

Het morfologische effect van bochtverbeteringen in een rivier



Afstudeerverslag


TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

Janneke Siers
juni 1997

Het morfologische effect van bochtverbeteringen in een rivier

Afstudeerverslag

Voor het behalen van het ingenieursexamen aan de Faculteit der Civiele
Techniek van de Technische Universiteit Delft

Vakgroep: Waterbouwkunde
Sectie: Rivierwaterbouwkunde

Afstudeercommissie:
Prof.dr.ir. H.J. de Vriend
Ir. H. Havinga
Dr.ir. Z.B. Wang
Prof.dr.ir. G.S. Stelling

Janneke Siers
juni 1997

Voorwoord

Dit rapport is het eindresultaat van het afstudeerwerk, verricht bij de vakgroep Waterbouwkunde, sectie Rivierwaterbouwkunde van de Faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Het beschrijft het onderzoek naar de grootschalige morfologische effecten ten gevolge van rivierbochtverbeteringen in de vorm van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen. Dit afstudeerwerk is uitgevoerd onder toezicht van prof.dr.ir. H.J. de Vriend, hoogleraar riviermorfologie en rivierwaterbouwkunde. De dagelijkse begeleiding was in handen van ir. H. Havinga. Daarnaast maakten dr.ir. Z.B. Wang en prof.dr.ir. G.S. Stelling deel uit van de afstudeercommissie.

Naast dit eindrapport is een overzicht gemaakt van de bestaande literatuur over onderzoek op het gebied van rivierbochtverbeteringen door middel van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen.

Mijn dank gaat uit naar de leden van de afstudeercommissie, in het bijzonder naar ir. H. Havinga voor het tussentijds kritisch doornemen van mijn werk. Daarnaast ben ik de medewerkers van het Waterloopkundig Laboratorium, met name dr.ir. C.J. Sloff, dankbaar voor de behulpzaamheid bij SOBEK.

Janneke Siers
Delft, juni 1997

Samenvatting

In een rivierbocht treedt een zogenaamde spiraalstroming op, waardoor het typische dwarsprofiel van een rivierbocht ontstaat: diep in de buitenbocht en ondiep in de binnenbocht. Hierdoor is slechts over een kleine breedte voldoende vaardiepte aanwezig en vormen bochten in de Waal een knelpunt in de rivier voor de scheepvaart. In het Waalproject worden onder andere deze knelpunten aangepakt. Daarbij wordt gezocht naar nieuwe, kleinschalige maatregelen, omdat de traditionele rivierverbeteringen te grote gevolgen hebben voor zowel de rivier als voor de ecologie en het landschap. Doordat deze maatregelen innovatief van karakter zijn, zijn de effecten ervan nog onvoldoende bekend.

In dit afstudeerproject zijn met behulp van het 1D-programma SOBEK de grootschalige morfologische effecten van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen bepaald. Deze bochtmaatregelen vergroten de weerstand van de rivier, waardoor de waterstanden bovenstrooms worden opgestuwd. Dit heeft zowel boven- als benedenstrooms van de bochtmaatregel morfologische gevolgen. Voor het bepalen van die morfologische gevolgen is van het rivierensysteem Rijn, Waal en Pannerdens Kanaal een 'gladde' schematisatie gemaakt, dat wil zeggen dat zo weinig mogelijk discontinuïteiten in geometrie en ruwheid op een riviertak voorkomen. Met deze schematisatie wordt bereikt, dat de bodemontwikkeling in langsrichting van de rivier geen zeer grote schommelingen vertoont, zoals dat in het door Rijkswaterstaat gebruikte Rijntakken-model het geval is en waardoor de morfologische gevolgen van bochtverbeteringen moeilijk te onderscheiden zijn van de overige morfologische veranderingen.

Het model is geijkt op waterbeweging, sedimentbeweging en morfologie. Daarbij is er van uitgegaan, dat het uiteindelijke doel van het model het voorspellen van gróótschalige morfologische ontwikkelingen ten gevolge van zomerbed ingrepen op met name de Waal is. Dit betekent dat, hoewel de waterbeweging redelijk goed is geijkt, het model niet geschikt is voor het voorspellen van locale waterstanden, omdat locale kenmerken in de geometrie van de rivier hierop veel invloed kunnen hebben en deze niet in het model zijn meegenomen. Om dezelfde reden is het model ook niet geschikt voor de voorspelling van zeer locale bodemontwikkelingen. De door SOBEK berekende sedimenttransporten komen goed overeen met de sedimenttransporten waarvan in het IVR project (Rijkswaterstaat) wordt uitgegaan. De autonome bodemdaling in het ontwikkelde SOBEK-model is over het algemeen te klein.

Benedenstrooms van een overgang van rivierbocht naar rechtstand treden oscillaties in de bodemligging op. De oscillaties benedenstrooms van een Waalbocht zijn analytisch benaderd met behulp van het twee-kanalen model. Benedenstrooms van een bocht waar een vaste laag of bodemkribben zijn aangelegd, zijn de oscillaties sterker dan in de oorspronkelijke situatie. Dit wordt veroorzaakt door de erosiekuil die benedenstrooms van de bochtmaatregel ontstaat. Bij bodemschermen ontstaat geen erosiekuil en zijn de bodemoscillaties kleiner dan in de oorspronkelijke situatie.

De vaste laag en de bodemkribben zijn in SOBEK weergegeven door een kleinere Chezy-waarde en een niet-erodeerbare laag. Daarbij zijn de opstuwing van de waterstanden en de bodemdaling in de bocht geijkt. De niet-erodeerbare, ofwel vaste laag heeft invloed op de sedimentbeweging. Door de hoogteligging van de laag te veranderen, verandert het sedimenttransport en kan de bodemverandering ter plaatse van de vaste laag worden geijkt.

De bodemschermen zijn in SOBEK weergegeven door een iets kleinere Chezy-waarde. Een kleinere Chezy-waarde heeft echter indirect tot gevolg, dat in SOBEK een groter sedimenttransport wordt berekend, dat in de praktijk niet zal optreden. Om dit te compenseren is de sedimenttransporterende breedte verkleind. Naast de opstuwing van de waterstanden is het sedimenttransport in de bocht geijkt.

Het in werkelijkheid optredende effect van een vaste laag kan uit bodempeilingen op de Waal worden gehaald, omdat in 1987 de aanleg van een vaste laag bij Nijmegen is gerealiseerd. Dit is echter de enige reeks bodempeilingen waarmee het SOBEK model vergeleken kan worden. Het bodemkribbenveld bij Erlecom is pas in 1996 gereedgekomen, zodat nog niet van een evenwichtssituatie van de bodemligging kan worden gesproken. En ook van de bodemschermen zijn nog geen bruikbare bodemgegevens beschikbaar.

In het model wordt op de Waal over het algemeen een te kleine autonome bodemdaling berekend en treden morfologische ontwikkelingen te langzaam op. Daarnaast is bij de gevoeligheidsanalyse duidelijk geworden, dat de hydraulische randvoorwaarde op de benedenrand er voor zorgt, dat op de Waal een te kleine bodemdaling wordt berekend. Wanneer deze fouten in de door SOBEK berekende bodemveranderingen worden verwerkt, komen de berekende bodemveranderingen op het traject tussen de 20 km bovenstrooms en 30 km benedenstrooms, qua grootte erg goed overeen met de bodempeilingen. In SOBEK treden de bodemveranderingen echter ongeveer drie keer zo langzaam op als in werkelijkheid.

De beoordeling van het model berust op de vergelijking van de SOBEK berekeningen met de bodempeilingen voor de situatie met de vaste laag. Om definitief te kunnen beoordelen of het model geschikt is voor het voorspellen van de morfologische effecten van bochtverbeteringen, is het vergelijken met één reeks bodempeilingen onvoldoende. Daarnaast is de ijking van de bodemkribben gebaseerd op een aanname voor de bodemverandering in de bocht, die is afgeleid van de situatie met de vaste laag. Uit bodempeilingen in de toekomst rond het bodemkribbenveld bij Erlecom, moet blijken of die aanname ook echt gerechtvaardigd is. Net als voor de bodemschermen is gedaan, zou de bodemverandering in de bocht ook met behulp van een computermodel kunnen worden bepaald.

Op basis van de resultaten en analyses in dit afstudeeronderzoek, kan worden gesteld, dat de voorspelling van de grootschalige morfologische ontwikkelingen met behulp van SOBEK vrij goed mogelijk is, mits rekening wordt gehouden met de te kleine autonome bodemdaling, het effect van de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde en het feit dat in werkelijkheid de ontwikkelingen sneller zullen plaatsvinden. Minder omslachtig is het om te kijken naar de bodemligging ten opzichte van de situatie zonder bochtmaatregel, omdat dan de eerste twee effecten niet meespelen.

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting	3
Lijst van bijlagen.....	9
Lijst van figuren.....	11
1. Inleiding	13
1.1 Rivierbochten	13
1.2 Opbouw afstudeerwerk.....	13
1.3 Opbouw eindrapport.....	14
1.4 Probleem- en doelstelling	14
1.5 Plan van aanpak	15
2. Opzet van het model	17
2.1 Inleiding.....	17
2.2 Schematisatie dwarsprofielen en geometrie	18
2.3 Uitgangspunten.....	18
3. IJking waterbeweging	21
3.1 Inleiding.....	21
3.2 Uitgangspunten.....	21
3.3 Invoer.....	22
3.4 Ijkingsprocedure.....	22
3.5 Conclusies ijking waterbeweging	24
4. IJking sedimenttransport en morfologie	27
4.1 Inleiding.....	27
4.2 Uitgangspunten.....	27
4.3 Invoer.....	28
4.4 Ijkingsprocedure.....	29
4.5 Conclusies ijking sedimenttransport en morfologie	31
5. Twee-kanalen model	35
5.1 Inleiding.....	35
5.2 Invoeren van de 2D-morfologie	36
5.3 Waterbeweging.....	36
5.4 Twee-kanalen model	37
5.5 Conclusies met betrekking tot het twee-kanalen model	43

6. Vaste laag	45
6.1 Inleiding	45
6.2 Invloed van de vaste laag op de waterbeweging	45
6.3 Verandering van het bochtprofiel	48
6.4 Sedimenttransport over een vaste laag	50
6.5 IJking waterbeweging in situatie met vaste laag	54
6.6 IJking van de morfologische ontwikkelingen in de bocht	55
6.7 Invloed van de vaste laag op de morfologie	55
6.8 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de vaste laag	58
7. Bodemkribben	61
7.1 Inleiding	61
7.2 IJking waterbeweging in de situatie met bodemkribben	61
7.3 IJking van de morfologische ontwikkelingen in de bocht	62
7.4 Invloed van de bodemkribben op de morfologie	62
7.5 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de bodemkribben	64
8. Bodemschermen	67
8.1 Inleiding	67
8.2 Effect van bodemschermen op het langsverhang	68
8.3 Effect van het bochtprofiel op het langsverhang	70
8.4 IJking van de waterbeweging	73
8.5 Invloed van de bodemschermen op de bodemligging	74
8.6 Invloed van de ruwheid op het sedimenttransport	75
8.7 IJking van het sedimenttransport in de bocht	76
8.8 Invloed van de bodemschermen op de morfologie	77
8.9 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de bodemschermen	78
9. Gevoeligheidsanalyse	81
9.1 Inleiding	81
9.2 Karakteristieke korreldiameter	81
9.3 Hydraulische randvoorwaarde benedenrand	82
9.4 Morfologische randvoorwaarde benedenrand	84
9.5 Bodemverhang Pannerdens Kanaal	84
9.6 Hoogteligging vaste laag	85
9.7 Conclusies met betrekking tot de gevoeligheidsanalyse	86
10. Conclusies en aanbevelingen	89
Lijst van symbolen	93
Literatuur	95
Tabellen	
Bijlagen	

Lijst van bijlagen

bijlage 2-I	'Referentie' dwarsprofielen
bijlage 2-II	Bodemligging in SOBEK en in IVR
bijlage 3-I	Dwarsprofielen Waal en Pannerdens Kanaal
bijlage 3-IIa	Waterniveaus op de Waal
bijlage 3-IIb	Verschil in waterniveaus tussen SOBEK en IVR
bijlage 4-I	Randvoorwaarde bovenrand, $Q(t)$
bijlage 4-II	Dwarsprofielen Rijn
bijlage 4-III	Sedimenttransporten op de riviertakken
bijlage 4-IV	Bodemontwikkeling
bijlage 4-V	Sedimenttransport Rijn en Waal
bijlage 5-I	Twee-kanalen model voor de bodemligging benedenstrooms van een rivierbocht
bijlage 5-II	Invloed parameters op oplossing voor $H(x)$
bijlage 6-I	Voortplantingssnelheid over een niet-alluviale bodem
bijlage 6-II	Bodemligging in en nabij de bocht 1926-1985 en 1987-1993
bijlage 6-III	Bodemontwikkeling Waal met vaste laag
bijlage 6-IV	Verandering bodemligging Waal met vaste laag
bijlage 6-Va	Bodemligging Waal na 40 jaar
bijlage 6-Vb	Verschil in bodemligging Waal met en zonder vaste laag na 40 jaar
bijlage 6-Vc	Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 6-VIa	Gemiddeld sedimenttransport op de Waal, 2002-2032
bijlage 6-VIb	Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002-2032
bijlage 6-VII	Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal per decennium
bijlage 7-I	Bodemontwikkeling Waal met bodemkribben
bijlage 7-II	Verandering bodemligging Waal met bodemkribben
bijlage 7-IIIa	Bodemligging Waal na 40 jaar
bijlage 7-IIIb	Verschil in bodemligging Waal met en zonder bochtmaatregel na 40 jaar
bijlage 7-IIIC	Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 7-IVa	Gemiddeld sedimenttransport op de Waal, 2002-2032
bijlage 7-IVb	Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002-2032
bijlage 8-I	Sedimenttransport op de Waal
bijlage 8-II	Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002-2032
bijlage 8-IIIa	Verandering bodemligging Waal met bodemschermen
bijlage 8-IIIb	Verandering bodemligging Waal met en zonder bodemschermen
bijlage 8-IVa	Bodemligging Waal na 40 jaar
bijlage 8-IVb	Verschil in bodemligging Waal met en zonder bodemschermen na 40 jaar
bijlage 9-Ia	Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-Ib	Verschil in bodemligging Waal na 40 jaar
bijlage 9-IIa	Sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002
bijlage 9-IIb	Verschillen in de bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-IIc	Verandering bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-IId	Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-IIIA	Sedimenttransport op de Rijn en de Waal
bijlage 9-IIIB	Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-IIIC	Verandering bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

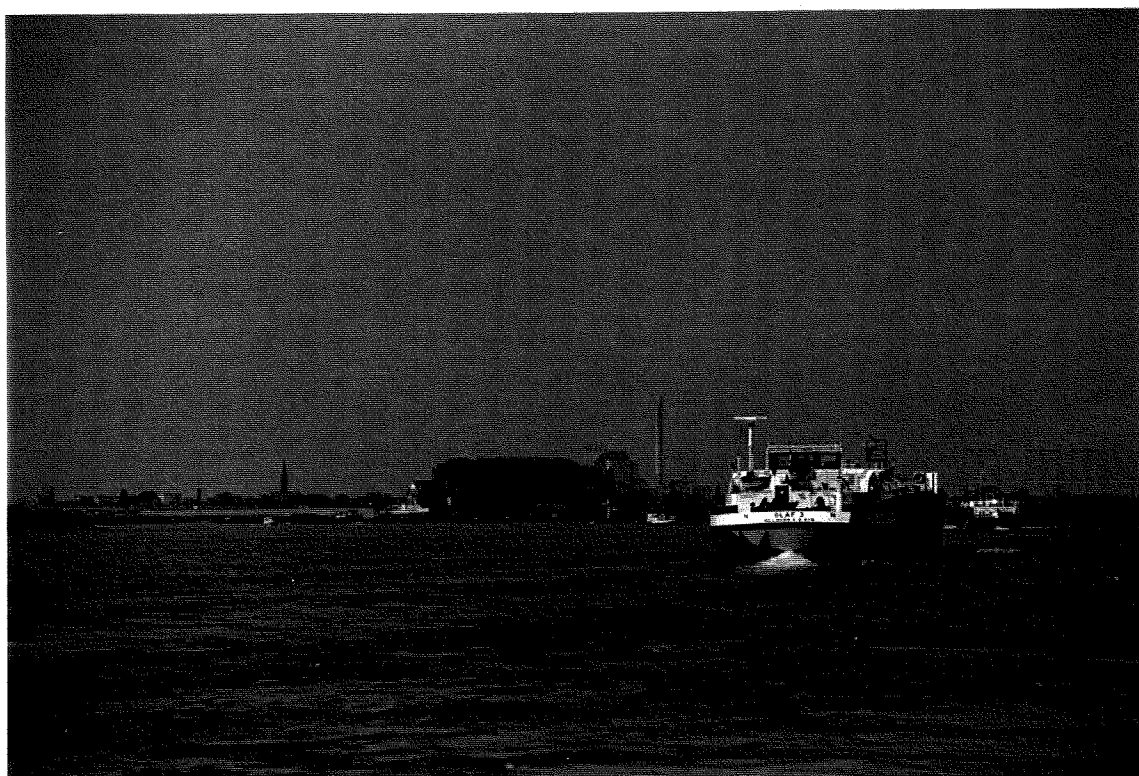
bijlage 9-IIId	Verschillen in de bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-IV	Verschillen in de bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar
bijlage 9-Va	Bodemligging Waal na 40 jaar
bijlage 9-Vb	Verschillen in bodemligging op de Waal na 40 jaar
bijlage 9-Vc	Bodemligging Waal na 40 jaar
bijlage 9-Vd	Verschillen in bodemligging op de Waal na 40 jaar
bijlage 9-Ve	Sedimenttransport op de Waal

Lijst van figuren

figuur 1.1	Spiraalstroming in een rivierbocht.
figuur 2.1	Roosterpunten en knopen.
figuur 2.2	Modelnetwerk.
figuur 4.1	Bodemligging Rijn, Waal en Pannerdens Kanaal met daarin aangegeven de gedefinieerde dwarsprofielen en de bodemligging in m tov NAP.
figuur 5.1	Definitie dwarsprofiel bij de 2D-morfologie optie.
figuur 5.2	Nieuwe schematisatie van het model.
figuur 5.3	Definities twee-kanalen model.
figuur 5.4	Dwarsprofiel van een Waalbocht.
figuur 5.5	Waterdieptes van het linker- en rechterkanaal benedenstrooms van een Waalbocht bij $Q_{Waal} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$, volgens vergelijking (5-22). $H_0 = 3 \text{ m}$.
figuur 5.6	Bodemverstoring tgv het dwarsverhang in de bocht (H_1) en tgv de erosiekuil benedenstrooms van de bochtmaatregel (H_2).
figuur 5.7	Waterdieptes van het linker- en rechterkanaal benedenstrooms van een Waalbocht bij $Q_{Waal} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$, volgens vergelijking (5-22). $H_1 (x=0) = 1,9 \text{ m}$ en $H_2 (x=0) = 2 \text{ m}$.
figuur 6.1	Opstuwing ten gevolge van vaste laag en drempelwerking.
figuur 6.2	Opstuwing over een lengte van 2,5 km voor verschillende drempelhoogtes. $C_{alluviaal} = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $C_{vaste laag} = 35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $B = 263 \text{ m}$, $i_b = 1,1 \cdot 10^{-4}$.
figuur 6.3	Vereenvoudiging bochtprofiel voor het bepalen van de bodemdaling in de binnenbocht.
figuur 6.4	Dwarsprofiel van een Waalbocht.
figuur 6.5	Definitie tekening vaste laag.
figuur 6.6	Reductie functies voor het sedimenttransport.
figuur 6.7	Voortplantingssnelheid van een bodemverstoring over een vaste laag als functie van δ_{vl} / δ .
figuur 8.1	Bodemschermen in een rivierbocht.
figuur 8.2	Bodemschermenveld en definitie van de afmetingen (bovenaanzicht).
figuur 8.3	Opstuwing over een lengte van 2,5 km ten gevolge van de bodemschermen ($H_v = 2,60 \text{ m}$).
figuur 8.4	Verhouding tussen het langsverhang met en zonder bodemschermen ($H_v = 2,60 \text{ m}$).
figuur 8.5	Vereenvoudiging dwarsprofielen van een bocht en een rechtstand van een rivier.
figuur 8.6	Verhouding i_{bocht}/i_{recht} als functie van het dwarsverhang in de bocht en voor verschillende waterdieptes.
figuur 8.7	Afname van de opstuwing over een lengte van 2,5 km, als gevolg van het bochtprofiel, bij een waterdiepte van ca 7,5 m ($Q_{Waal} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$).
figuur 8.8	Verandering bodemligging ten gevolge van de bodemschermen.
figuur 9.1	Stuwkrommes ten gevolge van veranderde waterstand op de benedenrand.
figuur 9.2	Stuwkromme als gevolg van bodemdaling en vaste $H(Q)$ relatie.

Hoofdstuk 1

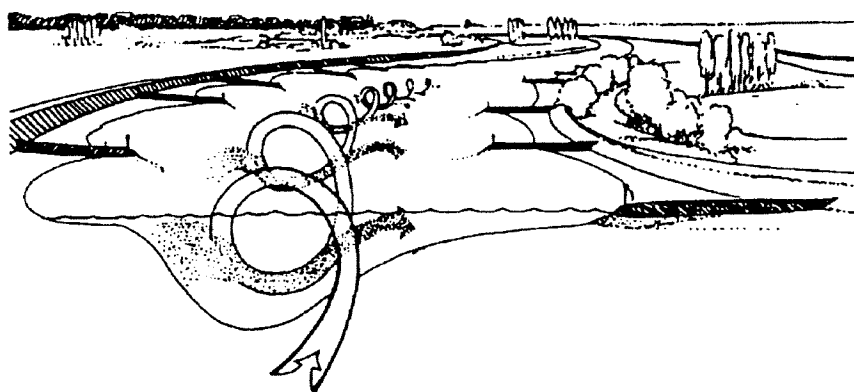
Inleiding



1. Inleiding

1.1 Rivierbochten

In een rivierbocht treedt een zogenaamde spiraalstroming op als gevolg van de niet-uniforme snelheidsverdeling en de centrifugaalkracht die in de bocht op het water werkt, zie figuur 1.1. Het sneller stromende water aan het oppervlak wordt richting buitenbocht gedreven en het water bij de bodem stroomt richting binnenbocht. De stroming aan de bodem verplaatst sediment van buiten- naar binnenbocht, waardoor het typische dwarsprofiel van een rivierbocht ontstaat: diep in de buitenbocht en ondiep in de binnenbocht.



Figuur 1.1 Spiraalstroming in een rivierbocht. Bron: Rijkswaterstaat (K.Nuijten).

De bochten in de Waal vormen een knelpunt voor de scheepvaart, doordat over de breedte waarover voldoende vaardiepte aanwezig is kleiner is dan in de rechte riviergedeelten. In het Waalproject worden onder andere deze knelpunten aangepakt. Omdat traditionele riviervverbeteringen, zoals bochtafsnijdingen en grootschalige normalisaties, te grote gevolgen hebben voor zowel de rivier als voor de ecologie en het landschap, wordt tegenwoordig gezocht naar nieuwe, kleinschalige maatregelen. Deze maatregelen zijn vaak innovatief van karakter, zodat effecten ervan nog niet goed bekend zijn. In dit afstudeerproject wordt gekeken naar de grootschalige morfologische effecten van bochtverbeteringen met behulp van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen.

1.2 Opbouw afstudeerwerk

Dit eindrapport is het tweede deel van het afstudeerwerk 'Het morfologische effect van bochtverbeteringen in een rivier'. In dit rapport wordt verslag gedaan van het bepalen van de grootschalige morfologische effecten van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen. Hiervoor is gebruikt gemaakt van het computerprogramma SOBEK en van analytische methoden. Daarnaast is een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd naar de gebruikte parameters. Het eerste deel van dit afstudeerwerk bestaat uit een onderzoek naar de bestaande literatuur op het gebied van bochtverbeteringen.

1.3 Opbouw eindrapport

In hoofdstuk 2 wordt de opzet van het model en de schematisatie van de riviertakken besproken. In de hoofdstukken 3 en 4 wordt de ijking van de water- en sedimentbeweging en de morfologie behandeld voor de situatie zonder bochtmaatregelen. Hoofdstuk 5 gaat over de mogelijkheid een rivierbocht quasi twee-dimensionaal te schematiseren in SOBEK. De hoofdstukken 6, 7 en 8 behandelen achtereenvolgens de invoer van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen in het model, de ijking ervan en de berekening van de morfologische gevolgen door SOBEK. Daarnaast wordt in deze hoofdstukken de benodigde theorie behandeld. De gevoeligheidsanalyse die vervolgens is uitgevoerd, wordt beschreven in hoofdstuk 9. In hoofdstuk 10 staan de conclusies en aanbevelingen waartoe dit afstudeerproject heeft geleid.

1.4 Probleem- en doelstelling

Probleemstelling

Doordat bochtverbeteringsmaatregelen in de vorm van constructies de ruwheid in een bocht vergroten, worden bovenstrooms de waterstanden opgestuwd. De verandering van de hydraulische parameters heeft zowel boven- als benedenstroomse morfologische effecten. Bij het bepalen van die morfologische effecten met behulp van het computerprogramma SOBEK, komen de volgende twee problemen naar voren:

1. Het bestaande SOBEK-Rijntakkenmodel geeft een erg onregelmatige bodemontwikkeling in de tijd berekend. Dit komt doordat de rivier vrij gedetailleerd is geschematiseerd met veel discontinuïteiten. Hierdoor is het morfologische effect van een bochtverbetering in dit model moeilijk te onderscheiden van de autonome bodemontwikkeling.
2. Om de grotere ruwheid ter plaatse van een bochtverbeteringsmaatregel weer te geven, kan de Chezy-waarde in het model plaatselijk worden verkleind. Verkleining van de Chezy-waarde heeft, indirect, tot gevolg, dat het programma een te groot sedimenttransport berekent. Hierdoor zijn de bodemdaling ter plaatse van de maatregel en het sedimentaanbod benedenstrooms daarvan te groot.

Daarnaast is bekend, dat benedenstrooms van een rivierbocht schommelingen in de bodemligging voorkomen, waardoor de bodem van een rivierhelft afwisselend hoger en lager komt te liggen dan de bodem in de andere helft. Deze effecten kunnen niet door het één-dimensionale model SOBEK worden weergegeven, zodat hiervoor een andere methode moet worden gezocht.

Rijkswaterstaat bereidt bochtverbeteringsmaatregelen in de Bovenwaal voor en heeft al een deel ervan uitgevoerd. Om deze reden wordt in dit afstudeerwerk naar het gebied van de Bovenwaal gekeken.

Doelstelling

Doel van dit afstudeerwerk is het bepalen van de morfologische effecten van de bochtverbeteringsmaatregelen vaste laag, bodemkribben en bodemschermen in de Bovenwaal en het op een goede manier weergeven van deze maatregelen in het programma SOBEK. In dit rapport wordt beschreven hoe de Waal voor dit doel in SOBEK is geschematiseerd en geijkt en hoe de morfologische effecten zijn bepaald.

Het uiteindelijke resultaat van het afstudeerwerk zal zijn:

- een literatuurverslag over eerdere onderzoeken naar bochtverbeteringsmaatregelen,
- een methode om de maatregelen goed te modelleren en schematiseren,
- een berekening van de morfologische effecten van de maatregelen,
- een gevoeligheidsonderzoek naar de gebruikte parameters, aannames en uitgangspunten.

1.5 Plan van aanpak

Voor dit werk zal gebruik worden gemaakt van het één-dimensionale computerprogramma SOBEK. SOBEK kan in open waterlopen de waterbeweging, sedimentbeweging, waterkwaliteit en zoutwaterbeweging simuleren.

Eerst wordt een model gemaakt van de Rijn, Waal en het Pannerdens Kanaal. Om het probleem van een te onregelmatige bodemontwikkeling, waardoor het effect van de maatregel niet meer duidelijk zichtbaar is, te vermijden, wordt de rivier sterk geschematiseerd, waarbij het zomerbed en de uiterwaarden een constante breedte hebben. De afmetingen van het dwarsprofiel en andere benodigde parameters zijn representatief voor de betreffende riviertak. De waterbeweging en de morfologie van het model worden geijkt voor de situatie waarin de vaste laag bij Nijmegen sinds 1986 aanwezig is.

Vervolgens worden achtereenvolgens de verschillende bochtmaatregelen ingevoerd. De veranderde ruwheid van de bocht wordt uit metingen van de opstuwing en de theorie (voor de bodemschermen) bepaald. Door verschillende parameters aan te passen moet nu het in werkelijkheid optredende sedimenttransport in de bocht worden verkregen. Dit is in de evenwichtssituatie bij benadering gelijk aan het transport dat op het rechte rivierdeel optreedt. Hierna worden voorspellende berekeningen met het model gedaan voor de bepaling van de morfologische effecten van de bochtmaatregelen. Als debiet wordt hierbij een afvoerregime van de Rijn genomen. Op het eind wordt een gevoeligheidsonderzoek gedaan naar de verschillende invoerparameters.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

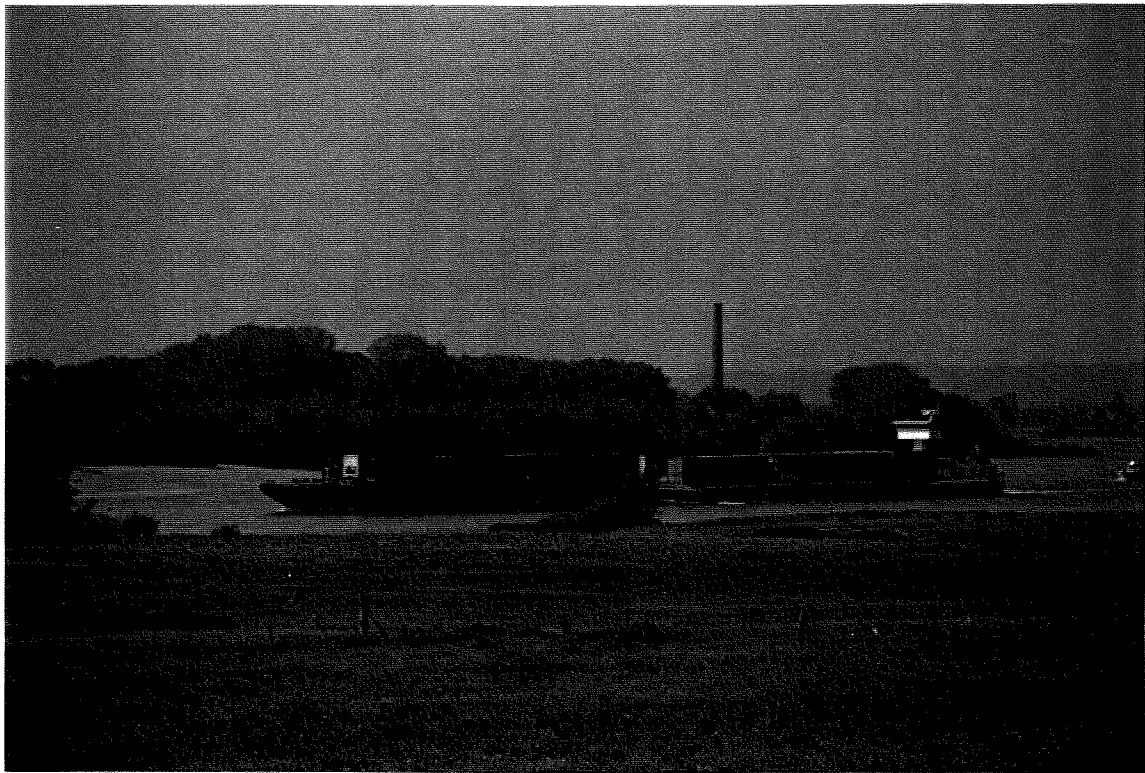
18

19

20

Hoofdstuk 2

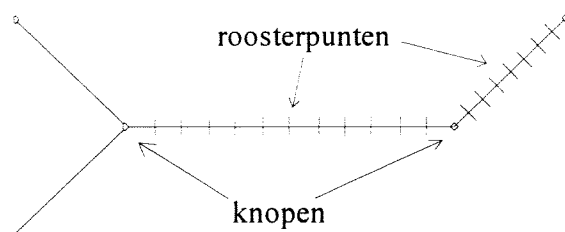
Opzet van het model



2. Opzet van het model

2.1 Inleiding

In SOBEK wordt een rivierensysteem ingevoerd als een stelsel takken, gekoppeld door knopen. Op de takken liggen roosterpunten op een afstand Δx van elkaar, zie figuur 2.1. De invoergegevens, zoals dwarsprofiel, ruwheid, bodemligging, korreldiameter en de beginwaarden voor waterdiepte en debiet, zijn aan deze roosterpunten verbonden.



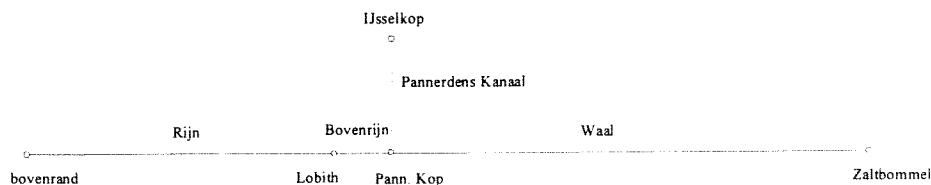
Figuur 2.1 Roosterpunten en knopen.

Door Rijkswaterstaat is in SOBEK een één-dimensionaal model voor de Nederlandse Rijntakken (Bovenrijn, Waal, Pannerdens Kanaal, IJssel en Nederrijn) gebouwd, het SOBEK-Rijntakkenmodel. Dit is gebeurd in het kader van de Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (IVR), met als doel het simuleren van waterbeweging en morfologie voor verschillende inrichtingsvarianten (lit.[2]).

Voor het doel van dit afstudeerwerk, het bepalen van de morfologische effecten van bochtverbeteringsmaatregelen, is een model gemaakt, bestaande uit vier takken:

- de Rijn (in Duitsland),
- de Bovenrijn (in Nederland),
- de Waal,
- het Pannerdens Kanaal.

De ligging van de takken en knopen en de lengte ervan, zijn gegeven in figuur 2.2 en de tabellen 2.1 t/m 2.3. In de volgende paragrafen wordt beschreven hoe de geometrie van de takken is geschematiseerd en wat daarbij de uitgangspunten en randvoorwaarden zijn. Met het programma SOBEK worden de water- en sedimentbeweging in deze riviertakken gesimuleerd en worden de morfologische veranderingen berekend.



Figuur 2.2 Modelnetwerk.

2.2 Schematisatie dwarsprofielen en geometrie

In het SOBEK-Rijntakkenmodel is om de 500 meter een dwarsprofiel ingevoerd. Zowel de vorm van het dwarsprofiel als de hoogteligging van de bodem kunnen per dwarsprofiel sterk verschillen, waardoor de geometrie van de rivier in langsricting erg onregelmatig is. Bij morfologische berekeningen veroorzaakt dit een erg onregelmatige bodemontwikkeling in de tijd, waarin moeilijk het effect van een bochtmaatregel te onderscheiden is. Om dit probleem te omzeilen wordt, om te beginnen, per riviertak één dwarsprofiel ingevoerd.

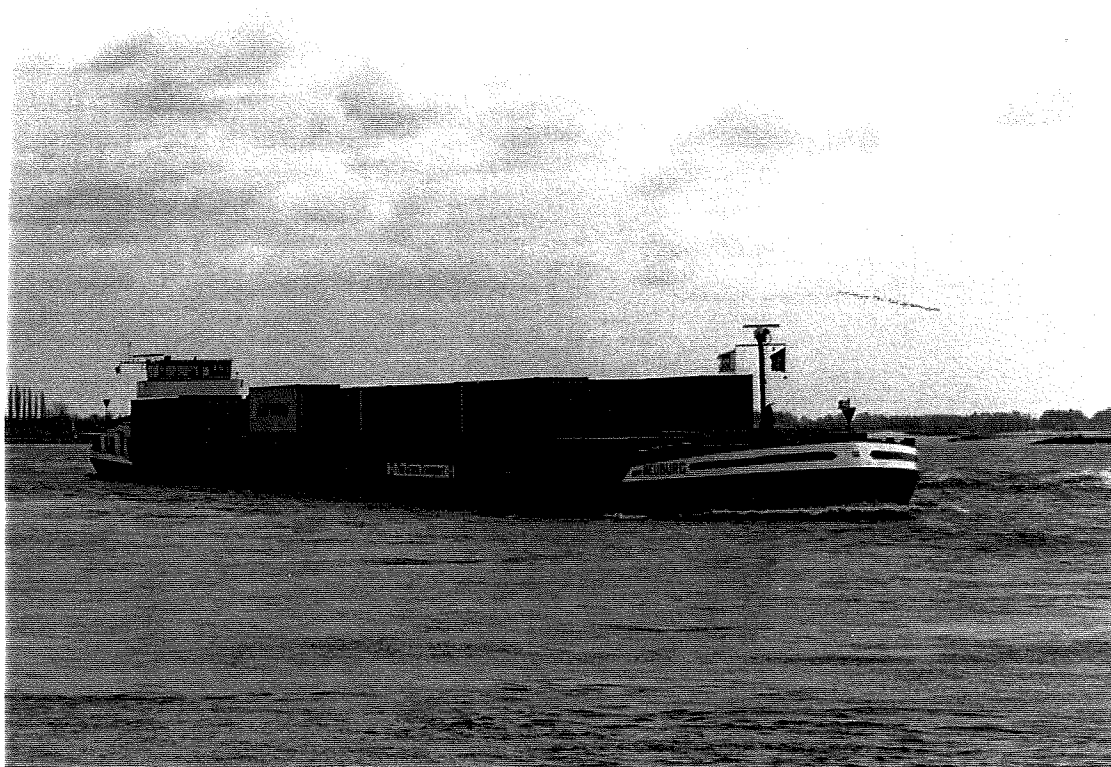
Uit de dwarsprofielen die in het SOBEK-Rijntakkenmodel zijn gebruikt, is voor iedere riviertak (Rijn, Bovenrijn, Waal en Pannerdens Kanaal) een 'referentie' dwarsprofiel bepaald, dat als uitgangspunt diende bij de ijking van het model. Deze dwarsprofielen zijn gegeven in bijlage 2-I. Het dwarsprofiel is te verdelen in een hoofdgeul, een kribvaksectie en een uiterwaard. Eventueel kan bij de ijking van het model het profiel nog worden aangepast. De hoogte ligging van de bodem is zoveel mogelijk in overeenstemming gebracht met het Rijntakken-model, waarin de bodemligging is bepaald aan de hand van bodemlodingen in 1992. Het verhang van de bodem is bepaald aan de hand van de bodempeilingen van een aantal jaren, die gegeven zijn in literatuur [1]. In bijlage 2-II zijn de bodemligging van Rijn, Waal en Pannerdens Kanaal en de globale bodemligging van het Rijntakken-model, zoals die in het IVR-rapport beschreven is, gegeven.

2.3 Uitgangspunten

Het uitgangspunt van de schematisatie is de invoer zoals die is gebruikt in het onderzoek Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (literatuur [2]). Hierbij is geprobeerd parameters als de Chezy-waarde, het dwarsprofiel en het bodemverhang, constant te houden in een riviertak.

Hoofdstuk 3

IJking waterbeweging



3. IJking waterbeweging

3.1 Inleiding

De waterbeweging is geijkt voor de volgende vier stationaire afvoeren:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Lobith}} &= 984 \text{ m}^3/\text{s} && (\text{Overeengekomen Lage Rivierstand, OLR}) \\ Q_{\text{Lobith}} &= 4500 \text{ m}^3/\text{s} && (\text{Bankfull afvoer}) \\ Q_{\text{Lobith}} &= 7944 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q_{\text{Lobith}} &= 15000 \text{ m}^3/\text{s} && (\text{Maatgevend Hoogwater, MHW}) \end{aligned}$$

Bij deze vier afvoeren is de afvoerverdeling tussen de Waal en het Pannerdens Kanaal geijkt en bij OLR, Bankfull en MHW zijn de waterstanden geijkt. De situatie bij de OLR afvoer is van belang voor de scheepvaart, de Bankfull afvoer bepaalt in sterke mate de morfologie van de rivier en de MHW afvoer is van belang voor het bepalen van de dijkhoogtes. Bij de afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt bovendien de afvoerverdeling tussen het zomer- en winterbed van de Waal geijkt. De uitwisseling van de afvoer tussen het zomer- en winterbed heeft ook grote invloed op de morfologie van de rivier.

De in eerste instantie ingevoerde parameters worden uit het IVR-rapport (lit.[2]) gehaald. De Chezy-waarden zijn daarin afvoerafhankelijk gegeven en variëren binnen een riviertak. Voor dit model wordt echter een Chezy-waarde gezocht die over de hele riviertak constant is. Ook de Q-H relaties voor Vuren en IJsselkop worden uit het IVR-rapport gehaald, zie tabel 3.1. Voor elke riviertak wordt één dwarsprofiel ingevoerd, zie hoofdstuk 2.

3.2 Uitgangspunten

Het model zal worden gebruikt voor de voorspelling van de morfologische veranderingen op de Waal ten gevolge van bochtverbeteringen op de Bovenwaal. Voor de voorspelling van de benedenstroomse effecten wordt de Waal tot aan Tiel nauwkeurig geijkt. Voor de voorspelling van de bovenstroomse effecten zou de Rijn nauwkeurig moeten worden geijkt. Van het deel bovenstrooms van Lobith, zijn echter erg weinig meetgegevens aanwezig, zodat van ijking geen sprake kan zijn en hiervoor als invoerparameters de waarden uit het IVR-rapport worden aangehouden.

De waterstanden en afvoeren worden respectievelijk gegeven door peilingen tijdens OLR 1991, de betrekkinglijn voor de Bankfull-afvoer en voorspellende waterstandsberekeningen met RIVCUR (een 2D-model voor de simulatie van de waterbeweging) voor Maatgevend Hoogwater, zie tabel 3.2. Deze metingen en voorspellingen zijn gedaan in de situatie dat de vaste laag bij Nijmegen al aanwezig is. In de peilstations Pannerdense Kop, Nijmegen-haven en Tiel-haven is getracht de waterstanden tot op 0,10 meter nauwkeurig te ijken. Dit is een afwijking in de waterdiepte van circa 2 % bij OLR en circa 0,7 % bij MHW. Voor de afvoeren is geprobeerd binnen 1% afwijking van de metingen en voorspellingen te blijven, zie tabel 3.3.

3.3 Invoer

Nadat de geometrie van het model is vastgelegd (zie hoofdstuk 2), moeten de volgende gegevens voor de riviertakken worden ingevoerd:

1. rekenrooster
2. tijdstap
3. hydraulische randvoorwaarden
4. dwarsprofiel van de rivier
5. bodemruwheid

ad 1. rekenrooster.

De afstand van de roosterpunten is, conform het IVR project, op 500 meter gezet. Bovendien eist SOBEK een minimale lengte tussen de roosterpunten van 0,5 % van de lengte van de riviertak, zodat de roosterafstand op de Rijn en de Waal niet veel kleiner kan worden gekozen. Op de locaties van de meetstations zijn extra roosterpunten geplaatst.

ad 2. tijdstap.

Omdat SOBEK een impliciet rekenschema gebruikt, is de berekening onvoorwaardelijk stabiel. Vanwege stabiliteit wordt dus geen eis aan de grootte van de tijdstap gesteld. Toch mag het courantgetal niet te groot worden om voldoende nauwkeurigheid te behouden. Een waarde van 30 à 40 wordt aangeraden voor het courantgetal (lit.[13]). Hier wordt gerekend met een tijdstap van 30 minuten, waardoor het courantgetal rond de 35 ligt.

ad 3. hydraulische randvoorwaarden.

Op de bovenstroomse rand wordt een debiet opgelegd en op de benedenstroomse randen een Q-H relatie, die in tabel 3.1 is gegeven.

ad 4. dwarsprofiel van de rivier.

Op elk roosterpunt kan een ander dwarsprofiel worden opgegeven. In dit model wordt per riviertak één dwarsprofiel ingevoerd in tabel vorm. Hierbij wordt op elk niveau een totale breedte en een stroomvoerende breedte opgegeven. Daarnaast moet de breedte van de hoofdgeul, van de kribvaksectie en van de uiterwaard worden opgegeven. De ingevoerde dwarsprofielen zijn in hoofdstuk 2 beschreven.

ad 5. bodemruwheid.

De bodemruwheid wordt ingevoerd als een Chezy-waarde voor de hoofdgeul en de kribvaksectie en als een Nikuradse k_n -waarde voor de uiterwaard. De Chezy-waarde wordt ingevoerd als functie van het debiet en is constant per riviertak.

3.4 IJkingsprocedure

In eerste instantie is het model geijkt via aanpassing van de bodemruwheid van de hoofdgeul en de uiterwaarden. Voor de kribvaksectie is voor alle riviertakken een constante Chezy-waarde van $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ genomen.

OLR en Bankfull

Bij de afvoeren OLR en Bankfull is het model geijkt met de Chezy-waarde voor de hoofdgeul. In tabel 3.4 zijn de berekende waterstanden in de meetstations en het verschil met de meetgegevens gegeven. Op het stuk van Pannerdense Kop tot Tiel voldoen de waterstanden op één punt na (Nijmegen bij Bankfull afvoer) aan de gestelde eis dat de waterstand niet meer dan 0,10 meter met de gemeten waterstand mag verschillen. De geijkte afvoer over de Waal is gegeven in tabel 3.6. Voor beide afvoeren (OLR en Bankfull) voldoet de afvoerverdeling aan de eis dat de afwijking niet groter mag zijn dan 1 %.

$$Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s en MHW}$$

Bij het ijken van de afvoeren MHW en $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn naast de Chezy-waarde voor de hoofdgeul ook de Nikuradse ruwheidsfactor (k_n) van de uiterwaarden en het profiel van de uiterwaarden aangepast. In eerste instantie traden te hoge waterstanden in de Waal op en ging bij $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$ relatief weinig water naar de Waal en bij MHW relatief veel. Bovendien stroomde er bij $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$ veel te weinig water door de uiterwaarden van de Waal. De MHW situatie vroeg dus om een kleiner doorstroomprofiel van de Waal en een groter doorstroomprofiel van het Pannerdens Kanaal. Bij $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$ was dit juist omgekeerd: het doorstroomprofiel van de Waal zou groter moeten worden en dat van het Pannerdens Kanaal kleiner. In bijlage 3-I is te zien hoe de dwarsprofielen van de uiterwaarden zijn aangepast om aan beide eisen te voldoen. Na aanpassing van de dwarsprofielen gingen de waterstanden op de Bovenwaal wel iets naar beneden, maar niet voldoende om aan de geeiste nauwkeurigheid te voldoen.

De afvoer door de uiterwaarden verschilt per traject (zie lit.[2]). Gemiddeld is deze winterbed afvoer in de Waal ongeveer $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ bij $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$. Om voldoende afvoer door de uiterwaarden van de Waal te krijgen, moest een erg lage k_n -waarde worden genomen. Hier is voor de Waal een k_n van 0,10 gevonden en voor het Pannerdens Kanaal een k_n van 0,40. De afvoer door de uiterwaarden van de Waal is echter nog steeds te klein ($835 \text{ m}^3/\text{s}$), maar een nóg kleinere k_n zou niet meer realistisch zijn. De afvoerverdeling tussen het zomer- en winterbed van het Pannerdens Kanaal is niet geijkt, omdat dit, zolang de sedimentverdeling in het splitsingspunt Pannerdense Kop niet wordt beïnvloed, niet van belang is voor het doel van dit onderzoek.

Op het rivierdeel benedenstrooms van Tiel ontstaat bij de hoge afvoeren een stuwkromme (M2 type). Om dit te voorkomen zou de Q-H relatie van Vuren kunnen worden aangepast, waarbij hogere waterstanden worden opgelegd voor de hogere afvoeren. Hierdoor worden echter ook de waterstanden op de Waal weer hoger. Tijdens de ijking van de sedimentbeweging zal blijken dat op dit deel zeer grote sedimenttransporten optreden, zodat de benedenstroomse rand in bovenstroomse richting naar Zaltbommel is verschoven. Hierop wordt in hoofdstuk 4 teruggekomen.

In tabel 3.5 zijn de geijkte waterstanden bij MHW gegeven en in tabel 3.6 de geijkte afvoer over de Waal. De afvoerverdeling voldoet aan de eis van maximaal 1 % afwijking. De geijkte waterstanden bij MHW zijn te hoog en voldoen niet aan de gestelde nauwkeurigheidseis. Toch zijn deze afwijkingen

relatief gezien klein: op de Bovenwaal circa 1,8 % van de waterdiepte en in Zaltbommel circa 2,4 % van de waterdiepte. Daarom is niet meer geprobeerd de waterstanden te verlagen.

In bijlage 3-II zijn de met SOBEK berekende waterstanden, de gemeten waterstanden en het verschil daartussen voor OLR, Bankfull en MHW op de Waal gegeven. En in de tabellen 3.7 en 3.8 zijn respectievelijk de geijkte Chezy-waarden en Nikuradse k_n -waarden gegeven. De Chezy-waarde voor de kribvaksectie blijft voor alle riviertakken $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

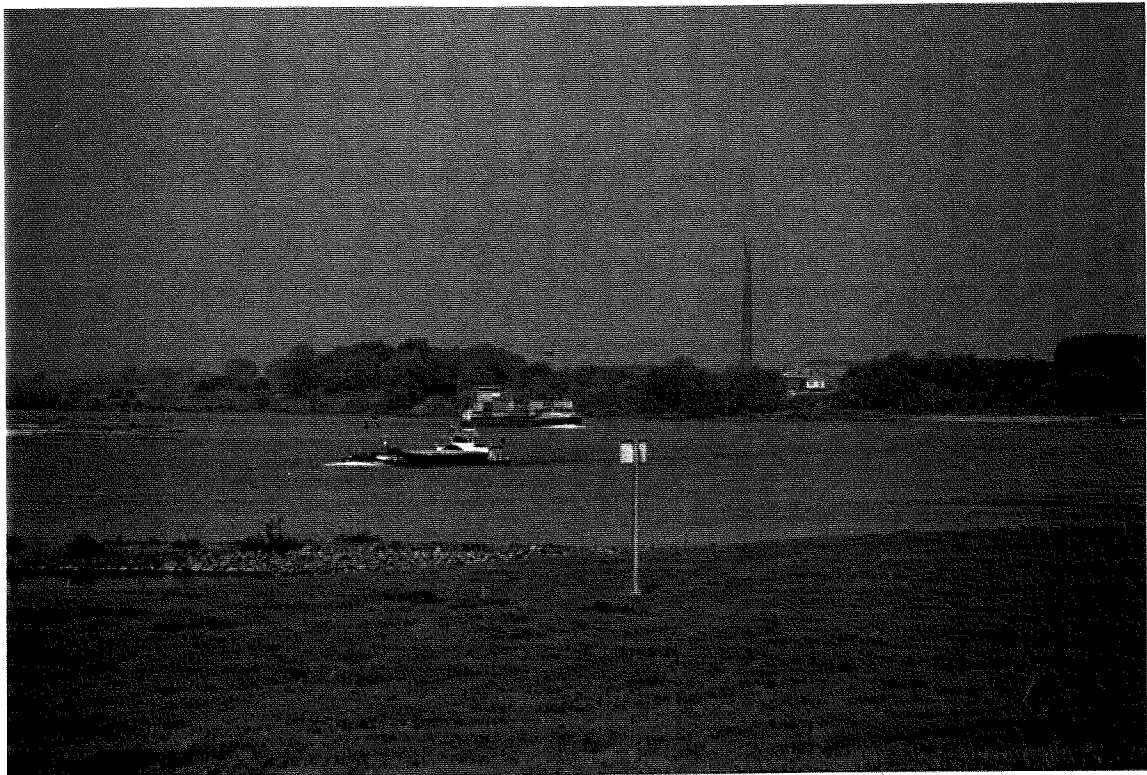
3.5 Conclusies ijking waterbeweging

Omdat het model gebruikt zal worden voor de voorspelling van de morfologische effecten op de Waal tussen Pannerdense Kop en Tiel, is dit deel nauwkeurig geijkt. Voor alle vier gekozen afvoeren waarbij de afvoerdeling over de riviertakken is geijkt, wordt aan de vereiste nauwkeurigheid van maximaal 1% afwijking voldaan. Bij de afvoeren door alleen het zomerbed (OLR en Bankfull) worden, op één punt na, de waterstanden voldoende nauwkeurig door SOBEK berekend. Bij MHW zijn de waterstanden op de Waal echter nog 0,26 meter tot 0,34 meter hoger dan de met RIVCUR voorspelde waterstanden. Hoewel dit niet aan de gestelde nauwkeurigheidseisen voldoet, is de afwijking slechts 1,8 tot 2,4% van de waterdiepte en is niet meer geprobeerd dit te verbeteren.

Bij de afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 7944 \text{ m}^3/\text{s}$ stroomt nog te weinig water door het winterbed van de Waal ($835 \text{ m}^3/\text{s}$ in plaats van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$). Doordat in SOBEK te veel water door het zomerbed stroomt, zullen de morfologische reacties sterker zijn. Dit zal moeten worden bijgestuurd bij de ijking van de morfologie van het model.

Hoofdstuk 4

IJking sedimentbeweging en morfologie



4. IJking sedimenttransport en morfologie

4.1 Inleiding

Na ijking van de waterbeweging in het model, worden het sedimenttransport en de morfologie in het model geijkt. Voor een eerste, zeer globale, ijking van het sedimenttransport wordt gerekend met een zogenaamde bedvormende afvoer van $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij deze afvoer treedt hetzelfde sedimenttransport op als bij de tijdafhankelijke afvoer. Voor een nauwkeuriger ijking is als bovenstroomse randvoorwaarde een $Q(t)$ relatie opgelegd met decade-gemiddelde afvoeren van de periode 1941-1991, zie de grafiek in bijlage 4-I. De tijdstap waarmee gerekend wordt is tien dagen, zodat een quasi-stationaire berekening wordt uitgevoerd.

Voor de parameters die moeten worden ingevoerd, worden in eerste instantie de waarden uit het Rijntakken-model genomen (zie lit.[2]). In dit Rijntakken-model zijn het sedimenttransport en de morfologie minder uitgebreid geijkt dan de waterbeweging en is er voornamelijk op gelet of de resultaten aannemelijk waren.

Onder andere door allerlei ingrepen in de rivier in het verleden, waarbij de afvoercapaciteit van de rivier en daarmee de stroomsnelheden van het water werden vergroot, vertoont de bodemligging van de Rijn en de Waal een dalende trend. Dit wordt de autonome bodemdaling genoemd.

4.2 Uitgangspunten

In het Rijntakken-model zijn over een periode van 30 jaar de volgende gemiddelde jaarlijkse sedimenttransporten berekend:

Bovenrijn:	$391500 \text{ m}^3/\text{jaar} \approx 0.0124 \text{ m}^3/\text{s}$
Waal:	$314000 \text{ m}^3/\text{jaar} \approx 0.010 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdens Kanaal:	$113000 \text{ m}^3/\text{jaar} \approx 0.0036 \text{ m}^3/\text{s}$

De inkomende zandvracht op de Waal wordt geschat op 300.000 m^3 per jaar, maar in sedimenttransportmetingen komen grote onnauwkeurigheden voor. Hier wordt uitgegaan van de in het Rijntakken-model berekende sedimenttransporten. Voor de autonome bodemdaling op de Waal bestaan verschillende scenario's, zie literatuur [1]. Hier wordt uitgegaan van een autonome bodemdaling van 2 cm/jaar bij de Pannerdense Kop, lineair afnemend tot 0 cm/jaar bij Zaltbommel.

Gerekend wordt met de Engelund & Hansen transportformule, die bodemtransport en zwevend transport berekent. SOBEK berekent het sedimenttransport per eenheid van breedte met:

$$S = \frac{0.05 U^5}{(1-\varepsilon) \sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} \quad (4-1)$$

waarin: U	=	gemiddelde snelheid in de hoofdgeul [m/s]
ε	=	poriënvolume van het sediment (meestal 0.4) [-]
g	=	zwaartekracht versnelling [m/s ²]
C	=	Chezy waarde [m ^{1/2} /s]
Δ	=	relatieve dichtheid van het sediment [-]
D ₅₀	=	korreldiameter waarvoor 50% van de korrels een kleinere diameter heeft [m]

4.3 Invoer

Naast de invoer, die nodig is voor de waterbeweging, moet voor de morfologische berekeningen het volgende worden ingevoerd:

1. De tijdstap.
De tijdstap voor de morfologische berekening wordt op tien dagen gezet. Omdat de voortplantingssnelheid van morfologische ontwikkelingen veel kleiner is dan die van het water, kan een grotere tijdstap worden genomen. Wanneer de morfologische berekening niet aan de stabiliteitsvoorwaarde voldoet, verkleint SOBEK automatisch de tijdstap.
2. De morfologische randvoorwaarden.
Op zowel de bovenstroomse als de benedenstroomse rand moet een morfologische randvoorwaarde worden opgelegd. In deze situatie, waarin maar één stromingsrichting voorkomt, is echter maar één morfologische randvoorwaarde nodig op de bovenrand. SOBEK gebruikt automatisch alleen deze bovenstroomse randvoorwaarde en negeert de morfologische randvoorwaarde op de benedenstroomse rand. Op de bovenstroomse rand wordt een bodemdaling als functie van de tijd opgelegd en op de benedenstroomse randen een constante bodemligging. Bij de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 9) zal blijken dat deze benedenstroomse morfologische randvoorwaarde inderdaad geen enkele invloed heeft.
3. De sedimenttransporterende breedte.
Deze is kleiner dan of gelijk aan de breedte van de hoofdgeul.
4. De manier waarop het sediment in een dwarsprofiel wordt opgeslagen: gelijkmatig over de breedte of evenredig met de waterdiepte. Hier is voor de laatste optie gekozen, omdat verwacht wordt dat dat een meer natuurgetrouw beeld geeft. Een bijkomend argument is, dat de andere methode voor programma technische problemen kan zorgen.
5. De karakteristieke korrelgrootte van het sediment.
Welke karakteristieke korrelgrootte moet worden opgegeven, is afhankelijk van de toegepaste transportformule. De transportformule van Engelund Hansen gebruikt de D₅₀ als karakteristieke korrelgrootte. De korrelgrootte kan worden opgegeven als functie van de locatie.
6. De transportformule.
Hier wordt de transportformule van Engelund Hansen genomen, die zowel het bodemtransport als het zwevend transport in de berekening

meeneemt. Ook kan hier een vermenigvuldigingsfactor voor het sedimenttransport worden ingevoerd.

7. De sedimentverdeling op het splitsingspunt Pannerdense Kop.
Hiervoor wordt de relatie tussen de verhoudingen S_{tak1}/S_{tak2} en Q_{tak1}/Q_{tak2} in tabelvorm gegeven.

4.4 IJkingsprocedure

In eerste instantie is het sedimenttransport geijkt, daarna is gekeken naar de morfologie van het model. Bij de ijking van het model zijn de volgende parameters gevarieerd:

- vermenigvuldigingsfactor in de sedimenttransport formule
- karakteristieke korrelgrootte van het sediment (D_{50})
- sedimenttransporterende breedte
- bovenstroomse morfologische randvoorwaarde
- sedimentverdeling op het splitsingspunt Pannerdense Kop

De eerste twee, de vermenigvuldigingsfactor en de korrelgrootte, zijn de belangrijkste parameters waarmee geijkt is. De sedimenttransporterende breedte wordt gebruikt voor kleine aanpassingen. De bovenstroomse morfologische randvoorwaarde blijkt weinig invloed te hebben binnen de rekentijd van 40 jaar. De sedimentverdeling op het splitsingspunt is uiteindelijk niet veranderd; deze is hetzelfde genomen als in het IVR project, zie tabel 4.2.

In het model, zoals dat na de ijking van de waterbeweging bestond, traden benedenstrooms van Zaltbommel zeer grote sedimenttransporten op als gevolg van een daar aanwezige stuwkromme van het M2-type. Daarom is de benedenstroomse rand naar Zaltbommel verschoven, waar de morfologische randvoorwaarde een constante bodemligging van -4.85 m NAP is. De nieuwe Q-H relatie van de benedenstroomse rand is gegeven in tabel 4.1.

Op de Rijn ontstond een stuwkromme van het M1-type, waardoor de stroomsnelheid en daardoor het sedimenttransport sterk afnam in benedenstroomse richting. Om voldoende grote stroomsnelheden te krijgen is de breedte van de hoofdgeul in twee stappen verkleind: op 50 en 100 kilometer benedenstrooms van de bovenrand, dus halverwege en op het eind van de Rijn, is de breedte van de hoofdgeul respectievelijk 510 en 360 meter (oorspronkelijke breedte was 900 meter). Bovendien is op de hele Rijn in de hoofdgeul de stroomvoerende breedte gelijk gesteld aan de totale breedte. De dwarsprofielen die zijn ingevoerd op de Rijn, de Waal en het Pannerdens Kanaal zijn gegeven in bijlage 4-II. In figuur 4.1 is in een langsdoorsnede de bodemligging van de Rijn, de Waal en het Pannerdens Kanaal gegeven, met daarin de locatie van de gedefinieerde dwarsprofielen en de bodemligging ten opzichte van NAP.

In het uiteindelijk geijkte model wordt de bodemligging op de bovenstroomse rand de eerste tien jaar constant gehouden om het model te laten inspelen. Voor de jaren daarna wordt een bodemdaling van 1 cm per jaar opgelegd. Naderhand is echter gebleken dat de bovenstroomse randvoorwaarde geen invloed heeft op de morfologische ontwikkeling van de Waal, omdat het veel langer dan 40 jaar duurt voordat deze opgelegde bodemdaling daar merkbaar is. Met de machtswet voor het sedimenttransport

$$s = mu^n \quad (4-1)$$

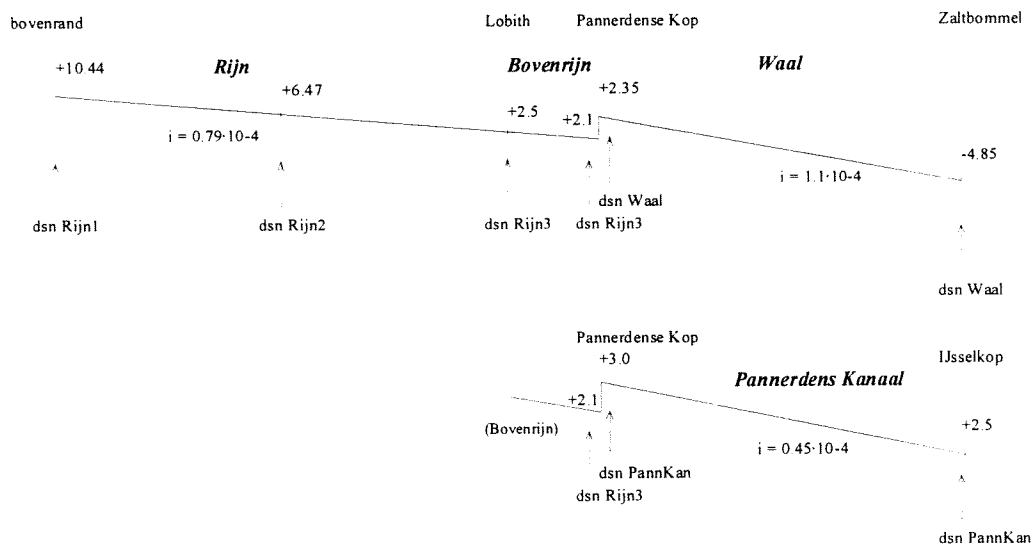
en de vergelijking voor de voortplantingssnelheid van een bodemverstoring (lit.[8]):

$$c = \frac{u}{h} \frac{ds}{du} \quad (4-2)$$

is een eenvoudige uitdrukking af te leiden voor de voortplantingssnelheid van een bodemverstoring:

$$c = n \frac{s}{h} \quad (4-3)$$

Hieruit volgt dat een bodemverstoring op de Rijn zich voortplant met een snelheid van 1 à 1,5 km/jaar. Dit betekent dat het 80 tot 120 jaar duurt, voordat de als randvoorwaarde opgelegde bodemdaling op de Bovenwaal merkbaar is.



Figuur 4.1 Bodemligging Rijn, Waal en Pannerdens Kanaal met daarin aangegeven de gedefinieerde dwarsprofielen en de bodemligging in m tov NAP.

Voor de bepaling van het gemiddelde sedimenttransport, wordt het transport berekend over de periode 2002-2032. In dit model is het gemiddelde sedimenttransport op de Rijn ongeveer $0,012 \text{ m}^3/\text{s}$, op de Waal $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ en op het Pannerdens Kanaal $0,003 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie bijlage 4-III), hetgeen goed overeenkomt met de in het Rijntakken-model berekende sedimenttransporten die in paragraaf 4.2 zijn gegeven. In bijlage 4-IV is de bodemontwikkeling van de riviertakken in de periode 2002-2032 gegeven. De door SOBEK berekende autonome bodemdaling is, op de benedenstroomse 15 km na, op de hele Waal te klein, zie tabel 4.6. In tabel 4.7 is de bodemligging voor een aantal locaties op de Rijn en de Waal gegeven voor de jaren 1992-2032.

De bodemdaling op de Waal groter maken door op de bovenstroomse rand een grotere bodemdaling op te leggen heeft geen zin, omdat in dit tijdsbestek de bovenstroomse randvoorwaarde geen invloed heeft op het sedimenttransport en de morfologische ontwikkelingen op de Waal. In bijlage 4-V is voor de situatie met een bodemdaling van 2 cm per jaar op de bovenstroomse rand, het sedimenttransport op de Rijn en de Waal gegeven. De door SOBEK berekende bodemligging na veertig jaar veranderd hierdoor niet, op de bovenstroomse 20 kilometer van de Rijn na, waar verschillen van enkele centimeters voorkomen. Dit deel van de rivier ligt echter buiten het projectgebied. De in SOBEK ingevoerde parameters zijn gegeven in de tabellen 4.2 t/m 4.5. De parameterwaarden voor tussenliggende locaties worden gevonden door interpolatie.

In de grafieken met de bodemligging, is telkens een grote sprong in de bodemligging te zien op de benedenstroomse randen. Deze sprong treedt op in het laatste rekenpunt van de riviertak en is het gevolg van een fout in de user-interface van het programma. SOBEK kent aan dit benedenstroomse punt de korrelgrootte toe, die voor het bovenstroomse punt van de riviertak is ingevoerd. Deze bodemsprong beïnvloedt de morfologie op de riviertakken niet.

4.5 Conclusies ijking sedimenttransport en morfologie

Om op de Rijn het juiste sedimenttransport te krijgen, is een vrij grote vermenigvuldigingsfactor gebruikt: 3,6. Op de Waal en het Pannerdens Kanaal zijn de vermenigvuldigingsfactoren respectievelijk 0,36 en 0,8. Waardoor het grote verschil tussen de vermenigvuldigingsfactor op de Rijn en de Waal wordt veroorzaakt, is niet duidelijk. Ter vergelijking: in het IVR project zijn vermenigvuldigingsfactoren voor de Rijn, Waal en Pannerdens Kanaal gebruikt van respectievelijk 1,2, 0,4 en 1,0. De gemiddelde jaarlijkse sedimenttransporten in de riviertakken die door het SOBEK-model worden berekend, komen zeer goed overeen met de in het Rijntakken-model berekende gemiddelde transporten.

Op de Rijn en de Waal is de bodemdaling, op de benedenstroomse 15 km na, te klein vergeleken met de voorspelde bodemdaling, zie de tabellen 4.6 en 4.7. SOBEK berekent op de Rijn een bodemdaling variërend van 0,03 tot 0,3 cm/jaar, op de Bovenwaal 0,08 tot 0,23 cm/jaar en op de Benedenwaal 0,25 tot 0,73 cm/jaar. Volgens literatuur [1] verloopt de autonome bodemdaling op de Waal van circa 2 cm/jaar bij de Pannerdense Kop tot 0 cm/jaar bij Zaltbommel. Bij het bepalen van de totale morfologische veranderingen na aanleg van de bochtmaatregelen, moet met deze te kleine bodemdaling rekening worden gehouden.

De te kleine autonome bodemdaling kan twee oorzaken hebben. Ten eerste kan de evenwichtsbodemligging in het model niet goed zijn en ten tweede kan de morfologische tijdschaal van de rivier in het model te klein zijn. Doordat echter niet bekend is wat de evenwichtsbodemligging van de Waal is en hoe lang de autonome bodemdaling nog zal duren, kan niet worden gezegd welke van de twee de oorzaak is van de te kleine autonome bodemdaling. Wanneer de evenwichtsbodemligging in het model niet goed is, kan het probleem waarschijnlijk (gedeeltelijk) worden opgelost door een gradiënt in bodemverhang en stroomvoerende doorsnede aan te brengen. In werkelijkheid nemen het bodemverhang af en de stroomvoerende doorsnede toe in

benedenstroomse richting. Door dit ook in SOBEK weer te geven, wordt bovenstrooms een grotere bodemdaling berekend, die in benedenstroomse richting afneemt.

De morfologische tijdschaal van een rivier is omgekeerd evenredig met het sedimenttransport. Een te kleine morfologische tijdschaal in het model betekent dus een te klein sedimenttransport. Aangezien de voorspelling van het sedimenttransport zeer moeilijk is en er makkelijk een factor twee verschil in kan zitten, zou ook dit de oorzaak kunnen zijn.

Voor het doel van dit onderzoek, het bepalen van de morfologische effecten van bochtverbeteringen, is een goede weergave van de autonome bodemdaling in het model minder belangrijk. Het meeste inzicht in de effecten wordt verkregen door de bodemligging te vergelijken met de situatie zonder bochtverbeteringen.

Uit de morfologische berekeningen van het Pannerdens Kanaal blijkt dat het ingevoerde bodemverhang niet het evenwichtsverhang is. Na de veertig jaar is een iets steiler bodemverhang ontstaan: circa $1,2 \cdot 10^{-4}$. In het gevoeligheidsonderzoek (hoofdstuk 9) wordt hierop teruggekomen.

Hoofdstuk 5

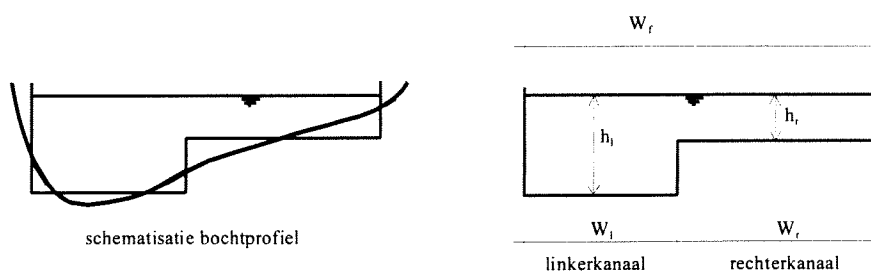
Twee-kanalen model



5. Twee-kanalen model

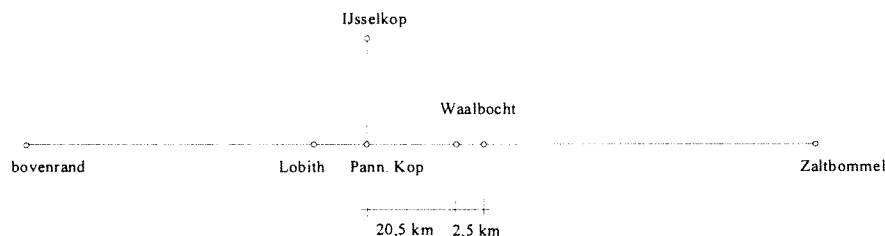
5.1 Inleiding

In SOBEK bestaat een optie voor het quasi twee-dimensionaal simuleren van de sedimentbeweging en de morfologie in een rivier. Deze optie is met name interessant voor het simuleren van de morfologie in een rivierbocht. Het dwarsprofiel in een rivierbocht bestaat uit een diepe buitenbocht en een ondiepe binnenbocht. De '2D-morfologie' optie van SOBEK geeft de mogelijkheid het dwarsprofiel te verdelen in een diep en een ondiep kanaal, respectievelijk 'main channel' en 'floodplain' genoemd, zie figuur 5.1. Van het linker en het rechter kanaal moeten de diepte en de breedte worden ingevoerd. Het dwarsprofiel is dus rechthoekig en er kunnen geen uiterwaarden worden ingevoerd. De 2D-morfologie geldt voor de hele riviertak.



Figuur 5.1 Definitie dwarsprofiel bij de 2D-morfologie optie.

In dit afstudeerwerk is geprobeerd de 2D-morfologie optie toe te passen voor een rivierbocht op de Bovenwaal. De bocht die wordt ingevoerd is 2,5 kilometer lang en wordt 20,5 kilometer benedenstrooms van de Pannerdense Kop gesitueerd, zodat hij net buiten de morfologische schommelingen rond de Pannerdense Kop ligt (zie bijlage 4-IVc). Omdat de 2D-morfologie voor een hele riviertak geldt, moet de schematisatie van het model worden veranderd; de Waalbocht moet als aparte riviertak worden ingevoerd, zie figuur 5.2.



Figuur 5.2 Nieuwe schematisatie van het model.

Eerst is gekeken in welke mate de waterbeweging verandert na invoering van het 2D-bochtprofiel. Daarna is gekeken naar de invloed op de sedimentbeweging en de morfologie. Deze morfologische berekeningen gaven echter grote problemen. Er traden grote sedimenttransporten en sedimentaties op rond de bocht en op de benedenrand van het model en de binnenbocht slibde erg snel dicht. Deze

problemen konden niet worden voorkomen door de karakteristieke korrelgrootte, de bodemruwheid of de vermenigvuldigingsfactor in de transportformule aan te passen. IJking van het model was erg moeilijk vanwege programma-technische problemen. Bovendien had op het moment van dit onderzoek niemand ervaring met de combinatie van 2D- en 1D-riviertakken. Daarom is uiteindelijk deze 2D-morfologie optie niet toegepast in de SOBEK-simulaties.

Voor de volledigheid wordt in paragraaf 5.2 de invoer van de 2D-morfologie in SOBEK beschreven en in paragraaf 5.3 de invloed hiervan op de waterbeweging. SOBEK gebruikt voor de 2D-morfologie optie een twee-kanalen model. Met dit model kunnen ook de morfologische veranderingen benedenstrooms van een rivierbocht worden beschreven (lit.[16] en [17]). Dit gebeurt in paragraaf 5.4 voor een Waalbocht op de Bovenwaal.

5.2 Invoeren van de 2D-morfologie

Het oppervlak van het twee-dimensionale bochtprofiel mag niet te veel afwijken van het oppervlak van het profiel dat voor de rest van de Waal geldt, omdat anders de waterbeweging te sterk beïnvloed wordt. Het hier ingevoerde bochtprofiel heeft een diep kanaal van 175 meter breed en een ondiep kanaal, dat 3 meter hoger ligt, van 370 meter breed.

Voor het diepe kanaal kan voor de ruwheid een Chezy-waarde als functie van het debiet en de locatie worden ingevoerd, voor het ondiepe kanaal kan de Chezy-waarde alleen als functie van de locatie worden ingevoerd. De karakteristieke korrelgrootte wordt voor het diepe en ondiepe kanaal apart ingevoerd.

Wanneer de twee-dimensionale riviertak bovenstrooms aansluit op een één-dimensionale riviertak, moet als randvoorwaarde in deze knoop worden opgegeven hoe het sediment en het water zich verdelen over het diepe en ondiepe kanaal. De randvoorwaarde voor de sedimentverdeling is:

$$S_l = \alpha_s S_t \quad \text{en} \quad S_r = (1 - \alpha_s) S_t$$

De randvoorwaarde voor de verdeling van de afvoer is:

$$Q_l = \alpha_w Q_t \quad \text{en} \quad Q_r = (1 - \alpha_w) Q_t$$

Waarin S_t en Q_t de totale hoeveelheden sediment en water zijn die van bovenstrooms worden aangevoerd en S_l , S_r , Q_l en Q_r de hoeveelheden sediment en water die naar het linker-, respectievelijk rechterkanaal, gaan. α_s en α_w kunnen worden gedefinieerd als functie van de afvoer Q .

5.3 Waterbeweging

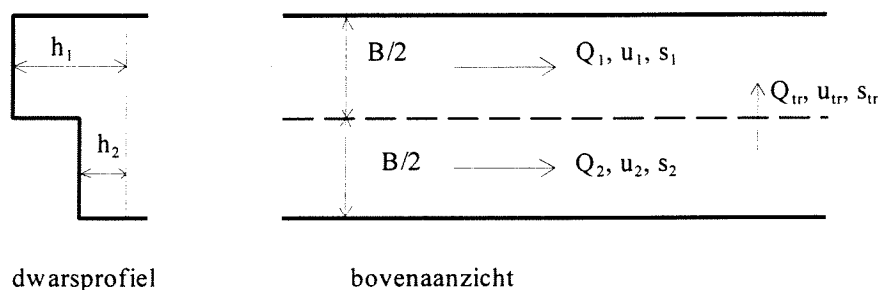
Voor de bodemruwheid in het diepe kanaal zijn dezelfde Chezy-waarden aangehouden als op de rest van de Waal. Op het ondiepe kanaal is een Chezy-waarde van $36 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ingevoerd. Voor de afvoeren $Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$, $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn de waterstanden ter plaatse van de Pannerdense Kop, Nijmegen en Tiel bepaald en vergeleken met metingen en voorspellingen in het

IVR project, zie tabel 5.1. Over het algemeen zijn de afwijkingen groter geworden. Daarnaast is de afvoer op de Waal bekeken en ook weer vergeleken met het IVR project, zie tabel 5.2. Ook de afwijkingen in de afvoer zijn groter geworden.

Omdat, vanwege de problemen met de morfologische berekeningen, de 2D-morfologie optie niet zal worden gebruikt in het verdere onderzoek, is de waterbeweging niet opnieuw geijkt.

5.4 Twee-kanalen model

De evenwichtsbodemligging benedenstrooms van een rivierbocht kan analytisch worden bepaald met behulp van het zogenaamde twee-kanalen model, zie literatuur [16] en [17]. De rivier wordt verdeeld in twee parallelle, overlangs gekoppelde kanalen, zie figuur 5.3. De indices '1', '2' en 'tr' wijzen respectievelijk op parameters die betrekking hebben op het linkerkanaal, het rechterkanaal en de uitwisseling tussen de twee kanalen. In deze paragraaf zal de theorie achter dit model, volgens literatuur [16] en [17], globaal worden behandeld. Dit twee-kanalen model wordt ook in SOBEK gebruikt voor de 2D-morfologie optie.



Figuur 5.3 Definities twee-kanalen model. Bron: lit. [16].

Voor de kanalen is de bewegingsvergelijking in langsrichting:

$$\text{kanaal 1:} \quad u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -g \frac{\partial z_{w1}}{\partial x} - \frac{gu_1^2}{C^2 h_1} \quad (5-1)$$

$$\text{kanaal 2:} \quad u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -g \frac{\partial z_{w2}}{\partial x} - \frac{gu_2^2}{C^2 h_2} \quad (5-2)$$

waarin z_w het niveau van de waterspiegel is.

Het dwarsverhang van de waterspiegel wordt verwaarloosd, omdat het veel kleiner is dan het dwarsverhang van de bodemligging. Dit betekent dat:

$$z_{w1} = z_{w2} \quad \text{en dus ook} \quad \frac{\partial z_{w1}}{\partial x} = \frac{\partial z_{w2}}{\partial x} \quad (5-3)$$

Vergelijkingen (5-1) en (5-2) opgeteld geeft dan:

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -\frac{g}{C^2} \left(\frac{u_1^2}{h_1} - \frac{u_2^2}{h_2} \right) \quad (5-4)$$

Er worden nieuwe parameters gedefinieerd:

$$U = u_1 - u_2 \quad \text{en} \quad \bar{u} = \frac{1}{2}(u_1 + u_2) \quad (5-5)$$

$$H = h_1 - h_2 \quad \text{en} \quad \bar{h} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2) \quad (5-6)$$

Aangenomen wordt, dat de gemiddelde snelheid en de gemiddelde waterdiepte uniform zijn langs de rivier en dat de verstoringen U en H veel kleiner zijn dan respectievelijk de gemiddelde stroomsnelheid en de gemiddelde waterdiepte:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0 ; \quad \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} = 0 ; \quad U \ll \bar{u} ; \quad H \ll \bar{h} \quad (5-7)$$

Vergelijking (5-4) is nu uit te werken tot:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U}{\lambda_w} = \frac{1}{2} \frac{\bar{u}}{\bar{h}} \frac{H}{\lambda_w} \quad (5-8)$$

$$\text{waarin } \lambda_w \text{ de aanpassingslengte van de stroming is, } \lambda_w = \frac{C^2}{2g} \bar{h} \quad (5-9)$$

De vergelijking heeft twee onbekende variabelen U en H , dus is er nog een vergelijking in U en H nodig om het probleem op te lossen. De continuïteitsvergelijking voor het water luidt voor de twee kanalen:

$$\text{kanaal 1:} \quad \frac{B}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u_1 h_1) = q_{tr} \quad (5-10)$$

$$\text{kanaal 2:} \quad \frac{B}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u_2 h_2) = -q_{tr} \quad (5-11)$$

Het verschil tussen deze twee vergelijkingen geeft:

$$q_{tr} = \frac{B}{4} \bar{u} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{B}{4} \bar{h} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (5-12)$$

en daaruit volgt:

$$u_{tr} = \frac{q_{tr}}{\bar{h}} = \frac{B}{4} \frac{\bar{u}}{\bar{h}} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{B}{4} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (5-13)$$

De continuïteitsvergelijking voor het sediment luidt voor de twee kanalen:

$$\text{kanaal 1:} \quad \frac{B}{2} \left[(1 - \varepsilon) \frac{\partial z_{b1}}{\partial t} + \frac{\partial s_1}{\partial x} \right] = s_{tr} \quad (5-14)$$

$$\text{kanaal 2:} \quad \frac{B}{2} \left[(1 - \varepsilon) \frac{\partial z_{b2}}{\partial t} + \frac{\partial s_2}{\partial x} \right] = -s_{tr} \quad (5-15)$$

De afgeleiden naar de tijd mogen gelijk worden gesteld aan nul, omdat de evenwichtsbodemligging wordt beschouwd. Het verschil tussen de vergelijkingen (5-14) en (5-15) is dan:

$$\frac{B}{2} \left(\frac{\partial s_1}{\partial x} - \frac{\partial s_2}{\partial x} \right) = 2 s_{tr} \quad (5-16)$$

Het dwarstransport wordt als volgt gemodelleerd (zie ook lit.[16]):

$$s_{tr} = \bar{s} \left[\frac{u_{tr}}{\bar{u}} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{z_{b1} - z_{b2}}{\frac{1}{2} B} - \frac{\Delta z_b}{\frac{1}{2} B} \right) \right] \quad (5-17)$$

waarin:

$\bar{s}$	=	$\frac{1}{2}(s_1 + s_2)$,
β	=	factor in het hellingstransport, wordt als constante behandeld,
de term met u_{tr}	=	het sediment dat door de dieptegemiddelde dwarssnelheid wordt getransporteerd,
de term met $(z_{b1} - z_{b2})$	=	het sedimenttransport ten gevolge van het dwarsverhang van de bodem,
de term met Δz_b	=	eventuele andere transportmechanismen,

Vergelijking (5-16) is nu uit te werken tot:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{H}{\lambda_s} = \frac{\bar{h}}{\bar{u}} (n - 1) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\Delta z_b}{\lambda_s} \quad (5-18)$$

waarin n de exponent uit de machtsformule voor het sedimenttransport is, $s = \mu u^n$ en λ_s de aanpassingslengte van de sedimentbeweging is:

$$\lambda_s = \frac{1}{8} \left(\frac{B}{h} \right)^2 \beta \bar{h} \quad (5-19)$$

of volgens literatuur [17]:

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{B}{h} \right)^2 f_s \theta \bar{h} \quad (5-20)$$

waarin f_s een vormfactor is van het sediment en θ de Shields parameter.

