

DI: 825124

AANSLUITING
TWENTHEKANAAL-IJSSEL

RAPPORT MODELONDERZOEK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
DELFT

M 812

mei '67

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Aansluiting Twenthekanaal-IJssel.

Rapport modelonderzoek

M 812.

mei 1967.

INHOUD

	blz.
<u>1. Overzicht</u>	
1.1. Inleiding	1
1.2. Aard van het onderzoek	1
1.3. Gegevens	3
1.4. Conclusies	3
<u>2. Het model</u>	
2.1. Schalen	5
2.2. Constructie en inrichting	6
<u>3. Opzet modelonderzoek</u>	
3.1. Inleiding	8
3.2. Invloed afvoer Twenthekanaal	8
3.3. Bodemligging	9
3.4. Stroombeeld	10
3.5. Bankvorming in de kanaalaansluiting	12
3.6. Wateruitwisseling	12
<u>4. Proeven</u>	
4.1. Onderzoek bestaande situatie (T0)	14
4.2. Onderzochte oplossingen	15
4.2.1. Oriënterende proeven	15
4.2.2. Onderzoek aanbevolen oplossing (T8)	20

FIGUREN

1. De IJssel bij Zutphen.
2. Overzicht model.
3. Zeefkromme bakeliet.
4. Afvoer door het Twenthekanaal.
5. Verhouding afvoer Twenthekanaal/afvoer IJssel.
6. Bodemligging prototype.
7. Bodemligging model huidige situatie.
8. Bodemligging model aanbevolen oplossing.
9. Dwarsprofielen prototype en model huidige situatie.
10. Dwarsprofielen model t.p.v. de onderzochte nieuwe kanaalaansluiting.
11. Dwarsprofielen model aanbevolen oplossing.
12. Overzicht onderzochte situaties.
13. Overzicht verrichte proeven en resultaten.

FOTO'S

1. Bouw van het model.
2. Bakeliet aangebracht.
3. Overzicht model.
4. Uitwisseling meten.
5. Stroombeeld model huidige situatie (T0).
6. Stroombeeld T8.
7. Stroombeeld T8 tijdens pompen.
8. Stroombeeld T8 tijdens schutten.
9. Stroombeeld T8 tijdens schutten.
10. Stroombeeld T4 tijdens spuien.
11. Stroombeeld T4 tijdens spuien.
12. Stroombeeld T4 tijdens spuien.
13. Stroombeeld T4 tijdens spuien.
14. Stroombeeld T8 tijdens spuien.
15. Stroombeeld T8 tijdens spuien.

GEBRUIKTE SYMBOLEN

symbool	beschrijving	dimensie
C	coëfficiënt van Chézy	$[L^{1/2} T^{-1}]$
\bar{d}	gemiddelde korreldiameter $= \sum (f_i d_i) / \sum f_i$	[L]
f_i	gewichtsfractie van zeefmonster	-
h	verticale afmeting, waterdiepte	[L]
I	verhang	-
I_k	kantelhoek	-
L	horizontale afmeting, lengte-eenheid	[L]
M	eenheid van massa	[M]
m	index voor model	-
n	schaal: $n_C = C_p / C_m$	-
p	index voor prototype	-
Q	debiet	$[L^3 T^{-1}]$
S	materiaaltransport over de totale breedte van de rivier	$[L^3 T^{-1}]$
T	eenheid van tijd	[T]
t	tijd, waarin bodemveranderingen plaatsvinden	[T]
t'	tijd betrokken op de waterbeweging	[T]
u	wateruitwisseling (% van rivierdebiet)	-
v	stroomsnelheid	$[L T^{-1}]$
Q_s	soortelijke massa bodemmateriaal	$[M L^{-3}]$

LITERATUUR

1. Rijkswaterstaat, directie Bovenrivieren, afdeling Studiedienst, "Bedvormende afvoer van de Bovenrijn en zijn takken, periode 1901-1950 voor toestand 1951.0".
Nota nr. 54.11
Arnhem, nov. 1954.
2. Rijkswaterstaat, directie Bovenrivieren, afdeling Studiedienst, "Zandtransportberekeningen o.m. verricht met het oog op de Rijnkanalisatie".
Nota nr. 55.18.
Arnhem, dec. 1955.
3. Rijkswaterstaat, directie Bovenrivieren, afdeling Studiedienst, "Toetsing zandtransportformules 1954-55"
Nota nr. 56.9.
Arnhem, sept. 1956.
4. Rijkswaterstaat, directie Bovenrivieren, afdeling Studiedienst, "Zandtransportkrommen van de Bovenrijn en zijn takken".
Nota nr. 64.8.
Arnhem, aug. 1964.
5. Thijsse, J.Th. "Wellenbewegungen und Längsströmungen in den anschleusen mit grossen Gefälle anschliessenden Haltungen, insbesondere auch solche Bewegungen, die durch rasche Füllung und Entleerung der Kammern dieser Schleusen erzeugt werden".
Prae-advies, nr. 5, XV 1^e int. scheepvaartcongres.
Brussel 1935.
6. Waterloopkundig Laboratorium, "Schaalbepaling riviermodellen"
Rapport nr. V 15.
Delft, april 1964.

7. Waterloopkundig Laboratorium, "De Lek bij Vreeswijk"
Rapport modelonderzoek M 741.
Delft, febr. 1965.

1. Overzicht.

1.1. Inleiding.

De arrondissementsingenieur in het arrondissement Almelo van de Rijkswaterstaat verleende in zijn brief van 26 juli 1963 - nr 4124 - aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht tot een modelonderzoek ten behoeve van de verbetering van de aansluiting van het Twenthekanaal op de IJssel. Het onderzoek vond plaats in het Laboratorium "de Voorst" van juni 1964 tot oktober 1965. Het stond onder leiding van ir. P.J. de Lange, die ook dit verslag samenstelde.

1.2. Aard van het onderzoek

De eisen voor de aansluiting van een kanaal op een rivier hebben betrekking op de bevaarbaarheid en het onderhoud.

Voor de bevaarbaarheid zijn van belang:

- het tracé en de vorm van de aansluiting;
- de bodemligging in de aansluiting en in de rivier ter hoogte van de aansluiting;
- het stroombeeld in en bij de aansluiting.

Ten aanzien van het onderhoud is in het kader van dit onderzoek het neerslaan van zand en slib in de aansluiting van belang.

Bij de aansluiting van het Twenthekanaal op de IJssel moet er niet alleen rekening worden gehouden met de stroming in de rivier en bij hoge afvoeren over de uiterwaarden, doch ook met die in het kanaal.

Een stroming het kanaal in, die niet groot is, treedt gedurende langere perioden op tengevolge van het oppompen van rivierwater om het boven de sluis Eefde gelegen kanaalpand zonodig op peil te houden.

Gedurende korte perioden van grote regenval kunnen via het kanaal aanzienlijke hoeveelheden water op de IJssel worden geloosd. Dit water is afkomstig van het Twenthekanaal en van het Berkel-afvoerkanaal.

Een afwisselend in- en uittrekkende stroom kan tenslotte ontstaan tengevolge van het schutten met de sluis te Eefde.

Het grootste deel van de schepen, dat het kanaal gebruikt, komt van of gaat op de rivier in bovenstroomse richting. De huidige mond van het kanaal is sterk met de stroomrichting van de rivier mee gericht (figuur 1). Dit heeft tot gevolg, dat het grootste deel van de schepen dat het kanaal gebruikt, een scherpe bocht moet maken om het kanaal in of uit te varen, hetgeen gezien de breedte van de rivier en het kanaal in verhouding tot de scheepslengte, een moeilijke manoeuvre is.

De mond van het kanaal is in een buitenbocht van de rivier gelegen. Ten gevolge van de situering van de mond mist de rivier over een vrij grote lengte de stroomgeleiding, die de oever normaal biedt. Hierdoor buigt de rivierstroom ter plaatse van de kanaalmond uit, waardoor op de rivier een ongunstige bodemligging ontstaat (figuur 6 en 9^a), hetgeen bij lage waterstanden in de rivier zowel de kanaalvaart als de doorgaande vaart op de rivier belemmert.

Ten aanzien van het stroombeeld onder verschillende omstandigheden en het neerslaan van zand of slib geeft de huidige mond geen aanleiding tot moeilijkheden.

Ten gevolge van de Rijnkanalisatie zullen lage rivierafvoeren en daarmee lage waterstanden in de toekomst minder vaak voorkomen. Hierdoor wordt echter slechts een deel van de bovengenoemde bezwaren ondervangen, zodat een verbetering van de kanaalaansluiting ook na Rijnkanalisatie gewenst blijft.

Bij het onderzoek naar de verbetering van de aansluiting is gebruik gemaakt van een model, waarin de bodemligging in de rivier, het stroombeeld en de aanzanding en aanslibbing in de aansluiting bestudeerd kunnen worden. Een dergelijk model is over het algemeen niet geschikt voor het verrichten van vaarproeven. De beoordeling van de nieuwe aansluiting op de bevaarbaarheid heeft daarom alleen kunnen plaatsvinden op grond van de situatie en vorm van de mond en de modelwaarnemingen ten aanzien van het stroombeeld en de bodemligging in de rivier.

Het stroombeeld bij hoge afvoeren, die mede via het winterbed plaats vinden is niet in het model gereproduceerd. Enerzijds omdat dit is te bestuderen met behulp van stroombaanberekeningen en anderzijds omdat het voor het onderzoek van de bodemligging in het zomerbed niet van groot belang is.

Bij het onderzoek is voornamelijk uitgegaan van het huidige rivierregiem. De gevolgen van de Rijnkanalisatie en eventuele toekomstige werken in en langs het Twenthekanaal zijn slechts globaal in beschouwing genomen. Aangenomen mag worden, dat de aansluiting die thans het beste voldoet, dit ook zal doen na Rijnkanalisatie.

1.3. Gegevens

- a. Tijdens het onderzoek vond door regelmatig mondeling en schriftelijk contact met de opdrachtgever en diens vertegenwoordigers en adviseurs, een vruchtbare uitwisseling van ideeën en inzichten plaats.
- b. De algemene gegevens ten behoeve van het modelonderzoek zijn ontleend aan enkele nota's van de afdeling Studiedienst in de directie Bovenrivieren van de Rijkswaterstaat [1] ... [4].
- c. De afdeling Studiedienst verstrekke de nodige peilkaarten en andere gegevens en verrichtte metingen met betrekking tot stroomsnelheden en verhangen in de rivier en translatiegolven in het Twenthekanaal.
- d. Gegevens omtrent het spuien via het IJsselpand van het Twenthekanaal zijn verstrekt door het arrondissement Almelo.
- e. Voor de bouw van het model werden gegevens gebruikt van de arrondissementen Almelo en Rijn en IJssel, alsmede van de Provinciale Waterstaat in Gelderland, het Bureau Gemeentewerken te Zutphen en het Kadaster.

1.4. Conclusies

De aansluiting van het Twenthekanaal op de IJssel kan in nautisch opzicht aanzienlijk worden verbeterd door een verplaatsing van circa 200 m in bovenstroomse richting en het aanbrengen van een circulatiekom. Het toepassen van een circulatiekom en het afsluiten van de huidige mond leidt tot een verbetering in bodemligging van de rivier die niet alleen de kanaalvaart doch ook de doorgaande vaart op de rivier ten goede komt.

Het stroombeeld in en bij de aansluiting zal onder normale omstandigheden en tijdens hoog water, pompen en schutten geen hinder opleveren voor de scheepvaart. Ook tijdens spuien zijn geen onoverkomelijke

bezwaren te verwachten, doch het stroombeeld wijkt dan dermate af van het normale, dat het aanbeveling verdient de scheepvaart hierop attent te maken.

Bij het aanbrengen van een verdediging van de afkalvende oever tegenover de nieuwe aansluiting - over een lengte van circa 300 m - verdient het aanbeveling het bovenstroomse gedeelte landwaarts van de zomernormaallijn te situeren. Dit houdt in dat de bestaande krib, waarop de oeververdediging aan de bovenstroomse zijde wordt aangesloten, ongeveer 10 m wordt ingekort. Door deze maatregel wordt het onderhoudsbaggerwerk van de aansluiting - bankvorming en aanslibbing - verkleind.

Een vermindering van het onderhoudsbaggerwerk wordt eveneens verkregen door het plaatsen van een scherm langs de oever aan de bovenstroomse zijde van de mond en door het aanbrengen van een ruw afgewerkte opstorting van het diepe gedeelte van het rivierdwarsprofiel ter hoogte van de kanaalaansluiting. Deze laatste maatregel wordt echter thans nog niet aanbevolen, omdat nog te weinig bekend is over de bodemontwikkeling in de rivier na Rijnkanalisatie, zodat de gewenste hoogte van de opstorting nog niet is te bepalen.

De aanbevolen oplossing (T8) is weergegevens in figuur 8. De verschillende stroombeelden zijn weergegeven op de foto's 6 ... 9, 14 en 15. Bodemdwarsprofielen in de rivier zijn aangegeven op de figuren 11 en de resultaten t.a.v. bankvorming en wateruitwisseling op figuur 13.

Afgezien van de gevolgen van hoog water zal de aanzanding en aanslibbing in de kanaalaansluiting ongeveer even groot zijn als thans. De aanzanding treedt op vlak bij de benedenstroomse zijde van de mond. Tijdens hoge rivierafvoer kan ook afzetting van materiaal verwacht worden in de bovenstroomse zijde van de circulatiekom. Deze kan groter zijn dan die aan de benedenstroomse zijde.

Een en ander zal aanleiding geven tot regelmatig onderhoudsbaggerwerk in de kanaalaansluiting.

2. Het model

2.1. Schalen

De uitgevoerde proeven betreffen in hoofdzaak verschijnselen met een beweeglijke rivierbodem. De modelschalen zijn daarom zo gekozen, dat een goede reproductie van de transportverschijnselen kan worden verwacht. De schalen zijn met een rekentuig geselecteerd op grond van een aantal theoretische en praktische normen [6].

De gekozen schalen zijn gecorrigeerd aan de hand van de proeven voor de bestaande toestand (TO). Op deze wijze zijn er voor de proeven met bodemtransport de volgende schalen gevonden:

lengteschaal	: $n_L = 80$	
diepteschaal	: $n_h = 40$	
ruwheidschaal	: $n_C \approx 1,25$	
snelheidschaal	: $n_v = 2,54$	
tijdschaal voor		(1 jaar prototype $\hat{=}$ ca 3 uur
bodemveranderingen	: $n_t = 3,1 \cdot 10^3$	model)
transportschaal	: $n_S = 83,3$	
kanteling	: $I_k = 0,8 \cdot 10^{-3}$	

In het model is gebruik gemaakt van gemalen bakeliet ($\bar{d} = 1,75$ mm, $\rho_s = 1450$ kg/m³) om het bodemtransport te simuleren. De zeefkromme van dit materiaal is weergegeven in figuur 3.

De kanteling, I_k is het verschil tussen het in het model optredende verhang en het verhang dat zou passen bij de gekozen samentrekking $- n_L/n_h -$. Deze verhangversterking wordt veroorzaakt, doordat de snelheidschaal kleiner is dan volgens de modelwet van Froude voor een juiste weergave van de waterstand gewenst is.

Bij de proeven met translatiegolven is er gewerkt met de snelheidschaal volgens Froude ($n_{v1} = \sqrt{n_h} = 6,33$). In dat geval bedroeg de tijdschaal voor de stromingen $n_{t1} = n_L/n_{v1} = 12,65$. De ruwheidschaal van het kanaal was daarbij afgestemd op de samentrekking $n_{C1} = \sqrt{n_L/n_h} = 1,4$.

2.2. Constructie en inrichting

Het in model weergegeven riviergedeelte strekt zich globaal uit over een rivierlengte van 5 km benedenstrooms van Zutphen. De kanaalaansluiting bevindt zich ongeveer in het midden van dit riviervak (figuur 1 en 2). Het model omvat alleen het zomerbed, de monden van de daarop uitkomende havens en het IJsselpand van het Twenthekanaal (tot de sluis te Eefde). De plaatsaanduiding in het model en in dit verslag is gebaseerd op de kilometrering langs de rivier en het Twenthekanaal in het prototype.

Het model is ingepast in een voor vroegere onderzoeken gebruikte ruimte (figuur 2). Hierdoor was het nodig een gedeelte van het Twenthekanaal om te vouwen. Voor een goede weergave van de translatiegolven in het kanaal is dit geen bezwaar [5]. Voor het onderzoek van bodemligging stroombeeld, aanzanding en aanslibbing in en bij de aansluiting behoeft alleen het kanaalgedeelte vlak bij de aansluiting geometrisch juist in het model te worden weergegeven. Ook de later eventueel aan te leggen industriehavens Eefde zijn zodanig geschematiseerd in het model weergegeven, dat de invloed op de translatiegolven op de juiste wijze kon worden gereproduceerd.

Om in het model tijdens het onderzoek naar de bodemligging in de rivier een juiste hoogte van de kribben, oevers en peilstenen ten opzichte van de waterstand te verkrijgen is bij de bouw gewerkt met een vergelijkingsvlak (het n.a.p.) onder de in par. 2.1 genoemde helling, $I_k = 0.8 \cdot 10^{-3}$, gemeten langs de as van de rivier. Het model is afgewerkt in beton - de zandige oevers en bodem van het Twenthekanaal glad, de kribben en bestorte oevers ruw - (foto 1). De bodem van de rivier is gevormd door vlijlagen van kalkzandsteen, waarop zich een laag bakeliet bevindt (foto 2). Hierdoor is een soepel aanpassen van het model aan de bodemontwikkeling tijdens het stromen mogelijk, terwijl de benodigde hoeveelheid bakeliet minimaal kan zijn.

Figuur 2 en foto 3 geven een overzicht van het model.

Het modeldebiet wordt aan een aanvoersloot onttrokken door een inlaatsluis type Romijn, die zodanig is geautomatiseerd, dat ook bij variërende bovenstroomse waterstand steeds het gewenste debiet - binnen zekere grenzen van nauwkeurigheid - wordt geleverd. Omdat de vaste onnauwkeurigheid van de inlaatsluis te groot is ten opzichte van het

kleine modeldebiet, is er een fijnregeling toegepast. Deze bestaat uit een bekken, langs de rand waarvan zich een V-vormige stuw bevindt, waarop het model is aangesloten en een brede verstelbare overlaat, die voor een constant peil in het bekken zorgt. Dank zij de afvoercharacteristieken van de V-stuw en de overlaat wordt de onnauwkeurigheid van de inlaatsluis voor het grootste deel door de overlaat verwerkt. Het spuien, schutten en pompen bij de sluis te Eefde is op eenvoudige wijze in het model gereproduceerd (figuur 2).

De waterstand in het model is met een beweegbare klep aan het benedenstroomse eind van het model zodanig ingesteld, dat ongeveer ter plaatse van de kanaalaansluiting - km 931.00 - het gewenste peil - behorend bij de ingestelde afvoer - wordt afgelezen. De breedte van de klep is zodanig gekozen, dat bij eventuele variatie van het modeldebiet het op de overeenkomstige plaats in het prototype optredende verband tussen afvoer en waterstand zo goed mogelijk is gevolgd. Behalve bij km 931 bevinden zich ook bij km 929 en km 933 peilnaalden, die dienen om het verhang in het model te kunnen bepalen.

