

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

oriënterend onderzoek naar de turbulentie-
structuur in de monding van de Oosterschelde

verslag onderzoek

R 2070

oktober 1986

stormvloedkering Oosterschelde

oriënterend onderzoek naar de turbulentiestructuur in de monding van de Oosterschelde

verslag onderzoek

R 2070

oktober 1986

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Probleembeschrijving.....	1
1.2 Doel van het onderzoek.....	1
2. <u>Aanpassing van empirische relaties voor excessieve turbulentie</u> ..	3
2.1 Inleiding.....	3
2.2 Invloed van turbulentie karakteristieken op stroomkrachten.....	4
2.3 Universele empirische relaties.....	6
2.4 Splitsen van turbulentie spectra.....	8
2.5 Herleiding van globale parameters naar locale parameters.....	9
3. <u>Kenmerken van de turbulentie in de monding van de Oosterschelde bij afwezigheid van de stormvloedkering</u>	10
3.1 Inleiding.....	10
3.2 Overzicht van turbulentiemetingen voor de Oosterschelde.....	10
3.3 Metingen aan gootturbulentie.....	11
3.4 Kwalitatieve verschillen tussen prototype-, model- en gootturbulentie.....	13
3.5 Vergelijken van turbulentie spectra.....	16
3.5.1 Kenmerken van turbulentie spectra.....	16
3.5.2 Nauwkeurigheidaspecten.....	17
3.5.3 Grootte van de turbulentie intensiteit in de Oosterschelde.....	19
3.5.4 Macro-lengteschaal van turbulentie.....	21
3.5.5 Spectrumvorm.....	22
3.6 Vergelijking turbulentie intensiteiten in model en prototype....	24
4. <u>Invloed van de stormvloedkering op de turbulentie</u>	25
4.1 Inleiding.....	25
4.2 Uniforme bouwfases.....	26
4.2.1 Toename van de turbulentie intensiteit.....	26
4.2.2 Afname van de turbulentie intensiteit.....	26
4.3 Niet uniforme bouwfases.....	27

INHOUD (vervolg)

4.4	Vergelijking met andere metingen.....	28
5.	<u>Conclusies</u>	32

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

TABELLEN

1. Turbulentie-intensiteiten gemeten in de Oosterschelde [52]
2. Macro-lengteschalen van turbulentie gemeten in de Oosterschelde [52]
3. Vergelijking van O.S. spectra (5RZUM, vloed) met spectra van gootturbulentie [24]
4. Vergelijking van Oosterschelde-en gootturbulentie spectra voor twee frequenties
5. Turbulentie-intensiteiten gemeten in M1000, in open sluitgat, [43]
6. Turbulentie-intensiteiten gemeten in M1001, in open sluitgat [50]
7. Vergelijking van turbulentie-intensiteiten bij M1000, M1001 en prototype voor situatie zonder kering
8. Karakteristieke stromingsgrootheden voor diverse uniforme bouwfases van de SVKO in de Roompot gemeten langs meetraai tussen pijler R10 en R11, in M1001
9. Relatieve turbulentie-intensiteiten stroomafwaarts van de SVKO (eindfase) in de Schaar, gemeten in M1001
10. Stroomsnelheid en turbulentie-intensiteit bij niet-uniforme bouwfases in de Roompot

FIGUREN

1. Overzicht meetposities turbulentiemetingen Oosterschelde, [52]
2. Lokatie turbulentiemetingen M1000, [43]
3. Lokatie turbulentiemetingen M1001, [50]
4. Turbulentie-intensiteitverdeling karakteristiek voor een stroming in een goot [24]
5. Spectra karakteristiek voor een stroming in een goot [24]
6. Macro-turbulentieschalen karakteristiek voor een stroming in een goot [24]
7. Een karakteristiek turbulentiespectrum
8. Relatieve turbulentie-intensiteiten gemeten in de monding van de Oosterschelde
9. Vergelijking van Oosterschelde spectra 5RZUM met spectra van gootturbulentie
10. Turbulentiespectrum 5RZUM bij vloed
11. Meetschema bouwfases Roompot, [51]
12. Meetschema in eindsituatie Schaar, [49]
13. Meetschema situatie 22 dorpels geplaatst [46]
14. Meetschema proef T8, [50]
15. Meetschema lang front met 28 pijlers, [48]
16. Stroomsnelheids- en turbulentievertikalen eindsituatie in de Roompot

SYMBOLLEN

A	karacteristiek oppervlak van lichaam
a	constante
a_1, a_n, a_i	parameters
B	breedte van een goot
C	Chézy coëfficiënt
C_d	weerstandscöefficient
D	waterdiepte
D_{MQ}	waterdiepte op gootschaal
D_{OS}	waterdiepte op Oosterscheldeschaal
E	eendimensionaal energiespectrum
E_{MQ}	spectrumwaarde van gootturbulentie
E_{OS}	spectrumwaarde van OS-turbulentie
F	genormaliseerd energiespectrum
F_w	stroomkracht op lichaam
\bar{F}_w	tijdsgemiddelde stroomkracht op lichaam
F_{OS}	F-waarde van Oosterschelde spectrum op prototypeschaal
F_{OS}^{MQ}	F_{OS} omgeschaald naar gootschaal
f	functie
g	versnelling van de zwaartekracht
I_h	verwaarloosd oppervlak van spectrum door hoge afsnijfrequentie
I_l	verwaarloosd oppervlak van spectrum door lage afsnijfrequentie
k	turbulente kinetische energie
M_o	oppervlak van spectrum
L	maaswijdte
L_x	macro-turbulentiënlengteschaal
n	frequentie
n_o	afsnijfrequentie
n_{MQ}	frequentie op gootschaal
n_{OS}	frequentie op prototypeschaal
$p(v)$	kansdichtheid
R	Reynoldsgetal
R_E, R_X	korrelatiefunctie
r	relatieve turbulentie intensiteit ($\sqrt{u'^2}/U$)
T	turbulentietijdschaal voor macrowervels
U	tijdgemiddelde stroomsnelheid in goot of prototype (hoofdstroom-richting)

SYMBOLLEN(vervolg)

\bar{U}	dieptegemiddelde snelheid U
u', v', w'	turbulentie snelheidsfluctuaties
$\overline{u'^2}$	tijdsgemiddelde waarde van u'^2
$\overline{u''}$	diepte gemiddelde waarde van $\overline{u'^2}$
V	algemene aanstroomsnelheid
V_c	gecorrigeerde aanstroomsnelheid
v	momentane snelheid
x	langscoördinaat
z	dieptecoördinaat
α	richting
δ	grenslaagdicte
λ_x	micro-turbulentieschaal
ν	laminaire kinematische viscosity
σ	relatieve turbulentie-intensiteit

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

ORIENTEREND ONDERZOEK NAAR TURBULENTIESTRUCTUUR IN DE MONDING VAN DE OOSTERSCHELDE.

1. Inleiding

1.1 Probleembeschrijving

In het verleden zijn in het prototype diverse metingen verricht van de turbulente fluctuaties van de (getij)stromingen in de monding van de Oosterschelde (december 1978 - oktober 1979 en juli 1981).

De verwerking en analyse van de door RWS, WTZ verrichte metingen zijn door het Waterloopkundig Laboratorium verzorgd (respectievelijk R 1437 en R 1699). In het kader van EKOR zijn eveneens turbulentiemetingen verricht, die echter niet door het Waterloopkundig Laboratorium zijn verwerkt. Tevens zijn in het kader van onderzoeken ten behoeve van de Stormvloedkering turbulentiemetingen verricht in het overzichtgetijmodel (M 1525) en in het permanentie detailmodel van de Oosterschelde (M 1898, M 1929).

In de Oosterschelde monding zal de stormvloedkering een verandering van de turbulentiestructuur veroorzaken. Daarom is het van belang inzicht te verkrijgen in de mogelijke gevolgen daarvan op bijvoorbeeld de bodemverdediging.

De formules voor de bepaling van de korrelstabiliteit (Paintal, Shields) en van de krachten op constructie-onderdelen geven niet expliciet de invloed van de turbulentie weer. Het is niet zonder meer duidelijk welke turbulentiekaracteristieken maatgevend zijn en hoe een verandering van de turbulentie structuur uitwerkt op de in de formules aanwezige empirische constanten. Om de invloed hiervan te kunnen aangeven is het gewenst inzicht in de turbulentiestructuur te verkrijgen.

1.2 Doel van het onderzoek

Het voorgestelde onderzoek beoogt:

- Het zo mogelijk geven van een karakterisering van de turbulentie structuur in de monding van de Oosterschelde aan de hand van in de literatuur gangbare turbulentie theoriën, zulks voorzover dat van belang is voor zaken als

korrelstabiliteiten en krachten op konstruktie-onderdelen.

- Het vergelijken van de karakteristieken van de turbulentie in de monding van de Oosterschelde (zonder en met stormvloedkering) met de karakteristieken van de turbulentie waarvoor de korrelstabiliteits-formules geldig zijn. Daarbij wordt nagegaan of op eenvoudige wijze een afwijkende turbulentie-structuur in rekening gebracht kan worden. Wat dat betreft zal niet op een specifieke empirische formule worden ingegaan. Wel wordt verondersteld dat de relaties betrekking hebben op door stroming veroorzaakte krachten en drukken, die bij de bodem optreden.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de turbulentie karakteristieken en op uitbreiding van empirische relaties. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de turbulentie in de monding van de Oosterschelde bij afwezigheid van de stormvloedkering. Deze wordt vergeleken met turbulentie gemeten in goten.

In hoofdstuk 4 wordt het effect van de stormvloedkering op de turbulentie nagegaan.

Opdracht voor het onderzoek is verleend op 10-5-84 per brief met kenmerk WT612.

Het onderzoek is uitgevoerd door ir. C. Flokstra die ook het verslag samenstelde. Van de zijde van Rijkswaterstaat werd het onderzoek begeleid door ir. H.E. Klatter en ir. M.B. de Groot

2. Aanpassing van empirische relaties voor excessieve turbulentie

2.1 Inleiding

Een empirische relatie heeft slechts betekenis binnen het toepassingsgebied waarvoor de relatie geijkt is. Toch wordt vaak getracht de relatie in een ruimer gebied toe te passen. Zo wordt in [37] voorgesteld hoe bij formules die betrekking hebben op korrelstabiliteit (Paintel, Shields) excessieve turbulentie in rekening gebracht kan worden. Ook bij stabiliteit van matten [16], ontgrondingskuilen, etc., komt de vraag naar voren hoe in prototype een formule toe te passen die in een geschematiseerd model is geijkt.

In dit hoofdstuk wordt nagegaan hoe in gevallen waarbij de turbulentieverdeling afwijkt van de verdeling waarvoor een relatie geijkt is, deze relatie toegepast kan worden. De volgende methoden worden daarbij beschouwd:

- De empirische relatie wordt universeel verondersteld (paragraaf 2.3)
- Splitsen van turbulentiespectrum in een standaard gedeelte en een excessief gedeelte (paragraaf 2.4)
- Herleiding van formules uitgedrukt in globale parameters tot formules in lokale parameters (paragraaf 2.5)

Het betreft hier echter adhoc manieren die op zich geen garantie bieden dat de resultaten correct zijn. De uitgebreide formulering zal als nog getoetst moeten worden. Daarom zullen in de praktijk ook de volgende mogelijkheden steeds overwogen moeten worden:

- Toepassing van de bestaande formule, aangevuld met het gebruik van een veiligheidsfactor.
- Het herhalen van de modelproeven, maar nu zorgdragend voor een goede reproductie van de in het prototype optredende turbulentie.
- Het algemener toepasbaar maken van de relatie door invoeren van correctiefactoren. De relatie tussen de correctiefactoren en de turbulentie karakteristieken zal dan moeten worden gemeten. Welke turbulentie karakteristieken dan beschouwd moeten worden hangt af van de toepassing. In paragraaf 2.2 wordt hier nader op ingegaan voor de stroming om een lichaam. Wat voor krachten op lichamen geldt, geldt in principe ook voor korrelstabiliteitsformules en sediment transportformules.

2.2 Invloed van turbulentie karakteristieken op stroomkrachten

Een lichaam dat zich in stromend water bevindt, ondervindt een kracht F_w waarvan de grootte veelal gerelateerd wordt aan een karakteristiek oppervlak A van het lichaam en de ongestoorde stroomsnelheid V van het water:

$$F_w = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (1)$$

waarin C_D de weerstandscoefficient
 A een karakteristiek oppervlak van het lichaam
 V de ongestoorde aanstroomsnelheid

De coëfficiënt C_D hangt van een groot aantal factoren af, zoals de vorm en ruwheid van het lichaam, de aanwezigheid van naburige begrenzingen, het Reynoldsgetal en de turbulentieverdeling van de aankomende stroming. Voor de huidige studie is het van belang vast te stellen hoe de turbulentie van de inkomende stroming de krachten op het lichaam beïnvloedt en welke turbulentie karakteristieken daarbij van belang zijn.

Turbulentie beïnvloedt de stroomkracht op een lichaam via

- de grenslaag om het lichaam (omslag laminaire grenslaag naar turbulente grenslaag afhankelijk van het Reynolds getal)
- de inkomende stroming (al dan niet turbulentievrij)

Voor het huidige onderzoek is vooral de laatste mogelijkheid van belang. De interactie tussen grenslaagturbulentie en de turbulentie van de inkomende stroming zal de kracht op het lichaam beïnvloeden.

Voor een globale beschrijving van turbulentie wordt veelal een aantal karakteristieke tijd- en lengteschalen ingevoerd, kenmerkend voor de energiedragende grote wervels en voor de kleinste nog net niet gedissipeerde wervels. Daarnaast wordt veelal de kinetische energie van de turbulentie als karakteristieke grootte onderscheiden. Deze energie is verdeeld over een range van lengteschalen zoals uit het turbulentiespectrum blijkt. De relatie tussen de over de turbulentietijdschalen-gemiddelde aanstroomsnelheid en de turbulentiekarakteristieken is niet eenduidig, zodat naast de stroomsnelheid afzonderlijk de turbulentiekarakteristieken gegeven moeten worden ter beschrijving van de stroomtoestand. Bij veel praktische situaties wordt hieraan voorbijgegaan. Gemeten empirische relaties worden daarvoor situatieafhankelijk.

De invloed van de turbulentie fluctuaties zoals tijdens de ijkfase aanwezig

wordt dan impliciet in de coëfficiënten meegenomen.

De invloed die een turbulente wervel op de kracht F_w heeft zal afhangen van verhouding tussen de schaal van de wervel en een karakteristieke afmeting van het lichaam. De beïnvloeding van de kracht F_w zal daarbij kunnen worden toegeschreven aan een momentane vergroting van de aanstroomsnelheid en richting, verandering van de C_D -waarde door verschuiving van de loslaatpunten van de grenslaag om het lichaam, door introductie van massastraagheidskrachten, etc. Onderzoek naar beïnvloeding van de kracht F_w door verandering van turbulentie-karakteristieken is nog slechts in beperkte mate uitgevoerd en wordt veelal uitgevoerd voor lichamen met een eenvoudige geometrie. In [43] wordt een beknopt literatuuroverzicht gegeven waar hier enige resultaten van worden vermeld.

Als algemene conclusies worden in [43] gegeven:

- De turbulentie van de aanstroming heeft invloed op de stroming om en de weerstand van stompe lichamen.

De invloed is afhankelijk van de vorm van het lichaam en de verhouding van de turbulentieschaal tot de afmetingen van het lichaam.

- De invloed van het getal van Reynolds lijkt zeer beperkt.

Van de aangehaalde literatuur zijn voor de huidige probleemstelling vooral de meetresultaten van Surry [40] voor een cirkelcylinder van belang. De proeven zijn uitgevoerd voor $Re \approx 10^4$, d.w.z. voor een laminaire grenslaag om de cylinder. De weerstandscoefficient van het lichaam en de drukverdeling werden gemeten voor verschillende turbulentieschalen en intensiteiten.

De volgende resultaten werden daarbij verkregen:

- 50% vergroting van de turbulentie-intensiteit leidt tot 10% verkleining van de C_D -waarde
- Reductie van de macroturbulentieschaal van 4.3 naar 0.36 maal de diameter, leidt bij een zelfde turbulentie-intensiteit tot een afname van de C_D -waarde van 1.23 naar 0.93. (Bij afwezigheid van significante turbulentie is gemeten $C_D = 1.31$)

Hieruit blijkt dat specificatie van alleen de turbulentie-intensiteit onvoldoende is.

Door Roberson et al [38] is de invloed van de turbulentie-intensiteit op de weerstand van rechthoekige lichamen onderzocht. Daarbij bleek zowel een vergroting als verkleining van de weerstand op te treden als de turbulentie-intensiteit vergroot werd. Dit blijkt terug te voeren te zijn op het gedrag van

de loslaatpunten van de grenslaag.

De vermelde resultaten zijn geenszins uitputtend, maar vormen een illustratie van het belang de turbulentie bij modelproeven correct weer te geven. Voorts blijkt dat:

- Naast de turbulentie-intensiteit ook de turbulentieschalen van invloed zijn op de grootte van de kracht
- De C_D -waarde kan circa 30% variëren
- Het in rekening brengen van de turbulentie intensiteit via een toeslagfactor (>1) op de aanstroomsnelheid zelfs kwalitatief niet juist hoeft te zijn.

Uitbreiding van een empirische relatie voor afwijkende turbulentie blijkt dus bemoeilijkt te worden doordat verschillende kenmerken van belang zijn die zich voorts niet eenvoudig laten omzetten naar een toeslagfactor op de aanstroomsnelheid.

2.3 Universele empirische relaties

Een empirische relatie legt verband tussen een aantal grootheden waarbij de invloed van de niet onderscheiden grootheden door de coëfficiënten van de relatie wordt weergegeven. Daarom zal bij aanwezigheid van coëfficiënten de relatie niet universeel zijn. Voor een bepaald toepassingsgebied kan een dergelijke relatie "voldoende universeel" zijn.

Bij empirische relaties die betrekking hebben op korrelstabiliteit, krachten op lichamen in stromend water, etc, wordt de invloed van de turbulentie uitsluitend door de coëfficiënten weergegeven. Stel bijvoorbeeld een formule van de volgende gedaante:

$$F_w = F(V, a_1, \dots, a_n) \quad (2)$$

waarbij V de ongestoorde over de turbulentietijdschalen gemiddelde aanstroomsnelheid is. De coëfficiënten a_1, \dots, a_n bevatten de invloed van de bij de ijkingsproeven aanwezige turbulentie. Een expliciete relatie tussen de coëfficiënten a_i en de turbulentiekaracteristieken is meestal niet te leggen dan via ijkingsproeven. Indien de coëfficiënten slechts in geringe mate afhankelijk zijn van de turbulentiekaracteristieken is de gemiddelde snelheid een voldoende maat voor het stroomveld.

Indien de ijkingsrange voor (2) wat betreft de turbulentiekenarakteristieken te beperkt is, kan overwogen worden om via de snelheid V in (2) de excessieve turbulentie expliciet in rekening te brengen. Formule (2) wordt dan als een universele formule opgevat. Generatie van een tijdsafhankelijk aanstroming, waarbij de aktuele turbulentiekenmerken in rekening worden gebracht (Monte Carlo methoden, [15]) levert dan met momentane toepassing van formule (2) een tijdsafhankelijke bepaling van F_w .

Bij deze aanpak wordt er aan voorbijgegaan dat

- de aanstroomrichting verandert
- een deel van de turbulentiebijdragen in de coëfficiënten a_i aanwezig is
- turbulentiewervels gradienten in het aanstroomveld veroorzaken
- Instationaire krachten geïntroduceerd worden die slechts te dele door (2) worden weergegeven.

In hoeverre een dergelijke benadering bruikbaar is hangt af van de gewenste nauwkeurigheid en de betreffende formule.

Indien alleen de tijdsgemiddelde grootheid bepaald hoeft te worden kan met een kansverdeling van de ongestoorde aanstroming worden volstaan:

$$\bar{F}_w = \int F(v, a_1, \dots, a_n) p(v) dv \quad (3)$$

Door een relatie te leggen tussen de kansverdeling en de turbulentieverdeling van de inkomende stroming, kan dus voor een willekeurig turbulentie-verdeling de invloed daarvan op \bar{F}_w worden bepaald. Ook hier wordt F universeel verondersteld en blijven boven-genoemde bezwaren gelden. Indien voor $p(v)$ de kansverdeling wordt gebruikt die geldt voor de ijkingsproeven zal \bar{F}_w over moeten gaan in de gemeten F_w . Dit leidt in het algemeen tot een strijdigheid die alleen ondervangen kan worden door de coëfficiënten a_1, \dots, a_n in de universele relatie aan te passen. Daarbij zal niet steeds duidelijk zijn welke a_i 's, aangepast moeten worden en hoe.

