

LOCKFILL

Schematisatie langskrachten
bij vullen en ledigen sluis-
kolken

M.J. Onrust

Technische Universiteit Delft

Omslag: Prinses Beatrixsluizen (Foto gemaakt door Menno Onrust, 2016)

LOCKFILL

Schematisatie langskrachten bij vullen en ledigen sluiskolken

door

M.J. Onrust

Student Bachelor of Science Civiele Techniek
aan de Technische Universiteit Delft

Delft, 13 juni 2016

Studentnummer: 4295846
Begeleiders: dr. ir. H. G. Voortman,
Ir. T. J. Zitman

Voorwoord

Het rapport dat voor u ligt is het eindrapport van mijn onderzoek naar de schematisatie van langskrachten bij vul- en ledigingssystemen van schutsluizen. Dit onderzoek is uitgevoerd als eindwerk van de Bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Van april 2016 tot en met juni 2016 ben ik bezig geweest met het onderzoeken en het schrijven van dit rapport.

Tijdens de bachelorfase van mijn studie is mijn interesse gewekt voor de stromingsleer. Vloeistofmechanica en Open Channel FLOW vond ik leuke vakken om te volgen en de stof vond ik interessant om te bestuderen. Ik heb dit onderwerp gekozen omdat het daar goed bij aansluit. In de master wil ik ook verder specialiseren in de waterrichting.

Graag wil ik mijn begeleider H.G. Voortman bedanken voor zijn inzet en tijd. Zijn raad en aanwijzingen hielden mij op het juiste spoor om tot een goede afronding van dit onderzoek te komen.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Menno Onrust
Delft, juni 2016

Samenvatting

Een schutsluis maakt het mogelijk om schepen van het ene naar het andere waterpeil te brengen. Een sluis moet snel en veilig gepasseerd kunnen worden door schepen. Van belang is hierbij dat de krachten op de schepen in de sluis niet te hoog worden. Het vullen en ledigen van een schutsluis gaat gepaard met golf- en stromingsverschijnselen die krachten op schepen uitoefenen. De langskrachten mogen niet te groot worden om het bezwijken van de scheepstrossen te voorkomen.

Voor het bepalen van de langskracht op een schip in een schutsluis wordt in Nederland een methode gebruikt die is gebaseerd op het onderscheiden van vijf krachtscomponenten. Deze schematisatie is opgenomen in het rekenprogramma LOCKFILL, dat in de jaren '80 is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium. Het gaat om de volgende krachtscomponenten:

1. kracht als gevolg van translatiegolven
2. kracht als gevolg van impulsafname
3. kracht als gevolg van wrijving
4. kracht als gevolg van straalwerking
5. kracht als gevolg van dichtheidsverschillen

De sommatie van de krachtscomponenten levert een totaalcracht op een schip.

Onsystematische waarnemingen bij echte sluizen wijzen erop dat schepen vaak in sluizen liggen zonder de trossen vast te maken. Deze schepen hebben dan geen problemen van langskrachten. LOCKFILL lijkt voor de verschillende krachtscomponenten verschillende aannames te hebben gedaan. Dit kan erop wijzen dat huidige rekenmethoden zoals LOCKFILL onnodig conservatief zijn.

De wiskundige modellering van LOCKFILL is in kaart gebracht. Hieruit blijkt dat er voor de krachtscomponenten als gevolg van impulsafname, wrijving en straalwerking dezelfde aannames zijn gedaan. LOCKFILL past een notatie toe waardoor de suggestie wordt gewekt dat de individuele krachtscomponenten los worden berekend. De schematisatie van de krachtscomponenten als gevolg van impulsafname, wrijving en straalwerking is daarmee niet onnodig conservatief. Of dit ook geldt voor de krachtscomponenten als gevolg van translatiegolven en dichtheidsverschillen moet in vervolgonderzoek worden onderzocht.

Verder is in dit rapport een alternatieve schematisatie ontwikkeld voor het bepalen van de krachtscomponenten als gevolg van impulsafname en wrijving. Door de toegenomen mogelijkheden van numeriek rekenen kan de langskracht nauwkeuriger bepaald worden dan in LOCKFILL. Wat dit betekent voor de ontwerppraktijk moet middels praktijkmetingen worden gevalideerd.

Om het onderzoek compleet te maken is het wenselijk dat de krachtscomponenten als gevolg van straalwerking, translatiegolven en dichtheidsverschillen in de schematisatie worden opgenomen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting	v
Notaties	ix
1 Inleiding	1
1.1 Vul- en ledigingssystemen	2
1.1.1 LOCKFILL	2
1.1.2 Hydraulische verschijnselen	2
1.2 Probleemanalyse	3
1.3 Doelstelling	5
1.4 Plan van Aanpak	5
1.5 Leeswijzer	6
2 Modelvorming	7
2.1 Definitie langskracht	7
2.2 Stroombeeld	8
2.3 Schematisatie langskracht sluiskolk	10
2.3.1 Uitgangspunten	11
2.3.2 Berekening	11
3 Schematisatie LOCKFILL	15
3.1 Uitgangspunten	18
3.2 Berekening	18
3.2.1 Langskracht boeg	18
3.2.2 Langskracht romp	20
3.2.3 Langskracht hek	21
3.2.4 Totale langskracht	21
3.3 Evaluatie	21
4 Evaluatie	23
5 Conclusie	27
Referenties	29
Bijlagen	31
A Referentiesluis	31

B	Langskracht schip in stroming	33
B.1	Schematisatie	34
B.2	Stroombeeld	34
B.3	Uitgangspunten	35
B.4	Berekening op basis van energiebalans.	35
B.5	Berekening op basis van de impulsvergelijking	39
B.6	Implementatie in LOCKFILL	44
B.7	Evaluatie	48
C	Langskracht schip in stroming met wrijving	51
C.1	Stroombeeld	51
C.2	Uitgangspunten	52
C.3	Berekening	52
C.4	Bepalen wrijvingscoëfficiënt	56
C.5	Implementatie LOCKFILL	58
C.6	Evaluatie	60
D	Langskracht schip in sluiskolk	61
D.1	Stroombeeld	61
D.2	Uitgangspunten	62
D.3	Berekening	62
D.4	Samenvatting ontwikkelde methode	65
D.5	Implementatie LOCKFILL	67
D.6	Evaluatie	69
E	Matlab code	73
E.1	Eigen methode	73
E.2	Methode LOCKFILL	75

Notaties

Symbool	Beschrijving	Eenheid
A_s	dwarsdoorsnede schip	[m^2]
A_x	dwarsdoorsnede natte kolk in raai x	[m^2]
A_I	dwarsdoorsnede kolk gedeelte I	[m^2]
A_{II}	dwarsdoorsnede kolk gedeelte II	[m^2]
b_k	breedte kolk	[m]
b_s	breedte schip	[m]
C	coëfficiënt van Chézy	[$\sqrt{m}/s$]
C_I	coëfficiënt van Chézy gedeelte I	[$\sqrt{m}/s$]
C_{II}	coëfficiënt van Chézy gedeelte II	[$\sqrt{m}/s$]
d_s	diepgang van het schip	[m]
F	totale langskracht op het schip	[N]
F_b	drukkracht tegen de boeg	[N]
F_{hek}	drukkracht tegen het hek	[N]
F_r	kracht op de romp van het schip	[N]
F_{bw}	langskracht als gevolg van wrijving wanden en bodem sluiskolk	[N]
F_{sw}	langskracht als gevolg van wrijving scheepshuid	[N]
F_{straal}	langskracht als gevolg van vulstraal	[N]
g	valversnelling zwaartekracht	[m/s^2]
h_x	waterstand in de sluiskolk in raai x (t.o.v. bodem sluiskolk)	[m]
h_k	gemiddelde kolkwaterstand	[m]
i	verhang van de waterspiegel	[$-$]
k_I	ruwheid kolkwand	[m]
k_{II}	ruwheid scheepshuid	[m]
l_k	lengte sluiskolk	[m]
l_s	lengte schip	[m]
Q_v	debiet bij instroom kolk	[m^3/s]
Q_x	debiet door raai x	[m^3/s]
U_x	gemiddelde stroomsnelheid in raai x	[m/s]
x	afstand x vanaf vuldeur	[m]
x_b	afstand boeg vanaf vuldeur	[m]
α	hoek van de straalas met horizontaal	[$^\circ$]
β	hoek van de boeg met horizontaal	[$^\circ$]
ρ	dichtheid van het water	[kg/m^3]

Inleiding

Waar vaarwegen hoogteverschillen moeten overbruggen worden sluizen gebouwd. Een schutsluis maakt het mogelijk om schepen van het ene naar het andere waterpeil te brengen. Het schutten gebeurt door water respectievelijk in of uit de sluisolk te laten stromen.

Een sluis moet snel en veilig gepasseerd kunnen worden door schepen. Van belang is hierbij dat de krachten op de gemeerd liggende schepen niet te hoog worden. Oorzaken van krachten kunnen bijvoorbeeld zijn: het vullen of ledigen van de kolk, het bewegen van de deur, het in- en uitvaren van andere schepen, uitwisselstromen, en dergelijke. In dit verslag is alleen het vul- en ledigingssysteem aan de orde. Dit verslag beperkt zich verder tot vul- en ledigingssystemen door het hoofd van de sluis. Vullen door de bodem of langs de wanden wordt niet bekeken.

Het schutten gaat gepaard met golf- en stromingsverschijnselen, die krachten op schepen in de kolk uitoefenen. De hoofdstroom in de kolk is in langsrichting. De krachten op het schip als gevolg van het vullen en ledigen van de sluis werken dan ook voornamelijk in langsrichting.

Bij het ontwerpen van een schutsluis dient het vul- en ledigingssysteem beoordeeld te worden. De langskrachten mogen niet te groot worden om het bezwijken van de scheepstrossen te voorkomen. Vul- en ledigsystemen van schutsluizen worden daarom ontworpen op het beheerst vullen, zodat de krachten op de schepen binnen acceptabele limieten blijven. Voor binnenvaartschepen wordt vaak als maat genomen dat de hydraulische krachten in langsrichting 1‰ van het scheepsge-
wicht niet mogen overschrijden. Het 1‰ criterium is gebaseerd op de maximaal toelaatbare tros-
krachten, zie Tabel 1.1.

Schip	WATERVERPLAATSING	Kabel	Breuksterkte	in ‰ van waterverplaatsing
1300 ton	1700 ton	∅ 18 mm	7 ton	4.1
2000 ton	2600 ton	∅ 20 mm	9 ton	3.5
duweenh. 4+1	10800 ton	∅ 22 mm	10.5 ton	1

Tabel 1.1: Maximale troskrachten bij verschillende scheepsklassen [4]

1.1. Vul- en ledigingssystemen

Dit rapport beperkt zich tot vul- en ledigingssystemen door de sluishoofden. Daaronder vallen drie typen vul- en ledigingssystemen:

- systeem met deurschuiven
- systeem met korte omloopriolen
- systeem heffen van de hefdeur

Het doel van het analyseren van het vul- en ledigingssysteem is het bepalen van de longitudinale kracht op het schip. In Nederland wordt voor deze analyse een methode gebruikt die is gebaseerd op het onderscheiden van vijf krachtscomponenten. Om de totale langskracht te bepalen worden deze op elkaar gesuperponeerd. Deze schematisatie is opgenomen in het rekenprogramma LOCKFILL.

1.1.1. LOCKFILL

LOCKFILL is een rekenprogramma dat bedoeld is als instrument voor het hydraulisch ontwerp van vul- en ledigingssystemen van schutsluizen. Het programma is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium in opdracht van Rijkswaterstaat [10]. Het rekenprogramma is te gebruiken bij vul- en ledigingssystemen door de sluishoofden.

Tijdens het vullen stroomt er water door de openingen; dit gaat gepaard met golf- en stromingsverschijnselen in de kolk. Het schip in de kolk is onderhevig aan deze golf- en stromingsverschijnselen, beïnvloedt deze en ondervindt hiervan krachten. Omdat het debiet bij een kolkeinde in- of uistroomt vinden de verschijnselen voornamelijk in langsricting van de kolk plaats. LOCKFILL maakt gebruik van een één-dimensionale aanpak voor het berekenen van de langskracht.

1.1.2. Hydraulische verschijnselen

Bij het vul- en ledigingsproces treden hydraulische verschijnselen op die krachten veroorzaken op de schepen die in de sluiskolk aanwezig zijn. Deze langskracht bij het vullen van de sluis is opgebouwd uit 5 componenten, te weten:

(a) Translatiegolven (Figuur 1.1a)

Als gevolg van veranderingen van het vuldebiet in de tijd worden translatiegolven bij de openingen opgewekt die zich voortplanten in de kolk. De golven worden gedeeltelijk gereflecteerd tegen de boeg en het hek van het schip en worden volledig gereflecteerd tegen de beide kolkeinden. De waterspiegel krijgt door de translatiegolven in langsricting een oscillerende beweging. De waterstandsverschillen door de translatiegolven zorgen voor een in de tijd variërende bijdrage in de langskracht.

(b) Impulsafname in langsricting van de kolk (Figuur 1.1b)

Het vuldebiet komt bij de deuropeningen de kolk binnen. Het debiet door een raai in de kolk neemt in langsricting af omdat een korter deel van de kolk achter deze raai gevuld moet worden. Dit effect resulteert in een impuls van de stroming die in langsricting van de kolk afneemt. Dit gaat gepaard met waterstandsverschillen.

(c) Wrijving (Figuur 1.1c)

Wrijving van het water met de kolkbodem en -wanden en de scheepshuid geeft een waterstandsverschil in langsrichting van de kolk. Dit waterstandsverschil samen met de directe wrijving op de scheepshuid levert een bijdrage aan de langskracht.

(d) Straalwerking (Figuur 1.1d)

Bij vulsystemen met deurschuiven komt het vuldebiet als een geconcentreerde straal de kolk binnen. In het begin van het vulproces botst de straal tegen de boeg van het schip. Naarmate het vulproces vordert, is het schip zo ver gestegen dat de vulstraal de boeg niet meer raakt, maar onder het schip doorstroomt. Bij het botsen van de stroom wordt impuls overgedragen.

(e) Dichtheidsverschillen (Figuur 1.1e)

Wanneer er dichtheidsverschillen aanwezig zijn tussen het water van de voorhaven en de kolk, worden bij het vullen van de kolk interne dichtheidsgolven opgewekt. Deze golven gaan gepaard met waterstandsverschillen in langsrichting van de kolk.

De totale langskracht is de sommatie van bovenstaande componenten.

De krachtscomponent als gevolg van de vulstraal hoeft alleen te worden meegenomen bij een vulsysteem met deurschuiven. Bij andere vul- en ledigingsystemen en bij het ledigingsproces is deze krachtscomponent niet aanwezig.

Voor sluizen waarbij er geen dichtheidsverschillen zijn tussen het water in de voorhaven en het water in de kolk hoeft de laatste krachtscomponent niet te worden meegenomen. In de regel levert deze component alleen een bijdrage bij zeesluizen. Bij het ledigen van een schutsluis spelen dichtheidsverschillen geen rol.

De invloed van dichtheidsverschillen op de langskracht zal in dit rapport niet worden behandeld.

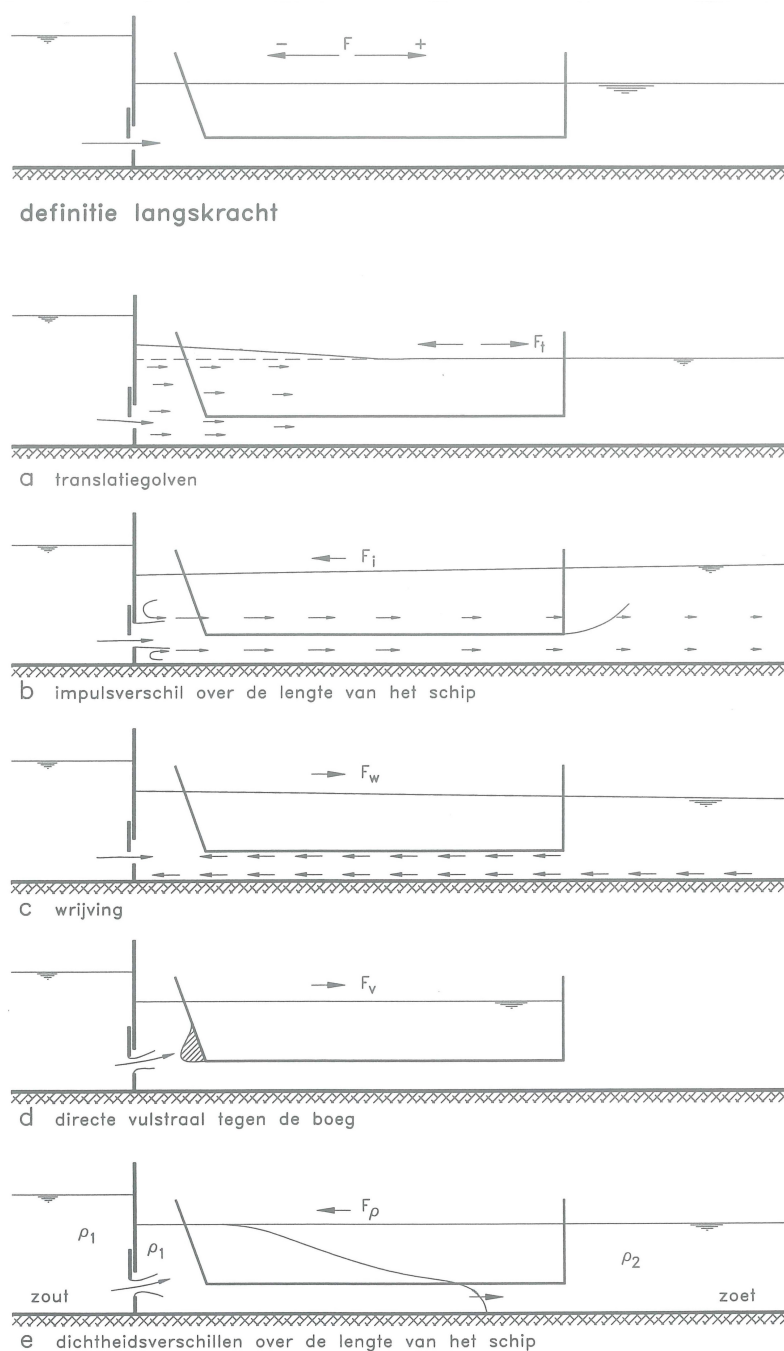
1.2. Probleemanalyse

Bij de gebruikte schematisatie in LOCKFILL lijken er verschillende aannames voor het stroombeeld te worden gedaan voor de berekening van de individuele krachtscomponenten, zie Figuur 1.1. Voor het berekenen van de individuele krachtscomponenten lijkt het effect van de andere krachtscomponenten weggelaten te worden. Naar mijn mening is dat vreemd aangezien het hier gaat om één vulproces met één stroombeeld.

Het is de vraag of superpositie van de verschillende krachtscomponenten met deze simplificatie nog toegestaan is, aangezien de verschillende krachtscomponenten elkaar lijken te beïnvloeden. Volgens Coenraad Hartsuijker is superpositie alleen toegestaan als het **beginsel van superpositie** toepassing vindt:

“Dat men de invloeden van de afzonderlijke belastingdelen bij elkaar mag optellen noemt men het beginsel van superpositie. Dit beginsel berust op het feit dat de betrekkingen tussen de verschillende grootheden lineair zijn.” [3]

Onsystematische waarnemingen bij echte sluizen wijzen erop dat schepen vaak in sluizen liggen zonder de trossen vast te maken. Deze schepen hebben dan geen problemen van langskrachten [7]. Dat kan erop wijzen dat in de praktijk de krachten veel lager zijn dan nu wordt berekend.



Figuur 1.1: Hydraulische verschijnselen bij het vullen van een sluiscolk. Al deze verschijnselen kunnen een langskracht op het schip veroorzaken. De krachtscomponenten als gevolg van translatiegolven en impulsverschil zorgen voor de grootste bijdrage aan de langskracht op het schip. De component als gevolg van dichtheidsverschillen wordt in dit rapport verder buiten beschouwing gelaten. [10]

1.3. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om de schematisaties van LOCKFILL te doorgronden. En vervolgens de gebruikte schematisatie te evalueren. Belangrijk onderdeel hiervan is het evalueren van de gehanteerde aannames van het stroombeeld en de correctheid van de toegepaste superpositie van krachten.

Verder is het doel om een schematisatie te ontwikkelen van een integraal stroombeeld op basis van een één-dimensionale schematisatie waarin alle krachten op het schip worden berekend. De kracht als gevolg van translatiegolven wordt hier in verband met de tijd weggelaten. De ontwikkelde schematisatie moet vervolgens worden geëvalueerd.

1.4. Plan van Aanpak

Om de gebruikte schematisatie in LOCKFILL te evalueren wordt het te ontwikkelen model vergeleken met de schematisatie in LOCKFILL. De schematisatie op basis van een integraal stroombeeld wordt stap voor stap opgebouwd:

	Schip	Wrijving	Gesloten einde	Straalwerking	Translatiegolf
1	ja	nee	nee	nee	nee
2	ja	ja	nee	nee	nee
3	nee	nee	ja	nee	nee
4	ja	ja	ja	nee	nee
5	ja	ja	ja	ja	nee
6	ja	ja	ja	ja	ja

Tabel 1.2: Plan van Aanpak

Hieronder staat stap voor stap uitgelegd wat er met de verschillende tussenstappen uit Tabel 1.2 wordt bedoeld.

1. Schip zonder wrijving
Schip in de stroming zonder wrijving: het schip vormt een blokkade in de stroming en is daarmee vergelijkbaar met de stroming over een lange overlaat. Er werkt een kracht op de boeg en op het hek van het schip.
2. Schip met alleen wrijving
Een schip in een kanaal met stroming: er is wrijving met de bodem en wrijving met het schip. Wrijving met het schip veroorzaakt een directe kracht op het schip. Wrijving (van schip en bodem) veroorzaakt een verhang. Als gevolg daarvan is er een horizontale kracht op het schip.
3. Gesloten einde zonder schip
Vanaf nu wordt uitgegaan van een sluis met een gesloten einde. Dit heeft twee effecten. Ten eerste zorgt het gesloten einde ervoor dat de waterdiepte niet meer constant is in de tijd. Tijdens het vullen zal het waterniveau stijgen en tijdens het ledigen zal het waterniveau dalen. Ten tweede veroorzaakt het gesloten einde een impulsafname in langsrichting van de sluis.

Het debiet neemt af in langsrichting van de sluis, omdat er water in het systeem wordt geboren: de waterspiegel in de sluis stijgt. De afname van het debiet in langsrichting veroorzaakt een impulsafname met een verhang van het waterniveau als gevolg.

4. Schip met wrijving en gesloten einde

Hier wordt het schip met wrijving gecombineerd met de situatie met een gesloten einde. Het debiet is niet meer constant in langsrichting van de schutsluis. Aangezien de wrijving afhankelijk is van de stroomsnelheid van het water zal deze groter zijn bij de instroom en kleiner richting het gesloten einde van de sluis.

Anderzijds zal de wrijving ook in de impulsbalans moeten worden opgenomen. Het verhang als gevolg van impulsafname zal hierdoor kleiner worden dan in de situatie zonder wrijving.

5. Schip met wrijving, gesloten einde en straalwerking

De straalwerking kan dan bij de volgende stap worden toegevoegd. Dit veroorzaakt een directe kracht op de boeg van het schip en verandert het verloop van de impuls bij de boeg van het schip.

