VERSLAG MODELONDERZOEK

RIVIERKRUISINGEN

M. 9-46.

Waterloopkundig Laboratorium.

Verslag van twee modelproeven in verband met de kruising van het kanaal van Amsterdam naar de Bovenrijn met de Lek.

M. 9 en M. 46.

November 1936.

I N H O U D.

-o-o-o-o-o-o-

F I G U R E N.

-o-o-o-o-o-o-

I. Inleiding en Overzicht.

1. Opdrachten en Doelstelling.

Op 3 Februari 1928 werd het door de Kanaalvereeniging ''De Geldersche Vallei'' opgedragen onderzoek met betrekking tot de kruising van een kanaal Amsterdam -Bovenrijn met de Nederrijn bij Wageningen aanvaard.

In overleg met de opdrachtgeefster is den Minister van Waterstaat gevraagd, actief deel te nemen aan de onderzoekingen. Aan dit verzoek is gevolg gegeven. De Hoofdingenieur van de Rijkswaterstaat dr. ir. L. R. Wentholt en de Ingenieur van de Rijkswaterstaat ir. E. M. H. Schaank zijn aangewezen om de proeven te volgen.

In 1931 werd in opdracht van het district Amsterdam - Bovenrijn II van de Rijkswaterstaat een tweede onderzoek aangevangen, waarbij een kruising bij Wijk bij Duurstede als uitgangspunt diende.

Het doel van de proeven was na te gaan of een kruising zonder stuw in de rivier mogelijk was en zoo ja, op welke wijze een dergelijke kruising het doelmatigst zou zijn aan te leggen.

De voornaamste eisch, die daarbij werd gesteld, was:

Bij de aanleg van voorhavens van de afmetingen als is voorzien in het verslag van de Staatscommissie, ingesteld bij K.B. van 7 Januari 1921 nr. 39 inzake de aanleg van een verbeterde scheepvaartweg van Amsterdam naar de Bovenrijn, Alg. Landsdrukkerij 1924 's-Gravenhage (Staatscommissie Limburg) moet het mogelijk zijn zonder overmatig baggerwerk voldoende diepte in de kruising en in de voorhavens te onderhouden.

Daarnaast werd het van belang geacht, dat:

de in de kruising en de voorhavens optredende stroomingen voor de scheepvaart niet hinderlijk zouden zijn;

het mogelijk bleef, zoowel boven- als beneden-

strooms van de kruising voldoende breedte en diepte in de rivier te handhaven:

het optredende verval niet te groot zou zijn.

De betreffende riviergedeelten toonen figuur 1 en figuur 2.

2. Gegevens.

De gegevens die het vraagstuk beheerschen hebben betrekking op:

a. de waterstanden op de rivier.
b. het verhang.
c. de waterafvoer van de rivier.
d. de afvoer van zand en slib.
e. het dwarsprofiel van de rivier.
f. de gewenschte afmetingen van de kruising.

a. De waterstanden op de beide voor de kruising in aanmerking komende plaatsen volgen uit de frequentielijnen van figuur 3[x)], die zijn afgeleid uit de waarnemingen 1921 - 1930. Belangrijke punten van de krommen zijn de hoogste stand (HHW), de middelbare zomerstand (MR), de lage peilen GlW en OLR (overeengekomen lage rivierstand) en de laagst bekende stand (LLW).

Deze peilen zijn in cm boven N.A.P.:

	HHW	MR 1911/20	MR 1921/30	GlW 1908	GlW 1923	OLR 1926/30	LLW
Wageningen	1100	660	630	575	558	460	400
Wijk bij Duurstede	800	380	335	320	230	175	140

De peilen zijn niet constant: MR verandert van de eene tienjarige periode op de andere soms in vrij sterke

x). Doordat in dit tijdvak de periode 1921 - 1922 met uiters lage rivierstanden voorkwam, hebben de lage waterstanden in de geteekende krommen een grootere frequentie, dan normaal is.

mate. Vooral te Wijk bij Duurstede is dit het geval. De genoemde waarden gelden voor de plaats van de geprojecteerde kruising. Die voor Wageningen liggen dus tusschen die van de peilschalen Lekskensveer en Grebbe; te Wijk bij Duurstede zijn de peilen bij de kruising ongeveer 15 cm lager dan aan de omstreeks 1300 m stroomopwaarts gelegen Rijkspeilschaal.

b. Het verhang van de waterspiegel kan zoowel voor Wijk bij Duurstede als voor Wageningen op ongeveer (ruim) 10^{-4}, of 10 centimeter per kilometer worden gesteld. Deze waarde geldt voor alle rivierstanden.

c. De afvoer van de Nederrijn - Lek kan worden gekarakteriseerd door een afvoerkromme voor Arnhem (figuur 4). Men mag zonder het maken van een beteekenende fout de afvoerkrommen voor andere plaatsen langs de rivier daaruit afleiden door de afvoer bij een peil, dat een bepaalde frequentie heeft, over de geheele rivier gelijk te stellen. Op grond van deze aanname kan ook voor de afvoer een frequentiekromme worden geteekend; dit is in figuur 3 gedaan. Met behulp daarvan kunnen bij elkander behoorende afvoeren en waterstanden gemakkelijk worden opgezocht. Een afvoer van 600 m^3/sec bijvoorbeeld, veroorzaakt (figuur 4) te Arnhem een peil van 955 cm, dat (figuur 3) gemiddeld 280 dagen per jaar niet wordt bereikt. Volgens de figuur hebben het peil van + 740 cm te Wageningen en dat van 440 cm te Wijk bij Duurstede dezelfde frequentie; men kan dus aannemen, dat deze eveneens bij een afvoer van 600 m^3/sec voorkomen.

De grootste afvoer bedraagt ongeveer 2900 m^3/sec, die bij MR kan op ruim 400 m^3/sec worden gesteld. Bij OLR, waarbij de onverdeelde Rijn bij Lobith ongeveer 1000 m^3/sec voert, heeft Nederrijn - Lek wat minder dan 200 m^3/sec; de kleinste afvoer ligt nog beneden 100 m^3/sec.

Het is opvallend hoe uiterst zeldzaam de zeer hooge afvoeren zijn. Op het voorkomen van een afvoer gelijk aan de helft van de grootst bekende bestaat slechts een

kans van twee dagen per jaar, dus omstreeks een half procent. Het dubbele van de minimum-afvoer (bijvoorbeeld 250 m^3/sec) daarentegen zou volgens de grafiek op bijna 70 dagen, dus achttien procent, worden onderschreden. Ten deele is dit verschil reëel; het vindt zijn grond in het feit, dat een laagwaterperiode een geheel ander karakter bezit dan een hoogwater. Echter is in het tijdvak 1921 - 1930 het verschil te sterk geprononceerd door het feit dat daarin zoowel een kort doch zeer hoog hoogwater (Januari 1926) als de ongekend langdurige laagwaterperiode van 1921 - 1922 voorkwam. De laatste periode maakt ook, dat de OLR-afvoer een abnormaal hooge frequentie heeft, namelijk van ruim 30 dagen per jaar. Strikt genomen geldt de figuur uitsluitend voor permanenties; bij sterke was of val gelden andere betrekkingen tusschen de afvoer en de waterstanden en tusschen de laatste onderling. De figuur is dan ook slechts als orientering bedoeld en er is ook niet de minste waarde te hechten aan het feit, dat bij de proeven voor Wijk bij Duurstede afvoeren zijn toegepast die iets grooter zijn dan volgens de grafiek uit de ingestelde waterstanden zou volgen.

d. Het slibgehalte van het water is vooral groot bij de hooge standen; het totale slibtransport is dan ook voor een groot deel in de hoogwaterperioden geconcentreerd. Uit de studies van C. Lely is af te leiden:

slibgehalte bij	zeer hooge waterstanden	100 en meer	gram/m^3
''	'' matig hooge ''	60 à 80	''
''	'' MR	30 à 40	''
''	'' lage waterstanden	25	''

Totale slibafvoer van de Lek per jaar tusschen 500.000 en 1.000.000 ton.

Over het slibbezwaar zal in het volgende weinig worden gezegd. In de rivier zelf speelt het geen rol en in de voorhavens, waar wel slibafzetting is te verwachten, kan men aannemen, dat de grootte van het slibbezwaar in het algemeen parallel zal loopen met die van het zandbezwaar.

Onze kennis van het zandtransport is verre van volledig. In het Rapport-Wentholt van 1927 wordt op blz. 15 beredeneerd dat de totale zandafvoer in een jaar de hoeveelheid van 1/4 millioen m^3 waarschijnlijk ver zal overschrijden. Wellicht zal een aanname van een half millioen m^3 per jaar, of wat minder, niet in strijd zijn met de waarnemingen.

Voor het beoordeelen van de modelmetingen zal het noodzakelijk blijken dat men er zich althans eenige voorstelling van maakt op welke wijze het totale zandtransport over de verschillende waterafvoeren Q is verdeeld. Hieromtrent is slechts zeer weinig bekend[x)].

Bij kleine afvoeren is het doorgaande transport gering en veelal wordt aangenomen dat het bij waterstanden van meer dan een halve meter onder MR is te verwaarloozen. Wanneer dit juist is, beteekent het, dat bij afvoeren kleiner dan rond 300 m^3/sec, dus ongeveer gedurende een derde van de tijd, nagenoeg geen zandbeweging voorkomt.

De grootste zandverplaatsingen geschieden bij de allerhoogste afvoeren; omtrent de grootte daarvan tasten wij in het duister. Eenige houvast verschaft de in het Rapport-Wentholt (blz. 15) vermelde waarneming, waaruit zou volgen, dat bij waterstanden tusschen een en twee meter boven MR in de Waal veel meer dan 3.000 m^3 per etmaal zou worden getransporteerd. Dit zou voor de Nederrijn - Lek kunnen worden geïnterpreteerd als 2000 tot 4000 m^3 per etmaal bij een afvoer van 700 tot 800 m^3/sec.

Met de drie gegevens:

a. benedengrens transport bij Q = 300 m^3/sec,

b. bij Q = 700 tot 800 m^3/sec een transport van 2000 tot 4000 m^3 per etmaal en

c. totaal transport 500.000 m^3 per jaar,

is getracht eenigermate een quantitatief oordeel te verkrijgen over de afvoeren, die ten aanzien van het zandtransport van het meeste belang zijn. Daartoe is (figuur 5) tas-

x). Met de resultaten die door de beide rivier-studiediensten van den Rijkswaterstaat sinds 1933 worden verkregen en die onze kennis ten aanzien van het zandafvoerprobleem in belangrijke mate vooruitbrengen, kon bij de proeven uiteraard nog geen rekening worden gehouden.

tenderwijs aangenomen een kromme, die de zandverplaatsing per etmaal aangeeft bij elke waarde van Q: Een tweede lijn in de figuur is de partieele frequentiekromme van Q, die de afgeleide is van de totale frequentiekromme voor Q uit figuur 3 en die aangeeft hoeveel dagen per jaar de afvoer ligt tusschen twee grenzen, die telkens 50 m^3/sec uiteen liggen. Het product van de beide grootheden levert de derde lijn, die dus aangeeft hoeveel zand er per jaar bij elke afvoertrap wordt verplaatst. Het oppervlak, dat door deze lijn wordt ingesloten moet op de totale jaarlijksche zandafvoer van 500.000 m^3 per jaar uitkomen. Na eenige malen probeeren gelukte het om aan deze eisch vrijwel te voldoen. De lijn van de zandafvoer als functie van de waterafvoer gaat inderdaad door het gebied (geharceerd), dat overeenkomt met een transport van 2000 tot 4000 m^3/etmaal bij een waarde van Q van 700 tot 800 m^3/sec. Bij de hoogere afvoeren, waarbij de uiterwaarden blank staan, is aangenomen dat het zandtransport niet zoo sterk meer met de waterafvoer toeneemt, als in het gebied daaronder. Bij de allerhoogste afvoer zou men aan een zandtransport van 12000 tot 15000 m^3 per etmaal kunnen denken.

Door horizontale lijnen is het oppervlak, dat de totale zandverplaatsing aangeeft, in tien gelijke deelen verdeeld.

Als resultaat van de bewerking kan worden geconcludeerd, dat lage rivierafvoeren (tot Q = 400 m^3/sec) voor de zandafvoer niet belangrijk zijn omdat het zand dan slechts weinig in beweging is, evenmin als de groote (boven Q = 1200 m^3/sec), die te zeldzaam zijn. Het belangrijkste deel van het transport, volgens de figuur de helft van het totaal, zou plaats vinden bij afvoeren tusschen 500 en 800 m^3/sec, dus bij waterstanden van 50 tot 200 cm boven MR. Het is dus zaak de kruising zoodanig te ontwerpen, dat vooral bij deze waterstanden de omstandigheden gunstig zijn.

Een andere conclusie dan deze mag uit figuur 5 niet worden getrokken, daarvoor staat het geheel veel te veel op losse schroeven.

e. De rivier had vóór 1927 een normaalbreedte (op MR), die bij Wageningen 130 m bedroeg en naar Wijk bij Duurstede tot 137

m toenam. Bij latere normaliseering is een versmalling tot 100 m voorzien. Door het flauwe beloop (1:4) van de koppen der kribben is de diepte in de bodem tusschen de kribben nog aanzienlijk geringer. Een grootere normaalbreedte zou voor de scheepvaart echter zeergewenscht zijn.

De onderlinge afstand der kribben is ruim honderd meter. Hun bovenkant ligt ongeveer een halve meter boven MR. Tot ongeveer drie meter boven ditzelfde peil blijft de rivier in zijn zomerbed; dan gaan de zomerkaden overloopen en de uiterwaarden een rol spelen bij de waterbeweging en bij de afvoer. De hoogte van de uiterwaarden varieert tusschen $\frac{1}{2}$ en $2\frac{1}{2}$ m boven MR. Hun breedte, die tot 1100 meter kan bedragen, is elders klein en op verscheidene plaatsen ontbreken ze geheel en al (o.a. te Wijk bij Duurstede aan de rechter oever boven de kruising).

De diepte van de rivier, die van plaats tot plaats sterk wisselt, is bij middelbare standen van de orde van grootte van vier meter. Bij de stand van OLR, wanneer de doorgaande vaardiepte op de Waal en de onverdeelde Rijn nog bijna drie meter bedraagt, kan op de Nederrijn - Lek niet op meer dan ruim anderhalve meter worden gerekend.

f. De diepte, die thans in de rivier voorhanden is, kan voor de overgang[x)] niet voldoende worden geacht. De op de Waal aanwezige diepte dient ook hier beschikbaar te zijn, zoodat in het korte riviervak dat deel uitmaakt van de kruising een diepte moet worden onderhouden, die ruim een meter grooter is, dan die van de natuurlijke rivier. Slaagt men er in het vormen van ruggen en drempels in de overgang te voorkomen, dan kan het verschil in de <u>gemiddelde</u> diepte kleiner zijn dan het genoemde bedrag. Het Rapport-Wentholt noemt als een verschil tusschen gemiddelde diepte en vaardiepte (minimumdiepte) 40 tot 60 cm. Wanneer dit verschil in de kruising de helft daarvan is, kan de gemiddelde overdiepte

x). In het vervolg zal onder ''kruising'' worden verstaan het geheele riviervak, dat door de kanaalaanleg wordt beïnvloed, benevens het geheele havencomplex van sluis tot sluis. De onderdeelen, waaruit de kruising bestaat, worden aangeduid door de namen, die op figuur 2a voorkomen.

minder dan een meter bedragen.

Dezelfde diepte als het riviervak moeten ook de voorhavens bezitten.

Het belang van de vaart op het kanaal, dus tusschen de beide voorhavens, vergt geen groote breedte van de rivier bij de kruising. Bij het oversteken van de rivier zal een schip met eigen beweegkracht min of meer in de stroomrichting gaan liggen en zich dus laten overgieren. Deze zelfde, in het verslag van de Staatscommissie Limburg beschreven, manoeuvre wordt door de sleepbooten gemaakt. Het ligt voor de hand, dat daarvoor een groote rivierbreedte onnoodig is. Wel moet de mond van de voorhavens zeer ruim zijn. De Staatscommissie Limburg gaf daarvoor 275 meter aan en in het Rapport-Wentholt wordt deze maat nog vergroot tot 295 meter. Het laatste getal is bij de modelproeven in het algemeen als grondslag genomen.

Vaartuigen, die komen van plaatsen, benedenstrooms van de kruising aan de rivier gelegen en die de voorhavens wenschen binnen te gaan, doen dit op dezelfde wijze, als de overstekende schepen. Ook het uitgaan van de havens voor opvarende schepen geschiedt zonder bezwaar. Moeilijker wordt de manoeuvre voor schepen, die de rivier afzakken en voor het kanaal bestemd zijn: zij moeten in de kruising opdraaien. Wanneer dit met een geheele sleep het geval is, heeft men geen zekerheid, dat deze manoeuvre geheel en al in het kruisingsvak kan geschieden en dan zullen de aansluitende riviervakken - althans dat aan de benedenstroomsche zijde - ruim genoeg moeten zijn voor het zwaaien. Uit een haven komende vaartuigen, die de rivier moeten afvaren, vereischen eveneens een groote ruimte om te zwaaien.

Schepen, die op de rivier blijven en de kruising passeeren, hebben hier evenzeer behoefte aan een groote breedte als elders. Wellicht is wegens de grootere drukte en de meerdere kans op het aantreffen van baggermateriaal juist hier in het bijzonder veel breedte gewenscht.

Op het vraagpunt van de breedte moest hier worden ingegaan, omdat uiteraard voor het instandhouden van de

diepte in de kruising een kleine breedte vereischt is en hier dus een tegenstelling bestaat tusschen de belangen van de doorgaande kanaalvaart, die een smalle en van het grootste deel van de overige vaart, die een breede rivier vraagt.

Een andere tegenstrijdigheid is gelegen in de hoogte van de leidammen, die de voorhavens aan de bovenstroomsche zijde begrenzen. Voor een rustige vaart, ook bij de hoogste standen, in de voorhavens is een watervrije dam het beste, doch in het belang van een niet al te groote verhooging van HHW boven de kruising kan een minder hooge ligging van de kruin gewenscht zijn.

Op een afstand van eenige honderden meters van de normaallijn kan de breedte van de voorhavens worden teruggebracht tot het verruimde kanaalprofiel, dat ter weerszijden van de schutsluizen is ontworpen. De schutsluizen zelf liggen nog veel verder; hun plaats is ten aanzien van het onderzoek van de kruising practisch zonder belang.

3. Geschiedenis van het onderzoek.

a. Model-Wageningen (M. 9).

Op 20 Februari 1928 werd begonnen met de bouw van het model, dat op 29 Maart zoover gereed was, dat water kon worden toegelaten. Op 7 April was het model geheel gereed en bedrijfsvaardig, zoodat de metingen konden aanvangen. Tot 2 Juni 1928 werden orienteerende metingen verricht, welke dienden om de meetmethoden te ontwikkelen en de wijze van beoordeeling van de verschijnselen vast te stellen. Voorts werden verbeteringen in de inrichting van het model uitgevoerd en de benoodigde meettoestellen en hulpmiddelen samengesteld.

Daarna werden bij verschillende afvoeren en waterstanden metingen verricht van de verdeeling der snelheden in de kruising en de mate van wateruitwisseling tusschen de kruising en de voorhavens, waarbij deze waren aangelegd volgens

het plan van de Staatscommissie Limburg (figuur 9). De invloed van leidwerken bovenstrooms van de kruising werd hierbij nagegaan, evenals die van versmalling of verwijding van de rivier bovenstrooms en van versmalling benedenstrooms Deze metingen werden voortgezet tot 3 October 1928.

Uit de resultaten van deze metingen bleek de wenschelijkheid om eenerzijds voor de kruising een plaats te kiezen, die verder rivierafwaarts is gelegen en anderzijds de vorm van de havens te veranderen. Daarom werd reeds begonnen met de bouw van havens in de nieuwe ligging en van een nieuwe vorm (figuur 9). Op 17 October konden de metingen in de nieuwe situatie aanvangen. Deze metingen, waarbij wederom de invloed van versmalling van de rivier boven- en benedenstrooms van de haven werd onderzocht, werden beëindigd op 12 Februari 1929.

