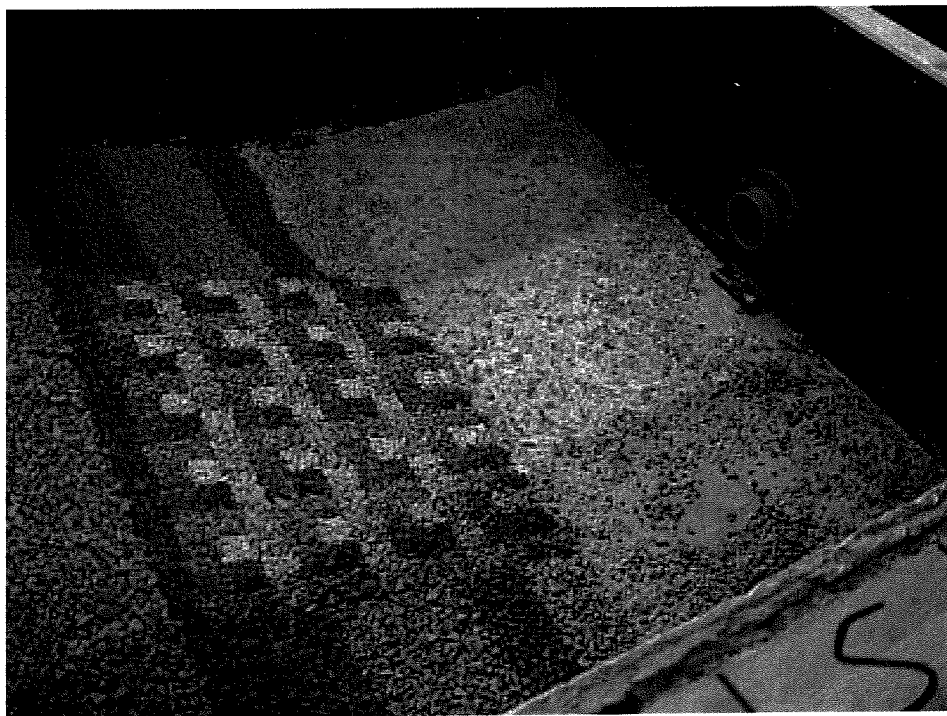


Vooronderzoek schroefstraal op een talud met breuksteen

Stroomsnelheden en steenstabiliteit

Januari 2002

V.J.C.G.L. van Veldhoven



Voorwoord

Ter afronding van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft heb ik onderzoek gedaan naar de stabiliteit van stenen op een talud onder belasting van een boegschroefstraal. Hiervoor heb ik een literatuurstudie uitgevoerd en modelproeven gedaan. De modelproeven zijn uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek. Dit onderzoek is verricht in samenwerking met Hydronamic, het ingenieursbureau van Koninklijke Boskalis Westminster nv.

Graag wil ik prof. ir. K. d'Angremond, ir. M. Geense en prof. ir. H. Ligteringen bedanken voor de goede begeleiding tijdens het afstuderen. Ik wil dr. ir. H. Fontijn en de werknemers van het Laboratorium bedanken voor het bouwen van de modelopstelling en de hulp bij de proeven. Ik wil verder de overige studenten die daar ook proeven aan het doen waren bedanken voor de nodige afleiding bij het uitvoeren van de proeven. Verder zou ik graag ir. Verhagen willen bedanken voor de enthousiaste begeleiding. Daarnaast voor het bieden van de kans om in Bulgarije bij de HADMAR 2001 een posterpresentatie te kunnen doen over mijn afstudeeronderwerp. Dit was een grote impuls tijdens mijn afstuderen. Tot slot gaat mijn dank uit naar ir. J. Olthof van Hydronamic voor de ondersteuning door de faciliteiten en kennis vanuit Hydronamic. Tevens voor het kritisch en nauwkeurig doornemen van mijn verslag.

Victor van Veldhoven
Delft, Januari 2002

Samenvatting

Als een schip dat naast een kade ligt op eigen kracht wegvaart, dan maakt het gebruik van zijn boeg- en hoofdschroef. Achter een draaiende schroef ontstaat een waterstraal. Achter een boegschroef ontstaat een waterstraal loodrecht vanaf het schip gericht. Deze waterstraal zal bij de afvaartmanoeuvre de kade raken. Indien de kade uit een kademuur bestaat, zal de straal de kademuur raken en alzijdig verspreiden. Een deel van de straal zal de bodem raken en hier voor een belasting op de bodembescherming zorgen. Als de kade uit een dek op palen bestaat zal de schroefstraal direct het talud onder het dek raken. Er is dus een bescherming op het talud nodig.

Er wordt in dit onderzoek slechts gekeken naar de straal door de boegschroef die een talud raakt waarop een bescherming van breuksteen is aangebracht.

Om de bescherming op het talud te kunnen berekenen zijn de stroomsnelheden in de schroefstraal ter plaatse van het talud nodig. Deze snelheden kunnen met behulp van de Nederlandse methode worden berekend. Deze methode is echter beperkt gebaseerd op metingen. Met behulp van een stabiliteitsformule en de stroomsnelheden kan dan een minimale steendiameter worden berekend.

In het verleden is bij onderzoek naar de stabiliteit van stenen onder invloed van een schroefstraal deze straal in een fysisch model enkele malen gemodelleerd door een simpele waterstraal. Het is niet bekend of dit geoorloofd is.

Het doel van dit onderzoek is:

1. het bepalen welke straal mag worden gebruikt om een boegschroefstraal te modelleren,
2. aan de hand van de metingen een uitspraak doen over de thans in gebruik zijnde berekeningsmethodes.

Deze doelstellingen werden bereikt door het uitvoeren van modelproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Eerst zijn proeven uitgevoerd met een boegschroefstraal. Hiervoor is in het model gebruik gemaakt van een schroef die in een korte tunnel was geplaatst. Deze schroef werd aangedreven door een motortje waarvan het toerental te regelen was. Voor de proeven met de jet is water door dezelfde tunnel als waar de schroef in zat gepompt. De proeven zijn uitgevoerd in een bak waarin een talud met kleine steentjes was aangebracht.

Er zijn stabiliteitsmetingen uitgevoerd om de relatie tussen het aantal verplaatste steentjes op het talud en de stroomsnelheid in de uitstroomopening, de initiële stroomsnelheid, te vinden. Hieruit bleek dat, als de initiële stroomsnelheid gelijk wordt gehouden, er meer steentjes verplaatsten onder belasting van de boegschroefstraal dan van de jet.

Er zijn ook snelheidsmetingen uitgevoerd om inzicht te krijgen in het verloop van de stroomsnelheden in de twee stralen. Uit de snelheidsmetingen bleek dat de

stroomsnelheid verder achter de schroef in de boegschroefstraal sneller afneemt dan de jet. Dus bij een gelijke initiële stroomsnelheid veroorzaakt de boegschroefstraal waarschijnlijk een lagere stroomsnelheid op het talud, maar verplaatst meer steentjes. Daarnaast is de verspreiding van de boegschroefstraal groter dan van de jet.

Er is een rekenmodel gebruikt, waarmee de stroomsnelheden in een waterstraal te berekenen zijn. De constanten voor dit rekenmodel zijn aan de hand van de gemeten stroomsnelheden voor de twee stralen bepaald. Vervolgens kon met behulp van dit rekenmodel en 'de Nederlandse methode' een maximale stroomsnelheid ter plaatse van het talud door de boegschroefstraal en de jet worden berekend. Uit de relaties van het aantal verplaatste steentjes en de maximale berekende stroomsnelheid op het talud bleek het verschil tussen de boegschroefstraal en de jet nog groter. Door gelijke maximale berekende stroomsnelheid op het talud verplaatsten veel meer steentjes bij een boegschroefstraal dan bij een jet.

Omdat het aantal verplaatste steentjes niet gelijk is bij een gelijke stroomsnelheid van de boegschroefstraal en de jet, kan worden geconcludeerd dat de jet niet mag worden gebruikt om een boegschroefstraal te modelleren.

De diameter van de steentjes die zijn gebruikt in de proefopstelling was bepaald met behulp van de thans in gebruik zijnde berekeningsmethodes en een bepaalde kritieke stroomsnelheid ter plaatse van het talud. Bij de metingen bleek echter dat de steentjes bij een veel lagere stroomsnelheid gingen bewegen dan deze kritieke stroomsnelheid. Hieruit kan worden geconcludeerd dat deze methodes niet volledig juist zijn. Hierbij gaat het met name om de Nederlandse methode en om de stabiliteitsformule.

Om te kunnen verklaren waarom er door de boegschroefstraal meer steentjes verplaatsten dan door de jet, is een analyse uitgevoerd voor een aantal aspecten die invloed hebben op de berekening van de steengrootte. Alhoewel het niet uit de huidige metingen bleek, is er een groot verschil in turbulentie tussen de boegschroefstraal en de jet. Dit is waarschijnlijk voor een groot deel verantwoordelijk voor het verschil in stabiliteit. Daarnaast is de verschillende invloed die de helling van het talud op de stabiliteit heeft bij de beide stralen belangrijk.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
1 Inleiding.....	1
1.1 Algemeen.....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Doelstelling.....	3
1.4 Opbouw.....	4
2 Literatuurstudie.....	5
2.1 Initiële stroomsnelheid.....	5
2.1.1 Berekeningsmethoden voor de initiële stroomsnelheid	5
2.1.2 Het ontwerpvermogen.....	12
2.1.3 Relatie diameter en initiële stroomsnelheid	13
2.1.4 Evaluatie	14
2.2 Het snelheidsveld.....	14
2.2.1 Straaltheorie	14
2.2.2 Schroefstraaltheorie	16
2.2.3 Stroomsnelheden op een talud	19
2.2.4 Evaluatie	23
2.3 Stabiliteit van stortsteen taludbescherming	24
2.3.1 Stabiliteit van een steen in een stroming.....	24
2.3.2 Stabiliteitsrelaties.....	25
2.3.3 Talud en turbulentie	27
2.3.4 Evaluatie	29
3 Modelopstelling.....	31
3.1 Doelstellingen.....	31
3.2 Achtergrond achter de opstelling	32
3.2.1 Prototypesituatie	32
3.2.2 Schaling.....	34
3.2.3 Modelsituatie.....	36
3.3 Modelopstelling	37
3.3.1 Afbakening model.....	37
3.3.2 Aandachtspunten van de opstelling	38
3.4 Meetprogramma	42
3.4.1 Metingen met de boegschroefstraal	42
3.4.2 Metingen met de jet	44

4	Snelheidsmetingen	47
4.1	Assenstelsel	47
4.2	Stroomsnelheden in de boegschroefstraal	49
4.2.1	Schroefkarakteristieken.....	49
4.2.2	Axiale stroomsnelheden in de boegschroefstraal.....	52
4.2.3	Tangentiële stroomsnelheden in de boegschroefstraal	63
4.2.4	Radiale stroomsnelheden in de boegschroefstraal	64
4.2.5	Turbulentie in de boegschroefstraal.....	65
4.2.6	Circulatie in de modelopstelling	68
4.3	Stroomsnelheden in de jet	69
4.3.1	Axiale stroomsnelheden in de jet.....	69
4.3.2	Turbulentie in de jet	73
4.4	Evaluatie	75
5	Stabiliteitsmetingen	79
5.1	Metingen	79
5.2	Stabiliteit.....	80
5.3	Evaluatie	84
6	Stabiliteitsanalyse	85
6.1	Begin van bewegen.....	85
6.1.1	Geen beweging.....	85
6.1.2	Weinig beweging	86
6.2	Berekening stabiliteitsparameter	88
6.3	Invloedsanalyse	89
6.3.1	Berekende stroomsnelheden op het talud, $U_{\text{talud,max}}$	90
6.3.2	Tangentiële stroomsnelheid, V	93
6.3.3	Invloed van de helling, m_h	93
6.3.4	Invloed van turbulentie, r	96
6.3.5	Evaluatie	97
7	Conclusies en aanbevelingen	101
	Symbolenlijst.....	103
	Literatuurlijst	107
	Bijlagen.....	109

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Transport over water is de laatste jaren toegenomen. Dit geldt met name voor het containertransport. Meer en steeds grotere containerschepen worden gebouwd. Daarnaast is de laatste jaren de trend ontstaan dat de containerschepen op eigen kracht afmeren en wegvaren. Om tijd te besparen wordt minder gebruik gemaakt van sleepboten bij deze manoeuvres.

Om op eigen kracht te kunnen wegvaren worden schepen uitgerust met een boegschroef. Een boegschroef is een in een tunnel geplaatste schroef die dwars op de as van het schip aan de voorkant is geplaatst. De door de boegschroef geleverde stuwkracht gecombineerd met de grote afstand tot het zwaartepunt van het schip levert een moment waardoor het schip kan draaien. Met behulp van de boegschroef kan de voorkant van het schip van de kade af worden gedraaid, waarna met behulp van de hoofdschroef kan worden weggevaren. Steeds grotere containerschepen worden gebouwd waarin een steeds groter vermogen wordt geïnstalleerd voor de aandrijving van de schroeven.

Een draaiende schroef veroorzaakt een waterstraal achter de schroef. Het gebruik van de boeg- en de hoofdschroef bij de kade levert een belasting op de kade op door deze waterstralen. De boegschroefstraal is, in het geval dat het schip parallel aan de kade ligt, loodrecht op de kade gericht. De hoofdschroefstraal wordt door het roer richting de kade afgebogen, zie Figuur 1-1. In het geval van een verticale kademuur worden de stralen na het raken van de kademuur alzijdig afgebogen en kan de straal de bodem raken. Hier kan erosie optreden. Dit kan de stabiliteit van de kademuur nadelig beïnvloeden. Daarom wordt vaak een bodembescherming toegepast aan de voet van een kademuur. In het geval van een dek op palen, zie Figuur 1-2, zijn de stralen op een talud gericht. Om het talud en de bodem te beschermen worden hier beschermingsmaatregelen getroffen.

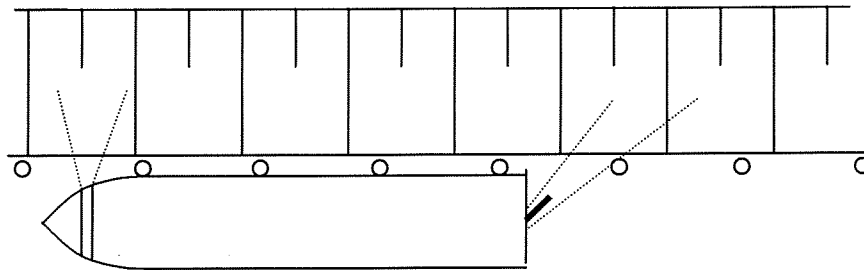
Hoe de bodem voor een kademuur kan worden beschermd tegen de belasting door de stralen is reeds een aantal malen onderzocht. Dit heeft geresulteerd in een bepaalde ontwerpmethodologie waarbij gebruik wordt gemaakt van een aantal correctiefactoren.

Hoe de helling onder een dek op palen kan worden beschermd tegen de aanval van schroefstralen is echter slechts beperkt onderzocht. Dit ondanks het feit dat deze constructiemethodologie wereldwijd veel wordt toegepast. Het belang van dit onderwerp blijkt uit het feit dat het PIANC een werkgroep in het leven heeft geroepen die in 1997 een inventarisatie van, door boegschroeven veroorzaakte, schades in de VS heeft gepubliceerd. Tevens worden er in deze publicatie een aantal ontwerpregels gegeven. Dit zijn echter zeer globale ontwerpregels.

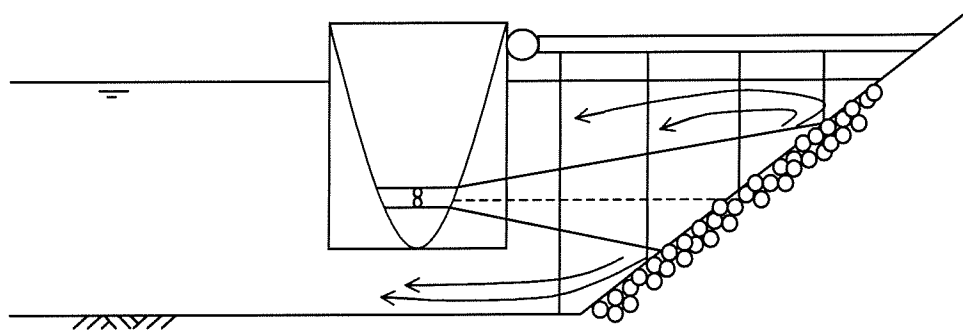
Voor de situatie van de boegschroefstraal bij een dek op palen is, naast de ontwerpregels van het PIANC, in Nederland een rekenmodel bekend waarmee de stroomsnelheden ter plaatse van het talud kunnen worden berekend. Dit rekenmodel wordt hier de

Nederlandse methode genoemd. Met behulp van de berekende stroomsnelheden is dan weer de minimale benodigde steengrootte van de taludbescherming te berekenen. Deze methode is echter slechts beperkt gebaseerd op modelmetingen. Er zijn voor zover bekend niet eerder stabiliteits- of erosiemetingen uitgevoerd voor deze specifieke situatie.

Er is behoefte aan een beter begrip van het gedrag van een schroefstraal op een talud (en de invloed daarvan op de stabiliteit van de verdediging) tijdens afmeren en wegvaren van een schip.



Figuur 1-1: Bovenaanzicht van schip langs kade met boeg- en hoofdschroefstraal.



Figuur 1-2: Vooraanzicht van de boegschroefstraal gericht op een talud.

1.2 Probleemstelling

Er is weinig bekend over de situatie van een schroefstraal die op een talud is gericht. Om dit goed te bestuderen is een uitgebreid onderzoek nodig. Dit onderzoek zal de door de stralen opgewekte stroomsnelheden voor en op het talud en de stabiliteit of erosie van de bescherming op het talud moeten opvatten. Dit zal voor de situatie van de boegschroefstraal loodrecht op het talud en van de hoofdschroefstraal onder een hoek met het talud, zie Figuur 1-1, afzonderlijk moeten worden bekeken.

Daarnaast zijn er nog een groot aantal variabelen die onderzocht dienen te worden. Hierbij kan gedacht worden aan meerdere schroeven voor de boeg- en de hoofdstroef, variabele roerhoek, verschillende soorten taludbekleding, beweging van het schip bij wegvaren, invloed van de aanwezigheid van de palen op het snelheidsveld en op de erosie etc.

Eén manier om onderzoek te doen naar bovenstaande situatie is om proeven uit te voeren in een fysisch model. In het verleden zijn door verscheidene onderzoekers fysische modellen gebruikt waarin de schroefstraal werd gemodelleerd door een eenvoudige waterstraal, een jet. Er werd geen gebruik gemaakt van een schroef voor het opwekken van de straal. Het voordeel van het gebruik van een jet voor het modelleren van een schroefstraal is de eenvoud van de opstelling. Het is echter onduidelijk of de jet voldoende overeenkomt met een schroefstraal om hiermee de prototypesituatie goed te modelleren.

Gezien de beperkte tijd die beschikbaar is voor dit onderzoek wordt slechts gekeken naar de situatie van de boegschroefstraal die loodrecht op een talud met breuksteen is gericht. Zoals in de vorige paragraaf is vermeld, wordt er in Nederland onder andere gebruik gemaakt van de Nederlandse methode. Deze methode maakt gebruik van een aantal vereenvoudigingen. Ten eerste wordt voor de berekening van de stroomsnelheden gebruik gemaakt van een rekenmodel dat is opgesteld voor de vrije schroefstraal. Dit is een schroefstraal die is opgewekt door een schroef die niet wordt omhuld door een tunnel of een straalbuis. De schroef van de boegschroef wordt echter omhuld door een relatief lange tunnel. Daarnaast wordt de invloed van de aanwezigheid van een talud op de optredende stroomsnelheden bij deze methode verwaarloosd. Het is niet duidelijk of deze vereenvoudigingen geoorloofd zijn.

1.3 Doelstelling

Dit onderzoek heeft twee doelstellingen waarin een aantal subdoelstellingen zijn te onderscheiden:

1. Bepalen welke straal mag worden gebruikt om een boegschroefstraal te modelleren, door:
 - inzicht te krijgen in het opgewekte stromingspatroon van een boegschroefstraal en een jet,
 - het stabiliteitsgedrag van een breuksteen taludbescherming onder invloed van een boegschroefstraal en een jet te onderzoeken.
2. Kan aan de hand van de bevindingen een uitspraak worden gedaan met betrekking tot de geschiktheid van de thans in gebruik zijnde berekeningsmethodes, met betrekking tot:
 - de berekening van de initiële stroomsnelheid,
 - het snelheidsveld bij onbelemmerde straaluitbreiding,
 - stroomsnelheden op het talud,
 - stabiliteit van de stenen op het talud.

Bovenstaande doelstellingen zullen worden bereikt door het uitvoeren van modelproeven in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft.

1.4 Opbouw

De problemen omtrent het onderwerp van een boegschroefstraal die op een talud is gericht zijn nu besproken en de doelstellingen van dit onderzoek zijn vastgesteld. In hoofdstuk 2 wordt vervolgens besproken wat de huidige stand van zaken is van de kennis omtrent dit onderwerp. Het rekenmodel voor de stroomsnelheden in de schroefstraal wordt uitgebreid besproken. Dit rekenmodel berekent de stroomsnelheden in de straal met behulp van de stroomsnelheid aan het einde van de tunnel van de boegschroef. De formules voor de berekening van deze stroomsnelheid worden tevens beschreven. Aan het eind van hoofdstuk 2 wordt een stabiliteitsrelatie beschreven waarmee, met behulp van de berekende stroomsnelheden, een minimale steendiameter kan worden berekend.

De doelstellingen die in paragraaf 1.3 zijn beschreven worden bereikt door modelproeven uit te voeren. Een belangrijke doelstelling is het bepalen met welke straal een boegschroefstraal kan worden gemodelleerd. Omdat hiervoor in het verleden gebruik is gemaakt van een jet, worden proeven met deze straal en een boegschroefstraal uitgevoerd. Er zijn voor de boegschroefstraal en de jet stabiliteitsmetingen en snelheidsmetingen uitgevoerd. In hoofdstuk 3 worden de afzonderlijke doelen van deze proeven beschreven. Tevens wordt beschreven hoe tot het ontwerp van de modelopstelling is gekomen en wordt de opstelling zelf beschreven. Tot slot wordt beschreven welke proeven precies zijn uitgevoerd.

De snelheidsmetingen worden in hoofdstuk 4 beschreven. Er worden aan de hand van de snelheidsmetingen rekenmodellen opgesteld voor de stroomsnelheden in de boegschroefstraal en in de jet. Deze rekenmodellen worden vergeleken met rekenmodellen die in de literatuur zijn gevonden voor de vrije schroefstraal en de jet.

De stabiliteitsmetingen worden in hoofdstuk 5 beschreven. Hier wordt een vergelijking gemaakt tussen de stabiliteit van het talud belast door een boegschroefstraal en een jet. Er worden grote verschillen gevonden.

De grote verschillen in de stabiliteit worden veroorzaakt door verschillen in de belasting. Deze verschillen bestaan uit de verschillen in de stroomsnelheden die in de stralen optreden. In hoofdstuk 6 wordt een poging gedaan om de verschillen in de stabiliteit te verklaren aan de hand van de verschillen in de gemeten snelheden.

Tot slot wordt in hoofdstuk 7 een aantal conclusies beschreven en worden aanbevelingen gedaan. De conclusies zijn vooral kwalitatief en hebben met name betrekking op de gevonden snelheden en de stabiliteit. De aanbevelingen worden vooral gedaan om bij een vervolgonderzoek beter te kunnen meten.

2 Literatuurstudie

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke berekeningsmethoden op dit moment worden gebruikt met betrekking tot de stroomsnelheid in een straal, de invloed van begrenzingen hierop en de steenstabiliteit.

Voor de berekening van de minimale benodigde steengrootte op een talud onder belasting van een boegschroefstraal, is de stroomsnelheid die ter plaatse van de stenen langs het talud optreedt nodig. Deze stroomsnelheid is te berekenen met een rekenmodel voor de stroomsnelheden in een schroefstraal. De stroomsnelheden worden in dit rekenmodel berekend met behulp van de stroomsnelheid aan het eind van de tunnel van de boegschroef, de initiële stroomsnelheid, en de diameter van de schroef. De initiële stroomsnelheid is afhankelijk van het gebruik en de eigenschappen van de boegschroef. Met een stabiliteitsrelatie is dan de minimale benodigde steendiameter te berekenen. Allereerst zal hier de berekening van de initiële stroomsnelheid worden beschreven.

2.1 Initiële stroomsnelheid

De initiële stroomsnelheid en de diameter van de schroef worden gebruikt bij de bepaling van het snelheidsveld achter de schroef. In deze paragraaf worden drie methoden beschreven voor de berekening van de initiële stroomsnelheid. In deze drie methoden worden de diameter en het aangewende vermogen van de aandrijving van de schroef gebruikt voor de berekening. Daarnaast wordt beschreven welk percentage van het geïnstalleerde vermogen wordt aangewend bij de aanleg- en afvaartmanoeuvre. Tot slot wordt een verband gepresenteerd tussen het geïnstalleerde vermogen en de diameter van de boegschroef.

2.1.1 Berekeningsmethoden voor de initiële stroomsnelheid

De basis voor de berekening van de initiële stroomsnelheid is de actuator disc theorie van Froude. Deze methode is onder andere door Blaauw en Van de Kaa (1978) beschreven en getoetst. Er wordt door Meijer en Verhey (1993) en Römisch (1993), ieder op een andere manier, gekeken naar de intree- en wrijvingsweerstand.

Blaauw en Van de Kaa (1978)

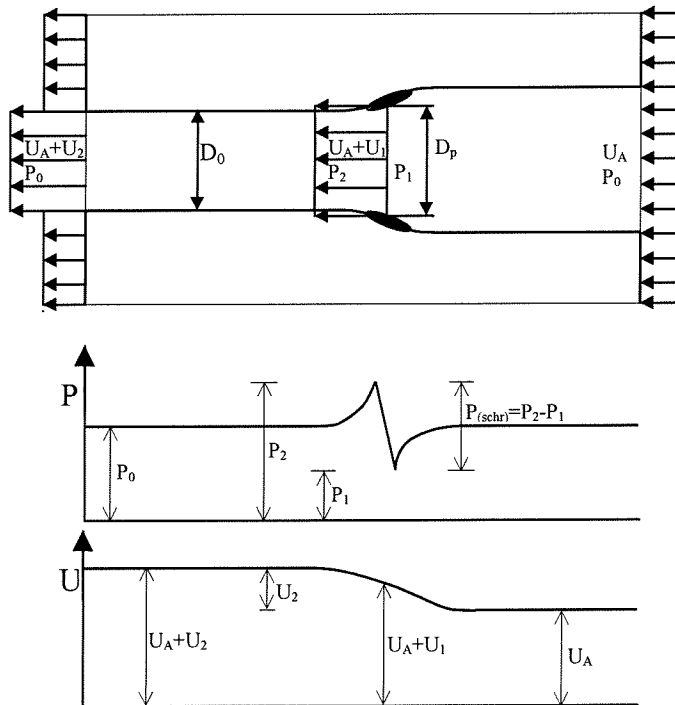
Blaauw en Van de Kaa (1978) geven een beschrijving van de axiale snelheden in de straal achter een schroef. Als basis voor de beschrijving werd de straaltheorie van Albertson gebruikt. Voor een beschrijving van deze theorie wordt verwezen naar sectie 2.2.1. De straaltheorie beschrijft het snelheidsveld van een waterstraal uit een ronde opening. In de uitstroomopening wordt de stroomsnelheid homogeen en constant genomen.

Er wordt van uitgegaan dat de schroefstraal direct achter de schroef alleen een axiale component heeft die homogeen verdeeld is over de uitstroomopening met een constante

stroomsnelheid. Dit is echter niet het geval in de werkelijke situatie waar de stroming naast axiale ook tangentiële (draaiend om de straalas) en radiale (van de straalas af gericht) snelheidscomponenten bezit, zie hoofdstuk 4.1. Bovengenoemde vereenvoudiging voor de stroomsnelheden in de schroefstraal wordt bereikt door het schematiseren van de schroef tot een actuator disc. Dit gebeurt aan de hand van de volgende aannamen wat betreft de schroef:

1. de schroef heeft een oneindig aantal schroefbladen,
2. het toerental van de schroef is oneindig hoog,
3. de door het schroefblad geleverde druk is constant over de lengte van het blad,
4. de stuwkracht van de actuator disc is gelijk aan de stuwkracht van de schroef.

De schroef is nu geschematiseerd als een schijf die een kracht, de stuwkracht van de schroef, op het water uitoefent. Met behulp van de bewegingsvergelijking kunnen nu lokale snelheden worden berekend. De bewegingsvergelijking geeft de balans tussen de traagheid, de aandrijvende kracht en de weerstand. De weerstand wordt buiten beschouwing gelaten en als aandrijvende kracht wordt de stuwkracht genomen.



Figuur 2-1: Balansgebied voor een actuator disc in een straalbuis.
(Blaauw en Van de Kaa (1978), Römisch (1993))

De bewegingsvergelijking ziet er als volgt uit:

$$T_{(ad)} = \frac{du}{dt} * \rho * V \quad (2-1)$$

De bewegingsbalans wordt toegepast over het totale balansgebied in Figuur 2-1. Dit is het balansgebied van een actuator disc in een straalbuis. V is het volume van het water dat

door de actuator disc in dt wordt versneld. Om het volume te berekenen wordt de stroomsnelheid ter plaatse van de actuator disc genomen, hier is immers het oppervlak bekend:

$$V = \Delta t * (U_A + U_1) * \frac{1}{4} * \pi * D_p^2 \quad (2-2)$$

Voor het snelheidsverschil du in het balansgebied wordt het verschil genomen tussen inkomende en uitgaande snelheid; dit is U_2 . Met de dichtheid voor water ziet de bewegingsvergelijking voor het balansgebied in Figuur 2-1 er als volgt uit:

$$T_{(ad)} = \rho_w * (U_A + U_1) * U_2 * \frac{1}{4} * \pi * D_p^2 \quad (2-3)$$

waarin:

$T_{(ad)}$	= stuwkracht van de actuator disc	[N],
ρ_w	= dichtheid van water	[kg/m ³],
U_A	= axiale stroomsnelheid naar schroef	[m/s],
U_1	= stroomsnelheid t.p.v. actuator disc vlak	[m/s],
U_2	= stroomsnelheid oneindig ver van schroefvlak	[m/s],
D_p	= diameter van de schroef of actuator disc	[m].

Met behulp van de wet van Bernoulli en de stuwkracht kan worden bepaald dat $U_1=U_2/2$. De wet van Bernoulli luidt:

$$H = z + \frac{U^2}{2g} + \frac{p}{\rho_w g} \quad (2-4)$$

waarin:

H	= energiehogte boven vergelijkingsvlak	[m],
z	= hoogte boven vergelijkingsvlak	[m],
p	= drukhoogte boven vergelijkingsvlak	[N/m ²].

De wet van Bernoulli wordt op het gedeelte van het balansgebied voor de schroef toegepast, zie Figuur 2-1:

$$\frac{U_A^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho_w g} = \frac{(U_A + U_1)^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho_w g} \quad (2-5)$$

Dit wordt ook voor het gedeelte na de schroef gedaan:

$$\frac{(U_A + U_1)^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_w g} = \frac{(U_A + U_2)^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho_w g} \quad (2-6)$$

Door substitutie van de term met U_1 in (2-5) in (2-6) krijgt men:

$$\frac{(U_A + U_2)^2}{2g} = \frac{U_A^2}{2g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho_w g} \quad (2-7)$$

Hierin is p_2-p_1 de druk die door de schroef wordt geleverd. Deze druk kan worden berekend door de stuwkracht door het oppervlak van de schroef te delen. De druk geleverd door de schroef wordt dan:

$$p_{(schr)} = \frac{T_{(ad)}}{A} = \rho_w * (U_A + U_1) * U_2 \quad (2-8)$$

Als deze druk in (2-7) wordt ingevuld voor $p_2 - p_1$ dan krijgt men:

$$\frac{(U_A + U_2)^2}{2g} - \frac{U_A^2}{2g} = \frac{\rho_w * (U_A + U_1) * U_2}{\rho_w g} \quad (2-9)$$

waaruit volgt:

$$\frac{1}{2} U_2^2 = U_1 U_2$$

Zo is berekend dat $U_1 = U_2/2$. De stuwkracht voor een vrijstaande schroef wordt dan:

$$T_{(schr)} = \rho_w * \left(U_A + \frac{U_2}{2} \right) * U_2 * \frac{1}{4} * \pi * D_p^2 \quad (2-10)$$

waarin:

$T_{(schr)}$ = effectieve stuwkracht van de schroef [N].

De wet van behoud van massa luidt:

$$\frac{1}{4} * \pi * D_p^2 * \rho_w * (U_A + U_1) = \frac{1}{4} * \pi * D_0^2 * \rho_w * (U_A + U_2) \quad (2-11)$$

wat leidt tot:

$$0,7 * D_p = D_0$$

waarin:

D_0 = diameter t.p.v. de maximale contractie van de straal [m].

In het geval van de vrijstaande schroef treedt contractie op. De effectieve diameter is derhalve kleiner dan de schroefdiameter. Verschillende onderzoekers gebruiken beide diameters voor de initiële diameter van de schroefstraal. De contractie kan als volgt worden gedefinieerd:

$$\phi' = \frac{D_0^2}{D_p^2} = \frac{U_A + U_1}{U_A + U_2} \quad (2-12)$$

waarin:

ϕ' = de contractiecoëfficiënt [-].

In het geval van de vrijstaande schroef geldt voor de contractie:

$$\phi' = 0,5 \quad [-],$$

en omdat er bij een schroef in een straalbuis geen contractie optreedt, geldt daarvoor:

$$\phi' = 1,0 \quad [-].$$

Indien $T_{(schr)}$, U_A en D_p bekend zijn, kunnen U_1 en U_2 berekend worden. Het is echter vaak eenvoudiger om de stuwkrachtcoëfficiënt te gebruiken die in combinatie met de voortgangcoëfficiënt volgt uit de systematische schroeven series, zie Oosterveld (1970). De voortgangcoëfficiënt geeft een relatie tussen de snelheid van een schip ten opzichte van het omliggende water (in het geval van de hoofdschroef) en het toerental vermenigvuldigd met de diameter van de schroef.

De voortgangscoefficiënt is:

$$J = \frac{U_A}{n * D_p} \quad (2-13)$$

en de stuwkrachtscoëfficiënt is:

$$k_{t(schr)} = \frac{T_{(schr)}}{\rho_w * n^2 * D_p^4} \quad (2-14)$$

waarin:

J = voortgangscoefficiënt [-],
 $k_{t(schr)}$ = stuwkrachtscoëfficiënt van de schroef [-],
 n = toerental [s^{-1}].

Substitutie van (2-10) in (2-14) geeft:

$$k_{t(schr)} = \frac{\rho_w * \frac{1}{4} * \pi * D_p^2 * \left(U_A + \frac{U_2}{2} \right) * U_2}{\rho_w * n^2 * D_p^4} \quad (2-15)$$

In het geval van een stilliggend schip geldt dat $J=0$ en $U_A=0$. Met behulp van (2-15) kan vervolgens U_2 worden bepaald:

$$U_2 = \sqrt{\frac{8 * n^2 * D_p^2}{\pi}} * \sqrt{k_{t(schr)}} \quad (2-16)$$

$$\approx 1,60 * n * D_p * \sqrt{k_{t(schr)}} \quad (2-17)$$

Indien $k_{t(schr)}$, D_p en n bekend zijn, is het mogelijk, met behulp van (2-17) de gemiddelde initiële snelheid achter de schroef te berekenen. De gemiddelde initiële snelheid achter de schroef is in het geval van een stilliggend schip gelijk aan U_2 :

$$U_0 = U_2 \quad (2-18)$$

waarin:

U_0 = initiële stroomsnelheid achter de schroef [m/s].

Vaak zijn echter $k_{t(schr)}$ en $T_{(schr)}$ eenvoudiger met de volgende benaderende vergelijking voor de stuwkracht te bepalen:

$$T_{(schr)} = 205,72 * D_p^2 * c * \left[\frac{1,36 * P}{\frac{\pi}{4} * D_p^2} \right]^{2/3} \quad (2-19)$$

waarin:

P = aangewend motorvermogen [W],
 c = prestatie coëfficiënt van een schroef in bollard pull situatie (schip/schroef plaatsvast tijdens prestatiemeting) [-].

Voor de coëfficiënt c_1 kunnen de volgende waarden worden aangehouden:

$c = 1,80$ voor een schroef in een straalbuis,
 $c = 2,90$ voor een schroef zonder straalbuis.

Met behulp van (2-14) en (2-19) kan (2-17) als volgt worden geschreven:
 voor een schroef in een straalbuis,

$$U_0 = 1,17 * \left(\frac{P}{\rho_w * D_p^2} \right)^{1/3} \quad (2-20)$$

Voor een schroef zonder straalbuis treedt geen contractie op. Hier wordt dus niet met $D_0=0,7*D_p$, maar met $D_0=D_p$ gerekend; (2-20) wordt dan:

$$U_0 = 1,48 * \left(\frac{P}{\rho_w * D_p^2} \right)^{1/3} \quad (2-21)$$

Formules (2-20) en (2-21) wijken af van de formules in Blaauw en Van de Kaa (1978), omdat hier de dichtheid van het water niet is weggedeeld. In Blaauw en Van de Kaa (1978) is dit wel gedaan en kloppen de dimensies niet.

Meijer en Verhey (1993)

De methode van Blaauw en Van de Kaa (1978) wordt tevens door Meijer en Verhey (1993) gebruikt. De invloed van de intree- en wrijvingsverliezen in de straalbuis worden echter ook meegenomen. Deze weerstand wordt opgevat als een drukverlies in het schroefvlak:

$$\Delta h = \xi_{tot} * \frac{U_0^2}{2 * g} \quad (2-22)$$

waarin:

Δh = drukverlies [m],
 ξ_{tot} = totale drukverliescoëfficiënt [-],
 g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²].

De kracht die door de energieverliezen verloren gaat is:

$$F = \Delta h * g * \rho_w * \frac{1}{4} * \pi * D_p^2 \quad (2-23)$$

waarin:

F = verloren kracht door energieverliezen [N].

De schroef levert naast de stuwkracht tevens de kracht F . Het totaal van deze krachten bedraagt, met $D_0=D_p$:

$$T'_{(schr)} = T_{(schr)} + F = \left(1 + \frac{\xi_{tot}}{2} \right) * U_0^2 * \rho_w * \frac{1}{4} * \pi * D_0^2 \quad (2-24)$$

waarin:

$T'_{(schr)}$ = door schroef geleverde kracht [N].

Door $T'_{(schr)}$ voor $T_{(schr)}$ in (2-14) in te vullen wordt een initiële stroomsnelheid verkregen van:

$$U_0 = \frac{1.1 * n * D_0 * (k_{t(schr)})^{0.5}}{(1 + 0.5 * \xi_{tot})^{0.5}} \quad (2-25)$$

Voor een containerschip geldt: $\xi_{tot}=0.5$

Dit betekent een afname van U_0 van ongeveer 10%. Verrekend in (2-17) levert deze afname de volgende vergelijking op:

$$U_0 \approx \left(\frac{P}{\rho_w * D_0} \right)^{1/3} \quad (2-26)$$

Römisch (1993)

Ook Römisch (1993) gebruikt de methode van Blaauw en Van de Kaa (1978). Hij laat echter ook de intree- en wrijvingsverliezen meetellen. Uitgangspunt is (2-20), de gemiddelde initiële stroomsnelheid in het geval van een schroef met een straalbuis. Römisch (1993) gaat er vanuit dat de tunnel van de boegschroef te vergelijken is met een straalbuis:

$$U_0 = 1,17 * \left(\frac{P}{\rho_w * D_p^2} \right)^{1/3} \quad (2-27)$$

De verliezen worden in (2-27) verwerkt en uitgedrukt in het vermogen P_d , de factor 1,17 vervalt en is waarschijnlijk in de verliesfactor verwerkt:

$$P = \frac{1 + \xi_{tot}}{2} * U_0^3 * \rho_w * \frac{1}{4} * \pi * D_p^2 \quad (2-28)$$

waarin:

ξ_{tot} = totaal van de verliescoëfficiënten [-].

Omgeschreven naar de snelheid, gaat (2-28) over in:

$$U_0 = \left[P * \frac{8}{\pi * \rho_w} * \frac{1}{(1 + \xi_{tot}) * D_p^2} \right]^{1/3} \quad (2-29)$$

Vergelijking (2-29) kan, om $1 + \xi_{tot}$ eenvoudiger te kunnen gebruiken, worden geschreven als:

$$U_0 = (1 - \zeta) * 1.17 * \left(\frac{P}{\rho_w * D_p^2} \right)^{1/3} \quad (2-30)$$

en

$$\zeta = 1 - 1.167 * \left(1 + \sum \xi \right)^{-1/3} \quad (2-31)$$

In Tabel 2-1 zijn de door Römisch (1993) aangegeven waarden voor de verschillende verlies- en reductiefactoren gegeven. Blokland (1997) gebruikt de formules van Römisch (1993) ook, maar gaat er vanuit dat een goed ontworpen tunnel een lagere reductiefactor geeft dan dat Römisch (1993) aangeeft. De waarden die Blokland (1997) voorstelt zijn ook in Tabel 2-1 weergegeven.

Tabel 2-1: Verlies- en reductiefactoren voor initiële stroomsnelheid achter de boegschroef.

Methode	Factor $1+\xi_{tot}$ [-]	Factor ζ [-]	Reductie U_0 [%]
Römisch	1-5	0,07-0,32	7-32
Blokland	1-1,5	0,07-0,14	7-14

2.1.2 Het ontwerpvermogen

De boegschroef en de hoofdschroef worden ieder met een bepaald vermogen aangedreven. Dit vermogen bepaalt de maximale stuwkracht die de schroef kan leveren en daarmee de maximale uitstroomsnelheid achter de schroef. In de volgende sectie wordt een relatie gegeven tussen het geïnstalleerde vermogen en de diameter van de boegschroef.

Het hoeft echter niet zo te zijn dat het volle vermogen gebruikt wordt. In de literatuur zijn een aantal richtlijnen gegeven die kunnen worden gebruikt voor het bepalen van het ontwerpvermogen voor de hoofd- en de boegschroef bij de aan- en afmeermanoeuvre.

PIANC (1997)

Het PIANC (1997) geeft de volgende waarden bij het wegvaren van de kade op eigen vermogen:

- boegschroef: vol vermogen,
- hoofdschroef: 10% van vol vermogen.

Blokland (1997)

Door Blokland (1997) worden de onderstaande waarden aangegeven:

- Actueel vermogensgebruik van hoofdschroef bij zeeschepen:
 - 25% van beschikbaar vermogen. Dit houdt in dat de stand ‘zeer langzaam’ wordt gebruikt, soms wordt echter de stand ‘langzaam’ gebruikt. Dit was de conclusie van een overleg tussen Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, een nauticus van het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam en loodsen. Er wordt echter uitgegaan van 50 tot 75% van het beschikbare vermogen, indien er sprake is van:
 - een relatief klein zeeschip;
 - afwezigheid van sleepboothulp en hekschroef;
 - een gecompliceerde afmeersituatie, waarin relatief veel manoeuvres worden uitgevoerd.
- Actueel vermogensgebruik van boegschroef en hekschroef:
 - 100% van het beschikbare vermogen.
 - Dit geldt ook indien er sprake is van sleepboothulp. De tijdsduur waarover de boeg- en hekschroef worden gebruikt wordt mede bepaald door de windrichting. Indien schepen door de overheersende windrichting van de kade af worden gezet, dan worden boeg- en hekschroef minder gebruikt.

Scheffer (2000)

Scheffer (2000) geeft aan, op basis van een PIANC Bulletin en verscheidene artikelen van Römisch, dat >>Voraus langsam<< in normale situaties en >>Voraus halbe<< in extreme situaties wordt gebruikt. Deze standen zijn gelijk op verschillende schepen, maar het toerental dat erbij hoort verschilt per schip. Het Institut für Schifftechnik, Seeverkehr und Simulation (ISSUS) der Fachhochschule Hamburg geeft de volgende waarden, ontleend aan een databank:

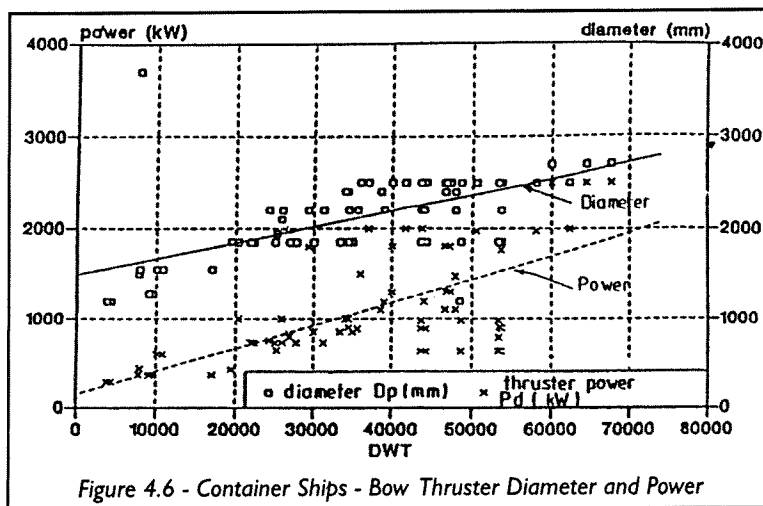
>>Halb voraus<< van grote containerschepen (b.v. Regina Maersk of Hannover Express) houdt in: 52-53% van maximale toerental

Het ISSUS geeft een toerentalbegrenzing voor manoeuvres aan van 65% (Hannover Express)-69%(Regina Maersk) aan. Deze orde van grootte werd tevens, op aanvraag, door de Duitse Lloyd gegeven.

Concluderend kan worden aangenomen dat >>slow ahead<< wordt gevaren tijdens de afvaartmanoeuvre. In extreme gevallen (zeer slecht weer, ter voorkoming van aanvaringen) wordt >>half ahead<< (rond de 53% van het maximaal toerental) gevaren. Voor de boegschroef kan worden aangenomen dat het volledige geïnstalleerde vermogen wordt aangewend bij de afvaartmanoeuvre.

2.1.3 Relatie diameter en initiële stroomsnelheid

Indien wordt aangenomen dat het volledige vermogen van de boegschroef wordt aangewend bij de aanleg- en afvaartmanoeuvre, kan een verband tussen de diameter en de stroomsnelheid direct achter de schroef worden aangegeven. De diameter en het geïnstalleerde vermogen van de boegschroef is echter niet altijd bekend. Het PIANC (1997) heeft gegevens verzameld met betrekking tot het geïnstalleerde vermogen en de diameter van de schroef bij containerschepen. Hoe oud de gegevens zijn en of modernere schepen afwijken door efficiëntere schroeven en aandrijving, is niet bekend. Het gegeven verband wordt hier slechts als een globale richtlijn gegeven.



Figuur 2-2: De diameter en het vermogen van verschillende schepen. (PIANC (1997))

In Figuur 2-2 zijn twee lijnen gegeven voor de diameter in relatie tot de DWT (Dead Weight Tonnage) van een schip en voor het geïnstalleerde vermogen in relatie tot de DWT.

Indien bekend is met welke diameter van de boegschroef rekening moet worden gehouden, kan in Figuur 2-2 worden bepaald welk vermogen waarschijnlijk geïnstalleerd is. Met behulp van (2-20) kan dan de initiële stroomsnelheid worden bepaald.

2.1.4 Evaluatie

De methode van Blaauw en Van de Kaa (1978) levert bruikbare formules op voor de berekening van de initiële stroomsnelheid. In dit onderzoek echter zijn de schroef en de aandrijving slechts een methode om een schroefstraal te verkrijgen. Er wordt niet gekeken naar eventuele wrijvingsverliezen, rendementen van overbrengingen, vormen van schroeven, etc. Er wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van formule (2-17) om het gedrag van de schroef -tunnelcombinatie met behulp van één constante te karakteriseren. Dit wordt gedaan in hoofdstuk 4.2.1.

Voor de ontwerppraktijk is het echter wel van belang om de initiële stroomsnelheid te kunnen bepalen. Het is moeilijk om voor een ontwerpschip een stuwkrachtscoëfficiënt te bepalen, dus formule (2-17) is moeilijk te gebruiken. Omdat het geïnstalleerde vermogen en de diameter van de boegschroef eenvoudiger te schatten zijn, zie paragraaf 2.1.2, zijn de formules (2-20) en (2-21) te gebruiken om initiële stroomsnelheid te berekenen. Als ook de wrijvingsverliezen in de berekening worden meegenomen zijn (2-26) en (2-30) te gebruiken.

2.2 Het snelheidsveld

Deze paragraaf behandelt het snelheidsveld dat ontstaat op enige afstand benedenstrooms van de schroef. Ten eerste zal de straaltheorie worden behandeld. Deze theorie is de basis van de schroefstraaltheorie. Tevens zal worden beschreven hoe de verschillende schroefstraaltheorieën rekening houden met begrenzingen. Onder begrenzingen worden verstaan het wateroppervlak, de bodem, een kademuur en een talud.

2.2.1 Straaltheorie

De schroefstraaltheorieën zoals die in de volgende paragraaf worden beschreven hebben als basis de diffusietheorie voor een vrije, ronde straal. De beschrijving komt uit Blaauw en Van de Kaa (1978) en is gebaseerd op de diffusietheorie voor een vrije, ronde straal van Albertson et al. (zie Blaauw en Van de Kaa (1978)). Er wordt aangenomen dat de schroefstraal slechts weinig afwijkt van andere typen stralen.

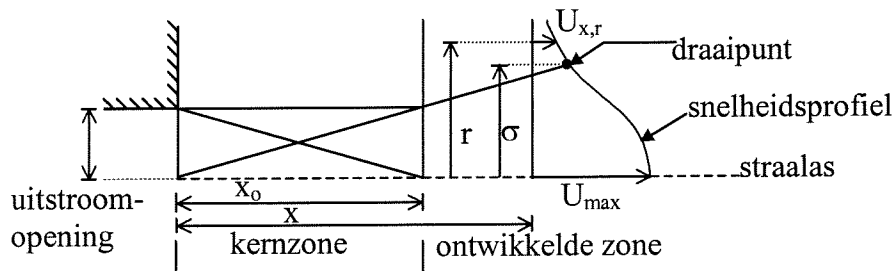
De vrije, ronde straaltheorie zoals die door Blaauw en Van de Kaa (1978) is beschreven deelt het snelheidsveld in twee gebieden. Het eerste gebied bestaat uit het ontwikkelingsgebied van de straal. Het einde is bereikt als het diffusiegebied is

doorgedrongen tot de as van de straal. De ontwikkelzone beperkt zich tot kort achter de schroef en is daarom niet interessant voor dit onderwerp. Het zal daarom niet verder worden besproken.

Het tweede gebied is het gebied van de ontwikkelde stroming. Voor de ontwikkelde zone worden de volgende aannamen gedaan:

- er heerst een hydrostatische drukverdeling in de stroming,
- het diffusieproces is dynamisch gelijkvormig.
- de axiale snelheidscomponent verloopt in elke dwarsdoorsnede van het diffusiegebied volgens de normale verdeling.

De aanname van dynamische gelijkvormigheid houdt in dat in alle doorsneden de verhouding tussen de standaard deviatie in de normale verdeling van de axiale stroomsnelheden en de afstand langs de straalas tot de uitstroomopening constant blijft. Deze constante verhouding wordt aangegeven met c_2 .



Figuur 2-3: Straaltheorie.

Alhoewel de stroomsnelheden in de kernzone buiten beschouwing worden gelaten, is de lengte van de kernzone wel van belang. De lengte kan als volgt met behulp van de aannamen en Figuur 2-3 worden bepaald:

$$\frac{D_0/2}{x_0} = \frac{\sigma}{x} \quad (2-32)$$

waarin:

- σ = standaarddeviatie van de axiale stroomsnelheden [m/s],
- x = afstand langs straalas tot uitstroomopening [m],
- x_0 = kernzonelengte [m].

wat, in combinatie met $\sigma=c_2*x$, voor de kernzonelengte x_0 betekent:

$$\frac{x_0}{D_0} = \frac{1}{2*c_2} \quad (2-33)$$

Het verloop van de axiale stroomsnelheidscomponent heeft in elke dwarsdoorsnede de vorm van een normale verdeling. De normale verdeling wordt door de volgende formule gegeven:

$$f(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2-34)$$

waarin:

- σ = de standaarddeviatie van de verdeling,

De standaarddeviatie is reeds eerder gelijk genomen aan $c_2 * x$, een verhoudingsconstante maal de afstand tot de uitstroomopening. Dit resulteert voor de verdeling van de axiale stroomsnelheden om de as in relatie tot de stroomsnelheid in de as in de volgende formule:

$$\frac{U_{x,r}}{U_{x,max}} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{c_2 * x}\right)^2\right] \quad (2-35)$$

Dit is te schrijven als de algemene beschrijving van de axiale stroomsnelheden in relatie tot de maximale stroomsnelheid in de as, zie Figuur 2-3:

$$\frac{U_{x,r}}{U_{x,max}} = \exp\left[-\frac{1}{2c_2^2} * \frac{r^2}{x^2}\right] \quad (2-36)$$

waarin:

x	= afstand tot de uitstroomopening	[m],
r	= afstand loodrecht op de as van de straal	[m],
$U_{x,r}$	= axiale stroomsnelheid op afstand (x,r)	[m/s],
$U_{x,max}$	= stroomsnelheid in de as van de straal	[m/s].

Indien in combinatie met (2-36) de volgende vergelijking voor de afname van de stroomsnelheid in de as van de straal wordt genomen:

$$\frac{U_{x,max}}{U_0} = \frac{1}{2 * c_1} \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1} \quad (2-37)$$

waarin:

c_1 = empirisch te bepalen constante [-],
is sprake van dynamische gelijkvormigheid in het diffusieproces.

Voor een jet is de waarde van de constanten c_1 en c_2 bepaald. De waarde van c_1 en c_2 is 0,081. Dit levert voor de jet de volgende formule op voor de berekening van de axiale stroomsnelheden in de ontwikkelde zone van de jetstraal:

$$\frac{U_{x,r}}{U_0} = 6,2 * \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1} * \exp\left[-76,2 * \frac{r^2}{x^2}\right] \quad (2-38)$$

2.2.2 Schroefstraaltheorie

De schroefstraal is een vorm van een jet, mits niet gehinderd door begrenzingen. De constante c , die in de vorige sectie is beschreven, is tevens bepaald voor schroefstralen. In deze sectie zullen enkele methoden, volgens welke dit is gebeurd, worden gepresenteerd.

De straaltheorie is opgesteld voor een jet. De schroefstraal komt echter niet volledig overeen met de jet. Ten eerste heeft een schroefstraal niet alleen een axiale snelheid (in de richting van de as van de straal), maar hij heeft ook tangentiële (loodrecht op de as van de straal) en radiale (draaiend om de as van de straal) snelheidscomponenten.

Het WL (1985) beschrijft dat de turbulentie in een schroefstraal hoger is dan in de jet en dat deze wordt veroorzaakt door hoog- en laagfrequente energie. De hoogfrequente energie komt van de wervels die zijn opgewekt door de schroefas en de schroefbladen. De laagfrequente energie komt van de waterstraal. Op korte afstand achter de schroef domineert de hoogfrequente energie; hier is de straaluitbreiding groot. De hoogfrequente energie dempt echter snel uit waardoor de laagfrequente energie op enige afstand van de schroef domineert. In het laagfrequente gebied is de straaluitbreiding kleiner. Het diffusieproces is derhalve niet dynamisch gelijkvormig. Uit eerdere metingen bleek dat de invloed van de wervels bij de bladeinden beperkt blijft tot een afstand van $x/D_0 < 20$.

Door de aanwezigheid van de as wordt in het rapport van het WL (1985) voorgesteld dat de maximale snelheid niet in de as van de straal, maar op een afstand van $D/2$ van de straalas zal optreden. Dit is het geval in de kernzone, maar niet in de ontwikkelde zone.

De hieronder beschreven snelheidsverdelingen zijn geldig in het geval van een straal die ongestoord kan uitbreiden. In het geval van stralen opgewekt door schroeven in schepen is dit echter vaak niet het geval. Er moet dan rekening worden gehouden met de aanwezigheid van grenzen zoals het wateroppervlak en de bodem. De situatie met een talud als grens wordt behandeld in de volgende paragraaf. Verder heeft ook de geometrie van het schip invloed op de straal. Het wel of niet aanwezig zijn van een tunnelconstructie, zoals reeds aangegeven, is hiervan een voorbeeld. Maar ook een roer of een situatie met meerdere schroeven is van invloed op het snelheidsveld. Deze situaties zijn beschreven in de literatuur en verschillende factoren zijn hiervoor aangenomen.

Een onderscheid dient nog te worden gemaakt tussen een vrije schroefstraal en een boegschroefstraal. Een vrije schroefstraal wordt opgewekt door een schroef zonder een tunnel of stroombuis eromheen. Een boegschroefstraal wordt opgewekt door een schroef die in een tunnel is geplaatst.

WL (1985), Schmidt (1998)

In het WL (1985) en door Schmidt (1998) worden dezelfde formules gebruikt voor de berekening van de axiale stroomsnelheden. De constanten c worden echter voor de berekening van de afname van de snelheden in de as (c_1) en voor de berekening van de snelheden in relatie tot de snelheden in de as (c_2) anders genomen.

