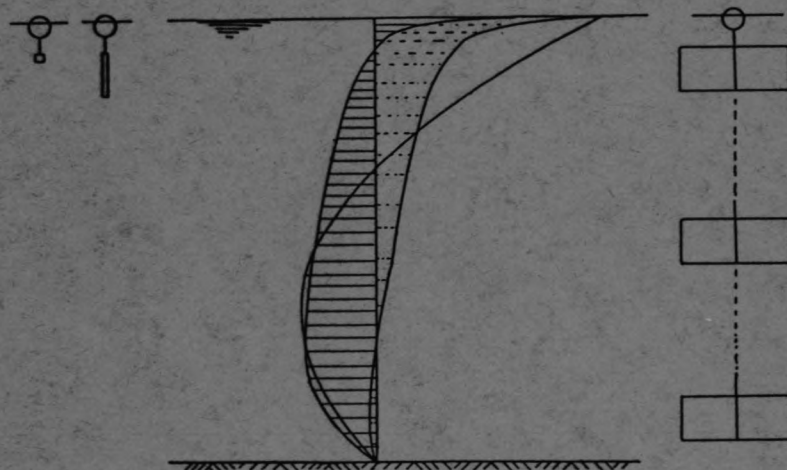


3015

BOEIVERSCHIL IN DE BOSBAAN.



Door F.A. van der Zee,

November 1985,

Technische Hogeschool Delft.

BOEIVERSCHIL IN DE BOSBAAN.

Onderzoek naar het optreden van boeiverschillen ten gevolge van wind-
invloeden in de Bosbaan te Amsterdam.

De invloed van de wind betaamt uit twee delen. Een direkte invloed van de
wind op de roeiboot en een indirekte invloed via waterstromingen die
door de wind aangedreven worden.

Afstudeerdocent: prof. dr. ir. C.B. Vreugdenhil

Begeleider: dr.ir. N.Booy

Student: F.A. van der Zee

Datum: November 1985

Technische Hogeschool Delft.
Afdeling der Civiele Techniek.

INHOUDSOPGAVE:

	bladzijde
HOOFDSTUK 1. INLEIDING	
1.1 Algemene inleiding	1
1.2 Aanpak	2
1.3 Situatie beschrijving	3
HOOFDSTUK 2. THEORIE	
2.1 Evenwichtsvergelijkingen en orde van grootte	5
2.2 Analytische oplossing bij constante viscositeit	14
2.2.1 De rondstroming	14
2.2.2 De retourstroming	15
2.3 Analytische oplossing bij niet constante viscositeit	18
2.4 Waarden voor de coëfficiënten	27
2.4.1 De windschuifspanning	27
2.4.2 De constante viscositeit	30
2.4.3 De variabelen bij niet constante viscositeit	32
2.5 Onderlinge vergelijking van de snelheden bij constante viscositeit	33
HOOFDSTUK 3. METINGEN UIT DE NATUUR.	
3.1 Opzet van de metingen in de Bosbaan	35
3.2 Meetresultaten	36
HOOFDSTUK 4. VERGELIJKING VAN DE THEORIE MET DE METINGEN EN GEVOELIGHEIDSANALYSE.	
4.1 Inleiding	37
4.2 Twee "standaard" gevallen	37
4.3 Gevoeligheid voor de variabelen	39
4.3.1 De oppervlakteruwheid z_1	39
4.3.2 De bodemruwheid z_0	40
4.3.3 De windsnelheid W	41
4.4 Vergelijking met de snelheid bij constante viscositeit	42
4.5 Vergelijking met de meetwaarden uit de natuur	42
4.6 Opmerkingen	43

HOOFDSTUK 5. TOEPASSING EN CONCLUSIES.

5.1 Verdieping naar 3 meter	44
5.2 Samenvatting en conclusies	44

HOOFDSTUK 6. WATER- EN LUCHTWEERSTANDEN.

6.1 Inleiding	45
6.2 Waterweerstand	45
6.2.1. De wrijvingsweerstand	45
6.2.2. De golfweerstand	47
6.2.3. De niet stationaire weerstanden	49
6.3 De luchtweerstand	50
6.4 Samenvatting en conclusies hoofdstuk 6	51

HOOFDSTUK 7. HET TOTALE BOEIVERSCHIL.

7.1 Inleiding	52
7.2 De invloed van de watersnelheid	52
7.3 De direkte invloed van de windsnelheid	53
7.4 Het totale boeiverschil	54
7.5 Samenvatting en conclusies hoofdstuk 7	54

HOOFDSTUK 8. SAMENVATTING, OPMERKINGEN, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1 Samenvatting	56
8.2 Opmerkingen	56
8.3 Conclusies	57
8.4 Aanbevelingen	58

literatuuropgave	60
------------------	----

Bijlagen:

5.1 Het computerprogramma	
6.1 t/m 6.13 Snelheidsverdelingen bij verschillende gevallen	

HOOFDSTUK 1. INLEIDING.

1.1 Algemene inleiding:

Nederland bezit één officiële roeibaan waar grote internationale wedstrijden gehouden kunnen worden. Deze roeibaan heet de Bosbaan en is in het Amsterdamse bos gelegen. De Bosbaan heeft een twijfelachtige naam in de internationale roeiwereld. Bij een scheef op de baanas staande wind gebeurt het vaak genoeg dat een op papier snelste ploeg niet als overwinnaar te voorschijn komt. Bij schuine meewind blijken de ploegen aan lagerwal in het voordeel te zijn ten opzichte van de ploegen aan hogewal en bij een schuine tegenwind is dit juist andersom. Men heeft ook de mening dat de grootste verschillen tussen de banen optreden bij tegenwind. Dit verschijnsel wordt boeiverschil genoemd.

Over het optreden van dit boeiverschil wordt al jarenlang gepraat en getheoretiseerd. In het algemeen worden de verschillen toegeschreven aan stromingen in het water. Men beschikte tot voor kort over geen enkel kwantitatief gegeven. De laatste drie jaar zijn enige drijfproeven met weerstandslichamen en een roeiboot gedaan. Hoewel het berekenen van de watersnelheden uit de verplaatsingen van de weerstandslichamen nog problemen oplevert, wekken deze proeven de indruk dat de stroomsnelheden en de optredende verschillen hierin vrij klein zijn. Waarschijnlijk zal de directe invloed van de wind op de roeier en boot ook een belangrijke factor zijn bij het optreden van boeiverschillen.

Dit onderzoek zal zich voornamelijk richten op het beschrijven van de door wind aangedreven stroming. Dit is temeer van belang met het oog op eventuele Olympische Spelen in 1992 waarvoor Amsterdam zich kandidaat gesteld heeft. De FISA (de internationale roeibond) zal pas toestemming verlenen de Bosbaan als Olympische baan te gebruiken indien deze van 90 naar 125 meter verbreed en van 2 naar 3 meter verdiept wordt. Het is belangrijk de invloed van deze veranderingen op de stromingen te kunnen voorspellen. Deze maatregelen zijn immers niet zinvol indien blijkt dat de boeiverschillen groter zullen worden.

1.2 Aanpak:

Bij de analyse wordt de volgende aanpak gevolgd. Eerst zullen de bewegingsvergelijkingen, die het probleem beschrijven opgesteld worden.

Met de aanname van een constante turbulente viscositeit zal door middel van vereenvoudigde vergelijkingen en benaderende sommen getracht worden enig inzicht in de orde van grootte van de optredende stromingen te krijgen.

Na deze oriënterende sterk vereenvoudigde berekeningen zal de aanname van een constante viscositeit losgelaten worden. Met behulp van een computerprogramma zullen de wat minder vereenvoudigde vergelijkingen die dan ontstaan opgelost worden.

Deze berekende water snelheden worden aan wat schaarse meetgegevens uit de natuur getoetst.

De wrijvingskrachten die een roeiboot ondervindt worden aan de hand van een artikel uit het blad "Roeien" (anoniem 1971) bepaald. De directe invloed van de wind op de snelheid wordt ook hieruit afgeleid.

Als slot zal onderzocht worden welke factor nu het belangrijkste is bij het optreden van de boeiverschillen, de directe invloed van de wind op het bovenwatergedeelte of de verschillen in watersnelheid.

1.3 Situatie beschrijving:

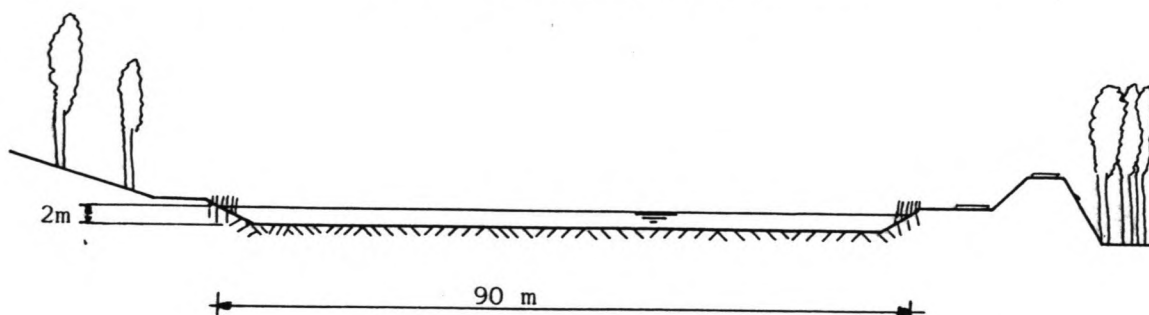
De huidige situatie van de Bosbaan is als volgt; De baan heeft een lengte van 2300 meter en een breedte van 90 meter. De baan maakt een hoek van 13 graden met het oosten. De wedstrijden worden in de richting van WZW naar ONO gevaren.

De baan is opgedeeld in 6 wedstrijdbanen en 1 oproeibaan aan de noordzijde. De diepgang onder de wedstrijdbanen is 2 meter en aan de zijkan-ten is een schuin beloop dat met riet is beplant.

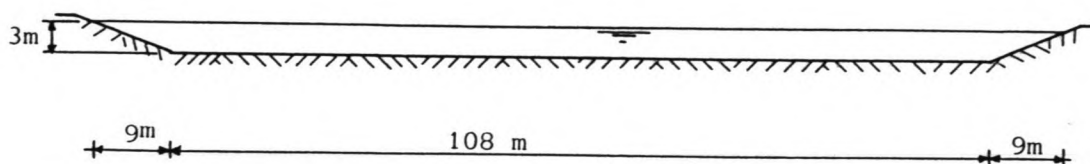
Aan de zuidzijde wordt het water begrensd door een laag gelegen vlak stuk met daarop een coachpad, daarnaast ligt een dijk met een weg en achter de dijk ligt een bijna aaneengesloten bomenrij langs de gehele lengte van de baan.

Aan de noordzijde loopt de bodem geleidelijk op. Hier is geen aaneenge-sloten begroeiing maar er liggen ook grasvlaktes tussen de bomen. Deze vlaktes zijn wit op de overzichtstekening in figuur 1.1.

De al genoemde FISA eisen houden een verbreding in tot 125 meter, waarbij de middelste 108 meter een diepgang moeten hebben van 3 meter met daarnaast aan beide zijden een geleidelijk tallud. In figuur 1.2 zijn de dwarsdoorsnedes (niet op schaal) weergegeven.



1.2a. Het huidige profiel,



1.2b. Het door de FISA geëiste profiel,

Figuur 1.2. De globale dwarsdoorsnede van de Bosbaan.

10

HOOFDSTUK 2. THEORIE.

2.1 Evenwichtsvergelijkingen en orde van grootte:

In de jaren zestig is een aantal artikelen gepubliceerd in verband met wind aangedreven stromingen in meren. Deze hadden het doel de verspreiding van verontreinigingen door lozingen in een meer te voorspellen. Het grote verschil met de bovenstaande theoriën zit hierin, dat in het onderhavige onderzoek juist de snelheden aan het wateroppervlak van belang zijn en niet de over de diepte gemiddelde watersnelheden met de dispersie van de verontreiniging. Toch zijn enkele vereenvoudigingen, die in de bovenstaande artikelen aannemelijk gemaakt zijn, ook in dit onderzoek toepasbaar.

Een algemene beschrijving voor circulatiestromingen in meren wordt gegeven door J.A. Liggett (1975):

- de bewegingsvergelijkingen luiden:

in x - richting:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_H \frac{\partial u}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\nu_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_V \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

in y - richting:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\nu_H \frac{\partial v}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\nu_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_V \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

in z - richting:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.3)$$

- de continuïteitsvergelijking wordt gegeven door:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

In deze formules zijn:

(u,v,w) de snelheidscomponenten in (x,y,z) richting, x in de lengte as van de baan, y loodrecht hierop en de z-as verticaal omhoog vanaf het wateroppervlak.

p is de lokale druk,

g is de versnelling van de zwaartekracht,

f is de Coriolis parameter, $f = 2\omega \sin \phi$ (2.5)

Hierin is ω de hoeksnelheid en ϕ de geografische breedte.

ν_H is de horizontale en ν_V de verticale turbulente viscositeit.

In deze vergelijkingen zijn de volgende aannames gedaan:

- de dichtheid van het water is constant verondersteld,
- de Coriolis parameter f is constant genomen,
- de druk is hydrostatisch aangenomen,

Deze laatste aanname omtrent de druk mag gedaan worden indien de verticale versnellingen klein zijn ten opzichte van de versnelling van de zwaartekracht. De stroming mag dan niet te snel in de tijd en ruimte variëren.

Dit komt overeen met de voorwaarde dat de horizontale dimensies van het meer veel groter moeten zijn dan de diepte. De windgolven worden door deze vergelijkingen niet beschreven en in wezen uitgefilterd.

In dit geval zijn de randvoorwaarden:

$$u = v = w = 0 \text{ op alle vaste wanden} \quad (2.6)$$

$$\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{sx}}{\rho}, \quad \nu_V \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{sy}}{\rho} \quad \text{op } z = \zeta \text{ (het vrije oppervlak)} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} = w \quad \text{op } z = \xi \quad (2.8)$$

$$p = 0 \quad \text{op } z = \xi \quad (2.9)$$

In deze vergelijkingen zijn τ_{sx} en τ_{sy} de windschuifspanningen in de x- en in de y richting.

Vergelijking (2.6) is de no-slip voorwaarde, in plaats hiervan wordt vaak, indien u of v $\neq 0$ de volgende voorwaarde genomen:

$$w = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{op } z = -h \quad (\text{de bodem}) \quad (2.10)$$

- Vereenvoudiging van de vergelijkingen:

De bewegingsvergelijkingen kunnen sterk vereenvoudigd worden bij de beschrijving van de circulatiestroming in een ondiep, homogeen meer in de stationaire toestand. J.A. Liggett en C. Hadjitheodorou (1969) geven de volgende vergelijkingen:

- de bewegingsvergelijkingen luiden:

in x - richting:

$$-fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.11)$$

in y - richting:

$$fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.12)$$

in z - richting:

$$g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.13)$$

- de continuïteitsvergelijking houdt dezelfde vorm:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

De randvoorwaarden zoals die in de vergelijkingen (2.6) tot en met (2.9) gegeven zijn veranderen verder niet.

In deze vergelijkingen komt alleen de verticale viscositeit voor ν_v , deze zal verder zonder index aangeduid worden met ν .

De vergelijkingen (2.1) tot en met (2.4) zijn hiermee gelineariseerd. Dit met behulp van de aanname dat het Rossby getal klein is. Het Rossby getal geeft de verhouding weer tussen de traagheid en de Coriolis krachten. De traagheidstermen mogen dus verwaarloosd worden.

Aangezien het meer ondiep is verondersteld, zijn de dominante wrijvingskrachten een gevolg van de bodemwrijving en zijn ook de horizontale convectie termen verwaarloosd.

Liggett en Hadjithodorou geven ook een maat voor het begrip ondiep. Een meer noemen zij ondiep indien $D/L \ll 1$ en D/d_E niet veel groter is dan 1. In deze notatie zijn D en L karakteristieke verticale en horizontale dimensies en de "Ekmandiepte" is $d_E = (2\nu/f)^{0.5}$. (2.15)

De aanname van een ondiep meer leidt er ook toe dat de verticale snelheid en zijn afgeleiden in de x - en y -richting klein zijn ten opzichte van de horizontale snelheden. De versnellingstermen worden daarom verwaarloosd.

De Coriolis parameter f is constant aangenomen.

De afmetingen van de Bosbaan zijn nog kleiner dan die van een meer, zeker met betrekking tot de diepte. Dit leidt tot een verdere vereenvoudiging.

De Ekmandiepte voor de Noordzee heeft een orde van grootte van 150 meter, de diepte van de Bosbaan is slechts 2 meter. Dit betekent dat D zoveel kleiner is dan d_E , dat de Ekman-spiraal als gevolg van de Coriolis versnelling, niet of nauwelijks op zal treden. De circulatie zal dus niet beïnvloed worden door de rotatie van de aarde en de Coriolis factor mag daarom verwaarloosd worden.

Deze benadering gebruiken H. Liu en H.J. Perez (1971). Als voorwaarde noemen zij voor de afmetingen: De horizontale dimensie van het basin mag niet langer zijn dan een paar duizend meter, en de water diepte moet veel kleiner zijn dan de horizontale dimensie.

- de bewegingsvergelijkingen zijn nu:

$$0 = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$0 = \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.17)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (2.18)$$

- en de continuïteitsvergelijking:

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.19)$$

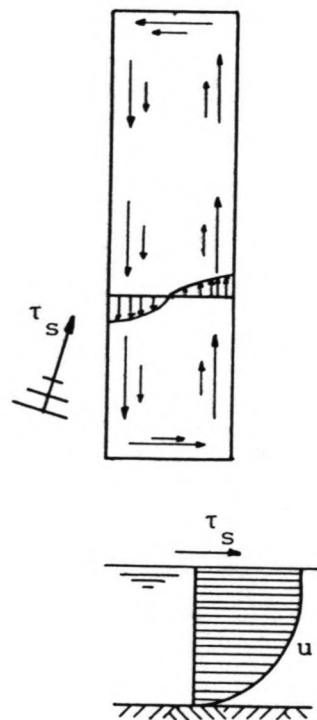
- Twee soorten circulatiestromingen:

Het is praktisch om bij de gelineariseerde vergelijkingen (2.16) tot en met (2.19) twee mogelijke circulatiestromingen te onderscheiden.

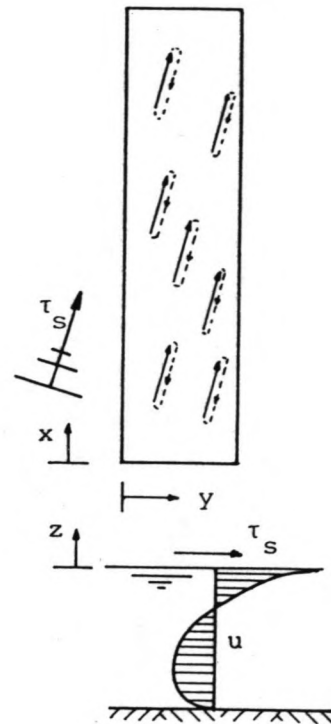
Eén in het horizontale vlak, die in het vervolg rondstroming genoemd zal worden. Hierbij ontstaat er in de Bosbaan een hele grote circulatie stroming, die over de diepte dezelfde richting heeft. Het water aan een kant stroomt precies de andere richting op als het water aan de overkant.

De andere circulatiestroming vindt plaats in het vertikale vlak, en zal met retourstroming aangeduid worden. Het bovenste deel van het water stroomt nu met de wind mee en aan de bodem stroomt het water tegen de windrichting in.

In figuur 2.1 zijn de twee circulatiestromingen geschetst.



2.1a. rondstroming



2.1b. retourstroming

Figuur 2.1. De mogelijke circulatiestromingen.

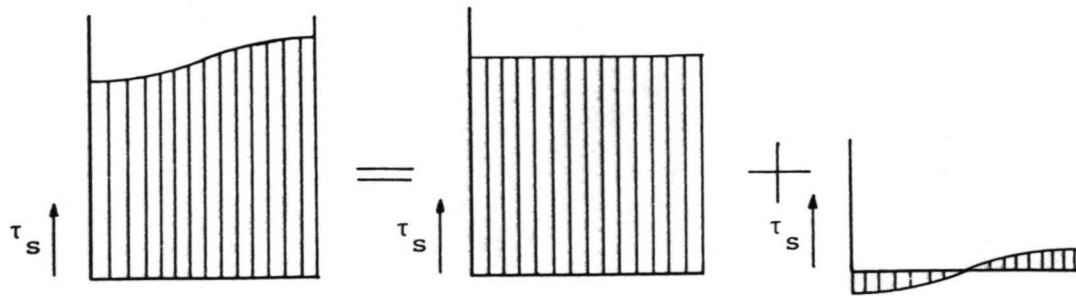
Indien de bewegingsvergelijkingen lineair zijn, mag de schuifspanning van de wind op het water in twee delen gesplitst worden.

In dat geval bestaat het eerste deel uit een over de breedte van de Bosbaan variabele schuifspanning, waarvan het gemiddelde nul is, zodat aan de continuïteits voorwaarde voldaan wordt. Dit deel van de schuifspanning kan een rondstroming veroorzaken.

