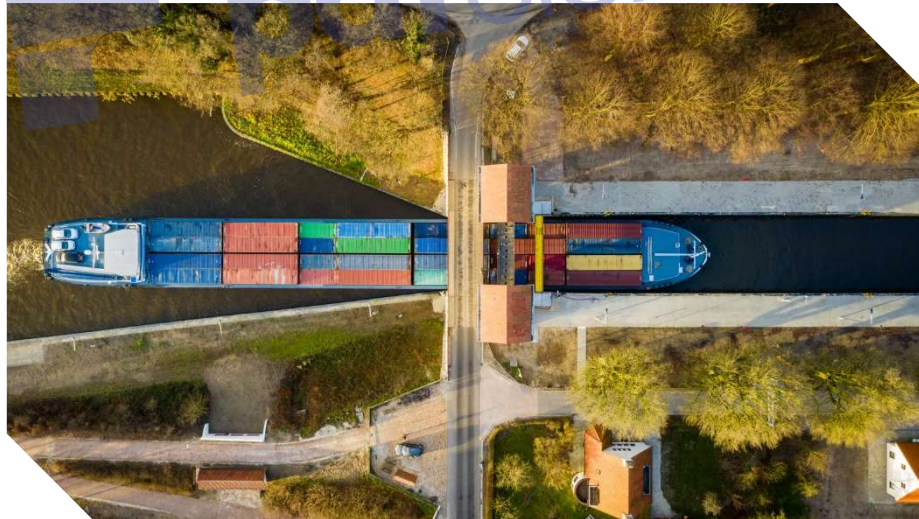


Dossier aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen

REALISATIE ONTWERPTOOL



Christian de Kruyf & Tristan Vlijm

TBI MOBILIS B.V. | APELDOORN | AFSTUDEERONDERZOEK CIVIELE TECHNIEK



Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerdossier 'Aanvaarbeveiligingen schutsluizen'. Dit rapport is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Windesheim te Zwolle. Het onderzoek heeft plaatsgevonden vanaf 28 januari tot en met 31 mei 2019. Het afstudeeronderzoek is geschreven in opdracht van TBI-Mobilis B.V.

Graag willen wij onze begeleiders Johan van Sloten van het Windesheim en André Bouman van TBI-Mobilis BV, bedanken voor de deskundige begeleiding en adviezen die zij ons gegeven hebben tijdens de afstudeerperiode. Daarnaast bedanken wij de bedrijven welke open stonden voor het beantwoorden van vragen.

We wensen u veel leesplezier,

Christian de Kruyf en Tristan Vlijm

Apeldoorn, juni 2019



Samenvatting

Schepen maken gebruik van schutsluizen om het verschil tussen twee waterstanden te overbruggen. In de kolk van de schutsluis wordt de waterstand verhoogd of verlaagd tot het juiste waterniveau om het schip zijn weg te laten vervolgen. Voordat het schip hiervan gebruik maakt, dient het schip de sluisolk binnen te varen. Bij het binnenvaren van de sluisolk bestaat de kans dat het schip niet tijdig kan afremmen, waarna het in contact komt met het keermiddel, de sluisdeur. Indien het schip het keermiddel doet bezwijken, vervalt de waterkerende functie van de schutsluis. Het kan ook voorkomen dat het schip het keermiddel enkel beschadigd waardoor de schutsluis niet kan functioneren. Het gevolg hiervan is dat de opvolgende schepen gestremd worden. Een aanvaarbeveiliging wordt toegepast in schutsluizen om een niet tijdig binnenvarend schip tot stilstand te brengen voordat het in contact kan komen met het keermiddel. Hiermee wordt het risico op stremming van het scheepvaartverkeer verlaagd en wordt de waterveiligheidsfunctie verhoogd.

In Nederlandse binnenvaartschutsluizen zijn er verschillende soorten aanvaarbeveiligingen toegepast. Er zijn aanvaarbeveiligingen welke op een vast niveau zitten en er zijn dynamische – meegaan met de waterstand – beveiligingen. De aanvaarbeveiliging kan gebruik maken van een installatie om een schip te doen stoppen of doormiddel van het vervormen van de aanvaarbeveiliging zelf. De vervorming van de aanvaarbeveiliging geeft een remweg van het schip, de afstand tot het schip stil komt liggen. Een aantal bestaande varianten zijn beschouwd op deze punten.

Uit interviews is gebleken dat er enkele tekortkomingen zijn bij de bestaande varianten. De tekortkomingen zijn ik kaart gebracht en beschreven. Met deze kennis zijn een zestal varianten ontwikkeld, welke een mogelijke optimalisatie van de huidige varianten zijn. De bestaande en de optimalisatie varianten zijn doormiddel van een Trade Off Matrix beoordeeld op verschillende criteria. Dit heeft geleid tot een vijftal varianten welke als meest geschikt zijn beoordeeld voor een mogelijke toepassing in de Nederlandse binnenvaarsluizen.

Schepen brengen een scheepsmassa met een vaarsnelheid in contact met de aanvaarbeveiliging, dit wordt uitgedrukt als de aanvaarenergie. De grootte van de aanvaarenergie bepaald voor een groot deel het ontwerp van de aanvaarbeveiliging. De aanvaarbeveiliging dient de aanvaarenergie te kunnen opnemen om het schip tot stilstand te brengen. Voor de maatgevende aanvaarenergie zijn er twee situaties beschouwd, de gemiddelde snelheid en de maximaal te behalen snelheid; de grenssnelheid. De maatgevende situatie dient vervolgens op de aanvaarkans te worden gecontroleerd, de kans op voorkomen van een aanvaring met deze aanvaarenergie.

De vijf varianten uit de Trade Off Matrix zijn verwerkt in een ontwerptool, de Aanvaarbeveiligingtool, welke een aanbeveling geeft op de best mogelijk toe te passen variant bij de ingevulde schutsluis gegevens. Er zijn enkele factoren welke van invloed zijn op het aangrijpingspunt van de belasting welke resulteren in de maatgevende oplegreactie van de variant. Daarnaast is per variant de methode van energieopname verschillend, deze is beschreven en berekend. De berekenmethode is toegevoegd in de Aanvaarbeveiligingtool. In de tool wordt automatische berekend of de maatgevende belasting optredend bij aanvaring kan worden opgenomen. De Aanvaarbeveiligingtool geeft voor de variant de meeste geschikte dimensionering weer en de resulterende krachten, oplegreacties, vrijkomend bij aanvaring. De op te nemen aanvaarenergie, de dimensionering en de vrijkomende krachten zijn per variant verschillend doordat er per variant andere factoren maatgevend zijn.

Als laatste onderdeel wordt er een schetsontwerp voorgedragen voor de Zuidersluis van Eefde, hierin is een advies opgenomen voor de toepassing van de aanvaarbeveiliging. De input van het ontwerp is het resultaat van de Aanvaarbeveiligingtool, deze casestudy geldt tevens als een validatie van de tool. De resultaten hieruit zijn opgenomen in de conclusie.

Abstract

Ships use locks to bridge the difference between two water levels. The water level is raised or lowered inside the lock chamber. Once at the correct level the ships are able to continue its voyage. Before either can take place, the ship must enter the lock chamber. During the entering off the lock chamber, there is a chance that the ship will not be able to be stopped in time and thus coming into contact with the lock gate. In case the ship causes the lock gate to fail, the function of the lock, retaining water, also fails. Besides this, a ship can just cause damages to the lock gate, which has as outcome that the lock cannot function for a period of time. The consequence of this is a complete obstruction of the lock for ships in either side off the lock. To prevent this from happening, a collision guard is used in front of lock gates and thus lowering the risk of a major obstruction and increases the water safety function of the lock.

Various types of collision guards have been used in Dutch inland locks. There are collision guards which have fixed level and there are dynamic guards, which go along with the water level in the lock chamber. A number of collision guards use an adjacent system to absorb the energy of a collision or by deformation of the guard itself. The deformation of the guard results in a braking zone of the ship, this is the distance in which the ship comes to a complete halt. A number of existing variants have been analysed based on these points.

Interviews have shown that there are some shortcomings with the existing variants. The shortcomings have been identified and described. With this knowledge, six new variants have been developed, which are possibly an optimization of the existing variants. All variants are assessed on various criteria using a Trade Off Matrix. Which resulted in five variants which have been selected as the most suitable for a possible application in Dutch inland locks.

Ships carry a ship his mass at a certain velocity when this comes in contact with a collision guard, this determines the collision energy. The size of the collision energy determines the design of the collision guard. The collision guard must be able to absorb all of the collision energy to bring the ship to a halt. There are two situations considered for the determination of the normative collision energy: the average speed and the maximum speed that can be achieved; the boundary speed. Afterwards, the normative situation must be checked for the chance of occurrence of the collision, this is the chance of a collision with this collision energy is occurring in a given time.

The five variants from the Trade Off Matrix have been included in a design tool, the collision guard tool. This tool gives a recommendation on the best possible variant to be used in the lock for which the tool has been filled in. There are a number of factors that determine the point of application of the load, which results in the normative support reaction of the variant. In addition, the method of energy absorption is different for each variant, this has been described and calculated. The calculation method has been included in the collision guard tool. The tool automatically calculates whether the normative load occurring in the event of a collision must be included. The collision guard tool shows the most suitable dimensioning for each variant and the forces/support reactions occurring during a collision. The normative collision energy, the dimensioning and the forces vary per variant because other factors are normative for each variant.

The final component of this research is a draft design for the South lock in Eefde, which includes advice for the application of collision guard. The input for the draft design is the result of the collision guard tool, this case study also serves as a validation of the tool. The results of the collision guard tool are included in the conclusion off the design study.

Begrippenlijst

Begrip	Definitie
Aanvaarbescherming	Verzamelnaam van alle constructies die zijn toegepast ter bescherming van kunstwerken tegen aanvaring
Aanvaarbeveiliging	Constructie toegepast in de sluiscolk ter beveiliging tegen aanvaring van de sluisdeur
Arrekeer voorziening	Veiligheidssysteem welke bij indrukken van een fender voorkomt dat deze terug veren/schieten
Benedenpand	Benedenstrooms gelegen waterweg, aansluitend op de schutsluis
Bovenpand	Bovenstrooms gelegen waterweg, aansluitend op de schutsluis
CEMT-klasse	Classificering voor binnenvaartschepen. Per klasse zijn de maximale afmetingen van het schip vastgelegd
Dynamisch	Meebewegend met het waterniveau
Elastische vervorming	Niet-permanente vervorming
Fender	Constructie om kinetische energie van een (afmerend-) schip op te vangen en op die manier schade aan een schip of de afmeerconstructie te voorkomen
Grenssnelheid	Maximaal te behalen snelheid van een schip in een waterloop
Minimumsluis	Sluiscomplex, bestaand uit één sluiscolk, waarin één maatgevend schip tegelijk gesloten kan worden
Nivelleren	Het waterpeil op het niveau brengen in de sluiscolk waarbij het schip kan uitvaren
Normaalkracht	Loodrechte component van een reactiekracht die op een voorwerp werkt
Oplegreactie	Kracht of een moment welke wordt uitgeoefend op een constructie, meestal in een oplegging
Plastische rotatiecapaciteit	De maximale plastische rotatie van het plastische scharnier
Plastische vervorming	Permanente vervorming
Remsysteem	Systeem die zorgt voor het remmen van schip tijdens aanvaring
RIMOB	Rimpelbuisobstakelbeveiliger, constructie die op autosnelwegen wordt gebruikt om obstakels te beschermen
Scharnier	Verbinding tussen twee delen welke rotaties tussen deze twee delen toelaat. Een scharnier kan geen moment opnemen
Stootbalk	Balk welke is aangebracht om belasting over te dragen aan de oplegging zonder daarbij te bezwijken
Stremming	Doorstroming van het scheepvaartverkeer plaatselijk geblokkeerd
Tweede keermiddel	Tweede sluisdeur gezien vanaf binnenvaren van de sluis
Trade off Matrix	Middel om keuzes te maken met behulp van criteria
Vervorming	Vormverandering van het materiaal veroorzaakt door een belasting

Symbolenlijst

Grootheid	Symbol	Eenheid	Toelichting
Vaste-stof mechanica			
Drukspanning	σ	Pa	$= N/mm^2$
Elasticiteitsmodulus	E	N/mm^2	
Kwadratisch oppervlaktemoment	I	mm^4	
Massa	m	kg	
Relatieve rek	ε	%	
Trekspanning	σ	Pa	$= N/mm^2$
Veerstijfheid	c, k	N/m	
Weerstandsmoment	W	mm^3	
Mechanica Algemeen			
Arbeid	W, A	J	= Nm
Dichtheid	ρ	kg/m^3	
Energie	E	Pa	= Nm
Energiestroom = vermogen	P	W	= J/s
Gewicht	G	N	
Gravitatieconstante	g	N/kg	= m/s^2
Hoekverdraaiing	ϕ, φ	rad	
Kinetische Energie	E_{kin}	J	= Nm
Kracht	F	N	
Kromming	κ	m^{-1}	
Moment	M	Nmm	
Normaalspanning	σ	Pa	$= N/mm^2$
Potentiële energie	E_{pot}	J	= Nm
Schuifspanning	τ	Pa	$= N/mm^2$
Verlenging	Δl	m	
Vloeispanning	f	Pa	$= N/mm^2$
Zakking, doorbuiging	δ	m	
Ruimte, tijd en periodieke verschijnselen			
Afstand	x	m	
Breedte	b	m	
Diameter	D, d	m	
Dikte	d	m	
Hoek	α	rad	
Hoogte	h	m	
Inhoud/Volume	V	m^3	
Lengte	l, a, b	m	
Oppervlakte	A	m^2	
Snelheid	v	m/s	
Straal	r	m	
Versnelling	a	m/s^2	
Scheepvaart			
Diepgang	d	m	
Remweg	S, x	m	

Inhoudsopgave

HOOFDSTUK 1 INLEIDING	12
1.1 Aanleiding voor het onderzoek	12
1.2 Probleemanalyse	12
1.3 Doel- en Vraagstelling	13
1.1.1 Doelstelling	13
1.1.2 Hoofdvraag	14
1.1.3 Deelvragen	14
1.4 Leeswijzer	14
HOOFDSTUK 2 ONDERZOEKSMETHODEN	15
2.1 Algemene onderzoeksmethoden	15
2.1.1 Te gebruiken methodes	15
2.2 Toe te passen onderzoeksmethoden per deelvraag	15
HOOFDSTUK 3 THEORIE	17
3.1 Schutsluis	17
3.2 Aanvaring	18
3.3 Sluis Eefde (L2T)	20
3.4 Van toepassing zijnde normen en voorschriften	20
HOOFDSTUK 4 FAALDEFINITIE	21
HOOFDSTUK 5 AANVAARBEVEILIGINGSCONSTRUCTIES	22
5.1 Soorten constructies	22
5.1.1 Bestaande varianten aanvaarbeveiliging	22
5.1.2 Toepassing in Nederlandse sluizen	22
5.2 Optimalisatie varianten aanvaarbeveiliging	22
5.2.1 Optimalisatie(s) ten opzichte van bestaande constructies	23
5.2.2 Varianten aanvaarbeveiligingen	23
5.3 Trade Off Matrix	28
5.3.1 Aspecten TOM	28
5.3.2 Resultaat	28
HOOFDSTUK 6 UITGANGSPUNTEN BELASTINGEN	29

6.1	Invloedfactoren voor de bepaling aanvaarenergie	29
6.1.1	Scheeps- en sluisgegevens	29
6.1.2	Scheepsaanbod	29
6.2	Belastingen	30
6.2.1	Bijzondere belastingen	31
6.2.2	Uitgangspunten ontwerp	31
HOOFDSTUK 7	AANVAARENERGIETOOL EN AANVAARKANS	32
7.1	Aanvaarenergietool	32
7.1.1	Situaties	32
7.1.2	Bepalen aanvaarenergie	33
7.1.3	Opstellen Aanvaarenergietool	33
7.1.4	Casestudy bepalen aanvaarenergie Zuidersluis Eefde	33
7.2	Aanvaarkans	35
7.2.1	Algemene aanvaarkans	35
7.2.2	Aanvaarkans bepalen	35
7.2.3	Casestudy Zuidersluis Eefde - Bepalen overschrijdingskans aanvaarenergie	36
7.3	Conclusie en aanbevelingen	36
HOOFDSTUK 8	INVLOEDFACTOREN	37
8.1	Invloedfactoren op de werking van de aanvaarbeveiliging	37
8.1.1	Aanvaarenergie	37
8.1.2	Aangrijpingspunt aanvaarenergie	37
8.2	Invloedfactoren geometrie aanvaarbeveiliging	38
8.2.1	Ruimte tussen stopstreep en keermiddel	38
8.2.2	Levensduur	39
8.2.3	Beschikbare ruimte	39
8.2.4	Plaatsingshoogte	40
8.3	Invloedfactoren toepassing aanvaarbeveiliging	41
8.3.1	Doorvaarthoogte	41
HOOFDSTUK 9	ONTWERPTOOL	42
9.1	Input	42
9.1.1	Advies toe te passen variant aanvaarbeveiliging	42
9.2	Buigzame ligger	43
9.2.1	Energieopname	43
9.2.2	Opleggingen	45
9.2.3	Resultaat en validatie	46
9.3	Stootbalk met dempers	47
9.3.1	Maatgevende situaties	47
9.3.2	Dimensionering stootbalk	48
9.3.3	Resultaat en validatie	48

9.3.4	Dempingscilinder	49
9.3.5	Rimpelbuis	50
9.4	Kabel met remcilinder	52
9.4.1	Maximale remweg (ondergrens)	52
9.4.2	Volledige benutting kabelkracht (bovengrens)	53
9.4.3	Kabelverlenging met kabelrek	53
9.4.4	Resultaat en validatie	54
9.5	Kunststofvangkabel	55
9.5.1	Reductie op de kabelrek	55
9.5.2	Energieopname	55
9.5.3	Kabel met voorspanning	57
9.5.4	Oplegreacties	57
9.5.5	Validatie	57
HOOFDSTUK 10	ONTWERPVOORSTEL ZUIDERSLUIJ EEFDE (CASESTUDY)	58
10.1	Advies toe te passen aanvaarbeveiliging	58
10.1.1	Resultaat Ontwerptool	58
10.1.2	Controle op trekkracht aan de kolkwanden (X-richting)	58
10.1.3	Inpassing constructie	59
10.1.4	Eindadvies	59
HOOFDSTUK 11	CONCLUSIE EN AANBEVELING	60
11.1	Conclusie	60
11.2	Discussie	61
11.3	Aanbevelingen	63
VERWIJZINGEN		64
Bronvermelding vergelijkingen, afbeeldingen en figuren		66

Hoofdstuk 1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

Bij het overkoepelende onderwerp binnenvaarsluizen is er in overleg met TBI-Mobilis BV een passend onderdeel gekozen. Onderdelen met betrekking op het onderwerp zijn: de sluisdeur, geleide- of remmingswerken of aanvaarbeveiliging. Daarnaast is het project Sluis Eefde^a in realisatie gedurende de afstudeerperiode, hier wordt de nodige kennis en achtergrondinformatie vandaan gehaald. Na literatuurstudies en verschillende brainstormsessies met betrekking tot de verschillende onderdelen is er gekozen om het onderzoek te richten op aanvaarbeveiligingen bij schutsluizen. Op het gebied van aanvaarbeveiliging is er vraag naar te nemen ontwerpbeslissingen en is er nog ruimte voor innovatie.

“Sluis Eefde paar uur gestremd door aanvaring met... aanvaarbalk”^b

In de dagen voorafgaand aan het tweede voortgangsgesprek heeft er een aanvaring plaats gevonden met de aanvaarbeveiliging van de Zuidersluis te Eefde. De beveiliging kon het ongeladen schip nog net tot stilstand brengen voor de sluisdeur. Het is denkbaar dat wanneer dit een volgeladen schip was de gevolgen groter waren. Dit maakt het onderwerp helemaal interessant, want als een aanvaarbeveiliging niet een volgeladen schip tegenhoudt, waar dient deze dan voor? Aan het eind van het onderzoek werd het nogmaals duidelijk dat een aanvaring geen sporadisch verschijnsel is, op 5 mei werd de aanvaarbeveiliging van Sluis Eefde wederom aangevaren. Dit zijn twee voorvallen bij Sluis Eefde in vrij korte periode, die het belang van een aanvaarbeveiliging doet bevestigen. In Nederland bestaan tientallen sluizen van een gelijk formaat of groter dan Sluis Eefde. Het is te verwachten dat een aanvaring bij iedere sluis wel eens voorkomt. In de toekomst is het denkbaar dat er sluizen worden gerenoveerd waarbij er een aanvaarbeveiliging dient te worden geplaatst, er is vraag naar kennis betreffende dit onderwerp.

1.2 Probleemanalyse

Nederland is het land van water, het land ligt doorkruist met rivieren en kanalen. Bij kruisingen van waterkeringen en waterwegen zijn er sluizen in de rivieren en kanalen geplaatst, dankzij deze sluizen die al vele tientallen jaren meegaan is er scheepvaart mogelijk. Recentelijk zijn meerdere sluiscomplexen gerenoveerd of uitgebreid om de groei van de scheepvaart te baten, een greep hieruit: Sluis Delden, Sluis Hengelo en de Beatrixsluizen. Met de groei van scheepvaart neemt de kans op ongevallen rond schutsluizen toe, dit brengt de waterveiligheid in gedrang en zorgt mogelijk tot stremmingen van het scheepvaartverkeer. Aanvaarbeveiliging zijn toegepast om de kans dat een schip in contact komt met de sluisdeur en gevolgen van bezwijken te verkleinen.

Uit het Handboek voor het Ontwerp van Schutsluizen^c volgt dat er niet voor iedere schutsluis in Nederland een aanvaarbeveiliging wordt toegepast. De keuze volgt uit een afweging tussen investering en risico's. Dit kunnen risico's zijn zoals: faalkans van de waterkering en het belang van scheepvaart. Het maken van deze afweging is een studie op zichzelfstaande. Vanwege de hoge complexiteit voor het bepalen van de faalkans wordt deze enkel kort en in de hoofdlijnen benoemd.

Wanneer er uit de bepaling van het risico volgt dat er een aanvaarbeveiliging wordt toegepast, dan dient er een ontwerp te worden gemaakt. Bij het maken van dit ontwerp is het van belang om te weten op welke hoeveelheid aanvaarenergie een aanvaarbeveiliging dient te worden ontworpen. Het

^a Project informatie van (Uitbreiding Sluis Eefde, 2019)

^b (De Stentor, 2019)

^c (Vrijburcht A. , 2000)

bepalen van de aanvaarenergie hangt sterk samen met de dimensioneren van de sluis en de vaarweg waarin deze zich bevindt. Rijkswaterstaat geeft de maatgevende energie op, wanneer er geen eis is opgenomen dient deze te worden bepaald. Het bepalen van de aanvaarenergie dient met verschillende methoden te worden benaderd.

De weerstand, uitvoering en vormgeving van de aanvaarbeveiliging zijn mede afhankelijk van de aanvaarbeasting; die volgt uit de aanvaarenergie. Veelal wordt er eerst uitgezocht welke ontwerpen er bestaan, voor welke situatie deze toepasbaar zijn en of deze geschikt zijn voor het opnemen van de energie. Er is vraag naar het versimpelen van dit proces. Een handreiking, in de vorm van een tool, welke al de te maken afwegingen doorneemt en welke een aanzet tot ontwerpen geeft. In het ontwerp van de aanvaarbeveiliging is er nog ruimte voor innovaties, doorgaans wordt een aanvaarbeveiliging uitgevoerd door de reeds uitgevoerde/ontworpen te beschouwen. Bestaan er een alternatieven of innovaties welke een verbetering zijn op de huidige aanvaarbeveiligingen?

Samenvattend betekend dit; Is de informatie welke over aanvaarbeveiliging beschikbaar is te koppelen waardoor het ontwerpproces wordt versimpeld. Daarnaast is er nog ruimte voor innovatie en/of alternatief welke een verbetering zijn op de huidige aanvaarbeveiligingen.

1.3 Doel- en Vraagstelling

1.1.1 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van het inzicht over aanvaarbeveiligingen en het ontwerpen van de aanvaarbeveiligingen bij binnenvaartsluizen in Nederland. Het verkregen inzicht leidt in het ontwikkelen van een ontwerptool, de Aanvaarbeveiligingtool. De Aanvaarbeveiligingtool bepaald de aanzet van de dimensionering en de op te nemen aanvaarenergie van een nieuw te realiseren aanvaarbeveiliging. De input hiervoor is: de geometrie van de sluis, scheepvaart en de maatgevende belastingen. Rijkswaterstaat kan in een (contract-)eis de rekenwaarde voor de aanvaarenergie geven, wanneer deze niet gegeven is wordt deze automatisch berekend doormiddel van de Aanvaarenergietool welke is ingevoegd in de Aanvaarbeveiligingtool. De Aanvaarenergietool bepaald de maatgevende energie doormiddel van de gegevens van het sluizencomplex en de scheepvaart in het sluizencomplex.

In de Aanvaarbeveiligingtool zijn een aantal varianten verwerkt, doormiddel van de input wordt de bijpassende variant gekozen. Vooraf worden notabele varianten voor Nederlandse binnenvaartsluizen onderzocht op werking. Er wordt ook gestreefd naar het bedenken van innovatieve varianten. In een Trade off matrix worden alle varianten beoordeeld, hiervan worden de beste beoordeelde varianten opgenomen in de Aanvaarbeveiligingtool. Hiermee wordt er een aanbeveling gedaan op de meeste geschikte aanvaarbeveiligingen die bij de ingevoerde gegevens, de input.

Na invoeren van de input wordt er een bijpassende variant voorgesteld. Hierbij worden onder andere de benodigde dimensionering en de af te dragen krachten op de sluisconstructie van de variant weergegeven. De uitkomst uit de tool dient een aanzet te zijn voor het ontwerpen en toetsen richting een voor- of definitieontwerp. De ontwerptool maakt het proces vanaf de gestelde eisen tot het bedenken van een (schets-)ontwerp efficiënter en geeft direct inzicht in de dimensionering, op te nemen belasting en af te dragen krachten van de te ontworpen aanvaarbeveiliging. Om aan te tonen dat de ontwerptool leidt tot een ontwerp wordt de tool gevalideerd op de Zuidersluis te Eefde. De gegevens van de Zuidersluis worden ingevoerd en vanuit de aanbeveling wordt er een voorstel tot voorontwerp gegeven.

1.1.2 Hoofdvraag

De hoofdvraag van het onderzoek luidt als volgt:

Hoe is de keuze voor een ontwerp van een aanvaarbeveiliging te bepalen middels een ontwerptool?

1.1.3 Deelvragen

1. Bij welke faalmechanismen van een schutsluis speelt het falen ten gevolge van aanvaring een rol? Hoe zien de foutenbomen hiervan eruit?
2. Welke soorten aanvaarbeveiligingen worden er in Nederland toegepast en zijn er alternatieven welke kunnen worden opgenomen in de ontwerptool?
3. Welke belastingen, bij de deelvraag 2 geïnterpreteerde faalmechanismen, zijn van invloed op het ontwerp van een aanvaarbeveiliging?
4. Welke factoren bepalen het ontwerp van een aanvaarbeveiliging?
5. Hoe kunnen de factoren worden geïmplementeerd in de ontwerptool?
6. In hoeverre kan de rekentool een bijdrage leveren aan het ontwerp van een aanvaarbeveiliging?

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat de toe te passen onderzoeksmethoden per deelvraag. Het onderzoek is in dit hoofdstuk ook weergegeven als een conceptueel model. Als laatste is de afbakening van het onderzoek beschreven.

Hoofdstuk 3 is een samenvatting van het literatuuronderzoek dat uitgevoerd is naar aanleiding van het onderwerp.

Hoofdstuk 4 benoemt de faaldefinitie van schutsluizen met de toepassing van een aanvaarbeveiliging.

Hoofdstuk 5 beschrijft de bestaande soorten aanvaarbeveiliging en de mogelijkheden tot verbetering op de bestaande soorten.

Hoofdstuk 6 bevat de invloedfactoren op de belasting en energie bij een aanvaring.

Hoofdstuk 7 is de toelichting op de aanvaarenergietool met daarbij een uitwerking van de aanvaarkans.

Hoofdstuk 8 beschrijft de invloedfactoren welke de toepassing van een aanvaarbeveiliging bepalen.

Hoofdstuk 9 zijn de berekeningen toegelicht van de opgenomen varianten in de ontwerptool.

Hoofdstuk 10 is de verificatie van de complete ontwerptool ingevuld voor de Zuidersluis van Eefde, hierin wordt een advies gegeven welke aanvaarbeveiliging het meest geschikt is om toe te passen en op welke manier.

Hoofdstuk 11 is de conclusie van het onderzoek en hierin worden de aanbevelingen gegeven voor een mogelijk vervolgonderzoek.

Voor een nadere beschouwing van de onderwerpen wordt er verwezen naar de Bijlage, hierin worden alle onderwerpen uitgebreid onderbouwd en beschouwd.

Hoofdstuk 2 Onderzoeksmethoden

2.1 Algemene onderzoeksmethoden

Het onderzoek dat wordt uitgevoerd is opgedeeld in twee delen, één deel is een exploratief onderzoek en het andere is een toegepast onderzoek. Het eerste deel levert inzicht voor de bepaling van aanvaarbeveiliging bij schutsluizen in Nederland. In het tweede deel worden de verkregen inzichten verwerkt in een ontwerptool welke het proces tot een ontwerp voor de aanvaarbeveiliging vereenvoudigt.

Het onderzoek werkt toe naar een product/methode welke in de praktijk kan worden toegepast: de ontwerptool. Het gebruik van de ontwerptool kan lijden tot het ontwerpen/ontwikkeling van een aanvaarbeveiliging door het bedrijf. Dit onderzoek resulteert tevens in nieuwe kennis en inzichten, die van toepassing is op het ontwerp van een aanvaarbeveiliging. Het onderzoek focust zich op het verbeteren van de huidige praktijk.

2.1.1 Te gebruiken methodes

Voor het onderzoek wordt er gebruik gemaakt van kwantitatief onderzoeksmethodes, wat inhoudt dat erbij het onderzoek veelal gebruik gemaakt wordt van numerieke gegevens. De resultaten kenmerken zich doordat deze voor een groot deel bestaan uit percentages en aantallen.

2.2 Toe te passen onderzoeksmethoden per deelvraag

Deelvraag 1

Om te bepalen van welke belastingen een ontwerp aanvaarbeveiliging gebruikt in een berekening, worden de faalmechanismen ten gevolge van aanvaring in kaart gebracht. Door een literatuurstudie uit te voeren, worden deze faalmechanismen gevonden. Literatuur die van toepassing is: ROK, Leidraad kunstwerken (TAW) en/of Ontwerp van Schutsluizen. Omdat er verschillende literatuur antwoord geeft, dienen de gevonden antwoorden met elkaar te worden geverifieerd om te checken op betrouwbaarheid. Aan de hand van de gevonden faalmechanismen worden in deelvraag 3 de belastingen bepaald.

Deelvraag 2

Er dient inzicht te worden verkregen in de soorten aanvaarbeveiliging toegepast in Nederland. Hieruit worden de verschillende soorten beschreven. Waarna er inzicht is in de verschillende systemen wordt er gekeken of deze uitvoerbaar zijn in verschillende soorten materialen. Dit wordt gedaan doormiddel van literatuuronderzoek en het houden van interviews met opdrachtgevers en ontwerpers. Het bedenken van een alternatief kan enkel wanneer dit is afgerond. Door de nadelen in beeld te hebben van de huidige aanvaarbeveiligingen wordt er gezocht naar verbeteringen. Deze verbeteringen worden samengevoegd in een nieuwe varianten.

De huidige varianten en de alternatieven worden doormiddel van een TOM beoordeeld of deze kunnen worden ingevoerd in de ontwerptool. Hierin worden de aanvaarbeveiligingen beschreven en voor meerdere criteria beoordeeld. Criteria zijn; Verval, Energie absorptie, Onderhoud, Inpassing en Uitvoeringsaspecten. Uit de TOM volgt een kwantitatieve bepaling van welke aanvaarbeveiligingen in de ontwerptool worden opgenomen en welke niet.

Deelvraag 3

In de ontwerptool is de aanvaarenergie een belangrijke parameter, deze energie wordt regelmatig in eisen van het project zijn opgegeven. Wanneer dit niet bekend is, dient de aanvaarbebelasting te worden bepaald. Hiervoor kan de aanvaarenergietool worden gebruikt. De overige belastingen (wind, wrijving

en eigen gewicht) welke invloed hebben op het falen van het object worden beschouwd en tevens verwerkt worden in de ontwerptool. Alle belastingen worden conform de NEN-EN 1991-1-X en de ROK uitgewerkt.

Doormiddel van een casestudy bij Sluis Eefde wordt er gekeken welke belastingen het ontwerp van de reeds ontworpen aanvaarbeveiliging hebben bepaald en de grootte van de belastingen. Hiermee wordt de belastingtool gevalideerd.

Deelvraag 4

Er zijn factoren welke van invloed zijn op het ontwerp, deze dienen inzichtelijk gemaakt te worden. Er zijn factoren welke bepalen of er wel of geen aanvaarbeveiliging wordt toegepast; zoals verval, sterkte deur en doorvaarhoogte. Er zijn ook factoren welke volgen uit de geometrie van de sluis. Denk hierbij aan: breedte, plaatsingshoogte, beschikbare ruimte ten behoeve van remweg en eventueel de maximaal op te nemen krachten in de kolkwand. Deze factoren worden met een literatuurstudie achterhaald en vergeleken met toepassingen in de praktijk.

Deelvraag 5

Allereerst dient er specifiek worden bepaald hoe de ontwerptool eruit komt te zien en wat de uitkomst van de ontwerptool dient te zijn. De factoren zijn reeds bekend, hoe kunnen deze worden verwerkt? Met behulp van normen (NEN) en richtlijnen (Vaarwegen 2017, TAW en ROK) kan de rekentool worden opgebouwd. Welke stappen dienen te worden genomen en met welke berekenmethode kan tot een concrete uitkomst komen. In deze deelvraag wordt de ontwerptool gemaakt. Het product is hier de ontwerptool voor de opzet van een ontwerp aanvaarbeveiliging.

Deelvraag 6

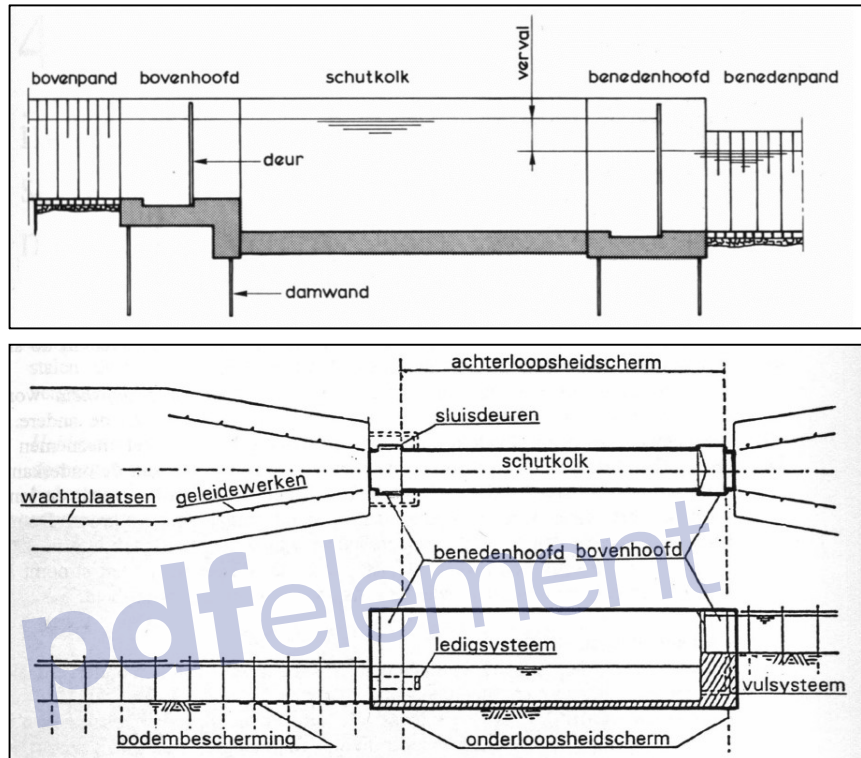
Uit deelvraag 5 volgt als product de ontwerptool, hier wordt die gevalideerd. Om de ontwerptool te valideren wordt er gebruik gemaakt van de gegevens van de Zuidersluis in Eefde. Geven de ingevoerde variabelen een uitkomst welke het verder ontwerpen van een aanvaarbeveiliging vereenvoudigd? Door de uitkomst uit de rekentool ook werkelijk verder te gaan ontwerpen in een voorontwerp aanvaarbeveiliging voor de Zuidersluis Eefde wordt het nut van de tool inzichtelijk.

Hoofdstuk 3 Theorie

3.1 Schutsluis^a

Schutsluizen worden toegepast als de scheepvaart een permanente waterkering of een stuw dient te passeren. Locaties waar sluizen voorkomen zijn: in een rivier naast een stuw, aan het begin en/of het einde van een kanaal met een beheerst peil of aan de kust bij een doorgang door de primaire waterkering.

Een schutsluis bestaat uit tenminste twee beweegbare waterkeringen in de zogeheten sluishoofden met daar tussenin een ruimte voor schepen, de (schut)kolk. De keermiddelen, de deuren, zijn toe te passen in verschillende typen zoals: puntdeuren, hefdeuren, roldeuren, segmentdeuren, waaierdeuren, klepdeuren en sectordeuren. Door het nivelleren kan een schip een verval in water overbruggen, van hoog water naar laag water of andersom. In *Figuur 3.1* zijn de onderdelen van schutsluizen weergegeven.



Figuur 3.1 Overzicht onderdelen Sluis

De toepassing van de schutsluis is in Nederland komt voor bij het overbruggen van vervallen tot ongeveer twaalf meter en onder de voorwaarde dat voldoende water beschikbaar is om het schutverlies, waterverlies bij schutten, te compenseren.

Vaarwegen in Nederland

In totaal telt Nederland zo'n 5.046 km aan vaarwegen, waarvan 4.800 km geschikt zijn voor goederenvervoer. De hoofdtransportassen en hoofdvaarwegen zijn samen circa 1.400 km lang. De overige vaarwegen hebben een gezamenlijke lengte van ongeveer 3.400 km. Waterwegen zijn sinds jaar en dag aanwezig en zijn niet alleen in gebruik als vaarwegen, ook voor de afvoer van water. Ze vormen een compleet watersysteem.

Binnenvaart

De binnenvaart is in Europa opgedeeld in zogenaamde CEMT-klassen om de afmetingen van vaarwegen in West-Europa op elkaar af te stemmen. De klassenindeling is bepaald door de Conférence Européenne des Ministres de Transport (vandaar de term CEMT-klasse).

^a Van (van Baars, Kuijper, & e.a., 2002)

Per klasse zijn de maximale afmetingen van het schip vastgelegd. Het weten van deze klassen aan boord is handig, omdat een schipper dan bijvoorbeeld weet welk kanaal te smal is of waar de sluisen te kort zijn voor zijn schip.

De scheepsoorten zijn in alle klassen vertegenwoordigd. Zo zijn er droge lading schepen van het formaat spits en ook van het formaat Groot Rijnschip. En ook tankers komen er in alle klassen (en dus diverse afmetingen) voor.

3.2 Aanvaring

Mechanica aanvaring

Wanneer een schip tegen een aanvaarbeveiliging vaart dienen de krachten in de vorm van energie opgenomen worden door de constructie, waarbij de constructie de krachten afdraagt op de fundering. Om te begrijpen wat de werking is van de constructie wordt eerst in gegaan op het begrip energie.



Energie

Om inzicht te krijgen in het concept van energie is het verhelderend om te kijken naar het zuiver natuurkundige begrip hiervan. In de natuurkunde wordt energie omschreven als een eigenschap van een object waarmee arbeid kan worden verricht. Energie kan op vele verschillende manieren aanwezig zijn in objecten, bijvoorbeeld als Potentiele gravitatie-, veer-, of kinetische energie.

In het SI-systeem wordt energie uitgedrukt in joule (J). Joule wordt gedefinieerd als de energie afkomstig uit of beschikbaar voor de arbeid waarmee een kracht over een afstand van één meter verplaatst wordt. Hierdoor is de joule ook uit te drukken als newtonmeter (Nm).

Kinetische energie

Objecten in beweging met een continue snelheid hebben een energie in de vorm van kinetische energie, naar het Griekse woord $\kappaινεω$, dat “ik beweeg” betekend. De kinetische energie van een bewegend object is te berekenen met [Vergelijking 3.1](#).

Vergelijking 3.1 Formule voor kinetische energie

$$E = 0,5 \times m \times v^2$$

Waarin:	E	= Kinetische energie	[kNm]
	m	= Massa van het object	[ton]
	v	= Snelheid van het object	[m/s]

Veerenergie

Bij het elastisch vervormen van een object wordt door de arbeid veerenergie in een object opgebouwd, deze elastische vervorming is niet blijvend waardoor het object weer terug veranderd naar zijn oorspronkelijke vorm wanneer de kracht verwijderd wordt. In een veer wordt energie opgebouwd volgens [Vergelijking 3.2](#).

Vergelijking 3.2 Bepalen veerenergie

$$E = 0,5 \times C \times u^2$$

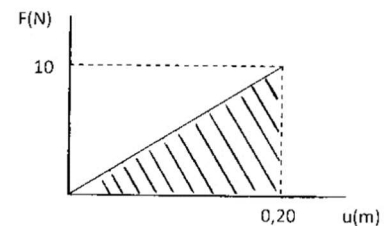
Waarin:	E	= Veerenergie	[kNm]
	C	= Veerconstante	[kN/m]
	u	= Uitwijking van de veer	[m]

Dit kan omgezet worden naar *Vergelijking 3.3*.

Vergelijking 3.3 Bepalen energie door kracht over een afstand

$$E = 0,5 \times F \times u$$

Wat uit *Vergelijking 3.3* duidelijk wordt is dat bij een gelijkblijvende kracht met een grotere uitwijking de energieopname groter is. Hierin wordt echter uitgegaan van lineair elastische vervorming, dit gaat in de realiteit niet altijd op. Daarom kan de energieopname van een elastisch vervormend object beter bepaald worden aan de hand van de F-u grafiek waarbij de oppervlakte onder de grafiek de Energie is van de geleverde arbeid, in *Figuur 3.2* is een voorbeeld van een F-u grafiek te zien. Bij plastisch vervormen kunnen de eerder benoemde vergelijkingen en grafieken gehanteerd worden als bij elastisch vervormen, echter is een plastisch vervormd object blijvend vervormd.



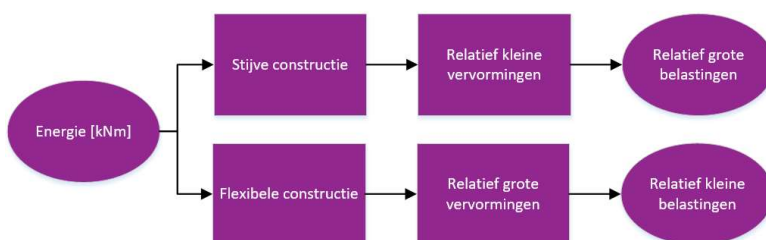
Figuur 3.2 F-u diagram

Rekenen met energie

Om te kunnen rekenen met energie is het belangrijk om te weten dat energie zich houdt aan de Wet van behoud van energie. Deze natuurwet stelt dat de totale hoeveelheid energie in een gesloten systeem niet verandert. Hieruit wordt opgemaakt dat energie niet zomaar ontstaat of verdwijnt enkel verandert van vorm door het verrichten van arbeid.

Energieopname van de constructie

Kijkend naar de uitleg over energie is de veerenergievergelijking, *Vergelijking 3.2*, van toepassing bij het opnemen van energie bij een aanvaarbescherming. Daaruit blijkt ook dat het voor het berekenen van de op te nemen energie niet noodzakelijk is om onderscheid te maken tussen elastische en plastische vervorming. Overigens betekent dit niet dat deze vervormingen buiten beschouwing wordt gelaten. De uitwijking van de constructie is echter wel van groot invloed voor het berekenen van de energie. Deze is afhankelijk van de stijfheid van de constructie, daarom wordt onderscheid gemaakt tussen stijve en flexibele constructies. Het verschil tussen de twee type constructies en wat dit als gevolg heeft is weergegeven in *Figuur 3.3*.



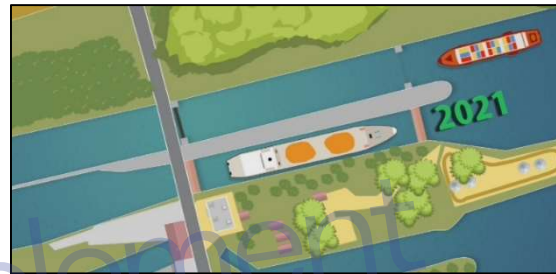
Figuur 3.3 Stijve of flexibele constructie

3.3 Sluis Eefde (L2T)^a

Sluis Eefde is gesitueerd in het Twentekanaal nabij Zutphen en is vanaf de IJssel de eerste van de drie sluisen richting Enschede, *Figuur 3.5*. De ‘zustersluizen’ Delden en Hengelo zijn de andere twee sluisen. Achter Sluis Eefde ligt meer dan dertig kilometer aan vaarwater, waaronder het zijkanaal naar Almelo. Jaarlijks passeren er circa 12.000 binnenvaartschepen^b, wat neerkomt op 33 schepen per dag. De sluis van Eefde is gebouwd in 1933 tegelijkertijd met de aanleg van het Twentekanaal. In 2017 is er gestart met de uitbreiding van Sluis Eefde, aan de Noordzijde van de bestaande kolk wordt een tweede sluisolk gerealiseerd, *Figuur 3.4*. Hiermee de capaciteit van het sluiscomplex vergroten, voorkomen van stremming, wachttijd verminderen en de economie van Twente een impuls geven. De ligging van Eefde betekent dat dit de poort naar Twente is, hierom is de naam Lock to Twente (L2T) aangenomen voor het overkoepelende bedrijf dat de nieuwe sluis realiseert.



Figuur 3.5 Locatie Sluiscomplexen op het Twentekanaal



Figuur 3.4 De bouw van de Noordersluis naast de bestaande Zuidersluis

3.4 Van toepassing zijnde normen en voorschriften

Algemeen

Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken 1.4: (ROK 1.4, 2017)

Een richtlijnen kader opgesteld door Rijkswaterstaat, de ROK is een verzameling van generieke eisen waaraan het ontwerp en de uitvoering van een nieuw te bouwen kunstwerk dient te voldoen. Deze richtlijnen geven wijzigingen, aanvullingen en toelichtingen op de Eurocodes met Nationale Bijlagen (NEN-EN + NB).

Leidraad Kunstwerken TAW: (Leidraad Kunstwerken, 2003)

Het leidraad Kunstwerken behandelt het realisatie- en instandhoudingsproces van waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies, voor zover ze behoren tot de primaire waterkeringen.

Ontwerp van Schutsluizen: (Ontwerp van schutsluizen, 2000)

Een handboek welke verschillende aspecten behandelt voor het ontwerpen van een sluis.

Q1399: (Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399, 1992)

Het Q1399, Aanvaarrisico's voor sluisdeuren, beschrijft de toepasbare methodiek ter bepaling van het risico op aanvaring met een sluisdeur. Op basis van kansverdelingsfunctie van de aanvaarsnelheid en -energie op gesloten sluisdeuren.

Richtlijn Vaarwegen 2017: (Richtlijnen Vaarwegen 2017, 2017)

Het uniform toepassen ervan leidt tot moderne, betrouwbare vaarwegen met voldoende diepte, breedte en doorvaarhoogte. Ook steeds meer aan een efficiënt, samenhangend netwerk van vaarwegen in ons land.

^a (Twentekanaal: uitbreiding Sluis Eefde, 2019)

^b (Aantal passages van binnenvaartschepen per sluis, 2019)

Hoofdstuk 4 Faaldefinitie

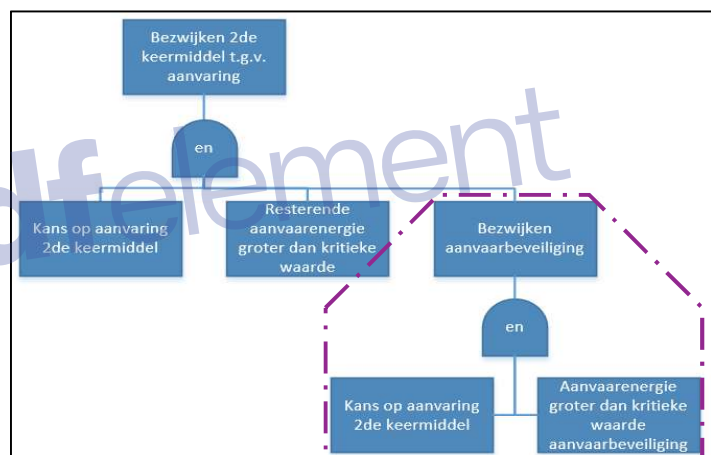
Falen is een gebeurtenis, of een verzameling gebeurtenissen, waardoor een systeem zijn functionaliteit of een deel van zijn functionaliteit verliest. Een schutsluis heeft grofweg twee hoofdfuncties: water keren en het laten passeren van scheepvaart. Bij verlies van één of beide functies is er gesteld dat de schutsluis heeft gefaald. In dit onderzoek is er gekeken naar de gebeurtenis: falen door aanvaring.

Beschikbaarheidsfunctie

De functie; Het laten passeren van scheepvaart, wordt uitgedrukt als de beschikbaarheid van de schutsluis. Uit een interview^a met Rijkswaterstaat komt ter sprake dat Rijkswaterstaat het beschikbaar zijn van de schutsluis op gelijkwaardig niveau schaaft als waterveiligheid, omdat bij beschikbaarheid van de sluis de waterveiligheid altijd gewaarborgd is. Waterveiligheid dient te allen tijde gewaarborgd te zijn. Bij aanvaring van het tweede keermiddel waarbij de schutsluis zijn beschikbaarheidsfunctie verliest, treedt er stremming van de scheepvaart op. De ernst van de schade bepaalt de stremmingsduur, bij een significant lange stremmingsduur treden er grote financiële gevolgen op. Rijkswaterstaat wenst grote financiële gevolgen te voorkomen wat erin resulteert dat er hoge eisen zijn gesteld aan het beschikbaar zijn van de schutsluizen.

Waterkerende functie

Een schutsluis maakt deel uit van een kering, waarbij aanvaring met het tweede keermiddel, de sluisdeur, mogelijk leidt tot het falen van de waterkering. In het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium^b van Rijkswaterstaat is falen van de waterkerende functie ten gevolge van aanvaring weergegeven in een foutenboom. Een aanvaarbeveiliging beperkt de kans van het bezwijken tweede keermiddel ten gevolge van aanvaring. Dit leidt tot een uitbreiding van de foutenboom *Figuur 4.1*. Waarbij de toevoeging van een aanvaarbeveiliging voor het tweede keermiddel leidt tot een grotere energie-opname-capaciteit ten behoeve van de aanvaarenergie.



Figuur 4.1 Uitbreiding foutenboom (Bezwijken 2de keermiddel t.g.v. aanvaring) met toepassing aanvaarbeveiliging

Definitie

De doelstelling van een aanvaarbeveiliging is de kans op bezwijken van het tweede keermiddel ten gevolge van een aanvaring te verkleinen en de beschikbaarheid van de schutsluis vergroten. Wanneer één of beide faaldefinities optreden heeft de schutsluis binnen dit onderzoek gefaald. Dit betekent dat de schutsluis ook faalt wanneer er een aanvaring optreedt welke het tweede keermiddel niet doet bezwijken, echter wel stremming van het scheepvaartverkeer veroorzaakt.

^a Bijlage 15 Interview R. Berentsen – Rijkswaterstaat (Berentsen, 2019)

^b WBI 2017: (Deltares, 2016)

Hoofdstuk 5 Aanvaarbeveiligingsconstructies

Nederland kent meerdere soorten aanvaarbeveiliging, deze zijn beschreven in het handboek (Ontwerp van schutsluizen). Het nut van een aanvaarbeveiliging blijkt uit *Hoofdstuk 4 Faalkans*, een aanvaarbeveiliging beperkt de kans op verlies van waterkerende functie van het tweede keermiddel en zorgt voor een betere beschikbaarheid van de sluis. Niet overal is in Nederland een aanvaarbeveiliging toegepast, in dit hoofdstuk zijn de soorten systemen benoemd welke in Nederland zijn toegepast. Daarnaast zijn in het hoofdstuk optimalisaties, ontwikkeling van alternatieven, onderzocht van de bestaande soorten aanvaarbeveiliging, welke samen met de bestaande soorten in een Trade Off Matrix zijn beoordeeld, de meest geschikte soorten worden in de ontwerptool opgenomen.

5.1 Soorten constructies

5.1.1 Bestaande varianten aanvaarbeveiliging

In Nederland bestaan er verschillende soorten aanvaarbeveiliging. In het schema zijn de zes soorten vermeld welke zijn benoemd in het handboek Ontwerp van Schutsluizen^a. Voor een uitgebreide uitwerking van de soorten wordt verwezen naar *Bijlage 2 paragraaf 2.1*. De zes bestaande varianten zijn:



5.1.2 Toepassing in Nederlandse sluizen

Uit de literatuurstudie volgt dat Nederland veertien sluiscomplexen telt met een totaal van tweeëntwintig aanvaarbeveiligingen in sluiskolken. Het gros van de sluizen met aanvaarbeveiliging bevindt zich in het Julianakanaal, Twentekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal en in het kanaal Wessem-Nederweert. In *Bijlage 2 paragraaf 2.2* zijn de toegepaste aanvaarbeveiligingen van de sluizen weergegeven. Van de zes benoemde soorten wordt het scharnierend portaal niet in Nederland toegepast, omdat deze enkel toepasbaar is bij een dusdanig groot verval welke in Nederland niet aanwezig is. De overige soorten zijn wel vertegenwoordigd in Nederlandse sluiscomplexen.

5.2 Optimalisatie varianten aanvaarbeveiliging

In de ontwerptool dienen varianten aanvaarbeveiliging opgenomen welke het beste toepassing vinden in de Nederlandse binnenvaartsluizen. Om deze keuze te maken zijn aan de hand van een Trade Off Matrix (TOM) de meest geschikte varianten bepaald. Naast de bestaande soorten aanvaarbeveiliging is er onderzocht of er ook alternatieven zijn toe te passen, welke ook in de TOM zijn beoordeeld. De alternatieven varianten zijn optimalisaties van de bestaande soorten om de toepasbaarheid van de aanvaarbeveiliging te vergroten. Aan de hand van een probleemanalyse, opgesteld op basis van interviews^b, is bepaald waarmee de toepasbaarheid te vergroten is. De probleemanalyse is uitgewerkt in *Bijlage 2 paragraaf 2.3*, de resultaten van deze analyse zijn in *paragraaf 5.2.1* beschreven.

^a (Ontwerp van Schutsluizen, 2000)

^b (Berentsen, 2019) (Bos, 2019) (Hoekstra, 2019)

5.2.1 Optimalisatie(s) ten opzichte van bestaande constructies

Optimalisaties en innovaties ontstaan uit problemen of tekortkomingen op huidige systemen. Uit de probleemanalyse volgt dat er in meerdere aspecten verbeterlagen zijn te behalen. Dynamisch maken (meegaand met de waterstand in de kolk), vrije doorvaarhoogte, compact maken, minder reactiekrachten, onderhoud minimaliseren en van eenvoudig vervangbare onderdelen maken.



Vanuit de bovengenoemde aspecten is er bestudeerd of er mogelijke optimalisaties zijn voor soorten aanvaarbeveiliging die reeds zijn toegepast of voor geheel nieuwe aanvaarbeveiliging. *Tabel 2.2* in *Bijlage 2* geeft weer bij welke aspecten de bestaande soorten aanvaarbeveiliging een mogelijk uitvoerbare verbeterlag ligt en welke variant niet geschikt zijn voor optimalisering. Uit de studie volgt dat het scharnierend portaal en het vangnet onvoldoende geschikt zijn voor optimalisatie. Bij de overige soorten zijn de mogelijkheden tot verbetering:

- *Buigzame ligger*; Dynamisch, beweegbaar, geringe reactiekrachten en vervangbare onderdelen.
- *Stootbalk met dempers*; Dynamisch, beweegbaar, compact afremsysteem, geringe reactiekrachten, onderhoudsarm en vervangbare onderdelen.
- *Kabel met dempcilinder*; Dynamisch, compact afremsysteem, geringe remafstand, geringe reactiekrachten, onderhoudsarm en vervangbare onderdelen.
- *Vangkabel*; Dynamisch, beweegbaar, geringe remafstand, geringe reactiekrachten en vervangbare onderdelen.

Uitgangspunten alternatieven

Om te bepalen of een verbetering van een bestaande variant of een geheel nieuwe variant (innovatie) haalbaar is, dient deze te voldoen aan de opgestelde uitgangspunten. Dit zijn uitgangspunten betreffende minimale aanvaarenergie en minimale overspanning. Een alternatief dient minstens toepasbaar te zijn in een sluis met een kolkbreedte van 7,50 meter^a en minstens een aanvaarenergie van 500 kNm^b.

5.2.2 Varianten aanvaarbeveiligingen

Uit de optimalisatie volgen zes varianten, deze zijn genummerd 07 tot en met 12. Samen met de zes bestaande soorten aanvaarbeveiliging, genummerd; 01 tot en met 06, komt dit neer op een totaal van twaalf soorten aanvaarbeveiliging die in de TOM zijn verwerkt. De varianten worden kort beschreven. Voor een uitgebreide beschouwing van de bestaande varianten wordt doorverwezen naar *Bijlage 2 paragraaf 2.1*, in *paragraaf 2.4* zijn de optimalisatie varianten uitgebreid beschouwd en onderzocht op toepasbaarheid en werking. *Bijlage 3* zijn schetsontwerpen van de optimalisaties weergegeven.

^a Afmeting minimumsluis CEMT-klasse II, uit (Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL), december 2017)

^b CEMT-II met massa van 650 ton en een snelheid van 1,15 m/s. Formule uit ROK: Aanvaarenergie = $E = 0,55mv^2$

BESTAANDE VARIANTEN

01 Buigzame ligger

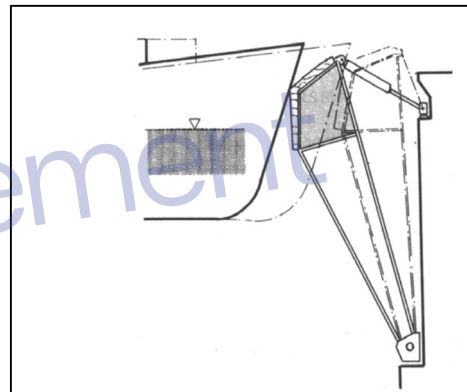
Een ligger gelegen over de kolk vormt een stootconstructie, waar een binnenvaartschip tegenaanvaart. De ligger is aan beide zijde opgelegd in de (schotbalk-)sponning. Bij aanvaring neemt de ligger door vervorming en wrijving aanvaarenergie op. Deze soort is niet beweegbaar en is afhankelijk van een groot verval om voldoende doorvaarthoogte te geven om schepen te laten passeren. Omdat het een vaste constructie is, is er slechts minimaal onderhoud benodigd. Dit heeft het voordeel dat de sluis vrijwel altijd beschikbaar is.



Afbeelding 5.1 Buigzame ligger - Sluis III Tilburg

02 Scharnierend Portaal

Deze aanvaarbeveiliging is niet in Nederland toegepast omdat er voor toepassing een groot verval, meer dan twintig meter, benodigd is. In Duitsland is de aanvaarbeveiliging bij enkele sluizen toegepast. Het scharnierend portaal vormt als ware een bumper voor het benedenhoofd. Door verplaatsing en cilinders wordt de aanvaarenergie opgenomen. Het scharnierend portaal heeft enkele cilinders welke mogelijk falen, de beoogde functie niet kunnen uitvoeren. Echter omdat de constructie vast op zijn plek staat, is de sluis vrijwel altijd beschikbaar.



Figuur 5.1 Scharnierend portaal

03 Stootbalk met dempcilinder

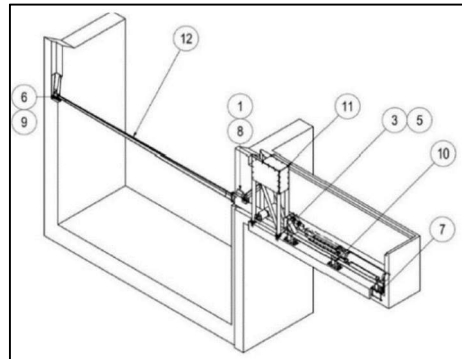
De stootbalk vormt een starre constructie welke de aanvaarenergie overdraagt naar dempcilinders aan weerszijden van de balk. Bij een aanvaring groter dan de maatgevende aanvaarenergie gaat de balk vervormen, de cilinders zijn dan geheel ingedrukt. De energieopname is afhankelijk van de indrukking van de cilinders én bij groter dan de maatgevende aanvaarenergie de vervorming van de balk. De constructie is niet beweegbaar en is afhankelijk van voldoende verval om eronder te kunnen varen. De cilinders hebben jaarlijks onderhoud nodig, daarnaast is de constructie onderhoudsarm. Enkel tijdens onderhoud is de sluis tijdelijk niet beschikbaar.



Afbeelding 5.2 Stootbalk met remcilinders - Sluis Maasbracht

04 Kabel met remcilinder en slagboomconstructie

Bij het uittrekken van de kabel over de kolk wordt een dempcilinder ingedrukt, deze remcilinder neemt de aanvaarenergie op. Het is mogelijk de remcilinderconstructie zo te ontwerpen dat de krachten binnen de dempconstructie elkaar neutraliseren, hierdoor zijn er minimale krachten op de fundering. Doormiddel van een slagboom wordt de kabel geheven, om daarmee een vrije doorvaarhoogte garanderen. Door de bewegende onderdelen (remcilinder, hefcilinder en omloopwielen) is er met regelmaat onderhoud benodigd, wat nadelig is voor de beschikbaarheid van de sluis. Door de hefcilinder is er tevens een vergroot risico op verlies van beschikbaarheid. Er bestaat een kans dat de hefcilinder vastloopt of de kabel niet goed vastgrijpt in de bevestigingsaanslag aan de overzijde in de kolkwand.



Figuur 5.2 Kabel met remcilinder-Sluis Panheel

05 Koker met vangkabel

Een vangkabel, uitgevoerd als staalkabel, neemt de energie op doormiddel van rek. De rek treedt op door de elastische en plastische vervorming van de kabel. De vangkabel is gespannen tussen twee bolders op de kolkwanden aan weerszijde en is veelal niet beweegbaar uitgevoerd. Er dient voldoende verval te zijn om de vangkabel toe te passen. Het grote nadeel is dat de kabel slechts geringe aanvaarenergie kan opnemen. De kabel is onderhoudsvrij, enkel wordt de kabel na een bepaalde levensduur vervangen. Geen onderhoud en geen bewegende onderdelen zorgen ervoor dat de sluis altijd beschikbaar is, mits er geen aanvaring plaatsvindt.



Afbeelding 5.3 Koker met vangkabel - Zuidersluis Eefde

06 Vangnet

Het vangnet is een aanvaarbeveiliging welke een grote aanvaarenergie kan opnemen. De constructie bestaat uit een raamwerk waarin meerdere verticale kabels verbonden zijn met remcilinders. In het raamwerk zijn enkele horizontale kabels gespannen. Het raamwerk wordt geheven door een aparte heftoren welke zich bevindt voor de heftoren waarin de sluisdeur zich bevindt. Het raamwerk wordt geheven om doorvaart mogelijk te maken. De constructie is uitermate geschikt om energie op te nemen van duwvaartschepen, door de verticale kabels met remcilinders. De remcilinders nemen de aanvaarenergie op. Bij het vangnet zijn meerdere bewegende onderdelen welke mogelijk falen, dit is nadelig betreft de beschikbaarheid.

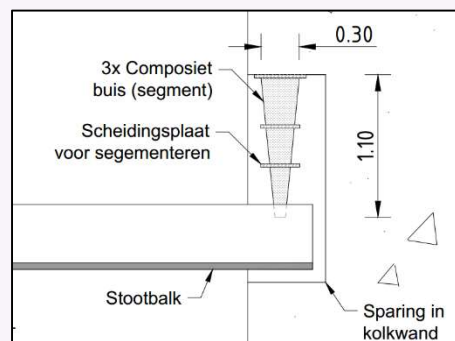


Afbeelding 5.4 Vangnet Prins Bernharsluis

OPTIMALISATIE VARIANTEN

07 Stootbalk met composiet buisprofiel

De stootbalk met composiet buisprofiel is een soortgelijk constructie als variant 03, enkel zijn de cilinders vervangen door composiet buisprofielen. Door de vervanging van de cilinders is deze variant onderhoudsvrij, alleen na een aanvaring worden de buisprofielen vervangen. De constructie is vast, er is geen mogelijkheid om vrije doorvaarhoogte garanderen. Doordat het onderhoudsvrij is en geen bewegende onderdelen heeft, is de beschikbaarheid van de sluis gegarandeerd, mits er geen aanvaring plaatsvindt.



Figuur 5.3 Schets composiet buis voor energieopname

08 Stootbalk met stalen buisprofiel (Rimpelbuis)

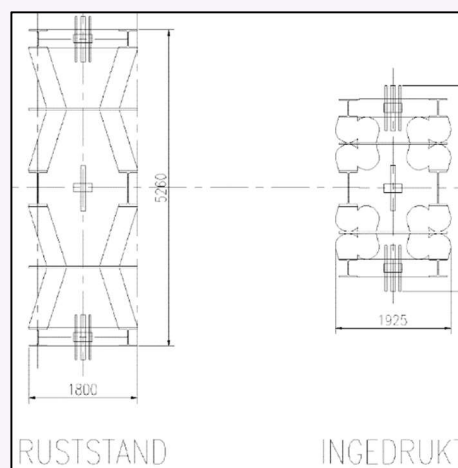
Eenzelfde variant als variant 07, alleen is er in plaats van composiet een stalen buisprofiel toegepast. Staal is een materiaal waarvan het bezwijkgedrag beter is in te schatten dan composiet. Het idee is afkomstig van de zogenoemde RIMOB die bij snelwegen is toegepast om de energie van een aanrijding op te nemen doormiddel van het indrukken (rimpelen) van de stalen buizen. De variant is tevens onderhoudsvrij, hierdoor wordt de beschikbaarheid van de sluis gegarandeerd.



Afbeelding 5.5 RIMOB toegepast bij obstakels langs snelwegen

09 Kabel met fenderconstructie en slagboomconstructie

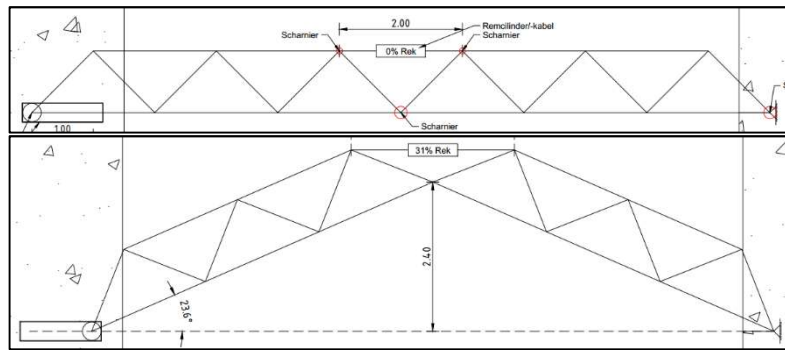
Als optimalisatie voor de kabel met remcilinder is de fenderconstructie ontworpen door staalbouwer Hollandia Infra BV. De fenderconstructie is een onderhoudsarme constructie welke compact is. Er worden rubberen blokken (fenders) ingedrukt bij aanvaring, hiermee wordt de energie opgenomen. Het gedrag van de rubberen blokken zorgt echter voor complexiteit, er dienen geleiders en een arreter voorziening te worden toegepast om juiste werking te garanderen. De arreter voorziening, een zaagtand, voorkomt dat na aanvaring de energie welke is opgeslagen in de fenders na indrukking meteen weer teruggeeft. De constructie geeft een vrij doorvaarhoogte doormiddel van een hefcilinder. De complexiteit van de fenders, geleiders en arreter voorziening werkt nadelig voor de beschikbaarheid van de sluis.



Figuur 5.4 Rubberblokken in de fenderconstructie (Hollandia-Infra)

10 Vakwerkligger met remcilinder

De vakwerkligger is een optimalisatie van de stootbalk met cilinders. Boven in het vakwerk bevindt zich een kunststofkabel of een cilinder welke bij aanvaring in werking treedt. Hiermee wordt enig ruimte bespaart in vergelijking met de stootbalk met cilinder gesitueerd in de kolkwand.

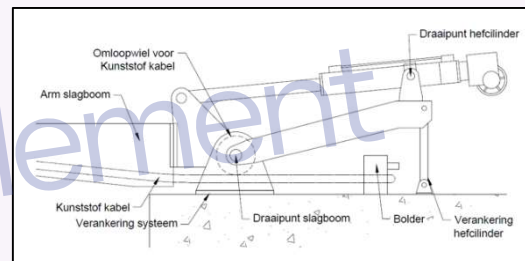


Figuur 5.5 Schets Vakwerkligger voor en na aanvaring. Vakwerk met kunststofkabel boven in de ligger.

Daarnaast is er zowel bij de kabel en de cilinder onzekerheden betreffende het gedrag bij aanvaren. Het vakwerk dient exact in het midden aan te worden gevaren om de cilinder en kabel juist aan te spreken en juist te functioneren. Bij een vakwerkligger met cilinder is veel onderhoud vereist, wat een groot risico op verlies van beschikbaarheid van de sluis geeft.

11 Kunststof vangkabel met slagboomconstructie

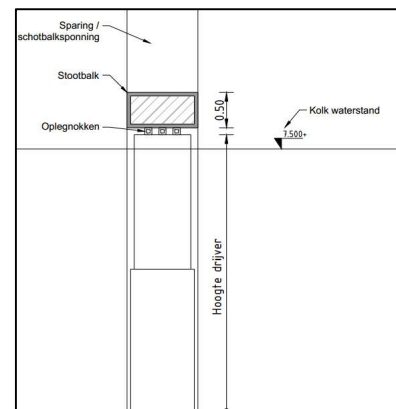
Door de vangkabel te combineren met een slagboomconstructie is variant 05 geoptimaliseerd op het gebied van het realiseren van een vrije doorvaarhoogte. De slagboomconstructie is éénzelfde constructie als die van variant 04. Door de toevoeging van een hefcilinder is er onderhoud benodigd. Het beweegbaar maken van de aanvaarbeveiliging geeft tevens risico's voor de beschikbaarheid. Er bestaat een kans dat de kabel niet correct in de fuik aan de overzijde valt. In de variant is er gekozen om een kunststofkabel toe te passen in plaats van een staalkabel, omdat een kunststofkabel meer rekt dan een staalkabel. De kunststoffen nylon en polyester zijn hiervoor het meest geschikt. Kunststoffen hebben een grotere rek, hierdoor zijn de krachten kleiner bij een aanvaring.



Figuur 5.6 Schets kunststof kabel met slagboom

12 Dynamische buigzame ligger

Deze variant is een optimalisatie van variant 01; buigzame ligger. De buigzame ligger is een vaste constructie welke niet meebeweegt met de waterstand (dynamisch) of open of gesloten wordt (doorvaarhoogte). Door de ligger op drijvers te plaatsen beweegt deze mee met de waterstand, om vervolgens doorvaart mogelijk te maken, wordt de constructie omhoog geheven. Hierdoor is deze constructie toepasbaar bij sluizen waar er grote fluctuaties zijn in het waterpeil in de kolk. Door de constructie drijvend te maken, is er geen extra onderhoud nodig ten opzichte van de buigzame ligger. Het hefsysteem heeft wel onderhoud nodig. De complexiteit van de constructie geeft risico's betreffende de beschikbaarheid van de sluis, er zijn onderdelen welke mogelijk falen.



Figuur 5.7 Schets drijvende stootbalk (doorsnede)

5.3 Trade Off Matrix

De twaalf varianten, uit *paragraaf 5.2.2 Varianten aanvaarbeveiligingen*, zijn in een TOM verwerkt, hieruit volgt welke varianten het meest geschikt zijn om op te nemen in de ontwerptool. De TOM is door drie partijen ingevuld, waarvan twee externe partijen, waarmee de meeste geschikte varianten worden geselecteerd. Deze drie partijen hebben de varianten beoordeeld:

- TBI-Mobilis BV (auteurs);
- Hollandia Infra;
- Ingenieursbureau Boorsma.

5.3.1 Aspecten TOM

In de TOM is er onderscheidt gemaakt tussen vier aspecten, waarbij ieder aspect een weging heeft op basis van importantie. De bepaling van de weging is weergegeven in *Bijlage 2 paragraaf 2.5.3*.



De aspecten zijn onderverdeeld in meerdere onderdelen waarop de variant een score dient te krijgen. De maximale score per onderdeel is vijf punten. De maximale score per aspect is gelijk aan de weging. De eindscore van een variant in de TOM is de optelsom van de score van de vier aspecten, de maximaal haalbare score is 100%.

5.3.2 Resultaat

Uit de TOM volgt het resultaat welke in *Bijlage 2 paragraaf 2.5.5* is weergegeven. De complete TOM met ingevulde waardes en onderbouwing is weergegeven in *Bijlage 5*. Variant 03, de stootbalk met dempcilinders, is beoordeeld met de hoogste score en Variant 12, de dynamische buigzame ligger, de laagste score. De vijf best beoordeelde varianten en de varianten welke opgenomen worden in de ontwerptool zijn:

- 01 Buigzame ligger;
- 03 Stootbalk met dempcilinders;
- 04 Kabel met remcilinder en slagboomconstructie;
- 08 Stootbalk met stalen buisprofiel;
- 11 Kunststof vangkabel met slagboomconstructie.

Deze varianten onderscheiden zich van de overige varianten door de brede toepasbaarheid, bewezen techniek in de praktijk, een brede variatie voor de inpassing en een grote beschikbaarheid van de varianten. De Buigzame ligger onderscheidt zich door de eenvoud van de constructie, waardoor de vrijwel onderhoudsvrij is en eenvoudig vervangbaar is na aanvaring. De stootbalk met dempcilinder en kabel met remcilinder zijn een bewezen techniek doordat het een flinke aanvaring heeft doorstaan, in Maasbracht en Empel respectievelijk. Waarna er binnen geringe tijd, scheepvaart weer kan passeren. De stootbalk met stalen buisprofielen en kunststofvangkabel zijn twee veelbelovende varianten, met beide weinig bewegende onderdelen wat resulteert in een onderhoudsarme constructie. Door te variëren in de geometrie, diameter kunststofkabel of type staalprofiel, kan er voor iedere sluis een bijpassend ontwerp worden gevonden.

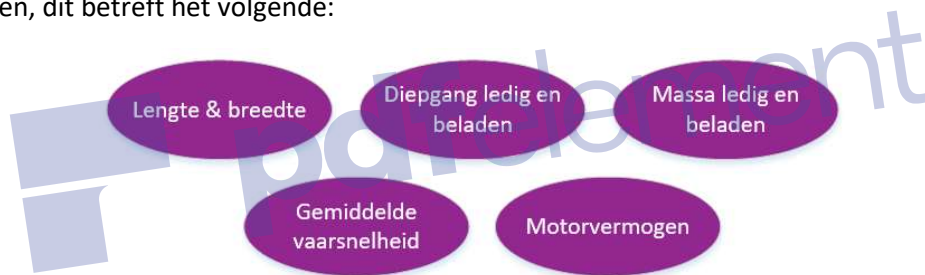
Hoofdstuk 6 Uitgangspunten Belastingen

Er zijn er verschillende invloedsfactoren van toepassing op het ontwerp van de aanvaarbeveiliging en er zijn ook factoren welke de belastingen bepalen. Dit zijn de scheeps- en sluisfactoren welke de grootte van de aanvaarenergie bepalen. De aanvaarenergie bepaalt de benodigde opnamecapaciteit van de aanvaarbeveiliging. Naast de aanvaarenergie is er onderzocht welke verschillende soorten belastingen maatgevend zijn voor het ontwerp en hoe deze met normen en voorschriften zijn te bepalen.

6.1 Invloedsfactoren voor de bepaling aanvaarenergie

6.1.1 Scheeps- en sluisgegevens

De aanvaarenergie volgt uit de massa en de snelheid van het schip. De snelheid is benaderd doormiddel van de gemiddelde snelheid of de grenssnelheid, waarin de grenssnelheid de maximale snelheid is. In de bepaling van de aanvaarenergie is de kans op voorkomen nog niet verwerkt, de kans dat een aanvaring plaatsvindt op grenssnelheid is vele malen kleiner dan een aanvaring met gemiddelde snelheid. De grenssnelheid is een theoretisch mogelijke snelheid, om dit te bereiken dient een schip met vol vermogen een sluis binnen te varen. De kans dat dit voorkomt is klein. De grenssnelheid is berekend met het “nat” oppervlak van het schip in verhouding met het wateroppervlak in de sluis. De gegevens van de scheepvaart zijn in *Bijlage 7 Gegevens Scheepvaart* weergegeven, dit betreft het volgende:

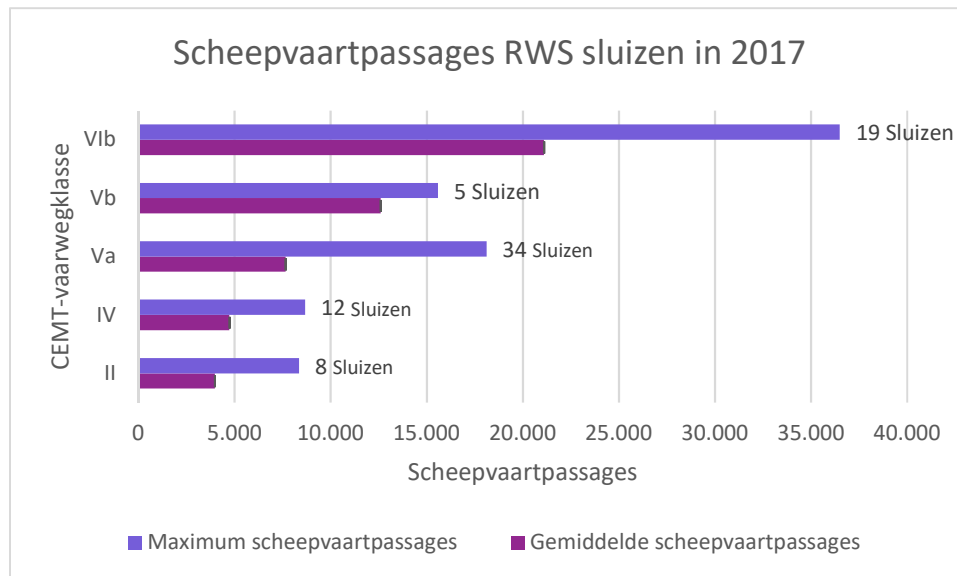


Voor het bepalen van het wateroppervlak in een sluis zijn de afmetingen van de betreffende sluis benodigd en de waterstanden van de sluis. Deze gegevens zijn per situatie uniek en zijn bij het opstellen en invullen van de aanvaarenergietool ingevuld. In *Bijlage 6 paragraaf 2* zijn de geometrie van sluizen uitgewerkt en waar deze minimaal aan dienen te voldoen.

6.1.2 Scheepsaanbod

Het scheepsaanbod heeft invloed op de grootte van de aanvaarenergie en op de kans van aanvaring. Bij een sluis waar grotere schepen passeren is de maatgevende aanvaarenergie, de energie welke de variant dient op te kunnen nemen, groter. Wanneer er meer grote schepen, CEMT-IV en hoger, passeren is de kans op een grote aanvaarenergie ook groter. Bij een sluis waar veelal kleine schepen, CEMT-III en lager, passeren is de maatgevende aanvaarenergie lager.

Het scheepsaanbod varieert per sluis, om een inschatting te geven van de scheepspassages in Nederland is bij Rijkswaterstaat voor alle RWS-sluizen het aantal scheepspassages opgevraagd voor het jaar 2017. Deze gegevens zijn weergegeven in *Figuur 6.1*, in *Bijlage 6 paragraaf 1.4* zijn per sluis het aantal passages in een tabel weergegeven. Er is hier gekeken naar het aantal scheepspassages van één sluis, bij grote sluizen passen meerdere schepen per sluis. Bij sluizen waar meerdere schepen per nivellering in de kolk passen, is het aantal nivelleringslagen lager dan het aantal scheepspassages.



Figuur 6.1 Gemiddelde en maximaantal scheepvaartpassages in Nederlandse sluizen in het jaar 2017; Bron: RWS

In de RVW-2017 is aangegeven dat er voor een minimumsluis een intensiteit dient te worden aangehouden van 10.000 à 12.000 passages beroepsvaart per jaar. Uit *Figuur 6.1* is te concluderen dat er enkel bij sluizen welke gelegen zijn in een vaarwegklasse IV of lager er een minimum van 12.000 passages een overschatting is. Een aanname van 9.000 á 10.000 geeft een meer realistische inschatting. Kijkend naar vaarwegklasse CEMT-Va en -Vb is de aanname vele malen realistischer. Het is het aan te raden wanneer een sluis, gelegen in een vaarweg Va of hoger, afwijkt van het criteria; minimumsluis, een simulatiemodel uit te voeren om de capaciteit te bepalen.