Met de vergelijkingen (5-8) en (5-18) kunnen de twee onbekenden U en H worden opgelost. Het stelsel kan worden herleid tot één vergelijking in H:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left[\frac{1}{\lambda_w} + \frac{1}{\lambda_s} - \frac{n-1}{2\lambda_w} \right] \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{H}{\lambda_s \lambda_w} = - \frac{\Delta z_b}{\lambda_s \lambda_w} \quad (5-21)$$

Oplossingen hebben de vorm:

$$H(x) = H_0 e^{-x/L_D} \sin\left(\frac{2\pi}{L_P} x\right) \quad \text{met } H(x=0) = H_0 \quad (5-22)$$

Deze vergelijking heeft de vorm van gedempte oscillaties waarin L_D de dempingslengte is en L_P de golflengte, waarvoor geldt:

$$\frac{2\pi}{L_P} \lambda_w = \frac{1}{2} \sqrt{(n+1) \frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \frac{\lambda_w^2}{\lambda_s^2} - \left(\frac{b-3}{2}\right)^2} \quad (5-23)$$

en

$$\frac{\lambda_w}{L_D} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \frac{b-3}{4} \quad (5-24)$$

Hieruit blijkt, dat de bodemligging benedenstrooms van een bocht niet meteen naar een over de breedte constante bodemligging gaat, maar sterke oscillaties kan vertonen. Dit wordt zichtbaar gemaakt met onderstaand voorbeeld voor een Waalbocht.

Voor de situatie met bedvormende afvoer ($Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$), is met behulp van vergelijking (5-22) de bodemligging benedenstrooms van een rivierbocht bepaald. Hier is uitgegaan van een profiel van een Waalbocht op de Bovenwaal, dat gegeven is in figuur 5.4. Bij bedvormende afvoer is de gemiddelde waterdiepte volgens SOBEK 7,5 meter. Hieruit volgt dat de waterdiepte in het diepe kanaal circa 9,0 meter is en in het ondiepe kanaal circa 6,0 meter, hetgeen betekent dat de verstoring H_0 van de waterdiepte in $x=0$, 3,0 meter is en het dwarsverhang van de bodem circa 0,025. Voor de andere parameters wordt verwezen naar bijlage 5-1. In figuur 5.5 zijn de waterdieptes van de twee kanalen benedenstrooms van de bocht, bij de bedvormende afvoer gegeven, berekend met vergelijking (5-22). Tot ongeveer 1,5 kilometer benedenstrooms van de bocht, zijn de oscillaties in de bodemligging duidelijk aanwezig, het maximale verschil in bodemligging is circa 1,2 meter. Dit gedrag van de rivierbodem is onder andere voor de scheepvaart van belang, omdat ook benedenstrooms van de bocht rekening moet worden gehouden met een veranderende vaarbaanbreedte en drempelvorming.

Bochtverbeteringsmaatregelen hebben tot gevolg, dat de bodem in de binnenbocht daalt en in de buitenbocht stijgt. Het verschil in waterdiepte tussen de twee kanalen is dus kleiner dan vóór de bochtverbetering. Dit betekent dat de verstoring H_0 in vergelijking (5-22) kleiner is, waardoor de oscillaties minder sterk zijn. Uit berekeningen met het computerprogramma RIVCOM is bekend, dat ten gevolge van de werking van de bodemschermen het bodemdwaarsverhang afneemt tot circa 0,015 (lit.[14]). In figuur 5.6 zijn op dezelfde manier als in

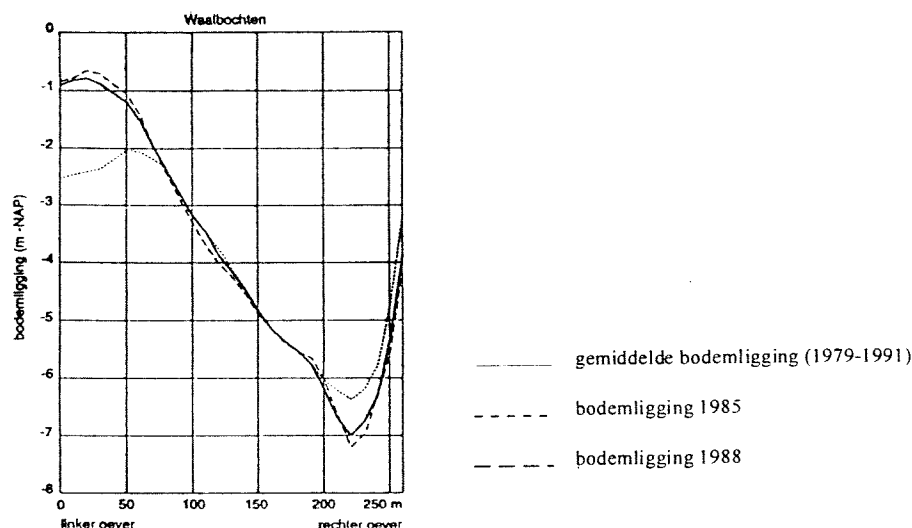
Hoofdstuk 9

Gevoeligheidsanalyse





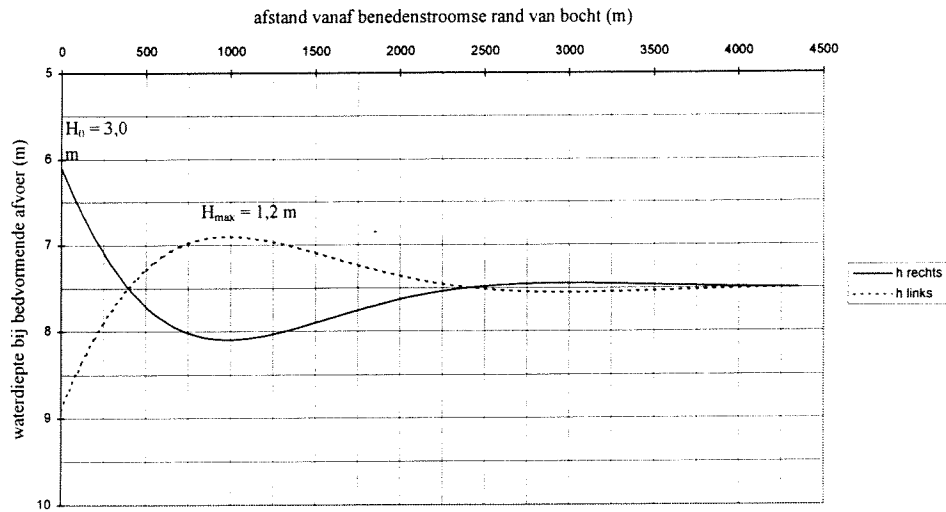
figuur 5.5 de waterdieptes van de twee kanalen benedenstrooms van de bocht uitgezet, alleen nu met $H_0 = 1,9$ meter, hetgeen een bodemdwaarsverhang van circa 0,015 betekent. Alle andere parameters zijn onveranderd. Het grootste verschil in bodemligging is circa 0,8 meter en treedt 1 km benedenstrooms van de bocht op. Nog verder in benedenstroomse richting dempen de verschillen erg snel uit.



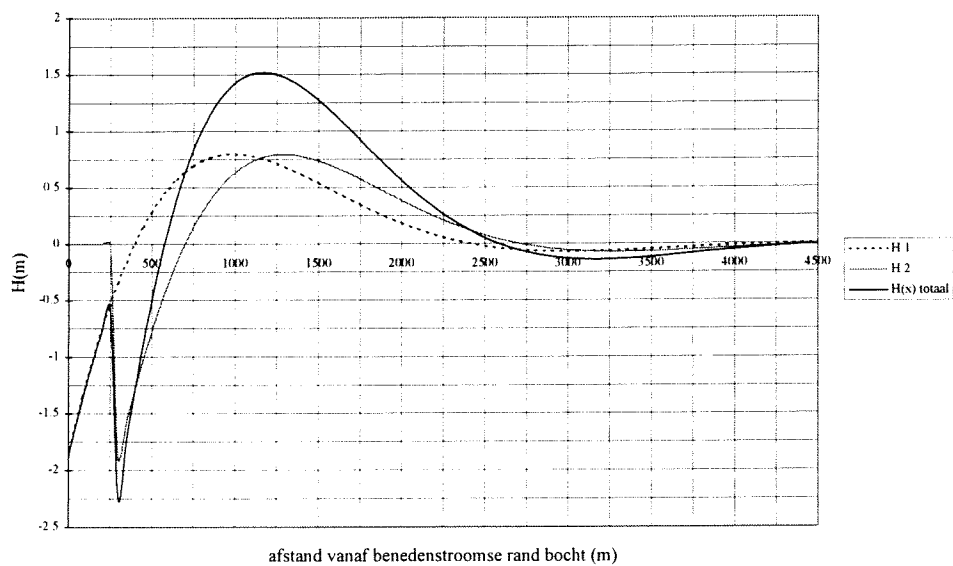
Figuur 5.4 Dwarsprofiel van een Waalbocht. Bron: lit.[18].

Daarnaast ontstaat benedenstrooms van een vaste laag en bodemkribben een erosiekuil in de buitenbocht en komt in de binnenbocht de bodem iets omhoog. Uit bodempeilingen benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen, blijken zowel de erosiekuil in de buitenbocht als de bodemverhoging in de binnenbocht circa 1 m groot te zijn, zodat een bodemverstoring van 2 m ontstaat. Deze verstoring H_2 wordt gesuperponeerd op de verstoring H_1 van het dwarsverhang in de bocht, zie figuur 5.6. De verstoring H_2 ontstaat niet plotseling, maar over een afstand van circa 500 m. Hier het begin van H_2 op een afstand van 300 m benedenstrooms van de bocht aangenomen. In figuur 5.7 zijn voor deze situatie de waterdieptes van het linker- en rechterkanaal benedenstrooms van de bocht uitgezet. Uit deze grafieken blijkt, dat de bodemoscillaties ten gevolge van een vaste laag en bodemkribben groter worden.

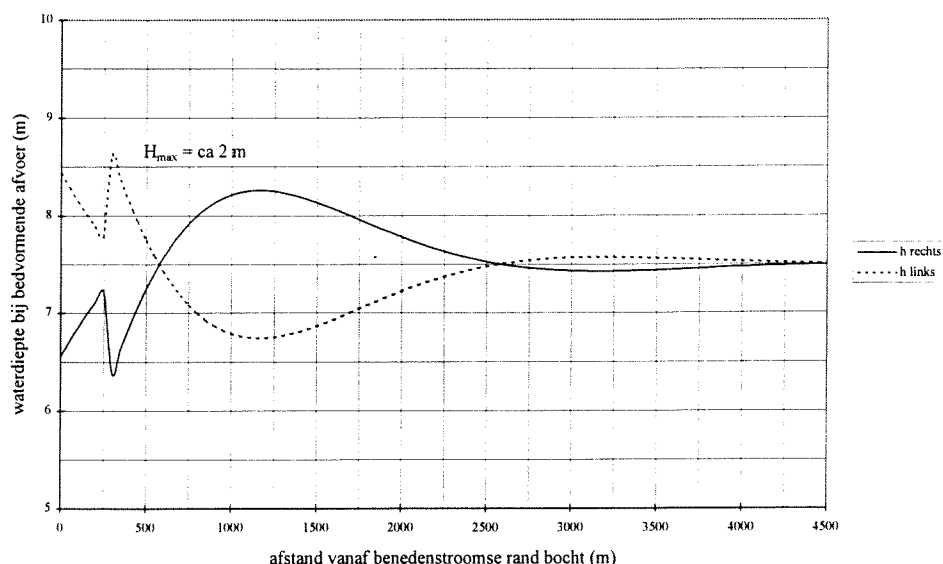
De mate waarin de oscillaties volgens vergelijking (5-22) worden gedempt, is afhankelijk van de grootte van de verschillende parameters. Als de dempingslengte L_D positief is, is de oplossing gedempt en als L_D negatief is groeit de oplossing exponentieel met x . Voor $n = 5$ ligt de grens bij $\lambda_w / \lambda_s = 1$. In bijlage 5-II is de oplossing voor $H(x)$ voor verschillende waarden van f_s en θ gegeven. Hieruit blijkt dat bij een kleinere waarde voor f_s en θ de oplossing sterker wordt gedempt.



Figuur 5.5 Waterdieptes van het linker- en rechterkanaal benedenstrooms van een Waalbocht bij $Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$, volgens vergelijking (5-22). $H_0 = 3\text{m}$.



Figuur 5.6 Bodemverstoring tgv het dwarsverhang in de bocht (H_1) en tgv de erosiekuil benedenstrooms van de bochtmaatregel (H_2).



Figuur 5.7 Waterdieptes van het linker- en rechterkanaal benedenstrooms van een Waalbocht bij $Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$, volgens vergelijking (5-22). $H_1(x=0) = 1,9\text{m}$ en $H_2(x=0) = 2 \text{ m}$.

5.5 Conclusies met betrekking tot het twee-kanalen model

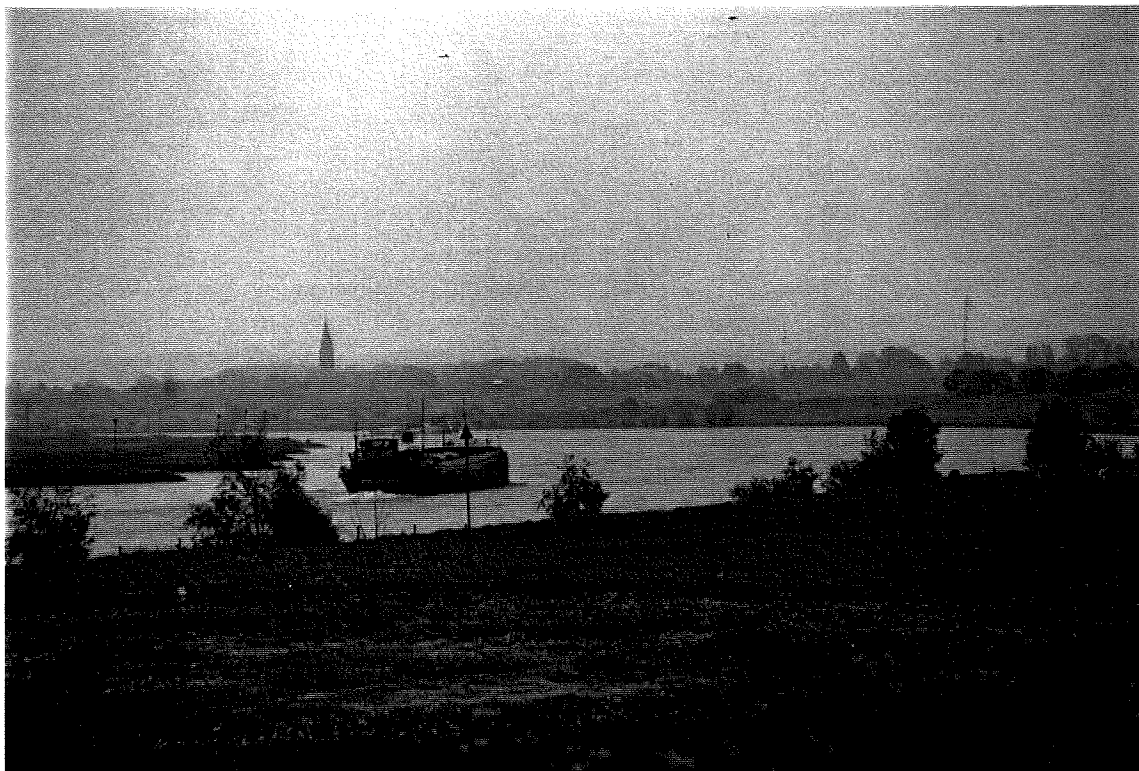
In SOBEK geeft de combinatie van 2D- en 1D-riviertakken erg grote problemen bij de ijking van het model. Hierdoor was deze optie niet toe te passen in dit afstudeerproject.

Met het twee-kanalen model zijn de morfologische veranderingen benedenstrooms van een Waalbocht beschreven. Uit dit model blijkt, dat benedenstrooms van een bocht oscillaties in de bodemligging van circa 1,2 meter kunnen voorkomen. Ten gevolge van een bochtmaatregel is de beginverstoring van de bodemligging kleiner, maar komt er in het geval van een vaste laag en bodemkribben een verstoring ten gevolge van de benedenstroomse erosiekuil bij. Deze twee verstoringen moeten worden gesuperponeerd. Voor de situatie op de Waal wordt dan een maximaal verschil in bodemligging tussen linker- en rechterkanaal van circa 2 meter gevonden, 0,8 m meer dan in de oorspronkelijke situatie. Vooral voor de scheepvaart kunnen deze sterkere bodemoscillaties problemen opleveren.

Benedenstrooms van een bodemschermenveld ontstaat geen erosiekuil en is er dus alleen een verstoring ten gevolge van het bodemdwaarsverhang in de bocht. Door de werking van de schermen is dit dwarsverhang afgenomen, waardoor ook de bodemoscillaties minder groot zullen zijn.

Hoofdstuk 6

Vaste laag



6. Vaste laag

6.1 Inleiding

Bij deze bochtmaatregel wordt in de diepe buitenbocht een laag stortsteen gestort. Door de verkleining van het doorstroomprofiel van de rivier en de verruwing van de buitenbocht, zal de binnenbocht zich gaan uitschuren. De vaste laag blijkt enige decimeters boven de breedtegemiddelde bodemligging van vóór de ingreep te komen liggen, waardoor het een drempel vormt in de rivier. In de Waalbocht bij Nijmegen is prototype-ervaring met een vaste laag als bochtmaatregel, zie ook de literatuurstudie van dit afstudeerwerk. In SOBEK zal de vaste laag over een lengte van 2,5 km worden aangelegd, tussen de 20,5 km en 23 km benedenstrooms van de Pannerdense Kop, zie ook figuur 5.2.

De aanwezigheid van een vaste laag heeft zowel invloed op de water- als sedimentbeweging. Door de grotere ruwheid en de drempelwerking worden de waterstanden bovenstrooms opgestuwd. De grootte van het sedimenttransport over een vaste laag wordt bepaald door het aanbod van sediment bovenstrooms ervan. De voortplantingssnelheid van bodemverstoringen is ter plaatse van een vaste laag over het algemeen groter dan over een alluviale rivierbodem (lit.[7]). In paragraaf 6.2 wordt de invloed van de vaste laag op de waterbeweging behandeld, in paragraaf 6.3 de verandering van het dwarsprofiel ten gevolge van de vaste laag en in paragraaf 6.4 de invloed van de vaste laag op de sedimentbeweging, zoals die in SOBEK in wordt meegenomen.

In de Ontwerpnota van het Waalproject (lit.[6]) wordt uitgegaan van een opstuwing ten gevolge van een vaste laag van 25 cm / 3 km en 4,5 cm / 3 km voor respectievelijk OLR en MHW. Deze opstuwing is bepaald aan de hand van analyses met het 2DH-model RIVCUR en waterstandsmetingen over de bocht (lit.[5]). Ook in dit afstudeerproject zal het SOBEK-model op deze opstuwing worden geijkt. In paragraaf 6.5 wordt de invoer van de vaste laag in SOBEK en de ijking van de opstuwing beschreven.

Wat betreft de verandering van de bodemligging in de bocht, wordt in de Ontwerpnota uitgegaan van een bodemdaling van 70 cm in de binnenbocht. Deze bodemdaling is gebaseerd op het uitgangspunt dat de breedte 35 meter toeneemt en de bodemhelling van het dwarsprofiel 1:50 is. Daarnaast kan de verandering van de bodemligging worden bepaald uit de gemiddelde bodemliggingen per km-raai, die ieder jaar door Rijkswaterstaat uit peilingen worden bepaald. In paragraaf 6.6 wordt de ijking beschreven van de morfologische veranderingen in de bocht en in paragraaf 6.7 worden de grootschalige morfologische gevolgen van de vaste laag bepaald. In paragraaf 6.8 volgen de conclusies met betrekking tot de vaste laag.

6.2 Invloed van de vaste laag op de waterbeweging

De opstuwing bovenstrooms van de vaste laag wordt veroorzaakt door de verruwing van de rivier ter plaatse van de bocht én door de drempel die de vaste

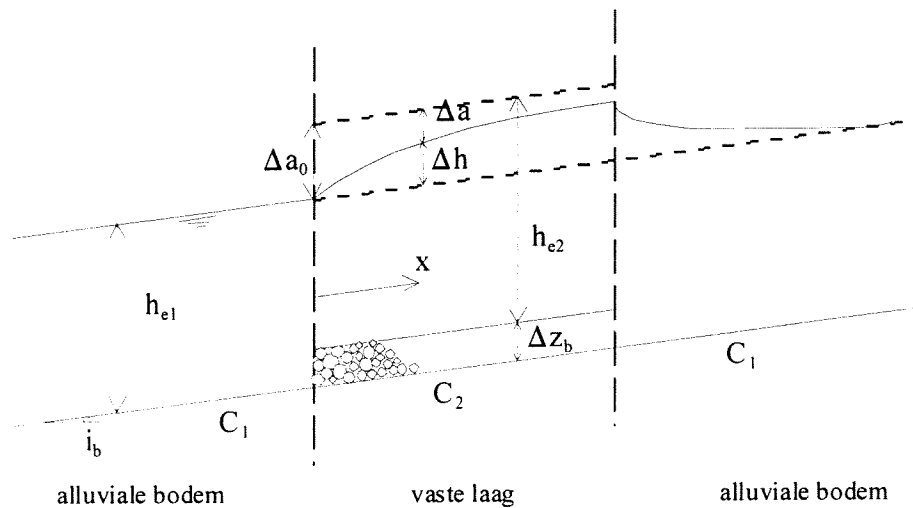
laag vormt. Wanneer benedenstrooms van de bocht uniforme stroming en voor de rivier een rechthoekig dwarsprofiel worden aangenomen, kan de opstuwing worden bepaald, zoals hierna zal worden beschreven. Dit is een één-dimensionale beschouwing. In een rivierbocht treedt echter een (drie-dimensionale) spiraalstroming op en is het dwarsprofiel niet rechthoekig. Het effect hiervan op de waterbeweging is klein vergeleken met het effect van de vaste laag (zie ook paragraaf 8.3), zodat dit ook een goede benadering is voor de opstuwing ten gevolge van een vaste laag in een rivierbocht.

Voor de evenwichtsdieptes h_{e1} benedenstrooms van de vaste laag en h_{e2} ter plaatse van de vaste laag, zie figuur 6.1, geldt (lit[8]):

$$h_{e1} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{C_1^2 i_b}} \quad \text{en} \quad (6-1)$$

$$h_{e2} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{C_2^2 i_b}} = \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{-\frac{2}{3}} \sqrt[3]{\frac{q^2}{C_1^2 i_b}} = \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{-\frac{2}{3}} h_{e1} \Rightarrow$$

$$h_{e2} = \alpha^{-2/3} h_{e1} \quad \text{met } \alpha = \frac{C_2}{C_1} \quad (6-2)$$



Figuur 6.1 Opstuwing ten gevolge van vaste laag en drempelwerking.

C_1 en C_2 zijn respectievelijk de alluviale Chezy-waarde en de Chezy-waarde ter plaatse van de vaste laag.

Algemeen geldt volgens de vergelijking van Bélanger:

$$\frac{dh}{dx} = i_b \frac{h^3 - h_e^3}{h^3 - h_g^3} \quad (6-3)$$

Voor de waterdiepte geldt: $h = h_{e2} - \Delta a$, dus geldt ook $dh/dx = -d(\Delta a)/dx$ en (x-richting positief in bovenstroomse richting):

$$\frac{d(\Delta a)}{dx} = i_b \frac{h^3 - h_{e2}^3}{h^3 - h_{g2}^3} \quad (6-4)$$

De eerste-orde Taylor ontwikkeling geeft voor $\Delta a \ll h_{e2}$

$$\frac{d(\Delta a)}{dx} = -\Delta a \frac{3h_{e2}^2}{h_{e2}^3 - h_{g2}^3} = -\frac{3i_b \Delta a}{h_{e2}} \cdot \frac{1}{1 - Fr^2} \quad (6-5)$$

Voor $Fr^2 \ll 1$ geeft dit

$$\frac{d(\Delta a)}{dx} = -\frac{3i_b \Delta a}{h_{e2}} \Leftrightarrow \int \frac{-3i_b}{h_{e2}} dx = \int \frac{1}{\Delta a} d\Delta a \Leftrightarrow$$

$$\ln \Delta a = -3 \frac{i_b}{h_{e2}} x + \text{constante} \quad (6-6)$$

De randvoorwaarde voor $x = 0$ is $h = h_{e1}$ en dus $\Delta a (x=0) = \Delta a_0$, waaruit volgt dat de constante gelijk is aan $\ln \Delta a_0$ en

$$\Delta a = \exp \left[-3 \frac{i_b x}{h_{e2}} + \ln \Delta a_0 \right] = \Delta a_0 \exp \left[-3 \frac{i_b x}{\alpha^{-2/3} h_{e1}} \right] \quad (6-7)$$

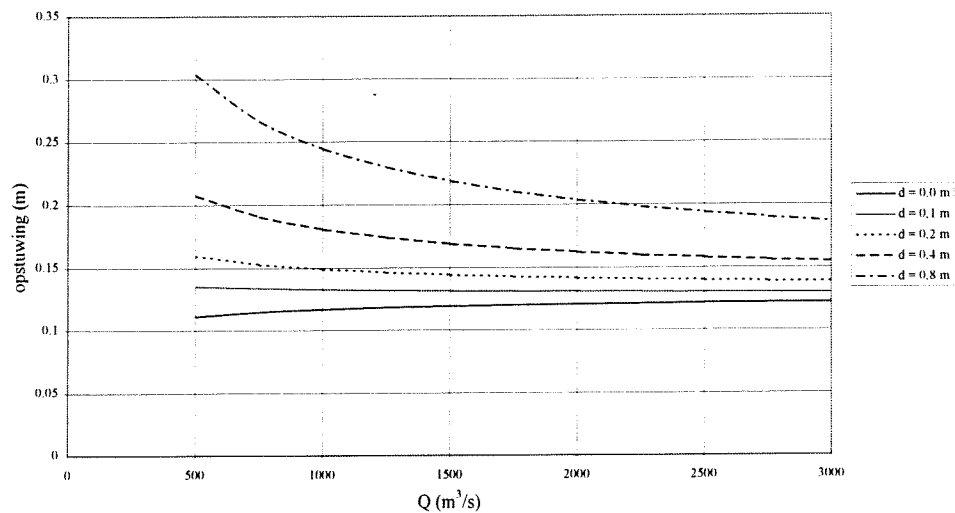
De verhoging van de waterstand is:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \Delta z_b + h_{e2} - h_{e1} - \Delta a = \Delta z_b + h_{e1} (\alpha^{-2/3} - 1) - \Delta a \\ \Rightarrow \Delta h &= \Delta z_b + h_{e1} (\alpha^{-2/3} - 1) - \Delta a_0 \exp \left[-3 \frac{i_b x}{\alpha^{-2/3} h_{e1}} \right] \Leftrightarrow \\ \Delta h &= \left\{ \Delta z_b + h_{e1} (\alpha^{-2/3} - 1) \right\} \left(1 - \exp \left[-3 \frac{i_b x}{\alpha^{-2/3} h_{e1}} \right] \right) \end{aligned} \quad (6-8)$$

In figuur 6.2 is de opstuwing over een lengte van 2,5 kilometer uitgezet voor verschillende drempelhoogtes en als functie van het debiet. Hierbij is de alluviale Chezy-waarde constant $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en de Chezy-waarde van de vaste laag $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. De rivierbreedte is 263 m en het bodemverhang is $1,1 \cdot 10^{-4}$. Bij grotere debieten 'voelt' de waterbeweging minder van de drempel in de rivier. Daardoor neemt de opstuwing af met groter wordend debiet. Dit is ook in de grafiek te zien.

Wanneer de drempelhoogte nul is, is er alleen de Chezy-waarde van de vaste laag die voor de opstuwing zorgt. Aangezien de Chezy-waarde hier niet groter wordt bij grotere debieten, maar een constante waarde heeft, verandert de opstuwing in dit geval nauwelijks bij toenemend debiet. Voor OLR afvoer ($Q_{\text{Waal}} = 777 \text{ m}^3/\text{s}$) ligt volgens bovenstaande afleiding de opstuwing tussen de 12

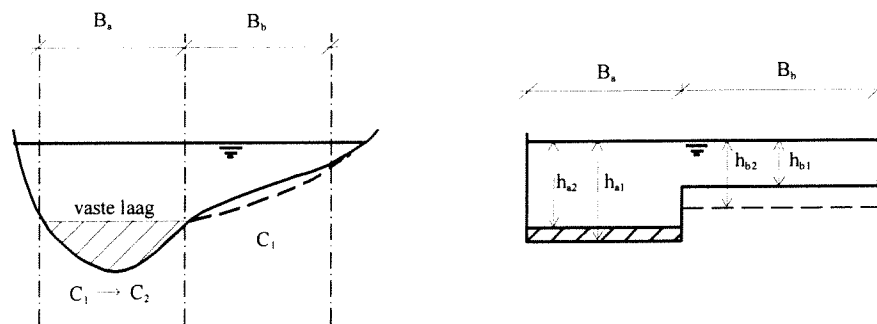
en 27 cm / 2,5 km. Dit komt goed overeen met de waterstandspeilingen in de praktijk, die een opstuwing van 25 cm / 3 km bij OLR geven.



Figuur 6.2 Opstuwing over een lengte van 2,5 km voor verschillende drempelhoogtes. $C_{\text{alluviaal}} = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $C_{\text{vaste laag}} = 35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $B = 263 \text{ m}$, $i_b = 1,1 \cdot 10^{-4}$.

6.3 Verandering van het bochtprofiel

Na de aanleg van de vaste laag in de diepe buitenbocht, is de oppervlakte van het dwarsprofiel afgenomen. De binnenbocht zal zich gaan uitschuren totdat een nieuw evenwichtsprofiel is ontstaan. Hoeveel de bodem in de binnenbocht daalt, is analytisch af te leiden door het bochtprofiel te vereenvoudigen tot een profiel met een diep en een ondiep deel, zie figuur 6.3.



Figuur 6.3 Vereenvoudiging bochtprofiel voor het bepalen van de bodemdaling in de binnenbocht.

Vóór de aanleg van de vaste laag geldt voor het debiet in het diepe en ondiepe kanaal respectievelijk:

$$Q_{a1} = B_a h_{a1} C_1 \sqrt{h_{a1} i_1} \quad \text{en} \quad Q_{b1} = B_b h_{b1} C_1 \sqrt{h_{b1} i_1} \quad (6-9)$$

En na de aanleg van de vaste laag geldt:

$$Q_{a2} = B_a h_{a2} C_2 \sqrt{h_{a2} i_2} \quad \text{en} \quad Q_{b2} = B_b h_{b2} C_1 \sqrt{h_{b2} i_2} \quad (6-10)$$

De indices a en b staan respectievelijk voor het diepe en ondiepe kanaal en de indices 1 en 2 voor respectievelijk de situatie vóór en na de aanleg van de vaste laag.

Het debiet verandert niet, zodat:

$$Q_{a1} + Q_{b1} = Q_{a2} + Q_{b2} \Leftrightarrow \quad (6-11)$$

$$B_a h_{a1}^{\frac{3}{2}} C_1 i_1^{\frac{1}{2}} + B_b h_{b1}^{\frac{3}{2}} C_1 i_1^{\frac{1}{2}} = B_a h_{a2}^{\frac{3}{2}} C_2 i_2^{\frac{1}{2}} + B_b h_{b2}^{\frac{3}{2}} C_1 i_2^{\frac{1}{2}} \quad (6-12)$$

Hieruit volgt:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{B_a h_{a1}^{\frac{3}{2}} i_1^{\frac{1}{2}} + B_b h_{b1}^{\frac{3}{2}} i_1^{\frac{1}{2}} - B_b h_{b2}^{\frac{3}{2}} i_2^{\frac{1}{2}}}{B_a h_{a2}^{\frac{3}{2}} i_2^{\frac{1}{2}}} \quad (6-13)$$

In figuur 6.4 is een voorbeeldprofiel van een Waalbocht gegeven. Bij bedvormende afvoer ($Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$, ofwel $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$) en even grote breedtes voor de beide kanalen, volgt hieruit voor het diepe, respectievelijk ondiepe kanaal de waterdiepte:

$$h_{a1} \approx 9,25 \text{ m}$$

$$h_{b1} \approx 6,25 \text{ m}$$

Wanneer nu de aanlegdiepte van de vaste laag (en hiermee h_{a2}) en de Chezy-waarden van de alluviale bodem en de vaste laag (C_1 en C_2) bekend zijn, kan de bodemdaling in de binnenbocht worden bepaald. Wanneer de vaste laag op een diepte van -6,0 m NAP wordt gelegd, wordt $h_{a2} = 9,1 \text{ m}$ gevonden. De Chezy-waarden in SOBEK zijn bij bedvormende afvoer:

$$C_1 = 48,6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

$$C_2 = 32,6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

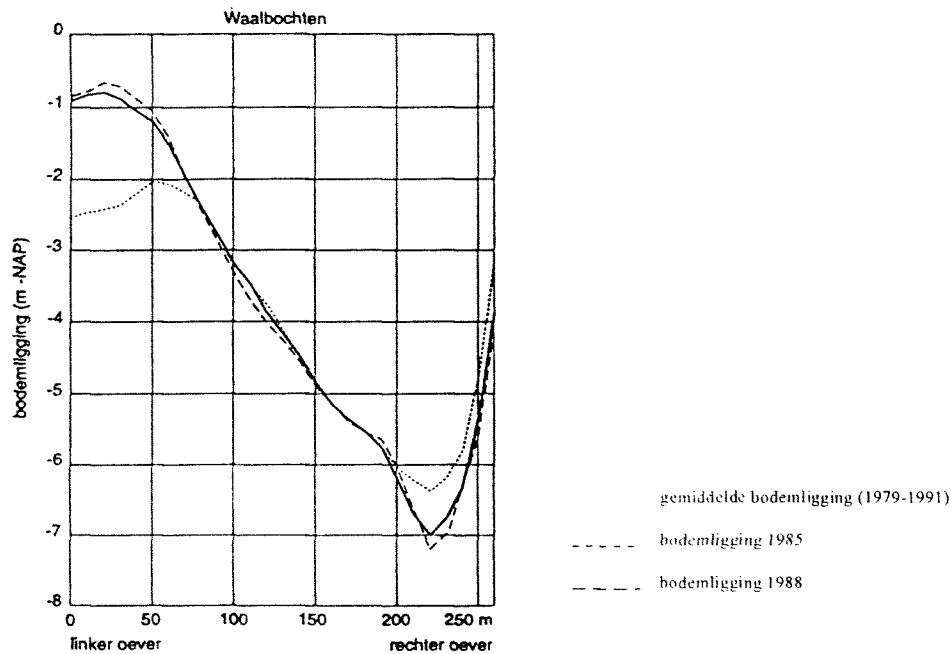
De opstuwing ten gevolge van de vaste laag is circa 15 cm / 2,5 km, waardoor $i_2 = 1,7 \cdot 10^{-4}$ wordt gevonden. Het oorspronkelijke langsverhang was $i_1 = 1,08 \cdot 10^{-4}$. Wanneer deze waarden worden ingevuld in vergelijking (6-13), wordt voor de nieuwe waterdiepte in de binnenbocht gevonden:

$$h_{b2} = 6,6 \text{ m}$$

Dit betekent een bodemdaling van circa 35 cm in de binnenbocht. Uit de bodempeilingen volgt een grotere bodemdaling. De breedte-gemiddelde bodemdaling was namelijk al 35 cm volgens de peilingen.

De Chezy-waarden, met name die van de vaste laag, zijn echter gebruikt als ijkingsparameter om de waterbeweging te ijken. Hierdoor is de oorspronkelijke betekenis van de Chezy-waarde, namelijk die van de weerstand van de rivier, verloren gegaan en zijn de Chezy-waarden minder goed bruikbaar in dit soort analyses. Daarnaast geldt de C_2 niet over de hele breedte van het diepe kanaal, zie figuur 6.4.

Om deze redenen wordt hier de uit de bodempeilingen bepaalde, over de breedte gemiddelde bodemdaling van 35 cm aangehouden.



Figuur 6.4 Dwarsprofiel van een Waalbocht. Bron: *lit. [18]*.

In de evenwichtssituatie moet het sedimenttransport na aanleg van de vaste laag gelijk zijn aan het transport vóór aanleg van de vaste laag. Met het achteraf substitueren van de gevonden waarden in de uitdrukkingen voor het sedimenttransport vóór en na de aanleg van de vaste laag:

$$S_1 = B_a m \left(\frac{Q_{a1}}{B_a h_{a1}} \right)^n + B_b m \left(\frac{Q_{b1}}{B_b h_{b1}} \right)^n \quad (6-14)$$

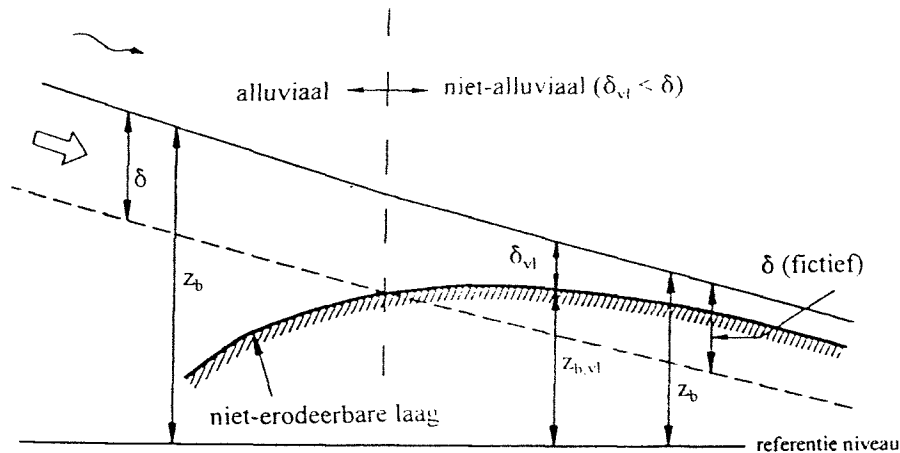
$$S_2 = B_a m \left(\frac{Q_{a2}}{B_a h_{a2}} \right)^n + B_b m \left(\frac{Q_{b2}}{B_b h_{b2}} \right)^n \quad (6-15)$$

kan worden aangetoond dat dit inderdaad zo is.

6.4 Sedimenttransport over een vaste laag

Een niet-erodeerbare ofwel vaste laag beïnvloedt ook de sedimentbeweging over de bodem. In deze paragraaf zal worden beschreven hoe het sedimenttransport en

de voortplantingssnelheid van bodemverstoringen worden beïnvloed door de aanwezigheid van een vaste laag, zie ook literatuur [7].



Figuur 6.5 Definitie tekening vaste laag. Bron: lit.[7].

Over het alluviale bed vindt het sedimenttransport plaats in de transportlaag:

$$\delta = \alpha h \quad (6-16)$$

waarin δ de dikte van de transportlaag, α een coëfficiënt en h de waterdiepte is. De dikte van de transportlaag is ongeveer gelijk aan de helft van de hoogte van de beddingsvormen (lit.[10]). De beddingsvormen zijn ongeveer 0,2h hoog, hetgeen betekent dat de coëfficiënt α ongeveer 0,1 is. Wanneer het niveau van de vaste laag binnen de transport laag komt te liggen, wordt de sedimentbeweging erdoor beïnvloed en wordt de dikte van de transportlaag, zie figuur 6.5:

$$\delta_{vl} = z_b - z_{b, vl} \quad (6-17)$$

waarin δ_{vl} de dikte van de transportlaag, z_b het bodemniveau en $z_{b, vl}$ het niveau van de vaste laag is. In de situatie dat $\delta_{vl} < \delta$, is de rivierbodem niet-alluviaal.

Het sedimenttransport over de alluviale en de niet-alluviale bodem wordt berekend met de gebruikelijke transportformules, maar voor de niet-alluviale bodem wordt het transport op de volgende manier gereduceerd:

$$s_{vl} = \psi \left(\frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) s \quad (6-18)$$

waarin s_{vl} het sedimenttransport per eenheid van breedte is over de niet-alluviale bodem, ψ de reductie functie en s het sedimenttransport per eenheid van breedte, dat met de transportformule is berekend voor de alluviale bodem:

$$s = f(u) \quad (6-19)$$

Voor Froude-getallen kleiner dan circa 0,6, kan voor de voortplantingssnelheid van bodemverstoringen over een alluviale rivierbodem worden afgeleid (lit.[8]):

$$c = \frac{s}{\beta \delta} \quad (6-20)$$

waarin β een vormcoëfficiënt voor de beddingsvormen is, $\beta \approx 1/2$.

Uitgaande van stationaire stroming kan met de waterbewegingsvergelijking:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -g \frac{u^2}{C^2 h} \quad (6-21)$$

en de continuïteitsvergelijking voor de niet-alluviale bodem:

$$\frac{\partial s_{vl}}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (6-22)$$

voor de voortplantingssnelheid van een verstoring over de niet-alluviale bodem worden afgeleid (lit.[7]):

$$c_{vl} = \frac{dx}{dt} = \psi \left(\frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) c + \psi' \left(\frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) \frac{s}{\delta} \left[1 + \frac{\delta_{vl}}{h} \frac{1}{(1 - Fr^2)} \right] \quad (6-23)$$

In SOBEK kan uit twee reductie functies ψ worden gekozen (zie ook figuur 6.6):

$$1) \quad \psi \left(\frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) = \frac{\delta_{vl}}{\delta} \quad \text{voor } \delta_{vl} < \delta \quad (6-24)$$

of

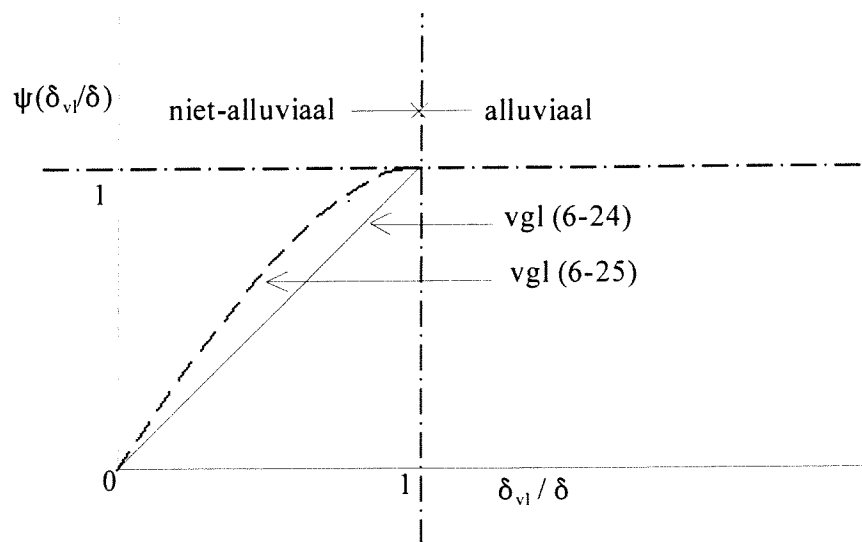
$$2) \quad \psi \left(\frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) = \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) \quad \text{voor } \delta_{vl} < \delta \quad (6-25)$$

Vergelijking (6-24) en (6-25) ingevuld in (6-23) en aangenomen dat $\delta_{vl} / h \ll 1$ geeft voor de voortplantingssnelheden:

$$c_{vl} \approx \frac{\delta_{vl}}{\delta} c + \frac{s}{\delta} \quad (6-26)$$

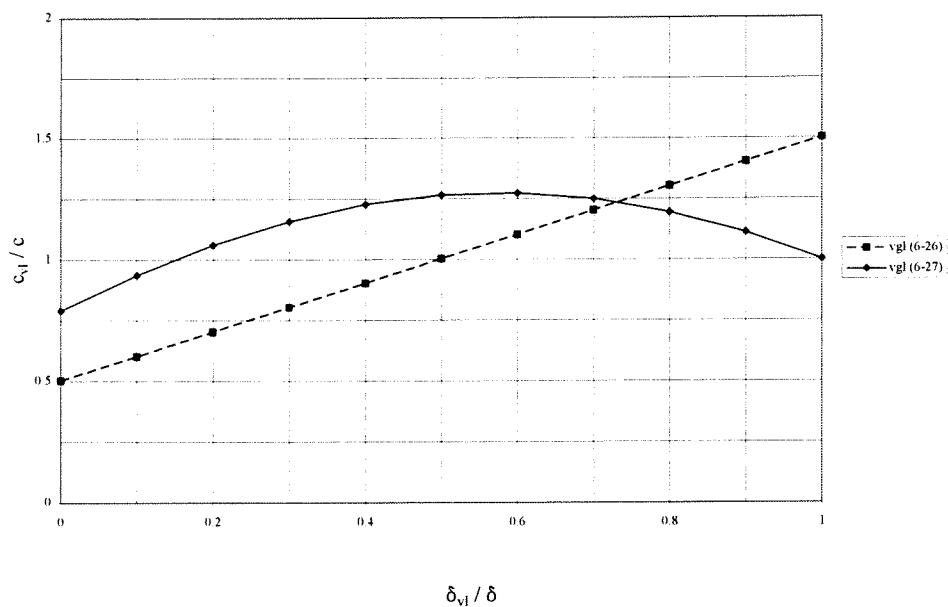
respectievelijk

$$c_{vl} \approx c \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) + \frac{\pi}{2} \frac{s}{\delta} \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta_{vl}}{\delta} \right) \quad (6-27)$$



Figuur 6.6 Reductie functies voor het sedimenttransport. Bron: lit.[7].

Op de overgang van alluviaal naar niet-alluviaal (als $\delta_{vl} = \delta$), treedt in vergelijking (6-26) een discontinuïteit op in de voortplantingssnelheid. Vergelijking (6-27) geeft een continue overgang, hetgeen fysisch aannemelijker is.



Figuur 6.7 Voortplantingssnelheid van een bodemverstoring over een vaste laag als functie van δ_{vl} / δ .

In figuur 6.7 is de verhouding c_{vl}/c volgens de vergelijkingen (6-26) en (6-27) uitgezet tegen de verhouding δ_{vl}/δ , voor de situatie met bedvormende afvoer en $\delta = 0,75$ m. Bij toepassing van de reductiefunctie in sinusvorm, is voor bijna alle waarden van δ_{vl} / δ de voortplantingssnelheid over de vaste laag groter dan over de alluviale bodem. Voor de lineaire reductiefunctie is dat pas vanaf $\delta_{vl} / \delta > 0,5$

het geval. In dit onderzoek is in SOBEK de sinusvormige reductiefunctie toegepast. In bijlage 6-I zijn de voor de grafiek gebruikte parameters gegeven.

Het gegeven, dat de hoogteligging van de vaste laag de sedimenttransportcapaciteit over de vaste laag beïnvloedt, betekent dat hiermee de bodemdaling in de bocht kan worden geïjkt. Een kleinere transportcapaciteit boven de vaste laag heeft sedimentatie in de bocht tot gevolg en een grotere transportcapaciteit betekent erosie in de bocht. Bij de ijking van de morfologie van de bocht in paragraaf 6.6, wordt hierop teruggekomen.

6.5 IJking waterbeweging in situatie met vaste laag

SOBEK biedt de mogelijkheid op een riviertak een niet-erodeerbare laag in te voeren. Het niveau van deze vaste laag wordt als functie van de plaats ingevoerd en geldt over de gehele breedte van de rivier.

Wanneer in SOBEK de morfologie-module aanstaat, kan op een riviertak de ligging van een vaste laag worden gedefinieerd. De hoogteligging van de vaste laag wordt in een tabel als functie van de locatie opgegeven. Waar de rivier alluviaal moet zijn, wordt de vaste laag ver onder de bodem gelegd en ter plaatse van de bocht, tussen de 20,5 km en 23 km benedenstrooms van de Pannerdense Kop wordt de vaste laag binnen de transportlaag van de alluviale bodem gelegd. Het nadeel van deze optie is dat de vaste laag over de gehele rivierbreedte komt te liggen en niet, zoals dat in de praktijk het geval is, alleen in de buitenbocht. Er zal bepaald moeten worden of de morfologische ontwikkelingen in de bocht, die door SOBEK worden berekend, overeenkomen met in de praktijk gemeten bodemveranderingen.

Met behulp van de Chezy-waarde ter plaatse van de vaste laag worden de opstuwingen geïjkt. Dit is gebeurd voor de afvoeren $Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$ (OLR) en $Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$ (MHW), waarbij uit peilingen en voorspellende berekeningen is bepaald, dat de opstuwing respectievelijk 25 cm / 3 km en 4,5 cm / 3 km is.

De ijking van de opstuwing gebeurt op de locaties 17,5 km en 20 km benedenstrooms van de Pannerdense Kop. Deze locaties liggen respectievelijk 3 km bovenstrooms van het (bovenstroomse) begin van de vaste laag en 3 km bovenstrooms van het (benedenstroomse) eind van de vaste laag. In tabel 6.1 zijn de waterstanden en opstuwingen gegeven die in de situatie met een vaste laag door SOBEK zouden moeten worden berekend. In de tabellen 6.2 en 6.3 zijn de door SOBEK berekende waterstanden en opstuwingen na ijking van het model gegeven en de Chezy-waarden die voor de verschillende Waalafvoeren zijn ingevoerd ter plaatse van de vaste laag. Op de rest van de Waal blijft de eerder geïjkte alluviale ruwheid gelden. Voor de Rijnaafvoeren $Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$, respectievelijk de OLR- en de MHW-afvoer, is de Chezy-waarde geïjkt. Voor de tussenliggende afvoeren zijn de Chezy-waarden geïnterpoleerd.

Voor de verdeling van de afvoer over het Pannerdens Kanaal en de Waal, is de verandering van de waterstand bij de Pannerdense Kop van belang. SOBEK berekent een waterstandsverhoging van 2 tot 6 cm bij de Pannerdense Kop, zie de tabellen 6.4 en 6.5. De vermindering van de afvoer op de Waal ten gevolge

van de hogere waterstanden op het splitsingspunt, ligt tussen de 0,3 en de 1,0 %, zie tabel 6.6.

6.6 IJking van de morfologische ontwikkelingen in de bocht

Uit bodempeilingen die ieder jaar door Rijkswaterstaat worden uitgevoerd en die worden verwerkt tot een gemiddelde bodemligging per km-raai, kan worden bepaald hoe de bodem zich ontwikkelde na de aanleg van de vaste laag bij Nijmegen. De aanleg van deze vaste laag vond plaats in de periode 1986-1987. In de grafiek in bijlage 6-II is de gemiddelde bodemligging in de bocht uitgezet tegen de tijd. Ook is de gemiddelde bodemligging boven- en benedenstrooms van de bocht in de grafiek weergegeven. Door de bodemligging van de bocht vóór de aanleg van de vaste laag, is een lineaire trendlijn getrokken, evenals door de bodemligging van ná de aanleg van de vaste laag. Volgens deze laatste trendlijn is de bodem in 1993 ten opzichte van 1985 30 à 35 cm gedaald. Aangenomen wordt, dat hiermee de dwarsdoorsnede in evenwicht is. In de Ontwerpnota van het Waalproject (lit.[6]), wordt uitgegaan van een bodemdaling in de binnenbocht van 70 cm. Dit is dus een andere grootte dan de gemiddelde bodemdaling over de gehele rivierbreedte, die in de grafiek is weergegeven.

Als ijkingsparameter is de hoogteligging van de vaste laag gebruikt, zie ook paragraaf 6.4. Hoe hoger de vaste laag ligt, hoe kleiner de transportlaag erboven is. Dit betekent een grotere reductie van het sedimenttransport (zie figuur 6.6) en dus een kleinere transportcapaciteit, waardoor de bodem boven de vaste laag minder erodeert. Anderzijds zorgt de kleinere Chezy-waarde in de bocht voor een toename van het sedimenttransport, zie ook hoofdstuk 8.

De vaste laag, waarbij in de bocht de bodem 30 à 35 cm daalt, ligt 0,40 meter onder het bodemniveau, zie bijlage 6-III en 6-IV, waarin de bodemligging en de bodemverandering van de Waal en de Rijn in de periode 1992-2032 zijn gegeven. De dikte van de transportlaag boven de vaste laag is dus 0,40 meter. De factor α in vergelijking (6-16) is 0,1 , zodat bij een gemiddelde waterdiepte van 7,5 meter de alluviale transportlaag δ circa 0,75 meter dik is. De verhouding δ_{vl} / δ is dan 0,53 en de reductiefactor voor het sedimenttransport volgens vergelijking (6-25) is circa 0,75.

Bovenstrooms van de bocht worden de waterstanden opgestuwd, waardoor daar de stroomsnelheid en dus ook het sedimenttransport in benedenstroomse richting afnemen en sedimentatie zal optreden. Hierdoor ontstaat benedenstrooms van de bocht een tekort aan sedimentaanbod en treedt erosie op.

6.7 Invloed van de vaste laag op de morfologie

Benedenstrooms van de vaste laag

Direct benedenstrooms van de vaste laag ontstaat in SOBEM een erosiekuil. De diepte van de erosiekuil is na tien jaar circa 55 cm, maar neemt in de jaren daarna af en is na veertig jaar zo goed als verdwenen.

Volgens de bodempeilingen van Rijkswaterstaat, is de, over 7 kilometer gemiddelde, bodemdaling op een afstand van 10 km, 20 km, 30 km en 40 km benedenstrooms van de vaste laag respectievelijk 41 cm, 33 cm, 26 cm en 49 cm in de periode 1985-1993. In SOBEK wordt op deze afstanden benedenstrooms van de vaste laag na tien jaar een bodemverandering van respectievelijk +3 cm, +2 cm, -11 cm en -12 cm berekend en na veertig jaar respectievelijk -34 cm, -20 cm, -27 cm en -30 cm. In SOBEK is de bodemdaling dus kleiner dan volgens de peilingen zou moeten optreden en duurt het ook langer voordat die bodemdaling bereikt is. Tijdens de ijking van de morfologie van het model is echter gebleken, dat de in SOBEK berekende autonome bodemdaling niet overeenkomt met de in werkelijkheid optredende autonome bodemdaling. In tabel 6.7 zijn de door SOBEK berekende en de in werkelijkheid optredende autonome bodemdaling gegeven. Voor de werkelijk optredende autonome bodemdaling bestaan verschillende scenario's. Hier is uitgegaan van een daling van 2 cm/jaar bij de Pannerdense Kop, lineair afnemend tot 0 cm/jaar bij Zaltbommel. Wanneer de fout in de door SOBEK berekende autonome bodemdaling wordt verwerkt in de bodemveranderingen en de bodempeilingen na 40 jaar worden benaderd door de autonome bodemdaling in 32 jaar in rekening te brengen, worden de volgende bodemveranderingen gevonden:

	10 km	20 km	30 km	40 km
SOBEK incl. autonome bodemdaling na 40 jr:	-64 cm	-44 cm	-25 cm	-5 cm
aangepaste peilingen na 40 jr:	-73 cm	-55 cm	-39 cm	-52 cm

Het verschil tussen SOBEK en de peilingen is 40 km benedenstrooms van de vaste laag erg groot.

Bij de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 9, paragraaf 9.3, zal blijken, dat ten gevolge van de hydraulische randvoorwaarde de door SOBEK berekende bodemdaling op de Benedenwaal te klein is: van 10 km tot 40 km benedenstrooms van de vaste laag oplopend van circa 10 cm tot 20 cm in 40 jaar. Wanneer dit wordt meegenomen, komen de aangepaste, door SOBEK berekende bodemveranderingen goed in de buurt van de (aangepaste) bodempeilingen:

	10 km	20 km	30 km	40 km
SOBEK incl. autonome bodemdaling en effect randvoorwaarde:	-74 cm	-58 cm	-42 cm	-25 cm
aangepaste peilingen na 40 jr:	-73 cm	-55 cm	-39 cm	-52 cm

Op de eerste dertig kilometer benedenstrooms van de vaste laag is het verschil tussen SOBEK en de bodempeilingen erg klein. Op een afstand van 40 km benedenstrooms van de vaste laag is het verschil echter nog steeds groot.

Een tweede verschil met de bodempeilingen is de snelheid waarmee de bodem daalt. In SOBEK treedt, in tegenstelling tot de bodempeilingen, de eerste tien jaar nauwelijks een bodemdaling op. Pas in de dertig jaar daarna wordt een duidelijke bodemdaling als gevolg van de vaste laag waargenomen. Dit is deels te verklaren met het feit dat in de praktijk de bodem in de binnenbocht op diepte wordt gebaggerd, omdat het anders te lang duurt voordat de gewenste toename van de

vaarbaanbreedte is bereikt. In SOBEK echter, moet de bodem zich ter plaatse van de vaste laag zelf uitschuren. Hierdoor is benedenstrooms van de bocht het aanbod van sediment tijdelijk groter dan de transportcapaciteit en treedt sedimentatie op. Pas wanneer deze sedimentatie is verdwenen, wordt de bodemdaling ten gevolge van de vaste laag zichtbaar. Toch duurt het in SOBEK dan nog dertig jaar, voordat de bodemdaling is bereikt die volgens de peilingen al na acht jaar optreedt. Tussen de tien en veertig jaar na de aanleg van de vaste laag, berekent SOBEK op een afstand van 10 km, 20 km, 30 km en 40 km benedenstrooms van de vaste laag een bodemdaling van respectievelijk 37 cm, 22 cm, 16 cm en 18 cm. Wanneer de door SOBEK berekende autonome bodemdaling uit tabel 6.7 hieruit wordt geëlimineerd, worden de bodemveranderingen ten gevolge van alleen de vaste laag gevonden: respectievelijk -29 cm, -19 cm, -2 cm en +4 cm. De bodemveranderingen volgens de peilingen, waaruit de autonome bodemdaling 8 jaar is geëlimineerd, is op die locaties -33 cm, -27 cm -23 cm en -48 cm. Wanneer ook hier rekening wordt gehouden met het effect van de hydraulische randvoorwaarde op de benedenrand, zie hoofdstuk 9, komen de (aangepaste) bodemdalingen volgens SOBEK in dertig jaar en volgens de bodempeilingen in acht jaar, ten gevolge van alleen de vaste laag, wat betreft grootte goed overeen. Het verschil in snelheid waarmee de bodemontwikkeling plaatsvindt, is echter erg groot:

	10 km	20 km	30 km	40 km
SOBEK 10-40 jr, excl. autonome bodemdaling,				
incl. effect randvoorw:	-39 cm	-33 cm	-19 cm	-16 cm
peilingen na 8 jr, excl autonome bodemdaling:	-33 cm	-27 cm	-23 cm	-48 cm

Ook hier is het verschil 40 km benedenstrooms van de vaste laag vrij groot. Dit komt (gedeeltelijk) doordat in SOBEK de bodemverstoring ten gevolge van de vaste laag hier nog niet is aangekomen. Op dezelfde manier als in paragraaf 4.4 is gedaan voor de Rijn, kan ook voor de Waal de voortplantingssnelheid van een bodemverstoring worden bepaald. Deze is, berekend met parameters uit SOBEK, 0,7 à 0,9 km per jaar. In veertig jaar verplaatst de bodemverstoring ten gevolge van de vaste laag zich dus 28 à 36 km in benedenstroomse richting en is nog niet op de afstand van 40 km benedenstrooms van de vaste laag zichtbaar. Dit is ook te zien in bijlage 6-Vb: het verschil in bodemligging tussen de situaties met en zonder vaste laag, gaat naar nul toe op ongeveer 40 km benedenstrooms van de vaste laag. In de praktijk heeft de bodemverstoring zich blijkbaar sneller voortgeplant. Daarnaast wijkt de bodempeiling op 40 km benedenstrooms van de vaste laag erg veel af van de andere drie bodempeilingen. Dit verschil moet met andere rivierwerkzaamheden te maken hebben.

Bovenstrooms van de vaste laag

Op de 20 km bovenstrooms van de vaste laag, daalt de bodem volgens de bodempeilingen 40 à 45 cm. In SOBEK stijgt de bodem op dit traject circa 20 cm. Ook hier is de in SOBEK berekende autonome bodemdaling niet juist: in werkelijkheid treedt een circa 1,7 cm/jr grotere bodemdaling op. Wanneer dit in rekening wordt gebracht, is na veertig jaar de bodem bovenstrooms van de vaste laag 45 à 50 cm gedaald, hetgeen redelijk overeenkomt met de bodempeilingen.

Vergeleken met de situatie zonder vaste laag

In bijlage 6-V is het verschil in bodemligging na veertig jaar vergeleken met de situatie zonder vaste laag. Door naar de verschillen van de twee situaties te kijken, spelen de te kleine autonome bodemdaling en de invloed van de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde geen rol. Ten gevolge van de vaste laag ligt de bodem bovenstrooms van de bocht na veertig jaar 15 tot 25 cm hoger dan in de situatie zonder vaste laag het geval zou zijn. Direct benedenstrooms van de bocht, ligt de bodem 35 cm lager en verder in benedenstroomse richting neemt het verschil af tot nul op 40 km benedenstrooms van de vaste laag. Dit komt doordat het effect van de vaste laag daar nog niet merkbaar is. Op de Rijn treedt ten gevolge van de vaste laag slechts een zeer kleine bodemverhoging op. De verschillen met de situatie zonder vaste laag zijn maximaal slechts 2 cm, zie bijlage 6-Vc.

In bijlage 6-VI is het gemiddelde sedimenttransport op de Rijn en de Waal voor de situatie met en zonder vaste laag gegeven. Mét vaste laag is het transport op de Waal kleiner dan zonder vaste laag. Benedenstrooms van de vaste laag gaat het transport in benedenstroomse richting geleidelijk aan omhoog en komt in de buurt van de situatie zonder vaste laag. Bovenstrooms van de vaste laag is het kleinere sedimenttransport het gevolg van de opstuwing van de waterstanden, waardoor de stroomsnelheden afnemen en hiermee ook het sedimenttransport. Benedenstrooms van de vaste laag ontstaat hierdoor een tekort aan sedimentaanbod. Richting benedenrand herstelt het sedimenttransport zich van dit tekort en komt weer in de buurt van het transport in de situatie zonder vaste laag.

6.8 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de vaste laag

In het model is een opstuwing geijkt van 25 cm / 2,5 km bij OLR en van 4,5 cm / 2,5 km bij MHW, overeenkomend met respectievelijk waterstandspeilingen en voorspellende berekeningen. Met de één-dimensionale analytische benadering van de opstuwing over een vaste laag, wordt bij OLR een opstuwing van 12 tot 27 cm / 2,5 km gevonden, afhankelijk van de drempelhoogte. Dit komt redelijk goed overeen met de waterstandspeilingen en de geijkte opstuwing. Ten gevolge van de opstuwing wordt het debiet op de Waal 0,3 à 1,0 % kleiner.

Voor de morfologie is een bodemdaling van 30 à 35 cm in de bocht geijkt. Dit komt overeen met de bodemdaling die volgt uit bodempeilingen na de aanleg van de vaste laag bij Nijmegen.

Wanneer rekening wordt gehouden met de te kleine autonome bodemdaling in SOBEK en de invloed van de hydraulische randvoorwaarde op de benedenrand, worden met SOBEK bodemdalingen berekend die tot ongeveer 30 km benedenstrooms van de vaste laag goed overeenkomen met de bodempeilingen. Hierbij moet worden opgemerkt, dat voor de in werkelijkheid optredende bodemveranderingen slechts één reeks bodempeilingen beschikbaar is. Het model in SOBEK zou beter beoordeeld kunnen worden, wanneer het met meer situaties zou worden vergeleken. In Nederland is echter alleen prototype ervaring met de vaste laag bij Nijmegen.

Verder moet rekening worden gehouden met het feit, dat in SOBEK de bodemveranderingen te langzaam optreden. Ook wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat in SOBEK de bocht zichzelf moet uitschuren, terwijl deze in de praktijk op diepte wordt gebaggerd, treden in de praktijk de bodemveranderingen nog ongeveer drie keer zo snel op. Dit heeft ook invloed op de afstand waarover de bodemveranderingen na een aantal jaren zichtbaar zijn. In SOBEK is bijvoorbeeld na veertig jaar de invloed van de vaste laag 40 km benedenstrooms van de bocht nog niet zichtbaar, terwijl dat volgens de bodempeilingen wel het geval zou moeten zijn. De eerste 10 km benedenstrooms van de vaste laag lijkt, de autonome bodemdaling niet meegerekend, in evenwicht te zijn na veertig jaar: de bodemligging lijkt hier om een evenwicht te gaan schommelen, zie bijlage 6-IV. Om er zeker van te zijn dat dit niet komt doordat in de laatste tien jaar het sedimenttransport kleiner is dan in de voorgaande decennia, zie bijlage 6-VII, zou de simulatie met 20 à 30 jaar verlengd moeten worden.

In SOBEK bestaat de mogelijkheid een hoeveelheid sediment uit een riviervak te onttrekken, bijvoorbeeld om baggerwerkzaamheden weer te geven. Door met deze optie de baggerwerkzaamheden in de rivierbocht te modelleren, wordt het proces van uitschuren van de rivierbocht overgeslagen en wordt met SOBEK het werkelijke verloop van de bodemontwikkeling beter benaderd.

Resumerend kan worden geconcludeerd, dat ten gevolge van alleen de vaste laag:

- de bodem bovenstrooms van de vaste laag circa 20 cm stijgt,
- ter plaatse van de vaste laag de (over de breedte gemiddelde) bodemligging 30 à 35 cm daalt,
- de bodemdaling benedenstrooms van de vaste laag circa 30 cm is.

Om de totale bodemveranderingen op de Waal te krijgen, moet rekening worden gehouden met het feit dat:

- SOBEK niet de goede autonome bodemdaling berekent,
- de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde een te kleine bodemdaling in SOBEK veroorzaakt,
- bodemveranderingen in SOBEK te langzaam optreden, waardoor bodemverstoringen in werkelijkheid al verder benedenstrooms zichtbaar zullen zijn dan volgens SOBEK het geval is.

Hoofdstuk 7

Bodemkribben



7. Bodemkribben

7.1 Inleiding

Bodemkribben zijn een soort drempels die in de buitenbocht van de rivier worden aangelegd. Net als bij een vaste laag verkleinen ook bodemkribben het doorstroomprofiel van de rivier en verruwen ze de buitenbocht. Hierdoor zal de binnenbocht worden uitgeschuurd en ontstaat er over een grotere breedte meer diepte. Bovendien kan er, door de bodemkribben niet helemaal loodrecht op de stroomrichting te plaatsen, plaatselijk een stromingspatroon worden opgewekt dat sediment van de ondiepe binnenbocht naar de diepe buitenbocht transporteert.

Uit vervalmetingen in de bocht bij Erlecom, direct na de aanleg van het bodemkribbenveld, is gebleken dat de opstuwing ten gevolge van de bodemkribben 14 cm / 3 km bedraagt bij OLR. De met WAQUA berekende opstuwingen van 20 cm / 3 km en 4 cm / 3 km bij respectievelijk OLR en MHW zijn dus aan de hoge kant. Bovendien wordt verwacht dat de ruwheid in de loop van de tijd zal afnemen door sedimentatie tussen de bodemkribben. In dit afstudeerproject wordt uitgegaan van een opstuwing van 14 cm / 3 km bij OLR en 2,5 cm / 3 km bij MHW. De ijking van de waterbeweging wordt beschreven in paragraaf 7.2

In de Ontwerpnota van het Waalproject, wordt uitgegaan van een bodemdaling van 50 cm in de binnenbocht. Deze bodemdaling is gebaseerd op het uitgangspunt dat 25 meter breedtewinst optreedt en de bodemhelling van het dwarsprofiel 1:50 is. Hier wordt uitgegaan van een, over de breedte gemiddelde, bodemdaling van 20 à 25 cm. Doordat het bodemkribbenveld bij Erlecom er pas vanaf de zomer van 1996 ligt, kan de bodemverandering niet aan de hand van bodempeilingen worden bepaald. In paragraaf 7.3 wordt de ijking van de morfologische veranderingen in de bocht beschreven. De invloed van de bodemkribben op de morfologie wordt in paragraaf 7.4 beschreven en in paragraaf 7.5 volgen de conclusies met betrekking tot de bodemkribben.

Ook de bodemkribben worden in SOBEK weergegeven door een niet-erodeerbare, ofwel vaste laag. Dit betekent dat de analyses in hoofdstuk 6 van het effect van een vaste laag op de water- en sedimentbeweging en de verandering van het bochtprofiel ook voor de situatie met bodemkribben gelden.

7.2 IJking waterbeweging in de situatie met bodemkribben

De bodemkribben worden, net als de vaste laag, tussen de 20,5 km en 23 km benedenstrooms van de Pannerdense Kop gelegd, zie figuur 5.2. De gegeven opstuwingen bij OLR en MHW, worden met behulp van de Chezy-waarde ter plaatse van de bodemkribben geijkt. Voor de ijking worden de waterstanden op de locaties 17,5 km en 20 km benedenstrooms van de Pannerdense Kop genomen. Deze locaties liggen respectievelijk 3 km bovenstrooms van het (

bovenstroomse) begin van het bodemkribbenveld en 3 km bovenstrooms van het (benedenstroomse) eind van het bodemkribbenveld.

In tabel 7.1 zijn de waterstanden en opstuwingen gegeven die in de situatie met een bodemkribbenveld door SOBEK zouden moeten worden berekend. In de tabellen 7.2 en 7.3 zijn de door SOBEK berekende waterstanden en opstuwingen na ijking van het model gegeven en de Chezy-waarden ter plaatse van het bodemkribbenveld als functie van de Waalafvoer.

Ook hier is de Chezy-waarde geijkt voor de OLR- en MHW-afvoer (respectievelijk $Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3$) en zijn voor tussenliggende afvoeren de Chezy-waarden geïnterpoleerd. Bij de Pannerdense Kop treedt een waterstandsverhoging van 1 à 2 cm op, zie de tabellen 7.4 en 7.5. Door de hogere waterstanden op het splitsingspunt Pannerdense Kop, gaat er meer water naar het Pannerdens Kanaal. De vermindering van de Waalafvoer ten gevolge van de bodemkribben, ligt tussen de 0,2 en de 0,6 %, zie tabel 7.6.

7.3 IJking van de morfologische ontwikkelingen in de bocht

Voor de verandering van het bochtprofiel ten gevolge van de aanleg van een bodemkribbenveld, geldt hetzelfde als voor de vaste laag is uitgelegd in paragraaf 6.5. De binnenbocht zal zich uitschuren tot een nieuw evenwichtsprofiel is bereikt. Bovenstrooms van de bodemkribben ontstaat sedimentatie ten gevolge van de opstuwing van de waterstanden en benedenstrooms van de bodemkribben treedt erosie op vanwege het tekort aan sedimentaanbod.

In de Ontwerpnota van het Waalproject wordt uitgegaan van een bodemdaling van 50 cm in de binnenbocht. Hier wordt aangenomen dat de over de breedte gemiddelde bodemdaling 20 à 25 cm is. Op deze bodemdaling is het model geijkt. Omdat het bodemkribbenveld bij Erlecom pas in de zomer van 1996 gereed is gekomen, kan uit bodempeilingen nog niet de verandering van de bodemligging worden bepaald. Uit bodempeilingen die over een aantal jaar worden uitgevoerd in en nabij het bodemkribbenveld bij Erlecom, moet blijken of hier de juiste bodemdaling in de bocht is geijkt. Op basis van de vergelijking met de vaste laag, wordt verwacht dat de bodemdaling in de praktijk niet veel zal verschillen van de hier aangenomen bodemdaling.

Ook bij de bodemkribben wordt de morfologie in de bocht geijkt met de hoogteligging van de vaste laag. Wanneer de vaste laag 0,4 meter onder het bodemniveau ligt, treedt in de bocht een bodemdaling van 20 à 25 cm op, zie de bijlagen 7-I en 7-II.

7.4 Invloed van de bodemkribben op de morfologie

De werking van bodemkribben en een vaste laag is in principe hetzelfde. Het verschil is dat bij bodemkribben de weerstand minder wordt verhoogd dan bij een vaste laag en dat met bodemkribben de bodem in de buitenbocht niet volledig wordt vastgelegd. Daarom kunnen bij bodemkribben dezelfde morfologische ontwikkelingen worden verwacht, zij het minder sterk dan bij een

vaste laag het geval is, omdat de opstuwing van de waterstanden en de invloed op de bodemligging in de binnenbocht kleiner zijn.

Van de bodemkribben zijn nog geen bodempeilingen beschikbaar, omdat het bodemkribbenveld bij Erlecom pas afgelopen zomer gereed is gekomen. Daarom zijn de SOBEK berekeningen voor de bodemkribben vergeleken met die voor de vaste laag.

Benedenstrooms van de bodemkribben

Direct benedenstrooms van de bodemkribben ontstaat een erosiekuil, die na tien jaar circa 50 cm diep is, tegenover 55 cm bij de vaste laag, zie de bijlagen 7-I en 7-II. Op een afstand van 10 km, 20 km, 30 km en 40 km benedenstrooms van de bodemkribben, berekent SOBEK na tien jaar een bodemverandering van respectievelijk +4 cm, +2 cm, -11 cm en -12 cm en na veertig jaar -22 cm, -13 cm, -23 cm en -30 cm. Wanneer het verschil in autonome bodemdaling met de werkelijkheid in rekening wordt gebracht, worden de volgende bodemveranderingen gevonden, zie ook tabel 6.7:

	10 km	20 km	30 km	40 km
bodemkribben (incl. aut. bod.daling, na 40 jr):	-52 cm	-37 cm	-21 cm	-5 cm
vaste laag (incl. aut. bod.daling, na 40 jr):	-64 cm	-44 cm	-25 cm	-5 cm

En wanneer ook het effect van de hydraulische randvoorwaarde op de benedenrand wordt meegenomen:

	10 km	20 km	30 km	40 km
bodemkribben (incl. aut. bod.daling en effect rvw, na 40 jr):	-62 cm	-51 cm	-38 cm	-25 cm
vaste laag (incl. aut. bod.daling en effect rvw, na 40 jr):	-74 cm	-58 cm	-42 cm	-25 cm

Voor de eerste dertig kilometer benedenstrooms van de bocht, is de bodemdaling ten gevolge van de vaste laag groter dan ten gevolge van de bodemkribben. Net als bij de vaste laag, wordt ook hier ervan uitgegaan, dat na veertig jaar de bodem op de eerste 10 km benedenstrooms van de bodemkribben, zijn evenwichtssituatie heeft bereikt, de autonome bodemdaling niet meegerekend. Dit betekent dat de bodemdaling ten gevolge van de vaste laag circa 10 cm groter is dan ten gevolge van de bodemkribben. Op een afstand van 40 km benedenstrooms van de bocht is er geen verschil tussen de twee maatregelen. Dit bewijst ook nog eens dat de bodemverstoring ten gevolge van de bochtmaatregel hier nog niet is aangekomen, zie ook paragraaf 6.7.

Net als bij de vaste laag, zal ook in het geval met bodemkribben de door SOBEK berekende bodemontwikkeling te langzaam optreden. Tussen de tien en veertig jaar na aanleg van de bodemkribben, berekent SOBEK op een afstand van 10 km, 20 km, 30 km en 40 km benedenstrooms van de bodemkribben een bodemverandering van respectievelijk -26 cm, -15 cm, -12 cm en -18 cm.

Wanneer hieruit de autonome bodemdaling volgens tabel 6.7 wordt geëlimineerd, worden de bodemveranderingen van alleen de bodemkribben gevonden: respectievelijk -18 cm, -12 cm, +2 cm en +4 cm. En wanneer ook nog het effect van de hydraulische randvoorwaarde op de benedenrand in rekening wordt gebracht, worden de volgende bodemveranderingen gevonden:

	10 km	20 km	30 km	40 km
bodemkribben 10-40jr, excl. aut.bod.daling, incl. effect rvw:	-28 cm	-26 cm	-15 cm	-16 cm
vaste laag 10-40jr, excl. aut.bod.daling, incl. effect rvw:	-39 cm	-33 cm	-19 cm	-16 cm

Verwacht moet worden, dat deze bodemveranderingen in werkelijkheid ongeveer drie maal zo snel optreden en dat de eerste tien jaar (periode 0-10 jaar) in SOBEK nodig is om de bodem ter plaatse van de bodemkribben uit te schuren, zie ook paragraaf 6.7. In werkelijkheid wordt de bodem in de bocht op diepte gebaggerd, zodat dit proces wordt overgeslagen.

Bovenstrooms van de bodemkribben

In SOBEK stijgt de bodemligging bovenstrooms van de bodemkribben in veertig jaar gemiddeld circa 8 cm op de Waal, zie bijlage 7-II. Wanneer ook hier rekening wordt gehouden met de autonome bodemdaling, is na veertig jaar de bodem gemiddeld circa 55 cm gedaald. De bodemverhoging ten gevolge van de bodemkribben op de Rijn is zeer klein, slechts 1 à 2 cm, zie bijlage 7-IIIc.

Vergeleken met de situaties zonder bodemkribben en met vaste laag

In bijlage 7-IIIa is voor de drie situaties (met bodemkribben, met vaste laag en zonder bochtmaatregel) de bodemligging op de Waal na veertig jaar uitgezet. De vaste laag heeft duidelijk meer invloed: bovenstrooms van de bocht gaat de bodem meer omhoog en benedenstrooms meer naar beneden dan in het geval met bodemkribben. In bijlage 7-IIIb is het verschil in bodemligging tussen de situatie met en zonder een bochtmaatregel gegeven. Naar de benedenrand toe neemt het verschil af, doordat de bodemverstoring daar nog niet is aangekomen. Maar wanneer de berekening nog een aantal jaren wordt doorgezet, zal ook hier de bodemdaling ten gevolge van de bochtmaatregel zichtbaar worden.

In bijlage 7-IV is het gemiddelde sedimenttransport op de Rijn en de Waal gegeven voor de drie situaties. Doordat de bodemkribben de waterstanden minder opstuwten dan de vaste laag, wordt het sedimenttransport bovenstrooms van de kribben minder geremd en is groter dan in de situatie met een vaste laag.

7.5 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de bodemkribben

In het model is een opstuwung van 14 cm / 2,5 km bij OLR en van 2,5 cm / 2,5 km bij MHW ten gevolge van de bodemkribben geijkt. Ten gevolge van de

opstuwing van de waterstanden bovenstrooms van het bodemkribbenveld, neemt de afvoer op de Waal met 0,2 à 0,6% af. De morfologie in de bocht is geijkt op een bodemdaling van 20 à 25 cm, 10 cm minder dan bij de vaste laag.

De door SOBEK berekende morfologische ontwikkelingen in de situatie met bodemkribben, kunnen niet worden vergeleken met bodempeilingen uit de praktijk. Daarom worden conclusies getrokken aan de hand van de vergelijking tussen bodempeilingen en SOBEK berekeningen in de situatie met een vaste laag.

Hieruit bleek onder andere, dat in SOBEK de bodemveranderingen veel te langzaam optraden, zie paragraaf 6.7. Aan de hand hiervan moet ook in het geval met bodemkribben verwacht worden, dat de door SOBEK berekende bodemveranderingen in werkelijkheid ongeveer drie keer zo snel zullen optreden. Bovendien wordt in werkelijkheid het proces van uitschuren van de bocht overgeslagen, omdat de bocht op diepte wordt gebaggerd. In SOBEK duurt dit proces ongeveer tien jaar. Ook hier geldt, dat dit proces waarschijnlijk met behulp van de baggeroptie in SOBEK kan worden overgeslagen. Het gevolg van de te langzame veranderingen in SOBEK is ook, dat in werkelijkheid de invloed op de bodemligging al veel verder benedenstrooms waar te nemen zal zijn, dan volgens SOBEK het geval is.

Ten gevolge van alleen de bodemkribben:

- stijgt de bodem bovenstrooms van de bodemkribben circa 12 cm, 8 cm minder dan bij de vaste laag,
- daalt ter plaatse van de bodemkribben de (over de breedte gemiddelde) bodemligging 20 à 25 cm, 10 cm minder dan bij de vaste laag,
- is de bodemdaling benedenstrooms van het bodemkribbenveld circa 20 cm, tegenover 30 cm bij de vaste laag.

Over een aantal jaar zal, uit bodempeilingen rond het bodemkribbenveld bij Erlecom, moeten blijken of hier de juiste bodemdaling in de bocht is geijkt. Verwacht wordt, dat de bodemdaling in de praktijk niet veel zal verschillen van de hier aangenomen bodemdaling. Bovendien zal bij de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 9 blijken, dat een kleine afwijking in de bodemdaling in de bocht erg weinig invloed heeft op de morfologie op de rest van de Waal.

Bij het vaststellen van de totale bodemveranderingen moet, net als bij de vaste laag, rekening worden gehouden met het feit dat:

- SOBEK niet de goede autonome bodemdaling berekent,
- ten gevolge van de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde een te kleine bodemdaling in SOBEK optreedt,
- bodemveranderingen in SOBEK ongeveer drie keer zo langzaam optreden, als in werkelijkheid gebeurt.

Hoofdstuk 8

Bodemschermen

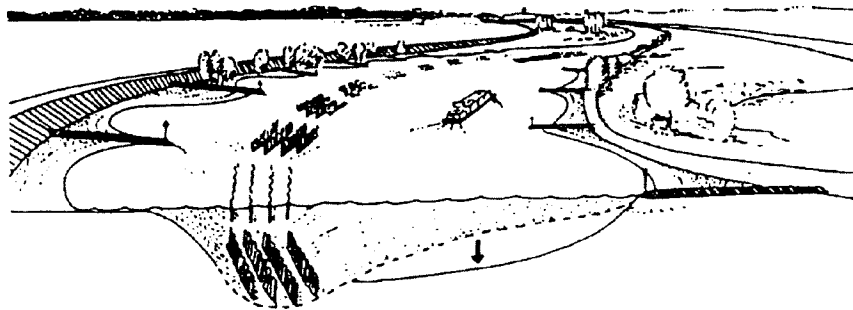




8. Bodemschermen

8.1 Inleiding

Bodemschermen worden in de buitenbocht van de rivier, in het stroombed geplaatst, zie figuur 8.1. De korte, verticale schermen maken een kleine hoek (5 à 20°) met de hoofdstroom en hebben een hoogte van 0,1 tot 0,5 maal de waterdiepte. Doordat over de bodemschermen een drukverschil heerst, ontstaat achter de schermen een spiraalstroming die tegengesteld is aan de van nature in een rivierbocht aanwezige spiraalstroming. De stroming aan de bodem, die oorspronkelijk naar de binnenbocht was gericht en verantwoordelijk is voor de sedimentverplaatsing van buiten- naar binnenbocht, wordt hierdoor tegengewerkt of opgeheven. Hierdoor neemt het dwarsverhang in de rivierbocht sterk af. Voor een uitgebreidere uitleg over de werking van bodemschermen wordt verwezen naar de literatuurstudie behorend bij dit afstudeerwerk.



Figuur 8.1 Bodemschermen in een rivierbocht. Bron: Rijkswaterstaat (K.Nuijten).

In Nederland zijn in de IJssel, bij Fortmont, bodemschermen op kleine schaal beproefd. Maar doordat er te weinig schermen zijn geplaatst en ze onvoldoende parallel aan elkaar stonden, hadden ze daar geen succes. In Nederland is er naast de proef in de IJssel geen prototype ervaring met bodemschermen. De toepassingen in de Verenigde Staten betreffen bodemschermen in kleine riviertjes en beken en hebben dus een veel kleinere schaal dan de geplande bodemschermen in de Waal. In het Waalproject wordt uitgegaan van een opstuwing van 1,5 cm / 3 km voor zowel OLR als MHW (lit.[6]). Deze gegevens zijn gebaseerd op berekeningen met het 2DH-model RIVCUR. Volgens berekeningen met het 2DH-morfologische model RIVCOM voor de Waalbocht bij Hulhuizen, daalt de bodem in de binnenbocht circa 1,0 m en stijgt de bodem in de buitenbocht circa 1,2 m (lit.[14]). In het model met de bodemschermen wordt de bodemdaling in de bocht niet geijkt, in tegenstelling tot de modellen met de vaste laag en de bodemkribben, waarin dat wel gebeurde. Hier wordt het sedimenttransport in de bocht geijkt, dat niet mag veranderen ten opzichte van de situatie zónder bodemschermen, omdat wordt aangenomen dat de bodemligging ter plaatse van de schermen niet verandert.

Voor het analytisch bepalen van het effect van de bodemschermen in een bocht op de waterbeweging, wordt het probleem gesplitst in het effect van de

bodemschermen (paragraaf 8.2) en het effect van het bochtprofiel (paragraaf 8.3) op het langsverhang van de waterspiegel. Het effect van het specifieke stromingspatroon in een rivierbocht, de spiraalstroming, wordt hier niet meegenomen. Verwacht wordt, dat het effect hiervan vele malen kleiner is dan het effect van de bodemschermen en het bochtprofiel. De ijking van de waterbeweging wordt beschreven in paragraaf 8.4.