In [37] wordt een toepassing gegeven van deze methode met betrekking tot de transportrelatie van Paintal:

$$\bar{Q} = a \bar{\psi}^{11} \quad (4)$$

waarin a een constante
 \bar{Q} een dimensieloze transportparameter
 $\bar{\psi}$ een dimensieloze schuifspanning

Hierbij wordt de macht van $\bar{\psi}$ bijvoorbeeld als universeel aangenomen en wordt a vervangen door een constante die bij de ijktoestand het referentietransport geeft.

Analoog aan deze benadering is de-eveneens in [37] gebruikte-methode om de invloed van traagheid op de stabiliteit weer te geven. Naast een elementaire beschrijving van de dynamica van een korrel, wordt een turbulent kracht signaal geïntroduceerd dat evenredig gesteld wordt met de schuifspanningsnelheid. Deze snelheid is eigenlijk een maat voor de ongestoorde aanstroomsnelheid. De relatie tussen deze snelheid en de werkelijk optredende kracht is niet zo eenduidig als bij de afleiding wordt gesteld.

Bij de hier aangegeven methoden wordt verondersteld dat een deel van de empirische relatie universeel gedig is. In het algemeen is er geen grond voor deze veronderstelling. Ten hoogste kan de methode leiden tot een zinvolle formule voor nadere ijking, of dienen voor een ruwe schatting. Per formule zal slechts vastgesteld kunnen worden hoe bruikbaar de bovenstaande methoden zijn.

2.4 Splitsen van turbulentie spectra

Bij de ijking van een empirische relatie in een schematisch schaalmodel zal de optredende turbulentie kunnen afwijken van de in het toepassingsgebied heersende turbulentie door bijvoorbeeld verwaarlozing van bepaalde bodem- of kunstwerkdetails en door het niet juist opleggen van de turbulentieverdeling op de instroomranden. Meestal wordt wat de laatste invloed betreft verondersteld dat het interessegebied in het schaalmodel voldoende ver van de rand verwijderd ligt zodat de inkomende turbulentieverdeling zich in het instroomdeel van het model kan instellen.

In hoeverre het zinvol is turbulentiespectra op te splitsen in een deel dat tijdens de ijking aanwezig was en een deel in het prototype aanwezige excessieve turbulentie is niet duidelijk. Turbulentie is een sterk niet lineair verschijnsel, waardoor een lineaire opsplitsing van het spectrum niet zinvol lijkt. Zelfs indien de excessieve turbulentie het gevolg is van de grootschalige turbulentie (topografische turbulentie) zal in het spectrum geen "spectral gap" aanwezig zijn tussen de grootschalige en kleinschalige turbulentiebijdragen, waardoor deze onafhankelijk kunnen worden beschouwd. Het aanbrengen van een scheiding zal dan vrij willekeurig zijn. (Dus geen tweetoppig spectrum als bij golven mogelijk is).

Indien wel een "spectrale gap" aanwezig zou zijn, is bovendien niet duidelijk in hoeverre de snelheid V in de empirische relatie vervangen kan worden door een voor de laagfrequente turbulentie gecorrigeerde aanstroomsnelheid V_c : Bijvoorbeeld in geval van een kwadratische relatie (2) in V door

$$V_c = \sqrt{V^2 + M_0} \quad (5)$$

waarbij V_c de gecorrigeerde snelheid
 V de tijdsgemiddelde snelheid
 M_0 het oppervlak van de laagfrequente energie in het turbulentie spectrum

De bezwaren vermeld in de voorgaande paragraaf blijven ook hier gelden.

2.5 Herleiding van globale parameters naar locale parameters

In goten opgewekte stroomverdelingen zullen in schematische situaties algemeen een in de verticaal volledig ontwikkelde snelheidsverdeling bezitten. Als karakteriserende maat van het snelheidsveld kan dan de diepte gemiddelde snelheid worden gebruikt. In gevallen waarbij een van de gootturbulentie afwijkend turbulentiespectrum voorkomt, zal veelal de verticale snelheidsverdeling ook afwijken van de volledig ontwikkelde verdeling in de goot. Nabij de bodem stelt het evenwichtssnelheidsprofiel zich sneller in dan in het bovenste gedeelte van het snelheidsverticaal. Voor krachten op lichamen die zich bij de bodem bevinden, kan een empirische relatie gebaseerd op een dieptegemiddelde snelheid herschreven worden als een functie van de schuifspanningssnelheid, zijnde een maat voor de snelheid bij de bodem. Een op een dergelijke wijze aangepaste formule zal een ruimer toepassingsgebied bezitten.

Toepassing van de herleide empirisch relatie vereist dan het bekend zijn van de snelheid op enige afstand van de bodem, waaruit met een verondersteld logaritisch verlopend snelheidprofiel de schuifspanningssnelheid kan worden bepaald. Voorts moeten de afmetingen van de lichamen klein zijn ten opzichte van de laag waarin het logaritmische profiel zich al heeft ingesteld. De methode is slechts beperkt toepasbaar. In bijvoorbeeld een neer (met horizontale as) zal het gedrag van de turbulentie bij de bodem niet overeenstemmen met de turbulentieverdeling behorend bij een logaritisch snelheidprofiel dan in een zeer dunne laag. Daarom zal de aanwezigheid van bodemverstoringen (duinen) de bruikbaarheid van de methode sterk reduceren.

3. Kenmerken van de turbulentie in de monding van de Oosterschelde bij afwezigheid van de stormvloedkering

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is nagegaan hoe een turbulentiestructuur afwijkend van die opgetreden bij de ijking van een empirische relatie, in rekening gebracht kan worden. Dit probleem speelt vooral bij de bepaling van krachten op lichamen en bij de bepaling van korrelstabiliteiten in de Oosterschelde. Het is daarom van belang om te weten of de daar optredende turbulentie afwijkt van turbulentie zoals deze in de modellen M1000 en M1001 en in goten optreedt.

Het is alleen nodig die turbulentiekenmerken te vergelijken die voor korrelstabiliteitsformules, voor drukken op matten en krachten op lichamen bij de bodem van invloed zijn. In paragraaf 2.2 is van een aantal kenmerken de invloed op krachten aangegeven. Naast de turbulentie-intensiteit zijn ook de turbulentielengteschalen van belang. Daar de belangrijkste schalen van turbulentie aan het spectrum te koppelen zijn, wordt hieronder naast de turbulentie-intensiteit, de vorm van het spectrum beschouwd.

In paragraaf 3.2 worden uitgevoerde turbulentiemetingen in de Oosterschelde weergegeven. In paragraaf 3.3 wordt ingegaan op metingen aan gootturbulentie. Paragraaf 3.4 gaat in op de kwalitatieve verschillen tussen gootturbulentie en turbulentie in model en prototype. In de paragrafen 3.5 en 3.6 worden de intensiteiten en spectra kwantitatief beschouwd.

3.2 Overzicht van turbulentiemetingen voor de Oosterschelde

Teneinde een indruk te krijgen van de turbulentie in de Oosterschelde zijn in het verleden enige prototypemetingen uitgevoerd. Deze metingen staan beschreven in [43], [52] en [53] en worden besproken in [37]. Alle metingen zijn uitgevoerd in de monding van de Oosterschelde.

In dit verslag wordt de aandacht vooral gericht op de metingen beschreven in [52] en uitgevoerd in dec. '78 en juni, sept, en okt '79. De meetlocaties bevinden zich in de Roompot, de Hammen en de Schaar zoals is aangegeven in Figuur 1. In elke verticaal is op drie plaatsen het snelheidssignaal gemeten. Daaruit zijn de spectra bepaald voor de maximum vloed en maximum eb periode en nabij kentering.

Daar veel onderzoek is uitgevoerd in de schaalmodellen M1000 en M1001 is het van belang te weten hoe de turbulentie in deze modellen zich verhoudt tot de prototype turbulentie. Het aantal beschikbare metingen voor situaties zonder stormvloedkering blijkt zeer beperkt. Turbulentiemetingen in M1000 worden alleen vermeld in [44], [43] en [47]. Daarvan is alleen [43] bruikbaar. De overige metingen hebben slechts een indicatief karakter. De meetlocaties staan aangegeven in figuur 2. Op twee plaatsen in de verticaal zijn spectra bepaald. Turbulentiemetingen in het M1001 model ontbreken nagenoeg geheel voor de situatie zonder S.V.K.. In [50] worden voor de Roompot turbulentiemetingen uitgevoerd. De meetlocaties zijn in Figuur 3 aangegeven.

3.3 Metingen aan gootturbulentie

Voor vergelijking van de Oosterschelde turbulentie met turbulentie optredend in een goot is in de beschikbare literatuur naar metingen van intensiteiten en spectra gezocht. Meetgegevens voor een instationaire stroming zijn zeer beperkt aanwezig. Daarom is gezocht naar meetgegevens voor een stationaire stroomtoestand bij pijp- en kanaalstromingen. In onderstaande wordt daar nader op ingegaan.

Turbulentiemetingen zijn uitgevoerd voor zowel open als gesloten kanalen met ronde dan wel rechthoekige doorsneden. Daarbij is aandacht geschonken aan de invloed van de bodemruwheid en van het Reynoldsgetal op de turbulentie, aan schalingsregels (inwendige, uitwendige schaling), variatie van de turbulentie over de diepte en aan de turbulentiestructuur. In het grootste deel van de gevallen wordt als kenmerk voor de turbulentie alleen de intensiteit van de turbulentie gemeten. Soms worden de spectra en de lengte en tijdschalen weergegeven.

Uitgebreide metingen aan cirkelvormige pijpstroming waarbij de nadruk lag op het vaststellen van de structuur van de turbulentie zijn uitgevoerd door Morrison en Kronauer [27], McConachie [23], Perry en Abell [30], Perry en Chong [31], Bullock, Cooper en Abernathy [6]. Voor een rechthoekige pijp door Comte-Bellot [7]. Centraal bij deze metingen staan de spectra en correlatiefuncties.

Door Melling en Whitelaw [25] is voor een vierkant kanaal de intensiteit en snelheidsverdeling over de doorsnede gemeten met aandacht voor het inschakelverschijnsel ten gevolge van het ontwikkelen van de grenslaag.

Door Resch [35] is voor een cirkelvormige pijpstroming in het midden van de pijp het verloop van de intensiteit en de spectrum vorm met Reynolds getal gemeten.

Door El Telbany and Reynolds [12], [13] zijn in een pijp met rechthoekige doorsnede waarvan één bewegende wand, intensiteitmetingen uitgevoerd voor Couette tot Poiseulle stroming. De resultaten worden vergeleken met een groot aantal andere metingen.

Door Nalluri en Novak [28] is gemeten aan stromingen met een vrij oppervlak in cirkelvormige pijp. De turbulentie intensiteitverdeling in een aantal verticalen is gemeten voor verschillende vullingsgraden. Er is aandacht geschoken aan de schalingsmethode. Voorts zijn spectra gemeten voor verschillende afstanden tot de wand.

Door Raichlen zijn spectra voor een open kanaal ($B/D=2.5$) gemeten. De wanden waren glad. De invloed van het Reynoldsgetal op dit spectra is nagegaan. ($R = 66.200$ en 91.100). De turbulentie-intensiteiten bedroegen bij het vrije oppervlak en bij de bodem respectievelijk ± 4 en 16% van de snelheid.

Blinco and Partheniades [3] hebben in een kanaal met vrij oppervlak ($B/D=2.5$) de bodem schuifspanning direct gemeten. Zij hebben spectra bepaald en de invloed van ruwheid en het Reynoldsgetal daarop nagegaan. Door Jonssen [22] en van Ippen [20] worden overzichten gegeven van metingen aan turbulentie in open kanaalstromingen, vooral wat betreft de turbulentie-intensiteiten.

Door Imamoto [19] zijn metingen in een open kanaal uitgevoerd, waarbij de aandacht gevestigd wordt op invloed van de breedte en diepte van de stroming. Uit deze metingen volgt niet dat horizontale en verticale snelheids-gradients tot verschillende pieken in het turbulentiespectrum leiden.

Door McQuivey en Richardson [24], [36] zijn metingen uitgevoerd aan open kanaalstromingen ($B/D=6$) met een gladde en ruwe bodem. Er zijn spectra op drie punten in de verticaal gemeten. Deze metingen worden in het onderstaande als referentie gebruikt voor vergelijking van gootturbulentie met de turbulentie in de Oosterschelde. De experimenten zijn uitgevoerd in een kanaal van 10 m lengte en een 20×20 cm dwarsdoorsnede. De proeven zijn uitgevoerd bij een diepte van ongeveer 3 cm zodat een kanaalbreedte/waterdiepte van ongeveer 6 wordt verkregen.

De Chezy coëfficiënt voor de gladde en ruwe bodem bedroegen respectievelijk 36.6 en $61.4 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, de gemiddelde stroomsnelheid respectievelijk 0.31 en 0.2 m/s. De metingen zijn met een hot film instrument uitgevoerd. Bij de bodem be-

droeg de relatieve turbulentie-intensiteit van gladde en ruwe goot respectievelijk 0.11 en 0.14 en bij het oppervlak 0.05 en 0.08 (zie Figuur 4). In Figuur 5 wordt het gemeten spectrum weergegeven. Daarnaast wordt in [24] aandacht geschonken aan de macroschaal L_x , kenmerkend voor energie dragende wervels en microschaal λ_x , kenmerkend voor dissipatie van wervels, volgens de definities (zie ook paragraaf 3.5.4):

$$L_x = \int_0^{\infty} R_x dx \quad (6)$$

en

$$\frac{1}{\lambda_x^2} = \frac{4\pi^2}{U^2(z)} \int_0^{\infty} n^2 F(n) dn \quad (7)$$

waarin:

R_x de autocorrelatiefunctie

$$F(n) = \frac{E(n)}{u'^2}$$

$E(n)$ het eendimensionale (gebaseerd op één snelheidscomponent) energiespectrum.

z de afstand tot de bodem

n de frequentie

De macroschaal L_x kan als volgt uit het spectrum bepaald worden:

$$L_x = \frac{1}{2} U(z) F(0) \quad (8)$$

Voor de ruwe goot bedraagt de maximale macroschaal $L_x = 1.2 D$. Deze wordt gemeten 0.4 D boven de bodem (zie Figuur 6). D is de waterdiepte. Resch [35] vindt een iets lagere waarde.

De spectra die in de bovenstaande literatuur worden weergegeven hebben veelal betrekking op de snelheidscomponent in de richting van de gemiddelde snelheid.

3.4 Kwalitatieve verschillen tussen prototype-, model- en gootturbulentie

De turbulentie die in de Oosterschelde voorkomt zal kwalitatief verschillen van de turbulentie die in goten voorkomt. Hoewel de modellen M 1000 en M 1001

zodanig geijkt zijn dat zij redelijk het over de turbulentie-tijdschalen gemiddelde snelheidsveld van het prototype reproduceren, zal het gedetailleerde turbulentieveld verschillen van het prototype veld.

Daarvoor zijn de volgende redenen aan te geven:

- horizontale en verticale begrenzingsen aan de stromingen
- de tijdschaal
- de lengteschaal
- de vertrekking
- de beperktheid van het gebied
- het getij

In het onderstaande wordt daar nader op ingegaan.

Turbulentie ontstaat door gradienten in een snelheidsveld. Deze gradienten worden veelal veroorzaakt door de vaste begrenzingsen aan de stroming opgelegd door bodem, eilanden en kunstwerken. Bij gootturbulentie ontbreken (in principe) de horizontale snelheidsgradiënten. Ook variatie in waterdiepte beïnvloedt de turbulentie en leidt tot verschillen met gootturbulentie (vlakke bodem). De geometrie van het gebied kan tot grote verschillen leiden, wanneer menglagen ontstaan (bijvoorbeeld bij loslating van de stroming), belangrijke versnellingen of vertragingen van de stroming optreden. Bij gootturbulentie zal de lengteschaal voor de grootste wervels in de orde liggen van de waterdiepte. Bij horizontale menglagen zal de lengteschaal van de grootste turbulentiewervels een veelvoud van de waterdiepte kunnen bedragen.

De schaalmodellen M1000 en M1001 zijn Froude-geschaald. Ook de in goten gesimuleerde turbulentie zal Froude geschaald zijn. De Froude-schaling houdt een verlaging van het Reynoldsgetal in het schaalmodel in. De stroming in het model gedraagt zich dus viskeuzer dan in het prototype. Voor de turbulentie houdt dit in dat de dissipatie van de turbulente kinetische energie bij relatieve grotere wervels plaats heeft dan uit Froude schaling van de overeenkomstige prototype wervels zou volgen. De grootschalige wervels zullen zich wel Froude geschaald gedragen, daar het effect van de viscositeit op deze wervels gering is. De opgewekte turbulente schuifspanning hangt alleen van de grote wervels af en zal dus nauwelijks afwijkingen vertonen. Wat de krachten op korrels betreft zal de optredende reductie van het Reynoldsgetal bij modelproeven de grenslaag om de korrels kunnen beïnvloeden, afhankelijk van vorm en grootte van de korrels ten opzichte van de onderdrukte wervels (dip in de Shields-kromme).

Het vortex-stretching-mechanisme dat in belangrijke mate de interactie tussen de turbulente wervels bepaalt, is een driedimensionaal mechanisme. Vertrekking van het model verstoort daarom de interactie tussen de wervels. In een vertrokken model wordt de bodemruwheid aangepast zodanig dat het effect van de bodemwrijving op de stroomverdeling in het vertrokken en onvertrokken model even groot is. Deze aanpassing van de bodemruwheid beïnvloedt ook de turbulentie-ontwikkeling. Uit het door Rodi [54] ontwikkelde diepte-gemiddelde $k-\epsilon$ model voor de beschrijving van turbulentie kan afgeleid worden dat door de aanpassing van de bodemruwheid

in het vertrokken model:

- de productie van turbulente kinetische energie door de bodemwrijving niet beïnvloed wordt door de vertrekkingfactor.
- de dissipatie van de kinetische energie door de invloed van de bodem wel door de vertrekkingfactor wordt beïnvloed.

De grootte van de turbulentie viscositeit wordt daardoor beïnvloed door de vertrekkingfactor.

In het geval van grote horizontale snelheidsgradiënten, zal de turbulentie ontwikkeling vooral door deze gradienten bepaald worden en kan het schaaleffect ten gevolge van vertrekking, althans wat de integrale kenmerken betreft verwaarloosd worden. In andere gevallen treedt beïnvloeding op.

Door het getij worden (grootschalige) turbulente wervels meegevoerd. Dit stelt eisen aan de grootte van het modelgebied. Als op een gegeven lokatie de turbulentie correct moet worden weergegeven, zullen de instroomranden, waar de turbulentie veelal niet juist wordt gereproduceerd, er voldoende ver van verwijderd moeten liggen. Advectief transport vindt gedurende een getij over een getijweglengte plaats ($\sim \frac{1}{2} U_{\text{gem}} T_g$, met U_{gem} = de gemiddelde snelheid gedurende eb of vloed, T_g = de getijperiode). De uitdemping van grootschalige wervels heeft plaats over een lengte $\sim \frac{C^2 D}{g}$. Voor Oosterschelde condities is de laatste invloed maatgevend. In het model M1000 ligt daarom de instroomrand voldoende ver van de kering verwijderd, in model M1001 marginaal.

In getijgebieden treedt naast de turbulentie-tijdschalen de tijdschaal van het getij op. Turbulentie past zich niet momentaan aan als een wijziging in de stroomtoestand optreedt. Daarom zal het turbulentiespectrum in een stationaire stroming verschillen van het spectrum in een getijstroom. Dit wordt bevestigd door metingen [14].

Om de verschillen tussen de turbulentie verdeling in het prototype, M1000 en M1001 kwantitatief vast te kunnen stellen zou een uitgebreide set meetgegevens noodzakelijk zijn. Zoals in paragraaf 3.2 is aangegeven, zijn de beschikbare gegevens voor vergelijking minimaal. In de volgende paragrafen wordt nader ingegaan op de kwantitatieve verschillen.

3.5 Vergelijken van turbulentiespectra

3.5.1 Kenmerken van turbulentie spectra

De turbulentiespectra die in dit verslag vergeleken worden zijn één-dimensionale energiespectra van de turbulentie snelheidscomponent in de richting van de over de turbulentietijdschalen gemiddelde stroomsnelheid. In Figuur 7 staat een karakteristiek verloop van een dergelijk spectrum weergegeven. Een dergelijk turbulentiespectrum bevat een aantal specifieke kenmerken:

- Het oppervlak van het spectrum is een maat voor de turbulente kinetische energie $k \{k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \approx \overline{u'^2}\}$.
- De doorsnijding van het spectrum met de verticale as bepaalt de macroschaal van de turbulentiewervels.
- Er zijn een aantal frequentie gebieden aan te wijzen met een specifiek verloop, dat door het uitzetten van het spectrum op log-log assen eenvoudig is vast te stellen:
- Een n^{-1} verloop. De betekenis van dit verloop is niet eenduidig. Het kan wijzen op grootschalige componenten (Herring [17]). Echter komt dit spectrum verloop ook voor bij pijpstromingen, (zie Hinze [18], Perry [31]).
- Een $n^{-\frac{5}{3}}$ verloop. Dit verloop heeft het spectrum in het inertiaalgebied en is karakteristiek voor isotrope turbulentie.
- Een n^{-7} verloop (Heisenberg hypothese) voor het gebied van de kleine turbulente wervels in het gebied van de energiedissipatie.