Het WL (1985) geeft, op basis van modelproeven, voor een vrije schroefstraal de waarde $c_1=c_2=0,18$. Schmidt (1998) geeft voor een boegschroefstraal de waarden: $c_1=0,26$ en $c_2=0,39$. Voor een vrije, ronde jet geldt $c_1=c_2=0,08$.

Dit resulteert voor de schroefstraal in:

$$\frac{U_{x,r}}{U_0} = 2,8 * \left(\frac{x}{D_0} \right)^{-1} * \exp \left[-15,4 * \frac{r^2}{x^2} \right] \quad (2-39)$$

waarin:

$D_0 = 0,7 * D_p$ voor een schroef zonder straalbuis,

$D_0 = 1,0 * D_p$ voor een schroef met straalbuis,

$D_0 = 0,85 * D_p$ voor een schroef-straalbuis-combinatie in een tunnel,

Schmidt (1998) heeft metingen gedaan in een boegschroefstraal met als resultaat:

$$\frac{U_{x,r}}{U_0} = 1,9 * \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1} * \exp\left[-3,3 * \frac{r^2}{x^2}\right] \quad (2-40)$$

De formule van de boegschroefstraal is gebaseerd op metingen die een erg grote spreiding vertonen. De snelheden zijn gemiddeld over snelheidsmetingen met een boegschroef op verschillende afstanden van een kademuur. Hamill en Jonston (1996) hebben snelheden gemeten waarbij ze de afstand tot een talud varieerden. Er bleek een duidelijk verband tussen de afstand tussen het talud en de schroef. Te verwachten is dat een dergelijk verband ook bestaat bij een verticale wand. Omdat Schmidt (1998) geen rekening heeft gehouden met de afstand tot de wand kan dit een reden zijn voor de grote spreiding van de meetwaarden. Tevens heeft hij de spreiding berekend op basis van meetpunten die zeer dicht bij de schroef lagen.

Römisch (1993)

Römisch (1993) stelt echter een afwijkende voorstelling voor van het snelheidsveld van een schroefstraal. Er wordt meer rekening gehouden met eventuele begrenzingen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie zones in de straal:

1. Zone met constante snelheid, kerngebied:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 1 \quad (2-41)$$

De lengte van het kerngebied is $x_0 = 2,6 * D_0$ [m].

Verder geldt altijd $D_0 = D_p$. Römisch (1993) maakt altijd gebruik van de diameter van de schroef en niet de diameter van de straal ter plaatse van de maximale contractie. Met constanten worden eventuele contractieverschijnselen meegenomen in de berekening.

2. Zone van ongestoorde straaluitbreiding:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 2,6 * \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1,0} \quad (2-42)$$

3. Zone van beperkte straaluitbreiding door bodem, waterspiegel, zijmuur en/of talud.

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = A * \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-a} \quad (2-43)$$

Waarin A en a constanten zijn waarvoor geldt:

zonder roer (voor $0,9 \leq h/D_p \leq 9$), waarin h = de diepte [m],

$A = 1,88 \exp(-0,092(h/D_p))$,

met een centraal roer (voor $0,9 \leq h/D_p \leq 8$),

$A = 1,88 \exp(-0,161(h_p/D_p))$,

a = 0,6 in het geval van begrenzing door bodem en waterspiegel,

a = 0,3 als tevens sprake is van begrenzing door laterale muur,

a = 0,57 indien straal door roer wordt gesplitst,

a = 0,25 voor dubbele schroef.

De locatie van de overgang moet per situatie worden bekeken, rekening houdend met een straal met een spreidhoek van 13^0 (vanaf uitgang van tunnel van de boegschroef).

De radiale snelheidsverdeling van de straal, als functie van de snelheid in de straalas, kan in de zones van de ongestoorde en beperkte straalluitbreiding als volgt worden beschreven:

$$\frac{U_{x,r}}{U_0} = \exp\left[-22,2 * \frac{r^2}{x^2}\right] \quad (2-44)$$

Hamill et al. (1996a)

Hamill (1996a) gebruikt in zijn publicaties een andere dan de hierboven gepresenteerde notatie voor de afname van de maximale stroomsnelheid. Hij maakt hierbij tevens de verdeling tussen de ontwikkelzone en de ontwikkelde zone. In de ontwikkelzone is de formule voor de afname van de maximale stroomsnelheid in een vrije schroefstraal:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 1,107 - 0,184 \left(\frac{x}{D_p}\right) \quad (2-45)$$

In de ontwikkelde zone verloopt de maximale stroomsnelheid volgens:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 0,543 - 0,0281 \left(\frac{x}{D_p}\right) \quad (2-46)$$

Voor de berekening van de snelheden buiten de as gebruikt Hamill et al. (1996a), voor zowel de ontwikkelzone als de ontwikkelde zone, een beschrijving die door Blaauw en Van de Kaa (1978) wordt gegeven voor de ontwikkelzone. Deze beschrijving houdt er rekening mee dat de maximale stroomsnelheid niet in de as optreedt. Het WL (1985), Blaauw en Van de Kaa (1978) en Römisch (1993) geven aan dat in de ontwikkelde zone de maximale stroomsnelheid zeker in de as van de straal optreedt. Op basis van deze andere onderzoeken wordt ervan uitgegaan dat de beschrijving van Hamill et al. (1996a) niet juist is. De beschrijving van Hamill et al. (1996a) wordt derhalve beperkt tot de formules voor de maximale stroomsnelheid.

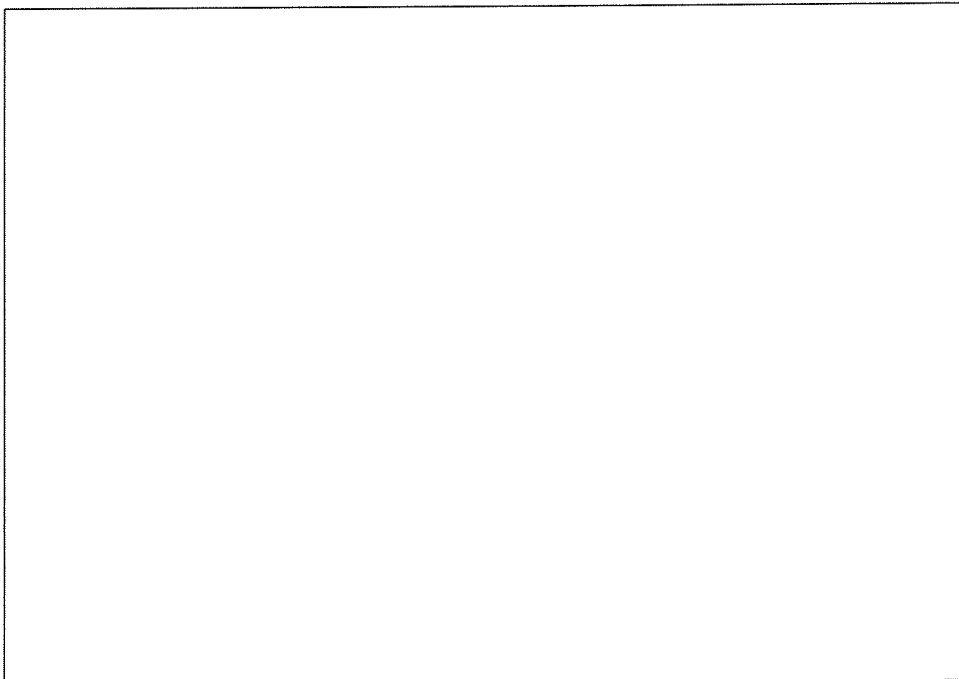
2.2.3 Stroomsnelheden op een talud

De stroomsnelheden kunnen met één van de in de vorige paragraaf beschreven methoden worden berekend. Deze methoden zijn echter alleen geldig indien de straal onbelemmerd kan uitbreiden. De straal kan worden belemmerd in de uitbreiding door zijdelingse belemmering, een parallelle kademuur, bodem of wateroppervlak, of door een obstructie, zoals een kademuur loodrecht op de stroming of een talud. In dit onderzoek is geen sprake van zijdelingse belemmering. De bodem, het wateroppervlak en wanden liggen buiten de invloedssfeer van de straal. Er is echter wel een belemmering van de straal in de vorm van een talud.

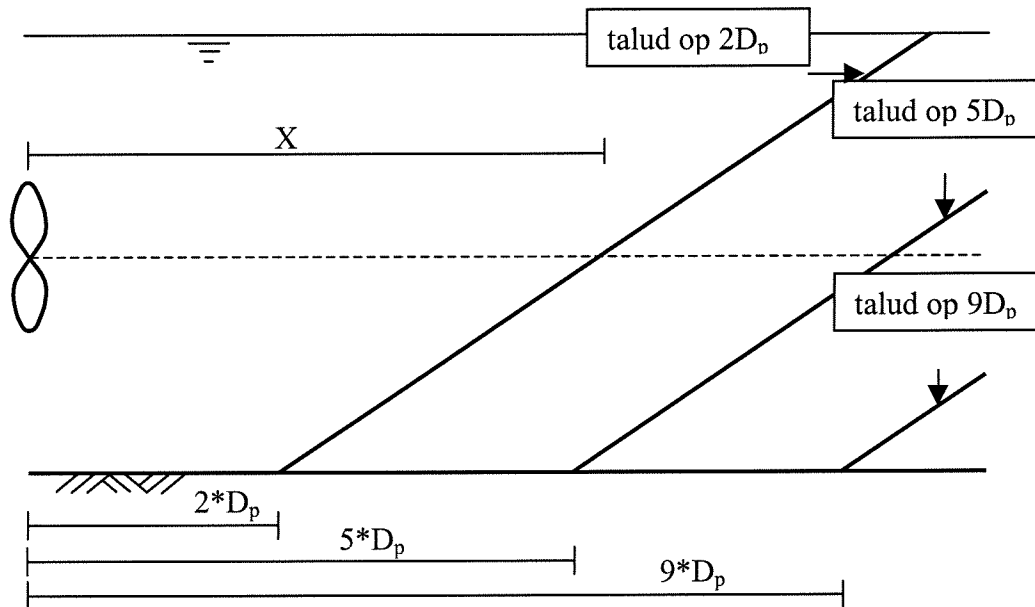
Hieronder zullen een aantal onderwerpen worden beschreven die te maken hebben met de invloed van een talud op de stroomsnelheden opgewekt door een boegschroef.

1. Hamill et al. (1996b): Invloed afstand talud op U_{max}

Hamill et al. (1996b) hebben onderzoek gedaan naar de invloed van de aanwezigheid van een talud op de stroomsnelheden in een straal van een vrijstaande schroef. Hamill et al. (1996b) hebben gevonden dat, bij afnemende afstand tussen de uitstroomopening en het talud, de snelheid in de as van de straal lager is. In Figuur 2-4 is te zien dat de afstand van het talud tot de straal een grote invloed heeft op de snelheid in de as van de straal. In de figuur zijn vier lijnen aangegeven voor de snelheid in de as van een straal waarbij de schroef op drie verschillende afstanden is geplaatst. De afstanden tussen de schroef en de teen van het talud, zoals die in Figuur 2-5 zijn aangegeven, zijn rechtsboven in de figuur gegeven.



Figuur 2-4: Invloed taludafstand op stroomsnelheid in de as (Hamill et al. (1996b))



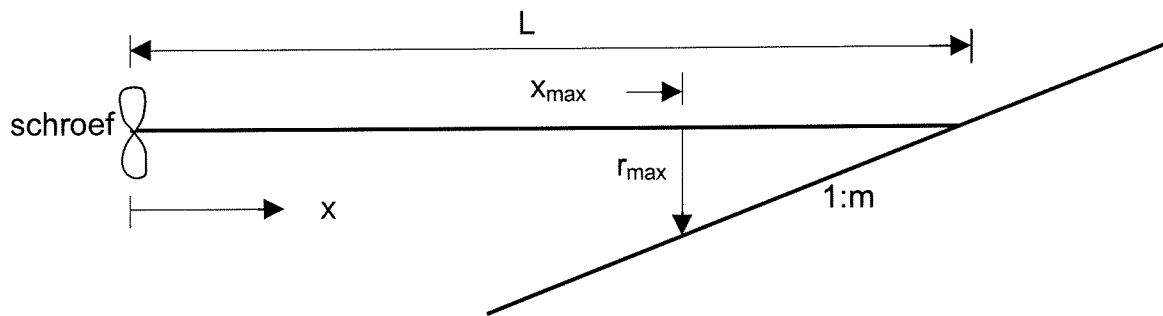
Figuur 2-5: Gebruikte grootheden in Figuur 2-4.

2. *Nederlandse methode*

Tot nu toe is besproken hoe de stroomsnelheden in een straal te berekenen zijn. In de vorige sectie is besproken hoe de aanwezigheid van een talud invloed kan hebben op de stroomsnelheden in een schroefstraal. Indien men een minimale steendiameter moet uitrekenen voor de bescherming van een talud is echter de stroomsnelheid ter plaatse van de stenen van belang. De boegschroefstraal is in de onderzochte situatie direct op een talud gericht. De straal zal het talud raken en omgebogen worden. Welke stroomsnelheden er ter plaatse van het talud optreden is echter onbekend.

De Nederlandse methode om de op een talud optredende stroomsnelheden te berekenen gaat er van uit dat de invloed van het talud op de maximale stroomsnelheden te verwaarlozen is. De stroomsnelheid ter plaatse van het talud is gelijk aan de stroomsnelheid op die plaats als ware het talud niet aanwezig.

Deze methode gaat uit van de schroefstraaltheorie zoals die is beschreven door het WL (1985). Deze methode wordt onderbouwd door een modelproef, uitgevoerd door het WL(1985). Het gaat echter om beperkte proeven met een vaste taludhoek van 1:4.



Figuur 2-6: Schroefstraal tegen talud bij Nederlandse methode.

Deze theorie gaat uit van de schroefstraaltheorie zoals die is beschreven door het WL (1985) met de in Figuur 2-6 aangegeven variabelen.

$$U(x, r) = A * U_0 * \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-a} * \exp\left[-b * \frac{r^2}{x^2}\right] \quad (2-47)$$

Met behulp van de uitdrukking van r in x:

$$r = \frac{1}{m} * (L - x) \Rightarrow \frac{r}{x} = \frac{1}{m} * \left(\frac{L}{x} - 1\right) \quad (2-48)$$

kan de stroomsnelheid als afhankelijke van x worden geschreven:

$$U(x, r) = A * U_0 * \left(\frac{D_0}{x}\right)^a * \exp\left[-\frac{b}{m^2} * \left(\frac{L}{x} - 1\right)^2\right] \quad (2-49)$$

Aan de hand van (2-49) kan de horizontale afstand x, van het punt op het talud waar de stroomsnelheid maximaal is, worden bepaald. De maximale stroomsnelheid treedt op bij $du/dx=0$:

$$\frac{du}{dx} = 0 \Rightarrow -a * x^{-a-1} + x^{-a} * (-2) * \frac{b}{m^2} * \left(\frac{L}{x} - 1\right) * \frac{-L}{x^2} = 0 \quad (2-50)$$

$$\Rightarrow 2 * \frac{b}{m^2} * (L - x) * \frac{L}{x^2} = a \Leftrightarrow \frac{1}{2} * \frac{a * m^2}{b} * \left(\frac{x}{L}\right)^2 = 1 - \frac{x}{L} \quad (2-51)$$

De afstand x van het punt waar de maximale stroomsnelheid optreedt is derhalve:

$$x_{\max} = L * k * \left(\sqrt{1 + \frac{2}{k}} - 1\right) \quad (2-52)$$

met:

$$k = \frac{b}{a * m^2} \quad (2-53)$$

Met behulp van (2-52) en (2-48) kan de radiale afstand worden bepaald van het punt op het talud waar de stroomsnelheid maximaal is:

$$r_{\max} = \frac{1}{m} * (L - x_{\max}) \quad (2-54)$$

De maximale stroomsnelheid op het talud kan worden berekend door (x_{\max}, r_{\max}) in (2-47) in te vullen.

2. Römisch (1996): talud door factoren

Römisch(1996) hanteert een soortgelijke methode. Het talud wordt slechts meegenomen in een aantal constanten. Deze constanten staan beschreven in de vorige paragraaf. Het gaat hier om de afhankelijkheid van de afname van de snelheid in de as van de afstand van een begrenzing tot de straalas. In Römisch (1993) worden deze constanten echter slechts gebruikt voor de invloed van de aanwezigheid van begrenzingen die evenwijdig aan de straalas liggen. Er wordt in Römisch (1996) niet vermeld of gecontroleerd is of deze constanten ook voor een begrenzing geldig zijn die niet evenwijdig aan de straalas ligt.

2.2.4 Evaluatie

De in deze paragraaf gepresenteerde beschrijving voor de stroomsnelheden in een schroefstraal, aan de hand van de straaltheorie, komt goed overeen met metingen verricht door Blaauw en Van de Kaa (1978), WL (1985), Römisch (1996) etc. Het WL (1985) geeft echter aan dat er een grote spreiding van in de meetresultaten zit. Rekening moet worden gehouden met een afwijking in de orde van 10 tot 20 procent.

De schroefstraaltheorie geldt voor de situatie waarbij de schroefstraal onbelemmerd kan uitbreiden. Sommige onderzoeken zijn echter specifiek gericht op de aanwezigheid van een constructie die de straal belemmert. De metingen door Schmidt (1998) zijn bijvoorbeeld verricht met de aanwezigheid van een kademuur. De constanten die aan de hand van deze metingen voor de schroefstraaltheorie zijn bepaald, zijn slechts toepasbaar op deze specifieke situatie. Deze constanten kunnen sterk afwijken van de constanten die voor een onbelemmerde schroefstraal zijn bepaald. Voorzichtigheid is dus geboden met het toepassen van de verschillende formules en constanten.

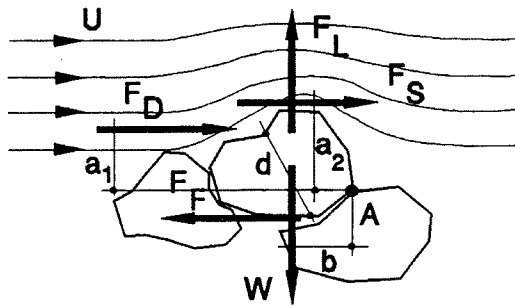
De stroomsnelheden die optreden op een talud zijn met behulp van de Nederlandse methode te berekenen. Met deze methode worden axiale stroomsnelheden uitgerekend. Bij de berekening van de steendiameter dient echter te worden aangenomen dat deze berekende axiale stroomsnelheid gelijk is aan de stroomsnelheid die optreedt over de steenlaag heen. Er wordt hierbij niets vermeldt over de richting van de stroming. Deze richting is van belang voor de stabiliteit van de steentjes. Als de stroming van het talud af is gericht, zijn de steentjes minder stabiel dan wanneer de stroming het talud op is gericht. De Nederlandse methode geeft dus een indicatie van de hoogte van de stroomsnelheden die ter plaatse van het talud optreden, maar niet meer.

2.3 Stabiliteit van stortsteen taludbescherming

Er zijn een aantal empirische relaties bekend die, aan de hand van de krachten op een steen in een uniforme stroming, de stabiliteit van een enkele steen bepalen. De meest bekende relaties zijn die van Shields (1936) en van Izbash. Deze relaties zullen worden beschreven.

2.3.1 Stabiliteit van een steen in een stroming

Allereerst zullen de krachten die op een steen in een stroming werken worden beschreven, zie Figuur 2-7.



Figuur 2-7: Krachten op een steentje door stroming.

Belasting

Sleepkracht : $F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w U_b^2 A_D$

Schuifkracht : $F_S = \frac{1}{2} C_F \rho_w U_b^2 A_S$

Liftkracht : $F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w U_b^2 A_L$

De belasting heeft derhalve de algemene vorm: $F \propto \rho_w U_b^2 D_{50}^2$

waarin:

D_{50} = mediane steendiameter [m],

ρ_w = dichtheid water [kg/m³],

U_b = stroomsnelheid ter plaatse van de bodem [m/s],

$C_{D,F,L}$ = constanten [-],

$A_{D,S,L}$ = oppervlakte van de steen waarop kracht werkt
(sleepkracht werkt bijvoorbeeld slechts op het deel van de steen dat boven omliggende stenen uitsteekt) [m²].

Sterkte

Gewicht onder water : $W = (\rho_s - \rho_w) g D_{50}^3$

Wrijvingskracht : $F_w = f * W$

waarin:

ρ_s = dichtheid steenmateriaal [kg/m³],

g = valversnelling [m/s²],

f = wrijvingscoëfficiënt [-].

In de stabiele situatie wordt aan horizontaal en verticaal evenwicht en momenten-evenwicht voldaan:

$$\begin{aligned} \Sigma H = 0 & : F_{D,S} = f * W \\ \Sigma V = 0 & : F_L = W \\ \Sigma M = 0 & : F_{D,S} * a = W * b \end{aligned}$$

De algemene vorm van het evenwicht is:

$$F \propto c * W$$

waarin c een onbekende constante is. Hieruit is de volgende evenredigheid te verkrijgen:

$$\rho_w U_b^2 D_{50}^2 \propto (\rho_s - \rho_w) g D_{50}^3$$

Dit leidt tot de volgende relatie voor de kritieke stroomsnelheid:

$$U_b^2 \Rightarrow \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) * g * D_{50} = \Delta * g * d \rightarrow U_b^2 = K * \Delta * g * D_{50} \quad (2-55)$$

met

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (2-56)$$

Hierin is K een empirisch te bepalen waarde. De relaties van Shields (1936) en Izbash zijn gebaseerd op deze relatie.

2.3.2 Stabiliteitsrelaties

Shields (1936)

Shields (1936) gebruikt de schuifkracht als de actieve kracht in de stabiliteitrelatie. Hij geeft een relatie tussen een dimensieloze schuifspanning en het Reynoldsgetal van het beschouwde deeltje. Het transport is acceptabel als de transportparameter onder een bepaalde kritieke waarde blijft.

De schuifkracht wordt bepaald met behulp van een schuifspanning, welke afhankelijk is van een bepaalde stroomsnelheid en de schuifspanningscoëfficiënt. Shields (1936) gaat uit van een volledig ontwikkelde grenslaag waarbij een logaritmischnelheidsprofiel optreedt. De gebruikte stroomsnelheid is de gemiddelde stroomsnelheid in het profiel. In de schroefstraal is weinig bekend over de ontwikkeling van een grenslaag bij contact met een steenlaag. Voorts is de invloed van de ruwheid op de optredende stroomsnelheden niet bekend. De stabiliteitsrelatie van Shields wordt derhalve niet toegepast in dit onderzoek.

Izbash

De Izbash-relatie is met name geschikt voor gevallen dat de stroomsnelheid bekend is, maar de relatie hiervan met de waterdiepte niet. Dit is het geval in de situatie van een

schroefstraal tegen een talud of over een bodem. Deze relatie gaat uit van het krachterevenwicht zoals het eerder is gegeven in combinatie met slechts één 'vuilnisbak' constante waarin alle aspecten die invloed hebben op de stabiliteit worden verwerkt. Voor iedere afwijkende situatie dient derhalve een nieuwe constante te worden bepaald. De steenlaag is stabiel als wordt voldaan aan het volgende stabiliteitscriterium:

$$\beta_{Iz} \geq \beta_{Iz,cr}$$

waarin:

$$\begin{aligned} \beta_{Iz} &= \text{stabiliteitsparameter van Izbash} & [-], \\ \beta_{Iz,cr} &= \text{kritieke stabiliteitsparameter} & [-]. \end{aligned}$$

De stabiliteitsparameter wordt als volgt berekend:

$$\beta_{Iz} = \frac{2 * g * \Delta * D_{50}}{U_b^2} \quad (2-57)$$

WL (1985)

Het WL (1985) hanteert de volgende, op Izbash gebaseerde, relatie:

$$\beta_{WL} \leq \beta_{WL,cr}$$

waarin:

$$\begin{aligned} \beta_{WL} &= \text{stabiliteitsparameter van WL} & [-], \\ \beta_{WL,cr} &= \text{kritieke stabiliteitsparameter} & [-], \end{aligned}$$

met

$$\beta_{WL} = \frac{U_b}{\sqrt{g * \Delta * D_{50}}} \quad (2-58)$$

Verband tussen parameters

Het verband tussen de parameters van Izbash en WL:

$$\beta_{Iz} = \frac{2}{\beta_{WL}^2} \quad (2-59)$$

Kritieke parameterwaarden

Onderstaand is een lijst gegeven van verschillende stabiliteitsparameters zoals die zijn bepaald door verschillende onderzoekers. Deze parameters zijn allemaal bepaald voor schroefstralen. De invloed van de turbulentie op de stabiliteit is in de stabiliteitsparameter opgenomen.

$$\beta_{WL,cr} \quad \beta_{WL} = 0,55 \quad \text{geen transport, WL (1985)}$$

$$\beta_{WL} = 0,70 \quad \text{gering transport, WL (1985)}$$

Deze waarden zijn bepaald voor een waterstraal opgewekt door een vrije schroef boven een horizontaal bed.

Voor een schroefstraal opgewekt door een boegschroef die loodrecht op een kademuur is gericht kwam Römisch (1993) op de volgende waarden:

$$\beta_{WL,cr} \quad \beta_{WL} = 1,2 \quad (\text{waarschijnlijk}) \text{ voor gering transport, wordt niet aangegeven.}$$

Blokland (1997) kwam voor dezelfde situatie op:

$$\begin{aligned} \beta_{Iz,cr} \quad \beta_{Iz,cr} &= 3,0 && \text{geen beweging toegestaan,} \\ \beta_{Iz,cr} &= 2,5 && \text{weinig beweging toegestaan.} \end{aligned}$$

In Tabel 2-2 zijn bovenstaande waarden omgerekend naar de stabiliteitsparameter van Izbash. Met deze waarden wordt de mediane diameter berekend, niet de nominale mediane diameter.

Tabel 2-2: Stabiliteitsparameters voor Izbash-formule.

Stabiliteitsparameter	Bepaald voor:	geen beweging	weinig beweging
Römisch (1993)	kademuur		1,4
WL (1985)	horizontaal bed	6,6	4,1
Blokland (1997)	kademuur	3,0	2,5

2.3.3 Talud en turbulentie

In de relatie van Izbash worden alle factoren die invloed hebben op de stabiliteit en die niet in de relatie voorkomen beschreven met één constante. Het is echter mogelijk om met behulp van correctiefactoren bepaalde invloeden in de stabiliteitsrelatie te verwerken. Zo is er een correctiefactor voor de invloed van een helling en voor de turbulentie.

Helling

De correctiefactor voor de invloed van de helling wordt hier gegeven om een indicatie te geven van de invloed van de helling op de stabiliteit. De coëfficiënt voor de helling m_h bij een stroming tegen het talud op is:

$$m_h = \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi + \alpha)} \quad (2-60)$$

voor een stroming van het talud af geldt:

$$m_h = \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi - \alpha)} \quad (2-61)$$

bij een stroming langs het talud geldt voor m_h :

$$m_h = \left[1 - \left(\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\varphi)} \right)^2 \right]^{-0.5} \quad (2-62)$$

waarin:

- α = hellingshoek van het talud [°],
- φ = hoek van inwendige wrijving van de stenen [°],
($\varphi \approx 40^\circ$ als $D_{50} \approx 1$ cm en $\varphi \approx 42^\circ$ als $D_{50} \geq 10$ cm).

Turbulentie

De invloed van de turbulentie kan op twee manieren in de stabiliteitsformule worden verwerkt. Ten eerste kan de turbulentie worden gekarakteriseerd met de correctiefactor K_V . Deze factor is een versterkingsfactor voor de belasting, de snelheid. De lokale stroomsnelheid wordt versterkt. Voorbeelden uit Schiereck (1998) zijn:

abrupt outflow : $K_V = 1,5$
 outflow with wing walls : $K_V = 1,3$

Het is ook mogelijk om de turbulentie-intensiteit te meten in de stroming. Een stroomsnelheid die op een bepaald moment optreedt kan namelijk als een totaal van de gemiddelde stroomsnelheid en de turbulente fluctuatie worden gezien:

$$U = \hat{U} + U' \quad (2-63)$$

waarin:

U = momentane stroomsnelheid [m/s],
 \hat{U} = tijdsgemiddelde stroomsnelheid [m/s],
 U' = turbulente fluctuatie [m/s].

Omdat het gemiddelde van de turbulente fluctuatie over de tijd nul oplevert, wordt vaak de turbulentie-intensiteit als maat voor de turbulente fluctuaties genomen. De turbulentie-intensiteit wordt gedefinieerd als de standaarddeviatie van de momentane stroomsnelheden:

$$I = \sqrt{\overline{(U')^2}} = \left[\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (U'^{(n)})^2 \right]^{1/2} \quad (2-64)$$

waarin:

I = turbulentie-intensiteit [m/s],
 N = aantal meetpunten [-].

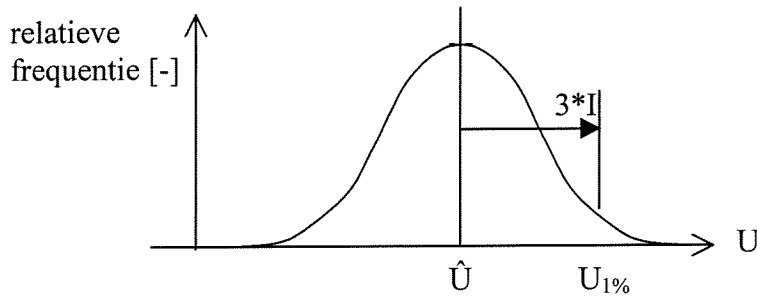
De relatieve turbulentie-intensiteit wordt vervolgens als volgt gedefinieerd:

$$r = I/\hat{U} \quad (2-65)$$

waarin:

r = relatieve turbulentie-intensiteit [-].

Indien de relatieve turbulentie-intensiteit bekend is, kan de turbulentie nauwkeuriger in de stabiliteitsrelatie worden meegenomen. In WL (1985) en Schiereck (1998) wordt beschreven dat aangenomen zou kunnen worden dat slechts de hoogste momentane stroomsnelheden die optreden zorgen voor instabiliteit van de stenen. Als wordt aangenomen dat de momentane stroomsnelheden normaal verdeeld zijn, dan kan met behulp van de standaarddeviatie een bepaalde stroomsnelheid worden gedefinieerd die met een bepaald overschrijdingspercentage optreedt. De standaarddeviatie van de momentane snelheidsverdeling is de turbulentie-intensiteit.



Figuur 2-8: Verdeling momentane stroomsnelheden volgens normale verdeling.

In WL (1985) en Schiereck (1998) wordt een overschrijdingspercentage van 1% genomen voor de grens waarboven de snelheden verantwoordelijk zijn voor de stabiliteit. Bij een normale verdeling treedt een maximale stroomsnelheid 1% van de tijd op als er bij de gemiddelde stroomsnelheid 3 keer de standaarddeviatie wordt opgeteld, zie Figuur 2-8 en hoofdstuk 4.5.2. Voor de maatgevende snelheid geldt derhalve:

$$U_{1\%} = \hat{U}(1 + 3r) \quad (2-66)$$

waarin:

$U_{1\%}$	= snelheid met overschrijdingskans 1%	[m/s],
\hat{U}	= gemiddelde stroomsnelheid	[m/s],
r	= relatieve turbulentie-intensiteit	[-].

De aangepaste stabiliteitsrelatie wordt dan:

$$\beta \geq \beta_{cr}$$

met:

$$\beta = \frac{2 * g * \Delta * D_{50}}{m_h * K_V^2 * U_b^2} \quad (2-67)$$

wat voor de ontwerpdiameter betekent:

$$D_{50} = \frac{\beta * K_V^2 * m_h * U_b^2}{2 * g * \Delta} \quad (2-68)$$

Indien de turbulentie intensiteit bekend is kan deze tevens in de Izbash-relatie worden verwerkt door de aangepaste stroomsnelheid te nemen in plaats van de kritieke:

$$D_{50} = \frac{\beta * m_h * U_b^2 * (1 + 3 * r)^2}{2 * g * \Delta} \quad (2-69)$$

2.3.4 Evaluatie

Voor het berekenen van de stabiliteit op het talud zal in dit onderzoek de formule van Izbash worden gebruikt. De reden hiervoor is de eenvoud in het gebruik van de relatie, met name omdat de stroomsnelheid eenvoudig te definiëren is. De correctiefactoren die zijn gegeven worden gebruikt in hoofdstuk 6 voor het analyseren van de stabiliteit bij een boegschroefstraal en bij een jet.

3 Modelopstelling

Om de doelstellingen die in hoofdstuk 1 zijn beschreven te bereiken zijn modelproeven uitgevoerd. De modelproeven bestaan uit stabiliteits- en snelheidsmetingen. In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk worden de afzonderlijke doelen van de metingen beschreven. Daarna wordt een ontwerp voor een modelopstelling gemaakt. Tot slot worden de metingen, die worden uitgevoerd in de modelopstelling, op een rijtje gezet.

3.1 Doelstellingen

Het primaire doel van dit onderzoek is om te bepalen hoe een boegschroefstraal mag worden gemodelleerd. Tijdens de literatuurstudie bleek dat onderzoekers voor het modelleren van schroefstralen soms een echte schroef en soms een jet gebruiken. Als een jet werd gebruikt, werd aangenomen dat deze jet hetzelfde snelheidsveld produceerde als een schroefstraal, althans op grote afstand achter de uitstroomopening. Volgens WL (1985) is de schroefstraal gelijk aan de jet op ongeveer $x/D_0 > 20$. In de situatie dat een schip langs een talud ligt is de afstand van de uitstroomopening tot het talud kleiner dan deze grens. Volgens WL (1985) komt derhalve de schroefstraal niet overeen met een jet in het onderzoeksgebied. Daarbij komt dat de rekenmodellen voor de stroomsnelheden in de jet en de schroefstraal niet goed met elkaar overeenkomen. Een reden om toch een jet te gebruiken in een model is de kosten. Het op schaalgrootte nabouwen van een boeg- of hoofdschroef kost meer geld dan het produceren van een jet. De vraag is echter of modelproeven met de goedkopere jet goed de prototypesituatie nabootsen.

In dit onderzoek wordt slechts bekeken of de boegschroefstraal kan worden gemodelleerd met een eenvoudige jet. Het is ook mogelijk om in de jet een schroef te plaatsen die door de stroming roteert. Op deze manier kan eventueel een betere modellering van de boegschroefstraal worden verkregen. Als men echter de moeite neemt om een schroef in de jet te plaatsen, dan is de stap klein om ook een aandrijving hierop aan te sluiten.

De vergelijking vindt plaats op basis van stabiliteitsmetingen. De reden van het uitvoeren van modelproeven is vaak om stabiliteitsmetingen te doen. Als de uitkomst van de stabiliteitsmetingen voor de boegschroefstraal en de jet niet overeenkomen is de jet niet geschikt om er een boegschroefstraal mee te modelleren.

Naast de stabiliteitsmetingen zijn tevens snelheidsmetingen uitgevoerd. Deze snelheidsmetingen dienen ter verduidelijking van de resultaten die tijdens de stabiliteitsmetingen zijn gevonden. Als uit de stabiliteitsmetingen blijkt dat de jet en de boegschroefstraal goed overeenkomen, kan dit eventueel worden verklaard aan de hand van de snelheidsmetingen. Dit geldt ook als de stabiliteitsmetingen niet overeenkomen.

Hierna zijn de afzonderlijke doelstellingen van de snelheids- en stabiliteitsmetingen beschreven.

Stabiliteitsmetingen

1. Vergelijken van de stabiliteit van het bed bij belasting door een boegschroefstraal en een jet.
2. Bepalen kritieke initiële stroomsnelheid waarbij begin van bewegen optreedt.
3. Het gedrag van het bed onderzoeken bij belasting door een boegschroefstraal en een jet.

Snelheidsmetingen

1. Rekenmodellen voor de stroomsnelheden in stralen toetsen.
2. Opstellen van een rekenmodel om de stroomsnelheid op het talud te kunnen voorspellen.
3. Verklaren van de verschillen dan wel overeenkomsten tussen de stabiliteitsmetingen van de jet en van de boegschroefstraal.

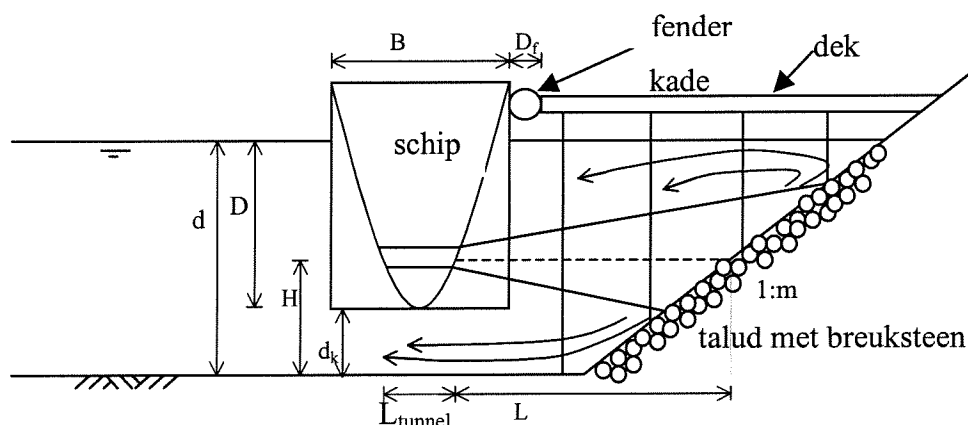
3.2 Achtergrond achter de opstelling

In dit onderzoek wordt gekeken naar de situatie dat een schip langs een kade ligt. Het schip gebruikt zijn boegschroef om weg te varen van de kade. De kade bestaat uit een dek op palen. Onder het dek op palen bevindt zich een talud, zie Figuur 3-1. In deze paragraaf zal worden beschreven hoe tot de modelopstelling is gekomen en welke aannamen hierbij gedaan zijn.

3.2.1 Prototypesituatie

In de prototypesituatie is een schip langs een kade gesitueerd en wordt een boegschroef gebruikt. De boegschroef wordt gebruikt voor afmeren of wegvaren. In dit onderzoek wordt de statische situatie bekeken dat het schip niet zijwaarts verplaatst, ondanks dat de boegschroef wordt gebruikt. Aangenomen wordt dat, wanneer het schip dicht langs de kade ligt, een grotere belasting optreedt door de boegschroef op het talud, dan wanneer het schip op enige afstand is van de kade. Er wordt zo gekeken naar de maximale belasting.

Het hoofddoel van dit onderzoek is het vergelijken van twee stralen. De twee stralen worden onder andere vergeleken aan de hand van de kritieke stroomsnelheid bij het begin van bewegen. Er wordt niet gekeken naar erosie, omdat wordt aangenomen dat erosie niet gewenst is op het talud. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een dek op palen zoals in Figuur 3-1. Reparatie van het talud is moeilijk door de aanwezigheid van het dek.



Figuur 3-1: Prototypesituatie met maten.

Hieronder worden de waarden gegeven van enkele afmetingen in de prototypesituatie zoals weergegeven in Figuur 3-1. Tevens zijn een aantal waarden weergegeven van aannamen met betrekking tot de boegschroefinstallatie, de optredende stroomsnelheden en de minimale benodigde steendiameter. Deze waarden worden geschaald gebruikt voor de modelsituatie.

Tabel 3-1: Maten in Figuur 3-1.

Grootheid	Symbol	Waarde
Waterdiepte	d [m]	12 ¹⁾
Taludhelling	m [-]	3 ²⁾
Fenderdikte	D_f [m]	1
Maximale breedte op de mal	B [m]	32 ³⁾
Diepgang schip	D [m]	11 ⁴⁾
Kielspeling	d_k [m]	1 ⁵⁾
Hoogte schroefas boven de bodem	H [m]	4 ⁶⁾
Lengte tunnel	L_{tunnel} [m]	6 ⁷⁾
Horizontale afstand van tunneleinde tot talud	L [m]	26
Diameter boegschroef	D_0 [m]	2,0 ⁸⁾
Geïnstalleerd vermogen van de boegschroef	P [kW]	1100 ⁹⁾
Aantal bladen van de schroef	z [-]	4 ¹⁰⁾
Toerental van de schroef	n [min^{-1}]	300 ⁹⁾
Stroomsnelheid direct achter de schroef, initiële stroomsnelheid	U_0 [m/s]	6,09 ¹¹⁾
Stroomsnelheid op het talud	$U_{\text{talud,max}}$ [m/s]	1,48 ¹¹⁾
Minimale mediane steendiameter	D_{50} [m]	0,22 ¹¹⁾

¹⁾ Volgt uit diepgang en kielspeling.

²⁾ Het PIANC(1997) geeft een aantal voorbeelden van een kade waarbij een dek op palen is gebruikt. In deze voorbeelden varieert de waarde van de hoek van het talud tussen 1:1.33 (Freeport, USA) en 1:2.6 (Freeport, USA).

³⁾ Standaardbreedte grotere containerschepen. Bron: Velsink, H, *Ports and Terminals*, Collegedictaat CTwa4330, februari 1997.

- 4) Is gemiddeld voor gebruikte scheepsafmetingen. Bron: Velsink, H, *Ports and Terminals*, Collegedictaat CTwa4330, februari 1997.
- 5) Minimale kielspeling.
- 6) Hoogte schroefas boven bodem is 4 meter (PIANC (1997): hoogte schroefas boven kiel=1,5*D₀).
- 7) Blokland (1997) geeft een waarde van 4 tot 6 meter, PIANC (1997) geeft een richtlijn van 29% van de maximale breedte op de mal.
- 8) Hoort bij een containerschip met DWT 30.000 volgens PIANC (1997).
- 9) Naar verhouding met twee voorbeelden: WD Fairway heeft een boegschroef met D_p=2,25m, P=1400 kW en n=265min⁻¹, de HAM310 heeft een boegschroef met D_p=1,55m, P=530 kW en n=365min⁻¹. In verhouding met D_p=2,0
- 10) Vaak vier bladen, als concreet voorbeeld de boegschroef van de TSHD WD Fairway.
- 11) Berekend met behulp van Nederlandse methode, zie Bijlage 3.1.

3.2.2 Schaling

Als een prototypesituatie in een model wordt nageemaakt is het van belang dat de processen in het model goed de relevante processen in het prototype weergeven. Om dit te bereiken is geometrische, kinematische en dynamische gelijkvormigheid nodig. De volgende grootheden worden gebruikt:

lengtematen: d, D_f, B, D, k, H, L_{tunnel}, L, D₀, D_{n,50}, D₅₀,

snelheden: U₀, U_{talud,max},

overige: g, Δ, m, z, P, n.

Geometrische gelijkvormigheid

Het model wordt horizontaal en verticaal gelijk geschaald. De geometrische schaal die op het model wordt toegepast is 1 op 25. Deze schaal levert hanteerbare afmetingen voor de diameter van de schroef, voor de opening en voor de afmetingen van een bassin van de modelopstelling. Om geometrische gelijkvormigheid te verkrijgen worden alle lengtematen met 1 op 25 verschaald, behalve D₀, L_{tunnel} en H, zie bijschrift bij Tabel 3-2.

Dynamische gelijkvormigheid

Dynamische gelijkvormigheid wordt bereikt door te voldoen aan de schaalregel van Froude en door het minimaliseren van viskeuze schaaffecten. Dit laatste wordt bereikt door een voldoende groot Reynoldsgetal.

De schaalregel van Froude stelt dat overeenkomstige punten in model en prototype een gelijk Froudegetal moeten hebben. Het Froudegetal is:

$$Fr = \frac{U^2}{g * L} \quad (3-1)$$

waarin:

Fr = Froudegetal [-],
U = karakteristieke stroomsnelheid [m/s],
L = karakteristieke lengte [m].

Er wordt voldaan aan de schaalregel van Froude als $Fr=1$. In dat geval geldt dat:

$$\frac{U_p^2}{g * L_p} = \frac{U_m^2}{g * L_m} \quad (3-2)$$

waaruit volgt:

$$\frac{U_p^2}{U_m^2} = \frac{L_p}{L_m} \quad (3-3)$$

Omdat de grootte in prototype gedeeld door de grootte in model de schaal is, geldt:

$$n_U = (n_L)^{0,5} \quad (3-4)$$

waarin:

$U_{P,M}$	= karakteristieke stroomsnelheid in prototype of model	[m/s],
$L_{P,M}$	= karakteristieke lengte in prototype of model	[m],
$n_{U,L}$	= schaal van snelheden of lengtes	[-].

Dit houdt in dat, wanneer de schaal van de lengte 1 op 25 is, de schaal van de snelheid, bij $Fr=1$, 1 op $(25)^{0,5}$ is. Deze schaal voor de snelheid geldt voor de initiële stroomsnelheid (U_0) en de snelheid in de as van de straal ter plaatse van het talud ($U_{L,0}$). Verder kan worden gezegd dat de valversnelling (g) niet geschaald wordt. Verder worden de volgende dimensieloze grootheden niet geschaald: de relatieve dichtheid van de stenen onder water (Δ), de taludhelling (m) en het aantal bladen (z). Door bovengenoemde schalen aan te nemen voor de lengte en de stroomsnelheid kan, met behulp van de formules (2-19) en (2-14) respectievelijk, de schaal van het vermogen (P) en het toerental (n) worden bepaald. Dit resulteert in de schaal voor het toerental van 1 op $(25)^{-0,5}$ en voor het vermogen van 1 op $(25)^{3,5}$.

In de prototypesituatie is de stroming turbulent, zie WL (1985). Om de prototypesituatie goed te modelleren dient de stroming in het model tevens turbulent te zijn. Ten eerste dient de straal turbulent te zijn. Dit wordt aangegeven door het Reynoldsgetal van de straal. Ten tweede dient de stroming over en door de taludbekleding turbulent te zijn. Dit wordt aangegeven door het Reynoldsgetal van de stroming over de stortsteenlaag.

- Het Reynoldsgetal van de straal:

$$R_0 = \frac{U_0 * D_0}{\nu} \quad (3-5)$$

waarin:

ν = kinematische viscositeit ($=1,33*10^{-6}m^2/s$).

Turbulent indien: $R_0 > 1000-2000$ Schiereck(1998)

$R_0 > 2500$ Bok(1996)

$R_0 > 3000$ WL(1985)

- Het Reynoldsgetal van de stroming over en door de stortsteenlaag:

$$R_e = \frac{U_b * D_{n,50}}{\nu} \quad (3-6)$$

waarin:

U_b = bodemstroomsnelheid [m/s].

Voor het Reynoldsgetal van de stroming over en door de stortsteenlaag gelden dezelfde grenzen als voor het Reynoldsgetal voor de straal.

3.2.3 Modelsituatie

De waarden van de maten zoals die zijn gegeven in de prototypesituatie worden geschaald tot de modelsituatie. De in Tabel 3-1 aangegeven prototypewaarden zijn geschaald in Tabel 3-2 weergegeven. Hierbij is uitgegaan van een geometrische schaling van 1 op 25. Door het gebruik van deze schaling is het mogelijk de modelopstelling in de 2 meter goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica te bouwen.

Er werd echter betwijfeld of er voldoende beweging bij de berekende steentjes, bij een geometrische schaling van 1 op 25, zou optreden. Besloten is om een grotere diameter voor de boegschroef, dan volgens de schaalregels nodig is, te gebruiken. Voor de boegschroef is een schaal van 1 op 20 gebruikt, zie ²⁾ in Tabel 3-2. De verhouding tussen de schroefdiameter en de tunnel is wel gelijk gehouden. De maximale stroomsnelheid op het talud is niet door schaling verkregen, maar door de berekening uit te voeren met behulp van de modelmaten, zie Bijlage 3.1. De gebruikte steentjes zijn wel volgens de schaalregels berekend. De afmetingen en de configuratie van de opstelling zijn in Bijlage 3.5 gegeven.

Tabel 3-2: Maten in modelopstelling volgens Figuur 3-1.

Grootheid	Symbol	Schaling	Waarde
Waterdiepte	d [m]	1:(25) ¹	0,48
Taludhelling	m [-]		3
Fenderdikte	D_f [m]	1:(25) ¹	0,04
Maximale breedte op de mal	B [m]	1:(25) ¹	1,28
Diepgang schip	D [m]	1:(25) ¹	0,44
Kielspeling	d_k [m]	1:(25) ¹	0,04
Hoogte schroefas boven de bodem	H [m]		0,19 ¹⁾
Lengte tunnel	L_{tunnel} [m]	1:(20) ¹	0,30 ²⁾
Horizontale afstand van tunneleinde tot talud	L [m]	1:(25) ¹	1,16
Diameter boegschroef	D_0 [m]	1:(20) ¹	0,10 ²⁾
Geïnstalleerd vermogen van de boegschroef	P [W]	1:(25) ^{3,5}	30,7
Aantal bladen van de schroef	z [-]		4
Toerental van de schroef	n [min ⁻¹]	1:(25) ^{-0,5}	1342
Stroomsnelheid direct achter de schroef, initiële stroomsnelheid	U_0 [m/s]		1,36 ⁴⁾
Stroomsnelheid op het talud	$U_{\text{talud,max}}$ [m/s]		0,43 ⁴⁾
Minimale mediane steendiameter	D_{50} [mm]	1:(25) ¹	8,4 ³⁾

¹⁾ Volgt uit diameter met een andere schaling en een kielspeling met normale schaling. $((1,5 \cdot 0,10) + 0,04) = 0,19$.

³⁾ Indien de mediane diameter eenvoudigweg zou worden geschaald, dan zou een

D_{50} van 8,8 mm nodig zijn. Er wordt een steengradering met een mediane diameter van 8,4 mm gebruikt, omdat deze voorhanden was.

4) Zie Bijlage 3.1.

Door de waarden uit Tabel 3-2 in (3-5) en (3-6) in te vullen, zijn de volgende Reynoldsgetallen te berekenen:

boegschroefstraal:	R_0	$=1,2*10^5$	$>3*10^3$,
stroming over steentjes:	Re	$=3,2*10^3$	$>3*10^3$.

De Reynoldsgetallen in de straal en in de stroming over de steentjes zijn groter dan de grens waarboven de stroming turbulent is. In combinatie met de schaalregel van Froude kan worden aangenomen dat de processen in de prototype- en modelsituatie dynamisch gelijkvormig zijn.

3.3 Modelopstelling

De modelopstelling is gebouwd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

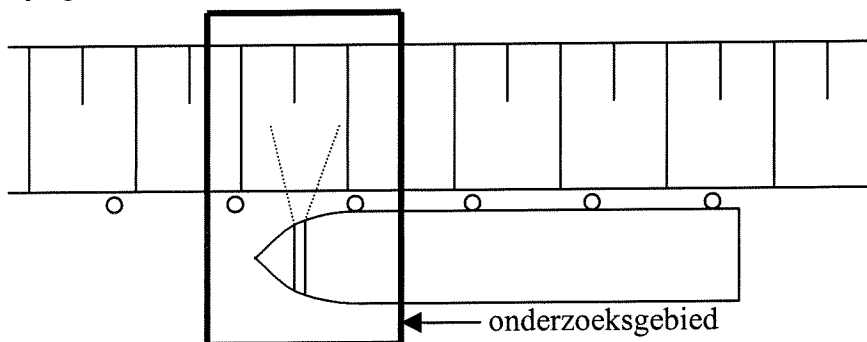
Indien de volledige prototypesituatie zou worden nagebouwd in een model zou een erg groot model nodig zijn. Om een hanteerbaar model te maken dient een afbakening te worden gemaakt van de prototypesituatie. Er moet een keuze worden gemaakt wat in het model moet worden meegenomen en wat weggelaten kan worden.

3.3.1 Afbakening model

Om een bruikbaar model te maken van de prototypesituatie zijn een tweetal aannames gemaakt. Deze aannames betreffen het afbakenen van het gebied in de prototypesituatie dat wordt bekeken en de invloed van de scheepsvorm in het model.

Afbakening onderzoeksgebied

Van de prototypesituatie is alleen de voorkant van het schip van belang. Hier is de boegschroefinstallatie gesitueerd. In het model zullen een sectie van het schip en het talud worden gemodelleerd, zie Figuur 3-2. De breedte van het bekeken gebied wordt zo klein mogelijk genomen. Dit wordt in de volgende sectie besproken.



Figuur 3-2: Afbakening onderzoeksgebied.

In de prototypesituatie zijn naast het schip tevens een talud, een bodem en een dek op palen aanwezig. Op het talud en de bodem wordt later teruggekomen. Het dek op palen heeft invloed op de stabiliteit van de breuksteen bescherming op het talud. Ten eerste omdat de stenen die direct tegen de paal liggen minder haakweerstand hebben aan de rand van de steenlaag met de paal. Daarnaast zorgt de aanwezigheid van de paal voor verergering van de belasting door hogere stroomsnelheden door blokkering en extra turbulentie. Dit wordt echter buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Dit zou bij een vervolgonderzoek aan bod kunnen komen.

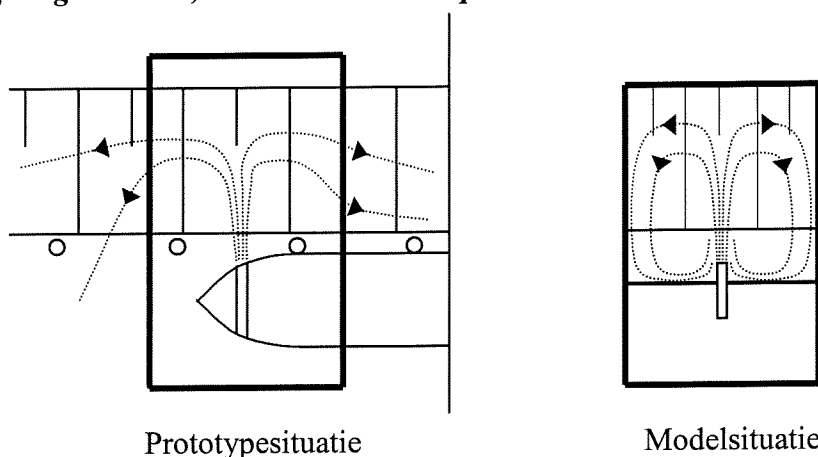
Scheepsvorm

Een boegschroef is altijd voor in een schip gesitueerd. Hier kan de boegschroef het grootste moment leveren om het schip te draaien. De voorkant van een schip heeft een ingewikkelde vorm. De vorm van het schip kan invloed hebben op de afstroom van het water nadat het de boegschroef heeft verlaten en het talud heeft geraakt. Het doel van dit onderzoek is echter niet om een rekenmodel op te stellen om berekeningen voor de prototypesituatie te doen. Er wordt in dit onderzoek gekeken naar hoe een boegschroefstraal kan worden gemodelleerd. Hierbij blijft de invloed van de rompvorm van een schip nog buiten beschouwing. Daarom is de romp van het schip in de modelopstelling gemodelleerd door een vertikaal schot.

3.3.2 Aandachtspunten van de opstelling

Naast de aannamen in de vorige sectie zijn nog een aantal overige aannamen gedaan om een model te kunnen maken. Deze aannamen en aandachtspunten worden hier opgesomd.

Stroming langs de kade, tussen kade en schip



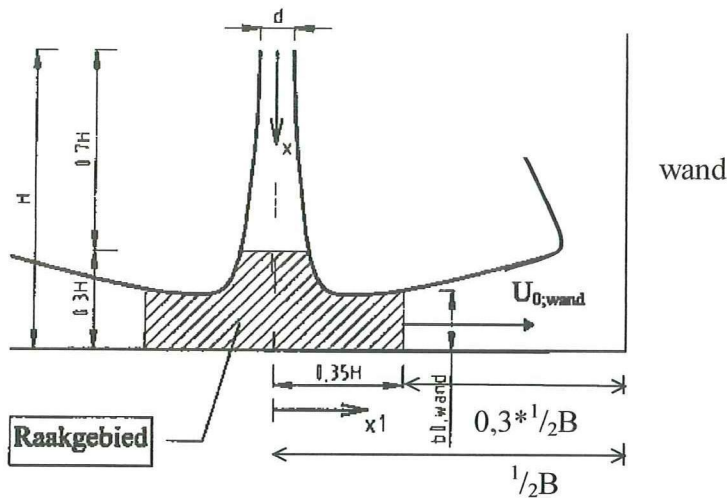
Figuur 3-3: Stroming in prototypesituatie vergeleken met modelsituatie

In de prototypesituatie ligt een schip langs een kade. Water dat door de boegschroef richting het talud wordt gestuurd komt van de andere kant van het schip. De aanvoer van het water heeft dus geen invloed op wat aan de taludkant van het schip gebeurt. Nadat het water via de boegschroeftunnel naar het talud is gestuurd zal het wegstromen tussen het talud en het schip en eventueel onder het schip door. In de modelsituatie is dit echter niet mogelijk. Omdat niet een heel schip wordt nagebouwd, maar slechts een sectie, kan het

water niet vrij wegstromen, zie Figuur 3-3. Er zal circulatie optreden in de bak. Om deze circulatie te beperken wordt het water dat wordt geïntroduceerd in de stroombak, via overlaten aan de zijkanten afgevoerd.

Minimale breedte van de bak

Beltaos (1976) geeft aan dat bij een loodrecht invallende luchtstraal het raakgebied op $H \cdot 0,3$ begint, zie Figuur 3-4. Voor een schatting van de minimale breedte van de bak wordt hier aangenomen dat dit ook geldt voor een schuin invallende waterstraal. Op $H \cdot 0,3$ begint de invloed van de wand op de stroomsnelheden in de straal. Nadat de straal in het raakgebied naar alle richtingen langs de wand is afgebogen ontstaat de wandstraal.



