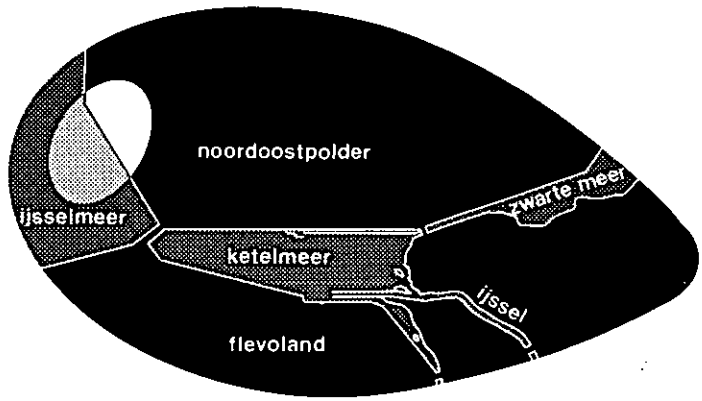
Ministerie van Verkeer en Waterstaat

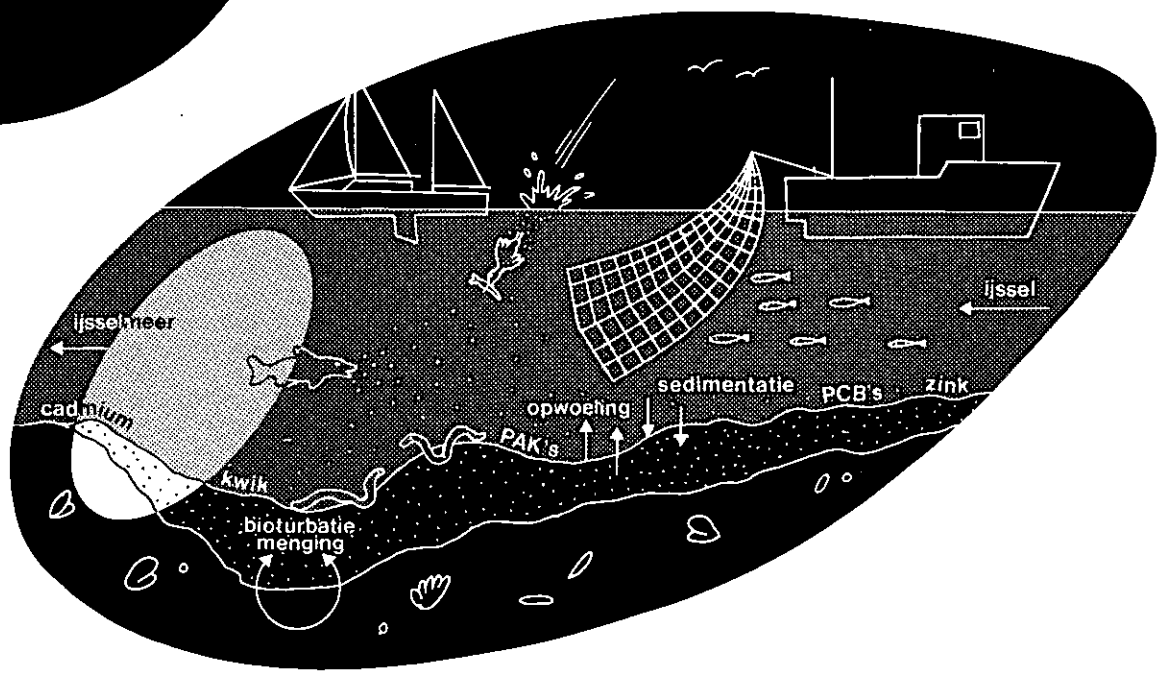
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Projectgroep Ketelmeer

Integraal Waterbeheer Ketelmeer

Modellering van slibtransport in het Ketelmeer





6640

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Projectgroep Ketelmeer

rijkswaterstaat bibliotheek
directie flevoland
postbus 600
8200 AP Lelystad

Integraal Waterbeheer Ketelmeer

Modellering van slibtransport in het Ketelmeer

november 1992

Christian Toet
Gerard Blom

Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer
Rijkswaterstaat, Directie Flevoland

b
77835 6640

Wageningen/Lelystad, 1992

VOORWOORD

Voor u ligt het rapport "Modellering van slibtransport in het Ketelmeer". In dit rapport worden de resultaten van onderzoek naar het transport van verontreinigd bodemslib in het Ketelmeer gegeven. De studie is uitgevoerd door de Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer, in samenwerking met Rijkswaterstaat, Directie Flevoland. Het onderzoek is geschied in opdracht van Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, in het kader van de werkzaamheden van de Projectgroep Ketelmeer. Deze projectgroep is ingesteld om:

- door onderzoek meer kennis en inzicht te verkrijgen van de verschillende aspecten van het watersysteem Ketelmeer;
- met behulp van de verkregen inzichten het integraal waterbeheer voor het Ketelmeer beter gestalte te geven.

Deze studie is grotendeels uitgevoerd in de periode november 1988 tot en met maart 1991. Er is door een groot aantal personen aan bijgedragen. De metingen in het kader van deze studie zijn uitgevoerd door Rijkswaterstaat, Directie Flevoland. De Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer verrichte de Cadmium- en Scandium-analyses. In de slotfase van het project zijn de simulatieberekeningen uitgevoerd door Yede Bruinsma (Rijkswaterstaat, Directie Flevoland). De studie werd begeleid door de Slibwerkgroep Ketelmeer.

De studie is grotendeels uitgevoerd door Chris Toet[1], die ook het leeuwedeel van de rapportage heeft verzorgd. Hij werd daarbij ondersteund door Gerard Blom, die de afronding van de studie verzorgde.

Wageningen, november 1992

---

[1] Chris Toet was over de periode november 1988 tot en met maart 1991 in dienst van de Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer en aangesteld t.b.v. de uitvoering van onderhavige studie. Hierna trad hij in dienst van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne. Chris overleed 2 april 1992.

INHOUD

INHOUD i
SAMENVATTING iii

1. INLEIDING 1
1.1. Algemene inleiding en probleemstelling 1
1.2. Doelstelling van het onderzoek 1
1.3. Werkwijze en rapportage 2

2. STRESS-2D; EEN 2-DIMENSIONAAL MODEL VOOR SEDIMENTTRANSPORT 3
2.1. Modellering slibtransport 3
2.2. Processen in het slibtransportmodel STRESS-2d 3
2.2.1. Waterbeweging 3
2.2.2. Resuspensie 4
2.2.3. Sedimentatie 6
2.2.4. Erosie en (bio-)turbatie 7
2.2.5. Massabalansen voor water en bodem 8
2.3. Enkele karakteristieken van het model STRESS-2d 8
2.3.1. Indeling zwevende stof in fracties 10
2.3.2. Verschillende benaderingen voor de bodem 10
2.3.3. Numerieke aspecten 10
2.3.4. Belangrijke invoergegevens 11

3. TOEPASSING VAN STRESS-2D OP HET KETELMEER 13
3.1. Karakterisering van het Ketelmeer 13
3.2. Schematisatie van het Ketelmeer 14
3.2.1. Tijdstap en plaatsstap 14
3.2.2. De diepte-schematisatie 15
3.2.3. De berekening van strijklengten 16
3.2.4. De beschrijving van de open randen 16
3.3. De indeling in slibfracties 17
3.4. Keuze voor resuspensie- en bodemmodel 18
3.5. Stroming en scheepvaart in het slibtransportmodel 19
3.5.1. Stroming 19
3.5.2. Scheepvaart 20

4. CALIBRATIE EN VALIDATIE VAN HET SLIBTRANSPORTMODEL 23
4.1. Calibratie: perioden, instellingen en beschikbare data 23
4.1.1. Calibratieperioden en meetpunten 23
4.1.2. Invoergegevens 23
1. Windgegevens; 2. IJsseldebieten en slibconcentraties; 3. Uitwisseling Ketelmeer/IJsselmeer; 4. Overige debieten
4.1.3. Initiële waarden en vaste gegevens 26
4.1.4. Calibratiegegevens 27
1. Slibconcentraties; 2. Cd/Sc-gehalten; 3. Fractiegrootteverdelingen; 2. Sedimentatiefluxen
4.2. Calibratie en validatie van het waterbewegingsmodel 29
4.3. Calibratie van het slibtransportmodel 33
4.3.1. Opzet van de schattingsprocedure 33
4.3.2. Resultaten van de calibratie 35
1. Gevoeligheidsanalyse; 2. Schattingen

4.4. Validatie van het slibtransportmodel 39
4.4.1. Slibconcentraties 39
4.4.2. Cd/Sc-verhoudingen. 39
4.4.3. Fractiegrootteverdeling zwevend slib 42
4.4.4. Ruimtelijke spreiding slib 44
4.5. Diskussie 44

5. SLIBTRANSPORT BIJ VERSCHILLENDE INRICHTINGS- EN BEHEERSVARIANTEN . . 45
5.1. Alternatieven voor inrichting en beheer van het Ketelmeer 45
5.1.1. Variant 1: continuering huidig beheer 45
5.1.2. Variant 2: aanleg van twee scheepvaartgeulen 45
5.1.3. Variant 3: verwijdering van alle verontreinigde bodemslib 45
5.1.4. Variant 4: grootschalige zandwinning 45
5.1.5. Variant 5: bodemsanering langs de randen van het Ketelmeer 45
5.1.6. Variant 6: aanleg eilanden 46
5.1.7. Variant 7: bodemsanering op enkele voor de recreatie belangrijke lokaties 46
5.1.8. Variant 8: combinatie van enkele ingrepen 46
5.2. Simulatie van het slibtransport 46
5.2.1. Opzet van de simulaties 46
5.2.2. Resultaten van de simulaties 47
5.2.3. Analyse van de resultaten 53
1. Sedimentatiepatronen; 2. Verspreiding van bodemslib; 3. Transport naar het IJsselmeer
5.2.4. Extrapolatie van de resultaten: lange termijn ontwikkelingen 56
1. Sedimentatiepatronen; 2. Afdekking van het sediment met IJsselslib en transport van bodemslib naar het IJsselmeer

6. CONCLUSIES 61
6.1. Het slibtransportmodel STRESS-2d voor het Ketelmeer 61
6.1.1. Toepassing van STRESS-2d op het Ketelmeer 61
6.1.2. Calibratie van het model 62
6.2. Resultaten van simulaties met het slibtransportmodel 63
6.2.1. Analyse van de huidige situatie 63
6.2.2. Analyse van de effecten van inrichtings- en beheersvarianten 64
6.2.3. Lange termijn ontwikkelingen 65

LITERATUUR 67

BIJLAGE I. Vergelijking van de aan de bodem optredende schuifspanning t.g.v. windgolven en stroming
BIJLAGE II. Simulaties met verschillende beschrijvingen van de open rand bij de Ketelbrug
BIJLAGE III. Simulaties met verschillende bodemmodellen
BIJLAGE IV. Windgegevens voor de calibratie-perioden
BIJLAGE V. Slibconcentraties in IJsselwater gedurende de calibratie-perioden
BIJLAGE VI. Invoervariabelen voor de jaarberekeningen over 1987
BIJLAGE VII. Overdracht van simulatieresultaten van STRESS-2d naar IMPAQT
BIJLAGE VIII. Extrapolatie van de resultaten van de berekeningen met het slibtransportmodel voor de verschillende inrichtings- en beheersvarianten

SAMENVATTING

In het kader van de werkzaamheden van de Projectgroep Ketelmeer is door Rijkswaterstaat, Directie Flevoland gewerkt aan een studie naar het slibtransport in het Ketelmeer. Een belangrijk deel van dit onderzoek is uitbesteed aan de Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer, Sectie Waterkwaliteitsbeheer. In dit onderzoek wordt het door beide instanties in samenwerking ontwikkelde slibtransportmodel STRESS-2d toegepast op het Ketelmeer.

Probleemstelling

In de waterbodem van het Ketelmeer is een grote hoeveelheid sterk verontreinigd slib aanwezig. Nu de kwaliteit van het aangevoerde IJsselslib verbetert ten opzichte van de kwaliteit in de jaren 60 en 70, is er sprake van het risico dat opwerveling van oud, verontreinigd slib nog jarenlang de kwaliteit van het water in het Ketelmeer, en via transport ook in het IJsselmeer, negatief beïnvloedt. Dit kan ertoe leiden dat na verloop van tijd de verontreinigde sliblagen afgedekt worden met schoner slib. Het is echter de vraag of dit overal in het Ketelmeer gebeurt, en of geplande ingrepen in het Ketelmeer invloed hebben op de mate van afdekking.

Doelstelling

De doelstelling van de studie was de operationalisering van het slibtransportmodel STRESS-2d voor het Ketelmeer en het uitvoeren van simulaties met dit model teneinde het slibtransport in de huidige situatie te beschrijven. Tevens dienden simulaties te worden uitgevoerd die de effecten van verschillende inrichtings- en beheersvarianten op het slibtransport laten zien. Tot slot worden de resultaten van deze studie gebruikt in simulatieberekeningen met het model IMPAQT, dat het transport van microverontreinigingen beschrijft.

Het slibtransportmodel STRESS-2d voor het Ketelmeer

Het slibtransportmodel STRESS-2d bevat procesbeschrijvingen voor de waterbeweging met daaraan gekoppeld advectief en dispersief transport van slib, voor resuspensie en sedimentatie, en voor een aantal bodemprocessen (turbatie, erosie en consolidatie). Op pragmatische wijze is voor enkele gebieden in het Ketelmeer erosie door scheepvaart en stroming ingevoerd.

Belangrijke randvoorwaarden worden tijdvariërend ingevoerd. Voor het Ketelmeer zijn dit met name de windsnelheid en -richting, de aanvoer van water en zwevende stof via de IJssel en de uitwisseling tussen Ketelmeer en IJsselmeer. Dit laatste is gegenereerd met een waterbewegingsmodel voor het IJsselmeer.

Het slib is in het model opgesplitst in een drietal fracties, onderscheiden op basis van verschillende gemiddelde valsnelheden. Hiernaast is elke fractie nog eens opgesplitst in een deel IJsselslib (recent aangevoerd IJsselmateriaal) en bodemslib (slib dat in de huidige situatie reeds op de bodem van het Ketelmeer aanwezig is). Een niet opwervelbare zandfractie is toegevoegd om de situatie in het zandige oostelijke deel van het Ketelmeer goed te kunnen beschrijven.

Calibratie en validatie van het model

De calibratie van het model is in twee fasen uitgevoerd. Eerst is voor zover mogelijk het waterbewegingsmodel gecalibreerd. Hierbij bleek de betrouwbaarheid van de simulaties grotendeels af te hangen van de betrouwbaarheid van de opgelegde randvoorwaarden, met name de uitwisseling tussen Ketelmeer en IJsselmeer ter plekke van de Ketelbrug. Deze randvoorwaarden, gegenereerd

met het IJsselmeermodel, bleken in de simulaties enige afwijkingen tussen gemeten en gesimuleerde waterpeilen te veroorzaken. De afwijkingen blijven echter binnen aanvaardbare marges. Over de gesimuleerde stromingspatronen kan weinig gezegd worden aangezien hiervan geen meetgegevens beschikbaar zijn.

De tweede calibratiefase betrof het slibtransportgedeelte van het model. Dit is gecalibreerd met behulp van een zorgvuldige schattingsprocedure. Hierin is gebruik gemaakt van een vereenvoudigde versie van STRESS-2d. Er zijn waarden voor de modelparameters gevonden, waarmee de slibhuishouding in het Ketelmeer goed beschreven kan worden.

Gedurende de validatie van het (gedetailleerde) slibtransportmodel bleek eveneens dat de gevonden parameterset een goede beschrijving oplevert van slibconcentraties in het Ketelmeer. Ook de gesimuleerde verhouding IJsselslib/bodemslib ligt in de goede orde van grootte ten opzichte van gemeten Cd/Sc-verhoudingen, die een maat zijn voor deze verhouding.

Simulatieberekeningen

Met het gecalibreerde en gevalideerde model zijn simulatieberekeningen uitgevoerd. Voor een achttal inrichtings- en beheersvarianten voor het Ketelmeer is steeds een jaar gesimuleerd. De varianten zijn:

1 Continuering van het huidige beheer (instandhouden van de huidige situatie, tevens het referentiepunt voor vergelijking met de overige varianten);
2 Aanleg van twee scheepvaartgeulen;
3 Verwijdering van de gehele sliblaag (inclusief het slib in de diepe putten);
4 Aanleg van een grote, diepe zandwinput;
5 Sanering van de randen van het Ketelmeer, waar dikke pakketten verontreinigd slib liggen;
6 Aanleg van drie recreatie-eilanden tussen Ketelhaven en Schokkerhaven;
7 Sanering van voor de recreatie belangrijke gebieden rond de havens;
8 Combinatie van de varianten 2, 6 en 7.

Analyse van de huidige situatie

De simulatie voor de eerste variant, waarbij de huidige situatie in stand gehouden wordt, wijst uit dat het grootste deel van het Ketelmeer gekarakteriseerd wordt door netto sedimentatie van slib. Voor het hele Ketelmeer geldt dat de gesimuleerde slibretentie in de orde van 60% is. Dit betekent dat er in principe sprake is van een algehele afdekking van oudere sliblagen ("bodemslib") met recenter aangevoerd slib ("IJsselslib"). Met name in het centrale deel van het Ketelmeer is er echter sprake van een sterke afwisseling tussen perioden met netto sedimentatie en perioden met netto erosie. Dit leidt in de simulatie tot een relatief grote hoeveelheid bodemslib in de toplaag van het sediment.

Het slib dat in de huidige situatie naar het IJsselmeer getransporteerd wordt, bestaat volgens de simulatie voor ongeveer 30% uit bodemslib. Het naar het IJsselmeer getransporteerde slib bestaat vrijwel geheel uit de lichtste fractie.

Analyse van de effecten van inrichtings- en beheersvarianten

De conclusies kunnen als volgt worden samengevat:

- De aanleg van twee scheepvaartgeulen (variant 2) heeft alleen het effect dat de erosie door scheepvaart wordt vervangen door een sterke sedimentatie in de uitgediepte geulen. De sedimentatiesnelheid in het westelijke deel van het Ketelmeer neemt door het afvangen van veel IJsselslib in de geulen af. De hoeveelheid bodemslib neemt alleen rond de geul iets af. Het transport van slib naar het IJsselmeer verandert nauwelijks door deze ingreep;
- De verwijdering van de gehele sliblaag (variant 3) heeft uiteraard tot gevolg dat het transport van bodemslib geheel verdwijnt. Door de algehele verdieping van het Ketelmeer verandert het sedimentatiepatroon enigszins, waarbij sedimentatie meer verschuift naar het centrale deel van het Ketelmeer. De retentie van slib wordt verhoogd tot 62%;
- Aanleg van een zandwinput (variant 4) leidt tot een sterke slibvang in deze put. De slibretentie in het Ketelmeer neemt daardoor toe tot ongeveer 64%. In het gebied ten westen van de put neemt daardoor de netto sedimentatie af met ongeveer 40%. Omdat ook veel IJsselslib in de put sedimenteert, wordt de afdekking van oude sliblagen belangrijk gereduceerd;
- De sanering van de randen van het Ketelmeer, waar dikke pakketten verontreinigd slib liggen (variant 5) heeft nauwelijks effect op de slibbalans van het Ketelmeer. Het transport van bodemslib naar het IJsselmeer neemt met ca. 25% af. Op de ontwikkeling van de waterbodemkwaliteit in niet gesaneerde gebieden heeft de ingreep nauwelijks effect.
- De aanleg van een drietal recreatie-eilanden tussen Ketelhaven en Schokkerhaven (variant 6) leidt tot een verhoogde sedimentatie rond de eilanden. Dit heeft een beperkt effect op de slibbalans van het Ketelmeer en heeft een geringe vermindering (10%) van het transport van bodemslib naar het IJsselmeer tot gevolg. Een ander gevolg is een reductie van de afdekking van bodemslib in westelijker delen van het meer.
- De sanering van enkele voor de recreatie belangrijke lokaties, rond Ketelhaven en Schokkerhaven (variant 7) is lokaal van betekenis, omdat een nabij Ketelhaven gelegen gebied omslaat van een erosie- naar een sedimentatiegebied. Verder zijn de effecten klein.
- De combinatie van drie varianten, waarbij zowel scheepvaartgeulen worden uitgediept, als eilanden aangelegd en havens gesaneerd (variant 8) leidt tot een grote sedimentatie in het midden-oostelijk deel van het Ketelmeer; daar waar de ingrepen gepland zijn. Op de slibbalans blijft het effect klein. Er is door deze combinatie van maatregelen enige vermindering van het transport van bodemslib naar het IJsselmeer te verwachten (20%). De afdekking van bodemslib in het midden-westen en westen van het meer wordt gereduceerd.

Een belangrijke algemene conclusie die uit deze simulaties volgt, is dat uitdieping van specifieke gebieden in het Ketelmeer, er in alle gevallen toe leidt dat de afdekking van oude sliblagen in gebieden westelijk van de uitgediepte delen belangrijk gereduceerd kan worden. Hoe dichter de uitgediepte gebieden bij de IJsselmonding liggen, hoe meer IJsselslib afgevangen wordt. Dit kan de kwaliteit van het afdekkende slib in meer westelijk gelegen gebieden negatief beïnvloeden.

Lange termijn ontwikkelingen

Met behulp van een eenvoudig rekenmodel is nagegaan hoe sedimentatiepatronen en de hoeveelheid bodemslib in water en sediment veranderen op een termijn van 20 jaar.

Verwacht wordt dat gesimuleerde sedimentatiepatronen over het algemeen niet veranderen op deze termijn. Bij ingrepen kan er lokaal echter een dermate hoge netto sedimentatieflux optreden, dat op kortere termijn de bodemligging zo verandert, dat dit invloed heeft op de resuspensie/sedimentatie van slib. Verwacht wordt dat in uitgediepte scheepvaartgeulen (variant 2) reeds na 6 jaar in sommige gedeelten weer erosie door scheepvaart kan optreden. In gesaneerde delen (randen, havens) is de sedimentatie zo hoog dat in sommige delen na ongeveer 10 jaar weer

resuspensie van slib op het huidige niveau verwacht kan worden. De aangelegde zandwinput (variant 4) sedimenteert niet vol binnen enkele decennia. Rond aangelegde eilanden (varianten 6 en 8) sedimenteert waarschijnlijk nog ongeveer 10 jaar veel slib, waarna een evenwichtsdiepte bereikt zal zijn.
Bij continuering van het huidig beheer zal ook op de middellange termijn een grote hoeveelheid bodemslib naar het IJsselmeer getransporteerd worden. Zelfs na 20 jaar is het gehalte bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem (buiten de vaarroute) nog 20 tot 55 %. De belangrijkste bronnen zijn de opwerveling in het midden van het Ketelmeer en die in de vaarroute. In de vaarroute is een netto erosie opgelegd, zodat hier nimmer afdekking van oud vervuild bodemslib gesimuleerd wordt. Op basis van de simulatieresultaten wordt verwacht dat na ca. 10 jaar uitputting van de laag vervuild bodemslib optreedt.
Met uitzondering van de variant 'volledige sanering' (variant 3) geldt dat alle gesimuleerde varianten op de langere termijn tot zeer geringe verschillen met variant 1 (continuering huidig beheer) of zelfs een verslechtering van de situatie leiden. Dit laatste geldt de varianten die tot gevolg hebben dat grote hoeveelheden IJsselslib in het midden-oostelijk deel, dicht bij de monding van de IJssel, sedimenteren, waardoor de afdekking in westelijker gelegen delen van het Ketelmeer beperkt wordt.

1. INLEIDING

1.1. Algemene inleiding en probleemstelling

De bodem van het Ketelmeer is ernstig vervuild met o.a. zware metalen en organische microverontreinigingen. De ecologische effecten van deze vervuiling komen o.a. tot uiting in een relatief laag aantal muggelarven in de waterbodem van het Ketelmeer en een relatief groot aantal misvormingen bij de in het sediment levende muggelarven (V&W, 1989).

Zware metalen en organische microverontreinigingen zijn in watersystemen veelal sterk gebonden aan deeltjes; bodemmateriaal of in het water zwevend materiaal. Het verontreinigde slib is in de loop der jaren aangevoerd met het IJsselwater. Door de lage stroomsnelheid in het Ketelmeer ten opzichte van die in de IJssel en de relatief grote verblijftijd heeft het Ketelmeer sinds zijn ontstaan gefunctioneerd als een bezinkbassin voor dit verontreinigde slib. De dikte van deze laag verontreinigd slib is op sommige plaatsen meer dan een meter (Driebergen, 1988).

Door saneringsmaatregelen is de vervuiling van het Rijn- en IJsselwater in de afgelopen 10 jaren sterk afgenomen (Van Broekhoven, 1987). Daardoor is ook de kwaliteit van het slib dat sedimenteert in het Ketelmeer verbeterd. Het aanwezige vervuilde bodemslib is in deze situatie in potentie een belangrijke interne belasting van het watersysteem met verontreinigingen. Nalevering van zware metalen en organische microverontreinigingen kan onder meer plaatsvinden door diffusie vanuit de waterbodem. Een belangrijk mechanisme is echter ook de nalevering via opwerveling van vervuild bodemmateriaal. Deze interne belasting is mede van belang voor de belasting van het IJsselmeer met zware metalen en microverontreinigingen. In dit verband zijn processen als resuspensie/erosie en sedimentatie, advectief en dispersief horizontaal transport, maar ook processen die zich in de bovenste lagen van de bodem afspelen, zoals bioturbatie, van belang.

Mede met het oog op de inrichting en eventuele sanering van het Ketelmeer is het van belang inzicht te hebben in de mate waarin opwerveling van het relatief vervuilde 'oude' bodemslib plaatsvindt, en in de lokaties binnen het Ketelmeer waar deze opwerveling een rol speelt.

In 1988 is, in opdracht van de Projectgroep Ketelmeer van Rijkswaterstaat, een onderzoek gestart naar het slibtransport en het transport van microverontreinigingen in het Ketelmeer. Het onderzoek betreft een modelmatige studie. Deze studie is uitgevoerd door Rijkswaterstaat, Directie Flevoland. Belangrijke onderdelen van de studie zijn uitbesteed aan de Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer, Sectie Waterkwaliteitsbeheer. Dit betreft voornamelijk het uitvoeren van een modelstudie naar het slibtransport in het Ketelmeer. Het daaraan gekoppelde transport van microverontreinigingen is uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium, met behulp van het model IMPAQT (Smits en Sonneveldt, 1991).

1.2. Doelstelling van het onderzoek

Voor het beschrijven van het slibtransport in ondiepe meren is door Blom en Van Duin (Lijklema e.a., in druk, Blom, 1989, Van Duin, in voorb., Van Duin & Blom, in voorb.) een twee-dimensionaal model ontwikkeld (STRESS-2d). Dit model beschrijft de sedimentatie en resuspensie van slib en het horizontaal transport door advectie en dispersie.

Doelstelling van dit onderzoek is het ontwikkelen van een operationeel model voor het slibtransport in het Ketelmeer, op basis van STRESS-2d. Een tweede onderdeel van de doelstelling is het analyseren van de huidige situatie met betrekking tot het transport van verontreinigd slib in het

Ketelmeer, mede via modelberekeningen. Ten derde dienen de effecten van verschillende, door de Projectgroep Ketelmeer vastgestelde alternatieven voor de sanering, inrichting en het beheer van het Ketelmeer te worden gesimuleerd. Als vierde belangrijke doelstelling geldt dat in deze studie de noodzakelijke data m.b.t. de slibhuishouding van het Ketelmeer t.b.v. de simulatie van het gedrag en transport van microverontreinigingen met het model IMPAQT gegenereerd moeten worden.

1.3. Werkwijze en rapportage

Een belangrijk onderdeel van het project was het verzamelen van gegevens, nodig voor de calibratie en validatie van het model. De veldmetingen zijn uitgevoerd in de periode juli 1988 tot en met juli 1989 door Rijkswaterstaat, Directie Flevoland. De resultaten van de veldmetingen zijn gerapporteerd in Toet (1991).

In dit rapport wordt achtereenvolgens ingegaan op de voor het transport van verontreinigd slib belangrijkste processen en de beschrijving daarvan in het gebruikte model STRESS-2d (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 wordt de toepassing van STRESS-2d op de situatie in het Ketelmeer besproken. In dit hoofdstuk wordt onder andere ingegaan op de gebruikte tijd- en plaatsstap, de opgelegde randvoorwaarden en de in het model toegepaste indeling van slib in fracties.

In hoofdstuk 4 wordt de calibratie en validatie van het slibtransportmodel besproken. Er wordt ingegaan op de calibratie en validatie van het (sub)model voor de waterbeweging, het (sub)model voor resuspensie/sedimentatie en het bodemmodel. Daarna wordt de validatie van het slibtransportmodel als geheel besproken.

Tot slot worden in hoofdstuk 5 de simulatieberekeningen besproken, waarin een achttal varianten betreffende de sanering en inrichting van het Ketelmeer doorgerekend worden. Eén van die varianten is het continueren van het huidige beheer.

Het rapport wordt afgesloten met enkele conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 6).

2. STRESS-2D; EEN 2-DIMENSIONAAL MODEL VOOR SEDIMENTTRANSPORT

2.1. Modellering slibtransport

Voor het beschrijven van het slibtransport in het Ketelmeer is een kwantitatief inzicht nodig in de belangrijkste processen, die het slibtransport bepalen. Het gaat dan om het horizontaal slibtransport, waarvoor inzicht in de waterbeweging (advectie en dispersie) nodig is; om het verticaal slibtransport (sedimentatie en resuspensie), om de processen die de beschikbaarheid van resuspendeerbaar materiaal in de toplaag van de bodem beschrijven en, indien van toepassing, de produktie en afbraak van zwevende stof en bodemslib. Er is in deze studie vanuit gegaan dat produktie en afbraak van zwevende stof en bodemslib van ondergeschikt belang zijn.

Door Verhagen (1988) is reeds een eenvoudig model (IJSLIB) ontwikkeld waarmee slibtransport in het systeem Ketelmeer/IJsselmeer gesimuleerd kan worden. Dit model werkt echter met een dermate grofmazig netwerk, dat de resultaten voor het Ketelmeer weinig waarde hebben. Bovendien heeft de calibratie van het genoemde model plaatsgevonden op basis van een minimaal aantal meetwaarden, waardoor de betrouwbaarheid van de simulatieberekeningen gering is.

Voor het beschrijven van het slibtransport in het Ketelmeer is in deze studie gebruik gemaakt van het model STRESS-2d, een 2-dimensionaal model voor de simulatie van het sedimenttransport in ondiepe meren. Het model is ontwikkeld door Blom en Van Duin (Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer, Sectie Waterkwaliteitsbeheer), Rijkswaterstaat, Directie Flevoland en in overleg met Rijkswaterstaat, Dienst Informatieverwerking (tegenwoordig: ICIM). Het model wordt uitgebreid beschreven door Lijklema e.a. (in press) en Blom (1989).

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de belangrijkste processen die het slibtransport bepalen en de daarvoor geldende relaties. Vervolgens worden enkele karakteristieken van het gebruikte model STRESS-2d gegeven.

2.2. Processen in het slibtransportmodel STRESS-2d

2.2.1. Waterbeweging

De waterbeweging, de advectieve stroming en de dispersie, wordt in systemen als het Ketelmeer bepaald door de aan- en afvoer van water en door wind geïnduceerde stroming binnen het systeem. Voor het berekenen van de waterbeweging, met name de stroomsnelheid en de verandering in waterpeil, gelden de continuïteitsvergelijking (gebaseerd op de wet van behoud van massa) en de impulsvergelijking (gebaseerd op de wet van behoud van impuls). Deze vergelijkingen worden, in 2-dimensionale vorm besproken door Stelling (1984) en Blom (1989).

Belangrijke grootheden voor het berekenen van de waterbeweging zijn, naast vanzelfsprekend de aan- en afvoer van water, de energieoverdracht van de wind naar het water (de windschuifspanning) en het energieverlies veroorzaakt door de weerstand van de bodem (schuifspanning aan de bodem). Voor het berekenen van de waterbeweging is het dus noodzakelijk de waarde van de schuifspanningscoëfficiënt (windstress-factor) voor de energieoverdracht van lucht naar water en de schuifspanningscoëfficiënt voor de energieoverdracht van water naar bodem (de Chezy- of Manningwaarde) vast te stellen. De waarde van deze parameters worden in praktijk door middel van calibratie vastgesteld.

Voor de dispersie in het watersysteem is de dispersiecoëfficiënt van belang. De dispersiecoëfficiënt is onder andere afhankelijk van de windsnelheid (door wind veroorzaakte turbulentie) en de stroomsnelheid (door stroming veroorzaakte turbulentie en verticale stroomsnelheidsverschillen). In een twee-dimensionale benadering, zoals ook in deze studie toegepast, wordt veelal gewerkt met een samengestelde dispersiecoëfficiënt, die op gebouwd is uit een constante dispersiecoëfficiënt en een bijdrage die evenredig is met de (eventueel door wind geïnduceerde) stroomsnelheid. Dit is het geval in WAQUA, het waterbewegingsmodel dat in deze studie gebruikt wordt. (Stelling, 1984, DIV, 1987). De waarde van beide parameters kan middels calibratie vastgesteld worden. Vaak worden ook de waarden gebruikt die gevonden zijn in andere, vergelijkbare watersystemen.

In sommige gevallen kan de schatting van de aan- en afvoer van water bij de beschrijving van de waterbeweging problemen opleveren. Dit is onder meer het geval in de situatie in het Ketelmeer, waar een open verbinding met het IJsselmeer bestaat (bij de Ketelbrug). Hier kan, afhankelijk van de windrichting en -snelheid, zowel water het Ketelmeer in- als uitstromen. Bovendien zijn geen betrouwbare gegevens bekend over de debieten op verschillende momenten. In een dergelijke situatie moeten randvoorwaarden gegenereerd worden. In dit geval bijvoorbeeld zijn randvoorwaarden gegenereerd met een waterbewegingsmodel voor het IJsselmeer.

2.2.2. Resuspensie

De resuspensie/erosie van bodemslib wordt veroorzaakt door de waterbeweging op het grensvlak water-bodem. Waterbeweging kan worden veroorzaakt door stroming, golven, scheepvaart, enz.. Van belang kan ook de opwerveling van bodemslib door in de bodem woelende organismen (ook vissen) zijn.

In bijlage I is een vergelijking uitgewerkt voor de schuifspanningen aan de bodem ten gevolge van windgolven, door wind geïnduceerde stroming en stroming ten gevolge van de aanvoer van IJsselwater. Bij grotere strijklengten en hogere windsnelheden overheerst de schuifspanning ten gevolge van windgolven. In andere gevallen is de schuifspanning door stroming nagenoeg gelijk of zelfs groter dan die veroorzaakt door windgolven. Er mag echter niet zonder meer geconcludeerd worden dat resuspensie door stroming in deze situaties belangrijker is dan resuspensie door windgolven. Bij langzame, weinig turbulente stroming, vormt zich direct boven het oppervlak van de bodem een grenslaag waar de stroomsnelheid nihil is. In het geval van windgolven, die juist gekenmerkt worden door een turbulent karakter, is dit niet het geval. Dus ook bij lagere windsnelheden zal in het grootste deel van het Ketelmeer de resuspensie voornamelijk veroorzaakt worden door windgolven. Lokaal kan erosie door stroming belangrijk zijn, met name in de diepe mondingen van de IJssel. Hiervoor is in het model lokale erosie door stroming ingevoerd, op een zeer pragmatische wijze (zie 3.5.1)

Kappe e.a. (1989 en 1991) schat dat de resuspensie/erosie veroorzaakt door scheepvaart relatief klein is ten opzichte van de resuspensie veroorzaakt door windgolven. Opgemerkt kan worden dat lokaal (b.v. in de vaargeul) de bijdrage van scheepvaart wel groot kan zijn. Om die reden is er voor gekozen ook erosie door scheepvaart in het model op te nemen, zij het op een zeer eenvoudige wijze (zie 3.5.2).

Blom (1989) schat dat de bijdrage van in de bodem woelende vissen aan de opwerveling van slib in het Veluwemeer eveneens klein is vergeleken met de door windgolven veroorzaakte resuspensie/erosie. Ook in het Ketelmeer is de bijdrage van in de bodem woelende organismen aan de slibopwerveling naar verwachting klein.

Op basis van bovenstaande kan gesteld worden dat de resuspensie/erosie van slib in het Ketelmeer grotendeels veroorzaakt wordt door windgolven.

De door wind veroorzaakte golfbeweging op het water kan worden berekend m.b.v de door CERC (1977) gegeven relaties. Deze relaties beschrijven de golfhoogte, -lengte en -periode, als functie van de windsnelheid, strijklengte van de wind over het water en de diepte van het water. In deze studie zijn deze relaties gebruikt, waarbij een 'aangepaste' windsnelheid volgens Bouws (1986) gebruikt is. Het gebruikte golfmodel is door Van Duin (in voorbereiding) getoetst aan gegevens verzameld in het Markermeer. Het model geeft een goede beschrijving van de golfkarakteristieken. Voor een beschrijving van het golfmodel wordt verwezen naar Van Duin (in voorbereiding) of Blom (1989).

De golfbeweging op het water veroorzaakt in ondiep water een orbitaalbeweging nabij de bodem. Deze orbitaalbeweging kan worden gekarakteriseerd door de maximale orbitaalsnelheid ($u_{b,max}$). Deze is een functie van onder meer de waterdiepte, golfhoogte, -periode en -lengte, en kan worden beschreven met (Phillips, 1966):

$$u_{b,max} = (\pi.H/T) \ / \ \sinh [\ 2.\pi.D/L_d]$$

$u_{b,max}$: maximale orbitaalsnelheid (m/s)
H : golfhoogte (m)
T : golfperiode (s)
D : diepte van het water (m)
L_d : golflengte in ondiep water (m)

De orbitaalbeweging veroorzaakt een schuifspanning aan de bodem (zie Blom, 1989). De hierdoor veroorzaakte energieoverdracht kan tot opwerveling van deeltjes leiden. De resuspensieflux kan worden beschreven als functie van de schuifspanning aan de bodem (o.a. Sheng en Lick (1979), Partheniades en Krone (zie Luettich, 1987), Mignot (idem)). Andere auteurs relateren de resuspensie direct aan de maximale orbitaalsnelheid aan de bodem. Een veel gebruikte relatie is die van Lam & Jacquet (1976):

$$\Phi_r = k\ [\rho_w.\rho_s/(\rho_s-\rho_w)]\ [(u_{b,max}-u_{b,cr})/u_{b,cr}] \qquad \text{als } u_{b,max} > u_{b,cr}$$

$$\Phi_r = 0 \qquad \text{als } u_{b,max} < u_{b,cr}$$

Φ_r : resuspensieflux (kg/m^2.s)
k : evenredigheidsconstante (-)
ρ_w : soortelijk gewicht water (kg/m^3)
ρ_s : soortelijk gewicht slib (kg/m^3)
$u_{b,cr}$: kritische orbitaalsnelheid (m/s)

De kritische orbitaalsnelheid is in deze relatie de minimale orbitaalsnelheid die nodig is om deeltjes op te wervelen.

Deze relatie van Lam & Jaquet blijkt voor het Veluwemeer goede resultaten op te leveren, beter dan de andere geteste beschrijvingen (Sheng & Lick, Partheniades & Krone en Mignot, zie Blom, 1989).

In watersystemen met zeer gemakkelijk opwervelbaar materiaal in de toplaag van de bodem is de kritische orbitaalsnelheid nagenoeg gelijk aan 0 (Blom, 1989). Omdat in de relatie van Lam & Jacquet gedeeld wordt door de kritische orbitaalsnelheid kunnen in deze systemen problemen ontstaan bij de toepassing van de relatie. De relatie kan, om deze problemen te omzeilen, worden vereenvoudigd tot (Blom, 1989):

$$\Phi_r = K\,(u_{b,max} - u_{b,cr}) \qquad \text{als } u_{b,max} > u_{b,cr}$$
$$\Phi_r = 0 \qquad \text{als } u_{b,max} < u_{b,cr}$$

K : evenredigheidsconstante (kg/m^3)

De evenredigheidsconstante (K) is een functie van de dichtheid van het sediment, de cohesie in de toplaag van de bodem (mede verantwoordelijk voor het bestaan van een kritische orbitaalsnelheid) en andere eigenschappen van het deeltje en de waterbodem. Tussen sedimentdeeltjes onderling en tussen verschillende waterbodems kunnen dan ook grote verschillen in de waarde van K en de waarde van $u_{b,cr}$ voorkomen.

De waarde van K en de kritische orbitaalsnelheid kunnen door calibratie bepaald worden. Het direct meten van deze grootheden is moeilijk.

