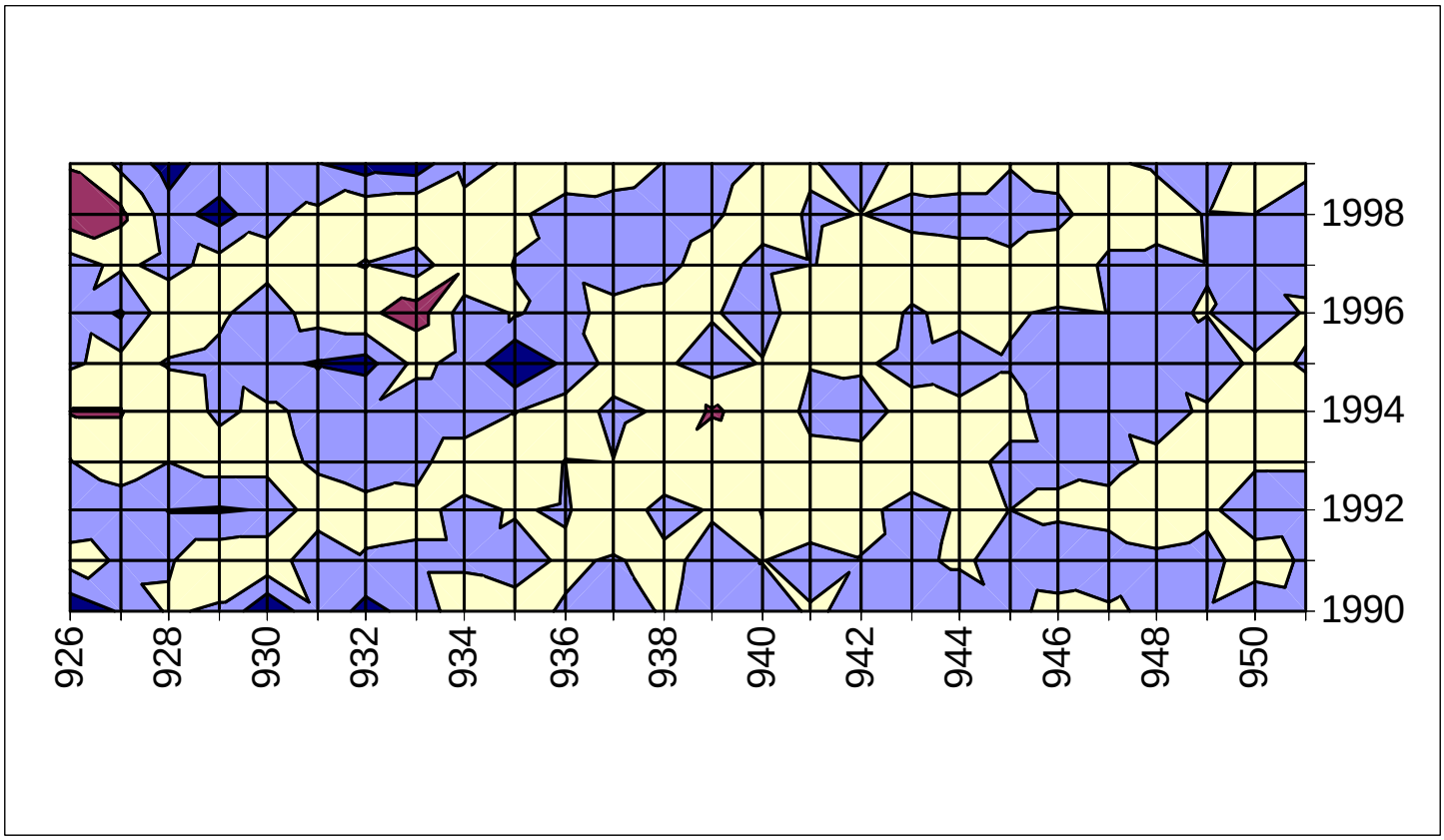


Zomerbedveranderingen door nevengeulen bij Gameren

Veranderingen in het zomerbed

door de geulen van de Gamerensche Waard

In dit werkdocument wordt niet noodzakelijkerwijs de visie van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat weergegeven

Werkdocument 2003.061x

auteur J. Sieben

datum 19 February 2004

Zomerbedveranderingen door nevengeulen bij Gameren

Blz.

Inhoud
1

Samenvatting
3

Hoofdstuk 1 Inleiding
1.1 Achtergrond 5
1.2 Onderzoeksvraag en werkwijze
5

Hoofdstuk 2 Inventarisatie bodemontwikkelingen
2.1 Achtergrond 7
2.2 Boven- en benedenstroomse veranderingen
7
2.3 Lange termijn bodemontwikkelingen
9
2.4 Kleinschalige bodemveranderingen
11
2.5 Conclusies
14

Hoofdstuk 3 Schatten van referentie bodemligging
3.1 Inleiding 15
3.2 Simple-wave model
16
3.3 Conclusies
18

Hoofdstuk 4 Verwacht effect
4.1 Inleiding 19
4.2 Theoretisch model
19
4.3 Relatieve afvoer- en sedimentonttrekking
21
4.4 Schatten van representatieve bodemverandering
24
4.5 Numerieke voorspelling 26
4.6 Conclusies
27

Hoofdstuk 5 Detail analyse van peilingen
5.1 Inleiding 29
5.2 Vergelijking monitoringsgegevens en jaarlijkse dwarspeilingen 30
5.3 Profielgemiddelde bodemveranderingen
31

5.4 Ruimtelijke variatie
32 5.5 Twee-dimensionale aspecten
34
5.6 Conclusies
35

Hoofdstuk 6 Conclusies
6.1 Evaluatie effectbepaling
37
6.2 Aanbevelingen 38

Literatuur 39

Bijlage A Overzicht gemiddelde en standaardafwijking van recentere bodemligging
41

Samenvatting

doel en aanpak

Welk effect hebben de nevengeulen in de Gamerensche Waard op het zomerbed. Om dit te kunnen bepalen zijn vanaf september 1995 tussen Waal km 935 en 941 regelmatig peilingen van het zomerbed uitgevoerd. Om de afzonderlijke invloed van de geulen te bepalen is als eerste stap van alle *relevante* ingrepen en ontwikkelingen het effect op bodemveranderingen in het interessegebied geschat. Door vergelijking met de gepeilde bodemveranderingen is vervolgens het afzonderlijk effect van de nevengeulen geschat.

conclusies

De bodempeilingen zijn geanalyseerd met behulp van kilometer-gemiddelde waarden, zowel profielgemiddeld als afzonderlijk voor drie 100 m zones parallel aan de rivieras. De belangrijkste conclusies zijn;

1) De met analytische en numerieke middelen voorspelde aanzanding ter plekke van het splitsingspunt (km 937) heeft vermoedelijk plaatsgevonden, maar wordt door passerende bodemdalingsgolven in de bodempeilingen tijdelijk onderdrukt. Deze bodemdalingsgolven zijn waarschijnlijk opgewekt door de lokale versmalling van de BenedenWaal (km 926 en 932) uit de periode 1980-1990.
2) Benedenstrooms van km 938 is het effect van de geulen in 2002 nog niet volledig ontwikkeld.
2) Aan de zijde van de onttrekking (linkeroever) is de reactie van de hoofdgeulbodem op de nevengeulen maximaal. Ter plekke van de rivieras en aan de overzijde (rechteroever) is daarentegen in de peilingen nauwelijks een effect te bespeuren. Er is dus sprake van een grote ruimtelijke variatie, zodat het profiel-gemiddelde effect de maximale sedimentatie met een factor 2 kan onderschatten.

aanbevelingen

Het lokale effect van nevengeulen is in bodempeilingen slechts te bepalen als de invloed van andere processen uit de data is verwijderd. Dit kan echter alleen als *lokale* monitoringsdata goed kunnen worden afgestemd op een *grootschaliger* morfologische context.

1) Voor de toekomst vergt dit een up-to date database met bodempeilingen van de Rijntakken die een voldoende groot tijds- en ruimtedomein beslaat en is opgebouwd met consistente/vergelijkbare waarnemingstechnieken en databewerkingsprocedures.
2) Het in deze studie gebruikte format van km-gemiddelde waarden in lengterichting en drie vakken (33% van de normaalbreedte) parallel aan de

rivieras lijkt gezien de beschikbare informatie voldoende inzicht te bieden in ruimtelijke en temporele variaties van het effect.

Hoofdstuk 1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Door Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland (DON) is aan het RIZA opdracht verleend om in een drietal uiterwaarden langs de Waal de nevengeulen integraal te monitoren (contactpersoon opdrachtgevende dienst is ing. F.R. Kok (DON-ANSP), contactpersoon opdrachtnemende dienst is ir L.H.Jans (RIZA-IHL)). Deze monitoring is bedoeld om effecten te bepalen en te evalueren en proceskennis te vergroten omtrent ecologisch herstel, hydromorfologische ontwikkelingen en beheer. De nevengeulen die inmiddels zijn aangelegd bevinden zich allen in de Gamerensche Waard. Inmiddels zijn ook een groot aantal peilingen van het zomerbed uitgevoerd (Sorber et al. (1999); Schropp, et al. (2002)). Het verwachte effect van nevengeulen, een bodemstijging tussen het onttrekkings- en samenvloeiingspunt werd echter in een eerste evaluatie van deze peilingen niet waargenomen. Omdat bij het ontwerp van nevengeulen de invloed op het zomerbed een grote rol speelt, heeft deze afwijking tussen waarneming en verwachting in opdracht van DON geleid tot dit nader onderzoek.

1.2 Onderzoeksvraag en werkwijze

De onderzoeksvraag die in dit werkdocument centraal staat is;

> *Welk effect hebben de nevengeulen in de Gamerensche Waard op de ontwikkeling van het zomerbed.*

In aanvulling op de eerste verkenningen zal in deze studie ook gekeken worden naar de ruimtelijke verdeling van effecten.

Om een effect van nevengeulen op het zomerbed te kunnen bepalen zou de invloed van externe ontwikkelingen (op lange en kortere termijn) moeten worden gescheiden van de veranderingen ten gevolge van de aanleg van nevengeulen. Daarom worden de volgende stappen gezet.

Analyse bodemontwikkelingen

1) Inventariseer alle bodemontwikkelingen en ingrepen die relevant zijn voor het rivierstuk met de nevengeulen, en in de periode vanaf de aanleg
2) Interpreteer de relevante bodemontwikkelingen en beheer zodanig dat een representatieve referentie bodemontwikkeling geconstrueerd kan worden
3) Bepaal de trends en ruimtelijke structuren in de domein-gemiddelde bodemliggingen met behulp van multibeam data (van de periode tijdens en na aanleg van de nevengeulen)
4) Bepaal het effect van de nevengeulen door vergelijking van de waargenomen bodem met de representatieve referentie bodemontwikkeling

Hiermee kan een indruk worden verkregen van lokale bodemveranderingen die niet aan nevengeulen gerelateerd zijn, maar aan bovenstroomse ontwikkelingen of lokale hoogwatereffecten. Door ook ruimtelijke structuren te analyseren kan een indruk worden gekregen van verschillen in bodemontwikkeling van binnenbocht en buitenbocht.

Analyse voorspelmethode

5) Inventariseer de voor het voorspellen van bodemveranderingen relevante processen
6) Combineer de relevante processen tot een beschrijving van het relevante hydraulische en morfodynamische gedrag
7) Controleer de beschrijving door vergelijking van grootte-orden en tijdschalen met de waarnemingen
8) Controleer de in de eerste verkenningen gebruikte voorspellingen van het numerieke model

Om het gebruikte voorspelgereedschap te verifiëren wordt met een gedragsanalyse de invloed van de belangrijkste processen beschreven. Dit leidt niet alleen tot alternatieve ontwerpregels, maar ook tot een efficiënte controle van het numeriek model. Tenslotte kan de oorspronkelijke verwachting worden gecontroleerd door vergelijking van de berekende effecten met het verschil tussen waargenomen bodem en referentie bodemontwikkeling.

De GIS analyses van de bodempeilingen zijn uitgevoerd door J.A.F. van Essen (RIZA-WSR) en ir M.H.I. Schropp (RIZA-WSR) heeft zorg gedragen voor de kwaliteit van dit werkdocument .

Hoofdstuk 2 Inventarisatie bodemontwikkeling

2.1 Achtergrond

De invloed van nevengeulen op de bodemligging van het zomerbed kan slechts worden bepaald door vergelijking van waargenomen bodemliggingen met een referentieniveau. Om waarnemingen van bodemliggingen correct te interpreteren moet de context van temporele en ruimtelijke trends in bodemligging op langere termijn bekend zijn. In dit hoofdstuk worden daarom de relevante morfologische ontwikkelingen geïnventariseerd. Veronderstel dat de bodemligging van het zomerbed in het rivierstuk ter hoogte van de Gamerensche Waarden kan worden beïnvloed door

I) grootschalige bovenstroomse veranderingen in
   a) afvoerregime en sedimentaanbod
   b) het systeem (normalisatie) en het beheer (baggeren)
II) grootschalige benedenstroomse veranderingen
   a) waterstandsregime (gemiddelde en getijdeslag)
III) lokale veranderingen ter plekke van de Gamerensche Waarden
   a) hydraulische condities tijdens gemiddelde afvoer
   b) hydraulische condities tijdens hoogwater
   c) baggeren en of storten
   d) sedimenteigenschappen

Op basis van deze categorieën worden voor het beschouwde rivierstuk de relevante bodemveranderingen geïnventariseerd. Nb, in het volgende worden lengteschalen gerelateerd aan de 4 km lengte van het beschouwde rivierstuk met nevengeulen.

2.2 Boven- en benedenstroomse veranderingen

Relevante veranderingen boven- en benedenstrooms van het rivierstuk van de Gamerensche Waarden kunnen zijn;

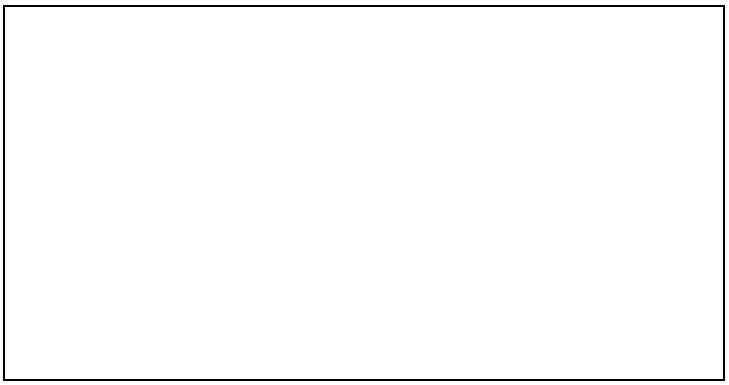
a) grootschalige regulatie en normalisatie
b) verandering in Waalafvoer- en sedimentaanbod aan de Waal
c) verandering in getijdeinvloed benedenstrooms van Tiel door afsluiting van het Haringvliet
d) kleinschalige ingrepen (vervolg normalisatie Beneden-Waal, aanleg vaste lagen)

De invloed van regulatie en normalisatie in de 19de en 20ste eeuw op de bodemligging van de Waal is uitermate groot; door de rivier te verkorten (bochtafsnijdingen) en te versmallen (normalisatie) is de evenwichtswaarde van de bodemhelling afgenomen. Daarbij geldt dat in de periode 1920-2000 vermoedelijk sprake is geweest van een (zeer) langzame verschuiving van afvoer van de Waal naar het Pannerdensch Kanaal (Schropp, 2000). Met een bijbehorende afname in sedimentaanbod aan de Waal kan ook dit leiden tot een kleinere bodemhelling. De verwachte afname van de bodemhelling draagt bij

aan bodemdaling in met name Boven- en Midden-Waal, en een tijdelijke sedimentatie in de Beneden-Waal tijdens de passage van bovenstroomse erosieprodukten. Dit is in Fig.2.1 geïllustreerd. In dit sedimentatiegebied van de Beneden- Waal is de baggerinspanning echter zo groot dat bodemstijgingen grotendeels zijn onderdrukt.

Het is niet waarschijnlijk dat deze bodem*veranderingen* een grote invloed hebben op de bodemligging ter plekke van de Gamerensche Waarden, in de periode tijdens en na aanleg van de nevengeulen. Immers, de aanzienlijke baggerinspanningen in het verleden hebben het morfologisch aanpassingsproces behoorlijk versneld zodat de theoretisch verwachte normalisatie-effecten reeds lang ontwikkeld lijken te zijn.

Op de benedenstroomse rand speelt sinds de afsluiting van het Haringvliet (2 November 1970) een afname van het getijde op de rivier met ongeveer een factor 6. Een tijverschil op een rivier leidt tot een versterking van de transportcapaciteit ; een afname van dit tijverschil leidt dan tot sedimentatie in het gebied met getijdeinvloed. Benedenstrooms van Tiel kan er dus, waarschijnlijk door afsluiting van het Haringvliet, sprake zijn van sedimentatie door een afname in sedimenttransportcapaciteit. In Sieben (2001) wordt geschat dat door deze afname in tijverschil *ter plekke van Herwijnen* de sedimenttransport-capaciteit met 20% afneemt (grofweg ongeveer 0,2 m bodemstijging), maar ter plekke van de Gamerensche Waard is dit effect kleiner.



Figuur 2.1 Principe grootschalige verandering Waalbodem (zonder baggeren).

Recentere ingrepen bovenstrooms van het projectgebied betreffen:

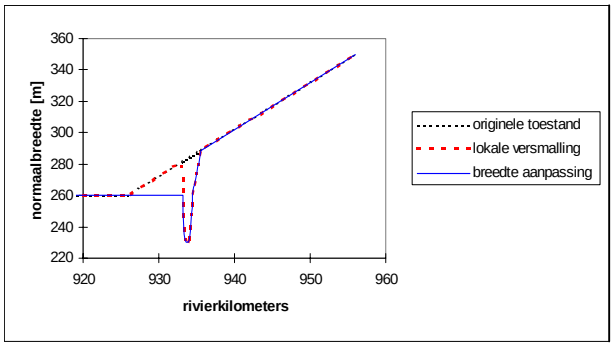
- 1972/73 lokale versmalling ter plekke van de brug bij Zaltbommel (km 932.8 - 935.5)
- 1980-1990 verdere normalisatie Beneden Waal; versmalling tussen km-926 en 932
- 1988 oplevering vaste laag Nijmegen
- 1996 oplevering bodemkribben Erlekom
- 1998 oplevering vaste laag St. Andries
- 1999 grootschalige baggerproef t.b.v. het project "Waal hoofdtransportas".