6. Schip met wrijving, gesloten einde, straalwerking en translatiegolven

De translatiegolf is, denk ik, de meest ingewikkelde component van de stroming. Door de translatiegolf is de stijging van de waterspiegel niet meer constant over de lengte van de sluis. Het debiet en daarmee ook de wrijving gaan meer variëren. Ook is de impuls in een raai moeilijker te bepalen.

In de tabel is een stippellijn aangegeven. Dit is een minimum eindresultaat voor dit bachelor-onderzoek.

In dit rapport worden enkele voorbeeldberekeningen uitgevoerd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een referentiesluis. Gegevens van deze sluis zijn te vinden in Bijlage A.

1.5. Leeswijzer

In dit rapport wordt een schematisatie voor vul- en ledigingssystemen van schutsluizen ontwikkeld. Tevens worden de schematies in het rekenprogramma LOCKFILL doorgrond en geëvalueerd.

De opbouw van dit rapport is als volgt: Hoofdstuk 2 beschrijft de ontwikkelde analysemethode op hoofdlijnen. Gedetailleerde uitwerking van de methode is in de bijlagen te vinden. Vervolgens geeft hoofdstuk 3 de schematisaties weer die in LOCKFILL zijn toegepast. Om de hoofdvraag te beantwoorden wordt ook de wiskundige modellering beschreven. In hoofdstuk 4 is een evaluatie van de methoden te vinden, waarin de methoden met elkaar worden vergeleken. Conclusies over de correctheid van superpositie en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 5.

2

Modelvorming

In dit hoofdstuk wordt een integrale berekenmethode op basis van een één-dimensionale schematisatie voor het vullen van een schutsluis afgeleid. De hydraulische verschijnselen die in de rekenmethode worden opgenomen zijn:

- Impulsafname
- Wrijving

Vulstraaleffecten worden in de schematisatie niet meegenomen; dus de stroming voor het schip wordt gelijkmatig verdeeld over de doorsnede verondersteld. Ook translatiegolven zijn niet in de schematisatie opgenomen. Deze effecten zijn in verband met de beschikbare tijd voor mijn onderzoek niet in de rekenmethode opgenomen.

In de volgende paragraaf wordt het stroombeeld in de sluis beschreven. Vervolgens worden de uitgangspunten voor de wiskundige modellering beschreven, waarna stap-voor-stap wordt beschreven hoe de rekenmethode is opgebouwd.

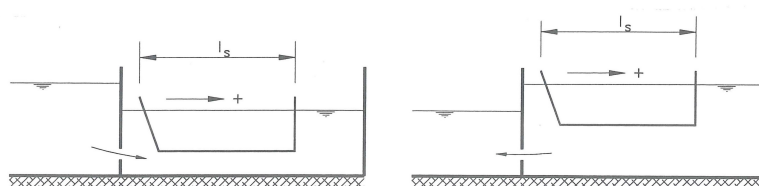
Gedetailleerde uitwerkingen van de methode en afleidingen van de vergelijkingen zijn te vinden in de bijlagen. De kracht op de boeg wordt in bijlage B beschreven. In bijlage C en bijlage D wordt beschreven hoe de kracht op de romp wordt berekend.

2.1. Definitie langskracht

Voor de langskracht wordt dezelfde definitie gebruikt als in LOCKFILL. De langskracht op een schip wordt, voor zowel het vullen als het ledigen, als volgt gedefinieerd:

“De langskracht is positief in de richting van het dichte kolkeinde en negatief in de richting van het kolkeinde met de nivelleeropeningen.” [10]

Een schematisch overzicht hiervan is weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Definitie Langskracht in LOCKFILL [10]

2.2. Stroombeeld

In deze paragraaf wordt het stroombeeld in de sluiskolk beschouwd. Dit heeft als doel inzicht te verschaffen in de fysische processen, het verklaren van de krachten op de schepen en het opzetten van de wiskundige modellering. De beschrijving van het stroombeeld is gebaseerd op referentie [9].

Het vullen en ledigen van sluizen gebeurt over het algemeen onder vrij verval. Het vul- en ledigingsdebiet is daarbij afhankelijk van het momentane verval over de openingen en de oppervlakte en de afvoer-coëfficiënt van deze openingen [9]. Dit levert een vul- en ledigingsdebiet in de tijd op dat eerst toeneemt tijdens het openen van de vulschuiven en na het maximum geleidelijk afneemt tot nul.

De (gemiddelde) kolkwaterstand hangt samen met dit debiet. Aanvankelijk stijgt het waterniveau langzaam, bij het maximum debiet het snelst, terwijl aan het einde van het proces de waterstand in de kolk nog slechts langzaam stijgt tot het niveau van de voorhaven bereikt wordt. Het ledigingsproces is vergelijkbaar, behalve dat de waterstand daalt in plaats van stijgt.

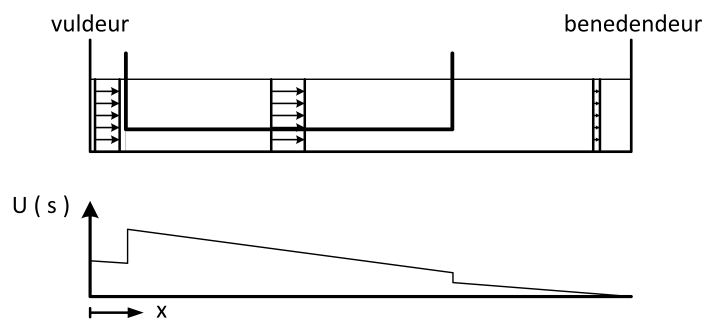
Het vuldebiet komt bij de vuldeur de sluis binnen als geconcentreerde vulstraal. Door de grote snelheidsverschillen tussen de straal en het omringende water wordt turbulentie opgewekt. De vulstraal zuigt water aan, waardoor de straaldikte in de stroomrichting toeneemt. De stroomsnelheden nemen af en het snelheidsprofiel krijgt een klokvorm. De straal botst deels tegen de onderkant van de boeg en stroomt deels direct onder het schip weg waarna de stroomsnelheden zich wat meer gelijkmatig over het gehele dwarsprofiel verdelen. Tussen de vuldeur en de boeg ontstaat een sterke neer die gevoed wordt door de botsende straal.

Bij vulsystemen met omloopriolen stroomt het vuldebiet meer gelijkmatig verdeeld over het dwarsprofiel de kolk in. Er is dan geen geconcentreerde vulstraal die een neer doet draaien. Bij het ledigingsproces bevindt de eventuele geconcentreerde straal zich buiten de kolk. Voor het ledigingsproces kan de vulstraal daarom ook buiten beschouwing worden gelaten. In de schematisatie in dit rapport is het effect van de vulstraal buiten beschouwing gelaten.

Voor de boeg het schip werken er twee hydraulische verschijnselen op de stroming. Door het plaatsafhankelijk debiet neemt de impuls in langsricting af. De stroming ondervindt daarnaast ook wrijving met de wanden en de bodem van de kolk. Deze effecten zullen evenwicht maken met een verhang van de waterspiegel.

De boeg van het schip vormt een blokkade in de stroming. De stroming wordt over korte afstand afgebogen en gespreid zodat langs het schip een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel ontstaat. Bij de boeg van het schip veroorzaakt dit een waterstandsverschil. Indien sprake is van een vulsysteem met deurschuiven botst de geconcentreerde vulstraal tegen de boeg en neemt de impuls van de stroming af. De waterspiegel naast het schip stijgt dan. Indien sprake is van een stroming die gelijkmatig over de doorsnede is verdeeld wordt de stroming bij de boeg versneld en daalt de waterspiegel langs de romp van het schip.

Bij de boeg van het schip neemt de gemiddelde stroomsnelheid toe waarna de stroomsnelheid in langsrichting langzaam afneemt. Het debiet neemt af in stroomrichting omdat het gedeelte van de sluis dat nog gevuld moet worden afneemt. De gemiddelde stroomsnelheid als functie van de plaats is weergegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.2: Gemiddelde stroomsnelheid als functie van de plaats. Langs het schip neemt de gemiddelde stroomsnelheid toe omdat de natte doorsnede hier verkleind is. In langsrichting neemt de stroomsnelheid lineair af als gevolg van het vullen van de schutsluis. [8]

De invloed van translatiegolven is niet opgenomen in de schematisatie in dit rapport. Translatiegolven worden opgewekt door het niet-permanente karakter van het vuldebiet. Translatiegolven planten zich voort in de sluiskolk en worden daarbij gereflecteerd bij de sluishoofden en bij het voor- en achtersteven van het schip. Door de oscillerende beweging die de waterspiegel hierdoor krijgt, krijgt de langskracht een sterk variërend karakter.

Met de afwezigheid van translatiegolven in de schematisatie kan ervan worden uitgegaan dat de waterspiegel overal in de kolk met constante snelheid stijgt (of daalt in het geval van ledigen). Uit de bergingsvergelijking volgt dan dat het debiet in langsrichting een lineair verloop krijgt:

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2.1)$$

De afname van de stroomsnelheid in de langsrichting van de sluis gaat gepaard met een afname van de impuls. Het waterniveau krijgt een verhang en er werkt een negatieve langskracht op het schip. De langskracht als gevolg van impuls is evenredig met de stroomsnelheid in het kwadraat: $F_{impuls} \sim -U^2$.

Wrijving in het systeem zorgt ervoor dat de waterstand achter het schip gaat dalen. Als gevolg van het verhang dat ontstaat werkt er een positieve langskracht op het schip. Daarnaast werkt er een

wrijvingskracht direct op de romp van het schip. Ook de kracht als gevolg van wrijving is evenredig met de stroomsnelheid in het kwadraat: $F_w \sim U^2$.

In theorie zou er een situatie kunnen ontstaan waarbij de langskracht als gevolg van wrijving en impuls elkaar volledig opheffen. In de praktijk komt het er op neer dat deze situatie met gelijke waterstanden voor en achter het schip een onrealistisch hoge wrijving vergt.

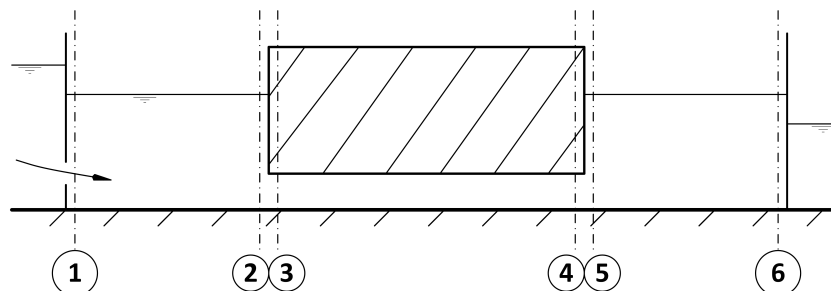
Bij het hek van het schip zal de stroming de heklijn niet kunnen volgen en zal deze loslaten. Hier zal een neer ontstaan, waarin het water sterk wervelend rondgaand beweegt. De bewegingen in de neer zijn relatief langzaam waardoor de waterdruk in de neer als hydrostatisch kan worden aangenomen.

In de ruimte achter het hek verdeelt de stroming zich weer over de gehele natte doorsnede, waardoor de waterstand stijgt. Het plaatsafhankelijk debiet zorgt hier echter voor een impulsafname. Tevens is er nog wrijving aanwezig. De stroomsnelheden zijn hier echter zeer klein, waardoor het effect van wrijving naar verwachting niet significant is.

2.3. Schematisatie langskracht sluiskolk

Het rekenmodel voor het bepalen van de langskracht op een schip in een sluiskolk wordt opgesteld aan de hand van het hierboven beschreven stroombeeld. Daarbij worden alleen de krachtscomponenten als gevolg van impuls en wrijving in de schematisatie meegenomen.

In het model wordt de sluiskolk opgedeeld in verschillende gebieden, die door genummerde raaien worden gescheiden. Dit is weergegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3: Schematisatie sluiskolk met verschillende zones. Zones worden gescheiden door genummerde raaien, zoals weergegeven in de figuur. Deze nummering voor de doorsnedes van de kolk worden in het gehele rapport gebruikt.

Raai 1 bevindt zich vlak achter de deur met de nivelleeropeningen.

Raai 2 bevindt zich vlak voor de boeg van het schip

Raai 3 bevindt zich vlak achter de boeg van het schip

Raai 4 bevindt zich vlak voor het hek van het schip

Raai 5 bevindt zich vlak achter het hek van het schip

Raai 6 bevindt zich vlak voor het dichte kolkeinde.

In elk van de zones tussen de genummerde raaien wordt de langskracht op het schip berekend met een integrale aanpak. De afzonderlijke krachtscomponenten van de verschillende zones worden bij elkaar opgeteld.

Hoewel de krachtscomponenten met een integrale aanpak worden bepaald zijn de krachtstermen niet geheel onafhankelijk van elkaar. De waterstand op de grens van een zone heeft invloed op de berekening in de naastgelegen zone. De waterstandsverschillen in een sluiskolk zijn echter zo klein dat superpositie van de krachten toch kan worden gerechtvaardigd.

De berekening van de langskracht gebeurt op basis van de wet van behoud van impuls. Hoewel de wet van behoud van energie een goede methode is om de langskracht op het schip te bepalen is deze methode voor de berekening van de kracht in een schutsluis ontoereikend. Voor zover ik weet is het namelijk niet mogelijk om **traagheid** met behulp van de wet van behoud van energie te beschrijven.

Tijdens het vul- en ledigingsproces wordt het water in de kolk versneld. Hierbij worden translatiegolven opgewekt. De watermassa in de kolk is aanzienlijk en er is sprake van een snel golfverschijnsel. Om het vul- en ledigingsproces te beschrijven in een model, moet traagheid dus worden meegenomen. Voor zover ik weet is het niet mogelijk om traagheid met energievergelijkingen te beschrijven. Ik heb het model daarom gebaseerd op de impulsvergelijkingen.

In het huidige model zijn translatiegolven en tijdsafhankelijkheid nog niet opgenomen en vormt traagheid dus geen probleem. Een model gebaseerd op de energievergelijkingen zou een eventuele toekomstige uitbreiding van het model in de weg staan. Daarnaast is het zo simpeler om de methode te vergelijken met LOCKFILL, aangezien LOCKFILL ook op de impulsvergelijkingen gebaseerd is.

2.3.1. Uitgangspunten

Voor de berekeningen worden de volgende aannames gedaan en uitgangspunten gebruikt:

- Het debiet is constant in de tijd. Er worden dus geen translatiegolven opgewekt
- Het debiet neemt lineair af in langrichting
- Er is geen straalwerking. Het snelheidsprofiel is gelijkmatig verdeeld over de natte doorsnede
- Er is wrijving op het schip en op kolkwanden en -bodem
- Bij de boeg van het schip wordt de stroming over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is
- De druk tegen het hek van het schip is hydrostatisch
- Het schip heeft geen invloed op de stroming voor de boeg van het schip

Om gecompliceerde berekeningen te vermijden wordt de kwaliteit van een vul- en ledigingssysteem getoetst aan de hand van een - in horizontale zin - vastgehouden schip.

2.3.2. Berekening

In deze paragraaf volgt een samenvatting van de berekenmethode. Voor een uitgebreide afleiding van de vergelijking verwijs ik naar de bijlagen:

Bijlage B Kracht op de boeg als gevolg van impuls

Bijlage C Kracht op de romp als gevolg van wrijving

Bijlage D Kracht op de romp als gevolg van impuls

Het debiet neemt lineair af in langsrichting. Het debiet door een raai op afstand x van de deur met nivelleeropeningen is dan:

$$Q(x) = Q_v \cdot \frac{l_k - x}{l_k} \quad (2.2)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} Q_v &= \text{debiet door deur met nivelleeropeningen} & [m^3/s] \\ l_k &= \text{lengte sluiskolk} & [m] \\ x &= \text{afstand vanaf deur met nivelleeropeningen} & [m] \end{aligned}$$

Zone 1-2: Vóór het schip

Stroming komt gelijkmatig verdeeld de kolk binnen. Het schip beïnvloedt de stroming voor de romp niet. Met een impulsbalans tussen raai 1 en raai 2 kan het waterstandsverschil $h_1 - h_2$ worden gevonden. F_{bw} is de wrijving van de stroming met de bodem en de wanden van de sluiskolk.

$$\frac{1}{2} \rho g b_k h_1^2 + \rho Q_1 U_1 - \frac{1}{2} \rho g b_k h_2^2 - \rho Q_2 U_2 - F_{bw} = 0 \quad (2.3)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} b_k &= \text{breedte van de sluiskolk} & [m] \\ U &= \text{gemiddelde stroomsnelheid in een doorsnede} & [m/s] \end{aligned}$$

De uitwerking voor de wrijvingskracht is in de bijlagen te vinden. In dit gebied werkt geen kracht op het schip, dus worden de wrijvingskracht en de impulsafname volledig gecompenseerd door het waterstandsverschil tussen raai 1 en raai 2.

Zone 2-3: Boeg van het schip

Raai 2 bevindt zich vlak voor de boeg en raai 3 bevindt zich vlak na de boeg. De afstand tussen deze doorsneden is heel klein. Wrijving is daarom verwaarloosbaar. Uit (2.2) volgt dat het debiet Q_2 gelijk aan het debiet Q_3 . De berekenmethode voor de kracht op de boeg is overgenomen van de methode van Bouwmeester. Dit is een beproefde methode. Bouwmeester heeft de kracht op de boeg gedefinieerd als [6]:

$$F_{boeg} = \frac{1}{2} \rho g b_s (h_2 - h_3 + d_s)^2 \quad (2.4)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} b_s &= \text{breedte van het schip} & [m] \\ d_s &= \text{diepgang van het schip} & [m] \end{aligned}$$

Volgens Bouwmeester geeft dat de volgende impulsvergelijking tussen raai 2 en raai 3:

$$\frac{1}{2}\rho g b_k h_2^2 - \frac{1}{2}\rho g b_s (h_2 - h_3 + d_s)^2 + \rho Q_2 U_2 - \frac{1}{2}\rho g b_k h_3^2 + \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 - \rho Q_3 U_3 = 0 \quad (2.5)$$

Uitwerken van de impulsvergelijking geeft het waterstandsverschil $h_2 - h_3$. Invullen in (2.4) geeft de kracht die op de boeg van het schip werkt.

Zone 3-4: Romp van het schip

Op de romp van het schip werkt een kracht als gevolg van het verhang en een wrijvingskracht op de scheepshuid. Het verhang wordt veroorzaakt door de wrijving en door het plaatsafhankelijke debiet. F_{sw} is de wrijving van de stroming met de scheepshuid. Het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ volgt uit de impulsbalans:

$$\frac{1}{2}\rho g b_k h_3^2 - \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 + \rho Q_3 U_3 - \frac{1}{2}\rho g b_k h_4^2 + \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 - \rho Q_4 U_4 - F_{verhang} - F_{sw} - F_{bw} = 0 \quad (2.6)$$

Hierin is:

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s (h_3 - h_4)$$

De wrijvingskrachten worden in de bijlagen verder uitgewerkt. De kracht die op de romp van het schip werkt is de optelsom van de verhangkracht en de directe wrijvingskracht met de scheepshuid. Invullen van $h_3 - h_4$ geeft de kracht langs de romp: $F_{romp} = F_{verhang} + F_{sw}$.

Zone 4-5: Hek van het schip

Net als bij de situatie bij de boeg is de afstand tussen raai 4 en raai 5 heel klein. Wrijving is daarom verwaarloosbaar en het debiet Q_4 is gelijk aan het debiet Q_5 . De stroming laat los bij het hek waardoor het doorvoerend oppervlakte in raai 5 gelijk is aan het doorvoerend oppervlakte in raai 4. Het loslaten van de stroming heeft verder als consequentie dat er geen waterstandsverschil is:

$$\frac{1}{2}\rho g b_k h_4^2 - \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 + \rho Q_4 U_4 - \frac{1}{2}\rho g b_k h_5^2 - \rho Q_5 U_5 = 0 \quad (2.7)$$

De impulsbalans kan worden gereduceerd tot de kracht op het hek:

$$F_{hek} = -\frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 \quad (2.8)$$

Zone 5-6: Achter het schip

In het gebied achter het schip herstelt het doorstroomprofiel zich weer naar de gehele doorsnede van de kolk. Raai 6 bevindt zich tegen het dichte kolkeinde aan: het debiet is er dus nul. Er is geen meevoering door deze snede. Wel is er wrijving met de bodem tussen raai 5 en raai 6. Er werkt geen kracht op het schip. Het waterstandsverschil $h_5 - h_6$ volgt uit de impulsbalans:

$$\frac{1}{2}\rho g b_k h_5^2 + \rho Q_5 U_5 - \frac{1}{2}\rho g b_k h_6^2 - F_{bw} = 0 \quad (2.9)$$

Totale langskracht

De totale langskracht op het schip is de som van de kracht tegen de boeg, de kracht langs de romp en de kracht tegen het hek:

$$F = F_{boeg} + F_{romp} + F_{hek} \quad (2.10)$$

3

Schematisatie LOCKFILL

Het rekenprogramma LOCKFILL is bedoeld als instrument voor het hydraulisch ontwerp van vul- en ledigingssystemen van schutsluizen. Het programma is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium in opdracht van Rijkswaterstaat-Bouwdienst [10]. Deltares heeft het LOCKFILL vrij beschikbaar gemaakt sinds juli 2015. De rekenmethode is bedoeld voor vul- en ledigingssystemen door de sluishoofden met een maximaal verval tot 4 meter.

Het rekenprogramma kan gebruikt worden om het vul- en ledigingssysteem van een schutsluis te analyseren. Het doel hiervan is het bepalen van de longitudinale kracht op het schip. De langskracht kan dan getoetst worden aan de maximale troskrachten. De kracht wordt veroorzaakt door stromingsverschijnselen in de kolk.

LOCKFILL onderscheidt vijf krachtscomponenten:

- kracht op schip als gevolg van translatiegolven
- kracht op schip als gevolg van impulsafname
- kracht op schip als gevolg van straalwerking
- kracht op schip als gevolg van wrijving
- kracht op schip als gevolg van dichtheidsverschillen

In dit rapport wordt alleen het effect van impulsafname, straalwerking en wrijving beschouwd.

LOCKFILL lijkt voor het berekenen van de individuele krachtscomponenten uit te gaan van verschillende stroombeelden. In de Handleiding LOCKFILL [10] staat per krachtscomponent hoe deze geschematiseerd is. Bij de impulsafname staat bijvoorbeeld:

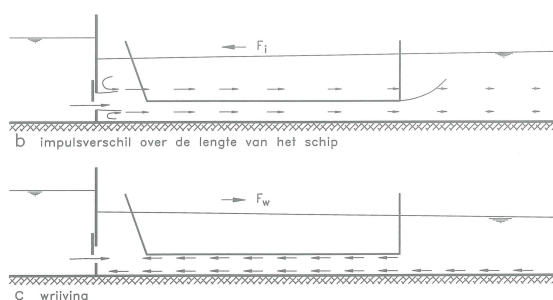
“De impulsvergelijking wordt toegepast voor het gebied tussen de raai net voor de boeg en de raai net achter het hek. Deze impulsvergelijking bestaat uit de in- en uitgaande impuls, de hydrostatische krachten op de raaien en de kracht op het schip als functie van het waterstandsverschil.” [10]

Wrijving lijkt niet te worden meegenomen in de impulsvergelijking. De Handleiding LOCKFILL wekt hiermee de suggestie dat de krachtscomponenten als gevolg van wrijving en impuls apart worden berekend en daarna bij elkaar worden opgeteld. Het is de vraag of deze superpositie hier toegestaan

is. Wrijving levert impuls aan de stroming, waardoor het de vraag is of de krachtscomponenten onafhankelijk van elkaar zijn.

