Montauban

netherlands
pavement
consultants

Ref. nr: 0 0 1 6 0 1

HET GOLFKLAPMODEL

4-april-2000

Rapport opgesteld in opdracht van

Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044
2600 GA DELFT

Contactpersoon

De heer ing. C.C. Montauban

Rapport opgesteld door

Netherlands Pavement Consultants bv
Postbus 2756 Winthontlaan 28
3500 GT UTRECHT 3526 KV UTRECHT

Telefoon 030 - 28 76 950
Telefax 030 - 28 87 844

Opdrachtnummer	998438
Projectleider	ir. G. Gaarkeuken
Projectmedewerker(s)	ing. A.K. de Looff ir. J.A.van Herpen ir. P. Meijers (Geo Delft)

Voor akkoord gezien

Utrecht, 4 april 2000

INHOUDSOPGAVE

Het auteursrecht van dit rapport is voorbehouden aan Netherlands Pavement Consultants bv te Utrecht.

222

1. INLEIDING

In opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) heeft Netherlands Pavement Consultants bv (NPC) een studie uitgevoerd naar de achtergronden van het huidige golfklapmodel. De studie maakt onderdeel uit van Fase 1 (modelbeschrijving) van het project "Ontwikkeling Golfklapmodel".

Het doel van de studie is om een overzicht te geven van de achtergronden die de basisinformatie vormen van het huidige model (zie ook Appendix A) [1,2,3,4]. De schematisering van de constructie en de belasting staan hierin centraal. Er wordt een overzicht gegeven van de werking van het programma GOLFKLAP (stroomschema) en een beschrijving gegeven van de invoerparameters en de invloed ervan op het uiteindelijke resultaat.

Dit is de rapportage van de bevindingen met een modelbeschrijving van het programma GOLFKLAP met technisch inhoudelijke aanbevelingen en verbeterpunten.

De projectgroep bestaat uit de volgende personen:
> ing. C.C. Montauban (Dienst Weg- en Waterbouwkunde);
> ir. R. 't Hart (Dienst Weg- en Waterbouwkunde);
> ir. P. Meijers (Geo Delft);
> ing. A.K. de Looff (Netherlands Pavement Consultants bv);
> ir. G. Gaarkeuken (Netherlands Pavement Consultants bv).

2. TOEPASSINGEN EN INVOER

Voor de toepassingsmogelijkheden van het programma Golfklap kan een onderscheid worden gemaakt in de toepassing bepaling Minersom en de toepassing laagdiktebepaling:

> Bij de toepassing bepaling Minersom berekent het programma de Minersom op een aantal locaties op het talud, gegeven de laagdikte- en stijfheidskarakteristieken van de bekleding en de ondergrond, en gegeven de belastingkarakteristieken.

> Bij de toepassing laagdiktebepaling berekent het programma de minimaal toe te passen laagdikte van de bekleding gegeven de stijfheidskarakteristieken van het bekledingsmateriaal en de ondergrond en gegeven de belastingkarakteristieken. In feite bepaald het programma de Minersom op een aantal locaties op het talud en vergroot vervolgens de laagdikte van de bekleding net zolang tot de Minersom kleiner is dan 1.

Het programma kan twee belastinggevallen doorrekenen namelijk de “Superstorm” en de “levensduurbepaling”:

> Bij de toepassing “Superstorm” berekent het programma de Minersom of de laagdikte op een aantal locaties op het talud, gegeven de randvoorwaarden van de eenmalig optredende storm. In feite wordt gecontroleerd of de dijkbekleding de “Superstorm” kan weerstaan.

> Bij de toepassing “levensduurbepaling” wordt de Minersom of de laagdikte op een aantal locaties op het talud bepaald, gegeven de hydraulische randvoorwaarden ter plaatse (getij en storminvloeden), en gegeven de gewenste levensduur.

De volgende parameters moeten worden ingevoerd:

> hstart; laagdikte van het asfaltpakket (aanvangsdikte).

> deltah; De nauwkeurigheid waarin de laagdikte moet worden bepaald (in meters). Als deltah < 0 wordt de minersom en niet de laagdikte bepaald. Bij de laagdiktebepaling wordt h

net zolang met deltah vergroot tot de minersom kleiner is dan 1;

> TH; taludhelling (tan alpha);
> E, ν, k_{asf} en a_{asf}; de E-moduls (MPa) en de poissonratio (-) van het asfalt en de vermoeiingseigenschappen log(k) en a van het asfalt;
> DR; de relatieve dichtheid (-) van de grond. Indien geen vaste beddingsconstante wordt ingevoerd, wordt gebruik gemaakt van de relatieve dichtheid om de beddingsconstante te bepalen. Deze module is in het programma ingevoerd om de beddingsconstante afhankelijk te maken van de golfhoogte en de Glijdingsmodulus van het asfalt.
> SWL_1, SWL_2; Laagste en hoogste beschouwde niveau (m + NAP). Het te dimensioneren deel van het talud.
> ninter; Het beschouwde niveau wordt verdeeld in ninter + 1 intervallen;
> SPRT; Het verschil tussen de hoogste en de laagste waterstand tijdens te storm. Te kleine verschillen worden afgevangen;
> D; De diepte van de waterbodem (m – NAP);
> LVSDR; De gewenste levensduur van de bekleding (jaar). deze is alleen van belang bij de "levensduurbepaling";
> Storm; De stormduur (uur). Deze is alleen van belang bij de module "ontwerpstorm";
> S_{min}, S_{max}; Intervalgrenzen van de stootfactor bij een talud 1:4. Hieruit wordt de statistische verdeling van de golfklappen bepaald.
> Kans (1 t/m 11); Kansdichtheid van de stootfactor (11 getallen). Uit de kansdichtheid en de minimale en maximale stootfactor wordt de kansverdeling van de stootfactor bepaald (verdeling van Führboter en Sparboom [5]);

$$p(q) = \frac{1}{\sigma_q.\sqrt{2\pi}}.e^{\frac{(q-q_{gem})^2}{2.\sigma_q^2}}$$

222

> Alfa, H_{stm}; Parameters kansverdeling golfhoogte waarin $H_{stm} = H_s(top) - H_s(min)$. Deze invoer is alleen van belang bij een levensduurbepaling (verdeling van Weibull, zie paragraaf 3.2);

> ISTORM; parameter voor keuze levensduurbepaling (ISTORM=0) of superstorm (ISTORM=1);

> $H_s(0)$, $H_s(1)$, $H_s(2)$; Golfhoogten begin, midden en einde van de storm (m). Het programma checkt of $H_s(1) > H_s(0)$ en of $H_s(1) > H_s(2)$. Als dit niet het geval is, wordt $H_s(1)$ aangepast [$H_s(1) = H_s(0) + 0{,}01$ of $H_s(1) = H_s(2) + 0{,}01$];

> T_{gem}; Gemiddelde golfperiode bij keuze enkele storm (sec). Deze is alleen van belang in geval een superstorm wordt doorgerekend;

> $I_{bedding}$; Als $I_{bedding}=1$ wordt gerekend met een vaste beddingsconstante, als $I_{bedding}=0$ wordt de beddingsconstante door het programma berekend afhankelijk van de golfhoogte op basis van de relatieve dichtheid (geldt alleen voor zand);

> $C_{bedding}$; Beddingsconstante (MPa/m). Deze wordt alleen gebruikt indien $I_{bedding}=1$;

Verder past het programma bij de module "levensduurbepaling" de parameters SWL_0 en ASWL toe. De parameters geven de overschrijdingskans van een specifiek beschouwd niveau (SWL) door het getij aan (Bruinsma [6]en de CUR [7]).

$$P(SWL) = e^{\frac{-(SWL - SWL_0)}{ASWL}}$$

Voor de parameters SWL_0 en ASWL gebruikt het programma de onderstaande waarden geldig voor Hoek van Holland:

SWL_0 = 2,2 m

ASWL = 0,3026

3. WERKING VAN HET PROGRAMMA

In dit hoofdstuk zal een korte uitleg over de werking van het programma worden gegeven. In detail is dit weergegeven in Appendix B in de vorm van een stroomschema. De toepassingsmogelijkheden "Superstorm" en "levensduurbepaling" worden apart behandeld.

3.1. "Superstorm"

Voordat het programma aan zijn uiteindelijke rekenpartij begint, worden eerst bepaald:

> De parameter NETTOT (sec/m); Deze parameter geeft aan hoeveel tijd (sec) de stilwaterlijn binnen 1 m bekleding verblijft. Hierbij is er vanuit gegaan dat de stilwaterlijn gedurende de storm, die min of meer sinusvormig zal verlopen, mag worden geschematiseerd tot een stilwaterlijn die op elk niveau even lang verblijft, zie figuur 3.1.

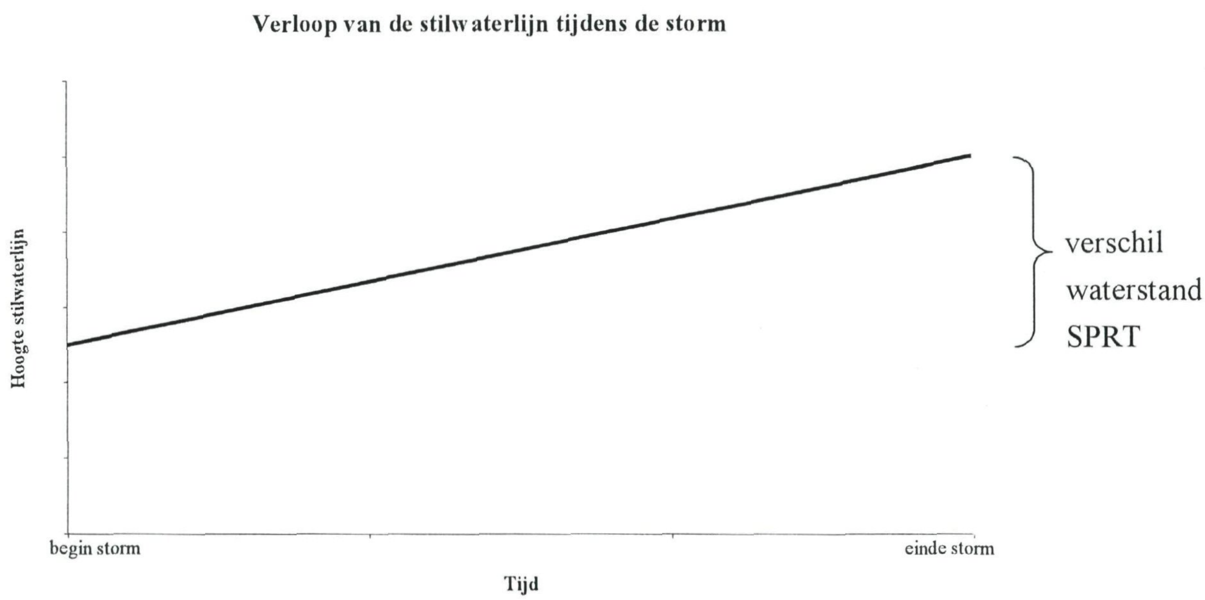


Fig. 3.1; Geschematiseerd verloop van de stilwaterlijn tijdens de storm

> De kansdichtheidfunctie van $H_s(t)$. Deze wordt bepaald met behulp van $H_s(0)$, $H_s(1)$ en $H_s(2)$ door twee halve parabolen aan elkaar te plakken, zie figuur 3.2. Het verschil tussen $H_s(max)$ en $H_s(min)$ wordt in 20 gelijke intervallen verdeeld en de verblijftijd tijdens elk interval wordt bepaald.

Kansdichtheidfunctie $H_s(t)$

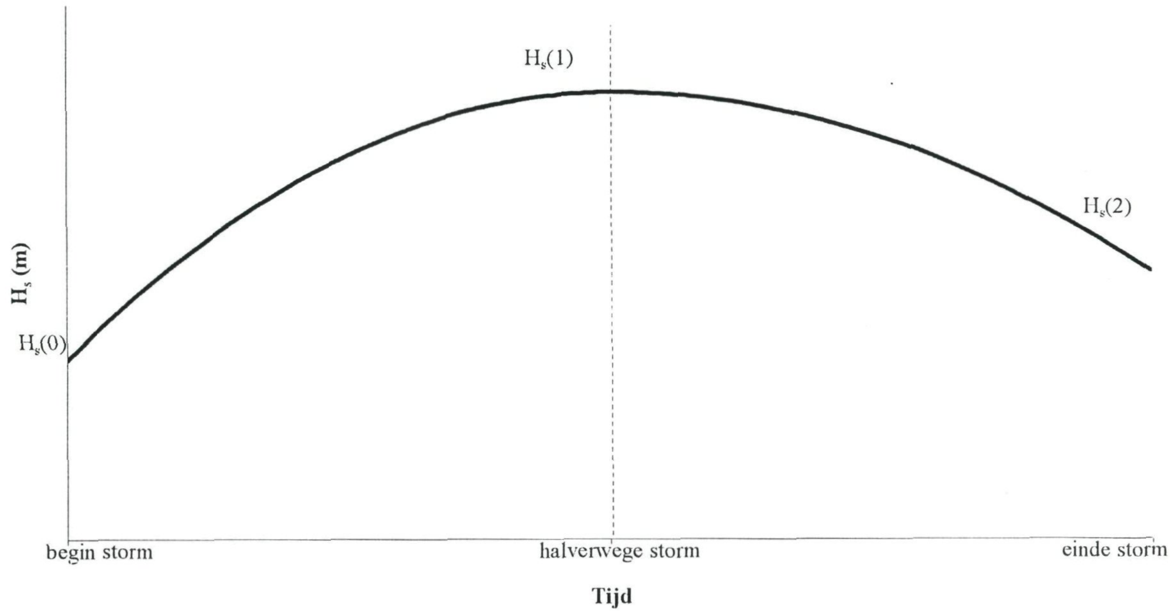


Fig. 3.2; Kansdichtheidfunctie $H_s(t)$

> De kansdichtheidfunctie van H. Hiervoor wordt een Rayleighverdeling toegepast.