Vervolgens werden van 11 tot 21 Maart op de plaats van de nieuwe havens de voorhavens weer in de oude vorm ingebouwd.

De waarnemingen in deze situatie duurden tot 18 April, waarna op 22 April 1929 met het afbreken van het model werd begonnen.

In verband met de ontwikkeling van de plannen voor het kanaal werd niet dadelijk een verslag over de verrichte proeven uitgebracht.

In 1931, toen een nader onderzoek van een kruising bij Wijk bij Duurstede werd opgedragen, is besloten de beide onderwerpen in één verslag samen te vatten.

Het onderzoek stond onder leiding van mr. ir. W. N. Dinger.

b. Model Wijk bij Duurstede. (M. 46).

De bouw begon op 10 November 1931. Op 10 December d.a.v. werd voor het eerst water in het model toegelaten. Tot 18 December werden metingen verricht bij verschillende waterstanden en afvoeren met een havenvorm, die op grond van de proeven van M. 9 was aangelegd. Van die datum tot 2 Maart

1932 werden doorgemeten de toestanden 0 tot en met VII, waarbij het voornamelijk erom ging, de invloed van de grootte en de vorm (verhouding van breedte tot lengte) van de havens te bepalen. Tevens werd de vorm van de koppen A en B, die de ingangen van de havens begrenzen, gevarieerd. Hierna werd geprobeerd verbetering te verkrijgen door de bovenstroomsche koppen (A) te doen overgaan in een loodrechte geleidingswand (T. III, B, C), daarna door die koppen zoo in te richten, dat aan de rivierzijde een splitsing van boven- en onderstroom optrad (T.III, D, E, E' en F). De bedoeling was hierbij de onderstroom naar het midden van de rivier af te leiden, zoodat de neeren in de voorhavens in hoofdzaak door rivierwater uit de bovenste lagen zouden worden gevoed. De metingen waarbij volgens dit beginsel werd gewerkt, werden begonnen op 10 Maart. Te beginnen met toestand III F is het vrije profiel van de koppen A en B boven N.A.P. + 465 cm verruimd ter vermindering van de opstuwing bij zeer hooge afvoeren. Bij een gedeelte van deze proeven is tevens het resultaat onderzocht van het in de havens binnenleiden van oppervlaktewater aan de benedenstroomsche zijde door middel van pontons (T. III F' en III F''). Ook werden de koppen B uitgevoerd met een spitse hoek (T.III GA-C-D). Deze metingen werden voorloopig beëindigd op 26 Mei. Het resultaat ervan was, dat het beginsel van de scheiding van boven- en onderstroom bij de bovenstroomsche koppen (A) werd aanvaard en de pontons bij de koppen (B) werden verworpen.

Metingen, die van 27 Mei tot 12 Juni werden verricht, hadden meer een theoretische beteekenis. Nagegaan werd, of de ronddraaiende beweging in de voorhaven kon worden versterkt, door uit het middengedeelte van de haven water weg te zuigen.

Hierna is dat gedeelte van het model, waar de stroomtoestand werd onderzocht, voorzien van een horizontale vloer van cementmortel. In deze toestand werd T.III K onderzocht, die alleen door een kleine wijziging van kop A van T.III G.D verschilt.

Na deze metingen, die tot 6 Juli 1932 duurden,

werden de proeven eenige tijd gestaakt in verband met een onderzoek, dat door de Rijkswaterstaat werd ingesteld ten aanzien van de breedte waarop het zomerbed van de rivier dient te worden gebracht.

Het model werd dienovereenkomstig gewijzigd; tevens werden aan de koppen andere afmetingen gegeven, om de opstuwing nog meer te verminderen. (T.VIII).

Van 4 October tot 11 October werd deze toestand doorgemeten, waarna kop A werd gewijzigd (T.IX). Na de proeven met deze situatie werd tot 7 November een serie kleine wijzigingen onderzocht, wat tenslotte leidde tot de vorm T. X, waarbij de bodemstroom naar het midden van de rivier wordt geleid door een kleine gebogen onderwaterdam. De metingen in deze toestand en in T. XI, die van T. X verschilt door een kleine wijziging aan de koppen B ter vermindering van de opstuwing duurden tot 25 November.

Om nauwkeuriger meting van de opstuwing mogelijk te maken (par. 13) werd daarna het riviergedeelte beneden de kruising in het model verlengd (T. XII). Van 13 December 1932 tot 16 Februari 1933 werd deze toestand doorgemeten. Om na te gaan of de gebogen vorm van het vlak, dat de koppen A in de laatst onderzochte toestanden aan de rivierzijde begrenst, bepaald nuttig is, werd deze begrenzing in T. XIII als plat vlak uitgevoerd (tot 1 Maart).

Als resultaat van alle tot dusver opgesomde metingen, zoowel in het eerste model als in het nieuwe, was gaandeweg een ontwerp voor de havens ontstaan, dat vooral in twee opzichten sterk van dat van de Staatscommissie Limburg afweek. In de eerste plaats was de oppervlakte van de voorhavens in niet onbelangrijke mate vergroot, voorts waren de beloopen die de koppen A vormden, vervangen door constructies met verticale wanden. Beide maatregelen verhoogden de kosten van de kruising en daarom was het aangewezen om nog eens na te gaan, of de wijzigingen inderdaad belangrijke verbeteringen beteekenen. Daartoe werden eerst de havens, met behoud van de koppen A van T. XIII, in de vorm van de Staatscommissie Limburg gebracht (T. XIV). Deze havenvorm is

ook onderzocht met de kop A van toestand XII (T. XV, tot 22 April 1933). Bij T. XVI (tot 15 Mei) werden de koppen door beloopen begrensd; de voorhavens hadden daarbij wederom de eivorm.

Overeenkomstig deze gedachtengang werden daarna de strekdammen, die het zomerbed onmiddellijk boven de kruising begrenzen, vervangen door kribben, die een aanpassing aan wijzigingen in de rivierbreedte gemakkelijker zouden maken (T. XVII; tot 7 Juni).

Op grond van de uitkomsten dezer metingen werd bij het latere onderzoek weder gewerkt met ronde havens, voorzien van geconstrueerde koppen A; de rivier werd wederom door strekdammen geleid. De verdere proeven liepen over variaties in de rivierbreedte en details van de vorm van de puntstukken.

T. XVIII en de daarvan weinig afwijkende T. XIX en T. XX, die van 23 Juni tot 23 Augustus 1933 werden beproefd, hadden een breede overgang; de laatste toestand (T. XX) is daarbij eveneens beproefd bij het versmalde rivierprofiel. Bij ditzelfde rivierprofiel werden vervolgens tot 26 Januari onderzocht de toestanden T. XXI tot en met T. XXVI, die onderling van elkaar verschillen door kleine wijzigingen van de koppen A en door het feit, dat van T. XXIV op T. XXV de haven kleiner is gemaakt. Tot 12 Maart 1934 daarna is onderzocht de invloed van wijzigingen van de benedenstroomsche koppen (T. XXVII en T. XXVIII).

Hierna werd het onderzoek voorloopig beëindigd en een overzicht van de tot dusverre verrichte metingen samengesteld, dat op 24 Maart 1934 werd ingezonden.

Van 8 tot 15 Augustus werden de metingen in T. XXVIII herhaald met een ruimer profiel, niet alleen in de overgang, maar ook in het overige deel van het model, (T. XXIX).

Daarna werd nagegaan welke invloed het vullen van de schutsluis van Wijk bij Duurstede heeft op de stroomtoestand in de oordelijke voorhaven en de kruising. Dit onderzoek, dat zoowel met nabootsing van het ontworpen verloop

van de sluisvulling, als met stationnaire wateronttrekking werd uitgevoerd, duurde tot 4 September 1934.

Van 20 tot 24 November werd vervolgens onderzocht T. XXX, die van T. XXIX verschilt door een andere hoogteligging van de koppen A.

Hierna werd overgegaan tot het verrichten van contrôlemetingen in de toestanden T. XXI en T. XXII (26 tot 28 November). De uitkomsten van deze metingen toonden vrij aanzienlijke verschillen ten ongunste vergeleken met de vroegere waarnemingen.

Op 30 November en 1 December werd weer een toestand met veranderde kruinshoogte onderzocht (T. XXXI), waarna de metingen met T. XXII nogmaals werden herhaald. (17 December 1934 tot 3 Januari 1935). Van 5 tot 23 Januari 1935 werden nog eenige wijzigingen van T. XXII doorgemeten (T. XXXII en T. XXXIII), waarna het model werd afgebroken.

Het onderzoek werd tot 4 September 1934 uitgevoerd door ir. K. E. Pomes en van 20 November 1934 af voortgezet door ir. F. A. J. Helmer.

In het eerste deel van 1935 moesten de resultaten onbewerkt blijven liggen; de definitieve bewerking geschiedde weder door ir. K. E. Pomes en na diens vertrek op 15 Februari 1936 door ir. J. B. Schijf. Dit verslag werd samengesteld door laatstgenoemde in samenwerking met ir. J, Th. Thijsse.

4. Resultaten.

Op grond van de resultaten van de proeven kan worden geconcludeerd, dat het niet mogelijk is aan beide eischen van een voldoend breede rivier en van een diepe overgang gelijktijdig te voldoen. Om de diepte in de kruising te handhaven zal baggerwerk moeten worden verricht. De hoeveelheid baggerwerk neemt toe met de breedte die de rivier ter plaatse van de kruising tusschen de normaallijnen

moet verkrijgen.

Overigens kan men bij het maken van de kruising een aantal maatregelen treffen, die de te baggeren hoeveelheid beperken. Eenige van deze maatregelen hebben invloed op de diepte in de overgang, en in de voorhavens beide, andere beperken vooral het baggerwerk in de overgang (dat vermoedelijk het meest omvangrijk zal zijn) terwijl ten slotte maatregelen kunnen worden genomen, die een gunstige invloed hebben op het aanzanden en aanslibben van de voorhavens.

Ten behoeve van de diepte in overgang en havens beide is het noodzakelijk dat de as van de rivier een buigpunt vertoont op eenige afstand bovenstrooms van de kruising. De juiste grootte van deze afstand valt uit de verrichte proeven niet af te leiden, waarschijnlijk moet men denken aan verscheidene honderden meters. Volgt het zomerbed een ander tracé, dan is het door de rivier getransporteerde zand niet op een symmetrische wijze over de rivierbreedte verdeeld. De overgang zal daardoor een sterke neiging vertoonen tot verondieping aan de kant, die overeenkomt met de bolle zijde van de bovenstroomsche rivierbocht. Ook de aan die kant gelegen voorhaven zal sterk aan verzanding onderhevig zijn (paragraaf 10). Van belang is het voorts, dat de stroom onmiddellijk boven de overgang niet wordt geleid door kribben, doch door strekdammen. Hierdoor wordt een regelmatiger strooming verkregen, waardoor men mag hopen, dat het verschil tusschen de gemiddelde en de minste diepte in de overgang gering zal zijn. Ook blijkt uit de proeven, dat dan de uitwisseling langs de open fronten tusschen het water van de voorhavens en dat van de overgang het minst intensief is, zoodat betrekkelijk weinig zand en slib in de voorhavens terecht komt.

In het belang van de overgang moet de normaalbreedte plaatselijk zoo klein worden gekozen, als met het oog op de navigatie maar eenigszins toelaatbaar is. Tengevolge van de groote diepte, die in de overgang moet worden gehandhaafd, is de natte doorsnede er grooter dan in de normale riviervakken en de gemiddelde stroomsnelheid dus klei-

ner. Dit moet leiden tot verbreken van het evenwicht in de zandafvoer: er wordt meer zand in de overgang gebracht, dan er door de relatief zwakke stroom uit wordt verwijderd.

Bij lage rivierstanden is de extra diepte ten opzichte van de diepte in de normale rivier groot en zal de stroomverlamming naar verhouding het meest belangrijk zijn (paragraaf 11). Tijdens de zeer groote afvoeren kan de vergrooting van het zomerbed worden gecompenseerd door de vernauwing, die de havendammen in het winterbed teweegbrengen. Wanneer de opstuwing van de hoogste waterstand dat toelaat, kan in dat geval zelfs een abnormaal klein profiel, dus een sterke stroom worden veroorzaakt, waardoor een deel van het zand dat tijdens minder hooge rivierstanden in de overgang is neergezet, weer kan worden opgeruimd.

Van het meeste belang is het, hoe groot de afwijking in het dwarsprofiel is bij standen, waarbij het meeste zandtransport plaats vindt; volgens paragraaf 2,d dus een halve tot twee meter boven MR.

Bij deze standen bedraagt de overdiepte ongeveer het vijfde deel van de normale diepte in de rivier (paragraaf 2, e en f) en een stroomvermindering in de overgang zou alleen te voorkomen zijn, wanneer de breedte plaatselijk met een zesde zou worden verminderd. Is dit niet mogelijk, dan heeft men zandneerzetting in de overgang te aanvaarden.

De snelheidvermindering zou nog sterker worden, wanneer de stroom zich niet zou beperken tot de overgang, doch ter plaatse van de voorhavens, waar geen zijdelingsche geleiding door oevers of kribben aanwezig is, daarin zou doordringen. Dit kan practisch geheel en al worden voorkomen door aan de voorhavens een geschikte vorm te geven (figuur 22a). Daarmede wordt bereikt, dat het stroomstelsel in deze havens zich aan de rivierzijde over de geheele lengte van het open front tot de normaallijn uitstrekt. De rivierstroom heeft daardoor vrijwel geen gelegenheid om de normaallijn te overschrijden en zoodoende zijn stroomgebied met een deel van de voorhavens uit te breiden. Bij de oorspronkelijk onderzochte voorhavenvorm (figuur 20) heeft dit overschrijden

Meer alles uitwaaiering

wèl plaats en het gevolg is dan ook een verdere vermindering van de stroomsnelheid in een deel van de overgang.

De beide middelen om een zoo goed mogelijke toestand in de overgang te verkrijgen: een smalle rivier en havens met een aansluitend stroomstelsel, worden in paragraaf 11 nader besproken.

Ter beperking van de verondieping van de havens is het in de eerste plaats gewenscht, dat het door de rivier afgevoerde zand en slib zoover mogelijk van de havens verwijderd blijft en dus wordt geconcentreerd in het midden van de rivier waar de grootste stroomsnelheden voorkomen. Daar vooral het zand, en in mindere mate ook het slib, aan de diepste stroomdraden is gebonden, komt het er op neer, dat onmiddellijk bovenstrooms van de kruising getracht wordt de bodemstroomen naar het midden van de rivier te laten convergeeren. Hiermede moet uiteraard gepaard gaan het divergeeren van de oppervlaktestroom, een opwaartsche waterbeweging in de as en een neerwaartsche aan de kanten van de rivier, zoodat twee tegengesteld gerichte schroefbewegingen ontstaan.

Volgens de proeven is het mogelijk een dergelijk stroombeeld te veroorzaken door aan de koppen A een geschikte vorm te geven. De bodemstroom en die aan de oppervlakte loopen beneden die koppen niet meer evenwijdig, doch maken een kleine hoek met elkander (paragraaf 12). Het oppervlaktewater heeft een geringe havenwaartsche component, wat weder tengevolge heeft dat het water in het grensgebied tusschen haven en rivier, dus langs het open front, voor een groot deel afkomstig is van de bovenste lagen van de rivier.

Maakt deze eerste maatregel, dat het zand dat dicht langs de havens trekt, een gering deel van de zandafvoer van de rivier uitmaakt, een tweede voorzorg moet er voor dienen, dat van dit deel zoo weinig mogelijk in de havens terecht komt, waar het, bij de zwakke stroomen, die daar heerschen, onherroepelijk blijft liggen. Deze voorzorg bestaat uit het veroorzaken van een weinig intensieve uitwisseling tusschen havenwater en rivierwater langs het open

front (paragraaf 12). De proeven toonen aan, dat een door beloopen begrensde kop A langs het open front een breed wervelgebied veroorzaakt, dat noch tot de rivierstroom, noch tot het stroomstelsel van de voorhaven behoort. Het bestaan van dit breede gebied schijnt een sterke uitwisseling van het water ter weerszijden in de hand te werken. De modelmetingen geven aan, dat een grooter aantal van de voorwerpen, die aan de rivierzijde in het water worden gebracht aan de havenzijde terecht komt, dan het geval is, wanneer langs het open front één smalle wervelstraat aanwezig is. Deze laatste is minder bewegelijk, ofschoon in dit geval nog in de verste verte geen sprake is van het bestaan van een stabiel scheidingsvlak tusschen rivier en haven. Uitwisseling zal er altijd zijn. Zonder deze zou het stroomstelsel in de haven onbestaanbaar zijn, omdat de voor het onderhouden van de havenstroomen benoodigde energie bijna uitsluitend kan worden ontleend aan het rivierwater dat telkens de haven binnendringt.

De smalle wervelstraat, die volgens de proeven dus gewenscht is, treedt in de plaats van de breede overgangszône, wanneer de koppen A in een doelmatig gevormde scherpe punt uitloopen. Het is dus noodig deze koppen gedeeltelijk als kunstwerken uit te voeren.

Geven de modelproeven geen aanwijzing omtrent de hoeveelheid die jaarlijks uit de overgang moet worden gebaggerd, dit is wel - althans globaal - het geval ten aanzien van de uit de voorhavens te verwijderen zandmassas. In beide havens tezamen zullen deze, bij een goede vormgeving van de koppen A, waarschijnlijk minder dan vijf procent van de totale zandafvoer van de rivier bedragen, dus van de orde van grootte van 10.000 m^3 zijn. Voor slib, ten aanzien waarvan het middel van het naar de as van de rivier richten van de bodemstroom minder werkzaam is, zal op een iets hooger percentage, bijvoorbeeld omstreeks vijf procent of 25.000 ton per jaar moeten worden gerekend.

Opvallend is de betrekkelijk geringe invloed van de koppen B. Toch is de vorm daarvan niet geheel zonder beteekenis en, ofschoon dit van niet zooveel belang is, als bij de koppen A, is het gewenscht, dat zij niet te stomp

worden afgewerkt. Een scherpe kop B schijnt de uitwisseling tusschen rivier en haven eenigszins tegen te werken, terwijl er bovendien door bereikt wordt, dat het stroomstelsel in de haven dicht tegen de rivier aansluit, zoodat de rivier goed wordt geleid.

Het spreekt van zelf, dat de uitwisseling in sterke mate wordt beperkt door het open front te verkorten, m.a.w. door de kop B dichter bij de kop A te brengen. Evenals bij de keuze van de rivierbreedte stelt het belang van de navigatie hier een grens. Het is daarom van belang, dat de havenvorm zoodanig is, dat in- en uitvaart met een minimale afstand tusschen de koppen A en B mogelijk is. Aan deze eisch voldoen de later onderzochte, min of meer eivormige havens beter, dan die van het oorspronkelijke model.

De metingen omtrent de opstuwing, die bij de hoogste rivierstanden door de kruising wordt veroorzaakt, hebben als resultaat opgeleverd, dat de opstuwing een groote waarde (bijna een meter) zou kunnen verkrijgen, wanneer de dammen langs de voorhavens het winterbed watervrij afsluiten (paragraaf 13). Een geringere kruinshoogte van deze dammen doet de opstuwing aanmerkelijk verminderen. Zoo werd bij verschillende situaties in het schematische model een opstuwing van minder dan twintig centimeter gemeten. De havendammen waren bij die metingen aan het worteleinde watervrij; zij daalden naar de rivier toe aanvankelijk tot anderhalve meter onder de hoogste stand, en over de laatste tientallen meters tot ruim drie meters onder dat peil. Ook de verdere situatie heeft invloed op de opstuwing, waarschijnlijk is een goede vormgeving van de koppen B van vrij groot belang.

Onmiddellijk beneden de kruising treedt plaatselijk een geringe verlaging van de hoogste stand op.