Het resterende constante deel van de schuifspanning wordt als de aandrijvende kracht van de retourstroming beschouwd.

In figuur 2.2 is een voorbeeld van de opdeling van de windschuifspanning gegeven. De windschuifspannings-verdeling kan elke mogelijke andere vorm aannemen, afhankelijk van de windrichting.

De mogelijke grootte van de optredende windschuifspanning zal in paragraaf 2.4 behandeld worden.



2.2c. totale schuifsp.

2.2b. constant deel,
(retourstroming)

2.2a. variabel deel,
(rondstroming)

Figuur 2.2. De opdeling van de windschuifspanning.

- De dieptegemiddelde vergelijkingen:

Bij de rondstroming zal zal in eerste instantie de dieptegemiddelde stroming bekeken worden. Door deze middeling komen de schuifspanningen, die eerst in de randvoorwaarden (2.6) en (2.7) stonden, direct in de vergelijkingen. De bewegingsvergelijkingen worden twee dimensionaal.

$$g \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \quad (2.20)$$

$$g \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.22)$$

Hierbij geldt dat:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.23)$$

Met behulp van een dimensie beschouwing is het mogelijk deze vergelijkingen nog iets verder te vereenvoudigen.

Hiertoe noemen we U en V typische waarden voor de snelheidscomponenten in x - en y -richting en L en B typische waarden voor de lengte afmetingen in x - en y -richting.

Dan geldt dat:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{U}{L} \quad \text{en} \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{V}{B} \quad (2.24)$$

Vullen we deze grootheden in de continuïteitsvergelijking in, dan volgt hieruit dat:

$$\frac{U}{L} \sim \frac{V}{B} \quad \text{oftewel,} \quad U \sim \frac{L}{B} V \quad (2.25)$$

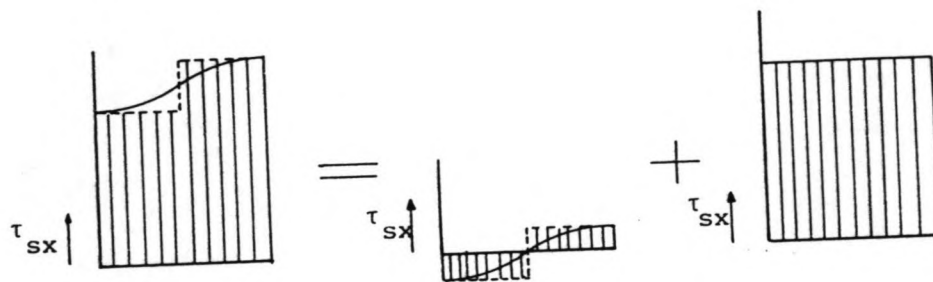
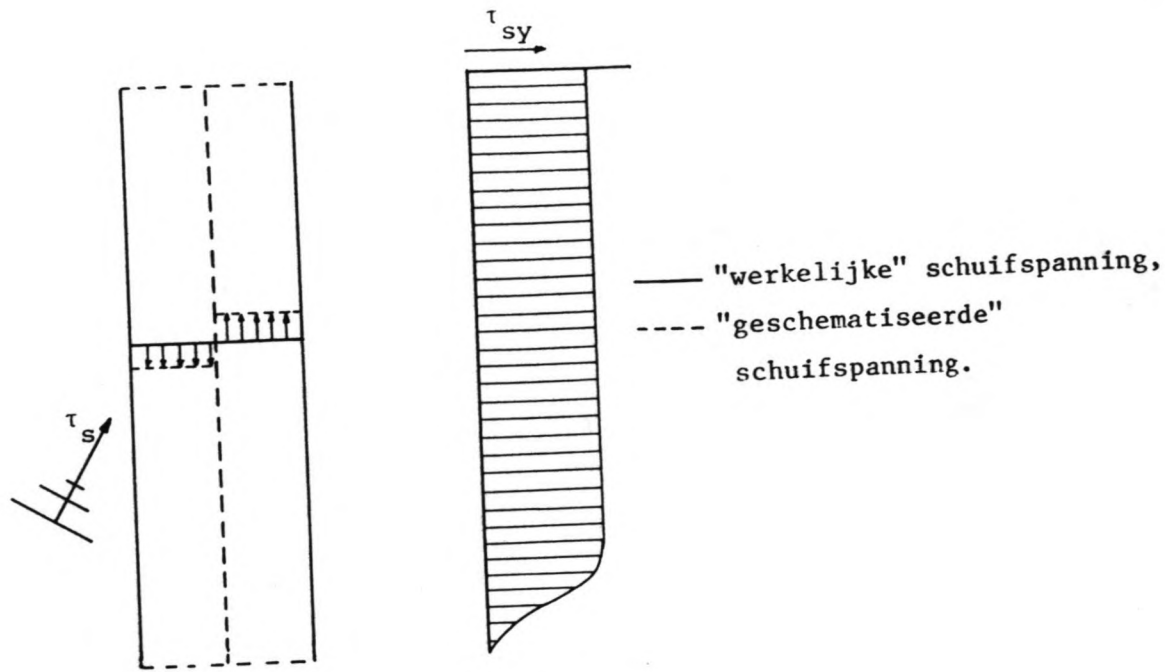
Aangezien geldt dat $L \gg B$, volgt hieruit dat $U \gg V$. Dat wil zeggen dat de snelheden in x -richting een orde groter zullen zijn dan de snelheden in y -richting.

In dit geval waarin de Bosbaan in twee delen is opgesplitst, waarbij op ieder deel een tegengestelde windrichting heerst, is ook een aanname omtrent het verhang te maken. Het verhang $\partial h / \partial x$ moet in dit model erg klein zijn, aangezien anders aan de beide uiteinden van de Bosbaan een erg groot dwarsverhang als gevolg van waterstandsverschillen in de breedte op zou treden.

Ook is het mogelijk een vereenvoudiging met betrekking tot de windschuifspanning te maken. De rondstroming wordt immers alleen aangedreven door het variabele deel van de windschuifspanning. Deze zal in de x -richting over de breedte varieëren door de invloed van de wal, die over de hele lengte van de baan merkbaar is.

De windschuifspanning in de y -richting zal echter alleen aan het uiteinde van de baan beïnvloed worden en over bijna de gehele lengte constant zijn. Het variabele deel van de windschuifspanning is daarom verwaarloosbaar. Dit betekent dat in de bewegingsvergelijking van de rondstroming in y -richting de term met τ_{sy} verwaarloosd mag worden.

In figuur 2.3 is een schets van de windschuifspanningen weergegeven om het bovenstaande te verduidelijken.



2.3a. tot. schuifsp. 2.3b. variabel deel 2.3c. constant deel,

Figuur 2.3. De windschuifspanning in x- en y-richting.

Bij deze benadering van de rondstroming wordt het variabele deel van de windschuifspanning zodanig geschematiseerd dat over de ene helft van de Bosbaan een over de breedte constante meewind waait en over de andere helft een identieke, even grote tegenwind.

Aangezien volgens de dimensie analyse geldt dat de snelheden in y-richting veel kleiner zijn dan die in x-richting, worden deze verwaarloosd en ontstaat een één dimensionale stroming. Verondersteld wordt dat tussen de twee helften van de Bosbaan geen enkele uitwisseling plaatsvindt. Zo vormen zich twee identieke windaangedreven stromingen die ieder een andere kant opstromen. Deze stromingen zijn ook in figuur 2.3 aangegeven. Aan de uiteinden van de Bosbaan zal een omkering van de stroming plaats moeten vinden. Dit zal daar leiden tot een stroming in dwarsrichting.

2.2 Analytische oplossing bij constante viscositeit.

- Inleiding:

In deze paragraaf zal door het oplossen van sterk geschematiseerde vergelijkingen getracht worden inzicht te verkrijgen in het optreden van circulatiestromingen en welke factoren daarbij een rol spelen. De belangrijkste aanname hierbij zal zijn dat de turbulente viscositeit bij een gegeven windsterkte constant over de diepte en onafhankelijk van de plaats genomen zal worden. De vergelijkingen zijn onder de gedane aannamen linear en kunnen analytisch opgelost worden, waarbij de windschuifspanning opgedeeld mag worden.

In werkelijkheid zal de turbulente viscositeit over de diepte variëren en afhankelijk zijn van de intensiteit van de turbulentie en dus van de optredende stroming. In paragraaf 2.3 zal hierop nader worden teruggekomen.

2.2.1 De rondstroming:

Met dezelfde aannames omtrent het verhang en de optredende snelheden, kan ook de vergelijking (2.16) direct geïntegreerd worden. De op te lossen vergelijking is nu, met verwaarlozing van de verhangterm en met de aanname van een constante viscositeit:

$$0 = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.26)$$

Integreren levert:

$$\partial u / \partial z = A \quad \text{en} \quad u = Az + B \quad (2.27)$$

Met de randvoorwaarde (2.6) op de bodem $z = -h$ en de randvoorwaarde (2.7) op het vrije oppervlak $z = \{$, volgt voor de waarden van de constanten A en B:

$$A = \tau_{sx} / \rho \nu \quad \text{en} \quad B = h \tau_{sx} / \rho \nu \quad (2.28)$$

Dit levert een lineaire snelheidsverdeling over de diepte:

$$u(z) = \frac{\tau_{sx}}{\rho \nu} (z + h) \quad (2.29)$$

Voor de maximale snelheid aan het oppervlak geldt nu:

$$\underline{u_s = \frac{h}{\rho\nu} \tau_{sx}} \quad (2.30)$$

2.2.2. De retourstroming:

In figuur 2.1b is de circulatiestroming in het verticale vlak schematisch weergegeven. Als aandrijvende kracht wordt in dit geval het constante deel van de windschuifspanning genomen, zoals deze in figuur 2.2b geschetst is.

In het geval van retourstroming wordt aan de continuïteitsvoorwaarde voldaan door te stellen dat de gemiddelde snelheid over de diepte gelijk aan nul moet zijn.

De stroomsnelheid in vaarrichting zal de grootste invloed hebben op het optreden van boeiverschil. Daarom wordt alleen de stroming in x-richting bekeken en moet vergelijking (2.16) opgelost worden:

$$0 = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.16)$$

De bodemschuifspanning en de windschuifspanning moeten nu evenwicht maken met het verhang.

Integreren van vergelijking (2.16) levert:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} z + A \quad (2.31)$$

$$u = \frac{1}{2\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + Az + B \quad (2.32)$$

Met de randvoorwaarde (2.6) op de bodem $z = -h$ en de randvoorwaarde (2.7) op het vrije oppervlak $z = \xi$, volgt voor de waarden van de constanten A en B:

$$A = (\tau_{sx} - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \xi) \frac{1}{\rho\nu} \quad (2.33)$$

$$B = -\frac{1}{2\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 + \frac{\tau_{sx}}{\rho\nu} h - \frac{1}{\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} h \cdot \xi \quad (2.34)$$

De waarde van ξ is heel klein en kan ten opzichte van h verwaarloosd worden. Dit levert voor de snelheidsverdeling de volgende formule:

$$u(z) = \frac{1}{2\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} (z^2 - h^2) + \frac{\tau_{sx}}{\rho\nu} (z + h) \quad (2.35)$$

Door de gemiddelde snelheid over de diepte te berekenen en samen met de continuïteitsvoorwaarde ($u = 0$) op te lossen, kan het verhang $\partial p / \partial x$ ook in de windschuifspanning τ_{sx} uitgedrukt worden.

De gemiddelde snelheid wordt gegeven door:

$$\bar{u} = \frac{1}{h+\xi} \int_{-h}^{\xi} u dz \quad (2.36)$$

Indien formule (2.35) hierin ingevuld wordt ontstaat de vorm:

$$\bar{u} = \frac{1}{h+\xi} \frac{1}{\rho\nu} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{1}{3} z^3 - zh^2 \right) + \tau_{sx} \left(\frac{1}{2} z^2 + zh \right) \right]_{-h}^{\xi} \quad (2.37)$$

Hieruit volgt:

$$\bar{u} = \frac{1}{h+\xi} \frac{1}{\rho\nu} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \xi^3 - \xi h^2 + \frac{1}{3} h^3 - h^3 \right) + \tau_{sx} \left(\frac{1}{2} \xi^2 + \xi h - \frac{1}{2} h^2 + h^2 \right) \right] \quad (2.38)$$

Weer met de verwaarlozing van ξ ten opzichte van h volgt:

$$\bar{u} = \frac{h}{2\rho\nu} \tau_{sx} - \frac{h^2}{3\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \text{oftewel,} \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{3}{2h} \tau_{sx} \quad (2.39)$$

Samen met vergelijking (2.20) volgt hieruit dat:

$$\tau_{bx} = 0.5 \tau_{sx} \quad (2.40)$$

Combinatie van de vergelijkingen (2.35) en (2.39) levert de volgende vergelijking voor de snelheid:

$$u(z) = \frac{\tau_{sx}}{\rho\nu} \left(\frac{3}{4} \frac{z^2}{h} + \frac{1}{4} h + z \right) \quad (2.41)$$

Dit is een parabolisch snelheidsprofiel over de diepte. Voor de maximale snelheid aan het oppervlak geldt nu:

$$\underline{\underline{u_s = \frac{\tau_{sx}}{\rho\nu} \left(\frac{1}{4} h \right)}} \quad (2.42)$$

Resumé vergelijkingen bij constante viscositeit:

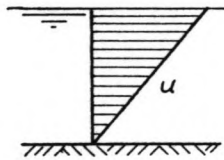
De rondstroming:

- geschematiseerd als een in twee delen opgesplitst oneindig lang kanaal zonder verhang.
- de bodemschuifspanning maakt evenwicht met de windschuifspanning.

$$\tau_{sx} = \tau_{bx}.$$

- alleen het variabele deel van de windschuifspanning levert de aandrijvende kracht.

Via integratie van de bewegingsvergelijking (2.26) in x-richting, onder de aanname van een constante viscositeit, ontstaat een lineaire snelheidsverdeling die beschreven wordt door:



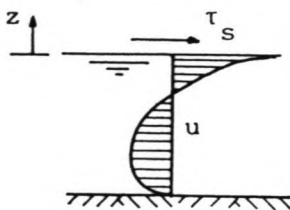
$$u(z) = \frac{\tau_{sx}}{\rho \nu} (z + h) \quad (2.29)$$

$$u_s = \frac{h}{\rho \nu} \tau_{sx} \quad (2.30)$$

De retourstroming:

- schematisatie als een gesloten bak.
 - de windschuifspanning en de bodemschuifspanning maken evenwicht met het verhang. Uit de continuïteitsvoorwaarde volgt dan,
- $$\tau_{bx} = 0.5 \tau_{sx}. \quad (2.40)$$
- alleen het constante deel van de windschuifspanning levert de aandrijvende kracht.

Integratie van de bewegingsvergelijking (2.16) in x-richting, onder de aanname van een constante viscositeit levert een parabolisch snelheidsprofiel dat beschreven wordt door:



$$u(z) = \frac{\tau_{sx}}{\rho \nu} \left(\frac{3}{4} \frac{z^2}{h} + \frac{1}{4} h + z \right) \quad (2.41)$$

$$u_s = \frac{\tau_{sx}}{\rho \nu} \left(\frac{1}{4} h \right) \quad (2.42)$$

2.3 Analytische oplossing bij niet constante viscositeit.

- Inleiding:

De aanname van een constante viscositeit leidde er in het vorige hoofdstuk toe dat, bij een netto stroming gelijk aan nul, de bodemschuifspanning $0.5 \cdot$ de oppervlakteschuifspanning was.

In werkelijkheid zal in turbulente stroming de bodemschuifspanning meestal kleiner zijn dan $0.1 \cdot$ de oppervlakteschuifspanning (Bowden, 1953). Indien bovendien een netto transport optreedt, zal de bodemschuifspanning ook van de gemiddelde snelheid afhangen. De formule voor de bodemschuifspanning wordt door Groen en Groves (1961) gegeven door:

$$\tau_b = -m_0 \tau_s + s^2 \rho \bar{u} |\bar{u}| \quad (2.43)$$

In dit hoofdstuk zal de theorie van Reid (1957) gebruikt worden, waarbij de viscositeit niet constant over de diepte genomen is. Eerst zal de theorie uiteengezet worden, waarbij de nadruk op de door Reid afgeleide resultaten zal liggen.

Met de vereenvoudigde formule voor de bodemschuifspanning (2.43), zal vervolgens een computer model gepresenteerd worden, waarmee de wind aangedreven stromingen benaderd kunnen worden.

In dit hoofdstuk moet de windrichting in de positieve x-richting genomen worden. Voorts is z in deze paragraaf omhoog gericht vanaf de bodem.

- De theorie volgens Reid:

Uit de impulsvergelijking (2.23) volgt d.m.v. integratie dat de schuifspanningsverdeling in homogeen water met te verwaarlozen versnellingen lineair over de vertikaal is. Uit een evenwichtsbeschouwing tussen het verhang en de schuifspanning volgt:

$$\tau(z) = \tau_b + z/h (\tau_s - \tau_b) \quad (2.44)$$

Hierin is h de diepte van het water.

Voorts gebruikt Reid de mengweglengte theorie volgens Prandtl en von Karman voor de relatie tussen de turbulente schuifspanning (z) en de stroomsnelheid u . Deze relatie wordt gegeven door:

$$\frac{\tau}{\rho} = 1^2 \frac{\partial u}{\partial z} \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (2.45)$$

$$\text{waarin geldt dat: } \nu = 1^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (2.46)$$

De mengweglengte l wordt gegeven door:

$$l = \chi (z + z_0) (1 - (z - z_1)/h) \quad (2.47)$$

Hierin zijn z_0 en z_1 de karakteristieke ruwheden voor respectievelijk de bodem en het oppervlak. En χ is de constante van von Karman, waarvoor de waarde 0.4 gebruikt wordt. Uit de vergelijkingen (2.44) tot en met (2.47) wordt door Reid een verband afgeleid tussen de bodem- en oppervlakteschuifspanning, als functie van de gemiddelde snelheid.

$$m = \frac{\tau_b}{\tau_s} = s^2 [V - G(a)] \left| V - G(a) \right| \quad (2.48)$$

Hierin is $V = \bar{u} (\rho/\tau_s)^{0.5}$, de dimensieloze gemiddelde snelheid.

s = de bodemruwheidscoëfficiënt, zie formules (2.50) t/m (2.52).

$$a = s (V - V_0)$$

$$V_0 = V_{(m=0)} \approx 5, \text{ voor kleine waarden van } r_0.$$

De formule $G(a)$ heeft als benaderde vorm:

$$G(a) = \begin{cases} \frac{5}{1 + 2a} + \frac{1.9 (a)^{0.5}}{0.48 + a^2} & \text{voor } a < 0 \\ \frac{5}{1 + 2a} + \frac{0.15 (a)^{0.5}}{0.043 + a^2} & \text{voor } a > 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\text{Indien } \tau_s = 0 \text{ volgt hieruit dat:} \quad \tau_b = s^2 \rho \bar{u} \left| \bar{u} \right| \quad (2.50)$$

$$\text{Voor uniforme stroming volgens Chezy geldt: } \tau_b = g/C^2 * \bar{u} \left| \bar{u} \right| \quad (2.51)$$

Indien de vergelijkingen (2.50) en (2.51) met elkaar vergeleken worden, volgt hieruit dat $s^2 = g/C^2$. Reid leidt direct uit de formule voor de gemiddelde snelheid, samen met $\tau_s = 0$, de volgende formules voor s af:

$$s = \chi (\ln(4h/z_0) - 2)^{-1} \quad (2.52)$$

Kivisild suggereerde in 1954 de al in de inleiding genoemde vereenvoudigde vorm voor de bodemschuifspanning. Deze is later door Groen en Groves (Hill, 1962) en door Vreugdenhil (1977) nader beschouwd.

$$\tau_b = -m_0 \tau_s + \rho s^2 \bar{u} \bar{u} \quad (2.43)$$

Indien $\bar{u} = 0$ geldt: $\tau_b / \tau_s = m_0$. (2.53)

Voor de waarde m_0 geeft Reid de volgende formule:

$$m_0 = s^2 \left(\frac{5}{1 + 10s} + \frac{8.85 (s)^{0.5}}{1 + 52 s^2} \right)^2 \quad (2.54)$$

Hieruit is op te maken dat m_0 alleen afhangt van de verhouding tussen h en z_0 .

Figuur 2.4 laat bij een waarde van $h/z_0 = 10^4$ het verschil tussen de formule van Reid (2.48) en de benadering volgens formule (2.43) zien.

