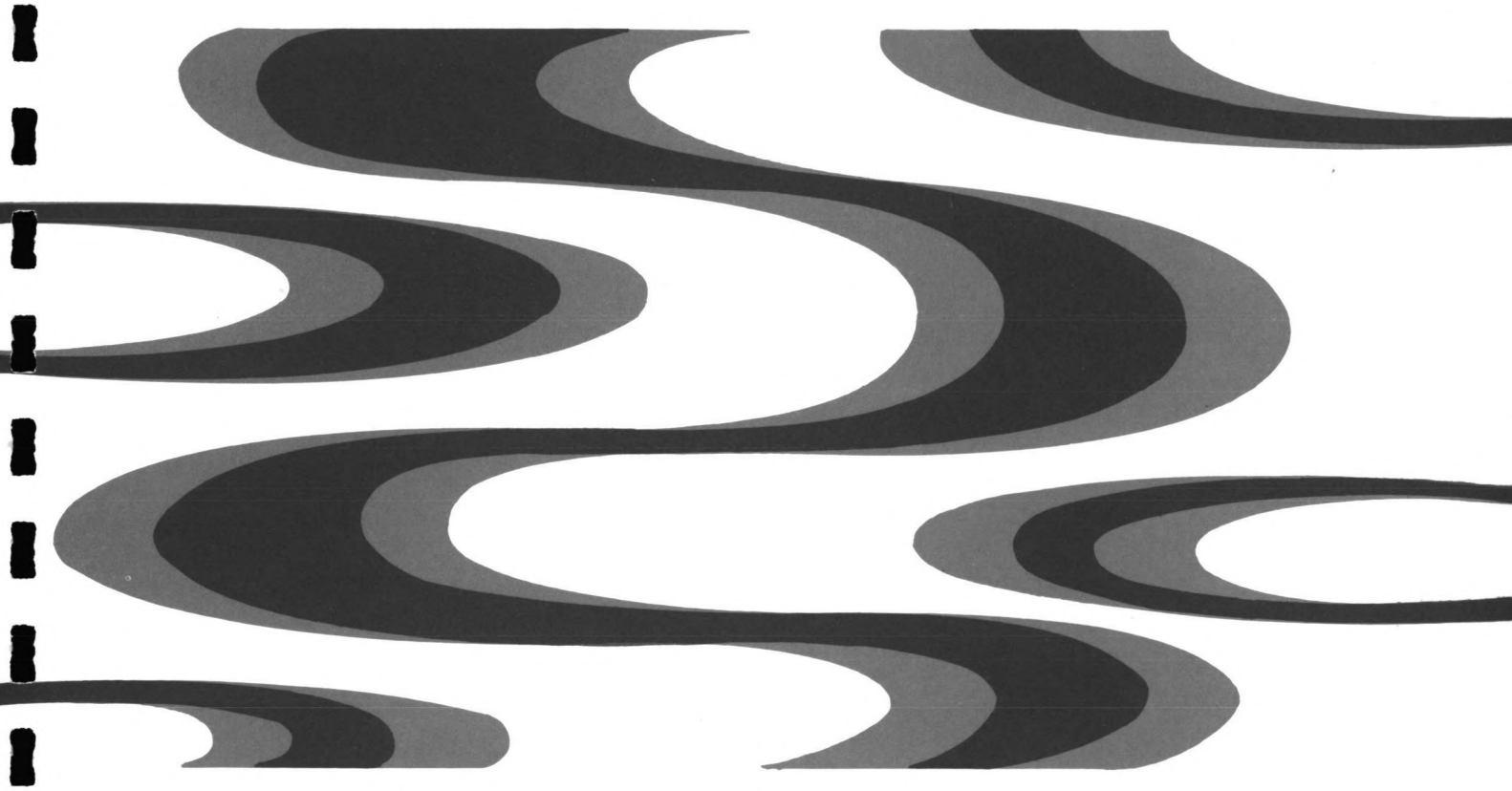
rijkswaterstaat



directie waterhuishouding
en waterbeweging
district zuidoost

Morfologische studie van de IJssel

hoofdontwerp deel II

Flip J. M. Hoefsloot

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde, k. 2.91
Stevinweg 1
2628 CN DELFT

Morfologische studie van de IJssel.

Hoofdontwerp deel II

Flip J.M. Hoefsloot.

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde, k. 2.91
Stevinweg 1
2628 CN DELFT

Afstudeerverslag TH-Delft.
Afdeling: Civiele Techniek
Vakgroep: Waterbouwkunde.
Docenten: Prof. Ir. J.F. Agema en
Prof. Dr. Ir. M. de Vries.
Begeleiding: Ir. J. Stuip
R.W.S. Directie Waterhuishouding en
waterbeweging, district Zuidoost.

Delft, November 1983.

Inhoudsopgave: pagina

I Inleiding en samenvatting 6
1 inleiding 6
2 samenvatting 8

II Doel van de studie 10

III Rijnkanalisatie 11
1 algemeen 11
2 theoretische beschouwing Rijnkanalisatie 14
1 inleiding 14
2 invloed van een bochtafsnijding 14
3 invloed gestuwde en ongestuwde periode 15
4 invloed debietverandering en wijziging van het zandaanbod 18

IV Opgetreden bodemontwikkelingen 24
1 bodemligging vanaf 1938 24
2 verwerking bodemligging vanaf 1938 27
3 vergelijking peilingen met theoretische beschouwing 30
1 bochtafsnijding Doesburg 30
2 bochtafsnijding Rheden-De Steeg 30
3 invloed gestuwde periode 30
4 niet verwachte ontwikkelingen 32

V Morfologische model 33
1.1 keuze model 33
1.2 afleiding model zandbalans 35
2 zandtransporten op basis van verschillende bronnen 38
1 aard van het transport 38
2 omvang van het transport 39
3 voorlopige keuze transportformule 40

3 gegevens 42
1 algemeen 42
2 bodemliggingen 42
3 transportparameters 42
1 zandtransporterende breedte 43
2 korrelgegevens 43
1 verzameling en verwerking 43
2 beschouwing korrelgegevens 45
3 stromingsparameters 48
1 algemeen 48
2 invloed regime 52
1 algemeen 52
2 geschematiseerd afvoer-verloop BR. 53
3 IJsselafvoer bij gem. Boven-Rijnafvoerverloop 53
4 baggergegevens 55
5 afname inhoud kribvakken 56
6 slibafzetting in de uiterwaarden tijdens HW 57
7 gestorte hoeveelheid specie op de IJssel 58
4 zandbalans 58
1 algemeen 58
2 berekening zandtransportcapaciteit 60
3 berekening opgetreden transport 60
4 vergeleijking beide transporten 62
5 verklaring afwijkingen 62
7 Bodemdaling IJssel tussen 1975 en 1977 63
8 betere schatting opgetreden transport, vergelijking met transportcapaciteit 77
9 nauwkeurigheid zandbalans 78
1 inleiding 78
2 fout in $\frac{\partial z}{\partial t}$ 79
3 fout in $\frac{\partial s}{\partial x}$ 80
4 conclusie 92

5 conclusie 92
6 aanbevelingen 94

VI Te verwachten bodemontwikkelingen 95
1 inleiding 95
2 zandbalans Juli 1977 t/m Juni 1981 96
3 bodemontwikkelingen op de IJssel 97

Literatuurlijst 98
Gebruikte notaties 99

I Inleiding en samenvatting.

I 1. Inleiding.

De IJssel is een vrij afstromende rivier in een alluviaal bed van ongeveer 110 km. lengte, zandtransporterende breedte varierend van 48 m. tot 134 m.; en heeft een verval van ongeveer 11 meter. De bedding is voortdurend in beweging als gevolg van steeds wisselende regime invloeden.
Als belangrijkste menselijke ingrepen in de laatste decennia kunnen worden genoemd:

- afsluiting Zuiderzee, waardoor de getijwerking aan de benedenmond verviel (1932);
- afsluiting Rechterdiep en Ganzediep in de IJsselmonding en aanleg van het Kattendiep (1939-1941);
- bochtafsnijdingen Doesburg (1954), inkorting 4870 m.
- bochtafsnijdingen Rheden-De Steeg (1969), inkorting 4020 m.
- Rijnkanalisatie; gereed in 1970, waardoor het afvoerregime van de IJssel sterk wijzigde.

Op grond hiervan is een morfologische studie van de IJssel gewenst, teneinde na te gaan

- welke bodemontwikkelingen hebben plaatsgevonden,
- met behulp van welk model deze nagerekend kunnen worden,
- en te voorspellen, welke ontwikkelingen nog te wachten staan.

Met name de gevolgen van de Rijnkanalisatie zijn hierbij van belang.

In Hoofdstuk II wordt het bovenstaande doel van de

studie geformuleerd.
In hoofdstuk III komt de Rijnkanalisatie aan bod, waar achtereenvolgens het doel van de Rijnkanalisatie en de theoretisch te verwachten gevolgen voor de bodemligging beschreven worden.
In hoofdstuk IV worden de opgetreden bodemontwikkelingen beschreven en verwerkt.
In hoofdstuk V wordt een morfologisch model opgesteld, waarmee de opgetreden bodemveranderingen worden beschreven. Eerst worden alle benodigde gegevens verzameld en uitgewerkt, waarna het model (zandbalans) wordt uitgewerkt. Aan het eind van dit hoofdstuk komt de nauwkeurigheid van de berekening aan de orde.
In hoofdstuk VI worden de te verwachten bodemontwikkelingen op de IJssel behandeld.
In hoofdstuk VII wordt een detailstudie gepresenteerd naar aanleiding van de bochtafsnijding Rheden-De Steeg.

I 2. Samenvatting.

In deze studie is een poging gedaan om de opgetreden bodemontwikkelingen op de IJssel m.b.v. zandbalansen en een transportformule te beschrijven. Door diverse oorzaken is dit maar ten dele gelukt:

- onbetrouwbaarheid in de korrelafmetingen, welke niet alleen langs de rivieras, maar ook in de tijd variaties ondergaan. Onder extreme omstandigheden (HW of langdurige periode met lage afvoer) kunnen deze variaties vrij groot zijn.
- de hoeveelheden materiaal, welke tijdens een hoogwater in de uiterwaarden achterblijven, vormen een belangrijk deel in de zandbalans en zijn onbekend; studie naar dit verschijnsel is gewenst.
- in de jaren '50 en '60 zijn grote hoeveelheden materiaal uit de kribvakken langs de IJssel gespoeld, welke hoeveelheid onbekend is, maar zeker een belangrijk aandeel in de zandbalans heeft.
- de nauwkeurigheid van één individuele peiling is bijzonder gering. Middeling van de peilingen in een vak (lengte-orde 10 km.) is hierdoor noodzakelijk. Door het optreden van systematische fouten bij de peilingen is de gemiddelde bodemligging van een vak nog aan een behoorlijke spreiding onderhevig. Middeling in de tijd (orde 10 jaar) blijft hierdoor noodzakelijk, waarmee enige informatie verloren gaat.
- de berekening van zandtransporten m.b.v. een transportformule is in het algemeen een zeer onnauwkeurige aangelegenheid.

Uit het onderzoek blijkt, dat de transportformule van Ackers en White redelijk voldoet op de IJssel. Voor deze formule bestaat geen enkele reden om deze op de IJssel niet toe te passen; dit in tegenstelling tot enkele andere zandtransportformules; de nauwkeurigheid laat echter nog veel te wensen over. De gevolgen voor de bodemligging onder invloed van de Rijnkanalisatie kunnen als volgt worden samengevat:

- bij de bochtafsnijding Rheden-De Steeg is de theoretisch verwachte bodemdaling bovenstrooms van de nieuwe bocht geheel opgetreden, wat bij de bochtafsnijding Doesburg niet het geval is;
- de invloed van de debietvergroting op de IJssel door de Rijnkanalisatie komt tot 1975 niet tot uitdrukking in de bodemligging, omdat in de periode 1970-1975 als gevolg van een lagere dan gemiddelde Boven-Rijnafvoer de IJsselafvoer lager dan gemiddeld was.
  Na 1975 vindt er in de Beneden-IJssel een geringe bodemdaling plaats, welke het gevolg kan zijn van de afvoervergroting.
  Behalve onder invloed van de bochtafsnijding Rheden-De Steeg vindt er in de Boven-IJssel in de periode 1970-1975 een bodemdaling plaats in de orde van 0.2 m, welke het gevolg kan zijn van een verminderd zandaanbod aan de IJsselkop.
- in de Midden-IJssel is de periode 1975-1977 een aanzienlijke bodemdaling opgetreden (orde 0.30 m). De oorzaak hiervan moet gezocht worden in een laag met een fijne korreldiameter direct onder de grovere toplaag, welke eerste na een hoogwater aan het bodemoppervlak verscheen en uitgeschuurd is.

II Doel van de studie.

Een morfologische studie van de IJssel is gewenst om na te gaan:

1 - welke bodemontwikkelingen hebben plaatsgevonden;

2 - met behulp van welk model kunnen deze ontwikkelingen nagerekend worden;

3 - welke ontwikkelingen nog te wachten staan bij een gemiddeld regime. Met name de gevolgen van de Rijnkanalisatie zijn hierbij van belang.

III Rijnkanalisatie.

III 1. Algemeen.

De Rijnkanalisatie en een deel van de Deltawerken dienen samen te zorgen voor een betere zoetwaterhuishouding van het Noorden van ons land en een verbetering van de scheepvaartmogelijkheden op de IJssel, zonder dat de zoutindringing in het Westen van ons land groter wordt.
Voor dat de Haringvlietsluizen en de Volkerakwerken tot stand kwamen, was het niet wenselijk om de waterverdeling bij de IJsselkop (splitsing van Pannerdenskanaal in Neder-Rijn en IJssel) te veranderen.
Ten behoeve van de waterhuishouding van het IJsselmeer was het echter gewenst, tijdens lage Boven-Rijn-afvoeren meer water door de IJssel te laten stromen; dit zou ook de scheepvaart-belangen op de IJssel dienen. Omwille van de terugdringing van de zoutgrens in de zeegaten echter in het westen, kon juist in droge perioden de Neder-Rijn-afvoer zeker niet verlaagd worden.
Door het tot stand komen van de Haringvlietsluizen en de Volkerakdam werd het zoutprobleem in het westen tijdens droge tijden veel minder, zodat een lagere Neder-Rijn-afvoer toelaatbaar werd.
De afvoervergroting van de IJssel werd nu wel mogelijk en wordt verkregen door de stuw bij Driel tijdens lage Boven-Rijn-afvoeren geheel of gedeeltelijk te sluiten (bijlage 1).
De waterverdeling wordt volgens een stuwprogramma als volgt geregeld:

Bij lage Boven-Rijn-afvoeren is de stuw bij Driel geheel gesloten en wordt slechts een debiet van 25 m^3/s

doorgelaten ter verversing van de Neder-Rijn en Lek. De rest van de afvoer vindt dan via de IJssel plaats. Bij toenemende afvoer blijft de stuw gesloten, totdat de IJsselafvoer 285 m^3/s bedraagt (stuwprogramma "285"). Bij nog verder toenemende Boven-Rijnafvoer wordt de stuw Driel zodanig geheven, dat de IJsselafvoer 285 m^3/s blijft bedragen. Wanneer de stuw geheel is getrokken, is de oorspronkelijke afvoerverdeling weer aanwezig.
Voordat de Rijnkanalisatie een feit was, was nog niet bekend welk stuwprogramma in de praktijk gebruikt zou worden; de grenzen waarbinnen het stuwprogramma moest vallen echter wèl. De bovengrens bedraagt 400 m^3/s en wordt bepaald door het feit, dat bij deze afvoer de uiterwaarden langs de IJssel beginnen in te stromen. De benedengrens wordt bepaald door de scheepvaartbelangen; om voldoende vaardiepte op deze belangrijke Noord-Zuid verbinding te krijgen, moet de IJsselafvoer minimaal 250 m^3/s bedragen.
Voor de lokatie van de stuw, die de afvoerverdeling tussen Neder-Rijn en IJssel moet regelen, speelden 2 factoren een belangrijke rol. Ten eerste was het wenselijk deze stuw zo ver mogelijk westelijk te leggen, om het aantal stuw- en sluiscomplexen op de Neder-Rijn en Lek te beperken. Ten tweede mag het complex niet te ver stroomafwaarts van het splitsingspunt gesitueerd worden, omdat dan de waterverdeling niet meer nauwkeurig geregeld kan worden en om de stuwschade bovenstrooms van de stuw zoveel mogelijk te beperken.
Zodoende viel de keuze voor plaatsing op een uiterwaard bij Driel. Door de geringe afstand van het stuwcomplex tot aan de Pannerdensekop (splitsing Boven-Rijn in Waal en Pannerdens kanaal) wordt ook hier echter de waterstand opgestuwd, hetgeen een verhoging van de Waalafvoer

tot gevolg heeft bij lagere afvoeren.
Dit bezwaar is gedeeltelijk ondervangen door twee bochtafsnijdingen in de IJssel te maken. Door deze ingreep wordt de weestand van de IJssel tussen het IJsselmeer en de IJsselkop verkleind, waardoor de waterstand bij een bepaalde afvoer aan de IJsselkop daalt, wat weer tot gevolg heeft, dat de IJssel een groter deel van de afvoer van het Pannerdens kanaal tot zich neemt.
Door deze waterstandsverlaging aan de IJsselkop wordt echter ook de afvoercapaciteit van het Pannerdens kanaal vergroot, wat weer als gevolg heeft, dat een groter deel van de Boven-Rijnafvoer via het Pannerdens kanaal plaats vindt, ten koste van de Waal.
Deze bochtafsnijdingen hebben niet tot gevolg, dat de Waalafvoervergroting tijdens gestuwde perioden geheel teniet wordt gedaan, wat voor de bevaarbaarheid van de Waal wel gunstig is.
De bedoelde bochtafsnijdingen zijn gemaakt bij Doesburg en bij Rheden-De Steeg. Bij Doesburg kwam de afsnijding in 1954 tot stand en werd de IJssel met 4600 m ingekort. Het zand, dat hierbij vrij kwam, werd gebruikt voor de opritten van de brug bij Doesburg.
De bochtafsnijding bij Rheden-De Steeg bestaat uit twee gedeelten en was in z'n geheel gereed in Oktober 1969. Het hierbij vrij gekomen zand werd gebruikt voor de aanleg van de IJsselweg (situatieschets bijlage 2).
In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de theoretisch te verwachten gevolgen voor de bodemligging van de IJssel onder invloed van de Rijnkanalisatie en de bochtafsnijdingen.

III 2. Theoretische beschouwing gevolgen Rijnkanalisatie.

III 2. 1. Inleiding.

In het voorgaande hoofdstuk is beschreven wat het doel van de Rijnkanalisatie is, terwijl tevens uitgelegd is, hoe dit doel met behulp van een stuwcomplex en twee bochtafsnijdingen verwezenlijkt werd.
In de voorgaande beschouwing zijn echter alleen de gevolgen voor waterstanden en afvoeren genoemd, omdat deze direct belangrijk waren om het doel (vergroting IJsselafvoer in droge tijden) te verwezenlijken.
De veranderingen in waterstanden en afvoeren hebben echter ook invloed op de zandbeweging in de rivier, waarvan in deze paragraaf de gevolgen op theoretische wijze worden bekeken.

III 2. 2. Invloed van een bochtafsnijding.