$$p(H) = 4\frac{H}{H_s}.e^{\left(-2.\left(\frac{H}{H_s}\right)^2\right)}$$

De vermoeiingsberekening kan nu aanvangen. Tijdens de berekening worden vijf geneste lussen doorlopen:

1. Een lus over het beschouwde niveau: Het beschouwde niveau (SWL_1 tot SWL_2) wordt verdeeld in NINTER + 1 intervallen waar voor ieder interval van SWL een Minersom of een laagdikte wordt bepaald. Er worden alleen verschillende Minersommen voor verschillende beschouwde niveau's bepaald als de optredende golfhoogte groter is dan de brekerhoogte. De golven die groter zijn de brekerhoogte worden door het programma gelijk gesteld aan de brekerhoogte. Gecontroleerd wordt of het beschouwde niveau niet lager ligt dan het voorland.
2. Een lus over H_s. Voor ieder interval van H_s (20 stuks) wordt de verblijftijd bepaald uit de kansdichtheidfunctie $H_s(t)$. Hieruit kan met behulp van de gemiddelde golfperiode worden bepaald hoeveel golfklappen met deze significante golfhoogte op de bekleding terecht komen. (= verblijf-tijd/golfperiode). De golfdruk p, de maximale druk van de driehoeksbelasting, wordt direct afhankelijk gesteld van de significante golfhoogte [$p = \rho_w.g.stoot.H_s$ (N/m^2) = $stoot.H_s/100$ (MPa)]. Dit geldt eigenlijk alleen voor zoet water. Bij zout water is er een afwijking van ca. 3%.
3. Een lus over H: Per significante golfhoogte H_s wordt met behulp van de Rayleigh-verdeling bepaald hoeveel klappen met een bepaalde golfhoogte H op de dijkbekleding terecht komen. Hiervoor worden 15 intervallen toegepast ($0,1H_s$ t/m $1,5H_s$ met een intervalgrootte $0,1H_s$). Indien de golfhoogte groter is dan de brekerhoogte wordt de golfhoogte gelijk gesteld aan de brekerhoogte. De breedte van de belastingdriehoek wordt gelijk gesteld aan de golfhoogte H. Eigenlijk wordt er dus een lus over de belastingbreedte uitgevoerd. De variatie in golfhoogte zorgt dus voor een belastingdriehoek met een andere breedte terwijl de maximale golfdruk gelijk blijft (afhankelijk van H_s).
4. Een lus over de stootfactor: Met behulp van de intervalgrenzen van de stootfactor wordt een kansdichtheidverdeling van de stootfactor gemaakt (verdeling van Führboter en Sparboom). Hiervoor worden

11 intervallen, afhankelijk van de taludhelling toegepast. De verdeling van de stootfactor is bepaald in de deltagoot uit de gemeten piekdruk en de opgelegde H_s.

5. Een lus over de plaats. De piek van de belastingdriehoek wordt precies boven het hart van het beschouwde interval van het talud gelegd. Vervolgens wordt de spanningsverdeling onder de belastingdriehoek bepaald door op 20 locaties onder de belastingdriehoek de spanning onderin het asfalt uit te rekenen (vanwege symmetrie hoeft het uiteindelijk maar op 10 locaties te gebeuren). Dit resulteert in $\sigma(z)$ met $-1/2H<z<1/2H$. Ook de spanningsverdeling naast de belastingdriehoek wordt op 2 x 10 locaties bepaald. Drukspanningen worden niet in de berekeningen meegenomen. Dit resulteert in $\sigma(z)$ met $1/2H<z<H$ en $-H<z<-1/2H$. De spanningen kunnen in de vermoeiingsformule worden geplaatst waardoor de spanningsverdeling $\sigma(z)$ overgaat in $N_{max}(z)$, zie figuur 3.3. N_{max} is gelijk aan het maximaal aantal malen dat de bekleding de betreffende trekspanning kan opnemen voordat hij op vermoeiing bezwijkt. $N_{max}(z)$ zal het kleinst zijn midden onder de belastingdriehoek (z=0).

$$N_{max}(z) = k.\sigma^{-a}(z) \qquad \text{Miner} = N_{optredend}/N_{max}$$

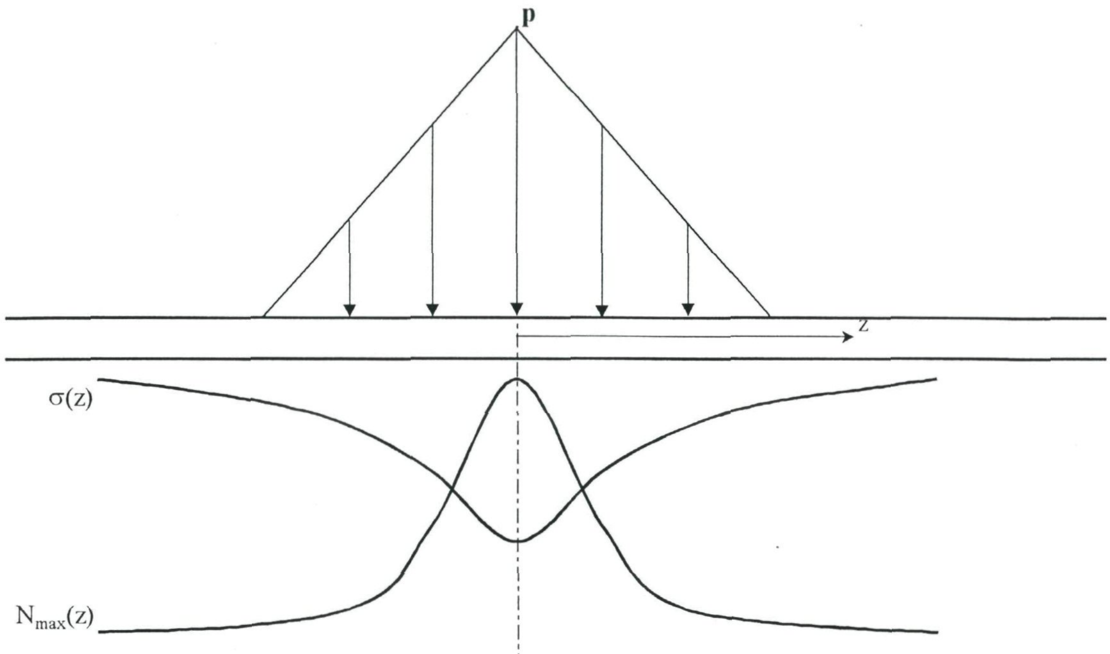


Fig. 3.3; Spanningsverdeling en vermoeiingsverdeling

Er worden meerdere golfklappen H op de bekleding doorgerekend. Omdat de golfklappen gegeven een stilwaterlijn nooit precies op dezelfde locatie op de dijkbekleding terecht zullen komen, en omdat de stilwaterlijn het beschouwde punt passeert, kan op grond van wederkerigheid met een gemiddelde N_{max} worden gerekend. Hiervoor wordt het positieve gedeelte van $N_{max}(z)$ geïntegreerd naar z.

Sommatie over de lussen

Door het aantal optredende belastingen te delen door N_{max} wordt de bijdrage aan de vermoeiing (de minersom) voor een specifieke H_s, H en stootfactor bepaald. Door de lussen over H_s, H en de stootfactor te doorlopen wordt de totale vermoeiing (Minersom) voor een taludinterval bepaald. Indien de optie laagdiktebepaling is toegepast en de Minersom is groter dan 1, wordt de laagdikte van de bekleding met deltah vergroot en wordt opnieuw begonnen bij de lus over het beschouwde niveau (SWL). Dezelfde

2225

procedures worden uitgevoerd voor de overige taludintervallen (2 t/m NINTER + 1).

3.2. "Levensduurbepaling"

Bij de optie "levensduurbepaling" worden er geen parameters vooraf bepaald. De rekenpartij kan direct beginnen. Kansdichtheidfuncties worden in de lus over het beschouwde niveau (SWL) bepaald. Gestart wordt met een specifieke laagdikte. Tijdens de berekeningen worden opnieuw vijf geneste lussen doorlopen:

1. Een lus over het beschouwde niveau: Het beschouwde niveau (SWL_1 tot SWL_2) wordt verdeeld in ninter intervallen waarvoor ieder een Minersom of een laagdikte wordt bepaald. Het verschil in uitkomsten is alleen afhankelijk van de brekerhoogte. Gecontroleerd wordt of het beschouwde niveau niet lager ligt dan het voorland. Bovendien wordt gecontroleerd of het beschouwde niveau niet lager ligt dan de ondergrens van het getij (SWL_0). De overschrijdingsfrequentie (N_{SWL}) en de NETTOT worden voor iedere specifiek beschouwd niveau bepaald.

$$N_{SWL} = e^{\frac{-SWL - SWL_0}{ASWL}}$$

$$BRUTOT = N_{SWL} * LVSDR * 12{,}4 * 3600$$

$$NETTOT = \frac{BRUTOT}{SPRT.\sqrt{1+\left(\frac{1}{TH}\right)^2}}$$

N_{SWL}	= overschrijdingsfrequentie (getijden>SWL/jaar)
12,4	= periode getij (uren)
3600	= seconden in een uur

BRUTOT = bruto verblijftijd (verticaal)

NETTOT = netto verblijftijd langs taludhelling

De parameter BRUTOT heeft een ondergrens van 3600*stormduur (uren).

Voor de frequentieverdeling van de significante golfhoogte wordt gebruik gemaakt van de Weibull-verdeling:

$$H_s(\min) = -0{,}043.SWL^2 + 1{,}15.SWL - 0{,}041$$

$$p(H_s) = \frac{ALFA-1}{H_{stm}} . \left(\frac{H_s - H_s(\min)}{H_{stm}}\right)^{ALFA-1} . e^{\left(-\frac{ALFA-1}{ALFA} . \left[\frac{H_s - H_s(\min)}{H_{stm}}\right]^{ALFA}\right)}$$

De stapgrootte voor H_s is gelijk aan $H_s(\min)/10$.

2. Een lus over H_s. De golfperiode is gelijk aan:

$$T_{gem} = 3{,}5\sqrt{H_s}$$

Hieruit kan direct de hoeveelheid klappen H_s worden afgeleid. De golfdruk p, de maximale druk van de driehoeksbelasting, wordt direct afhankelijk gesteld van de significante golfhoogte ($p = \rho_w.g.stoot.H_s$ (N/m^2) = $stoot.H_s/100$ (MPa).

3. Een lus over H: Per significante golfhoogte H_s wordt met behulp van de Rayleigh-verdeling bepaald hoeveel klappen met een bepaalde golfhoogte H op de dijkbekleding terecht komen. Hiervoor worden 15 intervallen toegepast ($0{,}1H_s$ t/m $1{,}5H_s$). Indien de golfhoogte groter is dan de brekerhoogte wordt de golfhoogte gelijk gesteld aan de brekerhoogte. De breedte van de belastingdriehoek wordt gelijk gesteld aan de golfhoogte H. De variatie in

2225

golfhoogte zorgt dus voor een belastingdriehoek met een andere breedte terwijl de maximale golfdruk gelijk blijft (afhankelijk van H_s).

4. Een lus over de stootfactor: Met behulp van de intervalgrenzen van de stootfactor wordt een kansdichtheidverdeling van de stootfactor gemaakt (verdeling van Führboter en Sparboom). Hiervoor worden 11 intervallen toegepast.
5. Een lus over de plaats. De piek van de belastingdriehoek wordt precies boven het hart van het beschouwde interval van het talud gelegd. Vervolgens wordt de spanningsverdeling onder de belastingdriehoek bepaald door op 20 locaties onder de belastingdriehoek de spanning onderin het asfalt uit te rekenen (vanwege symmetrie hoeft het uiteindelijk maar op 10 locaties te gebeuren). Dit resulteert in $\sigma(z)$ met $-1/2H<z<1/2H$. Ook de spanningsverdeling naast de belastingdriehoek wordt op 2 x 10 locaties bepaald. Indien er drukspanningen ontstaan wordt er eerder gestopt. Dit resulteert in $\sigma(z)$ met $1/2H<z<H$ en $-H<z<-1/2H$. De spanningen kunnen in de vermoeiingsformule worden geplaatst waardoor de spanningsverdeling $\sigma(z)$ overgaat in $N_{max}(z)$, zie figuur 3.3.. N_{max} is gelijk aan het maximaal aantal malen dat de bekleding de betreffende trekspanning kan opnemen voordat hij op vermoeiing bezwijkt. $N_{max}(z)$ zal het grootste zijn midden onder de belastingdriehoek (z=0). In eerste instantie wordt gecontroleerd of de maximale spanning $\sigma(z=0)$ groter is dan de bezwijkbelasting. In dat geval zal de bekleding bij één belasting al bezwijken. Vervolgens worden meerdere golfklappen H op de bekleding doorgerekend. Omdat de golfklappen nooit precies op dezelfde locatie op de dijk terecht komen, en omdat de stilwaterlijn het beschouwde punt passeert, is er voor gekozen om met een gemiddelde N_{max} te rekenen. Hiervoor wordt $N_{max}(z)$ geïntegreerd naar z. Door het aantal optredende belastingen (afhankelijk van de totale verblijftijd en dus van NETTOT) te delen door N_{max} wordt de bijdrage

aan de vermoeiing (de minersom) voor een specifieke H_s, H en stootfactor bepaald. Door de lussen over H_s, H en de stootfactor af te maken wordt de totale vermoeiing op een taludinterval bepaald. Dezelfde procedures worden uitgevoerd voor de overige taludintervallen (2 t/m ninter).

Het nut van de module “levensduurbepaling” is discutabel. De schade aan een bekleding die optreedt door stripping en veroudering overtreffen doorgaans de vermoeiingsschade.