De bovenstaande kenmerken lenen zich voor vergelijking en beoordeling van het spectrum.

De te vergelijken spectra zijn gemeten voor verschillende proefcondities en dienen derhalve geschaald te worden. Voor de schaling hier worden de externe grootheden U en D gebruikt. Door Comte-Bellot [7], Perry [32] wordt ingegaan op diverse schalingsmethoden. Geen van de schalingsmethoden blijkt te leiden

tot één universeel spectrumverloop. De hier gebruikte schaling is geschikt voor het gedeelte van het spectrum buiten het dissipatie frequentiegebied.

3.5.2 Nauwkeurigheidsaspecten

In [52] worden spectra gemeten in de Oosterschelde weergegeven. Deze spectra zijn bepaald uit snelheidsmetingen uitgevoerd met voornamelijk Ott molens. Daarbij wordt de grootte van de snelheid gemeten in richting van de momentane snelheid, zodat het gemeten spectrum ook invloed bevat van de normaal component van de turbulente fluctuaties. Zolang de turbulente fluctuaties klein zijn ten opzichte van de hoofdstroomsnelheid is het op deze manier gemeten spectrum bij benadering gelijk aan het spectrum van alleen de langscomponent van de turbulentie.

Bij de bepaling van het spectrum uit het snelheidssignaal wordt een filter toegepast met afsnijfrequenties $n = 0.00167$ en $n = 0.1 \text{ s}^{-1}$.

De hoogfrequente afsnijfrequentie blijkt nog relatief laag te zijn. De dimensioneloze afsnijfrequentie bedraagt voor gemiddelde stroomcondities in de Oosterschelde:

$$\frac{Dn}{U} = \frac{20 * 0.1}{1} = 2 \quad (9)$$

waarbij voor de waterdiepte wordt genomen: $D = 20 \text{ m}$ en voor de stroomsnelheid 1 m/s . Voor de spectra gemeten door Imamoto [19] geldt voor de overgangsfrequentie van het $n^{-5/3}$ naar het n^{-7} spectrumverloop:

$$\frac{Dn}{U} = 8.3 \quad (10)$$

Uit spectra gemeten door Nallury [28] is af te leiden: $\frac{Dn}{U} = 14.29$ en voor de spectra gemeten door McQuivey [24] voor de ruwe en gladde goot geldt respectievelijk $\frac{Dn}{U} = 8$ en 12 . Voor een frequentie midden in het inertiaal gebied ($n^{-5/3}$ spectrum) geldt voor McQuivey: ruwe goot 1 , gladde goot 1.5 en voor Nallury 1.78 .

De afsnijfrequentie blijkt dus ruim binnen het inertiaalgebied te liggen. De daardoor optredende fout in het oppervlak van het spectrum geschat worden door een $n^{-5/3}$ verloop aan te nemen voor het spectrum voor frequenties groter dan de afsnijfrequentie n_0 . Het verwaarloosde oppervlak bedraagt dan:

$$I = \int_{n_0}^{\infty} E(n) \, dn = 1.5 \, n_0 \, E(n_0) \quad (11)$$

In geval van een extrapolatie volgens het n^{-7} spectrum bedraagt de afwijking

$$I_h = 0.16n_o E(n_o) \quad (12)$$

Deze schattingen lopen een factor 10 uiteen. Daarom is voor een juiste schatting de positie van de afsnijfrequentie binnen het inertiaal gebied van belang. Als het door McQuivey, [24] gemeten spectrum voorbij de bovenvermelde afsnijfrequentie wordt verwaarloosd, ontstaat daardoor volgens (11) een fout van 22% in het spectrum oppervlak. In [53] wordt ook deze fout bepaald voor een aantal spectra. De hier gegeven schatting komt daar redelijk mee overeen. De laagfrequente afsnijfrequentie bedraagt 10 min.. Het effect van het filter is aanwezig vanaf 3.3 min.. Dit houdt in dat voor $n < 0.005$ beïnvloeding van het spectrum door het filter optreedt.

Een eendimensionaal spectrum kan voor de lage frequenties benaderd worden door

$$E(n) = \frac{\frac{4 \overline{u'^2} L_x}{U}}{1 + \frac{4 \pi^2 n^2 L_x^2}{U^2}} \quad (13)$$

In R1437 [52] vertonen de 0.S spectra voor lage frequenties juist een piek. Deze piek wordt geheel veroorzaakt door het filter. Het oppervlak van het spectrum dat hierdoor verwaarloosd wordt hangt af van de $E(o)$ waarde. Uit de later te bespreken tabel blijkt dat de uit het spectrum van McQuivey afgeleide waarde $E(o)$ voor de 0.S-spectra veelal samenvalt met de grootte van de gesignaleerde piek. Een grove benadering voor deze fout I_1 in het spectrumoppervlak bedraagt dan:

$$I_1 \approx 0.0025 * E_{\text{piek}} \quad (14)$$

Dit leidt tot een fout van de orde 15% van het opgegeven oppervlak voor het gootspectrum.

Bovenstaande schattingen geven aan dat de in [52] gegeven turbulentie-intensiteit de werkelijk optredende intensiteit onderschat met ongeveer 18% (spectrum oppervlak ongeveer 37%).

3.5.3 Grootte van de turbulentie-intensiteit in de Oosterschelde

In het onderstaande wordt ingegaan op de in de Oosterschelde gemeten turbulentie-intensiteit. Daarbij wordt de grootte en verdeling ervan vergeleken met de gootturbulentie gemeten door McQuivey [24].

De grootte van de turbulentie-intensiteiten in goten wordt hoofdzakelijk bepaald door de bodemruwheid. Door McQuivey zijn metingen uitgevoerd voor $C = 36.6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ en $C = 61.3 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$. In de Oosterschelde bedraagt de ruwheid van de bodem in de geulen: $C = 50 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ en op de platen: $C = 40 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$. In het EKOR-rapport [37], waarin de gemeten turbulentie-intensiteiten ook worden besproken, wordt een ruwheidshoogte van 0.2 m aangehouden.

Dit leidt tot $C = 55,4 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ voor een waterdiepte van 20 m, zijnde een waterdiepte karakteristiek voor de meetlocaties.

De door McQuivey gemeten intensiteiten zullen daarom grenzen aangeven voor de spreiding van de O.S. intensiteiten, indien in de O.S. geen excessieve turbulentie aanwezig is.

Door McQuivey zijn de volgende relatieve turbulentie-intensiteiten (betrokken op de diepte gemiddelde snelheid) gemeten: 0.10, 0.073 en 0.06 op respectievelijk de diepte $\frac{z}{D} = 0.1, 0.4$ en 0.7 . Uitgaand van een logaritmisch snelheidsprofiel volgt voor de relatieve intensiteit betrokken op de lokale snelheid: 0.12, 0.072, 0.055. Deze waarden hebben betrekking op $C = 61.3 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$. Voor $C = 36.6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ zijn de overeenkomstige intensiteiten betrokken op de lokale snelheid: 0.19, 0.098, 0.074.

Lineaire interpolatie leidt voor $C = 50 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ tot: 0.158, 0.0865, 0.0675.

In Figuur 8 zijn de gemeten relatieve (betrokken op de lokale snelheid) intensiteiten weergegeven en hebben betrekking op de metingen beschreven in [52]. De lokatie van de meetpunten is weergegeven in Figuur 1. De getalswaarden van de intensiteiten zijn gegeven in Tabel 1.

Wanneer de gemeten intensiteiten vergeleken worden met de geïnterpoleerde $C = 50 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ resultaten van McQuivey blijkt dat bij de bodem ($\frac{z}{D} = 0.1$) de gemeten intensiteiten bijna alle kleiner zijn dan de geïnterpoleerde waarde. De variatie die de metingen hier laten zien: 0.09 tot 0.17 lijkt niet verklaard te kunnen worden uit de grootte van de bodemwrijving. Dit lijkt te wijzen, met name de lage intensiteiten, op het nog niet volledig ontwikkeld zijn van de turbulentie op de meetlocatie. Reden daarvoor kunnen zijn, afgezien van invloeden van verwerking, meetinstrument en meetopstelling, de invloed van het getij en de invloed van de bodemgeometrie. De meetpunten liggen veelal nabij

overgangen van platen naar geulen, waardoor versnelling en vertraging van de stroming optreedt. Dit leidt tot afwijkende waarden voor de intensiteit. Op de waterdiepte $\frac{z}{D} = 0.4$ en 0.7 , blijken de meting 1 tot 4 (zie Figuur 8) een intensiteit aan te geven tot 12%. Dit betreft metingen in de Roompot. De metingen 2, 3, 4 en 6 zijn op dicht bij elkaar gelegen lokaties uitgevoerd. De verschillen zijn echter nogal aanzienlijk. De hoge intensiteiten moeten daarom meer toegeschreven worden aan lokale variatie van de bodemligging dan aan advectief aangevoerde grootschalige turbulentie.

Voorts is opvallend het verschil tussen de intensiteiten bij eb en vloed. Reden hiervoor kan zijn dat de ebperiode langer duurt dan de vloedperiode, waardoor bij eb de turbulentie zich meer kan ontwikkelen dan bij vloed. Daarnaast is de opstroomse bodemgeometrie in deze fasen verschillend. Dit kan leiden tot afwisseling van vertraging- en versnellingseffecten op de turbulentie tijdens de eb- en vloedfase met als gevolg respectievelijk een relatief hoge en lage intensiteit. Bij meting vanaf een vlet blijkt een grotere variatie van de intensiteit in de vertikaal op te treden (vergelijk 2 en 4) dan bij een meting uitgevoerd vanaf de bok.

De in het prototype gemeten turbulentie-intensiteiten vertonen een veel grotere variatie dan op grond van variatie in bodem ruwheid verwacht mag worden. Het gros van de gemeten waarden is lager dan wat op grond van metingen in gorten verwacht mag worden. In het bijzonder in de Hammen wordt een lage turbulentie-intensiteit gevonden. Dit kan niet verklaard worden door een lage ruwheid. Een Chézy-waarde $C = 60 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ geeft bij gootturbulentie nog een intensiteit die aanmerkelijk hoger is dan in de Hammen gemeten is. De in paragraaf 3.5.2 aangegeven fout ten gevolge van het gebruik van het filter geeft geen voldoende verklaring.

Voor de optredende verschillen kunnen een aantal oorzaken worden aangevoerd, die een nadere studie vereisen om tot meer concluderende uitspraken te komen:

- De snelheidsverticalen zijn nog niet ingespeeld. Beschouwing van

$$\frac{U\left(\frac{z}{D} = 0.7\right) - U\left(\frac{z}{D} = 0.1\right)}{U\left(\frac{z}{D} = 0.5\right) - U\left(\frac{z}{D} = 0.1\right)}$$

laat nogal variatie zien. Dit zal toegeschreven

kunnen worden aan variatie in de bodemligging en de versnellingen en vertragingen daardoor veroorzaakt.

- De insteltijd van een evenwichtsturbulentie-verdeling is te lang om binnen de getijcyclus een volledig ontwikkelde verdeling te geven.

Om een ruwe schatting te maken van de insteltijd van een volledig ontwikkelde turbulentie verdeling wordt uitgegaan van de ontwikkeling van een grenslaag langs een vlakke plaat. Daarvoor geldt:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.377}{R^{1/5}} \quad (15)$$

waarbij δ de grenslaagdikte
 x afstand tot de rand van de plaat
 $R = \frac{Vx}{\nu}$
 V de uniforme aanstroomsnelheid
 ν de laminaire kinematische viscositeit

Wordt voor δ een karakteristieke waterdiepte gekozen, 20 m en voor U 1 m/s dan volgt uit (15) voor de afstand waarover de grenslaag zich ontwikkelt: $x = 4527\text{m}$. De insteltijd bedraagt dus $\frac{x}{V} = 1\frac{1}{4}$ uur. Het is dus aannemelijk dat de turbulentie in het getijgebied niet de volledig ontwikkelde toestand bereikt, met name tijdens vloed.

3.5.4 Macro-lengteschaal van turbulentie

De macrotijdschaal, T , voor turbulentie wordt gedefiniëerd door [18]:

$$T = \int_0^{\infty} R_E(t) dt \quad (16)$$

waarin:

$$R_E(t) = \frac{\overline{u'(t') u'(t'-t)}}{\overline{u'^2}} \quad (17)$$

Voorts geldt:

$$E(n) = 4 \overline{u'^2} \int_0^{\infty} R_E(t) \cos 2\pi n t dt \quad (18)$$

Dus volgt:

$$T = \frac{E(0)}{4 \overline{u'^2}} \quad (19)$$

De bijbehorende lengteschaal L_x is:

$$L_x = UT = \frac{U E(0)}{4 \overline{u'^2}} \quad (20)$$

Door McQuivey [24] werden de volgende lengteschalen gemeten: $\frac{L_x}{D} = 0.75, 1.15$ en 1.05 voor respectievelijk $\frac{z}{D} = 0.1, 0.4$ en 0.7 . Voor de ruwe bodem werden ongeveer 5% hogere waarden en voor de gladde bodem ongeveer 5% lagere waarden voor de lengteschaal gemeten. De macro-lengteschaal voor gootturbulentie is dus van dezelfde orde als de waterdiepte.

In Tabel 2 zijn enige waarden voor de macro-lengteschaal afgeleid van de Oosterschelde metingen. De hierin vermelde waarden zijn op de volgende wijze verkregen: In het laag frequente gebied worden de waarden van het spectrum beïnvloed door het gebruikte filter. Daarom is voor $E(o)$ de maximale waarde voor E genomen zoals deze in de spectra vermeld in [52] is af te lezen. Voor de gemiddelde snelheid U in formule (20) is gekozen de gemiddelde snelheid op het middelste meetpunt in de betreffende verticaal.

Uit Tabel 2 blijken waarden voor de lengteschaal voor te komen die lager dan wel hoger zijn dan de referentiewaarden voor gootturbulentie. De lagere waarden moeten te dele toegeschreven worden aan de invloed van het filter en het nog niet volledig ontwikkeld zijn van de turbulentie. De waarden hoger dan de referentiewaarden kunnen wijzen op de invloed van horizontale snelheidsgradiënten op de turbulentieontwikkeling.

3.5.5 Spectrumvorm

In [52] worden de Oosterschelde spectra grafisch weergegeven met lineaire schalen voor zowel de energiedichtheid als de frequentie. Het onderscheiden van de karakteristieke gebieden in het spectrum ($n^{-1}, n^{-5/3}, n^{-7}$) wordt daarvoor bemoeilijkt. Het verdient aanbeveling turbulentiespectra ook dubbellogaritmisch uit te zetten.

In Tabel 3 wordt voor het meetpunt 5 RZUM het gemeten spectrum vergeleken met het spectrum gemeten door Mcquivey. Daartoe zijn de spectrumwaarden omgerekend naar de schaalwaarden van Mcquivey volgens de formules:

$$\frac{n_{OS} \cdot D_{OS}}{U_{OS}} = \frac{n_{MQ} \cdot D_{MQ}}{U_{MQ}} \quad (21)$$

$$F_{OS}^{MQ} = \frac{E_{OS}}{u'^2} \frac{n_{OS}}{n_{MQ}} \quad (22)$$

waarbij F_{OS}^{MQ} de waarde van F gemeten in de Oosterschelde en geschaald naar het model van Mcquivey is.

De spectrumwaarden F voor de ruwe en gladde goot verschillen weinig. Bij het omschalen van de spectrumwaarden is voor U_{OS} de snelheid in het bovenste meetpunt gebruikt.

Uit Tabel 3 blijkt dat behalve voor de F -waarden behorend bij de laagste frequentie, de spectrumwaarden van het Oosterschelde spectrum goed overeenkomen met de waarden van de gootturbulentie. Het 70% betrouwbaarheidsinterval van de gemeten Oosterschelde spectra [52] ligt tussen $(1-\varepsilon) E(n)$ en $(1+\varepsilon) E(n)$, waarbij $\varepsilon = 0.43$ of 0.3 voor een meetduur van respectievelijk 1 of 2 uur. De verschillen in Tabel 3 liggen ruim binnen dit interval. Het is niet duidelijk of de piekwaarde van het O.S-spectrum alleen door deze grote onnauwkeurigheid verklaard moet worden.

In Figuur 10 is het spectrum 5 RZUM 1 dubbellogaritmisch uitgezet. Dit spectrum toont een $-\frac{5}{3}$ helling voor bijna het gehele weergegeven frequentiegebied. Voor lage frequenties is mogelijk een -1 helling te onderkennen. Echter door de variatie in het spectrumverloop is deze helling niet met zekerheid vast te stellen.

In Tabel 4 worden voor twee frequenties het turbulentie-energiespectrum, gemeten op een aantal lokaties in de Oosterschelde, vergeleken met de overeenkomstige waarden van het referentiespectrum. De omrekening is gebaseerde op de waterdiepte en de diepte-gemiddelde snelheid. Daarbij is gekozen voor 2 vaste frequenties in het referentie spectrum : $n = 1$ en $n = 10^5$ herz. De eerste frequentie ligt in het n^{-1} spectrum en de tweede in het $n^{-\frac{5}{3}}$ spectrum.

De overeenkomstige frequenties in de O.S spectra blijken, voorzover deze karakteristieke gebieden daar te onderkennen zijn, in de overeenkomstige gebieden te liggen. De overeenkomstige spectrumwaarden stemmen redelijk overeen zeker gezien het bovenvermelde betrouwbaarheidsinterval.

Uit de bovenstaande vergelijkingen blijkt dat voor het hoogfrequente gebied de O.S. spectra redelijk overeenkomen met spectra karakteristiek voor gootturbulentie. Voor de lage frequenties ($n < 0.004$) is dit niet betrouwbaar vast te stellen gezien de relatieve nauwkeurigheid van het spectra en de gebruikte afsnijfrequentie ($n = 0.0017$). Dat bij O.S. spectra meer energie in het laagfrequente gebied aanwezig zou zijn dan bij het referentiespectrum is niet uitgesloten daar door horizontale snelheidsgradienten wervels opgewekt kunnen worden met afmetingen die groter zijn bij alleen bodemgegenereerde turbulentie. Een hoge energie bij lage frequenties behoeft nog niet te wijzen op aanwezige topografische turbulentie. In het bijzonder geven de coherentiefuncties geen

grote samenhang tussen de turbulentie in het bovenste en het onderste meetpunt [52]. Deze conclusie wordt echter minder hard door de gebruikte afsnijfrequentie.

3.6 Vergelijking turbulentie-intensiteiten in model en prototype

In Tabel 5 en 6 zijn de intensiteiten gemeten in M 1000 en M 1001 weergegeven. De metingen in M 1000 [43] laten een geringe variatie in de turbulentie-intensiteit zien. De waarden komen redelijk overeen met de referentie intensiteiten van Mcquivey. De metingen in M1001 langs de as van de kering (Roompot) zijn bij de oevers in overeenstemming met gootturbulentie. In het midden van de Roompot zijn de gevonden intensiteiten veel kleiner dan bij de referentieturbulentie. Mogelijk is de turbulentie hier nog niet volledig ontwikkeld. De instroomrand ligt ongeveer 2 km voor de kering, terwijl de inspeellengte volgens formule (15) 4.5 km moet zijn.

In Tabel 7 zijn voor de Roompot op een aantal plaatsen de relatieve turbulentie-intensiteiten vergeleken voor prototype en M 1001. Voor de Roompot Zuid komen de intensiteiten redelijk overeen, voor de Roompot Noord is er enig verschil. Wat betreft de vergelijking tussen M 1000 en M 1001 is nauwelijks informatie aanwezig. De turbulentie-intensiteiten op een punt in de Roompot vertonen redelijke overeenkomst, zij het dat de M 1000 resultaten op de ebperiode en die van de M 1001 op de vloedperiode betrekking hebben.

De beschikbare resultaten laten geen grote verschillen zien. Deze meetgegevens zijn echter onvoldoende om een verantwoord oordeel te kunnen geven over overeenkomst en verschillen tussen de modellen en het prototype. Daarvoor zou in de gebieden met grote variatie in de turbulentie-intensiteit, zoals uit de prototype metingen valt op te maken, ook in de schaalmodellen gemeten moeten worden.

4. Invloed van de stormvloedkering op de turbulentie

4.1 Inleiding

Daar de stormvloedkering het dwarsprofiel van de Oosterschelde plaatselijk in belangrijke mate vernauwt, ondervindt de stroming lokaal versnellings- en vertragingseffecten, die de turbulentieverdeling beïnvloeden. Daarnaast is de stormvloedkering een nauwelijks gestroomlijnde constructie, waardoor loslating van de stroming plaats heeft, wat gepaard gaat met een sterke toename van de turbulentie-intensiteit. Deze beïnvloeding van de turbulentie is bovenstrooms van de kering gering. Benedenstrooms treedt in de nabijheid van de kering een zeer sterke beïnvloeding op, die aanvankelijk toeneemt en daarna stroomafwaarts weer afneemt met de afstand tot de kering.

