

DI 102923

C6892



Rapport

BIBLIOTHEEK BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT

NR. ... C 6892 BDU ...

UBIJ-P-00081

Uitbreiding Gemaal IJmuiden

Ontwerpfilosofie waterkerende functie

Opgesteld : B. A. van den Horn, P. B. Webbers, G. K. Timmerman
Datum : 30 augustus 2000
Status : Definitief
Versie : 3
Projectnaam : Uitbreiding Gemaal IJmuiden
Toetser : S.E. van Manen
Paraaf

DI:105F53

LIBRARY OF THE BUREAU OF THE ARMY
WASHINGTON, D. C. 20315

INHOUDSOPGAVE	PAGINA
1. INLEIDING	3
1.1 Algemeen	3
1.2 Aanpak	3
2. HOOFDONDERDELEN EN FUNCTIES	4
2.1 Algemeen	4
2.2 Hoofdonderdelen	4
2.3 Gebruiksfase	5
2.4 Bouwfase	7
3. ONTWERPPUNT METHODE	8
3.1 Inleiding	8
3.2 Ontwerppuntbenadering op niveau I	8
3.2.1 Invloedsfactoren hoofdonderdelen	8
3.2.2 Uitwerking op hoofdniveau	9
3.2.3 Uitwerking bepaling ontwerpbelastingen	9
3.2.4 Uitwerking ontwerpsterkte: aansluiting op de normen	9
3.3 Numerieke invulling voor belastingen	10
3.3.1 Inleiding	10
3.3.2 Eigen gewicht	11
3.3.3 Extreme hoogwaterstand aan de zeezijde	11
3.3.3.1 Stormopzet	11
3.3.3.2 Zeespiegelstijging	12
3.3.3.3 Seiche	12
3.3.3.4 Extreem hoogwater uit stormopzet, zeespiegelstijging en seiche	12
3.3.4 Extreme laagwaterstand aan de zeezijde	12
3.3.4.1 Seiche	13
3.3.4.2 Extreem laagwater uit waterstand en seiche	13
3.3.5 De waterstand op het Noordzeekanaal	13
3.3.5.1 Waterstand	13
3.3.5.2 Afwaaiing en opwaaiing	14
3.3.6 Deiningsgolven	14
3.3.7 Windgolven	15
3.3.8 Windbelasting	16
3.4 Overzicht materiaalfactoren	16
4. REFERENTIES	18

1. INLEIDING

1.1 Algemeen

Dit document bevat de ontwerpfilosofie voor de uitbreiding van het gemaal in het kader van de Uitbreiding Gemaal IJmuiden. Het gemaal is een onderdeel van het Noordzeesluizencomplex, dat de hoogwaterkering die het gehele Noordzeesluizencomplex vormt tegen overstroming vanuit zee van de boezem Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal. De hoogwaterkering van het gemaal wordt gevormd door de civiele constructies (betonconstructie, fundering, onder- en achterloopsheidsschermen en aansluitende dijklichamen) en door de afsluitmogelijkheden in de maalgangen (terugslagkleppen en persschuiven).

Conform de *Richtlijn Waterkerings- en Beschikbaarheidseisen* vindt de dimensionering van de onderdelen plaats op basis van toelaatbare bezwijkfrequenties [1]. De Bouwdienst-ontwerpfilosofie [2] zegt dat de Bouwdienst ontwerpt op basis van het voldoen aan de gestelde functionele eisen en de basis van het maximaliseren van het nut voor de samenleving, vanuit een positie met maatschappelijke verantwoordelijkheid en met inachtneming van een aantal randvoorwaarden. In het geval van de Uitbreiding Gemaal IJmuiden wordt aangenomen dat de veiligheidseisen strenger zijn dan de eisen die zouden volgen uit een economische optimalisatie. Dit heeft ermee te maken dat de verwachte faalkosten veel hoger zijn dan de aanlegkosten van het gemaal.

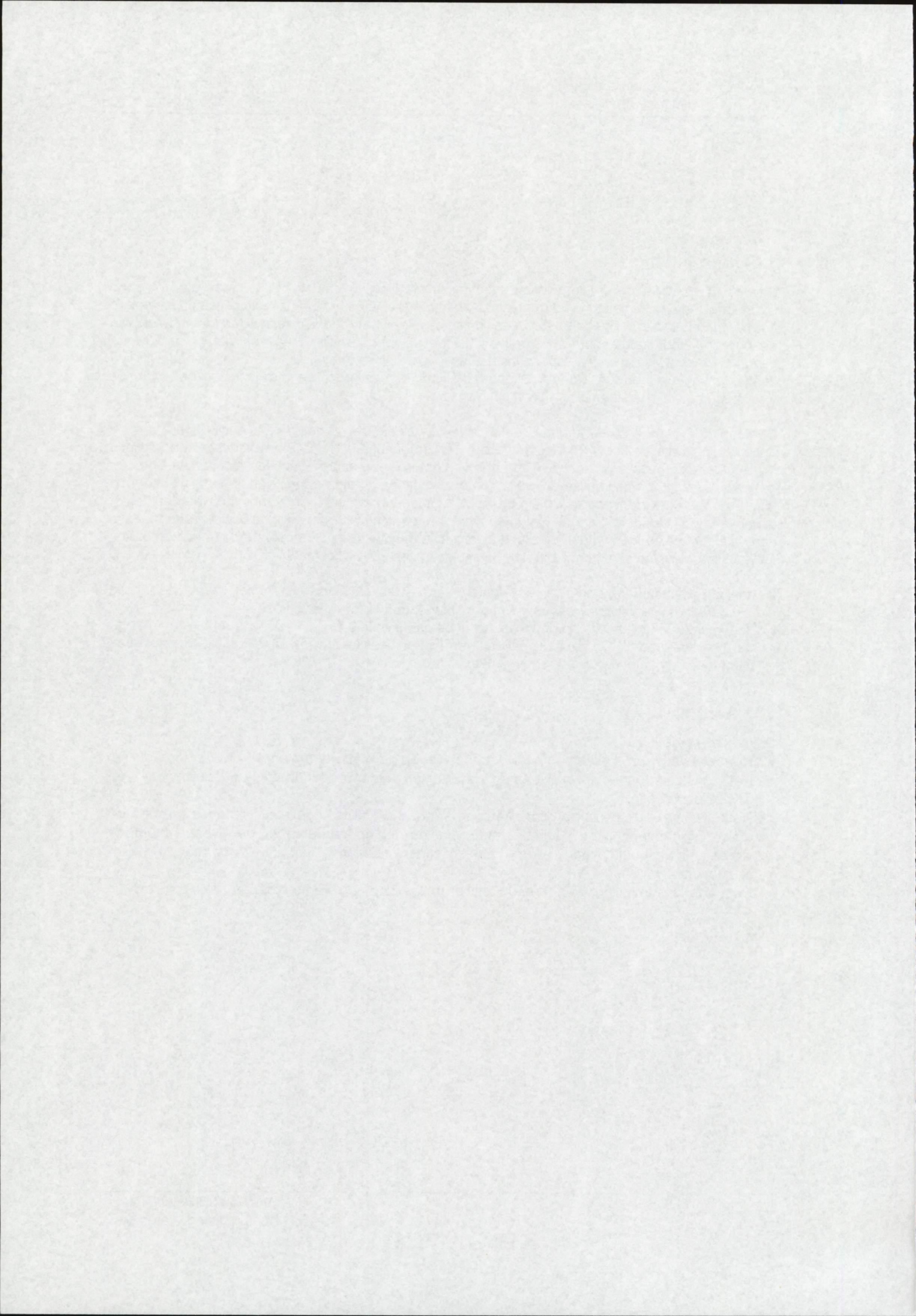
De toelaatbare bezwijkfrequenties zijn afgeleid van de taakstellende foutenbomen voor de functie hoogwaterkeren. De ontwerpfilosofie bevat per hoofdonderdeel van het gemaal:

- de toelaatbare faalkans in de bouwfase en in de gebruiksfase,
- de methode waarop er, gebruik makend van helder beschreven rekenmethodieken, omgegaan dient te worden met belasting- en materiaalfactoren.

1.2 Aanpak

De aanpak bestaat uit:

- Het opstellen van topeisen op basis van de Wet op de Waterkering en de TAW-Leidraad;
- Het opstellen van taakstellende faalkansen voor de hoofdonderdelen van de gemaaluitbreiding;
- Het beschrijven van de zogenaamde ontwerppuntmethode, die aangeeft hoe de ontwerpwaterstanden en sterktefactoren voor de hoofdonderdelen via de niveau I-methode worden gekoppeld aan een taakstellende faalkans (vaak uitgedrukt in een betrouwbaarheidsindex β).
- De numerieke invulling, waarmee de ontwerpbelastingen en sterktefactoren zijn bepaald.



2. HOOFDONDERDELEN EN FUNCTIES

2.1 Algemeen

De dijkkringbenadering wordt toegepast voor de formulering van de betrouwbaarheidseisen gesteld aan de functie hoogwaterkeren voor het gemaal. Dit is in overeenstemming met de overige elementen van het sluisencomplex te IJmuiden. De dijkkringbenadering houdt in dat:

- Volgens de Wet op de Waterkering is de waterkerende hoogte groter of gelijk is aan de met een kans van 10^{-4} per jaar optredende waterstand (NAP +5,15 m) [3]; en
- de kans op bezwijken van de constructie als geheel een orde lager moet zijn ($< 10^{-5}$ per jaar) volgens *Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies* [4] van de TAW.

Voor de laatste voorwaarde is van belang voor de dimensionering en controle van de constructies. De totaal beschikbare faalkansruimte voor het gehele complex is hierbij gelijk verdeeld over sluisen, spuisluis en gemaal, resulterend in een beschikbare faalkansruimte voor het gemaal van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar. De bijbehorende taakstellende foutenbomen voor gebruiks- en bouwphase, met een nadere detaillering voor het gemaal, zijn in de paragrafen 2.3 en 2.4, in respectievelijk figuren 2.3 en 2.4 weergegeven.

2.2 Hoofdonderdelen

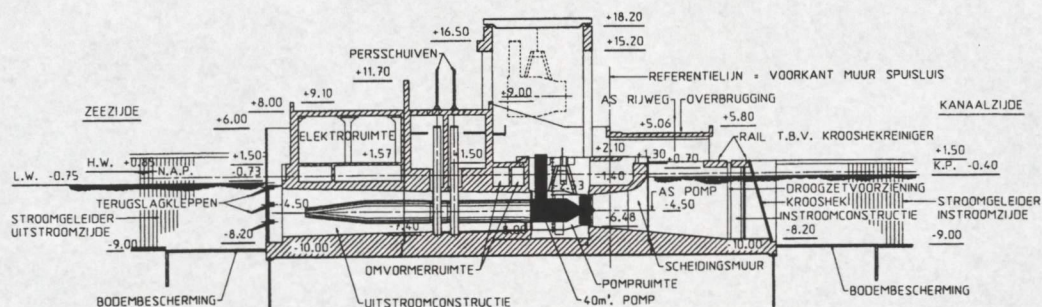
Figuur 2.1 en Figuur 2.2 tonen een dwarsdoorsnede en een bovenaanzicht. De te beschouwen hoofdonderdelen van de uitbreiding van het gemaal zijn:

- de terugslagkleppen en schuiven in de maalgangen;
- de pompen;
- de fundering;
- de betonnen onderbouw;
- de bovenbouw;
- de toegeleidingsschermen (stroomgeleiders, inclusief de onder- en achterloopschermes);
- de Noordelijke dijklichamen, inclusief de grondlichamen op de landtong; en
- de bodembescherming.

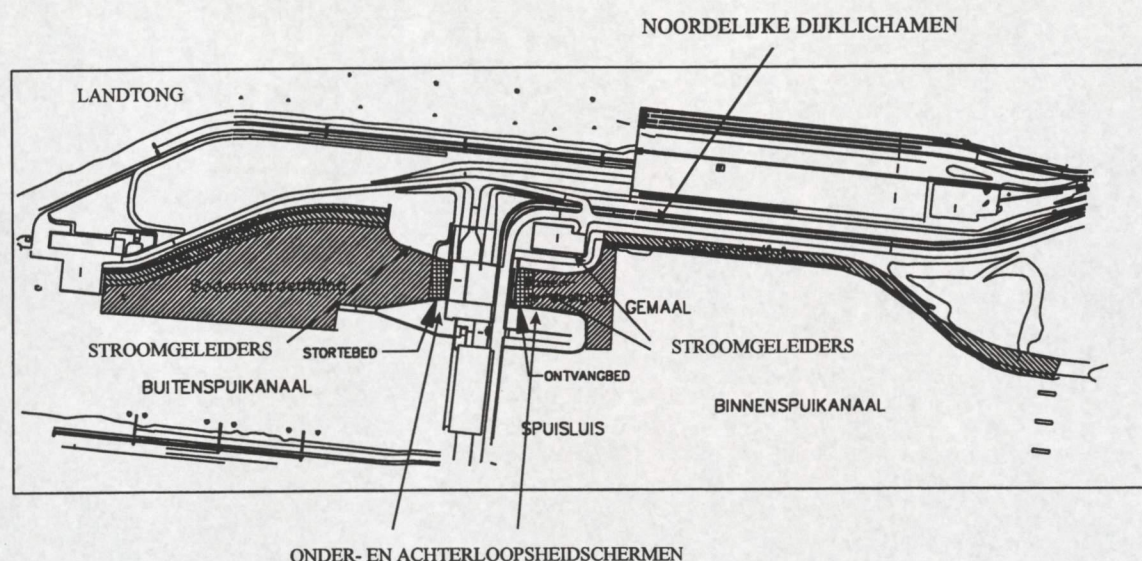
In dit document wordt ingegaan op de faalmechanismen die kunnen leiden tot het verlies van de waterkerende functie. Dit behelst het bezwijken van de onderstaande constructiedelen:

- Betonconstructie
- Fundering
- Onder- en achterloopsheidsschermen
- Noordelijke dijklichamen

of het niet-gesloten zijn van een maalgang ten gevolge van het falen van terugslagkleppen en persschuiven.