Met welke verhooging in de werkelijk optredende situatie moet worden gerekend, is op grond van deze proeven niet uit te maken. Daartoe zou deze situatie zelf in een model moeten worden nagebootst. Vermoedelijk zal de kruising beneden Wijk bij Duurstede ten aanzien van de opstuwing gunstig zijn in verband met het feit, dat de rechte bandijk

onmiddellijk boven de kruising een schaardijk is.

Gaat men ertoe over ten behoeve van een geringe opstuwing de voorhavendammen niet volledig watervrij aan te leggen, dan zal bij de allerhoogste standen de scheepvaart in de voorhavens eenige moeilijkheden ondervinden door dwarsstroomen. Overigens kan worden geconstateerd dat de stroomen in de kruising gunstig zijn voor de navigatie. De rivierstroom gaat, wat richting en snelheid betreft, geleidelijk over in die van de voorhavens en de geheele stroomverdeeling in de havens is zoodanig, dat het in- en uitvaren in de hand wordt gewerkt. In het bijzonder kan er op worden gewezen, dat zoowel de in- als de uitvarende schepen in de havens een zwakke stroom tegen hebben (figuur 25). De overstekende sleep in figuur 25, waarbij is gedacht aan een waterstand van N.A.P. + 465 (MR + 130) ontmoet bij het uitvaren van de noordelijke voorhaven een tegenstroom van 25 tot 35 cm/sec, bij het invaren van de zuidelijke een tegenstroom van 15 tot 20 cm/sec. Vooral wanneer een vaartuig of een sleep, die de kruising wil uitvoeren, op een tegenligger moet wachten, zal deze tegenstroom een voordeel beteekenen.

Resumeerende kan worden gezegd, dat volgens de proeven de gunstigste voorwaarden voor de kruising worden verkregen wanneer:

het zomerbed zoodanig wordt getraceerd, dat zich op eenige honderden meters boven de kruising een buigpunt bevindt,

de rivier onmiddellijk boven de overgang door strekdammen wordt geleid,

het zomerbed zoo nauw mogelijk is,

de voorhavens zoodanig zijn gevormd, dat hun stroomstelsels langs het geheele open front tot de normaallijn reiken,

de rivierzijde van de koppen A een vorm heeft, die de bodemstroom naar het midden van de rivier afleidt,

deze koppen een spitse punt bezitten,

en tenslotte ten behoeve van de opstuwing:

de voorhavendammen aan de rivierzijde niet tot de hoogste waterstand zijn opgetrokken.

Om in de overgang voldoende diepte te onderhouden, moet daarin periodiek baggerwerk worden verricht, de omvang daarvan valt uit de proeven niet af te leiden. Ook in de voorhavens zal baggerwerk noodig zijn; voor de orde van grootte daarvan geven de modelmetingen een hoeveelheid van eenige tienduizenden kubieke meters, zand en slib gezamenlijk, aan.

-o-o-o-o-o-o-

II. De modellen en de metingen.

5. Voorwaarden, waaraan de modellen moeten voldoen.

De verschijnselen, die in de modellen moeten worden beoordeeld zijn onder te brengen in twee groepen: beweging van water en beweging van vaste stoffen.

Om de waterbeweging in het model te laten overeenkomen met die in de werkelijkheid, is het noodzakelijk, dat de modelstroomen turbulent zijn, m.a.w. dat het dimensielooze getal van Reynolds, Re, niet kleiner is dan een zekere grenswaarde. Wordt voor de lengtemaat d in de formule

$$Re = vd : \nu$$

de waterdiepte genomen (v is de stroomsnelheid, ν de viscositeit, ongeveer 1:75) dan is de grenswaarde omstreeks 2000. Daalt in een turbulente stroom Re tot onder deze grens, dan zal de sprong van turbulent tot laminair niet dadelijk plaats vinden, doch eerst als Re verder is afgenomen, in gunstige gevallen wellicht tot 1000 of nog minder.

Bij de kruising komen de kleinste waarden van Re voor bij lage waterstanden: zoowel v als d zijn dan klein.

De allerlaagste rivierstanden mogen buiten beschouwing blijven. Zooals (paragraaf 5) werd vermeld, zullen de verplaatsingen van zand bij rivierstanden die meer dan een halve meter onder MR liggen, van weinig beteekenis zijn; het is dus voldoende als het model volledig bruikbaar is voor waterstanden van MR - 50 cm en hooger.

Wat de plaats betreft: in de rivier zelf is Re veel grooter dan in de voorhavens, waar de stroomen zwak zijn. In het midden van deze havens staat het water practisch stil, zoodat daar Re steeds kleiner is dan de grenswaarde. Het gebied, waar aan de turbulentievoorwaarde niet wordt voldaan, is in het model relatief grooter dan in de werkelijkheid, zoodat, hoè men het model ook inricht, steeds uit dien hoofde een afwijking bestaat.

Daartegen bestaat weinig bezwaar, wanneer de stroomen in het gebied, waar de werkelijkheid wèl, het

model echter niet turbulent is, van weinig invloed op het geheel zijn. Dit is het geval, wanneer het afwijkende gebied niet te dicht de omtrek van de havens of de rivier nadert.

De eisch is dus: kies de modelschalen zoodanig, dat bij een rivierpeil van MR - 50 cm Re slechts in het middelste deel van de havens kleiner is dan omstreeks 2000.

Om de gevolgen van deze eisch te bepalen, moet eenigszins bekend zijn, welke stroomsnelheid in de voorhaven kan worden verwacht. Op grond van ervaring met analoge gevallen mag deze snelheid langs de omtrek van de havens worden geschat op minder dan de helft, doch meer dan een vierde deel van die in de rivier, die in dit geval rond een meter per seconde is. Bij een aangenomen snelheid van 30 cm/sec en een diepte van 450 cm zou aan de rand van de haven dus gelden

$$Re = 30 \times 450 \times 75,$$

of ruim 10^6.

In een model wordt Re ten opzichte van de werkelijkheid verkleind met de $\frac{3}{2}$-de macht van de schaalverhouding in verticale richting, zoodat om voor Re-model zelfs aan de rand van de haven de waarde van 2000 te verkrijgen bij een gelijkvormig model, deze schaalverhouding k omstreeks 60 zou moeten zijn. Een model op deze schaal zou een zeer groote omvang moeten verkrijgen en een plaatsruimte vergen, die in het laboratorium niet beschikbaar was.

Daarom is bij het eerste onderzoek, dat voor Wageningen, gebruik gemaakt van een samengetrokken model.

De hierboven afgeleide schaal van 60 werd voor de verkleining in verticale richting aangehouden, in horizontale richting werd met verkleinen veel verder gegaan en wel tot de schaalverhouding van 200. Aan de turbulentieeisch is in een dergelijk model evengoed voldaan als in een model waarvan de verkleining ook in horizontale zin 60 is. Er moet echter op worden gelet, dat de omstandigheden niet in belangrijke mate mede worden beheerscht door verticale versnellingscomponenten van de waterdeeltjes. Wanneer dit het geval is, wijkt de stroomverdeeling in het model af van de werkelijke.

In een rivier kunnen verticale versnellingen inderdaad voorkomen en wel bij het stroomen over kribben. In het samengetrokken model zal het over een krib gestorte water zich aanvankelijk anders gedragen, dan het zou moeten doen. Intusschen heeft dit slechts weinig invloed op de hoofdstroom in de rivier en daar lage kribben in de onmiddellijke omgeving van de kruising zelf bij de oorspronkelijke ontwerpen niet voorkomen, werd deze fout van een samengetrokken model geaccepteerd.

Eenigszins anders stond het bij de tweede serie proeven, die voor de kruising beneden Wijk bij Duurstede. Het ging daarbij niet meer om het algemeene principe, maar ook om details van de beweging, naar aanleiding waarvan de juiste vormgeving van de voorhavens zou moeten worden bestudeerd. Bij de landtongen, die de havenmond ter weerszijden begrenzen, is te verwachten dat de kromming der stroomdraden zich niet tot een horizontaal vlak zal beperken, zoodat hier een samengetrokken model de beweging niet geheel juist zal weergeven. Iets dergelijks vindt bij de zeer hooge rivierstanden plaats, waar de stroom van de uiterwaarden in de veel diepere voorhavens terecht komt.

In verband hiermede is aan de eisch van juist weergegeven verticale bewegingscomponenten bij het tweede model de voorrang verleend boven die van turbulentie. De schaalverhouding werd zoo klein mogelijk gekozen, namelijk $k = 100$. Daarbij is de stroom in de rivier steeds in meer dan voldoende mate turbulent; ook in de havenmond is dit het geval en bij de hoogere waterstanden eveneens langs de geheele omtrek van de haven. Alleen bij lage standen is daar Re kleiner dan 2000, doch nog grooter dan 1000, zoodat de turbulente stroomingstoestand van het van de rivierzijde komende water niet licht in een laminaire zal overgaan.

Toch zal men er zich rekenschap van moeten geven, op welke wijze de stroom in de voorhavens bij laminaire toestand zal afwijken van die bij volledige turbulentie. Daarvoor is het noodig, op het stroombeeld in te gaan.

De strooming in watergebieden, met een plattegrond die niet al te veel van de cirkelvorm afwijkt (dus ook

bijvoorbeeld rechthoeken met een verhouding van de zijden van niet meer dan omstreeks 1:2) die aan een kant, het open front, aan een doorgaande stroom grenzen, bestaat uit een neer, dus een rondgaande beweging waarvan de hoeksnelheid naar het midden afneemt.

De neer wordt in stand gehouden door de hoofdstroom langs het open front. Bij laminaire beweging geschiedt dit door wrijving, dus door de schuifspanning in vlakken evenwijdig aan de hoofdstroomrichting, in het geval van turbulentie echter doordat waterdeeltjes uit de hoofdstroom deze vlakken doorkruisen en zoodoende in de neer terecht komen (schijnwrijving). In beide gevallen is de snelheid in de neer het grootst aan de omtrek bij de benedenstroomsche landtong (kop B). Meer naar het midden is de snelheid daar nog zeer klein, zoodat een groote snelheidsgradient en dus ook een groote wrijving, resp. schijnwrijving, aanwezig is. Dit heeft tengevolge, dat de naast de sterke stroom gelegen watergedeelten geleidelijk sterker aan de beweging mee gaan doen, doch dat daarentegen de spitse kop van de stroomkrommen lager wordt. De stroomkromme wordt dus geleidelijk vlakker en, omdat schijnwrijving sterker is dan wrijving zal dit proces zich in sterker mate voltrekken, wanneer de stroom turbulent is, dan bij laminaire beweging.

Zou men, uitgaande van een bepaalde stroomverdeeling bij kop B in een turbulente neer verderop stroomprofielen verkrijgen zooals ze in figuur 8 door gebroken lijnen zijn aangegeven, dan zullen deze profielen bij een zoover gaande verkleining, dat de laminaire toestand optreedt, allicht de vorm van de getrokken lijnen bezitten. Bij de bovenstroomsche landtong - kop A - is de stroom aan de rand dus te sterk. Men meende deze fout te mogen toelaten, daar in de uitgestrekte havens de verspreiding van de stroom ook bij laminaire beweging bij kop A reeds vrij volledig zal hebben plaats gehad, zoodat het snelheidsprofiel in het model daar niet veel van het juiste zal afwijken.

Een ander gevolg van het optreden van laminaire stroomen in de neer is, dat het energieverbruik, tengevolge van de geringe wrijvingen te klein is. De neer zal daardoor

wat te sterk worden. Groot kan ook deze fout niet zijn, daar ter plaatse van het grootste energieverlies - aan de omtrek bij kop B - de beweging ook in het model turbulent is.

Erger zou het zijn, wanneer de stroom langs het open front laminair was. De neer zou dan niet in voldoende mate worden aangedreven en veel te zwak worden. Bij de gekozen schaalverhouding van 100 bestaat daarvoor echter geen gevaar.

Het gevolg van het accepteeren van kleine waarden van Re is dus, dat bij de lage rivierstanden de neerbeweging in de voorhavens een weinig te sterk kan zijn. Deze afwijking uit zich vooral door een te groote stroomsnelheid langs de kanten van de havens; in het centrale deel daarentegen is de beweging in het model te zwak. Men moet er steeds op bedacht blijven geen conclusies te trekken, die door de bedoelde afwijking zouden kunnen zijn beïnvloed.

Thans dient te worden nagegaan op welke wijze in de modellen gegevens kunnen worden verkregen ten aanzien van de beweging van vaste stoffen: gesuspendeerd slib en zich over en dicht langs de bodem bewegend zand.

Dergelijke metingen kunnen rechtstreeks of indirect worden uitgevoerd. In het eerste geval wordt slib in het water gebracht en na eenige tijd de hoeveelheid neergeslagen slib bepaald. Ook de verplaatsing van zand, zoo noodig voorgesteld door een materiaal van kleiner soortelijk gewicht, kan in het model worden waargenomen.

Op deze wijze is in het model alleen bij orienteerende metingen, waarbij nog niet werd gestreefd naar quantitatieve bepalingen te werk gegaan. In model 9 werd geconstateerd, dat, zooals mocht worden verwacht, door de uitwisseling aan het open front slib in de havens werd gebracht en gedurende de periode waarin het model van een zandbodem was voorzien, is ook een algemeene indruk verkregen omtrent de beweging van het zand.

De laatste zal bij een model met een diepteschaal van 60, resp. 100, nimmer volledig met de werkelijke over-

eenkomen. De snelheid van het water is daarbij tot resp. een achtste en een tiende van de werkelijke teruggebracht en van de in gebruik zijnde modelmaterialen is er geen, dat bij een zoo groote snelheidsschaal zich juist zoo gedraagt als het rivierzand bij Wageningen en Wijk bij Duurstede. In de rivier zelf zal veelal de stroom sterk genoeg zijn om ook in het model verplaatsing van bodemmateriaal te veroorzaken. Wel zal die verplaatsing relatief te zwak zijn, zoodat de tijd die voor het vormen van een bepaalde aanzanding of uitschuring noodig is, te groot zal zijn, doch de ervaring heeft geleerd dat de vorm, die het rivierbed in het model op den duur verkrijgt, niet in belangrijke mate van de juiste afwijkt.

In het geval in kwestie is het bovendien noodig te weten in hoeverre het zand door de beweging aan het open front in de voorhavens wordt gebracht. Daarbij speelt een rol de vraag op welk punt de stroom zooveel van zijn snelheid heeft verloren, dat hij niet meer in staat is om het zand verder te vervoeren. Het ligt voor de hand dat hierbij de grenssnelheid, waarbij het zand nog juist in beweging geraakt, in het model moet overeenkomen met die in de werkelijkheid.

Om dit te bereiken zou men de stroomen in het model kunnen versterken. Daardoor vervalt men in de fout, dat de hoogteverschillen van de waterspiegel in het model relatief te groot zijn (slope-distortion), een omstandigheid die hier weinig of niet hinderlijk is. Inderdaad is in model 9 in deze richting gewerkt. Men heeft er ook nagegaan hoe ver men met versterken (en verzwakken) van de stroomen mocht gaan, zonder de gelijkvormigheid van het stroombeeld te storen, doch ten slotte is er de voorkeur aan gegeven, het gedrag van zand en slib niet uit rechtstreeksche, doch uit indirecte waarnemingen af te leiden.

Deze indirecte waarnemingen omvatten uiteraard de bepaling van richting en snelheid van de stroom, vooral langs de bodem. De richting van de stroom bepaalt ook die van de baan der vaste stoffen, die door de stroom worden bewogen. In het algemeen zullen die banen geheel of nagenoeg

samenvallen, afwijking treedt alleen op bij sterk gekromde stroomdraden. Gesuspendeerde stoffen, dus slib en hoog opgewervelde zandkorrels, zullen zich daar tengevolge van hun grooter soortelijk gewicht naar de buitenzijde van de bocht bewegen, zij worden als het ware uitgecentrifugeerd. De meegesleepte deeltjes, die een kleiner snelheid hebben dan het water, kunnen de scherpe kromming beter volgen en hebben tengevolge van de drukgradient, die meer naar het krommingsmiddelpunt is gericht, neiging om de binnenzijde van de bocht te volgen. Groot zijn de afwijkingen tusschen de banen der vloeibare en vaste fase doorgaans niet; bovendien werken de beide genoemde verschijnselen in tegengestelde zin, zoodat zij elkander gedeeltelijk compenseeren. Men zal dientengevolge slechts zelden met de afwijking rekening behoeven de houden en in den regel de banen van de zand- en slibdeeltjes met die van het water mogen identificeeren.

De snelheid van de stroomen is een aanwijzing voor de hoeveelheden verplaatst vast materiaal en ook voor de plaatsen waar slibneerslag, uitschuring of aanzanding is te verwachten. Versnelling van de stroom duidt veelal op uitschuring, vertraging op aanzanding of slibneerzetting. De plaats waar de vertraging van de stroom zoo ver is gevorderd, dat de bewegingsgrens van zand is bereikt, is een punt van de lijn tot waar zandaanvoer mag worden verwacht. Verderop kan alleen slib worden neergeslagen.

Indirecte bepaling van materiaaltransport is wel is waar omslachtig en tijdroovend, doch men bereikt er mede, dat aan het model geen andere eischen worden gesteld dan die van de gelijkvormigheid van de waterbeweging.

Voor bepaling van de toestanden bij een gecompliceerd stroombeeld, bijvoorbeeld in een bocht van een rivier, is de methode ongeschikt.

6. De inrichting van de modellen.

a. Het model 9.

Het model omvatte het gedeelte van de rivier

tusschen de raaien 44.300 en 47.500 (figuur 1), benevens een inloop- en een uitlaatgedeelte (figuur 9). De toegepaste schaalverhoudingen (paragraaf 5) waren 200 voor de horizontale en 60 voor de verticale afmetingen.

Het model was opgesteld op een houten vloer en omgeven door houten wanden. Het was vervaardigd van beton op een onderlaag van grint. De kribben in de rivier waren uitgevoerd in hout.

De waterafvoer vond plaats via een vaste meetgoot, waarin zich een stuw met horizontale rand bevond. Door middel van deze inrichting kon het rivierdebiet worden ingesteld en gemeten met een grooter nauwkeurigheid, dan voor de proeven noodig is (ongeveer tot op één procent).

Tusschen de inloopbak en het eigenlijke model was een houten verdeelrooster geplaatst, waardoor het water met een gelijkmatige stroomverdeeling het model binnentrad.

De uitlaat van het model was voorzien van een beweegbare klep met horizontale overstortrand, waarmee de waterstand in het model kon worden geregeld.

De figuren 10 en 11 geven een beeld van het model in bedrijfsvaardige toestand.

De verschillende in M. 9 onderzochte toestanden zijn gedefinieerd als volgt:

T. 1. De kruising was, met de as bij km 46,500, aangelegd volgens het ontwerp van de Staatscommissie Limburg. In de kruising en de aansluitende riviergedeelten was een overdiepte aanwezig van 2 cm (120 cm werkelijkheid).

T. 2. Het model was op de juiste diepte gebracht door aanvulling met zand.

T. 3. Het met zand bedekte bodemgedeelte was vervangen door een gipsvloer op de juiste diepte.

T. 4. De gipsvloer was vervangen door een gladde cementvloer.

Deze vier toestanden verschillen onderling dus uitsluitend ten aanzien van de wijze waarop de rivierbodem was uitgevoerd.

T. 5. Als T. 4.

De rivier bovenstrooms van de kruising was ver-

wijd tot 150 m tusschen de kribben op M.R.
T. 6. Als T. 5. Het model was uitgebreid tot het geheele winterbed.
T. 7. Als T. 4. De rivier bovenstrooms van de kruising was versmald tot 100 m tusschen de kribben op M.R.
T. 8. Als T. 7. Het model was uitgebreid tot het geheele winterbed.
T. 9. De kruising was aangelegd met eivormige voorhavens in de gewijzigde ligging.
T. 10. Als T. 9. De rivier bovenstrooms van de kruising was versmald tot 100 m tusschen de kribben op M.R.
T. 11. De oorspronkelijke voorhavens (volgens ontwerp van de Staatscommissie) in de nieuwe ligging.

b. Het model 46.