In het fysisch schaalmodel M1001 zijn een groot aantal bouwfasen en de eindfase van de stormvloedkering onder stationaire stroomcondities onderzocht. Behalve de snelheidsverdeling is ook de turbulentie-intensiteit gemeten voor een groot aantal lokaties tot maximaal 650 m uit de kering verwijderd. Het grootste deel van de metingen betreft lokaties die 150 m of minder uit de as van de kering liggen. In een aantal gevallen is ook het turbulentiespectrum bepaald. De volgende onderzoeken geven een beeld van de beïnvloeding van de turbulentie door de kering: M1878, [45], M1945, [49], M2037, [51], M1929, [48], M1982, [50] en M1898, [46].

Bij een analyse van de metingen valt op dat bovenstrooms nauwelijks beïnvloeding van de turbulentie-intensiteit optreedt. Dit blijkt in het bijzonder uit M1982 waarin verschillende bouwfasen bij dezelfde bovenstroomse stroomcondities zijn onderzocht. De relatieve diepte-gemiddelde turbulentie-intensiteit bedraagt bovenstroom ± 0.04 tot 0.08 . De vergroting van de turbulentie-intensiteit benedenstrooms blijkt bepaald te worden door:

- de pijlers
- de drempels
- de dorpels
- scheve aanstroming van de pijlers
- de dam aanzetten
- scheve situaties:
 - overgangen bij deels geplaatste dorpels
 - overgangen bij een gesloten schuif
- taludhelling

4.2 Uniforme bouwfasen

4.2.1 Toename van de turbulentie-intensiteit

In Tabel 8 zijn de diepte-gemiddelde turbulentie-intensiteit en de intensiteit 2 m boven de bodem opgenomen voor een meetraai loodrecht op de kering in de Roompot, lopend tussen pijler R10 en R11 (zie Figuur 11). De hier beschouwde toestanden slaan op "uniforme" bouwfasen van de SVK, namelijk kaal sluitgat, sluitgat met alle pijlers, sluitgat met pijlers en drempel voltooid, sluitgat met pijlers, drempel en alle dorpels. In deze volgorde wordt de doorstroomopening steeds sterker gereduceerd. De plaatselijke turbulentie-intensiteit wordt stroomafwaarts daardoor vergroot, zoals uit de Tabel 8 blijkt.

De invloed van de dam aanzet kan hier verwaarloosd worden. De tabel toont duidelijk een groei van de turbulentie intensiteit stroomafwaarts van de kering. Voor de situaties zonder drempel wordt de intensiteit maximaal op een afstand ongeveer ± 50 m benedenstrooms van de as van de kering. Voor de situatie met drempel ligt dit maximum meer dan 150 m verwijderd. Dit verschil in lokatie van de maximale intensiteit hangt samen met de afname van de waterdiepte op de as van de kering.

De relatieve diepte-gemiddelde intensiteit en intensiteit op 2 m boven de bodem bedragen 150 m stroomafwaarts van de kering respectievelijk 0.05 en 0.11 voor het kale sluitgat. Deze waarden zijn laag vergeleken met de overeenkomstige waarde in het prototype (zie Hoofdst. 3). Voor de eindfase van de SVK0 bedragen de overeenkomstige waarden maximaal: 0.34 en 0.55. Deze waarden voor de eindfase liggen aanmerkelijk hoger dan de waarden die in het prototype gemeten zijn voor de situatie zonder stormvloedkering. De oorzaken van de variatie in de turbulentie-intensiteit zoals bij afwezigheid van de SVK0 gemeten en in Hoofdstuk 3 besproken zijn, zijn blijkbaar ondergeschikt aan de invloed van de stormvloedkering op de turbulentie, althans in het gebied nabij de kering.

4.2.2 Afname van de turbulentie intensiteit

In Tabel 9 is voor de Schaar het verloop van de turbulentie intensiteit van 150 tot 350 m stroomafwaarts van de kering weergegeven. De meetlokaties worden in Figuur 12 aangegeven. Deze gegevens zijn afgeleid uit metingen beschreven in [49] voor de eindsituatie van de kering bij geopende schuiven. De intensiteit is gemeten 2 m boven de bodem. In het beschouwde gebied neemt de turbu-

lentie-intensiteit stroomafwaarts van de kering af.

Afname van de intensiteit u' volgens Tabel 9 kan benaderd worden door:

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{U} = \frac{\sqrt{u'_0^2}}{U} \frac{1}{\left\{1 + \frac{(x-150)}{59}\right\}^{0.4}} \quad (23)$$

waarin x de afstand tot de as van de kering, $\sqrt{u'_0^2}$ een referentie-intensiteit en U de gemiddelde snelheid is. De getallen 59 en 0.4 geven de "best fit". In geval van isotrope turbulentie gedraagt de afname van de turbulentie-intensiteit zich in de beginfase als, [18],

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{U} \sim \left(\frac{x}{L}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (24)$$

waarin L de maaswijdte is van het rooster waardoor de turbulentie wordt opgewekt.

De gevonden exponent: -0.4 is hier redelijk mee in overeenstemming. De afwijking moet toegeschreven worden aan de invloed van de bodem. De in Tabel 9 vermelde intensiteiten zijn op 2 m boven de bodem gemeten. In het bovenste deel van de verticaal zal de turbulentie-intensiteit zich minder snel aanpassen. Hier zal mogelijk $x^{-\frac{1}{2}}$ gelden. In de eindfase neemt de turbulentie-intensiteit af volgens, [18],:

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{U} \sim x^{-1.25} \quad (25)$$

Deze eindfase, waarbij de visceuse dissipatie dominant is, treedt hier niet op. De eindtoestand hier bestaat uit tenminste bodemgegenereerde turbulentie. Uit formule (23) volgt dat 1300 m stroomafwaarts van de kering een relatieve intensiteit van 0.1 wordt bereikt. Dit geeft een indicatie van het gebied waar de invloed van de SVK op de turbulentie-intensiteit merkbaar is.

4.3 Niet-uniforme bouwfasen

In Tabel 10 worden snelheden en turbulentie-intensiteiten gegeven voor situaties waarbij een discontinuïteit in de kering aanwezig is. In de Figuren 11, 13, 14 en 15 worden de meetlokaties weergegeven. De eerste situatie, ontleend aan [46], betreft een discontinuïteit in de dorpel. De tweede en derde situaties slaan op bouwfasen met een discontinuïteit in de drempel, ontleend aan

[48] en [50]. De resultaten hebben betrekking op een viertal punten die op een afstand van 150 m benedenstrooms uit de as van de kering liggen. De eerste drie punten liggen ter hoogte van de discontinuïteit in de kering, het laatste punt ligt achter het voltooide gedeelte op een plaats waar geen invloed meer verwacht mag worden van de discontinuïteit.

Voor de tweede en derde toestand blijken de gevonden relatieve intensiteiten in te liggen tussen de waarden van de uniforme toestand met drempel en de uniforme toestand zonder drempel. In geval van de discontinuïteit in de dorpel blijkt de relatieve intensiteit in het overgangsgebied die van uniforme situaties te overtreffen. Opvallend is ook de grote discontinuïteit in de snelheid. Dit moet toegeschreven worden aan de plaatselijk grote reductie, ongeveer 50%, in waterdiepte ten gevolge van de dorpel. Bij de eerste twee situaties treedt slechts een reductie van 16% op. Door de horizontale discontinuïteit in de snelheid wordt een menglaag ontwikkeld waarin hoge turbulentie intensiteiten ontstaan die de overshoot in de intensiteit veroorzaken.

In geval van discontinuïteiten in de snelheid door gedeeltelijk sluiten van de schuiven wordt de turbulentie eveneens in sterke mate beïnvloed. Achter de gesloten schuiven ontstaan neren. In de mengzones tussen de hoofdstroom en neren ontstaan hoge turbulentie-intensiteiten.

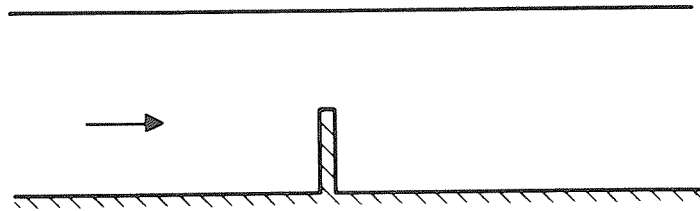
4.4 Vergelijking met andere metingen

De in M 1001 gemeten invloed van de SVK op de turbulentie blijkt vooral stroomafwaarts van de kering groot te zijn. Vanaf de kering groeit de relatieve turbulentie-intensiteit in stroomafwaartse richting tot een maximum van 0.30 à 0.40 die bereikt wordt op ongeveer 150 m uit de as van de kering. Verder stroomafwaarts neemt de intensiteit weer af tot een gebruikelijke orde grootte. In deze paragraaf wordt nagegaan of het gevonden gedrag aansluit bij uit de literatuur bekende metingen. Daar vooral gemeten wordt aan schematische 2D-situaties zal daarbij aansluiting gezocht moeten worden.

Door de SVK wordt het doorstroomprofiel zowel in horizontale als in verticale richting verkleind waardoor grote horizontale en verticale snelheidsgradienten ontstaan. Overeenkomstige schematische situaties moeten daarom zowel op horizontale als verticale doorsneden betrokken worden.

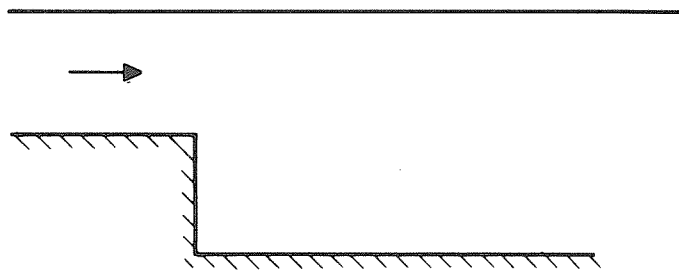
Schematische situaties die aansluiten bij de verticale doorsnede van de SVK zijn:

a)



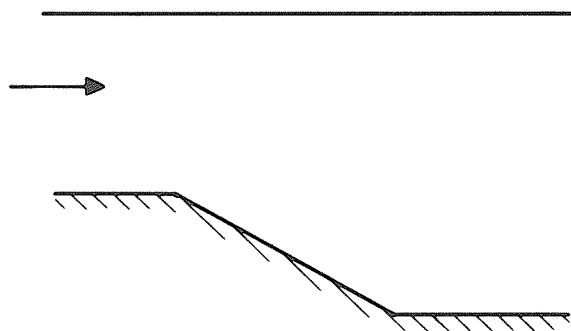
plaat op wand

b)



terugwaartse stap

c) diffusor

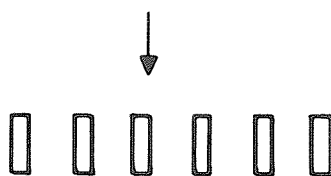


Schematische situaties die aansluiten bij de horizontale vernauwing zijn:

d) Strooming om een lichaam



e) Strooming door een cascade



In geval a en b treedt loslating van de stroming op. Achter de plaat of terugwaartse stap ontstaat een neer, waarbij de overgang naar de neer naar de hoofdstroom een menglaag is. De lengte van de neer is voor beide gevallen verschillend. In geval a ongeveer 12 maal de lengte van de plaat [9]. De breedte van de neer is daarbij groter dan de lengte van de plaat. Bij afnemende waterdiepte zal de neerlengte afnemen. In geval b, [10], 5 à 8 maal de stapgrootte afhankelijk van de waterdiepte verhouding bij in en uitstroming. Deze waarden gelden voor stromingen tussen vaste wanden. Bij een vrije waterspiegel kan beïnvloeding van de neerlengte optreden. Bij de stroming over de dorpel blijkt volgens M2037, [51], het eind van de neer te liggen ongeveer 125 m benedenstrooms van de as van de kering. De gemiddelde waterdiepte is circa 30 m en de diepte boven de dorpel ± 12 m. De lengte van de neer bedraagt dus ± 6 maal de staphoogte en is dus meer in overeenstemming met geval b dan a. Dit moet verklaard worden uit de dikte/hogte verhouding van de dorpel (d.w.z. opstroming ligt qua geometrie tussen situatie a en b in) en uit de verhouding van de waterdiepte boven dorpel en de waterdiepte voorbij de kering (verkleining van de doorstroomopening leidt bij de dorpel-afmetingen tot een verkleining van de neerlengte/dorpelhoogte verhouding).

De verhoging van de turbulentie-intensiteiten speelt zich bij de schematische doorsneden a en b vooral af binnen de menglaag. Vanaf het loslaatpunt neemt de turbulentie-intensiteit binnen de menglaag stroomafwaarts toe. De maximale waarde van de intensiteit wordt voor het reattachementpunt van de hoofdstroom bereikt. In een verticale dwarsdoorsnede is de turbulentie binnen de menglaag significant hoger dan daarbuiten. Karakteristieke waarden voor de maximale intensiteit in situatie b bedragen 40% van de lokale stroomsnelheid, [10]. Betrokken op de lokale snelheid zal het percentage aanmerkelijk hoger zijn. In Figuur 16 worden in M 1001 gemeten snelheden en turbulentie-intensiteiten weergegeven voor de eindsituatie van de kering in de Roompot bij vloed [51]. De meetpunten, 20,6,32,33 en 34, die hier beschouwd worden liggen op een raai loodrecht op de kering lopend tussen pijler R10 en R11 (zie Figuur 11). De waterdiepten op deze punten zijn respectievelijk 28.0, 11.68, 23.44, 32.80 en 36.48 m. Uit de gemeten snelheden kan afgeleid worden dat stroomafwaarts van de kering een neer optreedt met een horizontale as. Het reattachementpunt van de hoofdstroom ligt in tussen meetpunt 33 en 34. Stroomafwaarts van de kering neemt de turbulentie-intensiteit toe en wel het sterkst voor het middelste meetpunt in de verticaal. Dit punt ligt nabij de menglaag tussen neer en hoofdstroom. In verticaal 33 neemt in overeenstemming met experimenten voor de

schematische situaties a en b de turbulentie in dit punt weer af. Afwijkend is het gedrag van de turbulentie in het bovenste meetpunt. Hier blijft de intensiteit toe nemen ook voorbij het reattachmentpunt: De diepte-gemiddelde turbulentie intensiteiten bedragen voor de meetpunten 20,6,32,33 en 34, respectievelijk 0.09, 0.04,0.14,0.23 en 0.35. De schematische situaties hebben stroomafwaarts van de vernauwing een constante waterdiepte. Langs de meetraai in M1001 neemt de waterdiepte toe en komt daarom met situatie c overeen. Daar de bodemhelling ten hoogste 1:10 bedraagt kan de invloed daarvan op de intensiteit niet zo groot zijn. Dit gedrag kan ook niet verklaard worden uit de invloed van de vrije waterspiegel, [11], [1]. De grootte van de turbulentie-intensiteit is nog redelijk verklaarbaar, het verloop wijkt dus echter af van de 2D verticale situatie. De afwijking moet toegeschreven worden aan horizontale vernauwingen in de kering.

De schematische situatie d geeft de aanstroming van een afzonderlijk pijler weer. Indien de pijler op de kop wordt aangestroomd bedraagt de neerlengte ongeveer twee maal de breedte van de pijler, dus circa 10 m. Binnen de neer treedt de hoogste turbulentie-intensiteit op, orde 30% van de ongestoorde aanstroomsnelheid, Bradbury [5]. Bij rechte aanstroming zal deze neer niet het gezochte verschil kunnen verklaren. Bij scheve aanstroming zal de neerlengte groter zijn, maar nog niet voldoende groot zijn om het gevonden verloop van de intensiteit te verklaren. Schematische doorsnede e heeft een groter invloedsgebied. Een mengzone breidt zich bij benadering linear uit met de afstand tot het loslaatpunt, ongeveer met een hoek van 0.1 rad. De maximum intensiteit zal optreden, waar de mengzones van twee pijler elkaar snijden, dat is dus ongeveer op 225 m uit de as van de kering. De bovenbeschouwde meetpunten liggen binnen deze afstand. Aan configuratie e is veel gemeten i.v.m. de studie van homogene isotrope turbulentie, in het bijzonder met betrekking tot de afname van de intensiteit, Naudascher [29], Hinze [18]. Echter wordt dan niet gemeten in het gebied juist achter het rooster waar de toename van de intensiteit optreedt. In M1982, [50], komt een situatie voor die als benadering van situatie e kan dienen: een vlakke bodem met alleen de pijlers geplaatst. In het dwarsraai tussen pijler R10 en R11 vertonen de gemeten verticale en uniforme turbulentie verdeling in het bovenste deel van de verticaal. De relatieve intensiteit daarvan groeit in stroomrichting tot 0.15 op 150 m uit de as. Deze intensiteit is niet zo hoog als in de eindtoestand (M 2037, [51]) met dorpels. Blijkbaar is de hoge intensiteit hier een gevolg van de interactie tussen de horizontale en verticale vernauwingen in de kering.

5. Conclusies

In dit onderzoek is aandacht geschonken aan de volgende onderwerpen:

- Uitbreiding van empirische relaties in verband met excessieve turbulentie
- Vaststelling van de aard van de turbulentie in de monding van Oosterschelde
- Invloed van de stormvloedkering op de turbulentie

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- 1 De turbulentieverdeling van de inkomende stroming beïnvloedt de grootte van de stroomkracht op een lichaam. De turbulentie-intensiteit is niet een voldoende karakterisering van deze turbulentie verdeling. Ook de grootte van de turbulentiewervels is van belang. Verhoging van de turbulentie-intensiteit kan onder bepaalde omstandigheden tot verlaging van de stroomkracht leiden.
- 2 In deze studie zijn een aantal mogelijkheden nagegaan om een in een schaalmodel geijkte empirische formules uit te breiden voor mogelijke in het prototype afwijkende turbulentie-karakteristieken. Hierbij is vooral gedacht aan formules voor krachten of de stabiliteit van een constructie element op de bodem of het transport van loskorrelig materiaal. Hierbij is aandacht geschonken aan de volgende mogelijkheden:
 - A. Het opnieuw ijken van de empirische relaties, maar nu voor een model waarbij de turbulentie karakteristieken van het prototype worden gereproduceerd.
 - B. Toepassing van de relaties buiten het ijkingsgebied, waarbij een grote onzekerheidsmarge wordt gehanteerd.
 - C. Toepassing van de relaties waarbij één of meer empirische constanten worden gecorrigeerd voor de afwijkende turbulentie karakteristieken. De correctiefactoren dienen dan nader bepaald te worden als functie van deze turbulentie karakteristieken.
 - D. Toepassing van de empirische relatie als een universeel toepasbare relatie tussen de momentane kracht/transport en de momentane schuifspanning/snelheid. Op basis van het werkelijke, in de tijd variërende verloop van de snelheid/schuifspanning in het prototype kan dan het verloop van de kracht/transport bepaald worden.

- E. In geval van grootschalige turbulentie-wervels die wel in het prototype maar niet bij de modelproeven/gootproeven aanwezig zijn, kan uit het snelheidssignaal, een signaal afgeleid worden die alleen betrekking heeft op de laagfrequente snelheidscomponenten. De empirische relatie kan dan weer momentaan worden toegepast. Het effect van de fijschalige turbulentie is in de coëfficiënten van de relatie aanwezig. Deze methode komt neer op het splitsen van het turbulentie-energie-spectrum in twee delen die dan onafhankelijk van elkaar worden verondersteld.
- F. Bepaling van de stroomsnelheid in het prototype vlak boven de bodem na een herleiding van de empirische relatie naar deze snelheid. Deze methode kan eventueel gecombineerd worden met een van de voorgaande.

3. Bij de aanpak volgens de methoden D en E wordt voorbijgegaan aan enige wezenlijke kenmerken van de turbulente stroom en de interactie met de omstroomde constructieelementen. De methoden kunnen wel als denkmodel dienen op basis waarvan methode C kan worden ontwikkeld.

4. Turbulentie kan ondermeer door de volgende karakteristieken worden gekenmerkt:

- turbulentie-intensiteit $\overline{u'^2}$
- macro-lengteschaal L_x of tijdschaal T
- vorm van het spectrum

5. De turbulentie-karakteristieken kunnen op verschillende manieren dimensieloos gemaakt worden. Voor de huidige toepassing zijn de externe grootheden D, de hydraulische straal of waterdiepte en \bar{U} , de diepte-gemiddelde snelheid daarvoor gebruikelijk:

- $\frac{\overline{u'^2}}{\bar{U}^2}$ als functie van de hoogte tot de bodem $\frac{Z}{D}$
- $\frac{L_x}{D} = \frac{T\bar{U}}{D}$

De vorm van het spectrum komt het duidelijkst tot uitdrukking bij grafische representatie als het op dubbel logaritmisch papier wordt uitgezet.