Figuur 2.1 Dwarsdoorsnede van het gemaal

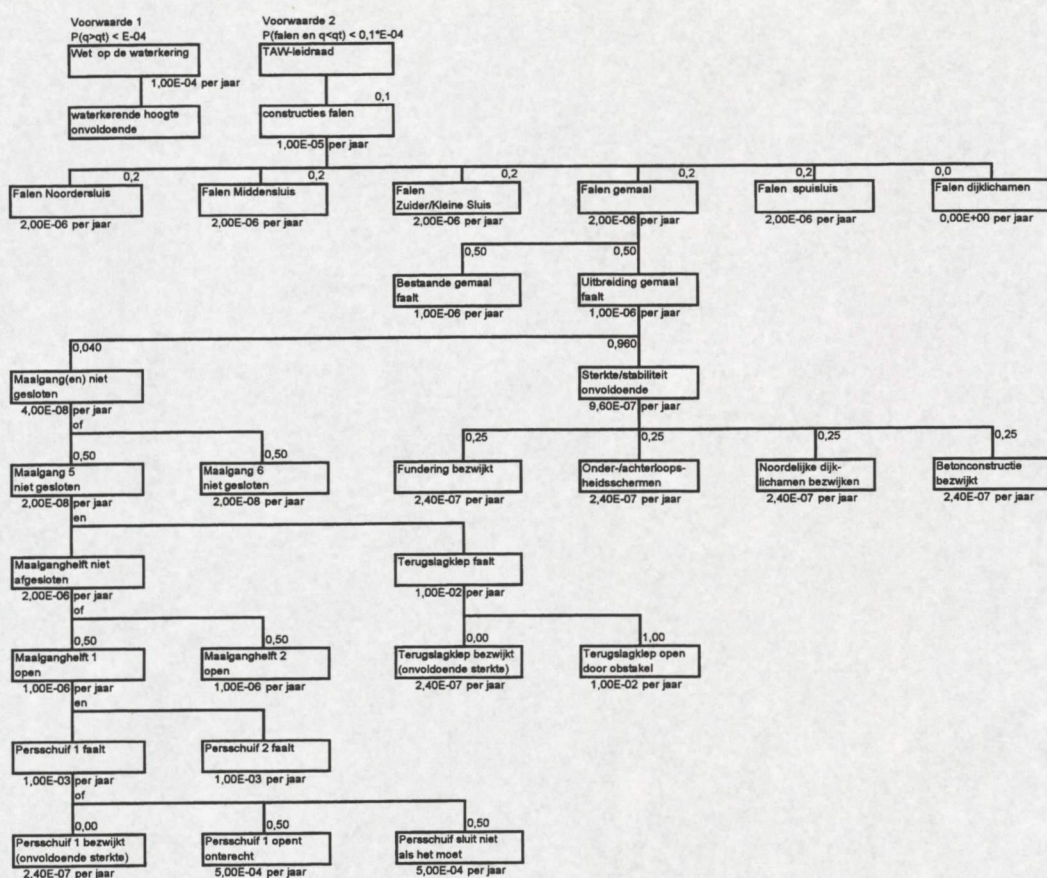


Figuur 2.2 Te beschouwen invloedsgebied van de uitbreiding van het gemaal.

2.3 Gebruiksfase

Figuur 2.3 toont de taakstellende foutenboom voor de waterkerende functie in de gebruiksfase. De eerste eis is (zoals reeds aangegeven in paragraaf 2.1 *voldoende waterkerende hoogte voor Noordzeewaterstanden*, dat wil zeggen dat een waterstand met een frequentie van 10^{-4} per jaar nog moet worden gekeerd. Tevens mag de ongewenste topgebeurtenis onvoldoende kerende hoogte van de dijken van het Noordzeekanaal met een frequentie van maximaal 10^{-4} per jaar optreden [3].

De zwaarste eis is echter het falen van het gemaal als onderdeel van het sluisencomplex; de totale faalruimte van het gemaal bedraagt $2,0 \cdot 10^{-6}$. Allereerst is de ruimte voor falen van het gemaal gelijk verdeeld over het bestaande gemaal en de uitbreiding van het gemaal (zie Figuur 2.3). De faalruimte voor de uitbreiding is verdeeld onder de mechanismen 'maalgangen niet gesloten' (0,04) en 'onvoldoende sterkte of stabiliteit' (0,96). De verdelingsgewichten zijn dusdanig gekozen dat de Noordelijke dijklichamen, de onder- en achterloopsheidsschermen, de fundering en de betonnen constructie allen een gelijke faalkans van $2,40 \cdot 10^{-7}$ per jaar hebben. De maximaal toelaatbare kans dat de maalgangen ten onrechte niet gesloten zijn bedraagt dan $4,00 \cdot 10^{-8}$ per jaar.



Figuur 2.3 Taakstellende foutenboom in de gebruiksfase

Elke maalgang is via een afscheiding in twee helften verdeeld, elk voorzien van twee persschuiven. De opening van de maalgang aan de kanaalzijde is voorzien van een terugslagkleppenraam. Elke maalgang bevat dus twee maal twee persschuiven en een terugslagkleppenraam als waterkerende onderdelen.

Het niet gesloten zijn van een maalgang is om meerdere redenen niet toelaatbaar: Allereerst is een te grote waterstandsverhoging op het Noordzeekanaal ten gevolge van het door de maalgang toestromende water ontoelaatbaar. Vervolgens kunnen de pomp of de bodembescherming door de extreem hoge stroomsnelheden beschadigd raken.

De beschikbare faalruimte voor het niet gesloten zijn van een maalgang is gelijk verdeeld per maalgang, namelijk $2,0 \cdot 10^{-8}$ per jaar. In deze situatie moet een combinatie ontstaan van het falen van de terugslagkleppen en het niet gesloten zijn van beide persschuiven in één maalganghelft.

De terugslagkleppen kunnen falen door bezwijken of doordat ze niet sluiten t.g.v. een aanwezig obstakel tussen klep en kleppenraam. Voor de laatste gebeurtenis is een kans $1,0 \cdot 10^{-2}$ per jaar gereserveerd.

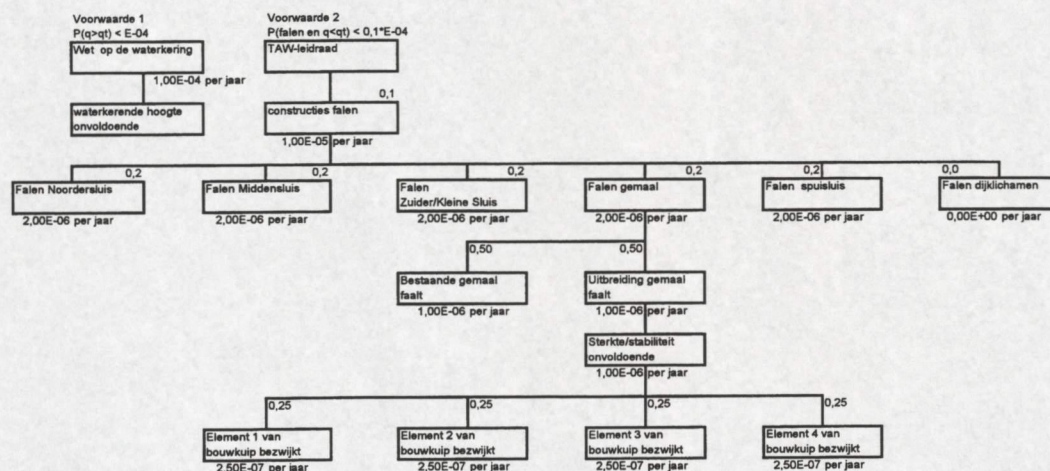
Falen van de persschuiven kan ontstaan door:

- bezwijken van de persschuif;
- onterecht openen van een persschuif, of;
- doordat een persschuif niet gesloten kan worden.

2.4 Bouwfase

Figuur 2.4 toont de taakstellende foutenboom voor de waterkerende functie in de bouwfase. Ook tijdens de bouwfase wordt voldoende waterkerende hoogte voor Noordzeewaterstanden geëist; een waterstand met een frequentie van 10^{-4} nog moet worden gekeerd. Ook tijdens de werkzaamheden mag de ongewenste topgebeurtenis onvoldoende kerende hoogte van de dijken van het Noordzeekanaal de 10^{-4} per jaar niet overschrijden. Tijdens de bouw zullen de damwanden die deel uitmaken van de bouwkuip de waterkerende functie overnemen.

De faalruimte voor de uitbreiding tijdens de bouw is volledig toebedeeld aan het mechanisme 'onvoldoende sterkte of stabiliteit'. De maalgangen zijn immers nog niet in bedrijf. Aangenomen is dat de aan te brengen bouwkuip bestaat uit vier elementen die bij individueel bezwijken tot het falen van de waterkerende functie als geheel leiden. De maximaal toelaatbare kans per element bedraagt dan $2,50 \cdot 10^{-7}$ per jaar.



Figuur 2.4 Taakstellende foutenboom in de bouwfase

3. ONTWERPPUNT METHODE

3.1 Inleiding

Hier wordt de methode beschreven om de in het vorige hoofdstuk vastgestelde betrouwbaarheden voor de constructiedelen aan te tonen.

Het doel is om zoveel mogelijk op de bestaande specifieke bouwvoorschriften en normen aan te sluiten. De moeilijkheid hierbij is dat het in de norm gehanteerde betrouwbaarheidsniveau niet overeenkomt met het geëiste betrouwbaarheidsniveau van de gemaaluitbreiding.

De koppeling van belastingen en sterkte wordt gerealiseerd met de ontwerppuntmethode, waarmee impliciet de geëiste faalkans wordt aangetoond.

Allereerst wordt beoordeeld of de specifiek voor het gemaal geldende belastingen binnen de norm afgedekt worden. Zonodig moeten belastingniveau's aangepast worden of moeten specifieke additionele belastingen geformuleerd worden.

Om het geëiste betrouwbaarheidsniveau voor de sterkte te realiseren moeten aanvullende materiaalfactoren bepaald worden.

3.2 Ontwerppuntbenadering op niveau I

Belasting en sterkte kunnen gescheiden behandeld worden. Voor de verificatie van de constructieve veiligheid moet worden aangetoond dat:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

Het bepalen van S_d en R_d verloopt daarbij als volgt. Uit de taakstellende faalkans voor het hoofdonderdeel volgt de betrouwbaarheidsindex β . Afhankelijk van de mate van onzekerheid in belasting en sterkte worden via de invloedsfactoren van α_S voor de belasting en α_R voor de sterkte de kans van overschrijding, respectievelijk onderschrijding bepaald, in formulevorm:

$$P(S \geq S_d) = \Phi(-\beta_S) = \Phi(-\alpha_S \beta) \quad (2)$$

$$P(R \leq R_d) = \Phi(-\beta_R) = \Phi(-\alpha_R \beta) \quad (3)$$

De grootte van de belastingen of combinaties van belastingen kan worden vastgesteld door uitgaande van de kansverdelingen van de desbetreffende belasting de waarde S_d behorend bij $P(S \geq S_d)$ te bepalen. Voor de sterkte dient de verkregen betrouwbaarheidsindex β_R vergeleken te worden met de betrouwbaarheidsindex van de gehanteerde norm. Afstemming tussen beide indices vindt plaats met behulp van een aanvullende partiële veiligheidsfactor voor de sterkte.

3.2.1 Invloedsfactoren hoofdonderdelen

Voor de uitwerking van de ontwerppuntbenadering zijn voor de hoofdonderdelen gegevens nodig over de mate van onzekerheid in belastingen en de sterkte, vertaald in de invloedsfactoren α_S en α_R . De invloedsfactoren α_S en α_R hebben de eigenschap:

$$\alpha_R^2 + \alpha_S^2 = 1$$

De ligging van het ontwerppunt en daarmee de juiste verhouding tussen α_S en α_R kan niet op voorhand bepaald worden. Hiervoor zijn bijvoorbeeld niveau II-berekeningen noodzakelijk. Een goede aanpak is om in het voorontwerp gebruik te maken van conservatieve waarden van α_S en α_R , waarbij de som van de kwadraten groter dan één is. De aanpak waarbij geldt dat $\alpha_S = \alpha_R = 1$ is een veel te conservatieve aanname. Daarom wordt er in dit geval in aansluiting op de Eurocode gebruik gemaakt van de verhouding $\alpha_S = 0,7$ en $\alpha_R = 0,8$.

3.2.2 Uitwerking op hoofdniveau

De uitwerking van de ontwerpbeurtbenadering kan met de vastgestelde gegevens en de toebedeelde faalkans nu als volgt plaats vinden:

Stap 1

De faalkans (P_F) per hoofdonderdeel (specifiek faalmechanisme) is in de foutenboom gedefinieerd per jaar. Door de kans P_F te vermenigvuldigen met de geëiste levensduur in jaren (N) ontstaat de faalkans per levensduur.

$$P \{ \text{falen hoofdonderdeel per levensduur} \} = N \cdot P_F \quad (4)$$

Stap 2

De faalkans per levensduur kan vertaald worden in de betrouwbaarheidsindex β gebruik makend van de Gaussische kansverdelingsfunctie Φ , waarbij $\Phi(-\beta) = N \cdot P_F$

Stap 3

De splitsing van belastingen en sterkte kan nu plaats vinden door gebruik te maken van de gedefinieerde invloedsfactoren α_S en α_R . Met formules (2) en (3) worden overschrijdskans van de belastingen, respectievelijk de onderschrijdskans van de sterkte in het ontwerpbeurt gedefinieerd.

3.2.3 Uitwerking bepaling ontwerpbelastingen

De ontwerpbelastingen zijn gedefinieerd als de belastingen met een overschrijdskans $\Phi(-\beta)$ van het ontwerpbeurt S_d . De ontwerpbelasting moet in dit kader gezien worden als een combinatie van belastingen uit meerdere belastingbronnen, zoals vervalbelasting, golven, wind, etc.

Door de splitsing van belastingen en sterkte op levensduurnivo heeft ook de betrouwbaarheidsindex $-\beta_S$ betrekking op de levensduur. In de definitie van de overschrijdskansen van de optredende belastingen verder in dit document wordt uitgegaan van overschrijdskansen per levensduur. Voor kleine overschrijdskansen kan de kans per levensduur weer getransformeerd worden naar kans per jaar door te delen door het aantal jaren van de levensduur via de benaderingsformule:

$$P(S \geq S_d) \text{ per jaar} = \Phi(-\beta_S) / N \quad (5)$$

Het feit dat de ontwerpbelasting in feite opgebouwd is uit een combinatie van belastingbronnen wordt als volgt verdisconteerd. In overeenstemming met de aanpak van de Eurocode wordt bij het combineren van twee of meer belastingen steeds een belasting als dominant aangemerkt met een ontwerpbeurt behorend bij een faalkansnivo van $\Phi(-\beta_S)$. De andere belastingen (combinanten) krijgen een ontwerpbeurt behorend bij een faalkansniveau van $\Phi(-r \cdot \beta_S)$, met r gelijk aan 0,4. In geval van correlatie tussen twee verschillende belastingen dienen deze óf beiden als combinant óf beiden als dominant te worden aangemerkt. Afhankelijk van het effect van de belasting dient een onder- of overschrijdswaarde te worden bepaald. In de maatgevende belastingcombinatie voor het beschouwde faalmechanisme zal de belasting met de meeste invloed op het mechanisme dominant zijn.

3.2.4 Uitwerking ontwerpsterkte: aansluiting op de normen

Opsplitsing van belastingen en sterkte in het ontwerpbeurt leidt tot een gedefinieerde onderschrijdskans van de sterkte voor de levensduur.

$$P(R < R_d) = \Phi(-\beta_R) = \Phi(-\alpha_R \cdot \beta) \quad (6)$$

Alle hoofdonderdelen hebben een gelijke faalkans toebedeeld gekregen. Voor de sterkte geldt per onderdeel $\beta_{R\text{-ond}} = \beta_R$. Om uitgaande van de geëiste betrouwbaarheidsindex $\beta_{R\text{-ond}}$ voor de sterkte aan te kunnen sluiten op de betreffende normen is naast de in de normen gedefinieerde materiaalfactoren een aanvullende partiële veiligheidsfactor voor de sterkte noodzakelijk. Voor het bepalen van deze factor wordt gebruik gemaakt van de aanpak zoals gehanteerd voor de Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg [5]. Uitgangspunt bij de uitwerking is dat de normen die in het voorontwerp gebruikt worden voor de diverse constructieve hoofdonderdelen tot de NEN 6700 serie behoren.

Voor een enkel element wordt in de norm de volgende relatie tussen de sterkte volgens de toetsingsregel en het ontwerppunt gehanteerd:

$$R_{d,norm} = R_{norm} / \gamma_m^* \quad (7)$$

met:

$R_{d,norm}$ sterkte volgens de norm in het ontwerppunt
 R_{norm} karakteristieke sterkte volgens de toetsingsregel
 γ_m^* materiaalfactor volgens de norm

De verwachtingswaarde volgens de norm wordt daarmee, uitgaande van een lognormale verdeling voor de sterkte:

$$E(R) = R_{norm} / \gamma_m^* \cdot \exp(\alpha_{R-norm} \cdot \beta_{norm} \cdot V_R) \quad (8)$$

met

α_{R-norm} invloedsfactor voor de sterkte volgens de norm (= 0,8)
 β_{norm} betrouwbaarheidsindex volgens de NEN 6700 serie (= 3,6)
 V_R variatiecoëfficiënt van de sterkte van een element

De ontwerpwaarde van de sterkte voor een onderdeel is:

$$R_{d-ond} = E(R) \cdot \exp(\beta_{R-ond} \cdot V_{R-ond}) \quad (9)$$

met:

R_{d-ond} ontwerpwaarde voor sterkte van een onderdeel
 β_{R-ond} betrouwbaarheidsindex van het onderdeel
 V_{R-ond} variatiecoëfficiënt van het onderdeel

Combinatie van (8) en (9) levert de gewenste relatie tussen de betrouwbaarheidsindices van de norm en van het beschouwde onderdeel.

$$\gamma_m^d = \gamma_m^* \cdot \exp(\beta_{R-ond} \cdot V_{R-ond} - \alpha_{R-norm} \cdot \beta_{norm} \cdot V_R) \quad (10)$$

De materiaalfactor γ_m^d is hierin de samengestelde materiaalfactor tussen de ontwerpsterkte van het onderdeel en de karakteristieke sterkte volgens de norm. De gezochte aanvullende partiële veiligheidsfactor voor de sterkte $\gamma_{R, \beta-ond}$ wordt daarmee:

$$\gamma_{R, \beta-ond} = \gamma_m^d / \gamma_m^* = \exp(\beta_{R-ond} \cdot V_{R-ond} - \alpha_{R-norm} \cdot \beta_{norm} \cdot V_R) \quad (11)$$

In de controle van de onderdelen dient de aanwezige sterktecapaciteit volgens de beschouwde toetsingsregels met deze partiële veiligheidsfactor gereduceerd te worden.

3.3 Numerieke invulling voor belastingen

3.3.1 Inleiding

Deze paragraaf geeft een overzicht van de in rekening te brengen belastingen op het gemaal waarbij zoveel mogelijk is aangesloten op de norm NEN 6702 (Belastingen en vervormingen). Conform de belastingdefinitie van NEN 6702 wordt het gemaal ingedeeld in veiligheidsklasse 3 met een referentieperiode (levensduur) van 50 jaar. Voor de gebruiks- en bouwphase wordt, vanwege het kleine verschil, van één faalkans van $2,4 \cdot 10^{-7}$ per jaar uitgegaan voor het bezwijken van de constructiedelen.

Voor beide fasen wordt een gelijke levensduur van 50 jaar gehanteerd, zodat de faalkans per levensduur $1,2 \cdot 10^{-5}$ wordt met een bijbehorende betrouwbaarheidsindex $\beta = 4,23$.

In tabel 3.1 zijn de overschrijdingskansen per levensduur en per jaar voor de dominante en de combinante belastingen afgeleid.

