

A stylized, grey silhouette of a crab, viewed from above, centered on the page. The crab's body is a large, rounded oval, and its four legs are positioned around the perimeter of the body. The text is centered within the upper part of the crab's body.

**Sedimentatiesystemen  
voor sleepopperzuigers 3**

Ingenieursopdracht

M.J.P. Meeuwissen, rapp. nr: 93.3.GV.4157

Hollandsche Aanneming Maatschappij  
Capelle aan den IJssel, november 1993

# VAKGROEP TRANSPORTTECHNOLOGIE, SECTIE GRONDVERZET

Project-/themacode:	030C922	Soort opdracht:	Ingenieurs
VF-code:	Wb-02/83-29	Opdrachtnummer:	93.3.GV.4157
Vertrouwelijk:	Ja	Datum:	28 september 1993
		Naam:	M.J.P. Meeuwissen

## Titel: **Sedimentatiesystemen voor sleephopperzuigers 3**

### Overweging

#### ■ Begripsbeschrijving

Voor het winnen van zand zijn verschillende werktuigen te onderscheiden. De twee belangrijkste typen werktuigen zijn de snijkopzuiger en de sleephopperzuiger. Een snijkopzuiger wordt gekenmerkt door een zuigbuis met aan het einde een roterende snijkop, die de grond snijdt en vervolgens verticaal omhoog transporteert. Een sleephopperzuiger is een vaartuig dat een sleepkop over de bodem voortsleept en door onder andere hydraulische erosie zand losmaakt, waarna het door de zuigbuis omhoog getransporteerd wordt.

Van groot belang bij een sleephopperzuiger is de cyclustijd, bestaande uit een winfase en een transportfase. De transportfase is in deze opdracht geen doel van onderzoek.

Er ontstaan tijdens de winfase verliezen bij het beladen van de hopper. Na het verticale transport wordt het mengsel in de hopper van de sleephopperzuiger gestort. In de hopper worden zand en water gesepareerd doordat de korrels bezinken en het water, wanneer de hopper gevuld is met mengsel, via de uitstroom de hopper verlaat met de niet bezonken deeltjes. De grootte van dit overvloeiverlies is ondermeer afhankelijk van de samenstelling van de grond (korrelgrootte en slibgehalte), het debiet, de concentratie van het opgezogen mengsel en de vormgeving en de dimensies van het totale systeem (instroom, bassin en uitstroom).

#### ■ Probleemstelling

Bij fijn en/of slibhoudend zand is het hopperrendement van de huidige sedimentatiesystemen laag. Dit heeft als gevolg dat gedurende een bepaalde laadtijd weinig nuttige lading in de hopper achterblijft, en de efficiency van de baggeroperatie is hierdoor laag.

#### ■ Doelstelling

Het construeren van een volledig en optimaal prototype van een lamellenbezinkstelsel met flappen.

#### ■ Tot nu toe uitgevoerd onderzoek

In een eerste afstudeeronderzoek van een andere student in 1990 is een inventarisatie gemaakt van de relevante fysische processen bij de hopperbezinking. Vervolgens is een schaalmodel ontwikkeld, waarin de processen zijn bestudeerd. Mede op basis van dit onderzoek is een aantal concrete verbeteringsvoorstellen gedaan. De modelopstelling is inmiddels ingrijpend aangepast teneinde aan de nieuwe randvoorwaarden en meetnauwkeurigheden te kunnen voldoen.



In de eerste afstudeeropdracht zijn de omgeving van de hopper en de processen die zich hierin afspelen aan de orde gekomen. Verder is een inventarisatie van bestaande en eventueel mogelijke hopperconfiguraties gemaakt. De cyclonenseparatoren en lamellenbezinksystemen zijn bij dit onderzoek uitgebreid aan de orde gekomen.

#### ■ **Uit te voeren werkzaamheden**

Het construeren van een lamellenbezinkstelsel met flappen. Dit stelsel dient te worden ontworpen aan de hand van de vershaling van het lamellenbezinkstelsel uit de tweede afstudeeropdracht.

Aandacht moet worden besteed aan de juiste vershaling van de stromingen en aan de stijfheid en sterkte van de constructie. Verder moet het stelsel een rendementsverbetering geven die opweegt tegen het extra volume, de extra massa en de overige problemen die dit stelsel bij inbouw in een hopper oplevert

#### **A Uitgangspunten**

- 1 Het rapport van de eerste en tweede afstudeeropdracht.
- 2 Overige relevante literatuur.

#### **B Opdrachten**

- 1 Analyse van de economische rendementsverbetering door het toepassen van een lamellenbezinkstelsel in de praktijk. (twee weken)
- 2 Ontwerp van het lamellenbezinkstelsel met flappen, betreffende algemeen plan en hoofdmaten. (twee weken)
- 3 Rapportage omtrent B1 en B2. (twee weken)

#### **C Begeleiding**

Deze opdracht dient zonder begeleiding te worden voltooid.

#### **D Planning en rapportage**

Gestreefd zal worden naar een tijdsbesteding van 240 uur, inclusief de rapportage. De opdracht vangt aan op maandag 4 oktober, terwijl het afstudeerverslag op maandag 15 november ingeleverd moet worden.

Er wordt een intern HAM-rapport gemaakt dat als basis voor de eindbeoordeling kan dienen. Op basis hiervan wordt een TU-afstudeerrapport gemaakt, waarbij de HAM zich het recht voorbehoudt om gevoelige HAM-bedrijfsinformatie daarin niet te laten opnemen.

Het rapport mag een omvang van 50 pagina's exclusief bijlagen en listings niet te boven gaan. Het rapport vangt aan met een kopie van deze opdracht gevolgd door een inhoudelijke samenvatting van ten hoogste vijf pagina's.

Er wordt een intern-HAM-rapport gemaakt dat als basis voor de eindbeoordeling kan dienen. Op basis hiervan wordt een TU-rapport gemaakt, waarbij de HAM zich het recht voorbehoudt gevoelige HAM-bedrijfsinformatie daarin niet te laten opnemen.



### E Archivering en eigendom

Het rapport is eigendom van de Technische Universiteit Delft. Het manuscript wordt losbladig ingeleverd bij de hoogleraar, terwijl twee gebonden exemplaren worden vervaardigd voor plaatsing in de bibliotheek van de Vakgroep Transporttechnologie voor intern TUD-gebruik.

De Technische Universiteit Delft zal het rapport de eerste twee jaar na gereedkomen niet aan derden verstrekken zonder schriftelijke toestemming van de HAM. De industriële eigendomsrechten van dit project zijn van de HAM. Publicatie zal in principe een gezamenlijke inspanning van de TUD en de HAM zijn.

### F Embargo

Naast een copie van het TU-rapport voor de HAM zal ook de student een copie van dit rapport krijgen. De student en zijn begeleiders verklaren bij deze het embargo te zullen eerbiedigen en de gevoelige HAM-bedrijfsinformatie vertrouwelijk te zullen behandelen.

#### ■ Voor accord:

De student,

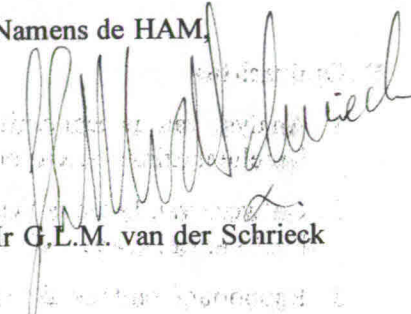
De hoogleraar,

Namens de HAM,



M.J.P. Meeuwissen

Prof. ir M. van Holst



Ir G.L.M. van der Schrieck

C.c.: Dr ir S.A. Miedema TU. Delft  
Ing. J. Brouwer T.U. Delft  
Hr M. Neeleman T.U. Delft  
Ir H.P.B. Hokke HAM

# Voorwoord

Deze ingenieursopdracht vormt de afronding van de schriftelijke rapportage van mijn afstudeerwerk bij de sectie Grondverzet van de faculteit der Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft. Het gehele afstudeerwerk is uitgevoerd in opdracht van en bij de Hollandsche Aanneming Maatschappij, aansluitend op een stageopdracht met hetzelfde onderwerp.

Voor de begeleiding en medewerking bij dit afstudeerwerk dank ik de Hollandsche Aanneming Maatschappij, in het bijzonder ir H.P.B. Hokke, mijn directe begeleider, en ir G.L.M. van der Schrieck, hoofd van de afdeling Research. Bij de uitvoering van diverse proeven in het laboratorium op de Merwelanden heb ik veel hulp gehad van de heer K. Klein.

Van de Technische Universiteit wil ik prof. ir J. de Koning en dr ir S.A. Miedema, mijn directe begeleider aldaar, danken voor hun adviezen en begeleiding gedurende de eerste en tweede afstudeeropdracht.

Capelle aan den IJssel, 12 november 1993

M.J.P. Meeuwissen



# Samenvatting

Gedurende het laadproces van sleehopperzuigers ontstaat bij het laden van slib en fijn zand aan het eind van het beladen een laag laadrendement, doordat een groot gedeelte van het niet gesedimenteerde te transporteren materiaal via de overvloei uit de hopper stroomt. Door het vergroten van dit laadrendement kan de laadtijd van een sleehoppercyclus worden verkleind. Bovendien wordt dan minder materiaal onnodig van de bodem in de sleehopperzuiger gepompt.

In de eerste afstudeeropdracht werd een inventarisatie gemaakt van bestaande en mogelijke niet eerder toegepaste sedimentatiesystemen. Aansluitend hierop zijn in de tweede afstudeeropdracht drie veelbelovende systemen (schottenkerend, intermitterend en lamellenbezinker met flappen) verder uitgewerkt en beproefd. In dit rapport wordt een prototype lamellenbezinkstelsel met flappen ontworpen voor plaatsing aan boord van een sleehopperzuiger.

De Geopotes 14, met een hopperinhoud van circa 6900 m<sup>3</sup> blijkt vooral vanwege het gunstige huidige overvloeiingssysteem, de meest geschikte sleehopperzuiger voor de inbouw van een prototype lamellenpakket in de hopper, ondanks het gesloten zijn van de hopper.

## Dimensionering van het lamellenpakket

Het lamellenpakket wordt op een dussdanige wijze ontworpen dat het zo goed mogelijk voldoet aan het Campmodel en het uitschuringscriterium. Het wordt geplaatst voor het huidige overvloeiingssysteem, dat uit een zestal kleppen langs de breedte richting van de hopper bestaat. De kleppen bevinden zich in twee rijen van drie boven elkaar en gaan in de richting van de hopper open.

Gekozen wordt voor een lamellenpakket dat in hoogterichting niet te veel ruimte inneemt, omdat op het moment dat het bezonken zandbed de onderkant van de lamellen heeft bereikt het systeem niet meer functioneert. De hoogte van het lamellenpakket wordt gesteld op 1,5 m en de lamelhoek op 60°. Dit betekent dat de lamellen 1,7 m breed worden. In de hopperbreedterichting is tussen de aan weerszijde aanwezige klepstangen 7,5 m ruimte. Bij het maximale debiet (zuigbuisnelheid is 4 m/s) komt dit neer op een doorstroomsnelheid die 0,56 m/s bedraagt, ruim tweemaal de uitschuursnelheid.

In lengterichting bevindt zich 11 m tussen de uiterste stand van de overvloeikleppen en het dichtstbijzijnde instroompunt. Volgens het Campmodel is een lamelafstand van 0,20 m het gunstigst. Tevens voldoet deze lamelafstand aan de eisen die gesteld worden ter voorkoming van verstopping. Tenslotte moet de lamelafstand een bepaalde grootte hebben ter verkrijging van een enigszins laminair stromingsbeeld in de lamellendoorgangen.

## Niveauperloop en positie in de hopper

Het verloop van het mengselniveau is redelijk constant in de lengterichting van de lamellen. Een verval aan de instroom zal optreden door de versnelling van het mengsel en verder zal een verval van enkele millimeters langs het hele lamellenpakket optreden. De stuwhoogte bij het hoogste debiet wordt ongeveer 0,6 m, dit betekent dat de stuwhoogte ongeveer 0,6 m onder de bovenkant van het lamellenpakket gelegen moet zijn.

De positie van het lamellenpakket in de hopper wordt zoals eerder vermeld in de breedterichting van de hopper vastgelegd door de klepstangen. In lengterichting bevindt het lamellenpakket zich tot aan de uiterste stand van de tevens eerder vermelde overvloeikleppen. Tenslotte is gekozen voor opstelling van het lamellenpakket ter hoogte van de middelste twee overvloeikleppen. Dit is 1 m onder het dak van de hopper.



## Sterkte, stijfheid en stabiliteit

Het lamellenpakket moet voldoende sterk, stijf en stabiel zijn geconstrueerd. De lameloppervlakken en de I-profielen worden nagerekend op dusdanige wijze dat wordt gekeken naar gestelde eisen met betrekking tot de sterkte en stijfheid. De stabiliteit, knik en plooiing in de lameloppervlakken wordt niet gecontroleerd, maar bij een uiteindelijk ontwerp moet hiermee eventueel rekening worden gehouden.

## Economische analyse

Het laadrendement moet door het toepassen van het lamellenbezinkstelsel voldoende toenemen, zodat de laadtijd korter wordt. De laadtijd zal korter worden bij het laden van zand met een fijne of medium korrelgrootte ( $60 \mu\text{m} < d_{50} < 600 \mu\text{m}$ ). Bij het laden van grof zand en grind ( $d_{50} > 600 \mu\text{m}$ ) kan het laadrendement niet toenemen, omdat dit al 100 % bedraagt (alles bezinkt dan toch al). Ook bij het laden van slib ( $d_{50} < 60 \mu\text{m}$ ) wordt geen toename van het laadrendement verwacht, slib sedimenteert namelijk door de lage bezinknelheid in het lamellenpakket eveneens slecht als een lamellenbezinker wordt toegepast.

Op grond van een voorspelling omtrent de tijden per jaar gedurende welke de Geopotes 14 zand met een fijne of medium korrelgrootte laadt en op grond van een aangenomen verbetering van het bezinkrendement (verdere proeven moeten dit aantonen) bij deze zandsorten is de tijdswinst gedurende het laden te berekenen.

De opslagcapaciteit van de hopper neemt af met ongeveer  $24 \text{ m}^3$ , door de massa van het lamellenpakket. Dit betekent dat tijdverlies bij ieder te transporteren materiaal tijdens het vervoer in de hoppercyclus optreedt.

Het lamellenpakket kan zich alleen terugverdienen als de tijdswinst tijdens het laden groter is dan het tijdverlies tijdens het vervoer. Dit blijkt voor de Geopotes 14 over de komende jaren gezien het geval te zijn. In een jaar wordt ongeveer 1,4 week bespaard, wat overeenkomt met een besparing van 0,7 miljoen gulden. Dit bedrag is even groot als de inbouwkosten, aangenomen dat het lamellenpakket een massa van  $45 \cdot 10^3 \text{ kg}$  heeft en één kg staal op een baggerschip globaal fl. 15,- kost.

Het lamellenpakket verdient zich volgens de gedane aannames en mits geen complicaties optreden in één jaar terug.

# Inhoud

<b>Opdrachtsomschrijving</b>	<b>I</b>
<b>Voorwoord</b>	<b>i</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>iii</b>
<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>1 Probleemstelling</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Keuze prototype schip</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Uitgangspunten</b> .....	<b>7</b>
3.1 Hopper van de Geopotes 14	7
3.2 Procesparameters	8
3.3 Verstopping	10
3.4 Sterkte, stijfheid en stabiliteit	10
3.5 Omgeving	10
<b>4 Dimensionering en positie in de hopper</b> .....	<b>13</b>
4.1 Dimensionering van het lamellenpakket	13
4.2 Niveauverloop langs de lamellen	15
4.3 Rooster bij de instroom	17
4.4 Positie van het lamellenpakket in de hopper	17
<b>5 Sterkte, stijfheid en stabiliteit</b> .....	<b>19</b>
5.1 Ondersteuning in lamelbreedterichting	19
5.2 Ondersteuning in lamellengerichting	21
5.3 Profielen ter bevestiging en voor de sterkte	22
<b>6 Economische analyse</b> .....	<b>25</b>
6.1 Afname opslagcapaciteit tijdens het varen	25
6.2 Toename van het laadrendement	25
6.3 Rendementsverbetering van de hoppercycli	26
<b>Conclusies</b>	<b>29</b>
<b>Referenties</b>	<b>31</b>
<b>Symbolen</b>	<b>33</b>
<b>Bijlage A: Keuze prototype schip</b>	
<b>Bijlage B: Stijfheid en sterkte van platen</b>	
<b>Bijlage C: Bovenaanzicht HAM 309 en Geopotes 14</b>	
<b>Bijlage D: Overvloeiverliezen Geopotes 14 in praktijk</b>	

# Inleiding

Sleephopperzuigers worden veelvuldig ingezet bij het transporteren van grote hoeveelheden baggermateriaal. Nadat materiaal van de bodem door de zuigbuis omhoog is getransporteerd komt het in de hopper terecht, alwaar het gedurende het horizontale transport wordt opgeslagen. Tenslotte wordt het op de plaats van bestemming gelost.