Het gewenste aanbod van transportmateriaal is gerealiseerd met een doseringsapparaat, dat elk uur een bepaalde hoeveelheid bakeliet in het bovenstroomse eind van het model deponeert. Dit doseringsapparaat en ook de bovengenoemde regeling van het debiet zijn zodanig uitgevoerd, dat het model ook 's nachts zonder menselijk ingrijpen kon doorstromen. Het getransporteerde bodemmateriaal bezinkt aan de benedenstroomse zijde van het model in een vang.

3. Opzet modelonderzoek

3.1. Inleiding

Bij het modelonderzoek zijn de volgende verschijnselen van belang (par. 1.2):

- a) de bodemligging in de rivier
- b) het stroombeeld in en bij de aansluiting
- c) de bankvorming in de aansluiting
- d) de wateruitwisseling tussen rivier en aansluiting, die een indicatie kan geven voor de aanslibbing in de aansluiting.

In dit hoofdstuk wordt aangegeven op welke wijze deze verschijnselen zijn gereproduceerd, waargenomen, verwerkt en beoordeeld.

3.2. Invloed afvoer Twenthekanaal

In het prototype staan bodemligging, stroombeeld, bankvorming en uitwisseling in principe onder invloed van het rivierregiem (afvoer, waterstand en zandtransport) in het beschouwde riviervak, alsmede van het regiem in het Twenthekanaal.

Er bestaat geen duidelijke correlatie tussen de afvoer door het Twenthekanaal en de IJsselafvoer. Dit wordt gedemonstreerd in figuur 4^a. In deze figuur is voor de periode 1959 ... 1963 aangegeven het aantal uren dat een zeker debiet door het Twenthekanaal samenviel met een bepaalde IJsselafvoer. Hierbij zijn voornamelijk de tijdvakken met een afvoer door Twenthekanaal van 40 m³/s of meer, in beschouwing genomen. Op de horizontale as is eveneens aangegeven hoe groot de IJsselafvoer geweest zou zijn indien de Rijnkanalisatie (met stuwprogramma "250" of "350") reeds was uitgevoerd.

De figuren 4^b en 4^c beschrijven de waargenomen afvoeren door het Twenthekanaal. Figuur 4^b geeft de frequentie als functie van de afvoer, terwijl in figuur 4^c is af te lezen hoe vaak en hoe lang een bepaalde afvoer is bereikt of overschreden. Over de afvoeren van 50 en 75 m³/s waren geen volledige gegevens beschikbaar.

In de figuren 5^a en 5^b zijn de waarnemingen nog op een andere wijze

bewerkt. Figuur 5^a geeft de overschrijdingsfrequentie van de verhouding van de afvoer door het Twenthekanaal en die door de IJssel. Figuur 5^b betreft weer eveneens de duur van de afvoercombinatie in de beschouwing.

Er mag worden geconcludeerd dat een enigszins betekende grote van deze verhouding slechts gedurende korte tijd per jaar optreedt. Dit betekent dat de invloed van de afvoer door het Twenthekanaal voor de bodemligging in de rivier mag worden verwaarloosd.

Wel dient er met deze afvoer rekening te worden gehouden in verband met mogelijke hinder van de scheepvaart.

Een "negatieve" afvoer door het Twenthekanaal, als gevolg van het oppompen van water, komt zo vaak voor dat er wel rekening mee moet worden gehouden voor de bepaling van de uitwisseling tussen rivierwater en kanaalwater en de aanzanding in de kanaalmond. Het pompdebiet is echter te klein om invloed uit te oefenen op de bodemligging in de rivier, zoals uit enkele proeven ook gebleken is.

Voor de uitwisseling is eveneens rekening gehouden met het schutten van de sluis bij Eefde.

3.3. Bodemligging

De bodemligging in de rivier is bereikt door het stromen met een constante afvoer ("bedvormende afvoer"). Op grond van prototypemetingen [4] en berekeningen wordt hiervoor $250 \text{ m}^3/\text{s}$ aangenomen. Bij deze afvoer hoort een zandtransport van $110 \text{ m}^3/\text{etm}$. Na Rijnkanalisatie zal de bedvormende afvoer voor stuwprogramma "250" iets meer dan $250 \text{ m}^3/\text{s}$ bedragen; voor een stuwprogramma "350" wordt een bedvormende afvoer van $350 \text{ m}^3/\text{s}$ gevonden. Deze laatste afvoer is gebruikt bij het onderzoek van de aanbevolen oplossing (T8), na het onderzoek met $250 \text{ m}^3/\text{s}$. De bij de afvoeren behorende waterstanden zijn afgelezen uit de betrekkinglijnen.

De bodem in het model is steeds gepeild over de hele lengte van de rivier in raaien om de 200 m. Door deze peilingen is de bodemligging, het lengteprofiel en de gemiddelde diepte van het beschouwde riviervak waargenomen.

In het gebied van de kanaalaansluiting (km 930.500 ... 931.500) zijn detailpeilingen verricht in raaien om de 50 m, die te vergelijken zijn

met de in het prototype verrichte detailpeilingen. Uit de detailpeilingen zijn gemiddelde dwarsprofielen afgeleid.

Om de wisselvallige invloed van bodemribbels, die door het model waarschijnlijk overdreven worden weergegeven, op de onderlinge beoordeling van de verschillende oplossingen te elimineren zijn de resultaten van de verschillende proeven - dieptelijnenkaarten en dwarsprofielen - verkregen door het middelen van een aantal op eenvolgende peilingen. Deze zijn verricht na het bereiken van evenwicht in bodemligging. Voor de dwarsprofielen - bijv. ter plaatse van de huidige of de toekomstige mond - is tevens gemiddeld over een viertal opeenvolgende raaien.

Uit de waarnemingen blijkt, dat het bodemdwaarsverhang in het model te steil wordt weergegeven (figuur 9). Dit verschijnsel is ook in andere riviermodellen [7] waargenomen. Voor het verkrijgen van een inzicht in de te verwachten bodemligging in het prototype vormt het geen beletsel, omdat uit het onderzoek van de huidige situatie een voldoende duidelijke relatie tussen prototype- en modelwaarnemingen volgt.

3.4. Stroombeeld

Het stroombeeld in en bij de kanaalaansluiting onder normale omstandigheden - zonder pompen, spuien of schutten - is waargenomen tijdens het onderzoek van de bodemligging. In verband met het hierna volgende zijn ter vergelijking waarnemingen verricht zowel bij de snelheidschaal, nodig voor de weergave van het bodemtransport, als die volgens de modelregel van Froude (par. 2.1). Uit de waarnemingen blijkt, dat de resultaten bij deze twee snelheidschalen goed met elkaar overeenstemmen.

Het bij een aantal proeven toegepaste pompdebiet is gesteld op $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze waarde houdt verband met de voorgenomen uitbreiding van de pompcapaciteit in het gemaal te Eefde.

Voor het stroombeeld tijdens spuien zijn waarnemingen verricht bij spuidebieten van 25, 50, 100, 115 en $150 \text{ m}^3/\text{s}$ in combinatie met rivierdebieten van 250 of $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze proeven zijn verricht met de snelheidschaal volgens de modelwet van Froude, om bodemveranderingen t.g.v. de overdreven duur van het spuien in het model (vgl. de tijdschaal par. 2.1) te vermijden.

Aangenomen mag worden dat het stroombeeld vooral afhankelijk is van de verhouding tussen spuidebiet en rivierdebiet. Tevens mag worden verwacht, dat na Rijnkanalisatie een rivierdebiet van minder dan $250 \text{ m}^3/\text{s}$ in combinatie met een groot spuidebiet zeer zelden zal voorkomen (figuur 4^a). Om deze redenen kan vooral voor de situatie na Rijnkanalisatie uit de verrichte proeven voldoende informatie over de mogelijke gevolgen van spuien voor het stroombeeld in de aansluiting worden verkregen.

De invloed van het schutten met de sluis te Eefde is alleen in beschouwing genomen bij een rivierafvoer van $250 \text{ m}^3/\text{s}$. De gevolgen van het schutten bij een bepaalde waterstand zullen tengevolge van "resonantie" het grootst zijn, als de sluis met regelmatige tussenpozen die overeenkomen met de "eigentrillingstijd" van het IJsselpand-Twenthekanaal, geopend wordt. Deze eigentrillingstijd bedraagt voor de waterstand bij een IJsselafvoer van $250 \text{ m}^3/\text{s}$ circa 40 min. Bij drukke scheepvaart is het in het prototype mogelijk dat de sluis ongeveer één maal per 40 min geopend wordt. Bij hogere rivierafvoer wordt de invloed van het schutten kleiner tengevolge van het kleinere verval over de sluis en de kleinere eigentrillingstijd van het IJsselpand. De kans op het optreden van resonantie wordt dan kleiner. Om deze redenen kan worden volstaan met het bestuderen van het schutten tijdens een rivierafvoer van $250 \text{ m}^3/\text{s}$, die na Rijnkanalisatie slechts gedurende korte tijd onderschreden zal worden.

Het gevolg van het schutten is, dat bij de kanaalaansluiting op de IJssel gedurende circa 20 min een uittrekkende stroom optreedt beginnend circa 10 min na het openen van de sluis en vervolgens gedurende circa 20 min een intrekkende stroom.

Tengevolge van de toegepaste kanteling (I_k) kan de waterstand in de rivier bij de proeven met de snelheidschaal volgens Froude slechts op een plaats juist worden weergegeven. Hiervoor is gekozen km 931.000. De afwijking van de vereiste waterstand bij de kanaalaansluiting is hierbij zo klein, dat het stroombeeld hiervan geen invloed zal ondervinden.

Het stroombeeld is waargenomen door snelheidsmetingen en met behulp van papiersnippers en drijvers. De snelheidsmetingen zijn verricht met een ottmolen of een slingerstroommeter. De stroomlijnen van de snippers of drijvers zijn fotografisch vastgelegd met tijdopnamen van 3 of 5 sec (foto 5 ... 15).

3.5. Bankvorming in de kanaalaansluiting

De bankvorming is steeds bestudeerd tezamen met de bodemligging in de rivier (par. 3.3). Hierbij moet worden opgemerkt, dat de bankvorming varieert met de rivierafvoer. Het is niet zeker dat de gemiddelde bankvorming optreedt bij de "bedvormende afvoer".

Voor de bank, die ontstaat op de grens van rivier en kanaal, tengevolge van bodemmateriaal dat via de wervelstraat wordt afgezet, is een onderlinge kwalitatieve vergelijking van de verschillende oplossingen goed mogelijk. De overdracht van karakteristieke grootheden van een bepaalde bank naar waarden voor het prototype is veel minder nauwkeurig. De bankvorming wordt in een model over het algemeen overdreven weergegeven, vermoedelijk omdat de sterkte van de wervelstraat tengevolge van schaal-effecten in het model relatief te groot is.

In het model is steeds de inhoud van de bank gemeten telkens na 24 uur stromen. Per situatie zijn een aantal uitkomsten gemiddeld en vervolgens met behulp van de tijdschaal voor bodemveranderingen (par. 2.1) omgerekend naar prototype-waarden. In verband met het bovenstaande hebben deze getallen uiteraard alleen waarde als indicatie.

3.6. Wateruitwisseling

De uitwisseling van water tussen rivier en kanaal, die bepalend is voor de mate van aanslibbing in de aansluiting, is gemeten onder normale omstandigheden, met pompen ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) en tijdens schutten. Tijdens spuien is de uitwisseling zeer klein. Bij het schutten zijn de perioden met in- en met uittrekkende stroom bij de kanaalaansluiting (par. 3.4) afzonderlijk in beschouwing genomen. De resultaten zijn vervolgens gemiddeld, zodat een vergelijking met een situatie zonder schutten mogelijk is.

De uitwisseling is voornamelijk gemeten met behulp van zo lang mogelijke drijvers. Vlak bovenstrooms van de kanaalaansluiting is het dwarsprofiel van de rivier verdeeld in vakken (breed 10 m) elk met een debiet ΔQ_i . Voor elk vak is statistisch het percentage drijvers a_i bepaald, dat de aansluiting ingaat (foto 4). De uitwisseling u wordt nu

gevonden als het verhoudingsgetal:

$$u = \frac{\sum (a_i \Delta Q_i)}{\sum \Delta Q_i}, \text{ waarbij geldt } \sum \Delta Q_i = Q .$$

De gevonden waarden van u geven een mogelijkheid tot onderlinge vergelijking van de verschillende oplossingen. In absolute zin is de waarde van u minder betrouwbaar omdat de aanslibbing in het prototype mede wordt bepaald door de verblijfstijd van het uitgewisselde water in de kanaalaansluiting. De uitwisseling is steeds gemeten kort na het weg-baggeren van de bank in de kanaalaansluiting.

4. Proeven

4.1. Onderzoek bestaande situatie (TO)

Voor het onderzoek is de rivierbodem in dwarsrichting horizontaal afgewerkt. In lengterichting is daarbij globaal uitgegaan van het in het prototype optredende lengteprofiel. De modelbodempligging is vervolgens bereikt met een constant debiet (par. 3.3).

Het modeldebiet en het aanbod van transportmateriaal zijn hierbij proef-ondervindelijk zodanig bepaald, dat de gemiddelde bodempligging en het verhang van de waterspiegel die in het prototype optreden, zo goed mogelijk zijn gereproduceerd. De hieruit volgende snelheidschaal n_v , en transportschaal n_s zijn vermeld in par. 2.1.

De overeenstemming in bodempligging tussen model en prototype is goed (figuren 6, 7 en 9). De geulen en banken worden door het model over het algemeen op de juiste plaats weergegeven. Ook het oversteken van de vaargeul vlak benedenstrooms van de mond van het Twenthekanaal treedt in het model op, zij het niet geheel op de juiste plaats. Het is niet uitgesloten dat hier de bodempligging in het prototype door baggeren wordt beïnvloed.

De diepten en ondiepten worden door het model overdreven weergegeven. (par. 3.3, figuur 9).

Het stroombeeld bij de mond van het Twenthekanaal is weergegeven in foto 5. In de mond van het Twenthekanaal bevindt zich een zwakke neer. Uit enkele globale prototype-waarnemingen met oppervlakte-drijvers onder vergelijkbare omstandigheden is gebleken, dat het ontmoetingspunt van de rivierstroom met de teruggelegen benedenstroomse kanaaloever in model en prototype goed overeenstemmen.

Gegevens over de gemeten bankvorming in de kanaalmond en de water-uitwisseling zijn vermeld in figuur 13. De bankvorming neemt sterk toe als er water het kanaal wordt ingepompt. Uit enkele oriënterende proeven is gebleken, dat een gevormde grote bank gedurende een korte hevige spuiperiode niet of nauwelijks wordt verkleind.

Op grond van de verrichte proeven komt men tot een schatting voor de bankvorming in de orde van grootte van $500 \text{ m}^3/\text{jaar}$. In het prototype behoeft in de huidige kanaalaansluiting niet te worden gebaggerd.

Hoewel het vermoeden bestaat, dat de bankvorming in het model overdreven wordt weergegeven (par. 3.4), is een volledige vergelijking tussen model en prototype toch niet mogelijk, omdat de invloed van verschillende factoren die een rol kunnen spelen niet bekend is.

In dit opzicht kunnen worden genoemd: de relatie tussen rivierdebiet en bankvorming (par. 3.4), de duur en intensiteit van het pompen en de invloed van de dijk langs het Twenthekanaal tijdens hoogwater (par. 4.2.2). Bij het onderzoek is daarom voornamelijk aandacht besteed aan de onderlinge vergelijking van de resultaten van de verschillende proeven.

De uitwisseling neemt ook toe bij pompen, doch blijft kleiner dan op grond van het pompdebiet kan worden verwacht (zie par. 4.2.2). Dit kan mede te wijten zijn aan het gebruik van korte drijvers bij deze meting. De aanname, dat de stroming tengevolge van het pompen voor een groot deel langs de bodem van de kanaalaansluiting optreedt is in overeenstemming met de gevonden grote bankvorming tijdens pompen.

De invloed van het schutten op de wateruitwisseling werd in de bestaande situatie niet gemeten. Wel werden enkele schutproeven verricht. Uit metingen van de optredende translatiegolven bleek een goede overeenstemming met berekeningen en resultaten van prototypemetingen [5]. Uit deze metingen bleek ook, dat bij regelmatig schutten volgens de "eigenfrequentie" van het IJsselpand-Twenthekanaal (par. 3.4) golfhoogten worden bereikt, die ongeveer 1,5 maal zo groot zijn als de translatiegolf tengevolge van een enkele schutting. Dat de resonantie niet groter is, is te danken aan de wrijving, waardoor de translatiegolf tijdens zijn loop door het kanaal wordt afgevlakt. Deze demping is groter naarmate de golfhoogte groter is, zodat op den duur bij regelmatig schutten een evenwichts-golfhoogte wordt bereikt.

4.2. Onderzochte oplossingen

4.2.1. Oriënterende proeven

In de oriënterende proeven zijn de vorm en plaats van de aansluiting, en de in het rivierbed te nemen maatregelen onderzocht.

In deze paragraaf worden alleen de proeven behandeld, die verricht zijn

met een rivierafvoer van $250 \text{ m}^3/\text{s}$. De gevolgen van de Rijnkanalisatie, hoogwater alsmede pompen, spuien en schutten hebben geen invloed op de keuze van de aan te bevelen oplossing. Deze gevolgen worden besproken in par. 4.2.2.

Voor de vorm van de aansluiting is uitgegaan van een circulatiekom op grond van vele andere onderzoeken en ervaring in het prototype met dergelijke kanaalaansluitingen op een rivier. Het doel van een circulatiekom is de mogelijkheid te bieden voor het optreden van een zo krachtig mogelijke stabiele neer, die ter plaatse van de mond geleiding geeft aan de stroom. Hierdoor wordt voorkomen dat er door de uitbuiging van de stroom in de rivier ter hoogte van de aansluiting een ongunstige bodemligging kan ontstaan. Een duidelijk voorbeeld hiervan vormt de situatie bij de huidige mond van het Twenthekanaal (figuur 9).

Tevens biedt de circulatiekom manoeuvreer- en eventueel wachtruimte voor de schepen, die het kanaal in of uitvaren. Als gewenste bodembreedte van de mond (op O.L.R. -3 m) is uitgegaan van 120 m .

Gezien het huidige tracé van het IJsselpand-Twenthekanaal en de scherpe bocht, die het merendeel van de schepen moet maken om het kanaal in of uit te varen (par. 1.2), wordt de beste verbetering verkregen door de kanaalaansluiting zoveel mogelijk in bovenstroomse richting te verplaatsen. Het riviertracé stelt in deze beperkingen, omdat de kanaalaansluiting in een buitenbocht gelegen moet zijn om voldoende diepte voor de mond te behouden. Om deze reden kan de maximale verschuiving van de kanaalaansluiting in bovenstroomse richting circa 250 m bedragen (figuur 6).