Tabel 3.1 Betrouwbaarheidsindex en overschrijdingskansen voor de belastingen conform de ontwerppuntmethode

Belasting	β_s	P_f (per levensduur)	P_f (per jaar)
Dominant	$\alpha_s \times \beta = 0,7 \cdot 4,23 = 2,96$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^{-5}$
Combinant	$0,4 \times \beta_s = 0,4 \cdot 2,96 = 1,18$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$

3.3.2 Eigen gewicht

Voor het eigen gewicht wordt gebruik gemaakt van een normale verdeling. Het daadwerkelijke gewicht blijkt gemiddeld ca 5% hoger te liggen dan de gewicht volgens de ontwerptekeningen. Gerekend wordt daarom met een gemiddelde van 1,05 maal het nominale gewicht. Verder wordt een variatiecoëfficiënt ($V_{e.g.}$) van 0,07 aangehouden (zie [10]). De hieruit voortvloeiende formules voor de belastingfactoren zijn:

$$\gamma_{S,e.g.} = 1,05 \cdot (1 + \beta_s \cdot V_{e.g.}) \quad (\text{belastend}) \quad (12)$$

$$\gamma_{S,e.g.} = 1 - \beta_s \cdot V_{e.g.} \quad (\text{ontlastend}) \quad (13)$$

$\gamma_{s,e.g.}$ belastingfactor eigen gewicht [-]
 $V_{e.g.}$ variatiecoëfficiënt eigen gewicht [-]

Tabel 3.2 toont de belastingfactoren bij dominante en combinante belastingen.

Tabel 3.2 In rekening te brengen factoren voor eigen gewicht.

Overschrijdingskans P_f (-/levensduur)	belastingfactor belastend	belastingfactor belastend (norm)	belastingfactor ontlastend	belastingfactor ontlastend (norm)
Dominant: $1,54 \cdot 10^{-3}$	1,27	1,35	0,79	0,9
Combinant: $1,18 \cdot 10^{-1}$	1,14	1,2	0,91	0,9

Volgens NEN 6702 dient bij een belastingcombinatie met alleen permanente belasting te worden gerekend met de belastingfactoren 1,35 belastend en 0,9 ontlastend. In combinaties met veranderlijke belasting gelden de belastingfactoren 1,2 belastend en 0,9 ontlastend.

Conclusie: NEN 6702 kan voor eigen gewicht zonder aanpassingen toegepast worden.

3.3.3 Extreme hoogwaterstand aan de zeezijde

3.3.3.1 Stormopzet

De extreme hoogwaterstanden zijn afkomstig uit de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6]. Conform [6] wordt uitgegaan van een Gumbelverdeling met $A = 0,326$ en $B = 2,15$ (zie Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Verdeling van de zeewaterstand bij hoogwater

overschrijdingskansen (1/jaar)	zeewaterstand H [m+N.A.P.]
10^{-1}	2,95
10^{-2}	3,70
10^{-3}	4,40
10^{-4}	5,15
10^{-5}	5,90
10^{-6}	6,65

Tabel 3.4 toont de bij de overschrijdingskansen behorende belastingen in de vorm van waterstanden.

Tabel 3.4 Extreem hoogwater uit stormopzet

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	Waterstand H
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	N.A.P. +5,54 m
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	N.A.P. +4,12 m

3.3.3.2 Zeespiegelstijging

Aangenomen wordt dat de zeewaterspiegel de komende eeuw 0,50 m stijgt. Daarom wordt gerekend een deterministische waarde van 0,25 m zeespiegelstijging in de referentieperiode van 50 jaar. Deze waarde wordt opgeteld bij de extreme hoogwaterstand.

3.3.3.3 Seiche

Zonder nader onderzoek is de onderbouwing van de seiche-amplitude zoals gegeven in de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6] het beste wat beschikbaar is. In dit rapport wordt de de waarde hiervoor ook gehanteerd zonder onderbouwing. Gerekend wordt daarom met een deterministische toeslag van 0,65 m op de extreme hoogwaterstand.

3.3.3.4 Extreem hoogwater uit stormopzet, zeespiegelstijging en seiche

Tabel 3.5 toont de bij de overschrijdingskansen behorende waterstanden, waarbij de zeespiegelstijging en seiche-amplitude zijn verdisconteerd.

Tabel 3.5 Extreem hoogwater uit stormopzet, zeespiegelstijging en seiches

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	Waterstand H
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	+5,54 + 0,25 + 0,65 = NAP +6,44 m
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	+4,12 + 0,25 + 0,65 = NAP +5,02 m

De extreem hoogwaterstand is in het algemeen dominant voor de sterkte. Daarom wordt de dominante waarde N.A.P. + 6,44 m voor de aansluiting met NEN 6702 als veranderlijke belasting toegepast zonder extra belastingfactor. Aangezien de extreem hoogwaterstand gecorreleerd is met de windgolfhoogten en -perioden moet er voor deze windgolven ook de dominante waarden worden gebruikt (zie ook paragraaf 3.3.7).

3.3.4 Extreme laagwaterstand aan de zeezijde

De extreme laagwaterstanden zijn afkomstig uit de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6]. Conform [6] wordt uitgegaan van een Gumbelverdeling met $A = -0,119$ en $B = -1,93$ (zie Tabel 3.6).

Tabel 3.6 Verdeling van de zeewaterstand bij laagwater

Overschrijdingskans (1/jaar)	zeewaterstand H [m+N.A.P.]
10^{-1}	-2,20
10^{-2}	-2,48
10^{-3}	-2,75
10^{-4}	-3,03
10^{-5}	-3,30
10^{-6}	-3,57

Tabel 3.7 toont de bij de onderschrijdingskansen behorende waterstanden.

Tabel 3.7 Extreem laagwater

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	Waterstand H
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	N.A.P. -3,17 m
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	N.A.P. -2,65 m

3.3.4.1 Seiche

Conform de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6] wordt gerekend met een deterministische toeslag van - 0,65 m op de extreme laagwaterstand.

3.3.4.2 Extreem laagwater uit waterstand en seiche

Tabel 3.8 toont de bij de onderschrijdingskansen behorende laagwaterstanden (inclusief seiches).

Tabel 3.8 Extreem laagwater, inclusief seiches

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	Waterstand H
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	-3,17 - 0,65 = NAP - 3,82 m
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	-2,65 - 0,65 = NAP - 3,30 m

Voor de aansluiting met NEN 6702 wordt voor de extreem laagwaterstand de dominante waarde N.A.P. - 3,82 m als veranderlijke belasting toegepast zonder extra belastingfactor.

3.3.5 De waterstand op het Noordzeekanaal

3.3.5.1 Waterstand

De waterstanden op het Noordzeekanaal zijn - conform de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6] - normaal met gemiddelde μ en standaardafwijking σ verdeeld. Tabel 3.9 toont het resultaat.

Tabel 3.9 Overschrijdingskans van de golfhoogte bij deining
(Hoog water: $\mu = -0,33$ [m+N.A.P.], $\sigma = 0,03$ m;
Laag water: $\mu = -0,46$ [m+N.A.P.], $\sigma = 0,06$ m)

Overschrijdingskans (1/jaar)	$H_{NZK,hoog}$ [m+N.A.P.]	$H_{NZK,laag}$ [m+N.A.P.]
10^{-1}	-0,29	-0,54
10^{-2}	-0,26	-0,60
10^{-3}	-0,24	-0,65
10^{-4}	-0,22	-0,68
10^{-5}	-0,20	-0,72
10^{-6}	-0,19	-0,75

Tabel 3.10 toont de hoog- en laagwaterstanden op het Noordzeekanaal.

Tabel 3.10 Hoog- en laagwaterstanden op het Noordzeekanaal

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	$H_{NZK,hoog}$ [m+N.A.P.]	$H_{NZK,laag}$ [m+N.A.P.]
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	-0,21	-0,70
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	-0,25	-0,63

3.3.5.2 Afwaaiing en opwaaiing

Voor de afwaaiing bij westenwinden is een deterministische waarde van $-0,30$ m in rekening gebracht, conform de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6]. Eventuele opwaaiing (oostenwind) is niet in rekening gebracht omdat hoge kanaalpeilen in het algemeen met westenwinden samenvallen.

Tabel 3.11 toont de hoog- en laagwaterstanden op het Noordzeekanaal, gecorrigeerd voor afwaaiing.

Tabel 3.11 Waterstanden op het Noordzeekanaal, gecorrigeerd voor afwaaiing

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	$H_{NZK, hoog}$ [m+N.A.P.]	$H_{NZK, laag}$ [m+N.A.P.]
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	-0,21	-1,00
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	-0,25	-0,93

Het toepassen van de combinante waarden voor de kanaalpeilen is gezien de lage mate van correlatie met de buitenwaterstanden voldoende.

3.3.6 Deiningsgolven

Voor afleiding van deiningsgolfhoogtes is gebruik gemaakt van de methodiek zoals beschreven in de *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6] en de bijbehorende achtergronddocumentatie. Voor de golfdoordringing van de buitenhaven naar het gemaal is een conservatieve waarde van 5% aangehouden. De ontwerpgolfhoogte H_d is gekozen op $2,0 \cdot H_s$. Gezien de geometrie van de constructie is er een reflectiefactor van 1,5 aangenomen, waarmee de ontwerpgolfhoogte moet worden vermenigvuldigd. Hierbij moet bedacht worden dat de amplitude gelijk is aan de halve golfhoogte. Tabel 3.12 toont het resultaat inclusief de bijbehorende significante golfperiodes.

Tabel 3.12 Overschrijdingskans van de golfhoogte bij deining.

Overschrijdingskans (1/jaar)	H_s [m]	H_d [m]	$1,5 \cdot H_d$ [m]	T_s [s]
10^{-1}	0,10	0,20	0,30	11,5
10^{-2}	0,11	0,22	0,33	12,1
10^{-3}	0,24	0,47	0,71	12,5
10^{-4}	0,27	0,54	0,81	12,8
10^{-5}	0,30	0,61	0,91	13,1
10^{-6}	0,33	0,67	1,00	13,4

Tabel 3.13 toont de aan te houden deiningsgolven.

Tabel 3.13 Deiningsgolfhoogte en -periode

Overschrijdingskans P_f (1/jaar)	$1,5 \cdot H_d$	T_s
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	0,86 m	13,0 s
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	0,57 m	12,4 s

Voor de aansluiting met NEN 6702 wordt de combinante waarde voor de deiningsgolf 0,57 m als veranderlijke belasting zonder belastingfactoren toegepast. De drukverhoging uit de deiningsgolf kan hydrostatisch aangehouden worden dan wel m.b.v. de golftheorie bepaald worden.

3.3.7 Windgolven

Voor de bepaling van de significante golfhoogte H_s en de significante golfperiode T_s is gebruik gemaakt van de golfgroeirelaties van Bretschneider [7] geldend voor diep water, constante windsnelheid en beperkte strijklengte. Hierbij wordt ervan uitgegaan, dat de duur van de heersende wind groter is dan de tijd die nodig is om golven bij deze wind volledig te laten ontwikkelen.

$$H_s = 0,283 \cdot \frac{u^2}{g} \cdot \tanh \left[0,0125 \cdot \left(\frac{g \cdot F}{u^2} \right)^{0,42} \right] \quad (14)$$

$$T_s = 1,2 \cdot 2\pi \cdot \frac{u}{g} \cdot \tanh \left[0,077 \cdot \left(\frac{g \cdot F}{u^2} \right)^{0,25} \right] \quad (15)$$

H_s	significante golfhoogte [m]
u	windsnelheid [m/s]
F	strijklengte [m]
g	zwaartekrachtsversnelling (=9,81 m/s ²)
T_s	significante golfperiode [s]

In overeenstemming met *Risicoanalyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden* [6] zijn de gereduceerde windsnelheden bij westenwind aangehouden. In [8] is de effectieve strijklengte bij westenwind voor de locatie van het gemaal bepaald ($F=500$ m). De methode ter bepaling van een dergelijke effectieve strijklengte is beschreven in [7].

De significante golfhoogte is een korte termijnparameter van een golfveld (in dit geval van een golfveld tijdens een storm). Gegeven deze significante golfhoogte is de verdeling van de individuele golfhoogte een Rayleigh-verdeling. Wanneer men aanneemt dat de stormduur ongeveer gelijk is aan 3 uur, wordt de overschrijdingskans van de individuele golfhoogte tijdens een storm met gegeven H_s door middel van de volgende formules bepaald:

$$P(\underline{H} > H | H_s) = 1 - \left(1 - e^{-2 \left(\frac{H}{H_s} \right)^2} \right)^N \quad (16)$$

H	individuele golfhoogte
H_s	significante golfhoogte
N	aantal golven gedurende een storm van 3 uur (= 3 * 3600 / T_{gem})
T_{gem}	gemiddelde golfperiode ($T_{gem} \approx T_s$)

Nu wil men weten wat de overschrijdingsfrequenties van de individuele golfhoogte per jaar (lange termijn) is. Dit kan men bewerkstelligen door de methode zoals onder andere beschreven in [9] te gebruiken. Hierbij kan voor iedere individuele ontwerpgolfhoogte H_d de overschrijdingskans per jaar berekend worden door de volgende betrekkingen te gebruiken:

$$P(\underline{H} > H_d) = \sum_{i=1}^n \left(P(H_{s,i}) \cdot P(\underline{H} > H_d | H_{s,i}) \right) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P(H_{s,i}) &= P(H_{s,i} - \Delta H_{s,i} < H_{s,i} < H_{s,i} + \Delta H_{s,i}) = \\ &= \Delta F(H_{s,i}) = F(H_{s,i} - \Delta H_{s,i}) - F(H_{s,i} + \Delta H_{s,i}) \end{aligned} \quad (18)$$

$F(H_s)$	overschrijdingsfrequentie significante golfhoogte [1/jaar]
$H_{s,i}$	gemiddelde significante golfhoogte in het interval $[H_{s,i} - \Delta H_{s,i}, H_{s,i} + \Delta H_{s,i}]$, waarbij $\Delta H_{s,i} = (\text{gekozen grootste } H_s)/n$
i	klasse-index (1,2,...,n)
n	aantal klassen (in H_s - bereik)

Gezien de geometrie van de constructie is er een reflectiefactor van 1,5 aangenomen, waarmee de individuele ontwerp golfhoogte moet worden vermenigvuldigd. Hierbij moet bedacht worden dat de amplitude gelijk is aan de halve golfhoogte. Tabel 3.14 toont het resultaat inclusief de bijbehorende significante golfperioden

Tabel 3.14 Overschrijdingskansen van de golfhoogte bij windgolven.