Toekomstig Scheepsaanbod

De verwachting is dat er in 2025, scheepsklasse CEMT-I t/m CEMT-III (met uitgang van klasse M5) veel minder gaan voorkomen. Dit brengt tevens een groei ter weeg bij de scheepvaartklassen hoger dan CEMT-III M4.^a Rijkswaterstaat heeft voor het Sluizencomplex Eefde een verdeling van het scheepsaanbod opgesteld, conform het GE-groeiscenario, waarin is geconcludeerd dat er in 2040 geen CEMT-I schepen passeren en forse mindering in passages van schepen CEMT-II.^b

6.2 Belastingen

De belasting is vastgesteld aan de hand van NEN-normen. Een NEN-nom is opgebouwd uit Nederlandse normen, Europese normen (NEN-EN, Eurocodes) of wereldwijd geldende normen (ISO). In NEN-normen geldend voor de aanvaarbeveiliging staan hoofdzakelijk (reken-)methoden om te bepalen of er aan een voorschrift uit het Bouwbesluit of Eurocode is voldaan. De belasting zijn bepaald op basis van de Eurocodes. Waarbij de Eurocode, Europese normen zijn voor het toetsen van de constructieve veiligheid van alle mogelijke bouwconstructies.

^a (De Vries, 2006)

^b (Aanvaarbescherming sluizen Delden en Hengelo en Eefde, 2015)

De Eurocode 0: (*Grondslagen van constructief ontwerp EN 1990*) en de Eurocode 1: (*Belastingen op constructies EN 1991*) zijn aangehouden. Kijkend naar de NEN-EN 1991 +NB, nationale bijlage, zijn de belastingen onderverdeeld in drie categorieën, te weten:

- Permanente belastingen;
 - o Eigen gewicht;
- Variabele belastingen;
 - o Windbelasting en Wrijvingsbelasting;
- Bijzondere belastingen;
 - o Aanvaarbelasting.

Zoals de naam doet vermoeden zijn permanente belastingen constant aanwezig op de constructie en variabele belastingen zijn niet constant aanwezig, deze komen wel met regelmaat voor. Een bijzondere belasting is eveneens een variabele belasting, echter komt deze niet met regelmaat voor. Voor een aanvaarbeveiliging is de aanvaarbelasting, bijzondere belasting, de maatgevende belasting.

Bij de belastingen is gegeven welke norm dient te worden geraadpleegd. Daarnaast schrijft de NEN-EN voor welke belastingcombinaties maatgevend zijn en van toepassing zijn op het ontwerp van een aanvaarbeveiliging. In *Bijlage 8 paragraaf 8.2.5 Grenstoestanden* hier verdiepend op ingegaan.

6.2.1 Bijzondere belastingen

Aanvaarbelasting

(NEN-EN 1991-1-7+C1+A1 (nl) Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen)

Bij een aanvaring wordt er energie overgedragen van het schip naar de aanvaarbeveiliging. Deze energie wordt kinetische energie genoemd. De massa en de snelheid van in dit geval het schip geeft de grootte van de energie. De energie is de benodigde arbeid waarmee een object in rust in de toestand waarin het verkeerd, te brengen. Energie verdwijnt niet, dit wordt overgebracht van kinetische energie naar massa vervorming, massa verplaatsing of elastische energie en vele andere soorten van energie. De aangebrachte kinetische energie is dynamische belasting genoemd.

De ROK 1.4 geeft een vergelijking voor het omzetten van aanvaarenergie (E_{kin}) naar aanvaarkracht ($F_{dx,max}$) geldend voor onder andere aanvaarbeschermingen. Deze vergelijking is niet van toepassing op aanvaarbeveiliging, want de vergelijking betreft een aanvaring met een star object. In ROK-vergelijking is uitgegaan van volledige energieopname van het schip middels vervorming van de boeg. De vergelijking berekend een statisch kracht bij een gegeven energieniveau. De mate van de vervorming van de boeg is onder andere afhankelijk van het type schip en snelheid, zie *Bijlage 9 energie omrekenen naar belasting*, waardoor de vervorming, en de energieopname, in elke situatie anders is. Er wordt vanuit gegaan dat de energie welke het schip in zich heeft volledig wordt overgedragen aan de aanvaarbeveiliging. De aanvaarbelasting volgt uit de aanvaarenergie en de af te leggen remweg van het schip.

6.2.2 Uitgangspunten ontwerp

Naast de normen geldend voor de belasting zijn er meer normen van toepassing om het ontwerp tot stand te brengen, deze zijn benoemd in *Bijlage 8 paragraaf 8.2.1*. De normen hebben geen invloed op de aanbeveling en berekening welke gegeven wordt in de Aanvaarbeveiligingstool. Deze normen zijn wel van invloed op een mogelijk verder ontwerp van de aanvaarbeveiliging.

Hoofdstuk 7 Aanvaarenergietool en aanvaarkans

7.1 Aanvaarenergietool

De aanvaarbelasting is de maatgevende belasting betreffende het ontwerp van de aanvaarbeveiliging, deze volgt uit de aanvaarenergie en de remweg. Er is een tool opgesteld welke de maatgevende aanvaarenergie bepaald, de Aanvaarenergietool. In een casestudy wordt met behulp van de contracteis van de aanvaarenergie, geldend voor de Zuidersluis van Eefde gevalideerd of de uitkomst uit de aanvaarenergietool overeenkomt. De uitgebreide uitwerking is in te zien in [Bijlage 10 Aanvaarenergietool](#), hierin zijn de situaties, scheepvaart en vergelijkingen nader toegelicht.

7.1.1 Situaties

In (Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399, p. paragraaf 4.1.3.) zijn ongevallen met schade aan het tweede keermiddel geanalyseerd. Op basis van deze analyse zijn er voor de aanvaarenergie in dit onderzoek twee situaties aangenomen:

1. Achteruitslaan faalt bij binnenvaren en schip vaart/drijft tegen de constructie;
2. Schip geeft vermogen bij om de sluis in te varen en door technisch mankement is het niet mogelijk om vermogen terug te nemen, het schip vaart versnelt tegen de constructie.

Voor de snelheid zijn twee benaderingen gebruikt, op basis van de gemiddelde snelheid en op basis van de grenssnelheid. De grenssnelheid geeft de maximale snelheid waarmee een schip een sluishoofd binnenvaart. Hierbij is de snelheid gelimiteerd door het doorstromend oppervlak en de weerstand van het water in het sluishoofd. De kans dat dit in werkelijkheid voorkomt is minimaal. Een schip dient maximaal vermogen te geven om dit te bewerkstelligen, alleen in uitzonderlijke situaties zou dit voorkomen.

Deze twee situaties schematiseren alle gevallen die in de Q1399 zijn benoemd. De maatgevende situatie is op voorhand te benoemen, dit is de situatie waar het binnenvaartschip vermogen bij geeft. Echter komt deze situatie bij één op de tien ongevallen voor, de kans is veel kleiner dan bij de andere situaties. De grenssnelheid geeft ook een hogere waarde dan de gemiddelde snelheid. Bij grenssnelheid dient een schip op maximaal vermogen door het sluishoofd te varen, de gemiddelde snelheid niet. De gemiddelde snelheid geeft wel het meest realistische scenario en is om deze reden opgenomen in de tool.

Voor het vaststellen van de aanvaarenergie dient te zijn nagegaan welke situatie maatgevend is, hierin dient de aanvaarenergie een realistisch beeld te geven. Aan de hand van verificaties is bepaald welke situatie het meest realistische beeld geeft. De aanvaarenergie dient hierbij niet significant groter te zijn. De aanvaarenergie dient een benadering te zijn van de energie die in de werkelijkheid voorkomt bij een aanvaring.

7.1.2 Bepalen aanvaarenergie

De aanvaarenergie van een schip is vastgesteld door de toepassing van *Vergelijking 7.1*. Deze vergelijking is afkomstig uit de (ROK 1.4, p. 51) waarbij een modelfactor van 1,10 opgenomen om rekening te houden met de energie afkomstig van de waterverplaatsing. Het bepalen van een kinetische energie wordt gedaan door $0,5mv^2$ in te vullen. Met de toevoeging van de modelfactor wordt de formule $1,10 \times 0,5mv^2$, herschreven volgt *Vergelijking 7.1*.

Vergelijking 7.1 Bepaling Kritieke aanvaarenergie in een kanaal

$$E_0 = 0,55 \times m_s \times v_s^2$$

Waarin:	E_0	= Aanvaarenergie	[kNm]
	m_s	= Massa van het schip	[ton]
	v_s	= Aanvaarsnelheid van het schip	[m/s]

7.1.3 Opstellen Aanvaarenergietool

Voor het opstellen van de aanvaarenergietool zijn de gegevens van het sluiscomplex en van de scheepvaart benodigd. De gegevens van scheepvaart zijn verzameld (zie *Bijlage 7*) en verwerkt in de tool voor het bepalen van de aanvaarenergie. De gegevens van het sluiscomplex dienen te worden ingevoerd in de "Inputtool" waarna de maatgevende aanvaarenergie wordt vastgesteld.

De grenssnelheid is bepaald aan de hand van de gegevens van de scheepvaart en het sluiscomplex, de vergelijking hiervoor is toegelicht in *Bijlage 10 paragraaf 1.2*. In de kolk geldt er een hogere grenssnelheid dan boven de drempel, omdat de kolk dieper is dan de aangesloten waterloop of het sluishoofd, waardoor er minder waterweerstand optreedt.

Het bepalen van de toe te voegen energie door vermogen (E_p) is benaderd door 10% van het maximaal vermogen te vermenigvuldigen met de vaarafstand en het kracht/vermogen van het schip. Voor het invaren is een maximum vaarsnelheid aangehouden, conform de ROK1.4; 3,0 m/s.^a Dit resulteert in vier benaderingen voor het bepalen van de aanvaarenergietool, te weten:

$$1.1 \quad E_0 = 0,55 \times m_s \times v_{gem}^2$$

$$1.2 \quad E_0 = 0,55 \times m_s \times v_{grens}^2$$

$$2.1 \quad E_0 = 0,55 \times m_s \times v_{gem}^2 + E_p$$

$$2.2 \quad E_0 = 0,55 \times m_s \times v_{grens}^2 + E_p$$

7.1.4 Casestudy bepalen aanvaarenergie Zuiderluis Eefde

De opgestelde aanvaarenergietool is ingevuld voor de bestaande Zuiderluis van Eefde. In het project Sluis Eefde heeft Rijkswaterstaat de (contract-)eis gesteld:

"Benedenhoofd dient Sluisdeuren in gesloten toestand vanaf de kolkzijde door middel van een scheepsvaartvriendelijke constructie te beschermen tegen aanvaring van alle voorkomende schepen bij aanvaring met een energie van maximaal 2,5 MJ zonder functioneel verlies."^{ab}

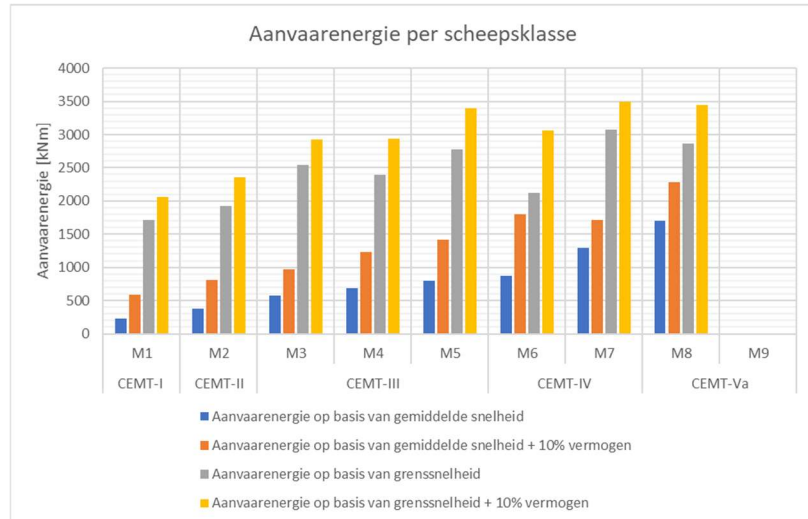
Het resultaat uit de casestudy is geverifieerd aan deze waarde voor de aanvaarbeveiliging. De maximale berekende aanvaarenergie dient 2,5 MJ (2500 kNm) te benaderen.

^a (Rijkswaterstaat, 2017) Conform de ROK, paragraaf 5.10, pagina 69

^b Contracteis Noordersluis Eefde - Rijkswaterstaat

Resultaten

De gegevens van de Zuidersluis van Eefde zijn in de tool verwerkt, hieruit volgen de resultaten welke zijn weergegeven in *Figuur 7.1*. In *Bijlage 10 paragraaf 2.2* zijn de resultaten in tabelvorm weergegeven. In de resultaten is er een groot verschil tussen de energie vast te stellen op basis van de gemiddelde snelheid en de energie bepaald op basis van de grenssnelheid. De grens-snelheid geeft hierbij altijd de grootste aanvaarenergie. Zoals verwacht geeft de benadering op basis van grenssnelheid + 10% vermogen de grootste aanvaarenergie.

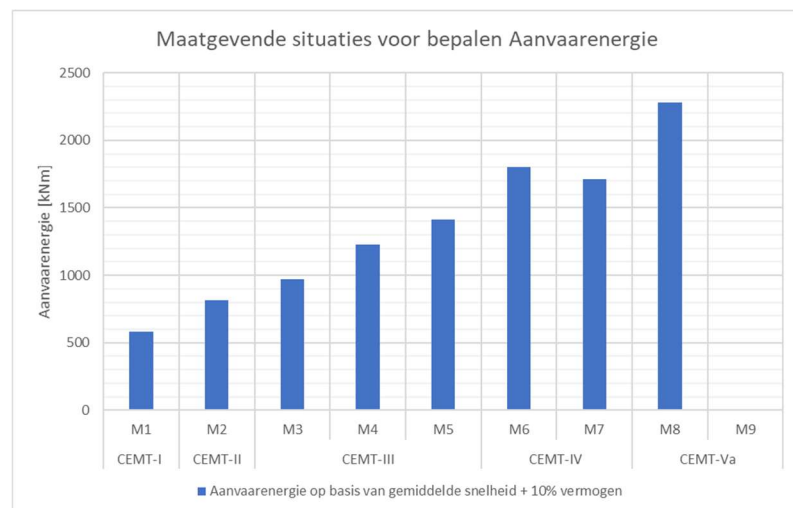


Figuur 7.1 Resultaten bepalen aanvaarenergie Zuidersluis Eefde uit aanvaarenergietool

In vergelijking met de opgegeven aanvaarenergie van Rijkswaterstaat overschrijden beide benaderingen op basis van de grenssnelheid de aanvaarenergie. De benadering op basis van gemiddelde snelheid + 10% vermogen geeft de beste benadering van de aanvaarenergie welke in werkelijkheid voorkomt. De grenssnelheid geeft een hoge inschatting en resulteert bij sluizen welke breder of dieper, de grenssnelheid benaderd hier 3,0 m/s, een grote overschatting van de aanvaarenergie.

Conclusie

Op basis hiervan is geconcludeerd dat de situatie gemiddelde snelheid + 10% vermogen de meest realistische inschatting is. De maatgevende aanvaarenergie dient vervolgens in de aanvaarkans te worden gecontroleerd op de kans op voorkomen. Wanneer hieruit volgt dat de kans op overschrijding te groot is, dient de maatgevende aanvaarenergie te worden verhoogd tot een waarde waarbij er een acceptabele overschrijdingskans is.



Figuur 7.2 Maatgevende situatie aanvaarenergie Zuidersluis Eefde

Verificatie conclusie

Ter verificatie of de conclusie geldig is bij meerdere sluiscomplexen in Nederland dient de tool te worden ingevuld voor andere sluizen. Hiervoor zijn Sluis Empel, Sluis III in Tilburg en Sluis Maasbracht aangehouden. Uit de resultaten blijkt dat de gemiddelde snelheid + 10% vermogen de meest realistische aanvaarenergie berekend. Echter dient het resultaat van de aanvaarenergietool te worden

gecontroleerd op de kans op overschrijding. De (contract-)eis van de aanvaarenergie welke is opgegeven door Rijkswaterstaat is in de meeste gevallen hoger, resulterend uit de overschrijdingskans. Het is opmerkelijk dat de opgegeven aanvaarenergie bij Sluis III en Sluis Empel gelijk zijn^a. Voor Sluis III geldt scheepsklasse CEMT-III M3 en voor Sluis Empel CEMT-IV M6 als maximaal toegestane scheepsklasse. Er kan geconcludeerd worden dat de overschrijdingskans bij Sluis III kleiner is dan bij Sluis Empel, er is immers geen significant verschil in het aantal sluispassages.^b Bij Maasbracht is de opgegeven aanvaarenergie lager dan Sluis III en Sluis Empel, bij Maasbracht passeren er grotere schepen dan bij Sluis III en Empel, maximaal CEMT-Va M8 bij Sluis Maasbracht.

Er wordt geconcludeerd dat het bepalen van de aanvaarenergie niet direct afhankelijk is van de maatgevende scheepsklasse, maar dat er nog andere factoren, waaronder de kans op voorkomen, zijn die mede vaststelt wat de maatgevende aanvaarenergie is.

7.2 Aanvaarkans

7.2.1 Algemene aanvaarkans

De aanvaarkans wordt vastgesteld door het aantal scheepspassages vermenigvuldigt met de kans dat een binnenvaartschip tegen een sluisdeur aanvaart. Dit komt gemiddeld genomen in Nederland neer op een kans van 1 op de 33.000 sluisnivelleringen dat een ongeval plaatsvindt. Dit is conform het rapport van RWS: aanvaarrisico's voor sluisdeuren Q1399^c. Als er 1.000 scheepspassages zijn dan bedraagt de kans op aanvaren 0,03 oftewel eens in de 33 jaar dat er een aanvaring voorkomt. Hoe meer scheepspassages er per jaar zijn, des te groter de aanvaarkans is.

7.2.2 Aanvaarkans bepalen

De algemene aanvaarkans bepaald de kans dat een schip, ongeacht de grootte van de aanvaarenergie, de tweede deur aanvaart. Dit zegt nog niets over de grootte van de energie die dient te worden opgenomen en hoe groot de kans is dat deze energie zich voordoet. Om de kans op aanvaring met een vastgesteld energieniveau te bepalen, dient de overschrijdingskans van het energieniveau te worden bepaald. De overschrijdingskans wordt per scheepsklasse bepaald en hiervan wordt de som genomen om de kans te bepalen, *Vergelijking 7.2* geeft dit weer.

Vergelijking 7.2 Bepalen overschrijdingskans vastgestelde aanvaarenergie

$$f = \sum_{i=CEM} (k_i \times m_{i,ongeladen} \times S_{i,ongeladen} + k_i \times m_{i,geladen} \times S_{i,geladen})$$

Waarin:

f	= De kans per jaar dat een schip met een vastgesteld energieniveau door de sluis passeert;
k_i	= Percentage scheepvaartpassages van een bepaalde CEMT-klasse; [%];
$m_{i,ongeladen}$	= Percentage ongeladen schepen; [%];
$m_{i,geladen}$	= Percentage geladen schepen; [%];
$S_{i,ongeladen}$	= Overschrijdingskans van een vastgesteld energieniveau door ongeladen schepen met klasse i ; Uit te lezen uit de overschrijdingskrommen in de Q1399; [-];
$S_{i,geladen}$	= Overschrijdingskans van een vastgesteld energieniveau door geladen schepen met klasse i ; Uit te lezen uit de overschrijdingskrommen in de Q1399; [-].

^a Beide sluisen hebben een systeemeis dat de aanvaarbeveiliging 2.000 kNm dient op te nemen, zie *Bijlage 10 paragraaf 3*.

^b Opgevraagd bij Rijkswaterstaat WVL

^c (Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399, 1992)

Het vermenigvuldigen van de algemene aanvaarkans met de kans dat een schip met een vastgesteld energieniveau door de sluis passeert, geeft de aanvaarkans van het keermiddel door een vastgesteld energieniveau of groter.

7.2.3 Casestudy Zuidersluis Eefde - Bepalen overschrijdingskans aanvaarenergie

Aanvaarkans

In *Bijlage 11 paragraaf 2* is de methode uitgewerkt om de aanvaarkans te bepalen en de uitwerking van de aanvaarkans, in deze paragraaf is de conclusie beschreven. Voor de aanvaarkans is uitgegaan van de (contract-)eis van de aanvaarenergie (2500 kNm) en niet de energie die volgt uit de aanvaarenergietool. Uit de uitwerking volgen de kansen voor het Sluiscomplex Eefde, *Tabel 7.1*.

Tabel 7.1 Resultaten aanvaarkans voor sluiscomplex Eefde

Algemene aanvaarkans	Kans op aanvaring [per jaar]	Kans groter dan 2500 kNm	Kans op kritieke aanvaring	Kans eens Per ... jaar
Zuidersluis huidig	0,18	0,098	0,018	57
Zuidersluis toekomst	0,16	0,055	0,009	114
Noordersluis toekomst	0,16	0,292	0,047	21

De huidige aanvaarkans van een aanvaring van 2500 kNm of groter is eens in de 57 jaar. De toekomstige aanvaarkans op een aanvaring van 2500 kNm of groter is een factor twee kleiner. Dit is te verklaren door de aanname dat de Noordersluis, alle schepen met een CEMT-klasse Va laat passeren, deze passeren niet meer de Zuidersluis. CEMT-klasse Va heeft een grote invloed op de overschrijdingskans, daardoor is de kans bij de Zuidersluis kleiner in de toekomst. In de Noordersluis is de aanvaarkans een factor drie groter dan de huidige situatie. Dit is te verklaren door de grote hoeveelheid CEMT-klasse Va schepen die hier in de toekomst gaan passeren. Met een aanvaarkans die een factor zes kleiner is dan de Noordersluis wordt er geconcludeerd dat het toepassen van een dermate grote aanvaarbeveiliging overbodig is.

In interviews met Rijkswaterstaat^a en de aannemer is duidelijk dat de wens is om de aanvaarbeveiliging in beide kolken gelijk te hebben. Mocht het voorkomen dat er een aanvaring is, dan is er de mogelijkheid om de onderdelen snel uit te wisselen. Dit zorgt voor een betere beschikbaarheid. Daarnaast is het nodig om reserveonderdelen te hebben van de aanvaarbeveiliging. Bij twee gelijke constructies kunnen dezelfde reserveonderdelen worden toegepast.

7.3 Conclusie en aanbevelingen

Voor het ontwerpen van een aanvaarbeveiliging is de aanvaarbelasting de maatgevende belasting. De belasting is uitgedrukt in een energie (kNm) en niet in kracht. De krachten volgen uit de aanvaarenergie over de benodigde remweg om een schip tot stilstand te laten brengen. De opgestelde aanvaarenergietool waarin de maatgevende energie per scheepsklasse is vastgesteld, is een correcte benadering van de werkelijkheid. Dit valt te concluderen uit de resultaten van de Casestudy bij de Zuidersluis Eefde. Hierbij is er opgegeven (contact-)eis van 2500 kNm, vrijwel gelijk aan het resultaat uit de aanvaarenergietool.

^a (Berentsen, 2019)

Hoofdstuk 8 Invloedfactoren

In *Hoofdstuk 6 paragraaf 6.1* zijn de factoren benoemd welke de grootte van de aanvaarenergie bepalen. In dit hoofdstuk zijn de factoren benoemd welke invloed hebben op de werking of de toepassing van een aanvaarbeveiliging. Het aangrijpingspunt van de aanvaarenergie op de variant heeft de grootste invloed op de werking, deze kan op verschillende manier aangrijpen. In dit hoofdstuk worden verschillende mogelijkheden beschreven, voor een uitgebreide uitwerking wordt verwezen naar *Bijlage 13*.

8.1 Invloedfactoren op de werking van de aanvaarbeveiliging

8.1.1 Aanvaarenergie

De grootte van de maatgevende aanvaarenergie bepaalt de hoeveelheid energie die maximaal dient te worden opgenomen. De aanvaarenergie zegt nog niks over de belasting, omdat de belasting volgt uit de energie en de remweg van het schip, zoals is vastgesteld in *hoofdstuk 4 paragraaf 3*. De opneembare energie betreft de capaciteit van dempcilinders, rimpelbuis, remcilinder, staalprofielen of kabel.

8.1.2 Aangrijpingspunt aanvaarenergie

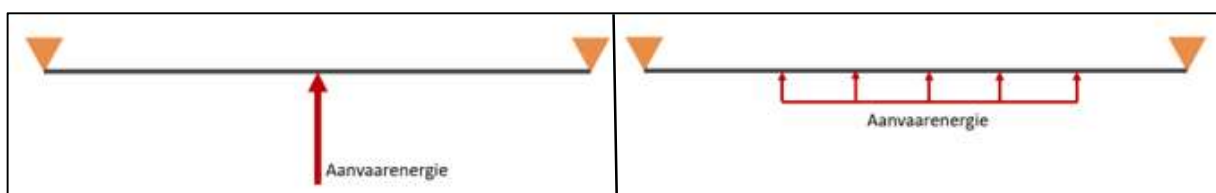
Onder een hoek/frontaal

Binnenvaartschepen benaderen al snel de breedte van de kolk, er is aangenomen dat een aanvaring altijd loodrecht op de aanvaarbeveiliging aangrijpt. Schepen kunnen onvoldoende scheefstand in de veelal smalle sluiskolk opdoen, de vaarrichting blijft onveranderd. De aanvaarenergie grijpt altijd loodrecht op de aanvaarbeveiliging aan.

Type schip

Er is in dit onderzoek onderscheidt gemaakt tussen twee type schepen, schepen met een spitse boeg en schepen met een vlakke boeg. De reactiekrachten op de constructie zijn bij de buigzame ligger, kabel met remcilinder en de kunststof vangkabel het grootst bij een aanvaring van een vlakke boeg. Omdat de vlakke boeg een kortere remweg geeft, daardoor zijn bij een gelijke energie de krachten groter in de aanvaarrichting. Krachten loodrecht op de kolkwand zijn groter bij een spitse boeg. De stootbalk met dempcilinders is hier een uitzondering op, want bij een gelijk energie zijn de remweg en krachten altijd gelijk, *Hoofdstuk 9 paragraaf 9.3.4*. De spitse boeg geeft echter wel een grotere kracht op de stootbalk, omdat er meer energie in een kleiner punt aangrijpt. Voor het ontwerp van de stootbalk is de aanvaring met een spitse boeg maatgevend.

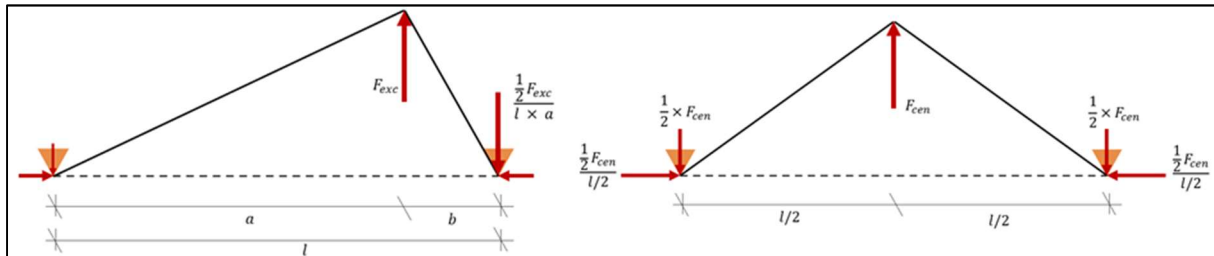
Er is aangenomen dat de breedte van het vlakke gedeelte gelijk is aan de breedte van het schip minus 0,5 meter aan weerszijden. Voor een CEMT-Va schip geldt dat de breedte van de voorkant 11,4 meter – 2 x 0,5 meter = 10,4 meter is. Het aangrijpunt van de aanvaarenergie is weergegeven als een gelijk verdeelde lijnlast, energie die aangrijpt over een zekere lengte, over de gehele breedte van de boeg, bij een spitse boeg is het aangrijppunt een weergegeven als een puntlast, energie die aangrijpt op één punt, *Figuur 8.1*.



Figuur 8.1 Schema's aangrijping aanvaarenergie per soort schip

(ex-)Centrisch aanvaring

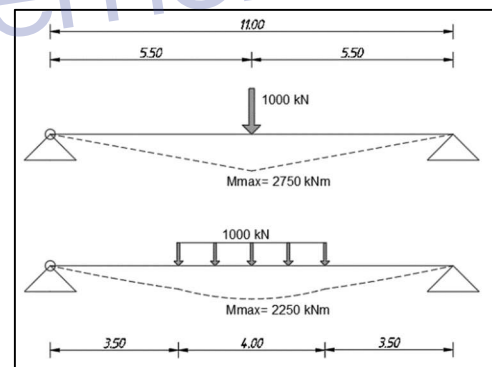
De locatie van het aangrijppunt van de aanvaarenergie is niet altijd centrisch, een excentrisch aanvaring is ook mogelijk. Bij een gelijke energie en remweg heeft een centrische aanvaring aan beide kolkwanden een gelijke belasting, een excentrische aanvaring geeft een grotere belasting in de kolkwand aan de zijde van aanvaring dan aan de overzijde. *Figuur 8.2* geeft de schematisatie van beide situaties weer.



Figuur 8.2 Centrische en excentrische aanvaring met aanvaarbelasting en resulterende krachten bij de kolkwanden

Bij een centrische aanvaring zijn de normaalkrachten, in horizontale richting, maatgevend voor de oplegreatie. Bij een excentrische aanvaring waarbij de aanvaarenergie gelijk is, zijn de dwarskrachten maatgevend. De aanvaring is dicht bij de kolkwand, de kleinste afstand (b) is gelijk aan de helft van het binnenvaartschip. Bij duwvaartschepen is dit nog dicht bij de kolkwand, echter grijpt de belasting op hetzelfde punt aan: in het midden van de boeg. De dwarskrachten zijn verschillend aan beide zijde, de kant van de aanvaring neemt een grotere kracht op. Voor dwarskrachten is dit de maatgevende belasting. De normaalkrachten zijn in deze situatie kleiner dan bij de centrische aanvaring, en zijn niet maatgevend.

De maatgevende belastingsituatie voor het maximale moment is een centrische aanvaring. Wanneer een schip met een spitse boeg een stootbalk aanvaart is er een grotere vervorming/doorbuiging ontstaan dan wanneer dit gebeurt door een schip met een vlakke voorzijde. Dit is goed af te leiden aan het buigend moment van een ligger op twee steunpunten, *Figuur 8.3*. Bij een gelijke aanvaarkracht geeft het schip met een spitse boeg een groter buigend moment dan waarna deze kracht aangrijpt over een breder oppervlak, zoals bij een vlakke boeg. Deze situatie is van belang voor de stootbalk met dempers en de buigzame ligger, voor de overige aanvaarbeveiligingen geldt dat er geen rekening dient te worden gehouden met het buigend moment. Bij de kabels treedt er geen buigend moment op.



Figuur 8.3 Verskil in buigend moment ligger met puntlast en lijnlast

8.2 Invloedfactoren geometrie aanvaarbeveiliging

8.2.1 Ruimte tussen stopstreep en keermiddel

De aanvaarbeveiliging is achter de stopstreep in de kolk geplaatst. In de kolk is een markering aangebracht, een stopstreep, waar het schip achter dient te blijven gedurende invaren en nivelleren. Het (Richtlijnen Vaarwegen 2017, p. 73) beschrijft het volgende: “Voor de stopstrepen gelden de volgende minimumafstanden tot karakteristieke punten op de kolkwand: Bij beveiligde sluisdeuren: 1,00 meter vanaf de opvangconstructie.” Hieruit is te concluderen dat de remweg waarbinnen een variant het schip afremt, volgt uit de stopstreep minus één meter. Wanneer er een aanvaarbeveiliging

is toegepast in een renovatieproject, is het veelal wenselijk om niet in te leveren op de schutlengte. Om dit te bereiken dient de bestaande stopstreepafstand te worden gehandhaafd. Dit is van grote invloed op de keuze van de aanvaarbeveiliging vanwege de veelal beperkte resterende remweg.



Afbeelding 8.1 Stopstreep voor aanvaarbeveiliging - Sluis Empel; Geel geeft de stopstreepafstand weer; Groen geeft de afstand weer tussen de stopstreep en de aanvaarbeveiliging

8.2.2 Levensduur

De ROK 1.4 beschrijft dat de kunstwerken in beheer van Rijkswaterstaat gelegen zijn in hoofd(vaar-)wegen, waardoor ze automatisch in gevolgklasse CC3 zijn geschaald.^a Een nieuw te bouwen sluiscomplex valt onder de gevolgklasse CC3, met een minimale ontwerplevensduur van 100 jaar. Waarbij er een uitzondering is aangehouden voor de mechanische uitrusting en hydraulische installaties/-cilinders; minimaal 50 jaar. Deze levensduur geldt voor aanvaarbeveiliging welke meerdere aanvaringen kunnen verwerken, dit geldt voor de starre balk met dempcilinders en de kabel met remcilinder. Voor de overige constructies welke na een aanvaringen vervangen dienen te worden, geldt dat de levensduur gelijk is aan de kans dat de aanvaarbeveiliging wordt aangevaren.

Bij constructies met langere levensduur is het gewenst om een constructie onderhoudsarm te ontwerpen, ten aanzien van de beschikbaarheid.

8.2.3 Beschikbare ruimte

Aan weerszijde van de sluiscolk is ruimte vereist voor de verankering van de aanvaarbeveiliging en in sommige gevallen ruimte nodig voor de energievernietiger. De benodigde ruimte aan weerszijde van de colk is per aanvaarbeveiliging en per sluis verschillend. Bij nieuwbouw sluizen is er veelal rekening te houden met de inpassing van een aanvaarbeveiliging. Bij bestaande sluizen is dit veelal niet mogelijk, hierbij dient er in de bestaande constructie een plaats te worden gerealiseerd. Voor de toepassing van een aanvaarbeveiliging in een bestaande sluis dient de kwaliteit van de constructie te worden onderzocht. Dit is bijvoorbeeld geldend voor de constructie waarop de aanvaarbeveiliging wordt gefundeerd. Bij het project: Renovatie Sluis Delden, is in de kolkwanden een uitsparing gerealiseerd ten behoeve van de dempcilinders van de aanvaarbeveiliging, *Afbeelding 8.2*. Hierbij is de constructie, de kolkwanden, eerst



Afbeelding 8.2 Uitsparing in een bestaande kolkwand voor dempcilinders van een aanvaarbeveiliging; Project: Renovatie Sluis Delden;

^a (Rijkswaterstaat, 2017, p. 36)

uitvoerig onderzocht of de belastingen vrijkomend bij aanvaring opneembaar is. Er wordt geconcludeerd dat bij bestaande constructies een aanvaarbeveiliging gewenst is welke geringe effecten heeft op de constructie. Waarbij veelal geldt dat de aanvaarbeveiliging weinig ruimte vereist. In *Bijlage 13 paragraaf 1.4* is per variant de benodigde ruimte benoemd en de mogelijkheden tot inperking van de benodigde ruimte. De belangrijkste voorwaarden om toepassing mogelijk te maken zijn:

- Stootbalk met dempcilinder of rimpelbuis: sparing van; >1 meter breed en >4 diep;
- Kabel met remcilinder: >5 meter breed en >2 meter diep en vice-versa.

8.2.4 Plaatsingshoogte

Uit de interviews met Hollandia Infra BV en Ingenieursbureau Boorsma, *Bijlage 15*, blijkt dat voor het juist functioneren van de aanvaarbeveiliging, deze met de onderzijde minimaal halve meter boven de kolkwaterstand komt te liggen. In deze situatie wordt de kans verkleind dat het schip over de aanvaarbeveiliging heen vaart, waardoor er weinig tot geen energie wordt opgenomen. Een geladen schip, welke een grote diepteligging heeft, kan bij een te hooggeplaatste aanvaarbeveiliging er onderdoor schieten. Bij een halve meter boven de kolkwaterstand is dit zoveel als mogelijk voorkomen. In *Figuur 8.4* zijn beide situaties weergegeven met een aanvaarbeveiliging halve meter boven het waterpeil. Er wordt verwezen naar *Bijlage 14* voor de tekeningen met alle onderzochte boegvormen van de schepen en de maatgevende situaties betreffende de aanvaarhoogte en plaatsingshoogte van



de aanvaarbeveiliging.

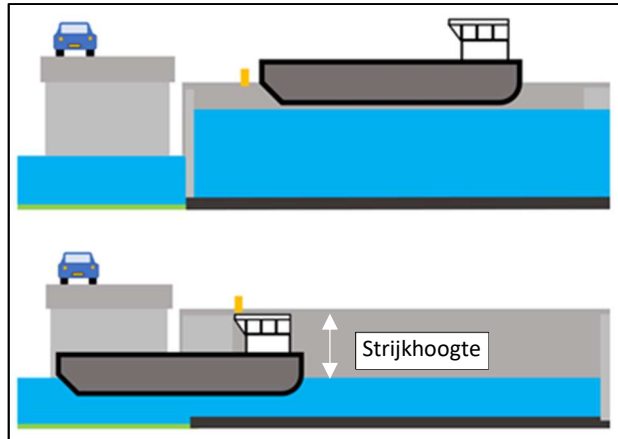
Figuur 8.4 Maatgevende situaties bepalen plaatsingshoogte aanvaarbeveiliging

Er zijn eisen gesteld aan de hoogte van het maximum schutpeil tot aan de bovenzijde van de kolkwand. Deze eisen zijn van invloed op de plaatsingshoogte van de aanvaarbeveiliging. Het RVW-2017 beschrijft: een minimumhoogte van 1,5 meter bij scheepsklasse I t/m IV, bij de klasse V en hoger op 2,5 meter boven het maximum schutpeil. Dit betekent dat bij het aanhouden van 0,5 meter de aanvaarbeveiliging 1 of 2 meter verdiept dient te zijn aangebracht in de kolkwanden. Bestaande sluiscomplexen zijn veelal niet gerealiseerd op basis deze regelgeving welke destijds niet geldend was. Hierbij is het mogelijk om de aanvaarbeveiliging boven op de kolkwanden toe te passen.

8.3 Invloedfactoren toepassing aanvaarbeveiliging

8.3.1 Doorvaarthoogte

De minimumdoorvaarthoogte is afhankelijk van het maximum schutpeil in de kolk. De minimumdoorvaarthoogte is van toepassing bij bruggen en hefdeuren én ook voor de onderdoortocht van een aanvaarbeveiliging. Een vaste aanvaarbeveiliging is alleen toepasbaar wanneer doorvaarthoogte voldoende is dat er onder doortocht mogelijk is, zoals is weergegeven in *Figuur 8.5*. Het RVW-2017 stelt eisen aan de minimumdoorvaarthoogte, echter is er de mogelijkheid om hiervan af te wijken door de vaarwegbeheerder. De vaarwegbeheerder kan beslissen om voor de doorvaarthoogte gelijk te stellen aan de maximaal voorkomende strijkhoopte, bovenzijde schip tot waterstandsniveau, van het de schepen welke door de sluis passeren. In *Tabel 8.1* is de minimale doorvaarthoogte per vaarwegklasse benoemd.



Figuur 8.5 Visualisaties doorvaarthoogte

Tabel 8.1 Minimum doorvaarthoogte vaste bruggen beroepsvaart

Vaarwegklasse	Minimale doorvaarthoogte [m]	Plaatsingshoogte AVB t.o.v. waterpeil voor nivelleren [m]	Benodigd verval voor doortocht [m]
CEMT-I	5,25	0,50	4,75
CEMT-II	6,10	0,50	5,60
CEMT-III	6,60	0,50	6,10
CEMT-IV	7,00	0,50	6,50
CEMT-Va	9,10	0,50	8,60

Hoofdstuk 9 Ontwerptool

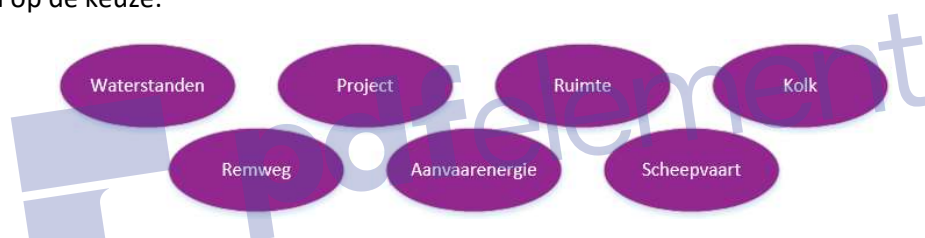
Voor de gekozen varianten is in Excel een ontwerptool opgesteld. Deze tool bevat een inputsheet met de in te voeren sluisgegevens en aanvaarenergie. De tool geeft weer welke variant geschikt is bij de betreffende input. De varianten zijn getoetst op het opnemen van de maatgevende aanvaarenergie. Het resultaat is de best mogelijke, toepasbare, oplossing welke resulteert in een zo klein mogelijke op te nemen reactiekracht voor de kolkwand. De resultaten zijn in de tool weergegeven in een schematisatie met de relevante parameters, zoals: geometrie, remweg, reactiekrachten en opgenomen energie. In dit hoofdstuk is benoemd hoe er tot dit resultaat is gekomen, welke situaties maatgevend zijn en welke berekeningsmethode is aangehouden. De uitgebreide onderbouwing voor de berekening per variant is uitgewerkt in *Bijlage 16 Ontwerptool*.

De opgenomen varianten in de tool zijn:

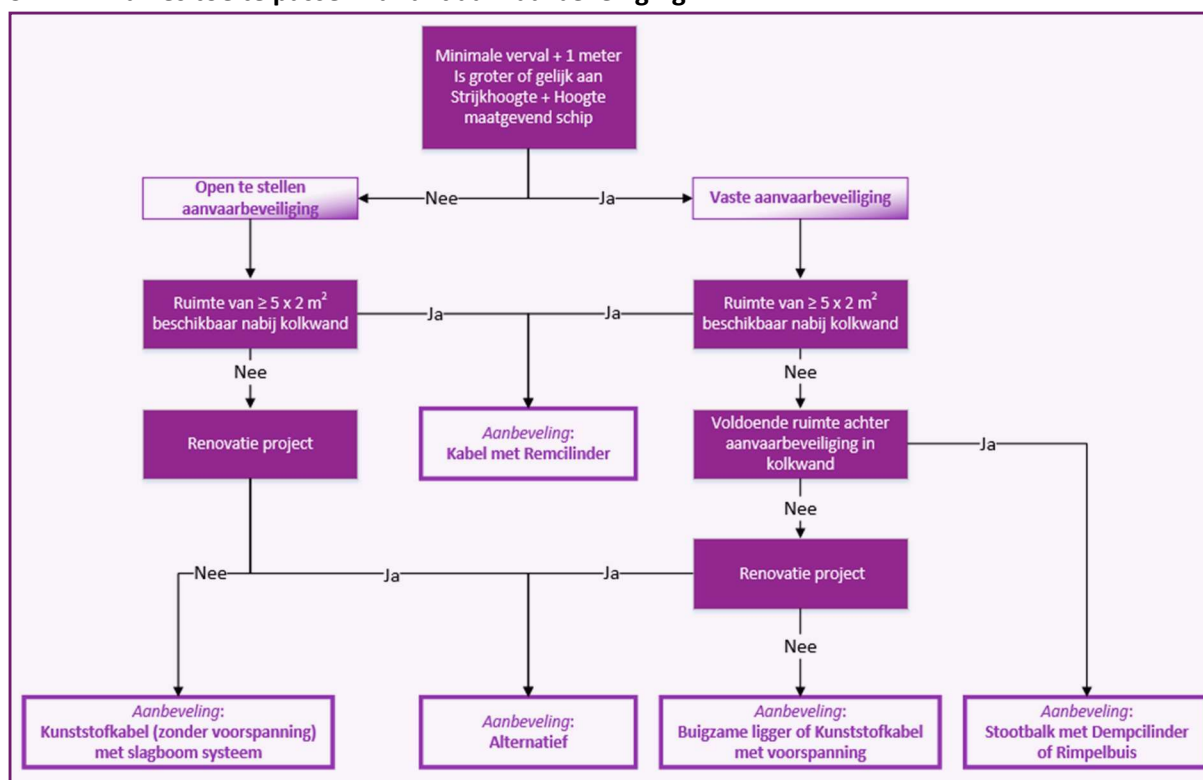


9.1 Input

De inputtool bepaald vanuit de relevante parameters betreffende het sluiscomplex welke variant het meest geschikt is. Uit de factoren, *Hoofdstuk 6* en *Hoofdstuk 8*, is gebleken dat deze factoren van invloed zijn op de keuze:



9.1.1 Advies toe te passen variant aanvaarbeveiliging



Minimale verval + 1 meter
Is groter of gelijk aan
Strijkhoogte + Hoogte
maatgevend schip

De voorkomende waterstanden bepalen wat het minimaal verval is en de doorvaarthoogte. Dit bepaalt de hoogte van het maximaal toe te laten schip. Is het schip hoger dan het minimaal verval dan dient de aanvaarbeveiliging open te stellen zijn, de varianten met slagboomconstructie zijn dan geschikt om toe te passen.

Ruimte van $\geq 5 \times 2 \text{ m}^2$
beschikbaar nabij kolkwand

De beschikbare ruimte nabij de kolk bepaald de grootte van een eventuele constructie voor een remcilinder naast de kolk. Wanneer de benodigde ruimte beschikbaar is wordt de kabel met remcilinder aanbevolen. Deze heeft de voorkeur om te worden toegepast vanwege zijn relatief kleine reactiekrachten op de kolkwanden.

Renovatie project

Bij een renovatiesluis dienen de reactiekrachten beperkt te zijn, dit geeft een kleinere impact op de bestaande sluis. Bij nieuwbouw zijn de kolkwanden ontworpen op de reactiekrachten en zijn er meer varianten toe te passen. Een kunststofkabel heeft grote krachten en is ongeschikt om toe te passen bij een renovatiesluis.

Voldoende ruimte achter
aanvaarbeveiliging in
kolkwand

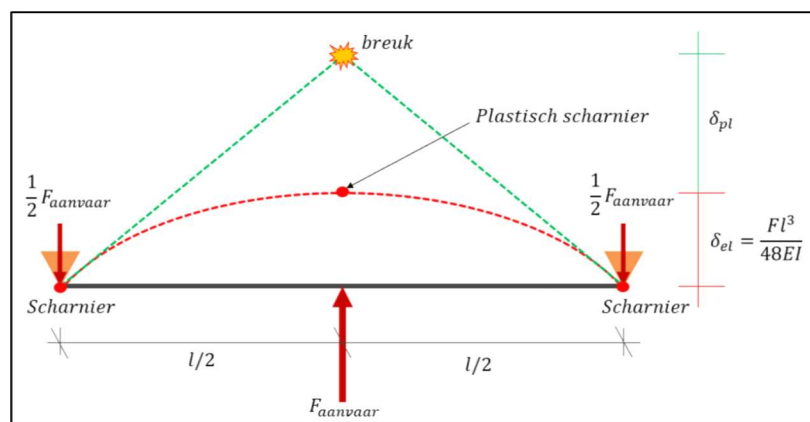
De stootbalk maakt gebruik van dempcilinders of rimpelbuizen. Deze dienen te worden ingepast in of op de kolkwand. In een renovatieproject waar een vaste aanvaarbeveiliging wordt toegepast is de stootbalk met cilinders een geschikte oplossing welke relatief kleine reactiekrachten geeft op de kolkwanden.

9.2 Buigzame ligger

Voor de buigzame ligger is er gebruik gemaakt van stalen H-profielen, te weten; IPE, HEA, HEB en HEM welke enkel, dubbel, driemaal of viermaal zijn toegepast. De ontwerptool kiest het type H-profiel in combinatie met het aantal op basis van de gegeven input. Het uitgangspunt voor de keuze is dat de maatgevende energie binnen de maximale remweg wordt opgenomen, waarbij er zo klein mogelijke reactiekrachten dienen optreden. De ligger bevindt zich op een vaste hoogte en op een vaste plaats in de oplegging in de kolkwand. Bij aanvaring dient de ligger te vervormen waardoor deze de maatgevende energie opneemt, dit betreft zowel elastisch- als plastisch vervorming.

9.2.1 Energieopname

De buigzame ligger is geschematiseerd als een ligger op twee steunpunten met scharnierende opleggingen. Bij vervorming in de plastische fase ontstaat er een derde scharnier op de plaats waar het grootste moment ontstaat, dit is het plastisch scharnier genoemd. In *Figuur 9.1* is het schema voor de buigzame ligger weergegeven voor zowel elastische als plastische vervorming.



Figuur 9.1 Ontstaan van plastische scharnier bij een ligger op twee steunpunten, centrisc belast

Vervorming tot aan optreden plastisch scharnier (elastisch fase)

De vervorming (δ_{el}) tot aan het optreden van het plastische scharnier is gedefinieerd als de elastische fase van de ligger, dit deel is weergegeven in het rood in *Figuur 9.1*. De grootte van de elastische vervorming wordt vastgesteld met de toepassing van het “vergeet me nietje” van de doorbuiging van een ligger op twee steunpunten. Waarin de belasting (F_p) volgt uit het plastisch moment (M_p) en de staalkwaliteit (f_y) van het staalprofiel. De energieopname (E_{el}) volgt uit de vervorming (δ_{el}) te vermenigvuldigen met de belasting (F_p).

Vervorming tot aan optreden breuk (plastische fase)

Vanaf het moment van het ontstaan van een plastisch scharnier treedt de plastische fase in werking. Deze fase gaat door tot er breuk optreedt. In de plastische fase vervormd de ligger significant meer dan in de elastische fase, de plastische fase bepaalt het grootste deel van de energieopname.

De energieopname in de plastische fase is berekend door de plastische rotatiecapaciteit te vermenigvuldigen met het plastisch moment (M_p). Dit is tevens te benaderen door de plastische vervorming te vermenigvuldigen met de belasting (F_p). De maximale vervorming (δ_{pl}) volgt uit de maximale plastische rotatiecapaciteit (φ_{pl}) en de lengte van de ligger.

Plastische rotatiecapaciteit

Voor het vaststellen van de plastische rotatiecapaciteit geeft het onderzoeksrapport^a *Vergelijking 9.1*. In dit onderzoeksrapport is geconcludeerd dat de rotatie afhankelijk is van de plastische kromming (K_{pl}) en de plastische lengte (L_p) van het scharnier.

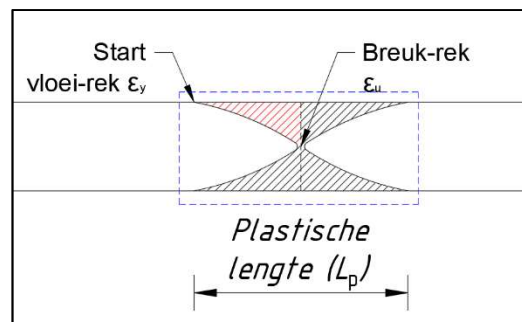
Vergelijking 9.1 Rotatiecapaciteit plastische scharnier

$$\varphi_{pl} = \kappa_{pl} \times l_p$$

Waarin:	φ_{pl}	= Maximale plastische rotatiecapaciteit	[rad]
	κ_{pl}	= Plastische kromming	[m ⁻¹]
	l_p	= Plastische lengte	[m]

Plastische lengte

De plastische vervorming van het scharnier ontstaat in een bepaalde zone, de plastische zone; *Figuur 9.2*. De plastische zone heeft een bepaalde lengte, genaamd de plastische lengte (l_p). De lengte is te bepalen met behulp van de vormfactor behorend bij het toegepaste staalprofiel, *Vergelijking 9.2*. De vormfactor is de verhouding tussen de plastische- en elastische moment eigenschappen van het profiel.



Figuur 9.2 Plastische zone (l_p) in ligger

Vergelijking 9.2 Plastische lengte

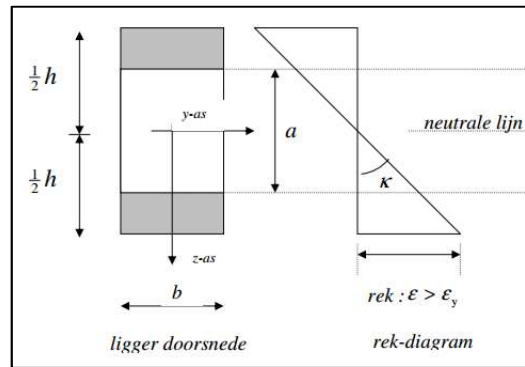
$$l_p = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \times l$$

Waarin:	α	= vormfactor	[-]
	l	= lengte ligger	[mm]

^a (Rotatiecapaciteit van plastische scharnieren in beton, 2007, p. 38)

Plastische kromming

De plastische kromming (κ_{pl}), de totale kromming van elastisch tot aan breuk, is te herleiden uit het rek-diagram van de toegepaste staalsoort en doorsnede van het profiel, *Figuur 9.3*. In de plastische zone zijn er verschillende trajecten van staalrek aanwezig. In het begin van de plastische fase treedt er vloeirek (ε_y) op. Wanneer de vervorming doorzet gaat de vloeirek langzaam over tot er aan het eind van plastische fase breukrek (ε_b) optreedt. In de plastische zone bestaat de kans dat er zowel vloeirek als breukrek optreedt. Door uit te gaan van een gemiddelde optredende rek (ε_{gem}) in deze zone is de plastische kromming te bepalen, *Vergelijking 9.3*.



Figuur 9.3 Kromming (κ_{pl}) in rek-diagram (plastische fase)

Vergelijking 9.3 Plastische kromming

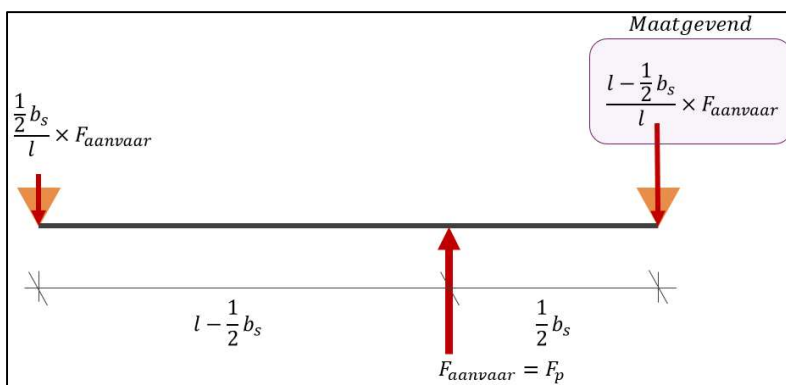
$$K_{pl} = \frac{\varepsilon_{gem}}{\frac{1}{2}h_y}$$

Waarin: h_y = Profiel hoogte sterke as (y) [mm]
 ε_{gem} = Gemiddelde rek in plastische zone [%]

9.2.2 Opleggingen

Oplegreacties

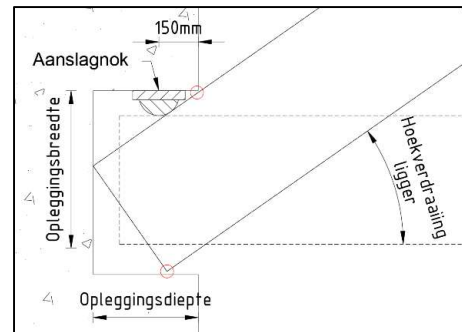
De maatgevende belasting voor de oplegreactie is een excentrische aanvaring, hierbij is één oplegging zwaarder belast dan de andere oplegging, *Figuur 9.4*. Doordat de ligger scharnierend is opgelegd draagt de ligger zijn krachten aan de kolkwand af middels drukkracht. De krachten zijn niet gelijkzijdig verdeeld over de oplegging wat wel het geval is bij een centrisc aanvaring. Bij een excentrische aanvaring vervormd de ligger minder waardoor de reactiekrachten nog groter zijn. De hoekverdraaiing van het plastisch scharnier is gelijk aan die bij een centrisc aanvaring, de vervorming is bij een excentrische aanvaring kleiner. Met behulp van verhoudingen van de hoeken wordt de vervorming bepaald.



Figuur 9.4 Bepalen oplegreacties bij maatgevende aanvaring (excentrisch), met b_s = breedte maatgevend schip

Dimensionering oplegging

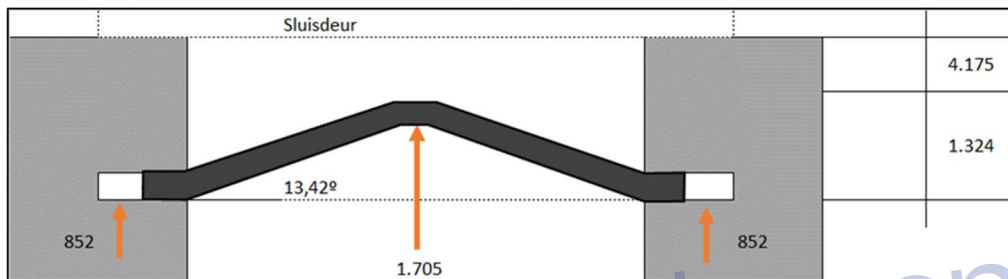
In *Bijlage 16 paragraaf 1.4* is de bepaling van de dimensionering van de oplegging uitgewerkt. De opleggingsdiepte dient zodanig te zijn dat bij maximale vervorming de hoekverdraaiing bij uiteinde van de ligger er niet voor zorgt dat de ligger van oplegging afkomt, *Figuur 9.5* geeft dit weer. Daarnaast dient de ligger bij maximale vervorming zo te verdraaien dat de hoek van de sponning zoveel als mogelijk onbeschadigd blijft.



Figuur 9.5 Oplegging buigzame ligger met aanslagnok

9.2.3 Resultaat en validatie

In de tool is bij de resultaten een schematisatie van de stootbalk weergegeven, hierin zijn alle relevante parameters in weergegeven zoals de belasting op de kolkwanden en de remweg. *Figuur 9.6* geeft een voorbeeld van een resultaat weer, dit is tevens het resultaat van Sluis III in Tilburg waarmee de tool is gevalideerd.



Figuur 9.6 Uitkomst ontwerptool: verdeling aanvaarbelasting bij centrale aanvaring met input van Sluis III

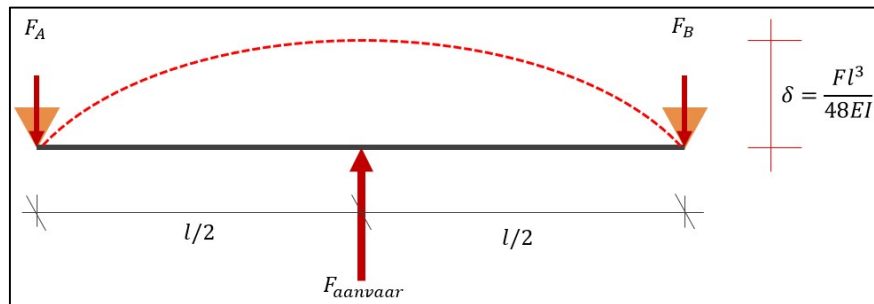
Bij Sluis III is er driemaal een HEB500 ligger, S355, van 11 meter toegepast met de oplegging in de schotbalksponning welke 2000 kNm aan energie dient op te nemen. In de berekening voor Sluis III is uitgegaan van een centrale aanvaring^a. Dit resulteert in vervorming en af te dragen kracht; Een vervorming van totaal 1238 mm (elastisch 68mm + plastisch 1170 mm) en een op te nemen belasting door de kolkwanden van 1661 kN.

De gegevens van Sluis III zijn verzameld en ingevuld in de tool. Hieruit volgt dat in de vervorming tot aan breuk, van driemaal HEB500, 2258 kNm aan aanvaarenergie is opgenomen. Hierbij is de vervorming in totaal 1324 mm (elastisch 78 mm + plastisch 1246 mm) en de op te nemen belasting door de kolkwanden is 1705 kN. De vervorming, belastingen en energieopname komen redelijk overeen. Het verschil tussen de resultaten is te verwaarlozen, de ontwerptool geeft een realistische inschatting.

^a (DO-Berekening Benedenhoofd - Verbreding Whilhelminakanaal Tilburg - WHK-202-2515-32-BER-BET-001_V2.0_DO, 11-2013)

9.3 Stootbalk met dempers

De stootbalk welke bij aanvaring de energie overbrengt naar de dempers dient minimaal te vervormen zodat alle energie door de vervorming van de demper wordt opgenomen. Hiervoor is een minimale doorbuigings eis aan de stootbalk gesteld van 0,3% van de lengte (l). Met behulp van de maximale doorbuiging (δ) en de maatgevende belasting is het benodigde traagheidsmoment (I) vast te stellen. De maatgevende belasting is de aanvaarbelasting ($F_{aanvaar}$), deze wordt bepaald door de som van de oplegreacties ($F_A + F_B$). In *Figuur 9.7* is het schema van de stootbalk weergegeven.



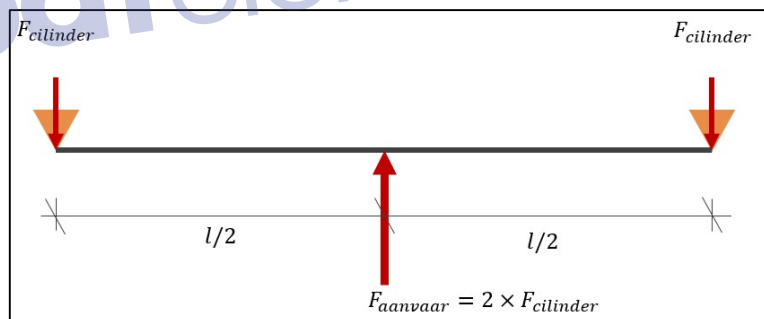
Figuur 9.7 Schema stootbalk

9.3.1 Maatgevende situaties

De maatgevende aanvaarbelasting van de stootbalk verschilt bij de toepassing van een dempingscilinder of rimpelbuis. Deze situaties stelt vanuit de reactiekracht van de cilinder/rimpelbuizen de maatgevende aanvaarbelasting vast, waarop de stootbalk dient te zijn ontworpen.

Dempcilinder

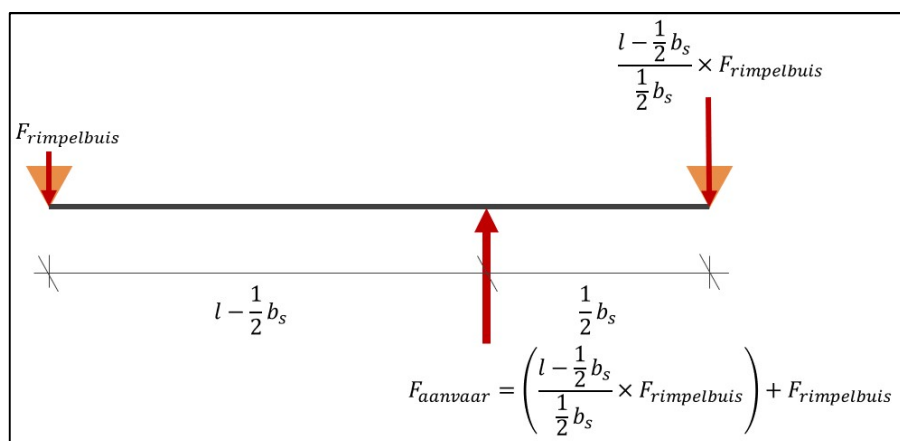
Bij de stootbalk met dempcilinders geeft een centrische aanvaring de maatgevende kracht waarop de stootbalk is gedimensioneerd. Een centrische aanvaring geeft een aanvaarbelasting gelijk aan twee keer de maximale reactiekracht van de cilinder ($F_{cilinder}$).



Figuur 9.8 Maatgevende belasting bij stootbalk met dempcilinders

Rimpelbuizen

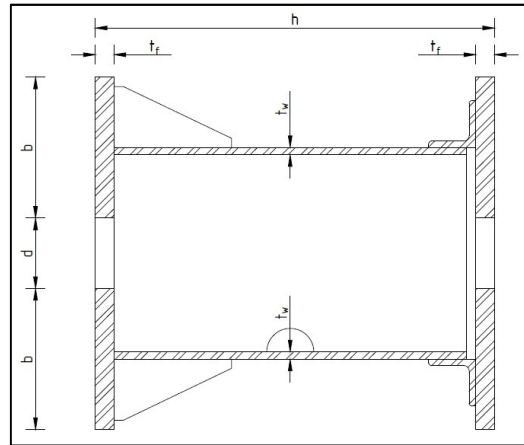
De maatgevende kracht geldt voor de stootbalk met rimpelbuizen bij een excentrische aanvaring. De oplegreactie is aan de zijde van aanvaring groter dan de bezwijkkracht ($F_{rimpelbuis}$) van de rimpelbuis, aan de andere zijde is de oplegreactie gelijk aan de bezwijkkracht.



Figuur 9.9 Maatgevende belasting bij stootbalk met rimpelbuizen, met b_s is breedte maatgevend schip

9.3.2 Dimensionering stootbalk

Uit de maximale doorbuiging en de maatgevende dwarskracht volgt de benodigde stijfheid (I_{ben}) van de stootbalk. Door de benodigde stijfheid gelijk te stellen aan de stijfheid van de stootbalk ($I_{stootbalk}$) is de geometrie van de stootbalk bepaald. Op basis van het ontwerp weergegeven in *Figuur 9.10* zijn de breedte, hoogte, dikte lijf en dikte flens vast te stellen. De stootbalk bestaat uit twee identieke profielen welke verbonden zijn middels schotten. De stijfheid van de balk is gelijk aan tweemaal de stijfheid van een profiel. De stijfheid van het profiel wordt bepaald met de stelling van Steiner, voor de uitwerking van deze stelling wordt verwezen naar *Bijlage 16 paragraaf 2.4*.

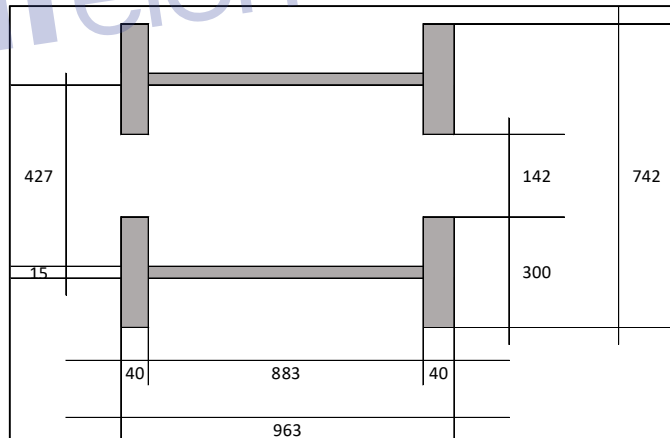


Figuur 9.10 Doorsnede stootbalk op basis van de stootbalk Delden en Hengelo

Voor de breedte van de flensen (b) is 300 mm aangehouden, het lijf van de ligger heeft een vaste dikte (t_w) van 15 mm. De dikte van de flens (t_f) wordt vastgesteld aan de hand van de hoogte, minimaal is deze 25 mm en maximaal is deze 40 mm. De waarde zijn op basis van bestaande HEM- en HEB-profielen, een groter profiel geeft een dikkere flens. De hoogte van de stootbalk (h) is de variabele. Aan de hand van deze variabele is de stijfheid van een profiel te bepalen. Dient er een hogere stijfheid te zijn, dan wordt dit bereikt door een grotere hoogte toe te passen. De afstand (d) tussen de twee profielen heeft geen invloed op de stijfheid van de stootbalk, wel geeft een grotere afstand tussen de profielen een stabielere ligger.

9.3.3 Resultaat en validatie

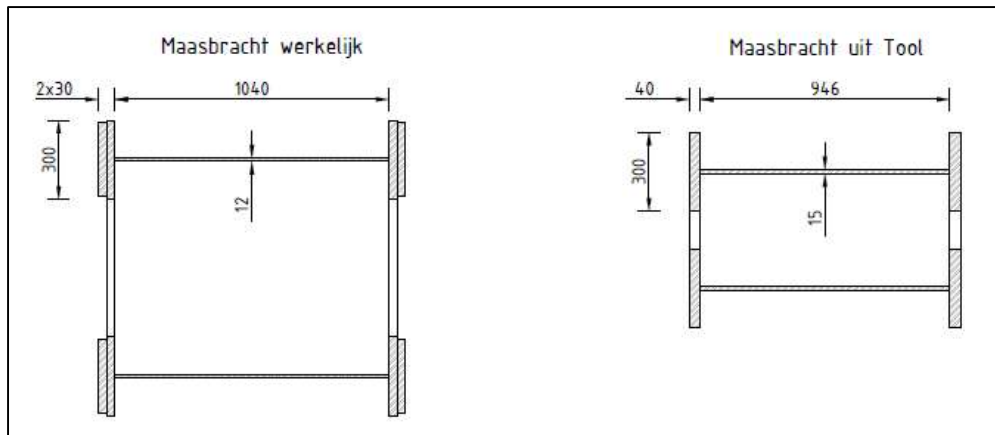
De geometrie van de stootbalk volgt uit de ontwerptool van de dempingscilinders als die van de rimpelbuis. Het resultaat is het minimaal toe te passen profiel, bij opgegeven reactiekrachten van dempcilinder of rimpelbuizen. In de tool volgt een schema met de resultaten, weergegeven in een doorsnede van de stootbalk zoals weergegeven in *Figuur 9.11*.



Figuur 9.11 Resultaat uit de ontwerptool bepalen dimensies stootbalk Delden

Ter validatie van de tool zijn de gegevens van Sluis Maasbracht ingevuld, van deze sluis is bekend wat de dimensies van de toegepaste stootbalk zijn. Het bestaande

profiel van Sluis Maasbracht is weergegeven in *Figuur 9.12*, samen met het resultaat uit de tool. Op basis van de resultaten van de dimensionering van de stootbalk is geconcludeerd dat de ontwerptool een juist resultaat weergeeft. Het resultaat is een ondergrens van wat wordt toegepast, waar nodig is ervoor te kiezen om op te schalen. Het gewicht van de stootbalk in Maasbracht bedraagt 742 kg/m en uit de tool volgt een gewicht van 600 kg/m. De stootbalk van Maasbracht is stabielere omdat deze "vierkanter" is, in een verdere ontwerpfase wordt dit uitgewerkt voor het ontwerp uit de tool.



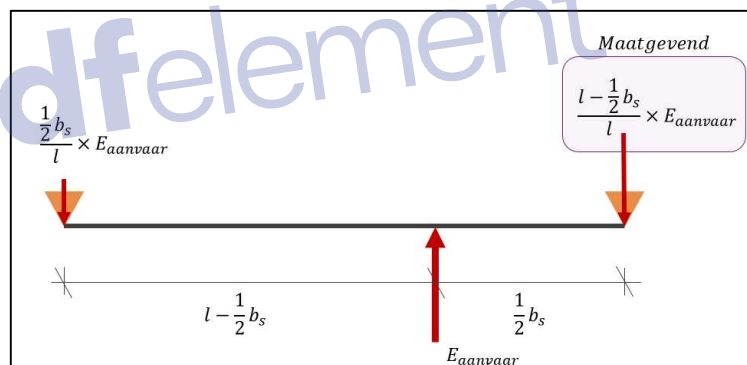
Figuur 9.12 Profieldoorsnede stootbalk Maasbracht (links) en het resultaat uit de ontwerptool (rechts)

9.3.4 Dempingscilinder

Om de energie van een aanvaring op te nemen zijn er dempcilinders toegepast. In [Hoofdstuk 9 paragraaf 3.5](#) zijn de rimpelbuizen uitgewerkt, welke als alternatief gelden voor de dempcilinder. De dempcilinders worden per project op maat gemaakt, er is hiervan geen eenduidige bepaling. De beschikbare ruimte bepaald wat de maximale grootte is en de aanvaarenergie stelt de benodigde capaciteit van de dempcilinder vast. In dit onderzoek is aangenomen dat de dempcilinder drie variabelen heeft, te weten: slaglengte, maximale reactiekracht en energieopname.

Benodigde energieopname

Er is de mogelijkheid dat de variabelen van de demp-cilinder zijn opgevraagd bij de leverancier. Wanneer de variabelen niet bekend zijn, dienen deze te worden bepaald. De maatgevende energie geldt bij een excentrische aanvaring, dit geldt als de minimum energie dat de dempcilinder dient op te nemen. Het bepalen van de energie is weergegeven in [Figuur 9.13](#). De maatgevende energie dat is opgenomen door de dempcilinder is geldend voor beide zijden.

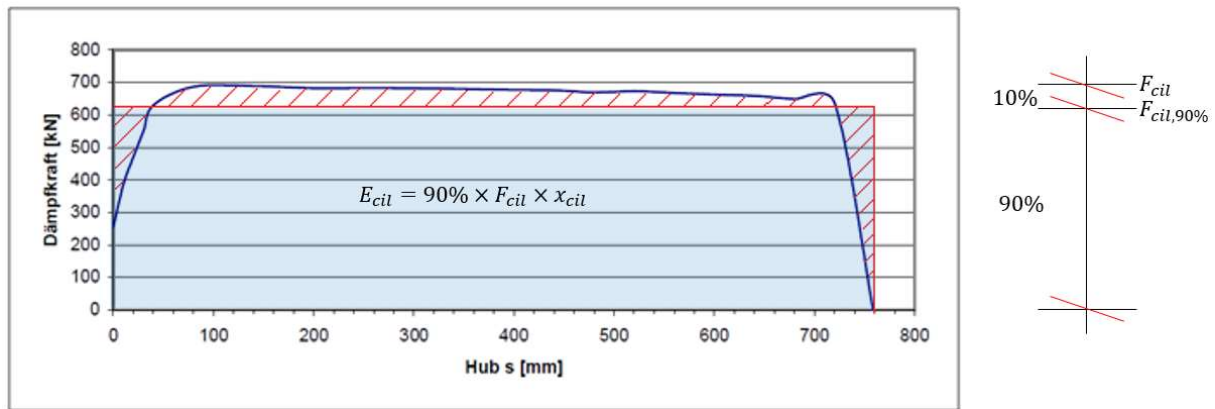


Figuur 9.13 Bepalen energie naar dempcilinder vanuit aanvaarenergie bij excentrische aanvaring, met b_s is breedte maatgevend schip

Bepalen variabelen dempcilinder

De slaglengte (x_{cil}) van de cilinder is geschat op basis van de beschikbare ruimte in de kolkwand achter de stootbalk. De slaglengte is geschat door de beschikbare ruimte voor de cilinder te delen door 2,4. De maximale lengte van de cilinder is 4,00 meter, met een bijhorende slag van 1,67 meter. De slaglengte stelt met de aanvaarenergie de reactiekracht (F_{cil}) vast van de cilinder bij indrukking.

Omdat de indrukking van een cilinder geen constante kracht heeft, is er een aanname gedaan. De energieopname bij een maatgevende aanvaring, waarbij de volledige capaciteit van de dempcilinder is benut, is geschematiseerd zoals weergegeven in [Figuur 9.14](#). Hierin representeert de blauwe lijn de werkelijke reactiekracht bij indrukken. Door aan te nemen dat de cilinder met een constante kracht welke gelijk is aan 90% van de maximale reactiekracht, is ingedrukt, is de energieopname (E_{cil}) van de dempcilinder benaderd. Bij de maatgevende aanvaarenergie en ingeschatte slaglengte is de maximale reactiekracht te bepalen.

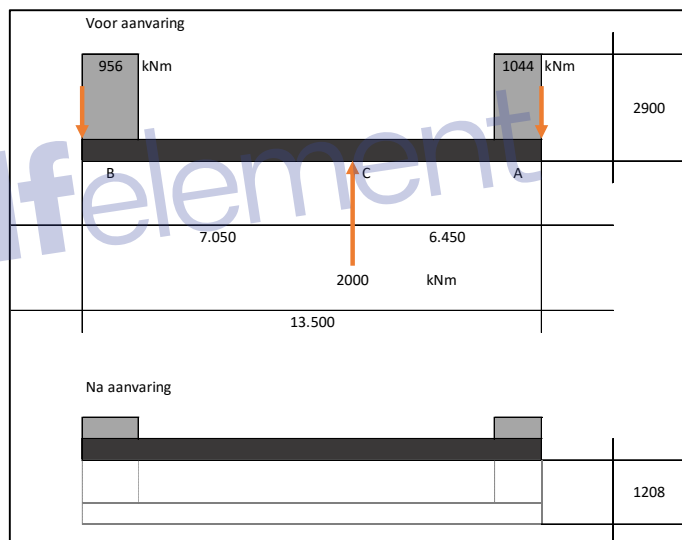


Figuur 9.14 Bepalen aanvaarenergie met schatting voor een dempcilinder met behulp van grafiek met reactiekracht over de lengte van een cilinder bij indrukking door een schip (excentrische aanvaring; energieopname door cilinder = 560 kNm) – Bron: Producent ACE (ACE, 2010)

Resultaat en validatie

Uit de ontwerptool volgt een schematisatie zoals is weergegeven in *Figuur 9.15*. De belangrijke parameters welke worden weergegeven zijn: De maximale reactiekracht, slaglengte, totale lengte van de cilinder en de maximale energieopname.

Ter validatie van berekening van de stootbalk met dempingscilinders is er gebruik gemaakt van de ontwerpgegevens van Sluis Delden. Hierbij zijn dempcilinders toegepast met een lengte van 2,98 meter, slaglengte van 1,20 meter en een energieopname van 1045 kNm. De maximale reactiekracht bedraagt 990 kN. Als input in de tool is aangehouden dat er een beschikbare ruimte in de kolkwand was waarbij er een cilinder met een slag van 1,20 meter wordt toegepast. Hieruit volgen de gegevens die zijn weergegeven in *Figuur 9.15*, de energieopname komt overeen en ook de totale lengte van de cilinder wijkt minimaal af. De reactiekracht bedraagt 960 kN. Hieruit is te concluderen dat de ontwerptool een betrouwbaar resultaat geeft. De tool is tevens ingevuld voor Sluis Maasbracht, in te zien in *Bijlage 16 paragraaf 2.6*, hieruit volgt eenzelfde conclusie.



Figuur 9.15 Verdeling aanvaarenergie bij excentrische maatgevende aanvaring Sluis Maasbracht

9.3.5 Rimpelbuis

De rimpelbuis dient energie op te nemen doormiddel van het laten vloeien van het staal, het laten plooiën van de buis onder druk. Door in een "gladde" buis rimpels aan te brengen, zijn er zwakke plekken gedefinieerd waar vloeï gaat optreden. De benodigde energieopname is op een gelijke manier te vast te stellen als de dempcilinder, dit is weergegeven in *Figuur 9.13*.

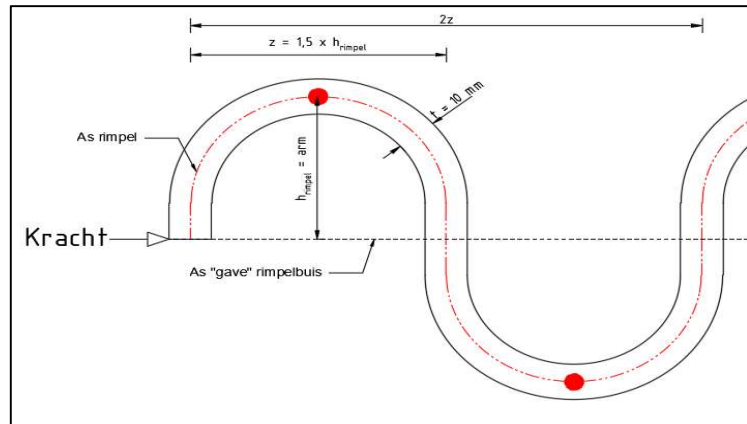
Dimensionering

De vorm van de rimpels bepaald de hoeveelheid energie dat wordt opgenomen samen met de diameter van de buis (d), de dikte van het lijf (t) en de lengte van een rimpel (z). Er is gekozen om een ronding met straal ' r ' te gebruiken die gelijk is aan ' $0,5z$ ', waarbij ' z ' is gelijk aan 1,5 maal de hoogte

van de rimpel (h_{rimpel}). Als de factoren bij elkaar zijn gevoegd, resulteert dit in een straal welke gelijk is aan 0,75 van de hoogte van de rimpel. De diameter van de buis is variabel, de minimale diameter is 500 mm en de maximale diameter is 750 mm. De dikte van het lijf is 10 mm, hierbij treedt een vergelijkbare kracht op als een dempcilinder en is er voldoende energieopname. De lengte van de rimpel is in te stellen op 30, 40 of 50 mm.

Weerstandsmoment

De diameter van de buis en de dikte van het lijf bepalen het weerstandsmoment van de buis tegen het vloeien. Hiervoor is aangenomen dat het plastisch weerstandsmoment van de doorsnede van plaat gelijk is aan het weerstandsmoment van de rimpelbuis. In deze aanname is de weerstand door de vorm, cirkel, weggelaten. De werkelijke waarde voor het plastische

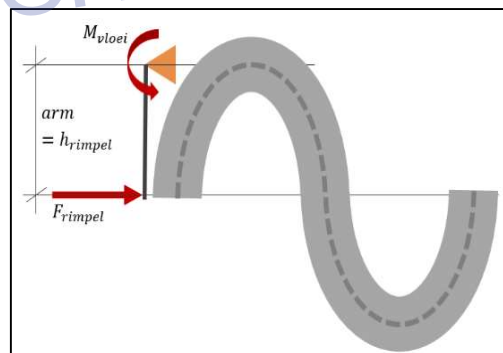


Figuur 9.16 Doorsnede rimpel

weerstandsmoment is groter dan de waarde die in dit onderzoek is aangehouden. De werkelijke waarde is niet eenduidig te bepalen in dit onderzoek en wordt aanbevolen om in een toekomstig onderzoek vast te stellen. Door drukproeven worden de parameters gevonden, echter dient te worden onderzocht of de fabricatie van een rimpelbuis haalbaar is.