Uit een oriënterende proef met de kanaalaansluiting in de meest bovenstroomse positie (T1, figuur 12) bleek, dat de aansluiting nog te veel in het gebied van de overstekende stroom gelegen was (foto 5), zodat er een grote uitwisseling optrad. Daarom is de aansluiting 50 m in benedenstroomse richting verschoven (T2). De mond strekt zich hierbij uit van circa $\text{km } 931.050$ tot $\text{km } 931.200$. Deze plaats is gedurende de rest van het onderzoek aangehouden (figuur 12).

De ellipsvormige circulatiekom van T1 en T2 is in T3 meer cirkelvormig gemaakt. Hierdoor en door een betere vormgeving van de uitmonding van het kanaal op de circulatiekom is meer manoeuvreer- en wachtruimte

voor de schepen verkregen. Uit de resultaten van T2 en T3 blijkt, dat deze vormverandering geen grote invloed uitoefent op de bodemligging in de rivier, de bankvorming in de aansluiting en de wateruitwisseling (figuren 10^b en 13). De in T3 onderzochte vorm van de circulatiekom is gedurende de rest van het onderzoek nagenoeg niet meer gewijzigd.

De bodemligging in de rivier ter hoogte van de nieuwe aansluiting is in T1, T2 en T3 slechts weinig slechter dan in T0 op deze plaatsen (figuur 10). Dit betekent een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de situatie, die thans bij de huidige mond optreedt (figuur 9). Door afsluiting van de huidige mond wordt daar ter plaatse een "normaal" dwarsprofiel verkregen (figuur 11^b). Het oversteken van de vaargeul benedenstrooms van de huidige mond (par. 4.1) treedt niet meer op. Ten aanzien van de bodemligging in de rivier biedt het toepassen van een circulatiekom dus belangrijke voordelen ten opzichte van de huidige kanaalaansluiting.

De bankvorming in de aansluiting in T1, T2 en T3 is ongeveer even groot als in T0 (figuur 13). De uitwisseling is wat groter dan in T0 (figuur 13).

Bij een controle van het model bleek dat de krib bij km 930.975 (gelegen kort bovenstrooms van de kanaalaansluiting in T1, T2 en T3 op de linker-oever - figuur 12 -) abusievelijk circa 10 m te kort was gebouwd. Op de resultaten van de huidige mond, die meer benedenstrooms van de te korte krib was gelegen, zal dit niet veel invloed uitgeoefend hebben, doch uit een proef met de op juiste lengte ingebouwde krib (T3-A) bleek een aanzienlijk verschil in uitwisseling en bankvorming ten opzichte van T3. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het feit dat de krib bij km 930.975 in het gebied van de stroomovergang is gelegen. De invloed op de bodemligging is niet groot. Alleen in de binnenbocht ligt de bodem in T3-A plaatselijk wat hoger dan in T3 (figuur 10^b). Op grond van deze proeven komt een verkorting van de krib bij km 930.975 naar voren als een middel om de bankvorming en uitwisseling te verminderen.

In de proeven T4-A ... T7 is de invloed van het aanbrengen van een strekdam tegenover de nieuwe kanaalaansluiting en de plaatsing van een scherm

op de bovenstroomse punt tussen rivier en circulatiekom onderzocht (figuur 12). De strekdam strekt zich uit van km 930.975 tot de reeds bestaande strekdam bij km 930.275. Ter plaatse bevindt zich thans een afkalvende oever.

Het scherm heeft als taak de wervelstraat, die zich in de kanaalmond bevindt - uitgaande van de bovenstroomse kop - te richten en te versmallen om een kleinere bankvorming en uitwisseling te verkrijgen. In T4 en T7 zijn respectievelijk strekdam en scherm afzonderlijk toegepast en in T6 een combinatie van beide.

De invloed van de strekdam kan worden bepaald door onderlinge vergelijking van T4 en T3-A alsmede van T6 en T7. De strekdam heeft een gunstige hoewel geringe invloed op de bodemligging bij de aansluiting, die voornamelijk in de binnenbocht tot uiting komt (figuur 10^c). Van een duidelijke invloed op de bankvorming en wateruitwisseling is geen sprake (figuur 13).

Voor de invloed van het scherm moeten T7 en T3-A alsmede T6 en T4 met elkaar vergeleken worden. Een invloed op bodemligging en bankvorming is hierbij niet waarneembaar. De wateruitwisseling wordt door het scherm wel gunstig beïnvloed.

Op grond van de resultaten van T3 ... T7 komt men tot een combinatie van de ingekorte krib 930.975 met een strekdam tegenover de kanaalaansluiting en een scherm vlak bovenstrooms van de mond. Deze combinatie is onderzocht in T8 (par. 4.2.2.).

Uit de resultaten van T8 en T6 (figuur 13) is te zien dat een landwaartse ligging van de strekdam tegenover de mond evenals verkorting van de krib 930.975 (T3 t.o.v. T3-A) een gunstige invloed op bankvorming en uitwisseling uitoefent.

In de proeven T9 ... T13 zijn voorts uitgaande van T8 het aanbrengen van een opstorting in het diepe gedeelte van de rivier voor de kanaalmond, een vermeerdering van het aantal schermen en een vormverandering van het scherm onderzocht (figuur 12).

De ruwe bestorting (T9) en de glad afgewerkte bestorting (T12) hadden in het model een hoogte van circa O.L.R. -3 m. In verband met de te

steile weergave van het bodemdwaarsprofiel in het model, betekent dit in het prototype een hoogte van circa O.L.R. -2,5 m.

In de binnenbocht lijkt de rivierbodem tengevolge van de bestorting iets omlaag te gaan (figuur 10^d). Dit leidt echter niet tot een wezenlijke verbetering. De bankvorming en uitwisseling zijn bij ruwe bestorting veel kleiner dan in T8 (figuur 13). Bij de glad afgewerkte bestorting van T12 is de bankvorming daarentegen iets groter dan in T8. De uitwisseling is in T12 niet gemeten.

Het aanbrengen van een bestorting heeft dus alleen zin om de bankvorming en uitwisseling te verkleinen. Deze bestorting moet dan een ruw oppervlak hebben.

Een bezwaar van een opstorting van het diepe gedeelte van het rivierdwarsprofiel is echter, dat de bestorting bij een eventuele daling van de rivierbodem een hinderlijke drempel kan gaan vormen. Indien de bestorting om deze reden bijv. een halve meter lager wordt gelegd, komt het effect hiervan veel minder tot zijn recht, vooral als de daling van de rivierbodem niet optreedt. Het verdient daarom aanbeveling het aanbrengen van een bestorting eerst te overwegen, als de gevolgen van Rijnkanalisatie en bochtafsnijdingen op de IJssel voor de rivierbodem voldoende bekend zijn en met de nieuwe aansluiting van het Twenthekanaal voldoende praktijkervaring is opgedaan om te beoordelen of een verbetering van deze aansluiting met betrekking tot aanzanding en aanslibbing gewenst of noodzakelijk is.

In T10 zijn drie schermen bovenstrooms van de kanaalmond in plaats van een onderzocht in combinatie met de bestorting van T9 (figuur 12). De resultaten van T10 zijn niet gunstiger dan die van T9 (figuren 10^d en 13). Vermeerdering van het aantal schermen heeft dus geen zin.

In T11 is een iets andere vorm van het scherm onderzocht eveneens in combinatie met de bestorting van T9. Op grond van de bankvorming en globale waarnemingen met betrekking tot de uitwisseling werd geen verbetering ten opzichte van T9 geconstateerd.

In T13 tenslotte is een circa 15 m langer scherm dan in T8 toegepast (figuur 12) met het doel aan de bovenstroomse zijde van de kanaalmond een meer vloeiende samenloop van de rivier- en de neerstroom te verkrijgen en daardoor een kleinere bankvorming en uitwisseling. De

bestorting is bij deze proef verwijderd en de mondwijdte is ongeveer 15 m kleiner dan in T8 tengevolge van het langere scherm. Toch zijn de resultaten van T13 niet gunstiger dan die van T8 (figuur 13).

Uit de proeven T9 ... T13 kunnen de conclusies worden getrokken, dat een ruwe bestorting ten opzichte van T8 verbetering geeft voor de bankvorming en uitwisseling en dat een versmalling van de mond met circa 15 m (door verlenging van het scherm) geen verbetering geeft. Het aanbrengen van een bestorting is evenwel voorlopig niet aan te bevelen.

4.2.2. Onderzoek aanbevolen oplossing (T8)

Kenmerken

Op grond van het in par. 4.2.1 vermelde, heeft de aanbevolen oplossing de volgende kenmerken (figuur 8):

- De kanaalaansluiting bestaat uit een ongeveer cirkelvormige circulatiekom, gelegen in een buitenbocht van de rivier op enige afstand benedenstrooms van de stroomovergang.
- De mond strekt zich uit van circa km 930.050 tot 930.200. Dit betekent ten opzichte van de huidige mond een verschuiving van circa 200 m in bovenstroomse richting.
- De bodembreedte van de mond (op O.L.R. 1962 ^{NAP-130} -3 m) bedraagt 120 m. De breedte op de waterspiegel bij een afvoer van 250 m³/s (waterstand 113) circa O.L.R. 1962 +2 m) bedraagt 135 m.
- Vlak bovenstrooms van de mond is langs de oever een stalen damwand-scherm geplaatst. Bij de hierboven opgegeven breedtematen is hiermee rekening gehouden.
- De uitmonding van het kanaal op de circulatiekom is zodanig gesitueerd dat er een goede neerstroom in de kom optreedt en een vlotte manoeuvreermogelijkheid voor de schepen aanwezig is.
- De aansluiting van de industriehavens Eefde op het kanaal is circa 250 m landwaarts van de circulatiekom gelegen.
- De huidige kanaalmond wordt afgesloten door een strekdam volgens het tracé van de zomernormaallijn.

uiteindelijk (juni '69) vastgesteld: 120 m op NAP-110.
talud helling 1:3,5. $Q = 250 = \text{NAP} + 3,41$ (was 3,77)
geeft breedte op waterlijn 135,70 m.
zie dossier.

- De afkalvende rivieroever tegenover de nieuwe kanaalaansluiting wordt vanaf de circa 10 meter ingekorte krib bij km 930.975 tot de reeds bestaande oeververdediging bij km 931.275 door een strekdam verdedigd.
- De afstand van de strekdam tot de zomernormaallijn verloopt geleidelijk van 10 m bij km 930.975 tot 0 m bij km 931.050.

Verrichte proeven

In de proeven T8 ... T8-E zijn bodemligging, stroombeeld, bankvorming en wateruitwisseling als gevolg van het rivierregiem, pompen, spuien en schutten onderzocht.

Omdat mag worden aangenomen, dat de invloed van het pompen, spuien en schutten als zodanig voor de verschillende in par. 4.2.1. vermelde oplossingen ongeveer hetzelfde is als die in de aanbevolen oplossing, zijn de hierop betrekking hebbende proeven ter vergelijking eveneens in deze paragraaf behandeld.

Voor de bodemligging in de rivier is alleen het rivierregiem van belang (par. 3.2). Hiervoor zijn resultaten gebruikt van de proeven T8, T8-A en T8-C (figuur 13). Proef T8-A is een herhaling van proef T8 ter controle van de reproduceerbaarheid. Tussen T8 en T8-A zijn in het model een aantal andere proeven verricht.

Voor het stroombeeld in en bij de kanaalaansluiting, de bankvorming in de circulatiekom en de wateruitwisseling tussen rivier en circulatiekom, zijn naast het rivierregiem ook het pompen, spuien en schutten van belang. Ten aanzien van het rivierregiem moet in deze afzonderlijk aandacht worden besteed aan stroming over de uiterwaarden tijdens hoge rivierafvoer, die niet in het model is onderzocht.

Voor het pompen is naast T8 en T8-A ook gelet op T3 en T4. De gevolgen van het spuien zijn in beschouwing genomen in T8-C ... T8-E alsmede in T4, T4-B ... T4-E.

Voor de invloed van het schutten is gelet op de proeven T8-A en T8-B alsmede T3 en T4-A.

De resultaten van de T8-proeven zijn weergegeven in de figuren 8, 11 ... 13 uit vergelijking van de proeven T8 en T8-A blijkt een goede reproduceerbaarheid van de resultaten.

Bodemligging

De bij T8 en T8-A gevonden bodemligging in de rivier ter hoogte van de nieuwe kanaalaansluiting is nog iets gunstiger dan thans op deze plaats (figuur 11^a). Veiligheidshalve kan gesteld worden, dat hier geen verslechtering optreedt. Dit is voornamelijk te danken aan het gekozen type kanaalaansluiting (circulatiekom, par. 4.2.1).

Benedenstrooms van de nieuwe kanaalaansluiting - ter hoogte van de huidige kanaalmond - treedt een aanzienlijke verbetering op t.o.v. thans (figuur 11^b). Ook het oversteken van de geul vlak beneden de huidige mond komt niet meer voor (figuren 7 en 8). Hierdoor ondervindt niet alleen de kanaalvaart verbetering doch ook de doorgaande vaart op de rivier. Een en ander is te danken aan de afsluiting van de huidige kanaalmond (par. 4.2.1).

In proef T8-C is getracht aan globale indruk te verkrijgen omtrent de gevolgen van de Rijnkanalisatie. Hierbij is uitgegaan van het meest ingrijpende stuwprogramma - programma "350" -. Voor de bedvormende afvoer onder deze omstandigheden is $350 \text{ m}^3/\text{s}$ aangehouden (par. 3.3).

Over de daarbij behorende bodemligging en het zandtransport in het beschouwde riviervak bestaat geen volledige zekerheid en deze is in dit model ook niet te verkrijgen. Er is uitgegaan van de verwachting dat de gemiddelde bodemligging geen verandering zal ondergaan. Vervolgens is proefondervindelijk het aanbod van transportmateriaal bepaald, dat nodig is, om de gewenste bodemligging te bewerkstelligen. In verband met het globale karakter van de proef is met het oog op tijdsbesparing genoeg genomen, met een gemiddelde bodemligging over de gehele lengte van het model, die circa 2 dm lager is dan de huidige. Het hierbij gevonden transport komt overeen met circa $250 \text{ m}^3/\text{etm}$. Dit is meer dan het zandtransport, dat onder het huidige regiem met de afvoer van $350 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondeert [4].

De configuratie van het rivierbed verandert niet. Het bodemdwaarsprofiel ter plaatse van de kanaalaansluiting ligt gemiddeld ongeveer 2 dm lager dan bij de bedvormende afvoer van $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (proeven T8 en T8-A - figuur 11^a -). Hieruit volgt, dat de verhouding in bodemligging tussen het gedeelte bij de kanaalaansluiting en de aangrenzende riviervakken niet verslechtert tengevolge van de regiemverandering.

Stroombeeld

Onder normale omstandigheden treedt in de circulatiekom een neerstroming op die geleiding geeft aan de rivierstroom (foto 6). De stroomsnelheid in de neer is kleiner dan op de rivier. Bij de gekozen mondbreedte zal de overgang van het gebied met grote naar dat met kleine stroom of andersom voor de schepen waarschijnlijk geen moeilijkheden opleveren.

Bij overstroming van de uiterwaarden tijdens hoog water, zal de stroming ter plaatse van de circulatiekom althans in de bovenste laag ongeveer evenwijdig aan de rivier zijn. Bij voldoende markering van de mond en de circulatiekom zal ook dan naar verwachting geen grote hinder door de scheepvaart worden ondervonden.

Tijdens het pompen blijkt de neerstroming in de circulatiekom gehandhaafd (foto 7). Het pompen leidt tot een wat grotere instroming aan de benedenstroomse kant van de mond en een wat kleinere uitstroming aan de bovenstroomse kant. Voor de scheepvaart zal dit geen hinder opleveren.

Het stroombeeld tijdens spuien wordt vooral bepaald door de verhouding tussen spuidebiet en rivierdebiet (par. 3.4). Het spuien is onderzocht bij een rivierdebiet van $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (proeven T4-B ... T4-E) en bij een debiet van $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (proeven T8-D en T8-E).

Op foto 10 is te zien, dat reeds bij een verhouding tussen spuidebiet en rivierdebiet van 0.1 verstoring van de neerstroming optreedt. Naarmate de spuistroom toeneemt, schijnt de dwars door de circulatiekom trekkende stroom meer direct op de benedenstroomse zijde van de mond gericht zijn (foto's 11 ... 13). Ter weerszijden van de spuistroom ontstaat een neer in de circulatiekom. De rivierstroom wordt door de spuistroom enigszins verdrongen. Gezien de korte spuiduren zal dit op de bodemligging in de rivier geen invloed uitoefenen (par. 3.2).

In de proeven T8-D en T8-E zijn respectievelijk spuidebieten van circa 50 en circa $115 \text{ m}^3/\text{s}$ toegepast. De afvoer van $115 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt gemiddeld gedurende 2 dagen per jaar bereikt of overschreden (figuur 4^b). De in het model gemeten snelheden van de spuistroom in de circulatiekom komen overeen met respectievelijk ongeveer 0,3 en 0,6 m/s (foto's 14 en 15). Indien de scheepvaart op de aanwezigheid van een spuistroom geattendeerd wordt, zijn naar verwachting geen bijzondere manoeuvreermoeilijkheden te vrezen.

Het stroombeeld tijdens schutten is weergegeven in de foto's 8 en 9. Tijdens uittrekkende stroom wordt de neer verstoord evenals bij zwakke spuistroom (foto's 8 en 10). Tijdens het kanaal intrekkende stroom ontstaat een stroombeeld dat vergelijkbaar is met dat tijdens pompen (foto's 7 en 9). Het stroombeeld is niet permanent omdat de uit- en intrekkende stromen veranderen met de tijd. Gezien de geringe stroomsnelheden zal dit geen hinder opleveren voor de scheepvaart. Omdat geen uitbuiging van de rivierstroom in de aansluiting optreedt, behoeft niet voor een ongunstige invloed van het schutten op de bodemligging in de rivier gevreesd te worden.

Resumerend kan gesteld worden, dat tijdens laagwater, spuien en schutten het normale stroombeeld in de kanaalaansluiting wordt verstoord. Door markering van de kanaalaansluiting en plaatsing van waarschuwingstekens kan de eventuele hinder van deze verstoring voor de scheepvaart ondervangen worden. Voor een ongunstige invloed op de bodemligging in de rivier behoeft niet te worden gevreesd.

Bankvorming

Onder normale omstandigheden (rivierafvoer $250 \text{ m}^3/\text{s}$) is de bankvorming in de kanaalaansluiting slechts weinig groter dan in de huidige situatie. Bij een afvoer van $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (proef T8-C) wordt een duidelijk grotere bankvorming gevonden (figuur 13). Ten dele wordt dit veroorzaakt doordat er nu meer bodemmateriaal per tijdseenheid langs de mond wordt getransporteerd. De riviertransporten verhouden zich voor de beide proeven globaal als 1:2; de bankinhouden als ongeveer 1:3.