De morfologische gevolgen van deze ingreep kunnen, uitgaande van een sterke vereenvoudiging, bepaald worden.
Op bijlage 3 is deze bochtafsnijding eenvoudig weergegeven (fig. a). De kortsluiting vindt plaats tussen A en B. Wanneer de bodem in het nieuwe traject gebaggerd wordt als aangegeven, stelt zich de toestand in van fig. b, direct na de doorsteek.
Ter plaatse en benedenstrooms van B verandert er niets.
In de nieuwe bocht heerst een kleinere evenwichtsdiepte als gevolg van het grotere bodemverhang. Deze evenwichtsdiepte zal gaandeweg van B naar A' steeds meer benaderd worden, waarbij de waterspiegel verloopt volgens een stuwkromme. Bij A' aangekomen, wordt de evenwichtsdiepte weer groter. Uitgaande van de waterstand bij A' ontstaat een stuwkromme, totdat de oorspronkelijke even-

wichtsdiepte wordt bereikt.
Deze toestand, direct na afsnijding, is echter niet stabiel, wanneer het een rivier betreft met een bewegelijke bodem. Door deze stuwkromme-effecten zijn de waterdiepten en -snelheden niet overal meer gelijk. Omdat het sedimenttransport in hoge mate snelheidsafhankelijk is, is de transportcapaciteit niet overal meer gelijk (fig. c).
Een toenemende transportcapaciteit, in stroomrichting, heeft uitschuring tot gevolg, terwijl een afnemende aanzanding veroorzaakt.
Pas wanneer door aanzanding en uitschuring de verhanglijnen van waterspiegel en bodem weer recht zijn, is het nieuwe evenwicht ontstaan met hetzelfde bodemtransport als vroeger. Hiertoe daalt de hele bodem bovenstrooms van A' met een waarde van de lengte van de inkorting maal het verhang (fig. d).

In werkelijkheid is het allemaal niet zo eenvoudig, omdat deze theoretische omstandigheden zich niet voor hoeven te doen, zoals:

- de afvoer varieert in de tijd, zodat er bij elke stromingstoestand nooit evenwicht bereikt wordt.
- de gebaggerde nieuwe geul hoeft helemaal niet de aangegeven vorm te hebben.
- het bodemmateriaal in de nieuwe geul kan een heel andere samenstelling hebben, waardoor uitschuringen verhinderd kunnen worden. Deze mogelijkheid bestaat ook voor de bodem bovenstrooms van de afsnijding, waar, door uitschuring, de onderliggende laag aan het bodemoppervlak komt.

Toch geeft bovenstaande theoretische beschouwing een indruk van wat er allemaal te wachten staat na een bochtafsnijding.

III 2. 3. Invloed gestuwde en ongestuwde periode.

Allereerst is het bodemevenwicht nabij het splitsingspunt van IJssel en Neder-Rijn van belang.
Vóór de Rijnkanalisatie was de situatie hier in evenwicht. Bij de gemiddelde afvoer is de breedte van het Pannerdens kanaal ongeveer 130 m, van de IJssel 65 m en van de Neder-Rijn 85 m. De IJssel en de Neder-Rijn zijn dus samen breder dan het Pannerdens kanaal. Dit heeft tot gevolg, dat in de oorspronkelijke evenwichtssituatie een sprong in de bodem aanwezig is als gevolg van de plotselinge verwijding.

Indien er gestuwd wordt, stijgt de waterstand aan de IJsselkop iets. Zoals eerder vermeld, neemt de afvoer van het Pannerdens kanaal in deze periode een weinig af (opstuwingseffect minus bochtafsnijdingseffect). Belangrijk is echter, dat de waterstand aan de IJsselkop stijgt, terwijl dit aan de Pannerdens kop nauwelijks het geval is. Hierdoor wordt de waterdiepte op dit pand in stroomrichting steeds groter, waarbij het verhang afneemt. Dit heeft tot gevolg, dat de transportcapaciteit van het Pannerdens kanaal nabij de IJsselkop nagenoeg nul bedraagt.
Het zandaanbod naar het Pannerdens kanaal zal bij de Pannerdense kop geen verandering ondergaan, uitgaande van het feit, dat de zandverdeling op dit splitsingspunt in grote mate afhankelijk is van de vorm van dit splitsingspunt (welke onveranderd blijft) en in mindere mate van de afvoerverdeling, welke echter alleen een zeer geringe verandering ondergaat.
In de gestuwde periode is dus het aanbod op het Pannerdens kanaal groter, dan het transport, waardoor dit pand zal aanzanden.

Voor de IJssel ontstaat in de gestuwde periode het volgende:
De afvoer van het Pannerdens kanaal vindt voor het grootste deel plaats via de IJssel.
De transportcapaciteit op de IJssel is in deze periode veel groter, dan wanneer er niet gestuwd zou worden.
Het zandaanbod uit het Pannerdens kanaal is dan echter te verwaarlozen, waardoor de IJssel bovenstrooms zal uitschuren.
Op de IJssel zal in de gestuwde periode een proces ingezet worden, waarbij een zodanig flauw verhang wordt ontwikkeld, dat er op de IJssel géén transport optreedt.
Doordat de gestuwde periode veel te klein is, komt alleen het begin van dit proces tot uitdrukking in een uitschuring op de Boven-IJssel.

Voor een groot deel van de tijd, zal de Boven-Rijn-afvoer zó groot zijn, dat de stuwen in de Neder-Rijn getrokken zijn. De oude afvoerverdeling van de Rijntakken zal zich dan weer instellen, wat één van de uitgangspunten van het Rijnkanalisatieplan was, teneinde de hoogwaterstanden niet of nauwelijks te beïnvloeden.
In deze ongestuwde periode wordt door de rivieren dan weer de oude evenwichtsligging nagestreefd.
Dit betekent, dat in deze periode het Pannerdenskanaal weer zal uitschuren, terwijl de Boven-IJssel aanzandt.

In werkelijkheid verandert de afvoer continue, waarbij de rivier dan een gemiddelde evenwichtsligging aanneemt, daar de perioden waarin de rivier de evenwichtssituatie bij die afvoer nastreeft, veel te klein zijn om deze situatie ook werkelijk tot stand te brengen.

Door het Waterloopkundig Laboratorium is een model onderzoek uitgevoerd naar het gedrag van het splitsingspunt IJsselkop (WL 1970) onder invloed van de werking van de stuw Driel.
Uit dit onderzoek bleek, dat in het geval van een niet te intensief stuwprogramma, de bodemveranderingen nabij het splitsingspunt binnen de huidige variaties in de bodemliggingen vallen.

III 2. 4. Invloed debietverandering en wijziging van het zandaanbod.

De invloed van een debietverandering en/of een wijziging in het zandaanbod op de bodemligging van een alluviale rivier, kan eenvoudig worden weergegeven aan de hand van de formules voor de water- en zandbeweging. Wanneer de zandbeweging voor de eenvoud alleen een functie van de watersnelheid wordt verondersteld, gelden de volgende betrekkingen:

$$Q = B_q a u$$
$$u = C\sqrt{ai}$$
$$S = B_s \alpha u^{\beta} \qquad (\beta \text{ is } 5 \text{ voor Engelund-Hansen})$$

hieruit volgt voor het evenwichtsverhang

$$i \sim \left(\frac{S^{3/\beta}}{Q} \right)$$

hieruit volgt, dat bij vergroting van het debiet bij gelijkblijvend zandtransport het verhang evenredig afneemt met de toename van het debiet.
Dit geldt overigens voor alle transportformules, waarin alleen de snelheid als tijdsafhankelijke variabele aanwezig is (waarbij de overige parameters alleen plaatsafhankelijk zijn) zoals b.v. bij Meyer-Peter en Müller:

$$\frac{S}{\sqrt{g \Delta d^3}} = 13{,}3 \left(\frac{\mu u^2}{C^2 \Delta d} - 0{,}047 \right)^{3/2}$$

Om in deze laatste formule het zandtransport gelijk te houden moet (wanneer de overige parameters geen verandering ondergaan) de stroomsnelheid (u) gelijk blijven.
Dit houdt in, dat het product ai constant blijft bij onveranderde C-waarde. Met de continuïteitsvergelijking voor het water volgt dan, dat het verhang (i) omgekeerd evenredig is met het debiet (Q).

Voor de zandtransportformule van Ackers en White gaat deze beschouwing niet zo duidelijk op, maar de invloed van een debiet verandering op het evenwichtsverhang wordt met bovenstaande beschouwing wel duidelijk beschreven.

Om de werkelijke verandering van het evenwichtsverhang te kunnen bepalen, moet de grootte van het zandtransport, het afvoerverloop en de transportformule welke het transport op de IJssel goed beschrijft bekend zijn.
Voor de IJssel kan verwacht worden, dat door de toename van de afvoer samen met een achterblijvende toename van het zandaanbod een vermindering van het evenwichtsverhang ontstaat.
Het proces van vermindering van het evenwichtsverhang duurt bijzonder lang, zodat de ontwikkelingen in de tussenliggende periode van veel groter belang zijn, dan de eindsituatie. De bodemligging kan eenvoudig uitgaande van bepaalde veronderstellingen met een numeriek morfologisch model berekend worden als functie van de tijd.
Een beschrijving van de theoretisch te verwachten bodemligging m.b.v. numeriek model blijft hier achterwege om een aantal redenen:

- het gedrag van de rivier tijdens HW kan moeilijk beschreven worden; met name het debiet in het

zomerbed is niet overal gelijk.
- afzetting van materiaal in de uiterwaarden is slecht bekend.
- de korrelafmetingen langs de rivieras variëren sterk.
- de toe te passen zandtransportformule is onbekend.

Samen met de wetenschap, dat het opstellen van een numeriek model zeer tijdrovend is, terwijl het eigenlijke doorrekenen behoorlijk duur is, wordt voorlopig afgezien van een berekening met een numeriek morfologisch model.

Er kan veel eenvoudiger inzicht verkregen worden in het tijdsafhankelijke proces m.b.v. de volgende eenvoudige beschouwing:
Uitgaande van een rivier in evenwicht met een constant bodemverhang en een constante afvoer, kan de stuwkromme getekend worden, welke bij een groter debiet hoort. Op plaatsen, waar de waterdiepte kleiner wordt, moet de stroomsnelheid toenemen, waardoor de transportcapaciteit moet toenemen (uitgaande van de veronderstelling, dat de overige transportbepalende parameters constant zijn). Op deze manier kan bekeken worden of een bepaald riviervak in de eerstkomende tijd aanzandt of uitschuurt, danwel onveranderd blijft.
Op bijlage 4 staan de bodemligging en verhanglijn getekend in de uitgangssituatie. De rivier wordt verondersteld in evenwicht te zijn, dus bodem- en waterspiegelverhang zijn gelijk.
Op dit moment wordt de afvoer vergroot en blijft op dit hogere niveau constant. De stuwkromme welke op tijdstip t=0 ontstaat, is aangegeven. De rivier is vanaf nu niet meer in evenwicht, totdat bodem- en waterspiegelverhangen overal weer gelijk zijn.

De transportcapaciteit bij deze grotere afvoer is in de vakken II, III en IV constant en even groot; in vak I neemt de transportcapaciteit in de stroomrichting toe, tot aan de monding. In vak I zal een uitschuring het gevolg zijn, welke tot aan de monding steeds groter wordt (de $\partial h/\partial x$ wordt in de stroomrichting groter, dus ook $\partial u/\partial x$, dus $\partial s/\partial x$ waardoor $\partial z/\partial t$ toeneemt). In vak II en III is het uitgaande transport even groot als het binnenkomende transport, zodat in de eerste periode hier geen bodemveranderingen te verwachten zijn. In vak IV is het uitgaande transport toegenomen vergeleken met de situatie vóór debietverhoging. Wanneer het zandaanbod bij de kop van de rivier ongewijzigd blijft, zal vak IV uitschuren; deze uitschuring vindt echter (in tegenstelling tot vak I) zeer plaatselijk plaats, daar overal in vak IV de transportcapaciteit constant is, behalve precies op de kop waar het transport (theoretisch) ineens toeneemt. Hier is dus $\partial s/\partial x$ erg groot en daardoor is $\partial z/\partial t$ ook erg groot. Op deze manier doorredenerend, kan een indruk verkregen worden, hoe de bodemliggingen in de tijd verlopen. Uit bijlage 4 blijkt, dat vanaf de monding een verdieping zich langzaam naar de kop voortplant. Deze verdieping is het gevolg van een grotere evenwichtsdiepte (dan voorheen), welke hoort bij een kleiner verhang en een grotere afvoer.
Tevens plant er zich vanaf de kop een verdieping voort, welke het gevolg is van een lager aanbod van zand t.o.v. de transportcapaciteit verderop. Deze verdieping heeft in eerste instantie een zeer steil front ($\partial s/\partial x$ is zeer groot) welke in de loop van de tijd afgevlakt wordt.

Aan de hand van een transportformule kan de evenwichtsligging onder invloed van een debietvergroting worden

vastgesteld, terwijl met bovenstaande beschouwing een indruk gekregen is, hoe het verloop van de bodemligging in de tijd zal zijn, tot dat de nieuwe evenwichtsligging bereikt is. Rest nu nog de vraag, hoelang het ongeveer duurt, voordat de eindsituatie bereikt is.

Een indruk omtrent de tijd, die nodig is om zulke morfologische veranderingen tot stand te brengen, kan verkregen worden door het bepalen van de morfologische tijdschaal (de Vries 1975) van de IJssel.

Beschouw een rivier, welke in een meer uitstroomt (bijlage 5):
Op tijdstip t=0 wordt het meerniveau met ΔZ verlaagd en blijft op dit niveau. De bodem van de rivier zal uiteindelijk ook ΔZ lager komen te liggen.
De morfologische tijdschaal van de rivier wordt nu gedefinieerd als: de tijd die nodig is, voordat op een punt, op een afstand van L_m van de monding, de rivierbodem verdiept is met de helft van de uiteindelijke waarde (dus $\frac{1}{2}\Delta Z$).
Teneinde het eenvoudige model dat aan de hier gebruikte morfologische tijdschaal ten grondslag ligt te mogen gebruiken, moet de afstand L_m minimaal 200 km. bedragen. De IJssel is echter geen 200 km. lang, wat overigens niets afdoet aan de bepaling van de grootte-orde van de tijd in welke morfologische processen zich afspelen. De bepaling van deze tijdschaal is gegeven op bijlage 5 en 6.
Het duurt ongeveer 18 eeuwen (1800 jaar) voordat op een afstand van 200 km. de halve uiteindelijke bodemdaling heeft plaats gevonden.
Voor de Waal bedraagt deze tijdschaal ongeveer 9 eeuwen (bijlage 6)

Het verschil met de IJssel komt door het lagere transport per eenheid van breedte op de IJssel (bij gelijk verhang) en de 2x zo grote waarde van de factor β (wat de rivier "sneller" maakt).
Deze tijdschaal is in vergelijking met andere rivieren groot, zodat de IJssel dus als een traag reagerende rivier beschouwd kan worden.

Uit het detailonderzoek van de Boven-IJssel m.b.t. een uitgevoerde bochtafsnijding blijkt (zie hoofdstuk VII), dat de voortplantingssnelheid van een bodemverstoring ligt in de orde van 1500 meter per jaar. Voor de verdieping in de Boven-IJssel als gevolg van een toename van het debiet bij een achterblijvend zandaanbod is deze voortplantingssnelheid van toepassing; de invloed van een verandering van het zandtransport breidt zich met deze voortplantingssnelheid uit.

IV Opgetreden bodemontwikkelingen.

IV 1. Bodemligging IJssel vanaf 1938.

Jaarlijks wordt de bodem van de IJssel gepeild. De metingen worden uitgevoerd door in dwarsraaien (loodrecht op de rivieras) te varen. In elke raai wordt om de 5 meter de diepte bepaald. Aan de hand van de waterstand ter plaatse kan hiermee de bodemhoogte bepaald worden. De metingen in elke raai worden gemiddeld tot één representatieve bodemhoogte in deze raai. Elke 100 m. wordt zo'n dwarsraai gevaren. Deze bodemliggingen per 100 m. worden in een peilboekje opgeschreven, waarna later de gemiddelde bodemligging per km. berekend wordt, welke samen met de peiling van het vorige jaar in één grafiek getekend wordt.

Opmerking:

De dieptepeilingen worden uitgevoerd tussen de normaallijnen welke over de kribkoppen lopen aan weerszijde van de rivier. De afstand tussen deze lijnen wordt bepaald door de normaalbreedte welke gelijk is aan de breedte van de waterspiegel t.pl.v. de kribkoppen bij een IJsselafvoer van 250 m^3/s.

Op plaatsen waar géén kribben aanwezig zijn, maar waar de rivier door een continue oeververdediging begransd wordt, wordt zover als mogelijk (i.v.m. vaardiepte) tot de normaallijn gepeild. Dicht bij de oever wordt dan een deel van het onderwatertalud gepeild, waardoor (na uitmiddeling over de breedte) de bodemhoogte over de zandtransporterende breedte hoger wordt voorgesteld, dan wanneer , bij de aanwezigheid van kribben, ook tussen de kribben gepeild wordt tot aan de normaallijn.

Deze zogenaamde jaarlijkse dwarspeilingen (JDP) zijn voor de periode 1938 t/m 1981 weergegeven op de tekeningen 1 t/m 6.

Wat bij deze bodemliggingen direct opvalt, is het onregelmatige verloop langs de rivieras, ondanks dat de invloed van duinvorming (duinen kunnen afmetingen aannemen van 40 m. lang en wel 1,5 m hoog) min of meer verdwenen is door per km. te middelen.
De oorzaak van deze onregelmatigheden moet o.a. gezocht worden in de morfologie van een crossing en in de breedte van het hoogwaterbed.
Na een hoogwater vertonen crossings (overgangen van een bocht en een tegenbocht) een verhoogde bodemligging, welke tijdens de opvolgende laagwaterperiode weer verdwijnt.
Een belangrijkere reden voor het niet rechtlijnig lopen van de bodem is de invloed van het hoogwaterbed. Tijdens een hoogwater vindt een belangrijk deel van het zandtransport plaats, dat in een jaar optreedt. Dit geldt vooral op die plaatsen, waar de gemiddelde afvoer snelheden veroorzaakt, welke dicht bij het begin van beweging van het bodemmateriaal liggen. Op plaatsen, waar het HW-bed erg smal is, vindt een groot deel van de afvoer plaats tussen de kribben over de beweeglijke bodem. Hierdoor zal het zandtransport op deze plaatsen aanzienlijk zijn, wat leidt tot een relatief lage bodemligging ter plaatse. Op plaatsen, waar het HW-bed juist heel breed is, zijn de watersnelheden erg klein, waardoor het aangevoerde zand hier tijdens hoogwater neerslaat met als gevolg een relatief hoge bodemligging.
Na de hoogwaterperiode vindt alle afvoer weer plaats in het genormaliseerde zomerbed, zodat een meer rechtlijnige bodemligging door de rivier wordt nagestreefd. De pieken en dalen in de bodemligging worden weer afgevlakt en planten zich langzaam voort.

Wat verder opvalt aan deze bodemliggingen is, dat de gemiddelde bodemhelling in de stroomrichting afneemt. Deze afname is bij de IJssel vrij groot en wordt voor een belangrijk deel bepaald door de sterk afnemende korreldiameter in de stroomrichting.

In de IJsselmond in het Ketelmeer bevindt zich een behoorlijke drempel, wat bij veel rivieren voorkomt, die in ondiep, relatief stil water, uitmonden.

De bodemveranderingen tussen 2 opvolgende jaren zijn zeer onregelmatig en kunnen het gevolg zijn van uitgevoerde werken, baggerwerkzaamheden of veranderingen in stromingsomstandigheden, welke weer van blijvende of zeer voorbijgaande aard kunnen zijn (Het laatste treedt b.v. op tussen 1957 en 1958 mede als gevolg van het hoogwater op 1 Maart 1958, waarbij de Boven-Rijnafvoer 9120 m^3/s bedroeg).

