

Achtergrond van en ervaringen met de probabilistische lekberekening

Freedom is just another word for nothing left to lose

De nieuwe regels voor probabilistische lekstabiliteit hebben een grote invloed op het scheepsontwerp, zowel op het ontwerp als zodanig, als op het ontwerpproces. SARC is de afgelopen jaren betrokken geweest bij vele berekening van probabilistische lekstabiliteit. De ervaringen en opvattingen die daarbij zijn vergaard worden in dit artikel besproken.

Principiële opzet van de probabilistische lekberekening

Waarom heet deze nieuwe categorie van lekberekening opeens probabilistisch, en waarin onderscheidt zich dat van de klassieke lekberekening?

Ter onderscheiding van de probabilistische methode kan de klassieke lekberekening deterministisch genoemd worden; de deterministische lekberekening wordt gekenmerkt door vaste schade-grenzen, die in de diverse voorschriften zijn neergelegd. Deze vaste schade-grenzen (zoals de beroemde "B over 5" voor o.a. passagiersschepen) geven de regels een rigide karakter.

Bij de probabilistische lekberekening wordt op statische grondslag de waarschijnlijkheid van optreden en de overlevingskans van ieder denkbaar schadegeval bepaald. Deze methode gaat dus niet uit van vaste schadeafmetingen, waardoor zij flexibel is en leidt tot een veel grotere ontwerp vrijheid.

De probabilistische lekstabiliteitsmethode is momenteel geldig voor twee categorieën:

- Schepen voor droge lading, groter dan 100 m, moeten voldoen aan de voorschriften volgens deel B-1, SOLAS 1992 (Hoofdstuk B.1, Bijlage II van de schepenwet). De voorschriften worden ondersteund door zg. "explanatory notes", die een uniforme interpretatie kunnen bevorderen.
- Het ligt in de bedoeling dat vanaf 1998 deze voorschriften ook gaan gelden voor schepen met een lengte tussen de 80 en 100 m.
- Voor passagiersschepen geldt vanaf 1973 de zg. equivalente methode (IMO A.265) die gebruikt mag worden in plaats van de deel B van SO-

De heer Koelman is werkzaam bij het Scheepsbouwkundig Advies en RekenCentrum (SARC) te Bussum. SARC is producent en leverancier van het PIAS systeem voor het ontwerpen en berekenen van schepen, en andere drijvende objecten.

LAS. Deze equivalente methode bevat een groot probabilistisch deel.

Het algemene uitgangspunt van de probabilistische methode is dat de overlevingskans groter moet zijn dan een voorgeschreven minimum, of in de bewoording van de wetgeving: De "Attained Subdivision Index (A)" moet groter zijn dan de "Required Subdivision Index (R)".

Required Subdivision Index R

Voor vrachtschepen is de Required Subdivision Index een eenvoudige functie van de scheepslengte (fig 1). Voor passagiersschepen wordt ook het aantal passagiers betrokken. Door z'n eenvoudigheid onthult de formule voor R verder geen interessante details.

Attained Subdivision Index A

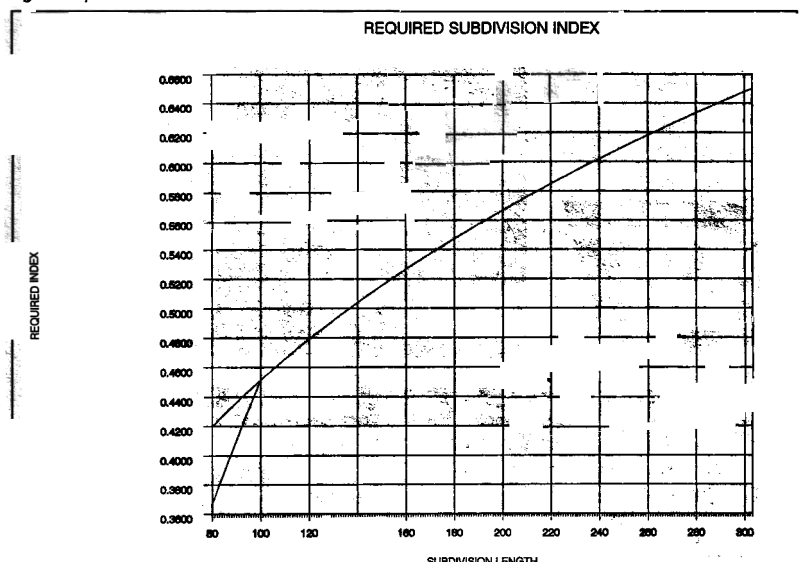
De Attained Subdivision Index wordt bepaald door 2 zaken:

- Vorm, afmetingen en lokatie van de beschadiging.
- Resterende stabiliteit van het schip na en tijdens vollopen door de beschadiging.

De invloed van vorm, afmetingen en lokatie van de beschadiging wordt in rekening gebracht door voor iedere schade de waarschijnlijkheid van optreden van die schade vast te stellen, gebaseerd op de veronderstelling dat er slechts één (zij-)schade is, die aan de onderzijde op de basis begrensd wordt, en die rechthoekig van vorm is. Gebaseerd op schadestatistieken zijn door de internationale wetgever IMO verdelingsfuncties afgeleid van schadeafmetingen en plaats van de schade. Op basis van deze verdelingsfuncties zijn formules ontwikkeld waarmee de kans op optreden van een specifieke schade kan worden berekend (zie o.a. [1]). Deze formules, die conceptueel simpel zijn, staan in de voorschriften.

In een waarlijk probabilistische methode zou de resterende stabiliteit na lekken ten grondslag liggen aan de overlevingskans. Omdat voor vrachtschepen geen relevant statistisch materiaal voorhanden bleek te zijn, is gekozen voor een deterministische benadering, op basis van de kromme van oprichtende restarmen. Als in een schadegeval aan deze criteria wordt voldaan:

Fig. 1. Required Subdivision Index



Statische hellingshoek < 25°
 Bereik van de stabiliteitskromme > 20°
 Maximum stabiliteitsarm > 0.10 m

dan wordt aangenomen dat het schip overleeft (overlevingskans = 1). zo niet dan wordt aangenomen dat het schip niet overleeft (overlevingskans = 0). In werkelijkheid zijn de regels iets complexer, omdat als probabilistisch sausje een klein overgangsgebied wordt geïntroduceerd waarin de overlevingskans een waarde tussen 0 en 1 aan kan nemen. Omdat dit overgangsgebied zelden voorkomt is het belang hiervan gering.

Uitvoeren van een complete berekening

Een complete berekening beslaat vijf stappen:

- 1- Schadegevallen worden gedefinieerd die alle compartimenten en combinaties van compartimenten lekmaken.
- 2- Van elke beschadiging wordt de kans daarop berekend.
- 3- Van elke beschadiging wordt de

kans bepaald op stabiel blijven drijven.
 4- Het product van de tweede en derde stap geeft de kans op overleven bij die beschadiging.

5- Het optellen van alle kansen op overleven, voor alle denkbare beschadigingen geeft de totale overlevingskans van het schip.

Deze berekening wordt uitgevoerd met inachtnaam van de volgende details:

- Voor vrachtschepen wordt de berekening uitgevoerd voor twee diepgangen, de zg. partiële diepgang, en de grootste diepgang. De resulterende overlevingskans is het gemiddelde van die twee.
- De permeabiliteiten zijn gefixeerd. Zo wordt voor laadruimtes 70%, voor machineruimtes 85% en voor voorraadruimtes 60% voorgeschreven.
- De actuele belastingtoestand wordt niet in ogenschouwen genomen.
- Aangenomen wordt dat elk compartiment, en elke groep van compartimenten beschadigd kunnen raken.
- Bij meercompartimentsschades wordt

dubbel telling voorkomen: De kans op beschadiging van meerdere compartimenten gelijktijdig is gelijk aan de totale kans, minus de kans op beschadiging van de afzonderlijke compartimenten.