Vloeimoment

De zwakke plekken in de buis bevinden zich in de toppen en de dalen van de rimpel, waar vloeï dient op te treden, met rood gedefinieerd in *Figuur 9.16*. De aanvaarbeasting grijpt aan als een kracht op de doorsnede van het profiel. De kracht vermenigvuldigt met de arm, welke gelijk is aan de rimpel hoogte, resulteert in een moment. Wanneer dit moment gelijk is aan het vloeimoment treedt er vloeï op in het staal.



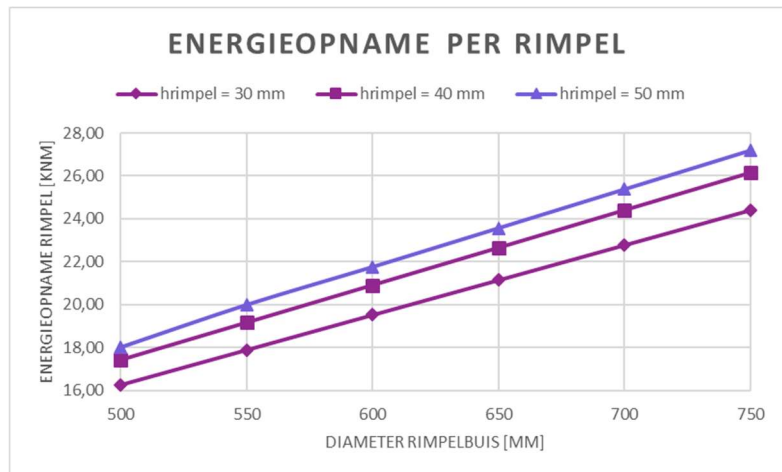
Figuur 9.17 Schema vloeimoment bij een rimpel

Het bepalen van het vloeimoment is het vermenigvuldigen van het plastisch weerstandsmoment en de vloeigrens van het staal. Voor elke staalkwaliteit is een vloeigrens gedefinieerd: bij S235; 235 N/mm² en bij S355; 355 N/mm². Dit geldt als de ondergrens waarbij vloeï optreedt, de ondergrens van de vloeï is hoogstzelden lager. Voor het vaststellen van het vloeimoment bij energieopname wordt de onderste vloeigrens aangehouden. Staal heeft vlak voordat het gaat vloeïen een hogere vloeigrens dan de onderste vloeigrens, dit is de bovenste vloeigrens. Deze bovenste vloeigrens is maatgevend voor het bepalen van de oplegreacties, de bovenste vloeigrens is niet opgegeven in normen en dient proefondervindelijk te worden ingeschat. Uit proeven van de TU-Delft volgt dat de bovenste vloeigrens bij S235 een factor 1,5 hoger is dan de onderste vloeigrens en bij S355 een factor 1,2 hoger is dan de onderste vloeigrens.

Energieopname rimpelbuizen

De energieopname per rimpel is vast te stellendoor de kracht, van het vloeimoment bij de onderste vloeigrens, te vermenigvuldigen met de afstand waarover de buis wordt ingedrukt. De afstand waarover de rimpel wordt ingedrukt is bij een volledige indrukking de lengte van een rimpel minus de dikte van het lijf. Voor de voorgeschreven waarden, benoemd in de paragraaf dimensionering, is de

energieopname bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in *Figuur 9.18*. De minimale energieopname is 16 kNm per rimpel en de maximale energieopname is 27 kNm per rimpel. In *Bijlage 16 paragraaf 3.7* is de reactiekracht van dezelfde rimpelbuizen weergegeven, hieruit wordt de invloed van de rimpelhoogte duidelijk.



Figuur 9.18 Energieopname per rimpel van de voorgeschreven rimpelbuizen

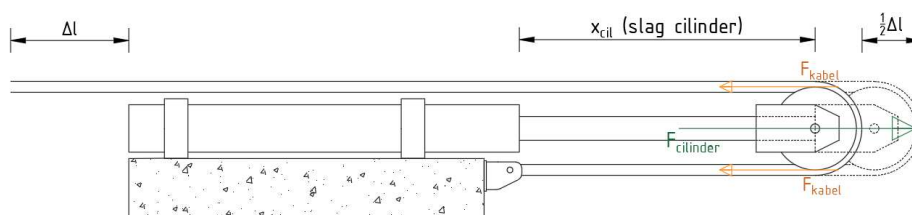
9.4 Kabel met remcilinder

De kabel met remcilinder is op twee methoden te ontwerpen, waarna de mogelijkheid is om te kiezen welke berekening in het vervolg wordt aangehouden. De ondergrens volgt uit de maximale benutting van de remweg waaruit de slag van de remcilinder en de bijhorende krachten zijn vastgesteld. De bovengrens gaat uit van de volledige benutting van de kabelkracht bij een minimale remweg.

9.4.1 Maximale remweg (ondergrens)

De maximale remweg limiteert de hoeveelheid kabel dat over de kolk is uitgetrokken bij een aanvaring. Bij een grote verlenging (lange remweg) zijn de resulterende krachten kleiner dan bij een korte verlenging (korte remweg) uitgaande van een gelijke aanvaarenergie. De totale verlenging (Δl) is de som van de uitreklengete (l_{uitrek}), de kabelverlenging door rek (l_{rek}) en verlenging door aanvangsspelings ($l_{speling}$). De remcilinder drukt bij aanvaring in over een bepaalde lengte, de slaglengte (x_{cil}), welke volgt uit de uitreklengete. Een centrische aanvaring met een spitse boeg is de maatgevende situatie betreffende uitreklengete en remweg.

Figuur 9.19 weergeeft een schematisatie van de remcilinder. De kabel slaat om de kop van de cilinderstang, waarna deze bevestigd is aan de fundering. De uitreklengete van de kabel is gelijk aan tweemaal de indrukking van de cilinder. Waarbij de kabelkracht (F_{kabel}) de helft van de reactiekracht van de cilinder (F_{cil}) is. De energieopname van de cilinder (E_{cil}) gelijk is aan 90% van de maximale reactiekracht maal de slaglengte. Dit is gebaseerd op *Hoofdstuk 9 paragraaf 3.4*, een remcilinder neemt de kracht op een soortgelijke manier op.



Figuur 9.19 Verlenging kabel door indrukken remcilinder met bijbehorende reactiekracht van de remcilinder + kabelkracht

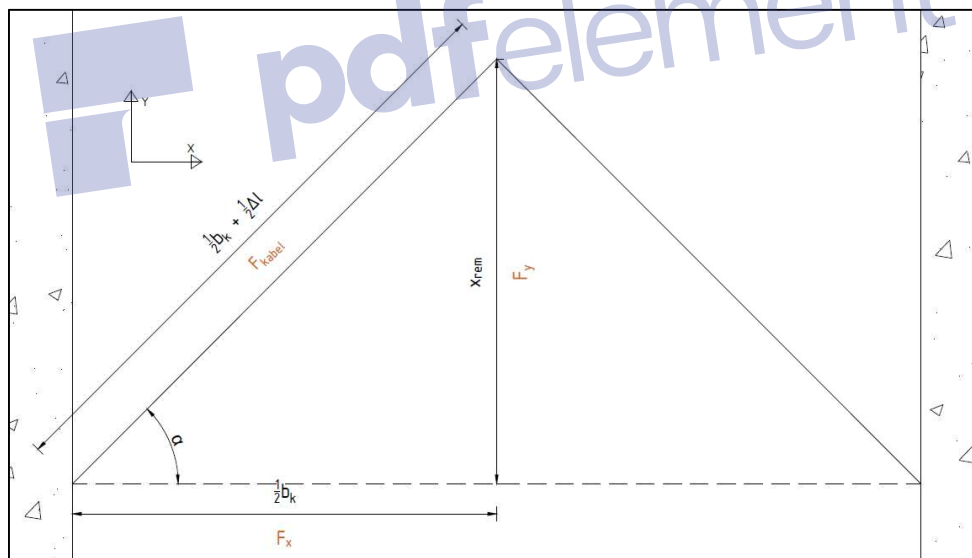
9.4.2 Volledige benutting kabelkracht (bovengrens)

De grootst mogelijke reactiekrachten op de kolkwanden treden op bij een minimale remweg waarbij de gehele aanvaarenergie wordt opgenomen. Dit treedt op wanneer de volledige kabelkracht is benut. De volledige benutting van de kabelkracht volgt uit de breukgrens van de kabel. Er dient kabelbreuk op te treden net voordat de cilinder volledig is ingedrukt, hierbij wordt de cilinder niet kapot gedrukt. Door een zwaktepunt bij de kabelbevestiging, nabij de kolkwand bevestiging, te definiëren, wordt het kapot drukken van de cilinder voorkomen. De breukgrens van het zwakke punt dient lager te zijn dan de breukkracht van de kabel. Uit een casestudy bij Sluis Empel en Eefde, uitgewerkt in *Bijlage 16 paragraaf 4.3*, is er geconcludeerd dat de breukgrens van de kabel een factor 1,40 hoger is dan de breukgrens van de kabelbevestiging. De kabelkracht tijdens aanvaren is een factor 1,40 lager dan de breukgrens van de kabelbevestiging. Deze factoren zijn opgenomen in de ontwerptool.

Met behulp van de kabelkracht is de reactiekracht van de cilinder bepaald en met de maatgevende aanvaarenergie is de slaglengte vastgesteld. Waarna de verlenging, de remweg en bijbehorende oplegreacties zijn bepaald.

Bepalen ontbondenden lengtes en krachten

Vanuit de kabelkracht is er met driehoeksverhoudingen de krachten in x- en y-richting bepaald, dit zijn de oplegreacties op de kolkwanden. De krachten in x- en y-richting (F_y en F_x) verschillen bij een aanvaring met spitse-boeg of vlakke boeg passend bij duwvaart. Van beide situaties is de grootste waarde aangehouden als maatgevend. De maatgevende aanvaarbelasting is vastgesteld door de kracht in y-richting (F_y) te vermenigvuldigen met twee. Met dezelfde verhoudingen is vanuit de remweg de verlenging van de kabel bepaald of vice-versa.



Figuur 9.20 Verhoudingen lengtes/krachten bij centrische aanvaring met spitse boeg

Ook voor een duwvaartschip zijn de krachten en lengtes te bepalen. Dit gebeurt op een gelijke manier, er is hierbij rekening gehouden met vlakke boeg van het schip. De hoek van de kabel α is hierdoor groter en dit resulteert in grotere krachten in y-richting. De kabelkracht is hetzelfde als bij de spitse boeg en eveneens is de uittreklengte van de kabel gelijk. In *Bijlage 16 paragraaf 4.5* is het schema van de duwvaart weergegeven.

9.4.3 Kabelverlenging met kabelrek

De bepaling van zowel de ondergrens als bovengrens verwaarlozen bij het vaststellen van de totale kabelverlenging de verlenging door kabelrek. De verlenging door kabelrek is bepaald met *Vergelijking*

9.4. De verlenging door rek plus de verlenging door aanvangsspeling en de uittrek lengte geven de maximale verlenging van de kabel over de kolk weer. Door de toevoeging van de verlenging door rek is de totale kabelverlenging groter, resulterende in een grotere remweg. De ondergrens overschrijdt hierdoor de maximale remweg. Hierbij is de maximale slaglengte van de cilinder kleiner.

Vergelijking 9.4 Verlenging door rek van de kabel bij trek

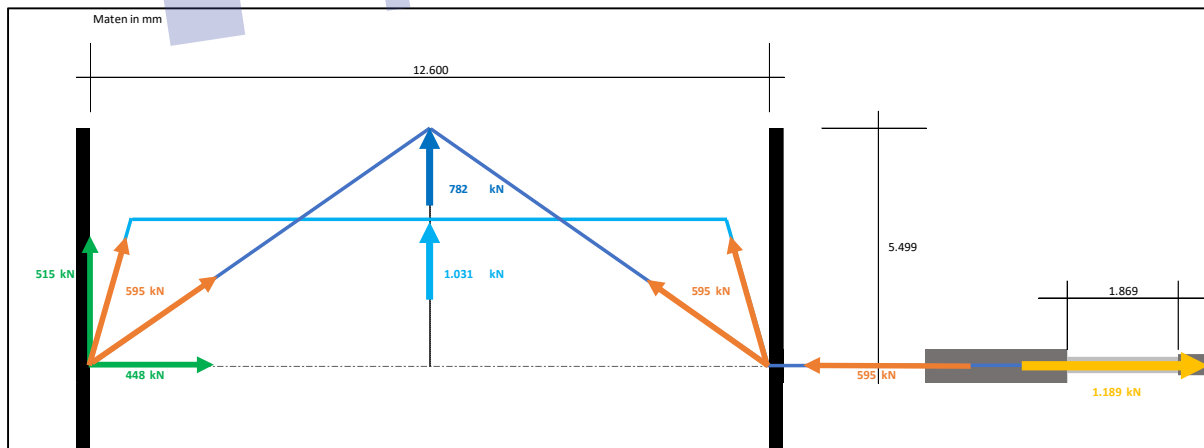
$$l_{rek} = \frac{F_{kabel} \times l_{kabel}}{\sigma_{max} \times E}$$

Waarin: l_{kabel} = Lengte van de kabel [m]
 σ_{max} = Breukspanning kabel [N/mm²]
 E = Stijfheid kabel [N/mm²]

9.4.4 Resultaat en validatie

Sluis Empel maakt gebruik van aanvaarbeveiliging in de vorm van een kabel met remcilinder. De slaglengte van de cilinder bij Sluis Empel (2,00 meter) is groter dan het resultaat uit de tool (1,87 meter), waardoor de krachten groter zijn in de tool. Er is in de berekening van Empel geen rekening gehouden met aanvangsspeling en met verlenging van de kabel ten gevolge van rek. Wanneer de aanvangsspeling en de verlenging door rek zijn verwaarloosd, komen de waarden vrijwel overeen. De remweg is in beide gevallen hetzelfde (5,50 meter). Het verschil in de reactiekracht van de cilinder is te verklaren door er in de ontwerptool uitgegaan is dat energieopname 90% bedraagt van maximale kracht vermenigvuldigd met de slaglengte. Doordat de slag kleiner is, is de kracht groter in de cilinder en dit geeft een grotere kabelkracht.

Op basis van deze resultaten is geconcludeerd dat de ontwerptool een nauwkeurige inschatting is van de maximale remweg op basis van de totale verlenging door indrukken van de cilinder, de kabelrek en de aanvangsspeling.



Figuur 9.21 Resultaat berekening kabel met remcilinder Sluis Empel uit ontwerptool

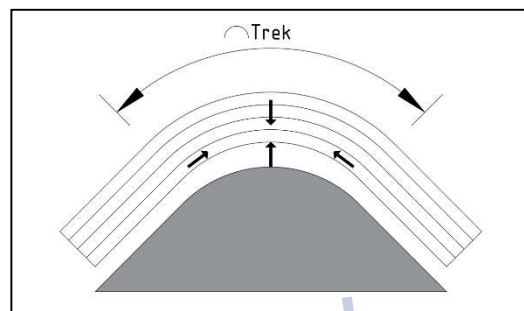
9.5 Kunststofvangkabel

De kunststofvangkabel is een gevlochten polyesterkabel. Het is mogelijk om de polyesterkabel uit te voeren als een open te stellen constructie, een vangkabel welke vrijgemaakt wordt voor doorvaart doormiddel van een slagboom. Daarnaast is het mogelijk om de kunststofvangkabel als een vaste constructie toe te passen, waarbij er met behulp van voorspanen van de kabel een reductie op de remweg is aan te brengen. Beide systemen maken gebruik van kabelrek voor het opnemen van energie.

9.5.1 Reductie op de kabelrek

De maximale rek tot aan breuk van een polyesterkabel is 35% overeenkomend met het kracht-rek-diagram van kabelproducent Van der Lee, *Bijlage 4*. Met behulp van de rek en de overspanningslengte is de kabelverlenging bepaald. Tijdens een aanvaring wordt de kabel dwars op de langs richting van de kabel belast. De kabel komt in contact met de boeg van het schip waarna de kabel daaromheen buigt.

In de kabel bevinden zich vezels gelijkliggend in de langs richting van de kabel. Bij het contact tussen de boeg van het schip en de kabel worden de lagen vezels in de kabel samengedrukt, *Figuur 9.22*. Aan de buitenzijde van de kabel worden de lagen/vezels verder uitgerekt dan aan de binnenzijde, hier treden de hoogste spanning op. In de buitenzijde is eerder de breukspanning bereikt dan wanneer de gehele kabeldoorsnede op trek in de langs richting wordt belast. Het is van belang dat de kabel op het punt van contact niet vroegtijdig breekt. De kabel dient voldoende aanvaarenergie op te nemen voordat deze de breukspanning bereikt.



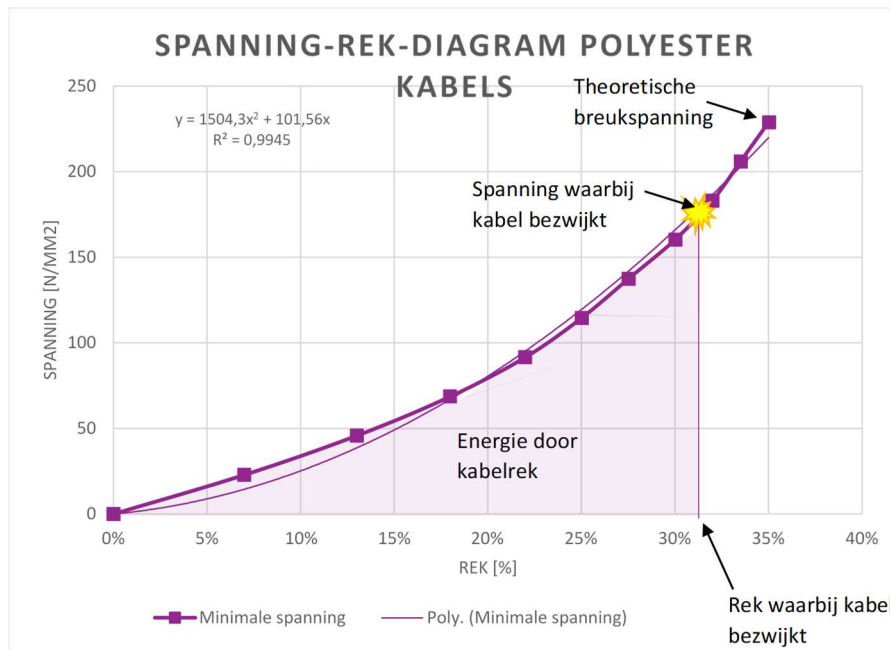
Figuur 9.22 Spanningen in contactvlak schip en kabel

Over de gehele lengte van de kabel wordt de breukspanning niet bereikt net als de breukrek van 35%. Dit komt enkel voor in het contactvlak, waar de hoogste spanning is. Hiervoor dient er te worden gerekend met een verlaagde rek en spanning voor het bepalen van de energieopname. Een (Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren, 1998) geeft een reservefactor die wordt aangehouden om de kabel niet te laten breken. Hierbij gaat het om een reservefactor van 0,82 van de sterkte van de kabel, behorend bij een diameter van 82 mm. In de ontwerptool is er gebruikgemaakt van een conversiefactor van 0,77 om onzekerheid over een mogelijk grotere reservefactor in relatie tot grotere kabeldiameters dan 86mm uit te sluiten.

De waarde voor de rek en spanning is bepaald door de breukspanning van de kabel te vermenigvuldigen met de conversiefactor van 0,77. Met het spanning-rek-diagram, *Figuur 9.23*, is de rek bepaald die optreedt bij de berekende spanning.

9.5.2 Energieopname

Producent Van der Lee geeft middels een kracht-rek-diagram, *Bijlage 4*, het verloop van de rek tot aan behorend bij polyesterkabels aan. Voor de kracht is de minimale breukspanning van de kabel, *Bijlage 17*, ingevuld. Hieruit volgt het spanning-rek-diagram welke is weergegeven in *Figuur 9.23*. Door het trekken van een parabolische trendlijn over de verloop tot de minimale breukspanning is de functie vastgesteld van de spanning-rek-diagram *Vergelijking 9.5* geeft de spanning-rek-functie weer.



Figuur 9.23 Spanning-rek-diagram polyesterkabel

Vergelijking 9.5 Spanning polyesterkabels in functie van de rek

$$\sigma_{\text{polyesterkabel}} = 1504,3 \times \epsilon^2 + 101,56 \times \epsilon$$

Waarin: $\sigma_{\text{polyesterkabel}}$ = Spanning in Polyesterkabel [N/mm²]
 ϵ = Kabelrek [%]

Om de energieopname vast te stellen dient het oppervlak onder de spanning-rek-functie te zijn bepaald en vermenigvuldigd met de inhoud van de polyesterkabel. De rekenwaarde voor de breukspanning bedraagt de breukspanning uit het spanning-rek-diagram vermenigvuldigd met de conversiefactor: $229 \text{ N/mm}^2 \times 0,77 = 176 \text{ N/mm}^2$. De rek die optreedt bij 176 N/mm^2 bedraagt 31% ($\epsilon_{\text{bezwijk}}$). De bovengrens heeft als coördinaat: (176;31). Voor het vaststellen van het oppervlak onder de kromme, dient de primitieve functie te zijn bepaald. De primitieve van *Vergelijking 9.5* is bepaald door de toepassing van rekenregels en resulteert in de vergelijking welke is weergegeven als *Vergelijking 9.6*. Hierbij dient er gebruik gemaakt te worden van de rekenwaarde van de rek ($\epsilon_{\text{rekenwaarde}}$). Dit is of de rek tot aan bezwijken of de rek welke binnen de gegeven remweg maximaal voorkomt wanneer kleiner dan 31% ($\epsilon_{\text{toegestaan}}$). Het oppervlak onder de kromme vermenigvuldigt met de inhoud van de kabel benaderd de energieopname van de kabel.

Vergelijking 9.6 Energieopname polyesterkabel bepalen als primitieve van $\sigma_{\text{polyester}}$ vermenigvuldigt met de inhoud van een de kabel

$$E_c = (501,4 \times \epsilon_{\text{rekenwaarde}}^3 + 50,78 \times \epsilon_{\text{rekenwaarde}}^2) \times V_{\text{kabel}}$$

Waarin: E_c = Energieopname polyesterkabel [kJNm]
 V_{kabel} = Inhoud kabel [dm³]
 $\epsilon_{\text{rekenwaarde}}$ = Rekenwaarde van de rek: $\epsilon_{\text{bezwijk}}$ (31%) of $\epsilon_{\text{toegestaan}}$ [%]

De totale energieopname van de kabel dient groter of gelijk te zijn aan de aanvaarenergie. Zo blijft er in *Vergelijking 9.6* één onbekende over, de inhoud van de kabel. Met deze methode is er per sluis een minimaal benodigde kabel voor te schrijven.

9.5.3 Kabel met voorspanning

Uit *Figuur 9.23* is af te leiden dat er een geringe energieopname plaatsvindt in de beginfase van de rek, er is sprake van een grote niet-werkzame remweg. De niet-werkzame remweg is verkort doormiddel van het toepassen van voorspanning. Als de toegestane rek tot aan de deur kleiner is dan bezwijkrek is voorspanning aan te raden. De energieopname is de maximale energieopname van de polyesterkabel tot het punt van bezwijken minus het energieverlies door voorspannen. In *Vergelijking 9.7* volgt de integraal voor de bepaling van de energieopname bij voorspannen.

Vergelijking 9.7 Energieopname polyesterkabel met voorspanning

$$\int_{\varepsilon_{voorspan}}^{\varepsilon_{rekenwaarde}} E_c = ((501,4 * \varepsilon_i^3 + 50,78 * \varepsilon_i^2) * V_{kabel})$$

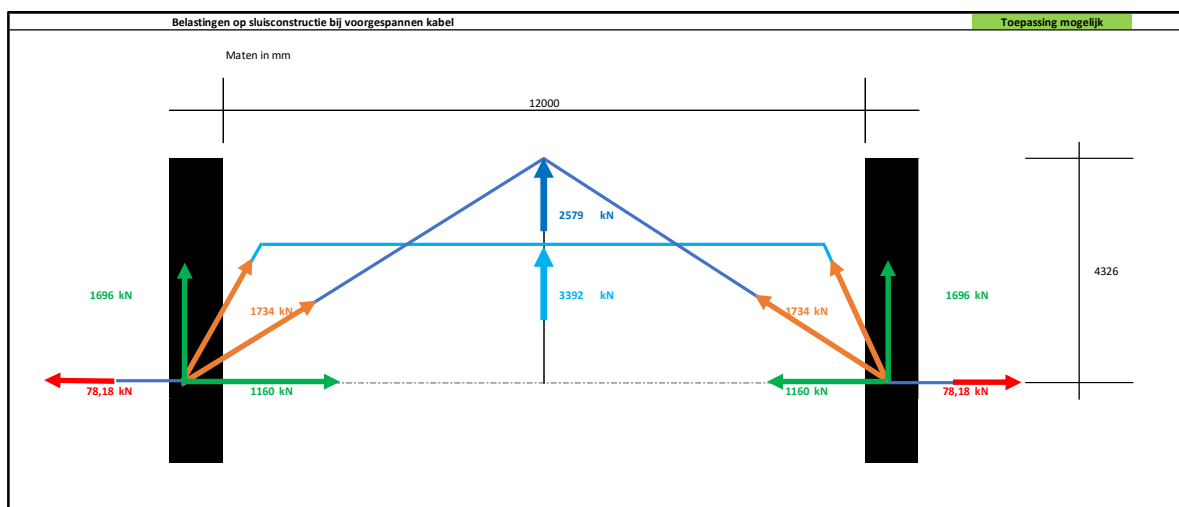
Waarin: $\varepsilon_{voorspan}$ = Rek door voorspanning [%]

9.5.4 Oplegreacties

Het bepalen van de oplegreacties geldt net als bij *Hoofdstuk 9 paragraaf 9.4.4; Kabel met remcilinder*, dat zowel een schip met spitse boeg als een duwvaartschip dient te zijn beschouwd. De kabelkracht, zonder gebruik van voorspanning, (F_{kabe}) is berekend door de spanning bij aanvaring te vermenigvuldigen met het kapeloppervlak. Hieruit zijn vervolgens de krachten in x-richting en y-richting vastgesteld met de hoek α of verhouding in zijden van de driehoeken. In *Figuur 9.24* zijn de verhouding in lengtes en belasting weergegeven.

9.5.5 Validatie

De variant maakt gebruik van bolders als bevestigingspunten, opleggingen. De bolders dienen de krachten vrijkomend bij aanvaring te weerstaan. Uitgaande van gegevens van Sluis Hengelo waarbij een vaste aanvaarbeveiliging is toegepast in de vorm van een stalkabels bevestigd aan bolders worden de krachten beschouwd. In *Figuur 9.24* is te zien dat de krachten zeer groot zijn, het gaat hierbij om een aanvaarenergie van 2000kNm afkomstig van CEMT-Va. Het RVW-2017 schrijft voor dat er voor CEMT-Va rekening dient te worden gehouden met een minimale bolderkracht van 250 kN. Op basis van de krachten behorend bij de aanvaarenergie is het hoogst onrealistisch dat de bolder bestand is tegen de (trek-)kracht. De bolder dient in zoverre mate over gedimensioneerd te zijn, voor het toepasbaar is. Op basis van de uitkomst van de benodigde remweg uit de ontwerptool is de kabel wel toepasbaar bij Sluis Hengelo.



Figuur 9.24 Resultaat berekening polyesterkabel Sluis Hengelo uit ontwerptool

Hoofdstuk 10 Ontwerpvoorstel Zuidersluis Eefde (Casestudy)

Voor de Zuidersluis Eefde dient er in opdracht van Rijkswaterstaat een nieuwe aanvaarbeveiliging te worden ontworpen welke bij de renovatie van de sluis in 2020 wordt geïnstalleerd. De bestaande aanvaarbeveiliging is onvoldoende bevonden voor het opnemen van de maatgevende energie. Doormiddel van de uitgangspunten van de Zuidersluis^a in te voeren in de Aanvaarbeveiligingstool wordt er een aanbeveling gegeven welke variant toepasbaar is. De aanbevolen variant wordt nader ontworpen om te valideren als de aanbeveling uit de tool werkelijk toepasbaar is.

10.1 Advies toe te passen aanvaarbeveiliging

Uit de Aanvaarbeveiligingstool volgt dat de kabel met remcilinder de voorkeur heeft om te worden toegepast. Argumenten hiervoor zijn:

- Beweegbaar, zodat er vrije doorvaarthoogte is;
- Beschikbare ruimte waar de remcilinder wordt geplaatst is aanwezig;
- Zelfde constructie als in de Noordersluis, heeft de voorkeur van Rijkswaterstaat.

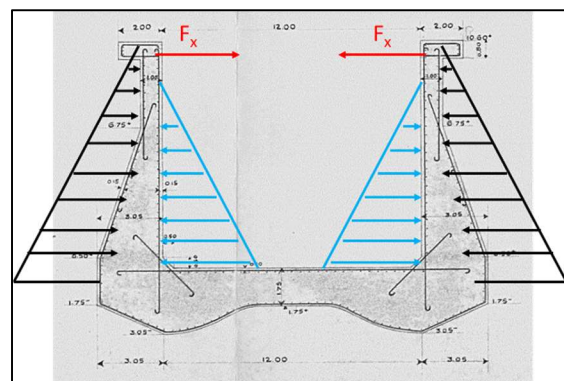
10.1.1 Resultaat Ontwerptool

De gegevens van de Zuidersluis Eefde en de uitgangspunten gesteld door Rijkswaterstaat betreffende aanvaarenergie zijn ingevuld in de Aanvaarbeveiligingstool, hieruit volgen de resultaten welke zijn weergegeven in *Bijlage 18*. De belangrijke gegevens van het ontwerp uit de tool zijn:

- Remweg is 5,20 meter;
- Remcilinder heeft een reactiekracht van 1.640 kN met een slag van 1,69 meter, dit geeft een energieopname van 2500 kNm, de totale lengte van de cilinder is 4,06 meter;
- De kabelkracht bedraagt de helft van de cilinderkracht en is 820 kN,
- De maatgevende krachten op de constructie bedragen: in Y-richting 784 kN en in X-richting 620 kN;
- De aanvaarbelasting bij duwvaart is 1.569 kN en bij een spitse boeg 1.074 kN.

10.1.2 Controle op trekkracht aan de kolkwanden (X-richting)

De huidige status van de kolkwanden zijn niet bekend, net als de exacte hoeveelheid, soort en plaats van de wapening in de wanden. Er wordt er doormiddel van een benaderingsberekening gecontroleerd als de kolk voldoende weerstand biedt tegen het optredend moment bij aanvaring. De weerstand volgt uit de waterdruk in de kolk tegen de kolkwand, bij aanvaring is er altijd hoogwater in de kolk. In de benadering worden twee situaties aangehouden: situatie bij onderhoud en situatie bij aanvaring. Bij onderhoud wordt de kolk leeggepompt en treedt hier een minimale waterdruk op. Daartegen werkt de gronddruk aan de buitenzijde van de kolk. Deze situatie geeft een moment door de gronddruk min de druk door laagwater, wat een groter moment dient te geven dan de andere situatie waarbij de gronddruk plus de aanvaring min de druk door hoogwater een moment geeft. In *Bijlage 18* is de benadering uitgewerkt, hieruit volgt dat het moment



Figuur 10.1 Optredende belasting bij situatie van aanvaring

^a (Uitgangspuntenrapport Aanvaarbeveiliging versie 2.0, 30-10-2017)

bij onderhoud significant groter is dan het moment bij aanvaring. Er wordt geconcludeerd dat een maatgevende aanvaring met deze constructie niet leidt tot bezwijken van de kolkwanden.

10.1.3 Inpassing constructie

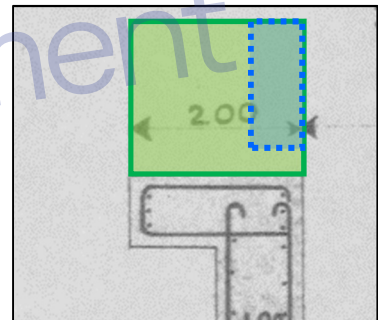
Voor de inpassing van de remcilinder dient er minimaal een ruimte van circa vijf meter bij twee meter aanwezig te zijn. Na het bestuderen van de tekeningen – van het ontwerp Sluis Eefde door L2T – is geconcludeerd dat er voldoende ruimte is aan beide zijden van de sluis kolk. *Figuur 10.2* geeft de visualisatie weer van het ontwerp.



Figuur 10.2 Ruimte voor de inpassing van de remcilinder

Voor inpassing van de hefcilinder en de remcilinder dienen er enkele aanpassingen worden uitgevoerd aan de sluisconstructie. Uitgaande van het handhaven van de maximale remweg van 5,20 meter en behoud van de plaatsingshoogte dient de hefcilinder op het plateau van de kolkwanden te worden bevestigd. Dit resulteert in dat de huidige kolkwanden dienen te worden aangepast. Dit houdt in dat een deel van de wandconstructie dient te worden opgebroken en er een constructie aan wordt gerealiseerd. Dit geldt voor de zijde van de remcilinder en de zijde van de fuik. De fuik is de constructie welke de slagboom inklemt wanneer deze is neergelaten.

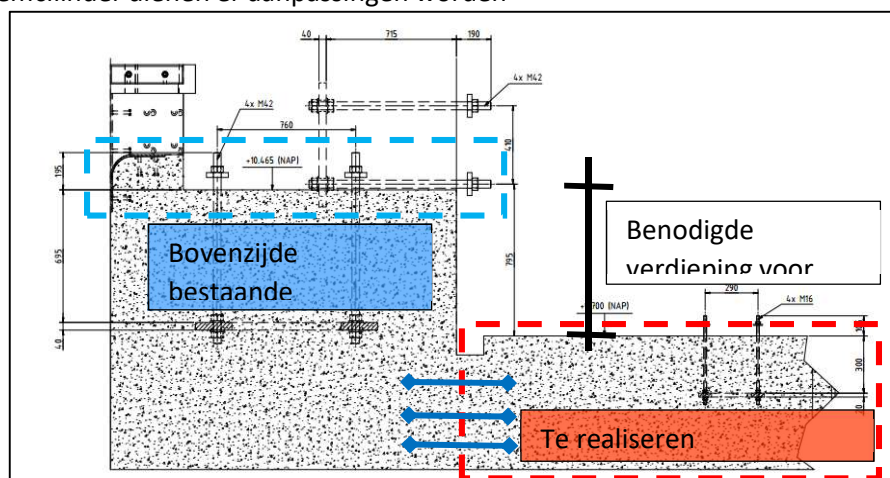
Een aandachtspunt is de positie van bolders en haalkommen in de kolkwand nabij de stopstreep. Bij het verplaatsen van de aanvaarbeveiliging voor de benodigde remweg komt deze op de plaats van de bolders. Om dit conflict op te lossen kan er worden gekozen voor het verplaatsen van de aanvaarbeveiliging of het verwijderen en buiten werking stellen van de bolders en haalkommen.



Figuur 10.4 Betonconstructie ter behoeve van de inpassing van de fuikconstructie

10.1.4 Eindadvies

Er wordt geadviseerd om een kabel met remcilinder toe te passen in de Zuiderluis bij Eefde gedurende de renovatie hiervan. Aan beide zijden van de kolk is voldoende ruimte om de remcilinder te plaatsen. Voor de inpassing van de remcilinder dienen er aanpassingen worden gedaan aan de kolkwand, zie *Figuur 10.3*. Aan de overzijde dient er een opstort te worden uitgevoerd ter behoeve van de plaatsing van de fuik, zie *Figuur 10.4*. In *Bijlage 18.3* zijn de schetsontwerpen toegevoegd betreffende de aanvaarbeveiligingsconstructie.



Figuur 10.3 Betonconstructie ter behoeve van de inpassing van de hefcilinder en de remcilinder

Hoofdstuk 11 Conclusie en aanbeveling

11.1 Conclusie

In dit onderzoek is gezocht naar het antwoord op de vraag: *‘Hoe kan de keuze voor een ontwerp van een aanvaarbeveiliging worden gedaan doormiddel van een tool?’*. Hiervoor is een exploratief onderzoek en een toegepast onderzoek uitgevoerd naar de realisatie van een “Ontwerptool” voor aanvaarbeveiligingen.

Uit de literatuur volgt dat het falen van de sluis gedefinieerd is in: Verlies van de waterkerende functie. Rijkswaterstaat voegt hierbij dat het falen van de sluis ook gedefinieerd wordt als; “Stremming van het scheepvaartverkeer”. De doelstelling van een aanvaarbeveiliging is de kans op bezwijken van het tweede keermiddel ten gevolge van een aanvaring te verkleinen en de beschikbaarheid van de schutsluis vergroten.

Doormiddel van een onderzoek naar de verschillende soorten aanvaarbeveiliging blijkt dat er verschillende tekortkomingen zijn. Uit literatuur en interviews blijkt dat de grootste te behalen optimalisatie de beschikbaarheid van de aanvaarbeveiliging betreft. De tekortkomingen hebben geleid tot zes optimalisatie varianten op de huidige toegepaste aanvaarbeveiligingen. De optimalisaties nemen enkele tekortkomingen weg, echter kunnen deze tekortkomingen niet in zijn geheel wegnemen. Doormiddel van een beoordeling van alle varianten op verschillende criteria zijn er drie bestaande varianten en twee optimalisatie varianten aanvaarbeveiligingen overgebleven welke het meest geschikt zijn voor de Ontwerptool. De in totaal vijf varianten zijn opgenomen in de Ontwerptool, deze zijn voornamelijk als geschikt beoordeeld vanwege de gunstige bijdrage aan het criteria: de beschikbaarheid.

De maatgevende aanvaarenergie treedt op bij een gemiddelde vaarsnelheid met extra bijgevoegd vermogen. Vanuit de maatgevende energie wordt de kans op voorkomen bepaald en kan wanneer nodig worden verhoogd. De aanvaarbelaasting wordt bepaald door de energie over een afstand te verdelen, waarbij een kortere afstand een grotere belasting geeft. De maatgevende belasting kan voor binnenvaartsluizen bepaald worden in de Ontwerptool.

De toepassingsmogelijkheid en de werking van de variant wordt bepaald door verschillende soorten invloedfactoren. De invloedfactoren stellen vast welke variant geschikt is om toe te passen. Waarbij er onderscheidt wordt gemaakt in een aanvaarbeveiliging welke zich op een vaste hoogte bevindt of open te stellen is voor scheepvaart. De factoren: beschikbare remweg, beschikbare plaatsingsruimte en de plaatsingshoogte bepalen de aanbevolen variant.

Uit dit onderzoek blijkt dat met behulp van de geschikte varianten, de maatgevende aanvaarenergie en de ontwerpgebepaalde factoren een Ontwerptool kan worden gerealiseerd. De ontwerptool geeft een aanbeveling voor de toe te passen aanvaarbeveiliging. Doormiddel van een ingevoegde berekenmethode geeft de ontwerptool als resultaat de bijpassende dimensionering van de variant, de hoeveelheid op te nemen energie en de oplegreacties. De tool is inzetbaar voor alle binnenvaartsluizen in Nederland en is via deze link te downloaden:

Link Aanvaarbeveiliging:

<https://www.dropbox.com/s/rfugdbb869a7djg/Aanvaarbeveiligingtool.xlsx?dl=0>

11.2 Discussie

Gedurende het onderzoek zijn er enkel aannames genomen om berekeningen toepasbaar te maken. Aannames en onderwerpen zijn zoveel mogelijk onderbouwd, echter zijn er enkele aannames en onderwerpen welke ter discussie staan.

- > In de faaldefinitie is er aangenomen dat beschikbaarheidsfunctie gelijk weegt met de veiligheidsfunctie, *Hoofdstuk 4*. De veiligheidsfunctie is altijd gewaarborgd wanneer de beschikbaarheid wordt gegarandeerd. Deze aanname is aangenomen op basis van een interview met Rijkswaterstaat, echter kan per individu van Rijkswaterstaat deze ‘mening’ verschillen. Om deze reden is er niet met 100% zekerheid vast te stellen dat Rijkswaterstaat de beschikbaarheid gelijkwaardig acht met de waterveiligheid;
- > In het onderzoek zijn naast de twaalf beschouwde varianten, enkele andere varianten ter sprake gekomen. De varianten: Constant tension winch, Airbag en af te zinken vangkabel zijn niet beschouwd. De keuze is gemaakt om vanwege het geringe tijdsbestek enkel zes optimalisatie varianten te beschouwen en zes bestaande varianten;
- > Gedurende het onderzoek is gebleken dat de onderzochte optimalisatie varianten, *paragraaf 5.2.2*, niet voldoende zijn beschouwd om een sterke conclusie te kunnen trekken over de toepasbaarheid. Het is aan te raden om doormiddel van nader onderzoek de varianten nader te beoordelen en uit te werken. Waarna er een gegronde uitspraak kan worden gedaan over de toepasbaarheid;
- > De Trade Off Matrix (TOM), *paragraaf 5.3*, is op verschillende manieren te interpreteren, de beoordeling is subjectief. Door te variëren in de wegingen wordt gecontroleerd of er een valide resultaat volgt. Daarnaast is de TOM door verschillende partijen ingevuld met elke een ander belang;
- > Bij het vaststellen van de aanvaarenergie zijn enkele onzekerheden betreffende de vaarsnelheid en ledig gewicht, *paragraaf 7.1.2*. Voor het ledig gewicht is een waarde aangehouden zoals opgegeven in de ROK 1.4, deze waarde is echter niet gevalideerd. Voor de vaarsnelheid is de gemiddelde snelheid gebruikt, afkomstig uit de RVW-2017 welke als bron de Q1399 heeft. Deze bron is meer dan veertig jaar oud en kan achterhaald zijn. Schepen varen hedendaags sneller dan veertig jaar geleden. Een aanvaring kan dus ook met een hogere snelheid voorkomen. De berekende aanvaarenergie op basis van de gemiddelde snelheid geeft daarnaast ook een lagere aanvaarenergie dan de opgegeven energie van Rijkswaterstaat bij de gevalideerde sluiscomplexen, *paragraaf 7.1.4*. Voor de gemiddelde snelheid wordt aanbevolen een nader onderzoek te doen naar de correcte benadering voor het bepalen van de aanvaarenergie;
- > De aanvaarkans is in de aanvaarenergietool buiten beschouwing gelaten, deze dient apart te worden ingevuld. Een verbeteringslag betreffende dit onderzoek en de aanvaarenergietool kan worden gevonden in het verwerken van de aanvaarkans, *paragraaf 7.2.2*, in de aanvaarenergietool. Hierbij is de verwachting dat er gefundeerde resultaten uitvloeien voor de aan te houden aanvaarenergie. Hierdoor kunnen eventuele eisen voor de aan te houden aanvaarenergie worden gecontroleerd. Dit geeft gehoor aan de discussie over de grootte van de aanvaarenergie bij sluiscomplexen. De partijen welke zijn betrokken bij de renovatie van Sluis Delden zijn verbaasd dat de aanvaarenergie hoger is dan bij Sluis Eefde. Beide sluisen zijn gelegen in hetzelfde kanaal, er passeren ruwweg dezelfde schepen en de afmetingen van de kolk zijn gelijk;
- > Bij de berekening van de varianten in de ontwerptool is er niet in alle gevallen gerekend met excentrische aanvaring. In de meeste gevallen is een excentrische aanvaring niet maatgevend

voor de energieopname of remweg, maar wel voor de oplegreacties. Bij een verdere ontwerpfase dient hier rekening mee te worden gehouden;

- > In het onderzoek is levensduur benoemd, *paragraaf 8.2.2*, deze is echter sterk afhankelijk van het type aanvaarbeveiliging dat wordt toegepast. De cilinders dienen langere tijd mee te gaan, maar wanneer er met regelmaat een grote aanvaring voordoet kan de cilinder eerder aan vervanging toe zijn. Een buigzame ligger heeft in principe een levensduur gelijk aan de tijd tot deze is aangevaren. Om deze redenen is er geen eenduidige levensduur voor een aanvaarbeveiliging te benoemen;
- > Voor de beschikbare ruimte nabij de kolkwanden zijn afmetingen, *paragraaf 8.2.3*, aangenomen om te kunnen concluderen als een remcilinder kan worden toegepast. Deze afmetingen zijn overeenkomend met de remcilinder van Sluis Eefde en Sluis Empel. Bij kleiner afmetingen van een remcilinder welke de maatgevende aanvaarenergie kan opnemen is het raadzaam het advies uit de Ontwerptool te negeren;
- > De doorvaarthoogte is niet alleen afhankelijk van de hoogte van een schip, achterliggende objecten bepalen mede de doorvaarthoogte. In dit onderzoek is aangehouden dat wanneer het schip onder de aanvaarbeveiliging kan doorvaren het mogelijk is een vaste aanvaarbeveiliging toe te passen, *paragraaf 8.3.1*. Deze aanname kan worden verworpen door de aanvaarbeveiliging op dezelfde hoogte te plaatsen als de onderzijde van het achterliggend object;
- > De toe te passen aanvaarbeveiliging welke volgt uit het stroomschema in *paragraaf 9.1.1* is een advies, de gebruiker kan hiervan afwijken. De gebruiker kan de resultaten uit de ontwerptool in een Trade Off Matrix tegen elkaar afwegen om de best toe te passen variant vast te stellen;
- > Voor de Buigzame ligger is er een berekenmethode opgesteld welke de plastische lengte bepaald met behulp van de gemiddelde rek en de vormfactor van het toegepaste profiel, *paragraaf 9.2.1*. In de berekenmethode van de plastische vervorming zijn meerdere methodes toegepast afkomstig van verschillende bronnen welke zijn samengevoegd tot één. Het is raadzaam de berekenmethode te valideren op waarheid;
- > De uitwerking van de stootbalk, *paragraaf 9.3*, is in dit onderzoek veréenvoudigd tot een ligger, in een verder onderzoek dient een complexere berekening te worden gedaan. Dit kan worden gedaan in 3D berekeningssoftware;
- > De rimpelbuizen, *paragraaf 9.3.5*, zijn een innovatief idee welke verder dienen te worden uitgewerkt voordat deze in de praktijk kunnen worden toegepast. Onderwerpen voor nader onderzoek zijn: fabricatie buizen, werkelijke energieopname, bezwijkgedrag en kostenvergelijking (LCC) met dempcilinder;
- > Voordat de kunststofkabel, *paragraaf 9.5*, kan worden toegepast, dient er een nader onderzoek te worden gedaan op het bezwijkgedrag en energieopname van kabels in de praktijk. Hiermee worden de berekende resultaten gevalideerd uit dit onderzoek;
- > In dit onderzoek zijn de kosten voor het uitvoeren van de aanvaarbeveiliging geheel weggelaten. In een verder onderzoek kan dit worden meegenomen;

11.3 Aanbevelingen

Met alle kennis die is opgedaan tijdens het afstudeeronderzoek zijn enkele aanbevelingen opgesteld welke bij een vervolgstudie meegenomen kunnen worden. Uit de conclusie blijkt dat de Aanvaarbeveiligingtool een snelle en eenvoudige wijze een aanzet geeft tot het voorontwerp. Tijdens het onderzoek zijn er echter afbakeningen aangenomen waardoor er binnen diverse onderwerpen ruimte is voor een verbeterslag. De aanbeveling is dat er nader onderzoek dient te worden uitgevoerd naar de varianten die zijn opgenomen in de tool. Hierbij dienen er enkele methodes en ontwerpen nader te worden geanalyseerd en waar nodig te worden geoptimaliseerd.

OPTIMALISATIES

In dit onderzoek zijn er geen “geschikte” optimalisaties gevonden voor een dynamische werking van een aanvaarbeveiliging. Een vervolgonderzoek naar haalbare dynamische aanvaarbeveiligingen kan bijdragen aan het verbreden van de huidige keuzemogelijkheden. Daarnaast is er optimalisatie haalbaar in het vrijmaken van de doorvaarthoogte, in dit onderzoek is alleen de slagboomconstructie opgenomen in de tool. In theorie zijn alle mogelijke soorten aanvaarbeveiliging beweegbaar te maken. Hoe dit kan worden gerealiseerd, wordt aanbevolen om te onderzoeken.

METHODES

Aangenomen is dat de aanvaarenergie afhankelijk is van de sluisgeometrie en de scheepvaart, ongeacht de kans van optreden. De aanbeveling is om vast te stellen of de overschrijdingskansen van het aanvaarenergieniveau een reductie of toevoeging op de maatgevende aanvaarenergie betekend.

In dit afstudeeronderzoek zijn er globale berekeningen gemaakt van de varianten, waarbij een aantal conservatieve aannames zijn gedaan. Aanbevolen wordt om de berekenmethodes van de opgenomen optimalisatie-varianten; De rimpelbuis en de kunststofvangkabel, te toetsen met behulp van berekensoftware (eindige-elementenanalyse). Hierdoor kan er een uitspraak worden gedaan over de haalbaarheid.

TOEPASBAARHEID

Het is aan te bevelen om doormiddel van proeven te ondervinden wat de grootte van de werkelijke energieopname van de varianten in de praktijk is. Met de praktijkresultaten worden de resultaten uit dit onderzoek gevalideerd. Er zijn inschattingen gemaakt over de uitvoerbaarheid. Het advies is om de invloed van de uitvoeringsmethode te beschouwen, waardoor er een beeld wordt verkregen van de toepasbaarheid en een inschatting van de te maken kosten.

Verwijzingen

ACE. (2010). *Documentatie ACE BOMaHe*.

Arnli. (2019, 02 06). *zoom.nl*. Opgehaald van https://zoom.nl/foto/full/bewerkte-fotografie/sluis-bij-tiel.2808674.html?object=user&object_id=30978

Berentsen, R. (2019, 02 25). Interview met Rijkswaterstaat. (T. Vlijm, & C. de Kruijf, Interviewers)

Binnenvaartcijfers. (2019, 04 22). *Aantal passages van binnenvaartschepen per sluis*. Opgehaald van www.binnenvaartcijfers.nl: <https://binnenvaartcijfers.nl/aantal-passages-van-binnenvaartschepen-per-sluis/>

Blok, I. R. (2006). *Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen* (9e ed.). Eindhoven: ThiemeMeulenhoff.

Bos, P. (2019, 03 11). Interview met Hollandia Infra BV. (T. Vlijm, & C. de Kruijf, Interviewers)

Daniëls, R., & Riep, R. (2007). *Rotatiecapaciteit van plastische scharnieren in beton*. Eindhoven: TU Eindhoven.

De Groot, R., & Schippers, R. (2013). Het sluitstuk van de Zuid-Willemsvaart: Sluis Empel. *Cement*, 20-25.

De Stentor. (2019, 05 05). *Sluis Eefde paar uur gestremd door aanvaring met... aanvaarbalk*. Opgehaald van www.destentor.nl: <https://www.destentor.nl/achterhoek/sluis-eefde-paar-uur-gestremd-door-aanvaring-met-aanvaarbalk~a0084f66/>

De Vries, C. (2006). *De toekomst van het goederenvervoer en de binnenvaart in Europa*. Rotterdam: Bureau Voorlichting Binnenvaart.

Deltares. (2016). *Basisrapport WBI 2017 versie 1.1*.

Hendriksen, R., Spruijt, P., & Van Vuren, G.-J. (2008). *Sluis Empel: Naar een veiliger, goedkoper en innovatief sluishoofd*. Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Hensen, M. (sd). *Binnenvaartinbeeld Sluizen*. Opgehaald van Binnenvaartinbeeld: <https://binnenvaartinbeeld.com/nl/sluizen>

Hoekstra, T. (2019, 03 19). Interview met Ingenieursbureau Boorsma. (T. Vlijm, & C. de Kruijf, Interviewers)

Hollandia Infra BV. (2018). *Functioneel ontwerpbeschrijving WTB*.

Hollandia Infra BV. (30-10-2017). *Uitgangspuntenrapport Aanvaarbeveiliging versie 2.0*.

Infra, H. (11-2013). *DO-Berekening Benedenhoofd - Verbreding Wilhelminakanaal Tilburg - WHK-202-2515-32-BER-BET-001_V2.0_DO*. Tilburg: Heijmans Infra.

Jansen Venneboer. (2013). *Ontwerpnota (UO) Aanvaarbeveiliging Sluis Empel*.

Klinken, v. E. (1991). *Onderzoek naar energieabsorptie in hybride composieten*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

Kootwijk-Damman, C. M. (1992). *Een visco-elastische benadering van plastische vloeï*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

- Nijssen, d. i. (2015). *Basiskennis composieten*. Hogeschool Inholland (VKCN-publicatie).
- Nortier, I. i., & de Koning, I. P. (1996). *Toegepaste Vloeistofmechanica* (7e ed.). Halsteren: Stam Techniek.
- PIANC. (1986). *Final Report of the International Commission for the Study of Locks*. Brussel: PIANC.
- Reed Business Information bv. (2004). *Polytechnisch zakboek*.
- Rekenset. (2019, 05 29). Opgehaald van http://www.rekenset.nl/Natuurkunde/Natuurkunde_onderwerpen/Mechanica/arbeid_en_energie_uitleg.htm
- Rijkswaterstaat. (2000). *Ontwerp van Schutsluizen*. Utrecht: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2015). *Aanvaarbescherming sluizen Delden en Hengelo en Eefde*. Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2017). *ROK 1.4*. Utrecht: RWS GPO.
- Rijkswaterstaat. (2019, 05 29). *Twentekanalen: uitbreiding Sluis Eefde*. Opgehaald van <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/twentekanalen-uitbreiding-sluiseefde/index.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2019, 02 11). *Twitter*. Opgehaald van www.twitter.com.
- Rijkswaterstaat, W. A. (2017). *Richtlijnen Vaarwegen 2017*. Rijkswaterstaat.
- Schuttevaer. (sd). *Aanvaarbeveiliging bewijst zich*. Opgehaald van Schuttevaer: <https://www.schuttevaer.nl/nieuws/havens-en-vaarwegen/nid27028-aanvaarbeveiliging-bewijst-zich.html>
- TAW. (2003). *Leidraad Kunstwerken*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).
- TBI Mobilis BV. (2019, 02 04). *Uitbreiding Sluis Eefde*. Opgehaald van www.mobilis.nl: <https://www.mobilis.nl/nl/uitbreiding-sluiseefde>
- Ten Broeke, E. (1997). *Alternatieve materialen en methoden in aanvaarconstructies*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit der Luchtvaart -en Ruimtevaarttechniek.
- van Baars, D. i., Kuijper, i. H., & e.a. (2002). *CT3330 Constructieve Waterbouwkunde*. Delft: TU Delft.
- Vrijburcht, A. (1992). *Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Vrijburcht, A. (2000). *Ontwerp van schutsluizen*. Utrecht: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Bouwdienst.
- Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL). (december 2017). *Richtlijn Vaarwegen 2017*. Utrecht: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Welleman, I. J. (2016, 03). *Op buiging belaste staafconstructies - Plasticiteitsleer*. Opgehaald van [tudelft.nl: http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT3109/collegestof/plasticiteitsleer/files](http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT3109/collegestof/plasticiteitsleer/files)
- Welleman, J., Dolfig, A., & Hartman, J. (2011). *Basisboek Toegepaste Mechanica* (3e ed.). Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.

Bronvermelding vergelijkingen, afbeeldingen en figuren

Vergelijkingen

		Bron
Vergelijking 3.1 Formule voor kinetische energie	18	Basisvaardigheden Natuurkunde
Vergelijking 3.2 Bepalen veerenergie	19	Basisvaardigheden Natuurkunde
Vergelijking 3.3 Bepalen energie door kracht over een afstand	19	Eigen werk
Vergelijking 7.1 Bepaling Kritieke aanvaarenergie in een kanaal	33	(ROK 1.4, 2017)
Vergelijking 7.2 Bepalen overschrijdingskans vastgestelde aanvaarenergie	35	Eigen werk
Vergelijking 9.1 Rotatiecapaciteit plastische scharnier	44	(Daniëls & Riep, 2007)
Vergelijking 9.2 Plastische lengte	44	(Welleman I. J., 2016)
Vergelijking 9.3 Plastische kromming	45	(Daniëls & Riep, 2007)
Vergelijking 9.4 Verlenging door rek van de kabel bij trek	54	(Hollandia Infra BV, 2018)
Vergelijking 9.5 Spanning polyesterkabels in functie van de rek	56	Eigen werk
Vergelijking 9.6 Energieopname polyesterkabel bepalen als primitieve van σ polyester vermenigvuldigt met de inhoud van een de kabel	56	Eigen werk
Vergelijking 9.7 Energieopname polyesterkabel met voorspanning	57	Eigen werk

Afbeeldingen

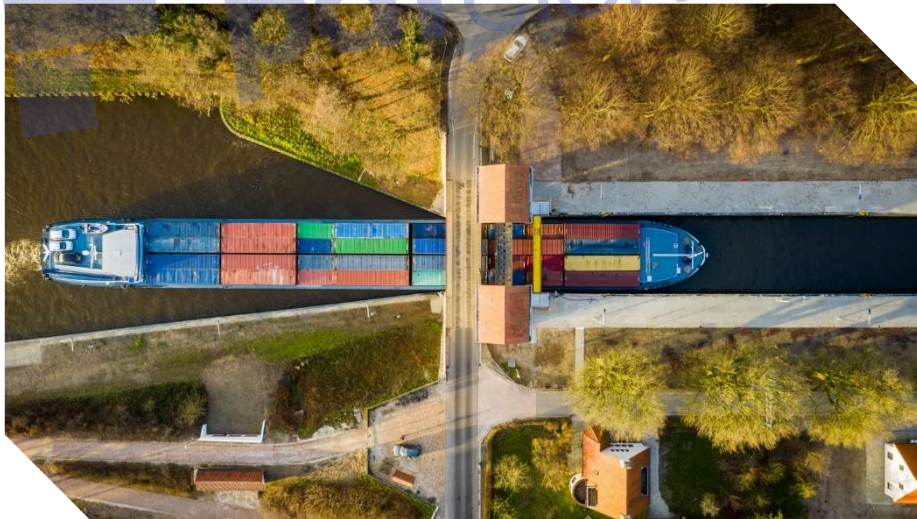
Afbeelding 5-1 Buigzame ligger - Sluis III Tilburg	24	(Berentsen, 2019)
Afbeelding 5-2 Stootbalk met remcilinders -Sluis Maasbracht	24	(Hoekstra, 2019)
Afbeelding 5-3 Koker met vangkabel - Zuidersluis Eefde	25	Eigen werk
Afbeelding 5-4 Vangnet Prins Bernharsluis	25	(Arnli, 2019)
Afbeelding 5-5 RIMOB toegepast bij obstakels langs snelwegen	26	(Rijkswaterstaat, 2019)
Afbeelding 8-1 Stopstreep voor aanvaarbeveiliging - Sluis Empel; Geel is de stopstreepafstand; Groen is afstand tussen stopstreep en aanvaarbeveiliging	39	(Berentsen, 2019) + Eigen toevoeging
Afbeelding 8-2 Uitsparing in een bestaande kolkwand voor dempingscilinders van een aanvaarbeveiliging; Project: Renovatie Sluis Delden;	39	(Hoekstra, 2019)

Figuren

Figuur 3.1 Overzicht onderdelen Sluis	17	(Vrijburcht A. , 2000)
Figuur 3.2 F-u diagram	19	(Rekenset, 2019)
Figuur 3.3 Stijve of flexibele constructie	19	Eigen werk
Figuur 3.4 De bouw van de Noordersluis naast de bestaande Zuidersluis	20	(Rijkswaterstaat, 2019)
Figuur 3.5 Locatie Sluiscomplexen op het Twentekanaal	20	(Rijkswaterstaat, 2019)
Figuur 4.1 Uitbreiding foutenboom (Bezwijken 2de keermiddel t.g.v. aanvaring) met toepassing aanvaarbeveiliging	21	Eigen werk
Figuur 5.1 Scharnierend portaal	24	(Ontwerp van Schutsluizen, 2000)
Figuur 5.2 Kabel met remcilinder- Sluis Panheel	25	(Jansen Venneboer, 2013)
Figuur 5.3 Schets composiet buis voor energieopname	26	Eigen werk
Figuur 5.4 Rubberblokken in de fenderconstructie (Hollandia-Infra)	26	(Hollandia Infra BV, 30-10-2017)
Figuur 5.5 TOT EN MET figuur 9.13	27	Eigen werk
Figuur 9.14 Bepalen aanvaarenergie met schatting voor een dempcilinder met behulp van grafiek met reactiekracht over de lengte van een cilinder bij indrukking door een schip (excentrische aanvaring; energieopname door cilinder = 560 kNm) – Bron: Producent ACE.	50	(ACE, 2010)
Figuur 9.15 TOT EN MET figuur 9.24	50	Eigen werk

BIJLAGE Dossier aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen

REALISATIE ONTWERPTOOL



Tristan Vlijm & Christian de Kruyf

TBI MOBILIS B.V. | APELDOORN | AFSTUDEERONDERZOEK CIVIELE TECHNIEK





Inhoudsopgave

BIJLAGE 1	FAALDEFINITIE	9
1.1	Falen schutsluis	9
1.1.1	Bovenliggende foutenboom	9
1.1.2	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI)	9
1.1.3	Uitbreiding foutenboom	10
1.2	Faaldefinitie	12
1.3	Conclusie	13
BIJLAGE 2	SOORTEN AANVAARBEVEILIGING	14
2.1	Uitwerking soorten aanvaarbeveiliging	14
2.1.1	Buigzame ligger	14
2.1.2	Scharnierend Portaal	14
2.1.3	Stootbalk met dempers	15
2.1.4	Kabel met dempcilinder (met slagboom)	15
2.1.5	Vangkabel (met koker)	16
2.1.6	Vangnet	16
2.2	Toegepaste aanvaarbeveiligingen in Nederland	17
2.2.1	Overzichtstabel aanvaarbeveiligingen in Nederland	17
2.2.2	Uitwerking aanvaarbeveiligingen in Nederland	18
2.3	Probleemanalyse bestaande soorten aanvaarbeveiliging	24
2.3.1	Problemen of tekortkomingen bij aanvaarbeveiliging	24
2.3.2	Geschikte soorten voor de optimalisatie	25
2.4	Uitwerking optimalisering varianten aanvaarbeveiliging	27
2.4.1	Dynamische Buigzame ligger	27
2.4.2	Stootbalk met composiet drukcilinders	31
2.4.3	Stootbalk met stalen rimpelbuizen	35
2.4.4	Stootbalk in de vorm van vakwerkligger met remcilinder	39
2.4.5	Kabel met fenderconstructie	42
2.4.6	Kunststofvangkabel met slagboomconstructie	44
2.5	Trade off matrix	51
2.5.1	Aspecten Trade Off Matrix	51
2.5.2	Beoordeling aspecten	52
2.5.3	Weging aspecten	52
2.5.4	Beoordeling varianten	54
2.5.5	Verificatie resultaten TOM met verschillende weging	56
2.5.6	Verificatie resultaten TOM met derden partijen	57
BIJLAGE 3	SCHETSONTWERPEN VARIANTEN	59
BIJLAGE 4	DATA VAN DER LEE	69

BIJLAGE 5	TRADE OFF MATRIX	71
5.1	Trade off Matrix ingevuld door TBI Mobilis	72
5.2	Trade off Matrix ingevuld door Ingenieursbureau Boorsma	73
5.3	Trade off Matrix ingevuld door Hollandia Infra	74
BIJLAGE 6	FACTOREN BELASTING	75
6.1	Scheepvaart	75
6.1.1	Geometrie	75
6.1.2	Massa	77
6.1.3	Snelheid	77
6.1.4	Scheepsaanbod	78
6.2	Sluiscomplex	82
6.2.1	Geometrie	82
BIJLAGE 7	GEGEVENS SCHEEPVAART	85
BIJLAGE 8	UITGANGSPUNTEN BELASTINGEN	86
8.1	Belastingen	86
8.1.1	Permanente belastingen	86
8.1.2	Variabele belastingen	86
8.2	Uitgangspunten ontwerp	87
8.2.1	Van toepassing zijnde normen en voorschriften	87
8.2.2	Gevolgklasse	87
8.2.3	Imperfecties	88
8.2.4	Vervormingen	88
8.2.5	Grenstoestanden	88
BIJLAGE 9	ENERGIE OMREKENEN NAAR BELASTING	89
9.1	Aanvaarkracht volgens Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken (ROK) 1.4	89
9.1.1	Pater & Joustra (1993)	89
9.1.2	Toepasbaarheid vergelijking	90
9.2	Aanvaarkracht met behulp van behoud van energie	90
9.2.1	Kracht uit verplaatsing van massa	90
9.2.2	Behoud van energie	91
BIJLAGE 10	AANVAARENERGIETOOL	92
10.1	Opstellen aanvaarenergietool	92
10.1.1	Situaties	92
10.1.2	Bepalen aanvaarenergie	93
10.1.3	Visualisatie Grenssnelheden	95
10.1.4	Visualisatie vaarafstand in de kolk	96

10.2	Casestudy aanvaarenergie Zuidersluis Eefde	97
10.2.1	Aanvaarenergie bepalen aan de hand van aanvaarenergietool	97
10.2.2	Resultaten aanvaarenergie	98
10.2.3	Analyse van de resultaten aanvaarenergietool	99
10.3	Verificatie Aanvaarenergietool	100
10.3.1	Sluis Empel	100
10.3.2	Nieuwe Sluis III te Tilburg	101
BIJLAGE 11	AANVAARKANS	103
11.1	Aanvaarkans	103
11.1.1	Bepaling kans op aanvaring	103
11.1.2	Aanvaarkans met een vooraf bepaalde Energie	103
11.2	Aanvaarkans Sluis Eefde	106
11.2.1	Verdeling scheepvaart	106
11.2.2	Uitwerking algemene aanvaarkans	106
11.2.3	Uitwerking Aanvaarkans met 2.500 kNm aanvaarenergie	107
11.2.4	Resultaat	108
BIJLAGE 12	UITDRAAI SHEETS AANVAARENERGIETOOL	109
BIJLAGE 13	INVLOEDFACTOREN	117
13.1	Invloedfactoren op de werking of toepassing van de aanvaarbeveiliging	117
13.1.1	Aangrijpingspunt aanvaarenergie	117
13.1.2	Plaatsingshoogte aanvaarbeveiliging	117
13.1.3	Doorvaarthoogte	119
13.1.4	Beschikbare ruimte in de kolkwanden en nabij de kolk	120
BIJLAGE 14	BEPALEN MAATGEVENDE AANVAARHOOGTE EN PLAATSINGSHOOGTE AANVAARBEVEILIGING	122
BIJLAGE 15	INTERVIEWS	125
15.1	Interview R. Berentsen van Rijkswaterstaat	125
15.2	Interview P. Bos van Hollandia Infra	132
15.3	Interview T. Hoekstra van Ingenieursbureau Boorsma	140
BIJLAGE 16	(ONTWERP-) AANVAARBEVEILIGINGTOOL	147
16.1	Buigzame ligger	147
16.1.1	Benodigde vergelijkingen	147
16.1.2	Schematisering	150
16.1.3	Reactiekrachten	153
16.1.4	Oplegging	155
16.1.5	Discussie	156

16.1.6	Validatie	157
16.2	Stootbalk met dempcilinder	159
16.2.1	Benodigde vergelijkingen	159
16.2.2	Maximale doorbuiging stootbalk	160
16.2.3	Oplegreacties	161
16.2.4	Bepalen profiel stootbalk	162
16.2.5	Dempcilinder	164
16.2.6	Validatie Stootbalk met dempcilinder	167
16.3	Rimpelbuis	172
16.3.1	Benodigde vergelijkingen	172
16.3.2	Bepalen profiel rimpelbuis	172
16.3.3	Voorgeschreven afmetingen rimpelbuis	173
16.3.4	Vloeigrens staal	175
16.3.5	Bepalen plastisch weerstandsmoment rimpelbuis	176
16.3.6	Indrukking rimpelbuis	176
16.3.7	Bepalen waarden voorgeschreven afmetingen rimpelbuis	177
16.3.8	Discussie	178
16.4	Kabel met remcilinder	179
16.4.1	Benodigde vergelijkingen	179
16.4.2	Maximale remweg	180
16.4.3	Volledige benutting kabelkracht	182
16.4.4	Nadere uitwerking met onder- en bovengrens	183
16.4.5	Oplegreacties	183
16.4.6	Discussie	184
16.4.7	Validatie kabel met remcilinder	185
16.5	Kunststofvangkabel	188
16.5.1	Benodigde vergelijkingen	188
16.5.2	Uitwerking	189
16.5.3	Spanning-rek-diagram	190
16.5.4	Energieopname	191
16.5.5	Voorspanning	192
16.5.6	Oplegreacties	193
16.5.7	Discussie	194
16.5.8	Validatie	195
BIJLAGE 17	EIGENSCHAPPEN (POLYESTER-)KUNSTSTOFVANGKABEL	199
BIJLAGE 18	CASESTUDY ZUIDERSLUIS EEFDE	200
18.1	Voorstel aanvaarbeveiliging Zuidersluis Eefde	200
18.1.1	Benodigde ruimte voor remcilinder	200
18.1.2	Remweg	201
18.1.3	Huidige status kolkwanden	202
18.1.4	Inpassing aanvaarbeveiliging	204
18.1.5	Aanvaarenergie Zuidersluis	207
18.1.6	Aanvaarbeveiligingtool resultaten op basis van contracteis aanvaarenergie	208
18.1.7	Aanvaarbeveiligingtool resultaten op basis van aanvaarenergie CEMT-IV	211

18.2	Controle berekening optredende momenten	212
18.3	Schetsontwerpen voorstel inpassing	213



Bijlage 1 Faaldefinitie

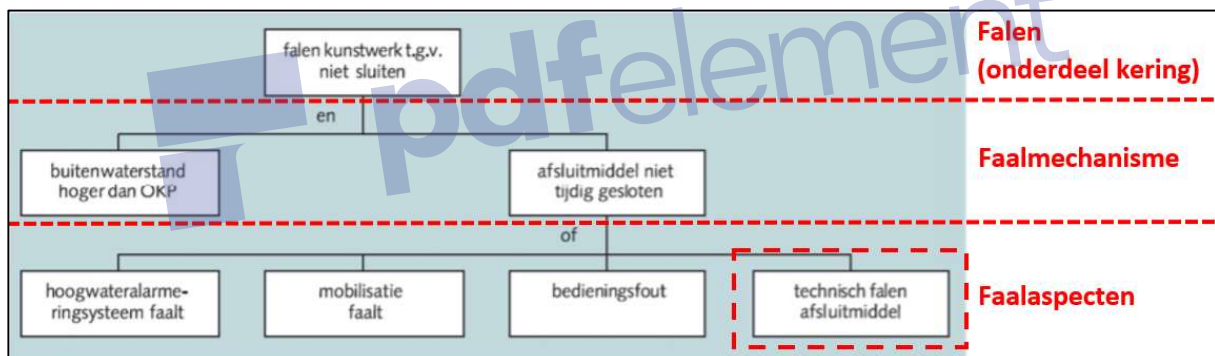
1.1 Falen schutsluis

Een schutsluis is een onderdeel, een waterkerende constructie, welke deel uit maakt van een kering. Er moet zich een combinatie van faalmechanisme voordoen om te zeggen dat de kering zijn waterkerende functie heeft verloren. In dit onderzoek wordt uitsluitend gekeken naar één onderdeel van de kering; de schutsluis. Het onderzoek focust zich op het falen van de schutsluis ten gevolge van aanvaring.

Een schutsluis is een onderdeel, waarbij de sluis zich bevindt in een primaire- of regionale kering. Bij het formuleren van de faaldefinitie wordt er gefocust op een schutsluis welke onderdeel is van een primaire kering. Waarbij de gevonden faaldefinitie betrekking heeft op een schutsluis voor beide keringen.

1.1.1 Bovenliggende foutenboom

In *Figuur 1.1* is de foutenboom weergegeven van het falen van een kunstwerk ten gevolge van niet sluiten. Dit is de bovenliggende foutenboom voor het falen van de kering ten gevolge van een aanvaring. Het falen komt door het optreden van een faalaspect gelijktijdig met een waterstand bij het bovenpand hoger dan het benedenpand. Het falen van het keermiddel kan middels verschillende faalaspecten voorkomen: Hoogwater-alarmeringssysteem faalt, Mobilisatie faalt, Bedieningsfout of Technisch falen afsluitmiddel, welke middels de foutenboom *Figuur 1.1* zijn verenigd.^a



Figuur 1.1 Foutenboom voor niet sluiten (Leidraad Kunstwerken)

1.1.2 Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI)^b

In het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) zijn voorschriften opgenomen voor het beoordelen van de primaire waterkeringen. Wanneer een schutsluis een primaire waterkering doorkruist maakt het tevens deel uit van deze waterkering. Het is ook mogelijk dat een schutsluis een regionale kering kruist, in dit geval is de schutsluis een regionale kering. Bij regionale keringen gelden in het algemeen minder strenge eisen dan bij een primaire kering. Echter omdat er enkel in het WBI wordt gekeken naar primaire kering, wordt voor dit onderzoek het WBI aangehouden voor het bepalen van de faaldefinitie. Op basis van het WBI geldt in dit onderzoek dat een regionale kering dezelfde faaldefinitie heeft als een primaire kering.

^a (Leidraad Kunstwerken, 2003)

^b (WBI 2017 Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk, 2 januari 2017)

De beheerder van de waterkering dient eens in de twaalf jaar de waterkeringen te toetsen op de overstromingskans om te controleren of deze voldoen aan de normen. De beoordelingsvoorschriften en hoe deze uitgevoerd moeten worden zijn vastgelegd in een wettelijk instrumentarium.^a

Binnen het WBI wordt onderzocht en beoordeeld hoe een kunstwerk, een schutsluis, bijdraagt aan het falen van waterkeringen. De beoordeling wordt uitgevoerd in drie fases: voorbereiding, uitvoering en rapportage. Waarbij de toetsing plaatsvindt in de uitvoeringsfase. De toetsing van een schutsluis dient te worden gedaan middels een toetsspoor: *“Een toetsspoor is de wijze waarop een mechanisme of een onderdeel van de waterkering wordt beoordeeld. Een toetsspoor bestaat in de meeste gevallen uit een: eenvoudige toets, een gedetailleerde toets en een toets op maat.”*^b Kijkend naar een schutsluis wordt deze beoordeeld middels toetsspoor: Sterkte en stabiliteit kunstwerk, puntconstructies. Sluizen en gemalen zijn voorbeelden van puntconstructies. Het gaat hierbij om een gedetailleerde toets.

Toetsspoor sterkte en stabiliteit kunstwerk, puntconstructie

In de gedetailleerde toets beschreven het WBI, (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, p. 90), wordt falen door bezwijken van het kunstwerk gedefinieerd als: *“het moment waarop de kritische stroomsnelheid van de bodembescherming wordt overschreden, dan wel het moment dat er in het achterland significante overstromingsgevolgen optreden als gevolg van stroming via het bezwijken kunstwerk.”*

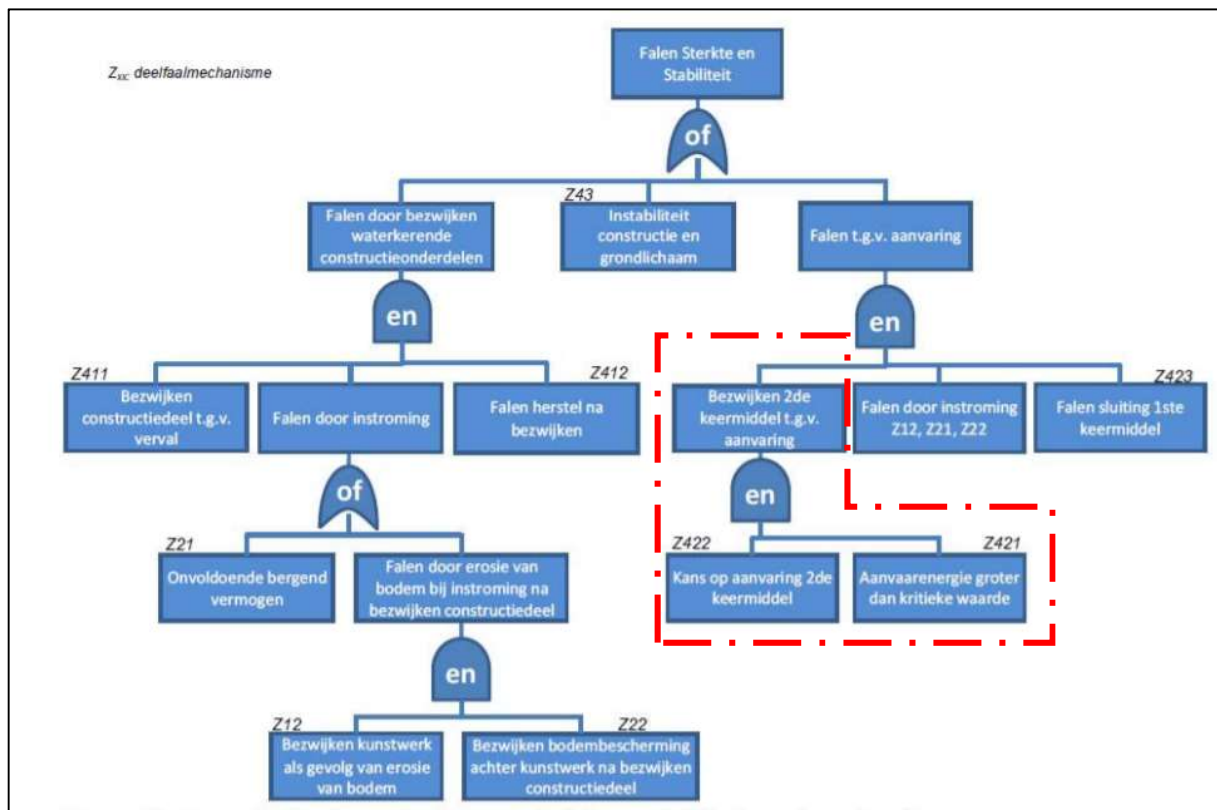
Het WBI schrijft voor om voor een schutsluis een probabilistische toets, zie *Figuur 1.2*, uit te voeren met een faalkanseis op objectniveau. Falen van de Sterkte en Stabiliteit is het constructief bezwijken van het kunstwerk, bijvoorbeeld de schutsluis. Hierbij is het faalmechanisme nog niet benoemd. Falen door aanvaring van het tweede keermiddel is een faalmechanisme dat enkel betrekking heeft op schutsluizen. Waarbij het WBI, (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, p. 90) het bezwijken als volgt omschrijft: *“Bezwijken vindt plaats indien de deuren in het ene sluishoofd open staan en een schip de deuren in het andere sluishoofd eruit vaart”*.

1.1.3 Uitbreiding foutenboom

Het falen als gevolg van aanvaring valt onder het faalaspect technisch falen, zie *Figuur 1.1*, bij een kritieke aanvaring kan de sterkte en stabiliteit van het tweede keermiddel falen. In *Figuur 1.2* is de foutenboom voor het faalmechanisme “Sterkte en Stabiliteit” weergegeven uit het WBI. De schutsluis kan hierin falen door het bezwijken van waterkerende constructieonderdelen, door instabiliteit en door aanvaring. Het falen ten gevolge van aanvaring doet zich alleen voor wanneer het tweede keermiddel bezwijkt door een aanvaring en het eerste keermiddel niet instaat is om te sluiten, waardoor er instroming ontstaat in het benedenpand.

^a (Primaire waterkering > Beoordelen (WBI), 2017)

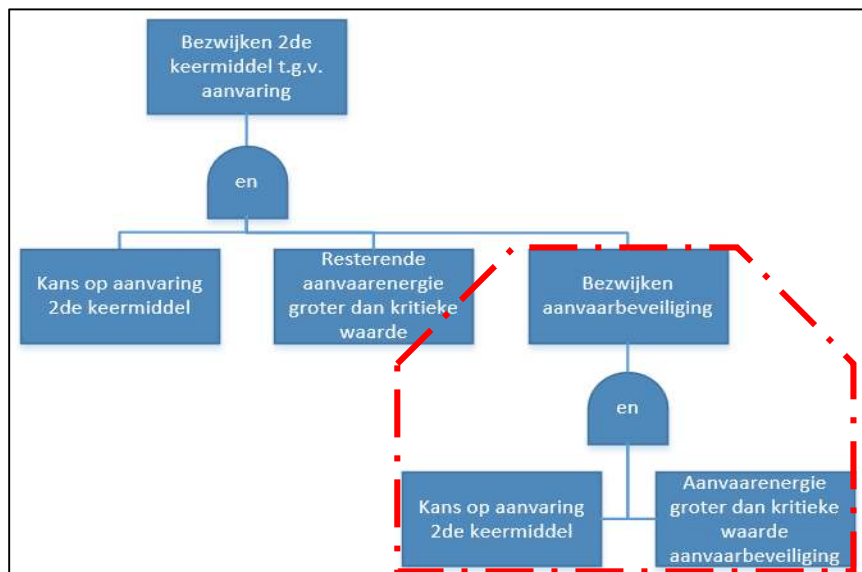
^b (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, p. 12)



Figuur 1.2 Modelling toetsspoor sterkte en stabiliteit kunstwerk, puntconstructie (Foutenboom)

Het tweede keermiddel kan ook falen ten gevolge van het bezwijken van waterkerende constructieonderdelen en de instabiliteit constructie en grondlichaam. Een aanvaarbeveiliging voor het tweede keermiddel geeft een grotere energie-opname-capaciteit, dan enkel het keermiddel. Met andere woorden; De kritieke waarde van de aanvaarenergie moet groter zijn om het laten bezwijken van het tweede keermiddel ten gevolge van aanvaring te doen optreden. Er is in de foutenboom van *Figuur 1.2* helder weergegeven dat de kans op aanvaring los staat van de aanvaarenergie.^aDe kans op aanvaring blijft namelijk gelijk ongeacht de toepassing van een aanvaarbeveiliging.