Figuur 3-4: Invloed wand op straal. (Beltaos (1976))

De wandstraal begint op $x_1/H=0,35$. In dit geval begint de wandstraal op $r=0,3m$. Als, in de modelopstelling, de straal in het raakgebied is afgebogen, ontstaat een wandstraal die alzijdig langs het talud is gericht. De bak moet minimaal zo breed zijn dat het raakgebied van de alzijdige wandstraal niet overlapt met het raakgebied van de straal. Het raakgebied van de straal is namelijk het gebied waarin de steentjes worden verplaatst. De invloed van de aanwezigheid van de wand mag bij voorkeur niet in het raakgebied van de straal doorwerken. In Figuur 3-4 is te zien dat de minimale breedte van de bak, B, gelijk moet zijn aan de afstand van het begin van de straal tot het vlak, H. De afstand van de uitstroomopening tot het talud is in de opstelling 1,16 m, dus de minimale breedte van de bak is 1,16 m. In de modelopstelling is de breedte van de bak 2 m. Er hoeft geen invloed van de wanden van de bak te worden verwacht op de optredende stroomsnelheden in het raakgebied.

Schroef

In het model is gebruik gemaakt van een messing 'speelgoed'-schroef, gebruikt in modelbouwbootjes. Het betreft de volgende schroef:

- merk: Raboesch
- type: 167-31 R M5
- diameter: 100 mm

Pomp

Voor de jetstraal is het watercirculatiesysteem van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica gebruikt. De druk in het systeem wordt constante gehouden. Aangenomen mag worden dat er een constante initiële stroomsnelheid uit de uitstroomopening komt. De laatste bocht in de aanvoerbuis zit minimaal 8 diameters voor de uitstroomopening, hierdoor mag worden aangenomen dat er geen invloed van de bocht op de verdeling van de stroomsnelheden in de uitstroomopening is.

Tunnel / Uitstroomopening jetstraal

De tunnel heeft een diameter van 10,3 cm. De reden hiervoor is dat de diameter van de tunnel groter moet zijn dan die van de schroef, omdat de schroef anders niet vrij kan draaien. Daarnaast was een PVC buis met deze diameter eenvoudig te verkrijgen. Een tunnel in de prototypesituatie heeft gestroomlijnde ingangen en eventueel een rooster in de opening. Omdat het een eenvoudig model betreft zijn de ingangen van de tunnel niet gestroomlijnd en is geen rooster geplaatst.



Figuur 3-5: Stroombak met uitstroomopening, steenlaag op bodem en talud.

Indien in een model gebruik wordt gemaakt van een jet om een boegschroefstraal te modelleren, zou de meest logische werkwijze zijn om de initiële diameter van de jet gelijk te houden aan de diameter van de tunnel van de boegschroef. In de opstelling is, voor de metingen met de jet, de schroef verwijderd en is het watercirculatiesysteem van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica aangesloten op de PVC-buis die tevens dienst doet als tunnel voor de boegschroef. Op deze manier is naast de diameter tevens de ruimtelijke plaats van de uitstroomopening gelijk gehouden voor de jet en de boegschroefstraal.

Aanvoerbak

Het water dat de stroombak wordt ingepompt bij de metingen met de boegschroef, komt uit de aanvoerbak. Het niveau van de aanvoerbak moet gelijk gehouden worden aan het

niveau van de stroombak, omdat anders ongewenste stroming door de tunnel ontstaat die niet is opgewekt door de schroef. Er wordt meer water in de aanvoerbak gepompt dan de schroef de stroombak inpompt. Het overtollige water stroomt over overlaten weg. Deze overlaten hebben alle dezelfde hoogte en zorgen ervoor dat het niveau van het water constant blijft. In de ideale situatie zou het water dat de aanvoerbak in wordt gepompt geen energie meer hebben zodra het in de bak zit. Stroming in de aanvoerbak zou tevens ongewenste stroming door de tunnel tot gevolg kunnen hebben. Het water wordt in een hoek in de aanvoerbak gepompt. De opening van de aanvoerpijp is omringd door stenen blokken om de stroming zo veel mogelijk te verspreiden.

Talud

Op de plaat die als talud dient wordt een laag steentjes in een laagje beton vastgezet. Deze laag heeft als doel voldoende ruwheid te bieden voor de steentjes die op het talud voor de stabiliteitsmetingen worden gebruikt. Bij een te lage ruwheid van het talud glijden de steentjes van het talud af. Daarnaast zorgt de laag voor een ruwheid van het talud, gelijk aan de ruwheid van de steenlaag, tijdens de snelheidsmetingen.

Bodem

Op de bodem worden dezelfde steentjes aangebracht als op het talud, nadat tijdens de stabiliteitsmetingen bleek dat progressief falen optreedt aan de grens van het talud met de bodem. Tijdens een test met een losse steenlaag voor het talud trad dit faalmechanisme niet op. Omdat over het algemeen een bodembescherming voor het talud aanwezig is in de praktijk, is besloten om op de bodem een laag steentjes aan te brengen voor het talud. Omdat niet wordt onderzocht wat de invloed is van de boegschroefstraal op de bodembescherming, is besloten om de steentjes op de bodem te fixeren met cement.

Steenlaag

Voor de stabiliteitsmetingen is het van belang om visueel te kunnen bepalen hoeveel, waarvandaan en waarheen steentjes bewegen. Om te kunnen zien of een steentje is verplaatst, zijn de steentjes gekleurd en in vakjes aangebracht, zie Figuur 3-6. Ieder vakje heeft een afmeting van 5 x 5 cm. Dit is praktisch gezien de kleinste afmeting van een vakje. Kleinere vakjes zouden enerzijds te veel werk zijn om alle steentjes na een stabiliteitsmeting weer terug te leggen, anderzijds zou het niet bevorderlijk zijn voor het visueel bepalen van de verplaatsingen. In totaal zijn er 15x12 vakjes aangebracht. De totale afmeting van het meetvlak is derhalve 0,75x0,60m. De laag is ongeveer 3 steendiameters dik. Er zijn negen verschillende kleuren gebruikt.

Zoals in Figuur 3-6 te zien is, zijn slechts op een beperkt deel van het talud vierkantjes aangebracht. Bij proeven gedaan voor het aanbrengen van de vierkantjes bleek dat slechts in een beperkt deel van het talud steentjes bewogen.



Figuur 3-6: Vierkantjes met gekleurde steentjes op talud.

Stenen

Voor de zeefkromme van de gebruikte steentjes, zie Bijlage 3.2. De steentjes zijn geverfd met latex verf. Aangenomen wordt dat dit de metingen niet beïnvloedt.

3.4 Meetprogramma

De metingen bestaan uit stabiliteits- en snelheidsmetingen. In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk zijn reeds de doelstellingen van de metingen besproken. Hier wordt in algemene lijn beschreven wat wordt gemeten. In hoofdstukken 4 en 5 worden de metingen in detail beschreven.

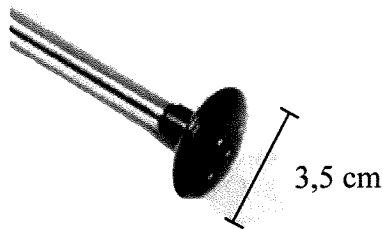
Het doel van dit onderzoek is het vergelijken van de stabiliteit van een stortstenen talud bij twee verschillende belastingen. Deze twee belastingen worden gevormd door twee verschillende waterstralen, de boegschroefstraal en de jet. Er worden snelheidsmetingen en stabiliteitsmetingen uitgevoerd waarbij een boegschroefstraal in de opstelling wordt opgewekt alsmede een jet.

3.4.1 Metingen met de boegschroefstraal

Snelheidsmetingen

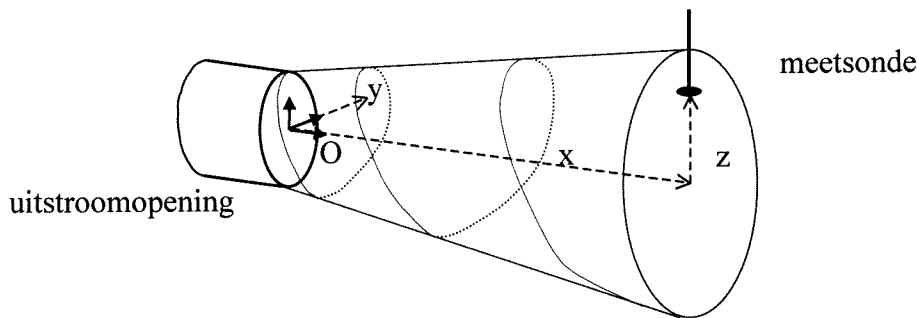
Voor de boegschroefstraal worden stabiliteitsmetingen uitgevoerd waarbij de belasting in stappen wordt verhoogd en het aantal verplaatste steentjes wordt bepaald. De stroomsnelheid in de boegschroefstraal, die de belasting vormt, is afhankelijk van de initiële stroomsnelheid. De initiële stroomsnelheid wordt geregeld aan de hand van het toerental van de schroef. De initiële stroomsnelheid is dus niet direct te regelen. Uit

formule (2-17) blijkt dat er een lineair verband is tussen het toerental van de schroef en de initiële stroomsnelheid. De verhouding van dit verband wordt bepaald door de stuwkrachtscoëfficiënt k_t . De waarde van k_t is echter per schroef verschillend en deze is onbekend voor de gebruikte schroef. Om de waarde van k_t te bepalen moet bij een aantal toerentallen de initiële stroomsnelheid worden bepaald. De stroomsnelheid in de uitstroomopening van de tunnel van de boegschroef is echter niet uniform. De initiële stroomsnelheid is daarom niet te bepalen aan de hand van slechts één meetpunt.



Figuur 3-7: EMS sonde.

In hoofdstuk 4.1 wordt beschreven dat er slechts in een verticaal vlak door de as van de straal kan worden gemeten. Tevens kan niet in de uitstroomopening zelf worden gemeten, omdat de relatief grote meetsonde, zie Figuur 3-7, dan de stroming te veel blokkeert. Er wordt in 21 punten in verticale lijn door de as van de straal op 10 centimeter achter de uitstroomopening gemeten.



Figuur 3-8: Assenstelsel voor de locatie van de meetpunten.

Aan de hand van het assenstelsel in Figuur 3-8 worden hieronder de coördinaten van de meetpunten gegeven:

$$(x,y,z) = (10,0,[10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,0,-1,-2,-3,-4,-5,-6,-7,-8,-9,-10]) \quad [\text{cm}],$$

Dit wordt gedaan voor de volgende vier toerentallen:

$$n = (750, 922, 1095, 1280) \quad [\text{min}^{-1}].$$

Met behulp van de gevonden snelheidsprofielen wordt per toerental een initiële stroomsnelheid berekend.

Voor de berekening van de stroomsnelheden in een boegschroefstraal is slechts het rekenmodel van Schmidt (1998) beschikbaar. Dit rekenmodel is echter alleen toepasbaar op een situatie met een kademuur. Om een goed beeld te krijgen van de stroomsnelheden in de boegschroefstraal wordt in een groot aantal punten de stroomsnelheid gemeten:

$$(x,y,z) = ([10,20,30,40,50,60,70],0,[-14,-10,-8,-6,-4,-2,0,2,4,6,8,10,20]) \quad [\text{cm}].$$

Dit is gedaan bij slechts één initiële stroomsnelheid van 1,50 m/s.

Stabiliteitsmetingen

Het doel van de stabiliteitsmetingen met de boegschroefstraal is het vinden van de relatie tussen de initiële stroomsnelheid en het aantal verplaatste steentjes. Om deze relatie te vinden is de initiële stroomsnelheid van de boegschroefstraal stapsgewijs verhoogd en is bij iedere stap bepaald hoeveel steentjes waren verplaatst. De volgende stroomsnelheden zijn gebruikt:

Tabel 3-3: Initiële stroomsnelheden per stap, boegschroefstraal.

stap	initiële stroomsnelheid [m/s]
1	0,16
2	0,22
3	0,28
4	0,34
5	0,41
6	0,47
7	0,53
8	0,59
9	0,65
10	0,72
11	0,78
12	0,84
13	0,90

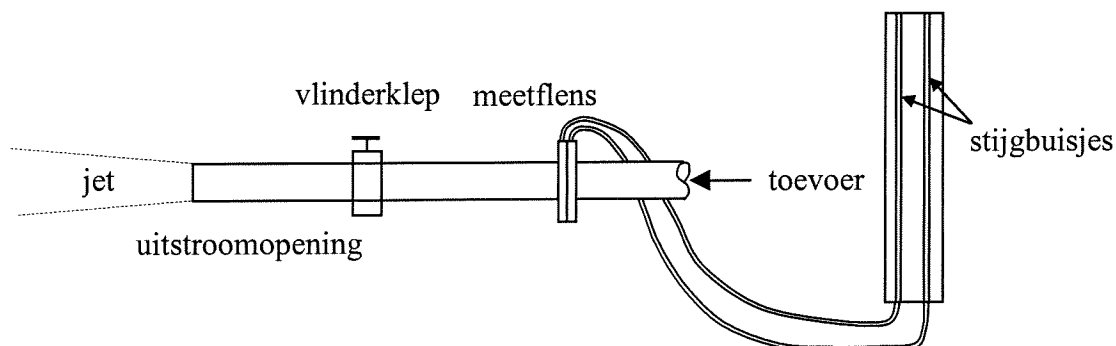
De stappen worden opeenvolgend gedaan en de verplaatste steentjes worden niet teruggelegd tussen een stap. Het hele proces wordt 10 keer herhaald waartussen de steentjes wel worden teruggelegd. Het aantal verplaatste steentjes wordt bijgehouden door te noteren waarvandaan en waarheen de steentjes bewegen.

3.4.2 Metingen met de jet

Snelheidsmetingen

Bij de snelheidsmetingen kan de stroomsnelheid wel direct worden geregeld. Het debiet dat door de pijp stroomde kan door middel van een vlinderklep worden ingesteld, zie Figuur 3-9. Het debiet dat door de pijp stroomt kan worden bepaald met behulp van een meetflens. Bij de meetflens is een calibratiecurve geleverd. Deze calibratiecurve geeft een verband tussen het debiet dat door de buis heen stroomt en het stijghoogteverschil in

de stijgbuisjes. Er wordt bij vier verschillende stijghoogteverschillen in 17 punten de stroomsnelheid gemeten. De initiële stroomsnelheid wordt, per stijghoogteverschil, berekend aan de hand van deze meetpunten. In combinatie met de calibratiecurve kan hiermee de berekeningsmethode van de initiële stroomsnelheid worden getoetst. Deze berekeningsmethode is beschreven in hoofdstuk 4.



Figuur 3-9: Regeling initiële stroomsnelheid jet.

De vier stijghoogteverschillen (wk) zijn:

$$wk = (10,20,30,40) \quad [\text{cm}].$$

De coördinaten van de meetpunten voor de bepaling van de initiële stroomsnelheid zijn:

$$(x,y,z) = (10,0,[8,7,6,5,4,3,2,1,0,-1,-2,-3,-4,-5,-6,-7,-8]) \quad [\text{cm}].$$

Voor de stroomsnelheden in de jet zijn, in tegenstelling tot de boegschroefstraal, wel formules beschikbaar. Desondanks zijn de snelheden tevens in de jet uitvoerig gemeten. Er is in dezelfde punten gemeten als bij de boegschroefstraal. De metingen zijn gedaan bij slechts één initiële stroomsnelheid van 0,97 m/s.

Stabiliteitsmetingen

De stabiliteitsmetingen met behulp van de jet zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als in de situatie met de boegschroefstraal. De initiële stroomsnelheden in Tabel 3-4 zijn gebruikt voor de verschillende stappen.

Tabel 3-4: Initiële stroomsnelheden per stap, jet.

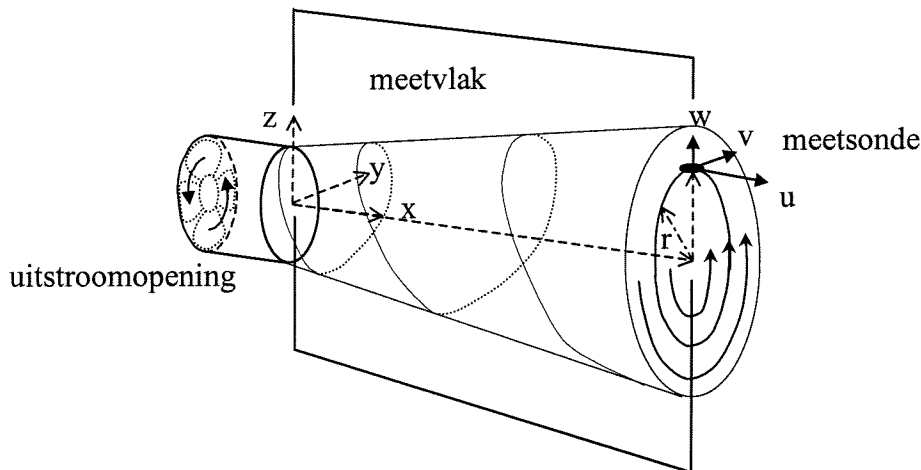
stap	initiële stroom- snelheid [m/s]	stap	initiële stroom- snelheid [m/s]
1	0,47	9	0,78
2	0,51	10	0,82
3	0,55	11	0,85
4	0,59	12	0,88
5	0,62	13	0,92
6	0,66	14	0,96
7	0,70	15	0,99
8	0,74		

4 Snelheidsmetingen en analyse

De stroomsnelheden in de stralen zijn op een groot aantal punten gemeten. Aan de hand van de gemeten snelheidsprofielen zijn de in de literatuur gevonden modellen voor de stroomsnelheden te verifiëren. De verschillen of overeenkomsten in de stroomsnelheden tussen de boegschroefstraal en de jet kunnen een verklaring geven voor de gevonden verschillen dan wel overeenkomsten die in de stabiliteitsproeven met de verschillende stralen naar voren komen. Naast de gemeten gemiddelde snelheden worden tevens de gemeten turbulentie-intensiteiten beschreven.

4.1 Assenstelsel

Om de locatie van de punten waar is gemeten en de richting van de componenten van het snelheidsveld aan te kunnen geven is gebruik gemaakt van een Cartesiaans assenstelsel. De locatie van de oorsprong en de richting zoals die zijn gebruikt zijn weergegeven in Figuur 4-1. Tevens is weergegeven welke snelheidscomponenten in een bepaald punt in de straal aanwezig zijn. In de boegschroefstraal veroorzaakt de schroef, naast een axiale snelheidscomponent, tevens een tangentiële component en een radiale component. De tangentiële en radiale component worden veroorzaakt door de draaiende beweging van de schroef. In de jet is voornamelijk een axiale component aanwezig. Omdat de jet divergeert, is ook een radiale component aanwezig.

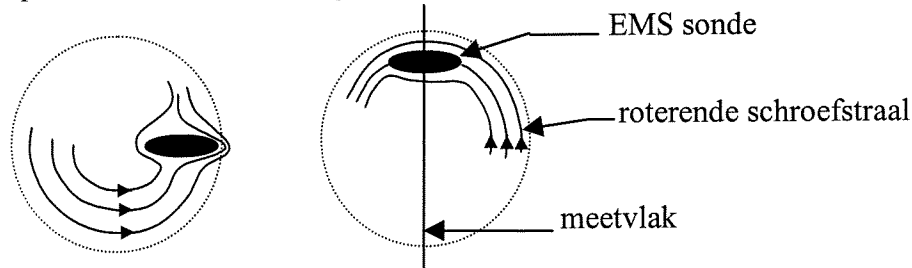


Figuur 4-1: Assenstelsel voor de stroomsnelheidsmetingen.

De meetsonde heeft een schijfvorm met een diameter van 3,5 cm. Indien de te meten stroming niet in het vlak van de schijf plaats vindt, ontstaat een onnauwkeurigheid. De meetsonde kan tevens slechts in een horizontaal vlak worden geplaatst. In Figuur 4-2 is te zien dat verkeerde positionering van de sonde een grote verstoring in de stroming veroorzaakt. Om dit te voorkomen is tijdens de meting in een vertikaal vlak door de as van de straal gemeten. De radiale snelheidscomponent ligt niet in het vlak van de schijf.

Deze component is derhalve niet gemeten. Zoals in sectie 4.2.4 wordt beschreven, kan worden aangenomen dat deze component te verwaarlozen is.

De stroomsnelheden zijn gemeten met een EMS (Electro-Magnetische Snelheidsmeter). Met de EMS kunnen twee snelheidscomponenten, die in het vlak van de meetsonde liggen, worden gemeten. Tijdens de snelheidsmetingen zijn de snelheidscomponenten u en v gemeten. Deze componenten komen, in het vlak waarin is gemeten, overeen met respectievelijk de axiale en de tangentiële snelheidscomponent. De radiale snelheidscomponent kon niet worden gemeten.

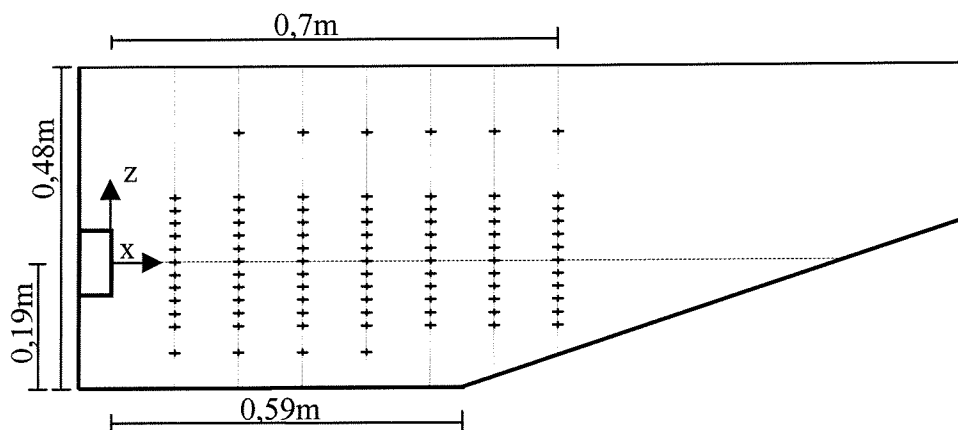


Figuur 4-2: Doorsnede schroefstraal: verstoring veroorzaakt door EMS sonde.

De stroomsnelheid is in een groot aantal punten gemeten om een goed beeld te krijgen van de straal. In Figuur 4-3 zijn de meetpunten in het meetvlak weergegeven. De meetpunten bevinden zich op de volgende coördinaten, in cm:

$$(x, z) = ((10,20,30,40,50,60,70), (-14,-10,-8,-6,-4,-2,0,2,4,6,8,10,20))$$

met uitzondering van de volgende punten: $(x,z)=(10,20),(50,-14),(60,-14),(70,-14)$.



Figuur 4-3: Locatie van de meetpunten.

De snelheden zijn tot maximaal 0,7 m achter de uitstroomopening gemeten. Er is bewust voor gekozen om een gat tussen de snelheidsmetingen en het talud te laten. Het doel van dit onderzoek is niet het in detail onderzoeken van de optredende stroomsnelheden nabij het talud. Hiervoor is het meetinstrument ook niet geschikt.

4.2 Stroomsnelheden in de boegschroefstraal

In dit onderdeel zal worden gekeken hoe de gemeten snelheden in de boegschroefstraal overeenkomen met de in de literatuur gepresenteerde rekenmodellen van de stroomsnelheden in een schroefstraal. In de literatuur zijn de stralen gekenmerkt door een bepaald aantal constanten. Dit is hier ook geprobeerd. Deze constanten worden in de straalformule gebruikt om de stroomsnelheden in de straal te kunnen berekenen.

De verkregen beschrijving van de boegschroefstraal zal worden gebruikt om een schatting te maken van de op de helling optredende stroomsnelheden.

4.2.1 Schroefkarakteristieken

Ten eerste is voor de schroef in de tunnel de stuwkrachtcoëfficiënt bepaald. Met behulp van deze stuwkrachtcoëfficiënt is bij de overige metingen de initiële stroomsnelheid in de uitstroomopening te bepalen. De stuwkrachtcoëfficiënt geeft een verband tussen het toerental van de schroef en de initiële stroomsnelheid. In de modelopstelling is het toerental van de schroef te regelen.

Op een afstand van 0,10 m van de uitstroomopening is het stroomsnelheidsprofiel bepaald. Met behulp van de wet van behoud van impuls is hieruit de gemiddelde initiële stroomsnelheid, zoals die in de uitstroomopening zou moeten optreden, berekend. De wet van behoud van impuls is gebruikt, omdat de wet van behoud van massa niet toepasbaar is. Het debiet neemt namelijk door meeneming van het omringende water toe.

De wet van behoud van impuls luidt als volgt:

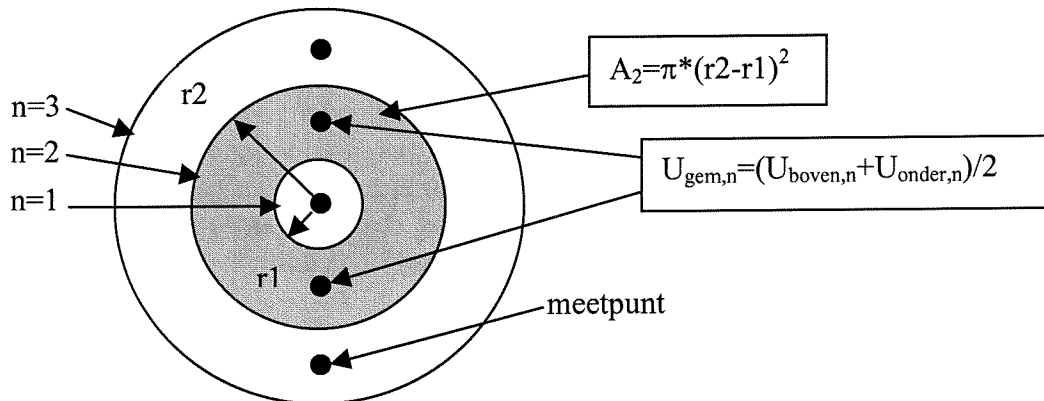
$$\frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^{\infty} U_{10,r}^2 * dA}{U_0^2 * \frac{1}{4} * \pi D_0^2} = 1 \quad (4-1)$$

Wat voor deze situatie praktisch inhoudt:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\sum_{n=1}^7 (U_{gem,n}^2 * A_n)}{I_0} = 1 \quad \text{met: } I_0 = U_0^2 * \frac{1}{4} * \pi * D_0^2 \quad (4-2)$$

waarin:

I	= totale impuls door een bepaalde doorsnede	[kgm/s],
I ₀	= impuls door de uitstroomopening	[kgm/s],
U _{10,r}	= stroomsnelheid op (x,r) = (10,r)	[m/s],
U _{gem,n}	= gemiddelde axiale stroomsnelheid in de twee punten van schijf n, zie Figuur 4-4	[m/s],
A _n	= opp. van schijf n waarover U _{gem,n} constant wordt gehouden	[m ²].



Figuur 4-4: Weergave berekening impulsbalans.

Zoals uit Figuur 4-4 blijkt is er bij de bepaling van de initiële stroomsnelheid van uitgegaan dat de stroomsnelheden in de straal axiaalsymmetrisch zijn. Van twee punten boven en onder de as, op een gelijke afstand van de as, is het gemiddelde genomen. Dit gemiddelde is radiaal constant genomen voor die afstand tot de as. In een eerder onderzoek door Schmidt (1998) van het Leichtweiss-Institut für Wasserbau is gebleken dat de stroomsnelheden niet radiaalsymmetrisch hoeven te zijn. Aangenomen wordt echter dat bovenstaande schematisatie een goed resultaat oplevert. In Tabel 4-1 zijn de stroomsnelheden weergegeven zoals die voor verschillende toerentallen op 10 cm achter de schroef zijn gemeten.

Tabel 4-1: Stroomsnelheden ter bepaling van U_0 .

Hoogte z [cm]	Toerental n [s^{-1}]			
	1280	1095	922	750
10	15,5	11,1	9,7	4,4
9	16,5	12,5	10,3	5,2
8	21,1	16,0	13,0	6,4
7	38,5	30,7	25,0	14,8
6	74,9	59,6	50,5	34,7
5	116,7	96,5	81,8	59,1
4	134,9	112,9	101,2	72,5
3	129,3	107,2	95,8	71,6
2	114,4	95,4	84,6	64,2
1	104,7	86,7	75,8	58,8
0	103,6	83,9	74,1	55,8
-1	111,8	90,9	80,4	59,1
-2	128,8	105,8	91,9	66,3
-3	149,3	123,5	106,0	75,7
-4	155,7	130,7	112,6	83,3
-5	132,1	111,4	96,5	76,9
-6	76,8	65,7	57,3	50,5
-7	30,1	23,9	23,0	20,7
-8	18,4	11,6	14,4	8,0
-9	16,1	9,9	10,1	6,0
-10	15,5	9,6	8,9	5,9
U_0 [m/s]	1,50	1,25	1,08	0,81

Gebruikte snelheden voor berekening van U_0

De initiële stroomsnelheid zou nauwkeuriger te bepalen zijn wanneer de stroomsnelheden ter plaatse van de uitstroomopening zouden zijn gemeten. Dit is echter niet mogelijk met een EMS in verband met de omvang van de meetsonde. Deze meetsonde is relatief groot, 3,5 cm, vergeleken met de diameter van de uitstroomopening, 10 cm. Plaatsing van de meetsonde in de uitstroomopening zou een te grote blokkering opleveren van de uitstroomopening.

De stuwkrachtcoëfficiënt wordt in de volgende formule gebruikt om de initiële stroomsnelheid te berekenen:

$$U_0 = 1,59 * n * D_p * \sqrt{k_t} \quad (2-17)$$

waarin:

U_0	= initiële stroomsnelheid	[m/s],
n	= toerental van de schroef	[1/s],
D_p	= diameter van de schroef	[m],
k_t	= stuwkrachtcoëfficiënt	[-].

De diameter van de schroef is in het geval van de boegschroef gelijk aan de initiële diameter. Omdat de stuwkrachtcoëfficiënt constant is voor een bepaalde schroef kan deze formule volgens Schmidt (1998) worden geschreven met slechts één enkele constante:

$$a = 1,59 * \sqrt{k_t} \quad (4-3)$$

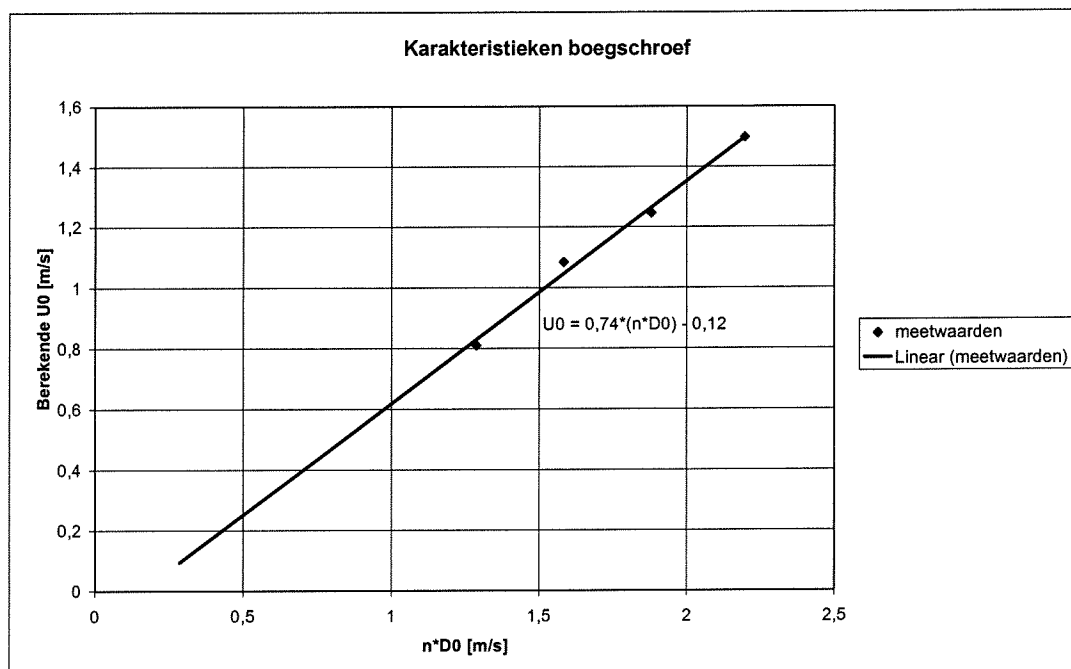
waardoor de formule voor de initiële stroomsnelheid wordt:

$$U_0 = a * n * D_0 \quad (4-4)$$

waarin:

a	= constante	[-],
D_0	= initiële diameter van de straal	[m].

In Figuur 4-5 zijn de, aan de hand van de metingen, berekende initiële snelheden bij verschillende toerentallen weergegeven. De helling van de lijn door de punten is gelijk aan de waarde van constante a . In Figuur 4-5 is af te lezen dat de constante a een waarde van 0,74 heeft. Dit komt overeen met een stuwkrachtcoëfficiënt van $k_t = 0,22$. Römisch (1993) geeft een bereik voor de stuwkrachtcoëfficiënt van $k_t = 0,25 - 0,50$. De orde van grootte van de gevonden waarde komt derhalve overeen met de stuwkrachtcoëfficiënten van schroeven in de prototype situatie. De grootte van de stuwkrachtcoëfficiënt is aan de lage kant, wat duidt op een schroef van slechte kwaliteit. De 'speelgoed'-schroef die is gebruikt voor de metingen is waarschijnlijk van slechtere kwaliteit dan de schroeven die worden gebruikt in de scheepsbouw.



Figuur 4-5: Karakteristieken van de boegschroef

4.2.2 Axiale stroomsnelheden in de boegschroefstraal

Voor de berekening van de axiale stroomsnelheden in een boegschroefstraal zijn niet veel rekenmodellen beschikbaar. Alleen Schmidt (1998) heeft aan de hand van metingen in een boegschroefstraal een rekenmodel opgesteld. De door Schmidt (1998) gemeten snelheden vertonen echter een grote spreiding en gelden slechts voor een situatie met een boegschroef in de omgeving van een verticale wand. Er wordt geen rekening mee gehouden dat de afstand tot de wand invloed heeft op de verspreiding van de straal, zie hoofdstuk 2. De invloed van de afstand van de uitstroomopening tot het talud is wel bestudeerd door Hamill et al. (1996b), echter voor een straal opgewekt door een vrijstaande schroef.

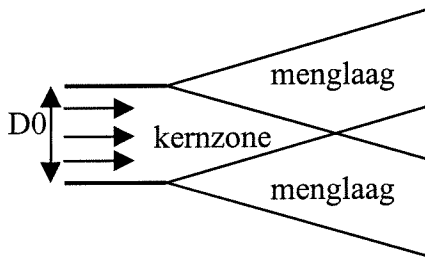
Voor de gebruikte opstelling zal, aan de hand van de snelheidsmetingen, een rekenmodel worden opgesteld voor de stroomsnelheden. Het wordt hier een rekenmodel genoemd, ondanks dat het slechts een fit op de meetwaarden is. Dit rekenmodel zal worden vergeleken met het rekenmodel voor een boegschroefstraal van Schmidt (1998), met het rekenmodel van een vrijstaande schroef van het WL (1985), met het rekenmodel van Hamill et al. (1996a) en met het rekenmodel van de jet.

Maximale stroomsnelheden

In de straaltheorie, zie hoofdstuk 2, wordt de beschrijving van het snelheidsveld in twee delen gesplitst: de afname van de snelheid in de as van de straal en de verspreiding om de as van de straal als functie van de snelheid in de as van de straal. In de theorie voor de schroefstraal wordt de verspreiding om de as van de straal niet als functie van de snelheid in de as van de straal genomen, maar als functie van de maximale snelheid. De reden hiervan is dat in de schroefstraal de aanwezigheid van de as van de schroef invloed heeft op het optredende snelheidsveld. Dit is vooral merkbaar in de kernzone. In de kernzone

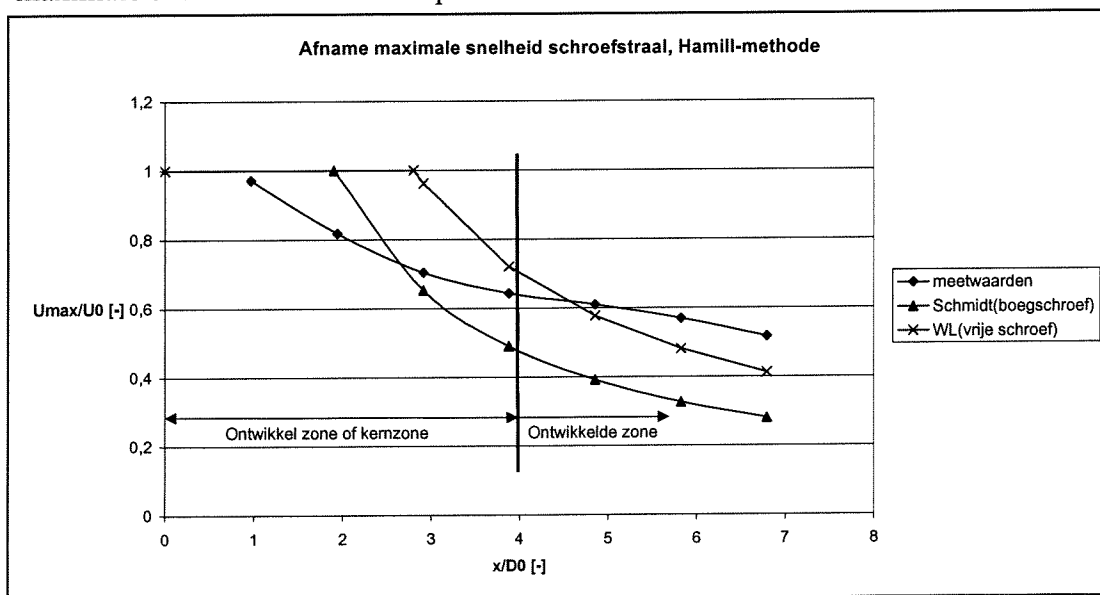
treedt de maximale stroomsnelheid aanvankelijk niet op in de as van de straal, zie figuur 1 t/m 3 in Bijlage 4.1. Als gebruik zou worden gemaakt van de snelheid in de as van de straal zou aanvankelijk de stroomsnelheid toenemen. In de theorie voor de jet komt de maximale stroomsnelheid wel overeen met de stroomsnelheid in de as van de straal.

In de boegschroefstraal in de opstelling bevindt het einde van de kernzone zich tussen de doorsnedes op $x/D_0 = 3,9$ en $4,9$. In Figuur 8 in Bijlage 4.1 is namelijk te zien dat de maximale stroomsnelheid niet in de as optreedt, terwijl dit in Figuur 9 wel het geval is. De menglaag is in Figuur 9, op $x/D_0 = 4,9$, doorgedrongen tot de as van de straal, zoals is weergegeven in Figuur 4-6.



Figuur 4-6: Kernzone.

De maximale snelheid wordt in de kernzone vaak gelijk aan de initiële snelheid gehouden, zie Schmidt (1998), WL (1985), Blaauw en Van de Kaa (1978) en Römisch (1993). Deze aanname wordt gedaan om de straaltheorie, zie hoofdstuk 2, te kunnen toepassen. In Figuur 4-7 is duidelijk te zien dat dit niet het geval is. Verder benedenstroom van de uitstrooioening wordt de afname lineair met D_0/x verondersteld. Twee methoden zullen worden toegepast om een beschrijving van het verloop van de maximale snelheden te kunnen opstellen.



Figuur 4-7: Opdeling straal in ontwikkelzone en ontwikkelde zone.

De door Schmidt (1993), WL (1985), Blaauw en Van de Kaa (1978) en Römisch (1993) gebruikte methode om het verloop van de maximale stroomsnelheden te beschrijven is ontleend aan de straaltheorie. Zoals beschreven in hoofdstuk 2, wordt in de straaltheorie aangenomen dat in de kernzone een constante maximale snelheid aanwezig is. Deze constante snelheid is gelijk aan de initiële stroomsnelheid. Buiten de kernzone wordt het verloop van de maximale stroomsnelheid beschreven met de volgende algemene formule:

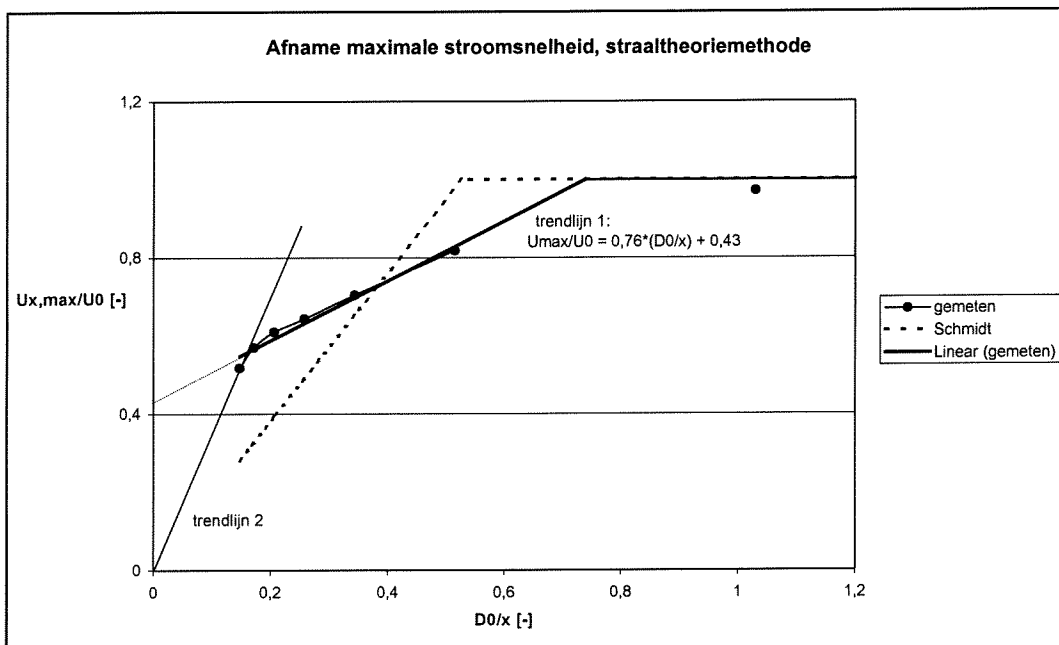
$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = \frac{1}{2c_1} \left(\frac{x}{D_0} \right)^{-1} \quad (4-5)$$

waarin:

c_1 = empirisch te bepalen constante [-].

Om de waarde van c_1 te bepalen wordt $U_{x,\max}$ tegen D_0/x uitgezet. De helling van de lijn die dan wordt gevonden is gelijk aan $1/2c_1$. Dit is gedaan in Figuur 4-8 door trendlijn 1. Tevens is in dit figuur het rekenmodel van Schmidt (1998) aangegeven. Wanneer een rechte lijn door de punten van de gemeten waarden wordt getrokken vallen een drietal punten op:

1. de afname van de maximale snelheid die optreedt is lager dan de afname die wordt gegeven door het rekenmodel van Schmidt (1998). Dit is te zien aan de helling van de lijn,
2. op oneindige afstand achter de schroef, $D_0/x \rightarrow 0$ in Figuur 4-8, wordt de maximale snelheid constant en ongelijk aan nul. In het geval van ongestoorde uitbreiding is dit zeer onwaarschijnlijk. De aanwezigheid van het talud zou echter de oorzaak kunnen zijn hiervan,
3. de kernzone, waar $U_{\max}/U_0 = 1$, eindigt op $D_0/x = 0,77$. De kernzone eindigt dus niet, zoals uit Bijlage 4.1 bleek, op ongeveer $4 \cdot D_0$, maar op $1,3 \cdot D_0$.



Figuur 4-8: Verloop maximale stroomsnelheid, straaltheorie methode.

Formule (4-5) gaat ervan uit dat op oneindige afstand achter de schroef de stroomsnelheid is gereduceerd tot nul. Als in Figuur 4-8 een rechte lijn door de meetpunten wordt getrokken dan snijdt de lijn de y-as op 0,43. Dit suggereert dat op oneindige afstand achter de schroef een maximale stroomsnelheid optreedt van 0,43 m/s. In de situatie van ongestoorde straaluitbreiding is, op oneindige afstand achter de schroef, de stroomsnelheid nul. Trendlijn 2 is een rechte lijn door de oorsprong en de meetpunten. Deze lijn is echter gebaseerd op slechts enkele meetpunten.

In de modelopstelling is geen sprake van ongestoorde uitbreiding van de straal en dit heeft invloed op de afname van de maximale stroomsnelheid. Het doel van het opstellen van een rekenmodel is om de stroomsnelheid op het talud te berekenen. Omdat trendlijn 1 een betere weergave van de meetwaarden geeft is voor deze lijn gekozen.

Omdat trendlijn 1 niet door de oorsprong gaat, kan het verloop van de maximale stroomsnelheid niet in de algemene vorm van (4-5) worden geschreven:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = \frac{1}{2c_1} \left(\frac{x}{D_0} \right)^{-1} + C \quad (4-6)$$

waarin

C = empirisch te bepalen constante [-].

In Figuur 4-8 is trendlijn 1 door de meetpunten gefit. De vergelijking voor deze trendlijn is in de figuur gegeven. Met behulp van deze vergelijking is te bepalen dat $c_1=0,66$ en $C=0,43$. De formule voor het verloop van de maximale stroomsnelheid langs de straalas, in de ontwikkelde zone, wordt dan:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 0,76 \left(\frac{x}{D_0} \right)^{-1} + 0,43 \quad \text{voor } x/D_0 > 1,33 \quad (4-7)$$

De waarde van c_1 die hier is gevonden wijkt sterk af van de waarde die door het WL (1985) is bepaald, $c_1=0,18$, omdat de fitlijn minder steil is.

In de kernzone is de maximale stroomsnelheid gelijk aan U_0 :

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 1 \quad \text{voor } 0 \leq x/D_0 \leq 1,33 \quad (4-8)$$

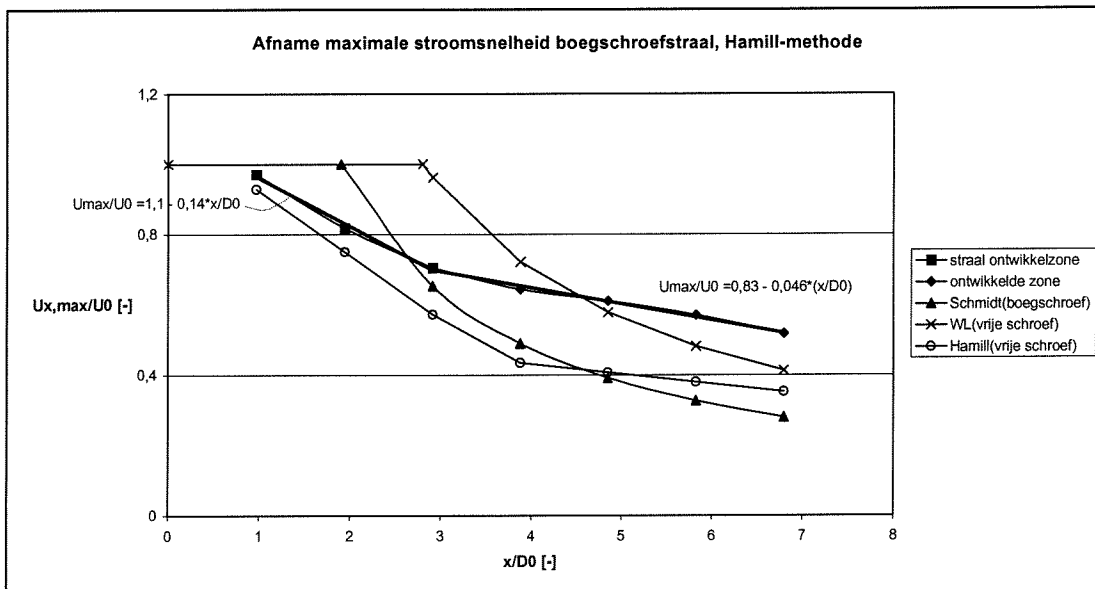
Hamill maakt gebruik van een andere dan de bovenstaande notatie om de maximale snelheid aan te geven, zie Hamill et al. (1996a), Hamill et al. (1996b) en hoofdstuk 2.2.1. De notatie die wordt gebruikt door Hamill heeft de volgende algemene vorm:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = A - B \left(\frac{x}{D_p} \right) \quad (4-9)$$

waarin:

U_0 = initiële stroomsnelheid [m/s],
 $U_{x,\max}$ = maximale stroomsnelheid op afstand x [m/s],
 A, B = empirisch te bepalen constanten [-],
 x = horizontale afstand tot de uitstroombening [m],
 D_p = diameter vrijstaande schroef [m].

Met behulp van deze methode wordt een rechte lijn door de meetpunten getrokken. Hamill (1996b) stelt dat er twee rechte lijnen door de meetpunten getrokken kunnen worden en dat de overgang tussen de lijnen tevens de overgang tussen de kernzone en de ontwikkelde zone weergeeft. In Figuur 4-9 is, met behulp van de kleinste kwadraten methode, een fitlijn getekend door de punten in de straalontwikkelzone en in de ontwikkelde zone. De vergelijkingen zijn in de figuur bijgevoegd. De overgang van de kernzone naar de ontwikkelde zone, zoals die volgt uit Figuur 4-9 ligt niet op dezelfde locatie als die is bepaald aan de hand van de snelheidsprofielen in Bijlage 4.1. Daar bleek de kernzone tot minimaal $x/D_0=3,9$ door te lopen, terwijl met de methode van Hamill de grens op $x/D_0=2,9$ ligt. Voor de beschrijving van de maximale stroomsnelheden is het echter niet van belang dat de methode van Hamill op een andere grens komt.



Figuur 4-9: Afname maximale stroomsnelheid in de boegschroefstraal, Hamill-methode.

In de kernzone neemt de stroomsnelheid sneller af dan in de zone van ongestoorde straaluitbreiding. In de kernzone wordt de maximale stroomsnelheid in relatie tot de initiële stroomsnelheid door de volgende formule weergegeven:

$$\frac{U_{x,max}}{U_0} = 1,1 - 0,14 \left(\frac{x}{D_0} \right) \quad \text{voor } x/D_0 \leq 3 \quad (4-10)$$

waarin:

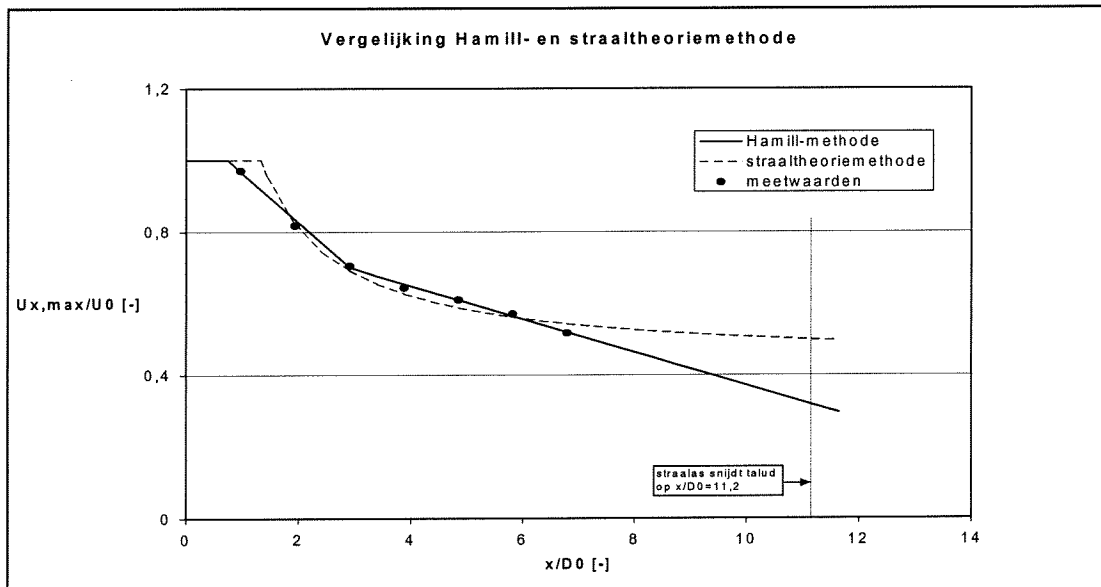
$$D_0 = \text{diameter tunnel} \quad [m].$$

Omdat deze relatie specifiek voor een boegschroef is, wordt gebruik gemaakt van de diameter van de tunnel. De berekende constanten zijn echter uitsluitend geldig voor de gebruikte opstelling met een boegschroef.

In de zone van ongestoorde straaluitbreiding kan de maximale stroomsnelheid in relatie tot de initiële stroomsnelheid worden weergegeven door onderstaande formule:

$$\frac{U_{x,max}}{U_0} = 0,83 - 0,046 \left(\frac{x}{D_0} \right) \quad \text{voor } x/D_0 > 3 \quad (4-11)$$

Voor de beschrijving van de afname van de maximale snelheid binnen het bereik van de metingen komen de straaltheoriemethode en de methode van Hamill redelijk overeen, zie Figuur 4-10. Indien echter wordt getracht om een voorspelling te doen over de stroomsnelheden die optreden buiten het bereik van de metingen, dient een keuze tussen de twee methoden gemaakt te worden. Beide bovenstaande methoden geven niet realistische waarden wanneer op zeer grote afstand benedenstrooms van de uitstroomopening wordt gekeken. De Hamill-methode geeft negatieve waarden en de straaltheoriemethode geeft een constante waarde ongelijk aan nul.



Figuur 4-10: Vergelijking Hamill- en straaltheoriemethode.

Het doel van het opstellen van een rekenmodel voor de stroomsnelheden is om een schatting te maken van de snelheden op het talud. De stroomsnelheden die volgens de rekenmodellen optreden op de afstand vanaf de uitstroomopening waar het talud zich in het model bevindt, $x/D_0 = 11,2$, zijn gegeven in Tabel 4-2. Het talud bevindt zich niet zo ver van de opening dat onrealistische, negatieve maximale stroomsnelheden worden verkregen uit de rekenmodellen.

Tabel 4-2: Maximale stroomsnelheden in de boegschroefstraal t.p.v. snijpunt straalas en talud.

Methode	formule	$U_{x,max}/U_0$ (op $x/D_0=11,2$) [-]
methode Hamill	$U_{x,max}/U_0 = -0,046 \cdot (x/D_0) + 0,83$	0,32
methode Straaltheorie	$U_{x,max}/U_0 = 0,76 \cdot (D_0/x) + 0,43$	0,50
LWI	$U_{x,max}/U_0 = 1,9 \cdot (D_0/x)$	0,17
Römisch	$U_{x,max}/U_0 = 1,88 e^{-0,092} (h/D_p) (x/D_p)^{-0,6}$ met h = waterdiepte	0,33

In Tabel 4-2 is te zien dat er een groot verschil is tussen de voorspelde stroomsnelheden in het snijpunt van de as van de straal met het talud. Extrapolatie van een trend in de gemeten waarden kan een grote fout opleveren. Om echter toch een voorspelling te kunnen doen van de op het talud optredende stroomsnelheden wordt gekozen om gebruik

te maken van de methode van Hamill om de maximale stroomsnelheden te bepalen. Van de drie methoden geeft deze methode een gemiddelde waarde van de stroomsnelheid ter plaatse van het talud.

Radiale uitbreiding van de boegschroefstraal

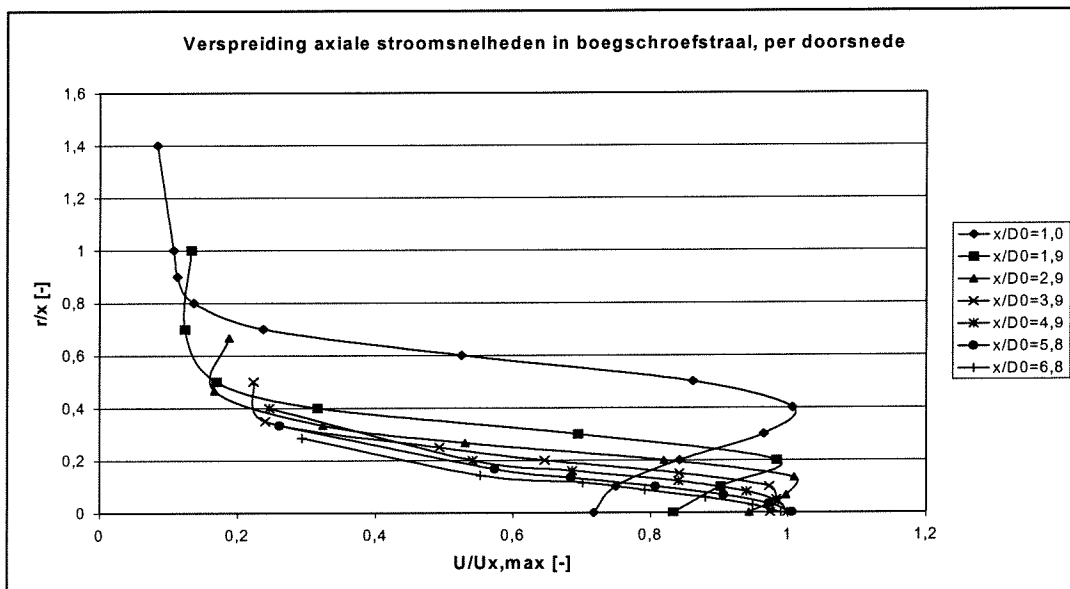
De stroomsnelheden in de straal buiten de as worden radiaalsymmetrisch om de as genomen en kunnen als volgt met behulp van de snelheid in de as worden beschreven:

$$U_{x,r} = U_{x,max} * e^{b * \left(\frac{r}{x}\right)^2} \tag{4-12}$$

waarin:

- r = radiale afstand tot de straalas [m],
- b = empirisch te bepalen constante [-],
- $U_{x,r}$ = stroomsnelheid in punt (x,r)[m/s].