2.2.3. Sedimentatie

Voor de beschrijving van sedimentatie van zwevende stof zijn in de literatuur in grote lijnen twee verschillende benaderingen te vinden. De eerste benadering, veelal toegepast bij de beschrijving van zand- en slibtransport in rivieren, gaat uit van het concept dat sedimentatie van zwevende stof alleen plaats vindt bij lage schuifspanning aan de bodem. Sedimentatie en resuspensie komen niet gelijktijdig voor. Als er sedimentatie plaatsvindt is deze evenredig met de valsnelheid en de zwevende stofconcentratie nabij de bodem (b.v. Partheniades en Krone, (zie Luettich, 1987)). Een tweede benadering, veelal toegepast in onderzoek in meren, gaat uit van het concept dat er altijd sedimentatie optreedt. Sedimentatie en resuspensie kunnen dus gelijktijdig optreden. De sedimentatieflux is in deze benadering gelijk aan het produkt van valsnelheid en zwevende stofconcentratie nabij de bodem (b.v. Aalderink et al, 1984, Brinkman en Van Raaphorst, 1986).

De tweede benadering levert over het algemeen in meren redelijke resultaten op. Blom (1989) heeft verschillende modellen voor resuspensie en sedimentatie vergeleken met behulp van gegevens verzameld in het Veluwemeer. Modellen op basis van de tweede benadering bleken betere simulatieresultaten op te leveren dan een model op basis van de eerste benadering.

De sedimentatieflux wordt beschreven met:

$$\Phi_s = w_s * c_b$$

Φ_s : sedimentatieflux ($kg/m^2.s$)
w_s : valsnelheid (m/s)
c_b : zwevende stofconcentratie nabij de bodem (kg/m^3)

Als de turbulentie in het systeem groot is, in verhouding met de valsnelheid, zal er sprake zijn van een volledige menging over de verticaal. Aangetoond kan worden dat geen concentratiegradienten te verwachten zijn als geldt dat:

$w_s * D << E_t$

w_s : valsnelheid (m/s)
D : diepte (m)
E_t : (totale) verticale dispersiecoëfficiënt (m^2/s)

De dispersie in water wordt bepaald door de verticale dispersiecoëfficiënt en de zogenaamde equivalente dispersiecoëfficiënt voor de verticale dispersie ten gevolge van windgolven. De totale dispersiecoëfficiënt is in Nederlandse meren ca. 2 - 10 • 10^{-4} m^2/s (Lijklema (z.j.)). In de Nederlandse ondiepe meren is over het algemeen sprake van volledige menging over de verticaal voor de relatief fijne slibfracties met een valsnelheid in de orde van 10^{-6} - 10^{-4} m/s, waar het in deze studie om gaat.

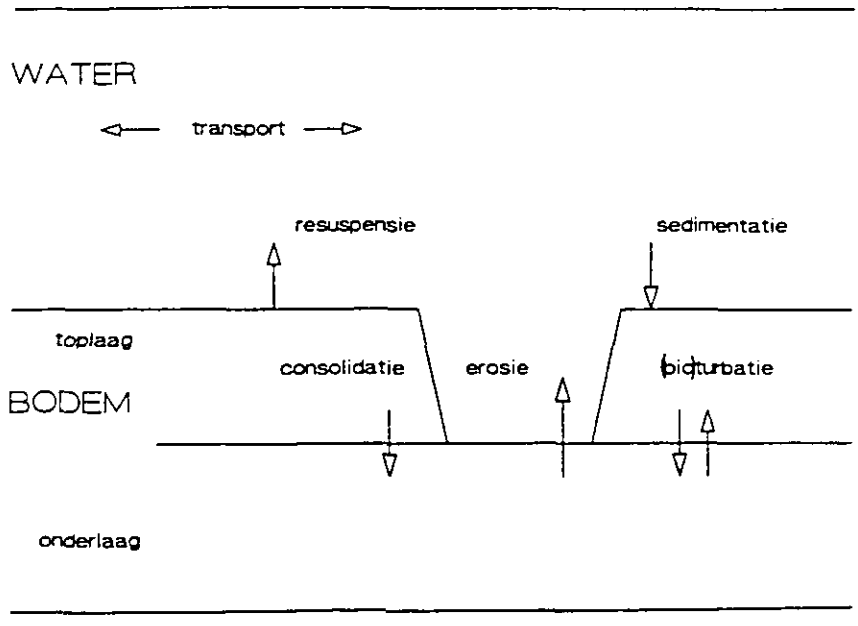
Kappe e.a. (1989) hebben zwevende stofconcentraties gemeten op verschillende diepten in het Ketelmeer. Uit deze metingen volgt dat ook in het Ketelmeer geen belangrijke concentratieverschillen over de verticaal voorkomen.

Als er sprake is van voldoende menging over de verticaal is de sedimentatieflux bij benadering gelijk aan de valsnelheid maal de zwevende stofconcentratie in de bulk van het water.

Tussen zwevende stof-deeltjes onderling kunnen grote verschillen in valsnelheid voorkomen. De valsnelheid is onder andere afhankelijk van de soortelijke massa van het materiaal, de diameter van deeltjes en de vorm van deeltjes.

2.2.4. Erosie en (bio-)turbatie

In het voorgaande werd vooral ingegaan op het slibtransport in en de waterfase. Van belang zijn echter ook de processen die zich in de bodem afspelen. In figuur 2.1. worden deze processen schematisch weergegeven.



Figuur 2.1. Schematisch overzicht van de processen in STRESS-2d.

De waterbodem bestaat grofweg uit een dunne waterige toplaag met daar onder een minder vocht bevattende, cohesieve onderlaag. Het materiaal in de toplaag is onderhevig aan resuspensie en wordt aangevuld door sedimentatie.

In perioden van langdurige resuspensie kan uitputting van de toplaag plaatsvinden. Als het makkelijk resuspendeerbare materiaal uit de toplaag uitgeput is kan in beginsel erosie van de onderliggende bodem plaatsvinden. Omdat het materiaal in deze laag cohesiever is zal erosie van de onderliggende laag moeilijker zijn, d.w.z. meer energie vergen, dan resuspensie van materiaal uit het waterige toplaagje.

In perioden waarin de sedimentatie overheerst zal het in het toplaagje aanwezige materiaal begraven worden door nieuw sedimenterend materiaal. Dit leidt tot consolidatie van gesedimenteerd materiaal.

In de bodem komen vele soorten organismen voor. Deze organismen zorgen o.a. voor menging van materiaal tussen top- en onderlaag. Ook door andere mechanismen treedt menging tussen de bodemlagen op. De som van al deze processen is in het model de turbatie genoemd.

Belangrijke grootheden voor het beschrijven van de bodem en de processen die daarin plaatsvinden zijn de dikte van de in de bodem te onderscheiden lagen, m.n. de dikte van de toplaag, de (bio)turbatiesnelheid en de consolidatiesnelheid.

2.2.5. Massabalansen voor water en bodem

De hierboven beschreven processen, advectief en dispersief horizontaal transport, resuspensie/erosie en sedimentatie, consolidatie en (bio-)turbatie zijn te beschouwen als de belangrijkste processen voor het transport van slib in systemen als het Ketelmeer. Voor de waterfase kan een 2 dimensionale massabalans worden opgesteld. Ook voor de bodemtoplaag en de onderliggende bodem kan een massabalans worden opgesteld. Deze massabalansen worden gegeven in het kader op de volgende bladzijde.

2.3. Enkele karakteristieken van het model STRESS-2d

Voor het oplossen van de impulsvergelijkingen en continuïteitsvergelijking, waarmee de waterbeweging en de veranderingen in de waterstanden berekend worden, en de drie hiervoor genoemde massabalansen, waarmee de concentratie zwevende stof in de waterfase en de concentratie en dikte van de bodemlagen kunnen worden berekend, wordt het model STRESS-2d gebruikt.

STRESS-2d is een twee-dimensionaal model voor het simuleren van sedimenttransport in ondiepe meren. Bij de ontwikkeling van het model is uitgegaan van het bestaande waterbewegingsmodel WAQUA, ontwikkeld door Rijkswaterstaat, de Dienst Informatieverwerking, en het Waterloopkundig Laboratorium. Voor wat betreft het berekenen van de waterbeweging werd de in WAQUA gebruikte benadering gehandhaafd. De in WAQUA gebruikte benadering wordt beschreven door Stelling (1984). Het model STRESS-2d wordt beschreven door Van Duin & Blom (in voorb.), Lijklema e.a. (in press) en Blom (1989).

In deze paragraaf zullen beide modellen niet uitgebreid besproken worden. Hiervoor wordt verwezen naar de bovengenoemde literatuur. Er zal in de volgende paragrafen ingegaan worden op enkele aspecten, die voor deze studie van bijzonder belang zijn.

Massabalansen voor water, bodemtoplaag en onderliggende bodem

Voor de waterfase:

$$\frac{\partial(H\,C)}{\partial t} + \frac{\partial(H\,U\,C)}{\partial x} + \frac{\partial(H\,V\,C)}{\partial y} + \frac{\partial\,(H\,D_x\,\partial C)}{\partial x\,\partial x} - \frac{\partial\,(H\,D_y\,\partial C)}{\partial y\,\partial y} = \Phi_r - \Phi_s$$

Voor de bodem-toplaag:

$$\frac{\partial(H_T\,C)}{\partial t} = \Phi_s - \Phi_r + \Phi_e - \Phi_c + \Phi_t$$

Voor de onderliggende bodemlaag:

$$\frac{\partial(H_O\,C)}{\partial t} = - \Phi_e + \Phi_c - \Phi_t$$

C	:	concentratie zwevende stof/slib (kg/m^3)
D_x	:	dieptegem. dispersiecoëf. in x-richting (m^2/s)
D_y	:	dieptegem. dispersiecoëf. in y-richting (m^2/s)
H	:	waterdiepte (m)
H_O	:	dikte van de onderliggende bodemlaag (m)
H_T	:	dikte van de bodemtoplaag (m)
t	:	tijd (s)
U	:	dieptegem. stroomsnelheid in x-richting (m/s)
V	:	dieptegem. stroomsnelheid in y-richting (m/s)
x	:	x-coördinaat, plaats/afstand in het 2dh-vlak (m)
y	:	y-coördinaat, plaats/afstand in het 2dh-vlak (m)
Φ_c	:	consolidatieflux (kg/m^2.s)
Φ_e	:	erosieflux (kg/m^2.s); hier beschouwd als transport van materiaal van de onderliggende laag naar de toplaag
Φ_r	:	resuspensieflux (kg/m^2.s)
Φ_s	:	sedimentatieflux (kg/m^2.s)
Φ_t	:	(bio-)turbatieflux (kg/m^2.s)

Bioturbatie wordt hier benaderd als een proces waarbij per tijds- en oppervlakte-eenheid een zekere massa droge stof uit de onderlaag naar de toplaag wordt getransporteerd en vice versa. In dit model is de massa (op droge stof basis) die van onder- naar toplaag wordt getransporteerd gelijk aan die welke van top naar onderlaag wordt getransporteerd.

2.3.1. Indeling zwevende stof in fracties

Om de diversiteit die in zwevende stof en bodemslib voorkomt voor wat betreft de valsnelheid en de eigenschappen van belang voor de resuspensie te benaderen, kan in het model STRESS-2d een indeling in maximaal 7 slibfracties gehanteerd worden. Voor elke fractie moeten vanzelfsprekend belangrijke grootheden als de valsnelheid (W_s), de resuspensie-evenredigheidsconstante (K) en de kritische orbitaalsnelheid ($u_{b,cr}$) worden opgegeven.

2.3.2. Verschillende benaderingen voor de bodem

In het model STRESS-2d zijn drie verschillende beschrijvingen voor de gelaagdheid van de bodem mogelijk.

De eerste benadering gaat uit van één bodemlaag met een oneindige dikte. Dit betekent dat de samenstelling van deze laag in het model niet variabel is. Er zal dan ook geen uitputting van de hoeveelheid materiaal beschikbaar voor resuspensie optreden.

De tweede benadering gaat uit van één bodemlaag met een eindige dikte. Voor deze bodemlaag wordt een massabalans bijgehouden. Zowel samenstelling als dikte van de laag zijn variabel. De dikte en samenstelling van de laag worden bepaald door de initiële dikte en samenstelling en de resuspensie en sedimentatie gedurende de simulatieperiode.

In de derde benadering bestaan twee bodemlagen: een dunne toplaag en een daar onder liggende bodemlaag. Voor beide lagen wordt een massabalans bijgehouden. De samenstelling en dikte van beide lagen zijn variabel. Voor de dikte en samenstelling zijn, naast de initiële waarden, resuspensie, sedimentatie, erosie, consolidatie en (bio-)turbatie van belang.

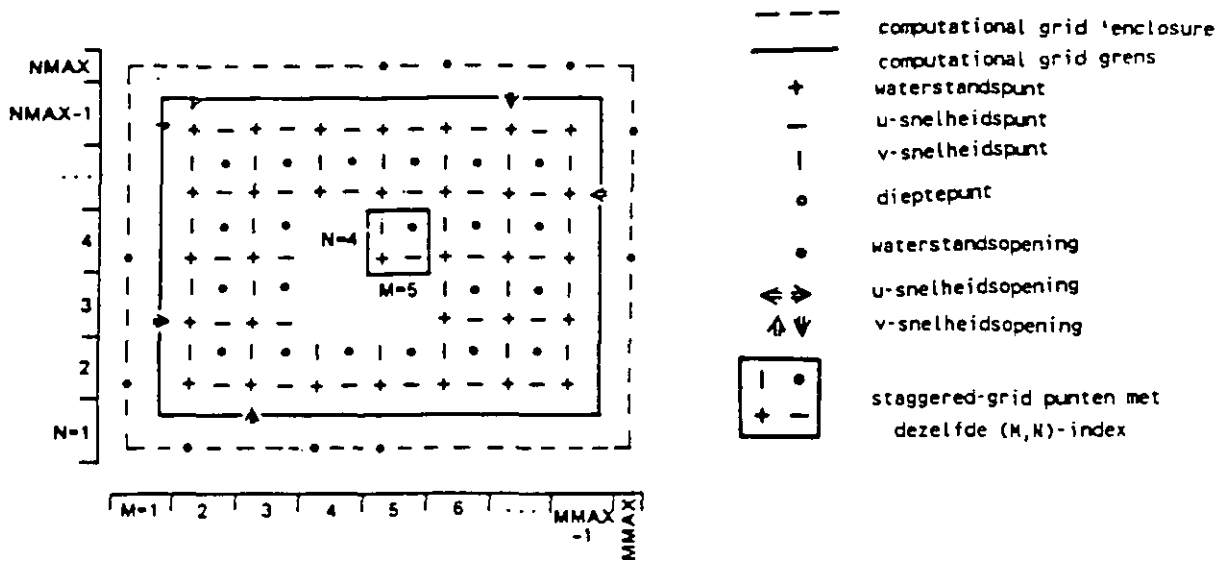
Het zal duidelijk zijn dat het laatstgenoemde bodemmodel een benadering is die de feitelijke situatie het best benaderd. Er geldt echter dat voor deze benadering ook veel meer informatie over de bodem en de processen die zich daarin afspelen noodzakelijk is.

2.3.3. Numerieke aspecten

In het model STRESS-2d wordt het watersysteem opgedeeld in een groot aantal rechthoekige segmenten. Deze segmenten zijn allen van gelijke grootte. In STRESS-2d wordt, in aansluiting op WAQUA, gerekend met een 'staggered grid', zie figuur 2.2. Dit betekent dat de punten in het systeem waarvoor stroomsnelheden in x- en y-richting worden berekend, en de punten waarvoor diepte opgegeven worden, een halve 'plaatsstap' verschoven liggen ten opzichte van punten waarvoor waterstanden, zwevende stofconcentraties, dikte en samenstelling van de bodemlagen berekend worden. Een gevolg hiervan is onder andere dat op de punten waarop waterstand, concentraties en dergelijke berekend worden, gerekend wordt met de gemiddelde diepte van de omliggende dieptepunten. Dit kan problemen opleveren in situaties met grote gradiënten in de diepte, zoals rond geulen en langs de oever. De mate waarin is voornamelijk afhankelijk van de grootte van de plaatsstap in verhouding tot de grootte van de gradiënten die in het systeem voorkomen.

Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking die de massabalans voor zwevende stof in het water beschrijft wordt een Alternating Direction Implicit rekenschema gebruikt (Stelling, 1984). In de berekening is de sedimentatieflux onderdeel van het impliciete deel van de vergelijking.

De resuspensie is echter onderdeel van het expliciete deel van de berekening, hetgeen mogelijk is omdat de resuspensie niet direct afhankelijk is van de actuele zwevende stofconcentratie.



Figuur 2.2. Het 'staggered grid'.

Voor het oplossen van de massabalansen voor de twee onderscheiden bodemlagen wordt een eenvoudig expliciet rekenschema gebruikt. Consolidatie treedt op indien de dikte van de toplaag groter wordt dan een opgelegde kritische dikte. Erosie, het opvullen van de toplaag met materiaal uit de onderliggende laag in het geval van uitputting van die toplaag door resuspensie, is een proces dat gestart wordt als de uitputting van de bodemtoplaag zover voortgeschreden is dat de kritische dikte wordt bereikt. De snelheid waarmee consolidatie en erosie plaatsvinden kan door de gebruiker opgegeven worden. De erosiesnelheid is, in tegenstelling tot de resuspensiesnelheid, in het model niet gerelateerd aan de orbitaalsnelheid aan de bodem, maar een constante. Turbatie wordt in het model opgelegd als een uitwisseling, met een opgelegde snelheid, tussen toplaag en onderlaag.

De tijdstap wordt beperkt door fysische eigenschappen van het systeem, zoals de dynamiek in de windsnelheid en -richting, maar ook door de gekozen numerieke benadering, onder meer in verband met de stabiliteit van het model.

2.3.4. Belangrijke invoergegevens

Voor de simulatieberekeningen met het model STRESS-2d is een groot aantal invoergegevens, constanten en variabelen, noodzakelijk. Enkele belangrijke zijn de diepte op de roosterpunten, de initiële dikte en samenstelling van de bodemlagen en de voor het berekenen van waterbeweging, resuspensie, sedimentatie en processen in de bodem belangrijke constanten (onder andere dichtheden van slib en water, porositeit van bodemlagen).

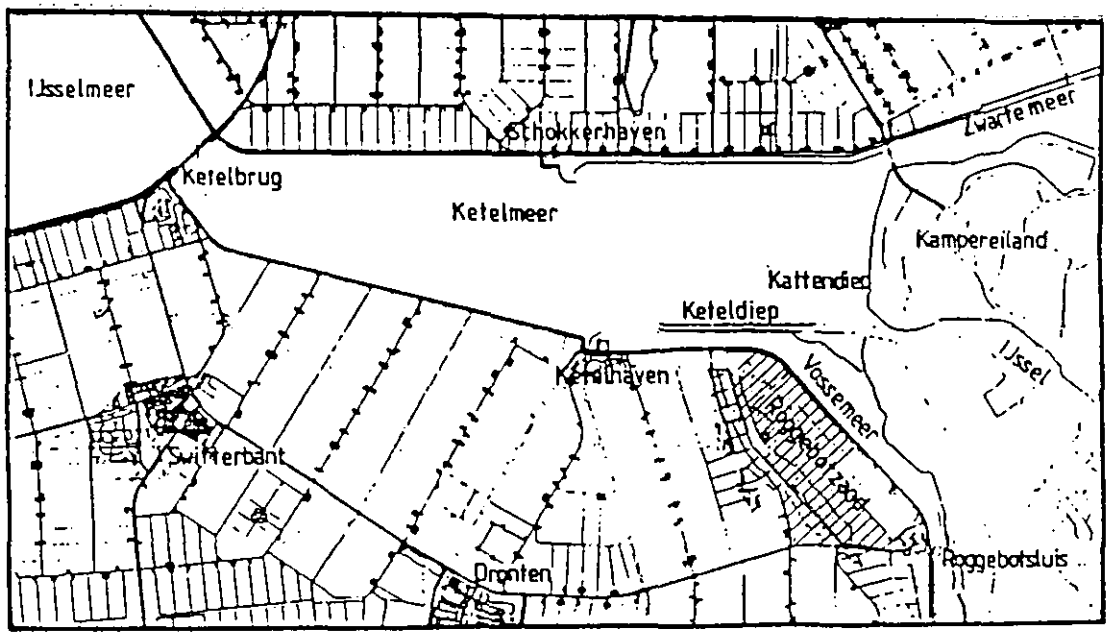
Voor de modelberekeningen belangrijke variabelen zijn ook de in- en uitstromende debieten en, voor wat betreft de instroming, de concentraties van verschillende zwevende stoffracties daarin.

Voor de modelberekeningen zijn de windsnelheid en -richting van belang voor het berekenen van de waterbeweging en de resuspensie. Voor het berekenen van de resuspensie is het ook noodzakelijk in elk segment voor elke windrichting de strijklengte van de wind over het water te kennen. Eén van de vereenvoudigingen die in het model zijn gemaakt is het feit dat de strijklengte slechts opgegeven wordt als gemiddelde waarde voor een beperkt aantal (b.v. 16) windrichtingssectoren.

3. TOEPASSING VAN STRESS-2D OP HET KETELMEER

3.1. Karakterisering van het Ketelmeer

Het Ketelmeer is ontstaan in 1953, toen de dijken van Oostelijk Flevoland gesloten werden. Een Kenmerkend punt in het Ketelmeer is de vertakte IJsselmonding: scheepvaart gebruikt vooral de zuidelijke tak, het Keteldiep, waar een vaargeul gegraven is die tot ver in het Ketelmeer doorloopt. De noordelijke tak, het Kattendiep, is veel ondieper. Twee belangrijke havens liggen in het Ketelmeer: Schokkerhaven aan de kant van de Noordoostpolder, en Ketelhaven aan de kant van Flevoland. Verbindingen zijn er met het Zwarte meer, met het Vossemeer en met het IJsselmeer. De Ketelbrug, die over de grens tussen Ketelmeer en IJsselmeer loopt, is een belangrijke verkeersverbinding.



Figuur 3.1. Overzicht van het Ketelmeergebied.

Een aantal algemene kenmerken van het Ketelmeer zijn weergegeven in tabel 3.1. Cruciale gegevens zijn met name de hydrologische, welke in belangrijke mate het slibtransport bepalen.

De netto waterbeweging, en daarmee het horizontale transport van slib, wordt voornamelijk bepaald door de instroming van IJsselwater. De IJsseldebieten variëren sterk, globaal tussen 200 en 700 m^3/s. Gemiddeld is het inkomende debiet in de orde van 300 m^3/s. Daarbij komt nog een kleine stroom vanuit andere bronnen, voornamelijk het Zwarte Meer. Deze leveren gemiddeld echter niet meer dan ca. 10 % van het inkomende debiet. De verblijftijd van het water in het Ketelmeer ligt gemiddeld op ongeveer 3 dagen, met een gemiddelde stroomsnelheid rond 5 cm/s.

De korte verblijftijd is er de reden van dat algengroei in het Ketelmeer nauwelijks te verwachten is. Een aanwijzing hiervoor wordt gegeven door de metingen (zie Toet, 1991), waarin wel verhoogde organische-stof-gehalten in de zomer gevonden worden, maar die zijn grotendeels al aanwezig in het instromende IJsselwater. Algengroei (= produktie van zwevende stof) vindt waarschijnlijk wel in de IJssel plaats, maar nauwelijks in het Ketelmeer.

Tabel 3.1. Karakteristieken van het Ketelmeer.

Afmetingen	
oppervlakte	38 km^2
lengte	12 km
breedte	max. 4 km
diepte	0 - 6 m (gemiddeld ca. 2.70 m, in putten tot > 10 m)
volume	ca. $1 \cdot 10^8$ m^3
Hydrologie	
aanvoer IJssel	200 - 700 m^3/s (gemiddeld ca. 300 m^3/s)
aanvoer Zwarte meer	gemiddeld 44 m^3/s
aanvoer Vossemeer	gemiddeld 5 m^3/s
aanvoer gemaal Colijn	gemiddeld 3 m^3/s
verblijftijd	2 - 6 dagen (gemiddeld ca. 3 dagen)
stroomsnelheid	2 - 7 cm/s (gemiddeld ca. 5 cm/s)

Door de lage stroomsnelheid functioneert het Ketelmeer als een bezinkbassin voor IJsselslib. In de periode vanaf 1953 is ca. 15 miljoen m^3 slib gesedimenteerd in het Ketelmeer. Dit levert een sliblaag op in het centrale en westelijke deel van het Ketelmeer van gemiddeld ca. 55 cm (Winkels en Van Diem, 1991, Winkels, Van Diem & Driebergen, 1990). In diepe (zandwin)putten ligt vaak enkele meters slib. In luwe gedeelten, met name langs de zuidelijke dijk, is eveneens veel slib gesedimenteerd. Rond Ketelhaven is daardoor een sliblaag van meer dan een meter ontstaan.

De verschillen in diepte zijn groot in het Ketelmeer. Het oostelijke deel is over het algemeen zeer ondiep, tot 2 meter (uitgezonderd de vaargeulen in het Keteldiep en Kattendiep). De opwerveling van lichte slibdeeltjes is hier dermate groot, dat de waterbodem voornamelijk uit zand bestaat. Dit zand is eveneens door de IJssel aangevoerd, en is dicht bij de mondingen bezonken. Verder westwaarts in het Ketelmeer neemt de diepte toe, tot 4 à 5 meter nabij de Ketelbrug.

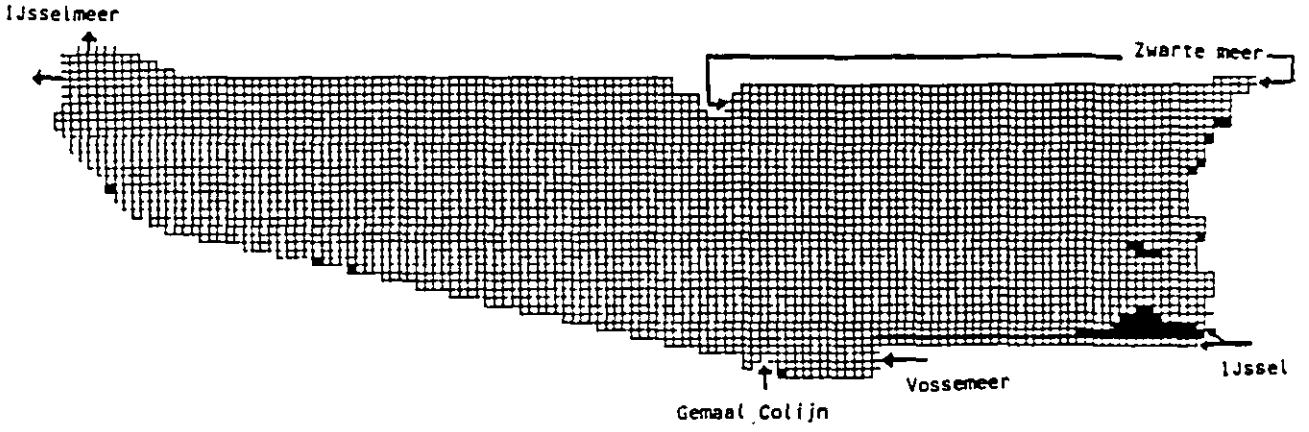
3.2. Schematisatie van het Ketelmeer

3.2.1. Tijdstap en plaatsstap

Elementaire grootheden in het slibtransportmodel STRESS-2D zijn de tijdstap en de plaatsstap, ofwel de grootte van de gridcellen. De keuze van deze parameters is onderhevig aan zowel theoretische als praktische beperkingen. Theoretisch gezien bepalen tijdstap en celgrootte gezamenlijk de stabiliteit en nauwkeurigheid (o.a. numerieke dispersie) van het model (zie o.a. Langerak e.a., 1987). De praktische beperking is met name de rekentijd en het geheugengebruik van de computer. Uit theoretisch oogpunt is een zo klein mogelijke tijd- en ruimtestap gewenst, uit praktisch oogpunt dienen beide parameters juist zo groot mogelijk gekozen te worden.

De celgrootte wordt met name bepaald door de ruimtelijke variatie in diepte. De belangrijkste grootheid daarin is de breedte van de vaargeulen in het Ketelmeer. De smalste geul is het Keteldiep.

Het Keteldiep zelf is niet in de schematisatie opgenomen, maar wel de voortzetting van de vaargeul vanaf het Keteldiep verder het Ketelmeer in. Deze geul heeft een breedte van ongeveer 100 meter. Om die reden is een celgrootte van 100 x 100 meter gekozen. Dit levert een totaal grid op van 6570 punten (45 x 146 cellen), waarvan er 4054 actief zijn, deze vallen binnen het 'computational grid'. Het zo verkregen grid ziet er uit als in figuur 3.1.



Figuur 3.2. Ruimtelijke schematisatie van het Ketelmeer. Zwarte cellen zijn permanent droge punten. De in- en uitstroomopeningen zijn aangegeven met pijlen.

De tijdstap is in deze studie gezet op 10 minuten. Theoretisch zou de tijdstap in de orde van enkele minuten moeten liggen voor nauwkeurige en stabiele resultaten (zie Langerak e.a., 1987). De gekozen grootte is een maximum om een stabiel verloop van de simulaties te garanderen onder alle omstandigheden. Een kleinere tijdstap leverde in een testrun sneller stabiliteit op, maar geen significant verschil in uitkomsten.

3.2.2. De diepte-schematisatie

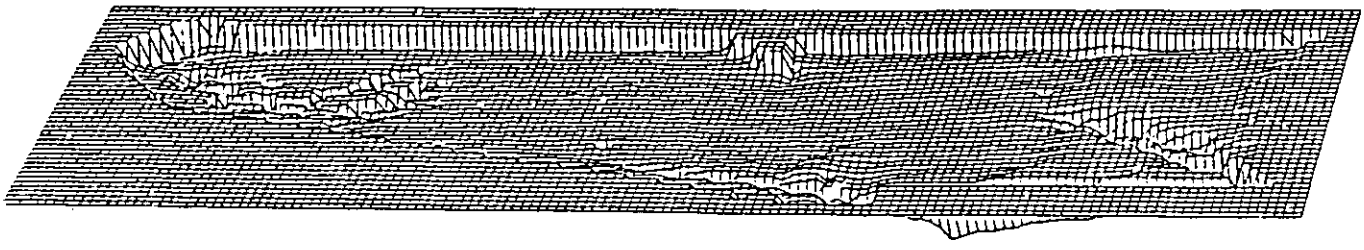
Voor elke cel is de diepte opgegeven ten opzichte van het referentievlak, waarvoor in deze studie het N.A.P-niveau is gebruikt. De gegevens voor de diepte-schematisatie zijn afkomstig van de meest recente lodingskaarten van Rijkswaterstaat (1987). Onzekerheid omtrent de diepte is er vooral in het ondiepe oostelijke gedeelte van het Ketelmeer, waar lodingsvaartuigen niet kunnen komen. Hier zijn diepten geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd vanuit de beperkte gegevens.

Belangrijk voor het slibtransport is met name de beschrijving van de vaargeulen en de diepe zandwinputten in het Ketelmeer. Geulen en putten hebben invloed op de waterbeweging, en zijn door hun diepte tevens gebieden waar de netto-sedimentatie hoog kan zijn. De invloed op de waterbeweging wordt pas merkbaar in het model als de geulen of putten een omvang hebben van ongeveer 3 maal de maaswijdte, die hier op 100 meter staat. Dit geldt voor alle putten in het Ketelmeer en de belangrijkste vaargeulen, behalve de vaargeul vanaf het Keteldiep. De stroming wordt in deze vaargeul echter hoofdzakelijk bepaald door de IJsselaanvoer, zodat de waterbeweging daar vrijwel vastgelegd wordt.

Opgemerkt moet worden dat bij het berekenen van de waterbeweging in het geval van diepe

putten mogelijk fouten gemaakt worden. In een situatie waarin onder in de putten een min of meer stagnante laag voorkomt en de waterbeweging ter plaatse feitelijk plaatsvindt via de bovenste waterlaag ('kortsluitstromen') wordt de waterbeweging niet juist beschreven met een 2-dimensionale benadering zoals die in WAQUA is toegepast.

In figuur 3.2 is de gehele diepteschematisatie als 3 dimensionale figuur weergegeven. Duidelijk zichtbaar zijn de vaargeulen en de zandwinputten.



Figuur 3.3. De diepteschematisatie van het Ketelmeer.

3.2.3. De berekening van strijklengten

Voor elke gridcel moeten voor het model strijklengten berekend worden. De strijklengte varieert sterk met de windrichting, met name in een langgerekt systeem als het Ketelmeer. Dit leidt tot een relatief groot aantal sectoren waarvoor -per cel- de strijklengte moet worden berekend. Voor de Ketelmeerstudie is gekozen voor 16 sectoren van 22.5°.

De strijklengten worden berekend als een gemiddelde strijklengte over een sector (zie Van Duin, in voorb.). In een aantal stappen wordt elke sector doorlopen, waarbij de strijklengte berekend wordt. Het gemiddelde van al die strijklengte wordt de strijklengte voor die sector. Alle strijklengten voor alle cellen worden opgeslagen in een strijklengtentabel, die als invoer voor het slibtransportmodel dient.

3.2.4. De beschrijving van de open randen

De IJssel stroomt aan de oostzijde het Ketelmeer binnen, terwijl onder de Ketelbrug water het Ketelmeer weer uit stroomt. Deze punten -en enkele andere instroomopeningen- worden binnen WAQUA beschreven als open randen, dat wil zeggen randen van het model waar randvoorwaarden in de vorm van waterstanden, stroomsnelheden of debieten, al dan niet tijdvariërend opgegeven kunnen worden.

Voor de IJssel is gekozen voor een debietrand, gesplitst in een opening in het Kattendiep en een opening aan het eind van het Keteldiep. De openingen zijn zo gepositioneerd dat de stroming in het Kattendiep noordwestelijk gericht is, en in het Keteldiep westelijk. De debieten worden als tijdreeksen opgegeven.

Andere instroomopeningen worden eveneens als een debietrand gedefinieerd. De openingen zijn (zie ook figuur 3.1):

- Zwarte Meer
- Schokkerhaven (uitstroom van het Ramsdiep)
- Vossemeer
- gemaal Colijn (bij Ketelhaven)

Het grootste probleem leverde de beschrijving van de Ketelbrug-rand op. Het meest voor de hand liggend is de beschrijving als waterstandsrand, waarvoor in 1988 ook waterpeilen nabij de Ketelbrug gemeten zijn. In testruns blijkt dit op zich een goede beschrijving van waterpeilen in het Ketelmeer op te leveren. De stroomsnelheden die dan echter gesimuleerd worden in de buurt van de Ketelbrug zijn dermate dynamisch, dat aan een juiste weergave van de werkelijkheid getwijfeld moet worden (zie Toet & Blom, 1989). Derhalve is uiteindelijk gekozen voor de beschrijving van de Ketelbrug als debietrand. De debieten die ingevoerd dienen te worden kunnen gelijk gehouden worden aan de totale aanvoer van water uit alle instroomopeningen. Dit levert een nogal star stroombeeld op, hetgeen de dynamiek van de stroming rond de Ketelbrug geen recht doet. Er is daarom gekozen voor het generen van dynamische randvoorwaarden met behulp van simulatieberekeningen met een WAQUA-model van het IJsselmeer. Dit model was beschikbaar, gecalibreerd en gevalideerd (Kruitwagen, 1987). Met behulp van deze invoer wordt een compromis bereikt tussen nauwkeurigheid van de simulatie van waterpeilen en het recht doen aan de dynamiek rond de Ketelbrug. In Bijlage II is voor een korte periode een vergelijking gemaakt tussen de verschillende opties voor de beschrijving van de Ketelbrugrand.

3.3. De indeling in slibfracties

In wekelijkse water- en sedimentvalmonsters is steeds de fractieverdeling bepaald. Hierbij zijn de gehalten aan 4 of 5 fracties slib gemeten, zoals beschreven in Toet (1991). De indeling is gebaseerd op valsnelheid. Elke fractie bestaat daardoor uit deeltjes met een valsnelheid die tussen twee grenzen ligt. In het slibtransportmodel worden slechts 3 fracties ingevoerd. In totaal zijn in STRESS-2d 7 fracties toegelaten. Aangezien voor het Ketelmeer één van de doelstellingen is om een onderscheid te maken tussen 'nieuw' IJsselslib en 'oud' bodemslib, wordt van alle fracties een 'IJsselslib-deel' en een 'bodemslib-deel' als aparte fractie in het model gebracht, waardoor dus een maximum van drie aan het aantal slibfracties gesteld wordt. De 4 of 5 gemeten fracties zijn daarom teruggebracht tot drie fracties in het model, zie Toet (1991). Deze indeling is gebaseerd op een zo evenwichtig mogelijke verdeling van de massa over fracties in zwevend materiaal in water, in sedimenterend materiaal en in het sediment.

IJsselslib en bodemslib kan in het veld onderscheiden worden met behulp van de verontreinigingsgraad, waarvoor de verhouding van de gehalten aan Cadmium en Scandium gebruikt wordt (Beurskens e.a. 1988, Ten Hulscher e.a. 1990). In 4.1 wordt nader ingegaan op de mogelijkheden om met behulp van Cd/Sc-metingen het model te calibreren.

Uiteindelijk zijn in het slibmodel 7 fracties ingevoerd: 3 fracties IJsselslib, 3 fracties bodemslib en één fractie niet resuspendeerbaar zand. Deze laatste fractie is ingevoerd om te voorkomen dat in het ondiepe oostelijke gedeelte, waar het sediment grotendeels uit zand bestaat, een overmatige resuspensie berekend wordt. Deze zevende fractie is als het ware een vulfractie voor het zandige gebied in het Ketelmeer.

In tabel 3.2 is weergegeven welke fracties in het model gebruikt worden, hoe ze in het vervolg van dit rapport genoemd worden, en welke valsnelheidsgrenzen daarbij horen. In het model wordt niet gewerkt met valsnelheidsgrenzen, maar met een gemiddelde valsnelheid per fractie. Per definitie ligt deze tussen de valsnelheidsgrenzen, maar is niet automatisch gelijk aan het rekenkundig gemiddelde van de grenzen. Dit geldt met name voor de lichtste en de zwaarste fractie, die in feite geen ondergrens resp. bovengrens hebben. De valsnelheden zijn daarom beschouwd als te calibreren parameters.

Opgemerkt dient nog te worden dat er geen verschil gemaakt wordt tussen sedimentatie- en resuspensie-eigenschappen van het IJsselslib en het bodemslib. Ook qua verontreinigingsgraad hoeft er niet per definitie een strikt verschil te zijn. De scheiding is in feite gemaakt tussen slib dat in de huidige situatie door de IJssel wordt aangevoerd, en slib dat in de huidige situatie reeds aanwezig is in het Ketelmeer. Deze scheiding heeft als voornaamste oogmerk de mate van opwerveling van oud slib na te gaan. Een koppeling met verontreinigingsgraad van getransporteerd slib is slechts kwalitatief te maken, aangezien niet al het oude slib even sterk verontreinigd is. In dit rapport wordt daarom verder gesproken over 'IJsselslib' en 'bodemslib', zonder daar direct een verontreinigingsgraad aan te koppelen.

Tabel 3.2. Fracties in het slibmodel voor het Ketelmeer.

Fractie nr.	Herkomst	Valsnelheidsgrenzen
1a	IJssel	$< 40.10^{-6}$ m/s
2a	IJssel	40 - 160.10^{-6} m/s
3a	IJssel	$>160.10^{-6}$ m/s
1b	bodem	$< 40.10^{-6}$ m/s
2b	bodem	40 - 160.10^{-6} m/s
3b	bodem	$>160.10^{-6}$ m/s
4	bodem (zand)	(n.v.t.)

3.4. Keuze voor resuspensie- en bodemmodel

Op basis van de ervaringen in eerder onderzoek in het Veluwemeer (Blom, 1989) is gekozen voor het resuspensiemodel van Lam & Jaquet in aangepaste vorm (zie hoofdstuk 2). Andere modellen zijn in deze studie niet uitgetest.

Voor de uiteindelijke berekeningen is steeds gewerkt met het bodemmodel waarin twee lagen met variabele dikte worden onderscheiden. Een beperkt onderzoek naar het effect van toepassing van andere bodemmodellen heeft plaatsgevonden, zie hiervoor bijlage III. De invloed van uitputting van de toplaag is nadrukkelijk aanwezig. In verband hiermee is met name de initiële dikte van

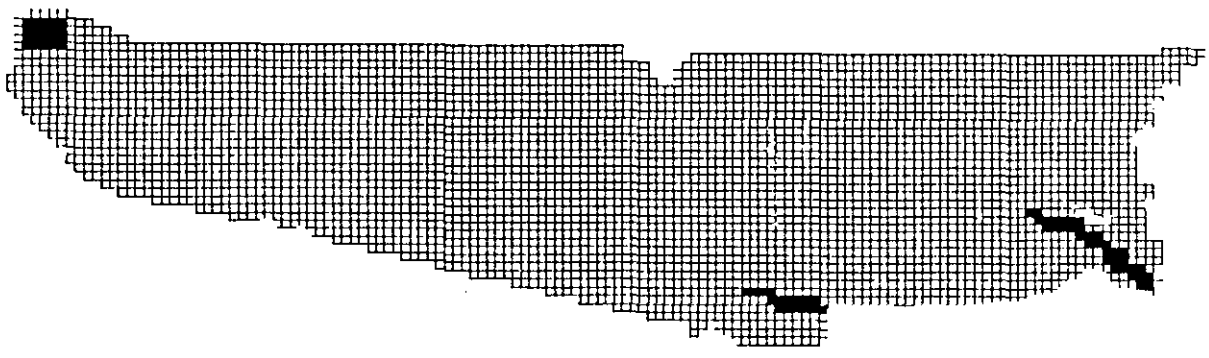
de toplaag een belangrijke parameter. De schatting hiervoor zal in het volgende hoofdstuk aan de orde komen.