In de handleiding is een afbeelding opgenomen waarin de componenten van de langskracht tijdens het vullen worden gedefinieerd. Deze afbeelding lijkt dit te ondersteunen. De krachtscomponenten impulsverschil en wrijving worden in Figuur 3.1 nogmaals getoond.

De stroombeelden in de sluiskolk voor de verschillende krachtscomponenten in de figuur zijn verschillend. Voor het impulsverschil over de lengte van het schip lijkt wrijving te worden verwaarloosd, en voor de wrijvingscomponent lijkt de impulsafname in langsrichting te worden verwaarloosd.



Figuur 3.1: Schematisatie in LOCKFILL. Stroombeeld voor de langskracht als gevolg van impulsafname en stroombeeld voor de langskracht als gevolg van wrijving. [10]

Figuur 3.2 toont de output die LOCKFILL teruggeeft voor de referentiesluis. De gegevens van de referentiesluis zijn te vinden in Bijlage A.

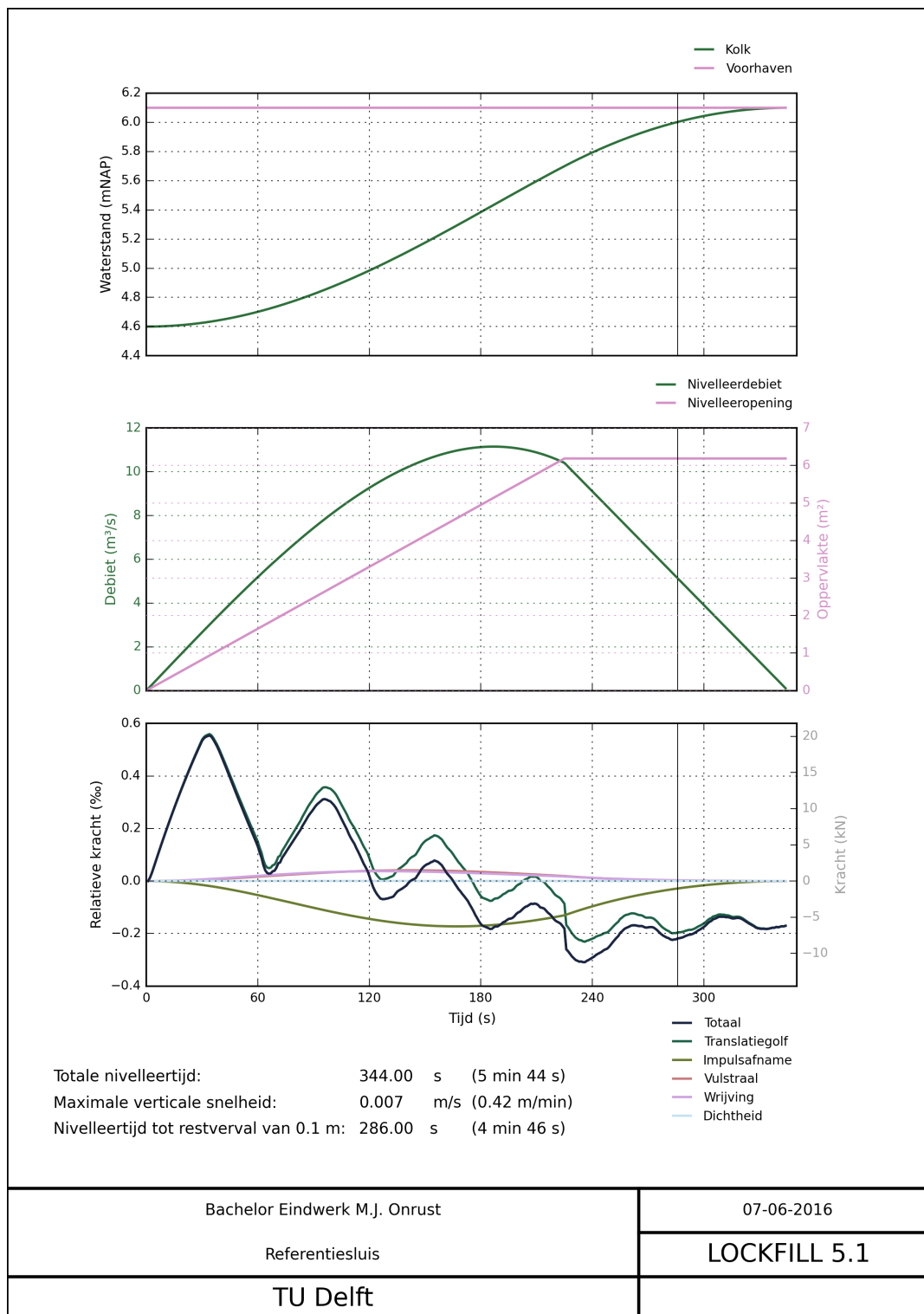
De eerste grafiek toont het verloop van het waterniveau in de kolk in de tijd.

De tweede grafiek toont het nivelleerdebiet en het oppervlakte van de nivelleeropeningen in de tijd.

De derde grafiek toont de langskracht op het schip in de tijd. De langskracht wordt getoond als relatieve kracht, dat wil zeggen als promille van het scheepsgewicht. Het onderscheid tussen de verschillende krachtscomponenten komt ook terug in de output. Dit doet vermoeden dat de krachtscomponenten los worden berekend op basis van verschillende stroombeelden.

Om dit vermoeden te kunnen weerleggen of bevestigen is onderzoek gedaan naar de wiskundige modellering in LOCKFILL. De rekenmethode van LOCKFILL is beschreven door A. Vrijburcht in referentie [8].

Net als de eigen ontwikkelde schematisatie in Hoofdstuk 2 maakt LOCKFILL gebruik van de impulsbalans voor de berekening. De berekenmethode is op dezelfde manier opgebouwd door te kijken naar de situatie tussen twee doorsnedes. Voor de nummering van de raaien is dezelfde nummering aangehouden als in Hoofdstuk 2. De situatie bij de boeg, langs de romp en bij het hek wordt bekeken.



Figuur 3.2: Output LOCKFILL

3.1. Uitgangspunten

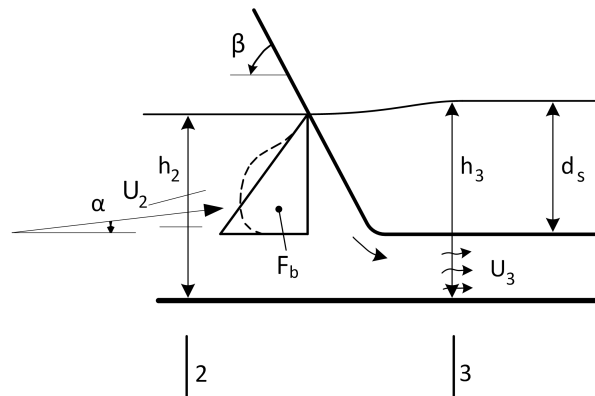
Voor de berekeningen worden de volgende aannames gedaan en uitgangspunten gebruikt:

- Er komt een geconcentreerde vulstraal de sluis binnen door de deuropeningen
- Bij de boeg wordt de stroming over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is
- De druk tegen de boeg is hydrostatisch, met een afwijking voor de straaldruk en afstromend water
- Het debiet is constant in de tijd. Er worden geen translatiegolven opgewekt
- Het debiet neemt lineair af in langrichting
- Er is wrijving op het schip en op kolkwanden en -bodem
- De druk tegen het hek van het schip is hydrostatisch
- Het schip heeft geen invloed op de stroming vóór de boeg van het schip

3.2. Berekening

3.2.1. Langskracht boeg

Bij de boeg van het schip wordt de stroming afgebogen met een impulsafname als gevolg. In het geval dat sprake is van een vulsysteem met deurschuiven komt de krachtcomponent als gevolg van straalwerking hier bij. Figuur 3.3 laat de situatie bij de boeg zien.



Figuur 3.3: Situatie bij de boeg [8]

Bij de boeg neemt de impuls van de stroming af, wat betekent dat er een kracht op de boeg werkt. Dit gaat gepaard met een verschil in de waterstanden vóór en achter de boeg. De druk tegen het voorsteven wordt grotendeels als hydrostatisch aangenomen, met in het midden een drukverhoging als gevolg van de straalwerking. Aan de onderkant van de boeg is een drukverlaging aanwezig door afstromend water. Referentie [8] beschrijft de kracht op de boeg met de volgende formule:

$$F_b = \frac{1}{2} \rho g (h_2 - h_3 + d_s)^2 b_s - C_1 C_2 \rho Q_1 U_1 \sin(\alpha + \beta) \sin \beta \quad (3.1)$$

Hierin is:

C_1 = coëfficiënt voor afwijking van hydrostatische druk

C_2 = coëfficiënt voor welk deel van de straal tegen de boeg gaat

α = hoek van de hartlijn van de straal met horizontaal

β = hoek van de boeg met horizontaal

Door de impulsvergelijking toe te passen kan het waterstandsverschil tussen raai 2 en raai 3 worden bepaald. Uit continuïteitsoverwegingen volgt dat de som van alle componenten nul moet zijn:

$$\frac{1}{2}\rho g h_2^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g h_3^2 b_k + \frac{1}{2}\rho g d_s^2 b_s + \rho Q_2 U_2 \cos \alpha - \rho Q_3 U_3 - F_b = 0 \quad (3.2)$$

Uitschrijven van (3.2) als uitdrukking voor het waterstandsverschil tussen raai 2 en raai 3 en invullen in (3.1) geeft de kracht op de boeg. Na vereenvoudiging levert dit:

$$F_b(t) = \frac{-d_s b_s S_1(t) \cos(\alpha)}{h_k b_k - d_s b_s} + \rho b_s d_s Q(t)^2 \frac{(l_k - x_b)^2}{l_k^2 [h_k b_k - d_s b_s]^2} + \frac{d_s b_s C_1 C_2 S_1(t) \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta)}{h_k b_k - d_s b_s} + C_1 C_2 S_1(t) \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta) \quad (3.3)$$

In deze formule worden de eerste twee termen veroorzaakt door de impulsafname bij de boeg. De laatste twee termen zijn het gevolg van straalwerking. In LOCKFILL wordt de kracht op de boeg daarom opgesplitst in een krachtscomponent als gevolg van de impulsafname bij de boeg:

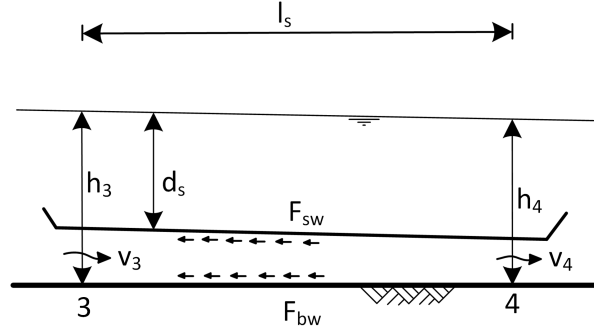
$$F_{impuls_b}(t) = \frac{-d_s b_s S_1(t) \cos(\alpha)}{h_k b_k - d_s b_s} + \rho b_s d_s Q(t)^2 \frac{(l_k - x_b)^2}{l_k^2 [h_k b_k - d_s b_s]^2} \quad (3.4)$$

En een krachtscomponent als gevolg van straalwerking:

$$F_{straal}(t) = C_1 C_2 S_1(t) \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta) \frac{d_s b_s}{h_k(t) b_k - d_s b_s} \quad (3.5)$$

3.2.2. Langskracht romp

Als gevolg van wrijving en de impulsafname langs de romp ontstaat er een verhang. Dit verhang geeft een kracht op het schip. Daarnaast werkt er ook een wrijvingskracht direct op de romp van het schip. Figuur 3.4 laat de situatie langs de romp zien.



Figuur 3.4: Situatie langs de romp [8]

Het verhang en de directe wrijving leveren de kracht op de romp: $F_r = F_{verhang} + F_{sw}$. Het afleiden van de wrijvingskrachten F_{bw} (met de bodem) en F_{sw} (met het schip) kunt u lezen in de bijlagen. Het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ kan worden bepaald met de impulsbalans:

$$\frac{1}{2}\rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g d_s^2 b_s - \frac{1}{2}\rho g h_4^2 b_k + \frac{1}{2}\rho g d_s^2 b_s + \rho Q_3 U_3 - \rho Q_4 U_4 - F_{verhang} - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (3.6)$$

Hierin is:

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s l_s \frac{h_3 - h_4}{l_s}$$

Uitwerken van (3.6) en invullen in $F_r = F_{verhang} + F_{sw}$ geeft:

$$F_r = \rho g \left[\frac{-Q(t)^2}{g(h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} + \frac{F_{bw} + F_{sw}}{\rho g (h_3 b_k - d_s b_s)} \right] d_s b_s + F_{sw}(t) \quad (3.7)$$

Herschrijven hiervan geeft:

$$F_r = \frac{-\rho Q(t)^2 d_s b_s}{(h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} + F_{bw}(t) \frac{d_s b_s}{h_3 b_k - d_s b_s} + F_{sw}(t) \frac{h_3 b_k}{h_3 b_k - d_s b_s} \quad (3.8)$$

In deze formule wordt de eerste term veroorzaakt door het plaatsafhankelijke debiet. De laatste twee termen zijn het gevolg van wrijving. In LOCKFILL wordt de kracht op de romp opgesplitst in een krachtscomponent als gevolg van het plaatsafhankelijke debiet:

$$F_{impuls_r} = \frac{-\rho Q(t)^2 d_s b_s}{(h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} \quad (3.9)$$

En een krachtscomponent als gevolg van wrijving:

$$F_{wrijving} = F_{bw}(t) \frac{d_s b_s}{h_3 b_k - d_s b_s} + F_{sw}(t) \frac{h_3 b_k}{h_3 b_k - d_s b_s} \quad (3.10)$$

3.2.3. Langskracht hek

Uit de impulsbalans tussen raai 4 en raai 5 volgt de kracht tegen het hek van het schip. LOCKFILL vindt hier dezelfde vergelijking als in het integrale model:

$$F_{hek} = -\frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 \quad (3.11)$$

3.2.4. Totale langskracht

Voor de langskracht als gevolg van impulsafname, wrijving en straalwerking worden in LOCKFILL drie gebieden beschouwd: de zone bij de boeg van het schip, de zone langs de romp van het schip en de zone bij het hek van het schip. De krachten uit de verschillende zones zijn onafhankelijk van elkaar en kunnen dus bij elkaar worden opgeteld.

Binnen de zones is met een integrale berekening de kracht op het schip berekend. Het bleek vervolgens mogelijk om de berekende kracht op het schip op te splitsen naar oorsprong van de kracht. De kracht op de boeg is bijvoorbeeld opgesplitst in een krachtscomponent als gevolg van impuls en een krachtscomponent als gevolg van straalwerking. De kracht op de romp is opgesplitst in een krachtscomponent als gevolg van de impulsafname in langsrichting en een krachtscomponent als gevolg van wrijving.

De totale langskracht wordt gegeven door:

$$F = F_{impuls} + F_{wrijving} + F_{straal} \quad (3.12)$$

De kracht als gevolg van de impulsafname is:

$$F_{impuls} = F_{impuls_b} + F_{impuls_r} + F_{hek} \quad (3.13)$$

3.3. Evaluatie

In dit hoofdstuk is gekeken naar de schematisaties in LOCKFILL. De Handleiding LOCKFILL lijkt te suggereren dat voor het berekenen van de verschillende krachtscomponenten verschillende stroombeelden worden gebruikt. De vergelijkingen in LOCKFILL bewijzen echter dat dit niet het geval is.

LOCKFILL kijkt naar de verschillende gebieden (bij de boeg, langs de romp, bij het hek) en berekent daar de kracht op het schip. Hierbij worden wel vereenvoudigingen toegepast om complex rekenwerk te voorkomen, maar worden geen verschillende stroombeelden gebruikt. Net als in de eigen methode bepaalt LOCKFILL dus een kracht op de boeg, een kracht op de romp en een kracht op het hek.

LOCKFILL heeft echter voor een notatie gekozen waarbij de kracht aan een hydraulisch verschijnsel in de kolk is gekoppeld. De krachten op de boeg, op de romp en op het hek bestaan uit meerdere termen. Deze termen worden in LOCKFILL gescheiden en naar oorsprong van de kracht

weer herverdeeld. LOCKFILL gaat dus uit van dezelfde vergelijkingen maar gebruikt een andere notatie voor het optellen van de verschillende krachtscomponenten.

Het scheiden van termen in een vergelijking mag volgens het *beginsel van superpositie*, omdat de termen in een vergelijking onafhankelijk van elkaar zijn. Uit de vergelijkingen blijkt dus dat superpositie van de krachtscomponenten als gevolg van impulsafname, wrijving en straalwerking is toegestaan.

4

Evaluatie

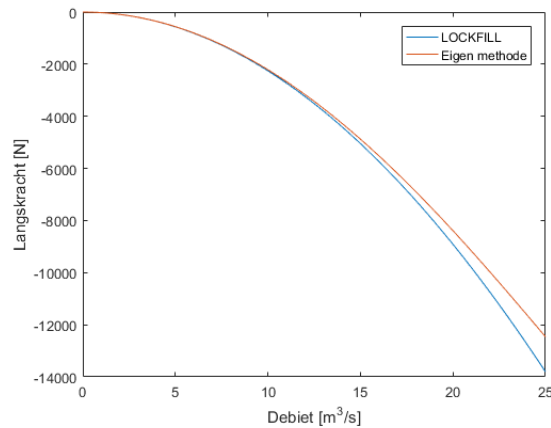
In de voorgaande hoofdstukken is de schematisatie van LOCKFILL doorgrond en is een eigen model opgesteld op basis van een integraal stroombeeld. Uit de vergelijkingen van LOCKFILL is al gebleken dat de toegepaste superpositie voor de beschouwde krachtscomponenten geldig is. De termen worden opnieuw geordend en er wordt een notatie gebruikt die aangeeft door welk hydraulisch verschijnsel de langskracht is veroorzaakt.

Een voordeel van de in LOCKFILL gebruikte notatie is dat deze notatie inzicht biedt in de hydraulische verschijnselen die een rol spelen bij het vullen en ledigen van een sluiskolk. De notatie geeft inzicht in de opbouw van de langskracht en in de grootte van de individuele krachtscomponenten. Hiermee kan dus ook worden bepaald welke maatregelen effectief zijn om de langskracht op het schip te verminderen.

Een voorbeeld: als de langskracht als gevolg van straalwerking kan worden verwaarloosd, is het toepassen van breekbalken om de langskracht te verminderen niet effectief.

LOCKFILL is ontwikkeld in de periode 1989 - 1993, maar de schematisatie bestaat al sinds 1969. In die tijd waren computers nog niet zo krachtig. In LOCKFILL zijn daarom verschillende vereenvoudigingen en aannames toegepast om analytisch te kunnen rekenen. De toegenomen mogelijkheden van numeriek rekenen maken deze vereenvoudigingen overbodig. Het ontwikkelde model maakt gebruik van numerieke rekenmethoden om de langskracht op het schip te berekenen. In dit hoofdstuk wordt gekeken wat het effect van deze vereenvoudigingen in LOCKFILL op de berekende langskracht is.

De vergelijkingen voor het berekenen van de langskracht voor de eigen methode en voor de methode van LOCKFILL zijn in Matlab gezet. Met behulp van dit script, dat te vinden is in Bijlage E, is de langskracht op het schip in de referentiesluis bij verschillende debieten bepaald. In Figuur 4.1 is de langskracht volgens de twee methoden tegen het vuldebiet uitgezet.



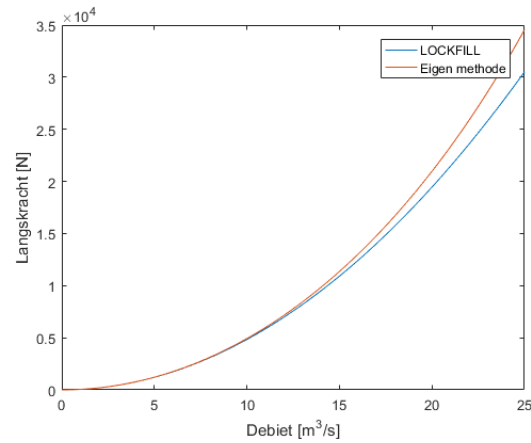
Figuur 4.1: Totale langskracht op het schip als gevolg van de krachtscomponenten impulsafname en wrijving.

De ontwikkelde methode berekent een kleinere langskracht dan de methode van LOCKFILL. Dit is te verklaren door de vereenvoudigingen die LOCKFILL heeft toegepast. De simplificaties zorgen voor de verschillen in uitkomsten tussen de methode in LOCKFILL en de ontwikkelde methode. Voor de debieten die veel bij vul- en ledigingssystemen voorkomen blijkt dat LOCKFILL de ontwikkelde methode zeer goed benadert. Voor de referentiesluis is het maximale vuldebiet bijvoorbeeld $11 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Figuur 3.2.

Bij grote debieten gaat LOCKFILL afwijken van de methode. Mogelijk is dat één van de redenen dat het gebruik van LOCKFILL beperkt wordt tot vervallen van 4 meter.

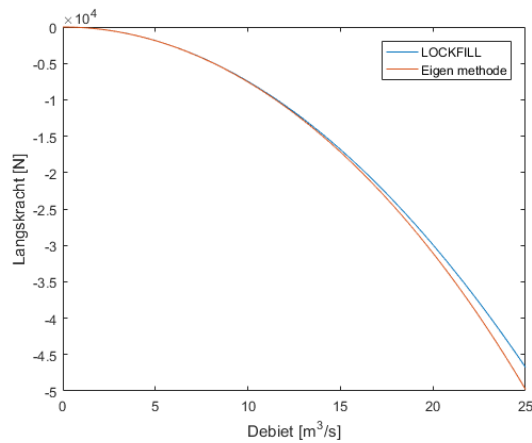
Uit de vergelijkingen is gebleken dat superpositie van de krachten is toegestaan. Daarom bekijk ik ook nog naar de verschillen tussen de twee methoden bij de individuele krachtscomponenten.

In Figuur 4.2 is de impulsafname bij de boeg van het schip uitgezet tegen het vuldebiet. De schematisatie in LOCKFILL komt hier tot een iets kleinere kracht. De berekening van beide schematisaties is bijna identiek. Dit verschil in kracht wordt daarom waarschijnlijk veroorzaakt door de versimpeling die LOCKFILL heeft toegepast. LOCKFILL verwaarloost het verschil in waterstand vóór en achter de boeg in het kwadraat (Δh^2). De eigen methode berekent het waterstandsverschil numeriek en hoeft deze vereenvoudiging dus niet te maken. De eigen methode komt daardoor tot een iets hogere langskracht als gevolg van impulsafname bij de boeg.