In Figuur 4-11 zijn per doorsnede de relatieve stroomsnelheden, $U_{x,r}/U_{x,max}$, tegen de relatieve afstand tot de straalas, r/x , uitgezet. In deze figuur is te zien dat de verspreiding van de stroomsnelheden ten opzichte van de maximale stroomsnelheid verschilt per doorsnede. De profielen van de doorsnedes die in de ontwikkelde zone liggen, $x/D_0 > 3,9$, lijken redelijk overeen te komen.



Figuur 4-11: Verspreiding van de axiale stroomsnelheden in de boegschroefstraal, per doorsnede.

De waarde van de constante b is per meetpunt te bepalen. In Tabel 4-3 is een overzicht gegeven van de gemiddelde waarde van b per doorsnede.

Tabel 4-3: Waarde van b, per doorsnede.

Doorsnede	x/D_0 [-]	b [-]
1	1,0	-4,4
2	1,9	-5,0
3	2,9	-5,1
4	3,9	-8,1
5	4,9	-11,6
6	5,8	-20,3
7	6,8	-34,3

}

ontwikkelzone

}

ontwikkelde zone

De constante b heeft geen constante waarde. De spreiding wordt kleiner naarmate de afstand tot de uitstroomopening groter wordt. De spreiding is aanvankelijk groot, omdat hier de vorm van het snelheidsprofiel afwijkt van de normale verdeling, zie Figuur 4-11.

De gebruikelijke methode om b te berekenen is het gemiddelde te nemen van alle metingen, zie Blaauw en Van de Kaa (1978), WL (1985), Schmidt (1998). Op de locatie van het talud is de straal echter ontwikkeld. Bij de berekening van de afname van de maximale snelheid is een onderscheid gemaakt tussen de kernzone en de ontwikkelde zone. Voor de bepaling van de spreiding wordt dit onderscheid ook gehanteerd.

In de ontwikkelde zone is echter allerminst sprake van een constante waarde van b. In WL (1985) wordt dit ook geconstateerd. Er wordt een formule opgesteld om te toetsen met meetdata. In deze formule wordt de aanname dat het diffusieproces gelijkvormig is niet gebruikt, b is niet constant. De coëfficiënt b wordt afhankelijk gemaakt van x/D_0 , de genormeerde afstand van de schroef, en krijgt de volgende vorm:

$$b = -\frac{1}{2c_3} * \left(\frac{x}{D_0}\right)^{c_4} \quad (4-13)$$

waarin:

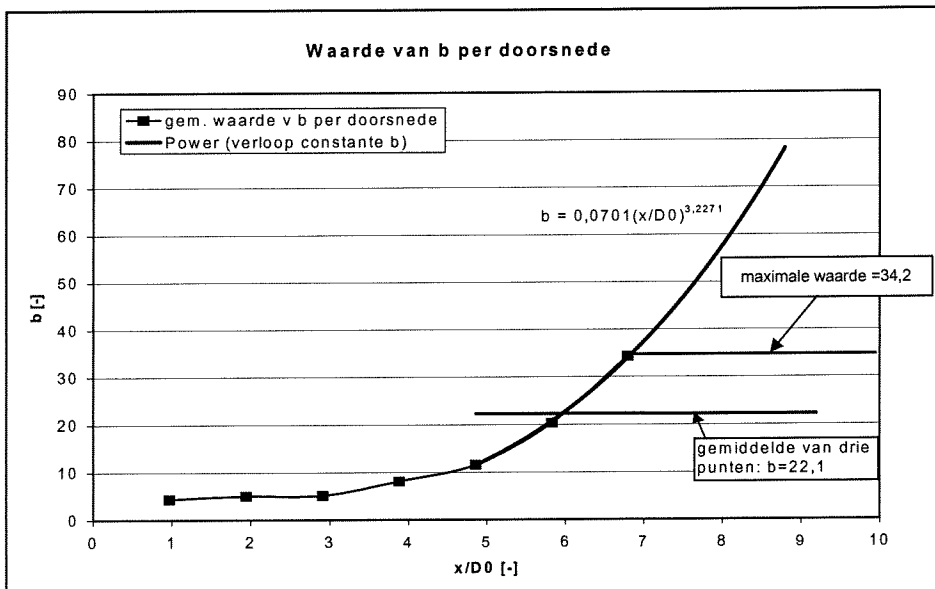
c_3, c_4 = empirisch te bepalen constanten [-].

Er werd echter nauwelijks een afhankelijkheid gevonden tussen b en de afstand tot de schroef. Een andere aanname die werd gedaan in de formule was dat de maximale stroomsnelheid niet in de as optreedt, maar op $r = D_p/2$ vanaf de straalas. Met behulp van de hieraan aangepaste formule werd geen betere voorspelling van de stroomsnelheden gevonden dan met behulp van de schroefstraaltheorie.

In Tabel 4-3 is echter te zien dat er in de huidige situatie wel een verband tussen de waarde van b en de afstand tot de schroef is. Een probleem ontstaat echter als deze waarden worden geëxtrapoleerd voor grotere afstanden vanaf de schroef. Op twee manieren kan een waarde voor b worden bepaald. Ten eerste, het nemen van een gemiddelde waarde van b voor de doorsnedes in de ontwikkelde zone. De waarde van b komt dan op 22,1. Of door extrapolatie van de bepaalde waarden van b. In Figuur 4-12 zijn de waarden van b uitgezet en is een fitcurve door de laatste drie waarden getekend. Bij grotere afstand vanaf de schroef neemt de waarde van b snel toe. Al gauw wordt de waarde van b, zoals die voor de jet geldt, van 76,2 bereikt. Het WL (1985) geeft aan dat

de schroefstraal op een afstand van $x/D_0 > 20$ gelijk aan de jet is. Volgens de fitcurve gebeurt dit voor de verspreiding echter al op ongeveer $x/D_0 = 8,5$.

Er wordt hier gekozen om gebruik te maken van een constante waarde van b . Ten eerste omdat dit in de literatuur gebruikelijk is. Ten tweede omdat gebruik van de fitcurve ter plaatse van het talud, $x/D_0 = 11,2$, een erg hoge waarde van b oplevert. Omdat er toch een opwaartse trend waarneembaar is in Figuur 4-12, maar het verloop na $x/D_0 = 6,8$ giswerk is, wordt ervoor gekozen om de waarde van de laatste doorsnede, op $x/D_0 = 6,8$, te gebruiken voor $x/D_0 \geq 6,8$. Voor $x/D_0 < 6,8$ kan worden geïnterpoleerd tussen de gemiddelden per doorsnede in Tabel 4-3.

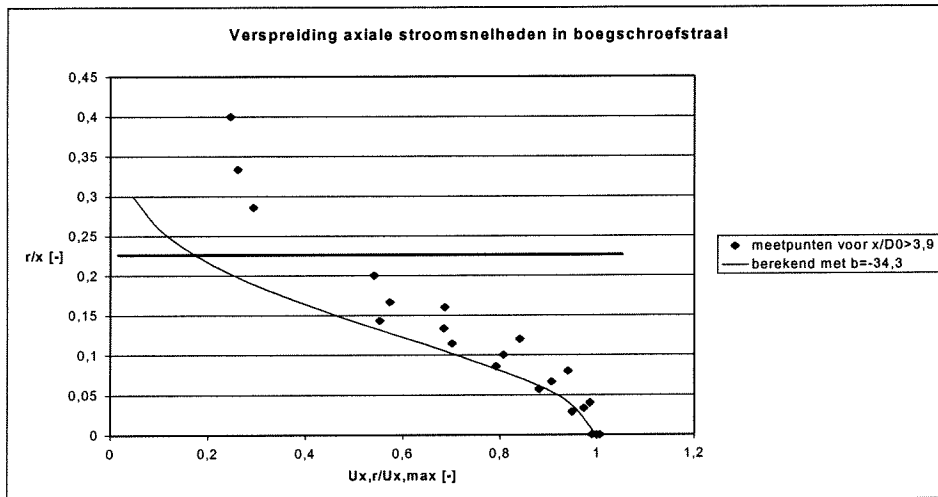


Figuur 4-12: Waarde van constante b per doorsnede, voor de boegschroefstraal.

In Figuur 4-13 zijn de meetwaarden van de metingen in de doorsneden die in de ontwikkelde zone liggen weergegeven. Tevens is de verspreiding weergegeven zoals die is berekend met een waarde van b van 34,3.

De formule voor de verspreiding in de boegschroefstraal ten opzichte van de maximale axiale stroomsnelheid wordt:

$$U_{x,r} = U_{x,\max} * \exp^{-34,3 \left(\frac{r}{x}\right)^2} \quad \text{voor } x/D_0 \geq 6,8 \quad (4-14)$$



Figuur 4-13: Verspreiding van de axiale stroomsnelheden in de boegschroefstraal, voor $x/D_0 > 3,9$.

In Figuur 4-13 is een grens aangegeven waarboven de meetpunten afwijken van de berekende verspreiding. Deze punten wijken af door de circulatie die in de bak in de opstelling optreedt. Voor de modelopstelling is de berekende verspreiding derhalve slechts geldig tot een r/x van ongeveer 0,22.

Er is nu een rekenmodel opgesteld waarmee de maximale stroomsnelheden en de overige stroomsnelheden in relatie tot de maximale stroomsnelheden kunnen worden berekend. In Bijlage 4.1 zijn per doorsnede de snelheidsverdelingen weergegeven zoals die zijn berekend met het hierboven beschreven rekenmodel.

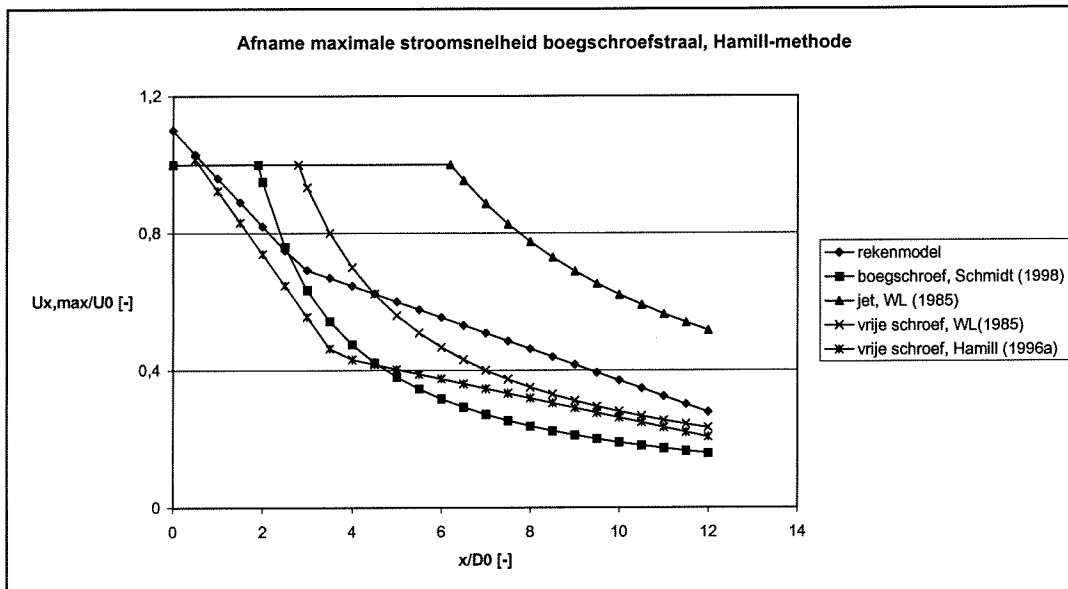
Vergelijking met andere stralen

Eerdere onderzoeken naar stralen hebben constanten, zoals die hierboven zijn beschreven, opgeleverd voor verschillende stralen. In Tabel 4-4 wordt een kort overzicht gegeven van de constanten van een aantal stralen.

Tabel 4-4: Weergave verschillende rekenmodellen voor enkele stralen.

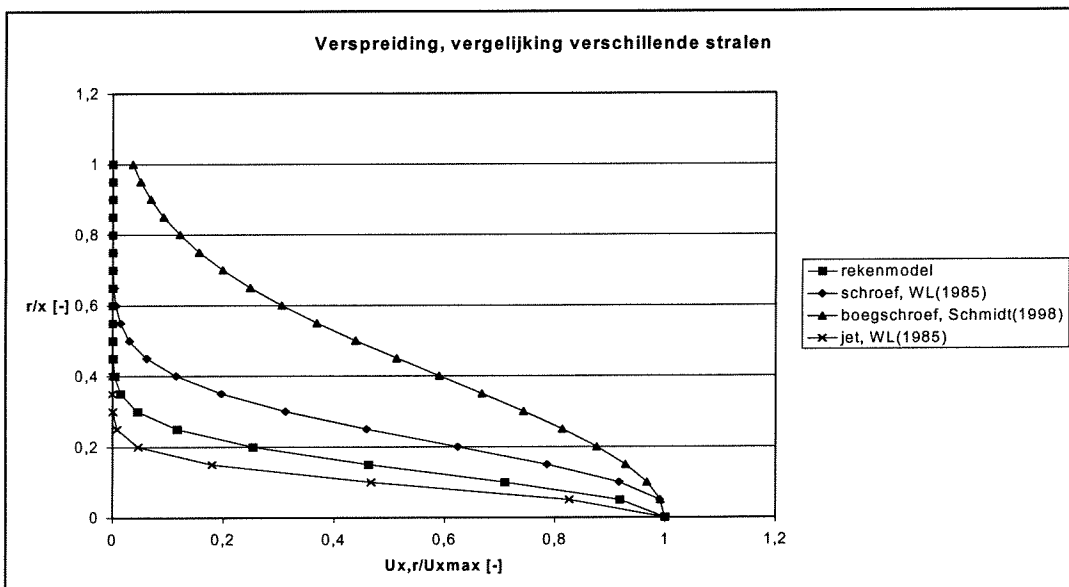
straal	$U_{x,max}/U_0 = a*(D_0/x)$	$U/U_{x,max} = \exp(-b*(r/x)^2)$
schroefstraal, WL (1985)	$2,8*(D_0/x)$	$\exp(-15,4*(r/x)^2)$
boegschroefstraal, Schmidt (1998)	$1,9*(D_0/x)$	$\exp(-3,3*(r/x)^2)$
jet, WL(1985)	$6,2*(D_0/x)$	$\exp(-76,2*(r/x)^2)$
rekenmodel	$-0,14*(x/D_0)+1,1$ als $(x/D_0) \leq 3$ $-0,046*(x/D_0)+0,83$ als $(x/D_0) > 3$	$\exp(-34,3*(r/x)^2)$ voor $x/D_0 \geq 6,8$, anders zie Tabel 4-3

Omdat, door de afwijkende notatie, bovenstaande beschrijvingen moeilijk te vergelijken zijn, is de afname van de maximale stroomsnelheid weergegeven in Figuur 4-14. De verspreiding zoals die geldt voor $x/D_0 \geq 6,8$ is weergegeven in Figuur 4-15.



Figuur 4-14: Afname maximale snelheid, vergelijking verschillende stralen.

In Figuur 4-14 is een duidelijk verschil te zien tussen de afname van de maximale stroomsnelheid in schroefstralen en in een jet. Van de schroefstralen wijkt het rekenmodel af door de grotere afname op grotere afstand van de schroef. Dit zou kunnen worden verklaard door de aanwezigheid van het talud.



Figuur 4-15: Verspreiding, vergelijking verschillende stralen.

In Figuur 4-15 is te zien dat de verspreiding die in het rekenmodel wordt gebruikt kleiner is dan de andere schroefstralen, maar groter dan de jet. In hoofdstuk 2 is reeds vermeldt dat Schmidt (1998) met zijn rekenmethode een grote spreiding vond. Hij vond een grotere spreiding in de boegschroefstraal dan het WL (1985) vond voor de schroefstraal. Te verwachten is echter dat de boegschroefstraal een kleinere spreiding zou hebben door

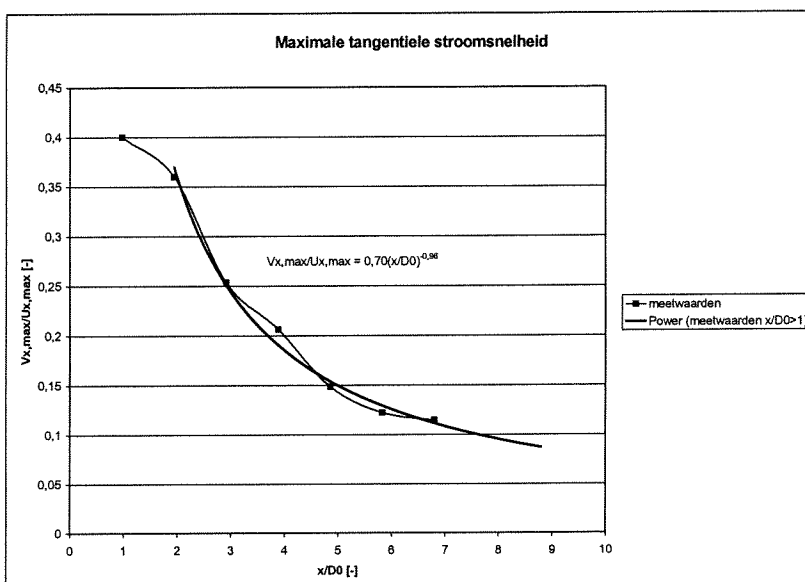
de aanwezigheid van de tunnel. De tunnel zal radiale uitbreiding van de straal tegengaan ter plaatse van de schroef en over de lengte van de tunnel. De basis van de spreiding in het rekenmodel is echter te beperkt om hier conclusies aan te verbinden.

4.2.3 Tangentiële stroomsnelheden in de boegschroefstraal

In de onderzoeken van WL (1985), Schmidt (1998), Hamill et al. (1996a) en Hamill et al. (1996b) is de tangentiële stroomsnelheid vaak buiten beschouwing gelaten. Deze onderzoeken hadden over het algemeen betrekking op de erosie door een schroefstraal van een horizontaal bed. De afstand achter de schroef waar de straal het horizontale bed raakt is groter dan de afstand achter de schroef waar een straal een talud raakt. Op grotere afstand van de schroef neemt de tangentiële stroomsnelheid af en heeft in het horizontale geval geen betekenis meer op het moment dat de straal de bodem raakt. In het geval van een talud zou zij echter nog wel van betekenis kunnen zijn.

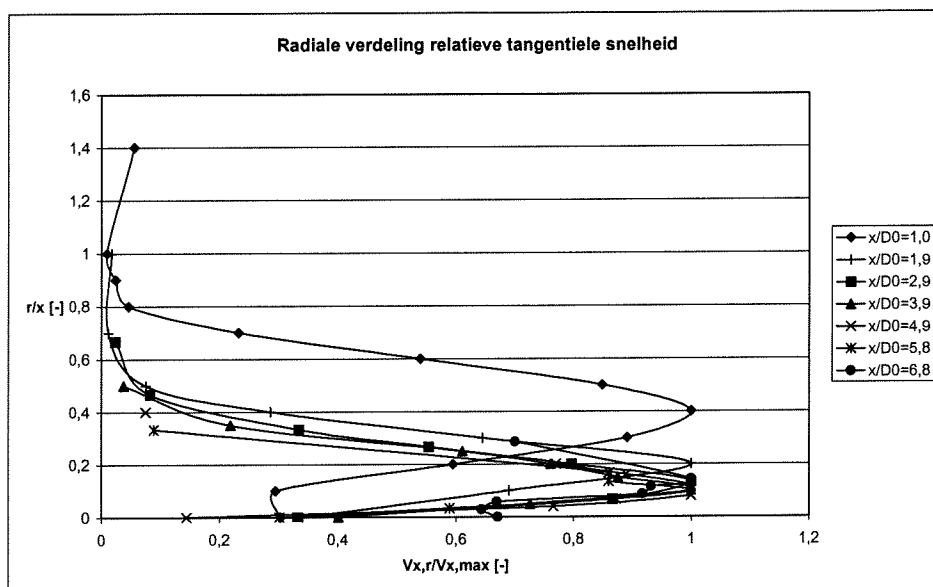
Snelheidsmetingen, verricht door Chin (2001), in een straal opgewekt door een vrijstaande schroef tonen aan dat de tangentiële stroomsnelheden klein zijn ten opzichte van de axiale stroomsnelheden. Op een afstand van $0,5 \cdot D_p$ achter de schroef treedt in de metingen van Chin (2001) een maximale tangentiële stroomsnelheid op van $2/3$ van de maximale axiale stroomsnelheid. Chin (2001) geeft echter aan dat de relatieve grootte van de tangentiële stroomsnelheden ten opzichte van de axiale stroomsnelheden snel afneemt op grotere afstand achter de schroef.

De tangentiële stroomsnelheden worden hier net als bij de axiale stroomsnelheden opgedeeld in de maximale tangentiële stroomsnelheid en de radiale verdeling van de tangentiële stroomsnelheid in relatie tot de maximale tangentiële stroomsnelheid. De maximale tangentiële stroomsnelheid is weergegeven in Figuur 4-16, in relatie tot de maximale axiale stroomsnelheid. Op deze manier is de invloed van de tangentiële stroomsnelheid op het totale snelheidsveld te zien.



Figuur 4-16: Maximale tangentiële stroomsnelheid.

In de metingen zijn, dicht bij de uitstroomopening, de relatieve stroomsnelheden iets kleiner dan de door Chin (2001) gemeten waarden, zie Figuur 4-16. Er is echter wel een sterke afname van de relatieve tangentiële stroomsnelheid gevonden. In de figuur is een trendlijn aangegeven waarbij het eerste punt behorend bij de doorsnede op $x/D_0=0,9$, buiten beschouwing is gelaten. Dit punt wijkt sterk af van de overige punten.



Figuur 4-17: Radiale verdeling relatieve tangentiële stroomsnelheid, per doorsnede.

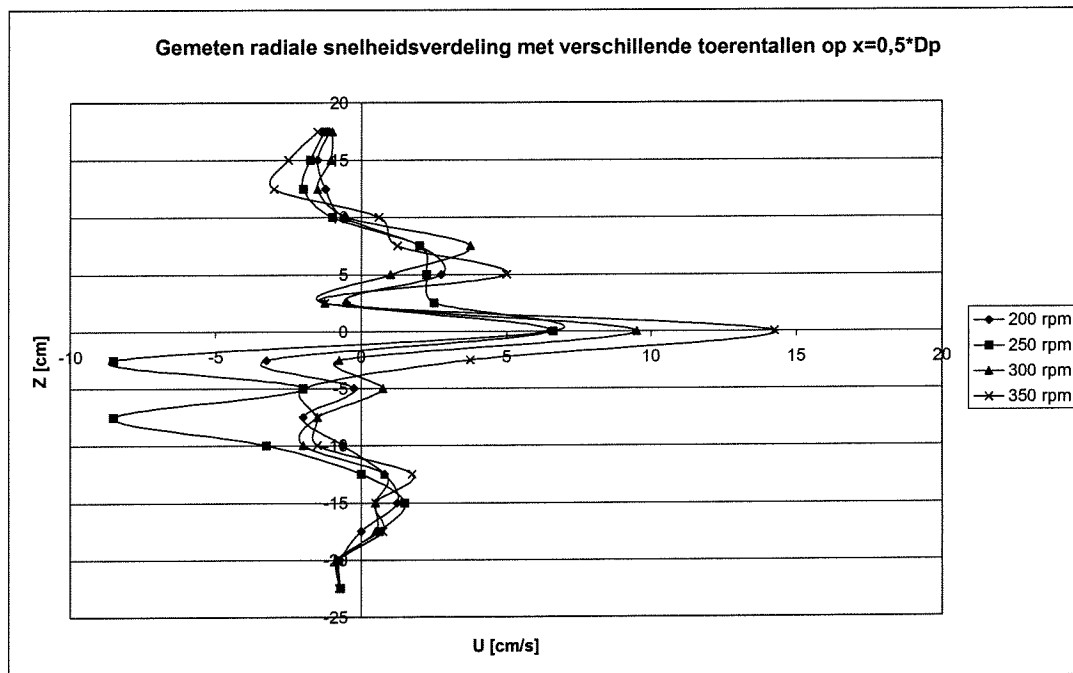
De radiale verdeling om de as van de tangentiële stroomsnelheden in relatie tot de maximale tangentiële stroomsnelheid is gegeven in Figuur 4-17. Voor de doorsneden met $x/D_0 \geq 2,9$ is een duidelijke trend aanwezig. De maximale tangentiële stroomsnelheid treedt op een afstand van ongeveer $r/x=0,1$ vanaf de as op.

4.2.4 Radiale stroomsnelheid in de boegschroefstraal

De snelheden zijn in twee richtingen gemeten. Stroomsnelheden in het snelheidsveld van de schroefstraal hebben echter ook een derde richting. Deze stroomsnelheid is van de as van de straal af gericht. Deze component wordt de radiale stroomsnelheid genoemd. Deze snelheden zijn gemeten door Chin (2001). Uit zijn meetresultaten in Figuur 4-18 blijkt dat de snelheden in de derde richting te verwaarlozen zijn.

In Figuur 4-18 zijn de door Chin (2001) gemeten waarden van de radiale stroomsnelheid weergegeven. De initiële stroomsnelheid varieerde van 30 tot 50 cm/s. De radiale stroomsnelheid is maximaal in de orde van grootte van 20 tot 30 procent van de initiële stroomsnelheid. De metingen zijn verricht op een afstand van 0,5 maal de diameter achter het vlak van de schroef. Te verwachten is dat hier de radiale stroomsnelheid het grootst is. Chin (2001) vermeldt tevens een sterke afname van de radiale component van de stroomsnelheid. In de situatie van een boegschroef wordt echter ter plaatse van de schroef de radiale snelheidscomponent in de straal onderdrukt door de aanwezigheid van de tunnel. Verwacht wordt dat in de situatie van een schroef in een tunnel de radiale component te verwaarlozen is.

Vanwege het gebruikte stroomsnelheidsinstrument konden de radiale stroomsnelheden in het onderhavige onderzoek niet worden gemeten.



Figuur 4-18: Gemeten radiale stroomsnelheden. (Chin (2001))

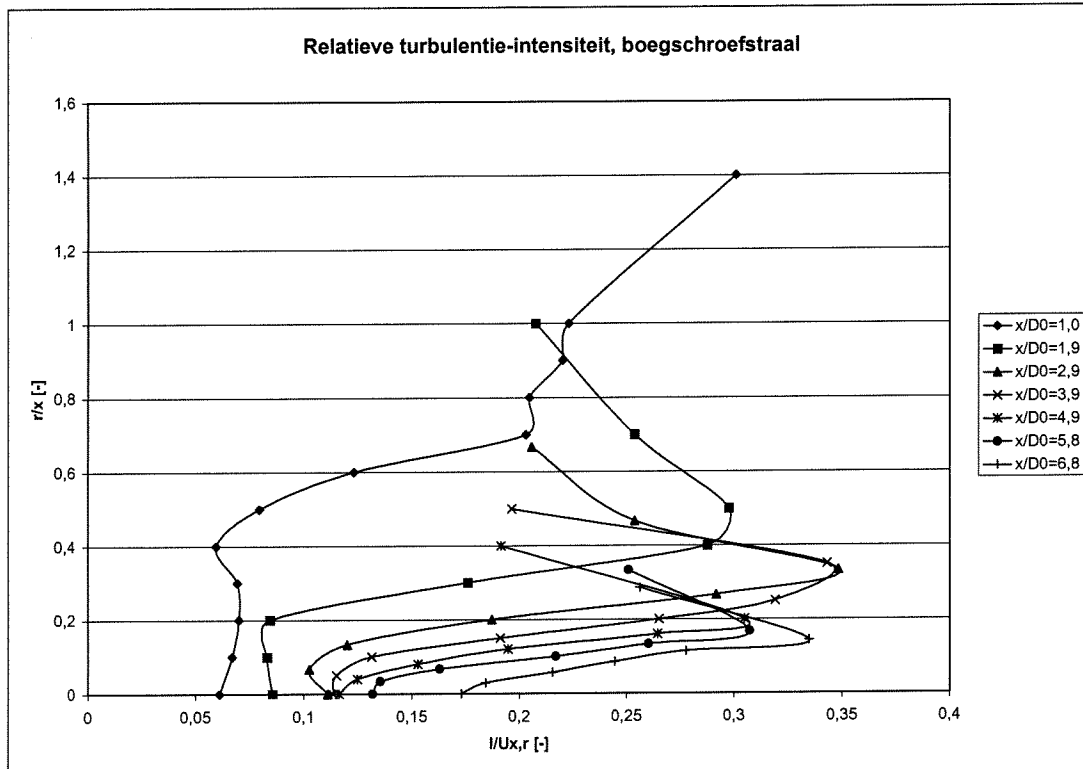
4.2.5 Turbulentie in de boegschroefstraal

In paragraaf 2.3.2 is beschreven wat een turbulente fluctuatie is en hoe de relatieve turbulentie intensiteit wordt bepaald. Het gebruikte meetinstrument kan echter de gemeten turbulente fluctuaties sterk beïnvloeden. Voor de snelheidsmetingen is hier gebruik gemaakt van een EMS en het data-acquisitie-programma DaisyLab.

Bij de metingen is een meettijd aangehouden van 6 minuten. De meettijd moet zodanig worden gekozen dat een middeling van de meetdata een goed gemiddelde oplevert. Wanneer deze meettijd te kort wordt gekozen, kan het zijn dat de turbulente fluctuatie niet goed uitgemiddeld is. Wanneer deze meettijd te lang wordt gekozen, kan een variatie in de hoofdstroom het gemiddelde beïnvloeden. Dit is echter niet het geval in deze situatie. In de straal treedt geen variatie in de hoofdstroom op.

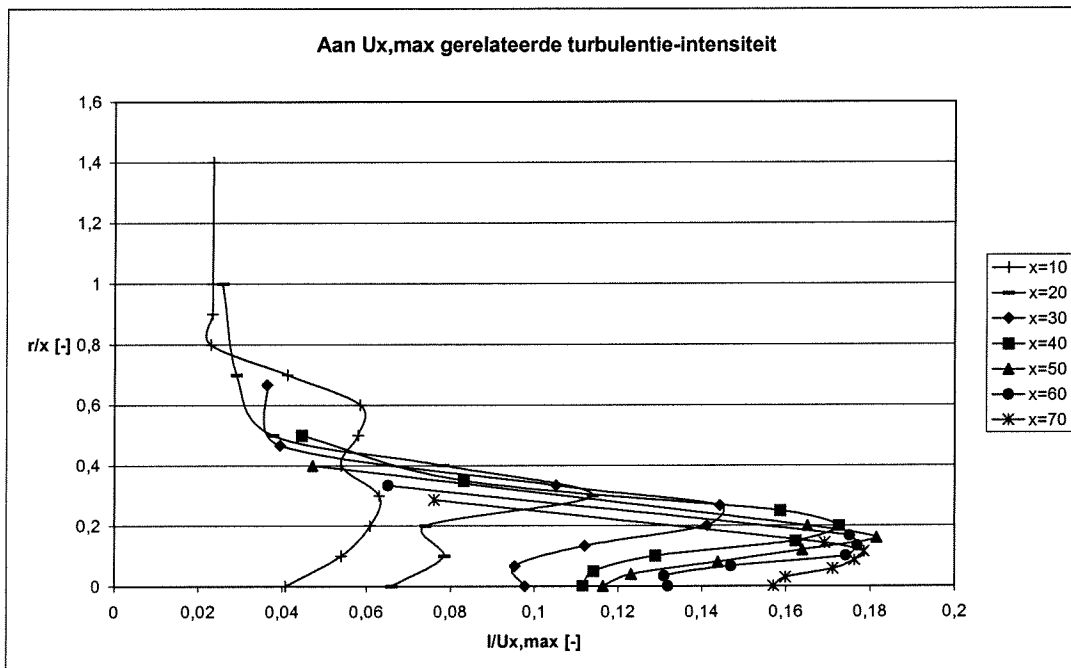
De lengte van de meettijd is dus van belang voor het verkrijgen van een goed gemiddelde. Voor het meten van de turbulente fluctuatie is het meetvolume van belang. Het meetvolume, het volume waarover de snelheid wordt gemiddeld, bepaalt de kleinste maat van de wervels van de turbulentie. Het meetvolume wordt bepaald door het meetinstrument. In het geval van de EMS is de lengtemaat van het meetvolume in de orde van 1 tot 1,5 cm. Dit betekent dat wervels met een grootte van 1 cm, wanneer ze in het meetvolume voorkomen, worden uitgemiddeld. Het zou best kunnen dat de wervels met een afmetingen in de orde van grootte van de steentjes erg belangrijk zijn voor de stabiliteit. De diameter van de steentjes, van 0,84 cm, is echter kleiner dan de kleinste wervel die kan worden gemeten. Het uitmiddelen van de wervels heeft invloed op de

turbulentie-intensiteit die wordt bepaald. Omdat de invloed van de kleinere wervels op de fluctuatie wordt uitgemiddeld, zal een lagere turbulentie-intensiteit worden gemeten.



Figuur 4-19: Relatieve turbulentie-intensiteit in de boegschroefstraal, per doorsnede.

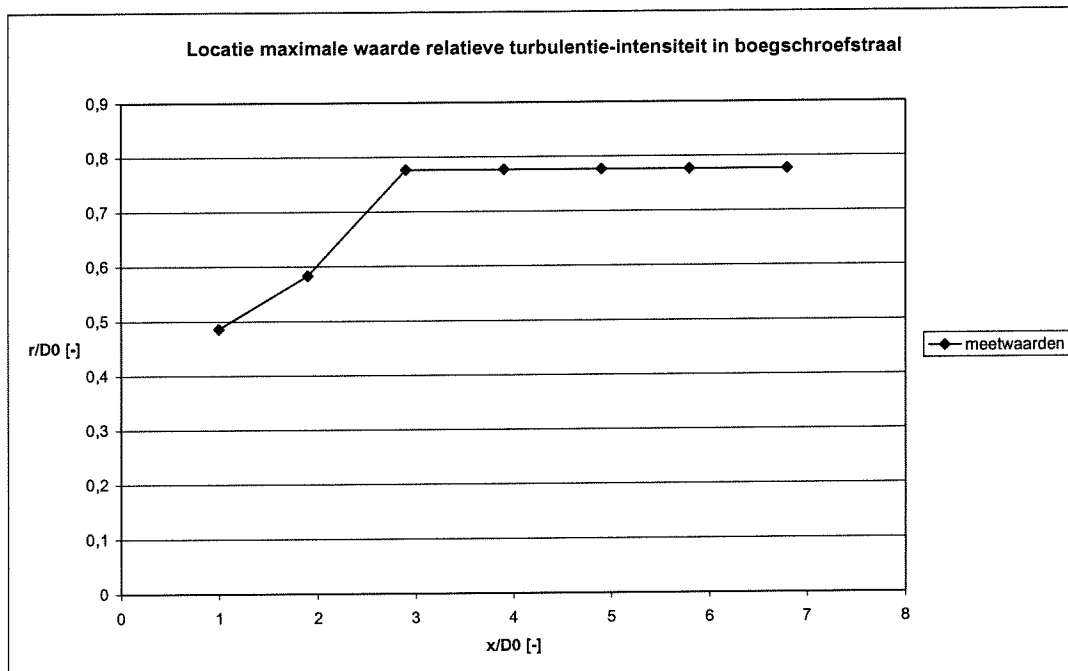
In Figuur 4-19 zijn de relatieve turbulentie-intensiteiten, die op basis van de meetdata zijn berekend, gegeven. Deze figuur geeft de relatie aan van de gemeten turbulentie-intensiteit en de lokale axiale stroomsnelheid. Het lijkt alsof er grote turbulentie optreedt op grotere afstanden van de straalas, dus grotere waarden van r/x . Om grotere afstand van de straalas treden relatief grote turbulentie-intensiteiten op, maar absoluut zijn ze klein. Dit is te zien in Figuur 4-20, waar de gemeten turbulentie-intensiteit is gerelateerd aan de maximale stroomsnelheid, $U_{x,max}$. Omdat deze weergave van de relatieve turbulentie-intensiteit meer inzicht geeft in de turbulentie-intensiteit, wordt deze weergave gebruikt.



Figuur 4-20: Aan $U_{x,max}$ gerelateerde turbulentie-intensiteit, boegschroefstraal.

De gevonden waarden voor de relatieve turbulentie-intensiteit zijn in de Figuur 4-20 weergegeven. In de figuur is te zien dat in de as van de straal een lage turbulentie-intensiteit optreedt die aanvankelijk, bij toenemende r/x , toeneemt om daarna af te nemen. De dip in de turbulentie-intensiteit in de as van de straal is te verklaren met Figuur 4-6. De grootste turbulentie treedt op in de menglaag die ontstaat tussen het water in de straal met een hogere stroomsnelheid en het omliggende bewegingsloze water. De hogere turbulentie in de menglaag heeft tijd nodig voordat het door kan dringen tot de as van de straal.

Het blijkt verder dat op grotere afstand van de uitstroomopening een constante maximale waarde van de relatieve turbulentie-intensiteit wordt bereikt. Blaauw en Van de Kaa (1978) hebben in hun snelheidsmetingen geconstateerd dat de relatieve turbulentie-intensiteit in de as van de straal snel toeneemt tot 6 tot 8 maal de schroefdiameter achter het schroefvlak. Hierna heeft de relatieve turbulentie-intensiteit een constante waarde van 0,25 tot 0,30. De maximale waarde die in Figuur 4-20 wordt bereikt, van ongeveer 0,18, is laag vergeleken met de waarde in de as van Blaauw en Van de Kaa (1978), maar is het is van dezelfde orde van grootte. In Figuur 4-21 is te zien dat de maximale relatieve turbulentie-intensiteit op een constante afstand van de as van de straal optreedt voor $x/D_0 \geq 2,9$.



Figuur 4-21: Locatie maximale waarde van de relatieve turbulentie-intensiteit in boegschroefstraal.

4.2.6 Circulatie in de modelopstelling

In de stroombak van de opstelling is op een aantal punten de stroomsnelheid gemeten om vast te kunnen stellen hoe groot de circulatie in de bak is.

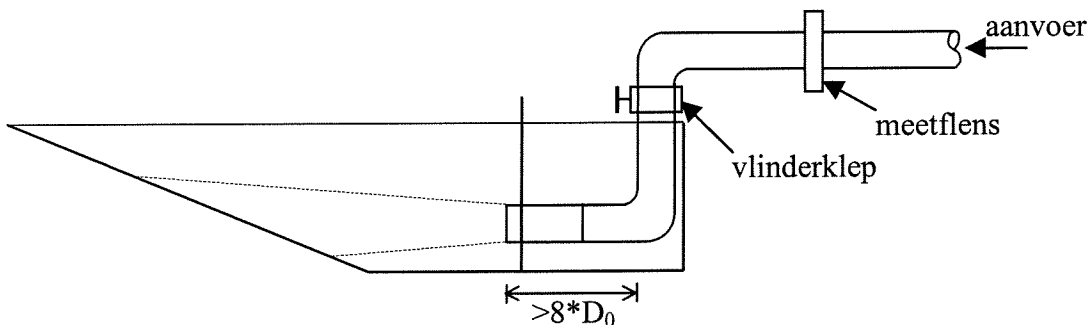
Bij een initiële stroomsnelheid van 1,5 m/s treedt een maximale stroomsnelheid buiten de straal op van 0,2 m/s.

4.3 Stroomsnelheden in de jet

Overeenkomstig de stroomsnelheidsmetingen die verricht zijn in de boegschroefstraal, zijn ook in de jet stroomsnelheidsmetingen verricht. Er zijn echter voor de situatie met de jet geen metingen verricht om de circulatie te kunnen bepalen. Aangenomen wordt dat de circulatie in het geval met de jet niet veel zal afwijken van de situatie met de boegschroefstraal. Ongeveer hetzelfde debiet wordt ingebracht in het betreffende deel van de modelopstelling. Dit gebeurt op dezelfde plaats door een buis met dezelfde diameter.

In de boegschroefstraal had het snelheidsveld naast axiale tevens tangentiële en radiale componenten. Het snelheidsveld van de jet heeft voornamelijk axiale componenten. Turbulentie treedt echter wel op in de jet.

Voor de stabiteitsmetingen en de snelheidsmetingen is het van belang om te kunnen bepalen wat de initiële stroomsnelheid in de uitstroomopening is. Bij de metingen met de boegschroefstraal kon de initiële stroomsnelheid worden geregeld met het toerental van de schroef.



Figuur 4-22: Opstelling voor metingen met jet.

Bij de metingen met de jet kon met een vlinderklep worden geregeld hoeveel water er door de buis stroomde, zie Figuur 4-22 . Met behulp van een meetflens kon worden bepaald wat het debiet door de buis was. In Bijlage 3.4 is de calibratiecurve van de meetflens weergegeven.

4.3.1 Axiale stroomsnelheden in de jet

De axiale stroomsnelheden worden in de jet op dezelfde manier beschreven als in de boegschroefstraal. Het snelheidsveld wordt opgedeeld in een maximale stroomsnelheid in de as en de verspreiding om de as van de straal.

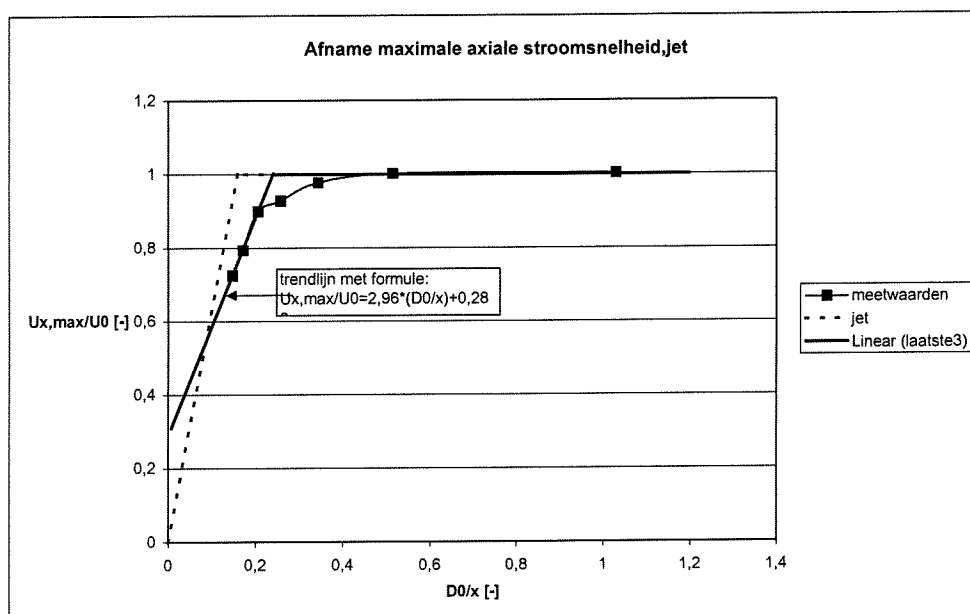
Maximale stroomsnelheden in de jet

De beschrijving voor de afname van de maximale stroomsnelheid die bij de boegschroefstraal is gebruikt wordt hier niet herhaald. Verwacht kan worden dat de beschrijving van de axiale stroomsnelheden, zoals die door de straaltheorie is gegeven,

goed overeenkomt met de gevonden stroomsnelheden in de jet. De theorie is immers opgesteld voor een jet.

In Figuur 4-23 zijn de gemeten maximale stroomsnelheden per doorsnede gegeven. De maximale snelheden zijn in Bijlage 4.2 in de tabellen vet aangegeven. Eerder is beschreven dat de maximale stroomsnelheden in de boegschroefstraal, op korte afstand benedenstrooms van de schroef, niet in de as van de straal optreden. In de jet treden de maximale snelheden wel op in de as van de straal. Een schroef is hier immers afwezig.

In Figuur 4-23 is door de laatste drie meetwaarden een fitcurve getrokken. In deze figuur is D_0/x uitgezet tegen de $U_{x,max}/U_0$ om de constanten c_1 en C te bepalen voor formule (4-6). Ook hier wordt gebruik gemaakt van de aangepaste formule voor de maximale stroomsnelheid, omdat de fitcurve niet door de oorsprong gaat.



Figuur 4-23: Afname van de maximale stroomsnelheid in de jet.

Met behulp van de formule van de fitcurve in Figuur 4-23 zijn de constanten te bepalen:

$$c_1 = 3,0 \quad [-],$$

$$C = 0,29 \quad [-].$$

De formule voor de maximale stroomsnelheid in de jet wordt dan:

$$\frac{U_{x,max}}{U_0} = 3,0 * \left(\frac{D_0}{x} \right) + 0,29 \quad \text{voor } x/D_0 > 4,9 \quad (4-15)$$

De waarde van c_1 die hier is bepaald wijkt sterk af van de waarde die voor de jet geldt (0,081). De stroomsnelheid neemt langzamer af in de gebruikte jetstraal dan in de theoretische jetstraal. Dit zou kunnen worden verklaard door de aanwezigheid van het talud.

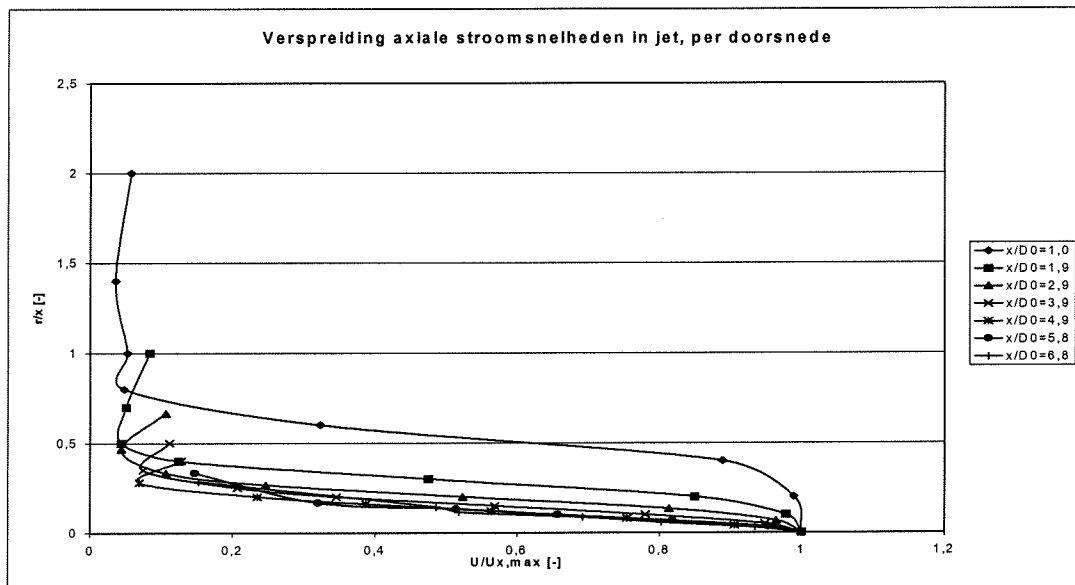
De locatie waar de trendlijn de waarde van $U_{x,max}/U_0 = 1$ snijdt is het einde van de kernzone. Dit betekent dat de kernzonelengte $x/D_0 = 4,2$. Dit is korter dan de kernzonelengte van de jettheorie; deze is $x/D_0 = 6,2$.

Radiale uitbreiding van de jet

De stroomsnelheden buiten de as van de jet worden radiaalsymmetrisch om de as genomen en kunnen als volgt ten opzichte van de snelheid in de as worden beschreven:

$$U_{x,r} = U_{x,max} * e^{b\left(\frac{r}{x}\right)^2} \quad (4-16)$$

In Figuur 4-24 zijn, per doorsnede, de meetpunten weergegeven. Het is duidelijk dat de spreiding minder varieert in de jet dan in de boegschroefstraal. Dit wordt met name veroorzaakt door de eerste profielen van de boegschroefstraal, die sterk afwijken van de normale verdeling.



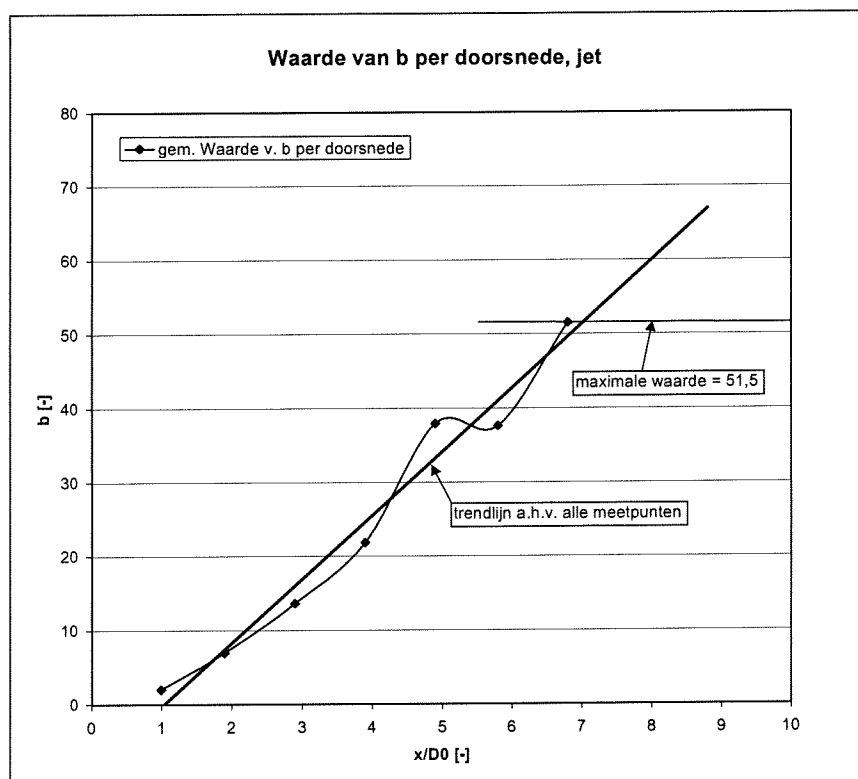
Figuur 4-24: Verspreiding van de axiale stroomsnelheden in de jet, per doorsnede.

De constante b is voor ieder meetpunt bepaald en is per doorsnede gemiddeld en weergegeven in Tabel 4-5.

Tabel 4-5: Gemiddelde waarde van constante b, per doorsnede.

Doorsnede	x/D_0	b [-]
1	1	-2,0
2	1,9	-6,9
3	2,9	-13,6
4	3,9	-21,8
5	4,9	-37,9
6	5,8	-37,6
7	6,8	-51,5

In de tabel is te zien dat, net als bij de boegschroefstraal, de waarde van b niet constant is. Zoals bij de boegschroefstraal is de verspreiding van de straal dicht bij de uitstroomopening groot vergeleken met de verspreiding op grotere afstand. In de vorige sectie is gebleken dat de kernzonelengte van de jet $x/D_0 = 4,2$ is. In de kernzone wijkt de verspreiding van de straal af van de ontwikkelde zone, omdat hier het profiel nog niet volledig is ontwikkeld. De waarde van b wordt daarom gebaseerd op de laatste drie doorsneden in de tabel.



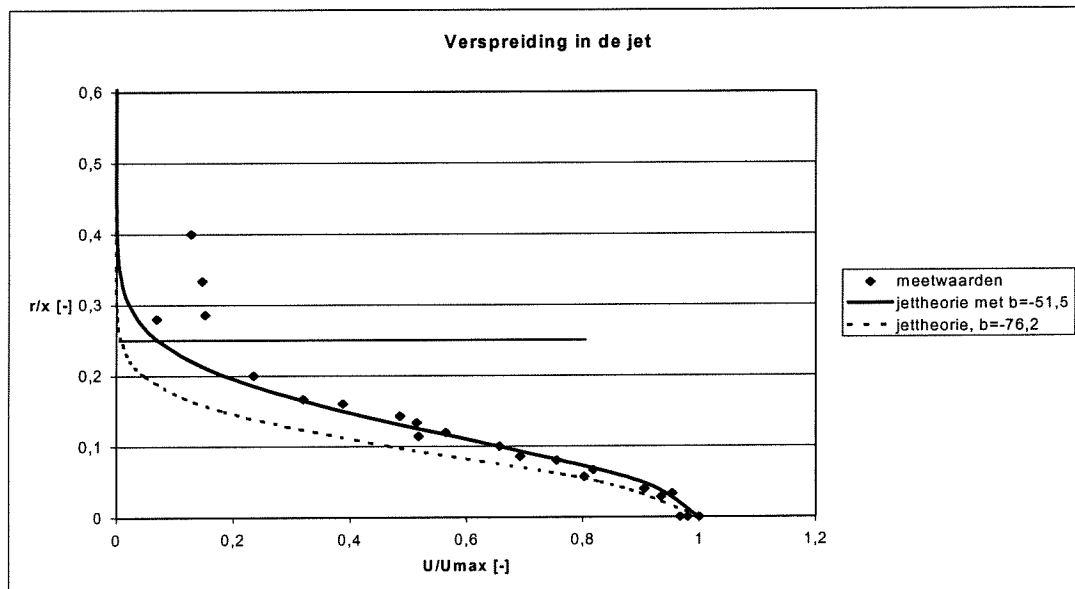
Figuur 4-25: Waarde van constante b per doorsnede, voor de jet.

In Figuur 4-25 is het verloop van de waarde b in relatie tot de afstand van de uitstroomopening gegeven. Er is een duidelijk ander verloop in vergelijking tot het verloop bij de boegschroefstraal. Er is een schijnbaar lineaire toename in de jet. Echter, ook in de straal is moeilijk een voorspelling te doen van het verloop na het laatste doorsnede. In de jettheorie wordt een gemiddelde waarde van b gebruikt van 76,2. Deze waarde zou, net als bij de boegschroefstraal, al op ongeveer $x/D_0 = 8,5$ worden bereikt. Net als bij de boegschroefstraal wordt, voor de verdere berekening bij $x/D_0 \geq 6,8$, gebruik gemaakt van de maximale bepaalde waarde. Deze waarde bedraagt 51,5. Voor $x/D_0 < 6,8$ kan voor de waarde van b worden geïnterpoleerd tussen de waarden in Tabel 4-5.

De formule voor de verspreiding van de stroomsnelheden in de jet wordt dan:

$$U_{x,r} = U_{x,max} * e^{-51,5 \left(\frac{r}{x}\right)^2} \quad \text{voor } x/D_0 \geq 6,8 \quad (4-17)$$

Bij grotere waarden van r/x is, net als bij de boegschroefstraal, de invloed van de circulatie in de modelopstelling zichtbaar.

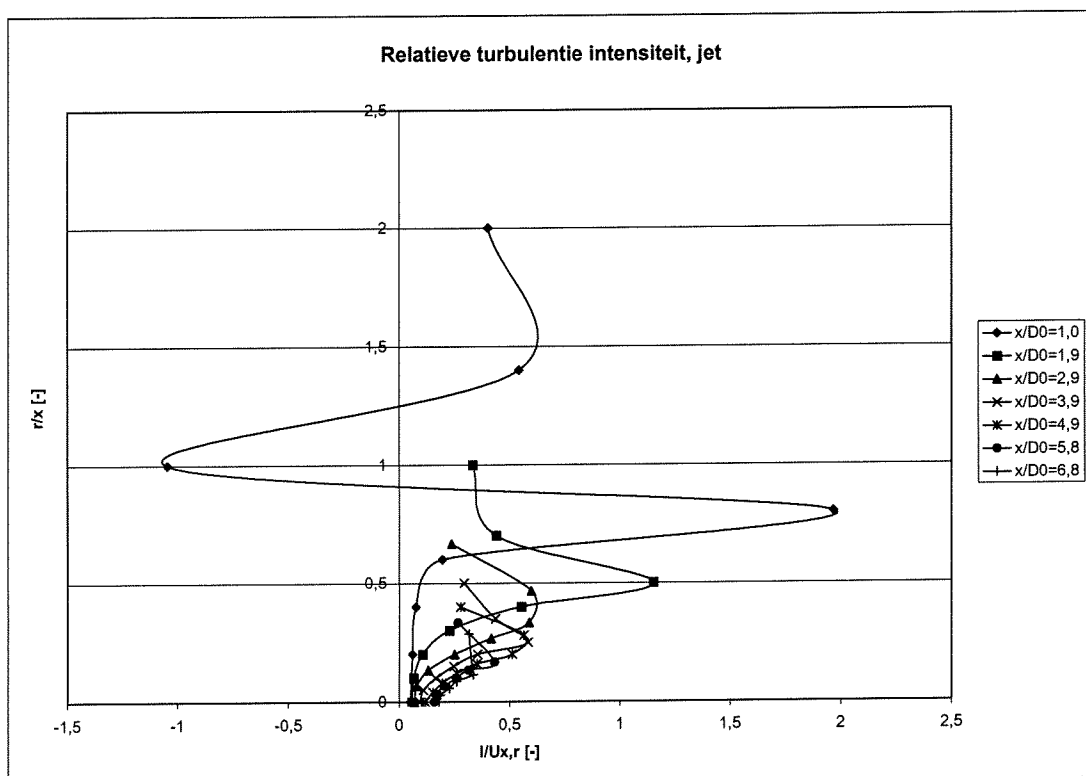


Figuur 4-26: Verspreiding in de jet.