Dit onderzoek is gericht op het optimaliseren van het hoppersysteem door verbetering van het laadrendement. Gekozen is voor het ontwerpen van een lamellenbezinkstelsel met flappen. Dit systeem wordt gedimensioneerd volgens het ideale bezinkmodel van Camp en het uitschuringscriterium.

Het lamellenpakket wordt op dusdanige wijze gedimensioneerd, dat volgens het Campmodel alle instromende deeltjes van een bepaalde diameter op de lamellen neer kunnen dalen gedurende het verblijf in het lamellenpakket.

Aan het uitschuringscriterium zal niet helemaal kunnen worden voldaan, daar het lamellenpakketoppervlak dwars op de hopper dan te groot wordt. Wel zal dit oppervlak zo groot mogelijk worden gemaakt, aangezien de doorstroomsnelheid de uitschuursnelheid niet te veel mag overschrijden. Wordt de uitschuursnelheid te veel overschreden dan zullen namelijk op de lamellen neergedaalde deeltjes worden opgewerveld en in de doorgaande stroom worden opgenomen.

Tenslotte komt het economische aspect van het lamellenpakket aan de orde. Het laadrendement van de sleephopperzuiger neemt toe door de kortere laadtijd. Hier staat tegenover dat door de massa van het lamellenpakket minder nuttige lading kan worden getransporteerd en de inbouwkosten van het lamellenpakket aanzienlijk zijn. Dit betekent dat de tijdwinst tijdens het laden groter moet zijn dan het tijdverlies tijdens het transport over een groot aantal sleephoppercycli beschouwd.



# 1 Probleemstelling

Het huidige laadrendement van sleephopperzuigers is laag bij het baggeren van slib en fijn zand. Door de inbouw van een lamellenbezinksysteem zal het laadrendement bij het laden van fijn zand toenemen. Bij slib wordt geen verbetering verwacht aangezien dit te langzaam bezinkt. De inbouw van een lamellenpakket is economisch interessant als de tijdwinst tijdens de hopperlaadcycli voldoende groter wordt bij het laden van fijn zand.

## 2 Keuze prototype schip

Aanvankelijk zou een lamellenbezinkstelsysteem met flappen voor de hopper van de HAM 309, afbeelding C1 (bijlage) worden ontworpen. Een belangrijke reden voor de keuze van de HAM 309 was dat dit schip zich in Europa bevindt en een open hopper heeft. Echter blijkt een nadere bestudering van de situatie op de HAM 309 is dit schip niet het meest geschikte voor plaatsing van het prototype lamellenbezinkstelsysteem. De Geopotes 14 (afb. C2, bijlage) die zich eveneens in Europa bevindt, lijkt ondanks de gesloten hopper een goed alternatief voor de HAM 309. Verder komen geen schepen in aanmerking.

In tabel 2.1 wordt de Geopotes 14 op systematische wijze met de HAM 309 vergeleken. Verder in dit hoofdstuk worden de in deze tabel vermelde punten nader toegelicht.

<b>Voordeel Geo 14 t.o.v. HAM 309</b>	Overvloei	Geen loze ruimte	
		Recht in plaats van rond	
		Niveau regelbaar met schuiven	
	Afwezigheid pijp dwars door hopper		
Laadcapaciteit groter	De massa en dus ook het volume van het lamellenpakket zijn klein ten opzichte van de nuttige lading		
	De verbetering van het beladingsproces is makkelijker aantoonbaar		
<b>Nadeel Geo 14 t.o.v. HAM 309</b>	Gesloten hopper	Inbouwprobleem bij de Geopotes 14	
		Bezinkproces in de lamellendoorgangen bij de Geo 14 moeilijk waarneembaar	Voor onderzoek
			Bij verstopping
<b>Voordeel Geo 14 en HAM 309</b>	Huidige locatie: Geopotes 14: Hamburg, vervolgens Nieuwe Waterweg HAM 309: Elbe, vervolgens eveneens Nieuwe Waterweg		

tab.2.1: Geopotes 14 ten opzichte van de HAM 309 beschouwd

### Voordelen Geopotes 14 ten opzichte van HAM 309

De voordelen van de Geopotes 14 ten opzichte van de HAM 309 kunnen in drie groepen worden ingedeeld. Ten eerste is het huidige overvloeisysteem van de HAM 309 ongunstig. Door de positie op enige afstand van de korte zijwand van de hopper ontstaat, als de uitstroom van de lamellenbezinker op de zelfde plaats zou worden gepositioneerd, een loze ruimte van ruim 100 m<sup>3</sup>. Dit is geen probleem bij de Geopotes 14, aangezien de overvloei zich daar in de korte zijwand bevindt.

Het tweede voordeel is de rechte overvloei van de Geopotes 14 ten opzichte van de ronde van de HAM 309. Door het recht zijn van de overvloei zijn de lamellen hier eenvoudiger op aan te sluiten.

Het derde voordeel is de regelbaarheid van het overvloeiniveau door middel van kleppen over een deel van de breedte van de hopper van de Geopotes 14. Met als gevolg dat, mits de doorgang door de schuiven nauwkeurig regelbaar is of regelbaar wordt gemaakt, het niveau aan de



uitstroomzijde van de lamellenbezinker hiermee kan worden ingesteld. Bij de in hoogte traploos verstelbare overvloei van de HAM 309 zal het niveau van de lamellenuitstroom moeilijker zijn te regelen. Om de hoogte van het lamellenpakket aan te passen aan de situatie van de laadcyclus en het te baggeren materiaal kan dan worden gekozen voor het in de hoogte meebewegen van het lamellenpakket met de overvloei of voor het opstellen van de lamellen los van de in hoogte beweegbare overvloei. Het meebewegen van het lamellenpakket betekent dat de ophanging van het zware lamellenpakket een probleem oplevert. Het opstellen van de overvloei en het lamellenpakket los van elkaar, betekent dat willen deze langs elkaar kunnen bewegen een zekere vorm van afdichting tussen deze twee moet worden aangebracht.

Een totale wijziging van het overvloeisysteem van de HAM 309 zal hoge kosten teweeg brengen. Als blijkt dat het lamellensysteem niet naar verwachting functioneert zal het niet eenvoudig zijn de oude situatie met de ronde overvloei te herstellen. Bij toepassing van het lamellenpakket voor de rechte overvloei van de Geopotes 14 hoeft bij niet goed functioneren enkel het lamellenpakket hiervoor te worden verwijderd. Doch door het gesloten zijn van de hopper van de Geopotes 14 is eventuele demontage van het lamellenpakket ook niet eenvoudig.

Een volgend nadeel van de hopper van de HAM 309 is de pijp die (met een aftakking naar de ronde overvloei ten behoeve van het arm mengsel overboord systeem) dwars door de hopper loopt, precies op de plaats waar het lamellenpakket zou moeten komen.

Het laatste voordeel van de Geopotes 14 is de hoppercapaciteit, het hoppervolume van de Geopotes 14 bedraagt  $6900 \text{ m}^3$ . Dit is anderhalf keer het hoppervolume van de HAM 309. Ook de gemiddelde dichtheid van het mengsel dat de hopper gemiddeld kan bevatten ligt bij de hopper van de Geopotes 14 hoger,  $1,67 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Na opbouw van een booster is dit voor de HAM 309,  $1,37 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . De massa van het lamellenpakket zal relatief kleiner zijn ten opzichte van de nuttig te vervoeren lading bij de Geopotes 14.

De verbetering van het laadproces is eenvoudiger aan te tonen bij de Geopotes 14, door de eerder genoemde kleinere relatieve massa van het lamellenpakket ten opzichte van de totale nuttige lading. Hierdoor is een kleine rendementsverbetering eenvoudiger aantoonbaar.

### **Nadeel Geopotes 14 ten opzichte van HAM 309**

Het grote nadeel van het installeren van de lamellenbezinker in de hopper van de Geopotes 14 is het gesloten zijn van de hopper. Dit betekent dat het lamellenpakket niet eenvoudig in de hopper is te plaatsen. Het lamellenpakket kan niet volledig opgebouwd in de hopper worden geplaatst, maar zal in losse onderdelen in de hopper moeten worden gebracht.

Op twee wijzen kunnen de onderdelen van het lamellenpakket in de hopper worden geplaatst. Ten eerste kan dit door een opening te maken in het dek boven de hopper of door de romp open te snijden. De tweede mogelijkheid is de onderdelen door de ongeveer 4 bij 6 meter grote bodemklepopeningen naar binnen te brengen. Dit laatste is alleen mogelijk als de sleehopper in dok ligt. De bodemdeuren bevinden zich dan ongeveer 1 m boven de bodem van het dok. Echter voor het samenvoegen van de onderdelen en voor de bevestiging van het lamellenpakket aan het casco zal altijd een steigerconstructie in de hopper moeten worden gebouwd. Dit betekent dat de inbouw van het lamellenpakket feitelijk alleen gedurende het dokken kan gebeuren.

### **Keuze van het prototype schip**

Mede naar aanleiding van een tweetal besprekingen met de TD, waarvan de besprekingsverslagen in bijlage A staan, wordt besloten een lamellenpakket voor plaatsing in de hopper van de Geopotes 14 te ontwerpen.



## 3 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten voor het te ontwerpen lamellenpakket vastgelegd. De onderstaande alinea's geven de uitgangspunten in het kort weer, waarna in de paragrafen de verdere uitwerking volgt.

### Geopotes 14

De Geopotes 14 is een sleehopperzuiger met een gesloten hopper met een volume van  $6900 \text{ m}^3$ , waarbij op drie posities in langrichting van de hopper mengsel in de hopper kan stromen. De overvloed bestaat uit zes overvloedkleppen langs de breedte aan de achterzijde van de sleehopperzuiger. De zes overvloedkleppen zijn opgesteld in twee rijen van drie onder elkaar. Door middel van vooral de stand van de middelste twee overvloedkleppen wordt het niveau in de hopper geregeld. De overvloedkleppen openen naar de hopper toe. De kleppen zullen enigszins open moeten staan tijdens het laden. Anders bestaat de kans dat de kleppen niet open kunnen door de druk van het mengsel in de hopper, aan het einde van het laden.

Bij het ontwerp van het lamellenbezinkstelsel zal voor de afmetingen van het lamellenpakket rekening moeten worden gehouden met vooral de afmetingen van de hopper en de zich daarin bevindende obstakels, zoals klepstangen.

### Sterkte, stijfheid en stabiliteit

Het lamellenbezinkstelsel moet op een dusdanige wijze aan het casco worden bevestigd, dat het geen gevaar oplevert voor de scheepssterkte. Verder mag in de meest ongunstige situatie geen bezwijking kunnen optreden. De meest ongunstige situatie ontstaat als de hopper leeg is en de lamellen met zand, dat zich tussen de lamellen heeft geklemd, is gevuld. Het lamellenpakket moet voldoende stijf zijn zodat geen grote vervormingen kunnen ontstaan. Tenslotte moet het lamellenpakket voldoende stabiel zijn ter voorkoming van verschijnselen als knik in de grote plaatoppervlakken.

### Instromend mengsel

Het systeem moet geschikt zijn voor een debiet waarbij de mengselsnelheid in beide zuigbuizen  $4 \text{ m/s}$  bedraagt. De dichtheid van het mengsel dat in de lamellendoorgangen stroomt wordt gesteld op maximaal circa  $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Korrels met een diameter van  $150 \mu\text{m}$  en groter moeten meer dan 50 % kans hebben te bezinken.

### Tweede afstudeeropdracht

De tweede afstudeeropdracht dient als uitgangspunt voor criteria voor de valsnelheid en de uitschuursnelheid die tot een optimale dimensionering van het lamellenpakket leiden. Verder is in deze afstudeeropdracht het verstoppingsprobleem (door inklemming als gevolg van korrelspanningen) uitvoerig aan de orde gekomen.

## 3.1 Hopper van de Geopotes 14

### Geometrie

#### ■ Lamellengte

De lamellengte wordt naar boven begrensd door de lengte van de hopper en door de daarin aanwezige obstakels. In de hopper van de Geopotes 14 is de afstand tussen het uiterste punt dat de luiken van de overvloed in geopende stand bereiken en het eerste obstakel een afstand van 11 meter in de lengterichting van de hopper. De hopper moet van boven toegankelijk blijven ten behoeve van bijvoorbeeld onderhoud aan bodemkleppen van het lossysteem. Dit betekent dat een niet te

groot oppervlak door de lamellen mag worden bestreken.

Het is gunstig de lamellenbezinker ver van de instroom te plaatsen omdat dichtbij de instroom nog veel grote makkelijk bezinkende deeltjes in het mengsel aanwezig zijn. Deze deeltjes bezinken zonder de lamellenbezinker ook goed in de hopper. Door plaatsing van de lamellenbezinker dichtbij de uitstroom verhinderen deze grote deeltjes, die toch al makkelijk bezinken, de bezinking van de kleine deeltjes (waarvoor de lamellenbezinker bestemd is) niet. Tenslotte zou de lamellenbezinker verstopt kunnen raken door de aanwezigheid van grote brokken, die bij plaatsing ver van de instroom mits de soortelijke massa van die brokken groot genoeg is al zijn bezonken.

Tenslotte geeft een grote lamellengte problemen bij het lossen. Met name door de inklemming tussen de lamellen als gevolg van de korrelspanningen in het zandpakket zal het zand bij het lossen niet makkelijk neerwaarts glijden. Door toepassing van een jetsysteem dat water in de lamellengerichting in de lamellendoorgangen doet stromen kan het zand in de lamellendoorgangen worden gelost.

#### ■ Lamellenpakketbreedte

De ruimte die de lamellenbezinker in de hopperbreedterichting in beslag neemt (de lamellenpakketbreedte) wordt naar boven begrensd door de beschikbare ruimte in de hopper. In de hopper van de Geopotes 14 bevinden zich aan weerszijde van het midden in lengterichting van de hopper klepstangen op een afstand van ruim 7,5 m van elkaar. Dit betekent dat de lamellenpakketbreedte maximaal 7,4 m mag zijn.

#### ■ Lamellenpakkethoogte

Op het moment dat het bezonken zandbed op de bodem de onderkant van de lamellendoorgangen bereikt, verslechtert de werking van de lamellenbezinker met de toename van de hoogte van het bezonken zandbed op de bodem van de hopper. Dit betekent dat de ruimte die de lamellenbezinker in verticale richting in beslag neemt niet te groot mag zijn. De hoogte van de hopper, van de bodem tot het overvloeiniveau gemeten, bedraagt bij de Geopotes 14 afhankelijk van het te baggeren materiaal tussen de 7 en 11,5 m.

### Bevestigingsmogelijkheden

De bevestiging van het lamellenbezinkersysteem aan het casco van de sleehopperzuiger mag in de meest ongunstige situatie niet leiden tot te grote belastingen op het casco. De meest ongunstige situatie doet zich voor op het moment dat de lamellendoorgangen volledig zijn gevuld met zand. Terwijl in de ruimte onder de lamellenbezinker geen materiaal meer aanwezig is, dat een opwaartse kracht op de lamellenbezinker uitoefent.

## 3.2 Procesparameters

De van belang zijnde procesparameter, het debiet, de dichtheid en de zandsoort, komen in deze paragraaf aan de orde.