6. Karakteristiek voor gootturbulentie is:

$$\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{U}} \left(\frac{Z}{D} = 0.1 \right) \approx 0.12, \quad \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{U}} (0.4) \approx 0.09, \quad \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{U}} (0.7) \approx 0.07$$

$$\frac{L}{D} \approx 1$$

- Vorm van het spectrum als in Fig. 7 weergegeven.
- 7 De beschikbare turbulentiemetingen in de Oosterscheldemond (prototype) voor de bouw van de stormvloedkering zijn te beperkt van omvang om eenduidig de oorzaken van de variatie in de intensiteiten vast te kunnen stellen.
- 8 De variatie in turbulentie-intensiteit voor de verschillende meetlokaties moet vermoedelijk aan de lokale bodemgeometrie worden toegeschreven.
- 9 Een op dominante wijze aanwezig zijn van grootschalige topografisch turbulentie, bij de turbulentie gemeten in de Oosterscheldemond voor de bouw van de stormvloedkering lijkt niet waarschijnlijk door de grote lokale variatie van de gemeten turbulentie.
- 10 De gemeten turbulentiespectra komen vrij goed overeen met de spectra van gootturbulentie.
- 11 De invloed van de stormvloedkering op de turbulentie is veel groter dan die van de overige oorzaken.
- 12 De gemeten variaties van de turbulentie intensiteit stroomafwaarts van de stormvloedkering komt kwaliteit en kwantitatief redelijk overeen met die gemeten in meer geschematiseerde situaties:
Toename van de intensiteit tot het reattachement punt van de stroming over drempel en dorpel, op ongeveer 150 m benedenstrooms van de kering. Daarna een afname van de intensiteit tot het niveau gootturbulentie.
- 13 De invloed van de stormvloedkering op andere turbulentiekaracteristieke anders dan de intensiteit is hier niet beschouwd.
- 14 Bij niet uniforme bouwfasen komen volgens de metingen in het overgangsgebied bij een discontinuïteit in de dorpel hogere intensiteiten voor dan bij de beide uniforme bouwfasen. In de overige niet uniforme bouwfasen geven de metingen een geleidelijke overgang in de intensiteit aan.

LITERATUUR

1. Alfrink, B.J. and Rijn, L.C. van
Two equation turbulence model for flow in trenches
J. of Hydr. Eng. (A.S.C.E.), Vol. 109, no 7, juli 1983.
2. Anwar, H.O. and Atkins, R.
Turbulence measurements in simulated tidal flow
J. of Hydr. D.V., Vol. 106, no hy8, aug. 1980
3. Blinco, P.H. and Partheniades
Turbulence characteristics in free surface flows over smooth and rough boundaries
J. of Hydr. Research, IAHR. Vol. 9, No. 1, 1971
4. Blinco, P.H. and Simons, D.B.
Turbulent structure near smooth boundary
J. of Eng. Mech. Div, ASCE, Vol. 101, No. em3, june 1975
5. Bradbury, L.J.S.
Measurements with a pulsed wire and a hot wire anemometer in the highly turbulent wake of a normal flat plate
J. of Fluid Mech, Vol. 77, part 3, oct. 1976
6. Bullock, K.J., Cooper, R.E. and Abernathy, F.H.
Structural similarity in radial correlations and spectra of longitudinal velocity fluctuations in pipe flow
J. of Fluid Mech., Vol. 88, 1978
7. Comte-Bellot, G.
Coefficients du dissymetrie et d'aplatissement, spectres et corrélations en turbulence de conduite
J. de Mecanique, 2, no. 2, june 1963

LITERATUUR (vervolg)

8. Counihan, J. Hunt, J.C.R. and Jackson, P.S.
Wakes behind two dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers
J of Fluid Mech, Vol. 64, part 3, july 1974
9. Durst, F and Rastogi, A.K.
Theoretical and experimental investigations of turbulent flows with separation
Pennsylvania, Proc. Symposium on Turbulent Shear Flows, april 1977
10. Durst, F. and Tropea, C.
Turbulent backward-facing step flows in two-dimensional ducts and channels
Davis, Proc. Third Symp on Turbulent shear flows, sept. 1981
11. Etheridge, D.W. and Kemp, P.H.
Measurements of turbulent flow downstream of a rearward facing step
J. of Fluid Mech. Vol. 86, part 3, june 1978
12. El Telbany, M.M.N. and Reynolds, A.J.
Velocity distributions in place turbulent channel flows
J. of Fluid Mech. Vol. 100, part 1, 1980
13. El Telbany, M.M.M. and Reynolds, A.J.
Turbulence in plane channel flows
J. of Fluid Mech, Vol. 111, okt. 1981
14. Flügge, G.
Transport- und Ausbreitungsmechanismen in Flüssen und Tideästuarien unter besonderer Berücksichtigung der Strömungsturbulenz
Hannover, Universität, Dissertation 1982
15. Frost, W and Moulden, T.H.
Handbook of turbulence, Vol. 1 Fundamentals and Applications
New York, Plenum Press, 1977

LITERATUUR (vervolg)

16. Groot, M.B. de and Konter, J.L.M.
Prediction of mattress stability in turbulent flow
17. Herring, J.R.
On the statistical theory of two-dimensional topographic turbulence
J. of Atmos Sci, Vol. 34, 1977
18. Hinze, J.O.
Turbulence
New York, McGraw-hill, 19..
19. Imamoto, H.
Universal representation of turbulence characteristics in free surface
shear flow
Sao Paulo, 16th Congress of IAHR. proc. 1975
20. Ippen, A.T.
Turbulence and diffusion in hydraulic engineering
Fort Collins, Proc. of 12 th Congress. IAHR, sept 1967
21. Ishihara, Y and Yokosi, S.
The spectra of turbulence in a river flow.
Fort Collins, Proc. of 12th congress IAHR, sept. 1967
22. Jonsson, I.G.
On turbulence in open channel flow
Acta polytech. Scandinavia, Civil eng. and Building Constr. series No. 31,
1965
23. McConachie
Convection velocities in turbulent pipe flow
J of Fluid Mech. Vol. 103, febr. 1981

LITERATUUR (vervolg)

24. Mcquivey, R.S. and Richardson, E.V.
Some turbulence measurements in open channel flow
J. of Hydr. Div, ASCE, Vol. 95, No. hyl, jan 1969
25. Melling, A. and Whitelaw, J.H.
Turbulent flow in a rectangular duct
J. of Fluid Mech. Vol. 78, 1976
26. Morrison, W.R.B., Bullock, K.J. and Kronauer, R.E.
Experimental evidence of waves in the sublayer
J. of Fluid Mech., Vol. 47, part 4, 29 June 1971
27. Morrison, W.R.B. and Kronauer, R.E.
Structural similarity for fully developed turbulence in smooth tubes
J. of Fluid Mech., Vol. 39, part 1, 1969
28. Nalluri, C. and Novak, P.
Turbulence characterisitics in a smooth open channel of circular cross
section
J. of Hydr. Research, IAHR, Vol. 11, No. 4, 1973
29. Naudascher, E. and Farell, C.
Unified analysis of grid turbulence
J. of Eng. Mech. Div, Vol. 96, No. em2, april 1970
30. Perry, A.E. and Abell, C.J.
Asymptotic similarity of turbulence structures in smooth- and roughwalled
pipes.
J. of Fluid Mech., Vol. 79, part 4, 23 march 1977
31. Perry, A.E. and Chong, M.S.
A physical interpretation of spectra
Davis, Proc. third Symposium on turbulent shear flows, 1981

LITERATUUR (vervolg)

32. Perry, A.E., Lim, K.L. and Henbest, S.N.
A spectral analysis of smooth flat-plate boundary layers
Ithaca, Fifth Symposium on turb. shear flows, aug. 8, 1985
33. Raichlen, F.R.
Some turbulence measurements in water
J. of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 93, No. em2, april 1967
34. Rajaratnam, N.
Developments in water science. Part 5: Turbulent jets
Amsterdam, Elsevier, 1976
35. Resch, F.J.
Hot film turbulence measurements in waterflow
J. of Hydr. Div. ASCE, Vol. 96, No. hy3, march 1970
36. Richardson, E.V. and Mcquivey, R.S.
Measurements of turbulence in water
J. of Hydr. Div. ASCE, Vol. 94, No. hy2, march 1968
37. Rijkswaterstaat Deltadienst
Onderzoek korrelstabiliteit
Nota 21 EKOR-N-82025, dec. 1982
38. Roberson, J.A., Lin, C.Y., Rutherford, G.S., and Stine, M.D.
Turbulence effects on drag of sharp-edged bodies
J of Fluid Mech., Vol. 71, part 1, sept. 1975
39. Rose, W.C.
Interaction of grid turbulence with a uniform mean shear
J of Fluid Mech., Vol. 44, part 4, dec. 1970

LITERATUUR (vervolg)

40. Surry, D.
Some effects of intense turbulence on the aerodynamics of a circular cylinder at subcritical Reynolds number
J. of Fluid Mech., Vol. 52, part 3, april 1972
41. Uberoi, M.S. and Wallis, S.
Small axisymmetric contraction of grid turbulence
J. of Fluid Mech., Vol. 24, part 3, 1961
42. C. Veth and Zimmerman, J.T.F.
Observations of quasi-two-dimensional turbulence in tidal Currents
J. of Phys. Ocean, Vol. 11, No. 10, oct. 1981
43. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Onderzoek naar stroomkrachten op pijlers tijdens bouwfasen
Verslag M 1525, jan. 1980
44. Waterloopkundig Laboratorium
Onderzoek naar de verspreidingsmechanismen in de Oosterschelde
Deel 1: continue lozingen
Verslag M 1603-I, sept. 1980
45. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Detailmodel stroomgeulen. Stroombeeld onderzoek bij een aantal gesloten schuiven
Verslag M 1878, dec. 1982
46. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Detailmodel stroomgeulen. Systematisch stroombeeld onderzoek rond bouwfronten
Verslag M 1898, april 1983
47. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde.
Oriënterende stabiliteitsproef en turbulentiemeting negatieve overlap
Verslag M 1916, febr. 1984

LITERATUUR (vervolg)

48. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Detailmodel stroomgeulen. Stroomonderzoek rond extreme bouwfronten
Verslag M 1929, nov. 1983
49. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Detailmodel stroomgeulen. Stroombeeld onderzoek bij een omgekeerd weigerende schuif
Verslag M 1945, febr. 1984
50. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Detailmodel stroomgeulen. Systematisch stroombeeldonderzoek naar bouwfase factoren
Verslag M 1982, mei 1984
51. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Detailmodel stroomgeulen. Sytematisch stroombeeld onderzoek rond schuiffronten
Verslag M 2037, nov. 1984
52. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Turbulentiemetingen in de monding van de Oosterschelde
Verslag R 1437, aug. 1980
53. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde. Turbulentiemetingen in de Hammen.
Verslag R 1699, sept 1981
54. Rodi, W.
Turbulence models and their application in hydraulics
IAHR, june 1980

meting nr.	meetplaats	periode	oppervlakte spektrum [$10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$]	σ [m/s]	U [m/s]	r = σ/U [%]
1RNR 1 2 3	Roompot-N	2 uur max. vloed	8,19 8,40 7,23	0,090 0,092 0,085	0,88 0,94 1,00	10 10 9
3RBU 1 2 3	Roompot-Z	2 uur max. eb	15,82 13,35 11,38	0,126 0,116 0,107	0,88 1,09 1,31	14 11 8
3RBU 1 2 3	Roompot-Z	2 uur max. vloed	6,16 5,70 4,56	0,078 0,075 0,068	0,75 0,81 0,88	11 9 8
3RBUV 1 2 3	Roompot-Z	2 uur max. eb	13,68 11,16 7,67	0,117 0,106 0,088	0,72 0,94 1,19	16 11 8
3SRV 1 2 3	Schaar	2 uur max. eb	13,06 8,90 3,46	0,114 0,094 0,059	0,69 1,06 1,24	17 9 5
4RBUH 1 2 3	Roompot-Z	2 uur max. eb	9,56 8,63 5,97	0,098 0,093 0,077	0,94 1,25 1,31	10 7 6
5RZUM 1 2 3	Roompot-Z	2 uur max. eb	2246 12,66 9,35	0,150 0,113 0,097	1,13 1,41 1,50	13 8 6
5RZUM 1 2 3	Roompot-Z	1 uur max. vloed	13,65 12,95 7,03	0,117 0,114 0,084	1,13 1,56 1,75	10 7 5
6HUM 1 2 3	Hammen	2 uur max. eb	6,59 4,99 2,16	0,081 0,071 0,046	0,91 1,19 1,31	9 6 4
6HUM 1 2 3	Hammen	2 uur max. vloed	8,77 6,69 3,45	0,094 0,082 0,059	1,00 1,38 1,50	9 6 4

Tabel 1 Turbulentie-intensiteiten gemeten in de Oosterschelde [52].

meetlocatie	stroomtoestand	macro-lengteschaal v.d. turbulentie L_x/D		
		$\frac{z}{D} = 0.7$	$\frac{z}{D} = 0.4$	$\frac{z}{D} = 0.1$
1RNR	vloed	1.28	1.03	1.34
3RBU	vloed	0.89	1.03	0.55
3RBU	eb	0.81	0.95	0.76
3RBUV	eb	0.91	0.65	0.53
3RBUV	eb	1.25	1.20	0.79
4RBUH	eb	1.70	1.67	1.14
5RZUM	eb	1.25	1.36	0.88
6HUM	vloed	1.36	1.01	1.19
6HUM	eb	0.75	0.68	0.88
Mcquivey	Stationair	1.05	1.15	0.75

Tabel 2 Macro-lengteschalen voor turbulentie gemeten in de Oosterschelde [52]

n_{OS}	F_{OS}^{MQ}			F_{MQ}	
	$\frac{z}{D} = 0.1$	$\frac{z}{D} = 0.4$	$\frac{z}{D} = 0.7$	$C = 61.4 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$	$C = 36.6 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$
0.0036	0.55	0.66	0.94	0.24	0.29
0.01	0.18	0.20	0.188	0.2	0.2
0.02	0.124	0.146	0.094	0.13	0.12
0.03	0.083	0.087	0.084	0.094	0.088
0.04	0.083	0.06	0.060	0.065	0.06
0.05	0.041	0.036	0.040	0.04	0.045

Tabel 3 Vergelijking van OS spectra (5RZUM, vloed) met spectra voor gootturbulentie [24].

lokatie	getij- periode	n_1	E_{MQ}	E_{OS}	n_2	E_{MQ}	E_{OS}
1RNR 1	vloed	0.01	0.16	0.245	0.1	0.016	0.0125
2		0.01	0.165	0.245	0.1	0.0165	0.0136
3		0.01	0.142	0.219	0.1	0.0142	0.0112
3RBU 1	eb	0.0056	0.53	0.645	0.056	0.053	0.071
2		0.0056	0.45	0.63	0.056	0.045	0.048
3		0.0056	0.38	0.43	0.056	0.038	0.048
3RBU 1	vloed	0.0044	0.28	0.344	0.044	0.028	0.026
2		0.0044	0.26	0.329	0.044	0.026	0.022
3		0.0044	0.20	0.275	0.044	0.020	0.021
3RBUV1	eb	0.005	0.54	0.80	0.05	0.054	0.048
2		0.005	0.44	0.50	0.05	0.044	0.040
3		0.005	0.30	0.40	0.05	0.030	0.029
3SRV 1	eb	0.0055	0.47	0.67	0.055	0.047	0.034
2		0.0055	0.31	0.41	0.055	0.031	0.024
3		0.0055	0.12	0.13	0.055	0.012	0.012
4RBUH1	eb	0.0083	0.22	0.34	0.083	0.022	0.014
2		0.0083	0.20	0.27	0.083	0.020	0.014
3		0.0083	0.14	0.17	0.083	0.014	0.011
5RZUM1	eb	0.0072	0.60	0.84	0.072	0.060	0.051
2		0.0072	0.33	0.47	0.072	0.033	0.026
3		0.0072	0.25	0.34	0.072	0.025	0.017
5RZUM1	vloed	0.0084	0.32	0.34	0.084	0.032	0.027
2		0.0084	0.31	0.34	0.084	0.031	0.034
3		0.0084	0.17	0.17	0.084	0.017	0.018
6HUM 1	eb	0.006	0.23	0.33	0.06	0.023	0.022
2		0.006	0.17	0.16	0.06	0.017	0.020
3		0.006	0.07	0.065	0.06	0.0074	0.009
6HUM 1	vloed	0.0066	0.26	0.34	0.066	0.026	0.021
2		0.0066	0.20	0.175	0.066	0.020	0.023
3		0.0066	0.10	0.09	0.066	0.010	0.013

Tabel 4 Vergelijking van Oosterschelde- en gootturbulentiespectra voor twee frequenties

no. (Fig. 2)	lokatie	stroom- richting	diepte [m]	afstand meetpunt bodem [m]	σ [m/s]	U [m/s]	r [%]
1822	Roompot- Midden	eb	31,0	2	0,059	0,52	11
				16	0,044	0,76	6
1834	Roompot- Noord	eb	15,0	2	0,048	0,44	11
				8	0,050	0,68	7
3812	Schaar- Midden	eb	20,5	2	0,064	0,64	10
				10	0,044	0,88	5
4810	Hammen- Zuid	eb	17,5	2	0,042	0,36	12
				9	0,031	0,56	6
4820	Hammen Noord	eb	18,0	2	0,046	0,40	12
				9	0,034	0,60	6
3714	Schaar- Midden	vloed	23,0	2	0,046	0,48	10
				12	0,027	0,72	4
4710	Hammen- Zuid	vloed	28,5	2	0,042	0,32	13
				14	0,027	0,64	4

Tabel 5 Turbulentie-intensiteiten gemeten in M1000, in open sluitgat, [43].

meetpunt (Fig 3)	waterdiepte(m)	meethoogte(m) boven bodem	U (m/s)	$\sqrt{u'^2}$ (m/s)	r
1	15.6	14.0	1.69	.09	0.05
		5.2	1.31	.11	0.08
		2.0	.97	.13	0.13
3	19.2	17.6	1.81	0.09	0.05
		6.4	1.50	0.13	0.09
		2.0	1.13	0.12	0.11
5	28.0	26.40	2.01	0.10	0.05
		9.36	1.74	0.12	0.07
		2.00	1.37	0.11	0.08
6	30.16	28.56	2.02	0.02	0.01
		10.08	1.86	0.10	0.05
		2.00	1.47	0.11	0.07
7	30.88	29.28	1.92	0.01	0.01
		10.16	1.79	0.09	0.05
		2.00	1.42	.11	0.08
8	29.60	28.00	1.82	.02	0.01
		9.84	1.62	.10	0.06
		2.00	1.29	.12	0.09
9	28.80	27.20	1.77	.02	0.01
		9.60	1.54	.09	0.06
		2.0	1.17	.12	0.10
10	28.00	26.40	1.61	.11	0.07
		9.36	1.29	.11	0.08
		2.00	.97	.11	0.11
11	23.36	21.76	1.36	.06	0.04
		7.76	1.04	.11	0.11
		2.00	.81	.11	0.14
13	20.00	18.40	1.46	.04	0.03
		6.64	1.21	.08	0.07
		2.00	.94	.09	0.10

Tabel 6 Turbulentie intensiteiten gemeten in M1001, in open sluitgat, [50].

	model	lokatie		stroom- toestand	D	$\frac{z}{D}$	r
		Fig.	No.				
Roompot-Zuid	prototype [52]	1	5RZUM	vloed	20.0	0.1	0.10
						0.4	0.07
						0.7	0.05
	M1001 [50]	3	3	vloed	19.2	0.1	0.106
						0.33	0.086
0.92						0.049	
M1000 [43]	2	1822	eb	31.0	0.06	0.11	
					0.52	0.06	
Prototype	1	5RZUM	eb	20.0	0.1	0.09	
					0.4	0.06	
					0.7	0.04	
Roompot-Noord	Prototype [52]	1	1RNR	vloed	10.0	0.2	0.10
						0.47	0.10
						0.73	0.09
	M1001 [50]	3	30	vloed	19.6	0.10	0.08
0.33						0.07	
0.91						0.05	
M1000 [43]	2	1834	eb	15.0	0.13	0.11	
					0.53	0.07	

Tabel 7 Vergelijking van turbulentie-intensiteiten bij M1000, M1001 en prototype voor situatie zonder kering.

bouwfase	stroom- grootheid	meetlokatie (zie Figuur 11)				
		20	6	32	33	34
Kaal sluitgat (T ₁ , [50])	\bar{U} (m/s)	1.81	1.82	1.83	1.70	1.54
	$\overline{u''}$ (m/s)	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07
	U(z=2) (m/s)	1.53	1.47	1.45	1.2	0.97
	$\sqrt{\overline{u''^2}}$ (z=2) (m/s)	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11
Alleen de pijlers geplaatst (T ₄ , [50])	\bar{U} (m/s)	1.77	2.59	2.28	1.79	1.53
	$\overline{u''}$ (m/s)	0.08	0.08	0.13	0.22	0.23
	U(z=2) (m/s)	1.36	2.07	1.61	0.97	0.85
	$\sqrt{\overline{u''^2}}$ (z=2) (m/s)	0.13	.17	0.23	0.22	0.16
Pijlers geplaatst Drempel zonder top laag (T ₆ , [50])	\bar{U} (m/s)	1.87	3.27	2.70	1.67	1.49
	$\overline{u''}$ (m/s)	0.08	0.07	0.13	0.35	0.31
	U(z=2) (m/s)	1.36	2.74	.40	0.59	0.76
	$\sqrt{\overline{u''^2}}$ (z=2) (m/s)	0.13	0.15	.15	0.23	0.20
Pijlers geplaatst, drempel + dorpels (T ₁ , [51])	\bar{U} (m/s)	2.21	6.59	2.96	2.23	2.00
	$\overline{u''}$ (m/s)	0.19	0.25	0.41	0.51	0.69
	U(z=2) (m/s)	1.95	7.12	-0.75	- 0.90	0.75
	$\sqrt{\overline{u''^2}}$ (z=2) (m/s)	0.24	0.40	0.45	0.41	0.42

Tabel 8 Karakteristieke stromingsgrootheden voor diverse uniforme bouwfasen van de SVKO in de Roompot gemeten langs meetraai tussen pijler R10 en R11, in M1001.

lokatie (Fig.12)	relatieve turbulentie- intensiteit	afstand tot kering (m)	gemiddelde relatieve intensiteit
1	0.35	150	0.336
2	0.38	150	
3	0.28	150	
4	0.22	225	0.243
5	0.24	225	
6	0.27	225	
7	0.16	300	0.205
8	0.25	300	
9	0.16	400	0.1753
10	0.19	400	
11	0.14	550	0.150
12	0.16	550	

Tabel 9 Relatieve turbulentie-intensiteiten stroomafwaarts van de SVKO (eindfase) in de Schaar, gemeten in M1001, [49].