- Schades met een kans op optreden of een overlevingskans van nul hoeven niet meegenomen te worden, ze dragen immers toch niet bij aan de Attained Subdivision Index.

Zie tabel 1 voor een voorbeeld van een uitvoer

Praktische aspecten bij het uitvoeren van de berekeningen

Conceptueel is de probabilistische lekstabiliteitsmethode elegant en rechttoe rechtaan. Door een aantal ogenschijnlijke bijzaken, zoals vermeld in de wetgeving en in de explanatory notes, neemt aantal en complexiteit van de schadegevallen echter toe.

- De effecten van openingen
 Als openingen, of openingen die "dicht tegen weer en wind" zijn, zich permanent onder water bevinden dan wordt het schip geacht niet te overleven in het schadegeval onder beschouwing. Dergelijke openingen bevatten ook luchtkappen, waterdichte deuren en luikhoofden. In de praktijk houdt dat dus in dat de types en plaatsen van alle luchtkappen, openingen e.d. bekend moet zijn voordat de probabilistische lekberekening uitgevoerd kan worden.
- Overigens accepteren sommige inspecties en klassifikatiebureaus luchtkappen als volkomen waterdicht, mits zij aantoonbaar aan bepaalde eisen voldoen.

- Pijpen en tunnels

Als pijpen of tunnels beschadigd raken, moeten hetzij voorzieningen worden getroffen zodat andere compartimenten niet via die pijpen of tunnels vervuld raken, hetzij de vervulling van die andere compartimenten in rekening worden gebracht. Neem bijvoorbeeld de schetsmatige DB configuratie uit fig. 2, waar door schade aan de achterste SB DB tank via de vulpijpen alle SB DB tanks vollopen.

- Minor damages

De aangenomen verticale omvang van de schade strekt zich uit van de basislijn omhoog. Indien echter een kleinere schade een lagere overlevingskans geeft, moeten deze worden aangehouden. Deze regel verveelvoudigt effectief het aantal lekberekeningen per schadegeval. Omdat in het algemeen op voorhand niet kan worden voorspeld welke minor damage een lagere overlevingskans geeft is het noodzakelijk om dom-