Er moet voor het prototype in dit verband worden opgemerkt, dat door de toename van de bedvormende afvoer door Rijnkanalisatie ook de aanzanding in de havenmond zal toenemen ten opzichte van de toestand zonder Rijnkanalisatie.

Het van te voren baggeren van een soort zandvang op de plaats, waar de bankvorming optreedt heeft niet volledig het verwachte effect. De bankvorming neemt in dat geval nog toe en er blijft zich een, zij het kleinere, plaatselijke ophoging boven de bodem van de circulatiekom voordoen.

Uit inlichtingen van de gemeente Zutphen blijkt, dat in de industriehaven Zutphen, die circa 1 km bovenstrooms van het Twenthekanaal is ge-

leggen (figuur 1) een aanzienlijke verondieping optreedt - enige duizenden m³/jaar - bestaande uit zand en slib, die voornamelijk geweten wordt aan afzettingen tijdens hoge afvoer. De industriehaven zou dan als vang fungeren voor het transport, dat bij hoge afvoer via het winterbed plaats vindt. De verklaring voor het feit, dat dit in de huidige mond van het Twenthekanaal niet optreedt, kan gezocht worden in de aanwezigheid van de hoogwatervrije stroomgeleidende dijk langs de benedenstroomse zijde van het Twenthekanaal. Deze verklaring roept de verwachting op, dat in de nieuwe kanaalaansluiting wel rekening moet worden gehouden met afzettingen tijdens hoogwater, die veel groter zijn dan de bankvorming onder normale omstandigheden. Indien deze afzetting optreedt, zal dit in de bovenstroomse zijde van de circulatiekom geschieden dus niet op dezelfde plaats als de normale bankvorming. Het is niet te verwachten, dat hierdoor grote hinder voor de scheepvaart zal ontstaan. Deze afzetting kan wel de aanleiding vormen tot regelmatig onderhoudsbaggerwerk.

De bankvorming bij pompen is in de aanbevolen oplossing circa 1,5 maal zo groot als normaal, doch kleiner dan in de huidige situatie bij pompen (figuur 13). Tijdens spuien behoeft, gezien het stroombeeld, niet voor bankvorming te worden gevreesd. Anderszijds wordt een eenmaal gevormde bank ook door langdurig spuien niet aangetast. Op grond van het stroombeeld is dit ook niet te verwachten (foto's 10 ... 15).

Op grond van de waargenomen gemiddelde wateruitwisseling tijdens schutten (zie verder) wordt verwacht, dat de bankvorming door het schutten niet wordt beïnvloed.

Resumerend kan gesteld worden dat de bankvorming, afgezien van de gevolgen van hoogwater, ongeveer in de zelfde orde van grootte zal liggen als in de huidige situatie. De gevolgen van hoogwater kunnen aanleiding vormen tot regelmatig onderhoudsbaggerwerk.

Wateruitwisseling

De wateruitwisseling tussen rivier en circulatiekom is onder normale omstandigheden in de aanbevolen oplossing ongeveer even groot als in de huidige situatie (figuur 13). Dit gunstige resultaat is voornamelijk te danken aan het stalen damwandscherm vlak bovenstrooms van de mond en aan de landwaartse ligging van de strekdam tegenover de mond (par. 4.2.1).

Bij de afvoer van $350 \text{ m}^3/\text{s}$ is de uitwisseling slechts weinig groter dan bij $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (vgl. T8 en T8-C, figuur 13).

Het is niet te verwachten, dat bij overstroming van de uiterwaarden tijdens hoogwater een veel grotere uitwisseling zal optreden.

De toename van de uitwisseling tijdens pompen is kleiner dan de verhouding tussen pomp- en rivierdebiet (zie figuur 13, T3 en T4). Uit het stroombeeld tijdens pompen is dit verklaarbaar (zie boven).

Tijdens spuien kan op grond van het stroombeeld een zeer kleine uitwisseling verwacht worden.

De invloed van het schutten is onderzocht in T3 en T8-A.

De gemiddelde uitwisseling tijdens regelmatig schutten (par. 3.5 en 4) ligt in dezelfde orde van grootte als de uitwisseling onder normale omstandigheden (figuur 13).

Uit vergelijking van de proeven T8-A en T8-E blijkt dat de aanleg van de industriehavens Eefde een geringe gunstige invloed uitoefent.

De gevolgen van de voorgenomen verruiming van het IJsselpand-Twenthekanal zijn niet in beschouwing genomen, omdat deze verruiming naar verhouding zeer klein zal zijn en naar verwachting een gunstige invloed uitoefenen.

Bij verhoging van de rivierafvoer - na Rijnkanalisatie - zal de invloed van het schutten eveneens kleiner worden (par. 3.4).

Resumerend kan gesteld worden dat de wateruitwisseling in de aanbevolen oplossing ongeveer even groot zal zijn als in de bestaande situatie.

Samenvatting

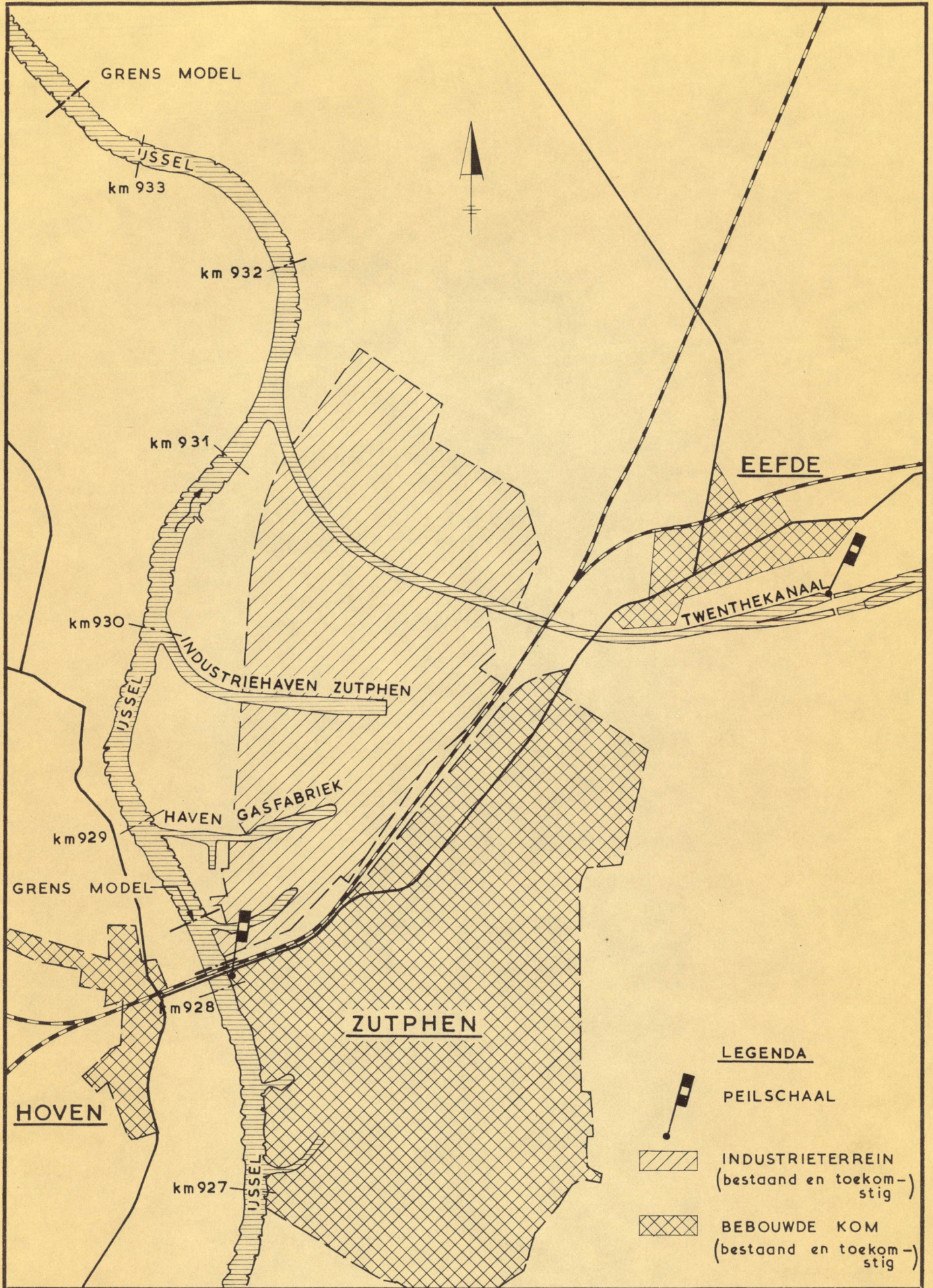
De bodemligging in de rivier wordt bij de aanbevolen oplossing t.o.v. de huidige situatie dusdanig verbeterd, dat niet alleen de kanaalvaart doch ook de doorgaande vaart op de rivier hiervan voordeel ondervindt.

Het stroombeeld in en bij de kanaalaansluiting kan afhankelijk van de omstandigheden verschillende gedaanten aannemen. Door de scheepvaart hierop attent te maken en door markering van de aansluiting, kunnen de hieraan verbonden bezwaren ondervangen worden.




Afgezien van de gevolgen van hoogwater zal de bankvorming in de circulatiekom ongeveer even groot zijn als in de huidige kanaalmond. Tijdens

hoogwater kan de afzetting van materiaal groter zijn dan thans. Een en ander kan aanleiding geven tot regelmatig onderhoudsbaggerwerk in de orde van grootte van enige duizenden m³/jaar.

De wateruitwisseling zal in de aanbevolen oplossing niet groter zijn dan thans.



LEGENDA

-  PEILSCHAAL
-  INDUSTRIETERREIN
(bestaand en toekomstig)
-  BEBOUWDE KOM
(bestaand en toekomstig)

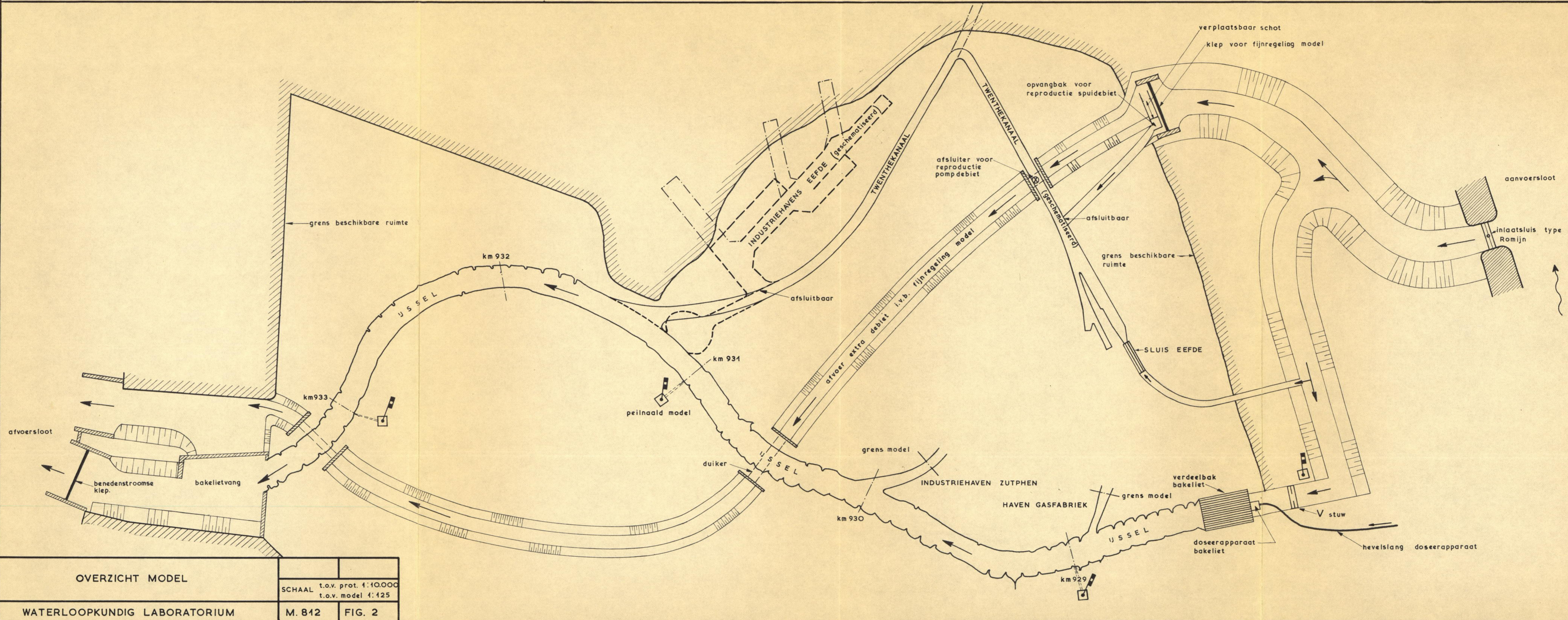
DE 'JSSEL BIJ ZUTPHEN

SCHAAL 1 : 25.000

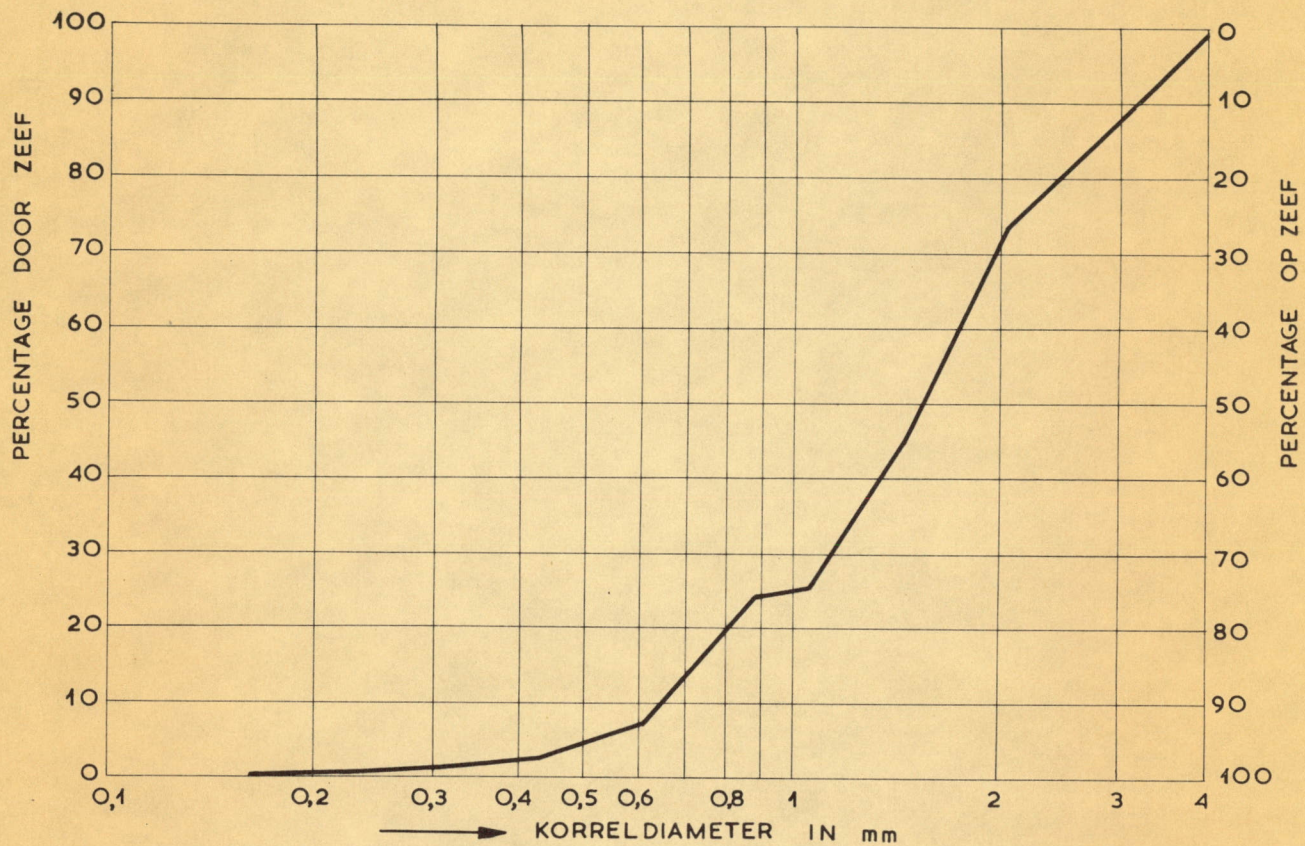
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 842

FIG. 1



OVERZICHT MODEL	SCHAAL	t.o.v. prot. 1:10.000
		t.o.v. model 1:425
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 812	FIG. 2



$\bar{d} = 1,72 \text{ mm}$
 $\rho_s = 1450 \text{ kg/m}^3$

ZEEFKROMME BAKELIET

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 812

FIG. 3

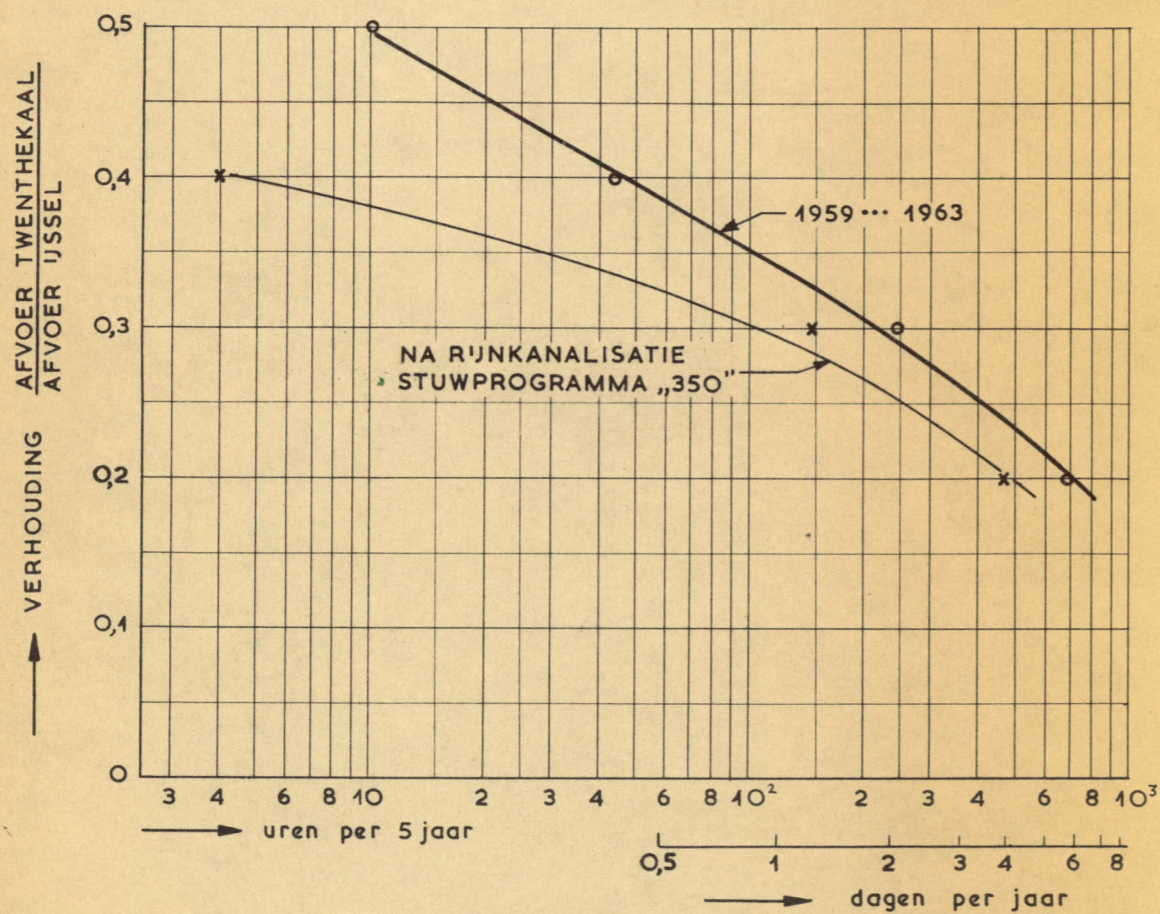


FIG. 5^a OVERSCHRJDINGSFREQUENTIE VAN DE VERHOUDING $\frac{\text{AFVOER TWENTHEKANAAL}}{\text{AFVOER IJSSEL}}$

WAARNEMINGSPERIODE 1959 ... 1963 (43.824 uur)