Bij de bochtverbeteringen met een vaste laag en bodemkribben, wordt de bodem (gedeeltelijk) vastgelegd. Met bodemschermen is dat niet het geval, zodat hier de vaste laag optie van SOBEK niet van toepassing is. Het verhoogde sedimenttransport ten gevolge van de kleinere Chezy-waarde, zal dus op een andere manier moeten worden opgeheven. In paragraaf 8.5 wordt de invloed van de bodemschermen op de bodemligging afgeleid en in paragraaf 8.6 wordt de invloed van de ruwheid op het sedimenttransport. Deze afleiding wordt toegepast in paragraaf 8.7, bij de ijking van het sedimenttransport in de bocht. De invloed van de bodemschermen op de morfologie wordt beschreven in paragraaf 8.8 en in paragraaf 8.9 volgen de conclusies met betrekking tot de bodemschermen.

8.2 Effect van bodemschermen op het langsverhang

De aanwezigheid van bodemschermen zorgt voor extra weerstand in de rivier. Doordat de schermen een kleine hoek met de hoofdstroom maken, oefenen ze een kracht uit op het water (sleepkracht F_D), hetgeen extra weerstand betekent. Daarnaast zorgt de wandruwheid van de schermen voor extra weerstand. In deze paragraaf wordt analytisch het effect van de bodemschermen op de waterstanden bovenstrooms van het bodemschermenveld bepaald. Hierbij wordt de wandruwheid van de schermen niet meegenomen.

De extra weerstand vergroot het langsverhang over het bodemschermenveld. In de literatuurstudie (zie ook lit.[4]) is voor het langsverhang in de situatie met bodemschermen op een recht stuk rivier de volgende formule gegeven:

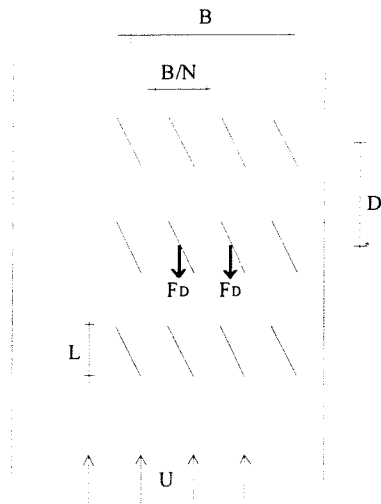
$$i = \frac{U^2}{hC^2} + \frac{f_s}{\rho g} \frac{H_v}{h} \left[1 + m \ln \frac{H_v}{h} \right] \quad (8-1)$$

Hierin is f_s de kracht van de schermen op het water in langsrichting, uitgesmeerd over het bodemschermenveld en met de eenheid N/m^3 :

$$f_s = \frac{F_D N}{BDH_v} \quad (8-2)$$

waarin

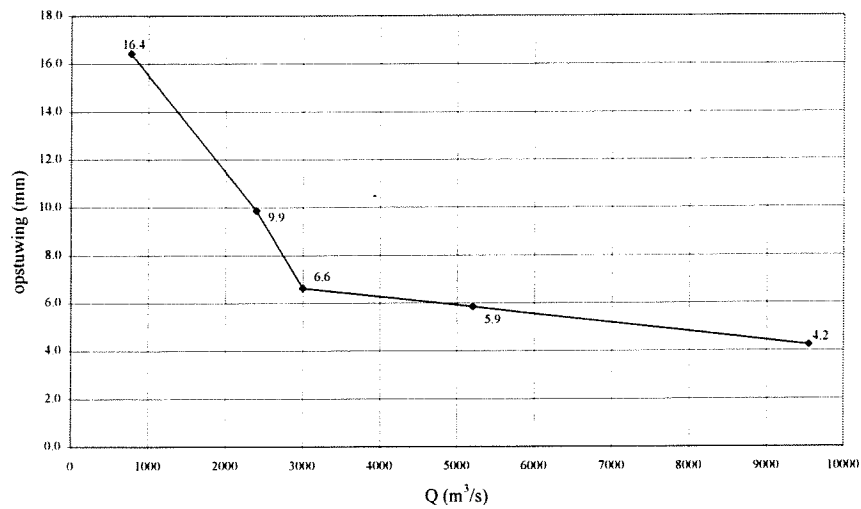
F_D	=	sleepkracht (dragforce) van de schermen op het water [N]
N	=	aantal schermen in één raai
B	=	breedte van het schermenveld [m]
D	=	afstand tussen de raaien in langsrichting [m]
H_v	=	hoogte van een scherm (vane) [m]
		zie ook figuur 8.2.



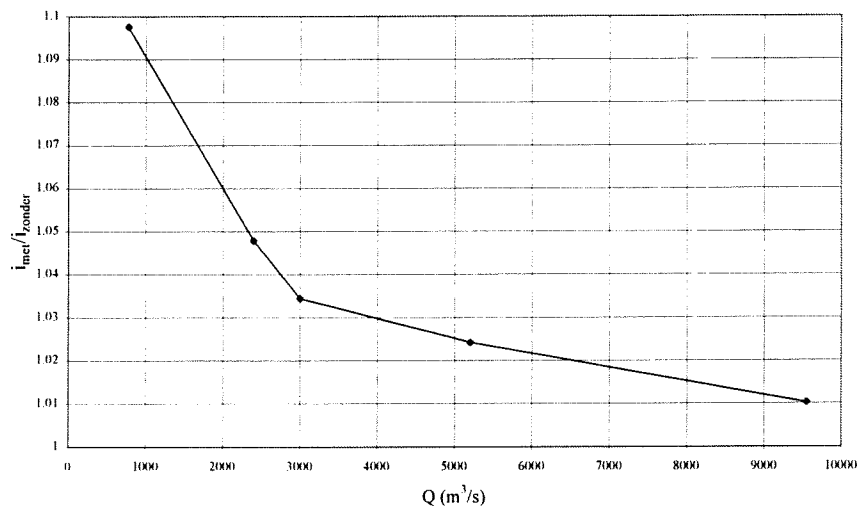
Figuur 8.2 Bodemschermenveld en definitie van de afmetingen (bovenaanzicht).

In de figuren 8.3 en 8.4 is voor verschillende debieten de opstuwing en de verhouding tussen het langsverhang met en zonder bodemschermen gegeven. Hierbij is gerekend met een schermhoogte H_v van 2,60 m (wanneer de schermen net geplaatst zijn), een scherm lengte L van 10 m, 10 schermen in een raai ($= N$), een afstand D tussen de raaien in langsrichting van 100 m en een aanstroomhoek α van 0,25 rad (ca 15°). Zoals kan worden verwacht neemt de invloed van de schermen sterk af bij een groter debiet en dus een grotere waterdiepte. Voor de situatie met bedvormende afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$, betekent dit een extra waterstandsverhoging over 2,5 kilometer van circa 13 mm. Naarmate het debiet groter wordt, 'voelt' de stroming de schermen minder en hebben ze minder invloed op de waterbeweging. De opstuwing wordt dus kleiner naarmate het debiet groter wordt. Voor debieten groter dan $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ neemt de opstuwing veel minder snel af dan voor kleinere debieten. Dit komt doordat bij een Waalafvoer van $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ de hoofdgeul helemaal gevuld is, zodat bij grotere debieten de uiterwaarden gaan meestromen. Doordat hierdoor het oppervlak van het dwarsprofiel veel groter is geworden, neemt de waterhoogte veel minder toe met toenemend debiet, dan wanneer alleen de hoofdgeul stroomt. En dus neemt ook de opstuwing veel minder toe bij toenemend debiet.

Wanneer de schermen al enige tijd in de bocht staan, heeft het bochtprofiel zich aangepast aan de veranderde bochtstroming. De binnenbocht is dieper komen te liggen en de buitenbocht is omhoog gekomen. Het gevolg hiervan is, dat de schermen minder hoog boven de bodem uitkomen en dat de dwarshelling van de bodem kleiner is geworden. Uit berekeningen met het 2DH-morfologische model RIVCOM, is gebleken dat de schermen na enige tijd nog 0 tot 1,50 m boven de bodem uitkomen (lit.[14]). Wanneer bovenstaande berekening met een (gemiddelde) schermhoogte H_v van 0,75 m wordt uitgevoerd, wordt een opstuwing van 0,7 mm / 2,5 km gevonden.



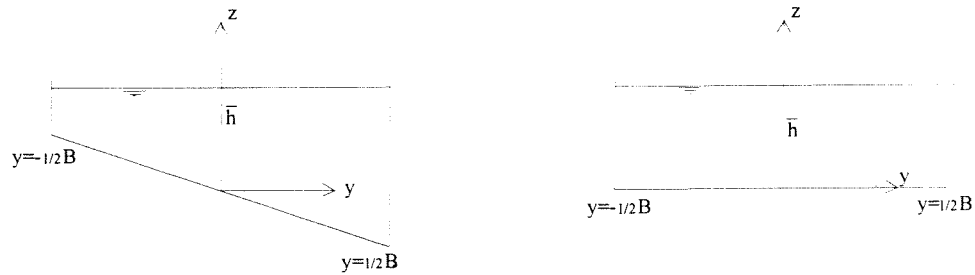
Figuur 8.3 Opstuwing over een lengte van 2,5 km ten gevolge van de bodemschermen ($H_v = 2,60$ m).



Figuur 8.4 Verhouding tussen het langsverhang met en zonder bodemschermen ($H_v = 2,60$ m).

8.3 Effect van het bochtprofiel op het langsverhang

Het dwarsprofiel in een rivierbocht heeft een andere vorm dan het dwarsprofiel in een recht stuk rivier. Om te bepalen wat het effect van de vorm van het bochtprofiel is op de weerstand van de rivier en dus op het langsverhang van de waterspiegel, worden de beide dwarsprofielen van bocht en rechtstand vereenvoudigd tot de vormen in figuur 8.5. Vervolgens wordt gesteld dat door het bochtprofiel een even grote afvoer moet stromen dan door het profiel van de rechtstand: $Q_{\text{bocht}} = Q_{\text{recht}}$



Figuur 8.5 Vereenvoudigde dwarsprofielen van een bocht en een rechtstand van een rivier.

Voor de waterdiepte in het bochtprofiel geldt:

$$h = \bar{h} + Sy \quad \text{waarin } h = \text{waterdiepte als functie van } y$$

$$\bar{h} = \text{gemiddelde waterdiepte}$$

$$S = \text{dwarsverhang in de bocht} = -\frac{\Delta z}{\Delta y}$$

$$y = \text{coördinaat in de dwarsrichting}$$

Het debiet door het bochtprofiel is:

$$Q_{\text{bocht}} = A \cdot u = \int_B u \cdot h \, dy \quad \text{en} \quad u = C \sqrt{hi} \quad (8-3)$$

$$\text{dus} \quad Q_{\text{bocht}} = \int_B C \sqrt{(\bar{h} + Sy) i_{\text{bocht}}} (\bar{h} + Sy) \, dy$$

$$Q_{\text{bocht}} = \int_B C i_{\text{bocht}}^{\frac{1}{2}} (\bar{h} + Sy)^{\frac{3}{2}} \, dy \quad (8-4)$$

Het debiet door het dwarsprofiel in de rechtstand:

$$Q_{\text{recht}} = \int_B C \sqrt{\bar{h} i_{\text{recht}}} \bar{h} \, dy = C B \bar{h}^{\frac{3}{2}} i_{\text{recht}}^{\frac{1}{2}} \quad (8-5)$$

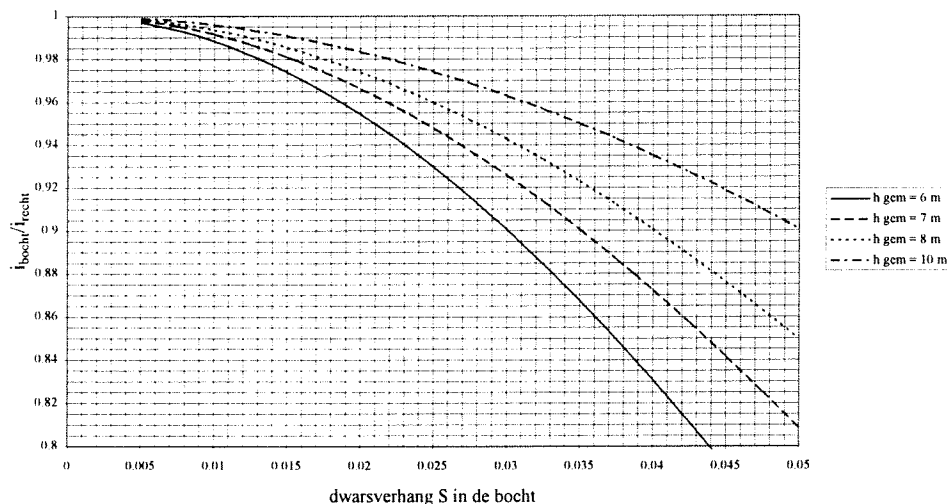
Gesteld wordt nu dat $Q_{\text{bocht}} = Q_{\text{recht}}$ waaruit volgt:

$$\int_{-\frac{1}{2}B}^{\frac{1}{2}B} C i_{\text{bocht}}^{\frac{1}{2}} (\bar{h} + Sy)^{\frac{3}{2}} \, dy = C B \bar{h}^{\frac{3}{2}} i_{\text{recht}}^{\frac{1}{2}}$$

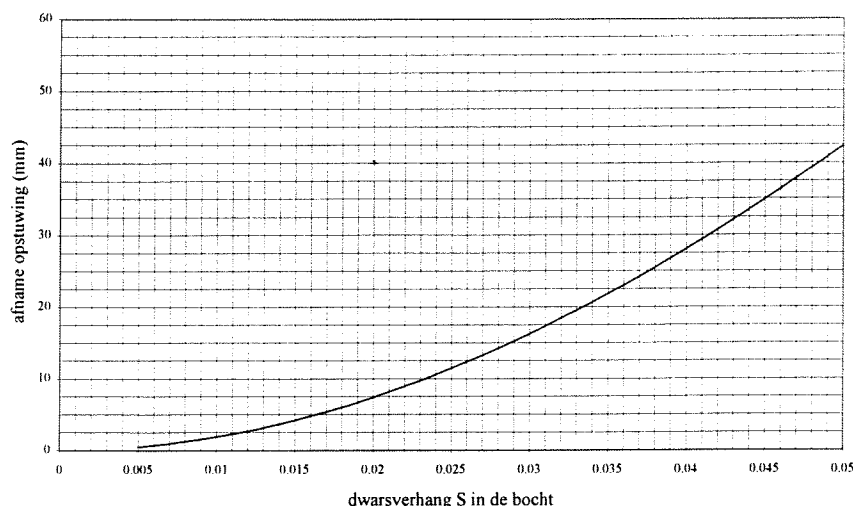
$$\Leftrightarrow C i_{\text{bocht}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}B}^{\frac{1}{2}B} (\bar{h} + Sy)^{\frac{3}{2}} \, dy = C i_{\text{recht}}^{\frac{1}{2}} B \bar{h}^{\frac{3}{2}}$$

$$\begin{aligned}
\Leftrightarrow \quad i_{\text{bocht}}^{\frac{1}{2}} \left[\frac{2}{5S} (\bar{h} + Sy)^{\frac{5}{2}} \right]^{\frac{1}{2}B} &= i_{\text{recht}}^{\frac{1}{2}} B \bar{h}^{\frac{3}{2}} \\
\Leftrightarrow \quad i_{\text{bocht}}^{\frac{1}{2}} \frac{2}{5S} \left\{ (\bar{h} + \frac{1}{2}SB)^{\frac{5}{2}} - (\bar{h} - \frac{1}{2}SB)^{\frac{5}{2}} \right\} &= i_{\text{recht}}^{\frac{1}{2}} B \bar{h}^{\frac{3}{2}} \\
\Leftrightarrow \quad \frac{i_{\text{bocht}}}{i_{\text{recht}}} &= \frac{\frac{25}{4} S^2 B^2 \bar{h}^3}{\left\{ (\bar{h} + \frac{1}{2}SB)^{\frac{5}{2}} - (\bar{h} - \frac{1}{2}SB)^{\frac{5}{2}} \right\}^2} \quad (8-6)
\end{aligned}$$

In figuur 8.6 is deze verhouding $i_{\text{bocht}}/i_{\text{recht}}$ uitgezet als functie van het dwarsverhang in de bocht. Het langsverhang in de bocht is kleiner dan in de rechtstand. Dit betekent dat de weerstand van een bochtprofiel kleiner is. In figuur 8.7 is de afname van de waterhoogte over een lengte van 2,5 km gegeven, die een bochtprofiel veroorzaakt ten opzichte van een profiel in de rechtstand. Voor de situatie met bedvormende afvoer ($Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$) en een dwarshelling van de bodem in de bocht van 0,025 (gemiddeld dwarsverhang in een Waalbocht zonder schermen) is de afname van de waterhoogte circa 11 mm / 2,5 km. Wanneer de bodemschermen hun werk hebben gedaan, is het dwarsverhang kleiner en is dus ook de afname van de waterhoogte kleiner. Uit de berekeningen met RIVMOR voor de Waalbocht bij Hulhuizen (lit.[14]) blijkt de dwarshelling na enige tijd gemiddeld circa 0,015 te zijn, hetgeen een afname van de waterhoogte van 4 mm / 2,5 km betekent.



Figuur 8.6 Verhouding $i_{\text{bocht}}/i_{\text{recht}}$ als functie van het dwarsverhang in de bocht en voor verschillende waterdieptes.



Figuur 8.7 Afname van de opstuwing over een lengte van 2,5 km, als gevolg van het bochtprofiel, bij een waterdiepte van ca 7,5 m ($Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$).

8.4 IJking van de waterbeweging

In de oorspronkelijke situatie, met een bochtprofiel met dwarshelling 0,025 en geen bodemschermen, is de waterstand 1,1 cm / 2,5 km lager dan over een recht stuk rivier, zie paragraaf 8.2. In de eindsituatie, nadat het bochtprofiel met bodemschermen een nieuw evenwicht heeft bereikt waarbij de dwarshelling 0,015 is en de schermhoogte 0,75 m, is de waterstand over de bocht nog 0,3 cm / 2,5 km lager dan over een rechtstuk rivier. Ten gevolge van de bodemschermen gaat de waterstand over 2,5 km dus 0,8 cm omhoog. Deze waarden gelden voor de bedvormende afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$). Uit berekeningen met het 2DH programma RIVCOM volgt vrijwel dezelfde opstuwing, namelijk 0,7 cm / 2,5 km bij een Waalafvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ (lit.[14]).

Voor kleinere afvoeren is zowel de invloed van de schermen als de invloed van het bochtprofiel groter, zie de figuren 8.3 en 8.6. En voor grotere afvoeren zijn beide invloeden kleiner. Op dezelfde manier als voor de bedvormende afvoer is gedaan, is voor de OLR- en MHW-afvoer af te leiden dat de waterstand ten gevolge van de bodemschermen in de eindsituatie respectievelijk 1,2 cm / 2,5 km en 0,4 cm / 2,5 km omhoog gaat. Voor de ijking van SOBEK wordt uitgegaan van een opstuwing van 1,5 cm / 2,5 km bij OLR- en Bankfull-afvoer ($Q_{\text{Waal}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$) en geen opstuwing bij de hogere afvoeren. Voor de OLR- en Bankfull-afvoer is de Chezy-waarde met $2 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ verlaagd en voor de hogere afvoeren is de Chezy-waarde niet veranderd, zie tabel 8.1. In tabel 8.2 zijn de opstuwingen gegeven die door SOBEK worden berekend en in tabel 8.3 is de door SOBEK berekende verandering van de afvoerverdeling op de Waal gegeven. Voor $Q_{\text{Lobith}} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$, ofwel $W_{\text{Waal}} = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, is er geen opstuwing meer over de bocht. Volgens de RIVCOM berekeningen is de opstuwing bij deze afvoer ook vrijwel nul: 0,1 cm / 2,5 km (lit.[14]).

8.5 Invloed van de bodemschermen op de bodemligging

Met een vaste laag en met bodemkribben wordt de bodem in de bocht (gedeeltelijk) vastgelegd. Met bodemschermen is dat niet het geval, waardoor het verhang van de bodem zich kan aanpassen aan de grotere ruwheid in de bocht. Door de grotere ruwheid ten gevolge van de schermen, neemt het langsverhang van de waterspiegel direct na plaatsing van de schermen toe. De aanpassing van de bodem aan de nieuwe situatie duurt langer. Het initiële verhang i_1 is $1,08 \cdot 10^{-4}$. Voor het nieuwe verhang van de waterspiegel in de situatie met bodemschermen is vergelijking (8-1) afgeleid:

$$i_2 = \frac{U^2}{hC^2} + \frac{f_s}{\rho g} \frac{H_v}{h} \left[1 + m \ln \frac{H_v}{h} \right]$$

De tweede term in het rechterlid representeert de kracht die door de schermen wordt opgenomen. Deze term zal dus niet in het verhang van de bodem, zodat voor het nieuwe bodemverhang wordt gevonden, zie ook figuur 8.8:

$$i^* = \frac{U^2}{hC^2} + \frac{f_s}{\rho g} \frac{H_v}{h} m \ln \frac{H_v}{h} \quad (8-7)$$

Met de continuïteitsvergelijkingen voor water en sediment:

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{en} \quad S_1 = S_2$$

wordt voor de waterspiegel gevonden: $h_1 = h_2$ en

$$i_2 = i_1 + \frac{f_s}{\rho g} \frac{H_v}{h_2} \left[1 + m \ln \frac{H_v}{h_2} \right]$$

en voor de bodemligging: $h_1 = h_2$ en

$$i^* = i_1 + \frac{f_s}{\rho g} \frac{H_v}{h_2} m \ln \frac{H_v}{h_2}$$

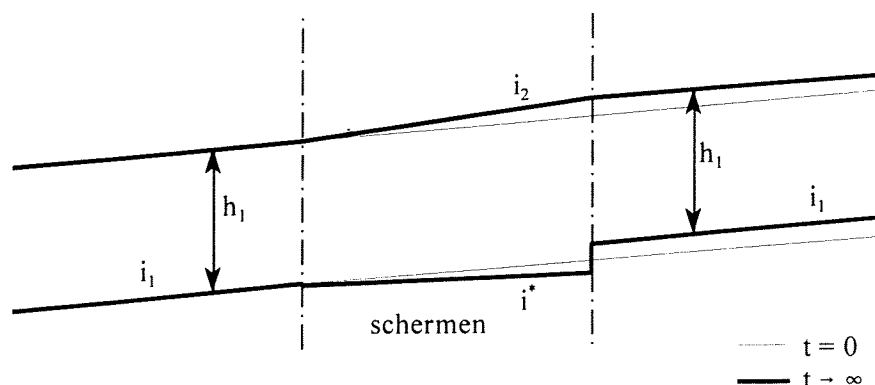
De indices '1' en '2' slaan respectievelijk op de situatie vóór en na de plaatsing van de bodemschermen.

Wanneer hierin de waarden voor $Q_{\text{Waal}} = 1650 \text{ m}^3/\text{s}$ (bedvormende afvoer) worden ingevuld en de evenwichtssituatie voor de schermen met $H_v = 0,75 \text{ m}$ (zie paragraaf 8.2), wordt voor de nieuwe verhangen gevonden:

$$i_2 = 1,081 \cdot 10^{-4} \quad \text{en} \quad i^* = 1,079 \cdot 10^{-4}$$

Met voor de waterspiegel en de bodemligging een verschillend langsverhang, gaat $h_1 = h_2$ niet meer op en is de stroming niet meer uniform. Maar omdat het verschil tussen de twee verhangen en tussen de oude en nieuwe situatie zeer klein is, kan dat effect worden verwaarloosd. Uit deze analyse blijkt dat de bodemverandering ten gevolge van de bodemschermen zowel ter plaatse van de

schermen als bovenstrooms ervan verwaarloosbaar klein is (bovenstrooms van de schermen komt de bodem volgens de analyse 0,5 mm hoger te liggen).



Figuur 8.8 Verandering bodemligging ten gevolge van de bodemschermen.

In paragraaf 8.4 is bepaald dat de opstuwing van de waterstand groter is dan uit deze analyse blijkt: circa 0,8 cm / 2,5 km is. Deze opstuwing kwam ook uit berekeningen met het 2DH programma RIVCOM, waarin niet van een uniforme stroming wordt uitgegaan, waardoor een beter benadering van de waterbeweging wordt verkregen. Bij de ijking van de waterbeweging is uitgegaan van een opstuwing van 1,5 cm / 2,5 km bij bedvormende afvoer. Dit betekent dat verwacht moet worden, dat bovenstrooms van de schermen de bodem circa 1,5 cm omhoog gaat.

8.6 Invloed van de ruwheid op het sedimenttransport

Met de Chezy-waarde is de opstuwing over de bocht geijkt. De Chezy-waarde komt echter ook voor in de sedimenttransportformule, zodat SOBEK ook een ander sedimenttransport berekent. Om de verandering van het transport ongedaan te kunnen maken, moet duidelijk zijn hoe het transport van de Chezy-waarde afhangt. Dit kan als volgt worden afgeleid, zie literatuur [15]:

De sedimenttransportformule van Engelund-Hansen luidt:

$$s = \frac{0,05 U^5}{(1 - \epsilon) \sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} \quad (8-8)$$

Aangenomen dat ϵ , g , Δ en D_{50} constant zijn, betekent dit:

$$s \sim \frac{u^5}{C^3} \quad (8-9)$$

De transportformule geldt voor stationaire, uniforme stroming en per eenheid van breedte. Voor de afvoer per eenheid van breedte bij stationaire, uniforme stroming geldt:

$$q = uh = Ch^{\frac{3}{2}} i^{\frac{1}{2}} = C \left(\frac{q}{u} \right)^{\frac{3}{2}} i^{\frac{1}{2}} \quad (8-10)$$

Waaruit volgt dat

$$u = (C^2 q i)^{\frac{1}{3}} \quad (8-11)$$

Vergelijking (8-11) ingevuld in (8-9) geeft:

$$s \sim C^{\frac{1}{3}} (q i)^{\frac{5}{3}} \quad (8-12)$$

De toename van het door SOBEK berekende sedimenttransport ter plaatse van de bochtmaatregel, wordt dus niet veroorzaakt door de kleinere Chezy-waarde, zoals tot nu toe werd aangenomen. Uit vergelijking (8-12) blijkt immers, dat een kleinere Chezy-waarde een kleiner sedimenttransport tot gevolg heeft. De kleinere Chezy-waarde veroorzaakt wel een groter langsverhang van de waterspiegel, dat er vervolgens voor zorgt dat het sedimenttransport toeneemt. Indirect heeft het verkleinen van de Chezy-waarde dus wel een groter sedimenttransport tot gevolg.

Wanneer nu gesteld wordt dat het sedimenttransport s_1 in de situatie dat er nog geen bodemschermen staan, gelijk is aan het sedimenttransport s_2 in de evenwichtssituatie mét schermen, zie figuur 8.8, wordt met behulp van vergelijking (8-12) gevonden:

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{C_2^{\frac{1}{3}} (q_2 i_2)^{\frac{5}{3}}}{C_1^{\frac{1}{3}} (q_1 i_1)^{\frac{5}{3}}} = 1 \Leftrightarrow \frac{q_2}{q_1} = \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{\frac{1}{5}} \frac{i_1}{i_2} \quad (8-13)$$

Om nu de invloed die de Chezy-waarde in SOBEK op het sedimenttransport heeft te compenseren, moet het specifieke debiet q_2 veranderen. Het debiet Q verandert niet, dus met $q = Q/B_{\text{gemidd}}$ kan worden bepaald hoe de stroomvoerende breedte moet worden aangepast. Voor de situatie met de bedvormende afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$, $i_1 = 1,0838 \cdot 10^{-4}$, $i_2 = 1,1438 \cdot 10^{-4}$, $B_{1,\text{gemidd}} = 160 \text{ m}$, $C_1 = 48,6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $C_2 = 46,6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, leidt dit tot $B_{2,\text{gemidd}} = 167 \text{ m}$.

De hierboven beschreven methode om de invloed van de Chezy-waarde te compenseren, heeft als nadeel dat door het veranderen van de breedte de waterbeweging wordt beïnvloed. In dit geval zal door de vergroting van de breedte de waterstand bovenstrooms van de bocht afnemen. Dat is ongewenst, omdat de geijkte opstuwing over de bodemschermen van belang is voor het bepalen van de morfologische effecten van de bodemschermen. Daarom wordt deze methode niet toegepast. In paragraaf 8.7 wordt beschreven hoe de ijking van het sedimenttransport uiteindelijk is gebeurd.

8.7 IJking van het sedimenttransport in de bocht

Het sedimenttransport wordt berekend met de transportformule van Engelund-Hansen. Deze formule zit als volgt in SOBEK:

$$S = \frac{0,05 U^5}{(1 - \epsilon) \sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} B_{\text{sed}} \quad (8-14)$$

De gemiddelde stroomssnelheid berekent SOBEK met:

$$U = \frac{Q}{A_{\text{flow}}} \quad (8-15)$$

Voor de situatie zonder bochtmaatregel en de situatie met bodemschermen wordt een simulatie gedaan, beide met de bedvormende afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Uit de file met de zogenaamde 'iteration dumps', kunnen het debiet en stroomvoerend oppervlak waarmee SOBEK heeft gerekend worden gehaald. Met behulp van de vergelijkingen (8-14) en (8-15) kan hiermee de stroomsnelheid en het sedimenttransport worden berekend.

Voor de situatie zonder bochtmaatregelen geldt voor de alluviale bodem:

$$u = \frac{Q}{A_{\text{flow}}} = \frac{1649}{1440} = 1,1451 \text{ m/s} \Rightarrow S_{\text{alluviaal}} = 0,00986 \text{ m}^3/\text{s}$$

En voor de situatie met bodemschermen geldt ter plaatse van de schermen:

$$u = \frac{Q}{A_{\text{flow}}} = \frac{1649}{1443} = 1,1428 \text{ m/s} \Rightarrow S_{\text{schermen}} = 0,01107 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ter plaatse van de bodemschermen wordt het sedimenttransport dus

$$\frac{S_{\text{schermen}}}{S_{\text{alluviaal}}} = \frac{0,01107}{0,00986} = 1,12 \quad \text{maal groter.}$$

Om dit grotere sedimenttransport ten gevolge van de kleinere Chezy-waarde te compenseren, wordt de sedimenttransporterende breedte B_{sed} ter plaatse van de bodemschermen met een factor $1/1,12 = 0,89$ verkleind:

$$B_{\text{sed, schermen}} = 0,89 \cdot 245 \text{ m} = 218 \text{ m}$$

In bijlage 8-I is voor de situatie met en zonder aangepaste sedimenttransporterende breedte het sedimenttransport op de Waal gegeven.

8.8 Invloed van de bodemschermen op de morfologie

Het model met de bodemschermen is erop geijkt, dat het sedimenttransport in de bocht met de schermen gewoon doorgang vindt. Het sedimenttransport op de Rijn en de Waal verandert dus vrijwel niet als gevolg van de plaatsing van de bodemschermen, zoals ook in bijlage 8-II is te zien. Hierdoor ontstaat benedenstrooms van het bodemschermenveld ook geen erosiekuil, zoals bij de vaste laag en de bodemkribben wel het geval was, zie bijlage 8-IIIa en 8-IVa. In

bijlage 8-IIIb is voor de situaties met en zonder bodemschermen de verandering van de bodemligging na tien en na veertig jaar gegeven. Hierin is te zien dat de bodemschermen de bodemligging vrijwel niet beïnvloeden. Bijlage 8-IVb geeft het verschil in bodemligging tussen de situaties met en zonder bodemschermen na veertig jaar. Het verschil is zeer klein: rond de 2 cm.

De bodemstijging bovenstrooms van de bodemschermen komt overeen met de verwachte bodemstijging van circa 1,5 cm. Ter plaatse van de bodemschermen verandert de bodemligging gemiddeld over de bocht vrijwel niet in SOBEK. De zeer kleine verschillen benedenstrooms van de bodemschermen ten opzichte van oorspronkelijke bodemligging moeten worden gezien als het gevolg van kleine afwijkingen in het sedimenttransport.

In paragraaf 6.7 is aangetoond, dat bodemveranderingen in SOBEK te langzaam optreden. Ook in deze situatie zal dat zo zijn en moet verwacht worden, dat de door SOBEK berekende bodemveranderingen in werkelijkheid ongeveer drie maal zo snel optreden. Daarnaast is in SOBEK de eerste tien jaar (periode 0-10 jaar) nodig om de bodem in de bocht uit te schuren, terwijl deze in de praktijk op diepte wordt gebaggerd en dit proces wordt overgeslagen.

8.9 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de bodemschermen

Zoals verwacht, is het effect van de bodemschermen op de morfologie zeer klein. De bodemveranderingen die optreden volgens SOBEK, zie bijlage 8-IVb, komen bovenstrooms en ter plaatse van de schermen goed overeen met de verwachtingen op basis van analyses. De kleine verschillen die optreden liggen binnen de nauwkeurigheidsmarges en worden voornamelijk veroorzaakt door vereenvoudingen.

Uit de analyse van de sedimenttransportformule blijkt, dat het verkleinen van de Chezy-waarde een kleiner sedimenttransport tot gevolg heeft. Het sedimenttransport is namelijk evenredig met de derdemachtswortel uit de Chezy-waarde. Wel veroorzaakt een kleinere Chezy-waarde een groter langsverhang van de waterspiegel, dat op zijn beurt weer een groter sedimenttransport tot gevolg heeft. De invloed van het langsverhang is blijkbaar groter, want door het verkleinen van de Chezy-waarde berekent SOBEK een groter sedimenttransport.

Ook in deze situatie kunnen met de SOBEK-optie om sediment aan de rivier te onttrekken, de baggerwerkzaamheden in de rivierbocht worden gemodelleerd. Hierdoor wordt het proces van uitschuren van de binnenbocht overgeslagen en wordt met SOBEK het werkelijke verloop van de bodemontwikkeling beter benaderd. Hiermee kan echter niet worden opgelost, dat de bodemveranderingen in SOBEK te langzaam verlopen.

Geconcludeerd kan worden, dat ten gevolge van alleen de bodemschermen:

- de bodem bovenstrooms van de schermen circa 2 cm stijgt,
- ter plaatse van het bodemschermenveld verandert de bodemligging vrijwel niet,
- de bodemdaling benedenstrooms van het bodemschermenveld circa 1 à 2 cm is.

Om de totale bodemveranderingen op de Waal te krijgen, moet, net als bij de vaste laag en de bodemkribben, ook hier rekening worden gehouden met het feit dat:

- SOBEK niet de juiste autonome bodemdaling berekent,
- de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde een te kleine bodemdaling in SOBEK veroorzaakt,
- bodemveranderingen in SOBEK te langzaam optreden, waardoor bodemverstoringen in werkelijkheid al verder benedenstrooms zichtbaar zullen zijn dan volgens SOBEK het geval is.

9. Gevoeligheidsanalyse

9.1 Inleiding

Bij het invoeren van een rivierensysteem in een computermodel, wordt de werkelijkheid sterk geschematiseerd. Parameters die worden ingevoerd worden uit metingen gehaald, maar vaak is slechts een bepaalde graad van nauwkeurigheid te halen bij de metingen

In dit hoofdstuk wordt gekeken wat de gevoeligheid van de berekende morfologische ontwikkelingen is voor afwijkingen in de invoerparameters in het model. Hiertoe wordt voor een aantal parameters een waarde ingevoerd die iets afwijkt van de in het onderzoek ingevoerde waarde en vervolgens wordt gekeken in welke mate hierdoor de morfologische ontwikkelingen worden beïnvloed. Dit wordt in principe gedaan voor de situatie zonder bochtmaatregelen.

Om rekentijd te besparen, wordt gerekend met de bedvormende afvoer $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$. De bedvormende afvoer is gedefinieerd als de waarbij hetzelfde sedimenttransport optreedt als de tijdsafhankelijke afvoer. In bijlage 9-Ia is de bodemligging op de Rijn en de Waal na veertig jaar gegeven, door SOBEK berekend met de bedvormende en de tijdsafhankelijke afvoer. In bijlage 9-Ib is het verschil tussen de twee bodemliggingen gegeven. Direct benedenstrooms van de Pannerdense Kop berekent SOBEK met de tijdsafhankelijke afvoer plaatselijk een 22 cm diepere bodemligging, op de rest van de Waal is het verschil erg klein: circa 5 à 10 cm. Voor het vergelijken van verschillende situaties is de bedvormende afvoer dus geschikt om mee te rekenen.

In de volgende paragrafen zal de gevoeligheid van het model voor de volgende parameters worden bepaald:

- karakteristieke korreldiameter
- hydraulische randvoorwaarde benedenrand Zaltbommel
- morfologische randvoorwaarde benedenrand Zaltbommel
- bodemverhang Pannerdens Kanaal
- hoogteligging vaste laag

9.2 Karakteristieke korreldiameter

Het sedimenttransport wordt berekend met de transportformule van Engelund-Hansen. Deze transportformule rekent met de D_{50} als karakteristieke korreldiameter. Dit is de diameter waarvoor 50% van het sediment een kleinere diameter heeft. De korreldiameter wordt bepaald door een sedimentmonster uit de rivierbodem te nemen en hiervan de zeefkromme te bepalen. Hierbij kunnen verschillende fouten optreden die te maken hebben met de methode van monsters nemen of de analyse van het materiaal. Bovendien kan de korreldiameter sterk variëren in langsrichting van de rivier.

Volgens de transportformule van Engelund-Hansen is het sedimenttransport omgekeerd evenredig met de D_{50} :

$$s = \frac{0,05 U^5}{(1 - \varepsilon) \sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} \quad (9-1)$$

Om te bepalen wat de gevoeligheid van het model is voor een verandering in de karakteristieke korreldiameter, wordt de D_{50} op de Waal met 7%, 14% en 20% vergroot, zie tabel 9.1. Het sedimenttransport zal hierdoor respectievelijk met circa 6,5%, 12% en 17% afnemen, hetgeen ook te zien is in de grafiek in bijlage 9-IIa.

In bijlage 9-IIb is het verschil in bodemligging gegeven tussen de geijkte situatie en de situatie met $D_{50} + 7\%$, $+14\%$ en $+20\%$. Hierin is te zien dat de invloed op de bodemligging van de Waal erg groot is. De plotselinge bodemverhoging van 20 à 55 cm op de Bovenwaal heeft een programma-technische oorzaak. In werkelijkheid zou het veel fijnere sediment dat van de Rijn op de Bovenwaal komt, gewoon worden getransporteerd. In SOBEK krijgt het sediment echter de korreldiameter toegekend die bij een bepaalde locatie hoort, in dit geval dus de grotere D_{50} die op de Bovenwaal geldt. Hierdoor treedt op vrijwel de hele Waal een bodemverhoging op in plaats van een bodemdaling, zie bijlage 9-IIc en d.

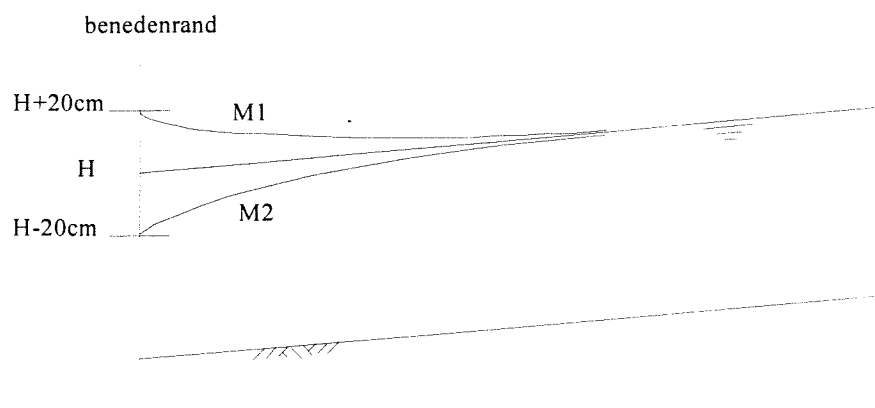
9.3 Hydraulische randvoorwaarde benedenrand

Als hydraulische randvoorwaarde is in Zaltbommel, de benedenrand van de Waal, een $H(Q)$ relatie opgelegd. Deze randvoorwaarde beïnvloedt de waterverdeling over de Waal en het Pannerdens Kanaal en daarmee ook het sedimenttransport en de morfologische ontwikkelingen. Om de gevoeligheid van het model voor de benedenstroomse randvoorwaarde te bepalen, is een simulatie gedaan waarin $H(Q)$ met 20 cm is verlaagd en een waarin $H(Q)$ met 20 cm is verhoogd. In de situatie met $H(Q) + 20$ cm, is het debiet op de Waal 0,5% kleiner dan in de geijkte situatie en in de situatie met $H(Q) - 20$ cm 0,2% groter. Deze afwijkingen in het debiet vallen binnen de geeiste nauwkeurigheidsmarge van 1% die bij de ijking van de waterbeweging is aangehouden (zie hoofdstuk 4), zodat ook met deze gewijzigde $H(Q)$ relaties het model aan de nauwkeurigheidseisen voor de waterbeweging zou kunnen voldoen.

Wanneer het debiet groter is, is de sedimenttransportcapaciteit ook groter (zie bijlage 9-IIIa), waardoor de autonome bodemdaling groter is. Dit is goed te zien in bijlage 9-IIIb en c. In de situatie $H(Q) + 20$ cm, waarin het debiet op de Waal kleiner is, is de bodemdaling kleiner dan in de geijkte situatie. Er treedt zelfs een kleine bodemstijging op. In de situatie $H(Q) - 20$ cm treedt een grotere bodemdaling op dan in de geijkte situatie.

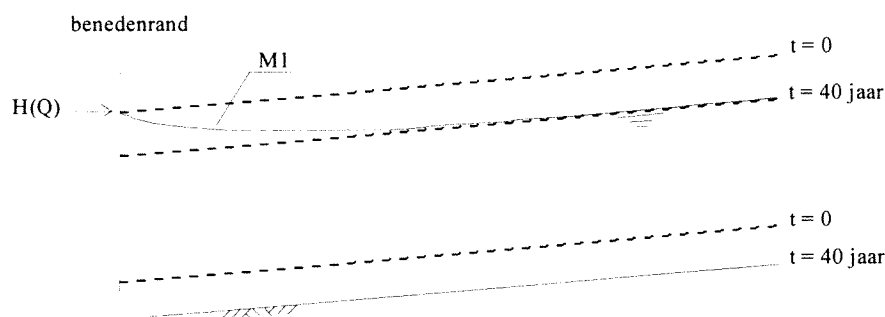
Dichter bij de benedenstroomse rand is de invloed van de randvoorwaarde $H(Q)$ het grootst, zie figuur 9.1. Bij de verhoogde $H(Q)$ relatie ontstaat een M1 stuwkromme. Door de opstuwing nemen de stroomsnelheden af en daarmee ook de sedimenttransportcapaciteit. Er ontstaat sedimentatie. In bijlage 9-IIId is te zien, dat voor de situatie $H + 20$ cm de bodemverhoging ten opzicht van de geijkte situatie groter wordt naar de benedenstroomse rand toe. Voor de verlaagde $H(Q)$ relatie ontstaat een M2 stuwkromme, waardoor de

stroomsnelheden en de transportcapaciteit toenemen. In deze situatie neemt de bodemdaling in benedenstroomse richting toe.



Figuur 9.1 Stuwkrommes ten gevolge van veranderde waterstand op de benedenrand.

De invloed van de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde op de bodemligging van de Waal is vrij groot. Op de Bovenwaal wordt bij de bochtmaatregelen vaste laag en bodemkribben gesproken over bodemveranderingen van 20 à 30 cm. Hier heeft een verhoging, respectievelijk verlaging van de $H(Q)$ relatie een bodemverhoging, respectievelijk verlaging van 5 à 10 cm tot gevolg. Dit is 25 à 30 % van de bodemverandering ten gevolge van de bochtmaatregel. De uiteindelijke nauwkeurigheid wordt uiteraard ook nog bepaald door de nauwkeurigheid waarmee het sedimenttransport en de morfologie zijn geijkt. De afwijkingen in het sedimenttransport zijn echter vrij klein (zie bijlage 9-IIIa), zodat ze binnen de meetbare nauwkeurigheid van het sedimenttransport vallen.



Figuur 9.2 Stuwkromme als gevolg van bodemdaling en vaste $H(Q)$ relatie.

Een belangrijk gevolg van een $H(Q)$ relatie als randvoorwaarde is, dat de waterstand op de benedenrand zich niet aanpast aan de veranderde bodemligging. In veertig jaar daalt in SOBEK de bodem op de Benedenwaal zo'n 25 cm, terwijl de waterstanden als functie van het debiet hetzelfde blijven. Dit betekent dat in de loop van de jaren een 25 cm te grote waterdiepte op de benedenrand is

ontstaan, waardoor een M1 stuwkromme optreedt, zie figuur 9.2. Hierdoor ontstaat in feite de hierboven beschreven situatie $H(Q) + 20$ cm, hetgeen betekent, dat de bodem op de Bovenwaal 5 à 10 cm hoger komt te liggen als gevolg van de stuwkromme en op de Benedenwaal 10 à 20 cm.

9.4 Morfologische randvoorwaarde benedenrand

In SOBEK moet op de boven- én de benedenrand een morfologische randvoorwaarde worden ingevoerd. Dit is wiskundig niet juist, één morfologische randvoorwaarde zou voldoende moeten zijn. De randvoorwaarde op de benedenrand is alleen nodig wanneer het water ook de andere kant kan opstromen. Dat gebeurt in deze situatie niet, zodat SOBEK automatisch deze benedenstroomse randvoorwaarde negeert.

Op de benedenstroomse randen van het model is een constante bodemligging ingevoerd. Uit de diverse grafieken waarin de door SOBEK berekende bodemligging wordt weergegeven, blijkt inderdaad dat de bodemligging op de benedenrand niet constant is gehouden en SOBEK dus blijkbaar niets met de benedenstroomse randvoorwaarde doet.

Als morfologische randvoorwaarde kan ook een sedimenttransport worden ingevoerd. Dit is gedaan voor de benedenrand van de Waal, waarbij het gemiddelde sedimenttransport op de Waal ($0,010537 \text{ m}^3/\text{s}$) als randvoorwaarde is ingevoerd. Op de benedenrand van het Pannerdens Kanaal is als morfologische randvoorwaarde een constante bodemligging aangehouden. Het blijkt dat de berekende bodemligging na veertig jaar exact hetzelfde is als met de randvoorwaarde $z_b = \text{NAP} - 4,85$ m op de benedenrand Zaltbommel. Ook wanneer als morfologische randvoorwaarde een sedimenttransport van $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ of een bodemligging van $\text{NAP} - 8,0$ m wordt genomen is er geen enkel verschil met het geijkte model. SOBEK doet dus inderdaad niets met de benedenstroomse morfologische randvoorwaarde.

9.5 Bodemverhang Pannerdens Kanaal

In hoofdstuk 4, bij de ijking van de morfologie van het model, is gebleken dat voor het Pannerdens Kanaal een te klein bodemverhang is ingevoerd. In dit onderzoek is gerekend met een bodemverhang van $0,45 \cdot 10^{-4}$, terwijl na veertig jaar een bodemverhang van $1,2 \cdot 10^{-4}$ is ontstaan. Om te kijken wat de invloed is van dit te kleine bodemverhang op de morfologische ontwikkelingen, wordt een simulatie gedaan waarbij het bodemverhang van het Pannerdens Kanaal $1,2 \cdot 10^{-4}$ is. Hiertoe wordt de bodemligging op de IJsselkop, de benedenrand van het Pannerdens Kanaal, verlaagd van $\text{NAP} + 2,50$ m naar $\text{NAP} + 1,60$ m.

In bijlage 9-IV is het verschil in bodemligging met de geijkte situatie na veertig jaar gegeven. De verschillen zijn zeer klein: maximaal 1 cm. Het gevolg van een verkeerde initiële bodemligging van het Pannerdens Kanaal is dus verwaarloosbaar klein.

9.6 Hoogteligging vaste laag

Bij de vaste laag en de bodemkribben wordt de bodemdaling in de bocht geijkt met behulp van de hoogteligging van de vaste laag, zie paragraaf 6.4 en 6.6. Hoe hoger de vaste laag ligt, hoe kleiner de transportlaag is en hoe groter de reductie van het sedimenttransport. De dikte van de transportlaag boven de alluviale bodem, wordt gegeven door vergelijking (6-16):

$$\delta = \alpha h$$

waarin δ de dikte van de transportlaag is, α een coëfficiënt en h de waterdiepte. De coëfficiënt α wordt door SOBEK alleen gebruikt bij de toepassing van een vaste laag, om de verhouding δ_{vl} / δ en daaruit de reductie van het sedimenttransport te bepalen, zie figuur 6.4 en 6.5.

Voor α is de waarde 0,1 genomen. Om te bepalen wat de gevoeligheid van de morfologische ontwikkelingen is voor de grootte van α , is ook een berekening met $\alpha = 0,2$ uitgevoerd. Een grotere α betekent een grotere dikte δ van de alluviale transportlaag, waardoor een groter deel van de vaste laag in de alluviale transportlaag komt te liggen, zie figuur 6.4, en de invloed van de vaste laag groter wordt. Dit is ook af te leiden uit de vergelijkingen (6-24) en (6-25): bij onveranderde δ_{vl} van de transportlaag boven de vaste laag, is de verhouding δ_{vl} / δ kleiner en de reductie van het sedimenttransport groter. Om dezelfde bodemdaling en dus dezelfde reductie van het sedimenttransport in de bocht te ijken als bij $\alpha = 0,1$, moet de δ_{vl} groter worden en moet de vaste laag dus lager komen te liggen.

Bij de situatie met een vaste laag (hoofdstuk 6), is er van uitgegaan dat de gemiddelde bodemligging in de bocht 35 cm daalt. Wanneer $\alpha = 0,1$ wordt genomen, moet de vaste laag 0,4 meter onder het bodemniveau liggen om de vereiste bodemdaling in de bocht te geven. Wanneer $\alpha = 0,2$ wordt genomen, moet de vaste laag 0,6 meter onder het bodemniveau worden gelegd om een bodemdaling van 35 cm in de bocht te krijgen. De van belang zijnde vraag is nu, of het voor de morfologische ontwikkelingen uitmaakt, of voor $\alpha = 0,1$ of $\alpha = 0,2$ is gekozen, terwijl in beide situaties wel de juiste bodemdaling in de bocht is geijkt.

Voor beide situaties is een simulatie uitgevoerd. In bijlage 9-Va en b is de bodemligging op de Waal na veertig jaar gegeven en het verschil in bodemligging tussen de twee situaties. Hierin is te zien, dat ter plaatse van de vaste laag de bodem in beide situaties niet exact evenveel daalt: in de situatie met $\alpha = 0,2$ is een circa 5 cm grotere bodemdaling geijkt. De verschillen op de rest van de Waal zijn zeer klein en zijn het gevolg van deze afwijking in de ijking van de bodemdaling in de bocht. De grootte van α heeft dus wel invloed op het sedimenttransport ter plaatse van de vaste laag, maar wanneer de verandering in het sedimenttransport op een andere manier wordt gecompenseerd, hier met de hoogteligging van de vaste laag, is er geen netto effect op de morfologische ontwikkelingen op de Waal.

De invloed van de hoogteligging van de vaste laag op de bodemdaling in de bocht en op de morfologische ontwikkelingen op de rest van de rivier, wordt

duidelijk met bijlage 9-Vc en d. Hier is de bodemligging op de Waal na veertig jaar uitgezet voor de situaties met $\delta_{vl} = 0,4$ m (de in hoofdstuk 6 geijkte situatie) en $\delta_{vl} = 0,6$ m. Met $\delta_{vl} = 0,4$ m is de bodemdaling in de bocht 30 à 35 cm en met $\delta_{vl} = 0,6$ m is dat 50 à 55 cm. De grotere bodemdaling in het geval met $\delta_{vl} = 0,6$ m, komt doordat in deze situatie het sedimenttransport minder wordt gereduceerd en dus meer erosie optreedt, zie bijlage 9-Ve. Het uit de bocht weggeërodeerde sediment, slaat benedenstrooms van de bocht neer. Op de rest van de Waal heeft deze 20 cm grotere bodemdaling in de bocht erg weinig invloed. Bovenstrooms komt de bodem circa 2 cm lager te liggen en benedenstrooms 2 à 3 cm hoger, zie bijlage 9-Vd.

9.7 Conclusies met betrekking tot de gevoeligheidsanalyse

De omgekeerd evenredigheid van het sedimenttransport met de karakteristieke korrelgrootte D_{50} , blijkt ook uit de door SOBEK berekende sedimenttransporten. De invloed hiervan op de bodemligging is voornamelijk van programmatische aard: in SOBEK krijgt het sediment de korreldiameter toegekend die bij die locatie hoort.

De hydraulische randvoorwaarde op de benedenrand in Zaltbommel, heeft vrij veel invloed op de bodemligging van de Waal. Een verhoging of verlaging van 20 cm in de $H(Q)$ relatie op de benedenrand, beïnvloedt de bodemverandering op de Bovenwaal met 25 à 30 %. De vaste $H(Q)$ relatie zorgt ervoor, dat in de loop van de jaren de waterdiepte op de benedenrand te groot is, omdat de bodem wel gedaald is, maar de waterstand niet. Hierdoor is de door SOBEK berekende bodemdaling op de Bovenwaal 5 à 10 cm te klein en op de Benedenwaal 10 à 20 cm. Omdat deze invloed vrij groot is, is hiermee al rekening gehouden bij het bepalen van de morfologische effecten van de bochtverbeteringen.

Uit SOBEK berekeningen met verschillende morfologische randvoorwaarden op de benedenrand, blijkt dat SOBEK inderdaad deze randvoorwaarde negeert. De morfologische randvoorwaarde op de benedenrand is alleen nodig wanneer de stroming ook de andere kant op gericht kan zijn.

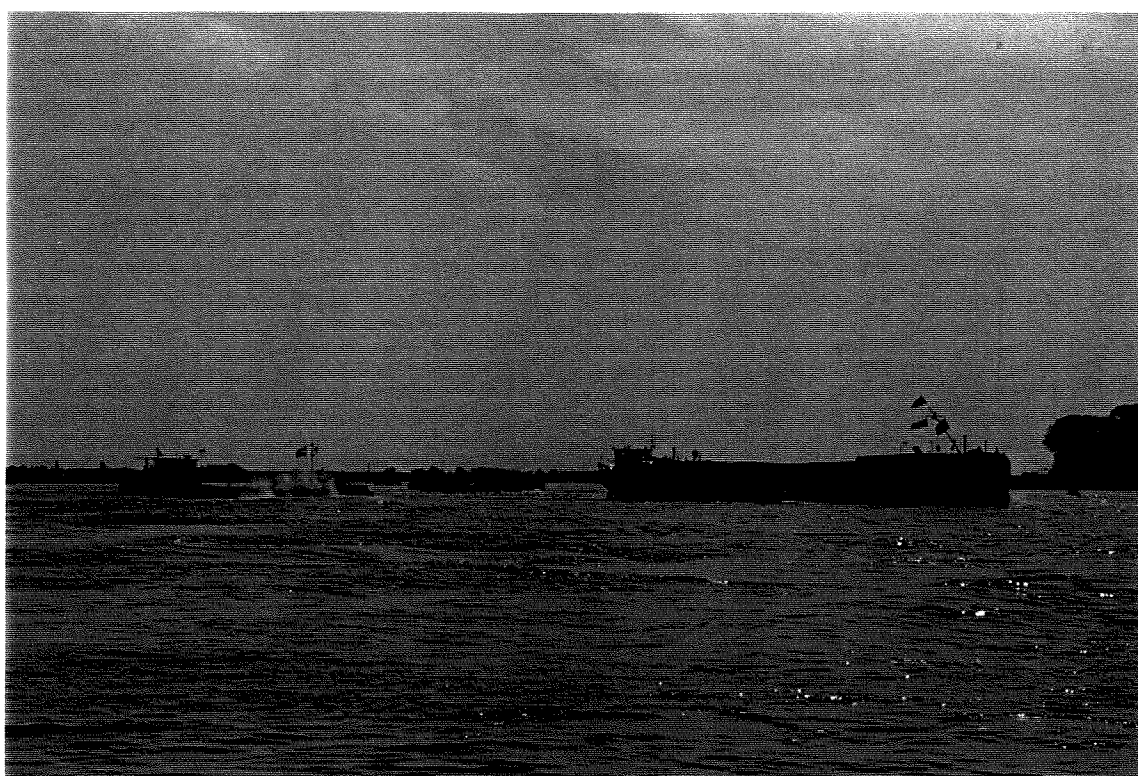
De invloed van het initiële bodemverhang van het Pannerdens Kanaal op de bodemontwikkeling op de Rijn en Waal is verwaarloosbaar klein.

De coëfficiënt α voor het bepalen van de transportlaagdikte, wordt door SOBEK alleen gebruikt wanneer in het model een vaste laag aanwezig is. α beïnvloedt indirect de grootte van het sedimenttransport ter plaatse van de vaste laag. Maar wanneer de hoogteligging van de vaste laag zodanig wordt aangepast, dat voor verschillende waarden van α hetzelfde sedimenttransport in de bocht optreedt, verandert de bodemligging op de rest van de riviertak niet.

De invloed van de in de bocht geijkte bodemdaling op de bodemligging op de rest van de rivier is erg klein. Een circa 20 cm grotere bodemdaling in de bocht, heeft bovenstrooms een circa 2 cm lagere bodemligging en benedenstrooms een 2 à 3 cm hogere bodemligging tot gevolg. Deze conclusie is belangrijk voor de situatie met bodemkribben, omdat hierbij een aanname is gedaan voor de bodemdaling in de bocht. De invloed van deze aanname op de bodemontwikkelingen op de rest van de Waal, is dus erg klein.

Hoofdstuk 10

Conclusies en aanbevelingen



10. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

- Het rivierensysteem met Rijn, Waal en Pannerdens Kanaal is sterk geschematiseerd weergegeven in SOBEK. Het model moet dan ook niet gebruikt worden voor de voorspelling van lokale waterstanden en morfologie.
- De ijking van de waterbeweging is redelijk nauwkeurig gebeurd. Daar het model wordt gebruikt voor morfologische berekeningen, is de ijking van sedimentbeweging en morfologie hier belangrijker. De geijkte sedimenttransporten komen overeen met de in het IVR project berekende sedimenttransporten. Deze zijn gebaseerd op de verwachte jaarlijkse zandvracht.
- De autonome bodemdaling die SOBEK op de Waal en Rijn berekent, is, op de benedenstroomse 15 km van de Waal na, te klein. Hiermee is rekening gehouden bij de interpretatie van de door SOBEK berekende bodemveranderingen ten gevolge van de bochtmaatregelen.
- Morfologische ontwikkelingen, en dus ook de autonome bodemdaling, treden in SOBEK langzamer op dan in werkelijkheid. Hiervoor kunnen twee mogelijke oorzaken worden aangewezen. Ten eerste kan de evenwichtsbodemligging van het model niet goed zijn en ten tweede kan de morfologische tijdschaal van het model te klein zijn. De evenwichtsbodemligging hangt samen met de ingevoerde geometrie van de rivier. In dit model zijn het bodemverhang en de stroomvoerende doorsnede constant op een riviertak, terwijl in werkelijkheid het verhang in benedenstroomse richting afneemt en de stroomvoerende doorsnede toeneemt. De morfologische tijdschaal is omgekeerd evenredig met het sedimenttransport. Aangezien het sedimenttransport erg moeilijk te voorspellen is en hier al snel een factor twee verschil in kan zitten, zou ook dit de te langzame bodemontwikkelingen kunnen veroorzaken.
- Doordat de $H(Q)$ relatie op de benedenrand niet verandert, maar de bodemligging in de loop van de jaren wel daalt, wordt de waterdiepte op de benedenrand te groot. Dit betekent dat een stuwkromme ontstaat en dat SOBEK te kleine bodemdalingen berekent. Op de Bovenwaal 5 à 10 cm te klein en op de Benedenwaal 10 à 20 cm.
- Benedenstrooms van een vaste laag en bodemkribben ontstaat in de buitenbocht een erosiekuil en in de binnenbocht een verhoging van de bodemligging. Daarnaast is er nog het verschil in bodemligging tussen binnen- en buitenbocht ten gevolge van het dwarsverhang in de bocht. Deze twee verstoringen gesuperponeerd veroorzaken grotere bodemoscillaties benedenstrooms van een bocht dan in de oorspronkelijke situatie. Vooral de scheepvaart zal hier rekening mee moeten houden.

- Een vaste laag en bodemkribben kunnen in SOBEK worden weergegeven met behulp van de vaste laag optie. De morfologische ontwikkelingen, en dus ook het sedimenttransport, in de bocht, kunnen worden afgeregeld met behulp van de hoogteligging van de vaste laag. De opstuwing ten gevolge van de bochtmaatregel wordt afgeregeld met behulp van de Chezy-waarde.
- De extra weerstand van de bodemschermen, wordt weergegeven door een iets verkleinde Chezy-waarde. De verhoging van de sedimenttransport hierdoor, wordt gecompenseerd door de sedimenttransporterende breedte aan te passen.
- Het sedimenttransport is rechtevenredig met de derdemachtswortel uit de Chezy-waarde. De verhoging van het sedimenttransport in SOBEK, ter plaatse van een bochtmaatregel, wordt dus niet veroorzaakt door de kleinere Chezy-waarde, zoals tot nu toe steeds werd gezegd. Wel veroorzaakt een kleinere Chezy-waarde een groter langsverhang van de waterspiegel, dat op zijn beurt weer een groter sedimenttransport tot gevolg heeft. De invloed van het langsverhang is blijkbaar groter, want door het verkleinen van de Chezy-waarde berekent SOBEK een groter sedimenttransport.
- Omdat slechts één reeks bodempeilingen beschikbaar is, is het moeilijk de validiteit van het model te beoordelen. De SOBEK resultaten met een vaste laag, komen goed overeen met de bodempeilingen. Op basis van deze resultaten en de analyses in dit afstudeeronderzoek, kan worden gesteld dat de voorspelling van de grootschalige morfologische ontwikkelingen door SOBEK vrij goed is, mits rekening wordt gehouden met de te kleine autonome bodemdaling, het effect van de benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde en het feit dat in werkelijkheid de bodemontwikkelingen sneller zullen optreden dan in SOBEK. Voor een betere beoordeling van het model is meer prototype ervaring nodig.
- Hoewel voor de bodemkribben een aanname is gedaan voor de bodemdaling in de bocht, is de invloed van deze aanname op de bodemligging op de rest van de Waal erg klein. Wanneer dus uit bodempeilingen in de toekomst rond het bodemkribbenveld bij Erlecom mocht blijken, dat een andere bodemdaling in de bocht optreedt, zal dit voor de hier berekende bodemontwikkelingen op de Waal vrij weinig uitmaken. Ook wanneer uit latere bodempeilingen blijkt, dat de bocht met de vaste laag bij Nijmegen nog niet helemaal zijn evenwichtsligging heeft bereikt, zoals hier wél was aangenomen, heeft dat niet veel invloed op de hier berekende bodemveranderingen.

Aanbevelingen

- De autonome bodemdaling in SOBEK kan waarschijnlijk worden vergroot door een gradiënt in het bodemverhang en de stroomvoerende doorsnede aan te brengen, dat wil zeggen, in benedenstroomse richting een afnemend bodemverhang en een toenemende stroomvoerende doorsnede. In werkelijkheid neemt het bodemverhang ook af en de doorsnede toe in benedenstroomse richting. Bovenstrooms zal dit leiden tot een groter sedimenttransport en daardoor een grotere autonome bodemdaling. In benedenstroomse richting neemt de autonome bodemdaling af. Dit komt

overeen met de verschillende scenario's voor de autonome bodemdaling, die er van uit gaan, dat deze in benedenstroomse richting afneemt.

- Het zou beter zijn op de benedenstroomse randen een waterdiepte, in plaats van een waterniveau, als functie van het debiet op te leggen. Hierdoor past de waterstand zich aan aan de veranderende bodemligging op de benedenrand. In dit onderzoek bleek, dat door het in de tijd constante waterniveau en de dalende bodem op de benedenrand, een stuwkromme ontstond. Dit had tot gevolg dat door SOBEK te kleine bodemdalingen werden berekend.
- Na aanleg van een bochtmaatregel, wordt in de praktijk de bodem in de binnenbocht op diepte gebaggerd. Door in SOBEK gebruik te maken van de mogelijkheid zand uit een riviervak te onttrekken, kunnen deze baggerwerkzaamheden worden gemodelleerd. Hierdoor wordt het proces waarin de bocht zichzelf uitschuurt in SOBEK overgeslagen en wordt met SOBEK het werkelijke verloop van de bodemontwikkelingen beter benaderd.
- Ervaringen met bochtmaatregelen in de toekomst, zullen moeten worden gebruikt voor een betere beoordeling van het model. Daarbij zijn de bodemveranderingen boven- en benedenstrooms van de bocht van belang, maar zeker ook de bodemverandering in de bocht zelf, waarop het model in feite is geijkt.

Lijst van symbolen

A_f	stroomvoerend oppervlak	m^2
B	breedte van het schermenveld	m
B_{flow}	stroomvoerende breedte	m
B_{sed}	sedimenttransporterende breedte	m
B_t	ijkingsparameter voor zwaartekrachtseffect in dwarsrichting	-
c	voortplantingssnelheid over alluviale bodem	m/s
c_{vl}	voortplantingssnelheid bodemverstoring over niet-alluviale bodem	m/s
C	Chezy-waarde	$m^{1/2}/s$
D	afstand tussen de raaien schermen in langsrichting	m
D_{50}	korreldiameter waarvoor 50 % van het materiaal kleiner is	m
f	ruwheidsfactor van Darcy-Weisbach	-
f_s, f_n	gelijkmatig over het horizontale vlak en over de hoogte van de schermen verdeelde krachten van de schermen op het water in respectievelijk langs- (s-) en dwars- (n-) richting	N/m^3
f_s	vormfactor van het sediment	-
F_L	liftkracht (liftforce) van het water op een scherm	N
F_D	sleepkracht (dragforce) van het water op een scherm	N
F_n	kracht in n-richting	N
F_s	kracht in s-richting	N
Fr	Froude-getal	-
g	zwaartekracht versnelling	m/s^2
h	waterdiepte	m
$\bar{h}$	gemiddelde waterdiepte (in twee-kanalen model)	m
h_e	evenwichtsdiepte	m
h_g	grensdiepte	m
H	verstoring in waterdiepte (in twee-kanalen model)	m
H_v	hoogte waarover de schermen boven de bodem uitsteken (subscript 'v' staat voor 'vanes')	m
i	langsverhang van de waterspiegel	-
i_b	bodemverhang in langsrichting	-
i_{bocht}	bodemverhang in langsrichting in een bocht	-
i_{recht}	bodemverhang in langsrichting op een recht stuk rivier	-
k	verhouding U/u_b	-
L_D	dempingslengte	m
L_p	golflengte	m
m	ruwheidsfactor ($= \kappa\sqrt{8} / f$)	-
m, n	coëfficiënten in de machtswet voor het sedimenttransport	
n	coördinaat in dwarsrichting, positief richting buitenbocht	m
N	aantal schermen in een raai	-
p	druk	N/m^2
q	specifiek debiet	m^2/s
Q	debiet	m^3/s
r	kromtestraal van de bocht	m

s	coördinaat in langsrichting, positief met de stroom mee	m
$\underline{s}$	sedimenttransport per eenheid van breedte over alluviale bodem	m^2/s
$\bar{S}$	gemiddeld sedimenttransport (in twee-kanalen model)	m^2/s
s_{vl}	sedimenttransport pev breedte over niet-alluviale bodem	m^2/s
S	sedimenttransport inclusief poriën	m^3/s
S	dwarsverhang van de bodem	-
S_r	dwarsverhang van de waterspiegel	-
$\underline{u}$	stroomsnelheid van het water in langsrichting	m/s
$\bar{u}$	gemiddelde stroomsnelheid (in twee-kanalen model)	m/s
u_b	langssnelheid bij de bodem	m/s
u_s	langssnelheid aan het wateroppervlak	m/s
u_*	schuifspanningssnelheid	m/s
U	diepte-gemiddelde stroomsnelheid in de langsrichting	m/s
U	verstoring in stroomsnelheid (in twee-kanalen model)	m/s
v	stroomsnelheid van het water in dwarsrichting	m/s
v_b	dwarsnelheid bij de bodem	m/s
z	coördinaat in verticale richting, positief naar boven	m
z_b	bodemniveau	m
$z_{b, vl}$	niveau van de vaste laag	m
z_w	niveau van de waterspiegel	m
β	factor in het hellingtransport	-
β	vormcoëfficiënt voor de beddingsvormen $\approx 1/2$	-
δ	dikte transportlaag boven alluviale bodem	m
δ_{vl}	dikte transportlaag boven niet-alluviale bodem (vaste laag)	m
Δ	relatieve dichtheid van het sediment $(\rho_s - \rho)/\rho$	-
ϵ	poriëngetal van het sediment	-
ϵ	eddy viscositeit	m^2/s
θ	Shields parameter	-
κ	von Karman constante (0.4)	-
λ_w	aanpassingslengte van de stroming $= C^2 h / 2g$	m
λ_s	aanpassingslengte van de sedimentbeweging	m
ρ	dichtheid van water	kg/m^3
ρ_s	dichtheid van het sediment	kg/m^3
τ_{bn}	bodemschuifspanning in de dwarsrichting (= n-richting)	N/m^2
τ_{bs}	bodemschuifspanning in de langsrichting (= s-richting)	N/m^2
τ_{nz}	schuifspanning in dwarsrichting als functie van z	N/m^2
τ_{sz}	schuifspanning in langsrichting als functie van z	N/m^2
τ_{vn}	schuifspanning t.g.v. de bodemschermen in dwarsrichting	N/m^2
τ_{vs}	schuifspanning t.g.v. de bodemschermen in langsrichting	N/m^2

Literatuur

- [1] TAAL, M. (1994); Ontwikkeling scenario's autonome bodemontwikkeling Waal. Notanr. 94.062. RIZA.
- [2] IVR (1994); Eendimensionaal model voor waterbeweging en morfologie van de Rijntakken (SOBEK). IVR-rapport nr. 6. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- [3] VEEN, R. VAN DER, PAKES, U., ESSEN, J. VAN en SCHUTTE, B. (1996); Calibratie SOBEK-Rijntakken. Notanr. 96.xxx. RIZA.
- [4] VRIEND, H.J. DE (1996); Bodemschermen in rivierbochten. Werking vanuit Newtons perspectief gezien.
- [5] KAIJ, TH. V.D. (1994); Waalbocht Nijmegen. Stromingsweerstand vaste laag. Q1806. Waterloopkundig Laboratorium.
- [6] HAVINGA, H. (1996); Ontwerpnota. Hydraulisch / morfologische effectbepaling Waalproject. Versie 2.1. Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.
- [7] STRUIKSMA, N. (1985); Celerity and deformation of bed perturbations travelling over a non-erodible layer. Waterloopkundig Laboratorium.
- [8] VRIES, M. DE (1994); Rivieren. Handleiding college f8. TU Delft.
- [9] VRIES, M. DE (1993); River Engineering. Lecture notes f10. TU Delft.
- [10] JANSSEN, P. PH. e.a. (1979); Principles of River Engineering.
- [11] RWS (1996); Modelleren Riviermaatregelen. Versie 3.0. Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.
- [12] SOBEK; User's Guide. Version 1.10. Delft Hydraulics, RIZA.
- [13] SOBEK; Technical Reference Guide. Version 1.10. Delft Hydraulics, RIZA.
- [14] WIERSMA, F.E. (1997); The modelling of submerged vanes. A means of fareway improvement in river bends. TU Delft.
- [15] VRIES, M. DE (1997); Commentaar door prof.dr.ir. M. De Vries op de Ontwerpnota Hydraulische / Morfologische effectbepaling Waalproject. Waterloopkundig Laboratorium.
- [16] VRIEND, H.J. DE (1996); River Dynamics. College f10. TU Delft.
- [17] STRUIKSMA, N., OLESEN, K.W., FLOKSTRA, C., VRIEND, H.J. DE (1985); Bed deformation in curved alluvial channels. Journal of Hydraulic Research, Vol. 23, No. 1, p.57-79.
- [18] IVR (1996); Hoofdrapport. Een weegschaal voor rivierbeheer. IVR-rapport nr. 1. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Tabellen

knoop	x (m)	y (m)	bodemligging (m tov NAP)
bovenrand	0	0	10.44
Lobith	100000	0	2.5
Pannerdense Kop	105040	0	Rijn: 2.1 Waal: 2.35 Pann Kanaal: 3.0
Vuren	188026	0	-6.65
IJsselkop	105040	11279	2.5

Tabel 2.1 Ligging van de knopen.

riviertak	lengte (m)	bodemverhang (-)
Rijn	100000	$0.79 \cdot 10^{-4}$
Bovenrijn	5040	$0.79 \cdot 10^{-4}$
Waal	82986	$1.1 \cdot 10^{-4}$
Pannerdens Kanaal	11279	$0.45 \cdot 10^{-4}$

Tabel 2.2 Riviertakken in het model.

Peilstation	afstand vanaf bovenrand (=x-coördinaat) (m)	afstand vanaf Pannerdense Kop (m)	bodemniveau tov NAP (m)
Pannerdense Kop	105040	0	+2.35
Nijmegen	122035	16995	+0.48
Tiel	150353	45313	-2.63
Zaltbommel	171472	66432	-4.85
Vuren	188026	82986	-6.50

Tabel 2.3 Locatie van de peilstations op de Waal.

Peilstation:	$Q_L = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_L = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_L = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Vuren	0.54	2.39	6.01
IJsselkop	7.29	11.01	14.47

Tabel 3.1 Q-H relatie Vuren en IJsselkop volgens IVR (H in m tov NAP).
Bron: lit.[2].

Peilstation	H (OLR 1991) $Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	H (betrekkingslijn) $Q_{\text{Lobith}} = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$	H (RIVCUR) $Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdense Kop	7.52	12.28	16.60
Nijmegen-haven	5.71	10.46	14.72
Tiel-haven	2.70	7.15	11.46
Zaltbommel	1.00	4.34	8.63

Tabel 3.2 Waterstanden in de peilstations in meter t.o.v. NAP. Bron: lit.[2].

Q_{Lobith}	Q_{Waal}	$Q_{\text{Pannerdens Kanaal}}$
984	777	207
4500	3000	1500
7944	5250	2694
15000	9530	5470

Tabel 3.3 Afvoerverdeling over Waal en Pannerdens Kanaal (m^3/s). Bron: lit.[2].

Peilstation	OLR ($Q_{lob}=984 \text{ m}^3/\text{s}$)		Bankfull ($Q_{lob}=4500 \text{ m}^3/\text{s}$)	
	H_{SOBEK}	$H_{SOBEK}-H_{meting}$	H_{SOBEK}	$H_{SOBEK}-H_{meting}$
Pannerdense Kop	7.57	0.05	12.20	-0.08
Nijmegen	5.73	0.02	10.33	-0.13
Tiel	2.79	0.09	7.19	0.04
Zaltbommel	1.17	0.17	4.70	0.36

Tabel 3.4 Geijkte waterstanden voor OLR en Bankfull (in m tov NAP) en het verschil met de gemeten waarden (in m).

Peilstation	MHW ($Q_{Lobith}=15000 \text{ m}^3/\text{s}$)		
	H_{SOBEK}	$H_{SOBEK}-H_{RIVCUR}$	afwijking als % van de waterdiepte
Pannerdense Kop	16.86	0.26	1.8
Nijmegen	15.00	0.28	1.9
Tiel	11.80	0.34	2.4
Zaltbommel	9.12	0.49	3.6

Tabel 3.5 Geijkte waterstanden voor MHW (in m tov NAP) en het verschil met de met RIVCUR voorspelde waarden H_{RIVCUR} (in m).

$Q_{Lobith} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$Q_{Waal} \text{ in SOBEK (m}^3/\text{s)}$	% afwijking met meting
984	776	0.13
4500	3001	0.03
7944	5204	0.88
15000	9550	0.21

Tabel 3.6 Geijkte afvoer door de Waal en percentage afwijking met de gemeten waarde.

Rijn		Waal		Pannerdens Kanaal	
Q_R	C_R	Q_W	C_W	Q_{PK}	C_{PK}
984	50	777	50	207	46
4500	50	3000	46.5	1500	43
7944	42	5205	46	2739	42
15000	42	9530	37	5470	43

Tabel 3.7 Geijkte Chezy-waarden ($m^{1/2}/s$) voor de Rijn, de Waal en het Pannerdens Kanaal voor verschillende afvoeren (m^3/s).

Riviertak:	k_n -waarde (m)
Rijn	0.25
Waal	0.10
Pannerdens Kanaal	0.40

Tabel 3.8 Nikuradse ruwheidsfactoren voor de uiterwaarden.

Q_{waal} (m ³ /s)	$H_{\text{Zaltbommel}}$ (m)
669	0.99
777	1.17
1160	1.89
1520	2.59
2340	3.88
3000	4.70
4370	6.23
6290	7.50
9550	9.12

Tabel 4.1 Q-H relatie Zaltbommel.

$Q_{\text{Waal}}/Q_{\text{PK}}$	$S_{\text{Waal}}/S_{\text{PK}}$	$Q_{\text{Rijn}}/Q_{\text{PK}}$	$S_{\text{Rijn}}/S_{\text{PK}}$	$Q_{\text{Waal}}/Q_{\text{Rijn}}$	$S_{\text{Waal}}/S_{\text{Rijn}}$
0	0	0	0	0	0
0.5	0.11	1.5	1.11	0.33	0.1
1	0.33	2	1.33	0.5	0.25
2	2.7	3	3.70	0.67	0.73
3	7.14	4	8.14	0.75	0.88
4	11.11	5	12.11	0.8	0.92

Tabel 4.2 Sedimentverdeling bij splitsingspunt Pannerdense Kop.

Rijn		Bovenrijn		Waal		Pannerdens Kanaal	
locatie	D_{50}	locatie	D_{50}	locatie	D_{50}	locatie	D_{50}
0	0.0044	0	0.004	0	0.00157	0	0.004
25000	0.0043	5040	0.0038	15000	0.0015	4000	0.0035
50000	0.0042			45000	0.0015	11279	0.003
75000	0.0041			66432	0.0011		
100000	0.0040						

Tabel 4.3 Karakteristieke korrelgroottes (m) op de riviertakken. De locatie (m) is de afstand tov de beginknoop van die tak.

dwarsprofiel	B hoofdgeul	B kribvaksectie	B uiterwaard	sediment transporterende breedte
Rijn1	900	664	525	900
Rijn2	509	150	1430	509
Rijn3	359	100	1630	359
Waal	263	183	780	245
Pannerdens Kanaal	138	85	1109	138

Tabel 4.4 Verschillende breedtes (m) van de dwarsprofielen.

riviertak	vermenigvuldigingsfactor
Rijn	3.6
Bovenrijn	3.6
Waal	0.36
Pannerdens Kanaal	0.8

Tabel 4.5 Vermenigvuldigingsfactoren transportformule.

afstand vanaf Pannerdense Kop (km)	autonome bodemdaling SOBEK (cm/jaar)	autonome bodemdaling werkelijkheid (cm/jaar)
2.5	0.08	1.9
12.5	0.15	1.6
22.5	0.23	1.3
32.5	0.25	1.0
42.5	0.10	0.7
52.5	0.45	0.4
62.5	0.73	0.1

Tabel 4.6 Door SOBEK berekende en werkelijke autonome bodemdaling op de Waal.

afstand vanaf bovenrand (km)	beginsituatie	2002	2012	2022	2032	autonome bodemdaling (cm/jaar)
0	10.44	10.44	10.34	10.24	10.14	0.75
25	8.45	8.45	8.45	8.44	8.44	0.03
50	6.47	6.43	6.40	6.35	6.36	0.28
75	4.49	4.50	4.52	4.52	4.52	0.08
100	2.54	2.56	2.54	2.53	2.54	0.00
110	1.81	1.53	1.81	1.94	1.70	0.28
130	-0.36	-0.35	-0.38	-0.49	-0.45	0.23
160	-3.60	-3.73	-3.76	-3.84	-3.82	0.55

Tabel 4.7 Bodemligging op verschillende locaties op de Rijn en de Waal (m tov NAP) en de door SOBEK berekende autonome bodemdaling.

$Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_{\text{SOBEK, oorspr}}$	$H_{\text{SOBEK, 2D}}$	H_{meting}	$H_{\text{SOBEK, nieuw}} - H_{\text{meting}}$
Pann. Kop	7.57	7.59	7.52	0.07
Nijmegen	5.73	5.63	5.71	-0.08
Tiel	2.79	2.83	2.70	0.13
$Q_{\text{Lobith}} = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$				
Pann. Kop	12.20	12.20	12.28	-0.08
Nijmegen	10.33	10.20	10.46	-0.26
Tiel	7.19	7.24	7.15	0.09
$Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$				
Pann. Kop	16.86	17.00	16.60	0.40
Nijmegen	15.00	15.04	14.72	0.32
Tiel	11.80	11.98	11.46	0.52

Tabel 5.1 Door SOBEK berekende waterstanden in de oorspronkelijke situatie, de situatie met het 2D-profiel en de waterstanden volgens metingen en voorspellingen (in m).

$Q_{\text{Lobith}} (\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{\text{Waal, oorspr}}$	$Q_{\text{Waal, 2D}}$	Q_{meting}	% afwijking met meting
984	776	788	777	1.4
4500	3001	3036	3000	1.2
7944	5204	5330	5250	1.5
15000	9550	10100	9530	6.0

Tabel 5.2 Door SOBEK berekende afvoeren in de oorspronkelijke situatie, de situatie met het 2D-profiel en de afvoer volgens metingen en voorspellingen (in m).

x-coord.(m)	OLR			MHW		
	zonder	met	opstuwing	zonder	met	opstuwing
17500	5.68	5.93	0.25	14.95	15.00	0.045
20000	5.41	5.66	0.25	14.67	14.71	0.045

Tabel 6.1 Waterstanden zonder bochtmaatregel, door SOBEK berekend en de waterstanden die in de situatie met vaste laag volgens metingen zouden moeten optreden in SOBEK (in m).

x-coord. (m)	OLR		MHW	
	H	ΔH	H	ΔH
17500	5.90	0.22	14.99	0.04
20000	5.68	0.27	14.72	0.05

Tabel 6.2 Door SOBEK berekende waterstanden en opstuwingen bij OLR- en MHW-afvoer in de situatie met een vaste laag (in m).

Q_{Waal}	$C_{\text{vaste laag}}$	$C_{\text{alluviaal}}$
777	33	50
3000	32	46.5
5205	31	46
9530	30	37

Tabel 6.3 Chézy-waarden ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) als functie van de afvoer (m^3/s).

peilstation of x-coord.	$Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdense Kop	7.57	13.26	16.86
Nijmegen	5.73	11.41	15.00
17500	5.68	11.36	14.95
20000	5.41	11.08	14.67
20500	5.36	11.03	14.61
Tiel	2.79	8.29	11.80

Tabel 6.4 Waterstanden door SOBEK berekend in de situatie zonder bochtmaatregel.

peilstation of x-coord.	$Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdense Kop	0.03	0.03	0.02
Nijmegen	0.21	0.15	0.04
17500	0.22	0.16	0.04
20000	0.27	0.19	0.05
20500	0.28	0.21	0.06
Tiel	-0.01	-0.02	-0.01

Tabel 6.5 Opstuwing door SOBEK berekend in de situatie met een vaste laag.

Q_{Lobith}	Q_{Waal} oorspronkelijk	Q_{Waal} met vaste laag	% verandering
984	776	768	1.0
6150	3996	3973	0.6
15000	9550	9517	0.3

Tabel 6.6 Verandering van de afvoerverdeling als gevolg van de opstuwing bij de Pannerdense Kop (Q in m^3/s).

autonome bodemdaling op de Waal					
afstand vanaf bovenrand (km)	SOBEK		werkelijkheid		SOBEK - werkelijkheid
	cm/jaar	na 40jr (cm)	cm/jaar	na 40jr (cm)	na 40 jaar (cm)
0	0.08	3	2	80	-73
10	0.15	6	1.7	68	-62
20	0.23	9	1.4	56	-47
afstand vanaf bocht (km)					
10	0.25	10	1.0	40	-30
20	0.10	4	0.7	28	-24
30	0.45	18	0.4	16	+2
40	0.73	29	0.1	4	+25

Tabel 6.7 Door SOBEK berekende en werkelijke autonome bodemdaling op de Waal zonder bochtmaatregelen. (Bocht tussen de 20,5 km en 23 km benedenstreams van de Pannerdense Kop).

x-coord.(m)	OLR			MHW		
	zonder	met	opstuwng	zonder	met	opstuwng
17500	5.68	5.82	0.14	14.95	14.98	0.025
20000	5.41	5.55	0.14	14.67	14.70	0.025

Tabel 7.1 Waterstanden zonder bochtmaatregel, door SOBEK berekend en de waterstanden die in de situatie met bodemkribben volgens metingen zouden moeten optreden in SOBEK (in m).

x-coord. (m)	OLR		MHW	
	H	ΔH	H	ΔH
17500	5.80	0.12	14.97	0.02
20000	5.57	0.16	14.70	0.03

Tabel 7.2 Door SOBEK berekende waterstanden en opstuwngen bij OLR- en MHW-afvoer in de situatie met bodemkribben (in m).

