

# Probabilistische Diepte Modelling Binnenhavengebied Haven van Rotterdam

- Eindrapport -



**Juni 2010**

**Y. Abdelouarit**

M. Sc. student Waterbouwkunde





## **Voorwoord**

Voor u ligt het rapport 'Probabilistische diepte modellering binnengebied, Haven van Rotterdam'. Dit rapport is geschreven in het kader van het afstuderen aan de faculteit Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het afstudeerwerk is uitgevoerd bij de opdrachtgever: Havenbedrijf Rotterdam NV (HbR).

De afstudeercommissie bestaat uit de volgende leden:

Prof.ir. H. Ligteringen (Civiele Techniek, TU Delft)  
H.J. van Wijhe (HbR)  
Dr.ir. P.H.A.J.M. van Gelder (Civiele Techniek, TU Delft)  
Dr.ir. H.J. de Koning Gans (Maritieme Techniek, TU Delft)

Met veel dank aan de leden van de afstudeercommissie en Jan Prince (HbR) voor de begeleiding bij dit afstudeerwerk.

Rotterdam, juni 2010

Yassine Abdelouarit



# Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	9
Symbolenlijst	12
<b>1. Inleiding</b>	
1.1. Waarom deze studie?	13
1.2. Leidraad deterministisch ontwerpen	13
1.3. Huidig ontwerp (binnen-) haven van Rotterdam	
1.3.1. Algemeen	14
1.3.2. Huidige kielspelingsnormen	15
1.4. Probleem-, doelstelling en onderzoeksvragen	
1.4.1. Probleemstelling	18
1.4.2. Doelstelling	18
1.4.3. Onderzoeksvragen	18
1.5. Aanpak	19
1.6. Leeswijzer	19
<b>2. Haven van Rotterdam</b>	
2.1. Beschrijving van de haven	
2.1.1. Algemeen	21
2.1.2. Toegankelijkheid	21
2.1.3. Havensectoren	22
2.1.4. Achterlandverbindingen	22
2.2. Toegankelijkheid scheepvaart	
2.2.1. Geul- en tijgebonden schepen	23
2.2.2. De toegangsecul	23
2.2.3. Procedures scheepvaart	25
<b>3. Elementen van een risicogebaseerde analyse</b>	
3.1. Introductie	29
3.2. Een risicogebaseerde analyse	
3.2.1. Omschrijving	29
3.2.2. Redenen voor risicogebaseerde benadering	31
3.3. Probabilistisch ontwerpen	
3.3.1. Het concept	31
3.3.2. Niveaus van exactheid	33
3.3.3. Probabilistische berekeningsmethoden	33
3.3.4. Deterministisch versus Probabilistisch	37
<b>4. Diepte ontwerp in het binnengebied</b>	
4.1. Kielspeling en marges voor benodigde diepte	
4.1.1. Algemeen	39
4.1.2. Referentieniveau	40
4.2. Het verticale getij	40
4.3. Meteorologische effecten	41
4.4. Onzekerheid in opgegeven diepgang	41
4.5. Effect soortelijke massa water	41
4.6. Verticale scheepsbewegingen in golven	42
4.7. Squat	43
4.8. Manoeuvrermarge	46

<b>5. Risico bodemberoering en verminderde manoeuvreerbaarheid</b>	
5.1. Algemeen	47
5.2. Kans op falen	
5.2.1. Algemeen	47
5.2.2. Criterium bodemberoering	48
5.2.3. Criterium verminderde manoeuvreerbaarheid	49
5.3. Consequenties van falen	
5.3.1. Consequenties bodemberoering	50
5.3.2. Consequenties verminderde manoeuvreerbaarheid	53
5.4. Risico	
5.4.1. Risico bodemberoering	55
5.4.2. Risico verminderd manoeuvreren	56
<b>6. Bestaande probabilistische modellen</b>	
6.1. Algemeen	61
6.2. Harap	
6.2.1. Introductie	61
6.2.2. Criteria	61
6.2.3. Wiskundige achtergrond	62
6.2.4. Modules	64
6.2.5. Klassen	65
6.3. Protide	
6.3.1. Introductie	68
6.3.2. Het algoritme	68
6.3.3. Kans op bodemberoering	69
6.3.4. Bepaling veilige route	70
6.4. CADET	
6.4.1. Introductie	71
6.4.2. Berekening van de kielspeling	71
6.4.3. Onzekerheden	72
<b>7. Het concept van een probabilistisch model voor de binnenhaven</b>	
7.1. Algemeen	75
7.2. Het studiegebied en de nautisch gegarandeerde diepte	78
7.3. Waterstand	79
7.4. Diepgang ontwerpschepen	
7.4.1. Inleiding	80
7.4.2. Toepassing in studiegebied	80
7.5. Squat in het binnengebied van de haven	
7.5.1. Methode	87
7.5.2. Kansverdeling vaarsnelheden	87
7.5.3. Blokfactor $S_2$	90
7.5.4. Blokcoefficient $C_B$	91
7.5.5. Resultaten squat	92
7.6. Overzicht	95
7.7. Analyse resultaten	99
<b>8. Conclusie en aanbevelingen</b>	
8.1. Onderzoeksvragen	101
8.2. Conclusie en aanbevelingen	103
Literatuurlijst	105
Begrippenlijst	107

## Bijlagen

- Bijlage 1: Omschrijving afstudeeropdracht (M.Sc.) TU Delft
- Bijlage 2: Kaart Haven van Rotterdam
- Bijlage 3: Nautische bodem
- Bijlage 4: Waterstand
- Bijlage 5: Histogrammen statische diepgang
- Bijlage 6: Saliniteit Europahaven
- Bijlage 7: Resultaten Monte Carlo simulatie per haven





## Samenvatting

Van oudsher staat veiligheid hoog in het vaandel in de maritieme wereld. Hoewel, voor wat betreft de haven van Rotterdam, het aantal incidenten in de afgelopen jaren op een acceptabel niveau zit, is er, op het gebied voor het bepalen van een veilig bodemniveau behoefte aan een ander ontwerpmethodiek. Waar vroeger vaak op een deterministische wijze een ontwerp werd gemaakt, gebeurt dat de laatste jaren steeds vaker op een probabilistische risicogebaseerde wijze. Een probabilistische aanpak beoogt beter inzicht te verkrijgen in de risico's van een ontwerp.

In dit rapport wordt een probabilistisch (diepte-) ontwerp gepresenteerd voor het binnengebied van de haven van Rotterdam. Ook worden de mogelijke faalmechanismen (bodemberoering en verminderd manoeuvreerbaarheid) bestudeerd. Als referentie modellen zijn bestudeerd de modellen Harap en Protide van Rijkswaterstaat, en CADET van US Army Corps of Engineers. Deze modellen zijn echter toepasbaar in open wateren (buiten de haven) en verschillen hiermee, zoals in het rapport naar voren zal komen, met het model voor het binnengebied.

Het probabilistische ontwerp beoogt inzicht te verkrijgen in de sterkte "R" (resistance) en de belasting "S" (sollcitation) van een systeem. De nautisch gegarandeerde diepte kan dan gezien worden als sterkte (R) in het model en het getij, de golven, squat en diepgang als belasting (S). De betrouwbaarheidsfunctie (Z) ziet er dan als volgt uit:

$$Z = d + H_t - (T + s)$$

Met:  $d$  = nautisch gegarandeerde diepte (t.o.v. het reductievlak)  
 $H_t$  = getijrijzing t.o.v. het reductievlak  
 $T$  = diepgang ontwerpschip (afhankelijk van de dichtheid)  
 $s$  = inzinking t.g.v. squat (trim en helling)

De parameters  $H_t$ ,  $s$ ,  $T$  zijn hoofdzakelijk deterministisch, maar hebben probabilistische componenten waarvoor kansdichtheidsfuncties kunnen worden bepaald.

Vervolgens kan de probabilistische analyse worden gemaakt met de volgende kans op falen (=bodemberoering):

$$P_f = P(Z < 0) = a$$

Waarbij 'a' de aanvaardbare kans op falen is voor het binnengebied van de haven.

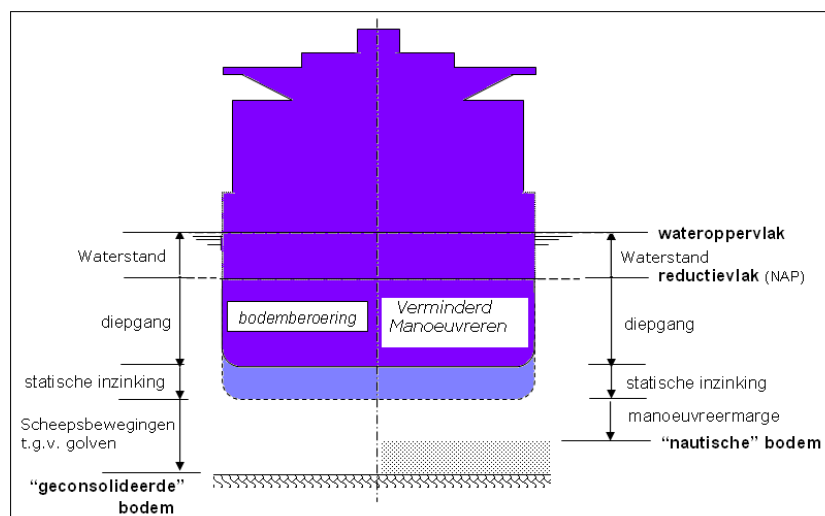
In deze studie worden twee zogenaamde faalmechanismen onderscheiden:

- Bodemberoering
- Verminderde manoeuvreerbaarheid/bestuurbaarheid

Van falen ten gevolge van bodemberoering is sprake als het schip op één of meerdere momenten tijdens de vaart de bodem raakt (t.g.v. een onvoldoende kielspeling). De bodem die hieraan gekoppeld is, is gedefinieerd als de "harde" of "geconsolideerde" bodem.

Van falen ten gevolge van verminderde manoeuvreerbaarheid/bestuurbaarheid zou sprake zijn als gedurende een wat langere periode de kielspeling onder een aanvaardbare norm (in de haven van Rotterdam wordt een marge van 1 m aangehouden) komt. Het schip reageert dan minder snel en effectief op roer- en schroefveranderingen, vooral als de kielspeling erg klein wordt.

De verschillen tussen de twee faalmechanismen in de bepaling van de kielspeling is geïllustreerd in figuur 1. Daarin zijn de hiervoor genoemde parameters gerelateerd aan het faalmechanisme. De statische inzinking is de marge voor de onzekerheid in diepgang, effect van zoet water en squat bij elkaar opgeteld.



**Figuur 1. Relatie faalmechanisme en diepte factoren**

Zo is te zien dat niet alle factoren relevant zijn voor elk faalmechanisme. In geval van het faalmechanisme bodemberoering is logischerwijs geen rekening gehouden met de manoeuvreermarge. In geval van verminderd manoeuvreren wordt het aspect 'scheepsbewegingen in golven' niet in beschouwing genomen, vanwege het dynamische karakter van het aspect. De statische inzinking dient voor beide faalmechanismen in beschouwing te worden genomen.

Gezien de zeer beperkte golfindringing kan gesteld worden dat het faalmechanisme bodemberoering niet dominant is. Bovendien ligt de referentiediepte bij dit faalmechanisme (geconsolideerde bodem) lager dan de referentiediepte van het faalmechanisme verminderd manoeuvreren (nautische bodem). Het faalmechanisme verminderd manoeuvreren is dan ook het uitgangspunt van het model. Hierbij is de aanvaardbare kans (het criterium) op verminderd manoeuvreren 1%.

Met behulp van de Monte Carlo Simulatie is de kielspeling  $Z$  bepaald aan de hand van verdelingen van de parameters in formule (1), waarbij moet gelden  $Z < 1$  om falen te voorkomen. De simulatie is uitgevoerd voor de havens en het Beerkanaal in de Maasvlakte 1. Vervolgens is de diepte in de havenbekkens geoptimaliseerd door de nautisch gegarandeerde diepte te verhogen of verlagen tot dat de diepte net voldoet ( $< 1,0\%$ ). De resultaten van de simulatie zijn weergegeven in tabel 1.

Haven	Faalkans [%]	Nautisch gegarandeerde diepte t.o.v. NAP [m]	Minimaal vereiste diepte t.o.v. NAP [m]	Winst in diepte [m]
Europahaven	1,0	16,65	<b>15,63</b>	<b>1,02</b>
Mississippihaven	1,0	22,65	<b>21,37</b>	<b>1,28</b>
YAEU	1,0	16,65	<b>16,40</b>	<b>0,25</b>
Yangtzehaven	1,0	16,65	<b>16,40</b>	<b>0,25</b>
Amazonehaven	1,0	16,65	<b>16,07</b>	<b>0,58</b>

**Tabel 1. Winst in diepte bij faalkans 1,0 %**

Het diepteontwerp voor de Europahaven en Mississippihaven is overgedimensioneerd, zoals blijkt uit de uitkomsten van de Monte Carlo simulatie. Dit geldt ook, weliswaar in mindere mate, voor de gebieden YAEU, Yangtzehaven en Amazonehaven. In deze havens valt dus winst in termen van diepte te halen.

De havens 6<sup>de</sup>, 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven en het Beerkanaal zijn gebaat bij een toelatingsbeleid. Deze havens ontvangen per jaar enkele tientallen diepstekende schepen die alleen gedurende HW een veilige doorvaart kunnen hebben (zoals blijkt uit de Monte Carlo simulatie).

De conclusies uit deze studie zijn:

- Het is mogelijk om ook voor het binnengebied de diepte op een probabilistische manier uit te rekenen;
- In het onderzochte gebied is het faalmechanisme "verminderd manoeuvreren" dominant ten opzichte van het faalmechanisme "bodemberoering";
- De probabilistische methode lijkt een voordeel op te leveren in de orde grootte van tienden meters tot zelfs meer dan 1 meter;
- Toepassing van een toelatingsbeleid binnen de probabilistische methode is noodzakelijk;
- De mogelijkheid bestaat om het toegepaste model uit te breiden tot een operationele tool.

## Symbolenlijst

<b>Symbol</b>	<b>Omschrijving</b>	<b>Eenheid</b>
$A_c$	Natte doorsnede vaarweg	[m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Nat grootspant schip	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Breedte schip	[m]
$C_b$	Blokcoefficient schip	[-]
$d$	Nautisch gegarandeerde diepte	[m]
FWA	Fresh Water Allowance	[cm]
$h$	Waterstand	[m]
$H_t$	Getijrijzing	[m]
$L$	Lengte schip	[m]
$R$	Sterkte (resistance)	[-]
$\rho$	Dichtheid (water)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$s$	Inzinking t.g.v. squat	[m]
$S$	Belasting (solicitation)	[-]
$S_2$	Blokfactor	[-]
$T$	Diepgang	[m]
$T_o$	Onzekerheid in diepgang	[m]
TPC	Tonnen per cm diepgang	[ton/cm]
$T_s$	Statische diepgang	[m]
$T_{zw}$	Diepgangsvermeerdering in zoet water	[m]
$V_k$	Vaarsnelheid	[knopen]
$W$	Displacement in zout water	[ton]
$W$	Breedte vaarweg	[m]
$Z$	Kielspeling	[m]

## **1. Inleiding**

### **1.1. Waarom deze studie?**

De Noordzee is een van de drukst bevaren zeegebieden ter wereld. Jaarlijks doen ca. 34.000 zeeschepen en 133.000 binnenvaartschepen de haven van Rotterdam aan. Ruim vijfhonderd lijndiensten verbinden Rotterdam met meer dan duizend havens over de hele wereld. De kans op ongevallen (zoals bodemberoering) die kunnen leiden tot ernstige schade aan het (maritieme) milieu is dus groot. Wetenschappelijk onderzoek helpt een beter zicht te krijgen op deze risico's en maatregelen voor te stellen die dergelijke ongevallen tot een minimum kunnen beperken.

Van oudsher staat veiligheid hoog in het vaandel in de maritieme wereld. Hoewel, voor wat betreft de haven van Rotterdam, het aantal incidenten in de afgelopen jaren op een acceptabel niveau zit, is er, op het gebied voor het bepalen van een veilig bodemniveau behoefte aan een ander ontwerpmethodiek. Waar vroeger vaak op een deterministische wijze een ontwerp werd gemaakt, gebeurt dat de laatste jaren steeds vaker op een probabilistische risicogebaseerde wijze. Een probabilistische aanpak beoogt beter inzicht te verkrijgen in de risico's van een ontwerp.

In dit rapport wordt een probabilistisch ontwerp gepresenteerd voor het binnengebied van de haven van Rotterdam. Het betreft het ontwerp van de diepte van de vaarwegen en havens. Ook worden de mogelijke faalmechanismen (bodemberoering en verminderd manoeuvreerbaarheid) bestudeerd. Hierbij zijn alleen de verticale aspecten in beschouwing genomen in de bepaling van de kielspeling. Breedte beschouwingen als de breedte van de vaarweg en oevereffecten zijn buiten beschouwing gelaten. Alleen in de bepaling van squat is de breedte van de vaarweg wel meegenomen.

Verwezen wordt naar bijlage 2 voor een kaart van de haven van Rotterdam met daarin belangrijke locaties aangegeven.

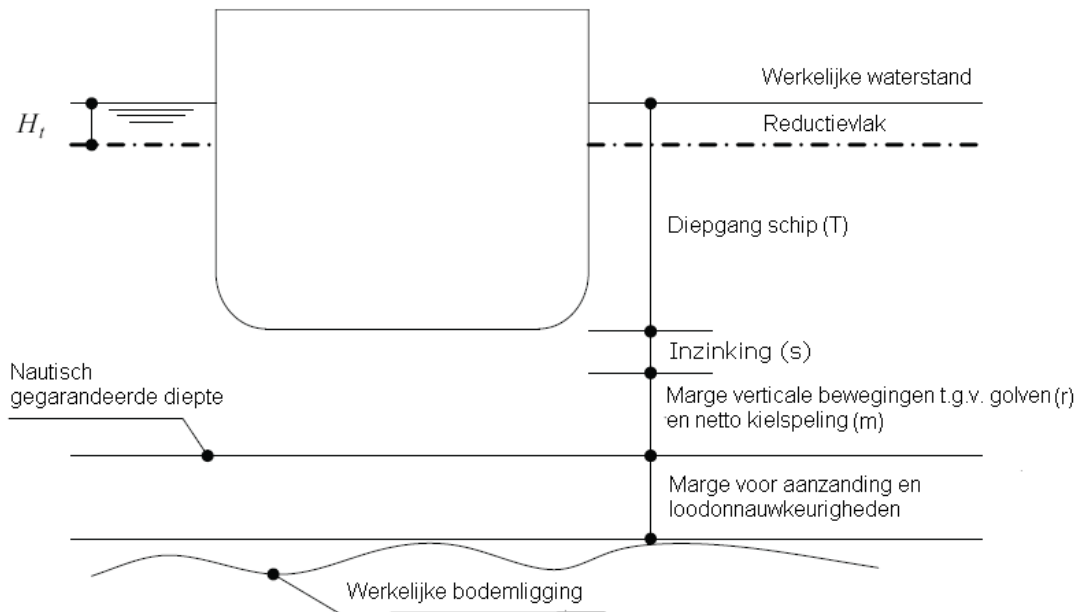
### **1.2. Leidraad voor deterministisch ontwerp**

In deze paragraaf wordt kort toegelicht hoe de diepte in een haven deterministisch bepaald kan worden.

Het ontwerp van de diepte van een vaarweg is afhankelijk van een aantal factoren, zoals ook te zien in figuur 1.1:

- De diepgang van het ontwerpschip, d.i. het schip met de grootste diepgang die de haven mag binnenvaren. Rekening dient men te houden met eventuele dichtheidsverschillen van het water.
- Overige schippergerelateerde factoren zoals squat (inzinking t.g.v. vaarsnelheid), trim (verschil in diepgang van voor- en achterschip) en de verticale respons op golven.
- De waterstand, meestal gerelateerd aan het getij. Maar ook lange golven, wind en seiches dienen in beschouwing te worden genomen, vooral indien deze frequent optreden.
- De bodemligging.

De afstand tussen de kiel van het schip en de bodem wordt de kielspeling genoemd. De kielspeling moet ruimte bieden om de hierboven genoemde factoren op te vangen en het schip voldoende manoeuvreerbaar te houden.



**Figuur 1.1. Factoren ter bepaling van bodemdiepte**

Voor al de bovengenoemde factoren dienen voor het ontwerp marges te worden berekend. De formule voor de nautisch gegarandeerde diepte luidt als volgt (Ligtingen, 2007):

$$d = T - H_t + s + r + m \quad (1)$$

Met:  $d$  = nautisch gegarandeerde diepte (t.o.v. het reductievlak)  
 $T$  = diepgang ontwerpschip  
 $H_t$  = getijrijzing boven het reductievlak  
 $s$  = inzinking t.g.v. squat, trim en helling  
 $r$  = verticale bewegingen van schip t.g.v. golven  
 $m$  = netto kielspeling (of marge voor veiligheid en manoeuvreren)

Het referentieniveau voor zeekaarten wordt het reductievlak (Eng: Chart Datum, CD) genoemd. In veel landen is het reductievlak sinds media 2006 gedefinieerd als LAT (lowest astronomical tide). Daarvoor werd vaak GLLWS (gemiddeld laag laagwater spring) gebruikt als reductievlak. LAT ligt over het algemeen lager dan GLLWS. In Nederland worden de dieptes echter aangegeven t.o.v. NAP en moet zodoende de getijamplitude in rekening worden genomen (i.p.v. getijrijzing; zie formule (1)).

Indien gewenst, kan een haven een tijpoort toepassen. De parameter  $H_t$  in formule (1) geeft de minimaal benodigde waterstand aan en daarmee ook het opening- en sluitingstijdstip van een tijpoort; een schip kan dan alleen een periode rond hoogwater varen in de haven (afgezien van eventuele beperkingen tengevolge van stroming).

De bepaling van de inzinking t.g.v. van squat, trim en helling ( $s$ ) is onderwerp van voortdurende studie; er bestaat een aantal empirische formules voor de bepaling van squat. In paragraaf 4.7 worden een aantal van deze formules besproken.

De verticale scheepsbewegingen ( $r$ ) t.g.v. golven kunnen worden bepaald aan de hand van Response Amplitude Operator (RAO) curven. Computer modellen zijn beschikbaar (zoals Octopus) die de scheepsbewegingen in de vorm van RAO-curven weergeven voor een gegeven schip en vaarwegdiepte. De RAO relateert de scheepsbewegingen met de

golfhoogte, ~periode en ~richting, en kan daarom worden gebruikt om de scheepsbewegingen in verschillende situaties te schatten.

De waarde voor  $m$  is voornamelijk afhankelijk van het type bodem van de vaarweg. De gevolgen van een bodemberoering in geval van een rotsachtige bodem zijn ernstiger dan in geval van een zandige bodem. Over het algemeen hanteert men de waarden zoals weergegeven in Tabel 1.1.

Type bodem	Marge
Slib	0,3 m
Zandig	0,5 m
Hard of rotsachtig	1,0 m

Tabel 1.1. Veiligheidsmarge (netto kielspeling)<sup>1</sup>. Bron: Ligtingen 2007

### 1.3. Huidig ontwerp (binnen-) haven van Rotterdam

#### 1.3.1. Algemeen

De bereikbaarheid van de haven wordt mede bepaald door de bodemligging van de vaarwegen en havens. Als naar de bodem gekeken wordt uit oogpunt van de bereikbaarheid, dan is deze afhankelijk van de volgende aspecten:

- Bodemligging
- Diepgang
- Waterstand
- Veiligheidseisen van de havenbeheerder

De veiligheidseis kan worden vertaald in de vrije ruimte, die ten minste aanwezig moet zijn, tussen de kiel van het schip en de bodem: de kielspelingsnorm. Deze norm wordt als volgt gedefinieerd: "de minimale ruimte tussen het schip en de bodem die de vaarwegbeheerder uit veiligheidsoogpunt noodzakelijk acht". In de Haven van Rotterdam gelden per gebied verschillende kielspelingsnormen, zoals in de volgende paragraaf (1.3.2) beschreven wordt.

De minimaal benodigde kielspeling is de marge die ten minste nodig is om het schip veilig te laten varen. Deze minimaal benodigde kielspeling bepaalt de voorwaarden waaronder een schip aan een reis mag ondernemen. Het proces, waarin deze factoren een rol spelen is het toelatingsbeleid scheepvaart.

Het toelatingsbeleid scheepvaart is hierbij gebaseerd op de volgende factoren:

- Constante scheepsgegevens (scheepstype en afmetingen)
- Variabele scheepsgegevens (diepgang en snelheid)
- Beschikbare waterdiepte
- Stroomrichting en -snelheid
- Geografische oriëntatie (schip)
- Vaarwegprofiel

Één (of een combinatie) van deze factoren kan het schip beperken in zijn reis. We spreken dan van een tijkpoort. Deze tijkpoort is een in de tijd begrensde venster waarbinnen het schip met de gestelde veiligheidscriteria kan varen.

De minimaal benodigde kielspeling kan als volgt worden omschreven:

---

<sup>1</sup> De kielspeling in de haven van Rotterdam is in een havenbekken bovenslib ook tenminste 50 cm.

- Voor een varend schip: *de minimaal vereiste afstand tussen de kiel van het schip en de bodem om veilig en met voldoende kleine kans op bodemberoering te kunnen manoeuvreren.*
- Voor een stilliggend schip: *de minimaal vereiste afstand tussen de kiel van het schip en de bodem om de kans op bodemberoering voldoende klein te houden.*

### 1.3.2. Huidige Kielspelingsnormen

De huidige kielspelingsnormen zijn in de loop der jaren op grond van algemene normen en praktijkervaring vastgesteld. Zij verschillen in Rotterdam niet veel met wat elders gebruikelijk is.

Er zijn, op dit moment, aparte kielspelingsnormen voor de volgende gebieden (vanwege de verschillende grootte van diverse invloeden):

- 1) Euro- Maasgeul
- 2) Europoort/Maasvlakte
- 3) Vaarwegen Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas
- 4) Havenbekkens, Hartelkanaal
- 5) Ligplaats

De kielspelingsnormen die in het vervolg gepresenteerd worden gelden overigens alleen voor inkomende schepen. Voor uitgaande scheepvaart gelden andere normen<sup>2</sup>. Zie paragraaf 2.2.3.

Een nadere toelichting van de gebieden:

#### 1) Euro/Maasgeul

De kielspelingsnorm voor de Euro/Maasgeul is gebaseerd op een model met een semi-probabilistische rekenmethode (HARAP), zie paragraaf 6.1. Randvoorwaarden van dit model zijn een gegarandeerde netto kielspeling van minimaal 1 meter<sup>3</sup> en een kans op bodemberoering van 10% in 25 jaar over het gehele traject, gekoppeld aan een nautisch gegarandeerde diepte. De nautische bodem<sup>4</sup> bevindt zich op het niveau waar de bodemlaag een dichtheid heeft van  $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$  (hierna 1.2 laag). Voor schepen met een diepgang  $> 22,00 \text{ m}$  wordt het traject tot aan de ligplaats in de berekening van het model opgenomen. Schepen met een diepgang tot  $22,00 \text{ m}$  worden tot het Lage Licht doorgerekend.

#### 2) Europoort/Maasvlakte

In het Caland- en Beerkanaal wordt voor geulgebonden schepen (diepgang  $17,40 \text{ m}$  tot  $22,00 \text{ m}$ ) een kielspelingsnorm van  $1 \text{ m}$  bruto aangehouden, voor schepen met diepgang  $\geq 22,00 \text{ m}$   $1 \text{ m}$  netto. Deze norm geldt vanaf het Lage Licht tot en met de ligplaats. De kielspelingsnorm geldt t.o.v. de nautische bodem, die gebaseerd is op de 1.2 grenslaag ( $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ ) voor de inloop van het Caland- en Beerkanaal en 1.03 grenslaag ( $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ ) voor het overige gebied.

#### 3) Vaarwegen

Vaarwegen zijn de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas. De kielspelingsnorm bedraagt 10% van de diepgang. Deze norm is gebaseerd op de diepgang die gecorrigeerd is voor de inzinking in zoet water. Voor een select aantal containerschepen met bestemming Waal/Eemhaven geldt vanaf de Botlek een norm van  $1 \text{ m}$ .

<sup>2</sup> Dit geldt uitsluitend voor uitgaande geulschepen die deterministisch in plaats van probabilistisch worden berekend.

<sup>3</sup> Deze minimale netto kielspeling geldt onder de meest ongunstige omstandigheden. Gerealiseerd dient te worden dat onder normale omstandigheden het schip meer kielspeling heeft.

<sup>4</sup> Verwezen wordt naar bijlage 1: Nautische bodem. voor uitleg over nautische bodem en dichtheidslagen.



#### 4) Havenbekkens

In havenbekkens geldt een kielspelingsnorm van 0,50m. Hierbij is gecorrigeerd voor inzinking t.g.v. dichtheidsverschillen. Het Hartelkanaal valt ook onder de kielspelingsnorm van 0,50m.

#### 5) Ligplaats

Het beleid voor ligplaatsen is gericht op het altijd drijvende zijn van het schip. Dit houdt in dat er enerzijds geen marges benodigd voor squat en manoeuvreren, anderzijds moet de diepte voldoende zijn om tijdens laagwater te kunnen overliggen zonder de bodem te beroeren. Er geldt op dit moment geen vaste norm. Voor het Europoortgebied is voor geulschepen een norm van 0,50m bepaald. Tussen ligplaatsen is nog een onderscheid gemaakt, t.w. : ligplaats met en ligplaats zonder bodembescherming.

Samenvattend, gelden de volgende kielspelingsnormen per gebied en type schip.

Gebied	Diepgang/type schip	Kielspelingsnorm	Definitie (nautische bodem ( $\rho = \dots$ kg/m <sup>3</sup> ))
Euro/Maasgeul	$T \geq 17,40\text{m}$	Semi-probabilistisch	1200
	$T < 17,40\text{ m}$	n.v.t.	1200
Europoort	$T > 22,00\text{ m}$	1,00 m (netto)	1200/1030
	$T \leq 22,00\text{ m}$	1,00 m	1030
Vaarwegen		$T \times 10\%$	1030
	Container	1,00 m	1030
Havenbekkens	$T \geq 17,40\text{ m}$	1,00 m	1030
	$T < 17,40\text{ m}$	0,50 m	1030
Ligplaats zonder bodembescherming	$T \geq 17,40\text{ m}$	0,50 m	1030
	$T < 17,40\text{ m}$	0,30 m	1030
Ligplaats met bodembescherming	$T \geq 17,40\text{ m}$	0,50 m	1030
	$T < 17,40\text{ m}$	0,50 m	1030

Tabel 1.2. Kielspelingsnormen

## **1.4. Probleem- , doelstelling en onderzoeksvragen<sup>5</sup>**

### *1.4.1. Probleemstelling*

De diepte van de vaargeulen en havenbekkens in het binnengebied van de Haven van Rotterdam zijn op een deterministische manier bepaald. Hoewel het huidige ontwerp als veilig wordt beschouwd, heeft men geen inzicht in de kans op bodemberoering door scheepvaart. Er is daarom ook geen toelaatbare kans op bodemberoering gedefinieerd. Het risico voor de haven en de scheepvaart is daarmee onbekend.

Daarnaast zijn er (mogelijk) kostenbesparingen in het ontwerpen van vaargeulen die niet dieper zijn dan wat minimaal benodigd is op basis van operationele aspecten en probabilistisch bepaalde veiligheidscriteria voor de haven.

### *1.4.2. Doelstelling*

Op de aspecten ter bepaling van de benodigde diepte zijn veel data en studies beschikbaar, zowel bij het Havenbedrijf Rotterdam als elders. Een doelstelling van het afstudeerwerk is het bestuderen en analyseren van deze data en informatie met als doel een probabilistische bepaling van de benodigde diepte.

Daarnaast zal de toelaatbare kans op bodemberoering/verminderd manoeuvreerbaarheid, zoals toegepast in havens wereldwijd, worden verkend en zal een aanvaardbare kans op bodemberoering worden voorgesteld voor het binnengebied. Deze kans zal als uitgangspunt dienen voor het probabilistische model.

### *1.4.3. Onderzoeksvragen*

De doelstellingen leiden tot de volgende onderzoeksvragen.

Hoofdvraag:

- Hoe kan de benodigde diepte in het binnengebied van de haven probabilistisch worden bepaald?

Deelvragen:

- Hoe de statistische verdelingen te bepalen voor de parameters relevant voor de benodigde diepte?
- Is een volledig probabilistisch ontwerp mogelijk, wenselijk?
- Wat zijn de probabilistische afhankelijkheden (correlaties) van de verschillende verdelingen?
- Hoe is de toelaatbare kans op falen (bodemberoering of verminderd manoeuvreren) te bepalen?
- Wat is de toelaatbare kans op falen voor het studiegebied?
- Wat is de winst, in termen van minder diepte of meer diepgang, bij een probabilistische rekenmethode?

---

<sup>5</sup> In bijlage 1 is de omschrijving van de afstudeeropdracht (M.Sc.) zoals opgesteld door TU Delft te vinden.

## 1.5. Aanpak

Aan de hand van literatuuronderzoek, interviews, data-analyse en simulatie is onderzoek gedaan naar de probabilistische diepte.

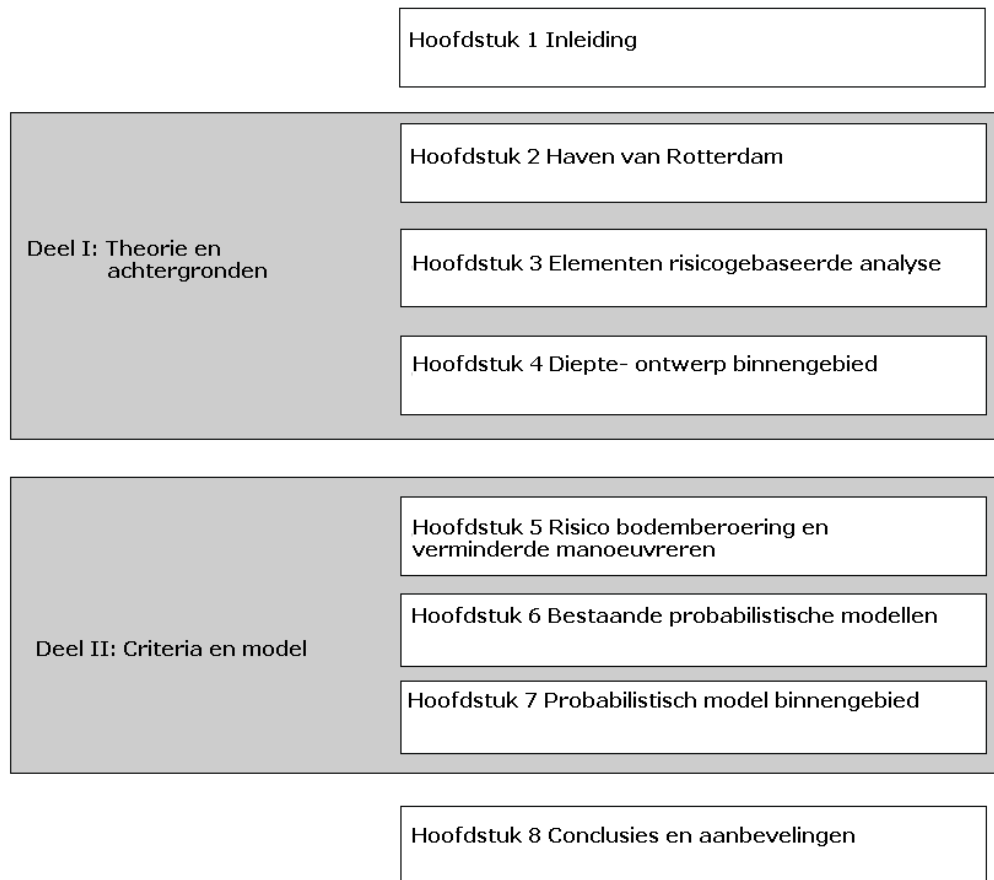
Een literatuuronderzoek is uitgevoerd. Belangrijke referentieprojecten zijn o.a. de modellen van Rijkswaterstaat (HARAP en Protide), zoals die gebruikt zijn voor de Euro-Maas geul, en de modellen van USACE die worden gebruikt voor Amerikaanse havens.

Vervolgens zijn alle data en informatie die beschikbaar en relevant zijn voor de kielspeling verzameld en geanalyseerd. De relevante parameters van deze data zijn verwerkt tot statistische verdelingen. Voorafgaand aan dit onderdeel wordt een studiegebied vastgesteld.

Het laatste onderdeel van het afstudeeronderzoek is het modelleren, waarbij de statistische verdelingen tot één model zijn geïntegreerd. Hierna wordt het model gebruikt in het studiegebied en zijn de resultaten hiervan geanalyseerd.