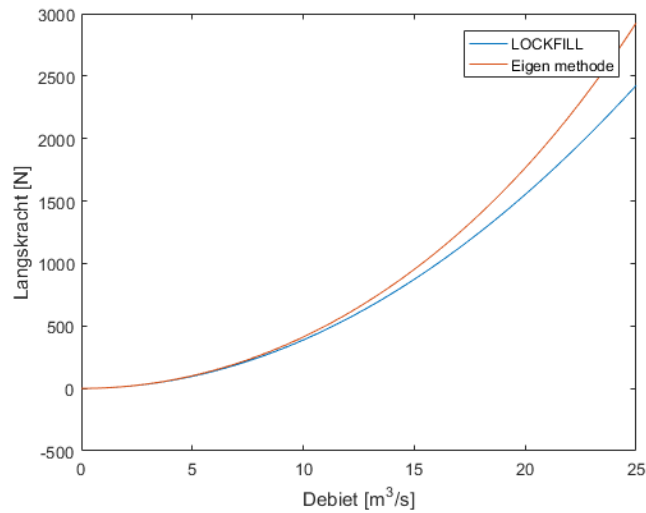
Figuur 4.2: Krachtscomponent impuls tegen boeg

Bij de impulsafname langs de romp van het schip heeft LOCKFILL eenzelfde soort vereenvoudiging toegepast: $h_3^2 - h_4^2 \approx 2h_3(h_3 - h_4)$. Als het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ groter wordt, dan wordt deze benadering minder nauwkeurig. Dit is te zien in Figuur 4.3. Voor de debieten die gebruikelijk zijn voor het vullen en ledigen van een sluiskolk komen beide berekenmethodes zeer goed overeen.



Figuur 4.3: Krachtscomponent impuls langs romp

De laatste component die in dit rapport beschouwd is, is de wrijvingskracht op het schip. In Figuur 4.4 worden de wrijvingskrachten in LOCKFILL en in de eigen methode met elkaar vergeleken.



Figuur 4.4: Krachtscomponent wrijving

LOCKFILL lijkt de wrijvingskracht hier te onderschatten. Dat komt omdat LOCKFILL ervoor heeft gekozen om de wrijving langs de romp te berekenen met de gemiddelde stroomsnelheid. De wrijvingskracht is echter evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheid $F_{wr} \sim U^2$.

In de eigen methode is numeriek geïntegreerd waarbij voor elke plaats de stroomsnelheid is berekend. De wrijvingskracht die op deze manier wordt berekend is groter dan wanneer met de gemiddelde stroomsnelheid wordt gerekend.

LOCKFILL past voor de wrijvingskracht nog een extra reductie toe voor het ontwikkelen van de grenslaag bij de boeg. Bij de boeg wordt de stroming afgebogen waarna de stroming niet meteen gelijkmatig verdeeld is over de doorsnede. LOCKFILL neemt dit effect mee door de wrijvingskracht te vermenigvuldigen met de coëfficiënt C_3 . Voor normale gevallen heeft deze coëfficiënt een waarde van 0.9. In de eigen methode zit deze reductiefactor niet. Om goed vergelijk van de methoden mogelijk te maken is voor C_3 een waarde van 1.0 gekozen.

5

Conclusie

In dit rapport is het vul- en ledigingssysteem van schutsluizen geanalyseerd. Hydraulische verschijnselen in de kolk veroorzaken een langskracht op schepen die in de sluis gemeerd liggen. Deze krachten mogen niet te groot worden om bezwijken van de scheepstrossen te voorkomen.

LOCKFILL is een rekenprogramma dat de langskracht op een schip uitrekent. Het programma is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium. LOCKFILL onderscheidt vijf krachtscomponenten die bij elkaar worden opgeteld. Hierbij lijkt het dat er voor het berekenen van de individuele krachtscomponenten verschillende aannames worden gedaan. Met andere woorden: voor elke krachtscomponent lijkt er een apart stroombeeld te worden aangenomen.

Uit de vergelijkingen van LOCKFILL blijkt echter dat er voor de krachtscomponenten als gevolg van wrijving, impuls en straalwerking één stroombeeld is aangenomen. Met een integrale aanpak is de kracht op het schip berekend, waarna de krachtstermen opnieuw zijn verdeeld. In feite past LOCKFILL alleen een nieuwe notatie toe; superpositie van krachten is daarmee gerechtvaardigd.

Na het doorgronden van de schematisaties in LOCKFILL heb ik een rekenmethode ontwikkeld op basis van een integraal stroombeeld. Hierin is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van numerieke rekenmethoden om zo min mogelijk vereenvoudigingen toe te moeten passen. In LOCKFILL zijn deze vereenvoudigingen wel toegepast om complex rekenwerk te voorkomen.

De twee methoden zijn met elkaar vergeleken, waaruit bleek dat de vereenvoudigingen in LOCKFILL tot debieten van $12 \text{ m}^3/\text{s}$ een goede benadering vormt voor de langskracht. De in dit rapport ontwikkelde methode heeft deze vereenvoudigingen niet toegepast en lijkt ook bij debieten boven $12 \text{ m}^3/\text{s}$ nauwkeurige resultaten te geven. De ontwikkelde methode moet nog gevalideerd worden aan praktijkmetingen om de toegevoegde waarde van de extra nauwkeurigheid door numeriek rekenen te bepalen.

Aanbevelingen

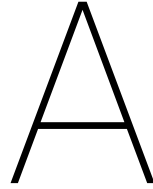
In dit rapport is een schematisatie ontwikkeld die de krachtscomponeneten als gevolg van impulsafname en wrijving op basis van een integraal stroombeeld afleid. Om het onderzoek compleet te maken is het wenselijk dat de krachtscomponeneten als gevolg van straalwerking, translatiegolven en dichtheidsverschillen in de schematisatie worden opgenomen.

Voor de krachtscomponenten als gevolg van translatiegolven en dichtheidsverschillen lijkt er in LOCKFILL een ander stroombeeld te worden aangenomen, waarin het effect van wrijving en impulsafname niet zijn meegenomen. Wat dit betekent voor de correctheid van superpositie is onbekend en moet in vervolgonderzoek worden onderzocht.

Om de ontwikkelde schematisatie in de ontwerppraktijk bruikbaar te maken is het van belang dat de schematisatie gevalideerd wordt met praktijkmetingen. De in dit rapport ontwikkelde methode biedt een grotere nauwkeurigheid voor het berekenen van de langskracht op het schip dan de methode van LOCKFILL. Wat de toegevoegde waarde hiervan is voor het bepalen van de werkelijke langskracht moet nog worden onderzocht.

Referenties

- [1] Battjes, J.A. *CTB2100 Vloeistofmechanica*, Collegedictaat. Technische Universiteit Delft, april 2002.
- [2] Battjes, J.A. en Labeur, R.J. *CTB3350 Open Channel Flow*, Collegedictaat. Technische Universiteit Delft, februari 2014.
- [3] Hartsuijker, Coenraad. *Toegepaste mechanica*, Deel 1 evenwicht. Academic Service, september 1999. ISBN 9039505934.
- [4] Kolkman, P.A. *Hydraulica bij schutsluizen*. Verzamelde notities, Technische Universiteit Delft, september 1969.
- [5] Leeuwdront, Gerbert. *De analyse van vul- en ledigingssystemen van vulsluizen*. Afstudeerproject, Hogeschool Utrecht, juni 2012.
- [6] Verheij, H.J., Stolker, C., en Groenveld, R. *Method of preservation of momentum*, In *Inland Waterways - Ports, waterways and inland navigation*, hoofdstuk 3.2.3, pagina's 40–44. VSSD, 2008. ISBN 9789065623430.
- [7] Voortman, H.G. Onderwerp bsc-eindwerk, schematisatie langskrachten bij vullen en ledigen sluiskolken. Technische Universiteit Delft.
- [8] Vrijburcht, A. *Het vulproces van een schutsluis met een langsvulstelsel, invloed translatiegolven, vulstraaleffecten en dichtheidsverschillen op de langskracht*, verslag berekeningen. Q176 deel II. Waterloopkundig Laboratorium, Delft, augustus 1988.
- [9] Vrijburcht, A. en Haas, R.G. *Het vulproces van een schutsluis met een langsvulstelsel, invloed translatiegolven, vulstraaleffecten en dichtheidsverschillen op de langskracht*, verslag modelonderzoek. Q176 deel I. Waterloopkundig Laboratorium, Delft, augustus 1988.
- [10] WL-Delft. *Handleiding LOCKFILL*. Q1536. Waterloopkundig Laboratorium, Delft, november 1994.



Referentiesluis

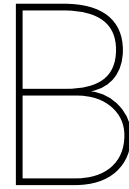
Gegevens sluis voor CEMT-klasse Va [5]

Type vul- en ledigstelsel: deurschuiven
Schuiven worden lineair geheven.

Gegevens

l_k	=	125 m	→ lengte kolk [m]
b_k	=	12.5 m	→ breedte kolk [m]
x_b	=	2 m	→ afstand van de deur tot de stopstreep [m]
b_h	=	$0.55 \cdot b_k = 6.875$ m	→ totale breedte van de vulopeningen [m]
h_h	=	0.9 m	→ hoogte van de vulopeningen [m]
A_h	=	$b_h \cdot h_h = 6.188$ m ²	→ oppervlak van de vulopeningen [m ²]
v_h	=	$4 \frac{mm}{s}$	→ hefsnelheid van de deurschuiven [m]
t_h	=	$\frac{h_h}{v_h} = 225$ s	→ openingstijd van de deurschuiven [s]
μ	=	0.6	→ afvoercoëfficiënt deuropening [-]
l_s	=	110 m	→ lengte van het schip [m]
b_s	=	11.4 m	→ breedte van het schip [m]
d_s	=	3.5 m	→ diepgang van het schip [m]
c_b	=	0.85	→ blokcoëfficiënt van het schip [-]
ρ	=	$1000 \frac{kg}{m^3}$	→ dichtheid zoet water [kg/m ³]
m_s	=	$l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot c_b \cdot \rho = 3.731 \times 10^6$ kg	→ massa scheepsverplaatsing van het schip [kg]
h_{bov}	=	6.1 m	→ waterstand bovenpand [m +NAP]
h_{ben}	=	4.6 m	→ waterstand benedenpand [m +NAP]

h_{bod}	=	0 m	→ hoogte bovenkant sluisbodem [m +NAP]
α	=	3 deg	→ hoek van de hartlijn van de vulstraal met horizontaal [°]
β	=	60 deg	→ hoek van de boeg met de horizontaal [°]
C_1	=	0.9	→ coëfficiënt voor afstromend water [-]
C_3	=	0.9	→ coëfficiënt voor ontwikkeling grenslaag [-]
k_I	=	0.01 m	→ ruwheid van de sluiswand/bodem [m]
k_{II}	=	0.002 m	→ ruwheid van het schip [m]



Langskracht schip in stroming

Dit is de eerste bijlage uit een reeks van drie bijlagen waarin de methode voor het berekenen van de langskracht op een schip in een sluiskolk wordt beschreven.

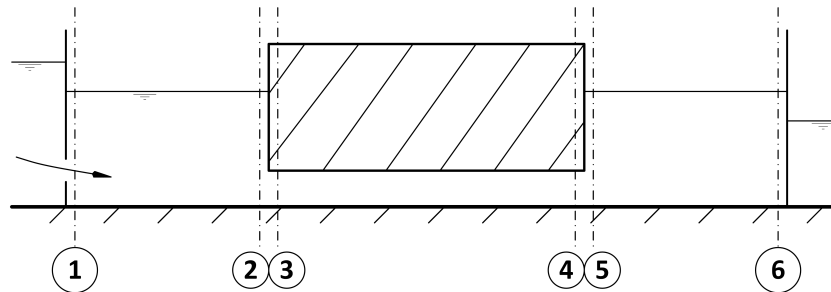
In deze bijlage wordt een berekenmethode gegeven voor het bepalen van de longitudinale kracht op een schip in een prismatisch kanaal. Het schip wordt door middel van trossen in horizontale zin vastgehouden. Het schip vormt hierbij een obstructie in de stroming. Wrijving wordt verwaarloosd en de stroming wordt gelijkmatig verdeeld over de doorsnede van het kanaal verondersteld. Dit is de eerste stap in de opbouw van een alternatieve schematisatie om de langskracht te berekenen.

In deze bijlage wordt de stroming in een (oneindig lang) kanaal beschouwd. Hoewel de stroming in een sluiskolk anders is dan de stroming in een (oneindig lang) kanaal kan deze versimpeling goed gebruikt worden als opstap naar de situatie van een sluiskolk. Dan gaan ook andere hydraulische verschijnselen een rol spelen zoals impulsafname in langsrichting van de kolk en tijdseffecten.

Allereerst wordt gekeken naar de berekening op basis van behoud van energie. Vervolgens wordt de opstap gemaakt naar de berekening op basis van de impulsbalans. LOCKFILL maakt ook gebruik van het behoud van impuls om de impulsafname rond de boeg van het schip te bepalen. Daarna worden de verschillende methoden vergeleken en wordt geëvalueerd met welke methode verder moet worden gewerkt.

B.1. Schematisatie

In het model wordt de sluiskolk opgedeeld in verschillende gebieden, die door genummerde raaien worden gescheiden. Dit is weergegeven in Figuur B.1. In deze bijlage wordt gekeken naar een prismatisch kanaal, maar voor de stroming rond het schip wordt dezelfde nummering gebruikt.



Figuur B.1: Schematisatie sluiskolk met verschillende zones. Zones worden gescheiden door genummerde raaien, zoals weergegeven in de Figuur.

Raai 1 bevindt zich vlak achter de deur met de nivelleeropeningen.

Raai 2 bevindt zich vlak voor de boeg van het schip

Raai 3 bevindt zich vlak achter de boeg van het schip

Raai 4 bevindt zich vlak voor het hek van het schip

Raai 5 bevindt zich vlak achter het hek van het schip

Raai 6 bevindt zich vlak voor het dichte kolkeinde.

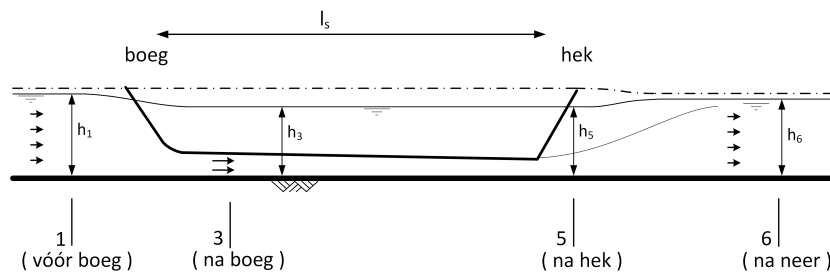
B.2. Stroombeeld

Figuur B.2 geeft een weergave van het stroombeeld rond een schip in een oneindig lang kanaal. Het water stroomt met een debiet Q en het schip ligt gemeerd. Het stroombeeld kan globaal als volgt worden beschreven:

In het kanaal stroomt het water met een debiet Q . Het snelheidsprofiel is gelijkmatig verdeeld over de natte doorsnede. Bij de boeg van het schip wordt de stroom versneld, dit heeft een spiegeldaling langs het schip als gevolg. De stroming wordt over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is.

Bij het hek van het schip vindt een abrupte verandering van het stromingsprofiel plaats. De stroom zal hier loslaten en er ontstaat een zogenaamde dekneer, waarin het water relatief langzaam en sterk wervelend rondgaand beweegt. Omdat de bewegingen relatief langzaam zijn kunnen we voor het effect van de neer op de hoofdstroom doen alsof de drukverdeling in de neer hydrostatisch is [1].

In het vertragsgebied na het hek van het schip stijgt de waterhoogte weer tot de stroming weer gelijk is over de waterdiepte. Door energieverliezen in de neer is de waterhoogte achter het schip lager dan de waterhoogte vóór de boeg. Dat is te zien aan een daling van de energiehoogte. In Figuur B.2 is de energiehoogte H aangegeven met een stippellijn.



Figuur B.2: Stroombeeld langs een schip in een oneindig lang kanaal

B.3. Uitgangspunten

Voor de berekeningen worden de volgende aannames gedaan en uitgangspunten gebruikt:

- Het debiet is constant in de tijd. Er worden geen translatiegolven opgewekt
- Het debiet is constant in langsrichting. Er wordt gekeken naar de stroming in een oneindig lang kanaal. In het kanaal is sprake van *stationaire stroming*
- Er is geen straalwerking. Het snelheidsprofiel is gelijkmatig verdeeld over de kolkdoorsnede
- Wrijving is verwaarloosbaar
- Bij de boeg van het schip wordt de stroming over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is
- De druk tegen het hek van het schip is hydrostatisch

B.4. Berekening op basis van energiebalans

Het stromingsgedrag van vloeistoffen kan worden beschreven door de **wet van Bernoulli**. De wet van Bernoulli is een wetmatigheid die de drukveranderingen aan hoogte- en snelheidsveranderingen relateert. De wet is een vereenvoudigde vorm van de wet van behoud van energie. De energiehoogte H [m] is constant langs een stroomlijn. De energiehoogte wordt gegeven door [1]:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} \quad (\text{B.1})$$

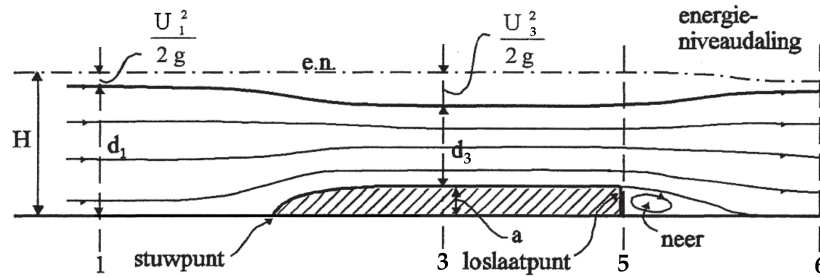
Hierin is:

z = plaatshoogte ten opzichte van referentieniveau	[m]
p = druk	[Pa]
ρ = dichtheid van het water	[kg/m ³]
g = valversnelling	[m/s ²]
U = gemiddelde stroomsnelheid door een doorsnede	[m/s]

Met de wet van Bernoulli kan de spiegeldaling langs het schip worden berekend, waarna met behulp van de impulsbalans de langskracht op het schip kan worden bepaald. Omdat de stroming langs een schip en de stroming over een lange overlaat veel overeenkomsten hebben wordt eerst de stroming over een lange overlaat beschouwd. Daarna wordt de stap gezet naar de stroming langs een schip.

B.4.1. Stroming over lange overlaat

De stroming langs het schip is vergelijkbaar met de stroming over een lange overlaat. De stroming over de overlaat wordt versneld. Boven de kruin zorgt dit voor een waterstandsdeling. De kruin van de overlaat is zó lang dat de stroomlijnen boven de overlaat als recht beschouwd kunnen worden. De druk kan daarmee als hydrostatisch worden verondersteld. Achter de overlaat ontstaat een neer. In de neer vindt dissipatie van energie plaats. Zoals in Figuur B.3 te zien is, daalt de energiehoogte daar.



Figuur B.3: Stroming over een lange overlaat [1]

De hoogte van de overlaat is gegeven door a . De waterdiepte in een raai wordt aangegeven met het symbool d . Met de stroomlijnen in de figuur wordt aangegeven hoe de vloeistofdeeltjes bewegen.

Langs de stroomlijnen is de energiehoogte constant. Deze kan dus gelijkgesteld worden aan de energiehoogte in een andere doorsnede. In het vertragsgebied (tussen raai 5 en raai 6) benedenstrooms aan de overlaat treden energieverliezen op. De wet van Bernoulli is in dit gebied daarom niet geldig. In dit geval biedt de impulsbalans een mogelijkheid om de benedenstroomse waterdiepte te berekenen.

De energiehoogten in raai 1, raai 3 en raai 5 worden gelijkgesteld:

$$d_1 + \frac{U_1^2}{2g} = a + d_3 + \frac{U_3^2}{2g} = d_5 + \frac{U_5^2}{2g} \quad (\text{B.2})$$

Over de overlaat is sprake van stationaire stroming, dus het debiet is overal gelijk. Dat levert de massabalans. Omdat water onsamendrukbaar is kan deze ook geschreven worden als een volumebalans:

$$q = U_1 d_1 = U_3 d_3 = U_5 (d_5 - a) = U_6 d_6 \quad (\text{B.3})$$

Toepassing van de behoudswetten voor volume en energie op het versnellingsgebied (tussen raai 1 en raai 5) levert:

$$d_1 - d_5 + \frac{(q/d_1)^2}{2g} - \frac{(q/(d_5 - a))^2}{2g} = 0 \quad (\text{B.4})$$

Als de waterhoogte bovenstrooms van de overlaat (d_1), het specifiek debiet (q) en de hoogte van de overlaat (a) bekend zijn, kan de waterdiepte vlak na de overlaat (d_5) worden berekend. De waterhoogte zal pas na het vertragsgebied weer herstellen, dus de waterhoogte vlak na de overlaat is gelijk aan de waterhoogte boven de kruin.

Met impulsbalans over het gebied tussen raai 1 en raai 5 kan de langskracht (per eenheid breedte) op de overlaat worden berekend. De impulsbalans bevat een component voor hydrostatische druk en een component voor doorvoering [1]:

$$\frac{1}{2}\rho g d_1^2 - \frac{1}{2}\rho g d_5^2 + \rho q U_1 - \rho q U_5 = F \quad (\text{B.5})$$

In bovenstaande beschouwing is beschreven hoe met behulp van de energiebalans de kracht op een lange overlaat kan worden bepaald. Deze berekening bestaat uit twee stappen:

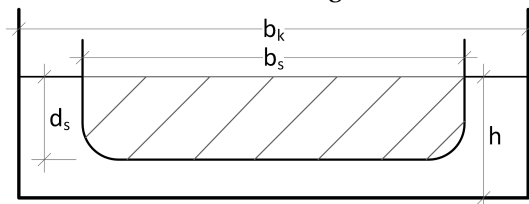
1. De wet van Bernoulli beschrijft de relatie tussen veranderingen in de waterhoogte en snelheidsveranderingen. Zolang er geen energiedissipatie plaatsvindt kan deze relatie gebruikt worden om de waterdiepte na de versmalling van het stroomprofiel te berekenen.
2. In het versnellingsgebied van de stroming is er impuls verloren gegaan. Om dit te compenseren wordt er een langskracht op de overlaat uitgevoerd. De wet van behoud van impuls geeft de relatie waarmee de langskracht kan worden berekend.

Nu de rekenmethode voor een lange overlaat beschreven is wordt gekeken naar de situatie van een schip in een stroming.

B.4.2. Stroming langs schip

In tegenstelling tot de situatie met de lange overlaat is de doorsnede van een sluiskolk met een schip niet prismatisch. Het schip blokkeert niet de volledige breedte van de kolk, zie Figuur B.4.

Figuur B.4: Dwarsdoorsnede sluiskolk met schip. Het schip blokkeert niet de volledige breedte van de sluiskolk, waardoor het water ook langs het schip kan stromen. De afmetingen zijn in de figuur aangegeven.



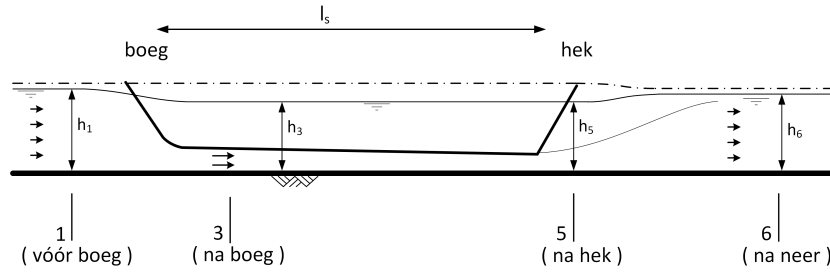
Als het water ook langs het schip kan stromen is het niet meer zelfsprekend om een 1D-model te gebruiken om de stroming te schematiseren. Aangenomen wordt dat de stroming in dwarsrichting relatief klein is en dus verwaarloosd kan worden. Het is dan toch goed mogelijk de stroming met een 1D-model te schematiseren.