Q_{Waal}	$C_{\text{bodembkribben}}$	$C_{\text{alluviaal}}$
777	38	50
3000	37	46.5
5205	35	46
9530	33	37

Tabel 7.3 Chézy-waarden ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) als functie van de afvoer (m^3/s).

peilstation of x-coord.	$Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdense Kop	7.57	13.26	16.86
Nijmegen	5.73	11.41	15.00
17500	5.68	11.36	14.95
20000	5.41	11.08	14.67
20500	5.36	11.03	14.61
Tiel	2.79	8.29	11.80

Tabel 7.4 Waterstanden (m) door SOBEK berekend in de situatie zonder bochtmaatregel.

peilstation of x-coord.	$Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdense Kop	0.01	0.02	0.01
Nijmegen	0.12	0.09	0.02
17500	0.12	0.09	0.02
20000	0.16	0.12	0.03
20500	0.17	0.12	0.03
Tiel	0.00	-0.01	0.00

Tabel 7.5 Opstuwing (m) door SOBEK berekend in de situatie met een bodemkribben.

Q_{Lobith}	Q_{Waal} oorspronkelijk	Q_{Waal} met bodemkribben	% verandering
984	776	771	0.6
6150	3996	3982	0.4
15000	9550	9530	0.2

Tabel 7.6 Verandering van de afvoerverdeling als gevolg van de opstuwing bij de Pannerdense Kop (Q in m^3/s).

Q_{Waal}	$C_{\text{bodemschermen}}$	$C_{\text{alluviaal}}$
777	48	50
3000	44.5	46.5
5205	46	46
9530	37	37

Tabel 8.1 Chézy-waarden ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) als functie van de afvoer (m^3/s).

peilstation of x-coord.	$Q_{\text{Lobith}} = 984 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{Lobith}} = 15000 \text{ m}^3/\text{s}$
Pannerdense Kop	0	0	0
Nijmegen	0.01	0	0
17500	0.01	0	0
20000	0.01	0.01	0
20500	0.01	0.01	0
Tiel	0	0	0

Tabel 8.2 Opstuwing (m) door SOBEK berekend in de situatie met een bodemkribben.

Q_{Lobith}	Q_{Waal} oorspronkelijk	Q_{Waal} met vaste laag	% verandering
984	776	774	0.25
6150	3996	3995	0.03
15000	9550	9539	0.12

Tabel 8.3 Verandering van de afvoerdeling als gevolg van de opstuwing bij de Pannerdense Kop (Q in m^3/s).

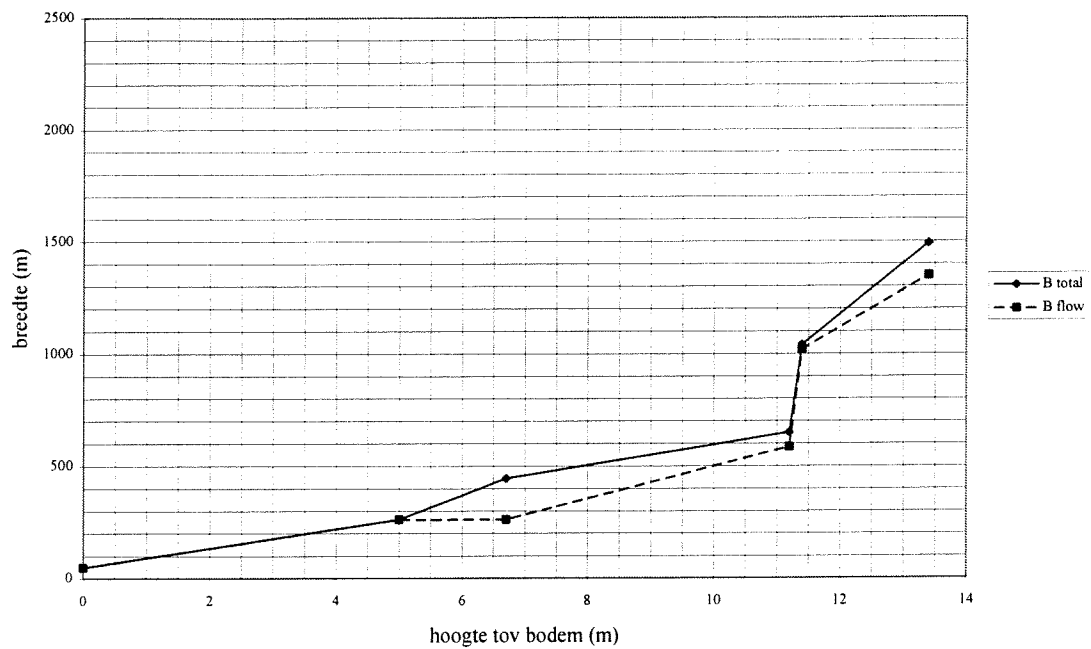
afstand vanaf Pannerdense Kop (m)	D_{50}	$D_{50} + 7\%$	$D_{50} + 14\%$	$D_{50} + 20\%$
0	0.00157	0.00167	0.00177	0.00187
1500	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018
4500	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018
66432	0.0011	0.00117	0.00124	0.00132

Tabel 9.1 In gevoeligheidsonderzoek toegepaste D_{50} (m) op de Waal.

Bijlagen

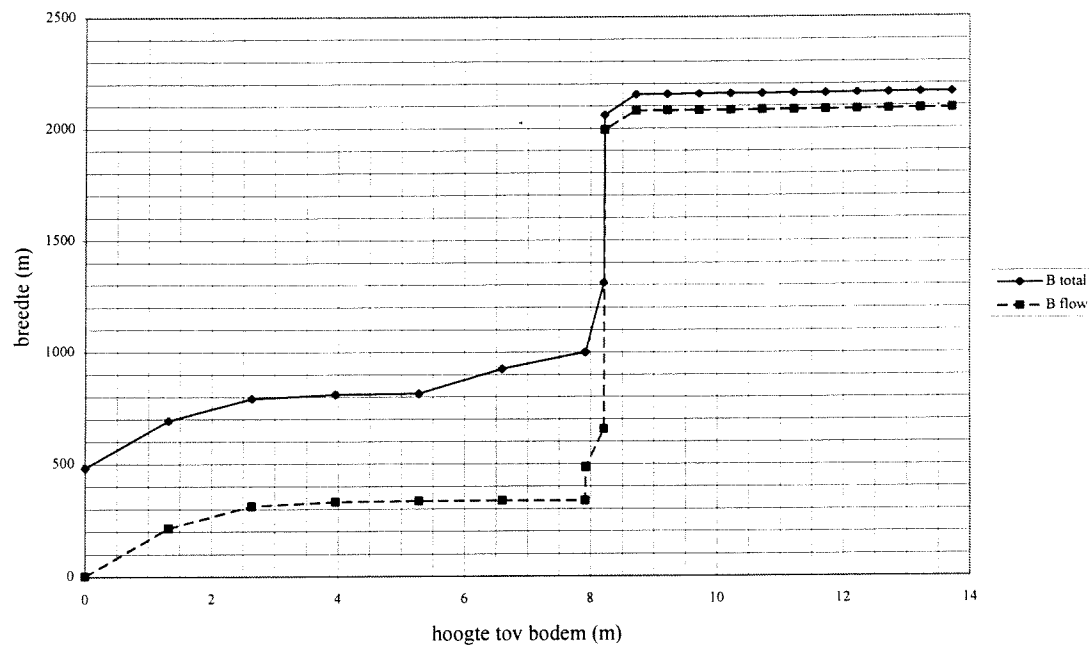
Bijlage 2-I 'Referentie' dwarsprofielen

'Referentie' dwarsprofiel van de Waal



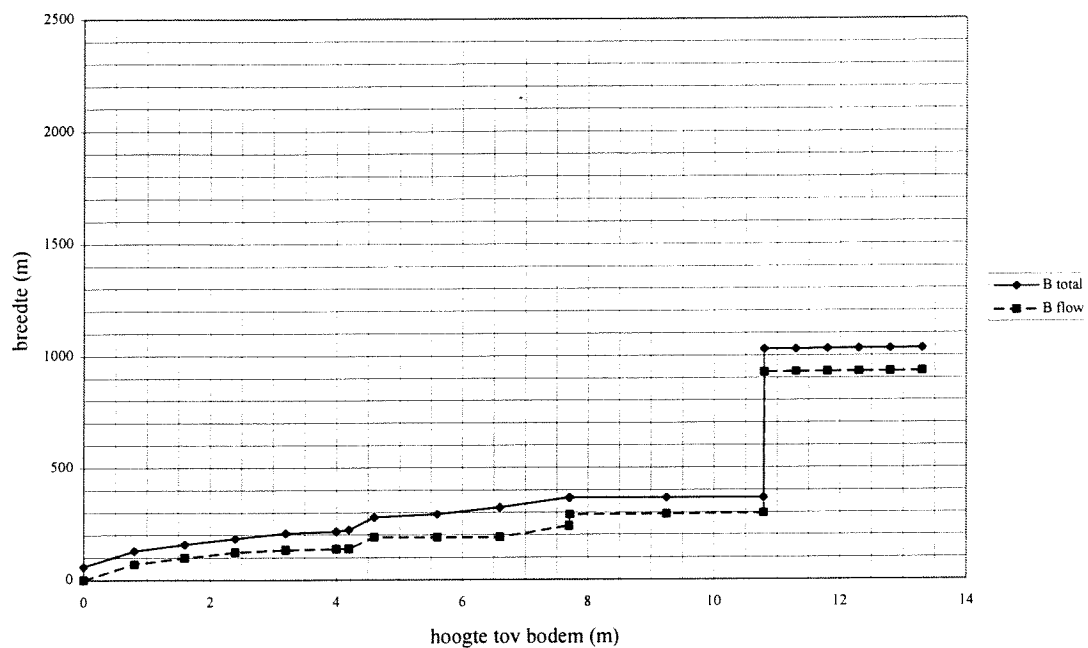
hoogte tov bodem (m)	B _{total} (m)	B _{flow} (m)
0	49	49
5	262	262
6.7	446	263
11.2	649	585
11.4	1039	1020
13.4	1491	1347

'Referentie' dwarsprofiel van de Rijn en Bovenrijn



hoogte tov bodem (m)	B _{total} (m)	B _{flow} (m)
0	482.9	3.5
1.32	694.1	214.7
2.64	792.7	313.3
3.96	810.3	330.9
5.28	814.8	335.4
6.6	924.9	336.4
7.91	1000.4	336.4
7.92	1000.4	485.5
8.21	1309.8	656.2
8.22	2059	1993
8.72	2153	2078.9
9.22	2154	2080
9.72	2155	2081
10.22	2156	2082
10.72	2157	2083
11.22	2158	2084
11.72	2159	2085
12.22	2160	2086
12.72	2161	2087
13.22	2162	2088
13.72	2163	2089

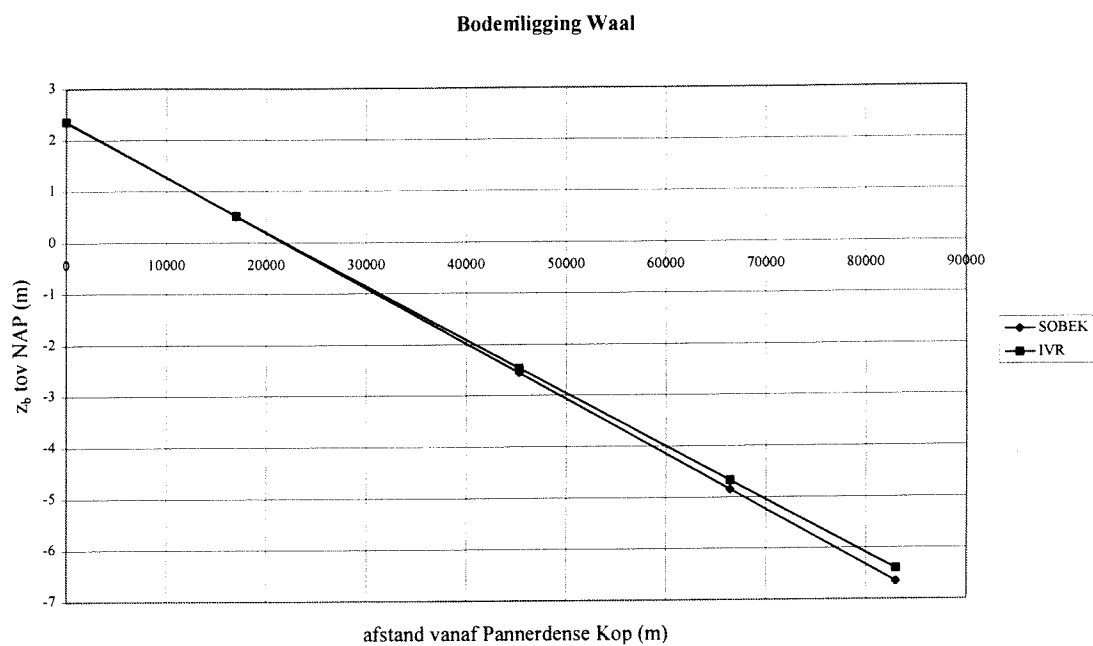
'Referentie' dwarsprofiel Pannerdens Kanaal



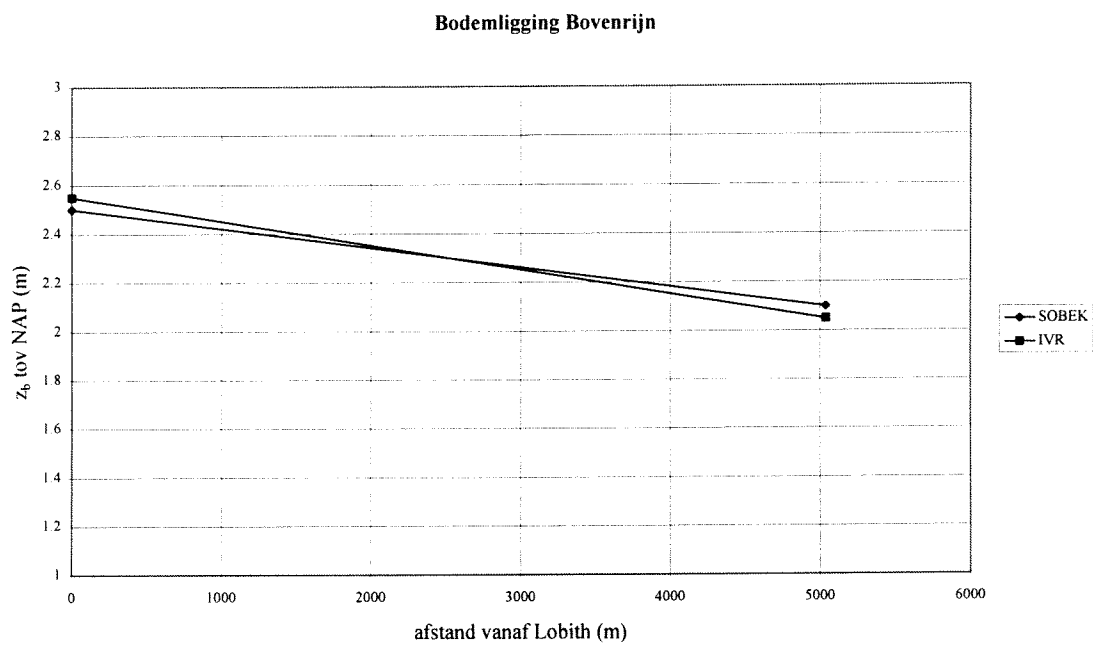
hoogte tov bodem (m)	B _{total} (m)	B _{flow} (m)
0	58	0
0.8	130	70
1.6	158	99
2.4	183	123
3.2	208	133
4	215	137
4.2	223	138
4.6	278	189
5.6	293	189
6.6	323	189
7.7	365	240
7.71	365	290
9.25	365	293
10.79	365	296
10.8	1028	926
11.3	1029	927
11.8	1030	928
12.3	1031	929
12.8	1032	930
13.3	1033	931

Bijlage 2-II Bodemligging in SOBEK en in IVR

Figuur a

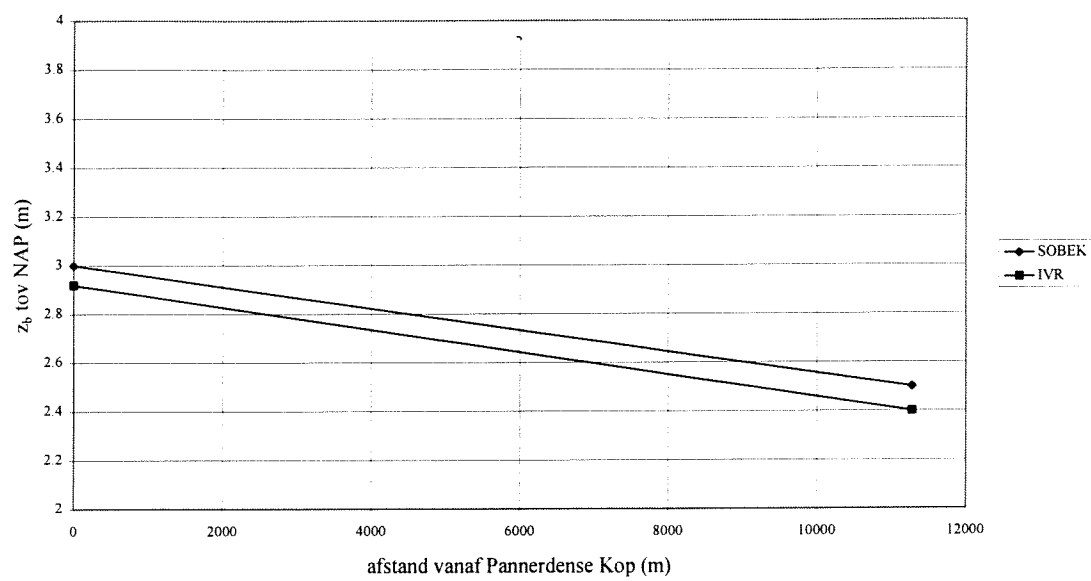


Figuur b



Figuur c

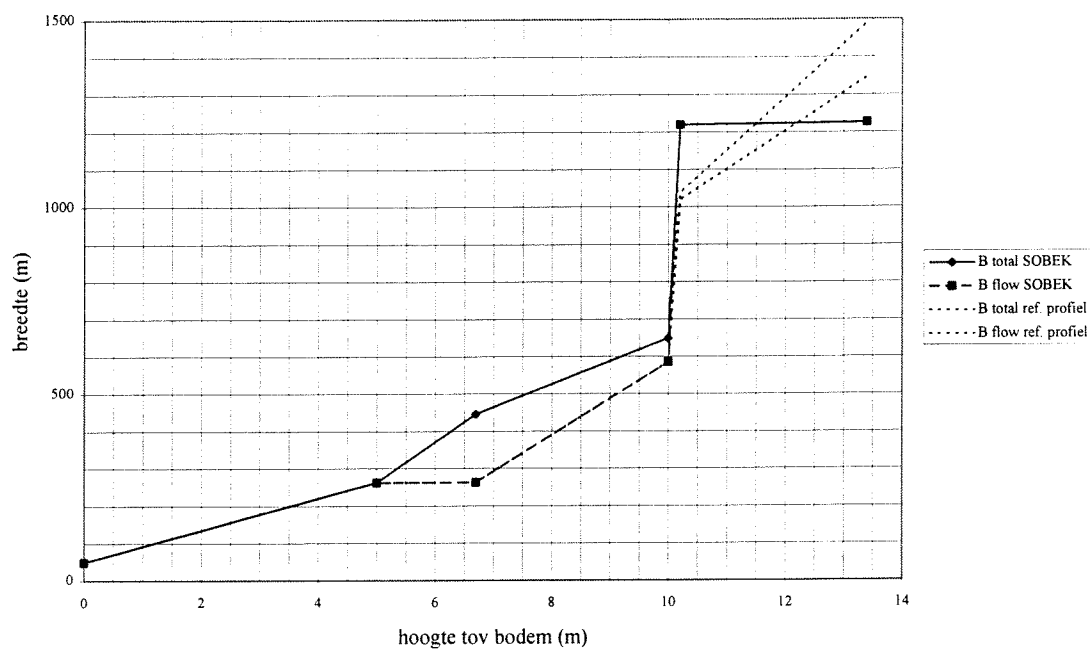
Bodemligging Pannerdens Kanaal



Bijlage 3-I

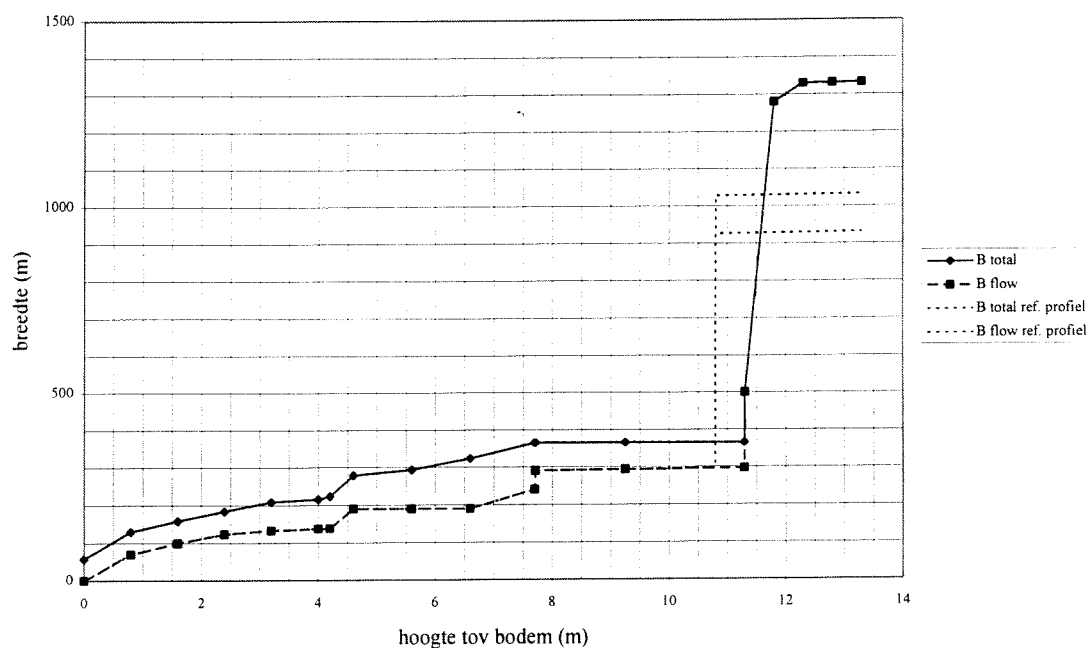
Dwarsprofielen Waal en Pannerdens Kanaal

In SOBEK ingevoerd dwarsprofiel voor de Waal
(en referentie profiel uit bijlage 2-I)



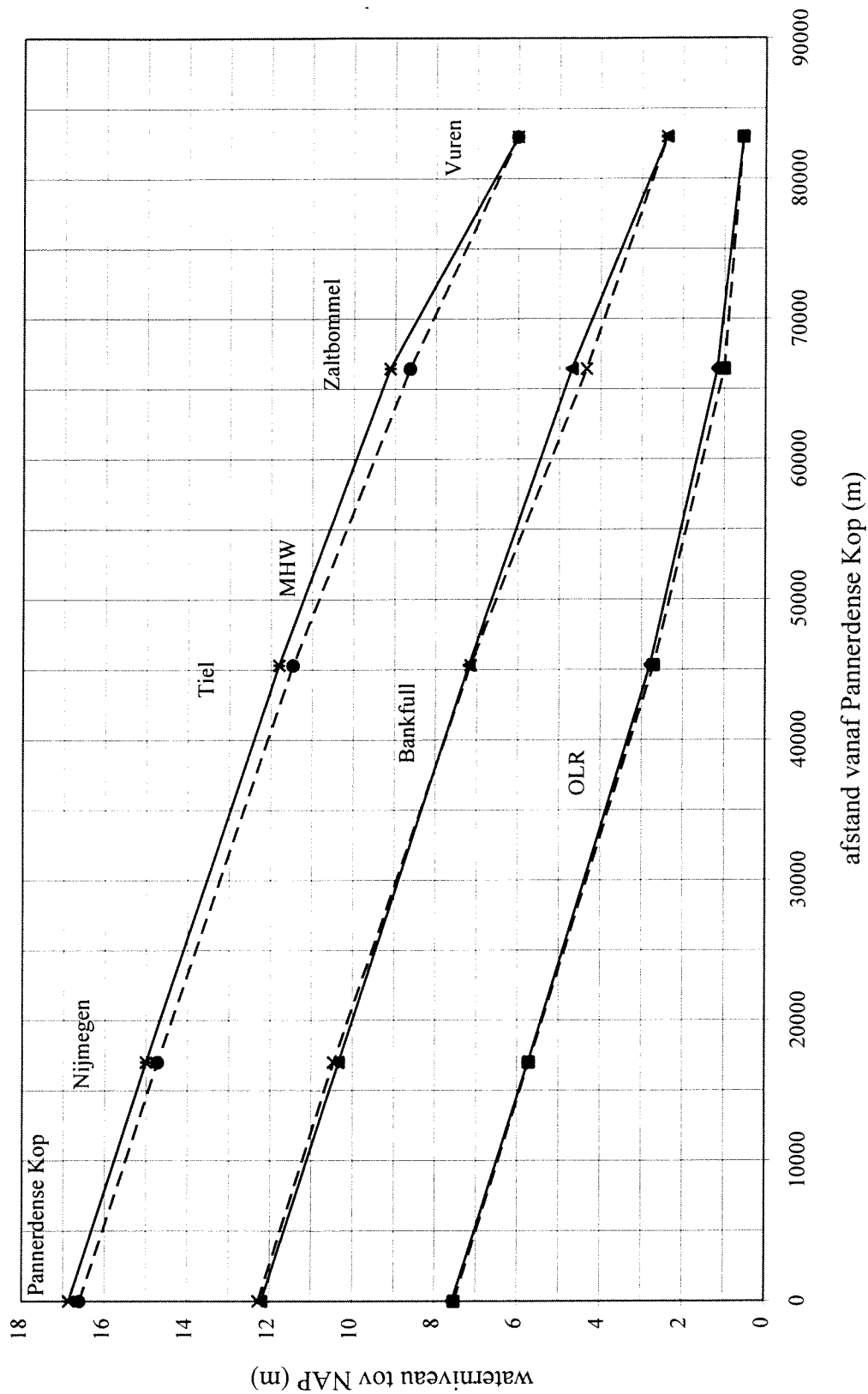
hoogte tov bodem (m)	B _{total} (m)	B _{flow} (m)
0	49	49
5	262	262
6.7	446	263
11.2	649	585
11.4	1039	1020
13.4	1491	1347

In SOBEK ingevoerd dwarsprofiel voor het Pannerdens Kanaal
(en referentie profiel uit bijlage 2-I)

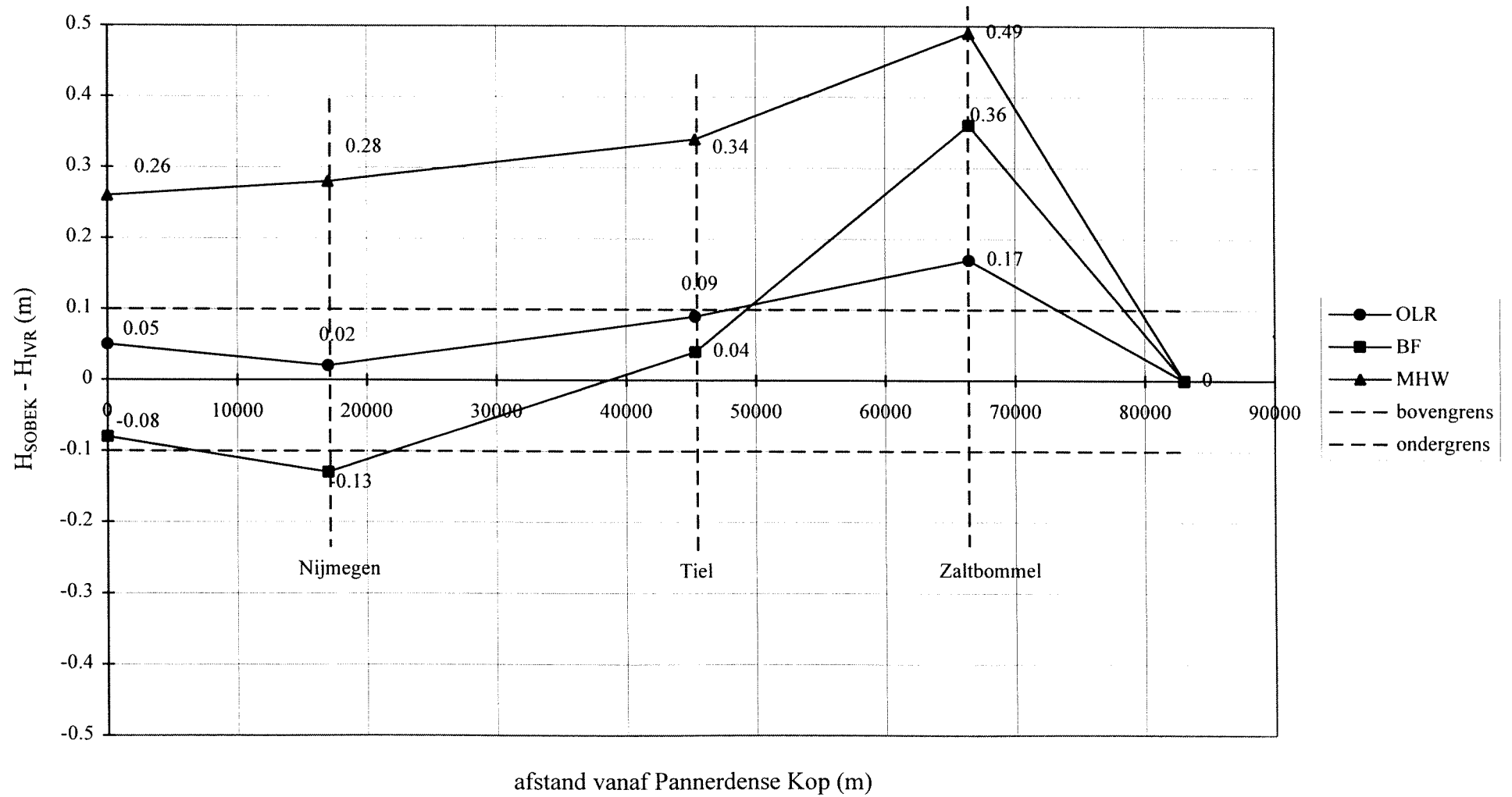


hoogte tov bodem (m)	B _{total} (m)	B _{flow} (m)
0	58	0
0.8	130	70
1.6	158	99
2.4	183	123
3.2	208	133
4	215	137
4.2	223	138
4.6	278	189
5.6	293	189
6.6	323	189
7.7	365	240
7.71	365	290
9.25	365	293
11.29	365	296
11.3	500	500
11.8	1280	1280
12.3	1330	1330
12.8	1331	1331
13.3	1332	1332

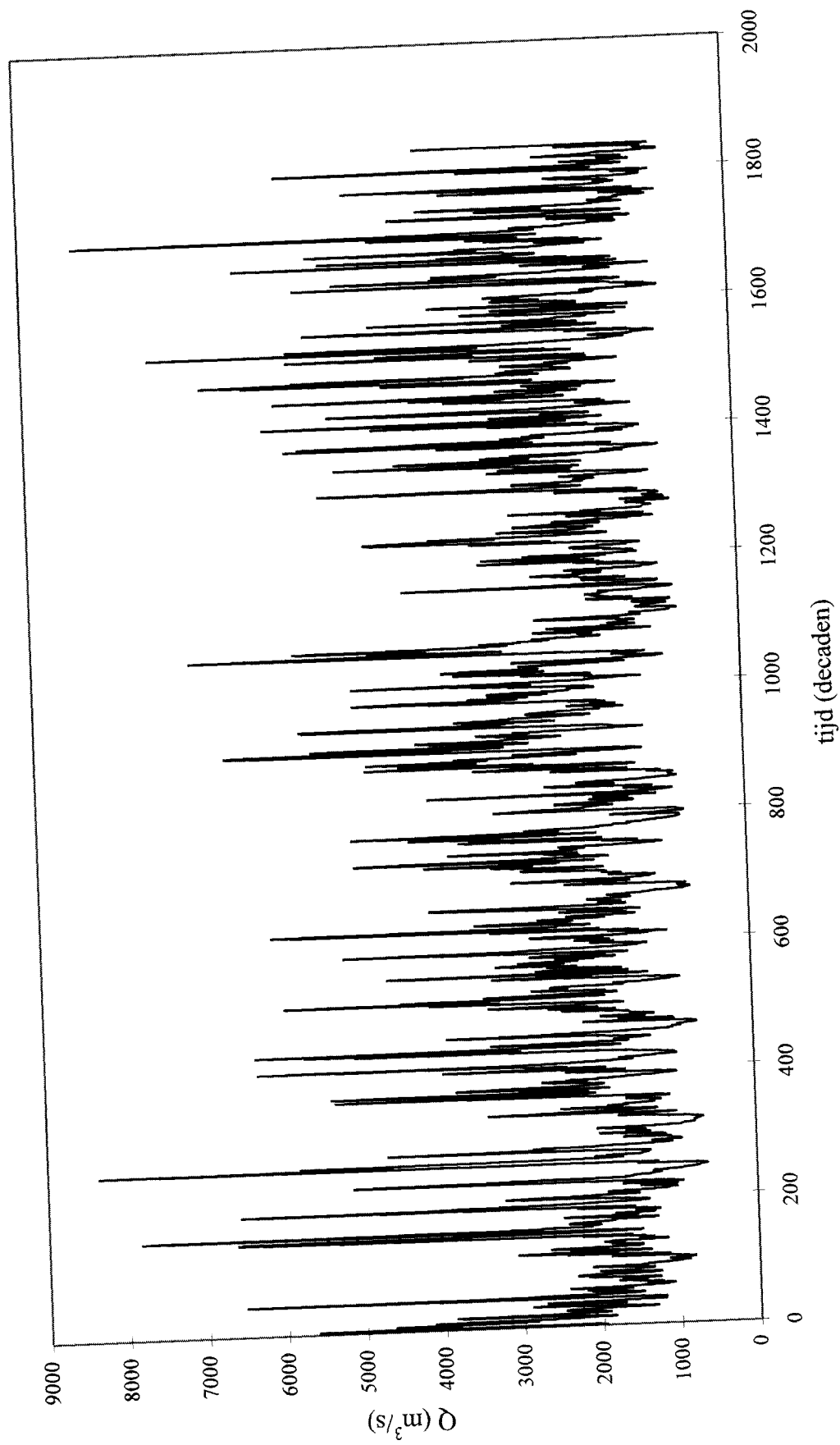
Waterniveaus op de Waal volgens SOBEK en volgens IVR-rapport



Vershil in waterniveaus tussen SOBEK en IVR

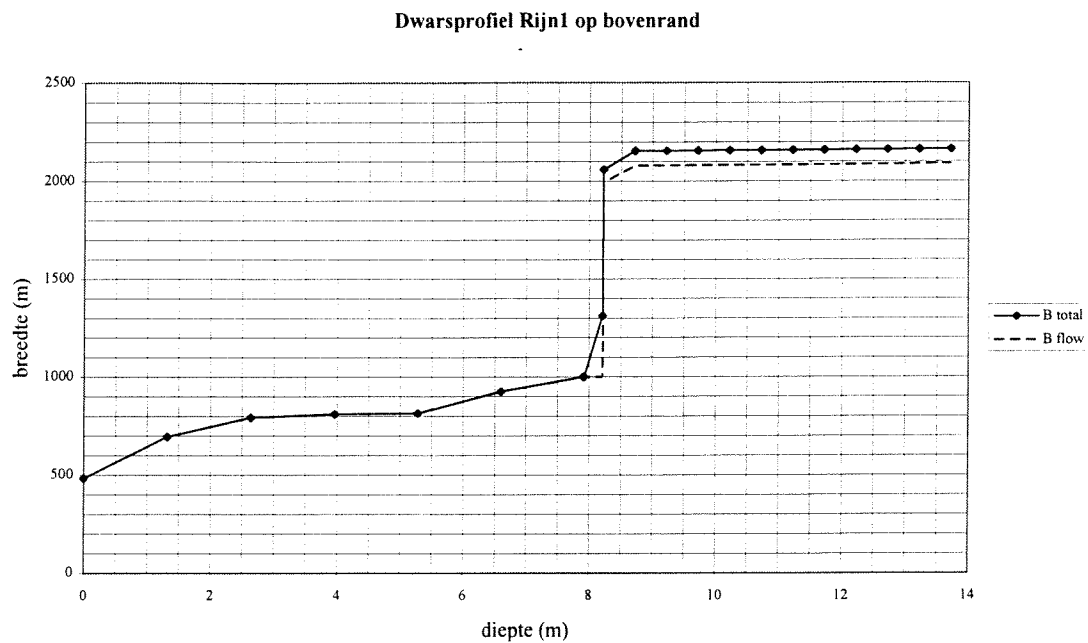


Randvoorwaarde bovenrand, $Q(t)$
decade gemiddelde afvoeren bij Lobith 1941-1991

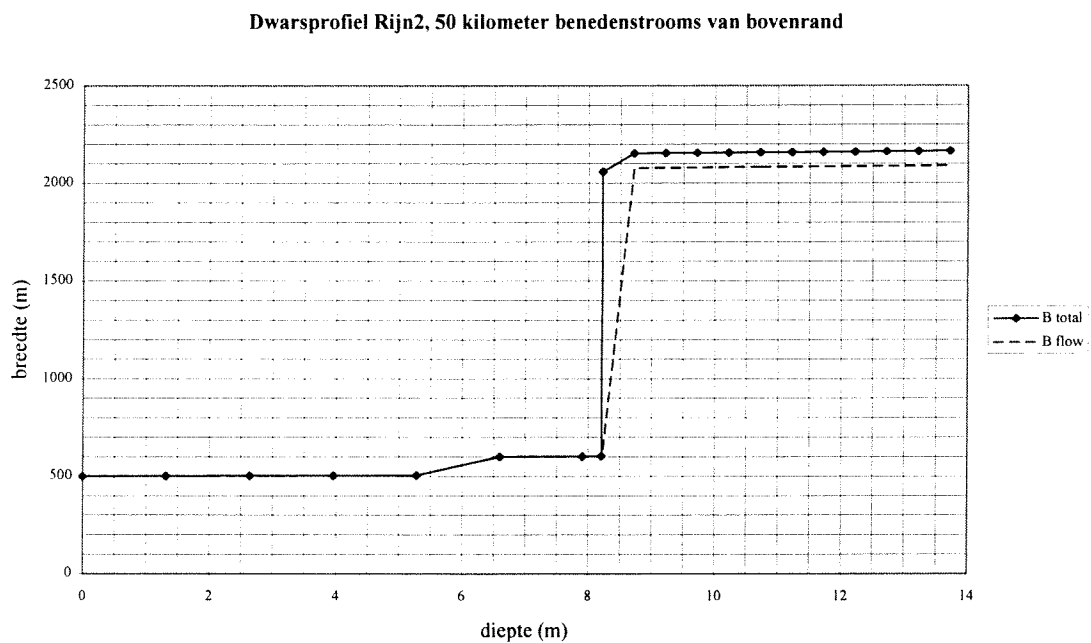


Bijlage 4-II Dwarsprofielen Rijn

Figuur a

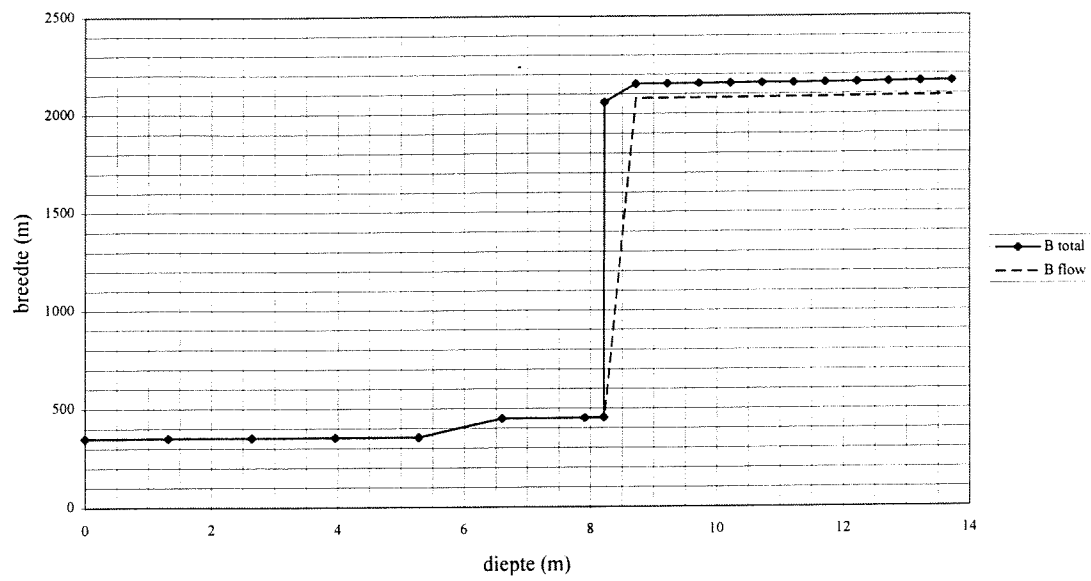


Figuur b

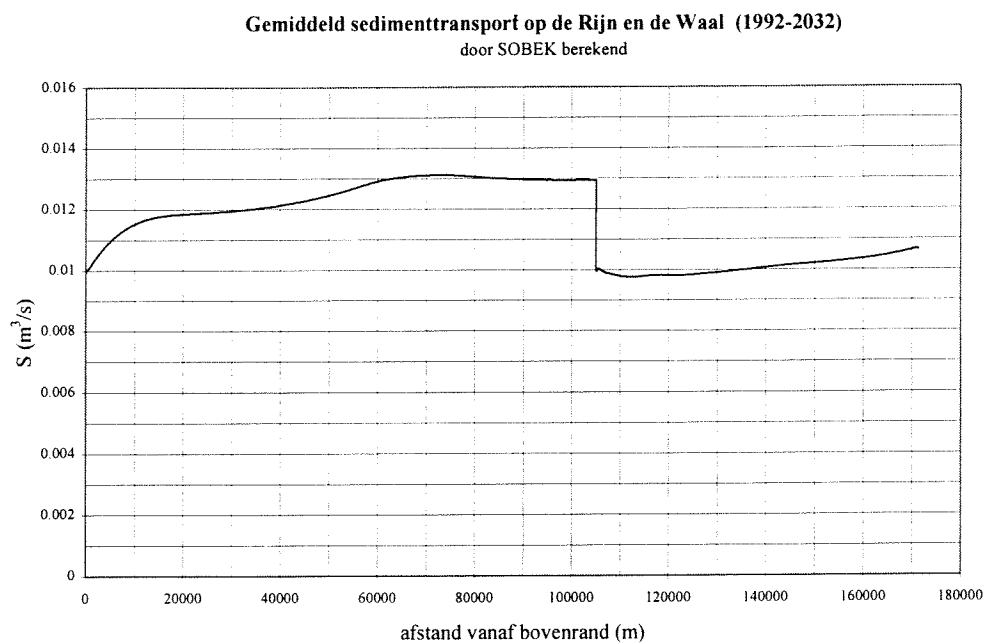


Figuur c

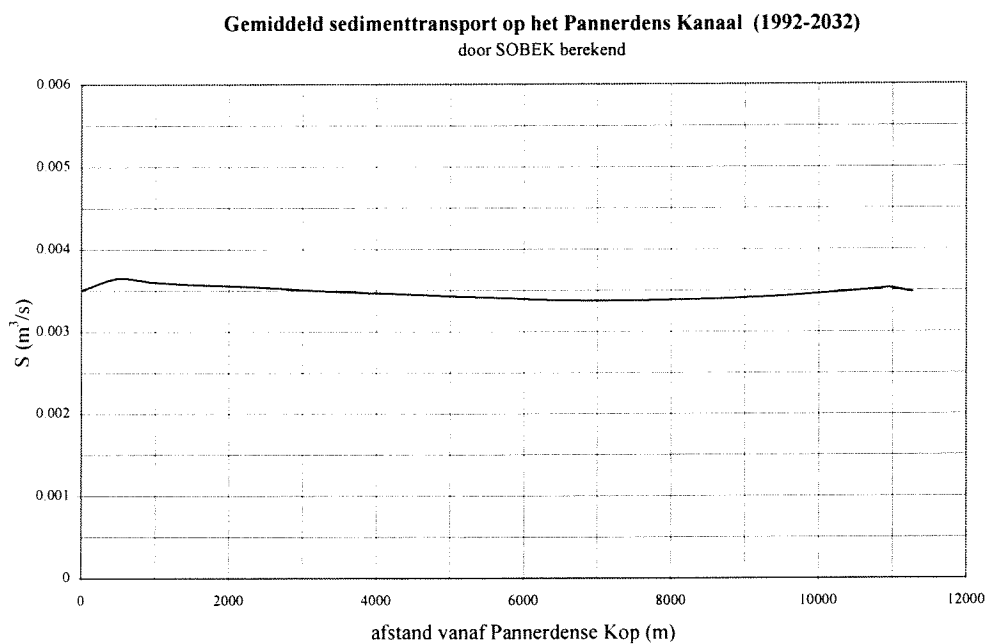
Dwarsprofiel Rijn3, 100 kilometer benedenstrooms van bovenrand



Figuur a



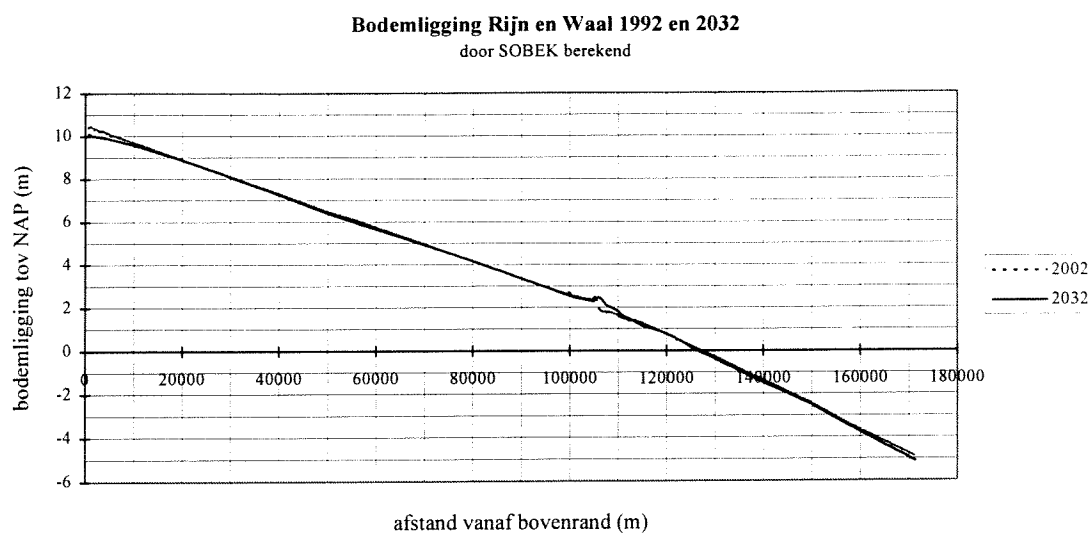
Figuur b



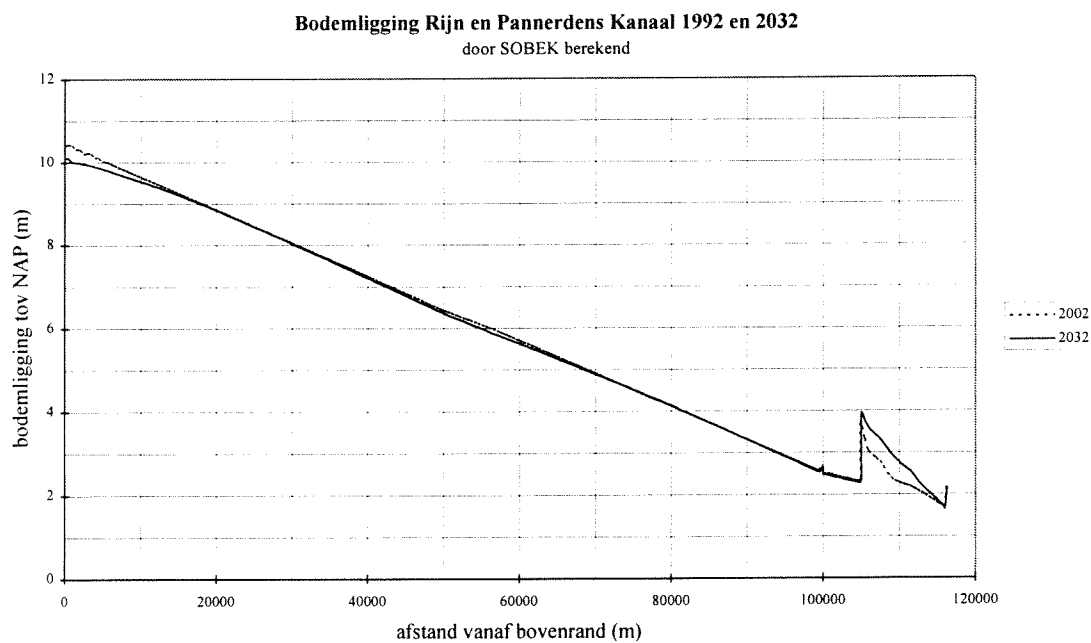
Bijlage 4-IV Bodemontwikkeling

door SOBEK berekend

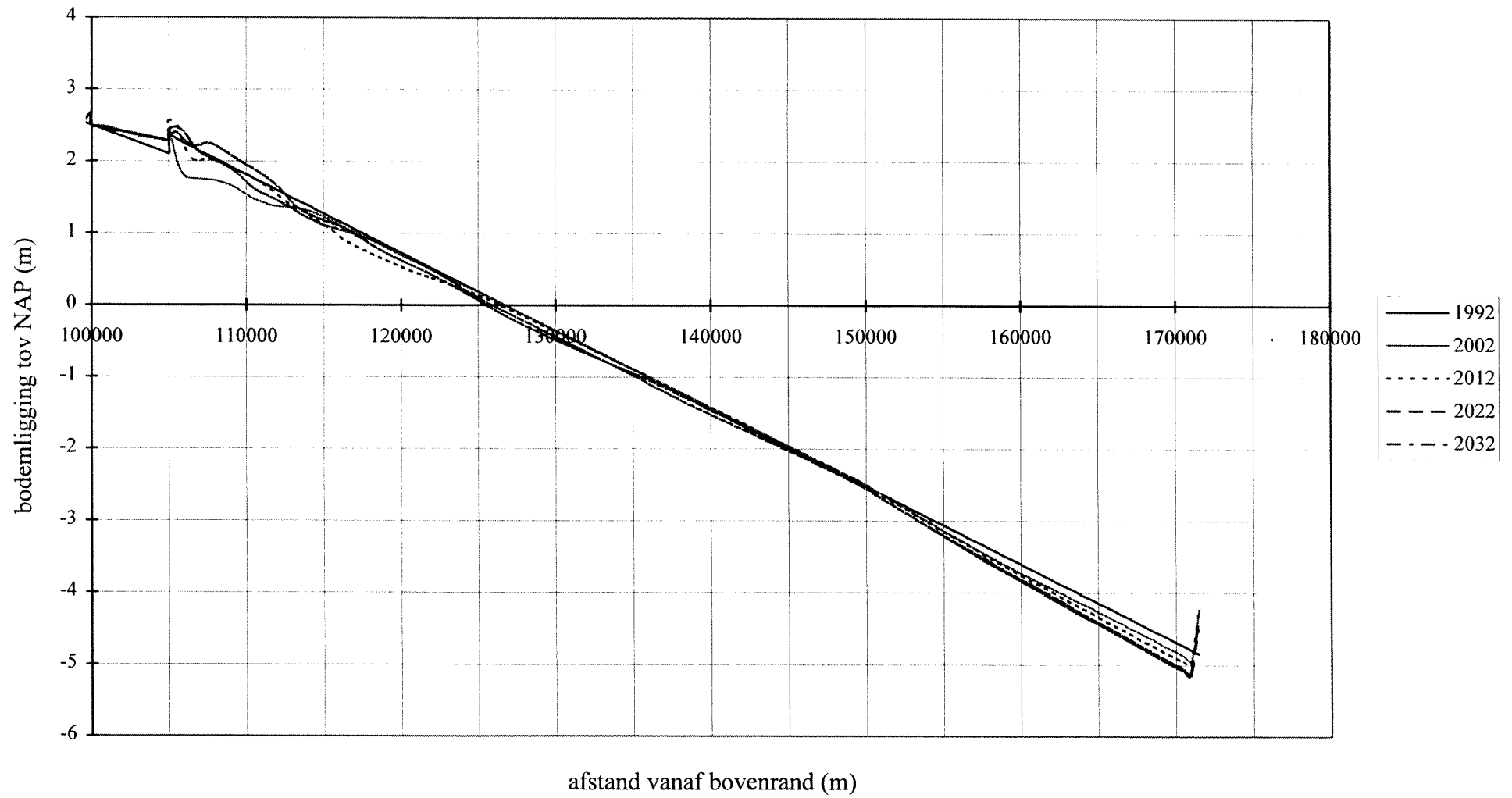
Figuur a



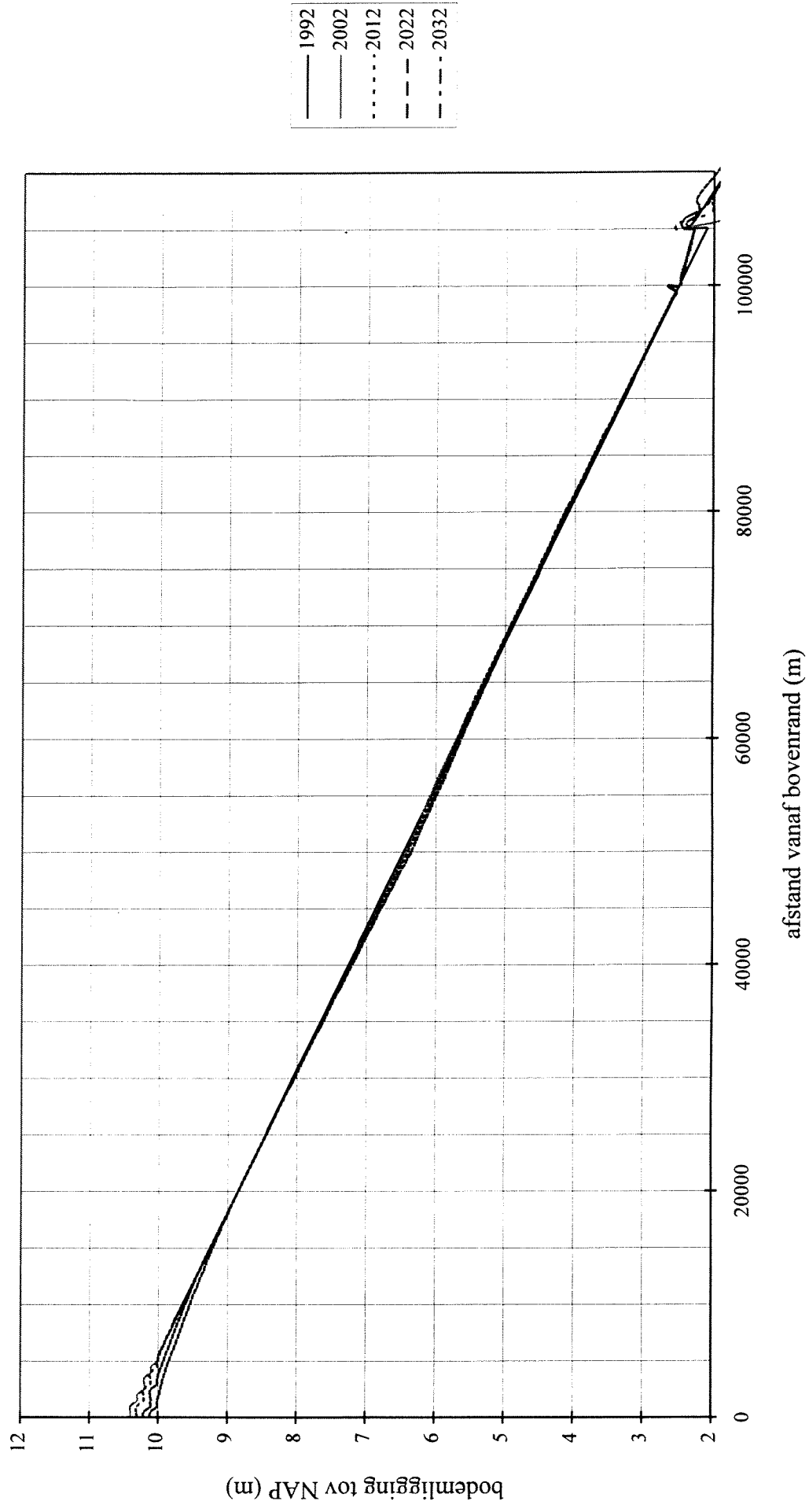
Figuur b



Bodemontwikkeling op de Waal
door SOBEK berekend



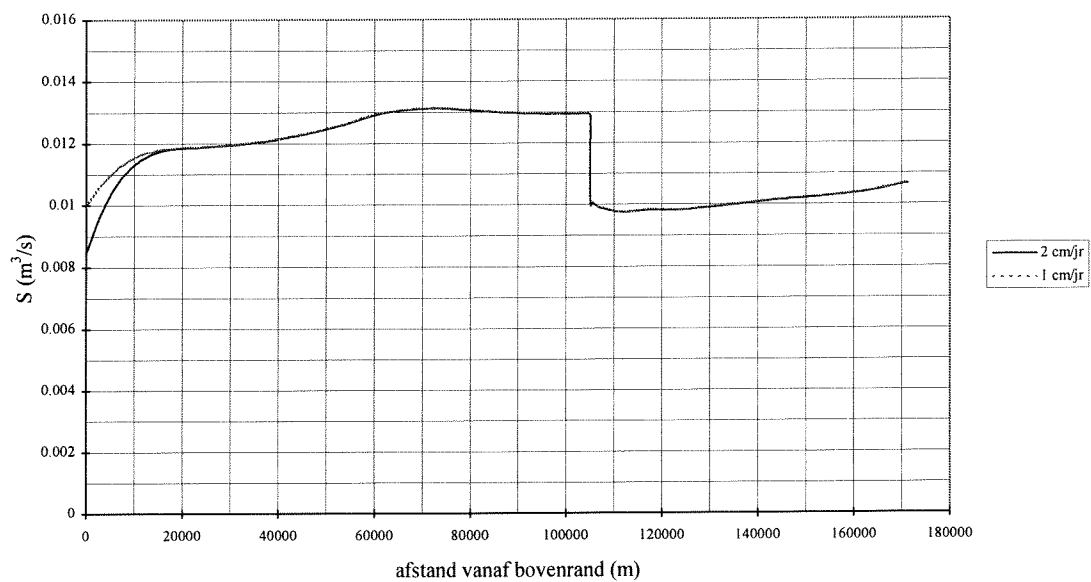
Bodemontwikkeling op de Rijn
door SOBEK berekend



Bijlage 4-V

Sedimenttransport Rijn en Waal door SOBEK berekend

Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en op de Waal (1992-2032)
bodemdaling van 2 cm/jr en 1 cm/jr op bovenstroomse rand, door SOBEK berekend





Bijlage 5-I Twee-kanalen model voor de bodemligging benedenstrooms van een rivierbocht

De volgende parameters zijn gebruikt voor de grafiek in figuur 5.5:

$$\begin{array}{lll} \bar{h} & = & 7,5 \text{ m} \\ C & = & 48,6 \text{ m}^{1/2}/\text{s} \\ B & = & 260 \text{ m} \\ \theta & = & 0,21 \quad (\text{zie lit. [17]}) \\ f_s & = & 1,5 \quad (\text{zie lit. [17]}) \\ n & = & 5 \quad (\text{Engelund-Hansen}) \end{array}$$

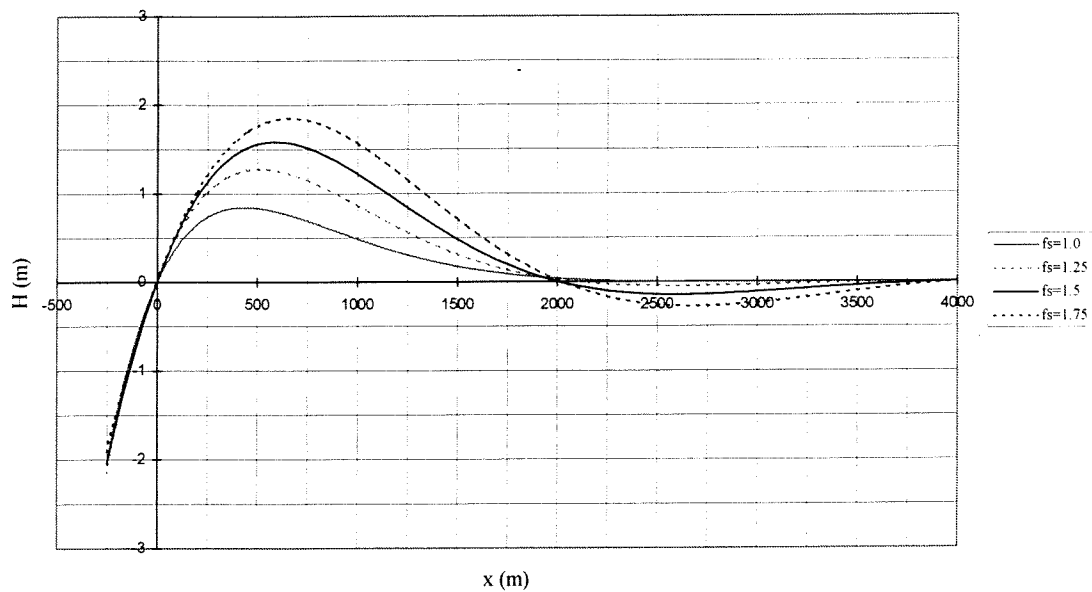
Hieruit volgt: $\lambda_w = \frac{C^2}{2g} \bar{h} = \frac{48,6^2}{2 \cdot 9,81} 7,5 = 903 \text{ m}$ en

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{B}{\bar{h}} \right)^2 f_s \theta \bar{h} = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{260}{7,5} \right)^2 1,5 \cdot 0,21 \cdot 7,5 = 288 \text{ m}$$

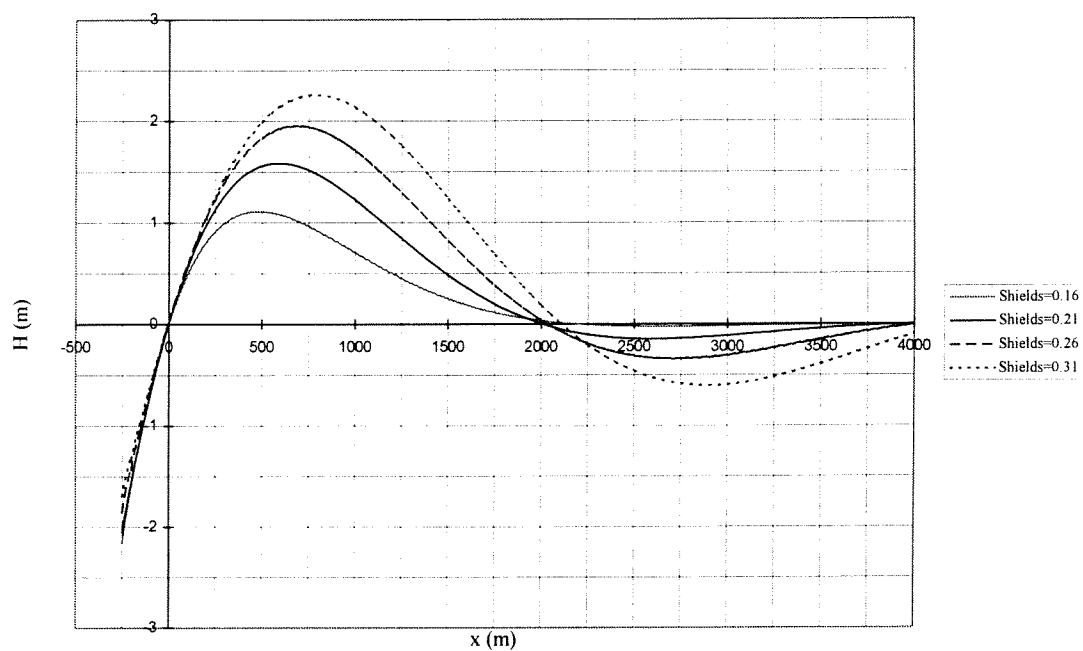
en met de vergelijkingen (5-23) en (5-24) worden de golflengte L_p en de dempingslengte L_D gevonden:

$$L_p = 4016 \text{ m} \quad \text{en} \quad L_D = 844 \text{ m}$$

Bijlage 5-II Invloed parameters op oplossing voor $H(x)$



Figuur a Oplossingen voor $H(x)$ voor verschillende waarden van f_s .



Figuur b Oplossingen voor $H(x)$ voor verschillende waarden van de Shields parameter.

Bijlage 6-I Voortplantingssnelheid over een niet-alluviale bodem

Hier volgt de uitleg, behorend bij de grafiek in figuur 6.7.

De grafiek is afgeleid voor de Waal, zoals die in SOBEK is ingevoerd en met een bedvormende afvoer van $Q_{\text{Lobith}} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Voor de voortplantingssnelheid over de niet-alluviale bodem wordt vergelijking (6-28) gebruikt:

$$c_{\text{vl}} \approx c \sin\left(\frac{\pi \delta_{\text{vl}}}{2 \delta}\right) + \frac{\pi s}{2 \delta} \cos\left(\frac{\pi \delta_{\text{vl}}}{2 \delta}\right)$$

en voor de voortplantingssnelheid over de alluviale bodem vergelijking (6-21):

$$c = \frac{B_{\text{sed}} Q}{A_{\text{flow}}^2} \frac{1}{(1 - Fr^2)} \frac{ds}{du}$$

Bij een afvoer op de Rijn van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ horen de volgende parameters:

afvoer op de Waal:	$Q_{\text{Waal}} =$	$1632 \text{ m}^3/\text{s}$
stroomvoerend oppervlak:	$A_{\text{flow}} =$	1400 m^2
gemiddelde diepte:	$\bar{h} =$	$7,55 \text{ m}$
sedimenttransporterende breedte:	$B_{\text{sed}} =$	245 m
Chezy-waarde:	$C =$	$48,6 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
Froude-getal:	$Fr =$	$0,14$

Voor het sedimenttransport geldt de machtswet:

$$s = \mu u^n \quad \text{en dus:} \quad ds/du = n \cdot \mu u^{n-1} \quad (\text{lit. [8]})$$

Wanneer de transportformule van Engelund-Hansen wordt gebruikt, geldt voor m en n:

$$m = \frac{0,05}{(1 - \epsilon) \sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} \quad \text{en} \quad n = 5$$

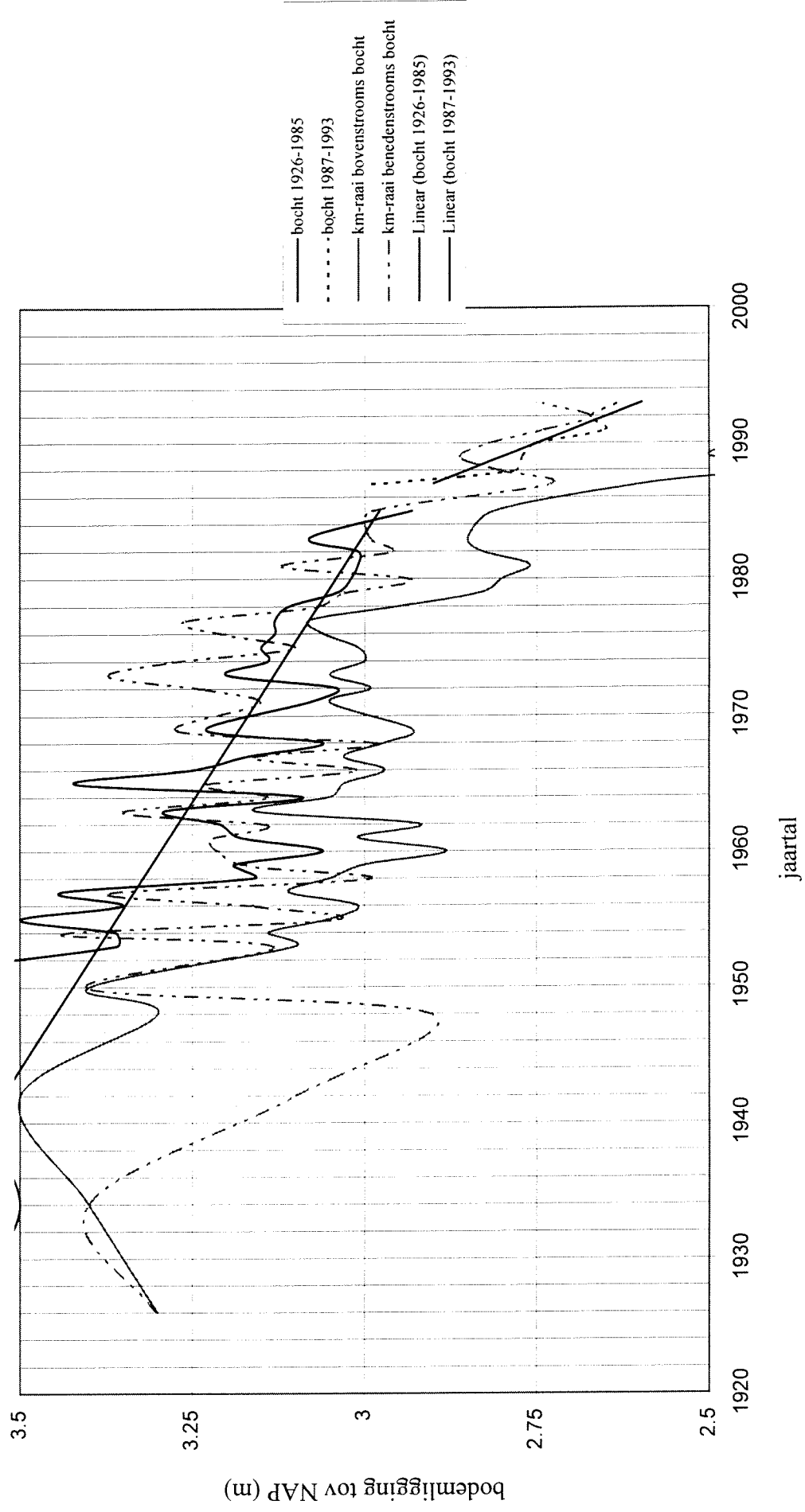
Met $\epsilon = 0,4$, $\Delta = 1,65$ en $D_{50} = 0,0015 \text{ m}$ geeft dit $m = 5,68 \cdot 10^{-5}$

$$\text{En dus:} \quad \frac{ds}{du} = n \cdot m \left(\frac{Q}{A_{\text{flow}}} \right)^{n-1} = 5,24 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Hieruit volgt:} \quad c = \frac{245 \cdot 1632}{1400^2} \frac{1}{1 - 0,14^2} \cdot 5,24 \cdot 10^{-4} = 1,09 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

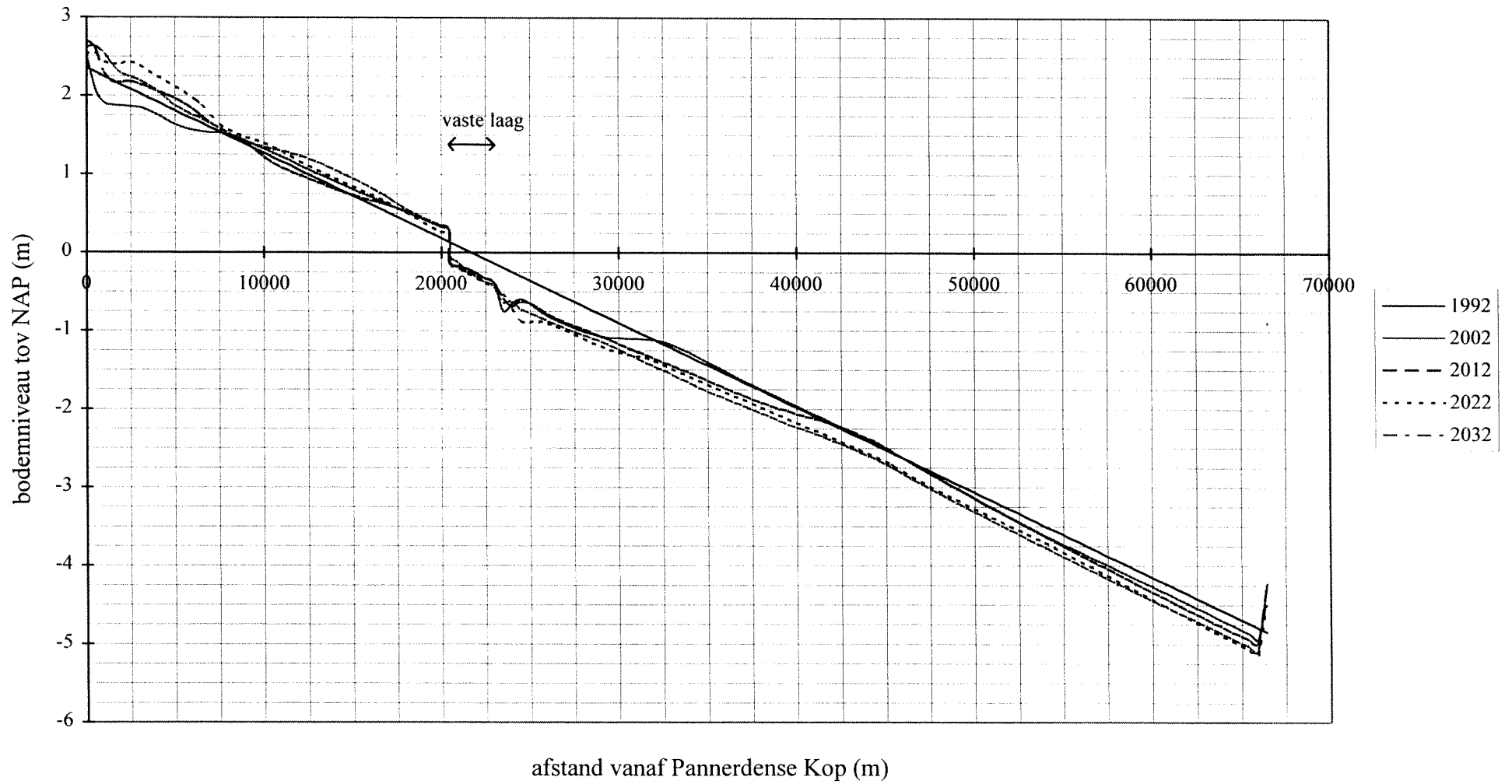
Het gemiddelde sedimenttransport s op de Waal, dat door SOBEK wordt berekend, is $4,30 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Wanneer de dikte van de transportlaag (δ) bekend is, kan de voortplantingssnelheid over de niet-alluviale bodem worden berekend. Voor de grafiek in figuur 6.7 is voor δ 0,75 meter genomen (α in vgl (6-16) is ca 0,1).

bodemligging in en nabij de bocht 1926-1985 en 1987-1993



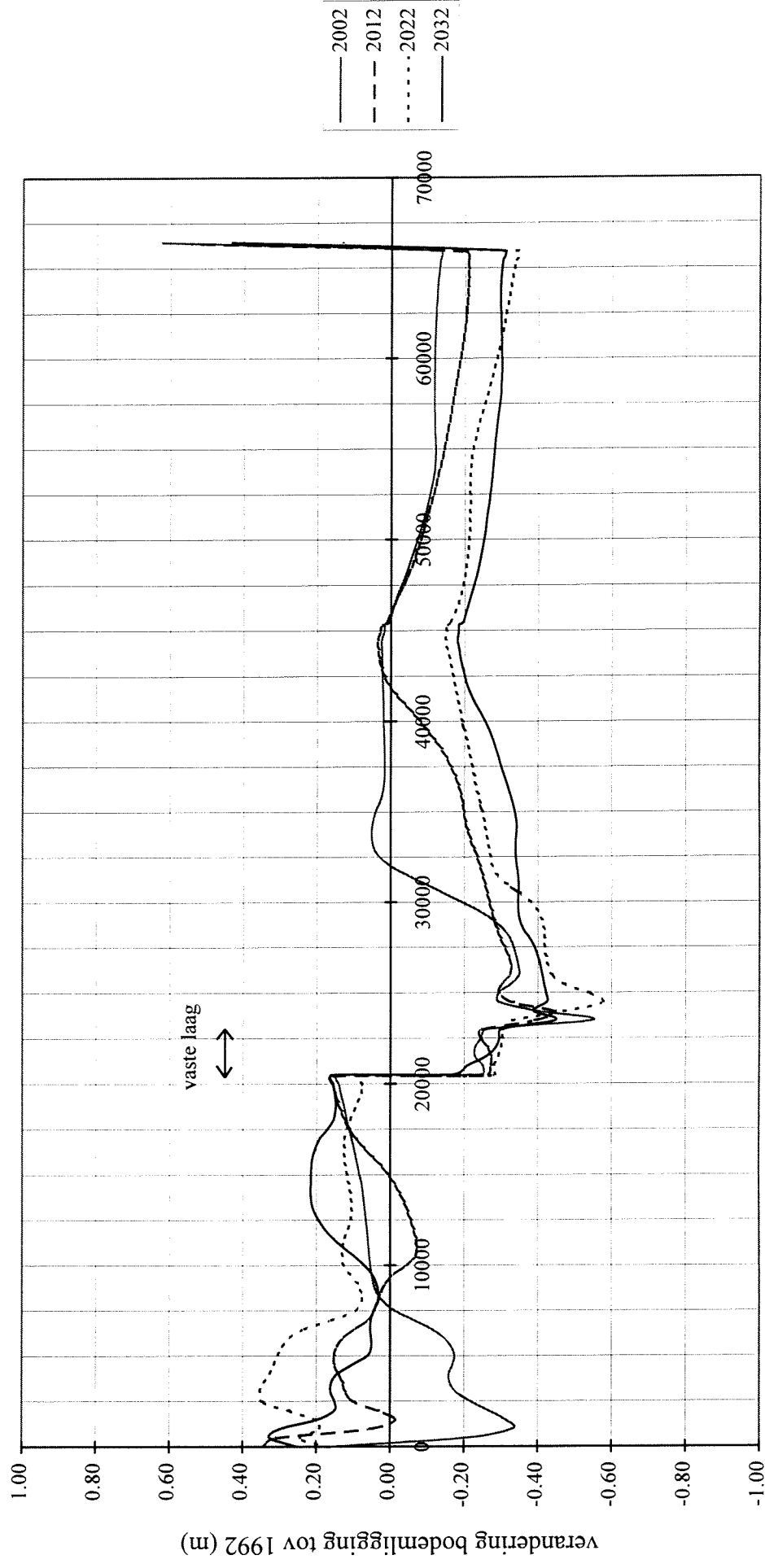
Bodemontwikkeling Waal met vaste laag

SOBEK, variabele afvoer



Verandering bodemligging Waal met vaste laag

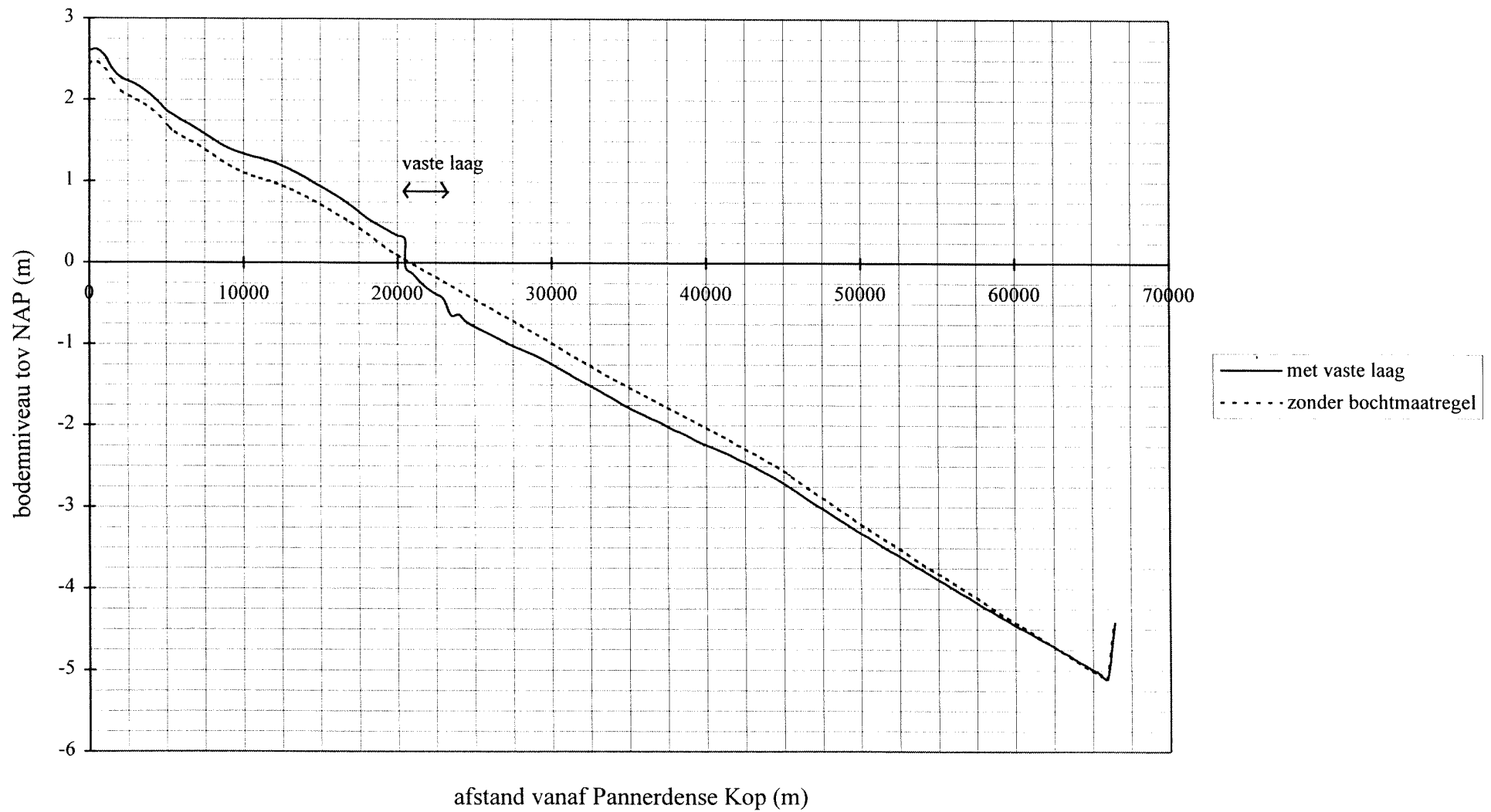
SOBEK, variabele afvoer



afstand vanaf Panhardse Kop (m)