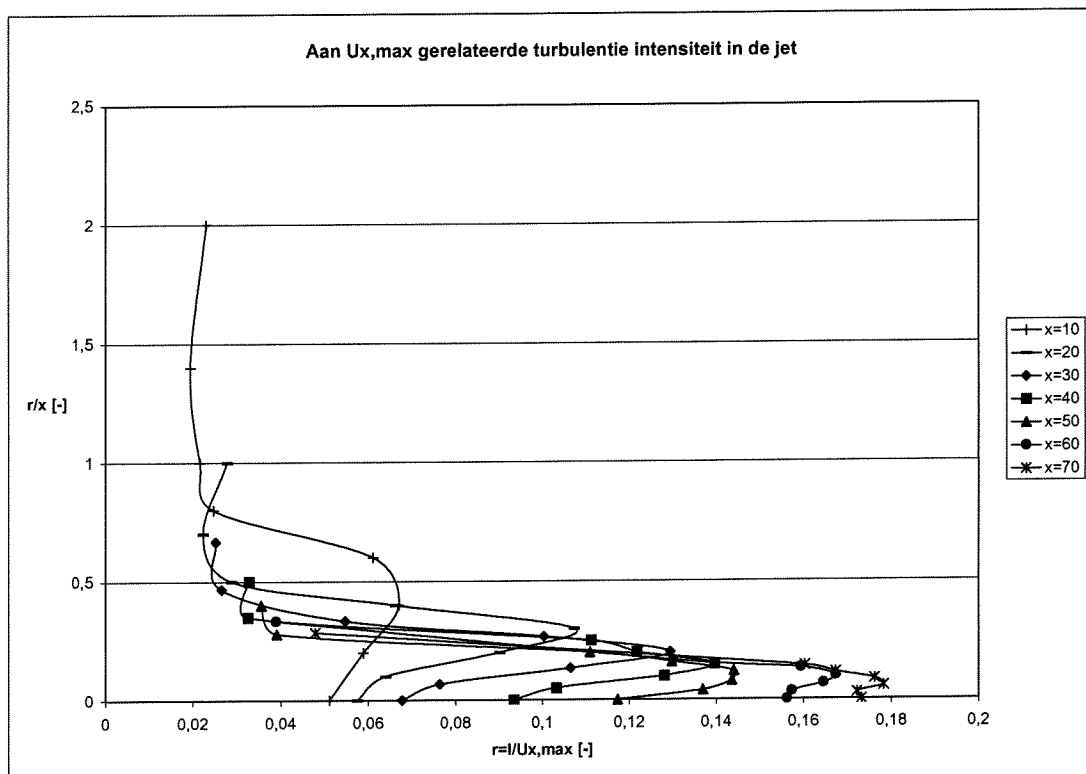
In Figuur 4-26 zijn de meetwaarden weergegeven van de punten in de ontwikkelde zone, $x/D_0 \geq 4,9$. In vergelijking tot de boegschroefstraal komt het rekenmodel beter overeen met de meetpunten. De spreiding tussen de meetpunten is tevens kleiner. Ook in de jet is de circulatie in de bak merkbaar. De lijn op $r/x = 0,25$ geeft een grens aan tot waar het rekenmodel de stroomsnelheden in de bak goed beschrijft.

4.3.2 Turbulentie in de jet

In Figuur 4-27 is de relatieve turbulentie-intensiteit tegen de relatieve afstand tot de straalas uitgezet. Zoals reeds eerder opgemerkt is, zegt deze figuur niet veel over de grootte van de turbulentie-intensiteit. Een grote turbulentie-intensiteit kan immers in combinatie met een lage stroomsnelheid voor een hoge relatieve turbulentie-intensiteit zorgen. In Figuur 4-28 is derhalve de turbulentie-intensiteit gerelateerd aan de maximale stroomsnelheid. De turbulentie is in de jet minder eenvoudig te beschrijven dan in de boegschroefstraal. Zoals uit Figuur 4-28 blijkt, lijkt de maximale relatieve turbulentie-intensiteit niet naar een constante waarde te gaan, zoals dit gebeurt in de boegschroefstraal. Uit Figuur 4-28 blijkt verder dat de afstand tot de straalas waarop de maximale relatieve turbulentie-intensiteit optreedt niet constant te worden op grotere afstand benedenstrooms van de uitstroomopening. De maximale relatieve turbulentie-intensiteit die optreedt in $x/D_0 = 6,8$ lijkt echter overeen te komen met die in de boegschroefstraal. Verder is de lagere relatieve turbulentie in de as van de straal ook aanwezig. Het WL (1985) heeft bepaald, aan de hand van meetdata, dat de relatieve turbulentie-intensiteit in een schroefstraal anderhalf keer zo hoog is als in de jet. Dit blijkt niet uit de huidige meetdata, waar de maximale relatieve turbulentie-intensiteiten ongeveer gelijk zijn.



Figuur 4-27: Relatieve turbulentie-intensiteit in de jet, per doorsnede.



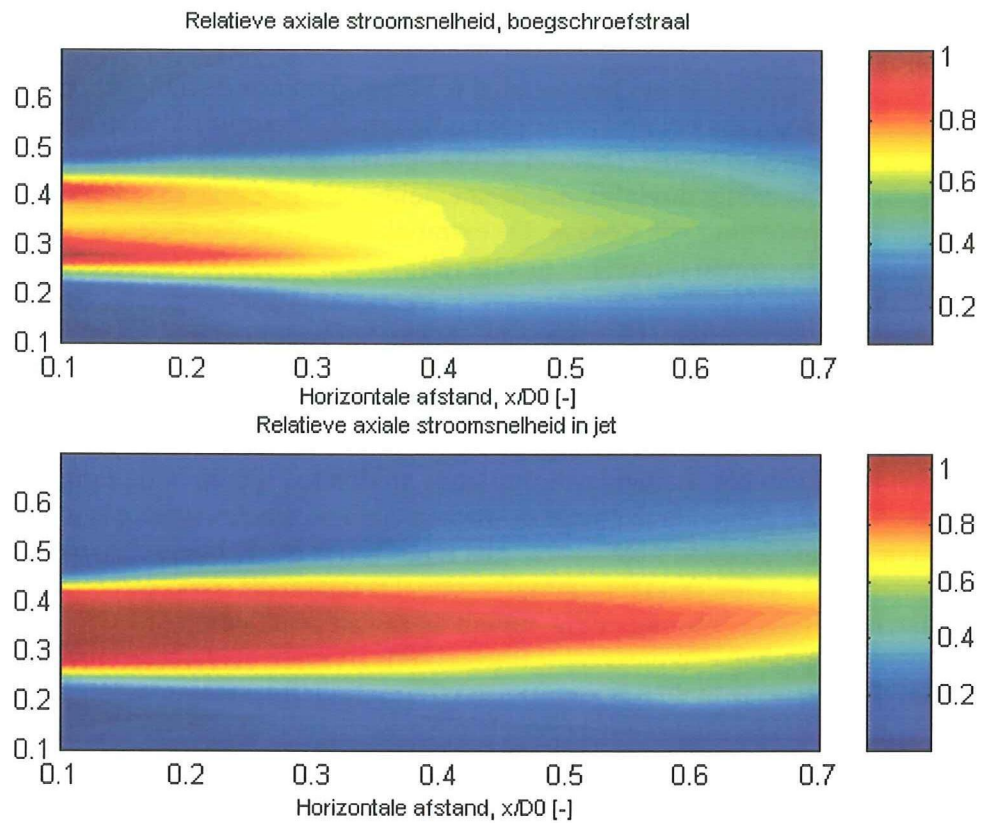
Figuur 4-28: Relatieve turbulentie-intensiteit in de jet.

4.4 Evaluatie

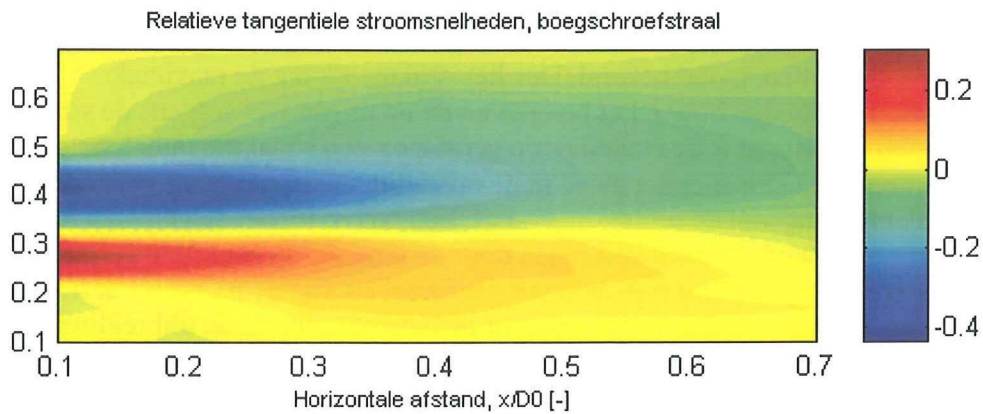
Het doel van dit onderzoek is om twee stralen te vergelijken aan de hand van de steenstabiliteit. Hiervoor is het onder andere nodig om de stroomsnelheden ter plaatse van het talud te kunnen schatten. Daarom is hier een rekenmodel opgesteld aan de hand van metingen. Het is echter duidelijk dat de snelheidsmetingen op een te korte afstand achter de uitstroomopening zijn gedaan. De extrapolatie van de data kan voor grote onnauwkeurigheden zorgen buiten het meetbereik.

Een aantal zaken zijn naar voren gekomen bij de snelheidsmetingen:

1. Er is een groot verschil in de snelheidsvelden van de boegschroefstraal en de jet. Ten eerste neemt de maximale stroomsnelheid in de boegschroefstraal sneller af dan in de jet. Dit is te zien in Figuur 4-29 waarin de data is geïnterpoleerd om een goed beeld van het snelheidsverloop in de stralen te krijgen. In de figuur geeft de kleur rood de gebieden aan waar de stroomsnelheid slechts weinig is afgenomen ten opzichte van de initiële stroomsnelheid. Ook is bij de boegschroefstraal duidelijk de invloed van de schroef te zien. De maximale stroomsnelheden treden daar, nabij de uitstroomopening, niet in de as van de straal op. In de jet is nabij de uitstroomopening een meer uniforme verdeling van de axiale stroomsnelheden te zien. Daarnaast is in de boegschroefstraal een duidelijke tangentiële stroomsnelheidscomponent aanwezig die afwezig is in de jet. In Figuur 4-30 zijn de relatieve tangentiële stroomsnelheden in de boegschroefstraal weergegeven. Hier is duidelijk te zien dat er een draaiing aanwezig is. In het blauwe gebied is de stroomsnelheid het papier uit gericht en in het rode gebied het papier in.
2. Het verloop van de maximale stroomsnelheid in relatie tot de initiële stroomsnelheid is niet te beschrijven met behulp van de straaltheorie. Dit geldt voor zowel de boegschroefstraal als voor de jet. Hiervoor kunnen twee redenen worden aangewezen. Ten eerste is het gehele verloop van de maximale stroomsnelheden niet bekend. Dus het is mogelijk dat de maximale stroomsnelheden buiten het bereik van de metingen wel volgens de straaltheorie lopen. Daarnaast is de straaltheorie gericht op een straal die onbelemmerd kan uitbreiden. Dit is niet het geval in de opstelling, waar het talud voor een belemmering van de uitbreiding zorgt. Een betere fit van de gemeten maximale stroomsnelheden wordt verkregen door de notatie van Hamill te gebruiken.
3. De spreiding van zowel de boegschroefstraal als van de jet neemt af richting het talud. Dit kan worden verklaard door de belemmering in de uitbreiding door de aanwezigheid van het talud. In de straaltheorie wordt aangenomen dat de spreiding constant is voor iedere afstand vanaf de uitstroomopening.



Figuur 4-29: Geïnterpoleerde axiale stroomsnelheidsvelden van boegschroefstraal en jet.



Figuur 4-30: Geïnterpoleerde tangentiële stroomsnelheden in de boegschroefstraal, V/U_0 [-].

De rekenmodellen die in de volgende hoofdstukken worden gebruikt om de stroomsnelheden ter plaatse van het talud te kunnen schatten zijn hieronder samengevat:

boegschroefstraal:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 1,1 - 0,14 \left(\frac{x}{D_0} \right) \quad \text{voor } x/D_0 < 3 \quad (4-10)$$

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 0,83 - 0,046 \left(\frac{x}{D_0} \right) \quad \text{voor } x/D_0 > 3 \quad (4-11)$$

$$\frac{U_{x,r}}{U_{x,\max}} = \exp \left(-34,3 * \left(\frac{r}{x} \right)^2 \right) \quad \text{voor } x/D_0 < 6,8 \quad (4-14)$$

jet:

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 1 \quad \text{voor } x/D_0 < 4,2$$

$$\frac{U_{x,\max}}{U_0} = 3,0 * \left(\frac{D_0}{x} \right) + 0,29 \quad \text{voor } x/D_0 > 4,2 \quad (4-15)$$

$$\frac{U_{x,r}}{U_{x,\max}} = \exp \left(-51,5 * \left(\frac{r}{x} \right)^2 \right) \quad \text{voor } x/D_0 < 4,9 \quad (4-17)$$

5 Stabiliteitsmetingen

Naast snelheidsmetingen zijn ook stabiliteitsmetingen gedaan. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de stabiliteitsmetingen gegeven en wordt de relatie tussen de stroomsnelheden en het aantal verplaatste steentjes bepaald.

De stabiliteitsmetingen zijn uitgevoerd om de stabiliteit bij twee verschillende belastingen te kunnen vergelijken. De twee verschillende belastingen zijn de boegschroefstraal en de jet.

5.1 Metingen

De uitkomst van de stabiliteitsmetingen is de relatie tussen het aantal verplaatste steentjes en de stroomsnelheid ter plaatse van de stenen. Omdat er geen snelheidsmetingen zijn verricht ter plaatse van de steentjes, is gezocht naar een relatie tussen het aantal verplaatste steentjes en de initiële stroomsnelheid. Om deze relatie te vinden is bij verschillende initiële stroomsnelheden bepaald hoeveel steentjes er waren verplaatst. Dit is bij steeds hogere stroomsnelheden gebeurd, waarbij de steentjes die waren verplaatst bij de vorige stroomsnelheid niet zijn teruggeplaatst. Er is dus sprake van cumulatieve schade. De stroomsnelheid is bij de metingen met de boegschroefstraal opgevoerd tot de bodem zichtbaar was. Bij de metingen met de jet is de stroomsnelheid opgevoerd tot een bepaalde waarde waarbij ongeveer een even groot aantal steentjes verplaatst was als het maximale aantal bij de metingen met de boegschroefstraal. Eén stabiliteitsmeting, van de laagste tot de hoogste snelheid, wordt een run genoemd in dit verslag.

Uit de relatie tussen het aantal verplaatste steentjes en de stroomsnelheid is te bepalen wat de kritieke stroomsnelheid is. Bij de kritieke stroomsnelheid verplaatst een, door de ontwerper te bepalen, acceptabel aantal steentjes.

Een steentje is verplaatst als het over de grens gaat van het vakje waar het lag aan het begin van de run. Als een reeds verplaatst steentje bij een hogere belasting nogmaals verplaatst, werd dit niet genoteerd. Eén steentje kan dus slechts één keer verplaatsen. Een steentje is over de grens als het midden van het steentje over de grens is. Van een verplaatst steentje is zo nauwkeurig mogelijk genoteerd waar het vandaan kwam en waarheen het bewoog, zie Bijlage 3.3. Dit wordt in hoofdstuk 6 gebruikt om meer over de relatie tussen de berekende stroomsnelheden ter plaatse van het talud en de verplaatsingen van de steentjes te kunnen zeggen.

Bij de eerste run is de initiële stroomsnelheid opgevoerd met discrete stappen van 0,063 m/s beginnend bij 0 m/s. Bij iedere stap werd de initiële stroomsnelheid constant gehouden, totdat er 15 minuten lang geen steentje meer was bewogen. Dit betekent dat een stap soms wel meer dan een uur duurde. Omdat bij de eerste run de eerste verplaatsing bij een initiële stroomsnelheid van 0,28 m/s optrad, is besloten om iedere volgende run bij een initiële stroomsnelheid van 0,15 m/s te beginnen. De reden waarom

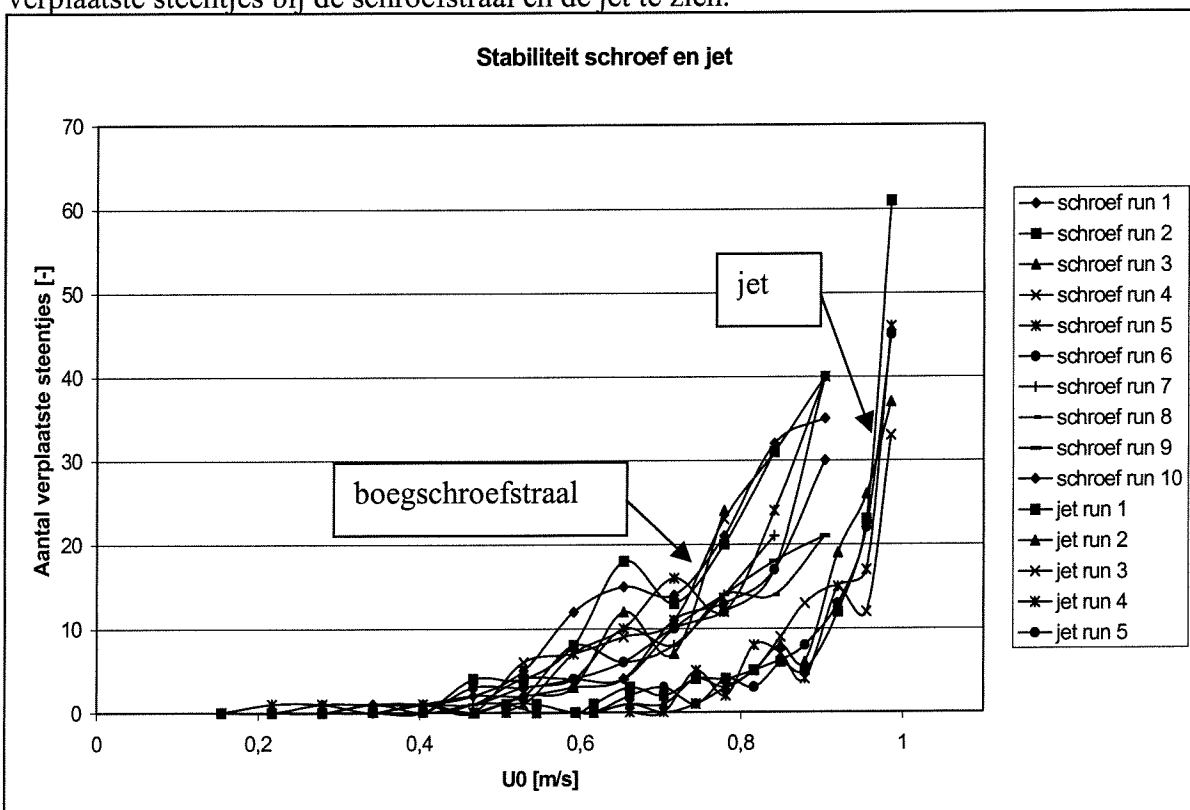
met 0,063 m/s is opgevoerd is dat het toerental van de schroef eenvoudig met die stappen op te voeren was.

Bij metingen met de jet werd ook bij de eerste run bij nul begonnen en werd de initiële stroomsnelheid met ongeveer 0,036 m/s per stap opgevoerd. De eerste verplaatsing vond bij de eerste run plaats bij een initiële stroomsnelheid van 0,51 m/s. Bij de volgende runs werd begonnen bij 0,46 m/s. In hoofdstuk 4 is reeds beschreven hoe de initiële stroomsnelheid is bepaald.

De stabiliteitsmetingen met de boegschroefstraal zijn tien keer herhaald. Omdat bleek dat de curve van de stabiliteitsmetingen van de jet duidelijk afweek van die van de boegschroefstraal, is volstaan met 5 herhalingen voor de jet. Het was immers reeds duidelijk dat de stabiliteit onder invloed van een boegschroefstraal en van een jet ongelijk was.

5.2 Stabiliteit

In Figuur 5-1 zijn de tien runs van de stabiliteitsmetingen met de schroef en de vijf runs met de jet weergegeven. Er is een duidelijk verschil tussen het verloop van het aantal verplaatste steentjes bij de schroefstraal en de jet te zien.



Figuur 5-1: Aantal verplaatste steentjes in relatie tot de initiële stroomsnelheid.

Zoals reeds vermeld is, zijn er met behulp van de schroefstraal tien runs gedaan en met behulp van de jet vijf runs. De stabiliteitsproeven met de schroefstraal zijn het eerst

uitgevoerd. Hierbij bleek na tien runs een duidelijke trend te zijn ontstaan. Bij de daaropvolgende stabiliteitsproeven met de jet bleek dat de trend van de schroefstraal niet werd gevolgd. Vijf runs waren voldoende om met grote zekerheid te kunnen zeggen dat de belasting door een schroefstraal en door een jet niet dezelfde stabiliteit opleverden.

In Figuur 5-1 is te zien dat het aantal verplaatste steentjes niet altijd evenredig met de snelheid verloopt, maar dat er een knik in het verloop optreedt. Hier is het aantal verplaatste steentjes bij een bepaalde snelheid minder dan bij een lagere stroomsnelheid. Dit komt door versterking van het bed. Als bij een bepaalde stand steentjes verplaatst, ontstaat er een nieuwe evenwichtssituatie. Steentjes die instabiel lagen zijn verplaatst, maar ook niet verplaatste steentjes zijn stabiel gaan liggen door bijvoorbeeld een dichtere pakking. Er is dan een hogere snelheid nodig, dan de snelheid van de volgende stand, om het stabielere bed aan het bewegen te krijgen.

Om een duidelijker beeld te krijgen van het verloop van het aantal verplaatste steentjes in relatie tot de initiële stroomsnelheid is in Figuur 5-2 het gemiddelde van het beperkte aantal gemeten waarden weergegeven. Daarnaast zijn de grenzen gegeven waarbinnen, met een zekerheid van 95%, het gemiddelde van een oneindig aantal metingen zou liggen.

De grenzen zijn bepaald met behulp van Barber (1988). Gebruik wordt gemaakt van de student-t verdeling. De student-t verdeling is een, aan het aantal meetwaarden aangepaste, normaalverdeling. Om de grenzen te berekenen wordt de volgende formule gebruikt:

$$x_{\min, \max} = x_{\text{gem}} \pm t_{\alpha/2, df=n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5-1)$$

waarin:

$x_{\min, \max}$	= onder- of bovengrens van zekerheidsgebied,	
x_{gem}	= gemiddelde van de meetwaarden,	
α	= zekerheidsniveau = 0,05 bij 95% zekerheid	[-],
$t_{\alpha/2, df=n-1}$	= constante in de student-t verdeling, afhankelijk van het aantal meetwaarden	[-],
df	= aantal vrijheden = n-1	[-],
n	= aantal meetwaarden	[-],
s	= schatting van de standaarddeviatie.	

De schatting van de standaarddeviatie wordt als volgt gedaan:

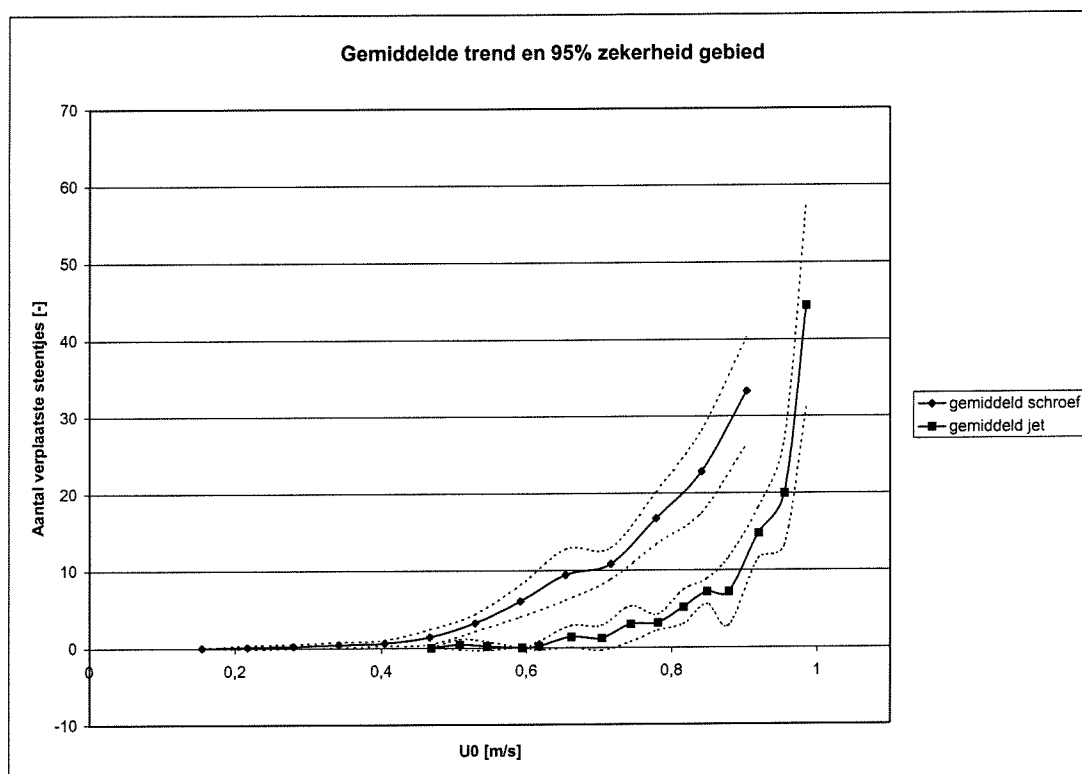
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{gem}})^2}{n-1}} \quad (5-2)$$

waarin:

x_i = een meetwaarde.

Met behulp van bovenstaande formules is een interval te berekenen waarbinnen met 95% zekerheid de gemiddelde waarde valt als een oneindig aantal proeven wordt gedaan. De intervallen voor de boegschroefstraal en de jet zijn weergegeven in Figuur 5-2. Hierin is te zien dat er een duidelijk verschil is tussen het verloop van het transport bij de

boegschroef en bij de jet. Dit kan met grote zekerheid worden gezegd, omdat de 95% zekerheidsintervallen niet over elkaar heen vallen.



Figuur 5-2: Gemiddelde relatie tussen aantal verplaatste steentjes en de initiële stroomsnelheid.

Een doelstelling van dit onderzoek is om te bekijken hoe een boegschroefstraal kan worden gemodelleerd. Om een boegschroefstraal te modelleren wordt in sommige onderzoeken gebruik gemaakt van een jet met een gelijke initiële diameter en een gelijke initiële stroomsnelheid. Aan de hand van Figuur 5-2 is te zeggen dat dit niet juist is, als het doel van de modelproeven is om de stabiliteit te onderzoeken. De proefresultaten geven aan dat in dat geval de boegschroefstraal niet mag worden gemodelleerd door een jet met een gelijke initiële diameter en stroomsnelheid.

Wat verder opvalt in Figuur 5-2 is dat het verloop van het aantal verplaatste steentjes verschillend is voor de twee stralen. Het aantal steentjes neemt geleidelijk toe bij toenemende initiële stroomsnelheid in het geval van de schroefstraal. In het geval van de jet is er sprake van een zeer sterke toename bij initiële stroomsnelheden groter dan ca. 0,9 m/s.

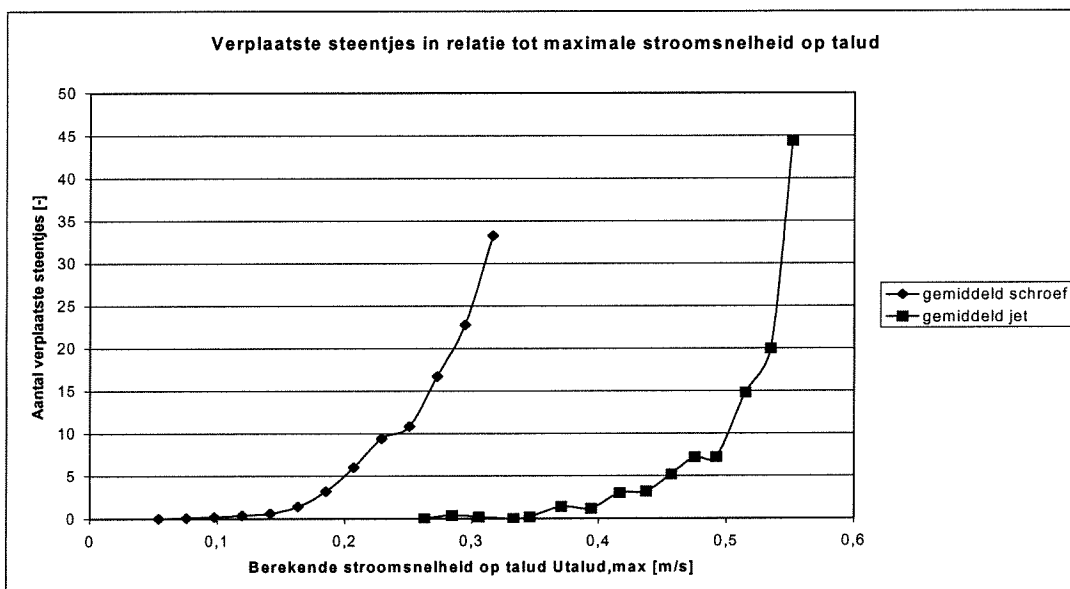
Een andere manier om de boegschroefstraal met behulp van een jet te modelleren is door de maximale stroomsnelheid in de jet en in de boegschroefstraal gelijk te houden ter plaatse van het talud. In Figuur 5-3 zijn de initiële stroomsnelheden uit Figuur 5-2 met behulp van de Nederlandse methode omgerekend naar de maximale stroomsnelheden die op het talud optreden. Het is duidelijk te zien dat, wanneer wordt gekeken naar de stroomsnelheid op het talud, er een duidelijk verschil is tussen het aantal verplaatste steentjes bij gelijke stroomsnelheid op het talud. Wel moet worden gezegd dat de

berekening van de stroomsnelheid met behulp van de Nederlandse methode is gedaan. Zie hoofdstuk 2 voor de beperkingen van deze methode. Met behulp van de methode van Römisch worden iets lagere maximale stroomsnelheden op het talud berekend. Zie voor de berekening van de stroomsnelheden op het talud Tabel 5-1.

Hier is gebruik gemaakt van de Nederlandse methode. Deze methode is gebaseerd op de beschrijving van de maximale stroomsnelheden in de straal volgens de straaltheorie. Het rekenmodel dat in hoofdstuk 4 is gehanteerd om het verloop van de maximale stroomsnelheid te beschrijven wijkt echter af van de straaltheorie. De afleiding voor de locatie van waar de maximale stroomsnelheid op het talud optreedt, kan daarom niet zo eenvoudig worden gemaakt. Omdat de locatie voornamelijk afhangt van de verspreidingscoëfficiënt b , wordt er hier van uitgegaan dat de Nederlandse methode wel toepasbaar is.

Tabel 5-1: Bepaling maximale stroomsnelheid op het talud.

methode	schroef	jet
Nederlandse	$U_{\max}/U_0=0,35$	$U_{\max}/U_0=0,56$
Römisch	$U_{\max}/U_0=0,33$	



Figuur 5-3: Aantal verplaatste steentjes in relatie tot berekende maximale stroomsnelheid op het talud.

Het verschil tussen Figuur 5-2 en Figuur 5-3 wordt veroorzaakt door het verschillende gedrag van de axiale stroomsnelheden van de twee stralen. In Figuur 4-29 is te zien dat de stroomsnelheid sneller afneemt in de schroefstraal dan in de jet. Dus bij gelijkblijvende initiële stroomsnelheid zal er een grotere stroomsnelheid op het talud optreden bij een jet dan bij een boegschroefstraal. Het is dan des te merkwaardiger dat ondanks het feit dat de jet, die bij gelijkblijvende initiële stroomsnelheid veel hogere snelheden op het talud geeft, er veel minder stenen worden verplaatst. Hier wordt in hoofdstuk 6 nader op ingegaan.

5.3 Evaluatie

Met Figuur 5-2 en Figuur 5-3 is een vraag, waarvan de beantwoording een doel is van dit onderzoek, beantwoord. Het is niet toegestaan om in een modelopstelling een boegschroefstraal eenvoudigweg te modelleren met een jet. De relatie tussen het aantal verplaatste steentjes onder belasting van een jet en een boegschroefstraal komen niet overeen. Een verder onderzoek zou eventueel aan kunnen tonen dat door aanpassing van de jet dit wel mogelijk is. De afweging tussen de kosten van dit extra onderzoek en de lagere kosten van een eenvoudigere opstelling moet dan worden gemaakt.

6 Stabiliteitsanalyse

In dit hoofdstuk wordt het verschil dat in hoofdstuk 5 aan het licht kwam tussen de stabiliteit van stenen onder belasting van een boegschroefstraal en een jet nader bekeken.

Ten eerste wordt de stabiliteitsparameter van Izbash bepaald. Omdat er een groot verschil is tussen de stabiliteitsparameters voor de boegschroefstraal en de jet, worden meerdere invloeden in de stabiliteitsrelatie verwerkt. Bekeken wordt of deze invloeden verantwoordelijk zijn voor het verschil.

Deze analyse wordt gedaan om meer inzicht te krijgen in de processen die verantwoordelijk zijn voor de verplaatsing van de stenen. Dit kan in eventueel vervolgonderzoek worden gebruikt om te bepalen wat en hoe moet worden gemeten om een goed inzicht te krijgen in de stabiliteit van stenen op een talud die worden belast door een boegschroefstraal.

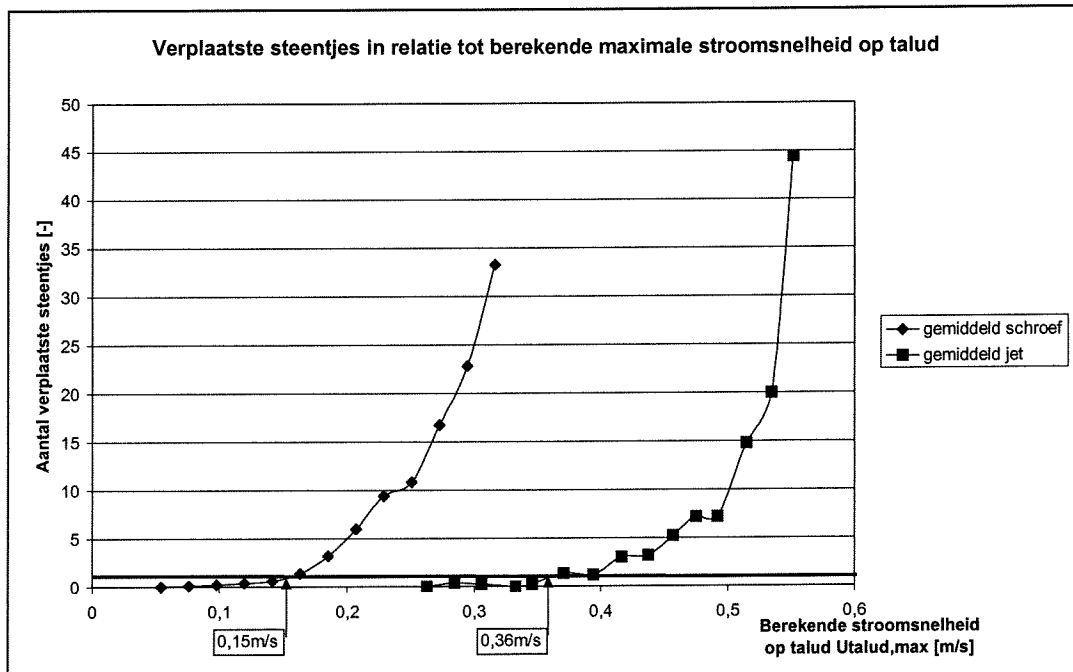
6.1 Begin van bewegen

In hoofdstuk 2 is de stabiliteitsrelatie van Izbash gegeven. In deze stabiliteitsrelatie is een kritieke stroomsnelheid aangegeven. De kritieke stroomsnelheid is de stroomsnelheid waarbij de stenen beginnen te bewegen. Het begin van bewegen kan worden gekozen waarbij geen stenen bewegen, of waarbij weinig stenen verplaatsten. Dit is echter een erg vage omschrijving die per onderzoeker anders wordt toegepast. Omdat iedere onderzoeker een andere definitie gebruikt, zijn de verschillende stabiliteitsparameters moeilijk te vergelijken.

6.1.1 Geen beweging

Bij bepaling van de definitie van het begin van bewegen moet de praktijk in ogenschouw worden genomen. Voor de grens van geen beweging wordt daarom niet nul verplaatste stenen gebruikt, maar een verwaarloosbaar aantal stenen. De grens van nul verplaatste stenen is erg conservatief en zal in een ontwerp tot erg grote stenen leiden. Hier wordt voor een verwaarloosbaar aantal stenen één steen als grens gebruikt. Dit zal bij een ontwerp ook tot erg grote stenen leiden, maar toch aanzienlijk minder erg dan bij de grens van nul stenen.

In Figuur 6-1 is te zien dat voor de boegschroefstraal de kritieke initiële stroomsnelheid bij geen beweging 0,15 m/s is. Voor de jet is dit 0,36 m/s.

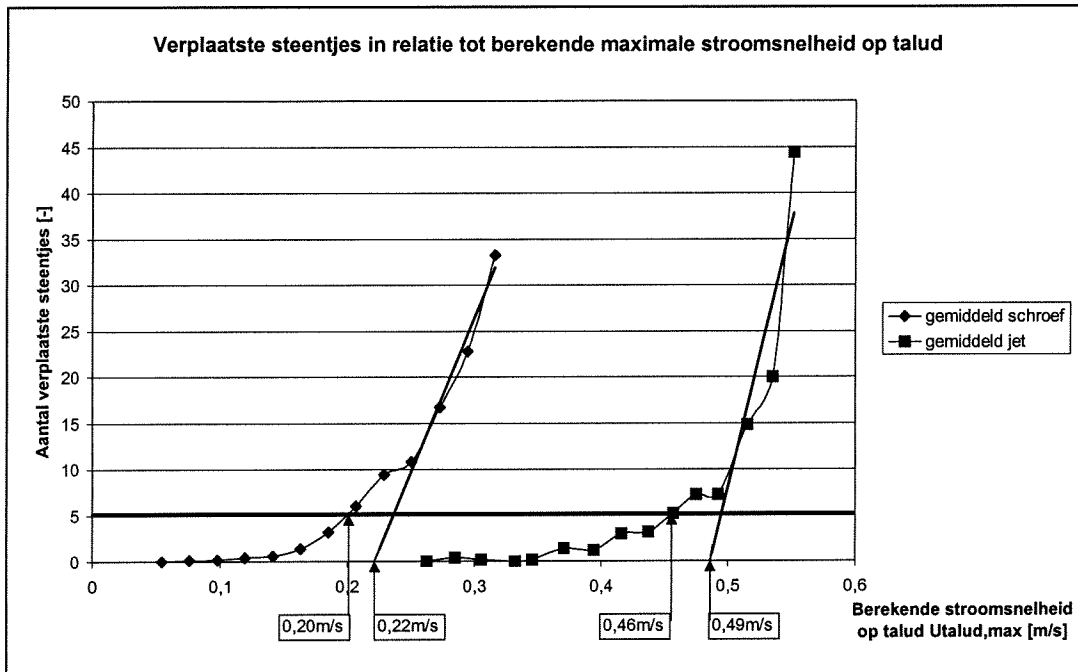


Figuur 6-1: Bepaling kritieke stroomsnelheid bij geen beweging.

6.1.2 Weinig beweging

De grens van geen beweging is conservatief. Het is ook mogelijk om meer verplaatste stenen toe te laten als het toelaatbaar is als meer dan één steen verplaatst. De hogere kritieke stroomsnelheid die hieruit volgt zal een lagere stabiliteitsparameter en dus een kleinere steendiameter tot gevolg hebben. Dit levert een kostenbesparing op voor de oeverbescherming. De kosten van onderhoud kunnen echter hoger worden.

De kritieke stroomsnelheid waarbij een nog acceptabel aantal stenen verplaatst kan op twee manieren worden bepaald. De eerste is door een maximaal aantal stenen te bepalen dat mag verplaatsen. Met behulp van de stabiliteitsmetingen is dan te bepalen wat de kritieke stroomsnelheid is. Dit maximale aantal stenen moet worden bepaald aan de hand van de afweging tussen de lagere kosten van de bescherming en de hogere onderhoudskosten. In Figuur 6-2 is een grens van vijf stenen gebruikt om de kritieke stroomsnelheid aan te geven. Deze grens is laag genomen omdat het niet gewenst dat er veel stenen verplaatsen op een locatie waar reparatie erg moeilijk is. In het geval van een dek op palen is reparatie moeilijk. Bepaling van het maximale aantal stenen dat mag verplaatsen leidt tot de kritieke stroomsnelheden in Tabel 6-1.



Figuur 6-2: Bepaling kritieke stroomsnelheid bij weinig beweging.

De andere methode om de kritieke stroomsnelheid te bepalen is door te bepalen waar de trendlijn door de hogere waarden van de verplaatsingskromme de nul snijdt. Met behulp van deze methode wordt een kritieke stroomsnelheid berekend waarboven de schade snel toeneemt. De trendlijnen zijn in Figuur 6-2 weergegeven door de vier laatste meetpunten van de twee belastingen. De waarde van de berekende stroomsnelheid op het talud waar de trendlijn snijdt met de as is de kritieke stroomsnelheid. De waarden die deze methode oplevert zijn tevens in Tabel 6-1 weergegeven. Deze methode levert een hogere kritieke stroomsnelheid op dan wordt verkregen met de vorige methode.

In de situatie van een talud onder een dek op palen is schade moeilijk te herstellen. Daarom wordt kritieke stroomsnelheid van de eerste, conservatievere methode gebruikt.

Tabel 6-1: Bepaling kritieke stroomsnelheid.

Kritieke stroomsnelheid [m/s]	boegschroefstraal	jet
maximum aantal steentjes	0,20	0,46
trendlijn	0,22	0,49

Er zijn nu twee criteria gevonden aan de hand waarvan met behulp van de stabiliteitsformule een steendiameter kan worden berekend. Hiermee wordt voor de stabiliteit een handvat verkregen waarmee het verschil in stabiliteit tussen de twee stralen kan worden beschreven.

Tabel 6-2: Kritieke stroomsnelheden voor geen en weinig beweging.

Kritieke stroomsnelheid [m/s]	geen beweging	weinig beweging
boegschroefstraal	0,15	0,20
jet	0,36	0,46

6.2 Berekening stabiliteitsparameter

Zoals in hoofdstuk 2.3 is vermeld, wordt in de stabiliteitsparameter van Izbash gebruik gemaakt van één enkele parameter voor alle factoren die invloed hebben op de stabiliteit. Voor iedere situatie moet afzonderlijk proefondervindelijk een stabiliteitsparameter worden bepaald. Voor de situatie zoals die is gemodelleerd voor de modelproeven is een stabiliteitsparameter te berekenen met behulp van de kritieke stroomsnelheden uit de vorige paragraaf.

De stabiliteitsparameter wordt berekend met behulp van (2-57):

$$\beta_{Iz} = \frac{2 * g * \Delta * D_{50}}{U_b^2} \quad (2-57)$$

De kritieke stabiliteitsparameter, $\beta_{Iz,cr}$, wordt verkregen door de kritieke situatie in te vullen in (2-57). In Tabel 6-3 zijn de berekende waarden van de stabiliteitsparameter gegeven die zijn berekend met behulp van de kritieke stroomsnelheden uit Tabel 6-2 en de volgende waarden:

$$\begin{aligned} D_{50} &= 8,4 * 10^{-3} && [\text{m}], \\ g &= 9,81 && [\text{m/s}^2], \\ \Delta &= 1,65 && [-]. \end{aligned}$$

Tabel 6-3: Kritieke stabiliteitsparameters.

Kritieke stabiliteitsparameter $\beta_{Iz,cr}$ [-]	geen beweging	weinig beweging
boegschroefstraal	12,1	6,8
jet	2,1	1,3

In Tabel 6-3 is duidelijk te zien dat de stabiliteitsparameters van de boegschroefstraal en de jet verschillend zijn. Bij de jet is een grotere berekende stroomsnelheid op het talud toegestaan alvorens de kritieke stabiliteitssituatie wordt bereikt. De stabiliteitsparameters van de boegschroefstraal zijn hoger dan de waarden gegeven in Tabel 2-2, deze waarden zijn nogmaals weergegeven in Tabel 6-4 voor een compleet overzicht.

Tabel 6-4: Kritieke stabiliteitsparameters van Izbash voor schroefstralen.

Kritieke stabiliteitsparameter $\beta_{Iz,cr}$ [-]	Bepaald voor:	geen beweging	weinig beweging
boegschroefstraal	talud 1:3	12,1	6,8
jet	talud 1:3	2,1	1,3
Römisch (1993)	boegschroefstraal tegen kademuur		1,4
WL (1985)	vrije schroef straal boven horizontaal bed	6,6	4,1
Blokland (1997)	vrije schroefstraal tegen kademuur	3,0	2,5

De stabiliteitsparameters in Tabel 6-4 die door Römisch (1993) zijn gegeven zijn aan de lage kant. Dit komt omdat hij een berekening voor de stroomsnelheid hanteert die hoge waarden oplevert in vergelijking met de berekening van Blokland (1997). Verder valt op dat de stabiliteitsparameters, zoals die hier bepaald zijn voor de boegschroef, sterk afwijken van de parameters van de jet, van Römisch (1993) en van Blokland (1997). Het verschil met de jet is reeds eerder naar voren gekomen. Het verschil met Römisch (1993) en Blokland (1997) kan misschien worden verklaard door het feit dat de boegschroefstraal direct de steentjes raakt. Bij Römisch (1993) en Blokland (1997) raakt de schroefstraal eerst de kademuur. Dit zou invloed kunnen hebben op de turbulentie en de tangentiële stroomsnelheden in de schroefstraal. De parameters van het WL (1985) liggen ook hoger dan bij een schroefstraal tegen een kademuur. De stabiliteitsparameters van het WL (1985) zijn bepaald voor een vrije schroefstraal boven een horizontaal bed. Hier heeft de schroefstraal ook direct contact met het bed, net als de boegschroefstraal.

In de volgende paragraaf zal naar verschillende factoren worden gekeken die een invloed hebben op de stabiliteit. Gekeken zal worden of deze factoren verantwoordelijk kunnen zijn voor de relatief hoge waarde van de stabiliteitsparameter. Als blijkt dat bepaalde factoren van grote invloed zijn op de stabiliteit, kan hiermee rekening worden gehouden bij eventueel vervolgonderzoek.

6.3 Invloedsanalyse

In de stabiliteitsrelatie van Izbash kunnen correctiefactoren worden gebruikt voor de helling en de turbulentie. Bekeken wordt of deze invloeden ook in de onderhavige situatie invloed hebben. Daarnaast zal er worden gekeken of de tangentiële stroomsnelheid die in de boegschroefstraal optreedt en het afbuigen van de straal richting het talud invloed hebben op de stabiliteitsberekening.

De Izbash-formule ziet er als volgt uit:

$$\beta_{Iz} = \frac{2 * g * \Delta * D_{50}}{U_b^2}$$

In deze formule worden nu een correctiefactor voor de helling en de invloed van de turbulentie verwerkt. De correctiefactor voor de helling is reeds in hoofdstuk 2 beschreven. De invloed van de turbulentie kan op twee manieren worden verwerkt in de stabiliteitsformule. Ten eerste door een empirisch te bepalen correctiefactor, K_V , toe te passen. Deze factor kan hier worden bepaald. Als echter de stabiliteitsparameters die in de vorige paragrafen worden gebruikt, dan wordt een correctiefactor voor de turbulentie verkregen van 1. Op deze manier is geen inzicht te verkrijgen in de invloed van de turbulentie op de stabiliteit.

Omdat de turbulentie-intensiteit is gemeten, kan hier gebruik worden gemaakt van de nauwkeurigere methode uit paragraaf 2.3.2 om de turbulentie mee te nemen. Er wordt dan in plaats van de bodemstroomsnelheid U_b gebruik gemaakt van een maximale

stroomsnelheid die slechts 1% van de tijd optreedt op het talud. De stabiliteitsrelatie wordt dan:

$$\beta = \frac{2 * g * \Delta * D_{50}}{m_h * U_{talud,max,1\%}^2}$$

waarin:

β	= empirisch te bepalen stabiliteitsparameter	[-],
m_h	= correctiefactor voor de helling	[-],
$U_{talud,max,1\%}$	= maximale stroomsnelheid op het talud die slechts 1% van de tijd optreedt	[m/s].

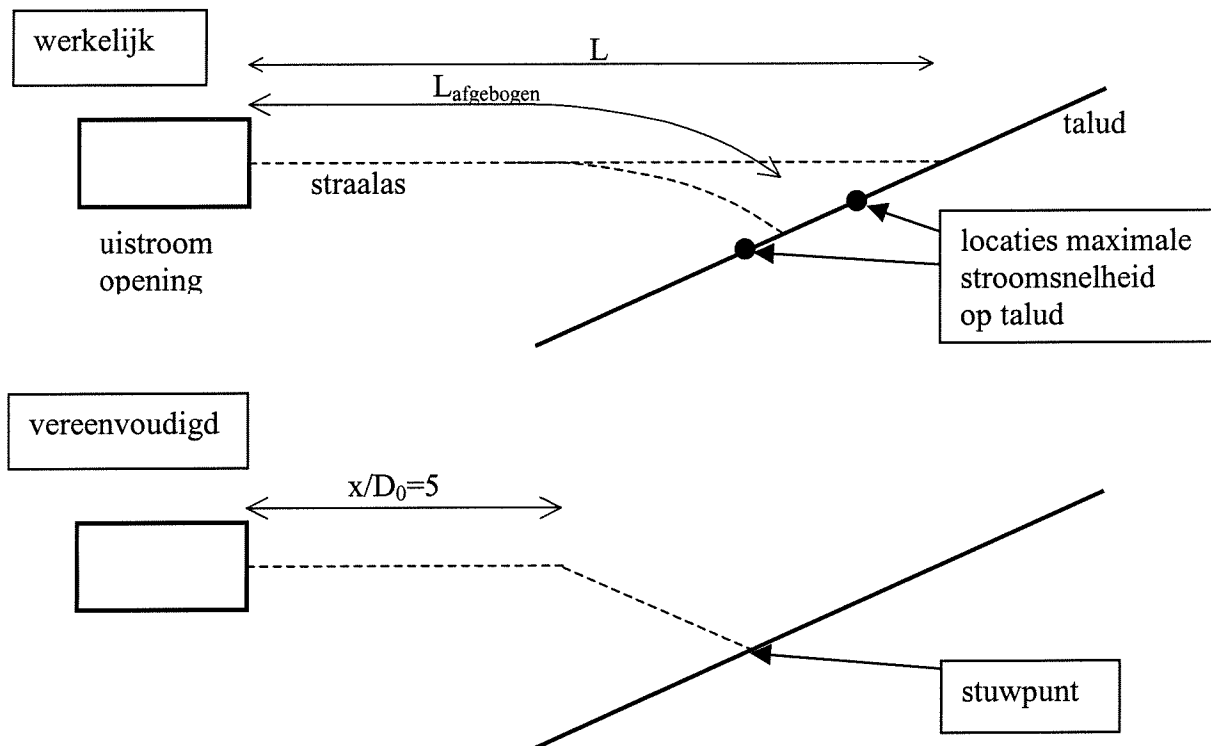
Om een nadere analyse van de invloed van verschillende factoren te kunnen maken zijn tijdens de stabiliteitsmetingen de verplaatsingen van de steentjes nauwkeurig genoteerd. Hierdoor is een duidelijk beeld ontstaan van de bewegingen van de steentjes op het talud onder invloed van de boegschroefstraal en van de jet. De verplaatsingen zijn in Figuur 1 en Figuur 7 in Bijlage 6.1 voor de jet en de boegschroefstraal weergegeven. In deze figuren zijn de vierkantjes zoals die zijn aangebracht op het talud, zie Figuur 3-6, weergegeven. Deze vakjes zijn langs de x- en de y-as genummerd. Ieder vakje heeft in het model een afmeting van 5 cm bij 5 cm. Met een zwarte lijn is aangegeven waar de grens is tot waar steentjes zijn bewogen. In deze figuren is duidelijk te zien dat de jet over een groter gebied invloed heeft. Het invloedsgebied van de jet strekt zich over de gehele hoogte van het meetvlak uit. Bij de boegschroefstraal verplaatsen steentjes in een kleiner gebied, dat dichterbij de bodem ligt. Daarnaast is te zien dat in de boegschroefstraal de verplaatsingen erg geconcentreerd zijn. Er is één vakje waaruit duidelijk de meeste steentjes bewegen. Bij de jet is dit minder het geval. In Figuur 2 en Figuur 8 zijn de netto verplaatsingen weergegeven. Het is te zien dat in het geval van de jet de steentjes gelijkmatig over het invloedsgebied zijn verdeeld, terwijl voor de boegschroefstraal wederom een concentratie optreedt. In Figuur 3 en Figuur 9 zijn de gemiddelde verplaatsingsrichting per vakje gegeven. Bij de jet wijzen de richtingen van het stuwpunt af, alle kanten op. Bij de boegschroefstraal lijkt het er echter op alsof de steentjes vooral naar links en rechts bewegen. In Figuur 4 en Figuur 10 zijn wederom de richtingen gegeven, maar nu stelt de lengte van de pijl de gemiddelde verplaatsingsafstand voor.

6.3.1 Berekenende stroomsnelheden op het talud, $U_{talud,max}$

Er zijn geen snelheidsmetingen uitgevoerd ter plaatse van het talud. In hoofdstuk 2 is echter de Nederlandse methode besproken om de stroomsnelheden op het talud te kunnen berekenen. Deze methode gaat ervan uit dat de aanwezigheid van het talud een verwaarloosbare invloed heeft op de stroomsnelheden die optreden ter plaatse van het talud. In Figuur 5 en 11 in Bijlage 6.1 zijn de stroomsnelheden zoals die zijn berekend met behulp van de Nederlandse methode voor de situaties met de jet en de boegschroefstraal weergegeven. In deze figuren is tevens aangegeven waarvandaan en hoeveel steentjes zijn verplaatst.

In beide figuren is duidelijk te zien dat op de locatie waar, met behulp van de Nederlandse methode is berekend dat de maximale stroomsnelheid optreedt, niet het

maximale aantal steentjes verplaatst. De locatie waar de maximale stroomsnelheid optreedt ligt op het talud boven de locatie waar het maximale aantal steentjes verplaatst. In eerdere onderzoeken van Beltaos (1976) en WL (1985) is reeds geconstateerd dat een jet of een schroefstraal die schuin op een vlak is gericht de neiging heeft af te buigen richting dat vlak. Als de schroefstraal en de jet in de opstelling richting het vlak afbuigen, dan zal de maximale stroomsnelheid lager op het talud optreden dan wordt berekend met behulp van de Nederlandse methode. Dit zou kunnen resulteren in hogere maximale stroomsnelheden op het talud, omdat de afstand vanaf de uitstroomopening tot het talud kleiner is en dus de maximale stroomsnelheid op die locatie minder is afgenomen, zie Figuur 6-3.



Figuur 6-3: Afbuiging van de straalas en de schematisatie hiervan.

Beltaos (1997) heeft dit met een schuin op een vlak vallende luchtstraal gedaan. Hij geeft aan dat een straal onder een hoek van 20° afbuigt over éénvijfde van de afstand L zoals is aangegeven in Figuur 6-3. Dat zou hier betekenen dat het snijpunt van de straalas en het talud over $0,2 * 1,16 = 0,23$ m langs het talud naar beneden verplaatst ten opzichte van het snijpunt van een rechte straalas met het talud. Het WL (1985) geeft op basis van metingen met een vrije schroefstraal gericht op een helling van 1:4 de volgende formule voor de afbuiging van de straalas:

$$\frac{y}{x} = -0,0015 * \left(\frac{x}{D_0}\right)^{1,6} \quad (6-1)$$

Als wordt aangenomen dat de straalas het talud snijdt waar de lijn het talud snijdt, dan verplaatst het snijpunt met 0,17 m naar beneden.

Met behulp van de richtingen van de verplaatste steentjes is te bepalen waar het stuwpunt zich bevindt op het talud. Het stuwpunt is het punt waar de maximale druk op het talud optreedt en vanwaar de stroming zich alzijdig over het talud verspreidt.

In het geval van de boegschroefstraal bevindt het stuwpunt zich 0,175 m vanonder, een verschuiving naar beneden van 0,40 m, zie Figuur 9 in Bijlage 6.1. Dit betekent dat de as van de straal afbuigt richting het talud. In WL (1985) wordt geconstateerd dat de as van de straal na 5 maal de schroefdiameter begint af te buigen. Dit zou betekenen dat in deze metingen in de zevende doorsnede de as reeds ongeveer 0,10 m moet afbuigen naar het talud toe. In Figuur 1 in bijlage 4.1 is te zien dat er sprake is van afbuiging, de maximale stroomsnelheid treedt namelijk onder de as op. Deze afbuiging blijft echter beperkt tot enkele centimeters. Om toch te bekijken hoe het snelheidsverloop op het talud eruit zou zien, wordt aangenomen dat de as van de straal horizontaal blijft tot op 5 maal de diameter van de opening, zie Figuur 6-3. Hierna maakt de as van de straal een knik richting het stuwpunt. Verder blijft de aanname gelden dat het talud geen invloed heeft op de optredende stroomsnelheden op het talud.

Voor de jet worden dezelfde aannamen gedaan als voor de boegschroefstraal. Het stuwpunt van de jet valt echter niet op dezelfde locatie als dat van de boegschroefstraal. Het stuwpunt bevindt zich 0,225 m vanonder, een verschuiving naar beneden van 0,35 m, zie Figuur 3 in Bijlage 6.1.

De verschuivingen die zijn bepaald aan de hand van de verplaatste steentjes zijn groter dan die zijn berekend met behulp van de Beltaos (1997) en WL (1985). Desondanks wordt hier met de hierboven bepaalde verschuivingen gerekend.