### Debiet

De lamellenbezinker moet geschikt zijn voor het maximale debiet waarmee de Geopotes 14 kan laden. Dit debiet wordt bereikt als de beide zuigsystemen aan weerszijde van het schip in werking zijn. Dit debiet is af te leiden uit de diameter van de zuigbuizen, die 1 m bedraagt, en de maximaal redelijke mengselsnelheid door deze buizen, die circa 4 m/s bedraagt. Dit betekent een debiet door elk zuigstelsel van 3,2 m<sup>3</sup>/s en een totaal debiet van 6,4 m<sup>3</sup>/s dat de hopper instroomt.



## Dichtheid

De dichtheid van het mengsel dat de hopper instroomt bedraagt maximaal ongeveer  $1500 \text{ kg/m}^3$  en de lamellenbezinker wordt geacht geschikt te zijn voor een in de lamellenbezinker stromend mengsel met een dichtheid van maximaal  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

## Zandsoort

De zandsoort waarvoor het lamellenbezinkstelsel optimaal moet functioneren heeft een gemiddelde korreldiameter,  $d_{50}$ , van  $150 \mu\text{m}$  en de soortelijke dichtheid bedraagt,  $\rho_z = 2650 \text{ kg/m}^3$  (kwarts). Aan de hand van de zandsoort kunnen de valsnelheid en de uitschuursnelheid van de deeltjes, die van belang zijn voor de optimale dimensionering van de lamellendoorgang, worden bepaald. Voor het bepalen van de optimale lamelafstand in het volgende hoofdstuk zijn de waarde van de valsnelheid en de uitschuursnelheid van de korrels van belang.

### ■ Valsnelheid

De valsnelheid van de deeltjes bepaald of deze gedurende het verblijf in de lamellendoorgang voldoende dalen om de onderlamel te kunnen bereiken en hierlangs verder neerwaarts glijden. De valsnelheid bij  $10^\circ\text{C}$  kan met de onderstaande vergelijking worden bepaald [VELDEN VAN DER: 56].

$$\log \frac{1}{w_0} = 0,4758 \cdot (\log d_{50})^2 + 2,1795 \cdot \log d_{50} + 3,1915 \quad (3.1)$$

Invullen van de korreldiameter,  $d_{50} = 150 \mu\text{m}$  geeft een valsnelheid van  $15 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

### ■ Uitschuursnelheid

De uitschuursnelheid is van belang, aangezien deze door de doorstromingsnelheid niet mag worden overschreden. De uitschuursnelheid wordt op dezelfde wijze bepaald als in de tweede afstudeeropdracht, paragraaf 5.1.1.

$$V_{\text{uitschuur}} = \frac{Re^* \cdot v \cdot C}{\sqrt{g} \cdot d_{50}} \quad (3.2)$$

Bij  $10^\circ\text{C}$  is de kinematische viscositeit,  $\nu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  en in de Shieldscurve (eerste afstudeerrapport afbeelding 3.4) is de waarde,  $Re^* = 1,5$ , af te lezen.

De waarde van de Chezy coëfficiënt,  $C$ , wordt evenals in het rapport van de tweede afstudeeropdracht (paragraaf 5.1.1) berekend met de volgende vergelijking.

$$C = 18 \cdot \log \frac{6 \cdot D}{d_{50}} \quad (3.3)$$

De Chezy coëfficiënt wordt berekend voor lamelafstanden van  $0,1 \text{ m}$  en  $0,5 \text{ m}$ . Aangenomen dat de lamelafstand tussen deze waarden ligt. Bij  $D = 0,1 \text{ m}$  is  $C = 64,8 \sqrt{\text{m/s}}$  en bij  $0,5 \sqrt{\text{m/s}}$  is  $C = 77,4 \sqrt{\text{m/s}}$ . Voor de uitschuursnelheid bij  $D = 0,1$  en  $0,5 \text{ m}$  geldt dan respectievelijk  $0,26$  en  $0,31 \text{ m/s}$ . Verder zal een uitschuursnelheid van  $0,25 \text{ m/s}$  worden aangehouden zo dat altijd ruimschoots aan de voorwaarde voor het niet uitschuren wordt voldaan. Volgens het uitschuringscriterium mag de doorstromingsnelheid de uitschuursnelheid niet overschrijden, zodat neergedaalde deeltjes niet kunnen worden opgewerveld. Wordt aan deze voorwaarde voldaan, dan wordt het lamellenpakketoppervlak in dwarsrichting te groot, circa  $20 \text{ m}^2$  bij het maximale debiet. Verder wordt gesteld dat de uitschuursnelheid maximaal ongeveer het dubbele van de uitschuursnelheid



mag bedragen,  $u_d \leq 0,50$  m/s.

### 3.3 Verstopping

Voorkomen moet worden dat de lamellenbezinker door verstopping niet meer goed functioneert of andere processen gedurende de hoppercyclus belemmert. Verstopping van de lamellenbezinker, zoals uitvoerig in de tweede afstudeeropdracht is beschreven kan in twee situaties gedurende een laadcyclus van de sleephopperzuiger een problemen opleveren.

Ten eerste kan verstopping optreden gedurende het laadproces, waardoor geen extra materiaal meer in de doorgangen kan bezinken. Doordat het bezonken zand in de doorgangen een groot deel van het dwarsdoorstroomde oppervlak in beslag neemt wordt het doorstroomde oppervlak te klein. Dit betekent dat de doorstroomsnelheid oploopt, met als gevolg dat veel minder deeltjes kunnen bezinken en het lamellenbezinkstelsel geen effect meer heeft.

De tweede situatie waarbij verstopping een probleem kan opleveren is de belemmering van het losproces. Zoals aan het begin van dit hoofdstuk in verband met de bevestiging van het pakket aan het casco reeds werd beschreven, is het heel goed mogelijk dat het zand, dat zich tussen de lamellen bevindt, niet vanzelf langs de lamellen neerwaarts glijdt. Dit kan problemen opleveren bij het leegzuigen en bij het lossen via de bodemkleppen. De losproblemen kunnen worden opgelost door water met jets in de langsrichting in de richting naar de instroom van de hopper te spuiten.

### 3.4 Sterkte, stijfheid en stabiliteit

Het lamellenpakket moet voldoende stijfheid hebben zodat met name de doorbuiging van de lamellen geen grote vervormingen van de lamellendoorgangen teweeg brengt.

Verder moet het lamellenpakket voldoende sterkte bezitten, in ieder geval mag het niet onder het eigen gewicht bezwijken. Als ongunstigste situatie wordt een lamellenpakket, dat in hoogte richting half met bezonken zand is gevuld, beschouwd. Op dat moment is geen mengsel meer aanwezig onder het lamellenpakket in de hopper. Het is aannemelijk dat dit de meest ongunstige situatie is, aangezien de lamellen hoogstens voor de helft met bezonken zand gevuld zullen worden. De individuele lamellen zullen voldoende moeten worden ondersteund in verband met doorbuiging van de grote plaatoppervlakken. De buitenste twee lamellen zullen uit dikker plaatmateriaal moeten bestaan, daar aan weerszijde van het lamellenpakket in de hopperbreedterichting tussen de hopperwand en de klepstangen golfslag door de scheepsbewegingen kan ontstaan. De kracht van deze golven wordt door deze buitenste lamellen opgevangen. Verder wordt nagegaan hoe de situatie is als een lamellendoorgang volledig met zand gevuld is en een daar opvolgende leeg is. Door de zwaartekracht en de cascovernelingen kunnen dan grote doorbuigingen in de richting van de lege doorgang ontstaan.

Problemen met de stabiliteit (knik en plooiing) kunnen optreden bij de grote plaatoppervlakken. In dit rapport zal hier niet verder op worden ingegaan. Bij een verder ontwerp van het lamellenpakket zullen de platen op dit verschijnsel moeten worden doorgerekend.

### 3.5 Omgeving

Een belangrijk aspect van de omgeving van de sleephopperzuiger is de milieuwetgeving. Met name bij het baggeren van verontreinigd havenslib, zoals bijvoorbeeld in Hong Kong [FINAL REPORT INDIA HONG KONG FIELDEXCURSION: XLI].

Indien een verbod om mengsel te laten overvloeien van kracht is, of het overvloeimengsel eerst

grondig moet worden gezuiverd voor het overboord mag, kan het ongunstig zijn om überhaupt mengsel te laten overvloeien. Als geen overvloeijsysteem kan worden toegepast of het zuiveren van het overvloeimengsel een duur proces met zich meebrengt, heeft het toepassen van een lamellenbezinkstelsel geen nut, daar geen mengsel uit het stelsel kan stromen.

## 4 Dimensionering en positie in de hopper

De meest beperkende factor voor het lamellenpakket is de ruimte in de breedte van de hopper. Verder mag het lamellenpakket in de verticale richting niet te groot zijn, aangezien anders in een te vroeg stadium van het laadproces het onder in de hopper gelegen bezonken zand de onderkant van het lamellenpakket bereikt.

### 4.1 Dimensionering van het lamellenpakket

#### Oppervlak lamellenpakket dwars op hopper

Het oppervlak van het lamellenpakket dwars op de hopper mag niet kleiner zijn dan een bepaalde waarde, wegens de naar boven begrensde doorstromingsnelheid,  $u_d \leq 0,50$  m/s.

##### ■ Breedte van het lamellenpakket

De breedte van het lamellenpakket mag niet groter dan 7,4 m zijn, gezien de losconstructie in de hopper. Bij verwaarlozing van de lameldikten is de lamellenpakketbreedte als volgt te schrijven:

$$n \cdot \frac{D}{\sin\theta} + B \cdot \cos 60^\circ \leq 7,4 \text{ m} \quad (4.1)$$

##### ■ Hoogte van het lamellenpakket

De dwarsdoorsnede van het lamellenpakket wordt doorstroomd door het totale debiet,  $Q$  (afb. 4.1 door het licht grijze gebied weergegeven). Bij dit lamellenpakket is uitgegaan van een lamellenpakkethoogte van 1,5 m. Het dwarsdoorstroomde oppervlak bedraagt in dit geval 11,3 m<sup>2</sup>. De doorstromingsnelheid mocht niet groter zijn dan ongeveer 0,50 m/s. Bij het maximale debiet,  $Q = 6,4$  m<sup>3</sup>/s wordt de doorstromingsnelheid het quotiënt van het debiet en het dwarsdoorstroomde oppervlak en bedraagt voor dit geval 0,56 m/s. De doorstromingsnelheid is in verband met de ruimte die het bezonken zandpakket, de flappen en de verstevigingen tussen de lamellen in beslag nemen, in werkelijkheid groter.

#### Lamelafstand

In de tweede afstudeeropdracht is gebleken dat, volgens het ideale bezinkmodel van Camp, voor zandkorrels met een bepaalde valsnelheid en uitschuursnelheid, de optimale lamelafstand is te berekenen.

Vervolgens is gebleken dat de lamelafstand niet te klein mag zijn ten opzichte van de grootte van de zandlaag die zich tussen de lamellen bevindt. Tenslotte moet de stroming in de lamellendoorgang voldoende laminair zijn, zodat de deeltjes rustig kunnen bezinken zonder te worden opgewerveld.

##### ■ Optimale lamelafstand

De optimale lamelafstand,  $D_{opt.}$ , kan worden bepaald met de volgende vergelijking (tweede afstudeerrapport vgl. 5.6).

$$D_{opt.} = \frac{w_0 \cdot L \cdot \cos\theta}{u_d} \quad (4.2)$$

Het invullen van de valsnelheid,  $w_0 = 15 \cdot 10^{-3}$  m/s, de doorstromingsnelheid,  $u_d = 0,56$  m/s, en de



lamelhoek,  $\theta = 60^\circ$ , geeft de optimale lamelafstand als functie van de lamellengte,  $L$ .

$$D_{\text{opt.}} = 0,013 \cdot L \quad (4.3)$$

Voor de lamellengte wordt  $L = 11$  m genomen (maximale ruimte in hopperlengterichting tussen de overvloeikleppen en de dichtstbijzijnde instroom), dit geeft de optimale lamelafstand,  $D_{\text{opt.}} = 0,15$  m.

#### ■ Minimale lamelafstand

De minimale lamelafstand,  $D_{\text{min.}}$ , wordt bepaald door het optreden van brugvorming door te grote korrelspanningen in het zandpakket tussen de lamellen volgens vergelijking 5.19 uit het tweede afstudeerrapport:

$$D_{\text{min.}} = \frac{\frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \sin\theta \cdot h_{\text{bz//}}^2}{(\sin\theta - \sqrt{\frac{1}{3}} \cos\theta) h_{\text{bz//}} - 1,11 \cdot \Delta h} \quad (4.4)$$

Invullen van de lamelhoek,  $\theta = 60^\circ$ , de evenwijdige bezonken zandlengte,  $h_{\text{bz//}} = 0,5$  m, en het niet van invloed veronderstelde niveauverschil,  $\Delta h = 0$  m, geeft een minimale lamelafstand,  $D_{\text{min.}} = 0,15$  m.

#### ■ Maximale lamelafstand

De maximale lamelafstand wordt vastgelegd door de voorwaarde dat de stroming laminair moet zijn ten behoeve van een rustig bezinkproces van de korrels.

$$Re = \frac{u_d \cdot R_h}{\nu} \Leftrightarrow R_h = \frac{\nu \cdot Re}{u_d} \quad (4.5)$$

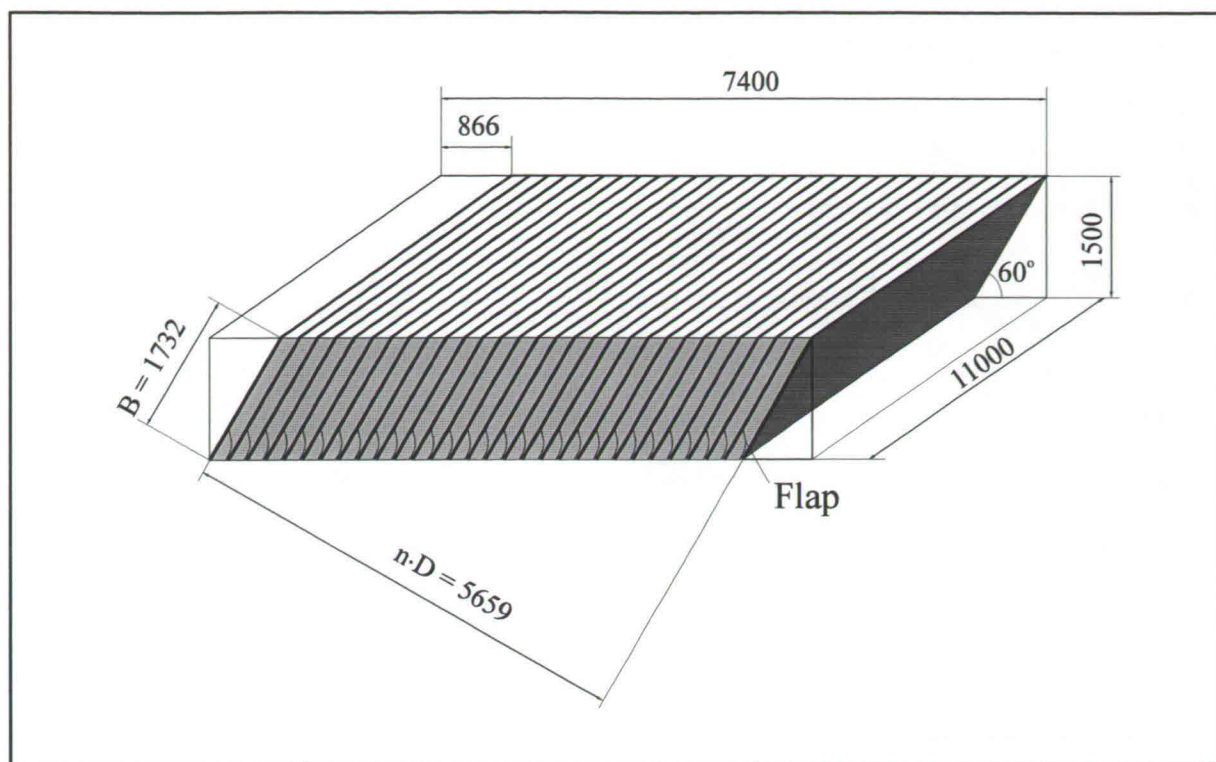
Invullen van  $u_d = 0,56$  m/s,  $\nu = 1,25 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s en  $Re = 2000$  (redelijke waarde waarbij stroming voldoende laminair is) [HUISMAN: 3-33] geeft de maximale lamelafstand,  $D_{\text{max.}} \approx 2 \cdot R_h = 0,009$  m. Deze waarde blijkt kleiner te zijn dan de minimale lamelafstand die voortkwam uit verstopping veroorzaakt door te grote korrelspanningen.