Het model omvatte een riviervak ter lengte van 1800 m, benevens een inloop- en een uitlaatgedeelte (figuur 12). De toegepaste schaalverhouding (paragraaf 5) was 100. De beschikbare ruimte maakte het niet mogelijk de geheele kruising op deze schaal weer te geven: van de noordelijke voorhaven kon slechts een gedeelte worden vervaardigd.

De buitenbegrenzing van het op de laboratoriumvloer geplaatste model bestond uit een gemetseld muurtje. Het rivierbed en de bodem van de voorhavens bestonden aanvankelijk geheel uit zand. In de loop van het onderzoek werd ten behoeve van de waarnemingen met bodemrollers de bodem van de overgang, van het gedeelte van het zomerbed tusschen de strekdammen, dat daar aan de bovenstroomsche zijde grenst, en van de monden der voorhavens van een betonvloer voorzien. De kribben in de rivier waren van beton vervaardigd. De begrenzingen van de voorhavens waren opgebouwd uit korte, van beton vervaardigde profielstukken, waardoor de vorm van de havens gemakkelijk en snel kon worden veranderd.

De regeling van de waterstroom door het model geschiedde op dezelfde wijze, als bij model 9. Alleen was tusschen de meetsuw en het houten verdeelrooster nog een gemetselde verdeelbak aangebracht.

Voor de bepaling van de hoogte van de waterspiegel boven en beneden de overgang en in de B.haven was een vijftal peilnaalden opgesteld (figuur 12). Vóór het onderzoek van toestand XII werd de rivier aan de benedenstroomsche zijde met ongeveer 2 m verlengd. Daarbij werd nog een peilnaald beneden de kruising in de as van de rivier geplaatst, op een afstand van 290 m benedenstrooms van de eerder opgestelde (O_2 in figuur 12).

De figuren 13 en 14 geven een beeld van het model in bedrijfsvaardige toestand.

7. Metingen en Meetmethoden.

Het doel der metingen is drieledig.

De opstuwing van de rivier, die bij hooge afvoeren van belang is, wordt gemeten door peilschaalwaarnemingen op verschillende plaatsen. Voor het beoordeelen van de toestand in de rivier is het noodig de stroomsnelheden te kennen. De aanzanding in de haven eindelijk is, behalve van de verdeeling van de zandafvoer over de breedte van de rivier, vooral afhankelijk van de uitwisseling van water tusschen de rivier en de haven zelf, vooral nabij de bodem.

Peilschaalwaarnemingen.

De eenvoudigste metingen zijn die van de hoogte van de waterspiegel. Op een aantal punten in de omgeving van de kruising zijn daartoe peilnaalden opgesteld; daarmede kan het niveau, wanneer de waterspiegel rustig genoeg is, tot op een twintigste millimeter nauwkeurig worden bepaald. In de betrekkelijk groote modellen is de nauwkeurigheid van een enkele meting geringer; er treden kabbelingen op en ook wel golvingen van een vrij groote periode, waardoor fouten van enkele tienden millimeters niet zijn uitgesloten. Door de metingen enkele malen te herhalen wordt echter bereikt, dat het niveau op elke plaats vrijwel tot op een tiende millimeter vaststaat, zoodat de nauwkeurigheid relatief vrijwel dezelfde is als die, waarmede in de werkelijkheid wordt

gemeten, namelijk tot op een centimeter.

Een complicatie doet zich voor, doordat de opstuwing niet gelijk mag worden gesteld aan het niveauverschil tusschen de spiegels op een punt boven de kruising en een daar beneden, verminderd met het normale verval tusschen die twee punten: het is kleiner. Beneden de kruising is de stroom aanvankelijk onregelmatig over het rivierprofiel verdeeld, dientengevolge bezit het stroomende water daar meer kinetische energie, dan met een normale verdeeling overeenkomt. Het surplus wordt verder benedenstrooms ten deele in potentieele energie omgezet, zoodat het verhang van de waterspiegel er minder groot is, dan met het energieverlies door wrijving overeenkomt. Voor het bepalen van de opstuwing mag de afgelezen waterstand op korte afstand benedenstrooms van de kruising dus niet zonder correctie worden gebruikt. Men moet de stroomverdeeling ter plaatse meten en op grond daarvan een correctie aanbrengen, of wel nog een of meer peilschaalwaarnemingen op grootere afstand van de kruising verrichten en alle waarnemingen gebruiken om daaruit de opstuwing af te leiden.

Stroomsnelheid.

In beide modellen is veel gebruik gemaakt van de slingerstroommeter volgens Jacobsen. Een voorwerp van geschikte vorm (bol, cylinder, torpedo, V-vormig gebogen plaatje) hangt aan een draad in het stroomende water. De helling van de draad wordt afgelezen; met behulp van een ijkkromme of ijktabel wordt de bijbehoorende snelheid opgezocht. Elk weerstandlichaam moet afzonderlijk worden geijkt. Bij metingen op eenige diepte moet rekening worden gehouden met het feit, dat de draad, waaraan het lichaam hangt, door de stroom wordt gebogen: de boven water afgelezen uitslag (helling) is dus grooter dan de bij de gezochte stroomsnelheid behoorende.

De hiervoor aan te brengen correctie is op grond van ijkingen te bepalen, doch de draadbuiging vormt een complicatie die de tijdsduur, benoodigd voor het uitwerken van de metingen, in belangrijke mate vergroot. In het bijzonder is dit het geval, wanneer de nauwkeurigheid hoog moet

worden opgevoerd.

Bij een juiste keuze van weerstandlichaam en het gebruik van een zoo dun mogelijke draad (haar) kan met de slingerstroommeter vrij nauwkeurig worden gemeten: een fout van vijf procent in elke gemeten snelheid kan als normaal worden beschouwd. Het instrumentje heeft het voordeel, dat het karakter van de stroom (bijvoorbeeld het voorkomen van pulsaties van meerdere of mindere intensiteit) er goed mee kan worden waargenomen en dat het ook stroomrichtingen aangeeft, evenals de variaties daarvan. Veelal zijn bij de metingen, behalve de gemiddelde waarde van stroomrichting en stroomsnelheid, ook opgeteekend de uitersten, waartusschen deze beide grootheden varieeren. In de diagrammen wordt de stroom voorgesteld door een lijn (vector), die het gemiddelde aangeeft en bovendien door een figuurtje, begrensd door twee stralen en twee concentrische cirkelbogen, dat het gebied aangeeft, waarin het uiteinde van de vector kan bewegen, (bijvoorbeeld figuur 23c).

Evenals een molentje heeft de Jacobsen-stroommeter voor het gebruik in modellen het bezwaar, dat het voorwerp, waarmee wordt gemeten, niet zeer klein is, zoodat het nimmer de snelheid in één punt geeft, doch onder invloed staat van de snelheden in een vlakje, dat geprojecteerd op de stroomrichting, eenige vierkante centimeters groot is. Er zijn dan ook geen uitkomsten mee te verkrijgen dichter bij het oppervlak, de bodem en de wanden dan ongeveer twee centimeter.

Het meten van de oppervlaktesnelheden geschiedt gemakkelijk met drijvertjes, meestal papiersnippers of kleine wasballetjes. De tijd, die deze drijvers noodig hebben om een traject van bekende lengte af te leggen, wordt met een stophorloge bepaald. Een andere manier is het fotografeeren van de drijvers, waarbij het beeldvlak van het fototoestel horizontaal is gesteld en de belichting telkens gedurende bekende tijdintervallen wordt onderbroken. Door alle op een foto voorkomende drijverbanen uit te meten, wordt de oppervlaktestroom op vele plaatsen in richting en sterkte bekend.

Een enkele maal zijn ook voor het bepalen van snelheden in diepere lagen drijvingen verricht. Daarbij werd een zeer klein drijvertje door middel van een koperdraadje van de vereischte lengte, verbonden met een (grooter) bolletje, waarvan de dichtheid iets grooter was dan die van water. Deze wijze van doen is niet geschikt, wanneer groote verschillen aanwezig zijn tusschen de stroom aan het oppervlak en in de diepte, waarop moet worden gemeten: Is het bolletje zwaar, dan is een relatief groot drijvertje noodig, zoodat de oppervlaktestroom storend werkt en als het soortelijk gewicht van het bolletje maar heel weinig boven de eenheid ligt, zal het verbindingsdraadje spoedig scheef gaan staan, zoodat niet meer in de juiste diepte wordt gemeten.

Voor bepaling van de stroom zoo dicht mogelijk bij de bodem kunnen deze ''diepdrijvers'' evenmin dienen als de slingerstroommeter. Daarvoor heeft men zijn toevlucht gezocht tot een indirecte methode, die alleen daar wordt toegepast, waar het model kan worden voorzien van een horizontale, gladde, vaste bodem. Daarop worden zuiver ronde knikkers geplaatst; deze worden door de stroom meegenomen, wanneer de snelheid grooter is dan een bepaalde grenswaarde. Zij volgen - behoudens het onder 6. gezegde voor gebogen stroombanen - een stroomlijn tot de plaats, waar de snelheid in die lijn tot de grenswaarde is gedaald. Wordt een aantal knikkers in het model gebracht dan zullen de plaatsen, waar zij tot rust komen, liggen op een lijn van gelijke bodemsnelheid.

Om meer van deze lijnen te vinden wordt gebruik gemaakt van de eigenschap dat binnen vrij ruime grenzen het stroombeeld gelijk blijft, wanneer de schaal van de stroomsnelheden wordt veranderd (paragraaf 6). Het rivierdebiet wordt dus trapsgewijze gevarieerd, waarbij de waterstand gelijk blijft. De lijn waarop de knikkers telkens blijven liggen, en die in het model steeds dezelfde stroomsnelheid (de grenssnelheid) aanduidt, komt in de werkelijkheid telkens met een andere snelheid overeen.

Gebruikt zijn verschillende soorten glazen en steenen knikkers. Hun grenssnelheden liepen uiteen van 5 tot

23 cm/sec; hun diameter is omstreeks 1,5 cm, zoodat zij reageeren op de snelheden in de onderste waterlaag van die dikte en dus ook nog niet de eigenlijke bodemsnelheid aangeven. Om deze nog dichter te benaderen is getracht te werken met kleinere bolletjes, waarbij bovendien naar een geringere grenssnelheid werd gestreefd, doch de daarbij bestaande onvolkomenheden in de bolvorm en de onvermijdelijke oneffenheden in de bodem bleken een te groote storing te veroorzaken. Weliswaar zou, bijvoorbeeld door de modelbodem te vervaardigen van spiegelglas, in deze richting een en ander kunnen worden bereikt, doch de meerdere te verkrijgen resultaten zoudende groote kosten en het aanzienlijke tijdverlies, dat daaraan verbonden zou zijn geweest, niet hebben gewettigd.

Uitwisseling.

De waarnemingen omtrent de uitwisseling van water tusschen de rivier en de voorhavens hebben deels een qualitatief karakter gehad, overigens waren het metingen, waarbij is getracht een oordeel te verkrijgen over de hoeveelheden water en vaste stoffen, die worden uitgewisseld.

Vele qualitatieve waarnemingen berusten op de indruk van onrust, die heerscht in de strook water, die het grensgebied vormt tusschen rivier en voorhaven en die in paragraaf 6 als het open front is aangeduid. Voor zoover de toestand aan het oppervlak betreft, is een goede illustratie van deze onrust te verkrijgen met drijvende wollen of katoenen draden, waarvan het eene uiteinde aan de bovenstroomsche landtong - kop A - is gelegd en waarvan de lengte ten naastebij overeenkomt met de lengte van het open front. Het vrije uiteinde kronkelt voortdurend heen en weer en geeft duidelijk aan, welke watermassas, die zich aan de rivierzijde van de draad bevinden, bij kop B in de haven terecht komen en omgekeerd, welke, uit de haven komend, deze bij kop B verlaten. Wanneer in het open front van elk der beide havens zulk een zweep is geplaatst, blijkt het, dat de slingeringen van beide verband met elkander houden: de rivier slingert dus over zijn geheele breedte.

De overeenkomstige waarneming ten aanzien van de stroom in de diepere waterlagen wordt gedaan door in de omgeving van kop A kristalletjes kaliumpermanganaat ($KMnO_4$) in het water te strooien. De van de kristalletjes uitgaande roodgekleurde staarten en de wolken getint water, die zich vormen, verraden een zelfde beweging, als met de drijvende draden aan het oppervlak werd geconstateerd. Tevens kan men opletten, hoeveel rood water bij de koppen B in de voorhavens terecht komt en zoo een eerste indruk verkrijgen van de hoeveelheid bodemwater, dat aan de uitwisseling deelneemt. Op deze wijze kan worden geconstateerd, of de beide havens ongeveer gelijkwaardig zijn, of wel dat in een van beide veel meer bodemwater binnentreedt, dan in de andere.

Dit kan ook geschieden door aan het water eenig slib toe te voegen en na eenige tijd de in de havens afgezette slibhoeveelheden te verzamelen en onderling te vergelijken. Een enkele maal is dit in het oudste model ook gedaan met fijn zand.

Ook door zaagsel in de rivier te brengen en de in de havens gerakende hoeveelheden daarvan te beoordeelen zijn qualitatieve gegevens omtrent de uitwisseling verkregen. Het in de rivier strooien van drijvers - in den regel papiersnippers - is een middel om de uitwisseling van oppervlaktewater na te gaan. Door de drijverbanen op de bovenbeschreven wijze te fotografeeren kan de mate van onrust in het open front worden vastgelegd.

Hier heeft men een overgang naar de quantitatieve metingen, want het ligt voor de hand om te tellen, hoeveel van de bovenstrooms van de kruising in de rivier gebrachte drijvers in de voorhavens geraken.

Bij de quantitatieve metingen zijn de papiersnippers vervangen door wasbolletjes, die in een inwerpraai enkele honderden meters boven kop A worden losgelaten. Aan de bodem zijn in de aanvang bij de telling diepdrijvers toegepast, doch om de bij de snelheidsmeting genoemde bezwaren zijn zij vervangen door bolletjes, die over een vlakke bodem rollen.

Zeer geschikt hiervoor zijn kruisbessen, die een

soortelijk gewicht hebben van slechts zeer weinig meer dan water en die de bodem slechts raken met hun harige uitsteeksels en die dus op elke grondslag, zelfs als die ruw of niet zuiver horizontaal is, kunnen worden gebruikt. Behalve het bezwaar, dat zij slechts enkele dagen per jaar zijn te verkrijgen, hebben ze echter het nadeel van te groote afstand van de bodem. Zij zijn dus niet representatief voor de bodemstroom.

De bolletjes, waarmee verreweg het grootste deel van de metingen werden verricht, zijn vervaardigd van was, gemengd met zooveel kopervijlsel of cement, dat zij zinken. Om het gedrag van de bodemstroom weer te geven moeten zij klein zijn, doch zij moeten toch weer zoodanige afmetingen bezitten, dat zij gemakkelijk met het oog kunnen worden gevolgd en dat zij geen neiging bezitten om in geringe verdiepingen van de bodem te blijven liggen. Aanvankelijk werden bolletjes gebruikt met een diameter van anderhalve centimeter; de latere wasbolletjes hadden slechts omstreeks 0,8 cm doorsnede.

Zij werden, evenals de drijvers, te water gebracht in de inwerpraai boven kop A. Daar de bolletjes, die van het midden van deze raai afkomstig zijn, zeer weinig kans hebben om in de havens terecht te komen en deze kans toeneemt naarmate men dichter bij de normaallijn komt, is het van belang op welke wijze het aantal bolletjes over de inwerpraai is verdeeld.

Deze verdeeling moet verband houden met die van het zandtransport over de breedte van de rivier. Verdeelt men deze bij de raai in een aantal, bijvoorbeeld tien, gelijke vakken, dan moet het aantal bolletjes, die in elk vak hun weg beginnen, evenredig zijn met het zandtransport daarin. Wanneer dit het geval is, stellen alle bolletjes even groote zandhoeveelheden voor en het percentage bolletjes, dat in elk der havens terecht komt, is dan gelijk aan het percentage van het totale zandtransport van de rivier, dat er wordt afgezet.

Om de juiste verdeeling van de bolletjes over de beginraai te vinden, is in het Wageningsche model de vol-

gende proef genomen. In de inloopbak werden achtereenvolgens honderd bolletjes gebracht; van elk werd genoteerd door welk van de tien vakken, waarin de inwerpraai was verdeeld, het passeerde. Dit werd eenige malen herhaald en op grond daarvan kon een frequentiekromme van de afvoer aan bolletjes over de rivierbreedte worden opgemaakt en bovendien een oordeel worden verkregen over de stabiliteit van deze frequentiekromme. Deze kromme zal, wanneer geen storrende invloeden in het model werkzaam zijn, ook de verdeeling van de zandafvoer weergeven.

Zooals in een scherpe bocht mocht worden verwacht, is de verdeeling asymmetrisch: de groote meerderheid van de bolletjes volgt de binnenbocht. Aan die zijde moeten dan ook bij de proeven de meeste bolletjes in de beginraai worden gebracht.

Met drijvers werd dezelfde handelwijze gevolgd. Hier bleek bij de beginraai de frequentie het grootst te zijn aan de buitenzijde van de bocht.

Bij het tweede model had het bepalen van de verdeeling van de bolletjes bij het passeeren door de inwerpraai weinig of geen zin, daar er van was afgezien in het model de situatie te Wijk bij Duurstede na te bootsen. In het rechte modelriviervak zou de verdeeling toch een andere zijn, dan in de werkelijkheid. Hier zijn de bolletjes bijna steeds uitsluitend ingelaten aan de voet van de strekdammen die ter plaatse van de beginraai het zomerbed begrenzen.

Bolletjes, die meer naar het midden in de rivier worden geplaatst, hebben slechts een geringe kans om in de voorhaven te komen. Om in een eenigszins redelijke tijd resultaten te verkrijgen was het dus aangewezen uitsluitend met de randgebieden te experimenteeren.

De op deze wijze verkregen uitkomsten gevan dan natuurlijk niet rechtstreeks het aantal procenten van de geheele zandafvoer van de rivier, dat in de havens terecht komt. Hiervan kan evenwel toch een denkbeeld worden verkregen.

Hiertoe is ten eerste vereischt, dat de verdeeling van het zandtransport over de breedte van de rivier althans

ten naastebij bekend is. Hieromtrent zijn uit op verschillende plaatsen in de natuur verrichte waarnemingen voldoende gegevens beschikbaar, om een benaderende aanname mogelijk te maken. Ten tweede is het noodzakelijk in het model eenige metingen te verrichten omtrent het percentage van meer naar het midden van de rivier ingezette bolletjes, dat in de voorhavens geraakt. Stelt men namelijk dit percentage van de bolletjes, die in een strook ter breedte van de op de afstand b van de teen van het beloop zijn ingezet, op λ_b, en het gedeelte van het totale zandtransport, dat in die strook wordt afgevoerd, op $\beta \frac{db}{2B} Z$ (B = halve rivierbreedte), dan zal de totale $\lambda_g Z$, die in de voorhavens geraakt, bedragen:

$$\lambda_g Z = \int_0^{2B} \beta \lambda_b Z \frac{db}{2B} ,$$

dus:

$$\lambda_g = \int_0^{2B} \lambda_b \beta \frac{db}{2B} .$$

Wanneer nu β bekend is als functie van b en λ gemeten wordt als functie van b en λ_0 (het uitwisselingspercentage van de bolletjes in het randgebied), dan wordt dit:

$$\lambda_g = \lambda_0 \int_0^{2B} f(b)db = \varepsilon\lambda_0 .$$

ε is dan de toe te passen reductiefactor.