3.5. Stroming en scheepvaart in het slibtransportmodel

In de beschrijving van het slibtransportmodel STRESS-2d is opgemerkt dat weliswaar wind de belangrijkste factor in de opwerveling van slib in het Ketelmeer is, maar dat lokaal opwerveling door stroming en scheepvaart belangrijk kan zijn. In de toepassing van STRESS-2d op het Ketelmeer zijn deze processen toegevoegd aan het model. De procesbeschrijvingen zijn niet gebaseerd op theorieën over erosie door stroming of scheepvaart, maar gebaseerd op het zo juist mogelijk beschrijven van de effecten van de processen. Dit betekent in beide gevallen een pragmatische oplossing, met vaste opgelegde erosiefluxen.

3.5.1. Stroming

Op een drietal lokaties in het Ketelmeer lijkt stroming een belangrijke factor te zijn die zorgt voor opwerveling van bodemmateriaal. Dit zijn de twee punten waar de IJssel het Ketelmeer in stroomt (Kattendiep en Keteldiep) en een gebied onder de Ketelbrug waar regelmatig sterke stromingen voorkomen. De stroomsnelheid op deze lokaties is gemiddeld meer dan 30 cm/s, terwijl in overige delen van het Ketelmeer zelden 10 cm/s wordt overschreden. Aangezien alle drie de lokaties een diepte hebben van meer dan 4 meter, heeft het ontbreken van resuspensie door stroming het gevolg dat sedimentatie van slib hier overheerst in modelberekeningen. Dit heeft op zijn beurt weer tot gevolg dat met name in de IJsselmondingen meer slib afgevangen wordt dan redelijkerwijs verwacht mag worden, hetgeen weer gevolgen heeft voor de gesimuleerde sedimentatiepatronen in de rest van het Ketelmeer.



Figuur 3.4. Ligging van de gridcellen waarin resuspensie door stroming is opgelegd.

Voor deze studie is ervoor gekozen resuspensie door stroming op een zeer pragmatische manier in te voeren. De gridcellen waar resuspensie door stroming plaatsvindt zijn vastgelegd (zie figuur 3.3), en in het model wordt de resuspensieflux zodanig vastgesteld dat voldoende bodemmateriaal

opgewerveld wordt om de dikte van de toplaag terug te brengen tot 0.5 mm. In simulaties leidt dit ertoe dat de tot dan toe gesimuleerde overmatige sedimentatie in de geulen vrijwel verdwijnt.

De geschetste oplossing is voor de Ketelmeerstudie voldoende nauwkeurig. Het belangrijkste oogmerk van het invoeren van resuspensie door stroming was n.l. het voorkomen van de overmatige sedimentatie in de drie genoemde gebieden. Een betere beschrijving van dit proces is theoretisch wel mogelijk door b.v. relaties tussen stroomsnelheid en bodemschuifspanningen uit de literatuur te gebruiken. Het nadeel hiervan is, dat weer enkele nieuwe parameters in het model worden ingevoerd. Het is verder de vraag of het uiteindelijke effect op de simulatieresultaten van zo'n verbeterde beschrijving erg groot zal zijn.

3.5.2. Scheepvaart

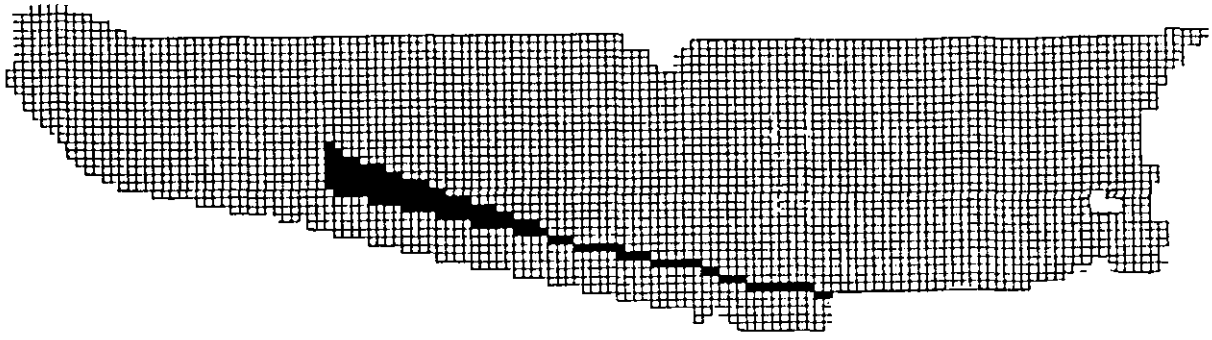
Door Kappe (1989) en Kappe en De Rijk (1991) is aangetoond dat scheepvaart een aandeel levert in de opwerveling van bodemmateriaal. De volgende resultaten zijn voor het slibtransport in het Ketelmeer van belang:

- Geschat wordt, dat jaarlijks ca. 0.6 miljoen ton slib door scheepvaart opgewerveld wordt;
- Het opgewervelde materiaal heeft de volgende eigenschappen:
  - het bestaat voor het grootste deel uit zwaar materiaal (gemiddeld valt 87% van het materiaal in de zwaarste fractie die in het model onderscheiden wordt);
  - het bestaat grotendeels uit (verontreinigd) bodemslib, gezien de hoge Cd/Sc verhouding die gevonden is;
- De belangrijkste variabele die de hoeveelheid opgewerveld materiaal lijkt te bepalen is de kielspeling: de afstand tussen de onderkant van het schip en de waterbodem. De kielspeling is m.n. afhankelijk van de scheepsklasse.

Gezien de hoeveelheid opgewerveld materiaal, en het feit dat het materiaal met name bestaat uit verontreinigd bodemslib, is het noodzakelijk om ook de gevolgen van scheepvaart in het slibtransportmodel op te nemen. In termen van het slibtransportmodel kunnen de effecten als volgt geformuleerd worden:

- De belangrijkste vaarroutes in het Ketelmeer liggen min of meer vast: van het Keteldiep uitwaaierend richting Ketelbrug. De gridcellen waarin de effecten van scheepvaart meegerekend moeten worden zijn hiermee vastgelegd. Overige, minder frequent bevaren routes (m.n. Ketelhaven-Schokkerhaven) zijn verwaarloosd;
- Omdat opwerveling door scheepvaart alleen optreedt bij kielspelingen, overeenkomend met waterdiepten in de orde van 3.5-4 meter, is het aantal gridcellen beperkt tot die cellen waar de bodemligging hoger dan 4 m-NAP ligt (waterdiepte < 3.70 m). De uiteindelijke ligging van de betreffende gridcellen is weergegeven in figuur 3.4;
- De resuspensieflux veroorzaakt door scheepvaart is zo hoog, dat aangenomen mag worden dat de toplaag vrijwel continu uitgeput is. In het model is dit ingevoerd door de resuspensieflux op de genoemde lokaties zodanig vast te stellen dat de gehele toplaag opgewerveld wordt. Er is geen rekening gehouden met het feit dat schepen incidenteel langskomen. Het aantal schepen dat het Ketelmeer bevaart is zodanig veel (ca. 7000 per jaar), dat aangenomen is dat er min of meer continu effecten van scheepvaart merkbaar zijn;
- De schuifspanning opgewekt door schepen is zo groot, dat ook materiaal uit de onderlaag opgewerveld wordt. Dit is gesimuleerd door de turbatie (menging tussen top- en onderlaag) zo groot te maken, dat de toplaag continu dezelfde samenstelling heeft als de onderlaag.

Het totaal effect van deze wijzigingen in het slibtransportmodel is dat in de vastgelegde vaarroutes een verhoogde resuspensie van met name verontreinigd bodemslib gesimuleerd wordt, overeenkomend met de situatie in werkelijkheid.



Figuur 3.5. Ligging van de gridcellen waarin de effecten van scheepvaart zijn opgelegd.

4. CALIBRATIE EN VALIDATIE VAN HET SLIBTRANSPORTMODEL

4.1. Calibratie: perioden, instellingen en beschikbare data

4.1.1. Calibratieperioden en meetpunten

In de periode 1988 - 1990 is in drie perioden intensief gemeten op het Ketelmeer. Op twee lokaties zijn continu-metingen uitgevoerd. Een beschrijving van deze metingen is te vinden in Toet (1991). Na verwerking van de resultaten zijn drie perioden van ca. 4 weken gekozen als calibratie/validatie-perioden. Voor deze perioden zijn voldoende gegevens beschikbaar: zowel invoerdata als calibratie-data. De perioden staan vermeld in tabel 4.1. Omdat de perioden steeds in een ander jaar vallen wordt in het vervolg van dit rapport gesproken over de meetperioden van 1988, 1989 resp. 1990.

Over de meetperioden is op te merken dat er in 1988 sprake was van een stormachtige periode, met windsnelheden tot 15 m/s; 1989 was veel rustiger en 1990 lag daar tussen in. De perioden in 1988 en 1989 vielen in het najaar, in 1990 in het voorjaar. Voor calibratie is de periode van 1990 het meest geschikt, gezien de beschikbare gegevens, en de windomstandigheden gedurende die periode.

Tabel 4.1. Data van de calibratieperioden.

jaar	begin/einddatum			begin/einddagnummer		
1988	18/11	-	12/12	323	-	353
1989	16/11	-	08/12	320	-	348
1990	20/04	-	07/06	110	-	158

De lokatie van de meetpunten in het Ketelmeer is weergegeven in figuur 4.1. Op de punten L1 en L2 zijn de continu-metingen uitgevoerd. Op de overige punten zijn wekelijks bemonsteringen uitgevoerd, zie Toet (1991).

4.1.2. Invoergegevens

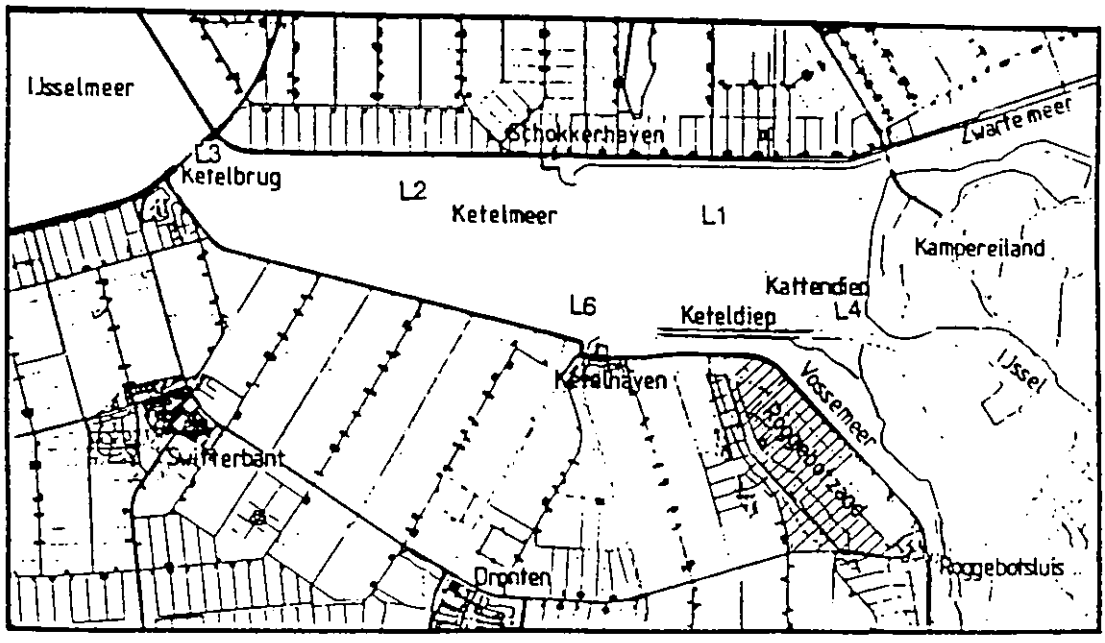
1. Windgegevens

Windsnelheid en windrichting zijn continu gemeten gedurende de meetperioden. Deze waarden (uurgemiddelden) zijn op hun betrouwbaarheid getoetst door ze te vergelijken met windgegevens van het KNMI-station Houtrib (zie Toet, 1991). De meetgegevens bleken betrouwbaar. Gaten in de meetserie zijn opgevuld via interpolatie of uit gegevens van Houtrib. De getoetste waarden zijn gebruikt als invoerwaarden voor het slibtransportmodel. De ingevoerde windgegevens zijn gegeven in de figuren in bijlage IV.

2. IJsseldebieten en slibconcentraties

IJsseldebieten zijn gemeten door Directie Gelderland van Rijkswaterstaat. Deze gemeten debieten zijn gebruikt als invoerwaarden voor het slibtransportmodel. De verdeling van het debiet over de twee instroomopeningen (Keteldiep en Kattendiep) is enigszins afhankelijk van het IJsseldebiet

(Havinga, 1984, Ubels, 1986). Voor de debieten die normaal voorkomen (< 1000 m^3/s) is een verdeling van 40% via het Keteldiep en 60% via het Kattendiep een goed gemiddelde.



Figuur 4.1. Overzicht van het Ketelmeergebied en ligging van de meetpunten. Continu-metingen zijn uitgevoerd op L1 en L2.

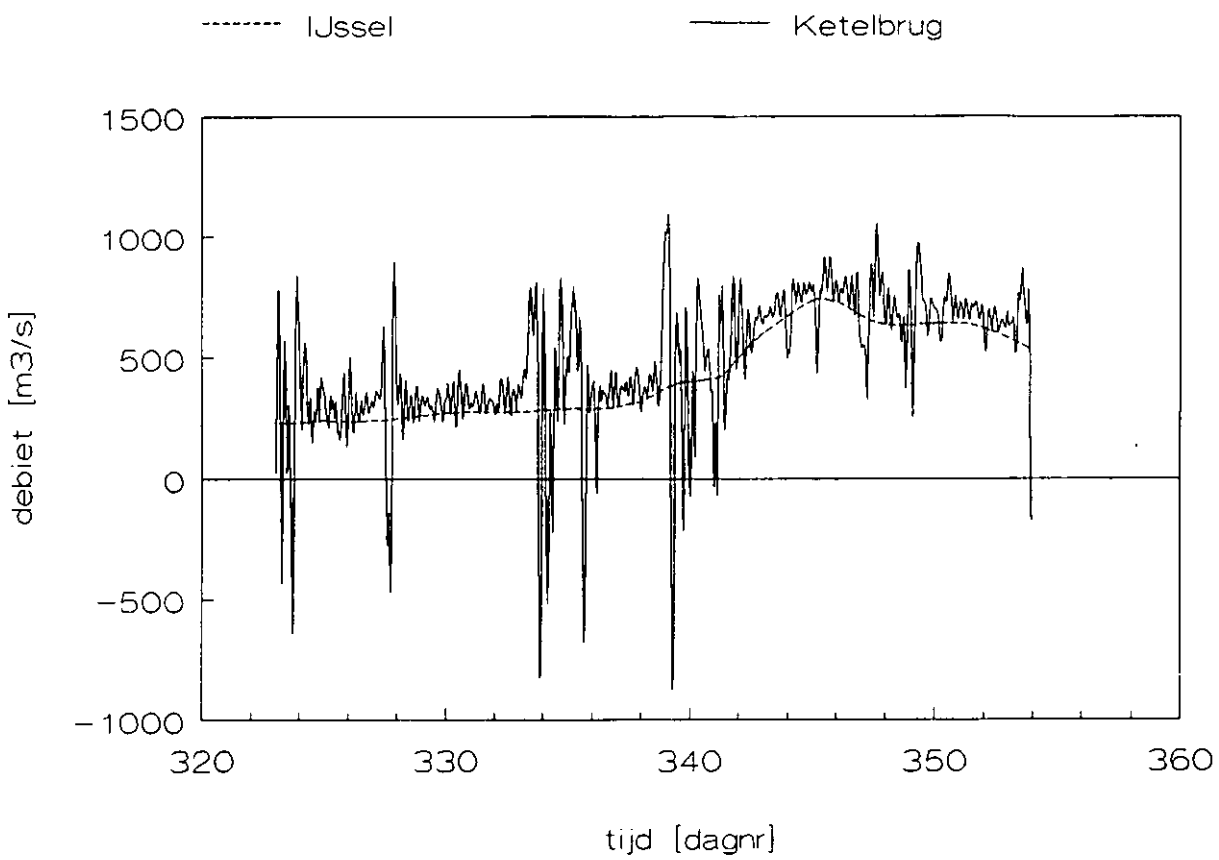
De slibconcentraties in het inkomende IJsselwater zijn gedurende een langere periode gemeten (meetpunt L4, figuur 4.1). De concentratie blijkt o.a. afhankelijk te zijn van het IJsseldebiet, maar eenduidig is die relatie niet. Om voor de calibratieperioden een juiste invoer te verkrijgen, is per meetperiode een lineair verband gezocht tussen IJsseldebiet en slibconcentratie. Via lineaire regressie zijn zo een drietal vergelijkingen gevonden, die met enige mate van betrouwbaarheid de slibconcentraties gedurende de perioden beschrijven, zie hiervoor bijlage V. Voor de fractiegrootteverdeling van het inkomende slib is de gemiddelde procentuele verdeling over de meetperiode genomen. Uit de resultaten, gegeven in tabel 4.2 en bijlage V, blijkt dat slibgehalten en fractiegrootteverdeling sterk variabel zijn in de IJssel.

Tabel 4.2. Slibconcentraties en fractiegrootteverdeling in IJsselwater.

jaar	verband IJsseldebiet ($m^3.s^{-1}$) en slibconcentratie	fractie 1	fractie 2	fractie 3
1988	$SS_{IJssel} = 7.498 + 0.0586 \cdot Q_{IJssel}$ mg/l	54.6 %	21.0 %	24.4 %
1989	$SS_{IJssel} = 2.964 + 0.0969 \cdot Q_{IJssel}$ mg/l	35.6 %	30.2 %	34.2 %
1990	$SS_{IJssel} = 37.8$ mg/l	39.7 %	25.3 %	34.0 %

3. Uitwisseling Ketelmeer/IJsselmeer

De uitwisseling tussen Ketelmeer en IJsselmeer wordt beschreven aan de hand van uitwisselingsdebieten (debietrand, zie 3.2.4). De uitwisselingsdebieten zijn gegenereerd met een WAQUA-model voor het systeem Ketelmeer/IJsselmeer. De debieten die hiermee berekend worden ter hoogte van de Ketelbrug kunnen niet direct in het model ingevoerd worden. Dit wordt veroorzaakt door het relatief kleine oppervlakte van het Ketelmeer, en de grove schematisatie van het IJsselmeermodel. Hierdoor ontstaan kleine onjuistheden in de waterbalans over het Ketelmeer, die kunnen leiden tot grote waterpeilverschillen tussen begin en eind van de simulatieperiode. Daarom zijn de gegenereerde debieten zodanig gecorrigeerd, dat de waterbalans voor het Ketelmeer kloppend is. De correctie is nooit meer dan 1%, overeenkomend met enkele m^3/s. Een voorbeeld van de uiteindelijk verkregen debieten is gegeven in figuur 4.2, voor 1988. De overige perioden vertonen een vergelijkbare dynamiek.



Figuur 4.2. Debieten van de IJssel en ter hoogte van de Ketelbrug, 1988.

De slibconcentraties die met het incidenteel instromende IJsselmeerwater mee komen zijn deels afhankelijk van de concentratie in het water dat als laatste uit het Ketelmeer gestroomd is. Ingesteld is een vaste waarde, gezet op 15 mg/l, waarin elke fractie voor een derde deel vertegenwoordigd is. Het slibtransportmodel werkt echter met een zogenaamde 'return' tijd. Als de stroming bij de Ketelbrug van richting verandert, duurt het een zekere tijd (hier ingesteld op 100 minuten) voordat IJsselmeerwater met de ingestelde concentratie inderdaad het Ketelmeer instroomt. Het model houdt er dus rekening mee dat hetzelfde water dat even tevoren het Ketelmeer is

uitgestroomd, even later weer terug kan stromen. Over de 'return' periode wordt de concentratie geïnterpoleerd tussen de laatste concentratie voordat de stroomrichting omkeerde, en de vaste IJsselmeerconcentratie. Dit heeft als voordelige consequentie dat in korte perioden van instroom van IJsselmeerwater geen al te extreme beïnvloeding van slibconcentraties nabij de Ketelbrug plaatsvindt.

4. Overige debieten

De debieten en slibconcentraties in de overige instroomopeningen zijn steeds constant gehouden. De waarden zij gegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3. Debieten en slibconcentraties overige instroomopeningen.

instroompunt	debiet (m^3/s)	slib (mg/l)	fractie 1	fractie 2	fractie 3
Zwarte meer	22.0	15	33 %	33 %	33 %
Schokkerhaven	22.0	15	33 %	33 %	33 %
Vossemeer	5.1	15	33 %	33 %	33 %
Gemaal Colijn	3.1	15	33 %	33 %	33 %

4.1.3. Initiële waarden en vaste gegevens

Het slibtransportmodel vraagt voor een aantal variabelen initiële waarden. Dit betreft waterpeilen, slibconcentraties, dikten van bodemlagen, en samenstelling van bodemlagen (fracties). Voor een aantal parameters kunnen waarden vastgesteld worden zonder noodzaak tot calibratie: de dichtheid van het slib, en de porositeit van het sediment. Al deze vastgestelde waarden zijn gegeven in tabel 4.4.

Initiële waarden voor waterpeil en slibconcentraties volgen uit de metingen van deze variabelen. De dichtheid van slib is voor alle fracties gelijk, en is gesteld op 2000 kg/m^3. Deze waarde is in vergelijking met de door Winkels & Van Diem (1989) gebruikte waarde van 2500 kg/m^{-3} laag. Op de resultaten van de simulatieberekeningen heeft dit echter nauwelijks invloed.

De dikte en samenstelling van de bodemlagen is arbitrair gezet op de gegeven waarden. De dikte van de toplaag is in simulaties sterk variabel, zodat de initiële waarde weinig invloed heeft in simulaties van enkele weken. De dikte van de onderlaag is gesteld op 40 cm in het gehele Ketelmeer. De samenstelling van de toplaag en de onderlaag is gebaseerd op de gemiddelde gemeten fractiegrootteverdeling in deze lagen (zie Toet, 1991). Voor de toplaag is een verhouding IJsselslib-bodemslib aangehouden van 40% - 60%. Deze aanname heeft zeer beperkte invloed op de simulatieresultaten. De onderlaag bestaat geheel uit bodemslib. In het oostelijke deel (de oostelijke 3 km van het meer) heeft het sediment een gewijzigde samenstelling gekregen, vanwege de grote hoeveelheid (niet opwervelbaar) zand die hier aangetroffen wordt. De zandfractie (nr. 4) heeft hier de overhand in top- en onderlaag. Bovendien is de initiële dikte van de toplaag verkleind tot ½ mm. Om een al te scherpe overgang te vermijden, is tussen het zandgebied en het slibgebied een korte overgangszone geplaatst.

Tabel 4.4. *Initiële waarden en vaste gegevens calibratie-perioden.*

variabele	jaar	totaal	fr.	1a	2a	3a	1b	2b	3b	4 *
water										
initieel waterpeil	1988	-0.32								
(m t.o.v. NAP)	1989	-0.32								
	1990	-0.15								
slib										
dichtheid slib	1988-90	2000								
(kg/m^3)										
initiële slibconc.	1988	25		10	5	4	5	1	0	0
(mg/l)	1989	10		5	1	0	3	1	0	0
	1990	25		10	5	4	5	1	0	0
sediment: toplaag										
porositeit toplaag	1988-90	0.95								
initiële dikte toplaag	1988-90	2								
(mm)	zand **	0.5								
slibconc. toplaag	1988-90	100		6.9	7.5	45.6	4.7	4.9	30.4	0
(kg/m^3)	zand **	100		1.3	2.7	26.7	0.8	1.6	13.3	53.6
sediment: onderlaag										
porositeit onderlaag	1988-90	0.70								
initiële dikte onderlaag	1988-90	400								
(mm)	zand **	400								
slibconc. onderlaag	1988-90	600		0	0	0	60	90	450	0
(kg/m^3)	zand **	600		0	0	0	10.7	20	36	533.3

* zie tabel 3.2
** oostelijke deel Ketelmeer

4.1.4. Calibratiegegevens

Calibratiegegevens zijn de gemeten waarden waaraan de uitkomsten van simulaties getoetst kunnen worden. Een aantal gegevens zal hieronder op een rijtje gezet worden. Voor figuren van de gegevens, zie Toet (1991).

1. Slibconcentraties

Slibconcentraties zijn gemeten met een interval van 8 uur, op twee meetpunten. Uitzondering is 1988, toen slechts op één punt (L2) de bemonstering gelukt is. De concentraties zijn voldoende nauwkeurig om te dienen als calibratie-gegevens. Enkele malen zijn gedurende een stormachtige dag op een twintigtal punten monsters genomen, waarin slibconcentraties bepaald zijn. Deze gegevens zijn bruikbaar ter controle van de ruimtelijke verspreiding van slib.

2. Cd/Sc-gehalten

Tijdens de meetperioden van 1989 en 1990 is dagelijks het gehalte van Cadmium en Scandium in zwevend slib bepaald. In 1989 in mengmonsters over 24 uur, in 1990 in steekmonsters om de 24 uur. De bedoeling van deze metingen was een meetreeks te verkrijgen waarmee de verhouding bodemslib/IJsselslib in water geijkt kan worden. Door Beurskens e.a. (1988) en Ten Hulscher e.a. (1989) is gevonden dat Cd een goede tracer is voor de aanwezigheid van oud, verontreinigd bodemslib in het Ketelmeerwater. Om het verschil tussen IJsselslib en bodemslib te benadrukken, dient daarvoor nog gecorrigeerd te worden voor het lutumgehalte, waarvoor het Scandium-gehalte een goede maat is. Aangetoond is, door genoemde auteurs, dat in IJsselwater momenteel een gemiddelde Cd/Sc-verhouding van 0.6 gevonden wordt, terwijl in de bodem van het Ketelmeer gemiddeld 1.7 gemeten is. Eigen metingen wijzen uit dat voor IJsselslib een gemiddelde Cd/Sc-verhouding van 0.7 geldt, en voor de onderlaag van het sediment een gemiddelde waarde van 3.2. Het verschil in de waarde voor de bodem wordt o.a. veroorzaakt door de diepte van de bemonstering. In de eigen metingen is specifiek de onderlaag bemonsterd, zoals die ook in het model onderscheiden wordt; tijdens de metingen van Beurskens e.a. is steeds de bovenste 5 cm bemonsterd. Ook in de waarnemingen van Beurskens komen Cd/Sc-verhoudingen in de bodem voor > 3. De spreiding in de waarnemingen is groot. De onnauwkeurigheid van de metingen is eveneens groot (geschat in de orde van 10 à 20%).

De waarde van de dagelijks gemeten Cd/Sc-verhoudingen moet niet overschat worden. De gegevens kunnen gebruikt worden voor calibratie van het bodemmodel: schatting van de consolidatie-, erosie- en turbatiesnelheden. In praktijk blijkt het moeilijkste punt te zijn de omzetting van gesimuleerde verhoudingen IJsselslib/bodemslib naar Cd/Sc-verhoudingen. Dit heeft te maken met bovengenoemde spreiding en onnauwkeurigheid. Een belangrijke factor is echter ook het feit dat bodemslib, zoals dat in het model wordt onderscheiden, niet geheel overeenkomt met 'oud, verontreinigd bodemslib'. De onderlaag die in het model overal 40 cm dik is, bestaat niet in het gehele Ketelmeer alleen uit sterk verontreinigd slib. In belangrijke delen is de kwaliteit reeds sterk verbeterd in de bovenste centimeters van deze onderlaag. Deze overwegingen leiden tot de conclusie dat de Cd/Sc-gegevens op zich waardevol zijn, maar voor de calibratie slechts deels geschikt zijn. De gegevens zijn als indicatieve waarden gebruikt voor de schatting van de bodemparameters.

Uit de metingen en berekeningen van Beurskens e.a. en Ten Hulscher e.a. volgt nog een belangrijk gegeven: het slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt, bestaat voor ca. 35% uit bodemslib (waarbij voor de term bodemslib weer dezelfde bovengenoemde bedenkingen gelden!). Ook deze waarde is als basis gebruikt voor de calibratie van het bodemmodel.

3. Fractiegrootteverdelingen

Gedurende de meetperioden is twee maal per week de fractiegrootteverdeling in zwevend slib, en in toplaagmateriaal bepaald. Wekelijks is ook de fractiegrootteverdeling van sedimentvalmateriaal

bepaald. Deze waarden zijn incidentele waarden, met een te geringe betrouwbaarheid voor calibratie. Deze waarden zijn daarom alleen ter controle gebruikt.

2. Sedimentatiefluxen

Wekelijks, ook gedurende de intensieve meetperioden, zijn sedimentatiefluxen gemeten m.b.v. sedimentvallen. Het is echter dubieus of deze gemeten fluxen gebruikt mogen worden als calibratiegegevens. De vangst in sedimentvallen wordt sterk beïnvloed door bijvoorbeeld langsvarende schepen (monstervaartuigen!), en mogelijk treedt in de sedimentvallen een verandering van het slib op. De fluxen zijn in de calibratie niet gebruikt.

4.2. Calibratie en validatie van het waterbewegingsmodel

Het waterbewegingsmodel (WAQUA) kan in principe geijkt worden op basis van de gemeten waterpeilen. Tijdens de meetperiode is een vrij complete set meetgegevens betreffende de waterpeilen op drie lokaties in het Ketelmeer verkregen. De calibratie van het waterbewegingsmodel is echter zeer beperkt gebleven in deze studie vanwege:

1. de dominante invloed van de opgelegde debieten bij de Ketelbrug;
2. de onmogelijkheid van een goede 2-dimensionale calibratie van de essentiële parameters;
3. het relatief ondergeschikte belang van een goede beschrijving van waterpeilen.

De punten zullen hieronder kort toegelicht worden, waarna de resultaten van de calibratie en validatie gepresenteerd zullen worden.

ad 1. Het stromingspatroon en het gemiddelde waterpeil in het Ketelmeer blijkt voor een zeer groot deel af te hangen van de stroming en waterstand in het IJsselmeer. Dit is onder meer aangetoond door de simulaties met verschillende opties voor de beschrijving van de open rand bij de Ketelbrug (zie Toet & Blom, 1989 en bijlage II). In deze studie is gekozen voor de optie waarbij de debieten bij de Ketelbrug verkregen worden uit simulaties met een grofmazig IJsselmeermodel. Dit levert op zich redelijke resultaten op, maar enkele onvolkomenheden zitten er nog in. Drie belangrijke onnauwkeurigheden zijn:

- Een kleine hoekverdraaiing van het Ketelmeer in het IJsselmeermodel, waardoor bij sommige windrichtingen een over- of onderschatting van de windopzet voorkomt;
- De grove schatting van de spuidebieten bij de Afsluitdijk (gelijk gesteld aan het totale inkomende debiet, met een correctie voor waterpeilverschillen tussen begin- en eindpunt van de simulatie in het IJsselmeer), waardoor het IJsselmeerpeil niet altijd juist wordt gesimuleerd;
- *Het kleine aantal cellen dat het Ketelmeer beslaat in het IJsselmeermodel,* waardoor randeffecten in dit model belangrijk kunnen worden. Gebleken is ook dat de verblijftijd in het Ketelmeer volgens het IJsselmeermodel veel langer is, dan in werkelijkheid het geval is (Kruitwagen, pers. med.).

De eerste twee punten kunnen mogelijk nog verbeterd worden. Het derde punt is een principieel bezwaar van het gebruik van een grofmazig model.

ad 2. De essentiële parameters voor het waterbewegingsmodel zijn de windstress-factor die de mate van windopzet bepaalt, en de bodemweerstand die een maat is voor de wrijving die stromend

water ondervindt. De windstress-factor is in principe voor het hele Ketelmeer hetzelfde. Een normale waarde is 1 à $3 \cdot 10^{-3}$. Bekend is echter ook dat de waarde sterk afhangt van de windsnelheid (Brinkman & V. Raaphorst, 1986). De invloed van de windstress-factor kan belangrijk zijn, met name bij harde wind in de lengterichting van het Ketelmeer. Te calibreren is deze parameter in het Ketelmeermodel echter niet, vanwege de dominante invloed van het IJsselmeerpeil.

Hetzelfde geldt ook voor de bodemruwheid, die opgegeven dient te worden als Manning-waarde. Deze waarde kan per gridcel opgegeven worden. Dit betekent bijvoorbeeld dat het oostelijke deel van het Ketelmeer, waar relatief veel waterplanten groeien, mogelijkerwijze een hogere bodemruwheid zou moeten krijgen. Dit kan echter alleen goed gecalibreerd worden als er goede gegevens betreffende stroomsnelheid op meerdere lokaties beschikbaar zijn, hetgeen in deze studie niet het geval is.

De schatting van deze twee parameters kan sterk verbeterd worden als het IJsselmeermodel beter gecalibreerd wordt. Wat de ruimtelijke variatie in de bodemruwheid betreft blijft het moeilijk om zonder stroomsnelheidsmetingen goede waarden te vinden.

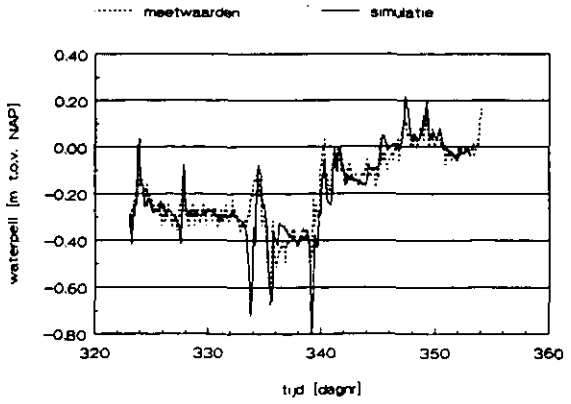
ad 3. Voor het slibtransport is een goede simulatie van waterpeilen van ondergeschikt belang. Bij een gemiddelde diepte van 3 meter, maakt een afwijking in de waterstand van enkele decimeters weinig verschil uit voor de resuspensie- en sedimentatiefluxen en de gesimuleerde concentraties slib in de waterfase.

Anders ligt het met de stroomsnelheden, en het globale stromingspatroon in het Ketelmeer. Het advectieve transport van slib in het Ketelmeer en de menging van slib over het Ketelmeer is sterk afhankelijk van dit stromingspatroon. Het slibmodel is dus wel degelijk gebaat bij een goede calibratie van met name de stroming. Met de beschikbare meetgegevens is dit echter onmogelijk in deze studie, omdat alleen waterpeilen als calibratievariabelen gemeten zijn.

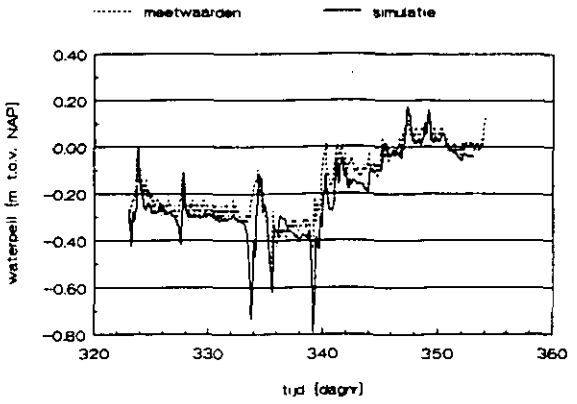
Bovengenoemde punten geven aanleiding om de calibratie van het waterbewegingsmodel zeer beperkt te houden. Voor de essentiële parameters zijn daarom literatuurwaarden genomen, en deze zijn via simulaties gecontroleerd op hun bruikbaarheid. Voor de windstress-factor is een waarde van $2.0 \cdot 10^{-3}$ genomen, en voor de globale bodemruwheid een Manning-waarde van 0.025. Om het energieverlies door wrijving en golfbreking langs de rechte damwanden te simuleren zijn langs alle rechte randen de bodemruwheden verhoogd tot 0.05. Tevens is ter plekke van de Ketelbrug de invloed van de brug (pijlers) gesimuleerd door eveneens de Manningwaarde te verhogen tot 0.05.

Met deze parameters is een validatie-simulatie uitgevoerd. De gesimuleerde waterpeilen op twee lokaties, voor de drie meetperioden, zijn uitgezet in de figuren 4.3 t/m 4.6, tezamen met de gemeten waarden. Opvallende punten zijn:

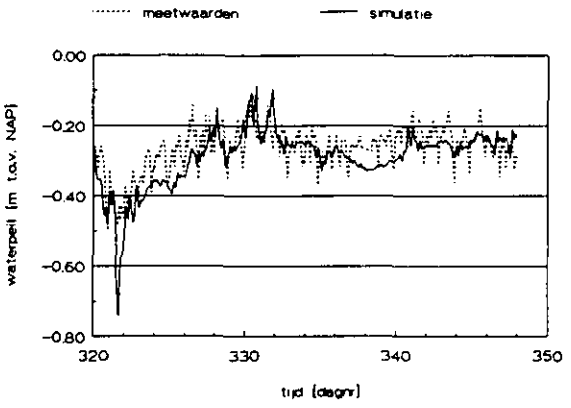
- De pieken in de gemeten waterpeilen worden over het algemeen erg goed gevolgd in de simulaties. Dit geeft aan dat de windopzet goed gesimuleerd wordt, en dat de windstress-factor dus de goede orde van grootte heeft;
- De fijne fluctuaties in de gemeten waterpeilen worden niet gevolgd. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de metingen zelf: de gebruikte meetapparatuur blijkt sterk temperatuurgevoelig te zijn, waardoor een dag/nacht-ritme gegenereerd wordt. Anderzijds is het waterbewegingsmodel niet geschikt om dergelijke fluctuaties te simuleren, gezien de maaswijdte, en het gebruik van dieptegemiddelde stroming;



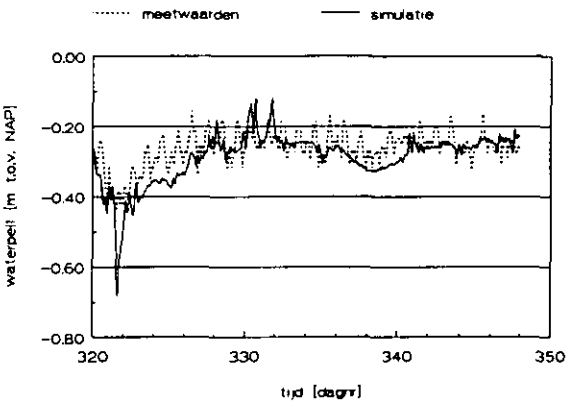
Figuur 4.3. Validatie waterpeilen L1, 1988.



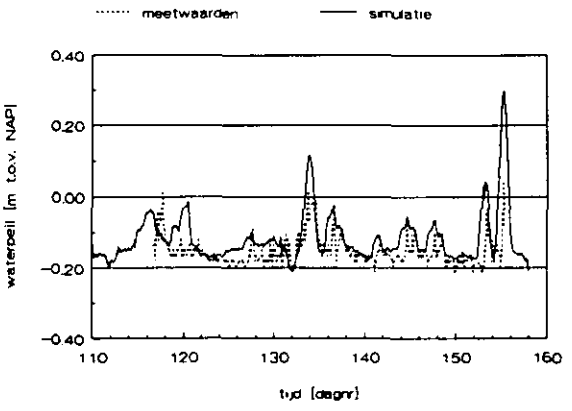
Figuur 4.4. Validatie waterpeilen L2, 1988.



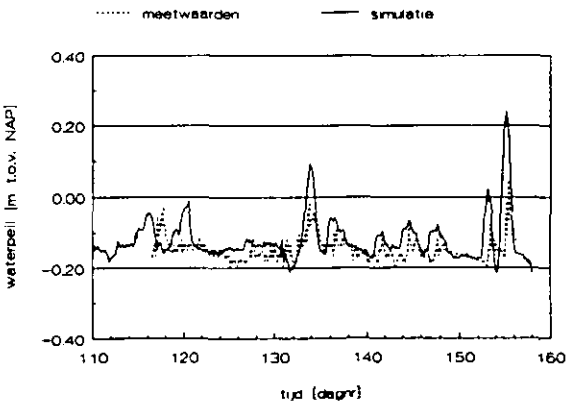
Figuur 4.5. Validatie waterpeilen L1, 1989.