#### ■ Keuze lamelafstand

Uit de voorgaande drie criteria waarmee de lamelafstand kan worden bepaald blijkt dat geen enkele lamelafstand voor de praktijksituatie aan alle voldoet. Gekozen wordt voor een lamelafstand,  $D = 0,20$  m. De feitelijke afstand tussen de lamellen is kleiner doordat de dikte van de lamellen niet is meegerekend.

### Aantal lamellen

Bij de vastgestelde lamelafstand,  $D = 0,20$  m, kunnen maximaal  $n = 29$  doorgangen over de afstand  $n \cdot D = 5,7$  m, (afb. 4.1) worden geplaatst. Dit betekent dat het lamellenpakket uit in totaal 30 lamellen bestaat.



afb. 4.1: Lamellenpakket met afmetingen

## 4.2 Niveauverloop langs de lamellen

Het verloop van het mengselniveau in de doorgangen van het lamellenpakket wordt in deze paragraaf berekend voor het maximale debiet,  $Q = 6,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Verval door stroomversnelling bij de instroom

Het dwarsoppervlak van het lamellenpakket is veel kleiner dan het dwarsoppervlak van de hopper, terwijl hetzelfde debiet door deze oppervlakken stroomt. Dit betekent dat het mengsel bij de instroom van het lamellenpakket versneld.

De gemiddelde stroomsnelheid van de hopper is te berekenen uit het quotiënt van het debiet,  $Q = 6,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en de dwarsdoorsnede van de hopper. Het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de hopper is het produkt van het mengselniveau, circa 10 m, en de hopperbreedte, 12,5 m. Dit oppervlak wordt dan ongeveer  $125 \text{ m}^2$ . De gemiddelde stroomsnelheid in de hopper is dan  $u_{\text{hopper}} = 0,04 \text{ m/s}$ . De gemiddelde stroomsnelheid in het lamellenpakket is de eerder in paragraaf 4.1 berekend,  $u_d = 0,56 \text{ m/s}$ .

Door het invullen van de stroomsnelheden in de onderstaande vergelijking (tweede afstudeerrapport vgl. 5.8 en 5.9) kan het verval aan de instroom bij het lamellenpakket worden berekend.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot (u_d^2 - u_{\text{hopper}}^2) \quad \wedge \quad \Delta h = \frac{\Delta p}{\rho_m \cdot g} \quad \Rightarrow \quad \Delta h = \frac{(u_d^2 - u_{\text{hopper}}^2)}{2 \cdot g} \quad (4.6)$$

Hieruit volgt de verlaging van het niveau bij het instromen in het lamellenpakket,  $\Delta h = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ .



## Verval door wrijving langs de lamellen

Door de wrijvingsweerstand langs de platen neemt de kinetische energie van het tussen de lamellen stromende mengsel af. Dit betekent dat in de lamellendoorgangen evenwijdig aan de lamellen een gelijkmatig verval optreedt. De grootte van dit totale verval is te berekenen met de volgende vergelijking (tweede afstudeerrapport vgl. 5.10 en vgl. 5.11):

$$\Delta p = \frac{A_{\text{lam}} \cdot \tau_0}{A_d} \quad \wedge \quad \tau_0 = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot u_d^2 \cdot f_0 \quad \wedge \quad \Delta h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad \Rightarrow \quad \Delta h = \frac{A_{\text{lam}} \cdot u_d^2 \cdot f_0}{8 \cdot A_d \cdot g} \quad (4.7)$$

Het dwarsdoorstroomde oppervlak,  $A_d = 9,8 \text{ m}^2$ , wordt voorgesteld door het licht grijze vlak in afbeelding 4.1. Het totale lameloppervlak ( $A_{\text{lam}}$ ) is het produkt van tweemaal het aantal doorgangen en het oppervlak van een lamel,  $A_{\text{lam}} = (2 \cdot 29) \cdot 11 \cdot 1,7 \text{ m}^2 = 1085 \text{ m}^2$ . De doorstroomsnelheid bedraagt evenals eerder berekend,  $u_d = 0,56 \text{ m/s}$  en de Darcy Weisbach coëfficiënt bedraagt voor ruwe plaat,  $f_0 = 0,02$ . (Voor gladde plaat geldt:  $f_0 = 0,015$ ).

Het invullen van de in de vorige alinea vermelde waarden in vergelijking 4.7 levert een verval door plaatwrijving tussen de instroom en de uitstroom van het lamellenpakket,  $\Delta h = 9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

## Stuwhoogte bij de uitstroom

Bij de uitstroom van het lamellenpakket verlaat het mengsel de doorgangen via rechte overvloeien, gevormd door de overvloeikleppen. Deze rechte overvloeien zijn evenals in de tweede afstudeeropdracht (afb. 5.4 en vgl. 5.12) voor te stellen als stuw. Met behulp van de hier volgende stuwhoogte vergelijking kan het niveau,  $H$ , boven de rand van de stuw worden bepaald.

$$H = \left( \frac{Q}{1,71 \text{ m} \cdot D_{h,\text{tot}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \wedge \quad m = 1,08 \quad \frac{1}{s} \quad (4.8)$$

Hierin is  $D_{h,\text{tot}}$  de som van de breedten waarover wordt afgestroomd, ongeveer  $7400 \text{ mm} - 866 \text{ mm} = 6,5 \text{ m}$  (afb. 4.1) en  $m$  is een stuwconstante. Invullen van de waarden in vergelijking 4.8 geeft een stuwhoogte,  $H = 0,66 \text{ m}$ .

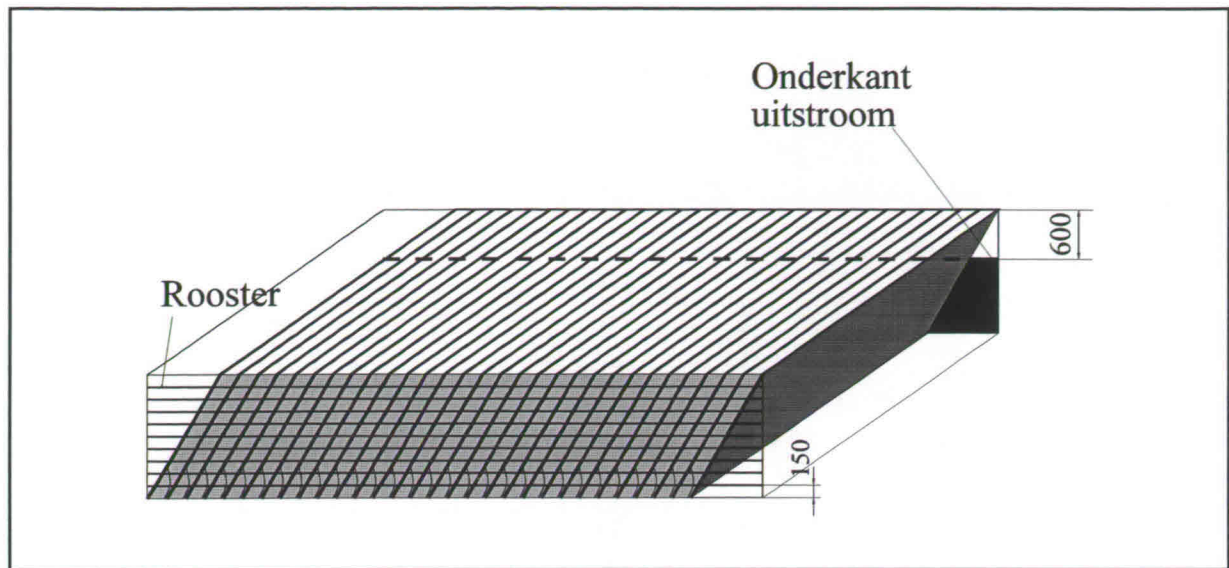
## Invloed van niveauperloop op het ontwerp

In werkelijkheid zal het verloop van het niveau in het lamellenpakket niet precies zijn zoals in deze paragraaf is beschreven. Dit wordt veroorzaakt door het niet horizontaal hangen van het lamellenpakket doordat de sleephopperzuiger niet horizontaal staat en door de invloed van de scheepsbewegingen. Ondanks dat de situatie in werkelijkheid anders zal zijn wordt verder toch uitgegaan van het niveauperloop zoals dat in deze paragraaf is berekend.

De hoogte van de bovenkant van het uitstroomschot van het lamellenpakket, dan wel de hoogte waarop de overvloeikleppen moeten worden opengesteld wordt vastgelegd door het verval door de wrijving langs de lamellen en de stuwhoogte bij de uitstroom. Aangenomen wordt dat het verval bij de instroom, dat ongeveer  $0,015 \text{ m}$  bedraagt, ervoor zorgt dat de instroom in het lamellenpakket niet volledig door het dwarsvlak, afb. 4.1 (licht grijze vlak), bij de instroom kan. Een klein deel van het mengsel dat niet bij de instroom door dit oppervlak kan, stroomt later van bovenaf in het lamellenpakket. Gezien het verval door plaatwrijving over het totale pakket (ongeveer  $0,01 \text{ m}$ ) kan dit mengsel in de richting van de uitstroom wel tussen de lamellen stromen.

De hoogte van de bovenkant van het uitstroomschot (gevormd door de overvloeikleppen), het onderste uitstroomniveau (afb. 4.2) tot aan de top van de lamellen wordt gelijk aan de som van het verval en de stuwhoogte genomen, ongeveer  $0,7 \text{ m}$ . De bovenrand van de bovenste openstaande

overvloeiklep zal zich tijdens het laden op ongeveer 0,6 m onder de bovenkant van de lamellen bevinden, zoals in afbeelding 4.2 (onderkant uitstroom) weergegeven is.



afb. 4.2: Rooster en uitstroom van het lamellenpakket

### 4.3 Rooster bij de instroom

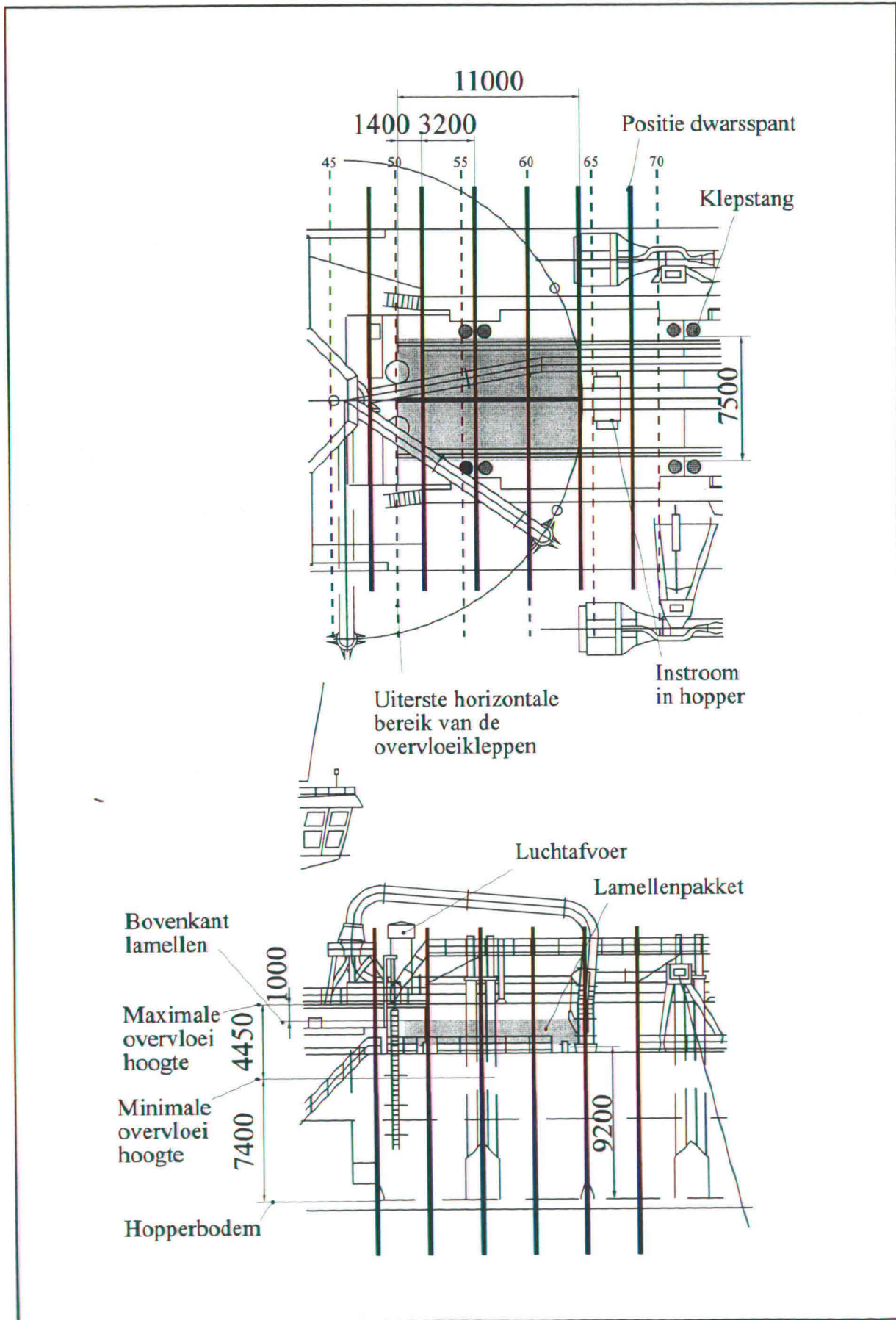
De kans bestaat dat grote delen, bijvoorbeeld boomstammen die door de lage soortelijke dichtheid van hout niet bezinken en in de lamellendoorgangen terecht kunnen komen, in de hopper terecht komen. Vanwege dit probleem wordt aan de instroomzijde een rooster gevormd, bestaande uit de lamellen en horizontale balken, met een verticale tussenafstand kleiner dan de lamelafstand, 0,15 m (afb. 4.2). De horizontale balken kunnen tevens ter vergroting van de stijfheid en sterkte van het lamellenpakket dienen.

### 4.4 Positie van het lamellenpakket in de hopper

Een gedeelte van het bovenaanzicht en het zijaanzicht van de Geopotes 14 met daarin de positie van het lamellenpakket door grijze vierkanten voorgesteld wordt in afbeelding 4.3 weergegeven. Tevens worden de klepstangen en de positie van de dwarsspanen aangeduid. De plaats van de klepstangen was de beperkende factor voor de grootte van het lamellenpakket in hopperbreedterichting.

De posities van de dwarsspanen is van belang voor de ophanging van het lamellenpakket aan het casco en de daarmee verband houdende versterkingsprofielen in breedterichting van het lamellenpakket.





afb. 4.3: Boven- en zijaanzicht van gedeelte van de Geopotes 14 met positie van het lamellenpakket

## 5 Sterkte, stijfheid en stabiliteit

In dit hoofdstuk wordt het geometrische ontwerp van het lamellenpakket uitgewerkt. De constructie moet in de eerste plaats voldoende sterkte hebben. De verstevigingsprofielen moeten aansluiten op het casco, zodat een gunstige doorgave van de krachten van het lamellenpakket op het casco ontstaat.

Het lamellenpakket moet verder voldoende stijfheid bezitten, zodat bijvoorbeeld geen te grote doorbuigingen van de lamellen, die vervorming van de lamellendoorgangen teweeg brengen, ontstaan.