In de volgende paragraaf worden deze grafieken verder verwerkt, zodat de veranderingen in bepaalde perioden kwantitatief bepaald kunnen worden.

IV 2. Verwerking bodemligging IJssel vanaf 1938.

Om kwantitatief iets te kunnen vertellen over de bodemveranderingen van de IJssel moeten de bodemliggingen sterk geschematiseerd worden.
Vanwege de zeer onregelmatige bodemveranderingen per jaar kunnen deze niet gebruikt worden voor een juiste beschouwing van de opgetreden veranderingen.
De invloeden van toevallige omstandigheden, zoals een hoogwater en uitgevoerde werken (b.v. baggeren) zijn te groot om een jaarlijkse beschouwing toe te laten en zijn op lange termijn onbelangrijk.
Tevens is de fout in de gemiddelde bodemligging van een vak op een bepaald tijdstip dermate groot, dat middeling in de tijd noodzakelijk is (zie par. V 4.9).
Om op lange termijn de verschillen te kunnen onderkennen, moeten voor lange perioden de bodemliggingen geschematiseerd en gemiddeld worden.

Om dit te bereiken zijn de bodemliggingen welke getekend zijn op de tekeningen 1 t/m 6 geschematiseerd tot rechte lijnen tussen de peilschalen. Van elke 2 jaar (welke door elkaar getekend zijn) is zo de gemiddelde bodemligging bepaald. De bodemhoogten aan peilschalen werden daarna afgelezen (op 5 cm. afgerond) en zijn weergegeven op bijlage 7.
Uit deze bijlagen blijkt, dat de bodemliggingen in de tijd nog grillig veranderen. Met deze (betrekkelijk onnauwkeurige) bodemliggingen kan geen lengte-profiel gemaakt worden welke op een bepaald moment representatief verondersteld kan worden voor dit moment.
Hiertoe zijn bodemhoogten per peilschaal als functie van de tijd uitgezet (bijlage 8).
Door deze verzameling punten is zo goed als mogelijk

het verloop door enkele rechten geschematiseerd.

Op deze manier kan voor elk moment een lengteprofiel samengesteld worden, welke met een behoorlijke nauwkeurigheid representatief is voor dit moment.
Op bijlage 9 zijn de geschematiseerde lengteprofielen voor 1960 en 1980 weergegeven.

Opmerkingen:

- de schematisatie van de lengteprofielen tot rechtlijnig verlopende bodemliggingen tussen de peilschalen geeft een snelle en redelijk betrouwbare indruk van de bodemligging van de IJssel op een bepaald moment. Het netjes middelen van de gemiddelde bodemliggingen per km. tussen de peilschalen is niet gedaan, omdat de getalswaarde van de gemiddelde bodemliggingen per km. alleen voor de laatste twintig jaar voorhanden zijn. Het aflezen van deze waarden uit de grafieken is een zeer tijdrovend werk.
- De bodemliggingen aan de peilschalen zijn afgelezen en afgerond op 5 cm. Hiermee wordt niet gezegd, dat de nauwkeurigheid van deze bodemliggingen de helft bedraagt van deze 5 cm. Door de schematisatie van de bodemliggingen tot rechte lijnen tussen de peilschalen een tweede of derde keer uit te voeren, blijkt, dat de opgegeven bodemliggingen aan de peilschalen tot 10 cm. kunnen afwijken.
  De werkelijke gemiddelde waarde van een bodemligging aan een peilschaal is dus de opgegeven waarde plus of min 10 cm.
  In eerste instantie is deze nauwkeurigheid bijzonder klein; door het uitzetten echter van deze waarden als functie van de tijd (wat gedaan is op bijlage 8)

kunnen, door de daarna uitgevoerde schematisatie, met grotere nauwkeurigheid op een bepaald moment de gemiddelde bodemliggingen aan de peilschalen bepaald worden.
Het gevonden lengteprofiel op een bepaald moment is dan niet een betere schatting van het werkelijke lengteprofiel van dat moment, maar stelt het lengteprofiel voor, dat zou zijn opgetreden, wanneer alle parameters, welke de morfologie van de rivier bepalen, over een lange periode (ongeveer 10 jaar) constant hun gemiddelde waarde hadden.
De nauwkeurigheid van de bodemliggingen aan de peilschalen op een bepaald moment is ongeveer plus of min 5 cm.

- De peilschalen worden om verschillende redenen weleens verplaatst (b.v. bij Doesburg en De Steeg n.a.v. de bochtafsnijdingen). Op bijlage 10 is de plaats van de peilschalen aangegeven.
  Voor elke periode is de bodemligging bepaald op de plaats waar de peilschaal in die periode stond, zodat met de bijbehorende betrekkingslijn voor die periode meteen de waterdiepte bekend is.
  Voor de berekeningen zijn kleine verplaatsingen van de peilschalen niet belangrijk (tot 1 km.), waarmee in het verloop van deze studie dan ook geen rekening is gehouden.

IV 3. Vergelijking peilingen met theoretische beschouwing.

IV 3. 1. Bochtafsnijding Doesburg (1954).

De invloed, die deze bochtafsnijding op de bodemliggingen heeft gehad, komt tot uitdrukking op bijlage 8. Bij Doesburg, dat precies bovenstrooms van de bochtafsnijding ligt, vindt een verdieping plaats ongeveer ter grootte van 25 cm.
De uitschuring verplaatst zich echter niet verder voort, zoals theoretisch verwacht werd (zie Hoofdstuk III); bij De Steeg is al geen bodemdaling meer waarneembaar (zie ook tekening 1 1955-1956). Het steilere verhang tussen De Steeg en Doesburg blijkt vrij stabiel te zijn.
Kennelijk zijn in deze periode niet alleen de waterdiepten en verhangen veranderd (verandering van de stroomsnelheden) maar moeten ook andere transportbepalende parameters wijzigingen hebben ondergaan, welke een verdere bovenstroomse uitschuring verhinderd hebben.
Op sommige plaatsen komen keileembanken voor in de IJsselbodem. Wanneer dit hier het geval is geweest, is het duidelijk, dat verdere uitschuring van de bodem verhinderd is.

IV 3. 2. Bochtafsnijding Rheden-De Steeg (1969).

In hoofdstuk VII wordt op de invloed van deze bochtafsnijding nog uitgebreid ingegaan. Uit deze beschouwing blijkt, dat bovenstrooms van de nieuwe bocht inderdaad een uitschuring plaats vond ter grootte van het verhang maal de inkorting, hetgeen theoretisch verwacht kon worden.

IV 3. 3. Invloed gestuwde periode (sinds 1970).

Onder invloed van een toename van het debiet (t.g.v. het in werking treden van de stuw bij Driel) wordt

theoretisch verwacht, dat de Beneden-IJssel gelijkmatig (vanaf de IJsselmeer zijde) uitschuurt én dat in het geval van een achterblijvend zandaanbod een verdieping in de bovenmond plaats vindt, welke in de vorm van een vrij scherpe kuil zich in de stroomrichting uitbreidt met een voortplantingssnelheid in de orde van 1500 m. per jaar.
Uit bijlage 8 zou dan moeten blijken, dat de bodemligging ter plaatse van Kampen, Katerveer en Wijhe omlaag gaat sinds 1970. Zoals te zien is op deze bijlage, is dit niet het geval: na 1970 komt de bodem enigszins omhoog.
Wordt de werkelijke gemiddelde afvoer bekeken voor en na de inwerking treden van de stuw Driel, dan blijkt, dat in de periode 1960-1970 de gemiddelde afvoer 300 m^3/s bedroeg, terwijl deze tussen 1970 en 1975 slechts 285 m^3/s was. Hieruit volgt dus, dat ondanks het stuwen de gemiddelde afvoer iets afnam (dit onder invloed van een kleiner dan gemiddelde Boven-Rijn afvoer in deze periode). Deze lagere afvoer zou theoretisch een bodemstijging in de Beneden-IJssel tot gevolg moeten hebben. In de periode '70-'75 is dit zoals blijkt uit bijlage 8 niet tegen te spreken. In de periode 1975-1980 was de gemiddelde IJsselafvoer 345 m^3/s, welke iets groter is dan de gemiddelde afvoer welke verwacht wordt na Rijnkanalisatie (hier wordt in hoofdstuk V nog op teruggekomen). In deze periode zou dus in de Beneden-IJssel een vrij gelijkmatige verdieping te zien zijn. Uit bijlage 8 blijkt dit inderdaad enigszins het geval te zijn.
De schokvormige verdieping in de Boven-IJssel treedt alléén op, wanneer het zandaanbod achterblijft bij een toenemend debiet.

Wanneer de verhouding $\frac{S^{3/\beta}}{Q}$ verandert, vindt er dus in de Boven-IJssel een scherpe verandering plaats.
Op bijlage 8 is zo'n verandering, wanneer deze slechts van korte duur is, niet te zien, omdat de geschematiseerde bodemligging ter plaatse van de IJsselkop te veel wordt beïnvloed door de gemiddelde bodemligging in het vak IJsselkop - De Steeg. Omdat de werkelijke gemiddelde afvoer in de periode 1970-1975 niet heeft geleid tot een debietvergroting, wordt in deze periode dan ook geen bodemdaling aan de IJsselkop verwacht. Overigens vindt er in de Boven-IJssel wèl in deze tijd een aanzienlijke bodemdaling plaats, welke echter voor het grootste deel het gevolg is van de bochtafsnijding Rheden-De Steeg.
Wanneer de jaarlijkse dwarspeilingen van na 1975 bekeken worden (tekeningen 5 en 6) blijkt, dat ondanks de debietvergroting in deze laatste periode geen bodemdaling is opgetreden. Hieruit kan worden geconcludeerd, dat het zandaanbod aan de IJsselkop schijnbaar niet is achtergebleven t.o.v. de debietvergroting, dus ook vergroot is.

IV 3. 4. Niet verwachte ontwikkelingen.

Behalve de verwachte bodemveranderingen t.g.v. de Rijnkanalisatie (welke gedeeltelijk zijn opgetreden en gedeeltelijk niet i.v.m. het niet gemiddelde afvoerverloop) is er een aanzienlijke bodemdaling opgetreden vooral in de Midden-IJssel, welke (zoals blijkt uit bijlage 8) hoofdzakelijk tussen 1975 en 1977 heeft plaats gevonden. Een verklaring hiervoor komt verderop in deze studie nog aan de orde (hoofdstuk V).

V Morfologisch model.

V 1. 1. Keuze model.

Voor het doen van kwantitatieve voorspellingen m.b.t. de toekomstige bodemligging van de IJssel is het noodzakelijk om de ontwikkelingen van de afgelopen 40 jaar m.b.v. een model te kunnen beschrijven.
Voor de beschrijving van een morfologisch probleem Kan in principe gebruik worden gemaakt van de volgende modellen:

- analytisch model
- numeriek model
- schaal model

Ieder van deze modellen heeft zijn gunstige en ongunstige eigenschappen.
Het analytisch model vergt een zeer grove schematisatie vooral wat betreft de geometrie. Hierbij moeten de differentiaal vergelijkingen voor water en zand gelineariseerd worden, terwijl de zandbeweging een sterk niet-lineair karakter heeft. Wel kan via een analytisch model veel inzicht verkregen worden in het proces (de theoretische beschouwing in hoofdstuk III is eigenlijk ook een analytisch model).
Het numerieke model daarentegen verschaft weinig inzicht, heeft echter het grote voordeel, dat het niet-lineaire gedrag volledig meegenomen kan worden, terwijl tevens m.b.v. een computer vrij snel vele mogelijkheden kunnen worden doorgerekend.
Daar het rekenen met zo'n numeriek model bijzonder duur is, is het gewenst om, voordat zo'n model gebruikt wordt, te weten welke transportformule gebruikt kan worden.
Verder kan van dit probleem een schaalmodel gebouwd worden; dit komt echter in verband met de uitzonderlijk hoge kosten niet in aanmerking.

Voor dit probleem is echter nog een andere mogelijkheid zeer goed bruikbaar: n.l. een eenvoudig numeriek model, wat neerkomt op het berekenen van het zandtransport uitgaande van bekende bodemliggingen en bekende stromingsomstandigheden, waarna via een zandbalans de volgende bodemligging berekend kan worden, welke vergeleken wordt met de bekende bodemligging. Op deze manier kan dan met enige zekerheid een keuze worden gemaakt m.b.t. de zandtransportformule welke de opgetreden ontwikkelingen op de IJssel goed beschrijft.

In de volgende paragrafen worden de gegevens verzameld, welke uiteindelijk moeten leiden tot een beschrijving van de morfologie van de IJssel m.b.v. het eenvoudige numerieke model. De berekening van de zandbalansen komt in dit hoofdstuk aan de orde. De perioden, waarvoor deze balans wordt opgesteld zijn:

1940 tot 1950
1950 tot 1960
1960 tot 1970
1970 tot 1975
1975 tot 1980

De trajecten, waarvoor de balansen worden opgesteld zijn de peilschaalvakken.

V 1. 2. Afleiding model zandbalans.

De bewegings- en continuïteitsvergelijkingen voor het water en sediment luiden per eenheid van breedte:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + g\frac{\partial a}{\partial x} + g\frac{\partial z}{\partial x} = g\frac{u|u|}{C^2 a} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} + a\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial a}{\partial x} = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} = V(x,t) \qquad (3)$$

$$s = f\ (u,\ a,\ D,\ B_s,\ C,\ \text{parameters}) \qquad (4)$$

In bovenstaande vergelijkingen zijn z, s, a, u, D, B, en C functies van x en t.

Voor de beschrijving van de bodemveranderingen kan uitgegaan worden van een quasi-stationaire waterbeweging. Samen met het feit, dat de term $u\frac{\partial u}{\partial x}$ verwaarloosbaar is t.o.v. $g\frac{\partial a}{\partial x}$ (Froudegetal veel kleiner dan 1) reduceren bovenstaande vergelijkingen tot:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{u|u|}{C^2 a} \qquad (1)$$

$$q = q(t) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} = V(x,t) \qquad (3)$$

$$s = f\ (u,a,\ D,\ B_s,\ C,\ \text{parameters}) \qquad (4)$$

Vergelijking (1) beschrijft de stuwkromme bij stationaire stroming.

Aangezien de bodemveranderingen slechts zeer langzaam plaatsvinden kan de waterdiepte a aan de benedenstroomse rand voor een bepaalde tijd constant worden verondersteld. Wanneer wordt aangenomen, dat C(x, t) een functie is van C(q(t), x) volgt uit vergelijking (1) en (2), dat a, u en h alléén afhankelijk zijn van de afvoer en de plaats:

$$a = a\ (q(t),x)$$
$$u = u\ (q(t),x)$$
$$h = h\ (q(t),x)$$

Opmerking:
voorgaande aannamen houden in, dat op elke plaats er een éénduidige Q - h relatie bestaat. Voor een beperkte tijd bestaat deze relatie (met een bepaalde onnauwkeurigheid) inderdaad voor de Nederlandse Rijntakken.

De korreldiameter en zandtransporterende breedte kunnen voor een beperkte periode verondersteld worden alleen af te hangen van de plaats: $D = D(x)$ en $B_s = B_s(x)$.

Uit vergelijking (4) volgt dan, dat het sedimenttransport op een bepaalde plaats alléén afhankelijk is van de afvoer: $s = s\ (q(t),x)$.
Deze relatie is slechts voor een beperkte periode geldig.
De zandbalans (vergelijking (3)) kan als volgt omschreven worden: voor een vak met lengte L en gemiddelde breedte B_s

$$\int_0^L \frac{\partial z}{\partial t}\,dx + \int_0^L \frac{\partial s}{\partial x}\,dx = \int_0^L V(x,t) \qquad \begin{array}{ll} z = z(x,t) & \text{m.} \\ s = s(x,t) & m^2/s \\ v = v(x,t) & m^2/s \end{array}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{z}\,L) + s(L) - s(0) = V(t)\,L \quad \text{als } V = V(t)$$

De sedimenttransporten s(L) en s(0) worden als volgt bepaald:

$$\begin{array}{ll} s(0) = \tfrac{1}{2}(s_{i-1} + s_i) & \\ s(L) = \tfrac{1}{2}(s_i + s_{i+1}) & \\ i = 1 & s(0) = s_i \\ i = n & s(L) = s_n \end{array}$$

Het sedimenttransport in een bepaald vak wordt bepaald uit de gemiddelde waarden van de transportbepalende parameters in dit vak.
Deze gemiddelde waarden zijn dan alléén afhankelijk van de afvoer (q(t)), zodoende is het transport in een bepaald vak voor een beperkte periode alléén een functie van de afvoer: $s_i = s_i(q(t))$
de zandbalans luidt nu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{z}\ L) + \tfrac{1}{2}\ s_{i+1}(q(t)) - \tfrac{1}{2}\ s_{i-1}(q(t)) = v(t)L$$

integratie tussen 0 en t geeft

$$(\bar{z}(t) - \bar{z}(0)\ L + \tfrac{1}{2} \int_0^t s_{i+1}(q(t))dt - \int_0^t s_{i-1}(q(t))dt =$$

$$= \bar{V}\ L\ \Delta t/B_s \quad \text{als } \bar{V} = \frac{B_s}{\Delta t} \int_0^t v(t)dt.$$

Vooruitlopend op wat in paragraaf V 3.3.3.2.4 gevonden wordt, geldt bij benadering $\int_0^t s_i(q(t))dt = s_i(Q_{gem}) \cdot \Delta t$

De zandbalans luidt wanneer de breedte meegenomen wordt:

$$B_s L \quad \frac{\bar{z}(t+\Delta t)-\bar{z}(t)}{\Delta t} + \tfrac{1}{2}\left[S_{i+1}(Q_{gem}) - S_{i-1}(Q_{gem})\right] = \bar{V}\ L$$

waarbij $S_i = B_s\ s_i$

V 2. Zandtransporten op bais van verschillende bronnen.

In deze paragraaf worden een aantal gegevens m.b.t. het zandtransport op de IJssel op een rijtje gezet, teneinde een idee te krijgen omtrent de omvang van het transport, waarna een voorlopige keuze gemaakt kan worden van de toe te passen zandtransportformule.

V 3. 1. Aard van het transport.

Om de aard van het transport te kunnen bepalen, wordt uitgegaan van de verhouding u_*/W

u_* = schuifspanningssnelheid

W = valsnelheid van de d_{50}

afhankelijk van bovenstaande verhouding treedt het volgende transport op:

	u_*/W
intensief bodemtransport	1/4
suspensie in de benedenste helft	1
deeltjes bereiken de waterspiegel	3
goed ontwikkelde suspensie	20
homogene suspensie	200

Voor de IJssel neemt deze verhouding waarden aan tussen de 0,25 en 1,50 (de laatste bij hogere afvoeren), zodat over het algemeen hoofdzakelijk bodemtransport optreedt. Wat dit betreft, kunnen de formules van Ackers en White en die van Engelund-Hansen, welke beide totaaltransportformules zijn (totale transport van het bodemmateriaal, washload is hierbij niet inbegrepen) goed gebruikt worden. De formule van Meyer-Peter en Müller welke alleen een bodemtransportformule is, zal alleen bij hoge afvoeren niet toegepast mogen worden.