Aannames

- Stroming in dwarsrichting verwaarloosbaar
- Schip wordt in horizontale zin vastgehouden

Voor de boeg van het schip wordt het water opgestuwd; hier bevindt zich een stuwpunt. Hoeveel het water hier wordt opgestuwd hangt af van de vorm van de boeg. Het effect van de opstuwing op de langskracht wordt verwaarloosd; in de methode van Bouwmeester wordt hier weer op teruggekomen.

De situatie met het schip is in Figuur B.5 weergegeven. De locatie van de raaien is zo gekozen dat deze overeenkomen met de raaien in Figuur B.3.



Figuur B.5: Stroming langs een schip

In het versnellingsgebied voor de boeg van het schip en langs de romp van het schip vindt geen energiedissipatie plaats. De energiehogte tussen raai 1 en raai 5 kan daarom constant worden verondersteld:

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} = h_5 + \frac{U_5^2}{2g} \quad (\text{B.6})$$

In de situatie van een schip in een oneindig kanaal wordt er geen water in het systeem opgeslagen. Het debiet in elke doorsnede is gelijk. De stroomsnelheid is dan gegeven door:

$$Q_v = U_1 A_1 = U_3 A_3 = U_5 A_5 = U_6 A_6 \quad (\text{B.7})$$

Hierin is:

$$Q_v = \text{debiet door de deur met nivelleeropeningen} \quad [m^3/s]$$

$$A_1 = h_1 b_k \quad [m^2]$$

$$A_3 = h_3 b_k - d_s b_s \quad [m^2]$$

$$A_5 = h_5 b_k - d_s b_s \quad [m^2]$$

$$A_6 = h_6 b_k \quad [m^2]$$

Toepassing van de behoudswetten van volume en energie geeft de volgende uitdrukking:

$$h_1 + \frac{(Q/(h_1 b_k))^2}{2g} - h_5 - \frac{(Q/(h_5 b_k - d_s b_s))^2}{2g} = 0 \quad (\text{B.8})$$

Hieruit kan de waterdiepte achter het schip (h_5) worden bepaald. Invullen van de waterdiepte in de impulsbalans geeft de langskracht op het schip:

$$\frac{1}{2} \rho g h_1^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g h_5^2 b_k + \rho Q U_1 - \rho Q U_5 = F \quad (\text{B.9})$$

De impulsbalans heeft een component voor de hydrostatische druk in beide raaien en een component van de meevoering. Het verschil in impuls tussen de twee doorsneden levert de langskracht op het schip.

B.5. Berekening op basis van de impulsvergelijking

De berekening op basis van de impulsbalans is hiervoor beschouwd. Nu wordt de impulsbalans gebruikt om de spiegeldaling langs het schip te berekenen. Eerst wordt gekeken naar een methode die gebruik maakt van de ondiepwatervergelijkingen. Daarna worden de methoden van Bouwmeester en LOCKFILL beschouwd.

B.5.1. Ondiepwatervergelijkingen

In het collegedictaat van Open Channel Flow [2] worden de (een-dimensionale) ondiepwatervergelijkingen afgeleid. Deze vergelijkingen staan ook wel bekend als de vergelijkingen van De Saint-Venant (1871) en zijn gebaseerd op de impulsbalans. Voor de afleiding van de ondiepwatervergelijkingen verwijs ik naar het collegedictaat van Open Channel Flow [2]. De ondiepwatervergelijkingen bestaan uit de **bergingsvergelijking**

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (\text{B.10})$$

en de **versnellings vergelijking**

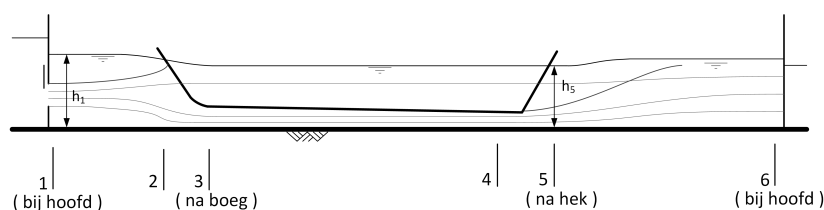
$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial s} + g \frac{\partial h}{\partial s} + c_f \frac{|U| U}{R} = 0 \quad (\text{B.11})$$

Hierin is de eerste term de lokale traagheidsterm. $U \frac{\partial U}{\partial s}$ is de advectieve traagheidsterm en $g \frac{\partial h}{\partial s}$ is de zwaartekracht term. De laatste term beschrijft de wrijving in het systeem.

Deze vergelijkingen vormen een gekoppeld systeem van partiële differentiaalvergelijkingen voor de onbekenden h (waterhoogte) en Q (debiet) als functie van plaats (s) en tijd (t). Als de geometrische parameters A_c , R en B en de wrijvingscoëfficiënt c_f als functie van de plaats, de waterhoogte en het debiet bekend zijn, en er randvoorwaarden zijn opgesteld, kan het systeem worden opgelost.

De ondiepwatervergelijkingen zijn alleen geldig binnen de hydrostatische drukbenadering. Dat is de reden dat ze alleen geldig zijn in ondiep water. Er is sprake van ondiep water als de diepte erg klein kan worden verondersteld in vergelijking met de typische lengteafmetingen van de golfverschijnselen.

De stroomlijnen moeten recht zijn. Voor de boeg van het schip worden de stroomlijnen afgebogen, het is dus de vraag of de drukverdeling hier als hydrostatisch mag worden aangenomen. Een schets van de stroomlijnen in een schutsluis is te zien in Figuur B.6.



Figuur B.6: Stroomlijnen schutsluis rondom schip

Het schip is hier afgebeeld als een blok in de stroming. In werkelijkheid is de boeg van het schip hydrodynamisch gestroomlijnd. Zoals te zien in Figuur B.6 is de afbuiging van de stroomlijnen klein. Er wordt daarom aangenomen dat hydrostatische drukverdeling vóór de boeg van het schip een goede benadering is.

We beschouwen de stroming rond het schip in een oneindig lang kanaal. Uit vergelijking (B.10) blijkt dat zowel $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ als $\frac{\partial Q}{\partial s} = 0$. De waterhoogte is dus constant in de tijd en het debiet is door elke doorsnede hetzelfde, dus is vergelijking (B.7) hier geldig:

$$Q_v = U_1 A_1 = U_3 A_3 = U_5 A_5 = U_6 A_6 \quad (\text{B.12})$$

Er is sprake van stationaire stroming en wrijving is verwaarloosbaar. De versnellingsvergelijking kan dan worden gereduceerd tot:

$$U \frac{\partial U}{\partial s} + g \frac{\partial h}{\partial s} = 0 \quad (\text{B.13})$$

Elimineren van ∂s geeft:

$$U \partial U + g \partial h = 0 \quad (\text{B.14})$$

In de ruimte vóór het schip is de stroomsnelheid constant. De stroomsnelheid is gelijkmatig over het natte profiel verondersteld en het verhang van de waterhoogte heeft een klein effect op de stroomsnelheid. Uit (B.14) blijkt dan dat het verhang *nul* is. In de situatie met wrijving kan er wel een verhang ontstaan om met de wrijving te compenseren. Het effect van de advectieve traagheidsterm is dan nog steeds verwaarloosbaar.

Uit (B.14) volgt ook dat het verhang tussen raai 3 en raai 4 (langs de romp van het schip) ook nul is. Bij de boeg van het schip wordt de stroming versneld, waardoor er over de boeg een hoogteverschil ontstaat. Bij het hek vertraagt de stroming. Dit zorgt ook voor een waterstandsverschil. De volgende formule geldt voor de stroming tussen raai 2 en raai 3:

$$U_2 (U_2 - U_3) + g (h_2 - h_3) = 0 \quad (\text{B.15})$$

Uitschrijven van (B.7) als uitdrukkingen voor U_2 en U_3 en invullen in (B.15) geeft:

$$\left(\frac{Q_v}{h_1 b_k} \right)^2 - \frac{Q_v}{h_1 b_k} \frac{Q_v}{h_3 b_k - d_s b_s} + g (h_1 - h_3) = 0 \quad (\text{B.16})$$

Hieruit kan de waterhoogte na de boeg van het schip (h_3) worden bepaald.

Voor het berekenen van de langskracht op het schip gaan we terug naar de impulsbalans van (B.9). Het balansgebied waarop de impulsbalans wordt toegepast wordt zo gekozen dat het hele schip in het balansgebied ligt. De langskracht volgt uit de impulsafname van de stroming in het balansgebied:

$$\frac{1}{2} \rho g b_k h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g b_k h_5^2 + \rho Q_1 U_1 - \rho Q_5 U_5 = F \quad (\text{B.17})$$

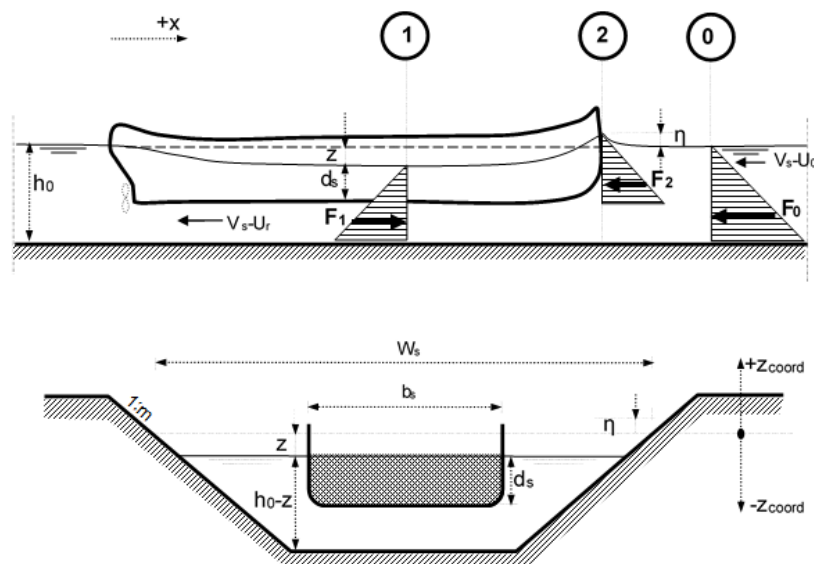
Bij het hek van het schip kan de stroming de heklijn niet volgen en laat de stroming los. De waterhoogte stijgt daardoor pas in het gebied ná het hek. Hiermee is h_5 dus gelijk aan de berekende waterhoogte na de boeg (h_3).

Met bovenstaande uiteenzetting kan de waterspiegeldaling langs het schip worden bepaald met behulp van de ondiepwatervergelijkingen. Uit de impulsvergelijkingen volgt dan dat er een langskracht op het schip werkt.

De methode van Bouwmeester is een andere methode om de spiegeldaling en de retourstroom langs een schip te bepalen. In tegenstelling tot voorgaande methoden gaat de methode van Bouwmeester uit van een varend schip in een prismatisch kanaal.

Om de spiegeldaling en de retourstroom rond een varend schip te berekenen zijn verschillende methoden ontwikkeld, zoals de methode van Schijf. De methode van Schijf is echter op de energiebalans gebaseerd en in dit onderzoek wordt gekeken naar een methode die is gebaseerd op behoud van impuls. Een methode die op de impulsbalans is gebaseerd is de methode van Bouwmeester (1977) [6].

Bouwmeester gaat uit van een schip dat vaart in een oneindig lang kanaal met een trapezium-vormige doorsnede. Bouwmeester heeft daarom geen last van effecten zoals straalwerking, impulsafname in langsrichting en translatiegolven. Bouwmeester kijkt alleen naar de impulsafname bij de boeg van het schip. De hydrostatische krachten in langskracht worden berekend door de hydrostatische drukken te integreren (F_0 , F_1 en F_2 , zie Figuur B.7)



Figuur B.7: Definities door Bouwmeester [6]

Het schip vaart met een snelheid V_s ; de snelheid van het water is U_0 . Bouwmeester heeft z gedefinieerd als de spiegeldaling langs de romp van het schip. Voor de boeg van het schip wordt het water opgestuwd. De grootte van de opstuwing voor de boeg is gegeven door:

$$\eta = C_D \frac{(V_s - U_0)^2}{2g} \quad (\text{B.18})$$

Waarin C_D de wrijvingscoëfficiënt is die afhangt van de vorm van de boeg. Voor de eenvoud heeft

Bouwmeester de wrijving langs de romp ook in deze coëfficiënt ingebracht:

$$C_D = \gamma \left(\frac{d_s}{h_0} \right)^2$$

γ is hierin een coëfficiënt die afhangt van de vorm van de boeg van het schip. Voor een volledig prismatische boeg geldt $\gamma = 1$; voor conventionele binnenvaartschepen ligt γ in de range 0.8 – 1 en γ is bijna 0 voor een duwboot met een schuin oplopende voorkant.

Bouwmeester berekent de spiegeldaling door een massabalans ($m_0 = m_1$) en een impulsbalans $(F_0 - F_1 - F_2) dt = mdU$ op te stellen:

$$\rho A_0 (V_s - U_c) dt = \rho A_1 (V_s - U_r) dt \quad (\text{B.19})$$

$$F_0 - F_1 - F_2 = \rho A_0 (V_s - U_r) dt \frac{(U_r - U_0)}{dt} \quad (\text{B.20})$$

Bouwmeester vindt hiermee de volgende relaties:

$$\frac{V_s - U_0}{\sqrt{g \cdot \bar{h}}} = \left[\frac{2 \left(\frac{z}{h} \right) \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_c} \right) - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{B_s}{W_s} \right) + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^3 \cdot \left(\frac{m \cdot \bar{h}}{W_s} \right)}{C_D \cdot \left(\frac{A_s}{A_c} + \frac{z}{h} \right) \cdot \frac{B_s}{W_s} + 2 \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{z}{h} \right) + \left(\frac{m \cdot \bar{h}}{W_s} \right) \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^2 - \frac{A_s}{A_c}} - 1 \right)} \right]^{1/2} \quad (\text{B.21})$$

$$\frac{U + U_0}{\sqrt{g \cdot \bar{h}}} = \left[\frac{1}{1 - \frac{z}{h} + \left(\frac{m \cdot \bar{h}}{W_s} \right) \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^2 - \frac{A_s}{A_c}} - 1 \right] \cdot \frac{V_s - U_0}{\sqrt{g \cdot \bar{h}}} \quad (\text{B.22})$$

In dit onderzoek wordt gekeken naar een schip in een sluiskolk met een rechthoekige doorsnede. Hieruit volgt dat zowel V_s als m gelijk zijn aan nul. Omdat de impulsbalans overzichtelijker is dan de relaties die Bouwmeester heeft afgeleid wordt de impulsbalans volgens Bouwmeester (B.20) gebruikt:

$$\frac{1}{2} \rho g b_k h_0^2 - \frac{1}{2} \rho g b_k (h_0 - z)^2 + \frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 - \frac{1}{2} \rho g b_s (\eta + z + d_s)^2 + \rho Q U_0 - \rho Q U_1 = 0 \quad (\text{B.23})$$

Hieruit kan de spiegeldaling langs het schip worden opgelost.

De langskracht volgt uit de impulsbalans tussen de boeg en het hek van het schip. De kracht op de boeg van het schip wordt door Bouwmeester als volgt aangenomen:

$$F_{boeg} = \frac{1}{2} \rho g b_s (\eta + z + d_s)^2 \quad (\text{B.24})$$

De kracht op het hek van het schip is bepaald met behulp van een impulsbalans tussen raai 4 en raai 5. Raai 4 is vlak voor het hek van het schip. De hydrostatische druk werkt hier niet over de gehele doorsnede, maar moet worden verminderd met de hydrostatische druk ter plaatse van het

schip. Aangezien de stroming na het hek loslaat is het doorvoerend oppervlakte tussen raai 4 en raai 5 gelijk. Dit levert:

$$\left(\frac{1}{2}\rho g b_k h_4^2 - \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2\right) - \frac{1}{2}\rho g b_k h_5^2 + \rho Q_4 U_4 - \rho Q_5 U_5 = F_{hek}$$

De meevoeringstermen vallen tegen elkaar weg. De kracht tegen het hek van het schip blijft over:

$$F_{hek} = -\frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2$$

De totale langskracht op het schip volgens Bouwmeester is:

$$F = F_{boeg} + F_{hek} = \frac{1}{2}\rho g b_s (\eta + z + d_s)^2 - \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 \quad (B.25)$$

Bouwmeester heeft wrijving verwaarloosd. Uit modelonderzoek is gebleken dat de extra spiegeldaling als gevolg van wrijving slechts 3% is [6]. Voor een schip dat door een kanaal vaart is het dus gerechtvaardigd om wrijving te verwaarlozen.

Voor de stroming in een sluis is het effect van wrijving naar verwachting hoger. Ten eerste is er bij het vul- en ledigingsproces sprake van stroming in de kolk, waardoor bodemwrijving een rol gaat spelen. Daarnaast is het doorstroomprofiel in een schutsluis veel kleiner dan het doorstroomprofiel in een kanaal. Een schip in een sluis blokkeert een relatief groot deel van dit doorstroomprofiel, met hogere stroomsnelheden als gevolg. Wrijving is evenredig met de stroomsnelheid in het kwadraat en is in een schutsluis naar verwachting groter dan in een kanaal. Bij het schematiseren van de stroming in een sluiskolk mag dit effect daarom niet worden verwaarloosd.

Correctheid aanname kracht op boeg

Bouwmeester berekent de spiegeldaling middels de wet van behoud van impuls. Hierin zijn zowel de kracht op de boeg als de spiegeldaling onbekend. Bouwmeester heeft de kracht op de boeg daarom aangenomen als

$$F_{boeg} = \frac{1}{2}\rho g b_s (\eta + z + d_s)^2 \quad (\text{zie B.24})$$

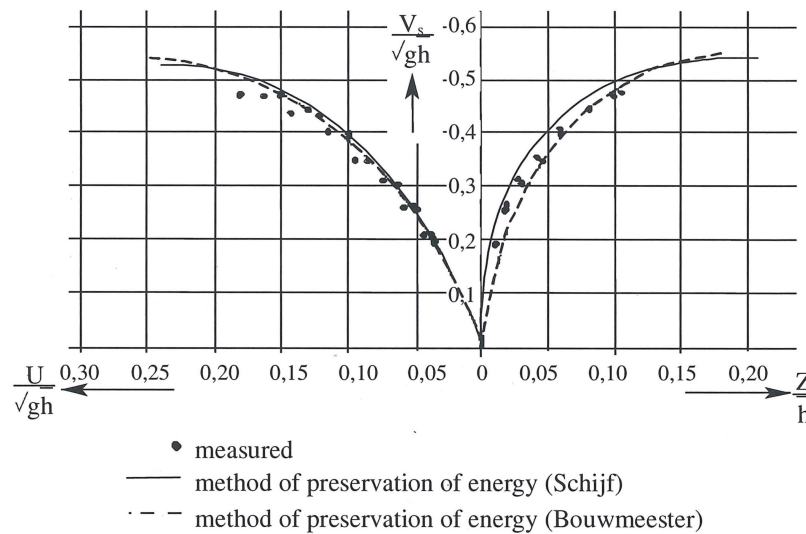
In de literatuur heb ik geen onderbouwing voor deze aanname kunnen vinden. Om deze aanname te controleren heb ik een impulsbalans opgesteld over de boeg van het schip. Hierbij heb ik de opstuwing van het water voor de boeg verwaarloosd, omdat dit effect ook niet in LOCKFILL wordt meegenomen. De impulsbalans tussen raai 2 en raai 3 geeft:

$$F_{boeg} = \frac{1}{2}\rho g b_k h_2^2 + \rho \frac{Q^2}{h_2 b_k} - \frac{1}{2}\rho g b_k h_3^2 + \frac{1}{2}\rho g b_s d_s^2 - \rho \frac{Q^2}{h_3 b_k - b_s d_s} \quad (B.26)$$

Versimpeling hiervan geeft:

$$F_{boeg} = \frac{1}{2}\rho g b_k \left(h_2^2 - h_3^2 + \frac{b_s}{b_k} d_s^2 \right) + \rho Q^2 \left(\frac{1}{h_2 b_k} - \frac{1}{h_3 b_k - b_s d_s} \right) \quad (B.27)$$

De verkregen vergelijking lijkt heel anders te zijn dan de aangenomen kracht op de boeg van Bouwmeester. Naast de termen voor hydrostatische druk is er in vergelijking (B.27) ook een term voor meevoering.



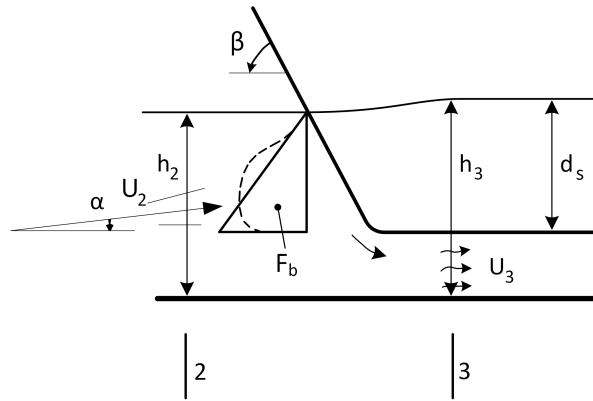
Figuur B.8: Methode van Bouwmeester vergeleken met de methode van Schijf [6]

Toch blijkt de methode van Bouwmeester goede resultaten te bieden [6]. Figuur B.8 laat de grootte van de retourstroom (U) en van de spiegeldaling (z) zien in vergelijking met de methode van Schijf en met meetresultaten. De methode van Schijf is gebaseerd op de wet van behoud van energie. Zowel Schijf als Bouwmeester benaderen de gemeten waarde goed. Bouwmeester is dus een beproefde methode.

B.6. Implementatie in LOCKFILL

LOCKFILL maakt gebruik van de impulsbalans om de kracht op het schip te bepalen. De methode die in LOCKFILL is geïmplementeerd lijkt gebaseerd te zijn op de methode van Sharp en Fenton (1968). De methode van Sharp en Fenton is een versimpeling van de methode van Bouwmeester waarbij is uitgegaan van een rechthoekige doorsnede en waarbij de wateropstuwing voor de boeg is verwaarloosd. De karakteristieke stroomsnelheden in een schutsluis zijn gering, waardoor het verwaarlozen hiervan gerechtvaardigd lijkt te zijn.

Figuur B.9 laat de situatie bij de boeg zien. Net als bij Bouwmeester wordt de kracht op de boeg veroorzaakt door een druk op de boeg die grotendeels als hydrostatische druk wordt aangenomen. LOCKFILL heeft hier een aanvulling op gedaan om het effect van de geconcentreerde vulstraal te kunnen beschrijven. Als gevolg van straalwerking is er in het midden van de boeg gecorrigeerd door middel van een drukverhoging. Door afstromend water is er aan de onderkant van de boeg een drukverlaging aanwezig. Deze uitgangspunten in LOCKFILL zijn gebaseerd op referentie [8].