FREQUENTIE EN AANEENGESLOTEN DUUR
VERHOUDING $\frac{\text{AFVOER TWENTHEKANAAL}}{\text{AFVOER IJSSEL}}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 842

FIG. 5

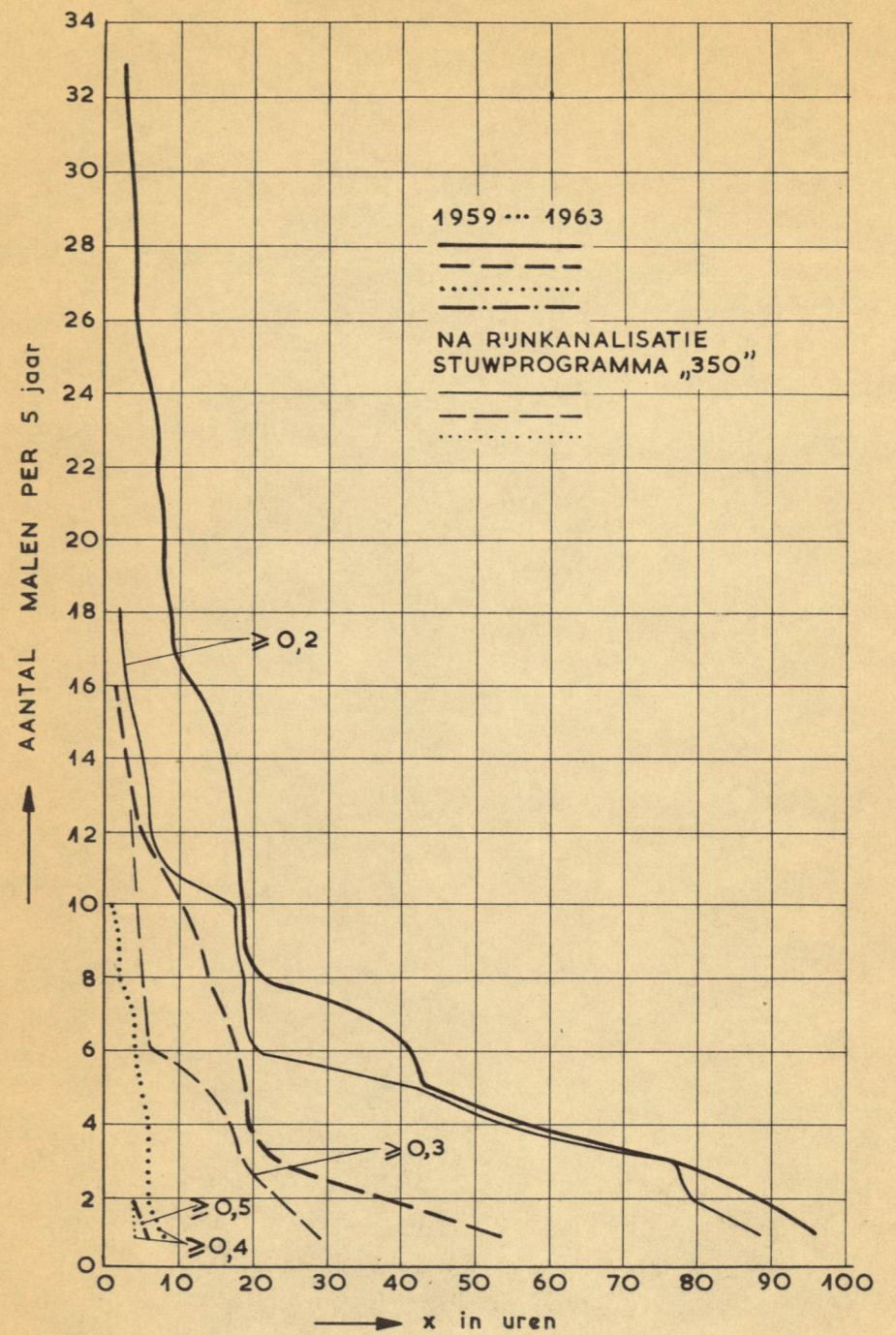
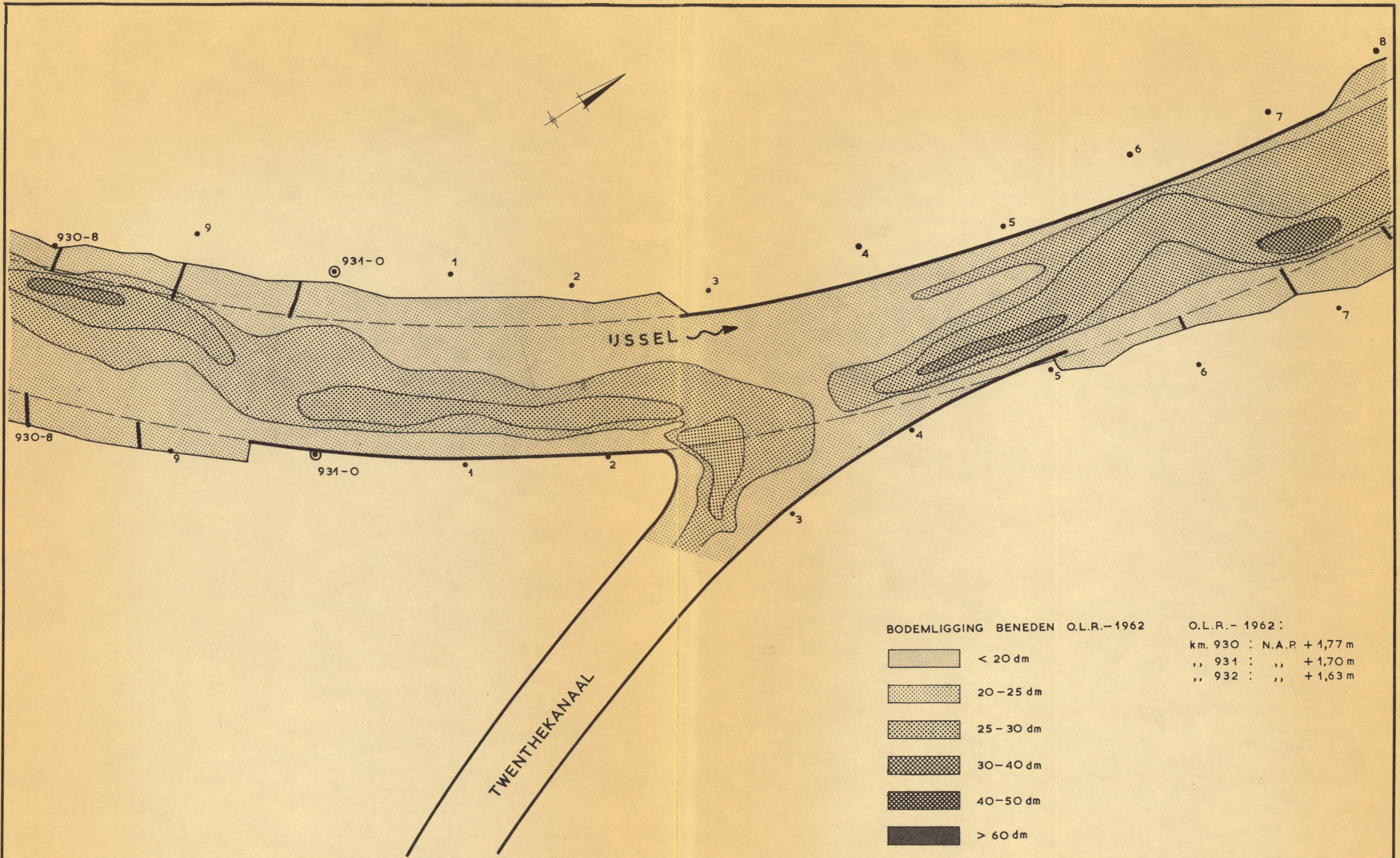


FIG. 5^b AANTAL MALEN DAT EEN VERHOUDING $\frac{\text{AFVOER TWENTHEKANAAL}}{\text{AFVOER IJSSEL}}$ VAN 0.2 RESP. 0.3, 0.4 EN 0.5 OF GROTER IS OPGETREDEN EN X UUR OF LANGER HEEFT GEDUURD.

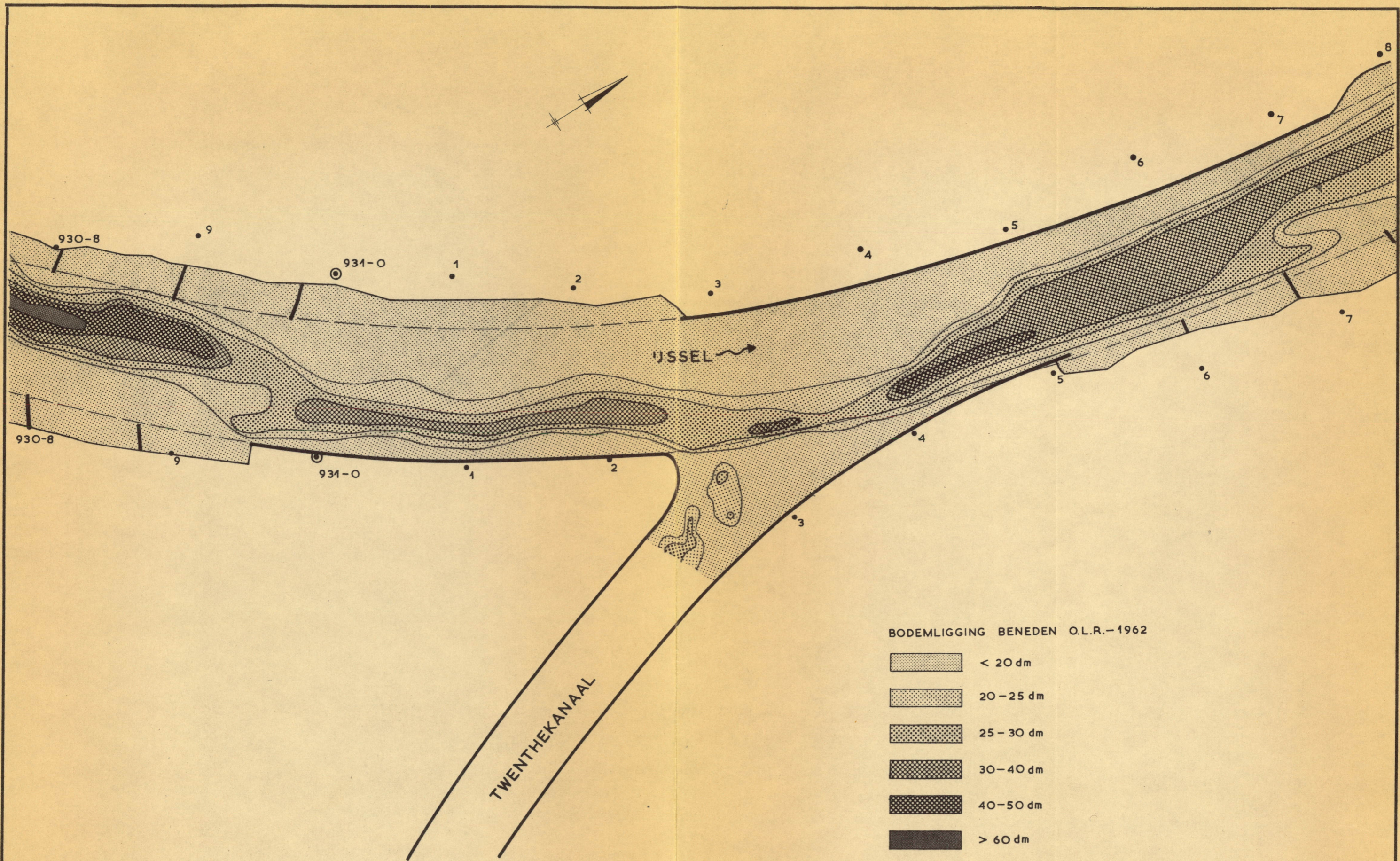
N.B. Afvoer Twenthekanaal is afvoer door de kanaalmond.
Afvoer IJssel is rivierafvoer bovenstrooms van de kanaalmond.



BODEMLIGGING PROTOTYPE		
	SCHAAL 1:2500	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 812	FIG. 6

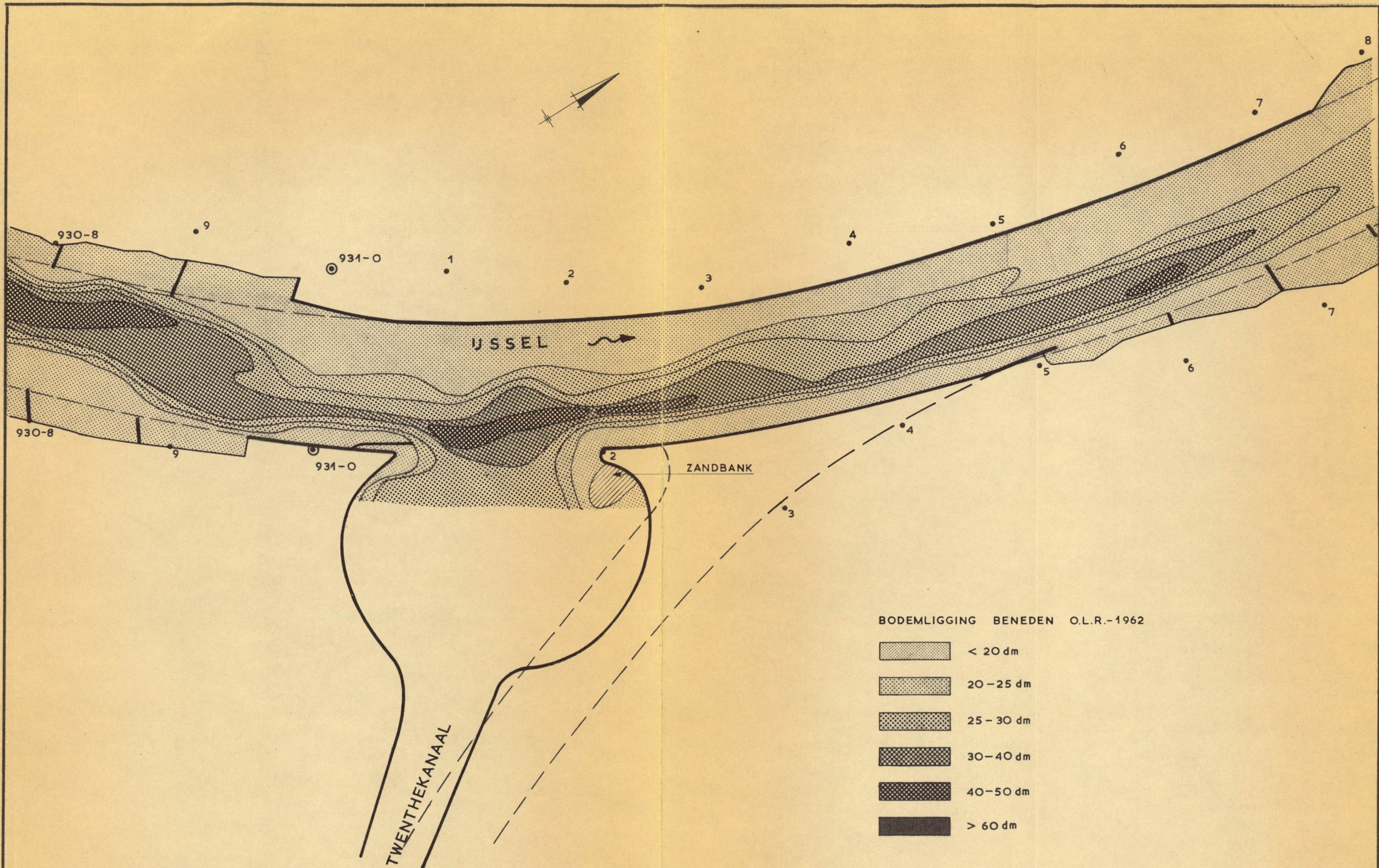
GEMIDDELDE VAN DETAILPEILINGEN VAN:
 nov. 1963
 jan. 1964
 april 1964

AFSTAND TUSSEN DE RAAIEN
 IN DE IJSEL : 50 m
 IN DE MOND VAN HET TWENTHE KANAAL: 10 m
 AFSTAND TUSSEN DE PEILPUNTEN IN DE RAAIEN : 10 m


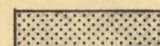
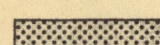





BODEMLIGGING MODEL HUIDIGE SITUATIE		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 812	FIG. 7