Van belang is ook nog de nauwkeurigheid, die met de beschreven meetwijze wordt bereikt. Met behulp van de foutenleer wordt afgeleid, dat de middelbare fout in het aantal bolletjes, dat in de havens geraakt, de wortel uit dat aantal bedraagt, mits het een niet te groot percentage van het totaal aantal bolletjes uitmaakt. Is het laatste n en zijn daarvan a in de havens geraakt, dan is dus $\sqrt{a}$ de middelbare fout (m.f.) in a, zoodat de m.f. in het percentage:

$$(\lambda_0 = \frac{100\ a}{n})$$

bedraagt:

$$m_0 = \frac{100}{n}\sqrt{a},$$

of

$$10\sqrt{\frac{\lambda_0}{n}}$$

De middelbare fout in λ_g, welke een kleinere waarde heeft dan λ_0, is uiteraard ook kleiner. Wanneer op grond van de verdeeling van de zandafvoer over de rivierbreedte de afvoer in de strook langs het talud, waar bij de geregelde metingen de bolletjes worden ingezet, gesteld moet worden op

$$\beta_0 \frac{Z}{2},$$

dan volgt voor de middelbare fout in λ_g,

$$m_g = \frac{100}{n}\sqrt{\varepsilon\beta_0 a} = m_0\sqrt{\varepsilon\beta_0}$$

Een verfijning bij deze meetwijze bestaat nog hierin, dat niet alleen onderscheid wordt gemaakt tusschen de bolletjes, die in de haven komen en die, waarbij dat niet het geval is, maar dat het open front in strooken evenwijdig aan de rivieras is verdeeld (figuur 6 en 7) en genoteerd wordt hoeveel bolletjes elk der strooken bereiken. In de meest rivierwaarts gelegen strook is de snelheid van de stroom reeds wat kleiner dan in de eigenlijke rivier, zoodat er neiging tot aanzanden bestaat, zelfs al blijven de bolletjes er niet liggen. In de verder van de rivier gelegen strooken neemt de kans, dat eenmaal zoo ver doorgedrongen zand blijft liggen, toe. Hoe dieper een bolletje de haven binnendringt des te meer beteekenis heeft het ten aanzien van de aanzanding. Ook krijgt men op deze wijze eenig inzicht, op welke plaatsen de grootste aanzanding kan worden verwacht.

Om hierin nog een stap verder te gaan, zijn bij een deel van de waarnemingen de strooken in het open front nog onderscheiden in een gedeelte bovenstrooms van de as van de voorhaven en een vak benedenstrooms daarvan.

8. Uitgevoerd meetprogramma.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de in de beide modellen verrichte metingen, gerangschikt naar

het gemeten object en naar de wijze van meten.

Elke meting is aangeduid door de datum waarop hij is verricht.

-o-o-o-o-o-o-

III. Discussie van de waarnemingen.

9. Vergelijking met de werkelijkheid.

Ook wanneer aan de theoretische eischen voor de gelijkvormigheid zoo goed mogelijk is voldaan, blijft het steeds wenschelijk de overeenstemming van de stroomingsverschijnselen in het model met die in de werkelijkheid door directe vergelijking te toetsen.

Uit den aard der zaak was dit, voor zoover het de voorhavens betrof, niet mogelijk. De gelegenheid daartoe zal eerst aanwezig zijn nadat de kruising zal zijn voltooid en ter plaatse metingen zullen kunnen worden verricht.

Wel bestond de mogelijkheid een oordeel over de betrouwbaarheid van het modelonderzoek te verkrijgen door vergelijking van de verschijnselen in de rivier. In dit opzicht is de vergelijking niet uitgevoerd door het verrichten van vergelijkbare stroommetingen in de rivier en in het model, doch heeft men zich beperkt tot een qualitatieve vergelijking van de strooming in de kribvelden. Dit punt is van belang, omdat een kribveld eenigszins kan worden beschouwd als een voorhaven in het klein.

Zooals bekend is, wordt een kribveld veelal gevuld door een neerstroom die van krib tot krib reikt en niet zelden tot over de normaallijn in de rivier dringt. In zeer langgerekte velden echter, waar de afstand van krib tot krib eenige malen zoo groot is, als de lengte der kribben (van de kop tot de waterlijn) treft men een ander stroombeeld aan (figuur 19). De neer beslaat daar slechts het gedeelte, dat aan de bovenstroomsche krib grenst; verder benedenwaarts kan de hoofdstroom van de rivier in het kribveld uitbuigen. Dit laatste stroombeeld werd in het model waargenomen bij lage rivierstanden: de waterlijn is dan betrekkelijk ver rivierwaarts gelegen, zoodat de velden een langgerekte vorm hebben. Alleen tusschen de beide kribben, die de toegang tot de Wageningsche haven begrenzen, blijft dan de stroomverdeeling(één enkele neer) be-

staan, die bij hoogere rivierstanden ook in de overige kribvakken voorkomt.

Een en ander is, volgens mededeeling van de Rivierdienst, in overeenstemming met de werkelijkheid.

Bij zoo hooge waterstanden, dat de kribben in belangrijke mate worden overstroomd, wordt de toestand in de kribvelden ingrijpend veranderd.

Niet voor contrôle komt in aanmerking het verhang van de waterspiegel. Binnen zekere grenzen kan men dit in het model, door het kiezen van een bepaalde wandruwheid, naar willekeur varieeren.

10. De plaats van de kruising.

a. Het ontwerp van de Staatscommissie.

De toestanden 1 tot en met 8 van M. 9 betreffen de kruising op de plaats en in de vorm, die is aanbevolen in het rapport van de Staatscommissie Limburg, dus bij kilometerraai 46.000. In deze situatie bevindt de kruising zich ongeveer in een buigpunt van de stroomdraad (figuur 2). Reeds uit de globale waarnemingen van het stroombeeld bleek deze ligging tengevolge te hebben, dat de stroomverdeeling in de overgang vrij sterk asymmetrisch was. Dit bracht tevens mee, dat de stroomingstoestanden in de beide voorhavens onderling verschilden. Door de in T. 1-2-3-4-5-7 verrichte snelheidsmetingen met de slingerstroommeter werden de globale waarnemingen bevestigd (figuren 20 en 21). De asymmetrie van de stroomingstoestand ter plaatse van de kruising blijkt eveneens duidelijk uit de metingen, die verricht zijn om de verdeeling van het transport van vaste stoffen over de breedte van de rivier na te gaan (paragraaf 7). Figuur 20 toont de verkregen verdeelingskrommen van

a. drijvende wasbolletjes,
b. bodemrollers met een soortelijk gewicht van ongeveer 1,02,

c. bodemrollers met een soortelijk gewicht van 1,85.

Zooals op grond van het gevonden stroombeeld was te verwachten, passeeren de meeste der ingebrachte bodemrollers nabij de bolle (zuidelijke) oever, met dien verstande natuurlijk, dat in de aan die zijde optredende neer in het geheel geen transport plaats vindt. De drijvers daarentegen passeeren, eveneens in overeenstemming met hetgeen omtrent de waterbeweging in een gebogen riviervak bekend is, de meetraai in hoofdzaak langs de holle oever.

Uitkomsten, die tot dezelfde gevolgtrekking leidden als de boven beschrevene, werden verkregen bij de proeven tot bepaling van de stroomsnelheid in de overgang met behulp van bodemrollers. Figuur 21 toont een overzicht van de uitgewerkte resultaten van deze metingen; aangegeven zijn daarop de lijnen van gelijke bodemsnelheid, welke zijn afgeleid uit de plaatsen, waar de bodemrollers bleven liggen (paragraaf 7). Tevens is gebruik gemaakt van de resultaten van de waarnemingen met de slingerstroommeter. Ook hierin treedt de asymmetrie van de stroomingstoestand in de overgang duidelijk te voorschijn.

Aan de bolle (zuidelijke)oever ontstaat een gebied van kleine stroomsnelheden, waar het neerzetten van zand te verwachten is.

Tenslotte blijkt hetzelfde verschijnsel nog uit de metingen van de uitwisseling. Deze metingen werden verricht in toestand I met oppervlaktedrijvers (kurk) en bodemrollers (kruisbessen) in toestand 3 met oppervlaktedrijvers (wasbolletjes) en bodemrollers (verzwaarde wasbolletjes) en in toestand 5 met bodemrollers (verzwaarde wasbolletjes).

De uitkomsten hiervan zijn neergelegd in de onderstaande tabellen.

Tabel 2. Waarnemingen met oppervlaktedrijvers.

toestand	peil in cm + L.R.	aantal drijvers	percentage in	
			haven A	haven B
1	M.R.	500	6,5	2,9
	M.R.	100	10,0	3,0
	M.R.	350	16,0	1,4
	+ 300	250	14,0	0
gem.		1200	11,1	1,9
3	M.R.	420	12,9	8,8
	+ 200	560	9,5	2,1
gem.		980	10,9	5,0
alg. gem.		2180	11,0	3,3

Tabel 3. Waarnemingen met bodemrollers.

toestand	peil in cm + M.R.	aantal rollers	percentage in	
			haven A	haven B
1	M.R.	800	0,4	4,4
	M.R.	500	0,8	6,0
	+ 300	100	0	22,0
eff. gem.		1400	0,4	10,2
3	M.R.	324	8,0	42,0
	+ 200	214	0,5	13,5
eff. gem.		538	3,0	24,0
5.	- 50	114	3,5	20,2
	+ 50	74	2,7	13,5
	+ 150	37	0	13,5
	+ 250	37	0	16,0
eff. gem.		262	1,0	14,2
alg. gem.		2200	2,1	15,6

Uiteraard zijn de drijvers en rollers over de rivierbreedte verdeeld overeenkomstig de krommen van figuur 20C. De gevonden waarden geven dus (zonder correctie) het percentage van de geheele zandafvoer van de rivier, dat in de havens terecht komt, dus de in paragraaf 7 vermelde λ_g. De percentages voor elk der beide havens zoowel als hun verhouding loopen bij de verschillende waarnemingen vrij sterk uiteen. Dit geldt voor beide categorieën van waarnemingen. Deze strooiing kan voor een deel het gevolg zijn van het feit dat niet steeds hetzelfde materiaal is toegepast, maar zal voornamelijk moeten worden toegeschreven aan de betrekkelijk kleine aantallen drijvers of rollers, die werden losgelaten. De middelbare fout in de percentages (paragraaf 7) is dus tamelijk groot. Het uitbreiden van deze aantallen zou evenwel de duur van de metingen in sterke mate hebben verlengd, terwijl ondanks de gevonden strooiing de waarnemingscijfers een alleszins overtuigend beeld geven van het verschil in de aard van de uitwisseling van elk der havens met de rivier. Met zekerheid kan de gevolgtrekking worden gemaakt, dat in haven B veel meer bodemmateriaal zal worden afgezet dan in haven A, en ook dat die afzetting een niet onbelangrijk deel van het totale zandtransport van de rivier zal bedragen.

Uit alle verrichte waarnemingen is gebleken dat de stroomingstoestand in de overgang, en daarmee ook de verplaatsing van bodemmateriaal, sterk asymmetrisch is en dat dit verschijnsel een ongunstige invloed heeft op de verondieping, in het bijzonder van haven B. Het lag daarom voor de hand voor de kruising een ligging te zoeken, waar een dergelijke asymmetrie niet was te verwachten. Hiertoe werd in het model de kruising omstreeks 500 m stroomafwaarts verlegd.

b. De gewijzigde ligging.

In de nieuwe ligging bevond de kruising zich bij kilometerraai 46.000. Toestand 11 omvat de metingen, waarbij de vorm van de havens ongewijzigd bleef. Van de in T.11

verrichte waarnemingen kunnen met de onder a besprokene alleen metingen van de uitwisseling met behulp van bodemrollers (verzwaarde wasbolletjes) onmiddellijk worden vergeleken. De uitkomsten hiervan waren:

Tabel 4.

toestand	peil in cm + M.R.	aantal rollers	percentage in	
			haven A	haven B
11	+ 200	1650	0,3	2,4

Uit deze cijfers blijkt duidelijk dat een groote vooruitgang van haven B ten opzichte van de oorspronkelijke ligging is verkregen. Daarbij was als gemiddelde voor de waterstanden van 200 en meer cm boven M.R. gevonden, voor haven A eveneens 0,3 procent, doch voor haven B 16,2 procent (tabel 3).

In toestand 11 zijn voorts, bij een waterstand van M.R. + 150 cm met de slingerstroommeter in de as van de rivier bodemsnelheden bepaald. In de overgang zijn die snelheden kleiner dan tusschen de strekdammen, die de rivier daarboven begrenzen. Het minimum, 84 procent van de snelheid tusschen de strekdammen, werd aangetroffen op 120 meter beneden de uiteinden der korte dammetjes die de koppen A vormen, dus ongeveer in het midden van de overgang, en niet ver van de plaats, waar volgens figuur 21 in de overgang bij km 46,000 het minimum ligt. Uit deze figuur blijkt dat op de laatstgenoemde plaats bij de oorspronkelijke rivierbreedte de stroomverlamming sterker uitgesproken is dan bij km 46,500. Bij een tot op 100 m vernauwd zomerbed vertoont de rivier bij de eerst onderzochte toestanden daarentegen een wat geringere stroomverlamming dan bij toestand 11.

De stroommetingen geven dus niet duidelijk aan, of de toestand in de overgang door het verplaatsen van het kruisingspunt verbetert.Toch is het zeker, dat een verbetering wordt bereikt en wel tengevolge van het wegval-

len van het gebied met zwakke stroomen aan de bolle zijde, dat onder a werd gesignaleerd. Het feit blijft echter bestaan, dat ook bij het nieuwe kruisingspunt een niet onbelangrijke stroomverlamming optreedt.

In de toestanden 9 en 10, waarin zich in de nieuwe ligging havens van een gewijzigde vorm bevonden, zijn eveneens enkele metingen verricht, welke voor vergelijking met die in de oorspronkelijke situatie vatbaar zijn. Dit zijn de waarnemingen met de slingerstroommeter in stroomopwaarts van de havensgelegen profielen. De uitkomsten hiervan doen zien, dat de asymmetrische stroomverdeeling vrijwel verdwenen is.

Resumeerende kan worden gezegd dat, om de totale hoeveelheid zand, die de beide havens tezamen binnentreedt, gering te houden, het gewenscht is de as van de kruising een eindweegs benedenstrooms van een buigpunt van de rivier te leggen. De door de bovenstrooms gelegen bocht veroorzaakte asymmetrie van water- en zandbeweging is daar grootendeels verdwenen.

Bij een dergelijke plaatsing van de kruising vermindert ook de kans op het vormen van een gebied met kleine stroomsnelheden (en dus veel kans op aanzanding) aan de eene zijde van de overgang.

Uit de resultaten van de proef is niet af te leiden of de gekozen afstand van 500 meter de gunstigste is.

11. De stroom in de overgang.

a. De invloed van de havenvorm.

In paragraaf 10 is gebleken dat, hoewel de stroomtoestand bij een kruising met havens in de door de Staatscommissie aanbevolen vorm bij kilometerraai 46,500 gun-

stiger is dan bij kilometerraai 46,000, ook in de eerstgenoemde ligging een niet onbelangrijke stroomverlamming optreedt. De vraag rijst nu, of het mogelijk is door het wijzigen van de vorm van de havens een betere strooming in de overgang te verkrijgen. Zooals figuur 20 doet zien, valt het optreden van een stroomverlamming in het benedenstroomsche gedeelte van de overgang toe te schrijven aan het uitbuigen in de voorhavens van de stroom in de overgang, tengevolge waarvan de stroom een grooter profiel kan innemen en de gemiddelde snelheid dus kleiner wordt. Een bijkomend ongunstig verschijnsel is, dat de uitbuiging van de stroomdraden niet stabiel is, waarvan uitwisseling van water tusschen de overgang en de voorhavens het gevolg is. Het ligt voor de hand te trachten de geleiding van de hoofdstroom langs de open fronten te verbeteren, waarmee zoowel ten aanzien van de stroomverlamming als van de uitwisseling een gunstiger toestand zou worden verkregen.

In deze gedachtegang ontstond de nieuwe vorm van de voorhavens, die in de toestanden 9 en 10 van M. 9 is onderzocht (figuren 1 en 9) en die vervolgens gedurende vrijwel het geheele onderzoek in M. 46 is bewaard gebleven.

Uit het in de verkregen situatie opgenomen stroombeeld (figuur 22a) blijkt, dat de strooming langs de open fronten inderdaad is verbeterd.

De stroom wordt nu geleid tusschen twee meer stabiele neeren, die de voorhavens geheel opvullen.

Uitbuiging van de stroomdraden in de voorhavens werd niet meer waargenomen.

Metingen met bodemrollers leverden voor zoover betreft de stroom in de overgang in deze situatie geen quantitatief resultaat op: geen enkele roller bleef in de overgang liggen. Mocht hieruit worden geconcludeerd, dat van een stroomverlamming hoogstens in geringe mate sprake kon zijn, de metingen met de slingerstroommeter wezen nochtans uit, dat de stroom een kleine vermindering in snelheid ondervond. Dit is te zien in figuur 22b, waarin de uitkomsten van de slingerstroommetingen als lijnen van gelijke bodemsnelheid zijn weergegeven.

In de toestanden 0 tot en met VII van M. 46 (figuur 6) is onderzocht de invloed van variaties in vorm en afmetingen van de voorhavens, waarbij als grondslag echter de eivorm van T. 9 en T. 10 van M. 9 bleef. De invaartopening werd steeds op 295 m gehandhaafd. Het algemeene stroombeeld bleef in al deze situaties practisch ongewijzigd.

b. De invloed van de wijdte van de overgang.

Het behoeft geen betoog dat de stroomsnelheid in de overgang grooter zal zijn, naarmate het rivierprofiel ter plaatse kleiner, dus (waar immers de te handhaven diepte vaststaat) smaller is. Dit blijkt ook uit figuur 21, waarin de drempelwaarde van de stroomsnelheid, met nauwe inloop steeds hooger is dan bij het overeenkomstige rivierpeil met wijde inloop.

Toch is ook met de breedte van 100 m bij de onderzochte waterstanden de bodemstroom in de diepe overgang zwakker dan in het normale rivierprofiel. Een enkele meting met een nog verder versmalde kruising (90 meter op M.R.) gaf bij een peil van M.R. + 150 cm practisch geen stroomverlamming. Wel is waar had bij deze meting ook de gewijzigde havenvorm invloed op de stroom, doch er blijkt toch uit, hoever men wel met vernauwen zou moeten gaan om de grootere diepte te compenseeren.

Ditzelfde blijkt uit de uit waarnemingen met de slingerstroommeter afgeleide lijnen van gelijke bodemsnelheid bij een waterstand van N.A.P. + 465 cm (M.R. + 130 cm) in toestand XII van M. 46, die in figuur 23a zijn weergegeven. In die toestand bedraagt de rivierbreedte tusschen de normaallijnen 110 m, de bodembreedte tusschen de koppen van de kribben ongeveer 75 m. De laatste breedte (75,4 m) is ook toegepast op het smalste punt van de overgang, namelijk bij de koppen A, die ter plaatse(beneden het peil van N.A.P. + 465 cm) loodrechte wanden bezitten (figuur 6). De normale rivierbodem ligt op N.A.P. - 140 cm, de bodem in de overgang op N.A.P. - 170 cm. De overdiepte is hier dus slechts zeer gering.

Zooals de figuur doet zien, treedt bij het peil van N.A.P. + 465 cm ten opzichte van de gemiddelde bodemstroom tusschen de kribben (gelijk aan 100 gesteld) geen stroomverlamming op; de stroomsterkte in de rivieras daalt niet beneden 100.

Ook in dit geval is evenwel de toegepaste vernauwing vrij sterk, terwijl bij lagere waterstanden een daling van de stroomsterkte in het stroomafwaartsche deel van de overgang wèl kon worden verwacht.

Uiteraard is de stroomverzwakking in de overgang het meest geprononceerd bij de laagste rivierpeilen, wanneer de overdiepte ten opzichte van de normale diepte het grootst is. In figuur 21 blijkt dan ook, dat de stroomverzwakking van des te minder belang is, naarmate de rivierstand hooger wordt. Of de verzwakking bij de allerhoogste afvoeren geheel verdwijnt en zelfs wordt vervangen door een versterking, hangt af van de hoogte waarop de dammen worden aangelegd, die de voorhavens begrenzen. Zouden deze dammen over hun geheele lengte watervrij zijn, zoodat ze het winterbed volledig afsluiten, dan moet men waarschijnlijk rekenen met een verschijnsel, zooals ook bij hooge veerdammen (bijvoorbeeld Lekskensveer) voorkomt. De stroom wordt tusschen de koppen van de dammen geconcentreerd, waardoor daar ter plaatse een ontgronding optreedt. Het verplaatste zand wordt verder benedenwaarts ten deele medegenomen.naar de uiterwaarden, waar zich zanddepôts vormen.