Figuur B.9: Situatie bij de boeg [8]

Referentie [8] beschrijft de kracht op de boeg met vergelijking (B.28). De eerste term is de hydrostatische druk tegen de boeg. De tweede term is de afwijking van de hydrostatische druk als gevolg van de straalwerking.

$$F_b = \frac{1}{2} \rho g (h_2 - h_3 + d_s)^2 b_s - C_1 C_2 \rho Q_2 U_2 \sin(\alpha + \beta) \sin \beta \quad (\text{B.28})$$

Hierin is

C_1 = coëfficiënt voor afwijking van hydrostatische druk

C_2 = coëfficiënt voor welk deel van de straal tegen de boeg gaat

α = hoek van de hartlijn van de straal met horizontaal

β = hoek van de boeg met horizontaal

In normale gevallen kan volgens referentie [5] een waarde van 0.9 worden aangehouden voor de coëfficiënt C_1 . De grootte van coëfficiënt C_2 wordt bepaald met behulp van het oppervlak van de straal bij de boeg. Omdat het effect van de vulstraal in dit rapport niet wordt meegenomen wordt hier niet verder op ingegaan.

De afstand tussen raai 2 en raai 3 wordt als heel klein aangenomen. De wrijving die in dit gebied op de stroming werkt is daarom verwaarloosbaar. In het geval dat de stroming in een sluiskolk beschouwd wordt, betekent dat ook dat het debiet door 2 gelijk is aan Q_3 .

De spiegeldaling langs de romp van het schip wordt in LOCKFILL op vergelijkbare wijze als door Bouwmeester bepaald. Voor het eenvoud van de berekening heeft LOCKFILL de waterstandsverlaging langs de romp verwaarloosd voor het bepalen van de stroomsnelheid van het water. Gezien het geringe effect van de spiegeldaling op de stroomsnelheid is deze versimpeling te verantwoorden. De impulsbalans tussen raai 2 en raai 3 levert de het waterstandsverschil $h_2 - h_3$:

$$F_{stat_2} - F_{stat_3} + F_{hyd_2} - F_{hyd_3} - F_b = 0 \quad (\text{B.29})$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} F_{stat_2} &= \frac{1}{2} \rho g h_2^2 b_k \\ F_{stat_3} &= \frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g d_s^2 b_s \\ F_{hyd_2} &= \rho Q_2 U_2 \cos \alpha \\ F_{hyd_3} &= \rho Q_3 U_3 \end{aligned}$$

Om complex rekenwerk te vermijden heeft LOCKFILL aangenomen dat het waterstandsverschil relatief klein is. Het kwadraat hiervan (Δh^2) is dan te verwaarlozen. Stel:

$$\begin{aligned} (h_2^2 - h_3^2) &\approx 2h_2 (h_2 - h_3) \\ (h_2 - h_3 + d_s)^2 &\approx d_s^2 + 2d_s (h_2 - h_3) \end{aligned}$$

Dan wordt de impulsbalans:

$$\rho g (b_k h_2 - b_s d_s) (h_2 - h_3) + \rho Q_2 U_2 - \rho \frac{Q_3^2}{h_3 b_k - b_s d_s} - C_1 C_2 \rho Q_2 U_2 \sin(\alpha + \beta) \sin \beta = 0 \quad (B.30)$$

Vrijmaken van het waterstandsverschil $h_2 - h_3$ geeft:

$$h_2 - h_3 = \frac{-\rho Q_2 U_2 + \rho \frac{Q_3^2}{h_3 b_k - b_s d_s} + C_1 C_2 \rho Q_2 U_2 \sin(\alpha + \beta) \sin \beta}{\rho g (b_k h_2 - b_s d_s)} \quad (B.31)$$

Na vereenvoudiging levert dit het volgende waterstandsverschil:

$$h_2 - h_3 = \frac{-Q_2 U_2 \cos(\alpha) + \frac{Q_2^2}{h_k b_k - d_s b_s}}{g [h_k b_k - d_s b_s]} + \frac{C_1 C_2 Q_2 U_2 \cdot \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta)}{g [h_k b_k - d_s b_s]} \quad (B.32)$$

Hierin is:

$$h_k = \text{de gemiddelde kolkwaterstand} \quad [m]$$

In deze vergelijking is het effect van de vulstraal meegenomen. Voor deze situatie kan de vergelijking dus verder vereenvoudigd worden.

Impulsbalans tussen raai 4 (voor het hek) en raai 5 (na het hek) levert de kracht op het hek van het schip:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho g b_k h_4^2 - \frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 + \rho Q_4 U_4 - \frac{1}{2} \rho g b_k h_5^2 - \rho Q_5 U_5 - F_{hek} &= 0 \\ F_{hek} &= -\frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 \end{aligned} \quad (B.33)$$

De totale langskracht wordt vervolgens berekend door kracht op de boeg (B.28) en de kracht op het hek (B.33) bij elkaar op te tellen. Het effect van de straalwerking wordt hier weggelaten, omdat voor de stroming in een kanaal geen sprake is van een geconcentreerde vulstraal:

$$F = \frac{1}{2} \rho g (h_2 - h_3 + d_s)^2 b_s - \frac{1}{2} \rho g d_s^2 b_s \quad (B.34)$$

Invullen van (B.32) levert na vereenvoudiging:

$$F_b(t) = \frac{-d_s b_s S_1(t) \cos(\alpha)}{h_k b_k - d_s b_s} + \rho b_s d_s Q(t)^2 \frac{(l_k - x_b)^2}{l_k^2 [h_k b_k - d_s b_s]^2} + \frac{d_s b_s C_1 C_2 S_1(t) \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta)}{h_k b_k - d_s b_s} \quad (\text{B.35})$$

In deze formule wordt de derde term veroorzaakt door de directe straalwerking. Voor de kracht als gevolg van impulsafname hoeft deze term niet beschouwd te worden. In LOCKFILL worden de termen die door een ander hydraulisch verschijnsel worden veroorzaakt van elkaar gescheiden. De kracht op de boeg wordt gesplitst in een krachtscomponent als gevolg van impuls en een krachtscomponent als gevolg van straalwerking.

De krachtscomponent als gevolg van impuls tegen de boeg is:

$$F_{impuls_b} = \frac{-d_s b_s S_1(t) \cos(\alpha)}{h_k b_k - d_s b_s} + \rho b_s d_s Q(t)^2 \frac{(l_k - x_b)^2}{l_k^2 [h_k b_k - d_s b_s]^2} \quad (\text{B.36})$$

De krachtscomponent als gevolg van straalwerking is:

$$F_{straal} = \frac{d_s b_s C_1 C_2 S_1(t) \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta)}{h_k b_k - d_s b_s} \quad (\text{B.37})$$

In dit rapport werd de vraag gesteld of superpositie van de verschillende krachtscomponenten is toegestaan. Uit vergelijkingen B.35-B.37 volgt dat dit voor de krachtscomponent als gevolg van de impuls tegen de boeg en de krachtscomponent als gevolg van straalwerking is toegestaan. Er geldt namelijk:

$$F_b = F_{impuls_b} + F_{straal} \quad (\text{B.38})$$

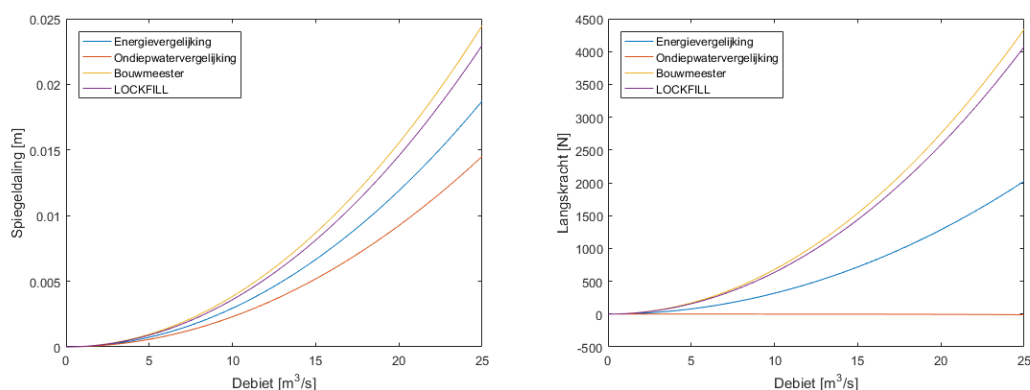
B.7. Evaluatie

In deze bijlage is de langskracht op een schip in een prismatisch kanaal geanalyseerd. Dit is de eerste stap in de opbouw van een alternatieve schematisatie om de langskracht te berekenen.

Bij de boeg van het schip wordt impuls overgedragen tussen de stroming en het schip. Dit zorgt voor een langskracht op het schip. In deze bijlage zijn verschillende methoden voor het berekenen van de impulsafname bij de boeg getoond. De verschillende methoden die in deze paragraaf worden beoordeeld zijn:

- Energievergelijking
- Ondiepwatervergelijking
- Bouwmeester
- LOCKFILL

Met de verschillende methoden is de spiegeldaling langs het schip en de kracht op de boeg berekend. Voor de afmetingen van het kanaal en van het schip zijn de gegevens van de referentiesluis gebruikt. In Matlab is de spiegeldaling en de langskracht volgens de verschillende methoden uitgezet tegen het debiet, zie Figuur B.10.



Figuur B.10: Spiegeldaling en langskracht verschillende methoden.

Wat meteen opvalt is dat de spiegeldaling en de langskracht volgens de verschillende methoden zo veel verschillen, aangezien hetzelfde verschijnsel op verschillende manieren wordt geanalyseerd. In werkelijkheid is er maar één spiegeldaling langs het schip en werkt er maar één langskracht op het schip. Bij de verschillende methoden worden andere aannames gedaan om de werkelijkheid te modelleren, maar dat verklaart niet waarom het verschil zo groot is.

De berekende waarden volgens de methode van LOCKFILL en de methode van Bouwmeester liggen dicht bij elkaar. Dit is te verklaren door het feit dat de vergelijkingen van LOCKFILL en van Bouwmeester veel overeenkomsten vertonen. Het verschil is afkomstig van de opstuwing voor de boeg die wel in de vergelijkingen van Bouwmeester is opgenomen, maar niet in de vergelijkingen van LOCKFILL.

De grootte van de opstuwing voor de boeg is afhankelijk van de vorm van de boeg. Voor conventionele binnenvaartschepen is een waarde van $\gamma = 0.9$ een goede waarde (in de Figuur). Als de

opstuwing voor de boeg door Bouwmeester wordt verwaarloosd ($\gamma = 0$) worden met de methode van Bouwmeester en de methode van LOCKFILL identieke waarden verkregen.

Er is ook gekeken naar de berekening op basis van de wet van Bernoulli. Het grote verschil met de methode van Bouwmeester is merkwaardig, gezien hetzelfde fysische verschijnsel wordt geschematiseerd. Dit verschil is extra opmerkelijk omdat de methode van Schijf en de methode van Bouwmeester zulke goede resultaten behaalden, zie Figuur B.8. De methode van Schijf is ook op de wet van behoud van energie gebaseerd en zou dus vergelijkbare resultaten als met de wet van Bernoulli moeten geven.

Mogelijk is er ergens in de berekening een incorrecte aanname gedaan of is er iets over het hoofd gezien. Binnen de tijdslimiet die gesteld is voor het Bachelor Eindwerk zie ik geen mogelijkheid dit verder te onderzoeken.

Er is nog een andere reden waardoor de energievergelijking geen goede methode is om de langskracht op een schip in een sluis kolk. Tijdens het vul- en ledigingsproces wordt het water in de kolk versneld. Hierbij worden translatiegolven opgewekt. De watermassa in de kolk is aanzienlijk en er is sprake van een snel golfverschijnsel. Om het vul- en ledigingsproces te beschrijven in een model moet traagheid worden meegenomen. Naar mijn mening is het niet mogelijk om traagheid met behulp van de wet van behoud van energie te beschrijven, dus is de methode op basis van de energiebalans ontoereikend.

De laatste methode die in deze bijlage is beschouwd is een rekenmethode op basis van de ondiepwatervergelijkingen. De ondiepwatervergelijkingen zijn niet geldig voor de stroming rond de boeg van een schip. Voor de afleiding van de ondiepwatervergelijkingen is de aanname gedaan dat de stroomlijnen recht zijn en er dus hydrostatische druk kan worden aangenomen. Bij de stroming rond de boeg is dat niet het geval. Dit verklaart echter niet het verschil met de methode van Bouwmeester. De methode van Bouwmeester gaat ook uit van hydrostatische druk tegen de boeg van het schip en doet dus ook deze aanname.

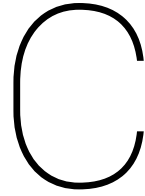
De langskracht op de boeg is volgens deze methode altijd nul. Hier zit de tekortkoming van de ondiepwatervergelijkingen. De ondiepwatervergelijkingen zijn niet afgeleid om de stroming rond objecten in de stroming door te rekenen. De enige externe kracht die in de vergelijkingen is opgenomen is de wrijvingskracht. Andere krachten als de kracht tegen de boeg van het schip zijn niet in de vergelijkingen opgenomen. In het rekenvoorbeeld heeft het verhang van de stroming evenwicht gemaakt met het verschil in doorvoering van impuls. De kracht op de boeg is dan altijd gelijk aan nul.

Ik heb geëxperimenteerd om deze kracht in de ondiepwatervergelijkingen onder te brengen, door een extra kracht in de vergelijkingen te introduceren op dezelfde manier als wrijving is geïntroduceerd:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial s} + g \frac{\partial h}{\partial s} + c_f \frac{|U| U}{R} = \frac{F}{\rho A_c \Delta s} \quad (\text{B.39})$$

Helaas is het niet gelukt om met deze aanpassing goede resultaten te behalen.

In deze methode zijn meerdere rekenmethoden behandeld om de kracht op de boeg van een schip te bepalen. Er is gekozen verder te rekenen met Bouwmeester, omdat met deze methode de beste resultaten zijn behaald.



Langskracht schip in stroming met wrijving

Dit is de tweede bijlage uit een reeks van drie bijlagen waarin de methode voor het berekenen van de langskracht op een schip in een sluiskolk wordt beschreven. In deze bijlage wordt wrijving geïntroduceerd in het model uit Bijlage B. Voor een goede continuïteit wordt aangeraden om eerst Bijlage B te lezen. Voor lezers die specifiek geïnteresseerd zijn in de manier waarop wrijving in het model gebracht wordt, kunnen dat hier vinden.

In deze bijlage wordt een berekenmethode gegeven voor het bepalen van de longitudinale kracht op een schip in een prismatisch kanaal. Het schip wordt door middel van trossen in horizontale zin vastgehouden. Het schip vormt hierbij een obstructie in de stroming. De stroming ondervindt wrijving langs de kolkwand en kolkbodem en het schip. De stroming wordt gelijkmatig verdeeld over de doorsnede van het kanaal verondersteld. Dit is de tweede stap in de opbouw van een alternatieve schematisatie om de langskracht te berekenen.

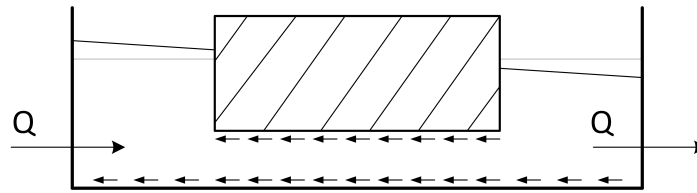
Tot nu toe werd de langskracht op een schip in een prismatisch kanaal geanalyseerd. Hier wordt wrijving aan de schematisatie toegevoegd. Wrijving langs de wand van het kanaal en langs de scheepshuid veroorzaakt een verhang van het waterniveau. Daarnaast zorgt de wrijving met de scheepshuid voor een directe langskracht op het schip. Naar beide effecten wordt gekeken.

Allereerst wordt gekeken hoe wrijving in het model gebracht kan worden. Vervolgens wordt gekeken hoe de wrijvingscoëfficiënten bepaald worden en hoe wrijving in LOCKFILL geïmplementeerd is. Als laatste wordt de methode vergeleken met de schematisatie in LOCKFILL.

C.1. Stroombeeld

Figuur C.1 demonstreert het effect van wrijving op de stroming rond een schip. Het water stroomt met een debiet Q en het schip ligt gemeerd. Het stroombeeld kan globaal als volgt worden beschreven:

In het kanaal stroomt het water met een debiet Q . Het snelheidsprofiel is gelijkmatig verdeeld over de natte doorsnede. Wrijving met de bodem zorgt voor een verhang van de waterspiegel.



Figuur C.1: Wrijving op het schip en op de kolkwanden zorgen voor een verhang van de waterlijn

Bij de boeg van het schip wordt de stroom versneld, dit heeft een spiegeldaling langs het schip tot gevolg. De stroming wordt over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is.

De hogere stroomsnelheden langs de romp zorgen voor een groter wrijvingsverhang: $F_{wrijving} \sim U^2$. Langs de romp van het schip ondervindt de stroming daarnaast ook nog wrijving van de scheepshuid. De scheepshuid is gladder dan de wanden en bodem van de kolk waardoor het grootste deel van de wrijving door bodemwrijving wordt veroorzaakt.

Bij het hek van het schip vindt een abrupte verandering van het stromingsprofiel plaats. De stroom zal hier loslaten en er ontstaat een zogenaamde dekneer. Het verhang herstelt zich weer naar de situatie voor het schip.

C.2. Uitgangspunten

Voor de berekeningen worden de volgende aannames gedaan en uitgangspunten gebruikt:

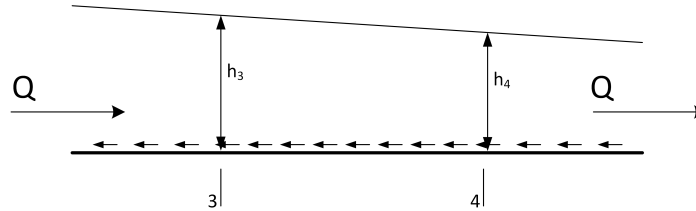
- Het debiet is constant in de tijd. Er worden geen translatiegolven opgewekt
- Het debiet is constant in langsrichting. Er wordt gekeken naar de stroming in een oneindig lang kanaal. In het kanaal is sprake van *stationaire stroming*
- Er is geen straalwerking. Het snelheidsprofiel is gelijkmatig verdeeld over het natte profiel
- Er is wrijving op het schip en op de kolkwanden en -bodem
- Bij de boeg van het schip wordt de stroming over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is
- Beweging van het schip is in horizontale richting verhinderd
- De druk tegen het hek van het schip is hydrostatisch

C.3. Berekening

Voor de implementatie van wrijving in het model wordt eerst gekeken naar de situatie zonder schip. De vergelijkingen worden dan veel simpeler. Vervolgens wordt in paragraaf C.3.2 de situatie met schip beschouwd.

C.3.1. Situatie zonder schip

De situatie zonder schip wordt eerst onderzocht. In de situatie zonder schip is er wrijving met de sluiswand en sluisbodem. De waterlijn krijgt hierdoor een verhang, zoals te zien in Figuur C.2.



Figuur C.2: Stroombeeld wrijving in een kanaal zonder schip

De berekening is gebaseerd op de impulsbalans. Hieronder is de impulsbalans opgesteld voor het balansgebied tussen raai 3 en raai 4:

$$F_{stat_3} - F_{stat_4} + F_{hyd_3} - F_{hyd_4} - F_{bw} = 0 \quad (C.1)$$

Hierin is:

$$F_{stat_3} = \frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k$$

$$F_{stat_4} = \frac{1}{2} \rho g h_4^2 b_k$$

$$F_{hyd_3} = \rho \frac{Q_3^2}{b_k h_3}$$

$$F_{hyd_4} = \rho \frac{Q_4^2}{b_k h_4}$$

Hierin is F_{bw} is de wrijvingskracht op de kolkbodem en -wanden. De wrijvingskracht is een functie van de schuifspanning (τ), de perimeter (p) en de lengte van het balansgebied (l). Indien de stroming stationair is, is de wrijvingskracht als volgt gedefinieerd:

$$F_{bw} = \tau p l \quad (C.2)$$

Hierin is:

$$\tau = \rho g R i$$

De dichtheid van het water is gegeven door ρ en de valversnelling door g . R is de hydraulische straal. De hydraulische straal is gedefinieerd als het oppervlakte gedeeld door de perimeter. i is het wrijvingsverhang gegeven door:

$$i = \frac{U^2}{C^2 R} \quad (C.3)$$

C is de coëfficiënt van Chézy. In paragraaf C.4 wordt verklaard hoe deze coëfficiënt wordt vastgesteld. De bodemschuifspanning wordt daarmee:

$$\tau = \rho g \frac{U^2}{C^2} \quad (C.4)$$

Bij het vul- en ledigingsproces in een schutsluis is geen sprake van stationaire stroming. De stroomsnelheid is niet constant in langsrichting, dus ook de bodemschuifspanning gaat in langsrichting variëren. De aanpak volgens vergelijking (C.2) voor het bepalen van de wrijvingskracht is dan niet meer geldig. De wrijvingskracht moet op elk punt afzonderlijk worden beschouwd:

$$F_{bw} = \int_0^l \tau p dx = \rho g \int_0^l \frac{U^2}{C^2} p dx \quad (C.5)$$

Invullen van de wrijvingskracht in (C.1) geeft:

$$\frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g h_4^2 b_k + \frac{Q_3^2}{b_k h_3} - \frac{Q_4^2}{b_k h_4} - \rho g \int_0^l \frac{U^2}{C^2} p dx = 0 \quad (C.6)$$

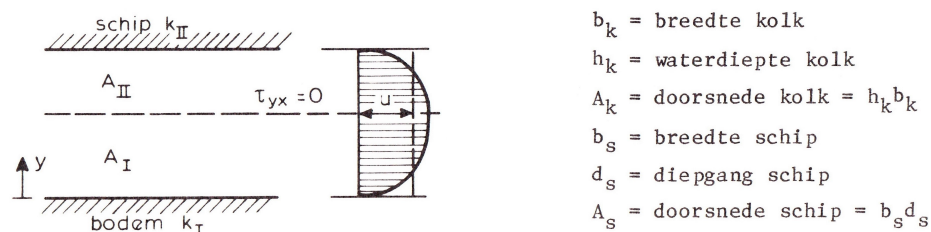
Hieruit kan het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ worden opgelost.

C.3.2. Situatie met schip

In de situatie met schip is er zowel wrijving met de scheepshuid als met de sluiswand/bodem. Net als in de situatie zonder schip ontstaat er een verhang. Het verhang veroorzaakt een langskracht op het schip. Daarnaast werkt er een directe wrijvingskracht op het schip. Dit veroorzaakt ook een langskracht.

Voor het bepalen van de langskracht op het schip als gevolg van wrijving wordt gekeken naar het gebied tussen raai 3 en raai 4. Dit is het gebied langs de romp van het schip.

Het schip en de betonnen kolkbak hebben een verschillende ruwheid. De stalen scheepshuid is veel gladder dan de betonnen kolkbak. Vanzelfsprekend is het effect van de wrijving op de scheepshuid veel kleiner dan het effect van de wrijving op de bodem en wanden van de sluis. De ruwheid van een materiaal wordt beschreven door de Nikuradse-ruwheid. Voor de ruwheid van de bodem en het schip zijn dat respectievelijk k_I en k_{II} . De Nikuradse-ruwheid voor verschillende materialen kan in ontwerptabellen worden opgezocht.