Het te verwachten effect hiervan wordt kort toegelicht.

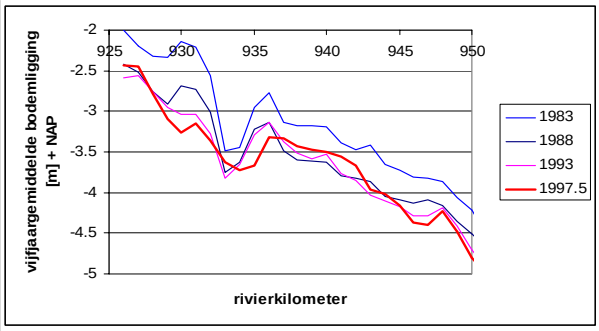
<u>lokale normalisatie</u>

De normalisatie van de Beneden-Waal ligt dichtbij het interessegebied en is in twee stappen uitgevoerd. Om de bodemligging van de Waal ter plekke van Zaltbommel te verbeteren, is begin november 1972 gestart met het aanbrengen van een versmalling bij de toenmalige bruggen, tussen km-raai 932,875 en 935,500 (rode onderbroken lijn in Fig.2.2-a). De grootte-orde van de bodemverandering die hierdoor wordt opgewekt bedraagt 0,8 m. Omdat deze lokale verandering

volgens de bodempeilingen binnen twee jaar was ontwikkeld, is voor de periode vanaf 1980 (acht jaar na de ingreep) deze eerste stap in de lokale normalisatie niet van belang.

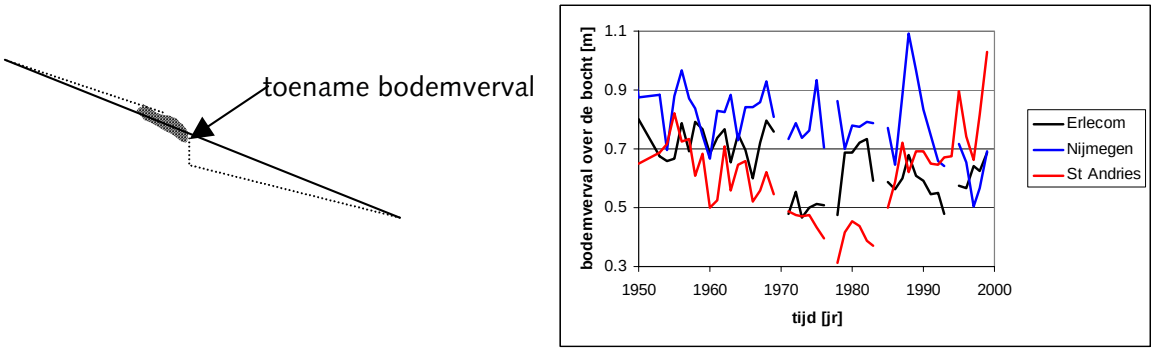


Figuur 2.2-a Overzicht aanpassingen normaalbreedte.



Figuur 2.2-b Langsprofiel gemiddeld over vijf jaar.

De tweede stap in de normalisatie werd gezet in de jaren tachtig en betreft het stroomlijnen van enkele binnenbochten (km-raai 920 en 926) en het verkleinen van de normaalbreedte tussen de km-raaien 926 tot aan de versmalling bij de brug van km-raai 932 (blauwe getrokken lijn in Fig.2.2-a). De aanleg en verbetering van kribben ging gepaard met het baggeren van sediment uit de binnenbocht. Deze rivierverbetering leidde tot een verdieping over het traject van de versmalling, en een afname van de lokale versmalling bij de brug (Fig.2.2-b)



Figuur 2.3 Bodemverval tussen traject 4 km boven- en 4 km benedenstrooms van bocht.

<u>lokale bodemfixatie</u>

Het theoretisch verwachte effect van vaste lagen (en in mindere mate bodemkribben) is behalve een verandering in het lokale dwarsprofiel ook een lokale reductie van het sedimenttransport. Om te bekijken welke invloed dit zou kunnen hebben op de sedimenthuishouding van de Waal is in Fig.2.3 het gemiddelde bodemverval over de Waalbochten bij Erlecom, Nijmegen en St.Andries weergeven. Na aanleg van de vaste laag bij Nijmegen is inderdaad gedurende een aantal jaren sprake van een (50%) groter bodemverval, dit effect lijkt echter slechts tijdelijk te zijn;vanaf 1994 is de oorspronkelijke waarde weer bereikt. Hetzelfde lijkt te gebeuren met het bodemverval van de Waalbocht bij Erlecom, de periode is echter te kort om trends uit te halen. De toename van het bodemverval bij St. Andries heeft waarschijnlijk meer te maken met de versmalling direct benedenstrooms van de bocht in de jaren 80-90.

Geconcludeerd wordt dat de vaste laag bij St.Andries het sedimentaanbod aan het benedenstroomse rivierstuk van de Gamerensche Waard vermoedelijk niet

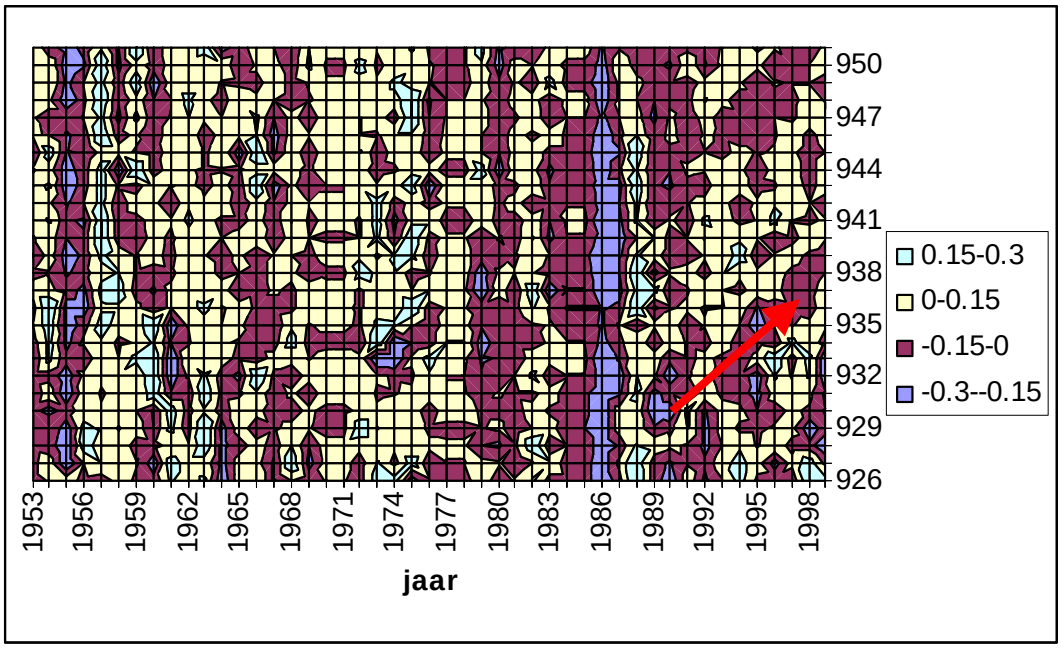
vermindert. Omdat de vaste laag bij St.Andries circa 10 km bovenstrooms van de Gamerensche Waard ligt, geldt bovendien dat het effect van de aanleg pas na circa 8 jaar (dus in 2005) in het interessegebied (km 937-940) merkbaar zal zijn. Om dezelfde reden kan worden gesteld dat ook de invloed van de grootschalige baggerproef voor het beschouwde rivierstuk (nog) niet relevant is.

2.3 Lange termijn bodemontwikkelingen

Om de lange termijn ontwikkelingen in de bodemligging te kunnen beschouwen is in Fig.2.4 voor een aantal rivierkilometers de jaarlijkse verandering in bodemligging (dus m/jaar) weergegeven. Fig.2.4 is gebaseerd op km-gemiddelde waarden van de jaarlijkse dwarspeiling volgens Ten Brinke (2001). Voor de jaren 1970; 1977; 1984 ontbreken peilingen. Hierdoor zijn voor de jaren 1970 en 1971; 1977 en 1978; 1984 en 1985 geen bodemveranderingen te bepalen.

De meest opvallende structuren in de bodemveranderingen van Fig.2.4 zijn

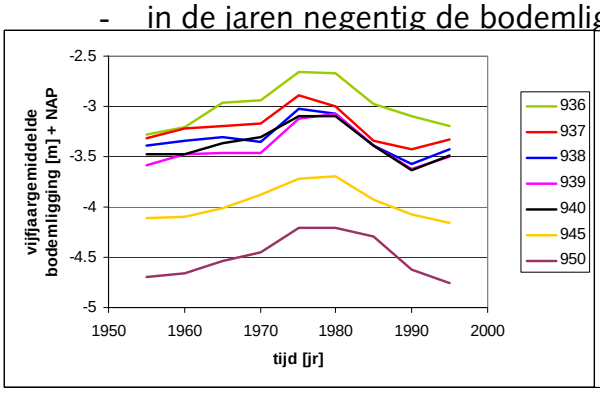
- een uniforme, en relatief grote bodemstijging in het begin van de jaren 70
- een uniforme bodemstijging in het begin van de jaren 80, en en relatief grote bodemdaling in de jaren tachtig
- een *niet-uniform* en *afwisselend* verloop van bodemveranderingen vanaf 1990. In deze periode kan een alluviaal gedrag worden herkend van bodemveranderingen die zich stroomafwaarts verplaatsen. Ter indicatie hiervan is in Fig.2.4 een rode pijl getekend waarlangs de bodemveranderingen zich lijken te verplaatsen.



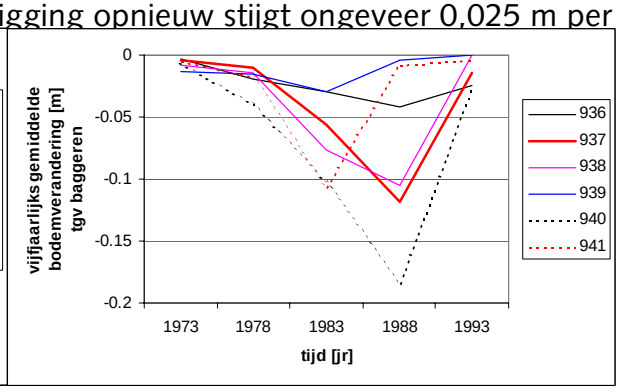
Figuur 2.4 Jaarlijkse km-gemiddelde bodemveranderingen op lange termijn

In Fig.2.5-a is op basis van een gemiddelde bodemligging over een periode van vijf jaar het tijdsverloop op een aantal lokaties ter plekke van de Gamerensche Waard weergegeven. In Fig.2.5-a valt op dat

- er sprake is van een lokaal langzame stijging in bodemligging (circa 0,025 m per jaar) in de periode '60-'80
- in de jaren tachtig de bodemligging relatief snel daalt met circa 0,050 m per jaar
- in de jaren negentig de bodemligging opnieuw stijgt ongeveer 0,025 m per



Figuur 2.5-a Gemiddeld tijdsverloop in km-gemiddelde bodemligging.



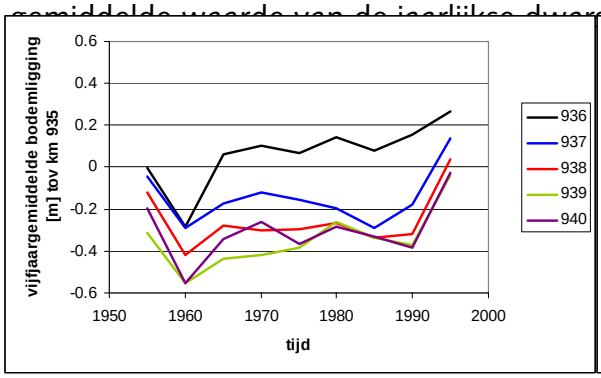
Figuur 2.5-b Gemiddeld verloop in bagger-inspanning (volumieke onttrekking per $3x10^5$ m^2).

Tussen 1955 en 1980 is sprake van een sedimentatie trend, welke in Sectie 2.2 verklaart wordt met de passage van erosieproducten uit Boven- en Midden-Waal en sedimentatie door afname van getij in de Beneden-Waal. Omdat de gemiddelde bodemveranderingen *voor* de jaren negentig grofweg gelijktijdig over grote lengte plaatsvinden (Fig.2.4) lijkt de invloed van baggeren groot. Om dit te onderzoeken is in Fig.2.5-b het temporeel verloop getekend van bodemveranderingen ten gevolge van

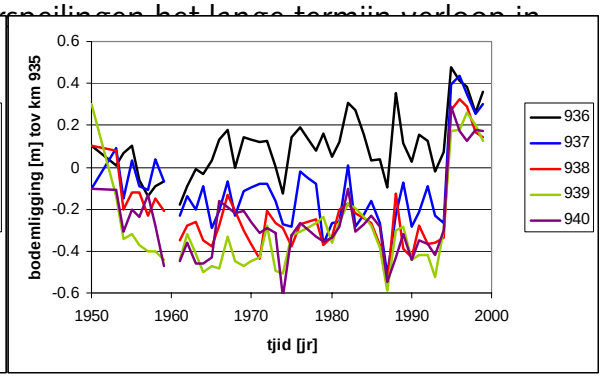
baggerwerk. Hieruit blijkt dat in de jaren tachtig door bagger relatief veel sediment is onttrokken, met de opvallend uniforme en relatief snelle bodemdaling van Fig.2.5-a in die periode tot gevolg.

2.4 Kleinschalige bodemveranderingen

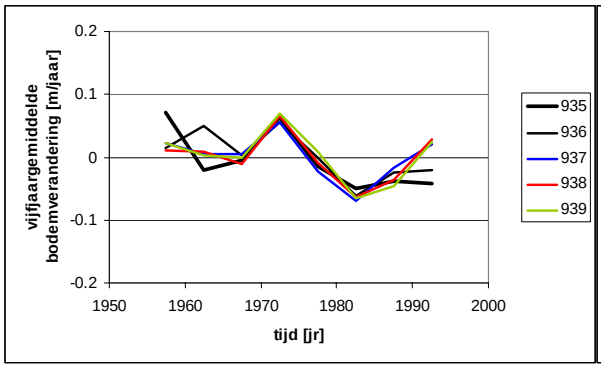
Behalve de grootschalige bodemveranderingen kan worden gekeken naar lokale trends (ruimtelijk en temporeel) die bijvoorbeeld door ruimtelijke gradiënten in hydraulische condities kunnen worden gegeneerd. In Fig.2.6 is op basis van de km-gemiddelde waarde van de jaarlijkse dwarspeilingen het lange termijn verloop in



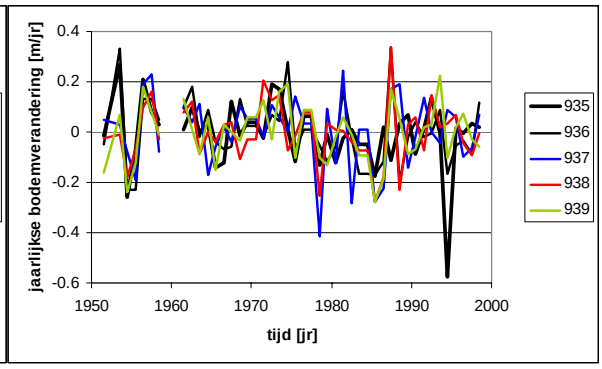
Figuur 2.6-a Vijf-jaargemiddelde verloop in lokale bodemligging.



Figuur 2.6-b Jaarlijks verloop in lokale bodemligging.



Figuur 2.6-c Vijfjaargemiddelde lokale bodemveranderingen.



Figuur 2.6-d Jaarlijkse lokale bodemveranderingen.

In het verloop van de lokale bodemgradiënt (Fig.2.6-a en –b) valt op

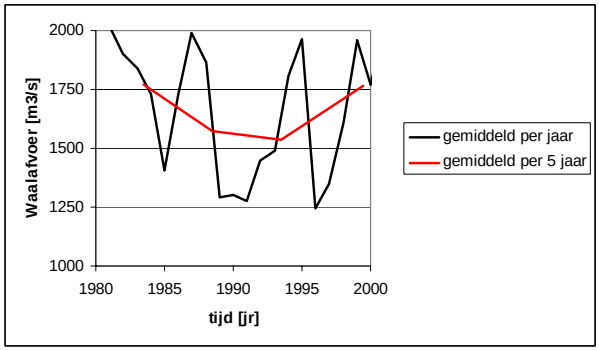
- een permanente lokale verondieping (van circa 0,2 m) tussen km 935 en 936

- een plotselinge, integrale verondieping benedenstrooms van km 935 halverwege de jaren negentig
- een variatie van circa 0,1 m rondom de vijfjaargemiddelde bodemligging

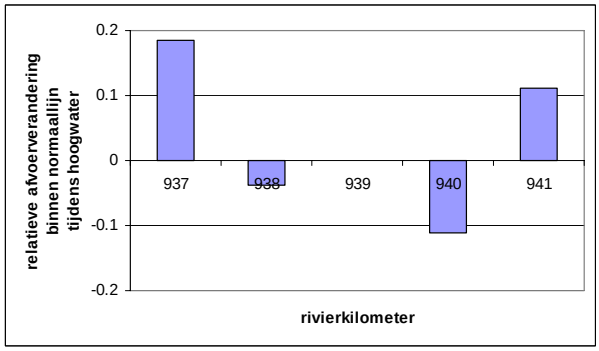
In het verloop van de bodemveranderingen (Fig.2.6-c en –d) valt op

- in de jaren een trendbreuk door sedimentatie bij km 937; 938 en 939, en een afname in erosie bij km 936.
- een variatie van ongeveer 0,1 m per jaar rondom de vijfjaar-gemiddelde bodemveranderingen

Over de gemiddelde structuren in lokale bodemligging kan het volgende worden opgemerkt. Bovenstrooms en ter plekke van de Gamerensche Waarden is sprake van variërende uiterwaarden en niet-uniforme belijningseigenschappen. Bij km raai 936 zijn de kribben op de linkeroever relatief kort en is op de rechteroever een gestrekte belijning met aangetakte plas (Kerkenwaard). Ter plekke van de Gamerensche Waard is zowel op de linker- en rechteroever sprake van een bekribde oever. Deze overgang van gestrekte oeverbelijning/kleine kribvakken naar (diepere) kribben kan leiden tot een lokale verondieping tussen km 936 en 937. Omdat de normaalbreedte ter plekke van de Gamerensche Waard constant is wordt verondersteld dat het effect van de variatie in oeverbelijning niet groot is. Echter, behalve de hydraulische conditie bij gemiddelde afvoer is ook de situatie tijdens hoogwater van belang. In Fig.2.6-a is de gemiddelde Waalafvoer weergegeven in de afgelopen 20 jaar, met een duidelijk afwisselend verloop van “nattere” en “drogere” jaren. Deze “natte” en “droge” perioden kunnen de lokale bodemligging beïnvloeden als sprake is van een lokaal variërende afvoerverdeling tussen winterbed en zomerbed tijdens hoogwater (Sieben, 2002).