Figuur 4.6. Validatie waterpeilen L2, 1989.



Figuur 4.7. Validatie waterpeilen L1, 1990.



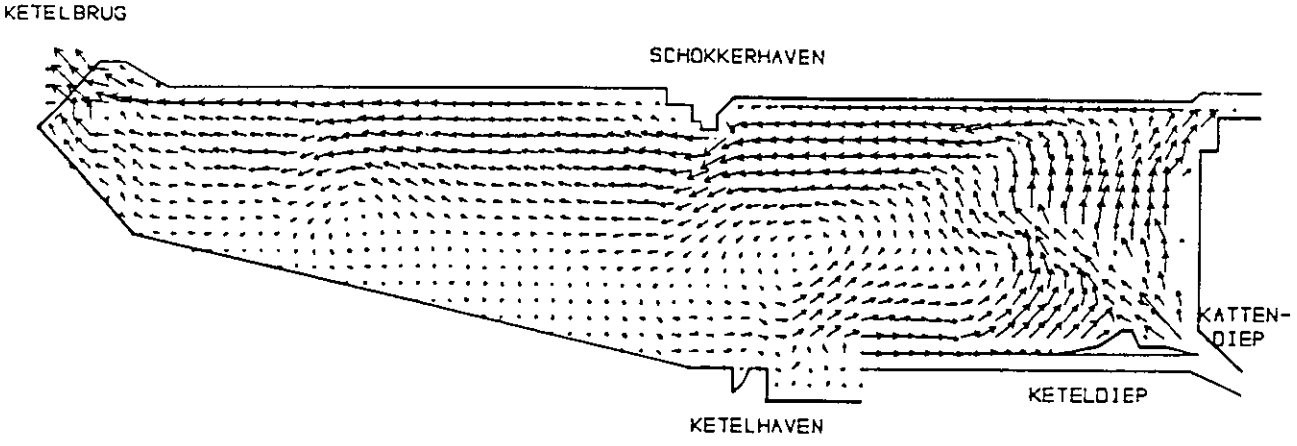
Figuur 4.8. Validatie waterpeilen L2, 1990.

- Nu en dan, bijvoorbeeld rond dagnr. 334 in 1988, treedt een zeer sterke waterpeildaling op in de simulatie, terwijl dit niet gemeten is. Dit is een effect van de grove schematisatie van het Ketelmeer in het IJsselmeermodel, waardoor pieken in de debieten nabij de Ketelbrug in de tijd verschoven gegenereerd worden. In eerste instantie is het uitstroomdebiet te hoog, leidend tot een sterke daling van het waterpeil. Korte tijd later wordt dit gecompenseerd

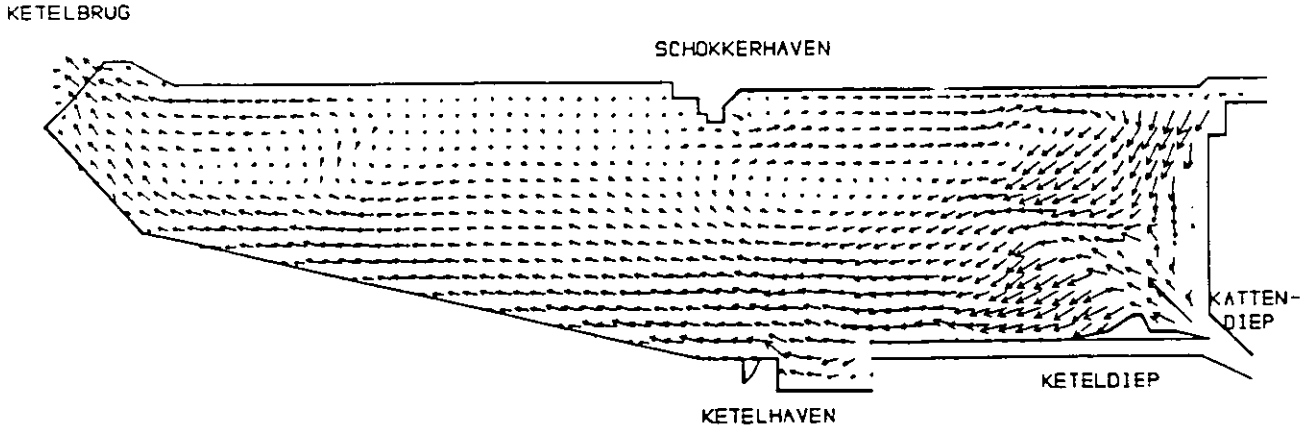
door een te laag uitstroomdebiet, of zelfs terugstroming vanuit het IJsselmeer. De juiste waterpeilen worden dan weer bereikt. De verstoring duurt slechts zeer kort, maximaal een dag, zodat de effecten hiervan verwaarloosbaar zijn.

In figuur 4.9 en 4.10 worden twee karakteristieke stromingspatronen weergegeven, voor stroming bij harde wind uit het zuidwesten resp. uit het noordoosten. Over de overeenkomst met de werkelijkheid kan echter geen uitsluitsel gegeven worden. Duidelijk is wel dat de hoofdstroming gedreven wordt door de IJsselaanvoer (stroming van oost naar west), terwijl de exacte ligging van de stroomlijnen door de wind bepaald wordt.

De conclusie is, dat het waterbewegingsmodel resultaten aflevert die de waterpeilen goed beschrijven. Over de waarde van de gesimuleerde stroomsnelheden kan weinig gezegd worden. De betrouwbaarheid van de simulaties wordt sterk gedomineerd door de betrouwbaarheid van het IJsselmeermodel waarmee de debieten bij de Ketelbrug worden gegenereerd. De waterbeweging heeft o.m. invloed op de ruimtelijke gradiënten in de zwevende stofconcentratie. Een redelijke beschrijving van deze gradiënten wijst op een redelijke betrouwbaarheid van het waterbewegingsmodel (zie par. 4.4.4.)



Figuur 4.9. Stromingspatroon in het Ketelmeer bij harde ZW-wind.



Figuur 4.10. Stromingspatroon in het Ketelmeer bij harde NO-wind.

4.3. Calibratie van het slibtransportmodel

4.3.1. Opzet van de schattingsprocedure

In het slibtransportmodel worden in totaal 7 fracties slib onderscheiden. Eén daarvan doet niet mee aan de resuspensie, de zandfractie. De overige zes fracties zijn in feite drie fracties: elke fractie bestaat uit een deel IJsselslib en een deel bodemslib. Uiteindelijk moeten dus voor drie fracties slib de resuspensie- en sedimentatie-parameters geschat worden. De parameters zijn per fractie (zie ook hoofdstuk 2):

- De evenredigheidsconstante K voor resuspensie;
- De kritische orbitaalsnelheid $u_{b,cr}$;
- De valsnelheid w_s

Daarnaast moeten waarden geschat worden voor de drie parameters in het bodemmodel:

- De consolidatiesnelheid;
- De erosiesnelheid;
- De turbatiesnelheid.

De schatting van deze parameters is uitgevoerd met behulp van twee vereenvoudigde modellen van het Ketelmeer: een 1-dimensionaal model, en een 2-dimensionaal model.

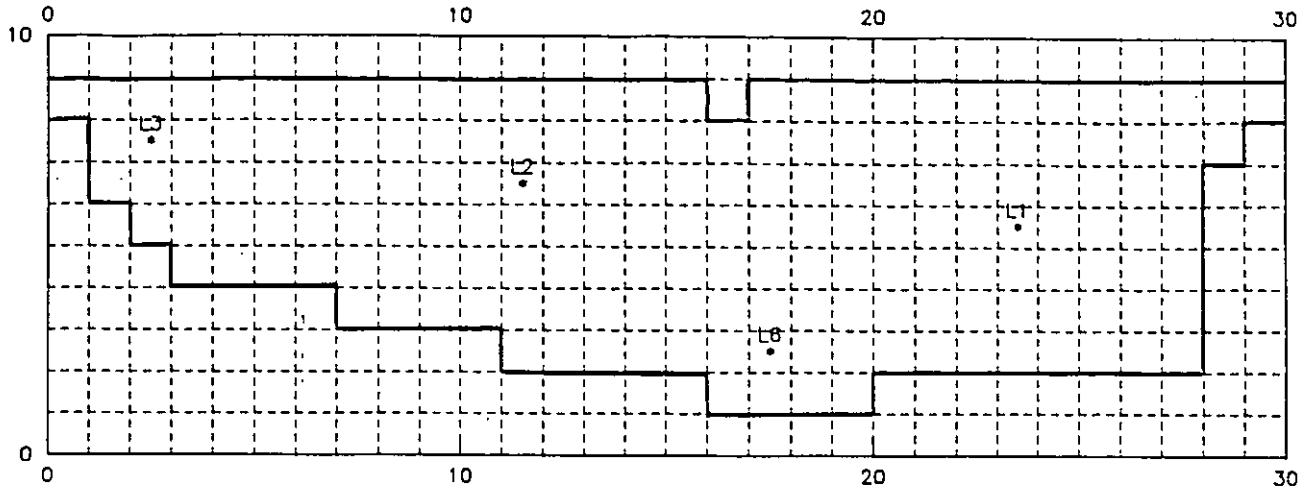
Het 1-dimensionale model is beschreven in Blom e.a. (1991). Dit model onderscheidt drie compartimenten in de lengterichting van het Ketelmeer. Uitwisseling tussen compartimenten is zowel advectief als dispersief.

De bruikbaarheid van dit 1-dimensionale model is beperkt, omdat de indeling in slechts drie compartimenten voor het Ketelmeer in feite te grof is. Dit model is daarom alleen gebruikt om richtinggevende startwaarden te genereren voor de resuspensie/sedimentatie-parameters, voor het 2-dimensionale calibratiemodel dat hieronder besproken zal worden. Het 1-dimensionale model is gekoppeld aan een parameterschattings-procedure, gebaseerd op de SIMPLEX-methode (Nelder & Mead, 1965). Deze methode zoekt naar een set parameters die de kleinste kwadratensom (= som van het kwadraat van het verschil tussen meetwaarde en gesimuleerde waarde) oplevert.

Het 2-dimensionale calibratiemodel is afgeleid van STRESS-2d. Het is zo aangepast dat een groot aantal calibratie-runs in korte tijd mogelijk is, om een juiste schatting van parameters te verkrijgen. Dit model heeft de volgende karakteristieken:

- Het model is 2-dimensionaal met een gridgrootte van 500 x 500 meter. De schematisatie is weergegeven in figuur 4.11. Vergeleken met het in STRESS-2d gebruikte grid van 100 x 100 meter is dit een sterke vergroving. Dit is toelaatbaar omdat ten eerste de waterbeweging, die sterk gevoelig is voor de gridgrootte, niet in dit grove model gesimuleerd wordt, en ten tweede de meetwaarden waarop gecalibreerd wordt slechts op enkele punten gemeten zijn, waardoor een grote mate van ruimtelijke gedetailleerdheid niet noodzakelijk is;
- Het model berekent alleen slibtransport; de waterbeweging (waterpeilen, stroomsnelheden) zijn invoervariabelen, evenals de orbitaalsnelheden, berekend met het golfmodel in STRESS-2d. Deze zijn (b.v.) afkomstig uit een WAQUA-run met het fijnmazige Ketelmeermodel, waarbij de resultaten over het juiste aantal cellen gemiddeld zijn;

- Gesimuleerde variabelen in het model zijn zeven slibfracties in water en in de top- en onderlaag van het sediment;
- De numerieke oplossingsmethode is gelijk aan de in STRESS-2d gebruikte methode (ADI-methode);
- Het bodemmodel is in dezelfde vorm aanwezig als in STRESS-2d.



Figuur 4.11. Het grid zoals gebruikt in het 2-dimensionale calibratiemodel.

Het model is ingebouwd in een parameterschattingsprocedure. Deze procedure is gebaseerd op het zogenaamde Rosenbrock-schema, waarmee in een klein aantal runs een goede set parameters geschat kan worden. De parameters die geschat kunnen worden zijn:

- De evenredigheidsconstante voor resuspensie K, per slibfractie;
- De kritische orbitaalsnelheid Ubcr per slibfractie;
- De valsnelheid Ws van de slibfracties binnen de valsnelheidsgrenzen van de fracties;
- Een achtergrondconcentratie van niet-bezinkend zwevend materiaal;
- De parameters uit het bodemmodel: consolidatie-, erosie- en turbatiesnelheid.

Gegevens waarop gecalibreerd kan worden zijn:

- Totaal-slib-concentraties op twee lokatie verkregen uit continu-bemonsteringen (3 x per dag);
- Totaal-slib-concentraties uit steekmonsters (2 x per week);
- Totaal-slib-concentraties berekend uit continu gemeten extinkties (wisselend aantal gelukte metingen per dag);
- Sedimentatiefluxen gemeten m.b.v. sedimentvallen (weeksom);
- Fractieverdeling van slib in steekmonsters;
- Fractieverdeling van slib in sedimentvalmateriaal;
- Fractie bodemslib in water en sedimentatieflux.

De schattingsprocedure zoekt naar de best passende set parameterwaarden. Als zoekfunctie geldt de kwadraatsom: de som van het kwadraat van het verschil tussen gemeten en gesimuleerde

waarden. Elk van de categorieën van meetwaarden kan een bepaalde weegfactor meegegeven worden in de kwadraatsom.

4.3.2. Resultaten van de calibratie

Met het boven beschreven slibmodel en de daaraan gekoppelde parameterschattingsprocedure is als eerste een ruwe gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, om voorafgaande aan het schatten van de parameters inzicht te krijgen in de gevoeligheid van het model voor deze parameters en een aantal randvoorwaarden. Als simulatieperiode is steeds de meetperiode van 30 dagen in het najaar van 1988 gekozen. Deze periode wordt gekenmerkt door perioden met hoge windsnelheden, vanuit verschillende richtingen. Voor het slibmodel is dit daarom bij uitstek een goede calibratieperiode. De reeks van gemeten slibconcentraties is echter beperkt in deze periode. Continu-metingen zijn er slechts op één lokatie, en de metingen op de vijf andere lokaties zijn weinig frequent (2 x per week). Een goede controle op de juistheid van gesimuleerde ruimtelijke verspreidingspatronen is daarom niet mogelijk. Voor de uiteindelijke calibratie is daarom uitgegaan van de periode van 1990, waarin slibconcentraties op twee lokaties continu gemeten zijn.

1. Gevoeligheidsanalyse

Voor de gevoeligheidsanalyse is uitgegaan van de parameterwaarden die in 1988 gevonden zijn met een 0-dimensionale model, zie Toet & Blom (1989). Als eerste is de gevoeligheid voor een aantal invoervariabelen bestudeerd. Dit betreft ten eerste de aanvoer van slib door de IJssel, ten tweede de initiële toplaagdikte en ten derde de maximale toplaagdikte. Vervolgens is de gevoeligheid van het model voor de modelparameters bestudeerd.

- De aanvoer van slib door de IJssel bepaalt in belangrijke mate de 'achtergrondsconcentratie' die gevonden wordt in de reeks gemeten slibconcentraties. Het betreft dan voornamelijk zeer fijn slib met een bezinktijd van meerdere dagen. Met name in perioden met hoge IJsselafvoeren kan deze restconcentratie belangrijk zijn (tot ca. 15 mg/l op het meetpunt L2). Door gebruik te maken van de debietafhankelijke slibconcentraties in IJsselwater wordt deze achtergrondsconcentratie veel beter beschreven dan met constante concentraties;
- De initiële toplaagdikte en de maximale toplaagdikte blijken op de gesimuleerde slibgehalten weinig invloed te hebben. De dikte van de toplaag fluctueert zo sterk, met name in de ondiepe delen, dat het model snel ingespeeld is. Bovendien is de simulatieperiode zo gekozen dat de eerste dagen geen hoge windsnelheden voorkomen, zodat in deze periode de toplaag in alle delen van het Ketelmeer aangroeit tot aan de maximale dikte. Uitputting van de toplaag speelt vooral in de ondiepe delen een belangrijke rol in de beperking van de resuspensieflux. De maximale toplaagdikte speelt daarbij wel een belangrijke rol, maar de absolute grootte van die dikte is van ondergeschikt belang, zolang deze zich in de orde van enkele millimeters bevindt.

De analyse naar de gevoeligheid van het model voor de waarde van de parameters heeft het volgende uitgewezen:

- De kritische orbitaalsnelheden tenderen in schattingen naar 0. In eerdere parameterschattingen zijn waarden geschat in de orde van 10^{-8} m/s, reeds optredend bij zeer lage windsnelheden (Toet en Blom, 1989). Uit analyse van de gemeten windsnelheden tegenover de gemeten slibconcentraties kan echter afgeleid worden dat met name voor de zwaardere fracties dit eerder in de orde van 10^{-2} m/s moet zijn. Dit betekent dat deze fracties pas bij windsnelheden van meer dan ca. 10 m/s (mede afhankelijk van windrichting en strijklengte) opgewerveld kunnen worden. De gevoeligheidsanalyse wijst uit dat met name de simulatie van hoge

pieken aanmerkelijk beter wordt bij invoering van hogere kritische orbitaalsnelheden voor de twee zwaarste fracties. Opmerkelijk is ook dat verdere verhoging van de kritische orbitaalsnelheden voor deze fracties geen duidelijk effect heeft. Dit komt overeen met de verwachting dat op zich de orde van grootte belangrijker is voor deze parameters dan de exacte absolute waarde. Verhoging van de kritische orbitaalsnelheid van de lichtste fractie heeft alleen een verslechtering van de simulatie tot gevolg. Deze fractie is zeer gemakkelijk opwervelbaar, met een kritische orbitaalsnelheid van bijna 0.

- De evenredigheidsconstante voor resuspensie K bepaalt direct de resuspensieflux zodra de orbitaalsnelheid groter is dan de kritische orbitaalsnelheid. Het is daarom weinig verrassend dat de waarde voor deze parameter veel invloed heeft op de simulatieresultaten. Ook hier geldt dat met name de parameters voor de zwaarste twee fracties het belangrijkst zijn, vooral tijdens pieken in de windsnelheid. De optimale waarde voor K wordt sterk bepaald door de waarde van $u_{b,cr}$;
- De valsnelheden van de fracties bepalen eveneens direct de simulatieresultaten. De valsnelheid voor de lichtste fractie is van belang voor de reeds genoemde achtergrondsconcentratie van IJsselmateriaal.
- De parameters uit het bodemmodel hebben een geringe invloed op gesimuleerde slibgehalten. Alleen in lange perioden met veel wind, kan door erosie een belangrijke nalevering van slib uit de onderlaag plaatsvinden. Consolidatie zorgt voor een beperking van de hoeveelheid beschikbaar materiaal in de toplaag, doch dit effect is nauwelijks merkbaar in de simulaties. Wel is overduidelijk dat alle drie parameters uit het bodemmodel (consolidatie-, erosie- en turbatiesnelheid) grote invloed hebben op de verhouding IJsselslib/bodemslib in het water en in de toplaag van het sediment. Belangrijk is met name een goede waarde voor de consolidatiesnelheid. Een te lage waarde veroorzaakt namelijk een ophoping van slib (voornamelijk IJsselslib) in de toplaag, waarna de menging met de onderlaag slechts zeer langzaam verloopt. De turbatiesnelheid is daarbij eveneens van belang, aangezien deze direct de menging tussen top- en onderlaag bepaalt.

2. Schattingen

Voorafgaande aan de parameterschatting is naar aanleiding van de gevoeligheidsanalyse eerst nagegaan wat de orde van grootte van de consolidatiesnelheid zou moeten zijn. Uitgaande van de veronderstelling dat op lange termijn de massa van de toplaag in sedimentatiegebieden gelijk moet blijven, is deze parameter berekend. Gemiddeld is de netto sedimentatie in het Ketelmeer in de orde van 0.25 Mton/jaar (Beurskens e.a., 1988), overeenkomend met $2 \cdot 10^{-7}$ g/m^2,s. Dit geeft de minimale waarde van de consolidatiesnelheid: $2 \cdot 10^{-9}$ m/s (uitgaande van de in het model gebruikte slibdichtheden en porositeiten, zie tabel 4.4). Uit simulaties blijkt dat de netto sedimentatie in het westelijk deel van het Ketelmeer echter een factor 3 hoger ligt dan gemiddeld. Hieruit volgt een juiste waarde voor de consolidatiesnelheid: ca. $6 \cdot 10^{-9}$ m/s. In simulaties met STRESS-2d en met het calibratiemodel blijkt deze waarde goed te voldoen. Ophoping van slib in de toplaag komt slechts incidenteel voor, in perioden waarin dit ook verwacht wordt (rustige, windstille perioden).

De parameterschatting is uitgevoerd voor de meetperiode van 1990, steeds gevolgd door een controle voor de meetperiode van 1988. Als calibratie-variabelen is alleen het gemeten totaal-slibgehalte genomen, op de twee meetpunten L1 en L2. Door een combinatie van gebrek aan gegevens en 'ruis' in de metingen bleken sedimentatiefluxen, fractiegrootteverdelingen en Cd/Sc-verhoudingen geen nuttige aanvulling voor de parameterschattingen te zijn. Ze zijn voor de validatie gebruikt. Per schattings-run kan slechts een beperkt aantal parameters geschat worden, wegens optredende onstabiliteit in de parameterschattingsprocedure bij meerdere geschatte parameters. De procedure was globaal als volgt:

- Valsnelheden, kritische orbitaalsnelheden en bodemparameters worden vastgelegd op 'aannemelijke waarden';
- De schatting wordt uitgevoerd voor de evenredigheidsconstanten K, voor de drie fracties;
- Een fijnafregeling van de gevonden fit wordt uitgevoerd door valsnelheden en bodemparameters te laten schatten;
- De uiteindelijk gevonden fit wordt gecontroleerd via een simulatie met het calibratiemodel voor de periode van 1988;
- Een nieuwe serie schattingen wordt gestart door nieuwe waarden voor de kritische orbitaalsnelheden en, op basis van het voorgaande, nieuwe startwaarde voor de overige parameters te nemen.

Op deze wijze zijn een aantal parametersets verkregen, die de slibconcentraties voldoende goed beschrijven. Uiteindelijk is één set geselecteerd, op grond van enerzijds de kwadraatsom, en anderzijds het 'op het oog' goed volgen van de belangrijkste pieken en dalen in de gemeten slibconcentraties. In tabel 4.5 zijn de parameterwaarden gegeven.

De resultaten van de simulaties met het calibratiemodel zijn weergegeven in de figuren 4.12 t/m 4.16. Zoals reeds vermeld is met name gecalibreerd op de periode van 1990 (figuren 4.15 en 4.16). De perioden van 1988 en 1989 gelden als controle.

Uit de figuren mag geconcludeerd worden dat met behulp van de gevonden parameterset, de het verloop van de slibconcentraties voldoende goed beschreven kan worden.

Opmerkelijk tijdens de schattingsprocedure was dat er een belangrijk verschil lijkt te bestaan tussen opwerveling van slib in de zomer (periode 1990) en in de winter (perioden 1988 en 1989). Gebleken is dat een optimale parameterset voor 1990 een grote overschatting van concentraties in 1988 oplevert. Een optimale set voor 1988 daarentegen levert een grote onderschatting van concentraties in 1990 op. De uiteindelijk geselecteerde set is een compromis daartussen, waarbij de prioriteit gelegd is op het juist simuleren van de relatief lage concentraties in 1990, aangezien dit normaliter het meest voorkomt.

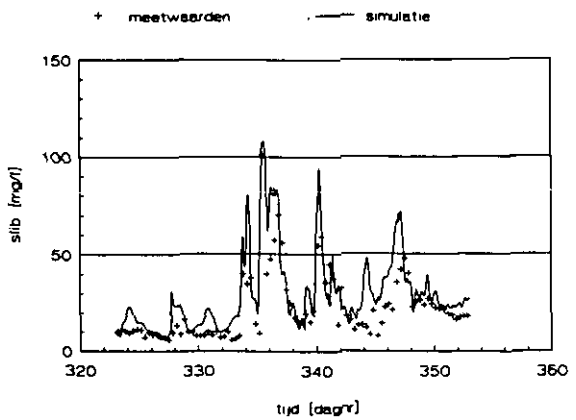
Tabel 4.5. Geschatte parameters voor het slibtransportmodel.

Resuspensie/sedimentatie

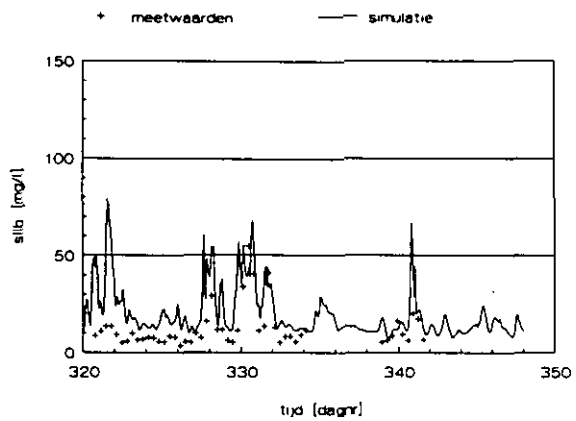
parameter		fractie 1a/b	fractie 2a/b	fractie 3a/b
K	(kg/m^3)	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
$u_{b,cr}$	(m/s)	0.	$8.0 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$
w_s	(m/s)	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$

Bodemprocessen

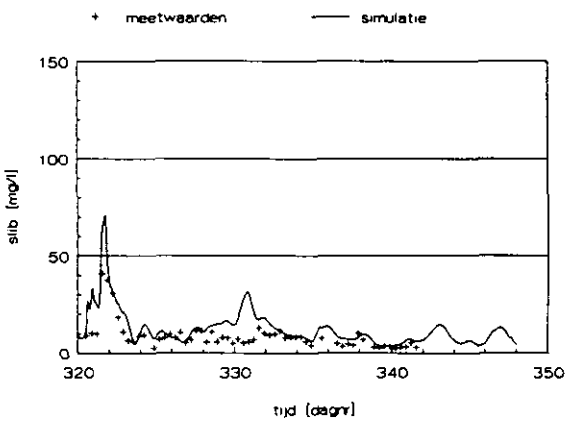
parameter		waarde
V_{conso}	(m/s)	$6.2 \cdot 10^{-9}$
V_{erosie}	(m/s)	$9.0 \cdot 10^{-9}$
V_{turb}	(m/s)	$8.0 \cdot 10^{-9}$



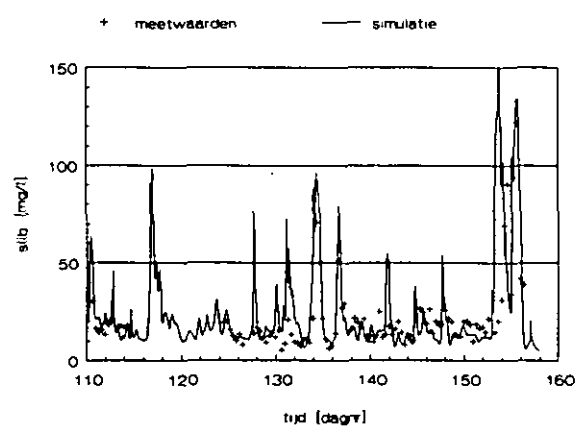
Figuur 4.12. Simulatie met het calibratiemodel, L2, meetperiode 1988.



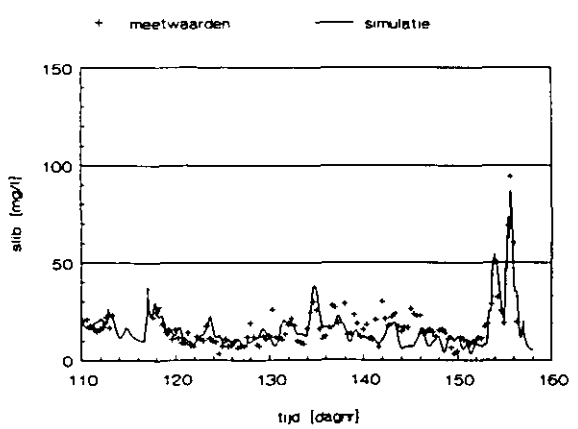
Figuur 4.13. Simulatie met het calibratiemodel, L1, meetperiode 1989.



Figuur 4.14. Simulatie met het calibratiemodel, L2, meetperiode 1989.



Figuur 4.15. Simulatie met het calibratiemodel, L1, meetperiode 1990.



Figuur 4.16. Simulatie met het calibratiemodel, L2, meetperiode 1990.

4.4. Validatie van het slibtransportmodel

Het model waarmee de calibraties zijn uitgevoerd is op bepaalde punten anders dan het 'grote' slibtransportmodel voor het Ketelmeer. Een verdere validatie met STRESS-2d is alleen daarom al noodzakelijk. Er is nagegaan of in de simulaties met STRESS-2d de gesimuleerde slibgehalten overeenkomen met de gemeten gehalten, en vooral ook of gesimuleerde verhoudingen IJsselslib/bodemslib overeenkomen met gemeten Cd/Sc-verhoudingen.

4.4.1. Slibconcentraties

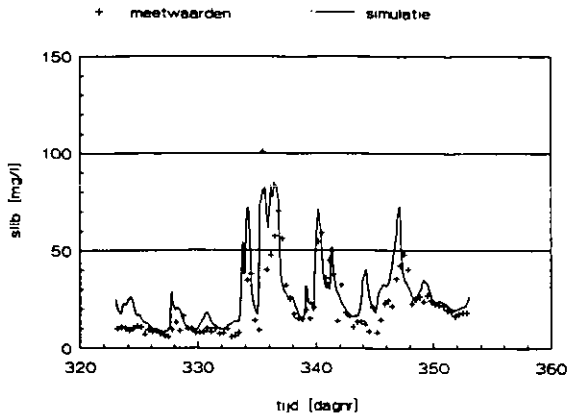
Voor de drie meetperioden, 1988, 1989 en 1990, zijn simulaties uitgevoerd met STRESS-2d. De gesimuleerde totaal-slibconcentraties zijn met de gemeten concentraties uitgezet in de figuren 4.17 t/m 4.21.

Vergelijking met de simulaties met het calibratiemodel leert dat verschillen zich vooral op L1 voordoen. Pieken in de validatie-simulaties zijn minder hoog dan in de calibratie-simulaties. Op L2 zijn de verschillen tussen de simulaties minimaal. Oorzaken voor de verschillen op L1 moeten vooral gezocht worden in de grove schematisatie van het calibratiemodel, waardoor dieptegradiënten, die in het oostelijke deel groter zijn dan in het centrale en westelijke deel, niet geheel tot hun recht komen. Ook speelt een rol dat de waterbeweging door de grove schematisatie gesimplificeerd is, zodat door advectief en/of dispersief transport meer opgewerveld slib bij L1 terecht komt dan in de simulatie met STRESS-2d. Uiteindelijk lijkt de overeenkomst tussen gemeten en gesimuleerde concentraties op L1 in de validatie-simulaties beter dan in de calibratie-simulaties. Voor L2 is het resultaat hetzelfde: de overeenkomst blijft goed.

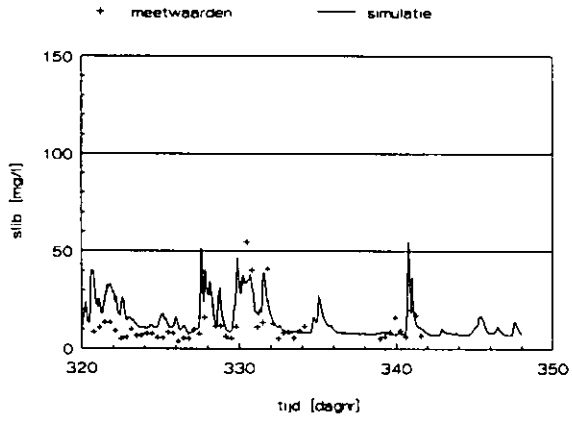
4.4.2. Cd/Sc-verhoudingen.

De gesimuleerde verhoudingen IJsselslib/bodemslib kunnen omgerekend worden naar Cd/Sc-verhoudingen. Daarbij is er vanuit gegaan dat IJsselslib een Cd/Sc-verhouding heeft van 0.7, en bodemslib 3.2. Dit zijn de gemiddelde waarden, volgend uit de metingen (Toet, 1991). In de figuren 4.22 t/m 4.25 worden de aldus gesimuleerde Cd/Sc-verhoudingen vergeleken met gemeten waarden, voor de perioden van 1989 en 1990.

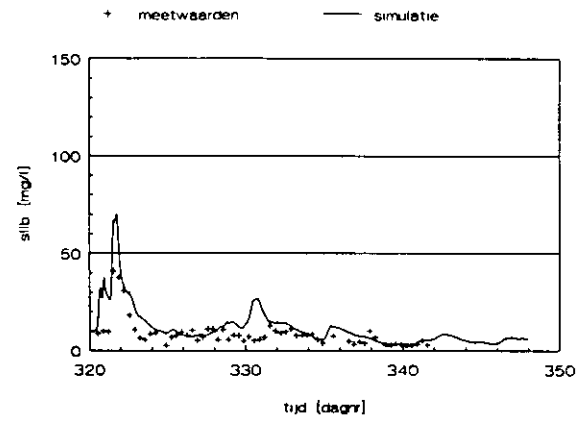
Uit de figuren is af te leiden dat de overeenkomst tussen gemeten en gesimuleerde waarden qua orde van grootte redelijk is. Belangrijk is met name dat in de meetperiode van 1989, waarin weinig wind voorkwam, op L2 toch relatief hoge Cd/Sc-verhoudingen gemeten zijn, gemiddeld hoger dan in 1990. Deze hoge waarden worden ook gesimuleerd door STRESS-2d. Dit geeft aan dat processen op een juiste manier gemodelleerd zijn, en dat parameters in de goede orde van grootte liggen. Specifieke pieken en dalen in de meetwaarden worden over het algemeen slecht gevolgd door de simulaties. De afwijkingen zijn dermate, dat niet verwacht kan worden dat met andere waarden voor de parameters in het bodemmodel een betere overeenkomst verkregen kan worden. Er is sprake van een zekere 'ruis' in de meetwaarden: pieken in de Cd/Sc-verhouding komen niet altijd overeen met te verwachten pieken (perioden met harde wind). De belangrijkste oorzaak hiervoor is het al vaker genoemde feit dat bodemslib in het model niet geheel overeenkomt met het actuele bodemslib, dat een grote spreiding in Cd/Sc-gehalten kent. Daarnaast blijkt ook uit de figuren dat gemeten Cd/Sc-verhoudingen regelmatig kleiner worden dan de aangenomen waarde voor IJsselslib. Dit wijst er op dat ook in IJsselslib de Cd/Sc-verhouding niet constant is.



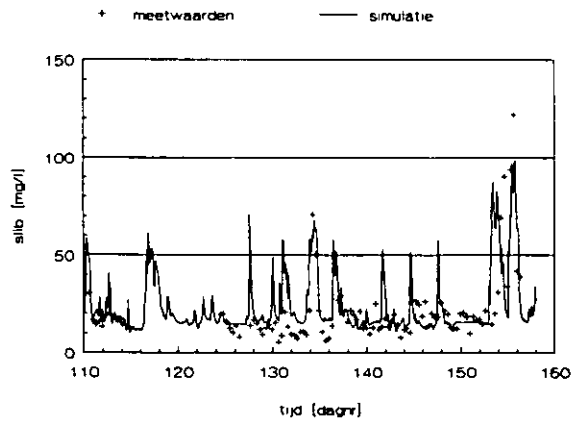
Figuur 4.17. Validatie slibconcentraties, L2, meetperiode 1988.



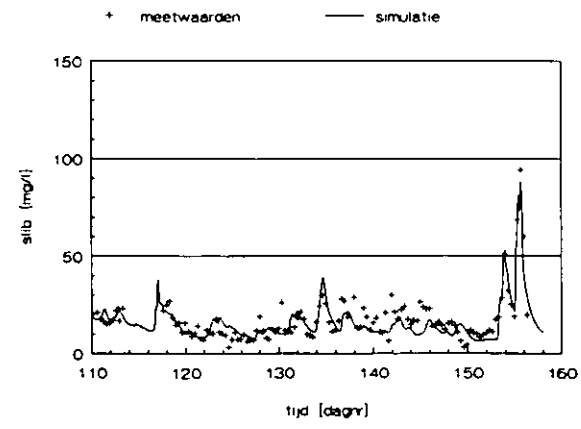
Figuur 4.18. Validatie slibconcentraties, L1, meetperiode 1989.



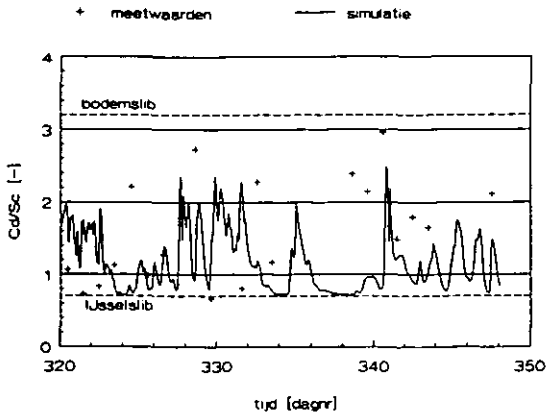
Figuur 4.19. Validatie slibconcentraties, L2, meetperiode 1989.



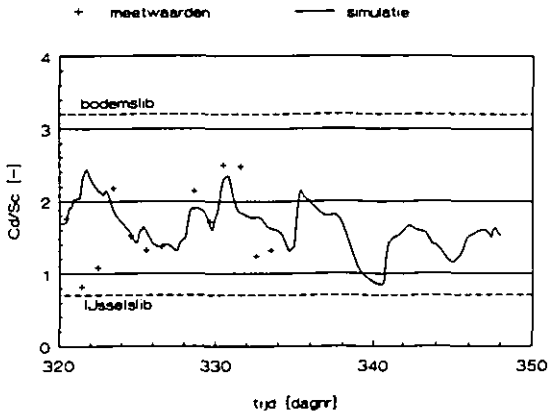
Figuur 4.20. Validatie slibconcentraties, L1, meetperiode 1990.



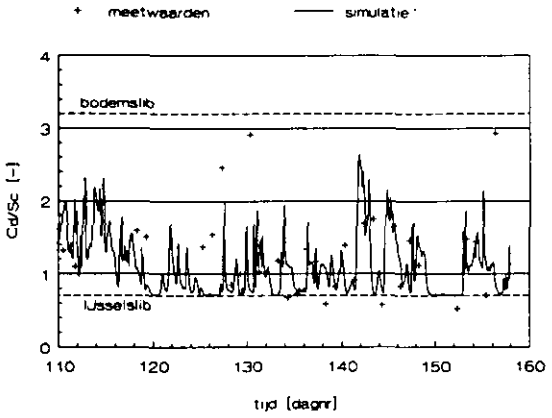
Figuur 4.21. Validatie slibconcentraties, L2, meetperiode 1990.



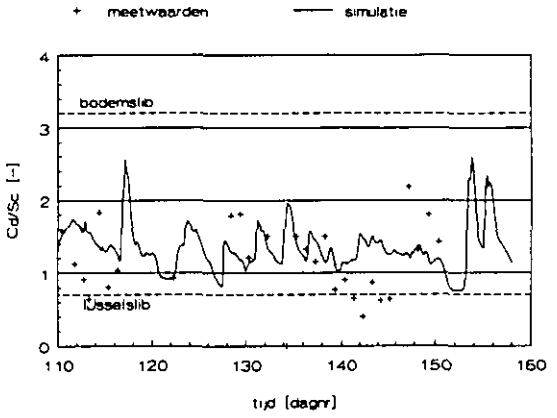
Figuur 4.22. Validatie Cd/Sc-verhouding, L1, meetperiode 1989.



Figuur 4.23. Validatie Cd/Sc-verhouding, L2, meetperiode 1989.



Figuur 4.24. Validatie Cd/Sc-verhouding, L1, meetperiode 1990.



Figuur 4.25. Validatie Cd/Sc-verhouding, L2, meetperiode 1990.

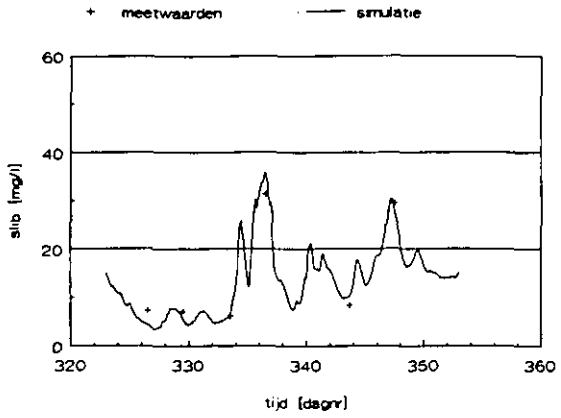
4.4.3. Fractiegrootteverdeling zwevend slib

Voor de perioden in 1988 en 1990 is gecontroleerd of gesimuleerde concentraties van de afzonderlijke fracties overeenkomen met de incidenteel gemeten fractiegrootteverdelingen. De gemeten en gesimuleerde concentraties per slibfractie op het meetpunt L2 zijn weergegeven in de figuren 4.26 t/m 4.31.