Met behulp van de bovenstaande aannamen kan een nieuw snelheidsverloop op het talud worden berekend. In Figuur 6 en 14 in Bijlage 6.1 zijn voor de jet en de boegschroefstraal de snelheden berekend met een knik in de straalas en verder hetzelfde snelheidsprofiel om de as. Het is niet mogelijk om met behulp van de Nederlandse methode de maximale stroomsnelheden te berekenen. Deze zijn bepaald met behulp van de figuren in Bijlage 6.1. De maximale stroomsnelheden zijn in Tabel 6-5 weergegeven.

Tabel 6-5: Maximale berekende $U_{talud,max}$ bij afgebogen straalas.

Straal	$U_{talud,max}$ bij rechte straalas [-]	$U_{talud,max}$ met knik in straalas [-]	$U_{0,krit}$ geen bew. [m/s]	$U_{0,krit}$ weinig bew. [m/s]	$U_{talud,krit}$ geen bew. [m/s]	$U_{talud,krit}$ weinig bew. [m/s]
Boegschroef -straal	$0,35 * U_0$	$0,47 * U_0$	0,43	0,57	0,2	0,27
Jet	$0,56 * U_0$	$0,66 * U_0$	0,64	0,82	0,42	0,54

Uit Tabel 6-5 blijkt dat de maximale berekende stroomsnelheid op het talud sterk wordt beïnvloed door de afbuiging van de straalas. Dit komt met name door de kortere afstand van de uitstroomopening tot het snijpunt met het talud, in Figuur 6-3 is $L_{afgebogen}$

(= ± 0,80 m) aanzienlijk korter dan L (= 1,16 m). Alhoewel de straalas niet op de voorgestelde wijze zal afbuigen, is het wel duidelijk dat eventuele afbuiging van belang is bij de berekening van de stroomsnelheden op het talud.

6.3.2 Tangentiële stroomsnelheid, V

Bij de snelheidsmetingen is naast de axiale stroomsnelheid ook de tangentiële stroomsnelheid gemeten. In het geval van de boegschroefstraal treedt een duidelijke tangentiële stroomsnelheid op terwijl die bij de jet te verwaarlozen is. Deze stroomsnelheid is beschreven in hoofdstuk 4.

In Figuur 4-18 is te zien dat V_{\max}/U_{\max} snel afneemt op grotere afstand achter de uitstroomopening. Met een eenvoudige schematisatie van het radiale verloop van $V_{x,r}/V_{\max}$, zie Tabel 6-6, zijn in Figuur 15 in Bijlage 6.1 de relatieve tangentiële stroomsnelheden ter plaatse van het talud weergegeven. Er treedt een maximale waarde van de tangentiële stroomsnelheid van ongeveer 0,036 op. In Figuur 16 zijn de resulterende stroomsnelheden weergegeven van de tangentiële en axiale stroomsnelheden. De resulterende stroomsnelheid wijkt slechts weinig af van de axiale stroomsnelheid, zie Figuur 11. De invloed van de tangentiële stroomsnelheid is op basis hiervan te verwaarlozen en wordt verder niet meegenomen in de stabiliteitsanalyse.

Tabel 6-6: Schematisatie van het verloop van $V_{x,r}/V_{\max}$ aan de hand van Figuur 4-19.

r/x	$V_{x,r}/V_{\max}$
0	0,3
0,1	1
0,3	0,4
0,6	0

6.3.3 Invloed van de helling, m_h

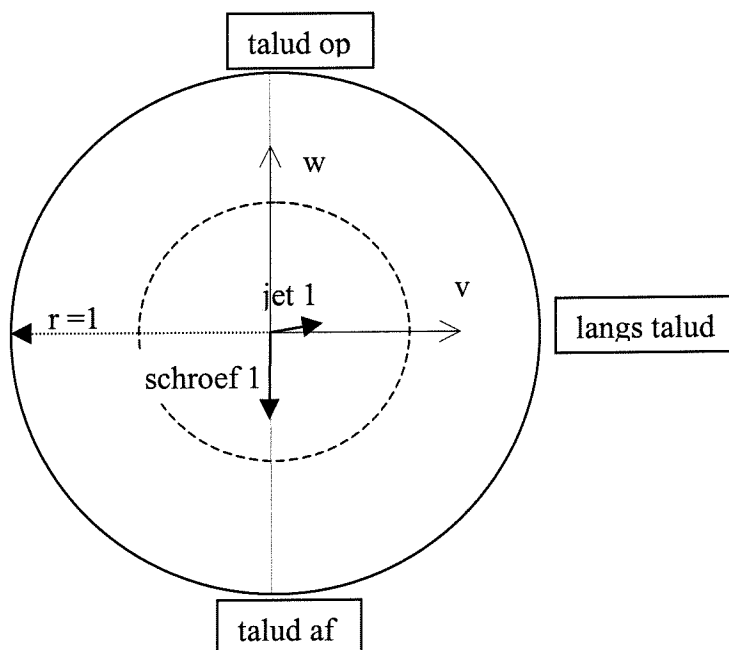
In de stabiliteitsrelatie van Izbash wordt de invloed van de helling verwerkt in de stabiliteitsparameter. Dit betekent dat er voor iedere helling een andere invloed is en daarom een andere stabiliteitsparameter moet worden bepaald. Het is echter ook mogelijk om een correctiefactor voor de helling in de stabiliteitsrelatie te verwerken. Deze correctiefactor wordt over het algemeen toegepast in situaties waarbij de richting van de stroming duidelijk is, bijvoorbeeld bij stroming over een dijk heen. In dit geval is de richting alle kanten op langs het talud. Het is niet bekend of deze correctiefactor in dit geval mag worden toegepast. Het wordt hier slechts gebruikt om een indicatie te krijgen van de verschillende invloed van de helling op de steenstabiliteit bij de twee stralen.

In de stabiliteitsmetingen is voor ieder verplaatst steentje bijgehouden waar het vandaan kwam en waar het heen ging. Dit is gedaan voor iedere run van de stabiliteitsmetingen van de boegschroefstraal en de jet. In Figuur 3 in Bijlage 6.1 is voor de jet en in Figuur 9 voor de boegschroefstraal weergegeven welke richting, per vakje gemiddeld, de steentjes verplaatsten. In Figuur 4 en Figuur 10 is de richting in combinatie met de gemiddelde verplaatste afstand weergegeven.

Om te kunnen bepalen welke correctiefactor voor de helling moet worden toegepast is voor de boegschroefstraal en de jet over alle steentjes de richting gemiddeld. Hierbij wordt iedere verplaatsing weergegeven door een vector met lengte 1. Middeling van alle vectoren van alle verplaatste steentjes resulteert in een vector met bepaalde lengte. De vectoren voor de boegschroefstraal, boeg 1, en voor de jet, jet 1, zijn weergegeven in Figuur 6-4. Voor de duidelijkheid zijn de v- en w-componenten van de vectoren in Tabel 6-7 weergegeven.

Tabel 6-7: Vectoren van de gemiddelde verplaatsingen.

Vector	v-component [-]	w-component [-]
jet 1	0,15	0,04
schroef 1	-0,01	-0,30



Figuur 6-4: Gemiddelde verplaatsingsrichting van de steentjes.

Uit Figuur 6-4 blijkt dat de steentjes die door de jet worden belast gemiddeld naar rechts op het talud bewegen. De bewegingen het talud op en af zijn gemiddeld verwaarloosbaar. Voor de belasting door de boegschroefstraal geldt dat de steentjes gemiddeld naar beneden op het talud bewegen. De bewegingen naar links en naar rechts zijn gemiddeld verwaarloosbaar.

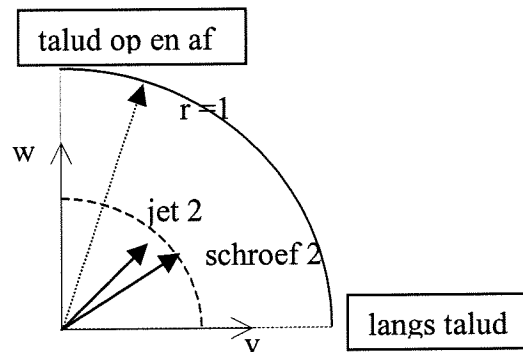
Voor de correctiefactor van de helling is het van belang om te weten of de steentjes van het talud af, het talud op of langs het talud bewegen. Het is hiervoor niet van belang of een steen naar links langs het talud beweegt of naar rechts. Er wordt hiermee rekening gehouden door de component van de verplaatsingsrichting langs het talud onafhankelijk te maken van de richting.

Door het gemiddelde van alle richtingen te nemen valt ook het inzicht in de verplaatsingen het talud op en af weg. Het zou kunnen dat bij de gemiddelde richtingen de verticale component nul is terwijl de steentjes voornamelijk het talud op en af

bewegen. Om het belang van deze verplaatsingen te bepalen worden ook de verplaatsingen het talud op en af onafhankelijk genomen van de richting en gemiddeld over alle steentjes. Hierdoor wordt niet het gemiddelde van de richtingen verkregen, maar de grootte van het belang van de richtingen. De componenten van de vectoren van de richtingen zijn in Tabel 6-8 gegeven en de vectoren zijn in Figuur 6-5 getekend.

Tabel 6-8: Vectoren van de absoluut gemiddelde verplaatsingen.

Vector	v-component [-]	w-component [-]
jet 2	0,25	0,36
schroef 2	0,4	0,22



Figuur 6-5: Gemiddelde van de absolute verplaatsingsrichtingen van de steentjes.

Uit Figuur 6-5 blijkt dat in het geval van de boegschroefstraal een grote component langs het talud te voorschijn komt. Dit betekent dat een groot deel van de steentjes langs het talud beweegt, maar dat het aantal steentjes dat naar links beweegt even groot is als het aantal naar rechts. De grootte van de w-component is ongeveer gelijk als bij de gemiddelde vector. Dit betekent dat de steentjes gemiddeld vooral van het talud af bewegen. Voor de boegschroefstraal kan worden gezegd dat de steentjes vooral van het talud af en langs het talud bewegen.

Bij de jet wordt de v-component groter wat inhoudt dat er ook een deel van de steentjes naar links beweegt, maar dat de beweging vooral naar rechts is. De w-component wordt duidelijk groter. Onder invloed van de jet bewegen de steentjes dus ook het talud op en af, maar is de gemiddelde verticale verplaatsing nul. Voor de jet kan worden gezegd dat de steentjes alle richtingen op gaan.

Allereerst zullen de verschillende correctiefactoren worden berekend voor de verschillende richtingen. De formule voor de correctiefactor voor de stroming langs het talud is:

$$m_h = \left[1 - \left(\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\varphi)} \right)^2 \right]^{-0,5} \quad (2-60)$$

waarin:

- α = taludhoek = 18,4°
- φ = hoek van inwendige wrijving = 40° als $D_{50} \approx 1$ cm

De correctiefactor die hieruit volgt is: $m_h = 1,15$ [-].

De formule van de correctiefactor voor de helling bij een stroming van het talud af is:

$$m_h = \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi - \alpha)} \quad (2-61)$$

De waarde van de correctiefactor voor deze situatie is: $m_h = 1,75 [-]$.

De formule van de correctiefactor bij een stroming het talud op is:

$$m_h = \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi + \alpha)}$$

De waarde van de correctiefactor voor deze situatie is: $m_h = 0,75$

Voor de boegschroefstraal wordt voor de correctiefactor voor de helling het gemiddelde genomen van de factoren voor een stroming langs het talud en van het talud af. Dit resulteert in een correctiefactor m_h van 1,45. Voor de boegschroefstraal wordt een gemiddelde genomen van alle factoren. De correctiefactor m_h is dan 1,2.

De factor vergroot de invloed van de stroomsnelheid op de stabiliteit van de stenen. Deze grotere invloed heeft, bij een gelijke steendiameter, een kleinere stabiliteitsparameter tot gevolg. Dit is in Tabel 6-9 weergegeven.

Tabel 6-9: Invloed correctiefactor voor de helling op de stabiliteitsfactor.

	$m_h [-]$	β geen bew. [-]		β weinig bew. [-]	
		zonder m_h	met m_h	zonder m_h	met m_h
boegschroefstraal	1,45	12,1	8,3	6,8	4,7
jet	1,2	2,1	1,7	1,3	1,1

6.3.4 Invloed van turbulentie, r

In hoofdstuk 4 bleek dat de maximale relatieve turbulentie-intensiteiten, zoals die in de laatste doorsnede optreden, voor de boegschroefstraal en de jet nagenoeg gelijk zijn, althans volgens de metingen. In hoofdstuk 4.2.5 wordt beschreven dat het gebruik van de EMS voor de snelheidsmetingen grote invloed heeft op de gemeten relatieve turbulentie-intensiteit. Door het grote meetvolume worden wervels die kleiner zijn dan het meetvolume uitgemiddeld. Deze wervels kunnen echter van belang zijn omdat ze van dezelfde orde van grootte zijn als de steentjes op het talud. De uitmiddeling van de kleinere wervels heeft een lagere gemeten turbulentie-intensiteit tot gevolg dan werkelijk optreedt. De gemeten maximale turbulentie-intensiteit in de boegschroefstraal van 0,18 is laag vergeleken met de gemeten maximale turbulentie-intensiteit in een schroefstraal van 0,25 tot 0,30, zoals die is gemeten door Blaauw en Van de Kaa (1978).

Te verwachten is dat de relatieve turbulentie-intensiteit in de schroefstraal hoger is dan in de jet. In de schroefstraal wordt namelijk turbulentie opgewekt door de draaiende schroef. Het WL (1985) heeft een 50 % hogere relatieve turbulentie-intensiteit in de schroefstraal geconstateerd dan in de jet. Deze constatering kan echter niet worden bevestigd aan de hand van de snelheidsmetingen in dit onderzoek. De relatieve turbulentie-intensiteit in de

jet is namelijk ongeveer gelijk aan de relatieve turbulentie-intensiteit zoals die gemeten is in de boegschroefstraal, 0,18.

Op basis van de snelheidsmetingen in hoofdstuk 4 zou geconcludeerd kunnen worden dat de turbulentie niet verantwoordelijk is voor het verschil in stabiliteit tussen de boegschroefstraal en de jet. Voor de analyse wordt echter aangenomen dat de metingen van het WL (1985) juist zijn en dat de relatieve turbulentie-intensiteit in de boegschroefstraal 50 % groter is dan in de jet. Daarnaast wordt aangenomen dat de relatieve turbulentie-intensiteit die in de jet is gemeten juist is. De relatieve turbulentie-intensiteit van de jet is 0,18 en wordt voor de boegschroefstraal 0,27. Met deze aannamen en met behulp van (2-66) worden de stroomsnelheden en stabiliteitsparameters in Tabel 6-10 gevonden.

Tabel 6-10: Invloed turbulentie op stabiliteitsberekening.

	r	$U_{1\%}$	$U_{\text{talud,max,1\%}}$ [m/s]		β [-]	
	[-]		geen bew.	weinig bew.	geen bew.	weinig bew.
Boegschroef-straal	0,27	$1,81 \cdot \hat{U}$	0,27	0,36	3,7	2,1
Jet	0,18	$1,54 \cdot \hat{U}$	0,55	0,71	0,9	0,5

Om een beeld te krijgen van de relatieve turbulentie is in Figuur 13 in Bijlage 6.1 de relatieve turbulentie op het berekende gemiddelde axiale snelheidsverloop op het talud geprojecteerd. De maximale relatieve turbulentie heeft een hoefijzervorm waarbinnen de maximale berekende stroomsnelheid op het talud valt. In Figuur 14 in Bijlage 6.1 is de stroomsnelheid die één procent van de tijd optreedt op het talud over de verplaatste steentjes heen geprojecteerd. Het maximum treedt op waar de hoefijzervorm van de turbulentie over de maximale berekende stroomsnelheid heen valt. Om de maximale stroomsnelheid die één procent van de tijd optreedt te berekenen mag daarom gebruik worden gemaakt van de maximale turbulentie intensiteit en de maximale berekende stroomsnelheid op het talud.

6.3.5 Evaluatie

Ten eerste moet nogmaals worden benadrukt dat de analyse die is gedaan gebaseerd is op een groot aantal aannamen. De conclusies die eruit worden getrokken zijn daarom niet zeker waar.

De effecten van de verschillende invloeden zijn samengevat in Tabel 6-12 en Tabel 6-13. Het afbuigen van de straalas en de turbulentie-intensiteit hebben invloed op de stroomsnelheid die in de stabiliteitsrelatie wordt gebruikt. De correctiefactor voor de helling is een versterkingsfactor voor de invloed van de stroomsnelheid op de stabiliteit. In de tabellen worden de verschillende invloeden vergeleken aan de hand van de stabiliteitsparameter. Cursief geschreven waarden zijn onveranderd, vetgedrukte betekenen dat deze waarden door de betreffende invloed zijn veranderd en normaal gedrukte waarden zijn veranderd onder invloed van de vetgedrukte waarden.

De grootste invloed op de stroomsnelheid heeft de turbulentie. In het geval van de boegschroefstraal wordt de stroomsnelheid met een factor 1,81 vergroot en voor de jet met 1,54. De stroomsnelheid heeft een kwadratische invloed in de stabiliteitsrelatie. In het geval van de boegschroefstraal zorgt een verdubbeling van de stroomsnelheid voor een vier maal zo kleine stabiliteitsparameter. In Tabel 6-14 is te zien dat de daling van de stabiliteitsparameter door de turbulentie relatief veel groter is in de boegschroefstraal dan in de jet. Het verschil in de turbulentie zou daarom een gedeeltelijke verklaring kunnen geven voor het stabiliteitsverschil tussen de boegschroefstraal en de jet. Tijdens de metingen is er echter geen verschil geconstateerd. Omdat de turbulentie belangrijk is voor de stabiliteit, wordt aangeraden om bij vervolgonderzoek gebruik te maken van nauwkeurige meetinstrumenten om de stroomsnelheden te meten. Dergelijke meetinstrumenten hebben bij voorkeur een hoge meetfrequentie, een klein meetvolume, een korte meettijd en verstoren de stroming niet. Een voorbeeld hiervan is een Laser-Doppler Anemometer.

De correctiefactor voor de helling heeft slechts beperkte invloed op de stabiliteitsparameter. Er is echter een groot verschil tussen de invloed van deze factor bij de boegschroefstraal en bij de jet. Bij de boegschroefstraal is de factor verantwoordelijk voor een daling van de parameter met 31% en bij de jet met slechts 14%. Omdat de helling een verschillende invloed heeft op de stabiliteit bij de twee stralen, kan worden aangenomen dat de helling mede verantwoordelijk is voor het stabiliteitsverschil.

Het effect van het afbuigen van de straal is groot. Het verschil tussen dit effect bij de boegschroefstraal en de jet is echter niet groot. Het afbuigen van de straal is daarom slechts beperkt verantwoordelijk voor het stabiliteitsverschil tussen de boegschroefstraal en de jet.

Tabel 6-12: Invloeden boegschroefstraal.

Boegschroefstraal	$U_{0,krit}$ geen bew. [m/s]	$U_{0,krit}$ weinig bew. [m/s]	$U_{talud,max}$ [-]	$U_{talud,krit}$ geen bew. [m/s]	$U_{talud,krit}$ weinig bew. [m/s]	m_h [-]	D_{50} [*10 ³ m]	β geen bew. [-]	β weinig bew. [-]
standaard	0,43	0,57	0,35* U_0	0,15	0,2	1	8,4	12,1	6,8
U_{knik}	0,43	0,57	0,49* U_0	0,21	0,28	1	8,4	6,2	3,5
m_h	0,43	0,57	0,35* U_0	0,15	0,2	1,45	8,4	8,3	4,7
r	0,43	0,57	0,35* U_0	0,27	0,36	1	8,4	3,7	2,1
totaal	0,43	0,57	0,49* U_0	0,38	0,51	1,45	8,4	1,3	0,7

Tabel 6-13: Invloeden jet.

Jet	$U_{0,krit}$ geen bew. [m/s]	$U_{0,krit}$ weinig bew. [m/s]	$U_{talud,max}$ [-]	$U_{talud,krit}$ geen bew. [m/s]	$U_{talud,krit}$ weinig bew. [m/s]	m_h [-]	D_{50} [*10 ³ m]	β geen bew. [-]	β weinig bew. [-]
standaard	0,64	0,82	0,56* U_0	0,36	0,46	1	8,4	2,1	1,3
U_{knik}	0,64	0,82	0,71* U_0	0,45	0,58	1	8,4	1,3	0,8
m_h	0,64	0,82	0,56* U_0	0,36	0,46	1,15	8,4	1,7	1,1
r	0,64	0,82	0,56* U_0	0,55	0,71	1	8,4	0,9	0,5
totaal	0,64	0,82	0,71* U_0	0,69	0,89	1,15	8,4	0,5	0,3

Tabel 6-14: Procentuele daling van de stabiliteitsparameter door de verschillende invloeden.

	daling β boegschroefstraal [%]	daling β boegschroefstraal [%]
U_{krit}	49	38
m_h	31	19
r	74	57
totaal	89	76

In de tabellen is tevens het effect van alle invloeden bij elkaar opgeteld. Voor de berekening van de stroomsnelheid die slechts 1% van de tijd optreedt is gebruik gemaakt van de maximale stroomsnelheid op het talud als de straalas afbuigt. Ook is de correctiefactor voor de helling in de stabiliteitsformule gebruikt. Hieronder is als voorbeeld de stabiliteitsparameter voor de boegschroefstraal bij geen beweging uitgerekend:

$$\begin{aligned}
 U_{0,\text{krit}} &= 0,43 \text{ m/s} \\
 U_{\text{talud,max}} &= 0,49 * U_{0,\text{krit}} = 0,28 \text{ m/s} \\
 r &= 0,27 \\
 U_{1\%} &= U_{\text{talud,max}} * (1+3*r) \\
 U_{\text{talud,max,1\%}} &= 0,51 \text{ m/s} \\
 m_h &= 1,45
 \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{2 * g * \Delta * D_{50}}{m_h * U_{\text{talud,max,1\%}}^2}$$

$$\beta = \frac{2 * 9,81 * 1,65 * 8,4 * 10^{-3}}{1,45 * (0,51)^2}$$

Het resultaat is: $\beta = 1,3$ [-].

De invloeden worden bij elkaar opgeteld om te proberen een totaalbeeld te krijgen van de invloed van alle factoren op de stralen. Het verschil tussen de stabiliteitsparameters voor de boegschroefstraal en de jet is aanzienlijk afgenomen. Zonder de invloeden is de stabiliteitsparameter van de boegschroefstraal een factor 5 à 6 groter dan die van de jet, maar met de invloeden is dat slechts 2 à 3. De behandelde invloeden kunnen het verschil in de stabiliteit tussen de twee stralen slechts gedeeltelijk verklaren. De stabiliteitsparameters komen bij elkaar in de buurt, maar nog niet voldoende, ondanks dat de invloeden soms groter zijn aangenomen dan waargenomen in de modelproeven, zoals bijvoorbeeld de turbulentie en de afbuiging.

Bovenstaande analyse van de verschillende invloeden op de stabiliteit geeft geen verklaring voor het verschil in stabiliteit dat optreedt bij een verschillende belasting. Een terugkomend probleem is echter dat de berekeningen zijn gebaseerd op extrapolaties. Deze extrapolaties zijn uiteraard zeer onnauwkeurig. Een beter inzicht in de stabiliteit van steentjes op een talud onder belasting van een schroefstraal kan worden verkregen door stroomsnelheidsmetingen ter plaatse van het talud te doen. Hier bij kan wel rekening worden gehouden met bovenstaande bevindingen. De afbuiging is van belang voor de stroomsnelheden die optreden op het talud. Alhoewel het niet is bekeken kan ook de combinatie van de afbuiging en de tangentiële stroomsnelheid van grote invloed zijn. De

tangentiële stroomsnelheid zal minder zijn afgenomen en daarom een grotere rol kunnen spelen dan hier is beschreven. De helling is verantwoordelijk voor een groot verschil tussen de stabiliteit bij een boegschroefstraal en een jet. Het is daarom van belang om vooral ook de richting van de stroomsnelheden ter plaatse van het talud te weten. Deze richting is hier buiten beschouwing gelaten. En tevens is de turbulentie van belang. Een probleem is echter dat de invloed van turbulentie op steenstabiliteit in het algemeen nog een moeilijk probleem is. Een andere factor die van invloed kan zijn op de stabiliteit is de druk. Omdat de waterstraal richting het talud afbuigt en deze raakt, ontstaat er een drukopbouw in het water. De hiermee gepaard gaande drukgradiënten kunnen invloed hebben op de steenstabiliteit.

Geconcludeerd kan worden dat de stabiliteit van de stenen in deze situatie afhankelijk is van een groot aantal factoren. Verder onderzoek is noodzakelijk om een betere verklaring te vinden voor het verschil in stabiliteit tussen een talud met breuksteen belast door een boegschroefstraal en een jet.

7 Conclusies en aanbevelingen

Er wordt in dit hoofdstuk een aantal conclusies getrokken uit de resultaten van dit onderzoek. Verder wordt een aantal aanbevelingen gedaan naar aanleiding van de inzichten die zijn verkregen tijdens het onderzoek.

Conclusies

- De belangrijkste conclusie die kan worden getrokken uit de resultaten van dit onderzoek is tevens het antwoord op de onderzoeksvraag. Mag een boegschroefstraal in een fysisch model worden gemodelleerd met behulp van een eenvoudige waterjet? Dit mag niet worden gedaan. De stabiliteit van stenen onder belasting van een boegschroefstraal wijkt sterk af van die onder belasting van een jet.
- De gevonden stabiliteitsparameters wijken sterk af van de parameters die door andere onderzoekers zijn gevonden.
- De berekeningsmethode voor de initiële stroomsnelheid, waarbij de stroomsnelheid slechts afhangt van de diameter van de schroef en de stuwkrachtscoëfficiënt, lijkt te voldoen voor de gebruikte opstelling.
- De straaltheorie is niet toepasbaar op de stroomsnelheden in de bekeken situatie. Volgens deze theorie is de uitbreiding van de straal constant wat betekent dat de maximale stroomsnelheid omgekeerd evenredig afneemt met de afstand achter de uitstroomopening. De uitbreiding is echter niet constant, maar neemt af naar het talud toe. De aanname in de straaltheorie dat het diffusieproces dynamisch gelijkvormig is gaat dus niet op in het bekeken geval.
- In dit onderzoek is 'de Nederlandse methode' gebruikt om de stroomsnelheden op het talud te berekenen. Tijdens het onderzoek is gebleken dat met deze methode een te kleine minimale mediane steendiameter wordt berekend.

Aanbevelingen voor de ontwerper

- Naar aanleiding van bovenstaande conclusie wordt aanbevolen om voorzichtig te zijn bij het gebruik van de Nederlandse methode bij het ontwerp van een stortstenen taludbescherming onder aanval van schroefstralen.
- Voorzichtigheid is tevens geboden bij het gebruik van de verschillende coëfficiënten die door verschillende onderzoekers zijn gevonden voor de schroefstraaltheorie. Deze theorie gaat uit van een ongestoorde uitbreiding van de straal. De metingen waarop de coëfficiënten zijn gebaseerd zijn echter vaak uitgevoerd met een waterspiegel, bodem en soms zelfs kademuur of talud als rand. De invloeden van de verschillende randeffecten zijn niet gelijk. Voordat bepaalde coëfficiënten worden gebruikt is het daarom belangrijk om te weten op wat voor metingen deze coëfficiënten zijn gebaseerd.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

- Gebruik, om een boegschroefstraal te modelleren, geen eenvoudige jet.
- Meer onderzoek is nodig om het inzicht in schroefstralen te vergroten. Hierbij is het van belang om goed inzicht te krijgen in de basisstraal, dit is de straal met ongestoorde uitbreiding.

Vervolgens kan deze basisstraal worden aangepast voor de verschillende randeffecten. Zo kan de invloed worden onderzocht van onder andere:

- de aanwezigheid een talud of kademuur,
 - de aanwezigheid van een roer,
 - de vorm van de tunnel van de boegschroef,
 - de aanwezigheid van de palen in het talud.
- In het onderzoek van Beltaos (1976) worden relaties gegeven voor de drukken en schuifkrachten op een vlak door een schuin invallende straal. Hij heeft modelproeven met een luchtstraal gedaan om deze relaties te verifiëren. Een soortgelijk onderzoek voor schroefstralen in water gericht op een vlak met breuksteen zou veel inzicht kunnen opleveren in de belasting van een straal op zo een vlak.

Aanbevelingen met betrekking tot de modelproeven

- De snelheidsmetingen in de stralen zijn tot op beperkte afstand achter de uitstroomopening gedaan. Om een goed beeld van de straal te verkrijgen dient tot op grotere afstand achter de opening te worden gemeten.
- In dit onderzoek zijn geen snelheidsmetingen gedaan net boven het taludoppervlak. De gebruikte meetinstrumenten lieten dit niet toe. Hierdoor is het verband tussen de schroefstraal en de stabiliteit van de stenen ondoorzichtig geworden. Het is onbekend welke stroomsnelheden op het talud optreden. Aanbevolen wordt om in onderzoek naar de stabiliteit van stenen onder invloed van een schroefstraal ook de snelheden net boven het te onderzoeken oppervlak te meten.
- In de modelproeven is gebruik gemaakt van een 'speelgoed' schroef. Nauwkeuriger gemodelleerde schroeven bestaan. Indien mogelijk wordt aanbevolen om deze schroeven te gebruiken voor modelproeven, omdat niet bekend is wat het effect is van de kwaliteit van de schroef op de stroomsnelheden. Omdat nauwkeurig gemodelleerde schroeven duur zijn, zou het nuttig kunnen zijn om te bepalen wat de invloed van de kwaliteit van de schroef op de metingen is.
- De snelheidsmetingen zijn uitgevoerd met een EMS. Deze snelheidsmeter heeft een groot meetvolume, beïnvloedt de stroming door zijn relatief grote meetsonde en meet slechts nauwkeurig in een stroming met twee componenten. Bij toekomstige proeven dient het meetvolume zo klein mogelijk te worden gehouden, omdat dan de turbulentie nauwkeuriger kan worden gemeten. De stroming dient zo min mogelijk te worden beïnvloed door de meetsonde, omdat dit de metingen ook beïnvloedt. Tevens heeft de stroomsnelheid in de schroefstraal drie componenten. Met name nabij het talud treedt een erg complex snelheidsveld op waar niet van tevoren kan worden bepaald in welk vlak de stroomsnelheden optreden. Indien in vervolgonderzoek snelheden worden gemeten wordt aanbevolen hiervoor een ander meetinstrument te gebruiken, bijvoorbeeld een Laser-Doppler Anemometer.
- De prototypesituatie wordt in een bak van beperkte omvang nagebootst. Hierbij wordt de zijwaartse verspreiding van de stroming nadat deze het talud heeft geraakt belemmerd door de wanden van de bak. Hierdoor ontstaat circulatie in de bak. Deze circulatie zou ook in de prototypesituatie kunnen optreden, maar waarschijnlijk niet in de mate waarin dat in de modelsituatie gebeurde. Bij voorkeur dient een bredere bak te worden gebruikt om de prototypesituatie na te bootsen.

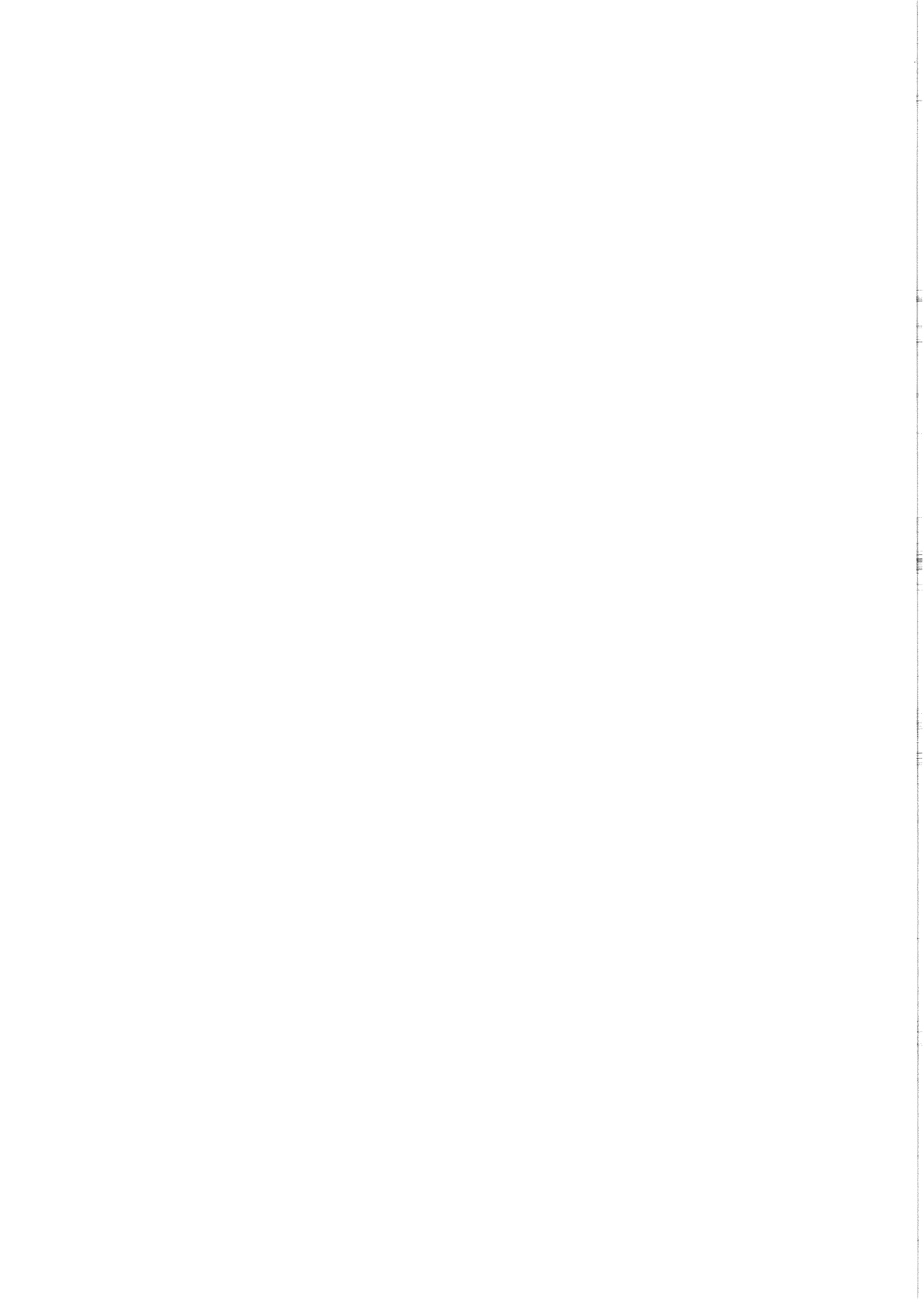
Symbol	Beschrijving	Eenheid
α	hellingshoek van het talud	°
α	zekerheidsniveau	-
φ	hoek van inwendige wrijving van de stenen	°
ζ, ξ	coëfficiënt voor wrijvings- en uittreeverlies	-
ν	kinematische viscositeit	m ² /s
ρ_w	dichtheid van water	kg/m ³
σ	standaard deviatie	-
ξ_{tot}	totale drukverliescoëfficiënt	-
ϕ	contractiecoëfficiënt	-
Δ	relatieve steendichtheid	-
Δh	Drukverlies	m
β_{Iz}	belastingparameter van Izbash	-
$\beta_{Iz,kr}$	kritieke belastingparameter van Izbash	-
ρ_s	dichtheid steen	kg/m ³
β_{WL}	stabiliteitsparameter van WL	-
$\beta_{WL,cr}$	kritieke stabiliteitsparameter van WL	-
A,B	empirisch te bepalen constanten in straaltheorie	-
a,A	empirisch te bepalen constanten in straaltheorie, Römisch	-
A_n	oppervlakte van de n-de schijf	m ²
$A_{D,F,L}$	oppervlak van een steen in stabiliteitsrelatie	m ²
b	constante in straaltheorie, $1/2c_2^2$	-
B	maximale breedte op de mal van schip	m
$c_{1,2,3,4}$	empirisch te bepalen constanten in straaltheorie	-
c	prestatiecoëfficiënt van een schroef in bollard-pull situatie	-
C	empirisch te bepalen constante in straaltheorie	-
$C_{D,F,L}$	constanten in stabiliteitsrelatie	-
d	waterdiepte	m
D_0	initiële diameter van de waterstraal	m
D_{50}	mediane diameter	m
D_f	fenderdikte	m
D_p	schroefdiameter	m
d_f	aantal vrijheden in student-t verdeling	-
f	wrijvingscoëfficiënt	-
Fr	Froude getal	-
$F_{D,L,S,W}$	krachten op steentje door stroming	N
g	zwaartekrachtversnelling = 9,81	m/s ²
h	waterdiepte t.p.v. beschouwde steen	m
H	energiehoogte	m
I	totale impuls in een doorsnede	kgm/s
I	turbulentie intensiteit	m/s
I_0	impuls in de uitstroomopening	kgm/s
J	voortgangcoëfficiënt	-
K	algemene empirisch te bepalen stabiliteitconstante	-

Symbolenlijst

k	constante in virtueel talud theorie	-
$k_{t(\text{schr})}$	stuwkracht coëfficiënt van de schroef	-
K_V	versterkingsfactor voor de belasting i.g.v. turbulentie	-
L	horizontale afstand schroef tot kruising talud en straalas	m
L_{tunnel}	lengte tunnel	m
$L_{P,M}$	karakteristieke lengte in prototype of model	m
m	verhouding taludhelling	-
m_h	correctiefactor voor de helling in de stabiliteitsrelatie	-
n	aantal meetwaarden	-
n	toerental boegschroef	s^{-1}
$n_{U,L}$	schaal van snelheden of lengtes	-
N	aantal meetpunten	-
p	drukhoogte	N/m^2
P_0	omgevingsdruk	N/m^2
$P_{1,2}$	drukafname voor of toename achter de schroef	N/m^2
P	aangewend motorvermogen	kW
p_s	druk in stuwpunt	N/m^2
p_w	druk in bepaald punt op raakvlak	N/m^2
r	relatieve turbulentie intensiteit	-
r	afstand loodrecht op de as, tot de as van de straal	m
r_{max}	radiale afstand van schroefas tot locatie van maximale bodemstroomsnelheid	m
R_0	Reynoldsgetal van de straal	-
R_e	Reynoldsgetal	-
s	schatting van de standaard deviatie	-
t	constante in student-t verdeling	-
$T_{(\text{ad})}$	stuwkracht van een actuator disc	N/m^2
$T_{(\text{schr})}$	stuwkracht van de schroef	N
U_A	omgevingsstroomsnelheid	m/s
$U_{1,2}$	stroomsnelheid ter plaatse van, achter de schroef	m/s
U_b	bodemstroomsnelheid	m/s
U_o	initiële stroomsnelheid	m/s
$U_{P,M}$	karakteristieke stroomsnelheid in prototype of model	m/s
$U_{x,\text{max}}$	axiale stroomsnelheid in de as van de straal	m/s
$U_{x,r}$	axiale stroomsnelheid in punt (x,r)	m/s
$U_{1\%}$	snelheid met overschrijdingskans van 1%	m/s
$U_{\text{talud,max}}$	maximale stroomsnelheid op talud	m/s
$U_{\text{gem},n}$	gemiddelde axiale stroomsnelheid in de twee punten van de n-de schijf	m/s
\hat{U}	gemiddelde stroomsnelheid	m/s
U'	turbulente fluctuatie	m/s
$V_{x,r}$	tangentiële stroomsnelheid in punt (x,r)	m/s
$V_{x,\text{max}}$	maximale tangentiële stroomsnelheid op afstand x	m/s
W	gewicht van een steentje onder water	N
x	horizontale afstand langs straalas tot uitstroomopening	m
x_0	kernzonelengte	m

Symbolenlijst

$x_{\min, \max}$	onder- of bovengrens van zekerheidsgebied	-
x_{gem}	gemiddelde van de meetwaarden	-
x_{\max}	horizontale afstand van schroef tot locatie van maximale bodemstroomsnelheid	m
Z	hoogte ten opzichte van straalas	m
Z	aantal schroefbladen	-



Literatuurlijst

Barber, G.M., *Elementary statistics for geographers*, New York: The Guilford Press, 1988.

Beltaos, S., *Oblique impingement of circular turbulent jets*, Journ. of Hydraulic Research, 14(1976) no.1, p.17-36, 1977.

Blaauw, H.G. en E.J. van de Kaa, *Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships*, Delft: WL publicatie nr. 202, juli 1978.

Blokland, T., *Bodembescherming belast door schroefstralen. Huidige ontwerpmethode*, Rotterdam: Ingenieursbureau Havenwerken, rapp. 61.00-R96.089, januari 1997.

Chin, C.O., Li, W., *Propeller jet flow*, Proc. XXIX IAHR congress Beijing, September 2001.

Elkens, F., Römisch, K., Sas, M., Raes, L., *The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments*, Antwerpen: 11th Int. Harbour Congress, p.433-442, Antwerpen, juni 1996.

Hamill, G.A., Johnston, H.T., Stewart, D.P.J., *Estimating the velocities in a ship's propeller wash*, Brussel: PIANC Bulletin 89, Brussel, 1996a.

Hamill, G.A., Johnston, H.T., Qurrain, R.M.M., *The influence of a revetment on diffusion of a propeller wash*, Brussel: PIANC Bulletin 91, Brussel, June 1996b.

Meijer, D.G., Verhey, H.J., *Stroomsnelheden bij de oever veroorzaakt door boegschroeven*, WL, Q1657, juli 1993.

Oosterveld, M.W.C., *Wake adapted ducted propellers*, Delft: Doctor's thesis, Delft University of Technology, 1970.

PIANC, *Guidelines for the design of armoured slopes under open piled quay walls*, Brussel: Supplement of PIANC Bulletin 96, Brussel, 1997.

Römisch, K., *Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen in Häfen, Häfen & Wasserstrassen*, 8 (1993), p.62-68, 1993.

Scheffer, H.J., *Lastannahme für Kolkschutzbemessungen*, Häfen & Wasserstrassen, 2 (2000), p.41-44, 2000.

Shields, A., *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*, Berlin: Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, 1936.

Schiereck, ir.G.J., *Introduction to bed, bank and shore protection*. Delft: Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, december 1998.

Schmidt, E., *Ausbreitungsverhalten und Erosionswirkung eines Bugpropellerstrahles vor einer Kaiwand*. Braunschweig: Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Mitteilungen Heft 143/1998, 1998.

Waterloopkundig Laboratorium (H.J. Verhey), *Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Technische aanbevelingen voor oeververdedigingen van losgestorte en gezette steen. Samenvattend verslag*, Delft: WL, M1115 deel XIX, december 1988.

Waterloopkundig Laboratorium, *Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Schroefstralen en de stabiliteit van bodem en oevers onder de invloed van de stroomsnelheden in de schroefstraal. Verslag modelonderzoek*, Delft: WL, M1115 deel VII en deel Xa, november 1985.

Bijlagen

Bijlage 3.1: Berekening U_0 , $U_{\text{talud,max}}$ en D_{50} voor prototype- en modelsituatie.

Bijlage 3.2: Zeefkromme steentjes.

Bijlage 3.3: Voorbeeld meetblad stabiliteitsmetingen.

Bijlage 3.4: Calibratiecurve meetflens.

Bijlage 3.5: Meetopstelling.

Bijlage 4.1: Snelheden in de doorsneden van de boegschroef.

Bijlage 4.2: Snelheden in de doorsneden van de jet.

Bijlage 4.3: Meetdata snelheidsmetingen.

Bijlage 5.1: Meetdata stabiliteitsmetingen.

Bijlage 6.1: Verplaatsingen steentjes.

Berekening van U_0 , $U_{\text{talud,max}}$ en D_{50} voor prototype- en modelsituatie

Prototypesituatie

De gegevens van de prototypesituatie die zijn gegeven in hoofdstuk 3 zijn in Tabel 1 weergegeven.

Tabel 1: Maten in prototypesituatie.

Grootheid	symbool	waarde
Horizontale afstand van tunneleinde tot talud	L [m]	26
Waterdiepte	d [m]	12
Hoogte schroefas boven de bodem	H [-]	4
Geïnstalleerd vermogen boegschroef	P [kW]	1100
Diameter boegschroef	D_0 [m]	2,0
Taludhelling	m [-]	3

Met behulp van deze gegevens en formule (2-30) kan de initiële stroomsnelheid worden berekend:

$$U_0 = (1 - \zeta) * 1,17 * \left(\frac{P}{\rho_w * D_p^2} \right)^{1/3} \quad (2-30)$$

met de maten uit Tabel 1 en de volgende waarden:

$\zeta = 0,2$ [-] : gemiddelde door Römisch (1993) aangegeven waarden zie hst 2,

$\rho_w = 1000$ [kg/m³],

wordt verkregen:

$$U_0 = (1 - 0,2) * 1,17 * \left(\frac{1100 * 10^3}{1000 * (2)^2} \right)^{1/3}$$

Hieruit volgt dat $U_0 = 6,09$ m/s. In hoofdstuk 2.2.3 wordt de Nederlandse methode beschreven waarmee een maximale stroomsnelheid op een talud kan worden berekend. Deze methode wordt hier gebruikt. Deze methode stelt dat de maximale stroomsnelheid optreedt in de coördinaten ($x_{\text{max}}, r_{\text{max}}$) met:

$$x_{\text{max}} = L * k * \left(\sqrt{1 + \frac{2}{k}} - 1 \right) \quad (2-52)$$

en:

$$r_{\text{max}} = \frac{1}{m} * (L - x_{\text{max}}) \quad (2-48)$$

,waarin:

$$k = \frac{b}{a * m^2} \quad (2-53)$$

a,b = constanten uit schroefstraaltheorie [-].

Er wordt gebruik gemaakt van de schroefstraaltheorie die is bepaald voor een vrijstaande schroef, hoofdstuk 2.2.2 WL (1985):

$$\frac{U_{x,r}}{U_0} = 2,8 * \left(\frac{x}{D_0} \right)^{-1} * \exp \left[-15,4 * \frac{r^2}{x^2} \right] \quad (2-39)$$

De waarden van de constanten zijn:

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ b &= 15,4 \end{aligned}$$

De waarde van k die hieruit volgt is 1,71. Hierdoor geldt voor de locatie waar de maximale stroomsnelheid op het talud optreedt:

$$x_{\text{max}}/L = 0,808$$

$$r_{\text{max}}/L = 0,064$$

en met $L = 26\text{m}$ wordt dit:

$$x_{\text{max}} = 21,0 \text{ m,}$$

$$r_{\text{max}} = 1,66 \text{ m.}$$

Door de waarden van x_{max} , r_{max} en U_0 in (2-39) in te vullen wordt berekend dat $U_{\text{talud,max}} = 1,48 \text{ m/s}$. Met behulp van de stabiliteitsrelatie van Izbash wordt de benodigde steendiameter berekend. Omdat er slechts een stabiliteitsparameter voorhanden is voor een horizontaal bed, wordt aan de stabiliteitsrelatie een hellingfactor toegevoegd, naar Blokland (1997). De formule voor de steendiameter wordt dan:

$$D_{50} = \frac{\beta * m_h * (U_{\text{talud,max}})^2}{2 * g * \Delta}$$

waarin:

$$\begin{aligned} \beta &= 4,1 && \text{WL (1985) voor weinig verplaatsing,} \\ m_h &= 0,78 && \text{stroming gaat helling op, zie (2-60) met } \alpha=18,4^\circ \text{ en } \varphi=40^\circ, \\ \Delta &= 1,65 && \text{zie (2-56) met } \rho_s=2650 \text{ kg/m}^3, \\ U_{\text{talud,max}} &= 1,48 \text{ m/s} && \text{zie hiervoor,} \\ g &= 9,81 \text{ m/s}^2 && \text{valversnelling.} \end{aligned}$$

Hieruit volgt een mediane diameter van 0,22m.

Het resultaat van bovenstaande berekening wordt in Tabel 3 samengevat.

Modelsituatie

Voor de modelsituatie wordt hetzelfde traject gevolgd als voor de prototypesituatie. De waarden die voor de modelsituatie zijn gegeven staan in Tabel 2.

Tabel 2: Maten in modelsituatie.

Grootheid	symbool	waarde
Horizontale afstand van tunneleinde tot talud	L [m]	1,16
Waterdiepte	d [m]	0,48
Hoogte schroefas boven de bodem	H [-]	0,19
Geïnstalleerd vermogen boegschroef	P [W]	30,7
Diameter boegschroef	D_0 [m]	0,10
Taludhelling	m [-]	3

Met behulp van (2-30), de waarden uit Tabel 2 en de constanten die bij de prototypesituatie zijn gegeven, kan de initiële stroomsnelheid worden berekend: $U_0 = 1,36 \text{ m/s}$. Om de stroomsnelheden in de prototypesituatie te berekenen wordt dezelfde schroefstraaltheorie gebruikt als voor modelsituatie. De waarden van de

constanten a en b zijn derhalve gelijk en dus is de relatieve locatie, waar de maximale stroomsnelheid op het talud optreedt, gelijk:

$$x_{\text{max}}/L = 0,81$$

$$r_{\text{max}}/L = 0,064$$

en met $L = 1,16\text{m}$ wordt dit:

$$x_{\text{max}} = 0,94 \text{ m,}$$

$$r_{\text{max}} = 0,074 \text{ m.}$$

Ingevuld in (2-39) levert dit op $U_{\text{talud,max}} = 0,37 \text{ m/s}$. De berekende waarden zijn in Tabel 3.

De schroef die is gebruikt om de maximale stroomsnelheid op het talud te berekenen is groter dan volgens de schaalregels nodig is. Deze stroomsnelheid is derhalve groter dan zou volgen uit het toepassen van de schaalregels op de stroomsnelheden uit de prototypesituatie. De steendiameter die in de modelopstelling wordt toegepast is echter wel door schaling berekend vanuit de prototypesituatie.

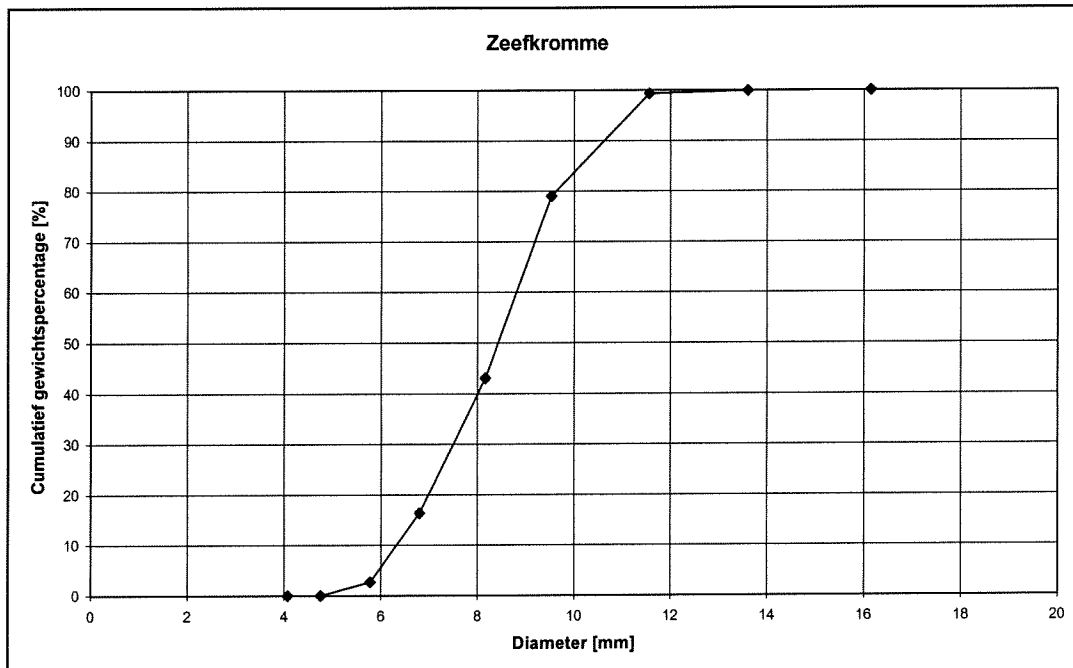
Tabel 3: Berekende grootheden.

Grootheid	symbool	waarde prototype- situatie	waarde model- situatie
Initiële stroomsnelheid	U_0 [m/s]	6,09	1,36
Maximale stroomsnelheid op talud	$U_{\text{talud,max}}$ [m/s]	1,48	0,37
Mediane diameter	D_{50} [m]	0,22	

Met behulp van verschillende draadzeven is de gradering van de gebruikte steentjes bepaald. In Tabel 1 zijn de waarden van de zeefkromme in Figuur 1 gegeven. De gradering heeft een nauwe wijde (D_{85}/D_{15}) van 1,5.

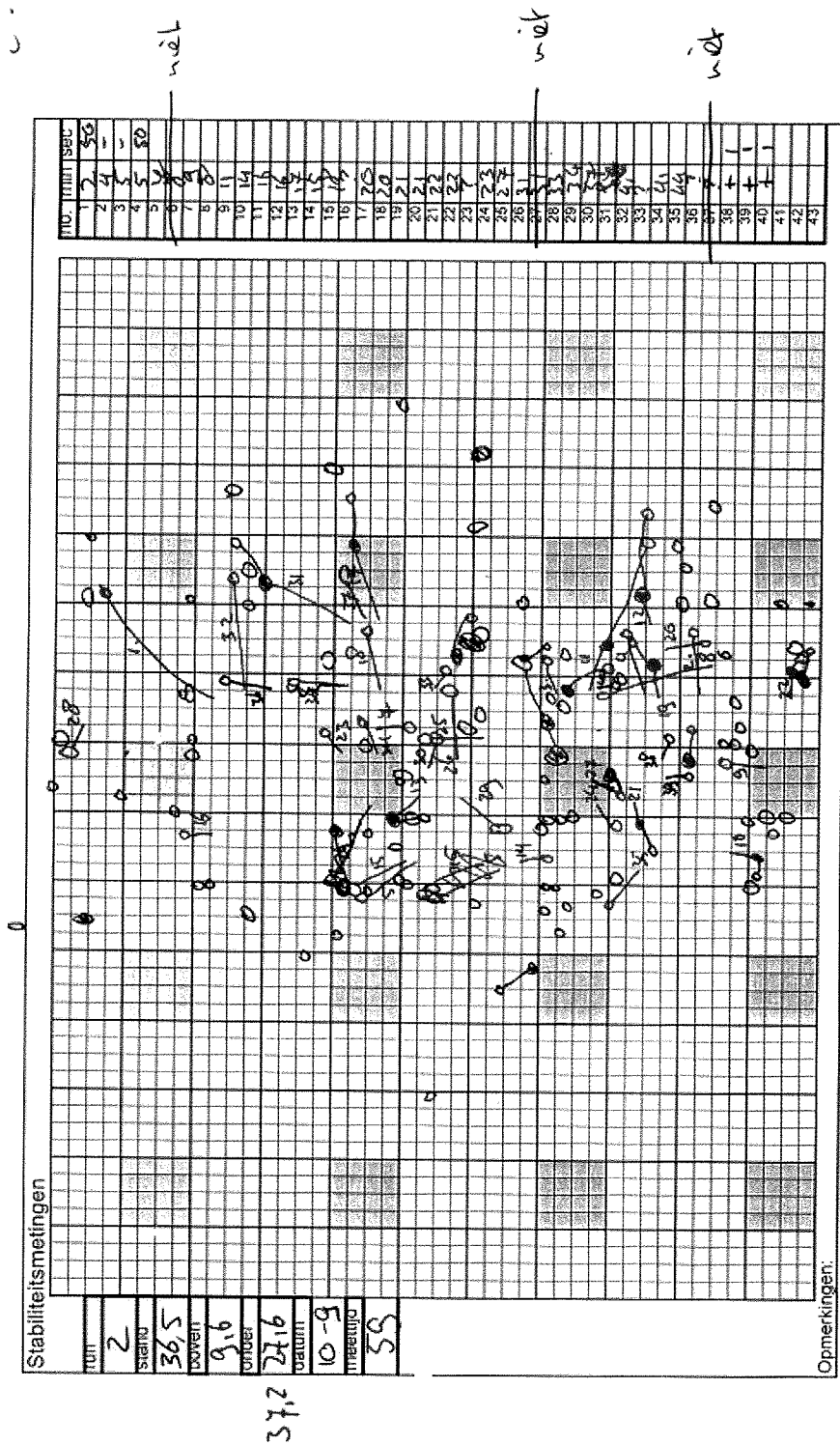
Tabel 1: Zeefwaarden.

	Draadzeef (mm)	Gewicht (g)	Percentage (%)	Cum. perc. (%)
	16,15	0	0	100
	13,6	0,64	0,1	99,9
	11,56	3,72	0,56	99,34
	9,52	134,54	20,31	79,03
	8,16	238,4	35,98	43,05
	6,8	177,18	26,74	16,31
	5,78	90,44	13,65	2,66
	4,76	17,67	2,66	0
	4,08	0	0	0
Rest	0	0	0	0
Totaal		662,59	100	
	D ₁₅	6,7 mm		
	D ₅₀	8,42 mm		
	D ₈₅	10,12 mm		



Figuur 1: Zeefkromme.

