

RWS Dir. Gelderland
Bibliotheeknr. C 651

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM.

Di: 48306

Onderzoek van de monden van den IJssel.



Modelonderzoek nr. 111.



I N H O U D.

	blz.
<u>HOOFDSTUK I. Overzicht.</u>	
1. Omschrijving en opdracht.....	1
2. Geschiedenis van het onderzoek.....	2
3. Gegevens.	
a. Waterstanden op het IJsselmeer.....	2
b. Afvoer van den IJssel en verdeeling over de takken.....	3
c. Waterstanden en verhangen op den IJssel.....	3
d. Afvoer van vaste stoffen.....	4
4. Kort overzicht van de uitkomsten.....	5
 <u>HOOFDSTUK II. Beschrijving van het model.</u>	
5. Grenzen.....	7
6. Schalen.....	7
7. Bouw van het model.....	11
8. De meetwijzen.....	11
a. Rivierafvoer. Verdeeling over de takken.....	11
b. Waterstand en verhang.....	11
c. Stroomsnelheden.....	12
d. Bodemtransport.....	12
e. Bodemligging.....	12
 <u>HOOFDSTUK III. De metingen en hun uitkomsten.</u>	
9. Overzicht der onderzochte toestanden.....	13
a. De bestaande toestand (T O).....	13
b. Het onderzoek volgens het oorspronkelijke pro- gramma.....	13
c. Het tweede deel van het onderzoek met verlegging van den bovenmond van het Rechterdiep naar km 142....	14
10. De verrichte metingen en berekeningen.....	15
11. De bestaande toestand (T O).....	17
12. Het onderzoek volgens het oorspronkelijke program- ma.....	18
13. Het tweede stadium van het onderzoek. Verlegging van de splitsing stroomopwaarts.....	23
14. Het derde stadium van het onderzoek. Afsluiting van het Rechterdiep en het maken van een doorsnij- ding door de Kattenwaard (Kattendiep).....	26
 <u>HOOFDSTUK IV. Slotbeschouwingen.</u>	
15. Betrouwbaarheid van de resultaten.....	30
16. Berekeningen over het zandtransport.....	31

FIGUREN.

1. Monden van den IJssel.
2. Waterstanden op den beneden-IJssel.
3. Transport van bodemmateriaal in rivier en model.
4. Het model.
5. Bouw van het model.
6. Opstellen van de kribben.
7. Onder profiel brengen van het rivierbed.
8. Toestanden 0 tot en met 4.
9. Toestanden 10 tot en met 17.
10. Toestanden 20 tot en met 22.
11. Toestanden 30 tot en met 32.
12. Toestanden 40 en 41.
13. Toestanden 51 en 52.
14. Toestanden 61-62 en 71.
15. Toestanden 81-90-91 en 92.
16. Stroommetingen en waterstanden in het model. T 0.
17. Bodemligging volgens de peilingen van April 1934.
18. Bodemligging in T 0.
19. Bodemligging in T 1.
20. Waterstanden in T 2.
21. Bodemligging in T 2.
22. Bodemligging in T 3.
23. Bodemligging in T 4.
24. Waterstanden in T 10.
25. Bodemligging in T 10.
26. Stroombeeld in T 14.
27. Bodemligging in T 14.
28. Stroombeeld in T 15a.
29. Bodemligging in T 15a.
30. Stroombeeld in T 15b.
31. Bodemligging in T 15b.
32. Stroombeeld in T 15c.
33. Bodemligging in T 15c.
34. Stroombeeld in T 17.
35. Bodemligging in T 17.
36. Stroombeeld in T 20.
37. Stroombeeld in T 21.
38. Stroombeeld in T 22a.
39. Bodemligging in T 22.
40. Stroombeeld in T 22b.
41. Stroombeeld in T 22c.
42. Waterstanden in T 30.
43. Stroombeeld in T 31.
44. Bodemligging in T 31.
45. Bodemligging in T 31.
46. Stroombeeld in T 41.
47. Bodemligging in T 41.
48. Stroommetingen en waterstanden in T 51.
49. Bodemligging in T 51.
50. Stroommetingen en waterstanden in T 52.

51. Bodemligging in T 52.
52. Bodemligging in T 61.
53. Waterstanden in T 62.
54. Bodemligging in T 71.
55. Bodemligging in T 81.
56. Stroommetingen in T 90.
57. Bodemligging in T 90.
58. Waterstanden in T 90.
59. Waterstanden in T 91.
60. Waterstanden in T 92.
61. Stroommetingen in T 92.
62. Bodemligging in T 92.
63. T 92. Vergelijking van snelheidsverdeclingen.

-o-o-o-o-

HOOFDSTUK I. Overzicht.

1. Omschrijving en opdracht.

De aanleg van den Noordoostelijken polder der Zuiderzeewerken maakte in en nabij de IJsseldelta een aantal voorzieningen noodzakelijk. Hiertoe behoorde de afsluiting van het Ganzendiep en het scheppen van een nieuwen uitgang voor de scheepvaart van het Zwarte Water. Voor het verwerken van dat gedeelte van den IJsselafvoer, dat in den bestaanden toestand door het Ganzendiep werd afgevoerd (omstreeks een derde van het totaal), werd overwogen verruiming en vervorming van den bovenmond van het Rechterdiep en verbetering van dezen tak. Deze werken zouden tevens ten dienste komen van de scheepvaart van het Zwarte Water, welke door een te graven kanaal door het Kampereiland naar het verbeterde Rechterdiep zou worden geleid en vervolgens door den Ketelmond het IJsselmeer zou kunnen bereiken. Om het onderhoud van de gewenschte diepte in en voor den Ketelmond te vergemakkelijken, lag het in de bedoeling den bovenmond van het Rechterdiep zoo in te richten, dat een zoo groot mogelijk deel van het zandtransport van den IJssel door het Rechterdiep zou worden gevoerd. In October 1936 werd door den Dienst der Zuiderzeewerken aan het Waterloopkundig Laboratorium opgedragen een modelonderzoek in te stellen naar een inrichting van den bovenmond van het Rechterdiep, welke moest voldoen aan de volgende drie eischen:

- a. voldoende ^{water}afvoerend vermogen, zoodat in de toekomst geen beteekenend hoogere waterstanden zijn te verwachten dan die, welke tot dusverre zijn voorgekomen;
- b. een zoo groot mogelijk deel van den zandafvoer door het Rechterdiep;
- c. een gunstige vorm voor de scheepvaart, in het bijzonder die van het Rechterdiep naar het Keteldiep en omgekeerd.

In den loop van het onderzoek bleek het, dat ondanks de verruiming en verbetering van het Rechterdiep bij de grootste IJsselafvoeren ontoelaatbare waterstanden zouden voorkomen. Tevens was besloten de scheepvaart van het Zwarte Water niet door Rechterdiep en Keteldiep te leiden, maar een anderen weg naar het IJsselmeer te kiezen. Het onderzoek kreeg daardoor een andere doelstelling, waarbij in den eisch c de scheepvaart in het Rechterdiep kwam te vervallen, (par. 13). Na enkele pogingen om de oplossing in andere richting te vinden, ontstond het plan het Rechterdiep geheel af te sluiten en een nieuwen mond te graven door de Kattenwaard, met den bovenmond onmiddellijk bovenstrooms van het begin van den Noordelijken Keteldam (het Kattendiep). De opdracht werd toen gewijzigd in het zoeken naar een vorm van den bovenmond van de nieuwe geul, welke voldeed aan de eischen a en b, waarbij voor Rechterdiep moet worden gelezen Kattendiep.

Fig. 1 geeft een overzicht van het betrokken gebied ¹⁾.

1) In deze figuur is, evenals elders in dit verslag, de oude kilometerverdeling gebruikt. In de nieuwe verdeling zijn de raainummers 858 hooger.

2. Geschiedenis van het onderzoek.

In October 1936 werd de modelbouw voorbereid. De noodige ruimte kwam vrij in April 1937, waarna met het bouwen kon worden begonnen. In Juli 1937 was het model zoover gereed, dat water kon worden toegelaten. In dezelfde maand en in Augustus 1937 zijn metingen verricht tot het vastleggen van de verschijnselen in den bestaanden toestand (T O). Nadat, o.m. door een bezoek ter plaatse, was vastgesteld dat het model een bevredigende overeenstemming met de werkelijke rivier vertoonde, werd begonnen met het eigenlijke onderzoek volgens het oorspronkelijke programma. Op het eind van Februari 1938 was een toestand verkregen, welke ten aanzien van de eischen b en c bevredigend was. Tijdens het onderzoek bleek, dat voor een goede uitvoering der proeven een grooter deel van het Rechterdiep in het model moest worden opgenomen dan oorspronkelijk het geval was. In November 1937 is het model dienovereenkomstig uitgebreid.

In Maart en April 1938, na de wijziging in de doelstelling, is voornamelijk rekenwerk verricht over den invloed van een verlegging van den bovenmond van het Rechterdiep van km 143 naar km 142 op de verhanglijn bij den grootsten IJsselafvoer. Intusschen werd het model in dien zin gewijzigd. In Mei 1938 zijn proeven met het verlegde Rechterdiep verricht, waarna in Juni het model benedenwaarts werd uitgebreid voor het onderzoek van de in paragraaf 1 vermelde oplossing met een nieuwen mond door de Kattenwaard. In dezelfde maand werd met het nieuwe onderzoek begonnen, dat duurde tot ^{eind} Januari 1939 een bevredigenden vorm was gevonden. Het model werd daarna afgebroken.

De bouw van het model en de uitvoering der proeven tot eind Februari 1938 was in handen van ir. M. Klasema. Vervolgens, tot half September 1938, was met het onderzoek belast ir. L. van Bendegom; het is voltooid door ir. H.D. de Vos.

De samenstelling van het verslag vond plaats in den loop van 1940 door ir. J.B.Schijf.

3. Gegevens.

a. Waterstanden op het IJsselmeer.

In het IJsselmeer wordt een gemiddeld peil gehandhaafd, dat alleen in uitzonderlijke omstandigheden groote schommelingen vertoont. Ook de waterstand bij den Ketelmond is daarvoor in den regel tennaaste bij constant.

Tusschen den waterstand op het IJsselmeer en den IJsselafvoer bestaat geen rechtstreeksch verband en bij slechts weinig verschillende peilen kunnen op het riviervak beneden Kampen zoowel zeer groote als kleine afvoeren voorkomen.

Voor de vorming van het rivierbed en voor de scheepvaart zijn de extreme gevallen, welke een zeer geringe frequentie hebben, van ondergeschikt belang. Daarvoor is dus de gemiddelde of een weinig daarvan afwijkende IJsselmeerstand maatgevend. Anders is het gesteld met de veiligheid der rivierdijken bij zeer groote afvoeren, waarbij juist de uitzonderlijke omstandigheden bepalend zijn. Als uiterste geval voor de op den beneden-IJssel te verwachten waterstanden is aangenomen de toestand op 8 Januari 1926 (fig. 2).

Volgens een door den Dienst der Zuiderzeewerken uitgevoerde berekening kan onder de op dien dag en de eraan voorafgaande heerschende omstandigheden op het voltooide IJsselmeer een stand van N.A.P. + 35 cm bij den Ketelmond worden verwacht. In de open Zuiderzee was de stand op dien dag + 72 cm.

b. Afvoer van den IJssel en verdeeling over de takken.

Voor het uitgevoerde onderzoek waren de kleine IJsselafvoeren van weinig belang. Dit was echter wel het geval met den grootsten te verwachten afvoer en met de verdeeling over de verschillende riviertakken.

Zooals reeds is meegedeeld, werd voor de bepaling van de waterstanden op den beneden-IJssel de toestand van 8 Januari 1926 maatgevend geacht. Bij de eerste berekeningen werd de afvoer op dien dag en den vooraftgaanden voor den ongesplitsten IJssel gesteld op 2400 m³ per sec, waarvan door het Ganzendiep 730 m³ per sec werd afgevoerd, door het Keteldiep 1130 en door het Rechterdiep 540 m³ per sec. Een latere beschouwing deed vermoeden dat de afvoer van den IJssel te groot was genomen. Inplaats van 2400 m³ per sec is hiervoor toen gesteld 2250 m³/sec, met een verdeeling van 750 m³/sec door het Ganzendiep, 600 door het Rechterdiep en 900 door het Keteldiep.

In een in Mei 1938 door den Studiedienst der Bovenriviervieren samengestelde nota werd ~~van~~ den grootsten afvoer in Januari 1926 het bedrag van 2135 m³ per sec opgegeven. Deze waarde is bij de daarna verrichte proeven en berekeningen als grondslag genomen.

Voor den uitslag der berekeningen omtrent de waterstanden in de toekomst in de omstandigheden van Januari 1926 is de variatie in den aangenomen grootsten afvoer van geen belang. Bij die berekeningen werd namelijk gebruik gemaakt van de bekende verhanglijn op den IJssel op 7 Januari, toen een nagenoeg stationnaire stroomingstoestand heerschte. Met deze verhanglijn en de bekende dwarsprofielen kon in elk der gevallen uit de formule

$$Q = CF\sqrt{RI}$$

de waarde Q:C worden bepaald (de verandering in snelheidhoogte van punt tot punt is van ondergeschikte beteekenis). De aanname van Q had dus allen invloed op de waarde van C, maar niet op de verhangen, welke met de waarden F en R van den nieuwen toestand werden berekend.

Bij andere dan de zeer groote afvoeren is op grond van een aantal door den Studiedienst der Bovenriviervieren verrichte afvoermetingen aangenomen, dat een derde van den afvoer door het Ganzendiep gaat en dat het Keteldiep vier maal zooveel afvoert als het Rechterdiep.

c. Waterstanden en verhangen op den IJssel.

Door de nabijheid van het IJsselmeer varieert de waterstand in de te onderzoeken rivierstrekking in het algemeen slechts weinig met den afvoer. Het gevolg daarvan is, dat bij verschillende afvoeren de voor den stroom beschikbare profielen eveneens weinig varieren. De stroomsnelheden en daarmee ook de verhangen zijn daardoor bij kleine en groote afvoeren sterk verschillend. Het verhang kan bijv. bij een afvoer van 1200 m³ per sec 25 cm per km bedragen tegen niet

meer dan 3 cm per km bij 225 m³ per sec. Zulks is geheel anders dan bij een meer stroomopwaarts gelegen riviervak, waar zelfs sterk uiteenlopende afvoeren doorgaans met weinig verandering in het verhang en dus ook betrekkelijk weinig variatie in de stroomsnelheid gepaard gaan.

In fig. 2 is de verhanglijn geteekend van 7 Januari 1926 bij den IJsselmeerstand van N.A.P. + 3 cm en een afvoer van 2135 m³ per sec. De waterstand bij Kampen was toen N.A.P. + 215 cm. Op 8 Januari kwamen hoogere waterstanden voor (Kampen N.A.P. + 227 cm), die vooral waren veroorzaakt door een hooger Zuiderzeepeil. De toestand op de rivier was dien dag dus niet stationnair: er liep een stuwgolf stroomopwaarts. Dientengevolge leenen zich de peilen van 8 Januari minder goed voor vergelijking met toekomstige toestanden. De te verwachten veranderingen zijn daarom afgeleid uit de gegevens van 7 Januari 1926.

Voor het benedenste deel van den IJssel waren de hoogste voorgekomen waterstanden echter niet het gevolg van een grooten rivierafvoer, maar van stormvloed in de open Zuiderzee. Deze zijn eveneens in fig. 2 opgenomen tot even beneden Katerveer (km 121.270). Het snijpunt van deze lijn met de verhanglijn van 8 Januari 1926 ligt tusschen km 130 en 131 op een hoogte van N.A.P. + 317 cm. Op eenigen afstand beneden dit punt is na de afsluiting door het wegvallen van de zeer hoge buitenstanden in elk geval het maximum-peil lager dan met open Zuiderzee. Erboven wordt dit peil bepaald door de afvoercapaciteit van de benedenrivier.

d. Afvoer van vaste stoffen.

Zoals hiervoor is meegedeeld, is in den beneden-IJssel en het Keteldiep de stroomsnelheid sterk verschillend bij kleine en bij groote afvoeren. Het gevolg van deze omstandigheid is, dat het materiaaltransport langs den bodem sterk varieert met den afvoer. Waar echter bij een bepaalden afvoer de waterstand niet steeds dezelfde is, maar met den IJsselmeerstand op en neer kan gaan, wordt het bodemtransport niet eenduidig bepaald door den afvoer. Door den Studiedienst der Bovenrivieren zijn in 1935, 1936 en 1937 waarnemingen gedaan, waarbij de grootte van het transport en de samenstelling van het bodemmateriaal in het gebied van het model werden bepaald. De waarnemingen vonden plaats bij afvoeren vanden ongesplitsten IJssel van 200 tot 750 m³ per sec, dus beneden Kampen van 130 tot 500 m³ per sec. De gemiddelde korrelgrootte van het verplaatste zand bewoog zich tusschen 350 en 450 μ .

Een zeer gering transport werd gemeten bij een afvoer van 180 m³ per sec beneden Kampen en een waterstand van omstreeks N.A.P. bij den Ketelmond (N.A.P. + 20 cm bij Kampen). Er kan dus worden geconcludeerd, dat ongeveer in deze omstandigheden het aanwezige zand in beweging begint te komen. Uit de metingen is afgeleid de in fig. 3 geteekende kromme, welke de hoeveelheid langs den bodem vervoerd zand geeft per eenheid van breedte als functie van de gemiddelde stroomsnelheid bij een diepte van 360 cm. Zoals boven is uiteengezet, kan in het bewuste gebied een transportkromme als functie van den afvoer niet goed worden samengesteld. Bij

het in verband brengen van de afzonderlijke metingen en van het extrapoleren naar grootere afvoeren is gebruik gemaakt van de zandafvoerformule van Prof. Meyer-Peter te Zürich met door den Studiedienst der Bovenrivieren gewijzigde coëfficiënten x), welke ook op den IJssel goed met de metingen overeenkomende uitkomsten levert.

4. Kort overzicht van de uitkomsten.

Om aan den laatsten van de drie oorspronkelijk gestelde, in paragraaf 1 genoemde eischen (scheepvaart, ook van Zwarte Water - Rechterdiep naar Keteldiep en omgekeerd) te kunnen voldoen, is het noodig door de landtong tusschen deze beide IJsseltakken een verbindingskanaal te maken (paragraaf 12). Een gunstige situatie voor dit verbindingskanaal is toestand 41 (fig. 12, 46 en 47). Het heeft een dubbel-eivormige gedaante. Beide bekkens grenzen aan de rivier met een 100 m wijden mond. In deze bekkens treden neeren op, die den rivierstroom geleiden. Om het vormen van banken in de monden te voorkomen, is de rivier in de omgeving van de splitsing eenigszins omgelegd. Om dezelfde reden is de kanaalmond aan het Rechterdiep iets verder stroomafwaarts geplaatst dan die langs het Keteldiep en is het bekken aan de zijde van het Rechterdiep grooter ontworpen dan het andere. Nam men deze maatregelen niet, dan zou in het kanaal een doorgaande stroom optreden, die aanleiding zou geven tot verzanding van één der monden en die ook voor de scheepvaart ongewenscht zou zijn. Nu is de stroomverdeeling gunstig voor de scheepvaart, die door bogen met grooten straal het kanaal kan binnenkomen en verlaten.