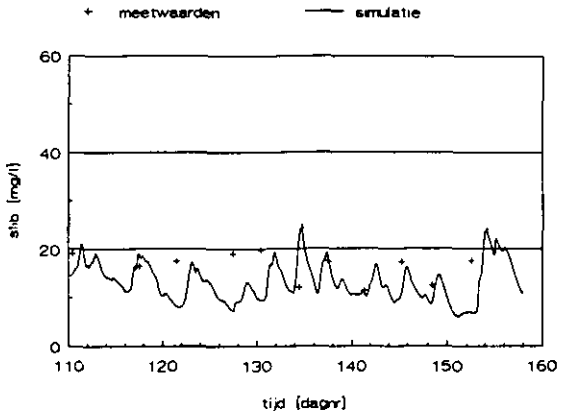
Opmerkelijk is dat voor de periode in 1988, de overeenkomst goed is, terwijl met name de zwaardere fracties in 1990 duidelijk te laag berekend worden. Twee oorzaken zijn hiervoor aan te wijzen:

- Er zijn aanwijzingen dat slib in de zomerperiode (1990) gemakkelijker opwervelt dan in de winterperiode (1988). Dit bleek al uit de schattingen op basis van totaal-slibconcentraties. De gemeten concentraties van de zwaarste fractie (3) in 1990 geven aan dat deze fractie in significante hoeveelheden voorkomt in water, ondanks het feit dat er zeer weinig wind staat. In 1988 zijn de concentraties van deze fractie beduidend lager bij weinig wind. Mogelijk is er sprake van een temperatuurafhankelijkheid van de kritische orbitaalsnelheid. Een dergelijke temperatuurafhankelijkheid wordt niet in het model beschreven;
- Het opsplitsen van slib in drie fracties is mogelijk nog te grof, met name in perioden met weinig wind.

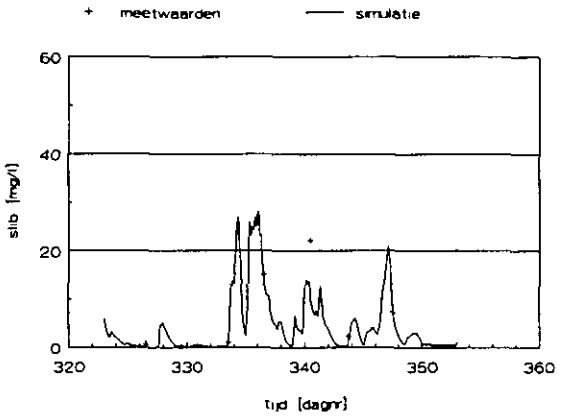
De mogelijke conclusie hieruit is dat mogelijk de opwerveling van de zwaarste slibdeeltjes onderschat wordt in rustige perioden in de zomer. Het is niet mogelijk dit met een betere parameterschatting te verhelpen, aangezien het om oorzaken lijkt te gaan die te maken hebben met de procesbeschrijvingen (temperatuurafhankelijkheid) en schematisatie (aantal slibfracties). Eén en ander wordt genuanceerd door het feit dat de fractiegroottebepalingen minder betrouwbaar zijn dan totaal-slibbepalingen, waarop gecalibreerd is. Daarnaast is het aantal metingen veel minder. Zolang totaal slib voor verschillende perioden en lokaties goed gesimuleerd wordt, kan verondersteld worden dat ook de afzonderlijke fracties redelijk goed gesimuleerd worden.



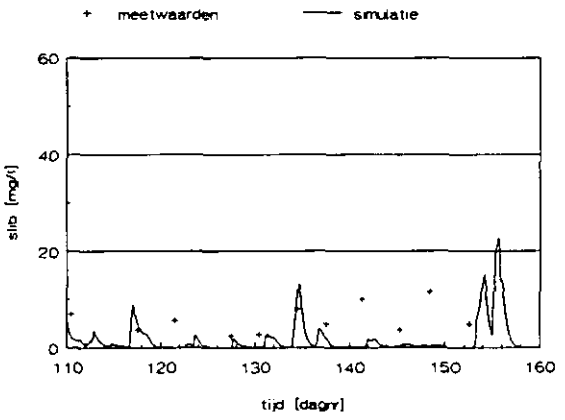
Figuur 4.26. Validatie slibfractie 1, L2, 1988.



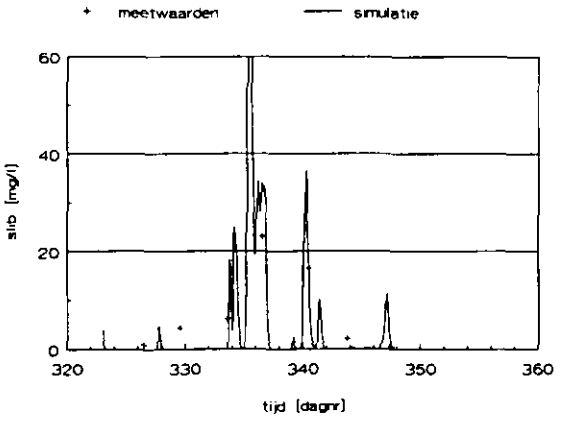
Figuur 4.27. Validatie slibfractie 1, L2, 1990.



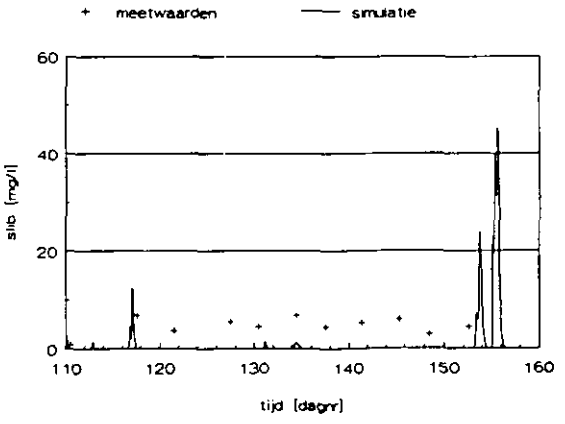
Figuur 4.28. Validatie slibfractie 2, L2, 1988.



Figuur 4.29. Validatie slibfractie 2, L2, 1990.



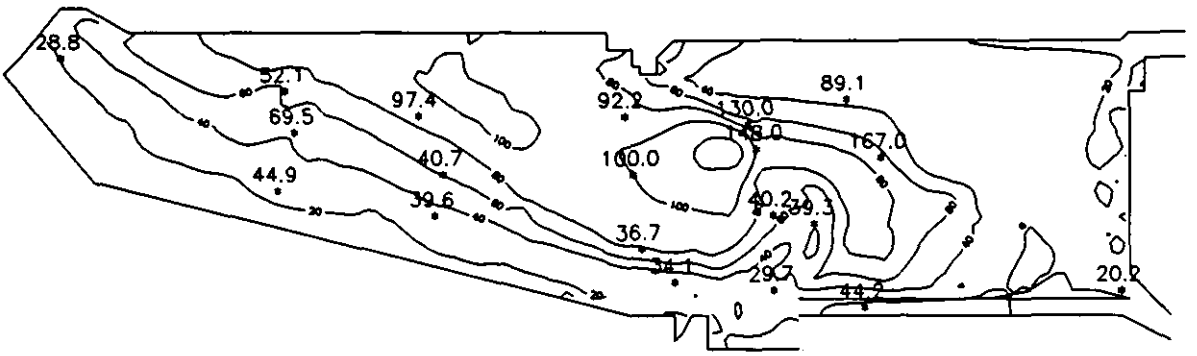
Figuur 4.30. Validatie slibfractie 3, L2, 1988.



Figuur 4.31. Validatie slibfractie 3, L2, 1990.

4.4.4. Ruimtelijke spreiding slib

Voor één van de data waarop op een twintigtal punten in het Ketelmeer de slibconcentraties bepaald zijn, is gecontroleerd of het model een overeenkomstige verspreiding van slib simuleert. De betreffende dag is 23 januari 1990, met windsnelheden van 15 m/s uit Z tot ZW. Deze dag is met het slibtransportmodel doorgerekend. Het berekende isolijnen-patroon is weergegeven in figuur 4.32, samen met de gemeten waarden. De gemeten waarden zijn afkomstig van monsters, genomen in een periode van enkele uren, terwijl het berekende patroon een momentopname is (15.00 uur). De overeenkomst is desondanks goed; zowel het spreidingspatroon (gradiënten) als de absolute waarden van concentraties in de simulatie liggen dichtbij de gemeten waarden.



Figuur 4.32. Gemeten en gesimuleerd spreidingspatroon van slib op 23/01/1991. Concentraties in mg/l.

4.5. Discussie

Een complex model als het model STRESS-2d vereist voor de calibratie en validatie een grote hoeveelheid gegevens. Ondanks het feit dat voor deze studie een grote hoeveelheid gegevens beschikbaar was, moest in het voorgaande regelmatig gesteld worden dat de calibratiemogelijkheden beperkt zijn. Voor modellen met een dergelijke complexiteit is dat echter meer regel dan uitzondering. De calibratie- en validatieresultaten laten een redelijke beschrijving van slibconcentraties in de waterfase, concentraties van de fracties en het percentage bodemslib zien. Het model is, zo kan op basis hiervan gesteld worden, voldoende betrouwbaar voor het uitvoeren van schattingen voor verschillende inrichtings- en beheersvarianten.

5. SLIBTRANSPORT BIJ VERSCHILLENDE INRICHTINGS- EN BEHEERSVARIANTEN

5.1. Alternatieven voor inrichting en beheer van het Ketelmeer

In een notitie voor de Projectgroep Ketelmeer zijn een zevental alternatieven voor inrichting en beheer van het Ketelmeer gepresenteerd. Een achtste mogelijkheid is naderhand toegevoegd, namelijk een combinatie van drie van de zeven alternatieven. Hieronder wordt per variant de belangrijkste kenmerken beschreven. In figuur 5.1 zijn de varianten schematisch weergegeven.

5.1.1. Variant 1: continuering huidig beheer

In dit scenario wordt niet ingegrepen in de huidige situatie. Deze variant is tevens de referentie voor de vergelijking van de varianten onderling.

5.1.2. Variant 2: aanleg van twee scheepvaartgeulen

In dit scenario is een vaargeul aangelegd tussen de monding van het Keteldiep en de Ketelbrug, evenwijdig aan de zuidelijke dijk, 500 meter daarvandaan. Eveneens is een zijgeul aangelegd, van Ketelhaven naar Schokkerhaven. De geulen hebben een diepte van 5 m-NAP. Deze geulen dienen de belangen van de scheepvaart door het Ketelmeer, maar zijn daarnaast ook milieuhygiënisch van belang. Door de toegenomen diepte van de vaargeul, en de min of meer vastgelegde vaarroutes door het Ketelmeer zal de opwerveling van verontreinigd slib door scheepvaart sterk verminderen.

5.1.3. Variant 3: verwijdering van alle verontreinigde bodemslib

Op basis van de gegevens van het bodemkundig onderzoek naar de dikte van de laag met IJm-slib in het Ketelmeer (Winkels & Van Diem, 1990), zijn de diepten aangepast. Uitgegaan is van een verwijdering van minimaal 30 cm slib. Maximaal is er lokaal 120 cm weggehaald, in de zandwinputten tot 5 meter.

5.1.4. Variant 4: grootschalige zandwinning

In het Beleidsplan Zandwinning IJsselmeergebied is als mogelijk alternatief grootschalige zandwinning in het centrale deel van het Ketelmeer, ten zuidwesten van Schokkerhaven voorgesteld. Na de voorgestelde maximale zandwinning in het Ketelmeer (130 miljoen m^3 in 10 jaar) ontstaat een zandwinput van 500 ha., 30 meter diep. Alleen deze eindsituatie is doorgerekend.

5.1.5. Variant 5: bodemsanering langs de randen van het Ketelmeer

Langs de dijken van de Noordoostpolder en Oostelijk Flevoland liggen de dikste pakketten verontreinigd slib. Hier vandaan vindt tevens de grootste verspreiding van verontreiniging naar het grondwater plaats. In deze variant worden de dikke pakketten slib langs de randen van het Ketelmeer verwijderd, tot 400 meter uit de dijk. Langs de zuidelijke dijk is dit tot ca. 120 cm slib, langs de noordelijke dijk tot ca. 60 cm.

5.1.6. Variant 6: aanleg eilanden

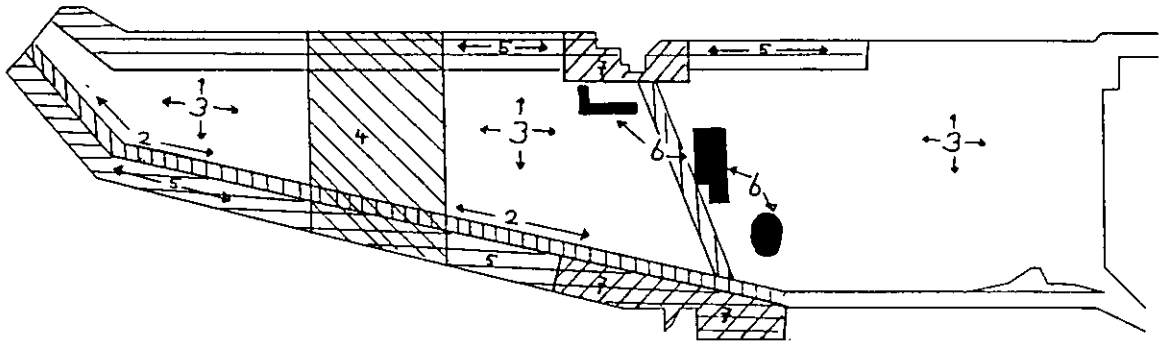
Volgens het Recreatieplan Ketelmeer van de gemeente Dronten en het Recreatieschap West-Overijssel zijn 3 eilanden geprojecteerd in het gebied tussen Ketelhaven en Schokkerhaven. De vorm van de eilanden varieert van rechthoekig tot ellipsvormig. De eilanden zijn enkele tientallen hectaren groot.

5.1.7. Variant 7: bodemsanering op enkele voor de recreatie belangrijke lokaties

Voor de recreatieve ontwikkeling van het Ketelmeer zijn met name de gebieden rond de havens van belang, inclusief de havens zelf en hun toegangen. In deze gebieden is voorgesteld de verontreinigde sliblaag geheel te verwijderen. Rond Ketelhaven gaat het om 100 ha, laagdikte 1 meter, rond Schokkerhaven om 112.5 ha, laagdikte 50 cm.

5.1.8. Variant 8: combinatie van enkele ingrepen

Deze variant is een combinatie van de varianten 2, 6 en 7: aanleg van twee scheepvaartgeulen, aanleg van drie recreatie-eilanden en bodemsanering rond Ketel- en Schokkerhaven.



Figuur 5.1. Schematische weergave van de inrichting- en beheersvarianten voor het Ketelmeer.

5.2. Simulatie van het slibtransport

5.2.1. Opzet van de simulaties

Voor elke variant is het slibtransport gesimuleerd met het gecalibreerde en gevalideerde slibtransportmodel. De volgende keuzen zijn voor de simulaties gemaakt:

- De simulatieperiode beslaat 1 jaar (360 dagen). Gekozen is om het jaar 1987 door te rekenen. Dit jaar is representatief voor wat de windgegevens betreft;
- De diepteschematisatie is in principe zoals in 3.2.2. beschreven. Voor de varianten is dit gedeeltelijk gewijzigd door in uitgediepte delen (geulen, zandwinning) de diepte aan te passen. In de varianten 6 en 8 zijn de eilanden ingevoerd als permanent droogliggende punten;
- De strijklengten zijn ongewijzigd, met uitzondering van de varianten 6 en 8, waarbij de strijklengtentabel opnieuw berekend is, aangezien de aanwezigheid van eilanden de strijklengten beïnvloedt;
- Windgegevens zijn afkomstig van het KNMI-station Houtrib, zie bijlage VI;
- IJsseldebieten zijn afkomstig uit de dagelijkse berichten van Directie Gelderland (Rijkswaterstaat), zie bijlage VI;
- De slibconcentratie in het IJsselwater is berekend met de regressie-vergelijking voor 1989 (tabel 4.2), aangezien deze periode een grote variatie aan debieten kent, en de fractiegrootteverdeling overeenkomt met gemiddeld gemeten verdelingen in IJsselwater. Slibconcentraties staan uitgezet in bijlage VI;
- De uitwisseling met het IJsselmeer is voor variant 1 ("continuering huidig beheer") berekend met behulp van het WAQUA-model voor het IJsselmeer. Voor andere varianten zijn vervolgens dezelfde uitwisselingsdebieten gebruikt.

Alle overige gegevens en initiële waarden zijn gelijk aan die uit de calibratie/validatie. Voor de modelparameters zijn de gecalibreerde waarden gebruikt (tabel 4.5).

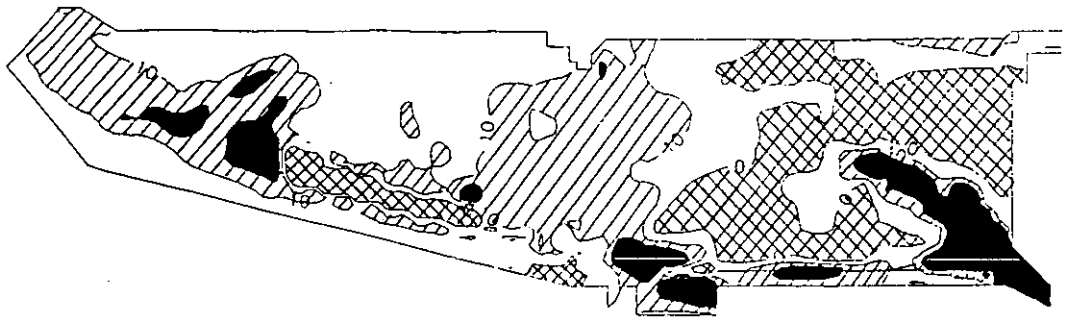
5.2.2. Resultaten van de simulaties

De resultaten van de simulatieberekeningen worden hier onder in een serie tabellen en figuren gepresenteerd. In de figuren 5.2 t/m 5.9 is per scenario de massatoename van het sediment na 1 jaar weergegeven. Dit is te zien als de spreiding van de netto sedimentatie in het Ketelmeer.

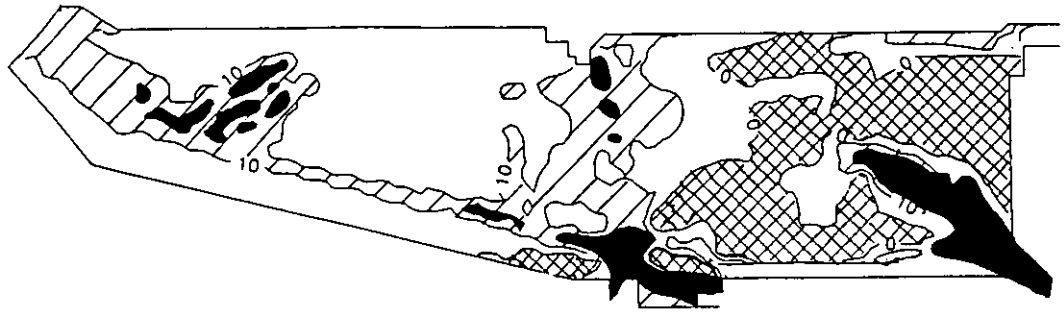
De fractie bodemslib in het toplaagje (enkele millimeters) van het sediment is een belangrijke aanwijzing voor de mate van erosie van oud, mogelijk sterk verontreinigd bodemslib in verschillende delen van het Ketelmeer. Bodemslib is gedefinieerd als het slib dat bij aanvang van de simulaties, het begin van het simulatiejaar, in de bodem aanwezig was. In de figuren 5.10 t/m 5.17 is dit weergegeven voor de situatie na 1 jaar.

Belangrijke resultaten van de simulaties betreffen tenslotte het transport van slib naar het IJsselmeer, en het aandeel van bodemslib daarin. In tabel 5.1 zijn de slibvrachten naar het IJsselmeer weergegeven, en de daaruit berekende retentie van slib. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de fractiegrootteverdeling in aangevoerd IJsselslib en slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt. In tabel 5.3 is het transport van bodemslib naar het IJsselmeer, en de berekende verschillen met de huidige situatie (variant 1) gegeven.

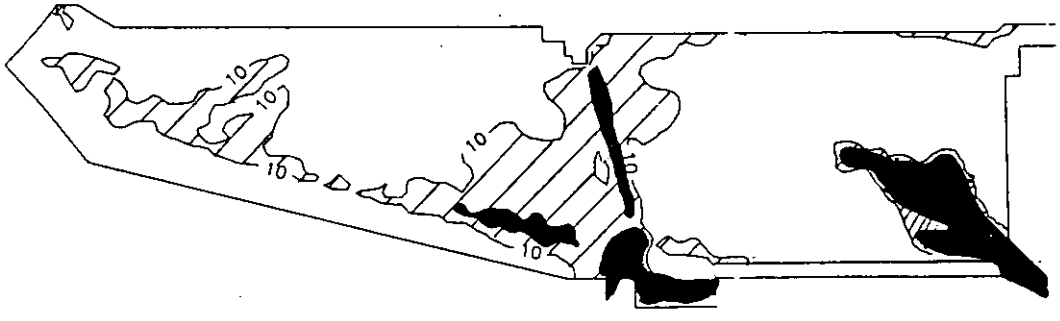
De simulatieresultaten zijn geschikt gemaakt voor simulaties met het model IMPAQT, waarmee het transport van microverontreinigingen in het Ketelmeer gesimuleerd kan worden. Hiervoor zijn de resultaten gemiddeld over ruimte en tijd, zodat uiteindelijk daggemiddelde waarden voor veertien compartimenten overgebleven zijn. De compartimentering, de middelingsprocedure en een vergelijking van enkele resultaten staat beschreven in bijlage VII.



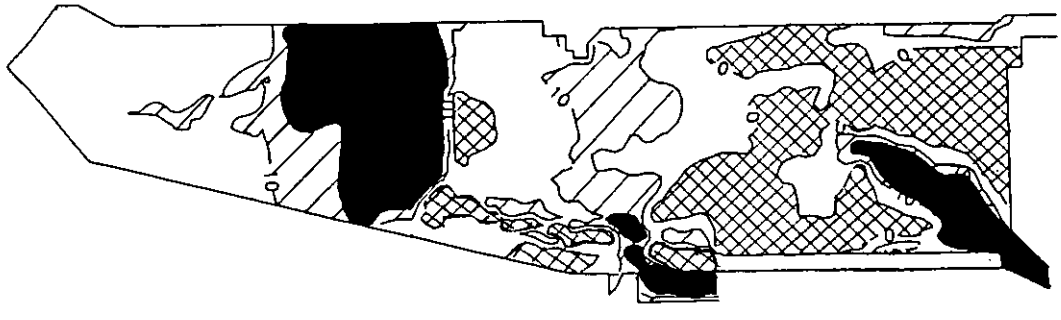
Figuur 5.2. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 1: continuering huidig beheer.



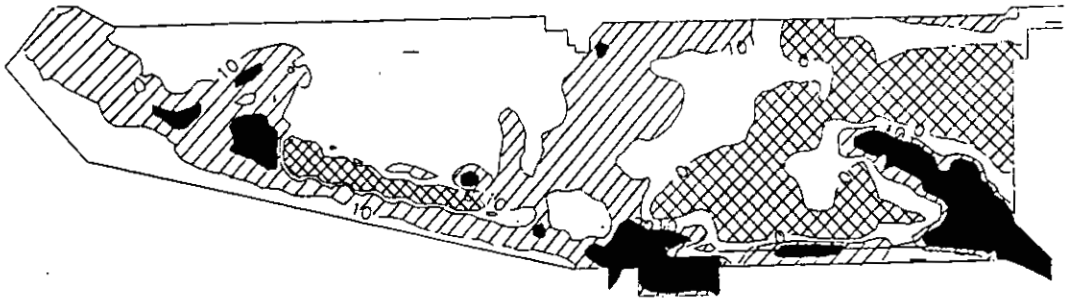
Figuur 5.3. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 2: aanleg twee scheepvaartgeulen.



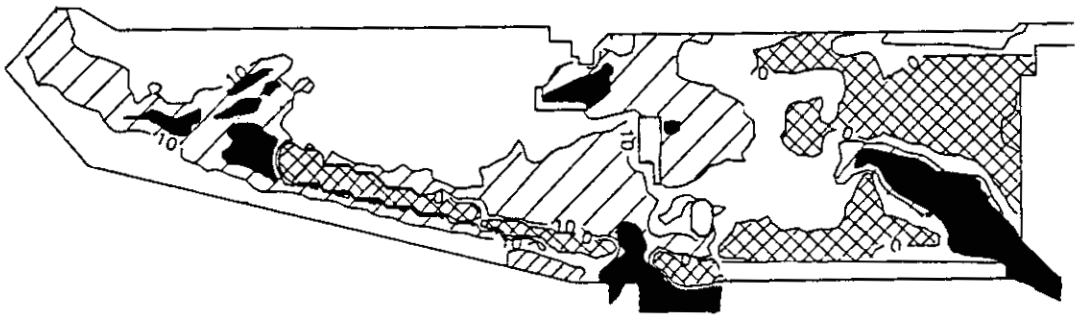
Figuur 5.4. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 3: verwijdering gehele sliblaag.



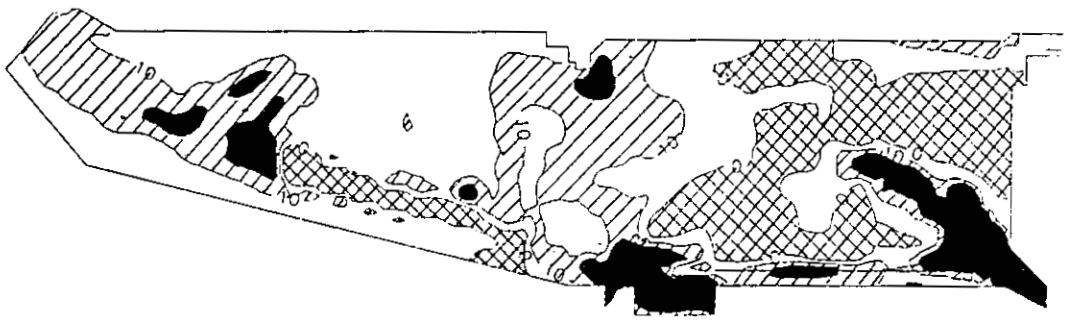
Figuur 5.5. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 4: Grootschalige zandwinning.



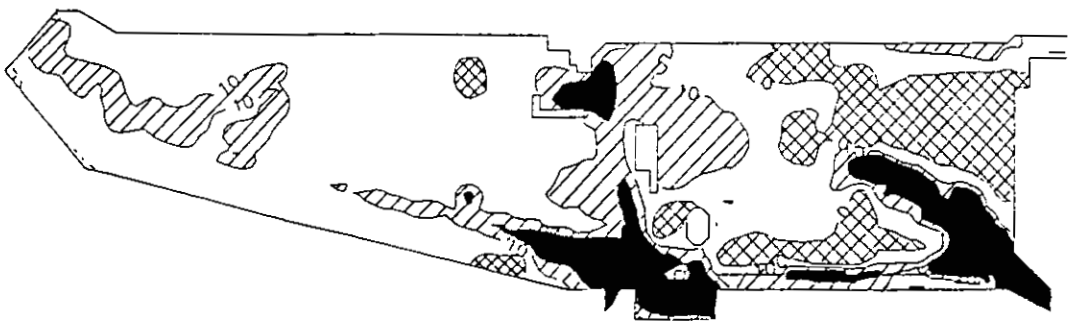
Figuur 5.6. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 5: sanering randen.



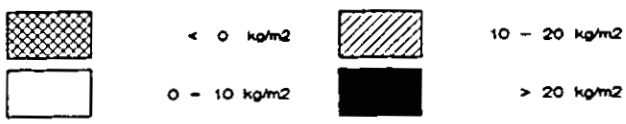
Figuur 5.7. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 6: aanleg eilanden.

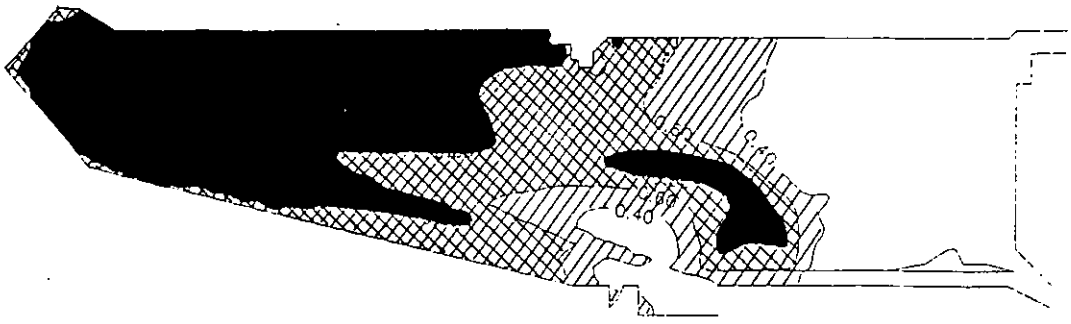


Figuur 5.8. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 7: sanering havens.

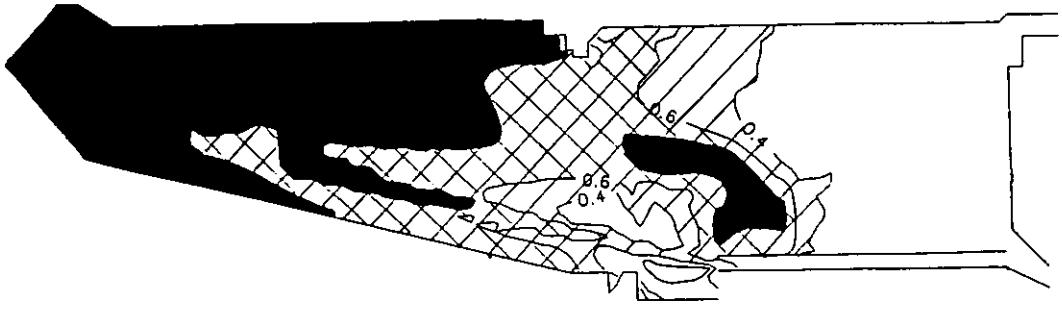


Figuur 5.9. Massatoename sediment na 1 jaar, variant 8: combinatie variant 2, 6 en 7.

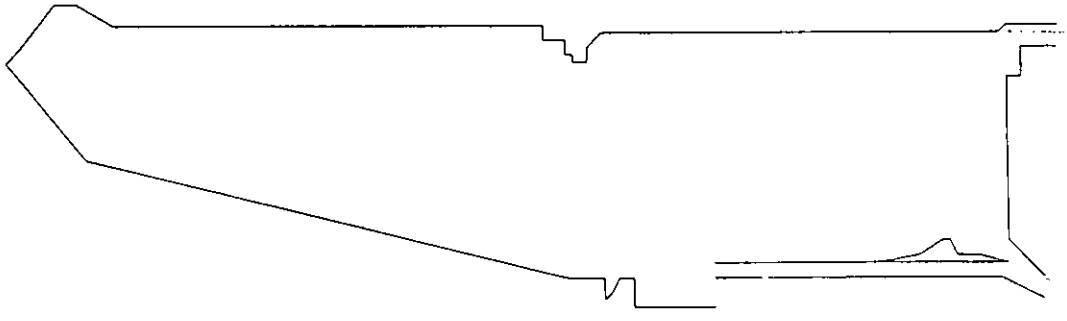




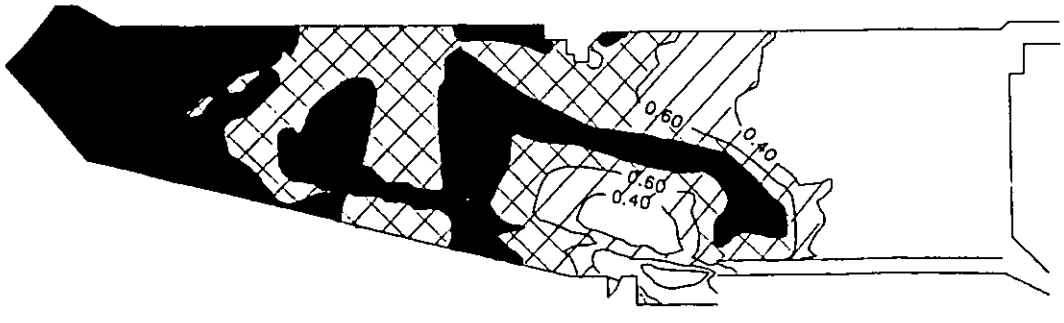
Figuur 5.10. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 1: continuering huidig beheer.



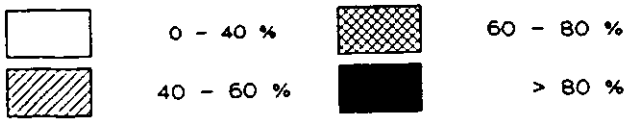
Figuur 5.11. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 2: aanleg twee scheepvaartgeulen.

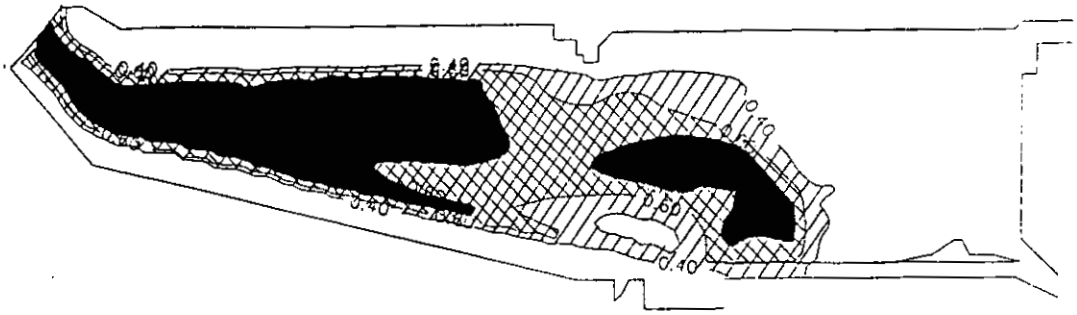


Figuur 5.12. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 3: verwijdering gehele sliblaag.

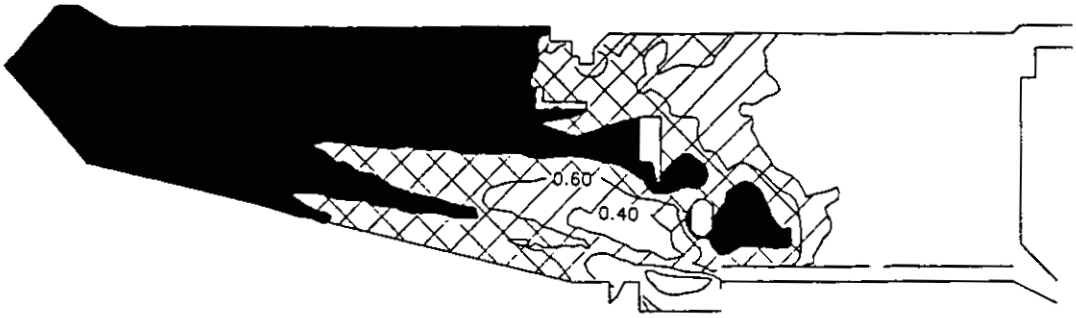


Figuur 5.13. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 4: Grootschalige zandwinning.

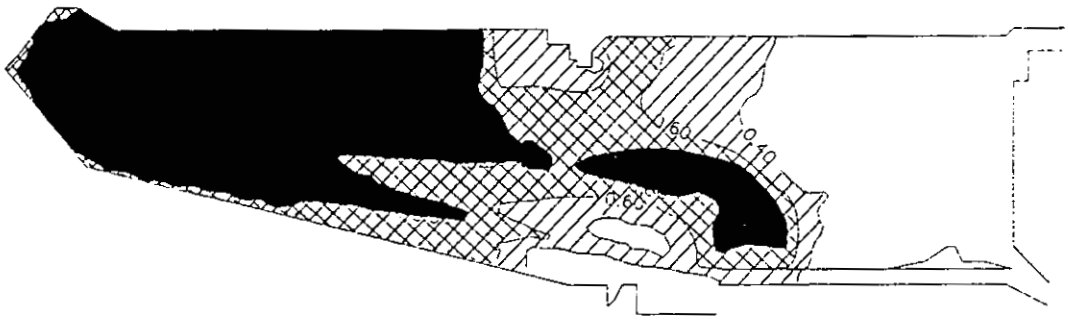




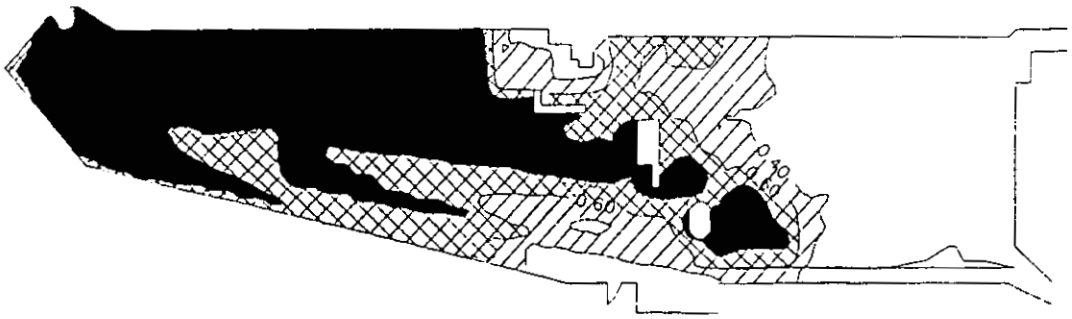
Figuur 5.14. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 5: sanering randen.



Figuur 5.15. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 6: aanleg eilanden.



Figuur 5.16. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 7: sanering havens.



Figuur 5.17. Fractie bodemslib in toplaag na 1 jaar, variant 8: combinatie variant 2, 6 en 7.

Tabel 5.1. Zwevende stof balans Ketelmeer.

scenario	IJssel 10^6 kg	Ketelbrug 10^6 kg	retentie %
1 continuering huidig beheer	601	265	56
2 aanleg vaargeulen	601	256	57
3 verwijdering sliblaag	601	226	62
4 grootschalige zandwinning	601	217	64
5 sanering randen	601	253	58
6 aanleg eilanden	601	251	58
7 sanering havens	601	262	56
8 combinatie 2, 6 en 7	601	240	60

Tabel 5.2. Fractiegrootteverdeling slib Ketelmeer.

scenario	IJssel			Ketelbrug		
%	fr-1	fr-2	fr-3	fr-1	fr-2	fr-3
1 continuering huidig beheer	35	30	35	79	17	4
2 aanleg vaargeulen	35	30	35	80	16	4
3 verwijdering sliblaag	35	30	35	83	16	1
4 grootschalige zandwinning	35	30	35	86	12	2
5 sanering randen	35	30	35	81	15	3
6 aanleg eilanden	35	30	35	81	15	3
7 sanering havens	35	30	35	79	17	4
8 combinatie 2, 6 en 7	35	30	35	83	14	3

Tabel 5.3. Bodemslib in het slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt.

scenario	fractie bodemslib in zw. slib %	transp.bodemslib naar IJsselmeer 10^6 kg	afname transport naar IJsselmeer %
1 continuering huidig beheer	29	77.4	0
2 aanleg vaargeulen	29	73.1	6
3 verwijdering sliblaag	0	0.0	100
4 grootschalige zandwinning	23	50.7	34
5 sanering randen	23	57.8	25
6 aanleg eilanden	28	69.5	10
7 sanering havens	28	74.0	4
8 combinatie 2, 6 en 7	26	61.8	20

5.2.3. Analyse van de resultaten

In deze paragraaf zullen uit de resultaten enkele belangrijke trends gedestilleerd worden. Dit betreft ten eerste een nadere karakterisering van de huidige situatie (variant 1), en ten tweede een onderlinge vergelijking van de varianten. De belangrijkste elementen in de analyse zijn de sedimentatiepatronen, de verspreiding van bodemslib, en het transport van slib naar het IJsselmeer.