2225

4. DE INVLOED VAN DE INVOERPARAMETERS OP HET RESULTAAT

De invoerparameters hebben een verschillende invloed op het uiteindelijke resultaat van de berekeningen. Om de invloed van de diverse parameters te kunnen bespreken, worden 4 beïnvloedingsgebieden aangegeven en apart belicht:

> De dichtheid van de golfklappen (golfklappen/lengte-eenheid). Wanneer er meer golfklappen op een kleiner deel van het dijktalud klappen, zal de Minersom toenemen.
> De golfbelasting.
> De materiaaleigenschappen en laagdikte.
> De gewenste levensduur van de bekleding of de duur van de "superstorm".

De invloed van de diverse parameters is bepaald door één parameter te variëren. Hierbij is gebruik gemaakt van een basisset voor de diverse parameters.

Parameter	Basiswaarde
Laagdikte (m), deltah (m)	0,30 – 0,02
Taludhelling (tan alpha)	0,25
E-modulus (MPa) en poissonratio (-) asfalt	9000 – 0,35
Vermoeiingseigenschappen log(k) en –a	3,5 – 2,5
Relatieve dichtheid grond (-)	0,6
SWL_1 en SWL_2 (beschouwd niveau)	2,3 – 4,5
NINTER	10
SPRT	0,5
Diepte voorland D (m – NAP)	2,0
levenduur LVSDR (jaren)	20
Stormduur STORM (uur)	17
Intervalgrenzen stootfactor S_{min} en S_{max}	2,0 – 6,0
Kansdichtheid golfklappen (11 getallen)	0,039-0,10-0,18-0,235-0,2-0,13-0,08-0,02-0,01-0,005-0,001
Alfa en H_{stm}	4,7 – 2,9
$H_s(0)$, $H_s(1)$, $H_s(2)$ [m]	3,9 – 3,91 – 3,9
Gemiddelde golfperiode T_{sig} (sec)	6,3
Beddingsconstante $C_{bedding}$ (MPa/m)	100

2225

4.1. De dichtheid van de golfklappen

Een grotere dichtheid van de golfklappen zorgt voor een hogere Minersom. Er komen meer klappen op een kleiner oppervlak. De volgende invoerparameters hebben invloed op de dichtheid van de golfklappen:

1. Het tijverschil. Een kleiner tijverschil zorgt voor een grotere dichtheid van de optredende golfklappen. Het deel van het talud waar de golflasten zullen optreden wordt kleiner en de Minersom neemt dus toe. Bij zeer kleine tijverschillen (kleiner dan 0,25 m) gaf het oorspronkelijke programma te hoge waarden voor de Minersom omdat er bijna geen golven zijn die hoger of lager dan het inslagpunt inslaan.. Hiervoor is een correctie ingebouwd. Dit is ondervangen door niet in alle gevallen te integreren over een gebied van de golfhoogte aan weerszijden van het inslagpunt, maar door te integreren over een gebied welke de kleinste waarde is van de golfhoogte en de zone waarover het inslagpunt varieert bij het gegeven springtijverschil. Dit heeft tot gevolg dat bij zeer kleine tijverschillen (SPRT < 0,1 m) er sprake is van een significante reductie van de Minersom.
2. De taludhelling. Bij een toename van de taludhelling met een factor 2 (dus van 1:4 naar 1:2) neemt de component van het tijverschil langs het talud af met een factor 0,54. Dit betekent dat de golfklappen die bij een talud 1:4 over één meter waren verspreid nu op 54 cm terecht zullen komen. De invloed op de Minersom is evenredig. De taludhelling heeft via de stootfactor ook nog een invloed op het rekenresultaat.

4.2. De golfbelasting

De volgende invoerparameters zijn van directe invloed op de intensiteit van de golfbelasting:

1. De significante golfhoogte. Een hogere significante golfhoogte zorgt voor een grotere Minersom. De maximale

piekdruk p is lineair afhankelijk van de significante golfhoogte, en ook de belastingbreedte is afhankelijk van de significante golfhoogte. Een toenemende significante golfhoogte hoeft niet direct een hogere trekspanning onderin het asfaltpakket ter plaatse van het inslagpunt tot gevolg te hebben. Omdat ook de belastingbreedte zal toenemen kan de maximale trekspanning zelfs afnemen. De gemiddelde trekspanning over het integratiegebied (-H tot H) neemt echter wel toe met een hogere Minersom tot gevolg. De significante golfhoogte is bij de module "superstorm" een invoerparameter. Bij variatie van H_s tussen 1,9 en 10,9 nam de Minersom toe met een machtsfactor 3. De kansdichtheidfunctie van de significante golfhoogte bij de module "levensduurbepaling" wordt bepaald door de invoerparameters Alfa en H_{stm}. De invoerparameters hebben echter geen invloed. Het programma past standaard waarden voor Alfa en H_{stm} toe [6].

2. De taludhelling. De taludhelling is van invloed op de stootfactor. Een steiler talud heeft een hogere stootfactor tot gevolg. De relatie stootfactor – taludhelling is weergegeven in onderstaande formule:

$$q_\alpha = \frac{\tan(\alpha)}{0,25} . q_r$$

waarin:

q_α	=	stootfactor bij een taludhelling α;
α	=	taludhelling;
q_r	=	stootfactor bij een helling 1:4.

Een verdubbeling van de taludhelling heeft ongeveer een verdubbeling van de stootfactor tot gevolg waarmee ook de spanningen verdubbelen. Via de vermoeiingsparameters a en k is de invloed van de taludhelling op de Minersom via de stootfactor zeer groot.

3. De diepte van het voorland. De diepte van het voorland is van directe invloed op de hoeveelheid golven die zullen breken en dus op de golfhoogte. De piekdruk, die afhankelijk is van H_s blijft constant maar de belaste breedte neemt af. Dit kan een toename van de maximaal optredende trekspanning onderin de bekleding tot gevolg hebben. De gemiddelde trekspanning over het integratiegebied neemt echter af met een lagere Minersom tot gevolg.
4. De kansdichtheid van de stootfactor. Grotere stootfactoren zorgen voor hogere spanningen. De relatie stootfactor – spanning is lineair. De Minersom neemt dus aanzienlijk toe met hogere stootfactoren.
5. De gemiddelde golfperiode (alleen bij module “ontwerpstorm”). Een kleinere golfperiode heeft meer golflasten en dus een hogere Minersom tot gevolg (lineair afhankelijk).

4.3. Materiaaleigenschappen en laagdikten

De volgende invoerparameters zijn van invloed:

1. De laagdikte van de asfaltbekleding. Deze is alleen van belang wanneer de Minersom wordt bepaald. Bij de laagdiktebepaling wordt de laagdikte door het programma net zolang verhoogd tot de Minersom kleiner is dan 1. Het moge duidelijk zijn dat kleinere laagdikten een hogere Minersom tot gevolg hebben. Het verband tussen laagdikte en Minersom is in de ‘normale’ bekledingsdikten (0,3-0,5 m) relatief lineair. Bij grotere bekledingsdikten neemt de absolute invloed van de grotere dikte af. Bij kleiner bekledingsdikten neemt de invloed juist toe. Bij zeer kleine bekledingsdikten neemt de Minersom weer af. Dit is het gevolg van de lagere trekspanningen onderin de bekleding. De ondergrond wordt steeds zwaarder belast. Bij de laagdiktebepaling is dit afgevangen. Wanneer een te lage aanvangsdikte wordt ingevoerd kan het voorkomen dat bij een toename van de bekledingsdikte een lagere Minersom

wordt gevonden. In dat geval stopt het programma met zijn berekeningen.

2. De materiaalparameters van het asfalt. De spanning onderin het asfaltpakket is ongeveer recht evenredig met de stijfheid van het asfalt. Hogere stijfheden betekenen hogere spanningen en dus hogere Minersommen. De invloed van de poissonratio is slechts beperkt. De invloeden van de vermoeiingsparameters zijn groter. De factoren a en k hebben een grote invloed op de Minersom vanwege het machtsverband in de vermoeiingsrelatie. Het is eenvoudig om de invloed van de materiaalparameters onafhankelijk van elkaar te zien. Dit is echter niet reëel. Wijzigingen in de stijfheid gaan doorgaans gepaard met veranderingen in de vermoeiingskarakteristieken.
3. De beddingsconstante van de ondergrond. Een hogere beddingsconstante zorgt voor een betere ondersteuning van de bekleding en voor een lagere Minersom. Na variatie van de beddingsconstante is er een relatie tussen beddingsconstante en Minersom gevonden die nagenoeg lineair is.
4. De relatieve dichtheid van de ondergrond (alleen van belang als de beddingsconstante onbekend is en door het programma moet worden bepaald). Uit de relatieve dichtheid van de grond wordt de beddingsconstante berekend. Een hogere beddingsconstante zorgt voor een betere ondersteuning van de bekleding en dus lagere spanningen en Minersommen. De relatieve dichtheid van de ondergrond is gevarieerd tussen 0,1 en 1,0. Bij relatieve dichtheden groter dan 0,2 neemt de beddingsconstante van de ondergrond toe met een toename van de relatieve dichtheid. Bij relatieve dichtheden groter dan 0,4 gaat dit vrij snel. Bij relatieve dichtheden kleiner dan 0,2 neemt de beddingsconstante van de ondergrond juist af met een toename van de relatieve dichtheid. Dit zijn echter onwaarschijnlijk lage relatieve dichtheden. De situatie is niet reëel.

2225

4.4. De duur van de belasting

De invloed van de duur van de belasting is vrij triviaal maar wordt toch nog kort belicht:

1. De levensduur van de bekleding (alleen van belang bij de module "levensduurbepaling"). Een grotere gewenste levensduur van de bekleding zorgt voor meer golfklappen en een hogere Minersom. Deze relatie is natuurlijk lineair.
2. De stormduur (alleen van belang bij de module "ontwerpstorm"). De stormduur heeft een gelijke lineaire invloed als de parameter LVSDR.

4.5. Nauwkeurigheid van de rekenresultaten

Een aantal invoerparameters hebben niet zo zeer invloed op de uitkomst van de Minersommen maar eerder op de nauwkeurigheid van bepaling:

1. Deltah (alleen van belang indien de laagdikte wordt bepaald). De laagdikte van de bekleding wordt met deltah vergroot tot de Minersom kleiner is dan 1. Een kleine deltah zorgt zo voor een scherpere dimensionering, maar ook voor een langere rekentijd.
2. De fijnheid van het meetnet (SWL_1, SWL_2 en NINTER). Wanneer een kleiner beschouwd niveau wordt gekozen en/of wanneer het betreffende beschouwde niveau in meer intervallen wordt verdeeld, heeft dit een grotere nauwkeurigheid van de rekenresultaten tot gevolg. Opgepast moet worden dat het (misschien kleinere) beschouwde niveau op de correcte (zwaarst belaste) locatie wordt gelegd. Legt men het beschouwde niveau te laag, kan het brekercriterium van grote invloed zijn en kan een hoger niveau zwaarder worden belast. Kiest men het beschouwde niveau te hoog, kan men een niet reële situatie berekenen.

2225

Het betreffende niveau wordt misschien nauwelijks belast door golfklappen.

5. VERBETERPUNTEN EN AANBEVELINGEN

Naar aanleiding van het programma-overzicht zijn er een aantal aanbevelingen en eventuele verbeterpunten opgesteld:

1. De constructie van de bekleding wordt geschematiseerd als een isotrope elastisch ondersteunde ligger met een stijfheidsmodulus E (MPa) van het asfalt en een beddingsconstante c (MPa/m) van de ondergrond. De beddingsconstante c kan door het programma worden bepaald uit:
   - G_a : glijdingsmodulus asfalt (GPa);
   - h_a : asfaltdikte (m);
   - H : golfhoogte (tevens belastingbreedte);
   - D_r : relatieve dichtheid ondergrond (-);
   - S : stootfactor (-);

$$c_{gr} = 197{,}688 - 22{,}5466G_a - 43{,}1319h_a - 86{,}9438H + 88{,}762D_r - 16{,}528S + 3{,}634843G_a^2 - 16{,}5262G_ah_a + 5{,}6098G_aH - 21{,}3728G_aD_r + 1{,}49847G_aS - 29{,}11h_a^2 + 59{,}4625h_aH - 164{,}053h_aD_r + 16{,}6407h_aS + 12{,}8129H^2 - 8{,}20928HD_r + 0{,}175211HS + 133{,}433D_r^2 + 0{,}426659D_rS + 0{,}537843S^2$$

Deze formule is een regressieverband, gebaseerd op de resultaten van PLAXIS-berekeningen [8]. Hierbij varieerde de asfaltdikte tussen 0,15 m en 0,35 m en de golfhoogte tussen 0,8 m en 2,4 m. Extrapolatie van het resultaat voor hogere golven en/of dikker asfalt kan tot foutieve of onveilige resultaten leiden. Om te voorkomen dat de beddingsconstante bij toenemende golfhoogte weer toe gaat nemen is een maximale golfhoogte toegepast. Bepaald wordt bij welke waarde van de golfhoogte H de formule een minimum geeft (bij verder gelijkblijvende parameters). Uit differentiatie van de voorgaande formule volgt dat dit minimum optreedt bij:

$$H = 3{,}39 - 0{,}219G_a + 0{,}32D_r - 2{,}32h_a - 0{,}007S$$

De waarde van de golfhoogte waar dit minimum optreedt blijkt voor normale waarden van de materiaalparameters op te treden bij H = 2 tot 3 m. Bij hogere golven wordt de beddingsconstante bepaald met een golfhoogte die bepaald is met de laatste formule. Verder is er een ondergrens ingebouwd voor de beddingsconstante. De minimum waarde van de beddingsconstante is 10 MPa/m. De formules zijn bovendien alleen geldig voor zand. Het is een omslachtige manier om de beddingsconstante van de ondergrond te bepalen. Het eenvoudigweg meten van de ondergrondkarakteristieken (bijvoorbeeld met behulp van valgewichtdeflectiemetingen) is een betere alternatief. Een optie is om een meerlagenmodel toe te passen. Dit vergemakkelijkt bijvoorbeeld de toepassing van valgewichtdeflectiemetingen op bekledingen om stijfheden te kunnen terugrekenen. De belastingtijd van het valgewicht zal wel moeten worden aangepast aan de belastingtijden van een golfklap. Asfalt is een visco-elastisch materiaal wat tot gevolg heeft dat de stijfheid afhankelijk is van de belastingtijd. Met behulp van een lineair elastisch meerlagenmodel worden tevens ingewikkelde regressieverbanden voor de bepaling van de beddingsconstante voorkomen.

