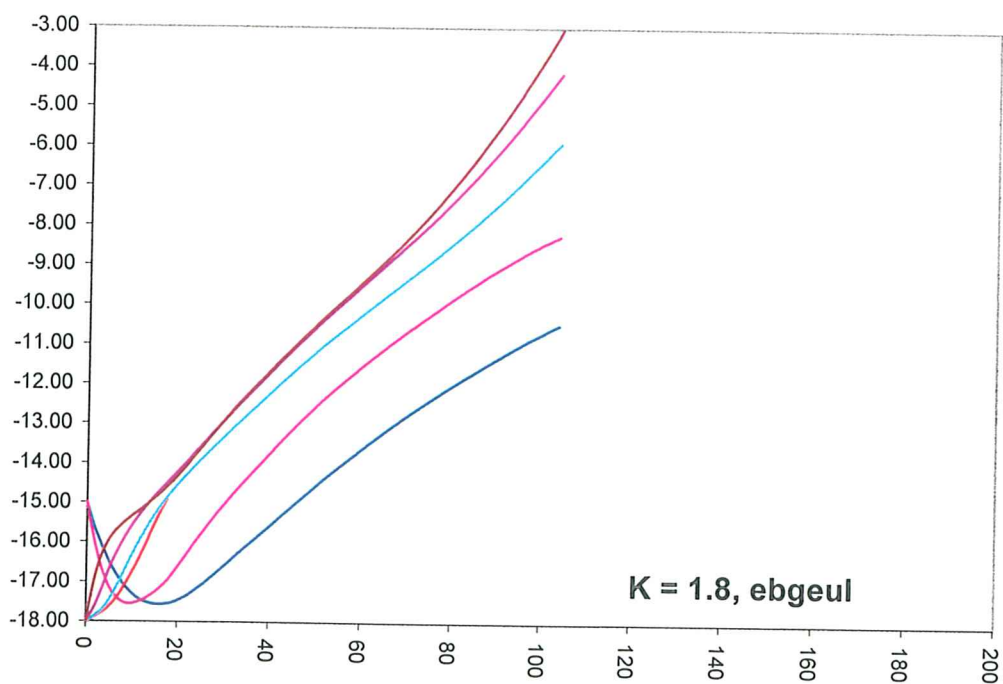
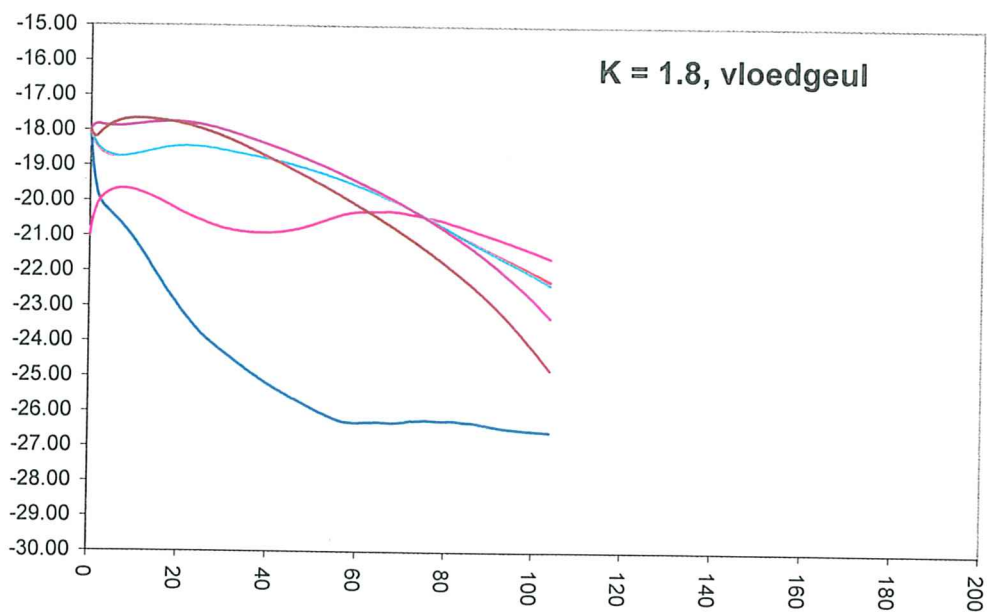
Ontwikkeling bodemniveau met $k = 1.8$, 15% storten in ebgeul en compensatie baggeren ver boven en benedenstrooms