1. Sedimentatiepatronen

In figuur 5.2 is het sedimentatiepatroon bij continuering van het huidige beheer gesimuleerd. De meest markante punten die hieruit volgen zijn:

- Het grootste deel (meer dan 2/3) van het Ketelmeer wordt gekarakteriseerd door netto-sedimentatie van slib;
- In het oostelijke deel van het Ketelmeer vindt lichte netto erosie plaats. Deze erosie is dermate minimaal (over het algemeen < 1 kg/m^2,jr) dat er in feite sprake is van een constant blijvende bodemligging. Netto sedimentatie in het oostelijke deel vindt plaats rond de monding van het Kattendiep. Ook nabij de monding van het Keteldiep vindt veel netto sedimentatie plaats;
- Belangrijke netto sedimentatie vindt plaats in het centrale en westelijke deel van het Ketelmeer. De meeste sedimentatie treedt op in het midden van het Ketelmeer (tussen Ketelhaven en Schokkerhaven) en in het midden van het westelijke deel. Sterke sedimentatie is te vinden in het gebied met de zandwinputten;
- In de vaarroute overheerst de erosie veroorzaakt door scheepvaart; direct voor de monding van het Keteldiep draagt de stroming bij aan de erosie;
- Lichte erosie vindt plaats langs de zuidrand, westelijk van Ketelhaven. Op deze lokatie is de combinatie van diepte, strijklengten en windomstandigheden in het gesimuleerde jaar zodanig dat netto erosie optreedt. In de meeste gebieden van het centrale en westelijke deel is de balans net omgekeerd. Dit wijst er op dat de afwisseling van sedimentatie en erosie, met name in het centrale deel van het Ketelmeer, groot is.

De belangrijkste verschillen die de overige varianten ten opzicht van deze simulatie laten zien zijn de volgende:

- Variant 2: de aanleg van twee vaargeulen heeft tot gevolg dat de erosie door scheepvaart in de vaargeul Keteldiep-Ketelbrug wegvalt. In plaats daarvan is er sprake van een sterke netto sedimentatie in de uitgediepte vaargeul. Doordat inkomend IJsselslib hierdoor afgevangen wordt, neemt de netto sedimentatie in het westelijke deel iets af. De verschillen zijn verder minimaal;
- Variant 3: de verwijdering van de gehele sliblaag heeft grote gevolgen voor het sedimentatiepatroon. De sedimentatie concentreert zich in het centrale deel van het Ketelmeer. Met name het sterk uitgediepte deel rond Ketelhaven laat een sterke sedimentatie zien. Doordat veel slib al in het centrale deel wordt afgevangen, is de netto sedimentatie in het westelijke deel minder. De erosiegebieden ontbreken geheel, omdat is aangenomen dat al het slib verwijderd is, zodat ook niets erodeerbaar is;
- Variant 4: in de zandwinput treedt een sterke sedimentatie op. Door de grote waterdiepte in de put is resuspensie vrijwel onmogelijk geworden. Het gevolg van deze sterke sedimentatie is een verminderde sedimentatie westelijk van de zandwinput. De afdekking van de verontreinigde lagen in dit deel van het Ketelmeer wordt daardoor vertraagd. Berekend is dat in dit gebied westelijk van de zandwinput de jaarlijkse netto sedimentatie met ongeveer 40 % afneemt. In overige delen van het meer blijft het patroon min of meer hetzelfde als bij continuering van het huidige beheer. Oostelijk van de zandwinput ontstaat een klein

netto-erosiegebied, veroorzaakt door veranderende waterbeweging rond de put. Dit toont aan dat de omslag van netto sedimentatie naar netto erosie in het centrale deel van het Ketelmeer al snel kan plaatsvinden.

- Variant 5: in de uitgediepte randen treedt een verhoogde sedimentatie op, met name in het gebied rond Ketelhaven. Rond Ketelhaven veranderd het gesimuleerde erosiegebied in een accumulatiegebied.
- Variant 6: rond de aangelegde eilanden treedt een verhoogde sedimentatie op. In grote lijnen blijft het sedimentatiepatroon in het Ketelmeer onveranderd.
- Variant 7: door verdieping van de gebieden rond de havens zal hier, in het bijzonder nabij Ketelhaven, een versterkte accumulatie van materiaal optreden.
- Variant 8: de aanleg van eilanden, verdieping van de vaargeul en sanering van de gebieden rond de havens leidt tot een sterk sedimentatie in deze gebieden, waardoor veel IJsselslib wordt weggevangen.

2. Verspreiding van bodemslib

Figuur 5.10 toont de verspreiding van bodemslib in de toplaag van het sediment. Dit is een momentopname van de situatie na 1 jaar, en geeft een goed beeld van de gradiënten zoals die voorkomen in het Ketelmeersediment. Opmerkelijke punten zijn de volgende:

- In het oostelijke deel ligt nauwelijks bodemslib, ondanks het feit dat er netto erosie optreedt. Het slib dat hier opwervelt is voornamelijk vers gesedimenteerd IJsselslib. De rest van het sediment bestaat uit (niet opwervelbaar) zand;
- In de richting van de Ketelbrug neemt het gehalte aan bodemslib sterk toe, van 40% tot meer dan 80%. De oorzaak hiervoor is tweeërlei:
  - In het centrale deel vindt relatief vaak erosie van bodemslib plaats. Dit slib wordt getransporteerd naar het westelijke deel, waar veel minder vaak erosie optreedt;
  - In het westelijke deel krijgt menging tussen bodemlagen meer gelegenheid dan in het centrale deel. In het centrale deel vindt een belangrijke afdekking met IJsselslib plaats. Een groot deel van dit IJsselslib bereikt het westelijke deel niet, of via enkele resuspensie-sedimentatie-stappen, waardoor eveneens menging met bodemslib plaatsvindt;
- De bijdrage aan de hoeveelheid bodemslib door opwerveling door scheepvaart in de vaargeul is gering. Enige verhoging in de fractie bodemslib in de vaargeul is wel zichtbaar.

Vergelijking van de resultaten voor de andere varianten met deze simulatie levert het volgende op:

- Variant 2: De uitdieping van de vaargeulen heeft een geringe wijziging van de verspreiding van bodemslib tot gevolg. In het westelijke deel, in het verlengde van de vaargeul, is de fractie bodemslib belangrijk kleiner dan bij continuering van het huidige beheer. Dit is het effect van het ontbreken van de 'pluim' van door scheepvaart opgewerveld bodemslib;
- Variant 3: Het geheel verwijderen van de sliblaag heeft uiteraard tot gevolg dat er geen bodemslib meer aanwezig is in het systeem;
- Variant 4: In de diepe zandwinput sedimenteert slib dat gemiddeld voor 60 tot 80% bestaat uit bodemslib. Met name langs de noordrand van het zandwingebied betekent dit een belangrijke verandering ten opzichte van variant 1. Dit betekent tegelijkertijd dat in de zandwinput relatief veel IJsselslib sedimenteert, dat in de huidige situatie in het gebied westelijk van de put sedimenteert.
- Variant 5: in de gesaneerde gebieden komt weinig bodemslib in de toplaag voor. Dit leidt ook tot een kleine afname van het gehalte bodemslib in de toplaag in het westelijk deel.
- Variant 6: door het wegvangen van IJsselslib in het gebied rond de eilanden wordt de netto

sedimentatie in de westelijker gelegen delen beperkt. Dit leidt o.m. tot hogere gehalten bodemslib in de toplaag, in het bijzonder in het centrale deel van het meer.

- Variant 7: hoewel in de gesaneerde gebieden een betrekkelijk laag gehalte bodemslib in de toplaag voorkomt, blijft globaal het verspreidingspatroon van bodemslib gelijk aan die in de uitgangssituatie. In tegenstelling tot de resultaten voor variant 5 komt in deze berekeningen meer dan 40% bodemslib in de toplaag van het sediment rond schokkerhaven voor. Een mogelijke verklaring is dat in deze simulatie verondersteld is dat in het geheel geen slib meer voorkomt in de uitgebaggerde delen, terwijl in variant 5 uitgegaan werd van een zekere laag schoon slib in de uitgebaggerde delen; dit om stabiliteits-redenen.
- Variant 8: de combinatie van maatregelen leidt tot veel sedimentatie van IJsselslib direct bij monding van het Keteldiep en rond de eilanden. Dit leidt op haar beurt tot een grotere fractie bodemslib in de toplaag in meer westelijk gelegen delen.

3. Transport naar het IJsselmeer

In de huidige situatie is de gesimuleerde retentie van slib 56%. Dit is een waarde die goed overeenkomt met door anderen gevonden waarden, ongeveer 50% (Beurskens e.a., 1988). De aanvoer van slib door de IJssel is in het gesimuleerde jaar ongeveer 0.6 Mton, hetgeen aan de hoge kant is, vergeleken met andere waarden (Beurskens e.a.: 0.46 Mton). Dit is mede veroorzaakt door het gebruikte simulatiejaar, waarin het IJsseldebiet relatief hoog was. Ook het gebruik van de lineaire relatie tussen IJsseldebiet en slibconcentratie in IJsselwater veroorzaakt mogelijk bij hoge debieten een overschatting van slibconcentraties.

De fractiegrootteverdeling van het slib dat het Ketelmeer verlaat, verschilt aanzienlijk van de fractiegrootteverdeling van het aangevoerde IJsselslib. Door de snelle bezinking van zwaardere deeltjes, vermindert het aandeel hiervan in het slib. Uiteindelijk blijkt ongeveer 80% van het slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt, te bestaan uit de lichtste fractie.

De hoeveelheid bodemslib die in de simulatie voor de huidige situatie naar het IJsselmeer getransporteerd wordt, is ongeveer 77 miljoen kg per jaar, ongeveer 30% van de totale slibvracht naar het IJsselmeer. Dit ligt op gelijke hoogte met het door Beurskens e.a. (1988) en Ten Hulscher e.a. (1990) gevonden percentage van 35%.

De effecten die de verschillende beheers- en inrichtingsvarianten hebben op het slibtransport naar het IJsselmeer, ten opzichte van de huidige situatie worden hieronder samengevat.

- Variant 2: de aanleg van twee scheepvaartgeulen heeft een minimale invloed op de totale slibbalans van het Ketelmeer. Zowel de retentie, als de fractiegrootteverdeling en aandeel van bodemslib in het naar het IJsselmeer getransporteerde slib, blijven hetzelfde als in de huidige situatie. De effecten van de scheepvaartgeulen zijn vooral lokaal;
- Variant 3: de verwijdering van de gehele sliblaag heeft een kleine toename van de slibretentie tot gevolg, veroorzaakt door de algehele verdieping van het Ketelmeer, waardoor de resuspensie van slib afneemt. Met name de opwerveling van de zwaarste fractie neemt af, blijkend uit het zeer lage percentage van deze fractie in het slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt. Uiteraard is er geen bodemslib in het getransporteerde slib aanwezig.
- Variant 4: De aanleg van de diepe zandwinput leidt tot een kleine verhoging van de slibretentie, door het afvangen van veel slib in de zandwinput. Dit leidt eveneens tot een vermindering van het aandeel van de zwaarste fracties in het slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt. De fractie bodemslib in het getransporteerde slib daalt naar 23%. Dit wordt veroorzaakt door het relatief grotere aandeel van de lichtste fractie IJsselslib die zonder te bezinken naar het IJsselmeer getransporteerd wordt. Samen met de verhoogde retentie, leidt de

aanleg van de zandwinput tot een afname van het transport van bodemslib naar het IJsselmeer met ongeveer 34% ten opzichte van de huidige situatie.

- Variant 5: de slibbalans en fractieverdeling blijven vrijwel gelijk aan die in de uitgangssituatie. Door een vermindering van de opwerveling van bodemslib treedt een afname (ca. 25%) van het transport van bodemslib naar het IJsselmeer plaats.
- Variant 6: de verminderde opwerveling van bodemslib in het gebied rond de eilanden wordt voor een deel teniet gedaan door een verhoogde opwerveling van bodemslib in westelijker gelegen delen van het Ketelmeer. Het effect van deze inrichtingsmaatregel op het transport van bodemslib naar het IJsselmeer is dan ook beperkt tot een afname van 10%.
- Variant 7: sanering van de gebieden rond de havens heeft nauwelijks effect op de slibbalans, de fractieverdeling en het transport van bodemslib naar het IJsselmeer.
- Variant 8: doordat de verminderde opwerveling van bodemslib in de gesaneerde gebieden rond de havens, de vaargeul en de gebieden rond de eilanden ten dele gecompenseerd wordt met een vergrote opwerveling van bodemslib in westelijker gelegen delen is het effect van deze combinatie van maatregelen op het transport van bodemslib naar het IJsselmeer beperkt tot een afname met ca. 20 % t.o.v. de huidige situatie.

5.2.4. Extrapolatie van de resultaten: lange termijn ontwikkelingen

De simulaties geven een beeld van het slibtransport vlak na het uitvoeren van de ingrepen in het Ketelmeer. Op basis hiervan is het mogelijk een globale schatting te maken van de belangrijkste ontwikkelingen in het slibtransport op een termijn van enkele decennia. In bijlage VIII wordt een dergelijke extrapolatie van de resultaten uiteengezet. In deze paragraaf worden slechts enkele hoofdlijnen gegeven van de te verwachten veranderingen in sedimentatiepatronen en kwaliteit van slib in de bovenste 10 cm. van het sediment en van het naar het IJsselmeer getransporteerde slib.

1. Sedimentatiepatronen

Voor de extrapolatie wordt er van uit gegaan dat de gesimuleerde netto sedimentatiesnelheden (in mm/jaar) niet essentieel veranderen op een termijn van 20 jaar. Dit betekent dat in principe de sedimentatiepatronen blijven zoals ze gesimuleerd zijn.

In tabel 5.4 is voor het centrale en het westelijke deel van het Ketelmeer weergegeven wat de gemiddelde netto sedimentatiesnelheid is. Dit geldt echter niet voor de verschillende gebieden die in de verschillende varianten worden uitgediept. Met behulp van de gesimuleerde netto sedimentatiesnelheden kan ingeschat worden hoe lang het duurt voordat uitgediepte delen weer zover zijn dichtgeslibd, dat het effect van de verdieping niet meer merkbaar is, d.w.z. dat er weer erosie/resuspensie kan optreden. De gemiddelde gesimuleerde netto sedimentatiesnelheden voor deze gebieden zijn eveneens weergegeven in tabel 5.4.

Tabel 5.4. Netto sedimentatiesnelheid per deelgebied.

	netto sedimentatiesnelheid in mm/jaar							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
Centraal								
gemidd.	11	13	16	18	12	13	12	14
geul	-	45	-	-	-	-	-	48
zandwin	-	-	-	40	-	-	-	-
rand	-	-	-	-	20	-	-	-
havens	-	-	-	-	-	-	12	23
West								
gemidd.	20	16	13	10	19	17	19	15
putten	42	37	26	20	38	36	42	32
geul	-	18	-	-	-	-	-	22
rand	-	-	-	-	13	-	-	-

Uit de resultaten kan het volgende afgeleid worden:

- Gemiddeld is de sedimentatiesnelheid in het centrale en westelijke deel van het Ketelmeer in de orde van 1 à 2 cm per jaar. Op een termijn van 20 jaar betekent dit dat een vermindering van de waterdiepte van 20 tot 30 cm verwacht kan worden. Alleen lokaal, in ondiepe delen van het centrale deel, heeft dit een significante invloed op de sedimentatiepatronen. Over het algemeen is het echter aanvaardbaar om te stellen dat de gesimuleerde sedimentatiepatronen voor een termijn van 20 jaar geldig blijven;
- In uitgediepte delen, of rond aangelegde eilanden, wijkt de netto sedimentatiesnelheid sterk af van de gemiddelde sedimentatiesnelheid. In deze gebieden zal binnen een termijn van 20 jaar een belangrijke verandering in sedimentatiesnelheid op treden, door de snelle diepteverandering. Enkele specifieke punten zijn:
  - in de uitgediepte scheepvaartgeulen (variant 2) is de sedimentatie in het stuk nabij de monding van de IJssel dermate hoog (tot 15 cm/jaar), dat verwacht wordt dat binnen ca. 6 jaar weer erosie door scheepvaart kan optreden. Gemiddeld sedimenteert in de eerste kilometers van de vaargeul vanaf het Keteldiep ongeveer 5 cm/jaar, zodat dit stuk in 20 jaar gemiddeld bijna een meter verontdiept kan zijn;
  - de sedimentatiesnelheid in de zandwinput (variant 4) is hoog, maar door de grote diepte van de put wordt niet verwacht dat binnen enkele decennia resuspensie vanuit de put zal optreden;
  - in de uitgediepte randen en havens nabij de IJsselmonding (varianten 5, 7 en 8) wordt verwacht dat op een termijn van ongeveer 10 jaar, de sedimentatie zover is voortgeschreden dat resuspensie ook in deze gebieden weer belangrijk kan worden;
  - rond de aangelegde eilanden (varianten 6 en 8) treedt een verhoogde sedimentatie op, ten gevolge van de invloed van de eilanden op de strijklengte (niet in tabel 5.4 opgenomen, maar afgeleid uit de gegevens, die samengevat zijn figuur 5.7 en 5.9). Verwacht wordt dat de sedimentatie doorgaat tot een waterdiepte bereikt is die vergelijkbaar is met die langs de randen van het Ketelmeer: 1.5 à 2 meter. Dit kan met de gesimuleerde sedimentatiesnelheden in een termijn van ongeveer 10 jaar plaatsvinden.

2. Afdekking van het sediment met IJsselslib en transport van bodemslib naar het IJsselmeer

Met behulp van de met STRESS-2d gesimuleerde sedimentatie- en resuspensiefluxen en het horizontaal transport van zwevende stof kunnen schattingen gemaakt worden omtrent de ontwikkeling van de samenstelling van het slib in de bovenste sedimentlaag (10 cm) en dat in de uitstroom naar het IJsselmeer op de middellange termijn. Hiervoor is een eenvoudig model ontwikkeld. Dit model wordt beschreven in bijlage VIII. In het model worden 11 compartimenten onderscheiden. Er worden 12 slibfracties gebruikt, te weten IJsselslib en bodemslib dat (oorspronkelijk; d.w.z. bij aanvang van de simulatie) afkomstig is uit de 11 compartimenten. Met het model kan voor een periode van 10 tot 20 jaar gesimuleerd worden welke ontwikkeling het slib in de waterfase en in de bovenste 10 cm van de bodem zal doormaken. Eveneens kan worden aangegeven uit welke delen van het Ketelmeer het naar het IJsselmeer getransporteerde slib (oorspronkelijk) afkomstig is. Een uitgebreid overzicht van de simulatieresultaten wordt gegeven in bijlage VIII. In tabel 5.5 en 5.6 worden de belangrijkste uitkomsten samengevat.

Tabel 5.5. Fractie bodemslib in het water in het westelijke deel van het Ketelmeer, na 0, 5, 10 en 20 jaar

	fractie bodemslib in zwevend slib in Ketelmeer-west (%)							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
0 jaar	29	29	0	23	23	28	28	26
5 jaar	24	13	0	18	24	20	24	16
10 jaar	20	7	0	15	22	19	21	13
20 jaar	15	2	0	10	18	15	15	7
	(2)*			(3)*	(5)*	(2)*	(2)*	

* geschatte waarde na 20 jaar, indien rekening gehouden wordt met uitputting van het bodemslib in de vaargeul na 10 jaar.

De belangrijkste punten die hieruit volgen zijn:

- Zonder ingrepen (variant 1) zal over een lange periode transport van verontreinigd bodemslib naar het IJsselmeer plaatsvinden. De belangrijkste bronnen van verontreinigd bodemslib zijn het centrale deel en de vaargeul. Deze laatste bijdrage is op de lange termijn waarschijnlijk overschat. Berekend kan worden dat het simulatieresultaat overeen komt met een laag van meer dan 1 meter bodemslib in de vaargeul, die naar het IJsselmeer getransporteerd zal worden. Er zal waarschijnlijk na ca. 10 jaar uitputting optreden. Het in tabel 5.5 tussen haakjes gegeven resultaat na 20 jaar houdt rekening met deze uitputting. Ook na 10 tot 20 jaar zal in de bovenste laag van de waterbodem nog een grote hoeveelheid (20 - 55 %) vervuild bodemslib aanwezig zijn.
- De verdieping van de vaargeul (variant 2) zal op de korte termijn (5 - 10 jaar) leiden tot een vermindering van de hoeveelheid bodemslib, die naar het IJsselmeer getransporteerd wordt. Op de lange termijn is, als rekening gehouden wordt met het hiervoor genoemde te verwachten uitputtingsverschijnsel in de vaargeul, nauwelijks verschil met scenario 1 aanwezig. In alle compartimenten zal de verdieping van vaargeulen leiden tot een verbeterde waterbodemkwaliteit. Met name in het midden-westelijk deel is dit verschil aanzienlijk.
- Grootschalige zandwinning (variant 4) leidt op de middellange termijn tot een vermindering van de bijdrage van bodemslib aan de slibstroom naar het IJsselmeer. In het westelijk deel van het Ketelmeer zal de afdekking van vervuilde bodemlagen vertraagd worden.

- De sanering van de randen (variant 5) heeft op de middellange termijn nauwelijks invloed op het transport van bodemslib naar het IJsselmeer. De effecten op de ontwikkeling van de waterbodemkwaliteit zijn, behalve langs de randen zelf waar de gehalten bodemslib kleiner dan 20% zijn, niet groot.
- Ook de aanleg van eilanden in het Ketelmeer (variant 6) heeft een op de middellange termijn nauwelijks merkbare invloed op de samenstelling van het naar het IJsselmeer getransporteerde slib. Het afvangen van IJsselslib in de midden-oostelijk deel van het meer leidt tot een vertraging van de afdekking in westelijke gelegen delen.
- De effecten van sanering van de gebieden rond havens (variant 7) heeft lokaal invloed op de waterbodemsamenstelling, maar heeft nauwelijks invloed op het transport van bodemslib naar het IJsselmeer. Er wordt een licht negatief effect op een termijn van 10 à 20 jaar op de bodemsamenstelling gesimuleerd.
- De combinatie van maatregelen in variant 8 leidt, vanwege het wegvangen van IJsselslib in het oostelijk deel van het Ketelmeer, op de lange termijn tot hogere gehalten bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem (m.u.v. het compartiment waarin de maatregelen grotendeels plaatsvinden. Met name voor het midden-westelijk deel zijn de verschillen met continuering van het huidig beheer groot.

Tabel 5.6. Fractie bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in het Ketelmeer, na 0, 5, 10 en 20 jaar

	fractie bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem (%)							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
Oost (1)								
0 jaar	100	100	0	100	100	100	100	100
5 jaar	0	0	0	0	0	0	0	0
10 jaar	0	0	0	0	0	0	0	0
20 jaar	0	0	0	0	0	0	0	0
Midden-oost (2, 6a t/m c)								
0 jaar	100	98	0	100	74	100	78	85
5 jaar	63	59	0	67	55	56	58	46
10 jaar	42	34	0	47	39	34	40	24
20 jaar	22	13	0	25	22	16	22	8
Midden-west (3, 7a t/m c)								
0 jaar	100	96	0	0	64	100	100	96
5 jaar	73	65	0	18	58	79	76	85
10 jaar	55	44	0	16	50	64	58	75
20 jaar	34	21	0	12	37	45	37	58
West (4, 5, 8a t/m c)								
0 jaar	100	95	0	100	55	100	100	95
5 jaar	58	57	0	72	33	61	59	61
10 jaar	39	36	0	54	25	42	40	42
20 jaar	23	16	0	33	19	26	24	25

De bij de compartimenten gegeven nummering verwijst naar indeling van het Ketelmeer zoals gebruikt in de IMPAQT-studie; bijlage VII

6. CONCLUSIES

In de inleiding van dit rapport is de doelstelling van deze studie vermeld. De doelstelling is ten eerste het ontwikkelen van een operationeel model voor het slibtransport in het Ketelmeer, op basis van het bestaande model voor sedimenttransport in ondiepe meren, STRESS-2d. Het tweede aspect van de doelstelling is het analyseren van de huidige situatie betreffende het slibtransport in het Ketelmeer, via modelberekeningen, en ten derde het doorrekenen van verschillende alternatieven voor de inrichting en het beheer van het Ketelmeer. De resultaten van deze studie zijn mede invoer voor berekeningen m.b.t. het gedrag en transport van microverontreinigingen m.b.v. het model IMPAQT. In dit hoofdstuk wordt op de eerste drie aspecten van de doelstelling ingegaan. Door Smits en Sonneveldt (1991) wordt het gebruik van de resultaten van deze studie in IMPAQT berekeningen bediscussieerd.

6.1. Het slibtransportmodel STRESS-2d voor het Ketelmeer

Het model STRESS-2d, ontwikkeld voor studies in het Markermeer en Veluwemeer, blijkt ook voor de situatie in het Ketelmeer een nuttig en werkbaar instrument te zijn voor het uitvoeren van simulatieberekeningen betreffende het slibtransport. De voor het slibtransport in het Ketelmeer belangrijkste processen worden in het model beschreven.

Voor enkele punten in het model zijn verbeteringen mogelijk. Dit geldt voor de beschrijving van erosie door stroming en scheepvaart, die in het model zeer pragmatisch zijn ingevoerd. Met name in het bodemmodel zijn nog enkele tekortkomingen aanwezig, zoals het ontbreken van een windafhankelijke erosie van de onderlaag en een door consolidatie veranderende kritische schuifspanning. Het model in de huidige vorm voldoet echter, zodat de verbeteringen, die ook een meer gecompliceerde parameterschatting tot gevolg hebben en op het probleem van het ontbreken van noodzakelijke datasets stuiten, niet in deze studie doorgevoerd zijn.

6.1.1. Toepassing van STRESS-2d op het Ketelmeer

De gekozen plaatsstap in het Ketelmeermodel is 100 meter. Voor de tijdstap bleek een waarde van 10 minuten de maximaal toe te passen waarde in verband met de stabiliteit van het model. Het betrekkelijk grote aantal rekenpunten en de kleine tijdstap maken simulatieberekeningen over langere perioden tijdrovend.

Bij het beschrijven van de waterbeweging in het Ketelmeer blijkt een goede beschrijving van de randvoorwaarden van bijzonder belang te zijn. In het bijzonder gaat het hier om de aanvoer van IJsselwater en de uitwisseling tussen Ketelmeer en IJsselmeer. Een voor deze studie bevredigende oplossing voor het beschrijven van de uitwisseling tussen Ketelmeer en IJsselmeer is verkregen door het toepassen van een grofmazig IJsselmeermodel voor het berekenen van de debieten tussen beide meren. Op enkele punten heeft het IJsselmeermodel tekortkomingen. Het gaat dan om de iets gedraaide ligging van het Ketelmeer en de sterk vereenvoudigde waterbalans voor het IJsselmeer waarin het spuidebiet bij de Afsluitdijk gelijk gesteld wordt aan het IJsseldebiet.

Er is in deze studie gekozen voor een indeling in drie slibfracties, elk uitgesplitst in een fractie IJsselslib en een fractie bodemslib, zodat zes fracties ontstaan. Een zevende zandfractie is toegevoegd om overmatige opwerveling in het zandige oostelijke deel van het Ketelmeer te voorkomen. De indeling in fracties blijkt noodzakelijk. Elk van de fracties vertoont een ander resuspensie/sedimentatiegedrag en heeft dientengevolge een andere verblijftijd in het systeem. De opdeling van slib in IJsselslib en bodemslib is wenselijk, gezien vanuit het oogpunt dat het

een belangrijke vraag is waar, en in welke mate opwerveling plaatsvindt van ouder, sterk verontreinigd slib in het Ketelmeer. Benadrukt moet worden dat niet direct een koppeling gemaakt mag worden tussen 'sterk verontreinigd slib' en bodemslib enerzijds en 'schoon slib' en IJsselslib anderzijds. De scheiding is gemaakt om een indicatie te krijgen van de mate waarin slib dat in de huidige situatie reeds aanwezig is in de bodem van het Ketelmeer meedoet in de slibhuishouding van het Ketelmeer. De verhouding bodemslib/IJsselslib geeft eveneens slechts een indicatie van de mate van verontreiniging van slib in water en sediment.

In deze studie is gebruik gemaakt van een bodemmodel waarin een dunne toplaag en een onderliggende dikkere laag worden onderscheiden. Dit onderscheid is noodzakelijk gebleken voor een goede beschrijving van het slibtransport.

Erosie van slib door stroming en scheepvaart is in het model ingevoerd op een pragmatische wijze, waarbij resuspensiefluxen zijn opgelegd in bepaalde gridcellen. Deze aanpak leidt tot bevredigende resultaten. Met name de overmatige sedimentatie die in de IJsselmondingen (Keteldiep en Kattendiep) gesimuleerd wordt zonder erosie door stroming wordt voorkomen. Scheepvaart levert lokaal een bijdrage aan de opwerveling van slib uit de onderlaag, hetgeen met de toegepaste beschrijving van een opgelegde resuspensieflux gecombineerd met een sterke menging tussen top- en onderlaag goed gesimuleerd wordt.

6.1.2. Calibratie van het model

Voor het calibreren van het waterbewegingsmodel voor het Ketelmeer zijn een aantal problemen gesignaleerd. Voor de calibratie van de waterbeweging is het in principe wenselijk over stroomsnelheidsgegevens te beschikken. Het meten van de stroomsnelheid, zeker het meten van de dieptegemiddelde stroomsnelheid, blijkt moeilijk zo niet onmogelijk in het Ketelmeer. Voor de calibratie zijn dientengevolge alleen waterstandsgegevens beschikbaar.

De invloed van het IJsselmeer op de waterstand in het Ketelmeer is zeer dominant. Alleen bij een zeer goede beschrijving van de waterbeweging in het IJsselmeer (incl. Ketelmeer) is een calibratie van het 'detail-model' voor het Ketelmeer mogelijk.

Voor de calibratie van het slibtransportmodel zijn twee vereenvoudigde modellen toegepast: een 1-dimensionaal en een 2-dimensionaal model. Met behulp van het 2-dimensionale model is via een zorgvuldig uitgevoerde calibratieprocedure een goede set parameters voor het slibtransportmodel verkregen.

Tijdens de calibratie bleek dat er tussen verschillende calibratieperioden een belangrijk verschil zit in de optimale set parameters. Mogelijk is het verschil terug te voeren op verschillen in het gedrag van slib in zomer en winter, veroorzaakt door het verschil in temperatuur. De optimale set parameters die gekozen is, is een compromis tussen verschillende parametersets, die elk de slibconcentraties voor een meetperiode goed kunnen beschrijven. Met deze set kan met voldoende mate van betrouwbaarheid het verloop van de slibconcentratie in zowel stormachtige als rustige perioden in zomer en winter gesimuleerd worden.

Op basis van de validatieresultaten kan gesteld worden dat het model voldoende nauwkeurig en betrouwbaar is voor simulatie van de slibhuishouding in het Ketelmeer. Slibconcentraties worden goed gesimuleerd, en de afwijking tussen simulaties met het 2-d-model dat tijdens de calibratie gebruikt is, en simulaties met STRESS-2d zijn gering. De bijdrage van bodemslib aan de zwevende stofconcentratie wordt in de goede orde van grootte gesimuleerd. De validatie hiervan wordt

bemoeilijkt door een grote ruis in de metingen, en het feit dat de gesimuleerde verhoudingen bodemslib/IJsselslib niet zonder meer vergeleken mogen worden met de gemeten Cd/Sc-verhoudingen. De simulatie van afzonderlijke fracties, en de ruimtelijke verspreiding van slib over het Ketelmeer blijkt in de validatie-simulaties voldoende nauwkeurig.

6.2. Resultaten van simulaties met het slibtransportmodel

Met het gecalibreerde en gevalideerde slibtransportmodel voor het Ketelmeer zijn simulaties uitgevoerd, waarmee de effecten van een achttal varianten voor inrichting en beheer van het Ketelmeer geanalyseerd kunnen worden. De belangrijkste resultaten van de simulaties zijn de gesimuleerde netto-sedimentatiepatronen binnen het Ketelmeer, en de gesimuleerde verspreiding van bodemslib.

De eerste variant is het continueren van het huidige beleid, ofwel het laten bestaan van de huidige situatie. Deze variant is het referentiepunt, waarmee de resultaten van de overige varianten-simulaties vergeleken worden.

6.2.1. Analyse van de huidige situatie

In de huidige situatie wordt het grootste deel van het Ketelmeer gekarakteriseerd door netto-sedimentatie van slib. De gesimuleerde retentie van slib op jaarbasis is 57%. Er zijn binnen het Ketelmeer belangrijke verschillen in netto-sedimentatiesnelheden. Er is een netto erosie van materiaal in de vaargeul, terwijl in diepe putten een netto sedimentatie van ca. 25 kg/m^2,jr optreedt.

In het oostelijke deel is er sprake van een zeer lichte netto erosie, leidend tot een min of meer constante bodemligging. Aangezien hier voornamelijk zand ligt, en er een grote aanvoer van IJsselslib plaatsvindt, is de hoeveelheid bodemslib in water en sediment gering.

In het centrale deel van het Ketelmeer vindt lichte netto sedimentatie plaats, waarbij de meeste sedimentatie plaatsvindt in de strook tussen Ketelhaven en Schokkerhaven. In het centrale deel is de netto sedimentatie dermate gering, dat geregeld netto erosie kan voorkomen, en daarmee erosie van bodemslib. In een klein gebiedje ten westen van Ketelhaven is zelfs sprake van een geringe netto erosie, gezien over een heel jaar. In de vaargeul vindt enige erosie plaats door scheepvaart, tevens leidend tot een verhoging van de hoeveelheid bodemslib in water en sediment rond de geul.

Het westelijke deel van het Ketelmeer wordt gedomineerd door lichte tot sterke sedimentatie. Het meeste slib sedimenteert in het midden van het westelijke deel, met sterke sedimentatie in de diepe zandwinputten. Het sedimenterende materiaal bestaat volgens de simulaties voor een belangrijk deel uit bodemslib. In de toplaag van het sediment in het westelijke deel wordt na 1 jaar berekend dat meer dan 80% van het slib bestaat uit bodemslib. Dit bodemslib is deels in oostelijker delen geërodeerd, en deels door menging afkomstig uit de onderlaag van het sediment.

De massabalans voor het Ketelmeer als geheel wijst uit dat in de simulatie 0.6 Mton slib het Ketelmeer inkomt. Dit is vergeleken met gegevens van anderen een hoge waarde, veroorzaakt door o.a. de IJsseldebieten in het doorgerekende jaar en de daaraan gekoppelde slibconcentraties in het IJsselwater. Er is geen reden aan te nemen dat hierdoor de resultaten essentieel verstoord worden. Mogelijk is er een overschatting van de begraving van oud slib.

Het slib dat naar het IJsselmeer getransporteerd wordt bestaat volgens de simulaties voor ca. 80% uit de lichtste fractie. De zwaardere fracties bezinken in het Ketelmeer. Het getransporteerde slib bestaat gemiddeld voor ca. 30% uit bodemslib, overeenkomend met het door anderen gevonden percentage (Beurskens e.a., 1988, Ten Hulscher e.a., 1990).

6.2.2. Analyse van de effecten van inrichtings- en beheersvarianten

Per variant zullen de belangrijkste conclusies samengevat worden.

- De aanleg van twee scheepvaartgeulen (variant 2) heeft alleen ter hoogte van de vaargeulen enig effect: de erosie door scheepvaart wordt vervangen door een sterke sedimentatie in de uitgediepte geulen. De sedimentatiesnelheid in het westelijke deel van het ketelmeer neemt door het afvangen van veel IJsselslib in de geulen af. De hoeveelheid bodemslib neemt alleen rond de geul iets af. Het transport van slib naar het IJsselmeer verandert niet door deze ingreep;
- De verwijdering van de gehele sliblaag (variant 3) heeft uiteraard tot gevolg dat het transport van bodemslib geheel verdwijnt. Door de algehele verdieping van het Ketelmeer verandert het sedimentatiepatroon enigszins, waarbij sedimentatie meer verschuift naar het centrale deel van het Ketelmeer. De retentie van slib wordt verhoogd tot ruim 60%;
- Aanleg van een grote, diepe zandwinput in het gebied ten westen van de lijn Ketelhaven-Schokkerhaven (variant 4) leidt tot een sterke slibvang in deze put. De slibretentie in het Ketelmeer neemt daardoor toe tot ongeveer 64%. In het gebied ten westen van de put neemt daardoor de netto sedimentatiesnelheid aanzienlijk af. Omdat ook veel IJsselslib in de put sedimenteert, wordt de afdekking van oude sliblagen belangrijk vertraagd;
- De sanering van de randen van het Ketelmeer, waar dikke pakketten verontreinigd slib liggen (variant 5) heeft nauwelijks effect de slibbalans van het Ketelmeer, noch op transport van bodemslib. De verminderde opwerveling van oud bodemslib heeft een klein positief effect op de samenstelling van de toplaag (bovenste mm's) van het sediment in het Ketelmeer.
- De aanleg van een drietal recreatie-eilanden tussen Ketelhaven en Schokkerhaven (variant 6) leidt tot een verhoogde sedimentatie rond de eilanden. Dit heeft een beperkt effect op de slibbalans van het Ketelmeer en een zeer geringe vermindering (5%) van het transport van bodemslib naar het IJsselmeer tot gevolg. Een ander gevolg is een vertraagde afdekking van bodemslib in westelijker delen van het meer.
- De sanering van enkele voor de recreatie belangrijke lokaties, rond Ketelhaven en Schokkerhaven (variant 7) is lokaal van betekenis, omdat een nabij Ketelhaven gelegen gebied omslaat van een erosie- naar een sedimentatiegebied. Verder zijn de effecten klein.
- De combinatie van drie varianten, waarbij zowel scheepvaartgeulen worden uitgediept, als eilanden aangelegd en havens gesaneerd (variant 8) leidt tot een grote sedimentatie in het midden-oostelijk deel van het Ketelmeer; daar waar de ingrepen gepland zijn. Op de slibbalans blijft het effect klein. Er is door deze combinatie van maatregelen enige vermindering van het transport van bodemslib naar het Ketelmeer te verwachten (25%). De afdekking van bodemslib in het midden-westen en westen van het meer wordt vertraagd.

Een belangrijke algemene conclusie die uit deze simulaties volgt, is dat uitdieping van specifieke gebieden in het Ketelmeer, er in alle gevallen toe leiden dat de afdekking van oude sliblagen in gebieden westelijk van de uitgediepte delen belangrijk vertraagd kan worden. Daardoor treedt een vergrote opwerveling van bodemslib op. Hoe dichter de uitgediepte gebieden bij de IJsselmonden liggen, hoe meer IJsselslib afgevangen wordt. Dit kan de kwaliteit van het afdekkende slib in meer westelijk gelegen gebieden negatief beïnvloeden.

6.2.3. Lange termijn ontwikkelingen

Met behulp van eenvoudig model is nagegaan wat de belangrijkste te verwachten veranderingen in de gesimuleerde sedimentatiepatronen en verspreidingspatronen van bodemslib zijn op een termijn van 20 jaar.

De gemiddelde netto sedimentatiesnelheden zijn over het algemeen dermate laag dat aangenomen mag worden dat de gesimuleerde sedimentatiepatronen geldig blijven voor een periode van 20 jaar. Lokaal zijn er wel veranderingen te verwachten. Het gaat hierbij vooral om de gebieden, waarin in de verschillende varianten ingegrepen wordt in de bodemligging door baggeren dan wel aanleg van eilanden. In het geval van uitdieping van vaargeulen (variant 2) wordt verwacht dat in de gedeelten van de vaargeul die dicht bij de IJsselmonding liggen, al na ongeveer 6 jaar de waterdiepte zover is afgenomen, dat weer erosie door scheepvaart kan plaatsvinden. Na uitdieping van de randen van het Ketelmeer of van de gebieden rond Ketelhaven en Schokkerhaven (varianten 5, 7 en 8) wordt verwacht dat na ongeveer 10 jaar de sedimentatie zover is voortgeschreden dat in sommige delen weer resuspensie (door wind) kan optreden, vergelijkbaar met de huidige situatie. Rondom aangelegde eilanden (variant 6) sedimenteert waarschijnlijk nog ca. 10 jaar veel slib, waarna een evenwichtsdiepte, passend bij de veranderde strijklengten, tot stand gekomen is. De voorgestelde diepe zandwinput (variant 4) zal niet binnen 20 jaar vol sedimenteren.

Bij continuering van het huidig beheer zal ook op de middellange termijn een grote hoeveelheid bodemslib naar het IJsselmeer getransporteerd worden. Zelfs na 20 jaar is het gehalte bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem nog 20 tot 55 %. De belangrijkste bronnen zijn de opwerveling in het midden van het Ketelmeer en die in de vaargeul. Voor deze laatste geldt dat na ca. 10 jaar uitputting van vervuild bodemslib valt te verwachten.
Met uitzondering van de variant 'volledige sanering' (3) geldt dat alle gesimuleerde varianten op de langere termijn tot geringe verschillen met variant 1 (continuering huidig beheer) of zelfs een verslechtering van de situatie leiden. Dit laatste geldt de varianten die tot gevolg hebben dat grote hoeveelheden IJsselslib in het midden-oostelijk deel, dicht bij de monding van de IJssel, sedimenteren, waardoor de afdekking in westelijker gelegen delen van het Ketelmeer vertraagd wordt.