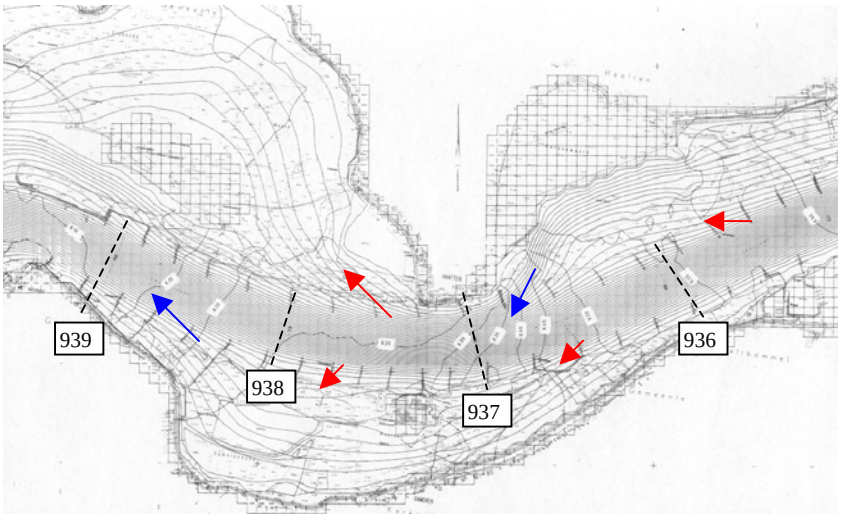


Figuur 2.6-a Verloop in gemiddelde Waalafvoer in de afgelopen decennia.



Figuur 2.6-b Ruimtelijke variatie in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater.

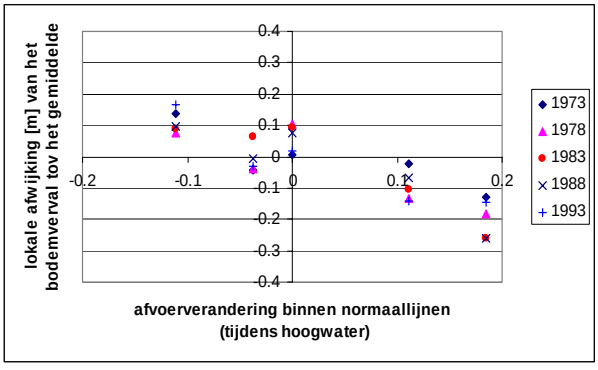
In Fig.2.6-b is de variatie in hoofdgeulafvoer voor het beschouwde rivierstuk *kwalitatief* weergegeven, op basis van een WAQUA berekening met maatgevende afvoer. Omdat deze afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed niet representatief behoeft te zijn voor lagere afvoeren is in Fig.2.6-b de hoofdgeulafvoer ter plekke van km 936 als referentie gebruikt. Hieruit blijkt dat de hoofdgeulafvoer ter plekke van km 937 lokaal toeneemt door de invloed van de schaardijk bij Haaften, en dat ter plekke van km 938 en 940 afvoer weer richting het winterbed stroomt. Dit is in Fig.2.6-c geschetst.



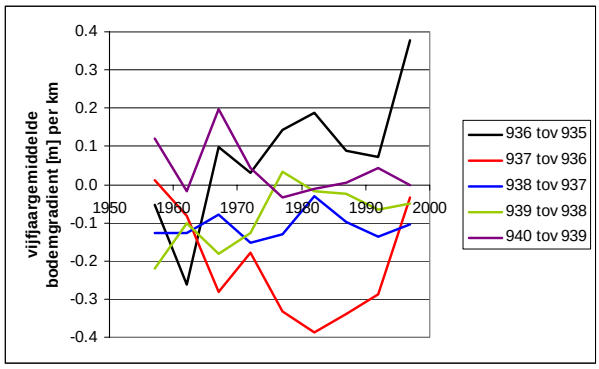
Figuur 2.6-c Berekende uitwisseling tussen zomer en winterbed.

Deze uitwisseling tussen zomer- en winterbed (Fig.2.6-c) leidt tot gradiënten in stroomsnelheid tijdens hoogwater; versnelling tussen km 937 en 936 (door de schaardijk bij Haaften) en tussen km 939 en 938 (door de schaardijk bij Nieuwaal) en vertraging tussen 936 en 935 (door de haven in de Kerkenwaard) en tussen 938 en 937 (door instroming naar Crobsche Waard en door de plas in de Gamerensche Waard). Tussen km 937 en 936 is wellicht een twee-dimensionaal effect te verwachten dat tegengesteld is aan de bochtstroming bij gemiddelde afvoer; in de binnenbocht is door uitwisseling sprake van versnelling, in de buitenbocht leidt de uitwisseling tot een relatieve afname van stroomsnelheden.

De snelheidsgradiënt in de hoofdgeul genereert vervolgens erosie en sedimentatie tijdens een hoogwater. Omdat de bodem tijdens lagere afvoeren niet geheel hiervan herstelt leidt dit uiteindelijk ook tot een jaargemiddelde lokale diepte variatie. Om de grootte hiervan te bepalen is in Fig.2.7-a de lokale bodemgradiënt voor dit rivierstuk uitgezet tegen de bijbehorende relatieve afvoerverandering in de hoofdgeul. Er lijkt inderdaad een eenduidige relatie te zijn tussen de uitwisseling tussen zomer- en winterbed en de gemiddelde ruimtelijke bodemvariatie. Het verloop van deze bodemgradiënt (gemiddeld over vijf jaar) is weergegeven in Fig.2.7-b. Ten opzichte van een gemiddelde bodemhelling van –0,1 m per km blijkt er uit Fig.2.7-b een lokale verondieping van circa 0,2 m tussen km 935 en 936; een lokale verdieping van circa 0,2 m tussen km 936 en 937; een kleine verondieping van circa 0,05 m tussen km 938 en 939 en een verondieping van circa 0,1 m tussen km 939 en 940.



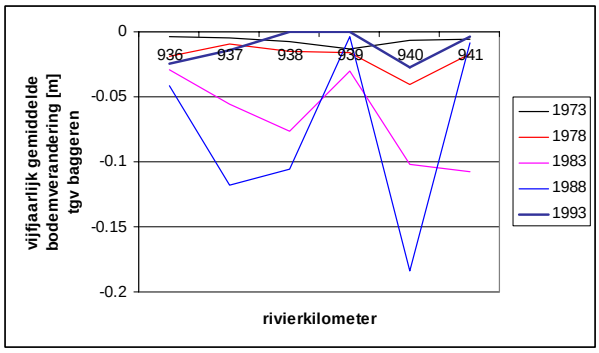
Figuur 2.7-a Bodemverval op basis van variatie in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater



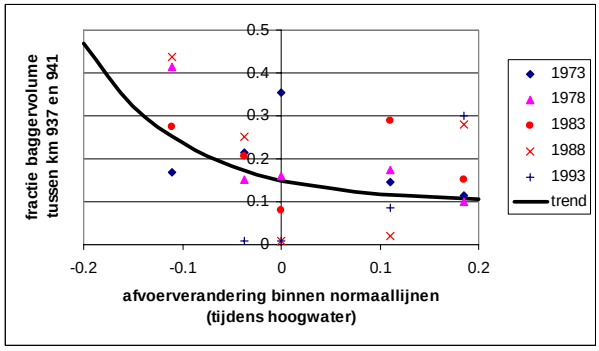
Figuur 2.7-b Bodemverval op basis van gemiddelde bodemligging.

Om de invloed van lokaal baggeren te onderzoeken wordt opnieuw gebruik gemaakt van data volgens Ten Brinke (2000). In Fig.2.8-a is het gemiddeld ruimtelijk verloop in baggerinspanning weergegeven, vertaald in een equivalente gemiddelde bodemverandering. Het valt op dat ter plekke van km 939

nauwelijks is gebaggerd en dat een maximale onttrekking plaats vindt bij km 940 en tussen 937 en 938. Om te onderzoeken of er een verband is met hoogwatereffecten wordt in Fig.2.8-b de baggerinspanning gerelateerd met de afvoervariatie binnen de normaallijnen. De trend suggereert dat in het gehele rivierstuk werd gebaggerd, echter het meest intensief op lokaties waar de hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater afneemt. Geconcludeerd wordt dat door baggeren de lokale hoogwatereffecten ter plekke van de Gamerensche Waard worden onderdrukt.



Figuur 2.8-a Ruimtelijke variatie in baggerinspanning



Figuur 2.8-b Relatie baggerinspanning en variatie in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater.

2.5 Conclusies

De inventarisatie van grootschalige en kleinschalige bodemveranderingen heeft geleid tot de volgende opmerkingen:

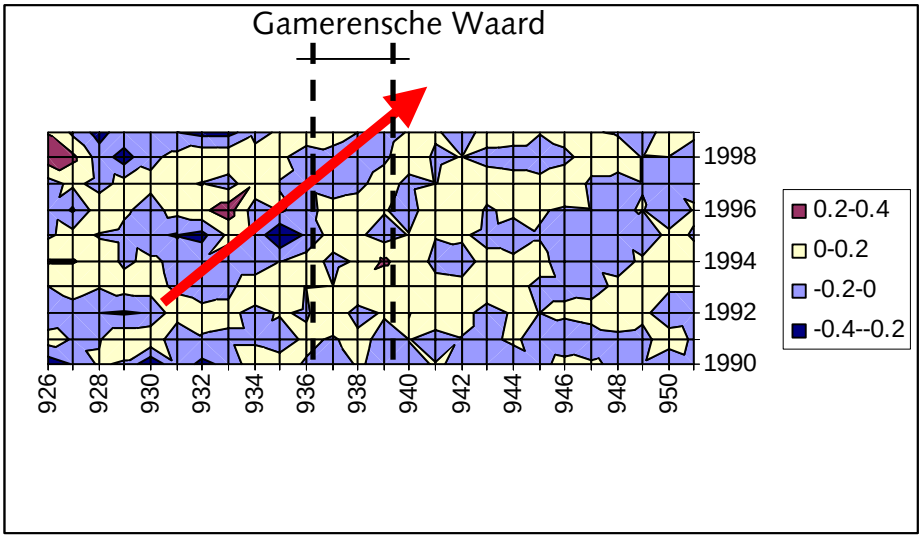
1) de invloed van grootschalige ingrepen op de (recente en lokale) bodemveranderingen ter plekke van de Gamerensche Waard wordt voor deze studie niet relevant geacht
2) vóór 1990 lijken bodemveranderingen vanwege het integrale karakter door baggerwerk gedomineerd te zijn (Fig.2.4).
3) vanaf 1990 kan in de bodemveranderingen van het beschouwde rivierstuk van de Gamerensche Waarden een alluviaal gedrag worden herkend waarin bodemveranderingen zich met constante snelheid stroomafwaarts verplaatsen (rode pijl als indicatie in Fig.2.4)
4) in het beschouwde rivierstuk van de Gamerensche Waard zijn hoogwatereffecten in het zomerbed aanwezig die leiden tot
    - een lokale verondieping van circa 0,2 m tussen km 935 en 936
    - een lokale verdieping van circa 0,2 m tussen km 937 en 936
    - een lokale verondieping van circa 0,15 m tussen km 938 en 940
5) het rivierbeheer in de afgelopen periode was er in dit rivierstuk tussen km 935 en 940
   waarschijnlijk op gericht om de lokale verondieping na hoogwater door baggeren te
   verminderen
6) de lokale bodemvariatie vertoont benedenstrooms van km 935 een trendbreuk in de
   tweede helft van de jaren negentig (afname erosie of zelfs sedimentatie)

De derde opmerking is aanleiding voor de analyse van het volgende hoofdstuk, waarin op basis van bovenstroomse bodemveranderingen een referentiebodemligging wordt gereconstrueerd. De vierde opmerking wordt gebruikt om de waargenomen ruimtelijke variatie in bodemligging tijdens en na aanleg van de nevengeulen te interpreteren.

Hoofdstuk 3 Schatten van referentiebodemontwikkeling

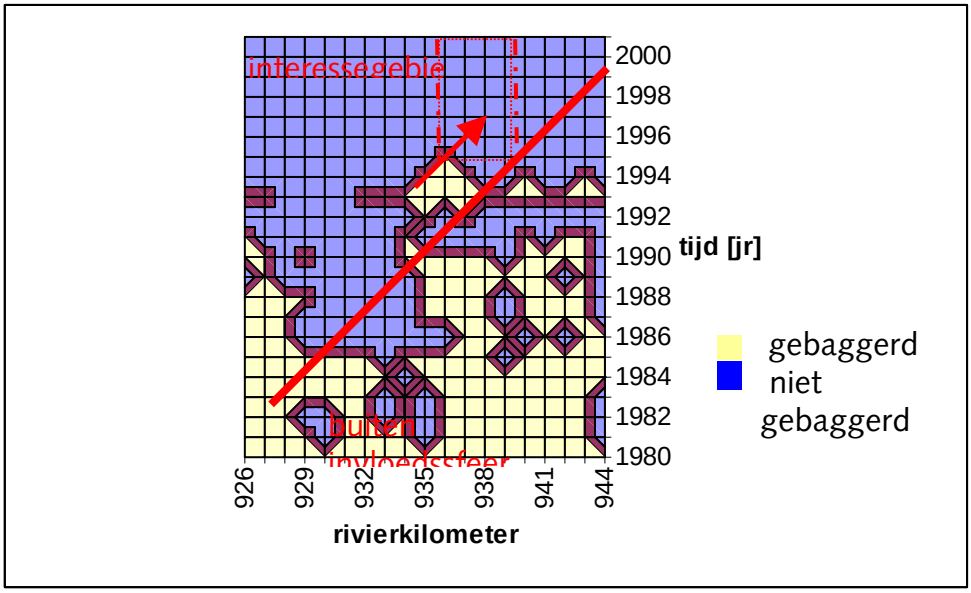
3.1 Inleiding

Om de invloed van de nevengeulen te bepalen moet een referentie bodemligging worden gereconstrueerd welke representatief is voor een bodemligging zonder aanleg van de nevengeulen. Dit is een hypothetische bodemligging. Uit de inventarisatie in het vorige hoofdstuk blijkt dat sinds de jaren negentig, de km-gemiddelde bodemveranderingen in het beschouwde rivierstuk een eenduidig patroon laten zien door als "bodemgolven" in benedenstroomse richting verplaatsen (Fig.2.4). Uit Fig.3.1 (een detail uit Fig.2.4) is te concluderen dat de verplaatsingssnelheid van een bodemverandering in deze periode ongeveer 1 km/jaar bedraagt.



Figuur 3.1 Voorplanting jaarlijkse bodemveranderingen.

In de tweede helft van de jaren negentig, dus tijdens en na de aanleg van de nevengeulen passeert een tijdelijke bodemdaling het interessegebied tussen km 936 en 940. Deze bodemgolf kan in Fig.3.1 worden getraceerd tot grofweg km 931-933 in 1991, in Fig.2.4 lijkt de golf tot bij km 924 aan het eind van de jaren tachtig herkenbaar.Ter plekke van km 935 is tussen 1994 en 1995 grote lokale bodemdaling geregistreerd. Om de oorzaak van deze bodemgolf te achterhalen is opnieuw gebruik gemaakt van de geregistreerde baggeractiviteit volgens Ten Brinke (2000). De weergave hiervan in Fig.3.2 bevestigt dat aan het einde van de jaren 80, tussen km 926 en 929 is gebaggerd. Vanaf 1994 tot 1996 is met name bij km 935 lokaal gebaggerd, recentere gegevens zijn niet beschikbaar.

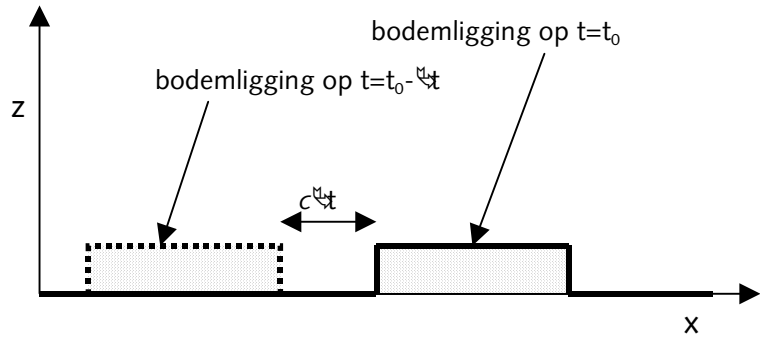


Figuur 3.2 Baggeractiviteit in invloedsgebied.

Geconcludeerd wordt dat in de tweede helft van de jaren negentig, tijdens de monitoringscampagne van de nevengeulen bij Gameren, een tijdelijke bodemdaling "passeerde" tussen km 936 en 940. Deze tijdelijke bodemdaling is gegenereerd door bovenstroomse baggeractiviteiten in de eerste helft van de jaren negentig.

3.2 Simple wave model

Om het effect van de nevengeulen afzonderlijk te bepalen is het nodig om de bijdrage van de tijdelijke bodemgolf aan de waargenomen bodemligging te onderdrukken. Op basis van het golfgedrag in Fig.3.1 wordt daarom geprobeerd om de peilingen met een theoretisch model te transformeren tot een representatieve referentieontwikkeling van de bodem.



Figuur 3.3 Golfvoortplanting zonder demping volgens Verg.3.1

Het golfgedrag van bodemveranderingen in Fig.3.1 komt overeen met het theoretisch model voor bodemveranderingen over kleine afstanden (zonder bijdragen van wrijving aan de waterbeweging), wat in Fig.3.3 schematisch is weergegeven. De Vries (1994) leidt hier voor af

$$\frac{\partial z}{\partial t} + c\frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad ; \quad c = n\frac{s}{a}$$

(3.1)

met z de bodemligging ([m] t.o.v. een referentieniveau); *t* en *x* tijd- en plaatscoördinatoren in [s] en [m], *c* een voortplantingssnelheid [m/s] van bodemveranderingen, *a* de waterdiepte [m], *s* het sedimenttransport [m^2/s] en *n* de niet-lineariteit van het sedimenttransport (uit een machtswet-benadering).

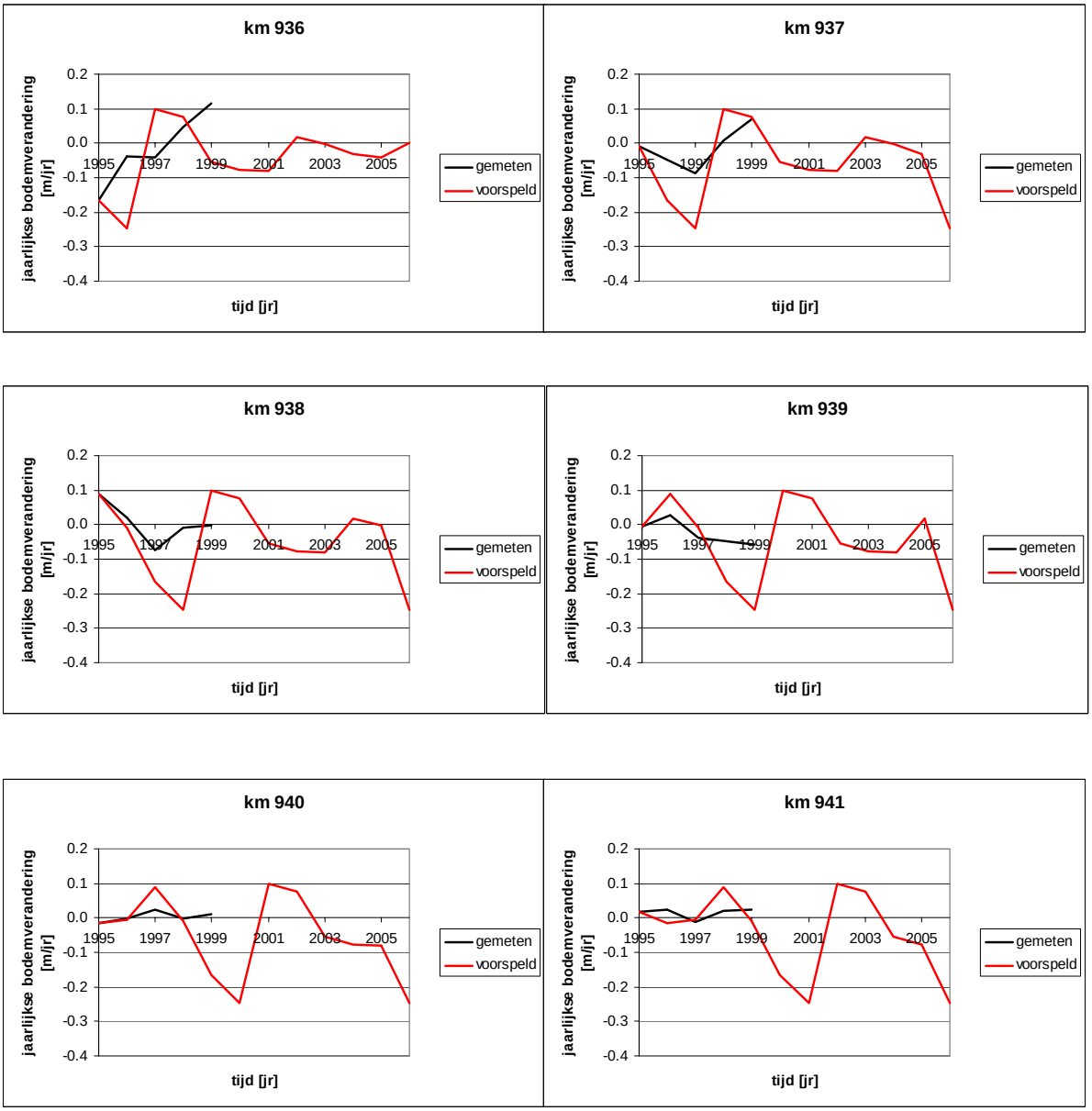
De "simple wave"-vergelijking Verg.3.1 voorspelt de verplaatsing van een enkelvoudige, niet-gedempte golf in de bodemligging. De toepassing is dan dat de bodemverandering op een lokatie $x=x_0$ op tijdstip $t=t_0+\otimes t$ gelijk is aan de bodemverandering op een bovenstroomse lokatie $x=x_0-c\otimes t$ op tijdstip $t=t_0$

$$\frac{\partial z(x_0; t_0+\Delta t)}{\partial t} = \frac{\partial z(x_0 - c\Delta t; t_0)}{\partial t} \text{ met } c \supset 1 \text{ km/jaar}$$

(3.2)

Voorwaarde is wel dat er in de periode $\otimes t$ geen significante veranderingen in het rivierstuk tussen x_0 en x_0-$c\otimes t$ plaatsvinden. Volgens Fig.3.1 is er bovenstrooms van km 935 vanaf 1990 inderdaad sprake van een uniform patroon in de jaarlijkse bodemveranderingen. Met Verg.3.2 en Fig.3.1 kan dan worden voorspeld dat ter plekke van km 937 in 2000 en 2001 sprake is van lokale sedimentatie, en daarna gedurende een periode van acht jaar lokale bodemdaling. Dit is per km in Fig.3.4 gedaan, op basis van de gepeilde bodemveranderingen in 1995. Aangenomen wordt dat de invloed van baggeren met de gepeilde bodemveranderingen wordt beschouwd. De bodemontwikkeling van Fig.3.4 is benaderd met

$$\frac{\partial z(x;1995)}{\partial t} = \frac{z(x;1996) - z(x;1994)}{2} \qquad \textbf{(3.3)}$$



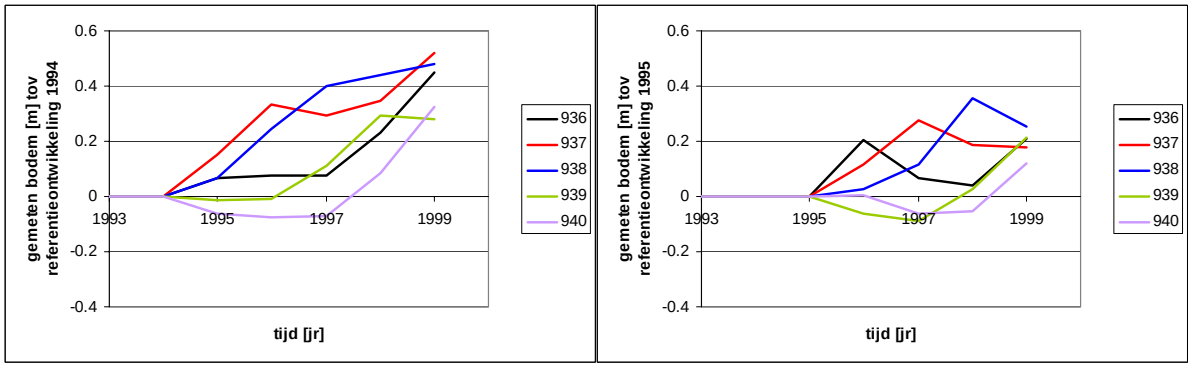
Figuur 3.4 Voorspelling lokale bodemontwikkeling met 1995 als referentie.

Om de voorspelde bodemligging te construeren is aangenomen dat de invloed van baggeren al in de bijbehorende jaarlijkse peiling wordt beschouwd. Bij de meeste km-raaien wordt in de periode 1995-2000 een trend van bodemdaling gevolg door bodemstijging verwacht. Volgens Fig.2.4 is deze bodemdaling te traceren tot een bodemdaling tussen km 924 en 930 aan het einde van de jaren 80.

Om een indruk te krijgen van onzekerheden in de voorspelde bodemverandering zijn in Fig.3.5-a twee referentiejaren gebruikt; 1994 en 1995. De onzekerheid in de voorspelde bodemveranderingen kan door het niet-synchroon lopen van jaarlijkse peiling en jaarlijks baggerwerk circa 0,1 m/jaar zijn. Bovendien introduceert de gekozen discretizatie met Verg.3.3 een onzekerheid in periode van circa 1 jaar. Dit kan ertoe leiden dat bijvoorbeeld in 1995, dus vóór aanleg van de geulen in de Gamerensche Waard, al een bodemverandering ten opzichte van de referentieontwikkeling is waar te nemen.

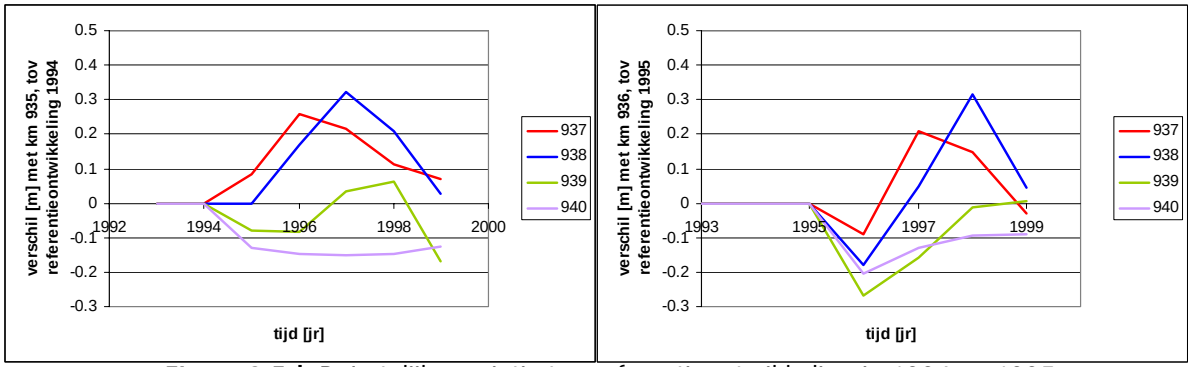
De voorspelling (de rode lijn in Fig.3.4) is de reconstructie van een bodemligging exclusief de invloed van nevengeulen bij Gameren. Dit is een *hypothetische* bodemligging die in deze analyse als referentie gebruikt wordt.Verondersteld wordt dat het verschil tussen de *gemeten* trend (blauwe lijn in Fig.3.4) en de *hypothetische* referentieontwikkeling van de bodem (rode lijn) te wijten is aan de invloed van de nevengeulen in de Gamerensche Waard. Door integratie van dit verschil (zwarte minus rode lijn in Fig.3.4) kan het effect van de geulen in [m] worden bepaald.

Om de bijdrage van eventuele niet beschouwde gebeurtenissen tussen referentiejaar en monitoringsperiode te beperken wordt 1995 als representatief referentiejaar gebruikt.



Figuur 3.5-a Km-gemiddelde bodemverandering tov referentieontwikkeling in 1994 en 1995.

Om de onnauwkeurigheden enigszins te verminderen wordt tenslotte de trend in ruimtelijke bodemvariatie beschouwd (Fig.3.5-b). Uit deze relatieve bodemverandering blijkt dat ten opzichte van de bodemverandering bij km 936 ter hoogte van de Gamerensche Waard een verondieping plaatsvindt van circa 0,2 m. Deze sedimentatie ontwikkelt zich in benedenstroomse richting.



Figuur 3.5-b Ruimtelijke variatie tov referentieontwikkeling in 1994 en 1995.

3.3 Conclusies

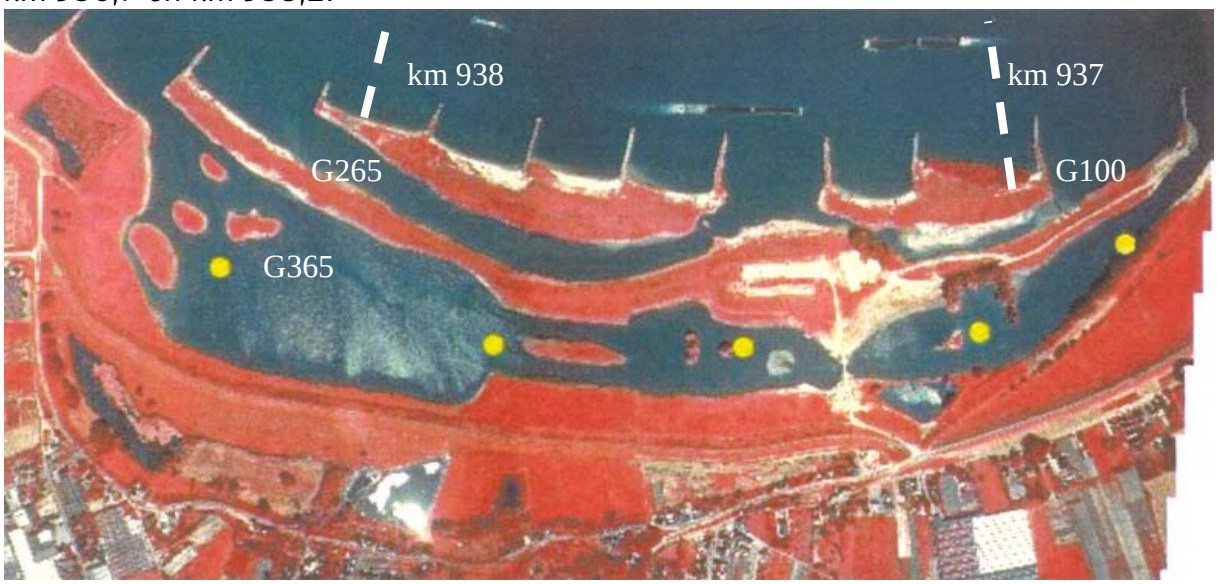
Ondanks een waarschijnlijk grote onnauwkeurigheid in de gebruikte methodiek, leidt Fig.3.4 tot de volgende conclusies.

- Door bovenstroomse bodemveranderingen is er in de tweede helft van de jaren negentig sprake van een tijdelijke bodemdaling. Deze bodemdaling is waarschijnlijk opgewekt bij de verdere normalisatie van de BenedenWaal tussen km 926 en 932 in de periode 1980-1990 (Sectie 2.2). Deze bodemverandering wordt hier beschouwd als de referentieontwikkeling.
- Bij km 936 lijkt ten opzichte van de referentieontwikkeling een bodemverandering van maximaal 0,2 m op te treden. Dit vindt plaats bovenstrooms van de nevengeulen. Omdat hiervoor geen directe verklaring is, wordt verondersteld dat dit een indruk geeft van de onnauwkeurigheid in de effectbepaling (o.a. onzekerheid van circa 0,1 m/jaar door de onbekende invloed van baggeren op de jaarlijkse bodemgradiënt).
- Bij km 937 en 938 lijkt sedimentatie te ontwikkelen met een snelheid van ongeveer 0,10 m per jaar. Het verloop tot 1999 duidt erop dat bij km 937 waarschijnlijk al een maximum effect bereikt is.
- Benedenstrooms van km 938 lijkt er in de beschouwde periode eerst sprake van een bodemdaling en pas na 1998 lijkt een sedimentatie trend te beginnen.

Het lijkt er met Fig.3.5-b op dat het effect van de nevengeulen in de periode 1995-1999 nog geen evenwichtswaarde heeft bereikt. De bodemveranderingen volgens Fig.3.4 en 3.5 zijn gebaseerd op gemeten bodemliggingen (jdp's) tot 1999. Voor een detailanalyse van bodemliggingen tot 2002 wordt verwezen naar Hoofdstuk 5, waar gebruik wordt gemaakt van een andere database.

4.1 Inleiding

Tussen km-936 en 940 zijn in de Gamerensche Waard drie nevengeulen aangelegd met een verschillende afvoer-waterstandskromme. Alle geulen takken aan en af in een buitenbocht van de Waal. De kleine geul in het Oosten (G100) is geopend in November 1996 en onttrekt volgens het ontwerp gemiddeld 100 dagen per jaar afvoer en sediment tussen km 936,9 en 937,4. De kleine geul in het Westen (G265) is eveneens in November 1996 geopend, en onttrekt volgens het ontwerp gemiddeld 265 dagen per jaar afvoer en sediment tussen km 937,4 en 938,2. De grote geul (G365) is geopend in Oktober 1999 en onttrekt permanent afvoer en sediment tussen km 936,7 en km 938,2.



Figuur 4.1 Overzicht nevengeulen (stroming van rechts naar links).

In dit hoofdstuk wordt een theoretisch model afgeleid voor lokale (dynamische) bodemveranderingen ten gevolge van afvoeronttrekkingen uit de hoofdgeul. Op basis van dit model wordt een ontwerpregel geformuleerd waarmee een generieke voorspelling van het effect van nevengeulen gemaakt kan worden. Deze ontwerpregel is gebaseerd op i) de *relatieve hydraulische veranderingen in het zomerbed*; ii) een *representatief afvoerverloop* en iii) het *relaxatiegedrag van lokale bodemveranderingen* in het zomerbed.
Alle componenten worden afzonderlijk belicht; de afleiding van het model voor bodemveranderingen (ad iii) in Sectie 4.2, de representatieve hydraulische veranderingen ad i) in Sectie 4.3. Het jaarlijkse afvoerverloop wordt gekarakteriseerd met twee afvoerniveau's;

- een representatieve hoogwaterafvoer Q_h met bijbehorende periode T_h
- een representatieve laagwaterafvoer Q_l gedurende de rest van het jaar.

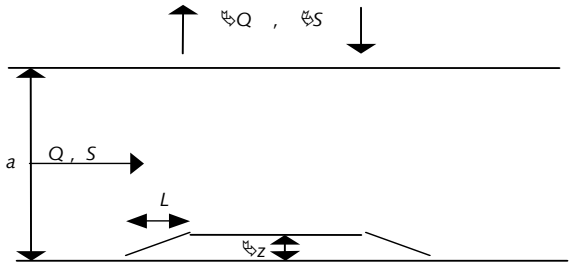
Om statistisch representatieve waarden te gebruiken wordt gekozen voor $Q_h = Q_{84}$; $Q_l = Q_{16}$ en $T_h = 365\ (Q_m - Q_l)/\ (Q_h - Q_l)$. Deze waarden zijn slechts statistisch comfortabel om een afvoervariatie weer te geven, er is geen fysische onderbouwing voor deze willekeurige keuze. Een voorbeeld van een gediscretizeerd afvoerverloop is gegeven in Fig.4.8-a.