Tabel 1. Voorbeeld berekeningsresultaat

PROBABILISTIC DAMAGE STABILITY CALCULATION (IMO MSC 19(58))								
Refrigerated Cargo Vessel								
Calculation for deepest loadline.								
Intact draft	=	6.500 m						
Intact trim	=	0.000 m						
Intact KG'	=	6.750 m						
Intact displacement	=	8020.693 ton						
Damage case	Aft	Fore	Inside	Upper	pi*ri*vi	si	ai	
1.1	-5.519	0.000	0.000	9.300	0.0052	1.0000	0.0052	
1.2	1.200	6.600	4.000	9.300	0.0000	1.0000	0.0000	
1.3	8.000	13.600	4.000	9.300	0.0000	1.0000	0.0000	
1.4	104.600	114.400	0.000	9.300	0.0123	1.0000	0.0123	
1.5	114.400	129.643	0.000	11.900	0.0924	1.0000	0.0924	
2.1	-5.519	6.600	4.000	9.300	0.0000	1.0000	0.0000	
2.2	1.200	6.600	0.000	9.300	0.0017	1.0000	0.0017	
2.3	1.200	13.600	4.000	9.300	0.0000	1.0000	0.0000	
2.4	13.600	21.300	0.000	8.000	0.0023	1.0000	0.0023	
2.5	23.400	42.300	3.000	11.900	0.0433	1.0000	0.0433	
2.6	42.300	63.300	3.000	11.900	0.0661	1.0000	0.0661	
2.7	63.300	82.900	3.000	11.900	0.0653	1.0000	0.0653	
2.8	82.900	104.600	3.000	11.900	0.0654	1.0000	0.0654	
2.9	104.600	129.643	0.000	11.900	0.0664	1.0000	0.0664	
3.1	-5.519	6.600	0.000	9.300	0.0071	1.0000	0.0071	
3.2	-5.519	13.600	4.000	9.300	0.0000	1.0000	0.0000	
3.3	1.200	13.600	0.000	9.300	0.0071	1.0000	0.0071	
3.4	8.000	21.300	0.000	9.300	0.0092	1.0000	0.0092	
3.5	23.400	26.900	0.000	11.900	0.0001	1.0000	0.0001	
3.6	26.900	42.300	0.000	11.900	0.0082	1.0000	0.0082	
3.7	42.300	63.300	0.000	11.900	0.0193	1.0000	0.0193	
3.8	63.300	82.900	0.000	11.900	0.0182	1.0000	0.0182	
3.9	82.900	104.600	0.000	11.900	0.0344	1.0000	0.0344	
4.1	63.300	104.600	0.000	11.900	0.0858	1.0000	0.0858	
4.2	42.300	82.900	0.000	11.900	0.0842	1.0000	0.0842	
4.3	13.600	63.300	0.000	11.900	0.1237	0.6528	0.0808	
Total					0.8178		0.7749	
CONCLUSION PROBABILISTIC DAMAGE STABILITY ACC. TO IMO MSC 19(58)								
Refrigerated Cargo Vessel								
Subdivision length (m)	=	135.162						
Attained index at partial loadline	=	0.8512						
Attained index at deepest loadline	=	0.7749						
Mean attained index	=	0.8130						
Required index	=	0.4982						
The vessel complies with the IMO MSC 19(58) requirements								
Abbreviations :								
Aft	:	Location of aft boundary of damage (25-2, 2.3)						
Fore	:	Location of fore boundary of damage (25-2, 2.3)						
Inside	:	Mean inside boundary of damage (from CL)						
Upper	:	Upper boundary damage (from baseline)						
pi*ri*vi	:	Probability of flooding						
si	:	Probability of survival (25-6)						
ai	:	Probability of survival and flooding (25-4, 2)						
note : The numbers refer to paragraphs from the legislation								
Calculations have been performed with MINIMUM damage breadth								
with an angle of inclination to SB								

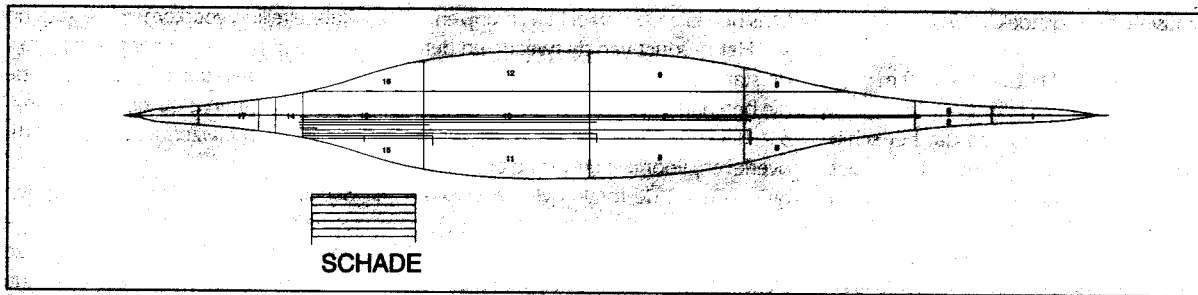


Fig. 2. Schade aan pijpen

weg alle minor damages integraal mee te nemen.

– Tussenstadia van vervulling

De voorschriften schrijven voor de lekstabiliteit te berekenen voor "elke toestand van vervuld raken". Ook deze regel vermeerderd het aantal lekberekeningen, omdat per schadegeval in ieder geval voor een aantal standaard percentages van vervulling (bv. 25%, 50% en 75%) de lekstabiliteit berekend moet worden. Daarnaast kunnen ook nog niet-standaard tussenstadia voorkomen waarbij, bv. ten gevolge van beschadiging van een pijp, sommige compartimenten eerder volstromen dan andere.