LITERATUUR

Aalderink, R.H., L. Lijklema, J. Breukelman, W. van Raaphorst, & A.G. Brinkman, 1984. *Quantification of wind induced resuspension in a shallow lake.* Wat. Sci. and Techn., Vol 17, pp. 903-914.

Beurskens, J.E.M., Th.E.M. ten Hulscher & L.E. van der Velde, 1988. Microverontreiniging; Verspreiding van microverontreiniging in IJssel, Ketelmeer en IJsselmeer. Rapport in de serie Integraal Waterbeheer Ketelmeer. Rijkswaterstaat, Projectgroep Ketelmeer. Lelystad.

Blom, G., 1989. Beïnvloeding transport fosfaatrijk slib in het Veluwemeer; een studie naar de effekten van slibvangen en dammen op de slibhuishouding in het Veluwemeer. Rapport Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer, Sektie Waterkwaliteitsbeheer. Wageningen.

Blom, G., E.H.S. Van Duin, R.H. Aalderink, L. Lijklema en C. Toet, in press. Modelling sediment *transport in shallow lakes - interaction between sediment transport and sediment composition.* Geaccepteerd voor publicatie in Hydrobiologia/Dev. Hydrobiol..

Bouws, E., 1986. Verwachting van de zeegang door middel van groeicurves, bevindingen verkregen aan de hand van de Markermeer dataset. K.N.M.I., Memo-00-86-33. De Bilt.

Brinkman, A.G. & W. van Raaphorst, 1986. De fosfaathuishouding in het Veluwemeer. Thesis, *Techn. Universiteit van Twente. Enschede.*

Broekhoven, A.L.M. van, 1987. De Rijn in Nederland; toestand en ontwikkelingen anno 1987. DBW/RIZA nota 87.061. Rijkswaterstaat, DBW/RIZA. Arnhem.

CERC, 1977. Shore protection manual. U.S. Army Coastal Engeneering Centre. Washington.

Dienst Informatieverwerking (DIV), 1987. Gebruik en toepassing van WAQUA, syllabus bij de cursus. Rijkswaterstaat, Dienst Informatieverwerking, Waterloopkundig Laboratorium.

Driebergen, J., 1988. Een eerste inventarisatie van de waterbodemkwaliteit van het Ketelmeer. Rapport in de serie Integraal waterbeheer Ketelmeer. Rijkswaterstaat, Projektgroep Ketelmeer, Lelystad.

Duin, E.H.S. van, & A.M.T. Kuipers, 1989. Fractiegrootte verdeling van en extinctie door zwevende stof in water in het Markermeer in 1988. Intern rapport 1989-27 liw. Directie Flevoland, Lelystad.

Duin, E.H.S. van, en G. Blom, in prep. STRESS-2d; a 2-dimensional model for sediment transport, resuspension and sedimentation in shallow lakes.

Duin, E.H.S. van, in prep. A two-dimensional model for sediment transport, the light field and some aspects of algal growth in a shallow lake. Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, serie Van Zee tot Land.

Havinga, H., 1984. Verbetering IJsselmonden. Rijkswaterstaat, DBW/RIZA, Interim-nota 84.2. Arnhem.

Hulscher, Th.E.M. ten, G.A.J. Mol & F.Lüers, 1990. Modelling sediment-water exchange of micro-pollutants using natural tracers; preliminary results of field measurements. In: A. Minderhoud & G. Angeletti, Incorporation of phisico-chemical processes in models describing the environmental fate of chemicals; Commission of the European Communities, Brussel.

Kappe, B., P. van Koningsbruggen & L. Voogt, 1989. Erosie van slib ten gevolge van scheepvaart. Rapport in de serie Integraal Waterbeheer Ketelmeer. Rijkswaterstaat, Projektgroep Ketelmeer, Lelystad.

Kappe, B. en M.G. de Rijk, 1991. Erosie van slib ten gevolge van scheepvaart, vervolgonderzoek. Rapport in de serie Integraal Waterbeheer Ketelmeer. Rijkswaterstaat, Projektgroep Ketelmeer, Lelystad.

Kruitwagen, P.G., 1987. Zoutverspreiding IJsselmeer ten gevolge van overslag Afsluitdijk en falen sluiscomplex Den Oever. Rijkswaterstaat, DBW/RIZA, notitie nr. 87.087X. Lelystad.

Langerak, A., J.Dijkzeul & G.K. Verboom, 1987. IJking model. In: DIV (1987).

Lam, D.C.L., & J.H. Jacquet, 1976. Computations of physical transport and regeneration of phosphorus in Lake Erie. J. Fish. Res. Board Canada, nr. 33, pp 550-563.

Lijklema, L. (zonder jaar). Collegedictaat Systeemanalyse in waterkwaliteitsbeheer. Landbouwuniversiteit Wageningen.

Lijklema, L., R.A. Aalderink, G. Blom & E.H.S. Van Duin, in press. Sediment transport in shallow lakes, two case studies related to sediment transport. In: J.V. DePinto (ed), Transport and transformation of contaminants near the sediment-water interface; Springer Verlag, New York.

Luettich, R.A., 1987. Sediment resuspension in a shallow lake. Thesis, Massachusetts Institute of Technologie. Cambride, Mass., U.S.A.

Nelder, J.A. & R. Mead, 1965. A Simplex method for function minimization. The Computer Journal, vol. 7, january 1965.

Phillips, O.M., 1966. The dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press. Cambridge.

Sheng, Y.P. en W. Lick, 1979. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. J. of Geophysical Research, Vol. 84, nr. c4, pp 1809-1826.

Smits, J.G.C. en H.L.A. Sonneveldt, 1991. Modellering van microverontreinigingen voor het Ketelmeer. Waterloopkundig Laboratorium, Delft.

Stelling, G.S., 1984. On the construction of computational methods for shallow water flow problems. Rijkswaterstaat communications, nr. 35, Den Haag.

Toet, C., 1991. Meetopstellingen en bemonsteringen Ketelmeer 1988 t/m 1990; methoden en resultaten. Rapport in de serie Integraal Waterbeheer Ketelmeer. Rijkswaterstaat, Projectgroep Ketelmeer, Lelystad.

Toet, C & G. Blom, 1989. Slibtransportmodel voor hrt Ketelmeer; Interimrapport betreffende simulaties met STRESS-2d voor het Ketelmeer. Intern Rapport 1989-25 liw. Rijkswaterstaat, Diectie FLevoland; Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Natuurbeheer, Sectie Waterkwaliteitsbeheer.

Ubels, J.W., 1986. MHW 165000; Verantwoording van het hoogwateronderzoek op de Boven-Rijn, de Waal, het Pannerdsch Kanaal, de Neder-Rijn, de Lek en de IJssel. Rijkswaterstaat, DBW/RIZA, Nota nr. 86.035. Arnhem.

Verhagen, J.H.G., 1988. Simulatiemodel van slibtransport in het IJsselmeer, IJSLIB. Onderzoeksverslag nr. 88. Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Hydraulica en afvoerhydrologie. Wageningen.

V&W, *Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1989. De derde nota waterhuishouding. 's Gravenhage.*

Winkels, H.J. & A. van Diem, 1989. De opbouw en kwaliteit van de waterbodem van het Ketelmeer. Rijkswaterstaat, Projectgroep Ketelmeer. In press.

Winkels, H.J., A.M.T. Kuipers, E.H.S. van Duin & R.Koopstra, 1989. De IJsselmeerafzetting in het Markermeergebied. Werkdocument 1989-25 liw. Rijkswaterstaat, Directie Flevoland. Lelystad.

BIJLAGE I. Vergelijking van de aan de bodem optredende schuifspanning t.g.v. windgolven en stroming

De resuspensie/erosie van bodemmateriaal wordt veroorzaakt door aan de bodem optredende schuifspanningen. Deze worden veroorzaakt door waterbeweging direct boven de bodem. Deze waterbeweging kan worden veroorzaakt door windgolven of door stroming. Deze laatste kan door de wind veroorzaakt worden, of door de aan- en afvoer van water.

Schuifspanning t.g.v. windgolven.

Voor het berekenen van de aan de bodem optredende schuifspanningen t.g.v. windgolven wordt gebruik gemaakt van de in paragraaf 2.3. genoemde relaties voor het berekenen van de golfkarakteristieken en de eveneens in paragraaf 2.3. gegeven relatie voor het berekenen van de maximale orbitaalsnelheid aan de bodem ($u_{b,max}$).

De over de tijd gemiddelde schuifspanning aan de bodem kan worden berekend met (Brinkman en Van Raaphorst (1986)):

$$tau_{b,gem,golf} = \frac{1}{2} \rho_w C_f u_{b,max}^2$$

$tau_{b,gem,golf}$	:	de tijdgemiddelde schuifspanning aan de bodem t.g.v. windgolven (N/m ^{2}); *in het vervolg aan te duiden als* $tau_{b,g}$
ρ_w	:	soortelijke massa water (1000 kg/m^3)
C_f	:	frictiecoëfficiënt (-)
$u_{b,max}$	:	maximale orbitaalsnelheid t.g.v. windgolven (m/s)

De frictiecoëfficiënt (C_f) ligt ca. tussen 10^{-3} en 10^{-1} (Kamphuis (1975)). Een redelijke waarde is 10^{-2}.

Schuifspanning t.g.v. door wind geïnduceerde stroming.

Door verschillende auteurs (zie Brinkman en Van Raaphorst (1986)) wordt uitgegaan van een constante verhouding tussen de schuifspanning veroorzaakt door de wind aan het wateroppervlak en de schuifspanning aan de bodem t.g.v. de door deze wind veroorzaakte stroming:

$$tau_{b,wstr} = tau_s * c$$

$tau_{b,wstr}$	:	schuifspanning aan de bodem t.g.v. door wind geïnduceerde stroming N/m^2)
tau_s	:	schuifspanning aan het wateroppervlak (N/m^2)
c	:	constante (-); afhankelijk van de 'relatieve ruwheid' van de bodem

De constante (c) is afhankelijk van de relatieve ruwheid van de bodem (z_b/h). Door Brinkman en Van Raaphorst zijn de in tabel I.1 gegeven waarden afgeleid.

De ruwheidshoogte is, uitgaande van gegevens van Brinkman en Van Raaphorst, ca $1.6 \cdot 10^{-5}$ meter.

Tabel I.1. De verhouding tussen de bodem- en oppervlakteschuifspanning (c) als functie van de relatieve bodemruwheid (z_b/h).

z_b/h	tau_b/tau_s
10^{-6}	- 0.025
10^{-5}	- 0.038
10^{-4}	- 0.058
10^{-3}	- 0.097
10^{-2}	- 0.188
10^{-1}	- 0.374

De schuifspanning die optreedt aan het wateroppervlak is een functie van de windsnelheid (zie Brinkman en Van Raaphorst (1986)):

$$tau_s = - C_d \rho_l |W_{10}| W_{10}$$

tau_s	:	schuifspanning aan het wateroppervlak (N/m^2)
C_d	:	frictiecoëfficiënt (-); ca. 1.5 10^{-3}
ρ_l	:	dichtheid lucht (kg/m^3); ca. 1.2
W_{10}	:	windsnelheid op 10 meter boven wateroppervlak (m/s)

Schuifspanning t.g.v. de stroming door aanvoer van IJsselwater.

Voor de schuifspanning aan de bodem t.g.v. de aanvoer van IJsselwater geldt de relatie:

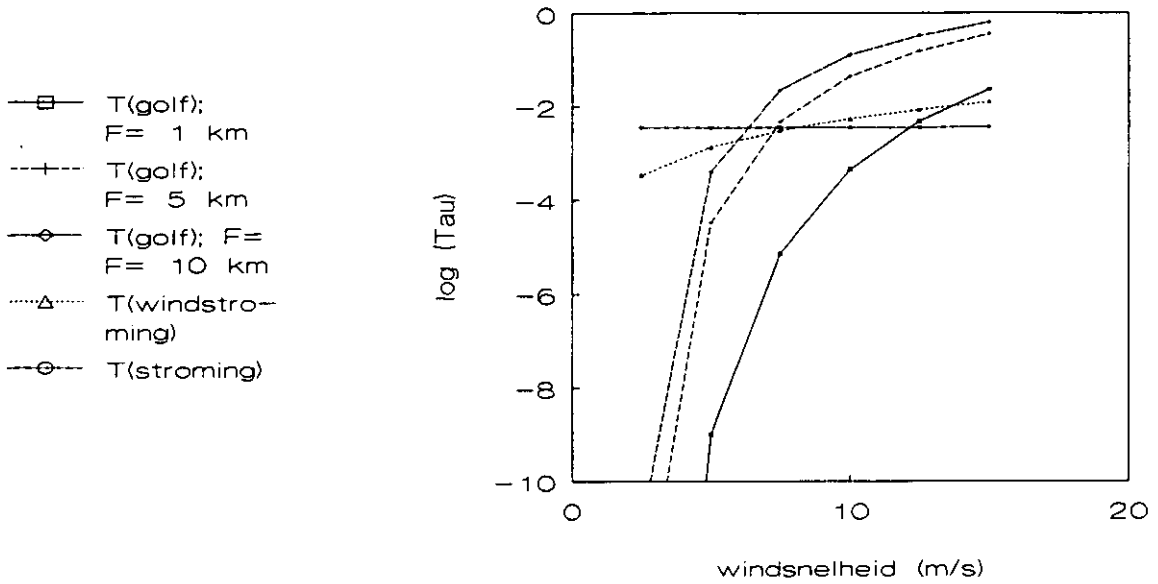
$$tau_{b,str} = \rho_w g u^2 / C^2$$

$tau_{b,str}$	:	schuifspanning t.g.v. stroming (N/m^2)
ρ_w	:	soortelijke massa water (1000 kg/m^3)
g	:	gravitatieversnelling (9.8 m/s^2)
u	:	stroomsnelheid (m/s)
C	:	Chezy-coëfficiënt ($m^{1/2}/s$)

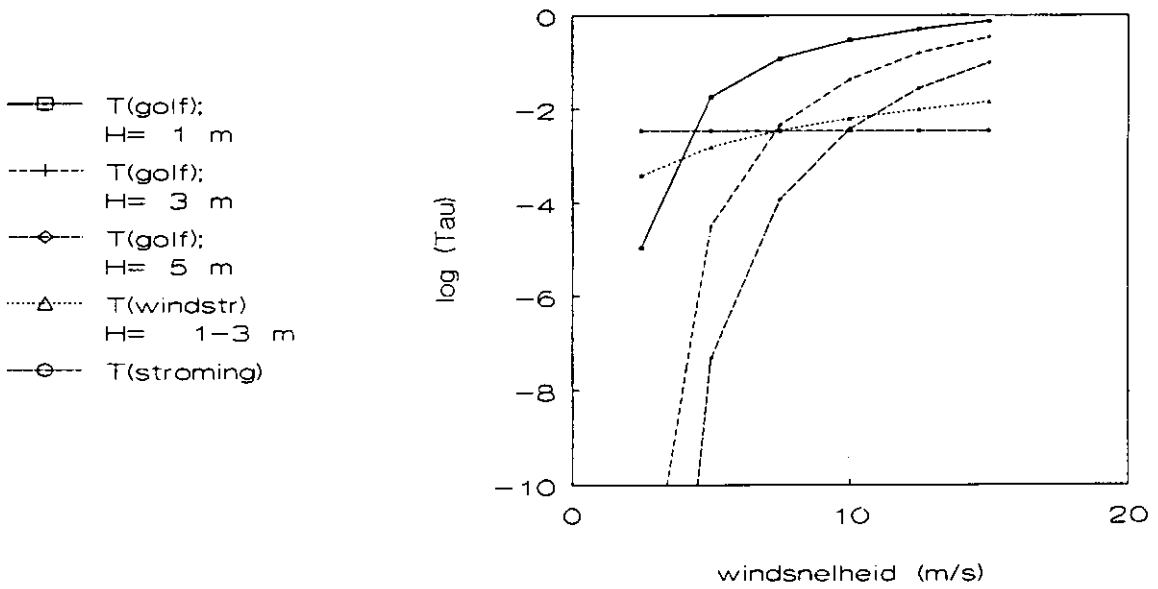
De Chezy-coëfficiënt is ca. 30 (ruw oppervlak) tot ca. 70 (glad oppervlak). In deze studie wordt uitgegaan van een waarde 50.

Vergelijking van de optredende schuifspanningen.

Met de bovenstaande vergelijkingen is een schatting van gemaakt van de schuifspanning aan de bodem die optreedt t.g.v. windgolven, door wind geïnduceerde stroming en stroming t.g.v. de aanvoer van IJsselwater. Bij de schattingen is uitgegaan een de gemiddelde diepte in het Ketelmeer (ca. 3 meter) en een gemiddelde stroomsnelheid t.g.v. de afvoer van IJsselwater van 3 cm/s.



Figuur I.1. De schuifspanning (tau) aan de bodem t.g.v. windgolven, door wind geïnduceerde stroming en stroming t.g.v. de aanvoer van IJsselwater bij verschillende strijklengten.

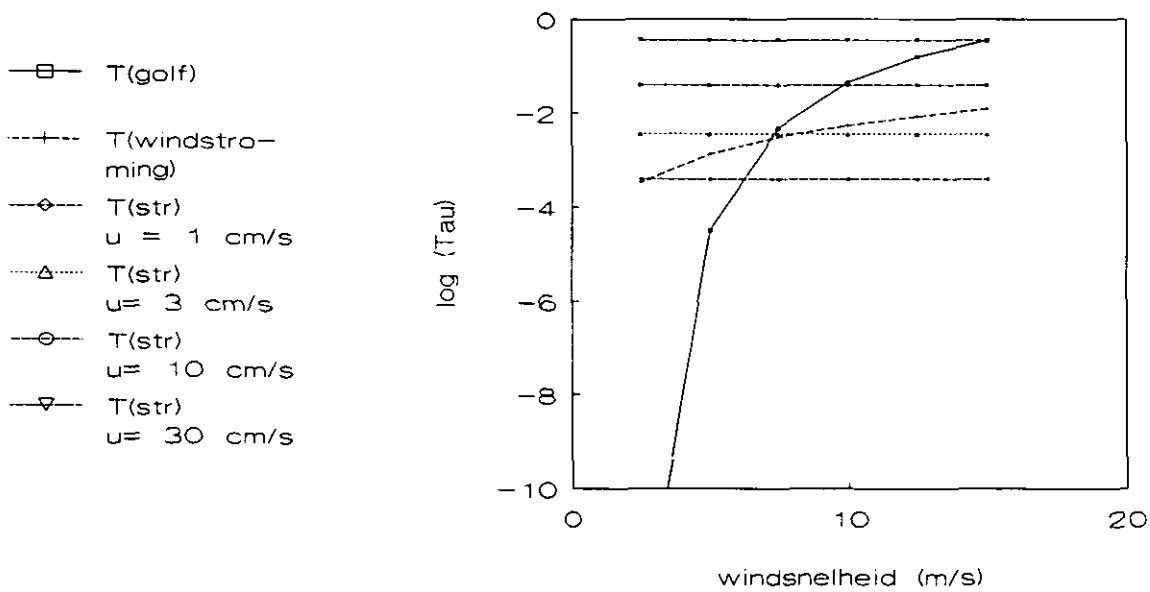


Figuur I.2. De schuifspanning (tau) aan de bodem t.g.v. windgolven, door wind geïnduceerde stroming en stroming door aanvoer van IJsselwater bij verschillende diepte (strijklengte is 5 km, stroming t.g.v. IJsselafvoer is 3 cm/s).

Uitgaande van deze waarden is de schuifspanning aan de bodem berekend voor verschillende windsnelheden. In figuur I.1 wordt de schuifspanning t.g.v. windgolven gegeven; dit bij verschillende strijklengten. Daarnaast wordt in de figuur de schuifspanning t.g.v. stroming (door wind geïnduceerd en door de aanvoer van IJsselwater veroorzaakt) gegeven.

Ook de diepte is van belang voor de schuifspanning die aan de bodem optreedt. In figuur I.2 wordt de schuifspanning bij verschillende diepten gegeven als functie van de windsnelheid. Er is ook hier uitgegaan van een gemiddelde stroomsnelheid t.g.v. de IJsselafvoer van 3 cm/s. Verder is uitgegaan van een strijklengte van 5 km. Opgemerkt moet worden dat ook de schuifspanning t.g.v. door wind geïnduceerde stroming een functie is van de diepte. Uit de gegeven relaties en daarbij behorende constanten is af te leiden dat de verschillen in de schuifspanning t.g.v. door wind geïnduceerde stroming bij verschillende diepten zeer klein zijn t.o.v. de verschillen in de schuifspanning t.g.v. windgolven. Mede door de logaritmische schaal zouden deze verschillen in de figuur niet terug te vinden zijn. Er is daarom voor de schuifspanning t.g.v. door wind geïnduceerde stroming slechts 1 curve in de figuur gegeven.

Bij de voorgaande berekeningen is uitgegaan van de gemiddelde stroomsnelheid t.g.v. de IJsselafvoer. Het lijkt echter waarschijnlijk dat deze afvoer lokaal veel grotere stroomsnelheden kan veroorzaken. Gedacht kan bijvoorbeeld worden aan de geulen in het Ketelmeer. In figuur I.3 wordt de schuifspanning t.g.v. de IJsselafvoer voor verschillende stroomsnelheden gegeven. Daarnaast wordt de schuifspanning t.g.v. windgolven gegeven (diepte 3 meter, strijklengte 5 km) en de schuifspanning t.g.v. door wind geïnduceerde stroming.



Figuur I.3. De schuifspanning (tau) aan de bodem t.g.v. windgolven, door wind geïnduceerde stroming en stroming door aanvoer van IJsselwater bij verschillende stroomsnelheden (diepte is 3 m, strijklengte is 5 km).

Uit de figuren is af te leiden dat bij relatief kleine diepten, grote strijklengten en/of hoge windsnelheden de schuifspanning veroorzaakt door windgolven sterk overheerst. In andere situatie (m.n. bij lage windsnelheden) overheerst vaak de schuifspanning door stroming.

Vanaf ca. een windsnelheid van 7.5 m/s is de schuifspanning t.g.v. door wind geïnduceerde stroming groter dan die door stroming t.g.v. de IJsselafvoer.

De vaak relatief kleine waarde van de schuifspanning ten gevolge van windgolven ten opzichte van die veroorzaakt door stroming betekent niet zonder meer dat de resuspensie veroorzaakt

door windgolven klein is t.o.v. die veroorzaakt door stroming. In he geval van langzame, niet turbulente stroming vormt zich aan het bodemoppervlak een laminaire grenslaag, waar de stroomsnelheid nihil is. Deze grenslaag is een belangrijke belemmering van slibtransport vanuit de bodem naar de waterfase. In het geval van de veel meer turbulente golfbeweging vormt zo'n grenslaag zich niet. Hierdoor heeft de schuifspanning veroorzaakt door windgolven een relatief grote bijdrage aan de resuspensie.

BIJLAGE II. Simulaties met verschillende beschrijvingen van de open rand bij de Ketelbrug

Om de stroming tussen Ketelmeer en IJsselmeer te beschrijven dienen ter plekke van de Ketelbrug zekere randvoorwaarden ingevoerd te worden. Binnen het waterbewegingsmodel WAQUA zijn er een aantal mogelijkheden om die randvoorwaarden op te leggen. Deze mogelijkheden zijn:

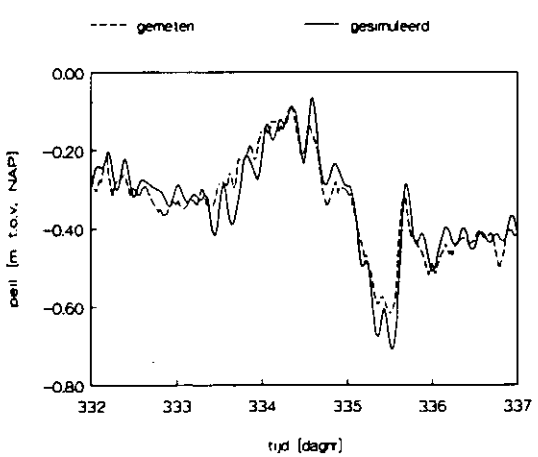
- een waterstandsrand, waarbij op de rand waterpeilen ingevoerd worden;
- een snelheidsrand, waarbij op de rand stroomsnelheden ingevoerd worden;
- een debietrand, waarbij op de rand debieten ingevoerd worden.

Voor het Ketelmeermodel valt een snelheidsrand buiten de mogelijkheden, omdat er niets bekend is over stroomsnelheden onder de Ketelbrug. De mogelijkheid van een waterstandsrand is goed bruikbaar, aangezien er waterstanden gemeten zijn bij de Ketelbrug. Een debietrand is eveneens mogelijk, waarbij twee opties toegepast kunnen worden: het debiet van Ketelmeer naar IJsselmeer gelijkstellen aan de totale aanvoer van water in het Ketelmeer; of het debiet genereren m.b.v. een grootschalig IJsselmeermodel.

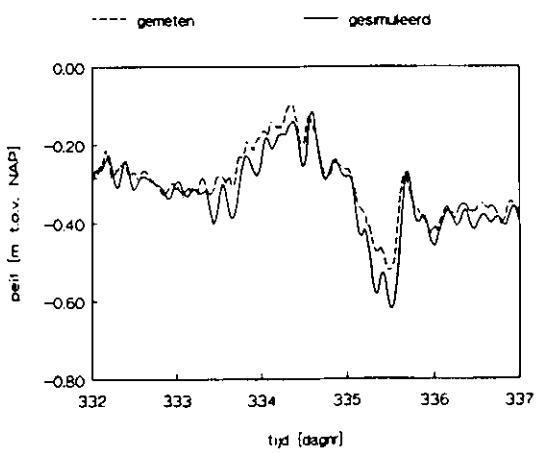
Uiteindelijk is gekozen voor de laatste optie, vanwege het feit dat met het IJsselmeermodel eenvoudig invoer gegenereerd kan worden voor perioden waarin geen waterstandsgegevens beschikbaar zijn, en omdat op deze manier iets van de dynamiek van de stroming tussen Ketelmeer en IJsselmeer naar voren komt.

In deze bijlage wordt het effect van de drie mogelijke opties voor de beschrijving van de Ketelbrugrand op gesimuleerde waterpeilen in het Ketelmeer gepresenteerd. Voor elke optie is een periode van 5 dagen uit de meetperiode van 1988 doorgerekend waarin een sterke winddynamiek optreedt. De gesimuleerde waterpeilen zijn daarna vergeleken met de gemeten waterpeilen op de twee meetpunten L1 en L2.

De resultaten zijn weergegeven in de volgende figuren.

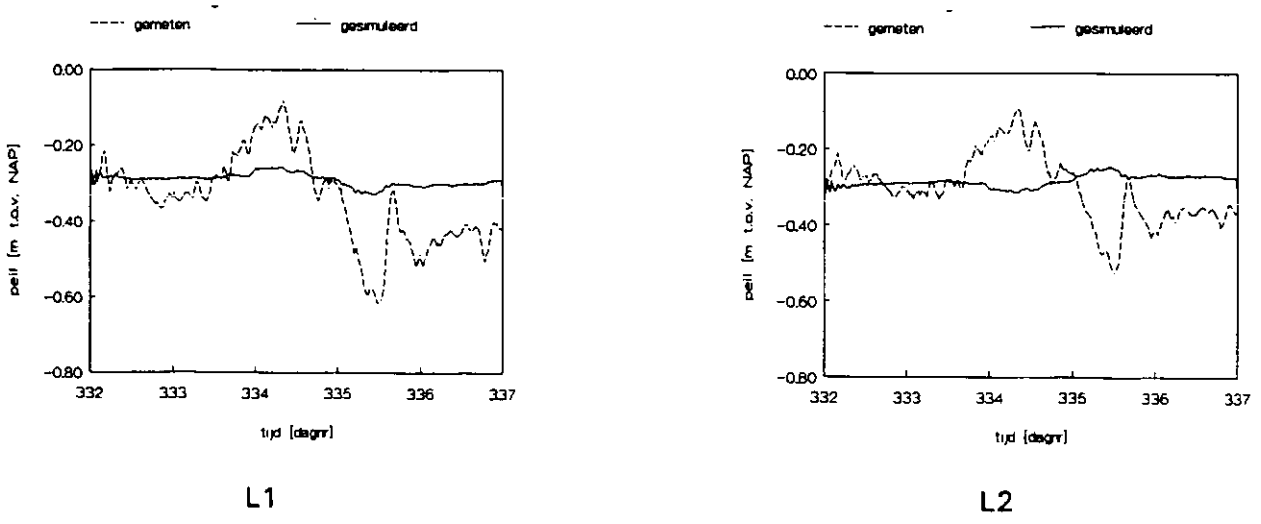


L1

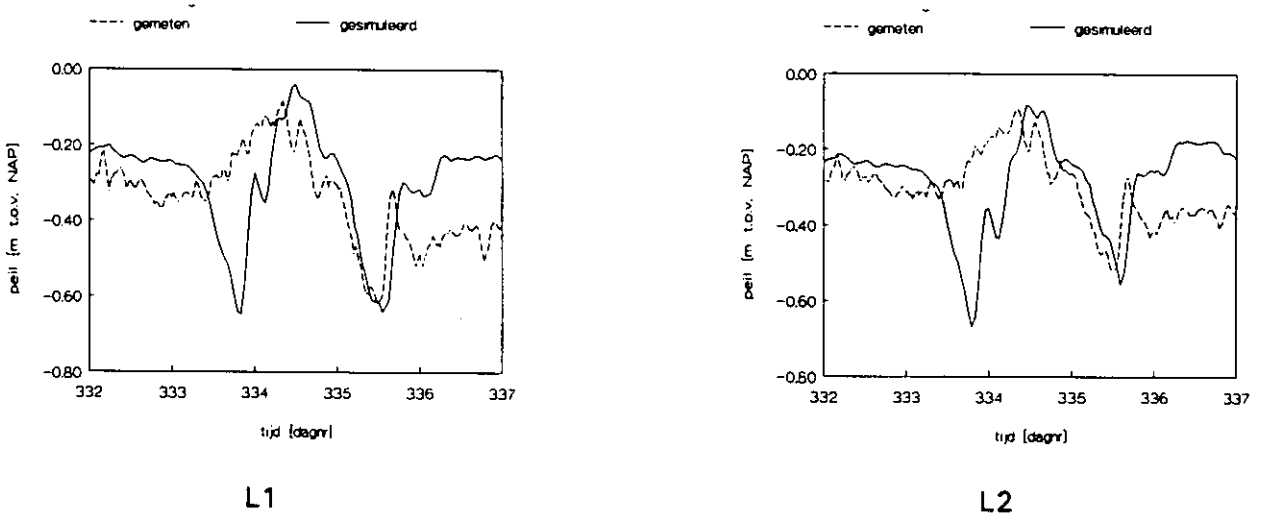


L2

Figuur II.1. Gemeten en gesimuleerde waterpeilen met de Ketelbrug als waterstandsrand.



Figuur II.2. Gemeten en gesimuleerde waterpeilen met de Ketelbrug als debietrand. Het Ketelbrugdebiet is gelijk aan de som van de inkomende debieten.

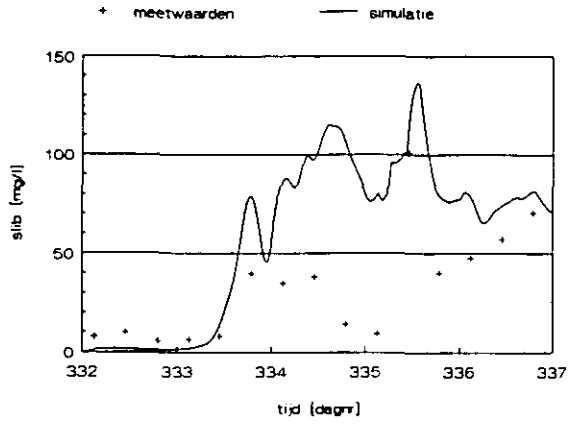


Figuur II.3. Gemeten en gesimuleerde waterpeilen met de Ketelbrug als debietrand. Het Ketelbrugdebiet is gegenereerd met het IJsselmeermodel.

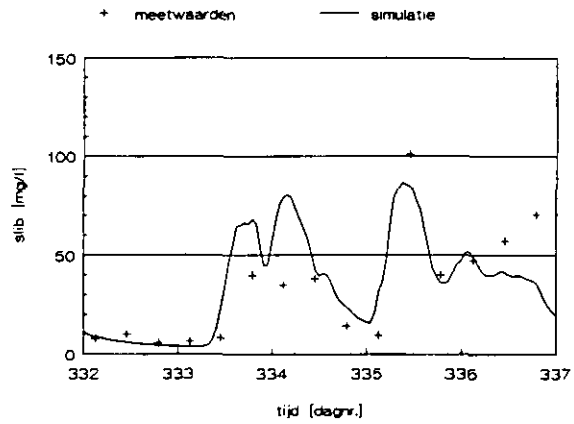
BIJLAGE III. Simulaties met verschillende bodemmodellen

In het model STRESS-2d zijn drie verschillende bodemmodellen mogelijk: een model met een onuitputbare bodemlaag, een model met een bodemlaag van variërende dikte (dus uitputbaar), en een model met twee bodemlagen met variërende dikte.

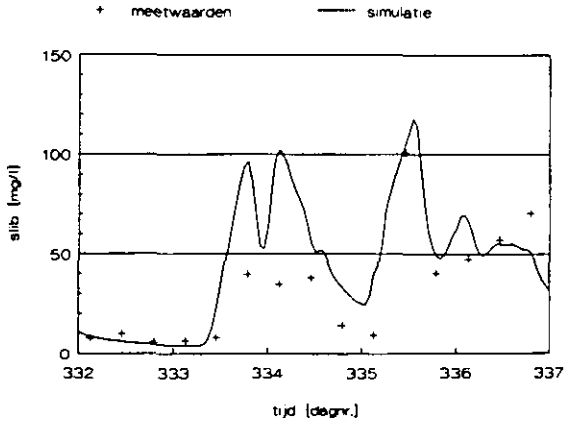
Voor een korte periode van vijf dagen uit de meetperiode van 1988 is de toepasbaarheid van de drie modellen uitgetest met STRESS-2d. De resultaten van deze simulaties zijn vergeleken met de gemeten totaal-slib-concentraties, en weergegeven in de figuren III.1 t/m III.3.



Figuur III.1. Simulatie met bodemmodel 1: oneindig dikke bodemlaag.

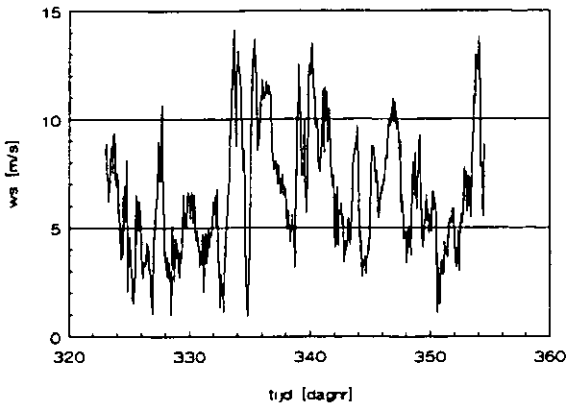


Figuur III.2. Simulatie met bodemmodel 2: één bodemlaag met variërende dikte.

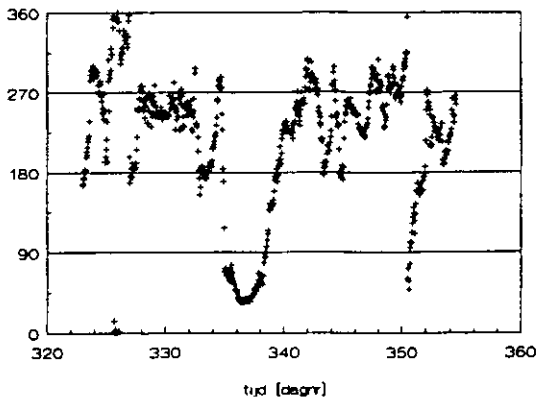


Figuur III.3. Simulatie met bodemmodel 3: twee bodemlagen met variërende dikte.

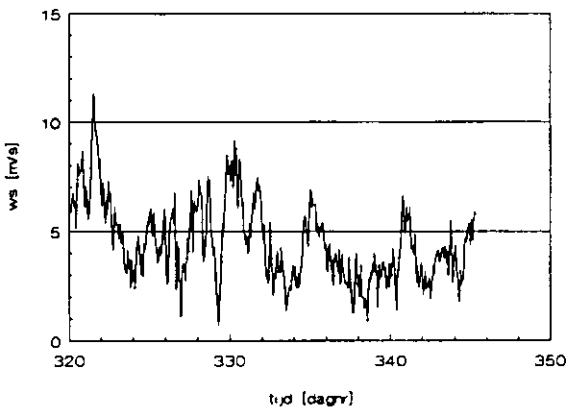
BIJLAGE IV. Windgegevens voor de calibratie-perioden



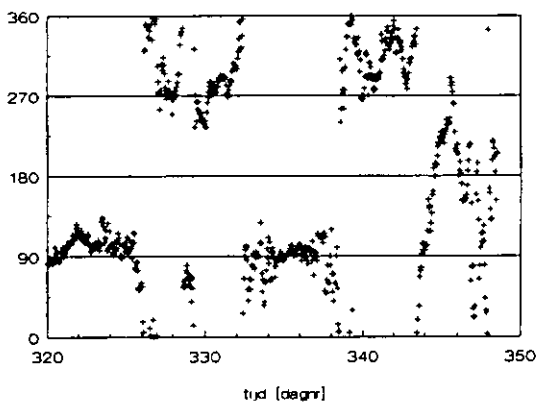
Figuur IV.1. Windsnelheid 1988.



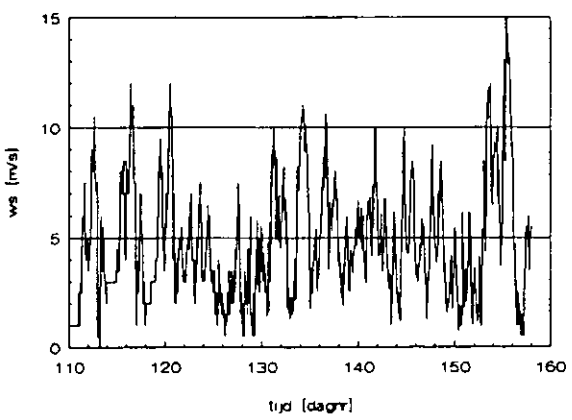
Figuur IV.2. Windrichting 1988.



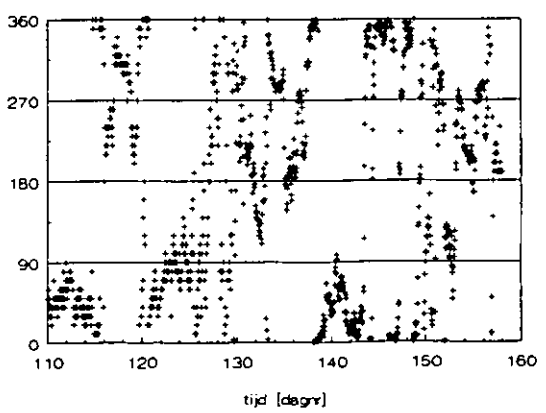
Figuur IV.3. Windsnelheid 1989.



Figuur IV.4. Windrichting 1989.



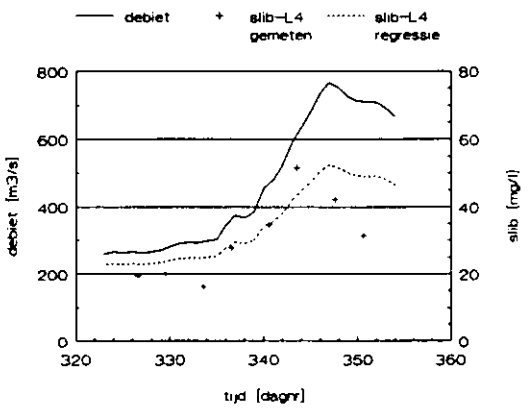
Figuur IV.5. Windsnelheid 1990.



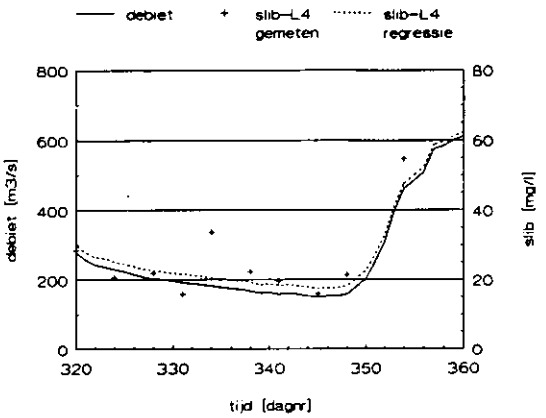
Figuur IV.6. Windrichting 1990.