De ontwerpregel wordt toegepast in Sectie 4.4. In Sectie 4.5 wordt tenslotte de berekening met een numeriek model gerapporteerd.

4.2 Theoretisch model

Door afvoer uit de hoofdgeul te onttrekken neemt lokaal de stroomsnelheid, en daarmee de capaciteit om sediment te transporteren af. Deze afname in transportcapaciteit leidt tot lokale sedimentatie en daarmee tot een lokale verondieping ter plekke van de onttrekking. Dit principe voor diepteverandering kan voor relatief korte nevengeulen (maximaal 5 km lengte geprojecteerd op de rivieras) als volgt in een theoretisch model worden beschreven (zie ook Sieben (1999). Veronderstel

- een quasi-stationaire stroming en een onttrekking van afvoer en sediment uit een hoofdgeul.
- de lokale waterspiegel is onafhankelijk van de hydraulische en morfologische veranderingen in de hoofdgeul (*rigid-lid* benadering)



Figuur 4.2 Principeschets afvoer en sedimentonttrekking

De reactie van het zomerbed wordt hier voorgesteld met een lokale bodemverandering ⊗z [m] (bodemsprong of bodemverval). Voor zowel het water als het sediment kan een massabalans voor de hoofdgeul worden opgesteld;

water $$\frac{\partial Q_{hg}}{\partial s} = -q_{uit} \qquad \textbf{(4.1)}$$

sedimentbalans $$B\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial S_{hg}}{\partial s} = -s_{uit} \qquad \textbf{(4.2)}$$

waarin

A	doorstroomoppervlak van de hoofdgeul [m^2]
B	gemiddelde hoofdgeulbreedte [m]
Q_{hg}	afvoer door hoofdgeul [m^3/s]
q_{uit}	de *onttrokken* afvoer *naar* de uiterwaard [m^2/s]
s	coordinaat in stroomrichting [m]
$u=Q_{hg}/A$	profielgemiddelde snelheid [m/s]
z	gemiddelde bodemligging [m] t.o.v. referentie niveau
S_{hg}	het totale sedimenttransport door hoofdgeul [m^3/s]
s_{uit}	het *onttrokken* sedimenttransport *naar* de uiterwaard [m^2/s]

De transportcapaciteit in de hoofdgeul, S_{hg}, wordt benaderd met $S_{hg} = Bm\left(Q_{hg} / A\right)^n$ met n van de orde 5 (Engelund en Hansen, 1967). Gradiënten in transportcapaciteit

worden dan geschreven als $\frac{\partial S_{hg}}{\partial s} \approx n\frac{S_{hg}}{Q_{hg}}\frac{\partial Q_{hg}}{\partial s} + n\frac{S_{hg}B}{A}\frac{\partial z}{\partial s}$

(4.3)

Invullen van Verg.4.3 in Verg.4.1 en 4.2, de massabalansen voor water en sediment levert dan

$$\frac{A}{nS_{hg}}\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{A}{B}\frac{q_{uit}}{Q_{hg}} - \frac{As_{uit}}{nBS_{hg}}$$

(4.4)

In deze één-dimensionale benadering van profielgemiddelde bodemveranderingen komt de lengte waarin de bodemsprong ⊗z wordt opgebouwd overeen met het traject waarin de extra afvoer uit de hoofdgeul verdwijnt, en waarin het stroombeeld in de hoofdgeul aan deze verminderde afvoer is aangepast (dit is dus *niet* de lengte tussen in- en uitstroomopening van de nevengeul, zie Fig.4.2). Veronderstel dat deze lengte van uitwisseling een afstand *L* bedraagt. Integratie van Verg.4.4 over deze afstand *L* levert dan $\frac{AL\alpha}{nS_{hg}}\frac{\mathrm{d}\Delta z}{\mathrm{d}t} + \Delta z = -\frac{A}{B}\left(\frac{\Delta Q_{hg}}{Q_{hg}} + \frac{\Delta S_{hg}}{nS_{hg}}\right)$

(4.5)

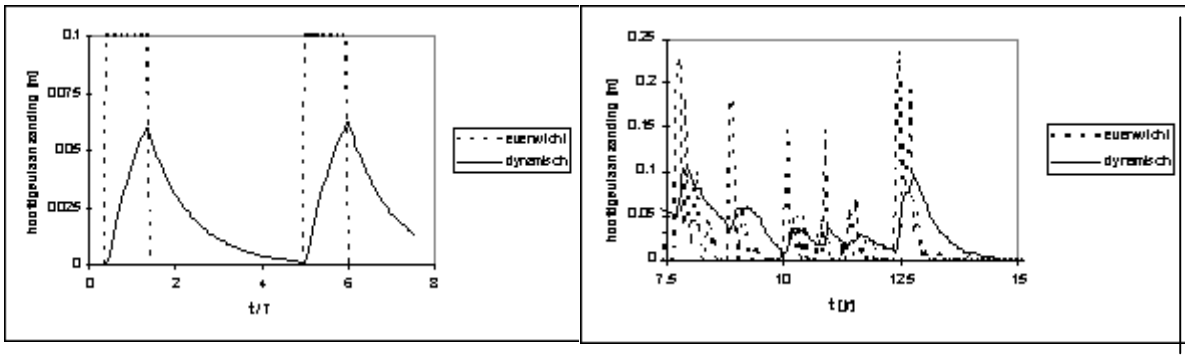
De bodemverandering ⊗z is hiermee gerelateerd aan het bodemverschil tussen km 936 en 937 (bij de instroming van de nevengeulen G100 en G365). Voor de afzonderlijke invloed van G265 heeft ⊗z betrekking aan het bodemverschil tussen km 937 en 938.

In Verg.4.5 is ⟨=*V*/*B*⊗z een *constant aangenome*n vormfactor die het volume *V* (m^3/m) relateert aan de hoogte ⊗z. Hier wordt gebruikt ⟨=1. De tweede term in het rechterlid van Verg.4.5 is de bijdrage van sedimentonttrekking naar de nevengeul die het effect van de verminderde hoofdgeulafvoer dempt.
In het algemeen wordt deze dempende bijdrage verwaarloosd, deze aanname wordt in Sectie 4.3 gecontroleerd.

De bovenstaande afleidingen hebben tenslotte geleid tot een theoretisch model van Verg.4.5, dat kan worden geschreven als een *relaxatievergelijking* $\frac{\mathrm{d}\Delta z}{\mathrm{d}t} = \frac{\Delta z_e - \Delta z}{T}$

(4.6)

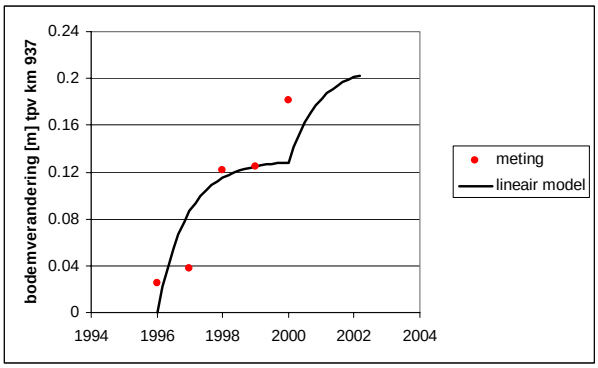
Met een morfologische tijdschaal $T = \alpha aL/ns_{hg}$ (ofwel $T = \alpha L/c$ volgens Verg.3.1) en een *evenwichtswaarde* $\Delta z_e = -a\frac{\Delta Q_{hg}}{Q_{hg}}$ (met $\Delta Q_{hg} < 0$ voor een afname van hoofdgeulafvoer). Dit relaxatiegedrag is ter illustratie weergegeven in Fig.4.3.



Figuur 4.3-a Relaxatie gedrag volgens Verg.4.6

Figuur 4.3-b Berekende bodemveranderingen ten gevolge van afvoeronttrekking (Sobek).

De uitdrukking voor de tijdschaal voor gemiddelde condities is $T = \alpha L / c \approx 1$ jaar (met ⟨=1, L= 1 km en c = 1 km/jaar volgens Fig.3.1). Dit betekend dat op basis van de theorie wordt verwacht dat in een periode van circa 3 jaar met een gemiddelde hydrograaf de bodemveranderingen ten gevolge van de nevengeulen bij Gameren zijn grotendeels voltooid. Als de oplossing van Verg.4.6 wordt vergeleken met de geschatte jaarlijkse bodemverandering van Fig.3.5, dan lijkt dit een redelijke tijdschaal (Fig.4.4). De knik in voorspelde bodemverandering markeert de aanleg van de permanent stromende geul G365.

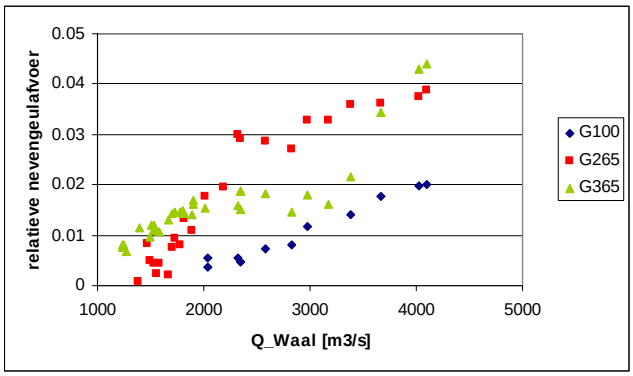


Figuur 4.4 Kwalitatieve vergelijking waarnemingen en model.

3.3 Relatieve afvoer- en sedimentonttrekking

Zoals met Verg.4.6 is beschreven, is de evenwichtswaarde ⊗z_e van belang voor de grootte van het nevengeuleffect. Deze evenwichtswaarde is gedefinieerd als het produkt van waterdiepte en relatieve afvoerverandering; $\Delta z_e = -a \dfrac{\Delta Q_{hg}}{Q_{hg}}$ Als niet alleen profielgemiddelde effecten maar ook ruimtelijke variaties moeten worden beschouwd, dan kan de lokale relatieve verandering in hoofdgeulafvoer worden berekend met een model voor twee-dimensionale waterbeweging (WAQUA). Langs een lijn loodrecht op de stroombanen ter hoogte van de extra stroming naar de uiterwaard kan dan worden gevonden $\Delta z_e(y) = -a(y) \dfrac{\Delta u_{hg}(y)}{u_{hg}(y)}$. In deze studie worden alleen profielgemiddelde variabelen beschouwd (zie ook Sectie 3.2).

De evenwichtswaarde is afhankelijk van de relatieve verandering in hoofdgeulafvoer van zowel water als sediment. Op basis van de gemeten afvoer in de nevengeulen (Schropp et al, 2002) en de bijbehorende Waalafvoer (DONAR, meetstation Tiel) is de relatieve afvoeronttrekking bepaald (Fig.4.5). Voor de legenda wordt gebruikt G365, de grote geul die permanent (365 dg per jaar) stroomt, G265 de westelijke kleine geul die 265 dg per jaar stroomt en G100 de oostelijke kleine geul die 100 dg per jaar stroomt (zie ook Fig.4.1).



Figuur 4.5 Relatieve afvoeronttrekking (Schropp et al, 2002).

Van het gemeten verloop in Fig.4.5 kan in de afvoer van de grote geul (G365) enigszins de regulerende werking van de brug herkennen worden; voor Waalafvoeren vanaf 3.000 m^3/s werkt de versmalling bij de brug niet langer als een afvoerbeperkende vernauwing en neemt de nevengeulafvoer snel toe bij stijgende Waalafvoer. Bij gemiddelde (en grotere) Waalafvoeren is de afvoer van de kleine oostelijke geul (G100) een factor 4 kleiner dan die van de beide andere geulen. De grootte van de gemeten afvoeren volgens Fig.4.5 komt goed overeen met de oorspronkelijke ontwerpeis van maximaal 3 % bij gemiddelde afvoer.

Volgens Verg.4.5 kan het effect van sedimentonttrekking op bodemveranderingen in de hoofdgeul worden verwaarloosd als geldt $\frac{\Delta S_{hg}}{S_{hg}} << n\frac{\Delta Q_{hg}}{Q_{hg}}$ met $O(n)=5$ **(4.7)**

Met behulp van de nevengeulafvoer (Fig.3.4) en een *hypothetische* splitsingspuntrelatie wordt dan geschat

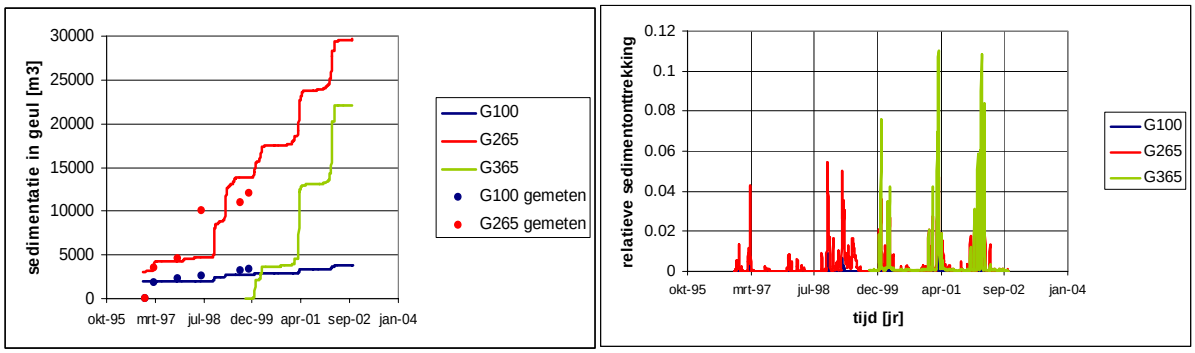
$$\Delta S_{hg} \approx \frac{\left(\frac{B_{ng}}{B_{Waal}}\right)^{1-k}\left(\frac{Q_{ng}}{Q_{Waal}-Q_{ng}}\right)^{k}}{\left(\frac{B_{ng}}{B_{Waal}}\right)^{1-k}\left(\frac{Q_{ng}}{Q_{Waal}-Q_{ng}}\right)^{k}+1} S_{Waal} \qquad \textbf{(4.8)}$$

met

	B_{ng}	[m]	stroomvoerende nevengeulbreedte ($O(B_{ng})$=20 m)
	B_W	[m]	stroomvoerende Waalbreedte (B_W=300 m)
	k	[-]	empirische constante met $O(k)$=3 (Bijlage C in Sieben (2002))
	Q_{ng}	[m^3/s]	nevengeulafvoer
	Q_W	[m^3/s]	Waalafvoer
	S_W	[m^3/s]	Waal-sedimenttransport
	$\otimes S_{hg}$	[m^3/s]	afname Waal-sedimenttransport

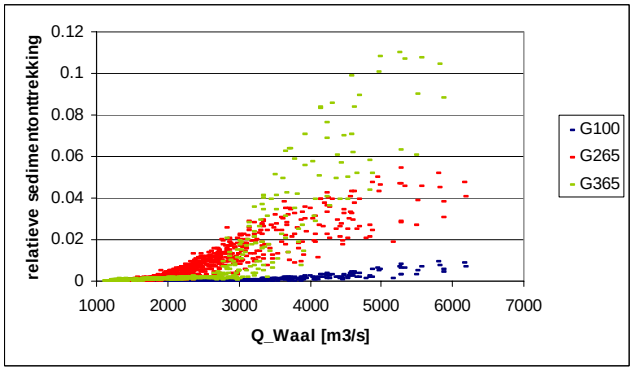
Om de maat te kunnen bepalen van een representatieve nevengeulbreedte wordt het sediment-transport volgens Verg.4.8 vergeleken met de waargenomen jaarlijkse aanzanding in de nevengeulen. Het sedimenttransport in de Waal wordt hiertoe geschat met $S_{Waal} = S_{ref}\left(\frac{Q_{Waal}}{Q_{ref}}\right)^{n/3}$ met n=5 (Engelund en Hansen, 1967); S_{ref}=1000 m^3/dag en Q_{ref}=1600 m^3/s. Deze empirische waarden zijn ontleend aan een fit van jaarlijkse bodemveranderingen (Sieben, 2002). Voor de nevengeulen in de

Gamerensche Waard leidt Verg.4.7 dan tot de geschatte aanzanding in Fig.4.6. De gemeten waarden zijn een globale schatting door Schropp *et al.* (2002). Aangenomen wordt dat de initiële aanzanding direct na aanleg niet wordt veroorzaakt door sedimentonttrekking uit de hoofdgeul. Grofweg is de geschatte aanzanding in G265 en G365 dan 5.000 m^3 per jaar en in G100 1275 m^3 per jaar.



Figuur 4.6 Gemeten en geschatte aanzanding in de nevengeulen.

Uit Fig.4.6 volgt dat de grootte-orde van sedimentonttrekking volgens Verg.4.8 in overeenstemming is met de schattingen van aanzanding in de nevengeulen. Vervolgens kan met Verg.4.8 de relatieve sedimentonttrekking bij variërende Waalafvoer worden weergegeven (Fig.4.7). Uit vergelijking van Fig.4.7 en Fig.4.5 volgt dat aan het criterium van Verg.4.7 wordt voldaan, zodat mag worden verondersteld dat het verwaarlozen van sedimentonttrekking in Verg.4.6 niet leidt tot een significante overschatting van bodemveranderingen in de hoofdgeul.

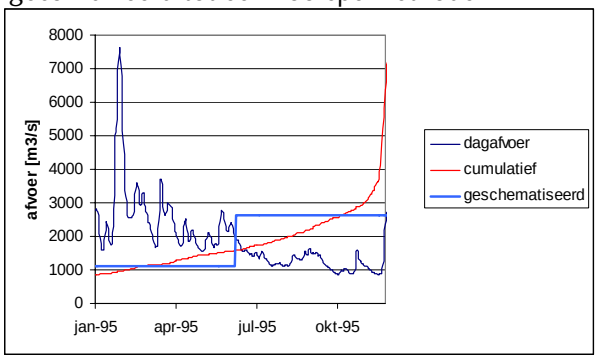


Figuur 4.7 Geschatte relatieve sedimentonttrekking.

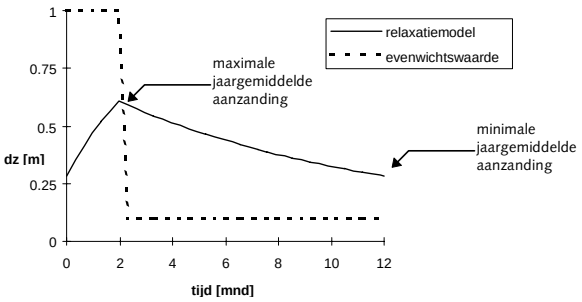
Met Fig.4.7 wordt geconcludeerd dat de evenwichtswaarde van bodemveranderingen voornamelijk evenredig is met het product van waterdiepte en de relatieve afname in hoofdgeulafvoer. De bijdrage van sedimentonttrekking aan de bodemverandering in de hoofdgeul wordt verwaarloosd.