Ook ten aanzien van den tweeden eisch is T 41 gunstig: het grootste deel van het aangevoerde zand treedt door den sterk verruimden mond het Rechterdiep binnen, zoodat slechts een klein gedeelte terecht komt in het Keteldiep, dat dien-tengevolge gemakkelijk op diepte kan worden gehouden. Alleen met het oog op den waterafvoer (eisch a) kan toestand 41 niet worden aanvaard, evenmin als elke andere toestand, waarbij de geheele afvoer moet plaats vinden door het Keteldiep en het Rechterdiep in hun oorspronkelijken loop.

Om aan dezen eisch te kunnen voldoen is het niet genoeg aan de takken alleen geringe wijzigingen aan te brengen: men zal zijn toevlucht moeten nemen tot omleggingen op groote schaal.

Dit kon niet blijken uit het onderzoek in het model, dat hiertoe een veel grooter uitgebreidheid zou hebben moeten gehad. Daarom zijn verhangberekeningen uitgevoerd. De resultaten daarvan zijn samengesteld in fig. 2, dat voor verschillende oplossingen de verhanglijn toont die zou zijn voorgekomen, indien de betreffende oplossing zou hebben verkeerd onder de omstandigheden van 7 Januari 1926.

Zooals uit deze figuur blijkt, zou bij het verwezenlijken van toestand 41 op verschillende plaatsen de hoogst bekende stand beduidend zijn overschreden.

Bij het zoeken naar middelen om ook een voldoende waterafvoerend vermogen te verkrijgen is de eisch van een goede scheepvaartverbinding tusschen Rechterdiep en Keteldiep onderling niet meer in aanmerking genomen. Zooals in paragraaf

x) ir. E. M. H. Schaank en ir. G. Slotboom. Enkele mededeelingen betreffende de zandbeweging op den Nederrijn. De Ingenieur

1 is vermeld, is voor de vaart van het Zwarte Water een andere oplossing gekozen.

Eerst (paragraaf 13) is getracht de noodige afvoercapaciteit te verkrijgen door den bovenmond van het Rechterdiep een kilometer stroomopwaarts te verleggen. Deze tak wordt daardoor nauwelijks langer, terwijl in het riviergedeelte van den nieuwen mond (km 142) tot den oorspronkelijken (km 143) niet meer de geheele afvoer optreedt, doch slechts het gedeelte dat via den Ketel het IJsselmeer bereikt. Aan eisch a kan dan ook worden voldaan, doch de oplossing kan niet worden aanvaard, omdat te veel van het aangevoerde zand bij de splitsing in de richting van den Ketel wordt gevoerd, wat in strijd is met eisch b.

Een oplossing die aan alle eischen voldoet, is gevonden door het Rechterdiep geheel te verlaten en een nieuwen mond te vormen die nog verder benedenstrooms van de rivier afsplitst en de Kattenwaard doorsnijdt (het Kattendiep, paragraaf 14).

Een berekening van den toestand in de omstandigheden van Januari 1926 had tot resultaat, dat bij Kampen de stand van N.A.P. + 240 cm niet zou zijn overschreden, wanneer de volgende maatregelen worden genomen:

1. verdieping van den IJssel tusschen km 137,5 en km 143 tot N.A.P. - 400 cm;
2. geleidelijke verbredening van de rivier van 165 m bij km 137,5 tot 185 m voor de nieuwe splitsing;
3. verlaging van de kruinen der kribben tusschen km 137,5 en km 143 tot N.A.P.;
4. verlaging van de zomerkade aan den rechteroever tusschen km 139,6 en km 141,8 tot N.A.P. + 100 cm;
5. maken van het Kattendiep met een breedte van 150 m en een bodemdpte van N.A.P. - 350 cm;
6. het verlengen van dit diep buiten den dijk met een geul van dezelfde afmetingen van ten minste 1000 m lengte.

De verhanglijn die bij den afvoer van 7 Januari 1926 zou zijn voorgekomen, is opgenomen in fig. 2. Op het punt, tot waar de hoogste waterstanden voorheen door stormvloedden werden veroorzaakt, ligt de verhanglijn nog 4 à 5 cm hoger dan die van 8 Januari 1926, die hoogerop de maximum-waterstanden geeft. Het verschil neemt stroomopwaarts nog af en men kan dus zeggen, dat de maximale waterstanden tengevolge van de uitvoering der werken nauwelijks wordt verhoogd.

Om het Kamper Eiland watervrij te maken, is het noodig, dat de bedijking daarvan tusschen km 138,5 en 140,5 wordt verhoogd.

Ten aanzien van de splitsing wordt de beste toestand verkregen met een naar het Keteldiep gebogen kop (toestand 92, fig. 15). Groote vervallen op korten afstand komen dan niet voor (fig. 60); de stroom is regelmatig verdeeld (fig. 61), zoodat de scheepvaart geen hinder zal ondervinden; een doorgaande geul van voldoende diepte en breedte ontwikkelt zich in het Keteldiep (fig. 62) en het overgrootte deel van het bodemmateriaal wordt naar het Kattendiep getransporteerd.

HOOFDSTUK II. Beschrijving van het model.

5. Grenzen.

De bovenmond van het Rechterdiep bevindt zich bij km raai 143 van den IJssel. Voor een goede weergave van de stroomingsverschijnselen nabij dat punt was het noodzakelijk van den IJssel zoowel als van het Rechterdiep een zoo groot gedeelte in het model op te nemen, dat de einden van het model daarop geen invloed meer konden uitoefenen. Onmiddellijk boven de splitsing bevindt zich in den IJssel een bocht van bijna 2 km lengte, welke wordt voorafgegaan door een vrijwel recht gedeelte van verscheidene kilometers. Het was daarom aangewezen het model stroomopwaarts uit te strekken tot in het rechte gedeelte, zoodat de stroom in de bocht zich volledig kon ontwikkelen. De bovengrens van het model werd daarom gelegd omstreeks km 140,5 (fig. 1). Benedenstrooms van de splitsing kon in eersten aanleg zonder bezwaar met een belangrijk kleinere lengte worden volstaan, omdat een storing zich slechts over een kleinen afstand stroomopwaarts doet gevoelen. De wenschelijkheid om in de beschikbare ruimte een model met zoo klein mogelijke schaalverhouding te plaatsen, leidde ertoe de benedengrens in het Keteldiep te leggen bij km 143,9, aan het begin van de Keteldammen en in het Rechterdiep op 700 m beneden den beteugelingsdam.

Na eenigen tijd bleek de benedengrens in het Rechterdiep niet op voldoende afstand gelegd te zijn, vooral doordat de onderzochte werken zich verder in het Rechterdiep uitstrekten dan waarop aanvankelijk was gerekend (par. 12). Het opruimen van een ander model gaf gelegenheid het Rechterdiep uit te breiden tot ruim 1700 m beneden de splitsing.

Voor het tweede deel van het onderzoek, waarbij de doelstelling was gewijzigd (par. 13), zoodat niet weer de bestaande splitsing maar een verder benedenwaarts gelegen punt werd bestudeerd, moest ook het Keteldiep worden verlengd. De ligging van andere modellen liet geen grootere uitbreiding toe dan tot km 144.15, wat echter juist voldoende was. Voor den nieuwen mond (Kattendiep) was een iets grootere lengte beschikbaar, n.l. tot km 144.3.

De zijdelingsche begrenzingen werden gevormd door de bandijken.

6. Schalen.

De beschikbare ruimte maakte het bij de in de vorige paragraaf beschreven begrenzingen mogelijk een schaal voor de lengteafmetingen toe te passen van 90 (fig. 4). Hiertoe was het noodig het model gespiegeld uit te voeren. Op de gelijkvormigheid van de waterbeweging heeft dit geen invloed, afgezien van de omwenteling der aarde (kracht van Coriolis). Deze is echter in het geval in kwestie te gering om een storenden invloed te kunnen hebben.

Voor het bestudeeren van de verschijnselen in bochten en splitsingen is een afwijking van de geometrische gelijkvormigheid (samentrekking, Verzerrung) bedenkelijk. De diepteschaal werd daardoor even groot genomen als de lengteschaal.

De gelijkvormigheid van de waterbeweging op zichzelf zou verlangen dat in het model even groote verhangen zouden worden toegepast als in de werkelijke rivier, waaruit dan voor de snelheidschaal zou volgen $\sqrt{90} = 9,5$ (regel van Froude). In dat geval zouden evenwel de snelheden in het model te klein zijn om het beschikbare bodemmateriaal in beweging te brengen op overeenkomstige wijze als dit met het bodemzand in de rivier gebeurt. Om een gelijkvormige bodembeweging te verkrijgen, was het dus noodig met grootere snelheden dan volgens de Froudeschaal te werken, dus met grootere verhangen dan in de rivier (verhangversterking).

Het lichtste bodemmateriaal, dat voor het model beschikbaar was, was bims met korrelgrootten van 0,5 tot 2 mm. Fig. 3 geeft van dit materiaal het transport per eenheid van breedte als functie van de gemiddelde snelheid bij een diepte van 4 cm, dus de diepte welke in het model overeenkomt met die van 360 cm van de overeenkomstige kromme voor zand (par. 3). De kromme voor bims is ontleend aan metingen in het laboratorium.

Zoals uit de figuur blijkt, ligt de grenssnelheid voor de beweging van bims bij 14 cm/sec. Bij toepassing van den regel van Froude (snelheidschaal 9,5) wordt in het model bij middelbare en kleine afvoeren die snelheid niet bereikt. Dit is te zien in de onderstaande tabel, waar voor drie verschillende afvoeren door den IJssel beneden Kampen de invloed van de verhangversterking op de bodembeweging in het model ten opzichte van die in de rivier is nagegaan. Deze afvoeren zijn 1200 m³/sec, 400 m³/sec en 225 m³/sec, dus een grooten, een matig grooten en een middelbaren afvoer, waarbij eveneens nog een redelijk bodemtransport plaats vindt.

TABEL I.

ri- vier af- voer m ³ /s	snel- heid cm/s	zand- af- voer cm ³ /min cm	zand- af- voer m ³ / etm	ver- hang- ver- ster- king	snel- heid schaal	snel- heid model cm/s	bims af- voer uit fig.	ver- hou- ding	schaal bodem- trans- port	tijd- schaal bodembe- weging
1200	165	400	8800	1	9,5	17,4	0,05	8000	720000	1,0
				1,65	7,4	22,2	0,6	670	60000	12
				2,8	5,7	29,2	7,0	57	5100	143
400	70	6,5	130	1	9,5	7,4	0	-	-	-
				4,7	4,4	16,0	0,016	400	36000	20
				8,5	3,25	21,5	0,42	15,3	1380	530
225	50	1	18	1	9,5	5,3	0	-	-	-
				7,3	3,52	14,2	0,003	320	28500	25
				16	2,4	21,0	0,32	3,1	280	2600

Bij den afvoer van 1200 m³/sec is bij toepassing van de snelheidschaal 9,5 (verhangversterking 1) de gemiddelde snelheid in het model voldoende om het bims in beweging te brengen; bij de andere afvoeren is daartoe vergrooiting van die snelheid, dus verhangversterking, noodzakelijk.

Bij het kiezen van de toe te passen verhangversterking

kunnen verschillende maatstaven worden aangelegd. Een voor de hand liggende werkwijze is als snelheidschaal te nemen de verhouding der grenssnelheden, waarbij resp. het zand in de rivier en het bims in het model in beweging komen. In dat geval zou overal waar in de rivier bodembeweging optreedt, zulks ook in de werkelijkheid het geval zijn. Dit zou leiden tot de snelheidschaal 3 en verhangversterking 10. In het model van den beneden-IJssel kon echter niet aldus te werk worden gegaan. Bij het toepassen van verhangversterking is het immers noodig daarmee bij het bouwen van het model rekening te houden en dit aan te leggen met het versterkte verhang. Zooals reeds werd uiteengezet (par. 3) is in den beneden-IJssel het verhang sterk afhankelijk van den afvoer. Het geven van een bepaalde helling aan het model brengt dus mede dat de relatieve verhangversterking, en dus ook de snelheidschaal, voor elken afvoer verschillend is. De bedoelde helling moet minstens zoo groot zijn, dat bij den kleinsten afvoer, waarbij het zandvervoer nog van belang is, in het model bimsvervoer optreedt. Als zoodanig is beschouwd de afvoer van $225 \text{ m}^3/\text{sec}$ (verhang 3 cm per km). De gemiddelde snelheid in de rivier bij de splitsing bij een IJsselmeerstand van N.A.P. - 40 cm is dan $50 \text{ cm}/\text{sec}$. De snelheid in het model moet grooter zijn dan $14 \text{ cm}/\text{sec}$, dus de snelheidschaal kleiner dan $50:14 = 3,6$ en de verhangversterking grooter dan $(9,5:3,6)^2 = 7$. De extra helling welke het model dan zou krijgen is $6 \times 3 \times 10^{-5} = 18 \times 10^{-5}$.

Dit is evenwel niet voldoende. Weliswaar zou de gemiddelde snelheid in het model juist beweging veroorzaken, maar geringe afwijkingen daarvan naar beneden doen de beweging ophouden; geringe afwijkingen naar boven daarentegen geven een relatief veel te sterke toename van het transport. Dit zou tengevolge hebben, dat zoowel de vorming van banken op plaatsen met kleinere als de vorming van geulen op plaatsen met grootere snelheid dan de gemiddelde onevenredig sterk zou zijn. Er zou dus een sterk verteekend beeld van de bodemligging ontstaan.

De eisch voor de gelijkvormigheid tusschen model en rivier in dit opzicht kan als volgt worden geformuleerd: bij gelijke relatieve afwijkingen van de snelheid ten opzichte van de gemiddelde moeten gelijke relatieve veranderingen in de intensiteit van de bodembeweging optreden. De volgens de snelheidschaal overeenkomende deelen van beide lijnen in fig. 3 moeten dan dezelfde helling bezitten. Het blijkt dat de zandkromme in het geheele van belang zijnde gebied, nl. boven $50 \text{ cm}/\text{sec}$ nagenoeg eenzelfde helling bezit, nl. 1:5. Het overeenkomende gedeelte van de bimskromme zou dus eveneens die helling moeten hebben.

Een dergelijk gedeelte is niet te vinden, omdat de bimskromme over haar geheele verloop een flauwere helling geeft. Een geheel gelijkvormige bodembeweging is daardoor in het model niet te bereiken. Zoowel verondiepingen als uitschuringen worden te sterk geprononceerd. Uit de figuur blijkt verder, dat de beweging van het bims weliswaar bij een snelheid van $14 \text{ cm}/\text{sec}$ begint, maar dat beneden $18 \text{ cm}/\text{sec}$ de verplaatsing zeer gering blijft. Pas bij een snelheid van meer dan $20 \text{ cm}/\text{sec}$ is van een eenigszins levendige beweging sprake. De met de gemiddelde snelheid van $50 \text{ cm}/\text{sec}$ in de

rivier, welke zooals boven is vermeld voorkomt bij een afvoer van $225 \text{ m}^3/\text{sec}$ en een IJsselmeerstand van N.A.P. - 40 cm, overeenkomende modelsnelheid moet daarom zoo mogelijk groter zijn dan $20 \text{ cm}/\text{sec}$. Dit is het geval bij een snelheidschaal 2,4, waarmee tevens wordt bereikt dat, althans bij dezen rivierafvoer, met de grenssnelheid voor het zand ($43 \text{ cm}/\text{sec}$) juist overeenkomt die snelheid in het model waarbij het bims een waarneembare verplaatsting gaat vertoonen. Bij de snelheidschaal 2,4 behoort een verhangversterking 16. Het verhang van 3×10^{-5} wordt dus verhoogd met 45×10^{-5} , hetgeen beteekent, dat aan het model een extra-helling van dat bedrag moet worden gegeven. Hieruit volgt tevens de waarde van de verhangversterking bij andere afvoeren. Bijv. bij $400 \text{ m}^3/\text{sec}$ (verhang in de rivier 6×10^{-5}) wordt deze $(45 + 6):6 = 8,5$, bij $1200 \text{ m}^3/\text{sec}$ $(45 + 25):25 = 2,8$.

De gevolgde werkwijze brengt mee, dat voor de bodembeweging een andere tijdschaal geldt dan voor de waterbeweging. De tijdschaal voor de waterbeweging volgt uit de betrekking:

$$\text{tijdschaal} \times \text{snelheidschaal} = \text{lengteschaal},$$

of

$$n_t = n_l : n_v.$$

Die voor de bodembeweging is bepaald door de overweging, dat in overeenkomstige tijden overeenkomstige hoeveelheden bodemmateriaal worden verplaatst, dus:

$$\text{tijdschaal} \times \text{bodemtransportschaal} = \text{inhoudschaal},$$

of

$$n_t = n_l^3 : n_z.$$

De bodemtransportschaal volgt uit de verhouding van de transporten in rivier en model. In de negende kolom van tabel 1 zijn deze gegeven voor het bodemtransport per eenheid van breedte. Om n_z te verkrijgen moet de verhouding worden vermenigvuldigd met de breedteschaal, dus n_l . Op die wijze worden dan de waarden voor n_t verkregen, welke in de laatste kolom zijn vermeld.

In de tabel zijn tevens opgenomen de snelheidschalen en verhangversterkingen voor elk der drie afvoeren, bij welke voor de bodembeweging dezelfde tijdschaal zou gelden als voor de waterbeweging (de middelste regel voor elk geval). Deze komen echter om verscheidene redenen niet voor toepassing in aanmerking. In de eerste plaats geven zij verschillende afvoeren een verschillend bedrag voor de extra-helling van het model en ten tweede liggen de modelsnelheden bij de kleinere afvoeren zoo dicht bij het begin van de beweging, dat zeer kleine variaties in snelheid reeds groote afwijkingen in de bodemligging zouden veroorzaken. Het bimsvervoer zou overigens ook te klein zijn, dan dat in een redelijke tijd duidelijke veranderingen tot stand zouden komen (te kleine tijdschaal). Zooals uit de tabel blijkt, zijn bij de gekozen extra-helling van 45×10^{-5} de tijdschalen zoo groot, dat in een proef van betrekkelijk korten tijd duidelijke aanwijzingen omtrent de bodembeweging worden verkregen. Bij de afvoeren van 1200, 400, resp. $225 \text{ m}^3/\text{sec}$ komt een uur in het model overeen met ongeveer 6 - 22, resp. 104 etmalen in de werkelijkheid.

De overeenkomstige punten van de drie besproken geval-

len zijn in figuur 3 door streeplijnen verbonden.

7. Bouw van het model.

Het model werd gebouwd binnen een gemetselde omgrenzing, welke samenviel met de bandijken (fig. 4). Binnen deze omgrenzing werden met cementmortel op een vulling van puin en zand de uiterwaarden, strekdammen en zomerkaden aangebracht, evenals de beteugelingsdam in den bovenmond van het Rechterdiep (fig. 5). De kribben werden, eveneens uit cementmortel, afzonderlijk vervaardigd en daarna op de juiste plaats en hoogte opgesteld (fig. 6). Om aan de kribben een met de werkelijkheid overeenkomende ruwheid te geven, zijn in de buitenste laag grove bimskorrels verwerkt. Op de plaatsen, waar op de uiterwaarden door rietvelden of andere beplantingen hindernissen voor de strooming voorkomen, werden in het model door middel van kopergeas overeenkomstige hindernissen aangebracht.

Het rivierbed bestond uit bims van 0,5 tot 2 mm korrelgrootte, dat met behulp van houten contramallen onder profiel werd gebracht (fig. 7).

Aan het bovenstroomsche uiteinde van het model bevond zich een inrichting voor den watertoevoer. Deze bestond uit een toevoerbak, waarin de aanvoerleiding uitmondde en waaruit het water over een horizontale meetstuw stortte in een inloopbak. Hieruit stroomde het water door een houten verdeelrek het model binnen. Over een lengte van enkele meters was het rivierbed met grind bekleed, zoodat het bims eerst begon waar de snelheid regelmatig verdeeld was. Aan het benedenstroomsche uiteinde van elk der beide takken van het model bevond zich een verstelbare cirkelvormige stuw.