BIJLAGE V. Slibconcentraties in IJsselwater gedurende de calibratie-perioden

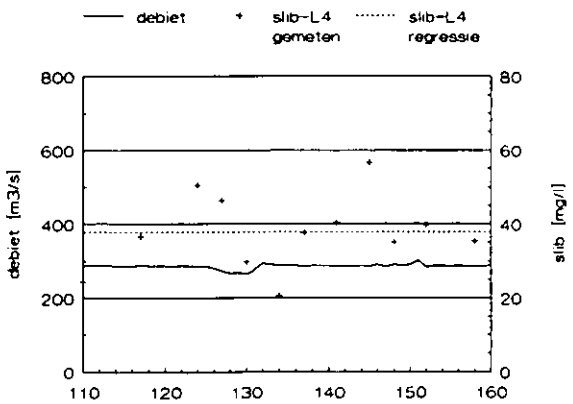
De slibconcentraties in het IJsselwater blijken enigszins gecorreleerd te zijn met de IJsseldebieten. Om invoerconcentraties voor het slibtransportmodel voor het Ketelmeer te verkrijgen, is er daarom voor gekozen een regressie-analyse uit te voeren, en zo een lineair verband te vinden tussen IJsseldebieten en slibconcentraties. De gevonden regressievergelijkingen staan in tabel 4.2. Correlatie-coëfficiënten liggen steeds in de orde van 0.8. In de figuren V.1 t/m V.3 zijn de resulterende concentraties weergegeven, tegelijk met de incidenteel gemeten concentraties op het meetpunt L4, en de IJsseldebieten. Conclusie uit deze figuren is dat de gevonden relaties een redelijke beschrijving geven van de slibconcentraties in IJsselwater, maar dat de spreiding nog zeer groot is.



Figuur V.1. IJsseldebieten, gemeten slibconcentraties en berekende slibconcentraties in IJsselwater, 1988.

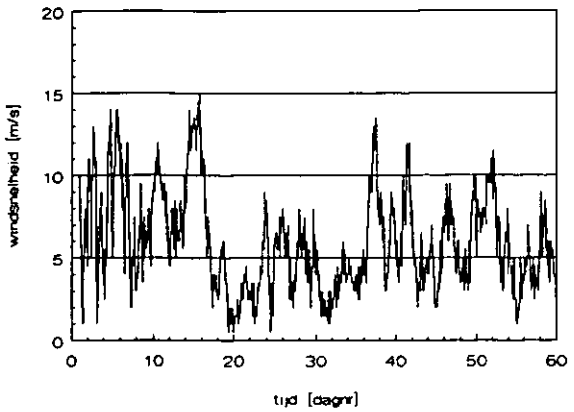


Figuur V.2. IJsseldebieten, gemeten slibconcentraties en berekende slibconcentraties, 1989.

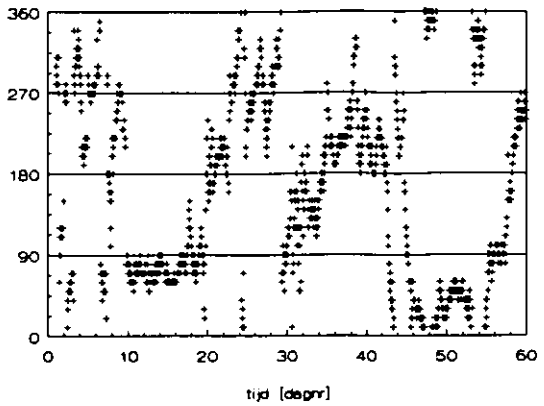


Figuur V.3. IJsseldebieten, gemeten slibconcentraties en berekende slibconcentraties, 1990.

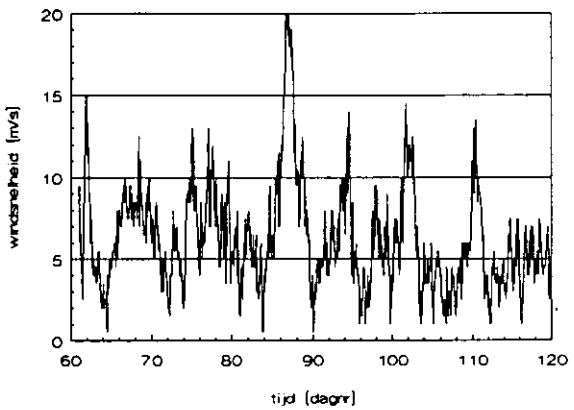
BIJLAGE VI. Invoervariabelen voor de jaarberekeningen over 1987



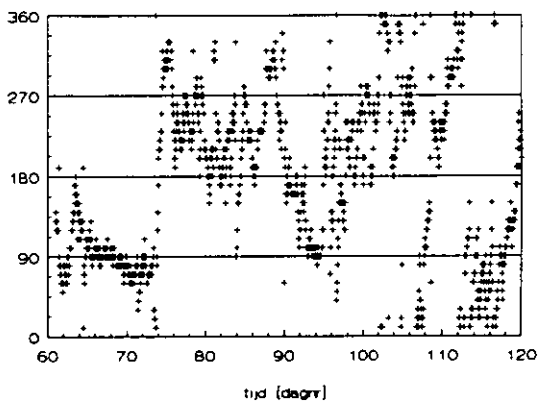
Figuur VI.1. Windsnelheid 1987, dagnr. 1-60.



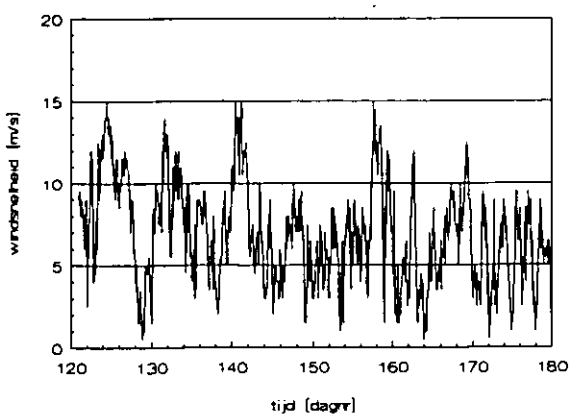
Figuur VI.2. Windrichting 1987, dagnr. 1-60.



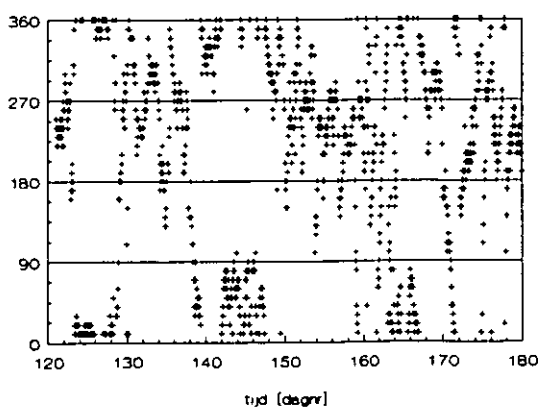
Figuur VI.3. Windsnelheid 1987, dagnr. 60-120.



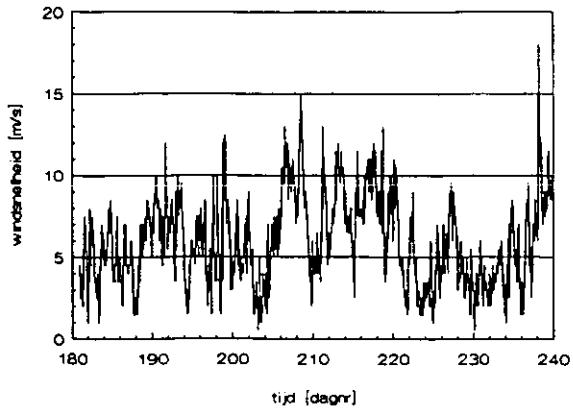
Figuur VI.4. Windrichting 1987, dagnr. 60-120.



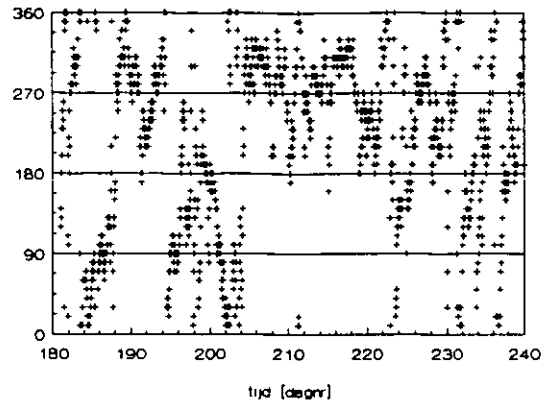
Figuur VI.5. Windsnelheid 1987, dagnr. 120-180.



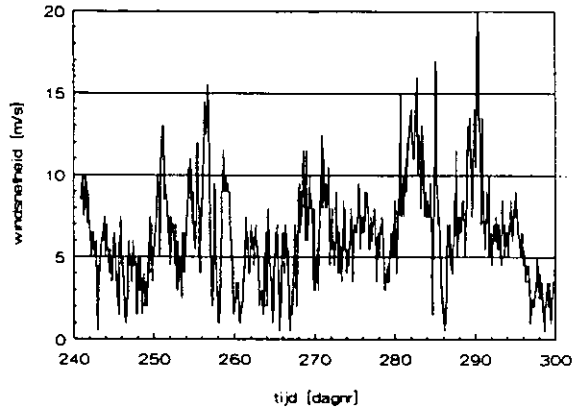
Figuur VI.6. Windrichting 1987, dagnr. 120-180.



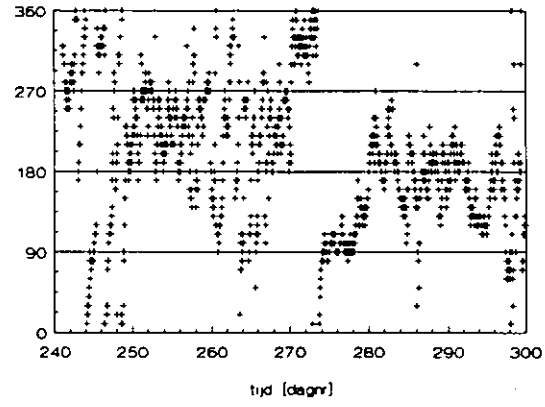
Figuur VI.7. Windsnelheid 1987, dagnr. 180-240.



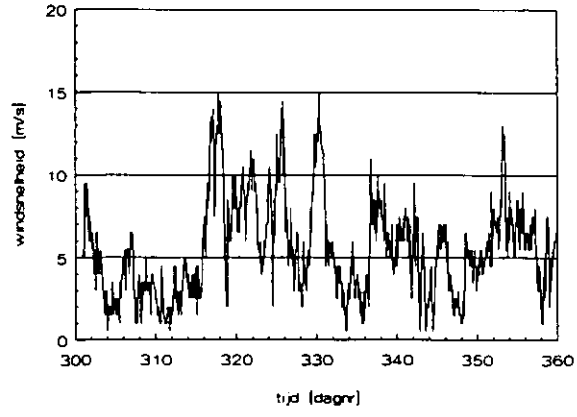
Figuur VI.8. Windrichting 1987, dagnr. 180-240.



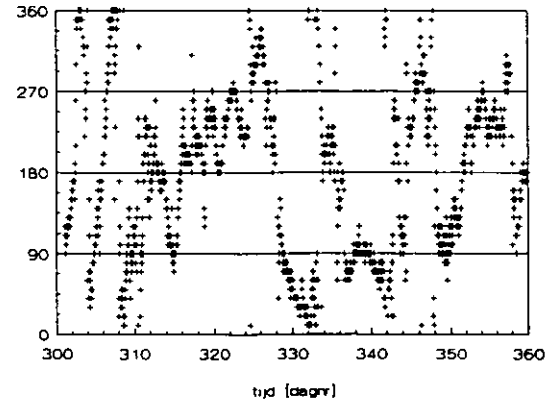
Figuur VI.9. Windsnelheid 1987, dagnr. 240-300.



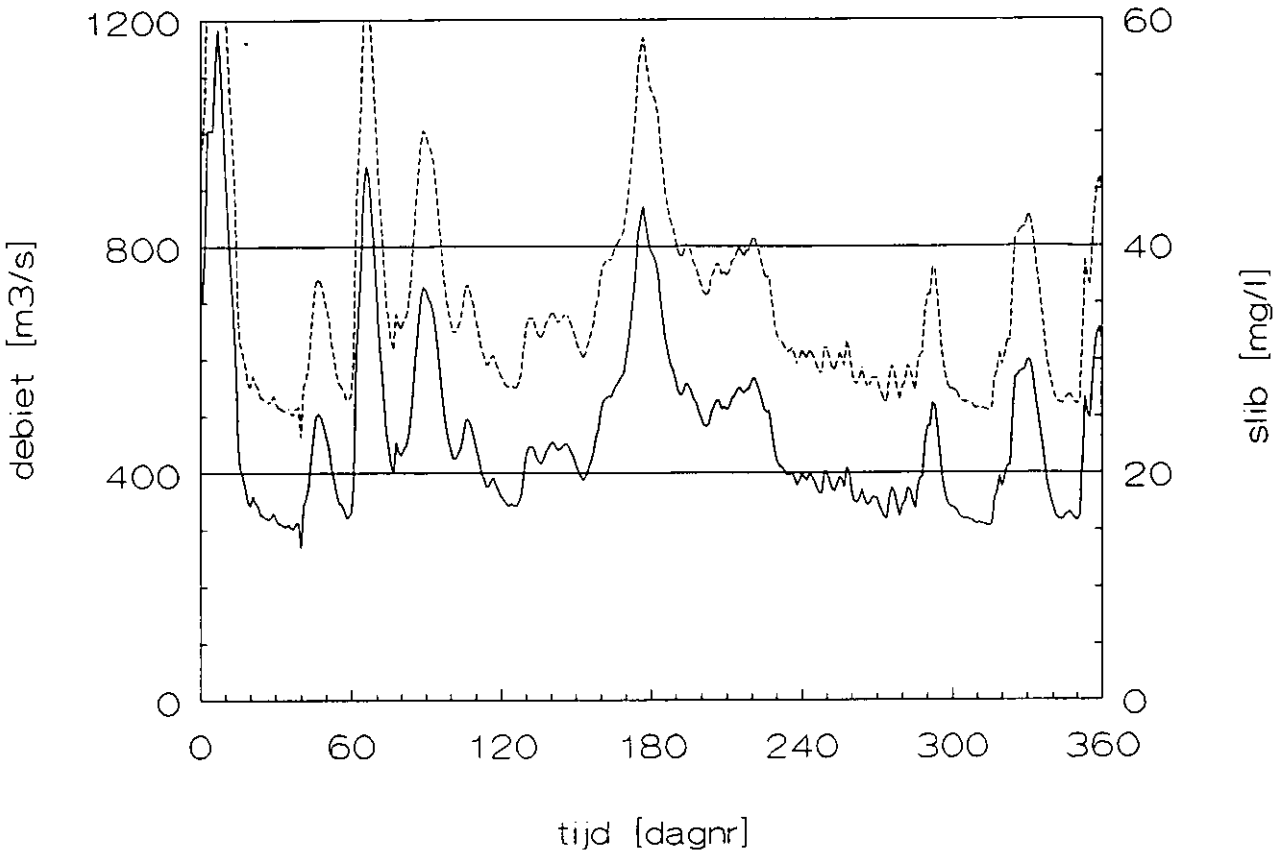
Figuur VI.10. Windrichting 1987, dagnr. 240-300.



Figuur VI.11. Windsnelheid 1987, dagnr. 300-360.



Figuur VI.12. Windrichting 1987, dagnr. 300-360.



Figuur VI.13. IJsseldebieten en slibconcentraties in IJsselwater, 1987.

BIJLAGE VII. Overdracht van simulatieresultaten van STRESS-2d naar IMPAQT

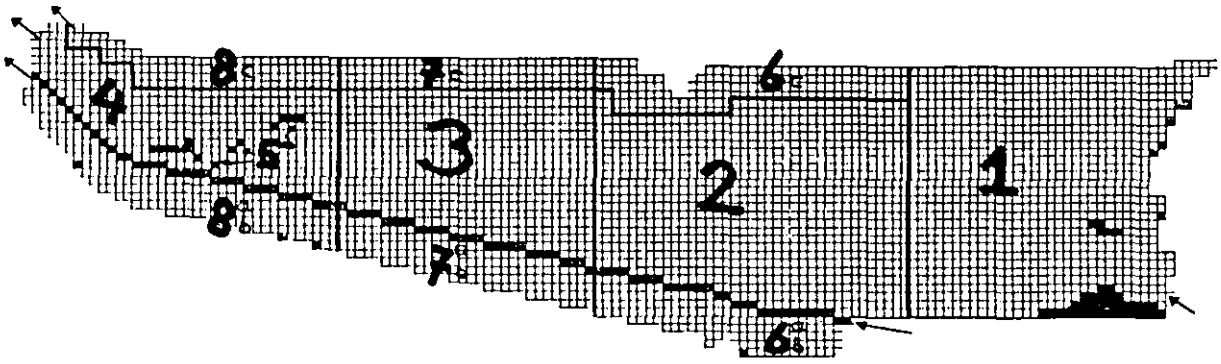
De resultaten van de simulatieberekeningen met het slibtransportmodel voor het Ketelmeer voor de verschillende beheers- en inrichtingsvarianten zijn geconverteerd naar invoergegevens voor het model IMPAQT. Dit model simuleert het transport van microverontreinigingen. Het slibtransport kan hierbij als externe invoervariabele opgelegd worden.

Een tweetal essentiële verschillen belemmeren een directe overdracht van gegevens:

- IMPAQT kan maar met een beperkt aantal compartimenten werken i.v.m. rekentijd en stabiliteit;
- De tijdstap die in IMPAQT gebruikt kan worden voor de invoer van resuspensie/sedimentatiefluxen kan niet onbeperkt klein worden gekozen. Dit hangt samen met het gebruikte bodemmodel, waarin de dikten van onderscheiden laagjes niet variabel is.

Er is derhalve voor gekozen een aantal middelingen toe te passen.

- Het Ketelmeer is voor de IMPAQT-simulaties opgedeeld in 14 compartimenten, zie figuur VIII.1. De simulatieresultaten zijn tijdens de simulatieruns gemiddeld over deze compartimenten;
- Als tijdstap voor invoer van de variabelen afkomstig van het slibtransportmodel is 1 dag genomen. Dit betekent dat alle resultaten gemiddeld zijn over 1 dag.



Figuur VIII.1. Indeling van het STRESS-2d-grid voor het Ketelmeer in compartimenten voor de IMPAQT-simulaties.

In de tabellen VIII.1 t/m VIII.4 zijn de (jaar)gemiddelde concentraties, bruto resuspensie- en sedimentatiefluxen, en de netto sedimentatiefluxen per compartiment en per variant gegeven.

Tabel VII.1. Jaargemiddelde slibconcentratie per compartiment.

	concentraties in mg/l							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
comp. 1	21,7	21,8	22,7	21,7	21,7	21,4	21,7	21,3
2	25,1	24,7	21,7	24,1	24,9	22,6	24,8	21,6
3	20,5	19,5	16,6	15,4	20,0	18,7	20,2	17,8
4	16,8	16,1	13,9	13,5	26,3	15,8	16,7	15,1
5	17,5	16,7	14,4	13,7	16,9	16,3	17,2	15,6
6a	26,6	24,1	22,1	25,1	25,5	26,1	25,2	22,7
6b	21,0	20,3	17,7	20,2	18,8	20,7	18,9	18,3
6c	17,4	17,4	16,0	17,6	16,8	16,5	17,4	15,7
7a	25,0	18,9	16,9	15,9	23,3	24,0	23,7	18,8
7b	17,4	15,9	13,6	13,6	15,4	16,7	16,4	14,7
7c	16,0	15,9	13,8	16,4	15,1	14,8	15,9	14,7
8a	18,1	16,0	14,1	13,2	17,0	17,2	17,5	15,5
8b	13,8	12,8	11,2	10,7	12,7	13,5	13,3	12,4
8c	14,3	14,2	12,5	13,5	13,8	13,5	14,2	13,3

Tabel VII.2. Jaartotaal bruto resuspensieflux per compartiment.

	resuspensieflux in kg/m^2							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
comp. 1	88,8	88,9	82,8	88,9	88,7	83,2	88,8	83,0
2	88,1	83,7	58,9	83,3	87,1	65,1	86,9	60,7
3	47,4	37,0	24,0	0,0	45,5	39,6	46,6	36,4
4	11,3	10,6	6,8	6,3	10,9	9,4	11,3	8,5
5	2,2	2,2	1,6	1,9	2,2	1,7	2,2	1,6
6a	120,9	54,3	42,4	111,2	113,9	113,5	113,1	46,6
6b	75,2	71,7	37,9	70,8	44,4	70,2	49,8	43,7
6c	52,0	51,5	36,5	50,5	42,1	42,0	48,4	37,1
7a	122,7	25,1	16,2	0,0	113,2	115,2	117,8	23,9
7b	42,8	39,2	22,9	0,0	28,3	37,6	41,3	33,0
7c	33,0	32,6	20,7	0,0	23,4	27,7	31,9	26,7
8a	20,0	13,0	8,3	9,0	18,6	16,7	19,8	10,8
8b	19,3	17,8	10,8	9,0	13,3	18,8	18,8	17,4
8c	16,4	16,3	10,0	10,5	11,5	14,6	16,3	14,4
totaal*	2541	2381	1777	2147	2375	2108	2447	1905

* totaal voor hele Ketelmeer in 10^6 kg

Tabel VII.3. Jaargemiddelde bruto sedimentatieflux per compartiment.

	bruto sedimentatieflux in kg/m²							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
comp. 1	98,5	98,5	94,1	98,5	98,3	93,9	98,4	93,7
2	95,7	91,6	67,9	89,3	93,5	74,4	93,5	69,0
3	52,7	44,9	29,7	22,8	49,2	42,7	51,3	37,8
4	27,4	23,4	16,7	14,2	25,2	23,1	27,0	20,8
5	27,6	24,2	17,2	13,6	25,2	23,1	27,1	20,9
6a	111,7	88,3	72,3	103,0	103,0	107,0	102,3	78,3
6b	87,0	81,4	59,4	83,3	67,6	83,7	70,0	64,8
6c	57,2	56,8	43,8	57,6	50,5	47,9	55,1	43,9
7a	94,4	39,1	30,0	25,4	84,9	86,9	89,6	46,9
7b	51,3	42,2	27,0	23,6	38,5	45,8	48,5	36,2
7c	38,6	37,8	25,0	29,9	31,5	31,4	36,9	29,6
8a	35,1	24,0	17,8	13,8	31,2	30,6	34,1	23,9
8b	25,7	22,2	15,0	11,5	20,6	24,1	25,0	20,9
8c	23,1	22,5	15,2	15,1	19,9	19,9	22,9	19,2
totaal*	2866	2712	2146	2517	2712	2447	2774	2253

* totaal voor hele Ketelmeer in 10^6 kg

Tabel VII.4. Jaargemiddelde netto sedimentatieflux per compartiment.

	netto sedimentatie in kg/m²							
variant	1	2	3	4	5	6	7	8
comp. 1	9,6	9,6	11,3	9,6	9,6	10,7	9,6	10,7
2	7,5	7,9	9,1	6,0	6,3	9,3	6,6	8,3
3	5,3	7,9	5,7	22,8	3,7	3,1	4,8	1,4
4	16,1	12,8	9,8	7,9	14,3	13,7	15,7	12,3
5	25,4	22,1	15,6	11,7	23,0	21,5	24,9	19,3
6a	-9,2	34,0	29,9	-8,2	-10,9	-6,5	-10,8	31,7
6b	11,8	9,7	21,6	12,5	23,2	13,6	20,2	21,1
6c	5,2	5,3	7,3	7,2	8,4	6,0	6,6	6,8
7a	-28,2	14,0	13,7	25,4	-28,2	-28,3	-28,2	23,0
7b	8,4	3,0	4,1	23,6	10,2	8,2	7,2	3,1
7c	5,6	5,2	4,3	29,9	8,1	3,7	5,0	2,9
8a	15,1	11,0	9,5	4,8	12,6	13,9	14,3	13,1
8b	6,5	4,4	4,2	2,5	7,3	5,3	6,2	3,5
8c	6,7	6,3	5,3	4,6	8,4	5,3	6,6	4,8
totaal*	323	332	370	370	335	339	327	348

* Totaal voor hele Ketelmeer in 10^6 kg

BIJLAGE VIII. Extrapolatie van de resultaten van de berekeningen met het slibtransportmodel voor de verschillende inrichtings- en beheersvarianten

Inleiding

Voor de evaluatie van de effekten van de verschillende inrichtings- en beheersvarianten is het gewenst om de resultaten op een langere termijn dan de m.b.v. STRESS-2d gesimuleerde periode van 1 jaar ten kennen. Voor het schatten van deze lange termijn effekten is een eenvoudig model voor extrapolatie van de resultaten ontwikkeld. Met het model kunnen schattingen gemaakt worden van:

- het transport van bodemslib naar het IJsselmeer, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen slib afkomstig uit de onderscheiden deelgebieden,
- de ontwikkeling van de bovenste 10 cm van de bodemlaag in verschillende deelgebieden, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen IJssel- en bodemslib.

Het model

Het model berekend voor 4 compartimenten in het Ketelmeer de concentraties van verschillende soorten slib in het water, in de toplaag van het sediment (bovenste mm's) en een laag van 10 cm van het sediment. Binnen 4 compartimenten wordt onderscheid gemaakt tussen meerdere deelgebieden; de zuidelijke en noordelijke oever, de vaargeul en het centrale deel. In totaal onstaan er 11 deelgebieden; de IMPAQT-compartimenten (figuur VIII.1). Als soorten slib worden onderscheiden: IJsselslib en slib (oorspronkelijk) afkomstig uit de 11 verschillende deelgebieden.

Het model maakt gebruik van de resultaten van de simulatieberekeningen met STRESS-2d, in het bijzonder van:

a: de zwevende stofbalansen voor het Ketelmeer (tabel 5.1),
b: de jaarlijkse bruto sedimentatie in verschillende deelgebieden (tabel VII.2),
c: de jaarlijkse netto sedimentatiefluxen in verschillende deelgebieden (tabel VII.4).

Voor de waterfase wordt verondersteld dat er binnen de 4 (hoofd-) kompartimenten sprake is van een volledige horizontale menging. De dispersie in de lengte-richting van het Ketelmeer wordt verwaarloosd.
Met behulp van de zwevende stof balans over het Ketelmeer (a) en de gegevens over de netto sedimentatie in verschillende gebieden (c) kan een slibbalans voor elk kompartiment opgesteld. De berekening van de samenstelling van het slib in de waterfase is gebaseerd op een semi-stationaire benadering. De samenstelling van het slib in de waterfase wordt bepaald door de samenstelling van het slib in de inkomende slibstroom (horizontaal transport) en de samenstelling van het geresuspendeerde materiaal; op haar beurt bepaald door de samenstelling van de toplaag van het sediment in de verschillende deelgebieden binnen het (hoofd-) compartiment. Verondersteld mag worden dat zich binnen de gebruikte tijdstappen (ca. ½ maand) een evenwichttoestand insteld.

Ook voor de toplaag van het sediment geldt dat aangenomen mag worden dat zich binnen een tijdstap een evenwicht insteld. De samenstelling van de toplaag is afhankelijk van de samenstelling van de sedimentatieflux (i.c. de netto flux), die op haar beurt bepaald is door de samenstelling van het slib in de waterfase. Daarnaast speelt een bijmenging van slib uit de onderliggende bodemlaag (van 10 cm) een rol. Deze bijmenging wordt veroorzaakt door enerzijds (bio-) turbatie en anderzijds

erosie van onderliggend bodemmateriaal in perioden met veel opwerveling. Deze twee processen worden samenbeschreven met behulp van een turbatieflux van 0.65 $kg.m^{-2}$.

Voor de bovenste 10 cm van de bodem mag niet verondersteld worden dat zich binnen de gebruikte tijdstappen een evenwichtstoestand insteld. In tegenstelling tot de waterfase en de bovenste millimeters van van de bodem (de toplaag) geldt dat in de laag van 10 cm de aanwezige massa groot is in verhouding tot de inkomende (en uitgaande) slibmassa's. Deze laatsten zullen dan ook slechts een geleidelijke verandering van de samenstelling van de bodemlaag betekenen. Voor de bovenste laag van de bodem, met een vaste dikte (10 cm) en massa (60 $kg.m^{-2}$), wordt de verandering van de samenstelling beschreven t.g.v. de netto sedimentatie en de turbatieflux tussen top- en onderlaag. De verandering wordt, naast door de grootte van beide fluxen, bepaald door de samenstelling van de toplaag.

Belangrijkste randvoorwaarde voor de toepassing van het model is dat het sedimentatie en resuspensie patroon zich gedurende de extrapolatieperiode niet belangrijk mag wijzigen. Uit paragraaf 5.2.4. kan worden afgeleid dat aan deze voorwaarde in grote delen van het Ketelmeer wordt voldaan. Uitzonderingen zijn de gesimuleerde verdiepte scheepvaartgeulen, waar zich binnen 10 jaar wijzigingen kunnen voordoen en de uitgediepte randen en havens (variante 5, 7 en 8) en de toestand rond aangelegde eilanden (varianten 6 en 8) waar zich over het algemeen na 10 jaren belangrijke wijzingen kunnen voordoen.

Voor de keuze van compartimenten en (in mindere mate) de beschrijving van transportprocessen is aansluiting gezocht bij de beschrijcing zoals die plaatsvindt in IMPAQT; dit om de vergelijkbaarheid van de resultaten te bevorderen.

De resultaten

Met het model zijn schattingen gemaakt voor de toestand 5, 10 en 20 jaar na uitvoering van de inrichtings- en beheersmaatregelen. De belangrijkste resultaten van de extrapolatieberekeningen worden gepresenteerd in een viertal tabellen per scenario:

1. Het % bodemslib in de slibstroom naar het IJsselmeer en de bijdrage van het slib afkomstig uit de 11 onderscheiden deelgebieden.
2. Het cumulatief transport van IJsselslib en slib afkomstig uit de verschillende deelgebieden in kton.
3. Idem als fractie van de intitieel aanwezige 10 cm (60 $kg.m^{-2}$) in de deelgebieden.
4. De samenstelling (% bodemslib) van de sedimentlaag (10 cm) in de 11 deelgebieden.

Discussie

In de vaargeulen doet zich, m.u.v. van de varianten waarbij de vaargeul verdiept is, een bijzondere situatie voor. De samenstelling van de top- en onderlaag worden daar niet berekend, maar opgelegd. Er is verondersteld dat daar ook op de lange termijn 100% bodemslib in de top- en onderlaag (10 cm) beschikbaar is. Dit leidt ertoe dat na een lange simulatieperiode tot 2 meter bodemslib geërodeerd kan worden. Zoveel is er niet beschikbaar. Na ca. 10 jaar zal waarschijnlijk uitputting optreden. Tussen haakjes zijn de resultaten vermeld, waarbij rekening gehouden is met deze uitputting.

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 1

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

		%bod. slib	oost		midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord		midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord		west geul	west centr	west put	west noord	Tot kTon
jaar	0	29															
jaar	5	24	0	0	29	29	0	0	25	12	0	0	0	0	0	0	63
jaar	10	20	0	0	35	25	0	0	30	10	0	0	0	0	0	0	53
jaar	20	15	0	0	47	13	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	40
		(2)			(0)				(0)								(5)

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

		IJssel (*10)	oost		midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord		midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord		west geul	west centr	west put	west noord	Tot
jaar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar	5	94	5	3	82	119	19	0	80	42	0	0	0	0	0	0	350
jaar	10	195	5	3	175	196	29	0	159	69	0	0	0	0	0	0	636
jaar	20	411	5	3	360	270	29	0	318	87	0	0	0	0	0	0	1073
					(174)				(159)								(729)

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

		oost		midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord		midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord		west geul	west centr	west put	west noord
jaar	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	5	1,0	0,0	3,5	0,2	0,1	0,0	6,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	10	1,0	0,0	7,5	0,2	0,2	0,0	13,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	20	1,0	0,0	15,4	0,3	0,2	0,0	26,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

		oost		midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord		midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord		west geul	west centr	west put	west noord
opp. (ha)		746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
jaar	5	0	50	100	63	72	64	100	75	74	71	50	48	37	70
jaar	10	0	28	100	41	52	43	100	56	55	51	31	30	25	50
jaar	20	0	14	100	20	29	24	100	34	32	29	19	19	18	29

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 2

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

		%bod. slib	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot kTon
jaar	0	29															
jaar	5	13	0	0	0	62	8	15	0	8	0	8	0	0	0	0	33
jaar	10	7	0	0	0	71	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	18
jaar	20	2	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

		IJssel (*10)	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot
jaar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar	5	104	5	8	0	118	23	26	0	20	0	13	0	0	0	0	212
jaar	10	217	5	8	0	192	36	44	0	26	0	15	0	0	0	0	325
jaar	20	458	5	8	0	264	36	59	0	26	0	15	0	0	0	0	410

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

		oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
jaar	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	5	1,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	10	1,0	0,1	0,0	0,2	0,3	0,6	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	20	1,0	0,1	0,0	0,3	0,3	0,8	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

		oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
opp. (ha)		746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar	0	100	100	0	100	100	100	0	100	100	100	0	100	100	100
jaar	5	0	52	12	59	70	82	12	61	71	76	12	47	31	67
jaar	10	0	28	7	34	47	66	11	36	50	56	12	24	14	45
jaar	20	0	8	3	12	22	42	5	13	24	30	7	8	5	19

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 4

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

		%bod. slib	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot kTon
jaar	0	23															
jaar	5	18	0	0	39	56	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	39
jaar	10	15	0	0	47	47	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	33
jaar	20	10	0	0	70	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
		(3)			(0)												(7)

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

		IJssel (*10)	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot
jaar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar	5	83	4	0	67	130	7	0	0	0	0	13	0	0	0	0	221
jaar	10	173	4	0	143	219	7	0	0	0	0	24	0	0	0	0	397
jaar	20	361	4	0	295	317	7	0	0	0	0	26	0	0	0	0	649
					(143)												(497)

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

		oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
jaar	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	5	1,0	0,0	2,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	10	1,0	0,0	6,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	20	1,0	0,0	12,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

		oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
opp. (ha)		746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar	0	100	100	100	100	100	0	0	0	0	100	100	100	100	100
jaar	5	0	49	100	69	65	18	19	18	19	86	75	63	52	76
jaar	10	0	28	100	49	43	16	16	16	16	73	56	41	31	57
jaar	20	0	14	100	25	21	11	11	12	11	53	33	21	15	34

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 5

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

	%bod. slib	oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord	Tot kTon
jaar 0	23															
jaar 5	24	0	0	25	38	0	0	21	17	0	0	0	0	0	0	61
jaar 10	22	0	0	32	27	0	0	27	14	0	0	0	0	0	0	56
jaar 20	18	0	0	39	17	0	0	33	11	0	0	0	0	0	0	46
	(5)			(0)				(0)								(13)

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

	IJssel (*10)	oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord	Tot
jaar 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar 5	92	5	0	76	139	0	0	63	58	0	0	0	0	0	0	342
jaar 10	189	5	0	154	233	0	0	139	101	0	0	0	0	0	0	633
jaar 20	394	5	0	331	336	0	0	291	159	0	0	0	0	0	0	1123
				(154)				(139)								(794)

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

	oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord
jaar 0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar 5	1,0	0,0	3,2	0,2	0,0	0,0	5,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar 10	1,0	0,0	6,6	0,3	0,0	0,0	11,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar 20	1,0	0,0	14,2	0,4	0,0	0,0	24,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

	oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord
opp. (ha)	746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar 0	100	0	100	100	0	0	100	100	0	0	100	100	100	0
jaar 5	0	17	100	68	10	16	100	81	14	13	53	50	28	14
jaar 10	0	14	100	40	13	20	100	66	18	18	34	31	25	19
jaar 20	0	11	100	24	12	19	100	44	19	18	20	19	18	19

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 6

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

	%bod. slib	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot kTon
jaar 0	28															
jaar 5	20	0	0	30	20	0	0	30	20	0	0	0	0	0	0	50
jaar 10	19	0	0	37	11	0	0	32	21	0	0	0	0	0	0	48
jaar 20	15	0	0	47	0	0	0	40	13	0	0	0	0	0	0	38
	(2)			(0)				(0)								(5)

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

	IJssel (*10)	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot
jaar 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar 5	91	3	0	75	68	8	0	75	60	0	8	0	0	0	0	296
jaar 10	189	3	0	163	103	8	0	151	110	0	8	0	0	0	0	545
jaar 20	394	3	0	339	123	8	0	301	178	0	8	0	0	0	0	959
				(163)				(150)								(633)

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
jaar 0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar 5	1,0	0,0	3,2	0,1	0,1	0,0	6,3	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar 10	1,0	0,0	7,0	0,1	0,1	0,0	12,5	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar 20	1,0	0,0	14,5	0,2	0,1	0,0	25,1	0,9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
opp. (ha)	746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar 0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
jaar 5	0	43	100	55	67	69	100	83	81	74	50	51	39	74
jaar 10	0	22	100	32	45	43	100	69	65	56	31	31	25	56
jaar 20	0	10	100	14	23	24	100	49	43	34	19	19	18	34

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 7

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

		%bod. slib	oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord	Tot kTon
jaar	0	28															
jaar	5	24	0	0	25	38	0	0	25	13	0	0	0	0	0	0	63
jaar	10	21	0	0	33	29	0	0	29	10	0	0	0	0	0	0	55
jaar	20	15	0	0	47	13	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	39
		(2)			(0)				(0)								(5)

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

		IJssel (*10)	oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord	Tot
jaar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar	5	93	5	0	79	136	0	0	73	45	0	3	0	0	0	0	341
jaar	10	144	5	0	166	225	0	0	152	76	0	3	0	0	0	0	621
jaar	20	407	5	0	343	320	0	0	309	110	0	3	0	0	0	0	1090
					(159)				(152)								(749)

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

		oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord
jaar	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	5	1,0	0,0	3,4	0,2	0,0	0,0	6,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	10	1,0	0,0	6,8	0,3	0,0	0,0	12,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	20	1,0	0,0	14,7	0,4	0,0	0,0	25,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

		oost	midden-oost zuid	midden-oost geul	midden-oost centr	midden-oost noord	midden-west zuid	midden-west geul	midden-west centr	midden-west noord	west zuid	west geul	west centr	west put	west noord
opp. (ha)		746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar	0	100	50	100	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100
jaar	5	0	25	100	66	38	68	100	77	76	72	51	48	38	71
jaar	10	0	17	100	45	28	48	100	59	58	52	32	30	25	51
jaar	20	0	11	100	22	17	37	100	37	35	31	19	19	18	29

OVERZICHT RESULTATEN EXTRAPOLATIEBEREKENINGEN VARIANT 8

Transport van bodemslib naar het IJsselmeer (% bodemslib) en de bijdrage van slib afkomstig uit de 11 deelgebieden

		%bod. slib	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot kTon
jaar	0	26															
jaar	5	16	0	0	0	31	0	6	0	56	0	6	0	0	0	0	38
jaar	10	13	0	0	0	23	0	8	0	62	0	8	0	0	0	0	31
jaar	20	7	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	17

Cumulatief transport van IJsselslib en slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer (kton)

		IJssel (*10)	oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord	Tot
jaar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
jaar	5	94	2	0	0	74	0	19	0	115	0	22	0	0	0	0	233
jaar	10	195	2	0	0	115	0	31	0	221	0	34	0	0	0	0	403
jaar	20	406	2	0	0	149	0	36	0	403	0	38	0	0	0	0	629

Cumulatief transport van slib uit de 11 deelgebieden naar het IJsselmeer als fractie van de initieel in 10 cm bodem aanwezige massa

		oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
jaar	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	5	1,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	10	1,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0	1,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
jaar	20	1,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,5	0,0	2,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0

Het percentage bodemslib in de bovenste 10 cm van de bodem in de 11 deelgebieden

		oost	midden-oost zuid	geul	centr	noord	midden-west zuid	geul	centr	noord	west zuid	geul	centr	put	noord
opp. (ha)		746	231	39	1320	235	120	20	335	80	229	36	364	15	112
jaar	0	100	50	0	100	50	100	0	100	100	100	0	100	100	100
jaar	5	0	15	7	54	32	82	17	91	83	81	15	50	37	75
jaar	10	0	6	4	29	20	67	15	83	68	64	16	28	20	55
jaar	20	0	2	1	9	8	44	10	68	46	41	12	14	11	31