4.4 Schatten van representatieve bodemverandering

In Sectie 4.2 is een model voor de morfodynamica van de lokale hoofdgeulbodem beschreven, in Sectie 4.3 is de grootte van de evenwichtswaarde bepaald. In deze sectie worden beide componenten gecombineerd tot een voorspelmethode.



Figuur 4.8-a Illustratie geschematiseerde hydrograaf.



Figuur 4.8-b Geschematiseerd morfodynamisch gedrag

De gemiddelde hydrograaf wordt beschreven met een hoogwaterafvoer Q_h met bijbehorende periode T_h en een representatieve laagwaterafvoer Q_l gedurende de rest van het jaar. Op basis van statistisch representatieve waarden wordt gekozen voor $Q_h = Q_{84}$; $Q_l = Q_{16}$ en $T_h = 365\ (Q_m - Q_l)/\ (Q_h - Q_l)$, een voorbeeld van de gediscretizeerde weergave is gegeven in Fig.4.8-a. Als het model voor bodemveranderingen (Sectie 4.2) voor een hoogwaterperiode en een laagwaterperiode wordt toegepast, dan is de berekende bodemverandering zoals weergegeven in Fig.4.8-b. Voor zowel de hoogwaterperiode als de laagwaterperiode moet een tijdschaal en een evenwichtswaarde worden bepaald. Op basis van Fig.4.4 worden daarom de bijbehorende relatieve afvoeronttrekkingen worden gevonden (Tabel 4.1).

	$Q_{_Waal}$ = 1115 m³/s (16% waarde 1996-2002)	$Q_{_Waal}$ = 1697 m³/s (gemiddelde 1996-2002)	$Q_{_Waal}$ = 2273 m³/s (84% waarde 1996-2002)
Geul 100 dg	0,000	0,0030	0,0050
Geul 265 dg	0,000	0,0075	0,0225
Geul 365 dg	0,005	0,0138	0,0175

Tabel 4.1 Relatieve nevengeulafvoer voor "hoge" en "lage" afvoer.

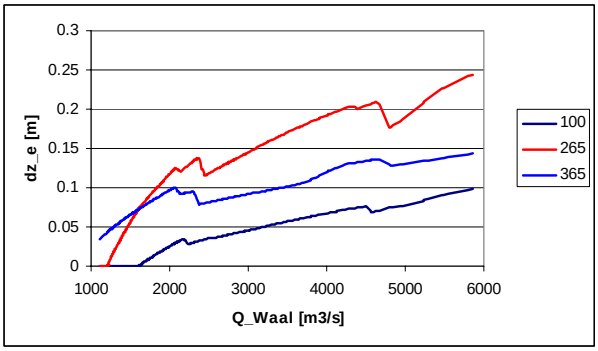
Ter controle van Verg.4.7 is in Tabel 4.2 de bijbehorende schatting van sedimentonttrekking gegeven (Fig.4.5). De geschatte sedimentonttrekking is verwaarloosbaar klein.

	$Q_{_Waal}$ = 1115 m³/s (16% waarde 1996-2002)	$Q_{_Waal}$ = 1697 m³/s (gemiddelde 1996-2002)	$Q_{_Waal}$ = 2273 m³/s (84% waarde 1996-2002)
Geul 100 dg	0,000	0,000	0,000
Geul 265 dg	0,000	0,001	0,001
Geul 365 dg	0,000	0,007	0,002

Tabel 4.2 Relatieve sedimentonttrekking voor "hoge" en "lage" afvoer.

Op basis van de definitie in Verg.4.6 kan de relatieve afvoerverandering met de bijbehorende waterdiepte worden vertaald in een evenwichtswaarde voor de aanzanding (Fig.4.9). Immers, $\otimes z_e$ de evenwichtswaarde van de bodemverandering is met Verg.4.6 gedefinieerd als $\Delta z_e = -\frac{\Delta Q_{hg}}{Q_{hg}} a$, met $\frac{\Delta Q_{hg}}{Q_{hg}}$ de relatieve verandering in hoofdgeulafvoer en a [m] de waterdiepte. In Fig.4.9 is voor variërende Waalafvoer op basis van lokale waterdiepte en gemeten relatieve afvoeronttrekking de evenwichtswaarde van de aanzanding geschat, in Tabel 4.3 zijn de representatieve

evenwichtswaarden weergegeven. De onregelmatigheden in Fig.4.9 zijn te wijten aan veranderingen in relatieve hoofdgeulafvoer.



Figuur 4.9 Evenwichtsaanzanding op basis van gemeten afvoeronttrekking.

	$Q_{_Waal}$ = 1115 m³/s (16% waarde 1996-2002)	$Q_{_Waal}$ = 1697 m³/s (gemiddelde 1996-2002)	$Q_{_Waal}$ = 2273 m³/s (84% waarde 1996-2002)
Geul 100 dg	0,000	0,010	0,030
Geul 265 dg	0,000	0,085	0,130
Geul 365 dg	0,040	0,080	0,090

Tabel 4.3 Theoretische evenwichtsaanzanding [m].

De evenwichtswaarden voor laag- en hoogwater zijn met Tabel 4.3 bepaald. Zoals weergegeven in Fig.4.8-b, is er voor de bodemverandering sprake van een dynamisch evenwicht, wat varieert tussen een maximale en een minimale waarde (Fig.4.8-b). De overlast van deze bodemverandering kan vervolgens worden beschreven met de *maximale aanzanding* $\otimes z_{max}$ ter plekke van de ingreep (na de hoogwaterperiode) en met de *amplitude van de bodemgolf* ($\otimes z_{max} - \otimes z_{min}$) die (in de periode van lagere afvoeren) in benedenstroomse richting verplaatst.

De maximale waarde die uit het gedrag van Verg.4.6 voor de condities van Fig.4.7-b volgt kan worden beschreven met

$$\Delta z_{\max} = \frac{\Delta z_{el}\left(e^{-\frac{T_d}{T_{mh}}} - e^{\frac{T_r}{T_{ml}}\frac{T_d}{T_{mh}}}\right) + \Delta z_{eh}\left(1 - e^{\frac{T_d}{T_{mh}}}\right)}{\left(1 - e^{\frac{T_r}{T_{ml}}\frac{T_d}{T_{mh}}}\right)}$$

(4.9)

De minimale waarde kan worden geschreven met $\Delta z_{\min} = \left(\Delta z_{\max} - \Delta z_{el}\right)e^{\frac{T_r}{T_{ml}}} + \Delta z_{el}$

(4.10)

met T_d [dg] duur van de hoogwaterperiode
T_r [dg] duur van de laagwaterperiode ($T_d + T_r$= 365 dg)
T_{mh} [dg] morfologische tijdschaal in de hoogwaterperiode
T_{ml} [dg] morfologische tijdschaal in de laagwaterperiode
$\otimes z_{eh}$ [m] evenwichtswaarde van bodemverandering in hoogwaterperiode
$\otimes z_{el}$ [m] evenwichtswaarde van bodemverandering in laagwaterperiode

$\otimes z_{max}$	[m]	jaarlijkse maximale waarde van bodemverandering

De tijdschalen kunnen voor de hoogwater- en laagwaterperiode worden geschat met $T = L/c$ (zie Verg.4.6) met L [m] de lengte van de gradiënt in hydraulische condities (zie Sectie 3.2) vanaf de bovenstroomse rand van de ingreep (maximaal 1 km), en c [m/s] een representatieve voortplantingssnelheid voor bodemveranderingen. Om $\otimes z_{max}$, de maximale aanzanding, te kunnen schatten wordt de voortplantingssnelheid bij Q_{84} (hoge afvoer) geschat op 10 m/dag, en bij Q_{16} (lage afvoer) op 2 m/dag (Sieben, 2002). Met een lengteschaal L = 200 m levert dit een morfologische tijdschaal van T_m = 20 dagen bij Q_{84} en T_m = 100 dagen bij $Q_{16.}$ Met het bovenstaande, Tabel 4.2 en Verg.4.9 en 4.10 kan tenslotte Tabel 4.4 worden ingevuld.

	$\otimes z_e$ [m] bij Q_{16}	$\otimes z_e$ [m] bij Q_{84}	$\otimes z_{max}$ [m]	$\otimes z_{min}$ [m]
Geul 100 dg	0,000	0,030	0,03	0,00
Geul 265 dg	0,000	0,130	0,13	0,02
Geul 356 dg	0,040	0,090	0,09	0,05

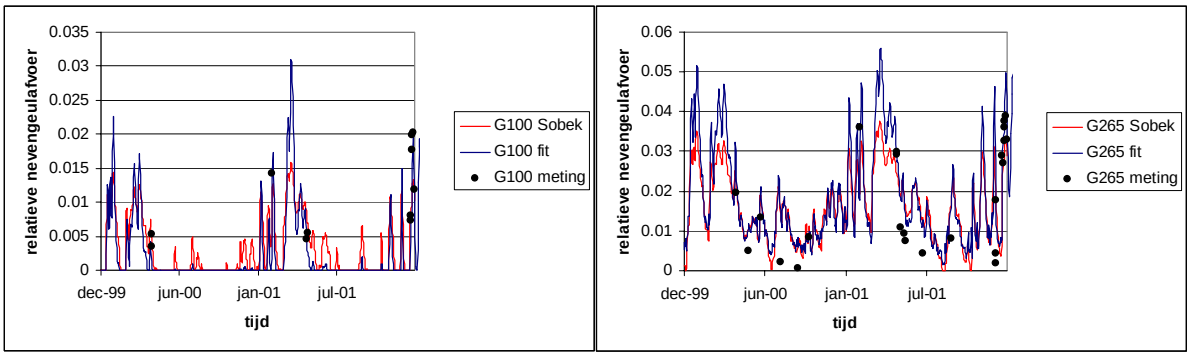
Tabel 4.4 Voorspelde maximale aanzanding volgens Verg.4.9.

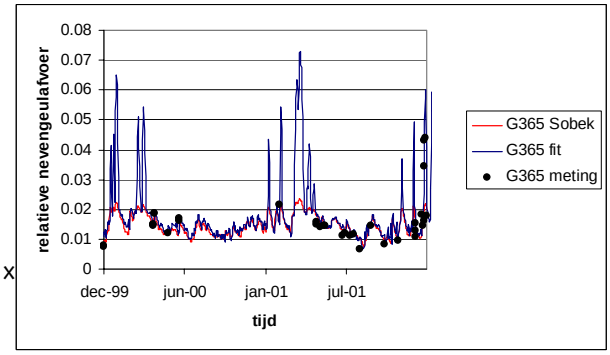
Voor de maximale aanzanding lijkt de situatie met Q_{84} (Q_W =2273 m^3/s) bepalend. Voor de geulen G100 en G365 is deze bodemverandering te verwachten tussen km 936 en 937, voor geul G265 is dit tussen km 937 en 938. Het afzonderlijk effect van de geulen is volgens Tabel 4.3 maximaal 0,13 m voor G265. Als nu wordt aangenomen dat het effect van G265 en G365 bij elkaar kan worden opgeteld, is de voorspelde aanzanding in de orde van 0,22 m. Dit is conform de oorspronkelijke ontwerpcriteria.

Volgens Tabel 4.3 zal door de nevengeulen bij km 937 maximaal 0,12 m sedimenteren en bij km 938 maximaal 0,21 m. Na aanleg van de beide kleine geulen is sedimentatie te verwachten tussen km 937 en 938, en een tijdelijke erosie bij km 939. Na aanleg van de grote geul is (opnieuw) sedimentatie te verwachten bij km 937, en (opnieuw) tijdelijke erosie bij km 939.

4.6 Numerieke voorspelling

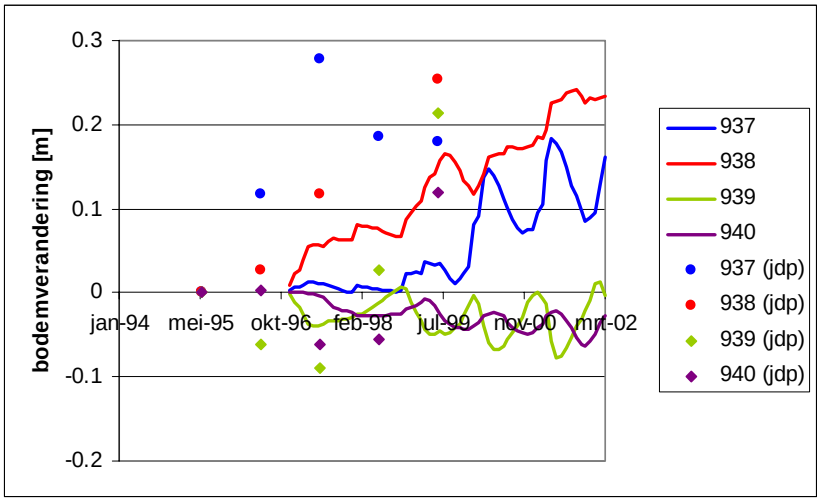
Behalve met de ontwerpregel zoals beschreven en toegepast in Sectie 4.5 kan het profielgemiddelde morfologisch effect van de nevengeulen worden geschat met behulp van een numeriek model. Ter verificatie van de voorspelling uit Sectie 4.5 wordt daarom in deze sectie een tweede voorspelling gerapporteerd die is uitgevoerd met behulp van een numeriek, één-dimensionaal Rijntakkenmodel. Zoals in het voorgaande is beschreven, kan het gedrag van een nevengeuleffect worden beschreven met een tijdschaal en een evenwichtswaarde. Door beide parameters in het numeriek model te bekijken kan de kwaliteit van de schematisatie worden beoordeeld. De invloed van de nevengeulen in de Gamerensche Waard wordt als een afvoer-onttrekking in dit numerieke model geschematiseerd. De schematisatie hiervan van december 1999 tot februari 2002 is samen met de metingen en een fit op basis van overlaatrelaties (Schropp, 2002) weergeven in Fig.4.10. De overeenkomst tussen meting en geschematiseerde weergave in het model is goed; de hydraulische karakteristieken van het numerieke model zijn daarmee representatief.





Figuur 4.10 Schematisatie verloop in relatieve nevengeulafvoer.

De met het numeriek model berekende bodemveranderingen ten gevolge van de nevengeulen zijn tenslotte weergegeven in Fig.4.11. Het lijkt erop dat een volledig evenwicht in de berekening nog niet is bereikt. De berekende snelheid van bodemveranderingen (0,03 á 0,04 m per jaar) lijkt een factor 2 lager te zijn dan de indicatie van jaarlijkse dwarspeilingen (Fig.3.5-b). De grootte-orde van de berekende bodemverandering (circa 0,2 m) komt wel overeen met de schatting op basis van de jaarlijkse dwarspeilingen (Fig.3.5-b). Gezien de onnauwkeurigheden in de effectbepaling (Hoofdstuk 3) wordt geconcludeerd dat de voorspelling met het numeriek model voor km 937 en 938 voldoende overeenstemt met de op basis van de jaarlijkse dwarspeilingen geschatte effecten.



Figuur 4.11 Verloop in berekende bodemveranderingen tpv km 937, 938, 939 en 940.

4.6 Conclusies

Het theoretisch verwachte, profielgemiddelde effect van nevengeulen is op basis van analytische en numerieke modellen samen te vatten met de volgende karakteristieken:

- In een periode van ongeveer drie jaar na aanleg bouwt een verondieping zich op, door een ontwikkeling in benedenstroomse richting vanaf het splitsingspunt. Ter plekke van het splitsingspunt is deze verondieping dus het eerst ontwikkeld.
- Vanwege massabehoud gaat deze verondieping gepaard met een verdieping (erosiegolf) die zich benedenstrooms van de aanzanding met gelijke snelheid verplaatst.
- De grootte van de verondieping, die zich na de aanpassingsperiode uitstrekt tussen splitsingspunt en samenvloeiingspunt, is evenredig met het produkt van relatieve nevengeulafvoer en lokale waterdiepte in de hoofdgeul
- Vanwege de afvoerafhankelijkheid van de verondieping in de hoofdgeul is er sprake van een groei

  bij hoogwater, en een afbraak bij laagwater. Het verschil hiertussen verplaatst zich als bodemgolf in benedenstroomse richting. De maximale verondieping uit dit dynamisch evenwicht kan in dit geval goed gekarakteriseerd worden uit de situatie bij een 84% onderschreden Waalafvoer.