8. De meetwijzen.

a. Rivieraafvoer. Verdeeling over de takken.

Het instellen en meten van den rivieraafvoer geschiedde door middel van de in de vorige paragraaf genoemde horizontale meetstuw in den toevoerbak.

De verdeeling van den afvoer tusschen Keteldiep en Rechterdiep resp. Kattendiep werd gemeten en ingesteld met behulp van de cirkelvormige afvoerstuwen.

b. Waterstand en verhang.

Het instellen van den waterstand geschiedde door dezelfde stuwen in verticalen zin te verplaatsen. Voor het meten van den waterstand en van het verhang waren vaste peilnaalden aangebracht in den IJssel bij de raaien 140,9, 141,9 en 142,9 (splitsing), in het Keteldiep bij raai 143,4 en 144, in het Rechterdiep bij raai 143,4 en 143,7 (fig. 7): Bij de verlenging van het Rechterdiep in November 1937 werden de peilnaalden in het Rechterdiep verplaatst naar de raaien 143,6 en 144,8, terwijl later nog een werd bijgeplaatst in raai 144,6. De peilnaald 143,4 in het Keteldiep werd later verplaatst naar 143,7. Na de verlegging van den mond van het Rechterdiep naar km 142 in April 1938 werd de plaats der peilnaalden hier 142,9, 143,8 en 144,05.

Nadat de nieuwe mond door de Kattenwaard in het model was aangebracht, werden de peilnaalden als volgt opgesteld:

IJssel, raaien 140,9, 141,9 en 143,35;
Keteldiep, " 144 en 144,15;
Kattendiep, " 144,2 en 144,325.

Al deze peilnaalden stonden in de as van de rivier.
Voor het meten van waterstanden op andere plaatsen werd gebruik gemaakt van een verplaatsbare peilnaald, welke door middel van een waterpastoestel werd afgelezen.

c. Stroomsnelheden.

Globale waarnemingen van den stroom vonden plaats met behulp van papiersnippers en kaliumpermanganaat. Meer nauwkeurige metingen zijn verricht met den slingerstroommeter of met behulp van verlichte drijvers, welke banen in een camera obscura werden opgenomen.

d. Bodemtransport.

De hoeveelheid in het model langs den bodem vervoerd materiaal werd bepaald door de hoeveelheid te meten, welke aan het bovenstroomsche eind van het model moest worden toegevoerd om de bodemligging in de omgeving daarvan te handhaven. Bovendien werd de hoeveelheid materiaal bepaald, welke aan het benedenstroomsche uiteinde het model verliet. In enkele gevallen is de proef doorgevoerd tot den evenwichtstoestand, waarbij de afvoer gelijk was aan den toevoer.

e. Bodemligging.

De bodemligging werd bepaald door het leggen van draden langs den rand van den telkens op een gewenschte hoogte ingestelden waterspiegel.

Bij wijze van proef werd in één geval de ligging vastgesteld door middel van stereofotogrammetrische opnamen, welke werden uitgewerkt door de afd. Geodesie van de Technische Hoogeschool.

HOOFDSTUK III. De metingen en hun uitkomsten.

9. Overzicht der onderzochte toestanden.

a. De bestaande toestand (T 0).

De bestaande toestand, zoover deze in het model was weergegeven, is afgebeeld in fig. 4.

b. Het onderzoek volgens het oorspronkelijke programma.

Dit omvatte in de eerste plaats de toestanden T 1 tot en met T 4 (fig. 8).

In T 1 was uitsluitend de beteugelingsdam verwijderd en een scherpe splitsingskop aangebracht.

In T 2 was de rivier boven de splitsing verwijderd tot een normaalbreedte van 150 tot 175 m, welke verwijding was tot stand gebracht op een zoodanige wijze, dat een gunstiger verloop van de bocht van km 141 tot 143 werd verkregen. Hiertoe waren boven km 140,5 alleen de kribben aan den rechteroever ingekort, van km 140,5 tot 141,1 (dus het eerste gedeelte van het model) was de verwijding uitsluitend aan den linkeroever gezocht. Van km 141,1 tot 141,5 waren beide normaallijnen achteruitgebracht. Van km 141,6 tot 142 waren de kribben aan den rechteroever meer dan 25 m ingekort, die aan den linkeroever overeenkomstig verlengd. Van km 142,05 tot km 142,7 was weer alleen de linkeroever achteruitgebracht, daarbeneden tot den mond van het Rechterdiep was de rechteroever afgegraven om een gunstiger instrooming in het Rechterdiep te verkrijgen. Het Rechterdiep zelf was verbreed van omstreeks 90 tot 135 m door opruiming van het ondiepe deel langs den rechteroever en verdiept tot N.A.P. - 3,50 m. De splitsingspunt was op grond van de proeven in T 1 meer in de stroomrichting gelegd.

T 3 was een eerste proef met het aanleggen van een verbindingskanaal tusschen Keteldiep en Rechterdiep. De gekozen vorm (dubbelvormig type) had de bedoeling een stelsel van twee neeren tot ontwikkeling te brengen, dat een gunstige geleiding van den stroom langs de beide kanaalmonden zou geven. De mondwijdte werd gesteld op 180 m, welke maat werd verkregen door de breedte van de voorhavens van de rivierkruising van het Amsterdam-Rijnkanaal bij Wijk-bij-Duurstede, welke na uitvoerige studies was bepaald, te verminderen in de verhouding van de lengten van de grootste te verwachten schepen. De diepte van het kanaal was N.A.P. - 3,50 m.

De splitsingskop werd weer veranderd.

In T 4 was een veel smaller verbindingskanaal aangelegd met evenwijdige oevers (type Krabbegoul). De mondwijdten bleven 180 m. Het rivierbed en de splitsingskop bleven onveranderd.

De tweede reeks toestanden was T 10^x) tot en met T 17 (fig. 9). T 10 was een proef zonder verbindingskanaal, waar bij het rivierbed van km 141,9 tot km 143,9 naar het Noorden was verlegd. De bedoeling hiervan was te vermijden, dat de mond van het verbindingskanaal aan de Ketelzijde aan den

x) De proeven zijn niet doorlopend genummerd; bij elke groep is een nieuw tiental genomen.

bollen oever zou liggen, zooals bij de toestanden 3 en 4 het geval was. De omlegging van de rivier was uitgevoerd als verticale baksteenmuur.

In T 11, T 12 en T 13 werd in deze situatie een verbindingskanaal onderzocht met mondwijden van 180 m en van het dubbeleivormige type. De ligging van de hoofden aan het Rechterdiep werd daarbij gevarieerd.

T 14 kwam overeen met T 13, waar de mondwijdte was verminderd tot 150 m (fig. 9).

T 15 wijkt van T 14 voornamelijk hierdoor af, dat de kom aan de zijde van het Rechterdiep groter was gemaakt, die aan de Ketelzijde daarentegen kleiner. Dit is gedaan om aan de neer tegen het Rechterdiep, welke sterker bleek te worden aangedreven, meer ruimte te geven. Bovendien was de benedenstromsche kop aan het Rechterdiep wat teruggetrokken.

T 16 en T 17 (fig. 9) vertoonden een verbindingskanaal van het type Krabbegoul, de eerste met een breedte van 80 m, de tweede met een kleinste breedte van ruim 50 m.

De volgende groep van toestanden was T 20, T 21 en T 22, waarbij de mondwijdte 100 m bedroeg en welke zich van elkaar onderscheiden door een verschillende ligging van den benedenstromschen kop aan het Rechterdiep (fig. 10). De rivier had de ligging behouden, die bij T 10 was aangelegd. Van het Rechterdiep was een langer gedeelte in het model weergegeven (fig. 4).

T 30 was de eerste van een nieuwe groep toestanden, waarbij de rivier minder ver was omgelegd (fig. 11). De wijdte tusschen de normaallijnen was verminderd tot 165 m, de breedte van het Rechterdiep tot 110 m, die van het Keteldiep tot 140 m. Ook in dit geval is de omlegging uitgevoerd met verticale baksteenmuren.

In T 31 was een verbindingskanaal gemaakt van het dubbeleivormige type met den grootstenkom aan het Rechterdiep en mondwijden van 90 m. De bovenstromsche kop aan het Keteldiep lag 150 m beneden den splitsingskop, die aan het Rechterdiep 180 m.

T 32 onderscheidde zich van T 31 alleen hierdoor, dat de mond aan het Rechterdiep in zijn geheel 30 m verder stroomafwaarts was gelegd.

In T 40 werden de baksteenbegrenzungen van de omgelegde rivier en het verbindingskanaal vervangen door kribben en belooopen. De verbinding kreeg den vorm van T 31, maar met mondwijden van 100 m op N.A.P..

T 41 onderscheidde zich van T 40 alleen doordat aan alle vier de hoofden van de monden een ^{sma}leidammetje was aangebracht (fig. 12).

c. Het tweede deel van het onderzoek met verlegging van den bovenmond van het Rechterdiep naar km 142.

Dit omvatte de toestanden T 51 en T 52 (fig. 13). De IJssel boven de splitsing had weer een wijdte van 165 m en was verdiept tot N.A.P. - 4,00 m, het Keteldiep was 150 m, het verlegde Rechterdiep 130 m breed. De verlegging was weer uitgevoerd met verticale muurtjes. In T 51 verwijde de ri-

vier zich boven de splitsing geleidelijk van 165 tot 285 m bij den splitsingskop.

In T 52 was door het uitbouwen van kribben op den rechteroever tot op 225m boven den splitsingskop de breedte van 165 m gehandhaafd, zoodat de splitsing veel meer abrupt tot stand kwam. De bedoeling, die hierbij voorzat, was een sterke bochtwerking te voorschijn te roepen in den stroom naar het Rechterdiep, tengevolge waarvan de bodemstroom een zoo groot mogelijk deel van het bodemtransport naar het Rechterdiep zou brengen.

d. Bovenmond van het Rechterdiep beneden km 143.

In de toestanden T 61, T 62 en T 71 (fig. 14) lag de splitsingskop op km 143,47.

In T 61 was de geul door de Kattenwaard uitgevoerd met verticale muurtjes. De breedte van het benedendeel van den IJssel was 180 m met een diepte van N.A.P. - 3,80 m, die van het Kattendiep 150 m met een diepte van N.A.P. - 3,50 m.

T 62 onderscheidde zich van T 61 alleen doordat de splitsingskop ook aan de zijde van het Kattendiep met een beloop was afgewerkt.

In T 71 was de bocht onmiddellijk boven de splitsing eenigszins flauwer aangelegd.

In de volgende toestanden was de splitsing nog verder benedenstrooms gelegd met den kop op km 143,78 (fig. 15).

In T 81 was de rechter rivieroever en het Kattendiep uitgevoerd met baksteenmuurtjes.

T 90 had dezelfde situatie, maar de muurtjes waren vervangen door ruw gemaakte beloop.

In T 91 was de splitsingskop gebogen naar de zijde van het Keteldiep, met het doel een betere geleiding van den stroom te verkrijgen.

In T 92 was de splitsingskop nog verder afgebogen, waardoor de invaartwijdte van het Keteldiep was teruggebracht tot 130 m op N.A.P.

10. De verrichte metingen en berekeningen.

Een overzicht van alle verrichte metingen is gegeven in de volgende tabel.

Het onderzoek gaf, behalve de proeven, aanleiding tot verscheidene berekeningen. Deze betroffen in de eerste plaats de te verwachten verhanglijn bij den grootsten rivierafvoer. op grond van de in paragraaf 3 vermelde gegevens. Een dergelijke berekening werd uitgevoerd voor de toestanden 10, 51 en 62, dus met de splitsing op de oude plaats, bij km 142 en bij km 143,5 (par. 9).

In het eerste geval werd een IJsselaafvoer genomen van 2400 m³/sec (Keteldiep 1200 m³/sec, Rechterdiep 1200 m³/sec), in het tweede van 2250 m³/sec (Keteldiep 900 m³/sec, Rechterdiep 1350 m³/sec) en in het laatste van 2135 m³/sec (Keteldiep 645 m³/sec, Kattendiep 1490 m³/sec). Zooda in paragraaf 3 is beschreven, heeft de aanname van den afvoer op de berekende verhanglijn geen invloed.

De bij de berekeningen, welke werden uitgevoerd in overleg met den Studiedienst der Bovenrivieren, gevolgde werkwijze en de verkregen resultaten zijn aan den opdrachtgever meegedeeld in brieven van 10 October 1937, 22 April

toestand	afvoer Q m ³ /sec	afvoer Rechter- diep (Katten- diep) m ³ /sec	verhang- verster- king	peil km 142,9 om t.o.v. N.A.P.	verhang		snelheid meting meetwijze	water- stan- den	bodem trans- port Q _z m ³ /etm	bodem- ligging	opmerkingen
					model	werke- lijk cm per km					
0	400 400 385	80 80 77	9 9 9	* 31 + 27 + 12	55 55 55	6 6 6	- sl.str. sl.str.	- - fig.16	180 - -	- - fig.18	
1	385	130	9	+ 12	56	6,2	-	-	-	fig.19	
2	570	230	8	- 6	74	9,2	-	fig.20	-	fig.21	2/3 Q _z door Rechterdiep
3	575	230	8	+ 1	66	8,2	globaal	-	-	fig.22	
4	575	230	8	-	-	-	globaal	-	-	fig.23	
10	575	230	8	- 2	54	6,8	-	fig.24	-	fig.25	verhanglijn berekend (fig. 2) 2/3 Q _z door Rechterdiep.
11	575	230	8	-	-	-	globaal	-	-	-	
12	575	230	8	-	-	-	globaal	-	-	-	
13	575	230	8	-	-	-	globaal	-	-	-	
14	575	230	8	- 1	58	7,2	globaal	-	160+60	fig.27	
15	575 575 575	230 200 195	8 8 8	+ 3 + 8 + 9	55 55 55	7 7 7	globaal globaal globaal	- - -	150+60 175+0 80+45	fig.29 fig.31 fig.33	
16	575	230	8	-	-	-	globaal	-	-	-	
17	575 575 575 575	245 230 210 230	8 8 8 8	- - 2 - - 2	- 62 - 55	- 7,8 - 7	globaal globaal globaal globaal	- - - -	- - - -	- - - fig.35	
20	580	230	8	- 2	64	8	globaal	-	-	-	
21	580	225	8	+ 2	66	8,2	globaal	-	-	-	
22	580 580 580 580	230 230 255 200	8 8 8 8	+ 4 + 2 + 4 + 2	62 - - -	7,8 - - -	globaal globaal globaal globaal	- - - -	- - - -	- - - fig.39	
30	580	230	8	+ 1	66	8,2	-	fig.42	-	-	
31	580	230	8	- 4	64	8	globaal _x	-	-	-	x na ontstaan van de bank
	580 580 580 580 580	230 225 245 230 230	8 8 8 8 8	+ 4 + 14 + 6 + 14 + 2 ^x	57 60 58 - -	7 7,5 7,2 - -	globaal globaal globaal - -	- - - - -	- - - - -	fig.44 - - - fig.45	x vervolgproef
32	580	245	8	+ 12	-	-	globaal	-	-	-	
40	580	230	8	+ 5	62	7,8	globaal	-	-	-	
41	580	235	8	+ 3	63	8	globaal	-	-	fig.47	
51	2250	1200	2,6	+120	78	30	sl.str.	-	-	-	verhanglijn berekend
52	2250 2250	1300 -	2,6 -	+156 ^x -	47 -	18 -	- drijvers	fig.48 fig.50	- -	fig.49 fig.51	x vervolgproef
61	2135	1550	2,6	+ 94	-	-	globaal	-	-	fig.52	
62	1280	-	2,25	-	80	35	globaal	fig.53	-	-	berekening van verhanglijn en zandtransport
71	2135	-	-	-	-	-	globaal	-	-	fig.54	
81	1280 1280	820 960	2,25 2,25	0 0	- -	- -	globaal globaal	- -	- -	globaal fig.55	
90	1000 2135	750 1550	3,7 2,34	0 + 80 ^{xx}	- -	- -	drijvers -	- fig.58	3600 -	fig.57 -	xx verder peil- len bij km 143,35
91	2135	1550	2,34	+ 80	-	-	-	fig.59	-	-	
92	2135 1000 500 1000 1000	1600 750 - - -	2,34 2,34 4 4 4 1	+ 80 + 80 0 - - -	- - - - -	- - - - -	- drijvers drijvers globaal globaal	fig.60 - - - -	- 3000 - - -	- fig.62 - - -	
	500 960	- -	4 4	- -	- -	- -	globaal drijvers	- -	- -	- -	verschillende interpretaties van zelfde proef
	960 xxx	- 30	4 -	- -	- -	- -	- drijvers	- -	- -	- -	vaste bodem op -400 zandbodem xxx 40l/sec opmeting langs fotogrammetri- schen weg en na egaliseren met geogali- seerde bodem
	xxx	30	-	+ 44	-	-	drijvers	-	-	-	

en 20 Juli 1938.

Figuur 2 toont de verkregen verhanglijnen.

11. De bestaande toestand (T O).

Alvorens met de eigenlijke proeven werd begonnen, is in de bestaande situatie nagegaan of het model den toestand in de werkelijkheid goed weergaf. Op drie punten kon dit worden gedaan: ten aanzien van de snelheidsverdeling in de omgeving van de splitsing, van de mate van verplaatsing van het bodemmateriaal en van de bodemligging.

Bij de eerste proeven in het model ontstond bij den splitsingskop een diepe uitschuring. Er kon niet worden aangenomen, dat deze in werkelijkheid aanwezig was, omdat de linker beteugelingsdam dan niet zou zijn te handhaven. Er waren twee mogelijkheden: of het model gaf een geheel verkeerden stroomingstoestand, of het beloop en de bodem ter plaatse waren in werkelijkheid verdedigd.

Bij een nader onderzoek bleek het laatste het geval te zijn; bovendien kwam vast te staan, dat de vorm van den linker beteugelingsdam in het model niet geheel juist was.

Nadat het model geheel in overeenstemming was gebracht met de werkelijkheid, werden snelheidsmetingen met den slingerstroommeter verricht bij een afvoer van $385 \text{ m}^3/\text{sec}$ met verhangversterking 9 en een waterstand die overeenkwam met een IJsselmeerstand bij den Ketelmond van N.A.P. - 10 cm.

De resultaten van deze metingen zijn neergelegd in fig. 16. Ter vergelijking wordt beschikt over enkele metingen, verricht met een Ott-molentje op 27 April en 19 Mei 1937 in het Rechterdiep, even beneden den beteugelingsdam. Op 27 April werd bij een afvoer van $500 \text{ m}^3/\text{sec}$ door den IJssel beneden Kampen in het punt 1 (fig. 16) een gemiddelde snelheid in de verticaal gemeten van $95 \text{ cm}/\text{sec}$. Uit de modelmeting wordt voor hetzelfde punt een gemiddelde van $70 \text{ cm}/\text{sec}$ gevonden bij $385 \text{ m}^3/\text{sec}$. Dit komt bij $500 \text{ m}^3/\text{sec}$ overeen met $90 \text{ cm}/\text{sec}$.