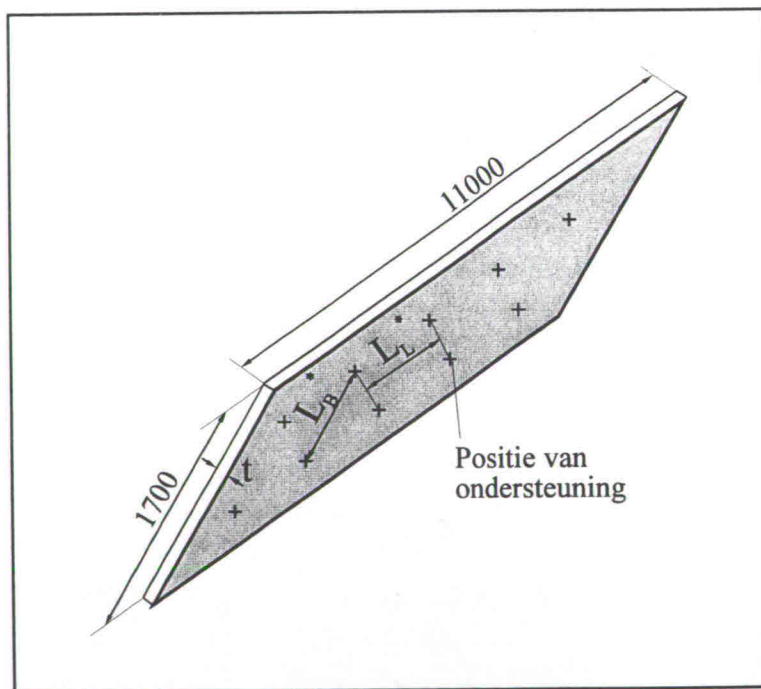
Tenslotte moet de constructie voldoende stabiliteit hebben, verschijnselen als knikken en plooiën mogen niet kunnen optreden. Het optreden van knikverschijnselen door de grote lengte van de lamellen in de lengterichting, kan worden voorkomen, door het lamellenpakket voldoende los van het casco op te hangen. Dan kunnen geen drukspanningen door vervormingen van het casco ontstaan.

Het ontwerp blijft in dit hoofdstuk beperkt tot de lameldikte, afstand van de ondersteuning tussende lamellen en de belangrijkste I-profielen ter ondersteuning van het pakket. De totale massa van het lege lamellenpakket wordt voornamelijk bepaald door de lamellen en de belangrijkste I-profielen. Voor de economische analyse van het toepassen van het lamellenpakket (hoofdstuk 6) is het van belang dat de massa van het lamellenpakket bekend is. Een zwaarder lamellenpakket betekent dat minder zand kan worden getransporteerd.

### 5.1 Ondersteuning in lamelbreedterichting

In de breedterichting van de lamel zal worden nagegaan of het nodig is de lamel te ondersteunen. De lamellen hebben in principe een plaatdikte,  $t = 8$  mm. Aan de einden van het lamellenpakket wordt een plaatdikte van 15 mm aangehouden. Verder zijn nog twee in het midden gelegen lamellen 15 mm dik (afb. 5.2).

Voor de stijfheid en sterkte beschouwing ten behoeve van de lamelondersteuning en de lamellen zelf, wordt de dikte van 8 mm aangehouden. De dikkere lamellen voldoen dan in ieder geval.



afb. 5.1: Afstanden tussen de ondersteuning

#### Niet in de breedte ondersteunde lamel

Allereerst wordt nagegaan wat de maximale spanning en de maximale uitwijking van een niet in de breedte richting ondersteunde lamel wordt. De lamel wordt aan weerszijden ingeklemd beschouwd, zoals voorgesteld in bijlage B1.



### ■ Maximale spanning

De volgende vergelijkingen gelden voor de maximale spanning,  $\sigma_{\max}$ , in deze situatie:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_b}{W_b} \quad \wedge \quad M_b = \frac{qL_B^2}{12} \quad \wedge \quad W_b = \frac{B \cdot t^2}{6} \quad (5.1)$$

Voor de belasting loodrecht op de plaat,  $q$ , wordt het eigen gewicht van de plaat genomen.

$$q = \cos\theta \cdot \rho_{st} \cdot g \cdot B \cdot t \quad (5.2)$$

Het herschrijven van vergelijkingen 5.1 en 5.2 levert de volgende vergelijking voor de maximale spanning op:

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cos\theta \cdot \rho_{st} \cdot g \cdot L_B^2}{t} \quad (5.3)$$

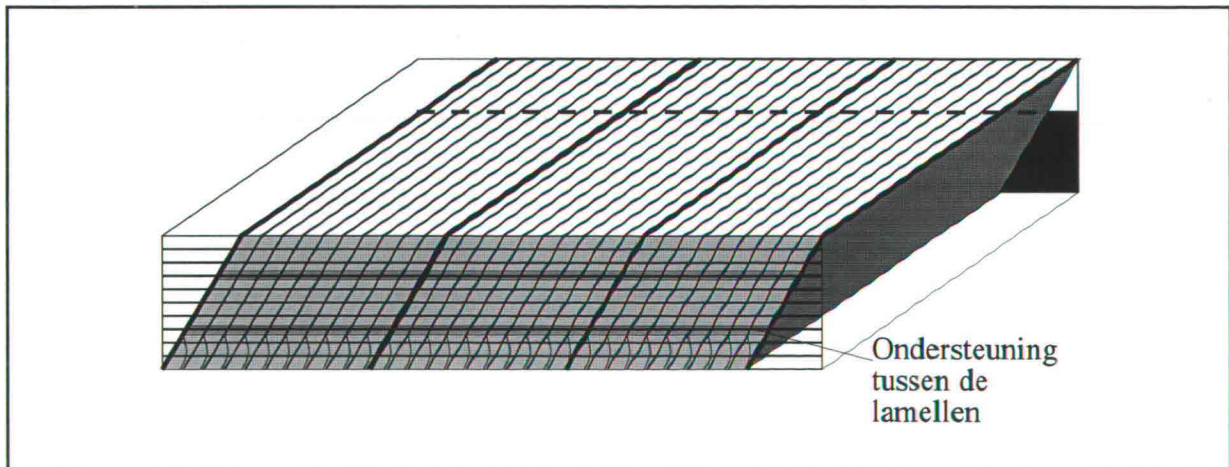
Invullen van de lamelhoek,  $\theta = 60^\circ$ , de soortelijke dichtheid van staal,  $\rho_{st} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , de plaatdikte,  $t = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  en de in de breedte niet ondersteunde afstand,  $L_B^* = 1,7 \text{ m}$ , geeft een maximale spanning,  $\sigma_{\max} = 7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ . Dit is veel kleiner dan de maximaal toelaatbare waarde,  $\sigma_{toel} = 100 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ .

### ■ Maximale uitwijking

Voor de maximale uitwijking geldt de volgende vergelijking:

$$\delta_{\max} = \frac{q \cdot L_B^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad \wedge \quad q = \cos\theta \cdot g \cdot B \cdot t \quad \wedge \quad I = \frac{B \cdot t^3}{12} \quad \Rightarrow \quad \delta_{\max} = \frac{\cos\theta \cdot \rho_{st} \cdot g \cdot L_B^4}{32 \cdot E \cdot t^2} \quad (5.4)$$

Invullen van de eerder beschreven waarden en de waarde voor de elasticiteitsconstante,  $E = 2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  geeft voor de maximale uitwijking,  $\delta_{\max} = 0,08 \text{ m}$ . Dit is een te grote waarde aangezien dit bijna de helft van de lamelafstand ( $D = 0,20 \text{ m}$ ) bedraagt.



afb. 5.2: Aanzicht van lamellenpakket met plaats van de ondersteuning

### Op twee plaatsen in de breedte ondersteunde lamel

De lamellen zullen op twee plaatsen in de breedterichting worden ondersteund, zoals in

afbeeldingen 5.1 en 5.2 wordt aangegeven. Deze ondersteuningselementen zullen tussen de lamellen worden gelast. De lassen kunnen op ongeveer 0,5 m van het uiteinde van de 0,2 m brede doorgangen worden geplaatst. Dit betekent dat de niet ondersteunde lamelbreedte  $L_B^* = 0,7$  m is. Voor deze situatie wordt de maximale spanning en de maximale uitwijking bepaald.

### ■ Maximale spanning

Het invullen van de nieuwe niet ondersteunde lamelbreedte en de overige gelijk gebleven waarden in vergelijking 5.3 geeft een maximale spanning die vanzelfsprekend wederom niet te groot wordt,  $\sigma_{\max} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ .

### ■ Maximale uitwijking

Het opnieuw invullen van vergelijking 5.4 geeft voor de maximale uitwijking,  $\delta_{\max} = 2 \cdot 10^{-3}$  m. Deze uitwijking die optreedt in het midden over de breedte van de lamellen gezien is wel acceptabel.

## 5.2 Ondersteuning in lamellengterichting

In de lengterichting van de lamellen zullen de ondersteuningselementen met een tussenafstand, die ongeveer gelijk is aan de maximale tussenafstand in de breedterichting (0,7 m) worden geplaatst. Ook zullen de ondersteuningselementen op plaatsen ter hoogte van de I-profielen worden geplaatst. De afstand in de lamellengterichting tussen de I-profielen bedraagt 3,2 m. Deze 3,2 m wordt door de ondersteuningselementen in vier gelijke afstanden van 0,8 m verdeelt. Aangenomen wordt dat de lamel, evenals in de breedterichting, kan worden beschouwd als zijnde aan weerszijden ingeklemd.

### ■ Maximale spanning

Invullen van de niet ondersteunde afstand in de lengte richting,  $L_L^* = 0,8$  m in plaats van  $L_B^*$  in vergelijking 5.3, waarbij de overige waarden gelijk blijven, geeft de maximale spanning,  $\sigma_{\max} = 1,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ . Deze waarde is ruimschoots toelaatbaar.

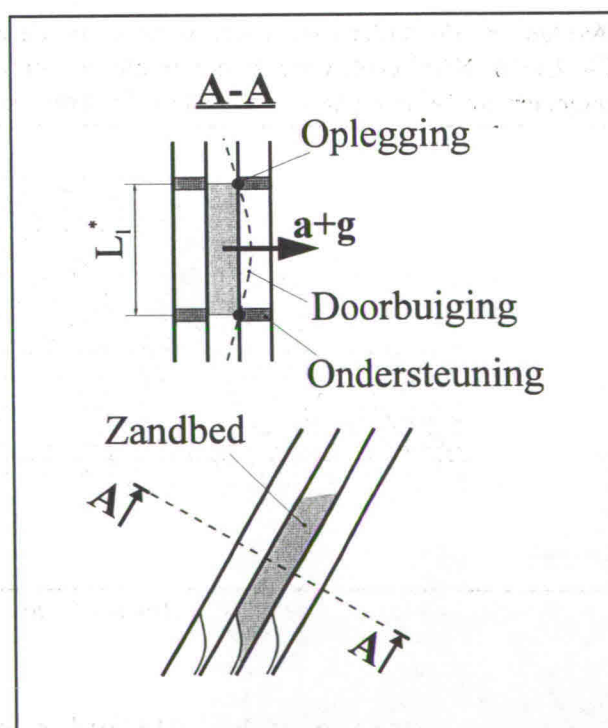
### ■ Maximale uitwijking

Het invullen van vergelijking 5.4 met  $L_L^* = 0,8$ , op de plaats van  $L_B^*$ , geeft een maximale uitwijking in het midden,  $\delta_{\max} = 4$  mm. Dit is ongeveer 20 % van de lamelafstand, echter alle lamellen buigen door dus de doorgangen worden niet kleiner.

### Controle bij ongunstigste situatie

De ongunstigste situatie doet zich voor als een lamelldoorgang met bezonken zand is gevuld en de hier aangrenzende doorgang leeg is terwijl een grote versnelling, (cascovernsnelling en gravitatieversnelling), in de richting van de lege doorgang werkt. Deze situatie wordt geschetst in afbeelding 5.3.

Aangezien dit een extreme situatie is, maakt



afb. 5.3: Lamelldoorbuiging door zandmassa



het niet uit dat de uitwijkingen dusdanig groot worden dat de lamellendoorgang veel vervormt. Dit betekent dat alleen hoeft te worden nagegaan of de toelaatbare spanning niet wordt overschreden.

Aangenomen wordt dat de zwaartekracht en de cascoversnelling ( $a$ ) loodrecht op de lamellen werken. De belasting per lengteafstand loodrecht op de plaat wordt gegeven door vergelijking 5.5:

$$q = (a+g) \cdot B \cdot (\rho_{st} \cdot t + \rho_{bz} \cdot (D-t)) \quad (5.5)$$

Invullen van deze vergelijking in vergelijking 5.1 geeft de maximale spanning in de lamellen.

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(a+g) \cdot (\rho_{st} \cdot t + \rho_{bz} \cdot (D-t)) \cdot L_1^2}{t^2} \quad (5.6)$$

Voor de maximale versnelling door scheepsbewegingen wordt  $2 \text{ m/s}^2$  genomen en voor de tussenafstand in lengterichting,  $L_1 = 0,8 \text{ m}$ . De overige in te vullen waarden zijn dezelfde als eerder in dit hoofdstuk. De maximale spanning wordt  $\sigma_{\max} = 27 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ , dit ligt nog ruim onder de toelaatbare waarde ( $\sigma_{\max} = 27 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ ).

### Verdere lamelverstijving

Ten behoeve van de langsstijfheid, mede in verband met de kans op het optreden van knik door een niet voldoende stijf zijn van de lameloppervlakken, kunnen langs de onderkant en de bovenkant van de lamellen in de lengterichting meer verstijvingen worden aangebracht. Dit kan langs de bovenzijde door een extra profiel langs de rand van de lamellen te bevestigen.

Langs de onderkant van de lamellen wordt de extra benodigde stijfheid verkregen door de strips die de flappen tegen de lamellen aan drukken. De flap bij de modellamellendoorgang (tweede afstudeerrapport, bijlage B) was op een soortgelijke wijze door middel van een op de lamel vastgeschroefde strip aan de lamel bevestigd.

## 5.3 Profielen ter bevestiging en voor de sterkte

In afbeelding 4.3 werd de positie van het lamellenpakket ten opzichte van de dwarsspanten weergegeven. De dwarsspanten bevinden zich om de 3,2 m afstand in de lengterichting van de hopper. Het is gunstig om de meest grove dwarsverstevingstructuur van het lamellenpakket op deze dwarsspanten aan te laten sluiten.

Het lamellenpakket zal worden opgebouwd uit zware I-profielen boven en onder voor de sterkte van het pakket. Deze I-profielen zullen ter plaatse van de dwarsspanten worden geplaatst. In afbeelding 4.3 is te zien dat vier dwarsspanten ter plaatse van het lamellenpakket (grijze vlak) zijn gelegen.

Aan de zijkanten worden de I-profielen in verticale richting verbonden door de verticale verbinding (afb. 5.4). Hierdoor ontstaat een vierkant verstijvingsprofiel bestaande uit steeds twee I-profielen en twee verticale verbindingen.

### Sterkte van de I-profielen

#### ■ Belasting per profiellengte

De I-profielen moeten in de meest ongunstige situatie voldoende sterk zijn. Als meest ongunstige situatie wordt een in hoogterichting voor de helft gevuld lamellenpakket gesteld. Voor de eenvoud wordt het lamellenpakket beschouwd als een rechthoekige pakket van 11 m lang en  $L^* = 7,4 \text{ m}$  breed, met een soortelijke dichtheid  $\rho_{bz} = 2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  (zandgevuuld) ondersteund door

acht dezelfde I-profielen (vier onder en vier boven). Eén I-profiel moet in de lengterichting maximaal  $B^* = 3,2$  m van de halve hoogte van het pakket dragen. Behalve de gravitatieversnelling wordt ook de maximaal aannemelijke versnelling door de scheepsbewegingen in beschouwing genomen. Dit wordt bewerkstelligd door bij de gravitatieversnelling,  $a = 2$  m/s<sup>2</sup> op te tellen.

De kracht per profiellengte door het zand wordt  $q_{\text{zand}} = \frac{1}{2} \cdot B^* \cdot 0,75 \cdot \rho_{\text{bz}} \cdot (a+g) = 29 \cdot 10^3$  N/m. De kracht die het lamellenpakket uitoefent op alle I-profielen is  $11 \cdot 1,7 \cdot (26 \cdot 0,008 + 4 \cdot 0,015) \cdot 7,9 \cdot 10^3 \cdot (2+9,8)$  N =  $466 \cdot 10^3$  N. Dit wordt verdeelt over  $8 \cdot 7,4$  m =  $59,2$  m profiel.