GEMIDDELDE VAN 3 DETAILPEILINGEN
VOOR O.L.R.-1962, PEILRAAIEN ENZ.
ZIE FIG. 6



BODEMLIGGING BENEDEN O.L.R.-1962

-  < 20 dm
-  20-25 dm
-  25-30 dm
-  30-40 dm
-  40-50 dm
-  > 60 dm

BODEMLIGGING AANBEVOLEN OPLOSSING	T8	
	SCHAAL 1:2500	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 812	FIG. 8

GEMIDDELDE VAN 3 DETAILPEILINGEN
VOOR O.L.R. 1962, PEILRAAIEN ENZ.
ZIE FIG. 6

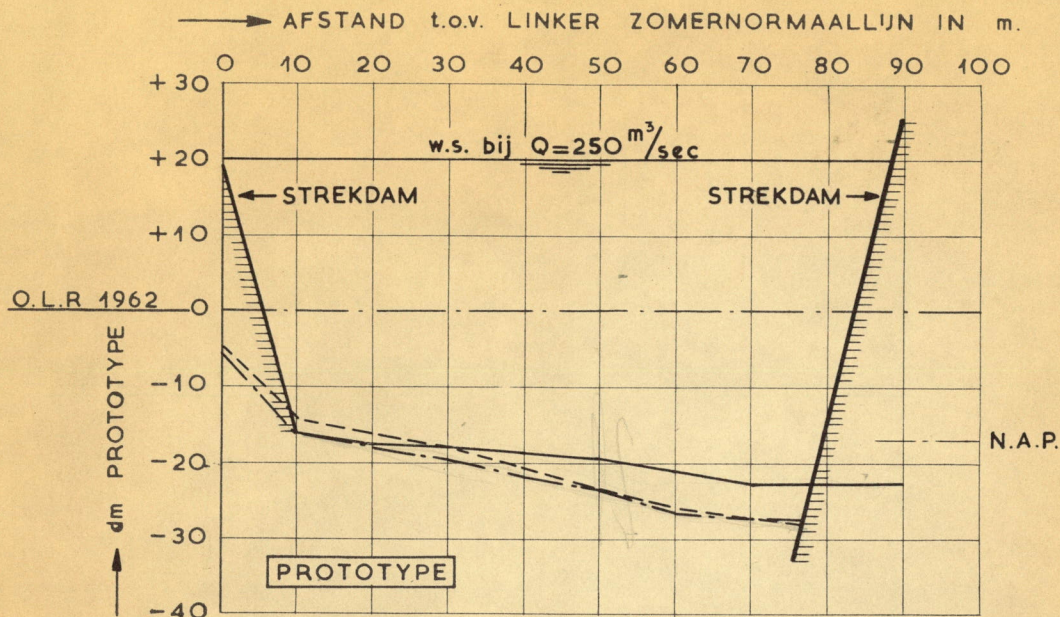


FIG. 9^a Gem. van peilingen { — km 931.250 ... 931.400 (huidige mond)
 nov. 1963, jan. en { - - - km 931.050 ... 931.200 (mond in T2...T13)
 april 1964 { - · - · km 931.000 ... 931.150 (mond in T1)

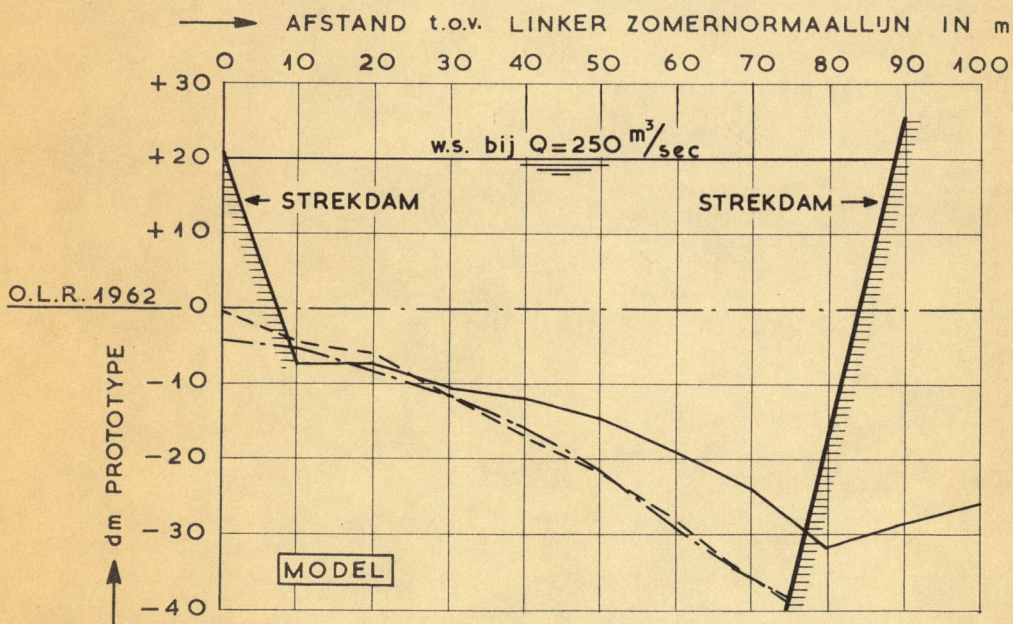
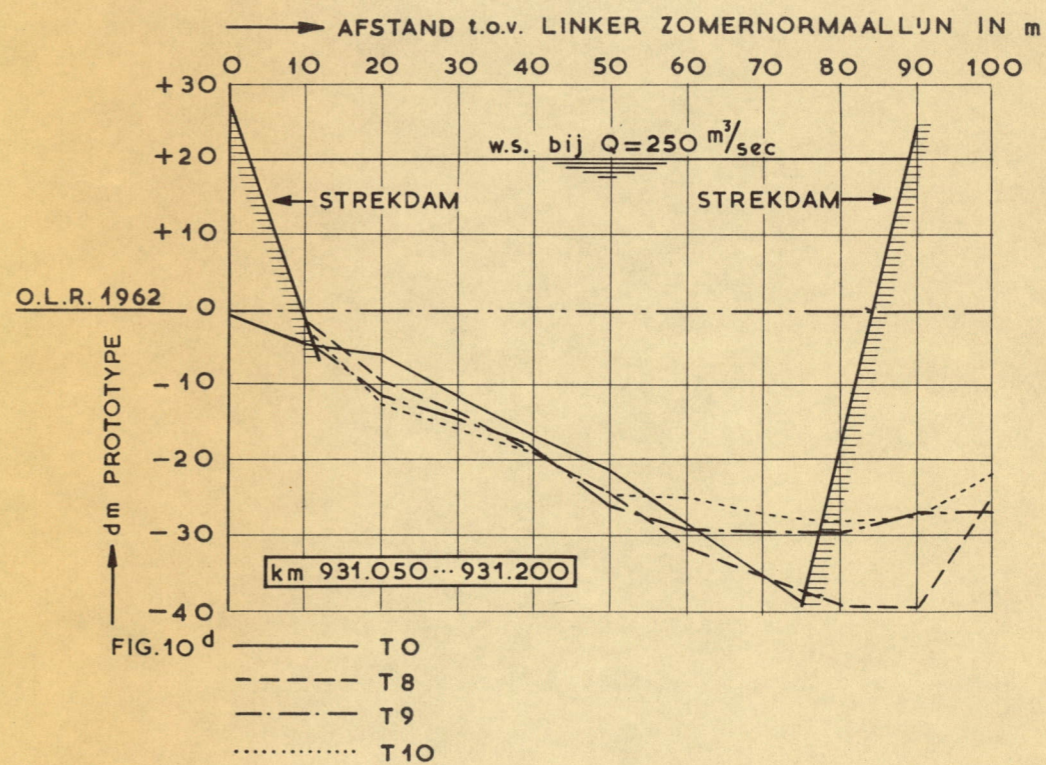
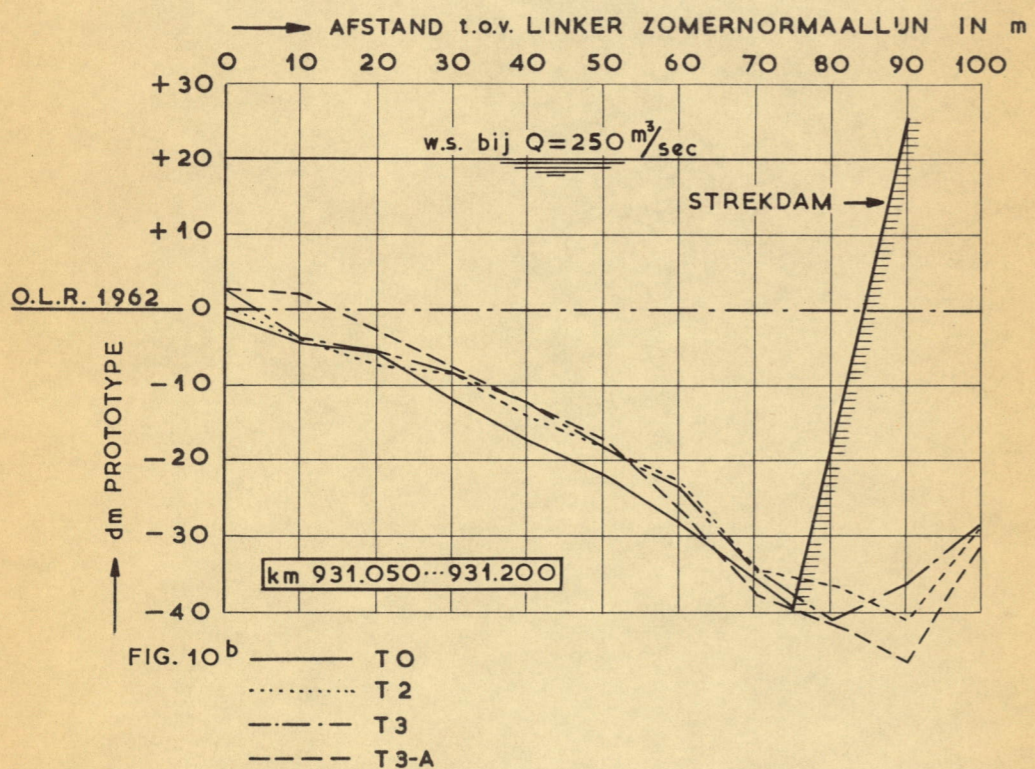
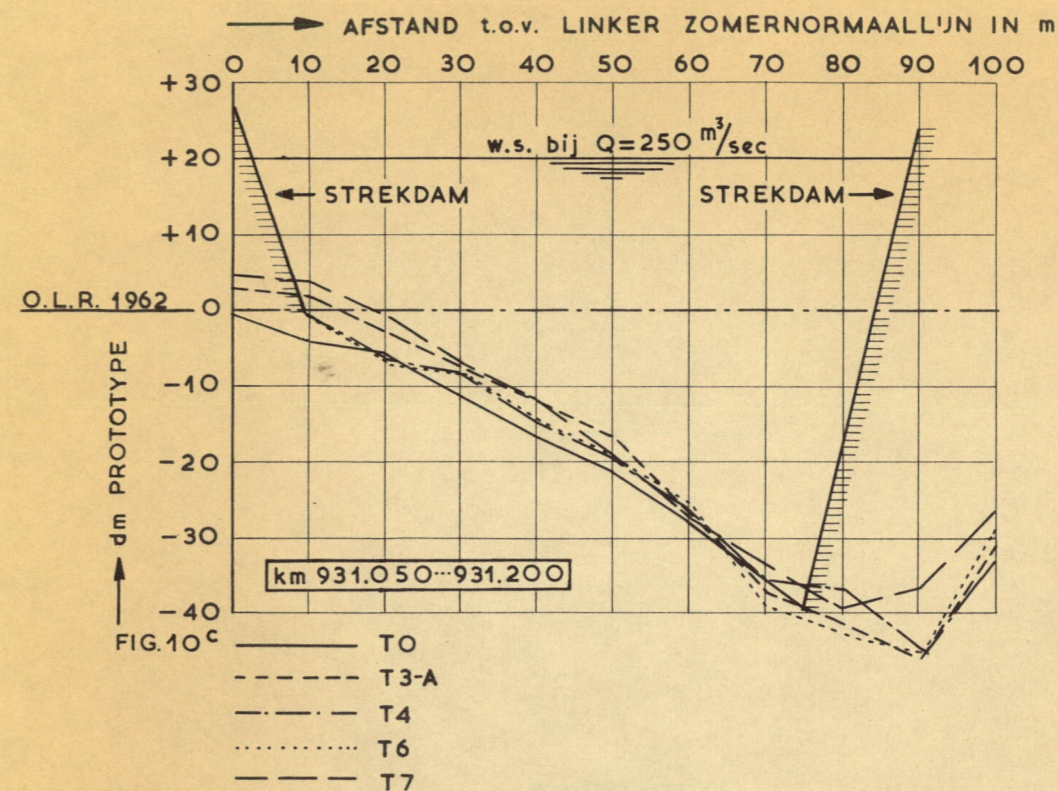
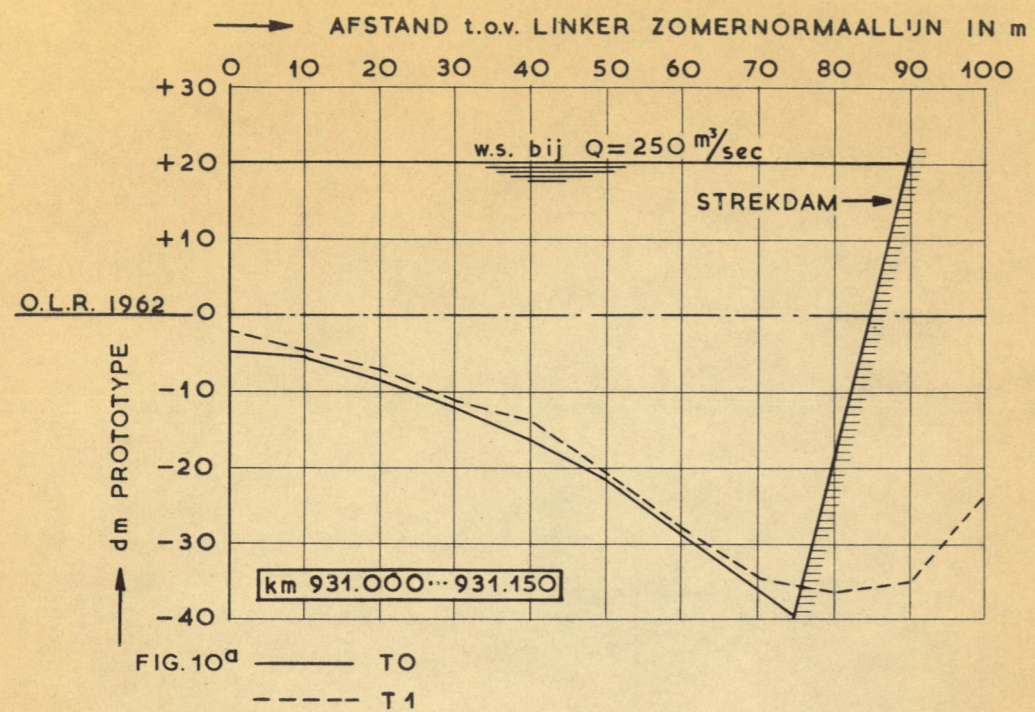


FIG. 9^b Gem. van 3 opéén-
 volgende peilingen { — TO km 931.250 ... 931.400 (huidige mond)
 { - - - TO km 931.050 ... 931.200 (mond in T2... T13)
 { - · - · TO km 931.000 ... 931.150 (mond in T1)

DWARSPROFIELEN PROTOTYPE EN MODEL
 HUIDIGE TOESTAND



DWARSPROFIELEN MODEL t.p.v. DE ONDER-
ZOCHE NIEUWE KANAALAANSLUITING

T1...T10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 812

FIG. 10

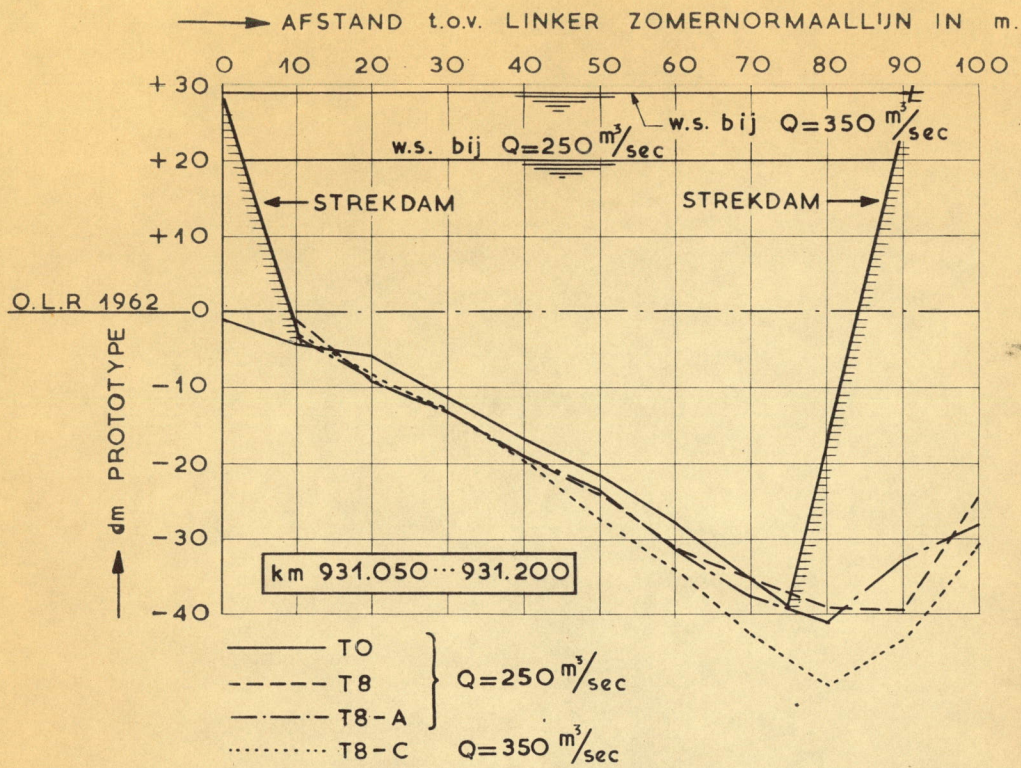


FIG. 11^a DWARSPROFIELEN t.p.v. DE AANBEVOLEN KANAALAANSLUITING

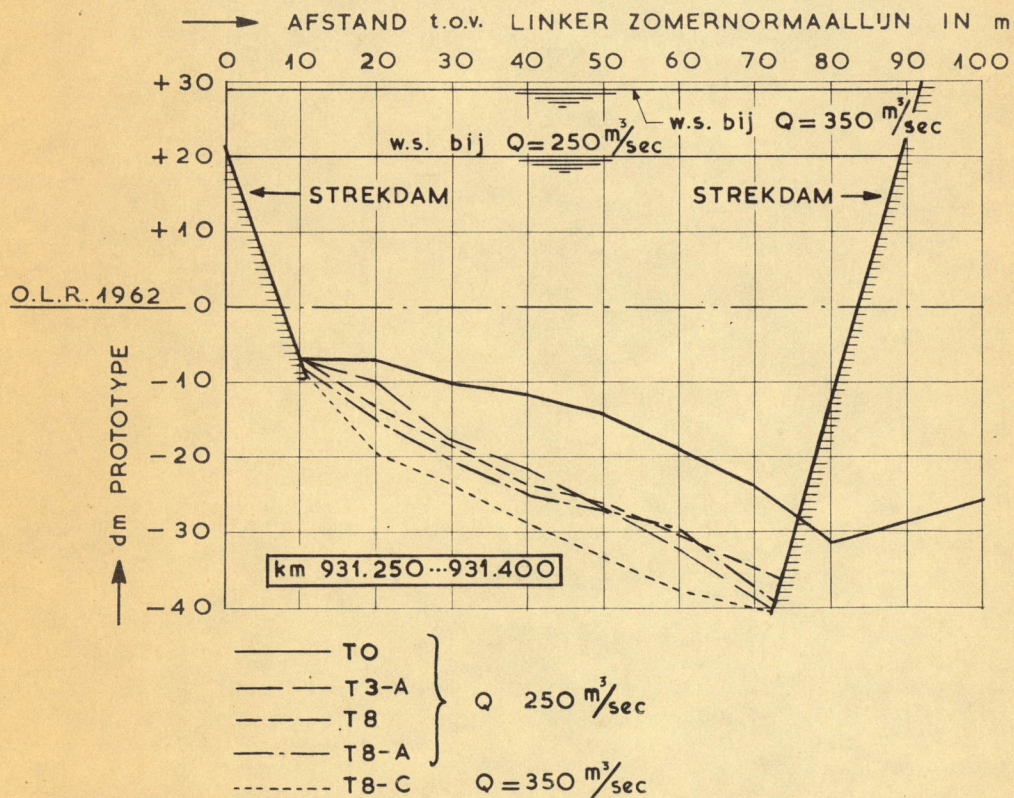
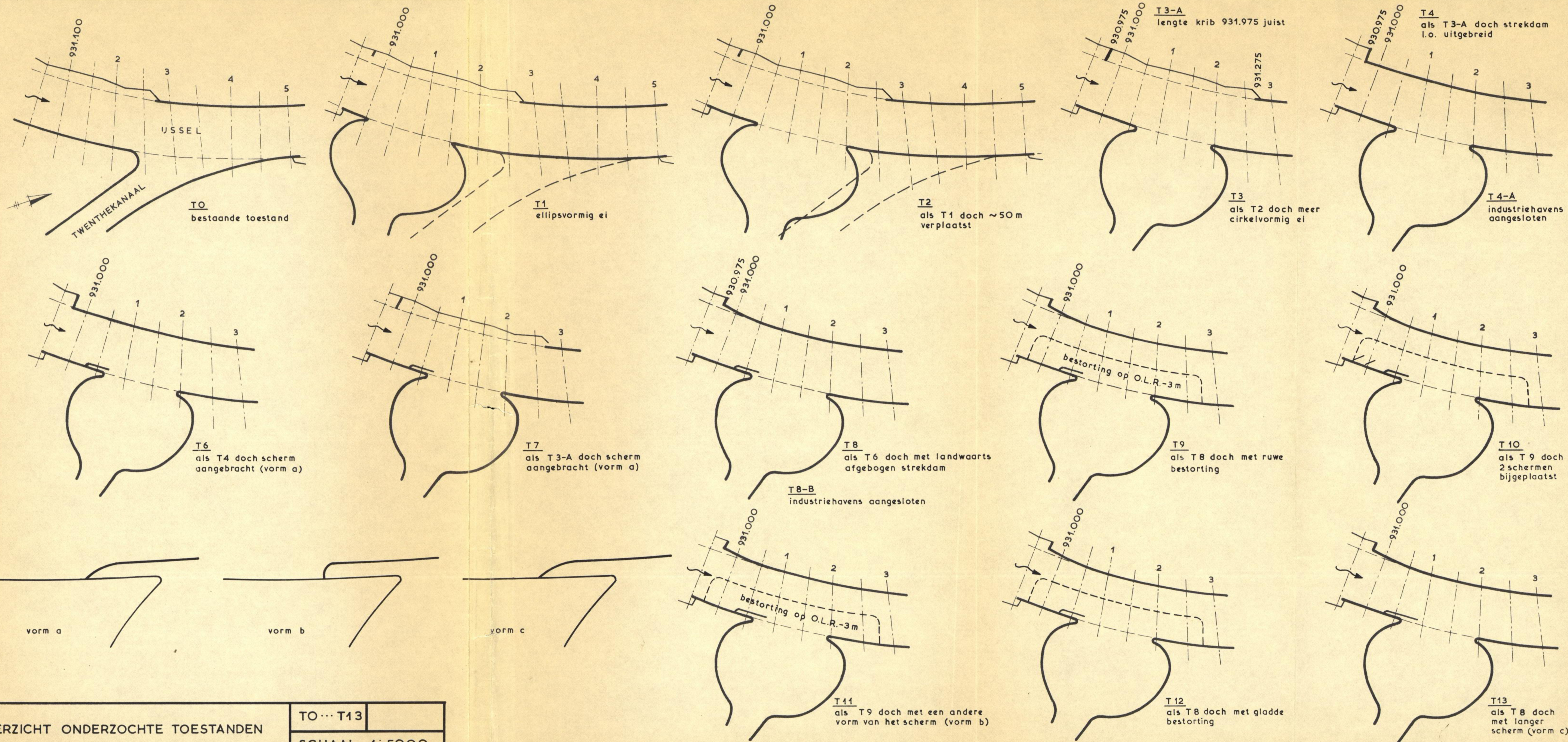


FIG. 11^b DWARSPROFIELEN t.p.v. DE HUIDIGE KANAALAANSLUITING

DWARSPROFIELEN VOOR AANBEVOLEN
OPLOSSING

T 8



OVERZICHT ONDERZOCHE TOESTANDEN

TO... T13	
SCHAAL 1: 5000	
M. 812	FIG. 12

vorm a

vorm b

vorm c

PROEF	OMSCHRIJVING										RESULTATEN UITWISSELING EN BANKVORMING									
											UITWISSELING (% VAN Q IJSEL)						BANKVORMING (m ³ /jaar)			
											KORTE DRIJVERS (n _v = 2,54)		LANGE DRIJVERS (n _v = √40)							
No	PLAATS MOND (m. benedenstr. km 931.000)	VORM.	SCHERM		LENGTE KRIB L.O. km 930.975	OEVER TEGENOVER NIEUWE AANSLUITING	BESTORTING	Q		INDUSTR. HAVENS EEFDE	NORMAAL	+ POMPEN	NORMAAL	+ POMPEN	+ SCHUTTEN			NORMAAL	+ POMPEN	
			AANTAL	VORM				IJSEL BIJ ZUTPHEN	TWENTE KAN. (spuizen)							STR. UIT	STR. IN	GEM.		
T0	huidige mond	—	—	—	- 10 m	onverdedigd	—	250 m ³ /sec	—		1,3	2,5							150	600
T1	0_150	~ellips	0	—	„	„	—	„	—										150	
T2	50_200	„	0	—	„	„	—	„	—		2,2								120	
T3	„	~cirkel	0	—	„	„	—	„	—		2,0	4,7	3,0	5,5	0,6	5,5	3,0		80	270
T3_A	„	„	0	—	juist	„	—	„	—				5,5						240	
T4	„	„	0	—	„	strekdam	—	„	—				7,0	8,2					240	340
T4_A	„	„	0	—	„	„	—	„	—	aangesloten					0,5	7,7	4,1			
T4_B	„	„	0	—	„	„	—	„	25 m ³ /sec											
T4_C	„	„	0	—	„	„	—	„	50 m ³ /sec											
T4_D	„	„	0	—	„	„	—	„	100 m ³ /sec											
T4_E	„	„	0	—	„	„	—	„	150 m ³ /sec											
T6	„	„	1	a	„	„	—	„	—				3,3						280	
T7	„	„	1	„	„	onverdedigd	—	„	—				3,8						200	
T8	„	„	1	„	- 10m	strekdam	—	„	—				2,2						200	300
T8_A	„	„	1	„	„	„	—	„	—				1,8		0	3,8	1,9		180	320
T8_B	„	„	1	„	„	„	—	„	—	aangesloten			—		0	3,0	1,5			
T8_C	„	„	1	„	„	„	—	350 m ³ /sec	—				2,5						650	
T8_D	„	„	1	„	„	„	—	„	50 m ³ /sec				—							
T8_E	„	„	1	„	„	„	—	„	155 m ³ /sec				—							
T9	„	„	1	„	„	„	ruw	250 m ³ /sec	—				1,3						100	
T10	„	„	3	„	„	„	„	„	—				1,4						90	
T11	„	„	1	b	„	„	„	„	—				—						90	
T12	„	„	1	a	„	„	glad	„	—				—						220	
T13	„	„	1	c	„	„	—	„	—				3,5						190	

Voor schermvormen a, b en c zie fig. 12

N.B. T5 vervallen proefnummer
T8-A is herhaling van T8
pompdebiet Q = 10 m³/sec

OVERZICHT VERRICHTE PROEVEN
EN RESULTATEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 812

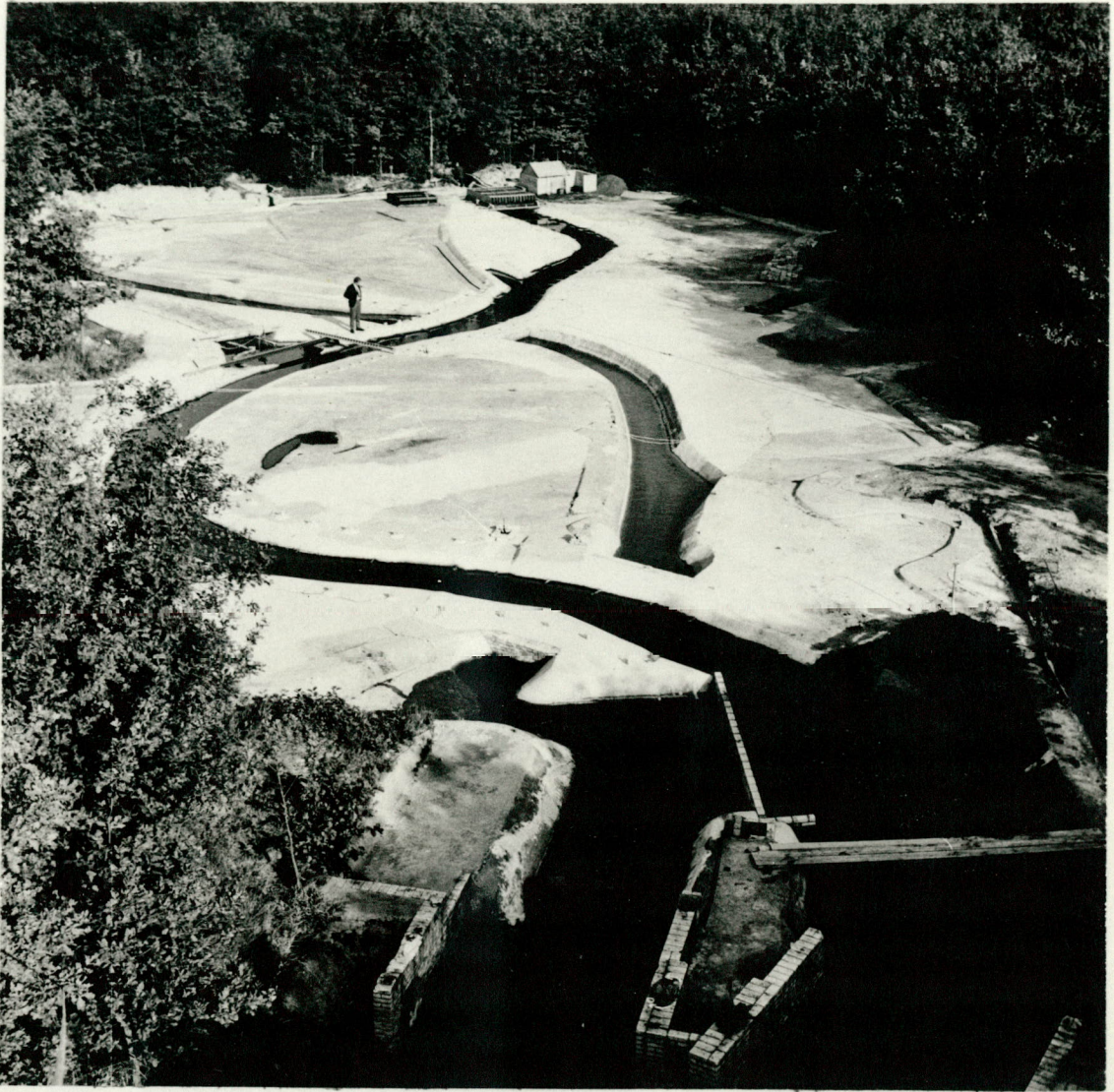
FIG. 13



1. BOUW MODEL.



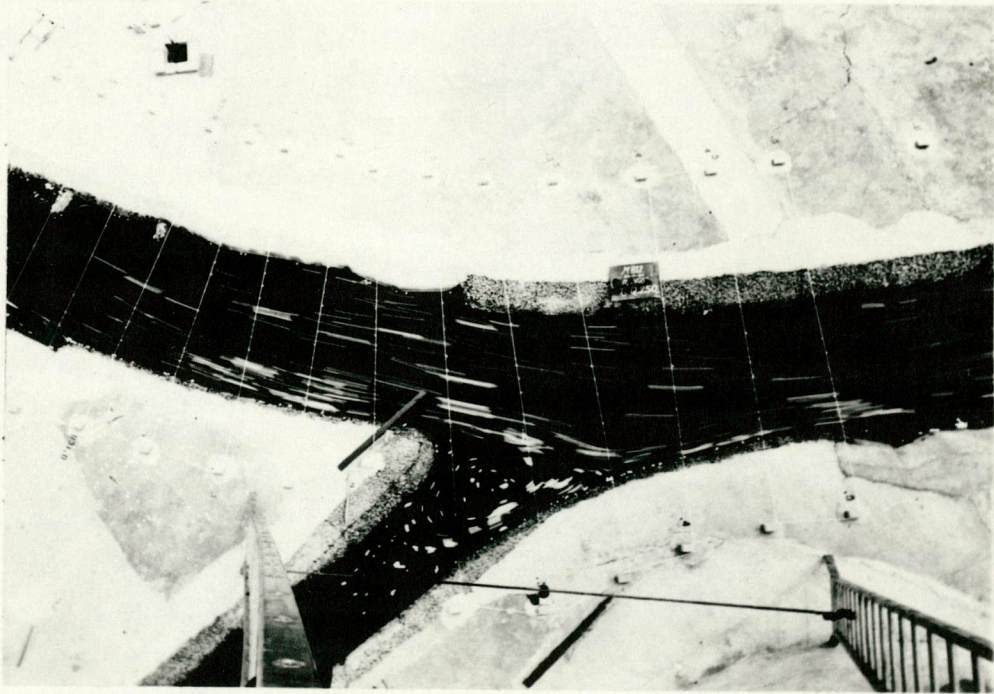
2. BAKELIET AANGEBRACHT.



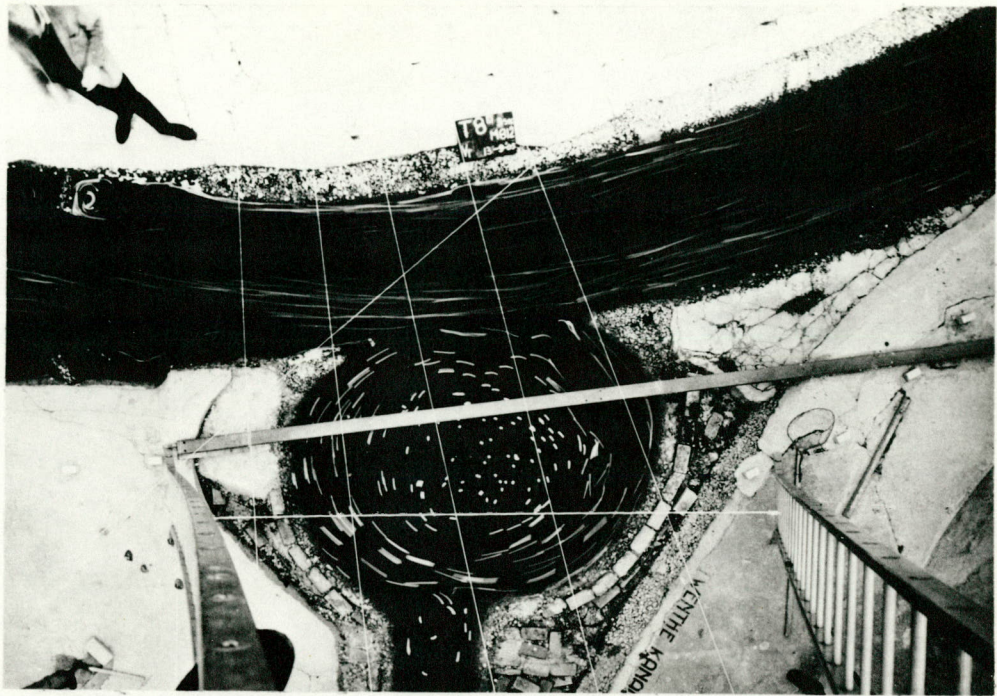
3. OVERZICHT MODEL.



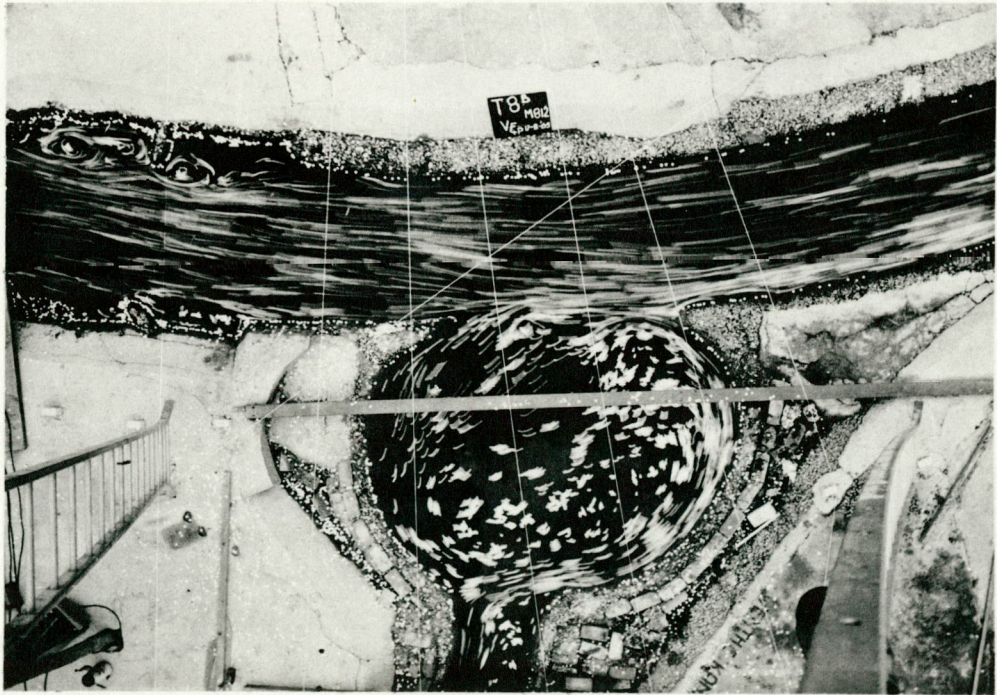
4. UITWISSELING METEN.



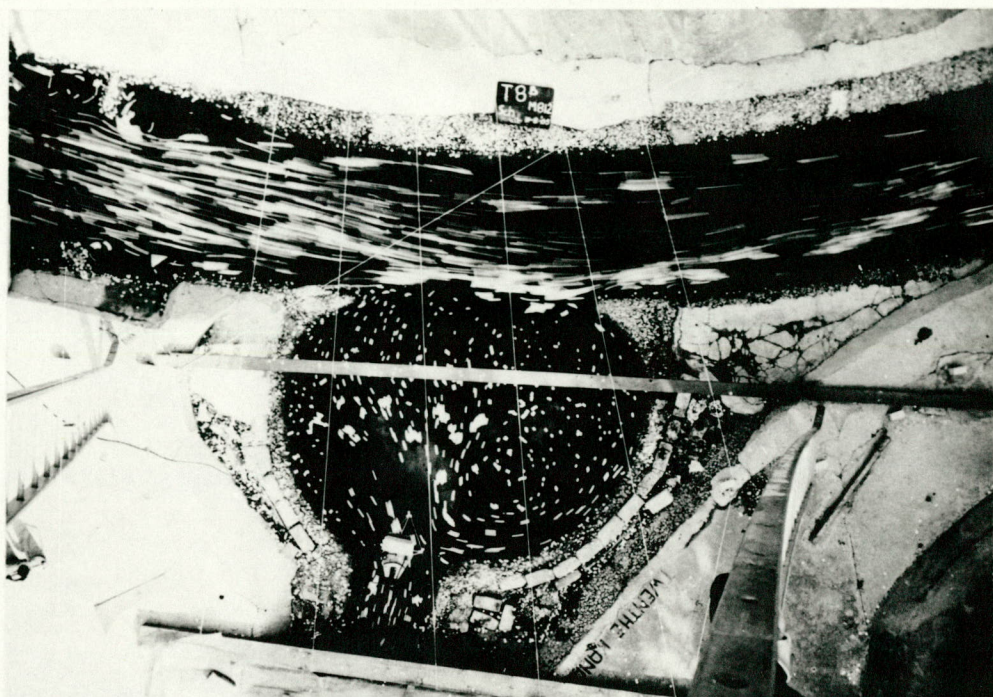
5. STROOMBEELD IN TO.



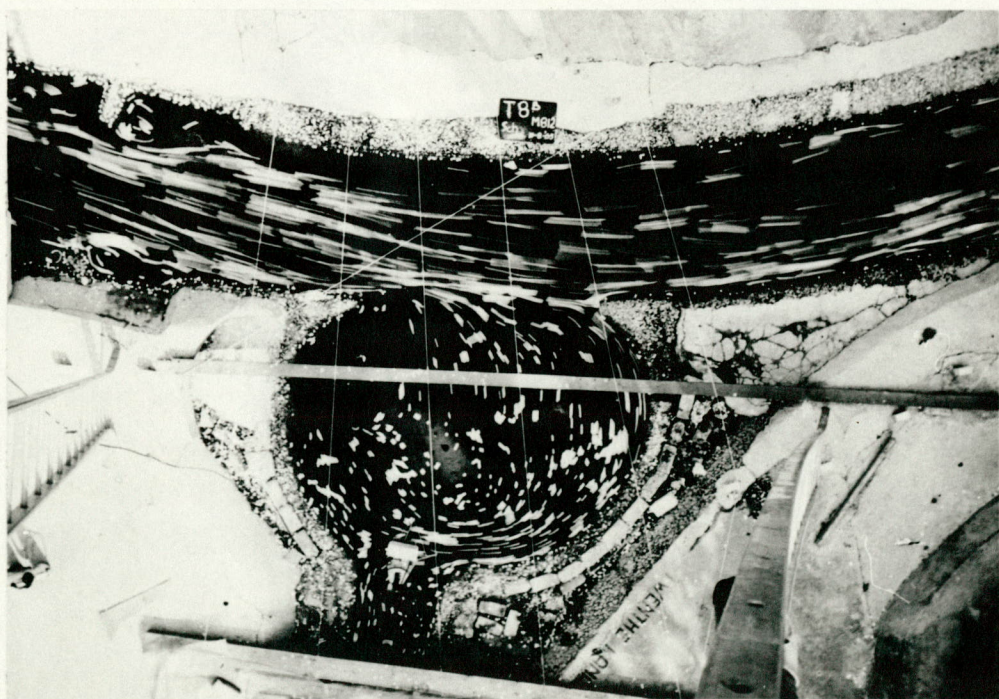
6. STROOMBEELD T8.



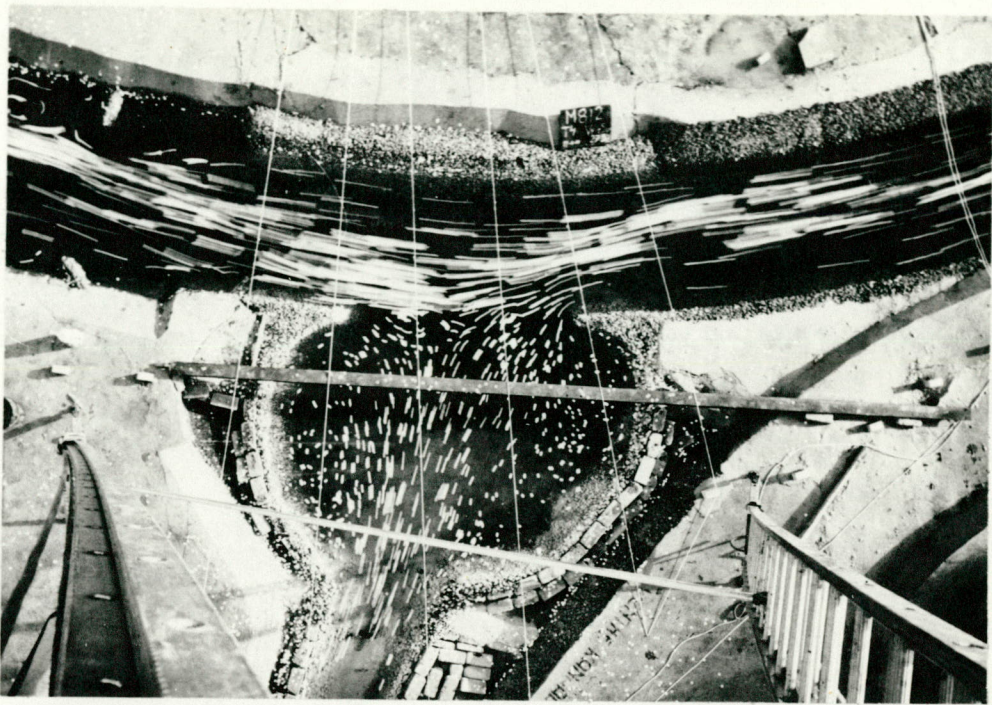
7. STROOMBEELD TIJDENS POMPEN.



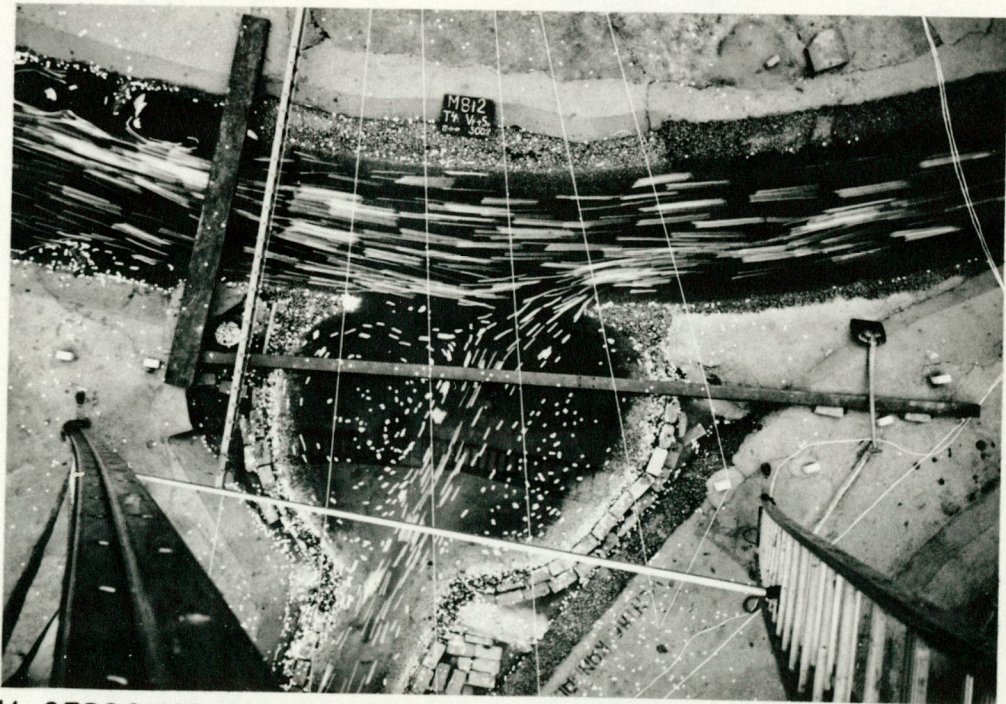
8. STROOMBEELD TJDENS SCHUTTEN.
(STROOM HET KANAAL UIT.)



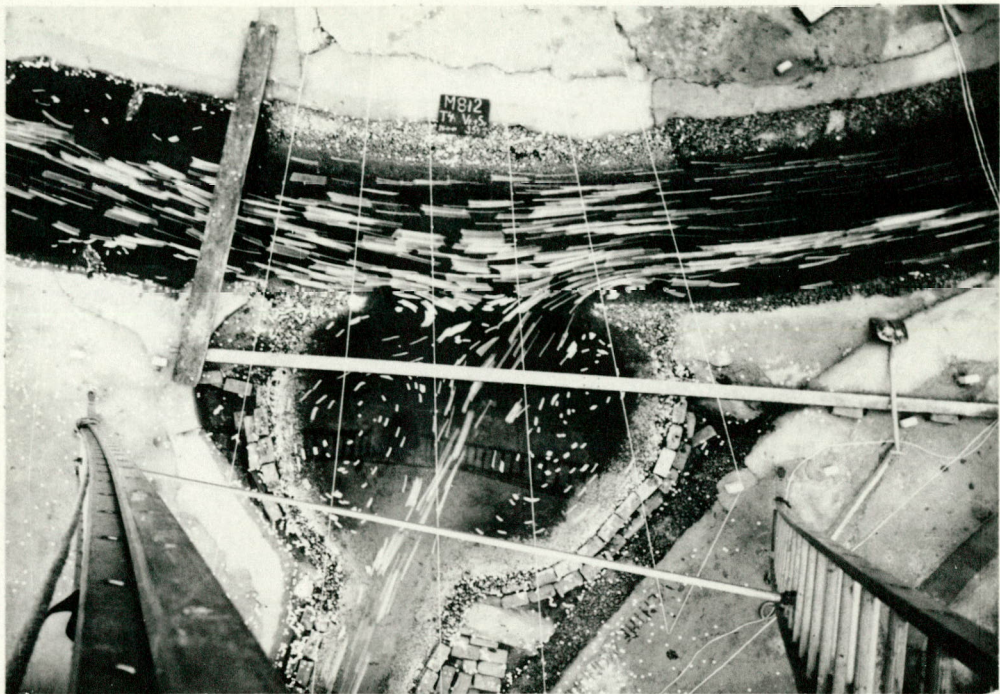
9. STROOMBEELD TJDENS SCHUTTEN.
(STROOM HET KANAAL IN.)



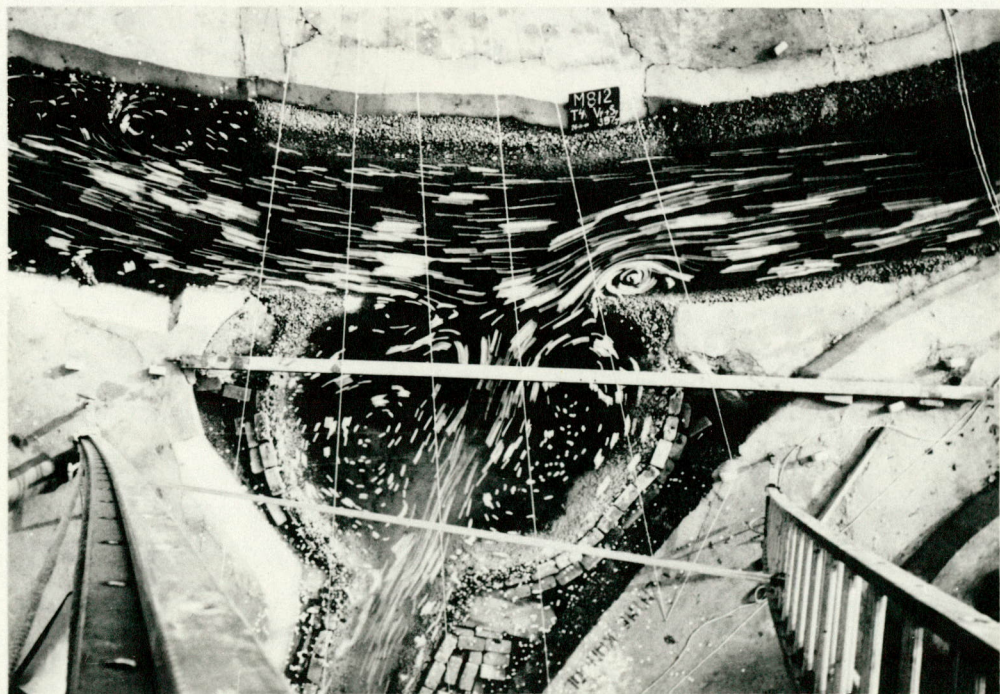
10. STROOMBEELD TJDENS SPUIEN IN T4.
 $Q_{\text{USSEL}} = 250 \text{ m}^3/\text{sec}$. $Q_{\text{TWENTHE KANAAL}} \approx 25 \text{ m}^3/\text{sec}$.



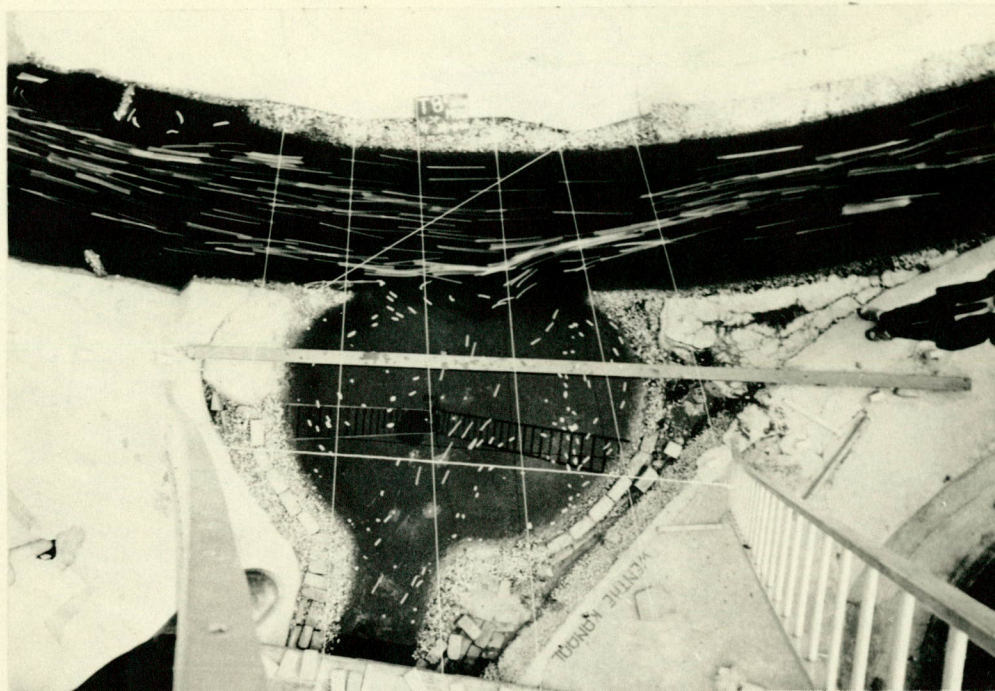
11. STROOMBEELD TJDENS SPUIEN IN T4
 $Q_{\text{USSEL}} = 250 \text{ m}^3/\text{sec}$. $Q_{\text{TWENTHE KANAAL}} \approx 50 \text{ m}^3/\text{sec}$.



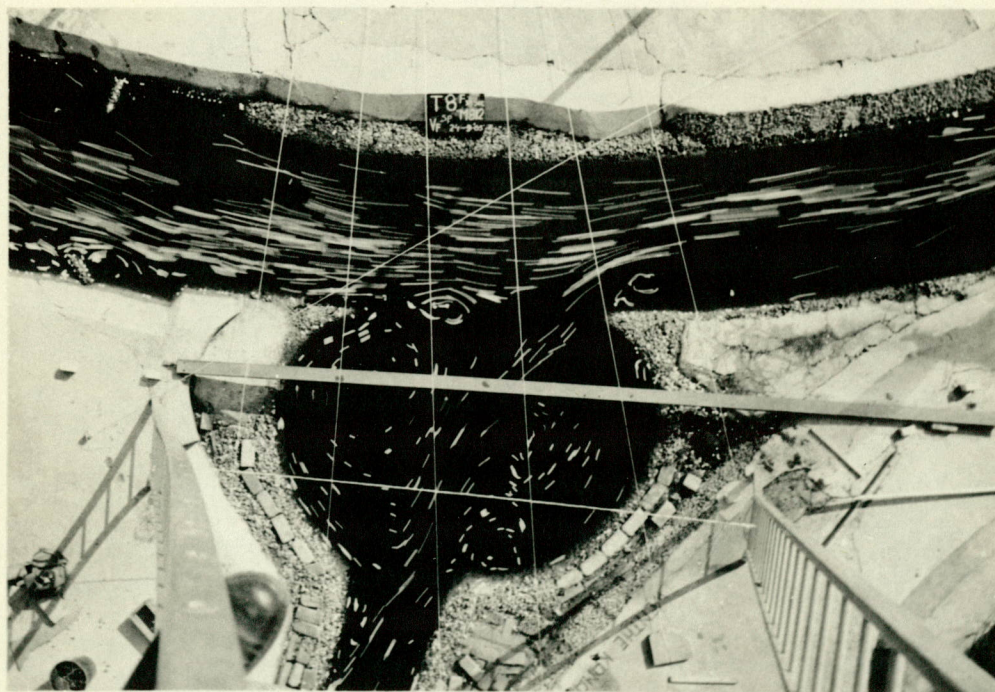
12. STROOMBEELD TJDENS SPUEN IN T4
Q USSEL = 250 m³/sec. Q TWENTHE KANAAL ≈ 100 m³/sec.



13. STROOMBEELD TJDENS SPUEN IN T4
Q USSEL = 250 m³/sec. Q TWENTHE KANAAL ≈ 150 m³/sec



14. STROOMBEELD TJDENS SPUIEN IN T8
Q USSEL = 350 m³/sec. Q TWENTHE KANAAL \cong 50 m³/sec



15. STROOMBEELD TJDENS SPUIEN IN T8
Q USSEL = 350 m³/sec. Q TWENTHE KANAAL \cong 115 m³/sec