Op 19 Mei was de afvoer beneden Kampen $280 \text{ m}^3/\text{sec}$. In het punt 1 was toen de gemiddelde snelheid $55 \text{ cm}/\text{sec}$, in het punt 2 werd gemeten $43 \text{ cm}/\text{sec}$. Het model geeft bij $385 \text{ m}^3/\text{sec}$ respectievelijk 70 en $65 \text{ cm}/\text{sec}$, of omgerekend op $280 \text{ m}^3/\text{sec}$ 50 en $48 \text{ cm}/\text{sec}$. De met elkaar vergelijkbare snelheden zijn dus uit de meting in de werkelijke rivier respectievelijk 95 , 55 en $43 \text{ cm}/\text{sec}$, in het model respectievelijk 90 , 50 en $48 \text{ cm}/\text{sec}$. De overeenstemming is bevredigend.

De vergelijking van de verplaatsing van het bodemmateriaal levert een controle op de juiste wijze van bepalen van de bodemtransport-schaal bij een bepaalde verhangversterking.

In het model in den bestaanden toestand werd een bimsvervoer gemeten van $7,5$ liter per uur bij een afvoer van $400 \text{ m}^3/\text{sec}$ en verhangversterking 9. Op de in paragraaf 6 aangegeven wijze wordt in dat geval voor de schaal van het bodemtransport gevonden 1000 en voor de bijbehorende tijdschaal 730 (1 uur komt overeen met een maand). Met deze schalen vindt men voor het werkelijke transport, dat met dat in het model overeenkomt, $180 \text{ m}^3/\text{etmaal}$ (tabel I).

Volgens een meting van den Studiedienst der Bovenrivie-

ren bedroeg het zandvervoer in de gegeven omstandigheden 130 m³/etmaal.

Met het oog op de onzekerheid in de bepaling der transporten, zoowel in de werkelijke rivier als in het model, is dit bevredigend. Het geeft een aanwijzing dat met de toegepaste schalen de veranderingen in bodemligging in de goede orde van grootte worden aangegeven, maar dat van de modeluitkomsten geen nauwkeurige gegevens over te verwachten hoeveelheden baggerwerk e.d. mogen worden verwacht.

Wat de bodemligging betreft, kan een vergelijking worden gemaakt tusschen de peilingen van April 1934 (fig. 17) en het resultaat van het stroomen met een afvoer van 385 m³/sec en verhangversterking 9 in het model (fig. 18)^x. De beide figuren toonen een volledige overeenkomst in de hoofdtrekken. In de details zijn enkele afwijkingen waar te nemen, welke deels verklaard kunnen worden uit het in paragraaf 6 besproken verschil in gedrag tusschen zand en bims, waardoor in het algemeen in het model een te sterk bodemrelief ontstaat, deels ook kunnen liggen aan het feit, dat het bed in werkelijkheid gevormd is door een opeenvolging van verschillende afvoeren en waterstanden, in het model echter slechts bij een enkelen stroomingstoestand gedurende een beperkten tijd. In het bijzonder het stroombeeld bij de beteugelingsdammen kan met den waterstand min of meer variëren. In het begin van het Rechterdiep zijn dan ook de afwijkingen het grootst. De diepe kolk onmiddellijk binnen de beteugelingsdammen ligt in het model meer uit het midden dan in de rivier, de erbij aansluitende geul is minder sterk ontwikkeld. Voor het overige is in het model in het Rechterdiep een stelsel van geulen en ruggen ontstaan, dat overeenkomt met dat in werkelijkheid, maar in zijn geheel naar den linkeroever is verschoven. Het relief is in het model sterker.

In den IJssel zelf is de overeenkomst zeer goed. De geul langs den rechteroever boven de splitsing heeft nauwkeurig dezelfde ligging en zelfs dezelfde diepte. Ook het verdere verloop van de geul tot den splitsingskop en het oversteken naar den anderen oever is geheel natuurgetrouw. De geul is over het geheel genomen dieper dan in de werkelijkheid, de banken aan weerszijden zijn wat hooger; beide verschijnselen welke uit de bovengenoemde bronnen van verschil gereedelijk te verklaren zijn.

De conclusie mag luiden, dat in alle opzichten: stroombeeld, bodemtransport en resulterende diepteligging, het model den toestand in de werkelijkheid zeer bevredigend weergeeft.

In toestand 0 is verder nog het verloop van den waterpiegel in de nabijheid van de splitsing vastgelegd bij een afvoer van 385 m³/sec in verhangversterking 9 (fig. 16). Duidelijk is het dwarsverhang boven de splitsing, dat in verband staat met de sterke kromming van de naar het Rechterdiep voerende stroomlijnen. Het verval in het Rechterdiep beneden de beteugelingsdammen is bijzonder groot.

12. Het onderzoek volgens het oorspronkelijke programma. Splitsing op de oude plaats.

Dit stadium van het onderzoek omvat de toestanden T 1

^x Hierbij dient te worden opgemerkt, dat fig. 18, evenals alle andere fotos, de situatie gespiegeld weergeeft. Met de teekeningen is dit niet het geval.

tot en met T 41 (paragraaf 9). Hoewel bij verscheidene van deze toestanden de rivier gedeeltelijk verwijd en verlegd werd, bleef de ligging van de splitsing in hoofdzaak onveranderd: de kop bevond zich steeds bij km 143.

T 1 In toestand 1 was uitsluitend de beteugelingsdam opgevoerd. De inrichting van het model maakte het niet mogelijk een verandering in de verdeeling van den afvoer rechtstreeks te constateeren: hiertoe zouden zoowel Rechterdiep als Keteldiep over hun volle lengte in het model moeten zijn uitgevoerd tot in het IJsselmeer. Aan de hand van de in het model gemeten verhangen kon echter worden berekend hoe die verdeeling zich ten opzichte van den bestaanden toestand zou wijzigen. Hieruit werd afgeleid, dat de verhouding Keteldiep:Rechterdiep = 4:1 veranderde in 2:1.

In verband hiermede ging ook een belangrijk deel van het bodemtransport naar het Rechterdiep. De toevoer van bodemmateriaal naar het Keteldiep was echter nog vrij groot, tengevolge waarvan in den ingang een bank ontstond (fig. 19).

T 2 In verband met de verwijding van het Rechterdiep werd de verdeeling van den afvoer weer gewijzigd en wel zoo, dat de verhouding Keteldiep:Rechterdiep 1,5:1 werd. De resultaten van de metingen bij een afvoer van $570 \text{ m}^3/\text{sec}$ zijn weergegeven in de fig. 20 en 21. De stroomgeleiding en tengevolge daarvan de bodemligging was belangrijk gunstiger dan in T 1. Omstreeks twee derde van het getransporteerde bodemmateriaal werd in het Rechterdiep gebracht. Het overige vormde wel een bank in den ingang van het Keteldiep, maar er bleef aan de noordzijde een doorgaande diepe geul over (fig. 21).

In het Rechterdiep was de vaargeul smal.

T 3 In toestand 3 werd een scheepvaartverbinding aangebracht tusschen Ketel- en Rechterdiep, waarvan de monden aan de hand van de waterstanden van fig. 20 zoo waren ontworpen, dat geen sterke doorstroming zou zijn te verwachten. Inderdaad bleek de doorstroming gering te zijn. In elk der eivormige helften ontwikkelde zich een neer, waarbij aan de zijde van het Rechterdiep de grootste stroomsnelheden optraden. De neer aan de zijde van het Keteldiep werd hoofdzakelijk gevoed door den stroom in de onderste lagen, tengevolge waarvan bodemmateriaal in den mond werd gebracht. Door de kleinere snelheid van het water in de neer kwam dit materiaal tot rust en vormde een bank (fig. 22). Ook in den mond aan de zijde van het Rechterdiep kwam eenig materiaal tot afzetting.

T 4 Het verbindingskanaal van toestand 4 (type Krabbegeul) maakte den toestand niet beter. De stroomingstoestand was minder stabiel dan in T 3 en evenals in dien toestand werden banken gevormd in de monden (fig. 23). Ook voor de scheepvaart is een verbinding van dezen vorm minder gunstig.

Naar aanleiding van de verkregen uitkomsten werd de rivier omgelegd. De bedoeling was te vermijden, dat het verbindingskanaal aan de zijde van het Keteldiep aan den bollen oever uitmondt. In een dergelijke mond vormt zich gemakkelijk een hooge bank.

T 10 In toestand 10 was nog geen verbindingskanaal aangebracht. De uitkomsten zijn weergegeven in fig. 24 en 25.

De stroomingstoestand en daarmee ook de bodemligging in de omgeving van de splitsing was behoorlijk regelmatig. Weer werd omstreeks twee derde van het materiaaltransport door het Rechterdiep afgevoerd.

T 11, 12,
13

Op grond van de waterstanden van fig. 24 werd in toestand 11 weer een verbindingskanaal van het dubbel-eivormige type ingebouwd. De mondwijdte was 180 m. Er bleek eenige doorstroming op te treden van het Rechterdiep naar het Keteldiep. Om dit op te heffen werd in toestand 12 en 13 de mond aan het Rechterdiep eenigszins gewijzigd zonder dat een bevredigend resultaat werd bereikt. In toestand 14 werden daarom beide monden vernauwd tot 150 m. Ook in dit geval was nog doorstroming van Rechter- naar Keteldiep waar te nemen. De bodemstroom werd echter goed langs de mondingen geleid, zoodat nagenoeg geen bodemmateriaal in het verbindingskanaal werd gevoerd (fig. 26 en 27).

T 14

De hoeveelheid bims die door het Rechterdiep werd afgevoerd, kwam overeen met $160 \text{ m}^3/\text{etmaal}$, die door het Keteldiep met $60 \text{ m}^3/\text{etmaal}$.

T 15

Bij alle proeven met het dubbel-eivormige verbindingskanaal bleek de neer aan de zijde van het Rechterdiep het sterkst te zijn. In toestand 15 werd daarom de kom aan die zijde groter gemaakt.

Het hiermee beoogde resultaat werd niet geheel bereikt: een geringe doorstroming bleef bestaan, echter zonder dat bodemmateriaal in het verbindingskanaal werd gevoerd (fig. 28 en 29). Door het Rechterdiep werd een hoeveelheid bims afgevoerd, welke overeenkwam met $150 \text{ m}^3/\text{etmaal}$, door het Keteldiep $60 \text{ m}^3/\text{etmaal}$. Terwille van de regelmatigheid van den stroomtoestand in het Rechterdiep bleek het gewenscht te zijn bij den bovenstroomschen kop aan het Rechterdiep een kleine bezinking aan te brengen teneinde te voorkomen dat ter plaatse de bodem te diep uitschuurde.

In dezen toestand werd de verdeling van den afvoer over Keteldiep en Rechterdiep gevarieerd om na te gaan in hoeverre de stroomingstoestand daardoor werd beïnvloed.

Bij de afvoerverhouding 1,2 (i.p.v. 1,5) werd door het Rechterdiep een hoeveelheid bims overeenkomend met $175 \text{ m}^3/\text{etmaal}$ getransporteerd, door het Keteldiep niets. Een geregelde doorstroming viel niet waar te nemen (fig. 30). Wel vond in de monding aan de zijde van het Keteldiep binnendringen van den bodemstroom plaats, tengevolge waarvan daar een bank werd gevormd (fig. 31). Het hoogste punt lag na een stroomduur van ruim 20 etmalen op N.A.P. - 200 cm.

Bij een afvoerverhouding van 1,95 nam het bimstransport door het Rechterdiep sterk af. Dit kwam overeen met $80 \text{ m}^3/\text{etmaal}$, dat door het Keteldiep met $45 \text{ m}^3/\text{etmaal}$. Er was een zwakke doorstroming van Rechter- naar Keteldiep (fig. 32); de neer aan de zijde van het Keteldiep draaide zeer langzaam. Verondiepingen van de mondingen vond^{en} in veel mindere mate plaats: het hoogste punt in de monding aan het Keteldiep was N.A.P. - 290 cm (fig. 33).

Uit deze vergelijking blijkt, dat een verzwakking van den stroom door het Rechterdiep belangrijk minder ongunstige

gevolgen heeft dan die van den stroom door het Keteldiep.

- T 16 Ook met deze uitvoering van de splitsing werd een verbindingskanaal van het Krabbegeultype onderzocht. Met een kanaalbreedte van 80 m (T 16) was er doorstroming van Rechter- naar Keteldiep en sterke bankvorming in de monding aan het Keteldiep. Na vernauwing van het verbindingskanaal in
- T 17 het midden tot 50 m (T 17, fig. 9) was dit eveneens het geval (fig. 34 en 35).

De resultaten van T 4, 16 en 17 doen zien, dat de monden van een verbindingskanaal met evenwijdige oevers (type Krabbegeul) verzanden. Ook voor de scheepvaart is een verbinding van dien vorm minder gunstig. Daarom is teruggekeerd tot het dubbel-eivormige type, maar thans met mondwijden van 100 m. In T 20 was, evenals in T 15, de kom aan de zijde van het Rechterdiep groter gemaakt. Het verkregen stroombeeld toont fig. 36. Er was geen doorstroming, maar aan de zijde van het Rechterdiep vormde zich een tegenneer.

T 20

Om deze op te heffen, werd de benedenstroomsche kop aan het Rechterdiep vooruit gebracht (T 21). Er was eenige doorstroming van Rechter- naar Keteldiep. Tijdens de proef werd deze strooming sterker, doordat in het Rechterdiep een bank ontstond (fig. 37).

Het stroombeeld werd nog verbeterd door de bodemverdediging, welke sinds T 15 in het stroomopwaartsche deel van de monding aan het Rechterdiep steeds was aangebracht, langs de geheele monding en nog verder stroomafwaarts uit te breiden.

T 22 ^{Verdere} ~~Hierin werd~~ ^{werd} verbetering verkregen door de benedenstroomsche kop aan het Rechterdiep een ligging te geven tusschen die van T 20 en T 21 in (T 22, fig. 10). Er was nog een geringe doorstroming van Rechter- naar Keteldiep (fig. 38), maar geen hinderlijke bankvorming (fig. 39).

Ook in dezen toestand werd de verdeling van den afvoer gevarieerd. Bij de verhouding 1,25 week het stroombeeld een weinig ^{van het normale} af (fig. 40); bij de verhouding 1,9 wat meer (fig. 41). Er was in het laatste geval een vrij sterke doorstroming van Rechterdiep naar Keteldiep.

Van kleine veranderingen in de afvoerverhouding behoeft op grond hiervan geen ongunstigen invloed te worden verwacht.

Toestand 22 geeft een uit waterloopkundig en nautisch oogpunt aanvaardbaren toestand, maar zou wegens de vereischte rivieromlegging vrij kostbaar zijn. Om die reden is geprobeerd een even gunstig resultaat te verkrijgen met een minder sterke omlegging, waarbij toch werd vermeden, dat de monding aan het Keteldiep aan een bollen oever kwam te liggen. Dit leidde tot toestand 30, welke evenals T 10 eerst zonder verbindingskanaal werd onderzocht. Het verloop van den waterspiegel is weergegeven in fig. 42. Het komt in sterke mate overeen met dat in T 10 (fig. 24), al duiden de lijnen van gelijke hoogte in het Keteldiep op iets meer bochtwerking. Verondersteld mocht worden, dat ook in deze situatie een bevredigend verbindingskanaal was te ontwerpen.

T 30

T 31 Een eerste poging daartoe was toestand 31 met een verbindingskanaal van het dubbel-eivormige type met mondingen van 90 m breedte en wederom de grootste kom aan het Rechterdiep.

Met de afvoerverhouding 1,5 ontstond een bevredigend stroombeeld met een zeer zwakke doorstroming van Rechter naar Keteldiep. Op den duur werd tengevolge van de vorming van banken in het Rechterdiep en toeneming van het verhang in dien tak de doorstroming wat sterker (fig. 43). Tevens wijzigde zich daardoor de afvoerverhouding eenigermate (tot 1,59). Ook de bodemligging ontwikkelde zich bevredigend (fig. 44).

Bij een latere proef was er eerst een geringe doorstroming van Ketel- naar Rechterdiep, welke onder invloed van de bankvorming geleidelijk afnam en in een doorstroming in tegengestelde richting werd gewijzigd. Van het bodemtransport ging drie vijfde door het Rechterdiep, twee vijfde door het Keteldiep. Op den duur ontstond in het Keteldiep ter hoogte van den benedenstroomschen kop eenige verondieping (fig. 45).

T 32 Een verlegging in stroomafwaartsche richting van de monding aan het Rechterdiep (T 32) bracht geen belangrijk verschil teweeg.

Een nader onderzoek van de situatie van T 31 werd gewenscht geacht, waarbij de uitvoering van het model beter in overeenstemming was met de werkelijkheid. De rivieromlegging en het verbindingskanaal, welke tot dusverre van baksteenmuurtjes waren gemaakt, werden daartoe voorzien van belopen. De wijfde der mondingen op N.A.P. werd op 100 m gebracht. Dit was toestand 40 (fig. 12).

T 40 Op grond van een voorloopige proef werd de bovenstroomsche kop aan het Rechterdiep enigszins verlegd. Er was daarna nog eenige doorstroming van Rechter naar Keteldiep. Het bleek dat met de ronde koppen, die uit de belopen waren gevormd, de stroomgeleiding wat minder goed was dan bij de scherp uitgevoerde van T 31. Om hierin verbetering te brengen, werden de koppen voorzien van verticale dammetjes boven de belopen, welke de doorvaartwijdten niet verminderden. (T 41, fig. 12).

T 41 Zooals uit fig. 46 blijkt, werd in dezen toestand weer een zeer goede stroomgeleiding verkregen. In het verbindingskanaal waren twee stabiele neeren aanwezig, welke aanvankelijk een zeer zwakke doorstroming van Rechter naar Keteldiep vertoonden. Na verloop van eenigen tijd hield het doorstromen geheel op. Door beide mondingen ging een deel van den bodestroom in het verbindingskanaal, maar in het model waren deze stroomen zoo zwak, dat geen bodemmateriaal werd meegevoerd. De bodemligging na eenigen tijd stroomen toont fig. 47. Hierin is te zien, dat zich in het model zoowel in het Ketel- als in het Rechterdiep een vaargeul vormde, welke een behoorlijke gelegenheid tot in- en uitvaren van het verbindingskanaal biedt.

Met toestand 41 was aan den in paragraaf 1 genoemden eisch c - gunstigen vorm voor de scheepvaart - voldaan. Ook ten aanzien van eisch b - grootste deel van het bodemtrans-

port naar het Rechterdiep - was deze oplossing bevredigend. De omlegging van de rivier, welke de situatie noodig maakt, is niet bijzonder omvangrijk, zoodat de aanlegkosten aanvaardbaar waren. Op grond van de modelproeven was er geen reden om een sterke verondieping, hetzij van bodemmateriaal, hetzij door den neerslag van zwevende stoffen, te verwachten. Een bodemvoorziening was alleen noodzakelijk langs en over eenigen afstand aan weerszijden van de monding van het verbindingskanaal aan het Rechterdiep.

Ten aanzien van den eisch a - voldoende waterafvoer - was de toestand echter minder gunstig. In fig. 2 is aangegeven de verhanglijn welke in den nieuwen toestand (afgesloten Ganzendiep, verwijding van het zomerbed van Kampen tot de splitsing met 25 m en verruimd Rechterdiep) zou zijn te verwachten in de omstandigheden van 7-8 Januari 1926.

Zooals in paragraaf 3 is meegedeeld, is daarbij gerekend op een IJsselmeerstand van N.A.P. + 35 cm en een IJsselafvoer van 2400 m³ per sec.

Voor de ruwheidscoëfficiënt in de formule van Manning wordt uit de verhanglijn van 7 Januari 1926 voor het betreffende riviervak gevonden:

$$k = 206 \text{ cm}^{1/3} \text{ sec}^{-1}$$

Daarbij is ondersteld dat het Ganzendiep een derde deel van het water afvoerde en dat het debiet beneden Kampen dus 1600 m³ is geweest. Deze waarde van k is bij de berekening van de nieuwe verhanglijn eveneens voor alle takken gebruikt.