Hoofdstuk 5 Detailanalyse van peilingen

5.1 Inleiding

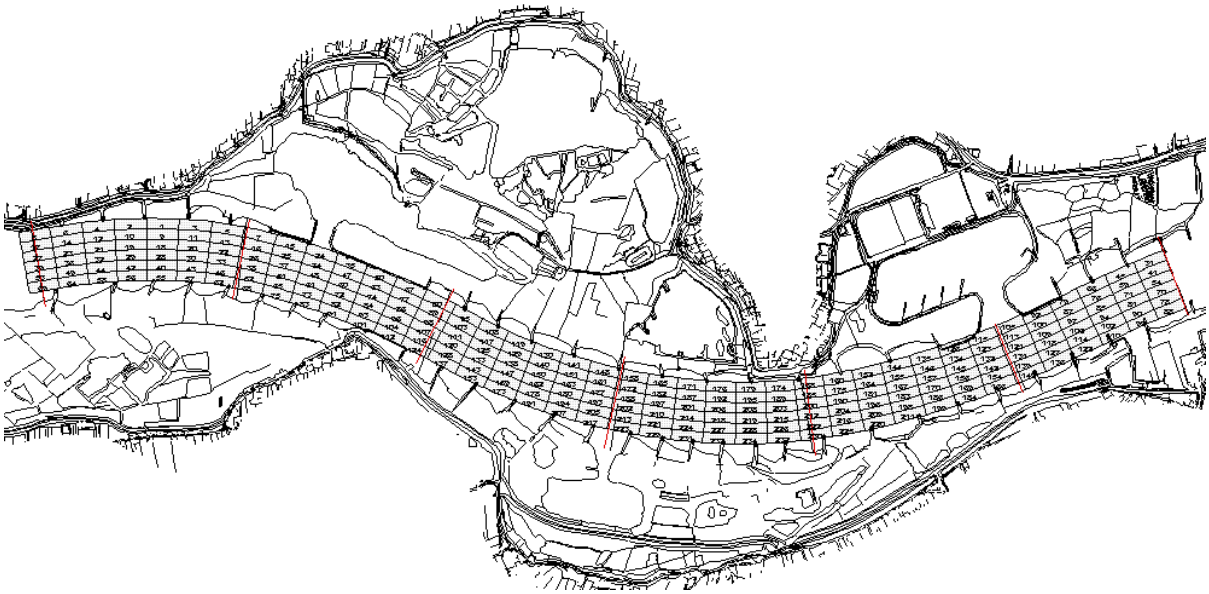
Sinds 1995 wordt er in het rivierstuk tussen km 935 en 941 frequenter gepeild om een indruk te krijgen van bodemveranderingen ten gevolge van de nevengeulen in de Gamerensche Waard. In Tabel 5.1 zijn de peilingen beschreven die voor deze studie zijn gebruikt. De oorspronkelijke data dichtheid en nauwkeurigheid zijn onbekend; de beschikbare meta informatie is daarom niet volledig zodat geen indicatie voor de betrouwbaarheid kan worden gegeven.

datum	type	aangeboden grid
Sep 1995	dwarsraaien	5 m x 5 m
Mar 1996	dwars- en lengte raaien	5 m x 5 m
Mei 1996	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Aug 1996	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Sep 1996	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Nov 1996	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Jan 1997	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Feb 1997	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Mar 1997	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Apr 1997	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Mei 1997	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Aug 1997	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Nov 1997	dwars en lengteraaien	5 m x 5 m
Feb 1998	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Mei 1998	dwars en lengteraaien	5 m x 5 m
Aug 1998	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Dec 1998	dwars- en lengteraaien	5 m x 5 m
Jun 1999	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Sep 1999	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Dec 1999	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Mar 2000	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Jul 2000	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Sep 2000	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Dec 2000	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Mar 2001	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Mei 2001	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Jul 2001	multibeampeilingen	5 m x 5 m
Sep 2001	multibeampeilingen	1 m x 1m
Dec 2001	multibeampeilingen	1 m x 1m
Jan 2002	multibeampeilingen	1 m x 1m
Apr 2002	multibeampeilingen	1 m x 1m
Aug 2002	multibeampeilingen	1 m x 1m

Tabel 5.1 Beknopte beschrijving van gebruikte data.

Als eerste stap in de bewerking van de peilingen is het gebied bepaald dat in alle peilingen voldoende wordt beschreven. Dit gebied omvat het zomerbed ongeveer vanaf km 935 tot km 941. Om een hoofdrichting van een dwarsrichting te kunnen onderscheiden is vervolgens voor dit traject een rooster gedefinieerd (Fig.5.1) met een celgrootte van 150 m in langsrichting en 50 m in dwarsrichting (totaal 234 cellen). De procedure van de roosterdefinitie is in detail beschreven in Sieben en Van Essen (2003). Per cel (150 m x 50 m) wordt het aantal waarnemingen, de extreme waarden (maximum en minimum), de gemiddelde waarde en de ruimtelijke standaardafwijking bepaald, zodat met het rooster in Fig.5.1 de bodemveranderingen in binnenbocht; buitenbocht en bij de as van de rivier afzonderlijk beschouwd kunnen worden.

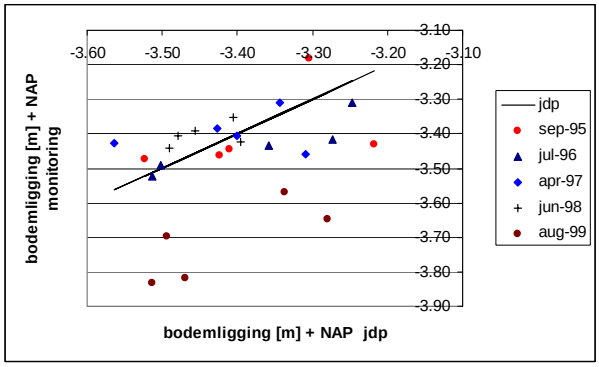
Voor de analyse van bodemveranderingen wordt van alle peilingen de gemiddelde waarde bepaald. Slechts van de multibeam peilingen wordt ook de standaardafwijking bekeken om een indruk te krijgen van de ruimtelijke verdeling in bodemvormen (Bijlage A).



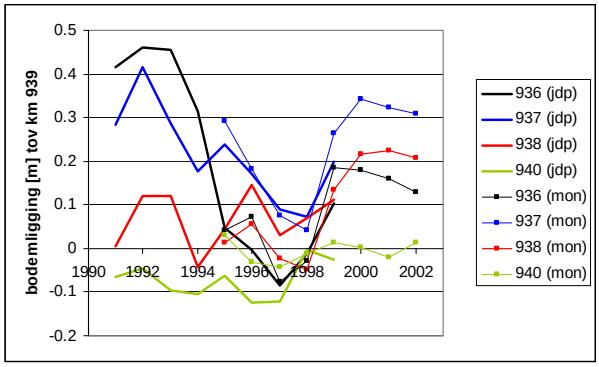
Figuur 5.1 Rooster voor ondersche id tussen stroom- en dwarsrichting.

5.2 Vergelijking monitoringsgegevens en jaarlijkse dwarspeilingen.

In Hoofdstuk 2 en 3 is de lokale bodemligging bij km 936-940 beschouwd op basis van jaarlijkse dwarspeilingen (Ten Brinke, 2000). Deze peilingen geven een indruk van de structurele ruimtelijke variatie vóór aanleg van de nevengeulen (Sectie 2.4). Om met de monitoringsgegevens van Tabel 5.1 veranderingen ná aanleg van de nevengeulen te kunnen bepalen worden in Fig.5.2-a gepeilde bodemliggingen (gemiddeld over een jaar en over een km) van beide datasets met elkaar vergeleken. Afwijkingen kunnen worden verklaard door verschillen in waarnemingstijdstip, verschillen in oorspronkelijke datadichtheid en verschillen in bewerking. Duidelijk blijkt dat de multibeampeilingen (aug 99) een relatief lagere bodemligging registreren, vermoedelijk omdat troggen van bodemvormen beter worden bepeild. Voor Fig.5.2-a is de afwijking in de jaar- en km-gemiddelde bodemligging van monitoringsgegevens en jaarlijkse dwarspeilingen gemiddeld 0,01 m met een standaardafwijking van 0,09 m. Ter plekke van km 936 is de afwijking maximaal, vermoedelijk ten gevolge van randeffecten, het bepeilde gebied is met name bovenstrooms van het interessegebied relatief beperkt.



Figuur 5.2-a Vergelijking bodemligging volgens monitoring en jaarlijkse

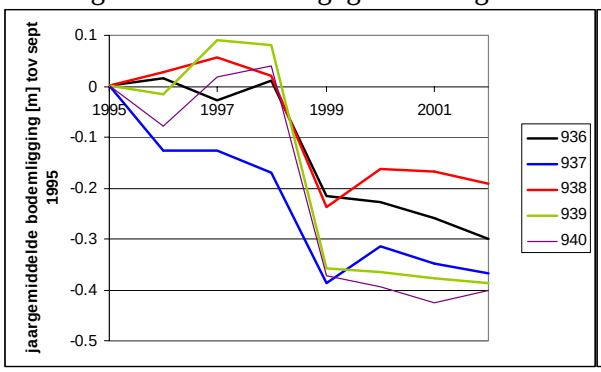


Figuur 5.2-b Temporele variatie volgens monitoring en jaarlijkse dwarspeilingen.

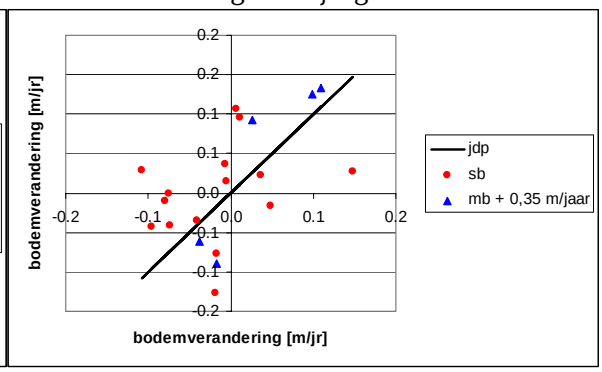
dwarspeilingen.

5.3 Profielgemiddelde bodemveranderingen

Om lokale structuren te kunnen bekijken is in Fig.5.2-b met beide datasets de bodemligging ten opzichte van de bodemligging bij km 939 getekend (bij deze raai komt de bodemhoogte voor beide databases het best overeen). Behalve bij km 936 (die in de bewerkte monitoringsdata ongeveer 0,1 m lager ligt dan in de jaarlijkse dwarspeilingen) lijken de ruimtelijke en temporele variaties in bodemligging vergelijkbaar. De overgang van dwars- en lengteraaien naar multibeam vindt plaats in 1999, omdat per peiling een referentieniveau wordt gebruikt is deze verandering in waarneming niet van invloed op de bodemgradiënt zoals weergegeven in FIg.5.2-b. Dit is echter niet het geval bij Fig.5.2-c.

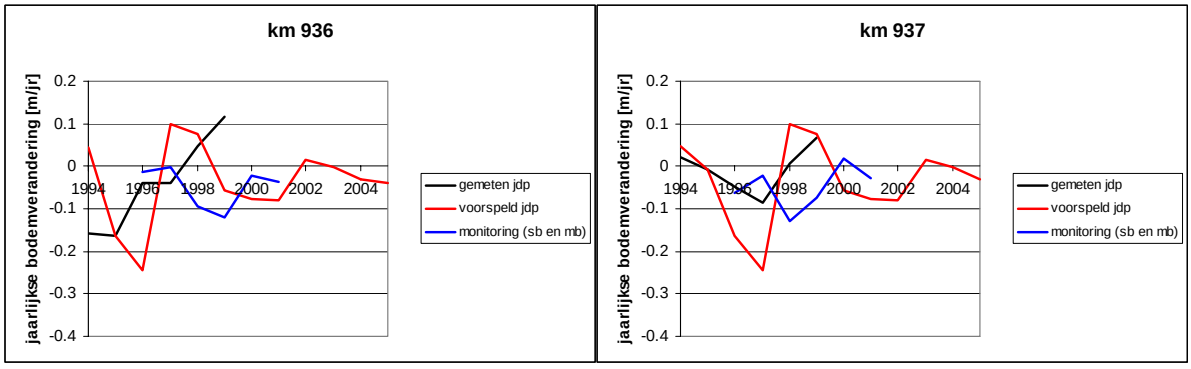


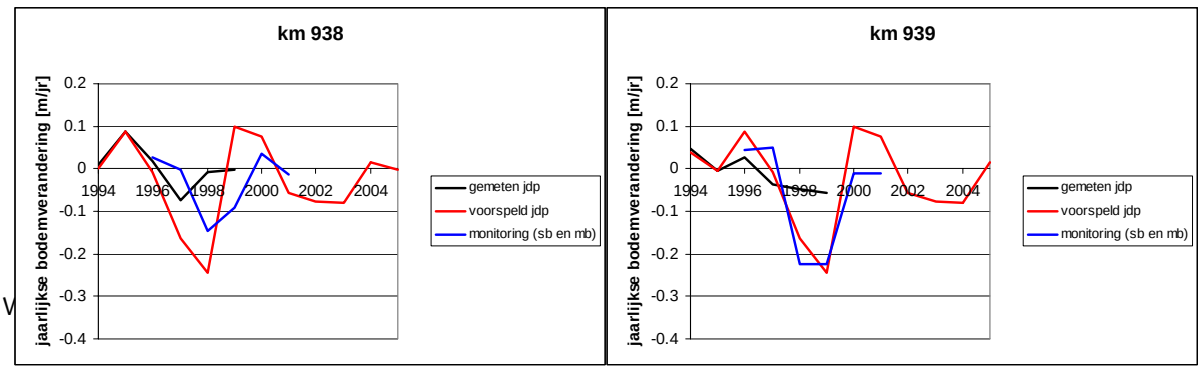
Figuur 5.2-c Lokale bodemveranderingen ten opzichte van 1995.

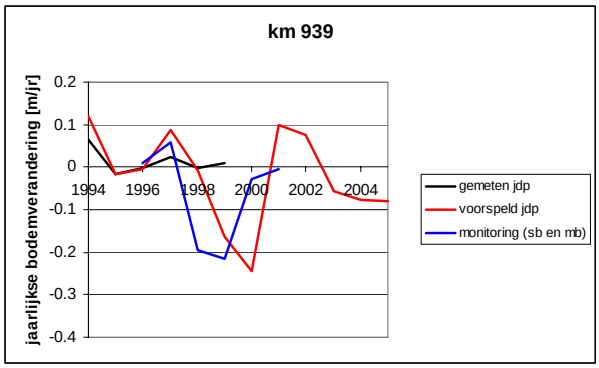


Figuur 5.2-d Jaarlijkse bodemveranderingen volgens dwars- en lengteraaien en multibeam.

Als de km-gemiddelde bodemligging ten opzichte van de eerste peiling (september 1995) wordt bepaald (Fig.5.2) is te zien dat in dit rivierstuk een korte periode van sedimentatie tussen 1995 en 1998, wordt gevolgd door een abrupte bodemdaling. Deze trendbreuk in 1999 van ongeveer 0,35 m bodemdaling (Fig.5.2-d) is te wijten aan de overgang op mulitbeampeilingen, en verhindert het trekken van conclusies over bodemveranderingen in Fig.5.2-c. Om desondanks een analyse te kunnen uitvoeren wordt de km-gemiddelde bodemligging uit multibeampeilingen op basis van Fig.5.2-d met 0,35 m verhoogd. In Fig.5.3 zijn de jaarlijkse bodemveranderingen uit Fig.5.2 vergeleken met de waarden uit Sectie 3.2 (Fig.3.4).

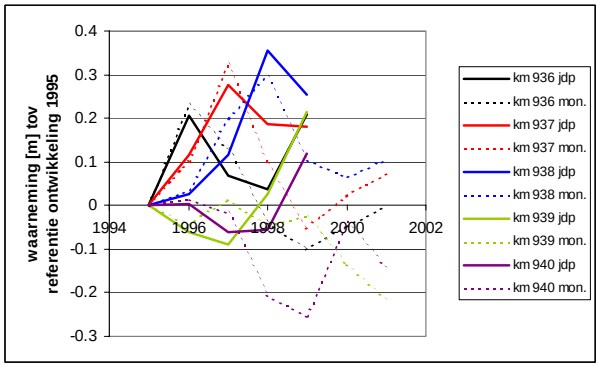




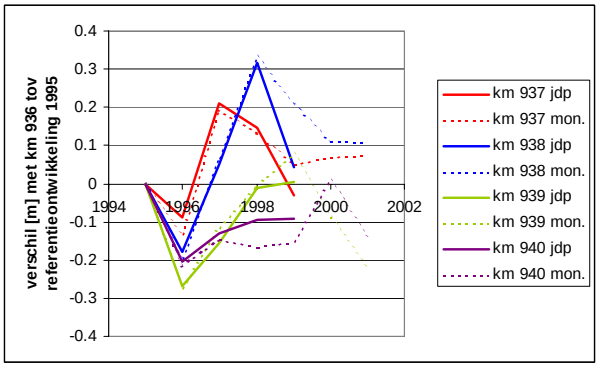


Figuur 5.3-a Jaarlijkse bodemveranderingen volgens monitoringsgegevens en jaarlijkse dwarspeilingen.

De faseverschillen kunnen te wijten zijn aan onnauwkeurigheden ten gevolge van de discretizatie (Verg.3.3) en verschillen in waarnemingstijdstip tussen jaarlijkse dwarspeilingen en monitorings-gegevens. Door vergelijking van gemeten bodemveranderingen volgens de monitoringsgegevens (zwarte lijn, jdp en blauwe lijn monitoringsgegevens) en geschatte referentie bodemontwikkeling volgens de jaarlijkse dwarspeilingen (rode lijn). Met de monitoringsgegevens kan de effectbepaling met van Hoofdstuk 3 worden uitgebreid.



Figuur 5.3-b Verschil tussen waarneming en referentie ontwikkeling



Figuur 5.3-c Ruimtelijke variatie in vermoedelijk effect ten opzichte van km 936.

5.4 Ruimtelijke variatie

Zoals in Hoofdstuk 2 is beschreven is er ten gevolge van hoogwatereffecten een lokale verondieping tussen km 935 en 936, km 938 en 939 en tussen km 939 en 940, en een lokale verdieping tussen km 936 en 937 (Fig.2.7-b). In Fig.5.4 is deze ruimtelijke structuur op basis van de monitoringsgegevens weergegeven. Opgemerkt wordt dat volgens Fig.5.2-b de gemiddelde bodemligging bij km 936 waarschijnlijk ongeveer 0,1 m te laag is. Dit zou kunnen komen door te weinig monitoringsgegevens in dit kilometervak. De bodemsprong tussen km 936 en 937 is daardoor waarschijnlijk 0,1 m te groot. In Tabel 5.2 zijn de trends samengevat, om de

waarde van de bodemsprong te vertalen in een dieptevariatie moet deze ten opzichte van een gemiddelde bodemgradiënt van circa –0,1 m per km geïnterpreteerd worden (ofwel de derde kolom is de tweede kolom plus 0,1 m).

km-raai	gemiddelde gradiënt jdp [m/km] 1985-1994	gemiddelde variatie in lokale diepte [m]	gemiddelde verandering 1985–1994 [m/jaar]	eindwaarde 2002 [m] monitoringsgegevens	gemiddelde verandering 1995-2002 [m/jaar]
936 tov 935	0,18	0,28	-0,0075	geen gegevens	geen gegevens
937 tov-936	-0,19	-0,09	0,0211	0,08 (gecorrigeerd)	0,02
938 tov 937	-0,21	-0,11	0,0067	-0,10	0,00
939 tov 938	-0,03	0,07	-0,0097	-0,21	-0,06
940 tov 939	-0,06	0,04	0,0012	0,01	0,01

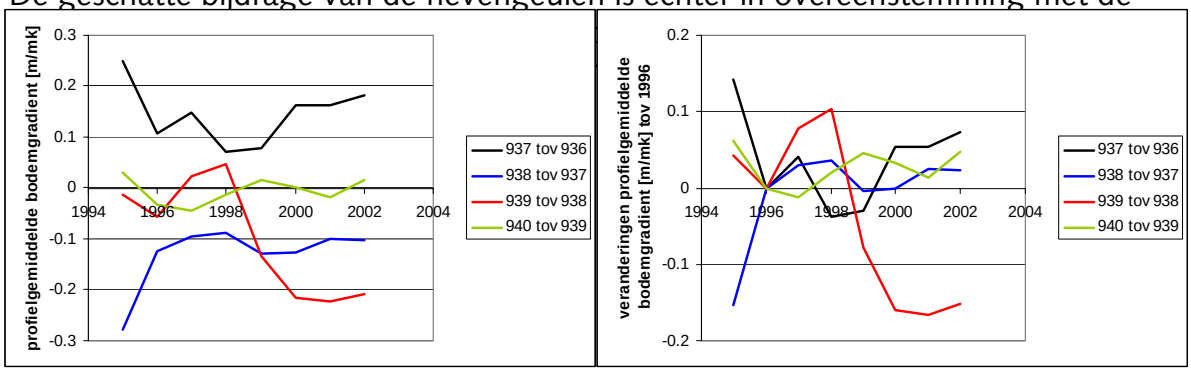
Tabel 5.2 Samenvatting ruimtelijke variaties.