– De hoogteligging van het zwaartepunt KG'

De KG' heeft een belangrijke invloed op de lekstabiliteit. Idealiter zou men de KG' voor de lekstabiliteit gelijk of hoger kiezen dan de maximaal toelaatbare KG' volgens de intacte stabiliteit, zodat de lekstabiliteit niet tot een operationele beperking voor het schip leidt.

In veel gevallen kan dat ideaal niet bereikt worden, zodat het nodig is de KG' voor één of beide diepgangen lager te kiezen.

Na iedere wijziging van de KG' moet de probabilistische berekening weer opnieuw gemaakt worden.

– Aantal schadegevallen

De scheepsonwerper is vrij in de keuze van de schadegevallen, en in het aantal wat hij wenst te gebruiken. Vanzelfsprekend kan de ontwerper stoppen schadegevallen toe te voegen als de Attained Subdivision Index (A) groter is dan de Required Subdivision Index (R), of als extra schadegevallen niet meer tot verhoging van de Attained Subdivision Index leiden.

De ervaring over de afgelopen jaren heeft geleerd dat veel schepen slechts met moeite voldoen. Om toch een zo hoog mogelijke A te krijgen, zal ieder schadegeval wat ook maar enigszins aan A bijdraagt in rekening moeten worden gebracht. In de praktijk kan dit leiden tot honderden tot zelf meer dan duizend schadegevallen!

Hoewel dit aantal schadegevallen erg hoog is, kan het nog extremer: Er zijn implementaties (zie o.a. [2]) waarbij de compartimenten worden gesplitst in een soort bouwblokken, die allemaal apart als compartiment worden behandeld. Deze aanpak doet het aantal schadegevallen nog verder stijgen.

– Schadeafmetingen

De schade wordt begrensd door vier vlakken, t.w. achter-, voor-, boven- en binnenvlak, waarbij het binnenvlak niet noodzakelijkerwijs evenwijdig aan HS hoeft te lopen. De plaats en oriëntatie van het binnenvlak wordt beheerst door de definitie van indringingsdiepte, die luidt:

"De gemiddelde dwarsscheepse afstand, gemeten loodrecht op het vlak van kiel en stevens ter hoogte van de hoogst gelegen indelingslastlijn, tussen de huid en een vlak door het meest buitenste deel van, en evenwijdig aan, het langsschot dat zich uitstrekt tussen de langsscheepse begrenzingen gebruikt voor de berekening van de factor pi".

Een definitie die zonder de voorbeelden uit de explanatory notes volkomen onbegrijpelijk is.

Wat in essentie bedoeld wordt is dat de schadeomvang zo groot mogelijk moet zijn, zonder compartimenten te raken die niet in het schadegeval onder beschouwing zitten. Om aan te tonen dat schadegrenzen niet noodzakelijkerwijs samen hoeven te vallen met compartimentsgrenzen zie fig. 3, waar een compartimentsconfiguratie getekend is.

Een vervulling van de compartimenten 1 en 2 (fig. 4) wordt veroorzaakt door een schade zoals aangegeven in fig. 5.

Knelpunten

– Verwerkingstijd

Voor een complete "gemiddelde" probabilistische berekening, bestaande uit een paar honderd schadegevallen, een paar tussenstadia van vervulling en wat minor damages bedraagt de rekentijd ongeveer:

COMPUTER TYPE REKENTIJ D (UREN)	
Pentium 90 mhz	12
Sun Sparcstation 1	18
80486 66 mhz	30
Compaq 80386/80387	
33 mhz	100
IBM XT 8 mhz	3500