Een overeenkomstige berekening werd uitgevoerd, uitgaande van een afvoer op 7 Januari van 2100 m³/sec, waarvan 1400 m³/sec door den IJssel beneden Kampen. Voor de waarde van k in IJssel en Keteldiep moest dan worden genomen 178, in het Rechterdiep 161. Dat in het Rechterdiep een grootere weerstand moet worden aangenomen, is zeer aannemelijk. Met deze waarden van afvoer en k wordt dezelfde verhanglijn gevonden als met de bovengenoemde.

Zooals uit fig. 2 blijkt, voeren de berekeningen tot rivierstanden, welke ook stroomopwaarts van km 130 zooveel hoger zouden zijn dan in Januari 1926 werden waargenomen, dat een ontoelaatbare toestand zou ontstaan (bv. een waterstand van N.A.P. + 255 cm te Kampen, km 137,51). Men zal T 41 dus moeten combineren met middelen om de afvoercapaciteit van de rivier beneden Kampen te vergroten.

Er deed zich echter een omstandigheid voor, welke het geheele onderzoek een andere wending gaf. Dit was het feit dat, om buiten het modelonderzoek liggende redenen, voor de scheepvaart van het Zwarte Water een andere uitweg werd gekozen. De eisch c werd daarmee beperkt tot de scheepvaart door IJssel en Keteldiep. De eisch b bleef gelden, maar de meeste nadruk werd gelegd op het verschaffen van een voldoende ruime afvoercapaciteit (eisch a).

13. Het tweede stadium van het onderzoek.

Verlegging van de splitsing stroomopwaarts.

Tengevolge van de nieuwe doelstelling is in het tweede stadium de aandacht ^{voortnamelijk} gericht op het verwerken van de groote afvoeren. Hierbij werd als criterium gesteld, dat de waterstand aan de peilschaal te Kampen bij den afvoer van Januari

1926 niet zou mogen stijgen boven N.A.P. + 240 cm, dat is 13 cm hooger dan het maximum dat toen is voorgekomen.

Uit de in de vorige paragraaf beschreven berekening bleek, dat in de tot dusverre onderzochte situatie aan dezen eisch niet zonder het toepassen van verdere middelen kon worden voldaan. De vraag deed zich voor, wat met een verplaatsing van de splitsing kan worden bereikt. Met een verschuiving stroomopwaarts kon tweeerlei voordeel worden verkregen: de ongedeelde rivier werd verkort en aan de eerste bocht in het Rechterdiep kon een gunstiger tracé worden gegeven.

T 51

In dit stadium was de splitsingskop gelegd bij km 142,08. Eer met de proeven werd begonnen is ook voor deze oplossing een berekening van het verhang bij grooten afvoer verricht. De toestand op 7 Januari 1926 werd hieraan wederom ten grondslag gelegd. Voor den afvoer werd ditmaal genomen $2250 \text{ m}^3/\text{sec}$, waarvan $1500 \text{ m}^3/\text{sec}$ door den IJssel beneden Kampen is gestroomd. Uit den waargenomen toestand werd thans voor den IJssel tusschen Kampen en het Rechterdiep en voor het Keteldiep gevonden een waarde voor k uit de formule van Manning van $210 \text{ cm}^{1/3} \text{ sec}^{-1}$. Met deze waarde voor alle takken werd gevonden, dat bij de voorgestelde ligging van de splitsing aan den eisch van een stand bij Kampen van N.A.P. + 240 cm kon worden voldaan op de volgende wijze:

verbredening van het zomerbed beneden Kampen van 150 m tot 165 m;

verdieping van het zomerbed tot gemiddeld N.A.P. - 400 cm;

aanleg van den doorsteek naar het Rechterdiep en uitbaggering van het verdere gedeelte van dien tak tot een breedte van 130 m bij een diepte van N.A.P. - 350 cm.

De verhanglijn, welke dan wordt verkregen, is geteekend in fig. 2.

De k -waarde van $210 \text{ cm}^{1/3} \text{ sec}^{-1}$ was gevonden bij aanname van een verdeeling van den afvoer over Ketel- en Rechterdiep in den ouden toestand van 2 tot 1, d.w.z. $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$ door het Ketel- en $500 \text{ m}^3/\text{sec}$ door het Rechterdiep. In den nieuwen toestand wordt dan door de twee armen afgevoerd resp. 1050 en $1200 \text{ m}^3/\text{sec}$.

De bovenbedoelde aanname voor den afvoer van het Rechterdiep is eenigszins aan den pessimistischen kant. Wanneer bij de berekening voor den afvoer van 7 Januari 1926 van het Rechterdiep wat ruimere profielen worden gekozen, dan vindt men een grooteren afvoer door het Rechterdiep en een kleinere waarde van k voor IJssel en Keteldiep. De verhanglijn voor den nieuwen toestand krijgt dan een ongunstiger verloop, omdat het vergrooten van het afvoerend vermogen van het Rechterdiep relatief geringer is.

Om na te gaan in hoeverre dit het geval kon zijn, werd eveneens een berekening uitgevoerd met de aanname dat op 7 Januari 1926 de afvoerverdeeling Keteldiep- Rechterdiep $1\frac{1}{2}$ tot 1 bedroeg (dus resp. 900 en $600 \text{ m}^3/\text{sec}$). Dit is zeer waarschijnlijk te gunstig voor het Rechterdiep (dus pessimistisch voor de nieuwe situatie). Voor de waarde van k in IJssel en Keteldiep werd dan gevonden $197 \text{ cm}^{1/3} \text{ sec}^{-1}$, voor die in het Rechterdiep $173 \text{ cm}^{1/3} \text{ sec}^{-1}$.

In dit geval kon na afsluiting van het Ganzendiep en

verplaatsing van de splitsing stroomopwaarts de gewenschte stand te Kampen slechts worden bereikt door de breedte van het Rechterdiep te vergrooten tot 145 m inplaats van 130 m en door bovendien de kade van de noordelijke uiterwaard tusschen km 139,6 en 141,8 af te graven tot magiveldhoogte. Het nieuwe Rechterdiep zou dan verwerken 1350 m³/sec, het Keteldiep 900 m³/sec, dus evenveel als in 1926.

T 51 De nieuwe situatie van de splitsing werd in het model onderzocht als toestand 51.

Hierin werd gestroomd met een afvoer van 2250 m³/sec, waarvan 1050 door het Keteldiep ging. Fig. 48 toont de verdeeling van de snelheid in het bovineind van elk der beide takken op 2 m onder den waterspiegel en het verloop van den waterspiegel in de nabijheid van de splitsing. Uit de lijnen van gelijke hoogte blijkt, dat een dwarsverhang aanwezig is naar het Keteldiep toe, tengevolge waarvan de stroom langs den bodem en daarmee de beweging van het bodemmateriaal naar dezen tak toe waren gericht. Dit was de oorzaak van een sterke bankvorming in den bovenmond van het Keteldiep, in weerwil van het feit, dat door de grootere stroomsnelheid in het Rechterdiep de afvoer van bodemmateriaal door dien tak het dubbele was van dien door het Keteldiep. De vaargeul in het Keteldiep was niet dieper dan N.A.P. - 2 m (fig. 49). Tengevolge hiervan wijzigde zich in het model ook de verdeeling van den afvoer over de beide takken. Nadat in de bodemligging een evenwichtstoestand was ontstaan, ging door het Keteldiep nog slechts 950 m³/sec; de overige 1300 door het Rechterdiep.

Hoewel dus deze oplossing een aanvaardbare verhanglijn bij zeer grooten afvoer opleverde, was de toestand bij de splitsing van dien aard, dat de scheepvaartgeul door het Keteldiep slechts ten koste van aanzienlijk baggerwerk zou zijn ten onderhouden.

T 52 In toestand 52 is nog geprobeerd de situatie bij de splitsing te verbeteren door het verlengen van de kribben aan den rechteroever onmiddellijk stroomopwaarts van de splitsing (fig. 13). De bedoeling hiervan was het opwekken van een dwarsverhang van links naar rechts, waardoor het in T 51 gevonden dwarsverhang van rechts naar links met de daarmee gepaard gaande verplaatsing van bodemmateriaal en bankvorming in het Keteldiep zou worden tegengewerkt. In dezen toestand werd eveneens gestroomd met een afvoer van 2250 m³/sec met dezelfde verdeeling als in T 51. Fig. 50 toont den stroomingstoestand en de hoogteligging van den waterspiegel bij deze proef, fig. 51 de bodemligging.

Inderdaad is eenige verbetering bereikt. In den bovenmond van het Keteldiep was een doorgaande diepte van bijna 3 m aanwezig. De vaargeul was echter zeer nauw, zoodat het resultaat nog niet bevredigend kon worden genoemd.

De kans op een verdere verbetering van de situatie met de splitsing bovenstrooms van de bestaande is niet groot. De kromming van de rivier is hier immers naar links en het afgevoerde zand zal daarom neiging hebben, in den linker tak terecht te komen. Het op diepte houden van dezen tak, die den

vaarweg vormt, zal dus moeilijk zijn. De situatie van T 52 is wel de gunstigste die men zich kan denken.

In overleg met den opdrachtgever werd daarom van verdere proeven in deze richting afgezien.

14. Het derde stadium van het onderzoek. Afsluiting van het Rech-
terdiep en het maken van een doorsnijding door de Katten-
waard (Kattendiep).

Een volgende poging om het verwerken van den afvoer van Januari 1926 met een waterstand aan de peilschaal te Kampen niet boven N.A.P. + 240 cm te bereiken zonder aanzanding van het Keteldiep, bestond in het volledig afsluiten van het Rechterdiep en het maken van een doorsnijding door de Kattenwaard. De bovenmond van de doorsnijding, welke met den naam Kattendiep wordt aangeduid, werd gedacht bij km 143, dus onmiddellijk benedenstrooms van den bovenmond van het Rechterdiep en bovenstrooms van den wortel van den Noorder Keteldam.

Ook in dit geval is allereerst een berekening verricht, om na te gaan welke afmetingen aan den IJssel beneden Kampen en aan het Kattendiep zouden moeten worden gegeven, teneinde de gewenschte verhanglijn bij den afvoer van Januari 1926 te verkrijgen.

Op grond van een in Mei 1938 ontvangen nota van den Hoofdingenieur van den Studiedienst der Bovenrivieren werd die afvoer, in afwijking van de vroegere berekeningen, gesteld op $2135 \text{ m}^3/\text{sec}$. Eveneens op grond van die nota werd de berekening niet zooals de vroegere uitgevoerd met de formule van Manning, maar met die van de Chézv waarin voor de ruwheidsfactor op den IJssel werd aangenomen:

$$c = 51 \text{ m}^{\frac{1}{2}} \text{ per sec}$$

en in Ketel- en Rechterdiep:

$$c = 55 \text{ m}^{\frac{1}{2}} \text{ per sec.}$$

De laatste waarde is ook voor het Kattendiep aangehouden.

Het resultaat van de berekening was, dat aan den eisch wordt voldaan, indien de volgende maatregelen worden genomen:

1. verdieping van den IJssel tusschen km 137,5 (Kampen) en km 143 tot N.A.P. - 400 cm;
2. geleidelijke verbredening van de rivier van 165 m bij km 137,5 tot 185 m vóór de nieuwe splitsing;
3. verlaging van de kruinen der kribben tusschen km 137,5 en km 143 tot N.A.P.;
4. verlaging van de zomerkade aan den rechteroever tusschen km 139,6 en km 141,8 tot N.A.P. + 100 cm;
5. maken van het Kattendiep met een breedte van 150 m en een bodemdiepte van N.A.P. - 350 cm;
6. het verlengen van dit diep buiten den dijk met een geul van dezelfde afmetingen van ten minste 1000 m lengte.

Om het Kampereiland watervrij te houden, is een verhooging van den rechterbanddijk tusschen km 138,5 en 140,5 noodzakelijk.

Volgens de berekening voert in dit geval het Keteldiep af $645 \text{ m}^3/\text{sec}$, het Kattendiep $1490 \text{ m}^3/\text{sec}$. De verkregen verhanglijn is uitgezet in figuur 2.

T 61 Het verdere onderzoek had tot doel een vorm van de splitsing te vinden, waarbij het overgrote deel van het bodemtransport in het Kattendiep wordt geleid. Hiervoor was het noodig het model naar de stroomafwaartsche zijde uit te breiden (par. 5, fig. 4). De eerst onderzochte vorm in de nieuwe ligging was toestand 61 (fig. 14). De splitsingskop lag hier bij km 143,47.

De rechter rivieroever en het Kattendiep waren in een voorloopige uitvoering van gemetselde muurtjes gemaakt.

De bodemligging na een langdurige proef met een afvoer van $2135 \text{ m}^3/\text{sec}$ en verhangversterking 2,6 is vastgelegd in fig. 52. De verkregen bodemligging is in het geheel niet bevredigend. In de binnenzijde van de bocht bovenstrooms van de splitsing (km 142 - 143) vindt een sterke verondieping plaats.

Hetzelfde is het geval in de binnenbocht van de splitsing zelf. Tengevolge van het groeien van deze bank werd tijdens de proef geleidelijk de afvoerverdeeling gewijzigd in dien zin, dat meer water door het Keteldiep werd afgevoerd. Wellicht was dit een van de redenen voor het steeds verder aangroeien van de bank aan den linkeroever in stroomafwaartsche richting. Zooals in fig. 52 is te zien, veroorzaakte een uitlooper daarvan in het Keteldiep een verondieping.

T 62 De loodrechte begrenzing van den splitsingskop aan de zijde van het Kattendiep gaf aanleiding tot een plaatselijke uitschuring. Er werd daarom allereerst toe overgegaan de splitsingskop geheel met belopen uit te voeren (toestand 62, fig. 14). In dezen vorm werd een meting verricht van het verloop van den waterstand nabij de splitsing (fig. 53) bij een afvoer van $1280 \text{ m}^3/\text{sec}$ met een verhangversterking van 2,25.

Deze afvoer werd gekozen, omdat hierbij nog een levendige bodembeweging optreedt, terwijl de behandeling van het model belangrijk eenvoudiger was dan bij een proef den grootsten afvoer. Het waargenomen waterspiegelverloop is goed in overeenstemming met de bodemligging van fig. 52; in het bijzonder is van belang het groote verhang in het bovendeele van het Kattendiep, waarvan het afstromen van meer water door het Keteldiep het gevolg is.

T 71 In toestand 71 (fig. 14) was de bocht bovenstrooms van de splitsing gewijzigd in overeenstemming met een voorstel van den Hoofdingenieur van den Studiedienst der Bovenrivieren, waarbij de bedoeling voorzat de verondieping aan den linkeroever tusschen km 142 en 143 te beperken. Het resultaat van een langdurige proef met een afvoer van $2135 \text{ m}^3/\text{sec}$ geeft fig. 54. Zooals hieruit blijkt, is de toestand inderdaad verbeterd. De bank strekt zich veel minder ver stroomafwaarts uit. Er was echter langs den linkeroever nog een vrij aanzienlijk bodemtransport, waarvan een deel in het Keteldiep werd gevoerd, zoodat daar wederom verondieping ontstond.

1001.780

T 81 In toestand 81 (fig. 15) was de splitsing nog verder stroomafwaarts verlegd, zoodat de kop zich bevond bij km 143,78. De rechter rivieroever en de oevers van het Kattendiep werden eerst als baksteenmuurtjes uitgevoerd. Bij de eerste proeven ontstond een diepe ontgronding langs den splitsingskop aan de zijde van het Kattendiep. Omdat dit in de werkelijkheid niet zou kunnen worden toegelaten en de verdieping de stroomingstoestand zou kunnen beïnvloeden, welke dan af zou wijken van die in de werkelijkheid, werd in het model de bodem met grind verdedigd op een diepte van N.A.P. - 6 m. Vervolgens werd gedurende langen tijd gestroomd met een afvoer van $1280 \text{ m}^3/\text{sec}$. Het resultaat hiervan toont fig. 55. Er is een belangrijke verbetering bereikt ten opzichte van den vorigen toestand (fig. 54). Het overgrootste deel van het bodemtransport gaat naar het Kattendiep. Slechts een klein gedeelte werd in het Keteldiep gebracht, waar het een drempel vormde van geringe hoogte.

De stroomingstoestand was echter nog niet geheel bevredigend. Aan den rechteroever vormde zich vlak bovenstrooms van de splitsing een ondiepte, waardoor de stroom geleidelijk meer naar den splitsingskop toe en zelfs in het Keteldiep werd gedrongen.

T 90 In toestand 90 werd bij dezelfde situatie de geheele rivier met belooopen uitgevoerd.

Fig. 56 toont het resultaat van een stroommeting met verlichte drijvers bij een afvoer van $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$ met verhangversterking van 3,7. Evenals in T 81 trekt een zeer sterke stroom langs den splitsingskop in het Kattendiep, waartegen een bodemverdediging noodig is. De bodemligging na een langdurige proef (fig. 57) geeft een overeenkomstige formatie te zien als in T 81 (fig. 55), maar minder sterk geprononceerd. De bank aan den rechteroever is minder hoog en van kleineren omvang dan in den vorigen toestand. Ook thans werd een drempeltje gevormd in het Keteldiep. Het bodemtransport kwam overeen met $3600 \text{ m}^3/\text{etmaal}$ in de werkelijkheid.

Bij een afvoer van $2135 \text{ m}^3/\text{sec}$ met verhangversterking 3 werd het verloop van den waterspiegel bepaald (fig. 58). Er blijkt, zooals reeds uit het stroombeeld duidelijk was, een sterk dwarsverhang te bestaan van links naar rechts. Dit is eensdeels het gevolg van de situatie, waarin de stroom naar het Kattendiep een bocht moet maken, andersdeels vloeit het voort uit den grooten watertoever naar het Kattendiep. Met de aanwezigheid van dit dwarsverhang hangt samen dat de bodemstroom - en daarmee het bodemtransport - in sterke mate het Kattendiep intrekt. Er blijkt echter uit fig. 58 tevens dat de splitsingskop ongunstig is georiënteerd ten aanzien van de richting van het verhang, waardoor plaatselijk een groote stroomsnelheid ontstaat, de waterspiegel in het Kattendiep diep afzinkt en een diepe ontgronding ontstaat. In het Keteldiep daarentegen loopt in verband met de afnemende stroomsnelheid de waterspiegel op.

Om de bezwaren op te heffen is de splitsingskop van een gebogen verlengstuk voorzien, dat ongeveer loodrecht staat op de niveaulijnen van fig. 58 in het Kattendiep (toestand 91, fig. 15). Tegen de plaatselijke vernauwing van den bovenmond van het Keteldiep welke daardoor ontstond, was

T 91

geen bezwaar. Evenals in den vorigen toestand werd het verloop van den waterspiegel gemeten (fig. 59). De verbetering was niet groot: ook thans vormt de splitsingskop nog een sterke hindernis voor den naar het Kattendiep gerichtten stroom, waarvan de diepe afzinking van den waterspiegel getuigt.

T 92 Aan den verlengden splitsingskop werd vervolgens een sterkere kromming gegeven, welke zich iets minder ver in het Keteldiep uitstrekt (toestand 92, fig. 15). Ook in dezen toestand werd, met een afvoer van $2135 \text{ m}^3/\text{sec}$ en verhangversterking 2,34, het verloop van den waterspiegel vastgelegd. Uit fig. 60 blijkt dat een groote verbetering is verkregen. Het verloop der lijnen van gelijke hoogte is regelmatiger geworden, er komen minder groote plaatselijke verhangen voor en in het Kattendiep langs den splitsingskop is nog slechts een matige afzinking aanwezig. Het verval bij de instrooming in het Kattendiep is teruggebracht van omstreeks 30 cm tot 15 cm, op welke waarde bij de verhangberekening was gerekend.