V 2. 2. Omvang van het transport.

a daling IJsselkop - De Steeg (km 878.500 - 887.500)
juni 1970 tot juni 1971
daling ± 0,20 m.
L = 9000 m
B_s = 51 m
minimum transport:
0,20 * 51 * 9000 m^3/jaar = 92.000 m^3/jaar.

b Studie WL bij bochtafsnijding Rheden-De Steeg en Doesburg
S = 110 à 220 m^3/dag of
S = 40 à 80.000 m^3/jaar

c Deventerbaggerproef
S 1901 - 1950 ± 43.000 m^3/jaar

d Keteldiep baggergegevens 1965 - 1970 90.000 m^3/jaar
1979 - 1975 200.000 m^3/jaar
1975 - 1980 85.000 m^3/jaar

e Sandtransportstudies related to the canalisation of the Lower Rhine IJsselkop

gemiddeld jaar	40.000 m^3/jaar
droog jaar	20.000 m^3/jaar
nat jaar	60.000 m^3/jaar

f nota 68.13 RWS BOR afd. studiedienst
zandtransport gebaseerd op een empirische relatie en het regime
gem. jaar S = 40.000 m^3/jaar

g Zandtransportmetingen 1960 - 1967 nota 71.5 WWZO (bijlage 10^a t/m d)

afvoer	Westervoort km 882.360	Doesburg km 904.000	Zutphen km 929.850	Wijhe km 967.240
200	32.000	26.000	25.000	12.000
300	45.000	47.000	42.000	44.000
400	50.000	69.000	58.000	86.000
500	54.000	95.000	70.000	139.000

Uit bovenstaande gegevens kan een goede indruk gekregen worden van de omvang van het transport op de IJssel. Hieruit blijkt, dat aan de IJsselkop het gemiddeld transport ongeveer 40.000 m^3/jaar bedraagt, welke hoeveelheid waarschijnlijk tot Kampen toeneemt, waar deze in de buurt van 80.000 m^3/jaar ligt.

V 2. 3. Voorlopige keuze transportformule.

Door RWS directie WWZO zij transportberekeningen gemaakt voor alle peilschaalvakken bij verschillende afvoerniveaus. Dit is gedaan voor vier transportformules t.w.:

- Frijlink
- Meyer-Peter en Müller
- Engelund en Hansen
- Ackers en White

De resultaten voor de berekening met een debiet, dat 50% van de tijd wordt overschreden (Q_{IJssel}= 296 m^3/s) zijn gegeven op bijlage 11.

De berekende zandtransporten met behulp van de formules van Ackers en White komen het meest overeen met de grootte orde van het zandtransport op de IJssel.

Op grond hiervan wordt voorlopig voor de berekeningen in deze studie de formule van Ackers en White gehanteerd. (formule A&W op bijlage).

Uit recente onderzoekingen door Yang en Molinas (1982) blijkt de transportformule van Ackers en White goed te voldoen. Dit werd gecontroleerd aan de hand van zeer veel laboratoriumproeven en toetsing op vele rivieren. Behalve de formule van Ackers en White voldeden de vergelijkingen van Yang en Engelund-Hansen (welke laatste overigens geen criterium voor begin van beweging heeft) ook bijzonder goed.
Alle drie vergelijkingen worden direct of indirect afgeleid uit de veronderstelling dat het sedimenttransport in een open waterloop gerelateerd moet worden aan de energie afname van de stroom. De overeenstemming tussen gemeten en berekende resultaten uit deze vergelijkingen, rechtvaardigen de afleiding van een zandtransportvergelijking uit de turbulente energie omzetting. (voor een uitgebreide beschouwing van de transportformule van Ackers en White zie Ackers en White 1973).

V 3. Gegevens

V 3. 1. Algemeen.

Voor het eenvoudige numerieke model zijn op elke plaats en in elke periode de volgende gegevens nodig:

- bodemligging
- transportparameters
- baggergegevens
- afname inhoudkribvakken
- materiaalafzetting in de uiterwaarden
- gestorte hoeveelheid specie

In de volgende paragrafen komen deze gegevens aan bod, waarna de zandbalansen kunnen worden opgesteld.

V 3. 2. Bodemliggingen.

Voor de zandbalansen moet aan het begin en einde van iedere periode de bodemligging bekend zijn.
Deze kunnen in principe voor elk tijdstip afgelezen worden uit bijlage 8, hier wordt echter gekozen voor gemiddelde bodemliggingen over een periode van 10 jaar. Dit op grond van het feit, dat de stromingsparameters ontleend worden aan afvoerkrommen en betrekkingslijnen welke een gemiddeld beeld geven over een aantal jaren van de waterstands afvoerrelatie.
Op bijlage 12 staan deze gemiddelde bodemliggingen vermeld, waarbij tevens is aangegeven hoe deze waarden uit bijlage 7 volgen.
De gemiddelde bodemliggingen in de perioden, waaruit de waterdiepte gehaald is, staan op bijlage 13.

V 3. 3. Transportparameters

De zandtransportcapaciteit is afhankelijk van de transportparameters in een bepaalde periode en vak. Uitgaande van de voorlopige keuze van de transportformule van Ackers en White in paragraaf V 2.3,

worden nu de voor deze formule benodigde parameters verzameld:

- zandtransporterende breedte B_s
- korrelkarakteristieke waarde d_{35}
- stromingsparameters (u, a en C)

V 3. 3.1 Zandtransporterende breedte.

De zandtransporterende breedte van de IJssel is de bodembreedte tussen de kribben en kan bepaald worden uitgaande van de normaalbreedte en de helling van de kribben.

De normaalbreedte van een riviervak is gelijk aan de waterspiegelbreedte tussen de kribkoppen bij een afvoer van 250 m^3/s.

De gemiddelde waterdiepte op de IJssel bij deze afvoer bedraagt 3,85 m.

De helling waaronder de kribkoppen lopen bedraagt ongeveer 1 op $3\frac{1}{2}$.

dus $B_s = B_n - 7 * 3{,}85$

$B_s = B_n - 27$ m

Voor de normaalbreedte in 1977 zie tekening RWS normaalbreedte IJssel toestand 1977 tek.nr. 77.234

V 3. 3.2 Korrelgegevens.

V 3. 3.2.1 Verzameling en verwerking

Van de korreldiameters op de IJssel zijn gegevens bekend van bodembemonsteringen uit 1950, 1967 en 1974/1976.

Van de bodembemonsteringen uit 1950 en 1967 zijn alleen de d_{50} en de d_m van het bedmateriaal bekend, terwijl van 1974/1976 de d_{90}, d_{50}, d_{10} en d_m bekend zijn, welke waarden gebruikt kunnen worden om een zeefkromme te bepalen per peilschaalvak. Zodoende kan de d_{35} bepaald worden, welke voor de transportformule van Ackers en White nodig is.

Op bijlagen 15 t/m 18 zijn deze gemiddelde gemeten waarden voor de d_{90}, d_{50}, d_{10} en d_m voor 1974/1976 uitgezet langs de rivieras. Door deze waarden zijn vloeiende krommen getrokken, waarna de geschematiseerde gemiddelde waarden per peilschaalvak zijn weergegeven op bijlage 20. Tevens zijn deze waarden uitgezet op bijlage 19.
Door op dit papier (horizontale as Gauss-verdeling, verticale as logarithmische verdeling) lineair te interpoleren kan de d_{35} bepaald worden. Voor de volledigheid is ook de d_{65} op dezelfde manier bepaald. Op bijlage 20 staan deze gemiddelde korrelkarakteristische waarden allemaal weergegeven (tot zover zijn mij deze gegevens verstrekt en is de verwerking uitgevoerd door RWS WWZO).

Voor elk peilschaalvak kan de verhouding tussen de d_{35} en de d_{50} bepaald worden (tevens bijlage 20). Verondersteld wordt nu, bij gebrek aan meerdere gegevens, dat deze verhouding in de loop der tijd niet veranderd is, zodat uitgaande van de bekende d_{50} in 1950 en 1967 hieruit de d_{35} gehaald kan worden. Het lijkt aanemenlijker om de verhouding d_{35}/d_{50} in de stroomrichting overal te laten toenemen. Gekozen wordt voor de op bijlage 22 gegeven waarden voor dit quotiënt. Op bijlage 21 is het geschematiseerde verloop weergegeven van de d_{50} voor de bodembemonsteringen uit 1950, 1967 en 1974/1976. De gemiddelde waarden per vak zijn op bijlage 22 weergegeven, waarbij de d_{35} berekend is uit de d_{50} voor 1950 en 1967.
De uit deze gegevens bepaalde d_{35} zijn echter zeer twijfelachtig, daar zij zijn ontstaan uit de nogal grove schematisatie van de d_{90}, d_{50}, en d_{10}, waarbij verondersteld is, dat deze volgens een nette e-macht in de stroomrichting afnemen.

Op bijlage 23 zijn in tabelvorm de gemiddelde waarden van de d_{50} gegeven voor de 3 bemonsteringen, welke op bijlage 24 zijn uitgezet langs de rivieras.
Uit deze laatste grafiek blijkt het zeer grillige verloop van de d_{50} langs de IJssel en een schematisatie tot de best passende e-macht (bijlage 21) is niet zonder-meer toegestaan.
Daar de invloed van de korreldiameter op het zandtransport nogal groot is, worden de werkelijke waarden van de d_{50} gebruikt, ter bepaling van de d_{35}.
Op bijlage 25 staan de gemiddelde waarden voor de d_{50} vermeld, zoals deze gehaald kunnen worden uit bijlage 24.
Tevens zijn op deze bijlage de berekende waarden voor de d_{35} gegeven, waarbij de eerder gevonden verhouding d_{35}/d_{50} bij gebrek aan verdere gegevens gebruikt is.

V 3. 3.2.2. Beschouwing korrelgegevens.

Hoewel de tot een vloeiende kromme geschematiseerde korrelafmetingen van het bedmateriaal nogal afwijken van de werkelijk gemeten afmetingen, geeft deze schematisatie wel een betrouwbare indruk van de veranderingen van de korrelafmetingen in de tijd.
Bijlage 21 kan dan ook gebruikt worden om deze veranderingen in de tijd te bekijken.

De bemonsteringen van 1950 en 1967 laten weinig verschillen zien. Ter plaatse van Zutphen is een geringe vergroving van het bedmateriaal te zien, welke naar de IJsselkop en het Ketelmeer afneemt, alwaar het bedmateriaal in deze periode wat grootte betreft onveranderd blijft. Op bijlage 21 zijn alleen de waarden voor de d_{50} weergegeven, dezelfde ontwikkelingen doen zich echter voor bij de andere korrelkarakteristieke waarden door het veronderstelde vaste verband tussen deze waarden en de d_{50} per peilschaalvak.

De bemonstering van 1974/1976 geeft hele andere resultaten. In vergelijk met de metingen uit 1950 en 1967 is het bodemmateriaal bovenstrooms van Doesburg flink grover geworden, terwijl in de Midden-IJssel juist een verfijning van het bedmateriaal te zien is.

De korreldiameter van het bedmateriaal kan in de tijd variëren door diverse oorzaken:

- bodemdaling, waardoor een grovere of fijnere laag aan de oppervlakte komt.
- bodemrijzing, waardoor afhankelijk van de aard van het aangevoerde materiaal het bedmateriaal fijner of grover wordt.
- verandering in het afslijpingsproces van de korrels op hun weg naar zee. Wanneer dit proces versneld wordt, wordt het bedmateriaal op een bepaalde plaats in de tijd fijner.
- verandering van het aangeboden materiaal in een bepaald vak, welke het gevolg is van veranderingen van het bedmateriaal in het direct bovenstrooms gelegen vak.
- tijdens perioden van lage afvoeren worden alleen de kleinere korrelfracties getransporteerd. Dit is waarschijnlijk het geval in de Boven-IJssel waar bij lage afvoeren het criterium begin van beweging niet bereikt wordt. In de Midden-IJssel wordt dit criterium ook bij lage afvoeren wel overschreden, zodat dit verschijnsel hier minder speelt (dit materiaal is uniformer verdeeld). Als gevolg hiervan mag verondersteld worden, dat tijdens lage afvoeren de korrelafmetingen in de Boven-IJssel toenemen en in de Midden-IJssel afnemen.

Wanneer alleen kleine korrels getransporteerd worden kan na enige tijd afpleistering plaats vinden, waarbij de grotere korrels een beschermende laag vormen boven kleinere korrels. Voor dit verschijnsel is de verhouding van de d_{90} en de d_{50} van belang of de geometrische standaardafwijking van de korrelverdeling.

- uit studies is gebleken, dat het kleiner worden van de gemiddelde korreldiameter langs de rivieras nauwelijks het gevolg is van het afslijpingsproces. Hoewel dit proces wel aanwezig is, vindt deze afslijping niet over een korte afstand plaats. (IJsselkop d_m= 6,50 mm. Kampen d_m= 0,60 mm. afstand 120 km.).

Deze variatie in korrelafmetingen zijn hoofdzakelijk het gevolg van het zevingsproces.
Door de Deen Rolf Deigaard is dit uitzevingsproces m.b.v. een wiskundig model beschreven.
Deigaard (1980) kwam tot de conclusie dat wanneer aan de bovenstroomse zijde in een waterloop een bepaalde korrelverdeling wordt toegevoegd, wordt, samen met kleine aanzandingen of uitschuringen, in vrij korte tijd een quasi-stationaire toestand bereikt, waarbij de gemiddelde korreldiameter in benedenstroomse richting afneemt, en op een bepaalde plaats constant is, uitgaande van het feit, dat de bodemligging m.b.v. een e-macht beschreven kan worden ($h = h_0 e^{-\alpha x}$). Uit deze studie bleek, dat de tijdschaal waarin het uitzevingsproces zich afspeelt véél kleiner is, dan de morfologische tijdschaal.
Deze bodemligging is echter niet in evenwicht. De tijdschaal, waarin dit evenwicht bereikt wordt, is echter enorm groot (vele eeuwen).

Het uiteindelijke rechte verhang, en overal uniforme korrelverdeling, treedt pas na verloop van zeer veel jaren op.

Wanneer de rivierbodem in evenwicht is, betekent dit dat overal hetzelfde sediment transport moet optreden. Uitgaande van het feit, dat de korreldiameter door afslijping niet zo snel kleiner wordt, betekent dit dat op een bepaalde plaats de korreldiameter in de tijd moet toenemen.
Opmerking:
Dat dit laatste op de Waal niet klopt (hier nemen de korrelafmetingen in de tijd af) kan weer het gevolg zijn van b.v. een fijner worden van het aangeboden materiaal.

V 3. 3.3 Stromingsparameters.

V 3. 3.3.1 Algemeen.

De stroomsnelheden in het zomerbed zijn belangrijke gegevens, welke gebruikt moeten worden in het morfologische model, daar zij in grote mate het zandtransport bepalen. Deze stroomsnelheden kunnen maar ten dele gehaald worden uit

$$u = \frac{Q}{B_q \cdot a}$$

Q is vrij nauwkeurig bekend, als functie van de waterstand aan de IJsselkop; a is de gemiddelde waterdiepte welke gahaald kan worden uit de bekende betrekkingslijn en de bekende bodemligging, beiden voor een beperkte periode geldig. B_q is de stroomvoerende breedte en is zolang de kribben niet overstroomd worden, een functie van de (bekende) normaalbreedte (B_n) en de (bekende) waterdiepte.
Wanneer de afvoer zo groot wordt, dat de kribben overstromen en het HW-bed meedoet aan de afvoer, kan de gemiddelde snelheid in het zomerbed niet langer bepaald worden

uit bovenstaande formule.
Voor een bepaalde periode en een bepaald vak kan nu de gemiddelde snelheid in het zomerbed uitgezet worden tegen de afvoer, voor die afvoeren, waarbij de kribben niet overstroomd worden.
Bij een extreem hoogwater van 3050 m^3/s op de IJssel zijn tevens de stroomsnelheden in het zomerbed enigszins bekend (zie tekening RWS dir. Bovenrivieren afd. studiedienst, tek.nr. 63.659, stroomsnelheden in het zomerbed bij extreem hoogwater). Door uit deze tekening de gemiddelde snelheid per vak te halen bij deze afvoer, kan door interpolatie naar dit punt een complete grafiek gemaakt worden van het verband tussen de afvoer en de gemiddelde snelheid in het zomerbed voor elk vak.

De waterdiepten bij verschillende afvoeren in een bepaalde periode wordt gehaald uit:

- de waterstanden bij deze afvoeren, welke gehaald worden uit de afvoerkrommen en betrekkingslijnen welke voor ee bepaalde periode geldig zijn (diverse afvoerkrommen en betrekkingslijnen. Voor de vereffende afvoeren voor de Rijntakken volgens afoverkrommen 1977-1978, zie bijlage 26).
- en de gemiddelde bodemliggingen in deze periode bijlage 13.

De stroomvoerende breedte is, zolang de kribben niet overstromen, een functie van de zandtransporterende breedte (welke weer een functie is van de normaalbreedte). Er geldt:

$$B_q = B_s + 3\tfrac{1}{2}a$$

De interpolatie naar hogere afvoeren wordt als volgt uitgevoerd:
Eerst wordt de snelheid bepaald, welke bij een afvoer

van 700 m^3/s hoort. Deze wordt gehaald uit de gemiddelde waarde van

- een lineaire extrapolatie van Q is 350 en 400 m^3/s naar Q is 700 m^3/s.
- en een lineaire interpolatie tussen Q is 400 en 3050 m^3/s naar Q is 700 m^3/s.

dus

$$u_{700} = \tfrac{1}{2} \cdot u_{400} + 6(u_{400} - u_{350}) +$$

$$+ \; u_{400} + \frac{3}{26,5} (u_{3050} - u_{400})$$

Voor afvoeren tussen 400 en 700 m^3/s wordt de gemiddelde stroomsnelheid bepaald door lineaire interpolatie tussen de snelheden, welke horen bij deze afvoeren.

In de formule van Ackers & White moet ook een Chézy-waarde (C) ingevuld worden. Daar de transportformule bijzonder ongevoelig is voor een variatie in de C-waarde hoeft deze, wanneer hiermee niet de gemiddelde stroomsnelheid berekend wordt, niet nauwkeurig bekend te zijn. In paragraaf V 4.9 wordt nog teruggekomen op de gevoeligheid van de parameters in de formule van Ackers & White.
In de berekeningen is een C-waarde van 45 $m^{\frac{1}{2}}/s$ aangehouden, welke constant is in de tijd en voor alle vakken gelijk is.
Opmerking:
Voor de berekening met een morfologisch computermodel is bovenstaande methode ter bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid in het zomerbed onpractisch.
In dit geval zal de snelheid gehaald moeten worden uit

$$u = C \sqrt{a i_w}$$

$$u = \frac{Q_{zom}}{B_s \; a}$$

Hierin moeten bekend zijn per vak: Q_{zom}, C en B_s.

Uitgaande van de bekende bodemligging en Q-h kromme aan de benedenstroomse rand kan de stuwkromme berekend worden. De gemiddelde snelheid volgt dan uit

$$u = \frac{Q_{zom}}{B_s \; a}$$

De stuw-kromme-berekening gaat als volgt:

- benedenstrooms rand a bekend
  Q_{zom} bekend
  B_s bekend
- daaruit volgt u
- $\bar{u}$ bekend
  C bekend
  a bekend
- daaruit volgt i_w
- i_w bekend, daaruit volgt a voor het volgende vak.

De onbekenden voor dat deze procedure gestart kan worden zijn: C en Q_{zom} afhankelijk van het peilschaalvak.

Q_{zom} kan bepaald worden, uitgaande van het bekende verband tussen $\bar{u}$ en Q_{tot}, waarbij tevens de waterdiepte bekend is, per vak.

$$Q_{zom} = u \; B_s \; a$$

Q_{zom} is hier alléén een functie van Q_{tot}, welke verondersteld moet worden niet te veranderen in de tijd.

De Chézy-waarde kan per vak éénmalig bepaald worden uit de betrekkingslijn, bodemligging en grafiek welke de snelheid geeft als functie van de afvoer. Er geldt dan:

$$C = \frac{u}{\sqrt{a i_w}}$$

Verondersteld moet nu worden, dat deze C-waarde in de tijd géén verandering ondergaat.