FIG 4.11



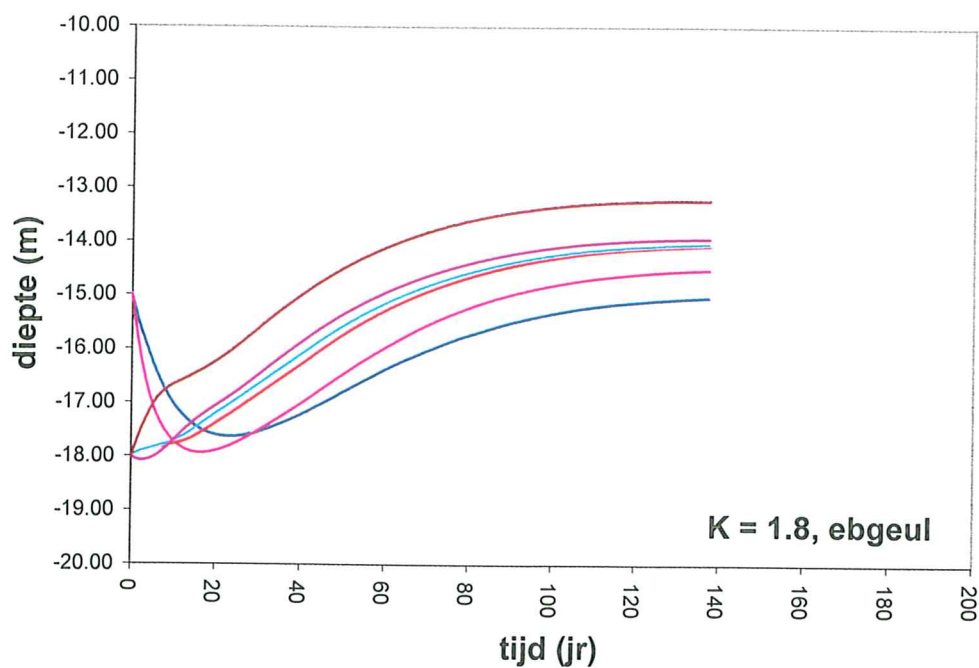
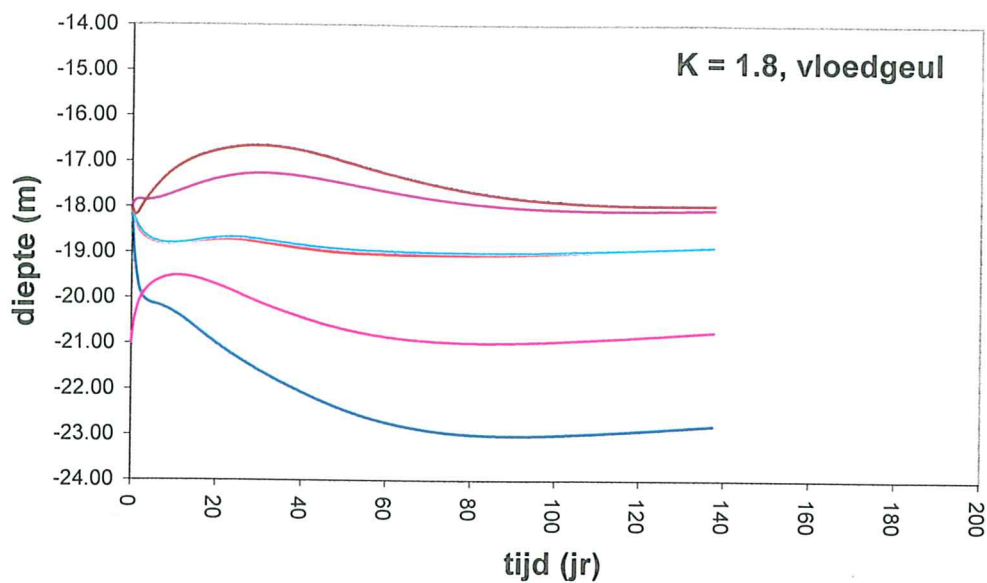
Ontwikkeling ebgeul en vloedgeul,
run: 15% storten in vloedgeul met compensatie baggeren voor en na
cel