Fig. 61 geeft het resultaat van een meting van de oppervlakt snelheden met verlichte drijvers bij een afvoer van $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$. De stroom langs den splitsingskop naar het Kattendiep, hoewel minder snel dan in T 90, zou nog ontgronding veroorzaken, zoodat op die plaats een bodemverdediging moet worden aangebracht.

Na een langdurige proef met dezen afvoer werd de bodemligging bepaald (fig. 62). Vooral bij vergelijking van deze figuur met figuur 57 komt de invloed van het ombuigen van den splitsingskop duidelijk tot uiting. De door den naar het Kattendiep trekkenden stroom gevormde geul sluit in T 92 vloeiend aan bij den gebogen kop. Van de door het model getransporteerde hoeveelheid bodemmateriaal, overeenkomend met $3000 \text{ m}^3/\text{etmaal}$, kwam bij deze proef nagenoeg niets in het Keteldiep.

Een afzonderlijke proef is nog uitgevoerd, toen de mogelijkheid werd geopperd, dat zich in den rivierbodem, bv. omstreeks N.A.P. - 4 m een laag klei of andere bodemsoort zou bevinden, welke niet of slechts in geringe mate aan uitschuring onderhevig is. In dat geval zou de in fig. 62 zichtbare geul zich niet of slechts zeer langzaam kunnen vormen. Het werd van belang geacht na te gaan of het uitblijven van deze geul het stroombeeld ingrijpend zou wijzigen, met name of dan meer bodemmateriaal in het Keteldiep zou kunnen raken. Om dit te doen werd in het model op N.A.P. - 4 m een vasten bodem aangebracht, waarover het bodemmateriaal kon worden voortbewogen.

De proef toonde geen verschillen in den aard van den streamingstoestand of van de bodembeweging.

Op grond van de beschreven uitkomsten kan toestand 92 worden aangemerkt als een bevredigende oplossing van de opgave een vorm van de splitsing te vinden, waarbij het overgrote deel van het bodemmateriaal door het Kattendiep wordt afgevoerd. Het bij de splitsing optredende verval (15 cm volgens fig. 60) kwam overeen met de daarvoor gestelde waarde in de berekening van de verhanglijn bij grooten afvoer.

HOOFDSTUK IV. Slotbeschouwingen.

15. Betrouwbaarheid van de resultaten.

In paragraaf 11 zijn de proeven beschreven met het model in den bestaanden toestand (T 0). Daarbij is geconstateerd dat, voor zoover de schaarsche gegevens een vergelijking mogelijk maken de verschijnselen in het model behoorlijk overeenkomen met die in de werkelijkheid. Ten aanzien van de snelheidverdeeling van den stroom in de nabijheid van den bovenmond van het Rechterdiep bestaat een bevredigende overeenstemming. De orde van grootte van de verplaatsing van bodemmateriaal is in de rivier en in het model dezelfde.

De bodem vertoont in het model meer relief dan in de rivier, een eigenschap die nagenoeg alle modellen met beweegbaren bodem hebben. Overigens is de reproductie goed en het is vooral bevredigend dat op de plaats, waar in het model de bodem te ver uitschuurde (beneden de splitsing langs den noordelijken oever van het Keteldiep), achteraf in de werkelijkheid een bezinking of bestorting is gevonden.

Op grond van deze feiten mag worden aangenomen, dat het model ook voor de nieuw-ontworpen situaties T 1 tot en met T 92 gegevens oplevert die met de werkelijkheid overeenkomen. Men mag na de uitvoering van een ontwerp wat minder hooge ruggen en wat minder diepe geulen verwachten dan het model te zien gaf, doch de algemeene verdeeling van diepe en ondiepe gedeelten zal dezelfde zijn als in het model.

In groote trekken levert het model ook gegevens over de te verwachten bodembeweging; een voorspelling ten aanzien van de hoeveelheid van het verplaatste zand en dus van eventueel te baggeren quanta, kan echter niet worden gemaakt. In de volgende paragraaf wordt nog op dit punt teruggekomen.

Om de onzekerheid in de te verwachten bodemligging nog te verkleinen is op het eind van het onderzoek, met toestand 92, nog een proef gedaan, waarbij geen puimsteen, doch zand als bodemmateriaal is gebruikt. Bij sterk gebogen stroomlijnen is er namelijk eenige kans, dat de puimsteenkorrels niet geheel dezelfde banen volgen als zanddeeltjes. Het geringere soortelijk gewicht maakt, dat de werking van de centrifugaalkracht voor de beide materialen verschillend is.

Daar in den aanbevolen toestand 92 de stroombanen bij den splitsingskop vooral in de diepe lagen vrij sterk gekromd zijn, is het wenschelijk geoordeeld de controleproef met zand te nemen.

Het resultaat is geruststellend. Er moet met zeer groote snelheden worden gestroomd, om het betrekkelijk zware materiaal in voldoende mate in beweging te brengen. De bodemligging die toen ontstond kwam goed overeen met die na de proeven met bims.

In modellen waarbij, zooals hier, het verhang is versterkt, bestaat wat minder zekerheid omtrent de juistheid van de stroomverdeeling dan bij andere modellen, waarin de schaal van de stroomsnelheid aan den regel van Froude voldoet. Om over dit punt klaarheid te verkrijgen, zijn bij dezelfde situatie (toestand 92) en bij een gelijke hoogte van den waterspiegel twee verschillende afvoeren ingesteld. De

eene kan worden opgevat als te behooren bij een werkelijken afvoer (IJssel beneden Kampen) van 1000 m³/sec, zonder verhangversterking, de andere, die reeds op figuur 61 is aangegeven, was twee maal zoo groot en beteekent bij denzelfden afvoer in de werkelijkheid dus een verhangversterking van 2² = 4.

In beide gevallen zijn in drie belangrijke meetraaien nabij de splitsing de stroomsnelheden dicht onder de oppervlakte gemeten. De uit deze metingen omgerekende snelheden zijn in figuur 63 met elkander vergeleken.

De overeenkomst is geheel bevredigend, op grond waarvan de conclusie mag worden getrokken, dat de stroomings-toestand in het model niet of nauwelijks wordt beïnvloed door de toegepaste verhangversterking.

Dit beteekent ook, dat bij een bepaalden waterstand het stroombeeld in de werkelijkheid hetzelfde karakter heeft, onafhankelijk van de grootte van het debiet. Neemt de afvoer toe, zonder dat de waterstand stijgt, dan zal overal de stroomsnelheid in dezelfde verhouding toenemen en de stroomrichting zal niet of nauwelijks veranderen.

De uitkomsten van de verschillende uitgevoerde controleproeven versterken de hiervoor op grond van de overeenstemming in den bestaanden toestand getrokken conclusie, dat de uit de modelmetingen afgeleide resultaten voor een nieuw te maken toestand met vertrouwen kunnen worden aanvaard. Alleen ten aanzien van details zijn afwijkingen te verwachten.

16. Berekeningen over het zandtransport.

De modelproeven konden wel inlichtingen verschaffen over plaatselijke veranderingen in de bodemligging, maar niet over den gang van het zandtransport in de geheele rivier of over den invloed van het uitvoeren van werken die zich over een groote lengte uitstrekken, zooals het tijdens het modelonderzoek ontwikkelde plan. Om eenige inzicht te verkrijgen omtrent het te verwachten gedrag van het zand in het verruimde rivierbed beneden Kampen en in het Katendiep is derhalve een aantal berekeningen over het zandtransport uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de zg. Züricher formule met door den Studiedienst der Bovenrivieren gewijzigde coëfficiënten, welke ook op den Nederrijn verrichte transportmetingen goed weergeeft^x. De formule luidt:

$$\frac{q^{2/3}}{d} I = a + b \frac{g^{2/3}}{d}$$

waarin

q = waterafvoer per m breedte in kg/sec;

g = zand " " " " " "

onder water gemeten;

I = verhang;

d = gem. korrelgrootte in m;

a = 17 b = 0,085.

Voor den IJssel kan de formule worden omgewerkt tot:

^x ir. E.M.H.Schaank en ir.G.Slotboom. Enkele mededeelingen betreffende de zandbeweging op den Nederrijn. De Ingenieur 1937, no. 51.

$$G = B \left(\frac{q^{2/3}}{0,085} I - 0,06 \right)^{3/2}$$

wanneer G het totale transport en
B de bodembreedte in m voorstelt.

Ook kan worden geschreven:

$$G = B \left(0,45 \frac{q^{8/3}}{h^3} - 0,06 \right)^{3/2}$$

wanneer q in m³ per sec per m' wordt geschreven en
h de gemiddelde diepte in m voorstelt.

Allereerst is voor de bestaande rivier het transport
over een gemiddeld jaar berekend in de vakken:

Westervoort - de Steeg
Olst - Wijhe
Wijhe - Katerveer
Katerveer - Kampen
IJssel beneden Kampen
Ganzendiep
Keteldiep.

Het resultaat hiervan was het volgende:

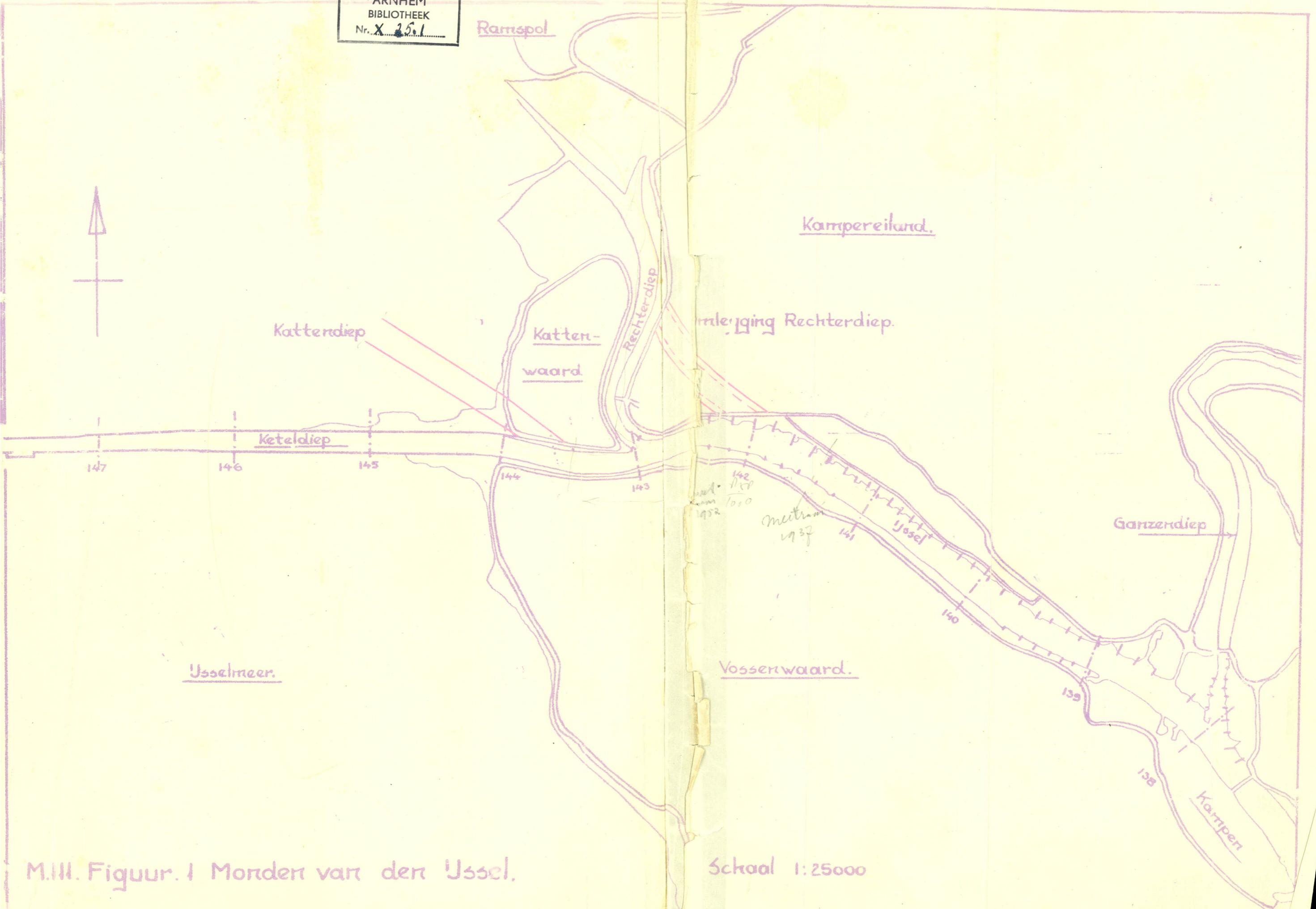
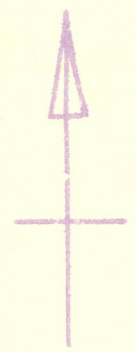
Van Westervoort tot omstreeks Olst-Wijhe wordt een hoeveelheid zand van 150.000 m³ per jaar vervoerd. Bij Kampen is het vermogen van de rivier nog slechts 16.000 m³ per jaar, zoodat tusschen Olst-Wijhe en Kampen omstreeks 130.000 m³ wordt afgezet.

Beneden Kampen kan de IJssel ongeveer 8.000 m³ verwerken, terwijl door het Ganzendiep 9 tot 10.000 m³ gaat. Door het Keteldiep wordt 4.000 m³ per jaar afgevoerd.

Gegevens voor een nauwkeurige controle van deze cijfers ontbreken. De orde van grootte van het totale transport is echter goed, terwijl boven Kampen inderdaad geregeld wordt gebaggerd en dit beneden Kampen niet noodig is. Ook met de in par. 3 vermelde waarnemingen van het zandtransport op den beneden-IJssel geeft de formule een behoorlijke overeenkomst.

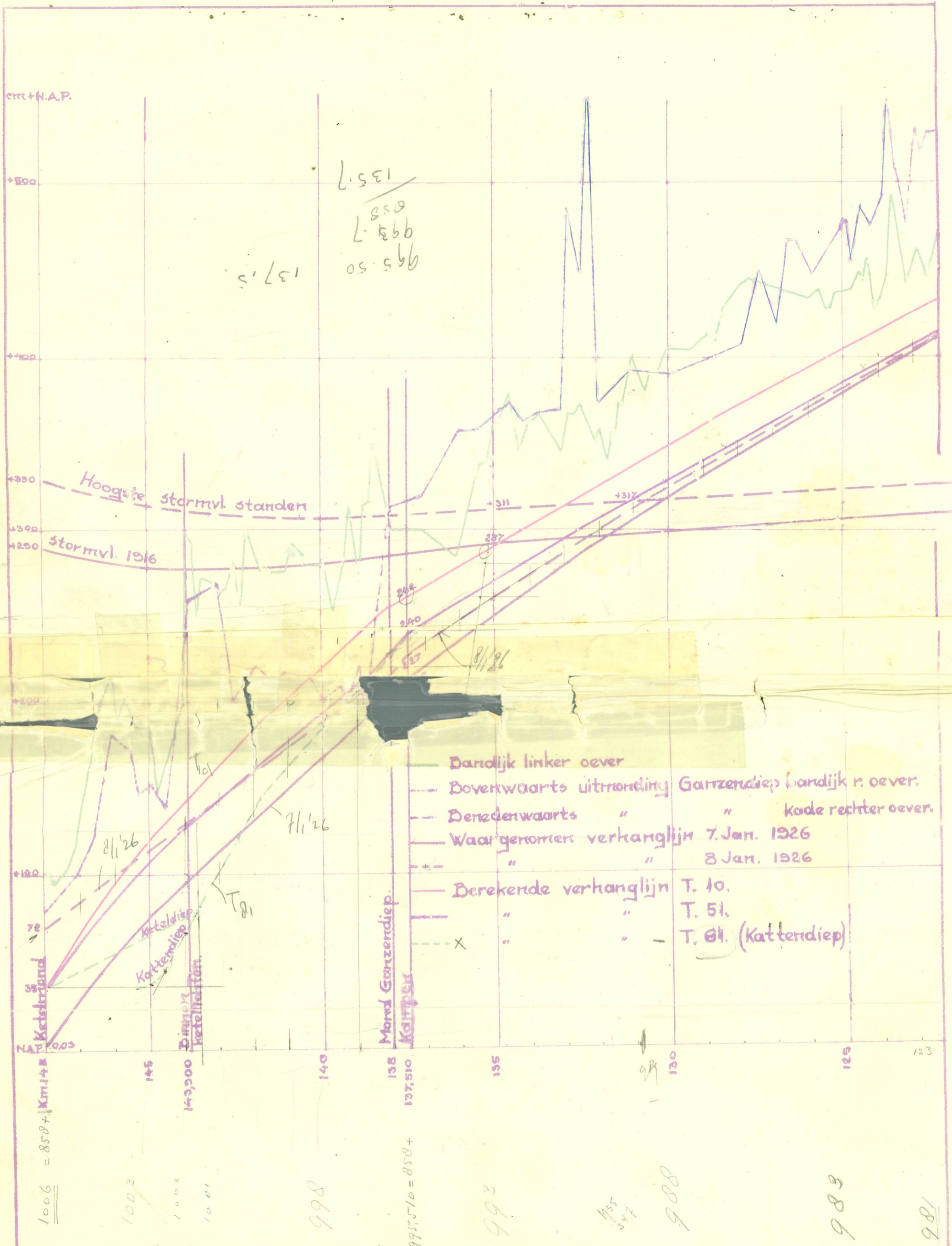
? In den nieuwen toestand met afgesloten Ganzendiep en Keteldiep, met de verruiming beneden Kampen en met het Kattendiep kan volgens de berekening de verruimde rivier beneden Kampen meer zand vervoeren dan de bovengenoemde 16.000 m³ per jaar. Er kan daar dus eerder op uitschuring dan op verondieping worden gerekend. Het Kattendiep kan echter niet meer dan de helft van het aangevoerde zand verwerken, terwijl de zandafvoer door het Keteldiep geheel vervalt. In het bovendee! van het Kattendiep moet dus een aanzanding van 5 tot 10.000 m³ per jaar worden verwacht. In de eerste jaren kan dit bedrag, door uitschuring van het rivierbed beneden Kampen, wat grooter zijn.