2. De module "levensduurbepaling" is een weinig toegepaste module. De eenmalig optredende "superstorm" is maatgevend. Ook de schade ten gevolge van veroudering en stripping overschaduwd de vermoeiingsschade. In overweging zal moeten worden genomen om de "levensduurbepaling" te laten vallen.
3. Het programma maakt bij een levensduurberekening alleen gebruik van de hydraulische randvoorwaarden ter plaatse van Hoek van Holland. De overschrijdingsfrequentie die wordt toegepast bij de "levensduurbepaling" kan op andere locaties langs de kust verschillen van die van Hoek van Holland. Indien de module "levensduurbepaling" toch als nuttig wordt ervaren, is het aan te bevelen om hiervan een invoerparameter te maken. De beschikbaarheid van de

hydraulische randvoorwaarden op andere locaties vormt in dat geval een aandachtspunt.

4. Bij de optie "ontwerpstorm" is geen relatie gelegd tussen de stilwaterlijn (de locatie waar de driehoeksbelasting aangrijpt) en de significante golfhoogte. Het verschil in belasting tussen de verschillende beschouwde niveau's wordt uitsluitend bepaald door het brekercriterium. Het gevolg hiervan is dat de verschillen in Minersom tussen de verschillende beschouwde niveau's uitsluitend worden bepaald door het brekercriterium. Een tweede gevolg is dat niveau's hoog op het talud, die nagenoeg nooit worden belast door golfklappen, toch een hoge Minersom krijgen. Het is aan te bevelen om een maximaal niveau van de stilwaterlijn als invoerparameter te kunnen gebruiken. Gebeurt dit niet dan moet de gebruiker zeer nauwkeurig omgaan met de resultaten en vooraf een goed inzicht hebben in de zwaarst belaste niveau op het talud.
5. Gegeven een bepaalde stilwaterlijn zal het aangrijppunt van de golfklappen op de bekleding variëren. De meeste golfklappen zullen aangrijpen op een afstand tussen 0,6H en 0,1H onder de stilwaterlijn. Omdat ook de positie van de stilwaterlijn varieert, is de spreiding van het aangrijppunt van de golfklap gedurende de "superstorm" aanzienlijk en is er voor gekozen om de spanningsverdeling te integreren. In feite is er van uitgegaan dat de belasting door golfklappen gedurende de storm over het integratiegebied (SWL-H tot SWL+H) constant is. Bij een klein tijverschil is deze aanname echter niet meer geldig. In dat geval zal er toch een concentratie van golfklappen optreden en zal het integratiegebied moeten worden aangepast (verkleind). Overleg is noodzakelijk.
6. De relatie tussen de golfhoogte en de breedte van de belastingdriehoek is bepaald op basis van een beperkt aantal metingen in Duitsland met golfhoogtes tot 1,5 a 2 m. De ontwikkelde relatie geeft bij golfhoogte groter dan 2 a 2,5 m geen toename meer te zien in de spanningen onderin de bekleding. Blijkbaar zorgt een grotere breedte van de

belastingdriehoek bij een gelijkblijvende maximale golfdruk niet voor een grotere kromming/moment in de bekleding. Nader onderzoek/discussie is noodzakelijk over de vorm van de belastingdriehoek. In het huidige model wordt de maximale golfdruk direct gerelateerd aan de significante golfhoogte en de breedte van de belasting gerelateerd aan de golfhoogte. Deze relaties zijn vastgelegd op basis van beperkt onderzoek in de deltagoot met golfhoogtes van maximaal 2 m. Dit kleinschalig onderzoek overschat de golfklappen. Grotere golven veroorzaken meer schuim. Door luchtinsluitingen reduceren de golfklappen sterk.

7. Bij de optie "levensduurbepaling" is wel een relatie gelegd tussen de significante golfhoogte en de stilwaterlijn.

$$H_s(\min) = -0{,}043.SWL^2 + 1{,}15.SWL - 0{,}041$$

Deze relatie is echter beperkt tot een stilwaterlijn boven NAP + 2,5 m en voor golven veroorzaakt door wind uit de richtingen tussen 285° en 360°. Voor andere windrichtingen zal deze relatie ook moeten worden bepaald. De windrichting kan in dat geval een invoerparameter worden.

8. Het invoeren van verschillende laagdikte op het talud kan de rekentijd verkorten. Wanneer een dijkbekleding een variabele laagdikte heeft, moet er voor iedere laagdikte een nieuwe berekening worden uitgevoerd.
9. Het is op dit moment nog mogelijk om berekeningen uit te voeren met een irreële invoer. Een verbeterpunt is dan ook om de invoer vooraf te controleren zodat onmogelijke invoer (bv. beschouwd niveau lager dan voorland etc.) wordt afgevangen.
10. Het programma berekent de vermoeiingsschade die optreedt ten gevolge van een "superstorm" afhankelijk van een ingevoerde golfverdeling $H_s(t)$. Het is echter mogelijk dat een eenmalig optredende (hoge) golf tot lokaal bezwijken van de bekleding leidt. Een optie is om te controleren of de maximaal optredende trekspanning onderin de bekleding ten

gevolge van een golflast de bezwijkspanning niet overschrijdt. Daarbij moet wel worden gerealiseerd dat het overschrijden van de bezwijkspanning lokale schade tot gevolg heeft.

11. De relatie taludhelling – verdeling stootfactor (Führboter en Sparboom) is vastgesteld door de taludhelling tot een maximale helling 1:3 te variëren. Overwogen moet worden om dit als maximale taludhelling toe te passen.

6. LITERATUURLIJST

1. Meijers, P; Ontwerpmethodiek bepaling asfaltdikte taluds onder golfbelasting, fase 2, CO-337630/9; Grondmechanica Delft, juni 1993, Delft;

2. De Looff, A.K.; Diverse berekeningsresultaten met GOLFKLAP 6.0 en 6.1; DWW, oktober 1996 en februari 1997, Delft;

3. Meijers, P; Notitie: Aanpassingen programma GOLFKLAP (versie 7.0), CO-381730/8; Grondmechanica Delft, februari 1998, Delft;

4. Technische adviescommissie voor de waterkeringen; Leidraad voor de toepassing van asfalt in de waterbouw; Staatsuitgeverij, 1984, 's-Gravenhage;

5. Führboter, A., Sparboom, U.; Shock pressure interactions on prototype sea dykes caused by breaking waves; SOWAS'88, 1988, Delft;

6. Bruinsma, J.; Golfhoogte – waterstandrelatie t.p.v. de NAP – 20 m lijn nabij Hoek van Holland t.b.v. de leidraad Duinafslag; Rijkswaterstaat WWKZ-82G.259, 1982, Den Haag;

7. CUR publicatie 141; Probabilistic design of flood defences;

8. Ruygrok, P., Van Ommen, A.; Parameterstudie voor formulering van een equivalente effectieve veerconstante voor het plaat op veren model; Rapport CO-336530/6, Grondmechanica Delft, november 1992, Delft;

9. Vledder, G. Ph.; Literature survey to wave impacts on dike slopes; WL H976, july 1990;

APPENDIX A

De achtergronden van het golfklapmodel

INHOUDSOPGAVE

Blz.

Het auteursrecht van dit rapport is voorbehouden aan Netherlands Pavement Consultants bv te Utrecht.

1. HET GOLFKLAPMODEL MET LIJNLAST

De grootste belastingen die golven kunnen uitoefenen op een plaatvormige bekleding zijn klappen veroorzaakt door overstortende golven. Plaatvormige bekledingen zijn asfaltbetonplaten, mastiekslabben, 'vol en zat' gepenetreerde breuksteenlagen, open en dichte steenasfaltplaten en lagen gebitumineerde zand.

1.1. De belasting

Een golfklap wordt veroorzaakt doordat de watermassa van de overstortende golf met een grote snelheid het talud treft. De golfklap is in feite een drukstoot die over een zekere breedte werkt, zie figuur 1.1.

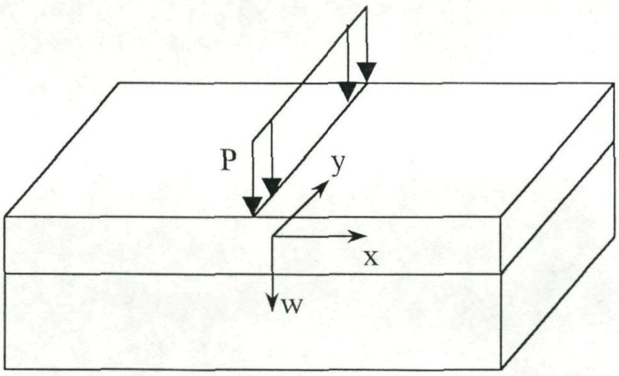


Fig. 1.1; Schematisering golfklap

Ten behoeve van de dimensionering is de golfklap in het verleden geschematiseerd als lijnlast.

$$P = p \cdot b$$

waarin:

P = grootte van de golfklap (N/m^1);

p = grootte van de maximale drukstoot (N/m^2);

b = breedte waarover de maximale drukstoot moet aangrijpen om de gehele golfbelasting te representeren (m).

De golfbelasting is afhankelijk van een groot aantal factoren zoals onder meer:

- De golfhoogte;
- De taludhelling.

De maximale drukstoot is gelijk aan:

$$p = \rho_w \, . \, g \, . \, q \, . \, H$$

waarin:

ρ_w = dichtheid van water (kg/m^3);
g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2);
H = golfhoogte (m);
q = stootfactor, afhankelijk van de taludhelling (zie onderstaande tabel).

taludhelling	**q** [-]
1:2	2,3
1:3	2,7
1:4	2,3
1:6	2

De geschematiseerde breedte waarover de maximale drukstoot werkt:

$$b = 0{,}4 \, . \, H$$

De duur van de drukstoot t (sec) werd ten behoeve van het model, gesteld op:

- taludhelling $\leq$ 1:3; $t = 0{,}06 \, . \, H^{½}$
- taludhelling $\geq$ 1:4; $t = 0{,}18 \, . \, H^{½}$

De lengte van de golfklap is afhankelijk van de hoek waaronder de golf het talud treft en van de voortplantingssnelheid van de golf. Naarmate deze groter zijn, is de lengte kleiner.
De brekende golf treft het talud op een afstand Δh onder de stilwaterlijn (SWL). Het gebied waarin Δh ligt is aangegeven in figuur 1.2.

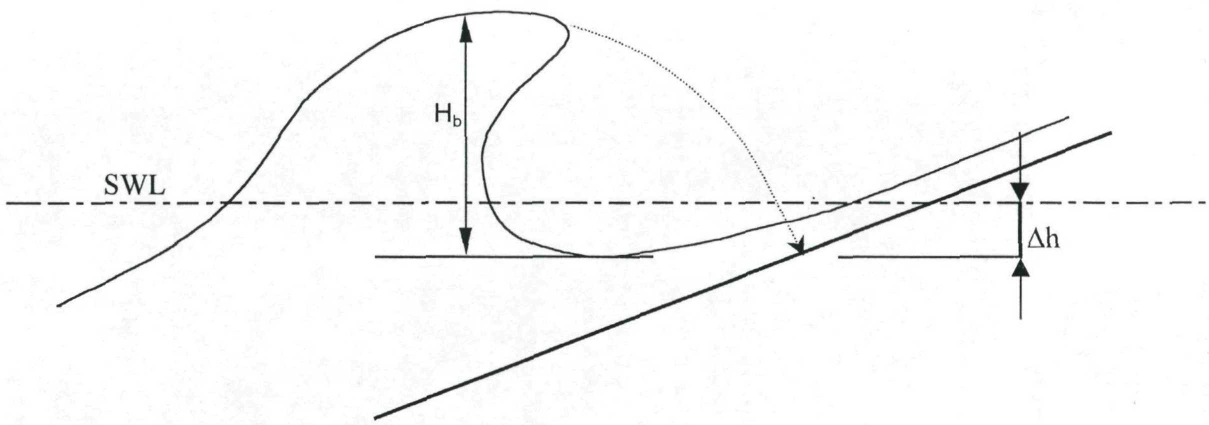


Fig. 1.2; De brekende golf

De parameter H stelt de hoogte van een enkelvoudige golf voor. In werkelijkheid zal de bekleding worden belast door een onregelmatig golfveld bestaande uit een groot aantal golven met verschillende hoogten en aantallen van voorkomen. Als golfhoogte voor de bepaling van de golfklapwaarden kan de significante golf H_s worden gebruikt die het beschouwde golfveld karakteriseert. Het aantal keren dat deze voorkomt, wordt zodanig gekozen dat dezelfde 'vermoeiingsbelasting' wordt bereikt als veroorzaakt door het golfveld. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat slechts een klein aantal van de golven die op de bekleding terecht komen ook een klap veroorzaakt.

1.2. Schematisering van de constructie

Voor de schematisering van de constructie is die van een plaat liggende op een elastisch reagerende ondergrond gekozen, zie figuur 1.3.