^a (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, 2017)



Figuur 1.3 Uitbreiding foutenboom (Bezwijken tweede keermiddel t.g.v. aanvaring) met toepassing aanvaarbeveiliging

Het rood gearceerde deel uit *Figuur 1.2* is verwerkt in *Figuur 1.3* en uitgebreid met de toepassing van een aanvaarbeveiliging. Hierin is uit af te leiden dat het tweede keermiddel pas faalt als er een aanvaarenergie optreedt die de aanvaarbeveiliging doet bezwijken, waarbij de resterende aanvaarenergie nog voldoende groot moet zijn om het tweede keermiddel te doen bezwijken.

1.2 Faaldefinitie

De definitie van falen wordt in twee manieren uitgedrukt:

- 1) Falen als verlies van waterkerende functie;
- 2) Falen als (lange) stremming van het scheepvaartverkeer.

Falen als in verlies van waterkerende functie

In het WBI is falen als verlies van waterkerende functie benoemd wat heeft geleid tot een uitbreiding van de foutenboom.

Falen als in (lange) stremming van de scheepvaart

Uit een interview met een werknemer, operationeel technisch manager, van Rijkswaterstaat^a is gebleken dat naast waterveiligheid ook de beschikbaarheid van de schutsluis een hoge prioriteit heeft. Rijkswaterstaat definieert beschikbaarheid van de sluis als volgt; *Het in staat zijn om de scheepvaart de sluis te laten passeren.*

Rijkswaterstaat maakt de afweging tussen waterveiligheid en beschikbaarheid. Een afweging die gemaakt wordt ten aanzien van beschikbaarheid is bijvoorbeeld: *'Hoelang is de stremmingsduur bij het bezwijken van het tweede keermiddel?'*. Hieruit kan blijken dat de stremmingsduur nadelige gevolgen (o.a. financiële) heeft, waardoor de toepassing van een aanvaarbeveiliging benodigd is. Dit geeft weer dat de maatschappelijke verantwoordelijkheden vaak haaks staan op de waterveiligheid. Waar de grens door Rijkswaterstaat wordt getrokken is situatie afhankelijk. Er wordt geconcludeerd dat de stremmingsduur van dusdanige duur, dat wil zeggen; lange stremming, moet zijn dat er grote financiële gevolgen optrede. Hierbij dient te worden vermeld dat waar deze grens wordt getrokken, tevens per situatie uniek is.

^a Bijlage 15.1 Interview R. Berentsen van Rijkswaterstaat

1.3 Conclusie

Een aanvaring met een tweede keermiddel gelegen in een sluis waar geen aanvaarbeveiliging is toegepast kan een aanvaring, falen in (lange-) stremming van de scheepvaart betekenen. Wanneer de aanvaring van zodanig aard is dat het tweede keermiddel bezwijkt treedt er falen op als in het verlies van de waterkerende functie. Bij een aanvaring in een sluis met wel een aanvaarbeveiliging geldt exact hetzelfde. Hieruit wordt geconcludeerd dat de faaldefinitie niet veranderd bij wel of geen toepassing van een aanvaarbeveiliging.

Bij het toepassen van een aanvaarbeveiliging moet de grootte van de aanvaring van zodanige omvang zijn wil er falen als in verlies van waterkerende functie optreden. Het falen in verlies van de waterkerende functie wordt zeer beperkt bij de toepassing van een aanvaarbeveiliging. In de (WBI 2017 Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk), wordt dit tevens geconcludeerd, zie *Figuur 1.4*.



Figuur 1.4 Weergave uit stroomschema afweging beoordelen aanvaren (Schematiseringshandleiding WBI)

Wanneer één of beide faaldefinities optreden heeft de schutsluis binnen dit onderzoek gefaald. Dit betekent dat de schutsluis ook faalt wanneer er een aanvaring voorkomt welke het tweede keermiddel niet doet bezwijken, maar er wel stremming van het scheepvaartverkeer is. De kans en grootte van optreden wordt buiten beschouwing gelaten.

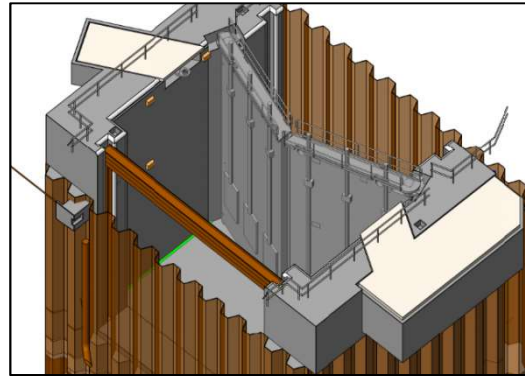
Het falen van een schutsluis is niet alleen afhankelijk van de kritieke aanvaring, er zijn meerdere faalmechanismen die naast falen ten gevolge van aanvaring kunnen voorkomen. De doelstelling van een aanvaarbeveiliging is de kans op bezwijken van het tweede keermiddel ten gevolge van een aanvaring te verminderen en de beschikbaarheid van de schutsluis vergroten. Er moet bij de toepassing van een aanvaarbeveiliging een hogere kritieke aanvaarenergie, *Bijlage 10 Aanvaarenergietool*, optreden om het tweede keermiddel te doen bezwijken dan zonder de toepassing van een aanvaarbeveiliging. Dit staat los van de aanvaarkans, *Bijlage 11 Aanvaarkans*, deze is te allen tijde even groot.

Bijlage 2 Soorten Aanvaarbeveiliging

2.1 Uitwerking soorten aanvaarbeveiliging

2.1.1 Buigzame ligger

Een buigzame ligger is veelal uitgevoerd als een stalen profiel bestaande uit één of meerdere staalprofielen (bijvoorbeeld HEB-profielen), *Figuur 2.1*. De buigzame ligger wordt enkel toegepast bij sluizen waarbij het minimale verval zo groot is dat schepen er onder iedere omstandigheid onderdoor kunnen varen. Het uiteinde van de liggers bevinden zich in een sparing, bijvoorbeeld de schotbalksponningen, van de kolkwanden. De ligger bevindt zich zonder aanvullende demping in de sponning. Dit betekent dat de aanvaarbebelasting één op één moet worden opgenomen in het betonwerk, de aanvaarenergie wordt niet opgenomen door aanvullende cilinders. Wel zal er door vervorming van de ligger, de belasting worden verkleind. De belasting op de kolkwanden zijn aanzienlijk groter dan bij een aanvaarbeveiliging welke gebruik maakt van een demper.



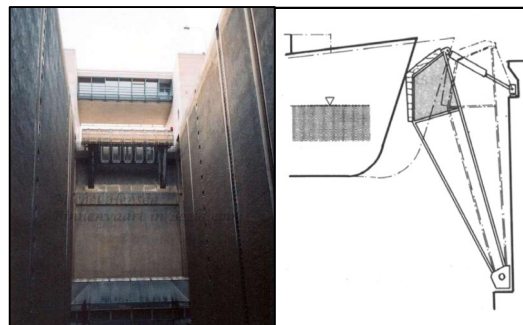
Figuur 2.1 Visualisatie buigzame ligger (Sluis III)

Bij aanvaring buigt de aanvaarbalk en verkort aanzienlijk. De belasting wordt door het profiel deels verkleind door het plastische vervormen van de ligger. De resulterende krachten vinden afdracht naar de oplegging, de kolkwanden, zonder enige demping. Bij aanvaring welke plastische vervorming te weeg brengt dient de balk volledig te worden vervangen. Daarnaast dient de uitsparing in de kolkwanden, bijvoorbeeld de schotbalksponning, te worden gecontroleerd en/of gerepareerd. Bij het vervormen van de ligger bestaat de mogelijkheid dat het beton/kolkwand rondom de ligger ernstig beschadigd raakt.

2.1.2 Scharnierend Portaal

Een zware balk (eventueel voorzien van een ballastbak om de massa te vergroten) vormt samen met twee poten een scharnierend portaal. Het portaal is bevestigd aan een keringswand boven de deur. Bij aanvaring met de balk wordt de achterliggende demper langzaam ingedrukt, *Figuur 2.2*. De beveiliging bevindt zich aan de benedenhoofdzijde waarbij bovenstrooms een gereguleerde waterstand is.

Bij aanvaring wordt de bewegingsenergie van een schip opgenomen door hydraulisch dempende cilinders en door de zwaartekracht-component van de zware stalen balk. Het portaal hangt iets richting de kolk, het staat gekanteld. Bij aanvaring wordt de balk naar achteren en omhoog gedrukt, de balk wordt uit het water gedrukt. Voor schepen met een duwbaksteven (schuin oplopende boeg) komt daar nog bij dat het schip zelf ook iets uit het water getild wordt door het omhoog



Figuur 2.2 Scharnierend portaal (Leerstetten)

draaiende portaal.^a Deze oplossing is aantrekkelijk bij een groot-verval waar de schepen na het nivelleren eenvoudig onderdoor kunnen varen.

Dit systeem is tweemaal in Duitsland toegepast, onder andere bij Sluis Uelzen en -Leerstetten. Deze sluizen zijn beide schachtsluizen welke zich kenmerken door een zeer groot verval meer dan twintig meter.

2.1.3 Stootbalk met dempers

De stootbalk is een op een vaste hoogte liggende horizontale balk met horizontaal gelegen, dempende cilinders ter ondersteuning. Dit constructietype is toegepast in de sluizen bij Born, Maasbracht en Delden. De balk is uitgevoerd uit een stalen ligger met aan aanvaarzijde een houten bekleding. De houten bekleding is enkel aangebracht ter bescherming van de scheepshuid bij aanvaring. De stalen ligger draagt bij aanvaring de krachten af aan de weerszijde gelegen dempers.

De hydraulische dempers bevinden zich aan weerszijde in een sponning van de kolkwanden, *Figuur 2.3*. De dempers worden bij aanvaring ingedrukt over een bepaalde afstand en tijd, afhankelijk van soort en grootte schokdemper. Bij aanvaring wordt de zuigerstang ingedrukt waardoor de olie in de zuiger door kleine openingen wordt gedrukt. De introductiesnelheid is constant net als dynamische druk en de tegenkracht.^b

Na aanvaring dienen de dempers te worden gecontroleerd en de vloeistof terug worden gebracht in de zuiger. De stalen balk met houten bekleding zal afhankelijk van de aanvaarenergie gerepareerd of vervangen moeten worden. Na reparatie of vervanging heeft de aanvaarbeveiliging opnieuw dezelfde werking als voorheen.



Figuur 2.3 Stootbalk met dempers (Maasbracht)

2.1.4 Kabel met dempcilinder (met slagboom)

De kabel met remcilinder maakt gebruik van een slagboomconstructie om de scheepvaart vrije doorvaart te garanderen. De slagboom met daaraan een kabel is in een frame geplaatst dat in hoogte verstelbaar is doormiddel van cilinders, *Figuur 2.4*. De kabel wordt aan één zijde door de slagboomfunctie in een opvangconstructie, in de kolkwand, vergrendeld. In een gesloten toestand wordt aan de andere sluiszijde doormiddel van hydraulische dempingcilinder de kabel op voorspanning getrokken.

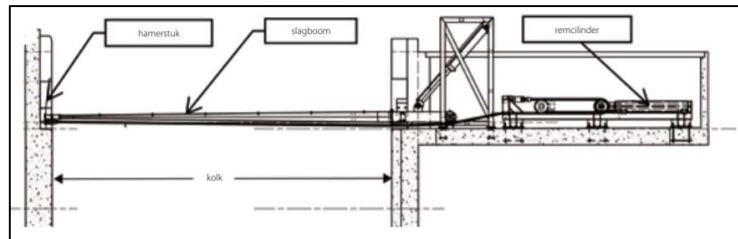
Bij aanvaring met de slagboom en kabel breekt de slagboom doormiddel van breekbouten nabij de sluiswand. De vangkabel neemt zelf (vrijwel) geen energie op. De energie van het af te remmen schip wordt per staalkabel opgenomen door een speciale reminstallatie. Bij aanvaring met de kabel treedt de (rem-)dempingscilinder in werking, een set katrollen zorgt voor de vertraging van een schip in zeer

^a (Vrijburcht, Ontwerp van schutsluizen, 2000)

^b (Schuttevaer, sd)

korte tijd. De vrijkomende energie uit de remvertraging wordt niet direct in de sluiswanden doorgezet. De hydraulische (rem-)dempingcilinder zet de kracht om in de verplaatsing van olie.

Aan de andere zijde van de kabel bevindt zich een hamerkop die in de opvangconstructie vast zit, deze vangt de krachten van een aanvaring op. De slagboom wordt zo uitgevoerd dat deze door bijvoorbeeld met rood-wit geblokte kleuren en waarschuwingsverlichting een visuele markering vormt.^a



Figuur 2.4 Technisch detail werking kabel over kolk met enkele remcilinders (sluis Empel)

2.1.5 Vangkabel (met koker)

De vangkabel is uitgevoerd als een voorgespannen staalkabel in of aan een kokerconstructie welke is bevestigd aan twee bolders (op elke zijde van de kolk één). De koker is vooral ten behoeve van het visueel maken van de aanvaarvoorziening. Deze koker levert, buiten een positief effect op inleiding van krachten, geen bijdrage aan de beveiliging. De koker met de kabel rust op de kolkwanden waar de bolders tevens zijn gerealiseerd. De koker met kabel kan in een naar boven gaande beweging van de wanden worden gelift doormiddel van horizontale lepels welke zijn bevestigd aan de deur. Hierdoor kan er bij een matig verval nog steeds onderdoor de koker worden gevaren. De kabel bestaat uit een stalenkabel of een vezel-versterktekabel. De aanvaarenergie wordt opgenomen doormiddel van het rekken van de kabel. Dit systeem is toegepast in Zuidersluis Eefde; *Figuur 2.5*, en Sluis Hengelo.

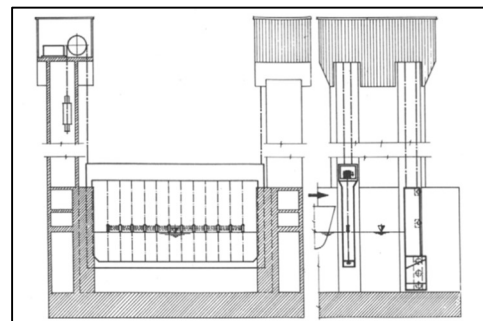


Figuur 2.5 Vangkabel in stalen koker (Zuidersluis Eefde)

2.1.6 Vangnet

Het vangnet bestaat uit een rechthoekig raamwerk met daarin een grof net van staalkabels, *Figuur 2.6*. De verticale kabels zijn elk afzonderlijk aan de bovenzijde verbonden aan een hydraulische rem, waardoor het een grote energie-opnamecapaciteit heeft. Bij aanvaring nemen de kabels de energie op door elastische vervorming en door de remmen in de bovenbalk.

Het raamwerk bevindt zich enkele meters voor de hefdeur. Vanwege deze afstand tussen de deur en het raamwerk is voor het liften meestal een aparte heftoren benodigd. Het raamwerk wordt net als de hefdeur gelift doormiddel van contragewichten. Het systeem is enkel toe te passen als er gebruik wordt gemaakt van een hefdeur/-toren. Het systeem is uitermate geschikt voor sluisen welke aan beide zijde sterk wisselende waterstanden hebben. De kabels kunnen op verschillende niveaus worden aangevaren en deze energie opnemen.^b



Figuur 2.6 Vangnet als aanvaarbeveiliging

^a (Het sluitstuk van de Zuid-Willemsvaart: Sluis Empel, 2013)

^b (Vrijburcht, Ontwerp van schutsluizen, 2000)

2.2 Toegepaste aanvaarbeveiligingen in Nederland

2.2.1 Overzichtstabel aanvaarbeveiligingen in Nederland

Tabel 2.1 geeft informatie weer van bestaande/komende aanvaarbeveiligingen in Nederlandse sluizen^a. Verderop in deze paragraaf worden de aanvaarbeveiligingen per situatie toegelicht.

Tabel 2.1 Overzicht van aanvaarbeveiligingen in Nederlandse sluizen

Sluizen	Scheeps- klasse	Aanvaarbeveiliging	Hoofdzijde	Max. verval [m]	Ingebruik- name [jaar]	Remweg [m]
Sluis III Tilburg	II	Buigzame ligger	Benedenhoofd	7,90	2017	6,10
Panheel (oude sluis)	II	Buigzame ligger	Benedenhoofd	7,85	?	1,50
Panheel (nieuwe sluis)	II	Kabel aan remcilinder	Bovenhoofd	7,85	?	6,00
Sluis Empel	IV	Slagboom met remkabel	Benedenhoofd	2,40	2014	6,00
Sluis Empel	IV	Slagboom met remkabel	Bovenhoofd	2,40	2014	14,00
Sluis Delden	IV	Balk met demper	Benedenhoofd	6,00	2018	4,20
Sluis Hengelo	IV	Balk met kabel (uitwendig)	Benedenhoofd	9,00	1979	4,20
Sluis Eefde (zuidersluis)	Va	Balk met kabel (uitwendig)	Benedenhoofd	6,00	1979	4,20
Sluis Eefde (noordersluis)	Va	Slagboom met remkabel	Benedenhoofd	6,00	2020	7,70
Sluis Weurt (westersluis)	Vb	Buigzame ligger(s)	Benedenhoofd	5,00	>2020	?
Zeesluis Farmsum (Grote sluis)	Va	Balk met kabel (inwendig)*	Benedenhoofd	?	?	Geen
Born (oostersluis)	Va	Balk met demper	Benedenhoofd	11,35	2009	7,00
Born (middensluis)	Va	Balk met demper	Benedenhoofd	11,35	2009	7,00
Maasbracht (oostersluis)	Va	Balk met demper	Benedenhoofd	11,85	2010	8,50
Maasbracht (middensluis)	Va	Balk met demper	Benedenhoofd	11,85	2010	8,50
Maasbracht (westersluis)	Va	Balk met demper	Benedenhoofd	11,85	2010	8,50
Sluis Terneuzen (middensluis)	Va	Slagboom met kabel (inwendig)	Bovenhoofd	5,50	2011	11,00
Prinses Irenesluis (oostersluis)	VIb	Vangnet	Benedenhoofd	5,00	1975	2,00
Prinses Irenesluis (oostersluis)	VIb	Vangnet	Bovenhoofd	5,00	1975	2,00
Prins Bernhardsluis (westersluis)	VIb	Vangnet	Benedenhoofd	5,50	1975	2,00
Prins Bernhardsluis (westersluis)	VIb	Vangnet	Bovenhoofd	5,50	1975	2,00
Urkersluis	I	Balk met demper	Benedenhoofd			

* Aanvaarbeveiliging bevindt zich buiten de kolk

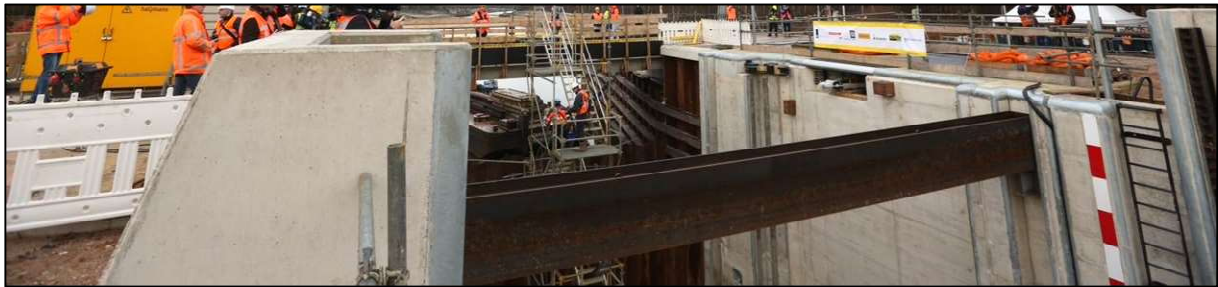
^a (Binnenvaartinbeeld Sluizen, sd)

2.2.2 Uitwerking aanvaarbeveiligingen in Nederland

Sluis III (Tilburg)

Sluis III bevindt zich in het Wilhelminakanaal. De nieuwe sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van II, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Kempenaar van 55 meter lang en 6,60 meter breed.

De nieuwe Sluis heeft aan de benedenhoofdzijde een aanvaarbeveiliging in de vorm van driemaal een stalen HEB-profiel, *Afbeelding 2.1*. Het gaat hierbij om een vervormbare aanvaarbeveiliging welke de maximale aanvaarenergie kan opnemen van 2.000 kNm doormiddel van elastisch- en/of plastische vervorming van het profiel.

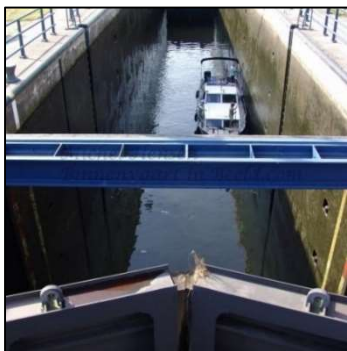


Afbeelding 2.1 Buigzame ligger Sluis III

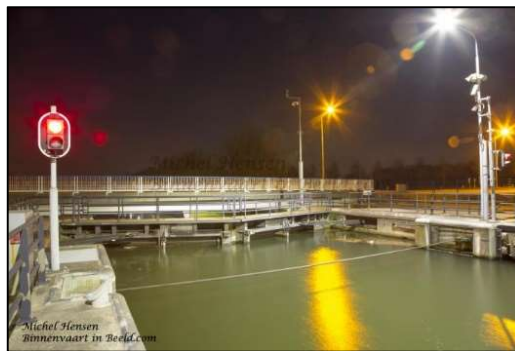
Sluis Panheel

Het Sluiscomplex Panheel bestaat uit twee sluizen welke zich bevinden in het kanaal Wessem-Nederweert. De nieuwe sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van II, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Kempenaar van 55 meter lang en 6,60 meter breed.

De twee sluizen hebben aan beide zijden puntdeuren. De oude sluis heeft aan de bovenhoofdzijde een aanvaarbeveiliging in de vorm van een stalen stootbalk met daarachter dempcilinders, *Figuur 2.7*. De nieuwe sluis heeft aan tevens aan de oostzijde een aanvaarbeveiliging in de vorm van een kabel welke is bevestigd aan een remcilinder, *Figuur 2.8*.



Figuur 2.7 – Aanvaarbalk met dempers (oude-)sluis Panheel



Figuur 2.8 Kabel met remcilinder (nieuwe-)sluis Panheel

Sluis Empel

Sluis Empel bevindt zich in het Maximakanaal. De nieuwe sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van IV, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Rijn-Hernekanaalschip van 85 meter lang en 9,50 meter breed.

De sluis heeft aan beide zijden een enkele deur welke naar de zijkant wordt gedraaid bij openen. De sluis heeft aan beide zijden een aanvaarbeveiliging in de vorm van een kabel welke is bevestigd aan een slagboom, *Figuur 2.9*. De kabel valt samen met de boom in een uitsparing waar een remcilinder aan de andere zijde samen met de kabel de energie uit een niet tijdig te stoppen schip moet halen. De slagboom visualiseert tevens de stopstreep, vergelijkbaar met een spoorslagboom.

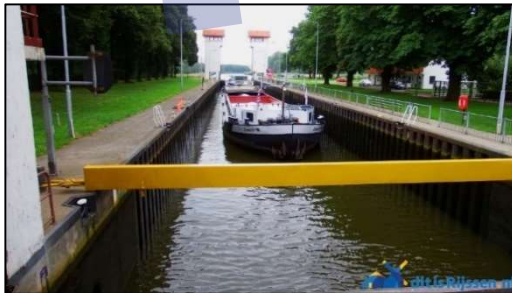


Figuur 2.9 Slagboom met kabel aan remcilinder Sluis Empel

Sluis Delden

Sluis Delden bevindt zich in het Twente-kanaal nabij Delden. De sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van IV, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Rijn-Hernekanaalschip van 85 meter lang en 9,50 meter breed.

De sluis maakt aan beide zijde gebruik van hefdeuren. Aan de benedenhoofdzijde bevindt zich achter de hefdeuren een vaste verkeersbrug. De hefdeur wordt beschermd tegen aanvaring doormiddel van een aanvaarbeveiliging. Voor de renovatie van de sluis in 2018 was er aanvaarbeveiliging bestaande uit een gele stalen kokerbalk waaronder een stalenkabel hangt die is bevestigd aan bolders toegepast, *Figuur 2.10*. In 2018 is deze aanvaarbeveiliging vervangen door een systeem welke vergelijkbaar is met die van sluis Maasbracht en Born. De aanvaarbeveiliging is uitgevoerd als een stalenligger waaraan aan beide kolkwandzijde dempcilinders zijn bevestigd welke de aanvaarenergie kunnen opnemen, *Figuur 2.11*.



Figuur 2.10 Aanvaarbalk met kabel (voor renovatie) Sluis Delden



Figuur 2.11 Aanvaarbalk met dempers (na renovatie) Sluis Delden

Sluis Hengelo

Sluis Hengelo bevindt zich in het Twente-kanaal nabij Hengelo. De sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van IV, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Rijn-Hernekanaalschip van 85 meter lang en 9,50 meter breed.

De sluis maakt gebruik van puntdeuren aan benedenhoofdzijde en hefdeuren aan bovenhoofdzijde. De puntdeuren worden beschermd tegen aanvaring doormiddel van een aanvaarbeveiliging. De aanvaarbeveiliging bestaat uit een gele stalen kokerbalk waaronder een staakabel hangt die bevestigd is aan bolders, *Figuur 2.12*.



Figuur 2.12 – Aanvaarbalk met kabel Sluis Hengelo

Sluis Eefde

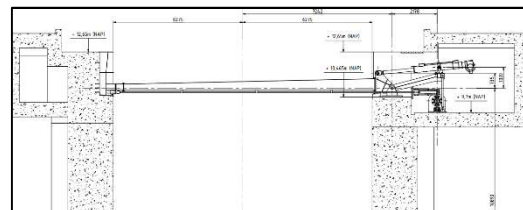
Sluizencomplex Eefde bestaat uit twee binnenvaartsluizen welke de verbinding tussen de IJssel en het Twente-kanaal mogelijk maken. De sluizen bieden doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van IV, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Rijn-Hernekanaalschip van 85 meter lang en 9,50 meter breed.

De Zuidersluis maakt aan beide zijde gebruik van hefdeuren. Aan de benedenhoofdzijde bevindt zich achter de hefdeuren een vaste verkeersbrug. De hefdeur aan de benedenhoofdzijde wordt beschermd tegen aanvaring doormiddel van een aanvaarbeveiliging. De aanvaarbeveiliging bestaat uit een gele stalen kokerbalk waaronder een stalenkabel hangt die is bevestigd aan bolders, *Figuur 2.13*.



Figuur 2.13 Aanvaarbalk met kabel Zuidersluis Eefde (voor renovatie)

De Noordersluis, welke begin 2020 in werking is, maakt aan bovenhoofdzijde gebruik van een segmentdeur en aan benedenhoofdzijde van puntdeuren. De puntdeuren worden beschermd doormiddel van een aanvaarbeveiliging. De aanvaarbeveiliging bestaat uit een slagboom met daaraan een kabel, *Figuur 2.14*. De kabel wordt één zijde bevestigd in de kolkwand en is aan de andere zijde met een remcilinder. Na de oplevering van de Noordersluis wordt de Zuidersluis gerenoveerd en uitgevoerd met eenzelfde soort aanvaarbeveiliging als die in de Zuidersluis.



Figuur 2.14 Slagboom met kabel Noordersluis Eefde

Sluis Weurt

Sluiscomplex Weurt bestaat uit twee sluisen welke de verbinding tussen de Waal en het Maas-Waalkanaal mogelijk maakt. De sluisen bieden doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van Vb, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Groot Rijnschip van 110 meter lang en 11,40 meter breed.

De wens van Rijkswaterstaat is om het trapsgewijs schutten van de Westersluis op te heffen. De Westersluis maakt gebruik van driemaal een hefdeur, waarbij de wens is om de middelste hefdeur te laten opheffen. Dit brengt teweeg dat bij aanvaring van de hefdeur in het benedenhoofd er geen extra keermiddel meer tot beschikking is. Vanwege veiligheidsredenen wil Rijkswaterstaat een aanvaarbeveiliging toepassen. Ingenieursbureau Boorsma, *Bijlage 15.3 Interview T. Hoekstra van Ingenieursbureau Boorsma*, heeft hiervoor een ontwerp gemaakt. Dit ontwerp bestaat uit een raamwerk van staalprofielen, zonder toevoeging van dempers.

Zeesluis Farmsum

Het sluisencomplex Farmsum bestaat uit een recreatievaart sluis en een zeesluis. De sluisen Farmsum bevindt zich nabij Delfzijl en staat in open verbinding met zee en sluit doormiddel van de sluis aan op het Eemskanaal. De zeesluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van Va, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Groot Rijnschip van 135,00 meter lang en 11,40 meter breed.

De sluis is aan beide zijden voorzien van puntdeuren. De aanvaarbeveiliging in de westelijke zeesluis is voornamelijk aangebracht ter beveiliging van de aan de noordzijde gelegen verkeersbrug (ophaalbrug). De aanvaarbeveiliging bestaat uit tweemaal een open stalenframe waardoor kabels zijn gespannen, *Figuur 2.15*. Het frame is doormiddel van raamwerkligger bevestigd aan de brug, de aanvaarbeveiliging bevindt zich op twee verschillende afstanden en niveaus. Mocht een schip deze aanvaren wordt doormiddel van de kabels de aanvaarenergie opgenomen.



Figuur 2.15 Aanvaarbalk met kabel Sluis Farmsum

Sluis Born

Sluiscomplex Born bestaat uit drie binnenvaartsluisen welke de verbinding tussen Julianakanaal en Berghaven mogelijk maakt. De twee nieuwe sluisen bieden doorgang aan schepen t/m een scheepsklasse van Va, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Groot Rijnschip van 135 meter lang en 11,40 meter breed.

De twee nieuwe sluisen hebben aan beide zijde puntdeuren. De benedendeur wordt beschermd doormiddel van een stootbalk, bestaande uit een stalen frame, *Figuur 2.16*. De stootbalk vangt de aanvaarenergie op doormiddel van dempingscilinders.



Figuur 2.16 Aanvaarbalk met dempers (nieuwe-Sluis Born)

Sluis Maasbracht

Sluiscomplex Maasbracht bestaat uit drie binnenvaartsluizen welke verbinding tussen Julianakanaal en Berghaven mogelijk maakt. De sluizen bieden doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van Va, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Groot Rijnschip van 135 meter lang en 11,40 meter breed.

De sluizen hebben aan beide zijde puntdeuren. De benedendeur wordt beschermd doormiddel van een stootbalk, uitgevoerd als een stalen frame welke is bekleed met hout, *Afbeelding 2.2*. De stootbalk is aan het uiteinde bevestigd aan dempingscilinders, welke de aanvaarenergie opnemen. De stootbalk is in Juli 2017^a aangevaren en heeft zijn dienst bewezen. De stootbalk is beschadigd en moest vervangen worden, maar de dempingscilinders zijn na een inspectie wederom in gebruik genomen.



Afbeelding 2.2 – Aanvaarbalk met dempers Sluis Maasbracht

Sluis Terneuzen

Sluizencomplex Terneuzen bestaat uit drie sluizen welke verbinding tussen Westerschelde Kanaal en Gent-Terneuzen biedt. De middensluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van Va, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Groot Rijnschip van 135,00 meter lang en 11,40 meter breed.

In de middensluis bevindt zich aan de beide zijde voor de ophaalbruggen een slagboom ter aanvaring van de brug, *Figuur 2.17*. In de slagboom zit een staalkabel welke is bevestigd aan een remcilinder. In gesloten stand valt de boom in een uitsparing, de kabel valt om een bolder in de uitsparing. Bij aanvaring bezwijkt de boom en zal de remcilinder de energie uit een niet tijdig te stoppen schip halen doormiddel van de kabel, deze kabel zal ook oprekken en dient vervangen te worden na een aanvaring. De remcilinders dienen na een dergelijk voorval te worden geïnspecteerd en wanneer deze in orde zijn, kunnen deze worden hergebruikt.^b



Figuur 2.17 – Slagboom met kabel aan remcilinder Sluis Terneuzen

^a (Sluisdempers bewijzen hun dienst na aanvaring bij sluis, 2017)

^b (Installatiebedrijf W.J. De Bruijn, sd)

Prinses Irenesluizen

De Prinses Irenesluis bestaat uit twee sluizen welke zijn gelegen in Amsterdam-Rijnkanaal nabij Wijk bij Duurstede. De sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van VIb, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een zesbakduwstel van 193 meter lang en 22,80 meter breed.

De oostelijke sluis is alleen uitgevoerd met aanvaarbeveiliging, *Figuur 2.18*, ter beveiliging van de aan beide zijde toegepaste hefdeuren. De hefdeuren worden omhoog/omlaag gebracht doormiddel van een loopwerk in de heftorens. De deuren zijn beschermd doormiddel van voorliggend frame waarin verticaal gespannen kabels zijn. Halverwege de verticale kabels zijn enkele horizontale kabels aangebracht. Het frame bevindt zich enkele meters voor de hefdeur en werkt in hetzelfde hijsstelsel als dat van de sluisdeur. Wanneer de deur wordt gehesen gaat het stelsel in dezelfde beweging mee omhoog. Deze aanvaarbeveiliging blijft zijn functie behouden bij een sterk fluctuerend waterpeil, de aanvaring kan op verschillende hoogtes plaatsvinden.



Figuur 2.18 - Vangnet Prinses Irenesluis

Prins Bernhardsluizen

Net als de Prinses Irenesluis is de Prins Bernhardsluis uitgevoerd met aanvaarbeveiliging, *Figuur 2.19*. De Prins Bernhardsluis bestaat uit twee sluizen en ligt in het Amsterdam-Rijnkanaal nabij Tiel en biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van VIb.

Voor de sluis geldt dat er bij de westelijke sluis hetzelfde principe aanvaarbeveiliging is toegepast als bij de Prinses Irenesluis.



Figuur 2.19 - Vangnet Prins Bernhardsluis

Urkersluis

De Urkersluis bevindt zich tussen de monding van de Urkervaart en de haven van Urk aan het IJsselmeer. De sluis biedt doorgang aan schepen t/m een CEMT-klasse van I, hierbij is het maximaal toe te laten scheepstype een Spits van 38,50 meter lang en 5,05 meter breed. De sluis maakt aan beide zijde gebruik van puntdeuren. Aan de benedenhoofdzijde bevinden zich voor de hefdeuren twee ophaalbruggen voor fiets- en gemotoriseerd verkeer. Tussen de beide bruggen in is een aanvaarbeveiliging geplaatst welke de puntdeuren beschermt. De aanvaarbeveiliging bestaat uit een aanvaarbalk welke aan beide zijde bevestigd is aan een dempingcilinders, *Figuur 2.20*.



Figuur 2.20 Aanvaarbalk met dempers Urkersluis

2.3 Probleemanalyse bestaande soorten aanvaarbeveiliging

2.3.1 Problemen of tekortkomingen bij aanvaarbeveiliging

Dynamische aanvaarbeveiliging

Wanneer de toegepaste aanvaarbeveiligingen worden beschouwd is er maar één systeem welke eenvoudig toepasbaar is bij een fluctuerende waterstand in de kolk, het vangnetsysteem. Enkel dienen voor dit systeem heftorens te worden gerealiseerd om voldoende doorvaarhoogte te kunnen garanderen. Om die reden is het niet rendabel om toe te passen bij kleinere sluiscomplexen. Er is vraag naar een kleinere of eenvoudige aanvaarbeveiliging die op verschillende waterstanden aanvaring stopt/afremt.

Beweegbare constructie

Meerdere varianten zijn enkel toepasbaar bij een verval waarbij de scheepvaart de mogelijkheid heeft om onder de aanvaarbeveiliging door te varen, deze aanvaarbeveiliging zijn gelegen op een vaste hoogte. Enkel de kabel met dempcilinder, vangkabel en het vangnet kunnen een vrije doorvaarhoogte garanderen. De kabelvarianten zijn uitermate geschikt om te combineren met een slagboom waardoor deze kunnen worden geopend. Het vangnet wordt doormiddel van externe heftorens in een gelijke beweging vrij gemaakt voor doorvaart. De stalenvangkabel met koker is enkel combinatie met een hefdeur op te liften, waardoor de mogelijkheid om deze beweegbaar te maken afhankelijk is van de achterliggende deur. Het vangnet heeft als nadeel dat er een externe constructie benodigd is. Van de zes soorten is enkel de kabel met remcilinder uitermate geschikt als beweegbare constructie in verschillende situaties. *Kunnen er meerdere soorten eenvoudig beweegbaar worden uitgevoerd?*

Compact afrem systeem

Bij het gebruik van een aanvaarbeveiliging welke de aanvaarenergie opneemt wordt er bijvoorbeeld gebruik gemaakt van hydraulische systemen. De inpassing van deze systemen nemen veel ruimte in beslag. Hierdoor is het bij bestaande sluizen, vanwege ruimtegebrek, vaak niet mogelijk een energie opnemend systeem toe te passen. Er is vraag naar een systeem welke compact is en zo weinig ruimte in beslag neemt nabij de kolkwanden. Hierdoor wordt het toepassingsgebied van aanvaarbeveiligingen welke een hoge energie opnemen vele mate groter, denk hierbij aan de toepassing bij een renovatieprojecten waarbij er vaak ruimte gebrek is voor een inpassing van een systeem naast de kolk.

Geringe remafstand

Aanvaarbeveiligingen maken gebruik van een lange remweg of een zeer korte. De afremsystemen maken gebruik van een lange remweg terwijl de buigzame aanvaarbeveiligingen weer gebruik van een kortere remweg. Het nadeel van een buigzame ligger is dat deze een geringe remweg heeft in vergelijking met andere varianten waardoor het schip een hoge klap krijgt te verduren en defect kan raken. Het nadeel van een lange remweg is dat er ingeleverd wordt op de nuttige kolk lengte, de benodigde ruimte waarin een schip tot stilstand komt na invaren en nivelleert. Een aanvaarbeveiliging met lange remweg dient veelal verder weg van de deur te worden geplaatst dan een starre aanvaarbeveiliging zoals een stootbalk met cilinders.

Geringe reactiekrachten op de sluisconstructie

De krachten vrijkomend bij aanvaring zijn dermate hoog dat het niet wenselijk is deze volledig door de kolkwand te laten opnemen. Bij bestaande sluizen welke moeten worden voorzien van aanvaarbeveiliging is het veelal mogelijk. De kolkwanden kunnen de krachten niet aan of dienen te worden aangepast, wat zeer ingrijpende methodes zijn. Een beter alternatief voor zowel nieuwbouw als renovatie is het toepassen van een aanvaarbeveiliging welke de krachten op een andere manier

opnemen of op externe constructie laten afdragen. Hierdoor hoeft de bestaande constructie slecht relatief kleine krachten op te nemen.

Onderhoudsarm

Wanneer er onderhoud dient te worden gepleegd aan een onderdeel van de sluis mag er niet worden gesloten, dit komt de beschikbaarheid ten nadele. Het is van belang om onderdelen te ontwerpen welke vrijwel geen onderhoud benodigd zijn. Wanneer onderhoud wel benodigd is het wenselijk dat de onderhoudsperiode zo kort mogelijk is. Betreft aanvaarbeveiliging is het wenselijk een ontwerp te maken welke onderhoudsarm is.

Vervangbaar

Wanneer een aanvaarbeveiliging aangevaren is dient deze zo snel mogelijk weer in werking te worden gebracht. De onderdelen dienen bestand te zijn tegen aanvaren óf wanneer aangevaren zo makkelijk en snel mogelijk te kunnen worden vervangen. Het kan bijvoorbeeld wenselijk zijn een aanvaarbeveiliging te ontwerpen met onderdelen welke reserve liggen nabij de sluis en snel en simpel kunnen worden gemonteerd.

2.3.2 Geschikte soorten voor de optimalisatie

Vanuit de aspecten wordt gekeken of er mogelijke optimalisaties zijn voor soorten aanvaarbeveiliging die reeds zijn toegepast. **Tabel 2.2** geeft weer bij welke aspecten voor de bestaande soorten aanvaarbeveiliging een mogelijk uitvoerbare verbetering ligt. Hierdoor wordt het duidelijk welke verbeteringen per variant wenselijk zijn om toepassing te vergroten en welke variant niet geschikt is voor optimalisering. Hierbij is er per aspect een score gegeven op basis van een waarderingsschaal:

- Veel optimalisatie in te behalen = 1 punt;
- Weinig optimalisatie in te behalen = 0,5 punt;
- Geen optimalisatie in te behalen = 0 punten.

Tabel 2.2 Mogelijke verbeteringen bij aanvaarbeveiligingen

Variant:	Dynamisch [waterstand]	Beweegbaar [doorvaarhoogte]	Compact afrem systeem	Geringe remafstand	Geringe reactiekrachten	Onderhoudsarm	Vervangbare onderdelen	Score
1 Buigzame ligger	1	1	0	0	0,5	0	0,5	43%
2 Scharnierend portaal	0	0	0	0	0	0,5	0,5	14%
3 Stootbalk met dempers	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	50%
4 Slagboomconstructie met kabel en dempcilinder	1	0	1	1	0,5	1	0,5	71%
5 Koker met vangkabel	1	1	0	1	1	0	1	71%
6 Vangnet	0	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5	29%

Uit **Tabel 2.2** volgt dat twee varianten, slagboomconstructie met kabel en dempcilinder en koker met vangkabel, het meest geschikt zijn voor optimalisatie. De buigzame ligger en de stootbalk met dempers zijn tevens geschikt voor optimalisatie. Het scharnierend portaal en het vangnet zijn ongeschikt voor optimalisatie, hierbij is een minimale verbetering te behalen. Bij de overige vier varianten zijn er meer mogelijkheden ter optimalisering.

Bij de buigzame ligger zijn er mogelijkheden voor optimalisatie; het dynamisch- en beweegbaar maken. Optimalisaties op het gebied van geringe reactiekrachten en vervangbare onderdelen zijn lastiger te realiseren.

De stootbalk met dempers heeft de grootste mogelijkheid ter optimalisering; het onderhoudsarm maken van de aanvaarbeveiliging. Het dynamisch en beweegbaar maken is lastiger te realiseren. Ook voor compact afremstelsysteem, geringe remafstand en vervangbare onderdelen zijn optimalisaties lastig

te vinden, omdat het systeem al redelijk compact is, een korte remafstand heeft en het uit vervangbare onderdelen bestaat.

De kabel met dempcilinder kan worden geoptimaliseerd voor bijna alle aspecten, enkel het beweegbaar maken is niet te optimaliseren. De kabel met dempcilinder is al beweegbaar uit te voeren. De mogelijkheden in optimalisering liggen vooral in het dynamisch maken, compact afremsysteem, geringe remafstand en onderhoudsarm maken.

De koker met vangkabel heeft meerdere mogelijkheden tot optimalisatie; Dynamisch, beweegbaar, geringe remafstand, geringe reactiekrachten en vervangbare onderdelen. Echter omdat er weinig bekend is over de koker met kunststofvangkabel dient het materiaal ook te worden onderzocht. Het beweegbaar maken is daarnaast de beste optie ter optimalisatie, hiervoor zou een vergelijkend systeem als bij de kabel met dempcilinder kunnen worden toegepast.

Optimalisaties welke nader worden beschouwd en onderzocht:

- Buigzame ligger; Een variant welke meebeweegt met wisselende waterstanden en welke vervolgens vrije doorvaarhoogte geeft;
 - o De dynamische buigzame ligger;
- Stootbalk met dempers; Een onderhoudsvrij alternatief op en dempingscilinder welke de energie trapsgewijs opneemt doormiddel van een duurzaam component;
 - o Stootbalk met composiet buisprofiel;
- Stootbalk met dempers; Een onderhoudsvrij alternatief op en dempingscilinder welke de energie trapsgewijs opneemt doormiddel van een stalen component;
 - o Stootbalk met stalen buisprofiel;
- Stootbalk met dempers; Een starre balk met minimaal ruimtegebruik bij de kolkwanden en minimale krachten op de kolkwanden;
 - o Stootbalk in de vorm van vakwerkligger met remcilinder;
- Kabel met dempcilinder; Een compact afremsysteem welke onderhoudsvrij is;
 - o Kabel met fenderconstructie;
- Koker met vangkabel; Een onderhoudsarme constructie die vrije doorvaarhoogte geeft;
 - o Kunststofvangkabel met slagboomconstructie.

Naast de bovengenoemde varianten zijn er enkele mogelijke optimalisaties ter sprake gekomen, welke niet zijn opgenomen in dit onderzoek. Deze varianten kunnen interessant zijn wanneer er nader onderzoek wordt gedaan. Verdere varianten die ter sprake kwamen maar niet zijn uitgewerkt:

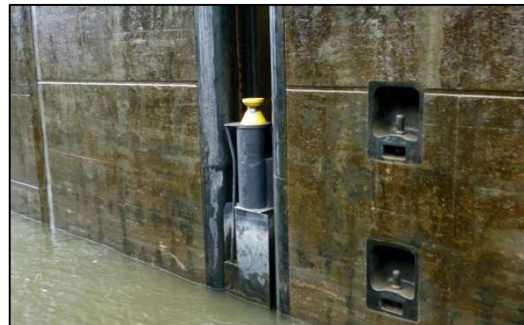
- Airbag;
- Afzinkbare kabel;
- Kunststofvangkabel met kabellier (constant tension winch);
- Slagboom welke de kabel voor invaren over de kolk spant, waarna de slagboom loskoppelt van de kabel en in opstaande positie wordt gezet, zoals wordt toegepast in Duitsland.

2.4 Uitwerking optimalisering varianten aanvaarbeveiliging

2.4.1 Dynamische Buigzame ligger

Achterliggende gedachte

Bij sluizen waar een groot verval optreedt worden veelal drijvende bolders gebruikt. Deze drijvende bolders vervangen de haalkommen toegepast in de kolkwanden. Bij een groot verval dien erbij een sluis met haalkommen telkens de tros om een haalkom te werpen met het schutniveau mee. Een drijvende bolder gaat bij het schutten tussen een geleiderails in de sluiswand mee omhoog en omlaag met het waterniveau, werkend als een dobber.^a



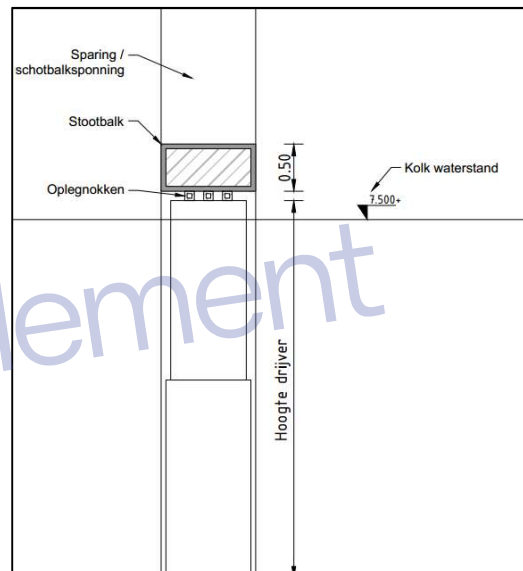
Figuur 2.21 Sluiswand met drijvende bolder (links) en haalkommen (rechts)

Concept

Voor de dynamische buigzame ligger wordt het systeem van de buigzame ligger als uitgangspunt genomen en geoptimaliseerd. De optimalisatie is te behalen in het dynamisch maken van een buigzame ligger en beweegbaar te maken voor vrije doorvaart.

De uiteinden van de balk bevinden zich in de schotbalksponningen. Door een drijvend mechanisme toe te voegen onder de balk behoudt de aanvaarbeveiliging altijd een gelijke hoogte boven de waterstand in de kolk.

Omdat de balk door het drijvende mechanisme altijd op een gelijke hoogte ten opzichte van de waterstand bevindt, is het niet mogelijk om dit systeem toe te passen zonder heffingsmechanisme. De balk drijft mee met het schutpeil waardoor de balk altijd op de juiste ligt om het schip te doen stoppen. Enkel is er geen mogelijkheid tot uitvaren omdat de balk voor het schip zit. De balk dient geheven te worden zodat het schip onder de aanvaarbeveiliging kan doorvaren.



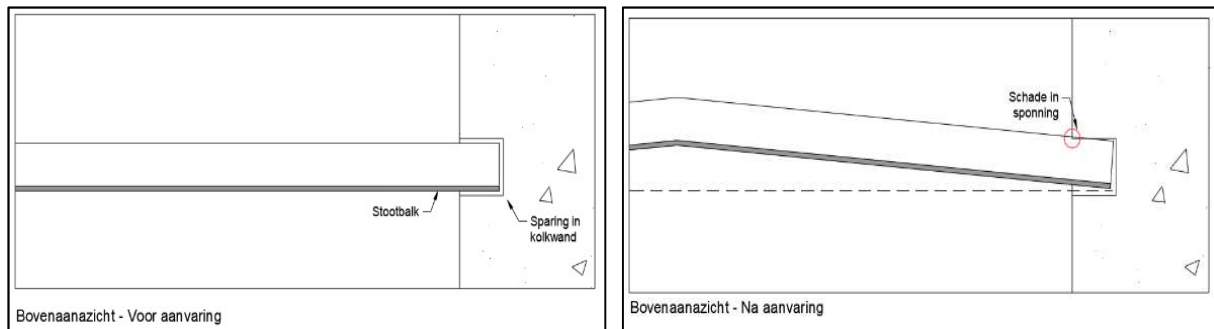
Figuur 2.22 Schets drijvende stootbalk (doorsnede)

Werking energieopname

De stootbalk wordt uitgevoerd als een stalen profiel met aan de aanvaarzijde azobé wrijvingshout, ten behoeve van de bescherming van het staal. Het hout wordt in secties uitgevoerd waardoor bij schade enkel een sectie hoeft te worden vervangen. De stootbalk bevindt zich in de sponning, bij een aanvaring moet de balk doormiddel van vervorming de belasting verkleinen. Het overige deel van de belasting wordt afgedragen naar de sponning in de kolkwanden.

^a (Final Report of the International Commission for the Study of Locks, 1986)

Doordat er bij een staalprofiel gemakkelijk in sterkte, aantal en afmeting kan worden veranderd is de stootbalk gemakkelijker tegen verschillende niveaus van aanvaarenergie bestand.



Figuur 2.23 Situatie voor- en na aanvaring

Toepasbaarheid

Vanwege de dynamische werking wordt de stootbalk op een drijver toegepast. De stootbalk wordt doormiddel van geleiding in de schotbalksponning op zijn plaats gehouden in de kolk. De drijver bevindt zich onder de stootbalk in de sponning over de gehele breedte van de kolk. Het drijvend vermogen van de drijver is afhankelijk van het gewicht van de stootbalk, de oppervlakte van de drijver en de minimale diepgang van de kolkwaterstand.

Een groot voordeel van het systeem is dat het goed inpasbaar is door dat de stootbalk zich in de sponning bevindt. Daarnaast haalt hij zijn dynamisch functie uit het drijven waardoor er enkel een drijver hoeft toe te passen. De stootbalk en drijver dient met een installatie uit de kolk worden geheven wat nadelig is voor de beschikbaarheid vanwege de vele beweegbare onderdelen welke benodigd zijn.

Nadere uitwerking toepasbaarheid

Om te toetsen als de mogelijkheid bestaat om een de constructie drijvend uit te voeren wordt er gebruik gemaakt van de wet van Archimedes.

De Archimedeskracht is gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof:

Vergelijking 2-1 Wet van Archimedes

$$m_a = \rho \times V$$

Waarin:	m_a	= Massa aanvaarbeveiliging	[kg]
	ρ	= Massadichtheid van water = 1.000	[kg/m ³]
	V	= Volume van de verplaatste vloeistof = Volume drijver	[m ³]

Voorbeelduitwerking Sluis III (Tilburg)

Volume

De afmeting van de drijver bedraagt 0,50 meter breed en 11,20 meter lang, gelijk aan de afmeting van het profiel. Dit resulteert in een benodigd oppervlakte van de drijver van 5,60 m². De hoogte van de drijver volgt uit de berekening voor de diepgang.

Staal

Er wordt gebruikgemaakt van driemaal een HEB500 met een lengte van 11,20 meter. Dit resulteert in een massa van 2.135 kg. Hierin is de massa van de drijver nog niet verwerkt. Er wordt uitgegaan dat de drijver uitgevoerd wordt in staal met een polyurethaan inhoud. De bijkomende massa van de drijver wordt uitgedrukt als een factor 1,5 ten opzichte van de aanvaarbalk. Deze factor volgt uit een berekening waarbij de diepgang wordt geïntegreerd, met de factor wordt eenvoudig een realistische

waarde benaderd. Uit *Vergelijking 2-1* wordt de formule voor het bepalen van de diepgang opgesteld. De formule voor het bepalen van de diepgang wordt dan als volgt:

Vergelijking 2-2 Inschatting diepgang stalen drijver

$$d_{drijver} = \frac{1,5 \times m_s}{\rho \times A_{drijver}}$$

Waarin: $m_s = 2.135$ [kg]
 $A_{drijver} = 5,60$ [m²]

De diepgang van de drijver bedraagt dan 0,60 meter. Hierin is te variëren door de drijver breder te maken dan de aanvaarbalk, daarmee kan de diepgang worden verlaagd. Een andere oplossing is: de drijver uitvoeren in een lichter materiaal. Er wordt uitgegaan dat de aanvaarbalk alle krachten opneemt, de sterkte van de drijver heeft hier geen invloed op. De functie van de drijver is enkel om de balk te doen drijven.

PET

Polyethyleentereftalaat (PET) heeft een dichtheid van 1.380 kg/m³, dit is een factor 5,6 lager dan staal. *Vergelijking 2-1* wordt wederom aangehouden als uitgangspunt. De massa van de balk is 2135 kg en het totale oppervlak van de drijver is 5,6 m². Om het eenvoudiger te maken om de drijver te vervangen wordt deze opgedeeld in elementen van 0,8 meter lang en 0,5 meter breed (gelijke breedte wordt aangehouden als de balk). In totaal worden er dan 14 drijfelementen toegepast. Bij stalen drijvers moest er een factor 1,5 in rekening worden gebracht voor de massa van de drijver, bij PET is deze factor kleiner. Een factor van 1,2 wordt aangehouden. De vergelijking wordt is als volgt:

Vergelijking 2-3 Inschatting diepgang PET-drijver

$$d_{drijver} = \frac{1,15 \times m_s}{\rho \times A_{drijver}}$$

Waarin: $m_s = 2135$ [kg]
 $A_{drijver} = 5,60$ [m²]

De diepgang bedraagt 0,45 meter bij deze inschatting, wat 15 cm minder bedraagt dan bij het toepassen van een stalen drijver. De massa is ook duidelijk kleiner geworden. De drijver van staal heeft een massa van ongeveer 1.000 kg, terwijl de PET-drijver ongeveer 300 kg weegt. Het voordeel van een lichtere constructie is dat deze beter op te tillen is doormiddel van een hefsysteem.

Ophaalmechanisme

Waarna de kolkwaterstand gelijk is met de achterliggende waterstand, vlak voor het openen van de deuren, dient de aanvaarbalk worden geheven. Hierdoor ontstaat er vrijedoorgang voor het schip om zijn weg te vervolgen. Doorgang voor het schip kan gerealiseerd worden doormiddel van werktuigbouwkundig installatie welke de balk doormiddel van aandrijving met kettingen/kabels lift. Bij sluizen welke gebruikmaken van een hefdeur als keermiddel is er een mogelijkheid om de balk te heffen doormiddel van het bevestigen van horizontale lepels aan de onderzijde hefdeur.

De uitvoering van het ophaalmechanisme als werktuigbouwkundige installatie wordt niet nader uitgewerkt, kennis ontbreekt over de juiste uitvoermethodes.

Uitgangspunten voor een werktuigbouwkundige installatie:

- Bewegende onderdelen zoveel mogelijk op de bovenzijde van de kolk uitvoeren, in de vrije ruimte. Hierdoor is erbij storing gemakkelijk onderhoud uit te voeren.
- Het systeem dient te beschikken over een vrijloop waardoor de aanvaarbalk met de waterstand mee drijft.

Bij gebruik van een hefdeur wordt de aanvaarbalk mee gelift met de op- en neergang van de deur zie [2.2.2 Sluis Eefde](#). Waarna er aan de onderzijde van de hefdeur horizontale staven, te vergelijken met lepels van een heftruck, haaks op de deur worden bevestigd kunnen deze de aanvaarbalk liften.

De aanvaarbalk rust in normaalstand op de drijvers meebewegend met de waterstand. Bij het heffen van de deur tillen de lepels de drijver en de aanvaarbalk op, mee naar boven. De aanvaarbalk is zijdelings gesteund in de sponning van de kolkwanden. Bij het volledig openstaan van de hefdeur kan het schip zijn weg vervolgen, deze vaart onder de aanvaarbalk door. Bij het sluiten brengt de hefdeur de aanvaarbalk weer mee naar beneden. Bij aanraking met het water in de kolk treden de drijvers weer in functie en drijft de aanvaarbalk weer op het waterniveau in de kolk. De lepels gaan verder met deur mee naar beneden. De lepels rusten in gesloten stand op de bodem van de kolk.

Voor- en nadelen

Het uitvoeren van de drijver in verschillende elementen vergemakkelijkt het vervangen van beschadigde drijvers, dit bespaart tevens in kosten. PET-drijvers zijn lichter dan stalen drijvers en hebben de voorkeur om uitgevoerd te worden vanwege zijn geringe benodigde hoogte voor het drijvend vermogen.

Bij de toepassing van een hefdeur is er doormiddel van de horizontale lepels een ophaalmechanisme te creëren welke zich in de praktijk heeft bewezen, zie [2.2.2 Sluis Eefde](#). Bij de sluisen welke gebruikmaken van een keermiddel welke niet opent doormiddel van heffen, dient er onderzoek te worden gedaan naar een ophaalmechanisme welke goed inpasbaar is en welke goed te onderhouden is.

Het is denkbaar om een aanvaarbalk dynamisch uit te voeren doormiddel van drijven. Het is onmogelijk om uit bovenstaande toelichting te kunnen concluderen dat het een goede/ideale manier van uitvoering is. Nader onderzoek naar een optimaal ontwerp is aan te raden. In een verder onderzoek wordt aanbevolen om voor de stootbalk met drijver het volgende nader te onderzoeken:

- Vormgeving drijver en bevestigingsmogelijkheden;
- Stabiliteit drijver;
- Materiaal voor stootbalk en drijver;
- Vervormingscapaciteit stootbalk in relatie met de drijver;
- Realiseren exacte plaatsingshoogte (bijv. 0,5 meter boven waterlijn);
- De overdracht van de krachten in de sponning;
- Mate van inklemming in sponning van de stootbalk na aanvaring;
- Werking geleiding en ophaalmechanisme;
- Onderhoudbaarheid van het gehele systeem; onderhoudsarme alternatieven.

2.4.2 Stootbalk met composiet drukcilinders

Achterliggende gedachte

Er zijn verschillende vakgebieden waarin energie op wordt genomen door het toepassen van een product met juiste vormgeving in combinatie met een energie opnemend materiaal. In bedrijfshallen waarbij gebruik gemaakt wordt van transportmiddelen, bijvoorbeeld een hijskranen, op een railsysteem worden veelal stootbuffers aan het einde van de rails geplaatst. Eenzelfde soort systeem is waar te nemen bij het einde van een spoorrails, hierbij wordt er gebruik gemaakt van stootblokken. Deze systemen maken beide gebruik van "buffers" waarbij door indrukking van het materiaal energie wordt opgenomen.



Figuur 2.24 Voorbeeld polyester demper

In de machinerie worden erbij pompende of sterk bewegende onderdelen regelmatig dempers toegepast. Deze dempers nemen bijvoorbeeld slagkracht op van een machine-element. Er bestaan kunststofmaterialen welke deze dempers vervangen^a. Het systeem, *Figuur 2.24*, opneemt doormiddel van indrukking de energie. De bouwvorm van de dempers is zo uitgevoerd dat bij een centrische belasting de buitzijde naar buitenkomt en daarbij de demper in lengte verkleind. Wanneer de belasting ervan wordt afgehaald schieten de dempers terug in de oorspronkelijke vorm.

Concept

Deze optimalisatie richt zich op het verbeteren van de stootbalk met dempers. Dit wordt bereikt door de constructie onderhoudsarm te maken en daarnaast wordt er een compact afremsysteem met vervangbare onderdelen toegepast.

Om energie op te nemen met een composiet worden de toegepaste dempcilinders bij een stootbalk, zie *paragraaf 2.1.3 Stootbalk met dempers*, vervangen door composieten buizen. Vergelijkbaar in werking met de polyester dempers, *Figuur 2.24*. Hierbij dient er bij een aanvaring enkel de buis te worden vervangen waardoor de aanvaarbeveiliging weer functioneert als voorheen. Het grootste voordeel aan composieten dempers is dat er geen onderhoud benodigd is binnen de verwachte levensduur.

De buizen dienen trapsgewijs aanvaarenergie te kunnen opnemen, dit wordt bereikt door het opvolgend toepassen van verschillende sterktes composietelementen, zie *Figuur 2.25*. Hierbij kunnen er verschillende grootte van aanvaarkrachten worden opgenomen waarbij maar er enkel een deel van de buizen vervangen hoeft te worden. Bij een relatief lage aanvaarkracht is vervanging van het geheel niet nodig. Het geheel dient de maatgevende aanvaarbebelasting op te kunnen nemen, hierbij dient het geheel vervangen te worden.

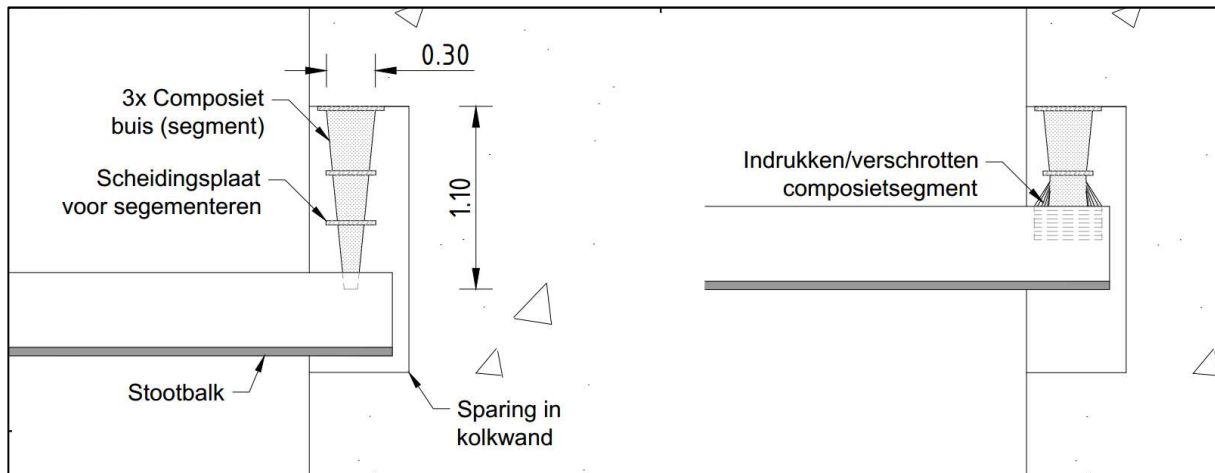
Werking energieopname

Wanneer het materiaal op druk belast wordt er enige energie opgenomen worden doordat er breuk optreedt op verschillende plaatsen. De energieopname van een composiet gebeurt door het materiaal te laten 'verschotten'. De breuk treedt op bij de vezels en de matrix (het hars/lijm) doordat er verschillende soorten van vervormingen optreden (trek, druk en afschuiving). Het laminaat kan gaan knikken en delamineren. De optredende vervorming en de delaminatie kunnen gezamenlijk zorgen voor een quasi-homogene energieopname.^b

^a (Tubus (Axial Damping), sd)

^b (Alternatieve materialen en methoden in aanvaarconstructies, 1997)

Een nadeel van composiet is dat het materiaal zeer weinig rek tot aan de breuk vertoont. Het materiaal bezwijkt veelal bros, plastische vervorming komt niet voor. Enige plastische vervorming worden bereikt door de toevoeging van andere materialen, zoals metalen.



Figuur 2.25 Schets composiet buis (demper) voor- en na aanvaring

Toepasbaarheid

De combinatie van composiet dempers met een starre stootbalk, *Figuur 2.25*, is mogelijk wanneer er voldoende verval is. De stootbalk draagt bij aanvaring direct zijn krachten af op de dempers, uitgaande van een oneindig starre balk. Hierbij is de remweg afhankelijk van de indrukking van de composiet dempers.

Wanneer er een holle-kegelvormige (tapse buis) wordt toegepast blijkt dat deze goed werkt voor het inleiden van scheurvorming, het is een gewenst faalmechanisme. Delaminatie is bij een composiet een vorm van scheurvorming tussen twee lamellen. Daarnaast is een cilindervorm een efficiënte manier om drukbelasting op te nemen. Bij een kegelvorm wordt de doorsnede langzaam groter waardoor de krachten geleidelijk kunnen worden opgenomen.^a

Het bezwijkgedrag hangt nauw samen met de opbouw van een composiet. De vezels in het composiet zijn bepalend voor de sterkte en de stijfheid. Als de vezels in de richting van de belasting worden gelegd is het geheel vele malen sterker en stijver. Doordat de kans bestaat dat de krachten bij deze toepassing niet in de richting van de vezels aangrijpen dient er ook in andere richtingen vezels te worden gelegd. Het geheel wordt hierdoor vele malen sterker maar de op te nemen krachten in de hoofdrichting wordt wel gereduceerd. Daarnaast zijn de materiaaleigenschappen van de vezels en de matrix van belang, deze zijn te verkrijgen in verschillende sterktes met elk zijn voor en nadelen. De verhouding hars-vezel is van belang voor de gehele samenwerking van de vezels. Bij een onjuiste hars-vezel verhouding worden vezels niet als geheel aangesproken.

Met de toepassing van composiet buizen is er een mogelijkheid om op verschillende manieren de remweg en energieopname te beïnvloeden:

- Met meerdere sterktes van segmenten achter elkaar wordt de energie geleidelijk opgenomen, maar de remweg wordt langer;
- De afmeting van de doorsnede, het soort vezels en matrix, vezelvolumegehalte en de opbouw van het laminaat bepaalt de maximale energieopname.

^a (Onderzoek naar energieabsorptie in hybride composieten, 1991)

Nadere uitwerking toepasbaarheid

Bij het bestuderen van verschillende onderzoeken en studies (weergegeven in kolom: bronnen in *Tabel 2.3*) is geconcludeerd dat de grootte van het energieopname-vermogen afhankelijk is van het volume toegepaste vezels en het soort vezel.

In *Tabel 2.3* wordt de capaciteit, het energieopname vermogen per gewicht, weergegeven van een buisvormig profiel met een grote hoeveelheid vezels parallel aan de richting van de belasting.

Vezel	Matrix	Vezelvolumegehalte*	Energieopname vermogen	Bronnen (onderzoek/studies)
		[%]	[kJ/kg]	
Carbon	Epoxy	22,5	85	<i>3D Fibre Reinforced Polymer Composites</i>
Carbon	Epoxy	45	120	<i>3D Fibre Reinforced Polymer Composites</i>
E-glas	Polyester	>45	50	<i>Experimental investigation of the collapse modes and energy absorption characteristics of composite tubes</i>
E-glas	Polyester	60	70	<i>Experimental and numerical study on axial crushing behaviour of pultruded composite tubes</i>

Tabel 2.3 Energieopname buisvormige profielen

* Vezelvolumegehalte, bijvoorbeeld: 60%. (= 60% vezels en 40% matrix)

In enkele onderzoeken, waaronder (Experimental investigation of the crash energy absorption of 2.5D-braided thermoplastic composite tubes), zijn hogere waarde, factor 1,5, gegeven voor het energieopname-vermogen dan de weergegeven waardes in *Tabel 2.3*. Ervan uitgaande dat het gebruik van E-glasvezel een gangbaar en financieel gunstigere keuze is dan Carbonvezels, is E-glas het uitgangspunt voor dit onderzoek. Het gemiddelde uit *Tabel 2.3* wordt aangehouden voor de op te nemen energie, dit komt neer op 60 kJ/kg.

Op te nemen aanvaarbeasting

Om een inschatting te geven of composiet profielen kunnen worden toegepast als een alternatief op dempers wordt er gekeken of de capaciteit voldoende is om de energie van een aanvaring te kunnen opnemen. Als case wordt aangehouden dat er een aanvaarbeasting van een binnenvaartschip CEMT-klasse II met een snelheid van 1,15 m/s moet worden opgenomen; wat resulteert is een energie van 480 kJ. Hierbij wordt van uitgegaan dat er geen belasting door de stootbalk wordt opgenomen maar deze gelijkwaardig wordt verdeeld naar beide zijde, wat resulteert in 240 kJ per demper.

Uitgangspunten:

- Scheepsbelasting: 240kJ (per zijde);
- E-glasvezel met polyester;
- Energieopname-vermogen: 60 kJ/kg;
- Buisvormig profiel.

Dichtheid:

Benodigde volume per meter profiel: $\frac{240kJ}{60kJ/kg} = 4 \text{ kg/m}^1$

Het benodigde volume resulteert in een nader te bepalen laminaat opbouw. Vanwege het aanhouden van 60 kJ/kg dient het laminaat tenminste 50% vezelvolumegehalte te hebben (zie *Tabel 2.3*). Aangehouden wordt dat de verdeling 60% E-glasvezel met 40% polyesterhars.

Zoals als benoemd in voorgaande beschrijving is het toepassen van een laagbouw waarbij het merendeel van de vezel in hoofdrichting ligt het uitgangspunt. Omdat de belasting ook excentrisch kan aangrijpen op het profiel dienen er in andere richting ook vezels aanwezig te zijn. Er wordt gekozen voor een kruislaagsverhouding.^a

- 75% vezels in de hoofdrichting; 0° ;
- 12,5% haaks op de hoofdrichting; 90°.

Materiaal	Dichtheid [kg/m ³]
E-glasvezel	2500
Polyester	1200

$$\text{Dichtheid laminaat} = (2500 * 60\%) + (1200 * 40\%) = 1980 \text{ kg/m}^3$$

Vormgeving:

Het benodigde profiel oppervlakte wordt gevonden door het volume te delen door de dichtheid van het gekozen laminaat.

$$\text{Oppervlakte} = \frac{4,0}{1980} = 2150 \text{ mm}^2$$

Er van uitgaande dat de wanddikte van het buisprofiel 10 mm is resulteert dit voor een lengte van 1,0 meter in een benodigd profieloppervlakte van: 80-10 mm². Wanneer er uit toetsing op knik blijkt dat er een kleinere lengte benodigd is dient de oppervlakte te worden vergroot.

Voor- en nadelen

Bij bovenstaande uitwerking is ervan uitgegaan dat de aanvaarbelasting centrisch aangrijpt op het buisprofiel. Bij aanvaring is het aanneembaar dat de stootbalk excentrisch (afhankelijk van de stijfheid van de stootbalk) gaat aangrijpen op de bovenzijde van het composietprofiel. Dit heeft een nadelige invloed op de knikbelasting. Cilindervormige profielen hebben al enige zijdelinkse instabiliteit en kunnen onder invloed van excentrisch belasting gaan knikken, bij grotere lengtes is de kans hierop nog groter.

De berekende doorsnede is toepasbaar wanneer het gaat om een aanvaring met een binnenvaartschip lager dan CEMT-klasse II. Het gevonden oppervlakte is passend bij een profiel van 1,0 meter. Op basis van een controle op knik wordt een naar optimum gezocht in relatie tot oppervlakte en lengte. Het is denkbaar dat er gekozen wordt voor meerdere buisprofielen hierdoor wordt het oppervlakte van één buis gereduceerd en waarbij ook de benodigde lengte.

Om de toepasbaarheid te vergroten wordt er gekozen voor een systeem waarbij er meerdere profielen gesegmenteerd van elkaar één geheel vormen. De segmenten hebben elk hun eigen sterkte. Bij een aanvaring met lage aanvaarenergie/belasting hoeft er bijvoorbeeld maar één segment te worden vervangen. Het geheel dient bestand te zijn tegen de maximaal optredende aanvaarenergie, de som van alle sterktes van de segmenten is bestand tegen deze energie.

Het is denkbaar om een composiet te gebruiken als energievernietiger in plaats van een dempcilinder. In een onderzoek naar aanvaarbeveiliging voor Sluis Empel^b wordt tevens gebruik gemaakt van een composiet als energievernietiger. Het onderzoek concludeert dat het mogelijk is om toe te passen. Daarentegen is het advies om afzonderlijk onderzoek te doen voordat er kan worden gezegd dat een

^a (Basiskennis composieten, 2015)

^b (Sluis Empel: Naar een veiliger, goedkoper en innovatief sluishoofd, 2008)

composiet als schokdemper toepasbaar is. Er zijn te veel variabelen en factoren welke van invloed op de grote van de op te nemen energie om te kunnen concluderen dat het daadwerkelijk toepasbaar is, de onwetendheid zit in het volgende:

- Werkelijke grote energieopname op basis van vormgeving element;
 - o Soort vezels en matrix;
 - o Vezelvolumegehalte;
 - o Opbouw laminaat, vezelrichtingen;
- Grootte van energieopname bij excentrische aanvaring;
- Voorkomen knik;
- Segmenteren van de buizen.

2.4.3 Stootbalk met stalen rimpelbuizen

Achterliggende gedachte

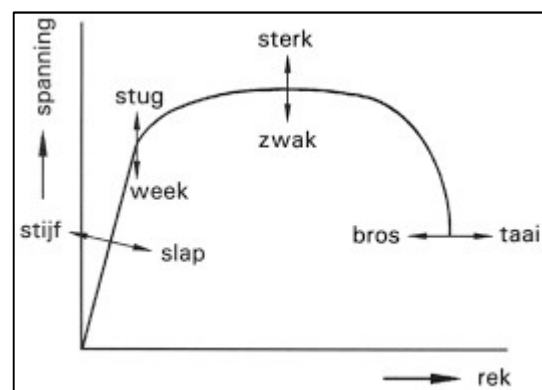
In de verkeerstechniek wordt er bij het beveiligen van obstakels nabij de rijbaan in sommige gevallen en obstakelbeveiliger toegepast. De obstakelbeveiliger, ook wel RIMOB genoemd, is een puntstuk welke aansluit op een beide zijde staande vangrail. De obstakelbeveiliger bestaat uit meerdere achter elkaar staande segmenten met daartussen rimpelbuizen *Figuur 2.26*. Bij een aanrijding vouwen de segmenten naar elkaar toe, de rimpelbuizen drukken samen en nemen energie op. In de voorste segmenten zitten rimpelbuizen die botsingen met lagere snelheden opnemen. De rimpelbuizen worden in trappen zwaarder uitgevoerd, hierdoor wordt er een steeds grotere energie opgenomen over een langere remweg. De rimpelbuizen worden in verschillende diktes en lengtes toegepast en bestaan uit zachte en onderhoudsarme staalsoorten zoals aluminium. Na aanrijding van de obstakelbeveiliger wordt de gehele constructie vervangen.



Figuur 2.26 Rimpelbuis in obstakelbeveiliger

Concept

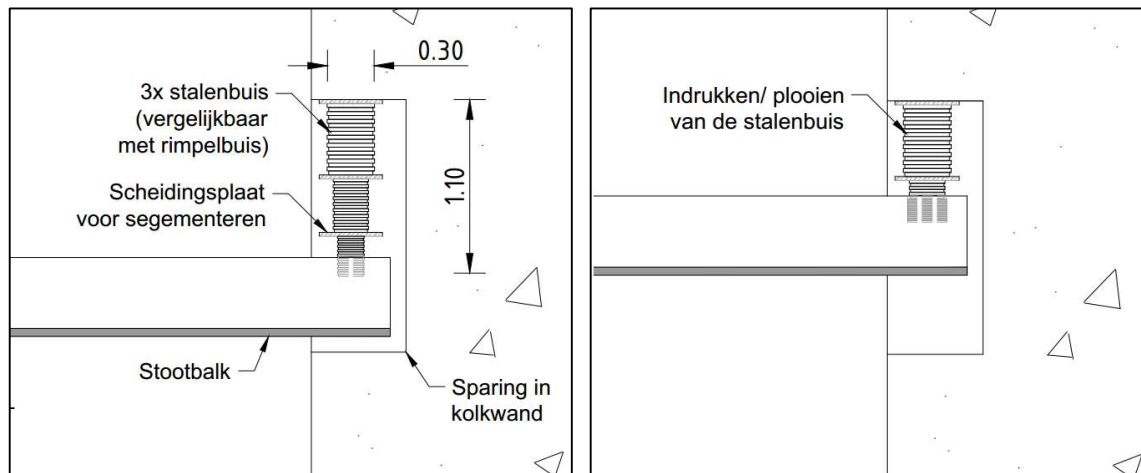
Om energie op te nemen met staalprofielen is er net als bij de composietprofielen een optie om stalen kokers/buizen toe te passen als dempers. Door verschillende sterktes van staalprofielen opvolgend toe te passen is vervanging van het geheel niet nodig wanneer er aanvaring is met een kleinere aanvaarenergie dan de maatgevende. Het geheel dient de maatgevende belasting op te kunnen nemen. In tegenstelling tot de composietprofielen zal staal plastisch vervormen en hierdoor taai bezwijken. De samenstelling van het staal kan zo worden samengesteld dat het staal wel voldoende sterk is, maar taai bezwijkt (*Figuur 2.27*).



Figuur 2.27 Spanning-rek diagram staal (taai en bros bezwijken)

Werking energieopname

Staal heeft een elastisch-plastisch vervormingsgedrag. De rimpelbuizen kunnen vervormen, indien op druk belast, door plooï-vouwmechanismen. Deze vouwmechanismen kunnen bijvoorbeeld ringvormig optreden. Er treden nabij de vouwlijnen plastische gebieden waarmee de energie wordt opgenomen door het vloeien van het staal wat een rek met zich meebrengt van het metaal. Hierbij is er onderscheid te maken in de rek bij het vloeien en de rek tot aan de breuk. Na de vervorming komt de elastische energie weer vrij doormiddel van trilling en terug vering.^a



Figuur 2.28 Schets stalen buis (demper) voor- en na aanvaring

Toepasbaarheid

De combinatie van stalen dempers met een starre stootbalk, *Figuur 2.28*, is mogelijk wanneer er voldoende verval is. De stootbalk draagt bij aanvaring direct zijn krachten af op de dempers, uitgaande van een oneindig starre balk. Hierbij is de remweg afhankelijk van de indrukking van de stalen dempers. Bij toepassing van een holle buis, blijkt dat deze goed bestand is tegen het opnemen van drukbelasting. Door verschillende sterktes gesegmenteerd toe te passen wordt de weerstand tegen indrukking geleidelijk groter.

De stijfheid en sterkte van staal moeten zodanig zijn dat het mogelijk moet zijn in te drukken. Bij het indrukken moet er een vervorming optreden in de vorm van ringvormige plooi. Staal kan bij de belasting op druk zijdelings gaan uitbuigen, knikken. Knik dient voorkomen te worden, omdat de buis dient te gaan plooien bij belasting op druk. Doormiddel van een juiste verhouding in dikte, diameter en lengte van de buis wordt dit zoveel al mogelijk voorkomen. Een andere methode om knik te voorkomen is het toepassen van geleiding/ondersteuning van het profiel.

Een metaal dat aanzienlijk vervormd, voordat er scheurvorming optreedt of breekt, wordt taai genoemd. Een metaalsoort met een geringe hoeveelheid koolstof, ook wel zacht staal genoemd, zal eerder taai bezwijken. Bij taaie materialen is er sprake van een hoge plastische deformatie, de energieopname is dus hoog. Bij een bros materiaal is dit andersom waardoor de energieopname gering is.^b Het toepassen van een "zachte" metaalsoort is wenselijk.

^a (Een visco-elastische benadering van plastische vloeï, 1992)

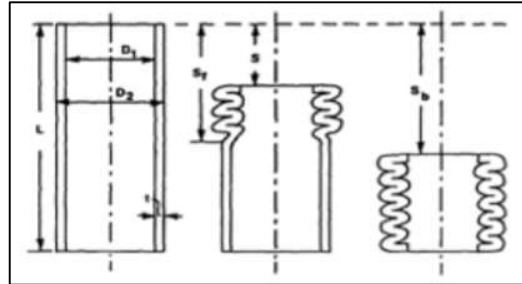
^b (Een visco-elastische benadering van plastische vloeï, 1992)

Met stalen dempers zijn op zodanig manier te dimensioneren dat de remweg en energieopname te beïnvloeden is:

- Met meerdere sterktes van segmenten achter elkaar wordt de energie geleidelijk worden opgenomen, maar de remweg wordt langer;
- De afmeting van de doorsnede en het soort staal van de buis bepaalt de maximale energieopname.

Nadere uitwerking toepasbaarheid

Voor de toepassing van rimpelbuizen als dempers dient er te worden gekeken of de indrukking van de buis mogelijk is. Het rimpelvormig bezwijken van een stalen buis zoals: de rimpelbuis in de obstakelbeveiliger, gebeurt doormiddel van het plooiën. Het toetsen bij welke belasting er plooï optreedt in een staalprofiel geschiedt volgens de NEN-EN-1993 1-6. Het centrisc belasten van een buis op druk kan plooï te weeg brengen, hierbij gaat het om lokale plooï.



Figuur 2.29 Rimpelvormig bezwijken / plooiën van een buis

De Unity check op plooï moet hoger dan 1,00 zijn wil plooï optreden, de optredende belasting is een fractie groter dan de weerstand tegen de belasting van plooï. De laagste aanvaarenergie welke opneembaar is met plastische vervorming, bijvoorbeeld de aanvaarbelasting behorend bij scheepsklasse CEMT-II, is maatgevend voor het activeren van het plooiën van de buis. Deze aanvaarbelasting, bijvoorbeeld de 7.250 kN, is het uitgangspunt voor de Unity check $= > 1,00$. Lagere aanvaarbelasting brengt geen plooï vervorming in de buis aan. Hogere aanvaarbelasting dient weer op te worden genomen door de achterliggende segmenten.

Daarbij dient de toetsing op plooï ook rekening te worden gehouden met het knikken van de buis. Er dient gezocht worden naar een profiel waarbij onafhankelijk van de grote van aanvaarbelasting plooï optreedt en geen knik. De unity check op knik dient in elk geval lager te zijn dan 1,00.

Vergelijking 2-4 Unity Check Plooï & Nik

- Plooï: $eis: \frac{F_{s;d}}{F_{u;d}} > 1,00$
- Nik, stabiliteit van gedrukte staven: $eis: \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$

Een studie naar energieopname van dunwandige aluminiumbuizen onder een axiale belasting toont aan dat er vervorming optreedt met een reeks plastische vouwen, rimpels. Wanneer een ronde dunwandige buis axiaal wordt belast, vouwt het asymmetrisch of niet-symmetrisch in. Dit is afhankelijk van de verhouding van de diameter tot de dikte (D/t), maar ook van de verhouding van de lengte tot de diameter (L/D). Buizen kunnen daarnaast ook gaan knikken (Eulertype knikmodus), wat een dit resulteert in een aanzienlijk verlies van energie opnemende capaciteit.^a

De NEN-EN 1993-1-1 classificeert de profieldoorsnede, om na te gaan hoezeer de weerstand en de rotatiecapaciteit van een doorsnede zijn beperkt door de plooïweerstand ervan. Voor deze toepassing dient de profieldoorsnede te voldoen aan klasse-1. Hierbij wordt in de doorsneden gemakkelijker een plastisch scharnier gevormd waarbij de rotatiecapaciteit voldoende is voor de plastische berekening zonder weerstandsverlies. Voor ronde buizen in klasse 1 geldt:

^a (Crushing Modes of Aluminium Tubes under Axial Compression, 2012)

Vergelijking 2-5 Maximale breedte-dikteverhouding voor op druk belaste onderdelen

$$\frac{D}{t} \leq 50\varepsilon^2$$

Waarin:	$\frac{D}{t}$	Diameter tot de dikte verhouding	[-]
	ε^2	Rek met $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	[%]

Een ronde buis is plooi gevoelig bij: $\frac{D}{t} > 50\varepsilon^2$. Hieruit is te herleiden dat bij de toepassing van dunwandige buis met een staalsoort welke een hoge vloeigrens [f_y] heeft er eerder plooï optreedt.

Omdat het lastig aan te tonen is, zonder diepgaande berekeningen, dat het systeem toepasbaar is wordt er gekeken naar de uitvoering zoals deze is bij de obstakelbeveiliger. De obstakelbeveiliger is net als een aanvaarbeveiliging berekend op het opnemen van kinetische energie. De RIMOB voldoet aan de eis: *voertuig-impacttest TC 1.2.130 conform NEN-EN 1317-3 2010*. De test is op basis van een voertuig met een gewicht van 1.300 kg en een maximale snelheid van 130 km/u.

Vergelijking 2-6 Kinetische energie (aanrijdenergie)

$$E = 0,50 \times m \times v^2$$

Waarin:	E	= Kinetische energieniveau van een voertuig	[MJ]
	m	= Massa	[kg]
	v	= Rijsnelheid	[m/s]

Dit resulteert in een maatgevende aanrijdenergie van een obstakelbeveiliger: 850 kNm. Deze energie is hoger dan de aanvaarenergie passend bij een binnenvaartschip CEMT-klasse II met een snelheid van 1,15 m/s; 480 kNm. Hierdoor is er met enige onzekerheid te concluderen dat de minimale aanvaarbelasting van een binnenvaartschip opgenomen wordt.

Voor- en nadelen

Uitgaande van de RIMOB waarbij in de berekening gebruik gemaakt is van een centrische belasting, wat in veel gevallen niet aannemelijk is, kan er geconcludeerd worden dat de toepassing mogelijk is. De aanbeveling is echter wel om nader onderzoek te verrichten naar de toepassingsmogelijkheid van een (rimpel-)stalenbuis bij aanvaarconstructies, de onwetendheid zit in het volgende:

- Afmeting en staalsoort buis voor maatgevende energieopname;
- Plaats optreden van het plastische scharnier;
- Grootte van energieopname bij excentrische aanvaring;
- Voorkomen knik;
- Segmenteren van de buizen.

De NEN-normen gaan uit van een ondergrens, maar bij deze toepassing is het wenselijk om uit te gaan van een bovengrens. Het ontwerpen op basis van Eurocodes wordt hierbij lastig dan wel niet onmogelijk.

Hoe en waar de plooï, plastische scharnier, optreedt in de buis is moeilijk te zeggen en is enkel te berekenen met specialistische berekeningen. Hierbij dient er ook worden nagegaan of de buis niet gaat knikken. Het is tevens niet aannemelijk dat de aanvaarbelasting exact als een centrische druk op een buis aangrijpt. Wanneer er enige excentriciteit optreedt dient er tevens een moment op te worden genomen. Excentrische optredende belasting kan ervoor zorgen dat de buis zich niet rimpelvormig inplooit. Of een stalen buis als demper een verbetering is ten opzichte van een hydraulische dempcilinder zal moeten volgen uit verder onderzoek.

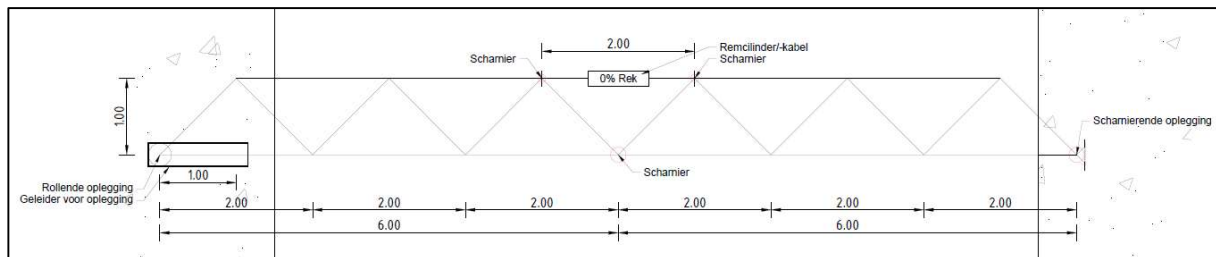
2.4.4 Stootbalk in de vorm van vakwerkligger met remcilinder

Achterliggende gedachte

De toegepaste aanvaarbeveiligingen met rem- of dempcilinders hebben altijd de cilinders aan de zijkanten van de constructie. Denk hierbij aan de kabel met dempcilinder of de stootbalk met dempers. Deze cilinders nemen ruimte in, met dit ontwerp worden de cilinders niet aan de zijkanten verwerkt, maar juist in het midden van de aanvaarbeveiliging. In een overleg met Ingenieursbureau Boorsma kwam een variant aanvaarbeveiliging in de vorm van een vakwerkligger.

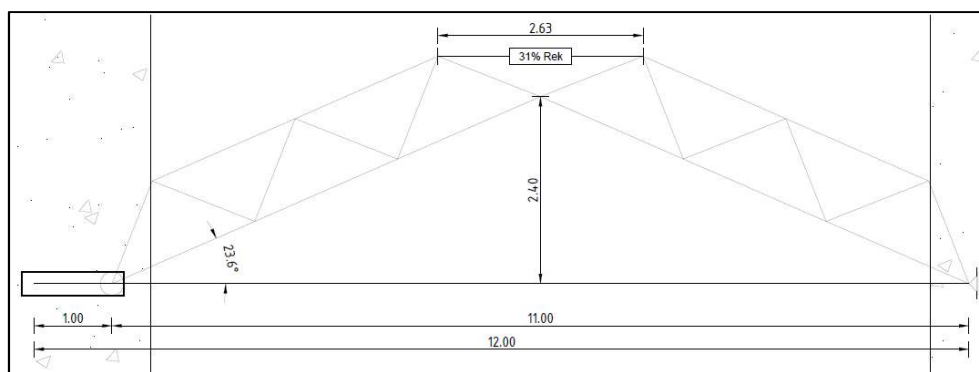
Concept

Bij deze vakwerkligger is aan de kant van de trekzijde een staaf verwisseld voor een remcilinder/-kabel. *Figuur 2.30* geeft een schets weer van het concept aanvaarbeveiliging, hierbij zijn enkele maten opgenomen om inzicht te verkrijgen in de verplaatsingen.



Figuur 2.30 Schets Vakwerkligger als Aanvaarbeveiliging

Een vakwerkligger bestaat uit staven met een starre verbindingen, ook wel knopen genoemd. Een vakwerk werkt optimaal wanneer de krachten aangrijpen in de knopen. De bovenkant van een vakwerk bestaat uit staven die op trek worden belast en de onderzijde wordt op druk belast. Door de starre verbindingen draagt een vakwerkligger zijn krachten efficiënt af naar de opleggingen. Om de trek optimaal op te nemen worden in de vakwerkligger enkele scharnierende verbindingen toegepast en om verplaatsing mogelijk te maken is er aan één zijde een roloplegging toegepast. *Figuur 2.31* geeft een weergave hoe de vakwerkligger eruit komt te zien na een aanvaring. De remweg bedraagt 2,40 meter waarbij de rek van de remcilinder/-kabel 31% is.



Figuur 2.31 Schets Vakwerkligger na maatgevende aanvaring

Werking energieopname

De vakwerkligger wordt in staal uitgevoerd met aan de aanvaarzijde azobé wrijvingshout, ten behoeve van de bescherming van het staal. Het hout wordt in secties uitgevoerd waardoor bij schade een sectie kan worden vervangen. Dit geeft een betere beschikbaarheid van het sluiscomplex. Het vakwerk dient een starre balk te zijn met een scharnierpunt in het midden, bij een aanvaring die niet in de knopen aangrijpt moeten de balken de kracht kunnen overdragen zonder ongewenst gedrag zoals buigen.

De rem wordt uitgevoerd als een trekcilinder. Het nadeel van de cilinder is dat het wordt blootgesteld aan invloeden van buitenaf en lastig te inspecteren is. Een alternatief voor de cilinder is een kunststofkabel. Deze is onderhoudsarm, maar moet na een aanvaring worden vervangen. In *paragraaf 2.4.6 Kunststofvangkabel met slagboomconstructie* wordt er meer toegelicht over kunststofkabels en de werking hiervan.

Het vakwerk kan worden ontworpen op iedere aanvaarenergie, net als de remcilinder. De kunststofkabels dienen nader onderzocht te worden of deze toepasbaar zijn bij deze variant. De lengte van de kabels is vele malen korter als de kunststofkabel en de rek wordt gelimiteerd door de knik van het vakwerk. Om een gelijke kracht op te vangen moet er een groter oppervlak kabel aanwezig zijn.

Toepasbaarheid

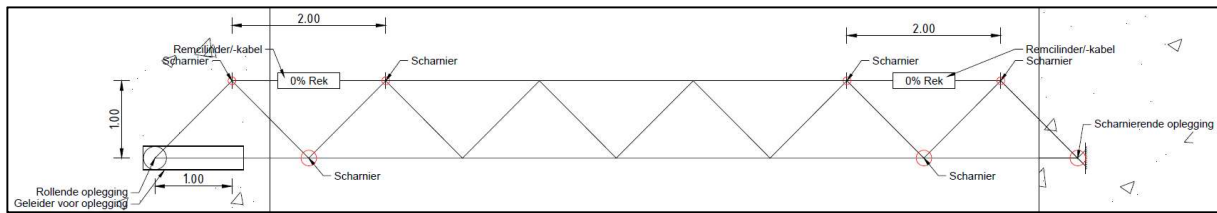
De doorvaarhoogte is gelimiteerd bij deze variant. Het vakwerk zal dusdanig groot en complex zijn dat het een vaste constructie wordt. De aanvaarbeveiliging is alleen toepasbaar bij sluizen met een groot genoeg verval waarbij de schepen onder de aanvaarbeveiliging kunnen doorvaren. In vergelijking met een starre balk met dempcilinders is het onderhoud van de vakwerkligger intensiever. Er is een trekcilinder aanwezig en er zijn meerdere bewegende onderdelen.

Verdere zaken die de toepasbaarheid beïnvloeden:

- Na een aanvaring is het mogelijk dat een onderdeel vervangen dient te worden. Echter bij het weghalen van een onderdeel van het vakwerk kan deze instabiel worden, onderhoud vergt meer moeite;
- De scharnieren kunnen door corrosie of andere factoren niet werken naar behoren, hierdoor wordt het gedrag van de aanvaarbeveiliging compleet anders. De cilinders nemen dan geen krachten op en wordt de gehele constructie een soort van starre balk. De scharnieren vergen extra onderhoud;
- Bij een grotere aanvaring dan de maatgevende is er een risico op schade aan de gehele constructie. Om dit te voorkomen moet er een breekpunt in de constructie worden bepaald.
- De aanvaring moet centrisch plaatsvinden, wanneer de aanvaring wat meer aan de zijkanen plaatsvindt werkt het systeem niet naar behoren. In plaats van een scharnierend vakwerk wordt het systeem dan een starre balk. Een vakwerk werkt het beste als de krachten in de knopen aangrijpt, de aanvaring moet plaatsvinden op een knoop;
- Om krachten aan te laten grijpen in knopen moet een schip een spitse punt hebben, echter bestaan ook schepen met een vlakke voorkant. De aanvaarbeveiliging is niet geschikt om deze schepen te keren, omdat de energie over een lengte van de vakwerkligger aangrijpt;
- Bij een aanvaring is er een aanzienlijke kans dat het vakwerkligger gaat kippen, om dit te voorkomen moet er een extra vakwerk boven worden geplaatst. Hierdoor wordt de constructie nog complexer en groter.

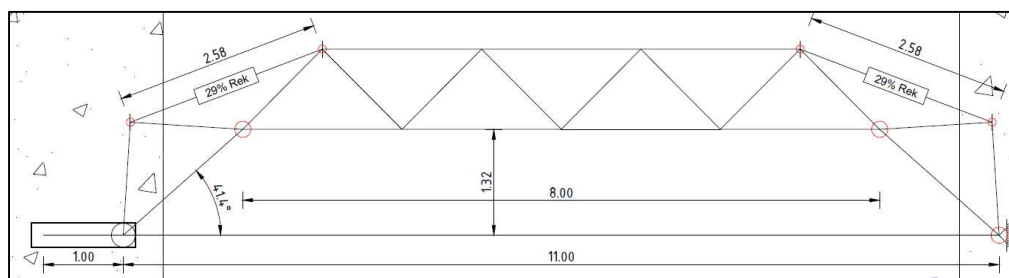
Nadere uitwerking toepasbaarheid

Het laten aangrijpen van de kracht in de knopen maakt de toepassing van deze variant onwaarschijnlijk. Een verdere verbeterstap is benodigd, waarbij een schip een groter oppervlak aanvaart, maar de energie nog steeds doormiddel van dempers in een vakwerk worden opgenomen. In *Figuur 2.32* is de verbeterde versie van de aanvaarbeveiliging te zien.



Figuur 2.32 Schets verbeterde vakwerkligger als aanvaarbeveiliging

De remcilinder is van het midden verplaatst naar de buitenkant, tevens worden er twee remcilinders gebruikt. Het middelste vakwerk is net als bij de starre balk een zeer stijve constructie, hierdoor kan het worden aangevaren over de gehele lengte van de ligger. De krachten hoeven niet meer in de knopen aan te grijpen. *Figuur 2.33* geeft de ligger weer na aanvaren, hierin is weergegeven dat de remweg voor het schip kleiner wordt, maar de totale rek van de remcilinders verdubbeld. Dit betekent dat de krachten op de opleggingen groter zijn geworden.



Figuur 2.33 Schets verbeterde vakwerkligger na maatgevende aanvaring

De verbeterslag brengt te weeg dat het benodigd onderhoud nog intensiever is, er is een extra cilinder bijgekomen en meer bewegende onderdelen. Tevens blijft het kippen van het vakwerk een probleem. Het systeem is ontworpen op krachten die loodrecht op het vakwerk aangrijpen, in werkelijkheid treden er ook krachten op die in de lengte richting van het vakwerk aangrijpen. Door deze krachten zal het vakwerk ander gedrag vertonen dan gewenst, zoals het uitrekken van maar één van de twee remcilinders.

Voor- en nadelen

Het voordeel van een vakwerk met remcilinders is dat het minder ruimte op de kolkwanden inneemt ten opzichte van een starre balk met remcilinder. Ook worden de remcilinders op trek belast, hierdoor treedt er geen knik op in de remcilinders.

Om een vakwerkligger met remcilinder – of andere vorm van energievernietiger – te kunnen toepassen als een aanvaarbeveiliging, moet er een diepgaander onderzoek naar worden gedaan. Uit dit onderzoek kan nog niet worden geconcludeerd dat de vakwerkligger als aanvaarbeveiliging een ongeschikt alternatief is. Maar uit dit onderzoek volgt wel dat een vakwerkligger geen optimalisatie is van de starre balk met dempcilinders. In een verder onderzoek wordt aanbevolen om voor de vakwerkligger met remcilinder(s) het volgende uitgebreider uit te werken:

- De krachtwerking in de staven van het vakwerk;
- De overdracht van energie naar de remcilinders;
- Het gedrag van het vakwerk bij een excentrische aanvaring;
- Het gedrag van de constructie bij een grotere aanvaring dan de ontworpen aanvaarenergie;
- De onderhoudbaarheid van het gehele systeem; onderhoudsarme alternatieven voor de remcilinders.

2.4.5 Kabel met fenderconstructie

Achterliggende gedachte

De remsystemen toegepast bij staalkabel met remcilinders geven weinig reactiekrachten op de sluisconstructie maar nemen veel ruimte in beslag. Uit interviews met verschillende betrokken partijen van Sluis Eefde volgde dat er vraag is naar een compacter systeem. Naast ruimte volgde ook dat er vraag is naar een onderhoudsarm systeem. De verbetering in de optimalisatie is: het toepassen van een compact- en onderhoudsvrij remsysteem welke de vrijkomende krachten grotendeels opneemt. Zodat er maar geringe reactiekrachten door de constructie hoeven worden opgenomen.



Figuur 2.34 Fender aan kade

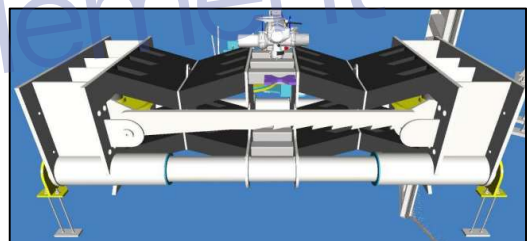
Concept

In gesprek met Hollandia Infra, zie *Bijlage 15.2 Interview P. Bos van Hollandia Infra*, is gebleken dat er vraag is naar compacte systemen. Omdat de remsystemen werktuigbouwkundige installaties zijn, welke buiten het vakgebied civiel ligt, worden er geen verbetering aangedragen betreffende de werking van het systeem. Hollandia Infra heeft een concept uitgewerkt waarbij gebruik gemaakt van fenders.

Werking energieopname

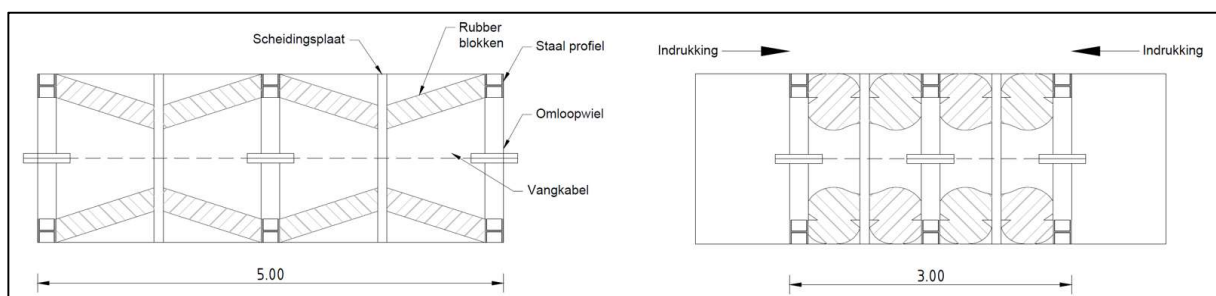
Bij het concept; fender remsysteem wordt gebruik gemaakt van rubberblokken om energie op te nemen.

Figuur 2.35 geeft een visualisatie van het systeem. Het systeem bestaat uit een slagboom met eraan vastgekoppeld een kabel. Tijdens het aanvaren van de slagboom in de sluiscolk breekt de slagboom en wordt doormiddel van het aanspannen van de kabel de fenderconstructie geactiveerd. Door het opspannen van de kabel worden twee omloopschijven in het frame naar



Figuur 2.35 Rubberblokken in de fenderconstructie (Hollandia Infra)

elkaar toe getrokken die vervolgens de fenderelementen indrukken. De kinetische energie, oftewel aanvaringsenergie van het schip, wordt door deze fenderelementen opgenomen. Vanwege de opstelling van fenderelementen, zoals in *Figuur 2.36* weergegeven, werken ze tegen elkaar in en daardoor worden de reactiekrachten uit het fenderelement opgeheven. Hiermee wordt de externe belasting op de kolkwand geminimaliseerd.



Figuur 2.36 Schematisering werking fenderconstructie

Toepasbaarheid

Het toepassen van fenderconstructie heeft als voordeel dat een onderhoudsarm systeem is. Door het gebruik van rubber welke het werk doet is er geen kans op stroring. Het draaipunt en de cilinder waarmee de slagboom op en neer bewogen wordt is gecombineerd met de fenderconstructie, waardoor een compacter geheel ontstaat. De constructie is 5,5 meter lang en 2,0 meter breed, wat in vergelijking met het toepassen van een remcilinder van Empel duidelijker kleiner is. Hierbij dient gezegd worden dat het niet gezien mag worden als een compact systeem, de constructie is nog steeds moeilijk inpasbaar bij bestaande sluizen. Een groot voordeel van het systeem is dat het maar minimale krachten hoeft af te dragen aan de kolkwanden. Hierdoor is het systeem gemakkelijk inpasbaar bij nieuwe sluizen.

Nadere uitwerking toepasbaarheid

Er zijn enkele uitdaging om de fenderconstructie toepasbaar te maken. De rubberblokken gaan in de loop der jaren door veroudering uitdrogen waardoor de blokken gaan zakken. De blokken worden dan niet meer op de juiste manier ingedrukt. Hierdoor wordt de aanvaarenergie niet op de juiste manier opgenomen. Hierbij dient de vraag te worden gesteld of de maatgevende energie nog wel wordt opgenomen.

Door binnen de fender constructie twee kabelschijven toe te passen zijn de krachten binnen de constructie tegengesteld en worden reactiekrachten geneutraliseerd. Hierdoor zijn er geen grote krachten op de vloer van de kelder. De krachten aan één zijde moeten de krachten aan de andere zijde tegen werken, maar wanneer er disbalans is in de stand van de blokken dan werkt dit nadelig voor de energieopname. De vrijkomende reactiekrachten worden hierdoor groter waardoor de constructie kan losbreken van zijn fundering. De fenderconstructie is daarnaast ontworpen dat de rubberblokken aan beide zijden met dezelfde kracht dienen te worden ingedrukt. Dit wordt alleen bereikt wanneer de blokken loodrecht worden ingedrukt. Als de blokken excentrisch worden ingedrukt is de kracht aan één zijde groter dan de andere zijde, de fenders gaan hierbij dan verkeerd knikken. De reactiekrachten zijn hierbij anders en is er risico dat de constructie niet de gewenste energie opneemt.

Voor- en nadelen

Het grootste voordeel van het fendersysteem was dat het een om onderhoudsvrij systeem ging, daarnaast nam het systeem minder ruimte in beslag dan de remcilinder gerealiseerd bij Sluis Empel. Tijdens het ontwerpen diende het originele systeem aangepast worden om de risico's te beperken. Zo moesten er geleiders worden aangebracht om de fenders in de juiste richting in te drukken. Tevens diende er een arreter voorziening worden toegepast om te voorkomen dat de fenders na aanvaring de energie onmiddellijk teruggeeft. Wanneer de energie weer vrijkomt is de kans aanwezig dat de kabel ongecontroleerd het geremde schip wegduwt. De geleiders zijn vooral ten bate van onderhoud nadelig, de arreter voorziening daarentegen geeft een veel groter nadeel. Na een aanvaring is er in de fenderconstructie potentiële energie opgeslagen, de fenderconstructie dient na aanvaring weer in de gebruiksstand terug te worden gezet. Hierbij dient de arreter voorziening worden losgekoppeld waarbij de opgeslagen energie weer vrijkomt. Het is aannemelijk dat fenders onmiddellijk in gebruikstand schieten wat voor een gevaarlijke situatie zorgt. Hiervoor diende er weer een ander systeem worden toegevoegd.

Het systeem is een innovatie en kan na een grondig onderzoek een alternatief zijn voor de kabel met dempcilinder. Op het moment wordt het systeem te complex om te kunnen concluderen dat het een optimalisatie is van de dempcilinder. Om deze reden is er gekozen om de dempcilinder toe te passen bij Sluis Eefde. In een verder onderzoek dient er te worden gekeken naar een alternatief voor het fendermateriaal, een materiaal dat energie opneemt en niet opslaat.

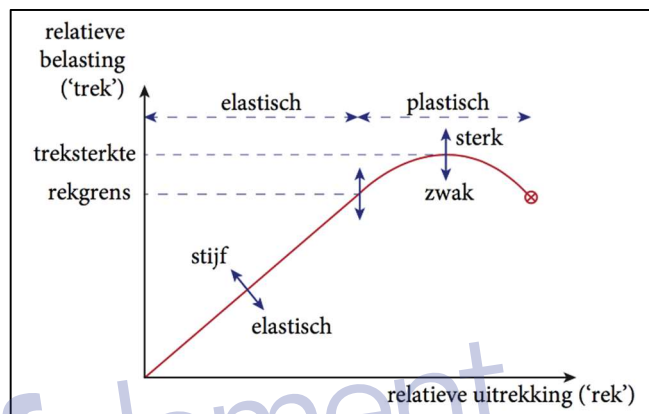
2.4.6 Kunststofvangkabel met slagboomconstructie

Achterliggende gedachte

Een stalen kabel met dempcilinder is goed te combineren met een slagboom. Om deze reden zou een kunststofvangkabel ook goed te combineren zijn met een slagboomconstructie. Het voordeel van de kunststofvangkabel is dat deze daarnaast geen dempcilinder nodig heeft, omdat het kunststof doormiddel van rek energie opneemt. Een kunststofvangkabel is ook onderhoudsvrij, alleen na een vastgestelde levensduur of na een aanvaring dient de kabel in zijn geheel te worden vervangen. In een haalbaarheidsonderzoek^a uit 1998 is er onderzocht of de toepassing van kunststofvangkabels mogelijk is als aanvaarbeveiliging. Naar aanleiding van dit onderzoek is er in Delden een kunststofvangkabel als aanvaarbeveiliging toegepast, welke slechts een energie van ongeveer 170 kNm^b kan opnemen.

Concept

Kunststoffen vertonen elastische vervorming onder spanning. Wanneer de maximale trek bereikt is, zal het bijna direct bezwijken. Kunststoffen vertonen weinig tot geen plastische vervorming. In *Figuur 2.37* is een spanning-rek-diagram weergegeven, hierin is te zien dat de elastische vervorming lineair verloopt. De *Wet van Hooke* in *Vergelijking 2-7* geeft het verloop hiervan weer, daarin is de spanning gelijk aan rek vermenigvuldigd met de E-modulus (elasticiteitsmodulus). De spanning wordt bepaald door de kracht te delen door het oppervlak van de kabel. De modulus geeft de stijfheid van een materiaal weer. Een grotere modulus betekent een stijver materiaal, dit komt neer op een hogere spanning bij een kleinere rek.



Figuur 2.37 Spanning-rek-diagram kunststof

Vergelijking 2-7 Wet van Hooke

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Waarin:	σ	= Spanning (trek)	[N/mm ²]
	E	= Elasticiteitsmodulus	[N/mm ²]
	ε	= Rek	[%]

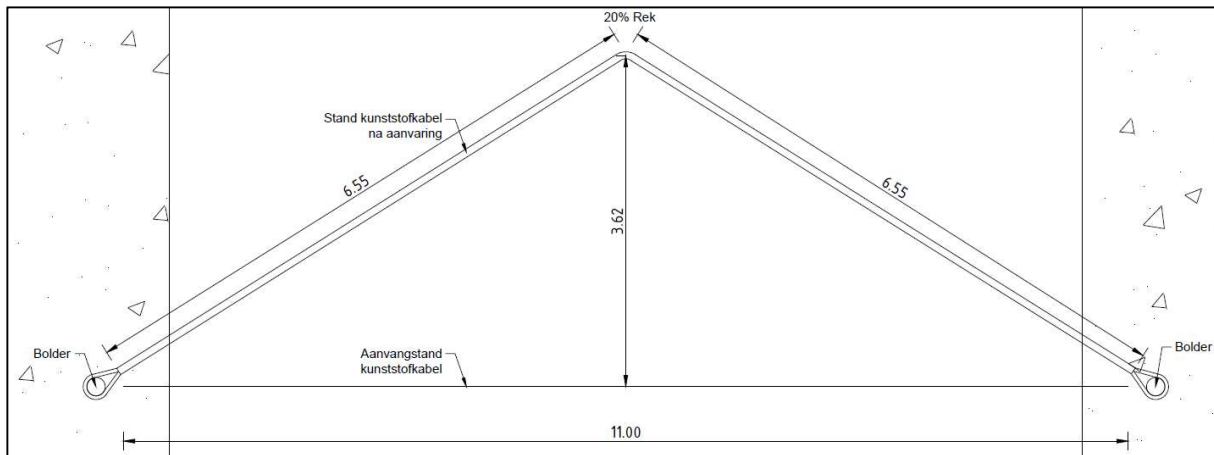
Tabel 2.4 Materiaaleigenschappen kunststofvezels

Materiaal	Soortelijk gewicht [kg/dm ³]	Breukspanning [N/mm ²]	Modulus [N/mm ²]	Rek bij breuk [%]
	ρ	σ	E	ε
Nylon 6	1,14	900	4.500	20
Polyester HT	1,38	1.100	8.500	13

De kabel wordt over de kolk gespannen, tijdens een aanvaring rekt de kunststofvangkabel uit. *Figuur 2.38* geeft een visualisatie hiervan weer.

^a (Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren, 1998)

^b (Interview met Rijkswaterstaat, 2019)



Figuur 2.38 Werking kunststofvangkabel

Werking energieopname

Wanneer bij een kunststof de geringe plastische vervorming wordt verwaarloosd, bepalen de modulus en de rek bij breuk de maximaal op te nemen energie. De opgenomen energie per kabelvolume (in de richting van de kabel) wordt benaderd met *Vergelijking 2-8*.

Vergelijking 2-8 Benadering maximale energie opname uit (Breen, 1999)

$$W_{max} = 0,5 \times E \times \varepsilon^2 \times V$$

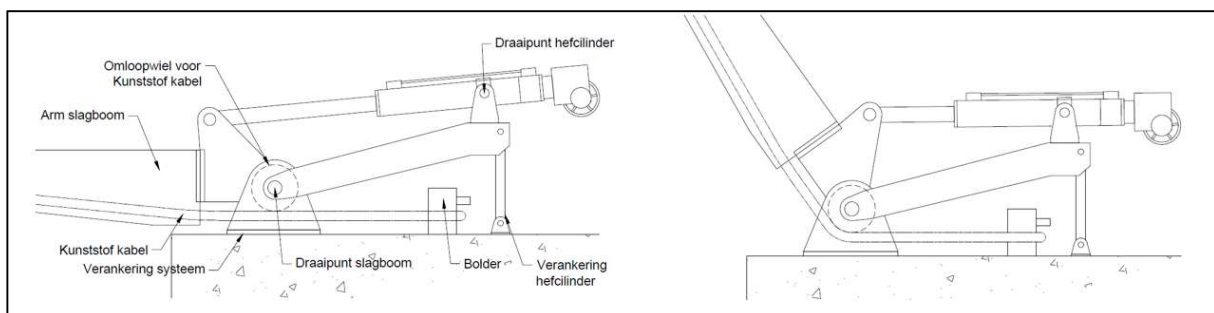
Waarin:	W_{max}	= Maximale energie opname	[kJ/dm ³]
	E	= Elasticiteitsmodulus	[N/mm ²]
	ε	= Rek	[%]
	V	= Volume van de kabel	[dm ³]

Wanneer *Vergelijking 2-8* wordt ingevuld voor de kunststofvezels met de gegevens uit *Tabel 2.4* volgt de energieopname:

- Nylon heeft een energieopname van 90 kJ/dm³;
- Polyester heeft een energieopname van 72 kJ/dm³.

Toepasbaarheid

De combinatie met een slagboom, zie *Figuur 2.39*, is mogelijk wanneer er onvoldoende verval is. De kabel moet om een bolder heen worden geslagen of in een fuik vastgrijpen. De combinatie met een slagboom maakt de kunststofvangkabel breder toepasbaar in Nederland, maar wordt hierdoor wel kwetsbaarder voor storingen. Een storing zoals: het vastlopen van de slagboom of het niet aansluiten op de bolder/fuik van de kabel.



Figuur 2.39 Slagboomconstructie kunststofvangkabel in 'gesloten' en 'open' toestand

De remweg is afhankelijk van de breedte van de kolk, bij een rek rond de 20% van de lengte houdt dit in dat bij een kolkbreedte van 10,00 meter, de kabel 11,00 meter lang moet zijn en 2,20 meter rekt. De remweg is wiskundig bepaald en bedraagt 3,60 meter. Een weergave van de uitrekking is weergegeven in *Figuur 2.38*.

Doorgaans is er een bepaalde ruimte beschikbaar in de sluis voor de remweg. Een langere remweg is gunstig voor de krachtafdracht, maar is kostentechnisch nadelig omdat het sluiscomplex langer wordt. In een kortere remweg zijn de krachten groter en ontstaat er meer schade aan het schip. De kunststofvangkabels kunnen op verschillende manieren de remweg en de energieopname beïnvloeden.

- Met voorspanning wordt de maximale rek en de totale energieopname gereduceerd. Ook materiaalkeuze heeft invloed hierop;
- Met meerdere kabels achter elkaar wordt de energie geleidelijk worden opgenomen, maar de remweg wordt langer;
- De dikte van de kabel bepaalt de maximale energieopname, de rek van de kabel blijft onveranderd. Met dikkere kabels wordt een grotere energie worden opgenomen, maar dit betekent ook grotere krachten op de sluisolk.

Bij het overschrijden van de maximale rek zal de kabel breken, bij vangkabels gaat dit gepaard met veel energie. Denk hierbij aan een elastiek dat breekt, maar dan in het groot. Dit kan gevaarlijke situaties veroorzaken, met letsel of erger tot gevolg. Dit is een risico op het gebied van veiligheid.

Nadere uitwerking toepasbaarheid

Voor de toepassing van kunststoffen dienen er conversiefactoren te worden toegepast. Kunststoffen worden in laboratoria getest, maar de praktijk wijkt af van de omstandigheden in het lab. Voor kruip, blootstelling aan water, temperatuur, vermoeiing, slijtage en veroudering door UV dient te worden onderzocht of er conversiefactoren benodigd zijn.

- Slijtage en veroudering door UV kunnen voorkomen bij kunststoffen naar aanleiding van wind en golfbelasting, door een beschermende koker om de kabel toe te passen wordt dit tegengegaan;
- Nylon en polyester ondervinden weinig invloed door verschillen in temperatuur, hiervoor hoeft er geen conversiefactor te worden toegepast;
- Kruip treedt op bij langdurige belastingen, niet bij kortstondige aanvaarbelasting;
- Vermoeiing treedt op bij herhalende belastingen, niet bij enkele aanvaarbelasting;
- Nylon is gevoelig voor blootstelling aan water, hiervoor dient een conversiefactor van 1,5 te worden toegepast. Polyester is niet gevoelig voor blootstelling aan water.

Voor de sterkte van Nylon dient een reductie van 1,5 te worden toegepast op de breuksterkte/-spanning, Polyester heeft geen conversiefactoren.

De werkelijke reductie van de stijfheid van een kunststofvangkabel zal tussen twee extremen liggen. De modulus van de kabel als geheel is namelijk nooit hoger zijn dan die van de individuele vezels. De stijfheid van de vezel wordt hooguit benaderd indien alle strengen van de kabel in hoofdrichting liggen, maar dit komt nooit voor bij een kabel. De rek van de gehele kabel is niet groter zijn dan die van de individuele strengen, ervan uitgaande dat een kabel is voorgerekte om eventuele rek door het maken van de kabel eruit te halen.

Uit het haalbaarheidsrapport blijkt dat de eigenschappen voor kunststofvezels niet kan worden aangehouden voor kunststofvangkabels. Er moet een reductie van 4,34 op de breukspanning en 1,25

op de rek bij breuk worden aangehouden op nylonvezels. Voor polyestervezels 6,6 en 1,25 respectievelijk. Door de waarde uit [Tabel 2.4](#) met deze factoren te reduceren, komt dit neer op de resultaten welke zijn weergegeven in [Tabel 2.5](#).

Tabel 2.5 Materiaaleigenschappen kunststofvangkabels (na reductie van waarde van de vezels)

Materiaal	Breukspanning met reductiefactor [N/mm ²]	Modulus [N/mm ²]	Rek bij breuk met reductiefactor [%]	Max. Energieopname [kJ/dm ³]
	σ	E	ϵ	W
Nylon	207	1.300	16,0	16,6*
Polyester	167	1.600	10,4	8,7

* Voor nylon dient er nog een conversiefactor van 1,5 worden toegepast voor blootstelling aan water.

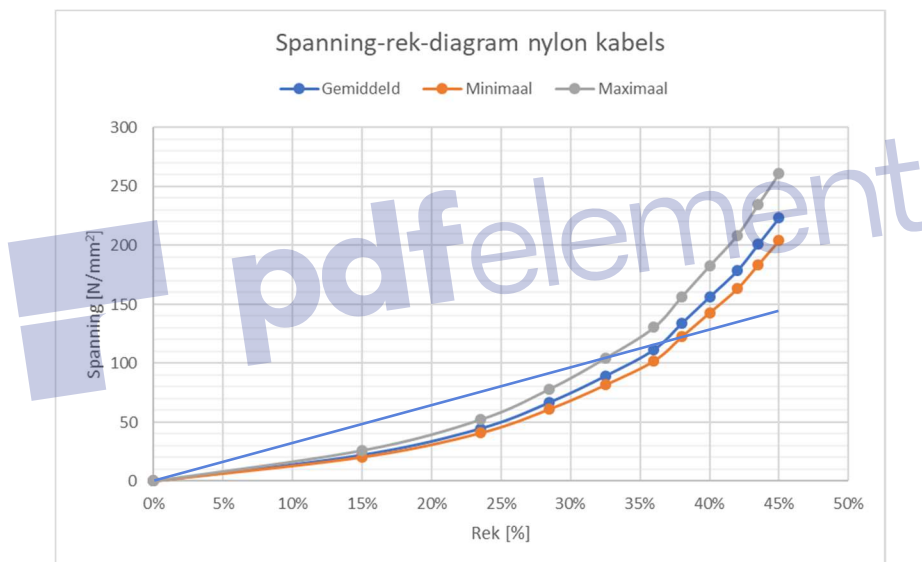
Bij producenten is informatie verkrijgbaar voor de eigenschappen van verschillende kabels. Hiermee wordt geverifieerd of de benaderde eigenschappen uit het haalbaarheidsonderzoek voor stijfheid overeenkomen met de eigenschappen van kabels afkomstig van producenten. In [Tabel 2.6](#) zijn de breekkrachten weergegeven bij verschillende diameters kunststofvangkabel, beschikbaar gesteld door Van der Lee. De rek bij breuk is af te lezen uit het kracht-rek-diagram, zie [Bijlage 4 Data Van der Lee](#), voor nylon bedraagt dit 45% en voor polyester 35%.

Tabel 2.6 Breekkracht bij kunststofvangkabels (beschikbaar gesteld door Van der Lee)

		Rek 45%		Rek 35%	
		Polyamide 6 /6.6 (Nylon)		Polyester	
Omtrek [duim]	Diameter [mm]	Breekkracht [kN]	Spanning bij breuk [N/mm ²]	Breekkracht [kN]	Spanning bij breuk [N/mm ²]
	20	81	258	77,8	248
	22	98	258	93,3	245
3	24	118	261	112	248
3,5	28	155	252	141,5	230
4	32	196	244	192,4	239
4,5	36	244	240	236,5	232
5	40	294	234	292,8	233
5,5	44	351	231	348	229
6	48	412	228	476,4	263
6,5	52	479	226	555,8	262
7	56	549	223	644,1	262
7,5	60	626	221	708,8	251
8	64	706	219	791,1	246
9	72	882	217	975,4	240
10	80	1080	215	1195,1	238
11	88	1280	210	1434,3	236
12	96	1510	209	1700	235
13	104	1780	210		
14	112	2060	209	2298	233
15	120	2350	208	2627	232
16	128	2670	207	2972,5	231

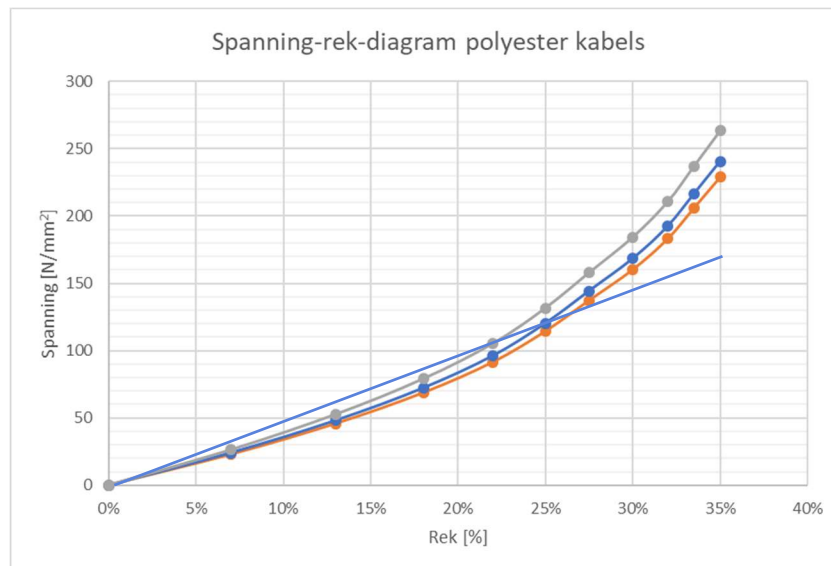
17	136	3000	207		
18	144	3350	206	3756,8	231
19	152	3730	206		
20	160	4120	205	4648	231
21	168	4530	204		

Samen met de kracht-rek-diagram is voor de kunststofvangkabels een spanning-rek-diagram opgesteld, zie *Figuur 2.40* en *Figuur 2.41*, echter is er niet bij iedere kabel een gelijk verloop. In de spanning-rek-diagrammen zijn hierdoor drie lijnen weergegeven: een lijn die het verloop tot de minimale breukspanning aangeeft, een lijn met de gemiddelde waarde en een lijn met de maximale breukspanning. Het oppervlak onder de functie geeft de opgenomen energie aan, om deze te kunnen bepalen wordt er een lineaire lijn getrokken. Deze lijn begint bij (0,0) en eindigt bij de rek bij breuk, voor nylon (45%, y) en voor polyester (35%, y). De lineaire lijn dient zo te worden getekend dat het oppervlak onder deze lijn gelijk is aan het oppervlak onder het spanning-rek verloop. Hierbij komt er een waarde voor de “y” bij nylon en polyester, dit is de fictieve breukspanning om de energieopname te bepalen. Met deze fictieve breukspanning kan de helling worden bepaald. Met *Vergelijking 2-8* is vervolgens de opgenomen energie per kabelvolume (in de richting van de kabel) te benaderen.



Figuur 2.40 Spanning-rek-diagram nylon kabel

In *Figuur 2.40* is de lineaire lijn getrokken voor de benadering van de energie opname, deze lijn snijdt de coördinaten: (0, 0) en (45%, 145). Met behulp van de coördinaten wordt de helling van de lijn bepaald, deze bedraagt 322. Met deze waarde en *Vergelijking 2-8* is vervolgens de energieopname benaderd, deze bedraagt 32,6 kJ/dm³. *Tabel 2.7* geeft een overzicht hiervan weer.



Figuur 2.41 Spanning-rek-diagram polyester kabel

In *Figuur 2.41* is de lineaire lijn getrokken voor de benadering van de energieopname, deze lijn gaat door de coördinaten: (0, 0) en (35%, 170). Met deze coördinaten kan de helling van de lijn worden bepaald, deze bedraagt 486. Met deze waarde en *Vergelijking 2-8* is vervolgens de energie opname benaderd, deze bedraagt 29,8 kJ/dm³. *Tabel 2.7* geeft een overzicht hiervan weer.

Tabel 2.7 Benadering energie opname kunststofvangkabels vanuit spanning-rek-diagram op basis van gemiddelde spanning

	Benadering energie opname nylon kabel op basis van gemiddelde spanning	Benadering energie opname polyester kabel op basis van gemiddelde spanning	
Fictieve breukspanning	145	170	N/mm ²
Rek bij breuk	45%	35%	
Helling	322	486	N/mm ²
Energieopname	32,6	29,8	kJ/dm ³

Met de benaderde waardes uit de spanning-rek-diagrammen en de gemiddelde breukspanning is *Tabel 2.8* worden opgesteld. Deze waardes worden vergeleken met de waardes uit *Tabel 2.5*.

Tabel 2.8 Materiaaleigenschappen kunststofvangkabel bij navragen producenten

Materiaal	Gemiddelde Breukspanning [N/mm ²]	Modulus [N/mm ²]	Rek bij breuk [%]	Gemiddelde Energieopname [kJ/dm ³]
	σ	E	ϵ	W
Nylon	232	Niet constant	45	32,6
Polyester	240	Niet constant	35	29,8

* Voor nylon dient er nog een conversiefactor van 1,5 worden toegepast voor blootstelling aan water.

Uit de gegevens van de producenten volgt een hogere waarde voor de maximale spanning en een significant hogere waarde voor de rek.

- Voor nylon was een energieopname berekend van 16,6 kJ/dm³, de benadering van de leverancier gaf een energieopname van 32,6 kJ/dm³;

- Voor polyester was een energieopname berekend van $8,7 \text{ kJ/dm}^3$, de benadering van de leverancier gaf een energieopname van $29,8 \text{ kJ/dm}^3$.

De energieopname is een factor 2,0 groter voor nylonkabels en een factor 3,0 groter voor polyesterkabels dan de berekende waarde uit het haalbaarheidsonderzoek. Het grootste verschil komt door de maximale rek van de kabel, een kabel die net uit de fabriek komt heeft een grote rek. De spanningen bij breuk zijn voor beide gevallen redelijk gelijk aan elkaar. De extra rek ontstaat bij het produceren van de kabel, de speling in de kabel voordat de kunststofvezels de kracht gaan opnemen geeft extra rek.

Bij de nylonkabel moet er een conversiefactor (1,5) worden afgetrokken, hierdoor wordt de energieopname $21,7 \text{ kJ/dm}^3$ en de rek bij breuk bedraagt 45%. Polyesterkabel heeft een energieopname van $29,8 \text{ kJ/dm}^3$ en een rek bij breuk van 35%.

In dit onderzoek wordt alleen uitgegaan de kunststofvangkabels: Nylon en Polyester. Volgens het haalbaarheidsonderzoek zijn dit de meest geschikte kunststoffen om te gebruiken als kunststofvangkabel. Echter zijn er meer materialen die mogelijk zijn voor de toepassing kunststof vangkabel, hieronder een opsomming met de voor- en nadelen van de overige soorten:

<i>Aramide (Twaron en Kevlar)</i>	+	Zeer hoge sterkte
	-	Weinig rek
<i>Dyneema</i>	+	Hoge sterkte
	-	Weinig rek
<i>Latex (elastisch koord)</i>	+	Extreem veel rek
	-	Zeer lage breuksterkte
<i>Koolstofvezel</i>	+	Zeer hoge sterkte
	-	Weinig rek
<i>Polypropreen (PP)</i>	+	Veel rek
	-	Slechte werking bij lage temperaturen

Voor- en nadelen

Een kunststofvangkabel met slagboomconstructie geeft een vrije doorvaarhoogte en een aanvaarbeveiliging met weinig onderhoud. Enkel de cilinders voor de slagboom hebben onderhoud nodig, de kabel is geheel onderhoudsvrij. Kunststof is daarnaast corrosievrij en een licht materiaal, de slagboomconstructie hoeft minder zwaar te worden ontworpen in vergelijking met een stalenkabel. Wel moet de kabel om de zoveel jaar worden vervangen, na een aanvaring moet het sowieso worden vervangen, maar als de kabel meerdere jaren niet is aangevaren moet deze ook worden vervangen.

Het nadeel van een kunststofvangkabel is de onwetendheid van het gedrag van de kabel bij een aanvaring met een grote energie. In het haalbaarheidsonderzoek werden enkele onzekerheden al benoemd, de onwetendheid zit in het volgende:

- De buiging van de kabel rond de boeg van het schip, aan de buitenzijde rekt de kabel verder en is er meer spanning;
- De aansluiting van de kunststofvangkabel naar de kabel rond de verankeringspunten.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat ondanks de onzekerheden een kunststofvangkabel met slagboomconstructie een verbetering is ten opzichte van de vaste vangkabel. Of de beweegbare kunststofvangkabel een verbetering is ten opzichte van de kabel met dempcilinder zal volgen uit verder onderzoek.

2.5 Trade off matrix

2.5.1 Aspecten Trade Off Matrix

De Trade Off Matrix is opgedeeld in vier te beoordelen aspecten met elk meerdere onderdelen. De vier aspecten zijn:

- Toepasbaarheid;
- Energievernietiger;
- Inpassing systeem;
- Beschikbaarheid.

Onder het aspect toepasbaarheid wordt gekeken naar de toepassing van de aanvaarbeveiliging in Nederlandse sluisen. Kan de aanvaarbeveiliging werken op verschillende waterstanden? Het andere onderdeel dat de toepasbaarheid beïnvloed; Is er de mogelijkheid dat de aanvaarbeveiliging een vrije doorvaart geeft? Als laatste onderdeel van de toepasbaarheid; Is het een scheepsvaartvriendelijke constructie?

In energievernietiger wordt onderverdeeld in vier onderdelen, te weten: methode, berekenmethode, kennis beschikbaar binnen civiele sector en bewezen techniek. De methode betreft de manier van energie opname van de energievernietiger, gaat dit heel stug of heel geleidelijk/trapsgewijs. De moeilijkheidsgraad van de berekeningen wordt meegenomen in de berekenmethode, complexe berekeningen worden bij voorkeur in de tool vermeden. Ook is het gewenst om kennis te hebben over de energievernietiger, een onbekende soort heeft minder de voorkeur om te worden toegepast. Als laatste is het onderdeel bewezen techniek. Wanneer een soort energievernietiger is toegepast en heeft bewezen dat deze de kracht kan opvangen is dat een pluspunt.

Inpassing systeem focust zich op de voorzieningen die benodigd zijn voor de realisatie van de aanvaarbeveiliging. Dit zijn voorzieningen in de sluisconstructie, remweg en krachten op wandconstructie. Ook wordt er gekeken naar de realiseerbaarheid, hoe groot is de kans dat een dergelijk systeem daadwerkelijk wordt gerealiseerd. Bij remweg wordt gefocust op de minimale remweg benodigd, dit betekent meer nuttige kolk lengte. Vanuit de scheepvaart wordt echter gevraagd naar een systeem dat juist een lange remweg heeft, dan heeft een schip minder schade. Dit is verwerkt in de toepasbaarheid, vanuit oogpunt van de aannemer is de nuttige kolk lengte belangrijker dan de scheepsvaartvriendelijkheid.

Beschikbaarheid is het laatste aspect, deze is onderverdeeld in drie onderdelen: beschikbaarheid bij werking, beschikbaarheid na aanvaring en onderhoudbaarheid. In de beschikbaarheid bij werking wordt beoordeeld hoe groot de kans is dat de aanvaarbeveiliging bij werking faalt en hierdoor de sluis niet meer beschikbaar is. De beschikbaarheid na aanvaring houdt in hoe snel na een aanvaring de sluis weer beschikbaar is, de vervangbaarheid van de aanvaarbeveiliging. Bij onderhoud is de sluis niet meer beschikbaar, een onderhoudsvrije aanvaarbeveiliging geeft maximale beschikbaarheid.

Bij ieder onderdeel is er criteria opgesteld waaraan de variant aanvaarbeveiliging moet voldoen om een maximale score voor dat onderdeel te krijgen, dit is weergegeven in *Tabel 2.9*.

Tabel 2.9 Aspecten TOM

Aspecten	Onderdeel	Criteria voor maximale score (5 of ++)
Toepasbaarheid	Niveau verstelbaar (fluctuaties waterstand in de kolk)	In niveau verstelbaar en/of is op meerdere hoogtes aan te varen
	Vrijmaken doorvaart	Vrij te maken voor doorvaart
	Scheepvaartvriendelijke constructie	Bij aanvaring geringe schade aan schip
Energie-vernietiger	Methode	Trapsgewijs opneembaar (dempend)
	Berekenmethode	Eenvoudig te berekenen voor civiele-aannemers/partijen
	Kennis beschikbaar binnen civiele sector (door aannemer zelf)	Goed te ontworpen (hoeft niet gerealiseerd te zijn) door aannemer
	Bewezen techniek	Praktijk: Maatgevende energie opgenomen
Inpassing systeem	Extra voorzieningen in constructie	Geen extra constructieve voorziening te treffen
	Remweg	Te realiseren binnen minimale stopstreep afstand
	Maakbaarheid/realiseerbaarheid	Eenvoudig te realiseren
	Invloed op (wand-)constructie sluis	Lage krachtenafdracht in de sluisconstructie
Beschikbaarheid	Beschikbaarheid bij werking	Werkt altijd, niet storing gevoelig
	Beschikbaarheid na aanvaring	Snel weer in werking (vervangbaar)
	Onderhoudbaarheid	Geen onderhoud benodigd

Daarnaast is er een extra aspect opgenomen in de TOM waarbij de risico's en kansen benoemt kunnen worden. Deze wegen niet mee in de algemene beoordeling en geven alleen inzicht op niet benoemde zaken.

2.5.2 Beoordeling aspecten

De varianten worden beoordeeld middels scores, *Tabel 2.10*.

Tabel 2.10 Beoordeling onderdelen TOM

Score	Weging	
5	Zeer hoog	++
4	Hoog	+
3	Neutraal	0
2	Laag	-
1	Zeer laag	--

Hierbij voldoet een variant met een zeer hoge score (5 of ++)

 aan het criteria uit *Tabel 2.9*.

2.5.3 Weging aspecten

Om onderscheid te maken in de invloed van de aspecten op de eindbeoordeling dient er een weging op de aspecten te worden gebracht. In *Tabel 2.11* is de bepaling van deze weging weergegeven. Door onderling het belang van een aspect aan te merken wordt de invloed zichtbaar. De weging wordt uitgedrukt in percentages waarbij er een ondergrens van 10% geldt.

Tabel 2.11 Weging aspecten

Aspecten	Toepasbaarheid	Energie vernietiger	Inpassing	Beschikbaarheid	Totaal ¹	%
Toepasbaarheid		0	0	0	0	10%
Energievernietiger	1		1	0	2	30%
Inpassing	1	0		0	1	20%
Beschikbaarheid	1	1	1		3	40%

¹ Minimaal 10%, ondergrens, weging per aspect

Onderbouwing weging

De beschikbaarheid is beoordeeld al het belangrijkste aspect, deze scoort de maximale weging van 40%. Beschikbaarheid is het beschikbaar zijn van de sluis om schepen te kunnen laten passeren. Als de beschikbaarheid van een sluis door de aanvaarbeveiliging wordt beperkt is de toepassing van een aanvaarbeveiliging niet wenselijk. Het aspect energievernietiger heeft een weging van 30% gekregen. Er moet voldoende kennis beschikbaar zijn over de werking van de energievernietiger, zodat bij de toepassing hiervan geen twijfel ontstaat over de werking. Wanneer de energievernietiger zich in de praktijk heeft bewezen heeft deze een hoge voorkeur om toe te passen. De inpassing van het systeem heeft 20% weging. De inpassing van de aanvaarbeveiliging heeft betrekking op de dimensionering en de sterkte van de constructie van het sluiscomplex. Toepasbaarheid, welke 10% mee weegt, geeft alleen de voordelen van toepassing van bepaalde varianten weer. Een beweegbare aanvaarbeveiliging heeft vele voordelen, maar deze zijn niet altijd van noodzaak.

In de verificatie wordt een alinea opgenomen waarin met de percentages wordt gevarieerd. Hierin zijn de wegingen ook eenmaal gelijkgezet om te beschouwen wat dit met het resultaat doet. Tevens is de bovengrens opgezocht door het aspect; Beschikbaarheid op 90% te beoordelen. Hieruit moet volgen of er een sterke variatie is in de resultaten of dat sommige varianten er duidelijk bovenuit schieten.

De score per aspect wordt gedeeld door de maximale score van hetzelfde aspect, hieruit volgt het scoringspercentage van dit aspect. Daarna moet het scoringspercentage worden vermenigvuldigd worden met de weging, de som van dit resultaat geeft de eindscore per variant. Hierbij is 100% de maximale score. De maximale score per aspect, het scoringspercentage, is gelijk aan de weging. Het eindtotaal geeft de uiteindelijke beoordeling van de variant weer. Hierna wordt op basis van vergelijk van de eindtotalen bepaald welke variant geschikt is om toe te passen in de Nederlandse Binnenvaart.

2.5.4 Beoordeling varianten

Onderbouwing scores

In deze paragraaf is per aspect de beoordeling van elke variant uitgelegd. Te weten varianten:

Tabel 2.12 Nummering varianten

Variant nummer	Beschrijving
01	Buigzame ligger
02	Scharnierend portaal
03	Stootbalk met dempers
04	Kabel met remcilinder
05	Koker met vangkabel
06	Vangnet
07	Stootbalk met composiet dempers
08	Stootbalk met stalen dempers
09	Kabel met fendersysteem
10	Vakwerk met kunststofkabel
11	Kunststofvangkabel
12	Dynamische buigzame ligger

Toepasbaarheid

Variant 4, de kabel met remcilinder, is beoordeeld met de hoogste score betreffende toepasbaarheid. Omdat de variant het schip geleidelijk afremt en een vrije doorvaarhoogte geeft, scoort deze variant het hoogst. Ondanks dat de kabel vrijgemaakt kan worden voor doorvaart hangt de kabel op een vast niveau, waardoor de variant niet de maximale score krijgt.

Variant; 6, 9, 11 en 12 scoren tevens hoog op toepasbaarheid; de varianten kunnen vrij worden gemaakt voor doorvaart, zijn dynamisch en/of scheepsvaartvriendelijk. Waarbij erop twee onderdelen vrij hoog wordt gescoord en waarvan erop één onderdeel een beduidend lagere beoordeling heeft.

De Varianten; 1, 2, 3, 7, 8 en 10 scoren laag op de toepasbaarheid, deze varianten zijn niet verstelbaar en ze kunnen geen vrij doorvaarhoogte garanderen. Daarbij worden ze beoordeeld als niet scheepsvaartvriendelijk. Variant 5 is een uitzondering hierop, deze scoort net wat hoger ten opzichte van de eerdergenoemde varianten. De variant is niet dynamisch en heeft niet de mogelijkheid tot het vrijmaken van doorvaarhoogte maar is wel scheepsvaartvriendelijkheid, dankzij de remweg welke ontstaat bij aanvaring

Energievernietiger

Variant; 1, 3, 4 en 6 scoren boven het gemiddelde op het aspect energievernietiger. Deze varianten onderscheiden zich van de andere varianten door een hoge score op minimaal twee van de vier onderdelen. Variant 1 heeft een relatief simpele berekeningsmethode waarbij er veel kennis beschikbaar is over de werking van de aanvaarbeveiliging. Daarnaast is de aanvaarbeveiliging meerdere malen toegepast in de Nederlandse binnenvaartsluizen. Variant 3 scoort het hoogst, de techniek heeft zichzelf bewezen in de praktijk en de variant is meerdere malen uitgevoerd in Nederlandse binnenvaartsluizen. Het enige minpunt aan deze variant is dat de energievernietiger beschikt over werktuigbouwkundige installaties; de dempcilinders. Dit wordt gezien als een minpunt, maar weegt niet zwaar mee in de uiteindelijke score.

Variant 4 scoort minder dan variant 1 en 3, deze variant is in de praktijk reeds toegepast en heeft een zeer efficiënte methode om energie op te nemen, maar er ontbreekt enkele kennis binnen de civiele

sector. De constructie is veelal werktuigbouwkundig, wat wordt beoordeeld als een minpunt. Variant 6 scoort boven gemiddelde dankzij een efficiënte manier van energie opnemen wat is bewezen in de praktijk. Ten opzichte van de eerdergenoemde varianten is variant 6 complexer te berekenen vanwege de werktuigbouwkundig installaties; de dempingscilinders.

Variant 2, 5, 8, 11 en 12 scoren gemiddeld op het aspect energievernietiger. Hoewel de varianten goed scoren op één onderdeel worden de andere onderdelen beoordeeld met een lagere score. De bovenstaande varianten hebben gemeen dat deze een techniek hebben welke niet bewezen is. Variant 7, 9 en 10 scoren het laagste op het aspect energievernietiger. Dit zijn varianten welke complexe berekenmethode hebben, complexe methode om de energie op te nemen en nooit zijn bewezen in de praktijk.

Inpassing

Variant 3, de starre stootbalk met dempcilinders, scoort het hoogst op het aspect inpassing. Door een korte remweg, weinig benodigde ruimte in de kolkwanden en weinig invloed op de kolkwanden scoort de variant hoog.

De varianten; 4,7,8,9,10 hebben een redelijk gelijke score. Hierbij zijn er van de vier onderdelen drie welke gemiddeld worden beoordeeld en waarbij er één onderdeel hoger uitvalt. Variant 1 en 11 scoren in het totaal gemiddeld maar hebben onderdelen waarop hoog wordt gescoord en enkele onderdelen waarop zeer laag wordt gescoord. De varianten zijn beide goed maakbaar maar hebben beide een grote krachtsafdracht op de sluisconstructie wanneer ze worden aangevaren.

Variant 2 en 12 scoren laag op het onderdeel maakbaarheid/realiseerbaarheid omdat het tevens omvangrijke constructies zijn welke moeilijk zijn in te passen maar waarbij de remweg goed te beïnvloeden is. Variant 6, krijgt de laagste score vanwege de omvangrijke constructie met veel extra voorzieningen welke ervoor zorgt dat deze moeilijk in te passen in de sluisconstructie is.

Beschikbaarheid

Variant 7 en 8 scoren het hoogst op de beschikbaarheid, deze zijn onderhoudsvrij en altijd beschikbaar. De constructie bestaat uit vaste onderdelen waarbij de onderdelen goed te vervangen zijn na een aanvaring. Variant 1 scoort tevens hoog vanwege zijn onderhoudsvrije werking waarbij de variant altijd beschikbaar is, echter dient de gehele constructie na aanvaring vervangen te worden.

Variant 3 wordt gemiddeld beoordeeld op het onderdeel onderhoud doordat de dempingscilinders enig onderhoud behoeven. Variant 3 scoort vanwege de dempingscilinders hoog op de beschikbaarheid bij werking en de beschikbaarheid na aanvaring. Na aanvaring kunnen de dempingscilinder doormiddel van het uitdrukken weer in werking worden gesteld.

Variant 11 scoort op alle onderdelen van het aspect beschikbaarheid boven gemiddeld maar bij geen één onderdeel maximaal. Dit komt omdat er wel enig onderhoud nodig is en er een risico bestaat dat tijdens het openen en sluiten de kabel niet goed in de aansluiting valt welke zich bevindt in de kolkwanden.

Variant 4 en 5 scoren gemiddeld, variant 4 heeft meerdere bewegende onderdelen welke variant 5 niet heeft. De bewegende onderdelen van variant 4 kunnen falen en hebben onderhoud nodig wat nadelig is voor de beschikbaarheid. Wel is de variant uitstekend herbruikbaar na een aanvaring. Variant 5 is onderhoudsvrij, maar moet na een aanvaring geheel worden vervangen en er is onzekerheid of de vangkabel het schip volledig en op een juiste manier afremt.

Variant 2, 6, 9, 10 en 12 scoren lager dan gemiddeld. Variant 12 scoort het allerlaagst, de constructie bestaat uit beweegbare onderdelen waarbij intensief onderhoud nodig is. Ook bestaat er het risico dat

de constructie niet naar behoren werkt, met andere woorden dat de sluis niet beschikbaar is. Variant 2, 6, 9 en 10 scoren allen gelijk, deze varianten hebben relatief veel onderhoud nodig en hebben het risico dat de aanvaarbeveiliging faalt waardoor deze niet beschikbaar is.

Scores varianten

In *Bijlage 5 Trade off matrix* zijn de aspecten van de Trade Off Matrix weergegeven met bijbehorende score en de totale score.

Tabel 2.13 Resultaten TOM

	Weging	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8	Variant 9	Variant 10	Variant 11	Variant 12
Toepasbaarheid	10%	2%	3%	3%	9%	5%	8%	3%	3%	8%	3%	8%	7%
Energieverminder	30%	24%	17%	27%	23%	18%	20%	9%	15%	12%	14%	18%	18%
Inpassing	20%	12%	10%	17%	13%	12%	9%	13%	13%	13%	11%	12%	10%
Beschikbaarheid	40%	32%	24%	32%	29%	29%	24%	37%	37%	24%	24%	32%	13%
Totaal		70%	54%	79%	74%	65%	61%	63%	69%	57%	52%	70%	48%

2.5.5 Verificatie resultaten TOM met verschillende weging

De resultaten met de weging conform *paragraaf 2.5.3 Weging aspecten* is in *Tabel 2.13* weergegeven. Om te verifiëren dat de weging niet de resultaten verkeerd beïnvloeden, dient er worden gevarieerd in de wegingen. De weging wordt voor de alle vier aspecten gelijkgezet, allemaal 25%. Daarnaast wordt uit het oogpunt voor een goede beschikbaarheid, dit aspect een extra hoge weging gegeven. De beschikbaarheid weegt 90% mee en de overige drie aspecten wegen 3,33% mee. In elk geval worden de onderdelen beoordeeld met een score van 1 tot en met 5. Uit deze wegingen volgen de resultaten zoals weergegeven in *Tabel 2.14* en *Tabel 2.15*.

Tabel 2.14 Resultaten TOM met gelijke weging van 25% voor de aspecten

Gelijke weging	Weging	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8	Variant 9	Variant 10	Variant 11	Variant 12
Toepasbaarheid	25%	5%	8%	8%	22%	13%	20%	8%	8%	20%	8%	20%	17%
Energieverminder	25%	20%	14%	23%	19%	15%	16%	8%	13%	10%	11%	15%	15%
Inpassing	25%	15%	13%	21%	16%	15%	11%	16%	16%	16%	14%	15%	13%
Beschikbaarheid	25%	20%	15%	20%	18%	18%	15%	23%	23%	15%	15%	20%	8%
Totaal		60%	50%	72%	75%	62%	63%	55%	60%	61%	48%	70%	53%

Tabel 2.15 Resultaten TOM met hoge weging van 90% voor beschikbaarheid

Max beschikbaarheid	Weging	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8	Variant 9	Variant 10	Variant 11	Variant 12
Toepasbaarheid	3,3%	1%	1%	1%	3%	2%	3%	1%	1%	3%	1%	3%	2%
Energieverminder	3,3%	3%	2%	3%	2%	2%	2%	1%	2%	1%	1%	2%	2%
Inpassing	3,3%	2%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Beschikbaarheid	90%	72%	54%	72%	66%	66%	54%	84%	84%	54%	54%	72%	30%
Totaal		77%	59%	79%	74%	72%	60%	88%	89%	60%	58%	79%	36%

2.5.6 Verificatie resultaten TOM met derden partijen

Boorsma

Uit de resultaten van de TOM van Ingenieursbureau Boorsma volgen vier varianten welke significant hoger scoren dan de andere varianten, te weten:

- Variant 1 Buigzame ligger;
- Variant 3 Stootbalk met dempcilinder;
- Variant 7 Stootbalk met composiet buisprofiel;
- Variant 8 Stootbalk met stalen buisprofiel.

De resultaten van de TOM ingevuld door Ingenieursbureau Boorsma zijn weergegeven in *Tabel 2.16*. De complete TOM is weergegeven in *Bijlage 5.2 Trade off Matrix ingevuld door Ingenieursbureau Boorsma*, hierin is de onderbouwing per onderdeel en variant uitgewerkt.

Tabel 2.16 Resultaten TOM ingevuld door Ingenieursbureau Boorsma

	Weging	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8	Variant 9	Variant 10	Variant 11	Variant 12
Toepasbaarheid	10%	5%	5%	6%	7%	6%	7%	6%	6%	7%	6%	8%	7%
Energieverminder	30%	26%	20%	27%	23%	24%	17%	23%	23%	20%	18%	15%	17%
Inpassing	20%	14%	6%	14%	10%	12%	11%	14%	14%	11%	14%	12%	8%
Beschikbaarheid	40%	37%	27%	37%	16%	21%	24%	37%	37%	19%	27%	19%	24%
Totaal		82%	58%	84%	56%	63%	59%	80%	80%	57%	65%	54%	55%

De varianten 1, 3 en 8 komen overeen met de resultaten van de TOM ingevuld door de auteurs in opdracht van TBI Mobilis BV. Dit zijn varianten die ook worden opgenomen in de Aanvaarbeveiligingtool, de Aanvaarbeveiligingtool. De varianten 4 en 11 komen hier minder naar boven, dit is te verklaren door de interpretatie van de persoon die de TOM invult. Variant 4 wordt ondanks de lagere score aanbevolen om in de Aanvaarbeveiligingtool te gebruiken, deze wordt in de tool opgenomen. Variant 11 wordt ondanks het verschil wel opgenomen in de tool, omdat het een innovatieve variant is.

Variant 7 wordt in deze TOM aanbevolen om op te nemen in de ontwerptool, iets wat niet gebeurt bij de TOM ingevuld door de auteurs. Er wordt gekozen om deze variant niet in de Aanvaarbeveiligingtool toe te passen, omdat de rekenmethode te deskundig is. Overige varianten worden niet aanbevolen om in de tool op te nemen, deze vallen daarom ook allemaal af.

Hollandia Infra

De resultaten van de TOM van Hollandia Infra zijn vrij wel een gelijk, wat het bemoeilijkt om een conclusie te trekken vanwege de geringe onderlinge verschillen in score. *Tabel 2.17* geeft de resultaten van Hollandia Infra weer.

Tabel 2.17 Resultaten TOM ingevuld door Hollandia Infra

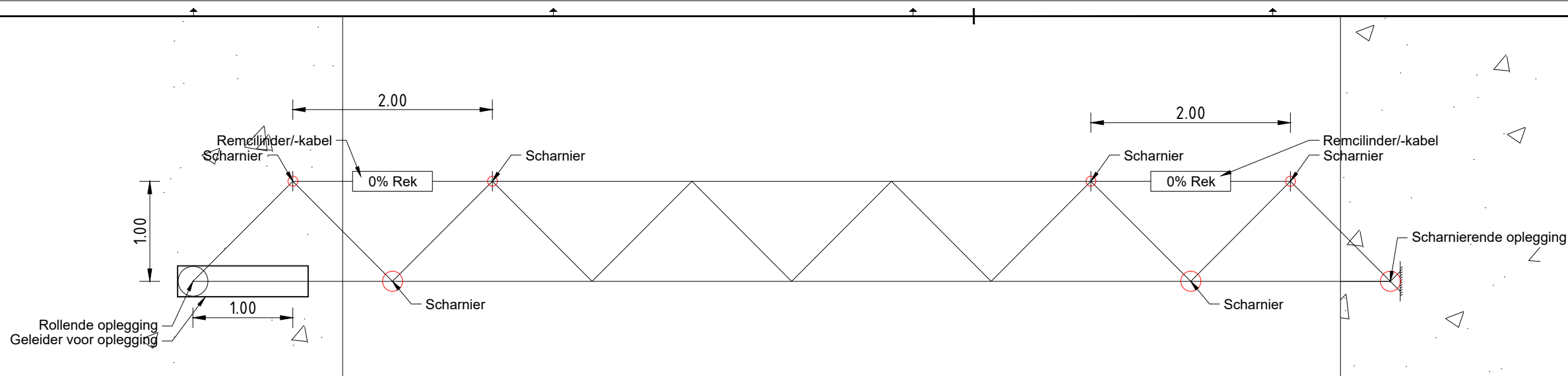
	Weging	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8	Variant 9	Variant 10	Variant 11	Variant 12
Toepasbaarheid	10%	4%	6%	5%	6%	4%	5%	4%	4%	6%	4%	6%	4%
Energievernietiger	30%	23%	17%	14%	14%	12%	21%	24%	24%	14%	21%	12%	23%
Inpassing	20%	14%	13%	15%	11%	10%	9%	15%	15%	8%	11%	9%	14%
Beschikbaarheid	40%	27%	24%	19%	24%	29%	27%	24%	24%	29%	27%	24%	24%
Totaal		67%	60%	52%	55%	55%	62%	67%	67%	57%	63%	51%	65%

De varianten 1, 5, 9 en 10 komen overeen met de resultaten van de TOM ingevuld door de auteurs in opdracht van TBI Mobilis BV. Van deze varianten worden de varianten 1 en 9 opgenomen in de Aanvaarbeveiligingtool. Het is opvallend dat de variant 4, slagboom met kabel en remcilinder, een lage score heeft. Variant 4 wordt door Hollandia Infra BV ontworpen als toepassing voor Sluis Eefde. Er kan geconcludeerd dat de beschikbaarheid negatief wordt beoordeeld. Vanwege de remcilinder is er regelmatig onderhoud benodigd, daarnaast wordt de beschikbaarheid bij werking negatief beïnvloed door de kwetsbaarheid van het aansluitingsmechanisme in de kolkwand bij sluiten. Er bestaat een kans dat deze bij een niet maatgevende aanvaring klem komt te zitten in slagkom. De manier van energie opnemen is als nadelig beoordeeld vanwege het specialisme welke bij de werking komt kijken, het aspect is verkeerd geïnterpreteerd. Uit interviews blijkt dat ondanks de mate van specialisme welke bij de toepassing komt kijken het systeem uitermate geschikt is voor het opnemen van energie. De remcilinder geeft namelijk kleine reactiekrachten op de kolkwanden bij aanvaring. Door de scores betreffende het aspect energievernietiger te middelen wordt er een score van 60% verkregen. De slagboom met kabel en remcilinder wordt gezien als een variant welke in de Aanvaarbeveiligingtool dient te worden opgenomen.

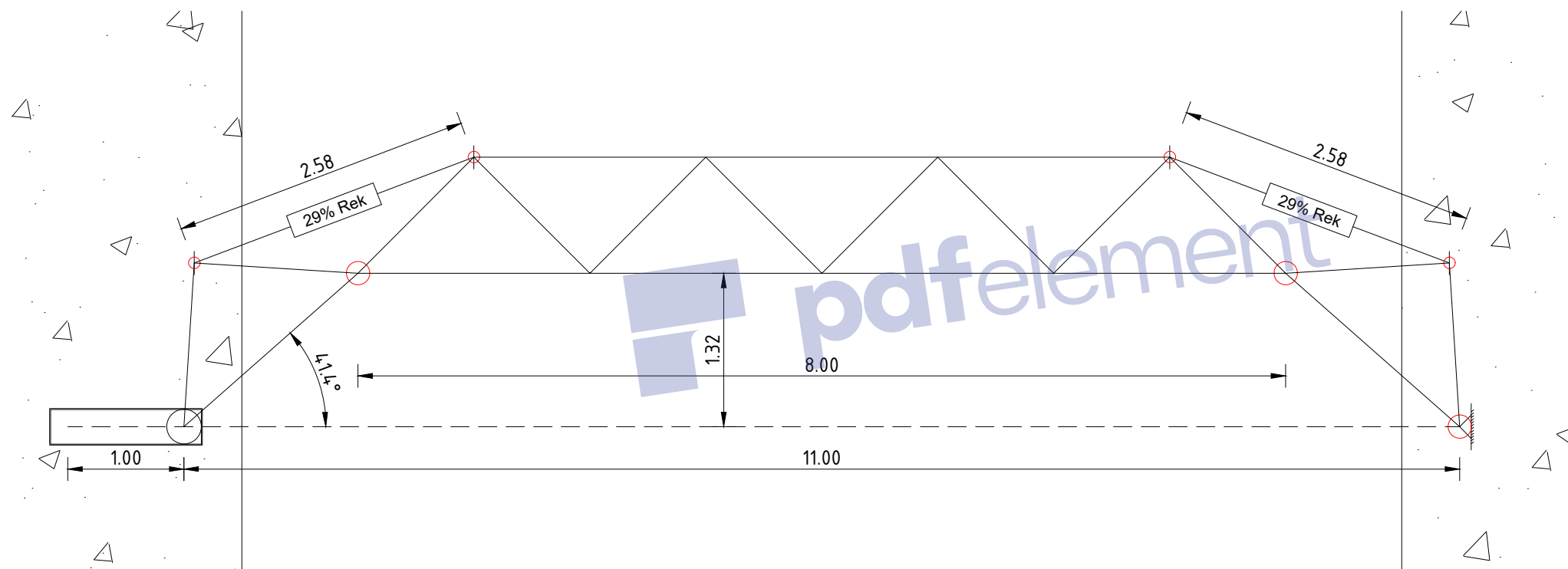
De varianten 7 en 8, optimalisaties op de bestaande, worden gezien als optimalisaties welke bij nader onderzoek een goed alternatief zijn op de bestaande varianten. Variant 7 en 8 hebben zodanig veel overeenkomst dat er vanwege de eenvoudigere, in vergelijking met elkaar, berekeningsmethode de variant wordt opgenomen in de tool.