Figuur C.3: Wrijving langs de romp [8]

In Figuur C.3 is te zien dat de stroomsnelheden dicht bij het schip en de bodem afnemen als gevolg van door wrijving opgewekte schuifspanningen. Het natte profiel wordt in twee delen gedeeld door een vlak waarin de schuifspanning nul is. In het snelheidsprofiel is te zien dat de stroomsnelheid daar maximaal is. De twee delen, oppervlak A_I en oppervlak A_{II} , hebben verschillende wrijvingscoëfficiënten, respectievelijk C_I en C_{II} .

Voor de stroming langs het schip kan een nieuwe impulsvergelijking worden opgesteld. De wrijvingskracht op het schip F_{sw} moet nu ook worden meegenomen. De wrijvingskrachten worden op dezelfde manier als in vergelijking (C.5) bepaald. Op het schip werkt een kracht als gevolg van het verhang:

$$\frac{1}{2}\rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g h_4^2 b_k + \frac{Q_3^2}{b_k h_3} - \frac{Q_4^2}{b_k h_4} - F_{verhang} - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (C.7)$$

Hierin is:

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s l_s \frac{h_3 - h_4}{l_s}$$

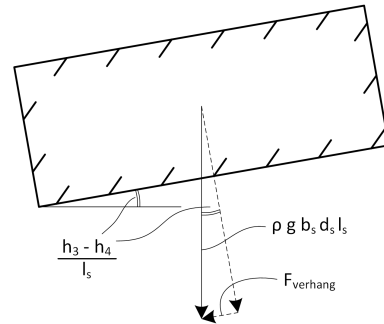
$$F_{bw} = \rho g \int_0^{l_s} \frac{U^2}{C_I^2} p_I dx$$

$$F_{sw} = \rho g \int_0^{l_s} \frac{U^2}{C_{II}^2} p_{II} dx$$

In Figuur C.4 staat uitgelegd hoe de verhangkracht tot stand komt. De coëfficiënten C_I en C_{II} worden in paragraaf C.4 bepaald. Daar staat ook uitgelegd hoe de perimeters p_I en p_{II} worden berekend. Als deze waarden bekend zijn kan met behulp van (C.7) het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ worden bepaald. De kracht die als gevolg van wrijving op het schip werkt is te berekenen met:

$$F_{wrijving} = F_{verhang} + F_{sw} \quad (C.8)$$

Figuur C.4: Het verhang zorgt er voor dat het schip gaat stampen. Er ontstaat dan een analogie met een massa op een helling. Op de massa werkt een voorwaartse kracht. Deze 'verhangkracht' is te berekenen door de hoek te vervullen met de neerwaartse kracht.



C.4. Bepalen wrijvingscoëfficiënt

De wrijvingscoëfficiënten worden bepaald gebruikmakend van de wet van Chézy. De hier beschreven methode wordt ook gebruikt in het rekenprogramma LOCKFILL. De wet van Chézy geeft het verband tussen de stroomsnelheid en het drukverhang. Aangezien er sprake is van een (oneindig lang) open kanaal is het drukverhang gelijk aan het verhang van het waterniveau. Bij het vul- en ledigingssysteem van een schutsluizen gaan ook impulseffecten een rol spelen. Het waterverhang is dan niet meer gelijk aan het wrijvingsverhang. De formule luidt:

$$U = C \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (C.9)$$

Hierin is:

U de gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

C de coëfficiënt van Chézy [$m^{1/2}/s$]

R de hydraulische straal [m]

i het verhang $[-]$

De coëfficiënt van Chézy is als volgt gedefinieerd:

$$C = 18 \log \left(\frac{12R}{k} \right) \quad (C.10)$$

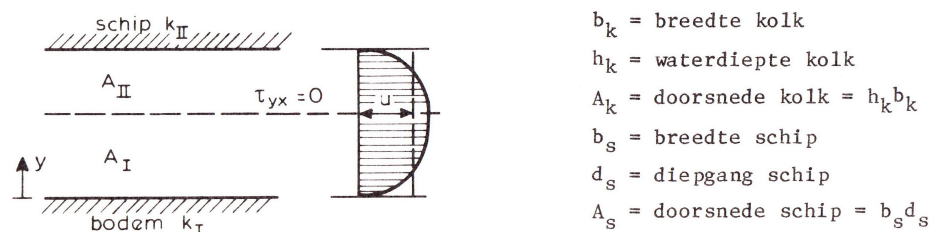
Hierin is:

k de Nikuradse-ruwheid

De ruwheid wordt gegeven door de Nikuradse-ruwheid k . De waarde kan worden vastgesteld met behulp van ontwerptabellen die met metingen zijn opgesteld.

In de situatie zonder schip kan de wet van Chézy zonder problemen worden gebruikt om het weerstandsverhang in langsrichting van de kolk te bepalen. In de situatie met schip wordt het ingewikkelder, omdat de Nikuradse-ruwheid van de kolkbodem en -wanden niet gelijk is aan de Nikuradse ruwheid van de scheepshuid.

We kijken nogmaals naar Figuur C.5. Volgens referentie [8] treedt het volgende snelheidsprofiel op in het natte profiel tussen de kolkwand/bodem en het schip:



Figuur C.5: Snelheidsprofiel ter plaatse van het schip [8]

De stroomsnelheid neemt af bij de wanden als gevolg van schuifspanningen die optreden door wrijving. Het snelheidsprofiel kent een maximale waarde. In dit vlak treden geen schuifspanningen op en deelt het natte profiel in twee delen: oppervlakte A_I en oppervlakte A_{II} . Er wordt aangenomen dat de gemiddelde snelheid en het drukverhang in beide delen gelijk zijn:

$$U_I = U_{II} = U \quad \text{en} \quad i_I = i_{II} = i$$

De gemiddelde snelheid en het drukverhang zijn voor beide delen gelijk; de wet van Chézy (C.9) voor beide gedeelten kan dan worden gelijkgesteld:

$$U^2 = C_I^2 R_I i = C_{II}^2 R_{II} i \quad (\text{C.11})$$

Hierin is:

C_I coëfficiënt van gedeelte I (zie vergelijking (C.10))

C_{II} coëfficiënt van gedeelte II (zie vergelijking (C.10))

R_I hydraulische straal gedeelte I

R_{II} hydraulische straal gedeelte II

De hydraulische straal voor gedeelte I is gegeven door:

$$p_I = b_k + 2 \cdot h_3$$

$$R_I = \frac{A_I}{p_I} = \frac{A_I}{b_k + 2 \cdot h_3} \quad (\text{C.12})$$

De hydraulische straal voor gedeelte II is gegeven door:

$$p_{II} = b_s + 2 \cdot d_s$$

$$R_{II} = \frac{A_{II}}{p_{II}} = \frac{A_{II}}{b_s + 2 \cdot d_s} \quad (\text{C.13})$$

Het totale natte oppervlakte is als volgt gedefinieerd:

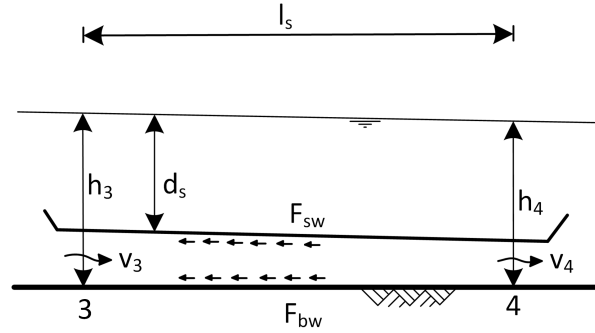
$$A_{tot} = A_I + A_{II} = h_3 b_k - d_s b_s \quad (\text{C.14})$$

Substitutie in (C.11) geeft waarden voor A_I en A_{II} . Invullen in (C.10) geeft C_I en C_{II} . In (C.12) en (C.13) staat de berekening van de perimeters p_I en p_{II} voor de twee delen.

C.5. Implementatie LOCKFILL

LOCKFILL implementeert wrijving in de schematisatie zoals beschreven staat in referentie [8]. In deze paragraaf wordt de rekenmethode uit de referentie gereproduceerd.

Om de langskracht op het schip als gevolg van wrijving te bepalen wordt gekeken naar de stroming tussen raai 3 en raai 4, zie Figuur C.6.



Figuur C.6: Uitgangspunten impulsvergelijking [8]

Impulsvergelijking tussen 3 en 4 van volume water:

$$F_{stat_3} - F_{stat_4} + F_{dyn_3} - F_{dyn_4} - F_{verhang} - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (C.15)$$

Hierin is:

$$F_{stat_3} = \frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g d_s^2 b_s$$

$$F_{stat_4} = \frac{1}{2} \rho g h_4^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g d_s^2 b_s$$

$$F_{dyn_3} = \rho Q_3 U_3$$

$$F_{dyn_4} = \rho Q_4 U_4$$

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s l_s \frac{h_3 - h_4}{l_s}$$

LOCKFILL gaat hier uit van een integrale berekening van de langskracht op de romp, waarin ook het effect van het plaatsafhankelijk debiet wordt meegenomen. Dit hydraulische verschijnsel wordt in Bijlage D besproken. In deze bijlage wordt alleen nog besproken hoe de wrijvingskrachten F_{bw} en F_{sw} worden bepaald.

In de tijd dat LOCKFILL werd ontwikkeld waren de mogelijkheden tot numeriek rekenen zeer beperkt. In LOCKFILL is daarom voor een analytische oplossing gekozen voor het berekenen van de wrijvingskrachten. De rechtstreekse kracht die uitgeoefend wordt op de bodem/wand wordt beschreven door de schuifspanning vermenigvuldigd met het natte oppervlak:

$$F_{bw} = \tau p_l l_s = \rho g \frac{U^2}{C_I^2} p_l l_s \quad (C.16)$$

De rechtstreekse kracht die uitgeoefend wordt op het schip wordt op vergelijkbare wijze bepaald:

$$F_{sw} = \tau p_{II} l_s = \rho g \frac{U^2}{C_{II}^2} p_{II} l_s \quad (C.17)$$

Voor de stroomsnelheid wordt de gemiddelde stroomsnelheid tussen raai 3 en raai 4 genomen. Hoewel de wrijvingskracht hiermee onderschat wordt, is dit wel een goede benadering van de totale wrijvingskracht op het schip. Als het debiet in langsrichting lineair afneemt, geldt:

$$Q_3 = Q_v \frac{l_k - x_b}{l_k} \quad \text{en} \quad Q_4 = Q_v \frac{l_k - x_b - l_s}{l_k}$$

De gemiddelde stroomsnelheid is dan:

$$U_{gem_{3-4}}^2 = \frac{Q_v \cdot |Q_v|}{[h_k * b_k - d_s b_s]^2} \left(\frac{2l_k - 2x_b - l_s}{2l_k} \right)^2 \quad (C.18)$$

Bij de boeg van het schip is nog geen ontwikkeld snelheidsprofiel aanwezig. Daardoor werkt bij de boeg nog niet de volledige schuifspanning. De wrijvingskracht moet daarom verminderd worden met een coëfficiënt C_3 . Volgens de literatuur is 0.9 een goede inschatting voor deze coëfficiënt. Dit geeft met (C.16) en (C.17):

$$F_{bw} = C_3 \rho g \frac{U^2}{C_I^2} l_s \quad (C.19)$$

$$F_{sw} = C_3 \rho g \frac{U^2}{C_{II}^2} l_s \quad (C.20)$$

C.6. Evaluatie

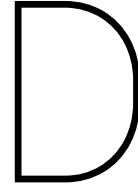
In deze bijlage is de langskracht op een schip in een prismatisch kanaal geanalyseerd. Dit is de tweede stap in de opbouw van een alternatieve schematisatie om de langskracht te berekenen.

Langs de romp van het schip werkt een wrijvingskracht op de stroming. Ook langs de bodem en wanden van de sluiskolk ondervindt de stroming wrijving. In deze bijlage zijn twee methoden getoond om de langskracht op het schip en op de bodem van de kolk te berekenen. Beide methoden maken gebruik van de wet van Chézy voor het bepalen van de wrijvingskracht.

De ontwikkelde methode maakt gebruik van de wet van Chézy om de wrijvingskracht te berekenen. Bij het vul- en ledigingssysteem is het debiet niet constant in langsrichting. Hierdoor krijgt de schuifspanning een variabel karakter. De ontwikkelde methode integreert de schuifspanning daarom over de lengte van het schip.

LOCKFILL gebruikt een andere aanpak. Om complex rekenwerk te voorkomen gebruikt LOCKFILL de analytische benadering waarin de gemiddelde stroomsnelheid wordt gebruikt. Deze methode is minder nauwkeurig, maar is desondanks een goede benadering van de langskracht.

LOCKFILL gebruikt een integrale methode om de langskracht als gevolg van wrijving en van het plaatsafhankelijk debiet te berekenen. De methode van LOCKFILL wordt in Bijlage D uitgebreidt, waarna de methoden in Bijlage D met elkaar worden vergeleken.



Langskracht schip in sluiskolk

Dit is de derde bijlage uit een reeks van drie bijlagen waarin de methode voor het berekenen van de langskracht op een schip in een sluiskolk wordt beschreven. In deze bijlage wordt impulsafname geïntroduceerd in het model uit Bijlage C. Voor een goede continuïteit wordt aangeraden om eerst Bijlage C te lezen. Voor lezers die specifiek geïnteresseerd zijn in de manier waarop impulsafname in het model gebracht wordt, kunnen dat hier vinden.

In deze bijlage wordt een berekenmethode gegeven voor het bepalen van de longitudinale kracht op een schip in een sluiskolk. Het schip wordt door middel van trossen in horizontale zin vastgehouden. Het schip vormt hierbij een obstructie in de stroming. De stroming ondervindt wrijving langs de kolkwand en kolkbodem en het schip. De stroming wordt gelijkmatig verdeeld over de doorsnede van het kanaal verondersteld. Tijdens het vul- en ledigingsproces neemt het debiet van de stroming in langsrichting af, doordat een steeds kleiner deel van de kolk gevuld hoeft te worden. Dit is de derde stap in de opbouw van een alternatieve schematisatie om de langskracht te berekenen.

Tot nu toe werd de langskracht op een schip in een prismatisch kanaal geanalyseerd. Hier wordt de deur van het benedenhoofd gesloten. Er is nu geen sprake meer van *stationaire stroming*. Impulsafname in langsrichting veroorzaakt een verhang van het waterniveau. Dit verhang zorgt voor een langskracht op het schip.// Allereerst wordt gekeken hoe de impulsafname in het model gebracht kan worden. Vervolgens wordt gekeken hoe de impulsafname in LOCKFILL geïmplementeerd is. Als laatste wordt de methode vergeleken met de schematisatie in LOCKFILL.

D.1. Stroombeeld

Het stroombeeld in de kolk kan globaal als volgt worden beschreven:

Het vuldebiet Q_v komt de kolk binnen door het hoofd met de nivelleeropeningen. Door een woelkelder of door breekbalken voor de nivelleeropeningen is het snelheidsprofiel gelijkmatig verdeeld over de natte doorsnede. Wrijving met de bodem zorgt voor een verhang van de waterspiegel. Daarnaast zorgt de impulsafname in langsrichting voor een verhang van de waterspiegel. Er worden geen translatiegolven opgewekt, dus het debiet neemt lineair af in langsrichting.

Bij de boeg van het schip wordt de stroom versneld, dit heeft een spiegeldaling langs het schip tot gevolg. De stroming wordt over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is.

Langs de romp ondervindt de stroming wrijving van het schip en van de kolkbodem en -wanden. Door het plaatsafhankelijk debiet neemt de impuls in langsrichting van de kolk af.

Bij het hek van het schip vindt een abrupte verandering van het stromingsprofiel plaats. De stroom zal hier loslaten en er ontstaat een zogenaamde dekneer. Het verhang herstelt zich weer naar de situatie voor het schip.

D.2. Uitgangspunten

Voor de berekeningen worden de volgende aannames gedaan en uitgangspunten gebruikt:

- Het debiet is constant in de tijd. Er worden geen translatiegolven opgewekt
- Het debiet neemt lineair af in langrichting
- Er is geen straalwerking. Het snelheidsprofiel is gelijkmatig verdeeld over de natte doorsnede
- Er is wrijving op het schip en op de kolkwanden en -bodem.
- Bij de boeg van het schip wordt de stroming over korte afstand afgebogen zodat er ter plaatse van raai 3 een gelijkmatig verdeeld snelheidsprofiel aanwezig is
- Beweging van het schip is in horizontale richting verhinderd
- De druk tegen het hek van het schip is hydrostatisch
- Het schip heeft geen invloed op de stroming vóór de boeg van het schip

D.3. Berekening

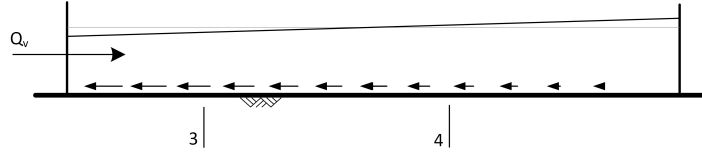
Voor de implementatie van het plaatsafhankelijk debiet in het model wordt eerst gekeken naar de situatie zonder schip. Vervolgens wordt de situatie met schip behandeld.

Allereerst wordt het debiet bekeken. Er worden geen translatiegolven opgewekt. De waterlijn stijgt dan met een constante snelheid. Daaruit volgt dat het debiet lineair afneemt in langsrichting. Het debiet door een raai op afstand x van de deur met nivelleeropeningen is gedefinieerd als:

$$Q(x) = Q_v \cdot \frac{l_k - x}{l_k} \quad (\text{D.1})$$

D.3.1. Sluiskolk zonder schip

De situatie zonder schip wordt eerst onderzocht. De impulsafname in de stromingsrichting wordt gecompenseerd door de wrijvingskracht en door een verhang van de waterhoogte. Figuur D.1 toont de sluiskolk zonder schip.



Figuur D.1: Stroombeeld impuls in een kanaal zonder schip

De berekening is gebaseerd op de impulsbalans. Hieronder is de impulsbalans opgesteld voor het balansgebied tussen raai 3 en raai 4:

$$F_{stat_3} - F_{stat_4} + F_{hyd_3} - F_{hyd_4} - F_{bw} = 0 \quad (D.2)$$

Hierin is:

$$F_{stat_3} = \frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k$$

$$F_{stat_4} = \frac{1}{2} \rho g h_4^2 b_k$$

$$F_{hyd_3} = \rho \frac{Q_3^2}{b_k h_3}$$

$$F_{hyd_4} = \rho \frac{Q_4^2}{b_k h_4}$$

De wrijvingskracht F_{bw} is gedefinieerd in Bijlage C. Het debiet neemt af in langsrichting. Voor het debiet door raai 3 en raai 4 geldt:

$$Q_3 = Q_v \frac{l_k - x_b}{l_k} \quad (D.3)$$

$$Q_4 = Q_v \frac{l_k - x_b - l_s}{l_k} \quad (D.4)$$

Invullen van de debieten en de wrijvingskracht in (D.2) geeft:

$$\frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g h_4^2 b_k + \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b}{l_k}\right)^2}{b_k h_3} - \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b - l_s}{l_k}\right)^2}{b_k h_4} - \rho g \int_{x_b}^{x_b + l_s} \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x}{l_k}\right)^2}{C^2 \cdot [h_3 b_k]} p dx = 0 \quad (D.5)$$

Hieruit kan het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ worden opgelost.

D.3.2. Sluiskolk met schip

In de situatie met schip verandert er weinig aan de schematisatie. Net als in de situatie zonder schip ontstaat er een verhang. Het verhang veroorzaakt een langskracht op het schip.

Voor het bepalen van de langskracht op het schip als gevolg van wrijving wordt gekeken naar het gebied tussen raai 3 en raai 4. Dit is het gebied langs de romp van het schip. Voor dit balansgebied wordt dezelfde impulsbalans opgesteld als in Bijlage C. Hierin worden (D.3) en (D.4) ingevuld:

$$\frac{1}{2}\rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g h_4^2 b_k + \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b}{l_k}\right)^2}{b_k h_3} - \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b - l_k}{l_k}\right)^2}{b_k h_4} - F_{verhang} - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (D.6)$$

Hierin is:

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s l_s \frac{h_3 - h_4}{l_s}$$

$$F_{bw} = \rho g \int_{x_b}^{x_b + l_s} \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x}{l_k}\right)^2}{C_I^2 \cdot [h_3 b_k]} p_I dx$$

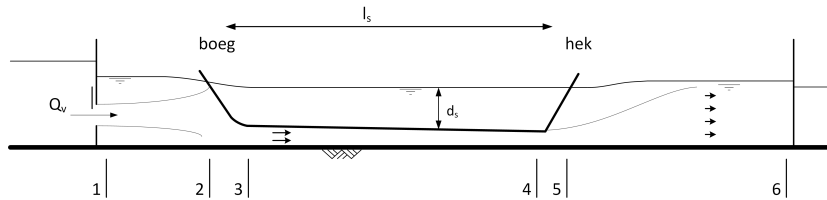
$$F_{sw} = \rho g \int_{x_b}^{x_b + l_s} \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x}{l_k}\right)^2}{C_{II}^2 \cdot [h_3 b_k]} p_{II} dx$$

Hieruit kan het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ worden bepaald. De kracht op de romp als gevolg van wrijving en het plaatsafhankelijk debiet is te berekenen met de volgende formule:

$$F_{romp} = F_{verhang} + F_{sw} \quad (D.7)$$

D.4. Samenvatting ontwikkelde methode

In dit rapport is een alternatieve schematisatie ontwikkeld om de langskracht op een schip in een sluiskolk te berekenen tijdens het vul- en ledigingsproces. In verband met de beschikbare tijd voor dit onderzoek zijn alleen de krachtscomponenten als gevolg van impulsafname en wrijving in de alternatieve schematisatie opgenomen. De schematisatie maakt gebruik van een integraal stroombeeld om de langskracht te berekenen.



Figuur D.2: Overzicht stroming bij het vullen van de sluiskolk

Figuur D.2 geeft een overzicht van de stroming en de gebruikte nummering van de raaien. Als gevolg van het vullen neemt het debiet in de langsrichting van de sluiskolk af:

$$Q(x) = Q_v \cdot \frac{l_k - x}{l_k} \quad (D.8)$$

Om de langskracht op een schip te bepalen is gekeken naar de situatie bij de boeg, langs de romp en bij het hek van het schip. Deze situaties worden hier nog eens kort herhaald.

Situatie bij de boeg:

De boeg van het schip vormt een blokkade in de stroming. De stroming wordt afgebogen en stroomt weg onder en langs het schip. Bij de boeg van het schip ontstaat daardoor een waterstandsverschil. De kracht op de boeg is bepaald middels de methode van Bouwmeester. De kracht op de boeg is gegeven door:

$$F_{boeg} = \frac{1}{2} \rho g b_s (h_2 - h_3 + d_s)^2 \quad (D.9)$$

De impulsbalans tussen raai 2 en raai 3 geeft de volgende vergelijking:

$$\frac{1}{2} \rho g b_k h_2^2 - \frac{1}{2} \rho g b_k h_3^2 + \frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 - F_{boeg} + \rho Q_2 U_2 - \rho Q_3 U_3 = 0 \quad (D.10)$$

Invullen van de kracht op de boeg en het debiet levert:

$$\frac{1}{2} \rho g b_k h_2^2 - \frac{1}{2} \rho g b_k h_3^2 + \frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 - F_{boeg} + \rho \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b}{l_k} \right)^2}{h_2 b_k} - \rho \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b}{l_k} \right)^2}{h_3 b_k - d_s b_s} = 0 \quad (D.11)$$

Hieruit kan het waterstandsverschil $h_2 - h_3$ worden bepaald. Invullen in vergelijking (D.9) geeft de kracht op de boeg.

Situatie langs de romp:

Het plaatsafhankelijk debiet en de wrijving van het systeem zorgen voor een verhang van de waterhoogte. Dit veroorzaakt een kracht op het schip. Daarnaast werkt er een directe wrijvingskracht op het schip. Tussen raai 3 en raai 4 geeft dat de volgende impulsvergelijking:

$$\frac{1}{2}\rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g h_4^2 b_k + \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b}{l_k}\right)^2}{b_k h_3} - \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x_b - l_k}{l_k}\right)^2}{b_k h_4} - F_{verhang} - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (D.12)$$

Hierin is:

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s l_s \frac{h_3 - h_4}{l_s}$$

$$F_{bw} = \rho g \int_{x_b}^{x_b + l_s} \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x}{l_k}\right)^2}{C_I^2 \cdot [h_3 b_k]} p_I dx$$

$$F_{sw} = \rho g \int_{x_b}^{x_b + l_s} \frac{Q_v^2 \cdot \left(\frac{l_k - x}{l_k}\right)^2}{C_{II}^2 \cdot [h_3 b_k]} p_{II} dx$$

De kracht op de romp is gegeven door:

$$F_{romp} = F_{verhang} + F_{sw} \quad (D.13)$$

Uit (D.12) kan het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ worden bepaald. Invullen hiervan in (D.13) levert de kracht op de romp.

Situatie achter het hek:

Bij het hek van het schip zal de stroming de heklijn niet kunnen volgen en zal deze loslaten. Hier zal een neer ontstaan, waarin het water sterk wervelend rondgaand beweegt. De bewegingen in de neer zijn relatief langzaam waardoor de waterdruk in de neer als hydrostatisch kan worden aangenomen. Hieruit volgt dat de kracht tegen het hek gegeven is door:

$$F_{hek} = \frac{1}{2} \rho g b_s d_s^2 \quad (D.14)$$

Totaalkracht op het schip:

De totaalcracht op het schip wordt gevonden door de kracht tegen de boeg, de kracht langs de romp en de kracht tegen het hek bij elkaar op te tellen:

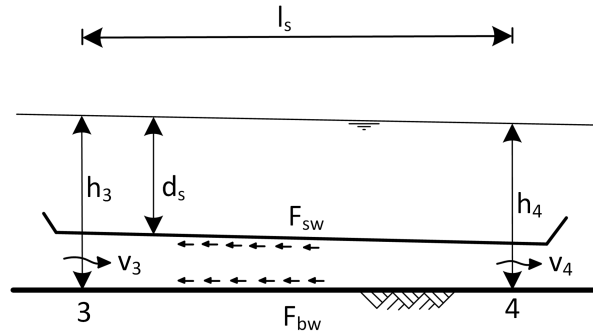
$$F = F_{boeg} + F_{romp} + F_{hek} \quad (D.15)$$

De krachtstermen van de afzonderlijke gebieden zijn onafhankelijk van elkaar en kunnen dus zonder problemen bij elkaar worden opgeteld.

D.5. Implementatie LOCKFILL

Net als voor wrijving kijkt LOCKFILL voor de impulsafname naar de impulsvergelijking tussen raai 3 en raai 4. De rekenmethode in LOCKFILL staat beschreven in referentie [8]. In deze paragraaf wordt de schematisatie uit de referentie uitgewerkt.

Om de langskracht op het schip als gevolg van impuls te bepalen wordt gekeken naar de stroming tussen raai 3 en raai 4, zie Figuur D.3.



Figuur D.3: Uitgangspunten impulsvergelijking [8]

Impulsvergelijking tussen 3 en 4 van volume water:

$$F_{stat_3} - F_{stat_4} + F_{dyn_3} - F_{dyn_4} - F_{verhang} - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (D.16)$$

Hierin is:

$$F_{stat_3} = \frac{1}{2} \rho g h_3^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g d_s^2 b_s$$

$$F_{stat_4} = \frac{1}{2} \rho g h_4^2 b_k - \frac{1}{2} \rho g d_s^2 b_s$$

$$F_{dyn_3} = \rho Q_3 U_3$$

$$F_{dyn_4} = \rho Q_4 U_4$$

$$F_{verhang} = \rho g d_s b_s l_s \frac{h_3 - h_4}{l_s}$$

De impulsvergelijking wordt uitgewerkt met:

$$h_3^2 - h_4^2 \approx 2 h_3 (h_3 - h_4)$$

$$Q_3 U_3 = \frac{Q^2}{h_3 b_k - d_s b_s} \left(\frac{l_k - x_b}{l_k} \right)^2$$

$$Q_4 U_4 = \frac{Q^2}{h_4 b_k - d_s b_s} \left(\frac{l_k - x_b - l_s}{l_k} \right)^2$$

De benadering voor $h_3^2 - h_4^2$ is bedoeld om de berekening eenvoudig te houden. Zeker bij kleine verschillen tussen h_3 en h_4 is dit een zeer goede benadering.

LOCKFILL gaat daarnaast uit van een lineair afnemend debiet. De waterspiegel stijgt dan overal met dezelfde snelheid $\frac{\partial h}{\partial t} = Q_v / A$. Zolang er geen translatiegolven worden opgewekt is dit waar. Translatiegolven zorgen voor een afwijking van dit verloop.

Invullen in (D.16) geeft:

$$\rho g (h_3 b_k - d_s b_s) (h_3 - h_4) + \rho \frac{Q^2}{h_3 b_k - d_s b_s} \left(1 - \left(\frac{l_k - l_s}{l_k} \right)^2 \right) - F_{bw} - F_{sw} = 0 \quad (D.17)$$

Het waterstandsverschil kan vervolgens worden uitgedrukt in het debiet, de geometrie van de sluis en de wrijvingskrachten:

$$h_3 - h_4 = \frac{-Q_v^2}{g (h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} + \frac{F_{bw} + F_{sw}}{\rho g (h_3 b_k - d_s b_s)} \quad (D.18)$$

Het eerste deel van het waterstandsverschil is afkomstig van het plaatsafhankelijk debiet, het tweede deel van de wrijving. De kracht op de romp kan vervolgens worden gevonden door het waterstandsverschil in te vullen in

Het gevonden waterstandsverschil is dus bepaald met een integrale methode voor de krachtscomponenten impulsafname en wrijving.

Invullen in de impulsvergelijking geeft de kracht die op de romp van het schip werkt. Deze kracht is opgebouwd uit een component door het verhang (wrijving en impulsafname) en een direct wrijvingskracht:

$$\begin{aligned} F_r &= F_{romp} + F_{sw} \\ F_r &= \rho g \left[\frac{-Q^2}{g (h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} + \frac{F_{bw} + F_{sw}}{\rho g (h_3 b_k - d_s b_s)} \right] b_s d_s + F_{sw} \\ F_r &= \frac{-\rho Q^2 d_s b_s}{(h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} + F_{bw} \frac{b_s d_s}{h_3 b_k - d_s b_s} + F_{sw} \frac{h_3 b_k}{h_3 b_k - d_s b_s} \end{aligned} \quad (D.19)$$

Het eerste deel van de kracht is afkomstig van het plaatsafhankelijk debiet, de tweede en derde term zijn afkomstig van de wrijving. In LOCKFILL wordt de kracht op de romp opgedeeld in een krachtscomponent als gevolg van het afnemende debiet en een krachtscomponent als gevolg van wrijving:

$$F_r = F_{impuls_romp} + F_{wrijving} \quad (D.20)$$

$$F_{impuls_romp} = \frac{-\rho Q^2 d_s b_s}{(h_3 b_k - d_s b_s)^2} \cdot \frac{(2l_k - 2x_b - l_s) l_s}{l_k^2} \quad (D.21)$$

$$F_{wrijving} = F_{bw} \frac{b_s d_s}{h_3 b_k - d_s b_s} + F_{sw} \frac{h_3 b_k}{h_3 b_k - d_s b_s} \quad (D.22)$$

De totaalcracht is gegeven door:

$$F = F_{impuls_b} + F_{impuls_romp} + F_{hek} + F_{wrijving} \quad (D.23)$$

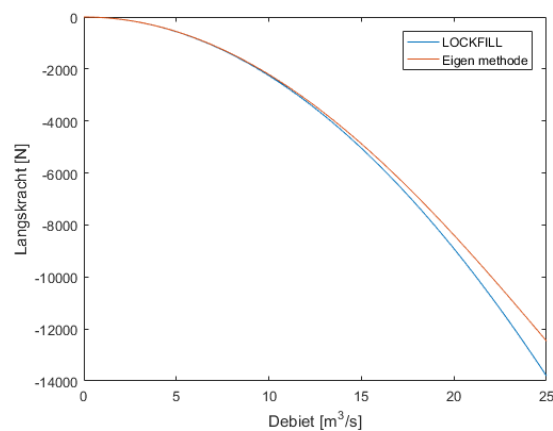
D.6. Evaluatie

In drie bijlagen is de schematisatie van LOCKFILL doorgrond. Uit de vergelijkingen van LOCKFILL blijkt dat de toegepaste superpositie voor de beschouwde krachtscomponenten geldig is. Voor het bepalen van de krachtscomponenten splitst LOCKFILL verschillende termen uit de vergelijkingen. De relatie tussen losse termen in een vergelijking is lineair, dus vind het beginsel van superpositie toepassing.

Daarnaast is een alternatieve schematisatie ontwikkeld op basis van een integraal stroombeeld. Uit de vergelijkingen blijkt dat de alternatieve schematisatie veel overeenkomsten vertoont met de schematisatie in LOCKFILL. In de alternatieve schematisatie zijn echter een aantal wijzigingen doorgevoerd:

LOCKFILL is ontwikkeld in de jaren '80. In die tijd waren computers nog niet zo krachtig. In LOCKFILL zijn daarom verschillende vereenvoudigingen en aannames toegepast om complex rekenwerk te voorkomen. Met de toegenomen mogelijkheden van numeriek rekenen is het toepassen van deze vereenvoudigingen overbodig geworden. In de alternatieve schematisatie zijn deze vereenvoudigingen dan ook niet opgenomen.

De vergelijkingen voor het berekenen van de langskracht voor de eigen methode en voor de methode van LOCKFILL zijn in Matlab gezet. Met behulp van dit script, dat te vinden is in Bijlage E, is de langskracht op het schip in de referentiesluis bij verschillende debieten bepaald. In Figuur D.4 is de langskracht volgens de twee methoden tegen het vuldebiet uitgezet.



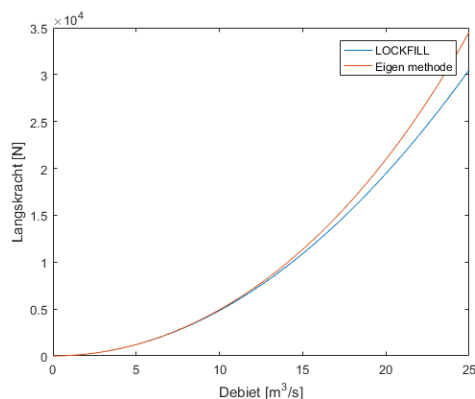
Figuur D.4: Totale langskracht op het schip als gevolg van de krachtscomponenten impulsafname en wrijving.

De ontwikkelde methode berekent een kleinere langskracht dan de methode van LOCKFILL. Dit is te verklaren door de vereenvoudigingen die LOCKFILL heeft toegepast. De simplificaties zorgen voor de verschillen in uitkomsten tussen de methode in LOCKFILL en de ontwikkelde methode. Tot een debiet van ongeveer $12 \text{ m}^3/\text{s}$ levert de methode een zeer goede benadering van de langskracht. Voor hogere debieten is de alternatieve schematisatie nauwkeuriger.

Kanttekening hierbij is dat de alternatieve schematisatie niet is gevalideerd met praktijkmetingen. Hoe deze schematisatie zich houdt in de ontwerppraktijk is dus onbekend.

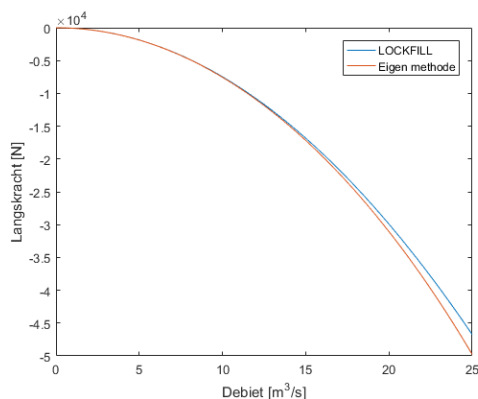
Het opsplitsen van krachten naar oorsprong van de kracht is toegestaan zoals hiervoor aange-toond. Daarom bekijk ik ook nog naar de verschillen tussen de twee methoden bij de individuele krachtscomponenten.

In Figuur D.5 is de impulsafname bij de boeg van het schip uitgezet tegen het vuldebiet. De schematisatie in LOCKFILL komt hier tot een iets kleinere kracht. De berekening van beide schematisaties is bijna identiek. Dit verschil in kracht wordt daarom waarschijnlijk veroorzaakt door de versimpeling die LOCKFILL heeft toegepast. LOCKFILL verwaarloost het verschil in waterstand vóór en achter de boeg in het kwadraat (Δh^2). De eigen methode berekent het waterstandsverschil numeriek en hoeft deze vereenvoudiging dus niet te maken. De eigen methode komt daardoor tot een iets hogere langskracht als gevolg van impulsafname bij de boeg.



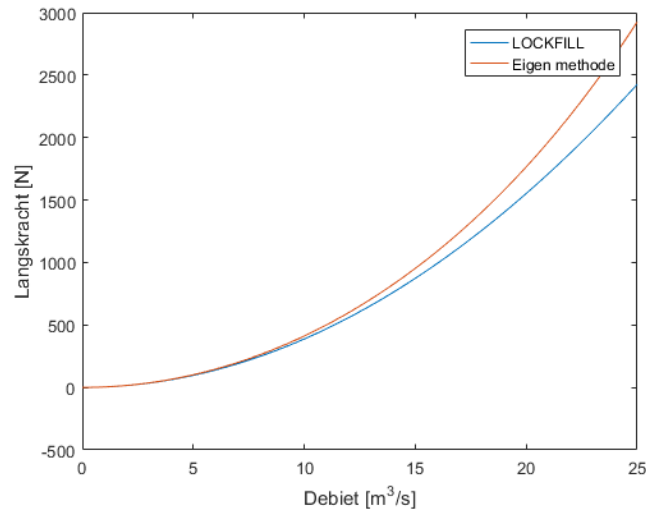
Figuur D.5: Krachtscomponent impuls tegen boeg

Bij de impulsafname langs de romp van het schip heeft LOCKFILL eenzelfde soort vereenvoudiging toegepast: $h_3^2 - h_4^2 \approx 2h_3(h_3 - h_4)$. Als het waterstandsverschil $h_3 - h_4$ groter wordt, dan wordt deze benadering minder nauwkeurig. Dit is te zien in Figuur D.6. Voor de debieten die gebruikelijk zijn voor het vullen en ledigen van een sluiskolk komen beide berekenmethodes zeer goed overeen.



Figuur D.6: Krachtscomponent impuls langs romp

De laatste component die in dit rapport beschouwd is, is de wrijvingskracht op het schip. In Figuur D.7 worden de wrijvingskrachten in LOCKFILL en in de eigen methode met elkaar vergeleken.

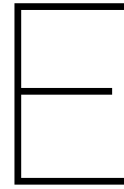


Figuur D.7: Krachtscomponent wrijving

LOCKFILL lijkt de wrijvingskracht hier te onderschatten. Dat komt omdat LOCKFILL ervoor heeft gekozen om de wrijving langs de romp te berekenen met de gemiddelde stroomsnelheid. De wrijvingskracht is echter evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheid $F_{wr} \sim U^2$.

In de eigen methode is numeriek geïntegreerd waarbij voor elke plaats de stroomsnelheid is berekend. De wrijvingskracht die op deze manier wordt berekend is groter dan wanneer met de gemiddelde stroomsnelheid wordt gerekend.

LOCKFILL past voor de wrijvingskracht nog een extra reductie toe voor het ontwikkelen van de grenslaag bij de boeg. Bij de boeg wordt de stroming afgebogen waarna de stroming niet meteen gelijkmatig verdeeld is over de doorsnede. LOCKFILL neemt dit effect mee door de wrijvingskracht te vermenigvuldigen met de coëfficiënt C_3 . Voor normale gevallen heeft deze coëfficiënt een waarde van 0.9. In de eigen methode zit deze reductiefactor niet. Om goed vergelijk van de methoden mogelijk te maken is voor C_3 een waarde van 1.0 gekozen.



Matlab code

E.1. Eigen methode

```
function [F] = integraal(Q1, x_b, l_s, l_k, b_k, b_s, d_s, h_1, k_1, k_2)
g = 9.81;
rho = 1000;
c_b = 0.85;
m_schip = l_s*b_s*d_s*c_b*rho;

%Sectie 1
A_1 = h_1*b_k;
U_1 = Q1/A_1;
R_1 = A_1/(2*h_1+b_k);
C_1 = 18*log(12*R_1/k_1);
i = U_1^2/C_1^2/R_1;

fun = @(x) rho*g*(b_k+2*h_1)*(Q1*(l_k - x)/l_k/h_1/b_k).^2/C_1^2;
F_w1 = integral(fun,0,x_b);

%Sectie 2
Q2 = Q1 * (l_k - x_b)/l_k;
syms h_2
h_2 = vpasolve(1/2*rho*g*b_k*h_1^2-1/2*rho*g*b_k*h_2^2+rho*Q1*U_1 ...
    - rho*abs(Q2)*Q2/(h_2*b_k)-F_w1==0,h_2,[3 7]);
U_2 = Q2/(b_k*h_2);

%Sectie 3
Q3 = Q2;
syms h_3;
h_3 = vpasolve(1/2*rho*g*b_k*h_2^2-1/2*rho*g*b_s*(h_2 - h_3 + d_s)^2 ...
    - 1/2*rho*g*b_k*h_3^2 + 1/2*rho*g*b_s*d_s^2 + rho*Q2*U_2 ...
    - rho*Q3^2/(h_3*b_k-d_s*b_s)==0,h_3,[4 7]);
F_boeg = 1/2*rho*g*(h_2-h_3+d_s)^2*b_s;
F_hek = -1/2*rho*g*b_s*d_s^2;
A_3 = h_3*b_k-b_s*d_s;
```

```

U_3 = Q3/A_3;

%Wrijving langs romp
syms A_I A_II;
R_I = A_I/(b_k+2*h_3);
R_II = A_II/(b_s+2*d_s);
C_I = 18*log(12*R_I/k_1);
C_II = 18*log(12*R_II/k_2);
[A_I,A_II] = vpasolve([C_I^2*R_I==C_II^2*R_II,A_I+A_II==A_3],[A_I,A_II]);
R_I = A_I/(b_k+2*h_3);
R_II = A_II/(b_s+2*d_s);
C_I = double(18*log(12*R_I/k_1));
C_II = double(18*log(12*R_II/k_2));
i = U_3^2/C_I^2/R_I;

funb = @(x) rho*g*(Q1*(l_k - x)/l_k/(double(h_3)*b_k - b_s*d_s)).^2 ...
        /C_I^2*(b_k+2*double(h_3));
F_bw = integral(funb,x_b,x_b + l_s);

funs = @(x) rho*g*(Q1*(l_k - x)/l_k/(double(h_3)*b_k - d_s*b_s)).^2 ...
        /C_II^2*(b_s+2*d_s);
F_sw = integral(funs,x_b,x_b + l_s);

%Sectie 4
Q4 = Q1 * (l_k - x_b - l_s)/l_k;
syms h_4;
assume(h_4 > 3.5);
h_4 = solve(1/2*rho*g*b_k*h_3^2-1/2*rho*g*b_k*h_4^2+rho*Q3*U_3 ...
        -rho*abs(Q4)*Q4/(h_4*b_k-b_s*d_s)-rho*g*d_s*b_s*(h_3-h_4) ...
        -F_bw-F_sw==0,h_4);
F_verhang = rho*g*d_s*b_s*(h_3-h_4);
F_romp = F_verhang + F_sw;

%Sectie 5
Q5 = Q4;

%Totaalkracht
F = F_boeg + F_romp + F_hek;

```

E.2. Methode LOCKFILL

```

function [F] = lockfill(Q1, x_b, l_s, l_k, b_k, b_s, d_s, h_k, k_1, k_2)
g = 9.81;
rho = 1000;
c_b = 0.85;
alfa = 0/360*2*pi; beta = 90/360*2*pi;
C_1 = 0.9; C_2 = 0; C_3 = 1.0;
m_schip = l_s*b_s*d_s*c_b*rho;

%Sectie 1
A_1 = h_k*b_k;
U_1 = Q1/A_1;

%Sectie 2
Q2 = Q1 * (l_k - x_b)/l_k;
U_2 = Q2/(b_k*h_k);

%Sectie 3
Q3 = Q2;
A_3 = h_k*b_k - b_s*d_s;
U_3 = Q3/A_3;
deltah_boeg = ((-Q2*U_2*cos(alfa)+Q2^2/(h_k*b_k-d_s*b_s)) ...
    /(g*(h_k*b_k-b_s*d_s)) ...
    +C_1*C_2*Q2*U_2*sin(alfa+beta)*sin(beta)/(g*(h_k*b_k-b_s*d_s)));
F_boeg = 1/2*rho*g*(deltah_boeg+d_s)^2*b_s ...
    +C_1*C_2*rho*Q2*U_2*sin(alfa+beta)*sin(beta);

%Wrijving langs romp
syms A_I A_II;
R_I = A_I/(b_k+2*h_k);
R_II = A_II/(b_s+2*d_s);
C_I = 18*log(12*R_I/k_1);
C_II = 18*log(12*R_II/k_2);
[A_I,A_II] = vpasolve([C_I^2*R_I==C_II^2*R_II,A_I+A_II==A_3],[A_I,A_II]);
R_I = A_I/(b_k+2*h_k);
R_II = A_II/(b_s+2*d_s);
C_I = 18*log(12*R_I/k_1);
C_II = 18*log(12*R_II/k_2);

%Sectie 4
Q4 = Q1 * (l_k - x_b - l_s)/l_k;
U_4 = Q4/(h_k*b_k - d_s*b_s);

%Section 5
Q5 = Q4;

%Verhang
U_gem = (U_3 + U_4)/2;
F_bw = C_3*rho*g*U_gem^2/C_I^2*(b_k+2*h_k)*l_s;
F_sw = C_3*rho*g*U_gem^2/C_II^2*(b_s+2*d_s)*l_s;

```

```
F_verhangimpuls = (-rho*Q1^2*d_s*b_s)/(h_k*b_k-d_s*b_s)^2 ...  
    *((2*l_k-2*x_b-l_s)*l_s)/(l_k)^2;  
F_verhangwrijving = F_bw*d_s*b_s/(h_k*b_k-d_s*b_s) ...  
    + F_sw*h_k*b_k/(h_k*b_k-d_s*b_s);  
  
F_hek = - 1/2*rho*g*b_s*d_s^2;  
  
F_impuls = F_boeg + F_verhangimpuls + F_hek;  
F_wrijving = F_verhangwrijving + F_sw;  
  
%Berekening lanskracht  
F = F_impuls + F_wrijving;
```