Fig. 3. Compartimentsconfiguratie

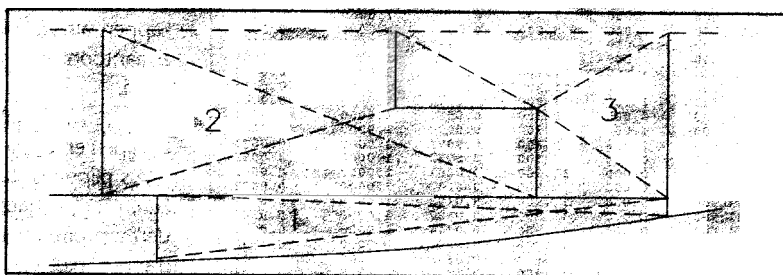


Fig. 4. Beschadigde compartimenten

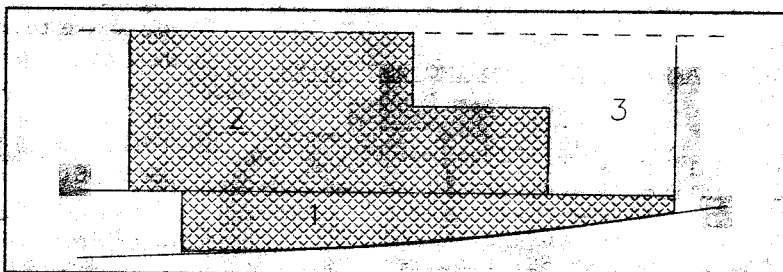
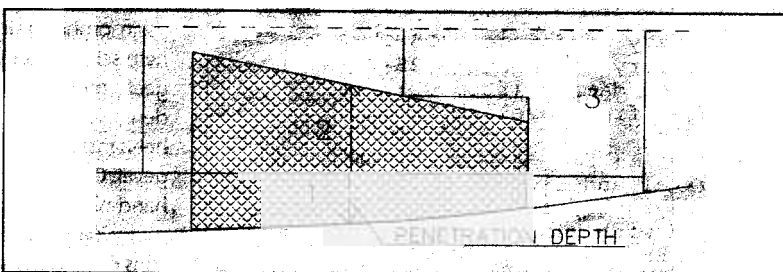


Fig. 5. Schadeafmetingen



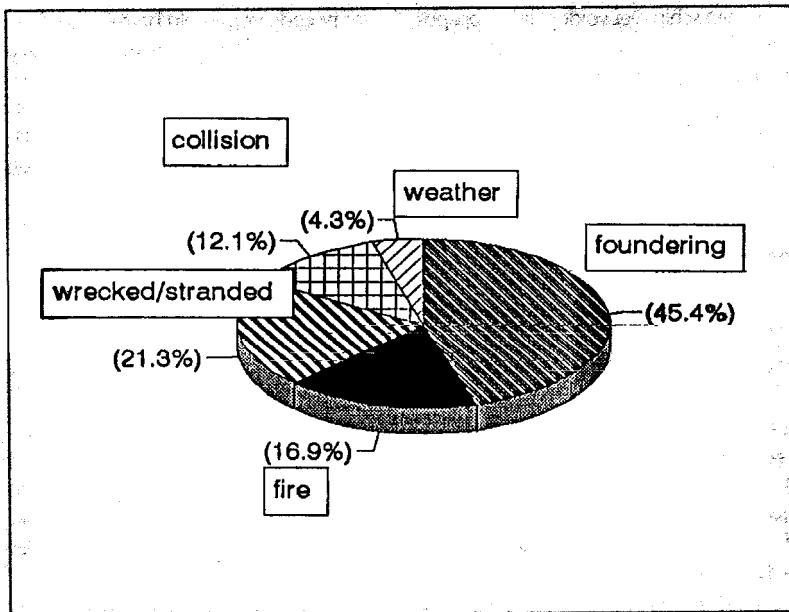


Fig.6. Schadeorzaken

Deze rekentijd is inclusief het gebruik van geavanceerde technieken, zoals automatische generatie van schadegrenzen en minor damages, en automatische bepaling van schadegrenzen, zoals die in het PIAS computerprogramma zijn opgenomen. Zonder deze technieken zal de pure computertijd minder zijn, maar zal de tijd van de handmatige selectie van schadegevallen, minor damages en schadegrenzen minstens enkele dagen bedragen!

Na iedere ontwerpwijziging moeten enkele of alle schadegevallen herberekend worden.