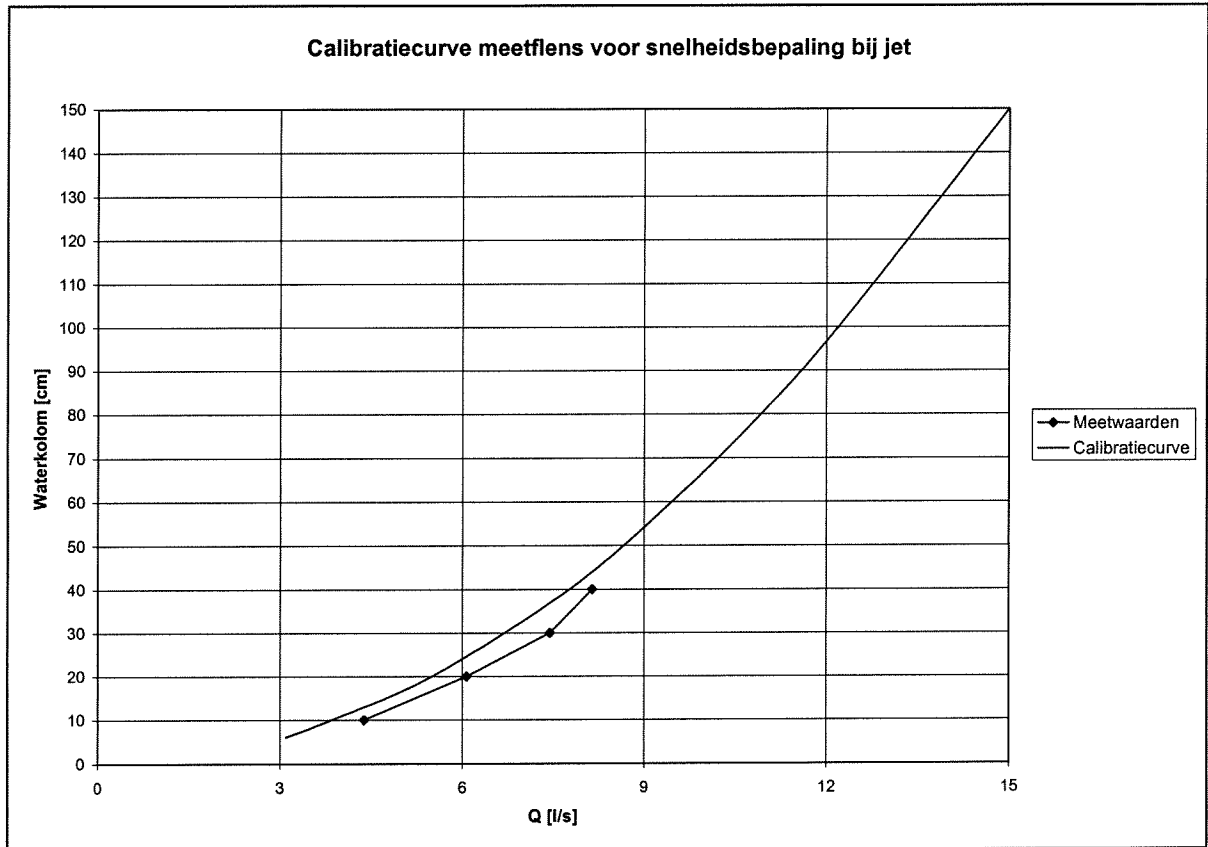
Meetblad stabiliteitsmetingen.



Figuur 1: Voorbeeld stabiliteitsblad.

Op het stabiliteitsblad is bijgehouden waarvandaan en waarheen de steentjes bewogen. Daarnaast is de meettijd bijgehouden. Dit voorbeeld is van metingen met de jet, omdat de twee standen van de stijgbuisjes zijn aangegeven.

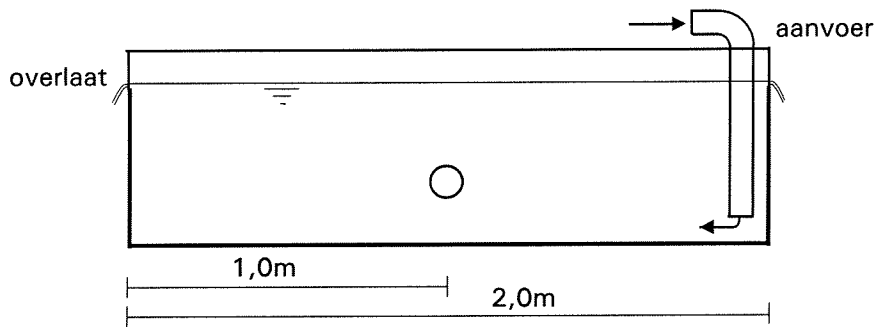
In Figuur 1 is de calibratiecurve die bij de meetflens was geleverd weergegeven in combinatie met de berekende waarden van de debieten bij vier verschillende waterstanden in de stijgbuisjes. Stijgbuisjes zijn gebruikt om de energiehogte voor en achter de meetflens te meten. Het verschil tussen de stijghoogte van de twee stijgbuisjes levert, aan de hand van de calibratiecurve, een debiet op.



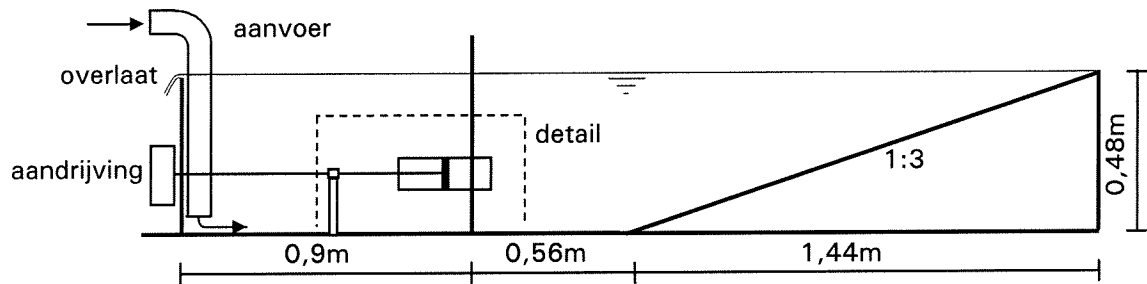
Figuur 1: Calibratiecurve van de meetflens.

Meetopstelling

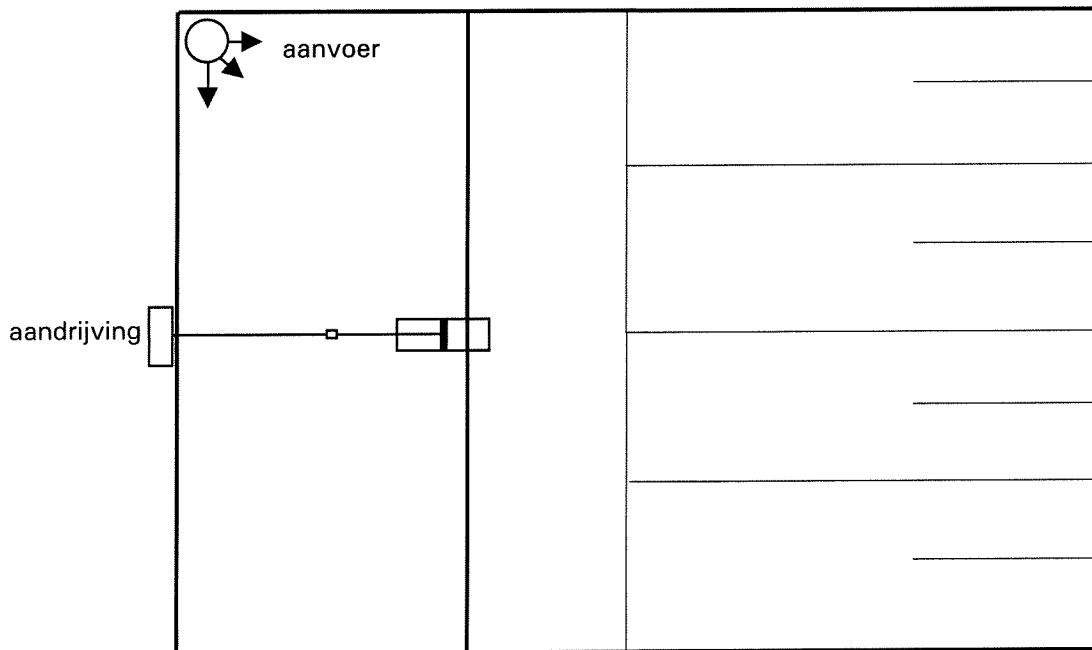
Meetopstelling voor de metingen met de boegschroefstraal.



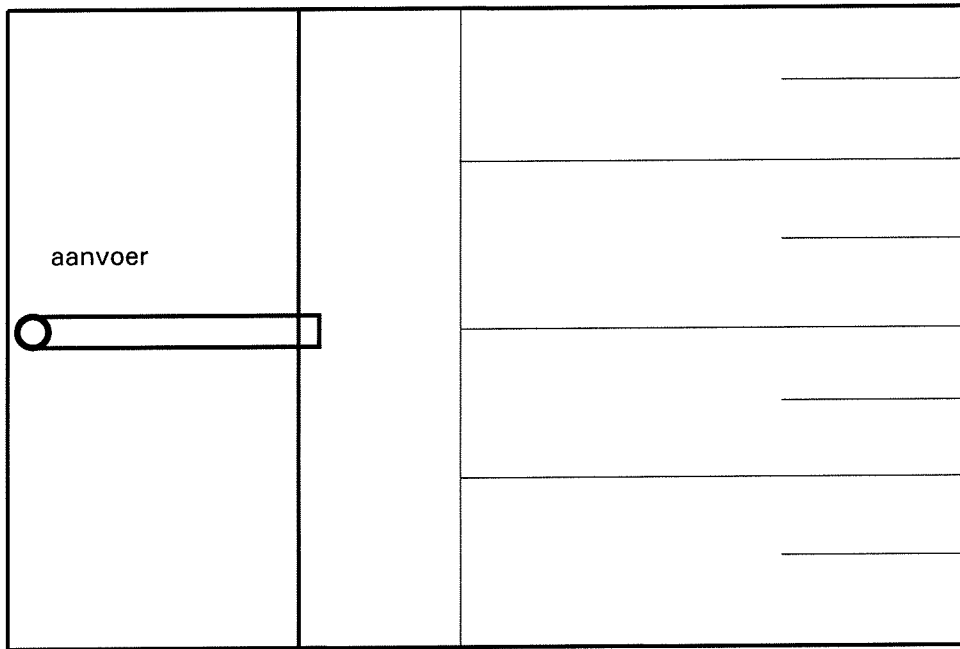
Figuur 1: Vooraanzicht bak voor metingen met boegschroefstraal.



Figuur 2: Zijaanzicht bak voor metingen met boegschroefstraal.

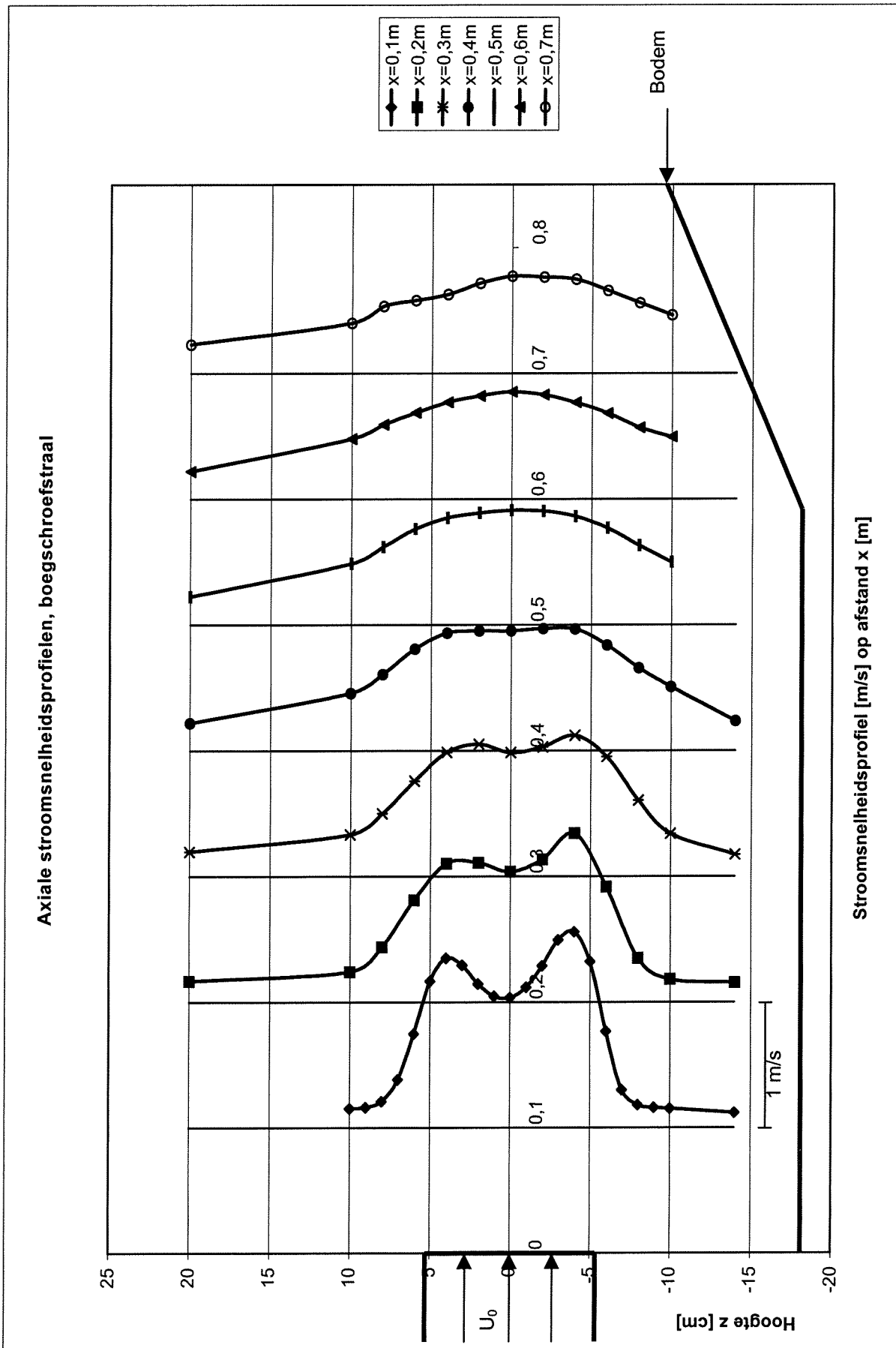


Figuur 3: Bovenaanzicht bak voor metingen met boegschroefstraal.

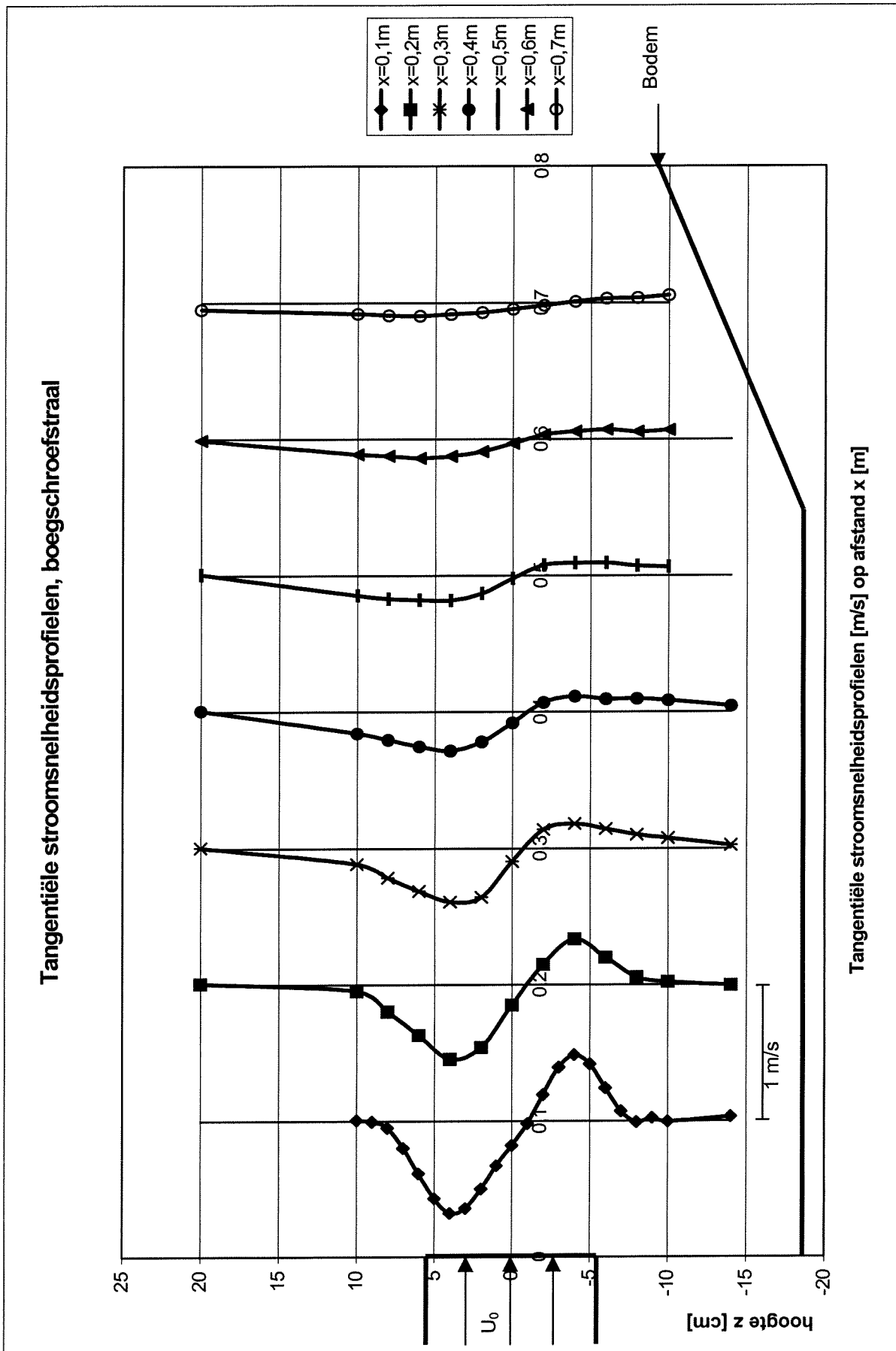


Figuur 7: Bovenaanzicht voor metingen met jet.

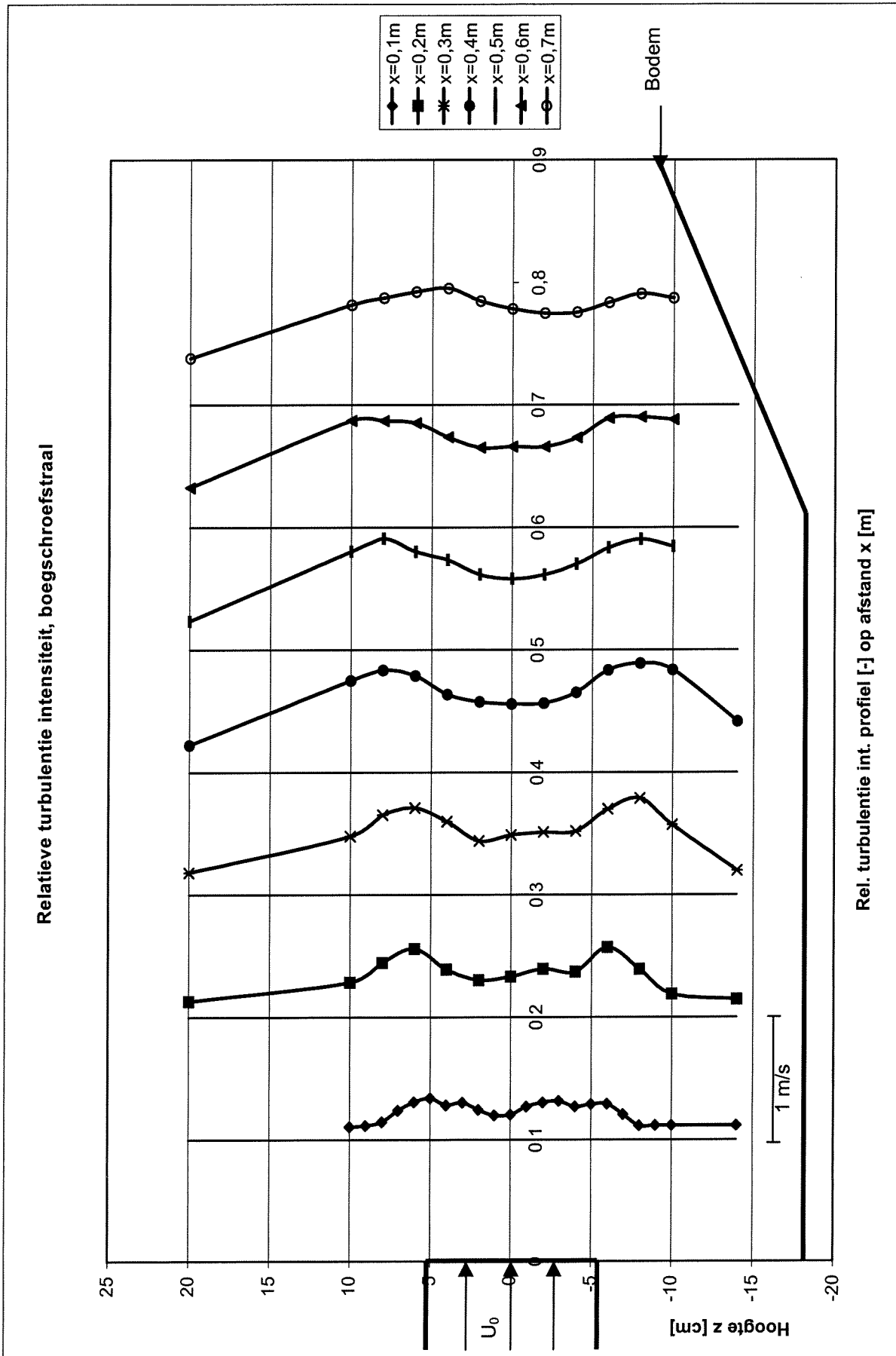
Bijlage 4.1: Snelheden in de doorsneden van de boegschroefstraal.



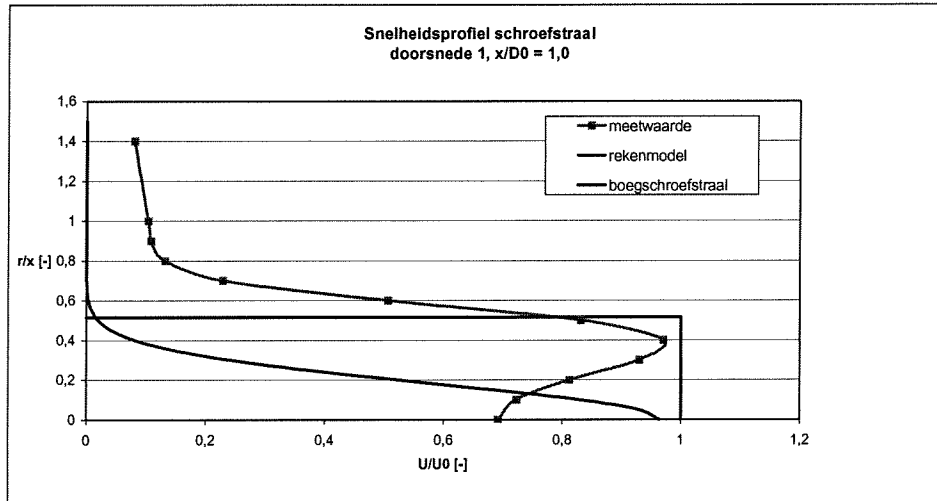
Figuur 1: Gemeten stroomsnelheden in de zeven doorsneden. Deze snelheden zijn in figuur 5 tot figuur 11 dimensieloos weergegeven.



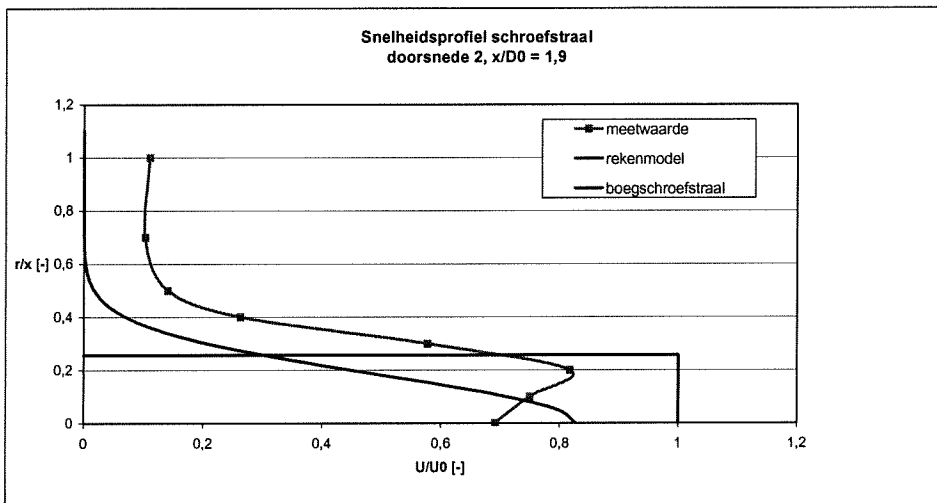
Figuur2: Gemeten tangentiële stroomsnelheden in de zeven doorsneden.



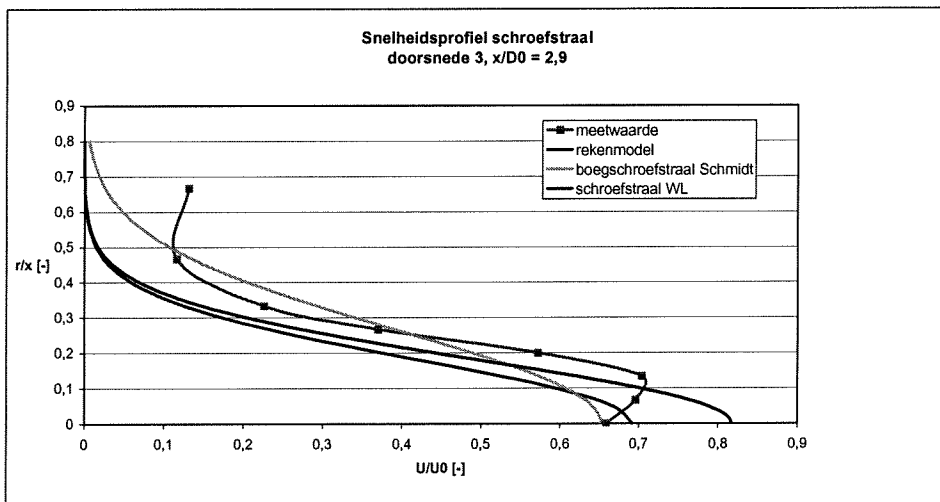
Figuur3: Gemeten relatieve turbulentie intensiteit in de zeven doorsneden.



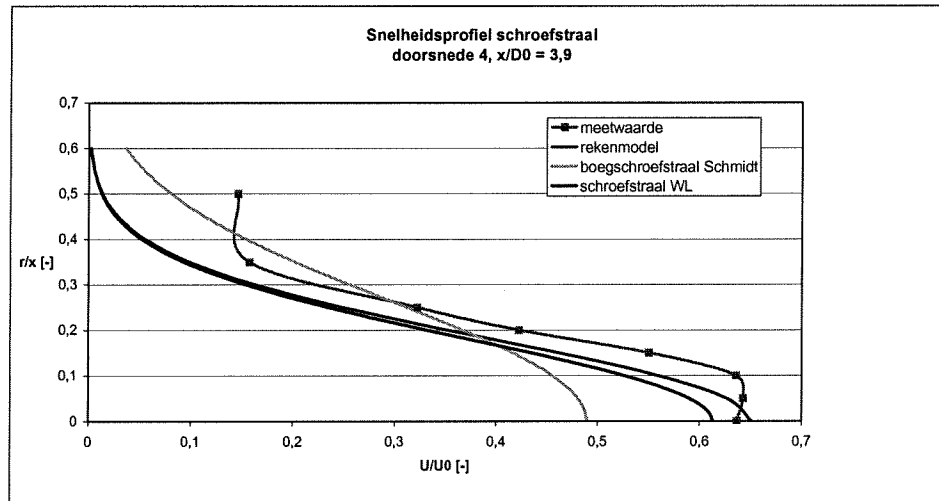
Figuur 5: Doorsnede a op $x/D_0=1,0$.



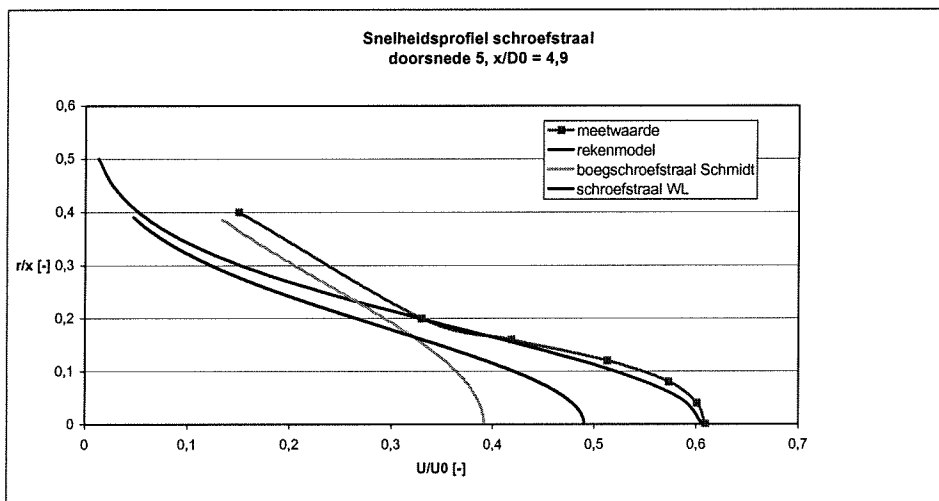
Figuur 6: Doorsnede 2 op $x/D_0=1,9$.



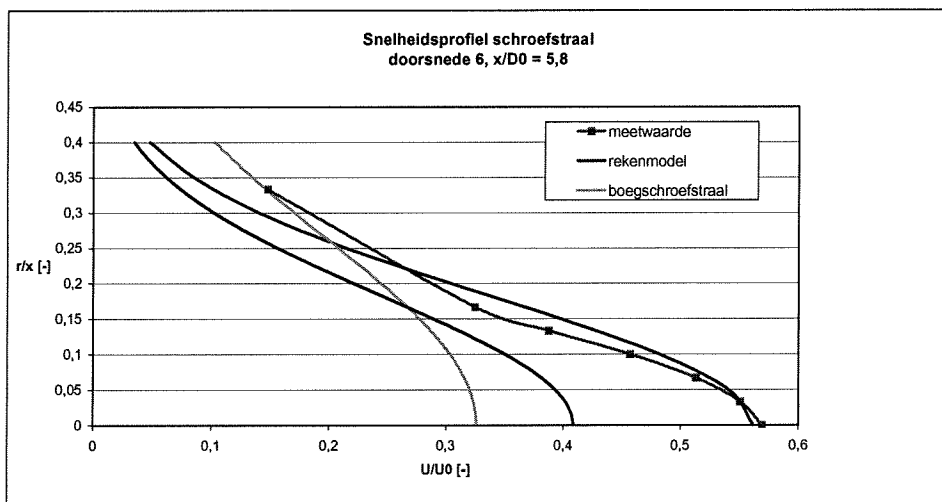
Figuur 7: Doorsnede 3 op $x/D_0=2,9$.



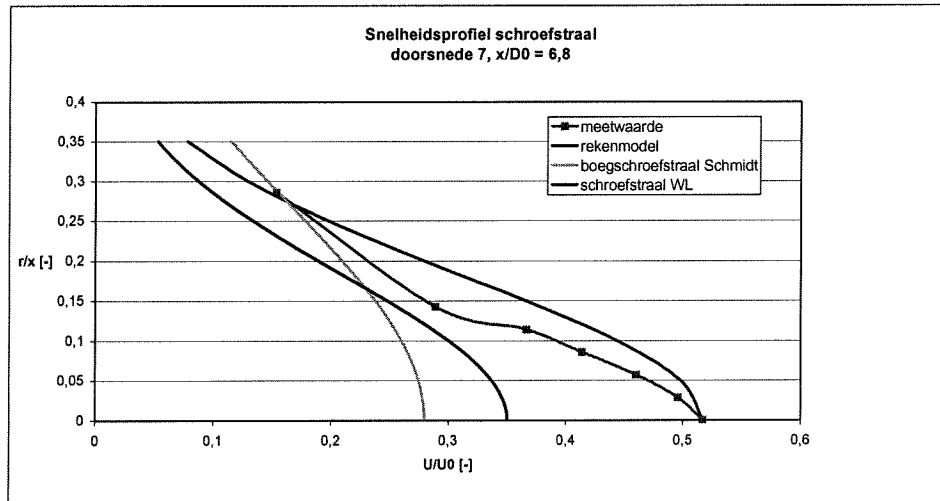
Figuur 8: Doorsnede 4 op $x/D_0=3,9$.



Figuur 9: Doorsnede 5 op $x/D_0=4,9$.

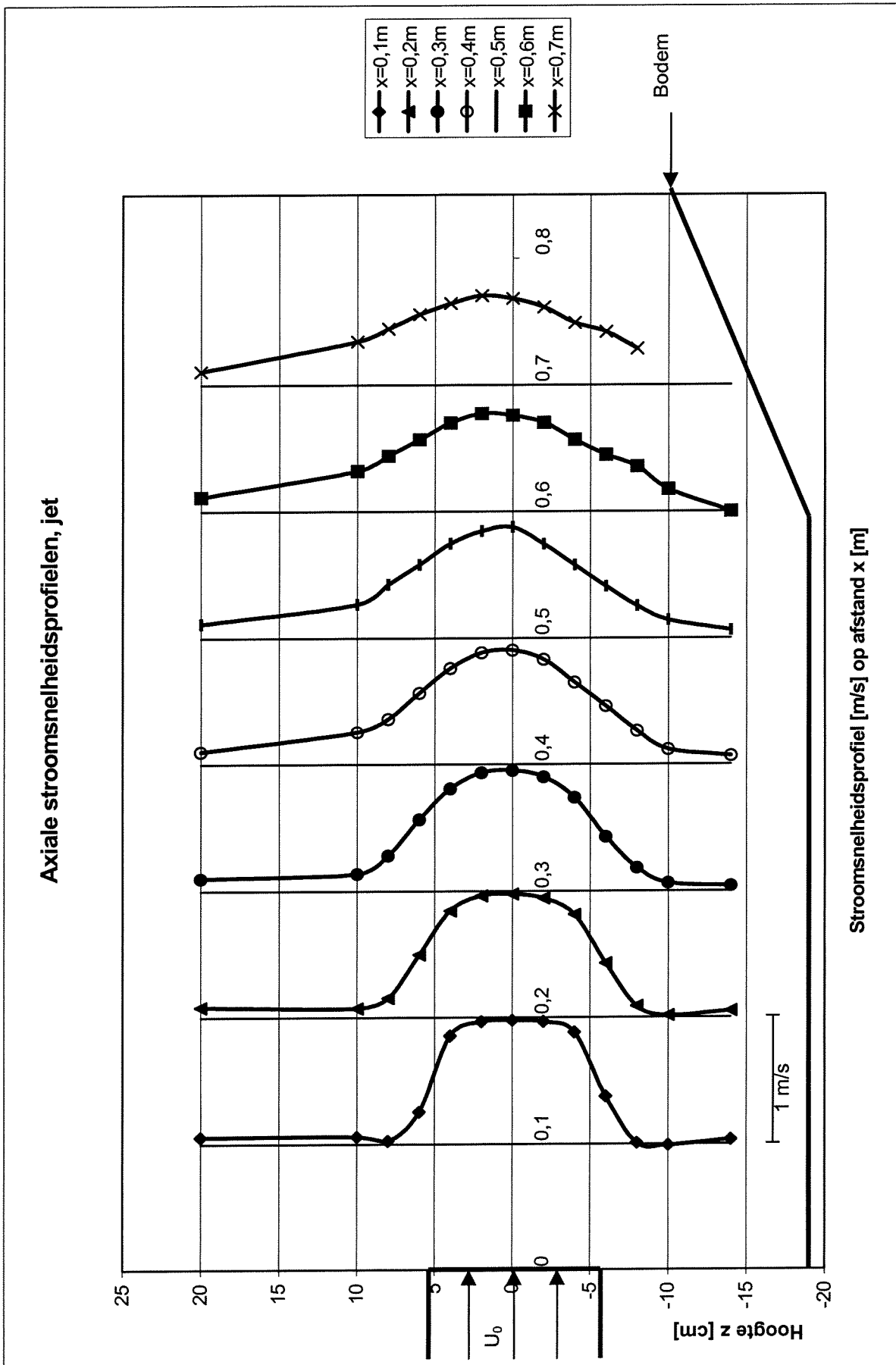


Figuur 10: Doorsnede 6 op $x/D_0=5,8$.

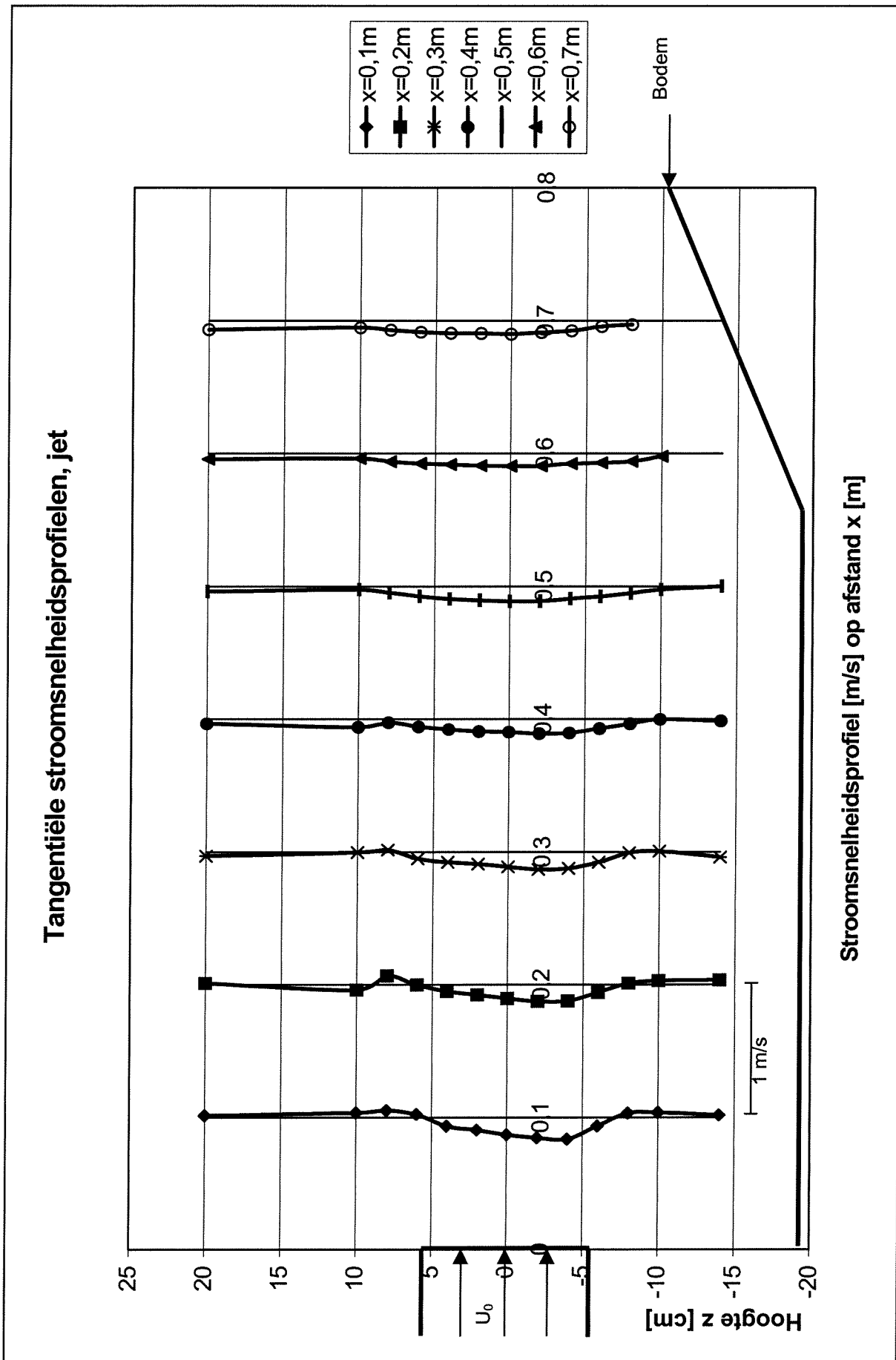


Figuur 11: Doorsnede 7 op $x/D_0=6,8$.

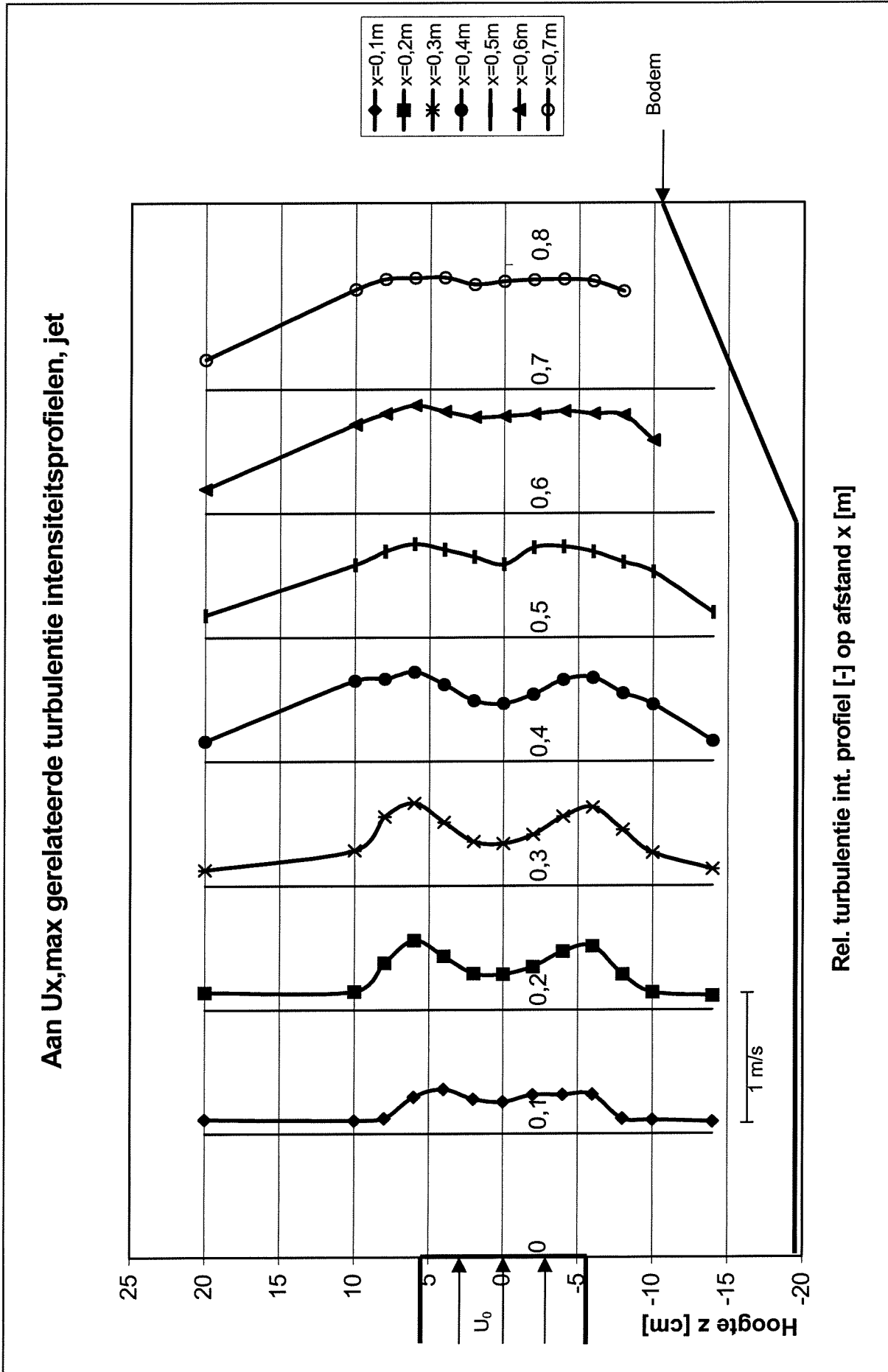
Bijlage 4.2: Snelheden in de doorsneden van de jet.



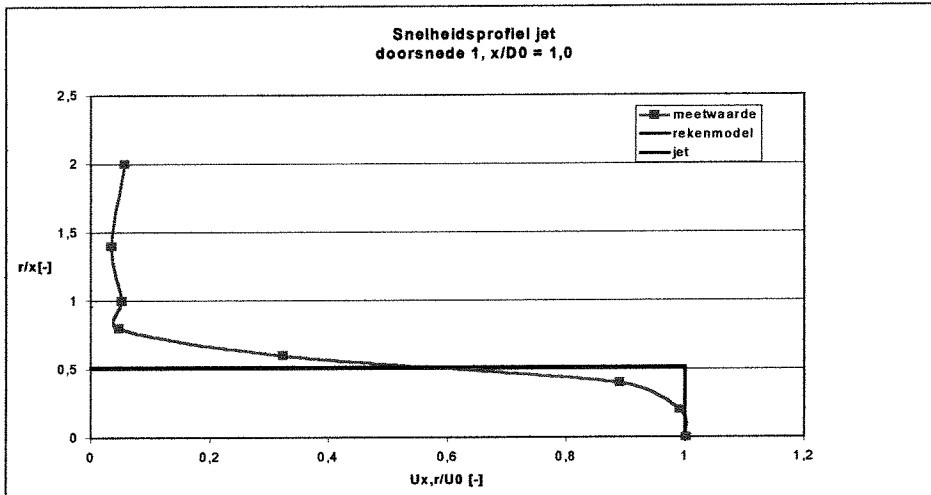
Figuur1: Gemeten stroomsnelheden in de jet in de zeven doorsneden. Deze snelheden zijn in figuur 5 tot figuur 11 dimensieloos weergegeven.



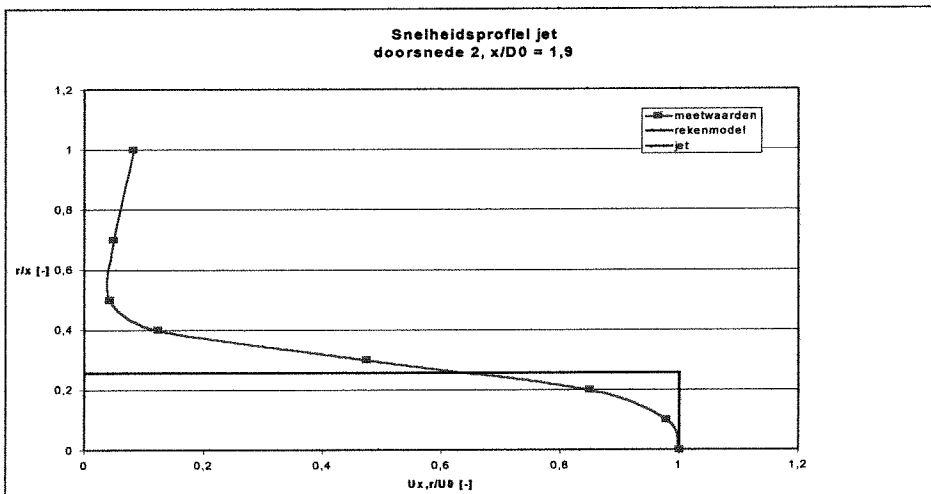
Figuur 2: Gemeten tangentiële stroomsnelheden in de zeven doorsneden



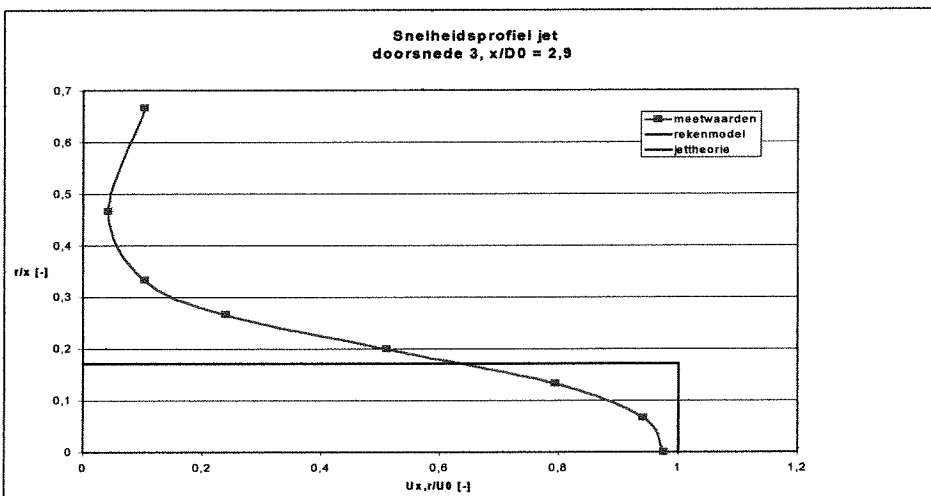
Figuur 3: Aan de maximale stroomsnelheid gerelateerde turbulentie intensiteit in de jet.



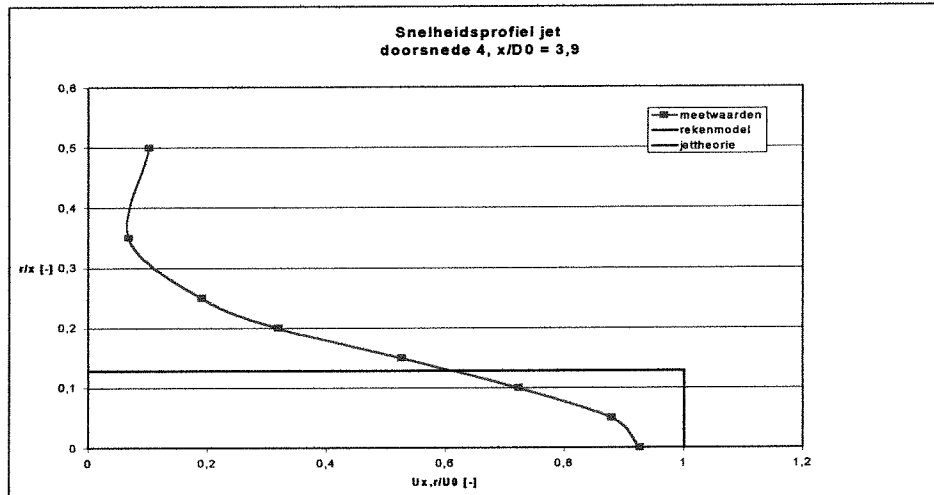
Figuur 5: Doorsnede 1 op $x/D_0=1,0$.



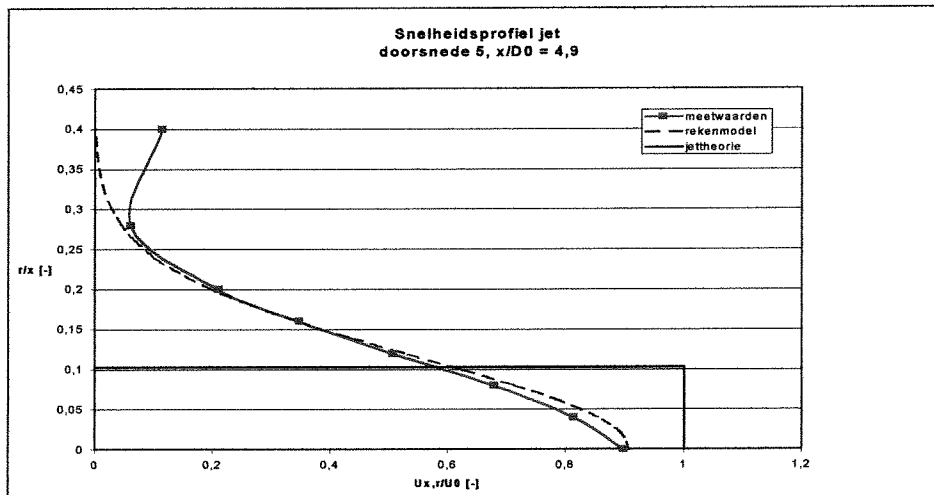
Figuur 6: Doorsnede 2 op $x/D_0 = 1,9$.



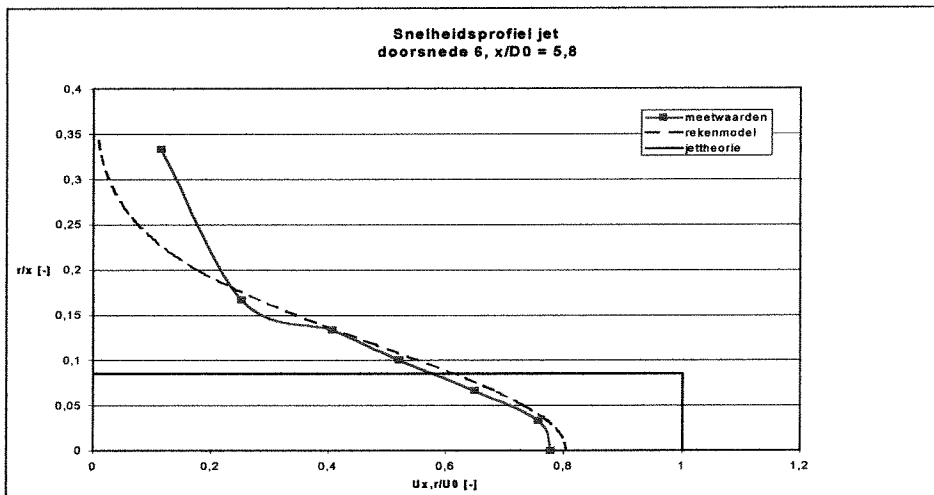
Figuur 7: Doorsnede 3 op $x/D_0 = 2,9$.



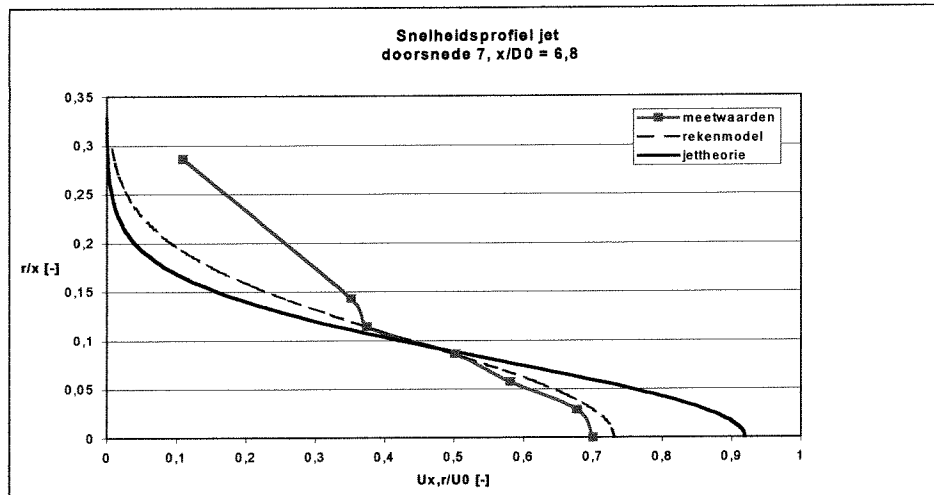
Figuur 8: Doorsnede 4 op $x/D0=3,9$.



Figuur 9: Doorsnede 5 op $x/D0 = 4,9$.



Figuur 10: Doorsnede 6 op $x/D0 = 5,8$.



Figuur 11: Doorsnede 7 op $x/D0 = 6,8$.