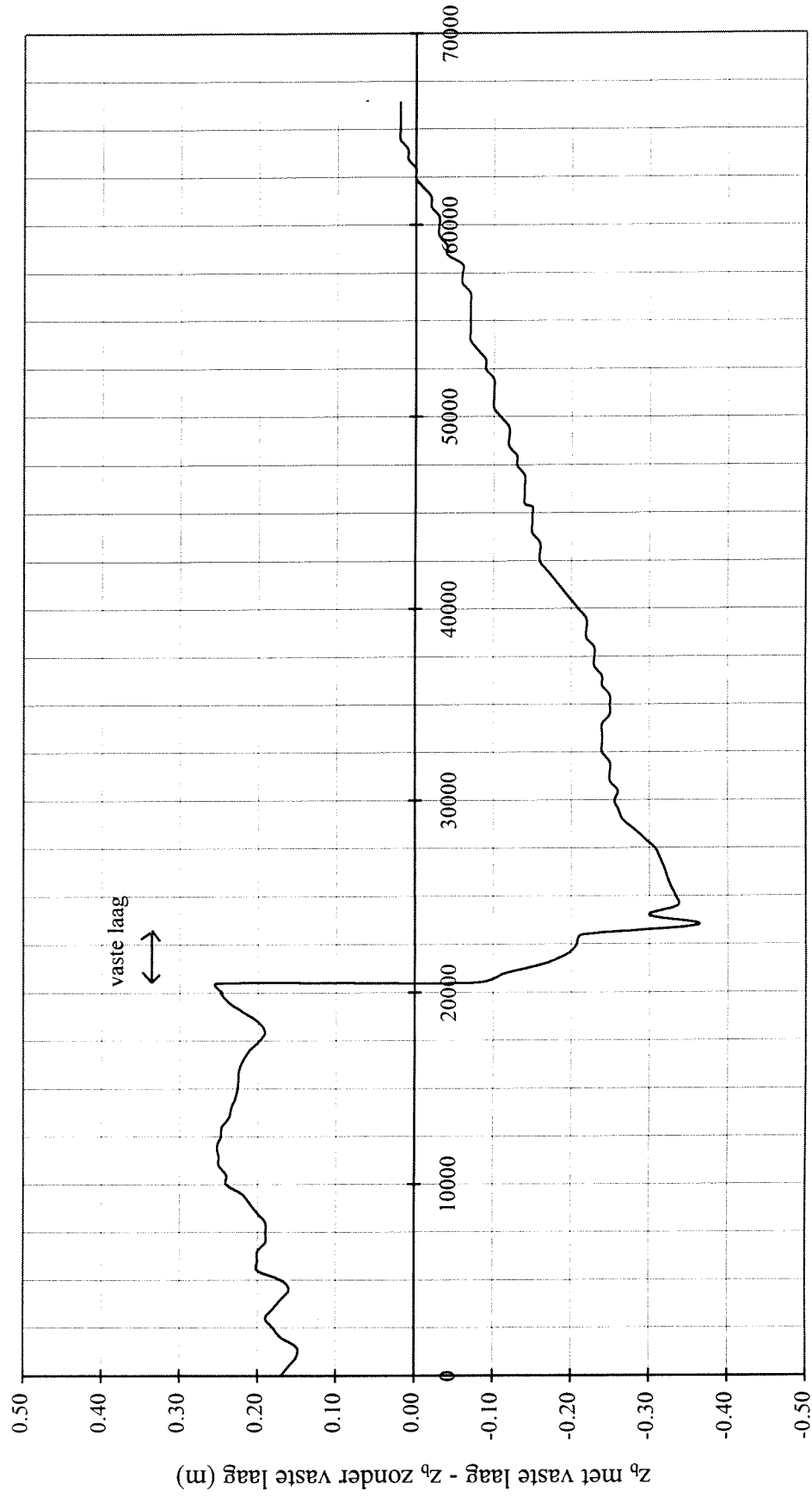
Bodemligging Waal na 40 jaar

SOBEK, variabele afvoer



Vershil in bodemligging Waal met en zonder vaste laag na 40 jaar

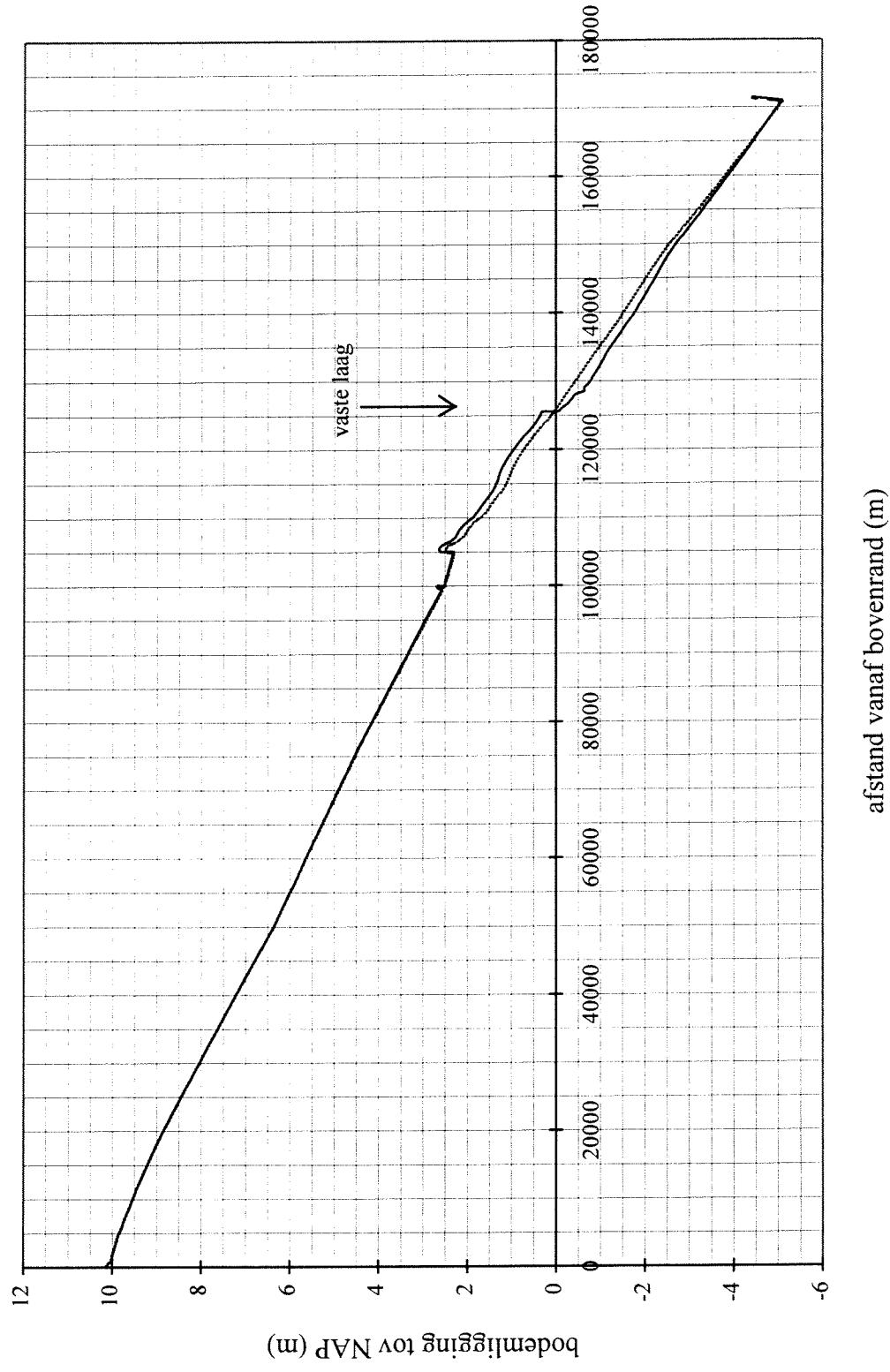
SOBEK, variabele afvoer



afstand vanaf Pannerdense Kop (m)

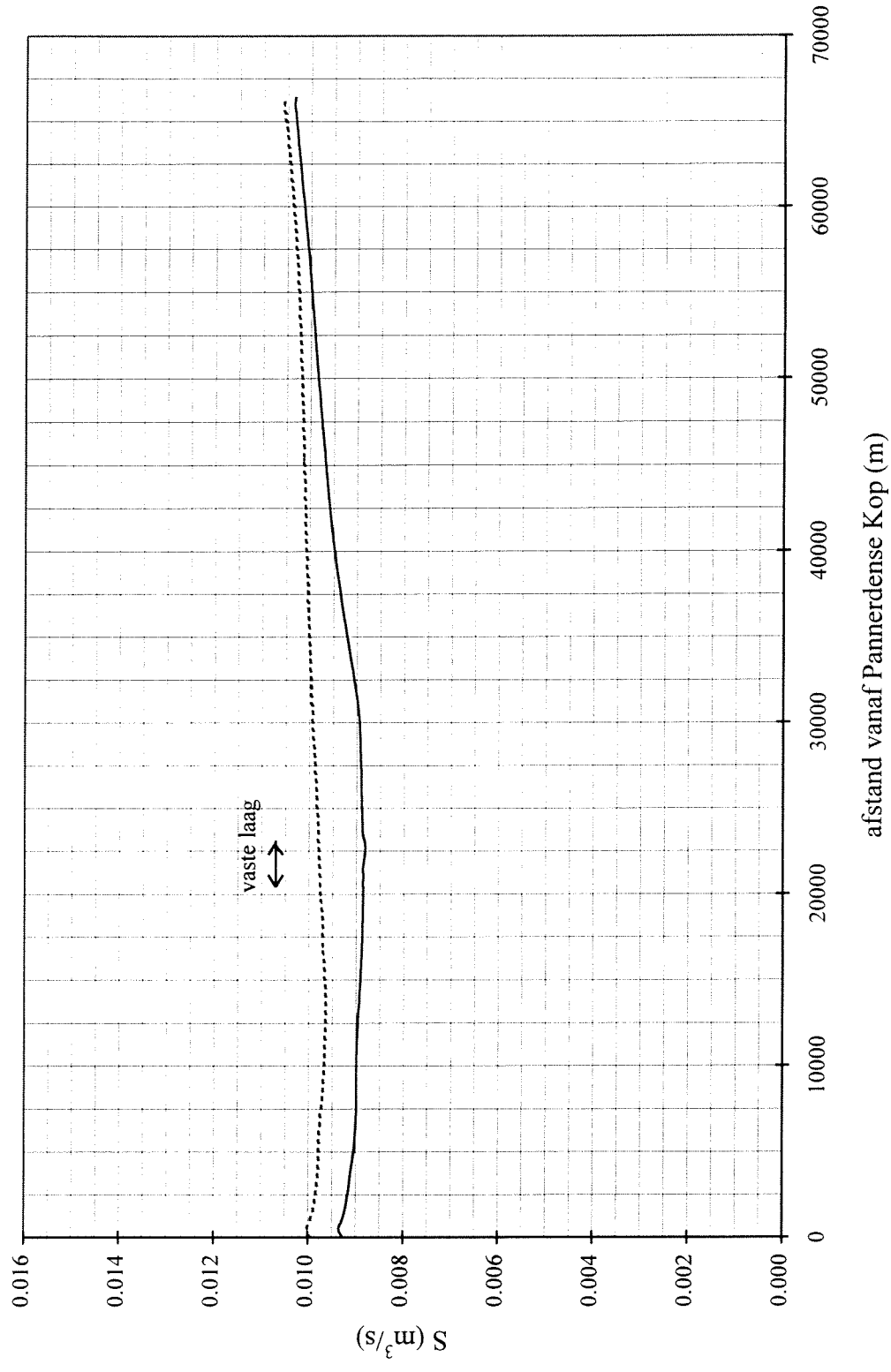
Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

SOBEK, variabele afvoer



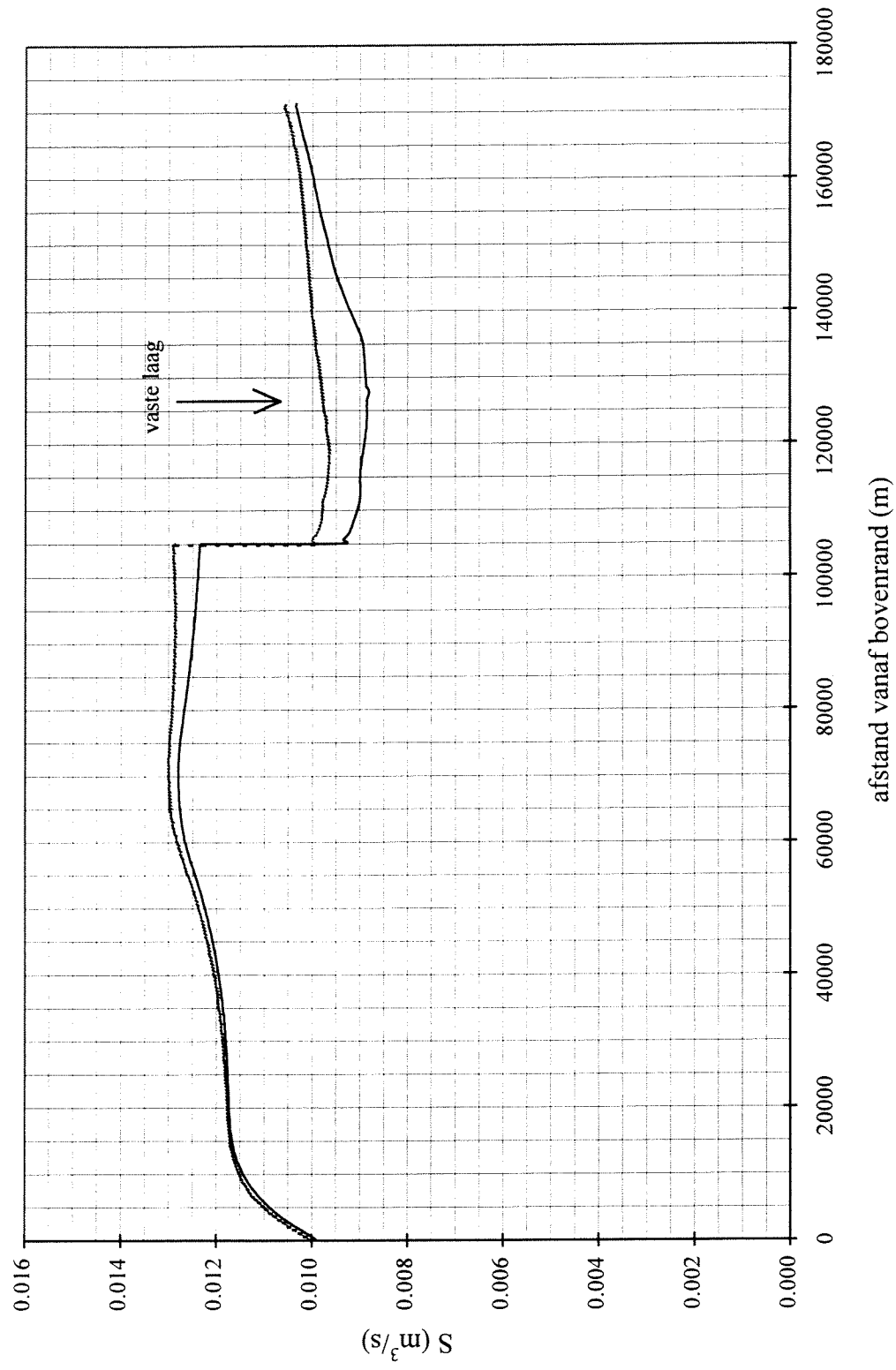
Gemiddeld sedimenttransport op de Waal, 2002-2032

SOBEK, variabele afvoer



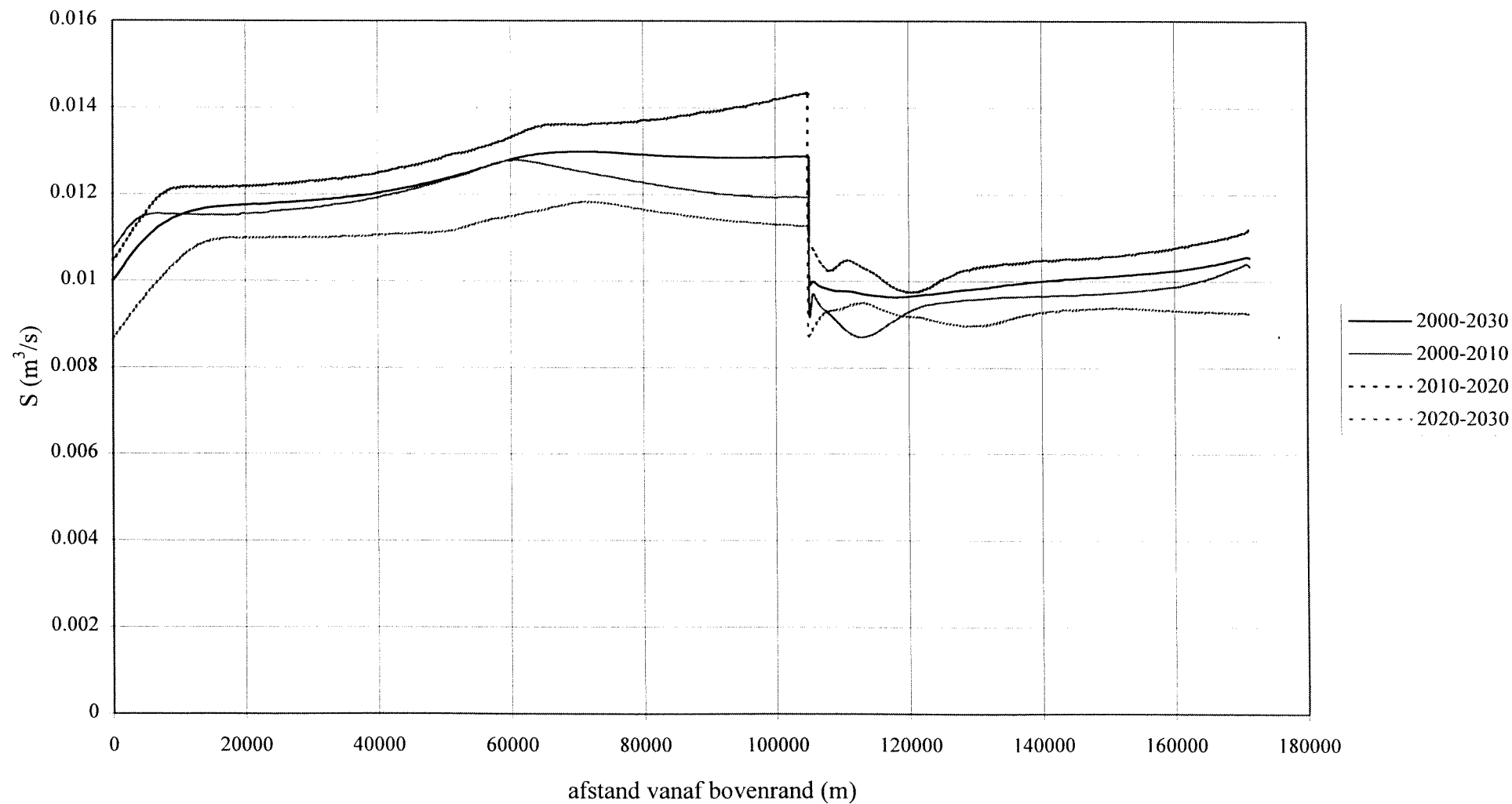
Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002-2032

door SOBEK berekend, variabele afvoer



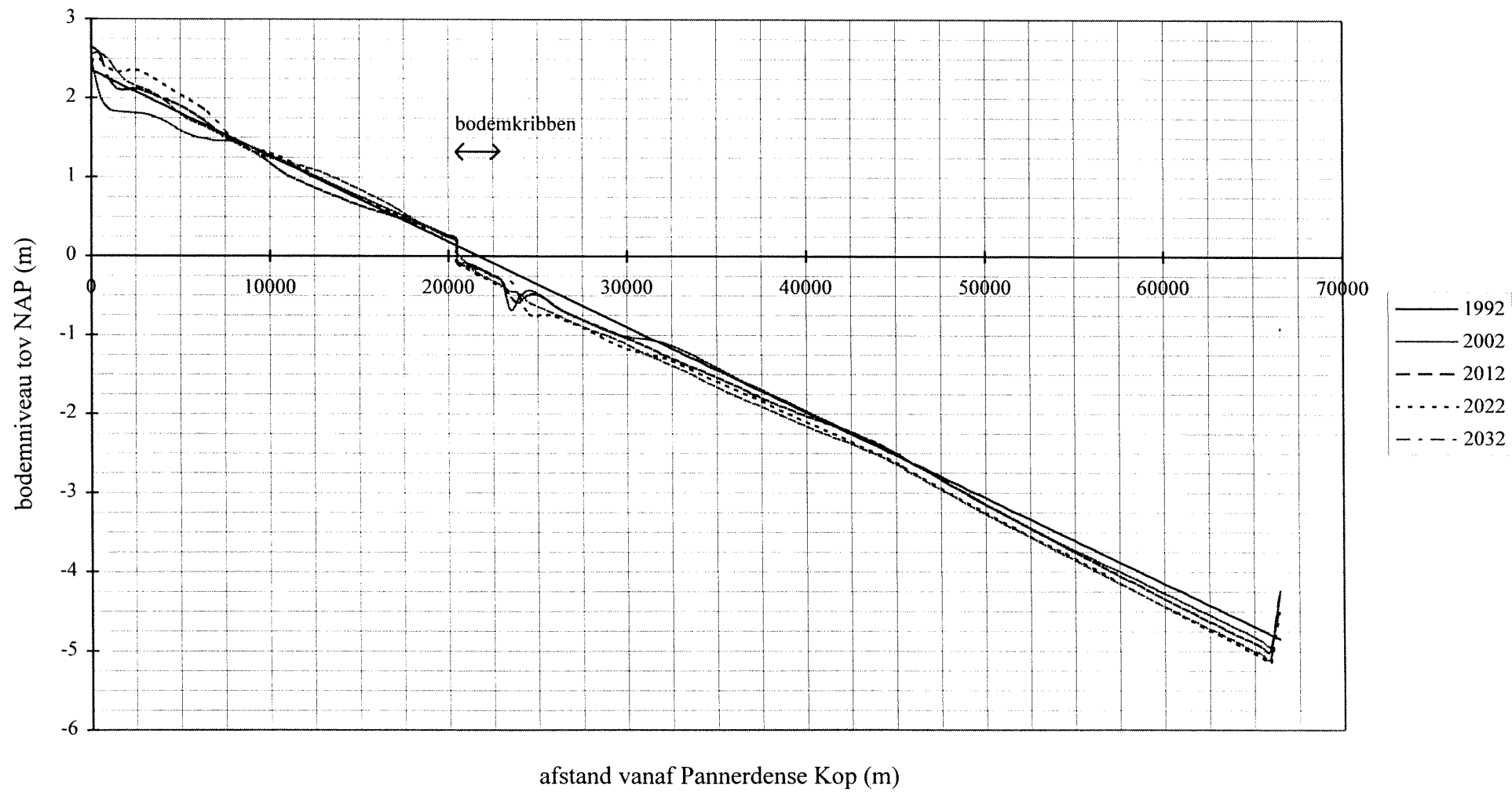
Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal per decennium

SOBEK, geen bochtmaatregelen



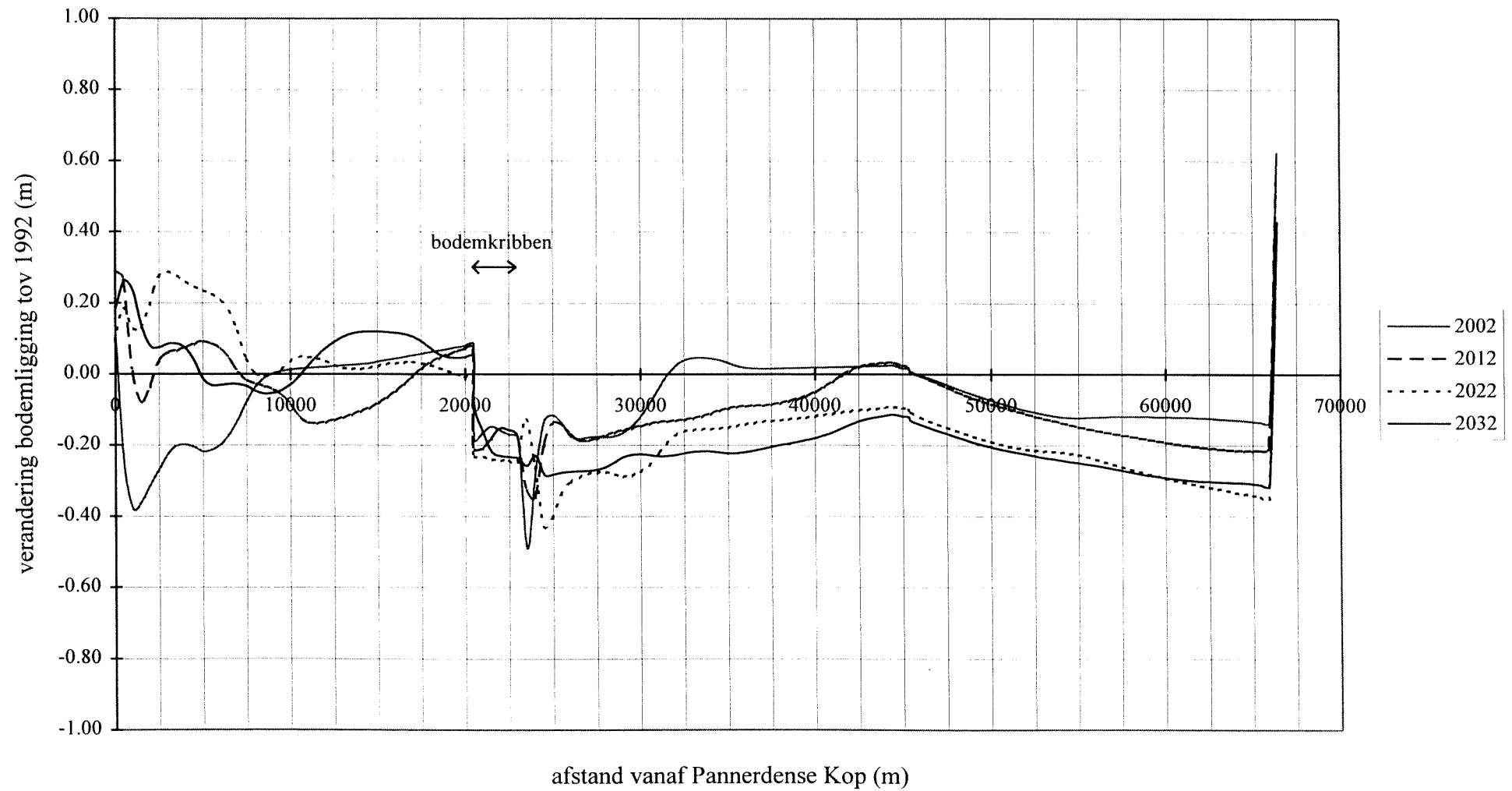
Bodemontwikkeling Waal met bodemkribben

SOBEK, variabele afvoer



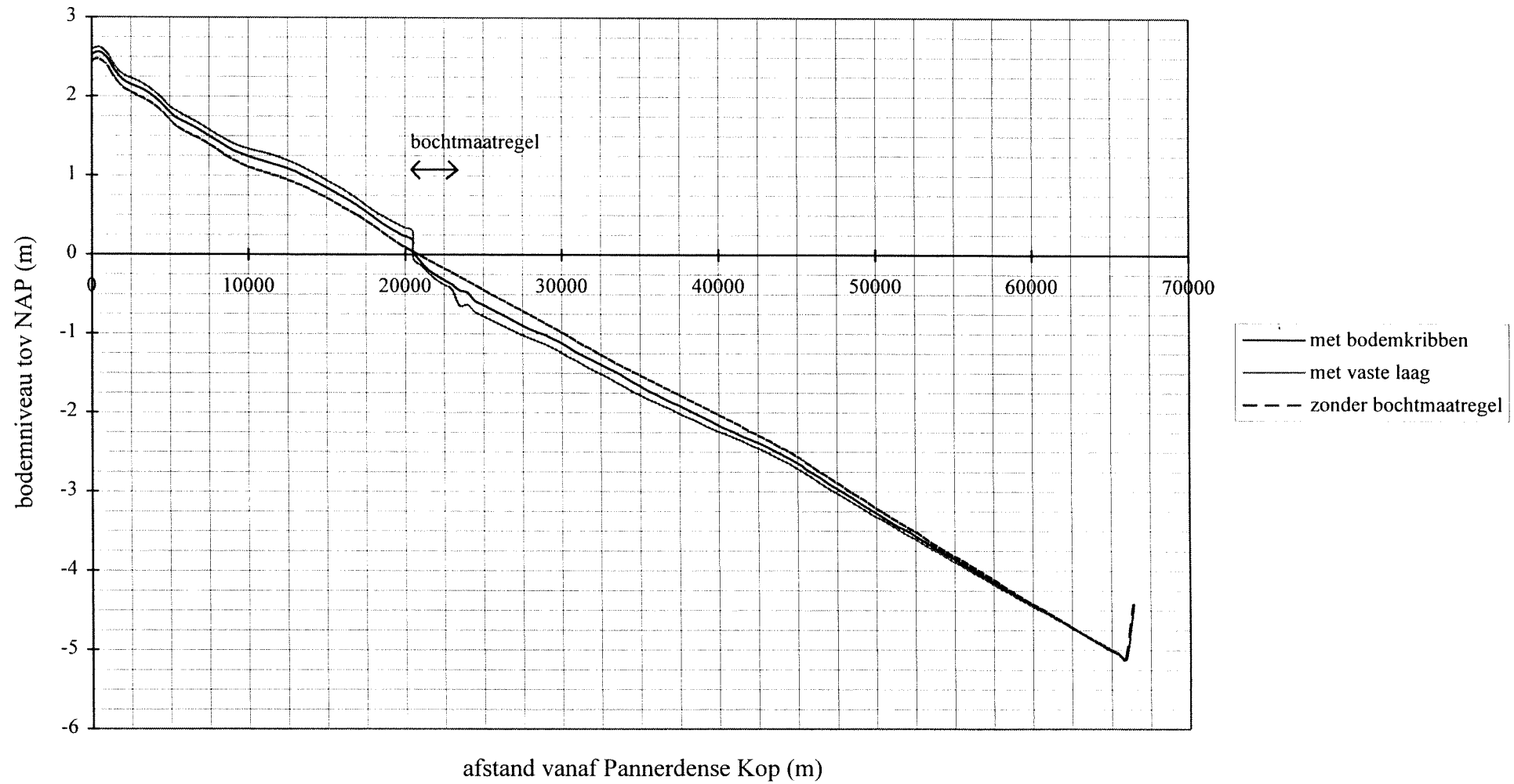
Verandering bodemligging Waal met bodemkribben

SOBEK, variabele afvoer



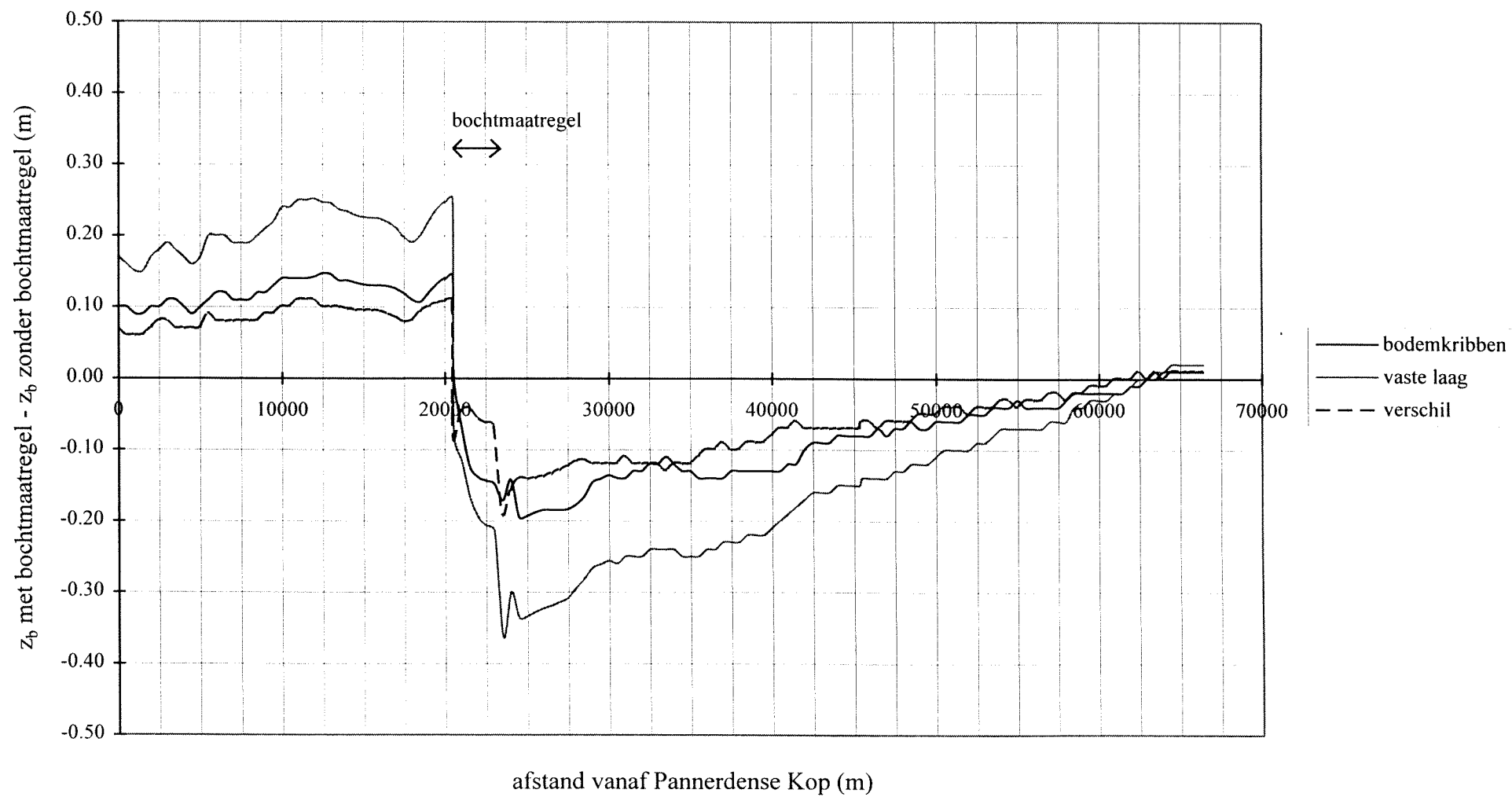
Bodemligging Waal na 40 jaar

SOBEK, variabele afvoer



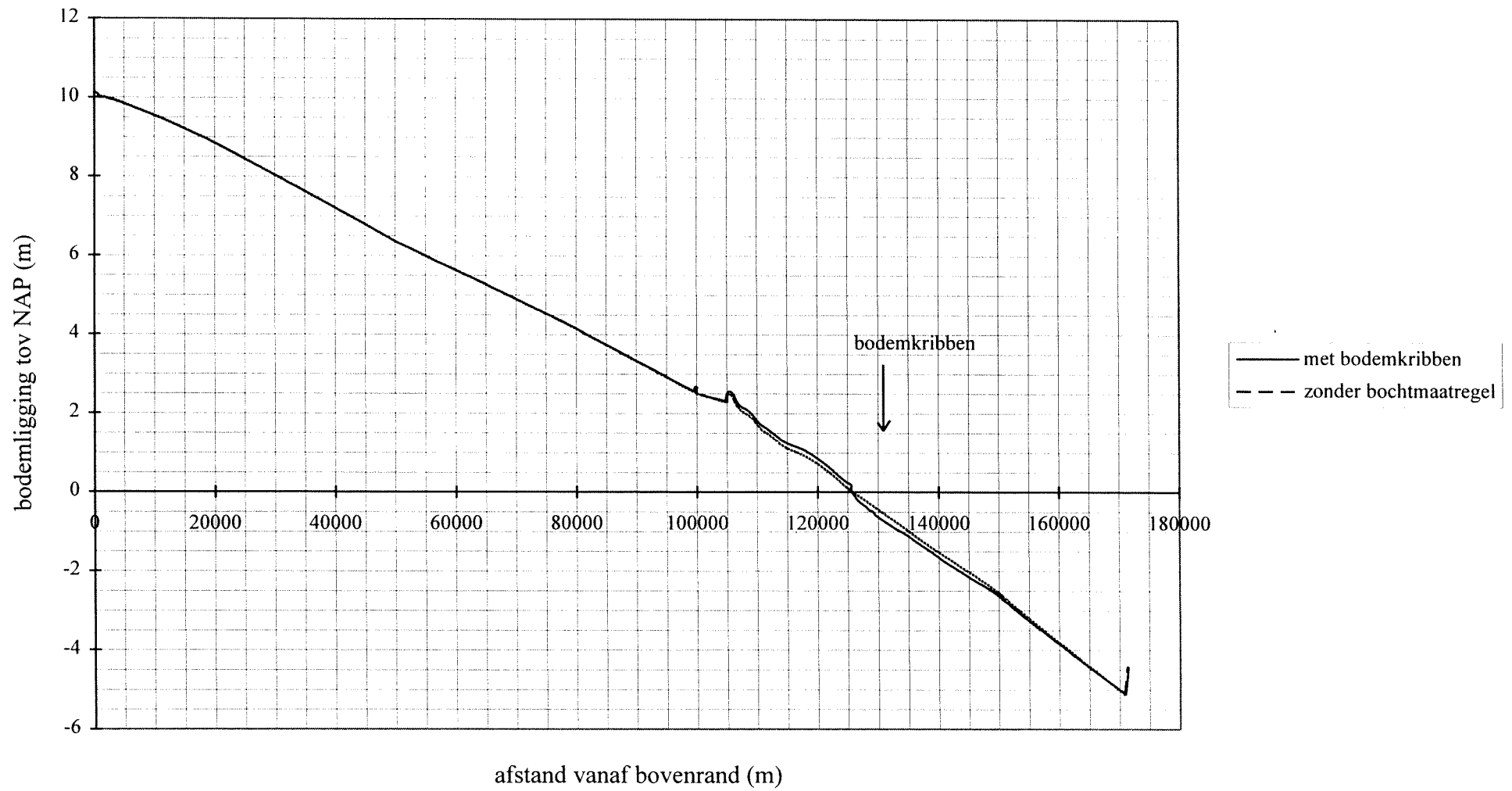
Vershil in bodemligging Waal met en zonder bochtmaatregel na 40 jaar

SOBEK, variabele afvoer



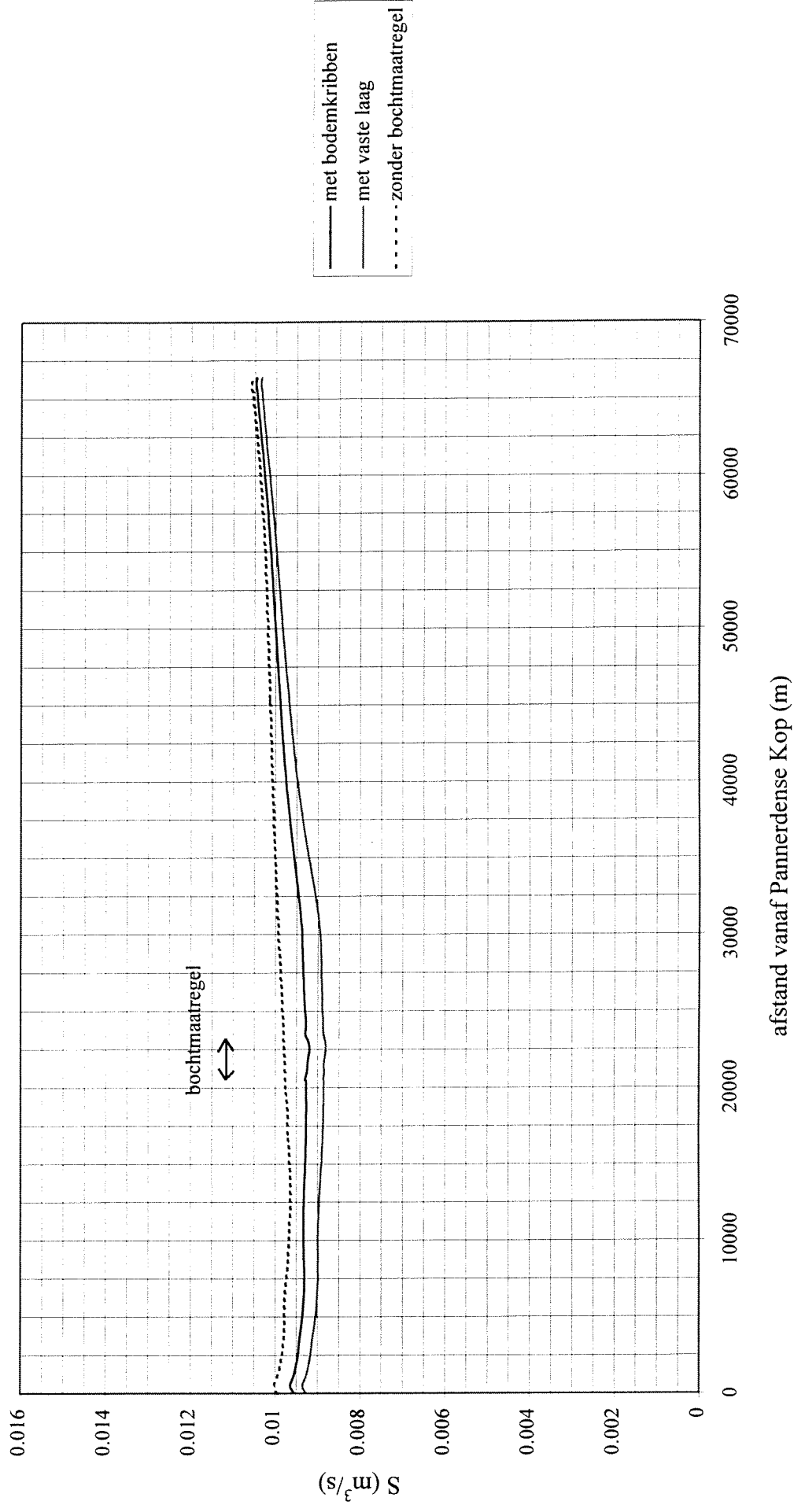
Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

SOBEK, variabele afvoer



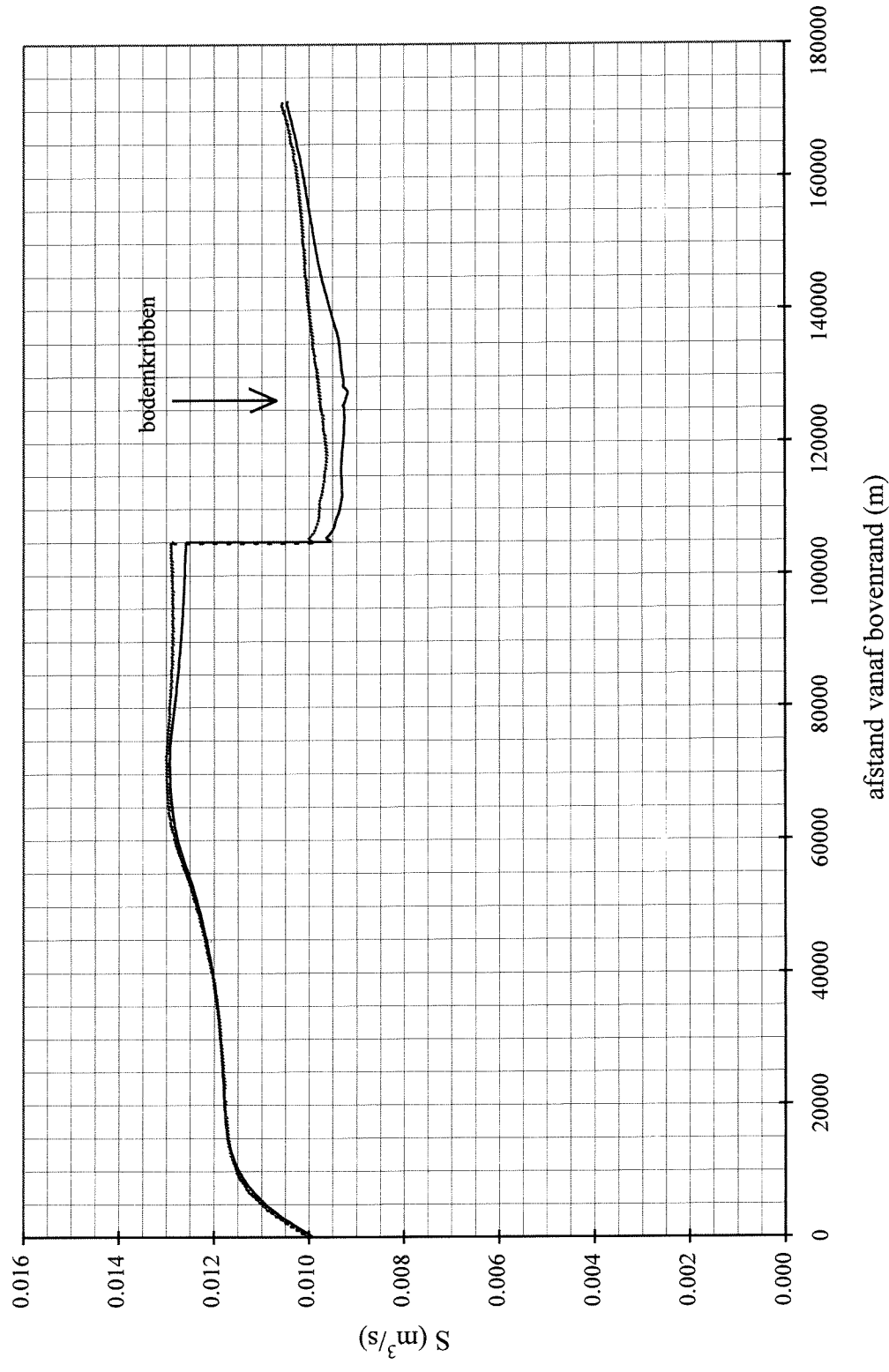
Gemiddeld sedimenttransport op de Waal, 2002-2032

SOBEK, variabele afvoer



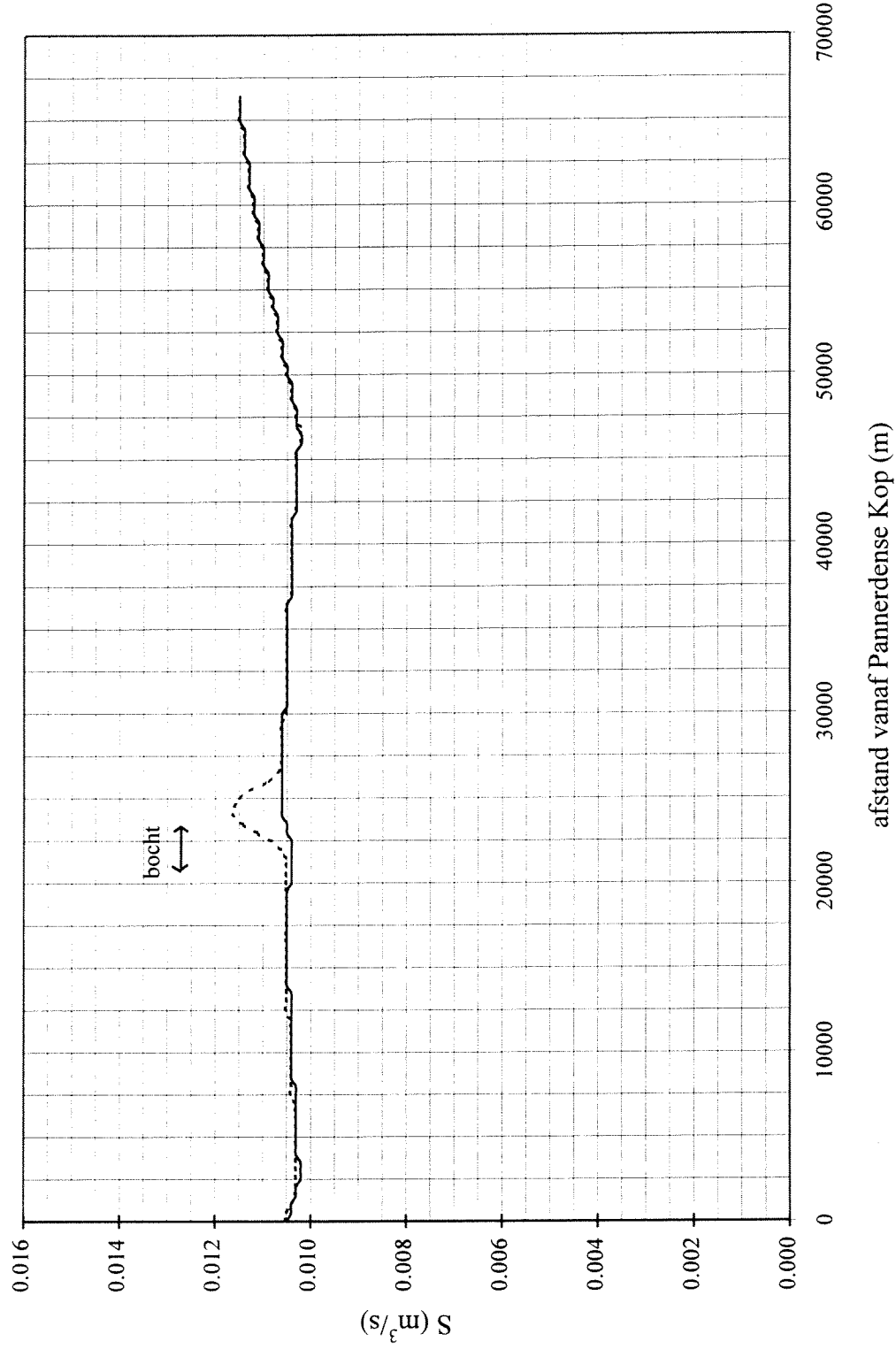
Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002-2032

SOBEK, variabele afvoer



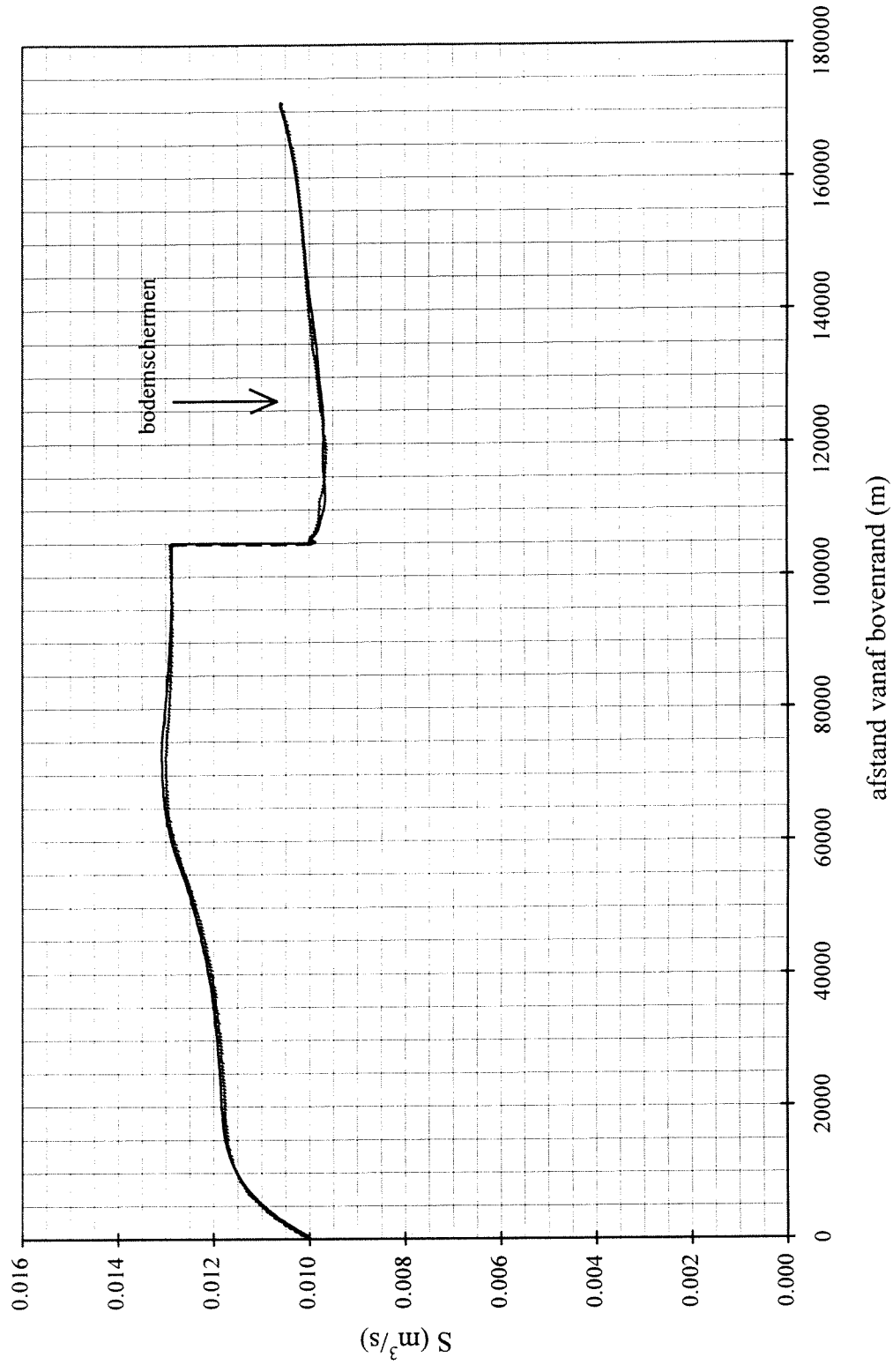
Sedimenttransport op de Waal

SOBEK, $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



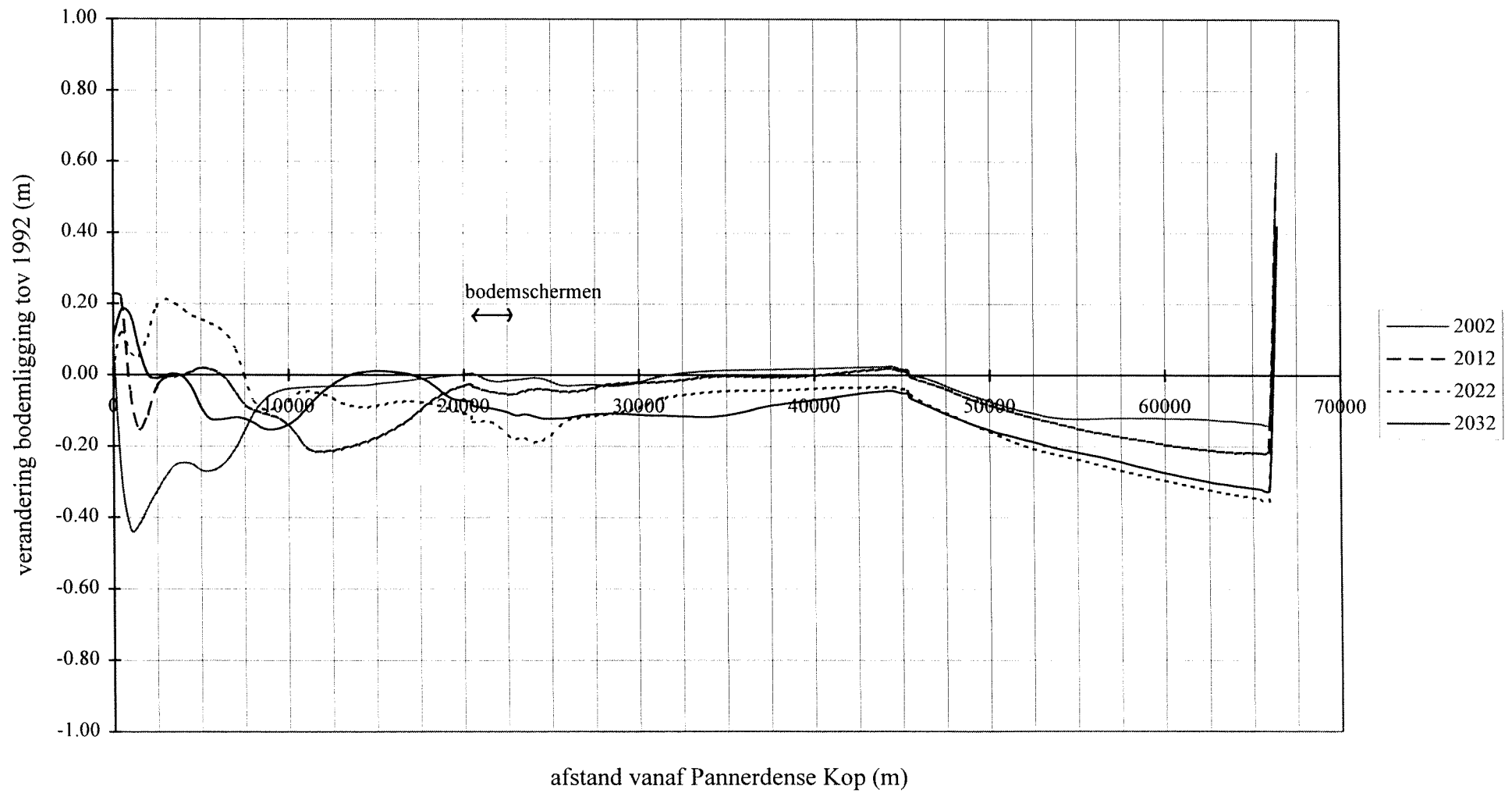
Gemiddeld sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002-2032

SOBEK, variabele afvoer



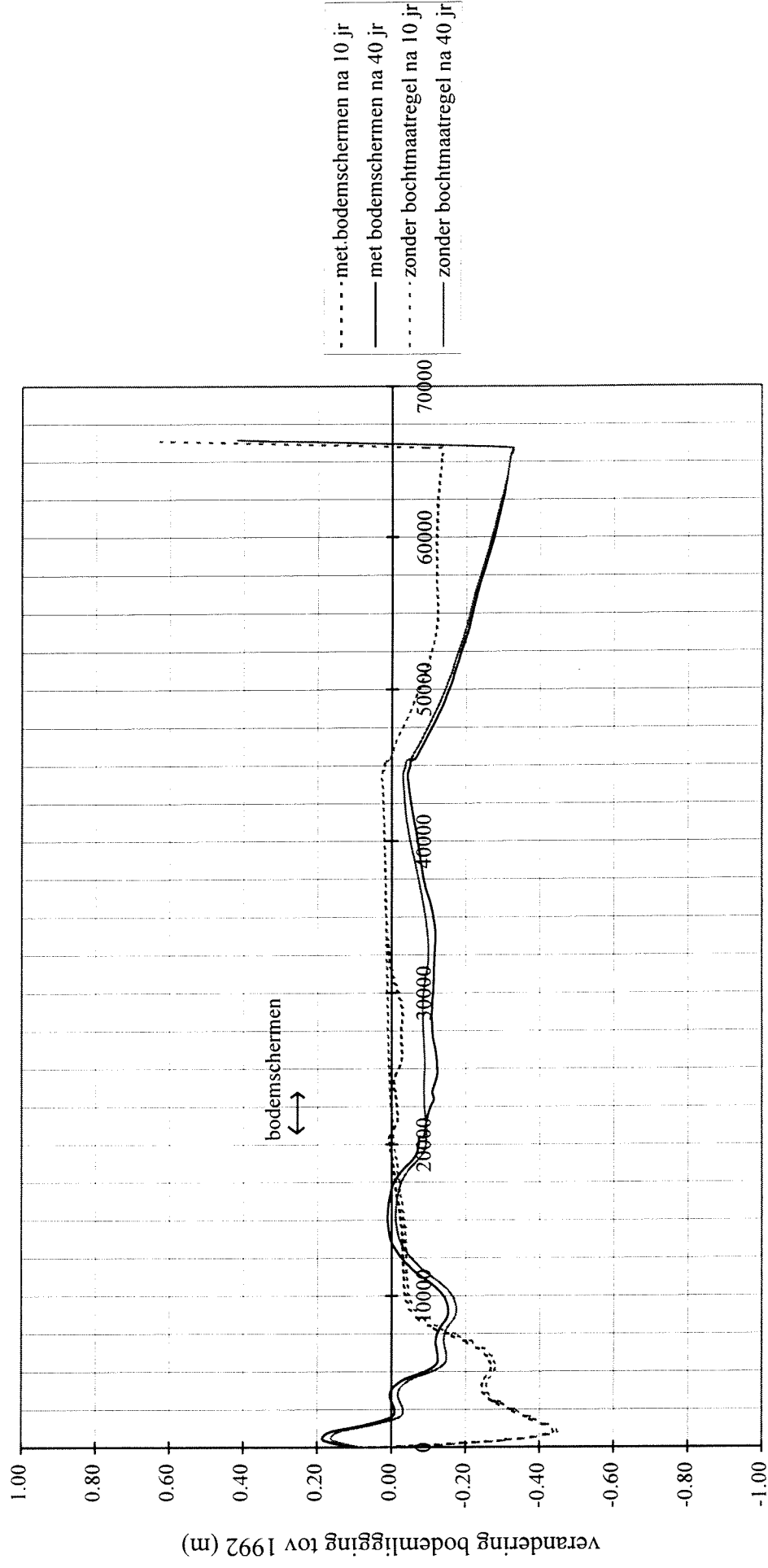
Verandering bodemligging Waal met bodemschermen

SOBEK, variabele afvoer



Verandering bodemligging Waal met en zonder bodemschermen

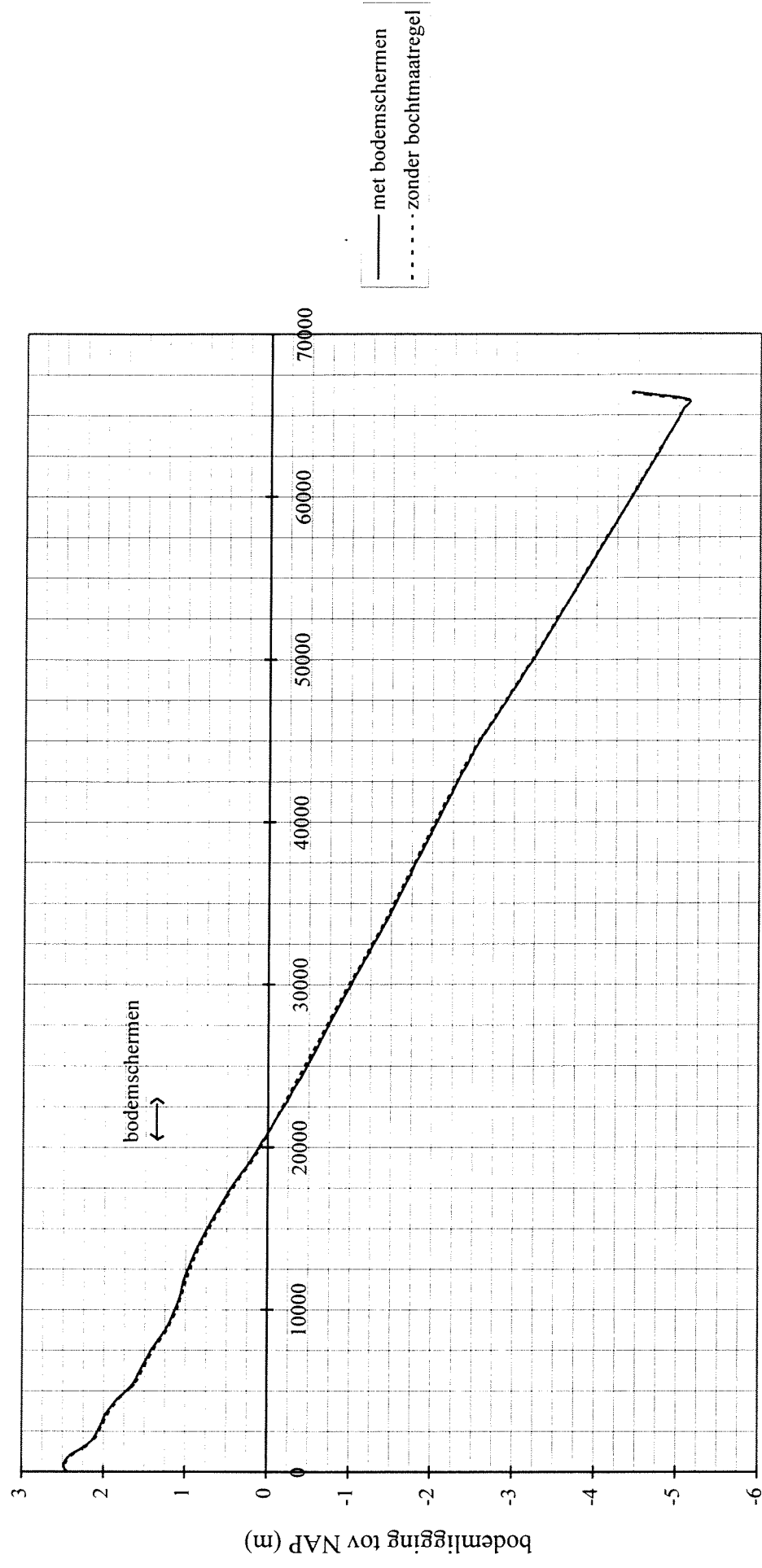
SOBEK, variabele afvoer



afstand vanaf Pannerdse Kop (m)

Bodemligging Waal na 40 jaar

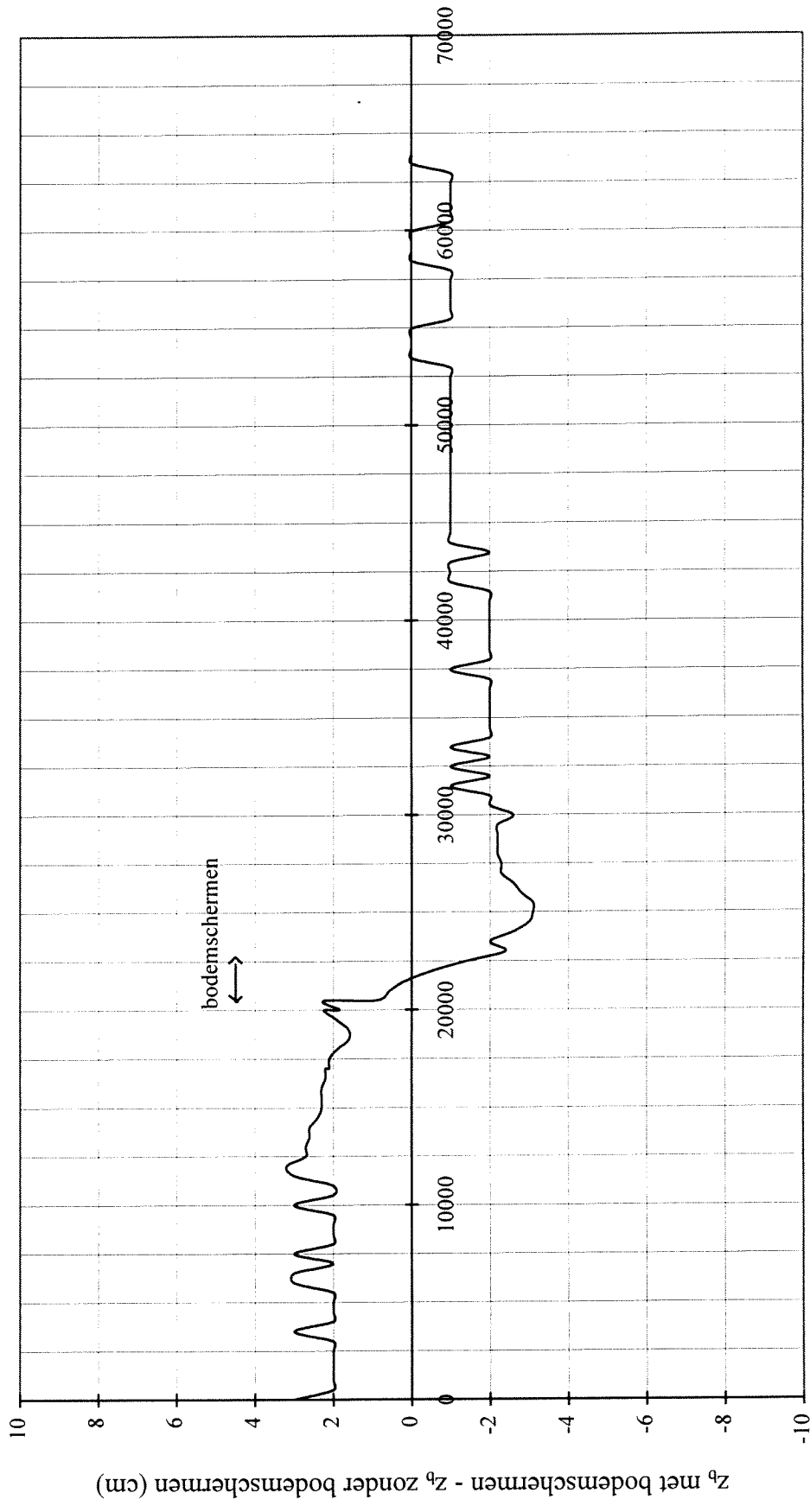
SOBEK, variabele afvoer



afstand vanaf Pannerdse Kop (m)

Vershil in bodemligging Waal met en zonder bodemschermer na 40 jaar

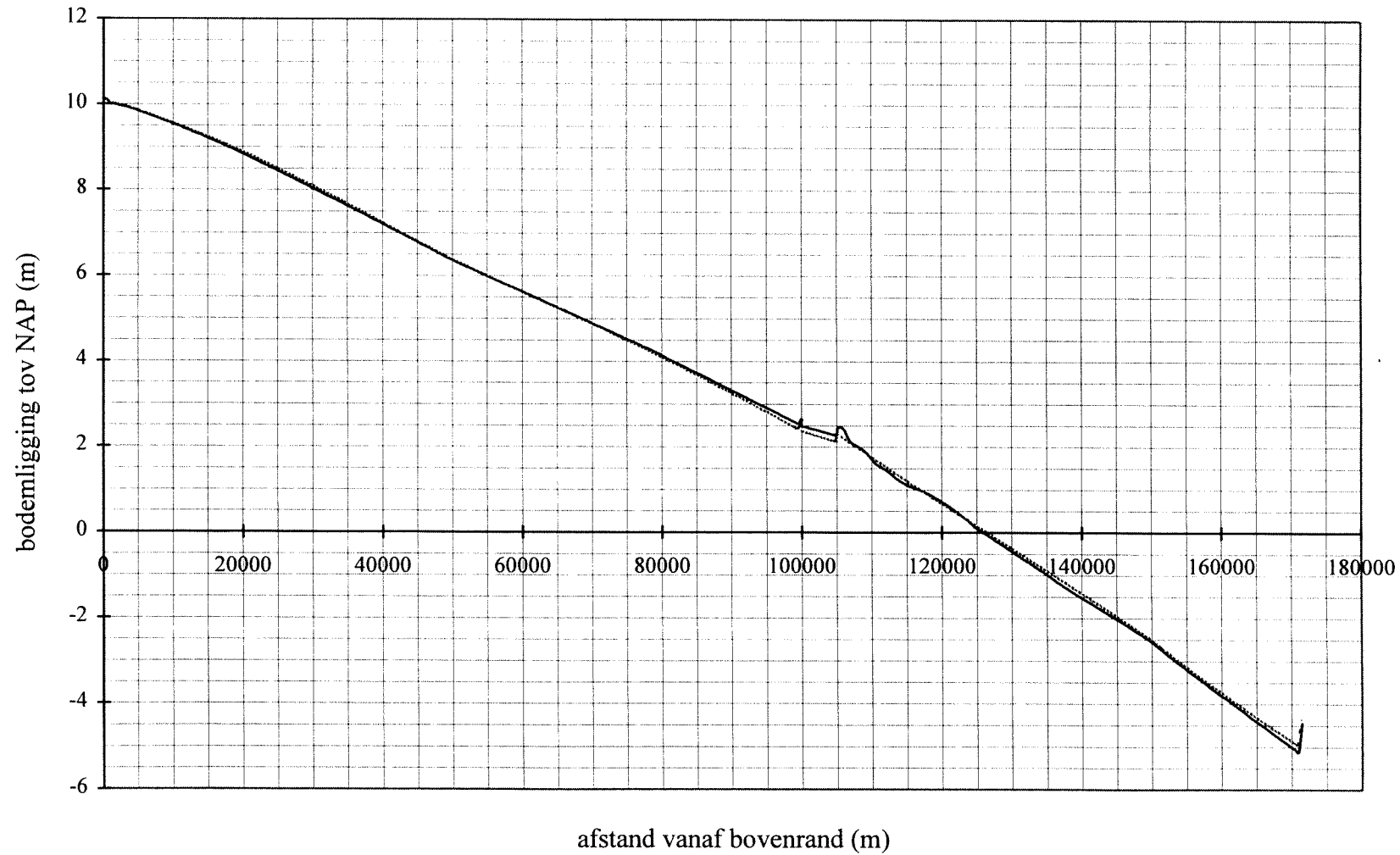
SOBEK, variabele afvoer



afstand vanaf Pannerdse Kop (m)

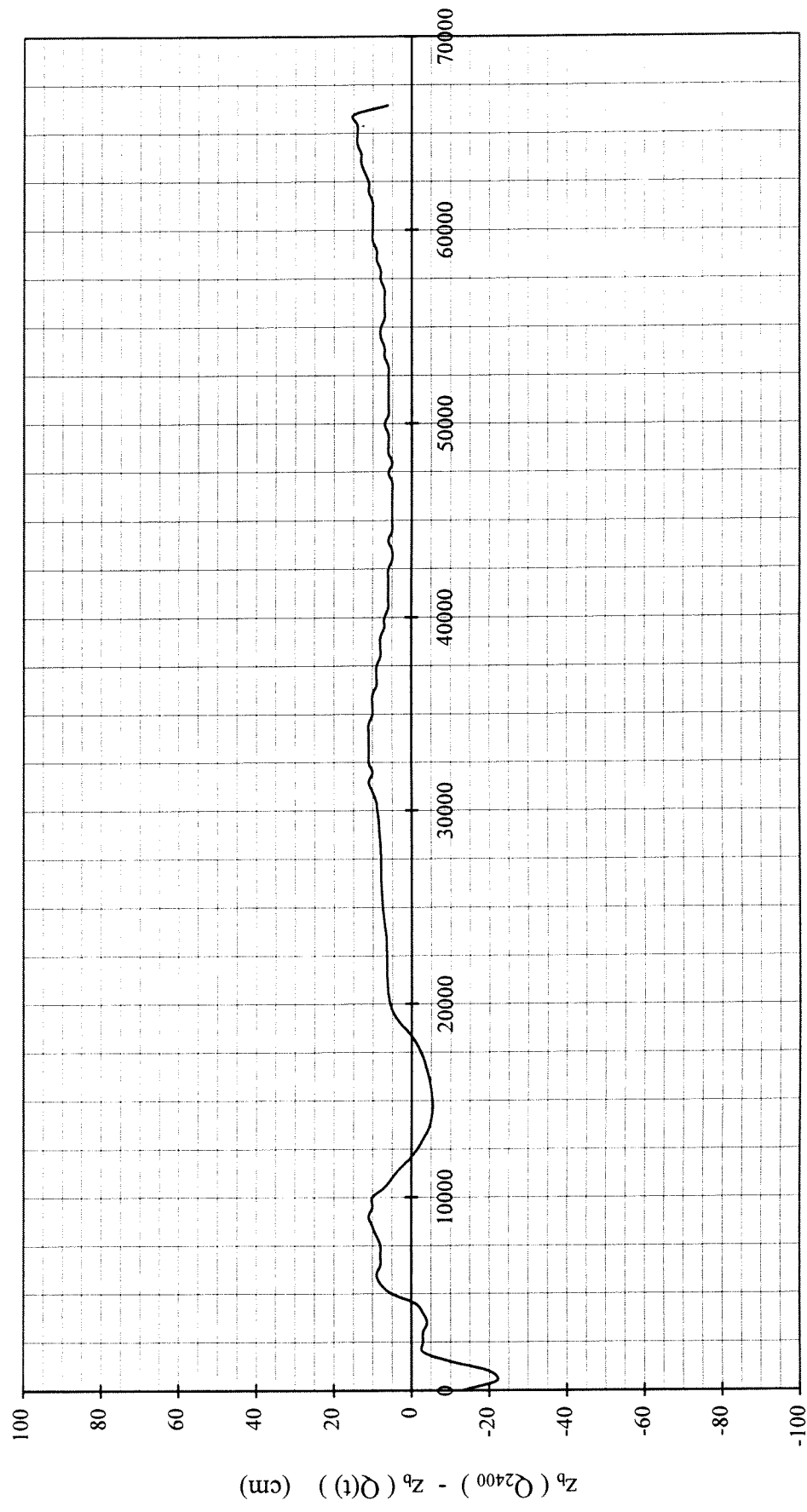
Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

SOBEK berekeningen met $Q = Q(t)$ en $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ als bovenstroomse randvoorwaarde



Vershil in bodemligging Waal na 40 jaar

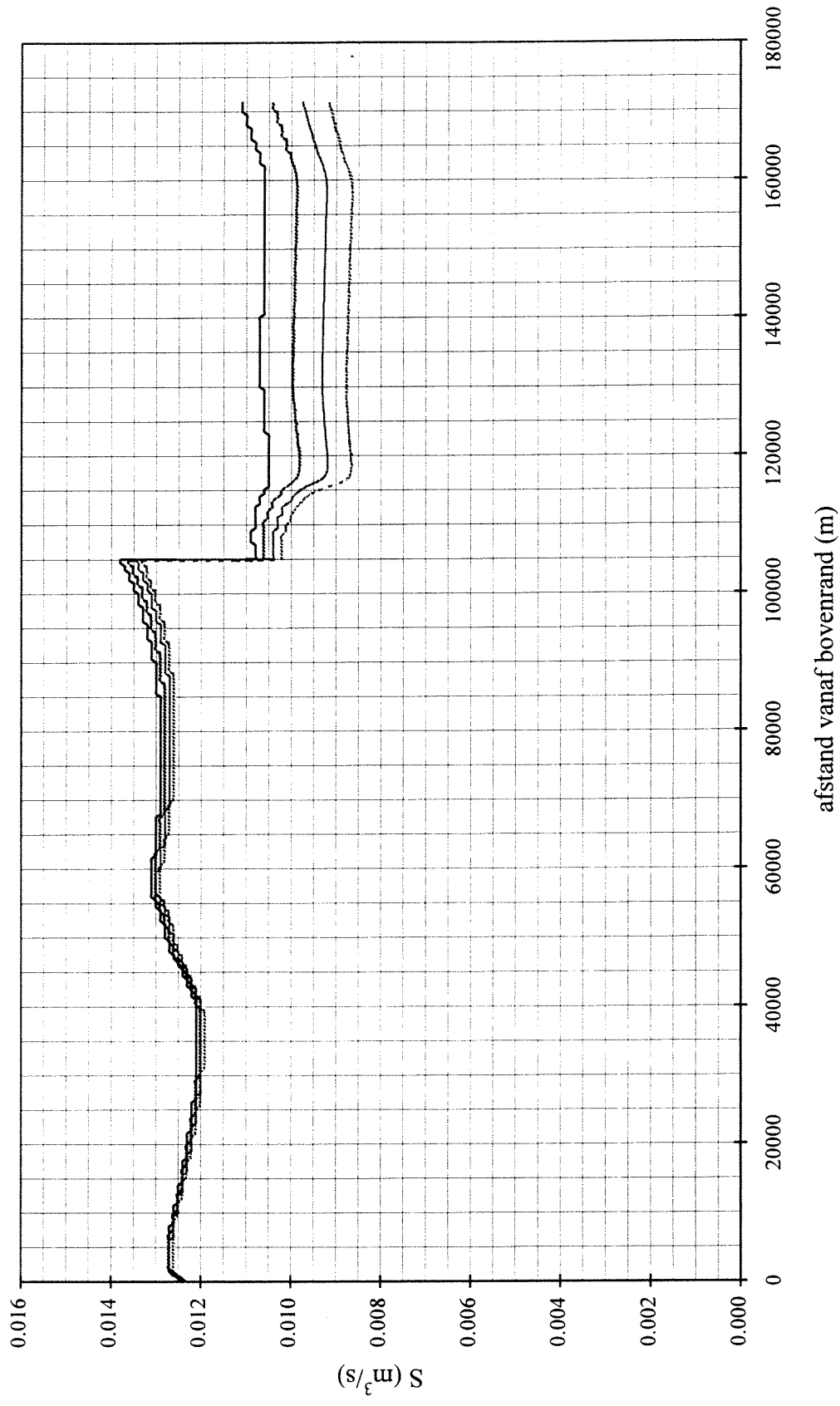
SOBEK berekeningen met $Q = Q(t)$ en $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$ als bovenstroomse randvoorwaarde



afstand vanaf Pannerdse Kop (m)

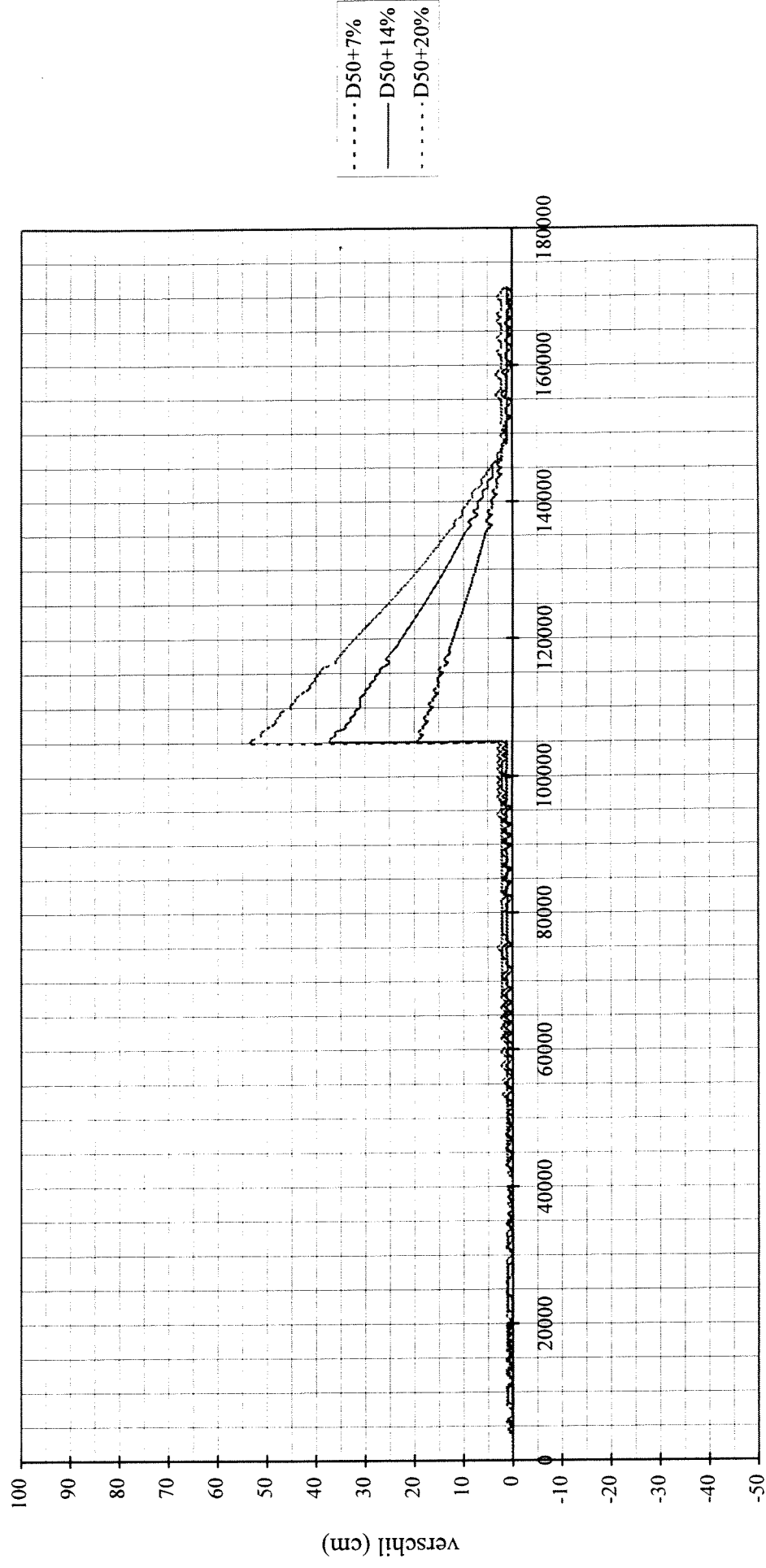
Sedimenttransport op de Rijn en de Waal, 2002

SOBEK, $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



Verschillen in de bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

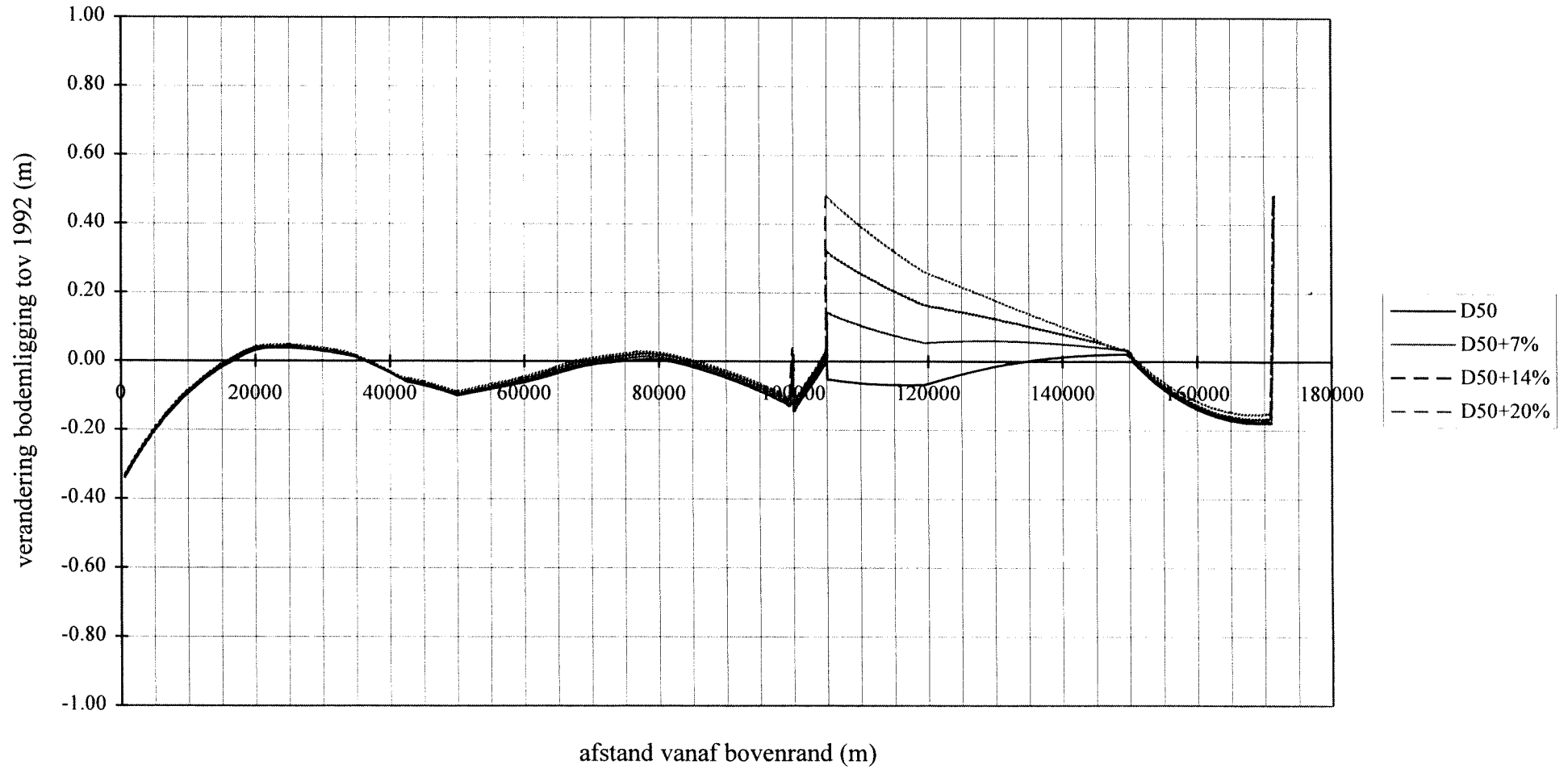
z_b (D50+7, +14 en +20%) - z_b (D50), $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



afstand vanaf bovenrand (m)

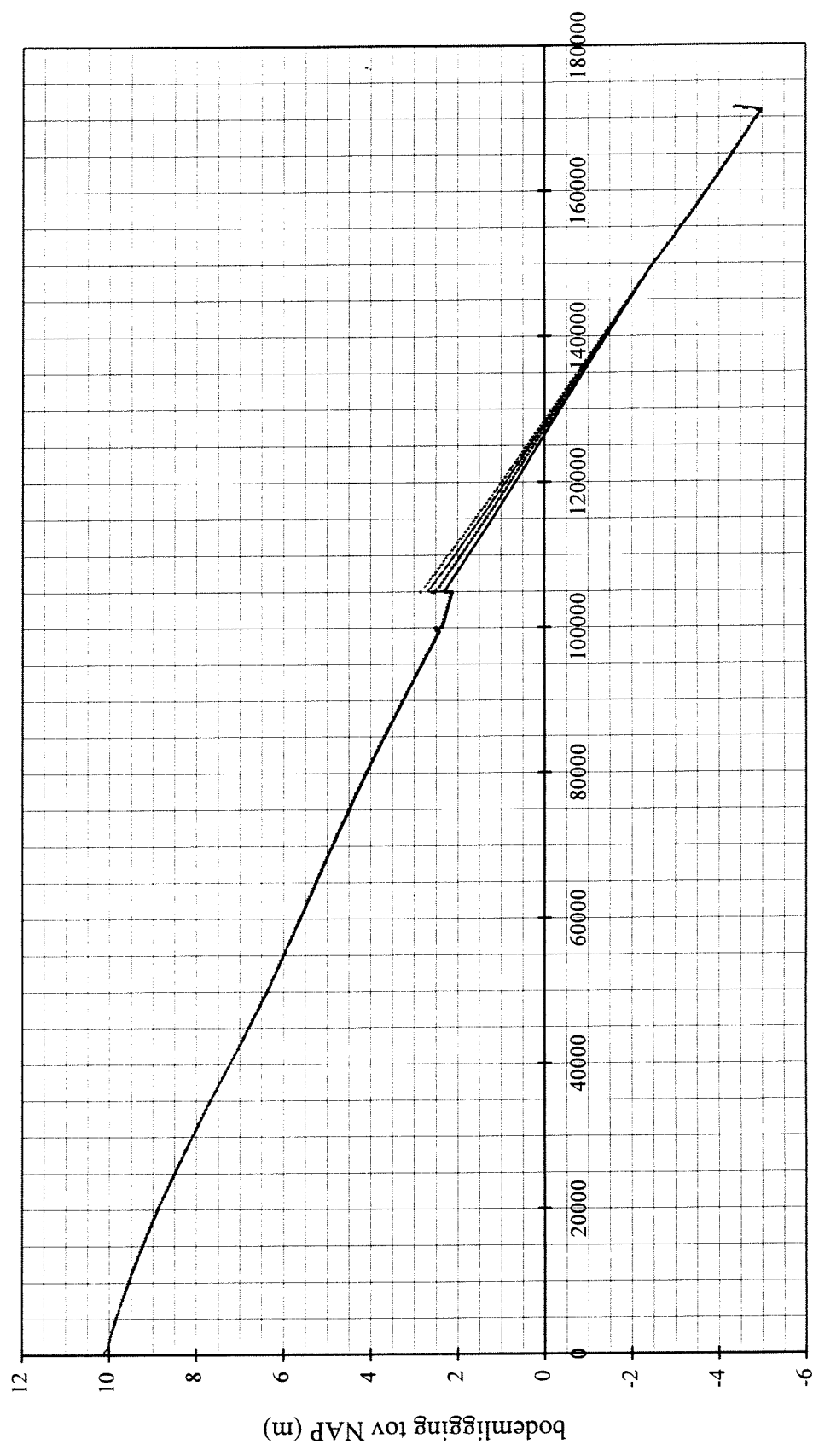
Verandering bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

SOBEK, $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

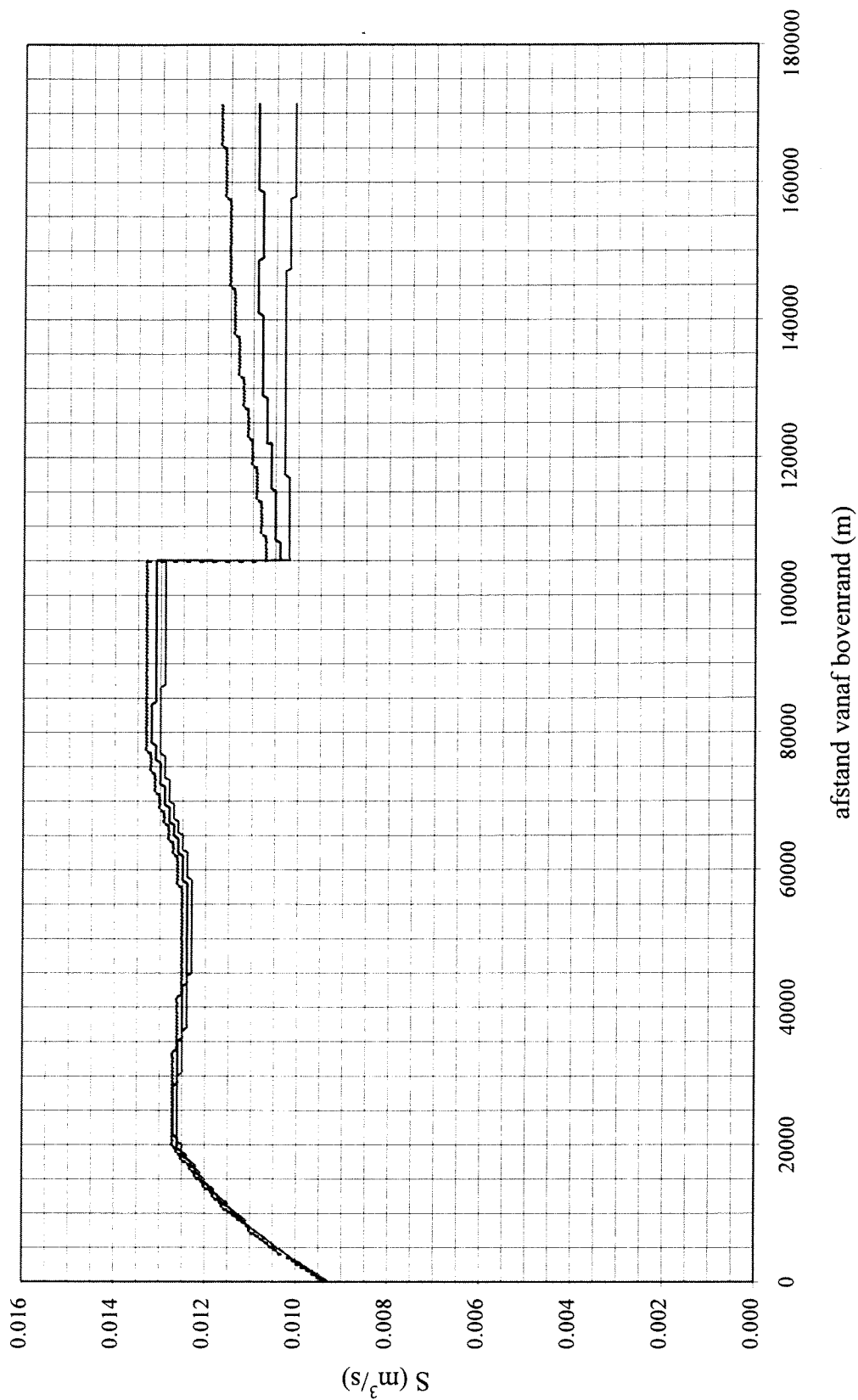
SOBEK, Q = 2400 m³/s



afstand vanaf bovenrand (m)

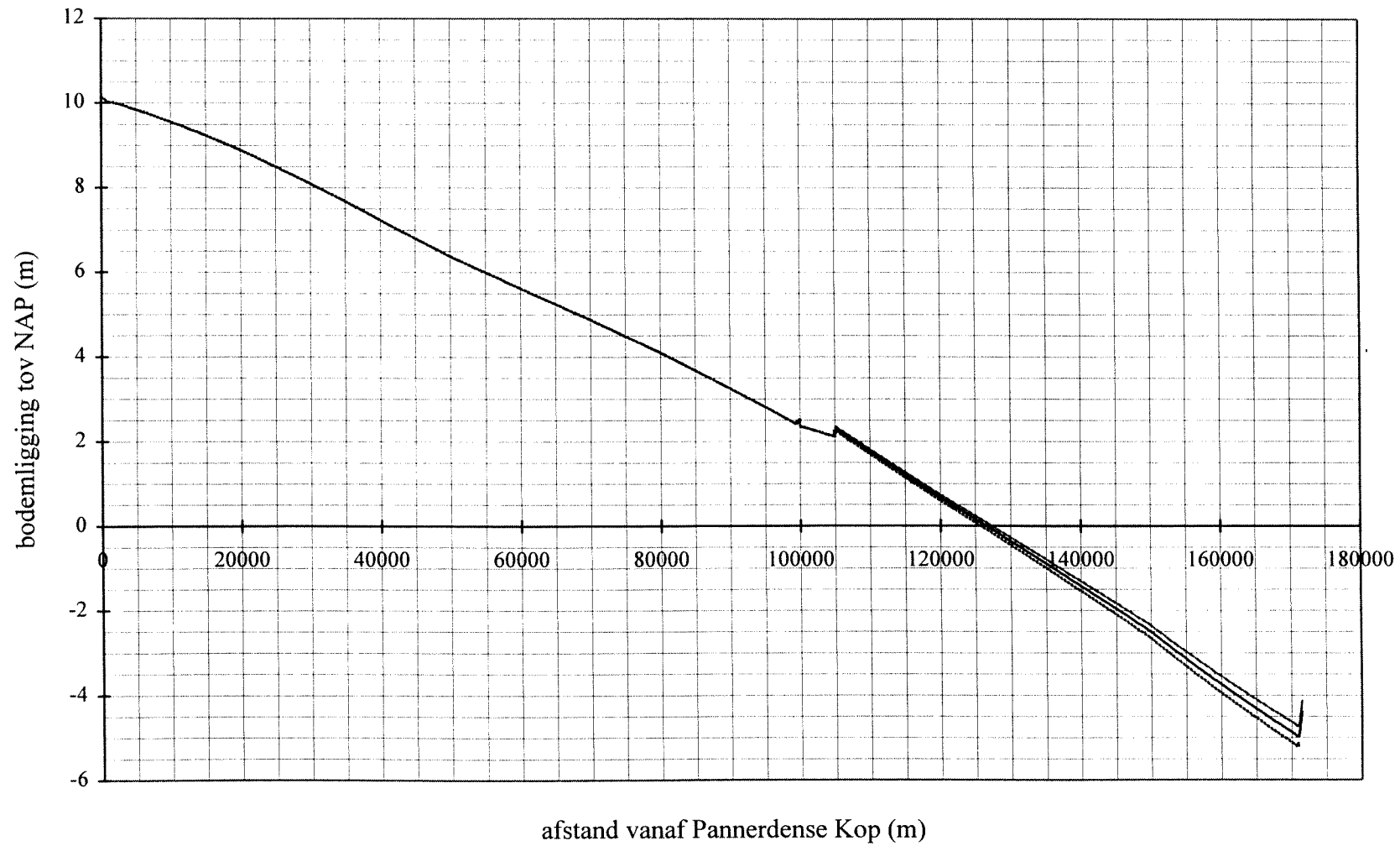
Sedimenttransport op de Rijn en de Waal

SOBEK, $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



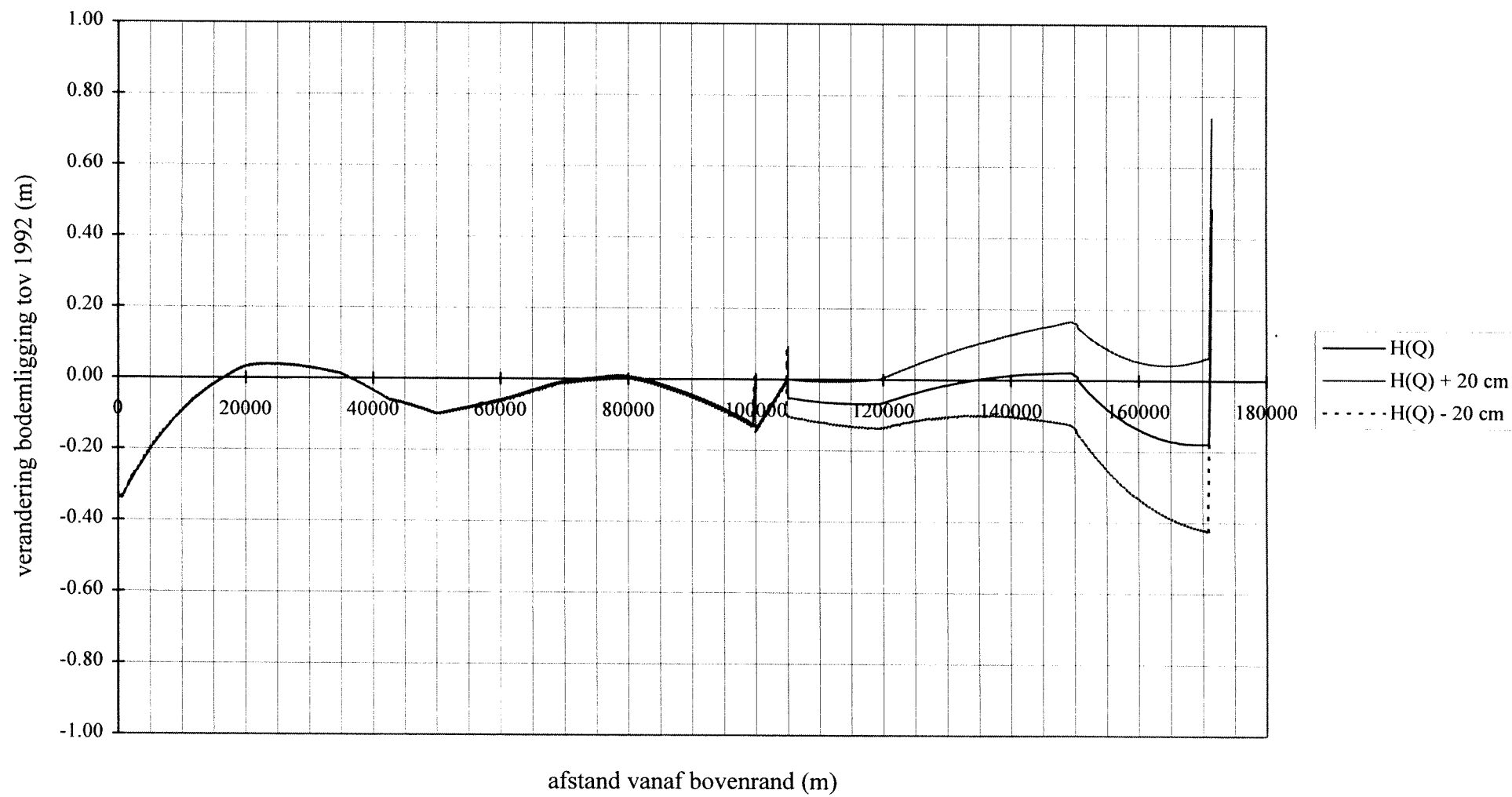
Bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

SOBEK, $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



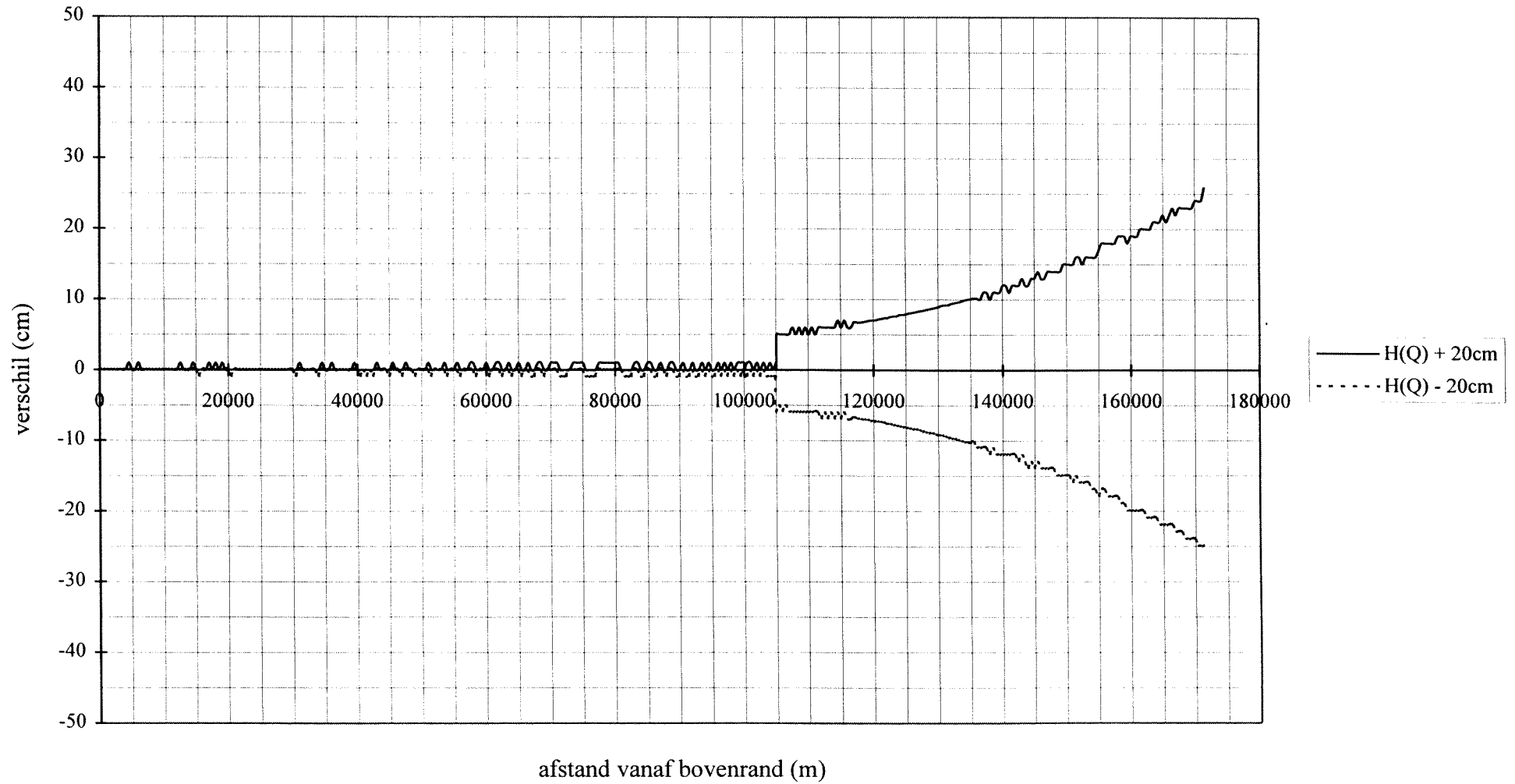
Verandering bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

SOBEK, $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



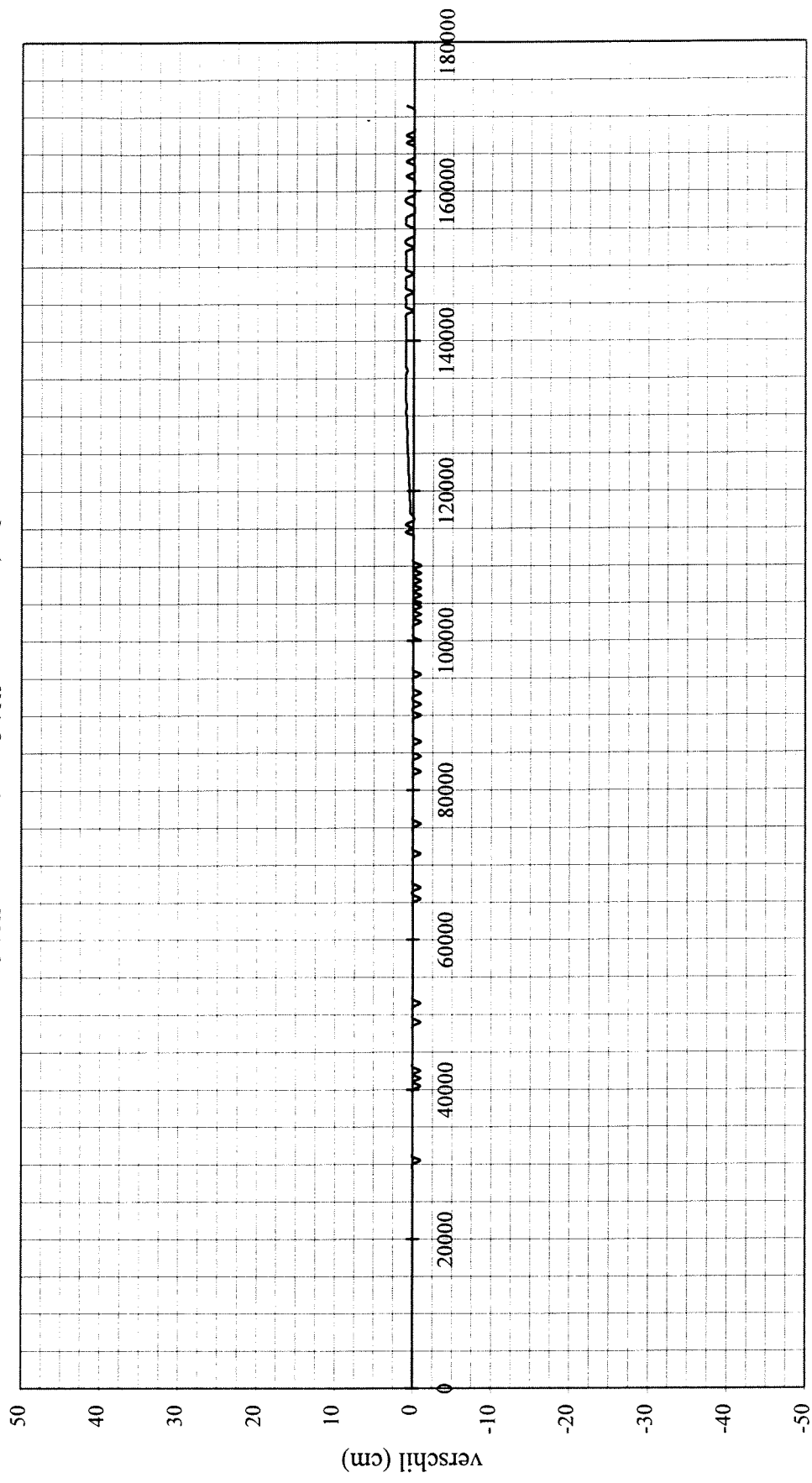
Verschillen in de bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

z_b (gewijzigde $H(Q)$) - z_b (oorspronkelijke $H(Q)$), $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



Verschillen in de bodemligging Rijn en Waal na 40 jaar

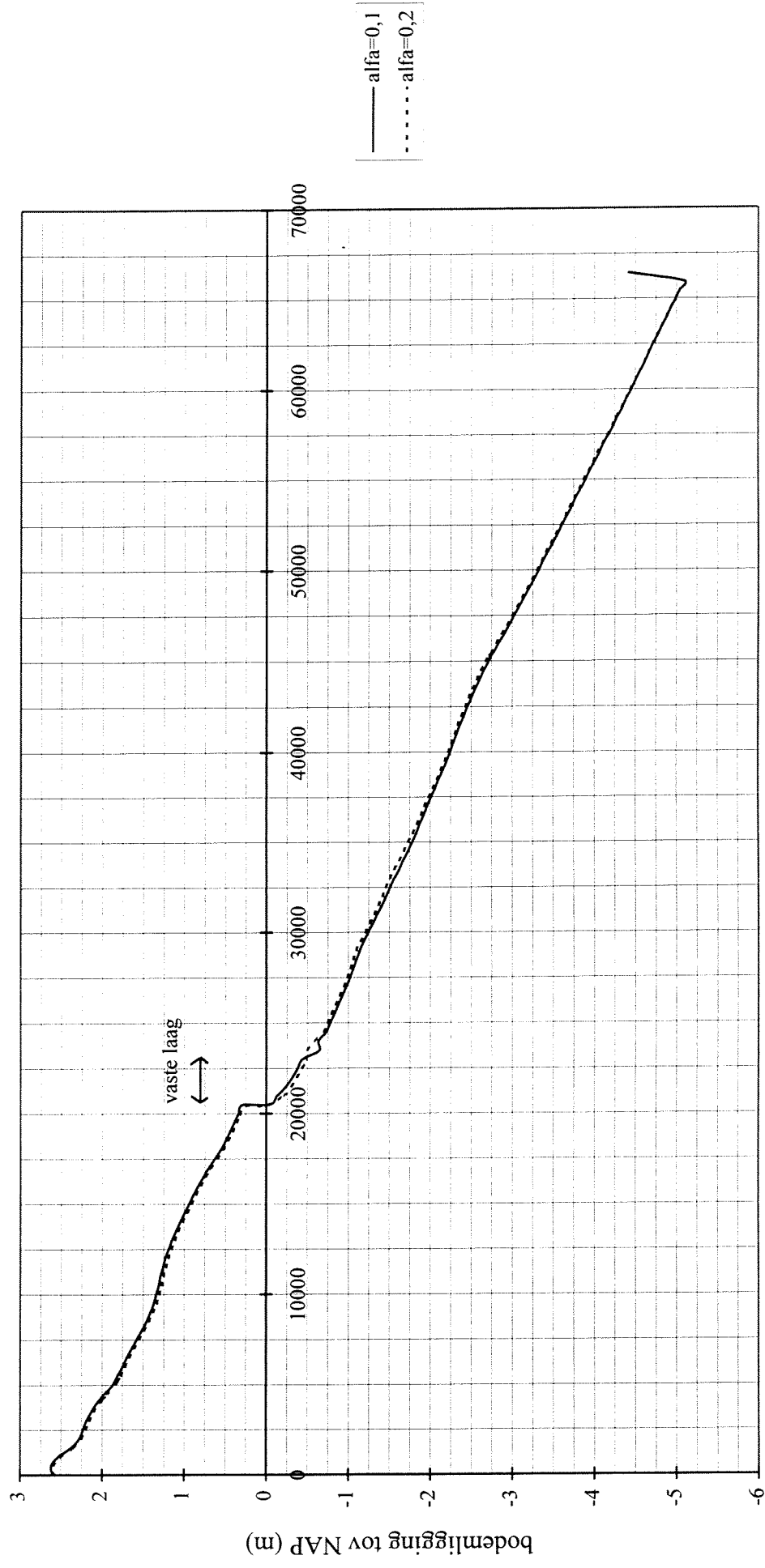
$$z_b(i_{PK} = 1,2 \cdot 10^{-4}) - z_b(i_{PK} = 0,45 \cdot 10^{-4}), Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$$



afstand vanaf bovenrand (m)

Bodemligging Waal na 40 jaar

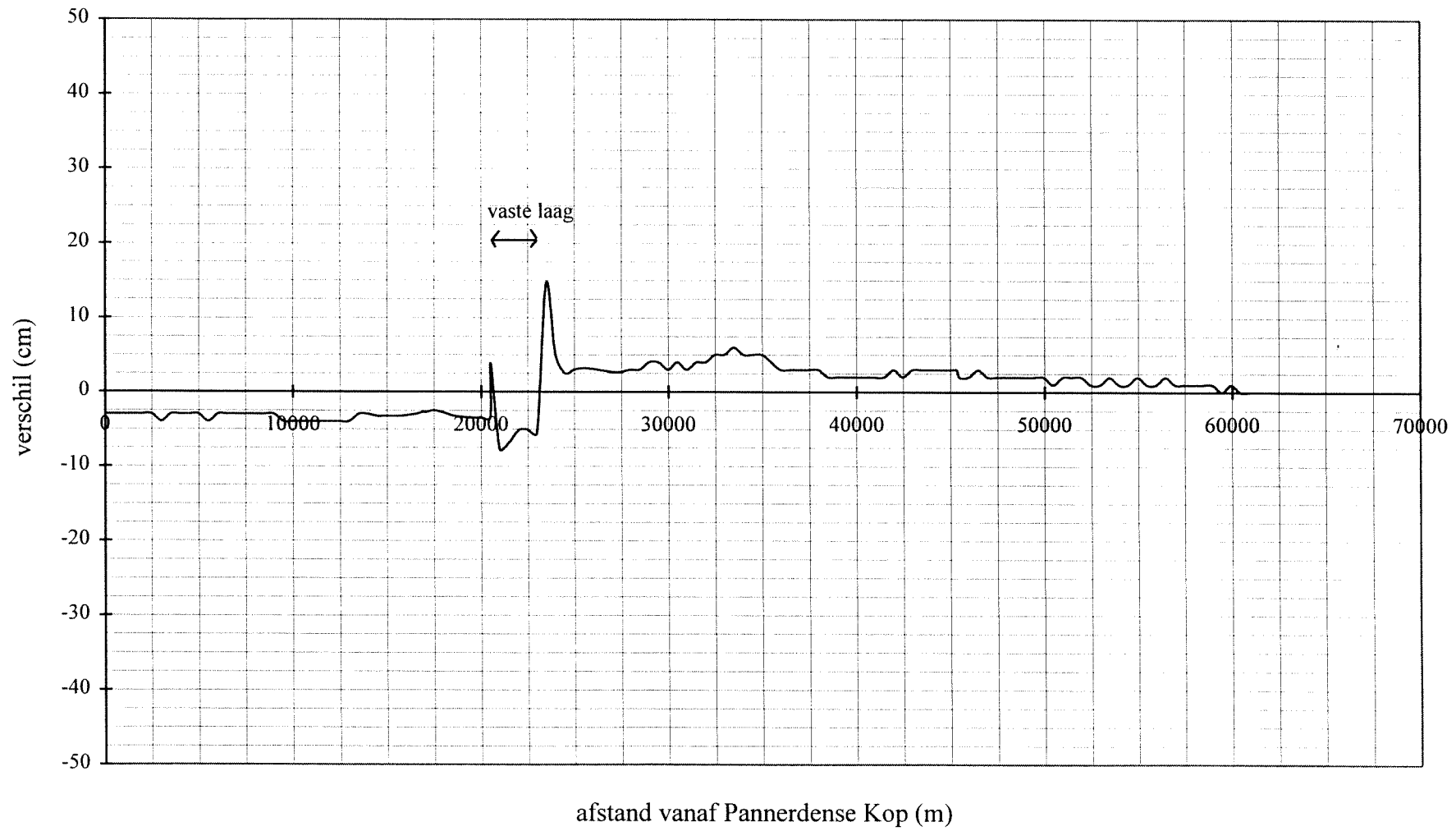
SOBEK, variabele afvoer



afstand vanaf Pannerdse Kop (m)

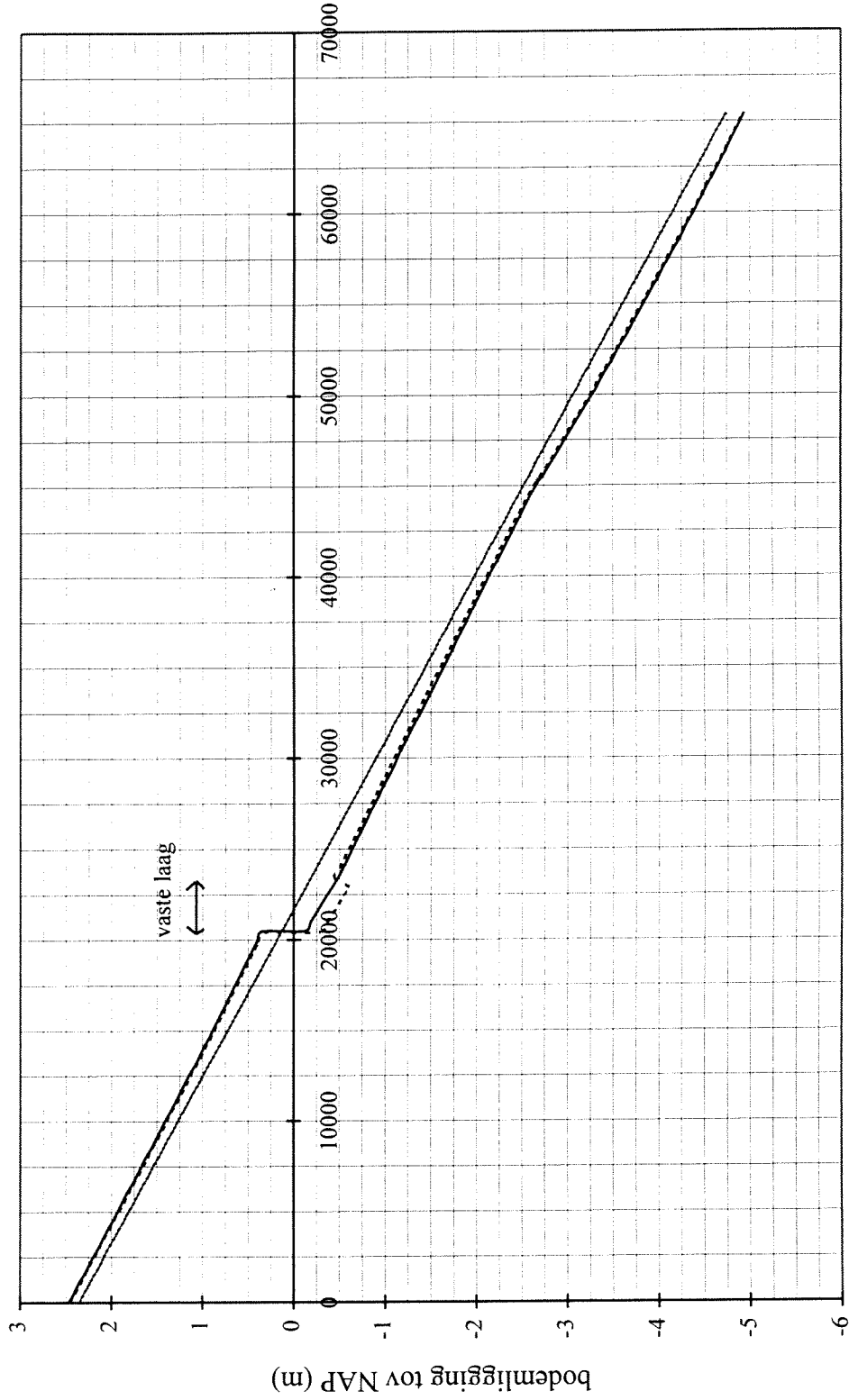
Verschillen in bodempligging op de Waal na 40 jaar

$z_b(\alpha=0,2) - z_b(\alpha=0,1)$, variabele afvoer



Bodemligging Waal na 40 jaar

SOBEK, Q = 2400 m³/s

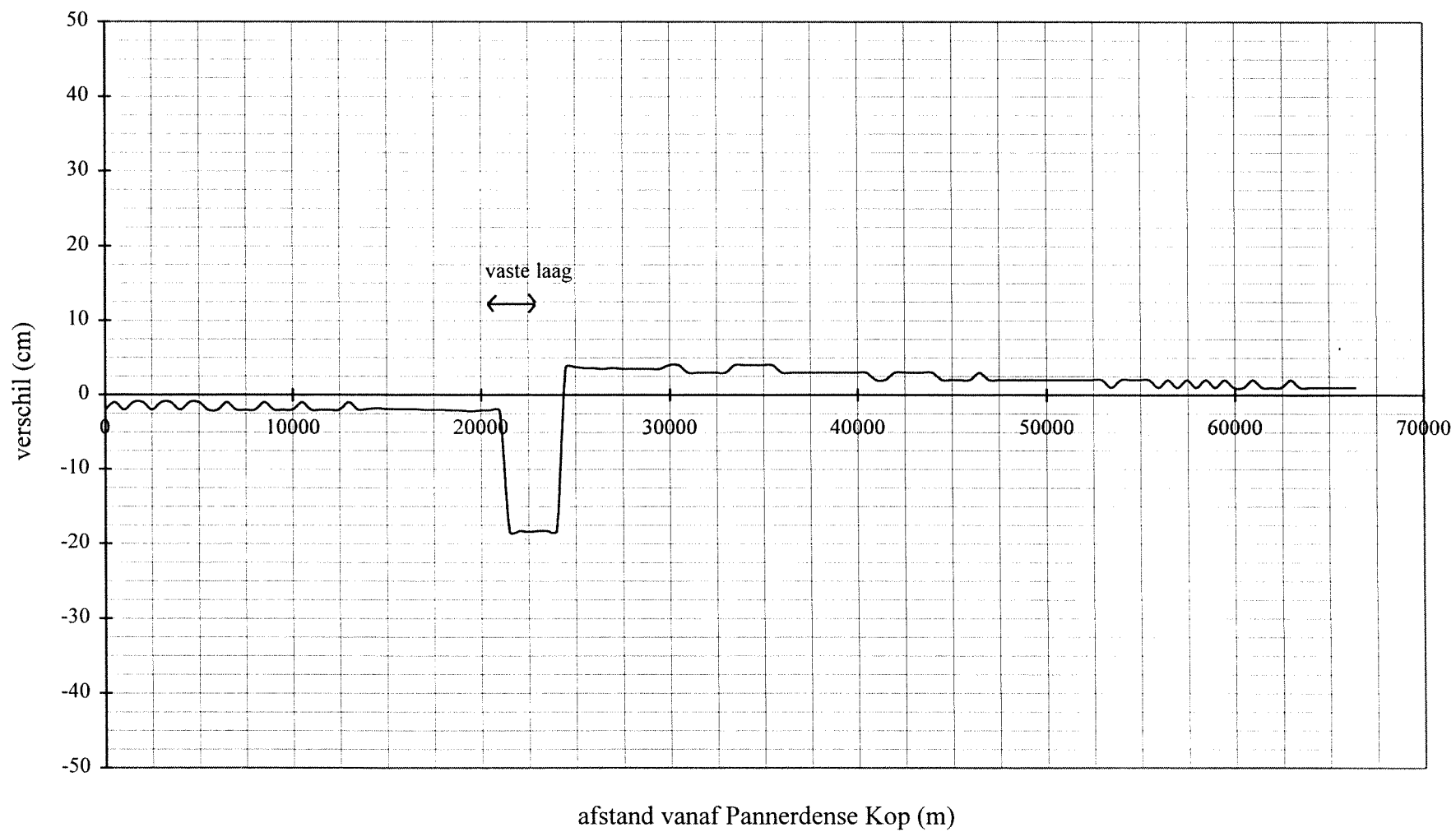


— $\Delta v_l = 0,4 \text{ m}$
- - - $\Delta v_l = 0,6 \text{ m}$
— bodemligging op $t = 0$

afstand vanaf Pannerdse Kop (m)

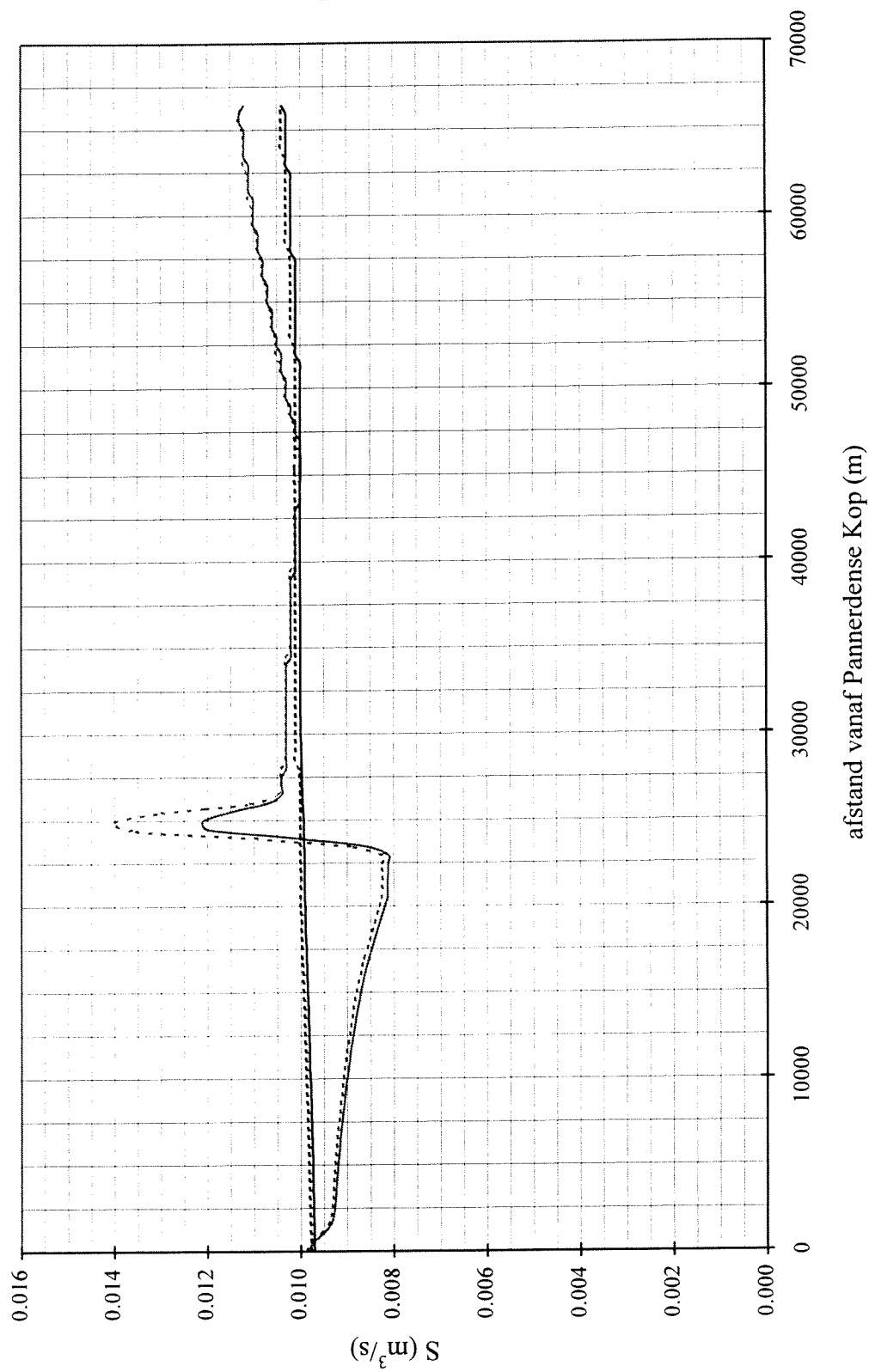
Verschillen in bodemligging op de Waal na 40 jaar

z_b (delta vl = 0,6 m) - z_b (delta vl = 0,4 m), $Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



Sedimenttransport op de Waal

$Q = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$



Het morfologische effect van bochtverbeteringen in een rivier



Literatuurverslag

TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

Janneke Siers
juni 1997

Het morfologische effect van bochtverbeteringen in een rivier

Literatuurstudie

Onderdeel van het afstudeerwerk aan de Faculteit der Civiele Techniek van de
Technische Universiteit Delft

Vakgroep: Waterbouwkunde
Sectie: Rivierwaterbouwkunde

Afstudeercommissie:
Prof.dr.ir. H.J. de Vriend
Ir. H. Havinga
Dr.ir. Z.B. Wang
Prof.dr.ir. G.S. Stelling

Janneke Siers
juni 1997

Voorwoord

Dit literatuurverslag maakt deel uit van het afstudeeronderzoek naar de grootschalige morfologische effecten van bochtverbeteringen in de vorm van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen. Het afstudeerwerk is verricht bij de vakgroep Waterbouwkunde, sectie Rivierwaterbouwkunde van de Faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Dit afstudeerwerk is uitgevoerd onder toezicht van prof.dr.ir. H.J. de Vriend, hoogleraar riviermorfologie en rivierwaterbouwkunde. De dagelijkse begeleiding was in handen van ir. H. Havinga. Daarnaast maakten dr.ir. Z.B. Wang en prof.dr.ir. G.S. Stelling deel uit van de afstudeercommissie.

Janneke Siers
Delft, juni 1997

Samenvatting

Op dit moment zijn de afmetingen van de vaargeul in de Waal niet overal voldoende groot om het in de toekomst verwachte scheepvaartverkeer te kunnen verwerken. Op rechte rivierstukken is op een aantal plaatsen te weinig diepte en in bochten is sprake van te weinig breedte. In het kader van het Waalproject worden deze knelpunten weggewerkt.

De riviervverbeteringen die vroeger werden toegepast waren erg ingrijpend voor zowel de rivier als voor ecologie en landschap. Tegenwoordig maken nieuwe technieken en kennis milieuvriendelijker maatregelen mogelijk. In een rivierbocht is van nature een spiraalvormige stroming aanwezig, die sediment van de buiten- naar de binnenbocht verplaatst. Hierdoor ontstaat een diepe, smalle vaargeul in de buitenbocht. De huidige maatregelen zijn er op gericht deze spiraalstroom te beïnvloeden.

Bij de methode met een vaste laag, wordt de diepe buitenbocht opgehoogd en met een stroomvaste laag van stortsteen aangestort. Hiermee wordt de sedimentverplaatsing van buiten- naar binnenbocht voorkomen en door een grotere ruwheid in de buitenbocht zoekt de stroom de binnenbocht meer op, waardoor deze uitschuurt. In de Waalbocht bij Nijmegen is eind jaren tachtig een vaste laag aangelegd, waarmee bij laagwaterstanden een breedtewinst van 30 á 40 meter is bereikt. De methode is relatief duur.

Bodemkribben zijn een soort drempels die in de buitenbocht worden aangelegd en veroorzaken ook een grotere ruwheid in de buitenbocht, waardoor de binnenbocht uitschuurt. Bovendien wordt geprobeerd de spiraalstroom te beïnvloeden, door de kribben onder een bepaalde hoek ("scheppend") aan te leggen. Veel onderzoek is gedaan naar bodemkribben in de Waalbocht bij Erlecom. De methode werkt minder goed dan een vaste laag, maar is wel veel goedkoper.

Bodemschermen zijn korte, verticale schermen, die in de buitenbocht worden geplaatst onder een kleine hoek met de stroom. De schermen wekken een spiraalstroom op die tegengesteld is aan de van nature in een bocht aanwezige spiraalstroom. Door afmetingen en plaatsing te optimaliseren, wordt getracht de spiraalstroom in een bocht geheel op te heffen. Bodemschermen zijn in de Verenigde Staten uitgebreid beproefd in kleine riviertjes en beken, voornamelijk voor het beschermen van de oever van de buitenbocht en voor het vastleggen van riviergeulen om erosie van constructies tegen te gaan. Bij een goed ontwerp bleken de schermen goede resultaten te geven. Bovendien is het een relatief goedkope methode.

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting	3
Lijst van bijlagen.....	7
Lijst van figuren.....	8
Lijst van tabellen.....	8
1. Inleiding	11
1.1 Opbouw afstudeerwerk	11
1.2 Opbouw literatuurverslag.....	11
1.3 Rivierverbeteringen in het verleden.....	11
1.4 Huidig rivierbeheer	13
2. Rivierbochten	15
3. Vaste laag	19
3.1 Inleiding.....	19
3.2 Hydraulische effecten.....	19
3.3 Morfologische effecten	21
4. Bodemkribben	23
4.1 Toepassingen in het verleden.....	23
4.2 Toepassingen in de Waal	25
4.2.1 Algemeen	25
4.2.2 Waalbocht bij Erlecom	27
4.2.3 Advies ontwerp bodemkribbenveld bij Erlecom	29
4.2.4 Evaluatie aangelegd bodemkribbenveld Erlecom.....	31
5. Bodemschermen	33
5.1 Oorsprong bodemschermen	33
5.2 Toepassingen van bodemschermen	37
5.2.1 Werking van de bodemschermen	37
5.2.2 De bodemschermen van Odgaard	39
5.2.3 Bodemschermen in een rivierbocht.....	39
6. Het Waalproject	43
6.1 Doelstelling van het Waalproject.....	43
6.2 Randvoorwaarden	43
6.3 Breedteknelpunten.....	45

6.4 Maatregelen	45
6.5 Alternatieven	47
6.5.1 Toetsing van de alternatieven	49
6.5.2 Effectbepaling van de alternatieven	51
6.6 Het Voorkeurs Alternatief.....	51
6.6.1 Toetsing van het Voorkeurs Alternatief.....	51
6.6.2 Effectbepaling van het Voorkeurs Alternatief	51
7. Conclusies.....	53
Lijst van symbolen.....	55
Literatuur.....	57
Bijlagen	

Lijst van bijlagen

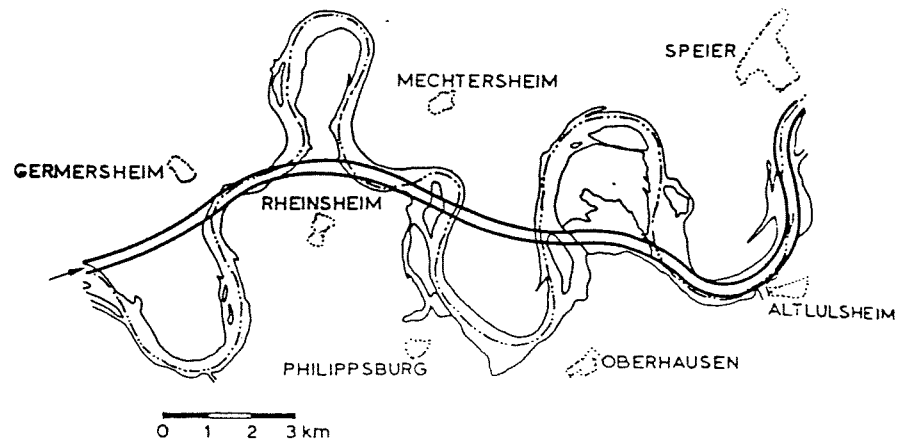
Bijlage 2-I:	Diepte-gemiddelde bewegingsvergelijkingen bocht
Bijlage 2-II:	Afleiding vergelijking voor het dwarsverhang
Bijlage 3-I:	Debiet vs. waargenomen verval
Bijlage 3-II:	Debiet vs. waargenomen verval
Bijlage 3-III:	Verhang als gevolg van locale ruwheidsverhoging en drempelwerking
Bijlage 3-IV:	Toename verval over de sterk geschematiseerde Waalbocht voor verschillende combinaties van ruwheidsverhoging en drempelhoogte
Bijlage 3-V:	Bodemontwikkeling tgv vaste laag en bodemkribben, berekend met SOBEK
Bijlage 4-I:	Dieptelijnen prototype, zonder bodemkribben
Bijlage 4-II:	Berekende dieptelijnen, mét bodemkribben
Bijlage 4-III:	Berekende lengteprofielen, mét bodemkribben
Bijlage 4-IV:	Overzicht situatie met indicatie bodemkribbenveld
Bijlage 4-V:	Berekende lengteprofielen, uitgebreid bodemkribbenveld
Bijlage 4-VI:	Berekende dieptelijnen, uitgebreid bodemkribbenveld
Bijlage 4-VII:	Vaarbaanbreedte met en zonder bodemkribben
Bijlage 4-VIII:	Berekende lengteprofielen, verhoogde bodemkribben
Bijlage 4-IX:	Berekende dieptelijnen, verhoogde bodemkribben
Bijlage 4-X:	Vaarbaanbreedte verhoogde bodemkribben en uitgebreid bodemkribbenveld
Bijlage 4-XI:	Situatie geadviseerd bodemkribbenveld
Bijlage 5-I:	Afleiding formules voor F_L en F_D
Bijlage 5-II:	Experiment met bodemschermen in een stroomgoot
Bijlage 5-III:	Afleiding langs- en dwarsverhang situatie mét bodemschermen
Bijlage 6-I:	Verandering waterstanden bij MHW en OLR per alternatief
Bijlage 6-II:	Effecten en rangorde effecten van de alternatieven

Lijst van figuren

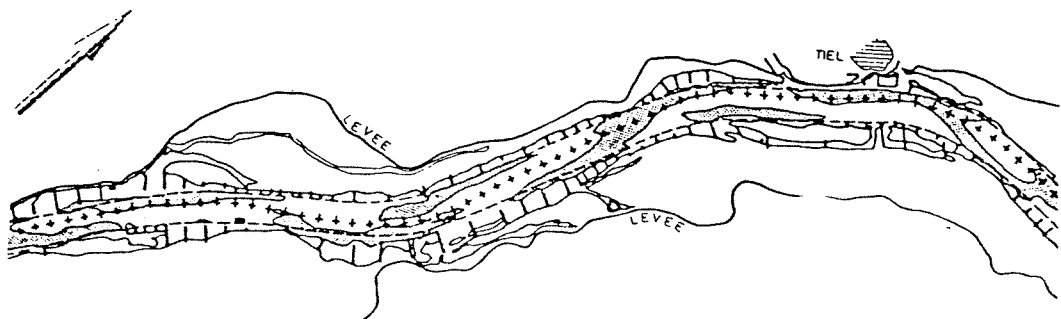
figuur 1.1	Bochtafsnijdingen in de Rijn bij Mannheim.
figuur 1.2	Normalisatie van de Waal bij Tiel.
figuur 2.1	Spiraalstroming in een rivierbocht.
figuur 2.2	Snelheidsprofiel en centrifugaalkracht over de verticaal.
figuur 2.3	Krachten op het water.
figuur 3.1	Overzicht meetpunten bij Nijmegen
figuur 3.2	Langsverhang uitgezet tegen de Waalafvoer. Maart '86: begin werkzaamheden, september '87: eind werkzaamheden.
figuur 4.1	Bodemkribben in een rivierbocht.
figuur 4.2	Bodemtopografie en locatie van de kribben.
figuur 4.3	Dwarsdoorsneden van de rivier.
figuur 4.4	Definitieschets configuratie bodemkribben.
figuur 5.1	Bodemschermen in een rivierbocht.
figuur 5.2	Bandalls.
figuur 5.3	Surface panels.
figuur 5.4	Scouring barge.
figuur 5.5	Bottom panels.
figuur 5.6	Krachten van het water op een scherm en de reactiekrachten van het scherm op het water.
figuur 5.7	Spiraalstroom, veroorzaakt door bodemscherm.
figuur 5.8	Gemeten snelheden in langs- en dwarsrichting benedenstrooms van een scherm.
figuur 5.9	Schematisch weergegeven verandering van het bodemprofiel, veroorzaakt door een rij van drie bodemschermen.
figuur 5.10	In een stroomgoot gemeten verandering van het bodemprofiel benedenstrooms van bodemschermen.
figuur 5.11	Toepassingen van bodemschermen bij oeverbescherming en/of ter voorkoming van ondiepten.
figuur 6.1	De Waal tussen de Pannerdense Kop en Zaltbommel.

Lijst van tabellen

tabel 3.1	Vervallen voor enkele karakteristieke Waalafvoeren, berekend met het aangenomen exponentiële verloop.
tabel 4.1	Onderlinge afstand bodemkribben.
tabel 6.1	Extra jaarlijkse baggerhoeveelheden per alternatief door verandering van de waterstanden bij OLR (in m ³).
tabel 6.2	Aanpassing jaarlijkse baggerhoeveelheden van de alternatieven door aanzandingseffect en waterstandseffect.
tabel 6.3	Verandering jaarlijkse baggerhoeveelheid bij het Voorkeurs Alternatief (in m ³).



Figuur 1.1 Bochtafsnijdingen in de Rijn bij Mannheim. *Bron: Lit.[22].*



Figuur 1.2 Normalisatie van de Waal bij Tiel. *Bron: lit.[22].*

1. Inleiding

1.1 Opbouw afstudeerwerk

Het eerste deel van het afstudeerwerk 'Het morfologische effect van bochtverbeteringsmaatregelen' is een onderzoek naar de bestaande literatuur over bochtverbeteringen door middel van een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen en naar de voorgenomen maatregelen in de Waal. In dit rapport wordt van dat literatuuronderzoek verslag gedaan. Het tweede deel is het afstudeerverslag en gaat over de bepaling van de morfologische gevolgen van bochtverbeteringen in de Waal. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het één-dimensionale model SOBEK, waarmee water- en sedimentbeweging kunnen worden gesimuleerd.

1.2 Opbouw literatuurverslag

Eerst worden in hoofdstuk 2 de fysische verschijnselen in een rivierbocht besproken en theoretisch beschreven. In de hoofdstukken 3, 4 en 5 worden respectievelijk de maatregelen vaste laag, bodemkribben en bodemschermen toegelicht en wordt het onderzoek dat er tot nu toe naar is gedaan behandeld. Wat betreft de vaste laag is voornamelijk onderzoek gedaan naar de vaste laag in de bocht bij Nijmegen. Het onderzoek naar bodemkribben is voornamelijk gericht op de Waalbocht bij Erlecom. En het onderzoek naar bodemschermen bestaat voor een groot deel uit proeven die in de Verenigde Staten zijn gedaan. In hoofdstuk 6 wordt het Waalproject beschreven. Hierbij wordt ingegaan op de doelstellingen en randvoorwaarden van het project en de afweging van de alternatieven. In hoofdstuk 7 worden de belangrijkste conclusies naar aanleiding van het literatuuronderzoek op een rijtje gezet.

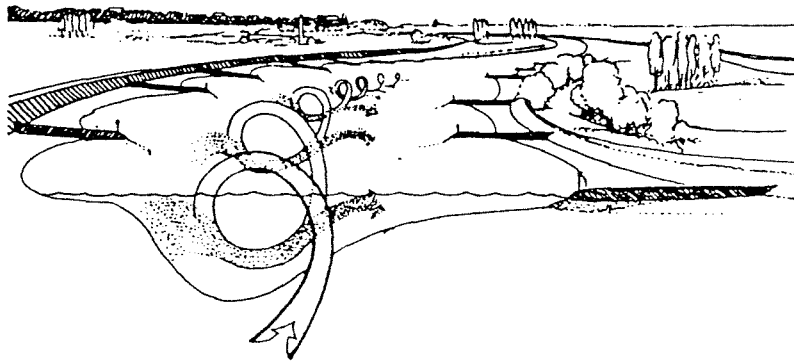
1.3 Rivierverbeteringen in het verleden

In het verleden zijn vaak ingrijpende maatregelen toegepast om de bevaarbaarheid en veiligheid van de Rijntakken te verbeteren. Dit waren bijvoorbeeld bochtafsnijdingen en normalisaties, zie figuur 1.1 en 1.2. De nadelen voor ecologie en landschap waren groot en ook riviertechnisch waren de gevolgen ingrijpend. Door deze rivierkundige normalisaties is het zomerbed van de Waal sinds het begin van deze eeuw al meer dan anderhalve meter gedaald. Dit is het gevolg van de toegenomen stroomsnelheden van het water, waardoor de erosie is toegenomen. En deze zogenaamde autonome bodemdaling gaat nog steeds door. In Duitsland heeft dit ernstige gevolgen en brengt dit hoge kosten met zich mee. Uiterwaarden verdrogen geleidelijk, havens worden minder toegankelijk en constructies kunnen instabiel worden en moeten worden aangepast.

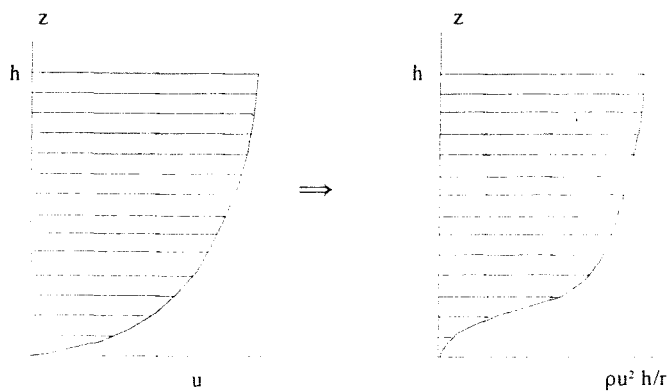
1.4 Huidig rivierbeheer

In het huidige rivierbeheer wordt er naar gestreefd zowel de scheepvaartbelangen als de ecologische belangen te behartigen (zie ook lit.[23]). De traditionele maatregelen met grootschalige effecten komen dan niet meer in aanmerking voor rivierverbetering. Er moet worden gezocht naar kleinschalige maatregelen die ook gunstig uitpakken voor het ecologisch herstel. Deze kleinschalige maatregelen zijn innovatief van karakter, waardoor de effecten nog niet goed bekend zijn.

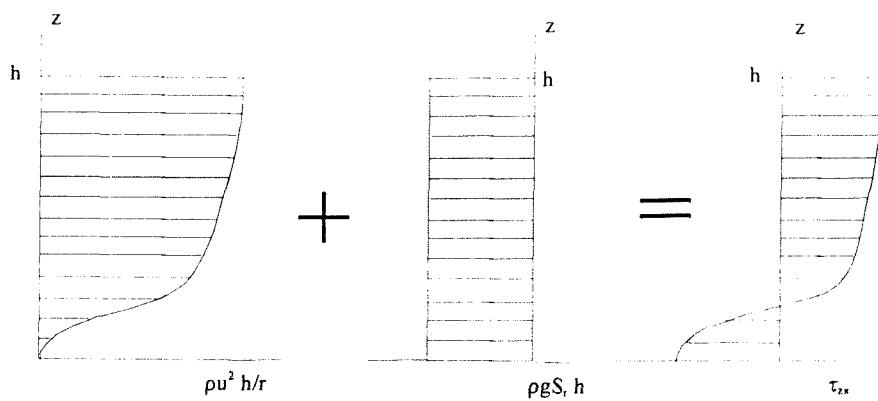
Drie van deze nieuwe technieken, bodemschermen, bodemkribben en een vaste laag, worden in de volgende hoofdstukken besproken.



Figuur 2.1 Spiraalstroming in een rivierbocht. Bron: Rijkswaterstaat.



Figuur 2.2 Snelheidsprofiel en centrifugaalkracht over de verticaal. Bron: lit.[21].



Figuur 2.3 Krachten op het water. Bron: lit.[21].

2. Rivierbochten

In een rivierbocht ziet de stroming er anders uit dan in een recht stuk rivier. In een bocht treedt een zogenaamde spiraalstroming of secundaire stroming op als gevolg van de niet-uniforme snelheidsverdeling en de centrifugaalkracht die in de bocht op het water werkt. Het sneller stromende water aan het oppervlak ondervindt een grotere centrifugaalkracht en wordt richting buitenbocht gedreven. Aan de bodem is de stroming naar de binnenbocht gericht. De stroming aan de bodem verplaatst sediment van buiten- naar binnenbocht, waardoor het typische dwarsprofiel van een rivierbocht ontstaat: diep in de buitenbocht en ondiep in de binnenbocht, zie figuur 2.1.

In een bocht gelden de volgende diepte-gemiddelde bewegingsvergelijkingen (zie bijlage 2-I):

$$\rho g i h = \tau_{bs} \quad (1)$$

$$\rho g S_r h = -\tau_{bn} + \rho U^2 \frac{h}{r} \quad (2)$$

waarin:	i	=	langsverhang van de waterspiegel,
	S_r	=	dwarsverhang van de waterspiegel,
	h	=	waterdiepte,
	τ_{bs}	=	bodemschuifspanning in de langsrichting (= s-richting),
	τ_{bn}	=	bodemschuifspanning in de dwarsrichting (= n-richting),
	U	=	diepte gemiddelde stroomsnelheid in langsrichting.
	ρ	=	soortelijke massa van het water
	g	=	gravitatieversnelling
	r	=	bochtstraal

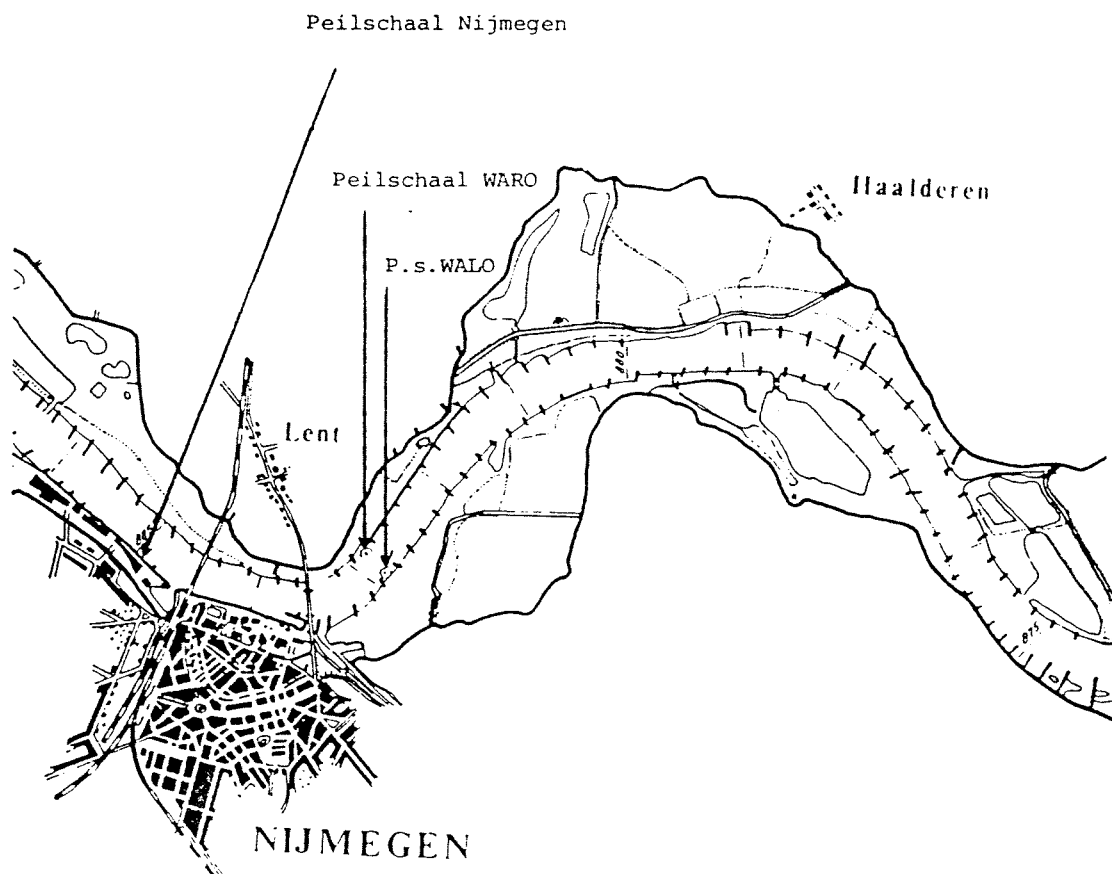
Diepte-gemiddeld gezien is er in dwarsrichting krachtenevenwicht (vgl. 2), maar lokaal gezien is dat niet het geval. Doordat de stroomsnelheid (u) bij de bodem veel kleiner is dan bij het wateroppervlak, ondervindt het water bij de bodem een veel kleinere centrifugaalkracht ($\rho u^2/r$), zie figuur 2.2. De kracht ten gevolge van het dwarsverhang ($\rho g S_r h$) is constant over de diepte. De resulterende kracht op het water is te zien in figuur 2.3. Deze kracht, die aan de bodem naar de binnenbocht is gericht en aan het oppervlak naar de buitenbocht, veroorzaakt de secundaire stroom.



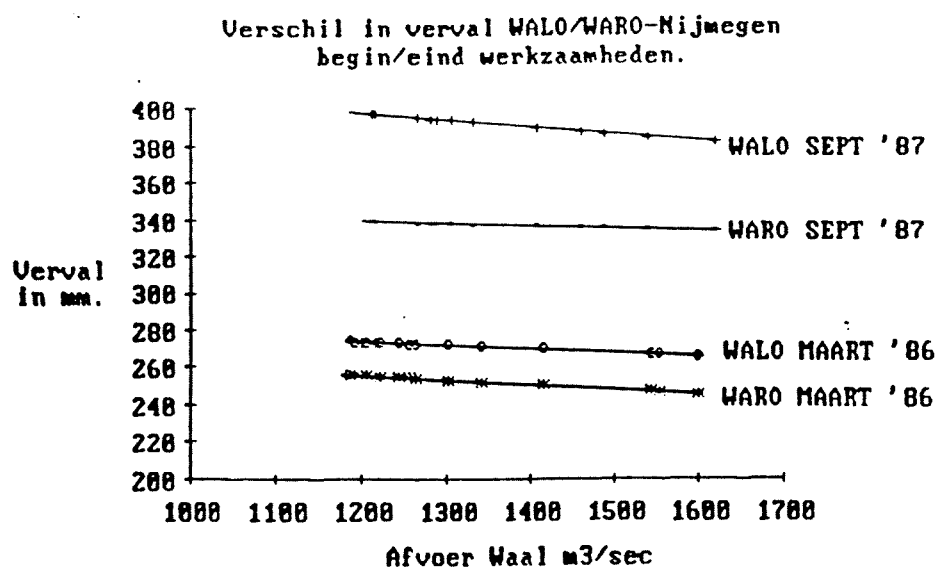
Voor het dwarsverhang kan de volgende uitdrukking worden afgeleid, zie bijlage 2-II:

$$\frac{d(h)}{dn} = - \frac{m}{\rho \kappa U B_i \sqrt{\theta \Delta g D}} \tau_{bn} \quad (3)$$

De maatregelen die tegenwoordig worden toegepast, een vaste laag, bodemkribben en bodemschermen, zijn er op gericht de spiraalstroom te onderbreken of op te heffen. In de volgende drie hoofdstukken worden deze bochtverbeteringsmaatregelen behandeld.



Figuur 3.1 Overzicht meetpunten bij Nijmegen. Bron: lit.[19].



Figuur 3.2 Langsverhang uitgezet tegen de Waalafvoer. Maart '86: begin werkzaamheden, september '87: eind werkzaamheden. Bron: lit.[19].

3. Vaste laag

3.1 Inleiding

Bij een vaste laag wordt de buitenbocht opgehoogd met zand uit de binnenbocht en vervolgens vastgelegd met een laag stortsteen. Hierdoor wordt het doorstroomoppervlak verkleind en ontstaat een ruwere buitenbocht, waardoor de stroomsnelheden in de binnenbocht groter worden en waardoor de binnenbocht uitschuurt. Bovendien kan geen zand meer van de buiten- naar de binnenbocht worden verplaatst door de spiraalstroom, omdat de buitenbocht is afgedekt met een stroomvaste laag van stortsteen.

3.2 Hydraulische effecten

In de periode 1986-1988 is in de bocht bij Nijmegen een vaste laag gerealiseerd. In die tijd is ook een onderzoek uitgevoerd naar de verandering van de bodemruwheid ten gevolge van het aanbrengen van die vaste laag (lit.[19]). Op drie lokaties zijn de waterstanden gemeten. Bovenstrooms van de bocht (bij kmr 882.875) zijn twee peilschalen geplaatst: WALO op de linker oever en WARO op de rechter oever. Benedenstrooms van de bocht bevindt zich de hoofdpeilschaal Nijmegen-haven. In figuur 3.1 zijn de meetpunten aangegeven. Uit figuur 3.2 blijkt dat zowel het langsverhang als het dwarsverhang zijn toegenomen. Bij toename van de afvoer wordt de toename van het verval over de vaste laag kleiner. Uit de vervallen en peilingen kan worden geconcludeerd dat de bodemruwheid over de Waalbocht is toegenomen.

In een onderzoek in 1994 (lit.[20]) zijn de vervalmetingen in de bocht bij Nijmegen nader geanalyseerd en is een aantal RIVCUR-berekeningen gedaan om te kijken wat het effect van de vaste laag op de waterstanden is, vooral bij hoge Waalafvoeren. Uit de metingen is voor de Q - ΔH relatie een exponentieel verband gevonden, zie ook de grafieken in de bijlagen 3-I en 3-II. In tabel 3.1 zijn voor een aantal Waalafvoeren de vervallen gegeven, zoals die met het aangenomen exponentiële verloop zijn berekend. (Dit exponentiële verband mag alleen binnen het bereik van de metingen gebruikt worden, omdat het geen fysische betekenis heeft.) De toename van het verval werd veroorzaakt door een grotere ruwheid van de vaste laag én doordat de vaste laag enkele decimeters boven de bodem kwam te liggen, waardoor een drempel in de rivier ontstond. Met het programma RIVCUR werd een toename van het verval over de bocht berekend van 10 cm, voor zowel een Waalafvoer van $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ als voor een Waalafvoer van $9530 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is dus ongeveer 5 cm meer dan uit de metingen is bepaald. Bovendien geeft RIVCUR voor toenemende Waalafvoeren een grotere toename van het verval ten gevolge van de vaste laag, terwijl uit de metingen is gebleken dat de toename van het verval kleiner wordt met toenemende afvoeren. Op het moment van het onderzoek was RIVCUR dus nog niet geschikt voor het voorspellen van waterstandsveranderingen ten gevolge van bochtmaatregelen.

Q_{waal} [m ³ /s]	Verval 1986 [cm]	Verval 1989-1993 [cm]	Toename verval [cm]
778 (OLR)	25.7	45.8	20.1
1000	25.7	41.4	15.7
1500	25.7	35.3	9.6
2000	25.7	33.0	7.3
2500	25.7	32.0	6.3
3000	25.7	31.6	5.9
3500	25.7	31.4	5.8
4000	25.7	31.4	5.7

Tabel 3.1 Vervallen voor enkele karakteristieke Waalafvoeren, berekend met het aangenomen exponentiële verloop. *Bron: lit.[20]*

Over een sterk geschematiseerd rivierdeel kan, onder aanname van uniforme stroming benedenstrooms en een constante Chezy-waarde, de toename van het verval ten gevolge van een grotere ruwheid en een locale drempel worden berekend, zie bijlage 3-III. De berekende toename van het verval voor verschillende combinaties van

Chezy-waarde en drempelhoogte is gegeven in bijlage 3-IV. Uit de berekeningen blijkt dat:

1. Een grotere ruwheid een toename van het verval veroorzaakt, die volgens de berekeningen vrijwel onafhankelijk is van de grootte van de afvoer. Dit laatste is niet in overeenstemming met de metingen, waaruit blijkt dat de toename van het verval afneemt naarmate de afvoer toeneemt.
2. De drempelwerking een toename van het verval veroorzaakt, die kleiner wordt naarmate de afvoer toeneemt. De toename van het verval ten gevolge van de drempelwerking is recht evenredig met de hoogte van de drempel.

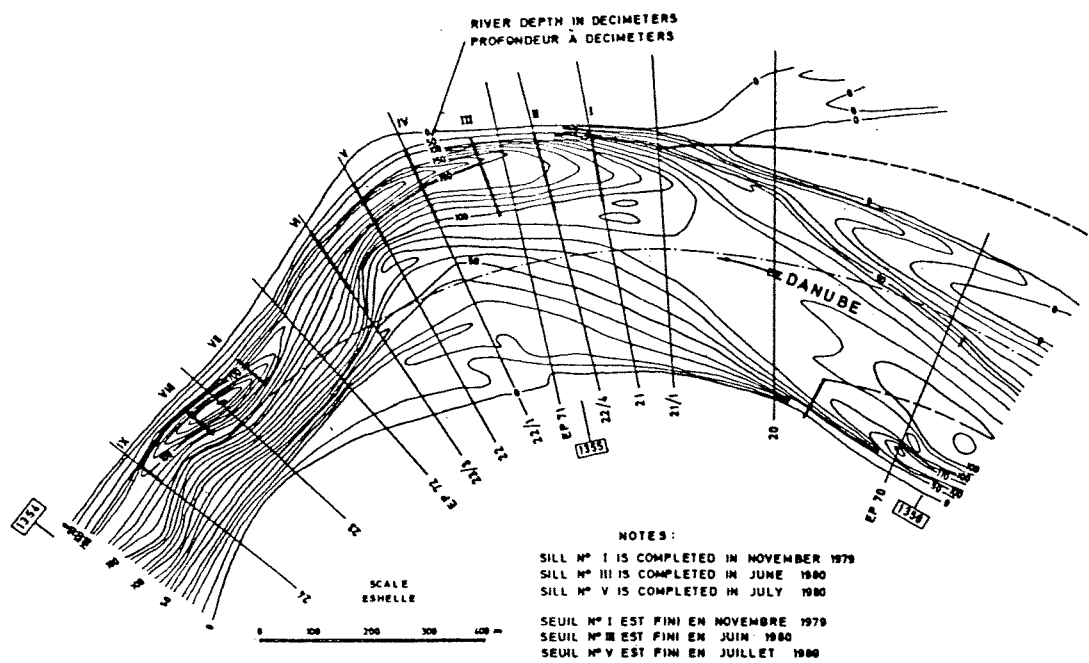
Voor effectbepalingen in het Waalproject wordt uitgegaan van opstuwingen zoals die met het programma WAQUA zijn berekend. Deze opstuwingen zijn 25 cm / 3 km en 4.5 cm / 3 km voor respectievelijk OLR en MHW (lit.[17]).

3.3 Morfologische effecten

In het kader van het Waalproject zijn met het programma SOBEK morfologische berekeningen uitgevoerd om het morfologische effect van een serie rivierkundige maatregelen te bepalen. Hierin kwam ook de geplande vaste laag bij St.Andries voor. Ter plaatse van de vaste laag is de Chezy-waarde verkleind (ruwheid vergroot) om de opstuwung ten gevolge van de vaste laag te verkrijgen. Het sedimenttransport is echter sterk omgekeerd evenredig met de Chezy-waarde, zodat ter plaatse van de vaste laag erg grote sedimenttransporten werden berekend die in de praktijk niet zullen optreden, zie bijlage 3-V. Benedenstrooms van de vaste laag zal dit sediment weer neerslaan, zodat daar grote sedimentatie optreedt. Door dit verschijnsel is het morfologische effect van de vaste laag niet goed te bepalen.



Figuur 4.1 Bodemkribben in een rivierbocht. Bron: Rijkswaterstaat.



Figuur 4.2 Bodemtopografie en locatie van de kribben. Bron: lit.[18].

4. Bodemkribben

Bodemkribben worden in de diepe buitenbocht aangelegd. Net als een vaste laag verkleinen ze het doorstroomoppervlak en verhogen ze de ruwheid, waardoor de binnenbocht uitschuurt, zie figuur 4.1. Bovendien kan er, door de bodemkribben niet helemaal loodrecht op de stroomrichting te plaatsen, plaatselijk een stromingspatroon worden opgewekt dat sediment van de ondiepe binnenbocht naar de diepe buitenbocht transporteert, hetgeen tegengesteld is aan de sedimentverplaatsing ten gevolge van de spiraalstroming.

4.1 Toepassingen in het verleden

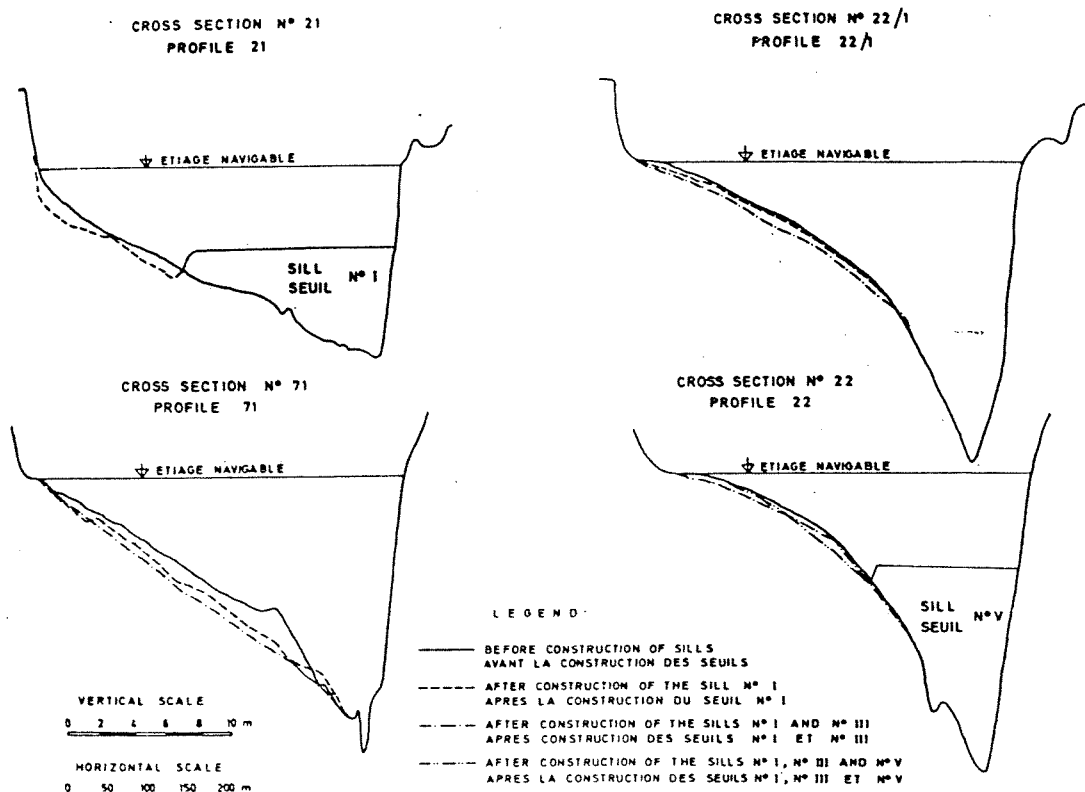
In het verleden is weinig prototype ervaring met bodemkribben opgedaan. In 1981 is op een congres van het IAHR verslag gedaan van proeven met bodemkribben in de Donau in voormalig Joegoslavië (lit[18]). In de scherpe bochten van deze rivier was de vaargeulbreedte te klein voor de scheepvaart en hiervoor werd een oplossing gezocht in de vorm van bodemkribben in de diepe buitenbocht. Eerst is gekeken naar het effect van de bodemkribben in het prototype. In de rivier werden drie kribben aangelegd, gemaakt van kunststof zakken, gevuld met zand uit de rivier. De metingen in het prototype konden later worden gebruikt voor de calibratie van een model. In figuur 4.2 en 4.3 zijn respectievelijk de bodemtopografie en dwarsdoorsneden van de rivier op een aantal plaatsen gegeven.

Eerst werd een bodemkrib aan het begin van de bocht geplaatst, nummer I in figuur 4.2. Deze zorgde ervoor dat de stroming meer door de binnenbocht stroomde en dat de ondiepe binnenbocht erodeerde. De eerste 200 meter waren deze effecten het grootst. De tweede bodemkrib werd ongeveer 200 meter benedenstrooms van de eerste geplaatst, nummer III in figuur 4.2. In deze situatie erodeerde de binnenbocht meer en traden de effecten over een grotere lengte van de rivier op. Bovendien werd een kleinere lokale erosie bij het kribhoofd geconstateerd. Bij de plaatsing van een derde bodemkrib, nummer V in figuur 4.2, traden dezelfde veranderingen op. De resultaten geven ook aan dat de bodemkrib aan het begin van de bocht het belangrijkste is. De volgende bodemkribben zorgden ervoor dat de gunstige effecten zich verder benedenstrooms over een langer deel van de rivier voortzetten.

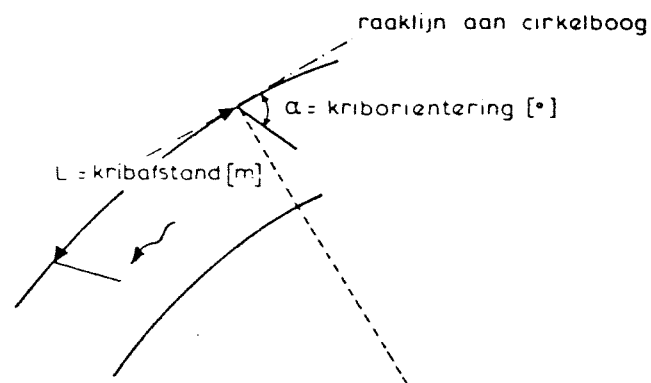
Naar aanleiding van proeven in een stroomgoot werd nog het volgende worden opgemerkt:

Wanneer de afstand tussen de bodemkribben werd gehalveerd, traden geen duidelijke veranderingen op. Onderzoek naar de afmetingen van de kribben toonde aan, dat wanneer de kribben erg laag zijn en dus slechts het allerdiepste deel van de rivierdoorsnede afsluiten, ze nauwelijks effect hebben, omdat de stromingscapaciteit van dit deel van de doorsnede relatief klein is.

Aan deze prototype proeven konden geen definitieve conclusies worden verbonden. Aanbevolen is om voor het verkrijgen van algemene richtlijnen systematisch onderzoek aan bodemkribben in een schaalmodel te doen in plaats van prototype -proeven.



Figuur 4.3 Dwarsdoorsneden van de rivier. Bron: lit.[18].



Figuur 4.4 Definitieschets configuratie bodemkribben. Bron: lit.[10].

4.2 Toepassingen in de Waal

4.2.1 Algemeen

In 1987 is, in opdracht van Rijkswaterstaat, door het Waterloopkundig Laboratorium onderzoek gedaan naar de werking van bodemkribben in een rivierbocht (lit.[10]). In de periode 1984-1986 werd in de Waalbocht bij Nijmegen een vaste laag aangelegd om de vaargeul te verbreden. Die methode is echter duur en veroorzaakt bovendien bovenstrooms van de vaste laag veel opstuwung van het water, waardoor de methode niet geschikt is voor toepassing in de Waalbochten nabij het splitsingspunt Pannerdense Kop. Daarom is besloten nader onderzoek te verrichten naar de toepassing van bodemkribben als alternatief voor de vaste laag. Bij een eerder onderzoek (project M1278, WL, 1984) was gebleken dat een vaste laag beter werkt dan bodemkribben. In dit onderzoek was de configuratie van de bodemkribben echter min of meer toevallig gekozen, zodat het niet uitgesloten was dat met een meer geoptimaliseerd ontwerp betere resultaten verkregen konden worden.

Het onderzoek werd gesplitst in een onderzoek naar de vloeistofmechanische veranderingen ten gevolge van de bodemkribben en een onderzoek naar de morfologische gevolgen ervan. In het eerste onderzoek zijn de onderlinge afstand van de kribben, de hoek waaronder een krib ligt en de vorm van een krib gevarieerd, de hoogte is constant gehouden. De proeven werden uitgevoerd in een gekromde goot met een vastgelegd bed. Het model is gebouwd voor een verschijnselformonderzoek in een buitenlandse rivier en kan als representatief worden beschouwd voor de Waal in de buurt van Nijmegen.

Vloeistofmechanisch onderzoek

Het meest optimale stroombeeld blijkt op te treden, wanneer de onderlinge afstand van de kribben een achtste is van de aanpassingslengte van de hoofdstroom, de kribben onder een hoek van $67,5^\circ$ met de raaklijn aan de buitenbocht (zie figuur 4.4) worden geplaatst en de kribben een scherpe vorm (bijvoorbeeld uitgevoerd als damwand) hebben. Dit laatste betekent dat de werking van de bodemkribben voornamelijk berust op het verkleinen van het doorstroomprofiel en de extra ruwheid van de kribben en in veel mindere mate op de beïnvloeding van de spiraalstroming. In de vergelijking tussen vaste laag en bodemkribben is geconcludeerd dat een vaste laag, qua invloed op het stroombeeld, overeenkomt met bodemkribben geplaatst op een achtste van de aanpassingslengte.

Morfologisch onderzoek

Het onderzoek naar de morfologische effecten van bodemkribben bevestigde de conclusie dat bodemkribben beter werken naarmate het talud steiler is. Wel blijken bij bodemkribben in de vorm van een damwand bovenstrooms van de krib erosiekuilen te ontstaan. Dit kan ook te maken hebben met de drie-dimensionale effecten die in het geschaalde model veel sterker zijn dan in de werkelijkheid. De

hoek van de bodemkribben is in het morfologische onderzoek constant op $67,5^\circ$ gehouden en er is dus niet gecontroleerd of deze hoek ook morfologisch gezien optimaal is. De aanleghoogte van de bodemkribben is niet onderzocht. In het morfologisch onderzoek bleken bodemkribben toch niet zo goed te werken als een vaste laag. Ten eerste was de onderlinge afstand van de bodemkribben iets groter dan de geadviseerde een achtste van de aanpassingslengte. Ten tweede bedekte het sediment de bodemkribben, waardoor de ruwheid en dus ook de werking van de bodemkrib afnam. En ten derde vormde het sediment in het model relatief te grote duinen, waardoor een relatief te kleine ruwheid van de bodemkribben optrad.

4.2.2 Waalbocht bij Erlecom

In 1990 is in de bocht bij Erlecom een proef uitgevoerd met bodemkribben. Over een derde van de bocht werden elf bodemkribben aangelegd, opgebouwd uit 25 meter lange, met zand gevulde zakken van poly-propyleen, ook wel zandworsten genoemd. De aanleghoogte van de kruinen is OLR -4,04 meter (OLR staat voor Overeengekomen Lage Rivierstand). Voorafgaand aan de aanleg van de kribben is een groot baggerwerk uitgevoerd om de bodem te vereffen en om voldoende vaarruimte te creëren, zodat tijdens de uitvoering zo min mogelijk hinder voor de scheepvaart ontstond. Er werd in totaal 400.000 m^3 materiaal gebaggerd, waarvan 140.000 m^3 weer werd teruggestort tussen de bodemkribben. Uit peilingen blijkt dat de bodem zich van de baggerwerkzaamheden herstelt, waardoor de vaargeulbreedte weer afneemt. Na de baggerwerkzaamheden (1989) was de vaargeul ongeveer 200 meter breed. In juni 1992 was de extra vaargeulbreedte ten opzichte van de situatie vóórdat gebaggerd was nog ongeveer 30 meter. En de bodem leek nog niet in evenwicht te zijn, zodat verwacht werd dat de uiteindelijke breedtewinst nog kleiner zou zijn.

Parallel aan deze prototype-proef en als vervolg op het morfologische onderzoek dat in de vorige paragraaf is besproken, is door het Waterloopkundig Laboratorium een morfologisch onderzoek uitgevoerd met het 2-D programma RIVCOM (lit.[11]), om dit programma geschikt te maken voor het ontwerpen van bodemkribbenvelden in de toekomst. Nadat de bocht geijkt was voor de situatie zonder bodemkribben, zijn de elf bodemkribben gemodelleerd met kruinhoogte OLR -3,54 meter (dit komt niet overeen met de aanleghoogte van OLR -4,04 meter van de bodemkribben bij Erlecom) en zijn berekeningen gedaan. In de figuren 4-I, 4-II en 4-III in de bijlage zijn respectievelijk de dieptelijnen zónder bodemkribben, de dieptelijnen mét bodemkribben en de lengteprofielen gegeven. Omdat op het moment van dit modelonderzoek nog geen metingen beschikbaar waren van de prototype-proef, kon de modellering nog niet definitief geëvalueerd worden. Maar bij een globale vergelijking van de resultaten van de modelberekeningen met resultaten uit proeven in een gekromde goot (Van Huystee, 1987), bleek de modellering realistische resultaten te geven. Uit de figuren 4-I en 4-II blijkt dat:

- aan het begin (bovenstrooms) van het bodemkribbenveld de vaargeul duidelijk breder is geworden (ca 40 meter), doordat de zandbank langs de rechteroever kleiner is geworden,
- de breedte-toename aan het eind van het bodemkribbenveld erg klein is (ca 10 meter),
- direct benedenstrooms van het bodemkribbenveld de vaargeulbreedte kleiner is geworden, doordat zich een grote zandbank langs de rechteroever

heeft gevormd. Waarschijnlijk kan deze zandbankvorming voorkomen worden door het bodemkribbenveld in benedenstroomse richting uit te breiden.

In het onderzoek werd geconcludeerd, dat het aangelegde bodemkribbenveld te klein is om de vereiste vaargeulverbreding te realiseren. Het knelpunt wordt ongeveer een kilometer in benedenstroomse richting verplaatst. Aanbevolen werd om te onderzoeken of uitbreiding van het bodemkribbenveld in benedenstroomse richting wél de vereiste vaargeulverbreding kan bewerkstelligen.

Dit onderzoek is gedaan in 1993 en wordt beschreven in literatuur [12]. In dit onderzoek is het oude bodemkribbenveld aan boven- en benedenstroomse zijde uitgebreid met de kribben 1 t/m 7 en 12 t/m 34, zie figuur 4-IV. De kruinhoogte in de berekeningen is OLR -3,90 meter, overeenkomend met de peilingen in de bocht bij Erlecom van juni 1992. Uit de rekenresultaten in de figuren 4-V en 4-VI blijkt dat de zandbank net benedenstrooms van het bodemkribbenveld lager wordt in de situatie met het uitgebreide bodemkribbenveld. Uit de figuren 4-V en 4-VII, waarin de vaarbaanbreedte langs de lengte-as van de rivier is gegeven voor de situatie met een uitgebreid bodemkribbenveld en de situatie zonder bodemkribben, blijkt dat de verbetering voor de scheepvaart erg tegenvalt. De maximale extra breedte-winst is ongeveer 3,5 meter. Deze conclusie komt overeen met eerdere modelonderzoeken van het Waterloopkundig Laboratorium (M1278, 1984 en Q98, 1987).

Omdat de verlenging van het bodemkribbenveld niet de gewenste resultaten opleverde, is onderzocht of met de verhoging van de kribben in het uitgebreide bodemkribbenveld de gewenste vaargeulbreedte verkregen kon worden. De kribben zijn 0,36 meter verhoogd, waarmee de hoogte op OLR -3,54 meter komt, overeenkomend met de hoogte in de eerste berekeningen. De rekenresultaten zijn gegeven in de figuren 4-VIII, 4-IX en 4-X. Ook nu bleek de extra breedte-winst erg klein te zijn: maximaal 7,5 meter.

4.2.3 Advies ontwerp bodemkribbenveld bij Erlecom

In literatuur [13] is door het Waterloopkundig Laboratorium alle bestaande kennis van de werking van bodemkribben op een rijtje gezet om een advies uit te brengen over de door Rijkswaterstaat voorgenomen uitbreiding van het bodemkribbenveld in de bocht bij Erlecom. Geconcludeerd wordt dat de gewenste verbreding van de vaargeul met 40 meter (bij OLR -2,80 meter) niet gerealiseerd kan worden met alleen bodemkribben. Er zullen aanvullende maatregelen nodig zijn. Aangenomen dat het bestaande bodemkribbenveld wordt uitgebreid, wordt het volgende geadviseerd voor het nieuwe bodemkribbenveld:

1. Een onderlinge afstand van de bodemkribben van 70 meter. In het bestaande bodemkribben veld is de afstand tussen de eerste drie en de laatste drie kribben te groot, zie tabel 4.1, zodat hier kribben tussen moeten worden geplaatst.
2. Een zo hoog mogelijke ligging van de kruin, in dit geval OLR 1991 -3,45 meter. Theoretisch is de maximale hoogteligging, rekening houdend met vaardiepte, autonome bodemdaling, kielspeling en inzinking OLR -3,35 meter. De hoogte van de vaste laag bij Nijmegen is OLR -3,30 meter en is

Kribben	Onderlinge afstand (m)
1 - 2 (bovenstrooms)	102
2 - 3	102
3 - 4	68
4 - 5	68
5 - 6	68
6 - 7	65
7 - 8	65
8 - 9	65
9 - 10	110
10 - 11 (benedenstrooms)	110

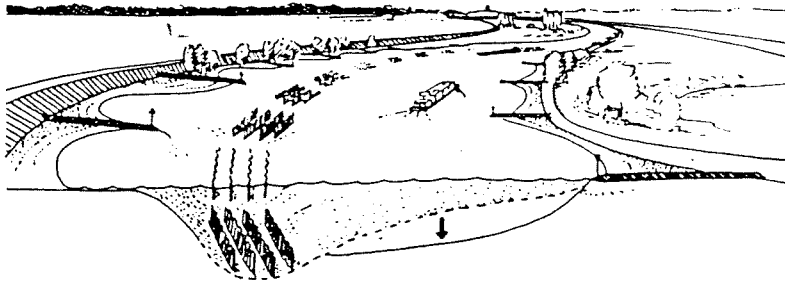
Tabel 4.1 Onderlinge afstand bodemkribben. *Bron: lit.[13].*

- dus maatgevend. Uitgaande van een uitvoeringsnauwkeurigheid van 0,15 meter, kan de aanleghoogte op OLR 1991 -3,45 meter worden gesteld.
3. Een hoek van $67,5^\circ$ tussen de raaklijn aan de buitenbocht en de krib, zie ook figuur 4-XI. Uit eerder onderzoek (lit.[10]) was gebleken dat dit de optimale hoek was.
 4. Een lengte van de bodemkribben van 200 meter. Bij deze lengte steken alle bodemkribben minimaal 10 meter in de bank in de binnenbocht, waardoor lokale erosie bij de kop van de bodemkrib wordt voorkomen.
 5. De taluds zo steil mogelijk, bij voorkeur in de vorm van damwanden. Een scherpe vorm en steile taluds blijkt de beste resultaten op te leveren (lit.[10]). Op deze manier wordt de ruwheid het meest vergroot.
 6. 26 extra kribben, waarvan 4 tussen het bestaande veld en 22 benedenstrooms daarvan, zie figuur 4-XI in de bijlage waarin de al bestaande kribben zijn gestippeld. De kribben 1 t/m 4 zijn nodig, omdat aan het begin en eind van het bestaande bodemkribbenveld de afstand tussen de kribben te groot is, wat een lokale aanzanding veroorzaakt. Uitbreiding van het bodemkribbenveld in bovenstroomse richting verbetert daar de situatie niet duidelijk, maar de toestand ter plaatse van het bestaande bodemkribbenveld wordt er wel slechter door (lit.[12]). De geplande uitbreiding in bovenstroomse richting wordt dan ook niet aanbevolen. De uitbreiding in benedenstroomse richting is nodig om de zandbank die direct benedenstrooms van het bodemkribbenveld ontstaat uit te smeren. De invloed van de bodemkribben op de benedenstroomse bocht mogen echter niet te groot zijn, omdat dan de zandbank in die bocht in benedenstroomse richting wordt weggedrukt, waardoor de vaargeulbreedte in de benedenstroomse bocht afneemt (lit.[12]). Geadviseerd wordt het bodemkribbenveld door te trekken tot kmr 876.2, waar de huidige zandbank eindigt.

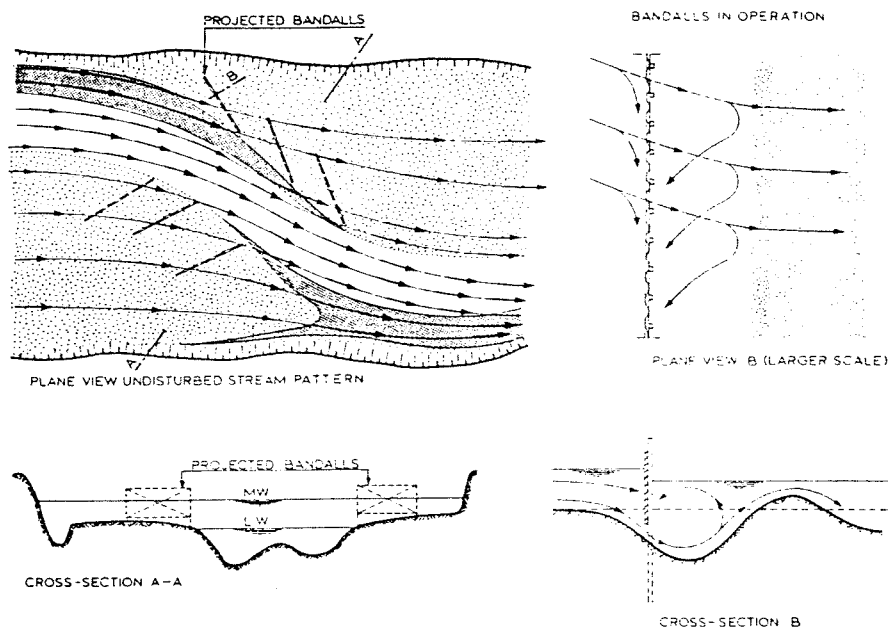
4.2.4 Evaluatie aangelegd bodemkribbenveld Erlecom

Uit vervalmetingen in de bocht bij Erlecom, direct na de aanleg van het bodemkribbenveld, is gebleken dat de opstuwing ten gevolge van de bodemkribben 14 cm bedraagt (lit.[17]). Dit betekent dat de met WAQUA berekende opstuwingen van 30 cm en 4 cm bij respectievelijk OLR en MHW in de praktijk lager zullen uitvallen. Bovendien wordt verwacht dat de ruwheid in de loop van de tijd zal afnemen door sedimentatie tussen de bodemkribben. Op het moment van de metingen was het dwarsprofiel van de bocht echter nog niet in evenwicht.

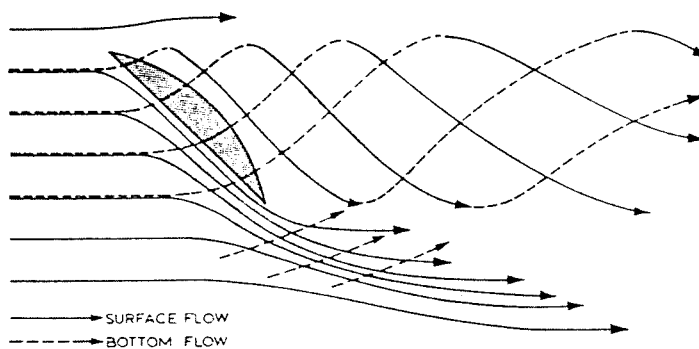
In de in paragraaf 3.3 genoemde morfologische berekeningen is ook het bodemkribbenveld van Erlecom gemodelleerd. Dit geeft dezelfde problemen als bij de vaste laag: door de kleinere Chezy-waarde treden grote sedimenttransporten op ter plaatse van de bodemkribben en grote sedimentatie benedenstrooms daarvan, zie bijlage 3-V.



Figuur 5.1 Bodemschermen in een rivierbocht. Bron: Rijkswaterstaat.



Figuur 5.2 Bandalls. Bron: lit.[22].



Figuur 5.3 Surface panels. Bron: lit.[22].

5. Bodemschermen

Bodemschermen zijn korte, verticale schermen die in de buitenste helft van een rivierbocht in het stroombed worden geplaatst, zie figuur 5.1. De schermen maken een kleine hoek (5 à 20°) met de stroming, en hebben een hoogte van $0,1$ tot $0,5$ maal de waterdiepte.

5.1 Oorsprong bodemschermen

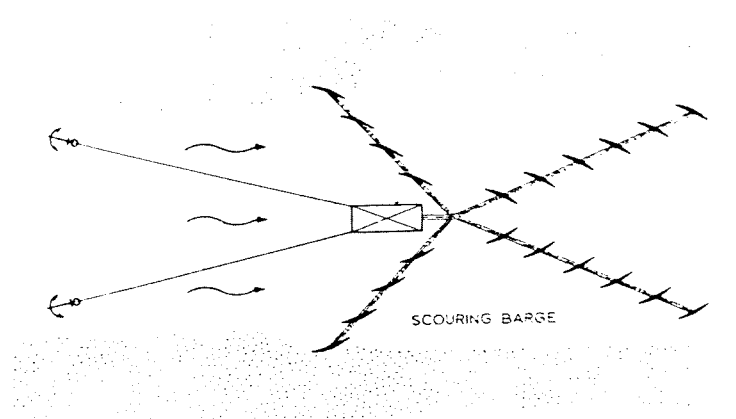
Bodemschermen vinden hun oorsprong in de toepassing van verschillende soorten schermen om de bevaarbaarheid in natuurlijke alluviale rivieren in onder andere Pakistan, India en Bangladesh te verbeteren (lit.[22], Jansen, 1979). De werking van die schermen berustte op het plaatselijk verhogen van de weerstand van de rivier en het veroorzaken van een spiraalstroom die de vaargeul uitschuurt. Het waren allemaal tijdelijke constructies, die aan het eind van een hoogwater periode werden geplaatst en werden verwijderd wanneer de vaargeul voldoende was uitschuurd.

Bandalls

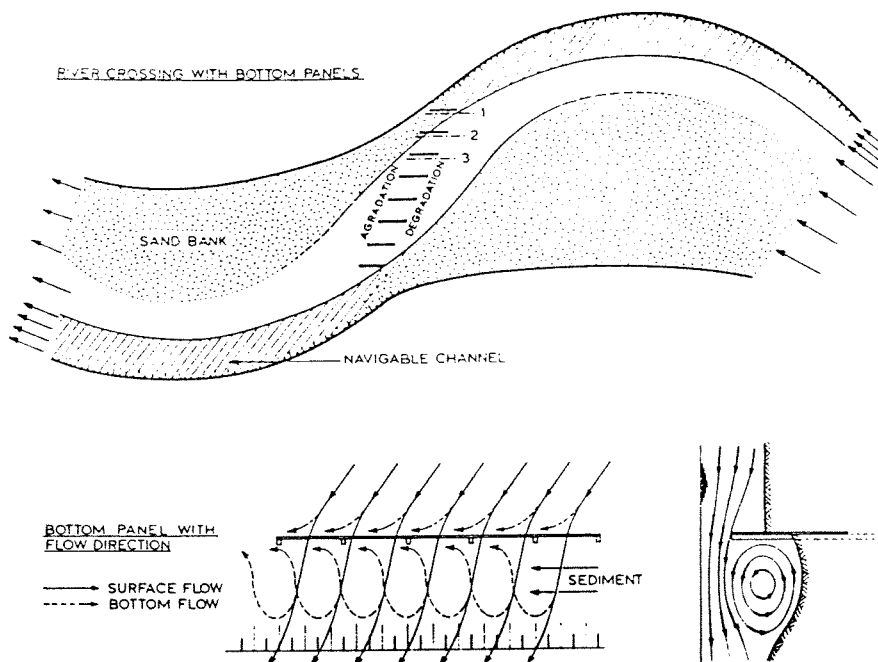
In Bangladesh werd het systeem met zogenaamde 'bandalls' ontwikkeld. Bandalls bestaan uit bamboe matten, ondersteund door palen, die op de zandbanken schuin op de stroming worden geplaatst, aan één of aan beide zijden van de vaargeul, zie figuur 5.2. Door de verhoogde weerstand concentreert de stroming zich in de vaargeul waardoor deze erodeert. Omdat het sediment uit de vaargeul moet verdwijnen, is tussen de mat en de bodem van de rivier is een kleine opening gelaten. De versnelde bodemstroming transporteert hier onderdoor het sediment, dat vervolgens achter de bandalls neerslaat. Voor een gedetailleerde beschrijving van de werking van bandalls wordt verwezen naar literatuur [9] en [22].

Surface panels

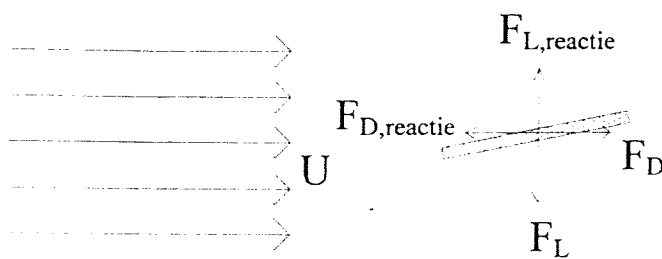
In de USSR werd door Potapov e.a. een systeem met 'surface panels' ontwikkeld. De schermen worden schuin op de stroming en iets boven de bodem geplaatst. Hierdoor buigen de oppervlakte- en de bodemstroming beide een andere kant op en ontstaat er benedenstrooms van de schermen een spiraalstroming, zie figuur 5.3. De spiraalstroom schuurt de vaargeul uit, het sediment slaat, net als bij de bandalls, achter de schermen neer. Dit systeem werd oorspronkelijk toegepast voor het tegengaan van sedimentatie in waterinlaten en voor het verminderen van de erosie van oevers in de buitenbocht van de rivier. In Frankrijk werd dit principe ook toegepast voor het uitschuren van een vaargeul. Een aantal schermen vormde samen een zogenaamde 'scouring barge', zie figuur 5.4.



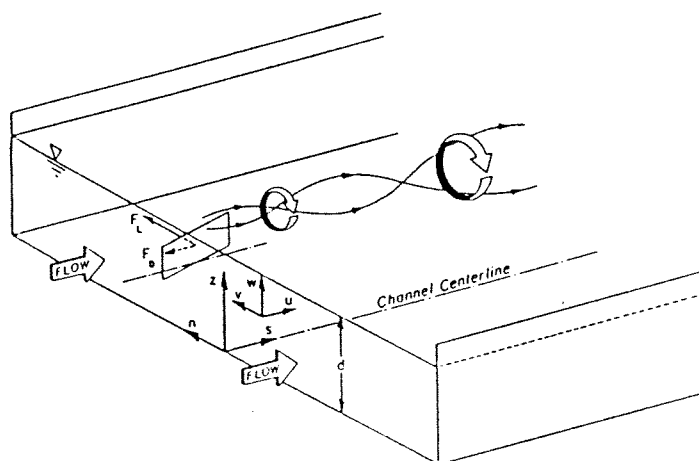
Figuur 5.4 Scouring barge. Bron: lit.[22].



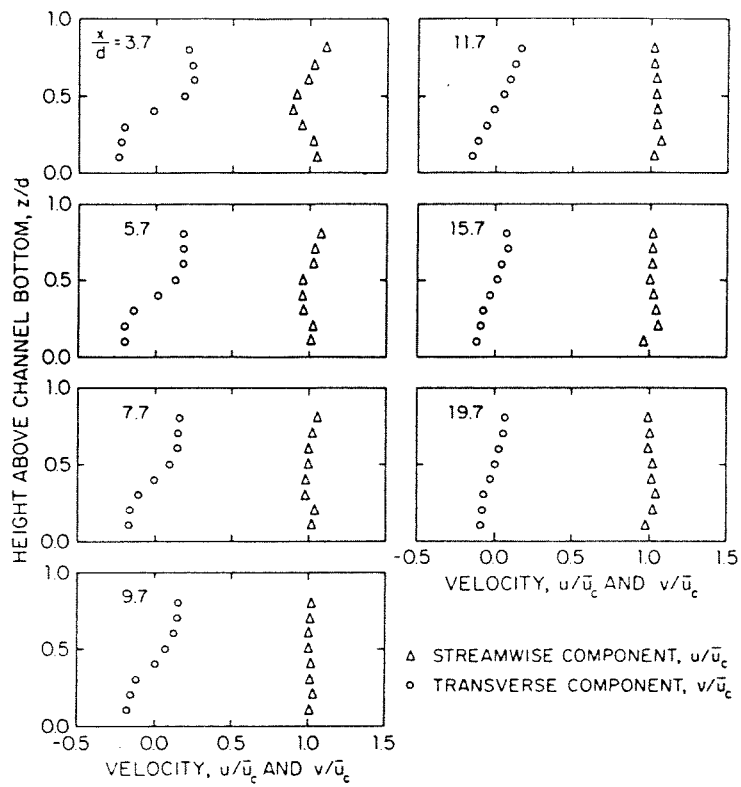
Figuur 5.5 Bottom panels. Bron: lit.[22]



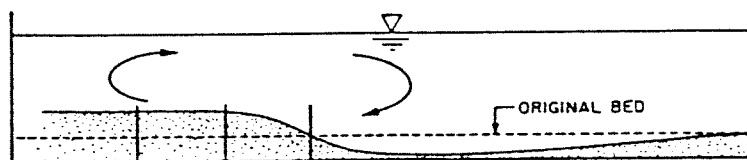
Figuur 5.6 Krachten van het water op een scherm en de reactiekrachten van het scherm op het water. Bron: lit.[21].



Figuur 5.7 Spiraalstroom, veroorzaakt door bodemscherm. Bron: lit.[6].



Figuur 5.8 Gemeten snelheden in langs- en dwarsrichting benedenstrooms van een scherm. Goot: $B = 61$ cm; $Q = 0.021$ m³/s; $h = 0.521$ m; aanstroomhoek $\alpha = 15^\circ$. Bron: lit.[3].



Figuur 5.9 Schematisch weergegeven verandering van het bodemprofiel, veroorzaakt door een rij van drie bodemschermen. Bron: lit.[6].

Bottom panels

De 'bottom panels' die begin jaren zestig in Frankrijk werden ontwikkeld, lijken al meer op de huidige bodemschermen. De schermen worden onder een hoek van 20° à 45° met de stroming geplaatst. Het water dat over de schermen stroomt, versnelt en verandert van richting. De spiraalstroom die achter een scherm ontstaat transporteert het zand uit de vaargeul. Voor details wordt verwezen naar literatuur [9] en Batalin (1961). In figuur 5.5 is te zien hoe de bodemschermen worden gebruikt voor het verdiepen van een vaargeul. Ook werden ze toegepast bij het afsluiten van riviertakken. Bodemschermen hoeven niet te worden verwijderd, maar kunnen na de volgende hoogwater periode weer opnieuw hun werk doen. In een niet vastgelegde rivier staan ze na een hoogwater echter zelden op de goede plaats en is ook deze methode slechts een tijdelijke oplossing.

5.2 Toepassingen van bodemschermen

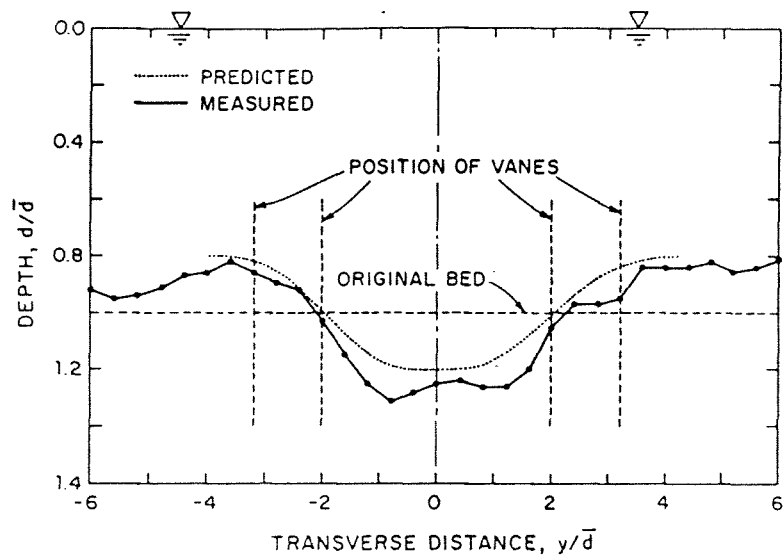
Volgens Jansen e.a. (1979, lit.[22]) was de efficiency van de in de vorige paragraaf besproken methoden laag en was men nooit zeker van hun succes. In de jaren tachtig toonden studies van het Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) aan dat de methode met bodemschermen (ofwel 'submerged-vane structure') een effectieve en economische manier kan zijn voor het oplossen van zeer uiteenlopende sedimentatie en erosie problemen, mits de bodemschermen goed gedimensioneerd en gesitueerd worden.(lit.[2] t/m [8]).

5.2.1 Werking van de bodemschermen

De bodemschermen die de laatste jaren onderwerp van studie zijn en die ook in dit afstudeerwerk worden bedoeld, zijn korte, verticale schermen die in de buitenste helft van een rivierbocht in het stroombed worden geplaatst. De schermen maken een kleine hoek (5° à 20°) met de stroming, en hebben een hoogte van 0,1 tot 0,5 maal de waterdiepte. Wanneer het scherm een kleine hoek maakt met de stroom, ondervindt het van het water een liftkracht F_L en een sleepkracht F_D . Het scherm oefent tegengestelde reactiekrachten op het water uit, zie figuur 5.6. De formules voor de berekening van de krachten F_L en F_D worden gegeven in Bijlage 5-1 (lit.[6]).

De spiraalstroom ontstaat doordat er over het scherm een drukverschil heerst: aan de bovenstroomse kant neemt de druk van onder- naar bovenkant scherm af en aan de benedenstroomse kant neemt de druk van onder- naar bovenkant scherm toe. Hierdoor is aan de bovenstroomse kant van het scherm de stroming naar boven gericht en aan de benedenstroomse kant naar onder gericht. Dit resulteert in een spiraalstroom benedenstrooms van een bodemscherm, zie figuur 5.7. Ook in experimenten in een rechte goot werd een spiraalstroom gemeten, zie figuur 5.8.

Doordat de bodemstroming, die het sediment verplaatst, verandert ten gevolge van de bodemschermen, ontstaat er mét bodemschermen een ander bodemprofiel dan zonder bodemschermen, zie figuur 5.9. Bij een experiment met bodemschermen in een rechte stroomgoot werd het bodemprofiel in figuur 5.10 gemeten. De schermen staan (met de stroom mee) naar de buitenkant van de goot gericht, zodat het sediment door de opgewekte spiraalstroming uit het midden van de goot naar de buitenkant wordt verplaatst.



Figuur 5.10. In een stroomgoot gemeten verandering van het bodemprofiel benedenstrooms van bodemschermen. *Bron: lit.[4].*

5.2.2 De bodemschermen van Odgaard

De studies en toepassingen van Odgaard e.a. aan het IIHR hadden voornamelijk als doel het verminderen van de uitschuringsdiepte in de buitenbocht, waardoor minder dure oeverbeschermingen nodig waren en het vastleggen van riviergeulen om de erosie van bijvoorbeeld bruggehoofden tegen te gaan. In figuur 5.11 zijn enkele van deze toepassingen van bodemschermen gegeven.

5.2.3 Bodemschermen in een rivierbocht

Bodemschermen in een rivierbocht richten de bodemstroming naar de buitenbocht, waardoor de secundaire of spiraalstroom die in een bocht van nature aanwezig is (zie hoofdstuk 1) wordt tegengewerkt of opgeheven. Hierdoor vermindert de erosie van de oever van de buitenbocht en schuurt de bodem in de buitenbocht minder uit. Het dwarsprofiel van de rivierbocht verandert: minder diep in de buitenbocht en dieper in de binnenbocht. In bijlage 5-II is een voorbeeld van een experiment in een stroomgoot gegeven. In de grafieken zijn de gemeten dwarsprofielen van vóór en na de installatie van de schermen gegeven. Hierin is duidelijk te zien dat:

- de diepe buitenbocht door de schermwerking minder diep is geworden,
- de ondiepe binnenbocht dieper is geworden, vooral duidelijk te zien in de doorsneden 80, 88 en 144,
- de helling van de bodem in dwarsrichting sterk is afgenomen (en in doorsnede 144 zelfs verdwenen is).

In Nederland zijn in 1990 in de IJssel, bij Fortmont, bodemschermen op kleine schaal beproefd. Ze hadden daar geen succes, omdat ze onvoldoende parallel aan elkaar stonden en er te weinig schermen zijn geplaatst. De afgelopen jaren zijn er, onder leiding van het Waterloopkundig Laboratorium, modelproeven gedaan in een laboratorium in Caïro en daaruit bleek dat de schermen een sterke spiraalstroming kunnen opwekken. Daarmee zou de breedte van de vaargeul wel degelijk kunnen worden vergroot. Een nauwkeurige uitvoering is noodzakelijk voor het succes van de schermen. De afwijking in de hoek die de schermen met de hoofdstroom maken, mag niet meer dan vijf graden zijn.

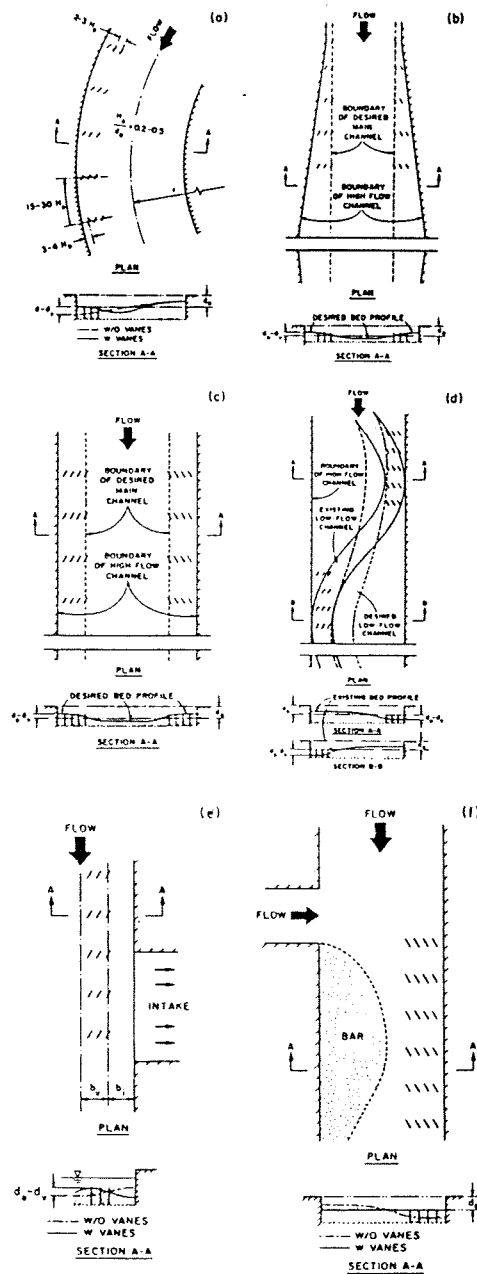
De diepte-gemiddelde bewegingsvergelijkingen in een rivierbocht met bodemschermen zijn (lit.[6]):

$$\rho g h = \tau_{bs} + f_s H_v \quad (4)$$

$$\rho g S_r h = -\tau_{bn} + f_n H_v + \rho U^2 \frac{h}{r} \quad (5)$$

Waarin:

τ_{bs}, τ_{bn}	=	bodemschuifspanning in respectievelijk langs- (s-) en dwars-(n-)richting,
f_s, f_n	=	krachten ten gevolge van de schermen, gelijkmatig over het horizontale vlak en over de hoogte van de schermen verdeeld, respectievelijk in de langs- (s-) en de dwars- (n-) richting,
H_v	=	hoogte waarover de schermen boven water uitsteken (subscript 'v' staat voor 'vanes').



Figuur 5.11

Toepassingen van bodemschermen bij oeverbescherming en/of ter voorkoming van ondiepten: (a) in een rivierbocht; (b) in een verbreding bij een brug; (c) in een vaargeul; (d) in een rivier met zandbanken; (e) bij een waterinlaat; en (f) bij een samenvloeiing van twee rivieren. *Bron: lit.[7].*

Vergelijk deze vergelijkingen met de vergelijkingen (1) en (2) voor de situatie zonder bodemschermen in hoofdstuk 2. Uit deze vergelijkingen is af te leiden, dat de schermen ervoor zorgen dat in langs- en in dwarsrichting het verhang van de waterspiegel vergroot wordt: door de toevoeging (t.o.v. de vgl (1) en (2)) van de termen $f_s H_v$ en $f_n H_v$ wordt het rechterlid van de vergelijkingen groter. De bodemschuifspanning neemt af doordat de schermen het snelheidsprofiel in langsrichting beïnvloeden, maar deze afname is erg klein. Om evenwicht te maken, zullen i , respectievelijk S_r groter moeten worden. Om de grootte van het effect op het verhang te bepalen, moeten de snelheidsprofielen worden uitgewerkt.

Odgaard verwaarloost de invloed van de schermen op het snelheidsprofiel in langsrichting en stelt de kracht van de schermen (vanes) voor als een schuifspanning (τ_{vs}) door de kracht uit te smeren over het bodemschermenveld. Hij vindt voor het langsverhang (zie bijlage 5-III):

$$\rho g i h = \tau_{bs} + \tau_{vs} \quad \Rightarrow \quad i = \frac{U^2}{h C^2} + \frac{\tau_{vs}}{\rho g h} \quad (6)$$

En voor het dwarsverhang:

$$\frac{d(h)}{d n} = - \frac{m}{\rho \kappa U B_t \sqrt{\theta \Delta g D}} \tau_{bn} \quad (7)$$

De Vriend neemt wel de invloed van de schermen op het snelheidsprofiel mee en vindt voor het langsverhang (zie lit.[21]):

$$i = \frac{U^2}{h C^2} + \frac{f_s}{\rho g} \frac{H_v}{h} \left[1 + m \ln \frac{H_v}{h} \right] \quad (8)$$

Waarin de tweede term in het rechterlid de door de schermen op het water uitgeoefende kracht in langsrichting voorstelt en de derde term voor een correctie zorgt voor de invloed die de schermen op het snelheidsprofiel hebben.

6. Het Waalproject

De Waal is de drukst bevaren rivier in Europa. Op dit moment gaat 135 miljoen ton goederen per jaar tussen de Amsterdamse, Rotterdamse en Antwerpse haven en Duitsland over de rivier. Verwacht wordt, dat dat over tien jaar ongeveer 40 procent meer is: 160 tot 220 miljoen ton per jaar. Het geschikt maken van de Waal om ook in de toekomst voldoende transportcapaciteit te hebben, gebeurt onder de naam Waalproject. Een uitgebreide beschrijving van het Waalproject is te vinden in de Projectnota Waal en de Keuzenota Waal (lit.[14] en [15]). Hieronder worden de belangrijkste punten besproken.

6.1 Doelstelling van het Waalproject

De huidige, minimale afmetingen van de vaarweg bij de Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR) zijn 2,50 meter diep en 150 meter breed. In de in 1993 verschenen nota Toekomstvisie Waal Hoofdtransportas werd geconcludeerd dat deze afmetingen voor de toekomst niet voldoende zijn. Het scheepvaartverkeer zal toenemen en zesduwbak-combinaties moeten vaker kunnen worden ingezet. Bovendien is vanuit economisch oogpunt een grotere laaddiepte gewenst. Om ook in de toekomst het scheepvaartverkeer vlot en veilig te kunnen verwerken moet de vaargeul verruimd worden. Besloten is de vaargeulafmetingen te vergroten naar 2,80 meter diep en 170 meter breed bij OLR. Dit is de hoofddoelstelling van het Waalproject. Verder wordt op knelpunten de scheepvaartbegeleiding geïntensiveerd en worden uitwijkhavens aangelegd.

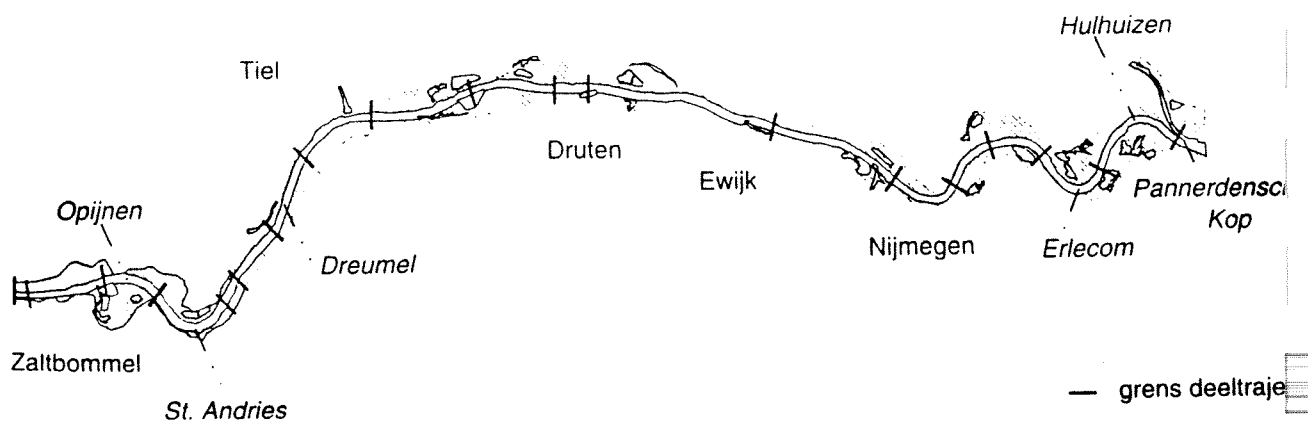
Het Waalproject is opgedeeld in drie deelprojecten: de Waalbochten boven Nijmegen, de Midden-Waal tussen Nijmegen en Tiel en de bochten bij St.Andries en Opijnen. Deze opdeling is geschied op basis van verschil in problematiek. In bochten is sprake van een te kleine breedte (zie hoofdstuk 1) en op het relatief rechte riviergedeelte, de Middel-Waal, is sprake van een te kleine diepte.

6.2 Randvoorwaarden

Omdat ingrepen in rivieren meestal niet alleen lokale effecten hebben, maar ook verder boven- en benedenstrooms hydraulische en morfologische veranderingen teweeg kunnen brengen, is het noodzakelijk de maatregelen in samenhang te toetsen aan de randvoorwaarden.

De randvoorwaarden die gelden zijn:

- De maatregelen mogen niet de veiligheid tegen overstromingen nadelig beïnvloeden. Dit betekent dat geen verhoging van de Maatgevend Hoogwaterstanden (MHW) mag optreden.



Figuur 6.1 De Waal tussen de Pannerdense Kop en Zaltbommel. Bron: *Rijkswaterstaat*.

- In droge tijden mag de waterhuishouding van Nederland niet nadelig worden beïnvloed. Dit betekent dat bij lage waterstanden (OLR) de afvoerverdeling in de Rijntakken niet mag veranderen.
- De op dit moment optredende autonome bodemdaling mag door de maatregelen in de Waal niet vergroot worden.

6.3 Breedteknelpunten

Omdat dit afstudeerwerk gaat over bochtverbeteringen, wordt hier voornamelijk aandacht besteed aan het probleem van onvoldoende breedte in de bochten. Op de volgende bochttrajecten worden in het Waalproject maatregelen genomen om de vaargeulbreedte te vergroten (zie ook figuur 6.1):

- Hulhuizen
- Erlecom
- Haalderen I
- Haalderen II
- Nijmegen
- St. Andries
- Opijnen

6.4 Maatregelen

Naast het aanleggen van een vaste laag, bodemkribben en het plaatsen van bodemschermen, komen de volgende maatregelen in aanmerking om toegepast te worden in het Waalproject:

Baggeren

Hierbij worden ondiepten weggebaggerd. Baggeren moet periodiek gebeuren, na een hoogwaterperiode waarin de ondiepten ontstaan of vooruitlopend op het ontstaan van een ondiepte door een reserve-diepte te baggeren. Om te voorkomen dat de bodem daalt, moet het gebaggerde materiaal in de rivier worden teruggestort.

Versmalling door middel van kribverlenging

Door het verlengen van de kribben wordt het doorstroomprofiel van de rivier kleiner en nemen de stroomsnelheden toe. De rivier schuurt zichzelf uit, de diepte neemt dus toe.

Bochtstraalcorrectie

Hierbij worden de kribben in de bocht zodanig verlengd of verkort, dat de straal van de bocht groter wordt en de bocht minder scherp is. Hierdoor is de spiraalstroming minder sterk en dus ook het verschijnsel van de diepe buitenbocht en de ondiepe binnenbocht.

Verminderen zijdelingse uitwisseling

Bij hoogwater stroomt water over een laag punt van de zomerdijk de uiterwaard in. Stroomafwaarts stroomt het water weer ergens het zomerbed in. Dit wordt de zijdelingse uitwisseling genoemd. Wanneer plaatselijk meer water door het winterbed gaat stromen, nemen de stroomsnelheden in het zomerbed af. Als gevolg daarvan ontstaat er een zandbank in de vaargeul. Op de plaats waar het water weer het zomerbed instroomt, schuurt de vaargeul uit ten gevolge van de ter plekke toenemende stroomsnelheden. Het verminderen van de zijdelingse uitwisseling heeft tot doel het ontstaan van bovengenoemde zandbanken te voorkomen en kan worden gerealiseerd door het verhogen van een oeverwal of zomerkaden of het aanleggen van dwarskaden.

Kribvakafsluiting

Door de verwijding van de stroombanen tussen twee kribben nemen plaatselijk de stroomsnelheden af en kunnen zich lokale zandbanken vormen. Een (gedeeltelijke) kribvakafsluiting verbetert de stroomgeleiding en vermindert de uitwisseling tussen het kribvak en de hoofdgeul.

De vaste laag, bodemkribben, bodemschermen en bochtstraalcorrectie worden uitsluitend in bochten toegepast. De overige maatregelen kunnen zowel in bochten als op rechte rivierstukken effectief zijn.

Voor de bochten bij Erlecom en St. Andries is al een definitieve keuze gemaakt: bij Erlecom is in de zomer van 1996 de bochtverbetering met bodemkribben gereed gekomen en bij St. Andries wordt binnenkort begonnen met de aanleg van een vaste laag.

6.5 Alternatieven

Bij het genereren van alternatieven is eerst een tweetal basisalternatieven bekeken: de (scheepvaart-) alternatieven S1 en S2, die principieel verschillende riviertechnische maatregelen bevatten voor het bereiken van de vereiste vaarwegdimensies:

- S1: Alternatief met een minimum aan constructieve maatregelen. Hierbij ligt het accent op de maatregel baggeren, hetgeen leidt tot een aanzienlijke, jaarlijks terugkerende baggerinspanning
- S2: Alternatief met een maximum aan constructieve maatregelen. De maatregelen worden gekenmerkt door een grote eenmalige inspanning voor de aanleg en een geringe inspanning voor het jaarlijkse baggerwerk.

Voor deze twee alternatieven is globaal naar de effecten gekeken om een beeld te krijgen van de orde-grootte van de belangrijkste effecten en om de methode van effectbepaling te toetsen. Na deze globale analyse op basis van de alternatieven S1 en S2 is een aantal alternatieven bekeken waarin de belangrijkste effecten geoptimaliseerd zijn:

- effecten voor de scheepvaart: het scheepvaart-alternatief (SA),
- effecten voor de ruimte voor de andere gebruiksfuncties van de rivier: het gebruikersruimte-alternatief (GA),

Maatregeltraject		SA	GA	EA
1	Hulhuizen	-9.000	-51.000	-8.000
2	Erlecom	+7.000	-6.000	-8.000
3	Haalderen I	0	+5.000	+5.000
4	Haalderen II	-5.000	+4.000	+30.000
5	Nijmegen	0	0	+29.000
6	Slijk-Ewijk	+1.000	+1.000	+1.000
7	Dodewaard	0	0	+20.000
8	Druten	-1.000	-1.000	+11.000
9	IJendoorn I	-6.000	-6.000	+5.000
10	IJendoorn II	-21.000	-21.000	+13.000
11	Tiel	-10.000	-10.000	+1.000
12	Dreumel	-49.000	-49.000	-5.000
13	Varik	-16.000	-15.000	-21.000
14	Heerewaarden	-6.000	-6.000	-16.000
15	St. Andries	-9.000	-9.000	-19.000
16	Opijnen	0	0	0
17	Zaltbommel I	0	0	0
18	Zaltbommel II	0	0	0
Totaal		-124.000	-164.000	+37.000

Tabel 6.1 Extra jaarlijkse baggerhoeveelheden per alternatief door verandering van de waterstanden bij OLR (in m³). Bron: lit.[15].

Alternatief	Oorspronkelijke baggerhoeveelheid	Aanzandingseffect	Waterstandseffect bij OLR	Aangepaste baggerhoeveelheid
SA	525.000	+17.000	-124.000	418.000
GA	1.102.000	+10.000	-164.000	948.000
EA	566.000	+12.000	+37.000	615.000

Tabel 6.2 Aanpassing jaarlijkse baggerhoeveelheden van de alternatieven door aanzandingseffect en waterstandseffect bij OLR (in m³). Bron: lit.[15].

- effecten voor milieu, natuur en landschap: het meest milieuvriendelijke alternatief (MMA),
- effecten voor de kosten: het economisch alternatief (EA).

Voor de invulling van de alternatieven wordt verwezen naar literatuur [15]. De maatregelen in het gebruiksruimte alternatief en het meest milieuvriendelijke alternatief blijken hetzelfde te zijn.

6.5.1 Toetsing van de alternatieven

De drie overgebleven alternatieven zijn getoetst op:

- het effect van de verandering van de waterstanden bij OLR,
- de verandering van de waterstanden bij MHW en de benodigde aanvullende maatregelen om opstuwing te compenseren,
- de verandering van de afvoerverdeling bij OLR bij de Pannerdense Kop,
- de omvang van de aanzanding bovenstrooms van de constructieve maatregelen in bochten, als gevolg van de opstuwing van het water,
- het effect op de autonome bodemontwikkeling.

De omvang van de aanzanding en het effect van de verandering van de waterstanden bij OLR is uitgedrukt in extra baggerhoeveelheden en is gegeven in de tabellen 6.1 en 6.2. Alleen bij het economisch alternatief neemt de jaarlijkse baggerhoeveelheid toe.

Voor de berekening is gebruik gemaakt van het 1-D model SOBEK. Ook zijn de waterstanden berekend in de MHW-situatie (maatgevend hoogwater) met de aanvullende maatregelen om opstuwing te compenseren. De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven in bijlage 6-I. Het scheepvaart-alternatief veroorzaakt de meeste opstuwing. Hierbij zijn tien aanvullende maatregelen nodig. Bij het economisch alternatief zijn zeven aanvullende maatregelen nodig en bij het gebruiksruimte alternatief twee.

Wat betreft de verandering van de afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop zijn er geen duidelijke verschillen tussen de drie alternatieven, zie ook bijlage 6-I. Dit komt voornamelijk doordat de bodemkribben in de bocht bij Erlecom, die al aanlegd zijn en dus in elk alternatief voorkomen, erg bepalend zijn voor de opstuwing en dus ook voor de afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop. Een hogere waterstand bij de Pannerdense Kop betekent dat minder water naar de Waal gaat. Ter compensatie van de opstuwing zijn bij alle drie de alternatieven aanvullende maatregelen nodig.

Wat het effect van de alternatieven op de autonome bodemontwikkeling is, is nog niet duidelijk. Wel is een aantal verkennende berekeningen uitgevoerd, maar hieruit mogen geen definitieve conclusies worden getrokken.

Maatregeltraject		Oorspronk. baggerhoev.	Aanzandings- effect	Waterstands- effect OLR	Aangepaste baggerhoev.
1a	Hulhuizen (bocht)	42.000	0	-13.000	29.000
1b	Hulhuizen (crossing)	48.000	+5.000	-23.000	30.000
2a	Erlecom (bocht)	56.000	0	-16.000	39.000
2b	Erlecom (crossing)	17.000	+5.000	-2.000	20.000
3a	Haalderen I (bocht)	16.000	0	-2.000	14.000
3b	Haalderen I (crossing)	1.000	+5.000	0	6.000
4a	Haalderen II (bocht)	25.000	0	-2.000	23.000
4b	Haalderen II (crossing)	22.000	+5.000	0	27.000
5a	Nijmegen (bocht)	68.000	0	0	68.000
5b	Nijmegen (crossing)	3.000	0	0	3.000
6	Slijk-Ewijk	26.000	0	0	26.000
7	Dodewaard	118.000	0	-4.000	115.000
8	Druten	12.000	0	0	12.000
9	IJzendoorn I	39.000	0	-3.000	36.000
10	IJzendoorn II	82.000	0	-9.000	73.000
11	Tiel	42.000	0	-5.000	36.000
12	Dreumel	86.000	0	-21.000	65.000
13	Varik	33.000	0	-16.000	17.000
14	Heerewaarden	13.000	0	-6.000	7.000
15a	St. Andries (bocht)	26.000	0	-13.000	13.000
15b	St. Andries (crossing)	6.000	+5.000	0	11.000
16a	Opijnen (bocht)	43.000	0	0	43.000
16b	Opijnen (crossing)	8.000	0	0	8.000
17	Zaltbommel I	12.000	0	0	12.000
18	Zaltbommel II	3.000	0	0	3.000
Totaal		847.000	+25.000	-135.000	736.000

Tabel 6.3

Verandering jaarlijkse baggerhoeveelheid bij het Voorkeurs Alternatief (in m³). Bron: lit.[15].

6.5.2 Effectbepaling van de alternatieven

De verschillende alternatieven worden beoordeeld aan de hand van de volgende effecten:

- Effecten op de scheepvaart. Dit betreft de veiligheid en vlotheid van de verkeersafwikkeling.
- Kosten.
- Effecten op natuur en landschap en overige gebruiksfuncties.
- Inpasbaarheid in plannen van derden.
- Risico's en onzekerheden.
- Effecten op de RWS-organisatie. Dit betreft het aantal mensjaren dat nodig is voor de realisatie van het alternatief.
- Flexibiliteit.

Voor de uitwerking van de effectbepaling wordt verwezen naar literatuur [15].

6.6 Het Voorkeurs Alternatief

Aan de hand van de effectbepaling en de voor- en nadelen van de verschillende alternatieven die daaruit voortvloeien, is getracht een 'verbeterd' alternatief te maken door de voordelen van de alternatieven zo veel mogelijk te combineren en de nadelen zo veel mogelijk te beperken. Het alternatief dat hieruit voortkomt wordt het Voorkeurs Alternatief (VA) genoemd. Voor de invulling van het Voorkeurs Alternatief wordt verwezen naar literatuur [15].

6.6.1 Toetsing van het Voorkeurs Alternatief

Het Voorkeurs Alternatief is op dezelfde punten getoetst als de drie voorgaande alternatieven (zie paragraaf 6.5.1). In tabel 6.3 is de verandering van de jaarlijkse baggerhoeveelheden gegeven. Om te voldoen aan de eis dat geen hogere waterstanden mogen optreden tijdens MHW, is ook voor het Voorkeurs Alternatief een aantal aanvullende maatregelen nodig. In bijlage 6-I is de verandering van de waterstanden, berekend met SOBEK, gegeven. Net als bij de voorgaande drie alternatieven, wordt is ook van het Voorkeurs Alternatief de invloed op de autonome bodemontwikkeling nog niet duidelijk.

6.6.2 Effectbepaling van het Voorkeurs Alternatief

In de tabel in bijlage 6-II zijn de effecten van de vier alternatieven vergeleken en is een rangorde in de effecten aangebracht. In literatuur [15] wordt de effectbepaling gedetailleerd beschreven.

7. Conclusies

De van nature in een rivierbocht aanwezige spiraalstroom veroorzaakt in de bocht een dwarsverhang van de bodem. Hierdoor ontstaat een relatief diepe, smalle vaargeul in de buitenbocht, hetgeen een knelpunt voor de scheepvaart kan vormen. Omdat bochtverbeteringsmaatregelen als bochtafsnijdingen té ingrijpende gevolgen hebben voor de rivier en het milieu, worden tegenwoordig maatregelen gezocht die alleen lokaal invloed hebben op de rivier. Drie maatregelen, die tot doel hebben een bredere vaargeul in de bocht te creëren, zijn in dit verslag besproken, te weten: vaste laag, bodemkribben en bodemschermen.

Een vaste laag verkleint het doorstroomprofiel van de rivier en verhoogt de ruwheid in de buitenbocht, waardoor de binnenbocht uitschuurt. Als gevolg van de hogere ruwheid wordt het water bovenstrooms opgestuwd. Bovendien vormt de vaste laag een drempel, waardoor ook opstuwing ontstaat. De opstuwing is 25 cm/ 3 km voor OLR en 4.5 cm / 3 km bij MHW. Een vaste laag is een relatief dure methode.

Ook de werking van bodemkribben berust op het verkleinen van het doorstroomprofiel en het verhogen van de ruwheid in de buitenbocht. Door de bodemkribben onder een bepaalde hoek te plaatsen, wordt bovendien getracht de spiraalstroom te beïnvloeden. Deze invloed is echter vrij klein. Ook bodemkribben veroorzaken bovenstrooms opstuwing van de waterstanden. Uit modelproeven en berekeningen is een voor de Waal optimaal bodemkribbenveld ontworpen. Deze methode is goedkoper dan de vaste laag. Uit recente vervalmetingen over het bodemkribbenveld bij Erlecom blijkt de opstuwing 14 cm bij OLR te zijn. Hierbij moet worden opgemerkt dat het dwarsprofiel van de bocht nog niet de evenwichtstoestand heeft bereikt.

Bodemschermen heffen de spiraalstroom in een bocht (gedeeltelijk) op, waardoor het dwarsverhang in de bocht afneemt en de vaarbreedte groter wordt. Bodemschermen veroorzaken nauwelijks extra ruwheid, waardoor het effect op de waterstanden bovenstrooms erg klein is. In de Verenigde Staten hebben de bodemschermen zich al bewezen, voornamelijk met als doel het beschermen van de oever in de buitenbocht en het vastleggen van de stroomgeul. De methode vereist een nauwkeurige uitvoering, maar is relatief goedkoop.

De diepte- en breedteknelpunten in de Waal worden weggewerkt onder de naam Waalproject. De belangrijkste randvoorwaarden hierbij zijn, dat géén verhoging van de Maatgevend Hoogwaterstanden mag optreden, de afvoerverdeling in de Rijntakken niet mag veranderen bij de Overeengekomen Lage Rivierstand en de autonomen bodemdaling niet vergroot mag worden. Het genereren van alternatieven is vanuit meerdere belangenooipunten gedaan. De effecten van deze alternatieven zijn geïnventariseerd en hieruit is een verbeterd alternatief, het Voorkeurs Alternatief, ontstaan. Op dit moment is in de bocht bij Erlecom een bodemkribbenveld aangelegd en wordt binnenkort met de aanleg van een vaste laag bij St. Andries begonnen.

Lijst van symbolen

B_t	ijkingsparameter voor het zwaartekrachtseffect in dwarsrichting (vgl. B-28)	-
C	Chezy waarde	$m^{1/2}/s$
f	ruwheidsfactor van Darcy-Weisbach	-
f_s, f_n	gelijkmatig over het horizontale vlak en over de hoogte van de schermen verdeelde krachten van de schermen op het water in respectievelijk langs- (s-) en dwars- (n-) richting	N/m^3
F_D	sleeppkracht (dragforce) van het water op een scherm	N
F_L	liftkracht (liftforce) van het water op een scherm	N
F_n	kracht in n-richting	N
F_s	kracht in s-richting	N
g	zwaartekracht versnelling	m/s^2
h	waterdiepte	m
H_v	hoogte waarover de schermen boven de bodem uitsteken (subscript 'v' staat voor 'vanes')	m
i	langsverhang van de waterspiegel	-
k	verhouding U/u_b	-
m	ruwheidsfactor ($= \kappa \sqrt{8} / f$)	-
n	coördinaat in dwarsrichting, positief richting buitenbocht	m
p	druk	N/m^2
r	kromtestraal van de bocht	m
s	coördinaat in langsrichting, positief met de stroom mee	m
S_r	dwarsverhang van de waterspiegel	-
u	snelheid in langsrichting	m/s
u_b	langssnelheid bij de bodem	m/s
u_s	langssnelheid aan het wateroppervlak	m/s
u_*	schuifspanningssnelheid	m/s
U	diepte-gemiddelde stroomsnelheid in de langsrichting	m/s
v	snelheid in dwarsrichting	m/s
v_b	dwarssnelheid bij de bodem	m/s
Z_w	niveau van de waterspiegel	m
z	coördinaat in verticale richting, positief naar boven	m
Δ	relatieve dichtheid van het sediment ($\rho_s - \rho$)/ ρ	-
ε	eddy viscositeit	m^2/s
θ	Shields parameter	-
κ	von Karman constante (0.4)	-
ρ	dichtheid van water	kg/m^3
ρ_s	dichtheid van het sediment	kg/m^3
τ_{bn}	bodemschuifspanning in de dwarsrichting (= n-richting)	N/m^2
τ_{bs}	bodemschuifspanning in de langsrichting (= s-richting)	N/m^2
τ_{bs}	schuifspanning t.g.v. de bodemschermen in dwarsrichting	N/m^2
τ_{nz}	schuifspanning in langsrichting als functie van z	N/m^2
τ_{sz}	schuifspanning in langsrichting als functie van z	N/m^2
τ_{vs}	schuifspanning t.g.v. de bodemschermen in langsrichting	N/m^2

Literatuur

- [1] ODGAARD, A.J. (1986); Meander flow model. I: Development. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 12, p. 1117-1136.
- [2] ODGAARD, A.J. and SPOLJARIC, A. (1989); Sediment control by submerged vanes. *Design Basis*. American Geophysical Union.
- [3] ODGAARD, A.J. and KENNEDY, J.F. (1983); River-bend bank protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 8, p. 1161-1173.
- [4] ODGAARD, A.J. and SPOLJARIC, A. (1986); Sediment control by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 12, p. 1164-1181.
- [5] ODGAARD, A.J. and MOSCONI, C.E. (1987); Streambank protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 4, p. 520-536.
- [6] ODGAARD, A.J. and WANG, Y. (1991); Sediment management with submerged vanes. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 3, p. 267-283.
- [7] ODGAARD, A.J. and WANG, Y. (1991); Sediment management with submerged vanes. II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 3, p. 284-302.
- [8] ODGAARD, A.J. (1984); Submerged vanes for flow control and bank protection in streams. Iowa Institute of Hydraulic Research.
- [9] JAMME, G. (1974); Travaux fluviaux. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.
- [10] WL (1987); Werking grondkribben ten behoeve van vaarwegverbreding in rivierbochten. Verslag detailonderzoek en Verslag verschijnselonderzoek, Q98. Waterloopkundig Laboratorium.
- [11] WL (1990); Bodemkribben Waalbocht Erlecom. Rivcom-berekeningen. Verslag rekenonderzoek, Q956. Waterloopkundig Laboratorium.
- [12] WL (1993); Bodemkribben Waalbocht Erlecom. Rivcom-berekeningen voor uitbreiding bodemkribbenveld. Verslag rekenonderzoek, Q1504. Waterloopkundig Laboratorium.
- [13] WL (1994); Advies bodemkribben Erlecom. Bureaustudie, Q1856. Waterloopkundig Laboratorium.
- [14] RWS (1996); Projectnota Waal. Verdieping en verbreding van de vaarweg tussen de Pannerdensche Kop en Zaltbommel. W-KS-96070, versie 2.1. Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.
- [15] Keuzenota Waal, juli 1996, RA/96-198. Resource Analysis.
- [16] RWS (1996); Modellerings riviermaatregelen. W-KS-95077, versie 3.0. Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.
- [17] RWS (1996); Ontwerpnota (Hydraulisch / morfologische effectbepaling project Waal). B-KS-96017, versie 2.1. Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.
- [18] MUSKATIROVI, J. (1981); Regulation of sharp river bends by submerged sills. International Association for Hydraulic Research. Congress XIX, New Delhi, 1981. Volume II, subject A (d) paper 19.
- [19] RIZA (1988); Onderzoek naar verandering in bodemruwheid ten gevolge van de bochtverbetering van de Waal te Nijmegen. Rijkswaterstaat, Dienst Binnenwateren/RIZA.

- [20] WL (1994); Waalbocht Nijmegen; stromingsweerstand vaste laag. Bureaustudie, Q1806. Waterloopkundig Laboratorium.
- [21] VRIEND, H.J. de (1996); Bodemschermen in rivierbochten. Werking vanuit Newtons perspectief gezien.
- [22] JANSEN, P.P.H. e.a. (1979); Principles of River Engineering.
- [23] HAVINGA, H. (1996); Modern rivierbeheer: integratie van scheepvaart- en natuurbelangen. Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.

Bijlagen

Bijlage 2-I: Diepte-gemiddelde bewegingsvergelijkingen bocht

Bron: literatuur [6].

De diepte-gemiddelde bewegingsvergelijkingen zijn:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + F_s \quad (\text{B-1})$$

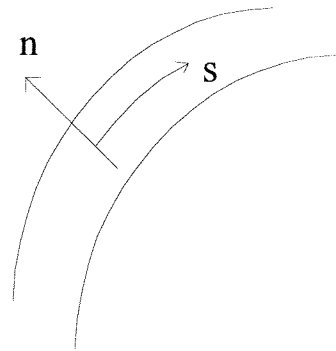
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + F_n \quad (\text{B-2})$$

Het bijbehorende assenstelsel is in figuur 2-1 gegeven. u en v zijn de stroomsnelheden in respectievelijk de s - en de n -richting.

De volgende vereenvoudigingen worden gemaakt:

Stationaire stroming: $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

Geheel ontwikkelde stroming: $\frac{\partial}{\partial s} = 0$ en $\bar{v} = 0$



Figuur 2-1. Assenstelsel.

Schuifkrachten:

In langsrichting volgt uit het krachtenevenwicht (zie figuur 2-2):

$$\tau_{sz} = \rho g i (h - z) \quad (\text{B-3})$$

Hierbij is $\sin i \approx i$ en $G = \rho g (h - z) \Delta s$.

De bodemschuifspanning is dan ($z=0$): $\tau_{bs} = \rho g i h$

Dus:
$$\tau_{sz} = \tau_{bs} \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (\text{B-4})$$

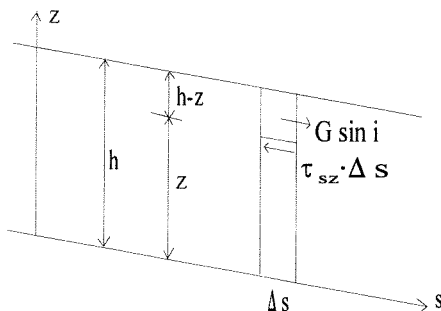
De schuifkracht F_s in vergelijking (B-1) is dan:
$$F_s = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{sz}}{\partial z} = \frac{-\tau_{bs}}{\rho h} \quad (\text{B-5})$$

In dwarsrichting volgt uit het krachtenevenwicht (zie figuur 2-3):

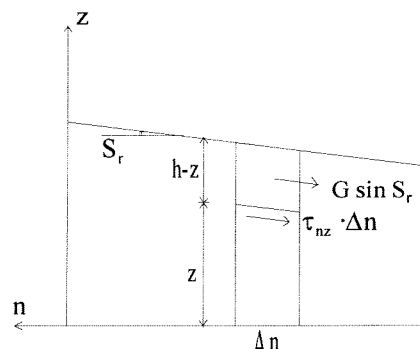
$$\tau_{nz} = -\rho g S_r (h - z) \quad (\text{B-6})$$

De bodemschuifspanning is dan: $\tau_{bn} = -\rho g S_r h$

De schuifkracht F_n in vergelijking (B-2) is dan:
$$F_n = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} = \frac{-\tau_{bn}}{\rho h} \quad (\text{B-7})$$



Figuur 2-2. Krachten in langsrichting



Figuur 2-3. Krachten in dwarsrichting

Dit invullen in de vergelijkingen (B-1) en (B-2) geeft:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\tau_{bs}}{\rho h} \quad (\text{B-8})$$

$$-\frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - \frac{\tau_{bn}}{\rho h} \quad (\text{B-9})$$

Verder geldt:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = g \frac{\partial z_w}{\partial s} \quad \text{en} \quad i = -\frac{\partial z_w}{\partial s}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = g \frac{\partial z_w}{\partial n} \quad \text{en} \quad S_r = \frac{\partial z_w}{\partial n}$$

waarin z_w het niveau van de waterspiegel is. Vergelijking (B-8) en (B-9) worden:

$$\begin{cases} \rho g i h = \tau_{bs} \\ \rho g S_r h = -\tau_{bn} + \rho U^2 \frac{h}{r} \end{cases} \quad (\text{B-10) en (B-11)}$$

In vergelijking (B-11) is voor de snelheid in langsrichting de diepte-gemiddelde waarde (U) genomen.

Bijlage 2-II: Afleiding vergelijking voor het dwarsverhang

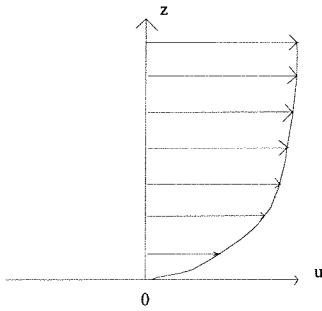
Bron: literatuur [6].

De snelheidsprofielen die worden aangenomen zijn (zie ook figuur 2-4 en 2-5):

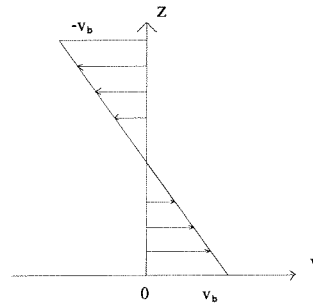
$$\text{in langsrichting:} \quad u(z) = \frac{m+1}{m} \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{m}} U \quad (\text{B-12})$$

$$\text{en in dwarsrichting:} \quad v(z) = 2v_b \left(\frac{1}{2} - \frac{z}{h} \right) \quad (\text{B-13})$$

$$\text{met} \quad m = \kappa \sqrt{\frac{8}{f}}$$



Figuur 2-4. Snelheidsprofiel in langsrichting.



Figuur 2-5. Snelheidsprofiel in dwarsrichting.

Vergelijking (B-9) in bijlage 2-I aan het wateroppervlak (de subscript 's' staat voor 'surface') is:

$$\frac{-u_s^2}{r} \rho = -g\rho S_r + \left[\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \right]_s \quad (\text{B-14})$$

Vergelijking (B-11) hierin substitueren geeft:

$$\rho (u_s^2 - U^2) \frac{h}{r} + \tau_{bn} + \left[\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \right]_s h = 0 \quad (\text{B-15})$$

$$\tau_{sz} = \tau_{bs} \left(1 - \frac{z}{h} \right) = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{met} \quad \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{m+1}{m^2} \frac{U}{h} \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{m}-1} \quad \text{geeft:}$$

$$\varepsilon = \tau_{sz} \frac{1}{\rho} \frac{m^2}{m+1} \frac{h}{U} \left(\frac{z}{h} \right)^{1-\frac{1}{m}} \quad (\text{B-16})$$

$$\tau_{nz} = \rho \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \quad \text{met} \quad \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-2v_b}{h} \quad \text{en met voor } \varepsilon \text{ vergelijking (B-16) geeft:}$$

$$\tau_{nz} = \frac{-2v_b \tau_{sz}}{U} \frac{m^2}{m+1} \left(\frac{z}{h} \right)^{1-\frac{1}{m}}$$

Hierin vergelijking (B-4) substitueren geeft:

$$\tau_{nz} = -2\tau_{bs} \frac{v_b}{U} \frac{m^2}{m+1} \left[\left(\frac{z}{h} \right)^{1-\frac{1}{m}} - \left(\frac{z}{h} \right)^{2-\frac{1}{m}} \right] \quad (B-17)$$

$$\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} = \frac{-2\tau_{bs} v_b}{hU} \frac{m}{m+1} \left[(m+1) \left(\frac{z}{h} \right)^{-\frac{1}{m}} - (2m-1) \left(\frac{z}{h} \right)^{1-\frac{1}{m}} \right] \quad (B-18)$$

aan het wateroppervlak geldt: $\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \Big|_s = \frac{2m^2}{m+1} \frac{\tau_{bs}}{h} \frac{v_b}{U}$ (B-19)

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{bs} = \rho u_*^2 \\ \tau_{bs} = \rho g h \\ U = C\sqrt{h} \end{array} \right\} \Rightarrow u_*^2 = \frac{gU^2}{C^2} \Rightarrow \tau_{bs} = \rho g \frac{U^2}{C^2} \quad (B-20)$$

$$f = \frac{8g}{C^2} \quad \text{en} \quad m = \kappa \sqrt{\frac{8}{f}} \Rightarrow m^2 = \kappa^2 \frac{C^2}{g} \quad (B-21)$$

Vergelijkingen (B-20) en (B-21) substitueren in vergelijking (B-19) geeft:

$$\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \Big|_s = \frac{2\rho \kappa^2 U}{(m+1)h} v_b \quad (B-22)$$

Aangenomen wordt, dat bij de bodem in langs- en dwarsrichting het snelheidsprofiel dezelfde vorm heeft. Dit betekent dat $\frac{v_b}{u_b} = \frac{\tau_{bn}}{\tau_{bs}}$

Gedefinieerd wordt: $k = \frac{U}{u_b}$, zodat $v_b = \frac{\tau_{bn}}{\tau_{bs}} \frac{U}{k}$ (B-23)

Vergelijking (B-15) wordt nu herschreven met behulp van de vergelijkingen (B-22) en (B-23) en met

$u_s = \frac{m+1}{m} U$ en $\tau_{bs} = \rho \kappa^2 \frac{U^2}{m^2}$ (volgen respectievelijk uit vgl. (B-12) en vgl. (B-20) en (B-21)) :

$$\tau_{bn} = \rho U^2 \frac{h}{r} - \rho u_s^2 \frac{h}{r} - \left(\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \right)_s h \Rightarrow \quad (B-24)$$

$$\tau_{bn} = -\rho U^2 \frac{h}{r} \frac{k}{m^2} \left[\frac{(2m+1)(m+1)}{k(m+1) + 2m^2} \right] \quad (B-25)$$

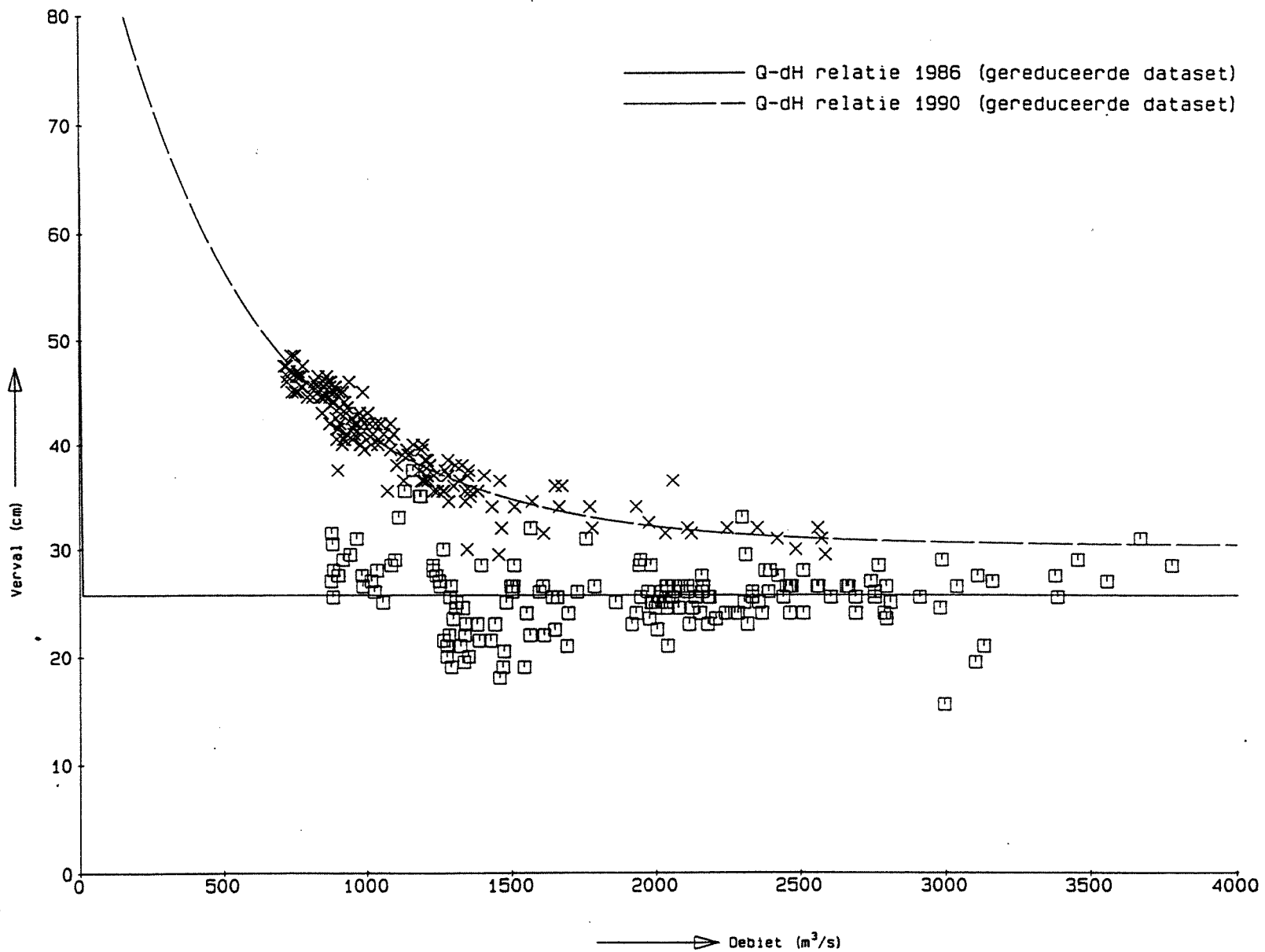
Deze vergelijking gesubstitueerd in vergelijking (B-11):

$$\rho g S_r h = \rho U^2 \frac{h}{r} (\alpha + 1) \quad \text{met } \alpha = \frac{k}{m^2} \left[\frac{(2m+1)(m+1)}{k(m+1) + 2m^2} \right] \quad (\text{B-26})$$

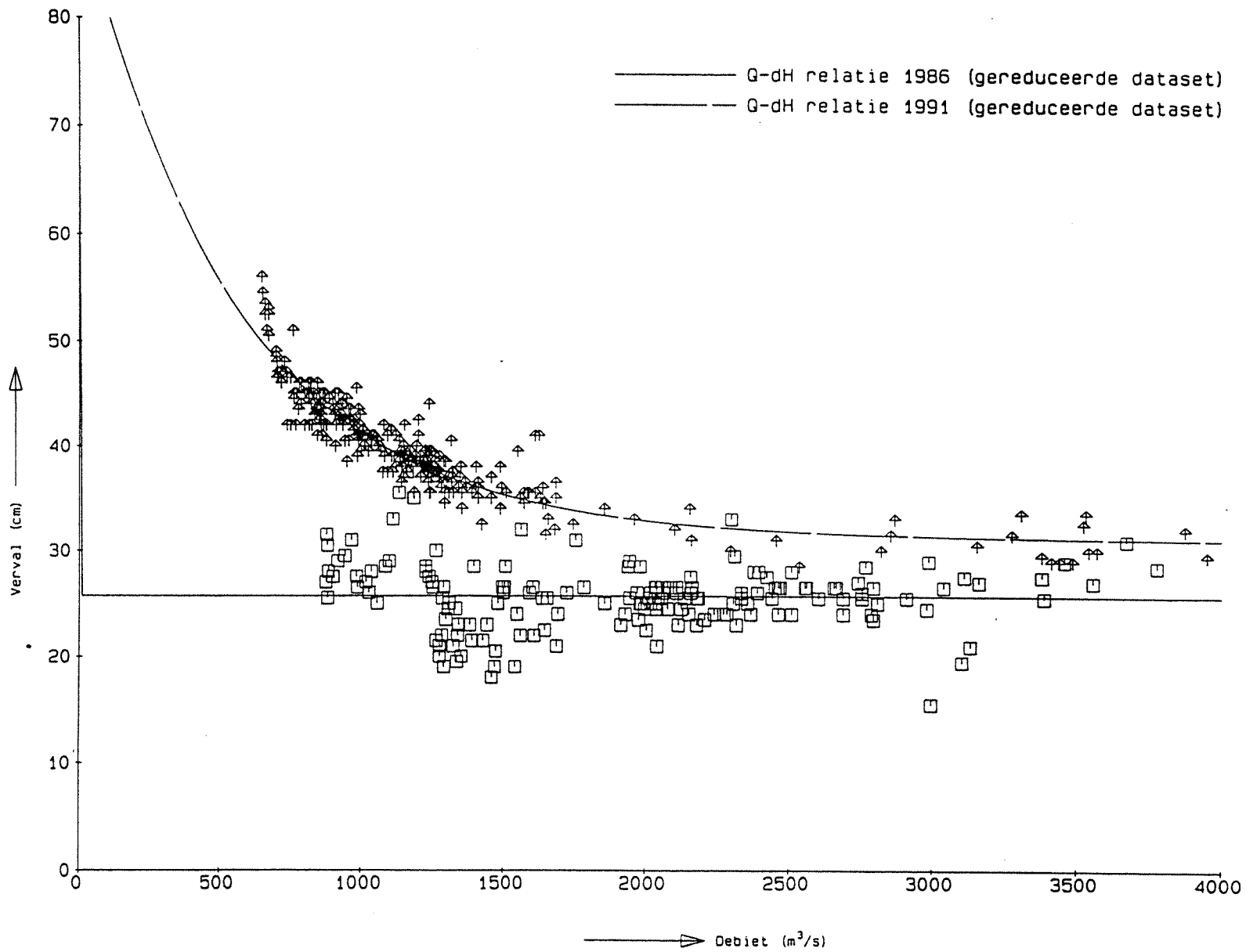
De vergelijking $\tau_{bs} = \rho \kappa^2 \frac{U^2}{m^2}$ samen met vergelijking (B-10) geeft: $U^2 = g h \frac{m^2}{\kappa^2}$ (B-27)
 en deze in de volgende vergelijking voor krachten-evenwicht van zandkorrels op een helling:

$$\frac{d(h)}{d n} = - \frac{1}{B_t \sqrt{\theta \rho \Delta g D}} \frac{\tau_{bn}}{\sqrt{\tau_{bs}}} \quad (\text{B-28})$$

$$\text{geeft: } \frac{d(h)}{d n} = - \frac{m}{\rho \kappa U B_t \sqrt{\theta \Delta g D}} \tau_{bn} \quad (\text{B-29})$$

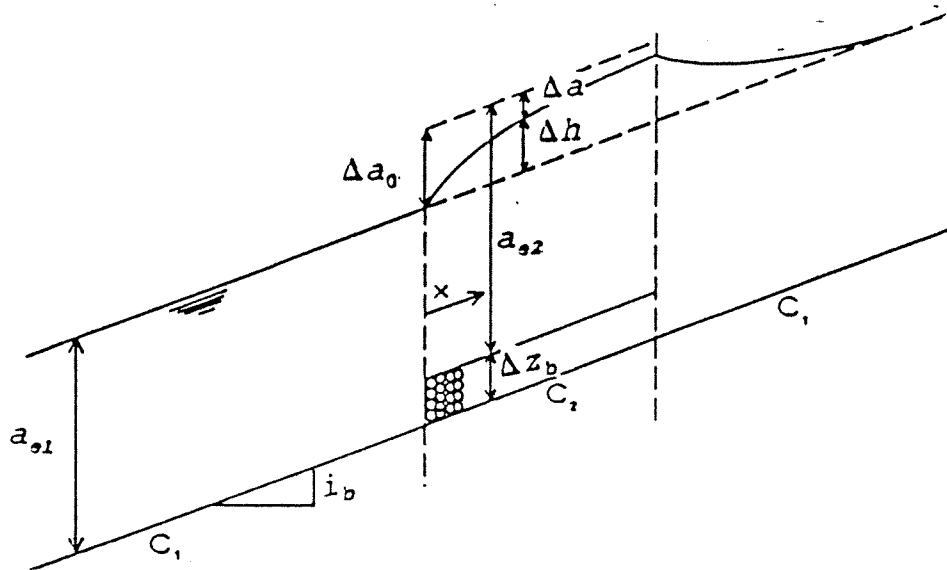


Bijlage 3-II: Debiet vs. waargenomen verval



Bron: literatuur [20].