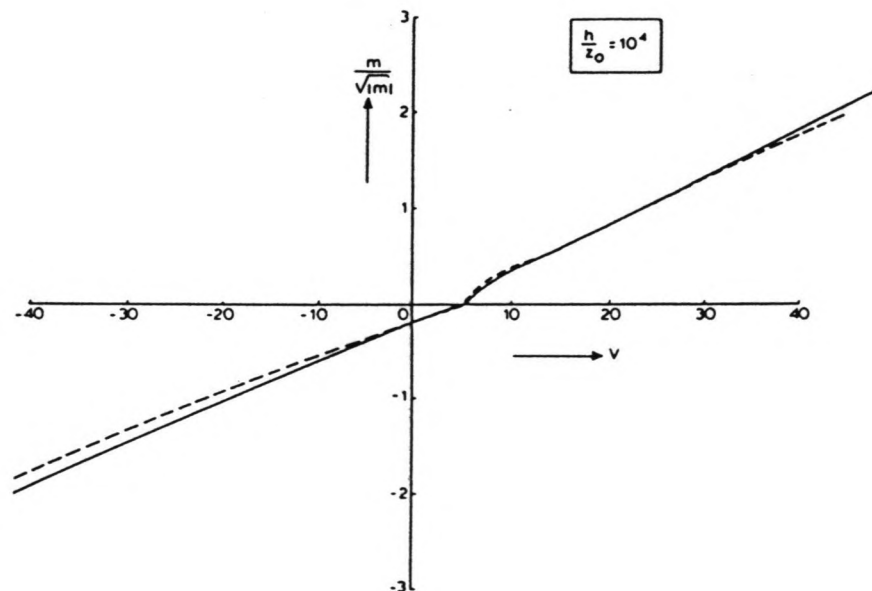


FIG. 2 Ratio of bottom stress to surface stress m as a function of dimensionless mean velocity V in case the two stresses are in the same (upper part) or opposite directions (lower part). The simplified relation due to Groen en Groves is indicated by a dashed line.

Figuur 2.4 De waarde van m volgens Reid en de benadering (2.43) Vreugdenhil (1977) figuur 2.

Uit deze figuur wordt de conclusie getrokken dat de benadering voldoende nauwkeurig is in vergelijking met de formule van Reid.

- De snelheidsverdeling:

Omdat we niet alleen geïnteresseerd zijn in de oppervlakesnelheden, maar ook in de snelheden tot op 20 cm diepte, wordt ook de snelheidsverdeling over de diepte uitgerekend.

De door Reid afgeleide formules voor de snelheidsverdeling over de diepte als functie van m , worden hieronder behandeld. Ze bestaan uit twee basis gevallen, één waarbij $m < 0$ en één waarbij $m > 0$.

Indien $m < 0$ vindt een retourstroming plaats en bij $m > 0$ heeft de stroming overal dezelfde richting.

Figuur 2.5 toont de gebruikte begrippen met aan de linkerkant twee gevallen voor de schuifspanningsverdeling en aan de rechterkant de bijbehorende snelheidsverdelingen.

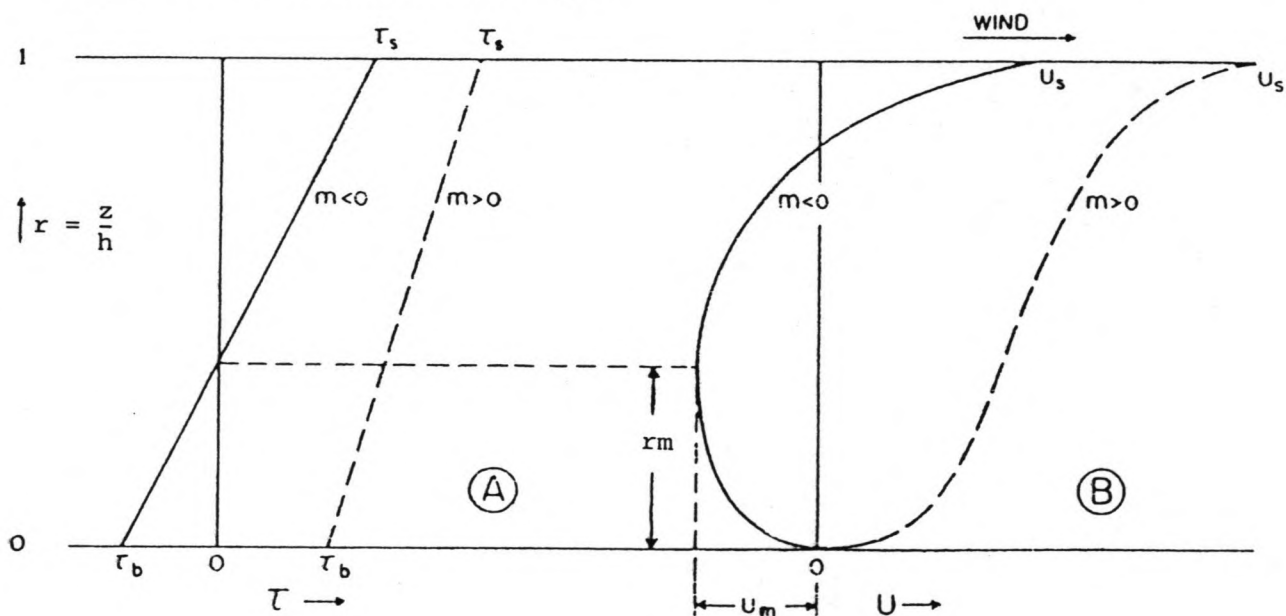


FIGURE 4

Shear stress distribution (A) and Associated current (B) (schematic) for the cases of negative m (full curves) and positive m (dashed curves). Note geometrical interpretation of r_m .

Figuur 2.5 De schuifspanningsverdeling en de bijbehorende snelheidsverdeling. Uit Reid (1957), figuur 4.

Hierbij is $r = z/h$ en $r_m = m / (1 + m)$.

(2.55)

- De snelheidsverdeling bij negatieve m:

De snelheidsverdeling bij negatieve m bestaat uit twee delen, er geldt:

- indien $r < r_m$:

$$U = -U_m - \frac{1}{\chi'} \left[B_0 \ln \left\{ (B_0 - A) / (B_0 + A) \right\} + 2B_1 \arctan (A/B_1) \right] \quad (2.56A)$$

- indien $r > r_m$:

$$U = -U_m - \frac{1}{\chi'} \left[2B_0 \arctan (A/B_0) + B_1 \ln \left\{ (B_1 - A) / (B_1 + A) \right\} \right] \quad (2.56 B)$$

In deze formules geldt dat:

$$\begin{aligned} A &= (|m + (1 - m)r|)^{0.5} \\ B_0 &= (|(1 - m)r_0 - m|)^{0.5} \\ B_1 &= (|1 + (1 - m)r_1|)^{0.5} \\ \chi' &= \chi(1 + r_0 + r_1) \end{aligned} \quad (2.57)$$

en verder wordt U_m gegeven door:

$$U_m = \frac{1}{\chi'} \left[B_0 \ln \left\{ (B_0 + |m|^{0.5}) / (B_0 - |m|^{0.5}) \right\} - 2B_1 \arctan (|m|^{0.5}/B_1) \right] \quad (2.58)$$

- De snelheidsverdeling bij positieve m:

Hierbij zijn vier gevallen te onderscheiden, te weten:

- A) $0 \leq m \leq r_0/(1+r_0)$
- B) $r_0/(1+r_0) \leq m \leq (1+r_1)/r_1$, $m \neq 1$
- C) $m = 1$
- D) $m \geq (1+r_1)/r_1$

Reid leidt uit de vergelijkingen (2.44) t/m (2.47) de volgende vergelijkingen af voor deze vier gevallen,

- geval A):

$$U = \frac{1}{\chi'} \left\{ 2B_0 \left[\arctan (A/B_0) - \arctan (m/B_0) \right] - B_1 \left[\ln \left\{ (B_1 - A) / (B_1 + A) \right\} - \ln \left\{ (B_1 - m) / (B_1 + m) \right\} \right] \right\} \quad (2.59 A)$$

- geval B):

$$U = \frac{1}{\chi'} \left[B_0 \ln \{ (A - B_0) (m^{0.5} + B_0) \} \{ (A + B_0) (m^{0.5} - B_0) \}^{-1} \right. \\ \left. - B_1 \ln \{ (A - B_1) (m^{0.5} + B_1) \} \{ (A + B_1) (m^{0.5} - B_1) \}^{-1} \right] \quad (2.59 \text{ B})$$

- geval C), hierbij geldt dat $\tau_s = \tau_b$:

$$U = \frac{1}{\chi'} \left[\ln \{ (r_0 + r) / r_0 \} - \ln \{ (1 + r_1 - r) / (1 + r_1) \} \right] \quad (2.59 \text{ C})$$

- geval D):

$$U = \frac{1}{\chi'} \left[B_0 \ln \{ (B_0 - A) (B_0 + m^{0.5}) \} \{ (B_0 + A) (B_0 - m^{0.5}) \}^{-1} \right. \\ \left. + 2B_1 \{ \arctan (A/B_1) - \arctan (m/B_0) \} \right] \quad (2.59 \text{ D})$$

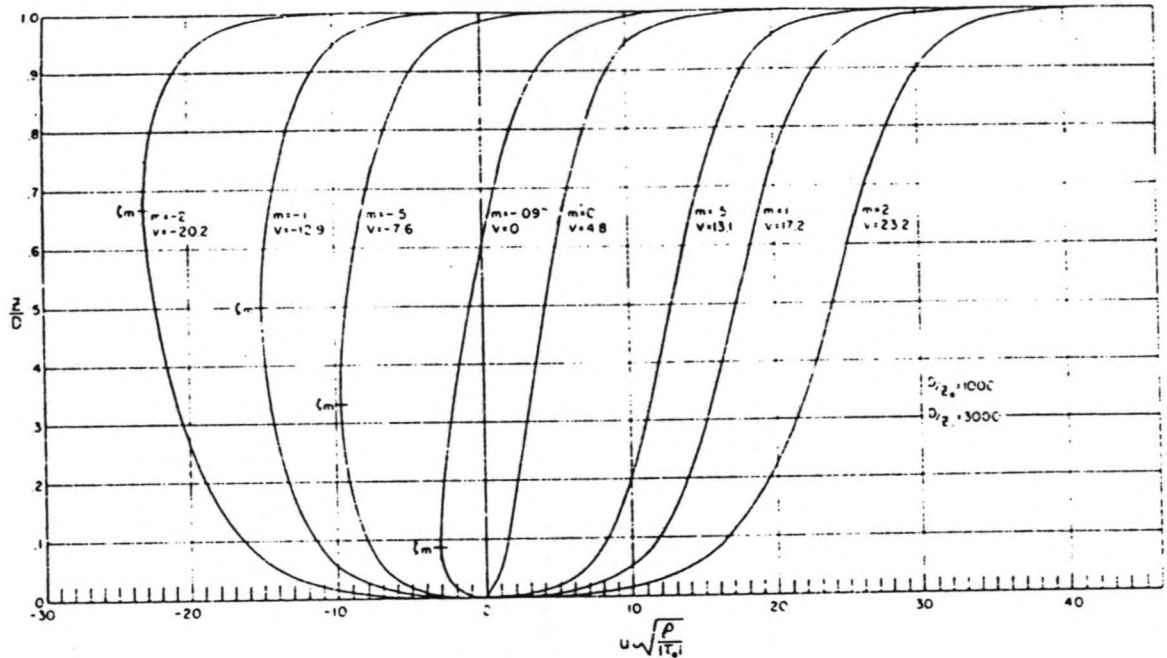
De afhankelijkheid van de hoogte is in deze vergelijkingen verwerkt in de factor A, welke volgens vergelijking (2.57) mede bepaald wordt door de dimensieloze hoogte r.

De werkelijke (niet dimensieloze) snelheid u wordt verkregen door U te vermenigvuldigen met de wortel uit de schuifspanning gedeeld door de dichtheid van water:

$$u = U \left(\frac{\tau_s}{\rho} \right)^{0.5} \quad (2.60)$$

De snelheidsverdeling over de diepte is in de vergelijkingen (2.56) en (2.59) gegeven als een functie van m, r_0 en r_1 .

Figuur 2.6 toont de snelheidsverdelingen voor 8 verschillende waarden van m , waarbij $r_0 = 10^{-3}$ en $r_1 = 1/3000$.



Figuur 2.6 De snelheidsverdeling als functie van m .
 Uit Reid (1957), figuur 5.

- Het oplossen van de verkregen vergelijkingen:

De bosbaan wordt geschematiseerd als een oneindig lang kanaal, zodat de uiteinden geen invloed hebben. De stroming wordt in een dwarsdoorsnede bekeken, welke opgedeeld is in een aantal onafhankelijke raaien. In deze raaien heeft de windsnelheid een constante waarde en verandert ook niet in de tijd. De windrichting wordt evenwijdig aan de baan-as genomen. De stroming is met deze benadering stationair en vindt alleen in de x-richting plaats. De vergelijkingen (2.20) en (2.23) leveren samen de volgende bewegingsvergelijking in x-richting:

$$h \frac{\partial p}{\partial x} = \tau_s - \tau_b \quad (2.61)$$

Voor de bodemschuifspanning wordt formule (2.43) gebruikt:

$$\tau_b = -m_0 \tau_s + s^2 \rho \bar{u} |\bar{u}| \quad (2.43)$$

Aangezien $\partial h / \partial y$ verwaarloosbaar klein is, zal $\partial p / \partial x$ niet over de breedte y variëren en constant worden verondersteld. Deze waarde zal verder aangeduid worden met de hoofdletter P .

De gemiddelde snelheid $\bar{u}$ kan nu als volgt uitgedrukt worden in de waarde van m_0 , τ_s en s .

$$\bar{u} = \pm \{ (1 + m_0)^{0.5} \tau_s - hP \} (s \rho^{0.5})^{-1} \quad (2.62)$$

Aangezien s gegeven wordt door vergelijking (2.52), m_0 door (2.54) en τ_s bekend is, staan in deze vergelijking slechts twee onbekenden, u en P .

Als extra vergelijking bestaat nog de continuïteits voorwaarde dat de netto stroming over de hele breedte gelijk aan nul moet zijn, oftewel:

$$\int_0^b \bar{u} \, dy = 0 \quad (2.63)$$

De waarde van P zal zo bepaald moeten worden, dat de snelheid aan de continuïteits vergelijking (2.67) voldoet.

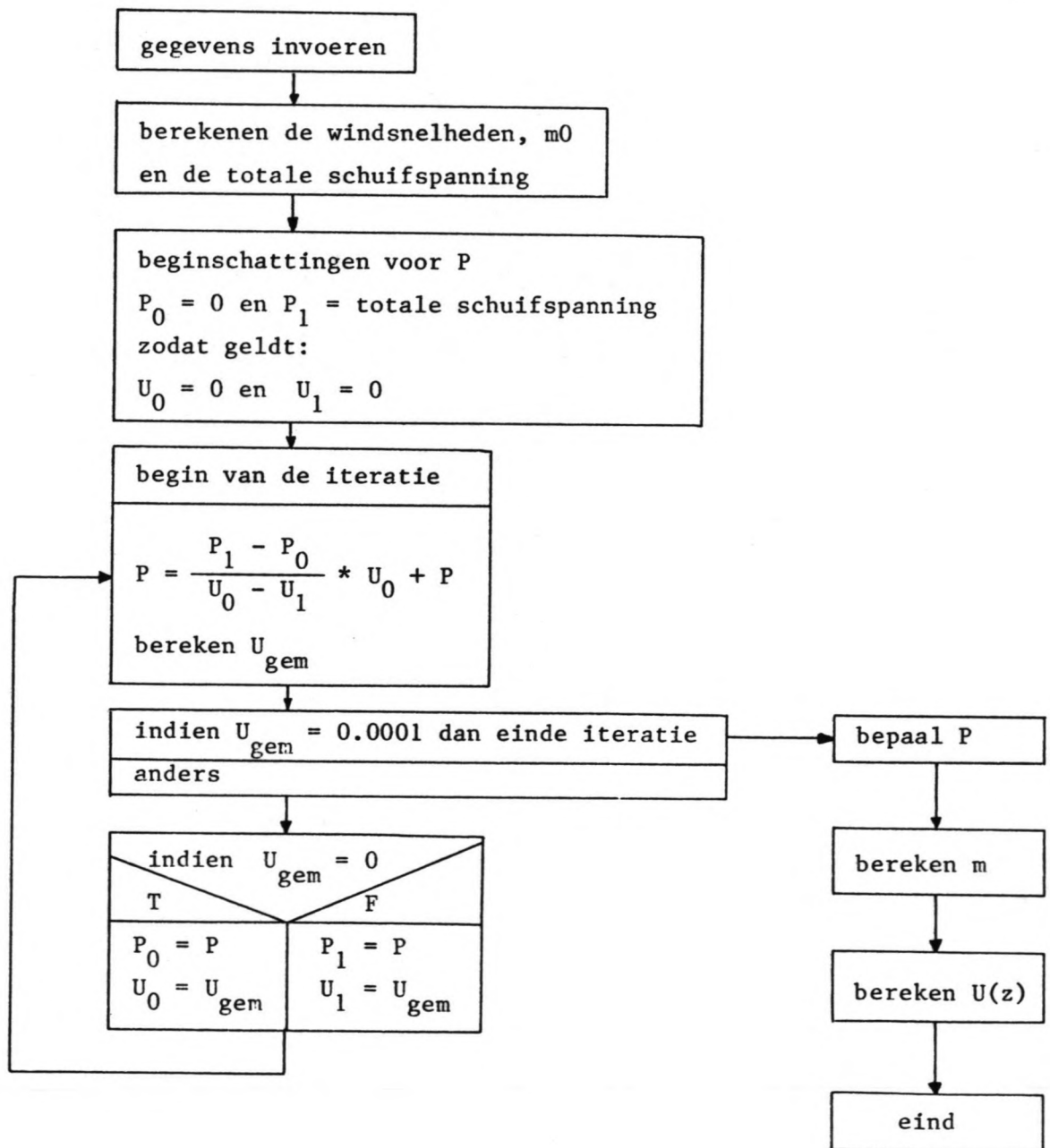
Is de juiste waarde van P gevonden, dan kan de waarde voor m bepaald worden. Uit (2.61) volgt:

$$m = 1 - \frac{h P}{\tau_s} \quad (2.64)$$

Met deze waarde voor m kan met behulp van de vergelijkingen (2.56) en (2.59) de snelheidsverdeling in iedere raai opgelost worden.

- Computerprogramma:

De theorie is uitgewerkt in een computerprogramma. Hier wordt volstaan met de weergave van een eenvoudig structuurschema van dit programma. In dit programma wordt eerst de waarde van P iteratief bepaald en vervolgens de snelheidsprofielen in de afzonderlijke banen. In de bijlage 5.1 is het programma volledig weergegeven.



Figuur 2.7. Het structuurschema van het computerprogramma.

2.4 Waarden van de coëfficiënten.

- Inleiding:

In paragraaf 2.2 zijn formules afgeleid voor de circulatiestromingen. In deze formules is de snelheid een functie van de viscositeit, die constant veronderstelt is en de windschuifspanning op het water oppervlak. Het is moeilijk de juiste waarden die voor deze grootheden in de formules ingevoerd mogen worden te bepalen. In dit hoofdstuk zal een korte samenvatting van een onderzoek in de literatuur gegeven worden. Vervolgens worden de variabelen die bij de berekening met een variabele viscositeit ingevoerd moeten worden behandeld.

2.4.1. De windschuifspanning:

In de literatuur komt men bij onderzoek naar het verband tussen de windsnelheid en de door de wind veroorzaakte schuifspanning op het water evenveel verschillende coëfficiënten tegen als onderzoekers.

De windschuifspanning wordt in de meeste gevallen evenredig verondersteld met het kwadraat van de windsnelheid. Vaak wordt dit verband nog aangepast voor hogere windsnelheden.

Een exact verband is niet bekend, dit is overigens niet nodig, bij de afleiding van de formules zijn immers erg vergaande vereenvoudigingen toegepast.

Eerst zal beschreven worden van welke factoren de windschuifspanning afhankelijk verondersteld wordt. Daarna zal een keuze gemaakt worden welk verband het beste op de Bosbaan toegepast kan worden.

- Factoren die de windschuifspanning bepalen:

De basisformule voor de schuifspanning die door de wind uitgeoefend wordt op het wateroppervlak wordt gegeven door:

$$\tau_s = \rho' C_z W^2 \quad (2.65)$$

Hierin is ρ' de dichtheid van de lucht en W de windsnelheid in m/s.

De weerstandscoefficient C_z is geen constante en wordt door de meeste onderzoekers afhankelijk van de windsnelheid (gemeten op een hoogte z) verondersteld.

De windschuifspanning blijkt afhankelijk te zijn van de volgende factoren:

- de toestand van het wateroppervlak (hoogte en soort golven),
- de ruwheid bovenwinds van het meer,
- de algemene stabiliteit van de luchtmasse,
- het temperatuurverschil tussen de lucht en het water.

Tot een windsnelheid van 6 of 7 m/s zullen zich nog geen golven vormen op het wateroppervlak. Vines (1960) heeft aangetoond dat een vloeistof oppervlak bij lage windsnelheid dezelfde wrijvingscoefficient heeft als een gepolijste plaat.

Indien de windsnelheid groter is dan 6 of 7 m/s dan wordt meestal de weerstandscoefficient C uit twee delen opgebouwd. Het eerste deel is de weerstand van het gladde oppervlak en wordt onafhankelijk van de windsnelheid genomen, het tweede deel geeft daar een toeslag bovenop om de invloed van de oneffenheid van het wateroppervlak te verdisconteren.

Francis (1951) vond bij laboratoriumproeven dat de weerstandscoefficient lineair met de windsnelheid toenam en veronderstelde dat de weerstand voornamelijk bepaald wordt door de kleine wind ribbels op het wateroppervlak. Deze hypothese is later theoretisch bevestigd door Munk (1955).

De laatste drie factoren hebben alle drie invloed op het windprofiel boven het wateroppervlak.

De weerstandscoefficient C_z is gerelateerd aan de hoogte z in meters boven het wateroppervlak, waar de windsnelheid gemeten wordt. Indien men de windsnelheid altijd op 1 m hoogte boven het water zou meten, dan zou de afhankelijkheid van de stabiliteit van de lucht massa verdwijnen.

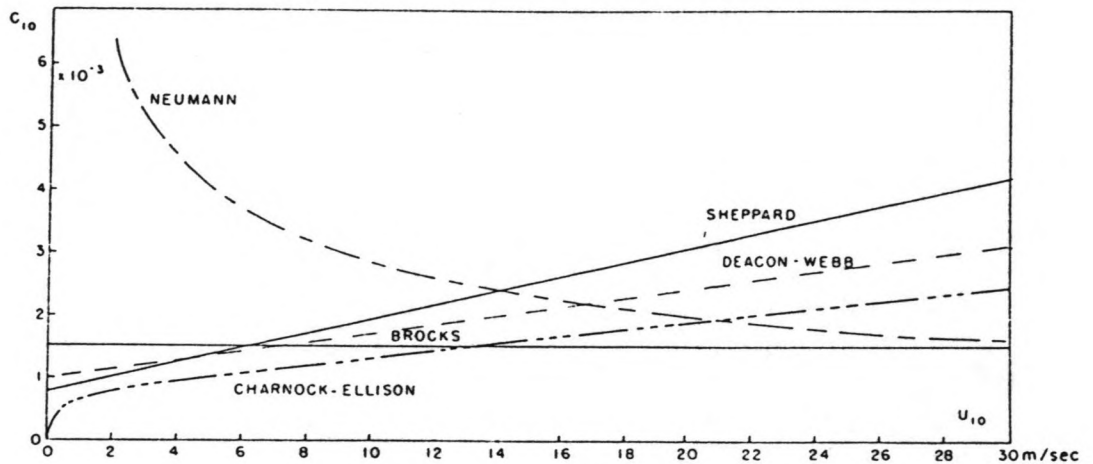
Bij een gegeven windsnelheid op 1 m, zal de windsnelheid op 10m hoogte onder stabiele omstandigheden groter zijn dan onder onstabiele omstandigheden.

De weerstandscoefficient C_{10} moet dus kleiner zijn bij stabiele omstandigheden dan bij een onstabiele toestand van de lucht.

- De weerstandscoefficient C_z :

De gevonden waarden van C_{10} liggen afhankelijk van de windsnelheid tussen de $1.1 \cdot 10^{-3}$ en de $3.0 \cdot 10^{-3}$. Er bestaat echter wel een grote spreiding tussen de meetresultaten en meetmethodes.

Neumann en Pierson (1966), presenteren een figuur met daarin verschillende verbanden tussen de windsnelheid en de weerstandscoefficient C_{10} .



Figuur 2.8. Enkele formules voor de weerstandscoefficient C_{10} als functie van de windsnelheid.

Uit Neumann en Pierson (1966) blz 414, fig. 13.12.

De gevonden waarden van de weerstandscoefficient C_z vertonen nogal wat verschillen.

De waarden die volgen uit de formule van Deacon en Webb (Hill, 1962) liggen ongeveer midden tussen de gevonden andere waarden in. In het verdere onderzoek zal dan ook met hun formule gewerkt worden.

$$C_{10} = (1.00 + 0.07 W_{10}) \cdot 10^{-3} \quad (2.66)$$

In de volgende tabel (2.1) zijn enkele waarden voor de weerstandscoëfficiënt C_{10} en de schuifspanning die door de wind op het oppervlak uitgeoefend wordt weergegeven.

De dichtheid van de lucht is hierbij op 1.2 kg/m^3 gesteld.

W	C_{10}	s
m/s	$\cdot 10^{-3}$	N/m^2 $\cdot 10^{-3}$
1	1.07	1.28
2	1.14	5.47
3	1.21	13.07
5	1.35	40.50
10	1.70	204.00

Tabel 2.1 Enkele waarden van de windschuifspanning.

2.4.2 De constante viscositeit:

De viscositeit is bij de afleiding van de formules in hoofdstuk 2 constant in de diepte verondersteld. In werkelijkheid is de viscositeit wel variabel in de diepte en ook afhankelijk van de snelheid. De juiste waarde van de viscositeit is wel belangrijk, aangezien in de afgeleide formules (2.30) en (2.42) de snelheid omgekeerd evenredig is met de viscositeit.

- Enkele waarden voor de viscositeit:

Liggett (1975) gebruikt een vergelijking van Ekman, waarin de viscositeit afhankelijk is van het kwadraat van de windsnelheid:

$$\nu = 4.3 \cdot 10^{-4} W^2 \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (2.67)$$

De windsnelheid W moet hierin een aantal meters boven het wateroppervlak genomen worden.

In de formules (2.30) en (2.42) is de watersnelheid een functie van de windschuifspanning gedeeld door de viscositeit. De windschuifspanning is in vergelijking (2.66) bijna afhankelijk van het kwadraat van de windsnelheid. Dit betekend dat de watersnelheid nauwelijks afhankelijk is van de windsnelheid, iets dat niet erg logisch lijkt. Deze formule zal dan ook niet gebruikt worden.

Voor de grote meren gebruiken Liggett en Hadjitheodorou (1969) een constante waarde voor de viscositeit:

$$\nu = 2 * 10^{-2} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (2.68)$$

Liu en Perez (1971) veronderstellen dat de turbulente viscositeit bij benadering evenredig is met de grootte van de wervels, die bij benadering weer evenredig met de diepte zijn. Hieruit concluderen zij dat in een basin dat 2 of 3 keer kleiner is, de waarde van de viscositeit ook 2 of 3 keer kleiner zal zijn.

Voorts veronderstellen zij dat de viscositeit ook evenredig is met de intensiteit van de turbulentie, die op zijn beurt ongeveer afhankelijk is van de gemiddelde watersnelheid. Zij laten daarom de viscositeit lineair met de windsnelheid toenemen volgens:

$$\nu = (W/1.83) * 10^{-5} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (2.69)$$

In de tabel (2.2) zijn enkele waarden voor de viscositeit in m^2/s weergegeven.

W	Visc. Liu/Perez	Visc. Liggett	verschil is een factor
	(2.69)	(2.68)	
m/s	$*10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$	$*10^{-3}$	
1	0.005	20	1000
2	0.011	20	
3	0.016	20	tot
5	0.027	20	
10	0.054	20	100

Tabel 2.2. Enkele waarden voor de viscositeit.

- Conclusie m.b.t. de waarden van de constante viscositeit

De gevonden waarden voor de constante, turbulente viscositeit liggen een factor 100 tot 1000 uit elkaar. Dit is niet verwonderlijk omdat de turbulente viscositeit nu eenmaal niet constant is, maar van de diepte en de stroming afhangt. En is dus afhankelijk van het probleem dat de onderzoeker behandeld heeft.

De grote spreiding in deze waarden werkt direct door in de snelheden, die als gevolg hiervan eenzelfde spreiding te zien zullen geven.

2.4.3. De variabelen bij niet constante viscositeit:

- de karakteristieke ruwheid van de bodem z_0 :

De waarde van de ruwheidsparameter z_0 is een maat voor de oneffenheid van de bodem en bedraagt $1/30^{\text{ste}}$ deel van de gemiddelde diameter van de karakteristieke ruwheidselementen. Deze waarde schatten we voor de Bosbaan op 6 cm, dit betekent dat de waarde $z_0 = 2 \cdot 10^3$ wordt.

- de karakteristieke ruwheid van het oppervlak z_1 :

De ruwheid van het oppervlak geeft de invloed van de golven weer. Uit onderzoekingen blijkt dat de waarde $r_1 (=z_1/h)$ bijna onafhankelijk is van de waarde h/z_0 en voor praktisch gebruik kan $r_1 = 1/3000$ genomen worden, oftewel $z_1 = h/3000$. De invloed van de waarde r_1 doet zich alleen aan het oppervlak gelden, bij de bepaling van de gemiddelde snelheid, wordt hij niet meegenomen.

2.5 Onderlinge vergelijking van de snelheden bij constante viscositeit.

Hoewel de snelheden een even grote spreiding te zien zullen geven als de viscositeit, en de berekende snelheden daarom niet betrouwbaar zijn, is het toch wel interessant te kijken hoe groot de snelheden zijn.

- De snelheid bij de rondstroming:

De snelheid aan het oppervlak bij de lineaire snelheidsverdeling volgens (2.29) wordt gegeven door:

$$u_s = \tau_{sx} / 500 \quad (2.70)$$

Afhankelijk van de keuze van de waarde van de viscositeit die constant of lineair met de windsnelheid kan zijn, zal de snelheid bij benadering respectievelijk kwadratisch of lineair met de windsnelheid zijn.

De afwijking van een volledig lineair verband is het gevolg van de afhankelijkheid van C_{10} volgens formule (2.66) van de windsnelheid.

Bij de berekening van de rondstroming is alleen het variabele deel van de windschuifspanning van belang. De verschillen in windsnelheid tussen de banen zullen niet al te groot kunnen zijn. Daarom wordt de snelheid alleen berekend bij kleine windsnelheden.

W	u_s lin. Liu/Perez	u_s lin. Liggett
m/s	$\cdot 10^{-2}$ m/s	$\cdot 10^{-2}$ m/s
1	51.4	0.01
2	99.5	0.05
3	163.4	0.13

Tabel 2.3. Enkele waarden voor de snelheid (rondstroming), bij verschillende snelheidsverdelingen en viscositeit.

- De snelheid bij de retourstroming:

De snelheid wordt in dit geval gegeven door een parabolisch profiel over de diepte. Aan het oppervlak is de snelheid gegeven door (2.42). Invullen van de diepte volgt:

$$u_s = \tau_{sx} / 2000 \quad (2.71)$$

In deze formule moet het constante deel van de windschuifspanning ingevoerd worden. Daarom worden de snelheden nu ook bij een grotere windsnelheid berekend.

W	u_s Liu/Perez	u_s Liggett
m/s	$\cdot 10^{-2}$ m/s	$\cdot 10^{-2}$ m/s
1	12.8	0.003
5	75.0	0.1
10	189.0	0.5

Tabel 2.4. Enkele waarden voor de snelheid (retourstroming), bij verschillende waarden voor de viscositeit.

- Conclusie van de snelheden bij constante viscositeit:

Door de verschillen in de waarden van de viscositeit, die wel een factor 100 tot 1000 bedragen, treden even grote verschillen op in de berekende snelheden.

De snelheden die berekend zijn met de viscositeit volgens Liu en Perez zijn veel te groot.

Met een constante viscositeit van $2 \cdot 10^{-2}$, die veel door Liggett gebruikt is, nemen de snelheden sterk toe met de windsnelheid.

Bij een grote hoeveelheid betrouwbare natuurmetingen zou men de viscositeit zo kunnen instellen dat de snelheid aan het oppervlak wel met de natuurmetingen overeenkomt.

De schematisatie die in paragraaf 2.2 is gedaan, waarbij de viscositeit constant aangenomen wordt over de diepte, leidt niet tot de bepaling van een redelijke orde van grootte van de snelheid. De oplossing is te onzeker om conclusies omtrent de grootte van de snelheid aan te verbinden.

HOOFDSTUK 3. METINGEN IN DE NATUUR.

3.1 Opzet van de metingen in de Bosbaan:

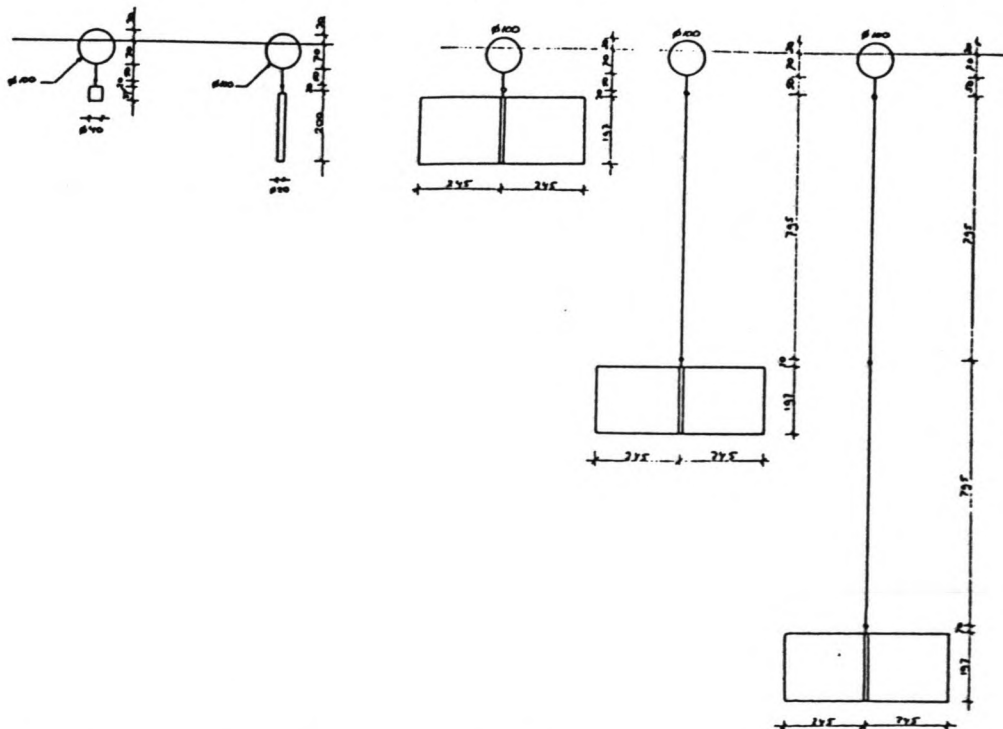
De H.T.S. Wiltzanghlaan in Amsterdam heeft drijfproeven uitgevoerd met weerstandslichamen. Deze werden over de breedte van de Bosbaan verdeeld en met twee theodolieten werd de verplaatsing in een beplaaide tijd gemeten.

De weerstandeslichamen bestonden uit twee p.v.c. platen, die in de vorm van een kruis aan elkaar bevestigd waren. De kruizen hadden een hoogte van 19.7 cm en een breedte van 49 cm.

Om ook de snelheidsprofielen in de diepte te kunnen meten, werden de kruizen op 3 verschillende hoogtes gehangen. De onderste randen van de kruizen bevonden zich op resp. 0.34, 1.11, en 1.90 m diepte.

De schuimplastic drijflichamen hadden een diameter van 10 cm, waarvan 3 cm boven water uit stak. Om de invloed van deze drijflichamen te kunnen verdisconteren, zijn 2 soorten dummy's gebruikt, één met een kort en dik blok en één met een lange en smale cylinder. Deze gewichten hadden dezelfde massa als de p.v.c. bladen.

In figuur 5.1 is een schets van de gebruikte dummy's en weerstandslichamen weergegeven.



Figuur 3.1 De gebruikte drijflichamen.

3.2 Meetresultaten:

Tot nu toe is men voornamelijk bezig geweest met het bepalen van de juiste C_d waarden voor de afzonderlijke lichamen.

De moeilijkheid hierbij is, dat uit proeven in een goot blijkt dat de kruizen gaan draaien en scheef hangen, wat van invloed is op het aan gestroomde oppervlak en de C_d waarden. Het herleiden van de snelheden uit de verplaatsing van deze lichamen stuit dus nog op enkele onzekerheden.

Zonder met deze factoren rekening te houden, wordt de snelheid in eerste benadering gegeven door:

$$U = (6.128 V_k - V_b)/5.128 \quad (\text{m/s}) \quad \text{of door:} \quad (5.1)$$

$$U = (4.762 V_k - V_s)/3.762 \quad (\text{m/s}) \quad (5.2)$$

In deze formules geldt:

V_k = de snelheid van de drijver met het kruis

V_b = de snelheid van de drijver met het blok

V_s = de snelheid van de drijver met de staaf

De orde van grootte van de op deze wijze verkregen snelheden komen redelijk met elkaar overeen.

Bij een windsnelheid van 9.3 m/s (gemeten op Schiphol), die een hoek van 7° met de baan maakt vinden zij snelheden van:

$u = 0.002$ m/s in de beschutte baan onder de wal,

$u = 0.030$ m/s in het midden van de baan en

$u = 0.022$ m/s aan de overkant.

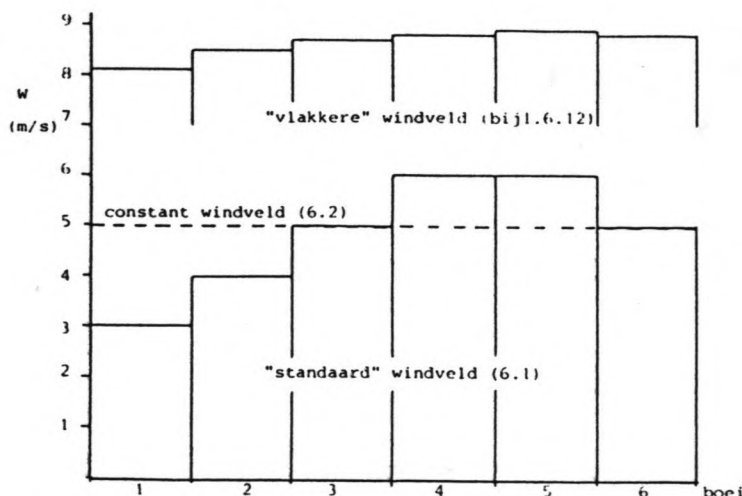
Deze snelheden zijn niet de oppervlakte snelheden, maar de gemiddelde snelheden iets onder het oppervlak. Bij een parabolisch profiel maakt dat al snel 10% in grootte uit.

HOOFDSTUK 4. VERGELIJKING VAN DE THEORIE MET DE METINGEN EN GEVOELIGHEIDSANALYSE.

4.1 Inleiding:

Met de in het vorige hoofdstuk behandelde model zijn enkele numerieke berekeningen gemaakt. De resultaten zullen in dit hoofdstuk behandeld worden. De gevoeligheid van de oplossing voor variatie van de waarden voor de ruwheden van oppervlak en bodem, zal ook geanalyseerd worden. De nu gevonden waarden zullen ook vergeleken worden met de in hoofdstuk 4 verkregen snelheden, die afgeleid waren met de aanname van een constante viscositeit. Om deze vergelijkingen te kunnen maken is de breedte van de bosbaan opgedeeld in 6 banen. De windsnelheid wordt vrij sterk gevarieerd over de breedte. Bij de vergelijking met de metingen uit de natuur, is een "vlakker" windprofiel gebruikt.

De volgende figuur 4.1 laat deze windvelden zien.

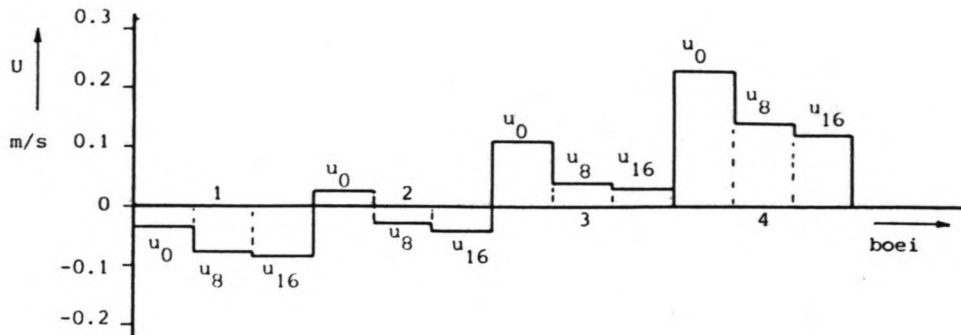


Figuur 4.1 De gebruikte windvelden.

4.2 Twee "standaard" gevallen:

Het "standaard" snelheidsprofiel wordt gevonden door voor de ruwheden de waarden in te voeren zoals die in paragraaf 5.6 gegeven zijn en een "standaard" windveld. De resultaten zijn in bijlage 6.1 weergegeven en geven de snelheden om de 0.4 m. Aangezien we voornamelijk geïnteresseerd zijn in de snelheden vlak bij het oppervlak, zijn de bovenste 40 cm ook nog onderverdeeld in 5 stukken van 8 cm.

De watersnelheden op drie verschillende hoogtes zijn in de onderstaande figuur 4.2 opgenomen. Per boei zijn steeds drie snelheden gegeven: links de snelheid aan het oppervlak, in het midden de snelheid op 8 cm diepte en rechts de snelheid op 16 cm diepte.



Figuur 4.2 De stroomsnelheden in het standaard geval op drie hoogtes.

Uit de figuur 4.2 is duidelijk te zien dat de stroomsnelheid vlak bij het oppervlak sterk varieert.

Zowel de rondstroming als de retourstroming zijn in het snelheidsbeeld duidelijk terug te vinden. In de boeien 4 en 5 overheerst de rondstroming dusdanig dat er geen retourstroming meer optreedt. In boei 1 is de stromingsrichting zelfs tegengesteld aan de windrichting.

Het tweede "standaard" geval betreft een constant windveld over de hele Bosbaan. In bijlage 6.2 is de situatie met een constante wind van 5 m/s weergegeven. In iedere baan moet nu de gemiddelde snelheid gelijk aan nul zijn. Dit betekent dat geldt dat $m = m_0$ en m is in dit geval gelijk aan -0.097 .

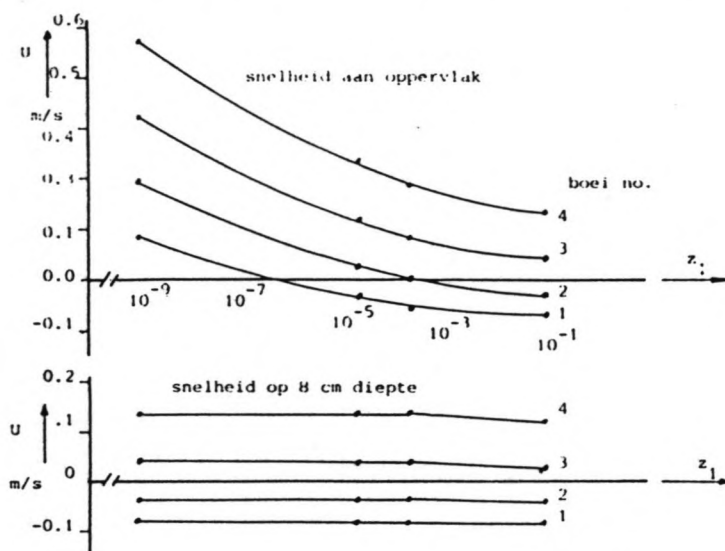
De snelheid aan het oppervlak is nu gelijk aan 0.115 m/s, dit is 2.3 % van de windsnelheid. Deze waarde is 0.7 % lager dan het percentage dat door Reid gegeven wordt. Dit verschil is het gevolg van het verschil in de formule voor de oppervlakteschuifspanning.

Ook hier neemt de snelheid sterk af onder het oppervlak en de snelheid bedraagt op 8 cm diepte nog maar 0.039 m/s.

4.3 Gevoeligheid voor de variabelen:

4.3.1 De oppervlakte ruwheid z_1 :

Reid geeft als waarde voor $z_1 = h/3000$. Indien $h = 2\text{m}$ geldt $z_1 = 6.7 \cdot 10^{-3}$. In figuur 4.3 is de oppervlakte snelheid en de snelheden op 8 cm diepte gegeven als functie van z_1 . De waarden voor z_1 zijn 10 maal, bijna 1000 maal en 10^6 maal de door Reid gegeven waarde.



Figuur 4.3 Snelheden als functie van z_1 .

Figuur 4.3 laat zien dat indien de waarde voor z_1 10 maal zo groot wordt, de snelheden aan het oppervlak in de banen 3 en 4 met ongeveer 25 % afnemen. Met een duizendvoudige waarde voor $z_1 = 0.1$, reduceren deze snelheden tot ongeveer de helft. En met een heel kleine waarde voor z_1 ($= 1 \cdot 10^{-9}$), verdubbeld de snelheid aan het oppervlak. De oplossing is dus niet heel erg gevoelig voor variatie in de waarde van z_1 .

Uit figuur 4.3 valt op te maken dat de snelheid op 8 cm diepte zelfs al bijna niet meer van z_1 afhangt.

De door Reid genoemde waarde voor $z_1 = h/3000$, kan dan ook gerust als de juiste waarde voor z_1 gebruikt worden.

In de bijlagen 6.3 tot en met 6.5 zijn de volledige resultaten van de berekeningen weergegeven.

4.3.2 De bodemruwheid z_0 :

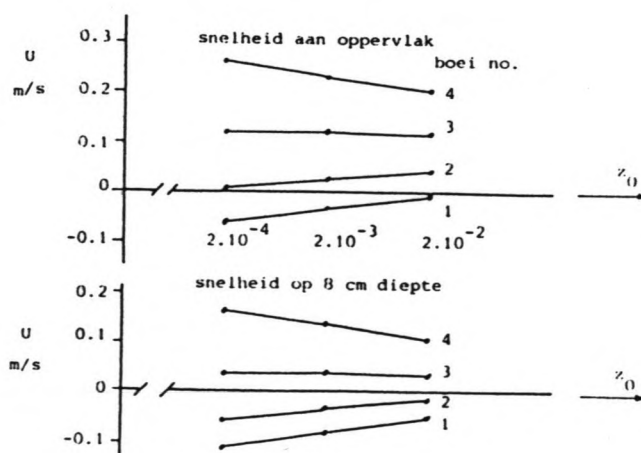
Variatie van de waarde voor z_0 heeft een grotere invloed dan de hierboven beschreven variatie van z_1 . De waarden van m_0 en het verhang P zijn beide afhankelijk van z_0 , zoals tabel 4.1 laat zien. De volledige uitvoer bij dit constante windveld van 5 m/s is in de bijlagen 6.6 en 6.7 opgenomen.

z_0	m_0	P
$2 \cdot 10^{-3}$	- 0.097	0.022
$2 \cdot 10^{-4}$	- 0.059	0.021
$2 \cdot 10^{-2}$	- 0.189	0.024

Tabel 4.1 De afhankelijkheid van m_0 en P van z_0 .

Een grotere waarde van z_0 leidt via de vergelijkingen (2.52) en (2.54) tot een grotere waarde voor m_0 . Deze heeft op zijn beurt weer invloed op de waarde van P via vergelijking (2.62). De waarde van m wordt ten slotte bepaald door de waarden van P en de windschuifspanning volgens vergelijking (2.64).

Figuur 4.4 geeft de snelheden aan het oppervlak en op 8 cm diepte bij het "standaard" windveld als functie van z_0 .



Figuur 4.4 De snelheid als functie van z_0 .

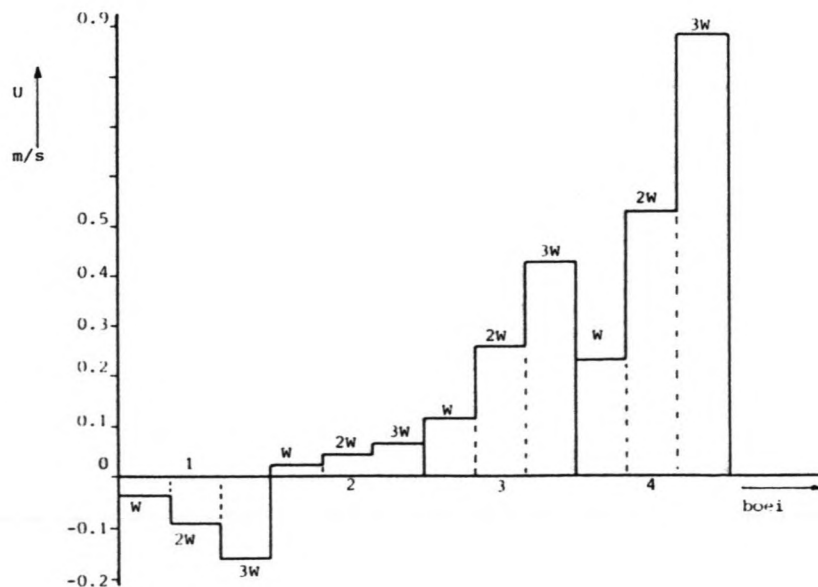
Zoals uit figuur 4.4 en nog vollediger ook uit de bijlagen 6.8 en 6.9 is op te maken, varieert de snelheid nu niet alleen aan het oppervlak maar over de hele diepte. Indien de waarde voor z_0 10 maal zo groot wordt, nemen de waarden voor m af en de waarde van P toe. De snelheden worden over de hele hoogte ongeveer met dezelfde waarde gereduceerd. Indien z_0 10 maal zo klein wordt gebeurt het tegenovergestelde.

De afhankelijkheid van de snelheden voor variatie in de waarde van z_0 is echter niet erg groot. Als geschatte waarde voor de bodemruwheid van de Bosbaan kan daarom gerust $2 \cdot 10^{-3}$ genomen worden.

4.3.3 De windsnelheid W :

De waarde van het verhang P zal met toenemen van de wind groter worden. Aangezien m afhankelijk is van het verhang P en de waarde van de windschuifspanning, zal bij een hogere windsnelheid de absolute waarde van m toenemen. De snelheden, die afhankelijk zijn van de windschuifspanning en de waarde van m , zullen als gevolg hiervan in absolute zin meer dan evenredig toenemen.

Dit is in de volgende figuur 4.5 goed te zien. Dit figuur geeft drie oppervlakte snelheden weer bij het "standaard", het dubbele en het driedubbele windveld. De waarden zijn uit de bijlagen 6.10 en 6.11 afkomstig.



Figuur 4.5. De snelheid als functie van de windsnelheid.

4.4 Vergelijking met de snelheden bij constante viscositeit:

In de tabellen 2.3 en 2.4 staan de snelheden die gevonden waren bij de aanname van een constante viscositeit. De snelheden die gevonden waren met de viscositeit volgens Liu en Perez zijn een factor 10 groter dan de in dit hoofdstuk gevonden waarden. En de snelheden bij de onafhankelijk van de wind zijnde viscositeit volgens Liggett zijn een factor 100 kleiner dan de nu gevonden waarden.

4.5 Vergelijking met meetwaarden uit de natuur:

De gemeten snelheden uit hoofdstuk 3 hadden een orde grootte van 0.002 tot 0.03 m/s, bij een windsnelheid op Schiphol van 9.3 m/s.

Om deze snelheden te kunnen vergelijken wordt een windveld aangenomen dat niet zo sterk over de breedte varieert als het "standaard" windveld en waarvan de snelheid iets lager ligt dan de snelheid die op het open veld bij Schiphol is gemeten. De snelheid wordt gevarieerd van 8.1 tot 8.9 m/s. De uitkomst van de berekening is in bijlage 6.12 opgenomen.

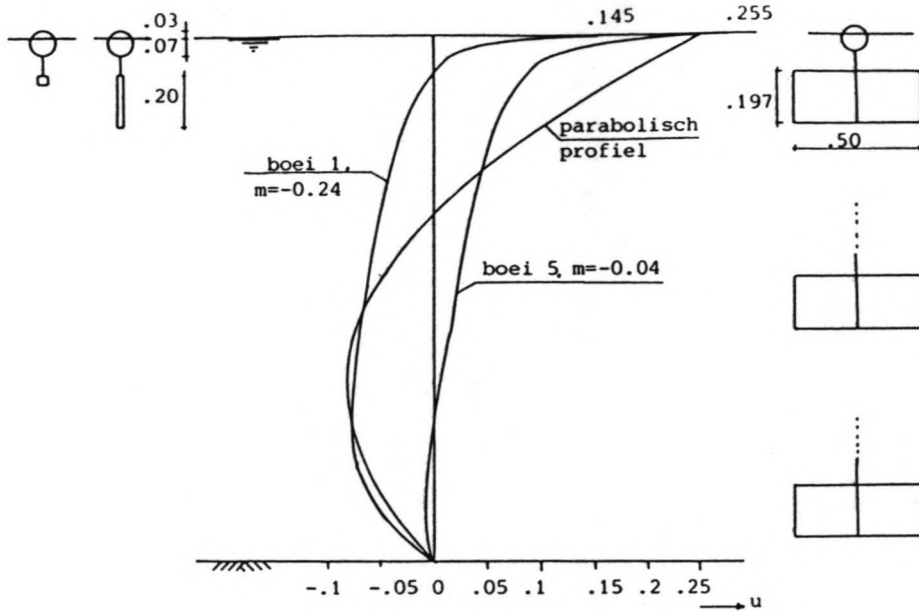
De orde van grootte van de snelheid ligt op de diepte van het kruis rond de - 0.01 tot 0.06 m/s.

Dit komt redelijk overeen met de gemeten waarden van 0.002 tot 0.03 m/s.

In figuur 4.6 is de snelheidsverdeling volgens bijlage 6.12, op de boeien 1 en 5 en een aangepaste snelheidsverdeling volgens het parabolisch model voor de retourstroming uit paragraaf 2.6 weergegeven.

De weerstandslichamen zijn op schaal afgebeeld.

Duidelijk is te zien dat de snelheden volgens de huidige theorie vlak onder de oppervlakte veel sterker afnemen dan bij het parabolisch profiel uit paragraaf 2.5 het geval was.



Figuur 4.6 Enkele snelheidsprofielen en de weerstandslichamen.

4.6 Opmerkingen:

Bij de bepaling van de windschuifspanning zijn de formules (2.65) en (2.66) gebruikt. In deze formules moet de windsnelheid op 10 meter hoogte ingevoerd worden, welke bij de Bosbaan niet veel zal variëren. In de berekeningen is daarom gedaan alsof de variaties van de windsnelheid vlak boven het wateroppervlak optreden op 10 meter hoogte.

De snelheden zijn berekend bij aangenomen windvelden. Om een juist beeld te krijgen van de water snelheden die werkelijk optreden, zou onderzocht moeten worden hoe de windsnelheden in werkelijkheid over de bosbaan verdeeld zijn.

HOOFDSTUK 5. TOEPASSING EN CONCLUSIES.

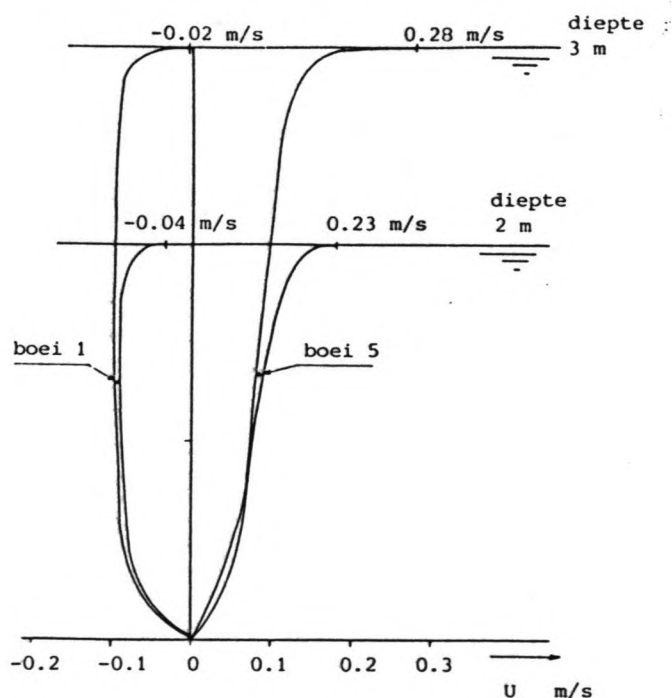
5.1 Verdieping naar 3 meter:

In verband met de door de FISA geëiste, kostbare verdieping naar 3 meter, wordt aan deze ingreep speciale aandacht geschonken.

De waterdiepte komt alleen via de bodemwrijving in de vergelijkingen voor en de verdieping dus niet erg veel effect opleveren. In bijlage 6.13 is het effect van een verdieping van de Bosbaan naar drie meter onder invloed van het "standaard" windveld te zien.

De snelheden aan het oppervlak nemen toe van 0.23 tot 0.28 m/s. De snelheden 12 cm onder het oppervlak nemen slechts toe van 0.13 naar 0.14 m/s.

De volgende figuur 5.1 toont de snelheidsprofielen in de banen 1 en 5.



Figuur 5.1 De snelheidstoename op de boeien 1 en 5 bij verdieping.

5.2 Samenvatting en conclusies:

De in paragraaf 2.3 gepresenteerde berekeningswijze leidt tot een redelijk beeld in de wind aangedreven stromingen die in de Bosbaan optreden.

De oppervlakte snelheden bedragen ongeveer 2.5 % van de windsnelheden. Onder het oppervlak nemen de snelheden sterk af en zijn op 8 cm diepte tot ongeveer 1/3 à 1/4 gereduceerd.

De door de FISA geëiste verdieping naar drie meter zal leiden tot grotere door de wind aangedreven snelheden.

HOOFDSTUK 6. WATER- EN LUCHTWEERSTAND.

6.1 Inleiding:

Om de directe invloed van de wind op de roeiers en boot te kunnen analyseren is het noodzakelijk inzicht in de grootte van de water- en luchtweerstand van de roeiers en boot te hebben. Als basis zal hiervoor een artikel uit het blad "Roeien" (anoniem 1971) gebruikt worden. Dit artikel is gebaseerd op o.a. het boek Fluid Dynamic Drag van Dr. ing. S.F. Hoerner en niet nader gespecificeerde Duitse proeven in een sleeptank.

De waterweerstand en de luchtweerstand zullen achtereenvolgens behandeld worden.

6.2 Waterweerstand:

Een aantal factoren spelen bij de bepaling van de totale waterweerstand een rol. Deze weerstand is in twee hoofdgroepen in te delen, in een stationair en in een niet stationair deel. Deze delen zijn ieder weer uit een aantal factoren opgebouwd. Tabel 6.1 laat zien wat het procentuele belang van iedere factor is.

Stationair	niet stationair
wrijving 86% C_{ww} (Reynolds getal) (waarvan 1% vormweerstand)	hokken 1%
golfweerstand 8% C_{wg} (froude getal)	dansen 3% dompen 1%
totaal 94%	totaal 6%

Tabel 6.1 Factoren die de waterweerstand bepalen.

In het kort zal ingegaan worden op de wijze hoe al deze factoren tot stand gekomen zijn.

6.2.1 De wrijvingsweerstand:

De basisformule voor wrijving in een stroming luidt:

$$F = 0.5 \ v^2 C_w A \quad (N) \quad (6.1)$$

Hierin is:

v = de snelheid van het schip,

F = de kracht in Newton (N),

C_w = de wrijvingscoëfficiënt (dimensieloos),

A = het oppervlak, het aangestroomde bij de vormweerstand en het natte bij de wrijvingsweerstand (m^2).

Voor schepen geldt dat de wrijvingscoëfficiënt voor het water (C_{ww}) een functie is van het Reynoldsgetal, dat gegeven wordt door:

$$Re = vl/\nu \quad (6.2)$$

Waarin geldt dat:

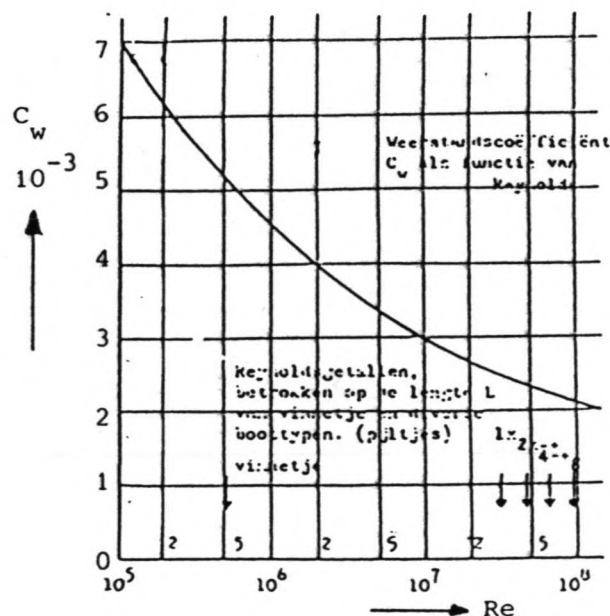
l = de lengte van het schip,

ν = de viscositeit van water = 1.10^{-6} .

Er worden in de literatuur vele verbanden gegeven tussen deze twee factoren welke allemaal bijna op hetzelfde neerkomen. In het gebruikte artikel wordt voor boten op baansnelheid het volgende verband gegeven:

$$C_{ww} \propto Re^{-0.15} \quad (6.3)$$

Figuur 6.1 laat dit verband zien. Hieruit volgt dat voor een vier geldt dat $C_{ww} = 2.3 \cdot 10^{-3}$.



Figuur 6.1 De wrijvingscoëfficiënt als functie van het Reynoldsgetal.

- vormweerstand (1%):

In het artikel uit het blad "Roeien" wordt hierover het volgende gesteld: Doordat het schip een richting op beweegt, zal ook een hoeveelheid water de andere kant op bewegen. Deze terugstroming is ervoor verantwoordelijk dat het schip ten opzichte van het water een hogere snelheid heeft dan ten opzichte van de wal. Het effect wordt bepaald door de slankheid van het schip en is in de wrijvingscoëfficiënt verwerkt door deze te verhogen met een bedrag:

$$dC_{ww}/C_{ww} = 1.5 (B/L)^{1.5} \quad (6.4)$$

Voor roeiboten is B/L ongeveer gelijk aan 1 : 25, zodat de vergroting van de wrijvingsweerstand ongeveer 1% bedraagt.