Overschrijdingskansen (1/jaar)	gereduceerde U_w [m/s]	H_s [m]	H_d [m]	$1,5 \cdot H_d$ [m]	T_s [s]
10^{-1}	20,5	0,43	0,96	1,44	2,23
10^{-2}	24,5	0,52	1,15	1,73	2,83
10^{-3}	28,0	0,61	1,34	2,01	3,44
10^{-4}	31,0	0,69	1,54	2,31	4,08
10^{-5}	35,5	0,80	1,74	2,61	4,47
10^{-6}	38,0	0,87	1,95	2,93	5,51

Tabel 3.15 toont de aan te houden windgolven.

Tabel 3.15 Windgolven

Overschrijdingskansen P_f (1/jaar)	Ontwerpgolfhoogte $1,5 \cdot H_d$	T_s
Dominant: $3,08 \cdot 10^{-5}$	2,46 m	4,28 s
Combinant: $2,36 \cdot 10^{-3}$	1,91 m	3,21 s

Aangezien de de windgolfhoogten en -perioden gecorreleerd zijn met de extreem hoogwaterstand moet er voor deze windgolven ook de dominante waarden worden gebruikt. Voor de aansluiting met NEN 6702 wordt de dominante waarde van de windgolven ($1,5H_d = 2,46$ m en $T_s = 4,28$ s) als veranderlijke belasting zonder belastingfactoren toegepast. Het drukverloop over de waterdiepte kan m.b.v. de golftheorie bepaald worden.

3.3.8 Windbelasting

Volgens NEN 6702 is de lokatie IJmuiden ingedeeld in gebied II met een stuwdruk van $0,88 \text{ kN/m}^2$ op 10 meter hoogte boven het terrein / wateroppervlak. Met $\beta = 4,23$ wordt nu een circa 14 maal hogere veiligheid geëist dan met behulp van de norm verkregen wordt ($\beta = 3,60$). Dit verschil wordt gecompenseerd door het gemaal in gebied I in te delen met een stuwdruk van $1,06 \text{ kN/m}^2$ op 10 meter hoogte boven het terrein / wateroppervlak. De windbelasting is daarbij verder standaard volgens NEN 6702 toe te passen met een belastingfactor 1,5.

3.4 Overzicht materiaalfactoren

Voor het bepalen van de aanvullende partiële veiligheidsfactor voor de sterkte $\gamma_{R, \beta\text{-ond}}$ van de diverse materialen zijn gegevens nodig over de variatiecoëfficiënten van de sterkte. Zoals in paragraaf 3.2.4 vermeld, wordt er onderscheid gemaakt tussen de variatiecoëfficiënt van een element (V_R) en de variatiecoëfficiënt van een hoofdonderdeel ($V_{R\text{-ond}}$).

Praktisch gezien houdt de aanvullende partiële veiligheidsfactor voor de sterkte $\gamma_{R, \beta\text{-ond}}$ in dat bij de standaard controle volgens norm tussen rekenbelasting en capaciteit (Unity Check) de capaciteit gedeeld wordt door de veiligheidsfactor $\gamma_{R, \beta\text{-ond}}$. De controle is in orde wanneer de Unity Check kleiner of gelijk is aan $1 / \gamma_{R, \beta\text{-ond}}$.

In Tabel 3.16 wordt een overzicht gegeven van de gebruikte invoerwaarden bij de bepaling van de aanvullende partiële veiligheidsfactoren. Hierbij ziet men ook de verschillende variatiecoëfficiënten voor de sterkte van element en hoofdonderdeel.

Tabel 3.16 Overzicht invoer voor berekening materiaalfactoren

	β_{R-ond}	V_{R-ond}	α_{R-norm}	β_{norm}	V_R
staal	4,23-0,8	0,13 *	0,8	3,6	0,10 *
beton	4,23-0,8	0,18 ***	0,8	3,6	0,15 ** (betondruksterkte)
grond	4,23-0,8	0,20	0,8	3,6	0,17

* waarde afkomstig uit [5]

** waarde afkomstig uit het TNO-rapport BI-84-4 *Statistische gegevens ten behoeve van het project Veiligheid Van Bouwconstructies* [10]

*** waarde afkomstig uit *Partiële veiligheidsfactoren betonconstructies* [11]

Tabel 3.17 toont de resultaten van de numerieke uitwerking van de formule (11) van paragraaf 3.2.4 voor de materialen staal, beton en grond, gebruik makend van de gegevens uit Tabel 3.16 .

Tabel 3.17 Overzicht materiaalfactoren

	γ_R, β_{-ond}	$UC=1/\gamma_R, \beta_{-ond}$
staal	1,16	0,86
beton	1,19	0,84
grond	1,21	0,83

4. REFERENTIES

- [1] *Richtlijn Waterkerings- en Beschikbaarheidseisen, Consequenties van eisen aan de waterkering, spuien en verkeer te land en te water voor het ontwerp van kunstwerken in de natte infrastructuur*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Fugro B.V., Grondmechanica Delft, september 1998
- [2] *Ontwerpfilosofie Bouwdienst*, OF-R-0001, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, februari 2000.
- [3] *Hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen*, ISBN-90-3693-718-3, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, september 1996.
- [4] *Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies*, Basisrapport behorende bij de TAW-leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies, Technische Advies-commissie voor Waterkeringen (TAW), juni 1997.
- [5] S.E. van Manen, e.a., *Probabilistic Design of the Steel Structure of the New Waterway Storm Surge Barrier*, Proc. Of the 7th IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Boulder Colorado, USA, April 1996.
- [6] Bouwdienst Rijkswaterstaat, *Risico analyse Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Bouwdienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Natte Infrastructuur, Constructieve Waterbouw, rapportnr. RN-ZS-94003, Utrecht 11 januari 1994.
- [7] CERC, *Shore Protection Manual*, U.S. Army Coastal Research Center, Corps of Engineers, 1973.
- [8] P.F. de Swart, *Maatgevende waterstanden, golven en kruinhoogten voor dijken in de haven van IJmuiden*, Directie Sluizen en Stuwen, Hoofdafdeling Waterbouw, rapportnr. WB-161-PdS-88002, Werkgroep Grond en Dijklichamen, 14 december 1988.
- [9] W.W. Massie, P.E., *Coastal Engineering, Volume I Introduction*, , Coastal Engineering Group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, pp. 57-62, Delft, 1982.
- [10] A. Vrouwenvelder, *Statistische gegevens ten behoeve van het project veiligheid van bouwconstructies*, rapportnr. BI-84-4/62.4.1301, Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies.
- [11] S.E. van Manen, *Partiële veiligheidsfactoren betonconstructies*, notitie WBR-M-93-018, 5 augustus 1993.