- Zoals besproken is de probabilistische methode zuiver gebaseerd op schade in de zij. Het diagram in fig. 6 toont echter aan dat slechts 12% van alle verliezen in 1993 veroorzaakt is door zijschade (collision).

- Benodigde informatie

Op voorhand moet de volgende informatie aanwezig zijn: scheepsvorm, leeg scheepsgewicht & maximum diepgang, vorm van alle compartimenten, de loop van alle leidingen & plaats en type van de afsluiters en tenslotte de plaats en het type van alle ontluchtingen.

In een voorlopige ontwerpfase is deze informatie vaak niet (compleet) beschikbaar.

- Negatieve kansen van optreden

Het is gebleken dat bij meercompartimentsschades de formule voor het bepalen van de invloed van de indringingsdiepte op de kans van optreden leidt tot negatieve kansen.

Daardoor komt de som van alle aanvaringskansen niet op de theoretisch te verwachten waarde van 1.00 uit. Afgezien van de theoretische onjuistheid missen we door dit verschijnsel een goed controlemiddel, zowel voor

- Meercompartimentsschades

De methode voor meercompartimentsschades kan tot inconsistenties leiden indien deze gebruikt wordt bij een compartiment wat een ander geheel omsluit (Fig. 7)

De kans van optreden kan niet bepaald worden zonder gebruik te maken van virtuele compartimenten. Het gebruik van virtuele compartimenten

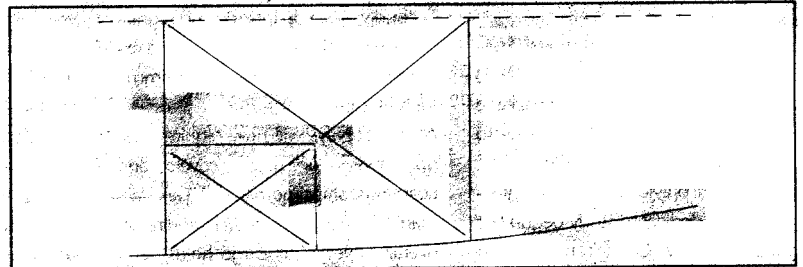


Fig.7. Compartiment wat een ander omsluit

werkt complicierend, en is strijdig met de aanvankelijke aanname dat er slechts één schadegeval betrokken is per groep van beschadigde compartimenten. Een meer consistente formulering zou zijn:

"de kans op optreden in het geval van het gelijktijdig vervuld raken van meerdere compartimenten (de hoofdschade) wordt verkregen door de kans op die hoofdschade te verminderen met alle subschades voor zover die binnen die hoofdschade vallen."

Goedkeuring

Omdat grote hoeveelheden schadegevallen betrokken zijn, kan de keuring door inspecties of klassifikatiebureaus tot problemen leiden. De voorlopige ervaring wijst uit dat, als men al controleert, de instanties neigen tot het herberekenen in plaats van het controleren van een voorgelegde berekening. Als de uitkomsten van de herberekening niet

overeenstemmen met die van de voorgelegde berekening, is de bron van de verschillen zeer moeilijk op te sporen.

Sommige buitenlandse instanties hebben rekentechnisch moeite met de grote hoeveelheden schadegevallen, zodat hun herberekening op een veel kleiner aantal schadegevallen gebaseerd wordt, waardoor de Attained Subdivision Index navenant lager uitvalt. Op deze manier wordt de rekening voor het ontbreken van adequate (computer-)gereedschappen bij de keuringsinstantie uiteindelijk bij de ontwerper of bij de reder gelegd!

Presentatie

De resultaten van de berekeningen kunnen worden samengevat in een beknopte vorm, die alle kansen bevat, alsmede de A en R waarden.

Tussenresultaten, zoals bv. de stabiliteitsparameters in alle tussenstadi, kunnen vaak beter op floppy disk worden verstrekt. In een bepaald geval zou het afdrukken van alle tussenresultaten op papier 19.888 A4 pagina's gekost hebben, een stapel van 2 meter hoog.