De kracht per lengte eenheid door het lamellenpakket op de dragende constructie uitgeoefend bedraagt  $q_{\text{lamel}} = 8,3 \cdot 10^3$  N/m. De som van de kracht uitgeoefend door het zand en die uitgeoefend door het lamellenpakket is ongeveer  $q = 37 \cdot 10^3$  N/m.

### ■ Profielen beschouwd als opgelegde balken

De I-profielen worden beschouwd als aan weerszijden opgelegde balken, zoals in bijlage B2, (afb. B2) een opgelegde plaat wordt weergegeven. De maximale belasting kan worden berekend met de volgende vergelijking [GERE AND TIMOSHENKO]:

$$\sigma_{\text{max}} < \frac{M_b}{W_b} \quad \wedge \quad M_b = \frac{q \cdot L}{4} \quad \Rightarrow \quad W_b > \frac{q \cdot L}{4 \cdot \sigma_{\text{max}}} \quad (5.7)$$

Het buigende moment in de balk,  $M_b$ , en dus de trekspanning in het buitenste deel van de I-profielen is in het midden het grootst. De maximaal toelaatbare spanning in de I-profielen wordt gesteld op minder dan een derde van de treksterkte van staal  $\sigma_{\text{toel}} = 100 \cdot 10^6$  N/m<sup>2</sup>. Dit betekent dat de buigstijfheid,  $W_b$ , groter moet zijn dan  $6,8 \cdot 10^4$  m<sup>3</sup>.

### ■ Keuze van de I-profielen

Uit tabel E-1, Axis 1-1, GERE AND TIMOSHENKO, wordt een geschikt I-profiel gekozen met een voldoende groot weerstandsmoment,  $S > 680$  cm<sup>3</sup>. Gekozen wordt voor een I-profiel van 305 mm hoog en 165 mm breed (305 x 165), dat een weerstandsmoment tegen buiging  $S = W_b = 752$  cm<sup>3</sup> heeft.

### Stijfheid van de I-profielen

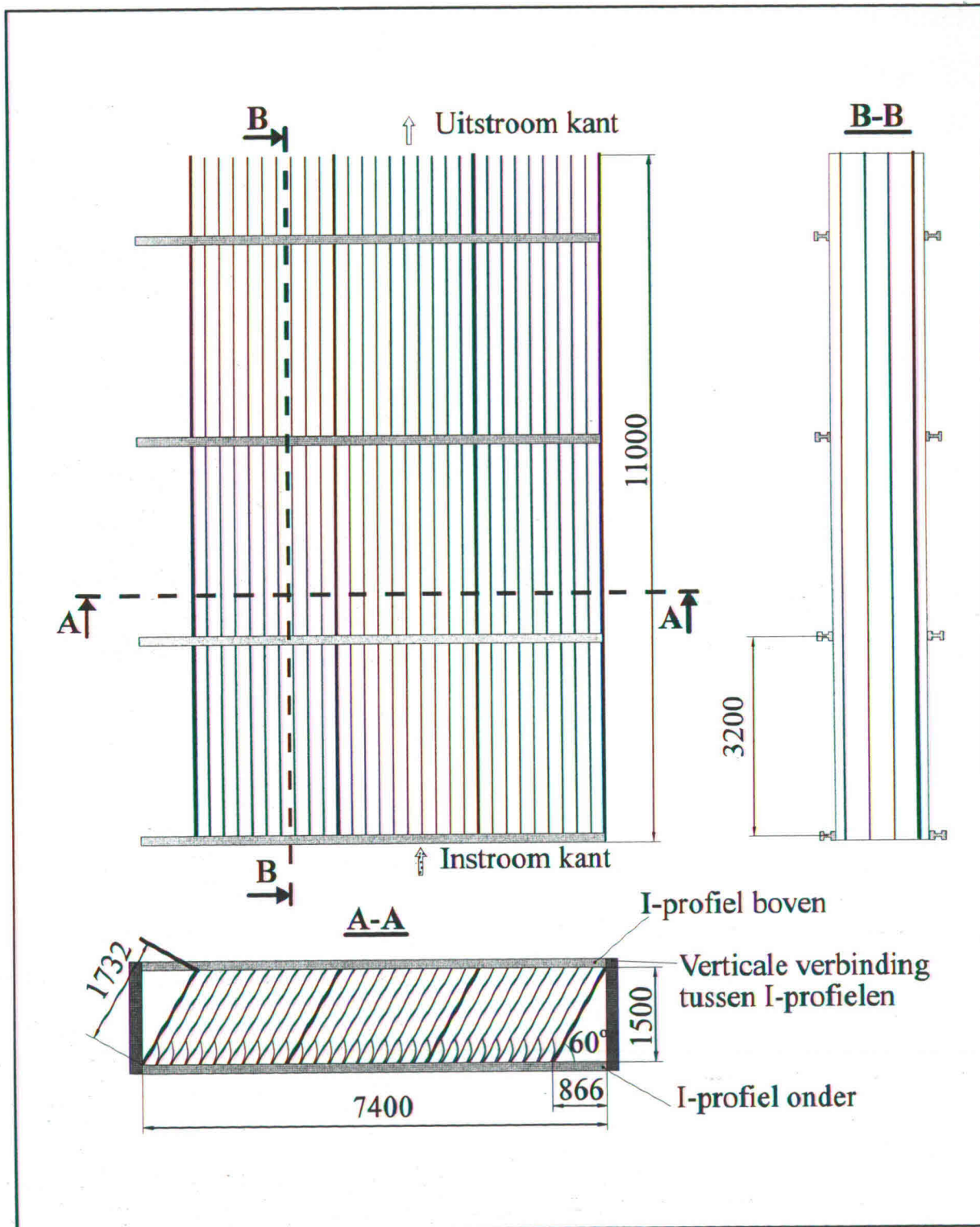
De maximale doorbuiging,  $\delta_{\text{max}}$ , wordt bij het 305 x 165 I-profiel berekend met behulp van het kwadratische oppervlakte moment,  $I = 11686$  cm<sup>4</sup> =  $1,17 \cdot 10^{-4}$  m<sup>4</sup>, de elasticiteitsconstante,  $E = 2,1 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup> en de eerder in deze paragraaf berekende  $q = 37 \cdot 10^3$  N/m en  $L^* = 7,4$  m. Deze waarden worden in de onderstaande vergelijking, die eveneens in bijlage B2 staat, ingevuld.

$$\delta_{\text{max}} = \frac{5 \cdot q \cdot L^{*4}}{384 \cdot E \cdot I} \quad (5.8)$$

De maximale doorbuiging wordt veel te groot, ongeveer 8 m. Als de I-profielen in het midden worden ondersteund bedraagt de door de I-profielen te overbruggen niet ondersteunde afstand minder dan 3,7 m. De onderste I-profielen moeten dan via een verticale balk steunen op de dwarsspanten in de kippekooi. De bovenste moeten worden opgehangen aan het dak van de hopper. Invulling van  $L^* = 3,7$  m en dezelfde waarde als hiervoor in vergelijking 5.8, geeft een maximale doorbuiging van 0,37 m. Dit is nog te veel over een lengte van 3,7 m.

De I-profielen zullen verder moeten worden verstijfd door de opleggingen meer ingeklemd uit te voeren en eventueel door meer ondersteuning aan te brengen.





afb. 5.4: Lamellenpakket met I-profielen

## 6 Economische analyse

Het is interessant een lamellenpakket op een sleephopperzuiger te bouwen als het economisch een verbetering oplevert. Door de betere bezinking zal de laadfase van de hoppercyclus korter worden, echter door de massa van het lamellenpakket kan minder materiaal worden vervoerd. Als de tijdwinst tijdens het laden groter is dan het tijdverlies tijdens het varen over een groot aantal hoppercycli, dan kan het op de lange termijn gunstig zijn om een lamellenbezinker toe te passen.

De totale verbetering van de laadcyclus moet tenslotte opwegen tegen de kosten van het inbouwen, de te verwachten complicaties (bijvoorbeeld verstopping) en het onderhoud met betrekking tot het lamellenpakket.

In dit hoofdstuk wordt de situatie sterk vereenvoudigd weergegeven. Uit de tijdwinst tijdens het laden en het tijdverlies door de afgenomen opslagcapaciteit bij de diverse te transporteren materialen, wordt bepaald of het toepassen van het lamellenpakket economisch gunstig is.

### 6.1 Afname opslagcapaciteit tijdens het varen

De massa van het lamellenpakket wordt bepaald uit de som van de massa van de lamellen en die van de I-profielen. De overige massa's, de ondersteuning en de flappen, worden als verwaarloosbaar klein beschouwd.

#### ■ Lamellen

De massa van de lamellen wordt berekend door het volume van de lamellen te vermenigvuldigen met de soortelijke massa van staal:  $11 \text{ m} \cdot 1,7 \text{ m} \cdot (26 \cdot 0,008 \text{ m} + 4 \cdot 0,015 \text{ m}) \cdot 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \approx 40 \cdot 10^3 \text{ kg}$ .

#### ■ I-profielen

De massa van de I-profielen wordt bepaald aan de hand van de massa per lengte eenheid van de I-profielen (tabel met I-profielen, vorige hoofdstuk. Deze totale massa bedraagt:  $8 \cdot 7,4 \text{ m} \cdot 54 \text{ kg/m} = 2,8 \cdot 10^3 \text{ kg}$ .

### Afname van de laadcapaciteit van de hopper

De totale massa van het lamellenpakket bedraagt ruim de massa van de som van de lamellen en de I-profielen,  $45 \cdot 10^3 \text{ kg}$ . Dit betekent dat de laadcapaciteit uitgaande van bezonken zand,  $\rho_{bz} = 1,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , afneemt met ongeveer  $24 \text{ m}^3$ .

### 6.2 Toename van het laadrendement

Het laadrendement is het quotiënt van de toename per tijdseenheid van de hoeveelheid materiaal in de hopper en de hoeveelheid materiaal die per tijdseenheid in de hopper stroomt.

Bij de proeven uit de tweede afstudeeropdracht met de lamellendoorgangen, was de situatie voor de lamellenbezinker, wat betreft de gestelde criteria, uitschuring en Campmodelbezinking, zeer ideaal. Het overvloeiverlies was dan ook niet meetbaar klein.

Voor een systeem op ware grootte is het volledig voldoen aan deze twee criteria niet haalbaar. Het ontworpen lamellensysteem voldoet alleen aan het Campmodel en de uitschuursnelheid wordt met ruim een factor twee overschreden. In dit hoofdstuk zullen, ten behoeve van het enigszins kunnen voorspellen van het economische nut van het inbouwen van het lamellenpakket in de



hopper van de Geopotes 14, aannames worden gedaan omtrent het laadrendement bij bepaalde soorten te transporteren baggermateriaal.

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de zandsoorten, die de Geopotes 14 waarschijnlijk vervoert.

Tabel D.1 in bijlage D geeft voor verschillende gemiddelde korreldiameters de overvloeiverliezen in de praktijk met het huidige overvloeisysteem.

### Rendementsverbetering bij verschillende soorten materiaal

Materiaal		Laadrendement in %	
Benaming	Korreldiameter in $\mu\text{m}$	Huidig	Lamellen
Grind	> 2000	100	100
Grof zand	600 tot 2000	100	100
Medium zand	200 tot 600	95	99
Fijn zand	60 tot 200	50	75
Slib	< 60	0	0

tab. 6.1: Verwacht laadrendement bij verschillende soorten materiaal voor de Geopotes 14

Uit tabel 6.1 kan worden afgelezen dat alleen bij het laden van medium en fijn zand een voordelige situatie ontstaat.

## 6.3 Rendementsverbetering van de hoppercycli

### Medium zand

Aangenomen wordt dat 1/3 van de cyclus wordt geladen en de overige 2/3 van de cyclus wordt gevaren. Door de lamellenbezinker wordt volgens tabel 6.1 een laadrendementstoename van 4 % verwacht. Dit betekent dat 4/3 % winst wordt behaald op het beladen tijdens een cyclus.

Echter tijdens het varen kan circa 24 m<sup>3</sup> minder zand worden vervoerd, dit betekent uitgaande van een totale hoeveelheid zand in de huidige situatie van 5000 m<sup>3</sup>, dat 1/2 % minder zand kan worden vervoerd. Dit betekent dat gedurende 2/3 van de cyclus een 1/2 % nadeel ontstaat, wat over de hele cyclus 1/3 % verlies geeft wat betreft de afname van de hoppercapaciteit.

Door het aftrekken van het verlies door afname van de hoppercapaciteit, van de winst door het snellere laden, bedraagt de rendementsverbetering over de hele cyclus 1 %.

### Fijn zand

Bij fijn zand wordt aangenomen dat de laadtijd en de vaartijd beiden de helft van de cyclustijd bedragen. Wederom wordt uit de waarden voor het laadrendement uit tabel 6.1 de winst door het snellere laden bepaald.

In de huidige situatie is het laadrendement 50 %, dit betekent dat gemiddeld van de X m<sup>3</sup> zand die per tijdseenheid wordt geladen, X/2 m<sup>3</sup>, daadwerkelijk in de hopper achterblijft. Wordt het lamellenbezinkersysteem toegepast dan wordt verwacht dat het laadrendement 75 % bedraagt. Dit betekent dat van iedere X m<sup>3</sup> die per tijdseenheid wordt geladen, gemiddeld 3·X/4 in de hopper achterblijft. Als het totale hoppervolume, dat wordt gevuld wordt gesteld op Y, dan duurt dat in de

huidige situatie,  $2/1 \cdot Y/X$  en met de lamellenbezinker,  $4/3 \cdot Y/X$ . Het verschil in laadtijd tussen de huidige situatie en de situatie met de lamellenbezinker bedraagt  $1/3$  van de huidige situatie. Dit betekent dat sprake is van 33 % tijdswinst gedurende het laden dat de helft van de cyclus in beslag neemt. Tijdens het laden is de winst op de totale cyclus dan 16,5 %.

Gedurende het varen wordt de huidige hopperinhoud bij fijn zand gesteld op 4200 m<sup>3</sup> zand, wederom kan 24 m<sup>3</sup> minder zand worden vervoerd. Dit bedraagt 0,6 % van de totale hoeveelheid zand en gedurende de hele cyclus  $1/2 \cdot 0,6 \% = 0,3 \%$ .

Gedurende de hele cyclus wordt bij fijn zand een rendementsverbetering behaald van ruim 16 %.

### Grind, grof zand en slib

Bij grind, grof zand en slib wordt geen verbetering verkregen door het lamellenbezinkstelsel. Dit betekent dat plaatsing van het lamellenpakket de cyclustijd juist nadelig zal beïnvloeden, doordat minder zand kan worden vervoerd. Aangenomen dat de laadtijd de helft van de cyclustijd bedraagt en dat evenals bij het medium zand een 1/2 % minder zand kan worden vervoerd. Dit geeft een rendementsverlies per cyclus van 1/4 %.

Materiaal	Weken	Tijdswinst in	
		%	weken
Grind	2	- 1/4	- 0,005
Grof zand	3	- 1/4	- 0,0075
Medium zand	13	1	0,13
Fijn zand	8	16	1,28
Slib	12	- 1/4	- 0,03

tab.6.2: Verwacht werk en berekende tijdswinst door lamellenbezinker in één jaar voor Geopotes 14

### Tijd waarin lamellenpakket zich terugverdient

Tabel 6.2 is gebaseerd op een werking van de Geopotes 14 van 38 weken per jaar. Het aantal weken dat een bepaald soort materiaal wordt getransporteerd en de bijbehorende tijdswinst wordt tevens in de tabel aangegeven. In de meest rechtse kolom staat de tijdswinst in weken voor de diverse materialen. De som van deze kolom, 1,4 weken, is de tijdswinst per jaar.

Aannemende dat de Geopotes 14 ongeveer een half miljoen gulden per week kost, levert dit een besparing van 0,7 miljoen gulden per jaar op. Als de kosten voor de constructie en het inbouwen van het lamellenpakket wordt geschat op fl. 15,- per kg staal (bijlage A1), dan kost het lamellenpakket 0,675 miljoen gulden. Dit betekent dat het lamellenpakket zich precies in één jaar terugverdient.

Is dit incl. kosten - nu schep  
tijdes inbouw?