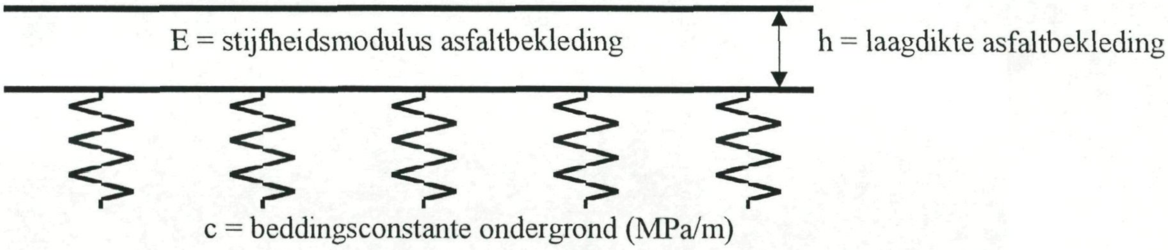


Fig. 1.3; Schematisering constructie

De drie veranderlijken in het systeem zijn:

- De stijfheidsmodulus E van het asfaltpakket (N/m^2);
- De dikte h van het asfaltpakket (m);
- De beddingsconstante c van de ondergrond (MPa/m).

De beddingsconstante geeft het verband weer tussen de vervorming van de ondergrond op een locatie (x,y) en de optredende spanning:

$$\sigma_z\,(x,y) = c\,.\,w\,(x,y)$$

waarin:

$\sigma_z(x,y)$ = optredende verticale normaalspanning ter plaatse van de onderzijde van de ligger op locatie (x,y) in (N/m^2);

c = beddingsconstante van de ondergrond (N/m^3);

w(x,y) = verticale verplaatsing van de onderzijde van de ligger op locatie (x,y) in (m).

Door de keuze van het assenstelsel varieert de verticale verplaatsing alleen in x-richting.

1.3. Dimensionering

1.3.1. Model voor een plaatvormige bekleding met een enkelvoudige lijnbelasting

Een brekende golf zal een kortdurende stootbelasting uitoefenen op een plaatvormige asfaltbekleding. In het model wordt de golfklap – omdat de lengte zeer groot is ten opzichte van de breedte – geschematiseerd als een lijnbelasting die blokvormig in de tijd is, zie figuur 1.4.

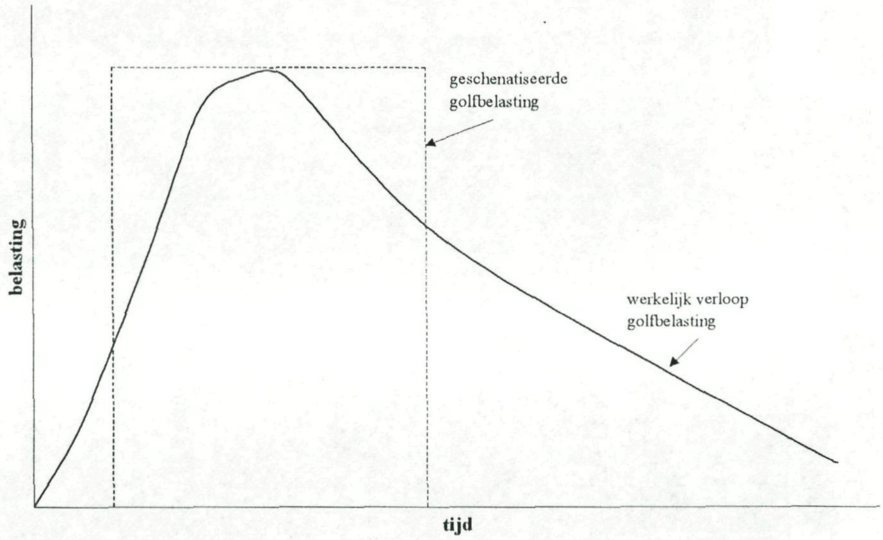


Fig. 1.4; Schematisering van de belasting

De ondergrond wordt voorgesteld door een veermodel. De massa van de ondergrond wordt bij de massa van de plaat gevoegd.

De doorbuiging van de plaat ten gevolge van een op t = 0 aangrijpende lijnbelasting P (N/m) kan worden beschreven met de differentiaalvergelijking:

$$K\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + cw = 0$$

met:

$$K = \frac{E.h^3}{12\left(1-\upsilon^2\right)}$$

$$-K\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{P}{4\sqrt[4]{\frac{c}{4K}}}$$

waarin:

E = stijfheidsmodulus van het asfalt (N/m^2)
h = dikte van de plaat (m)
ν = constante van poisson van het asfalt (-)
M = massa van de plaat + een meewerkende grondmassa (kg/m^2)
c = veerconstante van de ondergrond (N/m^3)
w = doorbuiging van de plaat (m)
t = tijd (s)
x = horizontale as (m)

Indien t → ∞ dempt d^2w/dt^2 uit. Met andere woorden de zakkingslijn nadert een eindwaarde w_∞. De oplossing van de vergelijking wordt dan:

$$m(x) = \frac{P}{4}\frac{e^{-\beta x}\left(\sin \beta x - \cos \beta x\right)}{\beta}$$

het moment is maximaal op x=0

$$m(0) = \frac{P}{4\beta}$$

waarin

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3c\left(1-\nu^2\right)}{Eh^3}}$$

De optredende buigspanning is gelijk aan:

$$\sigma = \frac{m}{W}$$

waarin:

σ = de optredende buigspanning (N/m^2);
W = het weerstandsmoment = 1/6h^2 (m^2);
h = de laagdikte (m).

Hieruit kan de laagdikte worden bepaald:

$$h^2 = \frac{6m}{\sigma_b}$$

waarin:

σ_b = de bezwijkspanning van het asfalt (N/m^2)

ofwel:

$$h = \sqrt[5]{\frac{P^4}{\sigma_b^4} A} \quad \text{met } A = \frac{27S}{16(1-\nu^2)c}$$

hierin is E vervangen door S, die de stijfheidsmodulus van asfalt voorstelt.

Hiermee is een formule verkregen voor de dimensionering van een asfaltbekleding op een lijnlast (bijvoorbeeld een golfklap) van een enkelvoudige grootte P. In werkelijkheid is de golfbelasting geen lijnbelasting maar een verdeelde belasting. Hiervoor is een reductiefactor van 0,75 toegepast. Dus voor één golfklap:

$$h = 0{,}75\sqrt[5]{\frac{P^4}{\sigma_b^4} A}$$

1.3.2. Berekening van de laagdikte onder invloed van meer dan één golfklap (vermoeiing)

In werkelijkheid zal een dijkbekleding door een scala aan verschillende golfbelastingen worden belast die elk een aantal malen voorkomen.

Indien een plaat een zekere dikte h bezit dan bedraagt de optredende maximale spanning in de plaat ten gevolge van een golfklap met een bepaalde grootte P:

$$\sigma = P\left(\frac{A}{h^5}\right)^{1/4}$$

Aangenomen wordt nu dat alle golfklappen dezelfde duur hebben en dat de temperatuur constant is. Voor een bepaald mengseltype is dan de factor:

$$\left(\frac{A}{h^5}\right)^{1/4} = \text{constant}$$

ofwel $\sigma = Pc$ waarin c een constante voorstelt.

Asfalt is een vermoeiingsgevoelig materiaal. Een spanning σ kan een aantal malen N door de bekleding worden opgenomen voordat bezwijken door vermoeiing optreedt. Als algemene vermoeiingsformule wordt vaak aangenomen:

$$N = k\sigma^{-a}$$

waarin:

k en a = constanten voor een bepaald mengseltype met een bepaalde stijfheidsmodulus;
N = aantal belastingen met grootte σ dat de bekleding kan hebben.

Aangenomen wordt dat de regel van Miner geldt. Deze stelt dat er een lineair verband is tussen de optredende schade en het aantal lastherhalingen. Bij n lastherhalingen met optredende spanning σ en bijbehorende vermoeiingslevensduur N heeft een schade M tot gevolg met grootte:

$$M = \frac{n}{N}$$

Breuk of vermoeiing treedt dan op als de som van alle schades de waarde 1 bereikt. Bij combinatie van telkens n_i belastingwisselingen met een amplitude σ_i wordt de breukgrens bereikt wanneer voldaan is aan de voorwaarde:

$$\sum_{i=1}^{j} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad \text{ofwel :} \quad \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + ... + \frac{n_j}{N_j} = 1$$

Met $N = k\sigma^{-a}$ en $\sigma_i = c.P_i$ volgt:

$$n_1(P_1c)^a + n_2(P_2c)^a + ... + n_j(P_jc)^a = k$$

met

$$c = (\frac{A}{h^5})^{1/4}$$

volgt

$$h = \sqrt[5]{\left[\frac{\sum_{i=1}^{j} n_i P_i^a}{k}\right]^{4/a} A}$$

Hiermee is een formule verkregen voor de berekening van de laagdikte van een asfaltbekleding onder een variabel aantal golfklappen met verschillende grootte en aantallen van voorkomen.

1.3.3. Toepassing bij variërende golfhoogten en waterstanden, de 'superstorm'

In de voorgaand afgeleide formule stelt P_i een golfklap voor die n_i maal voorkomt tijdens de levensduur van de bekleding. Om deze grootheden te kunnen bepalen moet het golfbeeld voor de dijk bekend te zijn. Tevens is het zinvol de plaats te weten waar de golfklappen het talud treffen, zodat niet het gehele golfgebied in rekening hoeft te worden gebracht. Verder moet er rekening worden gehouden dat niet alle golven een klap veroorzaken.

Gebruikelijk is het om een dijk te dimensioneren op ontwerpomstandigheden. Als ontwerpomstandigheid kan worden gekozen voor een 'superstorm'. De dijkbekleding moet een 'superstorm' kunnen weerstaan. De exceptionele superstormomstandigheid moet nog kunnen worden opgenomen door een in de loop van de tijd, door het voorafgaande golfbeeld, verzwakt materiaal. Met de regel van Miner kan dit worden geschreven als:

$$n_1(P_1c)^a + n_2(P_2c)^a + \dots n_j(P_jc)^a + n_s(P_sc)^a = k$$

P_1 t/m P_j stellen de golfklappen voor met resp. n_1 t/m n_j als aantallen van voorkomen, die gedurende het leven van de bekleding, bij een bepaalde waterstand, erop hebben gewerkt. P_s stelt de golfklap voor die de 'superstorm' bij een bepaalde waterstand representeert, en n_s het aantal malen dat deze klap moet worden opgenomen.
Ofwel:

$$(P_sc)^a\left[n_1\left(\frac{P_1}{P_s}\right)^a + n_2\left(\frac{P_2}{P_s}\right)^a + \dots n_j\left(\frac{P_j}{P_s}\right)^a + n_s\right] = k$$

met:

$$c = \left(\frac{A}{h^5}\right)^{1/4}$$

volgt:

$$h = \sqrt[5]{\frac{P_s n_s^{4/a}}{k^{4/a}} A \left[\sum \frac{n_i}{n_s} \left(\frac{P_i}{P_s}\right)^a + 1 \right]^{4/a}}$$

Dit wordt geschreven als:

$$h = f \sqrt{\frac{P_s^4 n_s^{4/a}}{k^{4/a}} A}$$

De formule is nu onderverdeeld in:

1. een factor *f* die als het ware de vermoeiing van het asfalt karakteriseert, veroorzaakt door de vóór de superstorm voorafgaande belastingen. Deze factor wordt de vermoeiingsfactor genoemt.
2. de term $[P_s^4 n_s^{4/a} A / k^{4/a}]^{0,2}$ waarmee de dimensionering van de laagdikte onder ontwerpomstandigheden (de 'superstorm') kan plaatsvinden. Dit wordt het dimensioneringsgedeelte van de golfklapformule genoemd.

Met de ontwerpgolfklap P_s met een maatgevend aantal belastingsherhalingen n_s wordt een bekledingsdikte berekend, die in geval van vermoeiing veroorzaakt door een voorafgaande belasting, gecorrigeerd wordt met de factor *f*.

1.3.3.1. Bepaling van het dimensioneringsgedeelte van de golfklapformule

Het dimensioneringsgedeelte van de golfklapformule luidt:

$$h = \sqrt{\frac{P_s^4 n_s^{4/a}}{k^{4/a}} A}$$

Dimensionering gebeurt op een ontwerpomstandigheid, de 'superstorm'. De 'superstorm' wordt gekarakteriseerd door een golfveld met een constante significante golfhoogte H_s. De golfklap P_s is nu direct af te leiden uit H_s. Tevens wordt aangenomen dat de golven in het betreffende golfveld gekarakteriseerd door H_s een Rayleigh-verdeling hebben, zie figuur 1.5.

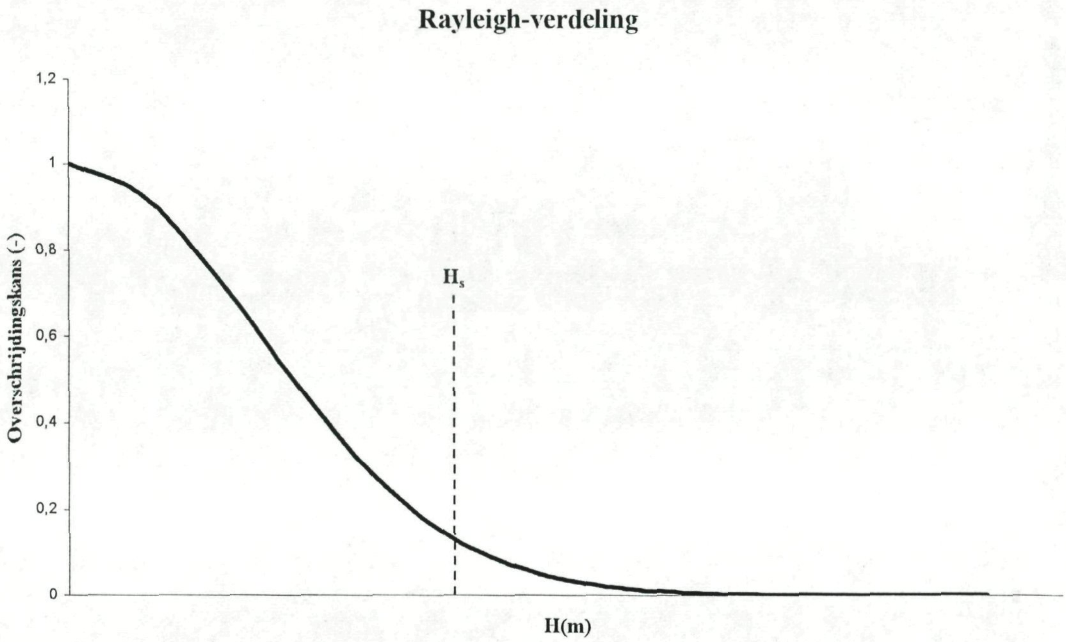


Fig. 1.5; Rayleigh-verdeling

De kans dat een golf met hoogte H in een interval met breedte ΔH voor komt bedraagt:

$$P(H - \Delta H / 2) - P(H + \Delta H / 2)$$

met:

$$P = \rho_w gtHb$$

waarin:

t = een bepaalde waarde afhankelijk van de taludhelling;

b = breedte waarover de golfklap werkt (b=H/q);

q = een bepaalde factor.