Bijlage 3-III: Verhanglijn als gevolg van lokale ruwheidsverhoging en drempelwerking



Aannamen : Uniforme stroming benedenstrooms (evenwichtsdiepte)
Uniforme breedte en over de breedte constante diepte

$$a_{e1} = \sqrt[3]{\frac{(Q/B)^2}{C_1^2 i_b}}$$

$$a_{e2} = \sqrt[3]{\frac{(Q/B)^2}{C_2^2 i_b}} = \alpha^{-\frac{2}{3}} a_{e1} \text{ met } \alpha = \frac{C_2}{C_1}$$

Verder geldt, indien $Fr^2 \ll 1$ en $\Delta a \ll a_{e1}$ (De Vries; Collegedictaat Rivieren; F8N 1985):

$$\Delta a = \Delta a_0 \exp\left(\frac{-3 i_b x}{a_{e2}}\right) = \Delta a_0 \exp\left(\frac{-3 i_b x}{\alpha^{-\frac{2}{3}} a_{e1}}\right)$$

Voor de waterstandsverhoging, Δh , t.o.v de waterstand zonder verruwing en drempel geldt dan:

$$\Delta h = \Delta z_b + a_{e2} - \Delta a - a_{e1} = \Delta z_b + \left(\alpha^{-\frac{2}{3}} - 1 \right) - \Delta a$$

$$= \left(1 - \exp \left(\frac{-3 i_b x}{\alpha^{-2/3} a_{e1}} \right) \right) (\Delta z_b + (\alpha^{-2/3} - 1) a_{e1})$$

Bijlage 3-IV: Toename verval over de sterk geschematiseerde Waalbocht voor verschillende combinaties van ruwheidsverhoging en drempelhoogte

Waalbocht

Bodemverhang = 1.3E-04
Breedte = 250 m
Lengte bochtverbetering = 2000 m

$Q \setminus \Delta z_b$	0.0 m	0.1 m	0.2 m	0.4 m	0.8 m
500 m ³ /s	0.0	0.029	0.057	0.115	0.229
750 m ³ /s	0.0	0.023	0.046	0.091	0.182
1000 m ³ /s	0.0	0.019	0.038	0.077	0.153
1250 m ³ /s	0.0	0.017	0.034	0.067	0.134
1500 m ³ /s	0.0	0.015	0.030	0.060	0.120
1750 m ³ /s	0.0	0.014	0.027	0.055	0.109
2000 m ³ /s	0.0	0.013	0.025	0.051	0.100

Chezycoefficiënt (alluviaal) = 50 m⁴/s
Chezycoefficiënt (bochtverbetering) = 50 m⁴/s

$Q \setminus \Delta z_b$	0.0 m	0.1 m	0.2 m	0.4 m	0.8 m
500 m ³ /s	0.094	0.119	0.144	0.195	0.296
750 m ³ /s	0.097	0.117	0.137	0.176	0.256
1000 m ³ /s	0.099	0.115	0.132	0.166	0.232
1250 m ³ /s	0.100	0.114	0.129	0.158	0.217
1500 m ³ /s	0.101	0.114	0.127	0.153	0.205
1750 m ³ /s	0.101	0.113	0.125	0.149	0.196
2000 m ³ /s	0.102	0.113	0.124	0.146	0.189

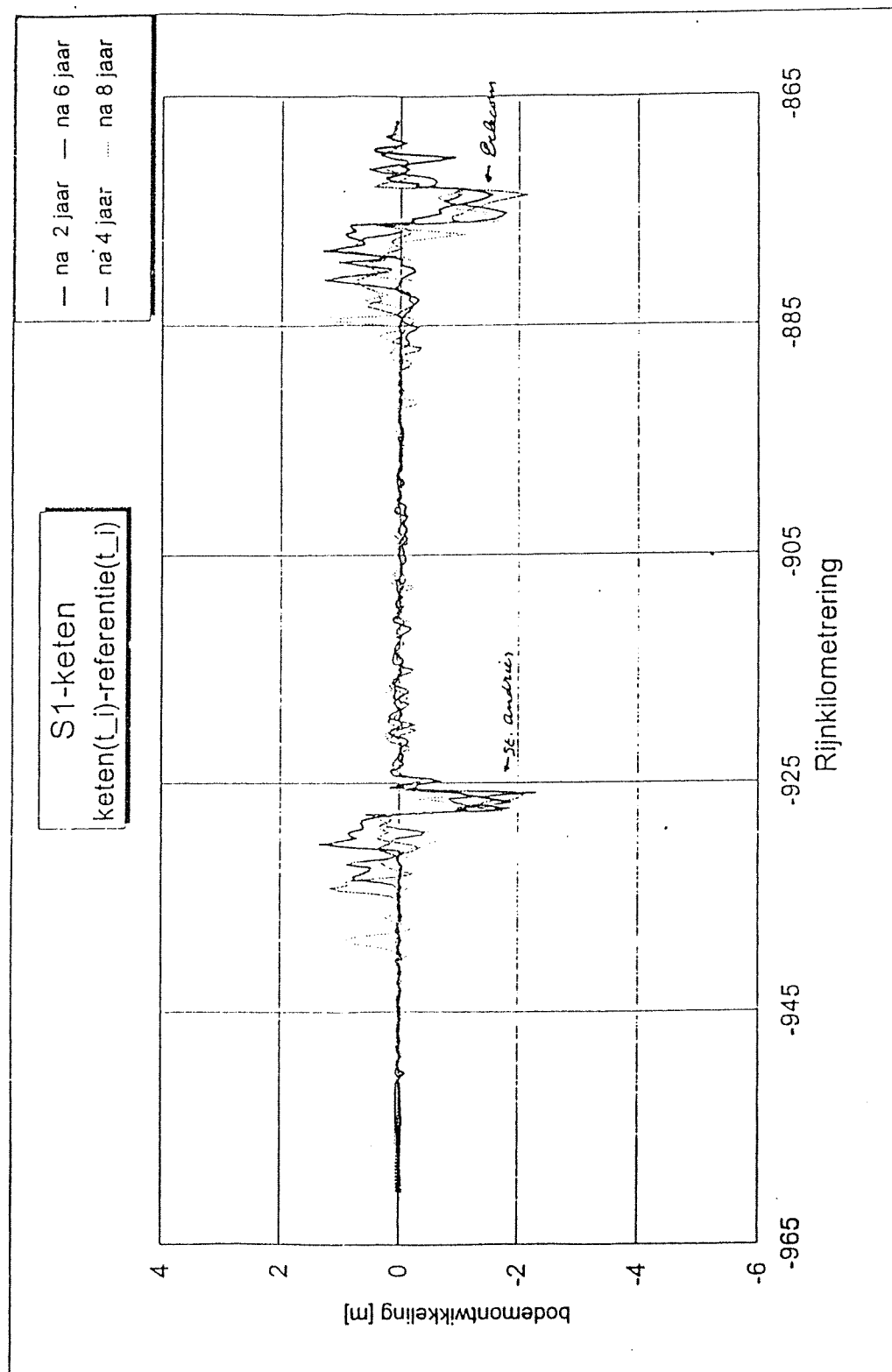
Chezycoefficiënt (alluviaal) = 50 m⁴/s
Chezycoefficiënt (bochtverbetering) = 40 m⁴/s

$Q \setminus \Delta z_b$	0.0 m	0.1 m	0.2 m	0.4 m	0.8 m
500 m ³ /s	0.200	0.222	0.243	0.286	0.371
750 m ³ /s	0.205	0.222	0.239	0.272	0.340
1000 m ³ /s	0.209	0.223	0.237	0.265	0.321
1250 m ³ /s	0.211	0.223	0.235	0.260	0.310
1500 m ³ /s	0.213	0.224	0.234	0.256	0.299
1750 m ³ /s	0.214	0.224	0.233	0.253	0.293
2000 m ³ /s	0.215	0.224	0.233	0.251	0.288

Chezycoefficiënt (alluviaal) = 50 m⁴/s
Chezycoefficiënt (bochtverbetering) = 30 m⁴/s

Bron: literatuur [20].

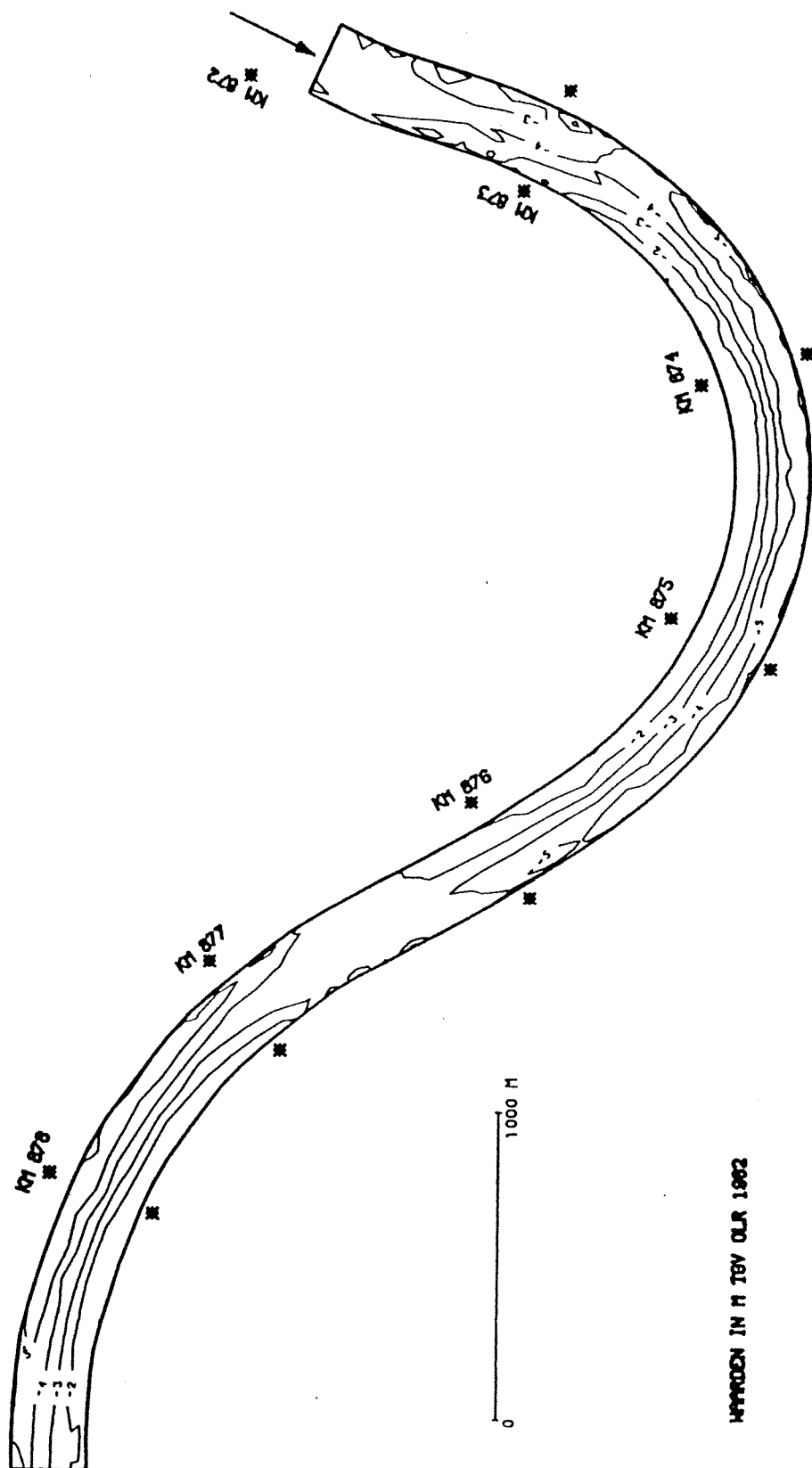
Bijlage 3-V: Bodemontwikkeling tgv vaste laag en bodemkribben, berekend in SOBEK



Vaste laag bij St.Andries en bodemkribben bij Erlecom.

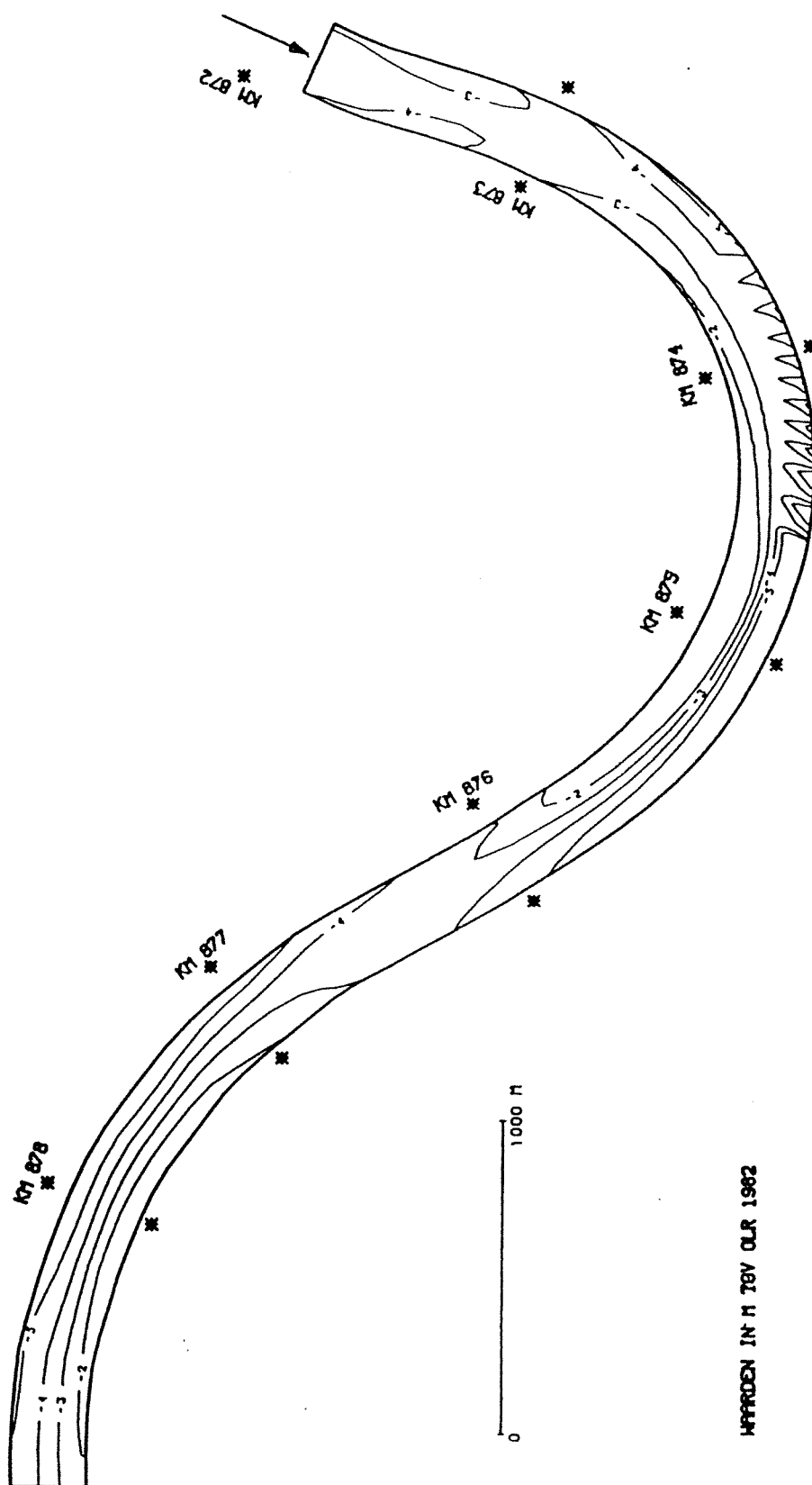
Bron: literatuur [17].

Bijlage 4-I: Dieptelijnen prototype, zonder bodemkribben



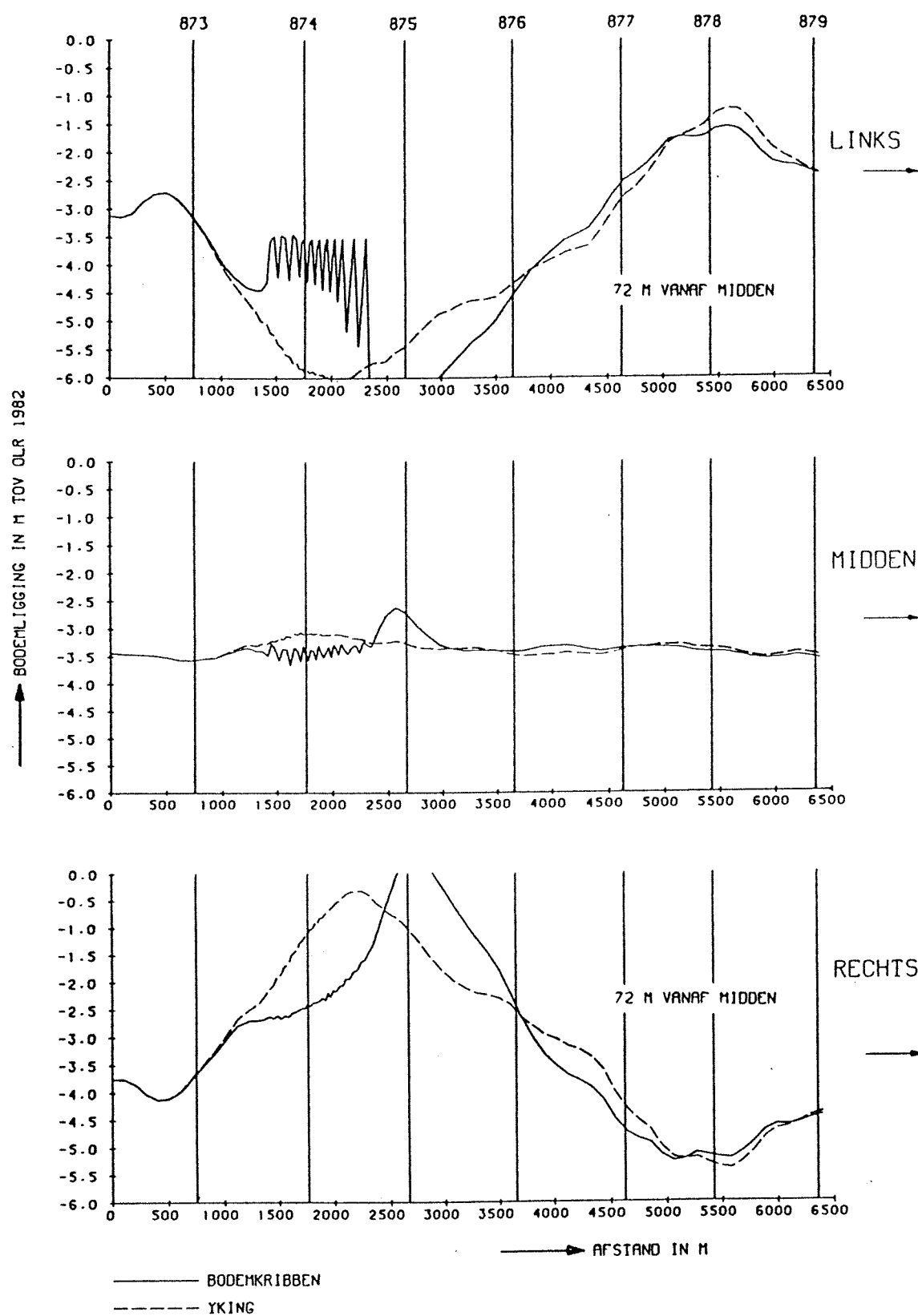
Bron: literatuur [11].

Bijlage 4-II: Berekende dieptelijnen, mét bodemkribben



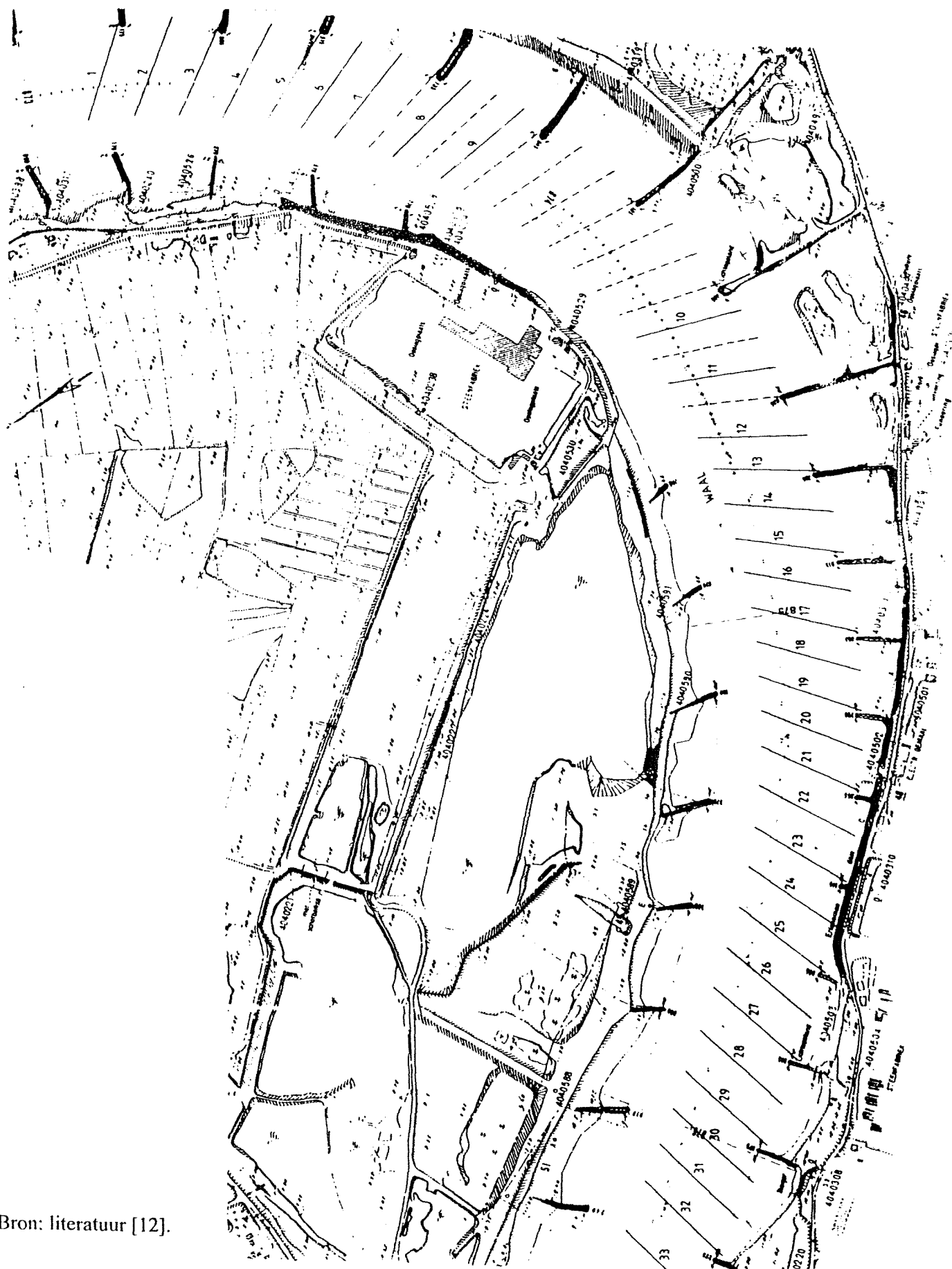
Bron: literatuur [11].

Bijlage 4-III: Berekende lengteprofielen, mét bodemkribben



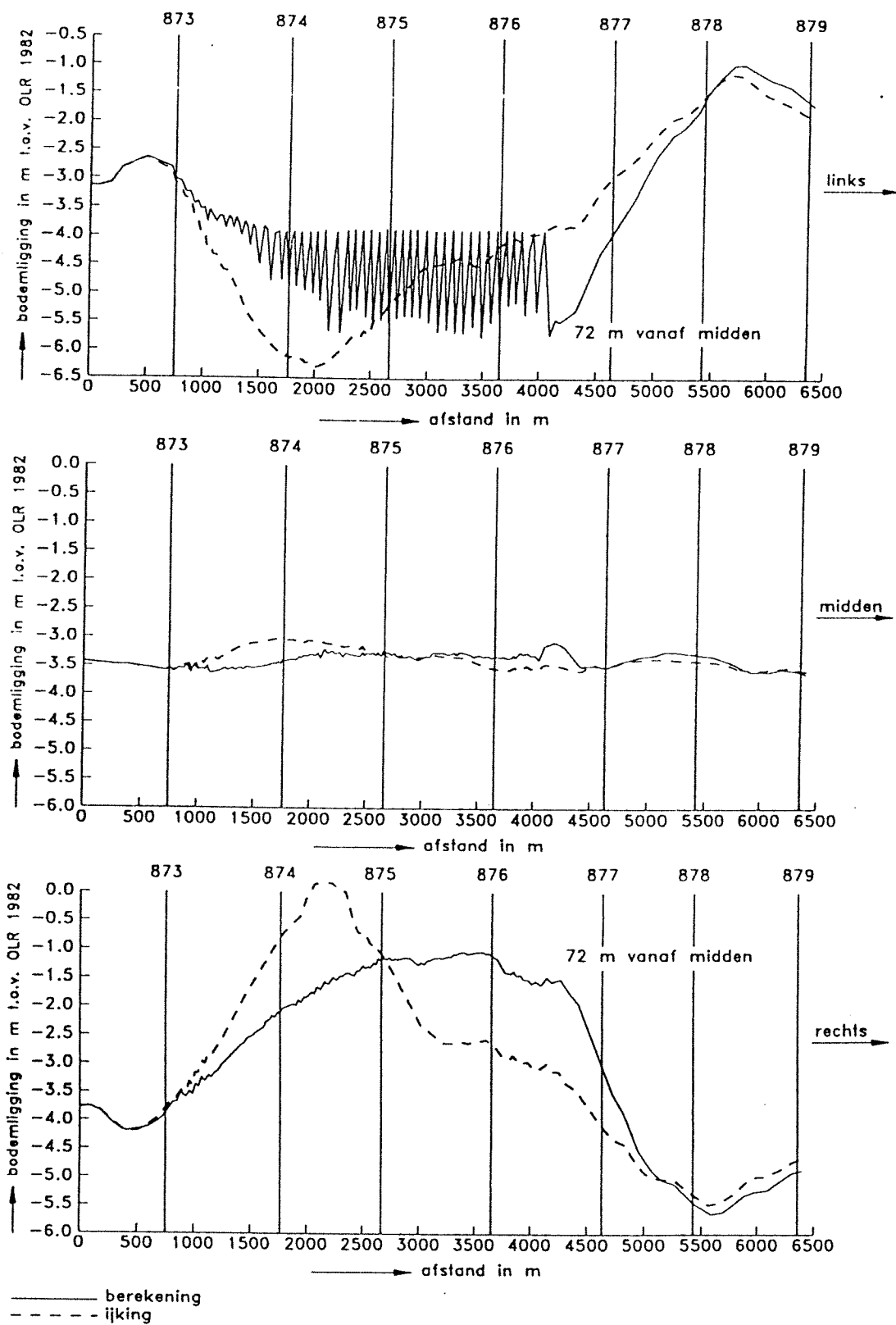
Bron: literatuur [11].

Bijlage 4-IV: Overzicht situatie met indicatie bodemkribbenveld

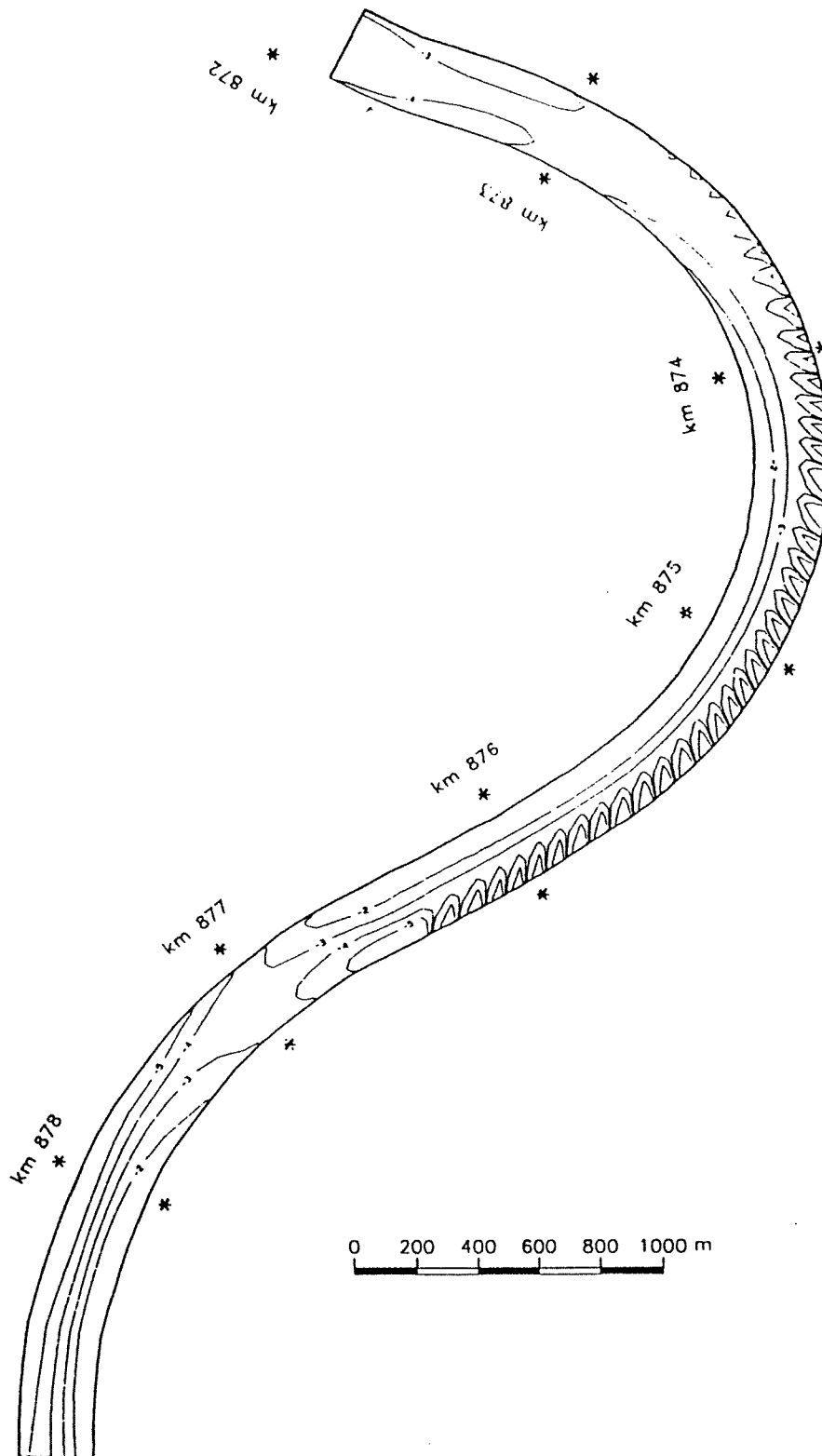


Bron: literatuur [12].

Bron: literatuur [12].



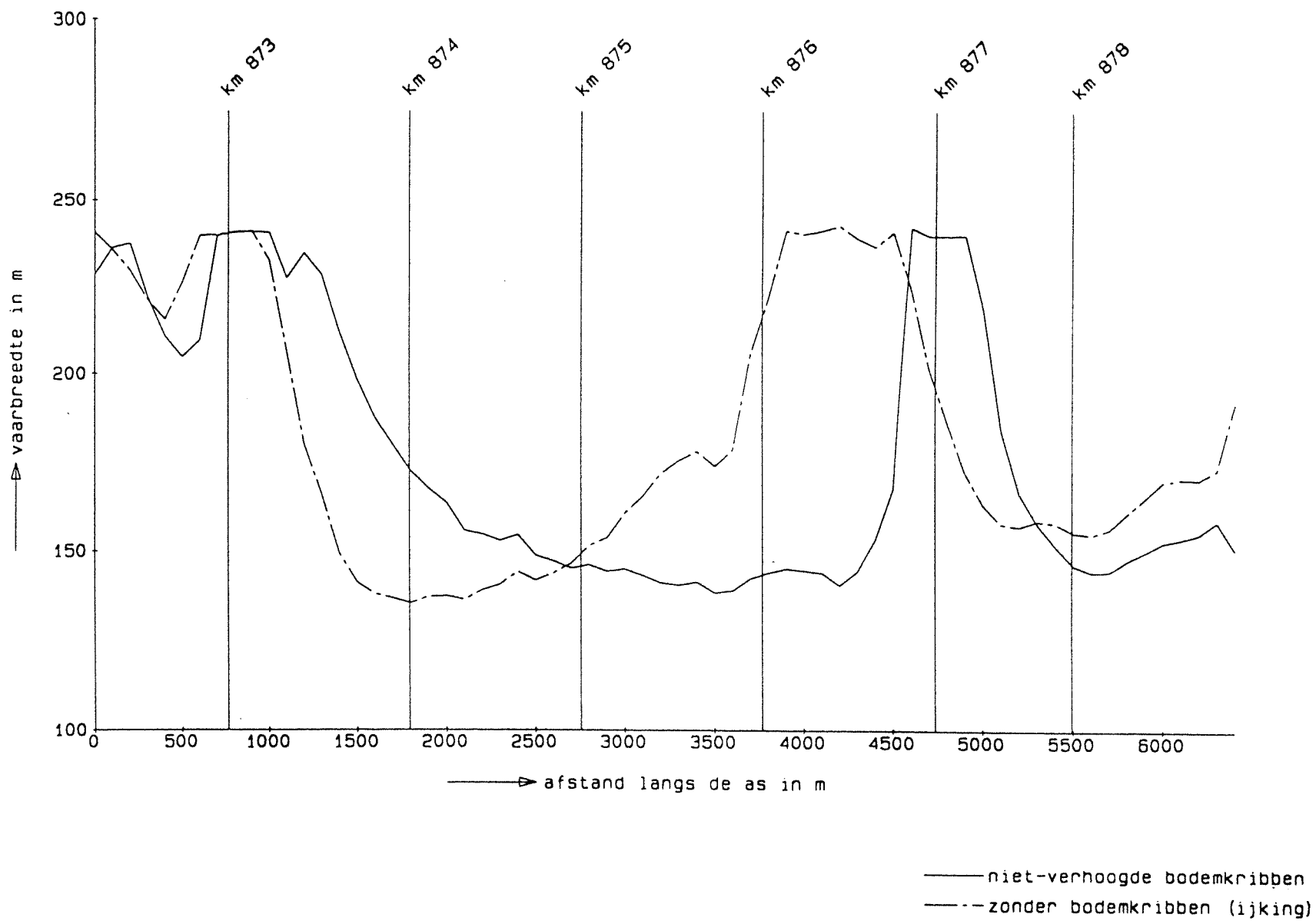
Bijlage 4-VI: Berekende dieptelijnen, uitgebreid
bodembkribbenveld



in m t.o.v. OLR 1982

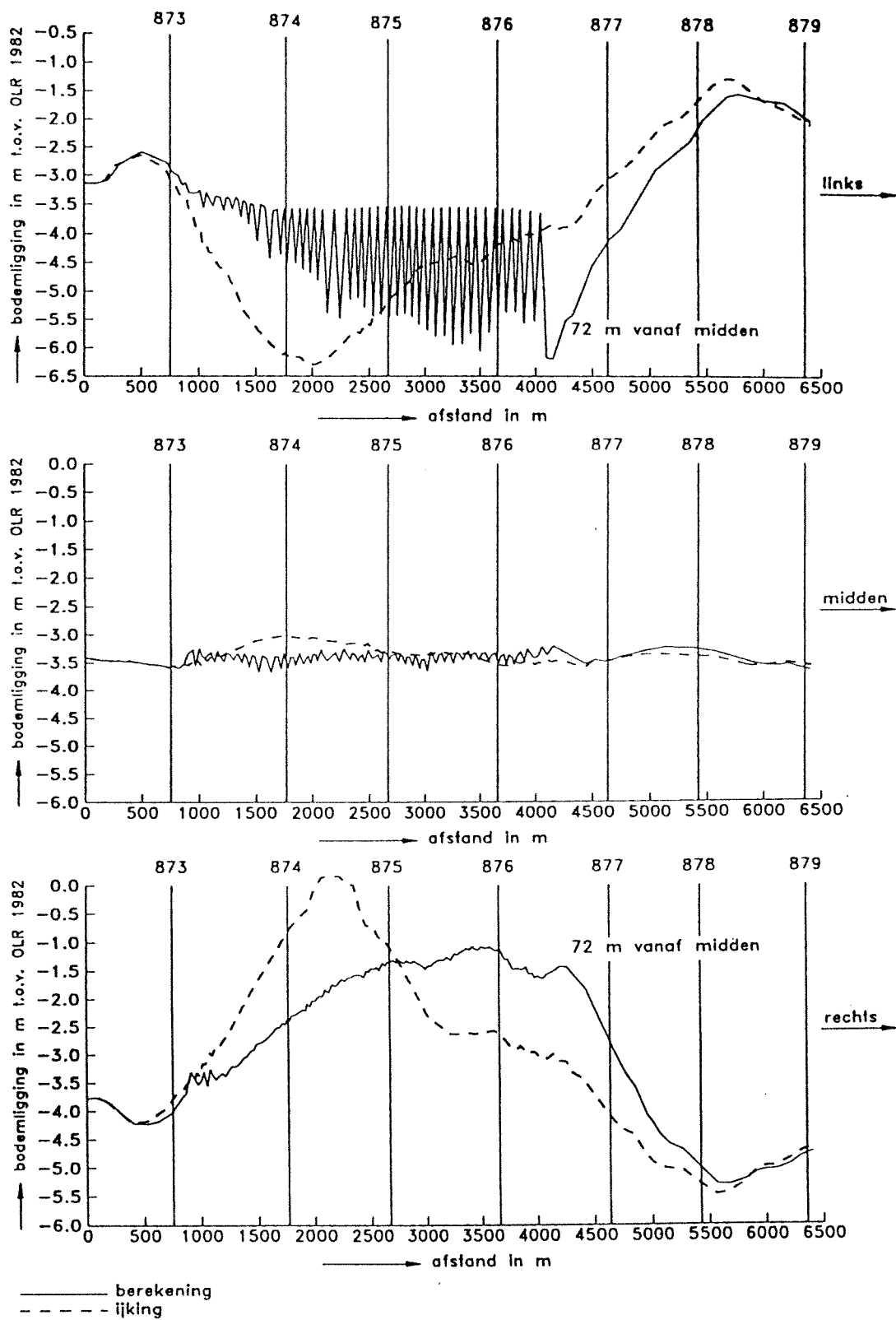
Bron: literatuur [12].

Bijlage 4-VII: Vaarbaanbreedte met en zonder bodemkribben



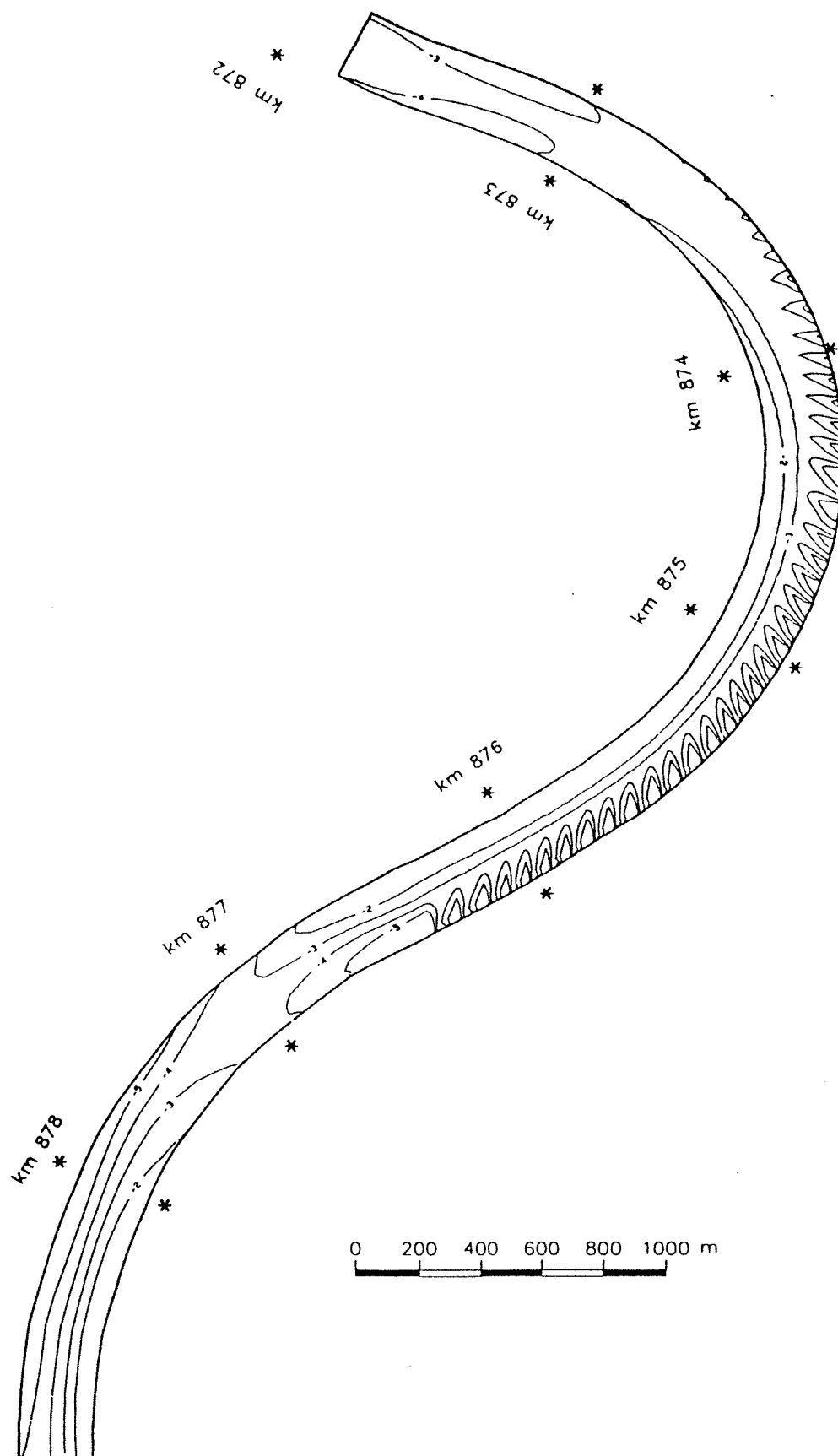
Bron: literatuur [12].

Bijlage 4-VIII: Berekende lengteprofielen, verhoogde bodemkribben



Bron: literatuur [12].

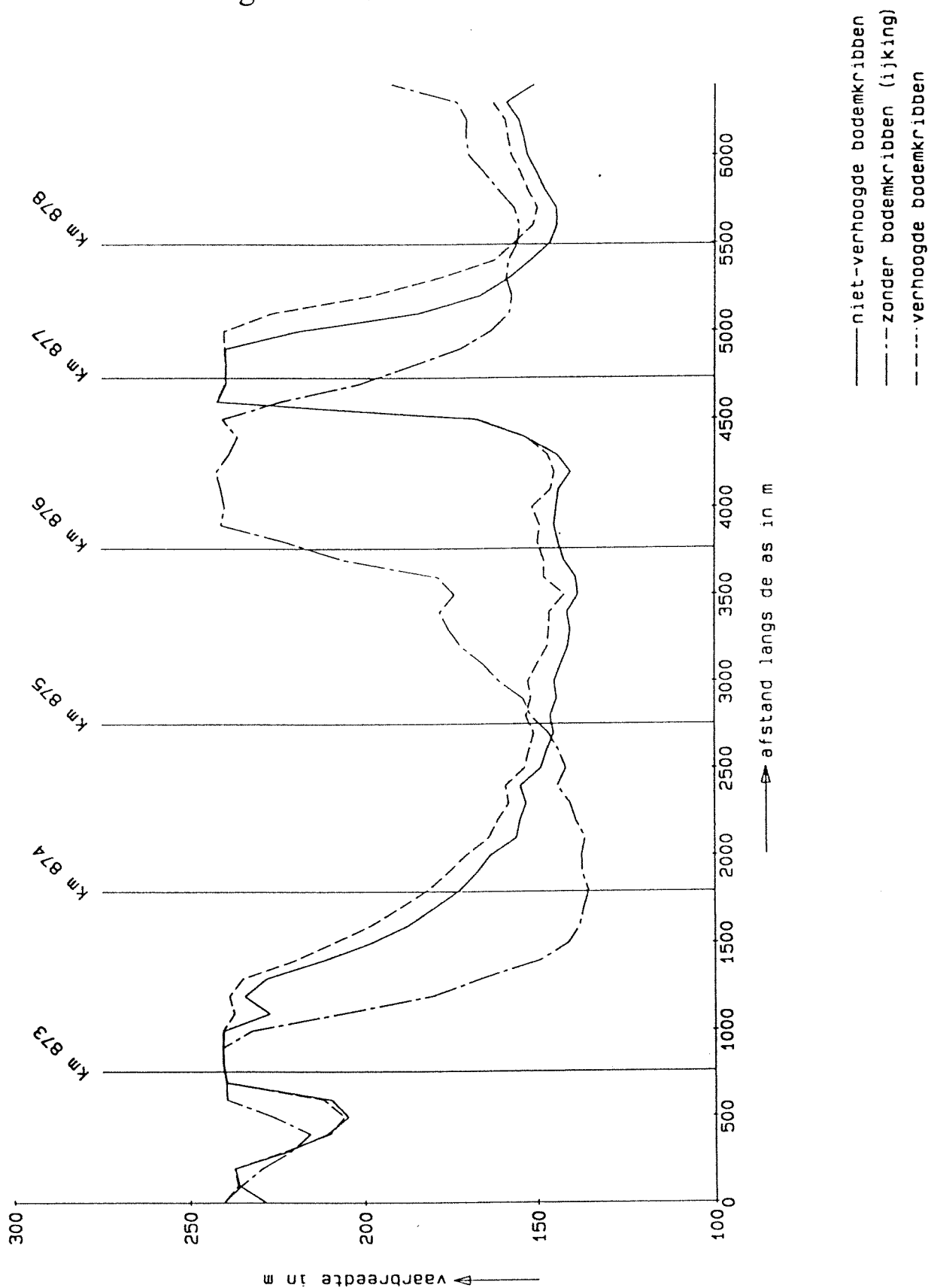
Bijlage 4-IX: Berekende dieptelijnen, verhoogde bodemkribben



Bron: literatuur [12].

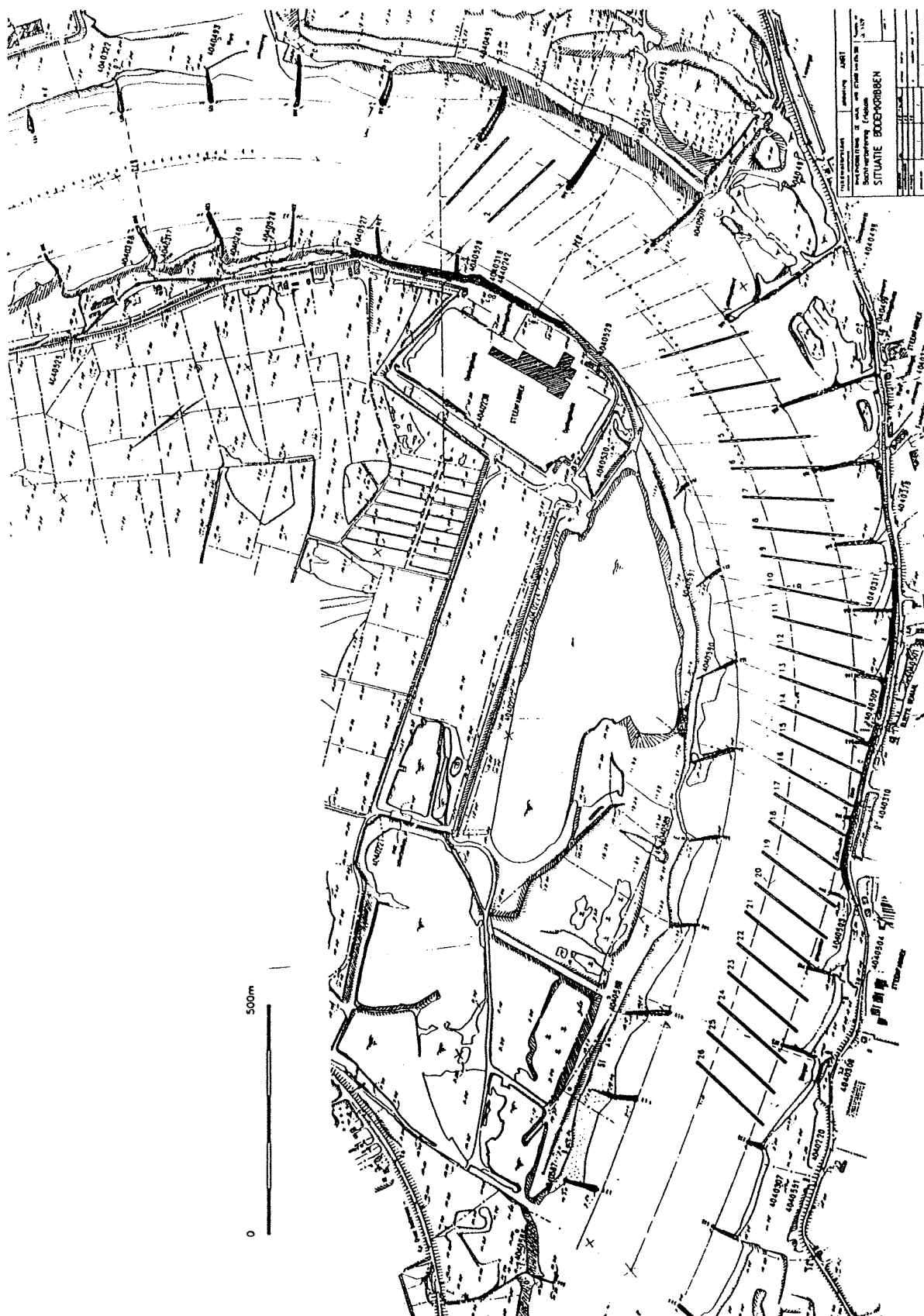
in m t.o.v. OLR 1982
na 20 jaar kribben 0,36 m hoger

Bijlage 4-X: Vaarbaanbreedte verhoogde bodemkribben en uitgebreid bodemkribbenveld



Bron: literatuur [12].

Bijlage 4-XI: Situatie geadviseerd bodemkribbenveld



Bron: literatuur [12].

Bijlage 5-I: Afleiding formules voor F_L en F_D

Bron: literatuur[6]

De grootte van de liftkracht (liftforce) en de sleepkracht (dragforce) kunnen worden afgeleid uit de stromingsdruk:

$$F_L = \frac{1}{2} c_L \rho L_v \int_0^{H_v} u^2 dz$$

en

$$F_D = \frac{1}{2} c_D \rho L_v \int_0^{H_v} u^2 dz$$

met: L_v = lengte van het scherm,
 H_v = hoogte van het scherm,
 c_L en c_D = lift- en dragcoëfficiënt.

Wanneer voor $u(z)$ het aangenomen machtsprofiel (zie ook bijlage 2-II) wordt gesubstitueerd, geeft dat:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho c_L H_v L_v U^2 \frac{(m+1)^2}{m(m+2)} \left(\frac{H}{h} \right)^{\frac{2}{m}}$$

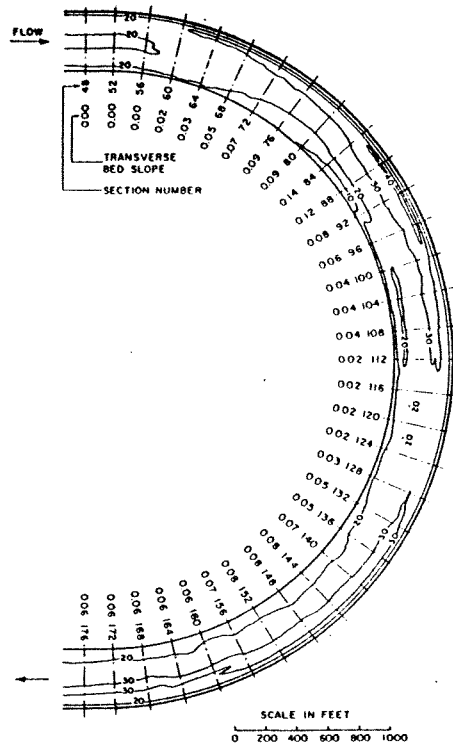
en

$$F_D = \frac{c_D}{c_L} F_L$$

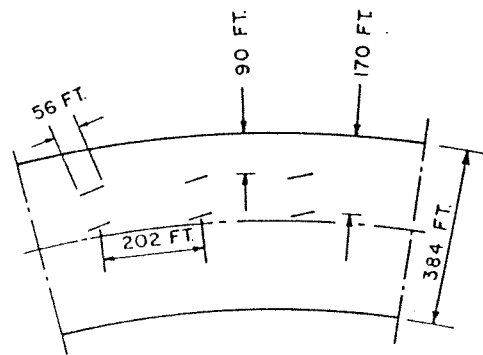
c_L en c_D worden gegeven door:
$$c_L = \frac{2\pi\alpha}{1 + \frac{L_v}{H_v}} \quad \text{en} \quad c_D = \frac{1}{2\pi} \frac{L_v}{H_v} c_L^2$$

waarin α de hoek is tussen de stroom en het scherm.

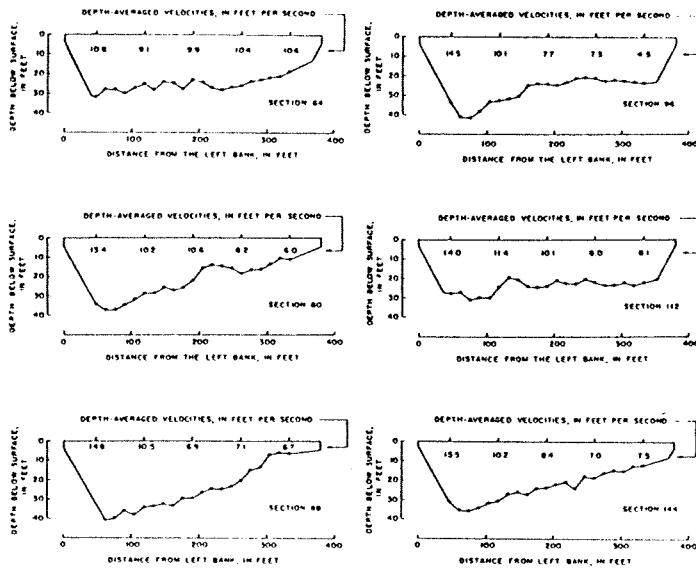
Bijlage 5-II: Experiment met bodemschermen in een stroomgoot



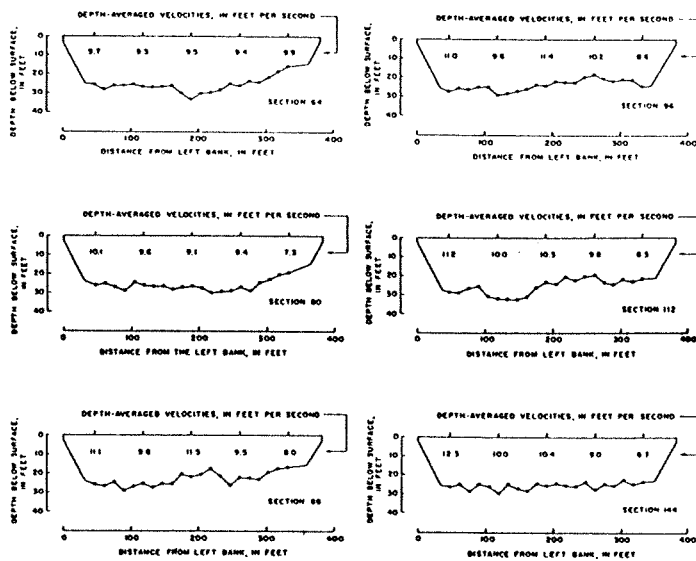
Gemeten bodemtopografie in evenwichtstoestand.



Configuratie bodemschermen



Gemeten dwarsprofielen vóór plaatsing van de bodemschermen.



Bron: literatuur [4].

Bijlage 5-III: Afleiding langs- en dwarsverhang situatie mét bodemschermen

Bron: literatuur [6]

De vergelijkingen (B-10) en (B-11) in bijlage 2-II worden nu:

$$\begin{cases} \rho g h = \tau_{bs} + \tau_{vs} \\ \rho g S_r h = -\tau_{bn} + \tau_{vn} + \rho U^2 \frac{h}{r} \end{cases} \quad (\text{B-30) en (B-31)}$$

Hierin zijn τ_{vs} en τ_{vn} de schuifspanning ten gevolge van de bodemschermen in respectievelijk de langs- en dwarsrichting.

Uit vergelijking (B-14) in bijlage 2-II vergelijking (B-31) volgt:

$$\rho(u_s^2 - U^2) \frac{h}{r} + \tau_{bn} - \tau_{vn} + \left[\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \right]_s h = 0 \quad (\text{B-32})$$

Voor het snelheidsprofiel in dwarsrichting wordt een lineaire verdeling aangenomen:

$$v = 2(v_{vn} - v_b) \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{B-33})$$

waarin v_b = snelheid bij de bodem t.g.v. de centrifugaalkracht en
 v_{vn} = snelheid bij de bodem t.g.v. de bodemschermen.

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{2}{h} (v_{vn} - v_b) \quad \text{en} \quad \tau_{nz} = \rho \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \quad \text{met voor } \varepsilon \text{ vergelijking (B-16). Hieruit volgt:}$$

$$\tau_{nz} = 2\tau_{bs} \frac{v_{vn} - v_b}{U} \frac{m^2}{m+1} \left[\left(\frac{z}{h} \right)^{1-\frac{1}{m}} - \left(\frac{z}{h} \right)^{2-\frac{1}{m}} \right] \quad (\text{B-34})$$

$$\frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} = 2\tau_{bs} \frac{v_{vn} - v_b}{hU} \frac{m}{m+1} \left[(m-1) \left(\frac{z}{h} \right)^{-\frac{1}{m}} - (2m-1) \left(\frac{z}{h} \right)^{1-\frac{1}{m}} \right] \quad (\text{B-35})$$

$$\left. \frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \right|_s = \frac{-2\rho \kappa^2 U}{h(m+1)} (v_{vn} - v_b) \quad (\text{B-36})$$

$$\text{Aangenomen wordt dat} \quad \frac{\tau_{vn}}{\tau_{bs}} = \frac{v_{vn}}{u_b} \quad \Rightarrow \quad v_{vn} = \tau_{vn} \frac{1}{k} \frac{m^2}{\rho \kappa^2 U}$$

$$\text{Eerder was al aangenomen dat} \quad \frac{v_b}{u_b} = \frac{\tau_{bn}}{\tau_{bs}} \quad \Rightarrow \quad v_b = \tau_{bn} \frac{1}{k} \frac{m^2}{\rho \kappa^2 U}$$

Deze vergelijkingen substitueren in vergelijking (B-36) geeft:

$$\left. \frac{\partial \tau_{nz}}{\partial z} \right|_s = \frac{-2m^2}{k(m+1)h} (\tau_{vn} - \tau_{bn}) \quad (\text{B-37})$$

En dit in vergelijking (B-32) geeft:

$$\tau_{bn} = -\rho U^2 \frac{h}{r} \frac{k}{m^2} \left[\frac{(2m+1)(m+1)}{k(m+1) + 2m^2} \right] + \tau_{vn} \quad (\text{B-38})$$

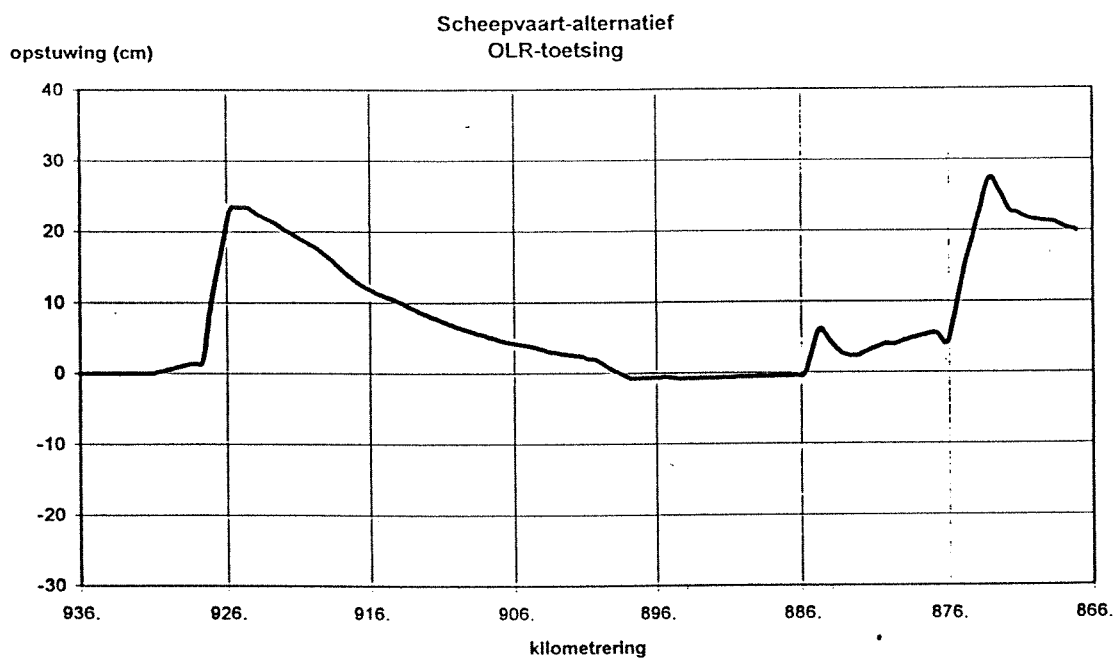
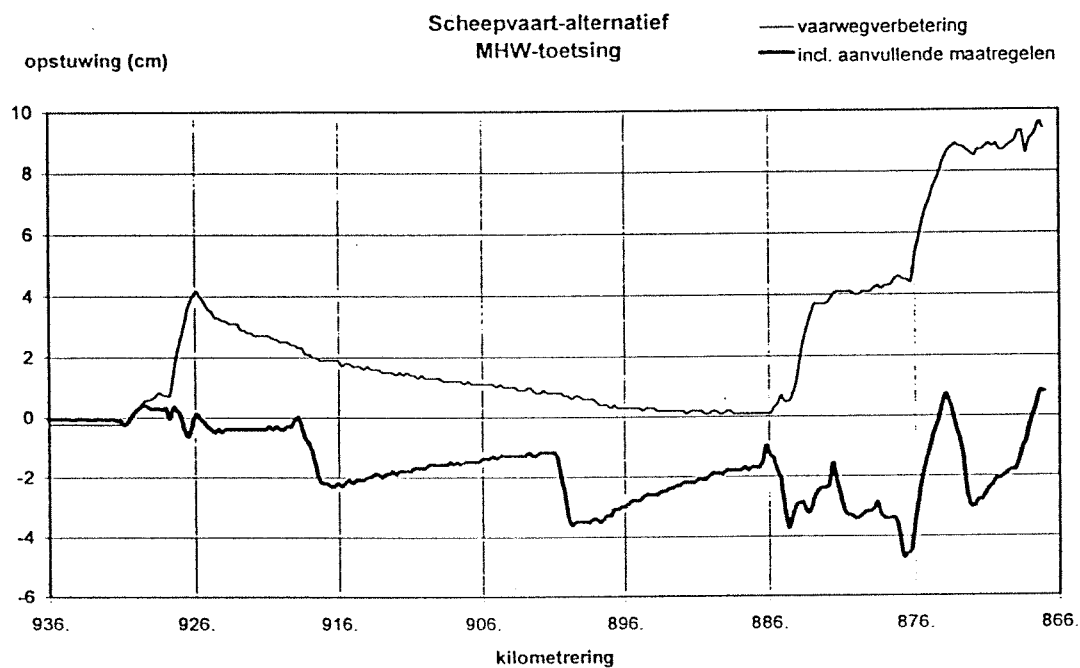
Voor het dwarsverhang geldt nog vergelijking (B-29) in bijlage 2-II, maar nu met τ_{bn} uit vergelijking (B-38).

Vergelijking (B-27) in bijlage 2-II wordt in de situatie met bodemschermen:

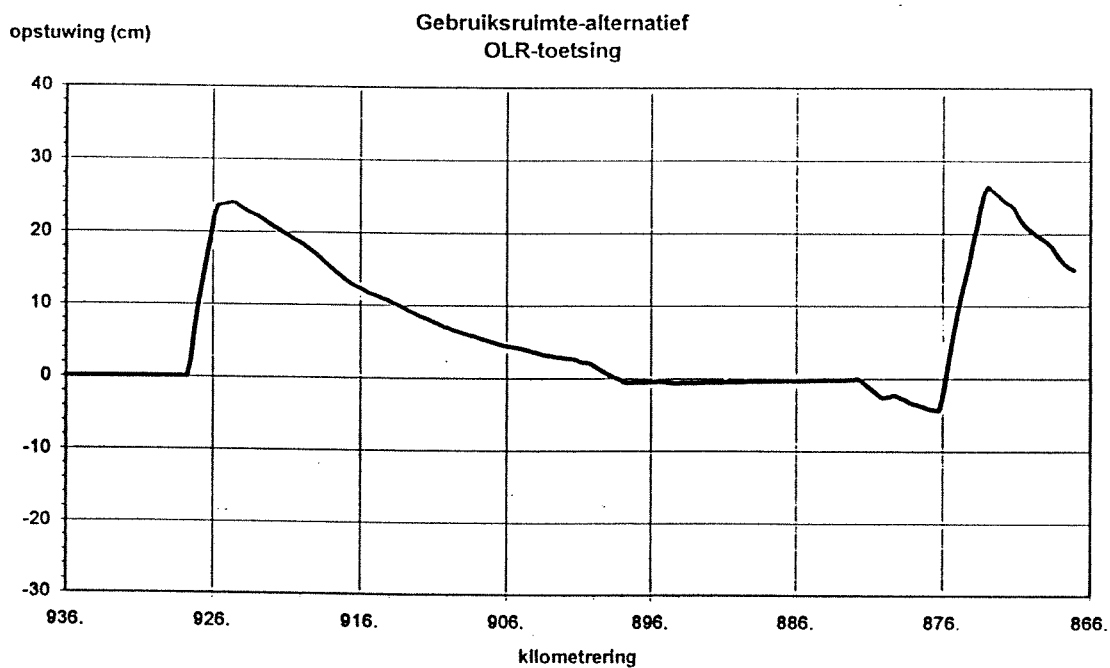
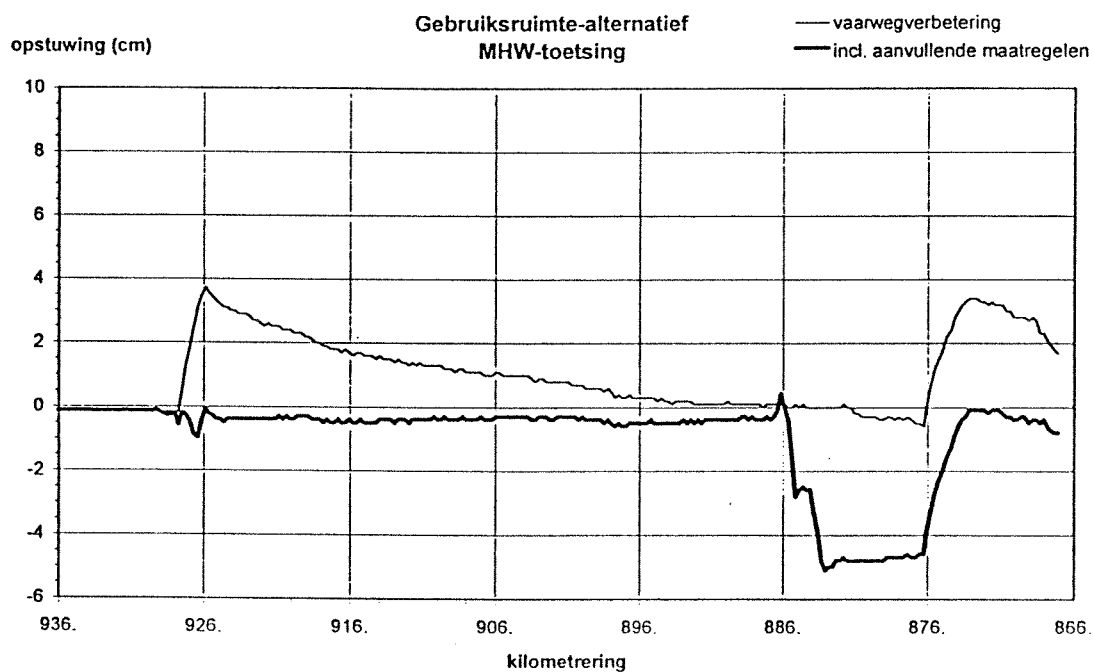
$$U^2 = \frac{m^2}{\kappa^2} \left(gih - \frac{1}{\rho} \tau_{vs} \right) \quad (\text{B-39})$$

Bijlage 6-I: Verandering waterstanden bij MHW en OLR per alternatief

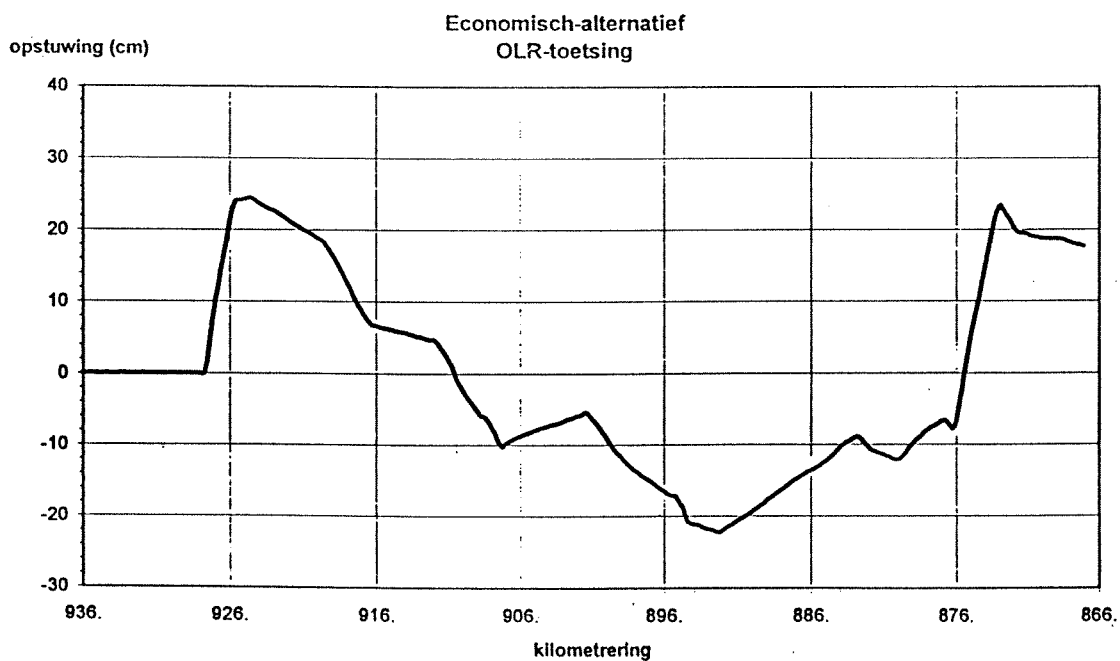
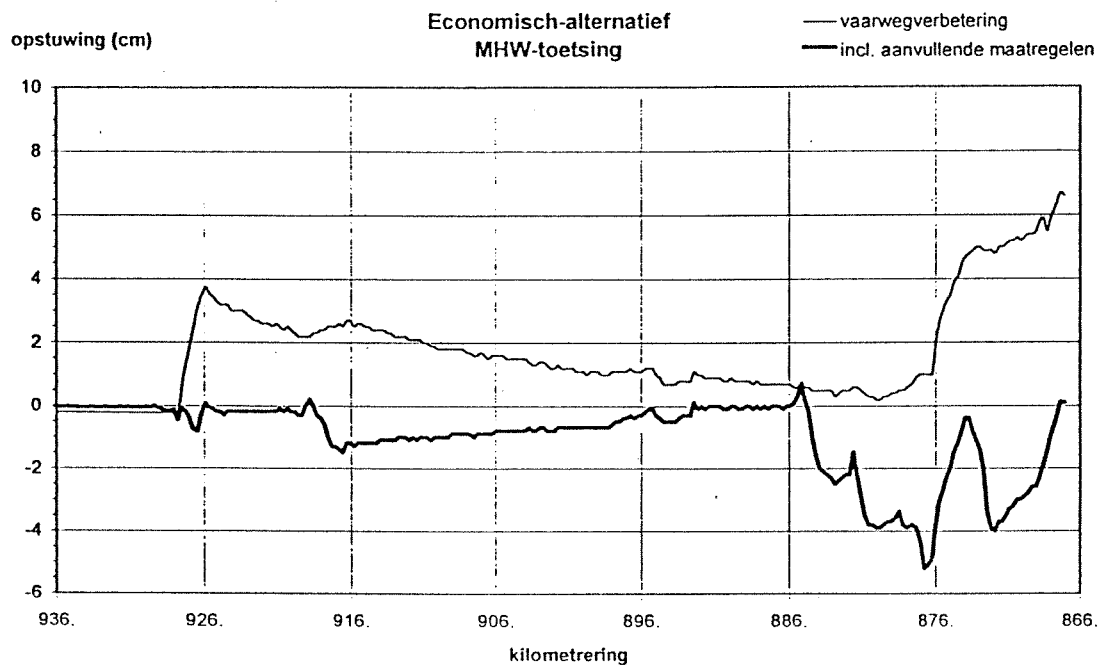
Scheepvaart Alternatief (SA)



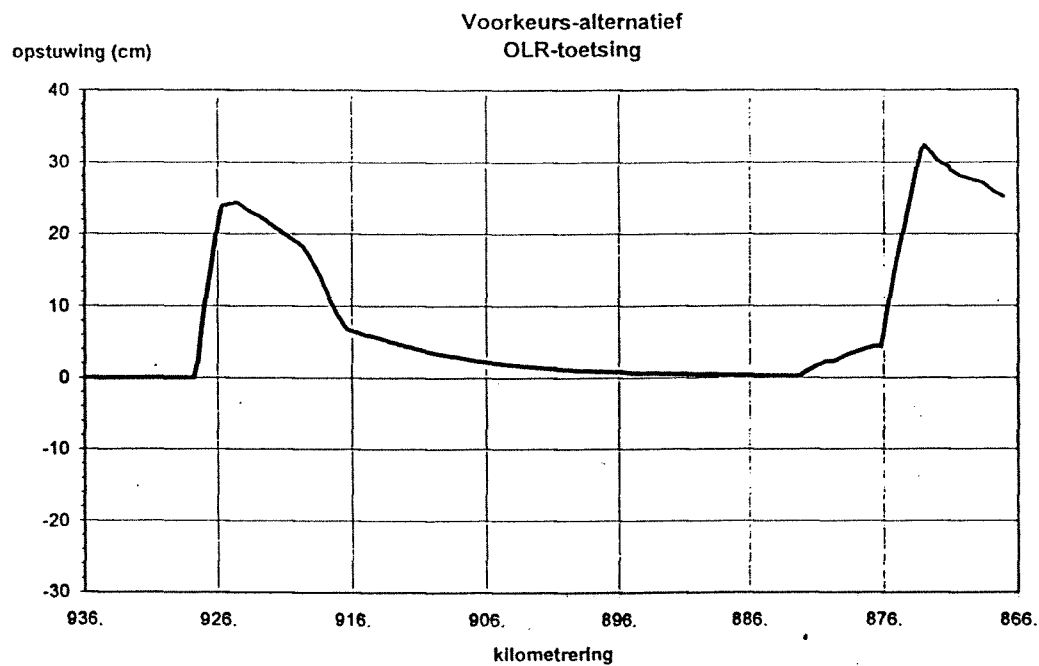
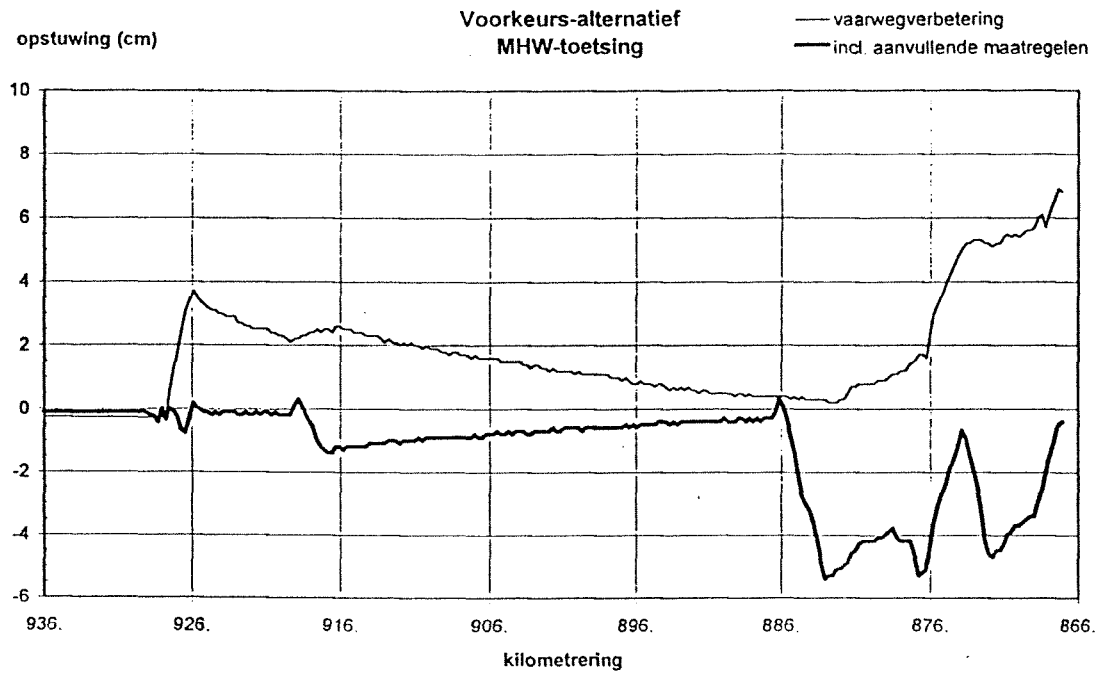
Gebruiksruimte Alternatief (GA)



Economische Alternatief (EA)



Voorkeurs Alternatief (VA)



Bron: literatuur [15].

Bijlage 6-II: Effecten en rangorde effecten van de alternatieven

	SA		GA		EA		VA	
	effect	rangorde*	effect	rangorde*	effect	rangorde*	effect	rangorde*
Scheepvaart-effecten								
- ongevallen per jaar	81.9	1	82.0	2	83.2	4	82.1	3
- kosten reistijdverlies (Kf./jaar)	4169	1	4185	2	4396	4	4233	3
- hinderdagen per jaar	37	1	79	3	124	4	77	2
Kosten (NCW; Mf.)	458.9	4	381.3	3	317.6	1	347.0	2
Effecten op natuur en landschap**	0	4	+	1	o/+	2	o/+	2
Inpasbaarheid in plannen van derden***	-	2	0	1	-	2	-	2
Risico's en onzekerheden								
- onzekerheid in kosten (NCW; Mf.)	110.6	3	112.9	4	97.1	2	93.0	1
- werkingsrisico (verhouding: 1.0 = grootste risico)	0.44	1	1.0	4	0.65	2	0.78	3
- planningsrisico (3.0 = grootste risico)	3.0	4	1.7	2	1.9	3	1.5	1
Effecten op de RWS-organisatie								
- gedurende uitvoering (mensjaren per jaar)	43.1	4	24.7	2	26.0	3	21.0	1
- na de uitvoering (mensjaren per jaar)	6.7	3	5.6	1	6.0	2	6.7	3
Flexibiliteit (1.0 = minst flexibel)	1.7	3	10	1	1.0	4	2.5	2

* Rangorde 1 = het meest gunstig

** Legenda: + = positief; +/- = neutraal tot positief; 0 = neutraal; - = negatief

*** Legenda: 0 = inpasbaar; - = slecht inpasbaar