Gemeten snelheden in boegschroefstraal op $x=0,10\text{m}$ met verschillende toerentallen

Toerental= 750 /min					
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	n [1/min]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
10	4,364613	3,444833	753,8991	1,911745	3,892256
9	5,240947	1,863266	749,5616	2,240796	3,876777
8	6,383772	3,735619	749,578	2,925987	4,300237
7	14,82531	-2,67013	749,8581	4,565972	6,280708
6	34,72689	-16,9097	750,7245	6,084228	6,10233
5	59,05237	-28,4042	751,6838	6,689655	4,629273
4	72,53817	-36,2801	750,1904	6,227876	4,641455
3	71,61053	-34,7598	750,2764	6,171465	5,700928
2	64,19227	-28,0965	751,9146	5,507819	4,979646
1	58,80696	-17,1063	751,5576	4,717879	4,205284
0	55,76461	-8,40719	753,3616	4,40028	4,082908
-1	59,11054	-1,77222	749,531	5,312794	4,054955
-2	66,3424	7,608184	748,6477	6,666286	3,722244
-3	75,66042	18,86613	747,3377	7,447289	4,219731
-4	83,26941	28,97701	747,5682	6,828599	5,006285
-5	76,89316	28,53064	748,8501	6,316208	4,954862
-6	50,50734	21,01381	750,1959	6,989332	5,400429
-7	20,68092	11,46413	751,0356	5,042772	4,925638
-8	8,048231	7,317054	750,8965	2,572101	4,337107
-9	5,960443	5,786616	749,4042	2,187696	3,804232
-10	5,899705	4,690633	750,3252	1,955738	3,90082

Toerental= 1095 /min					
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	n [1/min]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
10	11,14278	-0,18826	-1094,53	3,007958	5,930563
9	12,53045	0,177035	-1098,84	3,00971	6,521376
8	15,98357	-2,87546	-1100,15	4,041917	7,800247
7	30,70393	-13,4582	-1099,45	6,560784	9,404817
6	59,56277	-31,5946	-1098,5	8,332	7,978121
5	96,53156	-50,5249	-1097,33	8,94308	5,742591
4	112,8786	-60,845	-1099,46	7,962444	4,87637
3	107,1527	-57,006	-1098,02	7,819884	6,125669
2	95,37576	-43,1968	-1096,13	6,184001	5,538134
1	86,70518	-26,3531	-1096,12	5,38215	4,608126
0	83,90421	-14,1458	-1097	5,506127	4,617703
-1	90,93929	-2,48654	-1094,55	7,212358	4,313155
-2	105,7795	13,09748	-1095,17	8,515007	4,575481
-3	123,5152	29,6284	-1094,17	8,500684	5,527638
-4	130,6617	38,4247	-1092,7	7,026605	5,295102
-5	111,3518	34,35008	-1089,44	7,090073	5,335426
-6	65,72362	20,32249	-1090,58	8,293673	6,267207
-7	23,94202	7,208073	-1089,32	5,700786	6,462553
-8	11,63631	5,141621	-1089,68	3,360604	5,963086
-9	9,894822	2,900712	-1093,08	3,007564	6,770921
-10	9,556042	2,373598	-1096,15	2,849673	5,814151

Bijlage 4.3: Meetdata snelheidsmetingen

Toerental= 922 /min					
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	n [1/min]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
10	9,722636	0,197024	-916,81	2,474894	4,890627
9	10,26344	-0,29897	-912,566	2,665234	5,838216
8	12,96579	-0,30906	-918,844	3,544082	5,847562
7	24,95106	-10,4752	-923,31	5,861678	8,228019
6	50,5469	-26,7036	-922,727	7,027134	7,164384
5	81,83857	-41,5739	-921,897	7,605982	5,38337
4	101,2006	-45,9773	-922,222	6,275999	4,578162
3	95,75641	-44,1587	-924,637	6,345914	5,449365
2	84,6345	-33,1618	-925,649	5,983454	4,830542
1	75,77167	-20,793	-924,576	4,875157	4,058669
0	74,14793	-10,9275	-923,899	4,743094	4,399536
-1	80,38059	-1,56034	-923,455	6,18907	4,132243
-2	91,92287	10,74967	-922,975	6,905435	3,636918
-3	106,0185	23,6446	-922,058	7,242539	4,687091
-4	112,6446	30,29586	-924,271	6,295321	4,815184
-5	96,51021	28,81537	-923,597	6,429914	4,973245
-6	57,29127	17,18467	-923,302	6,943594	5,307301
-7	23,0127	5,762667	-923,692	4,626399	5,566292
-8	14,379	1,574944	-923,255	2,858589	5,657056
-9	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-

Toerental= 1280 /min					
z [cm]	U _{x,r} [cm/s]	V _{x,r} [cm/s]	n [1/min]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
10	15,53783	0,765433	-1273,55	3,290147	7,119247
9	16,47611	-0,34383	-1271,92	3,553121	8,014212
8	21,13064	-4,74515	-1269,86	4,55101	9,880366
7	38,47391	-19,6489	-1268,49	7,449877	10,1034
6	74,86329	-38,4866	-1269,6	9,579024	8,445957
5	116,7219	-56,921	-1269,31	10,58392	5,994818
4	134,8954	-67,7013	-1270,35	8,799449	4,996349
3	129,31	-64,2036	-1274,46	9,449151	6,388753
2	114,4254	-49,7594	-1276,29	7,619721	6,7929
1	104,6601	-32,5361	-1280,89	6,156973	5,561305
0	103,6058	-17,6182	-1285,88	6,341365	5,970343
-1	111,8256	-1,72007	-1299,1	8,40009	4,602765
-2	128,8011	19,43519	-1297,41	9,478955	4,757528
-3	149,2781	39,49553	-1290,37	9,806287	5,482435
-4	155,7129	48,59437	-1291,19	8,409126	5,498976
-5	132,0743	41,81015	-1293,28	9,02085	6,288502
-6	76,76886	24,26184	-1289,31	9,102238	7,383271
-7	30,0852	7,344435	-1287,91	6,395955	7,612432
-8	18,39364	-0,66851	-1287,53	3,57136	7,594132
-9	16,10684	2,454538	-1285,43	3,621049	8,152035
-10	15,47433	-0,3308	-1286,09	3,630455	7,881686

Gemeten snelheden in de boegschroefstraal

boegschroefstraal		x=0,10m	y=0m					
z [cm]	U _{x,r} [cm/s]	V _{x,r} [cm/s]	n [1/min]	U' [cm/s]	V' [cm/s]	U _{x,r} /U ₀ [-]	U'/U _{x,r} [-]	U'/U _{x,max} [-]
						U ₀ =1,50m/s		
10	15,537831	0,7654334	-1273,551	3,2901469	7,1192475	0,1035855	0,2117507	0,021129572
9	16,476107	-0,343826	-1271,92	3,5531208	8,0142121	0,1098407	0,2156529	0,02281841
8	21,130635	-4,745151	-1269,862	4,5510098	9,8803659	0,1408709	0,215375	0,029226928
7	38,473909	-19,64895	-1268,489	7,449877	10,103398	0,2564927	0,1936345	0,047843672
6	74,863289	-38,48656	-1269,595	9,5790241	8,4459571	0,4990886	0,1279536	0,061517216
5	116,72194	-56,92099	-1269,31	10,583916	5,9948178	0,7781463	0,0906763	0,067970707
4	134,89537	-67,70128	-1270,348	8,7994485	4,9963491	0,8993024	0,0652317	0,056510723
3	129,30998	-64,20359	-1274,46	9,4491507	6,3887528	0,8620665	0,0730736	0,060683159
2	114,42539	-49,75939	-1276,286	7,6197209	6,7929	0,762836	0,0665912	0,048934423
1	104,6601	-32,53609	-1280,894	6,1569729	5,5613052	0,697734	0,0588283	0,039540545
0	103,60582	-17,61818	-1285,879	6,3413647	5,9703426	0,6907055	0,0612066	0,040724723
-1	111,82558	-1,720072	-1299,098	8,40009	4,6027647	0,7455039	0,0751178	0,053946012
-2	128,80105	19,435189	-1297,411	9,4789547	4,757528	0,8586737	0,0735938	0,060874563
-3	149,27806	39,495533	-1290,366	9,8062867	5,4824352	0,9951871	0,0656914	0,062976714
-4	155,71295	48,594373	-1291,185	8,4091258	5,4989762	1,0380863	0,054004	0,054004041
-5	132,07431	41,810152	-1293,282	9,02085	6,2885022	0,8804954	0,0683013	0,05793258
-6	76,768859	24,261838	-1289,305	9,1022377	7,383271	0,5117924	0,1185668	0,058455258
-7	30,0852	7,3444346	-1287,91	6,3959548	7,6124323	0,200568	0,2125947	0,041075304
-8	18,39364	-0,668509	-1287,526	3,5713605	7,5941318	0,1226243	0,1941628	0,022935546
-9	16,10684	2,4545384	-1285,425	3,6210493	8,1520348	0,1073789	0,2248144	0,023254652
-10	15,474332	-0,330802	-1286,092	3,6304549	7,8816863	0,1031622	0,2346114	0,023315056
-14	12,086484	3,2706937	-1255,144	3,6398605	3,2702105	0,0805766	0,3011513	0,023375459

		x=0,20m	y=0m					
z [cm]	U _{x,r} [cm/s]	V _{x,r} [cm/s]	n [1/min]	U' [cm/s]	V' [cm/s]	U _{x,r} /U ₀ [-]	U'/U _{x,r} [-]	U'/U _{x,max} [-]
20	16,65658	0,7710153	-1247,871	3,458733	6,4338921	0,1110439	0,2076496	0,025732457
10	24,122947	-4,630783	-1281,605	7,6240904	9,2866595	0,1608196	0,3160514	0,056722094
8	43,823886	-19,59898	-1281,776	11,970067	10,768863	0,2921592	0,2731402	0,08905551
6	81,097303	-36,89562	-1282,99	15,002655	9,8970284	0,5406487	0,1849957	0,111617511
4	110,33201	-54,51818	-1286,073	10,460803	7,6829255	0,7355467	0,094812	0,077826812
2	110,87067	-45,93197	-1287,851	8,1273705	8,8047608	0,7391378	0,073305	0,060466423
0	103,61854	-14,9724	-1294,028	8,8670728	7,5836548	0,6907903	0,0855742	0,065969698
-2	113,62305	14,88706	-1278,609	10,551381	7,1223473	0,757487	0,092863	0,078500702
-4	134,41126	33,612955	-1276,764	9,9465286	7,2372548	0,8960751	0,0740007	0,074000687
-6	91,657263	19,931693	-1273,863	15,31048	9,3628424	0,6110484	0,1670405	0,113907682
-8	34,736364	5,589006	-1272,09	10,502279	9,4139286	0,2315758	0,3023425	0,078135389
-10	18,127869	2,0197393	-1272,536	5,0640041	8,3518648	0,1208525	0,2793491	0,037675434
-14	15,404386	-0,525161	-1255,891	3,90817	6,856918	0,1026959	0,253705	0,029076201

Gemeten stroomsnelheden in jet op $x=0,10\text{m}$ met verschillende niveau's in meetflens

Waterkolom=0,10m				
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
8	5,10711	5,639826	1,295048	2,1912
7	8,445167	6,639893	1,753428	2,312365
6	18,72932	6,342588	3,080249	2,894327
5	37,09414	5,259987	3,567593	2,915017
4	47,66703	4,664437	3,083389	3,066278
3	51,27736	4,541143	2,721858	3,235965
2	53,54481	3,812597	2,678422	3,239596
1	54,07543	2,695537	2,688708	3,061609
0	54,0973	1,606284	2,818795	2,794602
-1	53,74602	0,493291	3,034213	2,523373
-2	53,50645	-0,26107	3,403906	2,360223
-3	52,379	-0,97829	3,796415	2,231896
-4	49,44108	-1,57839	4,216733	2,572592
-5	40,07541	-1,43666	4,05526	2,868968
-6	24,2876	0,768273	3,355997	2,583496
-7	8,506814	3,924857	2,096446	1,70596
-8	3,578452	4,746654	1,187642	1,631754

Waterkolom=0,30m				
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
8	33,40547	-7,44001	12,04462	3,583452
7	50,66282	-9,23805	14,91689	4,214356
6	147,499	-7,41358	27,20185	5,239341
5	60,38571	-0,30694	6,973845	5,745276
4	79,5011	2,292157	5,913817	6,378058
3	85,66059	3,068938	5,401507	6,432039
2	88,27441	4,816191	4,755845	6,313549
1	88,97013	6,674721	4,505336	5,810837
0	89,28516	8,218044	4,733687	5,280777
-1	88,93002	10,21637	5,220026	4,826446
-2	88,19116	12,07823	5,543145	4,289977
-3	86,69814	13,00559	6,235112	4,094817
-4	81,83603	12,82695	6,834307	4,405331
-5	67,48718	10,54822	6,76009	5,083219
-6	41,56886	2,908768	5,824696	4,892504
-7	13,02112	-5,64618	3,968307	3,404435
-8	5,639262	-8,22726	2,102103	3,279285

Waterkolom=0,20m				
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
8	7,373838	7,020337	1,700356	2,673576
7	10,93888	9,621056	2,414102	3,437698
6	26,91131	10,10919	4,459326	4,090441
5	52,26736	7,491444	5,145587	3,943854
4	68,26062	8,029615	4,178846	4,337155
3	73,16532	7,30206	3,831532	4,373465
2	75,89582	6,633332	3,620363	4,506896
1	76,61343	5,415051	3,428598	4,172861
0	71,81967	7,73872	3,915618	4,291118
-1	71,85444	8,936932	4,348837	4,076946
-2				
-3	69,80298	11,31441	5,406738	3,398145
-4	65,83612	11,03735	5,762304	3,58732
-5	54,25822	9,178361	5,70539	4,195126
-6	32,39242	2,916338	5,235176	4,328946
-7	9,825406	-4,01636	2,760673	2,625329
-8	4,570433	-7,34192	1,607417	2,682442

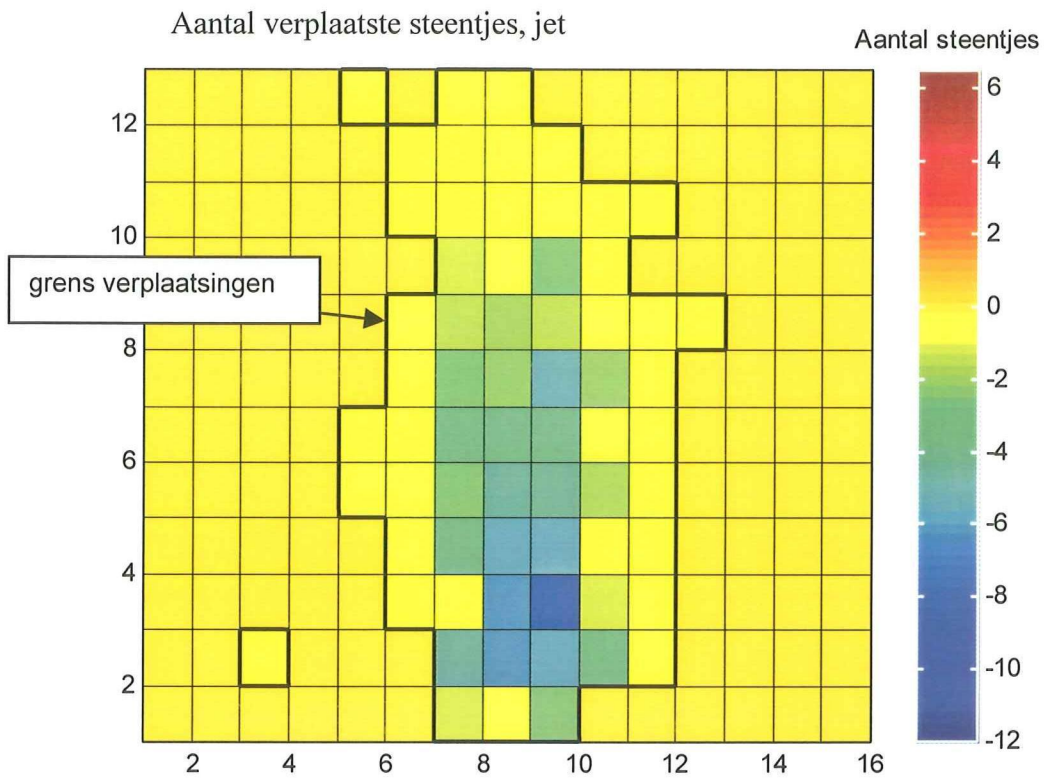
Waterkolom=0,40m				
z [cm]	U [cm/s]	V [cm/s]	U' [cm/s]	V' [cm/s]
8	2,515248	-5,34758	2,42623	4,568148
7	11,74563	-10,0351	3,486805	4,568685
6	25,55015	-2,56825	5,779172	6,096081
5	70,44154	0,241878	8,032252	6,939386
4	85,554	6,279381	6,961518	7,286262
3	102,0056	14,45862	7,00144	4,66186
2	96,65054	9,29327	5,417483	7,042194
1	103,639	8,524491	5,107246	6,705033
0	97,7089	12,89016	4,995753	5,63296
-1	103,909	12,11811	5,442866	5,216716
-2	96,69904	15,16527	6,094228	4,659041
-3	102,0056	14,45862	7,00144	4,66186
-4	88,11372	16,15287	6,136214	4,927866
-5	81,14698	10,68503	7,538024	5,616856
-6	37,56624	6,376176	6,167259	5,277154
-7	15,8702	-6,73879	4,221232	3,851144
-8	0,806292	-3,45534	2,395684	4,357569

Gemeten snelheden in de jet

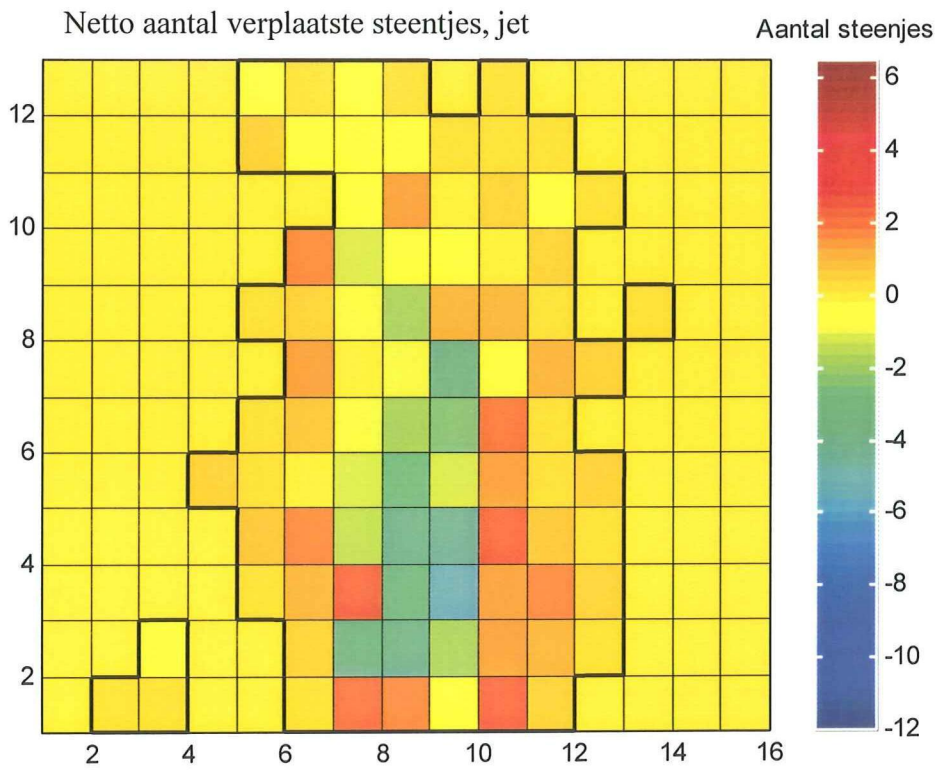
jet	x=0,10m	y=0m							
z [cm]	V [cm/s]	U [cm/s]	V' [cm/s]	U' [cm/s]	V _{x,r} /U ₀	U _{x,r} /U ₀	U'/U _{x,r} [-]	U'/U _{max} [-]	
20	-1,5365	5,6037	4,3558	2,2524	-0,0165	0,0602	0,402	0,02305	
10	-3,7804	5,8432	3,9465	2,0489	-0,0406	0,0628	0,3507	0,02097	
8	-5,3476	2,5152	4,5681	2,4262	-0,0575	0,027	0,9646	0,02483	
6	-2,5682	25,55	6,0961	5,7792	-0,0276	0,2747	0,2262	0,05915	
4	6,2794	85,554	7,2863	6,9615	0,0675	0,9198	0,0814	0,07125	
2	9,2933	96,651	7,0422	5,4175	0,0999	1,0391	0,0561	0,05545	
0	12,89	97,709	5,633	4,9958	0,1386	1,0505	0,0511	0,05113	
-2	15,165	96,699	4,659	6,0942	0,163	1,0396	0,063	0,06237	
-4	16,153	88,114	4,9279	6,1362	0,1737	0,9473	0,0696	0,0628	
-6	6,3762	37,566	5,2772	6,1673	0,0686	0,4039	0,1642	0,06312	
-8	-3,4553	0,8063	4,3576	2,3957	-0,0371	0,0087	2,9712	0,02452	
-10	-3,8562	-0,8914	3,0334	2,1749	-0,0415	-0,0096	-2,44	0,02226	
-14	-1,8068	3,497	4,2264	1,8971	-0,0194	0,0376	0,5425	0,01942	

	x=0,20m	y=0m							
z [cm]	V [cm/s]	U [cm/s]	V' [cm/s]	U' [cm/s]	V _{x,r} /U ₀	U _{x,r} /U ₀	U'/U _{x,r} [-]	U'/U _{max} [-]	
20	-1,0317	8,1533	4,364	2,7156	-0,0111	0,0877	0,3331	0,02782	
10	3,8699	7,1702	4,6327	2,8983	0,0416	0,0771	0,4042	0,0297	
8	-6,7789	15,411	6,4602	7,356	-0,0729	0,1657	0,4773	0,07537	
6	0,036	49,725	8,8746	10,946	0,0004	0,5346	0,2201	0,11215	
4	5,0258	84,505	7,6687	8,4169	0,054	0,9085	0,0996	0,08624	
2	7,6055	96,41	7,1952	5,7039	0,0818	1,0365	0,0592	0,05844	
0	10,296	97,601	5,815	5,6135	0,1107	1,0493	0,0575	0,05752	
-2	12,509	94,543	5,3128	6,784	0,1345	1,0165	0,0718	0,06951	
-4	12,251	81,345	6,7842	9,1829	0,1317	0,8746	0,1129	0,09409	
-6	5,7056	42,961	7,7705	9,9986	0,0613	0,4619	0,2327	0,10244	
-8	-1,1113	8,8522	5,2974	5,5666	-0,0119	0,0952	0,6288	0,05703	
-10	-3,1573	1,4401	3,7106	2,7387	-0,0339	0,0155	1,9018	0,02806	
-14	-3,5445	4,9462	2,8281	2,175	-0,0381	0,0532	0,4397	0,02228	

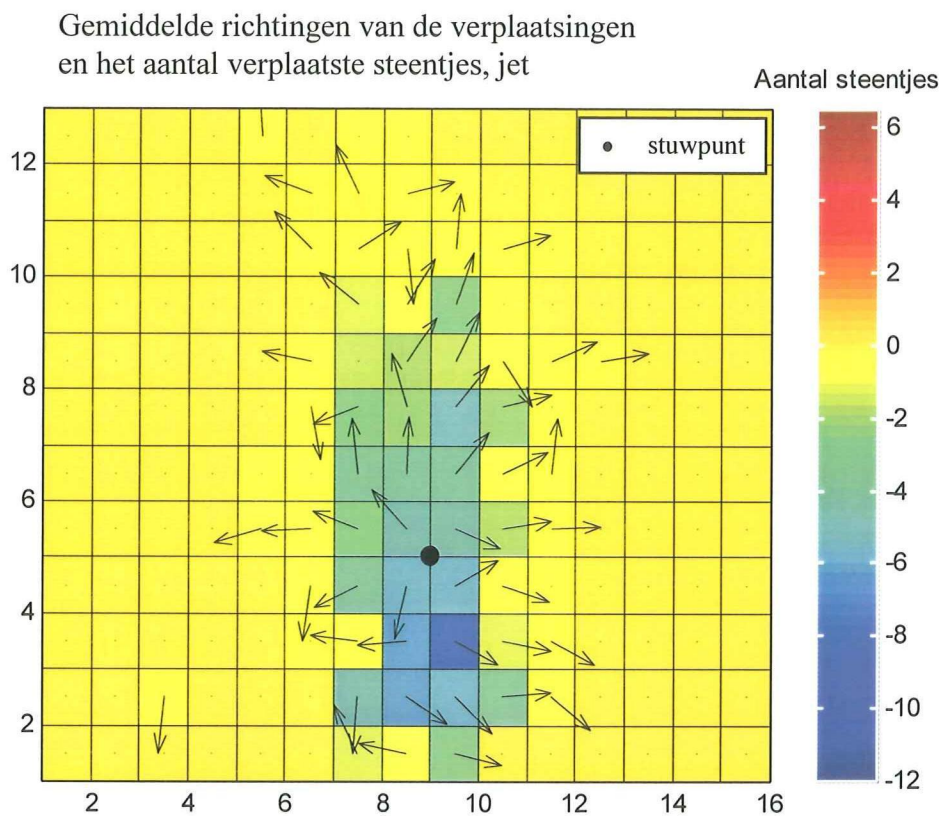
	x=0,30m	y=0m							
z [cm]	V [cm/s]	U [cm/s]	V' [cm/s]	U' [cm/s]	V _{x,r} /U ₀	U _{x,r} /U ₀	U'/U _{x,r} [-]	U'/U _{max} [-]	
20	2,8257	10,134	3,8314	2,3986	0,0304	0,1089	0,2367	0,02519	
10	0,2545	13,894	6,1763	5,3901	0,0027	0,1494	0,388	0,05662	
8	-1,696	28,417	8,7367	10,578	-0,0182	0,3055	0,3722	0,11111	
6	4,9444	56,686	10,288	12,655	0,0532	0,6095	0,2233	0,13293	
4	7,6556	80,959	8,4657	9,7089	0,0823	0,8704	0,1199	0,10198	
2	8,9675	93,535	7,622	6,7317	0,0964	1,0056	0,072	0,07071	
0	11,087	95,201	7,026	6,4539	0,1192	1,0235	0,0678	0,06779	
-2	13,067	90,152	7,4201	7,8097	0,1405	0,9692	0,0866	0,08203	
-4	12,352	73,955	8,6728	10,562	0,1328	0,7951	0,1428	0,11094	
-6	7,6085	42,943	8,8771	11,976	0,0818	0,4617	0,2789	0,12579	
-8	0,623	18,517	6,3895	8,5278	0,0067	0,1991	0,4605	0,08958	
-10	-0,6082	6,3777	4,7086	5,0363	-0,0065	0,0686	0,7897	0,0529	
-14	3,8232	4,2241	2,6967	2,5258	0,0411	0,0454	0,5979	0,02653	



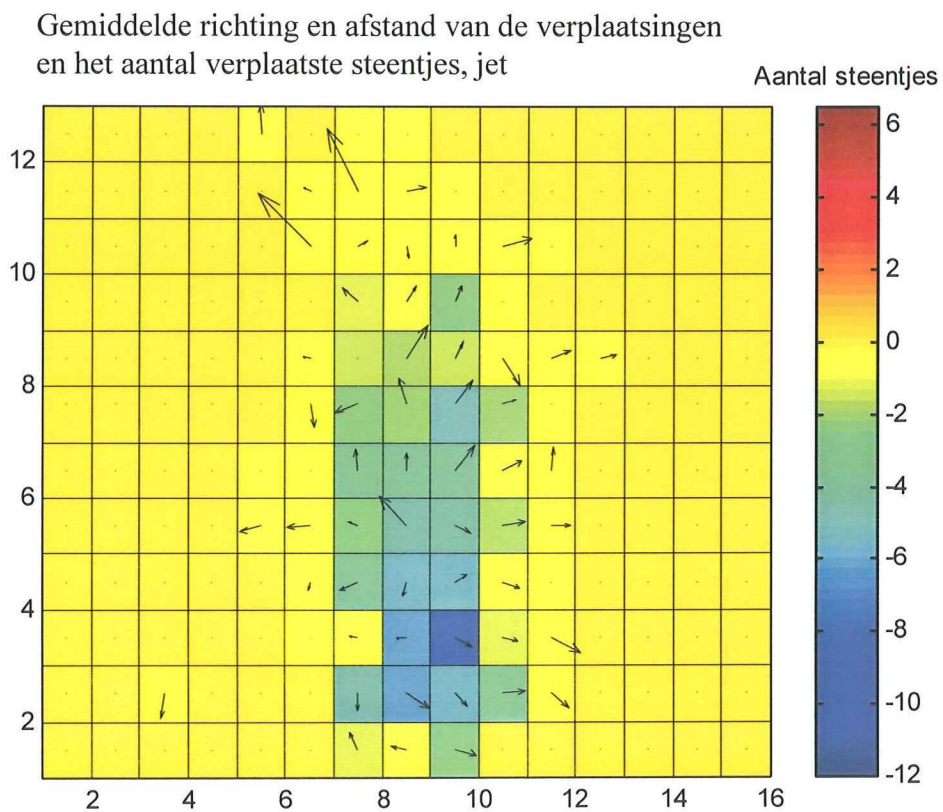
Figuur 1: Aantal verplaatste steentjes voor de jet.



Figuur 2: Netto aantal verplaatste steentjes voor de jet.

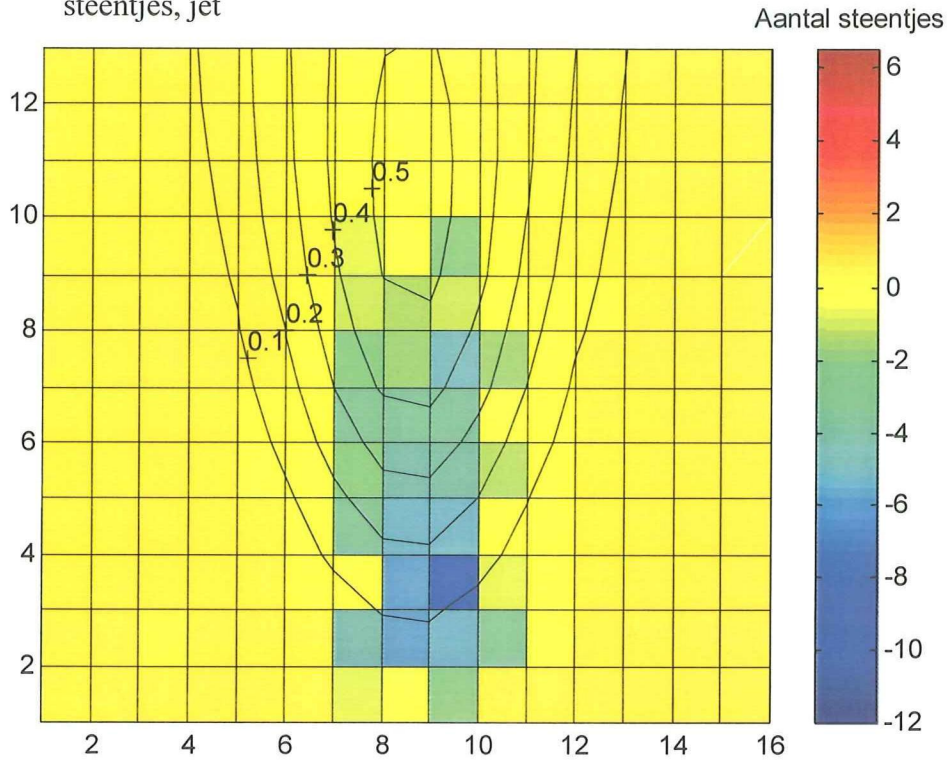


Figuur 3: Gemiddelde richting van de verplaatsingen voor de jet.



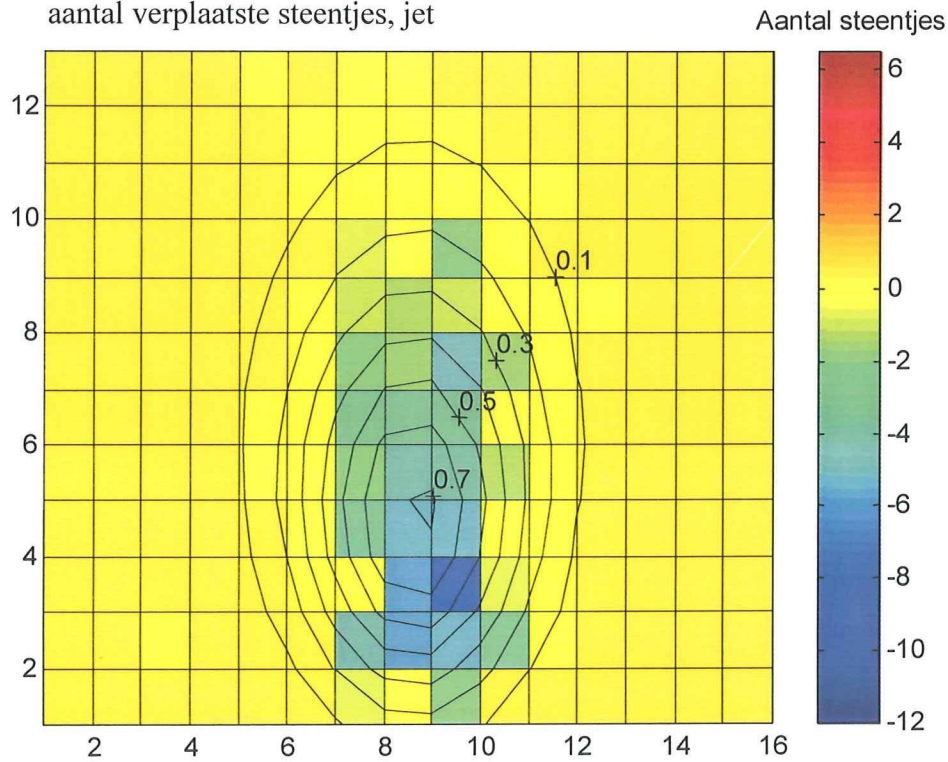
Figuur 4: Gemiddelde richting en afstand van de verplaatsingen, jet.

Berekende U_{talud}/U_0 en het aantal verplaatste steentjes, jet

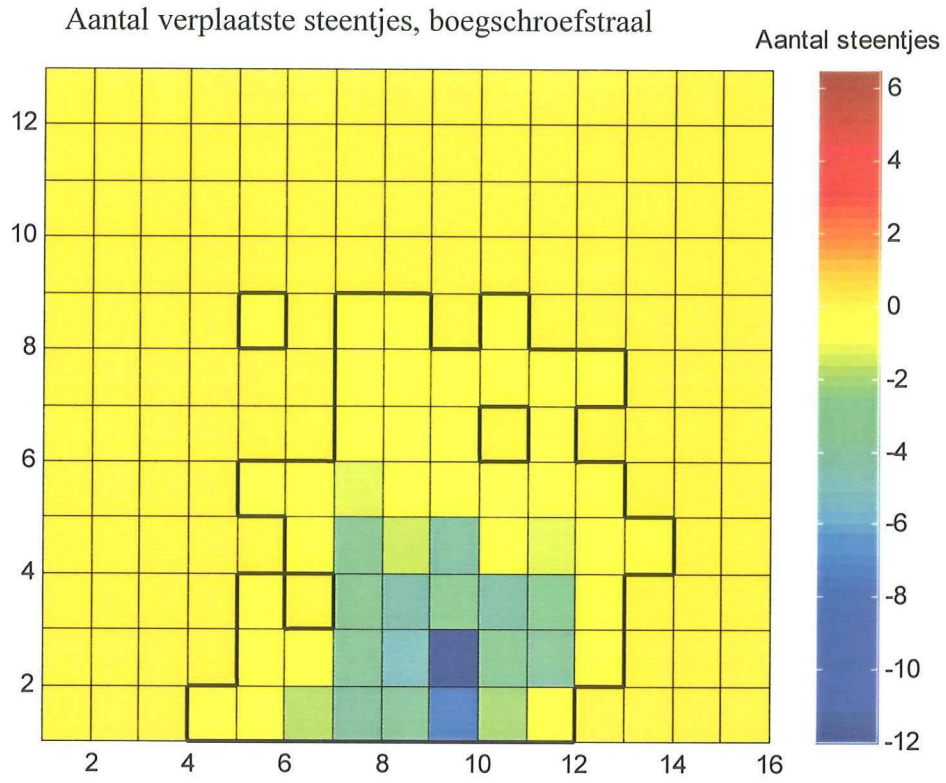


Figuur 5: Berekende U_{talud}/U_0 op het talud voor de jet.

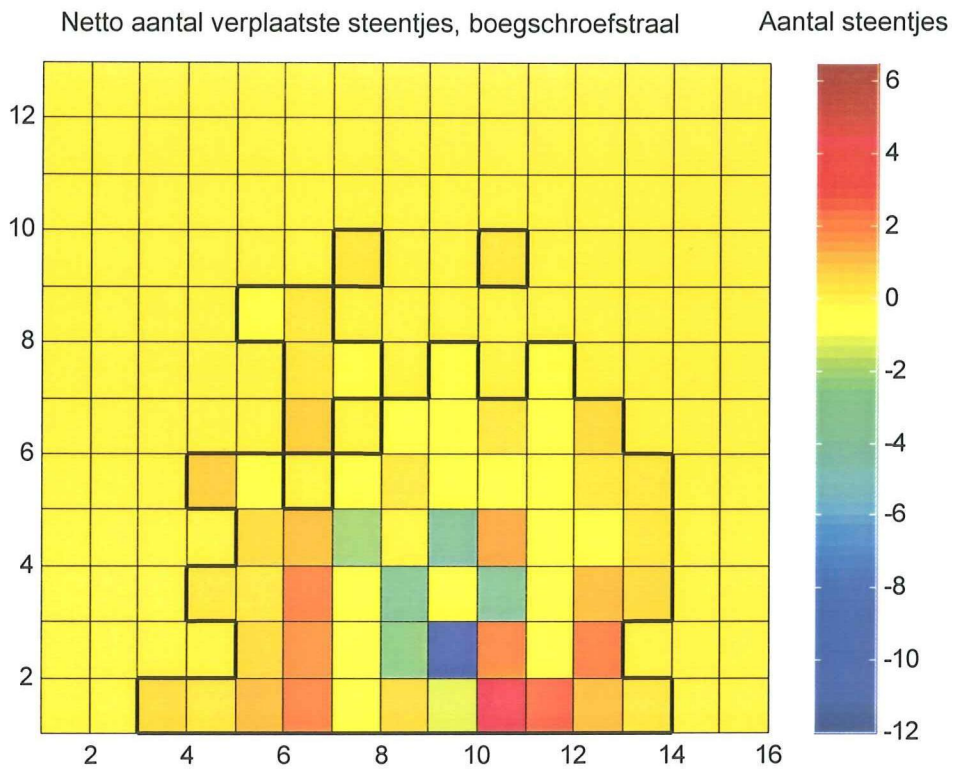
Berekende U_{talud}/U_0 met afbuigende straalas en het aantal verplaatste steentjes, jet



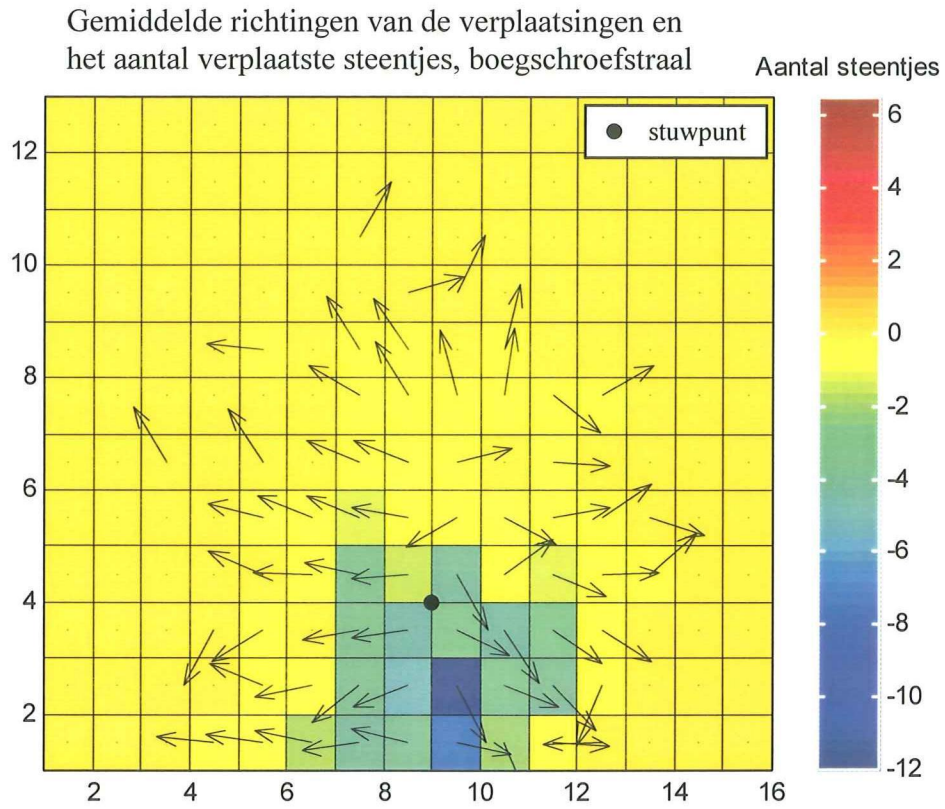
Figuur 6: Berekende U_{talud}/U_0 voor de jet, met afbuigende straalas.



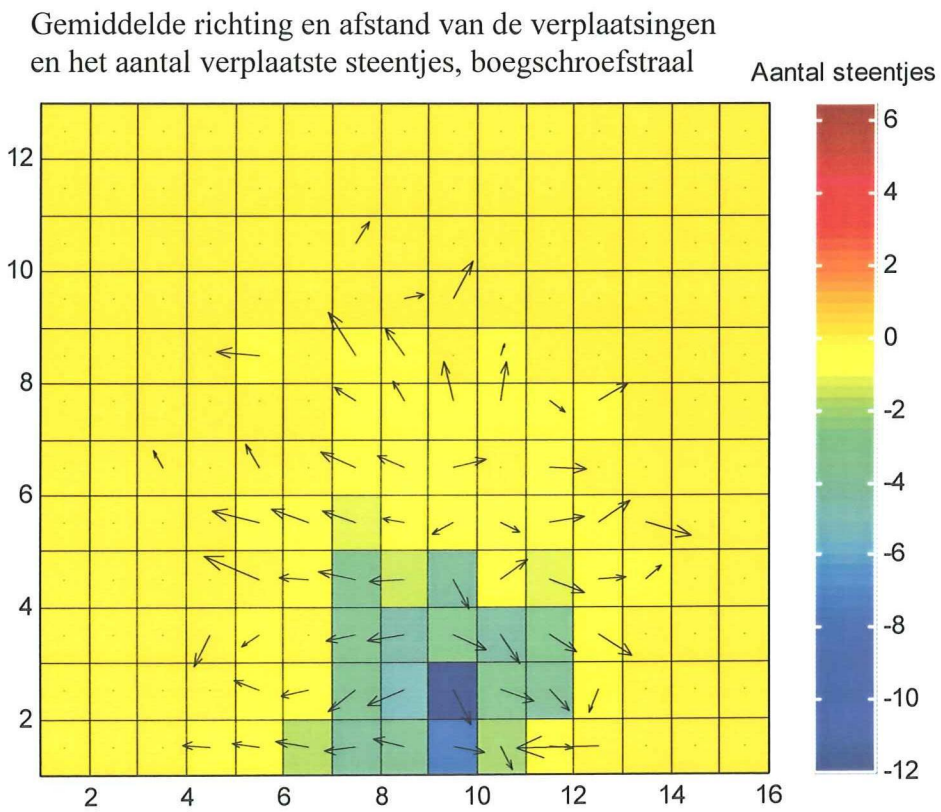
Figuur 7: Aantal verplaatste steentjes voor de boegschroefstraal.



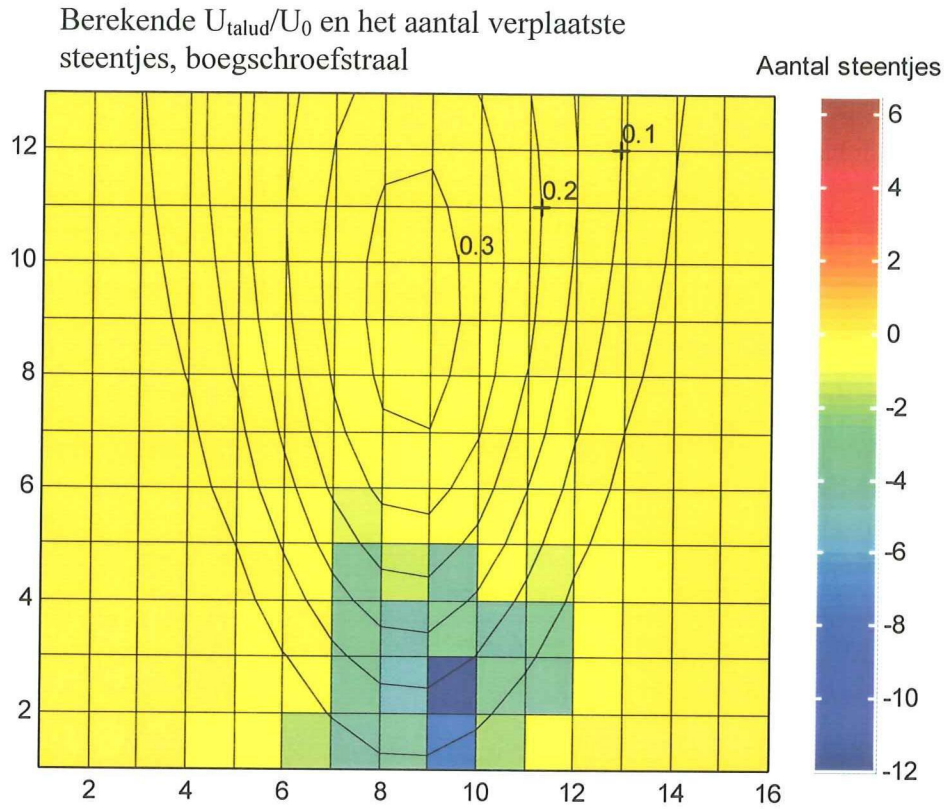
Figuur 8: Netto aantal verplaatste steentjes voor de boegschroefstraal.



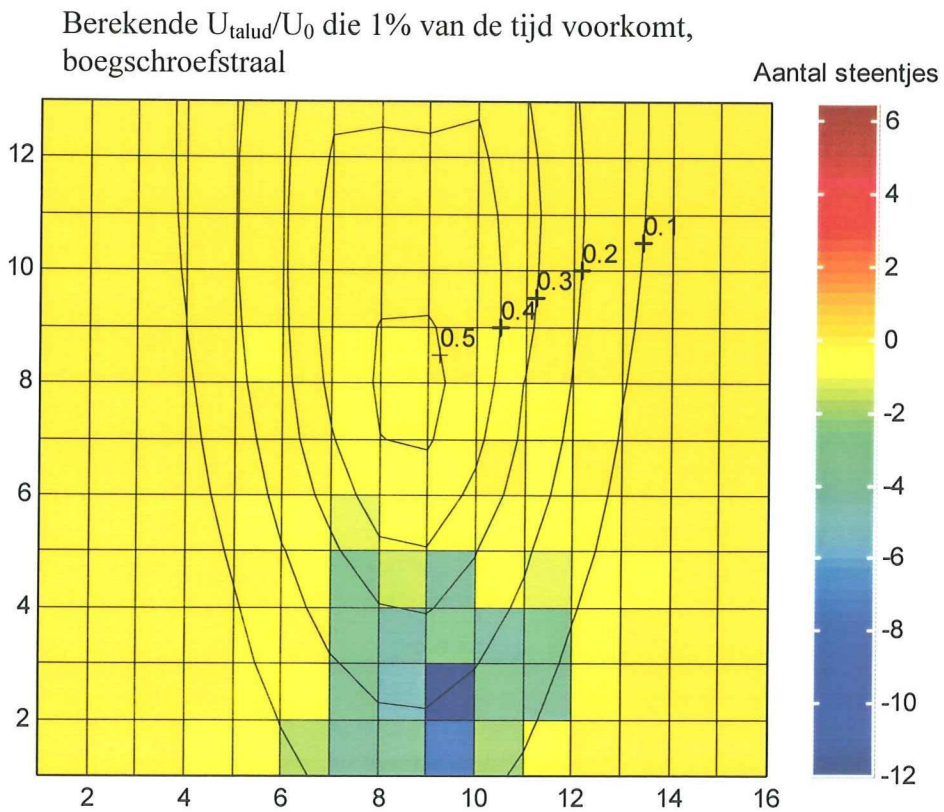
Figuur 9: Gemiddelde richting van de verplaatsingen voor de boegschroefstraal.



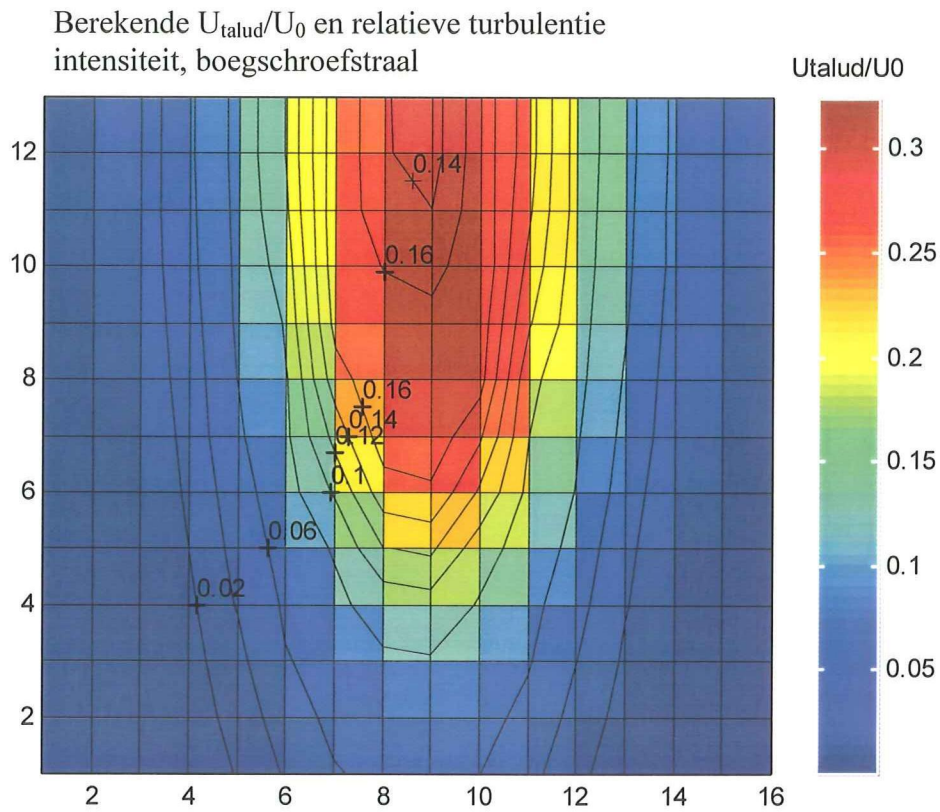
Figuur 10: Gemiddelde richting en afstand van de verplaatsingen, boegschroefstraal.



Figuur 11: Berekende U_{talud}/U_0 voor de boegschroefstraal.

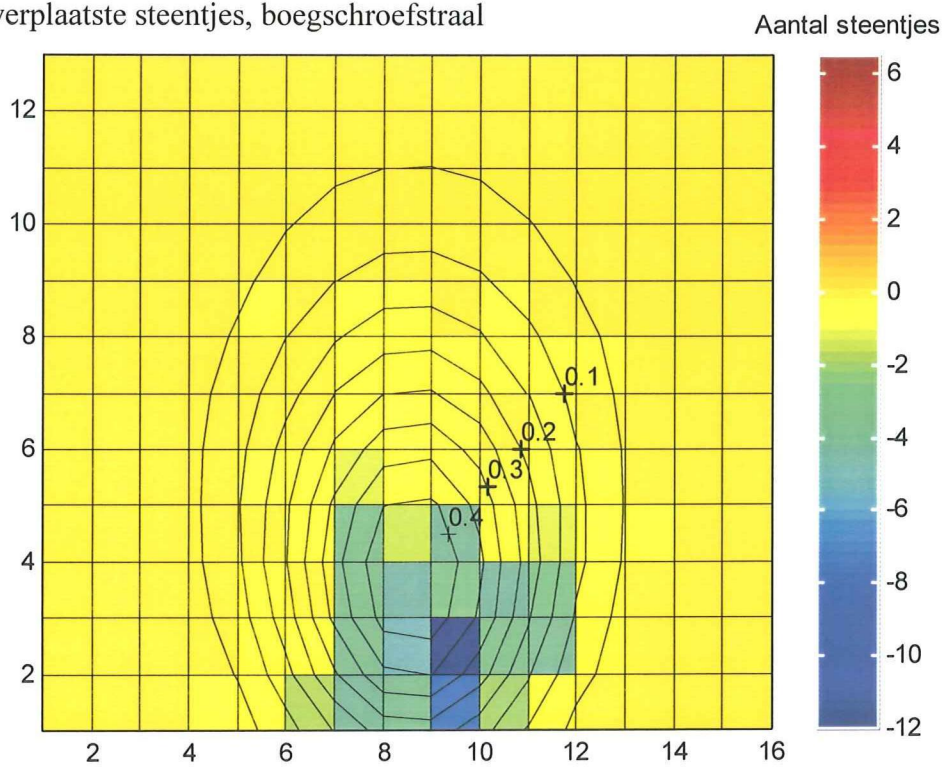


Figuur 12: Berekende U_{talud}/U_0 die 1% van de tijd voorkomt, boegschroefstraal.

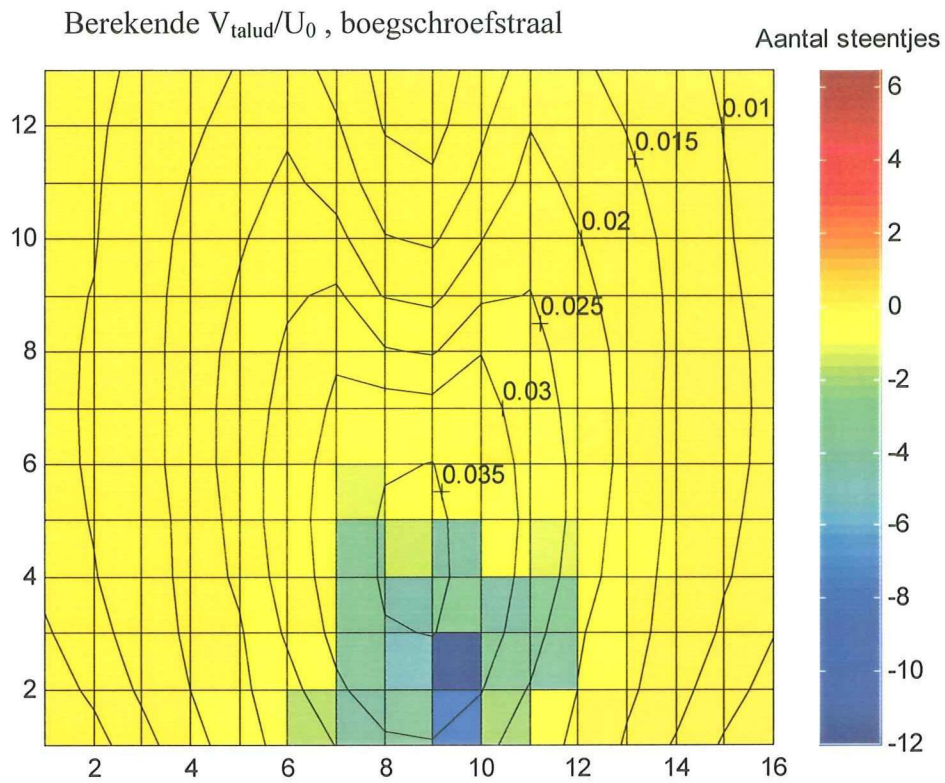


Figuur 13: Berekende U_{talud}/U_0 en de relatieve turbulentie intensiteit op het talud voor de boegschroefstraal.

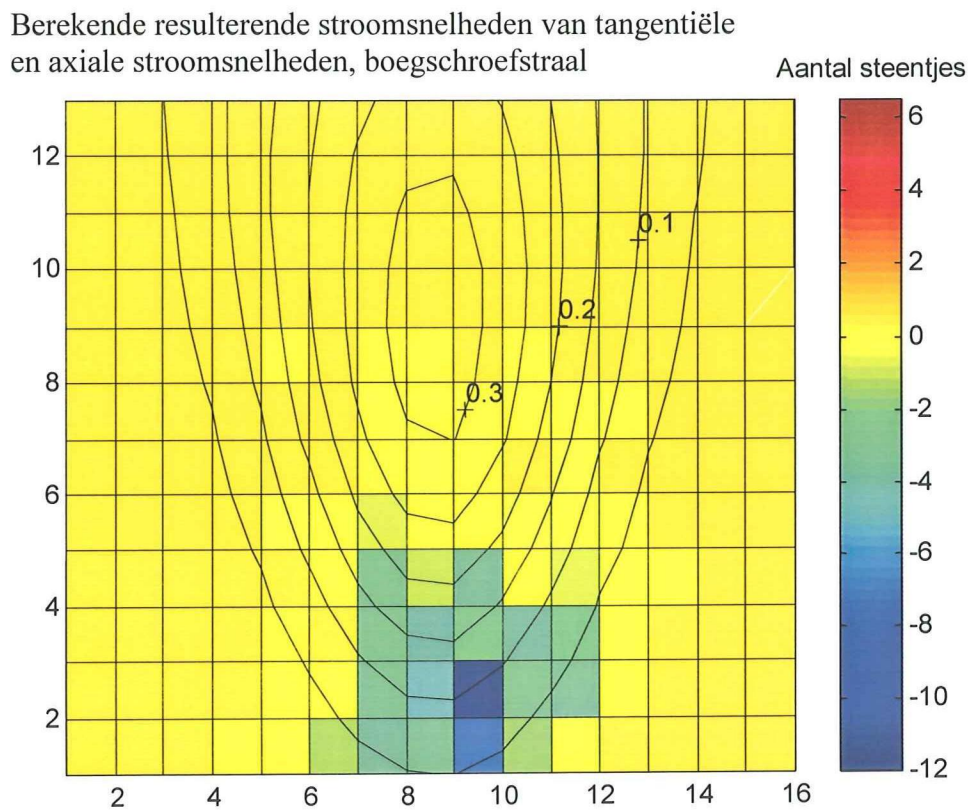
Berekende U_{talud}/U_0 met afbuigende straalas en verplaatste steentjes, boegschroefstraal



Figuur 14: Berekende U_{talud}/U_0 voor de boegschroefstraal, met afbuigende straalas.



Figuur 15: Berekende tangentiële stroomsnelheden op het talud voor de boegschroefstraal.



Figuur 16: Berekende resulterende stroomsnelheden van tangentiële en axiale stroomsnelheden voor de boegschroefstraal.