Als m het totaal aantal golven voorstelt gedurende de ‘superstorm’ kan per intervalbreedte ΔH_i bepaald worden hoeveel golflasten n_i van hoogte H_s deze intervalbreedte representeert. Sommatie hiervan levert de totale hoeveelheid golven met hoogte H_s van de ‘superstorm’, n_s. Voor a =5, een gebruikelijke waarde voor asfalt, wordt dit:

$$n_s = 3{,}75m$$

De totale hoeveelheid golven in een ‘superstorm’, kan bepaald worden uit:
waarin:

$$m = \frac{T}{T'}$$

T = duur van de ‘superstorm’;

T' = gemiddelde periode van de golven in het golfveld.

Uit het waterstandsverloop tijdens een 'superstorm' kan de maatgevende taludstrook en de golfduur bepaald worden, zie figuur 1.6.

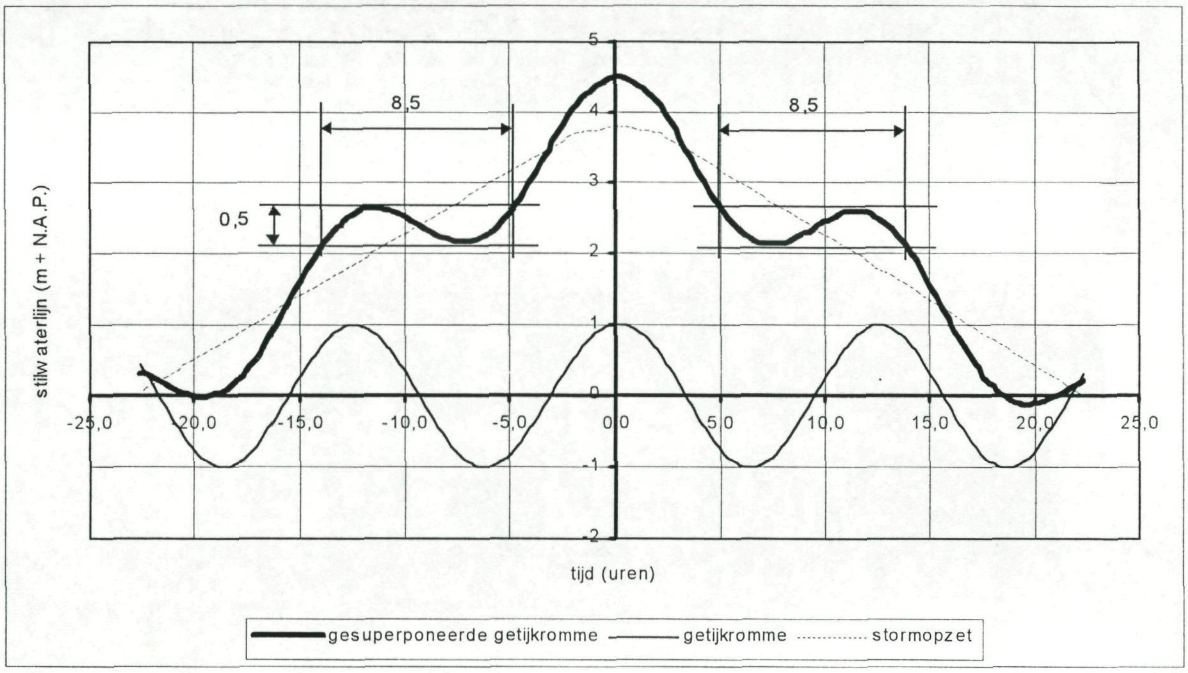


Fig. 1.6; Verloop waterstand tijdens ontwerpstorm

Voor andere bepaling van n_s kan gebruikt worden gemaakt van empirische relaties tussen significante golfhoogte H_s en de golfperiode T':

voor de Noordzee : $T' = 3{,}94 H_s^{0{,}376}$
voor de monding Oosterschelde : $T' = 3{,}55 H_s^{0{,}45}$
$T' = 3{,}36 H_s^{0{,}48}$

1.3.3.2. Bepaling van de vermoeiingsfactor uit de golfklapformule

De vermoeiingsfactor wordt voorgesteld door de parameter *f*. er wordt het volgende gesteld:

1. Bevindt de bekleding, of een gedeelte ervan, zich in een gebied dat onder normale omstandigheden niet of slechts

zelden wordt belast (maar waarop wel de 'superstorm' omstandigheden van toepassing zijn), dan wordt voor de factor $f = 1$ genomen. Dit is bijvoorbeeld het gebied boven de springtijzone van een dijk.

2. Bevindt de bekleding, of een gedeelte ervan, zich in een gebied dat onder normale omstandigheden wel aan golfbelastingen is blootgesteld, dan speelt vermoeiing een rol en wordt voor de factor f een waarde aangenomen ongelijk aan 1. Dit geldt bijvoorbeeld voor het gebied in de springtijzone van een dijk. Hierop zal niet verder worden ingegaan.

1.4. Het brekercriterium

De golfhoogte wordt begrensd door het brekercriterium. Dit betekent dat bij een gegeven waterdiepte golven hoger dan een bepaalde waarde zullen breken. Hiervoor wordt de volgende arbitraire formule aangehouden:

$$H_{breek} = 0{,}6.\,\text{waterdiepte}$$

Hierin is H_{breek} de maximale golfhoogte bij de gegeven waterdiepte. Alle golven groter dan H_{breek} worden zullen een hoogte krijgen gelijk aan H_{breek}.

2. TOEPASSING VAN EEN DRIEHOEKSLAST

De eerder afgeleide golfklapformule is afgeleid van de maximale optredende spanning onder de lijnlast. Na onderzoek naar het gedrag van asfaltbekledingen onder een golfbelasting is gebleken dat een golflast beter kan worden geschematiseerd door een driehoeksbelasting met een maximale drukstoot p_{max} en een bandbreedte gelijk aan de golfhoogte H, zie figuur 2.1.

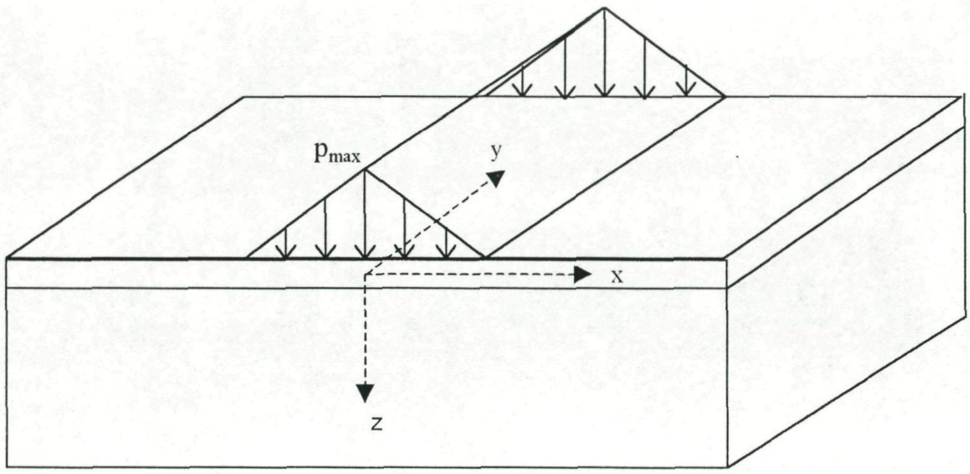


Fig. 2.1; Driehoekslast

De eerder afgeleide maximale trekspanning onderin het asfaltpakket zal hierdoor wijzigen. Ter vergelijking:

Lijnlast:

$$\sigma = \frac{p_{max}}{4\beta}\frac{6}{h^2}$$

met

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3c(1-\nu^2)}{Sh^3}}$$

Driehoekslast:

$$\sigma = \frac{p_{max}}{4\beta^2 \beta z}\left[1 - e^{(-\beta z)}(\cos(\beta z) + \sin(\beta z))\right]\frac{6}{h^2}$$

waarin:

σ = optredende trekspanning aan de onderzijde van de bekleding (MPa);

p_{max} = maximale drukstoot (MPa);

h = laagdikte (m);

z = halve breedte driehoeksbelasting (=0,5H);

c = beddingsconstante van de ondergrond (MPa/m);

S = stijfheidsmodulus van het asfalt (MPa);

ν = constante van Poisson van het asfalt (-).

De maximale drukstoot wordt als volgt gedefinieerd:

$$p_{\max} = \rho_w g q H$$

waarin

q = stootfactor afhankelijk van de taludhelling (-).

De spanningsverdeling langs de x-as kan wordt gegeven door de volgende formules:

$$\sigma = -\frac{p_{\max}}{8\beta^2 \beta z}\left[\begin{array}{l} -\sin(\beta x) * \left\{e^{\beta x} - e^{-\beta x}\right\} e^{-\beta z}\{\cos(\beta z) - \sin(\beta z)\} + \cos(\beta x) * \left\{e^{\beta x} + e^{-\beta x}\right\} e^{-\beta z}\{\cos(\beta z) + \sin(\beta z)\} - \\ 2e^{-\beta x} * \{\sin(\beta x) + \cos(\beta x)\} \end{array}\right] \cdot \frac{6}{h^2}$$