Bijlage 3 Schetsontwerpen varianten



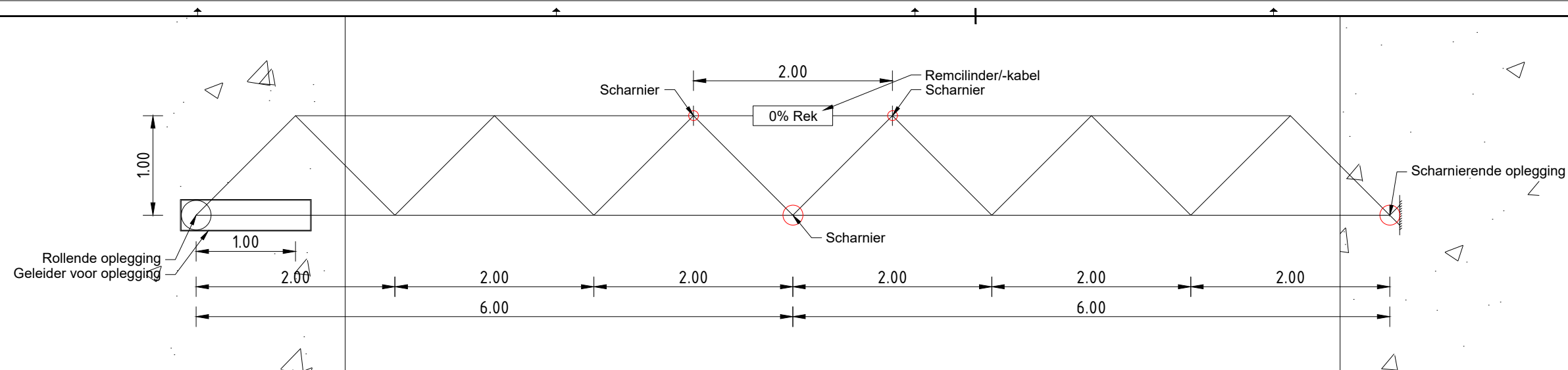


Overzichtstekening Vakwerkligger met remcilinder/-kabel als Aanvaarbeveiliging

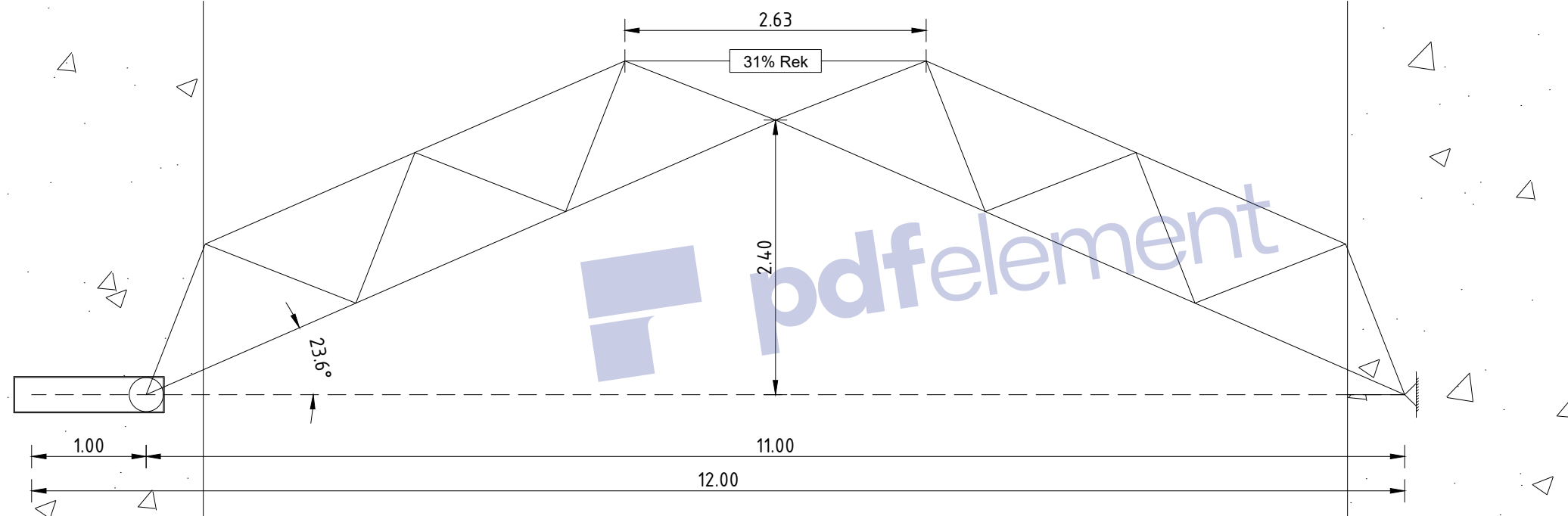


Overzichtstekening na aanvaring Aanvaarbeveiliging

 TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging			Hogeschool Windesheim 		
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen			VOE: BT.AFST-CT.V17		
Deelvraag 1			Aansluitend document: Bijlage 3		
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging			Paragraaf Rapport: 5.2.2		
Vakwerkligger met dubbele remcilinder/-kabel					
getekend	C de Kruyf	datum	21-03-2019	schaal: 1:50	in 9 bladen, bladnr. 2
gecontroleerd	T Vlijm	datum	21-03-2019	formaat: A3	projectnummer:
vrijgegeven	T Vlijm	datum	21-03-2019	tekeningnummer: 01 SO Vakwerk (2)	
status	Definitief	versie	A		

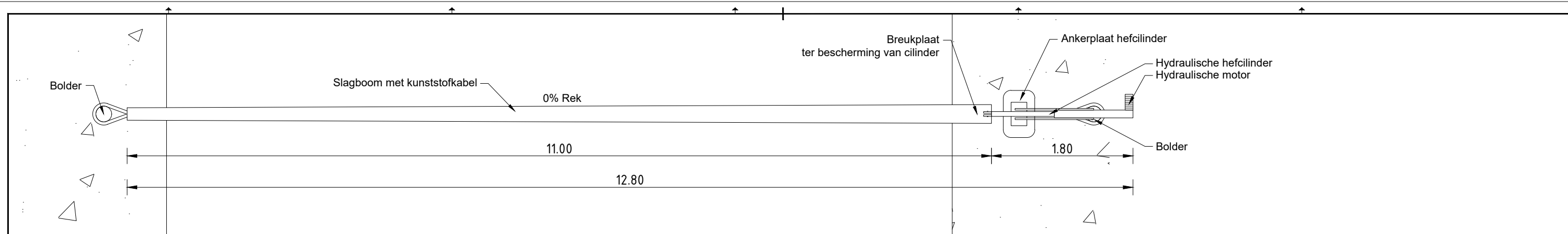


Overzichtstekening Vakwerkligger met remcilinder/-kabel als Aanvaarbeveiliging

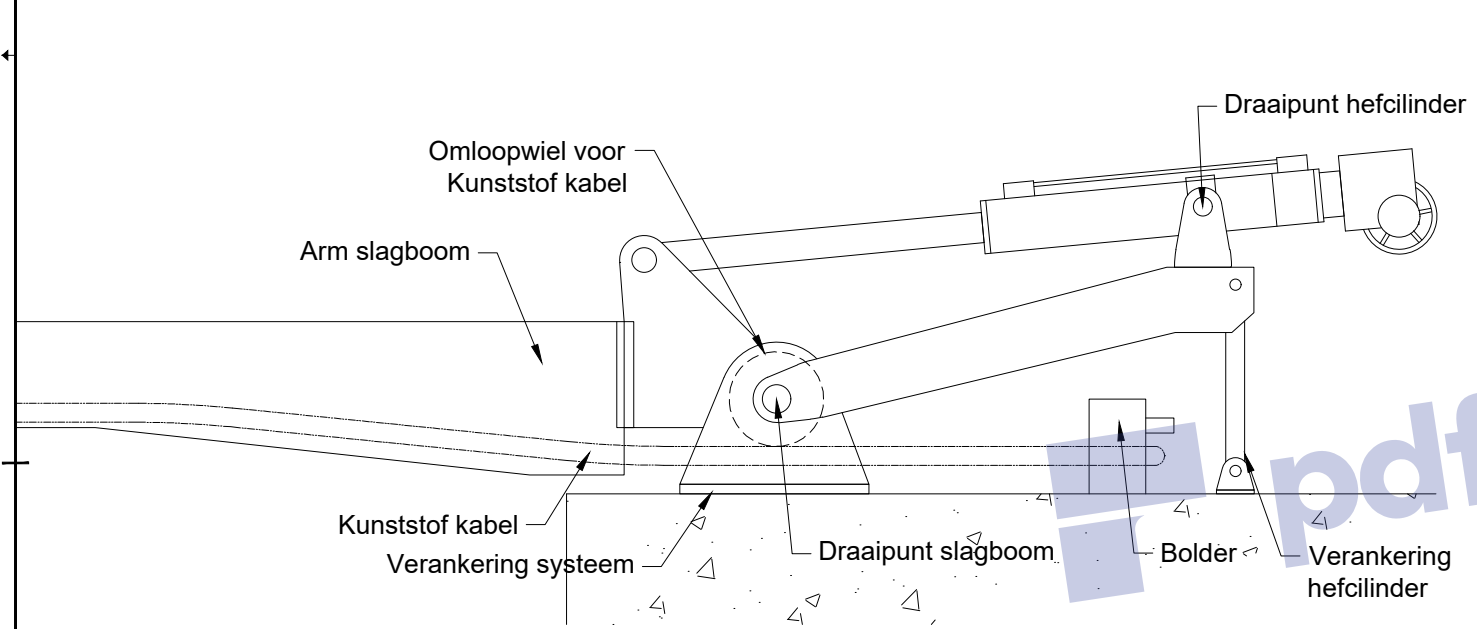


Overzichtstekening na aanvaring Aanvaarbeveiliging

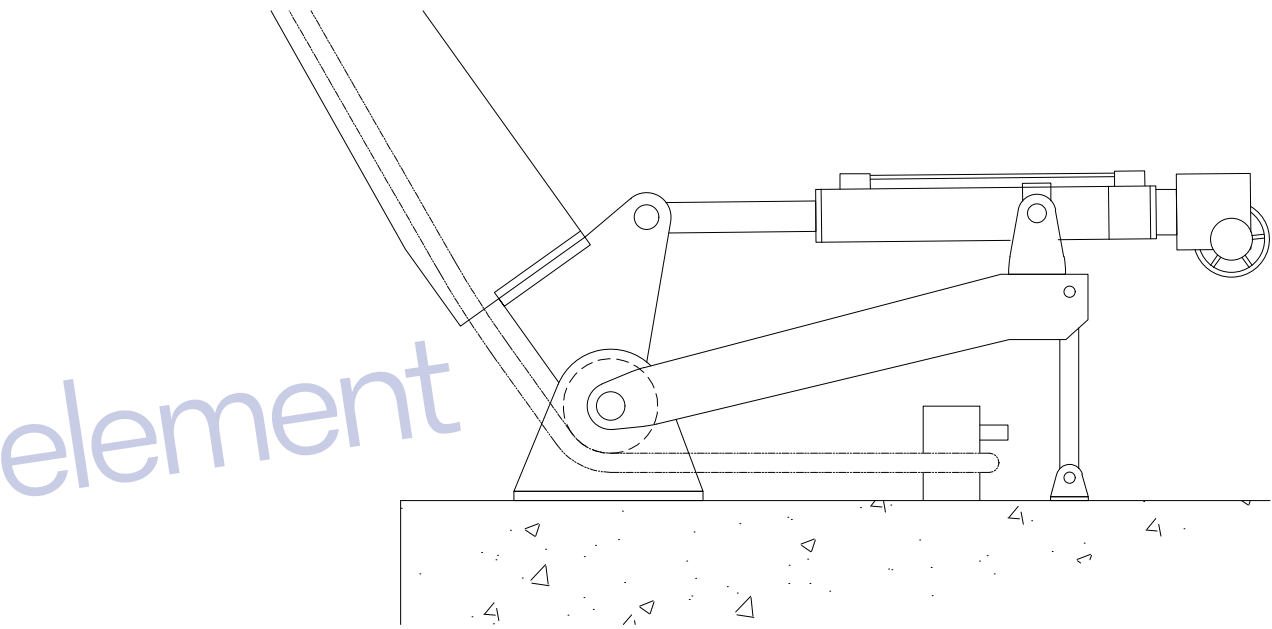
 TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim 	
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen				VOE: BT.AFST-CT.V17	
Deelvraag 1				Aansluitend document: Bijlage 3 Paragraaf Rapport: 5.2.2	
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging					
Vakwerkligger met enkele centrische remcilinder/-kabel					
getekend	C de Kruyf	datum	21-03-2019	schaal: 1:50	in 9 bladen, bladnr. 1
gecontroleerd	T Vlijm	datum	21-03-2019	formaat: A3	projectnummer:
vrijgegeven	T Vlijm	datum	21-03-2019	tekeningnummer: 01 SO Vakwerk (1)	
status	Definitief	versie	A		



Overzichtstekening Beweegbare Kunststofkabel als Aanvaarbeveiliging
Schaal 1:50

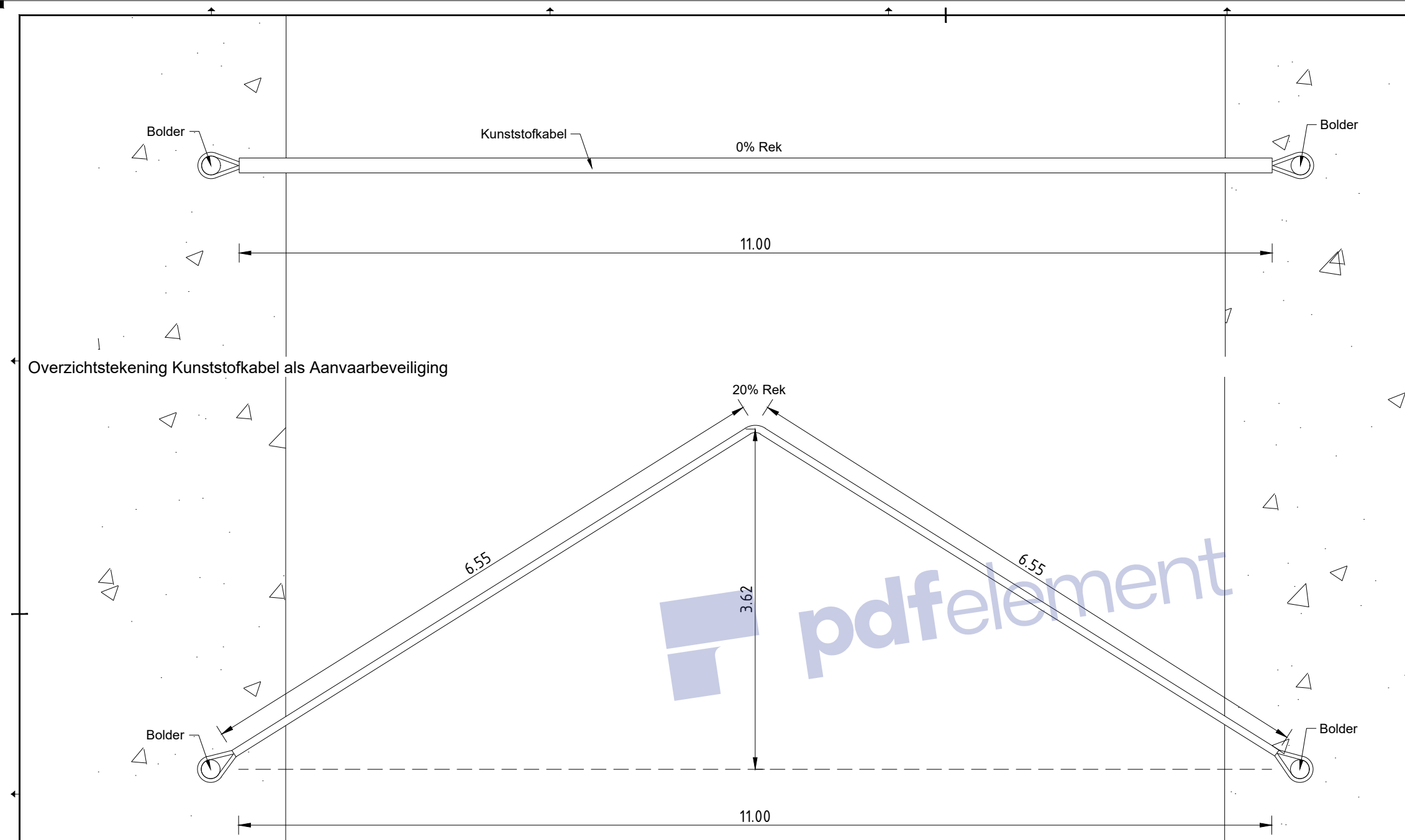


Detail slagboom in 'gesloten' positie
Schaal 1:20



Detail slagboom in 'open' positie
Schaal 1:20

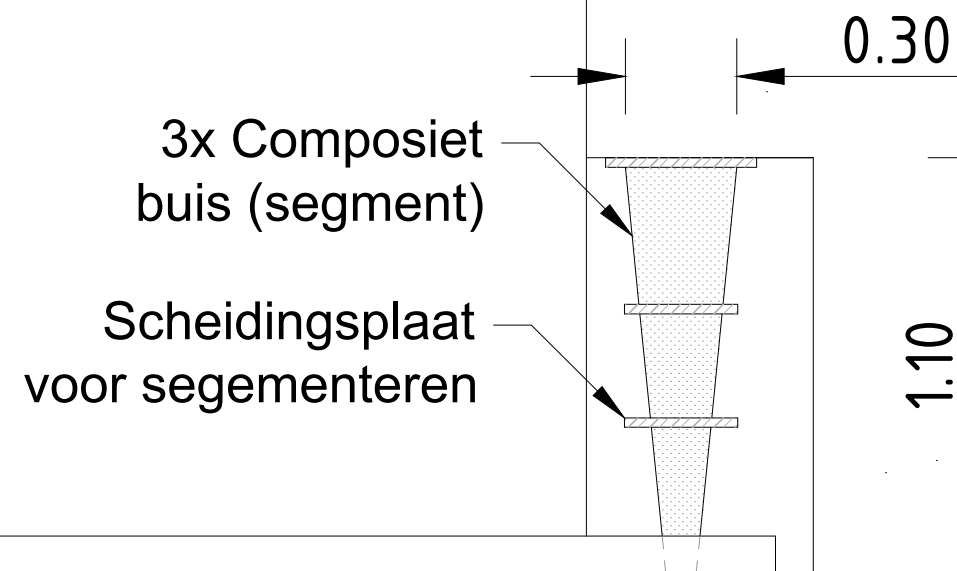
				TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging		Hogeschool Windesheim 	
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen						VOE: BT.AFST-CT.V17	
Deelvraag 1						Aansluitend document: Bijlage 3	
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging						Paragraaf Rapport: 5.2.2	
Beweegbare Kunststofkabel							
getekend	C de Kruyf	datum	21-03-2019	schaal: 1:50	in 9 bladen, bladnr. 4		
gecontroleerd	T Vlijm	datum	21-03-2019	formaat: A3	projectnummer:		
vrijgegeven	T Vlijm	datum	21-03-2019	tekeningnummer: 02 SO Bew. Knstkabel			
status	Definitief	versie	A				



Overzichtstekening Kunststofkabel als Aanvaarbeveiliging

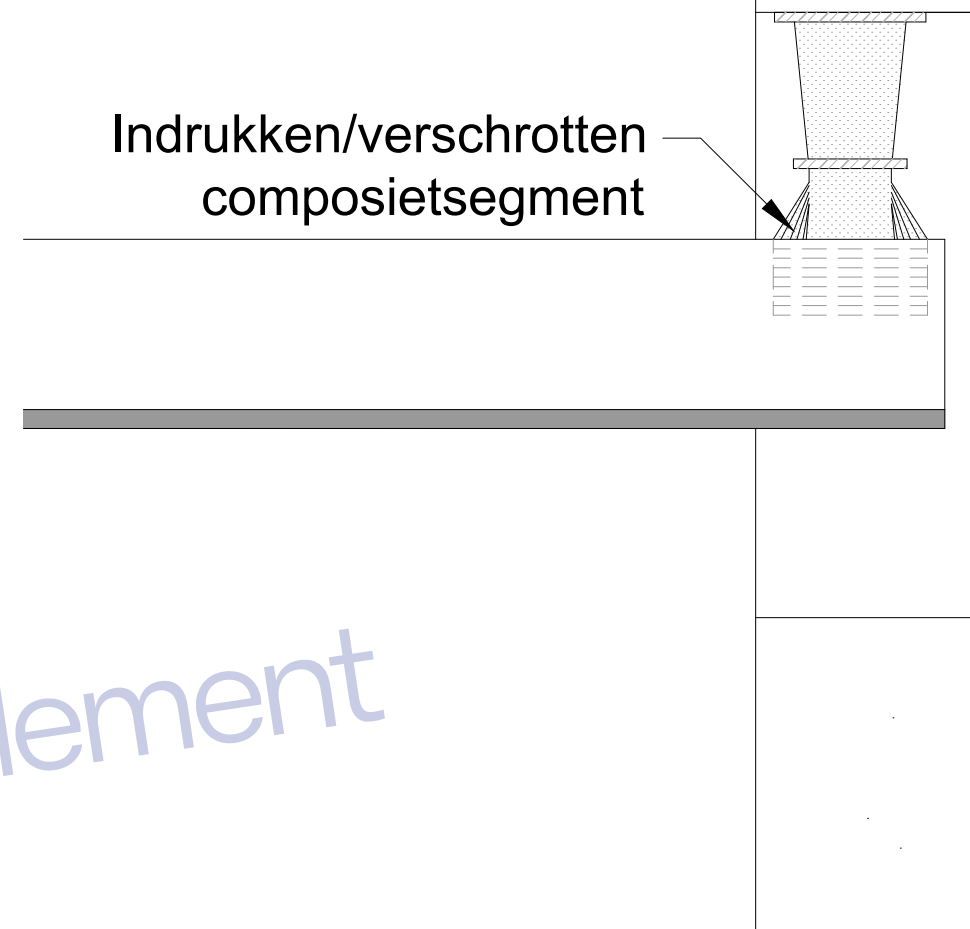
Overzichtstekening na aanvaring Aanvaarbeveiliging

 mobilis TBI infra					TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging					Hogeschool Windesheim 				
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen										VOE: BT.AFST-CT.V17				
Deelvraag 1										Aansluitend document: Bijlage 3 Paragraaf Rapport: 5.2.2				
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging														
Kunststofkabel														
getekend	C de Kruyf			datum	21-03-2019		schaal:	1:50		in 9 bladen, bladnr. 3				
gecontroleerd	T Vlijm			datum	21-03-2019		formaat:	A3		projectnummer:				
vrijgegeven	T Vlijm			datum	21-03-2019		tekeningnummer: 02 SO Kunststofkabel							
status	Definitief			versie	A									



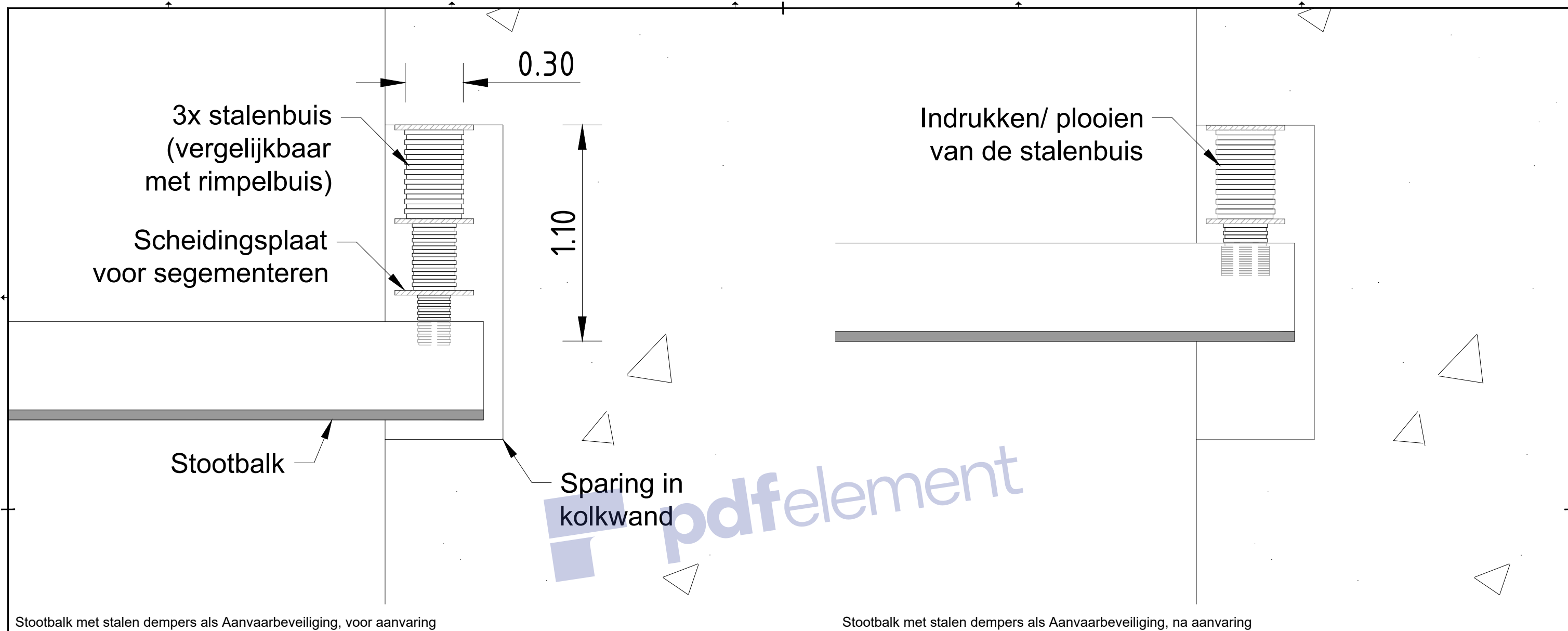
Stootbalk met composiet dempers als Aanvaarbeveiliging, voor aanvaring

Indrukken/verschroten
composietsegment



Stootbalk met composiet dempers als Aanvaarbeveiliging, na aanvaring

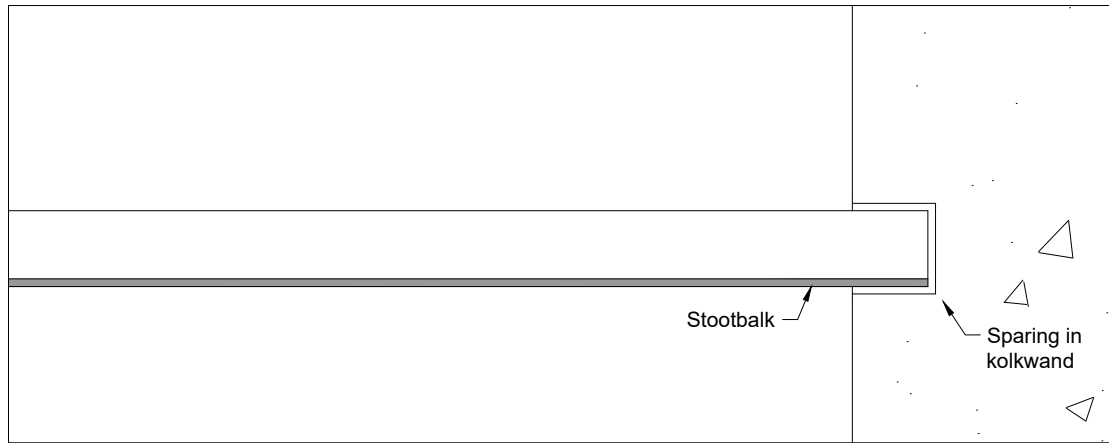
 mobilis TBI infra		TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim 
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen						VOE: BT.AFST-CT.V17
Deelvraag 1						Aansluitend document: Bijlage 3
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging						
Composiet demper						Paragraaf Rapport: 5.2.2
getekend	T. Vlijm	datum	26-03-2019	schaal: 1:20	in 9 bladen, bladnr. 5	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	26-03-2019	formaat: A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	26-03-2019	tekeningnummer: 04 SO Composiet demper		
status	Definitief	versie	A			



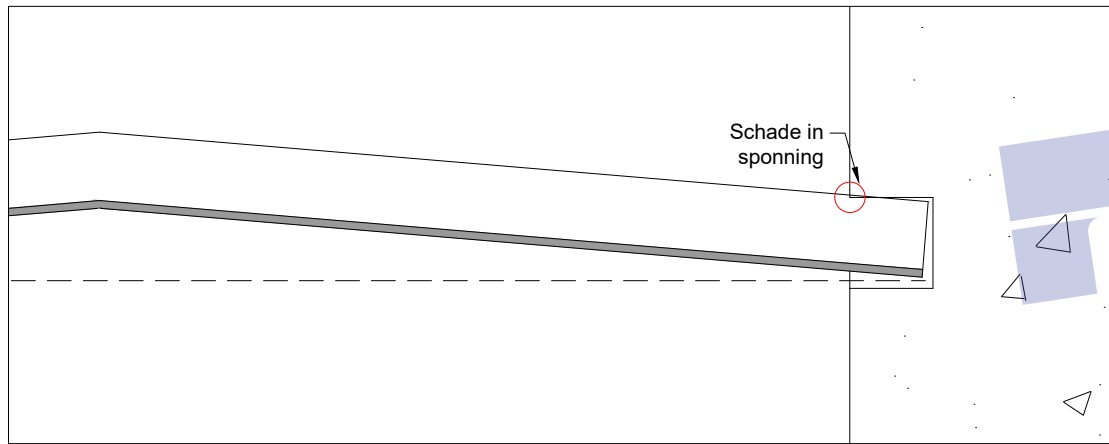
Stootbalk met stalen dempers als Aanvaarbeveiliging, voor aanvaring

Stootbalk met stalen dempers als Aanvaarbeveiliging, na aanvaring

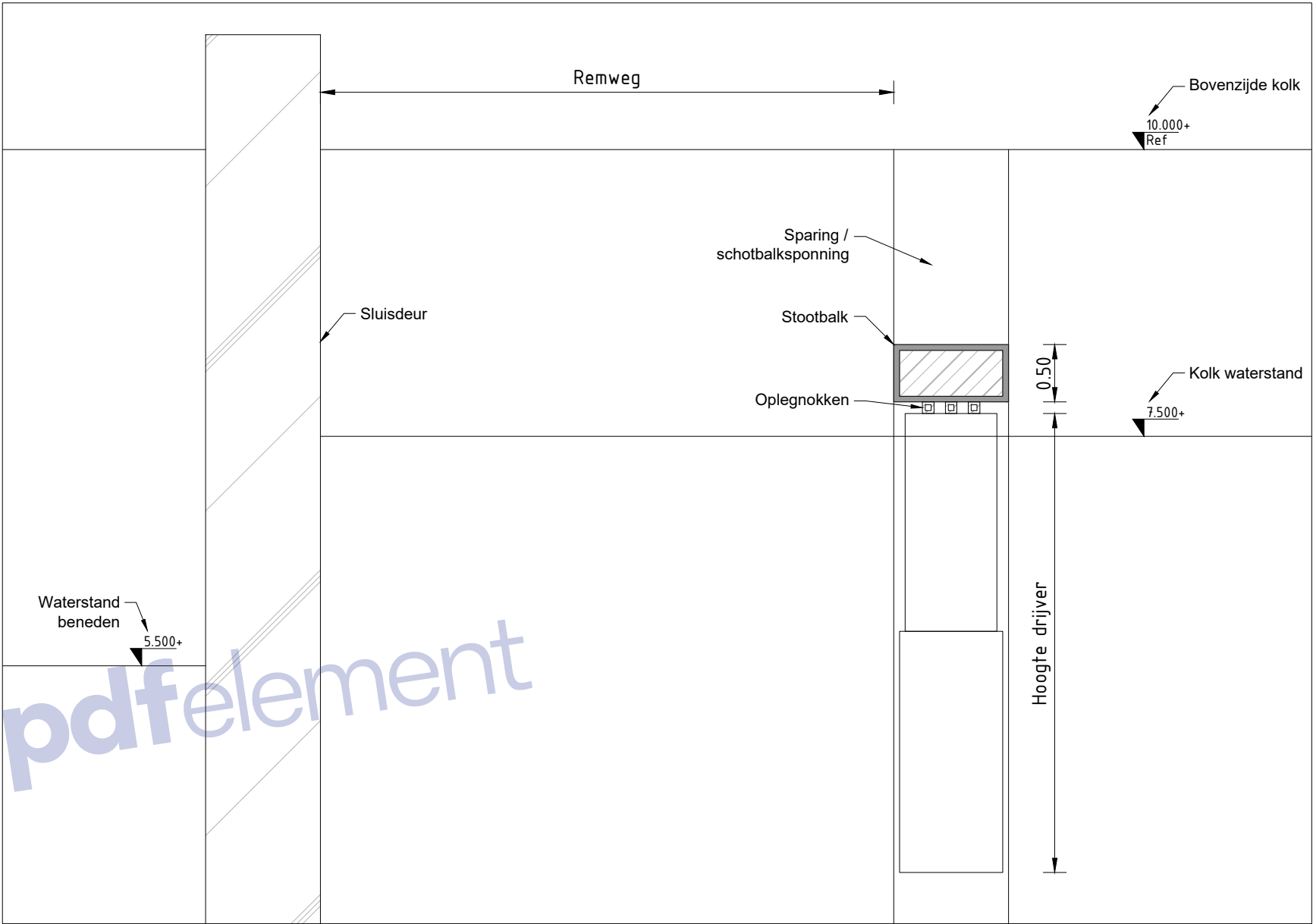
 mobilis TBI infra		TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim 
		Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen Deelvraag 1 Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging Stalen demper				VOE: BT.AFST-CT.V17 Aansluitend document: Bijlage 3 Paragraaf Rapport: 5.2.2
getekend	T. Vlijm	datum	26-03-2019	schaal:	1:20	in 9 bladen, bladnr. 6
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	26-03-2019	formaat:	A3	projectnummer:
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	26-03-2019	tekeningnummer: 05 S0 Stalen demper		
status	Definitief	versie	A			



Bovenaanzicht - Voor aanvaring

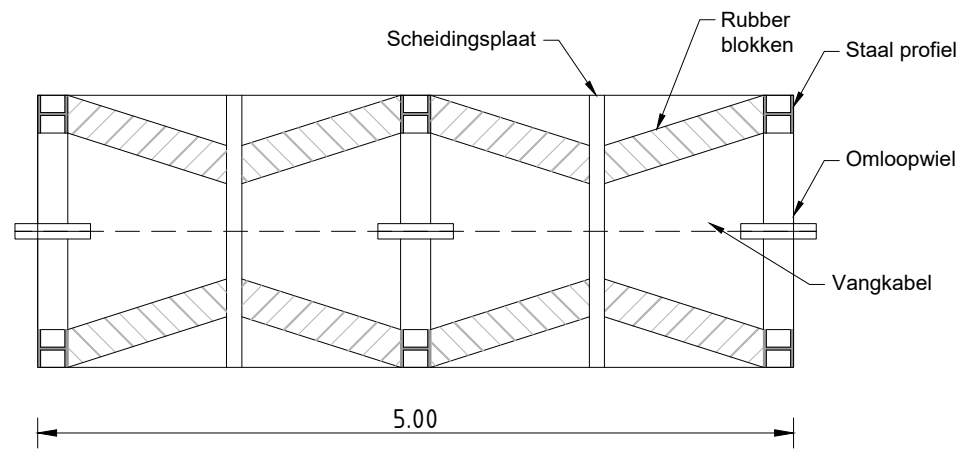


Bovenaanzicht - Na aanvaring

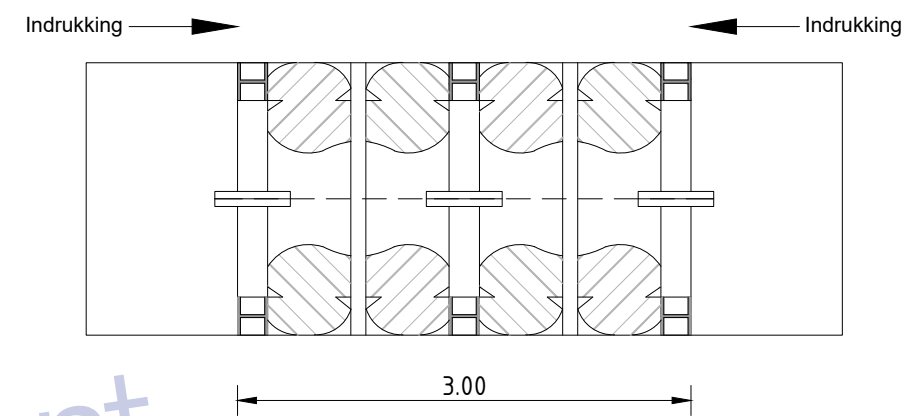


Stootbalk met drijver in schotbalksponning - Doorsnede

 mobilis TBI infra TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging						Hogeschool Windesheim 	
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen						VOE: BT.AFST-CT.V17	
Deelvraag 1						Aansluitend document: Bijlage 3	
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging						Paragraaf Rapport: 5.2.2	
Stootbalk op drijver							
getekend	T. Vlijm	datum	26-03-2019	schaal: 1:50	in 9 bladen, bladnr. 7		
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	26-03-2019	formaat: A3	projectnummer:		
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	26-03-2019	tekeningnummer: 06 S0 Stootbalk drijvend			
status	Definitief	versie	A				

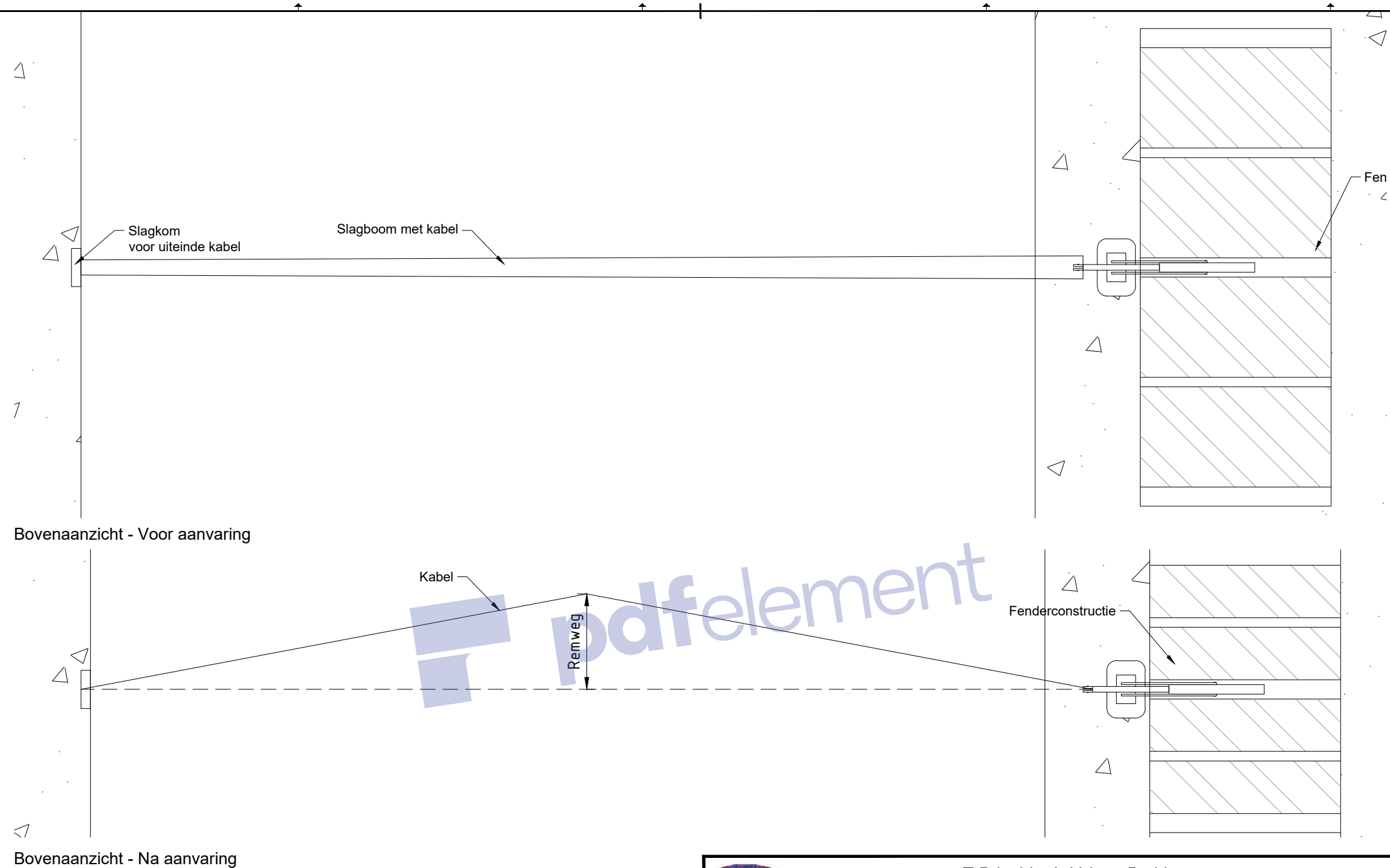


Dwarsdoorsnede - Voor aanvaring



Dwarsdoorsnede - Na aanvaring

 mobilis TBI infra				TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging		Hogeschool Windesheim 	
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen						VOE: BT.AFST-CT.V17	
Deelvraag 1						Aansluitend document: Bijlage 3	
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging						Paragraaf Rapport:	
Fender constructie - blokken (Dwarsdoorsnede)						5.2.2	
getekend	T. Vlijm	datum	28-03-2019	schaal: 1:50	in 9 bladen, bladnr. 9		
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	29-03-2019	formaat: A3	projectnummer:		
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	29-03-2019	tekeningnummer: 07 SO Fender (DRSN)			
status	Definitief	versie	A				



 TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging					Hogeschool Windesheim 	
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen					VOE: BT.AFST-CT.V17	
Deelvraag 1					Aansluitend document: Bijlage 3 Paragraaf Rapport: 5.2.2	
Schetsontwerp Varianten Aanvaarbeveiliging						
Fender constructie (bovenaanzicht)						
getekend	T. Vlijm	datum	28-03-2019	schaal: 1:50	in 9 bladen, bladnr. 8	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	29-03-2019	formaat: A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	29-03-2019	tekeningnummer: 07 SO Fender (BAZ)		
status	Definitief	versie	A			

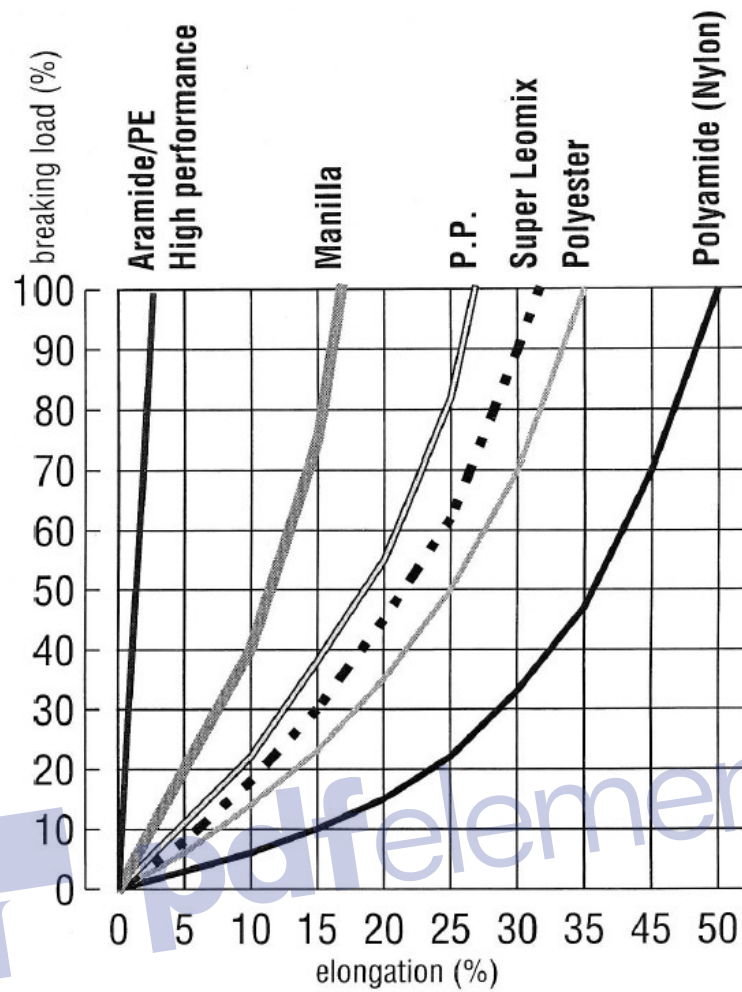
Bijlage 4 Data Van der Lee

CONVERSIONTABLE BREAKINGLOADS

(1 daN = 1.0197 kgf) - According to British Standards Specification and NEN-EN.

Circ. inches	Rope Ø mm	Super- leomix daN	Polyamide 6/6.6. daN	Polyester daN	Polyetheen daN	Polypropeen daN	Manilla daN	Polypropylene high strength daN
—	4	—	314	290	196	235	—	—
—	6	735	735	554	392	539	314	785
—	8	1.320	1.320	1.250	686	941	470	1.397
—	10	2.040	2.030	1.950	1.070	1.400	622	2.100
—	12	2.940	2.940	2.780	1.510	1.990	931	3.000
—	14	4.020	4.020	3.900	2.050	2.740	1.250	4.100
—	16	5.190	5.200	4.970	2.750	3.430	1.740	5.100
—	18	6.500	6.560	6.220	3.400	4.360	2.080	6.600
—	20	8.100	8.100	7.780	4.200	5.260	2.780	7.895
—	22	9.800	9.800	9.330	5.000	6.370	3.330	9.295
3	24	11.760	11.800	11.200	6.000	7.450	3.980	10.995
3 1/2	28	15.500	15.500	14.150	7.900	9.900	5.220	14.600
4	32	19.600	19.600	19.240	10.200	12.500	6.720	18.400
4 1/2	36	24.310	24.400	23.650	12.800	15.800	8.470	23.205
5	40	29.410	29.400	29.280	15.300	19.000	10.190	28.200
5 1/2	44	35.290	35.100	34.800	18.500	22.900	12.450	33.400
6	48	41.170	41.200	47.640	22.000	26.700	—	39.110
6 1/2	52	48.030	47.900	55.580	25.700	30.900	—	45.410
7	56	54.900	54.900	64.410	29.600	35.300	—	51.920
7 1/2	60	62.740	62.600	70.880	33.600	40.400	—	59.520
8	64	70.600	70.600	79.110	37.900	45.180	—	67.320
9	72	88.200	88.200	97.540	47.600	57.400	—	84.225
10	80	108.000	108.000	119.510	—	70.600	—	103.020
11	88	153.000	128.000	143.430	—	84.700	—	124.830
12	96	182.000	151.000	170.000	—	100.000	—	146.850
13	104	212.000	178.000	—	—	115.000	—	—
14	112	245.000	206.000	229.800	—	135.000	—	—
15	120	281.000	235.000	262.700	—	152.000	—	—
16	128	318.000	267.000	297.250	—	172.000	—	—
17	136	358.500	300.000	—	—	193.000	—	—
18	144	399.000	335.000	375.680	—	215.000	—	—
19	152	446.500	373.000	—	—	240.000	—	—
20	160	495.000	412.000	464.800	—	261.000	—	—
21	168	546.000	453.000	—	—	294.000	—	—

BREAKING LOAD/ELONGATION DIAGRAM

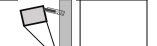
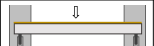
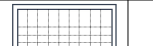
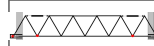


Bijlage 5 Trade off matrix



Trade-off Matrix

Object: Sluis
Hoofddoeldeel: Aanvaarbeveiliging
Beoordelaar:
Bedrijf / organisatie:
Versie: 1
Datum: 29-4-2019

Varianten:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:		Weging:
Omschrijving:	Variant 1		Variant 2		Variant 3		Variant 4		Variant 5		Variant 6		Variant 7		Variant 8		Variant 9		Variant 10		Variant 11		Variant 12			
Visualisatie																										
	Voorzijde		Deurzijde		Bovenzijde		Voorzijde		Voorzijde		Voorzijde		Bovenzijde		Bovenzijde		Voorzijde		Bovenzijde		Voorzijde		Voorzijde/Deurzijde			
Niveau verstelbaar (t.b.v. aanvaring):	Nee, de balk bevindt zich op een vast niveau	1	Nee, het portaal bevindt zich op een vast niveau	1	Nee, de stootbalk bevindt zich op een vast niveau	1	De slagboom en kabel bevinden zich normaliter op een vast niveau, kan wel worden gerealiseerd	3	Nee, de koker en kabel bevinden zich op een vast niveau	1	Ja, op elke niveau kan aanvaring worden geabsorbeerd	5	Nee, de stootbalk bevindt zich op een vast niveau	1	Nee, de stootbalk bevindt zich op een vast niveau	1	De slagboom en kabel bevinden zich normaliter op een vast niveau, kan wel worden gerealiseerd	3	Nee, het vakwerk bevindt zich op een vast niveau	1	De slagboom en kabel bevinden zich normaliter op een vast niveau, kan wel worden gerealiseerd, maar heeft grote invloed op de rek.	2	Ja de balk beweegt mee met het waterniveau	5		
Vrijmaken doorvaart:	Nee, geen mogelijkheid	1	Nee, geen mogelijkheid	1	Nee, geen mogelijkheid	1	Ja, de slagboom met kabel kan worden opengeklapt	5	Alleen mogelijk met in combinatie met een achterliggende hefdeur	2	Ja, het met de het heffen van deur mee. Een eigen hefforen dient hiervoor te worden gerealiseerd	3	Nee, geen mogelijkheid	1	Nee, geen mogelijkheid	1	Ja, de slagboom met kabel kan worden opengeklapt	5	Nee, geen mogelijkheid	1	Ja, slagboom kan de kabel open zetten	5	Doormiddel van WTB-installatie of doormiddel van leps aan hefdeur	4		
Scheepvaartvriendelijke constructie:	Bij aanvaring krijgt de scheepshuid een flinke klap, er is minimale demping	1	Het schip wordt grotendeel afgeremd waardoor de schade aan de scheepshuid meevalt	3	De scheepshuid krijgt een klap te verduren maar de demping beperkt de schade	3	Het schip wordt geleidelijk afgeremd waardoor erminimale schade aan de scheepshuid is	5	Het schip wordt geleidelijk afgeremd waardoor erminimale schade aan de scheepshuid is	5	Het schip wordt geleidelijk afgeremd waardoor de schade aan de scheepshuid meevalt en de kracht	4	De scheepshuid krijgt een klap te verduren maar de demping beperkt de schade	3	De scheepshuid krijgt een klap te verduren maar de demping beperkt de schade	3	Het schip wordt grotendeel afgeremd waardoor de schade aan de scheepshuid is	4	De scheepshuid krijgt een klap te verduren maar de beweging beperkt de schade	3	Het schip wordt geleidelijk afgeremd waardoor erminimale schade aan de scheepshuid is	5	Bij aanvaring krijgt de scheepshuid een flinke klap, er is minimale demping	1		
Methode:	Doormiddel van elastisch- of plastische vervorming van het profiel en krachtoverdracht naar de wanden van de sluis	3	Doormiddel van het indrukken van de schokdempers en het naar bovenbrengen van de balk	2	Doormiddel van het indrukken van de schokdempers wordt de aanvaarenergie grotendeels vernietigd	5	Doormiddel van een kabel welke is bevestigd aan remcilinder wordt de aanvaarenergie grotendeels vernietigd	5	Doormiddel van kabelrek, echter zijn er onzekerheden bij het rekken van kabels zoals: wat is de exacte rek bij breuk, wat is de exacte spanning bij breuk	3	Doormiddel van een kabel welke is bevestigd aan remcilinder wordt de aanvaarenergie grotendeels vernietigd	5	Doormiddel van het verschroten van de composiet elementen wordt de aanvaarenergie grotendeels vernietigd	3	Doormiddel van het indrukken (plooiën) van de stalen buis wordt de aanvaarenergie grotendeels vernietigd	3	Doormiddel van rubber blokken welke tegengesteld worden ingedrukt wordt de aanvaarenergie grotendeels vernietigd, werkt alleen bij centrische indrukking	3	Doormiddel van verplaatsing vakwerk in combinatie met kabelrek, van veel factoren afhankelijk	1	Doormiddel van kabelrek, echter zijn er onzekerheden bij het rekken van kabels zoals: wat is de exacte rek bij breuk, wat is de exacte spanning bij breuk	3	Doormiddel van elastisch- of plastische vervorming van het profiel en krachtoverdracht naar de wanden van de sluis	3		
Berekenmethode:	Eenvoudig	5	Moelijkheidsgraad hoe de kracht aangrijpt in de demper en de remming van de balk.	3	Matig. Moelijkheidsgraad hoe de kracht aangrijpt in de demper	4	WTB berekeningsmethode, maar komt neer op kracht x afstand	4	Eenvoudig	5	WTB berekeningsmethode, meerdere cilinders en kabels, lastig te bepalen wat het exacte gedrag is bij een aanvaring	2	Berekeningen composiet, gespecialiseerd	1	Berekeningen energieopname door plooiën buis, gespecialiseerd	1	WTB berekeningsmethode	2	Rek van cilinders kan eenvoudig worden bepaald net als sterkte van het vakwerk	4	Eenvoudig	5	Eenvoudig, kleine complexiteit betreffende drijvend	4		
Kennis beschikbaar binnen civiele sector (door aanemer zelf):	Veel. Afracht krachten en elastische/plastisch vervorming van staal profielen	5	Niet bekend.	1	Enkel de demper niet	4	Grote mate van WTB installaties, maar vaker toegepast in praktijk, zie empel	3	Gering, een gespecialiseerd onderwerp	3	Zeer grote mate van WTB installaties	1	Gering	3	Gering (plooi staal). Deels, bij RIMOB, obstakelbeveiliging voor voertuigen	3	Grote mate van WTB installaties	2	Uitvoering vakwerk wel. Rek kabel en afracht krachten niet/gering	3	Gering, een gespecialiseerd onderwerp	3	Afracht krachten en elastische/plastisch vervorming van staal profielen wel. Kennis toepassen driver en ophaalinstallatie niet	4		
Bewezen techniek:	Toepassing zie sluis III, nog geen berichtgeving over aanvaring na ingebruikname.	3	Ja in Duitsland, zie bouwjaar bij de Sluis Ulfen (Duitsland)	5	Ja, aanvaring in de praktijk hebben bewezen dat de techniek werkt, zie Maasdracht.	5	Toepassing zie sluis Empel. Nog geen berichtgeving over aanvaring na ingebruikname.	3	Slecht, bewezen dat deze geringe (recreatievaart) aanvaarenergie kan opnemen, zie Sluis Eefde.	1	Ja, zie jaar in gebruik name van bijv. de Prins Bernhardsluis	5	Nee, nog nooit toegepast	1	Deels, bij RIMOB, obstakelbeveiliging voor voertuigen	3	Nee, nog nooit toegepast	1	Nee, nog nooit toegepast	1	Slecht, bewezen dat deze geringe (recreatievaart) aanvaarenergie kan opnemen, zie Sluis Eefde.	1	Nee, nog nooit toegepast	1		
Extra voorzieningen in constructie:	Bevindt zich aan weerszijde in een spanning/sparing in de kolkwand, de wand dient voldoende sterk te zijn om de kracht aan te kunnen bij aanvaring	2	Bevindt zich boven de sluisdeur in een constructieve scheidingwand. Deze dient daarop te worden geconstrueerd	1	Er dient een sparingen te worden gemaakt boven in de kolkwand ter behoeve van de dempcilinders.	3	De remcilinder bevindt zich in een betonnen kelder achter de constructie. De slaglom aan de andere zijde dient te worden ingebouwd in de kolkwand	2	Constructie op de kolkwanden maken waarvan de kabel kan worden bevestigd	4	Enkele toe te passen bij hefdeuren. Er dient een gehele constructie worden ontworpen om het raamwerk met vang mee te laten liften.	1	Er dient een sparingen te worden gemaakt boven in de kolkwand ter behoeve van de inpassing van de composiet elementen.	3	Er dient een sparingen te worden gemaakt boven in de kolkwand ter behoeve van de inpassing van de stalen buizen.	3	De fender bevindt zich in een spanning/sparing in de kolkwand	2	Constructie op de kolkwanden maken waarvan het vakwerk wordt bevestigd en kan scharnieren	3	Constructie op de kolkwanden maken waarvan de kabel kan worden bevestigd ev. ict met voorspanning	4	Bevindt zich aan weerszijde in een spanning/sparing in de kolkwand, de wand dient over de gehele lengte voldoende sterk te zijn om de kracht aan te kunnen bij aanvaring	2		
Remweg	Het profiel kan zodanig worden ontworpen dat er een minimale benodigde ruimte tot aan deur is.	5	Gering. Afgeremd door het indrukken van de schokdempers en het naar bovenbrengen van de balk	5	Hoe langer je de remweg wil hoe langer de dempers en sparing. Sluis Delden bewijst dat het een goede optie is met kleine remweg	4	Voor dat de kabel de remcilinder aanspreekt is er al een geringe afstand afgelegd. Bij een schip met een puntige boeg is er een relatief lange remweg benodigd.	3	Wanneer aangevaren rekt de kabel eerst en breekt vervolgens, lange remweg benodigd voor afremming.	2	Enkele meters voor de deur.	3	Hoe langer je de remweg wil hoe langer de composiet elementen en sparing. Afhankelijk van de benodigde lengte van de buizen.	4	Hoe langer je de remweg wil hoe langer de demper aanspreekt is er al een geringe afstand afgelegd. Bij een schip met een puntige boeg is er een relatief lange remweg benodigd.	3	Voor dat de kabel de fender aanspreekt is er al een geringe afstand afgelegd. Bij een schip met een puntige boeg is er een relatief lange remweg benodigd.	3	Afhankelijk van de constructie	3	Zeer lange remweg benodigd voor afremming.	2	Het profiel kan zodanig worden bevestigd dat er een minimale benodigde ruimte tot aan deur is.	5		
Maakbaarheid/realiseerbaarheid:	Vrij eenvoudig te realiseren maar de wanden moet ook geschikt worden gemaakt voor de op te vangen krachten	4	Toepassing op hoogte in de kolk en veel aan te brengen voorzieningen in de wand boven de deur.	1	Sparing in kolkwanden voor inpassing. Cilinders hoeven enkel te worden geïnstaleerd.	5	Het realiseren van een ruimte achter je kolkwanden voor de remcilinder en het installeren van de remcilinder	3	Het toepassen van een constructie op je kolkwanden (bijv. bolder) waarvan je kabel wordt bevestigd	5	Zeet gecompliceerd vanwege de bouw van een hefconstructie	1	Sparing in kolkwanden voor inpassing. Segementeren van de elementen door middel van platen	3	Sparing in kolkwanden voor inpassing. Segementeren van de elementen door middel van platen	3	Het realiseren van een ruimte achter je kolkwanden voor de remcilinder en het installeren van de fender	3	Het maken van een vakwerk met scharnierpunten en realiseren bevestigingspunten kolkwanden	2	Het toepassen van een constructie op je kolkwanden (bijv. bolder) waarvan je kabel wordt bevestigd	5	De wanden moet geschikt worden gemaakt voor de op te vangen krachten. De driver moet ingepast worden niet als de ophaalinstallatie	2		
Invloed op (wand-)constructie sluis:	Aanvaarbalk heeft directe krachtafdracht op de constructie en dient speciaal te worden ontworpen om de balk te kunnen toepassen	1	Krachten grotendeels geabsorbeerd door dempers. Overige krachten grijpen aan op de wand boven de deur.	3	Cilinders drukken op vaste plek in de kolkmuur, deze kan hier goed op worden ontworpen	5	Geringe krachtoverdracht op de kolkwanden	5	Zeet groot, krachtsafdracht vrijwel volledig op de kolkwanden	1	Geringe krachtoverdracht op de constructie, maar de gehele constructie kan hierop worden ontworpen, want de hefftoeren zijn nodig voor het net	4	Niet bekend, gelijk aan cilinder?	3	Niet bekend, gelijk aan cilinder?	3	Geringe krachtoverdracht op de kolkwanden	5	Kleine remweg, grootte krachtafdracht op de kolkwanden	3	Zeet groot, krachtsafdracht vrijwel volledig op de kolkwanden	1	Aanvaarbalk heeft directe krachtafdracht op de constructie en dient speciaal te worden ontworpen om de balk te kunnen toepassen	1		
Beschikbaarheid bij werking:	Geen bewegende onderdelen. Ligt vast op zijn plek	5	Demperstang dient met regelmaat (1 of 2x per jaar) gesmeerd te zijn. Wanneer dit is gebeurt altijd beschikbaar	4	Demperstang dient eens per jaar gesmeerd te zijn. Wanneer dit is gebeurt altijd beschikbaar	4	De kabelkop moet goed in de slagkom vallen. Kans bestaat dat deze niet naar beneden kan worden gedraaid.	3	Geen bewegende onderdelen. Ligt vast op zijn plek kans dat schip kabel onder de boeg drukt	3	Kans bestaat dat deze niet naar beneden kan worden geheven	3	Geen bewegende onderdelen. Ligt vast op zijn plek	5	Geen bewegende onderdelen. Ligt vast op zijn plek	5	De kabelkop moet goed in de slagkom vallen. Kans bestaat dat deze niet naar beneden kan worden gedraaid.	3	Ligt vast op zijn plek	5	De kabelkop moet goed in de slagkom vallen. Kans bestaat dat deze niet naar beneden kan worden gedraaid.	4	Beweegbare delen ophaalinstallatie, kans op falen.	2		
Beschikbaarheid na aanvaring:	Wanneer aangevaren risico op beklemming tussen spanning. Kans dat de spanning vervormd/ vergruist. Na verwijdering balk, makkelijk te vervangen.	2	Dempers hoeven niet te worden vervangen. Na aanvaring de dempers controleren en in oorspronkelijke positie terugbrengen, dit moet wel op hoogte gebeuren	3	Dempers hoeven niet te worden vervangen. Na aanvaring de dempers controleren en in oorspronkelijke positie terugbrengen	5	Na aanvaring kan de remcilinder handmatig weer in werking worden gesteld	5	Na aanvaren gemakkelijk te vervangen indien reserve	3	Na aanvaring kan de remcilinder handmatig weer in werking worden gesteld. Het nadeel is dat de cilinders zich in het frame bevinden, maakt het gecompliceerd	4	Elementen zijn snel te vervangen door nieuw element te plaatsen. De verschroting van het composiet kan wel vast komen te zitten in de stootbalk.	4	Elementen zijn snel te vervangen door nieuw element te plaatsen. De buizen kunnen door het indrukken wel klem komen te zitten in de stootbalk	4	Na aanvaring moet de ingedrukte rubberblokken weer worden teruggebracht.	4	Na aanvaren dient een geheel nieuwe vakwerk te worden geplaatst omdat deze waarschijnlijk deels is vervormd. Het toepassen van nieuwe kabels	2	Na aanvaren gemakkelijk te vervangen indien reserve	4	Wanneer aangevaren risico op beklemming tussen spanning. Kans dat de spanning vervormd/ vergruist. Ophaalmechanisme en driver dient vervangen te worden	1		
Onderhoudbaarheid:	Stalen profiel, geen onderhoud, geen mechanische/bewegende onderdelen	5	Regelmatig inspectie dempers op hoogte	2	Regelmatig inspectie dempers, makkelijk bij te komen	3	Regelmatig inspectie van remcilinder. Systeem bevindt zich in een afgesloten ruimte welke is ontworpen zodat er inspecties kunnen plaats vinden	3	Koker hoeft enkel worden voorzien van verf. Geen mechanische/bewegende onderdelen	5	Regelmatig inspectie remcilinders. Remcilinders bevinden zich in het frame. Moelijk te bereiken.	2	Geen inspecties benodigd, composiet elementen door middel van platen	5	Geen inspecties benodigd, staal (nvs) heeft een lange levensduur en geen onderhoud benodigd	5	Rubber blokken gaan naar enige tijd doorhangen. Dit is op te lossen met geleiding enkel moet deze regelmatig worden gesmeerd	2	Onderhoud van de bewegende onderdelen in aansluiting op kolkwand en in vakwerk.	2	Enkel hefclinder smeren	4	Onderhoud ophaalmechanisme, bewegende onderdelen	2		
Voordelen:	Makkelijk inpasbaar		Grote aanvaarenergie opvangen		Goed inpasbaar, Demper aan te passen op de op te nemen kracht		Cilinder kan hoge krachten opnemen. Bewegbaar		Makkelijk uitvoerbaar en snel te vervangen		Op verschillende niveaus aan te varen.		Onderhoudsvrij, kleine inpassingsruimte		Onderhoudsvrij, kleine inpassingsruimte		Vrije doorvaarthoogte		Kleine inpassingsruimte voor de kolkwanden, efficiënte methode voor krachtabsorberen		Vrije doorvaarthoogte, kleine inpassingsruimte nodig, lichte constructie		Aanvaarbalk bij ieder waterpeil			
Nadelen:	Grote krachtafdracht op constructie waarop deze dient te worden ontworpen, niet beweegbaar		Alleen toepasbaar bij sluisen met een hoog verval		Afhankelijk van de werking van de demper, niet beweegbaar, starr constructie		Grote mate van inpassing, veel mechanische onderdelen		Kan zeer beperkte aanvaarenergie op nemen		Moelijk inpasbaar, een gehele constructie moet worden ontworpen.		Onbekende berekenmethode en onbewezen techniek		Onbewezen techniek op grote aanvaarenergie		Complex constructie, moet centrisch worden aangevaren, groot risico op kappen van hele constructie		Onbewezen techniek voor energievernietigen van een binnenvaartschip met grote kracht		Constructie met veel risico's op falen en onbewezen dat het werkt.					
Weging	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score	Score	Tot. Score		
Toepasbaarheid 10%	3	2%	5	3%	5	3%	13	9%	8	5%	12	8%	5	3%	5	3%	12	8%	5	3%	12	8%	10	7%		
Energievernietiger 30%	16	24%	11	17%	18	27%	15	23%	12	18%	13	20%	6	9%	10	12%	9	14%	9	14%	12	18%	12	18%		
Inpassing systeem 20%	12	12%	10	10%	17	17%	13	13%	12	12%	9	9%	13	13%	13	13%	13	13%	11	11%	12	12%	10	10%		
Beschikbaarheid 40%	12	32%	9	24%	12	32%	11	29%	11	29%	9	24%	14	37%	14	37%	9	24%	9	24%	12	32%	5	13%		
Totaal		70%		54%		79%		74%		65%		61%		63%		69%		57%		52%		70%		48%		
Geschied voor Nederlandse binnenvaart:	Goed toepasbaar, mits een verval van >1m	Ja	Alleen rendabel bij een hoog verval (>20m)	Nee	Goed toepasbaar, mits een verval van >1m	Ja	Goed toepasbaar	Ja	Onbekend of het geschikt is voor binnenvaart, de krachtenwerking is onbekend. In theorie moet het kunnen werken, maar zou eerst moeten worden onderzocht.	Ja	In toepasbaar, enkel is er een grootte constructie nodig voor het heffstelsel. Is dus niet rendabel bij kleinere sluiscomplexen.	Ja	Goed toepasbaar, mits een verval van >1m. Composiet moet nader worden onderzocht voor de energieopname, dus onbekend of het de energie kan opnemen.	Ja	Goed toepasbaar, mits een verval van >1m	Ja	In wel toepasbaar bij een verval van >1m. Constructie moet nader worden onderzocht en geoptimaliseerd voordat het kan worden toegepast.	Ja	Onbekend of het geschikt is voor binnenvaart, de krachtenwerking is onbekend. In theorie moet het kunnen werken, maar zou eerst moeten worden onderzocht.		Onbekend of het geschikt is voor binnenvaart, de krachtenwerking is onbekend. In theorie moet het kunnen werken, maar zou eerst moeten worden onderzocht.		Onbekend of het geschikt is voor binnenvaart, de krachtenwerking is onbekend. In theorie moet het kunnen werken, maar zou eerst moeten worden onderzocht.			

Bijlage 6 Factoren belasting

6.1 Scheepvaart

Binnenvaartschepen worden onderverdeeld in klassen, CEMT-klassen. Per klasse zijn er maximale afmetingen waar een schip aan moet voldoen. Voor het bepalen van de belasting moeten gegevens bekend zijn van de binnenvaartschepen in Nederland. Gegevens die van belang zijn: breedte, lengte, massa, gemiddelde snelheid en motorvermogen. Dit onderzoek richt zich op vaarwegen tot en met klasse Va, er worden vijf scheepsklassen aangehouden, te weten:

- Spits CEMT-klasse I/M1;
- Kempenaar CEMT-klasse II/M2;
- Dortmund-Eemskanaal CEMT-klasse III/M3-M5;
- Rijn-Hernekanaal CEMT-klasse IV/M6-M7;
- Groot Rijnschip CEMT-klasse Va/M7-M8.

6.1.1 Geometrie

In *Bijlage 7 Gegevens Scheepvaart* worden de gegevens van de binnenvaartschepen in Nederland weergegeven. Er zijn uitzonderingen op de onderstaande lengtes. Er zijn schepen in omloop welke zijn verlengd, vooral in de CEMT-III en CEMT-IV-klassen. Sommige scheepseigenaren kiezen ervoor hun schip te verlengen zodat ze meer lading kunnen vervoeren.^a In de onderstaande delen wordt de invloed benoemd van het onderdeel op de aanvaarbeveiliging.

Lengte

De lengte van een schip heeft natuurlijk invloed op de maximale belading, dit wordt onder massa verder uitgewerkt. De lengte van het schip bepaald de lengte in de kolk waarover een schip mogelijk kan versnellen door eigen motorvermogen.

Breedte

Net als de lengte van een schip heeft de breedte ook invloed op de maximale belading. Daarnaast is de breedte van het schip is medebepalend voor de maximaal te behalen snelheid in de kolk, de grenssnelheid *Vergelijking 10-2 Bepaling Grenssnelheid schip bij invaren sluiskolk*. Als het schip breedte gaat benaderen wordt de waterbreedte naast het schip kleiner waardoor de stroming van het retourwater belemmerd wordt en de vaarsnelheid afneemt^b.

Diepteligging

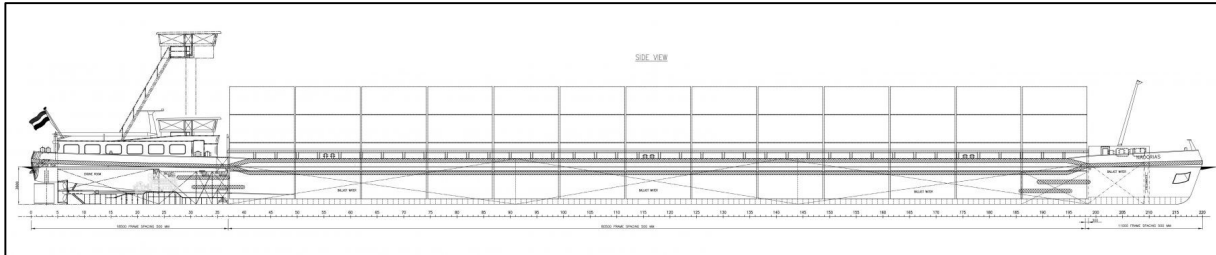
De diepteligging is afhankelijk van scheepsklasse en de beladingsgraad. De diepteligging van het schip is medebepalend voor de grenssnelheid. Ongeladen schepen hebben een grote kans om met de onderzijde van de boeg tegen de aanvaarbeveiliging aan te varen. Bij geladen schepen welke dieper liggen in het water zal de bovenzijde van de boeg de aanvaarbeveiliging raken. Bij volgeladen schepen is er een risico op onderdoor schieten, bij lege schepen is er een risico dat een schip over de aanvaarbeveiliging heen vaart. In *Bijlage 7 Gegevens Scheepvaart* worden de diepgang van volgeladen schepen en ledige schepen per scheepsklasse weergegeven.

^a (Classificatie en kenmerken van de Europese vloot en de Actieve vloot in Nederland , 2002)

^b (Richtlijn Ontwerp Kunstwerken ROK-1.4, p. 52)

Boeghoogte

Het voorste gedeelte van een schip wordt ook wel boeg of voorsteven genoemd. Dit is het gedeelte waarmee het schip de aanvaarbeveiliging raakt. De boeghoogtes verschillen per scheepvaartklasse, *Bijlage 7 Gegevens Scheepvaart* geeft de gemiddelde boeghoogte weer per scheepsklasse.



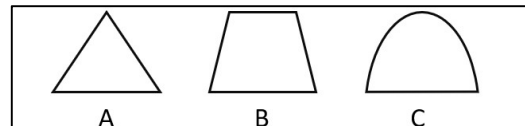
Figuur 6.1 Tekening CEMT-klasse Va containerschip ter indicatie boeghoogte

Boegvorm

Bij het beschouwen van de verschillende boegvormen van schepen is het van belang dat er zowel horizontaal, *Figuur 6.3*, als verticaal, *Figuur 6.4*, verschillen zijn op te merken.

Horizontaal (bovenaanzicht):

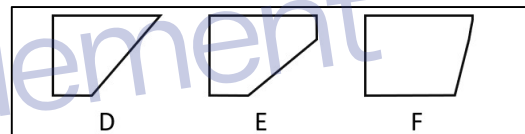
- A. Spits
- B. Vlak
- C. Boog



Figuur 6.3 Boegvorm horizontaal

Verticaal (zijaanzicht):

- D. Schuin
- E. Recht aflopend
- F. Recht



Figuur 6.4 Boegvorm verticaal

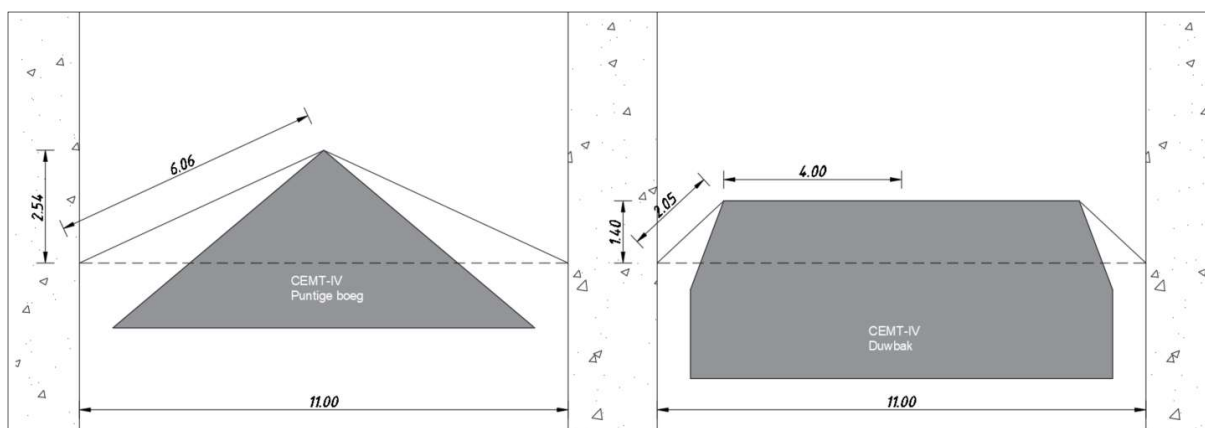
Er zijn verschillende combinaties in omloop waarvan er enkele combinaties veelvuldig terugkomen. De meeste voorkomende boegvormen zijn een combinatie van: A-D & B-E.



Figuur 6.5 Spitse boeg schuin aflopend (gebruikelijk), Vlakke boeg recht aflopend (duwvaart) en Boegboeg recht (komt zelden nog voor)

(Case) Kabel

Kijkend naar een kabelconstructie waarbij er een kabel is gespannen over de volledige kolkbreedte. Bij aanvaring van een duwvaartschip met een vlakke voorzijde is de remweg anders. Beide situaties *Figuur 6.6* gaan uit van een gelijke rek en een gelijke aanvaarenergie. Hierin is te zien dat de remweg bij de spitse boeg 2,54 meter is en bij de vlakke boeg 1,40 meter is. De aanvaarkracht is groter bij de vlakke boeg omdat de remweg korter is.



Figuur 6.6 Invloed boegbreedte op vangkabel

6.1.2 Massa

Per CEMT-klasse zijn de maximale laadvermogens vastgesteld. De maximale massa van een binnenvaartschip is het maximaal laadvermogen opgeteld met het gewicht van een ledig schip. De diepteligging van een schip is onder andere afhankelijk van de massa. Per CEMT-klasse is er een minimale en maximale diepteligging af te leiden. In *Bijlage 7* wordt de massa voor ledig en geladen binnenvaartschepen per CEMT-klasse weergegeven. Ledig gewicht wordt conform de ROK 1.4 op 15% van de maximale lading van het schip berekend. De massa bepaald mede met de snelheid de aanvaarenergie.

6.1.3 Snelheid

Gemiddelde snelheid

De gemiddelde snelheid waarmee een binnenvaartschip in de kolk vaart is niet eenduidig vastgelegd in de richtlijnen. De Schematiseringshandleiding strekte en stabiliteit benoemd wel enkele gemiddelde snelheden voor CEMT-klasse IV tot en met Vb. Hieruit wordt geconcludeerd dat de waardes in *Tabel 6.1* een goede benadering zijn van de gemiddelde snelheid in de kolk:

Tabel 6.1 Gemiddelde snelheden beladen en ledige schepen conform het RVW-2017

Scheepsklassen			
		Gem. snelheid beladen	Gem. snelheid ledig
		v_{gem} [m/s]	v_{gem} [m/s]
CEMT-I	M1	1,00	1,50
CEMT-II	M2	1,00	1,50
CEMT-III	M3	1,00	1,50
	M4	1,00	1,50
	M5	1,00	1,50
CEMT-IV	M6	1,00	1,50
	M7	1,00	1,50
CEMT-Va	M8	0,95	1,50
	M9	0,95	1,50

Grenssnelheid

Een alternatief voor de snelheid is de grenssnelheid. Grenssnelheid is de snelheid die een schip maximaal kan varen in een waterloop, hierbij wordt de snelheid gelimiteerd door het doorstromend oppervlak en de weerstand van het water in de kolk. De grenssnelheid wordt per scheepsklassen aan de hand van de afmetingen van het schip en de kolk bepaald, de gemiddelde snelheid is op basis van waarnemingen uit de praktijk. De Grenssnelheid wordt bepaald door de verhouding tussen het nat oppervlak van het sluishoofd en het oppervlak, onder de waterlijn, van het schip. De grenssnelheid geeft de maximale snelheid aan waarmee een schip een kolk binnen kan varen, de kans dat dit in werkelijkheid voorkomt is minimaal. Een schip dient maximaal vermogen te geven om dit te bewerkstelligen, alleen in extreem uitzonderlijke situaties zou dit kunnen voorkomen. Wanneer het oppervlak van het schip het oppervlak van de kolk benaderd, is de grenssnelheid klein. Bij grotere klassen is de grenssnelheid hierom meestal kleiner dan bij lagere klassen.

In de ROK 1.4 staat benoemd dat nabij sluizen en in voorhaven een maximale snelheid van 3,00 m/s mag worden aangenomen.

Motorvermogen

De vaarsnelheid van een schip is grotendeels afhankelijk van het vermogen van de schroefas. Bij invaren van een sluiskolk wordt er door de schipper bepaald met welk vermogen hij dat doet. Een schipper welke binnenvaart op hoog vermogen heeft een hoge vaarsnelheid en vice-versa. Een schip met een hoog vermogen kan over een geringe afstand meer versnellen dan een schip met minder vermogen. Een schip met een hoog vermogen kan daardoor veel energie opbouwen over een geringe afstand. Een realistische inschatting van het gebruik van vermogen in de sluis ligt rond de 10%, dit houdt in dat een schip bij het invaren ongeveer 10% van zijn vermogen gebruikt.

6.1.4 Scheepsaanbod

Het scheepsaanbod is afhankelijk van de maximale hoeveelheid passages welke een schutsluis kan verwerken en de intensiteit van het scheepvaartverkeer in de vaarweg waar de sluis zich bevindt. Een sluis heeft een maximum aan het aantal schepen dat de sluis kan passeren in een tijdsbestek, per nivellering is een bepaalde tijd benodigd; de nivelleertijd. Dit is de tijd waarin een schip de sluis invaart, de deur sluiten, de waterstand wordt verlaagd/verhoogt, de deur worden geopend en het schip uitvaart. Wanneer het volgende schip klaarligt om direct, na uitvaren van het voorgaande schip, in te varen wordt het maximumaantal scheepspassages pas behaald. In werkelijkheid komt dit niet voor, er is onvoldoende scheepsaanbod om dit te bewerkstelligen.

Huidig scheepsaanbod

Bij Rijkswaterstaat zijn het aantal (binnenvaart) scheepspassages opgevraagd voor alle sluizen in het beheer van Rijkswaterstaat. In *Tabel 6.2* zijn de scheepvaartpassages in 2017 van 65 sluiscomplexen in Nederland weergegeven. Bij sluiscomplexen met meerdere kolken is het totaal aantal passages verdeeld over de beschikbare kolken. Er is geen rekening gehouden met meerdere schepen per nivellering, *Tabel 6.2* geeft enkel het aantal passages weer.

Tabel 6.2 Aantal Scheepspassages van binnenvaartschepen door RWS-sluizen in Nederland in het jaar 2017

Sluizen ²	Provincie	Vaarweg benedenhoofd-zijde	Vaarweg bovenhoofd-zijde	Aantal Scheepspassages 2017 ¹	Scheeps-klasse
Panheel (oude sluis)	Limburg	Wessem-Nederweert	Wessem-Nederweert	4.284	II
Sluis 15 Nederweert	Limburg	Wessem-Nederweert	Noordervaart	2.318	II
Panheel (nieuwe sluis)	Limburg	Wessem-Nederweert	Wessem-Nederweert	3.148	II
Bosscheveld	Limburg	Zuid-Willemsvaart	Maas	2.546	II
Sluis Schijndel	Noord-Brabant	Zuid-Willemsvaart	Zuid-Willemsvaart	8.366	II
Sluis 13 Someren	Noord-Brabant	Zuid-Willemsvaart	Zuid-Willemsvaart	2.818	II
Sluis Helmond	Noord-Brabant	Zuid-Willemsvaart	Zuid-Willemsvaart	4.153	II
Sluis I Oosterhout	Noord-Brabant	Wilhelminakanaal	Wilhelminakanaal	4.146	II
Roggebotsluis	Flevoland	Drontermeer	Vossemeer	1.791	IV
Tsjerk hiddessluizen Grote sluis	Friesland	Van Harinxmakanaal	Noordzee	3.342	IV
Nijkerkersluis	Gelderland	Nijkerkernauw	Nuldernauw	2.176	IV
Zeesluis Farmsum Kleine sluis	Groningen	Noordzee	Eemskanaal	2.968	IV
Henriettesluis	Noord-Brabant	Gekanaliseerde Dieze	Maas	3.366	IV
Sluis Empel	Noord-Brabant	Maximakanaal	Maximakanaal	8.465	IV
Sluis Hintham	Noord-Brabant	Maximakanaal	Maximakanaal	8.471	IV
Marksluis Oosterhout	Noord-Brabant	Markkanaal	Wilhelminakanaal	2.902	IV
Krabbersgatsluizen (oude sluis)	Noord-Holland	Markermeer	IJsselmeer	6.050	IV
Sluis Delden	Overijssel	Twente-kanaal	Twente-kanaal	7.311	IV
Zandkreeksluis	Zeeland	Zandkreek	Veerse Meer	1.273	IV
Julianasluis	Zuid-Holland	Hollandsche IJssel	Gouwe	8.673	IV
Lorentzschutsluis	Friesland	IJsselmeer	Noordzee	6.362	Va
Prinses Margrietsluis	Friesland	Pr. Margrietkanaal	IJsselmeer	17.488	Va
Sluis Driel	Gelderland	Neder-Rijn	Neder-Rijn	7.531	Va
Sluis Sint-Andries	Gelderland	Kanaal van St. Andries	Maas	9.215	Va
Sluis Eefde	Gelderland	IJssel	Twente-kanaal	12.005	Va
Zeesluis Farmsum Grote sluis	Groningen	Noordzee	Eemskanaal	8.903	Va
Nieuwe Oostersluis	Groningen	Eemskanaal	Van Starckenborgh-kanaal	13.494	Va
Sluis Gaarkeuken	Groningen	Van Starckenborgh-kanaal	Van Starckenborgh-kanaal	14.075	Va
Belfeld (Westersluis)	Limburg	Maas	Maas	6.142	Va

Sluizen ²	Provincie	Vaarweg benedenhoofd- zijde	Vaarweg bovenhoofd- zijde	Aantal Scheeps- passages 2017 ¹	Scheeps- klasse
Belfeld (Middensluis)	Limburg	Maas	Maas	6.142	Va
Belfeld (Oostersluis)	Limburg	Maas	Maas	6.142	Va
Maasbracht (oostersluis)	Limburg	Julianakanaal	Julianakanaal	6.709	Va
Maasbracht (middensluis)	Limburg	Julianakanaal	Julianakanaal	6.709	Va
Maasbracht (westersluis)	Limburg	Julianakanaal	Julianakanaal	6.709	Va
Sluis Heel (oostersluis)	Limburg	Lateraalkanaal Linne-Buggenum	Maas	8.336	Va
Sluis Heel (westersluis)	Limburg	Lateraalkanaal Linne-Buggenum	Maas	8.336	Va
Born (oostersluis)	Limburg	Julianakanaal	Berghaven	6.093	Va
Born (Middensluis)	Limburg	Julianakanaal	Berghaven	6.093	Va
Born (westersluis)	Limburg	Julianakanaal	Berghaven	6.093	Va
Linne	Limburg	Lateraalkanaal Linne-Buggenum	Maas	3.342	Va
Roermond	Limburg	Maas	Maas	3.537	Va
Prinses Maximasluis (zuidersluis)	Noord-Brabant	Maas	Maas	6.319	Va
Prinses Maximasluis (noordersluis)	Noord-Brabant	Maas	Maas	6.319	Va
Sluis Sambeek (westersluis)	Noord-Brabant	Maas	Maas	7.871	Va
Sluis Sambeek (middensluis)	Noord-Brabant	Maas	Maas	7.871	Va
Sluis Sambeek (oostersluis)	Noord-Brabant	Maas	Maas	7.871	Va
Sluis Grave (nieuwe sluis)	Noord-Brabant	Maas	Maas	9.652	Va
Stevinsluizen	Noord-Holland	IJsselmeer	Waddenzee	3.006	Va
Wilhelminasluis	Noord-Holland	Zaan	Zaan	5.322	Va
Spooldersluis	Overijssel	IJssel	Zwarte Water	4.006	Va
Sluis Amerongen	Utrecht	Neder-Rijn	Neder-Rijn	11.455	Va
Zuidersluis Nieuwegein	Utrecht	Merwedekanaal	Merwedekanaal	1.040	Va
Sluis Vlissingen	Zeeland	Westerschelde	Kanaal door Walcheren	2.223	Va
Sluis Terneuzen (middensluis)	Zeeland	Westerschelde	Kanaal Gent- Terneuzen	18.125	Va
Houtribsluis Oostkolk	Flevoland	IJsselmeer	Markermeer	15.591	Vb
Houtribsluis Westkolk	Flevoland	IJsselmeer	Markermeer	15.591	Vb
Sluis Weurt Oostkolk	Gelderland	Maas-Waalkanaal	Waal	12.338	Vb

Sluizen ²	Provincie	Vaarweg benedenhoofd- zijde	Vaarweg bovenhoofd- zijde	Aantal Scheeps- passages 2017 ¹	Scheeps- klasse
Sluis Weurt Westkolk	Gelderland	Maas-Waalkanaal	Waal	12.329	Vb
Sluis Hagestein	Utrecht	Lek	Lek	7.200	Vb
Prins Bernhardsluis (oostersluis)	Gelderland	Amsterdam- Rijnkanaal	Amsterdam- Rijnkanaal	13.875	VIb
Prins Bernhardsluis (westersluis)	Gelderland	Amsterdam- Rijnkanaal	Amsterdam- Rijnkanaal	13.875	VIb
Volkeraksluis (westersluis)	Noord- Brabant	Volkerak	Hollandschdiep	36.502	VIb
Volkeraksluis (middensluis)	Noord- Brabant	Volkerak	Hollandschdiep	36.502	VIb
Volkeraksluis (oostersluis)	Noord- Brabant	Volkerak	Hollandschdiep	36.502	VIb
Oranjesluizen (zuidersluis)	Noord- Holland	IJ	IJ	10.950	VIb
Oranjesluizen (Prins Willem-Alexander)	Noord- Holland	IJ	IJ	10.950	VIb
Oranjesluizen (noordersluis)	Noord- Holland	IJ	IJ	10.950	VIb
Oranjesluizen (middensluis)	Noord- Holland	IJ	IJ	10.950	VIb
Prinses Irenesluis (oostersluis)	Utrecht	Amsterdam- Rijnkanaal	Amsterdam- Rijnkanaal	17.454	VIb
Prinses Irenesluis (westersluis)	Utrecht	Amsterdam- Rijnkanaal	Amsterdam- Rijnkanaal	17.454	VIb
Sluis Terneuzen (westsluis)	Zeeland	Westerschelde	Kanaal Gent- Terneuzen	18.125	VIb
Sluis Terneuzen (oostsluis)	Zeeland	Westerschelde	Kanaal Gent- Terneuzen	18.125	VIb
Krammersluis (zuidkolk)	Zeeland	Krammer	Oosterschelde	19.596	VIb
Krammersluis (noordkolk)	Zeeland	Krammer	Oosterschelde	19.596	VIb
Sluis Hansweert (oostsluis)	Zeeland	Oosterschelde	Westerschelde	20.199	VIb
Sluis Hansweert (westsluis)	Zeeland	Oosterschelde	Westerschelde	20.199	VIb
Kreekraksluizen (oostersluis)	Zeeland	Schelde	Schelde Rijnkanaal	34.622	VIb
Kreekraksluizen (westersluis)	Zeeland	Schelde	Schelde Rijnkanaal	34.622	VIb

¹Informatie Sluizen, locatie, vaarweg en scheepsklasse afkomstig uit (Vaarwegen en objecten, 2019).

²Aantal scheepspassages opgevraagd bij Rijkswaterstaat.

Toekomstig scheepsaanbod

De verwachting is dat het aantal scheepvaartbewegingen betreffende de binnenvaart licht gaat toenemen. De vraag naar het verbeteren van de milieuprestaties voor vervoerders en het terugdringen van de hoeveelheid voertuigen op de wegen zijn de voornaamste redenen. Scheepvaart heeft hierop een positieve invloed. De doelstelling van o.a. de Europese Unie is: Een 'modal shift' van 30% wegvervoer, naar water en spoor' in 2030, en 50% in 2050.^a

De verwachting is dat er in 2025 is dat er nog maar een klein aandeel schepen is met een deadweight-tonnage van minder dan 1.500 ton. Dit betekent dat scheepsklasse CEMT-I t/m CEMT-III (met uitgang van M5) veel minder gaan voorkomen. Dit brengt tevens een groei ter weeg bij de scheepvaartklassen hoger dan CEMT-III M4.^b

Case Eefde; Toename binnenvaart

Voor Sluis Eefde geldt de verdeling^c die in **Tabel 6.3** van scheepvaart voor het jaar 2013, 2020 en 2040, dit heeft Rijkswaterstaat conform het GE-groeienscenario opgesteld. 2040 is het ontwerpjaar van het sluiscomplex, hierbij is de tweede sluis, de Noordersluis, in werking gesteld vanaf 2020 en neemt een deel van de totale scheepvaart over.

Tabel 6.3 Gegevens verdeling scheepvaart Sluiscomplex Eefde

Scheepsklassen		2013		2020		2040	
			aantal		aantal		aantal
CEMT-I	M1	3,9%	451	0,0%	0	0,0%	0
CEMT-II	M2	8,3%	975	3,8%	537	3,5%	743
CEMT-III	M3-M5	34,1%	3.986	28,9%	4.121	26,9%	5.697
CEMT-IV	M6-M7	38,6%	4.513	35,3%	5.036	32,9%	6.962
CEMT-Va	M8	15,0%	1.754	32,1%	4.583	36,6%	7.744
Totaal		100%	11.679	100%	14.277	100%	21.146

6.2 Sluiscomplex

6.2.1 Geometrie

Het RVW-2017 geeft middels **Tabel 6.4** de minimale afmetingen aan waaraan een sluis moet voldoen. Het gaat hierbij om een sluis welke een aanbod heeft tot 5.000 schepen per jaar. Boven de 5.000 schepen zijn de afmetingen vaak groter. Onderstaande afmetingen worden gezien als de ondergrens waaraan sluisen voldoen.

Tabel 6.4 Afmetingen minimumsluis conform RVW-2017

Scheepsklasse	Minimale schutdiepte [m]	Kolkbreedte [m]	Kolklengthe [m]
CEMT-I	2,80	6,00	43
CEMT-II	3,10	7,50	60
CEMT-III	3,10	9,00	80
CEMT-IV	3,50	10,50	95
CEMT-Va	4,20	12,50	125

^a (Middellange Termijn Prognoses voor de binnenvaart (Vervoer in relatie tot Nederland, periode 2017 - 2021))

^b (De toekomst van het goederenvervoer en de binnenvaart in Europa, 2006)

^c Opgehaald uit (Aanvaarbescherming sluisen Delden en Hengelo en Eefde, 13-11-2015)

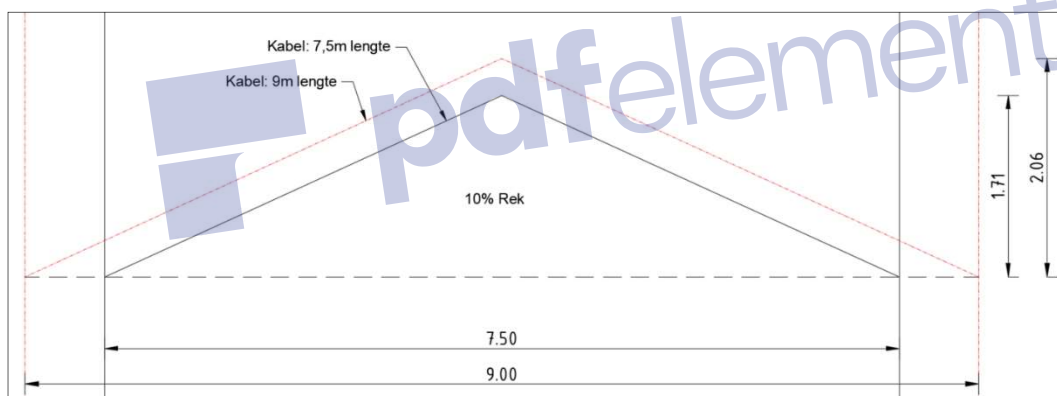
Kolk lengte

De lengte van de kolk is van belang voor de kans op aanvaring en de aanvaarsnelheid van het schip. Bij een langere kolk in vergelijking met de lengte van het schip heeft het schip een langere weg om tot stilstand te komen. Invarende schepen zullen veelal langzaam varen omdat ze even later moeten stoppen. Bij lange schutkolken is er een mogelijkheid dat een onvoorzichtige schipper toch met vrij veel snelheid binnenkomt, omdat er een langere weg beschikbaar is om tot stilstand te komen.

Het schip zal veelal niet te dicht bij de sluisdeuren willen liggen. Bij een korte kolk zal het schip gedwongen worden dicht op te stellen bij de sluisdeur en dus bij de aanvaarbeveiliging. De minimale nuttige kolk lengte, ruimte binnen de stopstrepen, bedraagt volgens RVW: $1,1 \times$ lengte maatgevend schip. Dit betekent dat het maatgevende schip maar 10% van zijn lengte speling heeft ten opzichte van de aanvaarbeveiliging.

Kolkbreedte

De remweg is bij veel varianten afhankelijk van de mate van vervorming en de energieopname per hoeveelheid verplaatsing. Bij een kabel met remcilinder is de benodigde remweg eenvoudig weer te geven, zie *Figuur 6.7*. De energie wordt opgenomen door een externe remcilinder, deze heeft een bepaalde rek nodig om tot een hoeveelheid energie te komen. In het figuur is 10% rek aangenomen, hierbij is er een duidelijk verschil te zien tussen de kabel van 7,5 meter en 9,0 meter. Voor een kunststofvangkabel is een soortgelijk verschil waar te nemen, echter is de opnamecapaciteit groter van een langere kabel. Dus bij een gelijke rek is de remweg langer, maar de energieopname is groter van de langere kabel.



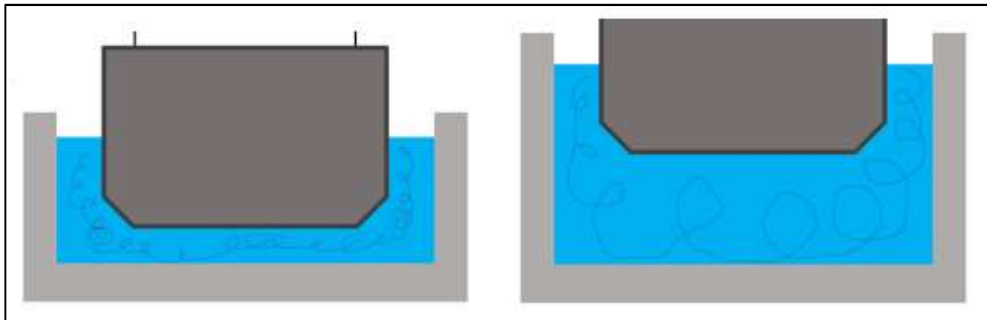
Figuur 6.7 Remweg in relatie tot kolkbreedte

Voor de buigzame ligger wordt de remweg ook langer wanneer de kolk breder is. Dit is te verklaren door het plastische scharnier die in het midden een vaste hoek heeft waarbij plastische rek optreedt. Deze hoek staat vast per profiel. In *Figuur 6.7* is weergegeven een ligger van 7,50 en 9,00 meter, de hoek is in beide liggers gelijk en de remweg is bij de ligger van 9,00 meter langer.

De breedte van de kolk is zoals benoemd ook van belang voor de dimensionering en de sterkte van de aanvaarbeveiliging. Logischerwijs dient een aanvaarbeveiliging langer te zijn wanneer de kolkbreedte dit ook is. In sommige gevallen verandert de grootte van doorsnede ook, net als de materiaaleigenschappen, waaronder de sterkte. De op te nemen aanvaarenergie wordt in veel gevallen kleiner wanneer de lengte langer wordt maar de materiaaleigenschappen en doorsnede niet veranderen.

Waterstand kolk

De maximale en minimale diepte van het schutpeil is van belang voor de natte doorsnede waarmee de grenssnelheid bepaald wordt en de mogelijkheid tot schutten van de schepen. De grenssnelheid is afhankelijk van de verhouding van de natte doorsnede van de sluis (breedte kolk x drempeldiepte) en het nat oppervlak van het schip. De stroming van het water rond het schip heet de retourstroom. Wanneer er bij de retourstroom sprake is van schietend water is de grenssnelheid van het schip bereikt, dit gebeurt sneller bij een klein oppervlak waar water doorheen stroomt dan bij een groot oppervlak. In *Figuur 6.8* is het doorstromend oppervlak van laag- en hoogwater weergegeven.



Figuur 6.8 Doorstromend oppervlak retourstroom bij lage waterstand (links) en hoge waterstand (rechts)

Uit het rapport Aanvaarrisico voor sluisdeuren (Q1399)^a wordt door het beschouwen van de overschrijdingskromme geconcludeerd dat er bij een lage waterstand in de sluiskolk de aanvaarsnelheid lager is dan bij een hogere waterstand.

Het minimum schutpeil is afhankelijk van diepgang van het schip in relatie tot de drempeldiepte en/of diepte kolk. In *Tabel 6.4* zijn minimale schutdieptes weergegeven, bij lagere waterstanden kunnen schepen niet binnenvaren.

^a (Aanvaarrisico voor sluisdeuren - Q1399)

Bijlage 7 Gegevens Scheepvaart

De tool moet gegevens hebben van de binnenvaart in Nederland. Gegevens die van belang zijn: breedte, lengte, massa en motorvermogen. Dit onderzoek richt zich op vaarwegen tot en met klasse Va, er worden vijf scheepsklassen aangehouden, te weten:

- Spits CEMT-klasse I/M1
- Kempenaar CEMT-klasse II/M2
- Dortmund-Eemskanaal CEMT-klasse III/M3-M5
- Rijn-Hernekanaal CEMT-klasse IV/M6-M7
- Groot Rijnschip CEMT-klasse Va/M7-M8

Tabel 7.1 Afmetingen binnenvaartschepen per CEMT-klasse

Scheepsklassen		Afmetingen Schip			Beladen		Ledig		Overige gegevens	
		Breedte ¹	Lengte ¹	Boeghoogte ³	Maximaal laadvermogen ²	Max diepgang ²	Massa ⁴	Diepgang ledig ³	Maximale massa totaal	Motorvermogen ²
		b_s [m]	l_s [m]	H_{boeg} [m]	$m_{lading, max}$ [ton]	$T_{s, max}$ [m]	$m_{s, ledig}$ [ton]	$T_{s, ledig}$ [m]	m_s [ton]	P_s [kW]
CEMT-I	M1	5,05	38,5	4,3	365	2,5	55	0,7	420	185
CEMT-II	M2	6,6	55	4,3	600	2,6	90	0,7	690	278
CEMT-III	M3	7,2	70	4,3	910	2,6	137	0,8	1.047	311
	M4	8,2	73	4,4	1.080	2,7	162	0,8	1.242	451
	M5	8,2	85	4,4	1.250	2,7	188	0,8	1.438	646
CEMT-IV	M6	9,5	80	4,6	1.370	2,9	206	0,9	1.576	881
	M7	9,5	105	4,7	2.040	3,0	306	0,9	2.346	746
CEMT-Va	M8	11,4	110	5,2	2.900	3,5	435	0,9	3.335	1.267
	M9	11,4	135	5,7	3.735	4,0	560	0,9	4.295	1.600

¹Bron: Ontwerp van Schutsluizen deel 1, blz. 4-5

²Bron: Richtlijn Vaarwegen 2017, Hoofdstuk2, lid 2.3.1

³De boeghoogte en diepgang ledig zijn bepaald op basis van gemiddelde diepgang van bestaande binnenvaartschepen

⁴De ledige massa is berekend op 15% van maximaal gewicht, conform ROK paragraaf 5.10 pagina 68

Bijlage 8 Uitgangspunten Belastingen

8.1 Belastingen

8.1.1 Permanente belastingen

Eigen Gewicht

(NEN-EN 1991-1-1 (en) Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen – Volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen)

Bij het eigen gewicht van bijvoorbeeld een stalenconstructie wordt rekening gehouden met een toename in gewicht ten gevolge van lassen, conservering, verbindingen en afwijkende plaatdiktes. Voor deze toename in gewicht wordt een factor [1,1] in rekening gebracht (gelijk aan 10% van het totaalgewicht).

De volumieke gewichten van materialen worden aangehouden conform de NEN 6702.

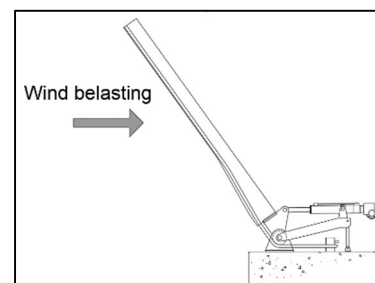
8.1.2 Variabele belastingen

Windbelasting

(NEN-EN 1991-1-4+A1+C2:2011 (nl) Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-4: Algemene belastingen – Windbelasting)

Conform de NEN-EN 1991-1-4 is Nederland onderverdeeld in drie windgebieden, bijhorend aan de windgebieden is een stuwkracht van de wind in dat gebied op een bepaald hoogte. De windbelasting dient te worden bepaald bij het uitwerken van het ontwerp en heeft verder geen invloed op de eigenlijke functie, aanvaarenergie opnemen, van de aanvaarbeveiliging. De belasting door wind wordt niet meegenomen in de tool.

In een mogelijk verder ontwerp is het nodig de windbelasting te bepalen, dit geschiedt volgens hoofdstuk 8.2.1 van NEN 6786. De maatgevende windbelasting komt alleen voor bij een aanvaarbeveiliging welke tijdens openen boven het sluisplateau uitkomt, bijvoorbeeld tijdens het vasthouden van de slagboom in geopende stand *Figuur 8.1*.



Figuur 8.1 Voorbeeld invloed windbelasting

Wrijving

(NEN-EN 1991-1-7+C1+A1 (nl) Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen)

Zie ook NEN 6786:2001 par 8.2.8

Wrijving wordt met behulp van paragraaf 8.2.8 uit de NEN 6786 bepaald. Wrijving komt alleen voor bij beweegbare aanvaarbeveiligingen. Het gaat hierbij om de wrijving tussen de bewegende onderdelen, bijvoorbeeld bij het draaipunt van een slagboom. De wrijving dient te worden bepaald bij het uitwerken van het ontwerp en heeft verder geen invloed op de basis voor het ontwerp, dus de belasting door wrijving wordt niet meegenomen in de tool.

8.2 Uitgangspunten ontwerp

Naast de normen geldend voor de belasting zijn er meer normen van toepassing om het ontwerp tot stand te brengen. In deze paragraaf zijn de ontwerpuitgangspunten benoemd die de basis vormen voor de Aanvaarbeveiligingstool en het constructief ontwerp van de aanvaarbeveiliging. De benodigde normen en voorschriften zijn vermeld net als de toe te passen factoren in de uiterste grenstoestanden.

8.2.1 Van toepassing zijnde normen en voorschriften

Algemeen

Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken 1.4: (Richtlijn Ontwerp Kunstwerken ROK-1.4, 2017)

Een richtlijnen kader opgesteld door Rijkswaterstaat, de ROK is een verzameling van generieke eisen waaraan het ontwerp en de uitvoering van een nieuw te bouwen kunstwerk moet voldoen. Deze richtlijnen geven wijzigingen, aanvullingen en toelichtingen op de Eurocodes met Nationale Bijlagen (NEN-EN + NB).

Leidraad Kunstwerken TAW: (Leidraad Kunstwerken, 2003)

Het leidraad Kunstwerken behandelt het realisatie- en instandhoudingsproces van waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies, voor zover ze behoren tot de primaire waterkeringen.

Ontwerp van Schutsluizen: (Ontwerp van schutsluizen, 2000)

Een handboek welke verschillende aspecten behandelt voor het ontwerpen van een sluis.

Q1399: (Vrijburcht, Aanvaarrisico voor sluisdeuren - Q1399, 1992)

Het Q1399, Aanvaarrisico's voor sluisdeuren, beschrijft de toepasbare methodiek ter bepaling van het risico op aanvaring met een sluisdeur. Op basis van kansverdelingsfunctie van de aanvaarsnelheid en -energie op gesloten sluisdeuren.

Richtlijn Vaarwegen 2017: (Richtlijnen Vaarwegen 2017, 2017)

Het uniform toepassen ervan leidt tot moderne, betrouwbare vaarwegen met voldoende diepte, breedte en doorvaarhoogte. Maar ook steeds meer aan een efficiënt, samenhangend netwerk van vaarwegen in ons land.

Grondslagen en belastingen (Eurocode)

NEN-EN 1990 + NB	Grondslagen van het constructief ontwerp
NEN-EN 1991 + NB	Belastingen
NEN-EN 1991-1-1	Algemene belastingen: Eigen gewicht en opgelegde belastingen
NEN-EN 1991-1-4	Algemene belastingen: Windbelasting
NEN-EN 1991-1-6	Algemene belastingen: Belastingen tijdens uitvoering
NEN-EN 1991-1-7	Buitengewone belastingen: Stootbelastingen en ontploffingen

Staalconstructies (Eurocode)

NEN-EN 1993 + NB	Staalconstructies
NEN-EN 1993-1-1	Ontwerp en berekening van staalconstructies: algemene regels
NEN-EN 1993-1-8	Ontwerp en berekening van verbindingen
NEN-EN 1993-1-10	Materiaaltaaiheid en eigenschappen in de dikterichting
NEN-EN 1090-1	Eisen voor het vaststellen van de conformiteit van constructie onderdelen
NEN-EN 1090-2	Technische eisen voor staalconstructies

Vezel versterkte kunststoffen (CUR)

CUR-Aanbeveling 96:2017	Grondslagen voor het ontwerp en de berekening
-------------------------	---

8.2.2 Gevolgklasse

Ten behoeve van de betrouwbaarheidsdifferentiatie, worden gevolklassen (CC), zoals gegeven in tabel B1 van de NEN-EN 1990, gedefinieerd door het beschouwen van de gevolgen van bezwijken of

het slecht functioneren van de constructie. De ROK 1.4 beschrijft dat de kunstwerken in beheer van Rijkswaterstaat gelegen zijn in hoofd(vaar-)wegen, waardoor ze automatisch in gevolgklasse CC3 dienen te worden geschaald.^a Een sluiscomplex valt onder de gevolgklasse CC3; Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving. (NEN-EN 1990 art. B3.1)

De betrouwbaarheidsklasse mag in één verband worden gezien met de gevolgklassen, dus voor sluiscomplexen geldt een betrouwbaarheidsklasse RC3. (NEN-EN 1990 art. B3.2(2)).

Een aanvaarbeveiliging wordt ontworpen op basis van bijzondere belasting waardoor de gevolgklasse voor de bezwijkende onderdelen van een aanvaarbeveiliging geen gevolgklasse geldt.

8.2.3 Imperfecties

In het ontwerp wordt geen rekening gehouden met imperfecties. Een imperfectie, bijvoorbeeld scheefstand, zal weinig invloed hebben op de inleiding van de krachten. De vervorming welke optreedt bij een aanvaring heeft een veel grotere invloed waardoor de mate van imperfectie verwaarloosd wordt.

8.2.4 Vervormingen

De doorbuigingseisen komen te vervallen voor bouwconstructies bij de toepassing van een aanvaarbeveiliging. De aanvaarbeveiliging neemt doormiddel van vervorming energie op, vervorming is dus wenselijk. De remweg is hier gelijk aan de doorbuiging/vervorming, deze bepaald de maximaal opneembare energie. Daarnaast wordt de variant welke gebruik maakt van een slagboom ontworpen om bij een aanvaring te bezwijken om de kabel in werking te laten treden. Na bezwijken van de slagboom wordt deze geheel vervangen waardoor doorbuigingseisen niet relevant zijn.

8.2.5 Grenstoestanden

De partiële factoren voor belastingen wat betreft de uiterste grenstoestanden in geval van buitengewone en ontwerp- en berekeningssituatie (formules 6.11a tot en met 6.12b) behoren gelijk aan 1,00 te zijn. ψ -waarden zijn gegeven in tabel A1.1.

Tabel 8.1 Belastingcombinatie buitengewone en ontwerp- en berekeningssituaties; NEN-EN 1990 Art. A1.3.2

Ontwerpsituatie	Blijvende belastingen		Overheersende buitengewone belasting	Veranderlijke belastingen gelijktijdig met de overheersende	
	Ongunstig	Gunstig	Aanvaarbeasting	Belangrijkste (indien aanwezig)	Andere
Buitengewone (Vgl. 6.11a/b)	$1,00G_k$	$1,00G_k$	$1,00A_d$	$1,00\psi_{1,1}Q_{k,1}$	$1,00\psi_{2,i}Q_{k,i}$ (met $i>1$)

^a (Rijkswaterstaat, 2017, p. 36)

Bijlage 9 Energie omrekenen naar belasting

Bij een aanvaring wordt er energie overgedragen van het schip naar de aanvaarbeveiliging. Deze energie wordt kinetische energie genoemd, voor het vervolg wordt dit de energie of aanvaarenergie genoemd. De massa en de snelheid van in dit geval een schip bepalen de grootte van de energie. Energie wordt uitgedrukt in Joule [J]; dit is een de arbeid waarmee een kracht een afstand van 1,00 meter wordt verplaatst. Joule kan ook worden uitgedrukt in Nm, 1 Joule = 1 Nm. Energie verdwijnt niet, maar verandert van kinetische energie naar massa verplaatsing, elastische energie, warmte (thermische energie), geluidsenergie of andere vormen van energie.

9.1 Aanvaarkracht volgens Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken (ROK) 1.4

In de ontwerprichtlijnen van Rijkswaterstaat, de ROK 1.4, is een vergelijking gegeven voor het omzetten van aanvaarenergie (E_{kin}) naar aanvaarkracht ($F_{dx,max}$), *Vergelijking 9-1*. Deze vergelijking is geldend voor een frontale aanvaring met een starre obstakel – scheepvaartonvriendelijke constructie – waarbij de energie volledig door de vervorming van het schip wordt opgenomen. Elastische en/of plastische vervorming van het object treedt niet op zolang de constructie niet bezwijkt. Bij een energie van 0,00 J resulteert dit in een aanvaarkracht van 5,6 MN.

Vergelijking 9-1 Aanvaarkracht (ROK 1.4)

$$F_{max,m} = 3,3 \sqrt{E} + 5,6$$

Waarin: F = Aanvaarkracht [MN]
 E = Aanvaarenergie; $E = 0,55 mv^2$ [MJ]

9.1.1 Pater & Joustra (1993)

Vergelijking 9-1 is afkomstig uit een onderzoeksrapport 'Aanvaarbeasting door schepen op starre constructies' opgesteld door Pater en Joustra van de TU-Delft^a. In het onderzoeksrapport wordt vanuit de kinetische energie van een binnenvaartschip een maximale aanvaarbeasting berekend op een statische constructie. Hierbij van uitgaande dat de hoeveelheid energie volledig wordt opgenomen door de vervorming, "kreukelzone", van de scheepshuid.

De hoeveelheid energie die wordt opgenomen door de vervorming van de scheepshuid is bepaald met handberekeningen. Deze berekening zijn vergeleken met computersimulaties van aanvaringen tegen starre constructies. Er zijn drie simulaties opgesteld waarin de (starre-)constructie en het schip constant zijn, de statische wrijvingsconstante* tussen de simulaties varieert. Het onderzoek concludeert uit de resultaten van de simulaties dat de eigenlijke waarde voor de vergelijking een gemiddelde moet zijn uit de drie simulaties, aangezien de resultaten zeer dicht bij elkaar liggen. Uit de resultaten is één formule bepaald die de gemiddelde maximale kracht tussen de drie modellen beschrijft *Vergelijking 9-1*.

In het rapport wordt het volgende geconcludeerd bij toepassing van de vergelijking: "In het algemeen kan de formule (met de nodige voorzichtigheid) toegepast worden voor klasse IV-schepen. Ook voor deze schepen geldt de restrictie dat het energieniveau niet hoger mag zijn dan 50 MNm en de vervorming niet meer dan 4 m mag bedragen, gemeten vanaf de punt van de boeg. Omdat gegevens

^a (Aanvaarbeasting door schepen op starre constructies, 1993)

* Getal dat de mate van wrijving tussen het schip en de constructie aangeeft

over de vervorming bij het voorspellen van de maximale aanvaarbebelasting vaak niet bekend zijn, zal het energiecriterium bepalend zijn. " (Joustra & Pater, 1993 , p. 33)

9.1.2 Toepasbaarheid vergelijking

Aangenomen is dat de volledige kinetische van het schip door de aanvaarbeveiliging opgenomen moet worden en niets door het schip zelf. Kijkend naar aanvaarbeveiligingen dient er geen vermindering van aanvaarenergie in rekening te worden gebracht. Aanvaarbeveiliging is zo ontworpen om kinetische energie op te nemen doormiddel van het creëren van een bepaalde remweg met de vervorming van de constructie. Aanvaarbeveiliging is erop ontworpen om te vervormen en niet als star object waarbij het uitgangspunt is dat het object niet vervormd.

Het is wel denkbaar om een mindering in rekening te brengen voor de energieopname van het schip. Het nadeel hierbij is dat de hoeveelheid van energieopname door vervorming, "kreukelzone", van het schip niet exact is vast te stellen. De hoeveelheid energieopname is onder andere afhankelijk van het type schip en de sterkte van de scheepshuid, dit zijn vrijwel onbekende gegevens welke onzekerheid met zich mee brengen.

Er mag niet worden aangenomen dat een deel van de geleverde kinetische energie opgenomen gaat worden door het schip. De conclusie die hieruit wordt opgemaakt is dat het omzetten van energie naar kracht niet wenselijk is, zoals wordt gedaan bij *Vergelijking 9-1*.

9.2 Aanvaarkracht met behulp van behoud van energie

Kijkend naar de NEN-EN 1991-1-7, C.2.2 Zachte stootbelasting: "Indien de constructie is ontworpen om de botsenergie door plastische vervormingen op te nemen, behoort ervoor te zijn gezorgd dat de ductiliteit voldoende is om de totale kinetische energie $\frac{1}{2}mv^2$ van het botsende object op te nemen."

Een aanvaarbeveiliging is een constructie welke erop wordt ontworpen om energie op te nemen. Uit bovenstaande citaat wordt geconcludeerd dat de belasting op een aanvaarbeveiliging moet volgen uit de aanvaarenergie en de mate van de gecreëerde remweg van de aanvaarbeveiliging, de af te leggen remweg van het schip.

9.2.1 Kracht uit verplaatsing van massa

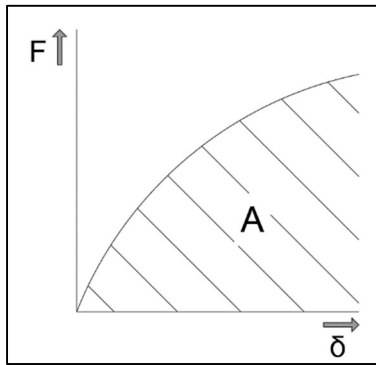
De aanvaarkracht kan gevonden worden met de vergelijking: Arbeid = kracht x afstand. Waarin de arbeid de energie is waarmee een kracht wordt verplaatst. Dit is omschreven naar de *basis-Vergelijking 9-2* voor de bepaling van de aanvaarkracht.

Vergelijking 9-2 Kracht uit verplaatsing van massa (arbeid)

$$F_{\text{Aanvaarkracht}} = \frac{E_0}{S_{\text{remweg}}}$$

Waarin:	F	= Aanvaarkracht	[kN]
	E_0	= Kritieke aanvaarenergie	[kNm]
	S	= Remweg	[m]

Vergelijking 9-2 is alleen van toepassing wanneer de kracht in dezelfde richting wijst als de verplaatsing en de kracht over de gehele remweg/traject gelijk is. *Figuur 9.1* Is geeft een realistischer beeld van de kracht behorend bij de energie en over de afgelegde remweg.



Figuur 9.1 Kracht-weg diagram in functie van de energie

9.2.2 Behoud van energie

De totale energie van een systeem is de som van alle vormen van energie die op verschillende manieren zijn opgeslagen. Dit betekent tevens dat energie kan om worden gezet in verschillende vormen van energie, waarbij de totale energie altijd constant blijft.

Vormen waarin de aanvaarenergie in kan worden omgezet:

- Kinetische energie (bewegingsenergie)
 - Verplaatsing;
- Potentiële energie (vervormingsenergie);
 - Remweg creëren door vervorming van de constructie;
- Potentiële gravitatie-energie (zwaartekracht energie);
 - Het laten optillen van het schip uit het water;

Andere vormen van energie waarin aanvaarenergie kan worden omgezet worden buiten beschouwing gelaten omdat deze verwaarloosbaar klein zijn. Waaronder:

- Warmte (thermische energie);
 - Wrijving tussen schip en aanvaarbeveiliging;
- Geluidsenergie.

Opname mechanisme aanvaarbeveiliging

Als er verondersteld wordt dat het schip oneindig stijf is, zal de aanvaarbeveiliging gedwongen worden om alle verplaatsingsenergie te behouden wat zal resulteren in een conservatieve oplossing voor de verplaatsingen.

De belangrijkste opname mechanisme van de aanvaarbeveiliging bij aanvaring zijn:

- Elastische vervorming van de aanvaarbeveiliging;
- Plastische vervorming van de aanvaarbeveiliging;
- Wrijving bij de 'scharnierende' steunen;
- Wrijving tussen het schip en de aanvaarbeveiliging.

In de meeste gevallen is de precieze hoeveelheid energie die door elk mechanisme wordt opgenomen moeilijk te bepalen zonder gedetailleerde tests. In dit onderzoek wordt alleen gefocust op de plastische- en elastische vervorming van de aanvaarbeveiliging.

Bijlage 10 Aanvaarenergietool

10.1 Opstellen aanvaarenergietool

Ten behoeve van het benaderen van de aanvaarenergie is een aanvaarenergietool opgesteld. Als uitgangspunten zijn de geometrie van de sluis en de gegevens van de scheepvaart genomen. De gegevens van de scheepsklasse zijn algemene gegevens, dit houdt in dat dit voor heel Nederland gelijk is. De gegevens van de scheepvaart zijn gehaald uit het Ontwerp van Schutsluizen, Richtlijn Vaarwegen en de ROK 1.4. De geometrie voor sluizen in Nederland is per situatie uniek en dient per situatie te worden ingevuld, dit is de input voor de tool om de aanvaarenergie te benaderen.

10.1.1 Situaties

In de Q1399^a; zijn ongevallen met schade aan de tweede deur geanalyseerd. Op basis van deze analyse zijn er voor de aanvaarenergie twee situaties aangenomen met ieder twee subonderdelen. In totaal volgen er vier benaderingen voor de aanvaarenergie, uit deze vier wordt gekozen welke het meest geschikt is om te gebruiken als rekenwaarde voor de aanvaarenergie.

1. Achteruitslaan faalt bij binnenvaren en schip vaart/drijft op constante snelheid door tegen de constructie;
 - De snelheid van het binnenvaren is op twee manieren te bepalen, te weten:
 - Op basis van de gemiddelde snelheid zoals benoemd in de Richtlijn Vaarwegen 2017;
 - Op basis van de grenssnelheid;
 - Deze situatie betreft bepaalde oorzaken:
 - Te laat of verkeerd afgestopt;
 - Breken, slippen, misgooien, en dergelijke van draad tijdens afstoppen;
 - Technisch mankement door weigeren achteruit te slaan;
 - Andere oorzaak (bijvoorbeeld: zet van ander schip, zuiging in sluis, ijsgang, schroef deels boven water, boegschroef blijft aan of koppeldraden breken).

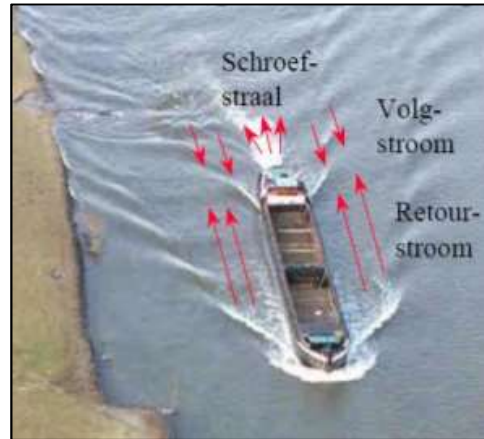
Dit veroorzaakt 90% van de aanvaringen met de tweede deur, volgens de Q1399;
2. Schip geeft vermogen bij om de sluis in te varen en door technisch mankement kan vermogen niet terugnemen; Het schip vaart versnelt tegen de constructie;
 - Is hoger dan situatie 1, omdat het schip energie toevoegt bovenop de gemiddelde of grenssnelheid van het binnenvaren;
 - Deze situatie heeft de oorzaak: door een misverstand vooruit in plaats van achteruitslaan. Deze oorzaak maakt 10% deel uit van alle ongevallen, conform Q1399. De kans dat dit voorkomt is significant kleiner dan situatie 1, maar de aanvaarenergie is groter.

^a (Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399, 1992, p. 4.1.3.)

10.1.2 Bepalen aanvaarenergie

De aanvaarenergie van een schip wordt bepaald door de toepassing van *Vergelijking 10-1*. Deze vergelijking is afkomstig uit de ROK 1.4 waarbij een modelfactor van 1,10 opgenomen is om rekening te houden met de energie afkomstig van de waterverplaatsing.

De waterverplaatsing rond een schip is te verdelen in drie onderdelen; stroming door schroefstraal, retourstroom en volgstroom, *Figuur 10.1*. De stroming door schroefstraal geeft een schip de voortstuwing welke benodigd is om te varen. De retourstroom is de stroming van het water in tegengestelde richting van het schip. Deze stroming bepaalt de maximale snelheid wat een schip kan varen, de retourstroom is de weerstand. Bij de achtersteven van het schip ontstaat door de stroming van de schroefstraal een volgstroom. De volgstroom geeft een schip bij plotseling vertragen, zoals een aanvaring, extra energie. De exacte hoeveelheid energie die wordt toegevoegd is onbekend, omdat de massa en stroomsnelheid niet eenduidig zijn te bepalen.^a Om deze reden heeft Rijkswaterstaat de modelfactor van 1,10 opgenomen in de berekening voor de aanvaarenergie.



Figuur 10.1 Weergave waterverplaatsing rond een schip bij varen in een open waterloop

Het bepalen van een kinetische energie wordt gedaan door $0,5mv^2$. Met de toevoeging van de modelfactor wordt de formule $1,10 \times 0,5mv^2$, herschreven volgt *Vergelijking 10-1*.

Vergelijking 10-1 Bepaling Kritieke aanvaarenergie in een kanaal

$$E_0 = 0,55 \times m_s \times v_s^2$$

Waarin:	E_0	= Aanvaarenergie	[kNm]
	m_s	= Massa van het schip	[ton]
	v_s	= Aanvaarsnelheid van het schip	[m/s]

Bepalen massa van het schip

De massa van binnenvaartschepen is uitgewerkt in *paragraaf 6.1.2*. De aanvaarenergie dient te worden bepaald voor alle scheepsklassen apart in ledige en volgeladen toestand.

Bepalen van de grenssnelheid

Voor de aanvaarsnelheid van het schip wordt V_{gem} en V_{grens} aangehouden. De gemiddelde snelheid volgt uit de RVW 2017, in *paragraaf 6.1.3* wordt deze toegelicht.

De grenssnelheid wordt aan de hand van de afmetingen van het schip en de kolk bepaald middels de *Vergelijking 10-2*.

Vergelijking 10-2 Bepaling Grenssnelheid schip bij invaren sluiskolk

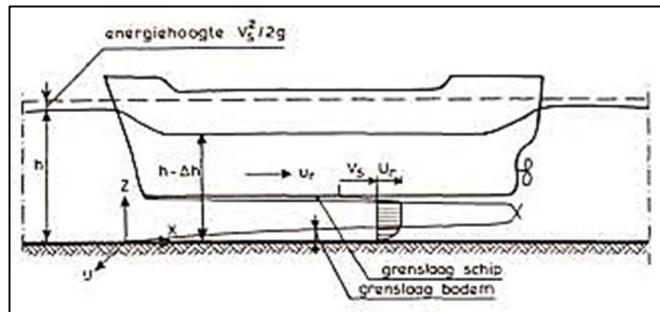
$$v_{grens} = \left(0,76 \times \left(\frac{A_s}{A_k}\right)^2 - 1,45 \times \left(\frac{A_s}{A_k}\right) + 0,74\right) \times \sqrt{(g \times (h_k - z_d))}$$

Waarin:	v_{grens}	= Grenssnelheid	[m/s]
	A_s	= Doorsnede schip onder water = $b_s \times d_s$	[m ²]
	b_s	= Breedte schip	[m]

^a (Toegepaste Vloeistofmechanica, 1996)

d_s	= Diepgang schip	[m]
A_k	= Doorsnede sluisprofiel = $b_k (h_k - z_d)$	[m ²]
b_k	= Breedte kolk	[m]
h_k	= Waterspiegelniveau	[m+NAP]
z_d	= Niveau kolkdrempel/vloer	[m+NAP]
g	= Versnelling zwaartekracht	[m/s ²]

De grenssnelheid wordt gedefinieerd als de maximale vaarsnelheid wat een schip kan behalen bij het invaren door het sluishoofd. Bij deze snelheid treedt “schietsend water” op, dit betekent dat er turbulente stroming rond het schip optreedt. *Figuur 10.2* geeft de weerstand van de retourstroom op de bodem van een waterloop weer, door de vaarsnelheid treedt er een retourstroom op welke het schip afremt. Naast het schip treedt er ook een waterstandsverlaging op door de toename van de stroomsnelheid van het water.^a



Figuur 10.2 Schematisatie weerstand schip bij varen

Bij het bepalen van de grenssnelheid worden twee situaties onderscheiden. De eerste situatie is bij het invaren door het sluishoofd en de tweede situatie is het invaren in de sluis kolk waarbij het schip volledig de drempel is gepasseerd. In *10.1.3 Visualisatie Grenssnelheden* is dit overzichtelijk weergegeven. De snelheid bij het invaren wordt bepaald met de grenssnelheid bij het sluishoofd, sneller kan het schip niet varen op dit punt. De grenssnelheid in de kolk is ter indicatie van wat de aanvaarenergie maximaal kan worden, echter het bereiken van de grenssnelheid in de kolk wordt onmogelijk geacht. Om deze grenssnelheid te bereiken dient er een lange vaarweg aanwezig te zijn, de lengte van een sluis kolk is hiervoor niet toereikend. De maximale snelheid waarmee een schip in de kolk vaart is 3,00 m/s^b conform de ROK 1.4. Deze snelheid wordt als absolute bovengrens aangehouden in het bepalen van de aanvaarenergie.

Energie door vermogen bijgeven (situatie 2)

Omdat de grenssnelheid hoger is in de kolk dan boven de drempel in het sluishoofd kan een schip theoretisch gezien versnellen. Zoals hierboven beschreven is het behalen van de grenssnelheid in de kolk onmogelijk. Om deze reden is de energie die een schip potentieel toevoegt afhankelijk van de vaarafstand en het vermogen van het schip. Het vermogen van het schip is uitgewerkt in *paragraaf 6.1.3*. De potentiële aanvaarenergie als gevolg van het vermogen van het schip wordt met *Vergelijking 10-3* bepaald:

Vergelijking 10-3 Bepaling Energie op 10% vermogen

$$E_P = 10\% \times P_s \times W_s \times l_v$$

Waarin:	E_P	= Potentiele aanvaarenergie op 10% van vermogen	[kNm]
	P_s	= Maximaal vermogen schip	[kW]
	W_s	= Kracht/Vermogen schip	[kN/kW]
	l_v	= Vaarlengte af te leggen in kolk	[m]

De energie is berekend voor verschillende percentages van het maximaal vermogen. Voor het motorvermogen wordt 10 % aangehouden, dit is een realistische inschatting van het vermogen van

^a (Nortier & de Koning, 1996)

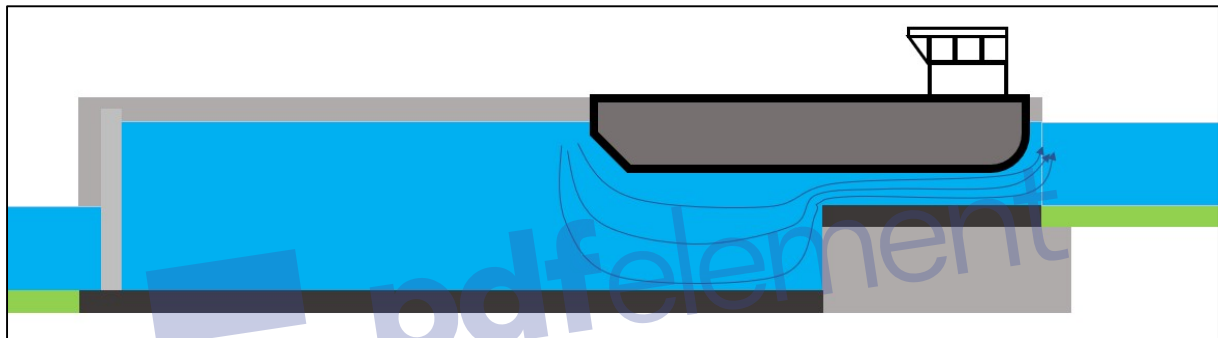
^b (Richtlijn Ontwerp Kunstwerken ROK-1.4, 2017, p. 69)

een schip bij het binnenvaren van een sluis. Een hoger motorvermogen kan voorkomen, maar dit is enkel te verwachten wanneer er sprake is van sabotage of terrorisme.^a Een hoger motorvermogen dan 10 % wordt niet meegenomen in de benadering voor de aanvaarenergie, omdat de kans hierop extreem klein wordt geacht.

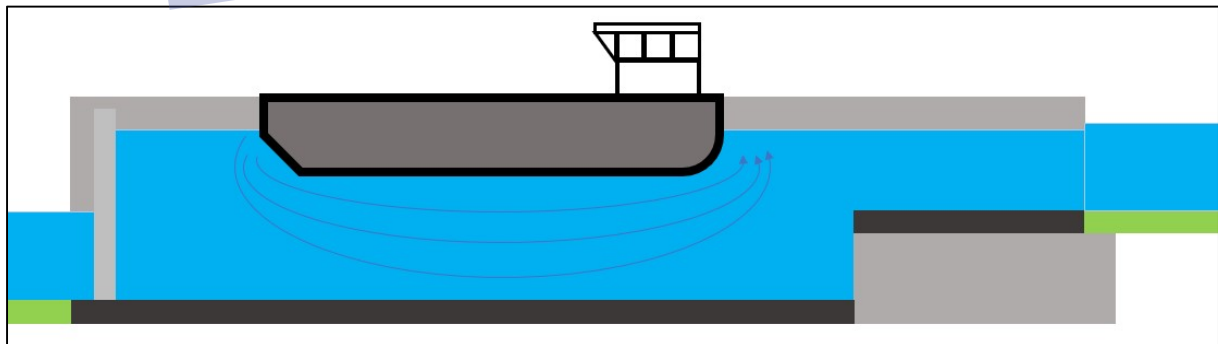
De energie door het vermogen dient bovenop de berekende energie uit *Vergelijking 10-1 Bepaling Kritieke aanvaarenergie in een kanaal* worden gedaan. Dit dient zowel voor de gemiddelde snelheid als voor de grenssnelheid te worden gedaan.

10.1.3 Visualisatie Grenssnelheden

In de onderstaande figuren zijn twee fases weergegeven van een schip gedurende het binnenvaren. De eerste fase is het schip dat vaart en zich (deels) boven de drempel bevindt, *Figuur 10.3*, hierbij limiteert de drempeldiepte de grenssnelheid. In de tweede fase is het gehele schip de drempel gepasseerd en limiteert de kolkvloer de grenssnelheid, *Figuur 10.4*. Met pijlen zijn de stromingen van het water weergegeven, hoe dichter de pijlen bij elkaar staan, betekent dit meer weerstand voor het schip en een lagere grenssnelheid. Er is duidelijk te zien dat in de tweede fase minder weerstand is dan in de eerste fase; een schip kan in de kolk versnellen.



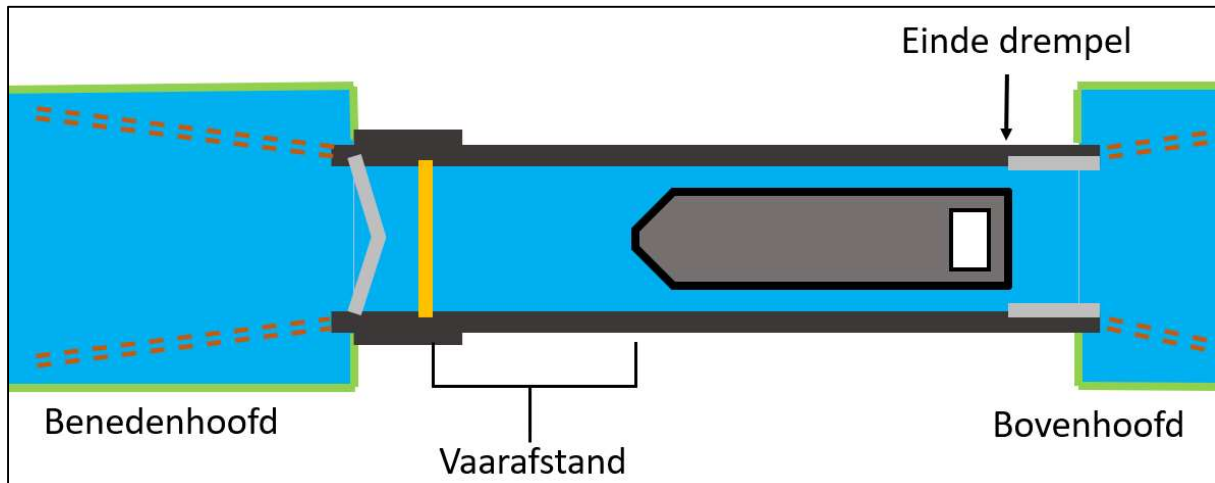
Figuur 10.3 Fase 1 waterstroming door schip boven drempel



Figuur 10.4 Fase 2 waterstroming door schip in de kolk na passeren drempel

^a (Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399, 1992)

10.1.4 Visualisatie vaarafstand in de kolk



Figuur 10.5 Vaarafstand na binnenvaren in de sluis

De vaarafstand in de kolk bepaalt de energie dat een schip toevoegt door het geven van vermogen in de sluis. Pas na het passeren van drempel kan een schip versnellen. De afstand tussen boeg en aanvaarbeveiliging/keermiddel is de vaarafstand in de kolk. *Figuur 10.5* geeft dit weer.

pdfelement

10.2 Casestudy aanvaarenergie Zuidersluis Eefde

Om te verifiëren of de aanvaarenergietool een correcte aanvaarenergie benaderd, wordt de tool ingevuld voor de Zuidersluis van Eefde. Zoals in de eisen is benoemd, dient de aanvaarbeveiliging van Eefde 2,5 MJ (2500 kNm) aan energie te kunnen opnemen. De verwachting is dat de tool een maximale waarde van rond de 2500 kNm als resultaat zal hebben.

10.2.1 Aanvaarenergie bepalen aan de hand van aanvaarenergietool

De opgestelde tool wordt voor de Zuidersluis van Eefde ingevuld.

Gegevens Zuidersluis Eefde

De gegevens van de Zuidersluis van Eefde dienen te worden ingevuld. De gegevens zijn afkomstig uit tekeningen van de bestaande sluis en de uitgangspuntennotitie voor de aanvaarbeveiliging van de Zuidersluis. *Tabel 10.1* geeft de gegevens weer.

Tabel 10.1 Gegevens Zuidersluis Eefde

Algemene uitgangspunten			
Algemeen			
Valversnelling	g	9,81	m/s ²
Soortelijk gewicht water	ρ	1.000	kg/m ³

Uitgangspunten Sluis			
Bovenhoofd			
Breedte	b_d	12,00	m
Peil drempel	h_d	6,50	m+NAP
Kolk			
Kolk lengte	l_k	140	m
Afstand stopstreep tot deur	x_{rem}	5,20	m
Kolkbreedte	b_k	12,00	m
Peil kolkvloer	h_k	0,00	m+NAP
Waterspiegel			
Maatgevende waterstand	h	10,20	m+NAP
Limieten scheepvaart			
Max. toegestane lengte	l	133,00	m
Max. toegestane breedte	b	11,40	m

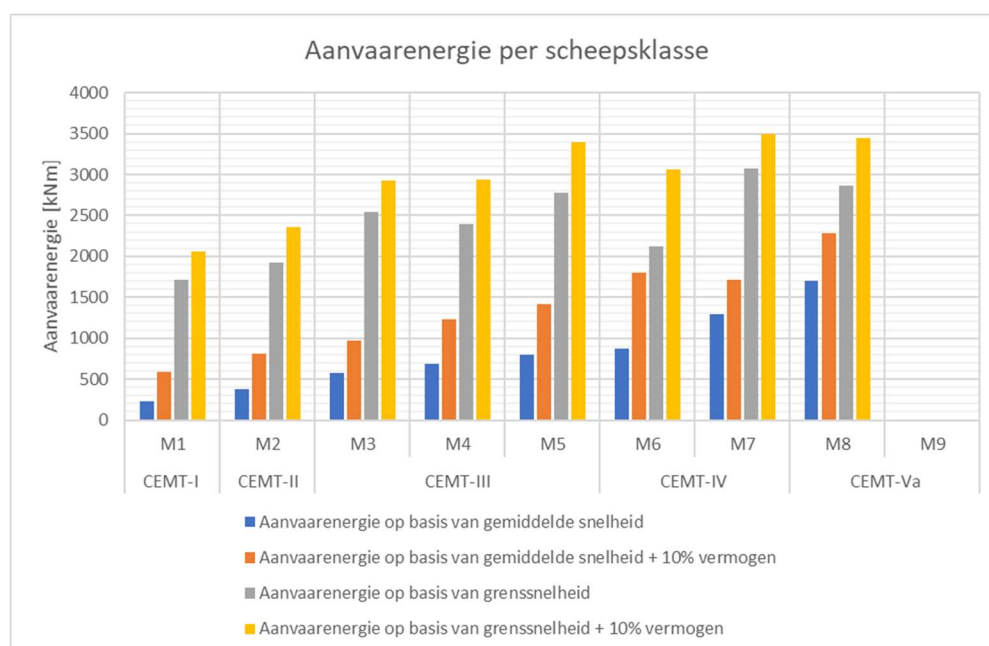
Berekende waardes Sluiscomplex			
Bovenhoofd			
Waterdiepte drempel	d_d	3,70	m
Wateroppervlak drempel	A_d	44,40	m ²
Kolk			
Nuttige lengte kolk	$l_{k,nut}$	135	m
Waterdiepte kolk	d_k	10,20	m
Wateroppervlak kolk	A_k	122,40	m ²

10.2.2 Resultaten aanvaarenergie

De benadering van situatie 2.2 (*Tabel 10.2*): Aanvaarenergie op basis van grenssnelheid + 10% vermogen geeft de grootste aanvaarenergie. Dit is te verwachten omdat de grenssnelheid altijd hoger is dan de gemiddelde snelheid, deze zal altijd de grootste energie geven. *Tabel 10.2* geeft maximale aanvaarenergie per klasse op voor de verschillende situaties. De hoogste waarde voor de aanvaarenergie uit de benadering bedraagt 3.494 kNm. Echter is de kans dat een schip op hoog vermogen een sluis invaart én vermogen bijgeeft onrealistisch. Om deze reden wordt er gekozen om situatie 2.1 als maatgevende bepaling te zien, de waarden uit deze bepaling zijn de rekenwaarden voor de aanvaarenergie.

Tabel 10.2 Maatgevende aanvaarenergie per scheepsklasse per benadering voor Zuiderluis Eefde

Scheepsklassen		Situatie 1.1: Aanvaarenergie op basis van gemiddelde snelheid	Situatie 1.2: Aanvaarenergie op basis van grenssnelheid	Situatie 2.1: Aanvaarenergie op basis van gemiddelde snelheid + 10% vermogen	Situatie 2.2: Aanvaarenergie op basis van grenssnelheid + 10% vermogen
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
CEMT-I	M1	232	1.714	582	2.063
CEMT-II	M2	382	1.923	815	2.357
CEMT-III	M3	579	2.539	971	2.930
	M4	687	2.399	1.228	2.940
	M5	795	2.776	1.415	3.397
CEMT-IV	M6	871	2.124	1.805	3.058
	M7	1.297	3.076	1.715	3.494
CEMT-Va	M8	1.699	2.865	2.282	3.448
	M9	0	0	0	0



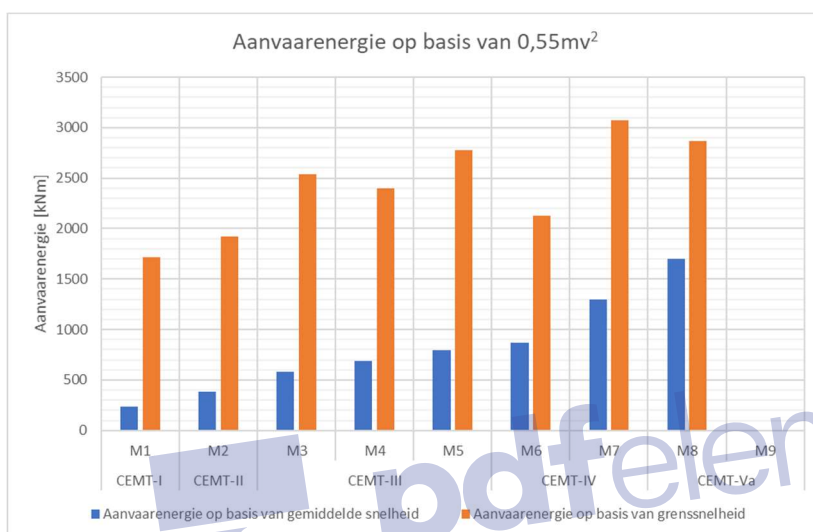
Figuur 10.6 Aanvaarenergie per scheepsklasse Zuiderluis Eefde uit aanvaarenergietool

10.2.3 Analyse van de resultaten aanvaarenergietool

Vanuit het uitgangspunten van het sluiscomplex en de scheepvaart wordt voor de Zuidersluis van Eefde de aanvaarenergie benaderd. In *Bijlage 12* is de uitdraai van de Excel-sheets weergegeven, de belangrijkste bevindingen worden in deze paragraaf toegelicht.

Situatie 1: gemiddelde snelheid of grenssnelheid

In de Schematiseringshandleiding Sterkte en Stabiliteit Kunstwerk wordt voor de CEMT-klasse IV en Va een gemiddelde snelheid aangegeven. Deze snelheid is gebaseerd op de ongevallen welke benoemd zijn in de Q1399, het gaat hier om de vaarsnelheid op het moment van aanvaren. De gemiddelde snelheid is de snelheid in de kolk van het schip. De aanvaarenergie op basis van de grenssnelheid geeft de situatie weer wanneer een schip een sluis komt binnenvaren en op deze snelheid constant blijft doorvaren tot het moment van aanvaren.

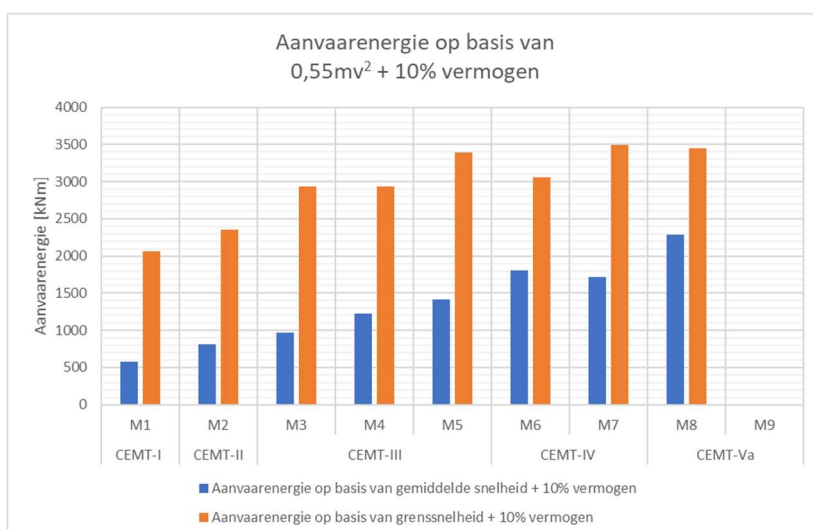


Figuur 10.7 Benadering aanvaarenergie op basis van de gemiddelde snelheid en grenssnelheid voor Zuidersluis Eefde

Er is een groot verschil te zien tussen de aanvaarenergie op basis van grenssnelheid en de gemiddelde snelheid. De CEMT-klassen I, II en III hebben de grootste afwijking. De grenssnelheid wijkt extreem af van de gemiddelde snelheid, dit is dus een onrealistische aanname. Om de grenssnelheid in werkelijkheid te halen moet een schip op hoog vermogen door het sluishoofd heen varen. Iets wat niet voorkomt.

Situatie 2: gemiddelde snelheid of grenssnelheid

Voor de Zuidersluis van Eefde zijn de parameters ingevuld en hieruit volgen de aanvaar energieën weergegeven in *Figuur 10.8*. De resultaten bij situatie 2 hebben een gelijke afwijking van elkaar als in



Figuur 10.8 Benadering aanvaarenergie op basis van de gemiddelde snelheid en grenssnelheid voor Zuidersluis Eefde + 10% vermogen

situatie 1, in situatie 2 wordt er per klasse voor gemiddelde- en grenssnelheid een gelijke hoeveelheid energie toegevoegd. Hieruit kan hetzelfde worden geconcludeerd. De grenssnelheid wijkt extreem af van de gemiddelde snelheid, dit is dus een onrealistische aanname. Om de grenssnelheid in werkelijkheid te halen moet een schip op hoog vermogen door het sluishoofd heen varen. Iets wat niet voorkomt.

Beladingsgraad

In de sheets in *Bijlage 12* valt af te lezen welke beladingsgraad de maatgevende aanvaarenergie geeft. Bij de benadering op basis van de gemiddelde snelheid zijn de bijna vol beladen schepen maatgevend. Alle andere benaderingen tonen aan dat de meer lege schepen maatgevend zijn. Door de grote diepgang welke een volledig beladen schip heeft, is de snelheid dermate laag dat een ledig schip met hogere snelheid maatgevend is.

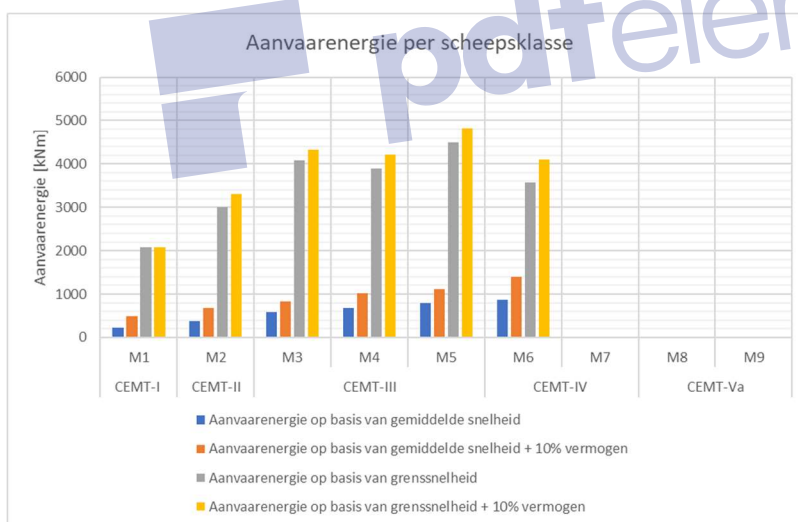
10.3 Verificatie Aanvaarenergietool

Uit de casestudy voor het bepalen van de aanvaarenergie van de Zuiderluis van Eefde volgt dat de maatgevende aanvaarenergie 2.282 kNm is, dit is uitgewerkt in *10.2 Casestudy aanvaarenergie Zuiderluis Eefde*. De maatgevende situatie hierbij is de aanvaarenergie op basis van de gemiddelde snelheid + 10% vermogen. Deze energie is een juiste benadering van de aanvaarenergie opgegeven door Rijkswaterstaat voor de benodigde opvangcapaciteit van de aanvaarbeveiliging bij Sluis Eefde. Om te kunnen concluderen dat de tool een realistische inschatting voor meerdere sluisen geeft, dient de tool te worden ingevuld voor andere sluisen. Bij de nieuwe Sluis III in Tilburg en Sluis Empel zijn de aanvaarenergie opgegeven door Rijkswaterstaat bekend, voor beide sluisen bedraagt deze 2000 kNm.

10.3.1 Sluis Empel

ID	Omschrijving	Bovenl. Eis	Onderl. eisen
E-032	De aanvaarconstructie dient een aanvaring van 2000 kNm op 0,5 meter boven de optredende waterstand op te vangen.	E-009	

Figuur 10.9 Systeemeis Sluis Empel^a



Figuur 10.10 Resultaat Aanvaarenergietool voor Sluis Empel

Het maatgevende schip bij Sluis Empel is een CEMENT-IV M6, aan de hand van de scheepvaartgegevens (*Bijlage 7*) en *Vergelijking 10-1* ($0,55\text{m}^2$) kan de snelheid voor een beladen en ledig schip worden berekend. Een beladen schip heeft een snelheid van 1,52 m/s en een ledig schip heeft een snelheid van 4,20 m/s nodig om een aanvaring van 2.000 kNm te veroorzaken. Hieruit is op te maken dat de maatgevende aanvaring een volgeladen

CEMENT-IV M6 schip betreft, een ongeladen schip kan geen aanvaring met een energie van 2.000 kNm veroorzaken.

In de resultaten van Sluis Empel zit een groot verschil tussen de aanvaarenergie berekend op basis van het gemiddelde en de berekening op basis van de grenssnelheid. De gemiddelde snelheid bedraagt ongeveer 1,00 m/s voor een volgeladen schip, de grenssnelheid benaderd de 3,00 m/s. De grenssnelheid in deze sluis is hoog omdat de drempel bij het boven- en benedenhoofd laag liggen. Om deze reden geeft de grenssnelheid een hoge bepaling van de aanvaarenergie, in het extreemste geval

^a (De Groot & Schippers, 2013)

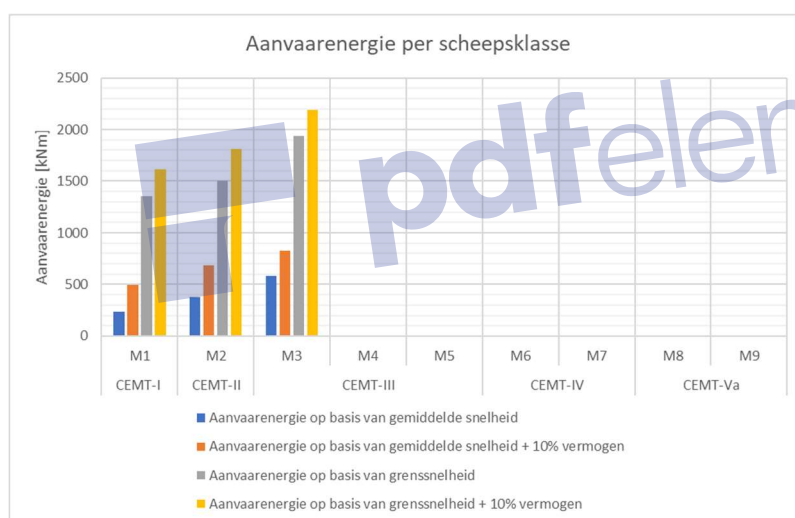
is de aanvaarenergie 4.800 kNm. De bepaling op basis van de gemiddelde snelheid geeft een meer realistische inschatting en is om deze reden maatgevend.

Uit de Aanvaarenergietool volgt dat de maatgevende aanvaarenergie 1.400 kNm bedraagt. Dat is 600 kNm lager dan de opgegeven aanvaarenergie van Rijkswaterstaat. De waarde uit de tool geeft een realistische inschatting voor een aanvaring bij Sluis Empel. In vergelijking met de gestelde eis van Rijkswaterstaat geeft de tool een juiste benadering van de aanvaarenergie. De kans dat een aanvaarenergie van 1.400 kNm zal voorkomen, is aannemelijk. De mogelijk is er om doormiddel van kansbepaling te bepalen of de aanvaarenergie dient te worden verhoogd om het risico te minimaliseren.

10.3.2 Nieuwe Sluis III te Tilburg

SCS3-021 Aanvaarbeveiliging waterkerende sluisconstructies	Bovenliggende eis(en)	Onderliggende eis(en)
De waterkerende constructies in het boven- en benedenhoofd van het element schutsluis dienen op een dusdanige wijze beschermd te worden met een aanvaarbeveiliging dat vanaf de kolkzijde een aanvaring met een energie van 2000 kNm geabsorbeerd kan worden zonder verlies van de waterkerende functie en/of de schutfunctie. Aanvaringen worden daarbij verondersteld op te treden in de zone vanaf de waterlijn tot 1,50 m daarboven, maar niet hoger dan de bovenzijde van het sluisplateau.	SCS3-013	SCS3-137

Figuur 10.11 Systeemeis nieuwe Sluis III te Tilburg^a



Figuur 10.12 Resultaat Aanvaarenergietool voor Sluis III

volgeladen CEMENT-III M3 schip betreft, een ongeladen schip kan geen aanvaring met een energie van 2.000 kNm veroorzaken. De kans dat een CEMENT-III schip een aanvaring heeft met een energie is zeer klein, op basis van de resultaten wordt afgelezen dat op basis van de grenssnelheid een aanvaarenergie van 2.000 kNm wordt bereikt.

Uit de Aanvaarenergietool volgt dat de maatgevende aanvaarenergie 827 kNm bedraagt. Dat is 1.173 kNm lager dan de opgegeven aanvaarenergie van Rijkswaterstaat. Het maatgevende schip in de tool is een beladen CEMENT-III M3 schip. Door de energie met $0,55\text{mv}^2$ om te rekenen naar de vaarsnelheid volgt dat de vaarsnelheid 1,20 m/s is bij aanvaring. Er is verschil van 0,66 m/s in de bepaling van de aanvaarenergie. De waarde uit de tool geeft een lage maar realistische inschatting voor de aanvaarenergie bij Sluis Empel. In vergelijking met de gestelde eis van Rijkswaterstaat geeft de tool

Het maatgevende schip bij Sluis Empel is CEMENT-III M3, aan de hand van de scheepvaartgegevens in *Bijlage 7* en *Vergelijking 10-1* ($0,55\text{mv}^2$) kan de snelheid voor een beladen en ledig schip worden berekend. Een beladen schip heeft een snelheid van 1,86 m/s en een ledig schip heeft een snelheid van 5,15 m/s nodig om een aanvaring van 2.000 kNm te veroorzaken. Hieruit wordt opgemaakt dat de maatgevende aanvaring een

^a (WillemsUnie, 26-11-2012)

een andere benadering van de aanvaarenergie. De kans dat een aanvaarenergie van 827 kNm zal voorkomen, is groot. Door semi-probabilistisch te rekenen dient de aanvaarenergie te worden verhoogd om het risico op falen te minimaliseren.



Bijlage 11 Aanvaarkans

Aanvaring op een sluisdeur is een gebeurtenis welke medebepaald hoe een sluisdeur wordt ontworpen, een sluisdeur dient een maximale aanvaarenergie te kunnen opvangen zonder zijn waterkerende functie te verliezen. Aanvaringen waarbij het gevolg het falen van de sluisdeur is, moeten worden voorkomen.

Een aanvaring is in veel gevallen een fout van menselijk handelen: onvoorzichtigheid, verkeerde besturing van het schip, beoordelingsfout, communicatie-storing of sluisbediening. In enkele gevallen is een technisch mankement de oorzaak. In dit onderzoek wordt er niet gekeken naar de oorzaak van aanvaring.

11.1 Aanvaarkans

11.1.1 Bepaling kans op aanvaring

De kans dat een schip - in het algemeen - tegen een object aanvaart in een jaar dient te worden herleid. Dit wordt gedaan aan de hand van *Vergelijking 11-1 Bepaling Algemene Aanvaarkans (a)*^a:

Vergelijking 11-1 Bepaling Algemene Aanvaarkans (a)

$$a = x \times y \times n \times k$$

Waarin:

- x = Mogelijkheid van aanvaren. Bij zowel opvaart als afvaart: 1; bij enkel opvaart of afvaart, het betreffende percentage passages meenemen [% passages]; Verschil tussen op- en afvaart;
- y = Percentage sluispassages van totale passages van het sluiscomplex [%]; Bij een sluisencomplex met twee sluisen zal dit percentage 50% (0,5) zijn;
- n = Totaalaantal nivellerings van het sluiscomplex [aantal per jaar]; Over het algemeen worden de scheepvaartbewegingen bijgehouden door de sluisbeheerder en Rijkswaterstaat, deze informatie is van noodzaak voor het bepalen van de aanvaarkans en dient te worden opgevraagd.
- k = Aanvaarkans van een sluisdeur [kans per nivellering]; Conform Q1399: 1 op 33.000 ($3,3 \times 10^{-5}$) per nivellering per jaar, algemene aanvaarkans sluisdeur.

Door de verschillende factoren met elkaar te vermenigvuldigen wordt de aanvaarkans (a) per jaar bepaald. Bij gebruik van deze methode voor een object welke in aanbouw is dienen de factoren te worden aangepast aan de verwachte toekomstperspectieven in scheepvaartbewegingen. Dit kan een uitbreiding van het sluiscomplex zijn, hogere scheepsklasse in de toekomst of meer nivellerings in de toekomst.

11.1.2 Aanvaarkans met een vooraf bepaalde Energie

De algemene aanvaarkans bepaald de kans dat een schip, ongeacht de grootte van de aanvaarenergie, de tweede deur aanvaart. Dit zegt nog niets over de grootte van de energie die dient te worden opgenomen en hoe groot de kans is dat deze energie zich voordoet. Om de kans op aanvaring met een vastgesteld energieniveau te bepalen, dient de overschrijdingskans van het energieniveau worden bepaald. De overschrijdingskans wordt per scheepsklasse bepaald en hiervan wordt de som genomen om de kans te bepalen, *Vergelijking 11-2* geeft dit weer.

Vergelijking 11-2 Bepalen overschrijdingskans vastgestelde aanvaarenergie

$$f = \sum_{i=II \text{ t/m } Va} (k_i \times m_{ongeladen} \times s_{i,ongeladen} + k_i \times m_{geladen} \times s_{i,geladen})$$

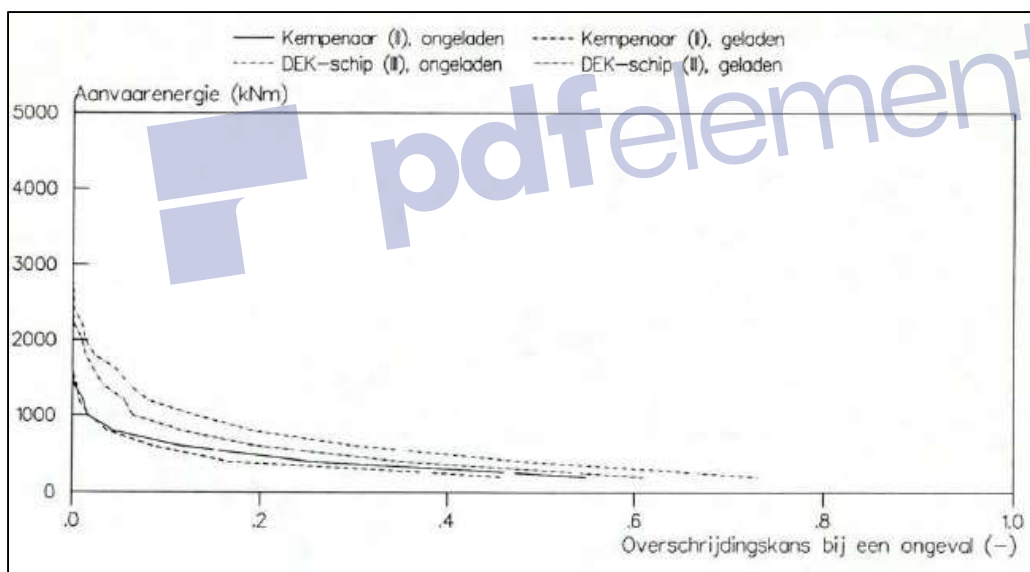
Waarin:

^a (Mobilis, TBI, 21 september 2017)

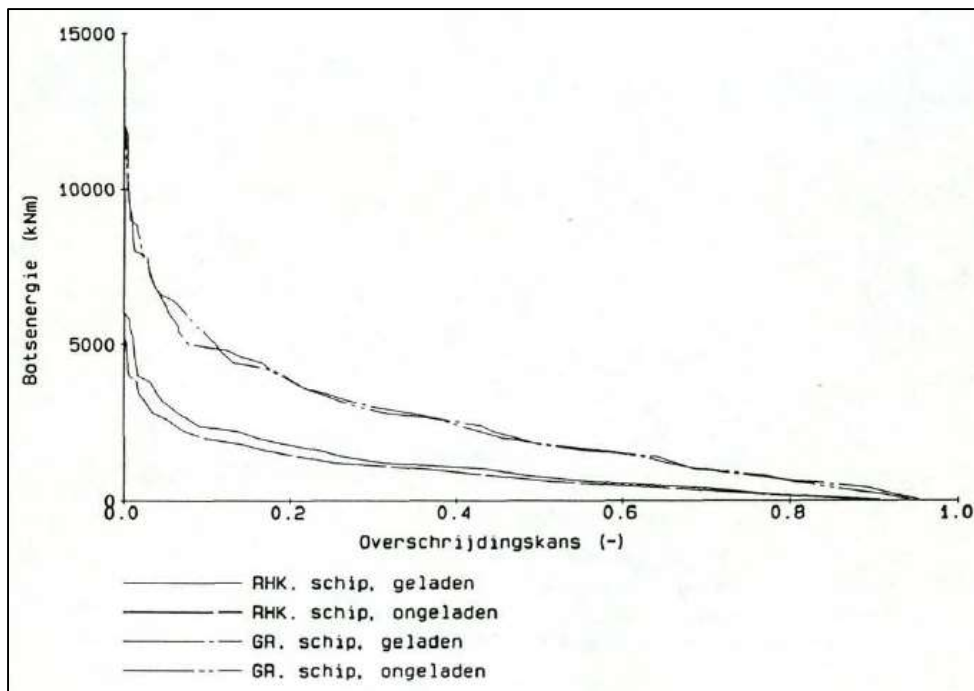
$f =$	De kans dat een schip met een vastgesteld energieniveau door de sluis passeert; [kans per jaar]
$k_i =$	Percentage scheepvaartpassages van een bepaalde klasse; CEMT-II, CEMT-III, CEMT-IV of CEMT-Va en groter; [%];
$m_{ongeladen} =$	Percentage ongeladen schepen; [%];
$m_{geladen} =$	Percentage geladen schepen; [%];
$S_{i,ongeladen} =$	Overschrijdingskans van een vastgesteld energieniveau door ongeladen schepen met klasse i; [-];
$S_{i,geladen} =$	Overschrijdingskans van een vastgesteld energieniveau door geladen schepen met klasse i; [-].