## 1.6. Leeswijzer

Het rapport is ingedeeld in 9 hoofdstukken. Verder kan het rapport globaal ingedeeld worden in 2 delen: Theorie en achtergronden, en Criteria en model. Zie ter illustratie figuur 1.2 hieronder.



**Figuur 1.2. Indeling rapport**

Na dit hoofdstuk, volgt hoofdstuk 2 *Haven van Rotterdam*. In hoofdstuk 2 staat een beschrijving van de haven en worden de procedures voor de scheepvaart, zowel inkomend als uitgaand, beschreven. In hoofdstuk 3 *Elementen van een risicogebaseerde analyse* wordt de theorie behandeld wat betreft probabilistisch ontwerpen. Ook wordt in dat hoofdstuk kort een vergelijking gemaakt met het deterministisch ontwerpen. In hoofdstuk 4 *Diepte-ontwerp in het binnengebied* staan factoren beschreven die invloed hebben op de benodigde diepte van een varend schip.

In hoofdstuk 5 *Risico bodemberoering en verminderde manoeuvreren* worden de criteria voor het probabilistische model afgeleid door middel van een kwantitatieve analyse. Nog voordat het probabilistische model voor het binnengebied (hoofdstuk 7) aan bod komt, wordt er in hoofdstuk 6 bestaande probabilistische modellen kort toegelicht en wordt hun toepasbaarheid voor het binnengebied beschreven. Tot slot hoofdstuk 8 *Conclusies en aanbevelingen*.

## 2. Haven van Rotterdam

### 2.1. Beschrijving van de haven

#### 2.1.1 Algemeen

De Haven van Rotterdam is een belangrijk logistiek en industrieel knooppunt van Europa. De haven is daarnaast ook één van de belangrijkste kruispunten van goederenstromen ter wereld. De overslag is gemiddeld over de laatste 3 jaar (2007, 2008 en 2009) 405 miljoen ton per jaar. De haven wordt jaarlijks bezocht door 34.000 zeeschepen en 133.000 binnenvaartschepen, en is daarmee de drukste zeehaven van Europa.

De haven is direct gelegen aan de diepe wateren van de Noordzee - de drukst bevaren zee ter wereld. De rivieren de Rijn en de Maas monden uit in de zee bij Rotterdam. De haven ligt bovendien in het hart van Europa - een markt met meer dan 500 miljoen consumenten. De belangrijkste industriële centra in Duitsland, België, Frankrijk en in Oost Europa zijn goed bereikbaar.

#### 2.1.2 Toegankelijkheid

Meer dan 500 lijndiensten verbinden Rotterdam met wereldwijd ruim 1.000 havens. Vanuit de haven distribueren zogeheten 'feederschepen' de containers over zee naar kleinere nabij gelegen havens.

De goede toegankelijkheid van de Haven van Rotterdam komt door de directe ligging aan en de directe open verbinding met de Noordzee. De terminals op de Maasvlakte kunnen daardoor binnen 1 tot 2 uur vanaf het loodsstation worden bereikt.

De haven van Rotterdam is diep genoeg om de grootste schepen ter wereld te ontvangen, zoals mammoettankers, ertscarriers en containerschepen. Daarvoor is voor de kust, in de Noordzee, de Euro-/Maasgeul gebaggerd. De Eurogeul heeft een lengte van 46 kilometer, de Maasgeul is 11.35 km lang.

In de haven zelf zijn de Nieuwe Waterweg, het Calandkanaal, het Beer kanaal en het Hartelkanaal gegraven. Het Calandkanaal is geschikt voor de grootste, diepstekende schepen en geeft toegang tot de Maasvlakte en het Europortgebied. De Nieuwe Waterweg loopt naar de andere havengebieden, die dieper het land in liggen. Zie figuur 2.1.



Figuur 2.1. Haven van Rotterdam

Door regelmatig te baggeren blijven de vaargeulen, de rivier en de havenbekkens op de juiste diepte. Dit gebeurt in opdracht van het Havenbedrijf Rotterdam (voor het

binnengebied) en Rijkswaterstaat (Euro-, Maasgeul, Nieuwe Waterweg, Nieuwe en Oude Maas).

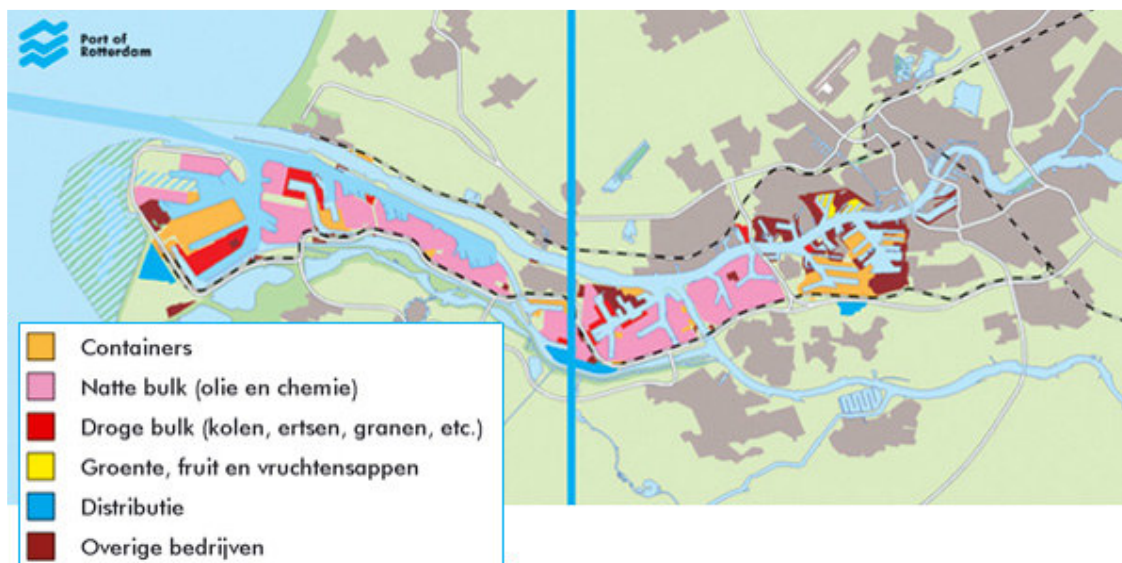
### 2.1.3 Havensectoren

Karakteristiek voor een mainport als Rotterdam is dat verschillende goederenstromen samen komen. In de Rotterdamse haven worden alle denkbare goederensoorten geladen, gelost en gedistribueerd via verschillende transportmogelijkheden.

Deze verschillende goederenstromen worden behandeld door gespecialiseerde bedrijven. De haven is toegerust op het gelijktijdig behandelen van chemicaliën, erts, vloeibare bulk, droge bulk, voertuigen, algemene lading, gekoelde lading, voedsel en containers. Waar mogelijk, worden bedrijven geclusterd. Door deze clustering per activiteit is de haven ook te typeren als een verzameling gespecialiseerde havens.

De haven van Rotterdam is de vierde grootste haven ter wereld, gemeten in tonnen/jaar overslag voor de periode 2005-2008. Voor dezelfde periode is de haven negende op de ranglijst van grootste containerhavens. De hoge positie van Rotterdam wordt voornamelijk veroorzaakt door het bulktransport (droge en natte bulk).

Op de onderstaande kaart zijn de verschillende sectoren in de Rotterdamse haven weergegeven.



Figuur 2.2. Sectoren haven van Rotterdam

### 2.1.4 Achterlandverbindingen

Rotterdam bedient een achterland van meer dan 150 miljoen consumenten binnen een radius van 500 kilometer van Rotterdam en zo'n 500 miljoen consumenten in heel Europa. Dit is een markt met een koopkracht van \$ 600 miljard. De goede toegankelijkheid van Rotterdam vanwege de diepe vaarwegen en uitstekende achterlandverbindingen, maakt Rotterdam tot een toegangspoort tot deze Europese markt.

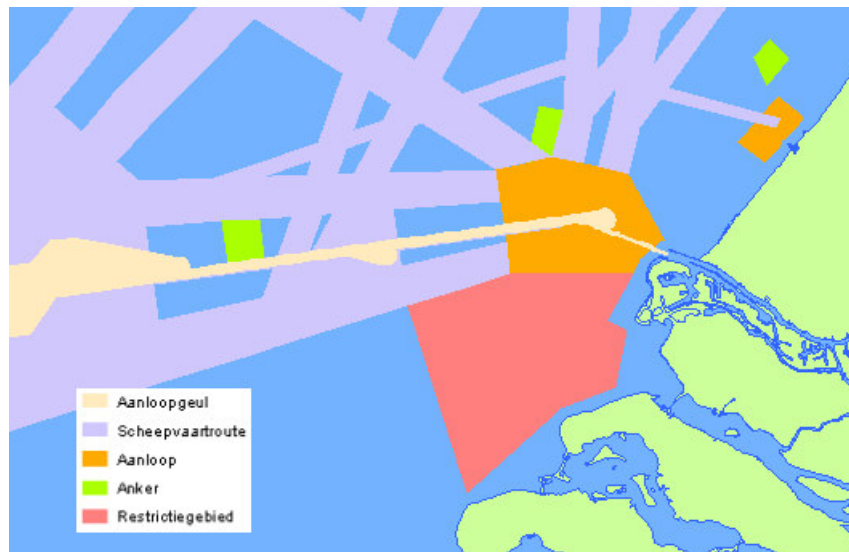
Vanuit Rotterdam zijn de belangrijkste industriële en economische centra van West Europa goed bereikbaar, bijvoorbeeld Duitsland, België, Frankrijk of Groot-Brittannië. Er zijn vijf concurrerende modaliteiten: weg, spoor, binnenvaart, kustvaart (short sea / feeder) en pijpleiding.

## 2.2. Toegankelijkheid scheepvaart

### 2.2.1 Geul- en tijgebonden schepen

Schepen die de haven alleen via de aanloopgeul bereiken kunnen, worden geulgebonden schepen genoemd. Tijgebonden schepen krijgen een tijpoortadvies omdat de waterstand niet altijd voldoende is voor deze schepen. Alleen met of rond hoogwater kunnen deze schepen de haven bereiken.

De haven van Rotterdam is voor schepen met een diepgang van 17,4 m tot en met 22,55 m alleen bereikbaar via de aanloopgeul. Dit houdt dus in dat deze schepen verplicht zijn de aanlooproute via de Euro- en Maasgeul te gebruiken volgens een vastgesteld plan van binnenkomst (geulgebonden). Voor schepen met diepgang kleiner dan 17,40 m is de haven bereikbaar via de overige scheeproutes, zie figuur hieronder.



**Figuur 2.3. Verkeersscheidingsstelsel Noordzee**

Schepen met een diepgang vanaf 17,40 m krijgen vanaf deiningklasse 8<sup>6</sup>, dit zijn golven met een golfhoogte vanaf 116 cm, een tijpoort. Schepen met een diepgang vanaf 20,00 m zijn tijgebonden en krijgen altijd een tijpoortadvies. Een tijpoort geeft aan gedurende welke tijdsperiode van het getij de geulvaart met een bepaald tijgebonden schip kan plaatsvinden. De tijpoort is dus vaak de periode rond hoog water, welke beschikbaar is voor een veilige vaart waarbij ook rekening gehouden is met het horizontale getij.

### 2.2.2 De toeganggeul<sup>7</sup>

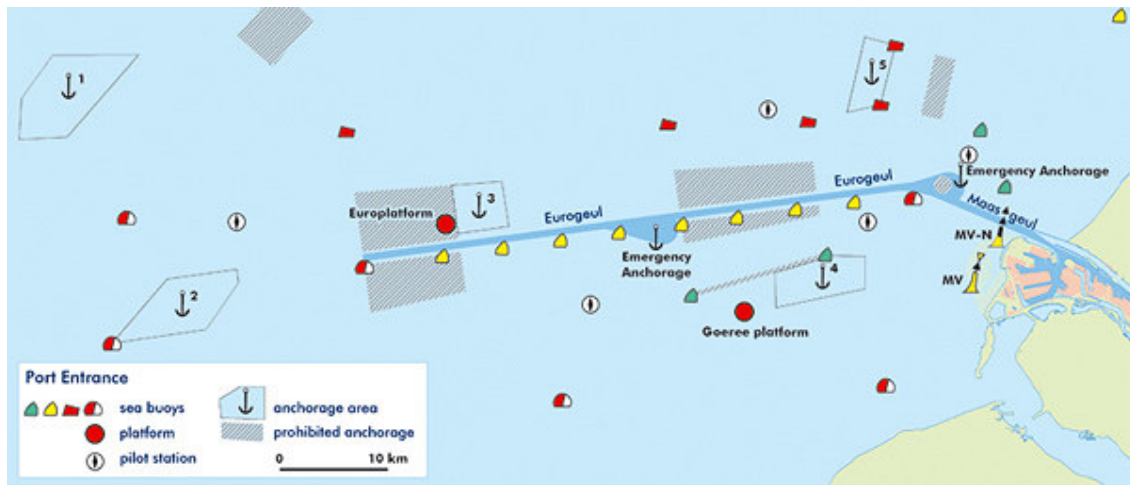
De toeganggeul tot de haven van Rotterdam bestaat uit de Euro- en Maasgeul (geel in figuur 3). Deze worden in deze paragraaf beschreven. Ook wordt het Binnengebied kort beschreven.

#### *Eurogeul*

De totale lengte van de Euro- en Maasgeul, gerekend vanaf (het zuidoostelijke) beginpunt van de Eurogeul tot aan de havenhoofden bij Hoek van Holland, bedraagt 57 km (ca 31 mijl), zie figuur 2.4.

<sup>6</sup> Zie paragraaf 2.2.3 voor een uitleg over deiningklasse.

<sup>7</sup> De toeganggeul is onderdeel van de aanloopgeul. De toeganggeul zelf bestaat uit de Eurogeul en Maasgeul. Zie ter illustratie figuur 2.4.



Figuur 2.4. Toegangsgeul naar Rotterdam met ankergebieden

De Eurogeul zelf is 45,65 km (25 mijl) lang en 600 m breed. De nautisch gegarandeerde diepte (t.o.v. LAT) van de Eurogeul neemt stapsgewijs af van 24,20 m tot 23,70 m (van west naar oost gezien). De Eurogeul is primair bedoeld voor schepen met een diepgang van 17,4 m of groter. Voor schepen met een diepgang kleiner dan 17,4 m is de haven bereikbaar via de overige scheepvaarroutes (parse routes in figuur 2.3).

Aan weerszijden van de Eurogeul ligt een 300 m brede berm (diepte: LAT -21,70 m tot LAT -21,80 m). Wanneer oploop- of ontmoetingmanoeuvres onvermijdelijk zijn, kan gebruik worden gemaakt van de berm(en). Het varen boven de berm(en) is alleen verantwoord als is vastgesteld dat er voldoende kielspeling aanwezig is. Schepen met een diepgang tot en met 21,35 m (70 voet) mogen alleen in bijzondere gevallen, zoals bij oplopen of ontmoeten, van de bermen gebruik maken. Schepen dieper stekend dan 21,35 m (70 voet) dienen te allen tijde binnen de 600 m brede Eurogeul te blijven.

De bodem van de Eurogeul heeft een zandgolfkarakter. Verder in oostelijke richting wordt de bodem steeds vlakker.

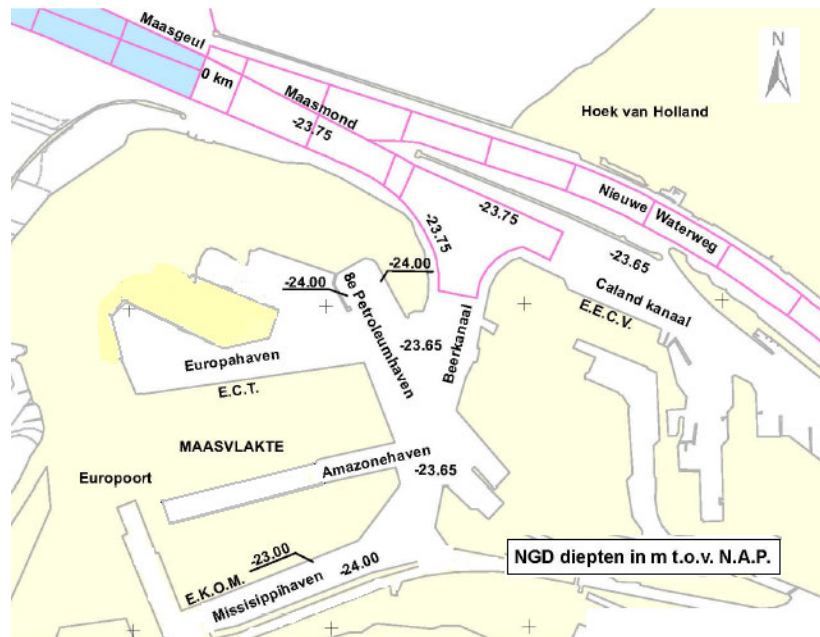
#### *Maasgeul*

De Maasgeul heeft een lengte van 11,35 km (6 mijl) en een breedte die afneemt van 600 m bij de Maas Center boei tot 500 m in de havenmond. De nautisch gegarandeerde diepte van de Maasgeul is 23,20 m t.o.v. LAT. De bodem van de Maasgeul is vrijwel vlak. De Maasgeul kent in tegenstelling tot de Eurogeul geen bermen.

#### *Binnengebied*

Het Binnengebied bestaat uit (o.a.) de Maasmond, het Calandkanaal en het Beerkanaal met de daaraan gelegen havens en ligplaatsen. Zie ter illustratie figuur 2.5. In de havenmond heeft de geul een breedte van 500 m. Het Beerkanaal bevat zwaaikommen voor schepen die rond moeten gaan om af te meren.





**Figuur 2.5. Kaart binnengebied**

Vanaf de havenhoofden tot aan de technische beheersgrenzen van RWS/HBR is de nautisch gegarandeerde diepte (NGD) NAP -23,75 m (= 22,83 m t.o.v. LAT). Tot aan de ligplaatsen waar de diepstekende schepen hun lading kunnen overslaan is de nautisch gegarandeerde diepte NAP -23,65 m (= 22,73 m t.o.v. LAT). Het gaat hier om diepten tot aan de EMO-Maasvlakte (oostelijke kade) in de Mississippihaven, de Maasvlakte Oil Terminal in de 8e Petroleumhaven, beide in het Beerkanaal, en de Ertskade (EECV westkade) in het Calandkanaal.

### 2.2.3 Procedures scheepvaart

In deze paragraaf worden de procedures voor de inkomende en uitgaande scheepvaart beschreven.

#### *Inkomende vaart*

De procedure die een inkomend geulschip dient te volgen staat aangegeven in de "Regeling geulgebonden schepen". Het in deze procedure genoemde tijpoortadvies stelt Rijkswaterstaat Noordzee vanuit haar verantwoordelijkheid als technisch vaargeulbeheerder op. Deze adviezen worden opgesteld door het Hydro-Meteo Centrum Noordzee (HMCN) te Rijswijk. Een tijpoortadvies, in de vorm van openings- en sluitingstijden voor Europegeul 57 km (oostelijk beginpunt), Maas Center (grens Euro- met Maasgeul) en Lage Licht (grens Maasmond-Binnengebied), wordt naast de overige informatie op het tijpoortformulier (digitaal) doorgegeven aan de nautische beheerder: Havenbedrijf Rotterdam NV. Het advies wordt door de Havenautoriteiten als een randvoorwaarde gehanteerd bij het opstellen van het plan van binnenkomst (opgesteld door de verkeersleider in samenspraak met de loodsdienstleider) en het vaarplan (opgesteld door de loods).

Aan elk tijgebonden schip (diepgang groter dan 20,00 m), dat zich voor de vaart naar de haven van Rotterdam aanmeldt, wordt een tijpoortadvies verstrekt. Vanaf deiningklasse 8 wordt ook voor schepen vanaf 17,40 m een tijpoortadvies verstrekt. Indien een tijgebonden schip zich aanmeldt, wordt de tijpoortinformatie ongeveer 6 uur voor passage Europegeul 57 km door middel van het tijpoortformulier uitgegeven. Het HMCN levert, in de tussentijd, nieuwe tijpoortinformatie indien veranderende omstandigheden hiertoe aanleiding geven. Tijdens de aanloop kan tot één uur voor passage Europegeul 57

km aan de hand van de laatste tijpoortinformatie worden besloten of de geplande geulvaart wordt doorgezet of afgebroken. Als er zich tijdens de geulvaart een onvoorziene verandering van de (verwachte) omstandigheden voordoet, dan wordt ook tijdens de geulvaart aanvullende tijpoortinformatie verstrekt.

De informatie voor het tijpoortadvies is afkomstig uit tijpoorttabellen (berekend met HARAP). Deze tijpoorttabellen zijn berekend door de Dienst Verkeer en Scheepvaart (voorheen: Adviesdienst Verkeer en Vervoer) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. De in de tijpoorttabellen vermelde openings- en sluitingstijdstippen gelden ten opzichte van het (verwachte) tijdstip van hoogwater bij Hoek van Holland.

Voor alle diepgangen gelden snelheidsafhankelijke tijpoorten. Er is sprake van een snelle (11,1 kn), een gemiddelde (10,1 kn) en een langzame vaart (9,1 kn). Deze vaarsnelheden zijn zodanig onderling op elkaar afgestemd dat de tijpoorten bij Eurogeul 57 km op elkaar aansluiten. Hiermee wordt een steeds smaller wordende (convergerende) tijpoort verkregen. In de Maasgeul en in het Binnengebied wordt geen onderscheid gemaakt naar snelle, gemiddelde of langzame vaart.

De tijpoortinformatie (uit de tijpoorttabellen) hangt af van de scheepsklasse, de astroklasse, de meteoklasse, de deiningklasse en de gekozen vaarsnelheid. Deze klassen worden als volgt bepaald:

- De scheepsklasse is afhankelijk van scheepstype, draagvermogen en (opgegeven) diepgang.
- De astroklasse wordt bepaald door de getijslag bij Hoek van Holland. De getijslag is het getijverschil tussen het astronomische hoogwater (van binnenkomst) en het voorafgaande astronomische laagwater.
- De meteoklasse wordt bepaald door de maatgevende meteoklasse (hoogste klasse nummer) van de meteoklassen van Hoek van Holland en Europlatform. De meteoklasse wordt bepaald door de som van het verwachte meteo-effect en het astronomische slagmidden van de betreffende locatie. Het slagmidden is het rekenkundige gemiddelde van de (astronomische) getijslag, van het hoog- en het voorafgaande laagwater.
- De deiningklasse wordt bepaald door de verwachte  $H_{E10}$ . De  $H_{E10}$  is een maat voor de laagfrequente golfhoogte (van de golven in de golfperiode-band van 10 tot 33 seconden).<sup>8</sup>

Voor de precieze indeling van de klassen wordt verwezen naar handleidingen van het programma HARAP.

#### *Uitgaande vaart*

Voor de uitgaande vaart is een geheel ander ontwerp van de regeling gedefinieerd. De belangrijkste eisen zijn een kielspeling van minimaal 15% van de diepgang op het gehele geultraject en een stroomvenster met minimale dwarsstroom in het gebied tussen de Havenhoofden en de Maasvlakte Noord boei. Dit venster bestaat uit twee perioden: Hoek van Holland -3:00 uur tot -2:00 uur of tussen HW HVH + 3:30 uur tot + 4:30 uur.

De standaard maximum diepgang voor een uitgaand geulchip is 20,75 m. Onder gunstige omstandigheden (deining tot en met klasse 4) kan met grotere diepgang worden vertrokken. Hierbij wordt een diepgang van 21,20 m als bovengrens gesteld. Deze diepgangen gelden voor een dichtheid van zeewater, d.i. 1025 kg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>8</sup> Het subscript E10 is de laagfrequente golfenergie; dit is de energie in het spectrum gelegen tussen 0,031Hz en 0,109Hz.

Er dient, bij het vrijgeven van het plan vertrek, voldoende zekerheid te bestaan dat er over het gehele traject voldoende kielspeling aanwezig zal zijn. De minimaal vereiste kielspelingen zijn per gebied in de volgende tabel gegeven.

<b>Gebied</b>	<b>Kielspeling</b>
Ligplaatsen en betreffende haven	0,50 m
Caland/Beerkanaal	1,00 m
Maasmond	10% van de diepgang
Maasgeul	15% van de diepgang
Eurogeul	15% van de diepgang

Tabel 1.1. Kielspeling per gebied

Voor de Euro en Maasgeul is gerekend met een dichtheid van 1025 kg/m<sup>3</sup>. Voor inkomende geulschepen wordt bij de tijpoortberekening een correctie toegepast voor inzinking in het binnengebied. Omgekeerd kan voor uitgaande geulschepen gecorrigeerd worden voor diepgangsafname in het buitengebied. De vertrekdiepgang op de ligplaats kan daarom hoger zijn dan de maximum geldende diepgang voor zeewater.



### 3. Elementen van een risicogebaseerde analyse

#### 3.1. Introductie

De aanpak van waterbouwkundige projecten is de afgelopen decennia onderhevig aan fundamentele veranderingen; van een conventionele deterministische basis naar de probabilistische risicogebaseerde methodologie.

De verandering in aanpak wordt gedreven door enkele vooruitstrevende ontwikkelingen. Allereerst is in de afgelopen jaren de kennis op het gebied van (probabilistische) waterbouwkundige processen toegenomen, in het bijzonder door vooruitgang in (veld) metingen en in het fysisch en numeriek modelleren. Bovendien is de capaciteit van de moderne computers enorm toegenomen, waardoor probabilistische berekeningen die in het verleden nog onpraktisch lang duurden nu goed binnen acceptabele tijd uitgevoerd kunnen worden. Ten derde, zijn de ingenieurs, die de beperkingen van een deterministisch ontwerp kennen, gemotiveerd om betere ontwerpprocedures door te voeren. Ten slotte is het publiek zich steeds meer bewust van en bezorgd om de kwaliteit van waterbouwkundige projecten en zij verwacht solide, deugdelijke projectanalyses.

#### 3.2. Een risicogebaseerde analyse

##### 3.2.1 Omschrijving

Een risicogebaseerde benadering is een beschouwing waarbij de gevolgen van het falen van een systeem of constructie expliciet in rekening zijn gebracht. Het is van belang zich te realiseren dat risico is gedefinieerd als de kans van optreden van een ongewenste gebeurtenis vermenigvuldigd met het effect/grootte van de gevolgen, uitgedrukt in verlies van geld, mensenlevens, milieuschade, tijd, etc.:

$$\text{Risico} = \text{kans van optreden} \times \text{gevolgen}$$

---

#### INTERMEZZO – Definitie risico

In de wetenschappelijke literatuur bestaat er geen eenduidige definitie voor het begrip risico. Er kunnen in het kader van een kwantitatieve aanpak verschillende definities van het begrip risico worden onderscheiden, zoals:

1. Risico = een kans
2. Risico = een effect, gevolg
3. Risico = kans \* gevolg
4. Risico = kans \* gevolg<sup>n</sup>

Definitie 3 is de meest gebruikte definitie. Onderdeel van de bepaling van het risico, is het aangeven waar het risico op van toepassing is. Het falen van een ontwerp of constructie wordt over het algemeen gebruikt als basis voor de risicoanalyse.

Het falen van een ontwerp kan verschillende gevolgen hebben. Voor definitie 1 en 2, is het gevolg meestal ééndimensionaal: alleen één "soort" gevolg wordt onderscheiden. Als voorbeeld: materiele schade of verlies van mensenleven na een ongeval kunnen de enige gevolgen zijn, die in beschouwing worden genomen.

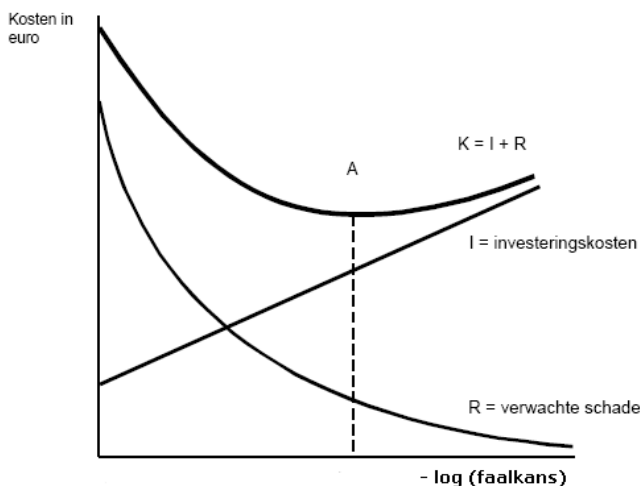
Definitie 3 en 4 kunnen gebruikt worden in geval van verschillende kans van optreden van de gevolgen. Bij een schip dat vaart in een vaarweg kan in geval van een bodemberoering materiele schade, milieuschade, vertraging, etc. optreden. Al deze gevolgen hebben een verschillende kans van optreden.

Ongeacht welke definitie wordt gekozen, moet er altijd een criterium worden gesteld om het risico te kunnen accepteren of afkeuren. Anders is het onmogelijk om het risico te toetsen.

In dit geval is het risico de kans op bodemberoering vermenigvuldigd met de financiële en milieu (omgeving) gevolgen van een bodemberoering. Om tot een aanvaardbare kans op bodemberoering te komen, moet het risico van een bodemberoering geoptimaliseerd worden. Hiervoor moeten de gevolgen van een bodemberoering in beschouwing genomen worden.

De financiële en milieu gevolgen zijn groter indien een vergelijkbaar schip een rotsachtige bodem raakt dan een modderige bodem. Ook zijn de gevolgen groter voor tankers dan voor General Cargo schepen. Zo kunnen risico niveaus worden geïntroduceerd, waarbij per type bodem en vracht de risicocriteria gekozen moeten worden. Nog een mogelijkheid is onderscheid te maken in locatie van bodemberoering. De gevolgen voor de omgeving zijn verschillend per locatie.

De figuur hieronder geeft een beeld van de totale kosten van een project als functie van de kans van falen (let op: van links naar rechts afnemend). Het economische optimum wordt gevonden bij het punt (punt A) waarbij de som van de totale kosten en de investeringen minimaal zijn.



**Figuur 3.1. Totale kosten als functie van de faalkans**

Toegepast binnen de context van dit afstudeerproject kan gesteld worden dat de faalkans, bij een gegeven ontwerpschip, groter wordt naarmate de waterdiepte kleiner wordt. De faalkans in figuur 3.1 kan zodoende vervangen worden door de diepte (in cm of m). De investeringskosten zijn bijvoorbeeld de kosten voor het op diepte brengen en houden van de bodem. De schade kan zijn schade aan het schip, lading verlies, kosten t.g.v. van vertraging (van ander schepen), etc. De verwachte schade dient in euro's te worden uitgedrukt<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Het in kaart brengen van financiële gevolgen kan wel eens een erg lastige zijn. Er zijn geen "normbedragen".

### 3.2.2 Redenen voor risicogebaseerde benadering

Er zijn een aantal redenen waarom waterbouwkundige projecten goed geanalyseerd kunnen worden met een probabilistische, risicogebaseerde aanpak, waaronder:

- 1) De belasting is probabilistisch van karakter
- 2) Veel onzekerheid in gedrag waterbouwkundige processen
- 3) Baten en risico's niet volledig weergegeven in deterministische termen

Ad 1.

Belastingen in de waterbouwkunde zijn probabilistisch van karakter. Zo variëren de golfkarakteristieken zowel op korte (de individuele golf) als lange termijn (van een zeegang naar een ander). Hetzelfde is waar voor de wind, waterstanden en stromingen.

Ad 2.

In de waterbouwkunde kenmerken de processen zich door hun onzekerheid. Achter de kennis die men tot nu toe vergaard heeft op "belasting" en "sterkte/response" van een parameter/proces schuilen onzekerheden. Een ontwerp op een deterministische wijze verbergt deze onzekerheden en kan dus misleidend zijn. Een risicogebaseerde benadering tracht de onzekerheden juist zichtbaar te maken.

Ad 3.

De baten en risico's van een waterbouwkundig project worden niet volledig weergegeven in deterministische termen (veiligheidsfactoren). En juist een betere weergave hiervan is gewenst. Een probabilistische aanpak leidt tot een betere weergave van de baten en risico's.

Naast de bovenstaande redenen, die meer gericht zijn op het ontwerp, is er nog een goed argument voor een risicogebaseerde analyse. Dat is het beoordelen van een waterbouwkundig project.

Ervaren waterbouwkundige ingenieurs zijn zich bewust van de beperkingen van een deterministische methode. En ook met een deterministische methode, kunnen zij een professioneel oordeel vellen over het ontwerp en een technisch succesvol project garanderen. Maar daar vaak het uiteindelijke lot van (grote) projecten in handen ligt van bedrijfskundigen of beleidsbepalers, die de technische belangen moeten afwegen tegen milieu, esthetische, sociale en politieke belangen, is een risico gebaseerde aanpak gewenst. Door het kwantificeren van de risico's, kan de ingenieur zijn ervaringen en professioneel oordeel beter doorgeven aan de beleidsbepalers, die vaak waterbouwkundige deskundigheid ontberen.

## 3.3. Probabilistisch ontwerpen

### 3.3.1 Het concept

Het probabilistische ontwerp beoogt inzicht te verkrijgen in de sterkte "R" (van resistance) en de belasting "S" (van sollicitation) van een systeem. Wanneer de belasting de sterkte overschrijdt, faalt het systeem. De staat waarin het mechanisme zich bevindt juist voor het falen, wordt de uiterste grenstoestand genoemd. De betrouwbaarheid van het mechanisme is de kans dat deze grenstoestand niet wordt overschreden. De algemene vorm van de betrouwbaarheidsfunctie is:

$$Z = R - S \quad (1)$$

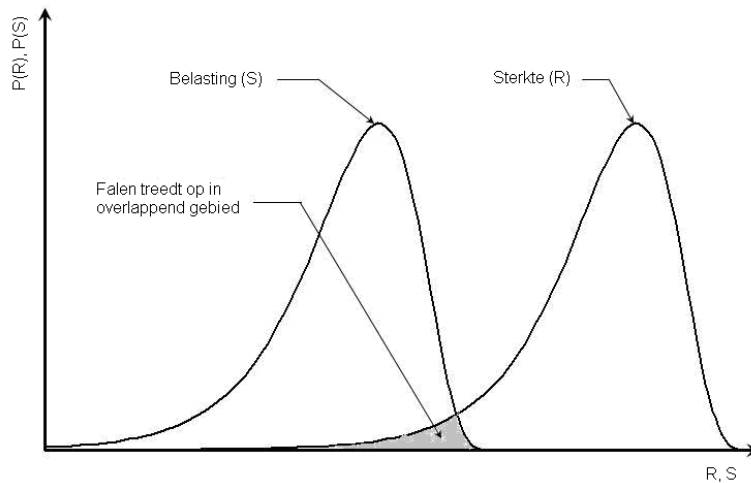
Met als kans op falen:

$$P_f = P(Z \leq 0) = P(S \geq R) \quad (2)$$

De betrouwbaarheid is de kans  $P(Z > 0)$  en is dus samen met de kans op falen gelijk aan 1:

$$P(Z > 0) = 1 - P_f \quad (3)$$

Gegeven de verdelingsfuncties van de sterkte en de belasting, treedt falen op in het overlappend gebied, zie figuur 3.2.



**Figuur 3.2. Grafische weergave faalgebied**

Een parallel kan gemaakt worden tussen het bovenstaande en de kans dat de diepte niet voldoende is. De nautisch gegarandeerde diepte kan dan gezien worden als sterkte (R) in het model en het getij, de golven, squat en diepgang als belasting (S). De betrouwbaarheidsfunctie (Z) ziet er dan als volgt uit (vergelijk met de uitdrukking in paragraaf 1.2):

$$Z = d + H_t - (T + s + r) \quad (4)$$

Met:  $d$  = nautisch gegarandeerde diepte (t.o.v. het reductievlak)  
 $H_t$  = getijrijzing boven het reductievlak  
 $T$  = diepgang ontwerpschip (afhankelijk van de dichtheid)  
 $s$  = inzinking t.g.v. squat (trim en helling)  
 $r$  = verticale bewegingen van schip t.g.v. golven

De parameters  $H_t$ ,  $s$ ,  $T$  zijn hoofdzakelijk deterministisch, maar hebben probabilistische componenten waarvoor kansdichtheidsfuncties kunnen worden bepaald. Ook voor de parameter  $r$  (probabilistisch) kan een kansdichtheidsfunctie worden bepaald.

Vervolgens kan de probabilistische analyse worden gemaakt met de volgende kans op falen (=bodemberoering):

$$P_f = P(Z < 0) = a$$

Met een risicogebaseerde benadering kan een waarde voor 'a' bepaald worden voor het binnengebied van de haven, zie hoofdstuk 5. Voor de toegangseul is 'a' vastgesteld op 1/100 vaarten door de geul (individueel vaartcriterium, zie hoofdstuk 6).



Naast de kans op bodemberoering zou nog een faalkans kunnen worden geïntroduceerd: kans op verminderd manoeuvreerbaarheid (zie hoofdstuk 5). Dit is de kans dat de manoeuvreermarge<sup>10</sup> onvoldoende is.

### 3.3.2 Niveaus van exactheid

In het constructieve vakgebied vinden veiligheidsbeschouwingen meestal plaats met de filosofie van grenstoestanden. Er zijn echter verschillende niveaus van exactheid waarop een grenstoestand vastgesteld kan worden. Een internationaal orgaan, het Joint Committee on Structural Safety, heeft de volgende drie niveaus onderscheiden:

- Niveau III: een exact probabilistische benadering waarbij de kansdichtheid functies van alle variabelen in aanmerking worden genomen. Voorbeelden: Monte Carlo simulatie en Numerieke Integratie.
- Niveau II: een benaderde methode, waarbij het probleem wordt gelineariseerd rond een met zorg gekozen punt (design point). Deze methode heet ook wel eerste orde - tweede moment methode. Voorbeeld van deze methode AFDA (approximate full distribution approach).
- Niveau I: de huidige ontwerp methode, die afstand schept tussen de karakteristieke waarden van sterken en belastingen, door middel van een verzameling partiële veiligheidsfactoren. Voorbeeld is de NEN-normen.

### 3.3.3 Probabilistische berekeningsmethoden

Omdat verwacht wordt dat de probabilistische diepte van het binnenhavengebied is te bepalen met een niveau III benadering worden hieronder twee in aanmerking komende niveau III methoden besproken.

In het ontwerpen van de diepte van een haven, worden een aantal variabelen voorspeld. Voorbeelden van zulke variabelen zijn de golfhoogte, het astronomische getij, vaarsnelheden, diepgang ontwerpschip, etc. Voor elke variabele wordt de variantie rond de verwachte waarde beschreven in de bijhorende kansverdelingen  $f_{X_i}(X_i)$ . De betrouwbaarheidsfunctie (het aantal bodemberoeringen) kan worden beschreven als functie van de variabele<sup>11</sup>  $\vec{X}$ :

$$\xi = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

De faalkans kan dan worden berekend met:

$$P_f = \int \int \dots \int_{Z < 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \quad (1)$$

Deze integraal kan zelden analytisch worden opgelost. Daarom worden hiervoor numerieke methoden gebruikt om de intergraal op te lossen. Hieronder worden twee van deze methoden besproken; Numerieke Integratie en Monte Carlo Simulatie.

<sup>10</sup> In de Haven van Rotterdam wordt voor het manoeuvreren minimaal 1m netto vereist.

<sup>11</sup> Gerealiseerd dient te worden dat de functie complexer kan zijn dan hier gepresenteerd. Er geldt waarschijnlijk een onderlinge afhankelijkheid tussen de variabelen, waarbij bijvoorbeeld geldt  $X_1(X_2) = \dots$ . Om de vergelijkingen simpel en overzichtelijk te houden, is dit in de formules buiten beschouwing gelaten.

### Numerieke Integratie

Numerieke integratie is in de numerieke wiskunde de berekening van de numerieke waarde als benadering van een integraal. Uitkomsten van veel integralen laten zich niet uitdrukken in elementaire functies. Om toch een oplossing te komen, neemt men zijn toevlucht tot numerieke integratie.

Vergelijking (1) kan geschreven worden als:

$$P_f = \int_{\xi > 0} dF_{\vec{X}}(\vec{X}) = \int_0^1 dF_{\vec{X}} = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 dF_{X_1}(X_1) \cdot dF_{X_2|X_1}(X_2|X_1) \dots dF_{X_n|X_{n-1}, \dots, X_1}(X_n|X_{n-1}, \dots, X_1)$$

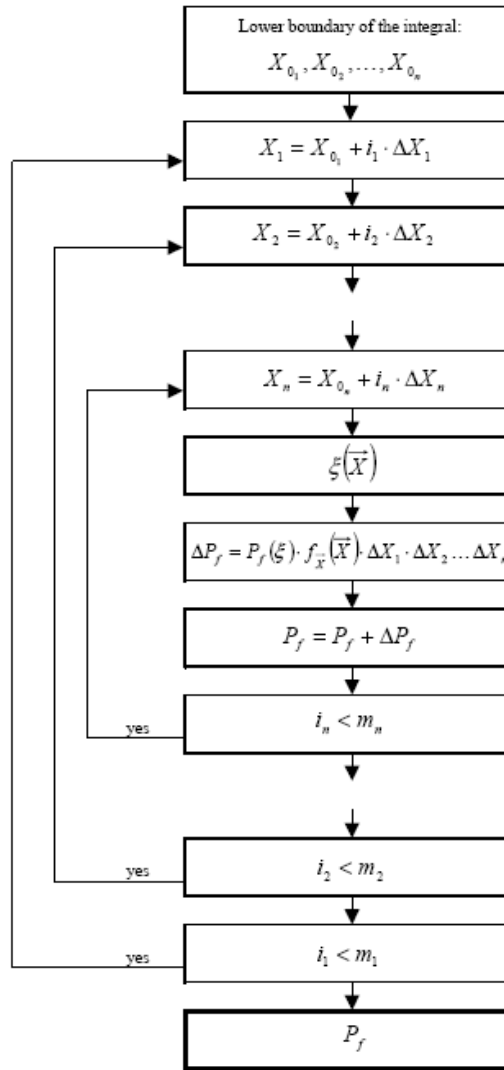
Met:

$$dF_{\vec{X}}(\vec{X}) = f_{\vec{X}}(\vec{X}) dX_1 dX_2 \dots dX_n$$

Als de variabelen X onafhankelijk zijn, dan geldt:

$$P_f = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 dF_{X_1}(X_1) \cdot dF_{X_1}(X_1) \cdot dF_{X_2}(X_2) \dots dF_{X_n}(X_n)$$

Om de bovenstaande integralen op te lossen, kunnen verschillende numerieke integratie technieken worden gebruikt. Een simpel numerieke integratie techniek is de Riemann techniek. Het stroomschema voor de Riemann procedure is in figuur 3.3 weergegeven.



**Figuur 3.3. Stroomschema Riemann procedure**

Volgens de procedure weergegeven in de bovenstaande figuur wordt de kans op falen benaderd met:

$$P_f \approx \sum_{i_1=0}^{m_1} \sum_{i_2=0}^{m_2} \dots \sum_{i_n=0}^{m_n} f_{\vec{X}}(\vec{X}_0 + i_1 \Delta \vec{X}_1 + i_2 \Delta \vec{X}_2 + \dots + i_n \Delta \vec{X}_n) \cdot \Delta \vec{X}_1 \cdot \Delta \vec{X}_2 \dots \Delta \vec{X}_n$$

Om tot enigszins betrouwbare resultaten te komen moet de integratiestap  $\Delta X_j$  voldoende klein zijn. Het aantal integratie stappen is weergegeven door de letter m.

#### *Monte Carlo Simulatie*

De Monte Carlo simulatie is een simulatietechniek waarbij door vele herhalingen, elke keer met een andere startwaarde, een verdelingsfunctie wordt verkregen. Bij een Monte Carlo simulatie wordt een simulatie van een doorvaart met één statistische

vector  $\vec{X}$  gekozen uit de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie  $f(\vec{X})$ . Door deze simulatie een aantal maal te herhalen kan de kans op falen worden berekend.

Om een waarde te kiezen uit een verdeling wordt de volgende bewering gehanteerd:

De "non-exceedance probability" van een willekeurige random variabele is uniform verdeeld tussen 0 en 1, ongeacht de verdeling van de variabele.

In formule vorm:  $F_X(X) = X_u$

$X_u$  Uniform verdeelde variabele tussen 0 en 1  
 $F_X(X)$  De "non-exceedance probability"  $P(X < X)$

De bovenstaande formule kan herschreven wordt tot:

$$X = F_X^{-1}(X_u)$$

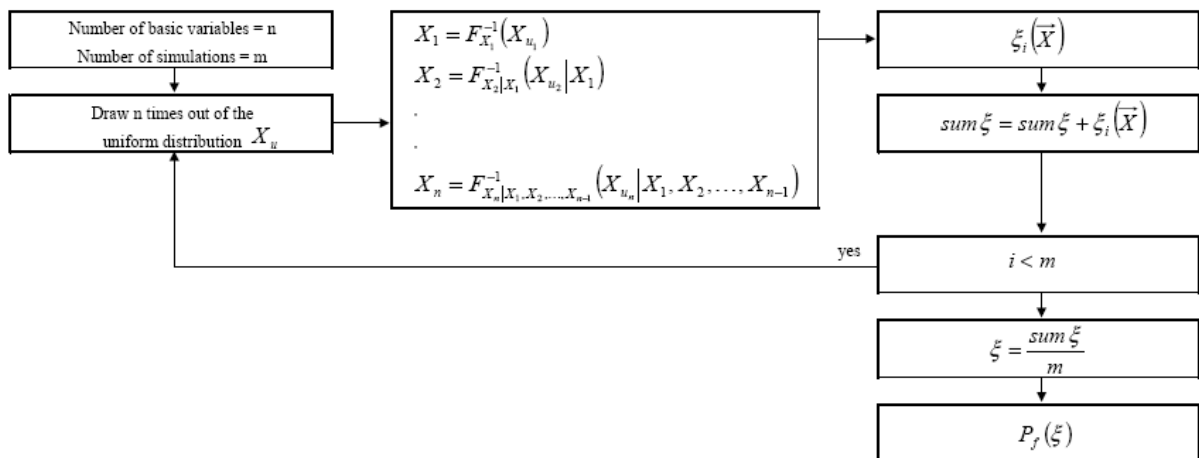
Om een waarde te bepalen uit een gezamenlijke kansdichtheidsfunctie moet deze functie geformuleerd worden als een product van de voorwaardelijke kansverdelingen van de variabele. In formule:

$$F_{\vec{X}}(\vec{X}) = F_{X_1}(X_1) \cdot F_{X_2|X_1}(X_2|X_1) \dots F_{X_n|X_1, X_2, \dots, X_{n-1}}(X_n|X_1, X_2, \dots, X_{n-1})$$

Door n realisatie van de uniforme verdeling te nemen tussen nul en één, kan de waarde bepaald worden voor elke  $X_i$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= F_{X_1}^{-1}(X_{u_1}) \\ X_2 &= F_{X_2|X_1}^{-1}(X_{u_2}|X_1) \\ &\vdots \\ X_n &= F_{X_n|X_1, X_2, \dots, X_{n-1}}^{-1}(X_{u_n}|X_1, X_2, \dots, X_{n-1}) \end{aligned}$$

In figuur 3.4 is het stroomschema van de Monte Carlo methode weergegeven.



**Figuur 3.4. Stroomschema Monte Carlo methode**

### 3.3.4 Deterministisch vs. probabilistisch; veiligheidsmarges vs. toelaatbare faalkans

Op dit moment wordt de vereiste diepte in het binnengebied van de haven op een deterministische manier bepaald. Bij deze methode worden ervaringsgebaseerde conservatieve aannames gedaan en veiligheidsmarges toegepast op zowel invoerparameters als berekeningsresultaten. Meestal resulteert dit, uit financieel-economisch oogpunt, in een overdimensionering van de diepte.

Bij een probabilistische ontwerpmethode wordt getracht om het conservatieve aspect (het afvangen van risico's) zo goed mogelijk te benoemen en te kwantificeren. Hierbij worden onzekerheden in invoerparameters en berekeningsmethoden zichtbaar gemaakt en wordt de mate van veiligheid vooraf gedefinieerd in de vorm van aanvaardbare kansen op "falen" (kans op bodemberoering, kans op verminderde manoeuvreerbaarheid).

De deterministische aanpak kent vele varianten, die over het algemeen een mix zijn van twee basisvormen:

- het gebruik "maximale" waarden voor alle invoerparameters;
- het gebruik van "gemiddelde" waarden voor alle invoerparameters, waarna op het eindresultaat een empirische "veiligheidsmarge" wordt toegepast.

De eerste basisvorm resulteert in een ontwerp met de zekerheid dat het (nagenoeg) nooit zal falen. Bij de tweede basisvorm en alle mengvormen is die zekerheid er niet en is de kans op falen ook niet kwantificeerbaar. Toepassing van conservatieve invoerwaarden in combinatie met conservatieve veiligheidsmarges (om de onzekerheid van falen te compenseren) resulteren vaak in conservatieve en dus dure ontwerpen.

Bij een volledig probabilistische aanpak wordt van alle invoerparameters de onzekerheid in kaart gebracht en gekwantificeerd (d.m.v. een kansverdeling). Hetzelfde gebeurt bij de berekeningsmethoden waar vanzelfsprekend ook onzekerheden in zitten. Het resultaat is een serie van uitkomsten (in ons geval: dieptes van het havenbekken) welke gekoppeld zijn aan een kans van falen (bodemberoering of manoeuvreerbaarheid). Een bewuste keuze van de acceptabele faalkans (acceptabel risiconiveau) is daarmee direct gekoppeld aan de toe te passen ontwerpdiepte.

Als de resultaten leiden tot een te duur ontwerp zijn er in principe twee mogelijkheden:

- 1) accepteren dat er vaker iets fout gaat. (deterministisch: kleinere veiligheidsmarge; probabilistisch: grotere faalkans);
- 2) versoepelen van de ontwerpcondities: schepen niet toelaten tijdens ongunstige omgevingscondities (tijvenster - "downtime").

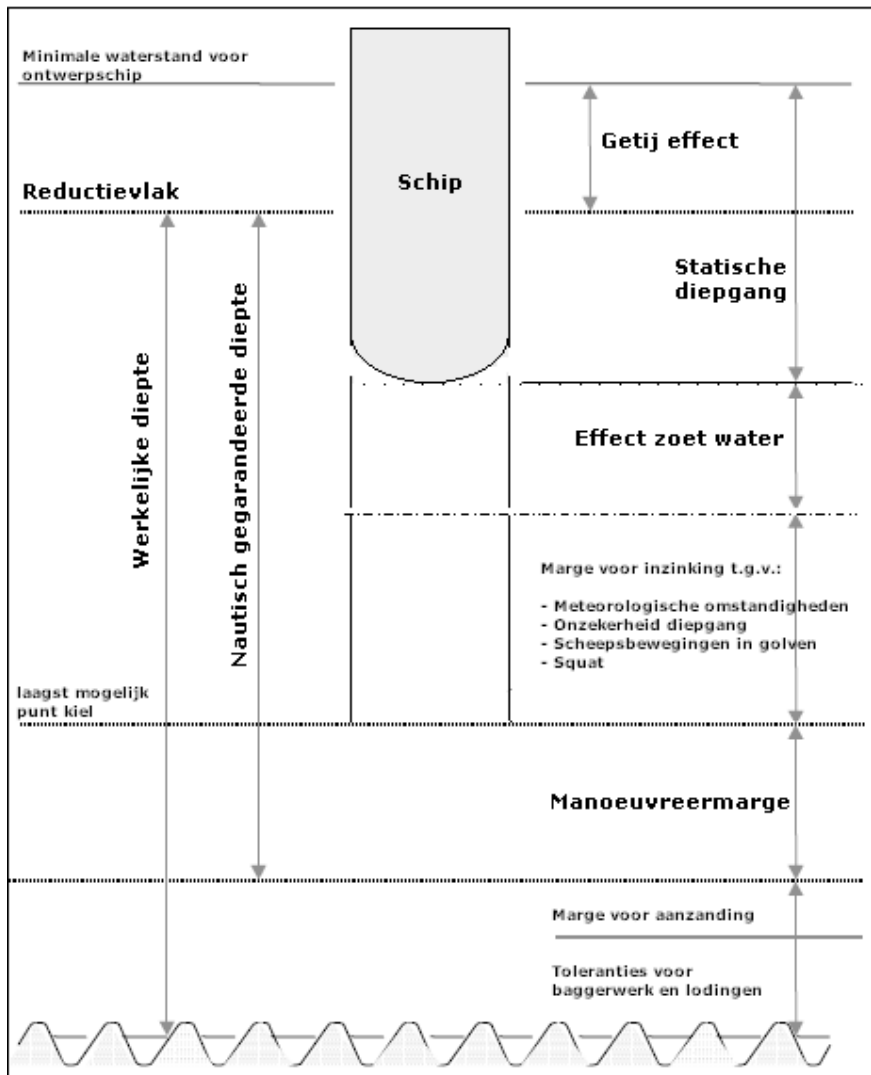


## 4. Diepteontwerp in het binnengebied

### 4.1. Kielspeling en marges voor benodigde diepte

#### 4.1.1 Algemeen

De diepte in het binnengebied van de haven kan bepaald worden door marges uit te rekenen voor elk van de factoren, die de kielspeling van het schip beïnvloeden, en deze bij de maatgevende diepgang op te tellen, zie ter illustratie figuur 4.1. Deze factoren worden hierna (kort) toegelicht.



Figuur 4.1. Beschouwing diepte in binnengebied

In dit onderzoek wordt uitgegaan van een nautisch gegarandeerde diepte. Deze diepte is in de figuur hierboven aangegeven. Factoren als marge voor aanzanding en toleranties voor het baggerwerk en lodingen zijn daarom buiten beschouwing gelaten.

#### 4.1.2 Referentieniveau

In veel landen is het reductievlak van zeekaarten sinds medio 2006 gedefinieerd als LAT (lowest astronomical tide). In Nederland worden de dieptes echter vaak aangegeven t.o.v. NAP. De getijtabellen worden bijvoorbeeld t.o.v. NAP gepresenteerd.

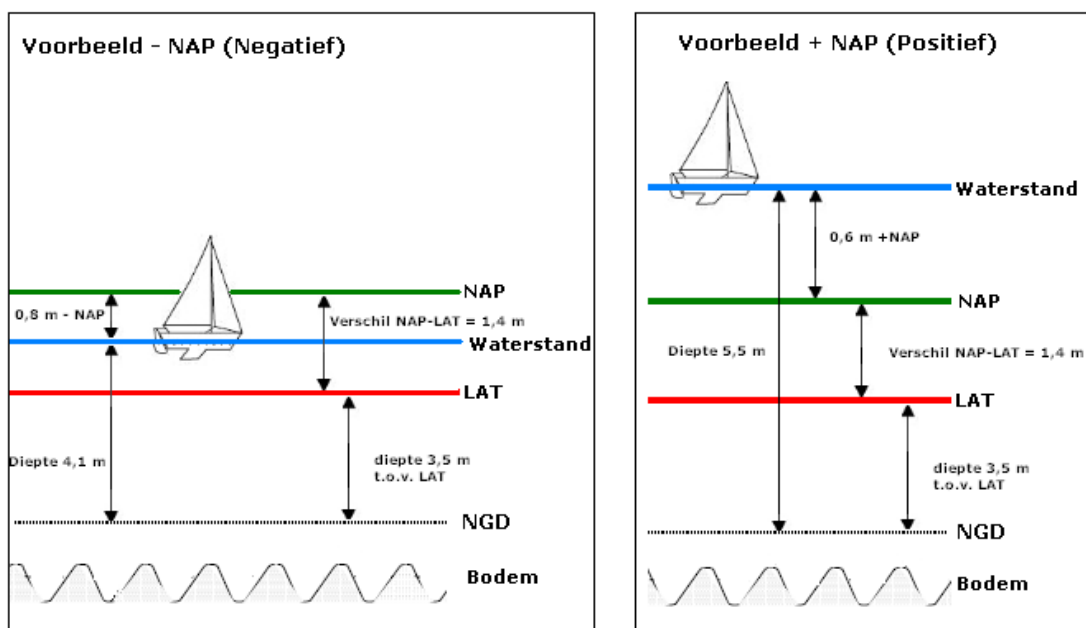
Verwarring ontstaat nog al eens door het afwisselende gebruik van NAP en LAT als referentieniveau. Daarom een korte beschouwing van deze referentieniveaus.

Bij NAP-gegevens wordt meestal **de positie** van de bodem of het waterpeil t.o.v. het NAP referentievlak gegeven. Boven NAP is positief, eronder negatief. Over het hele land verspreid zijn peilmerken te vinden die eens in de 10 jaar worden geijkt. Een NAP-hoogte van 0 meter is aan de kust ongeveer gelijk aan gemiddeld zeeniveau. NAP ligt over het algemeen boven LAT.

Het reductievlak LAT is daarentegen gekoppeld aan het getij. LAT is het laagst mogelijke niveau van het astronomische getij (in theorie). Hiermee wordt voorkomen dat het getij negatief kan zijn.

Bovendien wordt de bodem niet 'negatief' t.o.v. LAT gegeven, dit in tegenstelling tot NAP. Bij LAT wordt meestal **de diepte** van het water boven de bodem gegeven: als het waterpeil op LAT ligt (en de bodem dus onder LAT ligt) dan is het getal positief.

Hieronder het voorgaande geïllustreerd inclusief een numeriek voorbeeld (getallen zijn fictief). De dieptes zijn aangegeven t.o.v. de nautisch gearandeerde diepte (NGD).



Figuur 4.2. Illustratie NAP en LAT

Opgemerkt dient te worden dat het verschil tussen LAT en NAP per locatie verschilt aangezien ook per locatie de getijvariatie verschilt. In het Beerkanaal is het verschil tussen NAP en LAT ongeveer 0,65 m ( Hydro Meteo informatiebundel, 2004).

#### 4.2. Het verticale getij

De waterstand in de haven staat onder invloed van het astronomische getij. De haven kan ontworpen worden door uit te gaan van de laagste astronomische waterstand



(bijvoorbeeld LAT). Hierdoor zou de haven te allen tijde beschikbaar zijn voor de ontwerpschepen, zonder dat er daarbij wachttijden zijn voor deze schepen. Vaak is dit niet economisch, en wordt een tijvenster toegepast door een afweging te maken tussen (financiële/commerciële) gevolgen t.g.v. wachttijden voor schepen en kosten voor het baggeren.

Bij het bepalen van de duur van het tijvenster is inzicht in hoe het getij door de haven 'loopt' ook belangrijk. Zo zou bepaalde scheepvaart alleen bij opkomend getij een doorvaart kunnen hebben. Dit zou invloed kunnen hebben op het snelheidsregime; als gevolg van een (korte) tijvenster zou de vaarsnelheid kunnen oplopen wat leidt tot meer squat, meer hinder voor overige scheepvaart, etc.

#### **4.3. Meteorologische effecten**

##### *Wind*

De wind heeft invloed in de bepaling van de benodigde diepte. Enerzijds veroorzaakt de wind op- en afwaaiing, waarbij afwaaiing belangrijk is in deze context. Anderzijds zorgt (harde) wind ervoor dat schepen gaan slingeren. Dit geldt in het bijzonder voor schepen met een grote freeboard (LNG tankers en containerschepen).

##### *Seiches*

Seiches zijn golven in halfgesloten havenbekkens. De benaming is afgeleid van halingen, oud-Nederlands voor lange staande golven. Seiches hebben een periode van 10 minuten tot omstreeks 2 uur en een golflengte van enkele tientallen kilometers. In Nederland komen ze voor in de havens van IJmuiden en Rotterdam. Seiches ontstaan door een opslinger reactie van de haven op inkomende lange golven.

Deze inkomende golven hebben op de Noordzee een amplitude (hoogte) van ongeveer 10 cm, door het opslinger kan dit in het havenbekken oplopen tot ruim een meter. De amplitude is bij het gesloten einde van het havenbekken het grootst. In het Rotterdamse komen seiches met een amplitude hoger dan 25 cm ongeveer acht maal per jaar voor, vooral in de periode augustus t/m maart. Door een seiche kunnen laaggelegen kades onder water lopen of kunnen diepgaande schepen de bodem beroeren.

Onderzoek aan de TU Delft (2004; Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins) heeft uitgewezen dat bepaalde meteorologische omstandigheden (stormen) op de Noordzee deze lange golven opwekken.

#### **4.4. Onzekerheid in opgegeven diepgang**

De diepgang van de (geulgebonden) schepen wordt door kapiteins doorgegeven aan de havenmeester. De indicatieve tijpoort adviezen worden hierop gebaseerd. Indien de loodsen eenmaal aan boord van het schip de opgegeven diepgang zouden valideren, dan zou met deze gegevens de kansverdelingen van de onzekerheid in de diepgang kunnen worden verkregen.<sup>12</sup>

#### **4.5. Effect van soortelijke massa water**

De aangemelde diepgang van zeevarende schepen is vaak gebaseerd op de diepgang in (zout) zeewater ( $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ). Wanneer de schepen de haven binnenvaren in brak of zoet water neemt de diepgang toe t.g.v. een lagere dichtheid van zoet water ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ). De diepgang neemt in zoet water t.o.v. zout water met (maximaal) 2,5% toe.

In geval van een schip met een diepgang van 10 m, levert dit een verschil in diepgang tussen zee- en zoet water op van 25 cm.

---

<sup>12</sup> Dit is helaas niet het geval.

In de Haven van Rotterdam wordt de zoutconcentratie berekend met het model TRIWAQ. TRIWAQ is het waterbewegingmodel in drie dimensies van Rijkswaterstaat waarmee waterloopkundige processen in meren, rivieren, zeeën en estuaria kunnen worden gesimuleerd.

Met TRIWAQ worden waterstanden, waterstromingen en concentraties van opgeloste stoffen berekend in open wateren. In een TRIWAQ-model kunnen waterstromingen en concentraties van opgeloste stoffen variëren met de diepte (z-as), de lengte (x-as) en breedte (y-as) van een volume. Dit is een 3D (driedimensionale) benadering. TRIWAQ heeft een equivalent in twee dimensies, namelijk WAQUA.

#### **4.6. Verticale scheepsbewegingen in golven**

Hoewel de golven in het binnengebied minder dominant zijn als op zee, kunnen er significante golfhoogtes van 40 cm optreden met een overschrijdingskans van 10%<sup>13</sup> van de tijd.

De golfeffecten nemen toe met toenemende golfhoogte en nemen af met langere scheepslengte.

De beweging van het schip kent, als vrij bewegend object, zes vrijheidsgraden. Zie ter illustratie figuur 4.3. Translatie langs en rotatie om zowel de horizontale als verticale as is mogelijk. De benamingen van de vrijheidsgraden zijn als volgt, zie ook figuur 4.3:

Translatie:

- Schrikken (surge)
- Verzetten (sway)
- Dampen (heave)

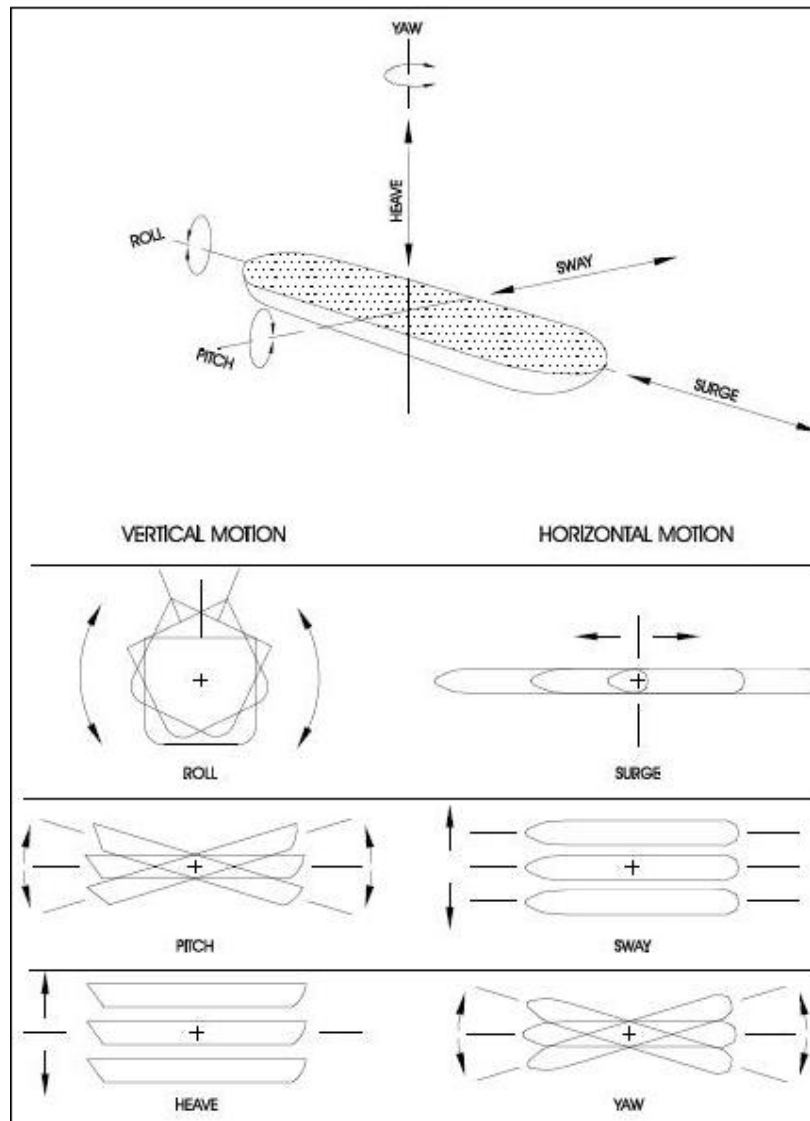
Rotatie

- Slingeren (roll)
- Stampen (pitch)
- Gieren (yaw)

De scheepsbewegingen die invloed hebben op de bepaling van de diepte zijn slingeren, stampen en dompen. Slingeren en dompen zijn de belangrijkste beweging als de golfrichting loodrecht op de vaarrichting is. Stampen is de belangrijkste bewegingen als de golfrichting parallel loopt met de vaar richting.

---

<sup>13</sup> Meetlocatie: Beerkanaal (kop). Bron: Hydro Meteo informatieBundel nr.3



**Figuur 4.3. Vrijheidsgraden schip (bron: ASCE)**

De verticale scheepsbewegingen hangen af van de gecombineerde effecten van:

- Golfhoogte,  $\sim$ periode,  $\sim$ lengte en voortplantingsnelheid
- Golfrichting t.o.v. het schip
- Scheepsgeometrie
- Snelheid schip
- Diepgang en kielspeling
- Wind en stromingen (snelheden en richtingen)
- Besturingsstrategie

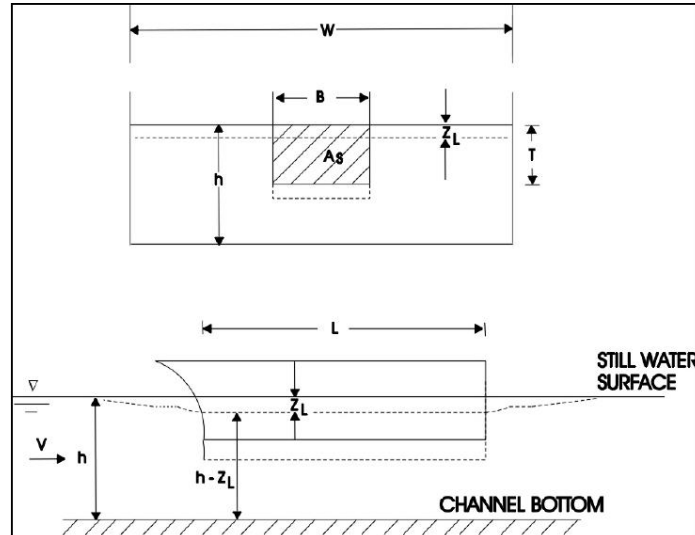
#### 4.7. Squat

Wanneer een schip vaart door water, wordt het water vooruit gedrukt. Om geen "leegte" in het water achter laten, moet dit volume water terug stromen langs de zijkanten en aan de onderkant van het schip. De stroomlijnen van de terugstroom vernauwen, waardoor de retourstroom versnelt. Dit veroorzaakt een drukverlaging, dat resulteert in een verticale inzinking van het schip.

Naast een inzinking, trimt het schip naar voren of achter. De totale afnamen van de kielspeling wordt squat genoemd.

De hoeveelheid squat dat wordt ervaren door een schip hangt sterk af van de vaarsnelheid, de blokcoëfficiënt, de diepgang van het schip en diepte van de vaarweg.

Het verschijnsel squat is moeilijk nauwkeurig in te schatten, en is onderwerp van hedendaagse studie. Er zijn echter wel enkele empirische formules om de inzinking van het schip t.g.v. squat ( $s$ ) in te schatten. De figuur hieronder geeft een definitieschets van de parameters ter bepaling van squat.



**Figuur 4.4. Definitieschets squat parameters (bron: ASCE). Let op: squat is in figuur aangegeven met  $z_L$  i.p.v.  $s$ .**

Veel van de empirische formules ter bepaling van squat, zijn alleen toepasbaar in open wateren. Open water wordt vaak gedefinieerd als een vaart met een effectieve breedte van ten minste 8 maal de breedte van het schip. De formule die hieronder zijn gepresenteerd gelden voor ondiep water, gedefinieerd als  $h < 2T$ .

Enkele formules om squat te bepalen in open wateren (fairway):

Barrass (1981) stelde de volgende formule voor ter bepaling van de maximale inzinking aan de boeg van het schip;

$$s = \frac{C_B \cdot S_2^{2/3} \cdot V_k^{2.08}}{30}$$

Met:

$$C_B = \text{blokcoëfficiënt} = \nabla / L_{pp} B T$$

$$S_2 = \frac{A_s}{A_w} \text{ with } A_w = A_c - A_s$$

$$V_k = \text{vaarsnelheid in knopen}$$

Rekonen (1980) en later Norrbin (1986) gingen verder op het werk van Tuck & Taylor en kwamen met de volgende formule voor squat in een vaargeul (open water),:

$$\frac{s}{T} = 2.4 \cdot \frac{C_B}{L/B} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1-F_h^2}}$$

Met:

$$F_h = \text{froude getal}$$

Voor een rechthoekig kanaal (rectangular canal):

Squat kan gerelateerd worden aan de het Froude getal en de grenssnelheid van het schip volgens Schijf:

$$F_L = \frac{V_L}{\sqrt{gh}}$$

$$s = h \left[ \frac{F_L^2}{2} (F_L^{1/3} - 1) \right]$$

Met:

$$F_L = \text{Froude getal}$$

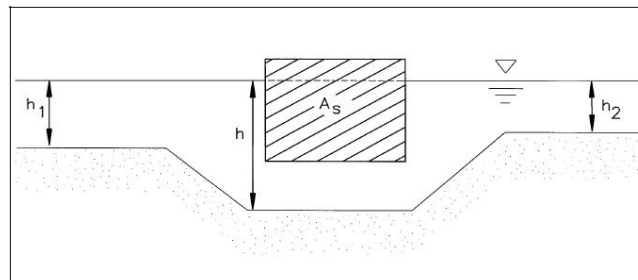
$$V_L = \text{Grenssnelheid volgens Schijf}$$

Voor een verdiepte vaargeul (trench channel):

Er bestaan verschillen vormen en configuraties van verdiepte vaargeulen. De configuratie van een verdiepte vaargeul zit tussen een volledig open water configuratie en een rechthoekig kanaal. Door interpolatie tussen deze extremen, kan een schatting worden gemaakt van de squat in een verdiepte vaargeul.

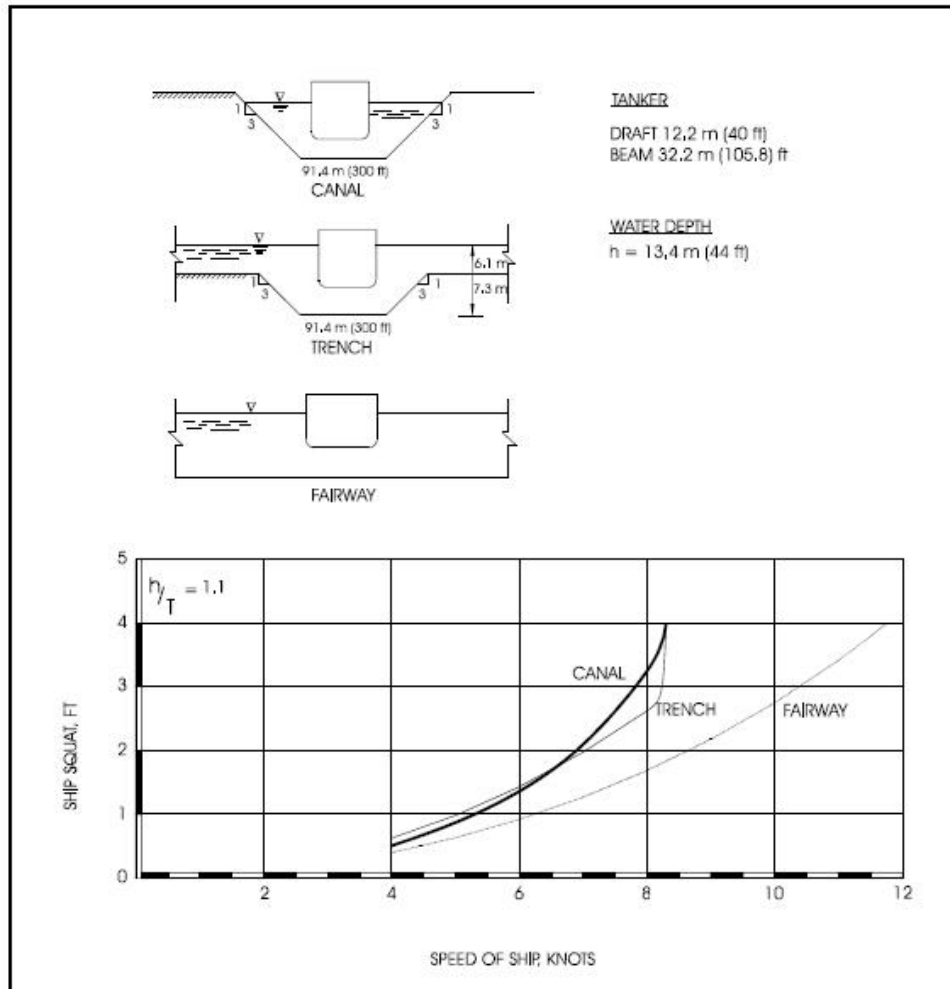
De formule:

$$s_T = \left( \frac{h_1 + h_2}{2h} \right) \cdot s_{\text{openwater}} + \left( 1 - \frac{h_1 + h_2}{2h} \right) \cdot s_{\text{rechthoekigkanaal}}$$



**Figuur 4.5. Definities verdiepte vaargeul**

Over het algemeen geldt dat bij een nauwer en begrensder vaart de squat enorm kan toenemen, vooral in geval van hoge vaarsnelheden. De figuur hieronder geeft indruk van de variatie van squat met de vaarsnelheid en vaart type. De berekeningen hiervoor zijn gemaakt met bovenstaande formules (Huval 1993).



**Figuur 4.6. Vergelijking squat per type vaarweg (bron: ASCE)**

#### 4.8. Manoeuvrermarge

In de haven van Rotterdam wordt voor het manoeuvreren 1m kielspeling aangehouden. Deze eis geldt bij een (nautische) bodem met als dichtheid 1200 kg/m<sup>3</sup>. In andere havens en vaarwegen in slibrijke gebieden wordt vaak een kleinere of geen manoeuvrermarge aangehouden (vaarwegen haven van Zeebrugge/Gent). Schepen zouden in principe door slibrijke bodems met een dichtheid kleiner 1200 kg/m<sup>3</sup> kunnen varen. De manoeuvreercharacteristieken van schepen door slibrijke bodems is onderwerp van hedendaagse studie.

De manoeuvreercharacteristieken van een schip zijn onder andere afhankelijk van de waterdiepte, de nabijheid van oevers en ondiepten, de rompvorm, de vorm en grootte van het roer, de vorm en het al dan niet verstelbaar zijn van de schroef, het machinevermogen en het vermogen van de eventueel aanwezige boeg- en hekschroeven. De manoeuvreerbaarheid bij zeer langzame vaart (tot vier knopen) is anders van karakter dan de manoeuvreerbaarheid bij een snellere vaart. Veel schepen zijn niet in staat om zelfstandig beneden de vier knopen te manoeuvreren.

Voor dit onderzoek kan de manoeuvrermarge van 1 m worden gehandhaafd en kan de kans op een te kleine manoeuvrermarge, als gevolg van de aspecten benoemd in dit hoofdstuk, als criterium gelden voor het probabilistische model.

## 5. Risico bodemberoering en verminderde manoeuvreerbaarheid

### 5.1 Algemeen

Het is van belang te realiseren dat risico is gedefinieerd als de kans van optreden van een ongewenste gebeurtenis (kans op falen) vermenigvuldigd met het effect/grootte van de gevolgen, uitgedrukt in verlies van geld, mensenlevens, milieuschade, tijd, etc.:

$$\text{Risico} = \text{kans van falen} \times \text{gevolgen}$$

In dit geval is het risico de kans op falen (bodemberoering of verminderd manoeuvreerbaarheid) vermenigvuldigd met de financiële en milieu (omgeving) gevolgen van het falen. Om tot een aanvaardbare kans op falen te komen, moet het risico van bijvoorbeeld een bodemberoering geoptimaliseerd worden. Optimalisatie kan kwalitatief (risk assessment) en kwantitatief (het bepalen van een risiconorm). Gekozen is voor een kwantitatieve benadering om tot een aanvaardbare kans op falen (criterium) te komen. Hiervoor moeten de gevolgen van het falen in beschouwing genomen worden.

Het is ook belangrijk om inzicht te hebben in de belangen van de betrokken partijen. Zo kan vastgesteld worden wie bepaalde risico's draagt en wie verantwoordelijk zijn.

De betrokken partijen:

- Havenbedrijf Rotterdam:
  - Divisie havenmeester: nautisch beheerder (veiligheid en milieu)
  - Baggerdienst: technisch beheerder, verantwoordelijk voor het op diepte houden van de gemeentelijke havens en vaarwegen
- Rijkswaterstaat: tijpoortadviseur en bodembeheerder van Eurogeul, Maasgeul, Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas.
- Rederijen: eigenaren van het schip
- Scheepsagent: vertegenwoordiger van het schip en reder
- Loodswezen: nautisch dienstverlener
- Kapiteins schepen: bevoegd gezag
- Sleepdienst: nautisch dienstverlener

### 5.2 Kans op falen

#### 5.2.1. Algemeen

In deze studie worden twee zogenaamde faalmechanismen onderscheiden:

- Bodemberoering
- Verminderde manoeuvreerbaarheid/bestuurbaarheid

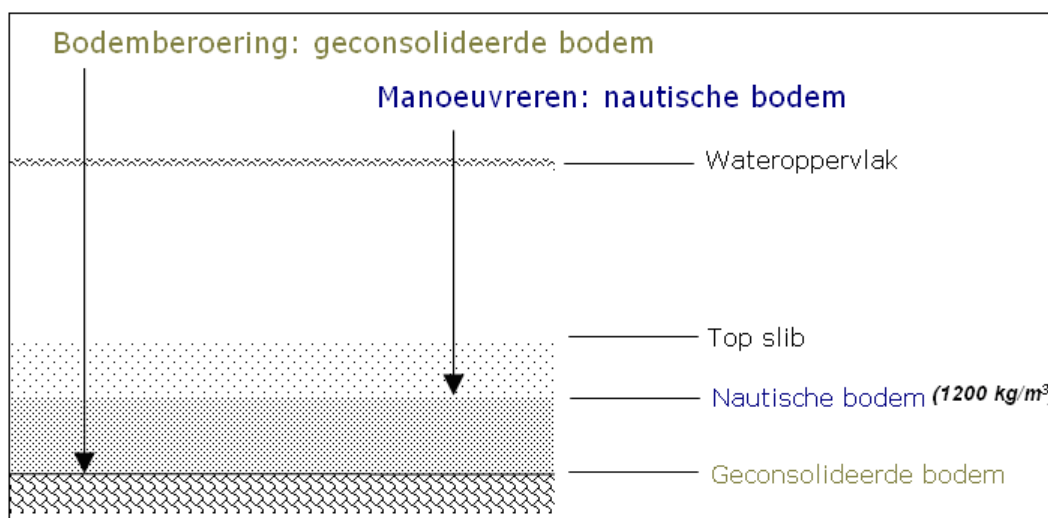
Van falen ten gevolge van bodemberoering is sprake als het schip op één of meerdere momenten tijdens de vaart de bodem raakt t.g.v. een onvoldoende kielspeling. De bodem die hieraan gekoppeld is, is gedefinieerd als de "harde" of "geconsolideerde" bodem.

Van falen ten gevolge van verminderde manoeuvreerbaarheid/bestuurbaarheid zou sprake zijn als gedurende een wat langere periode de kielspeling onder een aanvaardbare norm komt (korte op en neer gaande bewegingen door golven worden bij het manoeuvreeraspect buiten beschouwing gelaten). Het schip reageert dan minder snel en effectief (of onvoorspelbaar) op roer- en schroefveranderingen, vooral als de kielspeling erg klein wordt.

Op dit moment wordt binnen het Havenbedrijf een kielspeling van 1 m gehanteerd als manoeuvreermarge<sup>14</sup>, bij zeer langzame sleepbootgeassisteerde handelingen als bijvoorbeeld afmeren en ontmeren volstaat 0,5 m<sup>15</sup>. De referentiebodem bij dit faalmechanisme is de "nautische bodem". De nautische bodem wordt uit praktisch oogpunt gekoppeld aan een bepaald dichtheidsniveau in de bodemlaag. In Rotterdam is dat een dichtheid van 1030 of 1200 kg/m<sup>3</sup>. Zie bijlage 3 voor een nadere beschouwing van de nautische bodem.

In beide bovenstaande gevallen hoeft "falen" geen directe schade op te leveren (maar kan wel!), zie paragraaf 5.3.1. De "toelaatbare faalkansen" die daarbij worden gebruikt horen (in theorie) afgeleid te zijn van bedrijfsmatige en maatschappelijke toelaatbare risiconiveaus van directe en indirecte schade aan mensen, milieu, schepen en infrastructuur.

De figuur hieronder geeft een beeld van de relatie van faalmechanismen en bodems.



**Figuur 5.1. Relatie faalmechanisme en bodem**

### 5.2.2 Criterium bodemberoering

Zoals in de vorige paragraaf gedefinieerd is er sprake van een bodemberoering als het schip op één of meerdere momenten tijdens de vaart de bodem raakt, waarbij met bodem de geconsolideerde bodem wordt bedoeld. In deze paragraaf wordt de kans op een bodemberoering besproken.

In het kader van het ontwerp van de diepte, is de keuze voor een aanvaardbare kans (of veiligheids criterium) op bodemberoering een uiterst belangrijke, gezien het feit dat het direct gerelateerd is aan de nautische veiligheid.

#### Van de Kaa

Een van de eerste overzichten van criteria voor diepstekende schepen in toegangsheulen is samengesteld door Van de Kaa (1984). Vier van zijn opgestelde criteria (kansen per doorvaart) hebben betrekking op schip – bodem contact:

1. Incident onder gemiddelde omgevingscondities:  $5,0 \cdot 10^{-4}$  /doorvaart

<sup>14</sup> Deze meter geldt alleen voor geulschepen in het Caland/Beerkanaal en containerschepen bovenstrooms de Botlek.

<sup>15</sup> Dit geldt alleen voor niet-geulgebonden schepen. Voor geulgebonden schepen geldt ook bij afmeren en ontmeren een manoeuvreermarge van 1 m.



2. Incident met zware schade onder gemiddelde omgevingscondities  $2,5 \cdot 10^{-7}$  /doorvaart
3. Incident onder extreme omgevingscondities  $1,0 \cdot 10^{-2}$  / doorvaart
4. Incident met zware schade onder extreme omgevingscondities  $5,0 \cdot 10^{-4}$  /doorvaart

#### *PIANC*

In 1993 is door Dand en Lyon onderzoek gedaan naar bodemberoeringen in Noord-Europese havens (PIANC 1997). Hierbij is gebruik gemaakt van incidentendatabases van Noord-Europese havens. Het resultaat van het onderzoek leverde de volgende gemiddelde kans op bodemberoering op:

0,03 incidenten per 1000 scheepsbewegingen

Dit betekent dus een gemiddelde kans op bodemberoering van  $3,0 \cdot 10^{-5}$  per scheepsbeweging of één schip per 33.000 scheepsbewegingen, dat de bodem beroert. Hierbij is een scheepsbeweging (=doorvaart) gedefinieerd als een van de volgende bewegingen:

- 1) van binnenkomst in de haven tot ligplaats
- 2) van ligplaats tot ligplaats
- 3) van ligplaats tot uitgang haven

Deze gemiddelde kans op bodemberoering is gerelateerd aan alle bewegingen van de grotere schepen onder normale/gemiddelde omgevingscondities. Deze kans zou dan passen tussen de criteria 1 en 2 zoals opgesteld door Van de Kaa.

#### *Savenije*

De huidige criteria m.b.t. bodemberoeringen zoals die gelden voor de toegangsheuvelen van Rotterdam zijn opgesteld door Savenije (1996). Het betreffen de volgende twee criteria, zie ook paragraaf 6.1.2:

1. Gedurende 25 jaar een kans op bodemberoering, met meer dan lichte schade, niet meer dan 10%.
2. De kans op bodemberoering is tijdens een individuele vaart niet meer dan 1% gedurende alle weersomstandigheden.

Dit criterium is gebaseerd op een intensiteit van 250 diepstekende schepen die per jaar de haven van Rotterdam aandoen. Dit betekent dat 1 bodemberoering per 25 jaar of per 6250 scheepsbewegingen aanvaardbaar is. Dit betekent dus een kans van  $1,6 \cdot 10^{-4}$  per scheepsbeweging (of doorvaart), welke in dezelfde orde van grootte is als criterium 1 van Van de Kaa, met een kans van  $5,0 \cdot 10^{-4}$ .

#### *5.2.3 Criterium verminderde manoeuvreerbaarheid*

Verminderde manoeuvreerbaarheid/bestuurbaarheid is gedefinieerd als de gebeurtenis waarbij gedurende een wat langere periode de kielspeling onder een aanvaardbare norm komt (korte op en neer gaande bewegingen door golven worden dus bij het manoeuvreeraspect buiten beschouwing gelaten).

Om voldoende manoeuvreerbaarheid te behouden, geldt in de Haven van Rotterdam een manoeuvreermarge van minimaal 1 m netto kielspeling onder het varende binnenkomende schip zijn. Deze manoeuvreermarge is vastgesteld door de haven van Rotterdam en wordt beschouwd als veilig. De manoeuvreermarge van 1 m is ook als uitgangspunt gebruikt bij het dimensioneren van de haven (zoals draaicirkels en manoeuvreerbanen etc.).

Voor dit onderzoek kan de manoeuvreermarge van 1 m worden gehandhaafd en kan de kans op een te kleine manoeuvreermarge, als gevolg van de aspecten benoemd in hoofdstuk 4, als criterium gelden voor het probabilistische model.

Een acceptabele kans op verminderd manoeuvreren zou 1% kunnen zijn, net zoals het individuele vaartcriterium geldt in geval van bodemberoering (zie hoofdstuk 6).

### 5.3 Consequenties van falen

#### 5.3.1 Consequenties bodemberoering

##### Algemeen

Voor het bepalen van het risico van bodemberoering is het noodzakelijk de gevolgen hiervan te kunnen schatten. De gevolgen worden zo expliciet mogelijk benaderd en uitgedrukt in geld.

Als het schip de bodem raakt in het Calandkanaal of in het Beerkanaal of in de Europahaven kan dat verschillende gevolgen hebben. Als een schip bijvoorbeeld vast komt te liggen in de Europahaven hindert het minder het overige verkeer dan als het schip in het Beerkanaal vast komt te liggen. De gevolgen voor het overige verkeer zullen dan veel groter zijn.

Afhankelijk van de ernst van de bodemberoering, kan een bodemberoering verschillende gevolgen hebben. Mogelijke vormen van schade, die in beschouwing kunnen worden genomen, zijn:

- Imagoschade
- Schade aan schip (materiele schade)
- Kosten redding- en/of bergingsoperatie
- Kosten van een ladingsverlies
- Kosten voor de vertraging (tijd dat haven niet volledig operationeel kan zijn)

Ieder bodemberoering zal in ieder geval imagoschade betekenen voor de Haven van Rotterdam. Naarmate de gevolgen van een incident groter zijn, neemt deze imagoschade toe. Omdat een imagoschade moeilijk te kwantificeren is, blijft deze vorm van schade echter (in eerste instantie) buiten beschouwing.

In dit onderzoek naar de gevolgen van bodemberoeringen wordt niet meegenomen de schade in de vorm van verloren mensenlevens en/of gewonden. De reden hiervoor is dat persoonlijk letsel ten gevolge van bodemberoering redelijkerwijs niet aannemelijk is. Slechts in geval van zinken van een schip, verlies van schadelijke (bulklading) zou persoonlijk letsel als direct gevolg op kunnen treden.<sup>16</sup>

##### Scenario's

Er zijn verschillende scenario's denkbaar met betrekking tot bodemberoering. De volgende scenario's worden onderscheiden:

	Scenario	Gevolg
1	Een schip raakt de bodem en kan verder varen	- Geen of lichte schade aan schip; - Inspectie schip
2	Een schip raakt de bodem met schade aan	- Zware schade aan schip, reparatie

<sup>16</sup> Ook schade t.g.v. van 'lading verlet' wordt niet in beschouwing genomen. Dit is de rekening die de rederijen van scheepsagenten krijgen gepresenteerd, wanneer een verongelukt schip niet meer een geplande lading kan vervoeren.

	schip en bodem tengevolge	- Verlies van lading - reparatie bodem - Hinder voor overig scheepvaart
<b>3</b>	Een schip raakt bodem en komt vast te liggen (schip komt na 1 getijde weer los)	- Tijdsverlies voor het schip - In een haven: haven niet beschikbaar - In een vaarweg: vaarweg (mogelijk) gestremd - (incl. gevolgen scenario 1)
<b>4</b>	Een schip raakt bodem en komt vast te liggen (schip ligt langere tijd vast)	- Redding-/bergingsoperatie noodzakelijk - In een haven: haven niet beschikbaar - In een vaarweg: vaarweg (eventueel) gestremd - (incl. gevolgen scenario 1)
<b>5</b>	Een schip raakt bodem en zinkt	- Verlies van het schip - Verlies van de lading (mogelijk) - Milieuvervuiling - Redding-/bergingsoperatie noodzakelijk - Langdurig hinder overige scheepvaart

**Tabel 5.1. Scenario's bodemberoering**

Opgemerkt dient te worden dat het zeer onwaarschijnlijk is dat met name scenario's 4 en 5 optreden.

#### *Lading*

Een verder onderscheid kan gemaakt worden naar type schip. Vanaf scenario 2 (het moment dat lading verloren gaat) is het noodzakelijk het type lading in beschouwing te nemen. Hierbij zijn de gevolgen voor een oliecarrier of gastanker ernstiger dan een containerschip.

Opgemerkt dient te worden dat oliecarriers een grote diepgang kunnen hebben. In het jaar 2004 vervoerde 36% van de geulgebonden schepen en 70% van de tijgebonden schepen ruwe olie in de haven van Rotterdam.

#### *Handeling schip*

Er zou ook onderscheid gemaakt kunnen worden tussen een varende schip en een gemeerd liggend schip gemaakt en in het laatste geval met en zonder harde bodembescherming. Dit wordt echter buiten beschouwing gelaten gezien de complexe bewegingen van het schip tijdens het laden en lossen.

#### *Kwantificeren scenario's*

Zoals gezegd dienen de gevolgen van een bodemberoering gekwantificeerd te worden. Mogelijke vormen van schade die in beschouwing worden genomen zijn:

- 1) Schade aan schip (materiele schade)
- 2) Kosten redding- en/of bergingsoperatie
- 3) Kosten van ladingsverlies (bijv. olie morsen)
- 4) Kosten voor de vertraging (tijd dat haven niet volledig operationeel kan zijn)

#### Ad 1. Schade aan schip

Hierin kan onderscheid worden gemaakt tussen lichte en zware schade. Omdat schade aan het schip moeilijk te kwantificeren is, wordt de schade uitgedrukt in een percentage

van de waarde (aanschafprijs) van het schip. Hierbij wordt 'lichte schade' gedefinieerd als 2,5%-7,5% van de aanschafprijs; 'zware schade' als 25%-35% van de kost prijs. Hieronder een tabel met een indicatie van de aanschafprijzen van diverse typen schepen (bron: Review maritime transport 2007, UNCTAD). Voor de bepaling van de schade is uitgegaan van een schip van € 40 mln. Dit bedrag is gebaseerd op tabel 5.3 met daarin een schatting van de verdeling van de aanschafprijzen.

Representative newbuilding prices in selected years <sup>a</sup>  
(Millions of dollars, end-of-year figures)

Type and size of vessels	1985	1990	1995	2000	2003	2004	2005	2006	Percentage change 2006/2005	Percentage change 2006/2000
45,000 dwt dry bulk carrier	11	24	25	20	22	30	28	31	10.7	55.0
45,000 dwt tanker	18	29	34	29	30	38	43	47	9.3	62.1
72,000 dwt dry bulk carrier	14	32	29	23	25	35	35	40	14.3	73.9
110,000 dwt tanker	22	42	43	41	41	56	58	81	39.7	97.6
170,000 dwt dry bulk carrier	27	45	40	40	47	61	59	70	18.6	75.0
300,000 dwt tanker	47	90	85	76	75	105	120	130	8.3	71.1
150,000 m <sup>3</sup> LNG	200	225	245	165	155	190	205	220	7.3	33.3
78,000 m <sup>3</sup> LPG	44	78	68	60	59	77	89	92	3.4	53.3
20,000 dwt general cargo	12	24	21	19	16	20	18	24	33.3	26.3
2,500 TEU full containership	26	52	50	35	38	42	42	46	9.5	31.4

Source: Compiled by the UNCTAD secretariat on the basis of data from *Lloyd's Shipping Economist*, various issues.

<sup>a</sup> Vessel sizes for different years do not always coincide completely.

**Tabel 5.2. Aanschafprijzen diverse type schepen**

Aanschafprijs [mln. €]	Schatting zeeschepen [%]
10	20
25	30
50	30
75	10
100	5
150	5

**Tabel 5.3. Verdeling aanschafprijzen zeeschepen (schatting)**

#### Ad 2. Kosten redding- en bergingsoperatie

Wederom een moeilijk te kwantificeren vorm van schade. De kosten van een redding- en/of bergingsoperatie kunnen van geval tot geval enorm verschillen. Binnen het kader van dit rapport gelden echter de volgende beperkingen:

- Het betreft geen 'offshore' operatie maar een operatie in het 'beschermd' gebied. Bij een offshore operatie is de bergingsvloot blootgesteld aan golven, dat de operatie enorm kan hinderen en daarmee de kosten kan opdrijven.
- Zwaar materieel (kranen, barges, etc.) is relatief eenvoudig te mobiliseren (eventueel ook te verkrijgen) in het binnengebied van een haven (dicht op haveninfrastructuur).
- Bodemdiepte is beperkt, gunstig voor het lokaliseren (survey) en ophijsen van het wrak. Bovendien is met een beperkte diepte de tijdsdruk op de operatie relatief minder.

Als eerste inschatting worden de kosten van een redding- en/of bergingsoperatie in de binnenhaven geschat op enkele miljoenen euro's (zeg: tussen € 1 miljoen - € 5 miljoen).

### Ad 3. Kosten van Ladingsverlies

Deze vorm van schade kan relatief eenvoudig worden bepaald. Voor scenario 2 wordt aangenomen dat 20% van de lading verloren gaat.<sup>17</sup> Bij scenario 5 gaat 100% verloren. Zo kan met de dagwaarde van de lading de schade worden bepaald. Eventueel kan ook de transportkosten in beschouwing genomen, die voor de verloren lading niet meer terugverdiend kan worden.

### Ad 4. Kosten voor vertraging

Uit de nautische servicefilm "The Chain" die in opdracht van de internationale havenmeester organisatie (IHMA) is gemaakt, wordt duidelijk dat een vertraging van 6 uren kan leiden tot kosten die kunnen oplopen tot wel \$10.000.<sup>18</sup> Het bedrag is een optelsom van de volgende componenten:

• Operationele kosten	\$ 2.500
• Boete (Eng: penalty)	\$ 7.000
• Brandstof	\$ 350

Totaal: \$ 9.850

Dit bedrag is de totale schade van de vertraging, waar verschillende betrokken partijen voor moeten opdraaien. Het bedrag is per schip. Bij een incident zou bepaald moeten worden hoeveel schepen, naast het betreffende schip, vertraging oplopen.

Nu de verschillende gevolgen beschouwd zijn, kunnen de scenario's doorgerekend worden. Hieronder een overzicht met een (ruwe) schatting per scenario.

Scenario	Range kosten gevolgen bodemberoering
1	€ 250 - € 2 mln.
2	€ 10 mln. - € 12 mln.
3	€ 20.000 - € 2 mln.
4	€ 1 mln. - € 10 mln.
5	€ 50 mln.

**Tabel 5.4. Range kosten scenario's bodemberoering**

#### 5.3.2 Consequenties verminderde manoeuvreerbaarheid

Verminderde manoeuvreren is op zich geen gebeurtenis die direct leidt tot schade (zoals een bodemberoering dat wel is). Verminderd manoeuvreren kan leiden tot ongewenste gebeurtenissen. Of beter gezegd: vergroot de kans van optreden van ongewenste gebeurtenissen (het schip reageert minder snel en effectief op roer- en schroefveranderingen bij kleinere kielspeling, vooral als dit erg klein wordt).

In de (binnen) haven kunnen de volgende ongewenste gebeurtenissen benoemd worden:

- 1) Aanvaring
- 2) Bodemberoering\*
- 3) Schadevaring

De hierboven genoemde begrippen hebben een precieze definitie (zie de begrippenlijst) en kunnen dus gezien worden als gebeurtenissen die de gevolgen zijn van het

<sup>17</sup> In de bepaling van het percentage dat verloren gaat is het wellicht noodzakelijk om onderscheid te maken tussen de verschillende ladingen. Zo gaat liquid bulk makkelijker verloren dan droge stukgoed.

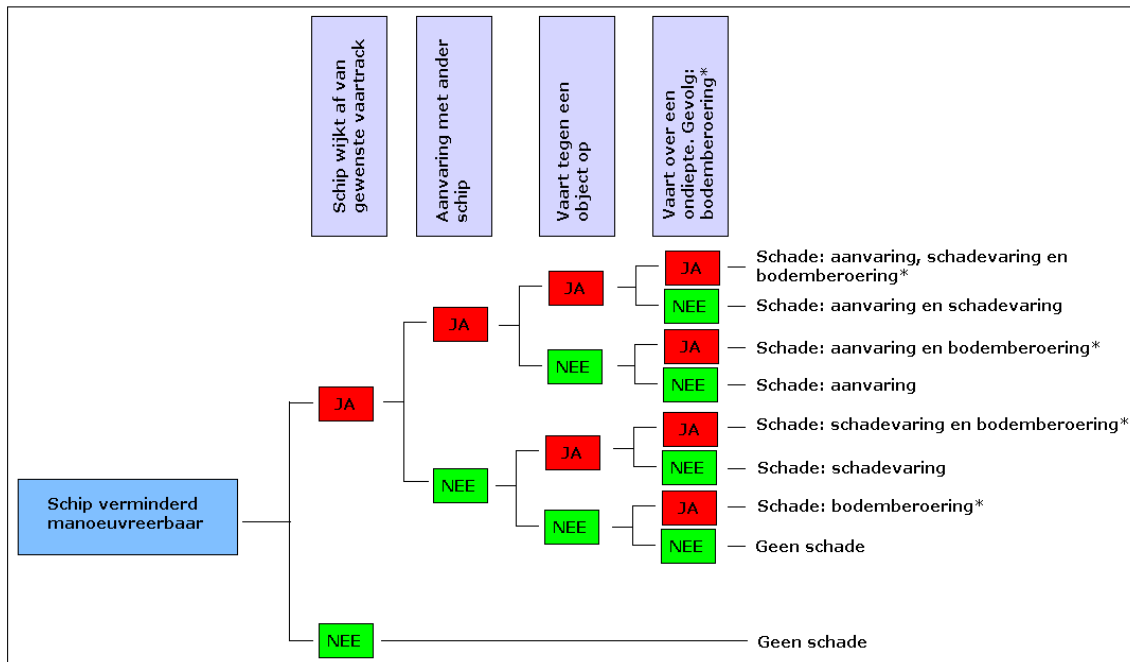
<sup>18</sup> Dit is een gemiddeld bedrag. De uurkosten van een schip kunnen sterk variëren al naar gelang type schip, aard van de lading, land van herkomst enz.

verminderd manoeuvreren t.g.v. een te kleine kielspeling (onderschrijding manoeuvreermarge).

Bodemberoering\* is het in aanraking komen met de bodem in geval dat het schip afwijkt van de gewenste track/vaarlijn t.g.v. een te kleine manoeuvreermarge en bijvoorbeeld een talud of lokale ondiepte op vaart. Bodemberoering (zonder asterisk), zoals tot nog toe werd beschouwd, is het gevolg van een onvoldoende kielspeling, gezien in het verticale vlak van de gewenste vaarlijn.

Naast de 3 genoemde ongewenste gebeurtenissen zou ook verwacht kunnen worden dat het schip een vertraging zou kunnen oplopen. Aangenomen wordt echter dat een schip nooit over een heel traject verminderd manoeuvreerbaar is, maar meer op (kritieke) momenten. Hierdoor zal de vertraging niet significant van grootte zijn en wordt deze dus buiten beschouwing gelaten.

De ongewenste gebeurtenissen worden in figuur 5.2 weergegeven in een gebeurtenissenboom, met als hoofdgebeurtenis verminderd manoeuvreren. De hoofdgebeurtenis treedt op als de manoeuvreermarge van 1 m wordt onderschreden. De subgebeurtenissen zijn: schip wijkt af van gewenste vaartrack, aanvaring met ander schip, schip vaart tegen een object op en schip vaart over een ondiepte met als gevolg een bodemberoering\*.



**Figuur 5.2. Gebeurtenissenboom verminderd manoeuvreren**

*Kwantificeren ongewenste gebeurtenissen*

De gevolgen van een aanvaring, bodemberoering\* of schadevaring kunnen van incident tot incident enorm verschillen.

Voor de gevolgen van een bodemberoering\* geldt in feite hetzelfde als voor de gevolgen van een bodemberoering (zoals in paragraaf 5.3.1). Dezelfde scenario's zouden kunnen optreden met dezelfde gevolgen. Zo zou tabel 5.4 hier ook moeten gelden. Hieronder wederom de tabel met daarin ook per scenario de waarschijnlijkheidsfactor (geconditioneerd op bodemberoering met een som van 1). De totale verwachte schade t.g.v. een bodemberoering\* kan daarmee bepaald worden, namelijk **€ 4 mln. - € 6 mln.**

Scenario	Range kosten gevolgen bodemberoering* [€]	Waarschijnlijkheid	Waarschijnlijkheidsfactor
1	€ 250 - € 2 mln.	Waarschijnlijk	0,3
2	€ 10 mln. - € 12 mln.	Waarschijnlijk	0,3
3	€ 20.000 - € 2 mln.	Waarschijnlijk	0,3
4	€ 1 mln. - € 10 mln.	Onwaarschijnlijk	0,09
5	€ 50 mln.	Zeer onwaarschijnlijk	0,01

**Tabel 5.5. Kosten gevolgen bodemberoering\***

In geval van een aanvaring is er niet één schip maar zijn er twee schepen betrokken. De schadeklassen die worden onderscheiden zijn geen (wel inspectiekosten), lichte en zware schade. Lichte schade wordt wederom gedefinieerd als 2,5% - 7,5% van de aanschafprijs en zware schade als 25% - 35% (zie tabel 5.2). Omdat in geval van een aanvaring (minimaal) twee schepen betrokken zijn, dient de schade vermenigvuldigd te worden met twee (uitgesloten wordt een aanvaring met meer dan twee schepen). In de tabel hieronder een overzicht van schade t.g.v. een aanvaring. De totale verwachte schade t.g.v. een aanvaring kan daarmee bepaald worden, namelijk **€ 3 mln. - € 5,5 mln.**

Schade	Range kosten gevolgen aanvaring [€]	Waarschijnlijkheid	Waarschijnlijkheidsfactor
Geen	500	Waarschijnlijk	0,45
Lichte	2 mln. - 6 mln.	Waarschijnlijk	0,45
Zware	20 mln. - 28 mln.	Onwaarschijnlijk	0,1

**Tabel 5.6. Kosten gevolgen aanvaring**

Een schadevaring kan tot gevolg hebben schade aan schip, kademuur, talud en/of vaarwegmeubilair (boeien en bakens). De schade klassen die worden onderscheiden zijn geen, lichte en zware schade (net zoals bij aanvaring). De totale verwachte schade t.g.v. een schadevaring kan daarmee bepaald worden, namelijk **€ 1,5 mln. - € 3 mln.**

Schade	Range kosten gevolgen schadevaring [€]	Waarschijnlijkheid	Waarschijnlijkheidsfactor
Geen	500	Waarschijnlijk	0,45
Lichte	1 mln. - 3 mln.	Waarschijnlijk	0,45
Zware	10 mln. - 14 mln.	Onwaarschijnlijk	0,1

**Tabel 5.7. Kosten gevolgen schadevaring**

## 5.4 Risico

In paragraaf 5.2 en 5.3 van dit hoofdstuk zijn respectievelijk de kans op falen en de gevolgen van het falen besproken voor de faalmechanismen bodemberoering en verminderd manoeuvreren. In deze paragraaf wordt ingegaan op de risico's van de faalmechanismen.

### 5.4.1 Risico bodemberoering

Het risico op bodemberoering zal bepaald worden aan de hand van de criteria zoals besproken in paragraaf 5.2.2 en de kosten van de gevolgen van een bodemberoering, zie tabel 5.4.

De scenario's zoals weergegeven in tabel 5.1 zullen worden gekoppeld aan de criteria (of: toelaatbare kansen) zoals opgesteld door Van de Kaa én Dand en Lyon (PIANC). Van de vier criteria opgesteld door Van de Kaa worden alleen de criteria beschouwd waarbij gemiddelde omgevingscondities gelden. De drie criteria, geordend van grote tot kleine kans:

- 1) Incident onder gemiddelde omgevingscondities  $5,0 \cdot 10^{-4}$  /doorvaart
- 2) Incident met gemiddelde kans op bodemberoering van  $3,0 \cdot 10^{-5}$  /doorvaart
- 3) Incident met zware schade onder gemiddelde omgevingscondities  $2,5 \cdot 10^{-7}$  /doorvaart

Het scenario dat het meest onwaarschijnlijk is, is scenario 5. Daarom wordt scenario 5 gekoppeld aan criterium 3 (zoals hierboven opgesomd), namelijk  $2,5 \cdot 10^{-7}$ . Scenario 4 heeft een grotere kans van optreden in vergelijking met scenario 5 en wordt daarom gekoppeld aan criterium 2, met als toelaatbare kans op bodemberoering  $3,0 \cdot 10^{-5}$ . Scenario's 1 t/m 3 zijn het minst onwaarschijnlijk en worden gekoppeld aan een kans van  $5,0 \cdot 10^{-4}$ .

Het risico voor elk scenario, uitgedrukt in €, is hiermee bepaald, zie voor een overzicht de tabel hieronder. Het risico per jaar is gebaseerd op de 77.000 scheepsbewegingen (=doorvaarten) die zich in 2009 in de haven van Rotterdam voordeden (zie tabel 9 in de volgende paragraaf). In de tabel is te zien dat scenario 2 resulteert in het grootste risico.

Scenario	Kans van optreden	Gevolgen [€]	Risico [€] / doorvaart	Risico [€] / jaar
1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	250 - 2 mln.	0,125 - 1.000	10.000 - 77 mln.
2	$5,0 \cdot 10^{-4}$	10 mln. - 12mln.	<b>5.000 - 25.000</b>	<b>385 mln. - 2 mld.</b>
3	$5,0 \cdot 10^{-4}$	20.000 - 2 mln.	10 - 1.000	770.000 - 77 mln.
4	$3,0 \cdot 10^{-5}$	1 mln. - 10 mln.	30 - 300	2 mln. - 23 mln.
5	$2,5 \cdot 10^{-7}$	50 mln.	12,5	1 mln.

**Tabel 5.8. Risico per scenario bodemberoering**

Deze risico's zijn gebaseerd op de criteria zoals gepresenteerd in paragraaf 5.2.2 en zijn daarmee gebaseerd op (maximaal) toelaatbare kansen. De risico's kunnen daarom gezien worden als acceptabele risico's. Opgemerkt dient te worden dat deze risico's niet alleen voor het Havenbedrijf zijn, maar voor alle betrokken partijen zoals benoemd in paragraaf 5.1.

#### 5.4.2 Risico verminderd manoeuvreren

Om het risico van verminderd manoeuvreren te kunnen schatten moet eerst de kans op de ongewenste gebeurtenissen, zie de gebeurtenissenboom in figuur 5.2, bepaald worden.

Het Havenbedrijf Rotterdam houdt intern in het Nautisch Ongevallen Database (NOD) alle ongevallen/incidenten bij die zich voordoen in de haven. Uit de gegevens van het NOD zou een bovengrens voor de kans van optreden van de gebeurtenissen (aanvaring, schadevaring en bodemberoering\*) bepaald kunnen worden. Een bovengrens, omdat de



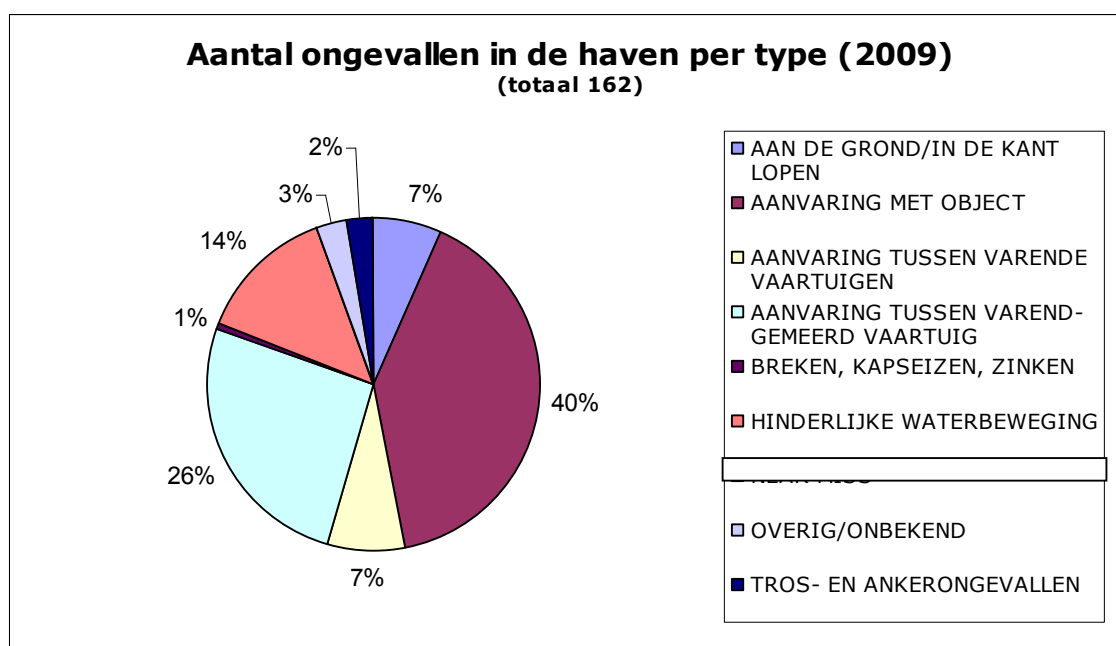
ongevallen in het NOD niet alleen het gevolg zijn van een te kleine manoeuvreermarge, maar ook bijvoorbeeld t.g.v. motor uitval, roerproblemen, menselijke fout, etc.<sup>19</sup>

Het aantal zeeschepen, dat de haven van Rotterdam bezocht, en aantal scheepsbewegingen (=doorvaarten) in de haven staan vermeld in de volgende tabel (voor het jaar 2009):

	Aantal in 2009
Zeeschepen	29.200
Scheepsbewegingen	77.000 (schatting)

Tabel 5.9. Aantal zeeschepen en scheepsbewegingen in 2009

In het jaar 2009 deden zich 219 nautische ongevallen voor<sup>20</sup>. In het diagram hieronder zijn de ongevallen onderverdeeld naar type.



Figuur 5.3. Ongevallen per type (2009)

Het type ongeval 'aan de grond lopen/in de kant lopen' is gelijk aan bodemberoering\* zoals in dit hoofdstuk gedefinieerd. Aanvaring, zoals in dit hoofdstuk gedefinieerd, is het type ongevallen 'aanvaring tussen varende vaartuigen' en 'aanvaring tussen varend - gemeerd vaartuig' bij elkaar opgeteld. Schadevaring is gelijk aan 'aanvaring met object'.

Met de bovenstaande informatie is de bovengrens bepaald voor de kans van optreden van elk der ongewenste gebeurtenissen, zie tabel 5.10.

Ongewenste gebeurtenis	Aantal ongevallen	Aantal / Schip	Aantal / Scheepsbeweging
Aanvaring	54	0,001849	0,000701
Schadevaring	65	0,002226	0,000844
Bodemberoering*	11	0,000377	0,000143

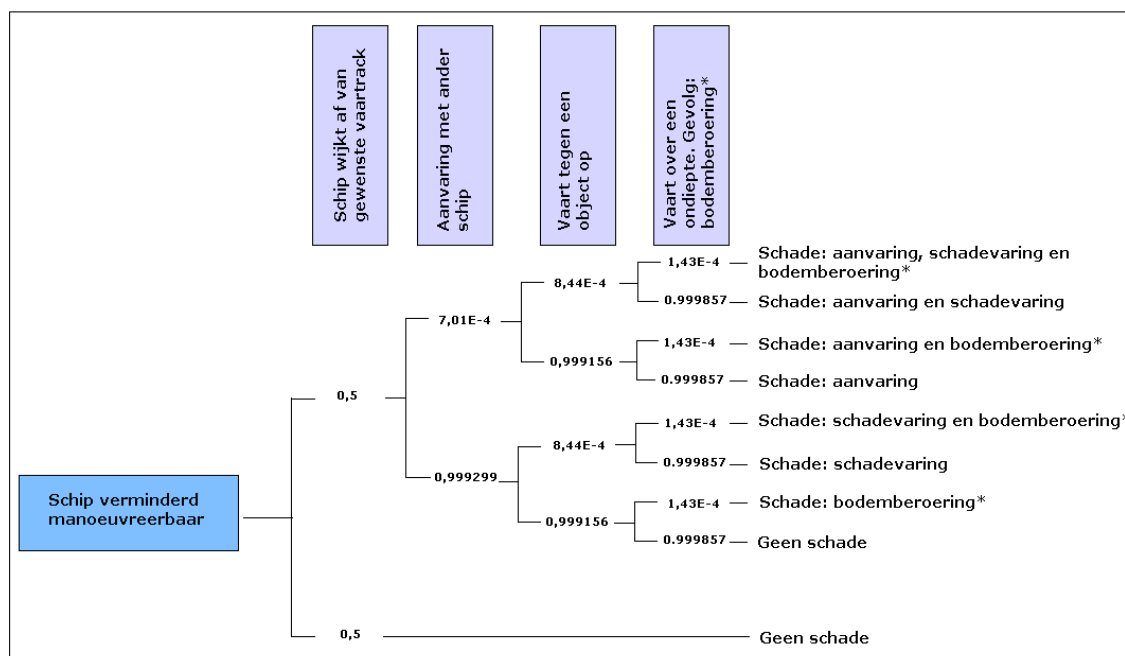
Tabel 5.10. Kans van optreden ongewenste gebeurtenissen

<sup>19</sup> Een verdere indeling naar oorzaak van het ongeval wordt dus helaas niet gedaan.

<sup>20</sup> Aangenomen wordt dat de 219 nautisch ongevallen allen ongevallen met zeeschepen betroffen. In werkelijkheid niet zo, aangezien er ook binnenvaartschepen (feeders) in de haven varen.

Met de kansen in de bovenstaande tabel zijn de kansen voor drie van de vier subgebeurtenissen bepaald. Alleen de kans op subgebeurtenis 'afwijken van gewenst vaartrack' is nog niet bepaald. Daarvoor wordt aangenomen dat wanneer het schip verminderd manoeuvreerbaar is de kans op het afwijken van de gewenste vaartrack 50% of 0,5 is<sup>21</sup>.

Nu de kansen bepaald zijn wordt wederom de gebeurtenissenboom beschouwd. Door voor elk tak de resulterende kans uit te rekenen volgen de kans voor aanvaring (aangegeven met subscript A), schadevaring (subscript S) en bodemberoering (subscript B\*). De kansen worden uitgedrukt in de kans op verminderd manoeuvreren ( $P_{VM}$ ).



**Figuur 5.4. Gebeurtenissenboom verminderd manoeuvreren met vermelding kansen per doorvaart**

De kansen op de ongewenste gebeurtenissen zijn dan:

$$P_A = P_{VM} \cdot (4,23 \cdot 10^{-11} + 2,96 \cdot 10^{-7} + 5,01 \cdot 10^{-7} + 3,50 \cdot 10^{-4}) = P_{VM} \cdot 3,51 \cdot 10^{-4}$$

$$P_S = P_{VM} \cdot (4,23 \cdot 10^{-11} + 2,96 \cdot 10^{-7} + 6,03 \cdot 10^{-8} + 4,22 \cdot 10^{-4}) = P_{VM} \cdot 4,23 \cdot 10^{-4}$$

$$P_{B^*} = P_{VM} \cdot (4,23 \cdot 10^{-11} + 5,01 \cdot 10^{-7} + 6,03 \cdot 10^{-8} + 7,14 \cdot 10^{-5}) = P_{VM} \cdot 7,20 \cdot 10^{-5}$$

$$P_{\text{geen schade}} = P_{VM} \cdot 0,99915641$$

De gevolgen voor de ongewenste gebeurtenissen zijn besproken in paragraaf 5.3.3 en zijn in de tabel hieronder samengevat:

Ongewenste gebeurtenis	Gevolgen [mln. €]
Aanvaring	3 – 5,5
Schadevaring	1,5 – 3
Bodemberoering*	4 – 6

**Tabel 5.11. Gevolgen ongewenste gebeurtenissen verminderd manoeuvreren**

<sup>21</sup> De kans op het afwijken van de gewenste vaartrack is aangenomen op 50%; er is geen enkel idee over de feitelijke kans op afwijken of hoe deze te bepalen.

Indien, zoals in paragraaf 5.2.3 voorgesteld, het criterium voor de kans op verminderd manoeuvreren gesteld wordt op 1% (net zoals criterium bodemberoering), dan kan het risico bepaald worden. Zie tabel hieronder. Het risico per jaar is gebaseerd op het aantal scheepsbewegingen zoals in tabel 5.9, namelijk 77.000.

Ongewenste gebeurtenis	Criterium verminderd manoeuvreren	Risico [€] / doorvaart	Risico [€] / jaar
Aanvaring	1%	19	1.463.000
Schadevaring	1%	13	1.001.000
Bodemberoering*	1%	4	308.000
<b>Totaal risico verminderd manoeuvreren</b>		<b>113,21</b>	<b>2.772.000</b>

**Tabel 5.12. Risico verminderd manoeuvreren**

Het risico van verminderde manoeuvreren is bij een criterium van 1% acceptabel. Hiermee is het criterium van 1% aanvaardbaar.



## 6. Bestaande probabilistische modellen

### 6.1. Algemeen

In dit hoofdstuk worden bestaande probabilistische modellen besproken. Het betreffen de modellen Harap en Protide van Rijkswaterstaat, en CADET van US Army Corps of Engineers. Alle drie de modellen zijn modellen die ontwikkeld zijn voor toegangseulen (buitengebied), die niet beschermd zijn tegen golven. Het model dat in dit rapport gepresenteerd wordt is juist voor het binnengebied waarbij golfindringing minimaal is.

Verder zijn de drie modellen op nog een punt verschillend met het model zoals in dit rapport; het betreffen namelijk beheermodellen. Het model in dit rapport is juist een ontwerpmodel. Een beheermodel gaat uit van actuele (real-time) gegevens, terwijl een beheermodel gebaseerd is op langjarige gemiddelden. Zo wordt bijvoorbeeld voor de waterstand in een beheermodel voorspellingen gebruikt, en in een ontwerpmodel langjarige meetreeksen.

Hierna achtereenvolgens een omschrijving van de modellen Harap, Protide en CADET. De laatste paragraaf in dit hoofdstuk gaat in op de toepasbaarheid van deze modellen in het binnengebied.

### 6.2. HARAP

#### 6.2.1 Introductie

HARAP (HARbour APproach) is een probabilistisch (computer) model dat de tijpoorten berekent voor de geulgebonden schepen die de Haven van Rotterdam willen binnen komen. Het model is ontwikkeld door Rijkswaterstaat, en is in 1985 voor het eerst in gebruik genomen.

#### 6.2.2 Criteria

In HARAP worden de berekende tijpoorten getoetst aan enkele (veiligheids-)criteria. Onveilige vaarten worden hiermee onderscheiden van veilige vaarten. De onveilige vaarten kunnen zo uitgesloten worden. De hieronder beschreven criteria gelden overigens ook voor Protide, zie paragraaf 6.2.

Om criteria te kunnen bepalen waaraan een vaart moet voldoen, zou een te accepteren kans op bodemberoering moeten worden vastgesteld. Om dit te kunnen doen, moet het risico (= kans x gevolgen) van een bodemberoering in beschouwing worden genomen.<sup>22</sup>

De criteria zijn als volgt geformuleerd:

#### Meerjarig criterium:

De tijpoorten die gepresenteerd worden garanderen een meerjarig veiligheids criterium, dat stelt dat een bodemberoering met maximaal lichte schade niet meer dan één keer per 237 jaar plaatsvindt. Deze frequentie is afgeleid van een kans op bodemberoering van 10% in 25 jaar, zoals volgt uit de onderstaande berekening. In de berekening wordt gebruik gemaakt van een Poisson kansverdelingfunctie.

Kans op bodemberoering in 25 jaar:

$$P(\xi > 0)_{25 \text{ jaar}} = 1 - e^{-\xi} = 0,1 \quad \rightarrow \quad \xi_{25 \text{ jaar}} = -\ln(0,9) = 0.105$$

<sup>22</sup> Hoe dit in HARAP (en Protide) is gedaan, is niet helemaal duidelijk. Verwezen wordt naar een rapport van TNO.

Kans op bodemberoering per jaar:

$$P(\xi > 0)_{25 \text{ jaar}} = 0,1 = 1 - (1 - P(\xi > 0)_{\text{jaar}})^{25} \rightarrow P(\xi > 0)_{\text{jaar}} = 1 - \sqrt[25]{1 - 0,1} = 0,004206$$

Aantal bodemberoeringen per jaar:

$$\xi_{\text{jaar}} = -\ln(1 - 0,004206) = 0,004214 \text{ /jaar}$$

Dit leidt gemiddeld tot één bodemberoering per T jaren:

$$T = 1 / \xi_{\text{jaar}} = 1 / 0,004214 \approx 237 \text{ jaar}$$

#### Individueel vaartcriterium:

In de in het bovengenoemde meerjarige criterium vastgestelde maximaal toelaatbare kans op bodemberoering is ook de kans van voorkomen van de bijbehorende golf- en waterstandconditie meegewogen. Een individuele vaart, dit is een vaart waarbij geen rekening gehouden is met de kansen van die golf- en waterstandcondities, kan bijvoorbeeld een kans op bodemberoering hebben van 5%, maar toch aan het meerjarige criterium voldoen als de kans van voorkomen van de condities waaronder de vaart plaatsvindt maar klein genoeg is. Dit is probabilistisch gezien geheel juist. Toch is besloten om nog een bovengrens te stellen aan de kans op bodemberoering tijdens een individuele vaart, ook al voldoet een vaart aan het meerjarige criterium. De kans op bodemberoering is tijdens een individuele vaart niet meer dan 1%.

#### Manoeuvremarge:

Om voldoende manoeuvreerbaarheid te behouden, moet er minimaal 1 m kielspeling gecorrigeerd voor squat onder het varende binnenkomende schip zijn. Ook in het geval dat de scheepsbewegingen nihil zijn (vrijwel vlak water: geen zeegang en/of deining), dit geldt voor ongeveer 80% van de vaarten. Een situatie met deze minimale kielspeling zal zich ten hoogste over een klein deel van het traject voordoen en dan nog sporadisch. In zeldzame gevallen kunnen onnauwkeurigheden in waterstand en diepgang ongunstig samenvallen. Het manoeuvreercriterium kan dus niet in 100% van de gevallen gegarandeerd worden. De tijpoorten zijn zodanig berekend dat in de praktijk in het Binnengebied in minder dan 1% van de vaarten de 1 meter onderschreden zal worden en in minder dan ca. 0,1% de 0,8 m.

#### Stroomcriterium:

Voor 72'(21.95m)-schepen is passage van het Lage Licht van hoogwater tot 2,5 uur na hoogwater te Hoek van Holland uitgesloten in verband met te hoge dwarsstroomsnelheden vlak voor het passeren van de havenhoofden.

### 6.2.3 Wiskundige achtergrond

HARAP is een mix van een level I en level III methode (zie hoofdstuk 3 probabilistisch ontwerpen). Met numerieke integratie worden de berekeningen uitgevoerd. Het kernprogramma van HARAP berekent de kans op bodemberoering gedurende een doorvaart voor een gegeven combinatie van omstandigheden. Dit wordt herhaald voor alle mogelijke combinaties gedurende een periode T. De gewogen som van al de kleine kansen op bodemberoeringen gedurende de gesimuleerde doorvaarten moet kleiner zijn dan het meerjarige criterium zoals gegeven in de vorige paragraaf. Dit is in het kort een beschrijving van de werking van HARAP. Hieronder volgt een wiskundige beschrijving van het model.

Het aantal bodemberoeringen  $\xi$  gedurende een doorvaart met conditie j:

$$\xi_j = \lambda \cdot T_{\text{doorvaart}}$$

De gemiddelde frequentie van bodemberoeringen is gelijk aan de gemiddelde frequentie van de verticale scheepsbewegingen die groter zijn dan de kielspeling.

Met een verwacht aantal doorvaarten B in periode T gedurende conditie j:

$$E[B_j] = \delta_j \cdot f_j \cdot T \quad \text{Met: } \delta_j = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{N_j(T)}{T}$$

$\delta$  = intensiteit doorvaarten  
 $f$  = frequentie van de condities  
 $T$  = de beschouwde periode  
 $N$  = aantal doorvaarten

Hiermee is het aantal bodemberoeringen in periode T gedurende conditie j:

$$\xi_j = T \cdot T_{\text{doorvaart}} \cdot \lambda_j \cdot \delta_j \cdot f_j$$

Het totale aantal bodemberoeringen gedurende periode T is de som van het aantal bodemberoeringen voor elke conditie:

$$\xi = T \cdot T_{\text{doorvaart}} \cdot \sum_j (\lambda_j \cdot \delta_j \cdot f)$$

De intensiteit  $\lambda$  is niet (zoals tot nu toe gesuggereerd) over de gehele vaart gelijk, omdat deze afhankelijk is van de kielspeling en golfklimaat. Binnen een traject van de geul is het golfklimaat constant. In elk traject ( $m$ ) is het golfklimaat verschillend. De kielspeling hangt onder andere af van de waterstand en bodemdiepte. In een deel van een traject (=segment) zijn deze factoren constant. Een traject heeft  $n$  segmenten<sup>23</sup>. Met  $m$  het aantal trajecten en  $n$  het aantal segmenten, is de kans op bodemberoering:

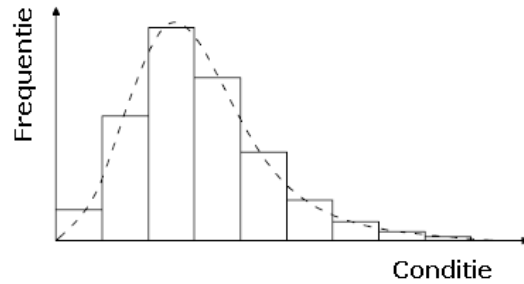
$$\xi = \sum_j \sum_m f_{j,m} \cdot T_{\text{pas},m} \cdot \sum_n \lambda_{j,m,n} \cdot \delta_{j,n} \cdot T_n$$

De kans op  $k$  bodemberoeringen, Poisson verdeeld, is nu:

$$P(\xi = k) = \frac{(\xi)^k}{k!} e^{-\xi}$$

Het model is nauwkeuriger naarmate het aantal sommaties naar oneindig gaat. De rekentijd gaat dan echter ook naar oneindig. HARAP rekent daarom met klassen voor de condities  $j$  (zie figuur 6.1), en verdeelt de geul onder in  $m$  en  $n$  delen.

<sup>23</sup> Voor nadere uitleg over de schematisatie van de geul wordt verwezen naar paragraaf 6.1.5.



**Figuur 6.1. Verdeling kansdichtheid in discrete klassen**

Het model onderscheidt de volgende condities  $j$  (zie ook 6.1.5):

- Het golfklimaat
- Meteorologische conditie
- Astronomische conditie
- Vaarsnelheid
- Diepgang

#### 6.2.4 Modules

HARAP kent 4 modules. Elk module bevat verschillende programma's. De volgende modules kunnen worden onderscheiden.

- Voorbereiding
- Kielspeling: check van de nautische toleranties
- Ksi ( $\xi$ ): check van de criteria
- Tijpoort: berekening van de tijpoort

##### Module 1

In module 1, voorbereiding, verifieert het model de input data. Daarnaast zet het de data om in rekenwaardes voor de volgende modules.

##### Module 2

Het model checkt twee veiligheidscriteria (1&2) en twee nautische criteria (3&4), t.w. zie ook paragraaf 6.1.2):

- 1) Het meerjarige criterium
- 2) Individueel vaartcriterium
- 3) Manoeuvreeerbaarheids criterium
- 4) Stroomcriterium

Deze module checkt de nautische criteria voor verschillende startmomenten van een doorvaart. Als gedurende de doorvaart één van de twee criteria niet voldoet dan wordt het betreffende startmoment uitgesloten. Deze module maakt dus een eerste selectie van de starttijden.

##### Module 3

De module 'ksi' berekent voor de selectie starttijden van module 2 de kans op bodemberoering voor verschillende condities. Vervolgens wordt het verwachte aantal bodemberoeringen  $\xi$  gedurende een doorvaart berekend, gegeven een set van voorspelde condities. Het aldus verkregen aantal moet voldoen aan het individuele vaartcriterium.

HARAP houdt verder rekening met de volgende onnauwkeurigheden:

- Diepgangvoorspelling
- Lodingonnauwkeurigheid
- Waterstandvoorspelling



- Onnauwkeurigheid wat betreft de lineaire relatie tussen de golfhoogte en scheepbewegingen van het schip
- Golfklimaat voorspelling

#### Module 4

Het programma in module 4 berekent de uiteindelijk benodigde tijpoort. De optimale tijpoort wordt berekend door deze steeds breder te nemen net zolang tot het meerjarige criterium wordt overschreden. Hiermee is het maximale toegankelijkheidspercentage gevonden. De uiteindelijke tijpoorten worden vervolgens in tabellen gepresenteerd.

#### 6.2.5 Klassen

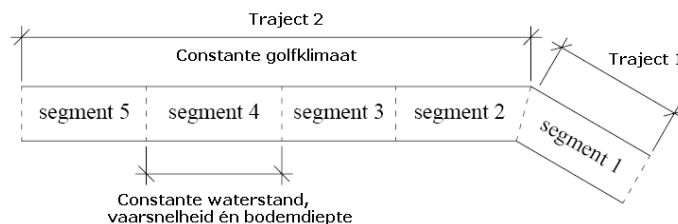
Het model heeft de volgende input variabelen:

- Geulgegevens
- Scheepsgegevens
- Getij data
- Meteorologische data
- Golfgegevens

#### Geulgegevens

In het model wordt de kans op bodemberoering berekend in een semi-stationaire situatie. Dit is een situatie waarin de waterstand en bodemdiepte constant is. Om toch variaties hierin mee te nemen is de geul geschematiseerd in een aantal delen. De geul is opgedeeld in  $m$  trajecten en trajecten zijn weer opgedeeld in  $n$  segmenten.

In HARAP is aangenomen dat het 'golfklimaat' niet verandert gedurende een vaart door een traject van de geul. De waterstand, bodemdiepte en vaarsnelheid variëren wel binnen een traject. Dit wordt gerealiseerd door een traject op te delen in segmenten. Elk segment heeft gedurende een doorvaart een constante waterstand, vaarsnelheid en diepte. Zie ter illustratie de figuur hieronder.



**Figuur 6.2. Geulschematisatie**

Verder houdt het model rekening met de invloed van zandgolven op de scheepsbewegingen door hiervoor marge in rekening te nemen. De ladingonnauwkeurigheid wordt ook in beschouwing genomen in de bepaling van de bodemdiepte.

#### Scheepsgegevens

Uit de praktijk is bekend dat elk schip een eigen bewegingsgedrag heeft. Het bewegen onder invloed van golven hangt, naast de waterdiepte, golfomstandigheden, vaarrichting en vaart, af van het type schip, de diepgang en het draagvermogen. Volgens deze laatstgenoemde eigenschappen zijn de scheepsklassen ingedeeld.

De bulkcarriers en tankers zijn ingedeeld in respectievelijk drie en twee draagvermogenklassen. De eerste klasse is, draagvermogen tot 280.000 DWT (afgekort tot 280 kt), de tweede tot 330.000 DWT (afgekort tot 330 kt) en de derde vanaf 330 kt. Binnen deze klassen is een onderscheid naar diepgang aangebracht in stappen. Voor tankers kleiner dan 280.000 DWT is geen aparte klasse gemaakt. De reden hiervoor is

dat er de afgelopen jaren geen tankers met dit draagvermogen zijn binnengekomen. Mocht dit in de toekomst toch gebeuren dan rekent HARAP voor zo'n tanker met de scheepsbewegingen van de klasse medium.

#### *Getij data*

Het verticale getij wordt opgesplitst in de astronomische waterstand en een meteorologisch effect (hierna meteo-effect). Beide delen worden in klassen verdeeld: astroklassen en meteoklassen.

Alle mogelijke astronomische waterstandskrommen zijn ingedeeld in 3 astroklassen. De astroklasse wordt bepaald door de getijslag bij Hoek van Holland. De getijslag is gedefinieerd als het verschil in waterstand tussen het astronomische hoogwater en het daaraan voorafgaande astronomische laagwater bij Hoek van Holland.

De astronomische hoog- en laagwaterstanden zijn te vinden in de getijtafels.

De astroklasse-indeling is in de volgende tabel weergegeven.

Astroklasse	getijslag (cm)
1	$\leq 155$
2	156 - 192
3	$\geq 193$

**Tabel 6.1. Astroklassen**

Aan de astronomische getij waterstanden zijn tevens stroomsnelheden en stroomrichting gekoppeld.

#### *Meteorologische data*

De meteorologische waterstand is per definitie het verschil tussen de werkelijke waterstand en de waterstand t.g.v. het astronomische getij. De afwijking van de (verwachte) astronomische waterstand wordt het meteo-effect genoemd. Deze afwijking wordt veroorzaakt door wind- (op- en afwaaiing) en luchtdrukeffecten.

De meteoklasse wordt bepaald bij Europlatform en Hoek van Holland. In de toelatingsregeling wordt de meteoklasse bepaald door de som van het meteo-effect en het slagmidden. Het meteo-effect is het verschil tussen de verwachte hoogwaterstand en de astronomische hoogwaterstand, zoals die wordt veroorzaakt door wind en luchtdrukeffecten. Het slagmidden is het rekenkundige gemiddelde van het astronomische hoogwater en het voorafgaande astronomische laagwater.

Meteoklasse	Som slagmidden (sm) en meteo effect (me) HW (cm)	
	Euro Platform	Hoek v Holland
1	$40 \leq sm+me$	$51 \leq sm+me$
2	$25 \leq sm+me < 40$	$38 \leq sm+me < 51$
3	$9 \leq sm+me < 25$	$20 \leq sm+me < 38$
4	$-8 \leq sm+me < 9$	$-1 \leq sm+me < 20$
5	$-25 \leq sm+me < -8$	$-14 \leq sm+me < -1$
6	$-58 \leq sm+me < -25$	$-45 \leq sm+me < -14$
7	$sm+me < -58$	$sm+me < -45$

**Tabel 6.2. Meteoklassen**

### Golfgegevens

Een golfklimaat kan binnen het model op drie manieren worden geschematiseerd:

1.  $H_{E10}$  waarden
2.  $H_s$ - $T_p$  combinaties
3.  $H_{E10}$ - $H_{res}$  combinaties

Tot nog toe wordt voor de bepaling van de deiningklasse uitgegaan van de  $E_{10}$  (de laagfrequente golfenergie in de golfperiode-band van 10 tot 33 seconden). Omdat het moeilijk is zich bij een golfenergie iets voor te stellen, is overgegaan op de golfhoogte-maat  $H_{E10}$ . Deze maat voor laagfrequente golfhoogte laat zich gemakkelijker voorstellen. De  $H_{E10}$  is gedefinieerd als:  $H_{E10} = 4 \times (E_{10})^{1/2}$ . In tabel 3 worden de 11 deiningklassen van de huidige toelatingsregeling weergegeven. De deiningklasse wordt bepaald door de tijdens de geplande vaart verwachte  $H_{E10}$ . Vanaf deiningklasse 8 worden er ook tijpoorten uitgegeven voor schepen met een diepgang van 18 tot 20 meter. Bij deiningklasse 11 is de geul voor alle scheepvaart gestremd.

Deiningklasse	$H_{E10}$ (cm)
1	0 - 25
2	26 - 40
3	41 - 55
4	56 - 70
5	71 - 85
6	86 - 100
7	101 - 115
8	116 - 130
9	131 - 145
10	146 - 220
11	$\geq 221$

Tabel 6.3. Deiningklassen

## 6.3. Protide

### 6.3.1 Introductie

Protide is de afkorting van 'PRObabilistic TIDal window Estimation'. Het is een tijpootadvies programma dat is bedoeld voor het bepalen van tijpooten in de Euro/Maasgeul (toegangsgeul Rotterdam) and IJgeul (toegangsgeul Amsterdam).

Protide is (/wordt) ontwikkeld in een samenwerkingsverband tussen Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS, Rijkswaterstaat) en Charta Software. Het idee was het ontwikkelen van een methode gebaseerd op een afstudeerwerk (TU Delft) van Ruud Bouw ('Admittance policy tidal bound ships', vrij vertaald: 'Toelatingsbeleid voor tijgebonden schepen'), een studie voor het vinden van een werkelijk probabilistische methodologie als verbetering van het huidige gebruikte HARAP model. De doelstellingen:

- Een model ontwikkelen dat real-time kan worden gebruikt
- Gebruik van actuele voorspellingen in plaats van geschematiseerde gegevens voor waterniveaus, deining en stroming
- Hanteer onafgebroken actuele gegevens voor de indeling van de vaargeul, de diepte van de vaargeul en de afmetingen van het schip (geen klassen meer)
- Hanteer scheepsbewegingonderzoeken gebaseerd op de huidige inzichten
- Onderzoek en gebruik veilige criteria voor iedere binnenkomst van een schip

Het programma is nog niet in gebruik, maar verwacht wordt dat Protide op korte termijn wordt geïmplementeerd. De criteria zoals beschreven in 6.2.2, blijven gelden, ook voor Protide.

### 6.3.2 Het algoritme

Om een tijpoot te berekenen wordt een probabilistische methode gebruikt die een set mogelijke condities simuleert om de exacte tijden en locaties te onderzoeken zodat de kans op bodemberoering onder het veilige criterium ligt. Vervolgens wordt met deze veilige momenten de route gevonden om het tijpootadvies te definiëren. Hieronder de beschrijving van de stappen om tot een tijpoot te komen voor een bepaald schip.

#### 1. Input

Alle afmetingen en voorspellingen worden voor de periode van geschatte aankomsttijd + 1 dag opgehaald uit de database. Het betreft de volgende gegevens:

- schatting van het waterniveau
- variatie in het waterniveau
- actuele richting (wind en stroming)
- actuele snelheid (wind en stroming)
- golfspectrum ( $H_{e10}$ )
- diepte van de vaargeul
- verhogingen van de bodem van de vaargeul
- graad en hoek van de vaargeul
- afmetingen van het schip

#### 2. Berekening verticale bewegingen

OCTOPUS (een programma van Amarcon) wordt gebruikt om de (mogelijke) verticale bewegingen te berekenen die voor dit schip kunnen voorkomen onder de geschatte omstandigheden. Dit wordt gedaan door:

- bepaling van de variatie in de hoogte van de golven
- maken van bestanden van de spectra van de golven

- berekenen van de respons voor het schip bij verschillende diepten, luchtstroom ratio's, golfhoogten en golfrichtingen.

### 3. Berekening tijd- wegdiagram

De volgende stap in de berekening van de tijpoort is het bepalen van de tijdsintervallen waarop een schip op elk kilometerpunt kan zijn, uitgaande van een bepaalde snelheid. Dit wordt gerealiseerd door de exacte tijden en locaties te vinden waarbij de kans op bodemberoering precies gelijk is aan het maximaal toegestane criterium. Deze "kenmerken" bepalen eveneens de veilige tijdsintervallen in het tijd-wegdiagram.

### 4. Uitsluiting dwarsstroom

De berekening van veilige tijdsintervallen bepaalt alleen dat op het gegeven tijdstip de kans op bodemberoering lager is dan het vereiste veilige criterium. Een ander criterium is de maximale toegestane dwarsstroom bij het binnenkomen in de haven. Dit is gesteld tussen ongeveer 0.4 en 0.6 m/s. De veilige tijdsintervallen worden bijgesteld, gesplitst of volledig verwijderd als de verwachte dwarsstroom te veel boven dit criterium ligt.

### 5. Bepaling veilige route

Nadat de veilige tijdsintervallen zijn bepaald, zal het algoritme een veilige route proberen te vinden met een minimale tijpoortbreedte. Het algoritme begint bij het eerst beschikbare veilige tijdsinterval op de meest beperkende kilometerpositie in de vaargeul en probeert vervolgens de bestemming te bereiken en begint dan vanaf dat punt in de vaargeul. Het algoritme begint met een minimale tijpoortbreedte van 2 uur en zal bij mislukking de vereiste breedte verkleinen. Verwezen wordt naar 6.3.4 voor een meer uitgebreid uitleg.

#### 6.3.3 Kans op bodemberoering

De kans dat een schip de bodem van de vaargeul raakt is gedefinieerd als de kans dat de neerwaartse beweging van het schip, behorend bij de golven van het meest kritieke punt, de kielspeling overstijgt. De kielspeling wordt als volgt gedefinieerd:

$$\text{Kielspeling} = \text{vaargeuldiepte} + \text{waterniveau} - \text{diepgang} - \text{squat}$$

Als een schip van punt A naar punt B in een vaargeul vaart, dan is aanvankelijk onbekend of en waar een bodemberoering zal voorkomen. De volgende veronderstellingen kunnen worden gedaan:

- Als de gemiddelde frequentie van bodemberoeringen gedurende de tijd constant is dan zal het aantal verwachte bodemberoeringen gedurende de doorgang gelijk zijn aan de doorgangstijd maal de gemiddelde frequentie van bodemberoeringen.
- De bodemberoeringen per doorgang zijn onafhankelijke random variabelen: de ene bodemberoering zegt niets over een andere.

Deze veronderstellingen resulteren in:

$$\text{Verwacht aantal bodemberoeringen} = \text{gemiddelde frequentie} * \text{doorgangstijd}$$

Het aantal verwachte bodemberoeringen tijdens de doorgang is Poisson verdeeld. De gemiddelde frequentie van bodemberoeringen is gelijk aan de gemiddelde frequentie van de verticale scheepsbewegingen die groter zijn dan de kielspeling. Gebaseerd op de formule van Rice volgt ( $m_0$  is het 0<sup>de</sup> spectrale moment van de scheepsbeweging):

$$\text{Gemiddelde frequentie bodemberoering} = (1 / \text{gemiddelde periode scheepsbeweging}) * e^{-(\text{kielspeling}^2)/(2 * m_0)}$$

In deze formule kan  $m_0$  bepaald worden uit de significant verticale scheepsbeweging. Gelijk aan de verdeling van de inkomende golven wordt aangenomen dat ook de verticale bewegingen van een schip Raleigh verdeeld zijn. Daarom is de volgende vergelijking waar:

$$m_0 = (1/16) * (\text{significante verticale scheepsbeweging})^2$$

Omdat voor het verwachte aantal bodemberoeringen de Poisson verdeling geldt, kunnen we de kans op bodemberoering tijdens een doorgang berekenen met:

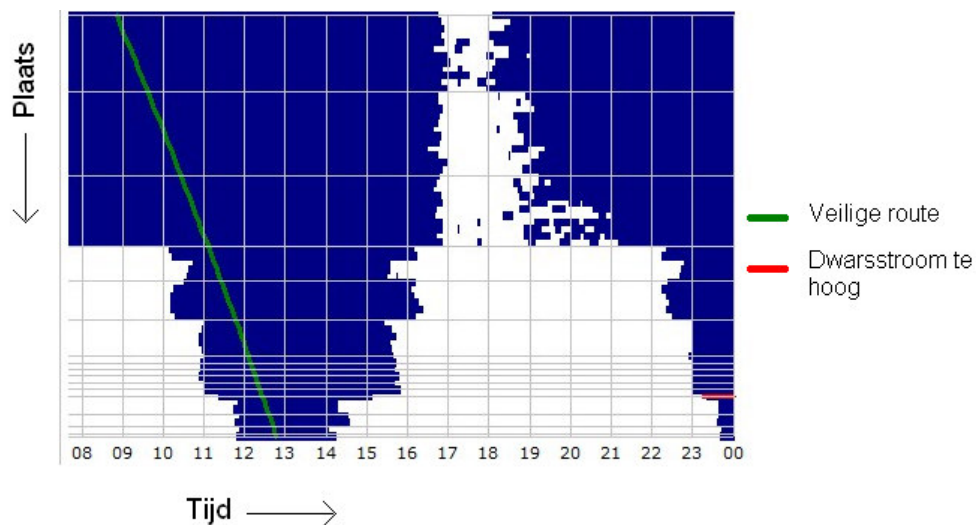
$$P(\text{aantal bodemberoeringen} > 0) = 1 - e^{-\text{aantal bodemberoeringen}}$$

#### 6.3.4 Bepaling veilige route

Het uiteindelijke doel van het rekenproces is een route te vinden met de vereiste tijpootbreedte. Dit wordt gedaan door de veilige tijdsintervallen te doorlopen waarbij rekening gehouden wordt met de snelheid van het schip en de verwachte actuele snelheid en richting.

##### *Van veilige tijdsintervallen naar een tijpootadvies*

Nadat de veilige tijdsintervallen zijn onderzocht is het volgende doel een route te vinden met een vereiste tijpootbreedte. De route begint bij de start van de toegangsgewel (40 tot 60 km op zee) via ingang van de haven, waar dwarsstroom verwacht kan worden, naar de bestemming (gegeven een ligplaats). Dit wordt gedaan door de veilige tijdsintervallen te doorlopen, beginnend bij de meest kritieke kilometerpositie (minste breedte), en het berekenen van het aantal keren dat het schip op een andere positie kan zijn, rekening houdend met de snelheid van het schip en de verwachte stroomsnelheid en -richting. Zie ter illustratie de figuur hieronder.



Figuur 6.3. Veilige route

##### *Gewenste breedte van de tijpoot*

De tijpoot moet zo breed mogelijk zijn (om de loodsen extra navigatieruimte en snelheidsschommelingen te geven), maar daarnaast heeft het schip tot doel de haven zo snel mogelijk te bereiken. Dit wordt geprobeerd door te beginnen met een route te bekijken met een gewenste breedte van 2 uur, maar telkens als er geen route gevonden kan worden gevonden, wordt de gewenste breedte gehalveerd tot een minimum van 15 minuten (de 'granulariteit' van het tijd-wegdiagram).

## 6.4. CADET

### 6.4.1 *Introductie*

CADET (Channel Analysis and Design Evaluation Tool) is een computermodel dat de effectieve kielspeling en kans op bodemberoering van schepen berekent op verschillende locaties in de VS. CADET is ontwikkeld door de 'Naval Surface Warfare Center' (NSWC) in opdracht van de US Army Corps Engineer (USACE). CADET is een uitbreiding op EMOGS<sup>24</sup>. EMOGS is een operationeel model dat een schatting (voorspelling) geeft van de verwachte kielspeling van een schip, gegeven real-time golf- en waterstandgegevens op een bepaalde locatie. Voor elke voorspelling van de kielspeling, berekent EMOGS daarnaast ook de onzekerheid en risico van een kans op bodemberoering onder die condities. EMOGS wordt momenteel op twee locaties, Georgia en Florida, gebruikt voor respectievelijk 8 en 14 jaar (up to date: 2004). Gedurende die periode hebben zich geen incidenten wat betreft bodemberoering voor gedaan.

CADET verschilt van EMOGS in de zin dat CADET een ontwerpmodel is, terwijl EMOGS meer een operationeel model is. EMOGS evalueert de kielspeling en het risico voor een bepaald schip bij een bepaalde waterdiepte, gebruikmakend van een beperkt gedefinieerd golfspectrum, voor een vaart in één richting op een specifieke datum en tijd. Hierbij worden de astronomische getij-effecten én meteo effecten op de waterstand in beschouwing genomen en de duur van de vaart gegeven een vaarsnelheid en configuratie van de vaargeul.

CADET daarentegen, evalueert de kielspeling en het risico voor een range van mogelijke waterdieptes. Bovendien evalueert CADET de waterdieptes voor elke configuratie van de vaargeul. Meerjarige lokale golfstatistieken worden gebruikt om de toegankelijkheid van de geulen te bepalen, uitgedrukt in dagen per jaar. De astronomische of meteorologische effecten zijn niet in beschouwing genomen aangezien gebruik wordt gemaakt van meerjarige (historische) meetreeksen.

### 6.4.2 *Berekening van de kielspeling*

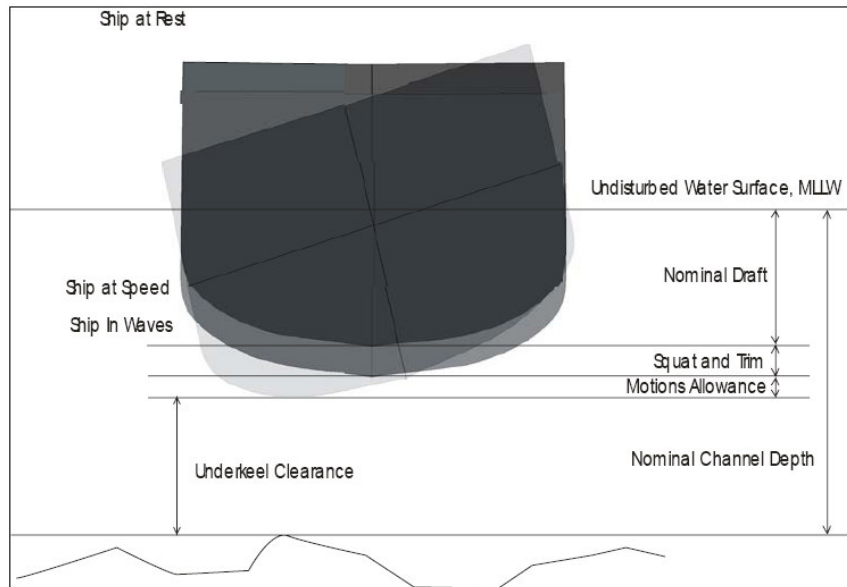
CADET berekent de kielspeling van een bepaald schip op een bepaalde locatie. Daarnaast voorziet het programma van informatie in de bepaling van de optimale diepte van een vaargeul. De optimale te baggeren diepte is gedefinieerd als de 'ondiepste waterdiepte' dat het maximale aantal dagen toegang geeft tot de haven in een gegeven jaar. De bereikbaarheid van de haven is bepaald uit de berekening van de kielspeling en het risico op bodemberoering onder de mogelijke golfcondities op de beschouwde locatie. De algemene regel die in dit model aangehouden wordt, is dat als het risico op bodemberoering minder is dan 1 op 100 gedurende een doorvaart, de haven dan bereikbaar is voor die waterdiepte. Het aantal dagen dat de haven toegankelijk is, is afhankelijk van het lokale golfklimaat.

De kielspeling van een schip wordt beïnvloed door (voornamelijk) vijf parameters. Deze parameters zijn de statische diepgang en trim van een stilliggend schip (1), squat (2), verticale bewegingen t.g.v. golven (3), de bodemdiepte of nautisch gegarandeerde diepte (4) en het astronomische getij in het beschouwde gebied. Omdat CADET een ontwerpmodel is, worden kortstondige parameters zoals het meteorologische getij niet in de berekening opgenomen. Ook vallen, aangezien CADET enkel de verticale kielspeling bepaald, de vaarweg breedte en oevereffecten buiten beschouwing.

Figuur 3 illustreert de parameters die in beschouwing zijn genomen bij de berekening van de verticale kielspeling in het model CADET.

---

<sup>24</sup> Environmental Monitoring and Guidance System (EMOGS)



**Figuur 6.4. Dwarsdoorsnede schip in vaarweg (CADET)**

In formule:

$$C_{eff} = E_{ch} + E_{at} - (T_j + S_j + A_j)$$

Met hierin:  $C_{eff}$  = de minimale effectieve kielspeling (netto kielspeling)

$E_{ch}$  = Bodemdiepte van de vaarweg

$E_{at}$  = De waterstand met in achtneming het astronomische tij

$T_j$  = Statische diepgang

$S_j$  = Inzinking t.g.v. squat

$A_j$  = Verticale scheepsbewegingen

### 6.4.3 Onzekerheden

Elk van de parameters weergegeven in de formule hierboven kent inherente onzekerheden. Tabel 4 toont de onzekerheden voor elke parameter die de netto kielspeling bepaalt (zie bovenstaande formule).

Summary of Bias and Variability in the Major Parameters Considered		
Parameter	Bias	Variability
Channel Depth	None	None
Static Draft		
Bow and Stern	None	0.5 m (1.8 ft)
Bilge	None	0.2 m (0.6 ft)
Squat	None	0.1 m (0.4 ft)
Transformed Wave spectra	0.2m (0.6ft)	80%
Motions based on Measured Wave Data	20% over value	34%

**Tabel 6.4. Samenvatting onzekerheden beschouwde parameters**



## 6.5. Toepasbaarheid voor het binnengebied

Het probabilistische diepte-ontwerp is dus niet nieuw. Zoals in de vorige paragrafen beschreven wordt dit al uitgebreid toegepast bij toegangseulen zowel in binnen- als buitenland. Toch is de methode niet één-op-één over te nemen in het ontwerp van het binnengebied. Er zijn een aantal essentiële verschillen, waarbij in het algemeen de toepassing voor havenbekkens uit een probabilistisch oogpunt complexer is dan die voor geulen. Tabel 6.5 geeft hiervan een indruk.

Zoals te zien is, is de toepassing voor de toegangseul redelijk "ééndimensionaal". Er is een dominant stochastisch fysisch proces (verticale bewegingen door golven), De schepen varen allemaal langs één vast traject en altijd van A naar B en doen tijdens dat traject geen "speciale handelingen", zoals afmeren of draaien.

	Toegangseul	Binnengebied
<b>Stochastisch proces</b>	Één dominant (golven)	Diverse kleine bijdragen, zoals wind, squat, dichtheidseffecten, etc.
<b>Faalmechanisme</b>	Één dominant (bodemberoering)	Twee (manoeuvrermarge en bodemberoering)
<b>Traject</b>	Één	Verschillende
<b>Bestemmingen</b>	Één	Meerdere
<b>Handelingen</b>	Één (doorvaren)	Meerdere (doorvaren, stoppen, bochten, zwaaien, afmeren, etc.)

**Tabel 6.5. Vergelijking toegangseul en binnengebied**

In een haven daarentegen, ontbreekt in het algemeen de dominantie van de golven, waardoor er meerdere kleinere aspecten een mogelijk gelijkwaardige invloed hebben. Verder varen sommige schepen verder door dan andere of slaan eerder of later af naar zijhavens. Daarmee is de duur dat ze aan de diverse processen blootgesteld zijn per schip verschillend. De verticale bewegingen van de schepen zijn verder ook niet alleen afhankelijk van de omgevingscondities (zoals in een geul), maar ook van de diverse handelingen die het schip tijdens het traject uitvoert. Dit betekent dat gerekend moet worden in een meerdimensionale probabilistische ruimte waarbinnen ook meerdere faalmechanismen actief zijn.



## 7. Het concept van een probabilistisch model voor de binnenhaven

### 7.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de waterdiepte bepaald voor Maasvlakte 1 (het studiegebied) in de haven van Rotterdam. Dit studiegebied bestaat uit de havens/kanaal: Beerkanaal, 6<sup>de</sup> Petroleumhaven, Mississippihaven, Amazonehaven, Europahaven, Yangtzehaven en 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven.

Dit hoofdstuk gaat verder op (met name) de hoofdstukken 4 en 5. In hoofdstuk 4 van dit rapport staat het ontwerp van de diepte van een haven beschreven. Hierin zijn de factoren die de benodigde waterdiepte bepalen toegelicht. In hoofdstuk 5 zijn de faalmechanismen bodemberoering en verminderd manoeuvreren geïntroduceerd en zijn daaruit de criteria bepaald.

De factoren die beschreven staan in hoofdstuk 4 zijn:

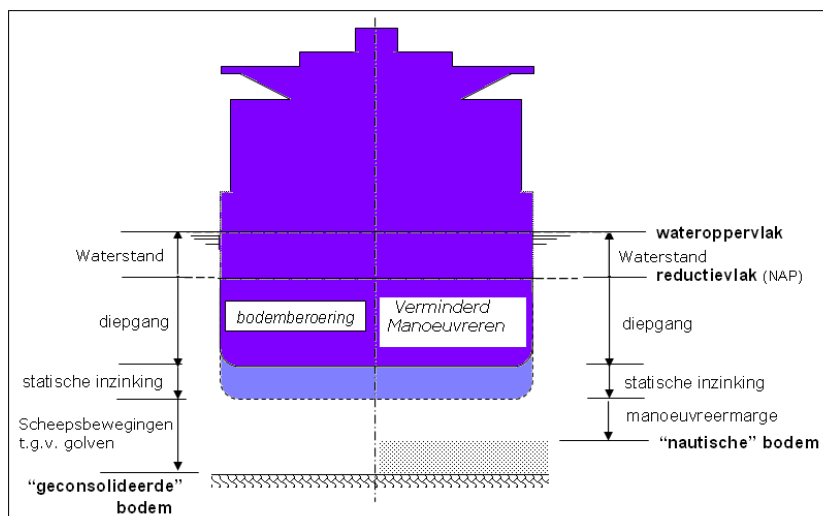
- Waterstand (astronomisch en meteorologisch)
- Diepgang schip en onzekerheid hierin
- Effect van soortelijke massa water (zoetwater)
- Scheepsbewegingen in golven
- Squat
- Manoeuvreermarge

De hierboven genoemde factoren worden in dit hoofdstuk uitgewerkt voor het studiegebied. Op de 'scheepsbewegingen in golven' na. Deze zijn minimaal in de havens van Maasvlakte 1 ('beschermd/beschut gebied'), in het bijzonder voor de grotere schepen.

De faalmechanismen bodemberoering en verminderd manoeuvreren (hoofdstuk 5) dienen nu nader beschouwd te worden. Omdat de scheepsbewegingen t.g.v. golven uiterst beperkt zijn in de binnenhaven, kan verwacht worden dat het faalmechanisme bodemberoering niet dominant zal zijn. Dit is geïllustreerd in de figuur hieronder. Daarin zijn de hiervoor genoemde factoren gerelateerd aan het faalmechanisme. De statische inzinking is de marge voor de onzekerheid in diepgang, effect van soortelijke massa water en squat bij elkaar opgeteld.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> Opmerking: squat is een dynamisch effect en valt in figuur 7.1 desondanks toch onder statische inzinking. Dit is in de figuur gedaan om de vergelijking tussen de bodemberoering (met verticale scheepsbewegingen t.g.v. golven) en verminderd manoeuvreren (manoeuvreermarge) overzichtelijk te houden.



**Figuur 7.1. Relatie faalmechanisme en diepte factoren**

Zo is te zien dat niet alle factoren relevant zijn voor elk faalmechanisme. In geval van het faalmechanisme bodemberoering is logischerwijs geen rekening gehouden met de manoeuvreermarge. In geval van verminderd manoeuvreren wordt het aspect 'scheepsbewegingen in golven' niet in beschouwing genomen, vanwege het dynamische karakter van het aspect. De statische inzinking dient voor beide faalmechanismen in beschouwing te worden genomen.

Gezien de zeer beperkte golfindringing kan gesteld worden dat het faalmechanisme bodemberoering niet dominant is. Bovendien treedt het faalmechanisme verminderde manoeuvreerbaarheid eerder in werking dan het faalmechanisme bodemberoering vanwege de relatie met nautische bodem respectievelijk geconsolideerde bodem. Naarmate nautische en geconsolideerde bodem dichterbij elkaar liggen wordt het kansverschil kleiner (en kan in theorie tot 0 afnemen als de bodemvlakken op elkaar vallen. In het vervolg zal daarom alleen het faalmechanisme verminderd manoeuvreren worden beschouwd.

Voor de relatie die de diverse factoren met elkaar maken wordt teruggegrepen naar hoofdstuk 3. In paragraaf 3.3.1 is de betrouwbaarheidsfunctie voor de benodigde diepte gepresenteerd.

De betrouwbaarheidsfunctie (Z):

$$Z = d + H_t - (T + s)$$

Met:  $d$  = nautisch gegarandeerde diepte (t.o.v. het reductievlak)

$H_t$  = getijrijzing boven het reductievlak

$T$  = diepgang ontwerpschip

$s$  = inzinking t.g.v. squat (en trim)

Het reductievlak dat in dit hoofdstuk gehanteerd wordt is NAP.

De parameters  $H_t$ ,  $s$ ,  $T$  zijn hoofdzakelijk deterministisch, maar hebben probabilistische componenten waarvoor kansdichtheidsfuncties kunnen worden bepaald.

De diepgang van het ontwerpschip is de optelsom van de statische diepgang ( $T_s$ ), onzekerheid in diepgang ( $T_o$ ) en de diepgangstoename t.g.v. zoet water ( $T_{zw}$ ). In formule vorm:

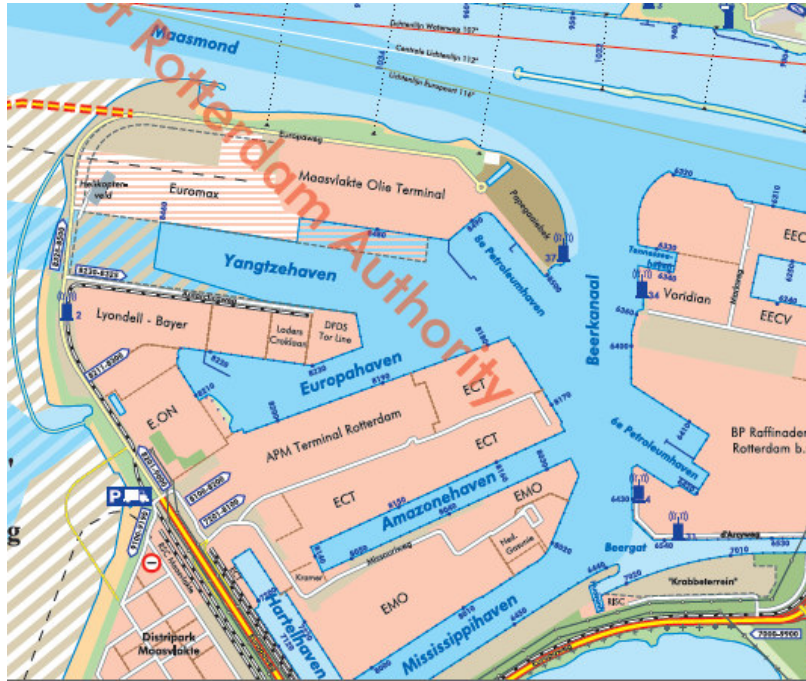
$$T = T_s + T_o + T_{zw}$$

Vervolgens moet gelden voor het voorkomen van het faalmechanisme verminderd manoeuvreren (in geval van een manoeuvreermarge van 1 m):

$$Z > 1$$

## 7.2 Het studiegebied en de nautisch gegarandeerde diepte

Het studiegebied bestaat uit de volgende havens: 8<sup>e</sup> Petroleumhaven, Yangtzehaven, Europahaven, Amazonehaven, Mississippihaven en 6<sup>e</sup> Petroleumhaven. Daarnaast bestaat deze ook nog uit het Beerkanaal. Zie onderstaand figuur. De nautisch gegarandeerde diepte<sup>26</sup> in dit gebied varieert van -16 m t.o.v. NAP tot -24 m t.o.v. NAP. De diepten genoemd in deze paragraaf zijn overgenomen uit de Baggeratlas van het Havenbedrijf Rotterdam.



**Figuur 7.2. Het studiegebied**

In de tabel hieronder staat de nautisch gegarandeerde diepte (d) per haven/kanaal vermeld.

Haven	Diepte (d) t.o.v. NAP
Europahaven	16 m tot 16,65 m
Yangtzehaven	16,65 m
8 <sup>ste</sup> Petroleumhaven	23,65 m
Beerkanaal	23,65 m
6 <sup>de</sup> Petroleumhaven	21,65 m tot 22,25 m
Mississippihaven	22,65 m tot 24 m
Amazonehaven	16,65 m tot 21,65 m

**Tabel 7.1. Nautisch gegarandeerde diepte**

<sup>26</sup> Binnen het havenbedrijf spreekt men van streef- of contractdiepte. Zie begrippenlijst.

### 7.3 Waterstand

Het model in dit hoofdstuk betreft een "ontwerpmodel", waarbij gemeten waterstanden zullen worden gebruikt. Astronomische en meteorologische effecten zijn dan eigenlijk niet zo relevant. Voor een "beheermodel" zijn deze effecten wel van belang ('real-time'). De waterstand t.g.v. het astronomische getij en meteorologische effecten is een voorspelling; voor een ontwerp zijn langjarige gemiddelden juist interessant. Het is daarom veel interessanter om in het kader van het ontwerp van de diepte van de haven, de historische gemeten waterstanden in beschouwing te nemen.

In het Hydro Meteo Informatie bundel (nummer 3, 2004), opgesteld door het Havenbedrijf afdeling Watersystemen, worden voor verschillende locaties de gegevens op het gebied van waterstand, stroming, golven, wind en zicht gepresenteerd. Deze gegevens zijn of gebaseerd op computerberekeningen of op metingen. Voor enkele relevante gegevens (m.b.t. de waterstand) uit het Hydro Meteo bundel zijn in bijlage 4 grafieken en tabellen gepresenteerd.

De waterstanden die in dit model worden beschouwd zijn LW-, Gemiddelde en HW-waterstand. De verdelingen voor deze waterstanden zijn bepaald uit metingen verricht in de periode van 1 januari 1998 tot 1 augustus 2003. Dit is een periode van 5,5 jaar. Normaal gesproken wordt voor langjarige gemiddelden een periode van 25-30 jaar genomen. In het kader van dit onderzoek wordt echter een periode van 5,5 jaren voldoende geacht.

Met Bestfit is voor de meetreeks van de LW- en HW-waterstand een kansverdeling bepaald. Uit trekkingen van de LW- en HW-verdeling, is de Gemiddelde waterstand bepaald (door het gemiddelde van LW en HW te nemen). Hieronder een tabel met daarin de verdelingen voor LW en HW voor meetlocatie Beerkanaal en Europahaven.

Waterstand - Beerkanaal	Verdeling [in m t.o.v. NAP]
LW	Normaal ( $\mu = -0,6412; \sigma^2 = 0,2665$ )
HW	Normaal ( $\mu = 1,2700; \sigma^2 = 0,3147$ )

Tabel 7.2. Verdeling waterstand Beerkanaal

Waterstand - Europahaven	Verdeling [in m t.o.v. NAP]
LW	Normaal ( $\mu = -0,6835; \sigma^2 = 0,2595$ )
HW	Normaal ( $\mu = 1,2600; \sigma^2 = 0,3098$ )

Tabel 7.3. Verdeling waterstand Europahaven

Met de verdelingen zoals hierboven in de tabellen getoond, is de parameter  $H_t$  uit de betrouwbaarheidsfunctie te bepalen.

## 7.4 Diepgang ontwerpschepen

### 7.4.1 Inleiding

Het ontwerp van de diepte van een vaarweg is o.a. gerelateerd aan de diepgang van het schip<sup>27</sup>. Als de vaarweg voor slechts één type schip ontworpen zou moeten worden, dan is de keuze voor de maatgevende diepgang (en daarmee ook lengte en breedte) simpel. Dit is echter zelden zo, waardoor analyse naar de maatgevende schip/schepen noodzakelijk is.

Het maatgevende schip is het schip waarvoor de vaarweg is ontworpen. Deze moet zodanig bepaald zijn dat het ontwerp een veilige doorvaart kan garanderen voor dit schip, en al de andere schepen die gebruik zullen gaan maken van de vaarweg. Het maatgevende schip moet aan zekere criteria voldoen en hoeft niet slechts één schip te zijn, er kunnen meerdere maatgevende schepen zijn (zeker in het geval van een probabilistisch ontwerp).

In een deterministisch ontwerp wordt een maatgevend schip (of schepen) bepaald met de filosofie dat deze representatief of 'dekkend' is voor al de overige scheepvaart. In een probabilistisch ontwerp is de filosofie achter het maatgevende schip anders. Sterker nog, eigenlijk zou het 'concept' van een maatgevend schip niet helemaal passen binnen een probabilistische benadering. In een probabilistische benadering zou voor een bepaalde locatie/bestemming (bijvoorbeeld de Europahaven) de diepgang van alle schepen die hier (langs) gaan varen bekeken moeten worden en zou een kansverdeling hierbij gevonden moeten worden. Uit de kansverdeling zou dan volgen wat de verwachte diepgang en mogelijke afwijking hiervan is.

Toch zou het toepassen van het concept van een maatgevend schip binnen een probabilistische benadering niet een slecht idee zijn. Zo zou een selectie schepen als maatgevend kunnen worden gezien en worden hiermee de kleinere schepen "gefilterd", die een kans op bodemberoering van zo goed als nul hebben.

Als (eerste) voorstel wordt gedaan om in deze probabilistische benadering alleen de schepen in beschouwing te nemen met diepgang ( $T_S$ ) groter dan de lokale diepte t.o.v. NAP (absolute waarde) minus 5 m. Dus als op een locatie de diepte -15 m t.o.v. NAP is, dan worden schepen met diepgang van 10 m of groter in beschouwing genomen.

### 7.4.2 Toepassing in het studiegebied

De totale diepgang ( $T_{\text{totaal}}$ ) van het ontwerpschip is de optelsom van de statische diepgang ( $T_S$ ) (in water met dichtheid van 1025 [kg/m<sup>3</sup>]), onzekerheid in diepgang ( $T_O$ ) en de diepgangstoename t.g.v. zoet water ( $T_{ZW}$ ). In formule vorm:

$$T_{\text{totaal}} = T_S + T_O + T_{ZW}$$

#### *Statische diepgang ( $T_S$ )*

Om tot een (kans-) verdeling voor de diepgang van schepen te komen zijn gegevens uit de database van HbR (Business Objects) opgevraagd voor een periode van 1 jaar (2009). Hierbij is gekeken naar alle scheepsbewegingen van zeeschepen. Dit zijn niet alleen aankomende reizen, maar ook vertrekkende en verhalende reizen. Dit is logisch want een schip hoeft niet éénzelfde diepgang te hebben bij aankomst als bij vertrek. Bovendien kunnen er bij het vertrekken andere omgevingscondities zijn. Zo wordt elk schip minimaal 2x meegenomen in de kansverdeling van de diepgang van schepen. Een

---

<sup>27</sup> De in deze paragraaf bepaalde maatgevende schip/schepen zijn bepaald voor enkel het diepte ontwerp. Voor de breedte ontwerp van een vaarweg spelen andere factoren een rol in de bepaling van het maatgevende schip. Het breedte ontwerp wordt buiten beschouwing gelaten in dit rapport.



verhalende reis (zeezwaaiër inbegrepen) is een reis waarbij een schip van de ene terminal naar een andere terminal binnen de Haven van Rotterdam vaart. Het verschil tussen een zeezwaaiende reis en een verhalende reis, is dat de zeezwaaiende reis voor het bereiken van de volgende terminal in de haven de haven uit moet varen en via de Noordzee weer binnen komt.

In bijlage 5 kan voor elke haven een histogram van de statische diepgang ( $T_s$ ) van schepen worden gevonden. Met behulp van de histogrammen zijn in het programma Bestfit de verdelingen gevonden die er het best bij passen. In tabel 7.4 een overzicht van de verdelingen per haven.

Haven	Verdeling statische diepgang $T_s$ [dm]
Europahaven	Normaal ( $\mu=120; \sigma^2=10,95$ )
Yangtzehaven	Normaal ( $\mu=127; \sigma^2=11,7$ )
8 <sup>ste</sup> Petroleumhaven	Normaal ( $\mu=202; \sigma^2=12,03$ )
Beerkanaal	Normaal ( $\mu=199; \sigma^2=14,77$ )
6 <sup>de</sup> Petroleumhaven	Normaal ( $\mu=194; \sigma^2=6,33$ )
Mississippihaven	Normaal ( $\mu=176; \sigma^2=7,98$ )
Amazonehaven	Normaal ( $\mu=122; \sigma^2=9,97$ )

**Tabel 7.4. Verdeling statische diepgang**

#### *Onzekerheid in diepgang ( $T_o$ )*

Aangenomen wordt dat de fout in de opgegeven diepgang normaal verdeeld is met een gemiddelde van 0,1 m en standaardafwijking 0,05 m (Normaal ( $\mu=0,1; \sigma^2=0,05$ )).

#### *Diepgangstoename t.g.v. zoet water ( $T_{zw}$ )*

Verwezen wordt naar bijlage 6 voor informatie over het onderzoek naar dichtheidsverschillen in de haven.

Aan de hand van de Fresh Water Allowance (FWA) worden de diepgangsveranderingen t.g.v. zoet water bepaald. Hiervoor zouden wel de FWA's van de schepen die de Europahaven aan doen beschikbaar moeten zijn.<sup>28</sup>

De Fresh Water Allowance (FWA) is het aantal centimeter dat de diepgang van een schip verandert als een schip van zout naar zoet water vaart (en omgekeerd). Hierbij is zout water gedefinieerd als 1025 [kg/m<sup>3</sup>] en zoet water als 1000 [kg/m<sup>3</sup>].

De FWA van een schip is bepaald uit de vorm die het schip heeft, en zo zal de FWA verschillend zijn voor verschillende schepen. De FWA kan op elk schip worden afgelezen uit het Plimsollmerk. Het is het verschil tussen de lijnen S (summer temperature seawater) en F (fresh water).

Gegeven de FWA dan kan de verandering in diepgang van het schip voor een willekeurige dichtheid  $\rho_i$  als volgt worden berekend<sup>29</sup>:

$$\frac{x}{FWA} = \frac{1025 - \rho_i}{1025 - 1000}$$

<sup>28</sup> Deze gegevens zijn niet verkrijgbaar. Met een waarde van TPC en displacement van een schip is de FWA wel uit te rekenen.

<sup>29</sup> Het verband tussen de diepgangsverandering en dichtheid is niet lineair (gegeven de vorm van het schip niet rechthoekig). Aangenomen wordt dat resultaten verkregen uit een lineaire benadering niet wezenlijk verschilt met de werkelijkheid.

Met:  $x$  = verandering in diepgang [m]  
FWA = fresh water allowance [m]

De fresh water allowance (FWA) kan als volgt bepaald worden<sup>30</sup>:

$$FWA = \frac{W}{40 \cdot TPC}$$

Met:

FWA = Fresh Water Allowance [cm]  
W = displacement in zout water [ton]  
TPC = ton per centimeter diepgang [ton/cm]

---

### Voorbeeld berekening verandering in diepgang

Scheepsnaam: MARKAB STAR

Uit SEAWEB (Lloyd's Register):

- Displacement  $\nabla$  = 339.839 [m<sup>3</sup>]
- TPC = 167,1 [ton/cm]

<b>MARKAB STAR</b>
--------------------

Type: Crude Oil tanker
------------------------

LOA = 332 m
Breedte = 58 m
Diepgang = 22,2 m

Displacement  $W = 339.839 \text{ [m}^3\text{]} * 1025 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 348.334.975 \text{ [kg]} = 348.335 \text{ [ton]}$   
(in zoutwater)

$$FWA = \frac{W}{40 \cdot TPC} = \frac{348335}{4 \cdot 167,1} = 52,115 \text{ [cm]} = 0,521 \text{ [m]}$$

Het schip MARKAB STAR zal dus een diepgangsverandering van 0,521 m indien het van zuiver zout naar zuiver zoet water vaart (en omgekeerd). Een diepgangsvermeerdering in geval van zout naar zoet en -vermindering indien van zoet naar zout.

Heeft het water er in de haven een dichtheid van  $\rho_i = 1015 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ , dan zal de diepgang van het schip t.o.v. de diepgang in zeewater bij benadering toenemen met:

$$\frac{x}{FWA} = \frac{1025 - \rho_i}{1025 - 1000} \rightarrow \frac{x}{0,521} = \frac{1025 - 1015}{1025 - 1000} \rightarrow \mathbf{x = 0,2084 \text{ m}}$$

---

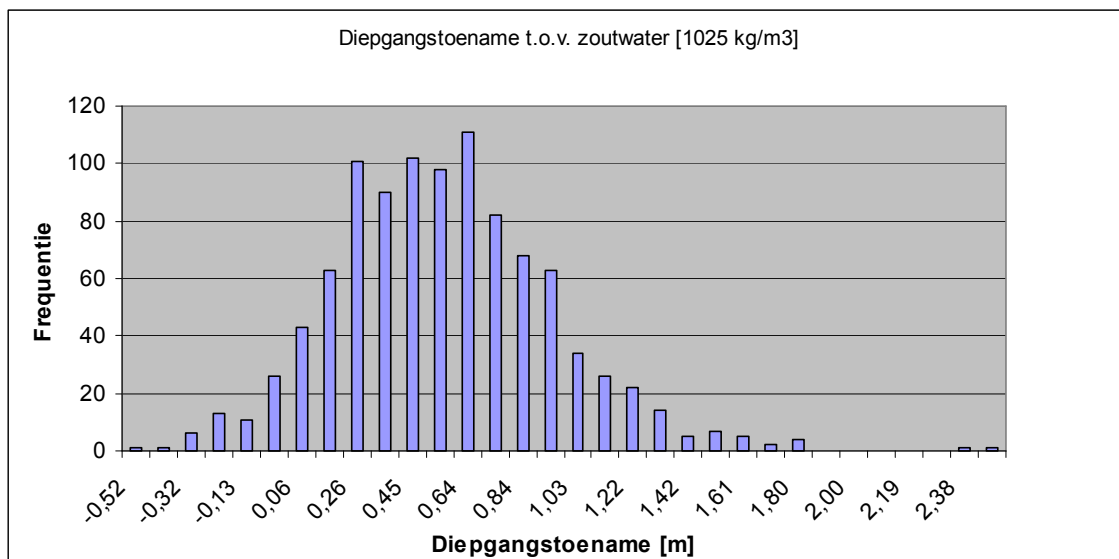
<sup>30</sup> Referentie formules: Ship Stability for Masters and Mates 6th Edition (2006), by Bryan Barrass and Capt D R Derrett.

De verdeling van de displacement (W) en TPC zijn bepaald uit de gegevens van de meest diepstekende schepen die de haven van Rotterdam in 2009 aandeden (diepgang van 17,4 m of groter). Hieronder een overzicht met de verdelingen voor de benodigde parameters ter bepaling van het effect van zoet water. De verdelingen gelden voor alle havens en kanalen in het studiegebied.

Parameter	Verdeling
Displacement W [ton]	Normaal ( $\mu=324000; \sigma^2=63600$ )
TPC [ton/cm]	Normaal ( $\mu=166; \sigma^2=20,87$ )
Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	Normaal ( $\mu=1020; \sigma^2=3.6$ )

**Tabel 7.5. Verdelingen ter bepaling van het effect van zoetwater**

Met behulp van een Monte Carlo Simulatie is de toename in diepgang t.o.v. zout water (1025 kg/m<sup>3</sup>) berekend. Hieronder het resultaat in de vorm van een histogram, met daarin de diepgangstoename uit gezet tegen de frequentie (aantal schepen per jaar).



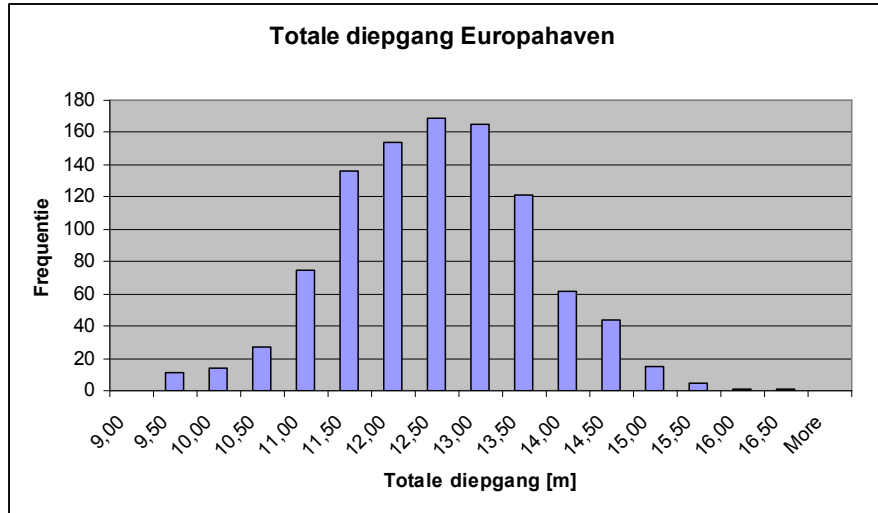
**Figuur 7.3. Histogram zoetwater effect**

*Totale diepgang ( $T_{\text{totaal}}$ )*  
 De totale diepgang is nu:

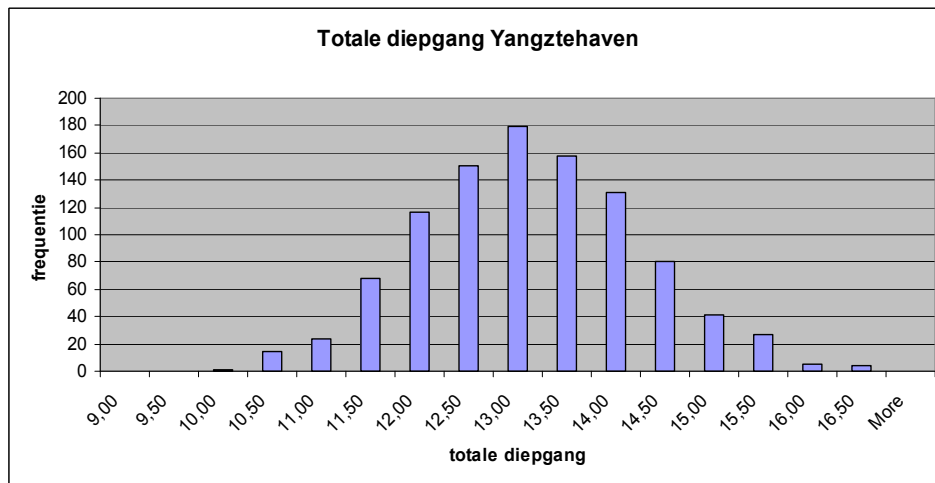
$$T_{\text{totaal}} = T_S + T_O + T_{ZW}$$

Per haven volgt hierna een histogram met de totale diepgang van de ontwerpschepen.

**Europahaven\***

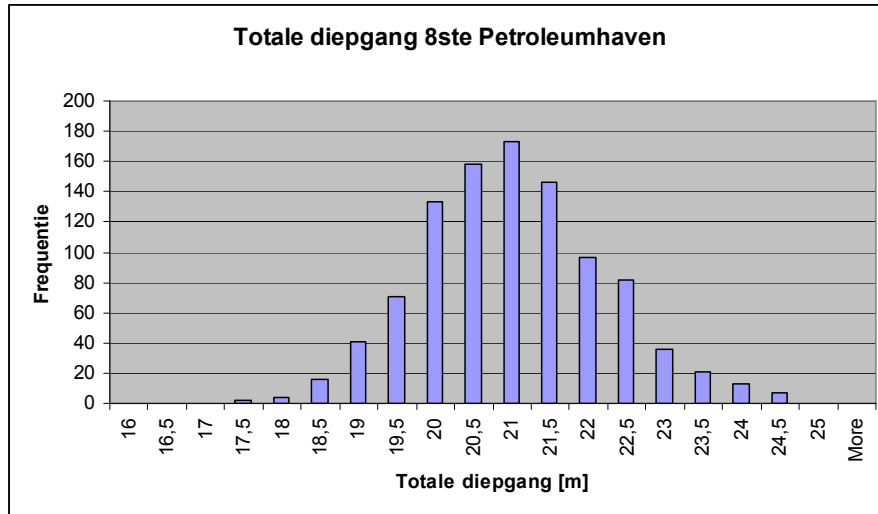


**Yangzehaven\***

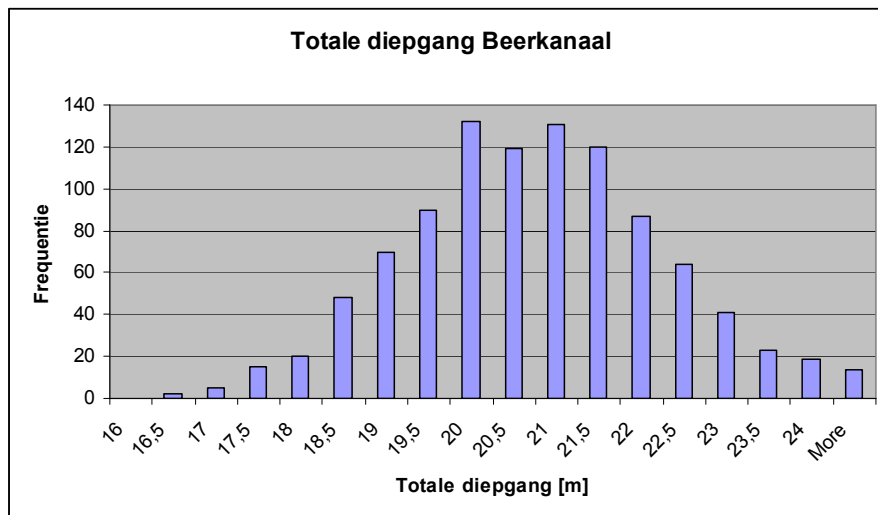


\*De grootste schepen die deze havens aandoen zijn containerschepen. Omdat displacement waarden van deze schepen niet in Seaweb staan is met de volgende formule de displacement geschat:  $\nabla = C_b \cdot L_{pp} B T$ . De lengte, breedte en diepgang van de schepen zijn bekend (uit database HBR). De blokcoëfficiënt  $C_b$  is geschat op 0,575 (typische waarde voor containerschepen, zie tabel 7.9 in paragraaf 7.5.4).

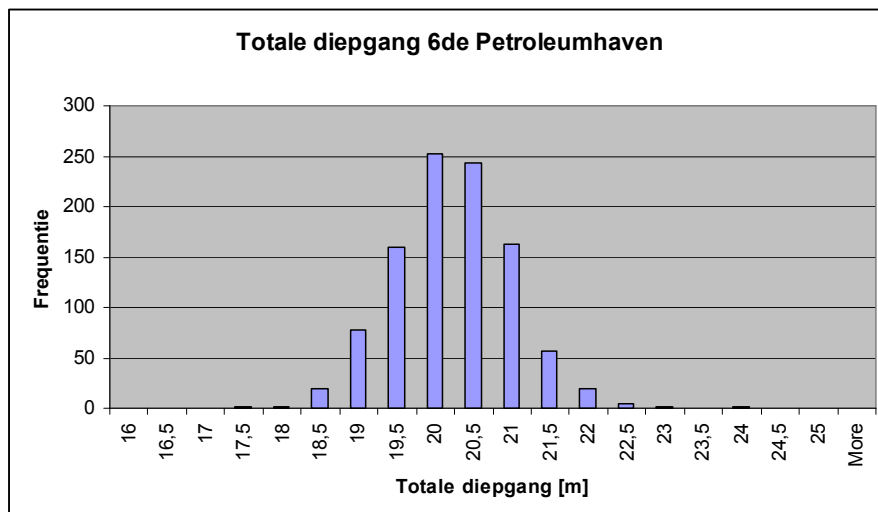
### 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven



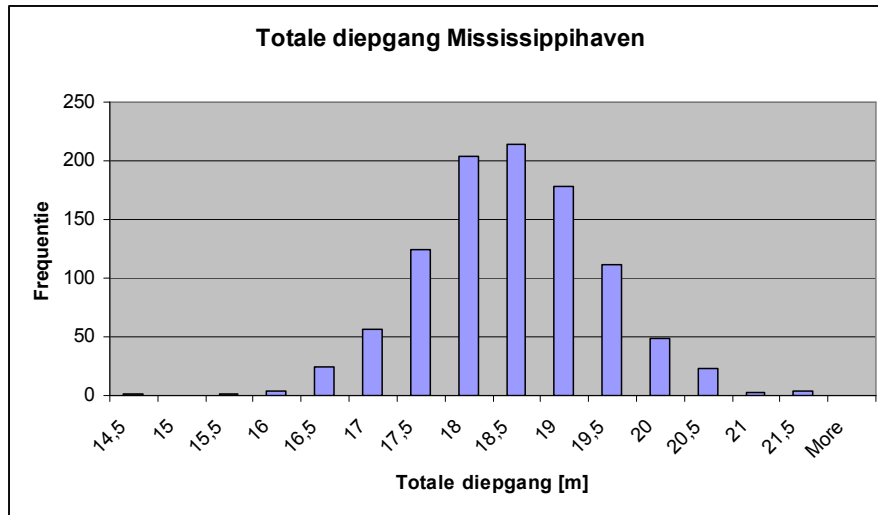
### Beerkanaal



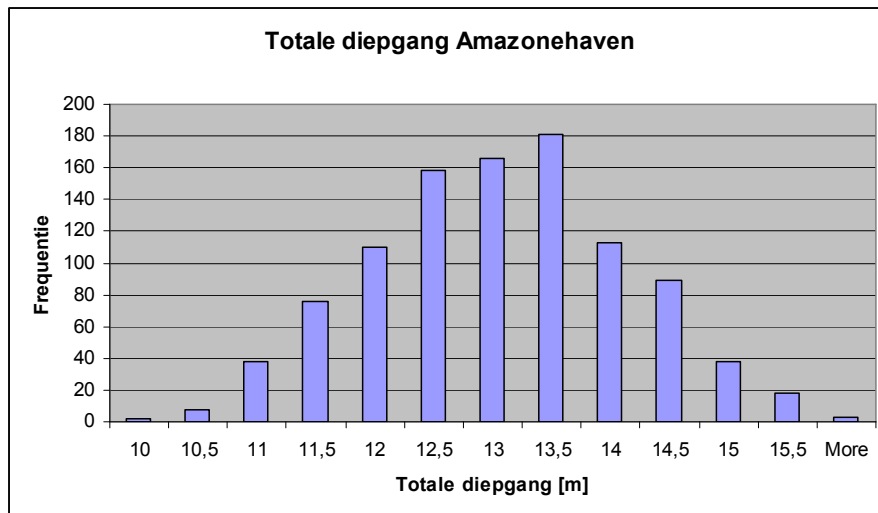
### 6<sup>de</sup> petroleumhaven



## Mississippihaven



## Amazonehaven



## 7.5 Squat in het binnengebied van de haven

### 7.5.1 Methode

PIANC (1997) classificeert, in de bepaling van squat, vaarwegen als onbegrensde ondiepe wateren (unrestricted shallow water), begrensde vaarwegen (restricted channels) of kanaal (canal). Hoewel de haven van Rotterdam al de drie typen kent, ligt de focus in dit onderzoek op squat in begrensde vaarwegen.

Een methode om in een begrensde vaarweg de squat te bepalen is m.b.v. de Barrass II methode. Barrass analyseerde squat met verschillende schepen en modelproeven met blokcoëfficiënten in de range 0,5-0,9. De ratio  $h$  (diepte vaarweg) en  $T$  (diepgang) varieerde hierbij van  $h/T = 1,1$  tot  $h/T = 1,5$ .

De formule ter bepaling van de inzinking t.g.v. squat ( $s$ ) luidt als volgt (zie ook hoofdstuk 4):

$$s = \frac{C_B \cdot S_2^{2/3} \cdot V_k^{2,08}}{30}$$

Met:

$$C_B = \text{blokcoëfficiënt} = \nabla / L_{pp} B T \quad [-]$$

$$\nabla = \text{verplaatste volume} = C_B \cdot L_{pp} \cdot B \cdot T \quad [\text{m}^3]$$

$$S_2 = \frac{A_s}{A_w} \text{ met } A_w = A_c - A_s \quad [-]$$

$$V_k = \text{vaarsnelheid} \quad [\text{kn}]$$

Deze formule is toepasbaar als aan de volgende eisen wordt voldaan:

1)  $0,5 \leq C_B \leq 0,9$

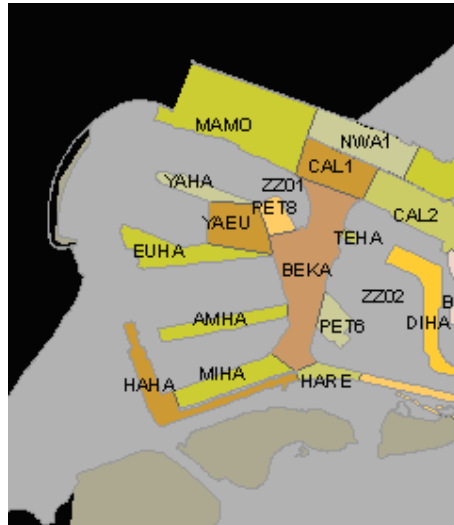
2)  $1,1 \leq h/T \leq 1,5$

3)  $F_h \leq 0,7$  met  $F_h = \frac{V_L}{\sqrt{gh}}$

Aan de eisen wordt voldaan, zoals volgt uit de volgende paragrafen.

### 7.5.2 Kansverdeling vaarsnelheden

De verdeling van de snelheid van schepen in het studiegebied is bepaald uit gegevens van de database van HbR (Business Objects). In Business Objects is de haven van Rotterdam opgedeeld in vakken waarbij informatie per vak beschikbaar is. De indeling van Maasvlakte 1 is in de figuur hieronder te zien.



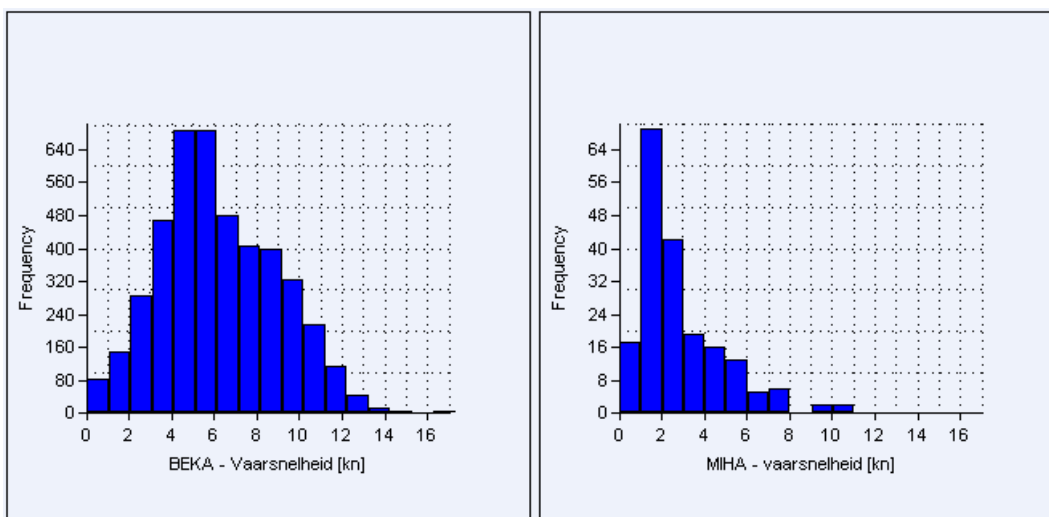
**Figuur 7.4. Indeling Studiegebied in vakken**

De vakken in het studiegebied:

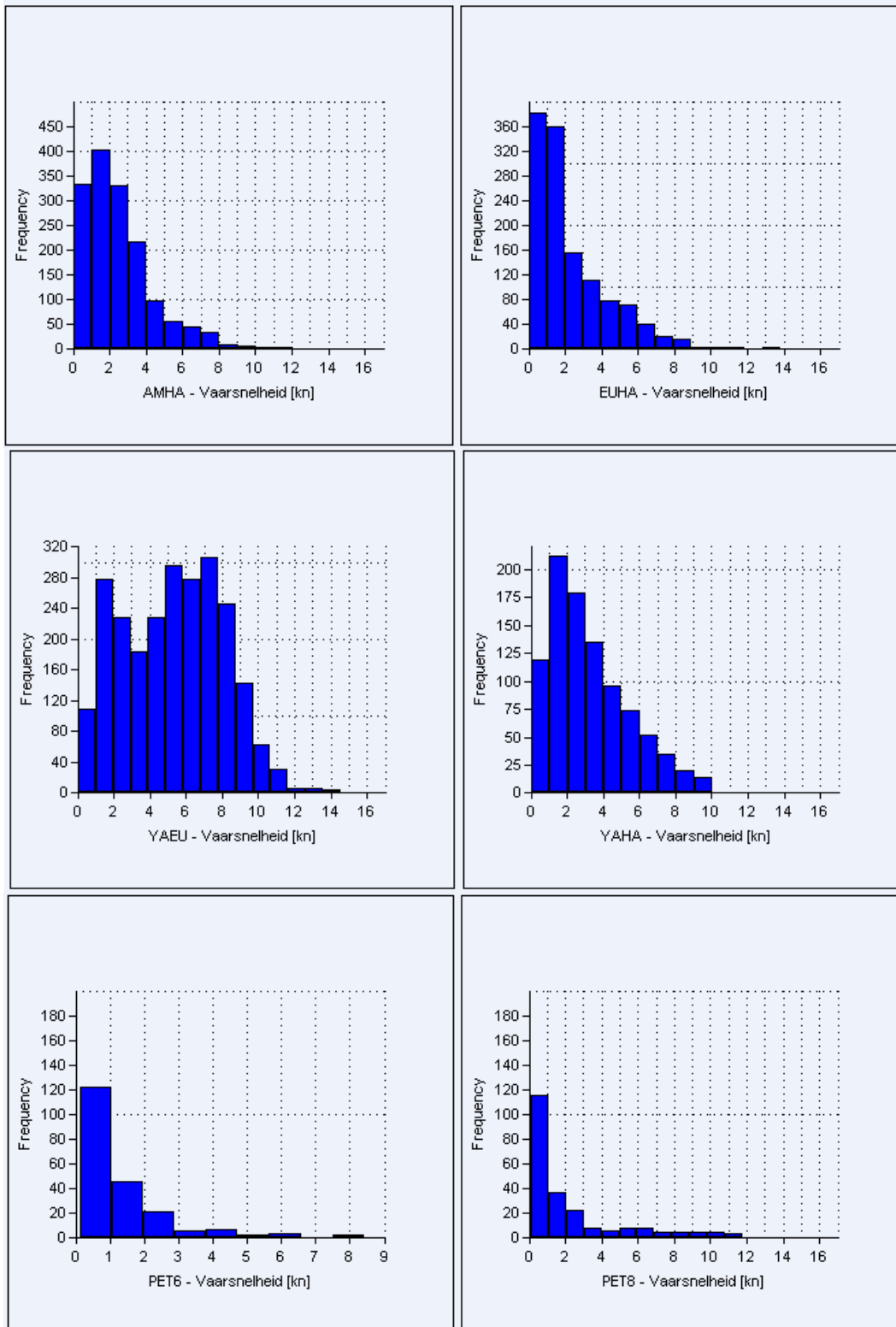
- BEKA: Beerkanaal
- PET6: 6<sup>de</sup> Petroleumhaven
- MIHA: Mississippihaven
- AMHA: Amazonehaven
- EUHA; Europahaven
- YAEU: Yangtzehaven/Europahaven
- YAHA: Yangtzehaven
- PET8: 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven

In de analyse naar squat zal het studiegebied ingedeeld worden in de hierboven genoemde vakken. Per vak zijn trajectmetingen verricht (m.b.v. radar) waarbij o.a. de vaarlengte en vaartijd van elk schip worden opgeslagen in de database. Hieruit kunnen de gemiddelde vaarsnelheden in de vakken worden berekend.

Voor de periode 1 januari 2010 tot 1 april 2010 (één kwartaal) zijn de betreffende gegevens van alle scheepsbewegingen in het studiegebied opgevraagd. Daaruit zijn per vak snelheidsverdelingen bepaald. In de figuur hieronder zijn de histogrammen van de gemiddelde vaarsnelheid per vak weergegeven.







**Figuur 7.5. Verdeling gemiddelde snelheid per vak**

Met behulp van de bovenstaande histogrammen is in het programma Bestfit de verdeling gevonden voor elk vak. In table 7.6 de verdelingen per vak.

Vak	Verdeling gemiddelde vaarsnelheid [kn]
BEKA	Normaal ( $\mu=5,73; \sigma^2=2,75$ )
PET6	Exponentieel ( $\lambda=1,67$ )
MIHA	Exponentieel ( $\lambda=3,04$ )
AMHA	Normaal ( $\mu=2,05; \sigma^2=1,85$ )
EUHA	Exponentieel ( $\lambda=2,57$ )
YAEU	Normaal ( $\mu=4,86; \sigma^2=3,31$ )
YAHA	Normaal ( $\mu=1,78; \sigma^2=2,46$ )
PET8	Exponentieel ( $\lambda=2,18$ )

Tabel 7.6. Verdeling gemiddelde vaarsnelheid per vak\*

\*Opmerking: Een snelheid van >6 knopen met maatgevende schepen in de betrokken vaargebieden is uitgesloten. De metingen zijn gebaseerd op alle schepen in het studiegebied. Dat verklaart enkele onwaarschijnlijke vaarsnelheden in figuur 7.5. (bijvoorbeeld 14 knopen in YAEU).

### 7.5.3 Blokfactor $S_2$

Voor elk deelgebied in het studiegebied moet de waarde voor de blokfactor  $S_2$  bepaald worden.  $S_2$  kan als volgt bepaald worden:

$$S_2 = \frac{A_s}{A_w} \text{ met : } A_w = A_c - A_s$$

Waarbij  $A_s$  staat voor 'natte grootspant schip' en  $A_c$  voor 'natte doorsnede van de vaarweg'. De squat neemt toe met afnemende kielspeling. Hoe ondieper de vaarweg des te meer squat er dus optreedt. Daarom wordt in de bepaling van squat uitgegaan van de verdeling van de LW-waterstand (zie bijlage Waterstand). Hiermee is de berekening van de squat aan de veilige kant.

De natte doorsnede vaarweg  $A_c$  is afhankelijk van de breedte van de vaarweg ( $W$ ), nautisch gegarandeerde diepte ( $d$ ) t.o.v. NAP en de waterstand ( $h$ ). In formule vorm:

$$A_c = (h - d) \cdot W$$

Voor de waterstand ( $h$ ) wordt dus de verdeling van LW-stand genomen. De LW-stand gemeten in het Beerkanaal t.o.v. NAP is normaal verdeeld ( $\mu=-64 \text{ cm}; \sigma^2=26,65 \text{ cm}^2$ )<sup>31</sup>. Aangenomen wordt dat deze verdeling representatief is voor het hele studiegebied. De NGD ( $d$ ) is een deterministische waarde die per haven verschilt, zie paragraaf 7.2. De (gemiddelde) breedte van de vaarweg ( $W$ ) is voor elk vak geschat (ook deterministisch), zie tabel 7.7.

Vak	Representatieve breedte vaarweg $W$ [m]
BEKA	700
PET6	600
MIHA	400
AMHA	250
EUHA	350
YAEU	1000
YAHA	600
PET8	1600

Tabel 7.7. Representatieve breedte vaarweg per vak

<sup>31</sup> De verdeling is m.b.v. Bestfit gevonden, gebaseerd op een meetreeks van 01/01/1998 tot 01/09/2003.

De doorsnede van het schip  $A_s$  kan bepaald worden uit de verdelingen van de (statische) diepgang en breedte per haven en de blokcoëfficiënt (zoals uit tabel paragraaf 7.5.4). De doorsnede van het schip  $A_s$  wordt bepaald met de formule:

$$A_s = B \cdot T \cdot C_b$$

Met:

B = breedte schip

T = diepgang schip

$C_b$  = blokcoëfficiënt

Aangenomen wordt dat ter hoogte van de waterlijn het schip haar maximale breedte (=B) heeft. De verdeling van de breedte per vak is te zien in de volgende tabel:

Vak	Verdeling breedte schip B [m]
BEKA	Uniform (58,60)
PET6	Uniform (58,60)
MIHA	Uniform (45,55)
AMHA	Uniform (37,5;45)
EUHA	Normaal ( $\mu=41,6; \sigma^2=5,9$ )
YAEU	Normaal ( $\mu=41,6; \sigma^2=5,9$ )
YAHA	Normaal ( $\mu=41,6; \sigma^2=5,9$ )
PET8	Uniform (58,60)

**Tabel 7.8. Verdeling breedte schepen**

#### 7.5.4 Blokcoëfficiënt $C_b$

De waarde van de blokcoëfficiënt (afhankelijk van de diepgang) varieert tussen 0,575 en 0,850. Enkele typische waarde voor de blokcoëfficiënt:

Type schip	Blokcoëfficiënt [-]	Type schip	Blokcoëfficiënt [-]
ULCC	0.850	General Cargo ships	0.700
Oil tankers	0.800	Passenger ships	0.625
Bulk carriers	0.750	Container / Ro-Ro	0.575

**Tabel 7.9. Typische waarden blokcoëfficiënt**

Voor de schepen waarvan de displacements bekend zijn, kan de blokcoëfficiënt bepaald worden, volgens de volgende formule:

$$C_b = \text{blokcoëfficiënt} = \nabla / L_{pp} B T \quad [-]$$

T volgt uit de diepgangsverdeling, zoals in 7.4.2 (statische diepgang), en is voor elke haven dus verschillend. De verdeling van displacement  $\nabla$  is net als die gebruikt is bij de bepaling van het effect van zoet water (paragraaf 7.4.2). Met een Monte Carlo simulatie, waarbij trekkingen worden gedaan uit de verdelingen van de diepgang en displacement, kan een verdeling worden gevonden voor de blokcoëfficiënt.

Indien van schepen het displacement  $\nabla$  niet bekend is dan wordt de blokcoëfficiënt  $C_B$  deterministisch bepaald. Per haven is bekend welke typen schepen de haven aandoen. Voor de diverse typen schepen zijn dan de waarden in de tabel hierboven aangehouden.

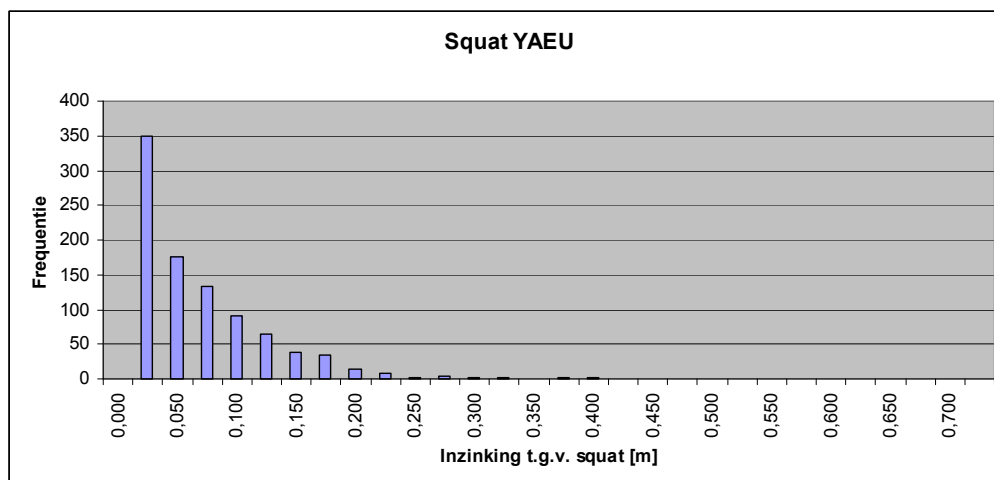
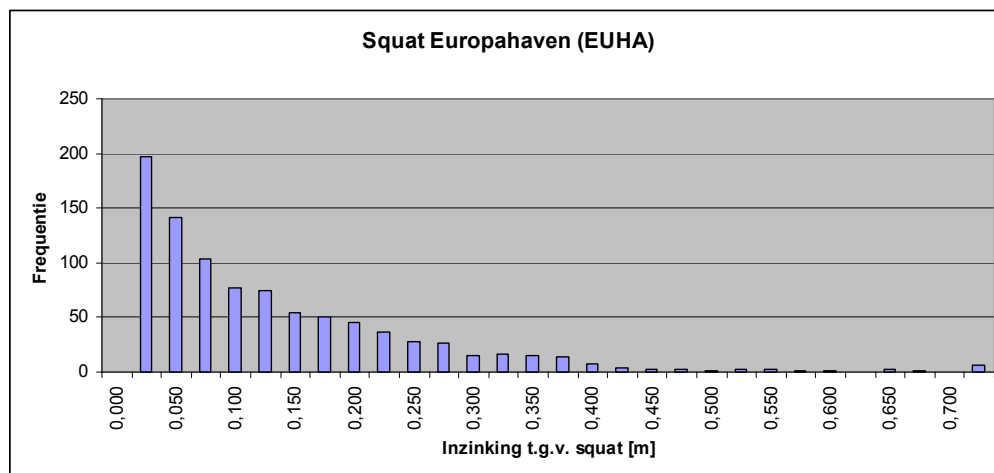
Hieronder een tabel met per vak de daarin toegepaste blokcoëfficiënt  $C_B$  :

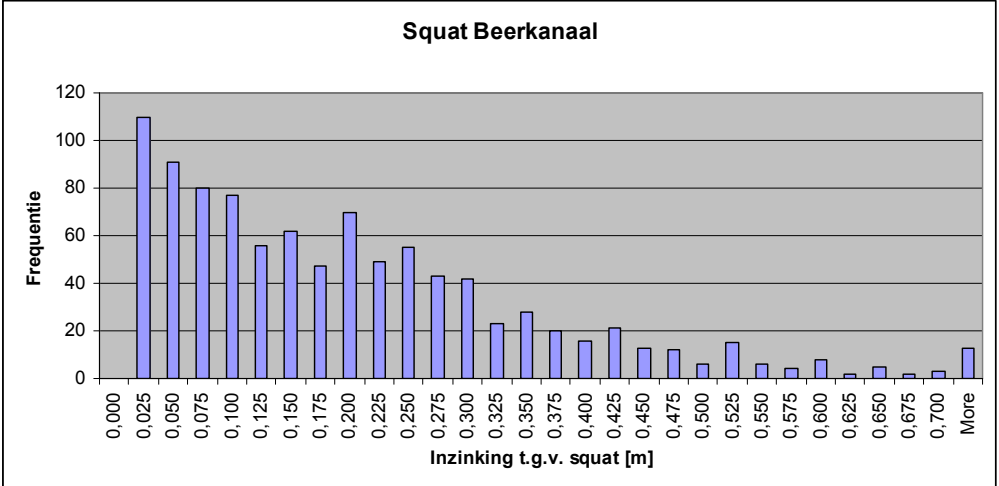
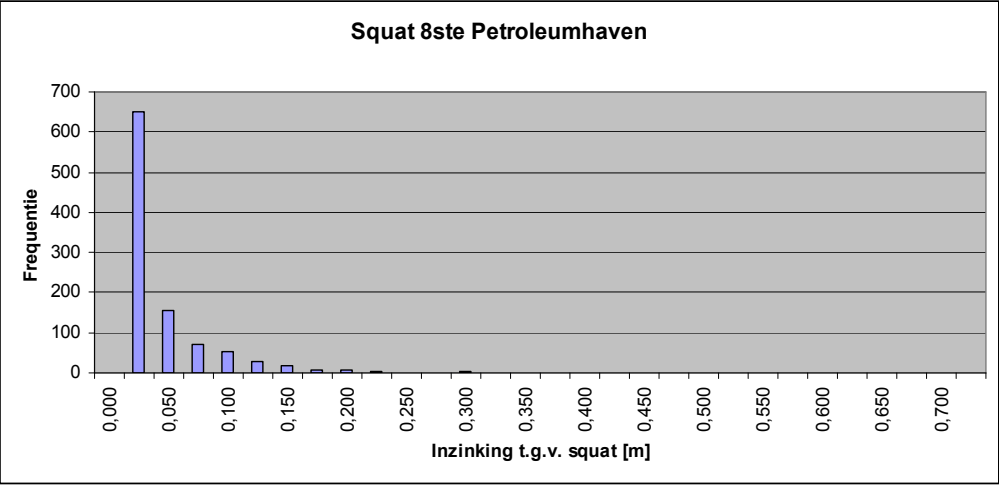
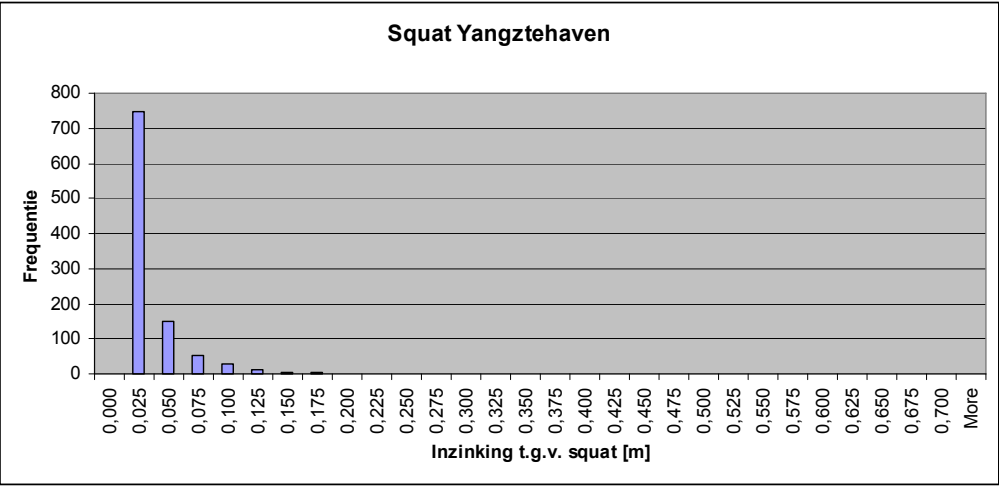
Vak	Blokcoëfficiënt $C_B$ [-]
BEKA	Uniform (0,75;0,85)
PET6	0,8
MIHA	0.75
AMHA	0.575
EUHA	0.575
YAEU	0.575
YAHA	0.575
PET8	0.8

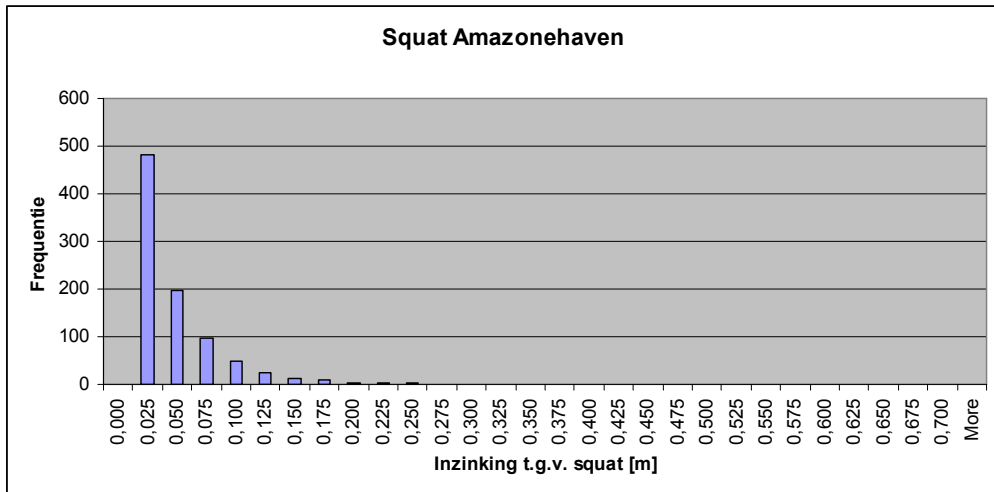
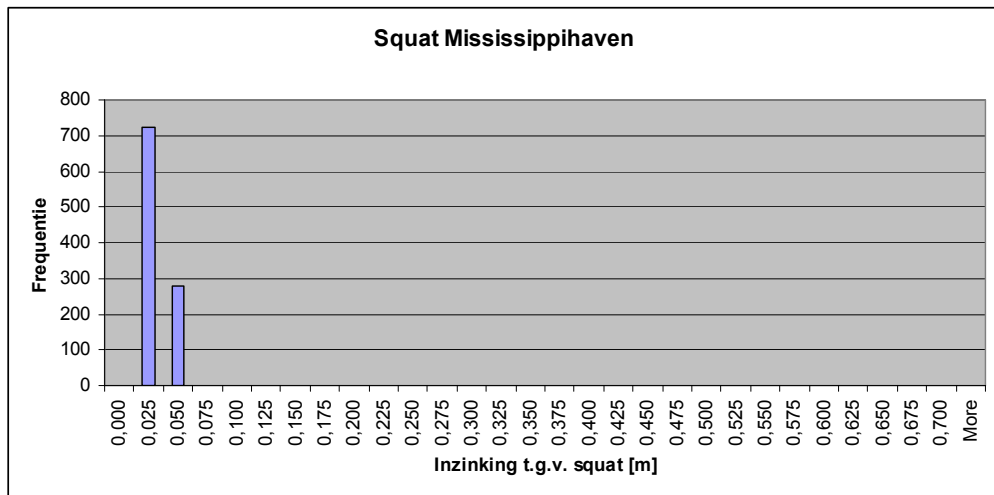
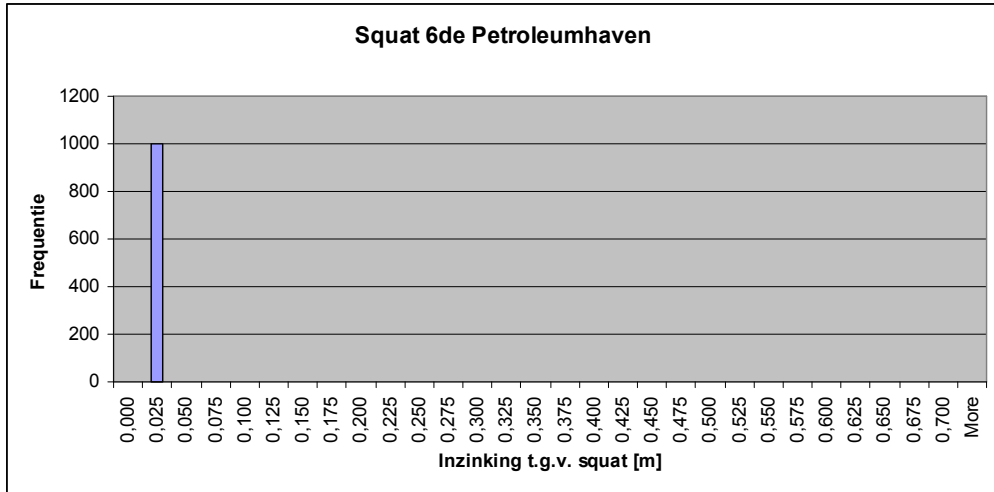
Tabel 7.10. Toegepaste blokcoëfficiënt per vak

### 7.5.5 Resultaten squat

In deze paragraaf worden de resultaten van de squat berekening getoond in de vorm van histogrammen. Per vak in het studiegebied kan de inzinking t.g.v. squat worden afgelezen.







## 7.6 Overzicht

De betrouwbaarheidsfunctie (Z):

$$Z = d + H_t - (T + s)$$

Met: d = nautisch gegarandeerde diepte (t.o.v. NAP)  
 $H_t$  = getijrijzing t.o.v. NAP  
 T = diepgang ontwerpschip  
 s = inzinking t.g.v. squat (trim en helling)

Vervolgens moet gelden voor het voorkomen van faalmechanisme verminderd manoeuvreren (in geval van een manoeuvreermarge van 1 m):

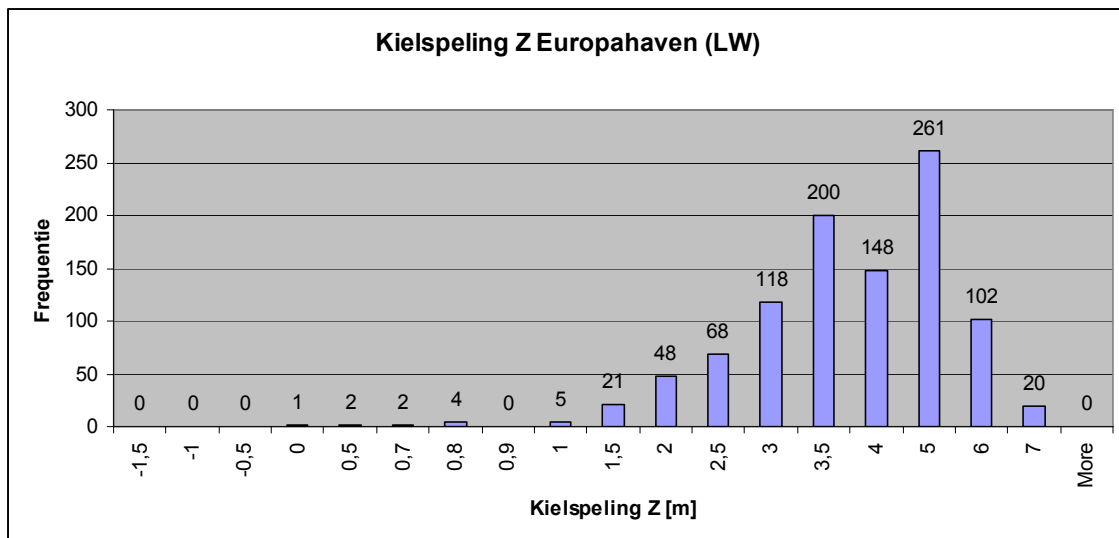
$$Z > 1$$

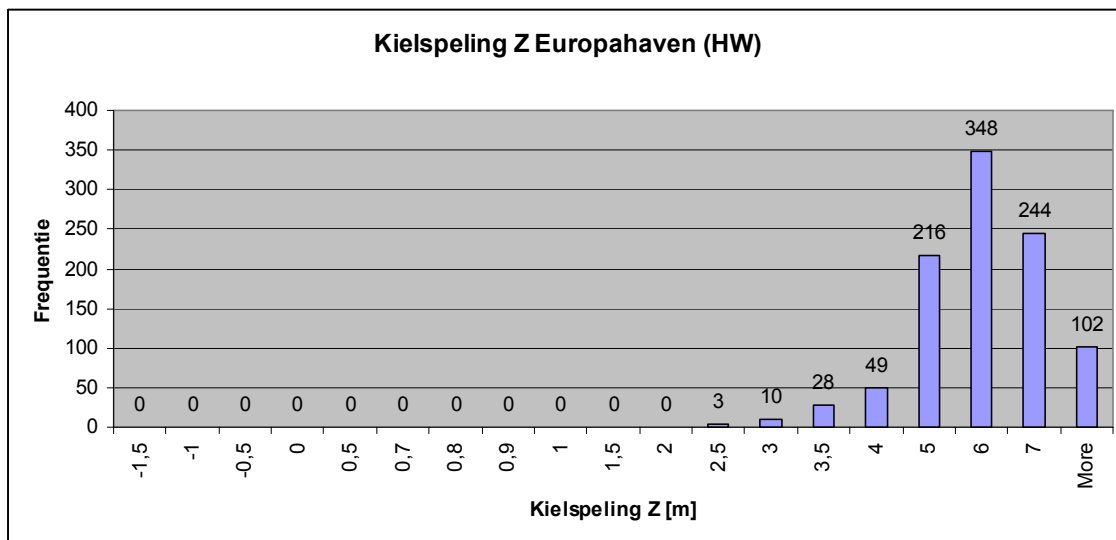
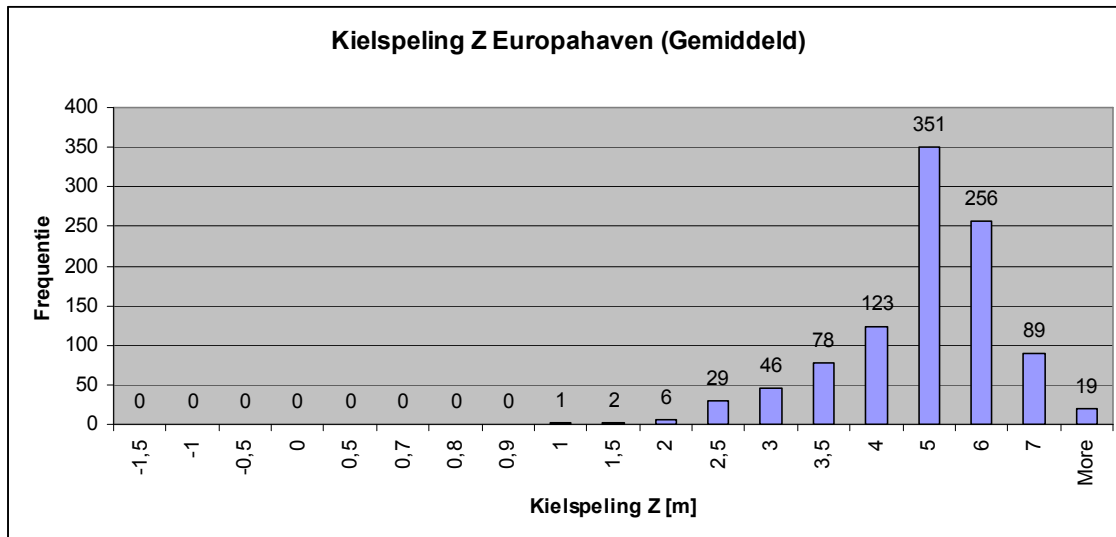
In de vorige paragrafen zijn de waarden van d, T en s gepresenteerd. De simulaties worden uitgevoerd voor drie waterstanden (LW, Gemiddeld en HW stand), zoals in paragraaf 7.3 toegelicht. Uitkomst van een simulatie is een verdeling voor de kielspeling (Z). Uit de verdeling kan dan de kans op  $Z < 1$  bepaald worden.

Indien de kans op  $Z < 1$  te groot of juist te klein is, kan de nautisch gegarandeerde diepte (d) gewijzigd worden tot de kans de gewenste grootte heeft. Vervolgens dienen dan de kosten afgewogen te worden: risico verminderd manoeuvreren versus kosten baggeren. In hoofdstuk 9 Conclusie wordt hierop teruggekomen.

Hieronder volgt per haven/vak de uitkomst van de Monte Carlo simulaties, voor LW, gemiddelde waterstand en HW. Uit de histogrammen is de kans op  $Z < 1$  te bepalen. De Monte Carlo simulatie is uitgevoerd met 1000 trekkingen. Voor de Europahaven worden de histogrammen hier weergegeven, voor de rest van de havens wordt verwezen naar bijlage 7.

### Europahaven





De figuren (histogrammen) hierboven geven de uitkomst van de simulatie voor de Europahaven weer. De simulatie met de LW-stand resulteert in 9 trekkingen met  $Z < 1$ . De faalkans wordt hiermee 0.9%. Deze kans is acceptabel in vergelijking met de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5), en is mogelijk wel te "veilig" is. Simulaties met hogere waterstanden leveren een kleinere faalkans op zie tabel hieronder.

<b>Europahaven Trekkingen met <math>Z &lt; 1</math></b>		
LW	Gemiddeld	HW
<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0,90%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>

**Tabel 7.11. Trekkingen met  $Z < 1$  (Europahaven)**



### YAEU

De tabel hieronder geeft het resultaat van de simulatie voor het vak YAEU weer. De simulatie met de LW-stand resulteert 30 trekkingen met  $Z < 1$ . De faalkans is hiermee 3,0%. Deze kans is groter dan de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5). Met de Gemiddelde waterstand is de faalkans wel kleiner dan toelaatbare kans, namelijk 0,5%. De simulatie met de HW-stand levert een nog kleinere faalkans op.

YAEU Trekkingen met $Z < 1$		
LW	Gemiddeld	HW
<b>30</b>	<b>5</b>	<b>0</b>
<b>3,00%</b>	<b>0,50%</b>	<b>0,00%</b>

Tabel 7.12. Trekkingen met  $Z < 1$  (YAEU)

### Yangtzehaven

De tabel hieronder geeft de resultaten weer voor de Yangtzehaven. De simulatie met de LW-stand resulteert 29 trekkingen met  $Z < 1$ . De faalkans is hiermee 2,9%. Deze kans is groter dan de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5). Met de Gemiddelde waterstand is de faalkans wel kleiner dan toelaatbare kans, namelijk 0,4%. De simulatie met de HW-stand levert een nog kleinere faalkans op.

Yangtzehaven Trekkingen met $Z < 1$		
LW	Gemiddeld	HW
<b>29</b>	<b>4</b>	<b>0</b>
<b>2,90%</b>	<b>0,40%</b>	<b>0,00%</b>

Tabel 7.13. Trekkingen met  $Z < 1$  (Yangtzehaven)

### 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven

De simulatie voor de 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven met de LW-stand resulteert 150 trekkingen met  $Z < 1$ . De faalkans is hiermee 15,0%. Deze kans is groter dan de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5). Met de Gemiddelde waterstand is de faalkans iets kleiner maar nog wel groter dan de toelaatbare kans, namelijk 4,3%. De simulatie met de HW-stand levert een nog kleinere faalkans op, zie tabel hieronder.

8 <sup>ste</sup> Petroleumhaven Trekkingen met $Z < 1$		
LW	Gemiddeld	HW
<b>150</b>	<b>43</b>	<b>7</b>
<b>15,00%</b>	<b>4,30%</b>	<b>0,70%</b>

Tabel 7.14. Trekkingen met  $Z < 1$  (8<sup>ste</sup> Petroleumhaven)

### Beerkanaal

De simulatie met de LW-stand resulteert 150 trekkingen met  $Z < 1$ . De faalkans is hiermee 18,1%. Deze kans is groter dan de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5). Met de Gemiddelde waterstand is de faalkans iets kleiner maar nog wel groter dan de toelaatbare kans, namelijk 7,0%. De simulatie met de HW-stand levert een nog kleinere faalkans op, zie tabel hieronder.

<b>Beerkanaal Trekkingen met Z&lt;1</b>		
LW	Gemiddeld	HW
<b>181</b>	<b>70</b>	<b>18</b>
<b>18,10%</b>	<b>7%</b>	<b>1,80%</b>

**Tabel 7.15. Trekkingen met Z <1 (Beerkanaal)**

### **6<sup>de</sup> Petroleumhaven**

De simulatie met de LW-stand resulteert 452 trekkingen met Z<1. De faalkans is hiermee 45,2%. Deze kans is veel groter dan de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5). Met de Gemiddelde waterstand is de faalkans kleiner maar nog wel groter dan de toelaatbare kans, namelijk 8,7%. De simulatie met de HW-stand levert een nog kleinere faalkans op, zie tabel hieronder.

<b>6<sup>de</sup> Petroleumhaven Trekkingen met Z&lt;1</b>		
LW	Gemiddeld	HW
<b>452</b>	<b>87</b>	<b>7</b>
<b>45,20%</b>	<b>8,70%</b>	<b>0,70%</b>

**Tabel 7.16. Trekkingen met Z <1 (6<sup>de</sup> Petroleumhaven)**

### **Mississippihaven**

De simulatie met de LW-stand resulteert 4 trekkingen met Z<1. De faalkans is hiermee 0,4%. Deze kans is acceptabel in vergelijking met de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5), en is mogelijk wel te "veilig" is. Simulaties met hogere waterstanden leveren een kleinere faalkans op zie tabel hieronder.

<b>Mississippihaven Trekkingen met Z&lt;1</b>		
LW	Gemiddeld	HW
<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0,40%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>

**Tabel 7.17. Trekkingen met Z <1 (Mississippihaven)**

### **Amazonehaven**

De simulatie met de LW-stand resulteert 23 trekkingen met Z<1. De faalkans is hiermee 2,3%. Deze kans is groter dan de toelaatbare kans van 1% (zie hoofdstuk 5). Simulaties met hogere waterstanden leveren een kleinere faalkans op zie tabel hieronder.

<b>Amazonehaven Trekkingen met Z&lt;1</b>		
LW	Gemiddeld	HW
<b>23</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>2,30%</b>	<b>0,10%</b>	<b>0,00%</b>

**Tabel 7.18. Trekkingen met Z <1 (Amazonehaven)**

## 7.7 Analyse resultaten

Hieronder een tabel met een overzicht van alle havens en de bijhorende faalkansen. Faalkansen groter dan de toelaatbare faalkans (1%) zijn vetgedrukt weergegeven.

Haven/kanaal	Faalkans verminderde manoeuvreren		
	LW	Gemiddeld	HW
Europahaven	0,9%	0,0%	0,0%
YAEU	<b>3,0%</b>	0,5%	0,0%
Yangtzehaven	<b>2,9%</b>	0,4%	0,0%
8 <sup>ste</sup> Petroleumhaven	<b>15,0%</b>	<b>4,3%</b>	0,7%
Beerkanaal	<b>18,1%</b>	<b>7%</b>	<b>1,8%</b>
6 <sup>de</sup> Petroleumhaven	<b>45,2%</b>	<b>8,7%</b>	0,7%
Mississippihaven	0,4%	0,0%	0,0%
Amazonehaven	<b>2,3%</b>	0,1%	0,0%

Tabel 7. Faalkans per haven voor LW, gemiddeld en HW waterstand

Over het algemeen kan het volgende over de resultaten in de tabel hierboven gesteld worden:

- Voldoet een haven/kanaal met de LW-stand dan is de waterdiepte aldaar wellicht te ruim → haven is onder alle getijfasen toegankelijk
- Voldoet een haven/kanaal net met de gemiddelde waterstand dan is de waterdiepte voldoende → eventueel toepassen van toelatingsbeleid ( d.m.v. getijvenster)
- Voldoet een haven/kanaal pas met HW-stand dan is de waterdiepte aldaar onvoldoende → toepassen van toelatingsbeleid (d.m.v. getijvenster)

Het diepteontwerp voor de Europahaven en Mississippihaven zijn over gedimensioneerd, zoals blijkt uit de uitkomsten van de Monte Carlo simulatie. Dit geldt ook, weliswaar in mindere mate, voor de gebieden YAEU, Yangtzehaven en Amazonehaven. In deze havens valt dus winst in termen van diepte te halen.

Worden deze havens geoptimaliseerd (= faalkans net kleiner dan 1,0% bij gemiddelde waterstand) dan zouden de minimaal vereiste diepte en winst in diepte gelden zoals in tabel hieronder.

Haven	Faalkans [%]	Nautisch gegarandeerde diepte t.o.v. NAP [m]	Minimaal vereiste diepte t.o.v. NAP [m]	Winst in diepte [m]
Europahaven	1,0	16,65	<b>15,63</b>	<b>1,02</b>
Mississippihaven	1,0	22,65	<b>21,37</b>	<b>1,28</b>
YAEU	1,0	16,65	<b>16,40</b>	<b>0,25</b>
Yangtzehaven	1,0	16,65	<b>16,40</b>	<b>0,25</b>
Amazonehaven	1,0	16,65	<b>16,07</b>	<b>0,58</b>

Tabel 7. Winst in diepte bij faalkans 1,0 %

De havens 6<sup>de</sup> en 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven voldoen pas met de HW-stand. Het Beerkanaal zelfs niet eens met de HW-stand (1,8% > 1,0%). De uitkomsten voor deze havens zijn echter wel te verklaren. Hierbij wordt verwezen naar bijlage 3: Histogrammen statische diepgang.

In bijlage 5 staan de histogrammen van de diepgang van schepen in de havens gepresenteerd. De histogrammen geven per haven een beeld van de verdeling van de diepgang. Ook kan afgelezen worden van de histogrammen het aantal schepen dat beschouwd wordt. De histogrammen van de 8<sup>ste</sup>, 6<sup>de</sup> petroleumhaven en het Beerkanaal zijn gebaseerd op respectievelijk 45, 17 en 71 schepen. Deze aantallen betreffen de meest diepstekende schepen in de gebieden. En voor diepstekende schepen is het economisch om een toelatingsbeleid te hanteren, door deze schepen alleen rond hoogwater naar binnen te laten varen. Met de hiervoor genoemde aantallen geldend voor een heel jaar (2009) is dat een acceptabel beleid. Veel winst in termen van minder diepte voor deze drie havens zit er echter niet.

## 8. Conclusie en aanbevelingen

### 8.1 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag:

- Hoe kan de benodigde diepte in het binnengebied van de haven probabilistisch bepaald worden?

Hoe de benodigde diepte in het binnengebied probabilistisch bepaald kan worden, is aangetoond in hoofdstuk 8. Het is voor een probabilistische benadering essentieel om een betrouwbaarheidsfunctie te definiëren, met hierin parameters die hetzij deel uitmaken van de sterkte van het systeem of de belasting hierop. Door voor al de parameters data te verzamelen en hierbij statistische verdeling te vinden, kan de betrouwbaarheidsfunctie 'gerund' worden. In deze studie is gekozen voor een Monte Carlo simulatie. Deze keuze lag voor de hand gezien het aantal variabelen in de betrouwbaarheidsfunctie, namelijk 4. Enkele van deze variabelen worden zelf ook bepaald door een aantal variabelen (bijvoorbeeld squat). Gezien het aantal variabelen is de methode van Numeriek Integratie geen goed alternatief meer, omdat de rekenmethode exponentieel met het aantal variabelen toeneemt (in tegenstelling tot de Monte Carlo simulatie).

Kenmerkend voor een probabilistische benadering is de toetsing van de betrouwbaarheidsfunctie aan een bepaald criterium. De bepaling van dit criterium, zowel kwalitatief als kwantitatief, behoort dus ook bij de probabilistische aanpak.

Deelvragen:

- Hoe statistische verdelingen te bepalen voor de parameters relevant voor de benodigde diepte?

Hoe de statistische verdelingen van de parameters te bepalen hangt van de aard van de parameters zelf af. Zo zijn er parameters waarvan data wordt bijgehouden in databases. Een voorbeeld hiervan zijn de geometrische eigenschappen van schepen die de haven van Rotterdam aan doen (of deden). Deze wordt via informatiesystemen nauwkeurig bijgehouden. Zo kan uit zulke data sets statistische verdelingen worden gevonden. Op een vergelijkbare wijze zijn de verdelingen voor LW-, Gemiddeld en HW-waterstand gevonden. Voor een periode 5,5 jaar zijn metingen verricht en bijgehouden, waaruit de verdelingen zijn bepaald.

Niet voor alle parameters zijn data beschikbaar, zoals voor het effect van zoet water, squat en onzekerheid in de opgegeven diepgang. De verdeling van het effect van zoet water is gevonden door met het model TRIWAQ een aantal scenario's te simuleren. Uit de resultaten van de simulatie/berekeningen is een verdeling gevonden voor de dichtheidsverschillen in de haven.

De squat is afhankelijk van een aantal factoren, maar de belangrijkste hierin is de vaarsnelheid. De verdeling van de vaarsnelheid is gebaseerd op trajectmetingen verricht (m.b.v. radar) waarbij o.a. de vaarlengte en vaartijd van elk schip zijn opgeslagen in de database. Hieruit zijn de gemiddelde vaarsnelheden berekend.

Tot slot de onzekerheid in diepgang, waarvoor geen data gevonden is. Om toch de invloed hiervan mee te nemen, is de verdeling hiervan geschat (normaal ( $\mu=0,1$ ;  $\sigma^2=0,05$ )).

- Is een volledig probabilistisch model mogelijk?

Een volledig probabilistische model is niet altijd mogelijk. Sommige verschijnselen zijn van nature meer deterministisch van karakter, waardoor het verschijnsel niet volledig probabilistisch kan worden bepaald. Vaak kunnen wel enkele componenten probabilistisch bepaald worden. Een voorbeeld hiervan is de squat. De squat wordt met een empirische formule (deterministisch) berekend. Enkele parameters ter bepaling van squat kunnen echter probabilistisch bepaald worden, zoals de vaarsnelheid en de geometrie van schepen.

- Wat zijn de correlaties van de verschillende verdelingen?

Van de volgende parameters in dit rapport zijn verdelingen bepaald: waterstand, diepgang schip, effect zoetwater (dichtheidsverschillen) en squat (vaarsnelheid, blokfactor ( $S_2$ ) en blokcoëfficiënt ( $C_B$ )).

Zoals uit hoofdstuk 7 blijkt is de parameter 'waterstand' gerelateerd aan de parameters 'het effect van zoetwater' en 'squat' (via de blokfactor ( $S_2$ )).

Bij de bepaling van de dichtheidsverschillen is het computermodel TRIWAQ gebruikt waarbij waterloopkundige processen in de rivieren en zeeën worden gesimuleerd. Ook de waterstand dus. Deze verschilt van de waterstand zoals gebruikt in dit model. De waterstand uit TRIWAQ betreft een gesimuleerde waterstand, de waterstand in dit model is gebaseerd op metingen. In het ideale geval zijn deze waterstanden gelijk. Toch kan gesteld worden dat een dergelijke koppeling niet noodzakelijk is. De nauwkeurigheid bij de bepaling van dichtheidsverschillen is namelijk niet zo hoog, zoals de aanname dat de diepgang op een punt een gewogen gemiddelde is van de 10 dieptelagen.

In het model is de parameter 'waterstand' ook gerelateerd aan de parameter 'squat', via de blokfactor ( $S_2$ ). De blokfactor ( $S_2$ ) is de verhouding tussen het 'natte grootspant schip' en 'natte doorsnede vaarweg'. Voor de bepaling van de natte doorsnede van de vaarweg moet uitgegaan worden van een waterstand. Voor dit model is gekozen voor LW-stand, net zoals gebruikt voor de parameter 'waterstand'. Voor de squat geldt hoe ondieper de vaarweg des te meer squat er optreedt. Vandaar de keuze voor de LW-waterstand en niet de gemiddelde of HW-waterstand. Hiermee is de berekening aan de veilige kant.

Opgemerkt dient te worden dat de diepgang van het schip en het effect van zoet water géén correlatie hebben. De diepgang zoals gebruikt ter bepaling van de parameter 'diepgang schip' is gebaseerd op een diepgang op zee, waarbij wordt aangenomen dat de dichtheid aldaar  $1025 \text{ kg/m}^3$  is.

- Hoe toelaatbare kans op falen te bepalen?

Een toelaatbare kans op falen bepalen is niet zo gemakkelijk gedaan. Om tot een toelaatbare kans te komen dient het risico van het falen in beschouwing te worden genomen, zoals ook toegelicht in paragraaf 3.2. Hierbij is het risico gedefinieerd als kans van optreden vermenigvuldigd met het effect/grootte van de gevolgen van het falen. Door uit te gaan van een acceptabel risico, kan een toelaatbare kans op falen worden vastgesteld.

In theorie (kwalitatief) klinkt een dergelijk bepaling eenvoudig. In praktijk (kwantitatief) is dit anders, zoals ook blijkt uit hoofdstuk 5. Daar is aan de hand van scenario's een risicoanalyse uitgevoerd voor zowel het faalmechanisme bodemberoering als verminderde manoeuvreren. Vooral het in kaart brengen van financiële gevolgen bleek een erg lastige. Deze zijn dan ook grof geschat. Hoewel door de vele aannames de betrouwbaarheid van de analyse verloren kan gaan, lijken de resultaten te kloppen.

- Wat is een toelaatbare kans op falen voor het studiegebied?

Zoals in hoofdstuk 5 beschreven, is de kans op bodemberoering van 1% (het individueel vaart criterium) zoals die nu voor het buitengebied geldt aangehouden als criterium voor het faalmechanisme verminderd manoeuvreren. Het risico op verminderd manoeuvreren lijkt hiermee acceptabel te zijn.

- Wat is de winst in termen van minder diepte of meer diepgang bij een probabilistische rekenmethode?

Om deze vraag te beantwoorden dient de huidige situatie (ontwerp) vergeleken te worden met de probabilistische rekenmethode. Deze vergelijking is aan de ene kant niet op te maken. In deze studie is het uitgangspunt van het model het faalmechanisme verminderd manoeuvreren, terwijl bij de deterministische aanpak het faalmechanisme een bodemberoering is. In deze studie zijn als het ware de eisen aan het ontwerp 'strenger' geworden.

Als de vergelijking dan toch wordt gemaakt, blijkt voor een aantal havens (Europa-, Mississippi-, Yangtze-, Amazonehaven) dat met de probabilistische methode een winst van orde grote tienden meters tot wel ruim een meter te behalen valt.

Voor de overige havens/kanaal (6<sup>de</sup>, 8<sup>ste</sup> Petroleumhaven en Beerkanaal) zijn de resultaten niet zo gunstig. Dit komt mede door het feit dat in het model geen toelatingsbeleid is gehanteerd, waarbij dus een downtime van 0% geldt (of in wachturen uitgedrukt 0 uren). De schepen die deze havens aandoen zijn de meest diepstekende schepen die de haven van Rotterdam aandoen.

Een gevolg van het niet hanteren van een toelatingsbeleid, is dat de verdelingen van de diepgangen van schepen die deze havens aandoen mogelijk niet goed gemodelleerd zijn. De diepgangsverdelingen voor de 8<sup>ste</sup>, 6<sup>de</sup> petroleumhaven en het Beerkanaal zijn gebaseerd op respectievelijk 45, 17 en 71 schepen. Deze aantallen betreffen de meest diepstekende schepen in de gebieden. De vele andere schepen, met mindere diepgang, die de haven aandoen zijn hierin niet meegenomen.

En voor diepstekende schepen is het economisch om een toelatingsbeleid te hanteren, door deze schepen alleen rond hoogwater naar binnen te laten varen. Met de hiervoor genoemde aantallen geldend voor een heel jaar (2009) is dat een acceptabel beleid.

## 8.2 Conclusie en aanbevelingen

De conclusies uit deze studie zijn:

- het is mogelijk om ook voor het binnengebied de diepte op een probabilistische manier uit te rekenen;
- in het onderzochte gebied is het faalmechanisme "verminderd manoeuvreren" dominant ten opzichte van het faalmechanisme "bodemberoering";
- de probabilistische methode lijkt een (bagger-) voordeel op te leveren in de orde grootte van tienden meters tot zelfs meer dan 1 meter;
- toepassing van een toelatingsbeleid binnen de probabilistische methode is noodzakelijk;
- de mogelijkheid bestaat om het toegepaste model uit te breiden tot een operationele tool.

Indien de resultaten van deze studie aanleiding geven tot een vervolg is het aan te bevelen om:

- Meer onderzoek naar de manoeuvreereigenschappen van schepen met weinig kielspeling. Hieruit de noodzakelijke waarde van de manoeuvreermarge bepalen (nu is er 1m aangenomen, maar waarom juist 1 m?).
- Meer onderzoek op het gebied van nautische bodem. Hieruit nauwkeuriger bepaling van de bodemligging.
- een softwarematig ontwerp- en operationeel model op te zetten, waarbij ook de gegevens die nu geschat zijn zo goed mogelijk ingevuld worden en berekening meer gedetailleerd uitgevoerd worden dan in deze studie;
- dit model "virtueel" toe te passen op een deel van de haven (bijvoorbeeld het studiegebied zoals in dit rapport) en de resultaten hiervan voor de periode van 1 jaar te monitoren en te evalueren zodat er vertrouwen opgebouwd kan worden in de toepassing en mogelijke kinderziektes afgevangen kunnen worden.



## Literatuurlijst

- [1] CUR190, Probability in Civil Engineering, Part 1: The theory of probabilistic design. Gouda: Stichting CUR, 1997.
- [2] Harap, Functioneel Ontwerp. Rotterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1994a.
- [3] PIANC, Approach Channels, A guide for Design. Brussels: PIANC, 1997.
- [4] PIANC, Under keel clearance for large ships in maritime fairways with hard bottom. Brussels: PIANC, 1985.
- [5] Ligteringen, H., Ports and terminals. Delft: Technische Universiteit Delft, 2007.
- [6] USACE, Hydraulic design of deep-draft navigation projects. Washington, DC: US Army Corps of Engineers, 2006.
- [7] Project Aqualoupe, Nautische en technische uitgangspunten voor de waterbodem (concept versie). Rotterdam: GHR, 1998.
- [8] Quy, N.M., Approach channels: Risk and simulation-based design. Delft: Technische Universiteit Delft, 2008.
- [9] Bouw, R., Admittance policy tidal bound ships. Delft: Technische Universiteit Delft, 2006.
- [10] HbR afdeling Watersystemen, Hydro Meteo informatiebundel. Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam, 2004.
- [11] HbR divisie Havenmeester, Port Information Guide. Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam, 2010.
- [12] Rijkswaterstaat Noordzee, Tjpoortregeling. Rijswijk: Hydro Meteo Centrum Noordzee, 2009.
- [13] Kopp, P.J. & Silver, A.I., Channel Analysis and Design Evaluation Tool (CADET). Maryland, US: Naval Surface Warfare Center, 2004.
- [14] Moes, H., Probability and risk criteria for channel depth design and channel operation. Beijing, 2008.

### Websites:

- [ ] <http://www.protide.eu>
- [ ] <http://www.portofrotterdam.com>
- [ ] <http://www.noordzeeatlas.nl/>
- [ ] <http://www.knmi.nl/>



## Begrippenlijst

Begrip		Synoniem	Verklaring
Aanvaring			de botsing van schepen met elkaar
Afmeren			Het degelijk bevestigen van de boot aan een kade, steiger of meerboei
Afwaaiing			Mate van de verlaging van het peil onder invloed van de wind
Algoritme			Lijst van stappen om met een computerprogramma een probleem op te lossen
Astronomisch getij			Getijbeweging als gevolg van de veranderlijke resultante van de aantrekkingskracht van de maan en de zon op de watermassa's op aarde, niet gestoord door weerkundige omstandigheden.
Baggeren			Het gehele proces van ontgraven, transport en storten van materiaal onder water met als doel het verdiepen of winnen van mineralen.
Beaufortschaal			Schaal voor het meten van windsterktes van windkracht 0 tot 12
Bodem			Het onder de waterspiegel gelegen grondvlak van een rivier, kanaal, meer, haven, etc., exclusief de overgangtaluds naar de oevers.
Bodemberoering			één of meerdere momenten tijdens een vaart waarbij het schip de bodem raakt (t.g.v. een onvoldoende kielspeling).
Bodemberoering*			Een bodemberoering ten gevolge van een schip dat verminderd manoeuvreerbaar is geraakt.
Boeg			Het voorste deel van de romp, ongeveer 1/3 à 1/4 van de lengte.
brak water			Water waarvan het zoutgehalte beduidend lager ligt dan dat van zeewater.
Bulk		Massagoed	Onverpakte droge lading die in grote hoeveelheden tegelijk in het laadruim gestort wordt
Constructiediepte			de maximale ligging van de havenbodem in m t.o.v. NAP, zoals aangenomen in het ontwerp van nabij gelegen constructie, zoals een kademuur.
Contractdiepte			de minimale ligging van de havenbodem in m t.o.v. NAP, zoals is overeengekomen in het contract tussen HbR en de klant
Deining			Elders opgewekte windgolven, voorkomend in een gebied met weinig of geen wind.
deterministisch model			Een model dat de invoer volgens een vaststaande wetmatigheid omzet in uitvoer, zonder rekening te houden met onzekerheden.
Diepgang			Verticale afstand van de waterspiegel tot het onderste deel van het schip.
Diepgangsmerk		Plimsol-merk	Tekens op een schip waarop men de diepgang kan aflezen.
Doodtij			Een getijfase waarbij de invloed van de zon die van de maan verzwakt.
Doorvaart			Benaming van een bepaalde vaarroute
down-time			het over alle omstandigheden gemiddelde percentagae van de tijdsduur van een getijcyclus, dat er geen opvaart mogelijk is.
echolood			Toestel dat de diepte aangeeft op basis van akoestische metingen
economische optimalisatie			Omvat minste kosten strategieën, maximalisatie van kosteneffectiviteit en kosten-baten relaties
Falen			Het onverwacht eindigen van het juist functioneren of het niet (meer) voldoen aan vastgestelde criteria van het systeem of een gedeelte daarvan
Geul			Smal en meestal diep water, smal kanaal
Geulgebonden schepen			Schepen die de haven alleen via de aanloopgeul (Euro-/Maasgeul) bereiken kunnen
Golfhoogte			De verticale afstand tussen dal en top van een golf
Golfklimaat			Gemiddelde en variabiliteit van karakteristieken van golven die in een bepaald gebied kunnen voorkomen.

haling		Seiches	Schommeling van het water in havens en andere bekkens
Hoogwater			Tweemaal daags optredend maximum van de getijbeweging
IMO-nummer			Internationaal erkent 7-cijferig identificatienummer, onverbrekkelijk verbonden met het schip.
Kielspeling	netto		de waterkolom onder de kiel van het varende schip in vlak water
Kielspeling	bruto		de waterkolom onder de kiel van het stilliggende schip
Laagwater			Tweemaal daags optredend minimum van de getijbeweging
LAT			Lowest Astronomical Tide; reductievlak voor zeekaarten
meteo-effect			afwijking van de waterstand t.o.v. de gemiddelde toestand, die wordt toegeschreven aan meteorologische oorzaken. In deregul verschil tussen opgetreden en astronomisch getij.
Nautisch gegarandeerde diepte			de minimale ligging van de havenbodem in m t.o.v. NAP
Onderhoudsmarge			Extra diepte ter compensatie van aanslibbing en onzekerheid hiervan.
Opwaaing			Mate van de verhoging van het peil onder invloed van de wind
Schadevaring			Het veroorzaken van schade door een varend schip aan bijv. kademuur, vaarwegmeubilair (boeien en bakens), etc.
Scheepsagent			Regelt als agent van een rederij de ontvangst, de aflevering en de betaling van de goederen bij de stuwadoor en de opdrachtgever
Scheepsbeweging		doorvaart	een van de volgende bewegingen: 1) van binnenkomst in de haven tot ligplaats, 2) van ligplaats tot ligplaats, 3) van ligplaats tot uitgang haven
Seiches		haling	Schommeling van het water in havens en andere bekkens
Springtij			Een getij fase waarbij de invloed van de zon die van de maan verstrekt.
Squat			diepgangsvermeerdering door (hoofdzakelijk) snelheid van het schip
Streefdiepte			Term gebruikt door HbR voor nautisch gegarandeerd diepte
Tijgebonden schepen			Schepen die een tijpoortadvies krijgen omdat de waterstand niet altijd voldoende is voor deze schepen. Alleen met of rond hoogwater kunnen deze schepen de haven bereiken.
Tijpoort			de tijdsperiode gedurende welke een tijgebonden schip naar binnen mag varen
Toelatingsbeleid			Het geheel van maatregelen en voorwaarden dat bepaalt of en onder welke condities een schip op een bepaalde vaarweg wordt toegelaten
Trim			Verskil in diepgang van voor- en achterschip.
verhalende reis			Een schip dat een van de ene ligplaats in de haven naar een andere haven vaart, zonder daarbij het havengebied uit te moeten.
Werkelijke diepte			de actuele daadwerkelijk gemeten diepte van de havenbodem in m t.o.v. NAP.
zeezwaaiër			Een schip dat een van de ene ligplaats in de haven naar de andere vaart, maar die daarvoor via de zee (om Lage Licht) moet varen.