V 3. 3.3.2 Invloed regime.

V 3. 3.3.2.1 algemeen.

Bij het opstellen van de zandbalansen voor de peilschaalvakken voor de tienjarige perioden speelt het regime van de rivier een belangrijke rol.

Teneinde niet voor elk vak in elke periode uit de opgetreden afvoer het opgetreden transport te hoeven bepalen is een andere werkwijze gekozen.

In alle perioden is voor een aantal vakken het transport bepaald, dat optreedt bij een geschematiseerd afvoerverloop. Dit afvoerverloop van de IJssel is het gemiddelde afvoerverloop, welke ontleend is aan de afvoerduurlijn van de Boven-Rijn.
Voor een vrij korte periode bestaat er bij benadering een éénduidige relatie tussen het transport en de afvoer. In deze periode moet dan een vaste Q-a relatie bestaan, bodem- en korreldiameterveranderingen moeten klein blijven en de ruwheid mag geen grote veranderingen ondergaan.

Uit de diverse transportberekeningen blijkt, dat bij benadering geldt:
In een bepaald vak en een bepaalde periode is het totale transport, dat optreedt bij het geschematiseerde afvoerverloop gelijk aan het totale transport, dat zou optreden, wanneer de afvoer constant haar gemiddelde waarde bezat.

Hierdoor is het mogelijk om het opgetreden transport per vak in elke periode te bepalen uit de waarde van de parameters, welke optreden bij de opgetreden gemiddelde afvoer in de desbetreffende periode.

De volgende punten krijgen eerst de aandacht:

- bepaling geschematiseerd afvoerverloop Boven-Rijn;
- hoe groot is de gemiddelde IJsselafvoer bij het geschematiseerde afvoerverloop Boven-Rijn in de diverse perioden.

V 3. 3.3.2.2 Geschematiseerd afvoerverloop Boven-Rijn.

Van de Boven-Rijn-afvoeren sinds 1901 is een afvoerduurlijn bekend, welke voor de periode 1901 tot heden geldig is. Deze afvoerduurlijn staat getekend op bijlage 27. Uit deze grafiek kunnen 12 maandafvoeren gehaald worden, welke samen een gemiddeld jaar voorstellen.

					Q - Boven-Rijn
15	dagen	onderschrijding	per	jaar	1000 m^3/s
45	"	"	"	"	1200 "
75	"	"	"	"	1400 "
105	"	"	"	"	1550 "
135	"	"	"	"	1750 "
165	"	"	"	"	1900 "
195	"	"	"	"	2050 "
225	"	"	"	"	2250 "
255	"	"	"	"	2450 "
285	"	"	"	"	2750 "
315	"	"	"	"	3150 "
345	"	"	"	"	4200 "

Gemiddelde afvoer bedraagt 2130 m^3/s.

Elke afvoer wordt veronderstled 365/12 dagen per jaar op te treden.

V 3. 3.3.2.3 IJsselafvoer bij gemiddelde Boven-Rijn- - afvoerverloop.

Om veranderingen in de IJsselafvoer bij gelijkblijvende Boven-Rijnafvoeren te achterhalen, zijn met

behulp van de afvoerkrommen 1977/1978, 1961.0, 1951.0 en 1914-1940 de IJsselafvoeren bepaald bij het geschematiseerde afvoerverloop van de Boven-Rijn.
Voor de periode 1977/1978 is op bijlage 28 het verband gegeven tussen de waterstanden Lobith en de IJsselafvoer zowel in de gestuwde situatie, als in de situatie in welke de stuwen continue uit de rivier zijn. Deze laatste, fictieve, situatie ter vergelijking met vroegere perioden.
Het verband tussen de waterstand Lobith en de IJsselafvoer in de ongestuwde toestand, is verkregen door het waterstands-afvoerverloop bij "S 250" te nemen boven Q-IJssel = 250 m^3/s én de aanname, dat de IJsselafvoer bij Q-Boven-Rijn = 750 m^3/s 11% bedraagt van deze Boven-Rijafvoer; dus Q-IJssel = 80 m^3/s , de bijbehorende waterstand Lobith bedraagt 7,20 m + NAP.

Uit deze vergelijking van de IJsselafvoeren voor verschillende perioden (bijlage 29) blijkt, dat de afvoer nogal toegenomen is, zoals ook blijkt uit de gemiddelde IJsselafvoer. (De gemiddelde afvoer in een bepaalde periode is die afvoer, die dezelfde hoeveelheid water omvat als het afvoerverloop in deze periode. De gemiddelde afvoer is dus niet gelijk aan de afvoer welke 50% van de tijd wordt onderschreden).
Zelfs bij hoge Boven-Rijnafvoeren is de IJsselafvoer toegenomen.

periode	gemiddelde afvoer
1914/1940	245
1951.0	250
1961.0	250
1971 gestuwd	310
1977/1978 gestuwd	335
1977/1978 ongestuwd	310

Door de Rijnkanalisatie en de afsnijding van 2 bochten, is de gemiddelde IJsselafvoer toegenomen ook al zouden de stuwen buiten werking gesteld worden.

V 3. 4. Baggergegevens.

Sinds 1935 zijn de door de industrie te ontlenen hoeveelheden zand aan de IJssel gebonden aan een maximum door de zogenaamde contingenteringsmaatregelen.
Onderscheid kan worden gemaakt tussen de gebaggerde hoeveelheden op het Kattendiep en die op de gehele IJssel.
Op bijlage 30 zijn in grafiekvorm de hoeveelheden zand weergegeven, welke aan de IJssel onttrokken zijn in de periode 1905-1950. Tot 1925 is een groot deel van de onttrokken hoeveelheden het gevolg van de normalisatie werkzaamheden. Tot 1935 neemt de gebaggerde hoeveelheid industriezand geleidelijk toe tot 400.000 m^3 in 1935.
Hierna werd de industriezandwinning via de contingenteringsmaatregelen aan banden gelegd.
Op bijlage 31 staan de toegelaten hoeveelheden te ontlenen zand en de werkelijk gebaggerde hoeveelheden voor de periode 1936-1954.
Tevens staan in de tienjarige overzichten der waterhoogten en afvoeren van 1931/1940 en van 1941/1950 de door derden gebaggerde hoeveelheden vermeld. In het overzicht van 1951/1960 staan geen baggergegevens vermeld.
De contingenteringsmaatregelen bepaalden sinds 1945 ook de plaatsen waar gebaggerd mocht worden, welke over de hele IJssel verdeeld waren. Na 1951 is de plaats van het toegestane baggeren hoofdzakelijk beperkt tot het Kattendiep en een hoeveelheid van 35.000 m^3/jaar kon overal gewonnen worden.
In de periode 1952-1955 zijn extra concessies verleend voor baggerwerkzaamheden bij de bochtafsnijding Doesburg, welk gedeeltelijk in de oude en gedeeltelijk in

nieuwe vaargeul plaatsvonden. De grootte hiervan bedroeg 240.000 m^3/ jaar, waarbij 60.000 m^3 van het contingent werd getrokken.
Verder zijn de volgende gegevens bekend:

- contingenteringsmaatregel 1955 t/m 1961: 35.000 m^3/j.
- nota 50.13 zandhuishouding.
  Volgens de thans geldende richtlijnen zullen na de voltooiing van de contingenteringsmaatregelen de volgende hoeveelheid zand aan de Rijntakken mogen worden ontleend. IJssel 75.000 m^3/jaar.
  Dit betreft dan de hoeveelheid, welke het Kattendiep op diepte moet houden.
- Sinds 1970 wordt er niet meer op de IJssel gebaggerd; behalve voor herstelwerkzaamheden en in het Kattendiep.
- Keteldiep baggergegevens: (verslag Rik Schut)

1965-1970	90.000	m^3/jaar
1970-1975	200.000	"
1975-1980	85.000	"

Door combinatie van al deze gegevens kan globaal het volgende beeld gegeven worden van de gebaggerde hoeveelheden in het zomerbed van de IJssel voor de periode 1930-1980:

periode	Kattendiep		IJssel(gelijkm.verdeeld)	
1930-1940	72.000	m^3/jaar	350.000	m^3/jaar
1940-1950	72.000	"	70.000	"
1950-1960	72.000	"	35.000	"
1960-1970	75.000	"	20.000	"
1970-1975	200.000	"	--	
1975-1980	85.000	"	--	

V 3. 5. Afname inhoud Kribvakken.

In het eind der jaren '50, beginjaren '60, vindt sterke aantasting van de oevers langs de IJssel plaats.

De oorzaak hiervan is niet helemaal bekend. De volgende punten spelen hierin echter een rol:

- haal- en spoelgolven van de grotere schepen;
- afkabbeling door windgolven;
- hoogwater.

Door de aantasting van de oevers tussen de kribben werden deze laatste op grote schaal achterloops. Teneinde dit proces stop te zetten, zijn in de jaren eind '60 en '70 veel oeverherstelwerkzaamheden uitgevoerd, terwijl tevens de oevers tussen de kribben van een steenbekleding voorzien zijn.

Eind jaren '50, begin jaren '60 (eventueel ook eind jaren '60) moeten dus grote (?) hoeveelheden zand uit de kribvakken verdwenen zijn, welke aan het sedimenttransport in de rivier hebben bijgedragen.
Over de grootte van deze hoeveelheid is helemaal niets bekend, zelfs geen ruwe schatting.

Hetzelfde verschijnsel deed zich voor op de Waal, waar in ongeveer 16 jaar tijd 3 à 4 miljoen m^3 zand uit de kribvakken verdween. (190.000 à 250.000 m^3/jaar).

Met de invloed van deze aangeboden hoeveelheid sediment (ongeveer gelijkmatig verdeeld langs de IJssel) zal zeker rekening moeten worden gehouden bij het beschouwen van de zandbalans.

V 3. <u>6. Materiaalafzetting in de uiterwaarden tijdens HW.</u>
Tijdens hoge afvoeren moet een deel van het sedimenttransport in suspensie plaatsvinden. Het sedimentrijke water, dat in de uiterwaarden min of meer tot stilstand komt, zal in deze uiterwaarden een hoeveelheid materiaal afzetten, zoals dit na ieder HW geconstateerd kan worden. Omtrent de omvang van deze afzetting is niets

bekend. Bij de beschouwing van de zandbalans komt dit probleem nog nader aan de orde.

V 3. 7. Gestorte hoeveelheid specie op de IJssel.

Ten behoeve van het op diepte houden van de industrie-havens aan de IJssel, worden deze regelmatig gebaggerd. De vrijgekomen specie wordt op de IJssel teruggestort. Op bijlage 32 is deze hoeveelheid specie per jaar weergegeven. Of deze hoeveelheden zand, welke zeer groot kunnen zijn, invloed hebben op de bodemligging is maar de vraag, want de uitgediepte havens zullen ook weer aanzanden. Wanneer de havens echter systematisch dieper worden gebaggerd, komt deze extra hoeveelheid materiaal wel ten goede aan de rivier.

Bij gebrek aan verdere gegevens en de wetenschap, dat deze invloed klein zal zijn, wordt verondersteld, dat deze gestorte hoeveelheden specie niet van belang zijn voor de zandbalans.

V 4. Zandbalans.

V 4. 1. Algemeen.

Nu alle relevante gegevens verzameld zijn, kan hiermee de zandbalans voor elke periode opgesteld worden.

De perioden, waarvoor de zandbalans wordt opgesteld zijn:

1940-1950
1950-1960
1960-1970
1970-1975
1975-1980

De gegevens, welke per periode gebruikt zijn, worden vermeld op bijlage 33.

Het is gebruikelijk om de zandbalans als volgt op te stellen:

- bodemligging begin van de periode;
- berekening transportcapaciteiten;
- uitwendige toevoeging: afname inhoud kribvakken;
- uitwendige afname: gebaggerde hoeveelheid, materiaalafzetting;
- berekening van de bodemligging aan het eind van de beschouwde periode.

Deze aanpak heeft het nadeel, dat twee bodemliggingen met elkaar vergeleken moeten worden, n.l.

- de berekende bodemligging aan het eind van een periode
- en de geschematiseerde bodemligging op dit tijdstip.

Hierbij is alleen indirekt te zien, hoe de gebruikte transportformule (welke in principe de enige onbekende is) functioneert.
Hieraan kan worden tegemoetgekomen, door vergelijking van twee transportcapaciteiten, n.l.

- berekening van het opgetreden transport, uitgaande van de bodemveranderingen in de betreffende periode, de gebaggerde hoeveelheid en de afname van de inhoud van de kribvakken in deze periode.
- berekening van de transportcapaciteit m.b.v. Ackers & White, met gebruikmaking van de gemiddelde transportbepalende parameters in de te beschouwen periode.

Op deze manier wordt direct inzicht verkregen omtrent het al of niet juist beschrijven van de ontwikkelingen door de toegepaste zandtransportformule.

V 4. 2. Berekening zandtransportcapaciteit.

Op de bijlagen 34 t/m 39 zijn de zandtransportcapaciteiten berekend met behulp van de formule van Ackers & White, waarbij tevens vermeld is, waaruit de transport bepalende parameters gehaald zijn.
De resultaten zijn weergegeven op bijlage 40. Hierbij zijn de transportcapaciteiten ter plaatse van de peilschalen gegeven door de gemiddelde waarde te nemen tussen de aan weerszijde gelegen peilschaalvakken. Voor het transport aan de IJsselkop is de waarde genomen van het traject IJsselkop-De Steeg, bij Kampen is het transport genomen van Katerveer-Kampen.

- de toename van de berekende transportcapaciteiten na 1970 is het gevolg van een toegenomen afvoer én een kleiner geworden korreldiameter in de Midden-IJssel.

V 4. 3. Berekening opgetreden transport.

Uitgaande van bijlage 12 kunnen in de te beschouwen perioden de opgetreden gemiddelde bodemveranderingen bepaald worden voor ieder peilschaalvak (bijlage 41). Door vermenigvuldiging van deze bodemveranderingen met de zandtransporterende breedte en lengte van het vak, kan het getransporteerde volume per jaar uit ieder vak bepaald worden (bijlage 42).
Tevens kan het gebaggerde volume voor de perioden per jaar bepaald worden. Dit gebaggerde volume wordt gelijkmatig verdeeld verondersteld langs de IJssel te zijn ontleend (bijlage 43).
Op grond van deze volumina kunnen de werkelijk opgetreden transporten aan de peilschalen (dus tussen de vakken) bepaald worden. Hierbij wordt de invloed van de kribvakinhoudsafname nog niet meegenomen.

De opgetreden transporten worden als volgt bepaald:

- voor elke periode wordt uitgegaan van de betrekkelijk willekeurige aanname, dat het transport aan de IJsselkop 40.000 m^3/jaar bedraagt:
- het opgetreden transport bij de volgende peilschaal is afhankelijk van de opgetreden bodemverandering en de gebaggerde hoeveelheid in het tussenliggende vak.

Op deze manier kunnen voor alle perioden de opgetreden transporten bepaald worden ter plaatse van de peilschalen (bijlage 43).
Hieruit volgt, dat in de periode 1940-1960 het berekende transport negatief wordt, hetgeen natuurlijk onmogelijk is. Een sterke vergroting van het aangeboden transport aan de IJsselkop kan dit negatieve transport verhinderen; een dermate groot transport aan de IJsselkop lijkt echter niet aannemelijk.
In deze beschouwing is nog géén rekening gehouden met de afname van de inhoud van de kribvakken.
Een afname van deze inhoud betekent, dat langs de rivieras bodemmateriaal toegevoegd wordt. Aangezien dit leidt tot een bodemstijging welke verder niet meer optreedt, betekent dit dat de transportcapaciteit aan een peilschaal schijnbaar moet toenemen met de bovenstrooms van dit punt toegevoegde hoeveelheid zand.
Wanneer aangenomen wordt, dat het transport bij Kampen al die jaren gelijk is aan de daar ter plaatse gebaggerde hoeveelheid, betekent dat dus, dat het transport daar ongeveer 75.000 m^3/jaar moet bedragen.
Hieruit volgt, dat in de perioden de volgende hoeveelheid materiaal uit de kribvakken moet zijn aangeboden:

1940-1950	100.000 m^3/jaar		
1950-1960	140.000	"	(ruwe schattingen)
1960-1970	70.000	"	

Uitgaande van de veronderstelling, dat deze hoeveelheid materiaal gelijkmatig aan de IJssel wordt toegevoegd, moeten de berekende transporten aan de peilschalen vermeerderd worden met de bovenstrooms van deze peilschaal toegevoegde hoeveelheid materiaal (bijlage 44).
Deze gemiddelde jaarlijkse uitschuring over 30 jaar geeft bij een IJssellengte van 123 km. en een aangenomen gemiddelde breedte van de kribvakken van 2 x 10 m. een bodemdaling in de kribvakken in de orde van 1 m.

V 4. 4. Vergelijking beide transporten.

De opgetreden transporten kunnen nu vergeleken worden met de berekende transportcapaciteiten (bijlage 40) bij gemiddelde afvoer.

De overeenkomst is bijzonder droevig. Wel kunnen de volgende overeenkomsten ontdekt worden:

- de transportcapaciteit neemt over het algemeen vanaf de IJsselkop toe tot aan Zutphen-Deventer-Olst om daarna gelijk te blijven of iets af te nemen.
- de transportcapaciteit bij Katerveer en Kampen ligt consequent veel lager dan de opgetreden transporten.
- Na 1970 neemt zowel de transportcapaciteit als het opgetreden transport toe.

V 4. 5. Verklaring afwijkingen.

Om deze slechte overeenstemming te kunnen verklaren en eventueel te verbeteren, worden eerst weer de gemaakte aannamen bekeken.

- bij de berekening van de transportcapaciteit is het werkelijke afvoerverloop niet meegenomen.
- de grootte van de afname van de inhoud van de kribvakken is zeer onzeker.
- de invloed van materiaalafzetting in de uiterwaarden

tijdens HW is niet meegenomen, omdat hiervan niets bekend is.

Verder kan de slechte overeenstemming te wijten zijn aan:

- de onbetrouwbaarheid van enkele transportparameters;
- de ongeschiktheid van de zandtransportformule van Ackers & White.

De overeenstemming tussen de berekende transportcapaciteit en het opgetreden transport is vooral na 1970 bijzonder slecht.

Het opgetreden transport benedenstrooms van Olst is veel groter, dan de berekende transportcapaciteit. De vraag kan gesteld worden of dit zeer grote transport ook werkelijk heeft plaatsgevonden.

Dit enorme transport moet opgetreden zijn i.v.m. de grote bodemdaling vooral in de Midden-IJssel, welke tussen 1975 en 1977 plaats vond, zoals blijkt uit bijl. 8.

In de volgende paragraaf wordt de vraag behandeld of en hoe de IJssel in zo een korte tijd zoveel kan uitschuren.

V 4. 7. Bodemdaling IJssel tussen 1975 en 1977.

Deze paragraaf kan in twee stukken worden verdeeld. Ten eerste de vraag of deze bodemdaling werkelijk is opgetreden en ten tweede, wanneer dit zo is, de vraag op welke manier dit zeer grote transport opgetreden kan zijn.

1. Uit de peilingen van 1975 en 1977 blijkt, dat er vooral in de Midden-IJssel een aanzienlijke bodemdaling is opgetreden. In hoeverre is deze, schijnbaar onmogelijk grote uitschuring, een vast gegeven? De mogelijkheid bestaat, dat door in gebruikname van nieuwe meetapparatuur de bodemligging anders (fout?) wordt weergegeven.