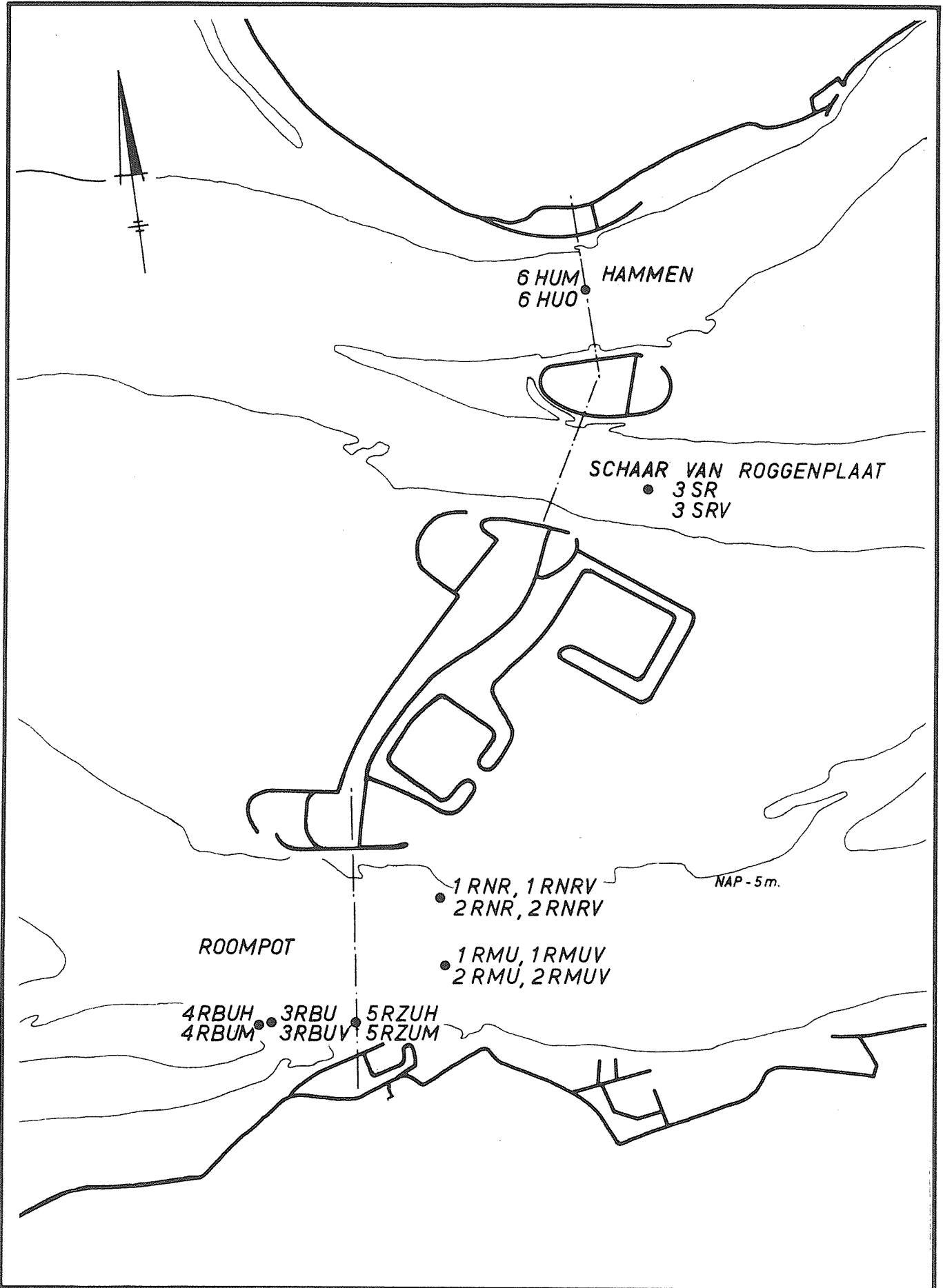
bouwfase	lokatie							
	1		2		3		uniform	
	\bar{U}	$\overline{u''} / \bar{U}$	\bar{U}	$\overline{u''} / \bar{U}$	\bar{U}	$\overline{u''} / \bar{U}$	\bar{U}	$\overline{u''} / \bar{U}$
22 dorpels geplaatst M1898/M2037	0.52 2.18	0.40 0.21	0.73 2.00	0.41 0.35		*		
Discontinuïteit in de drempel M1982			1.78	0.14			1.47	0.23
28 pijlers geplaatst M1929	1.57	0.15	1.59	0.14	1.49	0.15	1.27	0.20

* Heeft betrekking op M2037, met een debiet van 70.000 m³/s in plaats van 52.000 m³/s

Definitie van lokaties

lokatie	M1898		M2037		M1982		M1929	
	Fig.	meetpunt	Fig.	meetpunt	Fig.	meetpunt	Fig.	meetpunt
1	13	30					15	13
2	13	29			14	29	15	14
3	13	28					15	15
uniform			11	34	14	28	15	85

Tabel 10 Stroomsnelheid en turbulentie-intensiteit bij niet-uniforme bouwfasen in de Roompot.



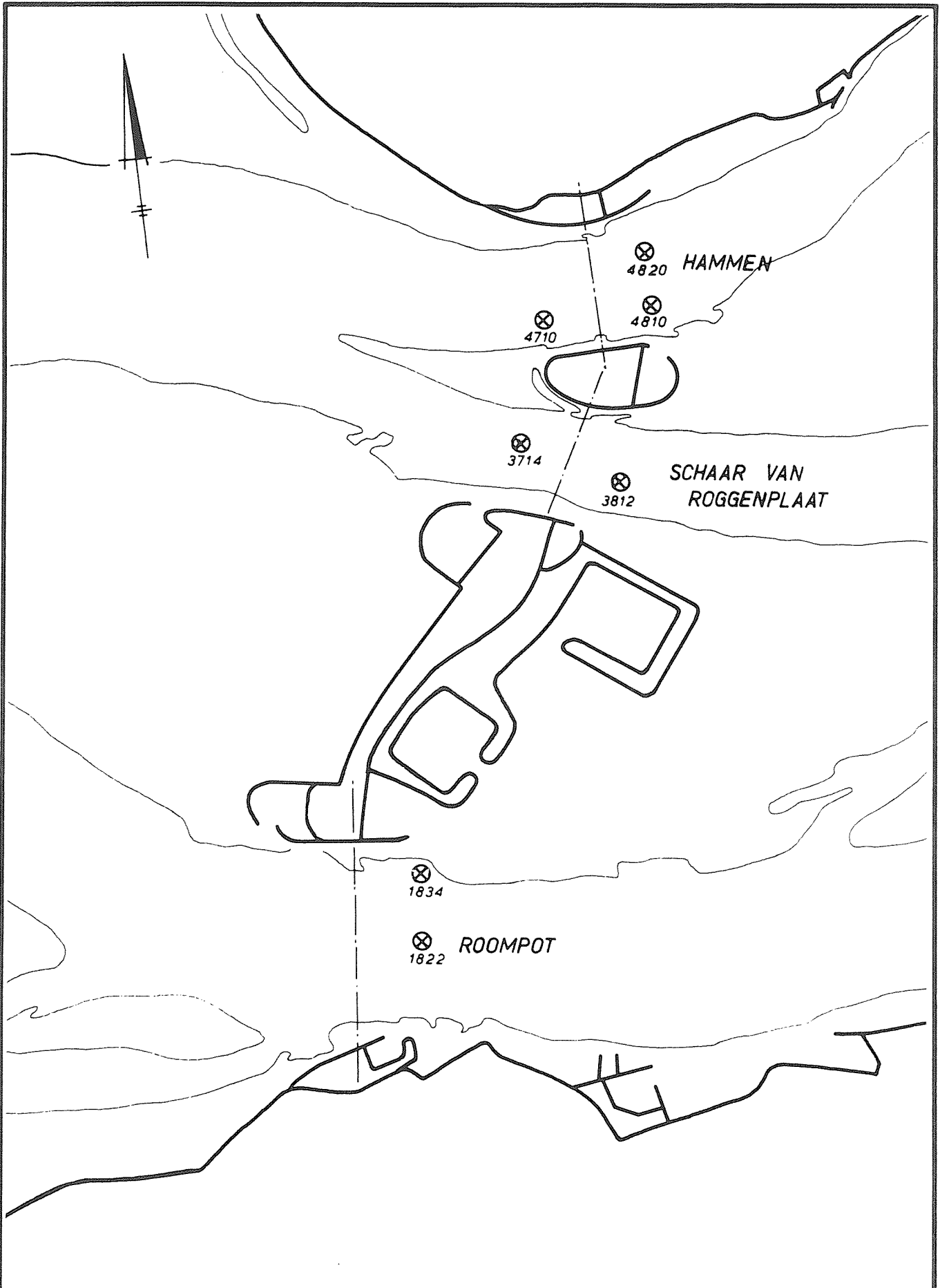
OVERZICHT MEETPOSITIES TURBULENTIE -
METINGEN OOSTERSCHELDE, [52]

SCHAAL 1: 50.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 1



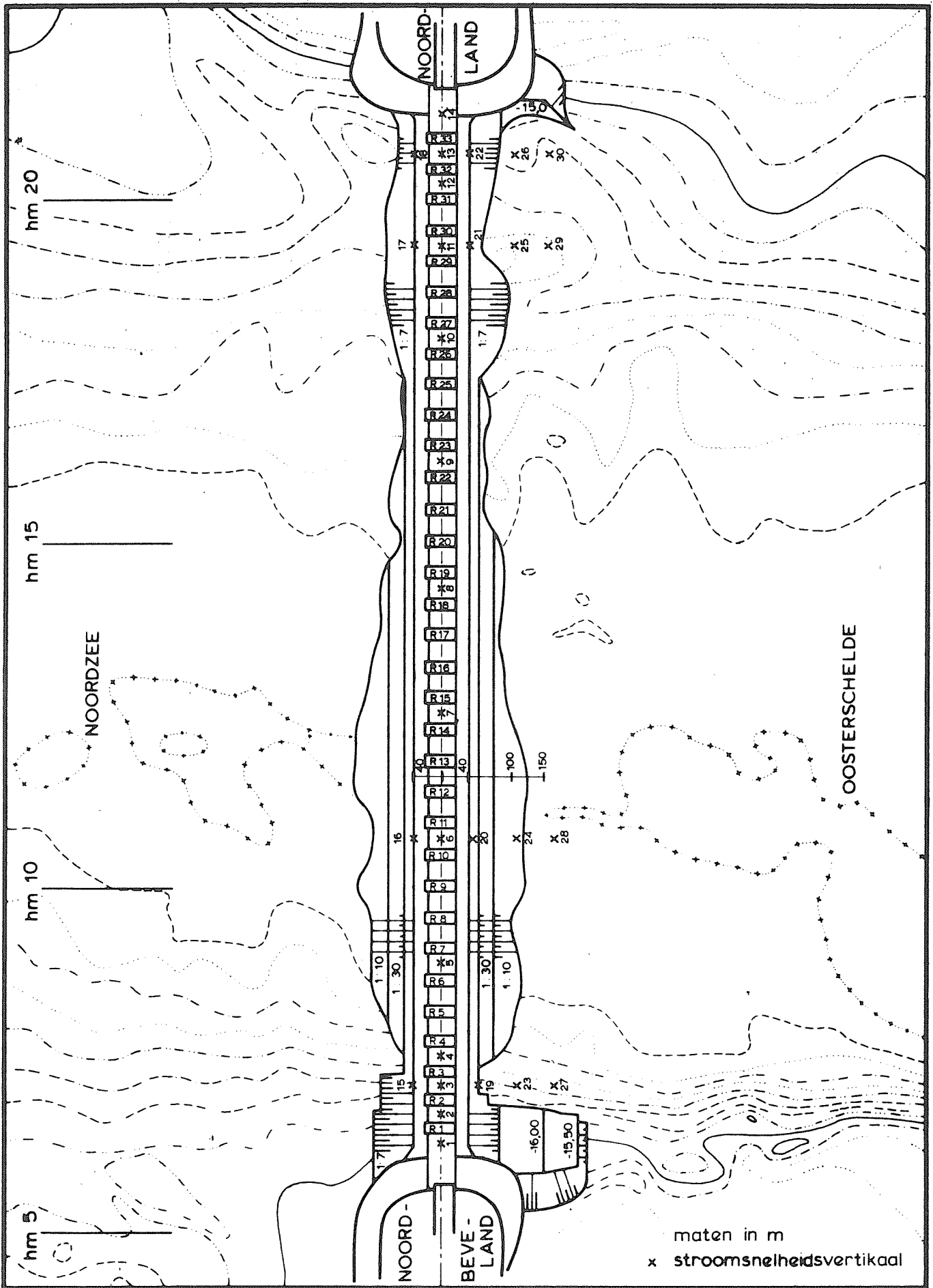
LOKATIE TURBULENTIEMETINGEN M 1000, [43]

SCHAAL 1:50.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 2



LOKATIE TURBULENTIE METINGEN M 1001, [50]