## Conclusies

De terugverdiëntijd is berekend na het doen van twee aannames voor de Geopotes 14, waarop het lamellenpakket moet komen. De eerste aanname betreft de toename van het laadrendement bij de diverse soorten te baggeren materiaal. De juistheid van deze eerste aanname zal nog moeten blijken uit verdere proeven op de Merwelanden en eventueel later in de praktijk. De tweede aanname is een schatting van het aantal weken dat de diverse materiaalsoorten worden gebaggerd.

Volgens deze aannames verdient het lamellenpakket zich in ongeveer één jaar terug. Hierbij wordt geen rekening gehouden met onderhoudskosten aan het lamellenpakket. Complicaties door verstopping kunnen het functioneren van de slephopperzuiger in gevaar brengen.

Het huidige overvloeisysteem hoeft voor het lamellenbezinkpakket niet ingrijpend te worden aangepast. Als het lamellenbezinkstelsel niet naar verwachting blijkt te werken, dan kan het redelijk eenvoudig worden verwijderd.

Door de gesloten hopper van de Geopotes 14 worden de inbouw, bestudering van lamellenbezinkprocessen en eventuele wijzigingen aan het lamellenpakket zeer bemoeilijkt. Waarschijnlijk kan het inbouwen alleen gebeuren tijdens het dokken.

# Referenties

GERE AND TIMOSHENKO, *Mechanics of materials*, PWS Engineering, Boston, Massachusetts, 1984.

HEMEL J.N.J. VAN AND NIEULANT J., *India Hong Kong Fieldexcursion, dispuut Grondverzet, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1992.*

HUISMAN L., *Sedimentation and flotation mechanical filtration*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1973.

MEEUWISSEN M.J.P., *Stagerapport: Modelbeunbezinking, variatie van debiet en inlaatsysteem*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1992.

MEEUWISSEN M.J.P., *Eerste afstudeerrapport: Sedimentatiesystemen voor sleephopperzuigers 1*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1993.

MEEUWISSEN M.J.P., *Tweede afstudeerrapport: Sedimentatiesystemen voor sleephopperzuigers 2*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1993.

VELDEN E.T.J.M. VAN DER, *Coastal Engineering, f7*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1990

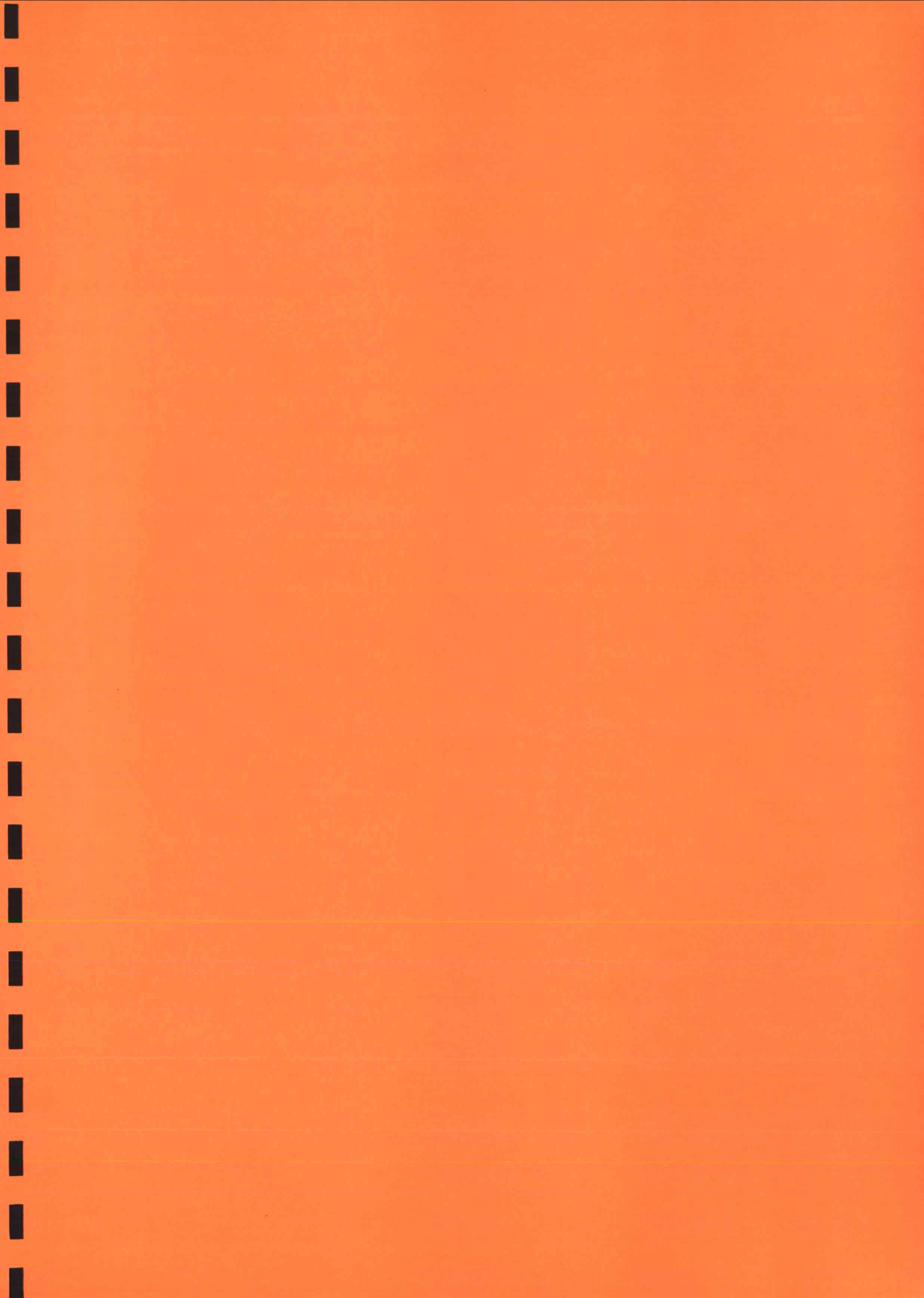


# Symbolen

$\delta$	m	uitwijking	
$\theta$	°	lamelhoek	60°
$\rho_{bz}$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid bezonken zand	2,0·10 <sup>3</sup>
$\rho_m$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid mengsel	
$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid water	1,0·10 <sup>3</sup>
$\rho_{st}$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid staal	7,9·10 <sup>3</sup>
$\rho_z$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid kwartszand	2,65·10 <sup>3</sup>
$\sigma$	N/m <sup>2</sup>	spanning	
$\sigma_{toel}$	N/m <sup>2</sup>	spanning maximaal toelaatbaar in staal	100·10 <sup>6</sup>
$\tau_0$	N/m <sup>2</sup>	schuifspanning wand	
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische viscositeit	
$a$	m/s <sup>2</sup>	maximaal aangenomen versnelling casco	2
$A$	m <sup>2</sup>	oppervlak	
$B$	m	lamelbreedte	
$C$	√m/s	Chezy coëfficiënt	
$D$	m	lamelafstand	
$d_{50}$	μm	korreldiameter	
$E$	N/m <sup>2</sup>	elasticiteitsconstante staal	2,1·10 <sup>9</sup>
$f_0$		Darcy-Weisbach coëfficiënt	0,02
$g$	m/s <sup>2</sup>	gravitatie versnelling	9,8
$h$	m	hoogte verticaal	
$I$	m <sup>4</sup>	kwadratisch oppervlakte moment	
$L$	m	lamellengte	
$m$	1/s	constante Rehbockstuw	1,08
$M_b$	N·m	buigend moment	
$n$		lamellen aantal	
$p$	N/m <sup>2</sup>	druk	
$q$	N/m	belasting per lengte eenheid	
$Q$	m <sup>3</sup> /s	debiet	
$Re$		Reynolds getal	
$R_h$	m	straal hydraulisch	
$S$	m <sup>3</sup>	buigweerstand	
$t$	m	dikte plaat	
$u$	m/s	snelheid stroom	
$V$	m/s	snelheid	
$w_0$	m/s	korrelsnelheid ongehinderde val	
$W_b$	m <sup>3</sup>	buigweerstand	

## Indices

B	Lamelbreedte richting	L	Lamellengte richting
d	doorgang richting	*	gedeelte van afstand





## **Bijlage A: Keuze prototype schip**

# **Inhoud**

<b>A1</b>	<b>Gesprek met J. de Blaey, TD nieuwbouw</b>	<b>A2</b>
<b>A2</b>	<b>Gesprek met P.F. Vos, TD materieel dienst</b>	<b>A4</b>

## A1 Gesprek met J. de Blaey, TD nieuwbouw, 13 oktober '93

### Voordeel van de Geopotes 14 en de HAM 309

Beide sleephopperzuigers bevinden zich op een locatie dichtbij. De Geopotes 14 bevindt zich momenteel in Hamburg en gaat vervolgens naar de Nieuw Waterweg. De HAM 309 bevindt zich nu op de Elbe.

### Voordelen Geopotes 14 ten opzichte van HAM 309

#### HAM 309 kan relatief weinig lading meenemen

De Geopotes 14 heeft een hopperinhoud van  $6900 \text{ m}^3$ , dit is anderhalf keer zo groot als de hopperinhoud van de HAM 309, die  $4600 \text{ m}^3$  bedraagt. Relatief ten opzichte van de nuttige lading zal het gewicht van het lamellenpakket bij de Geopotes 14 kleiner zijn.

De gemiddelde mengseldichtheid in de hopper bedroeg achtereenvolgens (bij 60 % voorraad):

$1,45 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ :	na nieuwbouw
$1,40 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ :	op dit moment
$1,37 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ :	na opbouw van een booster, met een massa van 100 ton in de nabije toekomst

#### Overvloeisysteem heeft bij de HAM 309 drie nadelen:

- Een groot nadeel van de hopper van de HAM 309 ten opzichte van de Geopotes 14 is de loze ruimte achter de overvloei omdat de overvloei op ruim twee meter van het einde van de hopper is geplaatst. Het verlies aan hoppervolume bedraagt ongeveer  $2 \cdot 11 \cdot 8 \text{ m}^3 = 176 \text{ m}^3$ .
- De rechte overvloei van de Geopotes 14 is gunstig, hierdoor zijn de lamellen hierop eenvoudiger aan te sluiten. Dit in tegenstelling tot de ongunstige ronde overvloei van de HAM 309.
- Bij de Geopotes 14 kan de niveauregeling in de lamellendoorgangen geschieden door middel van de kleppen die nu ook het overvloeiniveau regelen. Eventueel kunnen de cilinders die de kleppen sturen nauwkeuriger worden gemaakt.

#### Afwezigheid van leiding dwars door hopper

In de hopper van de HAM 309 voor de overvloei, richting middenzijde van de hopper, op de plaats waar het lamellenpakket zou moeten komen, loopt een leiding dwars door de hopper.

### Nadelen Geopotes 14 ten opzichte van HAM 309

De gesloten hopper is het grote nadeel van de Geopotes 14.

- Inbouwprobleem: Bovenkant van de hopper is eventueel open te snijden zodat de lamellen naar



binnen kunnen. Verder zal een steigerconstructie in de hopper moeten worden opgesteld om het installeren mogelijk te maken.

- Onderhoud: Voor onderhoud geldt dat het moeilijk is om bij de installatie te komen.
- Het bezinkproces is niet goed waarneembaar: Dit betekent dat ten behoeve van onderzoek de lamellen enkel vanuit een tweetal luiken boven in de afdichting kunnen worden bekeken. Verder is het moeilijk om bij eventuele uitval het lamellenpakket te bereiken, bijvoorbeeld in verband met verstopping door grote delen.

## Overige opmerkingen

- Lamellenpakket in breedterichting bij beide schepen tussen de klepstangen, die zich op ongeveer 7 m afstand van elkaar bevinden, plaatsen.
- De huidige overvloeiverliezen bedragen 10 tot 60 %.
- Mogelijk kan het jetsysteem dat bij het lossen en bij verstopping de doorgangen door kan spuiten in de balken die het lamellenpakket sterkte geven worden geplaatst.
- De kosten van het lamellenpakket zijn zeer globaal te berekenen met de vuistregel: fl. 15,- per kg staal. Uitgaande van lameldikten van 5 mm, 33 platen, een lamelbreedte van 1,5 m en een lamellengte 10 m bij verwaarlozing van overige massa's van constructie delen en een dichtheid van staal van  $8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  gaat dit pakket circa fl. 300.000,- kosten.
- Vergroting van de doorgang van de lamellendoorgangen richting uitstroomzijde, voorkomt verstopping bijvoorbeeld door inklemming als gevolg van korrelspanningen.
- De huidige gegevens van een sleehopperzuiger, die van belang zijn ten behoeve van het ontwerp van het lamellenbezinkstelsel, onder andere de hopperafmetingen en positie van obstakels, zijn te vinden in de tekening: general arrangement (after construction).

## Conclusie

De Geopotes 14 is aan te bevelen ten opzichte van de HAM 309 vanwege het grote aantal nadelen die hoge kosten met zich mee brengen bij de HAM 309. Echter de gesloten hopper van de Geopotes 14 zal de inbouw en de waarnemingen aan het bezinkprocessen niet eenvoudig maken.

## A2 Gesprek met P.F. Vos, TD materieel dienst, 14 oktober '93

### Voordelen Geopotes 14

#### Overvloei

- De rechte overvloei vereenvoudigt de aansluiting op het lamellenpakket.
- Aan het uiteinde van de hopper bevindt zich de overvloei, zodat minder hoppervolumeverlies optreedt na plaatsing van de lamellenbezinker.
- De niveauregeling in de hopper kan geschieden met behulp van de regelkleppen, die hier nu ook voor dienen. Bij de HAM 309 zou het lamellenpakket met overvloei of alleen de overvloei neerwaarts moeten bewegen. Als zowel het lamellenpakket als de overvloei neerwaarts moet bewegen vormt de ophanging van het lamellenpakket in verband van het gewicht van de lamellen en het zand dat zich hierin bevindt een probleem. Als alleen de overvloei neerwaarts beweegt, dan vormt de aansluiting van het lamellenpakket hierop een probleem.

Een alternatief is het overvloei-systeem volledig te wijzigen en een soort rechte overvloei in te bouwen, hetgeen een zeer kostbaar en ingrijpend alternatief is. Blijkt het lamellenbezink-systeem niet aan de verwachtingen te voldoen, dan kan het oude systeem niet worden hersteld.

### Nadelen Geopotes 14

#### Gesloten hopper

- Inbouwproblemen: Het inbouwen is waarschijnlijk alleen mogelijk bij het dokken. Gerealiseerd moet worden dat weinig tijd beschikbaar is gedurende dit dokken.

Een steigerconstructie moet in de hopper worden opgesteld om de lamellen te installeren. Het in elkaar zetten van het hele lamellenpakket is niet mogelijk omdat anders te grote gaten in de hopper moeten worden gemaakt. Eventueel kunnen de onderdelen bij het dokken door de bodemdeuren in de hopper worden geplaatst. De afmetingen van de bodemdeuren zijn 4 bij 5 m. De bodemdeuren bevinden zich bij het dokken op circa een meter van de bodem van het dok. Het dokken voor groot onderhoud gebeurt in principe twee maal per vijf jaar en bij schade.

Een alternatief om de lamellen en andere constructie delen van het lamellenpakket in de hopper te krijgen is door middel van het snijden van sleuven in het dek. Het gesloten zijn van de hopper is van zeer groot belang voor de scheepsterkte en zal na het inbouwen van het lamellenpakket moeten worden hersteld.

- Onderhoudsproblemen: nauwelijks te repareren als niet wordt gedekt. Vooral door het gesloten zijn van de hopper is het lamellenpakket moeilijk bereikbaar.

- Het niet zichtbaar zijn van het bezinkproces in het lamellenpakket vormt een probleem in verband met verstopping en waarnemingen van het proces in de lamellendoorgangen.

#### Overvloei-kleppen

De kleppen die de overvloei openen steken 1½ m naar binnen de hopper in bij volledige opening, waardoor de lamellen op die plaatsen slechts 9,5 m in plaats van 11 m lang kunnen zijn. Dit brengt enig hoppervolumeverlies met zich mee, maar zal minder verlies opleveren dan bij het toepassen van het lamellenpakket in combinatie met de huidige ronde overvloei van de HAM 309.