Worden ter wille van het beperken van de opstuwing de havendammen minder hoog aangelegd, dan zal het overcompenseeren van de stroomverlamming in mindere mate geschieden of zelfs geheel achterwege blijven.

c. De invloed van de bovenstroomsche koppen (de koppen A).

Bij de onderzoekingen in model 46 werd het criterium voor de beoordeeling der situaties voornamelijk gelegd in de mate van uitwisseling (paragraaf 12). In dit opzicht bleek van overwegend belang te zijn de vorm van de koppen A.

Het ligt voor de hand, dat de vorm van de koppen

A ook invloed zal uitoefenen op de stroom in de overgang, vooral in die gevallen, waar door middel van die koppen een onderlinge afwijking tusschen de richting van de boven- en die van de onderstroom werd geïntroduceerd. De overgangszône tusschen de rivierstroom en het stroomstelsel in de voorhavens werd dan namelijk behalve door dit stroomstelsel ook, en wel in vrij sterke mate, beheerscht door de vormgeving van de koppen. Dit komt tot uiting in een vergelijking van de uitkomsten der stroomwaarnemingen in de toestanden XIII en XIV, respectievelijk XII en XV (figuur 6), welke telkens onderling verschillen voor zoover de vorm van de havens betreft, maar overeenkomen in de vormgeving van de koppen A. De betreffende metingen van de stroom in de overgang zijn niet voldoende volledig voor het trekken van quantitatieve conclusies. Er blijkt echter wel, dat het verschil in stroombeeld tusschen de beide havenvormen door de invloed van de koppen A belangrijk is verminderd, en wel in die zin, dat de in M. 9 bij de haven van de Staatscommissie waargenomen uitbuiging van de rivierstroom nu minder sterk optreedt, waardoor ook de stroomverlamming minder duidelijk spreekt.

Een indruk van de stroomsplitsing, die met de koppen A wordt verkregen, geeft figuur 23b en c, bovenste helft. Ten eerste komen hierin tot uiting de onderlinge richtingsverschillen van de oppervlakte- en bodemstroomen, die door twee verschillende vormen van kop A (T. XII en T. XXVIII) worden teweeggebracht. Dat de koppen daardoor op het grensgebied tusschen de stroom in de overgang en die in de voorhavens een belangrijke invloed uitoefenen, ligt voor de hand.

Daarnaast laat de figuur zien, dat in beide gevallen de wijze van stroomgeleiding een regelmatige strooming in de overgang geeft.

Hetzelfde blijkt eveneens uit de onderste helft van figuur 23c, Hierin is op de in paragraaf 7 beschreven wijze de wisseling in sterkte en richting van de bodemstroom afgebeeld. Zooals de waarnemingen in de tusschen de koppen A gelegen raaien doen zien, is daar, in vergelijking

met wat rivieren te zien plegen te geven, een zeer regelmatige stroomingstoestand aanwezig. De wisselingen in het grootste deel van de overgang zijn nauwelijks, die in het grensgebied slechts weinig grooter.

Enkele waarnemingen zijn verder verricht met het doel na te gaan of een stroomgeleiding boven de kruising door middel van strekdammen, zooals tot dusverre in het model steeds was toegepast, zonder bezwaar kan worden vervangen door een met kribben (M. 46 - T. XVII, paragraaf 3). Dit bleek niet gewenscht te zijn: de stroomverdeeling was dan belangrijk minder regelmatig dan bij toepassing van strekdammen. Waar ook de waarnemingen omtrent de uitwisseling in deze toestand ongunstige uitkomsten opleverden (paragraaf 12), is het onderzoek in deze richting niet voortgezet.

Men komt dus tot de conclusie, dat een goede constructie van de koppen A voor de stroom in de overgang minstens even belangrijk is, als de eivorm van de voorhavens.

12. De uitwisseling.

De quantitatieve metingen van de uitwisseling vonden plaats op de in paragraaf 7 beschreven wijze door het bepalen van de percentages drijvers of bodemrollers, welke uit de rivier in de voorhavens geraakten.

De tabellen 3 en 4 van paragraaf 10 en de onderstaande tabel 5 geven de uitkomsten van de metingen met diepdrijvers en bodemrollers in model 9, in de tabellen 6, 7 en 8 zijn de in model 46 verkregen meetresultaten verzameld.

In de kolommen a, b, c en d van tabel 7 zijn, in overeenstemming met het hierover in paragraaf 7 gezegde, onderscheiden de rollers die in de haven zelf, respectievelijk in de zône tusschen de overgang en de haven, blijven liggen. In figuur 6 en 7 zijn de grenzen, die voor

die onderscheiding bepalend zijn, aangegeven. In kolom a is opgenomen het percentage in de haven, in b dat in de bij de haven aansluitende strook, in c en d die in de verder rivierwaarts gelegen strooken.

Het effectieve gemiddelde (δ) van de uitkomsten in eenzelfde toestand is bepaald door aan de bij elke rivierstand gevonden waarde een gewicht toe te kennen, evenredig aan het zandtransport bij de overeenkomstige afvoer (figuren 5 en 24). Deze waarde geeft een maat van het gedeelte van de totale zandafvoer van de rivier, dat in de havens zal moeten worden gebaggerd. De juiste werkwijze, die hierbij zou dienen te worden toegepast, is aangegeven in figuur 24, wanneer althans wordt aangenomen, dat met de daarin uitgezette gemeten waarden van λ_g bij de waterstanden N.A.P. + 800, + 650, + 465, + 335 en + 230 het verloop van λ_g voldoende vaststaat. In het uitgewerkte geval (T. XII) blijkt de op de ''exacte''wijze gevonden waarde van δ (1,7 procent) niet veel af te wijken van de op de hierboven aangegeven, eenvoudiger, wijze bepaalde (2,05 procent). Uit de figuur blijkt, dat tengevolge van de verdeeling van de zandafvoer de meting bij N.A.P. + 465 een overheerschende invloed heeft en dat de verdeeling van de waterstanden, waarbij in T. XII is gemeten, over de frequentiekromme een ~~een~~ behoorlijk representatief beeld van de uitwisseling geeft. Op deze gronden is δ steeds bepaald onmiddellijk uit de meetcijfers met daaraan volgens figuur 5 toegekende gewichten, in plaats van op de omslachtige en tijdroovende methode van figuur 24. Dit maakt dat, in het bijzonder wanneer slechts bij enkele waterstanden is gemeten, fouten in δ van de orde van grootte van 0,3 procent (als in XII is gevonden) of wat grooter kunnen voorkomen. In die toestanden waarin geen meting is verricht bij N.A.P. + 465, blijkt een bepaling van δ dus geen zin te hebben.

Tabel 5. Bodemrollers in model 9.

toestand	peil in cm + L.R.	aantal bodem-rollers	percentage in	
			haven A	haven B
10	+ 375	129	2,3	0,8
	+ 270	68	1,5	0
	+ 250	424	10,4	13,2
	+ 200	60	21,7	8,3
	+ 160	68	5,9	0
eff. gem.			9,6	4,4

Voor zoover de uitwisseling betreft, leveren de metingen in het model 9, waar de nadruk vooral viel op het bepalen van de meest gunstige ligging van de kruising in de gebogen rivier en op het zoeken van een vorm dervoorhavens, die een goede geleiding van de stroom in de overgang verschafte, niet veel gegevens. Zooals in paragraaf 10 is gebleken, toonen zij aan, dat de invloed van de bocht bij een minder gunstige ligging van de kruising ten opzichte van een buigpunt zich ook ten aanzien van de uitwisseling tusschen rivier en voorhavens terdege doet gelden (tabellen 2 en 3). Uit een vergelijking der tabellen 3 en 4 mag echter in het licht van de in model 46 verkregen uitkomsten - waarin is gebleken, dat de invloed van de vorm der voorhavens op de uitwisseling ondergeschikt is aan die van andere factoren - geen conclusie ten gunste van een der havenvormen worden getrokken.

Voor het beoordeelen van de in de tabellen 6, 7 en 8 verzamelde gegevens is het ten eerste gewenscht de vergelijkingsbasis te bepalen voor de met verschillende meetwijzen verkregen uitkomsten, ten tweede zich een denkbeeld te vormen van de werkelijke hoeveelheden bodemmateriaal, die door de cijfers in de tabellen worden voorgesteld. De wijze waarop dit kan worden gedaan, is in paragraaf 7 uiteengezet. Hierbij moet, wegens de in verschei-

58.
57.

Tabel 6. Diepdrijvers in model 46.

Toestand	Peil in cm+N.A.P.	Aantal drijvers	percentage in haven B					Bijzonderheden
			a	b+c	λ_0	λ_g	m_g	
IIIB	+ 800	108	10,2	3,7	12,0	8,0	2,2	Diepdrijvers gelijkmatig met onderlinge afstanden van 2,5 cm over de halve breedte van de rivier verdeeld.
	+ 650	108	-	23,2	11,6	7,7	2,2	
	+ 465	138	-	21,7	10,8	7,2	1,9	
δ					11,1	7,4	1,4	
IIIC	+ 800	102	9,8	2,9	11,3	11,3	3,3	Verdeeling der diepdrijvers: as bodemlijn
	+ 650	108	13,0	4,6	15,3	15,3	3,8	
	+ 465	108	9,3	10,2	14,4	14,4	3,6	1 cm 5x2 cm 4x2,5 cm 6xe cm
δ					14,3	14,3	2,1	
IIIC'	+ 800	108	6,5	4,6	8,8	8,8	2,9	
IIID	+ 800	96	5,2	4,2	7,3	7,3	2,8	
	+ 650	102	6,9	3,9	8,8	8,8	2,9	
	+ 465	96	7,3	2,1	8,3	8,3	2,9	
δ					8,3	8,3	1,7	
IIID'	+ 650	96	8,3	2,1	9,4	9,4	3,1	
IIIE	+ 650	192	10,4	6,8	13,8	13,8	2,7	b en c zijn half in rekening gebracht.
IIIE'	+ 800	102	12,7	4,9	15,2	15,2	3,9	
	+ 650	96	4,2	3,1	5,7	5,7	2,4	
	+ 465	102	7,8	2,9	9,3	9,3	3,0	
δ					9,3	9,3	1,8	
IIIF	+ 800	102	1,0	3,9	2,9	2,9	1,7	
	+ 650	102	2,0	2,9	3,4	3,4	1,8	
	+ 465	102	7,8	2,0	8,8	8,8	2,9	
δ					7,5	7,5	1,6	
IIIF'	+ 650	306	5,2	2,3	6,4	6,4	1,4	
	+ 465	102	4,9	2,0	5,9	5,9	2,4	
δ					6,0	6,0	1,2	
IIIF''	+ 650	102	1,0	2,9	2,5	2,5	1,6	
IIIF-L	+ 650	102	2,0	0	2,0	2,0	1,4	
IIIG	+ 650	102	2,0	2,9	3,4	3,4	1,8	
IIIG-C	+ 650	114	24,6	2,6	25,9	25,9	4,8	
	+ 465	102	6,9	2,9	8,3	8,3	2,9	
δ					11,2	11,2	2,3	
IIIG-D	+ 800	102	3,9	2,9	5,4	5,4	2,3	
	+ 650	102	2,9	0	2,9	2,9	1,7	
	+ 465	102	5,9	2,0	6,9	6,9	2,6	
δ					6,2	6,2	1,4	
IIIG-F	+ 800	60	13,3	-	13,3	2,2	0,5	Diepdrijvers ingelaten langs teentalud.
	+ 650	60	28,3	-	28,3	4,7	0,7	

Tabel 8. Uitwisselingsmetingen in L. 46.

Toestand	IIIB	IIIC	IIID	IIIE	IIIE'	IIIF	IIIF'	IIIF''
Metingen + 800	×	×	×		×	×		
bij de + 650	×	×	×	×	×	×	×	×
peilen + 465	×	×	×		×	×	×	
+ 400								
+ 335								
+ 230								
δ	7,4	14,3	8,3	13,8	9,3	7,5	6,0	2,5
m_δ	1,4	2,1	1,7	2,7	1,8	1,6	1,2	1,6

Toestand	IIIF-M	IIIG	IIIG-C	IIIG-D	IIIG-F	IIIK	VIII
Metingen + 800				×	×	×	×
bij de + 650	×	×	×	×	×	×	×
peilen + 465			×	×		×	×
+ 400							
+ 335							
+ 230							
δ	2,0	3,4	11,2	6,2	2,2 4,7	1,6	4,35
m_δ	1,4	1,8	2,3	1,4	0,5 0,7	0,1	0,15

Toestand	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XIX
Metingen + 800	×	×	×			×	×	×	×
bij de + 650	×	×	×	×	×	×	×	×	×
peilen + 465	×	×	×	×	×	×	×	×	×
+ 400									
+ 335			×				×	×	×
+ 230			×			×	×		×
δ	0,9	1,2	2,05	4,1	5,0	2,4	4,3	3,4	2,45
m_δ	0,1	0,2	0,15	0,4	0,4	0,15	0,2	0,2	0,15

Toestand	XX	XXI	XXII	XXII×	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
Metingen + 800	×	×		×	×	×	×	×
bij de + 650	×	×	×	×	×	×	×	×
peilen + 465	×	×	×	×	×		×	×
+ 400		×						
+ 335	×	×	×		×		×	×
+ 230	×							
δ	1,3	1,55	1,15	1,5	1,05	1,1 1,35	0,65	1,2
m_δ	0,15	0,1	0,15	0,2	0,15	0,25 0,3	0,1	0,15

Toestand	XXVII	XXVIII	XXIX	XXX	XXXI	XXXII	XXXIII
Metingen + 800	×	×		×	×	×	×
bij de + 650	×	×	×	×	×	×	×
peilen + 465	×	×	×	×	×	×	×
+ 400				×	×		
+ 335	×	×		×	×	×	×
+ 230							
δ	1,05	0,9	0,8	1,45	1,25	1,4	1,65
m_δ	0,1	0,1	0,15	0,15	0,1	0,15	0,15

× herhaalde meting.

De metingen tot en met IIIG-F vonden plaats met diepdrijvers, de verdere steeds met bodemrollers. Te beginnen met toestand XII werden de percentages in de overgangszône (paragraaf 7) verder onderscheiden (b en c).

den opzichten (zie paragraaf 7) heerschende onzekerheid, met een bepaling van de orde van grootte genoegen worden genomen.

De gegevens, waaruit het verband tusschen λ_g en λ_0 kan worden afgeleid, worden geleverd door de in de toestanden IIIK, XI en XIV verrichte waarnemingen, waarbij eenzelfde waterstand bodemrollers werden ingezet langs de teen van het talud en op verschillende afstanden daarvan. Uit die metingen valt af te leiden, dat practisch gesproken alleen die rollers, die zich binnen een afstand van een vierde van de bodembreedte uit de teen van het talud bevinden, kans hebben binnen de voorhavens te geraken; en verder, dat die kans ongeveer rechtlijnig afneemt met de afstand uit de teen. Dit komt er op neer, dat het in paragraaf 7 genoemde verband tusschen λ en λ_0 wordt uitgedrukt door de vorm:

$$\lambda = \lambda_0 \ (1-2b:B).$$

Wanneer de verdeeling van het bodemtransport over de bodem van de rivier gelijkmatig was (dus β gelijk aan één), zou gevonden worden:

$$\lambda_g = \lambda_0 : 4,$$

dus

$$\varepsilon = 0,25.$$

Dit is niet het geval: in een rechte rivierstrekking is het bodemtransport in het midden het grootst. Men mag wellicht als globale aanname stellen, dat de beide buitenste strooken ter breedte van een vierde van de bodembreedte tezamen omstreeks een derde gedeelte van het bodemtransport voeren en dat de intensiteit β van het bodemtransport in die strooken ongeveer lineair naar buiten toe afneemt. Met deze aanname wordt gevonden

$$\lambda_g = \lambda_0 : 9,$$

(dus

$$\varepsilon = 0,11)$$

Op een dergelijke lage waarde van λ_g zal echter voorzichtigheidshalve niet worden gerekend. Hierbij is onder andere overwogen, dat in het sterk genormaliseerde riviervakje, dat zich onmiddellijk boven de overgang bevindt, de zand-

afvoer wellicht gelijkmatig en over de rivierbreedte is verdeeld. Het is niet mogelijk een mathematisch gefundeerde keus voor λ_g te doen; als plausibele (veilige) aanname is verder gesteld:

$$\lambda_g = \lambda_0 : 6$$

(of $\varepsilon = 0,17$).

Deze waarde van λ_g komt ongeveer overeen met de verdeeling der diepdrijvers over de breedte van de rivier, die in de toestand IIIC tot en met IIIG-D is toegepast. Uit de resultaten van de metingen met gelijkmatig verdeelde diepdrijvers in toestand IIIB wordt λ_g gevonden door de percentages tot twee derde te reduceeren.

De grootte van de middelbare fout (m_g) in λ_g is in paragraaf 7 afgeleid. Stelt men nu β_0 op 0,05 à 0,07, dan wordt, met $\varepsilon = 0,17$, de formule voor m_g zeer eenvoudig, namelijk:

$$m_g = \sqrt{\lambda_0 : n}.$$

Een ander punt, dat zich bij de vergelijking der uitkomsten voordoet en dat eveneens reeds in paragraaf 7 is genoemd, betreft de afwijking van de banen der diepdrijvers van die van de bodemdeeltjes, tengevolge van de door de oppervlaktestroom op het kurkje uitgeoefende kracht. De invloed van die afwijking, die des te meer van belang is, naarmate de verschillen in grootte en richting tusschen de stroomingen in een zelfde verticaal grooter zijn, is niet goed te schatten. In den regel zal deze kwestie aanleiding zijn tot het vinden van een te hooge waarde voor λ. Dit blijkt bijvoorbeeld bij vergelijking van de metingen in de toestanden IIIG-D en IIIK, die in bouwwijze practisch niet verschillen. In IIIG-D zijn diepdrijvers, in IIIK bodemrollers toegepast.

Een andere reden, die tot eenige reserve bij het trekken van conclusies uit de waarnemingsresultaten noopt, is het in rekening brengen van de bodemrollers, die in de zône tusschen de overgang en de voorhaven zelf blijven liggen (de kolommen a, b, c en d in tabel 7). Tot het meetellen van deze rollers is alle reden, omdat ter plaatse

de bodemsnelheid kleiner is dan in de normale rivier en bodemmateriaal, dat er terecht komt, dus gedeeltelijk zal blijven liggen. De wijze van onderscheiding van deze rollers en de gewichten, die eraan moeten worden toegekend, zouden eigenlijk voor elke toestand op grond van de snelheidswaarnemingen moeten worden vastgesteld. Dit zou evenwel uitermate tijdroovend zijn geweest, om welke reden voor alle toestanden dezelfde plausibele, maar niettemin eenigszins willekeurige, regels zijn gevolgd.

In de toestanden 0, I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV, V, VI en VII (figuur 6) werden omtrent de uitwisseling alleen globale metingen verricht. In al deze toestanden was de uitwisseling aanzienlijk. Het minst ongunstig waren nog de met A aangeduide varianten, waarbij kop A voorzien was van een watervrij scherm (kruin op + 850). Hieruit kon ten eerste de voorloopige conclusie worden getrokken, dat de grootte van de haven op de uitwisseling slechts een geringe invloed heeft. De groote uitwisseling vond zijn oorzaak in de aanwezigheid van een breed wervelgebied, dat zich van kop A naar kop B tusschen de rivierstroom en het stroomstelsel in de voorhaven uitstrekte. De rondgaande strooming in de haven, van welke een geleiding van de stroom in de overgang was verwacht, bleek daartoe niet sterk genoeg te zijn. De breede wervelstrook gaf aanleiding te trachten met een scherpere uitvoering van kop A verbetering te bereiken. Het feit, dat het scherm in de varianten A eenig voordeel opleverde, wees mede in die richting.