Het oppervlak dat in de formule (6.1) ingevuld moet worden is in dit geval het natte oppervlak, en bedraagt voor een vier 6 m².

Hoewel de vormweerstand theoretisch los staat van de wrijvingsweerstand en de gebruikte methode formeel dus niet juist is, wordt hij wel overgenomen. De vormweerstand zal immers, gezien de zeer gunstige vorm van een roeiboot, slechts een kleine bijdrage leveren aan de totale weerstand.

6.2.2 De golfweerstand:

Het verloop van C_{wg} als functie van het Froude getal (Fr) is minder regelmatig dan dat van C_{ww} met Re . Met name bij modellen die voor en achter stomp gevormd zijn, zitten er bergen en dalen in de C_{wg} - Fr karakteristiek. Bij modellen met een gelijkmatiger dikte verloop blijven hier slechts rudimenten van over.

Het Froude getal wordt gegeven door:

$$Fr = v/(gL)^{0.5} \quad (6.5)$$

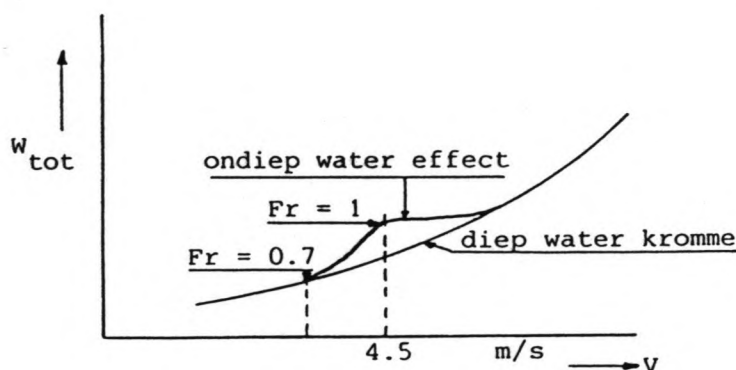
De golfweerstand wordt betrokken op de grootste (natte) dwarsdoorsnede van het model, en bedraagt 8% van de totale waterweerstand.

De gebruikte theorie gaat ervan uit dat het verschijnsel als een diepwater probleem mag worden opgevat. Indien dit niet het geval is, zal het ondiepwatereffect ervoor zorgen dat indien de snelheid van het schip in de buurt komt van de snelheid van de oppervlakte golven, de golfweerstand meer dan evenredig met het kwadraat van de snelheid toeneemt. De snelheid (c) van oppervlakte golven wordt voor ondiep water gegeven door:

$$c = (gh)^{0.5} \quad (6.6)$$

Dit betekent dat rondom $Fr = 1$ een bult in de $C_{wg} - Fr$ karakteristiek optreedt. De literatuur geeft geen grafieken die voor een roeiboot gebruikt kunnen worden, waarmee bekeken kan worden hoeveel de golfweerstand toeneemt als gevolg van het ondiepwatereffect.

De volgende figuur geeft een schets van de mogelijke toename van de golfweerstand op de totale weerstand als gevolg van het ondiepwatereffect.



Figuur 6.2 Toename van de golfweerstand als gevolg van het ondiepwatereffect.

Vanaf $Fr = 0.7$ is het ondiepwatereffect merkbaar, de weerstand neemt meer dan kwadratisch toe met de snelheid totdat $Fr = 1$. Daarna is een snelheidsverhoging te realiseren met een minder dan kwadratisch toenevende weerstand totdat de diepwaterkromme weer is bereikt.

De snelheid van de boot bepaalt of men bij een diepte van twee meter voor of achter de bult zit. De volgende tabel 6.2 geeft voor een drietal verschillende boottypen het Froude getal en de diepte waarbij van diepwater sprake zou zijn.

boottype	snelheid	Froude getal		Diepwater diepte in m.
		diepte Bosbaan		
	m/s	2 m	3m	Froude getal= 0.7
skiff	4.5	1.02	0.83	4.2
vier	5.1	1.15	0.94	5.4
acht	5.5	1.24	1.01	6.3

Tabel 6.2 Froudegetal en de diepwater diepte bij verschillende boottypen en dieptes.

Uit tabel 6.2 zijn de volgende conclusies te trekken. Bij een verdieping van 2 naar 3 m komen de schepen in het ongunstige gebied waar een meer dan kwadratische weerstandsvermeerdering plaatsvindt bij verhoging van de snelheid. Een ploeg die meer vermogen levert dan zijn tegenstander wordt daar in die situatie maar weinig voor beloond. Pas bij een verdieping van de Bosbaan naar 6.5 meter zal sprake zijn van echt diep water waarbij geen verhoging van de golfweerstand meer optreedt.

In de praktijk zal echter niet veel van dit verschijnsel gemerkt worden aangezien de golfweerstand op zichzelf maar een klein deel uitmaakt (8%) van de totale weerstand. Een verhoging van dit bedrag zal niet veel effect op de eindsnelheid hebben.

6.2.3 De niet stationaire weerstanden:

De hier gepresenteerde waarden zijn afkomstig van proeven in een sleep-tank in Duitsland met echte, bemande boten. De waarden zijn slechts in benadering nauwkeurig. Maar aangezien het relatief om kleine waarden gaat, zal de fout op de totale waterweerstand nooit groot kunnen zijn.

- dansen (3-4%):

Dansen is het gevolg van de verticale bewegingen die de roeiers in de boot maken. Dit leidt tot een extra component in de golfweerstand. Het dansen gaat in de dubbele slagfrequentie.

- dompen (1-2%):

Met de bovengenoemde bewegingen samenhangend en als gevolg van de horizontale verplaatsingen van het zwaartepunt van de roeiers, maakt de boot een dompende beweging in de slagfrequentie en leidt ook tot een extra component in de golfweerstand.

- hokken (1%, volgens anderen 3%):

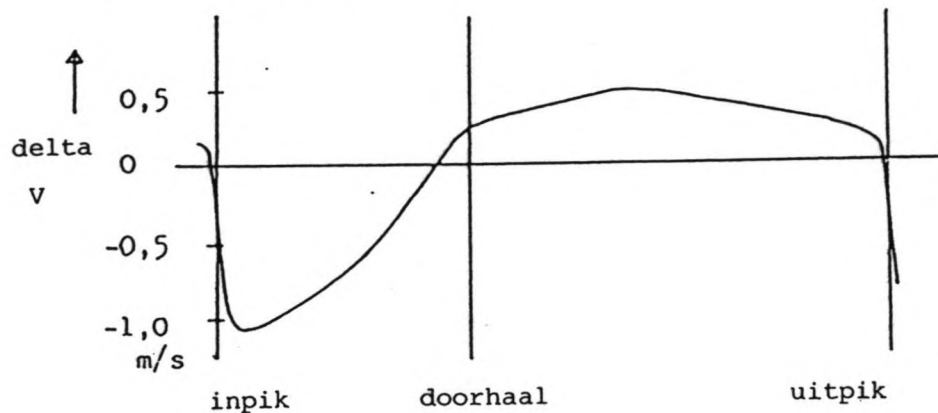
Onder hokken wordt de niet eenparige beweging van de boot verstaan. De bootsnelheid valt na de inpik even terug van 5 naar ongeveer 4 m/s en is de rest van de haal vrij constant iets groter dan 5 m/s. Dit wordt door twee elementen bepaald:

a) De beweging van de boot ten opzichte van het zwaartepunt van het hele systeem.

b) Een beweging van het zwaartepunt van het hele systeem ten opzicht van het water.

Het niet constant zijn van de bootsnelheid leidt tot een extra verhoging van de wrijvingsweerstand van slechts een procent.

De volgende figuur 6.3 geeft een beeld van de snelheidsfluctuaties van een vier tijdens een haal.



Figuur 6.3 De snelheidsfluctuatie van een vier.

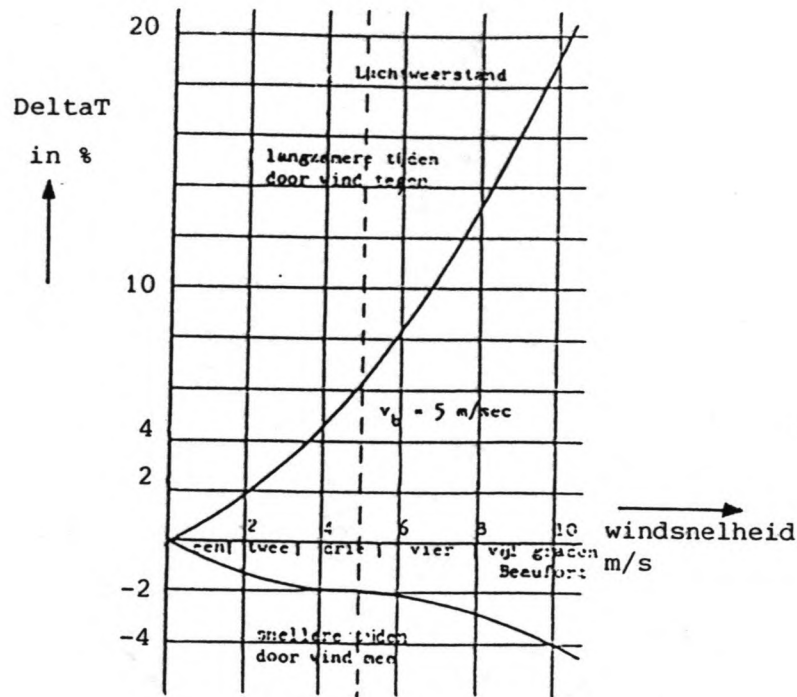
6.3 De luchtweerstand:

Bij de bepaling van de luchtweerstand wordt rekening gehouden met de invloed van de wind op de roeiers en bladen. De vier gedeeltelijk achter elkaar zittende roeiers worden beschouwd als twee palen met ieder een oppervlak van 0.4 m^2 en een C_w waarde van 0.8.

De vier bladen worden als vlakke rechthoeken van 0.1 m^2 met een C_w waarde van 1.0 opgevat. Er is rekening gehouden met het feit dat ze boven water een grotere snelheid hebben dan de boot en dat ze gedraaid worden.

Voorts is het slipverlies, dat bij windstil weer 20% bedraagt, groter genomen indien de bootsnelheid hoger is. Ook is het gemiddelde vermogen dat door de roeiers geleverd kan worden bij tegenwind iets lager genomen omdat het langer volgehouden moet worden.

Het bovenstaande leidt tot de volgende figuur met daarin de invloed van de wind op de tijd van een vier over 2 km.



Figuur 6.4 Het effect van de windweerstand op de tijd van een vier over 2 km.

Duidelijk is in figuur 6.4 te zien dat bij tegenwind de boot meer vertraagd wordt dan dat hij bij meewind versneld wordt.

Bij de bepaling van deze figuur is geen rekening gehouden met de gevolgen van de golfslag op de snelheid. Met name technisch minder be-
gaafde ploegen zullen hier meer last van hebben.

6.4 Samenvatting en conclusies hoofdstuk 6:

De wind heeft een grote invloed op de tijden die door roeiboten gerealiseerd kunnen worden. Bijvoorbeeld zal de eindtijd bij een tegenwind van 8 m/s met maar liefst 13% vermeerderd worden en wordt bij eenzelfde meewind de tijd met 2.8% verminderd. Het effect van de wind wordt weergegeven in figuur 7.3.

In verband met het ondiepwater effect, zal een verdieping van 2 naar 3 meter in theorie wederom een verslechtering teweeg brengen, indien het gaat om de verschillen tussen de banen. Pas bij een diepte van 6.5 m is sprake van diep water, waarbij in principe snellere tijden mogelijk zijn. Het ondiepwater effect is echter niet groot.

De invloed van de golfslag zal per ploeg verschillen en is niet in het model meegenomen.

HOOFDSTUK 7. HET TOTALE BOEIVERSCHIL.

7.1 Inleiding:

Het totale boeiverschil dat tussen twee banen optreedt is het gevolg van verschillen tussen zowel de windsnelheden als de watersnelheden in de beschouwde banen.

In dit hoofdstuk zal de invloed van de in hoofdstuk 4 gevonden wind-aangedreven watersnelheden op de tijd waarin de 2000 m afgelegd kan worden bekeken worden, samen met de direkte invloed van de wind op de roeiers in een vier volgens figuur 6.4.

7.2 De invloed van de watersnelheid:

De invloed van de watersnelheden als gevolg van het constante windveld van 5 m/s uit bijlage 6.2 en het "vlakke" windveld van 8.1 - 8.9 m/s uit bijlage 6.12 op de 2 km tijd zal hier onderzocht worden.

Er is moeilijkheid in de bepaling van de representatieve watersnelheid die de boot ondervindt. Het snelheidsprofiel varieert immers heel sterk vlak onder het oppervlak, zoals figuur 4.6 duidelijk laat zien.

Als representatieve snelheid zal een soort gemiddelde snelheid genomen worden volgens:

$$u_{rep} = (u_{2.0}^2 + u_{1.92} + u_{1.84} + u_{1.80})/4 \quad (7.1)$$

De volgende beschouwing ligt aan deze formule ten grondslag.

De relatief zeer grote snelheid aan het oppervlak werkt maar op een klein oppervlak en neemt zeer snel af. Daarom wordt hiervan de halve waarde genomen.

Een roeiboot heeft een diepgang van ongeveer 20 cm en een vrij platte onderkant, zodat een groot deel van het natte oppervlak zich op een waterdiepte van 15 - 20 cm bevindt. Vandaar dat een relatief groter gewicht toegekent wordt aan de watersnelheid op deze diepten, door de snelheden hier dicht bij elkaar te nemen.

De baansnelheid van de vier, die bij windstilte 5.10 m/s bedraagt, kan eenvoudigweg met deze representatieve water snelheden vermeerderd of verminderd worden.

De volgende tabel 7.1 geeft de representatieve snelheden en de invloed daarvan op de eindtijd bij verschillende windvelden.

windsnel- heid m/s	u_{rep} m/s	bootsnelheid m/s	Tijd min./s.	deltaT		verschil boei 1-5
				s	%	
0	0	5.10	6.32	0	0	n.v.t.
5	0.04	5.14	6.29	-3	-0.8	
-5	-0.04	5.06	6.35	3	0.8	
8.1	0.02	5.12	6.31	-1	-0.3	6 s=
8.9	0.10	5.20	6.25	-7	-1.8	1.5%
-8.1	-0.02	5.08	6.34	2	0.5	6 s=
-8.9	-0.10	5.00	6.40	8	2.0	1.5%

Tabel 7.1 De invloed van de watersnelheden op de eindtijd.

In deze tabel is tegenwind met een min teken aangegeven. Hij laat zien dat de invloed van de wind aangedreven stromingen op de eindtijd niet erg groot is.

De relatief grote boeiverschillen zijn een gevolg van de rondstroming. Bij het constante windveld van 5 m/s treedt geen rondstroming op, bij het varieërende windveld volgens bijlage 6.12 wel.

- de representatieve snelheid:

Indien we de representatieve snelheid bepalen door het gewone gemiddelde van de snelheden in de bovenste laag van het water te nemen, dan wordt de invloed van de watersnelheid op de eindtijd 30 - 50% groter.

De verschillen tussen boei 1 en 5 worden dan echter slechts ongeveer 10% groter.

Dat de verschillen tussen de boeien niet zo veel toenemen is als volgt annemelijk te maken:

Uit de figuren 2.1a en 2.1b valt op te maken dat de snelheid als gevolg van de rondstroming onder het oppervlak bijna constant is, en deze snelheid is dus onafhankelijk van de wijze waarop hij bepaald wordt.

De snelheid als gevolg van de retourstroming is wel sterk afhankelijk van de wijze waarop hij bepaald wordt, maar deze draagt niet zo sterk bij tot de verschillen tussen de boeien.

7.3 De direkte invloed van de windsnelheid:

Uit figuur 6.4 kan direkt de invloed van de wind op de beschouwde vier afgelezen worden. Dit leidt voor de verschillende windvelden tot de volgende tabel.

windsnel- heid m/s	deltaT %	deltaT s	Tijd min.	verschil boei 1-5
5	-2	-8	6.24	n.v.t.
-5	6.2	24	6.56	
8.1	-2.9	-11	6.21	2s=
8.9	-3.4	-13	6.19	0.5%
-8.1	13.5	53	7.25	10s=
-8.9	16.1	63	7.35	2.6%

Tabel 7.2 De direkte invloed van de windnelheid op de eindtijd.

Uit tabel 7.2 blijkt duidelijk dat de direkte invloed van de wind op de roeier veel groter is dan de invloed van de watersnelheden. Bij een windsnelheid van 8 m/s is dit effect wel 10 keer zo groot.

7.4 Het totale boeiverschil:

Indien we deze twee tabellen combineren krijgen we een duidelijk beeld van het totale effect. De verschillen zijn zowel in procenten als in seconden weergegeven.

windsnel- heid	deltaT water	deltaT wind	deltaT totaal	deltaT water	deltaT wind	deltaT totaal
m/s	s	s	s	%	%	%
5	-3	-8	-11	-0.8	-2	-2.8
-5	3	24	27	0.8	6.2	7.0
8.1	-1	-11	-12	-0.3	-2.9	-3.2
8.9	-7	-13	-20	-1.8	-3.4	-5.2
boeiverschil	6	2	8	1.5	0.5	2.0
-8.1	2	53	55	0.5	13.5	14.0
-8.9	8	63	71	2.0	16.1	18.1
boeiverschil	6	10	16	1.5	2.6	4.1

Tabel 7.3 Het totale boeiverschil in seconden en procenten.

Deze tabel laat zien dat, hoewel de direkte invloed van de wind in principe groter is dan die van de watersnelheden, bij meewind het boeiverschil voornamelijk door deze watersnelheden bepaald wordt. Bij tegenwind overheerst het direkte wind effect.

7.5 Samenvatting en conclusies hoofdstuk 7.

Bij een constant en een variabel windveld is bekeken wat de invloed van wind- en watersnelheden op de tijd over 2 km van een vier is.

De direkte invloed van de wind is vooral bij tegenwind groter dan die van de watersnelheid. Bij meewind is het verschil kleiner.

Het boeiverschil is bij meewind zelfs voornamelijk het gevolg van de verschillen in watersnelheden tussen de banen. De rondstroming is hiervoor verantwoordelijk. Deze heeft in het opgezette model een relatief grote waarde.

De direkte invloed van de golfslag is bij deze beschouwing niet meegenomen. Bij meewind zal deze het boeiverschil verkleinen en bij tegenwind juist verder vergroten.

HOOFDSTUK 8. SAMENVATTING, OPMERKINGEN, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.

8.1 Samenvatting:

Onderzocht is de invloed van de wind op de uitslag van een roeiwedstrijd over 2 km op de Bosbaan. Indien de wind schuin op de baan staat zullen twee gelijkwaardige ploegen niet gelijktijdig over de finish komen, dit verschijnsel wordt boeiverschil genoemd.

De wind heeft een directe invloed op de roeiers, maar ook is de wind verantwoordelijk voor stromingen in het water, die op hun beurt ook weer tot het boeiverschil bijdragen.

Het grootste deel van het onderzoek is gewijd aan het opstellen van een model dat de windaangedreven waterstromingen kan voorspellen. Een benadering met een constante viscositeit bleek niet tot redelijke uitkomsten te leiden.

Vervolgens is een computer model opgesteld, dat voornamelijk op de theorie van Reid is gebaseerd, met een over de diepte variabele viscositeit. Bij dit model wordt de Bosbaan in een aantal onafhankelijke banen opgedeeld met ieder een verschillende windsnelheid in de baanrichting, wat het effect van een schuin invallende wind weergeeft.

Door aan de continuïteitsvoorwaarde over de hele breedte te voldoen is het probleem dan iteratief op te lossen.

In het model worden duidelijk de retour- en rondstromingen weergegeven.

De berekende oppervlakte watersnelheden bedragen ongeveer 2.5 % van de windsnelheden. Onder het oppervlak nemen de snelheden sterk af; ze zijn op 8 cm diepte al tot ongeveer $1/3$ à $1/4$ gereduceerd.

Het directe effect van de wind op de snelheid van de boten is ook onderzocht. Hiervoor is een artikel uit het blad "Roeien" gebruikt.

8.2 Opmerkingen:

De resultaten zijn bepaald aan de hand van een aangenomen windveld. Om een juister beeld te krijgen van de effecten die in de werkelijkheid optreden, zou onderzocht moeten worden hoe de windsnelheden over de bosbaan verdeeld zijn.

De Bosbaan is opgedeeld in een aantal onafhankelijke banen.

De invloed van de wanden en de wrijving tussen de banen zullen deze rondstroming vermoedelijk iets dempen. Gezien de grote breedte/diepte verhouding zal dit effect niet sterk zijn.

Het psychologisch effect op de prestaties van roeiers indien ze denken dat ze op een slechte baan liggen is buiten beschouwing gebleven.

8.3 Conclusies:

Het boeiverschil is zowel het gevolg van het direkte windeffect als van verschillen in de wind aangedreven waterstromingen.