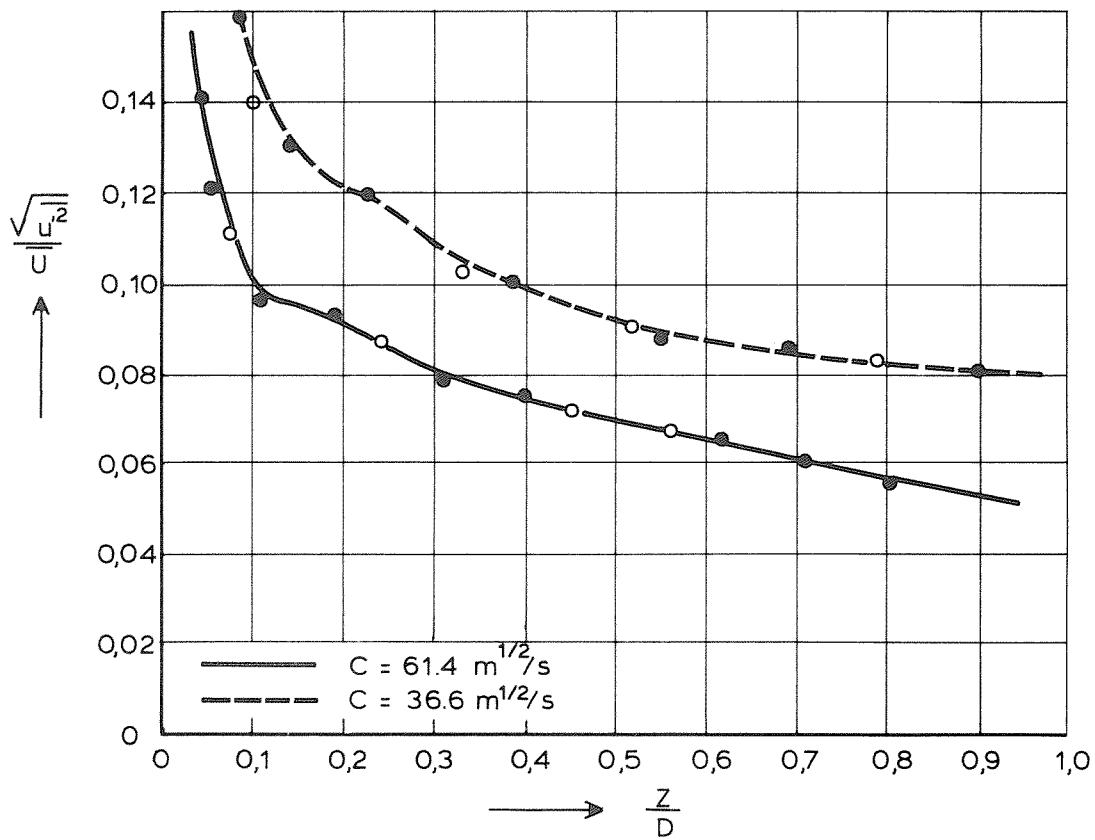
ROOMPOT VLOED

SCHAAL 1: 7500

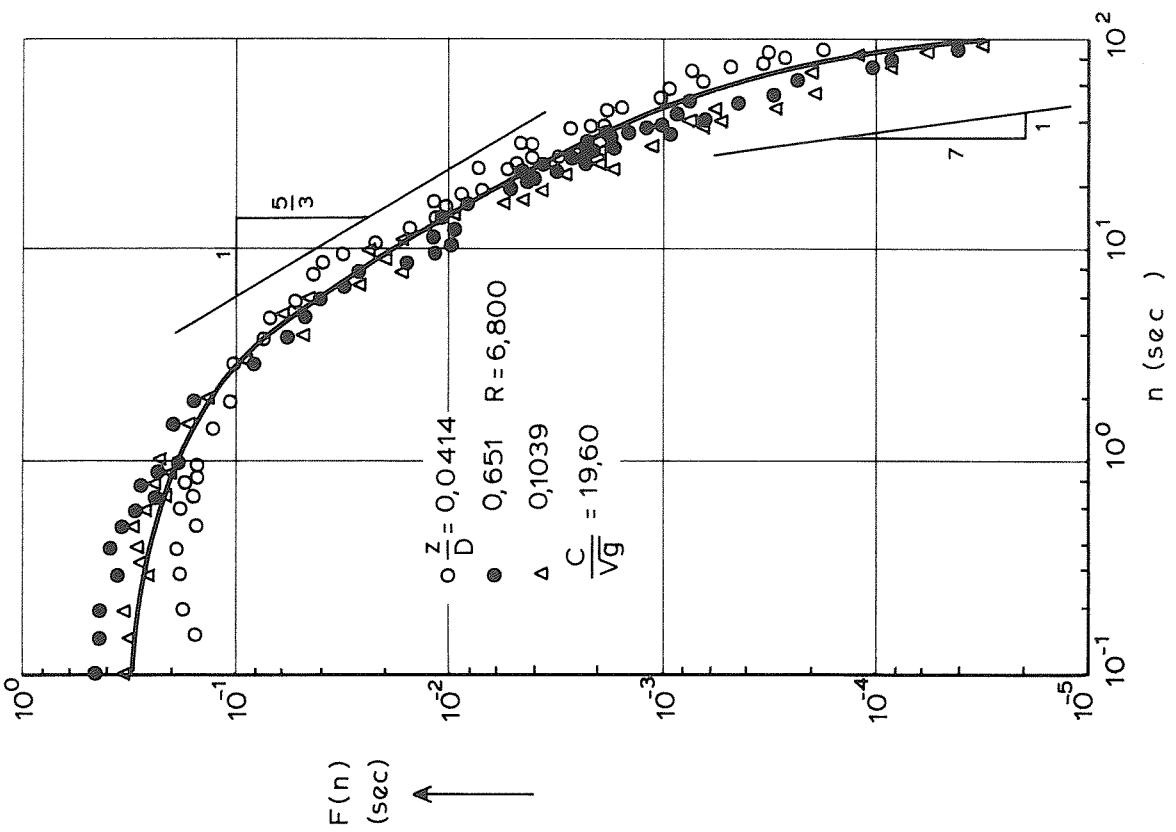
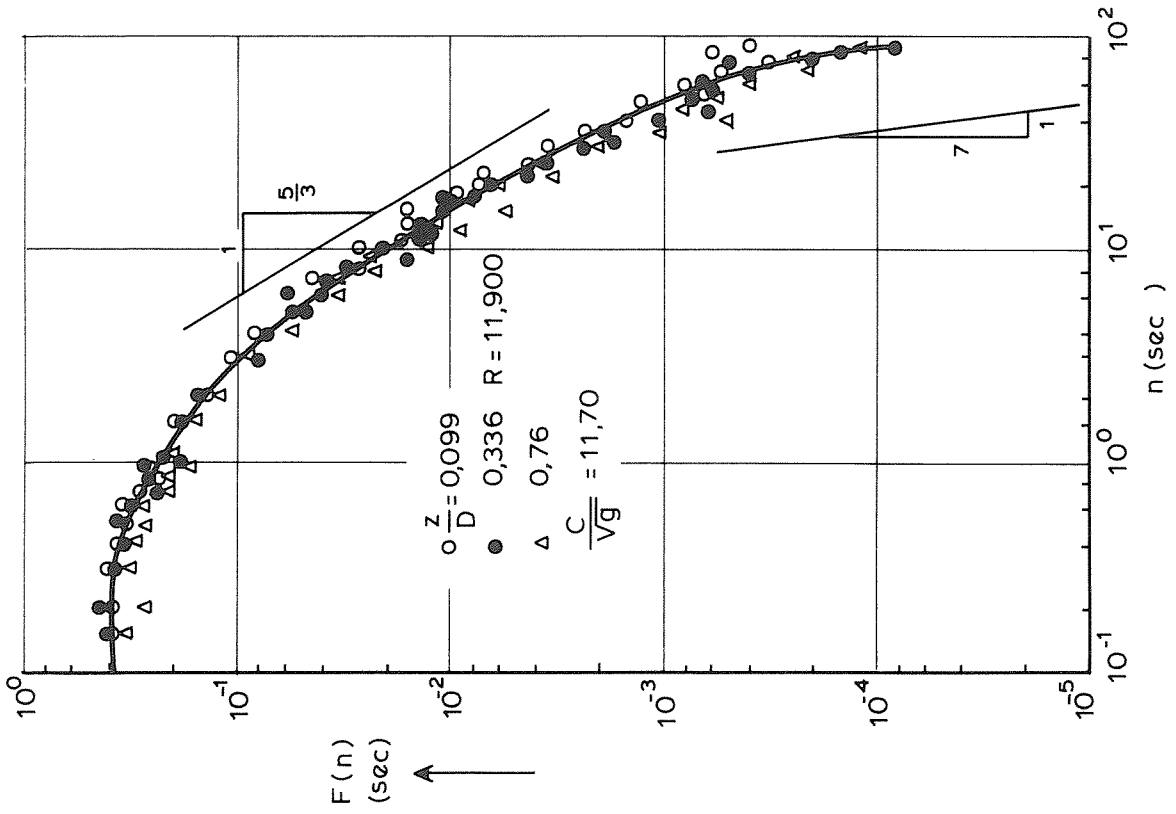
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

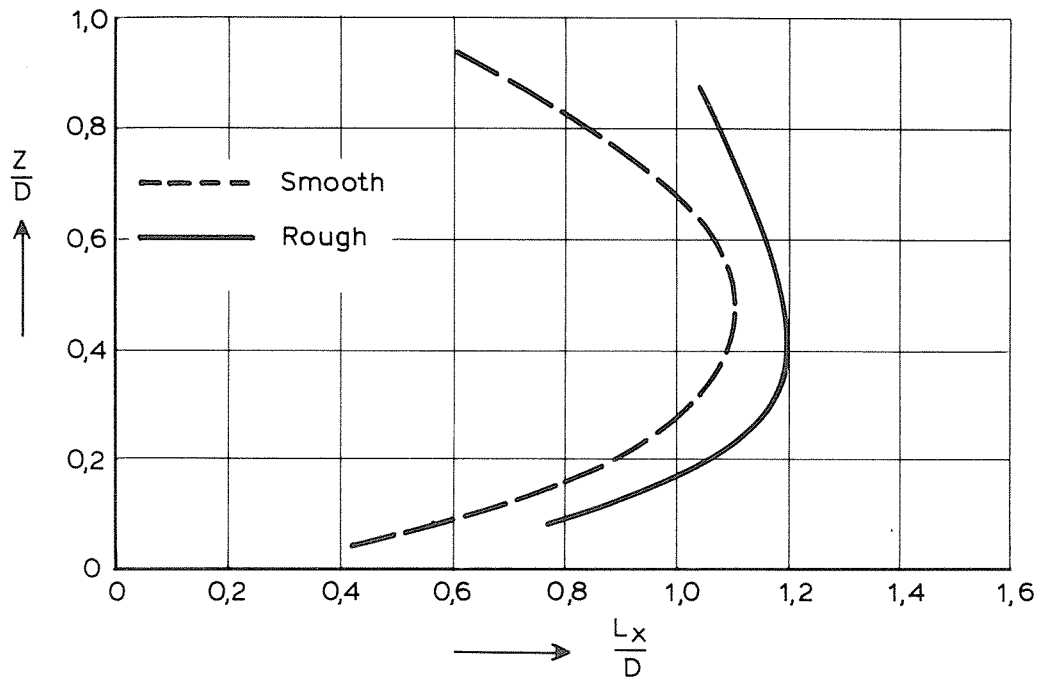
FIG. 3



TURBULENTIE-INTENSITEITEN KARAKTERISTIEK VOOR
EEN GOOT, [24]



SPECTRA KARAKTERISTIEK VOOR EEN GOOT, [24]

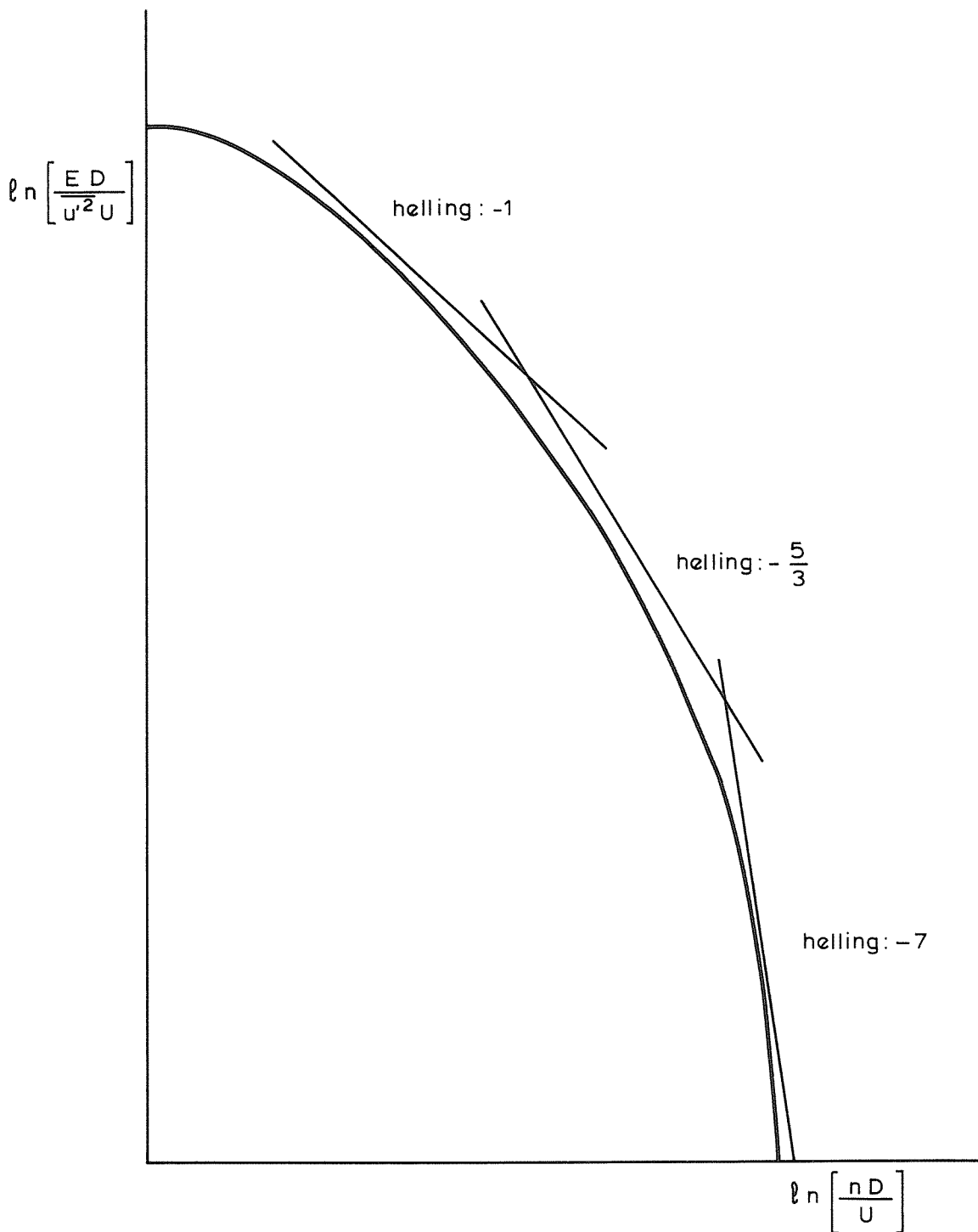


MACRO-TURBULENTIE SCHALEN
 KARAKTERISTIEK VOOR EEN GOOT, [24]

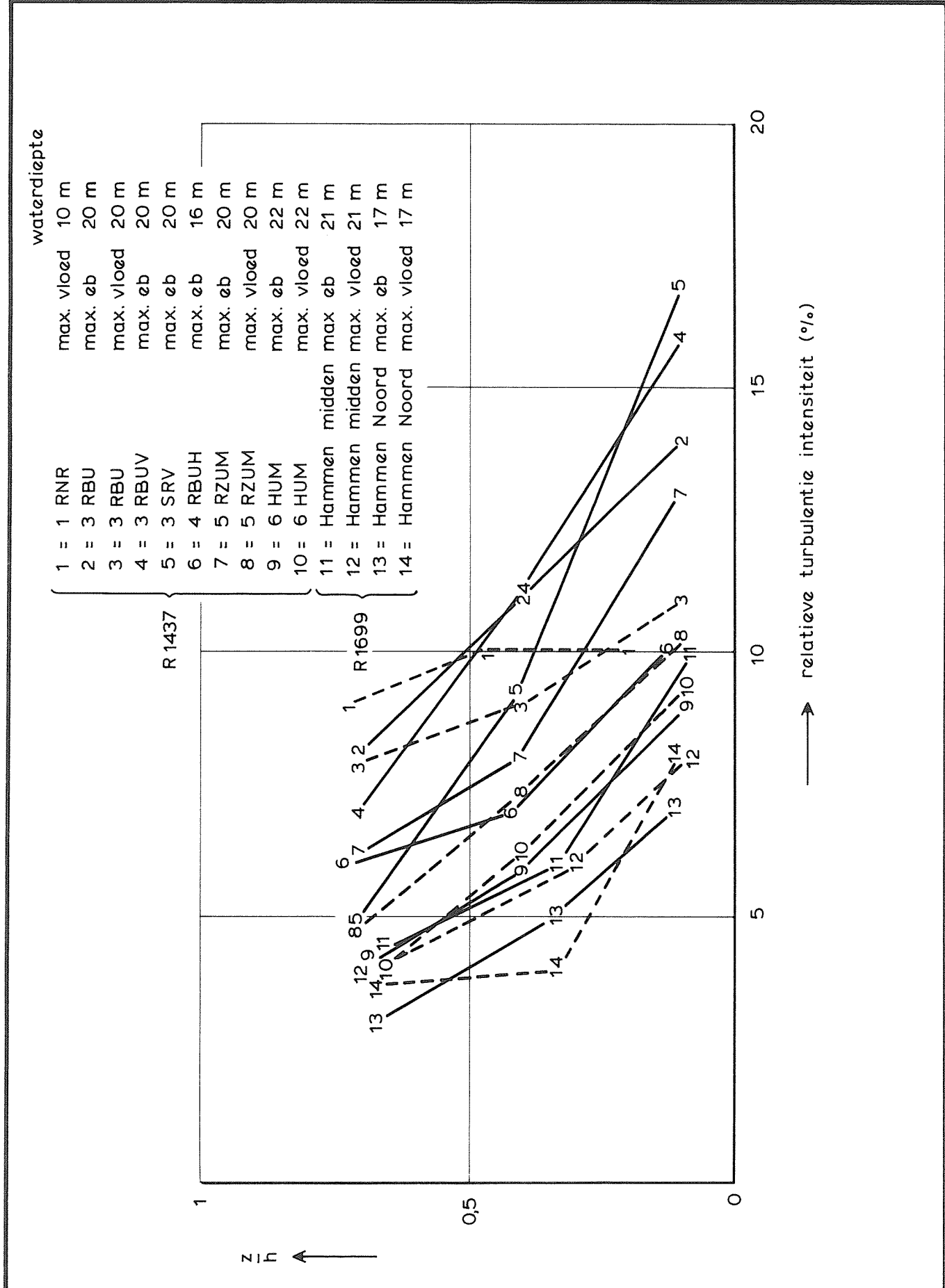
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