RIJKSWATERSTAAT
DIR. BOVENRIVIEREN
ARNHEM
BIBLIOTHEEK
Nr. X 251

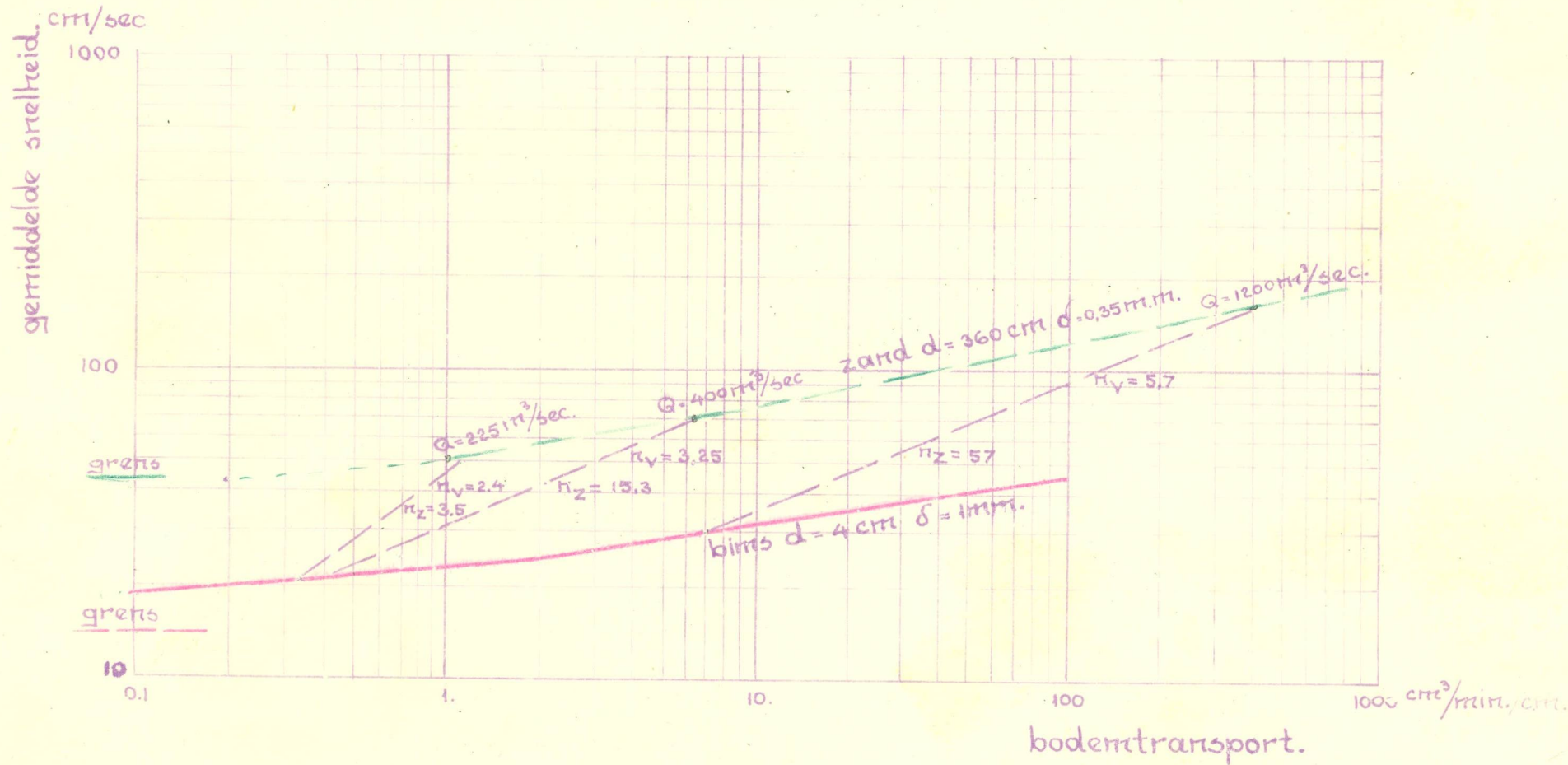


M.III. Figuur. 1 Morden van den IJssel.

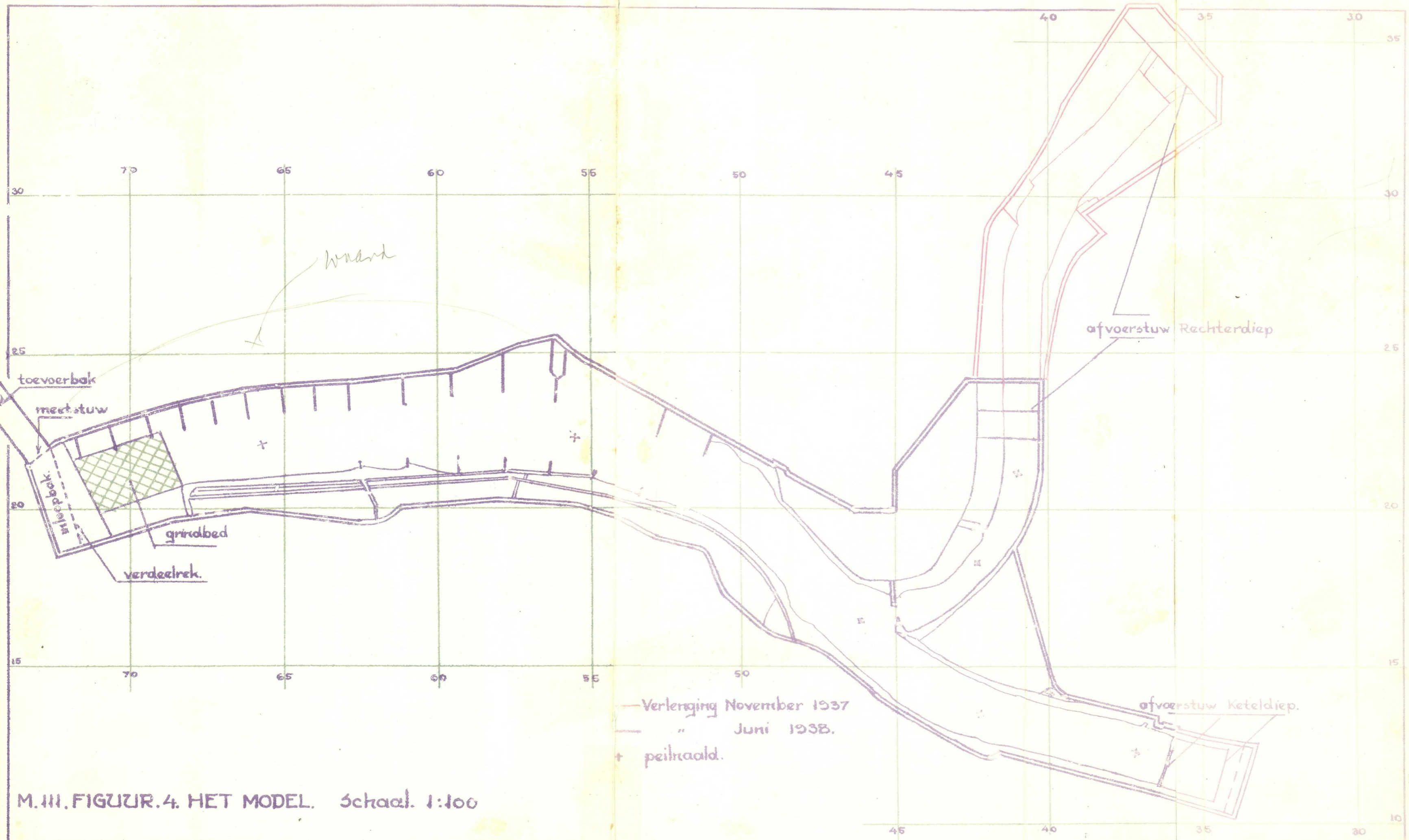
Schaal 1:25000



M.III. Figuur. 2. Waterstanden op den beneden-IJssel.



M.III. Figuur. 3. Transport van bodemmateriaal in rivier (zand).
 in model. (lims).



M.III.FIGUUR.4. HET MODEL. Schaal. 1:100

— Verlenging November 1937
 - - - " Juni 1938.
 + peilraald.



5. Bouw van het model.

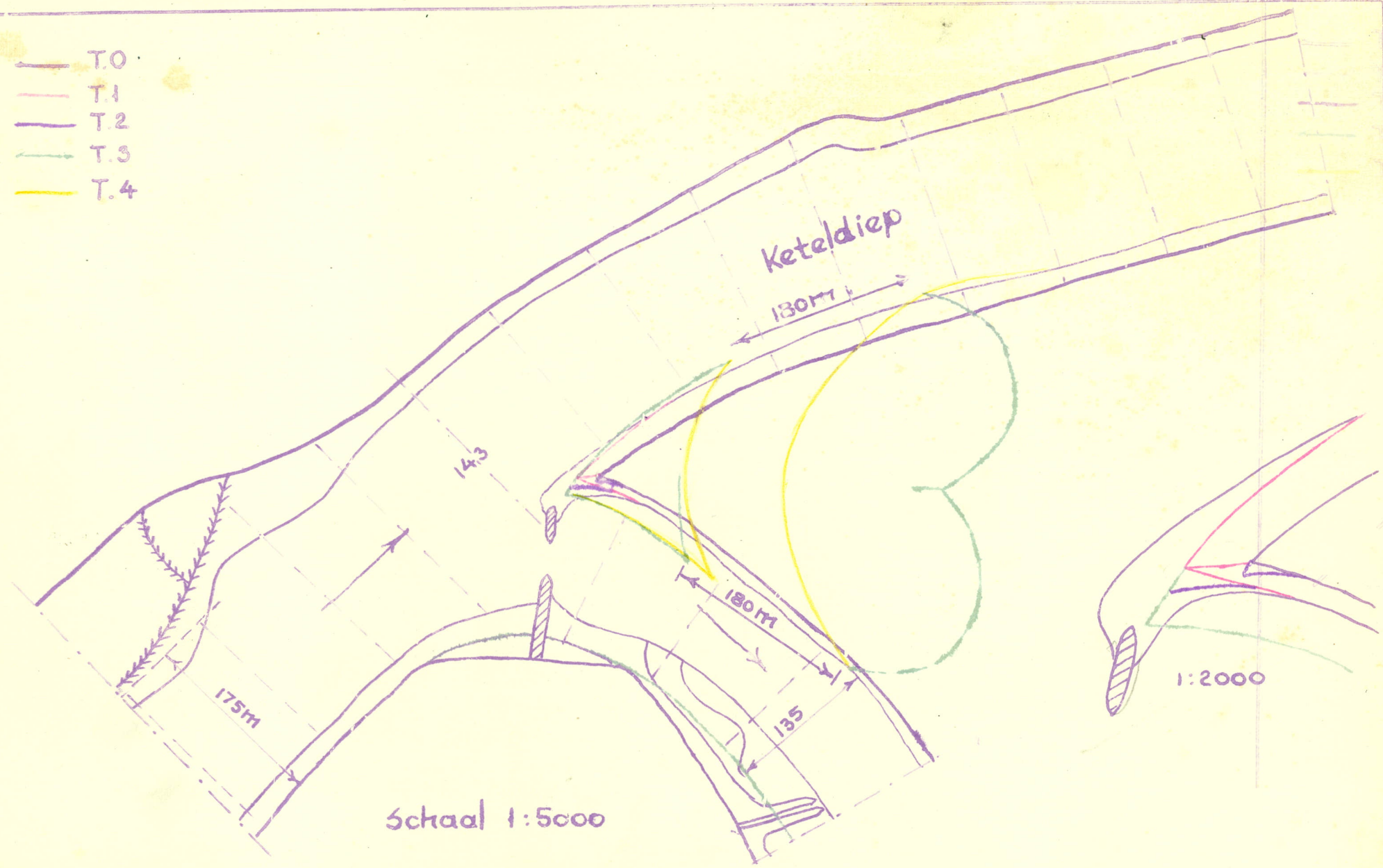


6. Opstellen van de kribben.

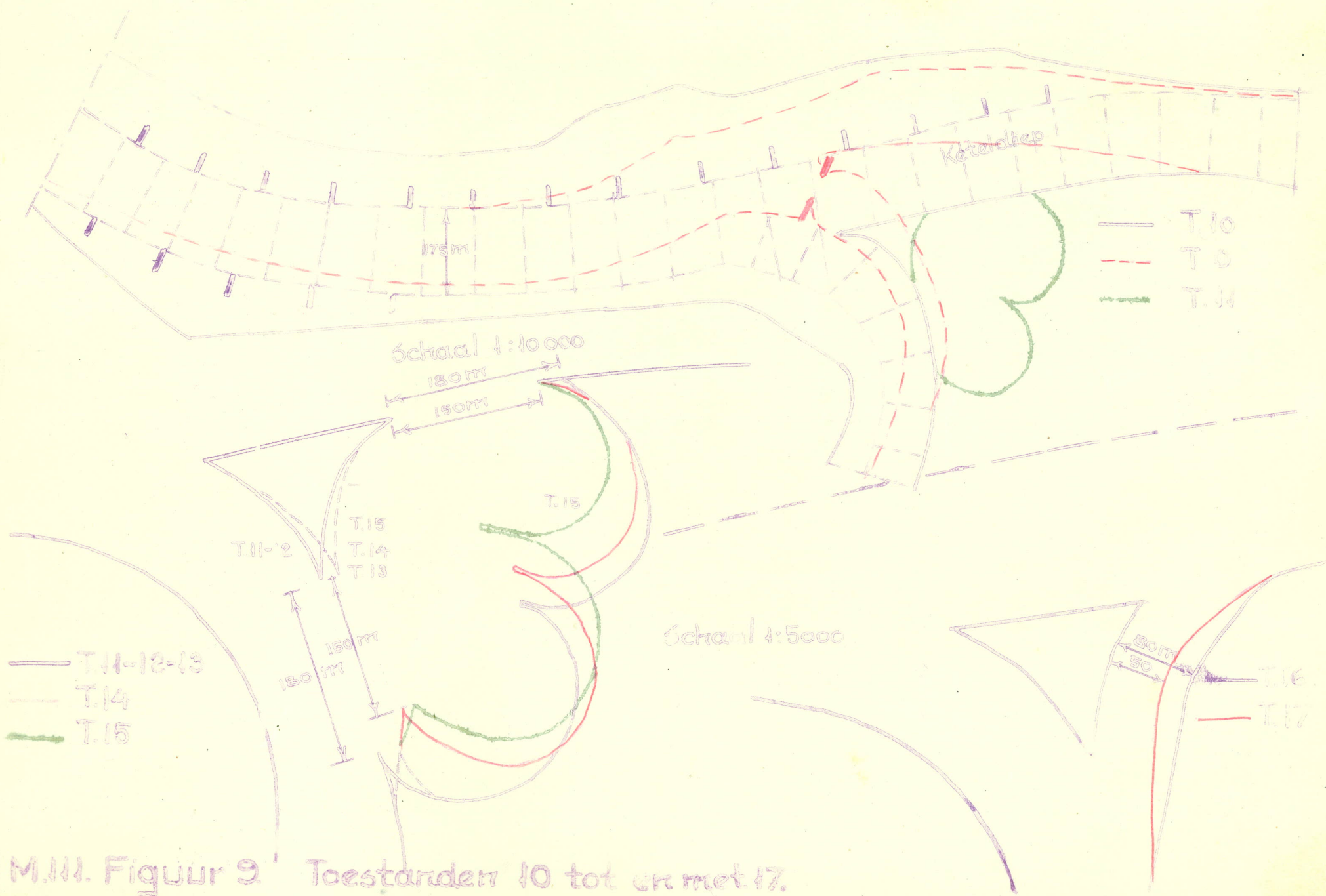


7. Onder profiel brengen van het rivierbed.

- T.0
- T.1
- T.2
- T.3
- T.4



M.III. Figuur. 8. Toestanden 0 tot en met 4.



M.H. Figuur 9 Toestanden 10 tot en met 17.

--- T.0
— T.20

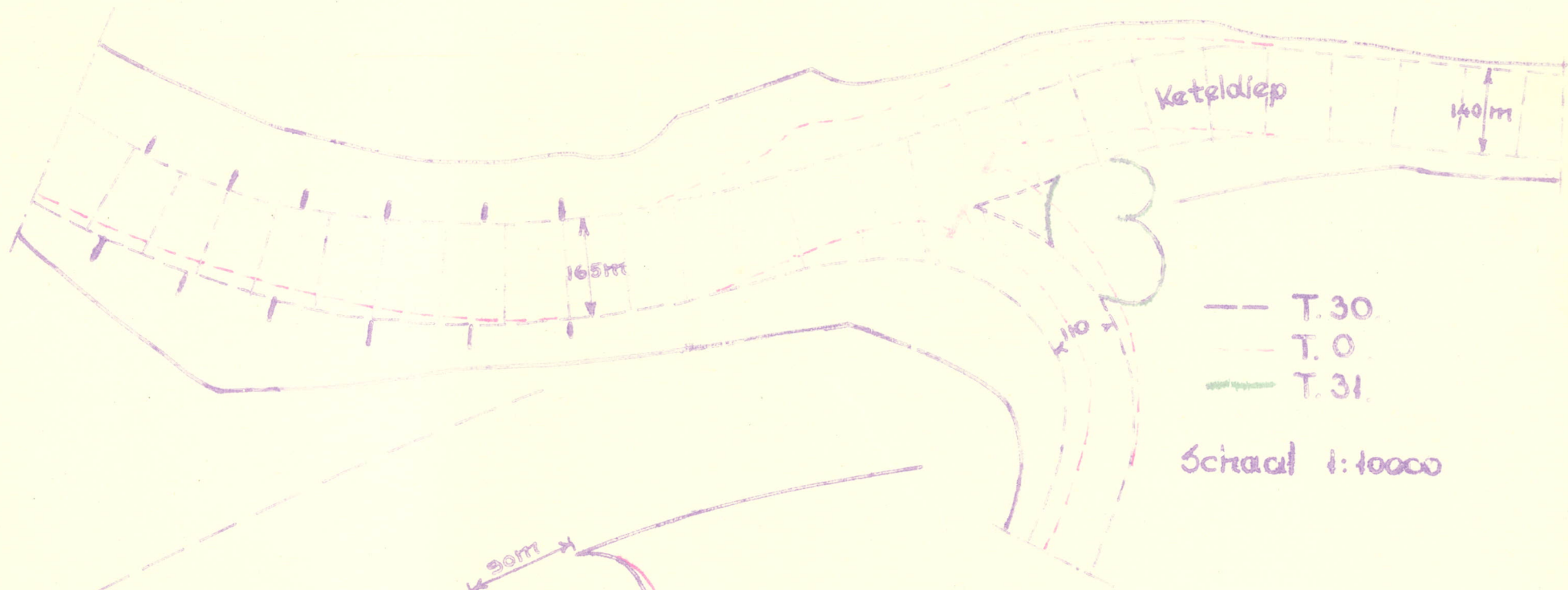


Schaal 1:10000

Schaal 1:5000

— T.20
— T.21
— T.22

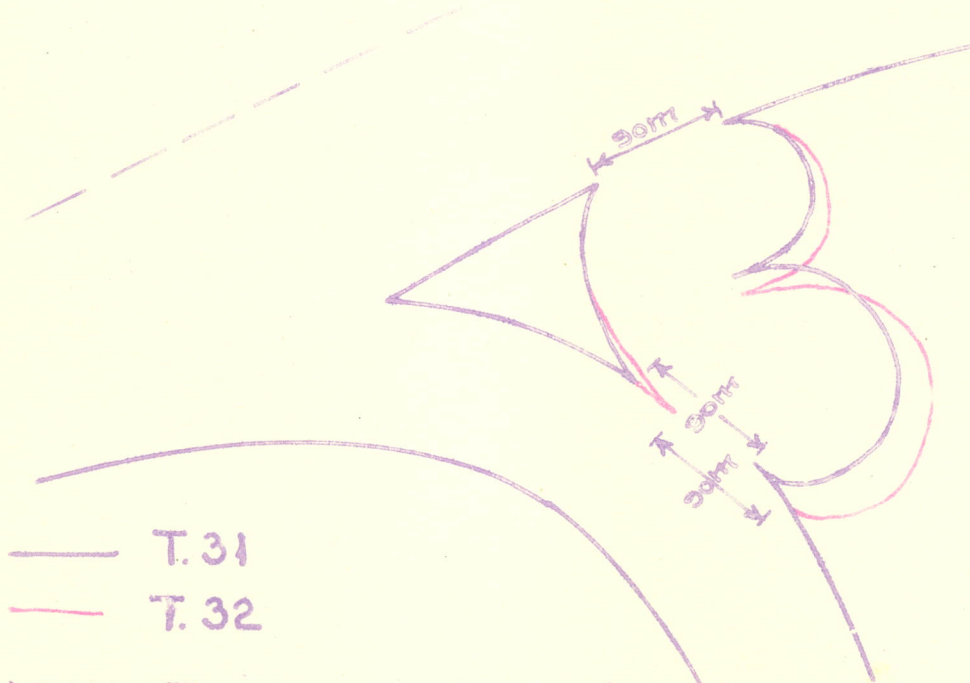
M.H. Figuur. 10. Toestanden 20 tot en met 22.