fig 4.12



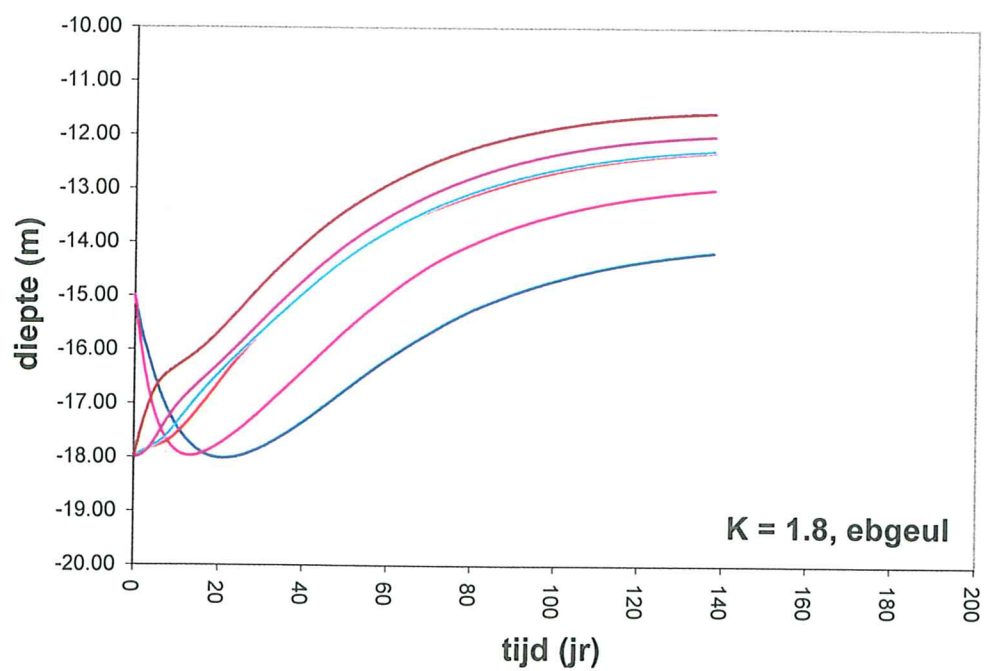
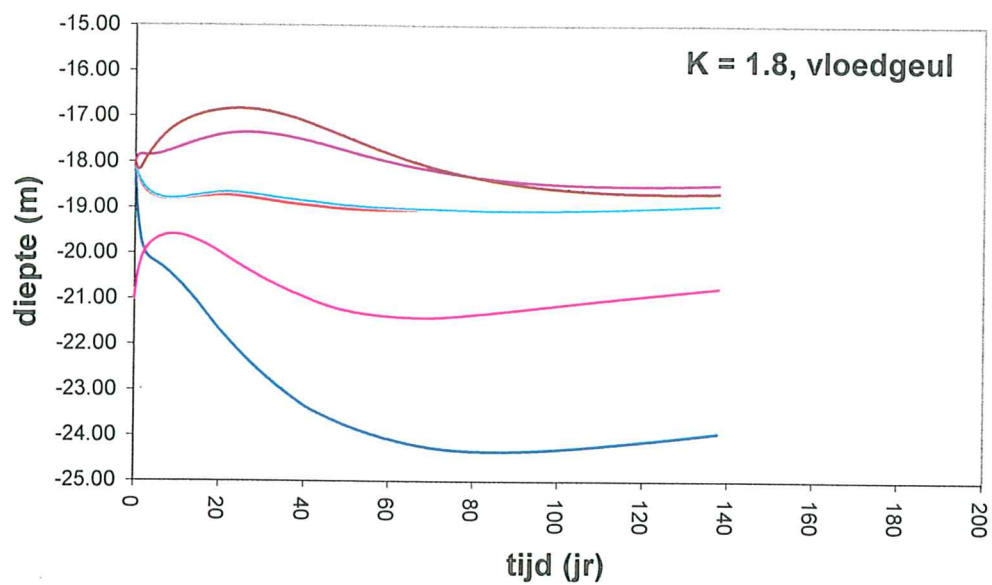
Ontwikkeling ebgeul en vloedgeul. 15% storten in ebgeul, gelijkmatig verdeeld over de hele lengte.