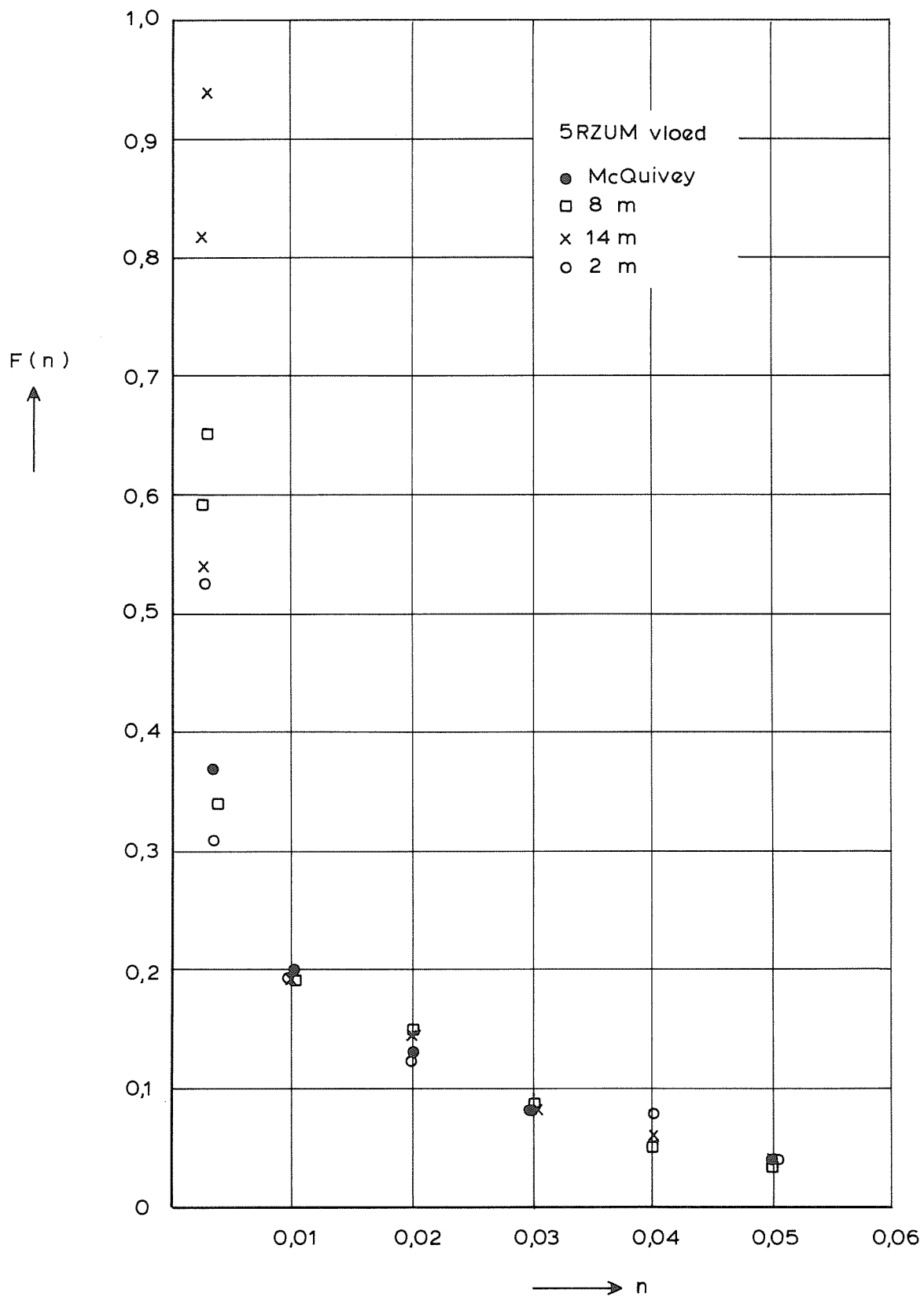
FIG. 6



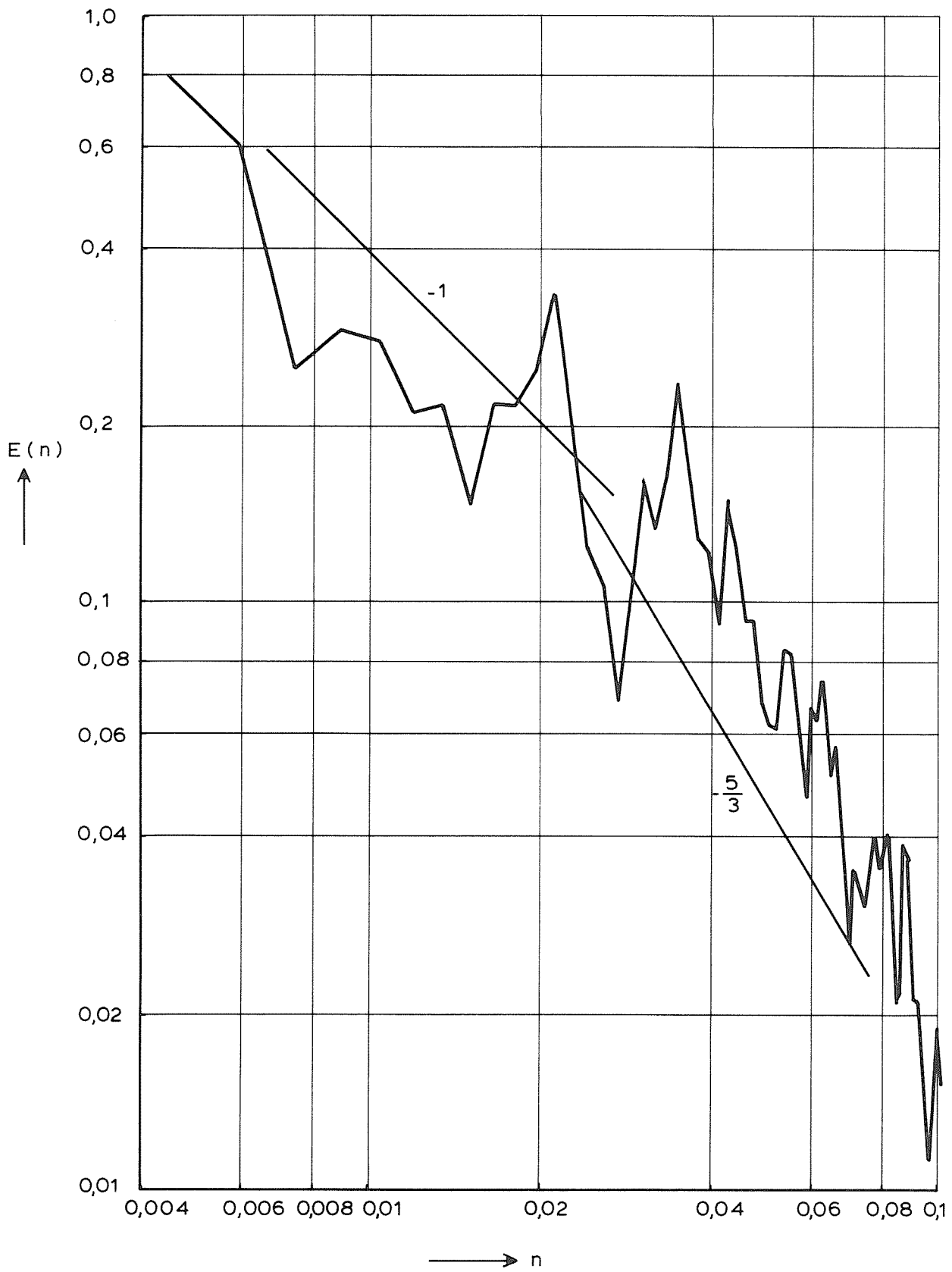
EEN KARAKTERISTIEK TURBULENTIESPECTRUM



RELATIEVE TURBULENTIE-INTENSITEITEN GEMETEN
 IN DE MONDING VAN DE OOSTERSCHELDE



VERGELIJING VAN O.S. SPECTRA 5RZUM MET
SPECTRA VAN GOOTTURBULENTIE

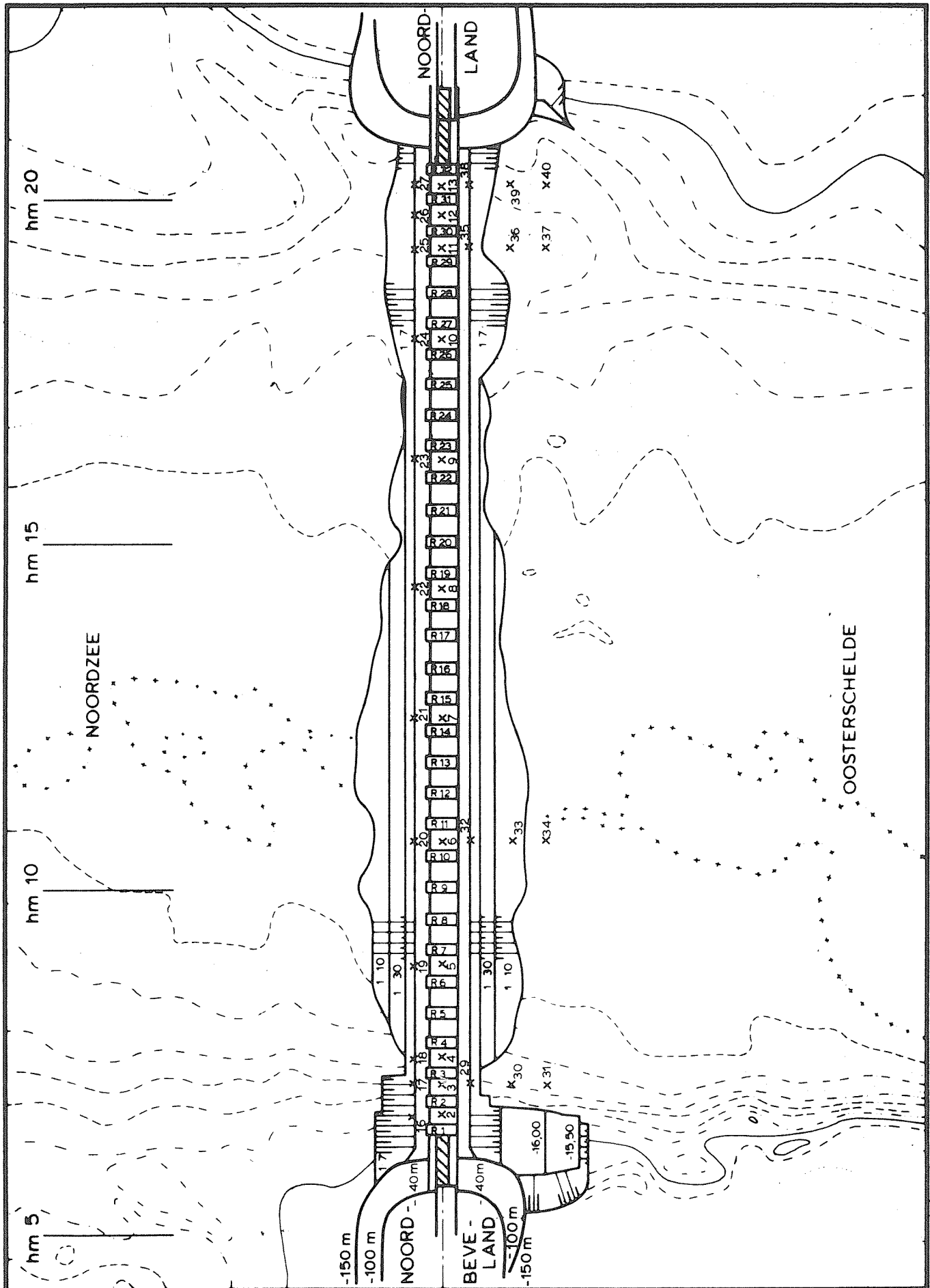


TURBULENTIESPECTRUM 5RZUM BIJ VLOED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 10



MEETSHEMA BOUWFASEN, [51]

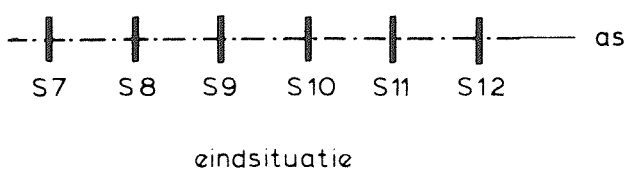
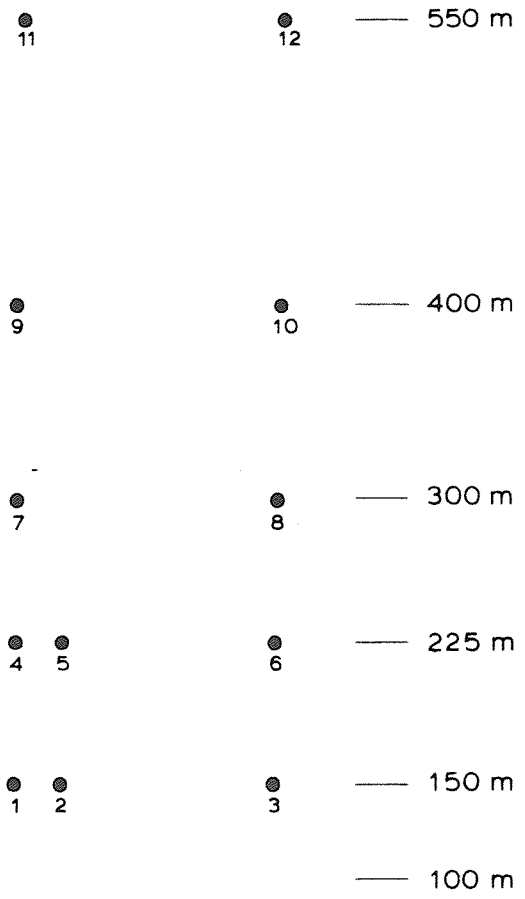
ROOMPOT VLOED

SCHAAL 1: 7500

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 11



MEETSHEMA IN EINDSITUATIE, [49]

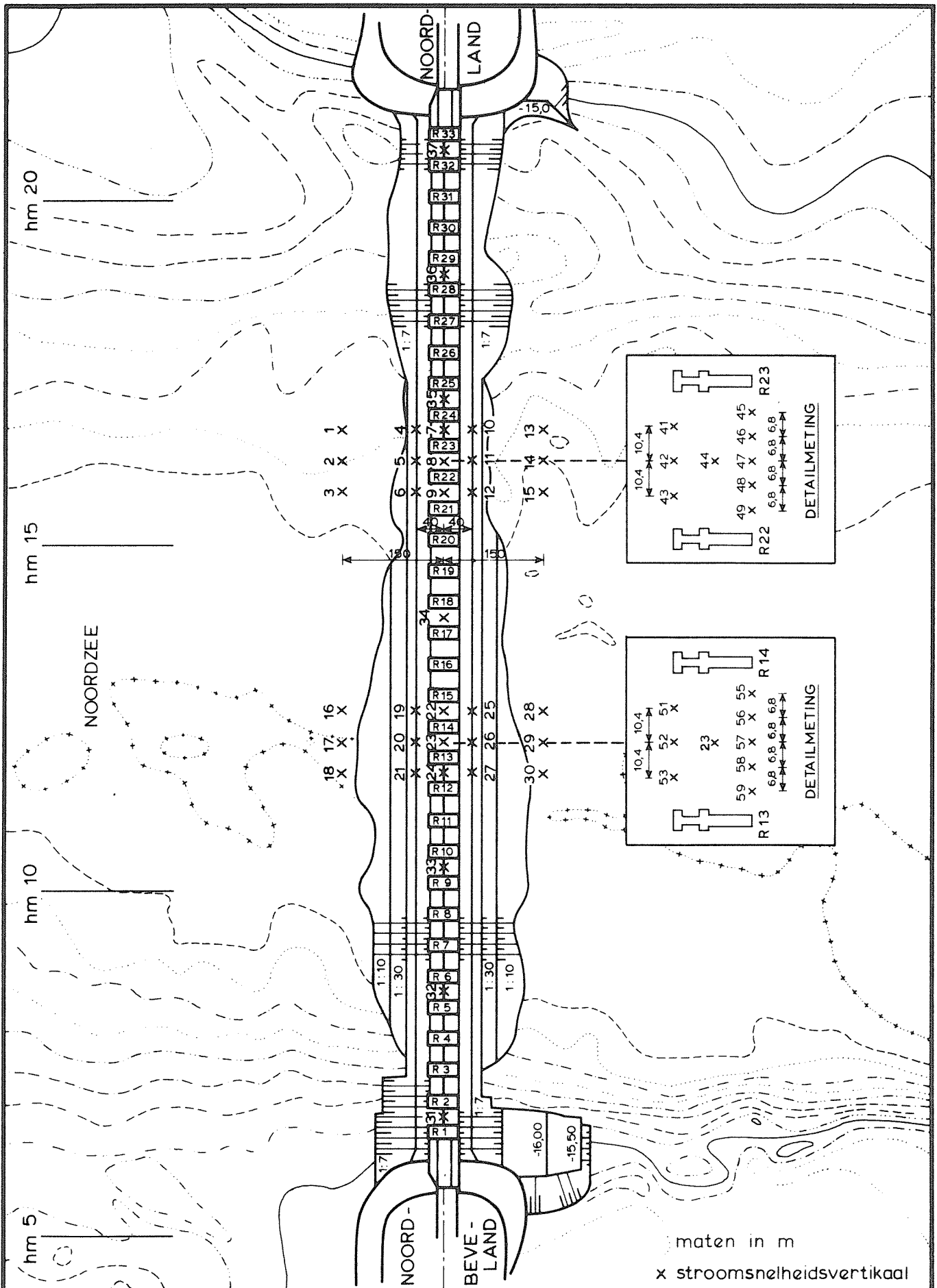
SCHAAR

EB

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 12



MEETSHEMA
SITUATIE 22 DORPELS GEPLAATST, [46]

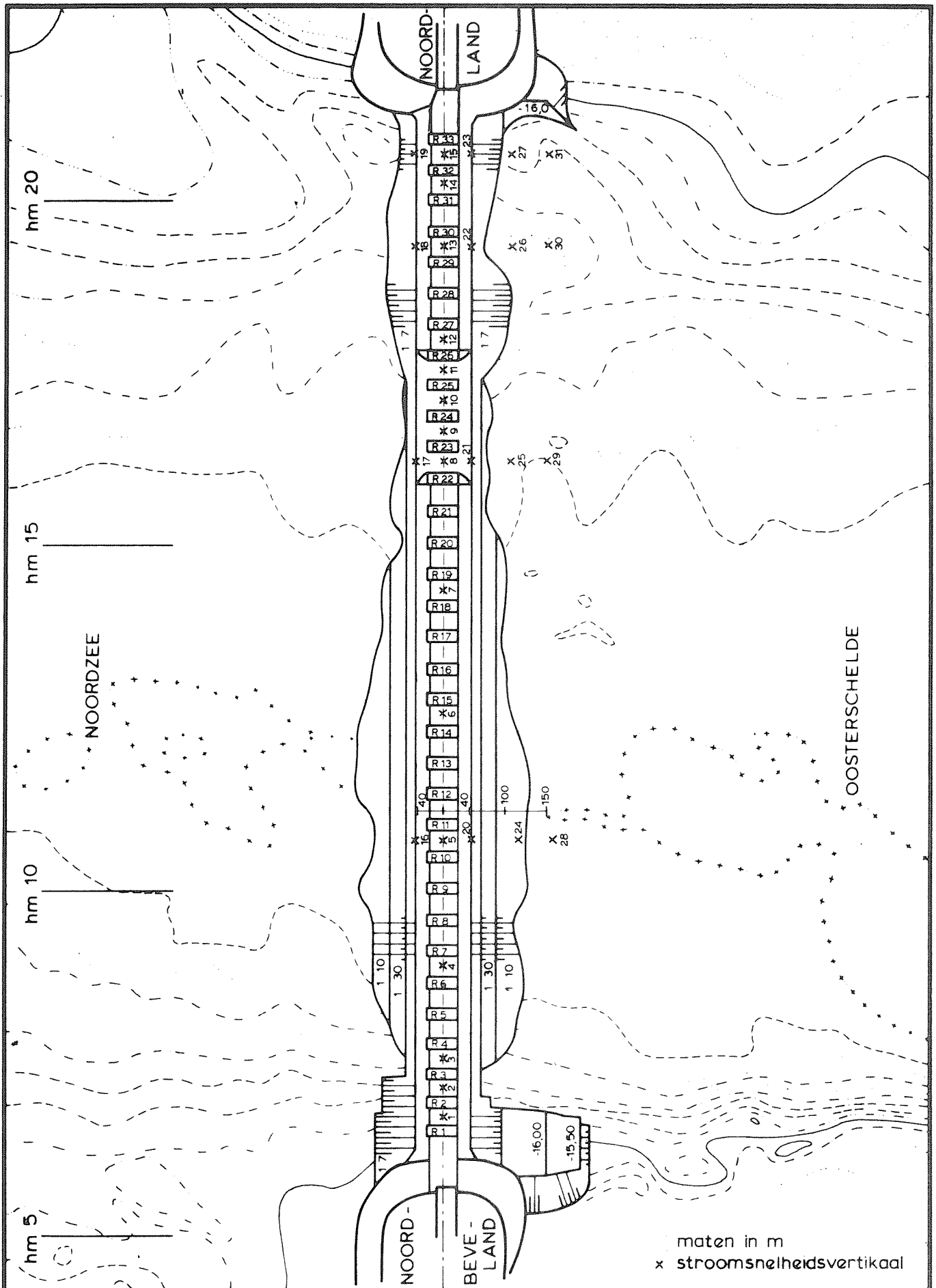
ROOMPOT

SCHAAL 1: 7500

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 13



MEETSHEMA PROEF T 8, [50]

ROOMPOT

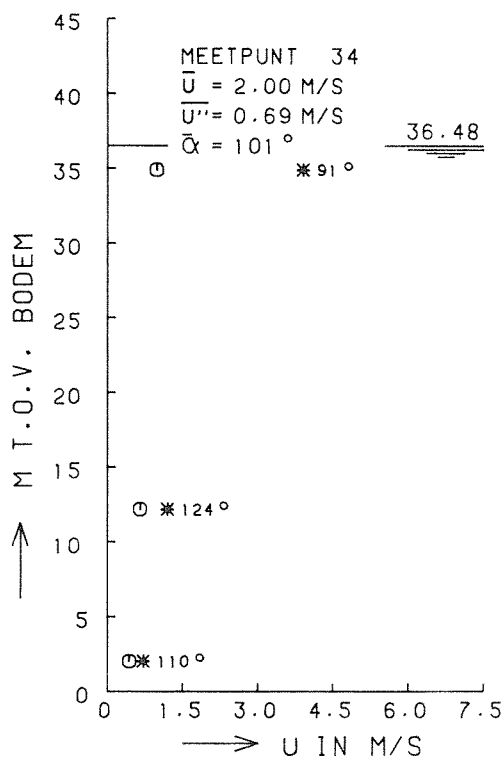
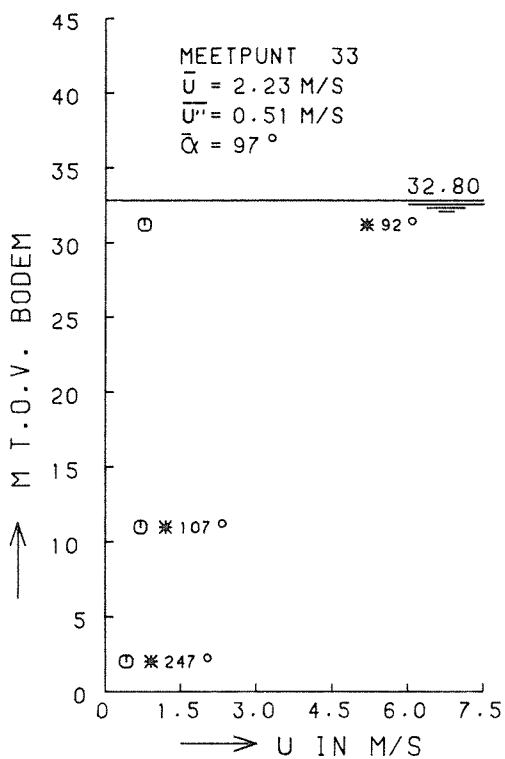
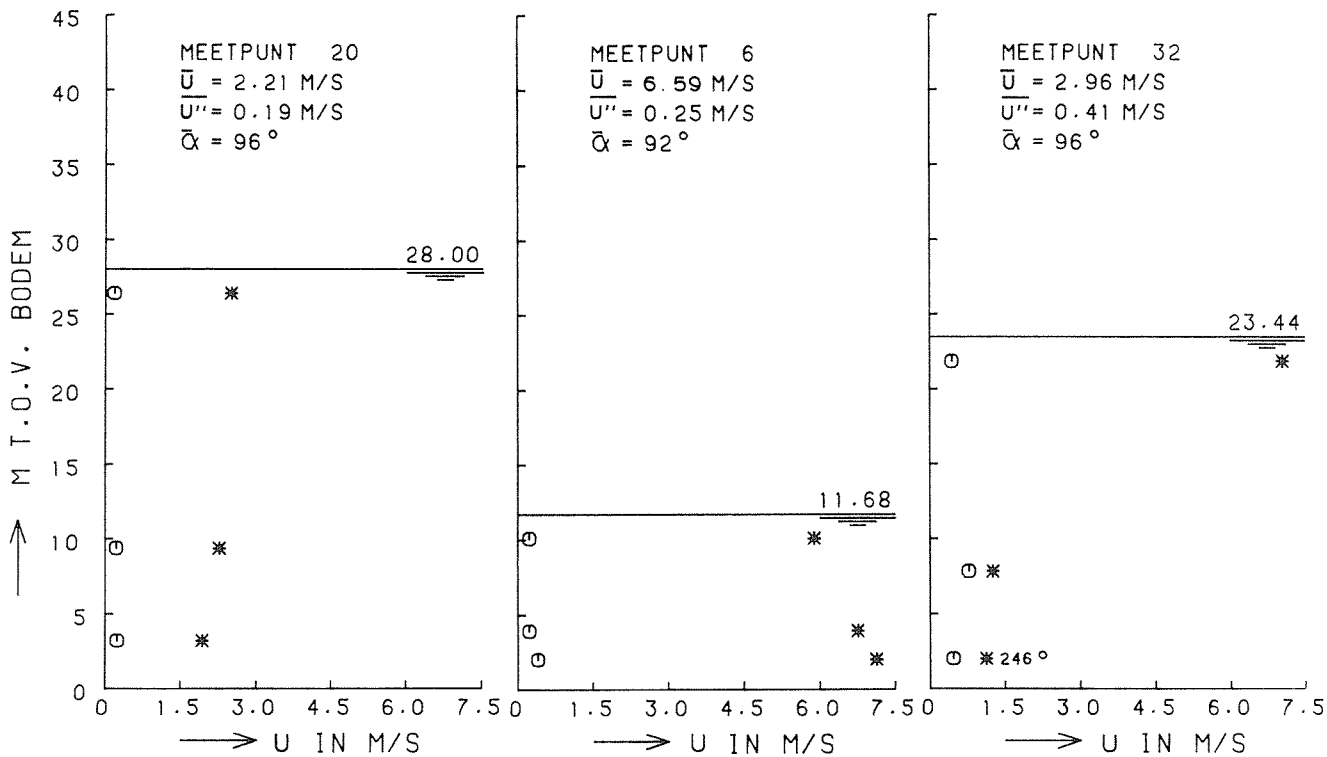
VLOED

SCHAAL 1: 7500

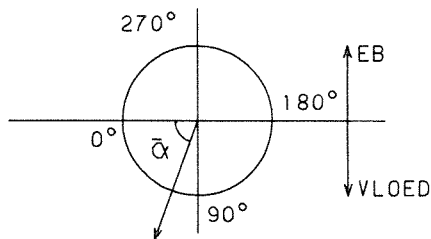
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 2070

FIG. 14



* STROOMSNELHEID
 ○ TURBULENTIE-INTENSITEIT



STROOMSNELHEIDS- EN TURBULENTIE-
 VERTIKALEN EINDSITUATIE, [51]

ROOMPOT VLOED

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands