

Nadere analyse van langskrachten
op schepen in sluizen met vul-en
ledigingssystemen via hoofden,
bodem of wanden.

K. den Boer

Afstudeerrapport-tekst R 1979 01 H

Vloeistofmechanica

Afd. Civiele Techniek

Technische Hogeschool Delft

NADERE ANALYSE VAN LANGSKRACHTEN
OP SCHEPEN IN SLUIZEN MET VUL- EN
LEDIGINGSSYSTEMEN VIA HOOFDEN, BODEM
OF WANDEN

K. den Boer

Afstudeerrapport - tekst
Vakgroep Vloeistofmechanica
Afstudeerdocent lector dr ir J.P.Th. Kalkwijk
Medebeoordelaar prof. ir P.A. v.d. Velde

R 1979 01 H

Maart 1979

LIJST VAN TABELLEN

LIJST VAN FIGUREN

LIJST VAN FOTO'S

LIJST VAN SYMBOLEN

<u>1. Inleiding</u>	2
1.1 Opdracht	2
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Samenvatting	3
1.4 Conclusies en aanbevelingen	5
<u>2. Algemene beschouwing van de vergelijkingen</u>	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Vereenvoudigde vergelijkingen	7
2.3 Verdere vereenvoudiging van de vergelijkingen en beschouwing van de stamp- en dompbeweging	9
<u>3. Vergelijking van een analytische oplossing met een numerieke oplossing bepaald met TROS</u>	12
3.1 Inleiding	12
3.2 Gelineariseerde vergelijkingen	12
3.3 Analytische oplossing voor een harmonische geval	13
3.3.1 Harmonische variabelen	13
3.3.2 Oplossing voor de sectie met schip	13
3.3.3 Oplossing voor de sectie zonder schip	15
3.3.4 Oplossing voor de stamp- en dompbeweging	16
3.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip	17
3.4.1 Analytische oplossing voor sluis zonder schip	17
3.4.2 Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis zonder schip ..	18
3.4.3 Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip	19
3.4.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip	19
3.5 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip	20
3.5.1 Analytische oplossing voor sluis met flexibel schip	20

3.5.2	Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis met flexibel schip	21
3.5.3	Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip	23
3.5.4	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip	23
3.6	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip	23
3.6.1	Analytische oplossing voor sluis met star schip	23
3.6.2	Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis met star schip	24
3.6.3	Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip	25
3.6.4	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip	25
3.7	Conclusies	25
<u>4.</u>	<u>Vergelijking van een analytische oplossing met een numerieke oplossing bepaald met NEBAS</u>	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Het rekenprogramma NEBAS	27
4.2.1	Algemene beschouwing van NEBAS	27
4.2.2	Schematisatie gesloten leidingen	28
4.2.3	Voorbeeld van de berekening van een sluisvulling met NEBAS (zonder schip)	30
4.3	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip	32
4.3.1	Analytische oplossing voor sluis zonder schip	32
4.3.2	Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis zonder schip	34
4.3.3	Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip	34
4.3.4	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip	34
4.4	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip	35

4.4.1	Analytische oplossing voor sluis met flexibel schip	35
4.4.2	Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis met flexibel schip	36
4.4.3	Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip	38
4.4.4	Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip	39
4.5	Analyse van de resultaten	39
<u>5.</u>	<u>Continuïteits- en bewegingsvergelijking voor een hoofdstroom met in- of uitstroming</u>	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Afleiding van de continuïteits- en bewegingsvergelijking voor een hoofdstroom met in- of uitstroming	41
5.3	Beschouwing van de term met α	46
5.4	Beschouwing van de term met κ en bepaling van de coëfficiënt κ ..	49
5.4.1	Terugwincoëfficiënt m	49
5.4.2	Energieverlies volgens Idel'cik	50
5.4.3	Energieverlies volgens Gardel	50
5.4.4	Evenredigheidscoëfficiënt κ	52
5.5	Conclusies	53
<u>6.</u>	<u>Vergelijking starre schip theorie met flexibele schip theorie ...</u>	54
6.1	Inleiding	54
6.2	Formulering en probleemstelling	55
6.3	Vergelijking starre schip theorie met flexibele schip theorie aan de hand van perioden van staande golven bepaald met een analytische oplossing	56
6.4	Vergelijking starre schip theorie met flexibele schip theorie aan de hand van langskrachten tengevolge van translatiegolven met TROS	57
6.4.1	Vulsysteem in één hoofd	57
6.4.2	Vulsysteem in beide hoofden	58
6.5	Conclusies	60

INHOUD (vervolg)

Blz.

<u>7. Fysisch modelonderzoek</u>	62
7.1 Inleiding	62
7.2 Componenten van de langskracht tijdens het vulproces	63
7.3 Gegevens	63
7.4 Langskrachtmetingen	65
7.4.1 Beschrijving van de metingen	65
7.4.2 Meetprogramma	67
7.4.3 Meetresultaten langskrachten	70
7.4.4 Conclusies langskrachtmetingen	72
7.4.5 Vergelijking langskrachten bij puntdeuren met langskrachten bij hefdeur	74
7.5 Dwarskrachtmetingen op voorschip	75
7.5.1 Beschrijving van de metingen	75
7.5.2 Meetprogramma	76
7.5.3 Meetresultaten dwarskrachten op voorschip	76
7.5.4 Conclusies dwarskrachtmetingen op voorschip	78
7.6 Snelheidsmetingen	78
7.6.1 Beschrijving van de metingen	78
7.6.2 Meetprogramma	79
7.6.3 Meetresultaten snelheden	80
7.6.4 Conclusies snelheidsmetingen	80
<u>8. Bepaling van afvoercoëfficiënt μ, wrijvingscoëfficiënt C_f, vormweerstandscoëfficiënt C_v en Nikuradse ruwheid k</u>	81
8.1 Inleiding	81
8.2 Afvoercoëfficiënt μ	81
8.2.1 Algemene formule	81
8.2.2 Bepaling gemiddelde afvoercoëfficiënt met behulp van gegeven vultijd	82
8.2.3 Bepaling afvoercoëfficiënt met behulp van vulkarakteristieken volgens M 950	82
8.2.4 Benadering afvoercoëfficiënt	83
8.2.5 Bepaling afvoercoëfficiënt met behulp van gemeten waterstanden in model met stationaire stroming	84
8.2.6 Invloed van de afvoercoëfficiënt op de langskrachten ten gevolge van translatiegolven	85

<u>8.3 Wrijvingsweerstandscoëfficiënt C_f, vormweerstandscoëfficiënt C_v en Nikuradse ruwheid k</u>	86
8.3.1 Componenten van de langskracht in een uniforme stationaire stroming	86
8.3.2 Bepaling wrijvingsweerstandscoëfficiënt C_f	87
8.3.3 Bepaling vormweerstandscoëfficiënt C_v	89
8.3.4 Bepaling Nikuradse ruwheid k van de kolk met schip erin	92
8.3.5 Invloed C_f , C_v en k op langskracht ten gevolge van translatiegolven	93
8.3.6 Toegepaste waarden van C_f , C_v en k	94
<u>9. Vergelijking compleet modelonderzoek met "procedure TROS + vulstraal" voor Rozenburgse sluis</u>	95
9.1 Inleiding	95
9.2 Modelonderzoek M 950	95
9.3 Toepassing "procedure TROS + vulstraal" op de Rozenburgse sluis..	95
9.4 Vergelijking langskrachten volgens "procedure TROS + vulstraal" met langskrachten volgens M 950	96
<u>10. Uitbreidung van het rekenprogramma TROS</u>	99
10.2 Meerdere schepen	99
10.3 Flexibele- en starre schip theorie	99
10.4 Invloed boven- en benedenpand	100
10.5 Bodem- of wandvul- en ledigingssysteem	102
10.6 Uitvoer van het programma	102
10.7 Opmerking	102
<u>11. Voortzetting onderzoek</u>	103
11.1 Inleiding	103
11.2 Vul- en ledigingssysteem via vloer of wanden	103
11.3 Langskrachten ten gevolge van de vulstraal	103
11.4 Dichtheidsverschillen	103
11.5 Inventarisatie buitenlandse sluizen	104
11.6 "Procedure TROS + vulstraal"	104

LIJST VAN TABELLEN

- 3.1 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip
- 3.2 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip
- 3.3 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip

- 4.1 Vergelijken analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip
- 4.2 Vergelijken analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip

- 5.1 ξ_c waarden volgens Gardel

- 7.1 Afmetingen schepen
- 7.2 Meetsituaties vullen hele kolk
- 7.3 Meetsituaties vullen grote deelkolk
- 7.4 Dwarskrachten op voorzijde "Groot Rijnschip" voor situatie t_{13}

- 8.1 Gegevens meetsituaties waterstanden en afvoercoëfficiënten
- 8.2 Gegevens meetsituaties vorm- en wrijvingsweerstand
- 8.3 Waarden van correctiefactor η

LIJST VAN FIGUREN

- 4.1 Waterstanden in kolk op verschillende tijdstippen. Voorbeeld sluisvulling NEBAS
- 4.2 Bodemvuldebieten op verschillende tijdstippen. Voorbeeld sluisvulling NEBAS
- 4.3 Staande golf in sluiskolk volgens NEBAS. Geen schip in de kolk.
- 4.4 Staande golf in sluiskolk volgens NEBAS. Flexibel schip in de kolk.
- 4.5 Waterstand in $x = 0$ als functie van de tijd volgens NEBAS. Flexibel schip in de kolk
- 4.6 Waterstand in $x = 115$ m als functie van de tijd volgens NEBAS. Flexibel schip in de kolk
- 4.7 Staande golf in sluiskolk volgens NEBAS. Flexibel schip in de kolk
 $dt = 2,0370$ s
- 4.8 Staande golf in sluiskolk volgens NEBAS. Flexibel schip in de kolk
 $dt = 0,4074$ s

- 5.1 Regaincoëfficiënt als functie van Q_z/Q_2

- 6.1 Vergelijken flexibel met star schip aan de hand van harmonische oplossingen. Duwboot + 2 bakken
- 6.2 Vergelijken flexibel met star schip aan de hand van harmonische oplossingen. Duwboot + 4 bakken
- 6.3 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip.
 $2 l_k / 2 l = 2,16$
- 6.4 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
 $2 l_k / 2 l = 2,56$
- 6.5 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
 $2 l_k / 2 l = 6,00$
- 6.6 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
 $2 l_k / 2 l = 3,01$
- 6.7 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
 $2 l_k / 2 l = 3,01$
- 6.8 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
Vullen door beide deuren. $Q_{links} = - Q_{rechts}$
 $l_k / 2 l = 1,34$
- 6.9 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
Vullen door beide deuren
 $l_k / 2 l = 1,34$

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 6.10 Vergelijking langskrachten op flexibel en star schip
Vullen door beide deuren
 $l_k/2 \approx 2,29$
- 7.1 Situatie Rozenburgse sluis
7.2 Vormgeving schutsluis Rozenburg
7.3 Aanbevolen deurontwerp Rozenburgse sluis
7.4 Globale afmetingen modelschepen
7.5 Vulkarakteristieken Rozenburgse sluis, hele kolk volgens M 950
7.6 Vulkarakteristieken Rozenburgse sluis, grote deelkolk volgens M 950
7.7 Meetopstelling goot II, zout-zoethal
7.8 Opstelling voor het statisch meten van langskrachten
7.9 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $t = 1,02 \text{ min}$ en $t = 1,88 \text{ min}$
- 7.10 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $t = 4,22 \text{ min.}$
- 7.11 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $t = 5,90 \text{ min.}$
- 7.12 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $t = 7,98 \text{ min.}$
- 7.13 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $t = 9,99 \text{ min.}, t = 12,05 \text{ min. en } t = 14,00 \text{ min.}$
- 7.14 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $t = 1,08 \text{ min.}, t = 2,00 \text{ min. en } t = 3,70 \text{ min.}$

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 7.15 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $t = 1,08 \text{ min.}, t = 2,00 \text{ min. en } t = 3,70 \text{ min.}$
- 7.15 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$
- 7.16 Langskrachten tengevolge van straal als functie van a
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $t = 6,50 \text{ min.}, t = 8,10 \text{ min. en } t = 9,50 \text{ min.}$
- 7.17 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 3,60 \text{ m} \dots$
- 7.18 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 7,20 \text{ m} \dots$
- 7.19 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 10,40 \text{ m} \dots$
- 7.20 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 12,80 \text{ m} \dots$
- 7.21 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 16,00 \text{ m} \dots$
- 7.22 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 19,60 \text{ m en } a = 30,00 \text{ m} \dots$

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 7.23 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 40,00 \text{ m}$ en $a = 60,00 \text{ m} \dots$
- 7.24 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 2 bakken
Vullen hele kolk
 $a = 120,00 \text{ m} \dots$
- 7.25 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $a = 160 \text{ m}$ en $a = 3,60 \text{ m} \dots$
- 7.26 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $a = 7,20 \text{ m}$ en $a = 10,40 \text{ m} \dots$
- 7.27 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $a = 12,80 \text{ m}$ en $a = 16,00 \text{ m} \dots$
- 7.28 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $a = 19,60 \text{ m}$ en $a = 30,00 \text{ m} \dots$
- 7.29 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $a = 40,00 \text{ m}$ en $a = 60,00 \text{ m} \dots$
- 7.30 Langskrachten tengevolge van straal als functie van t
Duwboot + 4 bakken
Vullen grote deelkolk
 $a = 120,00 \text{ m} \dots$
- 7.31 Langskracht tengevolge van straal als functie van a
Groot Rijnschip in midden kolk
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 7.32 Langskracht tengevolge van straal als functie van a
Groot Rijnschip op 0,40 m vanaf wand
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min.
- 7.33 Snelheidsverticalen; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min.
- 7.34 Horizontale snelheidsverdelingen; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min. $z = 0,60$ m
- 7.35 Horizontale snelheidsverdelingen; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min. $z = 1,20$ m
- 7.36 Horizontale snelheidsverdelingen; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min. $z = 2,00$ m
- 7.37 Horizontale snelheidsverdelingen; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min. $z = 3,00$ m
- 7.38 Horizontale snelheidsverdeling; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min. $z = 5,00$ m
- 7.39 Horizontale snelheidsverdeling; zonder schip
Met en zonder breekbalken
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min. $z = 6,60$ m
- 7.40 Snelheidsverticalen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90$ min.

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 7.41 Horizontale snelheidsverdelingen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$ $z = 0,60 \text{ m}$
- 7.42 Horizontale snelheidsverdelingen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$ $z = 1,20 \text{ m}$
- 7.43 Horizontale snelheidsverdelingen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$ $z = 2,00 \text{ m}$
- 7.44 Horizontale snelheidsverdelingen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$ $z = 3,00 \text{ m}$
- 7.45 Horizontale snelheidsverdelingen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$ $z = 5,00 \text{ m}$
- 7.46 Horizontale snelheidsverdelingen; met breekbalken
Met en zonder schip
Vullen grote deelkolk
 $t = 4,90 \text{ min.}$ $z = 6,60 \text{ m}$
- 8.1 Vulkarakteristieken Rozenburgse sluis, hele kolk
Variërende μ
- 8.2 Vulkarakteristieken Rozenburgse sluis, grote deelkolk
Variërende μ
- 8.3 Vergelijking langskrachten tengevolge van translatiegolven op duwboot
+ 4 bakken met constante en variërende afvoercoëfficiënt. Hele kolk
- 8.4 Vergelijking langskrachten tengevolge van translatiegolven op duwboot
+ 4 bakken met constante en variërende afvoercoëfficiënt.
Grote deelkolk
- 8.5 Vergelijking langskrachten tengevolge van translatiegolven op duwboot
+ 4 bakken met C_f en C_v minimaal en C_f en C_v maximaal

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 8.6 Vergelijking langskrachten tengevolge van translatiegolven op duwboot
+ 4 bakken met $k = 10^{-2}$ m en $k = 10^{-7}$ m
- 9.1 Langskrachtregistratie volgens M 950
- 9.2 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge
van straal op duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 3,6$ m
- 9.3 Vergelijken langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op
duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 3,6$ m
- 9.4 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge
van straal op duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 7,13$ m
- 9.5 Vergelijken langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op
duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 7,13$ m
- 9.6 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge
van straal op duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 171,22$ m
- 9.7 Vergelijken langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot
+ 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 171,22$ m
- 9.8 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge
van straal op duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 222,99$ m
- 9.9 Vergelijken langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op
duwboot + 2 bakken. Vullen hele kolk
 $a = 222,99$ m
- 9.10 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge
van straal op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 3,6$ m
- 9.11 Vergelijking langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot
+ 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 3,6$ m
- 9.12 Vergelijking langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot
+ 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 3,6$ m

LIJST VAN FIGUREN (vervolg)

- 9.13 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge van straal op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 12,84 \text{ m}$
- 9.14 Vergelijking langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 12,84 \text{ m}$
- 9.15 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge van straal op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 19,79 \text{ m}$
- 9.16 Vergelijking langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 19,79 \text{ m}$
- 9.17 Langskracht tengevolge van translatiegolven en langskracht tengevolge van straal op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 40,71 \text{ m}$
- 9.18 Vergelijking langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 40,71 \text{ m}$
- 9.19 Vergelijking langskracht TROS + straal met langskracht M 950 op duwboot + 4 bakken. Vullen grote deelkolk
 $a = 40,71 \text{ m}$

LIJST VAN FOTO'S

- Foto 1 Uitstroomzijde deuren met schuiven
Foto 2 Instroomzijde deuren met schuiven
Foto 3 Uitstroomzijde deuropeningen met breekbalken
Foto 4 Uitstroomzijde deuropeningen zonder breekbalken
Foto 5 Langskrachtmeting op duwboot + twee bakken
Foto 6 Detail langskrachtmeting op duwboot + twee bakken
Foto 7 Langskrachtmeting op "Groot Rijnschip"
Foto 8 Detail langskrachtmeting op "Groot Rijnschip"

LIJST VAN SYMBOLEN

a	afstand bovendeur tot boeg schip	[m]
A	natte doorsnede	[m ²]
A _d	oppervlakte van de schuifopeningen	[m ²]
A _z	natte doorsnede van de zijtak	[m ²]
b	breedte	[m]
b _z	breedte van de zijtak	[m]
c	voortplantsingssnelheid van translatiegolven	[m/s]
C	ruwheidscoëfficiënt volgens Chézy	[m ^½ /s]
C _i	met i = 1, 2, ..., 6 : integratieconstante	[—]
C _f	coëfficiënt voor de wrijvingsweerstand van het schip	[—]
C _v	coëfficiënt voor de vormweerstand van het schip	[—]
dr	drempelhoogte	[m]
e	diepgang van het schip	[m]
ΔE	energieverlies	[m]
F	oppervlakte	[m ²]
F	langskracht ten gevolge van translatiegolven	[N]
F' _f	langskracht ten gevolge van wrijving langs de scheepshuid	[—]
F' _r	langskracht gemeten in situatie zonder deur	[—]
F' _v	langskracht ten gevolge van de vormweerstand van het schip	[—]
F' _w	langskracht ten gevolge van wrijving langs kolkwanden en vloer	[—]
F' _x	langskracht in x-richting	[—]
F' _y	langskracht in y-richting	[—]
g	versnelling ten gevolge van de zwaartekracht	[m/s ²]
g ₁	constante	[—]
g ₂	constante	[—]
h	waterdiepte	[m]

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

Δh	waterstandsverschil	[m]
h_b	waterstand bij de boeg van het schip	[m]
h_{be}	waterstand in de kolk bij het benedenhoofd	[m]
h_{bo}	waterstand in de kolk bij het bovenhoofd	[m]
h_h	waterstand bij het hek van het schip	[m]
h_m	waterstand in het midden van de kolk	[m]
h_o	benedenwaterstand	[m]
h_1	waterstand ter plaatse van peilnaald 1	[m]
h_2	waterstand ter plaatse van peilnaald 2	[m]
h_3	waterstand ter plaatse van peilnaald 3	[m]
H	hefhoogte schuiven	[m]
i	wortel uit -1	[-]
i	helling van de waterspiegel	[-]
k	Nikuradse ruwheid	[m]
K	golfgetal	[rad/m]
l	halve lengte van het schip	[m]
L	halve lengte van de kolk	[m]
l_{12}	lengte van vuldeur tot boeg schip	[m]
l_{56}	lengte van hek schip tot ledigdeur	[m]
l_k	lengte kolk	[m]
m	regaincoëfficiënt	[-]
n	schaalfactor	[-]
n	natuurlijk getal	[-]
o	natte omtrek	[m]
Q	debiet	$[m^3/s]$
Q_1	debiet in hoofdstroom voor instroming zijtak	$[m^3/s]$
Q_2	debiet in hoofdstroom na instroming zijtak	$[m^3/s]$

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

Q_z	debiet in zijtak	$[m^3/s]$
q_z	debiet in zijtak per eenheid van lengte	$[m^2/s]$
R	hydraulische straal	$[m]$
Re	getal van Reynolds	$[-]$
s	verticale translatie van het schip	$[m]$
S	ontwikkelde natte oppervlak van het schip	$[m^2]$
t	tijd	$[s]$
dt	tijdstapgrootte	$[s]$
t_{ev}	vultijd van de sluis	$[s]$
t_H	heftijd van de schuiven	$[s]$
T	periode	$[s]$
T_{10}	tijdstip waarop verval nog 0,10 m is	$[s]$
v	snelheid van het water	$[m/s]$
V	waterverplaatsing van het schip	$[m^3]$
x	ruimtelijke coördinaat	$[m]$
Δx	stapgrootte in x-richting	$[m]$
y	ruimtelijke coördinaat	$[m]$
z	ruimtelijke coördinaat	$[m]$
z_o	waterstand bovenstrooms van de sluis	$[m]$

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg) (Griekse letters)

α	hoek tussen stromingsrichting van de hoofdstroom en de zijstroom	[rad]
γ	helling van het schip	[rad]
δ	grenslaagdikte	[m]
η	correctiefactor voor de vormweerstand	[I-I]
$\hat{\eta}$	golfamplitude	[m]
κ	coëfficiënt	[I-I]
λ	golflengte	[m]
μ	afvoercoëfficiënt	[I-I]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ξ_c	energieverliescoëfficiënt	[I-I]
ρ	dichtheid van water	[kg/m ³]
ω	hoekfrequentie	[rad/s]

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg) (indices)

.. ^h	harmonische grootheid
.. ⁺	grootheid ter plaatse van de overgang in de sectie met schip
.. ⁻	grootheid ter plaatse van de overgang in de sectie zonder schip
.. ^k	grootheid betrekking hebbend op kolk
.. ^s	grootheid betrekking hebbend op schip
..'	dimensieloze grootheid
..̄	gemiddelde grootheid
.. _{max}	maximale waarde van de grootheid
.. _{min}	minimale waarde van de grootheid
.. _o	grootheid in rust situatie
.. _{bo}	bovenhoofd of bovenpand
.. _{be}	benedenhoofd of benedenpand



1. Inleiding

1.1 Opdracht

In de eindstudie van de richting Civiele Techniek, afstudeerrichting Vloeistofmechanica, is als afstudeerwerk een nadere analyse van langskrachten op schepen in sluizen met vul- en ledigingssystemen via hoofden, bodem of wanden uitgevoerd. Het onderzoek is verricht in de periode maart 1978 tot maart 1979. Het onderzoek is begeleid door lector dr. ir. J.P.Th. Kalkwijk en is mede beoordeeld door prof. ir. P.A. v.d. Velde.

Het onderzoek is verricht in het kader van het Toegepast Onderzoek van de Waterstaat (TOW) betreffende kunstwerken in het Waterloopkundig Laboratorium te Delft. Dit rapport verschijnt ook als rapport R 1222/M 1481-II bij het Waterloopkundig Laboratorium.

1.2 Probleemstelling

Tijdens het schutproces van een sluis worden op de schepen in de kolk krachten uitgeoefend, welke in hoge mate bepaald worden door de waterbeweging in de sluiskolk. De krachten in langsrichting bestaan uit een aantal componenten tengevolge van translatiegolven en bovendien bij vullen via openingen in de deuren uit een aantal componenten, veroorzaakt door de vulstraal.

In 1977 is een rekenprogramma TROS ontwikkeld, waarmee voor sluizen met een langs vul- en ledigingssysteem in de hoofden de langskracht ten gevolge van translatiegolven op één schip in de kolk berekend kan worden, zie Bosma [4] en Stelling [14]. Voor het ledigen van een dergelijke sluis kan de totale langskracht op één schip in de kolk dus met het rekenprogramma TROS bepaald worden.

De tijdens het vulproces optredende langskrachten tengevolge van de vulstraal kunnen in een model met een stationaire stroming bepaald worden. Deze langskrachten opgeteld bij de langskrachten tengevolge van translatiegolven tijdens het vulproces, berekend met TROS, geven de totale langskrachten tijdens het vulproces.

Deze procedure (in dit rapport aangeduid met "procedure TROS + vulstraal") om de totale langskracht tijdens vullen te bepalen is in Bosma [4] toegepast op de sluis te Wijk bij Duurstede. In deze sluis bevinden zich hefdeuren. Een doelstelling van deze studie is de toepassing van deze procedure op een sluis met puntdeuren en een vergelijking van langskrachten be-

paald volgens deze procedure met langskrachten gemeten in een vorig model-onderzoek.

Het huidige rekenprogramma TROS is niet geschikt voor het bepalen van langskrachten op schepen in sluizen met een vul- en ledigingssysteem via bodem of wanden. Een volgende doelstelling van deze studie is te onderzoeken of het rekenprogramma NEBAS geschikt is voor het bepalen van langskrachten op schepen in dergelijke sluizen. Het programma NEBAS is ontwikkeld om de waterbeweging in open kanalen te bepalen.

Een doelstelling is meer inzicht te verkrijgen in de ondiepwater- en de scheepsbewegingsvergelijkingen en een idee te krijgen van nauwkeurigheden. Voor dit laatste zijn waterstanden, bepaald met een analytische oplossing, die een staande golf in een afgesloten kolk voorstelt, vergeleken met waterstanden bepaald met een numerieke oplossing volgens TROS en NEBAS. Hierbij zij opgemerkt dat zowel de analytische als de numerieke oplossingen hun eigen beperkingen hebben, zodat deze vergelijking niet te zien is als een echte controle.

Omdat in berekeningen met NEBAS de schepen als flexibel worden aangenomen, is een van de doelstellingen van deze studie te onderzoeken of deze aanname van flexibele schepen niet tot te grote onnauwkeurigheden leidt.

Een volgende doelstelling van dit onderzoek is het programma TROS zodanig uit te breiden, dat het in de nabije toekomst zo goed mogelijk bruikbaar is voor allerlei typen sluizen en schepen. Enkele punten, waarvoor het programma uitgebreid gaat worden zijn: sluizen met vul- en ledigingssystemen via bodem of wanden, meerdere schepen in de kolk, invloed van het boven- en benedenpand, starre en flexibele schepen, enz.

1.3 Samenvatting

In hoofdstuk 2 worden in vereenvoudigde vorm de vier vergelijkingen gegeven, afgeleid door Kalkwijk [9], waarmee de water- en scheepsbewegingen in een sluiskolk beschreven kunnen worden. Onder de aanname dat de waterstand en het debiet te splitsen zijn in een deel, onafhankelijk van de scheepsbewegingen en een deel, bepaald door de scheepsbewegingen, wordt getracht meer inzicht te verkrijgen in het stelsel van vier vergelijkingen. In dit hoofdstuk wordt tevens een uitdrukking gegeven, waarmee de langskracht tengevolge van translatiegolyen berekend kan worden, als de oplossing van het stelsel vergelijkingen bekend is.

In hoofdstuk 3 wordt onder verwaarlozing van de convectieve term en de wrijvingsterm in de waterbewegingsvergelijking een analytische oplossing bepaald. Deze oplossing stelt een staande golf voor in een kolk, waar geen debiet in- of uitstroomt. Waterstanden bepaald met de analytische oplossing worden vergeleken met waterstanden bepaald met een numerieke oplossing volgens TROS. Er wordt bij de analytische oplossing aangenomen dat ter plaatse van de overgangen van de kolksecties zonder schip naar de kolksectie met schip geen discontinuïteiten in waterstanden en debieten optreden.

In hoofdstuk 4 wordt een analytische oplossing, die een staande golf voorstelt, vergeleken met een numerieke oplossing, bepaald met NEBAS. Hierbij wordt ook aangenomen dat in waterstanden en debieten geen discontinuïteiten optreden ter plaatse van de overgangen.

In hoofdstuk 5 worden de continuïteits- en bewegingsvergelijkingen afgeleid van een hoofdstroom, waarin zijdelingse instroming plaatsvindt. Ten gevolge van de instroming blijken twee extra termen in de bewegingsvergelijking van de hoofdstroom te komen, die zonder instroming niet in deze vergelijking voorkomen. Met deze twee extra termen wordt in NEBAS geen rekening gehouden. Dit is van belang in verband met het onderzoek of NEBAS geschikt is voor het bepalen van langskrachten op schepen in sluizen met vul- en ledigingssystemen via bodem of wanden, waarbij tijdens het vullen een debiet in de kolk stroomt. In hoofdstuk 6 wordt de starre schip theorie vergeleken met de flexibele schip theorie aan de hand van perioden van staande golven, bepaald met een analytische oplossing en aan de hand van langskrachten ten gevolge van translatiegolven, bepaald met TROS. Dit is van belang in verband met het onderzoek naar de geschiktheid van NEBAS voor het bepalen van langskrachten, omdat in berekeningen met NEBAS het schip als flexibel wordt beschouwd en in verband met het berekenen van langskrachten op duwkonvooien.

In hoofdstuk 7 wordt een verslag gegeven van het modelonderzoek met een stationaire stroming, aan de hand waarvan de langskrachten, veroorzaakt door de vulstraal, tijdens het vulproces van de Rozenburgse sluis worden bepaald.

In hoofdstuk 8 wordt een viertal coëfficiënten bepaald met behulp van het modelonderzoek. Deze coëfficiënten zijn nodig voor de berekening van de langskrachten ten gevolge van translatiegolven op een schip in de Rozenburgse sluis, met het rekenprogramma TROS.

In hoofdstuk 9 worden totale langskrachten op een schip tijdens het vulproces van de Rozenburgse sluis, bepaald met de "procedure TROS + vulstraal", vergeleken met in een model van de complete Rozenburgse sluis gemeten totale langskrachten.

In hoofdstuk 10 worden enkele punten genoemd, waarmee het programma TROS zal

worden uitgebreid.

In hoofdstuk 11 tenslotte wordt aangegeven welke punten nader onderzoek vragen.

1.4 Conclusies en aanbevelingen

De voornaamste conclusies, waartoe het onderzoek heeft geleid, zijn:

- De verschillen in waterstanden bepaald met een analytische oplossing en een numerieke oplossing volgens TROS, die een staande golf voorstelt zijn gering, nadat enkele perioden zijn doorgerekend.
- De verschillen in waterstanden bepaald met een analytische oplossing en een numerieke oplossing volgens NEBAS, die een staande golf voorstelt zijn gering, nadat enkele perioden zijn doorgerekend.
- In de bewegingsvergelijking, die de waterbeweging beschrijft in een sluis-kolk, waar via de bodem of de wanden een debiet in- of uitstroomt, komen twee extra termen. Een van deze termen bevat de coëfficiënt κ , die bepaald kan worden als de energieverliezen in de kolk ten gevolge van de in- of uitstroming bekend zijn. Deze coëfficiënt blijkt erg klein te zijn en daarom kan de term met κ verwaarloosd worden. De andere extra term in de bewegingsvergelijking wordt in het rekenprogramma NEBAS evenmin opgenomen. Het is nauwkeuriger dit wel te doen. Daarom zal bij uitbreiding van het programma TROS deze term in de bewegingsvergelijking worden opgenomen.
- De verschillen in perioden van de staande golven volgens de analytische oplossing bepaald met de starre schip theorie en de flexibele schip theorie zijn voor de eerste harmonische (dan is de verhouding golflengte: schip-lengte $\lambda : 2 l > 2$) gering. Voor hogere harmonischen treden grotere verschillen op in de perioden.
- Als de voor de langskracht belangrijkste golf een lengte heeft van twee maal de sluislengte (dan is $\lambda : 2 l > 2$), dan zijn de verschillen in langskrachten ten gevolge van translatiegolven bepaald met de starre schip theorie en de flexibele schip theorie gering. Wanneer kortere golven voor de langskracht het belangrijkste zijn, wordt de langskracht ten gevolge van translatiegolven met de flexibele schip theorie niet goed weergegeven.

- Bij sluizen met vul- en ledigingssystemen via de bodem of de wanden, kunnen de voor de langskrachten belangrijkste golven een lengte hebben, die kleiner of gelijk is aan de kolk lengte. In berekeningen met NEBAS betreffende dergelijke sluizen wordt het schip als flexibel beschouwd. Het rekenprogramma NEBAS is daarom minder geschikt voor het bepalen van langskrachten op schepen in sluizen met vul- en ledigingssystemen via de bodem of de wanden. NEBAS kan wel gebruikt worden voor het verkrijgen van een eerste indruk van de langskrachten.

Opgemerkt zij dat in het onderzoek naar de geschiktheid van NEBAS het riolen-systeem buiten beschouwing is gebleven.

- De afvoercoëfficiënt μ blijkt te variëren tijdens het schutproces. In het rekenprogramma TROS kan deze variërende μ worden ingevoerd als functie van de tijd. De langskracht ten gevolge van translatiegolven wordt met deze variërende μ beter weergegeven dan met een tijdens het schutproces constante gemiddelde afvoercoëfficiënt.
- De invloed van de Nikuradse ruwheid k van de kolk met het schip erin op de langskracht ten gevolge van translatiegolven, blijkt gering te zijn.
- Uit de vergelijking van de totale langskrachten op een schip in de Rozenburgse sluis, bepaald door de langskrachten ten gevolge van translatiegolven (berekend met TROS) op te tellen bij de langskrachten ten gevolge van de vulstraal (bepaald in een modelonderzoek met stationaire stroming) met totale langskrachten, gemeten in een modelonderzoek van de complete Rozenburgse sluis, blijkt dat
 - de "perioden" van de langskrachten goed overeenstemmen.
 - de vorm van de grafieken van de langskrachten goed overeenstemt.
 - bij kleine afstanden a van de deuren tot de boeg van het schip verschillen in de grootte van de langskrachten optreden.
 - de maximale en minimale waarden van de langskrachten redelijk worden weergegeven.

De verschillen in de langskrachten kunnen voor een deel verklaard worden uit het feit dat de vormgeving van de deuren in de beide modellen niet volledig overeenstemde. Dit blijkt uit de verschillen in de waarden van de afvoer-coëfficiënt μ .

2. Algemene beschouwing van de vergelijkingen

2.1 Inleiding

Uitgangspunt is dat in een sluiskolk de waterbeweging en de damp- en stampbeweging van het schip beschreven kunnen worden door een vereenvoudigde vorm van de vergelijkingen, zoals die door Kalkwijk [9] zijn afgeleid. De afleiding van de vereenvoudigde vergelijkingen is beschreven in Bosma [4]. Getracht wordt meer inzicht te krijgen in dit stelsel vergelijkingen, waarbij de convectieterm in de waterbewegingsvergelijking wordt verwaarloosd. De damp- en stampbeweging blijken bepaald te worden door h^* en Q^* ter plaatse van de overgangen van de secties zonder schip naar de sectie met schip.

2.2 Vereenvoudigde vergelijkingen

Het hierboven genoemde stelsel van vier vergelijkingen bestaat uit de

continuiteitsvergelijking

$$(b_k - b_s) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \left(\frac{ds}{dt} + x \frac{dy}{dt} \right) = 0 \quad (2.01)$$

de waterbewegingsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_k - A_s} \right) + g (A_k - A_s) \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{c^2 (A_k - A_s) R} = 0 \quad (2.02)$$

de dampvergelijking

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{g b_s 21}{V} s = \frac{g b_s}{V} \int_{-1}^{+1} h dx \quad (2.03)$$

de stampvergelijking

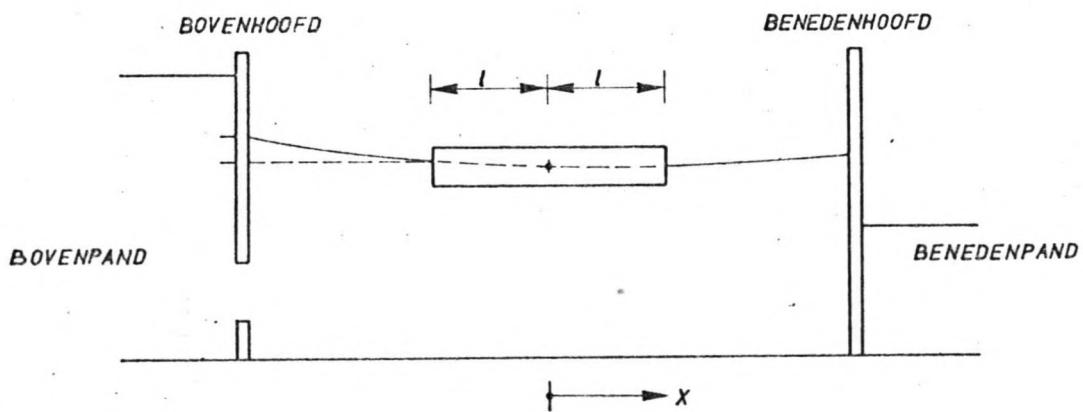
$$\frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \frac{g b_s 21}{V} \gamma = \frac{3 g b_s}{V 1^2} \int_{-1}^{+1} x h dx \quad (2.04)$$

In (2.01 t/m (2.04) is

- b_k breedte kolk
 b_s breedte schip
 h waterstand ten opzichte van stilwaterniveau
 Q debiet
 s verticale translatie van het schip ten opzichte van stilwaterniveau
 γ helling van het schip ten opzichte van de x -as
 x coördinaat in richting van sluisas
 t tijd
 g versnelling ten gevolge van de zwaartekracht
 A_k natte doorsnede kolk
 A_s natte doorsnede schip
 V volume van het door het schip verplaatste water
 $2l$ lengte schip
 C Chézy coëfficiënt
 R hydraulische straal

Index s slaat op schip, k op kolk.

De oorsprong van de x -as is genomen ter hoogte van het midden van het schip,
zie de figuur.



Bij de afleiding van (2.01) t/m (2.04) is het schip als star beschouwd.
(Het schip vervormt dan niet.)

Als de oplossing van dit stelsel van vier vergelijkingen bekend is, kan de langskracht ten gevolge van translatiegolven berekend worden met

$$F_x = - \rho g b_s \gamma \left[(e_o - s) 2l + \int_a^{a+2l} h dx \right] + \\ + \frac{1}{2} \frac{\rho g}{b_s} \left(A_{sb}^2 - A_{sh}^2 \right) + \\ + C_f \frac{1}{2} \rho \bar{v}_s |\bar{v}_s| s + C_v \frac{1}{2} \rho v_k |v_k| A_s$$

Hierin is

- F_x langskracht (positief in benedenstroomse richting)
 e_o diepgang schip in rustsituatie
 A_{sb} natte doorsnede schip ter plaatse van de boeg
 A_{sh} natte doorsnede schip ter plaatse van het hek
 C_f coëfficiënt voor de wrijvingsweerstand van het schip
 C_v coëfficiënt voor de vormweerstand van het schip
 \bar{v}_s gemiddelde snelheid ter plaatse van het schip
 v_k snelheid ter plaatse van de boeg van het schip, in de sectie zonder schip
 S ontwikkelde natte oppervlak van het schip
 $S = 2l (b_s + 2e)$
 e diepgang schip

Voor de bepaling van deze formule wordt verwezen naar Kalkwijk [9] en Bosma [4]. Voor het numeriek oplossen van het stelsel vergelijkingen en de bepaling van F_x is het rekenprogramma TROS ontwikkeld, zie Stelling [14].

2.3 Verdere vereenvoudiging van de vergelijkingen en beschouwing van de stamp- en dompbeweging

Om meer inzicht in het stelsel vergelijkingen te verkrijgen, wordt verondersteld dat de waterstand h en het debiet Q te splitsen zijn in een deel dat onafhankelijk is van de stamp- en dompbeweging s en γ van het schip en in een deel dat juist bepaald wordt door s en γ :

$$h(x, t) = h^*(x, t) - \frac{b_s}{(b_k - b_s)} [s(t) + x \gamma(t)] \quad (2.05)$$

$$Q(x, t) = Q^*(x, t) + \int_0^t g \frac{(A_k - A_s)}{(b_k - b_s)} b_s \gamma(t) dt \quad (2.06)$$

Substitutie in (2.01) t/m (2.04) geeft met verwaarlozing van de convectieterm

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_k - A_s} \right)$$

en de wrijvingsterm

$$g \frac{Q|Q|}{C^2 (A_k - A_s) R}$$

in de waterbewegingsvergelijking voor de
continuiteitsvergelijking

$$\frac{\partial Q^*}{\partial x} + (b_k - b_s) \frac{\partial h^*}{\partial t} = 0 \quad (2.07)$$

bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t} + g (A_k - A_s) \frac{\partial h^*}{\partial x} = 0 \quad (2.08)$$

dompvergelijking

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} s = \frac{g b_s}{21 A_s} \int_{-1}^{+1} h^*(x, t) dx \quad (2.09)$$

stampvergelijking

$$\frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} \gamma = \frac{3 g b_s}{21 A_s} \int_{-1}^{+1} h^*(x, t) dx \quad (2.10)$$

Differentiëren van (2.09) geeft

$$\frac{d^3 s}{dt^3} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} \frac{ds}{dt} = \frac{g b_s}{21 A_s} \int_{-1}^{+1} \frac{dh^*}{dt} dx$$

Met behulp van (2.07) wordt dit

$$\begin{aligned} \frac{d^3 s}{dt^3} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} \frac{ds}{dt} &= \frac{g b_s}{21 A_s} \int_{-1}^{+1} \frac{-1}{(b_k - b_s)} \frac{\partial Q^*}{\partial x} dx \\ \frac{d^3 s}{dt^3} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} \frac{ds}{dt} &= \frac{-g b_s}{21 A_s (b_k - b_s)} [Q^*(-1, t) - Q^*(1, t)] \end{aligned} \quad (2.11)$$

s wordt dus bepaald door Q^* ter plaatse van de overgangen van de sectie met schip naar de sectie zonder schip.

Differentiëren van (2.10) geeft met gebruik van (2.07)

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \gamma}{dt^3} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} \frac{d\gamma}{dt} &= - \frac{3 g b_s}{21 A_s (b_k - b_s)} [1 Q^*(1, t) + \\ + 1 Q^*(-1, t)] &+ \frac{3 g b_s}{21 A_s (b_k - b_s)} \int_{-1}^{+1} Q^*(x, t) dx \end{aligned}$$

Nogmaals differentiëren geeft met (2.08)

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \gamma}{dt^4} + \frac{g b_k b_s}{A_s (b_k - b_s)} \frac{d^2 \gamma}{dt^2} &= - \frac{3 g b_s}{21 A_s (b_k - b_s)} \frac{1}{t} \left[\frac{dQ^*(1, t)}{dt} \right. \\ \left. + \frac{dQ^*(-1, t)}{dt} \right] &+ \frac{3 g b_s}{21 A_s (b_k - b_s)} \frac{g (A_k - A_s)}{t} \left[h^*(1, t) - h^*(-1, t) \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

γ wordt dus bepaald door $\frac{dQ^*}{dt}$ en h^* ter plaatse van de overgangen.

3. Vergelijking van een analytische oplossing met een numerieke oplossing bepaald met TROS

3.1 Inleiding

Om de nauwkeurigheid van een numerieke oplossing volgens het rekenprogramma TROS van het stelsel vergelijkingen (2.01) t/m (2.04) te controleren, wordt een vergelijking gemaakt tussen een analytische en een numerieke oplossing. Daartoe wordt een analytische oplossing bepaald van het stelsel gelineariseerde vergelijkingen. Dit wordt achtereenvolgens gedaan voor een situatie, waarbij geen schip in de kolk aanwezig is, voor een situatie, waarbij het schip als flexibel wordt beschouwd, een flexibel schip is een schip dat op ieder tijdstip dezelfde vorm heeft als de waterspiegel ter plaatse van het schip - en tenslotte voor een situatie, waarbij het schip als star wordt beschouwd. Voor de situatie zonder schip worden verschillen in waterstanden gevonden van 0,25% van de amplitude van de staande golf ter plaatse van de vuldeur. Deze amplitude is 0,01 m.

Voor de situatie, waarbij het schip als flexibel wordt beschouwd, worden verschillen in waterstanden gevonden van maximaal 3,5% van de amplitude van 0,01 m en voor de situatie, waarbij het schip als star wordt beschouwd, worden verschillen gevonden van maximaal 2,5%. Er worden steeds vier perioden doorgerekend. De getallen hebben betrekking op de gegeven omstandigheden+

3.2 Gelineariseerde vergelijkingen

Voor de bepaling van de analytische oplossing, zoals aangegeven in Kalkwijk [9], is uitgegaan van gelineariseerde vergelijkingen, waarbij in de waterbewegingsvergelijking de convectie- en wrijvingsterm zijn verwaarloosd. Het stelsel vergelijkingen is dan

$$(b_k - b_s) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \left(\frac{ds}{dt} + x \frac{dy}{dt} \right) = 0 \quad (3.01)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g (A_k - A_s) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (3.02)$$

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{g b_s}{V} s = \frac{g b_s}{V} \int_{-1}^{+1} h dx \quad (3.03)$$

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{g b_s 21}{V} \gamma = \frac{3 g b_s}{V h^2} \int_{-1}^{+1} x h dx \quad (3.04)$$

Als aansluitvoorwaarden voor de overgangen van de secties zonder schip naar de sectie met schip geldt:

$$Q^- = Q^+ \quad (3.05)$$

$$h^- = h^+ \quad (3.06)$$

- Q^- = het debiet ter plaatse van een overgang in de sectie zonder schip
- Q^+ = het debiet ter plaatse van een overgang in de sectie met schip
- h^- = de waterstand ter plaatse van een overgang in de sectie zonder schip
- h^+ = de waterstand ter plaatse van een overgang in de sectie met schip

3.3 Analytische oplossing voor een harmonisch geval

3.3.1 Harmonische variabelen

Er wordt uitgegaan van de volgende harmonische variabelen:

$$Q = Q^h e^{i\omega t} ; \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{dQ^h}{dx} e^{i\omega t} ; \frac{\partial Q}{\partial t} = i\omega Q^h e^{i\omega t}$$

$$h = h^h e^{i\omega t} ; \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{dh^h}{dx} e^{i\omega t} ; \frac{\partial h}{\partial t} = i\omega h^h e^{i\omega t}$$

$$s = s^h e^{i\omega t} ; \frac{ds}{dt} = i\omega s^h e^{i\omega t} ; \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 s^h e^{i\omega t}$$

$$\gamma = \gamma^h e^{i\omega t} ; \frac{d\gamma}{dt} = i\omega \gamma^h e^{i\omega t} ; \frac{d^2\gamma}{dt^2} = -\omega^2 \gamma^h e^{i\omega t}$$

Q^h en h^h zijn onafhankelijk van t

s^h en γ^h zijn constanten

3.3.2 Oplossing voor de sectie met schip

Invullen van de harmonische variabelen in de bewegings- en continuïteitsvergelijking en delen door $e^{i\omega t}$ levert uitdrukkingen, die onafhankelijk

zijn van t.

$$\frac{dQ^h}{dx} + (b_k - b_s) i \omega h^h + b_s (i \omega s^h + i \omega \gamma^h x) = 0 \quad (3.07)$$

$$i \omega Q^h + g (A_k - A_s) \frac{dh^h}{dx} = 0 \quad (3.08)$$

Differentiëren naar x van (3.07) geeft een uitdrukking voor $\frac{dh^h}{dx}$ en deze ingevuld in (3.08) levert:

$$g \frac{(A_k - A_s)}{(b_k - b_s)} \frac{d^2 Q^h}{dx^2} + \omega^2 Q^h + i \omega g \frac{b_s (A_k - A_s)}{(b_k - b_s)} \gamma^h = 0 \quad (3.09)$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking is:

$$Q^h = C_3 e^{iK_s x} + C_4 e^{-iK_s x} + i N \gamma^h \quad (3.10)$$

C_3 en C_4 zijn integratieconstanten

$$K_s = \omega \left[g \frac{(A_k - A_s)}{(b_k - b_s)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$N = - \left[\frac{g b_s (A_k - A_s)}{\omega (b_k - b_s)} \right] \quad (3.12)$$

De oplossing (3.10) ingevuld in (3.07) geeft voor h^h

$$h^h = - \frac{K_s}{\omega (b_k - b_s)} \left[C_3 e^{iK_s x} - C_4 e^{-iK_s x} \right] - \frac{b_s}{(b_k - b_s)} \left[s^h + x \gamma^h \right] \quad (3.13)$$

De oplossingen (3.10) en (3.13) zijn geldig voor de sectie met schip, dus voor $-1 < x < +1$.

3.3.3 Oplossing voor de secties zonder schip

Voor de secties zonder schip is de bewegingsvergelijking met harmonische variabelen

$$i \omega Q^h + g A_k \frac{dh}{dx} = 0$$

en de continuïteitsvergelijking met harmonische variabelen

$$\frac{dQ}{dx} + b_k i \omega h^h = 0$$

Differentiëren van deze continuïteitsvergelijking geeft een uitdrukking voor $\frac{dh}{dx}$, die ingevuld in bovenstaande bewegingsvergelijking de volgende differentiaalvergelijking oplevert

$$\frac{g A_k}{i \omega b_k} \frac{d^2 Q^h}{dx^2} - i \omega Q^h = 0$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking voor $x \leq -1$ is

$$Q^h = C_1 e^{i K_k x} + C_2 e^{-i K_k x} \quad (3.14)$$

Differentiëren naar x van deze uitdrukking voor Q^h en invullen in de bovenstaande continuïteitsvergelijking geeft

$$h^h = - \frac{K_k}{\omega b_k} \left[C_1 e^{i K_k x} - C_2 e^{-i K_k x} \right] \quad (3.15)$$

Voor $x \geq +1$ zijn de oplossingen voor Q^h en h^h

$$Q^h = C_5 e^{i K_k x} + C_6 e^{-i K_k x} \quad (3.16)$$

$$h^h = \frac{-K_k}{\omega b_k} \left[C_5 e^{i K_k x} - C_6 e^{-i K_k x} \right] \quad (3.17)$$

c_1, c_2, c_5 en c_6 zijn integratieconstanten.

$$K_k = \omega \left[g \frac{A_k}{b_k} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

3.3.4 Oplossing voor de stamp- en dombeweging

Met behulp van de oplossing voor h^h voor de sectie met schip, (3.13), kan de in vergelijking (3.03) voorkomende integraal $\int_{-1}^{+1} h dx$ worden bepaald.

Uitgewerkt geeft dit voor (3.03) de volgende uitdrukking

$$\begin{aligned} \frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{g b_s 21}{V} s &= \frac{g b_s}{V} \left[-\frac{1}{\omega (b_k - b_s)} (c_3^2 \sin K_s 1 + \right. \\ &\quad \left. - c_4^2 \sin K_s 1) - \frac{b_s}{(b_k - b_s)} 2 1 s^h \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Uitwerken van deze differentiaal vergelijking met de harmonische variabelen geeft:

$$s^h = g_1 (c_3 - c_4) \quad (3.20)$$

g_1 is een constante

$$g_1 = \frac{\frac{g b_s}{\omega (b_k - b_s)}}{\frac{\omega^2 A_s 1 - g 1 b_s}{b_k} \frac{b_k}{(b_k - b_s)}} \sin K_s 1 \quad (3.21)$$

Met behulp van de oplossing voor h^h , gegeven in (3.13), kan ook de integraal $\int_{-1}^{+1} x h dx$ uit vergelijking (3.04) bepaald worden.

(3.04) wordt dan:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{g b_s 21}{V} \gamma &= \frac{3 g b_s}{V l^2} \left[-\frac{K_s}{\omega (b_k - b_s)} \left\{ 21 \cos K_s l * \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. * \left(\frac{i C_3}{K_s} + \frac{i C_4}{K_s} \right) + 2 \sin K_s l \left(\frac{i C_3}{K_s} + \frac{i C_4}{K_s^2} \right) \right\} + \right. \\
 &\quad \left. - \frac{b_s}{(b_k - b_s)} \left(\frac{2}{3} \gamma^h l^3 \right) \right] e^{i\omega t} \tag{3.22}
 \end{aligned}$$

Uitwerken van deze differentiaalvergelijking geeft

$$\gamma^h = i g_2 (C_3 + C_4) \tag{3.23}$$

g_2 is een constante

$$g_2 = 3 g_1 \left(-\frac{1}{l \operatorname{tg} K_s l} + \frac{1}{K_s l^2} \right) \tag{3.24}$$

3.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip

3.4.1 Analytische oplossing voor sluis zonder schip

In dit geval zijn geldig de oplossingen uit paragraaf 3.3 voor $x < -1$ en $x \geq +1$. Omdat er geen schip in de kolk ligt, is $l = 0$, zodat geldt voor $x \leq 0$

$$Q^h = C_1 e^{i K_k x} + C_2 e^{-i K_k x} \tag{3.14}$$

$$h^h = -\frac{K_k}{\omega b_k} \left[C_1 e^{i K_k x} - C_2 e^{-i K_k x} \right] \tag{3.15}$$

voor $x \geq 0$

$$Q^h = C_5 e^{i K_k x} + C_6 e^{-i K_k x} \tag{3.16}$$

$$h^h = \frac{-K_k}{\omega b_k} \left[C_5 e^{iK_k x} - C_6 e^{-iK_k x} \right] \quad (3.17)$$

Voor $x = 0$ gelden de aansluitvoorwaarden (3.05) en (3.06), waaruit volgt

$$C_1 + C_2 = C_5 + C_6 \quad (3.25)$$

$$C_1 - C_2 = C_5 - C_6 \quad (3.26)$$

Als de lengte van de sluiskolk $2L$ is, geldt (met $x = 0$ als midden van de sluis) voor $x = -L$

$$Q^h = 0 \quad \text{of met (3.14)}$$

$$C_1 e^{-iK_k L} + C_2 e^{iK_k L} = 0 \quad (3.27)$$

voor $x = +L$

$$Q^h = 0 \quad \text{of met (3.16)}$$

$$C_5 e^{iK_k L} + C_6 e^{-iK_k L} = 0 \quad (3.28)$$

3.4.2 Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis zonder schip

Stel de volgende situatie:

$$A_k = 144 \text{ m}^2$$

$$b_k = 24 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

gemiddelde waterdiepte = 6 m

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{met} \quad T = \frac{2L}{c} \quad \text{en} \quad c = \sqrt{g \frac{A_k}{b_k}}$$

voor $x = -L$: $Q = 0$ voor alle t

voor $x = -L$ en $t = 0$ $h^h = 0,01 \text{ m}$

Met deze twee voorwaarden kunnen C_1 en C_2 bepaald worden met de uitdrukkingen voor Q^h en h^h geldig voor $x \leq 0$ (3.14) en (3.15), hetgeen resulteert in

$$C_1 = + 0,92$$

$$C_2 = - 0,92$$

Met de aansluitvoorwaarden (3.25) en (3.26) voor $x = 0$ wordt nu voor C_5 en C_6 gevonden

$$C_5 = + 0,92$$

$$C_6 = - 0,92$$

Nu de integratieconstanten bekend zijn, zijn ook de uitdrukkingen voor Q en h bekend met (3.14) t/m (3.17)

$$Q = 0,92 \left(e^{iK_k x} - e^{-iK_k x} \right) e^{i\omega t} \quad (3.29)$$

$$h = \frac{-0,92}{c b_k} \left(e^{iK_k x} + e^{-iK_k x} \right) e^{i\omega t} \quad (3.30)$$

Hierin is gebruik gemaakt van $c = \frac{\omega}{K_k}$ (3.31)

3.4.3 Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip

Met (3.29) en (3.30) kunnen Q en h bepaald worden voor $t = 0$. Deze beginvoorwaarden zijn opgegeven in het rekenprogramma TROS, waarmee vervolgens vier perioden zijn doorgerekend. Voor de Nikuradse ruwheid is opgegeven $k = 10^{-12}$ m, teneinde de wrijvingsterm, die in de analytische oplossing is verwaarloosd, klein te laten zijn.

3.4.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip

In tabel 3.1 zijn de resultaten weergegeven van de analytische en van de numerieke oplossing. De verschillen in waterstanden zijn kleiner dan 0,25% van de amplitude van de staande golf voor $x = - L$, die 0,01 m bedraagt. De maximale verschillen treden op als de uitwijking van de waterspiegel het grootst is. Als de waterspiegel ongeveer horizontaal is, treden kleinere verschillen op. Er zijn vier perioden doorgerekend.

3.5 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip

3.5.1 Analytische oplossing voor sluis met flexibel schip

Wanneer het schip als flexibel wordt beschouwd, is

$$\frac{ds}{dt} + x \frac{dy}{dt} = \frac{dh}{dt}$$

en vervallen de twee vergelijkingen voor de scheepsbewegingen dompen en stampen. De continuïteits- en bewegingsvergelijking worden

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_k \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g (A_k - A_s) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (3.33)$$

De oplossingen voor Q^h en h^h ter plaatse van het schip zijn nu op dezelfde manier te bepalen als voor het starre schip is gedaan, zie ook de vergelijkingen (3.10) en (3.13). Dit geeft

$$Q^h = C_3 e^{iK_s x} + C_4 e^{-iK_s x} \quad (3.34)$$

waarin $K_s = \omega \left[g \frac{(A_k - A_s)}{b_k} \right]^{-\frac{1}{2}}$ (3.35)

K_s verschilt dus van K_s voor een schip dat als star wordt beschouwd, zie (3.11).

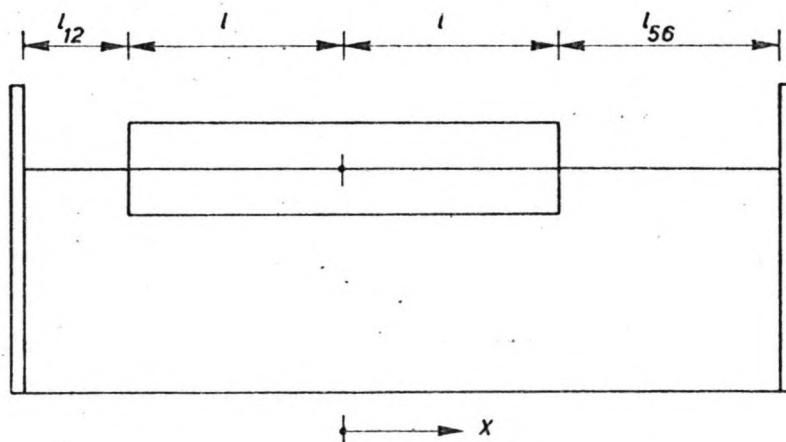
$$h^h = - \frac{K_s}{\omega b_k} \left[C_3 e^{iK_s x} - C_4 e^{-iK_s x} \right] \quad (3.36)$$

Voor de secties zonder schip blijven de oplossingen zoals gegeven in (3.14) t/m (3.17).

De procedure om voor een bepaalde sluis een analytische oplossing te bepalen is nu als volgt:

Er is een sluis met een schip ter lengte $2l$ erin op een afstand l_{12} vanaf de deur. De afstand van de achterkant van het schip tot de andere deur is l_{56} . Uitgaande van deze gegevens, volgen waarden voor ω . Dit is echter een gecompliceerde methode, zodat gekozen is voor een wat eenvoudiger procedure. Uitgaande van een l_{12} en een schiplengte $2l$ wordt een waarde voor ω gekozen. Bij deze ω kan een afstand l_{56} bepaald worden, op de manier zoals in het vervolg beschreven staat.

Met $Q^h = 0$ voor $x = -1 - l_{12}$ en h^h gegeven voor $x = -1 - l_{12}$ en $t = 0$, kunnen de integratieconstanten C_1 en C_2 berekend worden. Voor $x = -1$ zijn de aansluitvoorwaarden (3.05) en (3.06) van toepassing, waarmee C_3 en C_4 bepaald kunnen worden. Voor $x + 1$ gelden ook de aansluitvoorwaarden en daarmee kunnen C_5 en C_6 berekend worden. Uit de randvoorwaarden $Q^h = 0$ voor $x = +1 + l_{56}$ kan dan l_{56} bepaald worden.



3.5.2 Getallenvoorbeeld analytische oplossing voor sluis met flexibel schip

Gegevens:

$$l_{12} = 46 \text{ m}$$

$$2l = 100 \text{ m}$$

$$\text{gemiddelde waterdiepte} = 4,5 \text{ m}$$

$$\text{voor } x = -1 - l_{12} \quad \text{en } t = 0 \quad h = -0,01 \text{ m}$$

$$A_k = 108 \text{ m}^2$$

$$b_k = 24 \text{ m}$$

$$A_s = 54 \text{ m}^2$$

$$b_s = 18 \text{ m}$$

Kies $\omega = 0,08 \text{ rad/sec}$

$$K_k = \frac{\omega}{c} \quad \text{met} \quad c = \sqrt{g \frac{A_k}{b_k}}$$

$$K_s = \frac{\omega}{\sqrt{g \frac{(A_k - A_s)}{b_k}}}$$

Uit de voorwaarden $Q^h = 0$ voor $x = -1 - 1_{12}$ en $h^h = 0,01 \text{ m}$ voor $x = -1 - 1_{12}$ en $t = 0$, volgt met (3.14) en (3.15)

$$C_1 = 0,73 i + 0,32$$

$$C_2 = 0,73 i - 0,32$$

Met deze integratieconstanten kan Q^h met (3.14) berekend worden voor $x = -1$. Deze waarde voor Q^h moet ter plaatse van $x = -1$ gelijk zijn aan Q^h volgens (3.34), zoals volgt uit de aansluitvoorwaarden (3.05). Met de bekende integratieconstanten C_1 en C_2 kan ook h^h met (3.15) berekend worden voor $x = -1$ en dit moet volgens (3.06) gelijk zijn aan h^h volgens (3.36) voor $x = -1$. Uit deze twee aansluitvoorwaarden voor Q en h volgt

$$C_3 = 0,64 i$$

$$C_4 = 0,64 i$$

Met deze waarden voor C_3 en C_4 kan Q^h met (3.34) bepaald worden voor $x = +1$ en dat moet volgens (3.05) gelijk zijn aan Q^h volgens (3.16) voor $x = +1$. Ook h^h kan bepaald worden voor $x = +1$ met (3.36) en deze waarde van h^h moet volgens aansluitvoorwaarde (3.06) gelijk zijn aan h^h volgens (3.17) voor $x = +1$. Toepassing van deze aansluitvoorwaarden levert

$$C_5 = 0,73 i - 0,32$$

$$C_6 = 0,73 i + 0,32$$

Met (3.16) kan Q^h voor $x = +1 + l_{56}$ geschreven worden als

$$Q^h = C_5 e^{iK_k(1 + l_{56})} + C_6 e^{-iK_k(1 + l_{56})}$$

Dit moet nul zijn en dat geeft voor l_{56}

$$l_{56} = \frac{1}{K_k} \operatorname{arctg} \frac{0,73}{0,32} - 1 + \frac{n\pi}{K_k} \quad (3.37)$$

met $n = 0, 1, 2, \dots$

Met de gegevens uit dit voorbeeld volgt $l_{56} = 46,08$ m. Bij deze lengte l_{56} kan nog een aantal malen

$$\frac{\pi}{K_k} = \frac{\pi}{2\pi/\lambda} = \frac{\lambda}{2} =$$

een halve golflengte worden opgeteld.

Ook dan is $Q = 0$ voor $x = 1 + l_{56}$.

3.5.3 Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip

De oplossingen van Q en h met de integratieconstanten uit de vorige sectie voor $t = 0$ zijn weer als beginvoorwaarden ingevoerd in TROS. Er zijn vier perioden doorgerekend. De uitkomsten van de analytische en van de numerieke oplossing volgens TROS zijn weergegeven in tabel 3.2.

3.5.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip

Uit tabel 3.2 blijkt dat de verschillen in waterstanden maximaal 3,5% zijn van de amplitude van de staande golf voor $x = -1 - l_{12}$, die 0,01 m bedraagt. De verschillen zijn het grootst op de tijdstippen dat de waterspiegel ongeveer horizontaal is.

3.6 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip

3.6.1 Analytische oplossing voor sluis met star schip

In dit geval gelden weer de vier vergelijkingen, zoals gegeven in (3.01)

t/m (3.04). De oplossingen voor Q^h en h^h voor de secties zonder schip zijn gegeven in (3.14), (3.15), (3.16) en (3.17). De oplossingen voor Q^h en h^h voor de sectie met schip zijn gegeven in (3.10) en (3.13), terwijl de oplossingen voor s^h en γ^h zijn gegeven in (3.20) en (3.23). De procedure is hetzelfde als aangegeven in 3.5.1 voor het flexibele schip, er wordt een ω gekozen en l_{56} wordt berekend.

3.6.2 Getallenvoorbeeld analytische oplossing voor sluis met star schip

Gegevens:

$$l_{12} = 46 \text{ m}$$

$$2 l = 100 \text{ m}$$

gemiddelde waterdiepte = 4,5 m

voor $x = -1 - l_{12}$ en $t = 0$ $h = -0,01 \text{ m}$.

$$A_k = 108 \text{ m}^2$$

$$b_k = 24 \text{ m}$$

$$A_s = 54 \text{ m}^2$$

$$b_s = 18 \text{ m}$$

Kies $\omega = 0,08 \text{ rad/sec}$

$$K_s = \sqrt{\frac{\omega}{g}} \frac{(A_k - A_s)}{(b_k - b_s)}$$

$$K_k = \frac{\omega}{c} \quad \text{met} \quad c = \sqrt{g \frac{A_k}{b_k}}$$

Met deze gegevens zijn g_1 , g_2 en N te berekenen met (3.21), (3.24) en (3.12).

Uit de voorwaarden voor $x = -1 - l_{12}$, $Q = 0$ en voor $x = -1 - l_{12}$ en $t = 0$, $h = -0,01 \text{ m}$ volgt met (3.14) en (3.15):

$$C_1 = 0,73 i + 0,32$$

$$C_2 = 0,73 i - 0,32$$

Uit de aansluitvoorwaarden (3.05) en (3.06) volgt voor $x = -1$:

$$c_3 = 2,41 i$$

$$c_4 = 2,41 i$$

Hierbij is gebruik gemaakt van de uitdrukkingen voor Q^h en h^h voor $x \leq -1$ gegeven in (3.14) en (3.15) en van de uitdrukkingen voor Q^h en h^h voor $-1 \leq x \leq 1$ gegeven in (3.10) en (3.13).

Uit de aansluitvoorwaarden (3.05) en (3.06) volgt voor $x = 1$

$$c_5 = 0,73 i - 0,32$$

$$c_6 = 0,73 i + 0,32$$

Hierbij is gebruik gemaakt van de oplossingen voor Q^h en h^h gegeven in (3.10), (3.13), (3.16) en (3.17).

Uit de randvoorwaarden $Q = 0$ voor $x = +1$ volgt met (3.37)

$$l_{56} = 46,06 m$$

3.6.3 Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip

De oplossingen voor Q , h , s en γ met de integratieconstanten uit de vorige sectie voor $t = 0$ zijn als beginvoorwaarden ingevoerd in TROS. Er zijn vier perioden doorgerekend.

3.6.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met star schip

In tabel 3.3 zijn de uitkomsten van de analytische en van de numerieke oplossing volgens TROS weergegeven.

De verschillen in waterstanden zijn, nadat vier perioden zijn doorgerekend, maximaal 2,5% van de amplitude van 0,01 m. De verschillen nemen toe. Na één periode zijn ze kleiner dan 1%, na drie perioden kleiner dan 2%. De grootste verschillen treden op, op de tijdstippen dat de waterspiegel ongeveer horizontaal is.

3.7 Conclusies

De vultijd van een sluis heeft de orde grootte van 600 s. Voor de beschouwde gevallen met schip in de kolk zijn vier perioden doorgerekend, dat is

314 s, dus ongeveer de helft van de orde grootte van de vultijd. Alle gevonden verschillen tussen waterstanden volgens analytische oplossingen en volgens numerieke oplossingen bepaald met TROS, zijn voor bovenvermelde tijdsperiode kleiner dan de rekennauwkeurigheid van TROS, zoals gegeven in Stelling [14].

4. Vergelijking van een analytische oplossing met een numerieke oplossing bepaald met NEBAS

4.1 Inleiding

Met het rekenprogramma TROS kunnen de langskrachten op schepen tengevolge van translatiegolven berekend worden voor sluizen met het vul- en ledigings-systeem in de hoofden. TROS in de huidige vorm is dus niet geschikt voor sluizen met een vul- en ledigingssysteem in de vloer of de wanden. Daarom zal onderzocht worden of het rekenprogramma NEBAS, dat ontwikkeld is voor de berekening van de waterbeweging in open kanalen, geschikt is voor de berekening van de waterbeweging in een dergelijke sluis. Na een algemene beschouwing van dit rekenprogramma en een voorbeeld van de berekening van een sluisvulling, zal een vergelijking worden gemaakt tussen waterstanden bepaald met een analytische oplossing, die een staande golf in de kolk zonder schip erin voorstelt en een oplossing met NEBAS, waarbij de staande golf als beginvoorwaarde is opgegeven. Daarna zal zo'n vergelijking worden gemaakt voor een sluis met een schip erin, dat als flexibel wordt beschouwd. Een flexibel schip is een schip dat op ieder tijdstip dezelfde vorm heeft als de waterspiegel ter plaatse van het schip. Het blijkt dat de verschillen in waterstanden volgens de analytische oplossing en volgens de numerieke oplossing bepaald met NEBAS niet zo groot zijn, dat op grond daarvan gesteld kan worden dat NEBAS ongeschikt is voor het bepalen van de waterbeweging in sluizen met een vul- en ledigingssysteem in de vloer of wanden. In hoofdstuk 6 wordt nagegaan of de aanname van een flexibel schip, waarmee in NEBAS gerekend wordt, leidt tot de conclusie dat NEBAS niet geschikt is voor de bepaling van langskrachten in sluizen met een vul- en ledigingssysteem in de vloer of in de wanden.

4.2. Het rekenprogramma NEBAS

4.2.1 Algemene beschouwing van NEBAS

De waterbeweging in open kanalen met horizontale bodem kan beschreven worden met de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (A.v) = 0 \quad (4.01)$$

en de bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{v|v|}{C^2 R} = 0 \quad (4.02)$$

Hierin is: A natte doorsnede kanaal
v snelheid

Voor het oplossen van het stelsel vergelijkingen (4.01) en (4.02) is in het verleden het rekenprogramma NEBAS ontwikkeld. Bij toepassing van NEBAS op een kanaal, moet dit geschematiseerd worden tot takken, die in knooppunten aan elkaar zijn gekoppeld. Wanneer zich een schip in het kanaal bevindt, wordt dit in rekening gebracht door een vermindering van de natte doorsnede van de takken ter plaatse van het schip met de natte doorsnede van het schip. Er wordt geen rekening gehouden met de stamp- en dompbeweging van het schip. Dit komt erop neer, dat het schip als flexibel wordt beschouwd. NEBAS is dus niet geschikt voor berekeningen, waarbij het schip als star moet worden beschouwd. Voor verdere beschrijving van NEBAS wordt verwezen naar Vreugdenhil [18] en Meyer [12].

4.2.2 Schematisatie gesloten leidingen

Bij een sluis met een vul- en ledigingssysteem via de vloer of de wanden komen gesloten leidingen voor. NEBAS is ontwikkeld voor het oplossen van de waterbeweging in open leidingen. In Haas [6] is de volgende oplossing gegeven om NEBAS toe te kunnen passen voor het oplossen van de waterbeweging in gesloten leidingen:

- De continuïteits- en bewegingsvergelijking voor gesloten leidingen zijn uitgedrukt in het piëzometrisch niveau.

Continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Bewegingsvergelijking

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial}{\partial x} (\text{p.n.}) + g \frac{Q|Q|}{C^2 A^2 R} = 0$$

Hierbij is verondersteld dat de vloeistof onsamendrukbaar is en dat de leiding onvervormbaar is.

- De continuïteits- en bewegingsvergelijking voor open leidingen met horizontale bodem zijn ook uitgedrukt in het piezometrisch niveau.

Continuïteitsvergelijking

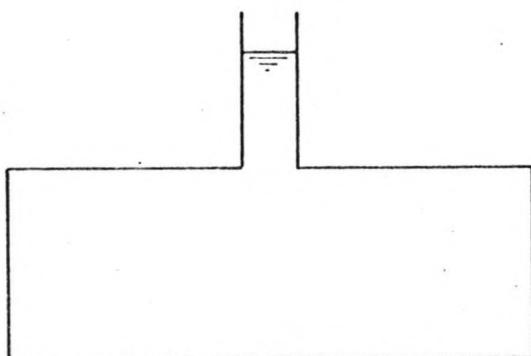
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial t} (\text{p.n.}) = 0$$

Bewegingsvergelijking

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \left(1 - \frac{Q^2 b}{g A^3} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\text{p.n.}) + g \frac{Q |Q|}{C^2 A^2 R} +$$

$$- \frac{2bQ}{A^2} \frac{\partial}{\partial t} (\text{p.n.}) = 0$$

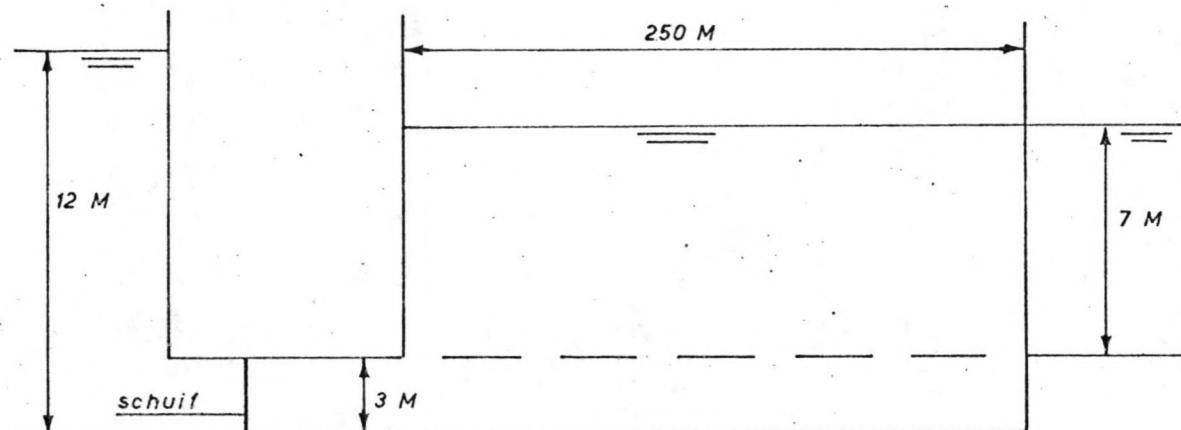
- Als in deze vergelijkingen voor open leidingen de bergende breedte b erg klein is, dan kunnen de termen met b verwaarloosd worden ten opzichte van de andere termen. Daardoor zijn de vergelijkingen die de waterbeweging in gesloten leidingen beschrijven hetzelfde als die, welke de waterbeweging in open leidingen beschrijven. Door de riolen te schematiseren tot een open leiding met een kleine bergende breedte b , zie figuur hieronder, kan de waterbeweging in gesloten leidingen met NEBAS goed benaderd worden.



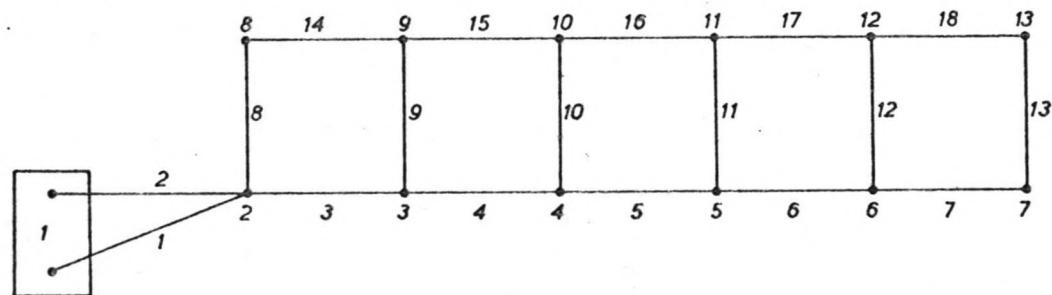
Voor nadere beschrijving van deze schematisatie en afleiding van de vergelijkingen wordt verwezen naar Haas [6].

4.2.3 Voorbeeld van de berekening van een sluisvulling met NEBAS (zonder schip)

Verondersteld wordt de volgende sluis

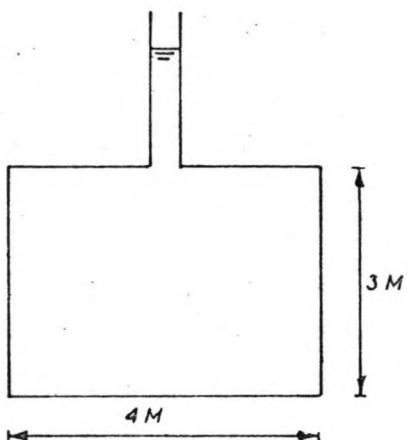


Deze sluis wordt geschematiseerd tot de volgende takken en knopen.



De gegevens van de takken zijn:

Tak 1 en 2 stellen het riool voor van het buitenwater naar de riolen onder de vloer. In deze takken bevinden zich schuiven. De lengte van de takken is 100 m. De breedte is 4 m en de hoogte tot onderzijde standpijp is 3 m. De breedte van de standpijp is 0,01 m.

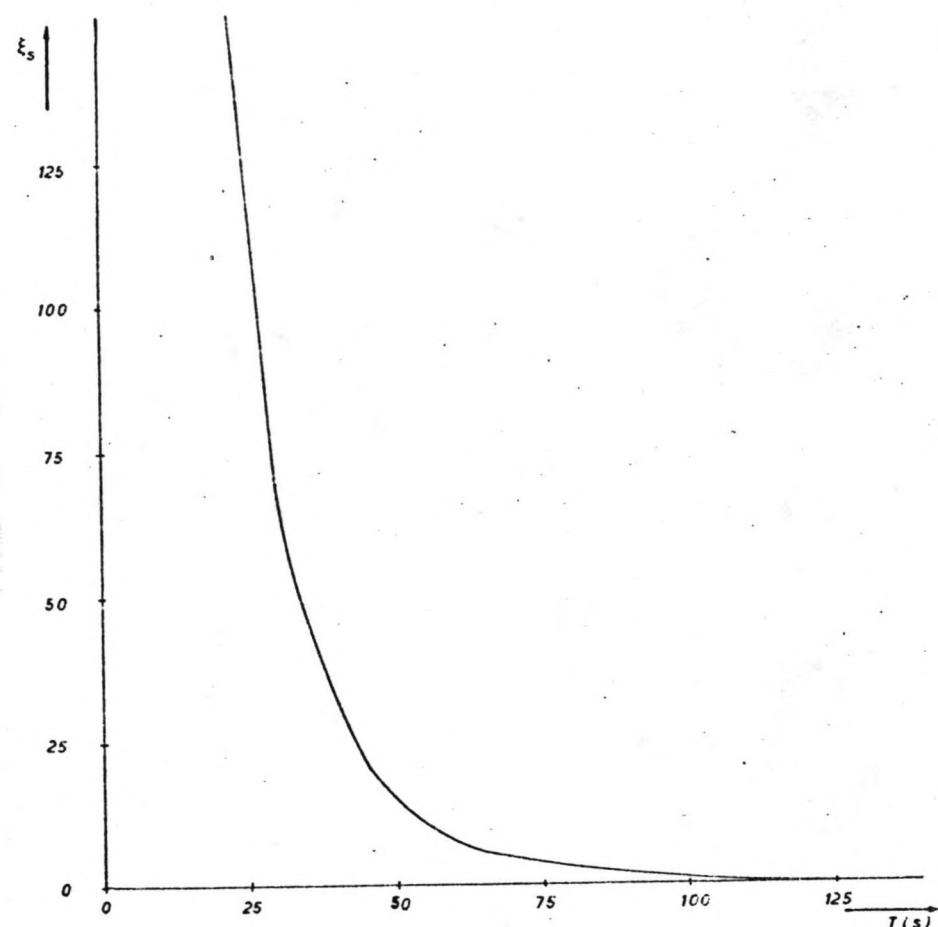


Tak 3 t/m 7 stellen de bodemriolen voor. De lengte van elk van deze takken is 50 m, de breedte 24 m en de hoogte tot onderzijde standpijp is 3 m. De breedte van de standpijp is 0,01 m.

Tak 8 t/m 13 stellen de uitstroomopeningen in de vloer voor. De lengte van deze takken is 22 m, de breedte 5 m en de hoogte tot onderzijde standpijp is 3 m. De breedte van de standpijp is 0,01 m.

Tak 14 t/m 18 stellen de kolk voor. De lengte van de takken is 50 m en de breedte 24 m. De waterstand in de kolk aan het begin van het vulproces is 7 m boven de vloer. De buitenwaterstand is 9 m boven de kolkvloer. Er is dus een verval van 2 m.

Vanaf het tijdstip $t = 0$ worden de schuiven geheven. Dit wordt in het rekenprogramma opgegeven als een weerstand van de schuiven ξ_s als functie van de tijd. In dit voorbeeld is onderstaande ξ_s als functie van t opgegeven.



Vanaf $t = 0$ wordt de kolk gevuld. De berekende waterstand in de kolk is voor verschillende tijdstippen van het vulproces weergegeven in figuur 4.1. De debieten die door de vloer de kolk instromen zijn voor verschillende tijdstippen van het vulproces gegeven in figuur 4.2.

4.3 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip

4.3.1 Analytische oplossing voor sluis zonder schip

In paragraaf 3.4.1 zijn voor de analytische oplossing voor een sluiskolk zonder schip erin de volgende uitdrukkingen van Q^h en h^h gevonden, bij een sluislengte van $2 L$ en met $x = 0$ als midden van de sluis.

Voor $x < 0$

$$Q^h = C_1 e^{iK_k x} + C_2 e^{-iK_k x} \quad (3.14) \quad (4.03)$$

$$h^h = \frac{-K_k}{\omega b_k} \left[C_1 e^{iK_k x} - C_2 e^{-iK_k x} \right] \quad (3.15) \quad (4.04)$$

Voor $x > 0$

$$Q^h = C_5 e^{iK_k x} + C_6 e^{-iK_k x} \quad (3.16) \quad (4.05)$$

$$h^h = \frac{-K_k}{\omega b_k} \left[C_5 e^{iK_k x} - C_6 e^{-iK_k x} \right] \quad (3.17) \quad (4.06)$$

Hierin zijn C_1 t/m C_6 integratieconstanten

$$K_k \text{ golfgetal } K_k = \omega \left[g \frac{A_k}{b_k} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.07)$$

ω hoekfrequentie van de staande golf

Voor $x = 0$ gelden de aansluitvoorwaarden (3.05) en (3.06), waaruit volgt

$$C_1 + C_2 = C_5 + C_6 \quad (3.25) \quad (4.08)$$

$$C_1 - C_2 = C_5 - C_6 \quad (3.26) \quad (4.09)$$

Voor $x = -L$ is de randvoorwaarde

$$Q^h (-L) = C_1 e^{-iK_k L} + C_2 e^{iK_k L} = 0 \quad (3.27) \quad (4.10)$$

Voor $x = +L$ is de randvoorwaarde

$$Q^h (+L) = C_5 e^{iK_k L} + C_6 e^{-iK_k L} = 0 \quad (3.28) \quad (4.11)$$

Met (4.08) t/m (4.11) kunnen de vier integratieconstanten worden bepaald en daarmee is de analytische oplossing voor een harmonisch geval dan bekend.

4.3.2 Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis zonder schip

Stel de volgende situatie:

$A_k = 144$	m^2	natte doorsnede kolk
$b_k = 24$	m	breedte kolk
$L = 100$	m	halve kolk lengte
$\bar{h} = 6$	m	waterdiepte in ongestoorde situatie
$h^h = 0,01$	m	voor $x = 0$ en $t = 0$
$T = 26,07$	s	periode staande golf $T = \frac{2L}{c}$
$\lambda = 200$	m	golf lengte $\lambda = 2L$
$c = 7,67$	m/s	loopsnelheid translatiegolf $c = \sqrt{g \frac{A_k}{b_k}}$
$K_k = 0,0314$	rad/m	golfgetal $K_k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Met deze gegevens wordt voor Q en h gevonden

$$Q = 0,92 \left[e^{iK_k x} - e^{-iK_k x} \right] e^{iwt} \quad (4.12)$$

$$h = - \frac{0,92}{c b_k} \left[e^{iK_k x} + e^{-iK_k x} \right] e^{iwt} \quad (4.13)$$

4.3.3 Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip

De sluiskolk is geschematiseerd tot 20 takken van 10 m lengte. De breedte van de takken is 24 m. Met (4.12) en (4.13) zijn Q en h te bepalen voor $t = 0$. Deze zijn als beginvoorwaarde ingevoerd in NEBAS en vervolgens zijn drie perioden doorgerekend. Teneinde de wrijvingsterm in de bewegingsvergelijking klein te laten zijn, is voor de Nikuradse ruwheid $k = 10^{-5} m$. De waterstand in de kolk is voor verschillende tijdstippen weergegeven in figuur 4.3.

4.3.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip

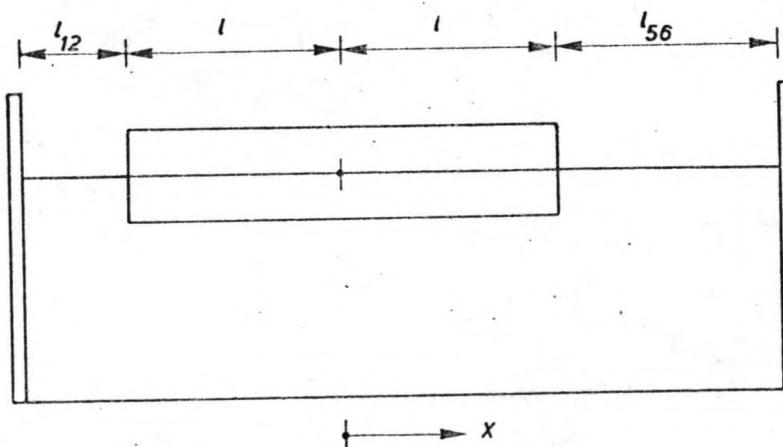
Voor verschillende waarden van x en t zijn in tabel 4.1 de waterstanden weergegeven, bepaald met de analytische en met de numerieke oplossing. De

verschillen in waterstanden zijn ten hoogste $0,7 \times 10^{-3}$ m, dat is 7% van de amplitude van de staande golf voor $x = -L$, die 0,01 m bedraagt. Deze maximale verschillen in waterstanden treden op als de waterspiegel ongeveer horizontaal is. Wanneer alleen de tijdstippen beschouwd worden, waarop de uitwijking van de waterspiegel maximaal is, dan zijn de verschillen in waterstanden na drie perioden ten hoogste 2% van de amplitude van 0,01 m.

4.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip

4.4.1 Analytische oplossing voor sluis met flexibel schip

In paragraaf 3.5.1 is de analytische oplossing gegeven voor een staande golf in een sluiskolk met een flexibel schip erin. De oorsprong van de x-as wordt in het midden van het schip genomen. De afstand van de "vuldeur" tot de boeg van het schip is l_{12} , de lengte van het schip is $2l$ en de afstand van het hek van het schip tot de "ledigdeur" is l_{56} .



Voor $x \leq -l$ is de oplossing voor Q^h en h^h gegeven in (4.03) en (4.04).
Voor $x \geq +l$ is de oplossing voor Q^h en h^h gegeven in (4.05) en (4.06).
Voor $-l < x < +l$ is de oplossing voor Q^h en h^h

$$Q^h = C_3 e^{iK_s x} + C_4 e^{-iK_s x} \quad (3.34) \quad (4.14)$$

$$h^h = \frac{-K_s}{\omega b_k} \left[C_3 e^{iK_s x} - C_4 e^{-iK_s x} \right] \quad (3.35) \quad (4.15)$$

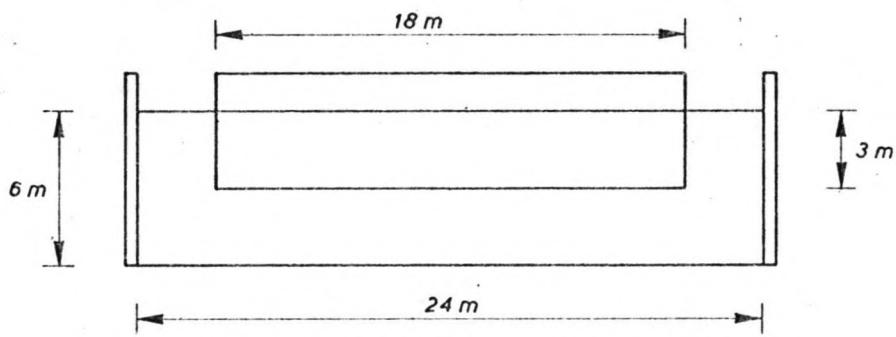
Hierin zijn C_3 en C_4 integratieconstanten.

$$K_s = \omega \left[g \frac{A_k - A_s}{b_k} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

De oplossingsprocedure ter bepaling van de integratiecondtanten C_1 t/m C_6 is, zoals beschreven in paragraaf 3.5.1: er wordt een ω gekozen en daarbij wordt een afstand l_{56} berekend. Uit de randvoorwaarden en aansluitvoorwaarden volgen de integratieconstanten. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van deze procedure wordt verwezen naar paragraaf 3.5.1.

4.4.2 Getallen voorbeeld analytische oplossing voor sluis met flexibel schip

Gegevens:



$A_k = 144$	m^2	natte doorsnede kolk
$b_k = 24$	m	breedte kolk
$A_s = 54$	m^2	natte doorsnede schip
$b_s = 18$	m	breedte schip
$l_{12} = 15$	m	afstand deur - boeg
$l_1 = 100$	m	lengte schip
$\bar{h} = 6$	m	waterdiepte in ongestoorde situatie
$h^h = 0,01$	m	voor $x = -l_1 - l_{12}$ en $t = 0$

Kies

$$\omega = 0,096 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda_k}$$

$$\lambda_k = 500 \text{ m} \quad \text{golfleugte}$$

$$c = 7,67 \text{ m/s} \quad \text{loopsnelheid golf}$$

$$T = 65,183 \text{ s} \quad \text{periode } T = \frac{\lambda_k}{c}$$

$$c = \sqrt{g \frac{A_k}{b_k}}$$

$$K_s = \omega \left[g \frac{A_k - A_s}{b_k} \right]^{-\frac{1}{2}} = 0,016 \text{ rad/m}$$

$$K_k = \omega \left[g \frac{A_k}{b_k} \right]^{-\frac{1}{2}} = 0,013 \text{ rad/m}$$

Met deze gegevens kunnen de integratieconstanten bepaald worden.

Voor $x = -1 - l_{12}$ geldt de randvoorwaarde $Q = 0$ en voor $t = 0$ $h = -0,01 \text{ m}$.
Met (4.03) en (4.04) volgt

$$C_1 = 0,67 i + 0,63$$

$$C_2 = 0,67 i - 0,63$$

Ter plaatse van het schip geldt voor Q^h en h^h (4.14) en (4.15). Voor $x = -1$ zijn de aansluitvoorwaarden

$$Q^- = Q^+ \quad (3.05) \quad (4.17)$$

$$h^- = h^+ \quad (3.06) \quad (4.18)$$

Uit deze aansluitvoorwaarden zijn met de oplossingen (4.03), (4.04), (4.14) en (4.15) de integratieconstanten C_3 en C_4 te berekenen.

$$C_3 = 0,63 i + 0,38$$

$$C_4 = 0,63 i - 0,38$$

Ook voor $x = +1$ zijn de aansluitvoorwaarden (4.17) en (4.18) van toepassing.

Dit geeft voor C_5 en C_6 :

$$C_5 = 0,71 i + 0,23$$

$$C_6 = 0,71 i - 0,23$$

Uit de randvoorwaarde $Q = 0$ voor $x = 1 + l_{56}$ volgt met (4.05)

$$l_{56} = 99,61 \text{ m}$$

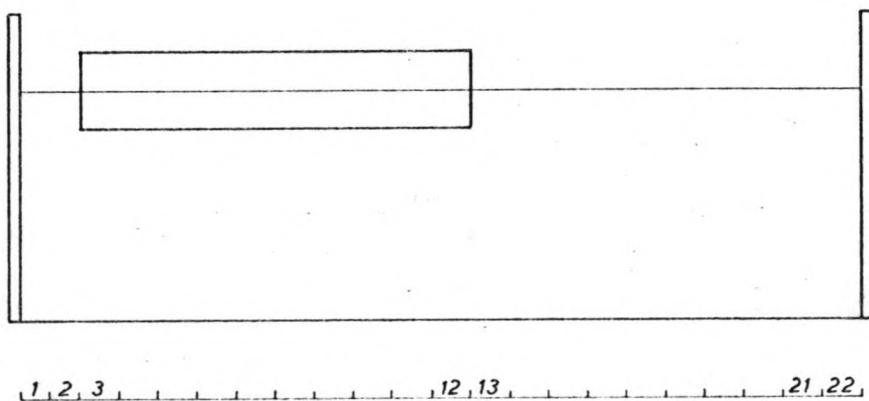
Nu de integratieconstanten bekend zijn, is de oplossing voor Q en h dus bekend voor de secties zonder schip en voor de sectie met schip.

4.4.3 Getallen voorbeeld numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip

Het gedeelte voor het schip is geschematiseerd tot twee takken met een lengte van 7,5 m en een breedte van 24 m. De sectie met schip is geschematiseerd tot de takken 3 t/m 12 met een lengte van 10 m en een breedte van 24 m. De vermindering van de natte doorsnede is ingevoerd door de bodemhoogte te vermeerderen met

$$\frac{A_s}{b_k} = \frac{54}{24} \text{ m}$$

Het gedeelte achter het schip is geschematiseerd tot de takken 13 t/m 22. De lengte van de takken 13 t/m 21 is 10 m en van tak 22 9,61 m, zodat volstaan is aan $l_{56} = 99,61 \text{ m}$, zoals in de vorige paragraaf berekend was. De breedte van de takken 12 t/m 22 is 24 m.



In de vorige paragraaf is de oplossing van Q en h bepaald voor de sluis van het getallen voorbeeld. Deze oplossingen voor $t = 0$ zijn als begin voorwaarden opgegeven in NEBAS. Er zijn vervolgens vijf perioden doorgerekend. De staande

golf volgens de numerieke oplossing is voor verschillende tijdstippen tijdens de eerste periode getekend in figuur 4.4. De waterstand in $x = 0$ (in de figuren van dit hoofdstuk 4 is de oorsprong van de x -as ter plaatse van de bovendeur getekend) en $x = 115$ m (de plaats van het hek van het schip) zijn voor de eerste twee perioden als functie van de tijd weergegeven in figuur 4.5 en 4.6. In figuur 4.7 is de staande golf om de halve periode weergegeven, berekend met een tijdstap $dt = 2,0370$ s. In figuur 4.8 is dit gedaan voor een berekening met $dt = 0,4074$ s. Uit vergelijking van figuur 4.7 met figuur 4.8 blijkt dat de golf minder dempt met een kleinere tijdstap.

4.4.4 Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip

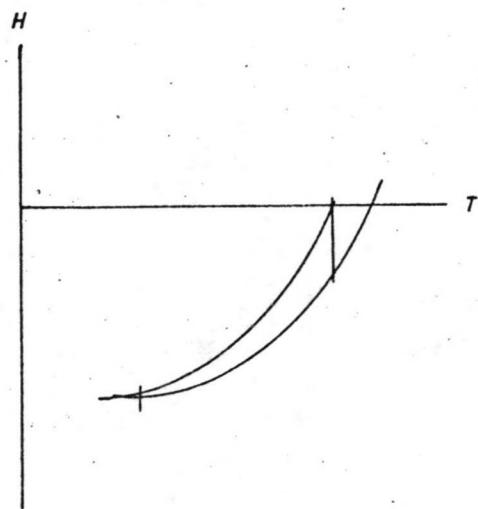
In tabel 4.2 zijn voor verschillende waarden van x en t de waterstanden weergegeven volgens de analytische oplossing en volgens de numerieke oplossing met NEBAS. De verschillen worden weer uitgedrukt in procenten van de amplitude van de staande golf ter plaatse van de bovendeur (0,01 m). Uit de tabel 4.2 blijkt dat de verschillen in waterstanden zijn:

- na 1,75 T maximaal 1%
- na 2,50 T maximaal 2%
- na 3,75 T maximaal 3%
- na 5,00 T maximaal 5%

Deze verschillen treden op als de waterspiegel ongeveer horizontaal is. Als alleen de tijdstippen beschouwd worden, waarop de uitwijking van de waterspiegel het grootst is, dan blijken de verschillen in waterstanden na vijf perioden maximaal 2% te zijn.

4.5 Analyse van de resultaten

Het blijkt dat de verschillen in waterstanden tussen de analytische en de numerieke oplossing het grootst zijn als de waterspiegel ongeveer horizontaal is. Door de wrijvingsterm van de bewegingsvergelijking die in de numerieke oplossing niet wordt verwaarloosd, kan de waterstand als functie van de tijd iets verschoven zijn ten opzichte van de analytische oplossing. Zoals in hiernavolgende figuur te zien is, zijn de verschillen in waterstand dan bij de nuldoorgangen groter dan bij de grootste uitwijkingen.



Op grond van de verschillen in waterstanden kan niet worden geconcludeerd dat NEBAS ongeschikt is voor de berekening van de waterbeweging in een sluis. Om te kunnen concluderen of NEBAS wel geschikt is, moet nog aandacht worden besteed aan de aanname dat het schip flexibel is, waarmee in NEBAS wordt gerekend. Dit aspect wordt in hoofdstuk 6 behandeld.

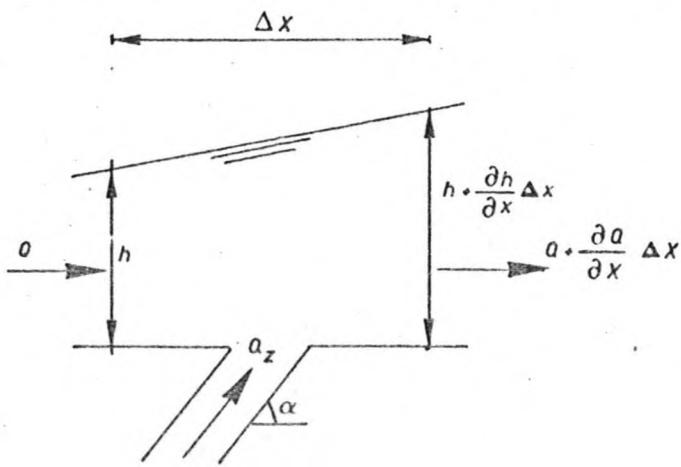
5. Continuïteits- en bewegingsvergelijking voor een hoofdstroom met in- of uitstroming

5.1 Inleiding

Bij een sluis met een vul- en ledigingssysteem via vloer of wanden, waarbij een debiet onder een hoek in of uit de kolk stroomt, komt een extra term in de bewegingsvergelijking voor de kolk ter plaatse van de in- of uitstroming. In de volgende paragraaf 5.2 worden de continuïteits- en bewegingsvergelijking afgeleid voor een hoofdstroom met in- of uitstroming onder een hoek α . De extra term is te splitsen in een term met een onbekende evenredigheidscoëfficiënt κ en een term met α . Getracht wordt een indruk te krijgen van de grootte van deze coëfficiënt κ aan de hand van experimenteel bepaalde energieverliezen volgens Idel'cik en volgens Gardel, bij een loodrechte instroming van een zijstroom in een hoofdstroom in gesloten leidingen. Dit leidt tot de indruk dat de term met κ erg klein is. Omdat bovendien geen gegevens bekend zijn over energieverliezen bij in- of uitstroming in een hoofdstroom in open leidingen, wordt de term met κ niet in de vergelijking opgenomen. De extra term met α wordt bij berekeningen met NEBAS niet in de berekening meegenomen. Het is echter nauwkeuriger om bij berekeningen betreffende sluizen met een vul- en ledigingssysteem via de vloer of de wanden deze term wel in de bewegingsvergelijking op te nemen. Bij de uitbreiding van het programma TROS zal dit dan ook gedaan worden.

5.2 Afleiding van de continuïteits- en bewegingsvergelijking voor een hoofdstroom met in- of uitstroming

Beschouwd wordt een hoofdstroom, waar onder een hoek α een debiet Q_z in- of uitstroomt. Aangenomen wordt een controlevolume ter plaatse van de in- of uitstroming, met een lengte Δx . De onderzijde van het volume valt samen met de bodem van de hoofdleiding, de bovenzijde valt samen met de waterspiegel.



Q_z is het debiet in de zijtak

A_z is de natte doorsnede van de zijtak

α is de hoek tussen de richting van de hoofdstroom en van de zijstroom

Voor het controlevolume wordt een massabalanis opgesteld.

massa op tijdstip t is $\rho A \Delta x$

massa op tijdstip $t + \Delta t$ is $\rho A \Delta x + \frac{\partial}{\partial t} (\rho A \Delta x) \Delta t$

De toename van de massa gedurende Δt is dan

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A) \Delta t \Delta x$$

Gedurende Δt stroomt in het controlevolume een massa $\rho Q \Delta t + \rho Q_z \Delta t$ en uit het controlevolume een massa $\rho Q \Delta t + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Q) \Delta x \Delta t$.

De netto ingestroomde massa is dan

$$\rho Q_z \Delta t - \frac{\partial}{\partial x} (\rho Q) \Delta x \Delta t$$

Gelijkstellen van netto ingestroomde massa en toename van de massa en delen door $\Delta x \Delta t$ geeft de continuïteitsvergelijking.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{Q_z}{\Delta x} \quad (5.01)$$

Vervolgens wordt een impulsbalans opgesteld voor het controlevolume. Op het controlevolume wordt een resulterende hydrostatische drukkracht uitgeoefend ter grootte

$$- \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x$$

en een wrijvingskracht ter grootte

$$- \rho g A \frac{|Q| Q}{A^2 C^2 R} \Delta x$$

De gedurende Δt instromende hoeveelheid van beweging in x-richting is

$$\rho Q \Delta t \frac{Q}{A} + \rho Q_z \Delta t \frac{|Q_z|}{A_z} \cos \alpha$$

$\frac{|Q_z|}{A_z}$ cos α is de component van de snelheid in x-richting in de zijtak.

Onder invloed van de hoofdstroom zal het debiet Q_z niet exact onder een hoek α het controlevolume instromen, maar onder een hoek, die daar iets van afwijkt. Deze afwijking van de hoek van instroming geeft een extra snelheidscomponent in x-richting van de zijstroom. Deze extra snelheidscomponent gemiddeld over het instroomoppervlak wordt evenredig gesteld met de snelheid in de hoofdstroom $\frac{Q}{A}$.

$$\Delta v = \kappa \frac{Q}{A}$$

Hierin is

Δv extra snelheid in x-richting van de zijtak

κ evenredigheidscoëfficiënt

Gedurende een tijdsinterval Δt stroomt dus een extra hoeveelheid van beweging in x-richting in het controlevolume ter grootte

$$\rho Q_z \Delta t \kappa \frac{Q}{A}$$

De uitstromende hoeveelheid van beweging in x-richting gedurende Δt is

$$\rho \frac{Q^2}{A} \Delta t + \rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) \Delta x \Delta t$$

De hoeveelheid van beweging in het controlevolume verandert gedurende Δt met

$$\rho \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta t \Delta x$$

Gelijkstellen van alle op het controlevolume uitgeoefende krachten in x-richting maal Δt met de netto uitstromende hoeveelheid van beweging in x-richting plus de verandering daarvan in het controlevolume geeft de bewegingsvergelijking.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{A C^2 R} &= \\ = \frac{Q_z |Q_z|}{A_z \Delta x} \cos \alpha + \kappa \frac{Q_z}{\Delta x} \frac{Q}{A} & \end{aligned} \quad (5.03)$$

Op plaatsen, waar geen in- of uitstroming plaatsvindt, vervallen de termen in het rechterlid van (5.03) en wordt de bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{A C^2 R} = 0 \quad (5.04)$$

Bij permanentie en $\alpha = 90^\circ$ en onder verwaarlozing van de wrijvingsterm wordt (5.03)

$$\frac{\partial h}{\partial x} = - \frac{1}{g A^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \kappa \frac{Q_z}{\Delta x} \cdot \frac{Q}{g A^2} \quad (5.05)$$

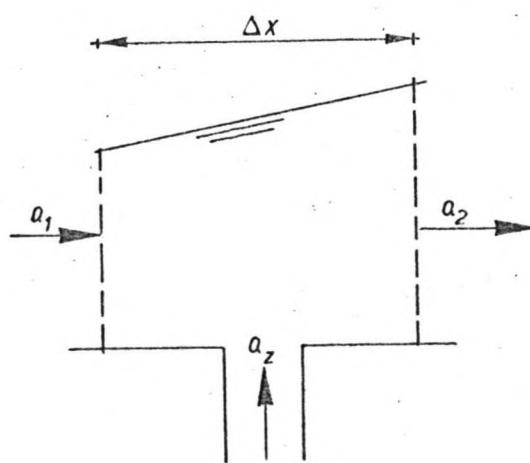
Geïntegreerd over Δx geeft dit

$$\Delta h = - \frac{1}{g A^2} \left(Q_2^2 - Q_1^2 \right) + \kappa Q_z \frac{Q}{g A^2} \quad (5.06)$$

Hierin is

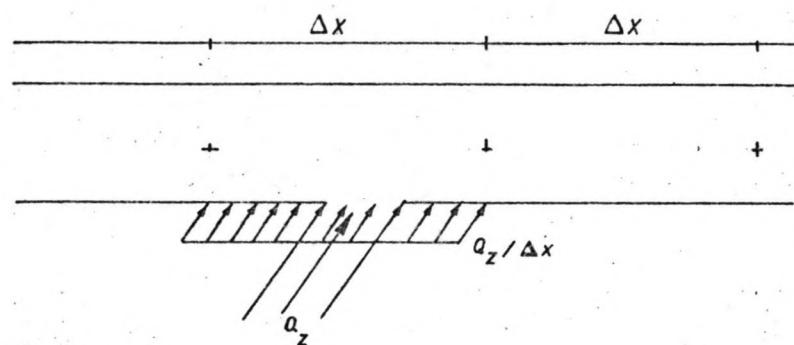
Q_1 het debiet in de hoofdstroom op de linkergrens van het interval waarover geïntegreerd wordt ter lengte Δx , zie onderstaande figuur.

Q_2 het debiet in de hoofdstroom op de rechtergrens. (5.06) geeft dus een uitdrukking voor het waterstandsverschil dat in de hoofdstroom ontstaat over een lengte Δx .

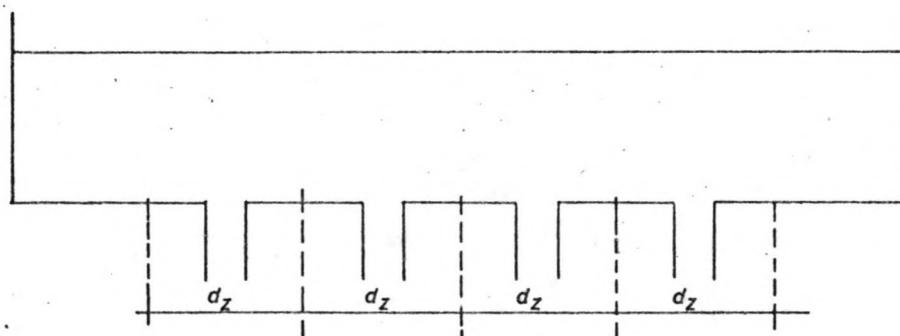


In de continuïteits- en bewegingsvergelijking komt in enkele termen Δx voor. Voor het oplossen van het stelsel vergelijkingen is het noodzakelijk dat deze Δx nader wordt omschreven. Deze omschrijving hangt af van het beschouwde geval.

In de situatie van de samenkomst van twee rivieren kan bij het numeriek oplossen van de vergelijkingen voor Δx de afstand tussen twee roosterpunten worden genomen. Dit komt erop neer dat wordt aangenomen dat tussen de twee roosterpunten een gelijkmatige verdeling van het instromende debiet bestaat, zie de figuur hieronder.



In de situatie van een sluis met een vul- en ledigingssysteem in de vloer of de wanden, kan voor Δx de afstand van de ene opening naar de volgende worden genomen, zie onderstaande figuur.



Voor een dergelijke sluis wordt de continuïteits- en de bewegingsvergelijking dan met verwaarlozing van de term met κ :

Continuiteitsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_z$$

(5.07)

Bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + g A \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q Q}{A C^2 R} = q_z v_{zx}$$

(5.08)

Hierin is

$$q_z = \frac{Q_z}{d_z}$$

$$v_{zx} = \frac{|Q_z|}{A_z} \cos \alpha = \text{snelheid in } x\text{-richting in de zijtak}$$

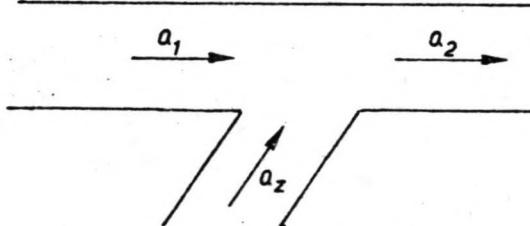
d_z = gedefinieerd in de bovenstaande figuur

5.3 Beschouwing van de term met α

Beschouwd wordt een rivier met een zijrivier. De stroming is permanent.

Uit (5.01) volgt

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_z}{\Delta x} \quad \text{zodat} \quad Q_2 - Q_1 = Q_z$$



Als vervolgens de wrijvingsterm en de term met κ in (5.03) worden verwaarloosd, dan is de bewegingsvergelijking voor dit geval

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q_z^2}{A_z} - \frac{\cos \alpha}{\Delta x}$$

Integratie over Δx geeft bij constante A

$$\frac{Q_2^2 - Q_1^2}{A} + g A \Delta h = \frac{Q_z^2}{A_z} \cos \alpha$$

zodat

$$\Delta h = \frac{Q_z^2}{A_z} \frac{\cos \alpha}{g A} - \frac{Q_2^2 - Q_1^2}{g A^2} \quad (5.09)$$

Stel dat voor de rivieren de volgende gegevens gelden:

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$A = 1000 \text{ m}^2$$

$$A_z = 500 \text{ m}^2$$

$$\cos \alpha = 0,5$$

$$Q_z = 400 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_1 = 800 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$$

Deze gegevens ingevuld in (5.09) levert

$$\Delta h = 0,016 - 0,080 = - 0,064 \text{ m}$$

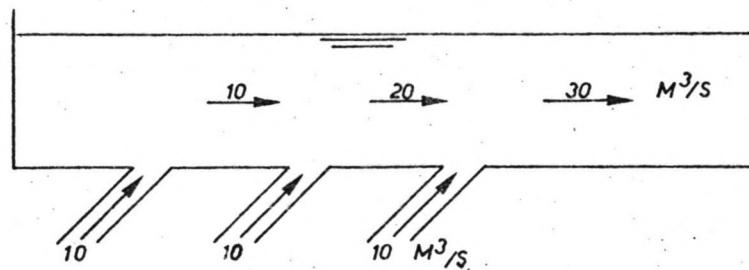
Indien de term met α niet in de vergelijking zou zijn meegenomen was gevonden

$$\Delta h = - 0,080 \text{ m}$$

Een verschil in Δh van 20%.

Ter plaatse van de instroming is de term met α dus niet zonder meer te verwaarlozen. Wanneer een rivier met een zijrivier wordt beschouwd, is de invloed van de instroming echter op de berekening van de hele rivier wel te verwaarlozen.

Wanneer echter op meerdere plaatsen instroming plaatsvindt, zoals in onderstaande figuur voor een permanente situatie is weergegeven en zoals in een sluis met een vul- en ledigingssysteem in de vloer of de wanden voor een niet-permanente situatie, dan is het nauwkeuriger de term met α niet te verwaarlozen.



Stel de volgende gegevens:

$$A_z = 10 \text{ m}^2$$

$$A = 100 \text{ m}^2$$

$$Q_z = 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\cos \alpha = 0,5$$

Met (5.09) volgt voor het waterstandsverschil over de eerste opening:

$$\Delta h = 0,005 - 0,001 = 0,004 \text{ m}$$

Voor de tweede opening

$$\Delta h = 0,005 - 0,003 = 0,002 \text{ m}$$

Voor de derde opening

$$\Delta h = 0,005 - 0,005 = 0 \text{ m}$$

Verwaarlozen van de term

$$\frac{Q_z^2 \cos \alpha}{A_z \Delta x}$$

in de bewegingsvergelijking leidt dus tot onnauwkeurigheden in de berekende waterstanden en debieten.

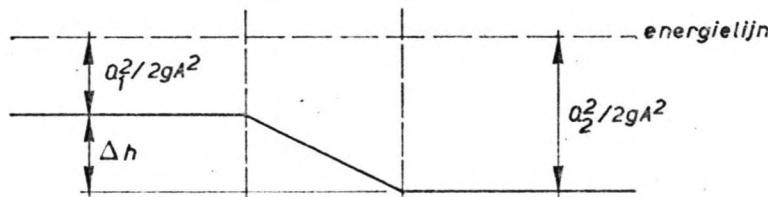
5.4 Beschouwing van de term met κ en bepaling van de coëfficiënt κ

5.4.1 Terugwincoëfficiënt m

In de vorige paragraaf is een uitdrukking (5,06) gegeven voor Δh bij permanentie, $\alpha = 90^\circ$ en verwaarlozing van de wrijving. Dit verschil Δh kan uitgedrukt worden in een fractie van het waterstandsverschil als $\kappa = 0$. De coëfficiënt, die aangeeft hoe groot deze fractie is, wordt terugwincoëfficiënt m genoemd, zie Deelen [5]. Voor Δh geldt dus

$$\Delta h = m \frac{(Q_1^2 - Q_2^2)}{g A^2} \quad (5.10)$$

Wanneer ten gevolge van de instroming geen energieverlies in de hoofdstroom optreedt, dan is in onderstaande figuur Δh af te lezen:

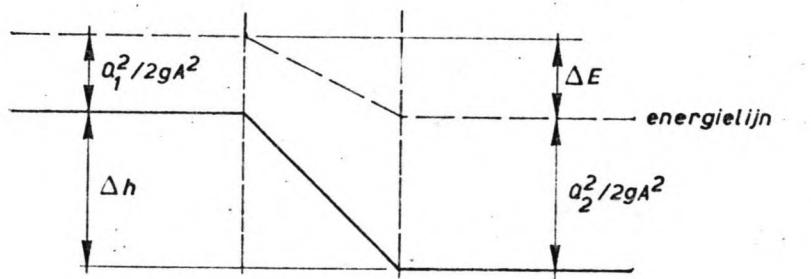


$$\Delta h = - \left[\frac{Q_2^2}{2gA^2} - \frac{Q_1^2}{2gA^2} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{g A^2} \right)$$

waaruit met (5.10) volgt $m = 0,5$.

Wanneer het energieverlies in de hoofdstroom ΔE bedraagt, dan is

$$\Delta h = \frac{Q_1^2 - Q_2^2}{2gA^2} - \Delta E \quad (5.11)$$



Gelijkstellen van (5.10) en (5.11) geeft

$$\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{2gA^2} - \Delta E = m \frac{Q_1^2 - Q_2^2}{gA^2} \quad (5.12)$$

Wanneer het energieverlies ΔE bekend is, kan m bepaald worden met (5.12).

5.4.2 Energieverlies volgens Idel'cik

Voor loodrechte instroming van een zijstroom in een hoofdstroom in gesloten leidingen, waarbij de doorsnede van de zijtak van dezelfde orde grootte is als die van de hoofdstroom, geeft Idel'cik [8] de volgende uitdrukking voor ΔE

$$\Delta E = \left[1,55 \frac{Q_z}{Q_2} - \left(\frac{Q_z}{Q_2} \right)^2 \right] \frac{Q_2^2}{2gA^2} \quad (5.13)$$

Dit ingevuld in (5.12) geeft

$$m = 0,5 - \frac{0,5 \left(1,55 - \frac{Q_z}{Q_2} \right)}{\frac{Q_z}{Q_2} - 2} \quad (5.14)$$

In figuur 5.1 is m volgens (5.14) uitgezet tegen $\frac{Q_z}{Q_2}$.

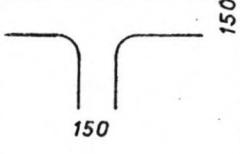
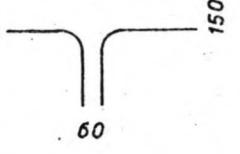
5.4.3 Energieverlies volgens Gardel

Van de Watering [19] geeft aan hoe volgens Gardel het energieverlies in de hoofdstroom bepaald kan worden ten gevolge van loodrechte instroming bij gesloten leidingen, waarbij de hoeken afgerond zijn. Voor het energieverlies geldt

$$\Delta E = \xi_c \frac{Q_2^2}{2gA^2} \quad (5.15)$$

Hierin is ξ_c een coëfficiënt, die door Gardel experimenteel is bepaald. In tabel 5.1 zijn voor twee verhoudingen van $A_z : A$ de waarden van ξ_c weer-gegeven behorend bij een bepaalde waarde van $\frac{Q_z}{Q_2}$. Daarin duidt ξ_{c1} op de ξ_c waarden behorend bij gelijke doorsnede van zijtak en hoofdtak en ξ_{c2} op ξ_c waarden behorend bij een zijtak met een diameter van 60×10^{-3} m en een hoofdtak met een diameter van 150×10^{-3} m.

Tabel 5.1 ξ_c -waarden volgens Gardel

$\frac{Q_z}{Q_2}$	 ξ_{c1}	 ξ_{c2}
0,1	0,15	0,22
0,2	0,20	0,37
0,3	0,27	0,51
0,4	0,32	0,61
0,5	0,36	0,70
0,6	0,37	0,79
0,7	0,37	0,84
0,8	0,36	0,89
0,9	0,34	0,91
1,0	0,31	0,91

(5.15) ingevuld in (5.12) geeft

$$m = 0,5 - \xi_c \frac{0,5}{\left(\frac{Q_z}{Q_2}\right)^2 - 2\left(\frac{Q_z}{Q_2}\right)} \quad (5.16)$$

Voor beide in tabel 5.1 weergegeven combinaties van doorsneden van hoofd- en zij-leiding is m als functie van $\frac{Q_z}{Q_2}$ weergegeven in figuur 5.1.

5.4.4 Evenredigheidscoëfficiënt κ

In paragraaf 5.2 is de coëfficiënt κ ingevoerd en gedefinieerd. Daarin werd voor het waterstandsverschil Δh van de hoofdstroom ten gevolge van loodrecht instroming uitdrukking (5.06) afgeleid. In 5.4.1 is de terugwin-coëfficiënt m gedefinieerd en is voor Δh uitdrukking (5.10) gegeven. Gelijksstellen van (5.06) en (5.10) levert

$$\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{g A^2} + \kappa Q_z \frac{Q}{g A^2} = m \frac{Q_1^2 - Q_2^2}{g A^2} \quad (5.17)$$

Wanneer Q in deze discrete beschrijving wordt benaderd door het gemiddelde van Q_1 en Q_2 dus

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$$

dan volgt na uitwerken van (5.17) met $Q_2 = Q_z + Q_1$

$$\kappa = 2(1 - m) \quad (5.18)$$

Uit figuur 5.1 blijkt dat m volgens Gardel met ξ_{c2} voor $0 < \frac{Q_z}{Q_2} < 1$ gemiddeld 0,99 is.

Voor de situatie, waarop ξ_{c2} betrekking heeft, is de doorsnede van de zijtak kleiner dan die van de hoofdtak en dat is ook het geval voor de situatie, waarvoor de vergelijkingen zijn afgeleid. Daarom wordt van de drie bepaalde terugwincoëfficiënten in figuur 5.1 gekozen voor m volgens Gardel met ξ_{c2} . Met $m = 0,99$ volgt met (5.18)

$$\kappa = 0,02$$

Voor het beschouwde geval is de snelheidscomponent in x -richting van het debiet dat in de hoofdleiding stroomt

$$0,02 \frac{(Q_1 + Q_2)}{2 A}$$

dus een zeer kleine snelheid.

5.5 Conclusies

De energieverliezen in een sluiskolk ten gevolge van een in- of uitstromend debiet zijn niet bekend. In de vorige paragraaf is κ bepaald aan de hand van energieverliezen in gesloten leidingen, waarbij geldt $Q_z < Q_2$. Voor een sluis met het vul- en ledigingssysteem in de vloer of de wanden, kan Q_z groter zijn dan Q_2 . Dit leidt tot kleinere waarden van κ . Verder is voor een dergelijke sluis A_z veel kleiner dan A , terwijl de in de vorige paragraaf beschouwde gevallen A_z dezelfde orde grootte had als A . Het is dus zeer plausibel dat de term met κ in de bewegingsvergelijking voor de waterbeweging in een sluis met het vul- en ledigingssysteem via de vloer of de wanden zeer klein is. Deze term kan daarom voor dergelijke sluizen worden verwaarloosd.

In berekeningen met NEBAS wordt de term met α niet in de bewegingsvergelijking meegenomen. Zoals in 5.3 is vermeld, leidt dit tot onnauwkeurigheden. Mede op grond hiervan zal daarom het programma TROS worden uitgebreid, zodat het geschikt is voor langskrachtberekeningen betreffende sluizen met het vul- en ledigingssysteem via de vloer of de wanden. Daarbij zal de term met α in de bewegingsvergelijking worden opgenomen.

6. Vergelijking starre schip theorie met flexibele schip theorie

6.1 Inleiding

Een van de doelstellingen van deze studie is, na te gaan of het rekenprogramma NEBAS geschikt is voor het berekenen van langskrachten op schepen in sluizen met bodemvul- en ledigingssystemen. Ter plaatse van het schip wordt in NEBAS alleen de doorsnedevermindering van het natte oppervlak in rekening gebracht. Met andere woorden, het schip wordt als flexibel opgevat. Een flexibel schip is een schip dat op ieder tijdstip dezelfde vorm heeft als de waterspiegel ter plaatse van het schip. In dit hoofdstuk wordt nagegaan of de aanname, dat het schip flexibel is, tot andere langskrachten leidt dan wanneer het schip als star wordt beschouwd.

Aan de hand van de analytische oplossing, die in hoofdstuk 3 is beschreven, wordt eerst nagegaan of er verschillen optreden in de perioden van staande golven. Voor golven met een golflengte gelijk aan twee maal de sluislengte, blijken de verschillen in de perioden erg klein te zijn. Voor de verhouding golflengte : schiplengte geldt dan

$$2 l_k / 2 l > 2$$

omdat de schiplengte, $2 l$, kleiner is dan de kolk lengte, l_k .

Vervolgens is aan de hand van langskrachtberekeningen met TROS nagegaan of er grote verschillen optreden in langskrachten tengevolge van translatiegolven, tijdens het vullen van een sluis door een van de hoofden. Dit blijkt niet het geval te zijn. Bij een sluis met een langsvulsysteem in de hoofden hebben de voor de langskracht belangrijkste golven een lengte gelijk aan twee maal de sluiskolk lengte, zodat op grond van de analytische oplossing in deze gevallen geen grote verschillen werden verwacht.

In TROS is vervolgens een randvoorwaarde gewijzigd, waardoor golven met een golflengte kleiner of gelijk aan de kolk lengte van belang zijn. Onder de aanname van een flexibel schip bleek het verloop van de langskracht nu niet goed te worden weergegeven, zoals ook op grond van de analytische oplossing voor hogere harmonischen werd verwacht.

Bij een sluis met een bodem- of wandvulsysteem kunnen de voor de langskracht belangrijkste golven een lengte hebben, die kleiner of gelijk is aan de sluislengte, zoals bijvoorbeeld gebleken is bij het onderzoek voor de Carillon sluis, en beschreven is door Pariset en Galiana [13]. In berekeningen voor dergelijke sluizen met het rekenprogramma NEBAS wordt het schip als flexibel

beschouwd.

Het resultaat van de vergelijking van de starre schip theorie met de flexibele schip theorie is dat voor sluizen met een bodemvul- en ledigingssysteem een flexibele schip benadering niet voldoet, zodat NEBAS niet goed geschikt is voor het bepalen van langskrachten op schepen in sluizen met bodemvul- en ledigingssystemen.

6.2 Formulering en probleemstelling

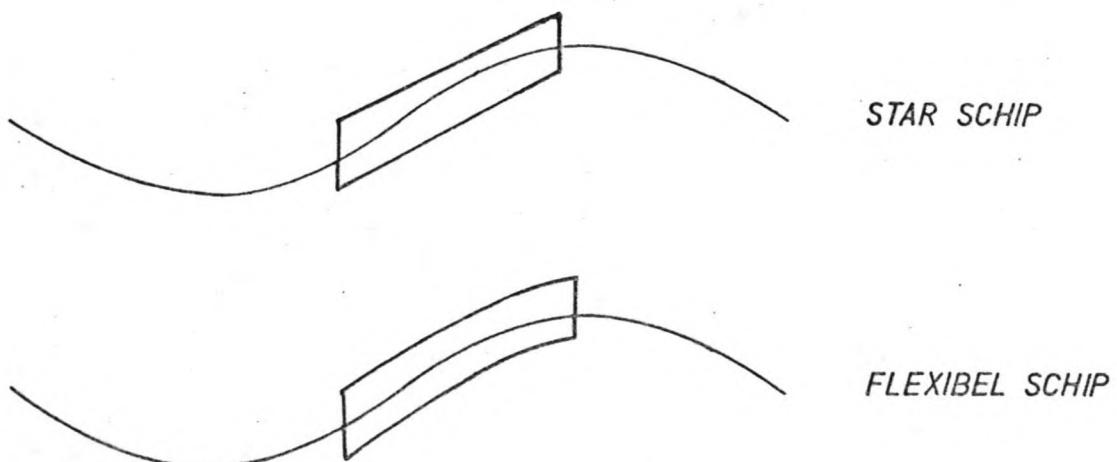
Voor de berekening van langskrachten op een schip dat als star wordt beschouwd, moeten de twee ondiepwater- en de twee scheepsvergelijkingen, gegeven in (2.01) t/m (2.04), worden opgelost.

Wanneer het schip als flexibel wordt beschouwd, behoeven voor de berekening van de langskrachten alleen de volgende twee ondiepwatervergelijkingen te worden opgelost.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_k \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (6.01)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g (A_k - A_s) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_k - A_s} \right) + g \frac{Q|Q|}{C^2 R (A_k - A_s)} = 0 \quad (6.02)$$

Ter plaatse van het schip wordt dan alleen de vermindering van de natte doorsnede in rekening gebracht. Met het programma NEBAS kunnen de vergelijkingen (6.01) en (6.02) opgelost worden. Met deze oplossing kunnen langskrachten bepaald worden op flexibele schepen.



De probleemstelling is nu in welke gevallen de eenvoudige flexibele schip benadering gebruikt mag worden en in welke gevallen de starre schip benadering gebruikt moet worden. Dit wordt beoordeeld aan de hand van perioden van staande golven volgend uit de analytische oplossing en aan de hand van langskrachten tengevolge van translatiegolven bepaald met TROS.

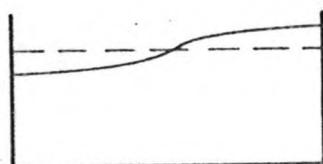
6.3 Vergelijking starre schip theorie met flexibele schip theorie aan de hand van perioden van staande golven bepaald met een analytische oplossing

In hoofdstuk 3 is de procedure beschreven om een analytische oplossing te bepalen voor een bepaalde situatie met een gesloten sluiskolk. Er wordt uitgegaan van een bepaalde afstand $\frac{1}{2}l_{12}$ van de bovendeur tot de boeg van het schip en van een schiplengte $2\frac{1}{2}l$. Vervolgens wordt een ω gekozen en kan $\frac{1}{2}l_{56}$ berekend worden. Door nu bij een bepaalde ω voor verschillende waarden van $\frac{1}{2}l_{12}$ de afstand $\frac{1}{2}l_{56}$ te berekenen, zowel volgens de starre als de flexibele schip theorie, kan voor beide theorieën het verband bepaald worden tussen $\frac{1}{2}l_{12}$ en $\frac{1}{2}l_{56}$, behorend bij die bepaalde ω en geldend voor de gegevens van de sluis en het schip, waarmee de berekening uitgevoerd is. Door deze procedure voor diverse ω 's te herhalen, kan het verband tussen $\frac{1}{2}l_{12}$ en $\frac{1}{2}l_{56}$ behorend bij deze ω 's bepaald worden.

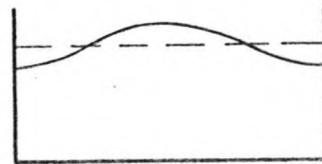
De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in figuur 6.1 door $\frac{1}{2}l_{12}$ uit te zetten tegen $\frac{1}{2}l_{56}$ voor de diverse waarden van ω . Er is daarbij onderscheid gemaakt tussen de eerste, tweede en derde harmonische.

De figuren zijn beperkt tot waarden van $\frac{1}{2}l_{12}$ en $\frac{1}{2}l_{56}$ die liggen tussen 0 en 1.

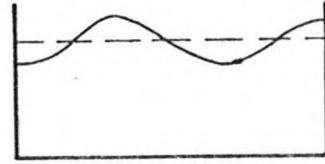
In de figuren zijn ook de gegevens vermeld, waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd.



EERSTE HARMONISCHE



TWEEDE HARMONISCHE



DERDE HARMONISCHE

Voor een andere situatie is ook het verband bepaald tussen $\frac{1}{2} \frac{12}{1}$ en $\frac{1}{2} \frac{56}{1}$ voor verschillende waarden van ω .

De gegevens, waarmee deze berekeningen zijn uitgevoerd en de resultaten zijn gegeven in figuur 6.2.

Er moet op gewezen worden, dat de figuren 6.1 en 6.2 alleen geldig zijn voor de in de figuren vermelde gegevens, zoals gemiddelde waterdiepte, kolkbreedte, enz. Wijziging van een van deze gegevens leidt tot een ander verband tussen $\frac{1}{2} \frac{12}{1}$ en $\frac{1}{2} \frac{56}{1}$ behorend bij een bepaalde ω . Zo is bijvoorbeeld gebleken

dat een grotere waterdiepte h tot kleinere verschillen in de grafieken, die het verband tussen $\frac{1}{2} \frac{12}{1}$ en $\frac{1}{2} \frac{56}{1}$ weergeven bij een bepaalde ω , leidt tussen de starre- en de flexibele schip theorie.

Wanneer nu uitgegaan wordt van de gegevens, zoals bijvoorbeeld vermeld in figuur 6.1, dan kan uit deze figuur voor een bepaalde sluis met daarin een als star beschouwd schip met lengte 21 op een afstand $\frac{1}{2} \frac{12}{1}$ vanaf de bovendeur en een afstand $\frac{1}{2} \frac{56}{1}$ vanaf de benedendeur de ω en dus de periode T van de staande golf worden bepaald voor de eerste, de tweede en de derde harmonische. Ditzelfde kan gedaan worden met precies dezelfde gegevens, maar nu met een schip, dat als flexibel wordt beschouwd. Het blijkt nu, dat voor de gegevens van de figuren 6.1 en 6.2 de verschillen in de periode T voor de eerste harmonische (de verhouding golflengte:sluislengte is dan gelijk aan twee en voor de verhouding golflengte:schiplengte geldt dan $\frac{\lambda}{21} > 2$) zeer klein zijn. Voor de tweede en derde harmonische treden grote verschillen op. Voor de verhouding golflengte:kolklengte geldt dan $\frac{\lambda}{1_k} < 1$.

6.4 Vergelijking starre schip theorie met flexibele schip theorie aan de hand van langskrachten tengevolge van translatiegolven bepaald met TROS

6.4.1 Vulstelsel in één hoofd

Met het rekenprogramma TROS kunnen de langskrachten tengevolge van translatiegolven bepaald worden, zowel op een star als op een flexibel schip. Om na te gaan of deze langskrachten op een star schip verschillen van die op een flexibel schip voor een bepaalde situatie, zijn voor een aantal gevallen berekeningen uitgevoerd met TROS. Bij langsvulling door één van de hoofden, zullen golven met een lengte gelijk aan twee maal de kolklengte van belang zijn, zodat geldt $\frac{\lambda}{21} > 2$. De berekende langskrachten tengevolge van translatiegolven zijn weergegeven in de figuren 6.3 t/m 6.6. De gegevens, waar-

mee de berekeningen zijn uitgevoerd en de verhouding $\frac{\lambda}{21}$, die gelijk is aan $2 \frac{1}{k}$, zijn in de figuren vermeld. Bij deze vier gevallen is de wrijvings- en vormweerstand niet in de berekening betrokken, door C_f , de wrijvingscoëfficiënt, en C_v , de vormweerstandscoëfficiënt, nul te nemen. Om na te gaan of deze componenten van de langskracht, tot verschillen in langskracht op een star en op een flexibel schip leiden, is bovendien een berekening gemaakt, met $C_f = 0,06$ en $C_v = 3,0$. De gegevens en de uitkomsten staan weergegeven in figuur 6.7. In de figuren 6.3 t/m 6.7 is te zien dat voor sluizen met een langsvul- en ledigingssysteem in de hoofden de langskrachten tengevolge van translatiegolven op een star schip en op een flexibel schip uitgeoefend, weinig verschillen voor de berekende gevallen. In al deze gevallen geldt voornaamste $\frac{\text{golfleugte}}{\text{schiplengte}} > 2$. Er zijn ook andere golfleugten voor, maar de voor de langskrachten belangrijkste golven hebben een lengte die bovenstaande eigenschap heeft.

6.4.2 Vulssysteem in beide hoofden

Met het standaardprogramma TROS kunnen alleen berekeningen gemaakt worden betreffende sluizen met een vul- en ledigingssysteem in de hoofden, zodat dan geldt dat de voor de langskrachten belangrijkste golfleugte groter is dan twee maal de schiplengte. Om ook voor kortere golven te kunnen nagaan of de langskrachten op een star schip veel verschillen van de langskrachten op een flexibel schip, is een versie van TROS gemaakt, waarin een gewijzigde randvoorwaarde is aangebracht. Door deze gewijzigde randvoorwaarde wordt het debiet tijdens het vulproces ter plaatse van de ledigdeur niet, zoals in het standaardprogramma, gelijk aan nul genomen, maar wordt dit debiet gelijk gesteld aan het debiet door de vuldeur, maar in tegengestelde richting stromend.

$$Q_{\text{ledigdeur}} = Q_{\text{vuldeur}} \quad (6.03)$$

Voor Q_{vuldeur} geldt

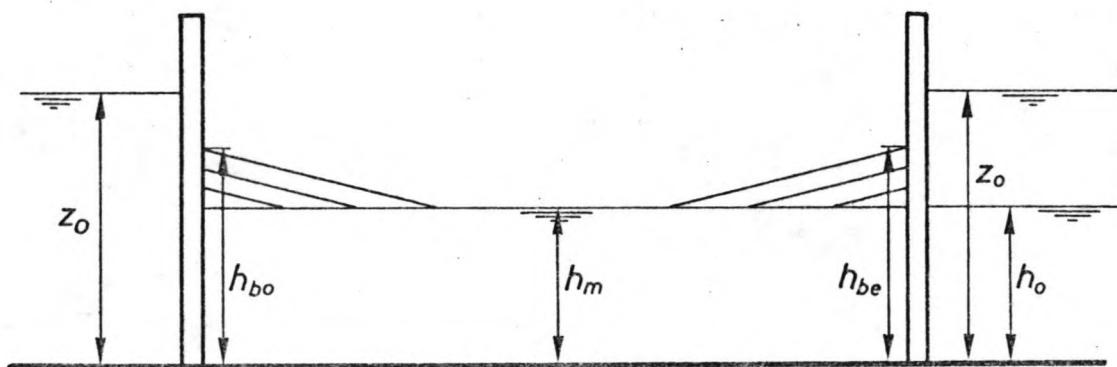
$$Q_{\text{vuldeur}} = \mu A_d \sqrt{2g (z_o - h_{bo})} \quad (6.04)$$

Hierin is: μ afvoercoëfficiënt

A_d doorstroomoppervlak van de openingen

h_{bo} kolkwaterstand ter plaatse van de vuldeur

z_o bovenwaterstand



Met de randvoorwaarden (6.03) en (6.04) zal er aan het begin van het schutproces vanaf beide deuren een translatiegolf gaan lopen. Als het schip precies midden in de kolk ligt, zal een volkomen symmetrisch beeld ontstaan ten opzichte van het midden van de kolk en dan zal de langskracht gedurende het schutproces nul zijn. Voor een situatie, waarbij het schip niet in het midden van de kolk lag, is een berekening gemaakt, waarvan de gegevens en de uitkomsten in figuur 6.8 staan. Daaruit zijn duidelijk de verschillen in "periode" van de berekende langskracht te constateren.

Hierna is de randvoorwaarde voor het debiet ter plaatse van de ledigdeur gewijzigd in

$$Q_{\text{ledigdeur}} = - \mu A_d \sqrt{2g (z_o - h_{be})} \quad (6.05)$$

h_{be} is de kolkwaterstand ter plaatse van de ledigdeur.

De gegevens, waarmee de berekening is uitgevoerd, en de resultaten van de langskrachtberekening met $Q_{\text{ledigdeur}}$ volgens (6.05) zijn gegeven in figuur 6.9. Ook hier zijn verschillen te constateren in de berekende langskrachten.

De grootte van de variaties in de langskracht op het starre schip, zoals weergegeven in figuur 6.9, is minder dan die in de langskracht op het starre schip berekend met $Q_{\text{ledigdeur}}$ volgens (6.03) en weergegeven in figuur 6.8. De oplossing van het stelsel vergelijkingen en daardoor de langskracht ten gevolge van translatiegolven blijkt opnieuw erg gevoelig te zijn voor de

randvoorwaarden. Bij de ontwikkeling van het rekenprogramma TROS was ook geconstateerd dat de oplossing gevoelig is voor de randvoorwaarden. Er was namelijk in eerste instantie als randvoorwaarde voor het debiet door de vuldeur ingevoerd

$$Q_{vuldeur} = \mu A_d \sqrt{2g (z_o - h_m)} \quad (6.06)$$

h_m is de waterstand midden in de kolk.

Hierbij treden extra slingeringen op in de langskracht. De correcte manier, waarmee verder altijd gerekend is in TROS, is het debiet door de vuldeur te koppelen aan h_{bo} , de kolkwaterstand ter plaatse van de vuldeur.

$$Q_{vuldeur} = \mu A_d \sqrt{2g (z_o - h_{bo})} \quad (6.04)$$

Met deze randvoorwaarde verminderden de slingeringen.

Bij de berekeningen van de figuren 6.8 en 6.9 was de verhouding voornaamste golflengte-schiplengte gelijk aan 1,34. Met de randvoorwaarden (6.04) en (6.05) is ook een berekening gemaakt, waarin deze verhouding 2,29 was. Op grond van de berekeningen in de vorige sectie en ook op grond van de harmonische oplossingen, waarbij golflengte:schiplengte > 2 , kan verwacht worden dat de verschillen niet zo groot zullen zijn. De gegevens en resultaten zijn gegeven in figuur 6.10. Daarin is te zien dat het verloop van de langskracht op een star schip niet zo veel verschilt van dat op een flexibel schip, alleen aan het eind van het schutproces treedt verschil in de langskracht op.

6.5 Conclusies

Op grond van de figuren 6.1 t/m 6.10 kan geconcludeerd worden dat voor de beschouwde situaties, de waterbeweging en de langskracht tengevolge van translatiegolven op een star en op een flexibel schip slechts geringe verschillen vertonen, als de verhouding golflengte:schiplengte groter is dan twee. Voor kortere golven worden de waterbeweging en de langskracht tengevolge van translatiegolven niet goed weergegeven, wanneer het schip als flexibel wordt beschouwd. Kalkwijk [9] geeft aan dat wanneer $\frac{\text{golflengte}}{\text{schiplengte}} > 2 \text{ à } 3$, de verschillen in langskrachten op een star en op een flexibel schip gering zijn.

Voor een sluis met een vul- en ledigingssysteem in de hoofden geldt dat

de voornaamste golflengte groter is dan twee maal de schiplengte, zodat de aannname van een flexibel schip voor zo'n sluis een goede benadering van de langskrachten oplevert.

Voor een sluis met een vul- en ledigingssysteem via de vloer of de wanden zal (vanwege de kortere golven) de aanname van een flexibel schip geen goede beschrijving van de waterbeweging en de langskrachten geven. Het programma NEBAS, dat met een flexibel schip rekent, is daarom niet goed geschikt voor het berekenen van langskrachten op schepen in sluizen met een vul- en ledigingssysteem via de vloer.

7. Fysisch modelonderzoek

7.1 Inleiding

Om de "procedure TROS + vulstraal" te vergelijken met een modelonderzoek van een complete sluis met puntdeuren, is deze procedure toegepast op de Rozenburgse sluis. De "procedure TROS + vulstraal" houdt in, zoals in hoofdstuk 1 vermeld, dat bepaalde componenten van de langskracht tijdens het vulproces van een sluis bepaald worden met een numeriek model, TROS, en dat de overige componenten bepaald worden in een fysisch schaalmodel met een stationaire stromingssituatie. De verschillende componenten moeten dan bij elkaar worden opgeteld om de totale langskracht tijdens het vulproces te verkrijgen. In dit hoofdstuk wordt het modelonderzoek in een stationaire stromingssituatie beschreven. Eerst zullen in 7.2 de componenten behandeld worden, waaruit de langskracht tijdens het vulproces is opgebouwd. Tevens zal worden aangegeven welke componenten met TROS en welke in een fysisch model bepaald moeten worden.

Andriessen [2] geeft een verslag van modelonderzoek M 950, waarin de totale langskrachten op schepen zijn gemeten tijdens het vulproces van de Rozenburgse sluis. De gegevens, die in paragraaf 7.3 zijn vermeld, zijn aan dit verslag ontleend.

De langskrachtmetingen in het model met een stationaire stromingssituatie worden beschreven in paragraaf 7.4.

Verder zijn in het modelonderzoek enkele metingen van dwarskrachten verricht. Een beschrijving van deze metingen wordt gegeven in paragraaf 7.5.

Deze dwarskrachten hebben betrekking op een situatie met een stationaire stromingstoestand. Tijdens het vulproces van de kolk zal de snelheid vanaf de vuldeur afnemen tot nul bij de ledigdeur. De dwarskrachten, gemeten in een stationaire stromingssituatie, zullen daarom groter zijn dan tijdens het schutproces.

Tenslotte zijn in paragraaf 7.6 metingen van snelheden van het water beschreven, die voorkomen in een situatie, die optreedt op een bepaald tijdstip tijdens het vullen van de grote deelkolk.

7.2 Componenten van de langskracht tijdens het vulproces

Tijdens het vullen van een schutsluis met een langsvulsysteem in de hoofden wordt op een schip in de sluis een langskracht uitgeoefend, die bestaat uit de volgende componenten, zie ook Bosma [4]:

1. langskracht veroorzaakt door translatiegolven
2. langskracht veroorzaakt door de helling van de waterspiegel als gevolg van snelheidsverschillen van plaats tot plaats
3. wrijvingsweerstand van het schip
4. rest- of vormweerstand van het schip
5. straalwerking tegen het schip
6. waterspiegelafzinking ter plaatse van de vulstraal

Wanneer het stelsel vergelijkingen (2.01) t/m (2.04) opgelost is, kan de langskracht samengesteld uit de componenten 1 t/m 4 worden berekend met

$$F_x = - \rho g b_s \gamma \left[(e_o - s) 21 + \int_a^{a+2l} h dx \right] + \frac{\rho g}{2 b_s} \left(A_{sb}^2 - A_{sh}^2 \right) + \\ + C_f \frac{1}{2} \rho |\bar{v}_s| S + C_v \frac{1}{2} \rho |v_k| |v_k| A_s$$

Voor de bepaling van de oplossing van het stelsel (2.01) t/m (2.04) moeten de afvoercoëfficiënt μ en de Nikuradse ruwheid k bekend zijn. Voor de bepaling van de langskracht zijn dan nog nodig de waarden van de coëfficiënten C_f en C_v . Deze vier coëfficiënten μ , k , C_f en C_v kunnen bepaald worden aan de hand van het modelonderzoek met een stationaire stromingssituatie. De bepaling van deze coëfficiënten zal behandeld worden in hoofdstuk 8. De bovengenoemde componenten 5 en 6 van de langskracht kunnen niet met een mathematisch model bepaald worden, wel met een fysisch model, waarin een permanente stroming aanwezig is.

7.3 Gegevens

Zoals vermeld, is de "procedure TROS + vulstraal" toegepast op de Rozenburgse sluis. De situatie en vormgeving van de Rozenburgse sluis zijn gegeven in de figuren 7.1 en 7.2. De afmetingen zijn:

lengte hele kolk	342,45 m
lengte grote deelkolk	237,45 m
lengte kleine deelkolk	105,00 m
breedte kolk	24,00 m
bodemdiepte	NAP - 6,50 m

De sluishoofden zijn voorzien van een dubbel stel stalen puntdeuren, waarin zich afsluitbare openingen bevinden. De vormgeving van de deur met de openingen is gegeven in figuur 7.3.

De maatgevende waterstanden zijn:

binnenwater NAP -0,50 m

buitenwater NAP +2,80 m

Het maatgevende verval is dus 3,3 m.

Het modelonderzoek is verricht met zoet water. Er waren geen dichtheidsverschillen.

De globale vormgeving van de schepen is weergegeven in figuur 7.4. De afmetingen van de schepen zijn vermeld in onderstaande tabel 7.1.

Tabel 7.1 Afmetingen schepen

Type schip	Lengte 21 [m]	Breedte b _s [m]	Diepgang e _o [m]	21 * b _s * e _o [m ³]	Waterverplaatsing [m ³]
duwboot	38,0	10,0	1,8	684	470
2 duwbakken	76,5	22,6	3,3	5705	5420
4 duwbakken	153,0	22,5	3,3	11411	10840
groot Rijn-schip	106,0	12,2	2,8	3621	2930

De hefsnelheid van de schuiven bedraagt 3,25 mm/s. De toegepaste schalen zijn:

lengte en hoogte	$n_L = 40$
snelheid	$n_v = 40^{\frac{1}{2}} = 6,33$
tijd	$n_t = 40^{\frac{1}{2}} = 6,33$
debiet	$n_Q = 40^{5/2} = 10119$
kracht	$n_F = 40^3 = 64000$

De vulkarakteristieken van de hele kolk, volgend uit modelonderzoek M 950, zijn gegeven in figuur 7.5. De oppervlakte van de doorstroomopeningen is maximaal $19,42 \text{ m}^2$ aan de kolkzijde en wordt bereikt als $t = 6,9 \text{ min}$. De schuiven worden na dit tijdstip nog verder geheven tot een hoogte van $1,56 \text{ m}$, zodat de grootte van de doorstroomopeningen aan de bovenzijde nog wel toeneemt tot $22,45 \text{ m}^2$, maar de oppervlakte van de openingen aan de kolkzijde blijft $19,42 \text{ m}^3$. Zie ook figuur 7.3, waarin de vormgeving van de openingen is weergegeven. Het maximale debiet is $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en treedt op als $t = 6,7 \text{ min}$, of $t = 400 \text{ sec}$. De vultijd van de hele kolk bedraagt 900 sec.

De vulkarakteristieken van de grote deelkolk, volgend uit modelonderzoek M 950, zijn gegeven in figuur 7.6. Wat betreft de oppervlak van de doorstroomopeningen geldt hetzelfde als hierboven gezegd is voor de hele kolk. De maximale hefhoogte van de schuiven is $1,56 \text{ m}$. Het maximale debiet is $44 \text{ m}^3/\text{s}$ en treedt op als $t = 330 \text{ sec}$. De vultijd van de grote deelkolk bedraagt 690 sec.

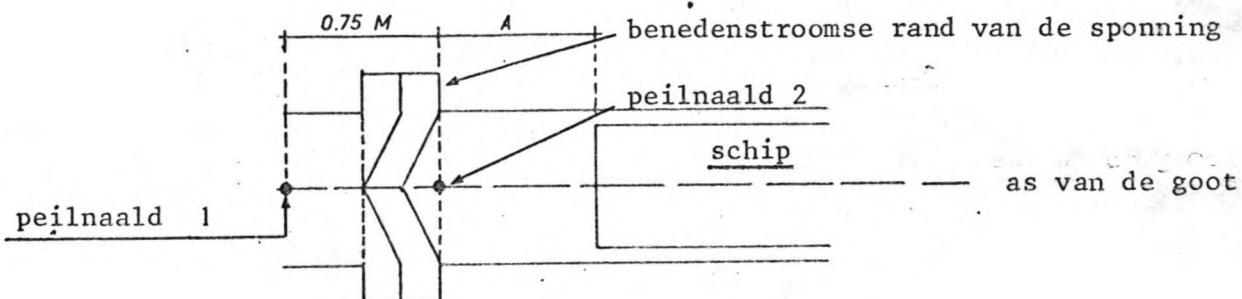
7.4 Langskrachtmetingen

7.4.1 Beschrijving van de metingen

De langskracht tengevolge van de straalwerking en de waterspiegelafzinking (in paragraaf 7.2 respectievelijk component 5 en 6 genoemd), die tijdens het vulproces van bijvoorbeeld de hele kolk van de Rozenburgse sluis op een schip wordt uitgeoefend, kan op de volgende manier bepaald worden. In een goot met een meetsectie met een breedte gelijk aan de geschaalde breedte van de kolk van de Rozenburgse sluis (zie figuur 7.7), waarin zich een stel deuren bevindt met de vormgeving van de deuren in het bovenhoofd van de Rozenburgse sluis, gegeven in figuur 7.3, wordt een debiet ingesteld. Met behulp van een V-stuw bovenstrooms van de deuren wordt de grootte van dit debiet bepaald. In de vulkarakteristieken van de hele kolk, figuur 7.5, wordt nagegaan op welk tijdstip t_1 tijdens het vulproces dit debiet optreedt.

Uit de vulkarakteristieken zijn de hefhoogte van de schuiven en de kolkwaterstand op dat tijdstip t_1 te bepalen.

De schuiven van de deuren worden op deze hefhoogte vastgezet en de waterdiepte in de goot, benedenstrooms van de deuren wordt met een regelklep aan het eind van de goot zo ingesteld, dat deze gelijk is aan de kolkwaterstand, die op tijdstip t_1 optreedt en bepaald is uit de vulkarakteristieken figuur 7.5. Deze waterstand in de goot, benedenstrooms van de deuren, wordt gemeten met een peilnaald, in het vervolg peilnaald 3 genoemd, die op 10,25 m (modelmaat) benedenstrooms vanaf de deuren is geplaatst. Deze afstand is gemeten vanaf de benedenstroomse rand van de sponning, waarin de deuren zijn geplaatst. Ook de afstanden van de boeg van het schip tot de deuren, a, wordt bepaald ten opzichte van deze rand van de sponning.



Behalve peilnaald 3 zijn in de as van de goot peilnaald 1 op 0,75 m (modelmaat) bovenstrooms van de deuren en peilnaald 2 ter plaatse van de genoemde rand van de sponning geplaatst. De peilnaalden zijn aangegeven in een overzicht van de meetopstelling in figuur 7.7.

Vervolgens wordt een bepaald schip, bijvoorbeeld een duwboot met twee bakken, in de as van de goot op een afstand a vanaf de deuren gelegd. Voorop het schip is een beugeltje bevestigd, waartussen een draad gespannen kan worden. Deze draad wordt bevestigd aan een krachtopnemer, zie figuur 7.8. Na enige tijd is de situatie redelijk stationair. Om de stationaire kracht te kunnen bepalen, is aan de krachtopnemer een teller gekoppeld, die gedurende een ingesteld tijdsinterval Δt , iedere seconde een waarneming uit het aan-

geboden signaal bij de voorgaande waarnemingen optelt. Delen door Δt geeft het gemiddelde gedurende dat tijdsinterval. De op deze manier gemeten langskracht bestaat uit de volgende componenten:

- a - langskracht door straalwerking (component 5)
- b - langskracht door waterspiegelafzinking (component 6)
- c - langskracht door wrijvingsweerstand van het schip in een stationaire uniforme stroming
- d - langskracht door vormweerstand van het schip in een stationaire uniforme stroming
- e - langskracht door helling van de waterspiegel ten gevolge van wrijving langs de wanden en de vloer van de goot, in een stationaire uniforme stroming

De grootte van de langskracht, bestaande uit de componenten c, d en e, kan bepaald worden door in de gegeven situatie, behorend bij tijdstip t_1 , het schip zover mogelijk benedenstrooms in de meetsectie van de goot te leggen, de deuren te verwijderen uit de goot, de sponningen op te vullen en vervolgens de langskracht op het schip te meten. De langskracht wordt positief genoemd, wanneer deze gericht is in benedenstroomse richting. Door de langskracht, gemeten in de situatie t_1 zonder deuren af te trekken van de langskracht, gemeten in de situatie t_1 met deuren, is de langskracht op een duwboot met twee bakken op een afstand a vanaf de deuren, ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking (componenten 5 en 6) bekend voor het tijdstip t_1 , tijdens het vullen van de hele kolk. Door voor verschillende tijdstippen van het vulproces van de hele kolk de procedure, zoals beschreven voor t_1 , uit te voeren, kan de langskracht bestaande uit de componenten 5 en 6 als functie van de tijd bepaald worden voor een duwboot met twee bakken op een afstand a vanaf de deuren.

7.4.2 Meetprogramma

In de eerste plaats zijn metingen verricht met deuren in de goot. Er zijn langskrachten gemeten op een duwboot met twee bakken, die optreden tijdens het vullen van de hele kolk. Voor de afmetingen van het schip wordt verwezen naar figuur 7.4 en tabel 7.1.

In dwarsrichting gezien, lag het schip in het midden van de meetsectie van de goot. De situaties, waarbij metingen zijn verricht, zijn weergegeven in tabel 7.2. Voor iedere situatie is de langskracht gemeten voor $a = 1,6$ -

3,6 - 7,2 - 10,4 - 12,8 - 16,0 - 19,6 - 40,0 - 60,0 - 120,0 m.

Voor de situatie t_1 en t_2 zijn bovendien langskrachtmetingen verricht voor $a = 171,2$ m en $a = 230,0$ m. Voor de situatie t_7 zijn bovendien langskrachten gemeten op een duwboot met twee bakken voor bovenvermelde serie afstanden a , nadat de breekbalken achter de openingen in de deuren waren verwijderd.

Tabel 7.2 Meetsituaties vullen hele kolk

Situaties	Tijd [min]	Tijd [sec]	Debit [m ³ /s]	Kolkwater-stand [m]	Hefhoogte-schuiven [m]
t_1	1,02	61	13,16	6,073	0,20
t_2	1,88	113	23,16	6,185	0,37
t_3	3,03	182	34,04	6,408	0,59
t_4	4,22	253	43,13	6,750	0,82
t_5	5,90	354	49,30	7,280	1,15
t_6	7,98	479	46,10	8,075	1,56
t_7	9,99	599	33,05	8,650	1,56
t_8	12,05	723	19,96	9,060	1,56
t_9	14,00	840	6,54	9,250	1,56

Vervolgens zijn langskrachten gemeten op een duwboot met vier bakken, die optreden tijdens het vullen van de grote deelkolk. Voor de afmetingen van het schip wordt weer verwezen naar figuur 7.4 en tabel 7.1. Het schip lag in de as van de meetsectie. De situaties, waarbij metingen zijn verricht, zijn weergegeven in onderstaande tabel 7.3. Voor iedere situatie is de langskracht gemeten voor $a = 1,6 - 3,6 - 7,2 - 10,4 - 12,8 - 16,0 - 19,6 - 40,0 - 60,0 - 120,0$ m. Voor de situaties t_{10} en t_{11} zijn bovendien voor $a = 171,2$ m langskrachtmetingen verricht. Voor de situatie t_{13} is de langskracht op een duwboot met vier bakken voor bovenvermelde serie afstanden a ook gemeten, nadat de breekbalken achter de openingen in de deuren waren verwijderd.

Tabel 7.3 Meetsituaties vullen grote deelkolk

Situatie	Tijd [min]	Tijd [sec]	Debit [m ³ /s]	Kolkwater-stand [m]	Hefhoogte-schuiven [m]
t_{10}	1,08	65	14,76	6,140	0,21
t_{11}	2,00	120	26,81	6,360	0,39
t_{12}	3,70	222	40,16	6,980	0,72
t_{13}	4,90	294	43,35	7,510	0,96
t_{14}	6,50	390	43,03	8,200	1,27
t_{15}	8,10	486	30,60	8,825	1,56
t_{16}	9,50	570	18,02	9,160	1,56

Tenslotte zijn voor de situaties t_1 t/m t_9 , gegeven in tabel 7.2, langskrachten gemeten op een duwboot met twee bakken zonder deuren in de goot en voor de situaties t_{10} t/m t_{16} , gegeven in tabel 7.3, op een duwboot met vier bakken zonder deuren in de goot. Het schip lag bij de metingen zonder deuren achterin de meetsectie van de goot.

Voor de situatie t_{13} , dus de situatie die optreedt tijdens het vullen van de grote deelkolk op het tijdstip $t = 4,9$ min., zijn langskrachten gemeten op het "Groot Rijnschip". Voor de afmetingen van dit schip wordt verwezen naar figuur 7.4 en tabel 7.1. Met het schip in de as van de meetsectie zijn langskrachten gemeten voor $a = 1,6 - 3,6 - 7,2 - 10,4 - 12,8 - 16,0 - 19,6 - 30,0 - 40,0 - 60,0 - 120,0$ m.

Nadat de breekbalken verwijderd waren, zijn opnieuw de langskrachten gemeten voor deze waarden van a .

Tenslotte zijn voor deze situatie t_{13} de langskrachten bepaald op het "Groot Rijnschip", terwijl dit op 0,40 m vanaf de kolkwand lag. De metingen zijn verricht voor $a = 1,6 - 3,6 - 7,2 - 10,4 - 12,8 - 16,0 - 19,6 - 30,0 - 40,0 - 60,0 - 120,0$ m, terwijl de breekbalken verwijderd waren. Daarna is deze serie afstanden opnieuw doorgemeten met het "Groot Rijnschip" op 0,40 m vanaf de wand, maar nu met breekbalken achter de openingen in de deuren. Voor het "Groot Rijnschip" zijn geen langskrachten gemeten zonder deuren.

7.4.3 Meetresultaten langskrachten

F'_x op duwboot + twee bakken als functie van a

Voor de situaties t_1 t/m t_9 , die optreden tijdens het vullen van de hele kolk en nader omschreven zijn in tabel 7.2, zijn de langskrachten gemeten op een duwboot met twee bakken voor een aantal afstanden a. Deze langskracht bestaat, zoals vermeld in 7.4.1, uit de componenten a t/m e.

Bij de metingen zonder deuren in de goot, bestaat de gemeten langskracht uit de componenten c, d en e.

Voor de situaties t_1 t/m t_9 zijn de langskrachten op een duwboot met twee bakken, bestaande uit de componenten a t/m e, dimensieloos uitgezet tegen de afstand van de deuren tot de boeg van het schip a, in de figuren 7.9 t/m 7.13. In de figuren zijn ook de langskrachten, gemeten in de situaties t_1 t/m t_9 zonder deuren, bestaande uit de componenten c t/m e, in dimensieloze vorm aangegeven. De krachten zijn dimensieloos gemaakt door de gemeten langskrachten te delen door het gewicht van het door het schip verplaatste water. In de bovenste grafiek van figuur 7.13 is ook de dimensieloze langskracht op een duwboot met twee bakken als functie van a weergegeven voor de situatie t_7 , maar nu zonder breekbalken achter de openingen in de deuren. In de figuren 7.10 t/m 7.13 is de langskracht ook weergegeven voor $a > 120$ m. Er is daarbij aangenomen dat de langskracht voor $a > 120$ m constant is.

F'_x op duwboot + vier bakken als functie van a

Voor de situaties t_{10} t/m t_{16} , weergegeven in tabel 7.3, zijn de langskrachten gemeten op een duwboot met vier bakken voor verschillende afstanden a.

Door deze langskrachten, bestaande uit de eerder genoemde componenten a t/m e, te delen door het gewicht van het verplaatste water, zijn de krachten in dimensieloze vorm verkregen. Deze dimensieloze langskrachten op een duwboot met vier bakken zijn als functie van de afstand a uitgezet in de figuren 7.14, 7.15 en 7.16. Daarin zijn ook weergegeven de langskrachten, die gemeten zijn in de situaties t_{10} t/m t_{16} zonder deuren in de goot, welke langskracht bestaat uit de componenten c, d en e. Voor de situaties t_{10} en t_{11} is aangenomen dat de langskracht constant verloopt voor $a \geq 171,2$ m.

Voor de situaties t_{12} t/m t_{16} is aangenomen dat dit het geval is voor $a \geq 120,0$ m. In figuur 7.15 is behalve de dimensieloze langskracht, gemeten in de situaties t_{13} , met breekbalken en de langskracht, gemeten in de situatie t_{13} zonder deuren, ook de dimensieloze langskracht als functie van

a uitgezet, gemeten in situatie t_{13} , zonder dat de breekbalken achter de openingen in de deuren aanwezig waren.

F'_x op duwboot met twee bakken als functie van t

Door voor een bepaalde afstand, bijvoorbeeld $a = 3,6$ m, de langskracht op een duwboot met twee bakken, bestaande uit de componenten a t/m e , gemeten in de situaties t_1 t/m t_9 , uit te zetten tegen de tijd, kan het verloop bepaald worden van de langskracht op een duwboot met twee bakken als functie van de tijd tijdens het vulproces van de hele kolk voor $a = 3,6$ m. De langskracht is dimensieloos gemaakt door deze te delen door het gewicht van het verplaatste water. Het verband tussen de dimensieloze kracht (in de figuur aangegeven met x) in °/oo van het gewicht van het verplaatste water en de tijd in minuten is weergegeven in figuur 7.17. Daarin is ook weergegeven de dimensieloos gemaakte langskracht, bestaande uit de componenten c , d en e , als functie van de tijd in minuten, gemeten in de situaties t_1 t/m t_9 zonder deuren in de goot (deze kracht is in de figuur aangegeven met y). Door de langskracht gemeten in een situatie zonder deuren (y) af te trekken van de langskracht gemeten in een geval met deuren (x) kan de langskracht op een duwboot met twee bakken, bestaande uit de componenten a en b , dus tengevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking, als functie van de tijd bepaald worden voor deze afstand $a = 3,6$ m, tijdens het vullen van de hele kolk. Deze langskracht is in dimensieloze vorm in figuur 7.17 weergegeven met $x-y$. De genoemde procedure is gevuld voor de afstanden $a = 3,6 - 7,2 - 10,4 - 12,8 - 16,0 - 19,6 - 30,0 - 40,0 - 60,0 - 120,0$ m. Voor elk van deze afstanden zijn dan de langskrachten in dimensieloze vorm op een duwboot met twee bakken bestaande uit de componenten a t/m e , c t/m e en $a + b$ als functie van de tijd bekend voor het vulproces van de hele kolk. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 7.17 t/m 7.24.

F'_x op duwboot + vier bakken als functie van t

Door voor een bepaalde afstand a de procedure, zoals hierboven beschreven voor langskrachten op een duwboot met twee bakken voor de situaties t_1 t/m t_9 , toe te passen op de langskrachten gemeten op een duwboot met vier bakken in de situaties t_{10} t/m t_{16} , optredend tijdens het vullen van de grote deelkolk, is voor deze bepaalde a het verloop bepaald van de langskrachten, in dimensieloze vorm, op een duwboot met vier bakken, bestaande uit de componenten a t/m e , c t/m e en $a + b$, als functie van de tijd in minuten, tijdens het vullen van de grote deelkolk. Dit is gedaan voor $a = 1,6 - 3,6 - 7,2 - 10,4 - 12,8 - 16,0 -$

19,6 - 30,0 - 40,0 - 60,0 - 120,0 m. De resultaten zijn gepresenteerd in de figuren 7.25 t/m 7.30.

F'_x op "Groot Rijnschip"

Tijdens het vullen van de grote deelkolk treedt op het tijdstip $t = 4,9$ min de situatie t_{13} op. Deze situatie is nader omschreven in tabel 7.3. Bij deze situatie t_{13} zijn, zoals in paragraaf 7.4.2 beschreven is langskrachten gemeten op het "Groot Rijnschip", voor verschillende afstanden a , met het schip in de as van de meetsectie van de goot en met het schip op 0,40 m vanaf de wand. De metingen zijn verricht met en zonder breekbalken. Het verloop van de dimensieloos gemaakte langskrachten als functie van de afstand a is weergegeven in de figuren 7.31 en 7.32.

7.4.4 Conclusies langskrachtmetingen

F'_x op duwboot met twee bakken als functie van a

Door in de figuren 7.9 t/m 7.13 de langskrachten bestaande uit de componenten a t/m e te beschouwen ten opzichte van de lijn, die de langskracht, gemeten in een situatie zonder deuren en bestaande uit de componenten c t/m e weergeeft, is het verloop van de langskracht op een duwboot met twee bakken, bestaande uit de componenten a en b , dus tengevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking, als functie van de afstand a af te leiden, geldend voor een bepaalde situatie, die optreedt tijdens het vullen van de hele kolk. Het blijkt dan dat de langskracht tengevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking voor de grote waarden van a vrijwel nul is. De invloed van de straal is daar gering. De afstand, waarboven dit het geval is, bedraagt ongeveer 60 m. Bij kleiner wordende a neemt de kracht snel af en wordt negatief, hetgeen toe te schrijven is aan de invloed van de waterspiegelafzinking. Bij nog kleinere waarden van a is te zien dat voor de situaties met breekbalken de kracht weer toe gaat nemen. Dit wordt veroorzaakt door de straalwerking. Door de breekbalken wordt de straal in de richting van de waterspiegel gespreid en dit heeft een positieve invloed op de langskracht. In de bovenste grafiek van figuur 7.13 is te zien, dat voor de situatie zonder breekbalken de straal bij de bodem blijft en daardoor onder het schip door gaat, zodat de kracht vooral bepaald wordt door de waterspiegelafzinking en de positieve invloed van de straalwerking niet aanwezig is in het geval zonder breekbalken.

F'_x op duwboot met vier bakken als functie van a

In de figuren 7.14, 7.15 en 7.16 is hetzelfde verloop te zien van de langskracht tengevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking (componenten a en b), op een duwboot met vier bakken geldend voor situaties, die optreden tijdens het vulproces van de grote deelkolk. Ook in de grote deelkolk is de invloed van de straal op grotere afstand vanaf de deuren dan ongeveer 60 m gering. Alleen voor de situatie t_{12} , die optreedt op $t = 3,7$ min., is de langskracht bestaande uit de componenten a en b nog bijna 0,05 °/oo, zoals te zien is in de onderste grafiek van figuur 7.14. In figuur 7.15 is de langskracht, gemeten in de situatie t_{13} zonder breekbalken weergegeven. In de figuur is te zien dat de straal in dit geval bij de bodem blijft, waardoor voor kleine afstanden a de kracht sterk negatief wordt door de waterspiegelafzinking, terwijl in de situatie met breekbalken de straalwerking een positieve invloed op de kracht heeft.

F'_x op "Groot Rijnschip"

Ook in de figuren 7.31 en 7.32 is te zien dat de langskracht voor een situatie zonder breekbalken voor kleine a sterk negatief wordt, terwijl in de situatie met breekbalken de straalwerking een positieve langskracht op het schip tot gevolg heeft. In figuur 7.32 is te zien dat de langskracht op een "Groot Rijnschip" op 0,40 m vanaf de wand zelfs positief is voor $a = 1,6$ m, doordat de straalwerking een grote invloed heeft dan de waterspiegelafzinking. Uit vergelijking van 7.31 met figuur 7.32 blijkt dat de langskrachten op het schip in de as weinig verschillen van die op het schip op 0,40 m vanaf de wand. Alleen voor de situatie met breekbalken is de langskracht op het schip op 0,40 m vanaf de wand voor kleine a groter dan die op het schip in de as.

F'_x op duwboot + twee bakken als functie van t

In de figuren 7.17 t/m 7.24 zijn de langskrachten, bestaande uit de componenten a t/m e, c t/m e en a + b weergegeven als functie van de tijd, die tijdens het vullen van de hele kolk uitgeoefend worden op een duwboot met twee bakken. Voor $a < 40$ m is de dimensieloze langskracht tengevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking tijdens het hele vulproces negatief. De minimale waarde bedraagt $-0,57$ °/oo en treedt op voor $a = 3,6$ m en $t = 5,9$ min., ongeveer het tijdstip, waarop het debiet maximaal is, zoals te zien is in de vulkarakteristieken van de hele kolk, in figuur 7.5.

Verder is te zien dat voor $a > 40$ m de componenten a en b klein zijn. De langskracht bestaande uit de componenten c, d en e blijkt steeds positief te zijn.

F'_x op duwboot + vier bakken als functie van t

In de figuren 7.25 t/m 7.30 zijn de langskrachten, bestaande uit de componenten a t/m e, c t/m e en a + b weergegeven als functie van de tijd, die tijdens het vullen van de grote deelkolk uitgeoefend worden op een duwboot met vier bakken. Voor $a < 30$ m is de langskracht tengevolge van straalworking (component a) en waterspiegelafzinking (component b) vrijwel steeds negatief. De minimale waarde bedraagt $-0,24\%$ en treedt op voor $a = 7,2$ m en $t = 6,5$ min. In figuur 7.6, de vulkarakteristieken van de grote deelkolk, is te zien dat op dit tijdstip $t = 6,5$ min. het debiet zijn maximale waarde gepasseerd is en weer begint af te nemen. De langskracht bestaande uit de componenten c, d en e blijkt ook nu steeds positief te zijn.

7.4.5 Vergelijking langskrachten bij puntdeuren met langskrachten bij hefdeur

In Bosma [4] is de toepassing van de "procedure TROS + vulstraal" beschreven voor de sluis te Wijk bij Duurstede. In een model met een stationaire stromingssituatie zijn langskrachten, bestaande uit de componenten a t/m e gemeten voor diverse situaties, die optreden tijdens het vullen van deze sluis. De deur in dit modelonderzoek was een hefdeur.

In de figuren 17 en 18 van het figurendeel van Bosma [4] is de langskracht op een duwboot met vier bakken voor de meetsituaties uitgezet tegen de afstand a. Voor de Rozenburgse sluis is de langskracht tengevolge van a t/m e op een duwboot met vier bakken voor de meetsituaties uitgezet tegen a in de figuren 7.14 t/m 7.16. Door deze langskrachten te vergelijken met de langskracht tengevolge van de componenten c, d en e, gemeten in situaties zonder deuren, kan het verloop van de langskracht tengevolge van de componenten a en b worden afgeleid.

Uit de figuren 7.14 t/m 7.16 blijkt dat voor de vormgeving van de puntdeuren met breekbalken de langskracht tengevolge van a en b voor $a < 40$ m vrijwel steeds negatief is, eerst afneemt met kleiner wordende a en daarna weer toeneemt, maar vrijwel niet meer positief wordt. Voor de vormgeving van de hefdeur blijkt uit de figuren 17 en 18 van Bosma [4] dat de langskracht tengevolge van a en b voor kleiner wordende a in situaties met breekbalken

eerst afneemt, daarna toeneemt, voor veel situaties positief wordt en daarna weer afneemt. Hieruit is af te leiden dat met de vormgeving van de hefdeur de straalwerking voor bepaalde afstanden a een grotere invloed heeft dan met de vormgeving van de puntdeuren, terwijl met de vormgeving van de puntdeuren de straal minder wordt gebroken en de waterspiegelafzinking overheerst.

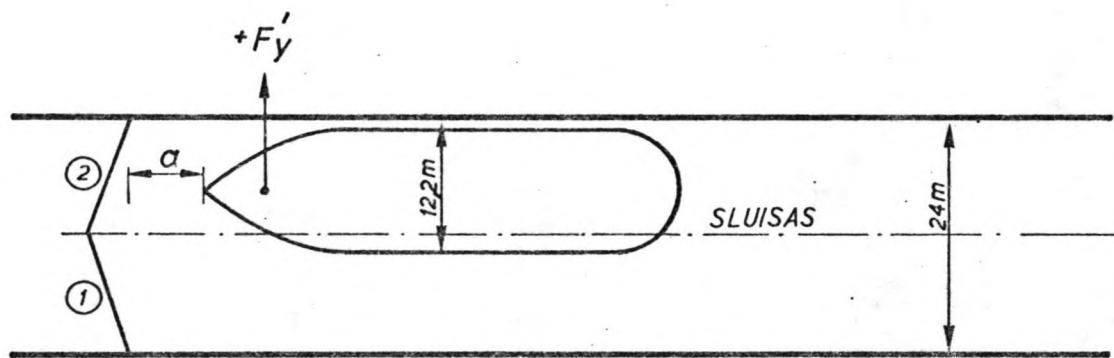
Er kan alleen een globale vergelijking worden gemaakt, omdat de gegevens van de meetsituaties, zoals debiet, waterstand, enz., verschillend zijn voor beide modelonderzoeken.

7.5 Dwarskrachtmetingen op voorschip

7.5.1 Beschrijving van de metingen

Om een indruk te krijgen van de dwarskrachten zijn een aantal dwarskrachtmetingen verricht in een stationaire stromingstoestand.

In het model is de situatie t_{13} ingesteld. De situatie treedt op tijdens het vullen van de grote deelkolk op het tijdstip $t = 4,9$ min., zie tabel 7.3. Het debiet bedraagt dan $43,35 \text{ m}^3/\text{s}$, hetgeen gemeten is met de V-stuw. De waterdiepte benedenstrooms van de deuren is dan 7,51 m en is ingesteld met behulp van de regelklep aan het eind van de goot en is gemeten met peilnaald 3. De schuiven van de deuren zijn op een hefhoogte van 0,96 m vastgezet. Voor op het "Groot Rijnschip" is een beugeltje bevestigd in dwarsrichting, waartussen een draad gespannen kan worden. Het schip is op 0,40 m vanaf de wand en op een afstand a vanaf de deuren gelegd. De draad is bevestigd aan de krachtopnemer en net als bij de langskrachtmeting kan nu de gemiddelde dwarskracht in een stationaire stromingssituatie, op de voorzijde van het schip gedurende een tijdsinterval Δt worden bepaald voor deze situatie. De achterzijde van het schip moet op zijn plaats worden gehouden. De dimensielloze dwarskracht F'_y is positief genoemd in de richting van de wand, waarlangs het schip op een afstand van 0,4 m ligt.



7.5.2 Meetprogramma

In de eerste plaats zijn metingen verricht met het "Groot Rijnschip" op 0,40 m vanaf de wand in de situatie t_{13} en voor $a = 3,6 - 7,2 - 10,4 - 16$ m. Bij deze metingen waren de breekbalken achter de openingen in de deuren aanwezig.

Vervolgens is de dwarskracht in een stationaire stroming ook gemeten voor bovenvermelde vier afstanden a , terwijl de breekbalken niet aanwezig waren.

7.5.3 Meetresultaten dwarskrachten op voorschip

De gemeten dwarskrachten op de voorzijde van het schip op 0,40 m vanaf de wand in de situatie t_{13} zijn voor de vier waarden van a , zowel met als zonder breekbalken weergegeven in tabel 7.4.

Tabel 7.4 Dwarskrachten op voorzijde "Groot Rijnschip" voor situatie t_{13}

a [m]	F'_y met breekbalken [°/oo]	F'_y zonder breekbalken [°/oo]
3,6	-0,17	-0,51
7,2	+0,02	-0,28
10,4	-0,01	-0,02
16,0	+0,03	-0,13

7.5.4 Conclusies dwarskrachtmetingen op voorschip

Voor de situatie met breekbalken blijkt de dwarskracht in een stationaire stroming op de voorzijde van het "Groot Rijnschip" voor $a > 7,2$ m klein te zijn. Voor de situatie zonder breekbalken neemt de dwarskracht af met toenemende a . In dit geval is de dwarskracht steeds negatief en groter dan in een situatie met breekbalken. De dwarskrachten in de situatie zonder breekbalken geven aanleiding tot erg grote krachten in de trossen, doordat deze onder een hoek met de x-as zijn bevestigd.

De gemeten dwarskrachten hebben betrekking op een stationaire stromings-situatie. In een sluiskolk nemen tijdens het vullen de snelheden in benedenstroomse richting af tot nul bij de benedendeur. Daardoor zullen de dwarskrachten in de kolk kleiner zijn dan in het model met de stationaire stromings-situatie.

7.6 Snelheidsmetingen

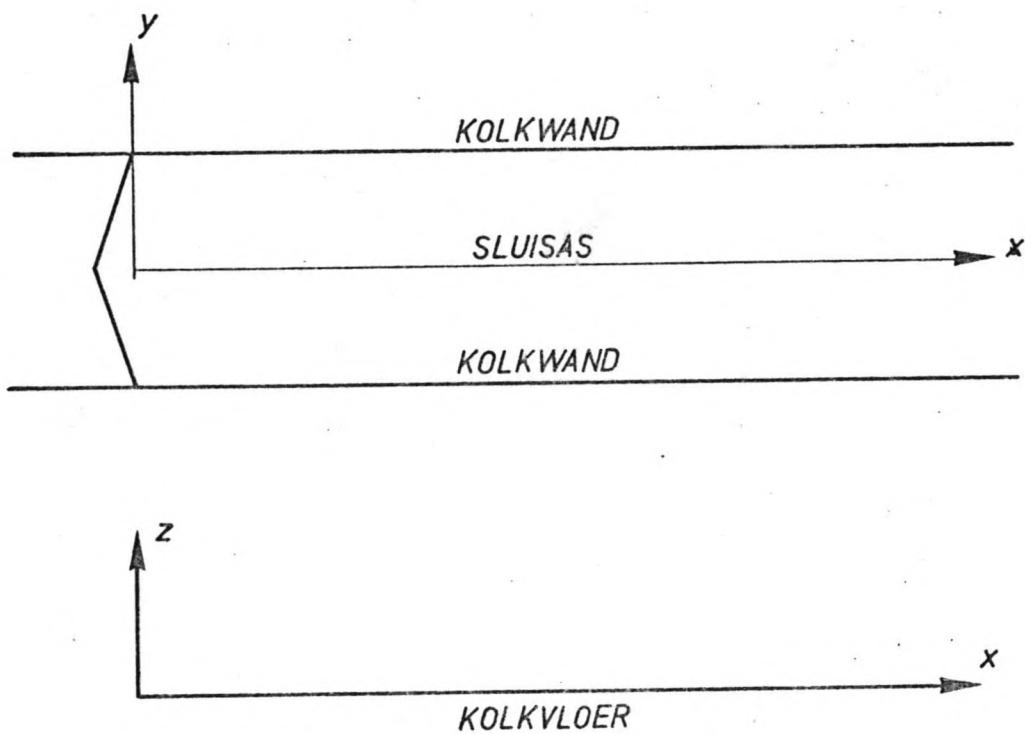
7.6.1 Beschrijving van de metingen

In het model is de situatie t_{13} ingesteld. Deze situatie treedt op tijdens het vullen van de grote deelkolk op het tijdstip $t = 4,9$ min. Het debiet bedraagt dan $32,35 \text{ m}^3/\text{s}$, (tabel 7.3).

In de goot is de bij dit tijdstip behorende waterdiepte van 7,51 m ingesteld met behulp van de regelklep. De waterstand is gemeten met peilnaald 3. De schuiven zijn vastgezet op een hoogte van 0,96 m.

Aan een meetbrug, die aan de gootwanden bevestigd is en die in lengterichting van de goot verplaatst kan worden, is een stang in een klem bevestigd, samen met een schaalverdeling. De klem is in dwarsrichting van de goot over de meetbrug verstelbaar. De stang is in verticale richting verstelbaar. Op de schaalverdeling is dan de hoogte af te lezen. Onder aan de stang is een micromolen bevestigd. Met deze micromolen zijn snelheden in lengterichting van de goot gemeten op verschillende plaatsen. Ter aanduiding van de plaats, waar de snelheid gemeten is, is het volgende assenstelsel gedefinieerd.

De snelheid is positief genoemd in positieve x-richting.



7.6.2 Meetprogramma

Er zijn eerst metingen verricht zonder schip. Bij een bepaalde x-waarde van de plaats van de micromolen zijn voor $y = 0 - 3,46 - 7,68$ en 10 m de snelheden gemeten op de hoogten $z = 0,6 - 1,2 - 2,0 - 3,0 - 4,0 - 5,0 - 6,6\text{ m}$. Dit is achtereenvolgens gedaan voor $x = 2,08 - 10,0 - 20,0 - 30,0 - 40,0 - 80,0\text{ m}$. Bovendien zijn voor $x = 380\text{ m}$ en $y = 0\text{ m}$ de snelheden gemeten voor $z = 0,6 - 1,2 - 2,0 - 3,0 - 4,0 - 5,0 - 6,6\text{ m}$. De metingen zijn verricht in situatie t_{13} , met breekbalken.

Vervolgens zijn de breekbalken verwijderd en zijn voor dezelfde punten als hierboven genoemd de snelheden in x-richting gemeten voor de situatie t_{13} . Hierna is een duwboot met vier bakken met de boeg op 40 m afstand vanaf de deuren neergelegd in de as van de meetsectie van de goot en zijn voor $x = 2,08 - 10,0 - 20,0 - 30,0\text{ m}$ de snelheden gemeten op $y = 0 - 3,46 - 7,68 - 10,0\text{ m}$ en $z = 0,6 - 1,2 - 2,0 - 3,0 - 4,0 - 5,0 - 6,6\text{ m}$. Deze snelheden zijn gemeten in de situatie t_{13} met breekbalken achter de openingen in de deuren.

7.6.3 Meetresultaten snelheden

De snelheden in langsrichting, gemeten voor de situatie t_{13} zonder schip, zijn voor het geval met breekbalken en voor het geval zonder breekbalken als verticale snelheidsverdelingen weergegeven in figuur 7.33. Onder de aanname dat de snelheidsverdeling in dwarsrichting symmetrisch is ten opzichte van het x-z-vlak zijn de gemeten snelheden uitgezet als horizontale snelheidsverdelingen in de figuren 7.34 t/m 7.39 voor de situatie zonder schip en met en zonder breekbalken.

Voor de situatie t_{13} , met breekbalken zijn de gemeten snelheden uitgezet als verticale snelheidsverdelingen in figuur 7.40. Dit is gedaan voor het geval met het schip op 40 m vanaf de deuren en voor het geval zonder schip. In de figuren 7.41 t/m 7.46 zijn de gemeten snelheden weergegeven als horizontale snelheidsverdelingen. Dit is gedaan voor de situatie met breekbalken, voor het geval met en voor het geval zonder schip.

7.6.4 Conclusies snelheidsmetingen

In figuur 7.33 is te zien dat tengevolge van de breekbalken de straal gespreid wordt in de richting van de waterspiegel. De snelheden zijn aan het oppervlak over het algemeen groter dan bij de bodem. In de situatie zonder breekbalken is het beeld juist omgekeerd. Nu zijn de snelheden bij de bodem over het algemeen groter dan aan het oppervlak. Voor $x = 80$ m zijn de snelheden al redelijk gelijkmatig verdeeld.

In de figuren 7.34 t/m 7.39 is te zien dat voor zowel met als zonder breekbalken de snelheden in het midden kleiner zijn dan bij de randen. Dit is een gevolg van de verticale schotten, die in de openingen zijn aangebracht, zie figuur 7.3. De bedoeling van deze schotten is ervoor te zorgen dat de straal, die door de puntdeuren de kolk instroomt, niet in de as van de kolk geconcentreerd wordt, maar in dwarsrichting gelijkmatig verdeeld wordt. Uit de horizontale snelheidsverdelingen blijkt dat de straal inderdaad niet in de as van de kolk geconcentreerd wordt, maar dat de schotten de straal juist iets te veel naar de wanden sturen.

Uit de verticale snelheidsverdelingen in figuur 7.40 blijkt dat de invloed van het schip op de spreiding van de straal voor het schip gering is. Dit blijkt ook uit de horizontale snelheidsverdelingen in figuur 7.41 t/m 7.46.

8. Bepaling van afvoercoëfficiënt μ , wrijvingsweerstandscoëfficiënt C_f , vormweerstandscoëfficiënt C_v en Nikuradse ruwheid k

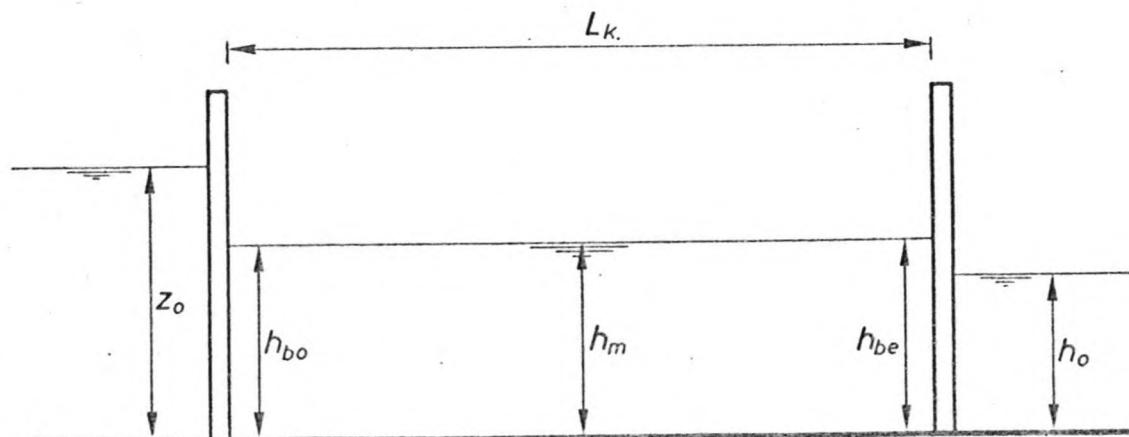
8.1 Inleiding

Voor het berekenen van langskrachten tengevolge van translatiegolven met het rekenprogramma TROS, moeten de afvoercoëfficiënt μ van de openingen in de deuren, de wrijvingsweerstandscoëfficiënt van het schip C_f , de vormweerstandscoëfficiënt van het schip C_v en de Nikuradse ruwheid k van de kolk met het schip erin bekend zijn.

Voor de bepaling van μ zijn er verschillende mogelijkheden. Er kan een gemiddelde μ worden bepaald op grond van een gegeven vultijd, maar er kan ook een μ worden bepaald, die varieert tijdens het schutproces. In paragraaf 8.2 wordt de bepaling van de afvoercoëfficiënt behandeld. Daarin wordt ook de invloed van μ op de berekende langskrachten tengevolge van translatiegolven bekeken. Het blijkt dat deze langskracht beter wordt weergegeven met een variërende μ , dan met een tijdens het vulproces constante gemiddelde μ . In de volgende paragraaf 8.3 wordt beschreven hoe aan de hand van het model met een stationaire stromingssituatie de coëfficiënten C_f , C_v en k bepaald zijn. Ook wordt nagegaan wat de invloed is van C_f , C_v en k op de berekende langskracht tengevolge van translatiegolven. Het blijkt dat deze langskracht beter wordt weergegeven met C_f en C_v waarden, die bepaald zijn aan de hand van een situatie, waarin het debiet maximaal is. De invloed van k op de langskracht is gering.

8.2 Afvoercoëfficiënt μ

8.2.1 Algemene formule



Voor het debiet door de openingen in de deur geldt:

$$Q = \mu A_d \sqrt{2g (z_o - h_{bo})} \quad (8.01)$$

8.2.2 Bepaling gemiddelde afvoercoëfficiënt met behulp van gegeven vultijd

Bosma [4] geeft een formule om een gemiddelde afvoercoëfficiënt $\bar{\mu}$ te berekenen onder de aanname, dat μ constant is gedurende het schutproces. Deze formule is

$$\bar{\mu} = \frac{l_k b_k \sqrt{2g (z_o - h_o)}}{g A_{dmax} (t_{ev} - \frac{1}{2} t_H)} \quad (8.02)$$

Deze formule is geldig als $t_{ev} > t_H$ en als A_d een lineaire functie is van t . Verder is

De gegevens voor de Rozenburgse sluis zijn

hele kolk	grote deelkolk
$l_k = 342,45 \text{ m}$	$l_k = 237,45 \text{ m}$
$b_k = 24,00 \text{ m}$	$b_k = 24,00 \text{ m}$
$z_o = 9,30 \text{ m}$	$z_o = 9,30 \text{ m}$
$h_o = 6,00 \text{ m}$	$h_o = 6,00 \text{ m}$
$A_{dmax} = 19,42 \text{ m}^2$	$A_{dmax} = 19,42 \text{ m}^2$
$t_{ev} = 900 \text{ sec}$	$t_{ev} = 690 \text{ sec}$
$t_H = 415 \text{ sec}$	$t_H = 415 \text{ sec}$

Voor de hele kolk zijn t_{ev} en t_H bepaald uit de vulkarakteristieken volgens modelonderzoek M 950, weergegeven in figuur 7.5. Voor de grote deelkolk zijn t_{ev} en t_H bepaald uit figuur 7.6. Bovenstaande gegevens ingevuld in (8.02) geeft zowel voor de hele kolk als voor de grote deelkolk $\bar{\mu} = 0,50$.

8.2.3 Bepaling afvoercoëfficiënt met behulp van vulkarakteristieken volgens M 950

Door in formule (8.01) de waterstand h_{bo} te vervangen door h_m , de waterstand in het midden van de kolk, wordt voor μ de volgende uitdrukking verkregen

$$\mu = \frac{Q}{A_d \sqrt{2g (z_o - h_m)}} \quad (8.03)$$

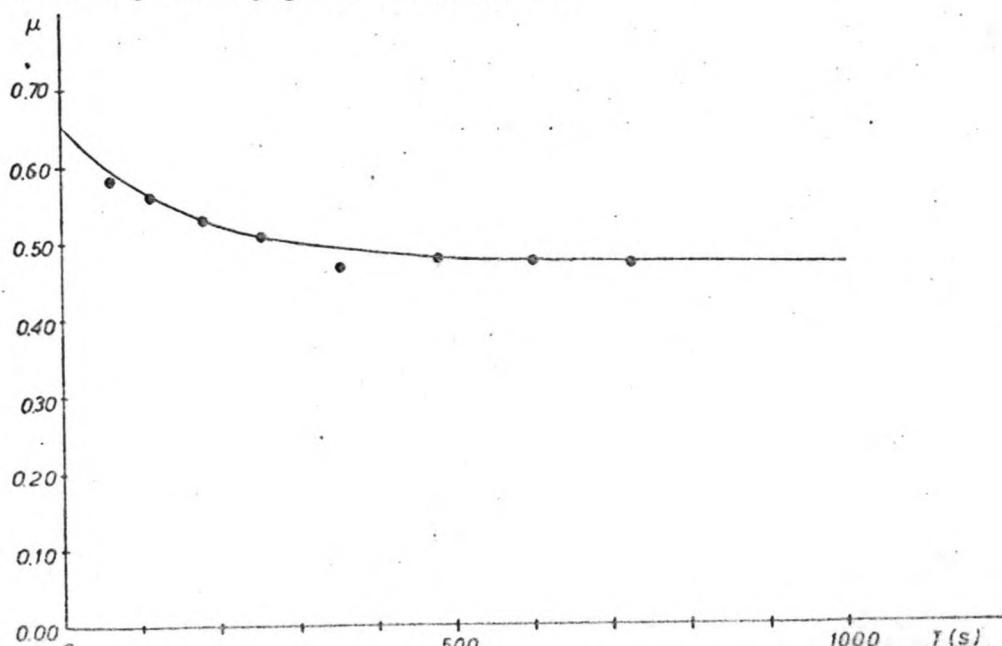
De waterstand h_m als functie van de tijd is voor de hele kolk weergegeven in figuur 7.5 en voor de grote deelkolk in figuur 7.6. Daarin zijn ook Q en A_d als functie van t weergegeven. Voor de situaties, waarin metingen van langskrachten zijn verricht (deze situaties zijn beschreven in tabel 7.2 en 7.3) is μ berekend. In tabel 8.1 zijn de gegevens uit tabel 7.2 en 7.3 overgenomen in de kolommen 1 t/m 5. In kolom 4 staat h_3 , de waterstand gemeten met peilnaald 3. Peilnaald 3 is geplaatst op 10,25 m (modelmaat) vanaf de deuren, zie figuur 7.7. Deze waterstand h_3 komt overeen met de kolkwaterstand h_m . In kolom 6 van de tabel is de waarde van A_d , het doorstroomoppervlak van de openingen voor de verschillende situaties weergegeven. In kolom 11 zijn de μ waarden weergegeven, die met de gegevens uit de kolommen 3, 4 en 6 van tabel 8.1 en met $z_o = 9,3$ m zijn berekend met (8.03).

8.2.4 Benadering afvoercoëfficiënt

Zoals uit kolom 11 van tabel 8.1 blijkt, varieert de afvoercoëfficiënt tijdens het vulproces. De mogelijkheid bestaat om μ als functie van de tijd in sec in te voeren in TROS, voor de berekening van langskrachten ten gevolge van translatiegolven. Daartoe is de afvoercoëfficiënt van de hele kolk benaderd door de volgende beschrijving.

$$\mu = 0,47 + 0,18 e^{-0,006 t} \quad (8.04)$$

Dit verband tussen μ en t is in onderstaande figuur weergegeven. Daarin zijn met stippen de waarden aangegeven van μ , die in kolom 11 van tabel 8.1 staan. Voor de tijdstippen uit kolom 2 van deze tabel zijn met (8.04) μ waarden bepaald. Deze zijn weergegeven in kolom 12.

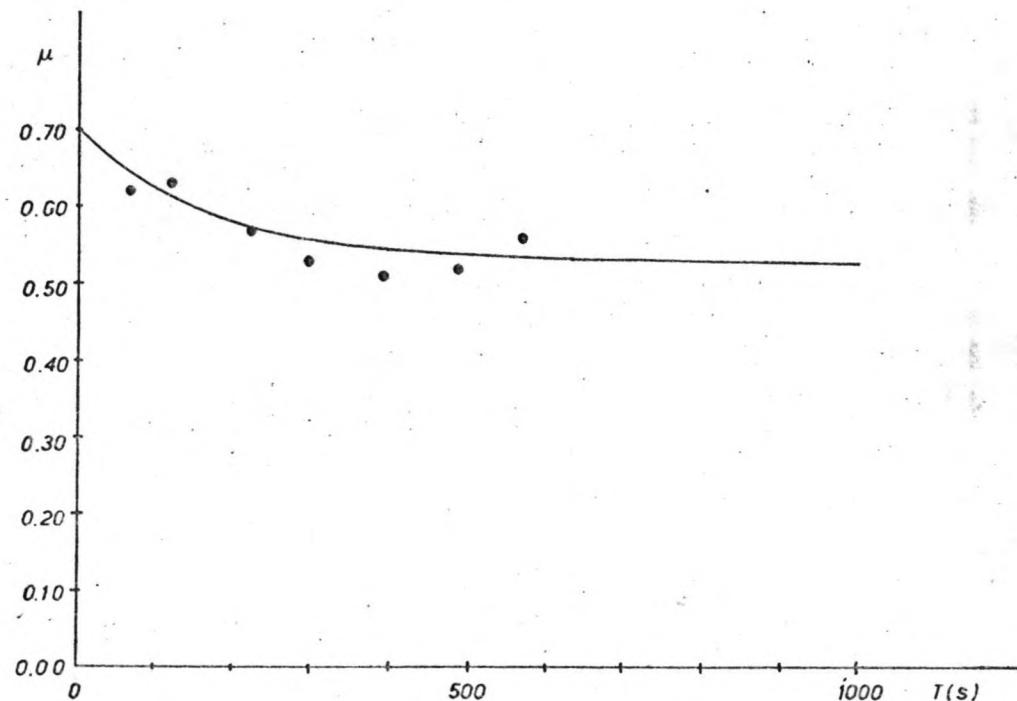


Met (8.04) zijn met TROS de vulkarakteristieken van de hele kolk bepaald en weergegeven in figuur 8.1. De figuren 8.1 (vulkarakteristieken hele kolk volgens TROS) en 7.5 (vulkarakteristieken hele kolk volgens M 950) stemmen goed overeen.

Voor de grote deelkolk is μ benaderd door

$$\mu = 0,53 + 0,17 e^{-0,006 t} \quad (8.05)$$

Dit verband tussen μ en t in sec is grafisch weergegeven in onderstaande figuur. De stippen geven de waarden van μ aan uit kolom 11 van tabel 8.1. In kolom 12 zijn de μ waarden vermeld volgens (8.05) voor de tijdstippen uit kolom 2.



De vulkarakteristieken van de grote deelkolk berekend met TROS met μ volgens (8.05) zijn weergegeven in figuur 8.2. Deze figuur stemt goed overeen met figuur 7.6, de vulkarakteristieken van de grote deelkolk volgens M 950.

8.2.5 Bepaling afvoercoëfficiënt met behulp van gemeten waterstanden in model met stationaire stroming

In het model (lengteschaal 1:40) is peilnaald 1 geplaatst op 0,75 m (modelmaat) bovenstrooms van de deuren, peilnaald 2 op 0 m vanaf de deuren en peilnaald 3 op 10,25 m (modelmaat) benedenstrooms van de deuren, zie figuur

7.7. Met behulp van de met deze peilnaalden gemeten waterstanden kan μ worden bepaald voor de verschillende meetsituaties. Met de waterstanden volgens peilnaald 1 en 2 kan μ berekend worden met

$$\mu_2 = \frac{Q}{A_d \sqrt{2g (h_1 - h_2)}} \quad (8.06)$$

Hierin is

- h_1 waterstand bepaald met peilnaald 1
 h_2 waterstand bepaald met peilnaald 2

Met de waterstanden bepaald met peilnaald 1 en 3 kan μ berekend worden met

$$\mu_3 = \frac{Q}{A_d \sqrt{2g (h_1 - h_3)}} \quad (8.07)$$

Hierin is

- h_3 waterstand bepaald met peilnaald 3

De in de verschillende situaties gemeten waterstanden h_1 , h_2 en h_3 zijn respectievelijk weergegeven in kolom 7, 8 en 4 van tabel 8.1. μ_2 en μ_3 zijn respectievelijk weergegeven in kolom 9 en 10 van deze tabel. Daarin is te zien dat de afvoercoëfficiënten μ_2 en μ_3 voor de meeste situaties niet veel van elkaar verschillen. De waarden van μ_2 en μ_3 zijn over het algemeen wel een stuk groter dan die van μ , bepaald met (8.03) aan de hand van de vulkaarakteristieken van de hele kolk en van de grote deelkolk van de Rozenburgse sluis, volgend uit modelonderzoek M 950. De waarden van deze laatste μ voor de verschillende situaties staan vermeld in kolom 11 van tabel 8.1.

8.2.6 Invloed van de afvoercoëfficiënt op de langskrachten ten gevolge van translatiegolven

Om een indruk te krijgen van de invloed van μ op de met TROS berekende langskrachten ten gevolge van translatiegolven, is een vergelijking gemaakt tussen langskrachten berekend met μ volgens (8.04) voor de hele kolk en volgens (8.05) voor de grote deelkolk en langskrachten berekend met $\mu = \bar{\mu} = 0,50$. Zie figuur 8.3 en 8.4. In het begin van het schutproces is $\bar{\mu}$ kleiner dan

dan μ volgens (8.04) of (8.05), waardoor de eerste top van de grafiek van de langskracht lager is voor $\mu = \bar{\mu}$ dan voor μ volgens (8.04) of (8.05). Voor de hele kolk blijkt uit figuur 8.3 voor $\mu = \bar{\mu}$

$$F'_{\min} = -0,26^{\circ}/oo$$

$$F'_{\max} = +0,41^{\circ}/oo$$

en voor μ volgens (8.04)

$$F'_{\min} = -0,29^{\circ}/oo$$

$$F'_{\max} = +0,49^{\circ}/oo$$

Voor de grote deelkolk blijkt uit figuur 8.4 voor $\mu = \bar{\mu}$

$$F'_{\min} = -0,21^{\circ}/oo$$

$$F'_{\max} = +0,32^{\circ}/oo$$

en voor μ volgens (8.05)

$$F'_{\min} = -0,24^{\circ}/oo$$

$$F'_{\max} = +0,40^{\circ}/oo$$

Voor de hele kolk is het verschil in F'_{\max} ruim 16% en voor de grote deelkolk 20%. De invloed van μ op de langskracht ten gevolge van translatiegolven is dus aanzienlijk. Daarom wordt in de toepassing van de "procedure TROS + vulstraal" ter bepaling van langskrachten (bepaalde componenten van de kracht meten en bepaalde componenten berekenen en vervolgens optellen) met een tijdens het schutproces variërende μ gerekend, aangezien de langskrachten voor dit geval dan meer in overeenstemming met de realiteit worden bepaald.

8.3 Wrijvingsweerstandscoëfficiënt C_f , vormweerstandscoëfficiënt C_v en Nikuradse ruwheid k .

8.3.1 Componenten van de langskracht in een uniforme stationaire stroming

In het model zijn langskrachtmetingen verricht in situaties, waarin geen deuren in de goot aanwezig waren. Het schip bevindt zich dan in een uniforme stationaire stroming. Zoals in paragraaf 7.4.1 is vermeld, bestaat de in deze situaties gemeten langskracht uit de volgende componenten:

c - langskracht door wrijvingsweerstand van het schip in een uniforme stationaire stroming (in dimensieloze vorm aangegeven met F'_f)

d - langskracht door vormweerstand van het schip in een uniforme stationaire stroming (in dimensieloze vorm aangegeven met F'_{v})

e - langskracht door helling van de waterspiegel ten gevolge van wrijving langs gootwanden en vloer van een uniforme stationaire stroming (in dimensieloze vorm aangegeven met F'_{w})

Als de gemeten langskracht, dimensieloos gemaakt door te delen door het gewicht van het verplaatste water, wordt aangeduid met F'_{r} , dan geldt

$$F'_{r} = F'_{f} + F'_{v} + F'_{w} \quad (8.08)$$

8.3.2 Bepaling wrijvingsweerstandscoëfficiënt C_f

De dimensieloze component van de langskracht ten gevolge van de wrijvingsweerstand van het schip in een uniforme stationaire stroming (F'_{f}) kan op twee manieren bepaald worden, zoals aangegeven in Bosma [4].

- Volgens Chézy

$$F'_{f} = \frac{\bar{v}_s | \bar{v}_s | s}{C_s^2 V_o} \quad (8.09)$$

- Volgens Schoenherr

$$F'_{f} = \frac{C_f^{\frac{1}{2}} \rho \bar{v}_s | \bar{v}_s | s}{\rho g V_o} \quad (8.10)$$

Hierin is

\bar{v}_s gemiddelde snelheid van het water ter plaatse van het schip

$$\bar{v}_s = \frac{Q}{b_k h_3 - b_s e_o} \quad (8.11)$$

s ontwikkelde natte oppervlak van het schip

$$s = 2.1 * (b_s + 2.e_o) \quad (8.12)$$

C_s Chézy ruwheidscoëfficiënt van het schip

$$C_s = 18 \log \left[\frac{12 R_s / n_L}{k_s + \frac{11,6 v}{3,2 \sqrt{g} \frac{\bar{v}_s}{C_s \sqrt{n_L}}}} \right] \quad (8.13)$$

Voor deze formule wordt verwezen naar Bosma [4].

R_s hydraulische straal schip

$$R_s = \frac{A_s}{b_s + 2 e_o} \quad (8.14)$$

k_s Nikuradse ruwheid van het schip in model

$$k_s = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$$

v kinematische viscositeit water

$$v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

v_o waterverplaatsing van het schip in een rustsituatie

C_f wrijvingsweerstandscoëfficiënt van het schip

volgens Schoenherr moet C_f voldoen aan

$$\sqrt{C_f} \log [C_f Re] = 0,242 \quad (8.15)$$

waarin Re het Reynoldsgetal is

$$Re = \frac{\bar{v}_s \cdot 2 l}{v \sqrt{n_L} n_L} \quad (8.16)$$

Gelijkstellen van (8.09) en (8.10) geeft

$$C_f = \frac{2g}{C_s^2} \quad (8.17)$$

In tabel 8.2 zijn in de kolommen 1, 2 en 3 respectievelijk de situatie, waarin gemeten is, het debiet en de waterstand h_3 weergegeven. Met (8.11) is \bar{v}_s bepaald voor de diverse situaties, zie kolom 5. Met (8.13) is C_s berekend voor de meetsituaties. De uitkomsten staan in kolom 11.

In kolom 12 staan de waarden van C_f , die met de berekende waarden van C_s en met (8.17) bepaald zijn. Ook aan de hand van (8.15) en (8.16) is C_f voor de diverse situaties bepaald, zie kolom 13. Nu deze coëfficiënten C_f en C_s

bepaald zijn, kan met (8.09) F'_f berekend worden volgens Chézy, zie kolom 9 en volgens Schoenherr met (8.10), zie kolom 14.

8.3.3 Bepaling vormweerstandscoëfficiënt C_v

De in de verschillende situaties gemeten langskrachten zijn in dimensieloze vorm weergegeven in kolom 7 van tabel 8.2. Uit (8.08) volgt

$$F'_v = F'_r - F'_f - F'_w$$

F'_f is voor de meetsituaties bepaald in de vorige paragraaf, zie kolom 9 en 14 van tabel 8.2. F'_w wordt in de volgende paragraaf bepaald. De resultaten daarvan staan in kolom 8 van tabel 8.2 en zoals gezegd staan de gemeten langskrachten F'_r in kolom 7. F'_v kan met deze gegevens dus voor iedere situatie bepaald worden.

De uitkomsten staan in kolom 15. Hierbij zijn voor F'_f de waarden van kolom 9 gebruikt.

In Bosma [4] is de volgende uitdrukking gegeven voor F'_v :

$$F'_v = \frac{C_v \frac{1}{2} \rho |v_k| v_k A_s}{\rho g V_o} \quad (8.18)$$

Hierin is

C_v vormweerstandscoëfficiënt van het schip

v_k snelheid van het water voor de boeg van het schip

$$v_k = \frac{Q}{b_k h_3} \quad (8.19)$$

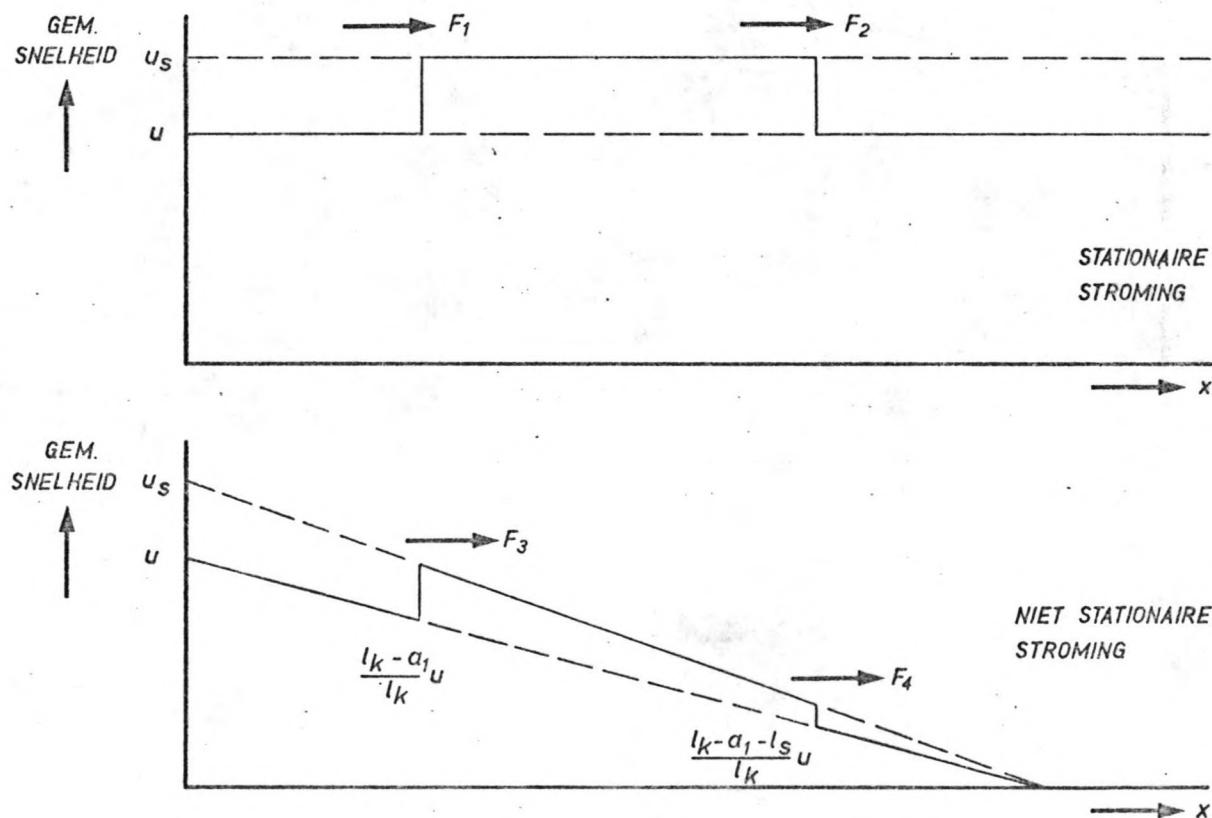
Voor de diverse situaties is v_k weergegeven in kolom 4 van tabel 8.2.

Met (8.18) is nu voor de verschillende situaties C_v te berekenen, omdat F'_v bekend is, zie kolom 15. De uitkomsten van C_v zijn weergegeven in kolom 16. Daaruit blijkt dat C_v aan het begin van het schutproces erg groot is. Aan deze grote waarden moet niet veel waarde worden gehecht, omdat in de bijbehorende meetsituaties de debieten erg klein zijn en daardoor de meetfouten maximaal zijn. In feite komen ook de onnauwkeurigheden in de bepaling van F'_f en F'_w tot uitdrukking in C_v . De C_v waarden in kolom 16 zijn geldig voor een uniforme stationaire stroming. Omdat tijdens een schutproces van

een sluis de stroming niet uniform en stationair is, moet C_v met een correctiefactor η worden vermenigvuldigd. Als de langskracht door vormweerstand wordt gesplitst in een bijdrage van de boeg en een bijdrage van het hek, geldt

$$F'_v = \xi \frac{C_v \frac{1}{2} \rho |u| A_s}{\rho g V_o} + (1 - \xi) \frac{C_v \frac{1}{2} \rho |u| u A_s}{\rho g V_o}$$

Hierin is ξ een coëfficiënt en u de gelijkmatig verdeelde snelheid ter plaatse van de boedeur.



Als wordt aangenomen dat de watersnelheid in de kolk lineair afneemt van u tot 0, dan geldt, zie figuur

$$F'_v = \xi \frac{C_v^{\frac{1}{2}} \rho \left| \frac{l_k - a}{l_k} u \right| \left(\frac{l_k - a}{l_k} \right) A_s}{\rho g V_o} + \\ + (1 - \xi) \frac{C_v^{\frac{1}{2}} \left| \frac{l_k - a - 21}{l_k} u \right| \left(\frac{l_k - a - 21}{l_k} \right) u A_s}{\rho g V_o} \quad (8.20)$$

De snelheid v_k , juist voor de boeg van het schip is

$$v_k = u \frac{(l_k - a)}{l_k} \quad (8.21)$$

Wanneer de correctiefactor van C_v genoemd wordt dan is met (8.18)

$$F'_v = \eta C_v \frac{\frac{1}{2} \rho v_k |v_k| A_s}{\rho g V_o} \quad (8.22)$$

Substitutie van v_k volgens (8.21) in (8.22) en vervolgens gelijkstellen van (8.22) en (8.20) geeft de volgende uitdrukking voor η

$$\eta = \xi + (1 - \xi) \left(1 - \frac{21}{l_k - a} \right)^2 \quad (8.23)$$

Onder de aanname dat $\xi = 0,5$, zijn voor de hele kolk en voor de grote deelkolk de waarden van η voor verschillende afstanden a weergegeven in hieravvolgende tabel 8.3.

Tabel 8.3

a	hele kolk	grote deelkolk
	$i_k = 342,45$	$i_k = 237,45$
	$n = 114,5$	$n = 191,0$
3,6	0,72	0,52
7,2	0,72	0,51
10,4	0,71	0,51
12,8	0,71	0,51
16,0	0,71	0,51
19,6	0,71	0,51
30,0	0,70	0,50
40,0	0,69	0,50
60,0	0,68	-
120,0	0,62	-

Waarden van correctiefactor n

8.3.4 Bepaling Nikuradse ruwheid k van de kolk met schip erin

De dimensieloze langskracht ten gevolge van de helling van de waterspiegel, die veroorzaakt wordt door wrijving van de uniforme stationaire stroming langs wanden en vloer van de goot, is aangeduid met F'_w . In Bosma [4] is voor F'_w de volgende uitdrukking gegeven

$$F'_w = i_k = \frac{\bar{v}_s^2}{C_k^2 R_k} \quad (8.24)$$

Hierin is

i_k helling van de waterspiegel

\bar{v}_s gemiddelde snelheid ter plaatse van het schip, zie (8.11)

C_k Chézy coëfficiënt van de goot

$$C_k = 18 \log \left[\frac{12 R_k / n_L}{k_k + \frac{11,6 \bar{v}}{3,2 \sqrt{g} \frac{\bar{v}_s}{C_k \sqrt{n_L}}}} \right] \quad (8.25)$$

R_k hydraulische straal

$$R_k = \frac{b_k \cdot h_3}{b_k + 2 h_3} \quad (8.26)$$

k_k Nikuradse ruwheid van modelgoot

$$k_k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

De waarden van R_k , C_k en \bar{v}_s zijn voor de meetsituaties respectievelijk weer-gegeven in kolom 6, 10 en 5 van tabel 8.2. Met deze gegevens kan met

(8.24) F'_w worden bepaald, zie kolom 8.

Voor de Chézy coëfficiënt C wordt het gemiddelde genomen van C_k (geldig voor

de kolk) en C_s (geldig voor het schip). Met deze waarde van C kan met

(8.27) k bepaald worden.

8.3.5 Invloed C_f , C_v en k op langskracht ten gevolge van translatiegolven

Om een indruk te krijgen van de invloed van C_f en C_v op de met TROS berekende langskrachten ten gevolge van translatiegolven, is voor het vullen van de hele kolk een berekening gemaakt van deze langskracht op een duwboot met twee bakken met de minimale waarden van C_f en C_v , die in kolom 13 en 17 van tabel 8.2 voor de hele kolk voorkomen en een berekening met de maximale waarden van C_f en C_v . Uit de tabel volgt:

$$\text{minimaal} \quad C_f = 0,0069 \quad C_v = 0,8$$

$$\text{maximaal} \quad C_f = 0,0139 \quad C_v = 8,1$$

De uitkomsten van beide berekeningen zijn weergegeven in figuur 8.5. Daarin is te zien dat de verschillen in de langskrachten het grootst zijn in de buurt van $t = 400$ s. Dit is ongeveer op het tijdstip dat het debiet maximaal is, zie figuur 8.1. In het begin van het vulproces zijn de verschillen in de langskrachten gering.

Voor C_f en C_v minimaal: $F'_{x \max} = 0,37\%$

Voor C_f en C_v maximaal: $F'_{x \max} = 0,39\%$

Het verschil in $F'_{x \max}$ is ongeveer 5%.

Grotere verschillen treden op in de negatieve langskrachten. Voor C_f

Voor C_f en C_v minimaal: $F'_{x \min} = -0,24\%$

Voor C_f en C_v maximaal: $F'_{x \min} = -0,11\%$

Het verschil in $F'_{x \min}$ is ongeveer 54%.

Bij het beschouwen van deze verschillen, moet bedacht worden dat deze extreme waarden van C_f en C_v bepaald zijn voor situaties waarin het debiet in het model erg klein is. De meetfouten zijn dan maximaal. Het is daarom aan te bevelen in de "procedure TROS + vulstraal" te rekenen met C_f en C_v waarden,

die bepaald zijn aan de hand van een situatie, waarbij het debiet ongeveer maximaal is, omdat de meetfouten dan het geringst zijn.

Om een indruk te krijgen van de invloed van k op de met TROS berekende langskrachten ten gevolge van translatiegolven, is een berekening uitgevoerd met $k = 10^{-2}$ m en een berekening met $k = 10^{-7}$ m. De uitkomsten zijn gepresenteerd in figuur 8.6. De verschillen zijn gering. De maximale langskrachten zijn voor beide berekeningen vrijwel gelijk. De minimale negatieve langskrachten zijn

$$\begin{array}{ll} \text{voor } k = 10^{-2} \text{ m} & F'_{x \min} = -0,21^\circ/\text{oo} \\ \text{voor } k = 10^{-7} \text{ m} & F'_{x \min} = -0,24^\circ/\text{oo} \end{array}$$

Het verschil in $F'_{x \min}$ is 12,5%.

8.3.6 Toegepaste waarden van C_f , C_v en k

Zoals in de vorige paragraaf is vermeld, kunnen voor C_f en C_v het beste de waarden worden genomen, die bepaald zijn voor een situatie, waarin het debiet ongeveer maximaal is. Uit kolom 12 en 16 van tabel 8.2 resulteert dit voor een duwboot met twee bakken in de hele kolk in $C_f = 0,007$ en $C_v = 2,6$, zie tabel 8.2 voor $t = 5,9$ min tijdens vullen hele kolk. Voor de correctiefactor η wordt voor de duwboot met twee bakken in de hele kolk voor alle afstanden a een waarde van 0,7 aangehouden, zie tabel 8.3. Dit resulteert in een gecorrigeerde $C_v = 1,8$, voor een duwboot met twee bakken in de hele kolk.

Tijdens het vullen van de grote deelkolk is het debiet ongeveer maximaal voor $t = 4,9$ min. Uit kolom 12 en 16 van tabel 8.2 volgt voor een duwboot met vier bakken in de grote deelkolk $C_f = 0,007$ en $C_v = 3,1$. Voor de correctiefactor η wordt genomen $\eta = 0,5$, zie tabel 8.3. Dit resulteert voor een duwboot met vier bakken in de grote deelkolk in $C_v = 1,6$.

Uit de berekeningen van paragraaf 8.3.4 volgt voor de hele kolk met daarin een duwboot met twee bakken $k = 0,0025$ m en voor de grote deelkolk met daarin een duwboot met twee bakken $k = 0,0028$ m.

9. Vergelijking compleet modelonderzoek met "procedure TROS + vulstraal"
voor Rozenburgse sluis

9.1 Inleiding

Voor de hele kolk en de grote deelkolk van de Rozenburgse sluis zijn in modelonderzoek M 950 ondermeer langskrachten op schepen gemeten tijdens het vulproces. Deze langskrachtregistraties worden in dit hoofdstuk voor een aantal gevallen vergeleken met de met TROS berekende langskrachten ten gevolge van translatiegolven, waarbij de aan de hand van het in hoofdstuk 7 beschreven modelonderzoek met een stationaire stromingssituatie bepaalde langskrachten ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking zijn opgeteld. Het blijkt dat het totaalbeeld en de "perioden" in de langskrachten goed overeenstemmen. In de grootte van de krachten treden vooral bij kleine afstanden a verschillen op. Bij grote afstanden a is de invloed van de straal op de langskracht gering en zijn de verschillen in de krachten minder groot. De verschillen in de totale krachten zijn voornamelijk een gevolg van de verschillen in de weergave van de straalwerking en de waterspiegelafzinking van de beide modelonderzoeken.

9.2 Modelonderzoek M 950

In 1968 is bij het Waterloopkundig Laboratorium een modelonderzoek (M 950) verricht voor de destijds te bouwen Rozenburgse sluis, zie Andriessen [2]. Daarin zijn ondermeer langskrachten bepaald, die tijdens het vulproces van de hele kolk en van de grote deelkolk op een schip worden uitgeoefend. Een voorbeeld van een registratie van zo'n langskrachtmeting is weergegeven in figuur 9.1. Daarin is tevens dezelfde registratie geschematiseerd weergegeven. Een aantal van dergelijke geschematiseerde langskrachtregistraties zullen gebruikt worden om langskrachten bepaald met de "procedure TROS + vulstraal" mee te vergelijken.

9.3 Toepassing "procedure TROS + vulstraal" op de Rozenburgse sluis

In hoofdstuk 7 is beschreven hoe aan de hand van een modelonderzoek met een stationaire stromingstoestand de langskracht ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking is bepaald als functie van t tijdens het vulproces van de hele kolk of de grote deelkolk van de Rozenburgse sluis. Met gebruik

van de in het vorige hoofdstuk bepaalde coëfficiënten kan met het rekenprogramma TROS de langskracht ten gevolge van translatiegolven worden bepaald. Wat betreft de hele kolk zijn voor vier afstanden a de langskracht ten gevolge van translatiegolven en de langskracht ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking op een duwboot met twee bakken bepaald als functie van de tijd, zie figuur 9.2, 9.4, 9.6 en 9.8. De afstanden a , waarbij de metingen zijn verricht, verschillen iets van de afstanden a , waarbij de langskrachten ten gevolge van translatiegolven zijn berekend, omdat in het rekenprogramma TROS de boeg van het schip in een roosterpunt komt te liggen. De vier afstanden, waarbij metingen zijn verricht, zijn 3,60 - 7,20 - 171,20 en 222,95 m, de afstanden in TROS zijn 3,60 - 7,13 - 171,22 en 222,99 m. De verschillen in deze afstanden zijn dus zeer klein. De in het hydraulische en mathematische model bepaalde krachten opgeteld, geven de totale langskracht tijdens het vulproces voor deze vier afstanden a , zie figuur 9.3, 9.5, 9.7 en 9.9. In deze figuren is ook voor de betreffende gevallen de totale langskracht gemeten in modelonderzoek M 950 weergegeven.

Wat de grote deelkolk betreft is eveneens voor vier afstanden a (3,60 - 12,80 - 19,60 en 40,00 m in het model en 3,60 - 12,84 - 19,79 en 40,71 m in TROS) de langskracht ten gevolge van translatiegolven en de langskracht ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking bepaald, zie figuur 9.10, 9.13, 9.15 en 9.17. De beide langskrachten uit figuur 9.10 zijn opgeteld en weergegeven in figuur 9.11 en 9.12. Daarin zijn ook de totale in M 950 gemeten langskrachten voor $a = 3,6$ m weergegeven. Voor deze afstand $a = 3,6$ m is in M 950 twee maal voor dezelfde situatie een langskrachtregistratie bepaald. In figuur 9.14 zijn de beide krachten uit figuur 9.13 opgeteld weergegeven en ook de in M 950 gemeten langskracht voor $a = 12,8$ m. De beide krachten uit figuur 9.15 zijn opgeteld weergegeven in figuur 9.16, evenals de langskracht volgens M 950 voor $a = 19,60$ m. Tenslotte zijn de beide krachten uit figuur 9.17 opgeteld weergegeven in de figuren 9.18 en 9.19. Voor de afstand $a = 40,00$ m zijn in M 950 weer twee langskrachtregistraties bepaald. Deze zijn geschematiseerd weergegeven in figuur 9.18 en 9.19.

9.4 Vergelijking langskrachten volgens "procedure TROS + vulstraal" met langskrachten volgens M 950

In de figuren 9.3, 9.5, 9.7 en 9.9 zijn voor het vullen van de hele kolk de totale langskracht op een duwboot met twee bakken, volgend uit modelonderzoek M 950 en volgend uit de "procedure TROS + vulstraal" weergegeven

als functie van de tijd. Uit de figuren blijkt dat de "perioden" over het algemeen goed overeenstemmen, maar in de grootte van de langskrachten treden verschillen op. In het totale beeld van de langskrachten bestaat over het algemeen redelijke overeenstemming. Voor grote afstanden a heeft de straal slechts een geringe invloed, zie bijvoorbeeld figuur 9.8, waarin $a = 222,99$. Uit figuur 9.9 blijkt dat voor deze grote afstand de langskrachten aan het begin van het vulproces redelijk overeenstemmen. In de figuren 9.11, 9.12, 9.14, 9.16, 9.18 en 9.19 zijn de langskrachten op een duwboot met vier bakken in de grote deelkolk weergegeven als functie van de tijd, volgend uit M 950 en volgend uit de "procedure TROS + vulstraal". Ook voor deze gevallen is er goede overeenstemming in de "perioden" en het totale beeld. De verschillen in grootte van de langskrachten zijn minder groot dan voor de duwboot met twee bakken in de hele kolk. Voor $a = 40$ m is de invloed van de straal gering, zie figuur 9.17. Uit de figuren 9.18 en 9.19 blijkt dat voor deze afstand de verschillen in de langskrachten niet erg groot zijn.

Op grond van de gemaakte vergelijkingen kan gesteld worden dat de langskrachten gevolge van translatiegolven, berekend met TROS, redelijk tot goed wordt benaderd. Bij deze berekening met TROS veroorzaken vooral de vier in hoofdstuk 8 behandelde coëfficiënten de belangrijkste onnauwkeurigheden. Wat betreft de langskracht ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking treden grotere verschillen op. Een groot deel van deze verschillen is het gevolg van het feit dat met twee verschillende modelonderzoeken is gewerkt (M 950 en M 1481), waarbij verschillende schalen zijn toegepast en andere schepen en deuren. Wel is getracht de afmetingen van de schepen en de deuren op grond van de gegevens van M 950 te doen overeenstemmen met de afmetingen van de schepen en deuren, die in M 950 zijn gebruikt. In kolom 9 en 10 van tabel 8.1 zijn μ -waarden weergegeven, volgend uit het modelonderzoek (M 1481) met een stationaire stroming. In kolom 11 van deze tabel zijn μ -waarden vermeld, volgens uit modelonderzoek M 950. De μ -waarden volgens M 950 zijn lager dan die volgens M 1481. Op grond van deze verschillen in μ -waarden kan geconcludeerd worden dat de vormgeving van de deuren met de openingen, de breekbalken en de schuiven waarschijnlijk niet volledig overeenstemde in beide modelonderzoeken. Dit verschil in vormgeving verklaart voor een belangrijk deel de gevonden verschillen in de langskrachten.

Een ander deel van de verschillen kan veroorzaakt worden doordat de langskrachten ten gevolge van translatiegolven en de langskrachten ten gevolge van de vulstraal in de "procedure TROS + vulstraal" als onafhankelijk van

elkaar worden beschouwd.

10. Uitbreiding van het rekenprogramma TROS

10.1 Inleiding

Na de eerste ervaringen met het rekenprogramma TROS bleek een duidelijke behoefte te bestaan om het aantal toepassingsmogelijkheden te vergroten. Daartoe zal het huidige standaardprogramma worden uitgebreid. Enkele aspecten van deze uitbreiding komen in dit hoofdstuk aan de orde, zoals de mogelijkheid om langskrachten op meerdere schepen in de kolk te berekenen, de keuzemogelijkheid voor de flexibele of de starre schip theorie, de invloed van het boven- en benedenpand op de randvoorwaarden, de mogelijkheid om langskrachten te berekenen op schepen in sluizen met een bodem- of wandvul- en ledigingssysteem en tenslotte de grotere uitvoermogelijkheden van het programma.

10.2 Meerdere schepen

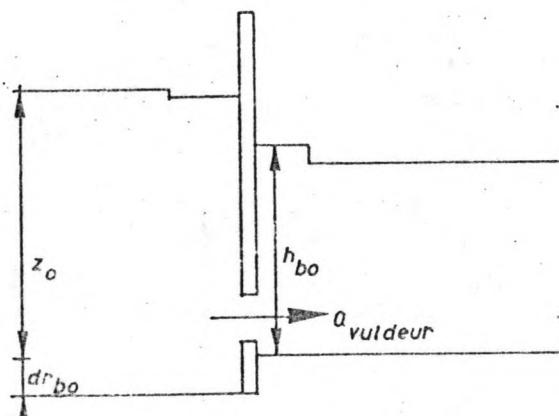
Met het huidige programma TROS kunnen langskrachten ten gevolge van translatiegolven op één schip berekend worden. Met een uitbreiding van het programma wordt getracht het mogelijk te maken langskrachten op meerdere schepen in de kolk te berekenen. Dit betekent dat voor ieder extra schip twee extra vergelijkingen, een stamp- en een dompvergelijking, opgelost moeten worden.

10.3 Flexibele- en starre schip theorie

De langskrachten ten gevolge van translatiegolven kunnen met het uitgebreide programma berekend worden met de flexibele of met de starre schip theorie. Bij keuze voor de starre schip theorie kunnen de schepen niet naast elkaar liggen. Dit is wel mogelijk bij keuze van de flexibele schip theorie. In de huidige standaardversie van TROS kan bij toepassing van de flexibele schip theorie de vorm- en wrijvingsweerstand van het schip niet in de berekening betrokken worden. Dit kan wel bij de nieuwe versie. Een duwboot met bijvoorbeeld twee maal twee bakken ervoor is geen star geheel, maar de koppeling van de duwboot aan de bakken en de voorste twee bakken aan de achterste twee is op te vatten als een soort "scharnier". Met de uitgebreide versie van TROS kunnen de langskrachten op een dergelijk duwkonvooi berekend worden alsof drie starre schepen achter elkaar liggen. Hierbij kan ook de doorsnede aangepast worden.

10.4 Invloed boven- en benedenpand

Op het ogenblik dat de schuiven geheven worden, gaat er bij het vulproces in de kolk een positieve translatiegolf lopen. In de voorhaven gaat een negatieve translatiegolf lopen. Omdat het debiet door de openingen afhankelijk is van het momentane verval over de deuren, zal dit debiet minder groot worden door de negatieve translatiegolf in de voorhaven. Zoals reeds eerder geconstateerd is, is de oplossing van het stelsel vergelijkingen gevoelig voor de randvoorwaarden. Daarom wordt de randvoorwaarde voor het debiet door de vuldeur zodanig gewijzigd, dat de invloed van de negatieve translatiegolf in de voorhaven in de randvoorwaarde is opgenomen.



De golfhoogte η van de translatiegolf in de voorhaven kan bepaald worden met:

$$\eta = \frac{Q_{vuldeur}}{b_{bo} \cdot c} \quad (10.01)$$

Hierin is:

b_{bo} breedte bovenpand

c voortplantingssnelheid translatiegolf in bovenpand

$$c = \sqrt{g (z_o + dr_{bo})} \quad (10.02)$$

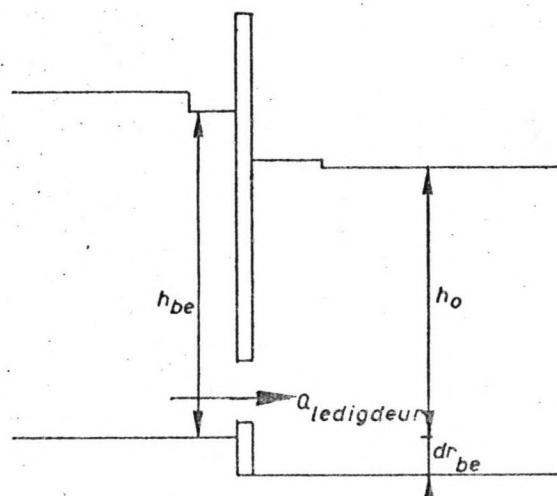
dr_{bo} is de hoogte van de kolkvloer min de hoogte van de bodem van het bovenpand

Het debiet door de vuldeur is

$$Q_{vuldeur} = \mu A_d \sqrt{2g (z_o - h_{bo} + \eta)} \quad (10.03)$$

Dit is de nieuwe randvoorwaarde in het uitgebreide TROS programma.

Tijdens het ledigen zal in de kolk een negatieve translatiegolf gaan lopen en in het benedenwater een positieve translatiegolf.



De randvoorwaarde voor het debiet door de ledigdeur is

$$Q_{ledigdeur} = \mu A_d \sqrt{2g (h_{be} - h_o - \eta)} \quad (10.04)$$

met

$$\eta = \frac{Q_{ledigdeur}}{b_{be,c}} \quad (10.05)$$

hierin is

b_{be} breedte benedenpand

c loopsnelheid translatiegolf in benedenpand

$$c = \sqrt{g (h_o + dr_{be})} \quad (10.06)$$

dr_{be} is de hoogte van de kolkvloer min de hoogte van de bodem van het benedenpand

Reflecties van de golven in het boven- of benedenpand worden buiten beschouwing gelaten.

10.5 Bodem- of wandvul- en ledigingssysteem

Eerder is geconstateerd dat het rekenprogramma NEBAS niet goed geschikt is voor het bepalen van langskrachten op schepen in sluizen met een bodem- of wandvul- en ledigingssysteem. In verband daarmee zal getracht worden het mogelijk te maken langskrachten ten gevolge van translatiegolven in dergelijke sluizen met de uitgebreide versie van TROS te berekenen. De debieten door de kolkvloer of wand worden niet met het programma TROS bepaald, maar met het in ontwikkeling zijnde programma BODVUSYS, zie Deelen [5], en als randvoorwaarden in TROS ingevoerd. Bij deze sluizen treden niet, zoals bij sluizen met het vul- en ledigingssysteem in de hoofden, langskrachten ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking op, zodat met de uitgebreide versie van TROS in combinatie met BODVULSYS de totale langskracht berekend kan worden.

10.6 Uitvoer van het programma

Per rekengeval kunnen drie plots uitgevoerd worden. Ten eerste de vul- of ledingskarakteristieken. Ten tweede de langskrachten op de schepen in de kolk. Ten derde de waterstand in de kolk voor verschillende tijdstippen van het vul- of ledingsproces. Behalve in dimensieloze vorm kunnen de langskrachten ook in "Newton" (N) worden uitgevoerd.

De langskrachten ten gevolge van straalwerking en waterspiegelafzinking kunnen in tabelvorm ingevoerd worden en door het programma bij de langskracht ten gevolge van translatiegolven worden opgeteld, zodat de totale langskracht uitgevoerd kan worden.

10.7 Opmerking

Aangegeven zijn enkele uitbreidingen van het huidige standaardprogramma TROS. Omdat op dit moment de uitgebreide versie nog in ontwikkeling is, kan niet gezegd worden in hoeverre de genoemde uitbreidingen gerealiseerd kunnen worden.

11. Voortzetting onderzoek

11.1 Inleiding

Er zijn een aantal onderwerpen betreffende het vullen en ledigen van schutsluizen, die nader onderzocht dienen te worden. In dit hoofdstuk worden die onderwerpen aangegeven, die het meest dringend zijn en in de naaste toekomst om antwoord vragen.

11.2 Vul- en ledigingssysteem via vloer of wanden

Wanneer het programma TROS uitgebreid is, kunnen in combinatie met het rekenprogramma BODVULSYS langskrachten berekend worden op schepen in sluizen met vul- en ledigingssystemen via de bodem of de wanden. Bij dergelijke systemen komen korte golven in de kolk voor. In het programma TROS worden de lange golfvergelijkingen opgelost. Nagegaan moet worden of langskrachten op schepen in dergelijke sluizen met de lange golfvergelijkingen voldoende nauwkeurig berekend worden. Dit kan gedaan worden door de berekende langskrachten te vergelijken met in vroeger modelonderzoek gemeten langskrachten.

11.3 Langskrachten ten gevolge van de vulstraal

Een volgend onderwerp, dat nader onderzocht dient te worden is de theoretische benadering van de langskracht ten gevolge van de vulstraal. Dit onderzoek kan zich bijvoorbeeld eerst richten op de beschrijving van het gedrag van de vulstraal zonder schip en daarna met schip. Dit theoretisch onderzoek zal wellicht nog aangevuld dienen te worden met enkele modelproeven. Het uiteindelijke doel is om bij sluizen met langsvul- en ledigingssystemen de langskrachten te kunnen bepalen met een rekenprogramma.

11.4 Dichtheidsverschillen

Tot nu toe zijn geen dichtheidsverschillen in de beschouwingen over vullen en ledigen van schutkolken opgenomen. De beschrijving van situaties met dichtheidsverschillen en de berekening van langskrachten in deze gevallen zijn punten van nader onderzoek.

11.5 Inventarisatie buitenlandse sluizen

Aan de hand van de literatuur zal een overzicht gemaakt moeten worden van vul- en ledigingssystemen van buitenlandse sluizen. Dit heeft als doel zo goed mogelijk op de hoogte te blijven van alle ontwikkelingen op dit gebied.

11.6 "Procedure TROS + vulstraal"

Zoals in hoofdstuk 9 is geconstateerd, zijn de daarin gevonden verschillen in langskrachten, bepaald met de "procedure TROS + vulstraal" en bepaald met een modelonderzoek van een complete sluis voor een deel het gevolg van het feit dat met twee verschillende modelonderzoeken is gewerkt. Om een nauwkeuriger vergelijking te maken, zouden de schalen, de schepen en de deuren hetzelfde moeten zijn in het complete sluismodel en in het model met de statinaire stromingssituatie. Wordt er in de toekomst een modelonderzoek van een complete sluis uitgevoerd, dan dienen in het kader van TOW-Kunstwerken aanvullende proeven verricht te worden met een statinaire stromingssituatie teneinde de langskrachten ten gevolge van de vulstraal te bepalen. Na optelling van deze langskrachten bij de berekende langskrachten ten gevolge van translatiegolven kan dan een zo goed mogelijke vergelijking gemaakt worden met het complete modelonderzoek.

$x =$	2,56	17,95	33,33	48,72	64,10	79,49	94,87	110,26	125,64	141,03	156,41	171,79	187,18
$t = \frac{1}{4} T$ analytisch TROS	0,0000 0,0000												
$t = \frac{1}{2} T$ analytisch TROS	0,0100 0,0099	0,0085 0,0084	0,0050 0,0050	0,0004 0,0004	-0,0043 -0,0043	-0,0080 -0,0080	-0,0099 -0,0099	-0,0095 -0,0095	-0,0069 -0,0069	-0,0028 -0,0028	-0,0020 -0,0020	-0,0063 -0,0063	-0,0092 -0,0092
$t = \frac{3}{4} T$ analytisch TROS	0,0000 0,0000												
$t = \frac{T}{2}$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0099	-0,0085 -0,0084	-0,0050 -0,0050	-0,0004 -0,0004	0,0043 0,0043	0,0080 0,0080	0,0099 0,0099	0,0095 0,0095	0,0069 0,0069	0,0028 0,0028	-0,0020 -0,0020	-0,0063 -0,0063	-0,0092 -0,0092
$t = \frac{3}{2} T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0100	-0,0085 -0,0085	-0,0050 -0,0050	-0,0004 -0,0004	0,0043 0,0043	0,0080 0,0080	0,0099 0,0099	0,0095 0,0095	0,0069 0,0069	0,0028 0,0028	-0,0020 -0,0020	-0,0063 -0,0063	-0,0092 -0,0092
$t = 3 T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0099	-0,0085 -0,0084	-0,0050 -0,0050	-0,0004 -0,0004	0,0043 0,0043	0,0080 0,0080	0,0099 0,0098	0,0095 0,0095	0,0069 0,0069	0,0028 0,0028	-0,0020 -0,0020	-0,0063 -0,0063	-0,0092 -0,0092
$t = 4 T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0100	-0,0085 -0,0084	-0,0050 -0,0050	-0,0004 -0,0004	0,0043 0,0043	0,0080 0,0080	0,0099 0,0098	0,0095 0,0095	0,0069 0,0069	0,0028 0,0028	-0,0020 -0,0020	-0,0063 -0,0063	-0,0092 -0,0092

Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis zonder schip

Tabel 3.J

$x =$	2,29	16,01	29,73	43,45	57,17	70,89	84,61	98,33	112,05	125,77	139,49	153,21	180,65
$t = \frac{1}{2} T$ analytisch TROS	0,0100 0,0100	0,0098 0,0098	0,0094 0,0093	0,0087 0,0086	0,0069 0,0069	0,0047 0,0047	0,0022 0,0022	-0,0004 -0,0004	-0,0030 -0,0030	-0,0055 -0,0055	-0,0076 -0,0076	-0,0089 -0,0089	-0,0099 -0,0099
$t = T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0100	-0,0098 -0,0098	-0,0094 -0,0094	-0,0087 -0,0087	-0,0069 -0,0069	-0,0047 -0,0046	-0,0022 -0,0021	0,0004 0,0005	+0,0030 +0,0031	+0,0055 +0,0055	+0,0076 +0,0076	+0,0089 +0,0089	+0,0099 +0,0098
$t = 2 T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0101	-0,0098 -0,0099	-0,0094 -0,0094	-0,0087 -0,0087	-0,0069 -0,0069	-0,0047 -0,0045	-0,0022 -0,0020	0,0004 0,0006	+0,0030 +0,0032	+0,0055 +0,0055	+0,0076 +0,0076	+0,0089 +0,0088	+0,0099 +0,0097
$t = 2\frac{1}{4} T$ analytisch TROS	0,0000 0,0000	0,0000 0,0000	0,0000 0,0000	0,0000 0,0000	0,0000 -0,0000	0,0000 -0,0002	0,0000 -0,0002	-0,0000 -0,0002	-0,0000 -0,0002	-0,0000 -0,0000	-0,0000 -0,0000	-0,0000 -0,0002	-0,0000 -0,0003
$t = 3 T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0101	-0,0098 -0,0099	-0,0094 -0,0094	-0,0087 -0,0087	-0,0069 -0,0068	-0,0047 -0,0045	-0,0022 -0,0019	0,0004 0,0007	+0,0030 +0,0032	+0,0055 +0,0055	+0,0076 +0,0075	+0,0089 +0,0087	+0,0099 +0,0096
$t = 3\frac{1}{4} T$ analytisch TROS	+0,0100 +0,0097	+0,0098 +0,0095	+0,0094 +0,0091	+0,0087 +0,0085	+0,0069 +0,0069	+0,0047 +0,0048	+0,0022 +0,0024	-0,0004 -0,0002	-0,0030 -0,0028	-0,0055 -0,0053	-0,0076 -0,0075	-0,0089 -0,0089	-0,0099 -0,0100
$t = 4 T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0100	-0,0098 -0,0098	-0,0094 -0,0094	-0,0087 -0,0086	-0,0069 -0,0068	-0,0047 -0,0045	-0,0022 -0,0019	0,0004 0,0007	+0,0030 +0,0032	+0,0055 +0,0055	+0,0076 +0,0075	+0,0089 +0,0087	+0,0099 +0,0096

Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens TROS voor sluis met flexibel schip

Tabel 3.2

Tabel 3.3

$x =$	2,29	16,01	29,73	43,45	57,17	70,89	84,61	98,33	112,05	125,77	139,49	153,21	180,65
$t = \frac{1}{2} T$ analytisch TROS	+0,0100 +0,0100	+0,0098 +0,0098	+0,0094 +0,0093	+0,0087 +0,0086	+0,0069 +0,0069	+0,0047 +0,0047	+0,0022 +0,0022	-0,0004 -0,0004	-0,0030 -0,0030	-0,0055 -0,0054	-0,0076 -0,0076	-0,0089 -0,0089	-0,0099 -0,0099
$t = \frac{\pi}{4} T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0100	-0,0098 -0,0099	-0,0094 -0,0094	-0,0087 -0,0087	-0,0069 -0,0069	-0,0047 -0,0046	-0,0022 -0,0021	+0,0004 +0,0005	+0,0030 +0,0031	+0,0055 +0,0055	+0,0076 +0,0076	+0,0089 +0,0089	+0,0099 +0,0098
$t = \frac{3}{4} T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0100	-0,0098 -0,0098	-0,0094 -0,0094	-0,0087 -0,0087	-0,0069 -0,0069	-0,0047 -0,0046	-0,0022 -0,0021	+0,0004 +0,0005	+0,0030 +0,0031	+0,0055 +0,0055	+0,0076 +0,0076	+0,0089 +0,0088	+0,0099 +0,0098
$t = 2\frac{1}{4} T$ analytisch TROS	+0,0000 -0,0000	+0,0000 -0,0000	+0,0000 -0,0000	+0,0000 -0,0000	+0,0000 -0,0001	+0,0000 -0,0001	+0,0000 -0,0001	-0,0000 -0,0001	-0,0000 -0,0001	-0,0000 -0,0000	-0,0000 +0,0001	-0,0000 +0,0001	-0,0000 +0,0002
$t = 3\frac{1}{4} T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0099	-0,0098 -0,0098	-0,0094 -0,0093	-0,0087 -0,0086	-0,0069 -0,0069	-0,0047 -0,0047	-0,0022 -0,0021	+0,0004 +0,0004	+0,0030 +0,0030	+0,0055 +0,0054	+0,0076 +0,0075	+0,0089 +0,0088	+0,0099 +0,0098
$t = 4\frac{1}{4} T$ analytisch TROS	-0,0100 -0,0099	-0,0098 -0,0098	-0,0094 -0,0093	-0,0087 -0,0086	-0,0069 -0,0068	-0,0047 -0,0046	-0,0022 -0,0021	+0,0004 +0,0005	+0,0030 +0,0031	+0,0055 +0,0054	+0,0076 +0,0075	+0,0089 +0,0088	+0,0099 +0,0097

Vergelijking analytische oplossing volgens TROS voor sluis met star schip

Tabel 4.1

Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis zonder schip

$x =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$t = 0 \text{ s}$ analytisch NEBAS	0,0100 0,0100	0,0095 0,0095	0,0081 0,0081	0,0059 0,0059	0,0031 0,0031	0,0000 0,0000	-0,0031 -0,0031	-0,0059 -0,0059	-0,0081 -0,0081	-0,0095 -0,0095	-0,0100 -0,0100
$t = 13,00 \text{ s}$ analytisch NEBAS	-0,0100 -0,0100	-0,0095 -0,0095	-0,0081 -0,0081	-0,0059 -0,0059	-0,0031 -0,0031	-0,0000 0,0000	0,0031 0,0031	0,0059 0,0059	0,0081 0,0081	0,0095 0,0095	0,0100 0,0100
$t = 19,50 \text{ s}$ analytisch NEBAS	-0,0001 -0,0003	-0,0001 -0,0003	-0,0001 -0,0003	-0,0000 -0,0002	-0,0001 -0,0001	-0,0000 0,0000	0,0000 0,0001	0,0001 0,0001	0,0001 0,0002	0,0001 0,0003	0,0001 0,0003
$t = 32,50 \text{ s}$ analytisch NEBAS	0,0002 0,0005	0,0002 0,0005	0,0002 0,0004	0,0001 0,0003	0,0001 0,0002	0,0000 0,0000	-0,0001 -0,0002	-0,0001 -0,0003	-0,0002 -0,0004	-0,0002 -0,0005	-0,0002 -0,0005
$t = 39,00 \text{ s}$ analytisch NEBAS	-0,0100 -0,0099	-0,0095 -0,0095	-0,0081 -0,0081	-0,0059 -0,0059	-0,0031 -0,0031	-0,0000 -0,0000	0,0031 0,0031	0,0059 0,0059	0,0081 0,0081	0,0095 0,0095	0,0100 0,0100
$t = 45,50 \text{ s}$ analytisch NEBAS	-0,0003 -0,0008	-0,0003 -0,0007	-0,0002 -0,0006	-0,0002 -0,0004	-0,0001 -0,0002	-0,0000 -0,0000	0,0001 0,0002	0,0002 0,0004	0,0002 0,0006	0,0003 0,0007	0,0003 0,0007
$t = 58,50 \text{ s}$ analytisch NEBAS	0,0004 0,0009	0,0004 0,0009	0,0003 0,0008	0,0002 0,0006	0,0001 0,0003	0,0000 0,0000	-0,0001 -0,0003	-0,0002 -0,0006	-0,0003 -0,0008	-0,0004 -0,0009	-0,0004 -0,0010
$t = 71,50 \text{ s}$ analytisch NEBAS	-0,0005 -0,0012	-0,0005 -0,0012	-0,0004 -0,0010	-0,0003 -0,0007	-0,0001 -0,0003	-0,0000 -0,0000	0,0001 0,0004	0,0003 0,0007	0,0004 0,0009	0,0005 0,0011	0,0005 0,0011
$t = 78,00 \text{ s}$ analytisch NEBAS	0,0100 0,0099	0,0095 0,0094	0,0081 0,0080	0,0059 0,0058	0,0031 0,0030	0,0000 -0,0001	-0,0031 -0,0031	-0,0059 -0,0058	-0,0081 -0,0080	-0,0095 -0,0094	-0,0100 -0,0098

$x = 0$	0	15	25	45	65	105	115	125	155	175	195	214,605
$t = 0$ analytisch NEBAS	-0,0100 -0,0100	-0,0098 -0,0098	-0,0093 -0,0093	-0,0076 -0,0076	-0,0052 -0,0052	+0,0010 +0,0010	0,0026 0,0026	0,0035 0,0035	0,0060 0,0060	0,0072 0,0072	0,0079 0,0079	0,0081 0,0081
$t = 65,184$ analytisch NEBAS	-0,0100 -0,0100	-0,0098 -0,0098	-0,0093 -0,0093	-0,0076 -0,0076	-0,0052 -0,0052	+0,0010 +0,0010	0,0026 0,0026	0,0035 0,0035	0,0060 0,0060	0,0072 0,0071	0,0079 0,0079	0,0081 0,0081
$t = 114,072$ analytisch NEBAS	-0,0000 -0,0002	-0,0000 0,0002	-0,0000 0,0002	-0,0000 0,0001	-0,0000 0,0001	0,0000 -0,0000	0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0001
$t = 162,960$ analytisch NEBAS	0,0100 0,0099	0,0098 0,0098	0,0093 0,0093	0,0076 0,0076	0,0052 0,0052	-0,0010 -0,0009	-0,0026 -0,0025	-0,0035 -0,0035	-0,0060 -0,0059	-0,0072 -0,0072	-0,0079 -0,0079	-0,0081 -0,0082
$t = 244,440$ analytisch NEBAS	-0,0000 0,0004	-0,0000 0,0004	-0,0000 0,0004	-0,0000 0,0002	-0,0000 0,0001	-0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0002	0,0000 -0,0002	0,0000 -0,0002	0,0000 -0,0002	0,0000 -0,0001	0,0000 -0,0001
$t = 268,884$ analytisch NEBAS	-0,0071 -0,0074	-0,0069 -0,0072	-0,0066 -0,0068	-0,0054 -0,0056	-0,0037 -0,0037	0,0007 0,0008	0,0018 0,0019	0,0025 0,0026	0,0042 0,0043	0,0051 0,0051	0,0056 0,0056	0,0058 0,0058
$t = 309,624$ analytisch NEBAS	-0,0000 0,0005	-0,0000 0,0005	-0,0000 0,0003	-0,0000 0,0001	-0,0000 -0,0002	0,0000 -0,0002						
$t = 325,920$ analytisch NEBAS	-0,0100 -0,0101	-0,0098 -0,0099	-0,0093 -0,0094	-0,0076 -0,0076	-0,0052 -0,0051	-0,0010 -0,0011	0,0026 0,0027	0,0035 0,0036	0,0060 0,0059	0,0072 0,0070	0,0079 0,0077	0,0081 0,0079

Vergelijking analytische oplossing met numerieke oplossing volgens NEBAS voor sluis met flexibel schip

Gegevens	Gemeten waterdiepten										Afvoercoëfficiënten			
	met breekbalken					met breekbalken					Voldgens M 950		Voldgens bena-dereïngsformule	
	Tijdstip	Vuldeebiteit	Waterdilepte benedens trooms	Oppervlakte schuiftoppe-ninggen	Achter sluis-deur	Bovenstrooms	Achter sluis-deur	Bovenstrooms	$A_d \sqrt{2g (h_1 - h_3)}$	$A_d \sqrt{2g (h_1 - h_2)}$	μ_3	μ	μ	(12)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	-	-	-
	min	sec	Q m^3/sec	h_3 m	H m	A_d m^2	h_1 m	h_2 m	μ_2	μ_3	μ	μ	μ	μ
t_1	1,02	61	13,16	6,073	0,20	2,86	7,57	6,06	0,84	0,85	0,58	0,59	0,59	0,59
t_2	1,88	113	23,16	6,185	0,37	5,28	7,67	6,09	0,79	0,81	0,56	0,56	0,56	0,56
t_3	3,03	182	34,04	6,408	0,59	8,50	8,10	-	-	0,70	0,53	0,53	0,53	0,53
t_4	4,22	253	43,13	6,750	0,82	11,84	8,47	6,71	0,62	0,63	0,51	0,51	0,51	0,51
t_5	5,90	354	49,30	7,280	1,15	16,56	8,75	7,26	0,55	0,55	0,47	0,47	0,49	0,49
t_6	7,98	479	46,10	8,075	1,56	19,42	8,96	8,00	0,55	0,57	0,48	0,48	0,48	0,48
t_7	9,99	599	33,05	8,650	1,56	19,42	9,10	-	0,53	0,57	0,48	0,47	0,47	0,47
t_8	12,05	723	19,96	9,060	1,56	19,42	9,22	8,99	0,49	0,59	0,47	0,47	0,47	0,47
t_9	14,00	840	6,54	9,250	1,56	19,42	9,26	9,19	0,29	0,98	0,34	0,47	0,47	0,47
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	-	-	-
	min	sec	Q m^3/sec	h_3 m	H m	A_d m^2	h_1 m	h_2 m	μ_2	μ_3	μ	μ	μ	μ
t_{10}	1,08	65	14,76	6,140	0,21	3,03	7,82	6,07	0,83	0,85	0,62	0,65	0,65	0,65
t_{11}	2,00	120	26,81	6,360	0,39	5,61	8,39	6,32	0,75	0,76	0,63	0,61	0,61	0,61
t_{12}	3,70	222	40,16	6,980	0,72	10,38	8,68	6,92	0,66	0,67	0,57	0,57	0,57	0,57
t_{13}	4,90	294	43,35	7,510	0,96	13,75	8,90	7,47	0,59	0,60	0,53	0,56	0,56	0,56
t_{14}	6,50	390	43,03	8,200	1,27	18,24	9,18	8,10	0,52	0,54	0,51	0,55	0,55	0,55
t_{15}	8,10	486	30,60	8,825	1,56	19,42	9,19	8,72	0,52	0,59	0,52	0,54	0,54	0,54
t_{16}	9,50	570	18,02	9,160	1,56	19,42	9,30	9,06	0,43	0,57	0,56	0,54	0,54	0,54

G E E V E N S		Berekende wrijvingsweerstand										Restweerstand			
		Kolkwand					Scheepsbuid								
Slituaties	Vuldebitet	Waterstand kolk		Gem. snelheid		Volgens de Chezy		Volgens de Chezy		Volgens Scheepsbuid		Weerstandscoëff.-Client (de Chezy)		Weerstandscoëff.-Client (Schöenherter)	
		Q m³/sec	h ₃ m	v _k m/sec	v _s m/sec	R _k m	F' r o/oo	F' w o/oo	C _k	C _s	C _f	F' f o/oo	F' v o/oo	C _v	-
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
t ₁	13,16	6,073	0,090	0,185	4,03	0,051	0,0036	0,0064	48,571	46,877	0,0089	0,0080	0,0057	0,0410	8,104
t ₂	23,16	6,185	0,156	0,314	4,08	0,115	0,0091	0,0159	51,432	50,332	0,0077	0,0071	0,0145	0,0900	5,952
t ₃	34,04	6,408	0,221	0,430	4,18	0,182	0,0157	0,0275	53,108	52,383	0,0072	0,0066	0,0254	0,1388	4,561
t ₄	43,13	6,750	0,266	0,493	4,32	0,204	0,0193	0,0351	53,971	53,277	0,0069	0,0064	0,0324	0,1496	3,397
t ₅	49,30	7,280	0,282	0,492	4,53	0,182	0,0181	0,0349	54,304	53,363	0,0069	0,0064	0,0323	0,1289	2,607
t ₆	46,10	8,075	0,238	0,387	4,83	0,105	0,0108	0,0229	53,644	51,698	0,0073	0,0067	0,0210	0,0714	2,030
t ₇	33,05	8,650	0,159	0,248	5,03	0,044	0,0046	0,0106	51,702	48,811	0,0082	0,0075	0,0096	0,0288	1,830
t ₈	19,96	9,060	0,092	0,140	5,16	0,015	0,0016	0,0039	48,699	45,043	0,0097	0,0086	0,0035	0,0095	1,809
t ₉	6,54	9,250	0,029	0,044	5,22	0,000	0,000	0,000	41,858	37,590	0,0139	0,0116	0,0005	0,0000	0,0000
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
t ₁₀	14,76	6,140	0,100	0,203	4,06	0,041	0,0042	0,0074	49,126	47,482	0,0087	0,0068	0,0058	0,0294	8,927
t ₁₁	26,81	6,360	0,176	0,343	4,16	0,093	0,0105	0,0186	52,011	50,926	0,0076	0,0060	0,0148	0,0639	6,323
t ₁₂	40,16	6,980	0,240	0,432	4,41	0,107	0,0148	0,0277	53,526	52,419	0,0071	0,0057	0,0222	0,0645	3,423
t ₁₃	43,35	7,510	0,241	0,410	4,62	0,096	0,0127	0,0253	53,611	52,083	0,0072	0,0058	0,0203	0,0580	3,058
t ₁₄	43,03	8,200	0,219	0,352	4,87	0,067	0,0090	0,0194	53,256	51,087	0,0075	0,0060	0,0154	0,0386	2,466
t ₁₅	30,60	8,825	0,144	0,223	5,09	0,027	0,0037	0,0088	51,207	48,104	0,0085	0,0066	0,0068	0,0145	2,199
t ₁₆	18,02	9,160	0,082	0,124	5,19	0,010	0,0013	0,0032	48,052	44,265	0,0100	0,0076	0,0024	0,0055	2,502

Gegevens meetsituaties, wrijvings- en vormweerstand

LITERATUUR

- [1] - , 1978
Gebruikershandleiding TROS,
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [2] ANDRIESSEN, Th.M., 1969
Rozenburgse Sluis, rapport modelonderzoek M 950
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [3] ATAVINE, A.A., MIKHAILOV, A.V., VASILIEV, O.F., 1965
Calculations of oscillations of water and vessels in
canals and chambers of navigation structures
11th Congres IAHR, 1965
- [4] BOSMA, J., 1978
Langskrachten op schepen in sluizen met vul- en ledigings-
systeem in de hoofden
Verslag onderzoek R 1222/M 1481, deel I
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [5] DEELEN, C., 1978
Hydraulische aspecten van in- en uitlaatconstructies
Berekening van de stroming in een geperforeerd riool bij
een niet-permanent debiet
Verslag onderzoek R 1229
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [6] HAAS, R.G., 1978
Duwvaartsluizen in de Philipsdam
Translatiegolfberekeningen kanaal Slaak
Verslag onderzoek R 1225, deel II
Waterloopkundig laboratorium, Delft
- [7] HENDERSON, F.M., 1970
Open channel flow
Macmillan, New York

LITERATUUR (vervolg)

- [8] IDEL'CIK, I.E., 1969
Memento des pertes de charge
Eyrolles, Paris
- [9] KALKWIJK, J.P.Th., 1973
Hydrodynamic forces and ship motions induced by
surges in a navigation lock
Technische Hogeschool, Delft
- [10] KOLKMAN, P.A., 1973
Low-head navigation locks door filling and emptying systems
developed by hydraulic investigations
publication no. 111
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [11] KOSTER, A., 1978
Analyserapport TROS
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [12] MEYER, Th.J.G.P., 1975
Gebruikershandleiding NEBAS
Waterloopkundig Laboratorium, De Voorst
- [13] PARISSET, E., GALIANA, G., 1959
Hydraulic study of the Carillon Lock
8th Congres IAHR, 1959
- [14] STELLING, G.S., 1978
Rekenschema's voor de water- en scheepsbeweging in een
schutsluis
Verslag onderzoek S 105
Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- [15] STREETER, V.L., 1961
Handbook of fluid dynamics
McGraw Hill, New York

LITERATUUR (vervolg)

- [16] VASILIEV, O.F., 1959
Water surface fluctuations in locks
8th Congres IAHR, 1959
- [17] VERSPUY, C., VRIES, M. De, 1977
Lange golven, b73A
Technische Hogeschool, Delft
- [18] VREUGDENHIL, C.B.,
Proceeding and information no. 18
Hydraulic research for water management
"Computational methods for channel flow"
- [19] WATERING, W.P.M. VAN DE, 1965
Energieverliezen bij leidingvertakkingen. Informatie V 154
Waterloopkundig Laboratorium, Delft