- Uit bijlage 8 blijkt, dat er in de Midden-IJssel een sprong optreedt tussen de peilingen van 1975 en 1977 (in 1976 is niet gepeild). Daar zo'n plotselinge sprong in de bodemligging zowel aan de IJsselkop als benedenstrooms van Deventer niet optreedt, lijkt het onmogelijk, dat deze bodemdaling te wijten is aan meetfouten.
- Wanneer op de IJssel een grote bodemverandering heeft plaatsgevonden, moet dit, bij een bepaalde afvoer (afgezien van stuw-effecten) te zien zijn aan de waterstanden ter plaatse van de peilschalen. Bijlage 45 geeft deze waterstanden voor 1971 en 1977/1978 voor enkele afvoeren. Hieruit blijkt, dat de waterstanden bij eenzelfde afvoer gedaald zijn in deze periode.
  Duidelijk is de waterstandsdaling bij een afvoer van 350 m^3/s, welke ongeveer even groot is, als de geconstateerde bodemdaling. Hieruit kan de conclusie getrokken worden, dat de gemeten bodemdaling tussen 1975 en 1977 ook werkelijk opgetreden is.

2. Nu rest nog de vraag, wat de oorzaak geweest kan zijn van deze enorme uitschuring in deze korte periode. Hierbij moet worden opgemerkt, dat in de jaren vóór 1975 de bodemligging weliswaar fluctueerde, maar nooit zo sterk en tevens, dat ná 1977 de bodemligging slechts een geringe daling heeft ondergaan (zie bijlage 8).
   Om deze vraag te kunnen beantwoorden, worden de transport bepalende factoren op een rijtje gezet, waarna de mogelijke veranderingen in deze factoren worden bekeken, te zamen met de invloed hiervan op het transport en de bodemligging.
   - gemiddelde afvoer
   - breedte

- waterdiepte en snelheid; afhankelijk (bij gelijke afvoer) van de ruwheid van het verhang.
- zandaanbod aan de IJsselkop;
- zandaanbod uit de kribvakken;
- gebaggerde volumina;
- korrelafmetingen;
- materiaalafzetting in de uiterwaarden.

- Gemiddelde afvoer.

Zoals uit bijlage 33 blijkt, is de gemiddelde afvoer van de periode 1975-1980 een stuk groter geweest dan in de periode 1970-1980 (345 m^3/s t.o.v. 285 m^3/s). Zoals uit de theoretische beschouwing bleek, heeft deze toename in eerste instantie alléén gevolgen voor de boven- en beneden IJssel en juist niet voor de bodemligging in de Midden-IJssel.
Op bijlage 46 staan de gemiddelde IJsselafvoeren vermeld voor de jaren 1970 t/m 1981. Hieruit blijkt, dat de gemiddelde afvoer in de jaren 1975 t/m 1977 nauwelijks is toegenomen. Tevens valt op, dat juist in het jaar 1976 de gemiddelde afvoer bijzonder laag was. Het lijkt onmogelijk, dat deze matige gemiddelde afvoer in deze periode een enorme uitschuring tot gevolg heeft gehad, terwijl in de jaren ná 1976 de gemiddelde afvoer een stuk groter was, waarbij de bodemligging nauwelijks veranderingen onderging.

- Breedte.

De zandtransporterende breedte heeft geen wijzigingen ondergaan en zou ook alleen een evenredige verandering in de transportcapaciteit tot gevolg hebben.
De breedte van het Hoogwaterbed, welke de snelheid in grote mate bepaald, heeft geen veranderingen ondergaan (kleine plaatselijke veranderingen, b.v. t.g.v. dijkverzwaringen, uitgezonderd)

- Waterdiepte en snelheid.

Het transport is in hoge mate snelheidsafhankelijk en nauwelijks gevoelig voor variaties in waterdiepte (bij gelijkblijvende snelheid).
Snelheidsveranderingen, als gevolg van veranderingen in gemiddelde afvoer, blijven buiten beschouwing, daar reeds eerder deze veranderingen in afvoer besproken zijn.
De waterdiepten en stroomsnelheden (bij een bepaalde afvoer) worden alleen bepaald door het bodemverhang en de ruwheid. Vóórdat de grote bodemdaling optrad was het bodemverhang vrij constant en er is geen enkele reden om aan te nemen, dat de ruwheid sterke wijzigingen heeft ondergaan.
De bodemdaling heeft vrij weinig invloed op het bodemverhang, welke alleen afhankelijk is van verschillen langs de rivieras in bodemveranderingen.
Uit bijlagen 47 en 48 blijkt dan ook, dat bij eenzelfde afvoer van 335 m^3/s de gemiddelde stroomsnelheden van de perioden 1970-1975 en 1975-1980 nauwelijks verschillen vertonen.

- Korrelafmetingen.

Zoals uit de bodembemonstering 1974/1976 bleek, is de korreldiameter van het bodemmateriaal in de Boven-IJssel sterk toegenomen t.o.v. de bemonstering van 1967. In de Midden-IJssel waren de korrelafmetingen kleiner geworden, terwijl in de Beneden-IJssel de beide bemonsteringen dezelfde resultaten gaven.
Dit zou in principe in kunnen houden, dat de Midden-IJssel een groter transport laat zien. Dit is inderdaad het geval voor de berekende transportcapaciteit, hiermee stuit ik echter op een tweetal andere problemen:

- de korreldiameter in de Beneden-IJssel ondergaat géén veranderingen, zodat de transportcapa-

citeit hier onveranderd blijft. Dit moet dan als gevolg hebben, dat het uit de Midden-IJssel getransporteerde materiaal zich in de Benedenloop afzet. Uit de berekende opgetreden transporten blijkt dit geenszins.

- waarom schuurt de Midden-IJssel juist in een periode met vrij lage gemiddelde afvoer ineens uit, terwijl (uitgaande van de veronderstelling, dat de laatste bodembemonstering jaren later nog representatief is voor het bodemmateriaal) dit in de opvolgende jaren met vrij hoge afvoeren juist niet het geval is?

Als eerste wordt een antwoord gegeven op deze laatste vraag.

Bij de beschouwing van de bodembemonstering kwam reeds aan de orde, dat de korrelafmetingen door diverse oorzaken in de tijd kunnen varieren. De gedachte, dat de bemonstering van 1974/'76 representatief is voor de jaren na 1976, kan hierdoor onjuist zijn. Tevens is bij deze beschouwing opgemerkt, dat bij lage afvoeren alleen de kleinere korrelfracties getransporteerd worden.

Tussen de peilingen van 1975 en 1977 (welke in de zomer gedaan worden) kan wat betreft de afvoer het volgende worden opgemerkt:

eind 1975 gemiddelde afvoer tot laag 294 m^3/s
geheel 1976 lage afvoer 247 m^3/s
begin 1977 hoge afvoer 384 m^3/s

In Februari 1977 werd een maandafvoer van 604 m^3/s bereikt, terwijl in deze maand de hoogste afvoer 850 m^3/s bedroeg.

In de anderhalf jaar tot aan 1977 was de IJsselafvoer dus bijzonder laag.

Voor de Boven-IJssel kan dit ingehouden hebben, dat alleen de kleinere korrelfractie getransporteerd is,

waardoor de gemiddelde korrelafmetingen in dit traject toegenomen zijn. Voor de Midden-IJssel werd het aangeboden materiaal dus fijner, terwijl het getransporteerde materiaal nauwelijks van samenstelling veranderde, omdat het bodemmateriaal in de Midden-IJssel uniformer verdeeld is. Hierdoor zou de Midden-IJssel dus fijner van samenstelling worden. Voor de Beneden-IJssel blijft het aangeboden materiaal van dezelfde fractie als voorheen, terwijl het ge transporteerde materiaal ook onveranderd blijft, zo ook dus het aanwezige bedmateriaal na een periode van lage afvoeren.
Wanneer het proces van uitzeving zich op deze manier afspeelt, betekent dit, dat na een lange periode van lage afvoer

- de Boven-IJssel grover van samenstelling wordt;
- de Midden-IJssel fijner wordt;
- de Beneden-IJssel onveranderd blijft.

In hoeverre dit uitzevingsproces voldoende tijd gekregen heeft om tot stand te komen in anderhalf jaar tijd, kan bekeken worden aan de hand van een wiskundig model over dit onderwerp van de onderzoeker Rolf Deigaard (Technical University of Denmark, Copenhagen). literatuur (2).
Uit de resultaten van dit onderzoek komt hij tot de conclusie, dat, indien aan een rivier met een gegeven bodemligging op het begintijdstip (bodemligging is exponentieel), en overal gegradeerd materiaal met dezelfde gemiddelde diameter (gelijke zeefkrommen), bovenstrooms het gegradeerde beginmateriaal continue wordt toegevoegd, neemt de gemiddelde korreldiameter in benedenstroomse richting af. Dit proces speelt zich vrij snel af.

Na korte tijd (orde 10 jaar) is op elke plaats het materiaal constant van samenstelling in de tijd. Hoe snel de quasi-stationaire korrelverdeling op een bepaalde plaats bereikt wordt, is afhankelijk van de afstand van dit punt tot aan de bovenmond. Hoe korter deze afstand, hoe sneller de quasi-stationaire toestand bereikt wordt.
In dit wiskundig model bestond er geen bodemevenwicht; wanneer dit namelijk opgelegd wordt, betekent dit, dat overal hetzelfde transport optreedt en dus, dat de korrelgrootte op een bepaalde plaats in de tijd moet toenemen.
Uit dit onderzoek volgde echter, dat de korrelafmetingen na verloop van tijd juist constant blijven. De uiteindelijke evenwichtssituatie in het model is natuurlijk, dat overal het verhang rechtlijnig en even groot is en dat overal materiaal van exact dezelfde samenstelling aanwezig is, dat gelijk is aan het aangeboden materiaal.
De quasi-stationaire toestand, met een gemiddelde korreldiameter welke samen met het verhang in benedenstroomse richting afneemt en waarvan de zeefkromme ook nog van vorm verandert in benedenstroomse richting, kan alleen bestaan, omdat de tijdschaal waarin de bodemveranderingen zich afspelen vele, vele malen groter is, dan de tijdschaal van het uitzevingsproces.

Uit dit onderzoek blijkt dus, dat als de samenstelling van het aangeboden materiaal wijzigt, de rivier zich vrij snel aanpast wat betreft de korrelverdeling. Op grond hiervan lijkt het eerder beschreven hypothetische proces bij lage afvoeren vrij reëel.
Bij lage afvoer wordt het getransporteerde materiaal uit de Boven-IJssel fijner van samenstelling. Binnen anderhalf jaar kan deze invloed zich uitgestrekt

hebben tot aan de Beneden-IJssel. Een opvolgende periode van hoge afvoeren heeft voor de Boven-IJssel een verfijning en voor de Midden-IJssel een vergroving tot gevolg.
Het is nu de vraag in hoeverre de bodembemonstering van 1974/76 representatief is of beïnvloed wordt door de droge periode eind 1975 en geheel 1976. Eigenlijk zou ook een bodembemonstering uit eind 1976 bekend moeten zijn. Een nadere beschouwing van de tijdstippen, waarop de bemonsteringen van 1974/76 hebben plaatsgevonden is wenselijk.
Dit houdt dus in, dat wanneer er bemonsteringen waren voor eind 1976 en voor b.v. 1978, deze aanzienlijke verschillen moeten laten zien.
Het is mogelijk, dat na een periode van zeer lage afvoer (eind '75 en heel '76) bij het eerstvolgende hoogwater enorme grote transporten optreden in de Midden-IJssel als gevolg van de tijdelijk kleinere korrelafmetingen. In de Boven-IJssel zou het transport in deze periode juist vrij laag moeten zijn.
Dat de hoogwaters in de opvolgende jaren niet dit enorme transport te zien geven, komt dan door het feit, dat het materiaal in de Midden-IJssel later veel grover is.
Toch kan dit proces, waarbij een zeer hoge transportcapaciteit optreedt, als gevolg van een tijdelijk kleinere korreldiameter niet leiden tot een enorme uitschuring, omdat in de periode, voorafgaand met lage afvoer, nooit zoveel materiaal getransporteerd kan zijn, dat de bovenste 50 cm van het bedmateriaal fijner van samenstelling geworden is.
De grote transportcapaciteit zal dan leiden tot een uitschuring, waarna de grovere onderliggende laag weer aan het bodemoppervlak komt, waardoor de transportcapaciteit flink daalt, met als gevolg, dat het

uitschuringsproces tot stilstand komt.

Het bovenbeschreven proces speelt een belangrijke rol bij de interpretatie van een bodembemonstering.

Een andere mogelijkheid tot vrij grote uitschuring in een periode van hoogwater kan gelegen zijn in het feit, dat het bodemmateriaal op enige diepte onder het bed niet van dezelfde samenstelling hoeft te zijn als het bedmateriaal zelf.
Door het effect van pantsering kunnen lagen van fijnere samenstelling bedekt en vastgehouden worden door een dunne toplaag van een grovere korreldiameter. Deze toplaag verhindert dan het transport van de onderliggende fijnere korrels.

Bij een hoogwater neemt deze toplaag wèl aan het sedimenttransport deel en wanneer enige uitschuring plaats vindt, zal de onderliggende laag vrij komen en getransporteerd worden.
Uit de transportcapaciteit verdeling langs de IJssel blijkt dat de Midden-IJssel continue de neiging heeft om uit te schuren.
Door het HW in het begin van 1977 kan dit verschijnsel in de Midden-IJssel zijn opgetreden. Het proces van uitschuring stopt op het moment, wanneer de korreldiameter van het bedmateriaal zo grof geworden is, dat de transportcapaciteit gelijk is aan ter plaatse aangeboden hoeveelheid materiaal, of wanneer andere stroombestendige lagen aan het bodemoppervlak verschijnen (Keileembanken), waardoor er geen alluviaal bed meer is.

Op de tweede vraag, waarom de Midden-IJssel juist in een periode met vrij lage gemiddelde afvoer

ineens uitschuurt, kan de verklaring dus gegeven worden, dat deze uitschuring het gevolg is van een hoogwater (Febr. 1977), waarbij een grove afdekkende laag in de Midden-IJssel verbroken is, waarna een grote hoeveelheid fijner sediment getransporteerd is. Een antwoord op de eerste vraag kan nu nog niet gegeven worden en komt later nog aan bod.

- Zandaanbod aan de IJsselkop.
Een verminderd aanbod aan de IJsselkop heeft in eerste instantie alleen invloed op de bodemligging van de Boven-IJssel. Hier zal dan zeer langzaam (i.v.m. de geringe bodemvoortplantingssnelheid) een uitschuring plaatsvinden. Aangezien de Boven-IJssel in deze periode geen sprong in de bodemligging laat zien (zie tekening 5), kan dit zandaanbod nooit de oorzaak zijn van een sterke uitschuring in de Midden-IJssel. Dit alles nog afgezien van het feit, of er überhaupt in deze periode een verminderd aanbod aan de IJsselkop is geweest.

- Zandaanbod uit de kribvakken.
Het zandaanbod uit de kribvakken werd in de jaren '50 geconstateerd, daar veel kribben bij hogere afvoeren achterloops werden. Vanaf de jaren '60 zijn veel oeverherstelwerkzaamheden uitgevoerd, waarbij vrijwel alle kribvakken van een steenbedekking voorzien zijn. Of in de jaren '70 nog zand uit sommige vakken verdwenen is, is mij niet bekend. Wanneer dit wel het geval zou zijn, zou dit betekenen, dat het opgetreden transport in werkelijkheid alleen maar groter wordt, waardoor de oorzaak van dit transport een nog grotere uitschurende werking heeft gehad. Omdat het vermoeden bestaat, dat na 1970

geen (of nauwelijks) materiaal uit de kribvakken is verdwenen, wordt hier verder vanaf gezien.

- Gebaggerde volumina.
Aangezien er sinds 1970 niet meer op de IJssel gebaggerd wordt, kan dit ook niet de oorzaak zijn geweest van de bodemdaling van de Midden-IJssel in de periode 1975-1977.

- Afzetting in de uiterwaarden.
In de uiterwaarden langs de IJssel worden tijdens hoogwater enorme hoeveelheden slib en zand afgezet. De hoeveelheid zand is samen met de gebaggerde hoeveelheden, afname inhoudkribvakken een externe factor in de zandbalans. De getransporteerde hoeveelheid slib vormt geen externe factor in de zandbalans, daar dit materiaal niet door de transportformule beschreven wordt.
Wanneer er bovenstrooms van een peilschaal een bepaalde hoeveelheid zand is afgezet, betekent dat, dat het opgetreden transport ter plaatse van deze peilschaal met die hoeveelheid verminderd moet worden.
De hoeveelheid materiaal, die in de uiterwaarden wordt afgezet is helemaal niet bekend. (ruwe schatting: tot max. 1 cm/jaar).

Het totale sedimenttransport in een rivier kan in drie delen opgesplitst worden:
- bodemtransport (bedload)
- zwevend transport van bodemmateriaal (suspended bedmateriaal load);
- spoeltransport (washload).

De eerste twee beschrijven het transport van bodemmateriaal, dat in het rivierbed ter plaatse voorkomt.

Het spoeltransport komt direct van het stroomgebied met het toegevoerde water; dit materiaal komt nauwelijks in het bed voor. Het spoeltransport is over het algemeen erg klein en wordt meestal verwaarloosd.
Het bodemmateriaal, dat zwevend (in suspensie) getransporteerd wordt, kan in de uiterwaarden afgezet worden wanneer de stroomsnelheden hier afnemen.

Het is niet zo, dat bij het berekende transport m.b.v. Ackers & White nog het zwevend transport moet worden opgeteld; de formule van A.& W. is n.l. een totaaltransportformule, d.w.z. dat deze formule het totale transport van bodemmateriaal beschrijft, dat getransporteerd wordt als bodemtransport èn als zwevend transport.
Een maat voor de intensiteit van het zwevend transport is de parameter $u_*/_W$

	$u_*/_W$
intensief bodemtransport	0,25
suspensie in de benedenste helft	1
deeltjes bereiken de waterspiegel	3
goed ontwikkelde suspensie	20
homogene suspensie	200

Voor de IJssel zijn op bijlage 49 de gemiddelde waarden per vak van de parameter $u_*/_W$ gegeven, behorende bij een afvoer van Q-IJssel = 863 m^3/s, welke afvoer nagenoeg gelijk is aan de topafvoer in Februari 1977.
Hierbij moet worden opgemerkt:
- dat de valsnelheid (W) een functie is van de d_{50}

van het bedmateriaal, welke volgt uit de bodembemonsteringen van 1974/1976. Hierbij is de aanname gemaakt, dat de korrelafmetingen exponentieel in de stroomrichting afnemen.
Uit deze exponentiele verdeling zijn de gemiddelde korrelafmetingen per vak bepaald. Ten eerste nemen de korrelafmetingen in werkelijkheid niet exponentieel af in stroomrichting (zie par. V 3.3.2) en ten tweede is het de vraag, of deze bodembemonstering representatief is voor Februari 1977.

- dat dit gemiddelde waarden per vak zijn. Vooral de parameter u_*, welke gelijk is aan $\sqrt{g}/_C * u$ is zeker niet constant over een vak.

Op plaatsen, waar het HW-bed erg smal is, zal veel meer materiaal in suspensie gaan. Wanneer het HW-bed weer breder wordt, zal een deel van de afvoer de uiterwaarden instromen, waar veel lagere snelheden optreden, zodat het in suspensie zijnde materiaal hier afgezet wordt. Hoe groot de hoeveelheid van het afgezette materiaal is, hangt niet zozeer af van de gemiddelde waarde van $u_*/_W$, maar van:

- hoe vaak worden de uiterwaarden in een bepaald vak gevuld;
- welke waarde heeft de parameter $u_*/_W$ vlak voordat het brede HW-bed bereikt wordt;
- is de aanpassingslengte van het smalle HW-bed voldoende lang, om de evenwichtsconcentratie te bereiken.