## Overige opmerkingen

■ De Geopotes 14 is op dit moment geschikt voor een gemiddelde dichtheid van het mengsel in de hopper van  $\rho = 1,67 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

■ De HAM 309 en de Geopotes 14 zijn beiden niet erg geschikt voor het inbouwen van een prototype lamellenbezinker. Een alternatief is de sleephopper Heron met een hoppervolume van  $1000 \text{ m}^3$ . Echter dit baggerwerktuig heeft net als de HAM 309 een ronde overvloei.

Een andere mogelijkheid is een schip in aanbouw zoals de HAM 311. Helaas heeft ook dit schip een ronde overvloei die nog meer dan bij de HAM 309 in het midden van de hopper is gepositioneerd.

## Conclusie

De Geopotes 14 en de HAM 309 zijn beiden niet uitermate geschikt voor plaatsing van prototype van de lamellenbezinker aan boord. Bij de Geopotes 14 vormt de gesloten hopper een groot probleem bij het inbouwen. Maar de hopper van dit baggerwerktuig hoeft niet ingrijpend te worden veranderd.

Het inbouwen van het prototype systeem in de hopper van de HAM 309 geeft veel problemen omdat de overvloei voornamelijk wat betreft locatie en vorm ongunstig is. De kosten die het ombouwen voor het verkrijgen van een optimale combinatie van overvloeiensysteem met lamellenpakket met zich mee brengt zullen hierdoor hoog oplopen.

Aangezien geen andere sleephopperzuigers geschikt zijn voor inbouw van het prototype van het lamellenbezinkpakket is de Geopotes 14 toch het meest aan te bevelen. Inbouw kan waarschijnlijk alleen plaatsvinden tijdens langdurig dokken.

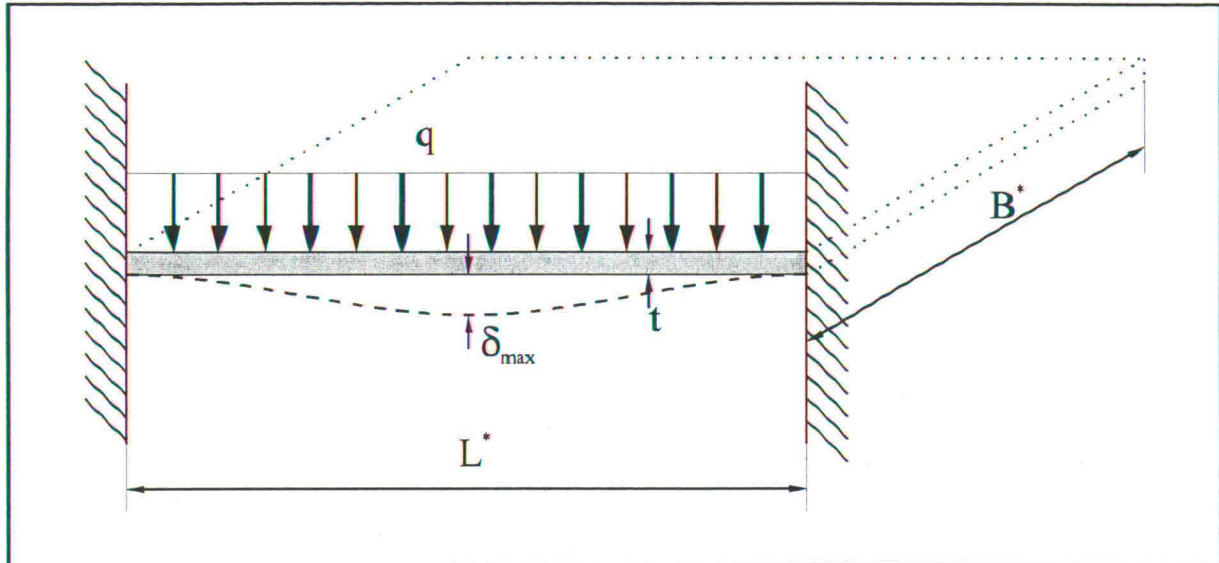
## **Bijlage B: Stijfheid en sterkte van platen**

# **Inhoud**

<b>B1 Langs twee einden ingeklemde plaat</b>	<b>B2</b>
<b>B2 Langs twee einden opgelegde plaat</b>	<b>B4</b>

## B1 Langs twee einden ingeklemde plaat

De vergelijkingen voor de maximale uitwijking en de maximale spanning van een langs twee einden ingeklemde plaat is af te leiden uit de literatuur [GERE AND TIMOSHENKO, EXAMPLE 8.3-6], waar de inklemming voor een balk in voorkomt. Afbeelding B1 geeft de situatie van de ingeklemde plaat weer.



afb. B1: Langs twee einden ingeklemde plaat

### Maximale uitwijking

De maximale uitwijking, in het midden gelegen, is met de volgende vergelijking te berekenen.

$$\delta_{\max} = \frac{q \cdot L^{*4}}{384 \cdot E \cdot I} \quad (\text{B1})$$

Voor het kwadratische oppervlaktemoment van de rechthoekige dwarsdoorsnede geldt het volgende.

$$I = \frac{B^* \cdot t^3}{12} \quad (\text{B2})$$

Door het invullen van het kwadratische oppervlaktemoment, vergelijking B2 in B1, wordt de volgende vergelijking voor de maximale uitwijking verkregen.

$$\delta_{\max} = \frac{1}{32} \cdot \frac{q \cdot L^{*4}}{E \cdot B^* \cdot t^3} \quad (\text{B3})$$



### Maximale spanning

De maximale spanning die aan de rand van de plaat optreedt is te berekenen uit het quotiënt van het buigende moment,  $M_b$ , en het weerstandsmoment tegen buiging,  $W_b$ .

$$\sigma_{\max} = \frac{M_b}{W_b} \quad (\text{B4})$$

Het buigende moment en het weerstandsmoment zijn als volgt te schrijven.

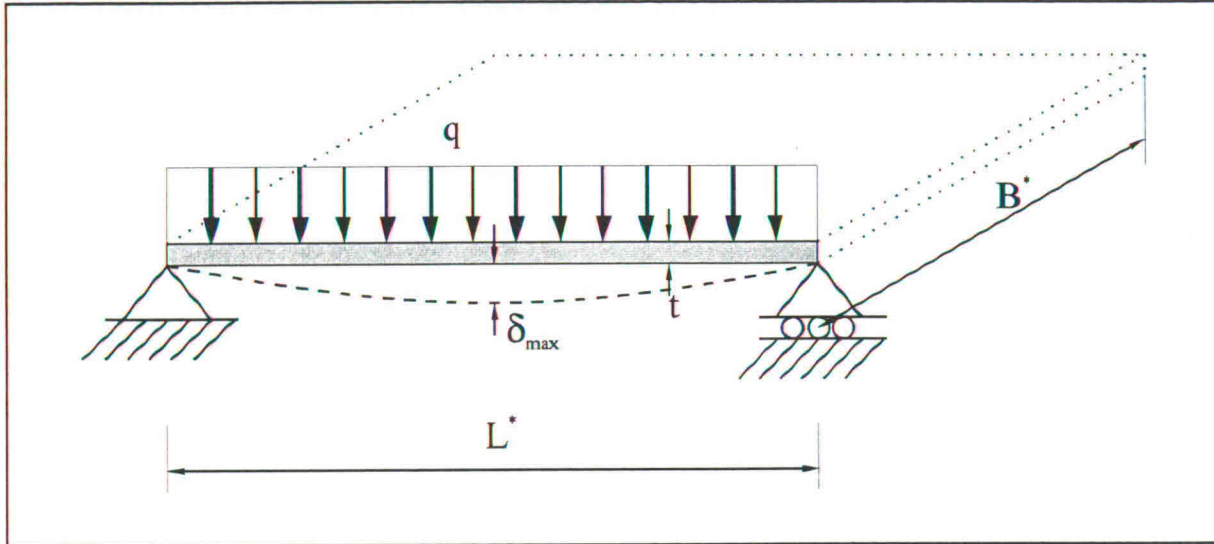
$$M_b = \frac{q \cdot L^2}{12} \quad \wedge \quad W_b = \frac{B \cdot t^2}{6} \quad (\text{B5})$$

Na invulling van vergelijkingen B5 in B4 wordt het volgende voor de maximale spanning verkregen.

$$\sigma_{\max} = \frac{1 \cdot q \cdot L^2}{2 \cdot B \cdot t^2} \quad (\text{B6})$$

## B2 Langs twee einden opgelegde plaat

De vergelijking voor de maximale uitwijking en de maximale spanning van een langs twee einden opgelegde plaat wordt evenals bij de langs twee einden ingeklemde plaat afgeleid uit vergelijkingen uit de literatuur [GERE AND TIMOSHENKO: 356]. In afbeelding B2 wordt de aan weerszijde ingeklemde plaat weergegeven.



afb. B2: Langs twee einden opgelegde plaat

### Maximale uitwijking

De maximale uitwijking is wederom in het midden gelegen en is te berekenen met de volgende vergelijking.

$$\delta_{\max} = \frac{5 q \cdot L^{*4}}{384 \cdot E I} \quad (\text{B7})$$

Het kwadratische oppervlaktemoment, vergelijking B2 invullen geeft de volgende vergelijking voor de maximale uitwijking.

$$\delta_{\max} = \frac{5}{32} \cdot \frac{q \cdot L^{*4}}{E \cdot B^* \cdot t^3} \quad (\text{B8})$$

### Maximale spanning

Het buigende moment, in het midden van de plaat waar de spanning zijn maximale waarde heeft, is in deze situatie met onderstaande vergelijking te berekenen.

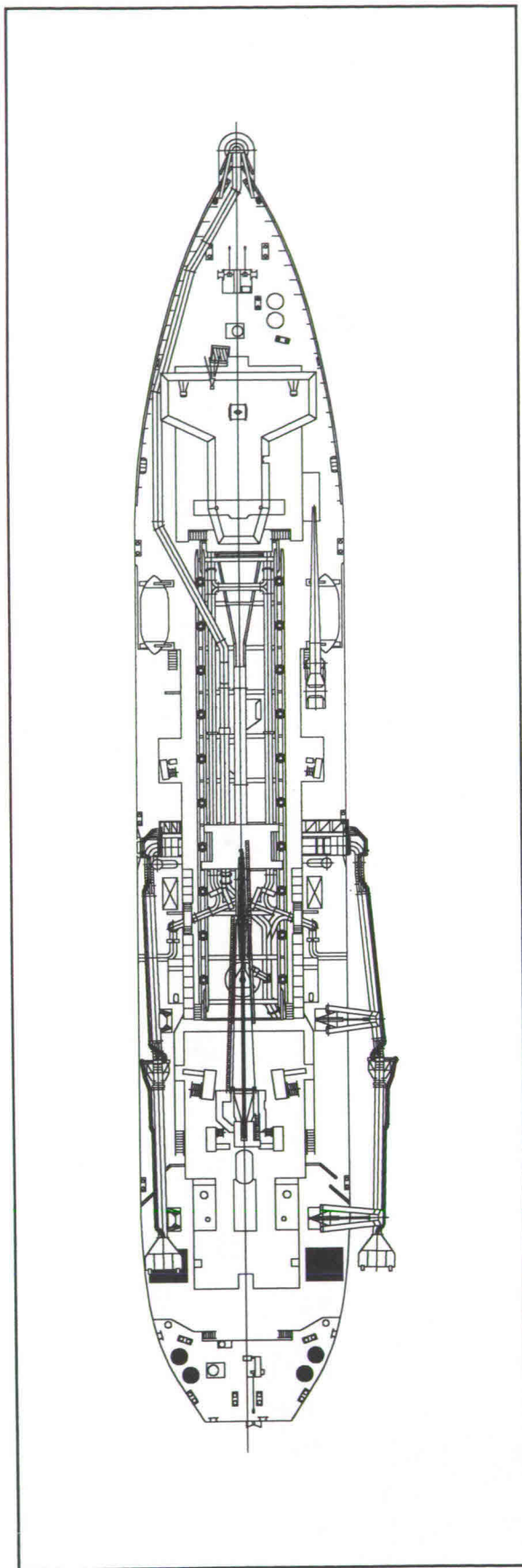
$$M_b = \frac{q \cdot L}{4} \quad (\text{B9})$$

Het invullen van dit buigende moment en het gelijk gebleven weerstandsmoment,  $W_b$ , uit vergelijking B5 geeft de volgende vergelijking voor de maximale spanning.

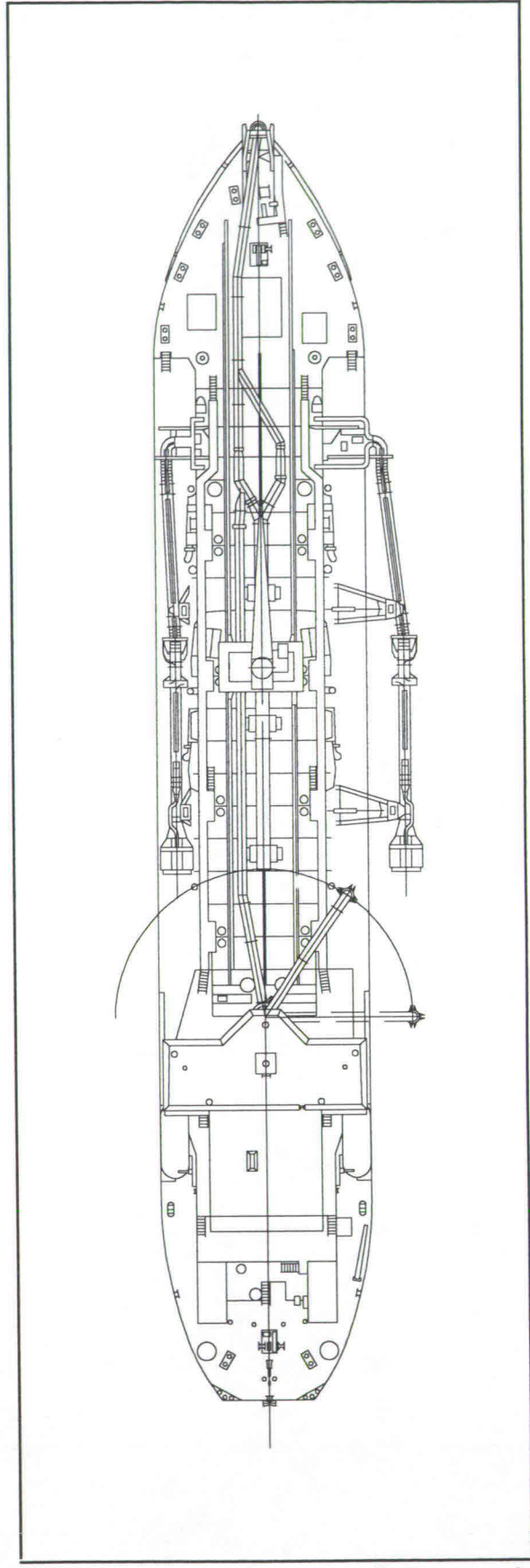
$$\sigma_{\max} = \frac{3 \cdot q \cdot L^2}{4 \cdot B \cdot t^2} \quad (\text{B10})$$



# Bijlage C: Bovenaanzicht HAM 309 en Geopotes 14



afb. C1: HAM 309



afb. C2: Geopotes 14

## Bijlage D: Overvloeiverliezen Geopotes 14 in praktijk

Grondsoort				Productie in m <sup>3</sup> /min.		Overvloeiverlies in %
d <sub>50</sub> in μm	C <sub>u</sub> = d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	d <sub>50</sub>		Zuigen	Laden	
		< 63 μm	> 2000 μm			
140	1,5 - 1,7	0,2 %	0,0 %	82	52	30
180 - 200	1,5 - 1,7	0,2 - 0,5 %	0,2 - 0,5 %	97	83	10
500 - 650	2,0 - 2,2	0,5 %	10 - 15 %	110	110	0
500 - 650	3,5 - 3,7	0,5 %	15 - 20 %	100	100	0

tab.D.1: Praktijkwaarden van de overvloeiverliezen van de Geopotes 14

De aanduidingen d<sub>10</sub> en d<sub>60</sub> in tabl D.1 zijn respectievelijk de korreldiameters waaronder 10 % en 60 % van de korrels liggen.