De direkte invloed van de wind op de snelheid is bij tegenwind veel groter dan bij meewind. Bij een windsnelheid van 5 m/s, zal bij tegenwind de tijd voor een vier met 6% toenemen en bij meewind met 2% afnemen. In beide gevallen is deze invloed groter dan de invloed van de water stroming. Bij een constant windveld van 5 m/s, zal de tijd als gevolg hiervan met nog geen 1% toe- of afnemen.

Bij een variabel windveld ontstaan als gevolg van rondstroming toch vrij grote verschillen in de watersnelheden. Bij het variabele windveld (van 8.1 tot 8.9 m/s) volgens bijlage 6.12, resulteert dit in het volgende beeld voor een vier.

	deltaT water	deltaT wind	deltaT totaal
	s	s	s
meewind	6	2	8
tegenwind	6	10	16

Tabel 8.1 Het boeiverschil voor een vier tussen boei 1-5 bij het windveld volgens bijlage 6.12.

Deze gepresenteerde verschillen zijn sterk afhankelijk van de gekozen getallen. Het boeiverschil is volgens deze berekeningen echter aanzienlijk.

Bij een meewind zal de niet meegenomen invloed van de golfslag tot een verkleining van de verschillen leiden en bij tegenwind tot een verdere vergroting.

Een verdieping van de Bosbaan naar drie meter zal in de situatie van de boeiverschillen geen verbetering opleveren, en is in verband met de daarmee gemoeide kosten onwenselijk.

In theorie is het zelfs zo dat een verdieping naar 3 meter om twee redenen ongunstige gevolgen heeft.

Ten eerste zal de invloed van de bodemwrijving op de waterstroming aan het oppervlak kleiner worden, zodat deze snelheden toe zullen nemen. Het gaat hierbij slechts om een marginale toename.

De tweede reden volgt uit het feit dat bij verdieping de schepen net in het ongunstige gebied van de weerstandskromme terecht komen, waar een verhoging van de snelheid gepaard gaat met een meer dan kwadratische verhoging van de weerstand. Aangezien het hierbij alleen om een verhoging van de golfweerstand gaat, die bij roeiboten slechts ongeveer 8% bedraagt, zal dit effect in de praktijk waarschijnlijk niet merkbaar zijn.

Een verbreding van de Bosbaan kan wel zinnig zijn, aangezien men dan meer vrijheid heeft die banen uit te zoeken waartussen de windsnelheidsverschillen het kleinst zijn.

8.4 Aanbevelingen:

De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat het verschijnsel boeiverschil op een redelijke wijze beschreven wordt.

De onzekerheden in de coëfficiënten hebben geen grote invloed op het resultaat. De grootste onzekerheid zit waarschijnlijk in de aanname van de windsnelheden, die een ongeveer evenredige invloed hebben op de bootsnelheden. De verschillen in de waterstromingen zijn evenredig met de wortel van de windverschillen.

Verdere studies zouden de volgende onderwerpen kunnen behelsen:

- De direkte invloed van de wind is aan de grote kant. De gebruikte schematisatie van o.a. vier roeiers als twee cylindrs is hiervan wellicht de oorzaak.
- De watersnelheden gaan bij een variabel windveld relatief erg sterk variëren over de breedte als gevolg van een sterke rondstroming. Een numeriek onderzoek naar de invloed van de wanden en de wrijving tussen de banen hierop is gewenst.
- Onderzoek naar de invloed op de bootsnelheid van de onder het oppervlak sterk variërende waterstroming is ook noodzakelijk. De genoemde representatieve snelheid kan nauwkeuriger bepaald worden.
- Het windsnelheidsprofiel is aangenomen. Onderzoek naar het gedrag van de windstromingen boven en rondom de Bosbaan is noodzakelijk om een volledig simulatiemodel te kunnen verkrijgen. Met name de snelheidsverschillen die tussen de boeien optreden zijn van belang.
- De invloed van de golfslag op de bootsnelheid dient hiertoe ook onderzocht te worden.
- De grootte van het ondiepwatereffect zal eveneens nader bestudeerd moeten worden.
- Het (verbeterde) model zou vervolgens getoetst kunnen worden aan natuur metingen die momenteel door de H.T.S. in A'dam verricht worden.
- Bij een verbreding zal men de baan zo moeten leggen, dat hij in de overheersende windrichting tijdens de wedstrijdmaanden ligt. Hierbij moet dan voornamelijk gekeken worden naar de windrichtingen bij de wat hogere windsnelheden.
- Het verdient de aanbeveling de boten altijd naast elkaar neer te leggen indien de baan niet vol bezet is. Daarbij moet de baan met de meest afwijkende windsnelheid leeg gelaten worden. Vermoedelijk zal dit de baan aan hogerwal zijn, aangezien men hier vaak een luwte waarneemt.

Literatuur

- Anoniem, (1971), Bootweerstand, "Roeien", officieel orgaan van de K.N.R.B., 25^e jaargang 12 mei 1971 no. 323, p 4-10.
- Bijker, E.W. (1980), Coastal engineering, Vol2, collegediktaat f11b, TH Delft.
- Francis, J.R.D. (1951), The aerodynamic drag of a free water surface. Proc. Roy. Soc. London, A 206, p 387-406.
- Hill, M.N. ed. (1962), Drag coefficients on the sea surface, The Sea, Vol. 1, p 57-66.
- Hoerner, S.F. (1965), Fluid Dynamic Drag, published by the author.
- Keulegan, G.H. (1951), Wind tides in small closed channels, Journ. of Res. of the Nat. Bureau of Standards, Vol. 46, no.5, May.
- Liggett, J.A. (1975), Lake circulation, in: Unsteady flow in open channels, Vol 2, p 879-923, (K. Mahmood and V. Yevjevich, ed.)
- Liggett, J.A. en Hadjitheodorou, C. (1969), Circulation in shallow homogenous lakes, Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., Vol. 95, no. HY2, Proc. Paper 6454, March, p 609-620.
- Liu, H. en Perez, H.J. (1971), Wind-induced circulation in shallow water, Journ. of the Hydr. Div., A.S.C.E., Vol. 97, no. HY7, Proc. Paper 8235, July, p 923-935.
- Munk, W. (1955), Wind stress on water: an hypothesis. Q.J.Roy.Met.Soc., 81, p 320-332.
- Neumann, G. en Pierson, W.J. (1966), Principles of Physical Oceanography, p 208-213 en p 412-416.
- Reid, R.O. (1957), Modification of the quadratic bottom-stress law for turbulent channel flow in the presence of surface wind-stress, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Mem. no 93.
- Sheppard, P.A. (1958), Transfer across the earth's surface and through the air above. Q.J.Roy.Met.Soc., 84, p 205-224.
- Vines, R.G. (1960), The damping of water waves by surface films. Austral.J.Phys., 13, p 43-51.
- Vreugdenhil, C.B. (1977), The formulation of wind influence in shallow water. Waterloopkundig laboratorium, Delft, S114 part V.
- Vreugdenhil, C.B. (1980), Waterloopkundige berekeningen 2. College-diktaat b85, TH Delft p 109.
- Vries, M.de, (1979), Vloeistofmechanica, concept college-diktaat b72, maart, TH Delft.

BIJLAGEN:

5.1 Het computer programma

Snelheidsverdelingen:

6.1 in het "standaard" geval

6.2 bij constant windveld

6.3 indien $z_1 = 6.7 \cdot 10^{-3}$

6.4 indien $z_1 = 0.1$

6.5 indien $z_1 = 1 \cdot 10^{-9}$

6.6 bij constant windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-4}$

6.7 bij constant windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-2}$

6.8 bij "standaard" windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-4}$

6.9 bij "standaard" windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-2}$

6.10 bij dubbele windsnelheden

6.11 bij driedubbele windsnelheden

6.12 bij een "vlakker" windveld

6.13 bij verdieping naar 3 meter

Bijlage 5.1. Het computer programma.

READY.

```

20 REM STROMING IN DE BOSBAAN
30 REM*****
31 INPUT"INVOERGEGEVENIS NAAR SCHERM OF PRINTER,S/P?";A$
32 IF A$="S" THEN D=3
33 IF A$="P" THEN D=4
34 IF A$<>"S" AND A$<>"P" THEN 31
35 OPEN 2,D
40 INPUT"RUWHEID OPP          Z1=";Z1
41 PRINT#2,"DE RUWHEID V/H OPPERVLAKE  Z1=",Z1
50 INPUT"RUWHEID BODEM        Z0=";Z0
51 PRINT#2,"DE RUWHEID V/D BODEM        Z0=",Z0
60 INPUT"V.KARMAN              K0=";K0
61 PRINT#2,"DE CONSTATE VAN V KARMAN K0=",K0
70 INPUT"DICHTHEID WATER      DI=";DI
71 PRINT#2,"DE DICHTHEID V/H WATER      DI=",DI
80 INPUT"DIEPTE                H=";H
81 PRINT#2,"DE DIEPTE VAN HET WATER      H=",H
90 INPUT"BREEDTE               B=";B
91 PRINT#2,"DE BREEDTE V/H WATER        B=",B
92 INPUT"AANTAL INTERVALLEN IN=";IN
93 PRINT#2,"AANTAL INTERVALLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS",IN
94 INPUT"MAASWIJDE             DY=";DY
95 PRINT#2,"DE MAASWIJDE DELTAY IS      DY=",DY
96 REM*****
100 REM DY IS DE MAASWIJDE EN N IS HET ANTAL MAZEN, W IS DE WINDSNELHEID, S IS
102 REM DE SCHUIFSPANNING, U DE SNELHEID (G GEMIDDELD EN R OP DE REL.HOOGTE Z/H)
103 REM M=BODEM/OPP SCHUIFSPANNING
112 REM*****
120 N=B/DY
125 Z=H/IN
130 DIM W(N), S1(N), UG(N), UR(N), M(N), A(N), B0(N), B1(N), C(N), MS(N), RM(N), Y(N)
133 PRINT#2
134 PRINT#2
140 FOR I=0 TO N-1
143 Y(I)=(I*DY)+0.5*DY
150 PRINT"GEEF DE WINDSNELHEID OP Y=";Y(I),"METER"
160 INPUT W(I)
162 IF W(I)>0 THEN 170
164 PRINT "DE WINDSNELHEID MOET POSITIEF ZIJN"
166 GOTO 150
170 NEXT I
178 CLOSE 2
180 REM*****
190 REM BEGIN VAN DE BEREKENINGEN
200 REM*****
210 R1=Z1/H
220 R0=Z0/H
230 S=K0/(LOG(4*H/Z0)-2)
240 M0=S+2*(5/(1+10*S))+8.35*SQR(S)/(1+52*S+2))↑2
244 REM *** BEREKENING TOTALE SCHUIFSPANNING ***
250 SOMS1=0
260 FOR I=0 TO N-1
270 S1(I)=1.2*(1+0.07*W(I))*10↑-3*W(I)↑2
280 SOMS1=SOMS1+S1(I)
290 NEXT I
300 REM *** BEGINSCHATTINGEN VOOR P, IT IS HET AANTAL ITERATIES ***
310 IT=0

```

```

320 P=0
330 GOSUB 611
340 P0=P
350 U0=UG
360 IF U0>0 THEN 330
370 PRINT"VERKEERDE BEGINSCHATTING VOOR P0"
380 GOTO 10000
390 P=SOMS1
400 GOSUB 611
410 P1=P
420 U1=UG
430 IF U1<0 THEN 460
440 PRINT "VERKEERDE BEGINSCHATTING VOOR P1"
450 GOTO 10000
459 REM*****
460 REM BEGIN VAN DE ITERATIE VOOR P
470 REM*****
480 IT=IT+1
490 P=(P1-P0)/(U0-U1)*U0+P0
500 IF U0<0.0001 THEN 710
505 IF U1>0.0001 THEN 710
510 REM *** GEMIDDELTE SNELHEID KLEIN GENOEG ***
520 GOSUB 611
530 IF U0<0 THEN 570
540 P0=P
550 U0=UG
560 GOTO 530
570 P1=P
580 U1=UG
585 REM PRINT "IT=";IT;" P=";P;" P0=";P0;" P1=";P1;" U0=";U0;" U1=";U1
590 IF IT > 30 THEN 710
594 REM *** "NOODSTOP" ITERATIE ***
600 GOTO 480
610 REM*****
611 REM SUB BEREKENING VAN U GEMIDDELD (UG)
612 REM*****
620 UG=0
630 FOR I=0 TO N-1
640 IF ((1+M0)*S1(I))<(H*P) THEN 670
650 U(I)=SQR((1+M0)*S1(I)-H*P)/(S*SQR(DI))
660 GOTO 680
670 U(I)=-SQR(H*P-(1+M0)*S1(I))/(S*SQR(DI))
680 UG = UG + U(I)
690 NEXT I
700 RETURN
705 REM*****
706 REM EINDE SUBROUTINE
707 REM*****
710 INPUT"UITVOER WAARDEN NAAR SCHERM OF PRINTER,S/P?";B$
710 IF B$="S" THEN D=3
710 IF B$="P" THEN D=4
740 IF B$(">"S" AND B$(">"P" THEN 710
750 OPEN 3,D
752 PRINT#3,"DE Y WAARDE IN M:","DE WINDSNELHEID IN M/S:","DE WAARDE M:"
754 PRINT#3
755 FOR I=0 TO N-1
756 M(I)=1-((H*P)/(S1(I)))
757 PRINT#3,,Y(I),,W(I),,M(I)
759 NEXT I
760 PRINT#3
762 PRINT#3,"HET AANTAL ITERATIES IS";IT
770 PRINT#3,"DE WAARDE VAN P =";P
771 PRINT#3,"DE WAARDE VAN UG =";UG
772 PRINT#3
773 PRINT#3
784 REM*****

```

```

785 REM BEREKENING SNELHEID OP HOOGTE Z
786 REM*****774
789 K0=K0*(1+R0/R1)

```

Bijlage 5.1 Vervolg

```

790 FOR I=0 TO N-1
792 Y(I)=(I*DY)+0.5*DY
794 PRINT#3,"DE SNELHEIDSVERDELING OP Y=";Y(I); "METER"
796 PRINT#3
798 PRINT#3,"DE HOOGTE Z IN M:",,"DE SNELHEID U IN M/S:"
802 FOR J=1 TO IN-1
803 GOSUB 313
804 NEXT J
806 FOR K=(IN*5-4) TO (IN*5)
807 J=K/5
808 GOSUB 313
809 NEXT K
811 PRINT#3
812 PRINT#3
813 NEXT I
814 GOTO 1106
815 REM*****
816 REM SUB BEREKENING VGL VAN REID
817 REM*****
818 R=J/IN
819 Z=R*H
820 A(I)=SQR(ABS(M(I)+(1-M(I))*R))
822 A=A(I)
830 B0(I)=SQR(ABS((1-M(I))*R0-M(I)))
832 B0=B0(I)
840 B1(I)=SQR(ABS(1+(1-M(I))*R1))
841 B1=B1(I)
843 C(I)=SQR(S1(I)/D1)/K0
845 C=C(I)
850 IF M(I)>0 THEN 938
855 REM *** DE SNELHEID BIJ NEGATIEVE M , TWEE GEVALLEN ***
860 MS(I)=SQR(ABS(M(I)))
861 MS=MS(I)
870 RM(I)=(ABS(M(I)))/(1+ABS(M(I)))
871 RM=RM(I)
881 D=B0*LOG((B0+MS)/(B0-MS))
890 E=2*B1*ATN(MS/B1)
891 IF R<RM THEN 920
900 UR(I)=C*(E-D-2*B0*ATN(A/B0)-B1*LOG((B1-A)/(B1+A)))
910 GOTO 1106
920 UR(I)=C*(E-D-B0*LOG((B0-A)/(B0+A))-2*B1*ATN(A/B1))
930 GOTO 1106
934 REM *** DE SNELHEID BIJ POSITIEVE M, 4 GEVALLEN ***
938 MS=SQR(M(I))
940 IF M(I)>R0/(1+R0) THEN 990
960 D=2*B0*(ATN(A/B0)-ATN(MS/B0))
970 E=B1*(LOG((B1-A)/(B1+A))-LOG((B1-MS)/(B1+MS)))
980 UR(I)=C*(D-E)
985 GOTO 1106
990 IF M(I)<>1 THEN 1020
1000 UR(I)=C*(LOG((R0+R)/R0)-LOG((1+R1-R)/(1+R1)))
1010 GOTO 1106
1020 IF M(I)=(1+R1)/R1 THEN 1070
1030 D=B0*LOG(((A-B0)*(MS+B0))/((A+B0)*(MS-B0)))
1040 E=B1*LOG(((A-B1)*(MS+B1))/((A+B1)*(MS-B1)))
1050 UR(I)=C*(D-E)
1060 GOTO 1106
1070 D=B0*LOG(((B0-A)*(B0+MS))/((B0+A)*(B0-MS)))
1080 E=2*B1*(ATN(A/B1)-ATN(MS/B0))
1090 UR(I)=C*(D+E)
1100 PRINT#3,,2,,UR(I)
1101 RETURN
1106 PRINT#3

```

1107 PRINT#3
1108 PRINT#3
1109 PRINT#3
1120 CLOSE3
1130 REM END
1233 REM PROGRAMMA AFDRUKKEN GAAT ALS VOLGT:
1300 REM OPEN1,4:CMD1
1310 REM LIST
1320 REM PRINT#1:CLOSE1
READY.

Bijlage 5.1 Eind.

Bijlage 6.1 Snelheidsverdeling in het "standaard" geval.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAKE Z1= 6.7E-04
 DE RUWHEID V/O BODEM Z0= 2E-03
 DE CONSTATE VAN V KARMAN K0= .4
 DE DICHTHEID V/H WATER D1= 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER H= 2
 DE BREEDTE V/H WATER B= 30
 AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDTE DELTAY IS DY= 15

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
7.5	3	-2.39962538
22.5	4	-.307710954
37.5	5	-.0969457877
52.5	6	.275784031
67.5	6	.275784031
82.5	5	-.0969457877

HET AANTAL ITERATIES IS 10
 DE WAARDE VAN P = .0222131522
 DE WAARDE VAN UG = 9.2019942E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0750170411
.8	-.0854456016
1.2	-.0914959806
1.6	-.0913036025
1.68	-.0898554629
1.76	-.0876726975
1.84	-.0843756006
1.92	-.0784601733
2	-.0354656534

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0585702445
.8	-.0648180381
1.2	-.0625881957
1.6	-.0543324416
1.68	-.0515710488
1.76	-.048001079
1.84	-.042970759
1.92	-.0344041235
2	.0243540331

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0163353275
.8	-9.09199834E-03
1.2	-4.67577461E-04
1.6	.0123362067
1.68	.0162014339

1.34
1.32
2

.0210782351
.0278065459
.0390539725
.115478412

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.3
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

.0595139011
.0728670434
.0855078384
.102501093
.107452366
.113635387
.122035449
.136086524
.230287727

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.3
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

.0595139011
.0728670434
.0855078384
.102501093
.107452366
.113635387
.122035449
.136086524
.230287727

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.3
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

-.0163858275
-3.09199834E-03
-4.67577461E-04
.0123362067
.0162014999
.0210782351
.0278065459
.0390539725
.115478412

Bijlage 6.1 Vervolg.

Bijlage 6.2 Snelheidsverdeling bij constant windveld.