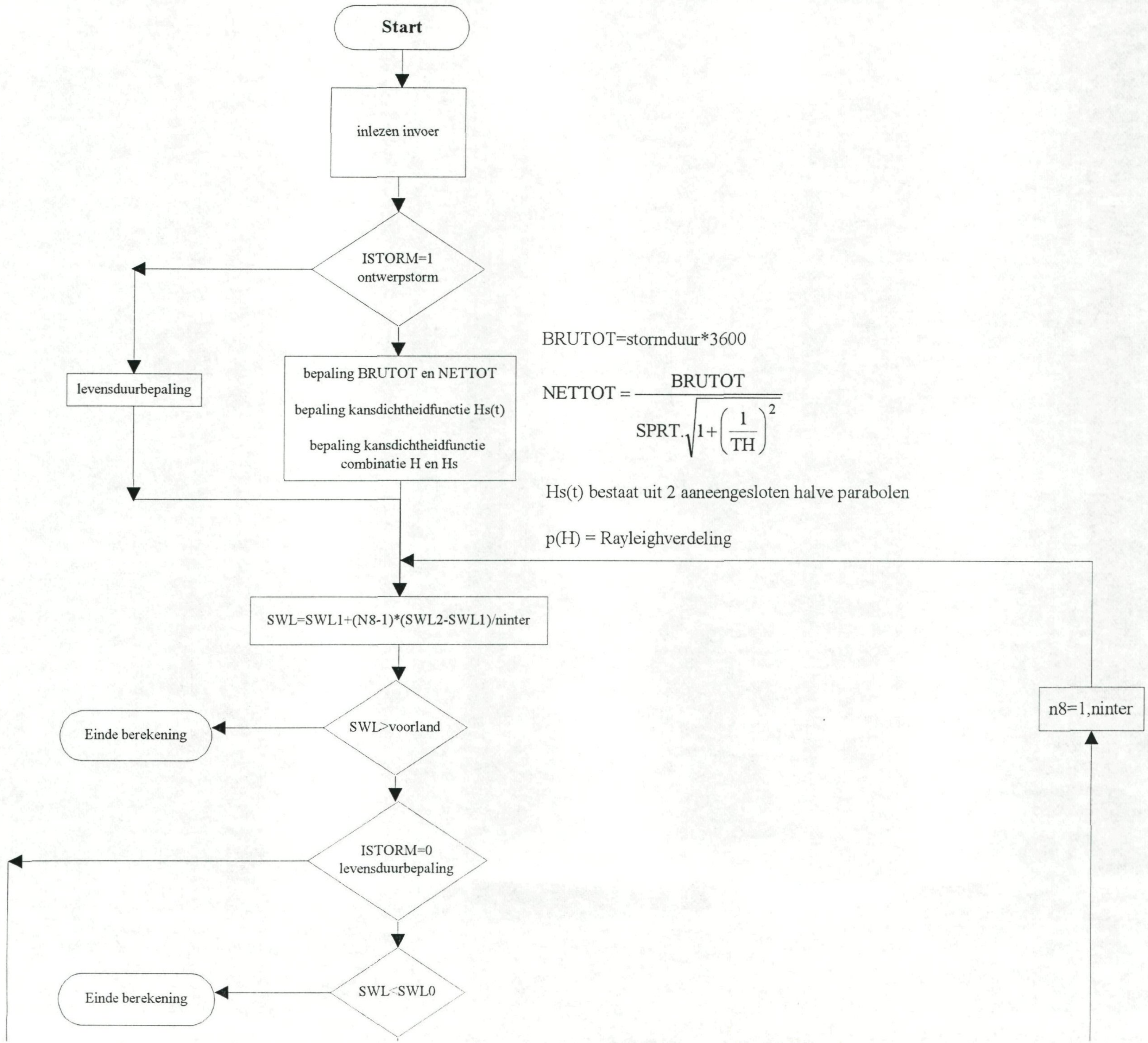
voor x < z en

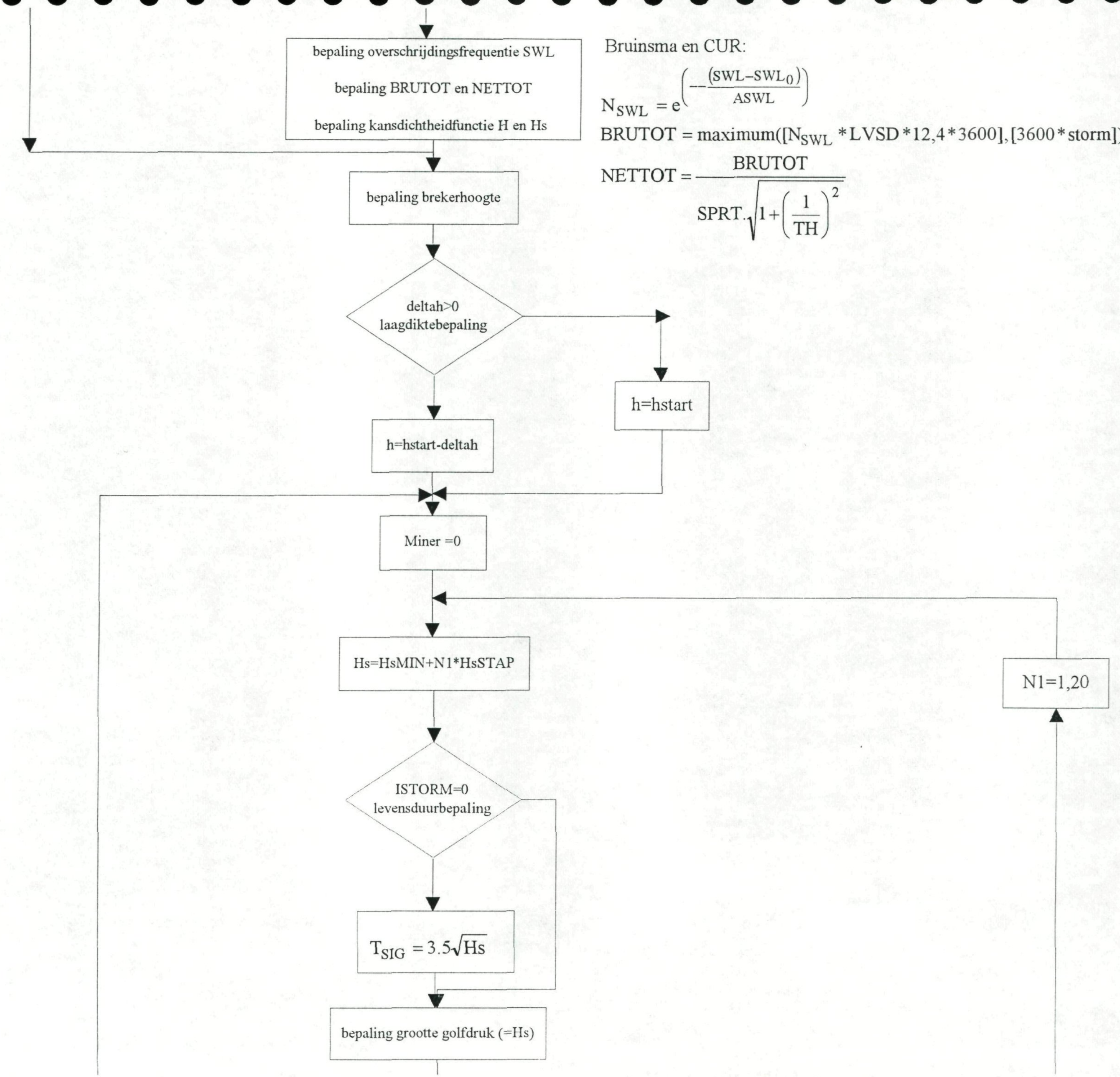
$$\sigma = -\frac{p_{\max}}{8\beta^2 \beta z} . e^{-\beta x}\left[\begin{array}{l} \cos(\beta x) * \left\{e^{\beta z}\{\cos(\beta z) - \sin(\beta z)\} + e^{-\beta z}\{\cos(\beta z) + \sin(\beta z)\}\right\} + \\ \sin(\beta x) * \left\{e^{\beta z}\{\cos(\beta z) + \sin(\beta z)\} + e^{-\beta z}\{\cos(\beta z) - \sin(\beta z)\}\right\} - 2\{\cos(\beta x) + \sin(\beta x)\} \end{array}\right] \cdot \frac{6}{h^2}$$

voor x > z

Appendix B

Stroomschema van het golfklapmodel


Start
inlezen invoer
ISTORM=1
ontwerpstorm
levensduurbepaling
bepaling BRUTOT en NETTOT
bepaling kansdichtheidfunctie Hs(t)
bepaling kansdichtheidfunctie
combinatie H en Hs
BRUTOT=stormduur*3600
$NETTOT = \frac{BRUTOT}{SPRT.\sqrt{1+\left(\frac{1}{TH}\right)^2}}$
Hs(t) bestaat uit 2 aaneengesloten halve parabolen
p(H) = Rayleighverdeling
SWL=SWL1+(N8-1)*(SWL2-SWL1)/ninter
n8=1,ninter
SWL>voorland
Einde berekening
ISTORM=0
levensduurbepaling
SWL<SWL0
Einde berekening

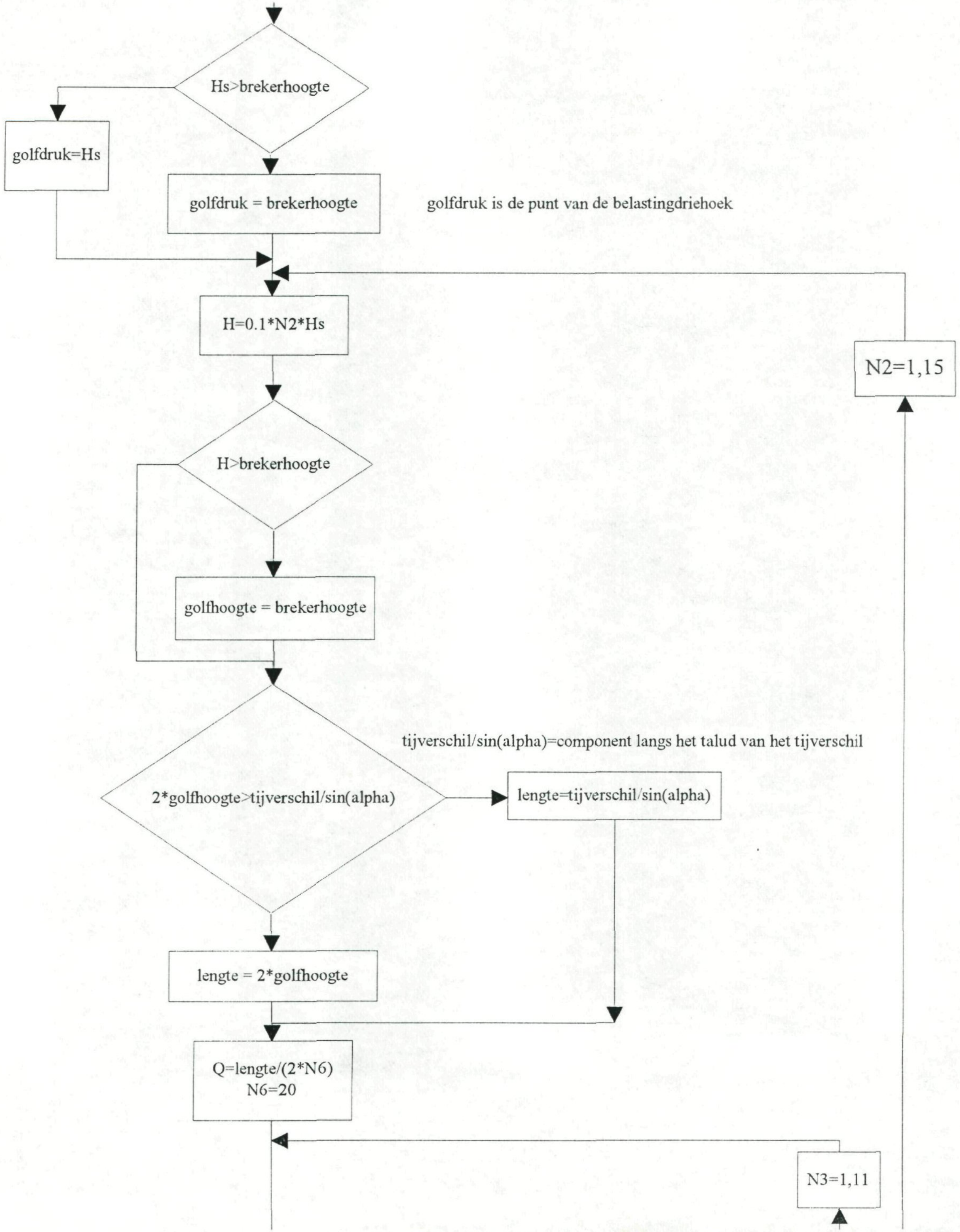


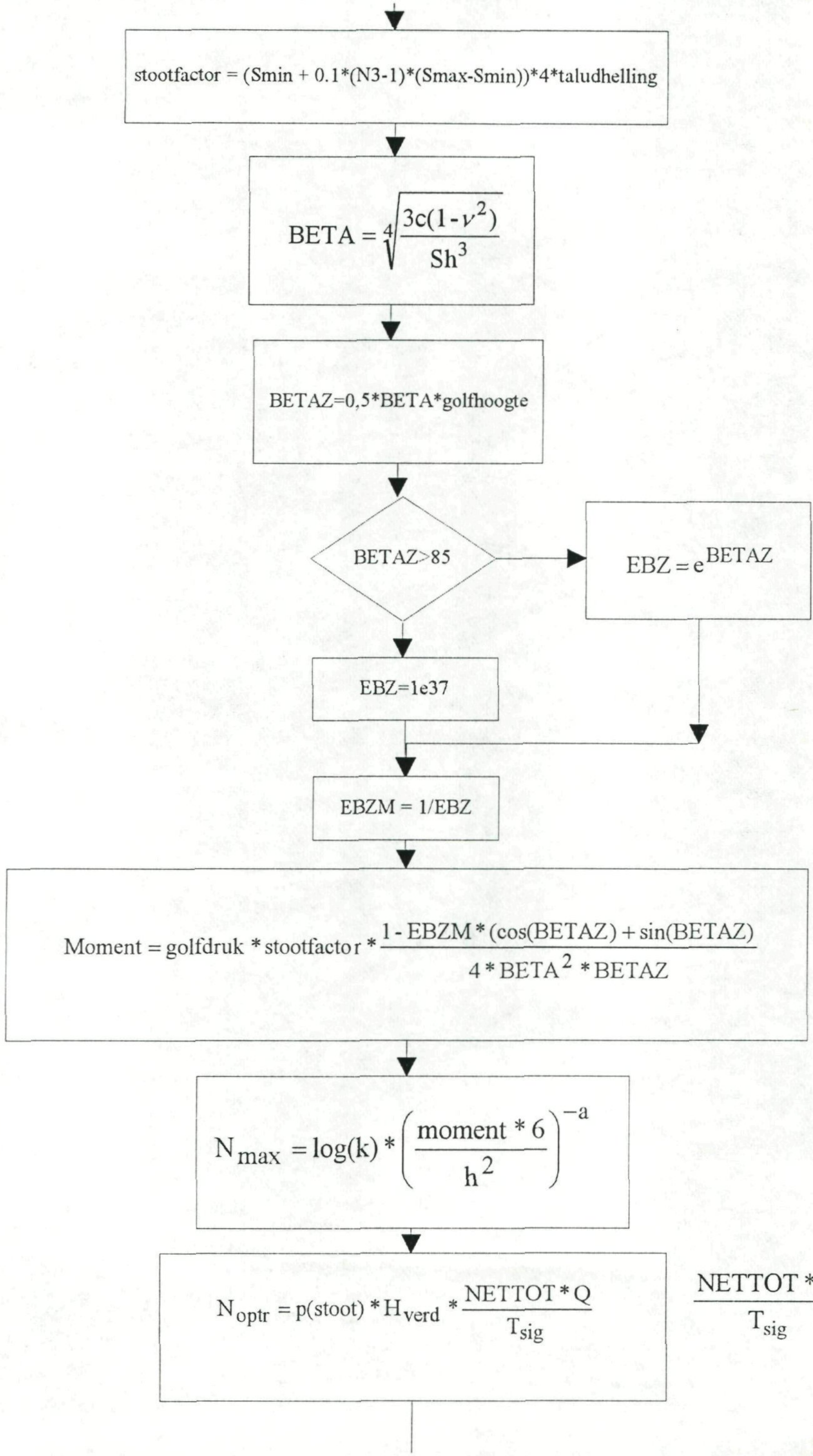
Bruinsma en CUR:

$$N_{SWL} = e^{\left(-\frac{(SWL-SWL_0)}{ASWL}\right)}$$

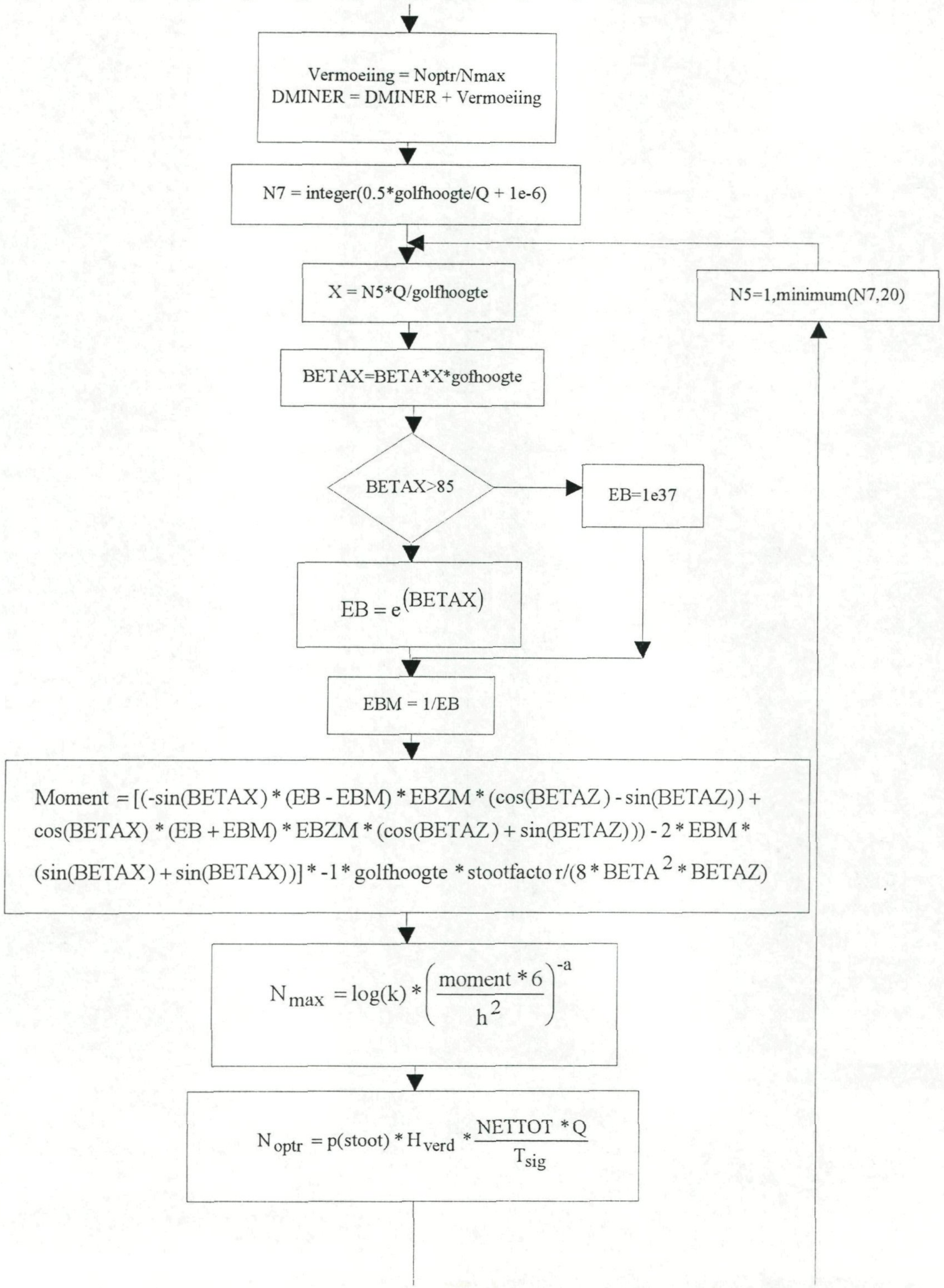
$$BRUTOT = \text{maximum}([N_{SWL} * LVSD * 12{,}4 * 3600], [3600 * storm])$$

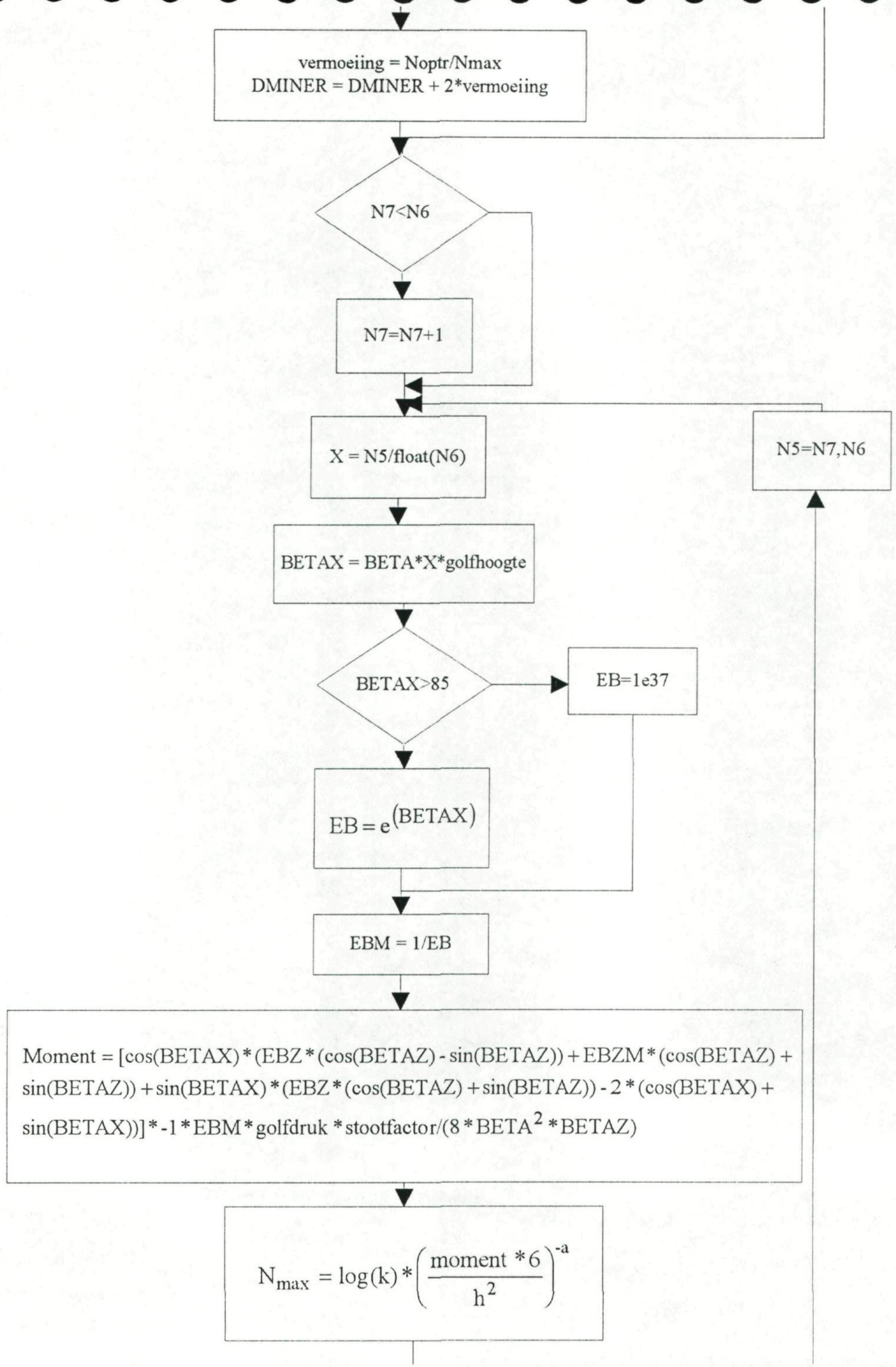
$$NETTOT = \frac{BRUTOT}{SPRT.\sqrt{1+\left(\frac{1}{TH}\right)^2}}$$

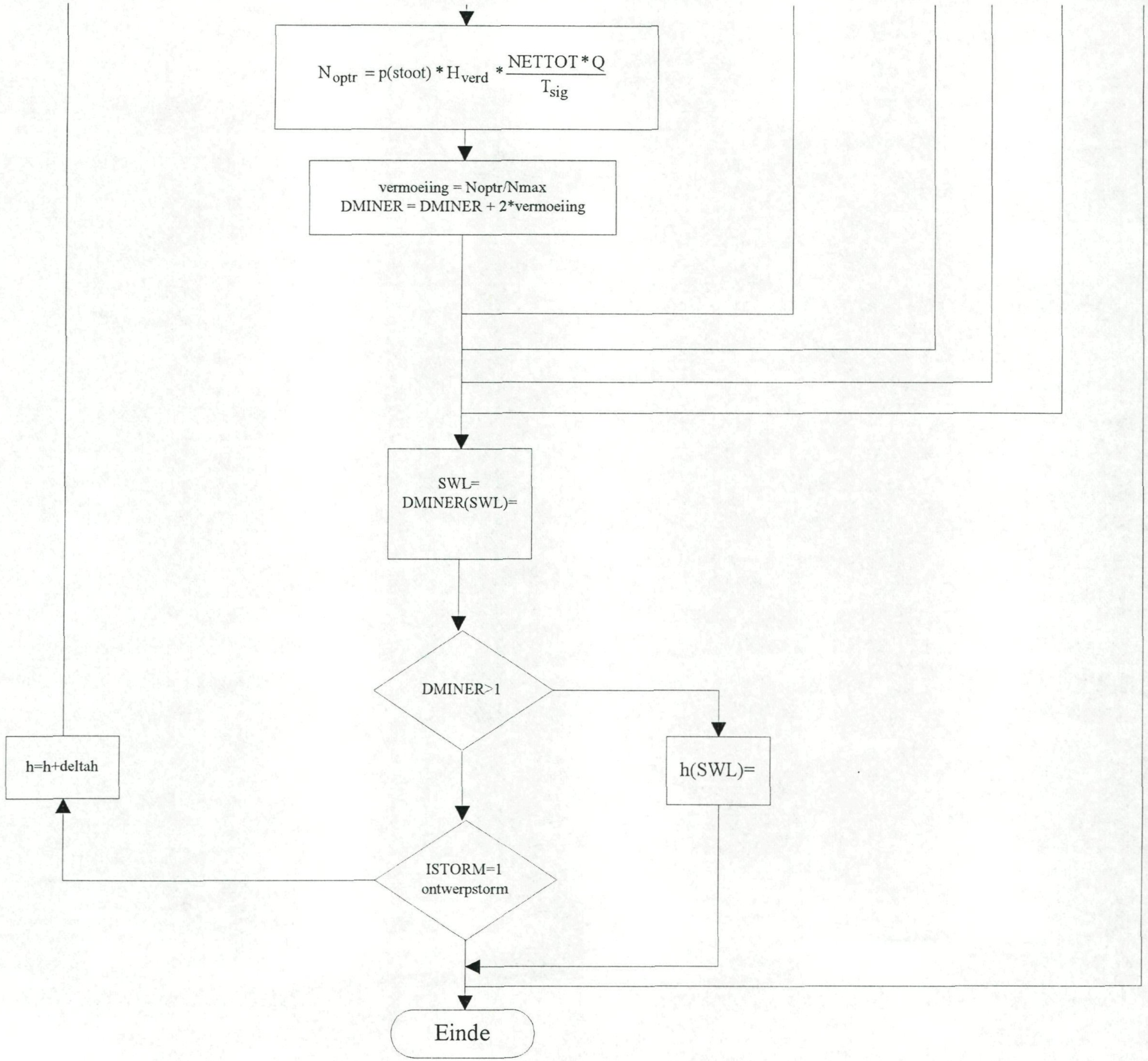

Hs>brekerhoogte
golfdruk=Hs
golfdruk = brekerhoogte
golfdruk is de punt van de belastingdriehoek
H=0.1*N2*Hs
N2=1,15
H>brekerhoogte
golfhoogte = brekerhoogte
tijverschil/sin(alpha)=component langs het talud van het tijverschil
2*golfhoogte>tijverschil/sin(alpha)
lengte=tijverschil/sin(alpha)
lengte = 2*golfhoogte
Q=lengte/(2*N6)
N6=20
N3=1,11



$$\frac{NETTOT * Q}{T_{sig}} = \text{hoeveelheid klappen op beschouwd niveau}$$


Vermoeiing = Noptr/Nmax
DMINER = DMINER + Vermoeiing
N7 = integer(0.5*golfhoogte/Q + 1e-6)
X = N5*Q/golfhoogte
N5=1,minimum(N7,20)
BETAX=BETA*X*gofhoogte
BETAX>85
EB=1e37
$EB = e^{(BETAX)}$
EBM = 1/EB
Moment = [(-sin(BETAX) * (EB - EBM) * EBZM * (cos(BETAZ) - sin(BETAZ)) + cos(BETAX) * (EB + EBM) * EBZM * (cos(BETAZ) + sin(BETAZ))) - 2 * EBM * (sin(BETAX) + sin(BETAX))] * -1 * golfhoogte * stootfacto r/(8 * BETA^2 * BETAZ)
$N_{max} = \log(k) * \left(\frac{moment * 6}{h^2}\right)^{-a}$
$N_{optr} = p(stoot) * H_{verd} * \frac{NETTOT * Q}{T_{sig}}$


vermoeiing = Noptr/Nmax
DMINER = DMINER + 2*vermoeiing
N7<N6
N7=N7+1
X = N5/float(N6)
N5=N7,N6
BETAX = BETA*X*golfhoogte
BETAX>85
EB=1e37
$EB = e^{(BETAX)}$
EBM = 1/EB
Moment = [cos(BETAX) * (EBZ * (cos(BETAZ) - sin(BETAZ)) + EBZM * (cos(BETAZ) + sin(BETAZ)) + sin(BETAX) * (EBZ * (cos(BETAZ) + sin(BETAZ)) - 2 * (cos(BETAX) + sin(BETAX))] * -1 * EBM * golfdruk * stootfactor/(8 * BETA^2 * BETAZ)
$N_{max} = \log(k) * \left(\frac{\text{moment} * 6}{h^2}\right)^{-a}$



$N_{optr} = p(stoot) * H_{verd} * \frac{NETTOT * Q}{T_{sig}}$
vermoeiing = Noptr/Nmax
DMINER = DMINER + 2*vermoeiing
SWL=
DMINER(SWL)=
DMINER>1
h=h+deltah
h(SWL)=
ISTORM=1
ontwerpstorm
Einde

netherlands
pavement
consultants

NPC
Winthontlaan 28
Postbus 2756
3500 GT Utrecht
telefoon 030 2876950
telefax 030 2887844