fig 4.13



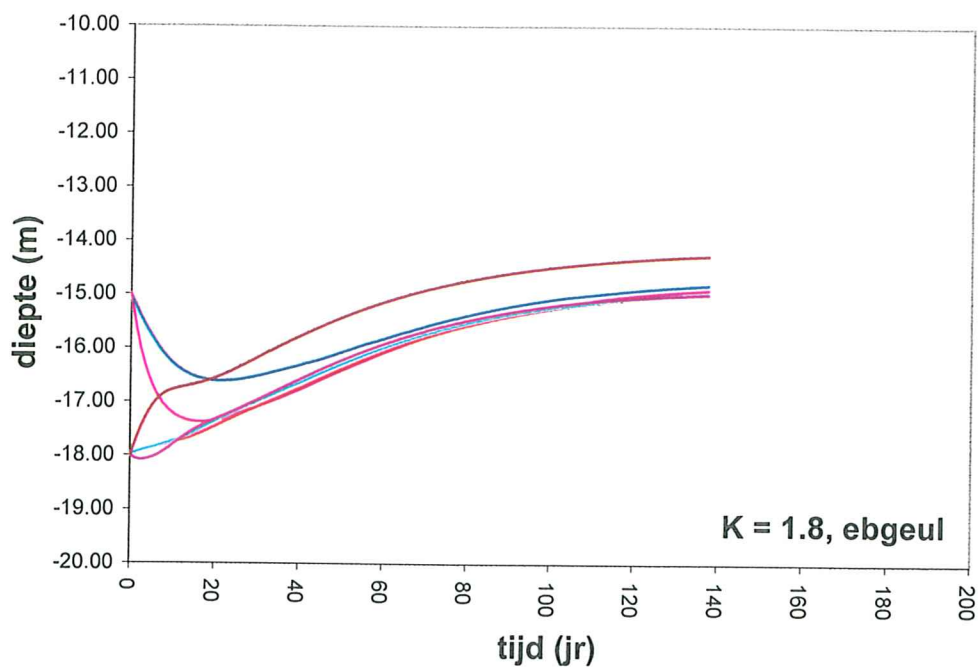
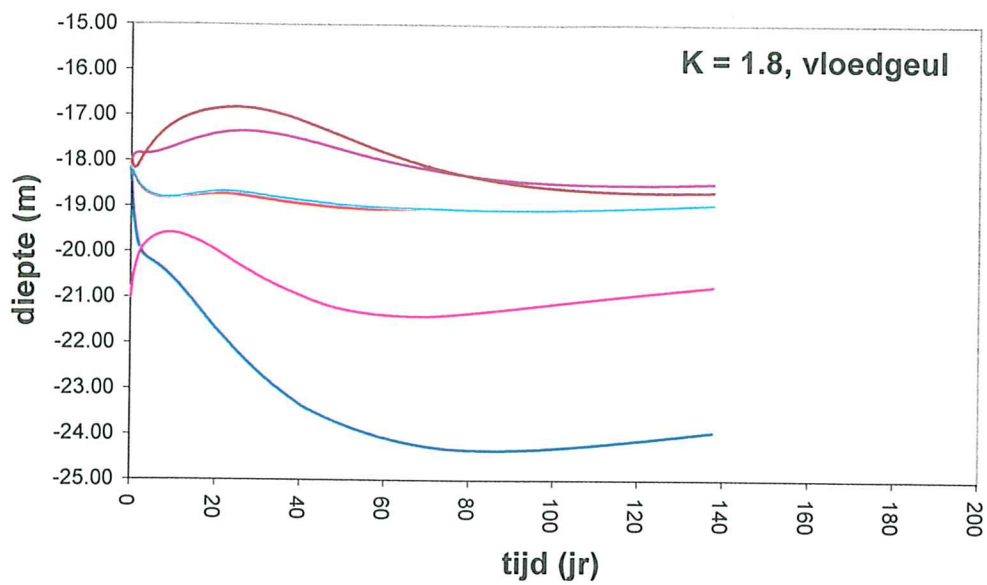
Ontwikkeling ebgeul en vloedgeul. 5% storten aan het begin van de ebgeul.