DE RUWHEID V/H OPPELVAK	Z1=	6.7E-04	
DE RUWHEID V/D BODEM	Z0=	2E-03	
DE CONSTATE VAN V KARMAN	K0=	.4	
DE DICHTHEID V/H WATER	DI=	1000	
DE DIEPTE VAN HET WATER	H=	2	
DE BREEDTE V/H WATER	B=	30	
AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS			5
DE MAASWIJDTE DELTAY IS	DY=	45	

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
22.5	5	-.0370103892
67.5	5	-.0370103892

HET AANTAL ITERATIES IS 16
DE WAARDE VAN P = .0222144604
DE WAARDE VAN UG = 4.37810392E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0163982211
.8	-9.10517379E-03
1.2	-4.81067126E-04
1.6	.0123225357
1.68	.016187801
1.76	.0210645103
1.84	.0277927971
1.92	.0390402012
2	.11546467

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0163982211
.8	-9.10517379E-03
1.2	-4.81067126E-04
1.6	.0123225357
1.68	.016187801
1.76	.0210645103
1.84	.0277927971
1.92	.0390402012
2	.11546467

Bijlage 6.3 Snelheidsverdeling indien $z_1 = 6.7 \cdot 10^{-3}$.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAKE	Z1=	6.7E-03	
DE RUWHEID V/D BODEN	Z0=	2E-03	
DE CONSTATE VAN V KARMAN	K0=	.4	
DE DICHTHEID V/H WATER	D1=	1000	
DE DIEPTE VAN HET WATER	H=	2	
DE BREEDTE V/H WATER	B=	30	
AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS			5
DE MAASWIJDTE DELTAY IS	DY=	15	

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
7.5	3	-2.39962538
22.5	4	-.807710954
37.5	5	-.0969457877
52.5	6	.275784031
67.5	6	.275784031
82.5	5	-.0969457877

HET AANTAL ITERATIES IS 10
 DE WAARDE VAN P = .0222131522
 DE WAARDE VAN UG = 3.2019942E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0747822212
.8	-.0851664591
1.2	-.0911807287
1.6	-.0910769572
1.68	-.0935742078
1.76	-.0874380538
1.84	-.0842398495
1.92	-.0786276998
2	-.0557250006

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0583371908
.8	-.0646087271
1.2	-.0623941128
1.6	-.0542275584
1.68	-.0515119448
1.76	-.0480180656
1.84	-.0431383384
1.92	-.0350098677
2	-3.27564378E-03

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0163374403
.8	-9.07516800E-03
1.2	-5.0354316E-04
1.6	.0121636639
1.68	.0159649135
1.76	.0207377601
1.84	.0272647722
1.92	.037937438
2	.0788593873

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0593265574
.8	.0726224047
1.2	.0851861551
1.6	.101998875
1.68	.106868114
1.76	.112919448
1.84	.121116774
1.92	.134402689
2	.184885164

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0593265574
.8	.0726224047
1.2	.0851861551
1.6	.101998875
1.68	.106868114
1.76	.112919448
1.84	.121116774
1.92	.134402689
2	.184885164

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0163374403
.8	-9.07516800E-03
1.2	-5.0354316E-04
1.6	.0121636639
1.68	.0159649135
1.76	.0207377601
1.84	.0272647722
1.92	.037937438
2	.0788593873

Bijlage 6.4 Snelheidsverdeling indien $z_1 = 0.1$.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAK $z_1 =$.1
 DE RUWHEID V/D BODEM $z_0 =$ 2E-03
 DE CONSTATE VAN V KARMAN $K_0 =$.4
 DE DICHTHEID V/H WATER $\rho =$ 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER $H =$ 2
 DE BREEDTE V/H WATER $B =$ 30
 AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDTE DELTAY IS $\Delta y =$ 15

DE Y WAARDE IN M:

DE WINDSNELHEID IN M/S:

DE WAARDE M:

7.5	3	-2.33362538
22.5	4	-.307710354
37.5	5	-.0363457877
52.5	6	.275784031
67.5	6	.275784031
82.5	5	-.0363457877

HET AANTAL ITERATIES IS 10

DE WAARDE VAN P = .0222131522

DE WAARDE VAN UG = 9.2013342E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0713281326
.8	-.0810719025
1.2	-.0865783121
1.6	-.0865727005
1.63	-.0853770553
1.76	-.0837707134
1.84	-.0815832142
1.92	-.0784295818
2	-.0731955161

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0556943322
.8	-.061536155
1.2	-.0535332356
1.6	-.052530519
1.63	-.0503688357
1.76	-.0477403413
1.84	-.0444007111
1.92	-.0338282344
2	-.0325334266

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0156233883
.8	-8.81657414E-03
1.2	-9.85741594E-04
1.6	9.89619213E-03
1.68	.0123222638
1.76	.0165134973
1.84	.0203814015
1.92	.0269873776
2	.0364063546

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0565716514
.8	.0630401032
1.2	.0805223953
1.6	.034973671
1.68	.0988501071
1.76	.103403563
1.84	.109015358
1.92	.116493388
2	.128126393

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0565716514
.8	.0630401032
1.2	.0805223953
1.6	.034973671
1.68	.0988501071
1.76	.103403563
1.84	.109015358
1.92	.116493388
2	.128126393

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0156233883
.8	-8.81657414E-03
1.2	-9.85741594E-04
1.6	9.89619213E-03
1.68	.0123222638
1.76	.0165134973
1.84	.0203814015
1.92	.0269873776
2	.0364063546

Bijlage 6.5 Snelheidsverdeling indien $z_1 = 1 \cdot 10^{-9}$.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAKE Z1= 1E-03
 DE RUWHEID V/D BODEM Z0= 2E-03
 DE CONSTATE VAN V KARMAN K0= .4
 DE DICHTHEID V/H WATER D1= 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER H= 2
 DE BREEDTE V/H WATER B= 30
 AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDTE DELTAY IS DY= 15

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
7.5	3	-2.39362538
22.5	4	-.807710954
37.5	5	-.0963457877
52.5	6	.275784031
67.5	6	.275784031
82.5	5	-.0963457877

HET AANTAL ITERATIES IS 10

DE WAARDE VAN P = .0222131522

DE WAARDE VAN UG = 9.2019942E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0750432234
.8	-.0854767323
1.2	-.0915311505
1.6	-.0914177345
1.68	-.0898867306
1.76	-.0876987034
1.84	-.0843902405
1.92	-.0784389334
2	.0847600331

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0585906549
.8	-.0643413738
1.2	-.0626098324
1.6	-.0543440422
1.68	-.0515774668
1.76	-.0479933361
1.84	-.0429512
1.92	-.0343328292
2	.130647073

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0163912214
.8	-9.03386889E-03
1.2	-4.63541074E-04
1.6	.012355607
1.68	.0162281508
1.76	.021116711
1.84	.027868168
1.92	.0391834544
2	.320290214

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0595347903
.8	.0728943295
1.2	.0855437442
1.6	.102557314
1.68	.107517867
1.76	.113715877
1.84	.122194999
1.92	.136280508
2	.47427219

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0595347903
.8	.0728943295
1.2	.0855437442
1.6	.102557314
1.68	.107517867
1.76	.113715877
1.84	.122194999
1.92	.136280508
2	.47427219

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.0163912214
.8	-9.03386889E-03
1.2	-4.63541074E-04
1.6	.012355607
1.68	.0162281508
1.76	.021116711
1.84	.027868168
1.92	.0391834544
2	.320290214

Bijlage 6.6 Snelheidsverdeling bij constant windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-4}$.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAK	ZI=	6.7E-04	
DE RUWHEID V/D BODEM	ZO=	2E-04	
DE CONSTATE VAN V KARMAN	KO=	.4	
DE DICHTHEID V/H WATER	DI=	1000	
DE DIEPTE VAN HET WATER	H=	2	
DE BREEDTE V/H WATER	B=	30	
AANTAL INTERVALLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS			5
DE MAASWIJDTE DELTAY IS	DY=	45	

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
22.5	5	-.0569351857
67.5	5	-.0569351857

HET AANTAL ITERATIES IS 14
 DE WAARDE VAN P = .0214029375
 DE WAARDE VAN UG = 9.81070167E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0162797743
.8	-8.49464003E-03
1.2	3.38056506E-04
1.6	.013270127
1.68	.0171569242
1.76	.0220547877
1.84	.0288047456
1.92	.0400763421
2	.116583225

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0162797743
.8	-8.49464003E-03
1.2	3.38056506E-04
1.6	.013270127
1.68	.0171569242
1.76	.0220547877
1.84	.0288047456
1.92	.0400763421
2	.116583225

Bijlage 6.7 Snelheidsverdeling bij constant windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-2}$.

DE RUWHEID V/H OPPELVAK	Z1=	6.7E-04	
DE RUWHEID V/D BODEM	Z0=	.02	
DE CONSTATE VAN V KARMAN K0=		.4	
DE DICHTHEID V/H WATER	DI=	1000	
DE DIEPTE VAN HET WATER	H=	2	
DE BREEDTE V/H WATER	B=	30	
AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS			5
DE MAASWIJDTE DELTAY IS	DY=	45	

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
22.5	5	-.18337038
67.5	5	-.18337038

HET AANTAL ITERATIES IS 16
 DE WAARDE VAN P = .0240766502
 DE WAARDE VAN UG = 6.42846263E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0153353186
.8	-.0101187503
1.2	-2.03363327E-03
1.6	.0102850508
1.68	.0140683273
1.76	.0188586072
1.84	.0254863634
1.92	.03653571
2	.112304851

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0153353186
.8	-.0101187503
1.2	-2.03363327E-03
1.6	.0102850508
1.68	.0140683273
1.76	.0188586072
1.84	.0254863634
1.92	.03653571
2	.112304851

Bijlage 6.8 Snelheidsverdeling bij "standaard" windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-4}$.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAK	Z1=	6.7E-04	
DE RUWHEID V/D BODEM	Z0=	2E-04	
DE CONSTATE VAN V KARMAN	K0=	.4	
DE DICHTHEID V/H WATER	D1=	1000	
DE DIEPTE VAN HET WATER	H=	2	
DE BREEDTE V/H WATER	B=	.90	
AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS			5
DE MAASWIJDTE DELTAY IS	DY=	15	

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
7.5	3	-2.27543746
22.5	4	-.741675483
37.5	5	-.0568744859
52.5	6	.302239556
67.5	6	.302239556
82.5	5	-.0568744859

HET AANTAL ITERATIES IS 12
 DE WAARDE VAN P = .0214017083
 DE WAARDE VAN UG = 8.77967868E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.104349136
.8	-.11447741
1.2	-.120256247
1.6	-.119587635
1.68	-.118014388
1.76	-.115793575
1.84	-.112462682
1.92	-.106515024
2	-.0634586349

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0804861008
.8	-.0861547877
1.2	-.0831357654
1.6	-.0746925301
1.68	-.0719040019
1.76	-.0683083864
1.84	-.0632530488
1.92	-.0546593073
2	4.76850593E-03

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0162001136
.8	-8.47429232E-03
1.2	3.58693187E-04
1.6	.0132909327
1.68	.0121222501

1.76	.0111111301
1.84	.0220756439
1.92	.0288256243
2	.0400377422
	.116604133

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	.0863030476
.8	.100460292
1.2	.113255452
1.6	.130354621
1.68	.135324826
1.76	.141526378
1.84	.149397384
1.92	.164023035
2	.258320013

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	.0863030476
.8	.100460292
1.2	.113255452
1.6	.130354621
1.68	.135324826
1.76	.141526378
1.84	.149397384
1.92	.164023035
2	.258320013

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0162601136
.8	-8.47429232E-03
1.2	3.58633187E-04
1.6	.0132309327
1.68	.0171777561
1.76	.0220756439
1.84	.0288256243
1.92	.0400377422
2	.116604133

Bijlage 6.8 Vervolg.

Bijlage 6.9 Snelheidsverdeling bij "standaard" windveld indien $z_0 = 2 \cdot 10^{-2}$.

DE RUWHEID V.H. OPPERVLAKE	$z_1 =$	$6.7E-04$	
DE RUWHEID V.D. BODEM	$z_0 =$	$.02$	
DE CONSTATE VAN V. KARMAN	$K_0 =$	$.4$	
DE DICHTHEID V.H. WATER	$\rho =$	1000	
DE DIEPTE VAN HET WATER	$H =$	2	
DE BREEDTE V.H. WATER	$B =$	30	
AANTAL INTERVALLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS			5
DE MAASWIJDE DELTA IS	$\Delta y =$	15	

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE IN:
7.5	3	-2.68461585
22.5	4	-.35325135
37.5	5	-.188902745
52.5	6	.215073012
67.5	6	.215073012
82.5	5	-.188902745

HET AANTAL ITERATIES IS 12
 DE WAARDE VAN P = .0240752306
 DE WAARDE VAN UG = 5.20075787E-06

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.04567008
.8	-.056677265
1.2	-.063208132
1.6	-.0642962914
1.68	-.0628882755
1.76	-.0608115397
1.84	-.0576173548
1.92	-.0518186784
2	-9.26230753E-03

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.036735185
.8	-.0433130042
1.2	-.0434617036
1.6	-.0357277489
1.68	-.033051888
1.76	-.0295630463
1.84	-.0246341019
1.92	-.0161302058
2	.0425976162

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0153336387
.8	-.0101116333
1.2	-2.03217319E-03
1.6	.0102927025
1.68	.0140766083
1.76	.0188663151

1.84	.0100000000
1.82	.0254341025
2	.0366034664
	.112312617

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	.0322684481
.8	.0446277745
1.2	.0567425603
1.6	.073329376
1.68	.0781962196
1.76	.0842864341
1.84	.0926259382
1.92	.106463245
2	.133800346

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	.0322684481
.8	.0446277745
1.2	.0567425603
1.6	.073329376
1.68	.0781962196
1.76	.0842864341
1.84	.0926259382
1.92	.106463245
2	.133800346

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.0153896387
.8	-.0101116333
1.2	-2.09217313E-03
1.6	.0102327025
1.68	.0140766089
1.76	.0183663151
1.84	.0254341025
1.92	.0366034664
2	.112312617

Bijlage 6.9 Vervolg.

Bijlage 6.10 Snelheidsverdeling bij dubbele windsnelheden.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAKE ZI= 6.7E-04
 DE RUWHEID V/O BODEM ZO= 2E-03
 DE CONSTATIE VAN V KARMAN KO= .4
 DE DICHTHEID V/H WATER DI= 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER H= 2
 DE BREKING V/H WATER D= 30
 AANTAL INTERVALLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDTE DELTA Y IS DY= 15

DE Y WAARDE IN M:

DE WINDSNELHEID IN M/S:

DE WAARDE M:

7.5	6	-2.64835156
22.5	8	-.068026158
37.5	10	-.0970807744
52.5	12	.296106085
67.5	12	.296106085
82.5	10	-.0970807744

HET AANTAL ITERATIES IS 14
 DE WAARDE VAN P = .111302239
 DE WAARDE VAN UG = -4.9566811E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.17083613
.8	-.194870527
1.2	-.209123066
1.6	-.211192734
1.68	-.208078895
1.76	-.203508769
1.84	-.196439401
1.92	-.183799025
2	-.0907456172

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	-.134335944
.8	-.14921336
1.2	-.145873541
1.6	-.128010666
1.68	-.121362774
1.76	-.114124305
1.84	-.103058698
1.92	-.0841310736
2	.0468454016

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

-.0368333871
-.0204672618
-1.11265067E-03
.0276224725
.0362973523
.0472422557
.0623427224
.0875856039
.259107649

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

.139808203
.170655485
.199663687
.238498351
.249794217
.263892875
.283151445
.31504645
.529526897

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

.139808203
.170655485
.199663687
.238498351
.249794217
.263892875
.283151445
.31504645
.529526897

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:

-.0368333871
-.0204672618
-1.11265067E-03
.0276224725
.0362973523
.0472422557
.0623427224
.0875856039
.259107649

Bijlage 6.11 Snelheidsverdeling bij driedubbele windsnelheden.

DE RUWHEID V/H OPPERVLAKE Z1= 6.7E-04
 DE RUWHEID V/O BODEM Z0= 2E-03
 DE CONSTATE VAN V KARMAN K0= .4
 DE DICHTHEID V/H WATER D1= 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER H= 2
 DE BREEDTE V/H WATER B= 30
 AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDTE DELTAY IS DY= 15

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
7.5	9	-2.83360438
22.5	12	-.310291315
37.5	15	-.0973458787
52.5	18	.308763812
67.5	18	.308763812
82.5	15	-.0973458787

HET AANTAL ITERATIES IS 12
 DE WAARDE VAN P = .303630472
 DE WAARDE VAN UG = -5.50262846E-06

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.2842435
.8	-.324344264
1.2	-.348525648
1.6	-.354481391
1.68	-.349727227
1.76	-.342573143
1.84	-.33147785
1.92	-.311207291
2	-.161730731

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.4	-.224389717
.8	-.243797343
1.2	-.246123239
1.6	-.217449555
1.68	-.207653593
1.76	-.194336161
1.84	-.176954922
1.92	-.146244389
2	.0671683539

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:
-.0603533313
-.033913137
-2.0371302E-03
.0452322734
.0535810324
.0776083762
.10248135
.144061435
.426530446

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:
.236774791
.288512639
.336972255
.401682966
.420485656
.443946211
.475983253
.523025831
.885597395

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:
.236774791
.288512639
.336972255
.401682966
.420485656
.443946211
.475983253
.523025831
.885597395

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.4
.8
1.2
1.6
1.68
1.76
1.84
1.92
2

DE SNELHEID U IN M/S:
-.0603533313
-.033913137
-2.0371302E-03
.0452322734
.0535810324
.0776083762
.10248135
.144061435
.426530446

Bijlage 6.12 Snelheidsverdeling bij "vlakke" windveld.

DE RUIMTEID VAN OPPELVAK Z1= 6.7E 04
 DE RUIMTEID VAN BODEM Z0= 2E 00
 DE CONSTATE VAN V KARMAN K0= .4
 DE DICHTEID VAN WATER D1= 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER H= 2
 DE BREEDTE VAN WATER B= 30
 AANTAL INTERVALLLEN WAAROP DE SNELEID BEREKENO MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDE DELTAY IS DY= 15

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELEID IN M/S:	DE WAARDE IN:
7.5	8.1	-.237375728
22.5	8.5	-.157460726
37.5	8.7	-.0852424125
52.5	8.8	-.0658543382
67.5	8.9	-.0375433344
82.5	8.8	-.0658543382

HET AANTAL ITERATIES IS 3
 DE WAARDE VAN P = .0800305364
 DE WAARDE VAN UG = 1.20036605E 05

DE SNELEIDOVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELEID U IN M/S:
.4	-.0750000027
.6	-.0680000186
1.2	-.0556000554
1.6	-.034356336
1.68	-.0277023105
1.76	-.0193027213
1.84	7.73074163E -03
1.92	.0117278403
2	.145004366

DE SNELEIDOVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELEID U IN M/S:
.4	-.0491450607
.6	.037110353
1.2	.0217206676
1.6	1.61436256E 03
1.68	8.70330000E 03
1.76	.0176747401
1.84	.0300657241
1.92	.0503101374
2	.131034404

DE SNELHEIDOVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0305073730
.8	.0166024000
1.2	2.00073740 04
1.6	.0341211707
1.68	.0314650755
1.76	.0407301000
1.84	.0535124155
1.92	.0748700655
2	.220055405

DE SNELHEIDOVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0130263750
.8	4.27703577E-03
1.2	.0126186740
1.6	.0374411000
1.68	.0443000433
1.76	.0543245621
1.84	.0673023232
1.92	.0803018143
2	.236163751

DE SNELHEIDOVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	5.0433323E-03
.8	.0105182260
1.2	.0278040300
1.6	.053216932
1.68	.060010731
1.76	.0703750022
1.84	.0835400145
1.92	.105541684
2	.254735679

DE SNELHEIDOVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

DE SNELHEID U IN M/S:

.4	.0130263750
.8	4.27703577E-03
1.2	.0126186740
1.6	.0374411000
1.68	.0443000433
1.76	.0543245621
1.84	.0673023232
1.92	.0803018143
2	.236163751

Bijlage 6.13 Snelheidsverdeling bij verdieping naar 3 meter.

DE RUWHEID V/H OPPELVAK Z1= 1E-04
 DE RUWHEID V/D BODEM Z0= 2E-03
 DE CONSTATE VAN V KARMAN K0= .4
 DE DICHTHEID V/H WATER 01= 1000
 DE DIEPTE VAN HET WATER H= 3
 DE BREEDTE V/H WATER B= 30
 ANTAL INTERVALLEN WAAROP DE SNELHEID BEREKEND MOET WORDEN IS 5
 DE MAASWIJDE DELTAY IS DY= 15

DE Y WAARDE IN M:	DE WINDSNELHEID IN M/S:	DE WAARDE M:
7.5	3	-2.37022904
22.5	4	-.792073794
37.5	5	-.0074605688
52.5	6	.28204628
67.5	6	.28204628
82.5	5	-.0074605688

DE ANTAL ITERATIES IS 13
 DE WAARDE VAN P = .0146807177
 DE WAARDE VAN UG = 3.5381142E-05

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 7.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.6	-.0801952937
1.2	-.0905628052
1.8	-.0965553273
2.4	-.0963117528
2.52	-.0947699936
2.64	-.0925730785
2.76	-.0892572581
2.88	-.083301166
3	-.0185227161

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 22.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:	DE SNELHEID U IN M/S:
.6	-.0624360232
1.2	-.0685586848
1.8	-.0661336597
2.4	-.0578286888
2.52	-.0550557619
2.64	-.0514714032
2.76	-.0464183788
2.88	-.0377382788
3	.0500726406

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 37.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.6
1.2
1.8
2.4
2.52
2.64
2.76
2.88
3

DE SNELHEID U IN M/S:

-.0163711465
-8.35183125E-03
-2.70253884E-04
.0125800584
.0164575552
.0213506381
.02810583
.0394216429
.152453335

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 52.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.6
1.2
1.8
2.4
2.52
2.64
2.76
2.88
3

DE SNELHEID U IN M/S:

.0643592067
.0777946475
.0304829184
.107522487
.112487331
.118689249
.127171431
.141256132
.260514948

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 67.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.6
1.2
1.8
2.4
2.52
2.64
2.76
2.88
3

DE SNELHEID U IN M/S:

.0643592067
.0777946475
.0304829184
.107522487
.112487331
.118689249
.127171431
.141256132
.260514948

DE SNELHEIDSVERDELING OP Y= 82.5 METER

DE HOOGTE Z IN M:

.6
1.2
1.8
2.4
2.52
2.64
2.76
2.88
3

DE SNELHEID U IN M/S:

-.0163711465
-8.35183125E-03
-2.70253884E-04
.0125800584
.0164575552
.0213506381
.02810583
.0394216429
.152453335