Explanatory notes

De explanatory notes geven een toelichting op de voorschriften. Zij geven veel, en soms uitsluitend, schetsen en

voorbeelden van allerhande schadegevallen. Het is dus aan de scheepsonwerper om uit deze specifieke voorbeelden een generieke regel te destilleren. Deze vorm van "wetgeving bij voorbeeld" is ongebruikelijk.

Werkwijze bij het uitvoeren van een lekberekening

Een algemene werkwijze (met behulp van een computerprogramma) is:

- 1 - Voer de scheepsvorm en de compartimenten in.
- 2 - Definieer (of genereer, als de software die mogelijkheid biedt) alle schadegevallen.
- 3 - Stel de KG' vast voor de twee te berekenen diepgangen, hetzij uit de te verwachten belading, hetzij uit de maximaal toelaatbare KG' in intacte toestand.
- 4 - Maak een berekening. Voldoet het schip niet, verander dan indeling en/of de KG'.
- 5 - Verwijder de schadegevallen met een niet-positieve overlevingskans.

6 - Definieer openingen en bereken opnieuw. Voldoet het schip niet trek dan de kritische opening op.

7 - Breng vervulling door pijpbeschadiging in rekening en bereken opnieuw. Voldoet het schip niet verander dan de loop van de pijpen.

8 - Definieer (of genereer) minor damages en bereken opnieuw. Voldoet het schip niet ga dan terug naar de eerste stap

Ervaringen in het ontwerpproces

- De ervaring leert dat de ervaring niet culmineert in vuistregels.
- Op het eerste gezicht valt zelfs niet globaal te voorspellen of het schip ruim, ongeveer of helemaal niet voldoet.
- De effecten van openingen kunnen een dramatisch verslechterend effect hebben op de overlevingskans.
- Schade aan pijpen, minor damages en tussenstadia van vervulling kunnen de overlevingskans significant aantasten.
- Meestal zijn meerdere complete berekeningen plus ontwerpaanpassingen nodig voordat het schip voldoet.

- Als een schip niet voldoet is het opsporen van de ene oorzaak vaak moeilijk of tijdrovend. Soms is er ook een wisselwerking tussen meerdere oorzaken in het spel.

Praktijkvoorbeelden

Als eerste voorbeeld wordt een coaster voor algemene lading behandeld, met een Required Subdivision Index van 0.46. De verschillende berekeningen gaven de volgende resultaten:

1 – Zonder openingen, geen tussenstadia van vervulling $A=0.38$

2 – KG-partiële diepgang 12% gereduceerd $A=0.53$

3 – Als 2, met openingen en tussenstadia $A=0.36$

4 – Als 3, incl. Schade door pijpleidingen $A=0.32$

De effecten van openingen, tussenstadia van vervulling en schade door pijpleidingen leidt tot een verlies van 40% van A. Uiteindelijk kon het schip slechts voldoen na een geheel aangepaste compartimentering.

Het tweede voorbeeld betreft een RoRo ferry. met een R van 0.656. In totaal zijn zeven complete ontwerpvarianten doorgerekend, waarbij de A geschommeld heeft tussen de 0.35 en 0.741. Een maatgevende factor bij dit schip was dat de ontluichtingsopeningen niet onbeperkt opgetrokken konden worden wegens de geringe maximaal toegelaten hoogte van de waterkolom. Voor dit schip zijn in totaal 8400 lekberoekekeningen gemaakt.

Conclusie

In concept is de probabilistische lekstabiliteitsmethode elegant, en geeft veel ontwerprijheid. Voor die vrijheid wordt echter wel betaald met een toegenomen complexiteit van die berekening.

[1]Waterdichte indeling en lekstabiliteit van vrachtschepen; Ir. H. Vermeer.

Schip & Werf de Zee pp. 229-233, 1991.

[2]Probabilistic Damage Stability Calculation for Ships; J.J. Jensen

WEMT'95, Copenhagen, pp. 71-96