- T.30
- ... T.0
- T.31

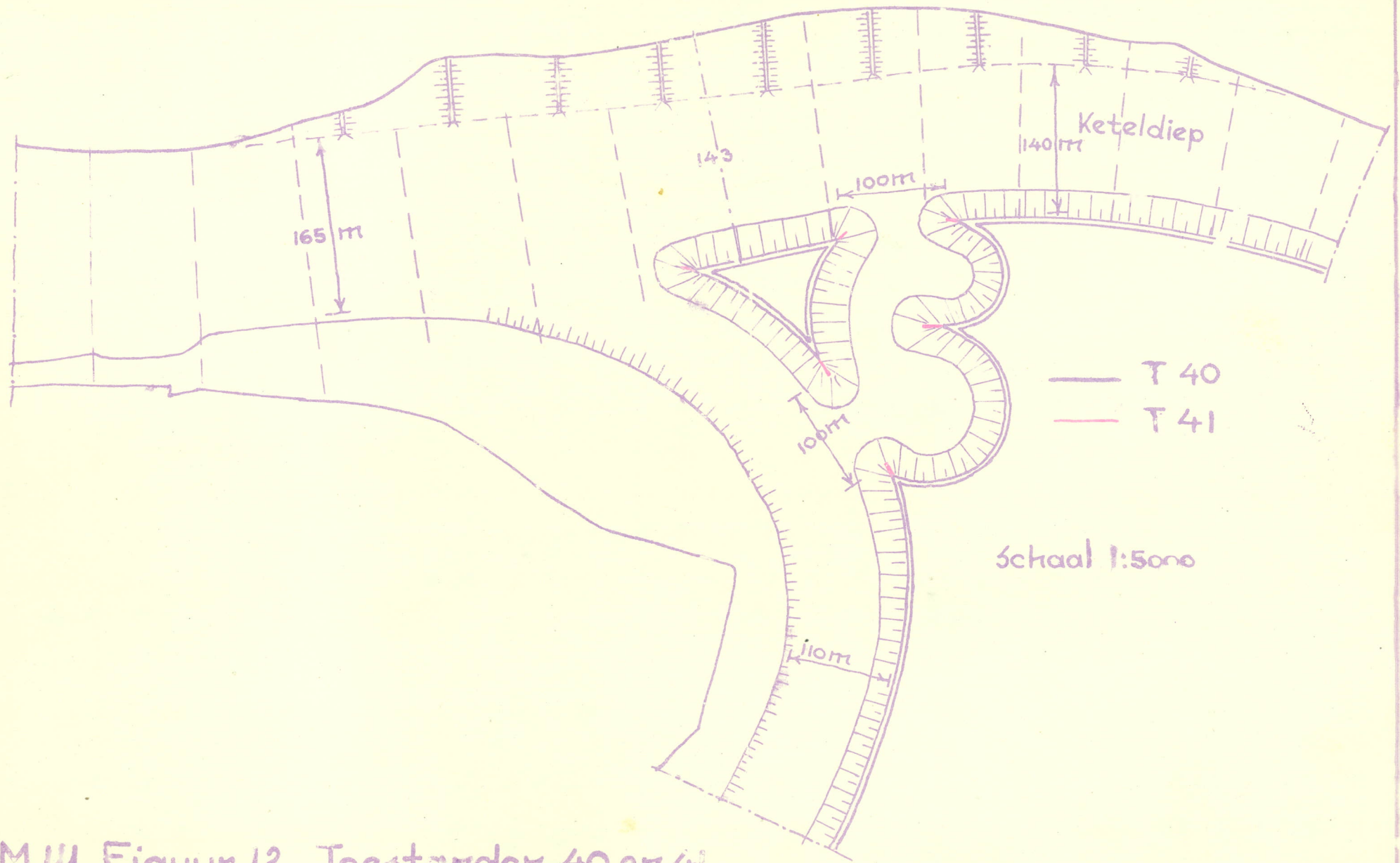
Schaal 1:10000

Schaal 1:5000

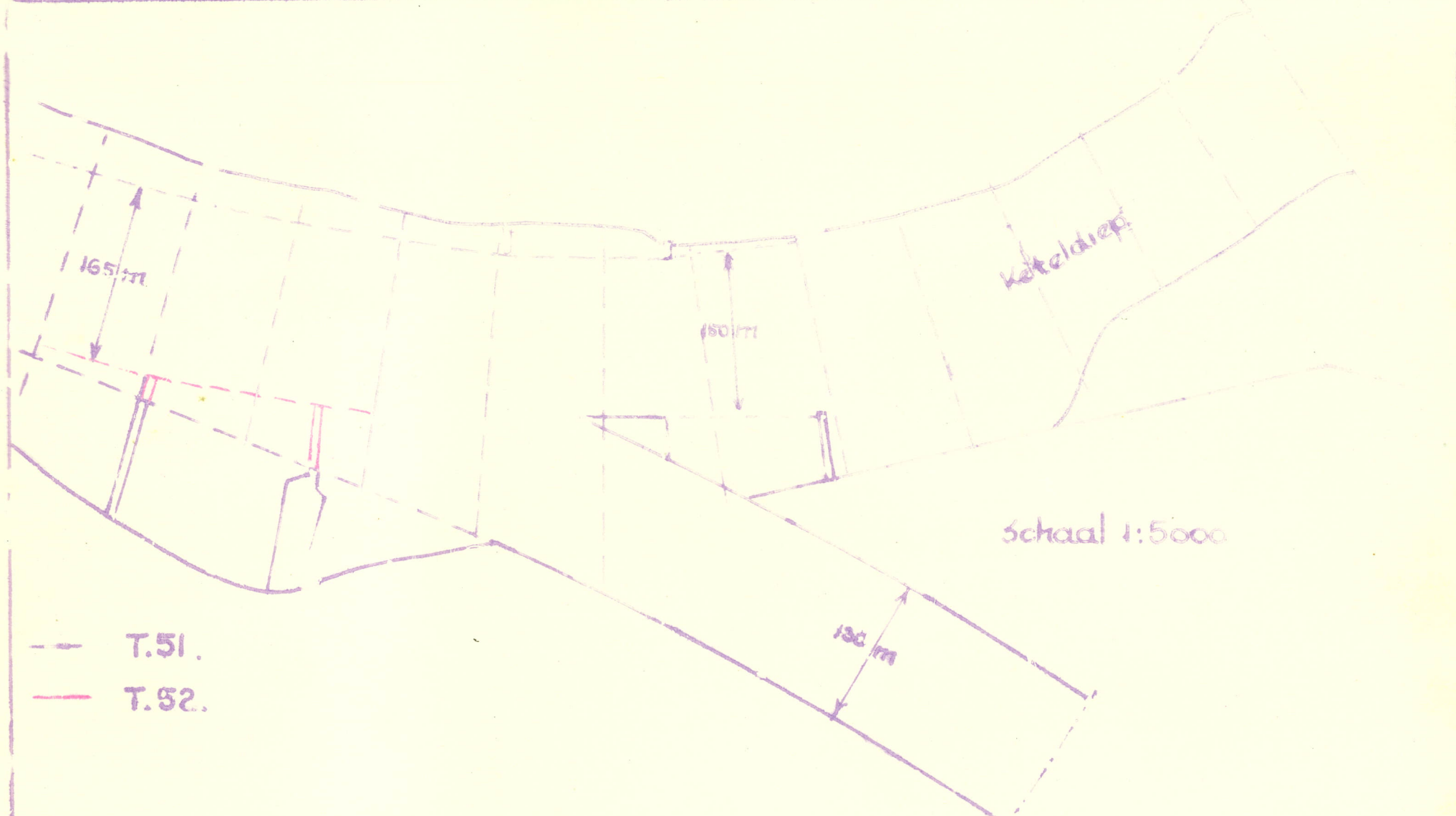


- T.31
- T.32

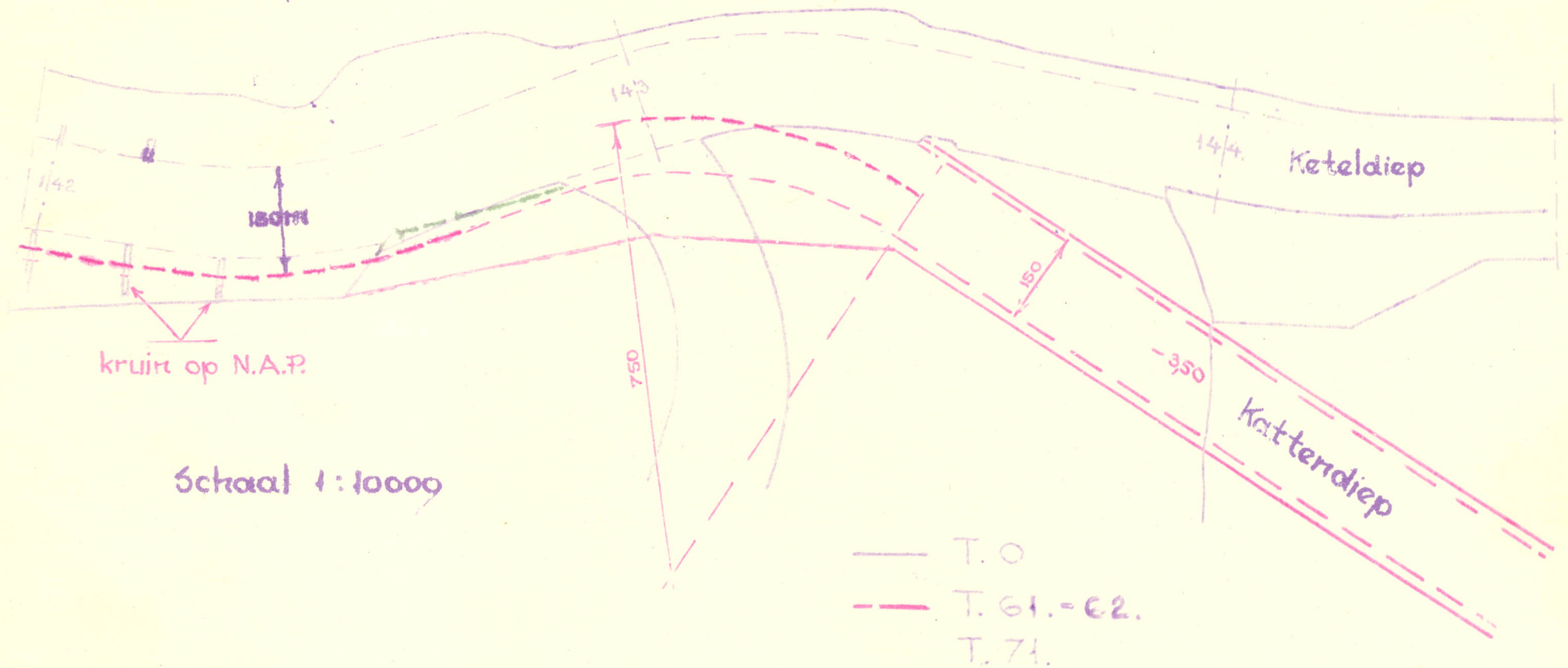
M.III . Figuur II. Toestanden 30-31 en 32.



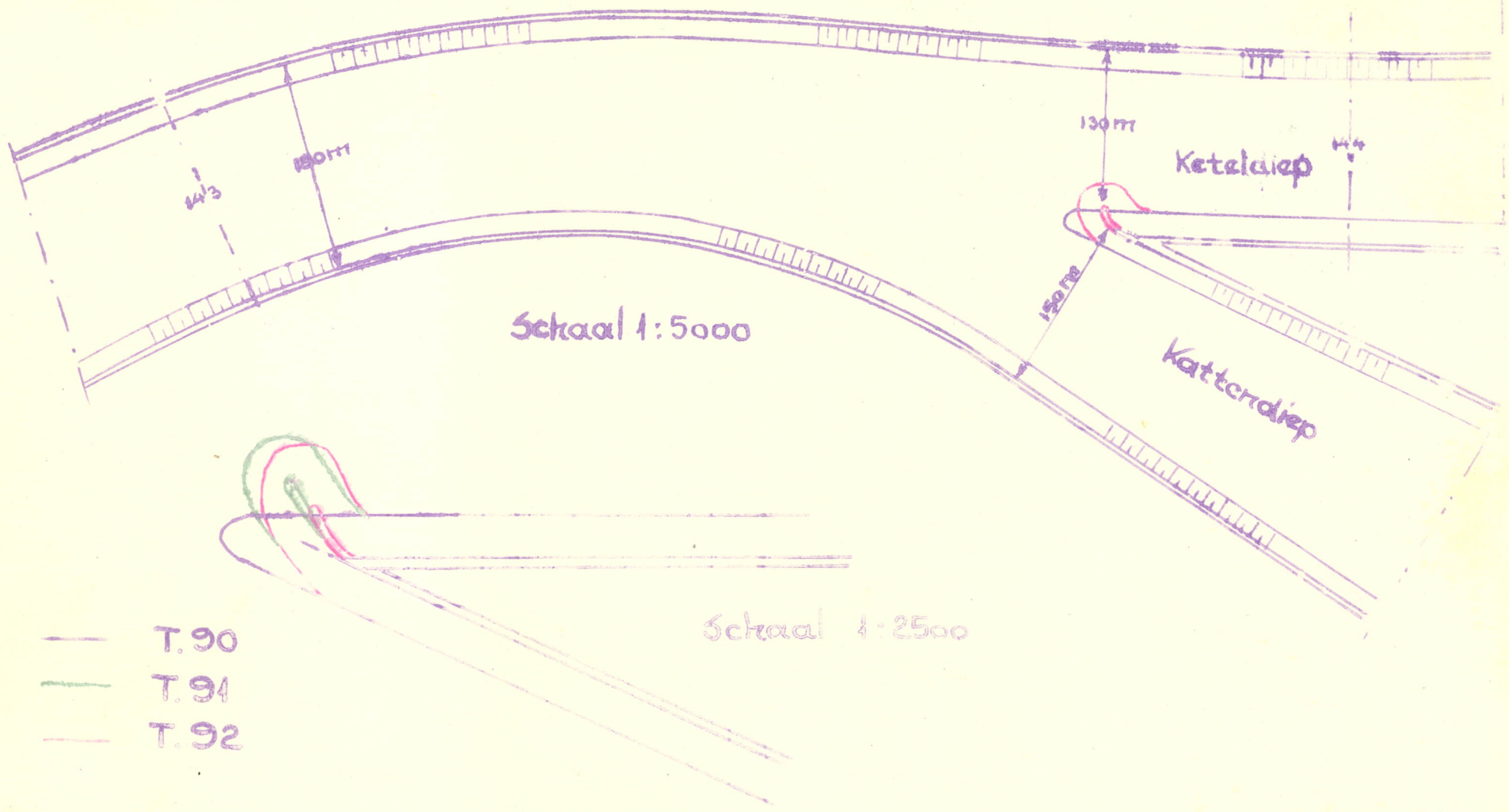
M.H. Figuur 12. Toestanden 40 en 41.



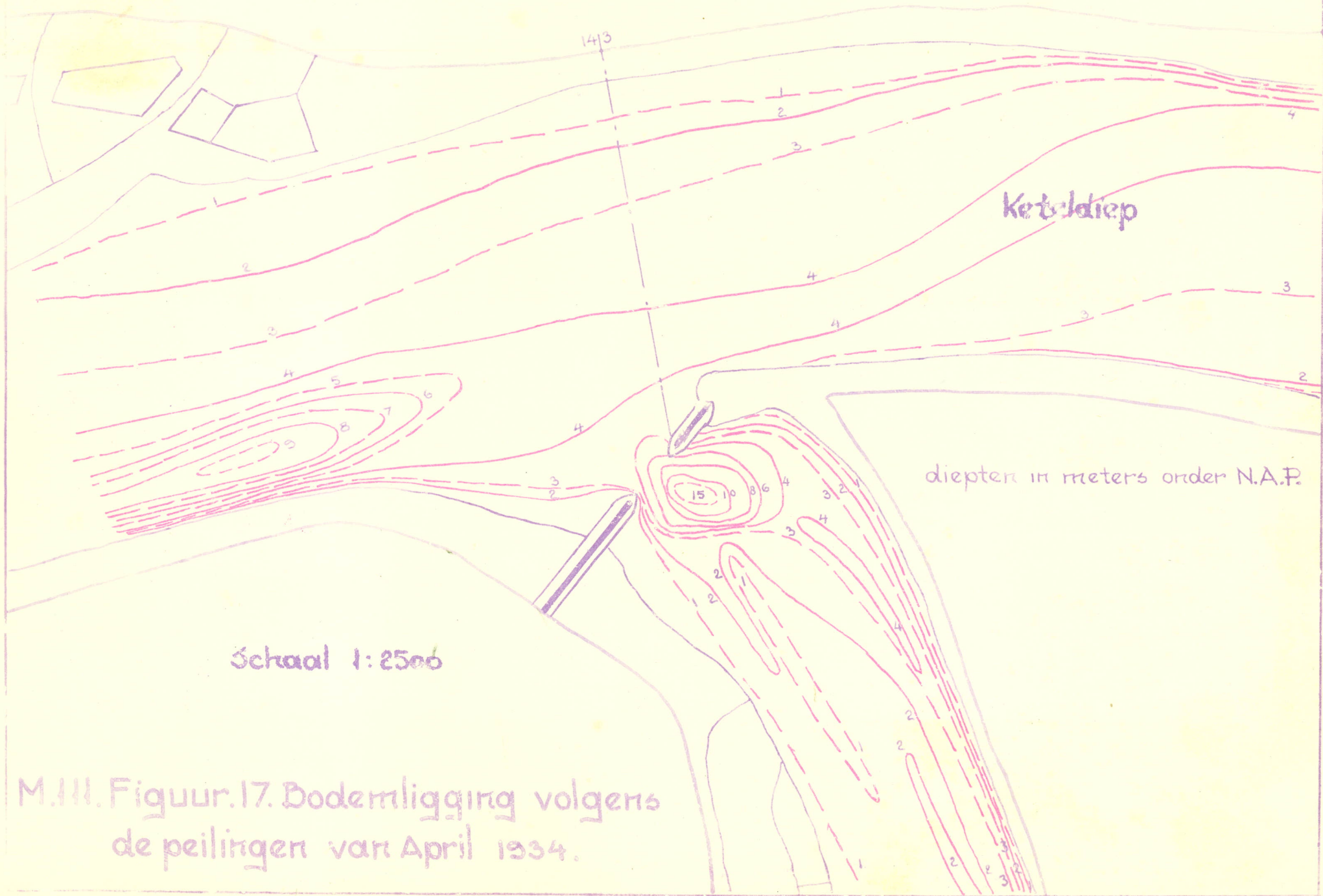
M. III. Figuur 13. Toestanden 51 en 52.



M. III. Figuur. 14. Toestanden 61-62 en 71.



M. III. Figuur: 5. Toestanden 81-90-91 en 92.



1413

Keteldiep

diepten in meters onder N.A.P.

Schaal 1:2500

M.III. Figuur. 17. Bodemligging volgens de peilingen van April 1934.