Vooral het tweede punt is verschrikkelijk moeilijk kwantitatief te bepalen.
Uit bijlage 49 blijkt, dat de gemiddelde waarde van $u_*/_W$ per vak in de stroomrichting toeneemt. Uitgaande van de veronderstelling, dat de maximum snelheid in

een vak het dubbele kan bedragen van de gemiddelde snelheid in dit vak, blijkt dat in de Beneden-IJssel plaatsen moeten voorkomen, waar de deeltjes de waterspiegel bereiken. In de Boven-IJssel kan het verloop van de parameter $u_*/_W$ verstoord worden door sterk afwijkende korrelafmetingen t.o.v. de exponentiele verdeling.
De grootte van het materiaaltransport tijdens HW is bijzonder moeilijk te bepalen.
Wèl is het mogelijk om de hoeveelheid afgezet fijn zand enigszins te bepalen, uitgaande van de opgetreden bodemverandering èn de aanname, dat de transportcapaciteit berekening m.b.v. de formule van Ackers & White redelijk goed is.

Allereerst wordt dit gedaan voor de periode 1977-1981 (bijlage 50). In deze berekening is de vakindeling en de opgetreden bodemverandering ontleend aan tekening 5 en 6.
Omdat het opgetreden transport uit vak V 230.000 m^3/j. bedraagt en de transportcapaciteitsberekening ongeveer 50.000 m^3/jaar laat zien, is aangenomen, dat bovenstrooms van Kampen 180.000 m^3/jaar aan zand in de uiterwaarden wordt afgezet.
Bij een bepaalde aanname omtrent het oppervlak, waar dit materiaal afgezet is, volgt hieruit, dat per jaar 3,1 mm. zand neerslaat.
De verdeling van de hoeveelheid zand, welke per vak wordt afgezet, is aan de hand van de parameter $u_*/_W$ welke gemiddelde waarde per vak bekend is, gedaan.
Uit deze gegevens kan dan op elke vakgrens het opgetreden transport berekend worden.
De overeenstemming van deze waarden met de berekende transportcapaciteit is redelijk.

Dit betekent, dat, wanneer de transporten volgens Ackers & White juist zijn, hiermee de afgezette hoeveelheid zand en de verdeling hiervan per vak goed geschat is.
Eenzelfde berekening kan gemaakt worden voor de periode 1975-1977 (bijlage 51). Voor de vakverdeling en opgetreden bodemveranderingen zie tekening 6.
Uit deze berekening volgt dan, dat tijdens het HW in het voorjaar van 1977 ruim 1 miljoen m^3 zand moet zijn afgezet in de uiterwaarden.
Dit is een zeer grote hoeveelheid; waarom alléén tijdens dit HW zoveel zand is afgezet (terwijl dit bij latere HW niet gebeurt) moet dan gezocht worden in de tijdelijk bijzonder kleine korreldiameters in de Midden-IJssel, als gevolg van het vrijgekomen fijn-korrelige materiaal.

V 4. 8. Betere schatting opgetreden transport, vergelijking met transportcapaciteit.

Zoals eerder vermeld, was de overeenstemming tussen de berekende transporten uit de opgetreden bodemveranderingen en de berekende transportcapaciteit bijzonder slecht.

In deze beschouwing was nog geen rekening gehouden met de hoeveelheid materiaal, welke in de uiterwaarden is afgezet.
Aangezien ik een groot vertrouwen heb in de toepasbaarheid van de transportformule van Ackers & White, wordt de omvang van de afgezette hoeveelheid zand in de uiterwaarden in de perioden tussen 1940 en 1970 bepaald, zodanig, dat het berekende transport uit:

- opgetreden bodemveranderingen;
- gebaggerde hoeveelheden in het zomerbed v.d. IJssel;
- zandaanbod IJsselkop; deze is o.a. een functie van

de afvoer en wordt hier gelijk genomen aan de berekende transportcapaciteit voor IJsselkop-de Steeg;

- zandafzetting in de uiterwaarden (aanname 80% Katerveer-Kampen en 20% Wijhe-Katerveer).

redelijk overeenstemt met de berekende transportcapaciteit in deze perioden.
De resultaten staan vermeld op bijlage 52, terwijl de berekende transportcapaciteit m.b.v. A.& W. in deze periode op bijlage 40 was gegeven.

Wanneer deze berekende hoeveelheden materiaal inderdaad benedenstrooms van Katerveer in de uiterwaarden worden afgezet, kan het sedimenttransport redelijk m.b.v. Ackers & White beschreven worden.
Dit wil echter niet zeggen, dat zondermeer deze transportformule goed voldoet voor de IJssel; hiervoor zijn de aannamen m.b.t.

- afname inhoud kribvakken;
- afgezette hoeveelheid materiaal;
- werkelijke korreldiameter op een bepaalde plaats en tijdstip;

te onzeker.

V 4. 9. Nauwkeurigheid zandbalans.

V 4. 9.1. Inleiding.

Met behulp van de zandbalans is in het vorige hoofdstuk eenpoging gedaan de toekomstige bodemligging van de IJssel te voorspellen, uitgaande van het berekende toekomstige transport:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{\partial s}{\partial x} + \text{bron} \qquad \text{met bron gelijk aan nul.}$$

teneinde de geldigheid van de toegepaste transportformule aan te tonen, is voor de periode 1940-1980 geprobeerd de omgekeerde weg te volgen:

$$\frac{\partial s}{\partial x} = - \frac{\partial z}{\partial t} + \text{bron.}$$

Aangezien de grootte van de bron volkomen onbekend is, is deze werkwijze onmogelijk. Hierna is geprobeerd de orde grootte van de bron te schatten, uitgaande van de geldigheid van de transportformule:

$$\text{bron} = \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x}$$

Voor de standaardafwijking in de bron kan geschreven worden:

$$(\sigma_{bron})^2 = (\sigma_{\frac{\partial z}{\partial t}})^2 + (\sigma_{\frac{\partial s}{\partial x}})^2$$

In de volgende paragrafen wordt verder ingegaan op fout in $\partial z/\partial t$ en $\partial s/\partial x$. Dit wordt gedaan voor een vak i, met breedte B_s, lengte L, en de aanname, dat de bron gelijkmatig over de lengte van het vak en in de tijd verdeeld is. Over een periode t luidt de zandbalans:

$$\bar{B}_s \, L \, \frac{\bar{z}_i(t + \Delta t) - \bar{z}_i(t)}{\Delta t} + \tfrac{1}{2} (\bar{S}_{i+1} - \bar{S}_{i-1}) = \bar{V} \, L$$

$\bar{B}_s$ = stroomvoerende breedte gemiddeld over het vak (m)
L = de vaklengte (m)
$\bar{z}_i(t)$ = de gemiddelde bodemligging van vak i, op tijdstip t (m)
$\bar{S}_i$ = het zandtransport in vak i, bepaald uit de gemiddelde waarden van de transportbepalende parameters in vak i (m^3/s)
$\bar{V}$ = bron (m^2/s).

V 4. <u>9.2. Fout in $\partial z/\partial t$.</u>

Voor de fout in de eerste term in de zandbalans kan geschreven worden:

$$\sigma^2\left\{ \bar{B}_s\ L\ \frac{\bar{z}_i(t+\Delta t) - \bar{z}_i(t)}{\Delta t} \right\} = \left\{ L\ \frac{\bar{z}_i(t+\Delta t) - \bar{z}_i(t)}{\Delta t} \right\}^2 \sigma_{B_s}^2$$

$$+ \left\{ \bar{B}_s\ \frac{\bar{z}_i(t+\Delta t) - \bar{z}_i(t)}{\Delta t} \right\}^2 \sigma_L^2 + \left\{\frac{\bar{B}_s L}{\Delta t}\right\}^2 \sigma^2_{\bar{z}_i(t+\Delta t)} +$$

$$+ \left\{\frac{\bar{B}_s L}{\Delta t}\right\}^2 \sigma^2_{\bar{z}_i(t)}$$

in bovenstaande vergelijking volgen L, B_s, Δt, $\bar{z}_i(t+\Delta t)$ en $\bar{z}_i(t)$ uit de zandbalans.
voor σ_L geldt 0 (50 m)
voor $\sigma_{\bar{B}_s}$ geldt 0 (2 m)
De grootste bijdrage in B L $\partial z/\partial t$ komt ongetwijfeld van $\sigma^2_{\bar{z}_i}(t+\Delta t)$ en $\sigma^2_{\bar{z}_i}(t)$, welke evengroot zijn.

Deze fout in de gemiddelde bodemligging per vak is een functie van:

de peilmeth ode
de plaatsbepalingsmethode
de middelingsmethode.

- peilmethode.

Bij de peiling door middel van een echolood worden fouten geintroduceerd als gevolg van:

de echofrequentie
de penetratie van het echolood in de rivierbodem
de afwijking van de werkelijke diepte tussen twee ijkingen.
de beperkte gevoeligheid van het instrument.
het feit, dat de diepte wordt opgegeven in decimeters.
de bepaling van de waterstand.
de invloed van golven.

- plaatsbepalingsmethode.

Wanneer de plaatsbepalingsmethode erg onnauwkeurig is, is het afhankelijk van de bodemfunctie (als functie van de plaats) of dit grote invloed heeft;
De diepte wordt op een bepaalde plaats gemeten, terwijl door de fout in de plaatsbepalingsmethode deze diepte aan een andere plaats wordt toegeschreven. Door de aanwezigheid van duinen kan de dieptefout in een individuele peiling eenvoudig de waarde van de duinhoogte bereiken.

- de middelingsmethode.

per meetraai worden ongeveer 20 individuele peilingen uitgevoerd. Elke 100 m wordt zo'n dwarsraai gevaren (vroeger gebeurde dit iedere 125,0 m, tegenwoordig wordt de rivier in lengterichting een aantal keren op en afgevaren, waarbij continue gepeild wordt).
Teneinde de gemiddelde bodemligging per vak te bepalen, worden alle metingen gemiddeld (20 peilingen/ raai * * 10 raaien/ km * ± 10 km/ vak = 2000 peilingen/ vak).

Door het grote aantal middelingen per vak, wordt de nauwkeurigheid van de gemiddelde bodemligging per vak aanzienlijk vergroot t.o.v. de nauwkeurigheid in de individuele peilingen. Hier volgt een globale schatting van de fout in de gemiddelde waarde per vak:

peilmethode: stochastische fout O (0,10 m) 2000 peilingen per vak fout O (2 mm)
systematische fout O (0,05 m)

plaatsbepalingsmethode: fout O (5 m) hierdoor kan een diepte fout ontstaan O (1 m) als gevolg van de duinen. Door aan te nemen, dat random op of naast de duinen wordt gepeild, wordt deze fout bij 2000 peilingen O (2 cm).

Tevens kan er te ver door gevaren worden in de kribvakken. Bij een te ver door varen van 5 m aan beide zijden van de normaallijnen en een hellin van het talud in het kribvak van 1 : 1 ontstaan per 20 peilingen 2 peilingen met een afwijking van 0,50 m. Hierdoor wordt per raai de gemiddelde bodemligging 0 (0,05 m) te hoog weergegeven. Alléén wanneer systematisch in het gehele vak te ver in de kribvakken wordt gepeild, is de bijdrage in de fout per vak 0 (0,05 m).

De grootte van de systematische fout kan ook beschouwd worden als een stochastische grootheid. Hierdoor wordt de totale fout in de gemiddelde bodemligging per vak 0 (0,08 m).

Zoals in paragraaf IV 1. aan de orde is gekomen, vertonen de gemiddelde bodemliggingen per km. in het lengteporfiel veel varaties, welke verklaarbaar zijn.

Grofweg verloopt het lengteprofiel (gemiddeld over de breedte) volgens een afnemende e-macht. De variaties hierop zijn het gevolg van:

- breedte HW-bed, tijdsafhankelijk;
- duinen;
- bochten en crossings
- variatie in de korreldiameter;
- uitwendigde omstandigheden (baggeren, storten);
- verschil in turbulentie intensiteit.

Deze variaties planten zich voort; b.v. de bij een HW ontstane ondiepte t.p.v. een breed HW-bed, is tijdens LW niet meer stabiel en zal stroomafwaarts verplaatsen.

Behalve variaties in de lengterichting, vertonen de gemiddelde bodemliggingen per km. grote variaties in de tijd (tussen 2 opeénvolgende jaren b.v.), welke niet verklaard kunnen worden door te stellen, dat de variaties in lengterichting zich verplaatst hebben. In opvolgende jaren komt het namelijk óók voor, dat de bodemligging in een héél vak fluctueert met een vrij grote amplitude (tot ± 0,12 m). Aangezien het fluctuaties betreft, lijkt het uitgesloten, dat er enorm grote aanzandingen en uitschuringen in korte tijd hebben plaatsgevonden.
De globale berekening van de nauwkeurigheid van een individuele gemiddelde waarde van de bodemligging per vak, kan deze fluctuaties in de tijd toeschrijven aan de fout in de gemiddelde waarde per vak.

Behalve middeling in de plaats, is ook een middeling van de gemiddelde bodemligging per vak, in de tijd noodzakelijk. De gemiddelde bodemligging in een tienjarige periode is gelijk aan:

$$\bar{z}(t) = \frac{1}{10}\, z(t_1) + \frac{1}{10}\, z(t_2) + \cdots\cdots + \frac{1}{10}\, z(t_{10})$$

voor de standaardafwijking in $\bar{z}(t)$ geldt:

$$\sigma^2_{\bar{z}(t)} = \frac{1}{100}\,\sigma^2 z(t_1) + \frac{1}{100}\,\sigma^2 z(t_2) + \cdots + \frac{1}{100}\,\sigma^2 z(t_{10})$$

met $\sigma_{z(t_i)} = 0{,}08$ m volgt

$$\sigma_{\bar{z}(t)} = 0{,}025 \text{ m}$$

voor $\Delta\bar{z} = \bar{z}(t+\Delta t) - \bar{z}(t)$ geldt

$$\sigma^2_{\Delta\bar{z}} = \sigma^2_{\bar{z}(t+\Delta t)} + \sigma^2_{\bar{z}(t)}$$

$$\sigma_{\Delta\bar{z}} = 0{,}036 \text{ m}$$

Hoe kleiner de absolute waarde van $\Delta\bar{z}$, hoe groter de relatieve fout in $\Delta\bar{z}$.

Bij verwaarlozing van de fouten in L en B_s (beiden hebben een kleine relatieve fout) geldt voor de eerste term in de zandbalans:

$$\sigma \left\{ \bar{B}_s \; L \; \frac{\bar{z}_i(t+\Delta t) - \bar{z}_i(t)}{\Delta t} \right\} = \bar{B}_s \; L \; \frac{\sigma_{\Delta \bar{z}}}{\Delta t} = \pm \frac{\bar{B}_s \, L}{\Delta t} \; 0{,}036 \text{ m}$$

V 4. <u>9.3. Fout in $\partial s / \partial x$.</u>

De benadering voor BL $\partial s / \partial x$ in vak i luidt volgens de zandbalans:

$$\tfrac{1}{2} \left(\bar{S}_{i+1} - \bar{S}_{i-1} \right) \qquad (m^3/s).$$

Het zandtransport in vak i is een functie van de gemiddelde waarden per vak van de transportbepalende parameters.

De fout in dit transport is een functie van:

1 - de fout in de gemiddelde parameters;

2 - de afwijking van deze parameters ten opzichte van hun gemiddelden in een vak;

3 - de toepasbaarheid van de zandtransportformule.

1 - de gemiddelde waarden van de transportbepalende parameters per vak zijn niet exact bekend, maar zijn wel met een zekere nauwkeurigheid te bepalen. Door de spreiding van de parameters rond hun gemiddelde waarden mee te nemen in de berekening van het transport, kan de spreiding en de gemiddelde waarde van het transport bepaald worden.

2 - de individuele waarden van de transportparameters zijn aan een veel grotere spreiding onderhevig binnen een vak, dan de gemiddelde waarden. Het in rekening brengen van deze grote spreiding bij de bepaling van de spreiding in het transport, is niet reëel. Dit komt doordat de transportparameters niet geheel onafhankelijk zijn. Binnen één vak is er in zekere mate evenwicht;

Overal is het transport bij benadering even groot; is dit n.l. niet het geval, dan zal door aanzanding en uitschuringen binnen dit vak spoedig (in een veel kleiner tijdsbestek dan nodig voor de hele rivier) evenwicht ontstaan. B.v. een grotere plaatselijke breedte gaat gepaard met een kleinere waterdiepte, zodanig, dat voor beide gevallen het transport gelijk is.
Wanneer de variaties van de individuele parameters t.o.v. hun gemiddelde waarden niet te groot zijn, kan het transport berekend worden, uitgaande van de gemiddelde waarden per vak.
Op bijlage 53 is voor een vak met verschillende breedten berekend welke fout hierdoor gemaakt wordt in het berekende transport. Hieruit blijkt, dat wanneer de variatie in de breedte minder dan 20% bedraagt, er een redelijk betrouwbare schatting van het gemiddeld transport ontstaat.

3 - de fout in het berekende transport is tevens een functie van de toepasbaarheid van de gebruikte transportformule. Het werkelijke transport is een factor α_1 groter dan het uit de parameters berekende transport. De factor α_1 is een stochastische grootheid, waarvan de kansverdeling bepaald kan worden uit gemeten en voorspelde transporten. De factor α_1 is gedefinieerd als het quotient van het gemeten- en het berekende transport, gebaseerd op gemeten ruwheden (in dit geval is géén gebruik gemaakt van een ruwheids voorspeller).

De kansverdeling van de factor α_1 voor de transportformule van Ackers & White is bepaald aan de hand van de CSU data (de Vries, Okt. 1983).

In de volgende paragraaf wordt voor een bepaald vak de fout in het sedimenttransport bepaald door de kansdichtheidsfunctie van het transport te bepalen. De gevoeligheid van de diverse parameters op deze kansdichtheidsfunctie zal tevens aan bod komen. Daarna wordt de kansdichtheidsfunctie van $\partial s / \partial x$ opgesteld.

Gevoeligheid transportparameters in Ackers & White.

Om de gevoeligheid op veranderingen van diverse parameters van de zandtransportformule van Ackers & White te onderzoeken, is voor een hoge en lage afvoer het transport berekend. Tevens zijn transporten berekend, waarbij steeds één parameter een andere waarde kreeg, waardoor een indruk wordt verkregen wat de gevoeligheid van een verandering in deze parameter op het zandtransport is.

Op bijlage 54 zijn de verbanden in grafiekvorm uitgezet:

- stroomsnelheid: het berekende transport met Ackers & White is in hoge mate afhankelijk van de stroomsnelheid. Deze dient dan ook zo nauwkeurig mogelijk weergegeven te worden.
- waterdiepte: grote variaties in de waterdiepte, b.v. 25 cm, hebben nauwelijks invloed op het berekende transport; de waterdiepten dienen wèl nauwkeurig te worden weergegeven, aangezien hieruit de stroomsnelheden berekend worden.
- Chézy waarde: bij grote korreldiameter is het transport zeer ongevoelig voor variaties in de C-waarde. Bij kleine diameters is deze gevoeligheid veel groter, zeker wanneer men dicht bij het criterium begin van beweging zit. Aangezien de grootste transporten optreden wanneer men ver van dit criterium afzit, is

hier de gevoeligheid van het transport op variaties in de C-waarde veel kleiner.
Tevens is de spreiding in het voorbeeld in werkelijkheid niet zo groot. Uit stuwkromme-berekeningen bleek een C-waarde van 45 $m^{\frac{1}{2}}/s$ redelijk te voldoen, zodat kleine variaties in deze waarde weinig invloed hebben op het berekende transport.