Ten opzichte van de gemiddelde waarde vóór 1995 is er tussen km 936 en 937 sprake van een relatief grote toename (sedimentatie) van circa 0,27 m (van –0,19 m in de tweede kolom naar 0,08 m in de vijfde kolom). Als de gemiddelde trend van de periode 1985-1994 zich ná aanleg van de nevengeulen voortzet, dan leidt dit tussen km 937 en 936 tot circa 0,13 m sedimentatie in de periode 1995-2002. De invloed van de invloed van de nevengeulen tussen km 936 en 937 kan dan geschat worden op 0,27 m – 0,13 m = 0,14 m. Deze grootte-orde komt ongeveer overeen met de schattingen in Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4. Op dezelfde wijze kan ook voor de andere raaien een schatting worden gemaakt. Dit is beschreven in Tabel 5.3.

km-raai	gemiddelde waarde [m] jdp	waarde 2002 [m] volgens monitoring	verandering bodemsprong [m] (3^{de}–2^{de} kolom)	ontwikkeling 1995-2002 [m]	vermoedelijke invloed nevengeulen [m]
936 tov 935	0,18	geen gegevens		-0,05	
937 tov 936	-0,19	0,08 (gecorrigeerd)	0,27	0,13	0,14
938 tov 937	-0,21	-0,10	0,11	0,04	0,07
939 tov 938	-0,03	-0,21	-0,18	-0,06	-0,12
940 tov 939	-0,06	0,01	-0,07	0,01	-0,08

Tabel 5.3 Schatting invloed nevengeulen op ruimtelijke structuur.

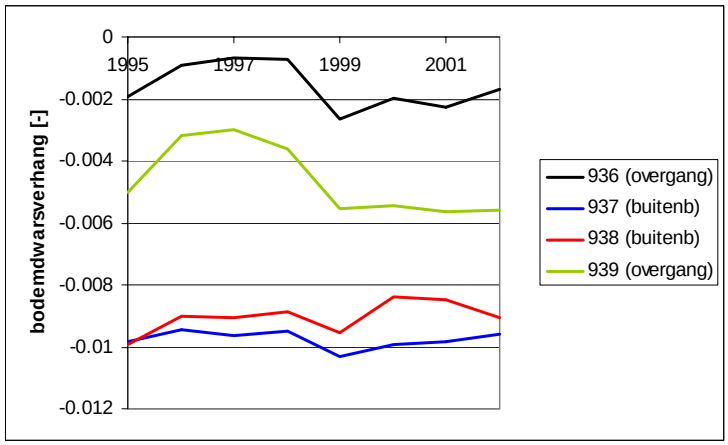
In Tabel 5.3 worden bodemliggingen van twee bronnen vergeleken. De standaardafwijking tussen beide bodemliggingen is 0,10 m. De standaardafwijking tussen bodemsprongen, daarmee de invloed op het geschatte effect (6de kolom Tabel 5.3) wordt dan bij een normale verdeling geschat op 0,14 m. Met deze relatief grote onzekerheidsband wordt de effectbepaling (6de kolom, Tabel 5.3) erg onnauwkeurig. De geschatte bijdrage van de nevengeulen is echter in overeenstemming met de



Figuur 5.4 Variatie jaargemiddelde bodemgradiënt (bodemhoogteverschil per km).

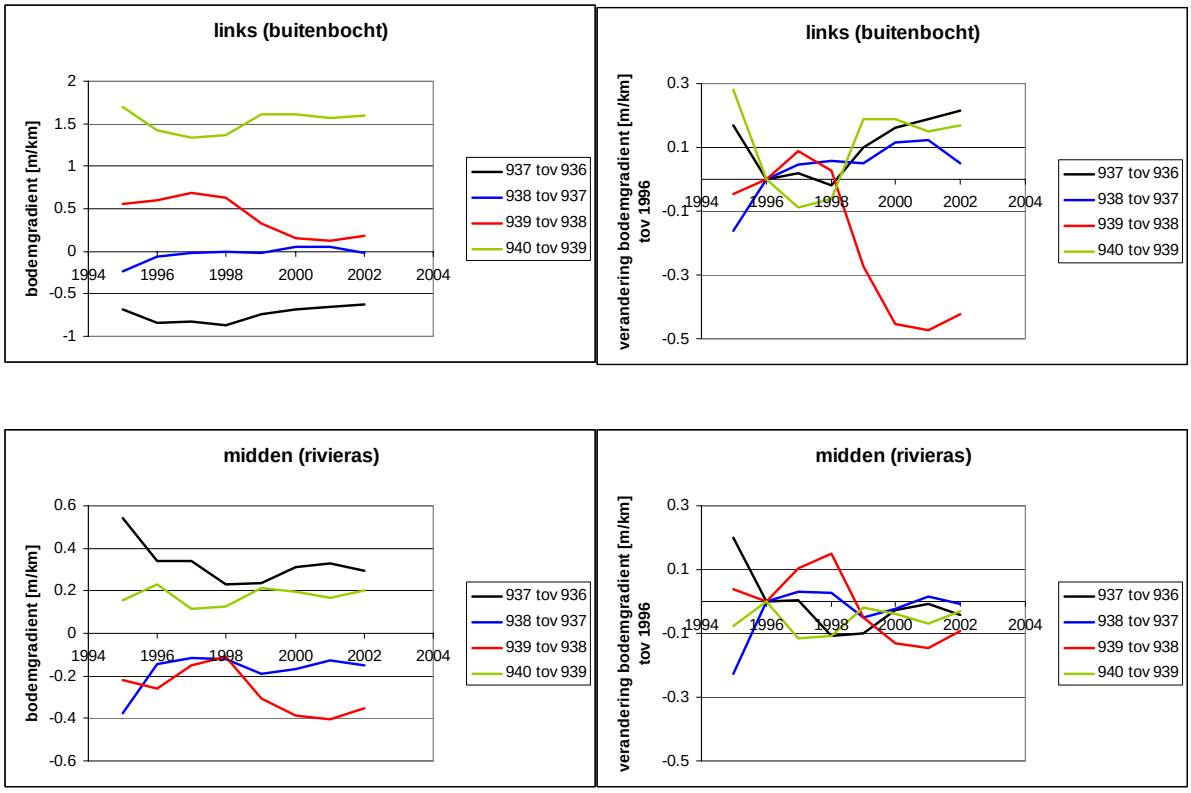
5.5 Twee-dimensionale aspecten

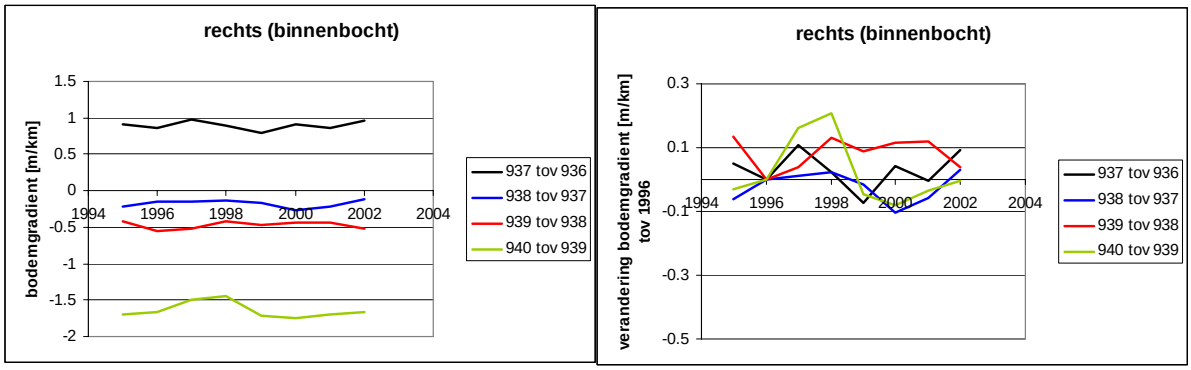
De grootte van de bodemsprong in Fig.5.4 is gemiddeld over het gehele dwarsprofiel. De monitoringsgegevens zijn op een rooster geprojecteerd (Sectie 5.1) om ook ruimtelijke variaties in dwarsrichting te analyseren. In Fig.5.5 is deze informatie over bodemveranderingen in het midden, links (zuidoever) en rechts (noordoever) gepresenteerd. De dwarsprofielen kunnen gekarakteriseerd worden als een overgang bij km 936, een bocht bij km 937 en 938 en opnieuw een overgang bij km 939. Tot 1999 lijkt het bodemdwarsverhang met name bij de "overgangen" km 936 en 939 tijdelijk af te nemen (sedimentatie in buitenbocht.



Figuur 5.5 Ruimtelijke variatie in bodemveranderingen.

In zones van 100 m breedte zijn vervolgens de bodemveranderingen in de buitenbocht ("links") rondom de rivieras ("midden") en in de binnenbocht ("rechts") geanalyseerd. De bodemgradienten in deze zones zijn weergegeven in Fig.5.6. Hieruit blijkt dat de grootste bodemveranderingen in de buitenbocht plaatsvinden, dus aan de zijde van de Gamerensche Waard. Er is daarmee sprake van een significante ruimtelijke variatie in bodemveranderingen. In de buitenbocht, dus aan de oever van de Gamerensche Waard, vindt bij km 937 en 938 een langzame verondieping plaats, terwijl benedenstrooms van km 938 de buitenbocht erodeert. In het midden, 100 m rondom de as van de rivier, zijn nauwelijks eenduidige trends op te merken. In de binnenbocht is tussen km 938 en 939 sprake van enige aanzanding.





Figuur 5.6 Ruimtelijke verdeling van bodemveranderingen.

Uit Fig.5.6 blijkt dat de grootste bodemveranderingen plaatsvinden in de buitenbocht, de minste in de binnenbocht. Deze bodemveranderingen aan de zijde van de Gamerensche Waard zijn een factor twee groter dan de profielgemiddelde (1D) veranderingen (Fig.5.4).

5.6 Conclusies

Door de monitoringsgegevens te verwerken tot km-gemiddelde waarden kan de analyse van de jaarlijkse dwarspeilingen uit Hoofdstuk 3 tot 2002 verlengd worden. Vanwege de overgang in waarnemingstechniek (multibeam vanaf juni 1999) kan een continue reeks alleen voor bodemgradiënten in langs- en dwarsrichting worden opgebouwd. Met het verloop in deze gradiënten kan bevestigt worden dat de invloed van nevengeulen in overeenstemming is met de oorspronkelijke voorspellingen.

Daarnaast geldt dat in het dwarsprofiel aan de zijde van de ingreep (linkeroever) de grootste veranderingen in bodemgradiënt hebben plaatsgehad. Dit wijst erop dat het effect voornamelijk te vinden is in de buitenbocht, in de directe invloedssfeer van de nevengeulen. Vanwege deze ruimtelijke variatie kan geconcludeerd worden dat effectbepaling met profielgemiddelde waarden de maximale bodemverandering met een factor twee kan onderschatten.

6.1 Evaluatie effectbepaling

Op basis van wiskundige modellen (en geverifieerde analytische en numerieke oplossingen hiervan) kan in het algemeen worden verwacht dat door onttrekking van afvoer uit de hoofdgeul aanzanding in de hoofdgeul optreedt. Deze aanzanding begint bij het onttrekkingspunt en plant zich daarna in benedenstroomse richting voort tot het samenvloeiingspunt. Deze aanzandingsgolf gaat in deze aanpassingsfase gepaard met een gelijktijdige (symmetrische) erosiegolf ter plekke van het samenvloeiingspunt.

In deze studie zijn bodempeilingen geanalyseerd met als onderzoeksvraag welke bodemveranderingen in de Waal tussen km 935 en 941 kunnen worden toegeschreven aan de periodiek en permanent stromende nevengeulen in de Gamerensche Waard.

Het bleek dat het theoretisch verwachte gedrag van aanzanding bij het onttrekkingspunt en een resulterende verondieping bij het samenvloeiingspunt zonder goede referentie niet uit de peilingen kan worden opgemaakt. Dit komt omdat het zicht op een nevengeuleffect wordt belemmerd door externe bodemontwikkelingen die uit de inventarisatie van jaarlijkse dwarspeilingen naar voren zijn gekomen:

- Tijdens en na de aanleg van de nevengeulen passeerde een tijdelijke bodemdaling het rivierstuk met de nevengeulen. Deze tijdelijke bodemdaling is vermoedelijk opgewekt bij de verdere normalisering van de BenedenWaal tussen km 926 en 932 in de periode 1980-1990 (Sectie 2.2).
- Ten gevolge van de zomer- en winterbeduitwisseling tijdens hoogwater ontstaat tussen km 935 en 936 een verondieping, en tussen km 936 en 937 een verdieping. Deze dieptevariatie blijft ook tijdens lagere afvoeren bestaan en kan in de jaarlijkse dwarspeilingen geïdentificeerd worden.

De waargenomen bodemontwikkelingen ter hoogte van de Gamerensche Waard worden dus veroorzaakt door zowel de aanleg van de nevengeulen als door de beide genoemde "externe" bodemontwikkelingen. Door reconstructie van een referentie bodemontwikkeling wordt duidelijk dat *ten opzichte van de passerende bodemdaling* wel degelijk een nevengeuleffect opgetreden kan zijn wat overeenstemt met de theoretische verwachting; een aanzanding ter plekke van het onttrekkingspunt (tussen km 936 en 937) aan benedenstroomse zijde voorafgegaan door een erosiegolf. Zowel de grootte als de snelheid van deze ontwikkeling kan verklaard worden met analytische en numerieke modellen.

In de evenwichtssituatie is theoretisch een constante verondieping te verwachten tussen onttrekking en samenvloeiing. Bij het onttrekkingspunt betekent dit in theorie een lokale verondieping tussen km 936 en 937. *Ten opzichte van de huidige bodemgradiënt* lijkt dit ook inderdaad te zijn ontwikkeld. Echter, omdat door hoogwatereffecten tussen km 936 en 937 sprake is van een lokale *verdieping*, is de resultante van zowel nevengeul- als hoogwatereffect voldoende lang na aanleg van de nevengeul nog steeds een verdieping.

Samengevat kan worden gezegd dat de nevengeulen in de Gamerensche Waarden vermoedelijk effecten genereren overeenkomstig de voorafgemaakte voorspellingen. Vanwege tijdelijke (externe) bodemveranderingen, en vanwege de lokaal aanwezige hoogwatereffecten is het niet goed mogelijk om deze effecten met grote nauwkeurigheid uit de monitoringsgegevens te determineren.

6.2 Aanbevelingen

Algemeen

- Monitoring voor het bepalen van lokale morfologische effecten heeft alleen zin als deze is afgestemd op de relevante context van (voornamelijk bovenstroomse) bodemontwikkelingen
- Een referentieontwikkeling ter beoordeling van morfologische veranderingen kan alleen geconstrueerd worden met voldoende data bovenstrooms van het rivierstuk met nevengeulen (zowel vóór als ná aanleg van de nevengeulen)
- De relatief grote verschillen tussen de km- en jaargemiddelde bodemliggingen van de jaarlijkse dwarspeilingen en de km-gemiddelde bodemliggingen van de monitoringsgegevens beperken een goede effectbepaling. Bij het uitvoeren van een monitoring is een consistente data-inwinning en bewerking noodzakelijk.
- Bij een ingreep aan één zijde van de hoofdgeul kan door ruimtelijke variatie de grootte van het effect langs het dwarsprofiel een factor twee groter/kleiner zijn dan de profielgemiddelde waarde. Voor een bepaling van een representatieve effect moet behalve het profiel-gemiddelde gedrag ook dit twee-dimensionale karakter worden beschouwd.
- In de effectbepaling lijkt (voor deze toepassing) de evenwichtsaanzanding bij Q_{84} representatief te zijn voor het effect van nevengeulen

Gamerensche Waarden

- De vermoedelijke grootte van de aanzanding tussen km 936 en 937 komt overeen met de voorspelde waarde en lijkt daarmee te voldoen aan het gestelde ontwerpcriterium voor *profielgemiddelde* aanzanding.
- Het effect van nevengeulen lijkt in de gebruikte peilingen benedenstrooms van km 938 nog niet volledig te zijn ontwikkeld.
- De grootste bodemveranderingen lijken te hebben plaatsgevonden in de buitenbocht, en in mindere mate rondom de rivieras.

Literatuur

Brinke, W.BT.M. (2000); Dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemligging en baggergegevens Rijntakken. Periode 1900-2000 compleet, cd rom, RIZA.

Schropp, M.; M. van Wijngaarden, A. v.d. Scheer en B.v.d. Heijdt (2002); Monitoring nevengeulen, morfologische en chemische monitoring geulen Gamerensche Waard en Opijnen, datarapportage 2000/2001, RIZA werkdocument 2002.028x.

Schropp, M. (2002); mondelinge communicatie

Sieben, J. (2001); Inrichtingsplan Heesseltsche uiterwaarden. Verkenning van morfologische effecten., PiHe-wd-12.

Sieben, J. (2002); Hoogwatereffecten in het zomerbed, verkenning kennis en kennisbehoefte, RIZA werkdocument 2001.142x.

Sieben en Van Essen (2003); Kleinschalige morfodynamica, waarom en hoe, RIZA werkdocument, 2003.060x

Vries, M. de (1994); Rivieren, Handleiding collegef8, Technische Universiteit Delft.

Bijlage A. Overzicht gemiddelde en standaardafwijking van recentere bodemligging.