Waar de indruk was gevestigd, dat de haven van T III nog het beste was, werd deze weer ingebouwd.

In deze gedachtegang ontstond de toestand IIIB, waarin de kop A een geleidelijke overgang van het talud tot een verticale begrenzing vertoont, op zoodanige wijze, dat het rivierprofiel beneden N.A.P. + 435 (M.R. + 100) hetzelfde oppervlak behoudt. Hiervan is uiteraard een grootere bodembreedte het gevolg, wat de geleiding van de bodemstroom niet ten goede komt. Hoewel de oppervlakte-

stroom in de havenmond een rustiger beeld te zien geeft, is daarom toch het uitwisselingscijfer vrij hoog (δ = 7,4 procent).

De volgende stap (IIIC) was het verkleinen van de breedte tusschen de koppen A met het doel de stroom naar het midden van de rivier te richten en daarmee het bodemtransport verder van de havenmond verwijderd te houden. Wederom werd een voor het oog rustiger stroomingstoestand verkregen, doch gaf het uitwisselingspercentage het tegendeel van een verbetering te zien (δ = 14,3 procent). Evenals bij de vorige toestand was de neiging om de haven binnen te trekken aan de bodem aanzienlijk sterker dan aan de oppervlakte. Het tegengaan van dit effect was de bedoeling, die bij toestand IIID voorzat (figuur 6). De bodemstroom wordt daar door de lage dam met loodrechte begrenzing naar het midden van de rivier geleid; om de profielsvernauwing te compenseeren, is het boven N.A.P. + 140 gelegen deel van kop A divergeerend gemaakt. De zoo verkregen splitsing van de stroomingen in de waterlagen op verschillende diepte brengt inderdaad verbetering in de uitwisseling: δ daalt tot 8,3 procent.

De toestand IIIC', waarbij de haven A was afgesloten, en IIID', waar de kop A in een overeenkomstige vorm met die van haven B was gebracht (voordien had kop A van haven A steeds de vorm van T O behouden) toonen aan, dat de havens elkaar slechts weinig beïnvloeden.

Om de naar het midden van de rivier afgeleide stroomlaag een grootere dikte te geven, is in toestand III E de lage dam verhoogd tot N.A.P. + 200. Ter compensatie van de daardoor ontstane profielvernauwing is de wijdte tusschen de dammen daarbij van 66,5 m op 71 m gebracht, waardoor de hoek tusschen het verticale leidvlak en de rivieras kleiner werd. Dit bleek geen vooruitgang te zijn. Het percentage bij de waterstand + 650 steeg in vergelijking met T. IIID van 8,8 tot 13,8. Om na te gaan of deze ongunstige uitslag aan de verhooging van de lage dam dan wel aan de verkleining van de afleidingshoek was te wijten, werd in toestand IIIE' de wijdte tusschen de dam-

men teruggebracht op 66,5 m. In deze situatie werd δ bepaald op 9,3 procent, het percentage bij N.A.P. + 650 was 5,7 procent. Deze cijfers toonen wel duidelijk de gunstige uitwerking van de grootere afleidingshoek. De damverhooging blijkt echter geen voordeel op te leveren.

Al was met de invoering van de splitsing van boven- en benedenstroom reeds een aanzienlijke verbetering bereikt, toch is de uitwisseling nog steeds omstreeks 10 procent van de totale zandstroom. Bovendien gaven de tot dusverre onderzochte situaties alle een zeer groote opstuwing te zien (paragraaf 13). Op grond van de laatste overweging werd in toestand IIIF het doorstroomingsprofiel, vooral bij de hooge waterstanden, wijder gemaakt. Tevens kreegkop B een scherpere vorm (figuur 6). Het resultaat ten aanzien van de uitwisseling was niet ongunstig, δ werd 7,5 procent. In vergelijking met IIIE' is vooral de uitwisseling bij hooge afvoeren sterk verminderd, bij de lage afvoer is het verschil zeer klein.

De ponton, (figuur 6), die in toestand IIIF' werd ingevoerd, had tot doel bij kop B het oppervlaktewater in, het bodemwater uit de haven te leiden. Bij de lage afvoer geeft dit inderdaad een goed resultaat: uitwisseling 5,9 procent; bij de waterstand N.A.P. + 650 staat de uitkomst achter bij die in T IIIF: de cijfers zijn resp. 3,4 procent en 6,4 procent.

Over het geheel genomen brengen de pontons dus geen waarneembaar voordeel, terwijl zij een belangrijke complicatie beteekenen en uit nautisch oogpunt op bezwaren stuiten. In toestand IIIF'' werd kop B voorzien van een scherm tot N.A.P. + 650, de pontons waren daarbij ook aanwezig. Uitwisseling werd alleen gemeten bij de waterstand N.A.P. + 650. De uitkomst was zeer goed (2,5 procent). Het verschil met T. IIIF (3,4 procent) blijft echter ruim binnen de waarnemingsnauwkeurigheid.

Tenslotte werd bij dezelfde grondvorm nog onderzocht de invloed van een van kop B uit in de haven stekend scherm met openingen aan de onderzijde (IIIF-M): Ook hier werd bij N.A.P.+ 650 een zeer goede uitkomst ver-

kregen (uitwisseling 2,0 procent). Evenwel zijn deze dammen in nog veel sterkere mate dan de pontons uit nautisch oogpunt ontoelaatbaar.

In toestand IIIG werd verder gegaan met het onderzoeken van de invloed van verschillende kleine veranderingen aan kop B. O.a. werd geprobeerd door het aanbrengen van een verbindingsleiding tusschen het midden van de haven en de overgang bij kop B een afzuiging van water uit de haven in het leven te roepen, die de neerbeweging in de haven zou bevorderen (IIIG-F). Veel uitwerking had dit niet. Vergeleken met T IIIG-D, waarin geheel dezelfde situatie zonder die afzuiging aanwezig was, zijn bij N.A.P. + 465 de gereduceerde uitwisselingscijfers: 4,7 procent tegenover 2,9 procent, en bij N.A.P. + 800 2,2 procent en 5,4 procent.

In toestand IIIK, die overeenkomt met IIIG-D, zijn voor de uitwisselingsmetingen bodemrollers ingevoerd. Het verkregen meetresultaat is belangrijk gunstiger dan dat met de diepdrijvers: δ bedraagt ~~bedraagt~~ 1,6 procent. tegenover 6,2 procent in IIIG-D. Dit groote verschil kan niet uit de spreiding der waarnemingen worden verklaard, daar de middelbare fouten in de genoemde waarden slechts klein zijn (tabel 8). Het is dus reëel en zal moeten worden toegeschreven aan de hiervoor gesignaleerde invloed van de oppervlaktestroom op de beweging der drijvers. Dit effect is bij de sterke afwijking tusschen de stroomingen in de verschillende lagen, die door de vormgeving van kop A is geïntroduceerd, in deze situatie sterk werkzaam.

In toestand VIII is het rivierprofiel tusschen de strekdammen vernauwd in overeenstemming met plannen voor een toekomstige normalisatie. Kop A is gewijzigd in het belang van een kleinere opstuwing, kop B is in hoofdzaak hetzelfde gebleven. De vorm van de voorhavens is lichtelijk gewijzigd. Zooals op grond van de voorgaande metingen reeds eenigszins viel te verwachten, is door het veranderen van kop A de uitwisseling vrij aanzienlijk toegenomen. Blijkens tabel 7 was dit in het bijzonder bij de lage afvoeren het geval. De verhouding δ steeg tot

4,3 procent.

In toestand IX werd de invloed van een groote reeks kleine veranderingen aan kop A nagegaan. Kop B bleef daarbij steeds ongewijzigd, Als resultaat van de metingen in T. IX ontstond T. X, welke vervolgens meer uitvoerig is onderzocht.

Het afleiden van de bodemstroom naar het midden van de rivier geschiedt hier in twee étappen (figuur 6).

De zeer bevredigende uitkomst van dit onderzoek is een waarde voor δ van 0,9 procent. Vooral bij de hooge waterstanden zijn de meetcijfers zeer fraai.

Geleidelijk is thans een uitwisselingspercentage verkregen, dat veel lager is dan dat, waarop in de eerste onderzochte situaties moest worden gerekend. Streven naar een nog verdere verlaging heeft weinig nut.

Een belangrijk deel van het verdere onderzoek had dan ook als opzet te trachten met een eenvoudiger en daardoor minder kostbare oplossing een even gunstig resultaat te verkrijgen. Begonnen werd in toestand XI met een wijziging van kop B. De invloed daarvan bleek niet noemenswaardig te zijn: δ = 1,2 procent.

De voorhaven met de koppen bleef in toestand XII geheel ongewijzigd. De andere benaming vindt zijn reden in een verlenging van het model naar de benedenstroomsche zijde met het doel nauwkeuriger metingen van de opstuwing mogelijk te maken. De uitwisselingsmetingen zijn in toestand XII uitgebreid tot kleinere afvoeren, dan tot dusverre was geschied. Tevens werd een verder gaande onderscheiding van de uitgewisselde bodemrollers naar hun banen ingevoerd (figuur 6). De uitkomsten bij de kleinere afvoeren zijn belangrijk slechter dan die bij de hoogere. Tengevolge daarvan stijgt δ een weinig: in T. XII is δ 2,1 procent. Het is echter zeer wel mogelijk, dat het overgaan op een lichtelijk afwijkende wijze van beoordeeling der metingen (onderscheiding in b en c) hierop van invloed is.

De volgende stap in het zoeken naar vereenvoudiging was T. XIII: het lage dammetje van kop A is wegge-

laten. De uitwisseling stijgt daardoor zeer sterk.

Het kleiner maken van de voorhavens door daaraan (voor zoover de benedenstroomsche zijde betreft) weder nagenoeg de vorm van de Staatscommissie Limburg te geven, leidt tot T. XIV. Hoewel de hierbij gevonden uitwisselingscijfers ietwat ongunstiger zijn dan in T XIII - bij N.A.P. + 650 resp. 2,25 en 2,35 procent, bij N.A.P. + 465 resp. 4,5 en 5,55 procent - zijn de verschillen niet zeer overtuigend. Om de vergelijking tusschen de beide havenvormen zuiverder te maken is daarna in toestand XV de kop A weer in de vorm van T. XII gebracht. Tevens is de havenbegrenzing aan de benedenstroomsche zijde zorgvuldiger uitgevoerd. Ook nu wordt bij elke waterstand een verschil ten gunste van de ronde haven (T. XLI) gevonden. De coëfficienten λ_g bij de drie in beide toestanden gemeten waterstanden, die binnen het zandvoerende gebied liggen (figuur 24) bedragen resp. in T. XII en T. XV:

bij N.A.P. + 800: 0,35 en 0,45 procent,
bij N.A.P. + 650: 0,45 en 0,95 procent,
bij N.A.P. + 465: 2,15 en 2,85 procent.

In toestand XVI is de haven weder rond gemaakt en kop B weer in de vorm van T. XII gebracht. Kop A is uitgevoerd met beloopen in plaats van loodrechte begrenzingen. Dit heeft geen gunstige invloed, δ, berekend over dezelfde waterstanden als in T. XII, N.A.P. + 800, + 650, + 465 en + 335, bedraagt 4,3 procent tegen 2,05 procent (m.f. 0,15 procent) in T. XII. m.f. 0,2 procent

Een nog verder gaande vereenvoudiging is verwezenlijkt in T. XVII, waar de stroomgeleiding boven de voorhavens geheel door kribben geschiedt (figuur 6). Hoewel de uitwisseling (op dezelfde wijze berekend) wat geringer is dan in T. XVI (3,8 procent, m.f. 0,2 procent), kan ook deze situatie een vergelijking met T. XII niet doorstaan.

In toestand XVIII is de rivier tusschen de strekdammen weer op de bestaande wijdte gebracht. Gezocht is naar een uitvoering van kop A, die eenvoudiger was dan T. X en toch gunstige uitwisselingscijfers vertoonde. De situatie, die het best voldeed, is daarna weer uitvoerig

onderzocht als T. XIX (figuur 6). De waarde van δ in deze toestand bedraagt 2,45 procent, dus slechts weinig meer dan in T. XII. Het verschil is voornamelijk te vinden in een grootere uitwisseling bij de hoogere waterstanden (tabel 7).

In toestand XX is het lage dammetje van kop A verlengd, waardoor de rivier hier smaller wordt. Dit brengt vooral bij de lage waterstanden verbetering: δ daalt tot 1,3 procent. In toestand XXI heeft het dammetje dezelfde lengte behouden, maar is verhoogd tot N.A.P, + 335. De invloed hiervan op de hoogere waterstanden is gunstig, de uitwisseling bij de lage waterstanden is evenwel grooter dan in T. XX. Uit de in tabel 7 opgenomen cijfers blijkt dat λ plotseling sterk toeneemt, wanneer de waterstand daalt tot eenige decimeters boven het dammetje. Uit dit feit valt af te leiden, dat de splitsing van de boven- en onderstroom werkelijk de veronderstelde gunstige uitwerking heeft. De uitwisseling, berekend uit de waterstanden N.A.P. + 800, + 650, + 465 en + 335 bedraagt 1,15 procent (m.f. 0,1 procent). Even fraaie uitkomsten werden gevonden in de toestanden XXII en XXIII (figuur 7). De lengte van het afleidingsdammetje in deze toestanden is ongeveer het gemiddelde van die in T. XIX en T. XX (wijdte tusschen de koppen A 85 m). De kruinshoogte was resp. N.A.P. + 335 en + 275. De coëfficient δ bedroeg in T. XXII en T. XXIII bij de oorspronkelijke metingen resp. 1,15 en 1,05 procent.

Een gedeelte van de metingen in T. XXI en T. XXII werd omstreeks een jaar later herhaald. De daarbij gevonden uitwisselingscijfers waren, hoewel nog steeds gunstig tenoemen, regelmatig belangrijk hooger dan de oorspronkelijke. In T. XXI was het bij de waterstand N.A.P. + 650 gevonden gereduceerde percentage eerst 0,4 procent (mf. 0,15 procent), later 1,65 procent (m.f. 0,3 procent). In T. XXII bij N.A.P. + 650 eerst 0,6 procent (m.f. 0,1 procent). later 1,25 procent (m.f. 0,15 procent), bij N.A.P. + 465 eerst 0,3 procent (m.f. 0,15 procent), later 1,6 pro-

cent, ~~later 1,6 procent~~ (m.f. 0,3 procent).

Uitvoerige controleproeven toonden aan, dat de gevonden afwijkingen niet kunnen worden toegeschreven aan de persoonlijke invloed van den waarnemer, noch aan geringe fouten bij de instelling van de afvoer en van de waterstand. De verklaring moet dus worden gevonden, hetzij in de omstandigheid, dat de herhaling van de metingen heeft plaats gevonden in een toestand, die niet geheel conform was aan de oorspronkelijke, hetzij in een eenigszins veranderd gedrag van het meetmateriaal, d.w.z. het voortbewegen van de rollers over de rivierbodem.

Beide mogelijkheden zijn aanwezig. Blijkens de directe waarnemingen van de werking van het afleidingsdammetje op de bodemstroom (figuur 23) zijn de gunstige uitwisselingscijfers te danken aan de naar het midden van de rivier gerichte afwijking, die vooral door het eenigszins concave uiteinde van het dammetje wordt bewerkstelligd. Een gering verschil in afwerking moet wel in staat worden geacht afwijkingen van de gevonden orde van grootte in het leven te roepen. Anderzijds is geconstateerd, dat vele bodemrollers in de loop der proeven iets van hun regelmatige vorm hadden verloren, terwijl ook de mogelijkheid niet mag worden uitgesloten, dat de rivierbodem geleidelijk minder effen is geworden. De laatstgenoemde twee factoren hebben de tendens de naar het middenvan de rivier afleidende werking te verkleinen.

Dit alles wijst erop dat, zooals reeds in paragraaf 7 is gesignaleerd, aan de absolute waarde van de gevonden uitwisselingspercentages geen al te groot gewicht mag worden gehecht. De bij de cijfers vermelde middelbare fouten geven alleen een beeld van de meetnauwkeurigheid, echter niet van de mate van zekerheid, waarmee de jaarlijks uit te baggeren hoeveelheden uit de meetcijfers kunnen worden afgeleid.

Toestand XXIV had de bedoeling het water, dat bij hoogere waterstanden over kop A heen in de haven binnenstroomt, zoodanig te geleiden, dat het voor het aandrijven

van de havenmeer een zoo groot mogelijk effect sorteerde. De uitwerking was niet waarneembaar.

In toestand XXV was de haven vrij aanzienlijk verkleind, terwijl kop B op eenigszins andere wijze was opgebouwd. De uitwisseling blijkt daarvan zeker geen ongunstige invloed te ondervinden, δ is zelfs nog lager dan in T. XXIII, namelijk 0,65 procent.

In toestand XXVI is gestreefd naar eenvoudiger constructie van kop A (figuur 7). De hoogte van het afleidingsdammetje, dat een recht verloop heeft gekregen, is hierbij, evenals in T. XIX en T. XX, gebracht op N.A.P. + 130. Voor de uitwisseling werd gevonden 1,2 procent, dus niet noemenswaard meer dan in T. XXII en volgende.

In toestand XXVII heeft ook kop B een ronde vorm gekregen, overeenkomstig kop A. De hoogte van kop B is gebracht op N.A.P. + 535. Dit heeft eveneens geen waarneembare uitwerking op de uitwisseling: δ = 1,05 procent. Een inkorting van kop B (T. XXVIII) heeft evenmin eenige invloed.

In toestand XXIX is het riviergedeelte in het model bovenstrooms van de kruising verwijd. Op de uitwisseling blijkt dit geen waarneembare invloed te hebben. De gevonden gereduceerde percentages zijn bij de waterstanden N.A.P. + 650 en + 465 resp. 1,05 procent (m.f. 0,25 procent) en 0,75 procent (m.f. 0,2 procent) tegen 1,2 procent (m.f. 0,3 procent) en 0,75 procent (m.f. 0,15 procent) in T. XXVIII.

In toestand XXX is de hoogte van kop A gebracht op N.A.P. + 335, van kop B op + 465. Over het geheel genomen neemt tengevolge daarvan de uitwisseling eenigszins toe, zooals blijkt uit de waarde van δ:
1,45 procent (m.f. 0,1 procent). Een geringe vooruitgang wordt daartegenover weer gevonden in T. XXXI, waar het afleidingsdammetje afdaalt van N.A.P. + 335 aan het wortelend tot + 260 aan de kop. Hier bedraagt δ 1,25 procent.

De toestand XXXII is geheel overeenkomstig gemaakt met T. XXII, alleen heeft de bovenstroomsche geleiding nu een recht verloop.De uitkomst δ = 1,4 procent (m.f. 0,15

procent) is practisch gelijk aan die van de herhaalde metingen in T. XXII (1,5 procent). Bij de thans uitgevoerde vorm van de kop A zelf, heeft dus de S-bocht in de strekdam niet veel invloed meer, althans bij de toestand waarin de rollers en de vloer zich in dit stadium van de proeven bevinden.

In toestand XXIII is de S-bocht boven kop A, die met ingang van T. X steeds aanwezig is geweest, vervangen door een dammetje van gelijke vorm als dat aan de kop. Het resultaat is een iets grootere uitwisseling dan in T. XXII: $\delta = 1,65$ procent. Uit directe waarneming volgt dat het benedenstroomsche dammetje min of meer in de luwte ligt van het andere, waardoor het afleiden van de bodemstroom in mindere mate plaats vindt.

De positieve conclusie, die uit de waarnemingen van de uitwisseling kan worden getrokken, is dat deze grootendeels wordt beheerscht door de vormgeving van kop A. De vorm van de haven zelf speelt slechts een zeer ondergeschikte rol, al geeft de vergelijking van de uitkomsten in de toestanden XII en XV een aanwijzing ten gunste van de ronde haven. Een invloed van de gedaante van kop B valt niet aan te wijzen.