fig 4.14



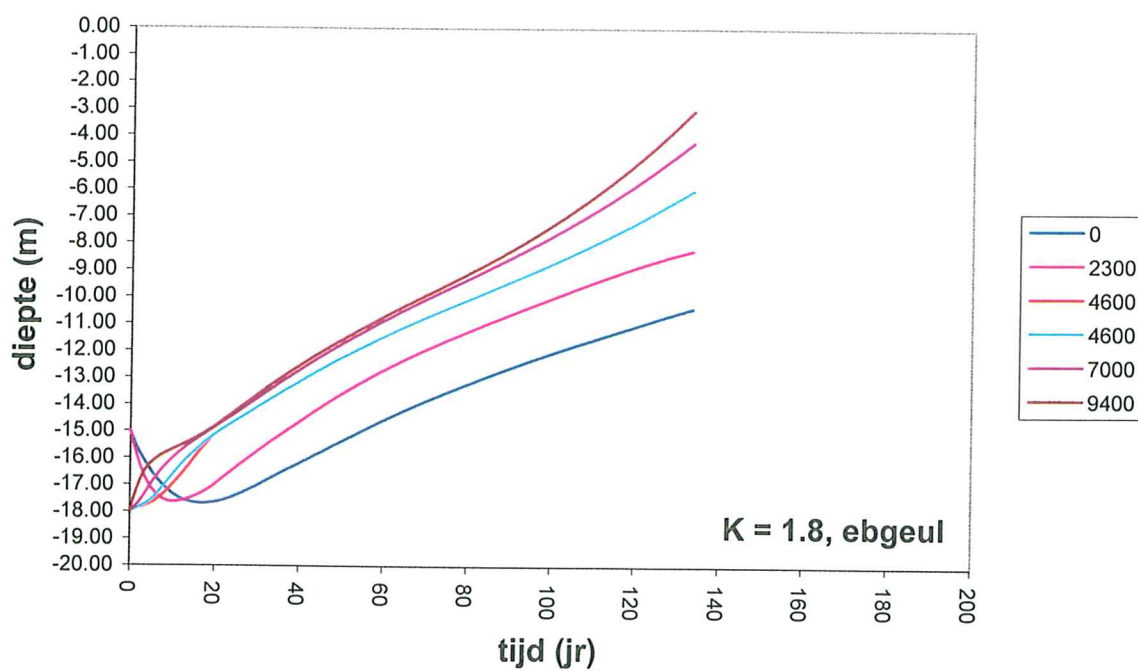
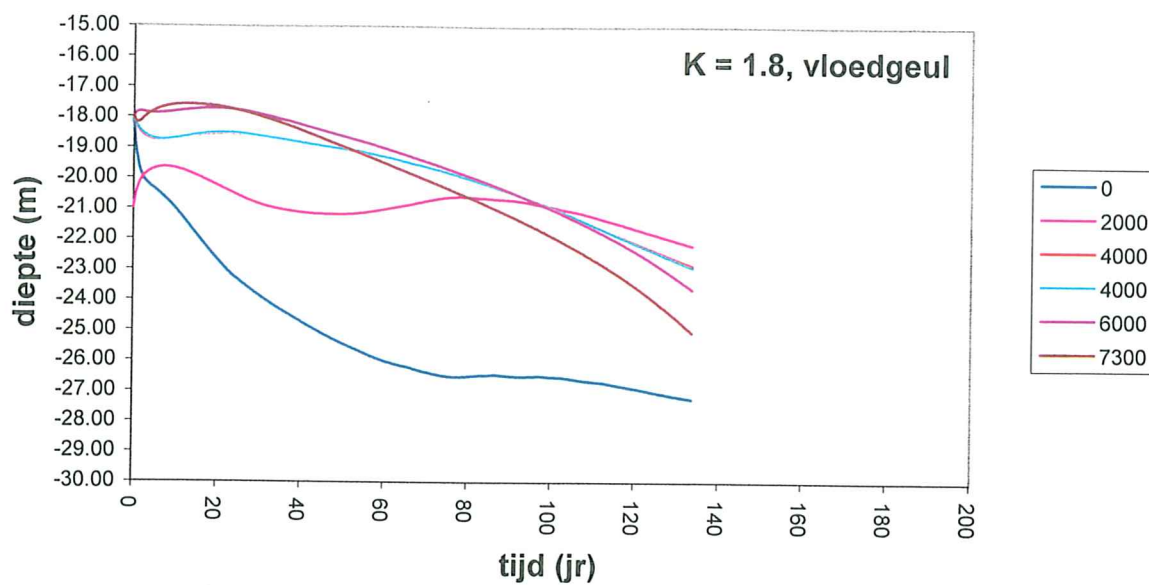
Ontwikkeling ebgeul en vloedgeul. 5% storten aan het eind van de ebgeul.

fig 4.15



Ontwikkeling ebgeul en vloedgeul. 15% storten aan het begin
(benedenstrooms) van de ebgeul.

fig 4.16



Ontwikkeling ebgeul en vloedgeul. 15% storten aan het eind
(bovenstrooms) van de ebgeul.

fig 4.17