- korreldiameter: De grootte van de korreldiameter heeft een behoorlijke invloed op de grootte van het zandtransport. Behalve dicht bij dit criterium van beweging is het transport ongeveer lineair afhankelijk van de korreldiameter.

In de formule van Ackers & White komt de watertemperatuur tot uitdrukking in de kinematische viskositeit (ν). Deze sit als volgt in de formule:

$$D_{grain} = \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} * d_{35}$$

Op bijlage 55 is de invloed van de temperatuur in grafiekvorm weergegeven. Hieruit blijkt, dat het transport weing temperatuursafhankelijk is (schommeling hoofdzakelijk tussen 5 en 20° C).
De berekeningen van de zandbalans zijn allen uitgevoerd bij een temperatuur van 9°C.

<u>Bepaling kansdichtheidsfunctie sedimenttransport</u>.
Uitgaande van de kansdichtheidsfuncties van de gemiddelde transportbepalende parameters en een bepaalde transportformule met parameter α_1 kan de kansdichtheidsfunctie van het gemiddeld sedimenttransport in een bepaald vak bepaald worden.

Aangezien het aantal parameters met een stochastisch karakter, welke in de transportformule van Ackers &

White voorkomen, nogal groot is, wordt de kansverdelingsfunctie niet bepaald door meervoudige integratie maar door gebruikmaking van de Monte Carlo - methode.

De Monte Carlo simulatie berekent voor een groot aantal schattingen van de parameters de waarden van de afhankelijke variabele, waarvan de verdelingsfunctie en/of de kansdichtheidsfunctie bepaald wordt.
De waarden van de parameters worden zodanig bepaald, dat de geselecteerde waarden bij benadering voldoen aan de kansdichtheidsfunctie/verdelingsfunctie van de betreffende parameter. Dit gaat als volgt:
Van de parameters is de verdelingsfunctie bekend. De simulatie genereert nu een random getal tussen 0 en 1. De geselcteerde waarde van de parameter is nu die waarde waarvan de onderschrijdingskans gelijk is aan het gegenereerde random getal.
In plaats hiervan is het ook mogelijk om uitgaande van random getallen een normaal random getal te berekenen, zodanig, dat het totaal van gegenereerde schattingen van een bepaalde parameter bij benadering een van te voren opgegeven gemiddelde waarde en standaardafwijking bezit.

Door deze werkwijze voor alle parameters een groot aantal (400) keren te herhalen, kan een groot aantal schattingen berekend worden van de afhankelijke variabele, waarvan de verdelingsfunctie bepaald kan worden.

Gegevens.
De berekening van de kansdichtheidsverdelingsfunctie van het sedimenttransport en de gevoeligheid hierop van de individuele parameters is uitgevoerd voor het vak Zutphen-Deventer in de periode 1977-1978.

De berekening van de kansdichtheidsverdelingsfunctie van het transport verschil is uitgevoerd voor het vak Deventer-Olst in de periode 1977-1978. Als gevolg van het gebruikte differentie-schema van de continuïteitsvergelijking voor dit vak zijn de gegevens nodig voor de vakken Zutphen-Deventer en Olst-Wijhe.

De berekeningen zijn uitgevoerd bij een IJsselafvoer van 250, 400 en 600 m^3/s. De bijbehorende waterstanden zijn:

afvoer m^3/s	Zut.-Dev. (m + NAP)	Olst-Wijhe (m + NAP)	Zut.-Dev. (m)	Olst-Wijhe (m)
250	3,04	1,31	3,90	3,95
400	4,36	2,37	5,22	5,01
600	5,64	3,46	6,50	6,10

De gemiddelde bodemliggingen in deze periode zijn ontleend aan bijlage 12 en zijn:

Zutphen-Deventer 0,86 m - NAP
Olst-Wijhe 2.64 m - NAP

De bijbehorende waterdiepten zijn in bovenstaande tabel gegeven.

Voor de standaardafwijking in de afvoer is een waarde van 1% aangehouden. De fout in de bodemligging bedraagt 0,10 m. De fout in de waterstand is afhankelijk gesteld van de afvoer. De Q-h kromme is n.l. géén exact gegeven. Voor de afvoeren 250, 400 en 600 m^3/s zijn de standaardafwijkingen in de waterstand gekozen resp. 0,055 - 0,075 en 0,10 m. Voor de fout in de waterdiepte levert dit resp. op: 0,115 - 0,125 en 0,140 m
De korrelafmetingen van het bodemmateriaal varieert zowel in de lengterichting als in de tijd. In de stroomrichting nemen zij globaal volgens een e-macht af en verder neemt de spreiding rond deze e-macht in stroom-

richting af.
Aangezien de korrelafmetingen vrij snel kunnen varieren in de tijd en de bemonsteringen niet erg vaak gedaan worden, betekent dit, dat alle drie de bemonsteringen representatief kunnen zijn voor elke periode (dit is een zeer ongunstig uitgangspunt).
De gemiddelde korreldiameterwaarde d_{35} in een vak is dus in de tijd niet constant, maar heeft een gemiddelde waarde en een standaardafwijking. De verdeling van de korreldiameter d_{35} in een bepaald vak is aan een veel grotere spreiding onderhevig. Voor de twee te beschouwen vakken geldt:

	μ (mm)	σ (mm)
Zutphen-Deventer	0,68	0,105
Olst-Wijhe	0,48	0,025

Voor de fout in de gemiddelde stroomvoerende breedte en helling van de kribkoppen is resp. een waarde gekozen van 1,0 m en 0,125.
Voor de Chézy-waarde is 45 $m^{\frac{1}{2}}/s$ aangehouden met een standaardafwijking van 2,5 $m^{\frac{1}{2}}/s$. Bij de bepaling van de kansdichtheidsfunctie van het transportverschil is Chézy constant gehouden. Eerder bleek n.l. de formule van Ackers & White ongevoelig voor variaties in Chézy.

De verdelingsfunctie van α_1 is ontleend aan de Vries, Okt. 1973.
De resultaten van de berekeningen zijn gegeven op bijlagen 56 t/m 61.
Meer inzicht geeft het plaatje op bijlage 62. Allereerst valt op, dat de nauwkeurigheid van de transportberekening erg klein is. De transportwaarde welke 90% van de gevallen is onderschreden is ongeveer een factor 10 groter, dan de 10% waarde. Dit blijkt hoofdzakelijk het gevolg te zijn van de grote onnauwkeurigheid in de

factor α_1. Wanneer de factor α_1 constant genomen wordt, is de 90% onderschreidingswaarde ongeveer 2 keer zo groot, als de 10% waarde (bijlage 64).

De nauwkeurigheid in het transportverschil is wel bijzonder klein, omdat 2 onnauwkeurige waarden van elkaar worden afgetrokken.
Op bijlage 63 zijn de kansverdelingen getekend van de transporten en het verschil ($\Delta S = S_2 - S_1$) voor een constante (!) waarde alfa 1 ($\alpha_1 = 1.23$).
Ondanks de veel kleinere spreiding in S_2 en S_1 als gevolg van een constante α_1 is de nauwkeurigheid van het transportverschil bijzonder klein.

Het in rekening brengen van de verdelingsfunctie van de factor α_1 maakt de fout in het transportverschil wel erg groot.
De standaardafwijking van S is overigens eenvoudig bij benadering af te leiden:

$$\Delta S = \tfrac{1}{2} (S_2 - S_1)$$

$$\sigma^2_{\Delta S} = \frac{1}{4} \sigma^2 S_2 + \frac{1}{4} \sigma^2 S_1$$

er geldt $S = \alpha S_x$

en bij benadering $\sigma^2 S = \sigma^2_\alpha * S_x^2$ omdat $\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} \gg \frac{\sigma S_x}{S_x}$

dus $\sigma^2 S_1 = \sigma^2_\alpha S x_1^2$

$$\sigma^2 S_2 = \sigma^2_2 S x_2^2$$

bij benadering geldt: $Sx_1 = Sx_2 = Sx$

dus $\sigma^2 S_1 = \sigma^2 S_2 = \sigma^2_\alpha \cdot Sx$

$$\sigma^2_{\Delta S} = \tfrac{1}{2} \sigma^2_\alpha \cdot Sx$$

met $\sigma_\alpha = \pm 1,0$ volgt $\sigma_{\Delta S} = \tfrac{1}{2} \sqrt{2}\, Sx$

In woorden: de standaardafwijking in het transportverschil bedraagt ongeveer 70% van de beide transporten.
Hoe kleiner het transportverschil, hoe groter de relatieve fout in het verschil.

V 4. 9.4. Conclusie:
Uit deze analyse blijkt dat het onmogelijk is om uit berekende transporten een nauwkeurige uitspraak te doen omtrent de grootte van $^{ds}/dx$ in een bepaald vak.
De onnauwkeurigheid wordt hoofdzakelijk bepaald door de onbetrouwbaarheid van de transportformule.
De transportbepalende parameters dragen ieder ook bij in de onnauwkeurigheid in $^{ds}/dx$, maar hebben een veel kleinere invloed.
Het heeft dan ook géén zin om de transportparameters nauwkeuriger te bepalen, vóórdat een beter toepasbare transportformule is gevonden. Voor de ijking van de transportformule zijn overigens wèl nauwkeurige transportparameters noodzakelijk.

V 5. Conclusies.

- De hele morfologische beschouwing van de IJssel wordt bijzonder bemoeilijkt door een aantal onzekere factoren. De belangrijkste twee zijn:
  - de hoeveelheid materiaal (fijn zand) welke tijdens een hoogwater in de uiterwaarden langs de IJssel wordt afgezet;
  - de korrelafmetingen van het bodemmateriaal welke niet alleen per plaats, maar ook in de tijd variëren.

  Voor de periode vóór 1970 bestaat tevens grote onzekerheid omtrent de hoeveelheid materiaal, welke uit de kribvakken langs de IJssel is verdwenen.

- De transportformule van Ackers & White lijkt in het algemeen een goede formule, omdat:
  - deze formule fundamenteel goed onderbouwd is (lit. 4 en 5);
  - gebaseerd is op zeer veel gootmetingen;
  - redelijk voldoet aan toetsing op vele rivieren.

- Voor de IJssel lijkt de transportformule van Ackers & White redelijk te voldoen, op grond van:
  - overeenstemming met transportmetingen;
  - overeenstemming met alle ideeën omtrent de omvang van het sedimenttransport op de IJssel.

  Deze twee punten zijn de grote voordelen van deze transportformule t.o.v. vroegere door RWS gebruikte formules.

- Op grond van de opgetreden bodemveranderingen samen met enkele zeer onzekere factoren (afname inhoud kribvakken, materiaalafzetting in de uiterwaarden en de korrelafmetingen) bestaat er geen enkele reden om de formule van Ackers & White voor de IJssel af te keuren.

- Uit de vergelijking van het opgetreden transport in de perioden 1975/1977 en 1977-1981 samen met alle transportbepalende factoren concludeer ik:
  - Het afgezette materiaal in de uiterwaarden tijdens een HW speelt een zeer belangrijke rol in de morfologie van de IJssel.
  - De korrelafmetingen langs de rivieras kunnen door extreme omstandigheden (lange periode van lage afvoer, hoogwater) behoorlijk veranderen.
  - Onder normale omstandigheden (1977/1981) wordt een hoeveelheid fijn zand jaarlijks in de uiterwaarden afgezet, welke in de orde ligt van

100- à 200.000 m^3/jaar.
Onder extreme omstandigheden kan dit oplopen tot 1.000.000 m^3.

V 6. Aanbevelingen.

- Het verdient de voorkeur om regelmatige bodembemonsteringen uit te voeren.
  Tevens is het nodig inzicht te krijgen in het bodemmateriaal op enige diepte onder de bodem, wat betreft korrelafmetingen d.m.v. het uitvoeren van boringen (dieptebemonstering).

- Er dient inzicht te worden verkregen in de hoeveelheid materiaal (en samenstelling), welke tijdens een hoogwater in de uiterwaarden achterblijft.

- Het verdient aanbeveling een zandbalans op te stellen over een vrij korte periode (van één jaar of over één HW), waarvoor nauwkeurige bodemligging nodig zijn. In zo 'n korte periode kan beter gecontroleerd worden of de gemeten (of geschatte) hoeveelheid materiaal afgezet in de uiterwaarden in de zandbalans past.

VI Te verwachten bodemontwikkelingen.

VI 1. Inleiding.

Een betrouwbare voorspelling voor de bodemligging van de IJssel in de toekomst is onmogelijk i.v.m. grote onzekerheid m.b.t.:

- de korrelafmetingen van het bedmateriaal door veranderingen in deze korrelafmetingen bij uitschuring van de bodem;
- de afzetting van materiaal in de uiterwaarden langs de rivier tijdens hoogwater.
- de nauwkeurigheid van de transportberekeningen.

Hierdoor is het onmogelijk om m.b.v. de transportformule van Ackers & White de opgetreden bodemveranderingen te beschrijven. Dit geldt overigens niet alleen voor de formule van Ackers & White; alle transportformules geven hetzelfde beeld van een toenemend transport vanaf de IJsselkop tot de Midden-IJssel, waarna het transport weer afneemt. Dit zou betekenen, dat tot aan de Beneden-IJssel een continue uitschuring te zien zou zijn en een aanzanding benedenstrooms hiervan.
In werkelijkheid gebeurt dit niet helemaal.

Voor de nabije toekomst kan een zeer globale voorspelling gemaakt worden, door extrapolatie van de opgetreden bodemveranderingen in de laatste paar jaren.
Aan de hand van de zandbalans tussen 1977 en 1981 kan enig inzicht verkregen worden omtrent de te verwachten bodemontwikkelingen op de IJssel en de betrouwbaarheid hiervan.

Zandbalans Juli 1977 t/m Juni 1981.

Voor de bodemveranderingen in de laatste 10 jaar kon gebruik worden gemaakt van de numerieke waarden van de gemiddelde bodemligging per km., welke m.b.v. de computer zijn verwerkt tot gemiddelde bodemliggingen per vak. Voor deze gemiddelde bodemliggingen en de vakindeling zie bijlage 65; deze waarden zijn op bijlage 66 in grafiek uitgezet.

Voor elk vak is m.b.v. de kleinste kwadraten methode (lineair tussen 1977 en 1981) een schatting gemaakt van de bodemligging in 1977 en 1981 en is de gemiddelde bodemverandering per jaar bepaald (bijlage 67). Op deze bijlage is tevens de correlatiecoëfficiënt gegeven, welke absolute waarde hiervan een maat is voor de overeenstemming tussen de werkelijke bodemligging en de berekende trend. Een waarde van 1 geeft aan, dat alle vakgemiddelden precies aan de trend voldoen, terwijl bij een waarde van 0 er geen sprake is van enig lineair verband tussen de opgetreden bodemveranderingen. Het teken van de correlatiecoëfficiënt geeft aan of er sprake is van een bodemstijging (+ teken) dan wel een bodemdaling (- teken) in de tijd.

Uit de gemiddelde veranderingen per jaar kan het opgetreden transport berekend worden per peilschaal, wanneer een aanname omtrent het aanbod aan de IJsselkop wordt gedaan (40.000 m^3/jaar) (bijlage 67).

Vergelijking van deze opgetreden transporten met de berekende transportcapaciteit in deze periode (bijlage 59) laat weer de slechte overeenstemming zien, welke weer het gevolg is van:

- grote onzekerheid van de korrelafmetingen (daar deze vrij snel in de tijd kunnen variëren en zijn ontleend aan de bemonstering van 1974/1976;
- de invloed van materiaalafzetting in de uiterwaarden,

welke vooral in de Beneden-IJssel een rol moet spelen;

- de werkelijk opgetreden afvoer, welke in deze periode 375 m^3/s gemiddeld bedroeg. (Een berekening van de transportcapaciteit m.b.v. de gemiddelde maandafvoeren in deze periode is gedaan voor het vak Katerveer-Kampen, welke een jaartransport opleverde van 84.500 m^3, bijlage 68).

Bodemontwikkelingen op de IJssel.

De berekende transportcapaciteit m.b.v. Ackers & White voor de periode ná 1980 (bijlage 39) geeft hetzelfde beeld als de transportcapaciteiten voor de periode 1975-1980 (bijlage 38). De waarden ná 1980 liggen ongeveer 20% lager.

Verwacht kan worden, dat de bodemdaling (zoals deze geconstateerd wordt sinds 1977, zie bijlage 66) zich op de IJssel in een iets lager tempo zal voortzetten. Deze bodemdaling zal ook in de Beneden-IJssel optreden, (dit in tegenstelling tot de afnemende transportcapaciteit) als gevolg van (waarschijnlijk) materiaalafzetting in de uiterwaarden.
Het proces van uitschuring kan drastisch veranderingen ondergaan, als gevolg van andere korrelafmetingen van het bodemmateriaal, dat na uitschuring aan het bodemoppervlak komt.

Literatuurlijst.

- Ackers & White, Journal of the Hydraulics Division,
ASCE vol 99 no HY 11
November 1973 pp 2041 - 2060.

- Rolf Deigaard, Longitudinal and transverse sorting of grain sizes in alluvial rivers.
IHHE Technical University of Denmark, 1980.

- P.Ph. Jansen, Principles of riverengineering.
Londen 1979.

- RWS WWZO en BOR afd. studiedienst, diverse nota's.

- de Vries, Morfological computations,
lecture notes f10 A.
Delft, University of Technology, 1975.

- Waterloopkundig Laboratorium, Rapport W 30 II, 1970.

- Waterloopkundig Laboratorium, Splitsingspunt Westervoort,
M 395 - 1
Delft, Oktober 1970.

- Yang and Molinas, Journal of the Hydraulics Division,
ASCE vol 108 No HY 6
June 1982 pp 774 - 793

gebruikte notaties

a	waterdiepte (m)
α	constante (-)
β	exponent in de zandtransportformule (-)
B_n	normaalbreedte (m)
B_q	stroomvoerende breedte (m)
B_s	zandtransporterende breedte (m)
c_b	voortplantingssnelheid van een bodemverstoring (m/s)
c_{max}	maximale bodemvoortplantingssnelheid (m/s)
C	coëfficiënt van Chézy ($m^{\frac{1}{2}}/s$)
d	korreldiameter (m)
d_x	zeefdiameter waardoor x% van de korrelfractie heenvalt (m)
D_{gr}	parameter van Ackers en White (-)
Δ	relatieve dichtheid sediment; Δ =1,65
F_{gr}	parameter van Akers en White (-)
g	versnelling van de zwaartekracht; $g=9,81 m/s^2$
G_{gr}	parameter van Ackers en White (-)
h	waterstand (m + NAP)
i	evenwichtsverhang (-)
i_b	bodemverhang (-)
i_w	waterspiegelverhang (-)
L	vaklengte (m)
μ	ribbelfactor (-)
q	afvoer per eenheid van breedte (m^2/s)
Q	afvoer (m^3/s)
Q_{zom}	afvoer in het zomerbed (m^3/s)
Q_{tot}	totale afvoer (m^3/s)
s	zandtransport per eenheid van breedte (m^2/s)
S	zandtransport (m^3/s)
t	tijd (s)
T	temperatuur (^oC)
u	stroomsnelheid (m/s)

u_*	schuifspanningssnelheid (m/s)
W	valsnelheid van de d_{50} (m/s)
x	lengte-coördinaat (m)
X	transportparameter (-)
Y	stroomparameter (-)
z	bodemligging (m + NAP)

ontwerp adviesdienst hoorn