Een gunstige uitwerking wordt verkregen met een onder omstreeks 30° naar het midden van de rivier toe geneigd afleidingsdammetje, waarvan de lengte binnen vrij wijde grenzen mag varieeren. De kruin van dit dammetje moet een eindweegs liggen beneden de laagste waterstand, waarbij nog een belangrijk zandtransport plaats vindt. De hoeveelheid bodemmateriaal, welke uit de rivier in de voorhavens geraakt, wordt daardoor teruggebracht tot enkele procenten van het jaarlijksche riviertransport.

Blijkens de verrichte contrôleproeven in de toestanden XXI en XXII laat de onzekerheid in de meetmethode niet toe conclusies te trekken omtrent details in de vormgeving van dekoppen A.

Dit geldt des te meer, omdat de indruk is verkregen, dat sommige zeer geringe wijzigingen aan deze kop een

onevenredig groote uitwerking zou kunnen hebben. Men zou in een dergelijk geval van een labiele toestand kunnen spreken.

13. De opstuwing.

In het model 9 is betreffende de door de kruising veroorzaakte opstuwing slechts een enkele globale meting verricht (tabel 1, toestand 2). Deze vond niet plaats bij een hooge waterstand, doch slechts bij een peil van N.A.P. + 730 (M.R. + 100 cm), waarbij het winterbed nog niet aan de stroming deelneemt. Het resultaat was, dat het verhang in de overgang even groot was als dat in de overige rivier.

Stelselmatige metingen bij de grootste afvoer (2900 m^3/sec) werden verricht in model 46, de uitkomsten hiervan zijn samengesteld in tabel 9.

Zooals in figuur 12 is te zien, waren de peilnaalden B en O_1 geplaatst onmiddellijk boven en beneden de kruising. Hun onderlinge afstand bedroeg 650 m. Peilnaald O_2 bevond zich op 290 m benedenstrooms van O_1.

Voor het verkrijgen van de door de kruising veroorzaakte opstuwing moeten de vervallen B-O_1, resp. B-O_2 worden verminderd met het normale rivierverval over een overeenkomstige afstand. Dit bedraagt tusschen de peilnaalden B en O_1 omstreeks 7 cm, tusschen B en O_2 omstreeks 10 cm. Wanneer deze reducties worden toegepast op de in de toestanden XII tot en met XIX gemeten vervallen, dan wordt steeds uit de waarden B-O_1 een grootere opstuwing gevonden, dan uit B-O_2. Het gemiddelde verschil bedraagt 2 cm. Dit is toe te schrijven aan het feit, dat ter plaatse van peilnaald O_1 de maatgevende gemiddelde snelheid een hoogere waarde heeft dan in de normale rivier (paragraaf 11, figuur 23), zoodat daar ook het verschil in hoogteligging tusschen energielijn en waterspiegel ($\alpha\frac{v^2}{2g}$) grooter is. Dit geldt in het bijzonder bij die toestanden, waar het rivierprofiel vrij sterk wordt vernauwd (0 tot en met III D, V tot en met VIIA). Een deel van deze extra snelheids-

Tabel 9.

Toestand	Stand peilnaald cm+N.A.P						Verval		Gecorrigeerd verval		Op-stuwing
	B	H_1	H_2	H_3	O_1	O_2	$B-O_1$	$B-O_2$	$B-H_2$	H_2-O	
0	836	800	800	800	743	-	93	-	36	49	78
I	842	819	821	819	781	-	61	-	21	32	46
IA	842	813	812	813	780	-	62	-	30	24	47
II	870	836	835	837	780	-	90	-	35	47	75
IIA	877	834	835	834	786	-	91	-	42	41	76
IIIB	855	825	821	821	780	-	75	-	34	33	60
IIIC	884	831	832	832	780	-	104	-	52	44	89
IIID	864	830	830	830	780	-	84	-	34	42	69
IIIF	829	819	819	821	777	-	52	-	10	40	43
IIIF'	839	829	829	829	780	-	59	-	10	47	50
IIIF''	840	830	830	831	780	-	60	-	10	48	51
IIIG-A	819	803	802	804	780	-	39	-	17	20	30
IIIK	822	810	809	808	780	-	42	-	13	27	33
V	845	814	814	814	780	-	65	-	31	26	50
VA	855	806	806	806	780	-	75	-	49	18	60
VII	842	815	812	813	780	-	62	-	30	24	47
VIIA	858	806	805	806	780	-	78	-	53	17	62
VIII	801	798	798	797	780	-	21	-	3	16	12
X	808	802	802	802	780	-	28	-	6	20	19
	818	-	-	-	780	-	38	-	-	-	29
	813	-	805	-	780	-	33	-	8	23	24
	824	-	820	-	808	-	16	-	4	10	7
	805	-	800	-	786	-	19	-	5	12	10
	805	-	800	-	786	-	19	-	5	12	10
	805	-	800	-	789	-	16	-	5	9	7
	806	-	800	-	788	-	18	-	6	10	9
	826	-	820	-	803	-	23	-	6	15	14
XI	806	-	800	-	781	-	25	-	6	17	16
XII	815	809	807	809	792	792	25	25	8	13	15
XV	808	800	800	-	782	780	26	28	8	16	18
XVII	818	801	799	800	790	790	28	28	19	7	18
XIX	804	800	800	800	783	780	21	24	4	15	14

hoogte gaat bij de overgang tot de normale snelheidsverdeeling verloren, het overige deel wordt teruggevonden in een relatieve verhooging van de waterspiegel. Voorzichtigheidshalve wordt aangenomen, dat in de toestanden XII tot en metXIX ter plaatse van peilnaald O_2 weer nagenoeg een normale toestand is ingetreden. Hieruit zou volgen, dat in die toestanden van de extra-snelheidshoogte bij peilnaald O_2 gemiddeld omstreeks 2 cm in de vorm van spiegelverhooging behouden blijft. De maat van deze verhooging hangt af van de situatie en kan dus van het eene tot het andere geval verschillen. De onderlinge afwijkingen in het bedrag van deze teruggewonnen energie, hetwelk op zichzelf al niet groot is ten opzichte van de gemeten opstuwingen, kan voor de toestanden, die in hoofdaanleg onderling weinig verschillen, van ondergeschikt belang worden geacht. Het is daarom toelaatbaar het voor de toestanden XII tot en met XIX gevonden bedrag van 2 cm ook op IIIF tot en met IIIK en VIII en volgende toe te passen.

Dit leidt tot de conclusie, dat de werkelijke opstuwingen in die toestanden kunnen worden gevonden door de vervallen $B-O_1$ te verminderen met 9 cm, of de vervallen $B-O_2$ met 10 cm. In de overige toestanden is het verschil in snelheidshoogte tusschen O_1 en de normale rivier grooter (15 à 20 cm), zoodat ook het teruggewonnen gedeelte grooter zal zijn. Een nauwkeurige bepaling van dit gedeelte is niet wel mogelijk: aangenomen mag worden dat het tusschen 5 en 10 cm zal varieeren.

Wordt een bedrag van 8 cm ingevoerd, dan kunnen hieruit geen belangrijke afwijkingen in de opstuwing (die juist in de laatstbedoelde situaties groot is) ontstaan. Hieruit volgt dat voor het vinden van de opstuwing in de toestanden 0 tot en met III D en V tot en met VIIA de vervallen $B-O_1$ moeten worden verminderd met 7 + 8 = 15 cm. Op deze wijzen zijn de in de laatste kolom van tabel 9 geplaatste opstuwingen berekend.

Deze waarden hebben in vele gevallen een grootte, die ver uitgaat boven deze van de snelheidshoogte in de normale rivier (25 à 30 cm). Dit wijst erop dat er zoowel

aan het bovenstroomsche als aan het benedenstroomsche einde van de overgang energieverliezen moeten optreden. Dit blijkt ook, wanneer de hoogteverschillen tusschen B en bijvoorbeeld H_2 eenerzijds en H_2 en O anderzijds in het oog worden gevat. Voor O is hier terwille van een juiste vergelijking genomen de stand O_1, vermeerderd met de geschatte terugwinst uit de extra-snelheidshoogte, dus 8 cm in de toestanden O tot en met IIID en V tot en met VIIA en 2 cm in de overige.

Verscheidene oorzaken werken samen, om de verschillen B-H_2 en H_2-O min of meer te doen afwijken van het energieverlies in het bovenste, resp. benedenste deel van de kruising. Deze vervallen geven echter wel een globaal beeld van de veranderingen in die verliezen, die het gevolg zijn van het wijzigen van de situatie.

Zoo valt het dadelijk op, dat het verschil B-H_2 bij de toestanden O tot en met IIID en V tot en met VIIA veel grooter is, dan bij de overige onderzochte toestanden. Het ligt voor de hand dit in verband te brengen met de verlaging van de plateaux, die in deze laatste toestanden is toegepast, waardoor het winterbed hier slechts in geringe mate is vernauwd.

Minder vast staat het verband tusschen het verschil H_2-O en de ligging van de benedenstroomsche plateaux. Wel valt ook hier herhaaldelijk een lage plateau-ligging samen met een klein verval, doch het omgekeerde komt ook voor (toestand IIIf, lage plataeux, groot verschil H_2-O) De indruk wordt voorts gewekt, dat de vorm van de koppen B een vrij groote invloed op het verval H_2-O heeft. In het algemeen is dit verval aan de kleine kant, wanneer de vorm zoodanig is, dat geen belangrijke insnoering in de hoofdstroom wordt veroorzaakt. Vooral een splitsing tusschen de hoofdstroom en de stroom die de haven binnentreedt door twee evenwijdige wanden, zooals voor het eerst in toestand IIIG-D is toegepast, schijnt het verval te beperken. Geheel duidelijk is het verband tusschen de vorm der koppen B en het verval echter niet: daartoe vertoonen de uitkomsten te groote, niet verklaarde, afwijkingen.

Ook is het niet gemakkelijk in te zien, waarom de aanwezigheid van de pontons een zoo groote vermeerdering van de opstuwing kan veroorzaken (H_2-O vermindert van 48 cm in IIIF'' door het wegnemen van de pontons tot 20 cm in IIIG-A).

Op grond van de metingen kan worden geconcludeerd:

1. De opstuwing wordt gereduceerd door de verkleining van het profiel van het winterbed ter plaatse van de kruising te beperken.

2. Vermoedelijk werken goed stroomgeleidende koppen B in dit opzicht gunstig.

3. De opstuwing kan in uiterste gevallen omstreeks drie kwart meter bedragen, doch is door een doelmatige situatie terug te brengen tot minder dan twintig centimeter. Deze bedragen komen alleen voor onmiddellijk boven de kruising; verder bovenstrooms loopt de opstuwing te niet.

-o-o-o-o-o-o-

IV. Aanhangsel.

14. Invloed van de sluisvullingen.

Enkele waarnemingen zijn verricht betreffende de invloed op de stroomingstoestand in de voorhavens en in de overgang van het schutten met de sluizen, die toegang geven tot de aansluitende kanaalpanden. Tijdens het vullen van de schutkolk wordt aan de voorhaven een hoeveelheid water onttrokken, welke hoeveelheid uiteraard weer door water uit de rivier moet worden aangevuld. In verband met de ligging en de inrichting van het model werd het water onttrokken aan de zuidelijke haven (haven B); de waterhoeveelheden werden echter gebaseerd op de toestanden in de sluis te Wijk bij Duurstede, waar het verval en dus de benoodigde hoeveelheid, grooter is. Op de waarnemingsresultaten heeft dit bij de symmetrische aanleg van de kruising geen invloed.

De inwerking van de sluisvulling op het stroombeeld en op de uitwisseling werd onderzocht bij de waterstanden N.A.P. + 650 en +465. Bij het eerstgenoemde peil (afvoer van de rivier 1300 m^3/sec) bedraagt de hoeveelheid water, welke gedurende een sluisvulling aan de voorhaven wordt onttrokken, omstreeks 45000 m^3. De duur van de vulling is rond 8 minuten, zoodat de gemiddelde onttrekking 90 m^3 per seconde bedraagt. De maximale waarde, die in het midden van de vulperiode wordt bereikt, is ongeveer 150 m^3/sec. Bij de waterstand N.A.P. + 465 (afvoer 670 m^3/sec) bedraagt de gemiddelde vulstroom omstreeks 80 m^3/sec.

De globale waarneming van het stroombeeld deed zien, dat tijdens de sluisvulling de wateruitwisseling tusschen rivier en haven inderdaad belangrijk toeneemt.

Proeven met bodemrollers bij een waterstand N.A.P. + 640 en een constante wateronttrekking van resp. 150 m^3/sec en 90 m^3/sec bevestigden dit. De gevonden gereduceerde percentages (λ_g) waren resp. 4,2 procent en 2,05 procent tegen 1,55 procent bij de normale strooming. Bij de water-

stand N.A.P. + 465 en een constante wateronttrekking van 80 m^3/sec was λ_g 4,6 procent tegen 1,1 procent bij normale strooming. Uit een bepaling van de uitwisseling in de tegenoverliggende haven bleek, zooalsop grond van het globaal waargenomen stroombeeld mocht worden verwacht, een afname van de uitwisseling aldaar, namelijk tot 0,7 procent.

De metingen bij N.A.P. + 650 doen zien, dat bij het instellen van een constante wateronttrekking (zonder welke quantitatieve metingen uiterst bezwaarlijk zouden zijn)de grootte van de vulstroom een belangrijke invloed uitoefent. De vraag rijst op welke wijze de uitwisseling tijdens een sluisvulling uit de beschreven waarnemingen kan worden afgeleid. Om hiervan eenig denkbeeld te kunnen vormen zijn bij de waterstand N.A.P. + 650 eenige reeksen foto's gemaakt, die de oppervlaktestroom in het benedenstroomsche deel van de overgang met de aansluitende havengedeelten in de verschillende gevallen te zien geven (figuur 27).

Reeks 1 is genomen zonder wateronttrekking en geeft dus de normale strooming te zien, reeks 2 vertoont het verloop van het stroombeeld tijdens een vulling, terwijl de reeksen 3 en 4 resp. weergeven de strooming bij een constante onttrekking van 90 m^3/sec en van 150 m^3/sec. De onderlinge verschillen tusschen de foto's der reeksen 1, 3 en 4 bestaan slechts uit de toevallige variaties, die bij elke toestand, ook de stationnaire, optreden. In reeks 2 daarentegen wordt het verloop van het, met de tijd veranderlijke, stroombeeld weergegeven.

De foto's van de reeksen 1 en 2 zijn gedurende omstreeks 3 sec, die van de reeksen 3 en 4 gedurende 4 à 5 sec belicht geweest.

Een beschouwing van de fotoreeksen doet zien, dat het karakter van de stroomingstoestand in de reeksen 3 en 4 slechts weinig verschillend is.

In reeks 4 is de snelheid van de langs/kop B in-

trekkende stroom grooter.

In reeks 2 treedt gedurende het laatste gedeelte van de vultijd een stroombeeld op, dat het meest met dat van reeks 3 (onttrekking van de gemiddelde vulstroom) overeenkomt. Er is dus, zooals kon worden verwacht, eenige tijd noodig voor het vormen van het nieuwe stroombeeld. Aannemelijk is, dat dit stroombeeld nog korte tijd na het eind van de sluisvulling blijft bestaan.

Voor het nagaan van de orde van grootte van de extra aanzanding, welke door de vulstroom van de schutsluis in haven A zal worden teweeggebracht, kan op grond van de bovenbeschreven proeven bijvoorbeeld worden aangenomen, dat gedurende de geheele vulling bij elke waterstand de extra uitwisseling omstreeks 3 procent van de zandstroom in de halve rivier zal bedragen.

De vermindering van de aanzanding in haven B is belangrijk kleiner. Deze kan geacht worden ongeveer op te wegen tegen de extra- aanzanding, die het vullen van de kleinere en veel minder in bedrijf zijnde zuidelijke schutsluis tengevolge heeft. Wordt verder het aantal sluisvullingen per etmaal op 16 gesteld en de gemiddelde duur op 8 min, dan volgt daaruit voor de orde van grootte van de jaarlijksche extra aanzanding een bedrag van $\frac{16 \times 8}{24 \times 60} \times \frac{3}{2}$, of omstreeks 0,12 procent van de totale zandafvoer van de rivier. De invloed van de sluisvullingen op de aanzanding van de voorhavens blijkt dus zeer gering te zijn.

15. Open blijvende vraagpunten.

De belangrijkste vraag, die niet is beantwoord, is die betreffende de wijze waarop het zomerbed van de rivier dient te worden geleid. In het eerste model (M. 9) is in dezen eenige ervaring opgedaan. Duidelijk bleek, dat het tracé van het zomerbed bovenstrooms van de kruising een belangrijke rol speelt ten aanzien van de verdeeling van het afgevoerde zand over de riviorbreedte. De conclusie kon worden getrokken, dat de kruising op eenige afstand

stroomafwaarts van een buigpunt moet liggen, maar het onderzoek heeft zich niet verder voortgezet.

In het model 46 is in het geheel geen onderzoek in deze richting ondernomen. De rivier is daar steeds recht uitgevoerd en de gemeten stroombeelden zijn dan ook steeds vrijwel symmetrisch geweest (figuur 23).

Om over dit punt meer gegevens te verzamelen zal in het nieuw te maken model de situatie beneden Wijk bij Duurstede moeten worden weergegeven en daarin met verschillende tracé's van het zomerbed worden geëxperimenteerd.

Er zal dan ook eenig inzicht worden verkregen in de overdiepte, die in de overgang eventueel zonder baggeren bij verschillende breedten van de rivier in de overgang kan worden gehandhaafd, wanneer het zand op de juiste manier door de rivier wordt aangevoerd.

Men kan voorshands trachten het zand vooral te leiden naar het midden van de rivier, waar de grootste stroomsnelheid voorkomt. Echter is het denkbaar, dat een te groote zandconcentratie daar plaatselijk verondieping zou veroorzaken, zoodat het verschil tusschen vaardiepte en gemiddelde diepte toch weer aanzienlijk zou worden.

Voor dit onderzoek moet worden beschikt over een groot, niet samengetrokken, model, waarin de stroomen sterk genoeg zijn om het bodemmateriaal in groote hoeveelheden te transporteeren. In een dergelijk model is het mogelijk eenig inzicht te krijgen in de hoeveelheden verplaatst materiaal: wellicht kan, in zeer groote trekken, het verband worden gevonden tusschen de breedte, de te onderhouden overdiepte en de daarvoor te baggeren zandhoeveelheden.

De eischen, waaraan de vorm van de voorhaven moet voldoen, vooral bij de koppen A en B en de zand-(en slib-) hoeveelheden die bij verschillende situaties in de haven geraken, zijn uit de proeven met model 46 in hoofdtrekken vastgesteld. Het is niet te verwachten dat de inzichten ten aanzien van deze kwestie door voortgezet modelonderzoek

in belangrijke mate zullen veranderen.

Dit is wèl het geval met de opstuwing van de rivier bovenstrooms. In het model 9 zijn daarover geen metingen verricht; deze zouden toch waardeloos zijn geweest, daar de situaties bij Wageningen en te Wijk bij Duurstede bij de hoogste standen onderling te veel verschillen.

De metingen die in model 46 werden verricht verschaffen wel gegevens omtrent de invloed die bepaalde wijzigingen in het ontwerp op de opstuwing hebben, doch men kan er de te Wijk bij Duurstede te verwachten opstuwing niet uit berekenen. Daartoe moet in het model de werkelijke situatie met de sterk wisselende breedte van het winterbed (figuur 2) worden onderzocht. Bij eenzelfde afvoer en gelijke waterstand aan het benedenstroomsche einde van het model wordt dan de waterstand boven de kruising (ongeveer bij km 71) éénmaal gemeten met de vroegere toestand en éénmaal na het aanbrengen van alle kanaalwerken tusschen de bandijken. Men moet ervoor zorgen, dat het model in benedenstroomsche richting zoo ver is uitgestrekt, dat na het passeeren van de kruising de stroomverdeeling over het dwarsprofiel van de rivier weder geheel normaal is geworden.

-o-o-o-o-o-