Door de uitkomst van *Vergelijking 11-2* te vermenigvuldigen met de uitkomst van *Vergelijking 11-1* volgt de aanvaarkans van de 2^e deur door een vastgesteld energieniveau of groter.

Hoe groot de kans op een bepaalde aanvaarenergie is, is afhankelijk van de verdeling van de vloot: welke typen schepen, welke regelmaat, geladen of ledig en de invaarsnelheid in de sluis. Het (Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399) heeft ten behoeve van de kansbepaling voor een bepaalde aanvaarenergie meerdere overschrijdingskromme opgesteld. Hierin wordt onderscheidt gemaakt tussen vaarwegklasse, diepte sluis, scheepvaartklasse en geladen/ongeladen. In *Figuur 11.1* en *Figuur 11.2* zijn twee overschrijdingskromme weergegeven. Deze overschrijdingskromme gelden bij een vaarwegklasse Va en een diepte van de sluis van 10 meter. In de Q1399 zijn de andere overschrijdingskromme opgenomen op bladzijde 72 tot en met bladzijde 111.



Figuur 11.1 Overschrijdingskromme Aanvaarenergie CEMT-II en CEMT-III (Q1399 figuur 17a)



Figuur 11.2 Overschrijdingskromme Aanvaarenergie CEMT-IV en CEMT-Va (Q1399 figuur 9a)

Uit deze overschrijdingskromme wordt afgelezen hoe groot het percentage van de klasse is dat een hoger potentiële energie heeft dan een vastgestelde aanvaarenergie.

Voorbeeld: CEMT-IV geladen, hoe groot is de overschrijdingskans van een aanvaarenergie van 2.500 kNm? Hiervoor wordt *Figuur 11.2* uitgelezen, hieruit volgt dat bij een aanvaarenergie van 2.500 kNm een overschrijdingskans van 0,11 is. 11% van de schepen CEMT-IV geladen hebben een grotere potentiële aanvaarenergie dan 2.500 kNm.

11.2 Aanvaarkans Sluis Eefde

11.2.1 Verdeling scheepvaart

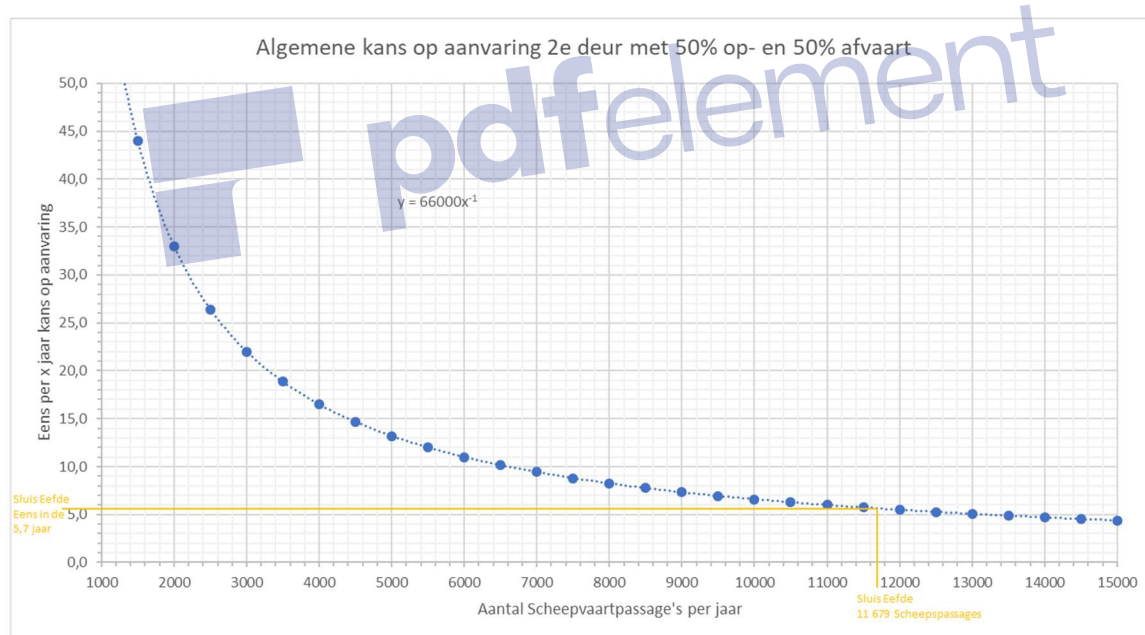
Voor Sluis Eefde geldt de verdeling^a die in *Tabel 6.3 Gegevens verdeling scheepvaart Sluiscomplex Eefde* van scheepvaart voor het jaar 2013 en 2040. 2040 is het ontwerpjaar van het sluiscomplex, hierbij is de tweede sluis, Noordersluis, in werking gesteld vanaf 2020 en neemt een deel van de scheepvaart over.

Tabel 11.1 Gegevens verdeling scheepvaart Sluiscomplex Eefde

Scheepsklassen		2013 (huidig)		2040 (ontwerpjaar)					
			aantal	Totaal complex		Noordersluis		Zuidersluis	
					aantal		aantal		aantal
CEMT-I	M1	3,86%	451	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0
CEMT-II	M2	8,35%	975	3,51%	743	1,48%	157	5,54%	586
CEMT-III	M3-M5	34,13%	3986	26,94%	5697	11,37%	1203	42,51%	4494
CEMT-IV	M6-M7	38,64%	4513	32,92%	6962	13,90%	1470	51,95%	5492
CEMT-Va	M8	15,02%	1754	36,62%	7744	73,24%	7744	0,00%	0
Totaal		100%	11679	100%	21146	100%	10573	100%	10573

11.2.2 Uitwerking algemene aanvaarkans

In *Figuur 11.3* is *Vergelijking 11-1 Bepaling Algemene Aanvaarkans (a)* in een grafiek weergegeven, hierbij is er aangenomen dat de verdeling op- en afvaart 50/50 is en de kans per nivellering is conform de Q1399. Voor Sluis Eefde kan worden afgelezen dat de huidige kans op een aanvaring eens in de 6 jaar voorkomt, ook in de toekomst na het realiseren blijft de aanvaarkans voor beide sluiscomplexen ongeveer eens in de 6 jaar. De kans blijft ongeveer gelijk doordat het aantal passages verdubbeld, maar wordt verdeeld over de twee kolken. In *Tabel 11.2* is de exacte kans weergegeven.



Figuur 11.3 Bepaling algemene kans op aanvaring 2e deur met 50% op- en afvaart

Tabel 11.2 Algemene aanvaarkans Sluis Eefde

Algemene aanvaarkans	Kans op aanvaring [per jaar]	Aanvaarkans is eens per ... jaar
Zuidersluis huidig	0,18	5,7
Zuidersluis toekomst	0,16	6,2
Noordersluis toekomst	0,16	6,2

^a Opgehaald uit (Aanvaarbescherming sluizen Delden en Hengelo en Eefde, 13-11-2015)

11.2.3 Uitwerking Aanvaarkans met 2.500 kNm aanvaarenergie

In het project Sluis Eefde is er gesteld dat de aanvaarbeveiliging een aanvaarenergie van 2.500 kNm moet kunnen afdragen. In dit deel wordt de kans bepaald dat deze aanvaring voorkomt. Hiervoor wordt *Vergelijking 11-2 Bepalen overschrijdingskans vastgestelde aanvaarenergie* toegepast. De verdeling van de scheepvaart uit *Tabel 6.3* wordt gebruikt, net als de bepaalde aanvaarkans uit *paragraaf 11.2.2*. Verder is de verdeling van geladen en ongeladen schepen nodig, voor Eefde geldt de verhouding geladen/ongeladen: 90% om 10%^a.

In *Figuur 11.1* en *Figuur 11.2* wordt de overschrijdingskans van 2.500 kNm afgelezen voor de scheepvaartklassen CEMT-II tot en met Va geladen en ongeladen. Hieruit volgt de overschrijdingskans, weergegeven in *Tabel 11.3*.

Tabel 11.3 Overschrijdingskansen 2500 kNm Sluis Eefde conform Q1399

Scheepsklasse			Overschrijding 2500 kNm
CEMT-II	M2	Geladen	0,00
		Ongeladen	0,00
CEMT-III	M3-M5	Geladen	0,00
		Ongeladen	0,005
CEMT-IV	M6-M7	Geladen	0,11
		Ongeladen	0,07
CEMT-Va	M8	Geladen	0,38
		Ongeladen	0,37

Door *Tabel 11.3* uit te breiden met de verdeling scheepvaart en het percentage geladen en ongeladen is de kans op aanvaring van 2.500 kNm of groter bepaald. In de volgende tabellen is dit uitgewerkt voor:

- De Zuidersluis voor renovatie;
- De Zuidersluis na renovatie;
- De Noordersluis na realisatie.

Tabel 11.4 Uitwerking kans op aanvaring voor renovatie (Zuidersluis) met aanvaarenergie groter als 2500 kNm

Kans Zuidersluis huidige tijd			Overschrijding 2500 kNm	Geladen/ ongeladen [%]	Verdeling scheepvaart (<i>Tabel 2.2.1</i>) [%]	Kans per klasse
CEMT-II	M2	Geladen	0,00	90	8,35	0,000
		Ongeladen	0,00	10		0,000
CEMT-III	M3-M5	Geladen	0,00	90	34,13	0,000
		Ongeladen	0,005	10		0,000
CEMT-IV	M6-M7	Geladen	0,11	90	38,64	0,038
		Ongeladen	0,07	10		0,003
CEMT-Va	M8	Geladen	0,38	90	15,02	0,051
		Ongeladen	0,37	10		0,006
					Totaal	0,098

^a Afkomstig uit (Aanvaarbescherming sluizen Delden en Hengelo en Eefde, 13-11-2015)

Tabel 11.5 Uitwerking kans op aanvaring Zuidersluis na renovatie met aanvaarenergie groter als 2500 kNm

Kans Zuidersluis toekomstige tijd			Overschrijding 2500 kNm	Geladen/ ongeladen [%]	Verdeling scheepvaart (Tabel 2.2.1) [%]	Kans per klasse
CEMT-II	M2	Geladen	0,00	90	5,54	0,000
		Ongeladen	0,00	10		0,000
CEMT-III	M3-M5	Geladen	0,00	90	42,51	0,000
		Ongeladen	0,005	10		0,000
CEMT-IV	M6-M7	Geladen	0,11	90	51,95	0,051
		Ongeladen	0,07	10		0,004
CEMT-Va	M8	Geladen	0,38	90	0,00	0,000
		Ongeladen	0,37	10		0,000
					Totaal	0,055

Tabel 11.6 Uitwerking kans op aanvaring Noordersluis na realisatie met aanvaarenergie groter als 2500 kNm

Kans Noordersluis toekomstige tijd			Overschrijding 2500 kNm	Geladen/ ongeladen [%]	Verdeling scheepvaart (Tabel 2.2.1) [%]	Kans per klasse
CEMT-II	M2	Geladen	0,00	90	1,48	0,000
		Ongeladen	0,00	10		0,000
CEMT-III	M3-M5	Geladen	0,00	90	11,37	0,000
		Ongeladen	0,005	10		0,000
CEMT-IV	M6-M7	Geladen	0,11	90	13,90	0,014
		Ongeladen	0,07	10		0,001
CEMT-Va	M8	Geladen	0,38	90	73,24	0,250
		Ongeladen	0,37	10		0,027
					Totaal	0,292

11.2.4 Resultaat

Als laatste stap wordt de berekende kans op aanvaring groter dan 2.500 kNm vermenigvuldigd met de algemene aanvaarkans. Het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel 11.7.

Tabel 11.7 Resultaten aanvaarkans voor sluiscomplex Eefde

Algemene aanvaarkans	Kans op aanvaring [per jaar]	Kans groter dan 2500 kNm	Kans op kritieke aanvaring	Kans eens per .. jaar
Zuidersluis huidig	0,18	0,098	0,018	57
Zuidersluis toekomst	0,16	0,055	0,009	114
Noordersluis toekomst	0,16	0,292	0,047	21

De huidige aanvaarkans is eens in de 57 jaar. Na realisatie van de nieuwe Noordersluis kolk wordt er verwacht dat de scheepvaart gaat groeien, met name CEMT-klasse Va. Omdat alle schepen van deze klasse door de nieuwe sluis kolk varen neemt de kans op een aanvaring groter dan 2.500 kNm toe met een factor 3. Bij de Zuidersluis kolk passeren alleen schepen tot en met een CEMT-klasse IV. Hierdoor wordt de kans op een aanvaring groter dan 2.500 kNm met een factor 2 af.

Bijlage 12 Uitdraai Sheets Aanvaarenergietool

Bepaling Maximale Aanvaarenergie op basis van Gemiddelde snelheid in de kolk

Formules

Formule voor bepalen Aanvaarenergie

$$E = 0,55 \times m_s \times v_{gem}^2$$

E = Aanvaarenergie

kNm

m_s = Massa schip

ton

v_{gem} = Gemiddelde vaarsnelheid

m/s

Op basis van: Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk, par. 7.5.4, Tabel 7-4

Berekening Aanvaarenergie met gemiddelde vaarsnelheid per klasse

NB: 3 m/s is de maximale vaarsnelheid, de snelheid buiten de kolk is 9 km/u = 2,5 m/s, met 20% overschrijding conform de ROK-eis komt dit neer op 3 m/s. Als de grenssnelheid hoger is dan 3 m/s wordt in de berekening voor de aanvaarenergie een snelheid van 3 m/s aangehouden, niet de berekende grenssnelheid.

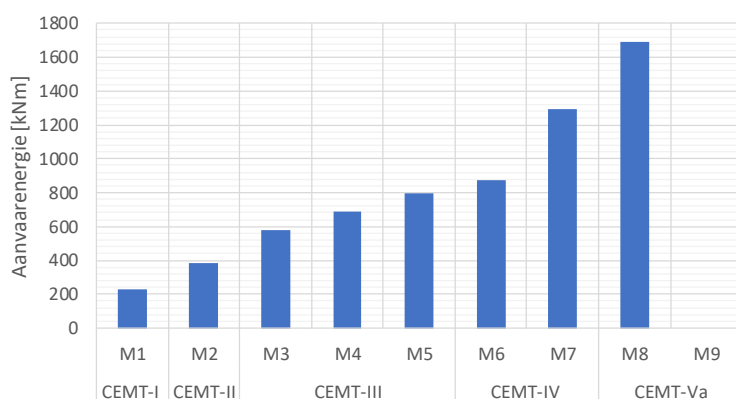
		1	2	3	4	5	6		
Grenssnelheid bij binnenvaren (bovenhoofd)									
CEMT-klasse I [M1]		Ledig							Vol
Diepgang	T_s	0,7	0,96	1,21	1,47	1,73	1,99	2,24	2,5 m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	3,54	4,83	6,13	7,43	8,73	10,03	11,33	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	m/s
Massa schip	m_s	55	107	159	211	263	315	368	ton
Aanvaarenergie	E_0	68	120	161	192	214	227	232	kNm
CEMT-klasse II [M2]		Ledig							Vol
Diepgang	T_s	0,7	0,97	1,24	1,51	1,79	2,06	2,33	2,6 m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	4,62	6,41	8,20	9,99	11,79	13,58	15,37	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	m/s
Massa schip	m_s	90	176	261	347	433	519	604	ton
Aanvaarenergie	E_0	111	197	265	316	351	373	382	kNm
CEMT-klasse III [M3]		Ledig							Vol
Diepgang	T_s	0,8	1,06	1,31	1,57	1,83	2,09	2,34	2,6 m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	5,76	7,61	9,46	11,31	13,17	15,02	16,87	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	m/s
Massa schip	m_s	137	267	397	527	657	787	917	ton
Aanvaarenergie	E_0	169	299	402	479	532	565	579	kNm
CEMT-klasse III [M4]		Ledig							Vol
Diepgang	T_s	0,8	1,07	1,34	1,61	1,89	2,16	2,43	2,7 m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	6,56	8,79	11,01	13,24	15,46	17,69	19,91	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	m/s
Massa schip	m_s	162	316	471	625	779	933	1088	ton
Aanvaarenergie	E_0	200	355	477	568	632	671	687	kNm

CEMT-klasse III [M5]		Ledig		Vigerend					Vol	
Diepgang	T_s	0,8	1,07	1,34	1,61	1,89	2,16	2,43	2,7	m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	6,56	8,79	11,01	13,24	15,46	17,69	19,91	22,14	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00	m/s
Massa schip	m_s	188	366	545	723	902	1080	1259	1.438	ton
Aanvaarenergie	E_0	232	411	552	658	731	776	795	791	kNm
CEMT-klasse IV [M6]		Ledig		Vigerend					Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,19	1,47	1,76	2,04	2,33	2,61	2,9	m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	8,55	11,26	13,98	16,69	19,41	22,12	24,84	27,55	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00	m/s
Massa schip	m_s	206	401	597	793	988	1184	1380	1.576	ton
Aanvaarenergie	E_0	254	450	605	721	802	851	871	867	kNm
CEMT-klasse IV [M7]		Ledig		Vigerend					Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3	m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	
Nat oppervlak	A_s	8,55	11,40	14,25	17,10	19,95	22,80	25,65	28,50	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00	m/s
Massa schip	m_s	306	597	889	1180	1472	1763	2055	2.346	ton
Aanvaarenergie	E_0	379	671	900	1073	1194	1267	1297	1290	kNm
CEMT-klasse Va [M8]		Ledig		Vigerend					Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,27	1,64	2,01	2,39	2,76	3,13	3,5	m
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	ONWAAR	ONWAAR	
Nat oppervlak	A_s	10,26	14,49	18,73	22,96	27,20	31,43	35,67	39,90	m ²
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,42	1,34	1,26	1,19	1,11	0,00	0,00	m/s
Massa schip	m_s	435	849	1264	1678	2092	2506	2921	3.335	ton
Aanvaarenergie	E_0	538	944	1253	1475	1618	1690	0	0	kNm
CEMT-klasse Va [M9]		Ledig		Vigerend					Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,34	1,79	2,23	2,67	3,11	3,56	4	m
Check Schip		ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	
Nat oppervlak	A_s	10,26	15,31	20,36	25,41	30,45	35,50	40,55	45,60	m ²
Vaarsnelheid	v_s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	m/s
Massa schip	m_s	560	1094	1627	2161	2695	3228	3762	4.295	ton
Aanvaarenergie	E_0	0	0	0	0	0	0	0	0	kNm

Maximale Aanvaarenergie per klasse

Scheepsklassen		Aanvaar- energie [kNm]
CEMT-I	M1	232
CEMT-II	M2	382
CEMT-III	M3	579
	M4	687
	M5	795
CEMT-IV	M6	871
	M7	1297
CEMT-Va	M8	1690
	M9	0

Maximale aanvaarenergie per klasse in de kolk



Bepaling Maximale Aanvaarenergie op basis van Grenssnelheid bij invaren

Formules

Formule voor bepaling Grenssnelheid

$$v_g = [0,76 (A_s/A_k)^2 - 1,45 (A_s/A_k) + 0,74] \sqrt{g (h_k - z_d)}$$

v_g	= grenssnelheid
A_s	= doorsnede schip
	= $b_s d_s$
b_s	= breedte schip
d_s	= diepgang schip
A_k	= doorsnede sluisprofiel
	= $b_k (h_k - z_d)$
b_k	= breedte kolk
h_k	= waterspiegelniveau
z_d	= niveau kolkdrempel
g	= versnelling zwaartekracht

Formule voor bepalen Aanvaarenergie

$$E = 0,55 \times m_s \times v_g^2$$

E	=	Aanvaarenergie	kNm
m_s	=	Massa schip	ton
v_g	=	Grenssnelheid bij de drempel	m/s

Berekening Aanvaarenergie uit Grenssnelheid per klasse

NB: 3 m/s is de maximale vaarsnelheid, de snelheid buiten de kolk is 9 km/u = 2,5 m/s, met 20% overschrijding conform de ROK-eis komt dit neer op 3 m/s. Als de grenssnelheid hoger is dan 3 m/s wordt in de berekening voor de aanvaarenergie een snelheid van 3 m/s aangehouden, niet de berekende grenssnelheid.

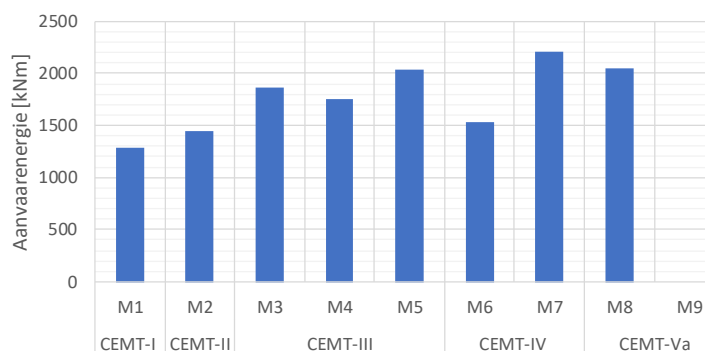
		1	2	3	4	5	6		
Grenssnelheid bij binnenvaren (bovenhoofd)									
CEMT-klasse I [M1]		Ledig						Vigerend	
Diepgang	T_s	0,7	0,96	1,21	1,47	1,73	1,99	2,24	2,5
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR
Nat oppervlak	A_s	3,54	4,83	6,13	7,43	8,73	10,03	11,33	12,63
Grenssnelheid	v_g	3,79	3,56	3,34	3,12	2,92	2,72	2,53	2,34
Massa schip	m_s	55	107	159	211	263	315	368	420
Aanvaarenergie	E_0	271	529	787	1045	1233	1283	1292	1269
CEMT-klasse II [M2]		Ledig						Vigerend	
Diepgang	T_s	0,7	0,97	1,24	1,51	1,79	2,06	2,33	2,6
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR
Nat oppervlak	A_s	4,62	6,41	8,20	9,99	11,79	13,58	15,37	17,16
Grenssnelheid	v_g	3,60	3,29	3,00	2,72	2,46	2,22	1,98	1,77
Massa schip	m_s	90	176	261	347	433	519	604	690
Aanvaarenergie	E_0	446	870	1294	1417	1443	1399	1307	1183
CEMT-klasse III [M3]		Ledig						Vigerend	
Diepgang	T_s	0,8	1,06	1,31	1,57	1,83	2,09	2,34	2,6
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR
Nat oppervlak	A_s	5,76	7,61	9,46	11,31	13,17	15,02	16,87	18,72
Grenssnelheid	v_g	3,40	3,10	2,80	2,53	2,27	2,03	1,80	1,59
Massa schip	m_s	137	267	397	527	657	787	917	1.047
Aanvaarenergie	E_0	676	1319	1715	1853	1861	1778	1634	1453

CEMT-klasse III [M4]		Ledig							Vigerend		Vol	
Diepgang	T_s	0,8	1,07	1,34	1,61	1,89	2,16	2,43	2,7		m	
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR			
Nat oppervlak	A_s	6,56	8,79	11,01	13,24	15,46	17,69	19,91	22,14		m ²	
Grenssnelheid	v_g	3,27	2,91	2,57	2,26	1,97	1,70	1,46	1,24		m/s	
Massa schip	m_s	162	316	471	625	779	933	1088	1.242		ton	
Aanvaarenergie	E_0	802	1472	1714	1757	1665	1492	1277	1052		kNm	
CEMT-klasse III [M5]		Ledig							Vigerend		Vol	
Diepgang	T_s	0,8	1,07	1,34	1,61	1,89	2,16	2,43	2,7		m	
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR			
Nat oppervlak	A_s	6,56	8,79	11,01	13,24	15,46	17,69	19,91	22,14		m ²	
Grenssnelheid	v_g	3,27	2,91	2,57	2,26	1,97	1,70	1,46	1,24		m/s	
Massa schip	m_s	188	366	545	723	902	1080	1259	1.438		ton	
Aanvaarenergie	E_0	928	1704	1984	2033	1927	1727	1478	1217		kNm	
CEMT-klasse IV [M6]		Ledig							Vigerend		Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,19	1,47	1,76	2,04	2,33	2,61	2,9		m	
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR			
Nat oppervlak	A_s	8,55	11,26	13,98	16,69	19,41	22,12	24,84	27,55		m ²	
Grenssnelheid	v_g	2,95	2,54	2,16	1,82	1,51	1,24	1,00	0,80		m/s	
Massa schip	m_s	206	401	597	793	988	1184	1380	1.576		ton	
Aanvaarenergie	E_0	981	1420	1534	1446	1247	1005	766	555		kNm	
CEMT-klasse IV [M7]		Ledig							Vigerend		Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3		m	
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR			
Nat oppervlak	A_s	8,55	11,40	14,25	17,10	19,95	22,80	25,65	28,50		m ²	
Grenssnelheid	v_g	2,95	2,52	2,13	1,77	1,46	1,18	0,94	0,74		m/s	
Massa schip	m_s	306	597	889	1180	1472	1763	2055	2.346		ton	
Aanvaarenergie	E_0	1460	2082	2210	2041	1719	1350	998	702		kNm	
CEMT-klasse Va [M8]		Ledig							Vigerend		Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,27	1,64	2,01	2,39	2,76	3,13	3,5		m	
Check Schip		WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	WAAR	ONWAAR	ONWAAR			
Nat oppervlak	A_s	10,26	14,49	18,73	22,96	27,20	31,43	35,67	39,90		m ²	
Grenssnelheid	v_g	2,68	2,09	1,59	1,16	0,83	0,57	0,00	0,00		m/s	
Massa schip	m_s	435	849	1264	1678	2092	2506	2921	3.335		ton	
Aanvaarenergie	E_0	1724	2049	1753	1252	784	446	0	0		kNm	
CEMT-klasse Va [M9]		Ledig							Vigerend		Vol	
Diepgang	T_s	0,9	1,34	1,79	2,23	2,67	3,11	3,56	4		m	
Check Schip		ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR	ONWAAR			
Nat oppervlak	A_s	10,26	15,31	20,36	25,41	30,45	35,50	40,55	45,60		m ²	
Grenssnelheid	v_g	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		m/s	
Massa schip	m_s	560	1094	1627	2161	2695	3228	3762	4.295		ton	
Aanvaarenergie	E_0	0	0	0	0	0	0	0	0		kNm	

Maximale Aanvaarenergie per klasse

Scheepsklassen		Aanvaar-energie [kNm]
CEMT-I	M1	1292
CEMT-II	M2	1443
CEMT-III	M3	1861
	M4	1757
CEMT-IV	M5	2033
	M6	1534
CEMT-Va	M7	2210
	M8	2049
	M9	0

Maximale aanvaarenergie per klasse bij binnenvaren



Bepaling Maximale Aanvaarenergie op basis van Gemiddelde snelheid en 10% Motorvermogen

Berekening Aanvaarenergie met gemiddelde vaarsnelheid per klasse

NB: 3 m/s is de maximale vaarsnelheid, de snelheid buiten de kolk is 9 km/u = 2,5 m/s, met 20% overschrijding conform de ROK-eis komt dit neer op 3 m/s. Als de grenssnelheid hoger is dan 3 m/s wordt in de berekening voor de aanvaarenergie een snelheid van 3 m/s aangehouden, niet de berekende grenssnelheid.

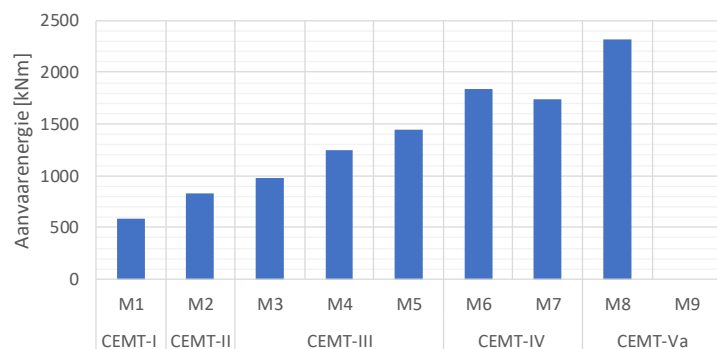
		1	2	3	4	5	6		
Grenssnelheid bij binnenvaren (bovenhoofd)									
CEMT-klasse I [M1]		Grenssnelheid bij binnenvaren (bovenhoofd)							
		Ledig	Vigerend						Vol
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00 m/s
Aanvaarenergie	E_0	68	120	161	192	214	227	232	231 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	97	97	97	97	97	97	97	97 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	3571	3571	3571	3571	3571	3571	3571	3571 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	357	357	357	357	357	357	357	357 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	425	477	518	549	571	584	589	588 kNm
CEMT-klasse II [M2]		Ledig	Vigerend						Vol
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00 m/s
Aanvaarenergie	E_0	111	197	265	316	351	373	382	380 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	80	80	80	80	80	80	80	80 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	4448	4448	4448	4448	4448	4448	4448	4448 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	445	445	445	445	445	445	445	445 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	556	642	710	760	796	817	826	824 kNm
CEMT-klasse III [M3]		Ledig	Vigerend						Vol
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00 m/s
Aanvaarenergie	E_0	169	299	402	479	532	565	579	576 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	65	65	65	65	65	65	65	65 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	4043	4043	4043	4043	4043	4043	4043	4043 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	404	404	404	404	404	404	404	404 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	573	703	806	883	937	969	983	980 kNm
CEMT-klasse III [M4]		Ledig	Vigerend						Vol
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00 m/s
Aanvaarenergie	E_0	200	355	477	568	632	671	687	683 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	62	62	62	62	62	62	62	62 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	5592	5592	5592	5592	5592	5592	5592	5592 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	559	559	559	559	559	559	559	559 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	760	914	1036	1127	1191	1230	1246	1242 kNm
CEMT-klasse III [M5]		Ledig	Vigerend						Vol
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00 m/s
Aanvaarenergie	E_0	232	411	552	658	731	776	795	791 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	50	50	50	50	50	50	50	50 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	6460	6460	6460	6460	6460	6460	6460	6460 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	646	646	646	646	646	646	646	646 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	878	1057	1198	1304	1377	1422	1441	1437 kNm

CEMT-klasse IV [M6]		Ledig		Vigerend				Vol		
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00	m/s
Aanvaarenergie	E_0	254	450	605	721	802	851	871	867	kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	55	55	55	55	55	55	55	55	m
Max energie toevoeging	ΔE_s	9691	9691	9691	9691	9691	9691	9691	9691	kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	969	969	969	969	969	969	969	969	kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	1223	1419	1574	1690	1771	1820	1840	1836	kNm
CEMT-klasse IV [M7]		Ledig		Vigerend				Vol		
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,43	1,36	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00	m/s
Aanvaarenergie	E_0	379	671	900	1073	1194	1267	1297	1290	kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	30	30	30	30	30	30	30	30	m
Max energie toevoeging	ΔE_s	4476	4476	4476	4476	4476	4476	4476	4476	kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	448	448	448	448	448	448	448	448	kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	826	1118	1348	1521	1641	1714	1745	1738	kNm
CEMT-klasse Va [M8]		Ledig		Vigerend				Vol		
Vaarsnelheid	v_s	1,50	1,42	1,34	1,26	1,19	1,11	0,00	0,00	m/s
Aanvaarenergie	E_0	538	944	1253	1475	1618	1690	0	0	kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	25	25	25	25	25	25	25	25	m
Max energie toevoeging	ΔE_s	6335	6335	6335	6335	6335	6335	6335	6335	kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	634	634	634	634	634	634	634	634	kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	1172	1577	1887	2109	2251	2323	0	0	kNm
CEMT-klasse Va [M9]		Ledig		Vigerend				Vol		
Vaarsnelheid	v_s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	m/s
Aanvaarenergie	E_0	0	0	0	0	0	0	0	0	kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	0	0	0	0	0	0	0	0	m
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	0	0	0	0	0	0	0	kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	0	0	0	0	0	0	0	kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	0	0	0	0	0	0	0	0	kNm

Maximale Aanvaarenergie per klasse

Scheepsklassen		Aanvaar- energie [kNm]
CEMT-I	M1	589
CEMT-II	M2	826
CEMT-III	M3	983
	M4	1246
	M5	1441
CEMT-IV	M6	1840
	M7	1745
CEMT-Va	M8	2323
	M9	0

Maximale aanvaarenergie per klasse bij binnenvaren



Bepaling Maximale Aanvaarenergie op basis van Grenssnelheid en 10% Motorvermogen

Berekening Aanvaarenergie uit Grenssnelheid per klasse

NB: 3 m/s is de maximale vaarsnelheid, de snelheid buiten de kolk is 9 km/u = 2,5 m/s, met 20% overschrijding conform de ROK-eis komt dit neer op 3 m/s. Als de grenssnelheid hoger is dan 3 m/s wordt in de berekening voor de aanvaarenergie een snelheid van 3 m/s aangehouden, niet de berekende grenssnelheid.

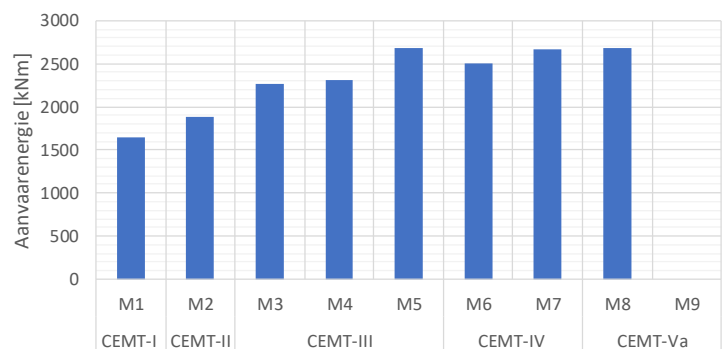
		1	2	3	4	5	6		
Grenssnelheid bij binnenvaren (bovenhoofd)									
CEMT-klasse I [M1]		Ledig		Vigerend				Vol	
Vaarsnelheid	v_s	3,00	3,00	3,00	3,00	2,92	2,72	2,53	2,34 m/s
Aanvaarenergie	E_0	271	529	787	1045	1233	1283	1292	1269 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	97	97	97	97	97	97	97	97 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	0	0	0	3571	3571	3571	3571 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	0	0	0	357	357	357	357 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	271	529	787	1045	1590	1640	1649	1626 kNm
CEMT-klasse II [M2]		Ledig		Vigerend				Vol	
Vaarsnelheid	v_s	3,00	3,00	3,00	2,72	2,46	2,22	1,98	1,77 m/s
Aanvaarenergie	E_0	446	870	1294	1417	1443	1399	1307	1183 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	80	80	80	80	80	80	80	80 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	0	0	4448	4448	4448	4448	4448 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	0	0	445	445	445	445	445 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	446	870	1294	1861	1888	1844	1752	1628 kNm
CEMT-klasse III [M3]		Ledig		Vigerend				Vol	
Vaarsnelheid	v_s	3,00	3,00	2,80	2,53	2,27	2,03	1,80	1,59 m/s
Aanvaarenergie	E_0	676	1319	1715	1853	1861	1778	1634	1453 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	65	65	65	65	65	65	65	65 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	0	4043	4043	4043	4043	4043	4043 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	0	404	404	404	404	404	404 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	676	1319	2119	2257	2266	2182	2038	1858 kNm
CEMT-klasse III [M4]		Ledig		Vigerend				Vol	
Vaarsnelheid	v_s	3,00	2,91	2,57	2,26	1,97	1,70	1,46	1,24 m/s
Aanvaarenergie	E_0	802	1472	1714	1757	1665	1492	1277	1052 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	62	62	62	62	62	62	62	62 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	5592	5592	5592	5592	5592	5592	5592 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	559	559	559	559	559	559	559 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	802	2031	2273	2316	2224	2051	1837	1611 kNm
CEMT-klasse III [M5]		Ledig		Vigerend				Vol	
Vaarsnelheid	v_s	3,00	2,91	2,57	2,26	1,97	1,70	1,46	1,24 m/s
Aanvaarenergie	E_0	928	1704	1984	2033	1927	1727	1478	1217 kNm
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 kN/kW
Vaarafstand	l_{vaar}	50	50	50	50	50	50	50	50 m
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	6460	6460	6460	6460	6460	6460	6460 kNm
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	646	646	646	646	646	646	646 kNm
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	928	2350	2630	2679	2573	2373	2124	1863 kNm

CEMT-klasse IV [M6]		Ledig							Vigerend		Vol	
Vaarsnelheid	v_s	2,95	2,54	2,16	1,82	1,51	1,24	1,00	0,80		m/s	
Aanvaarenergie	E_0	981	1420	1534	1446	1247	1005	766	555		kNm	
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		kN/kW	
Vaarafstand	l_{vaar}	55	55	55	55	55	55	55	55		m	
Max energie toevoeging	ΔE_s	9691	9691	9691	9691	9691	9691	9691	9691		kNm	
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	969	969	969	969	969	969	969	969		kNm	
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	1950	2389	2503	2415	2216	1974	1735	1525		kNm	
CEMT-klasse IV [M7]		Ledig							Vigerend		Vol	
Vaarsnelheid	v_s	2,95	2,52	2,13	1,77	1,46	1,18	0,94	0,74		m/s	
Aanvaarenergie	E_0	1460	2082	2210	2041	1719	1350	998	702		kNm	
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		kN/kW	
Vaarafstand	l_{vaar}	30	30	30	30	30	30	30	30		m	
Max energie toevoeging	ΔE_s	4476	4476	4476	4476	4476	4476	4476	4476		kNm	
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	448	448	448	448	448	448	448	448		kNm	
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	1908	2530	2658	2488	2167	1797	1445	1149		kNm	
CEMT-klasse Va [M8]		Ledig							Vigerend		Vol	
Vaarsnelheid	v_s	2,68	2,09	1,59	1,16	0,83	0,57	0,00	0,00		m/s	
Aanvaarenergie	E_0	1724	2049	1753	1252	784	446	0	0		kNm	
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		kN/kW	
Vaarafstand	l_{vaar}	25	25	25	25	25	25	25	25		m	
Max energie toevoeging	ΔE_s	6335	6335	6335	6335	6335	6335	6335	6335		kNm	
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	634	634	634	634	634	634	634	634		kNm	
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	2357	2683	2386	1886	1417	1079	0	0		kNm	
CEMT-klasse Va [M9]		Ledig							Vigerend		Vol	
Vaarsnelheid	v_s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		m/s	
Aanvaarenergie	E_0	0	0	0	0	0	0	0	0		kNm	
Kracht/vermogen		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		kN/kW	
Vaarafstand	l_{vaar}	0	0	0	0	0	0	0	0		m	
Max energie toevoeging	ΔE_s	0	0	0	0	0	0	0	0		kNm	
10% van max vermogen	$E_{10\%}$	0	0	0	0	0	0	0	0		kNm	
Totale Energie aanvaring	E_{tot}	0	0	0	0	0	0	0	0		kNm	

Maximale Aanvaarenergie per klasse

Scheepsklassen		Aanvaar-energie [kNm]
CEMT-I	M1	1649
CEMT-II	M2	1888
CEMT-III	M3	2266
	M4	2316
	M5	2679
CEMT-IV	M6	2503
	M7	2658
CEMT-Va	M8	2683
	M9	0

Maximale aanvaarenergie per klasse bij binnenvaren



Bijlage 13 Invloedfactoren

13.1 Invloedfactoren op de werking of toepassing van de aanvaarbeveiliging

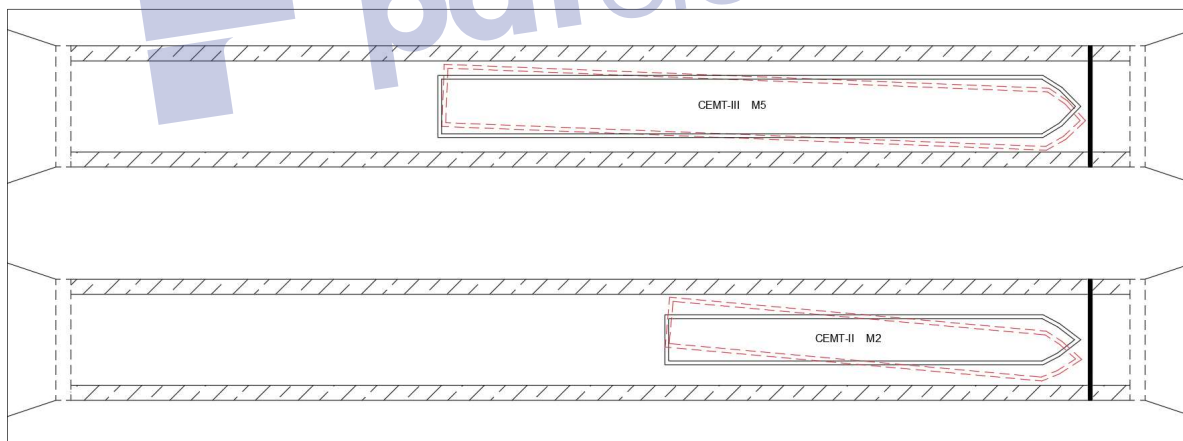
Behalve factoren welke de maatgevende aanvaarenergie bepalen zijn er ook factoren welke bepalend kunnen zijn voor de toe te passen aanvaarbeveiliging. Hierbij gaat het om factoren welke onder andere bepalend zijn voor de dimensionering en de inpassing van het ontwerp.

13.1.1 Aangrijpingspunt aanvaarenergie

Frontale aanvaring

Waar de belasting aangrijpt op de aanvaarbeveiliging hangt af van de diepgang, boegvorm van het schip en de geometrie van de aanvaarbeveiliging. De kracht wordt verdeeld over een oppervlak dat wordt bepaald door het type aanvaring, frontaal of zijdelings, en de afmetingen van het aangevaren object. Het is aannemelijk om te stellen dat bij het binnenvaren van de kolk dit rechtstandig gebeurt. Binnenvaartschepen benaderen al snel de breedte van de slusingang waardoor zij rechtstandig moeten invaren. Nadat het gehele schip de slusingang is gepasseerd, kan deze enigszins zijdelings draaien. Door de lengte van het schip kunnen zij ook maar beperkte scheefstand veroorloven. Dit zal betekenen dat de aanvaring met een aanvaarbeveiliging frontaal gebeurt.

In *Figuur 13.1* is de sluiskolk van de Zuiderluis Eefde geschematiseerd met daarin een schip CEMT-II en -III. Hierin is duidelijk weergegeven dat bij een maximale scheefstand er maar een beperkte zijdelinkse aanvaring is, gesteld kan worden dat deze nog steeds als frontaal kan worden gezien. Hierbij gaat om een loodrechte aanvaring. Daarnaast blijft de beweging van het schip altijd parallel aan de sluiskolk, er is geen ruimte om een “bocht” te maken.



Figuur 13.1 Frontale botsing aanvaarbeveiliging (case Sluis Eefde)

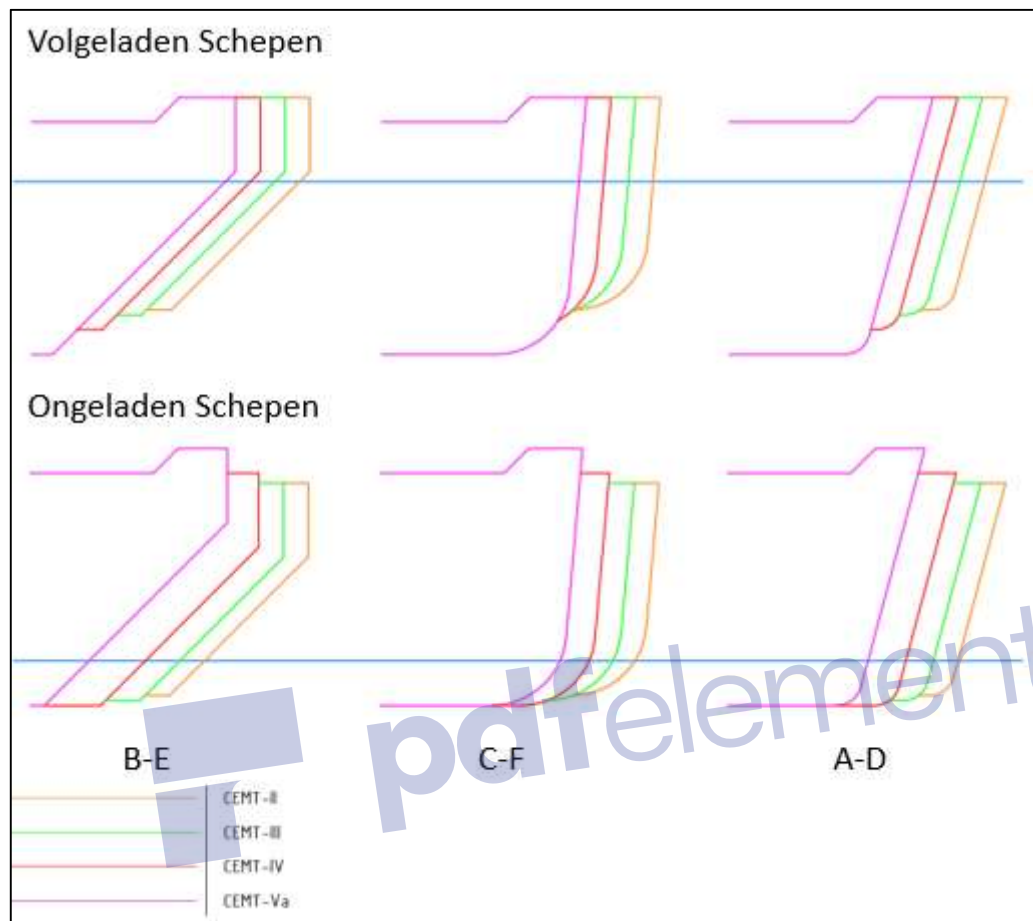
13.1.2 Plaatsingshoogte aanvaarbeveiliging

De plaatsingshoogte van de aanvaarbeveiliging is maatgevend voor het aangrijpingspunt van de aanvaarbeveiliging. Bij een excentrische aanvaring bestaat de kans dat het schip de aanvaarbeveiliging doen kantelen waardoor de krachten anders aangrijpen dan bij een centrische aanvaring. Daarnaast is het mogelijk dat het schip bij een aanvaring omhoog wordt gedrukt of juist onder de aanvaarbeveiliging door schiet, *Figuur 13.2*.



Figuur 13.2 Aanvaring waarbij er onder de aanvaarbeveiliging wordt doorgevoerd

De beschreven scheepsvormen zijn verwerkt en beschouwd in *Figuur 13.3*. Hieruit valt te concluderen dat de maatgevende situatie, betreffende de plaatsingshoogte, een ledig duwvaartschip is. Een duwvaartschip heeft een aflopende boeg, gelijkwaardig met boegvorm E uit *Figuur 6.4*. Wanneer het schip ledig is, is er een mogelijkheid dat de aanvaarbeveiliging onder de onderzijde van de boeg worden geduwd. Het schip drukt zichzelf omhoog en de aanvaarbeveiliging glijdt onder de boeg door.



Figuur 13.3 Ligging schepen in relatie tot waterstand

Constante waterstand

Tabel 13.1 Maximale en minimale waterstanden

Sluis	Streefpeil ¹ +NAP [m]	Minimale waterpeil ¹ +NAP [m]	Verschil [mm]	Maximale waterpeil ¹ +NAP [m]	Verschil [mm]
III (Tilburg)	1,26	1,24	20,00	1,29	30,00
Eefde	1,00	0,97	30,00	1,05	45,00
Delden	1,60	1,57	30,00	1,65	50,00
Hengelo	2,50	2,47	30,00	2,55	45,00
Empel	0,20	0,18	20,00	0,21	10,00
Panheel	2,87	2,85	15,00	2,88	10,00
Maasbracht & Born	3,27	3,25	15,00	3,29	25,00

¹Waterstanden vaarweg bij invaren sluis, Bron: waterinfo.rws.nl

Voor het ontwerp van de aanvaarbeveiliging bij Sluis Eefde is er gebruik gemaakt van een RWS-systeemeis welke stelt dat er rekening dient te worden gehouden met een maximum van 150 mm boven streefpeil.

13.1.3 Doorvaarthoogte

Het RVW-2017^a stelt minimumdoorvaarthoogte eisen aan bruggen welke zich bevinden in een vaarweg. Hierbij is de doorvaarthoogte (meter) = strijkhoogte + 0,3 'schrikhoogte'. Waarbij de schrikhoogte de veiligheidsmarge is, de vaarwegbeheerder heeft de mogelijkheid hierop afwijken. Vanuit de minimale doorvaarthoogte en de plaatsingshoogte (0,5 meter ten opzichte van het waterpeil) is er een minimaal benodigd verval in te schatten. Bij dit verval hoeft een aanvaarbeveiliging in principe niet beweegbaar te zijn voor vrije doorvaarthoogte. In *Tabel 13.2* zijn de waardes hiervoor in de laatste kolom weergegeven.

Tabel 13.2 Minimum doorvaarthoogte vaste bruggen beroepsvaart conform RVW-2017

Vaarwegklasse	Minimale doorvaarthoogte [m]	Plaatsingshoogte AVB t.o.v. waterpeil voor nivelleren [m]	Benodigd verval voor doorvaart [m]
CEMT-I	5,25	0,5	4,75
CEMT-II	6,10	0,5	5,60
CEMT-III	6,60	0,5	6,10
CEMT-IV	7,00	0,5	6,50
CEMT-Va	9,10	0,5	8,60

Bij Sluis Delden (CEMT-Va) waar een vaste aanvaarbeveiliging is toegepast is de doorvaarthoogte 6,5 meter welke afwijkt van de RVW eisen. Hierbij er gebruik gemaakt van de strijkhoogte van het schip. De RVW geeft een strijkhoogtes per scheepsklasse welke door 90% van de lege schepen in een bepaalde klasse wordt onderschreden. Er zijn enkele schepen welke deze strijkhoogte overschrijden. De vaarwegbeheerder heeft de mogelijkheid om af te gaan op de strijkhoogte en zelf een veiligheidsmarge in te bouwen, gebaseerd op maximale strijkhoogtes voorkomend op de te beheren vaarweg.

Tabel 13.3 Strijkhoogte schip geldend voor 90% van de totale scheepvaart per klasse

Vaarwegklasse	Strijkhoogte leeg [m]
CEMT-I	4,65
CEMT-II	5,80
CEMT-III	6,30
CEMT-IV	6,70
CEMT-Va	7,10

Verval

Het verval van de sluis is afhankelijk voor de keuze om een aanvaarbeveiliging toe te passen welke vast, dynamisch of welke is vrij te maken voor doorvaart. Hierbij is de waterstand waarbij er wordt binnengevaren maatgevend maar ook het schutverval, het schip kan wel of niet onder de aanvaarbeveiliging varen.

^a (Rijkswaterstaat W. A., 2017)

Voor het toepassen van een vaste aanvaarbeveiliging dient het minimale verval zodanig groot te zijn dat schepen er onder iedere omstandigheid onderdoor kunnen varen. In *Tabel 13.2* is per vaarwegklasse weergegeven wat de minimale doorvaarthoogte dient te zijn, dit is tevens het minimale verval. In Nederland blijft het verval beperkt tot en maximum van 12,00 meter, Sluis Maasbracht heeft het grootste schutverval; 11,85 meter.

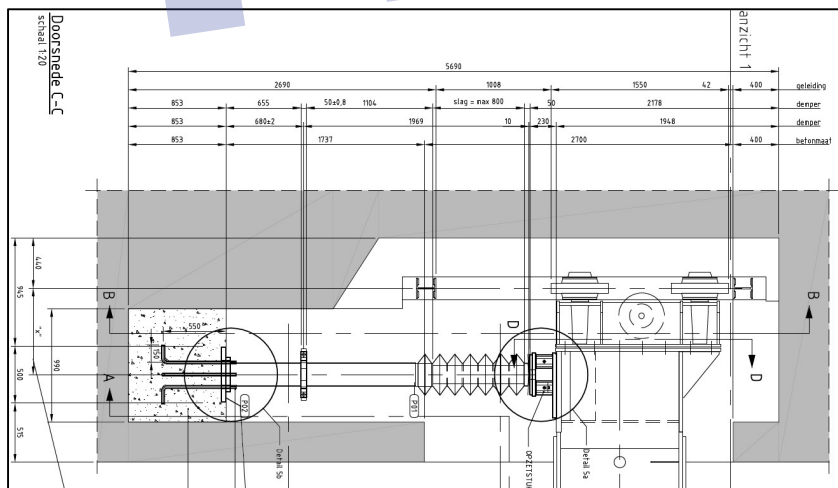
Soorten aanvaarbeveiligingen

- **Vaste:**
 - De waterstand bij het binnenvaren dient nagenoeg constant te zijn. Hierbij dient het verval bij het schutten zodanig te zijn dat het schip eronderdoor kan varen;
- **Vrij te maken voor doorvaart:**
 - De waterstand bij het binnenvaren dient nagenoeg constant te zijn. Hierbij is het verval bij het schutten niet maatgevend omdat de aanvaarbeveiliging vrij te maken is voor doorvaart;
- **Dynamische:**
 - De waterstand bij het binnenvaren, mag wisselend zijn. Hierbij is het verval bij het schutten niet maatgevend omdat de aanvaarbeveiliging vrij te maken is voor doorvaart;

13.1.4 Beschikbare ruimte in de kolkwanden en nabij de kolk

(Beschikbare ruimte in de kolkwanden) Stootbalk met dempcilinders^a

De stootbalk met dempcilinders heeft aan beide zijde een ruimte nodig van ongeveer 1 á 2 meter breed, 1 á 2 meter hoog en 4 á 6 meter diep, *Figuur 13.4*. Dit is de benodigde ruimte voor het uiteinde van de stootbalk, het geleidingssysteem, de dempcilinder en de fundering. De diepte kan per project verschillen, dit is afhankelijk van de waterstand in de kolk en de hoogte van de kolkwand, ervan uitgaande dat de stootbalk altijd 0,50 meter boven het waterpeil wordt geplaatst.



Figuur 13.4 Bovenaanzicht dempcilinder Nieuwe Sluis Maasbracht

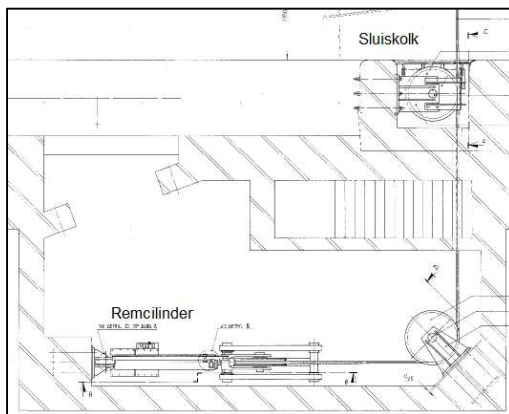
(Beschikbare ruimte nabij de kolk) Kabel met remcilinder^b

Een kabel met remcilinder heeft aan één zijde een grotere ruimte nodig voor het hefsysteem en de remcilinder dan aan de andere zijde. De grootte van de ruimte is afhankelijk van de grootte van de

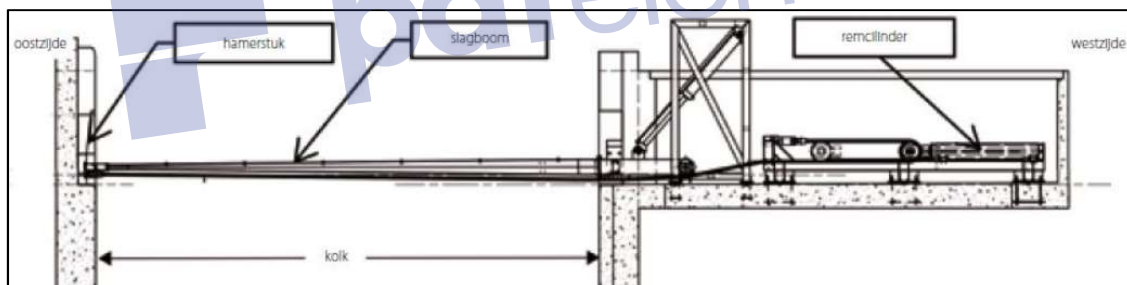
^a (Hoekstra, 2019)

^b (Berentsen, 2019) & (Hoekstra, 2019)

remcilinder, deze volgt uit de grootte van de aanvaarenergie. Bij een hoge aanvaarenergie moet een grotere cilinder worden toegepast dan bij een kleine aanvaarenergie. De energieopname van een remcilinder is afhankelijk van het oppervlak van de cilinder, de druk in de cilinder en de slaglengte. De slaglengte heeft de meeste invloed op de ruimte die benodigd is voor de remcilinder. In het ontwerp is het mogelijk dat de remcilinder haaks op de sluis wordt geplaatst, dit benut echter veel ruimte naast de sluis. Het is ook mogelijk om de remcilinder parallel aan de sluis in te passen. Dit wordt gerealiseerd door de toepassing van omloopwielen, hierdoor kan de kabel van richting worden veranderd. In *Figuur 13.5* en *Figuur 13.6* zijn de twee situaties weergegeven zoals bij Sluis Panheel en bij Sluis Empel. Uitgaande van deze ontwerpen wordt geconcludeerd dat er een ruimte benodigd is van 5 meter diep en 2 meter breed of 2 meter diep en 5 meter breed. Hierbij kan de cilinder zowel dwars op de kolkwand worden geplaatst of parallel aan de kolkwand.



Figuur 13.5 Bovenaanzicht remcilinder en omloopwielen parallel aan de kolk bij Sluis Panheel



Figuur 13.6 Zijaanzicht remcilinder en hefcilinder loodrecht op de kolk bij Sluis Empel

Buigzame balk^a

De buigzame balk wordt tussen de sponningen in de kolkwand geplaatst, deze constructie neemt minimale ruimte in. Echter is de resulterende belasting bij een aanvaring groot, er moet worden gecontroleerd of de (bestaande) constructie deze belastingen aankan.

Kunststofvangkabel

Een kunststofvangkabel vereist de minste ruimte om toe te passen, wanneer deze geen vrije doorvaarhoogte moet geven. De kunststofvangkabel wordt tussen twee bolders gespannen bij het sluishoofd. Met andere woorden; Er moeten twee bolders aan weerszijde van de kolk worden geplaatst met fundering. Als de vangkabel wordt gecombineerd met een hefcilinder voor vrije doorvaarhoogte dient er extra ruimte worden gemaakt voor de hefcilinder aan één zijde van de kolk. Deze hefcilinder neemt extra ruimte in, maar minder in vergelijking met de dempcilinders.

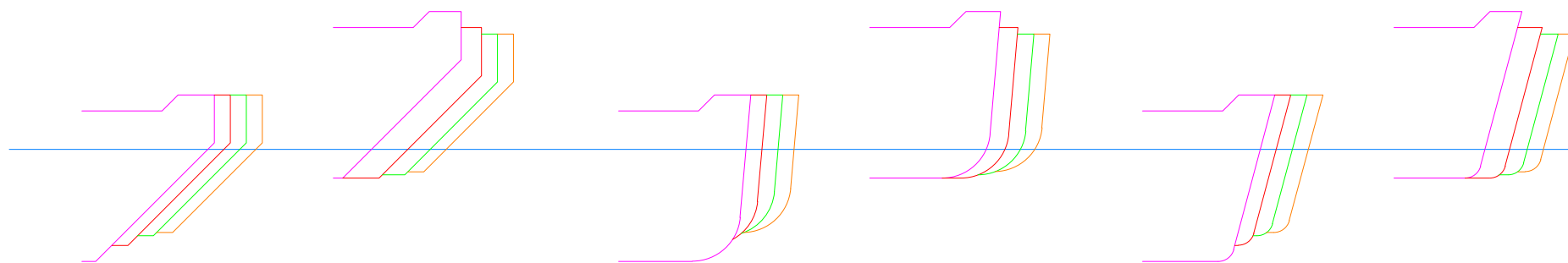
^a (WillemsUnie, 26-11-2012)

Bijlage 14 Bepalen maatgevende aanvaarhoogte en plaatsingshoogte aanvaarbeveiliging

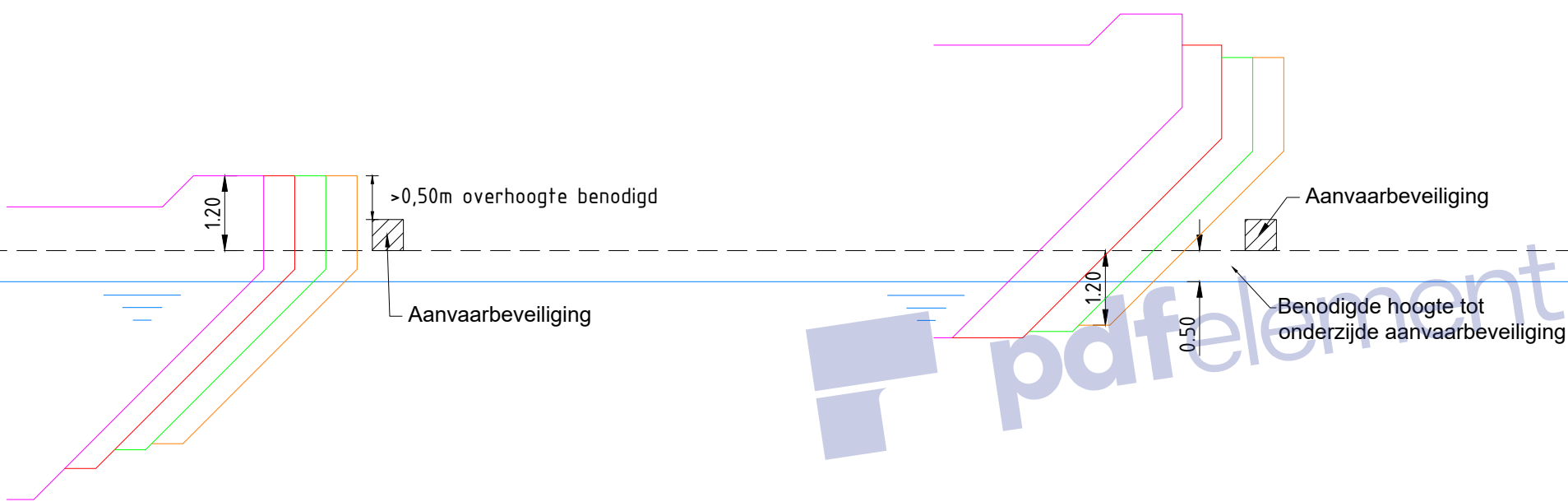


	Duwvaart		Boeg: Boogvormig		Boeg: Spitsvormig	
	Geladen	Ledig	Geladen	Ledig	Geladen	Ledig
CEMT-II Diepgang: 2,60 - 0,70m Boeghoogte: 4,30m						
CEMT-III Diepgang: 2,70 - 0,80m Boeghoogte: 4,40m						
CEMT-IV Diepgang: 3,00 - 0,90m Boeghoogte: 4,70m						
CEMT-IV Diepgang: 3,50 - 0,90m Boeghoogte: 5,20m						

 mobilis TBI infra					TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging					Hogeschool Windesheim 				
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen										VOE: BT.AFST-CT.V17				
Deelvraag 3										Aansluitend document: Bijlage 13 Paragraaf Rapport: 8.2.4				
Visualisatie aanvaarhoogtes														
CEMT-klassen (afzonderlijk weergegeven)														
getekend		T. Vlijm			datum		21-03-2019		schaal: 1:250		in 2 bladen, bladnr. 1			
gecontroleerd		C. de Kruyf			datum		21-03-2019		formaat: A3		projectnummer:			
vrijgegeven		C. de Kruyf			datum		21-03-2019		tekeningnummer: 01 Visu. aanvaarhoogte					
status		Definitief			versie		A							



Overzicht maatgevende aanvaarhoogtes
Schaal 1:200



Maatgevende situatie: Duwvaart ledig
Schaal 1:100

Legenda

Geometrie	Omschrijving
	CEMT-II
	CEMT-III
	CEMT-IV
	CEMT-Va
	Waterlijn

		TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim 
Ontwerptool aanvaarbeveiliging bij Schutsluizen						VOE: BT.AFST-CT.V17
Deelvraag 3						Aansluitend document: Bijlage 13 Paragraaf Rapport: 8.2.4
Visualisatie maatgevende aanvaarhoogte						
CEMT-klassen (afzonderlijk weergegeven)						
getekend	T. Vlijm	datum	21-03-2019	schaal: 1:100	in 2 bladen, bladnr. 2	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	21-03-2019	formaat: A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	21-03-2019	tekeningnummer: 02 Visu. aanvaarhoogte		
status	Definitief	versie	A			

Bijlage 16 (Ontwerp-) Aanvaarbeveiligingstool

In de ontwerptool, de Aanvaarbeveiligingstool, zijn de varianten opgenomen welke in de Trade Off Matrix het beste zijn beoordeeld. Voor elke variant is er een afzonderlijke tool opgesteld in Excel. De Aanvaarbeveiligingstool berekend middels benodigde input een aanbeveling voor de meest geschikte variant. De varianten in de worden onder andere berekend op de bijpassende dimensionering van de variant, de hoeveelheid op te nemen energie en de oplegreacties. Onderstaande paragrafen geven uitleg over de toegepaste berekenmethodes per variant welke zijn opgenomen in de Aanvaarbeveiligingstool.

16.1 Buigzame ligger

Om te onderzoeken hoe een buigzame ligger als aanvaarbeveiliging de energie van een schip opneemt, wordt onderzocht of de aanvaarbeveiliging doormiddel van plastisch vervorming de maatgevende energie kan opnemen. De aanvaarbeveiliging moet zodanig vervormen zodat alle kinetische energie wordt opgenomen.

16.1.1 Benodigde vergelijkingen

Elastische doorbuiging

Vergelijking 16-1 "Vergeet mij nietje" bepalen vervorming ligger op twee steunpunten met excentrische puntlast

$$\delta_{el} = \frac{F_p \times l^3}{48 \times E \times I_y}$$

Waarin:	δ	= Vervorming (zakking/doorbuiging)	[mm]
	F_p	= Maximale opneembare kracht van het staalprofiel	[N]
	l	= Lengte ligger	[mm]
	E	= Elasticiteitsmodulus	[N/mm ²]
	I_y	= Traagheidsmoment profiel	[mm ⁴]

Vergelijking 16-2 Max. opneembare kracht - excentrische puntlast ligger op twee steunpunten

$$F_p = \frac{M_p \times l}{a \times b}$$

Waarin:	M_p	= Plastisch moment	[Nmm]
	a, b	= Lengte van oplegging tot aan puntlast	[mm]

Vergelijking 16-3 Plastisch moment stalen ligger

$$M_p = W_{pl} \times \sigma_e$$

Waarin:	W_{pl}	= Plastisch weerstandmoment profiel	[mm ³]
	σ_e	= Staalkwaliteit profiel	[N/mm ²]

Vergelijking 16-4 Rotatie capaciteit elastisch

$$\alpha_1 = b g \sin \times \frac{\delta_e}{\frac{1}{2} \times l}$$

Waarin:	α_1	= Hoekverdraaiing nabij oplegging (elastische fase)	[rad]
---------	------------	---	-------

Plastische doorbuiging*Vergelijking 16-5 Plastische lengte*

$$l_p = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \times l$$

Waarin:	l_p	= lengte plastische zone	[mm]
	α	= vormfactor	[-]
	l	= lengte ligger	[mm]

Vergelijking 16-6 Vormfactor "belasting in sterke as"

$$\alpha = \frac{M_p}{M_e}$$

Waarin:	M_e	= Maximaal moment elastisch, staalprofiel	[N*mm]
	M_p	= Maximaal moment plastisch, staalprofiel	[N*mm]

Vergelijking 16-7 Gemiddelde rek in plastische zone

$$\varepsilon_{gmd} = \varepsilon_y - \varepsilon_u \times \frac{1}{4} l_p$$

Waarin:	ε_{gmd}	= Gemiddelde staalrek in plastische zone	[%]
	ε_y	= Vloeirek	[%]
	ε_u	= Breukrek	[%]

Vergelijking 16-8 Plastische kromming

$$K_{pl} = \frac{\varepsilon_{gmd}}{\frac{1}{2} h_y}$$

Waarin:	h_y	= Profiel hoogte sterke as (y)	[mm]
---------	-------	--------------------------------	------

Vergelijking 16-9 Rotatiecapaciteit plastische scharnier

$$\varphi_{pl} = K_{pl} \times l_p$$

Waarin:	φ_{pl}	= Maximale plastische rotatiecapaciteit	[rad]
	K_{pl}	= Plastische kromming	[m ⁻¹]

Vergelijking 16-10 Totale vervorming tot aan breuk

$$\delta_{tot} = \tan(\varphi_{pl}) \times \frac{1}{2} l$$

Waarin:	δ_{tot}	= Totale vervorming tot aan breuk	[mm]
---------	----------------	-----------------------------------	------

Vergelijking 16-11 Rotatie capaciteit plastisch

$$\alpha_2 = a \sin \times \frac{\delta_p}{\frac{1}{2} l}$$

Waarin:	α_2	= Plastische rotatie bij oplegging	[rad]
---------	------------	------------------------------------	-------

Vergelijking 16-12 Energieopname plastisch + elastisch

$$E_c = M_{pl} \times (2\alpha_2)$$

Waarin: E_c = Totale energieopname door ligger [kNm]

Controle

Vergelijking 16-13 (Controle) Totale opneembare energie door buigzame ligger

$$E_c = F_p \times \delta_{tot}$$

Vergelijking 16-14 (Controle) "Vergeet mij nietje" doorbuigingseis voor ligger in rust

$$\delta = \frac{5ql^4}{384EI_z} \leq 0,003 * l$$

Verdraaiing in oplegging

Vergelijking 16-15 Minimale opleggingsdiepte buigzame ligger

$$l_{oplegging} = \sin \alpha \times b_{profiel}$$

Waarin: $l_{oplegging}$ = Opleggingsdiepte [mm]
 α = Hoekverdraaiing bij max. doorbuiging ligger [graden°]
 $b_{profiel}$ = Breedte staalprofiel [mm]

Vergelijking 16-16 Minimale opleggingsbreedte buigzame ligger

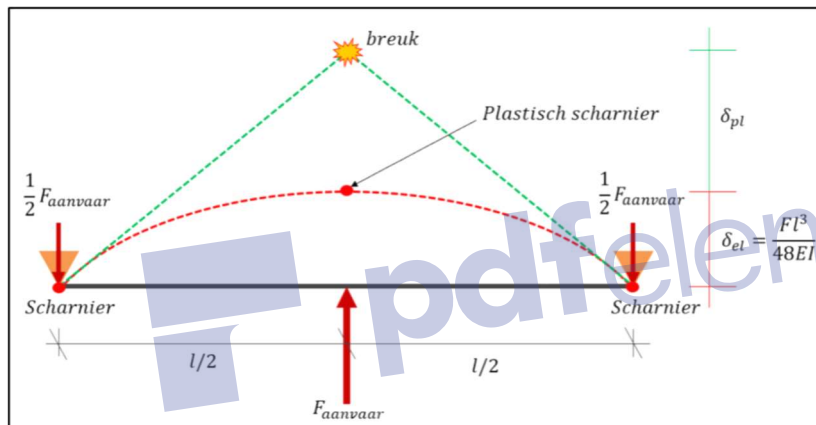
$$b_{sponning} = h_{nok} + b_{profiel} + (\tan \varphi_{pl} \times 150mm)$$

Waarin: $b_{oplegging}$ = Opleggingsbreedte [mm]
 h_{nok} = Hoogte van de aanslagsnok [mm]

16.1.2 Schematisering

De buigzame ligger bevindt zich in een sponning/uitsparing in de kolkwanden, wat is geschematiseerd als een ligger op twee steunpunten, met scharnierende oplegging. De maatgevende vervorming voor de buigzame ligger treedt op bij een centrische aanvaring, hierbij treedt de grootste remweg op waarbij er een zo groot mogelijke energie wordt opgenomen. De vervorming van een ligger welke excentrische wordt aangevaren is kleiner dan eenzelfde aanvaarenergie in combinatie met centrische aanvaring. Bij een excentrische aanvaring is er kleinere vervorming en nadelige verdeling van de aanvaarbelasting naar de opleggingen. Dit resulteert in grote reactiekrachten op de kolkwanden bij een excentrische aanvaring.

De vervorming van de aanvaarbeveiliging kan worden gezien als het vervormen van een plastisch scharnier. De ligger is scharnierend opgelegd waarbij er een plastisch scharnier ontstaat bij het grootst optredende moment. Bij de oplegging is aan beide zijde een "werkelijke" scharnier aanwezig in de ligger ontstaat een plastisch scharnier, *Figuur 16.1*. De grootte van de remweg is afhankelijk van het moment waarop het plastische scharnier optreedt en de vervorming van het plastische scharnier tot aan breuk. Vervolgens is er een benadering gedaan van de hoeveelheid op te nemen aanvaarenergie; de plastische vervorming vermenigvuldigd met de maximale bezwijkkracht.



Figuur 16.1 Ontstaan van plastische scharnier bij een ligger op twee steunpunten, centrisch belast

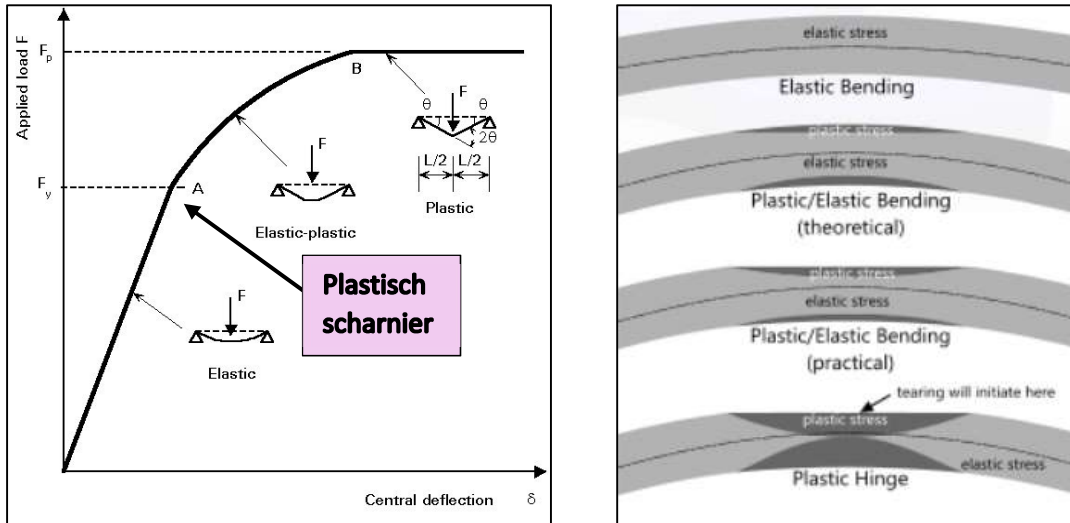
Vervorming tot aan optreden plastisch scharnier (elastisch)

De vervorming tot aan het optreden van het plastische scharnier wordt gedefinieerd als de elastische fase van de ligger. Wanneer er sprake is van elastische doorbuiging dan vormt de ligger na het verwijderen van de belasting zich weer terug in de oorspronkelijke stand. De doorbuiging in deze fase kan worden berekend doormiddel van het toepassen van "vergeet-mij-nietjes". De belasting bij aanvaring is als een eenvoudig belastinggeval geschematiseerd. Waarbij er een hoekverdraaiing en doorbuiging wordt bepaald.

De elastische doorbuiging wordt bepaald met *Vergelijking 16-1* waarbij er gebruik gemaakt is van de belasting welke de elastische fase volledig benut. Deze belasting wordt bepaald met het plastisch moment van het staalprofiel(-en). Het plastische moment volgt uit de vermenigvuldiging van de vloeispanning met het weerstandsmoment. In de vergelijkingen wordt er gebruik gemaakt van de plastische eigenschappen van het staalprofiel, de waardes vertegenwoordigen de uiterste eigenschappen waarmee in uitzonderlijke situaties, zoals bij een aanvaring, mee wordt gerekend.

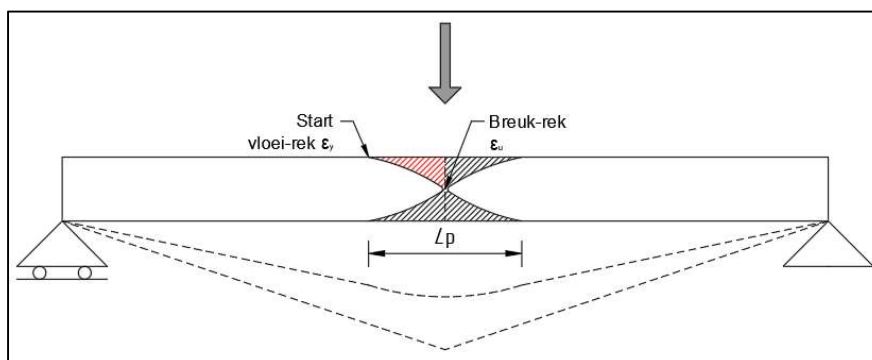
Vervorming tot aan optreden breuk

Na het optreden van het plastische scharnier vervormd de ligger nog aanzienlijk, *Figuur 16.2*. In de elastische-plastische fase wordt het schip nog aanzienlijk afgeremd, waardoor de ligger nog voldoende energie opneemt. Wanneer de ligger over gaat in de laatste fase, de volledige plastische fase, vervormd de ligger nog wel maar remt het schip niet af, de doorsnede van het profiel vertoont insnoering waarna er breuk optreedt^a.



Figuur 16.2 Vervormingsfases stalen ligger

De vervorming tot aan breuk is in grote mate afhankelijk van de hoeveelheid rek dat het staal van het profiel aankan. De plastische vervorming in het scharnier ontstaat in een bepaalde zone van de ligger, de plastische zone. De lengte van de plastische zone is afhankelijk van de staalrek, over de plastische lengte zijn er verschillende trajecten van rek. In het staalprofiel ontstaat er eerst vloeirek (ϵ_y), waarna er bij voldoende vervorming breukrek (ϵ_u) optreedt. De hoeveelheid rek, in percentage %, bij vloeien is vele male minder dan de rek bij breuk. Zowel de vloeirek, breukrek en alles daartussen in geven verschillende lengtes. De lengten van deze verschillende trajecten bepalen de totale plastische lengte (L_p). Aan de buitenzijde van de plastische zone treedt er vloeirek op en ongeveer te midden van de plastische zone treedt er breukrek op. Het is niet eenduidig vastgelegd wat de plastische lengte is of hoe deze bepaald wordt.



Figuur 16.3 Plastische zone in scharnier

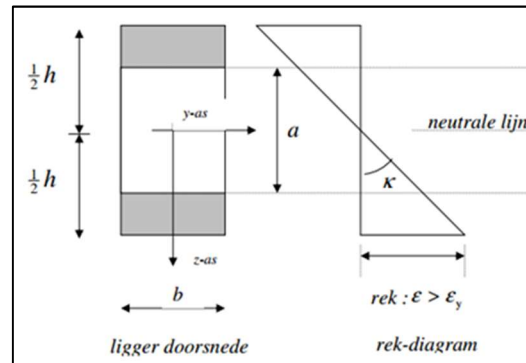
Collegesheets van het TU-delft met betrekking op plasticiteitsleer^b, geven voor het bepalen van de plastische lengte; *Vergelijking 16-5*. Waarin de lengte afhankelijk is van het toegepaste staalprofiel en

^a (Op buiging belaste staafconstructies - Plasticiteitsleer, 2016)

^b (Op buiging belaste staafconstructies - Plasticiteitsleer, 2016)

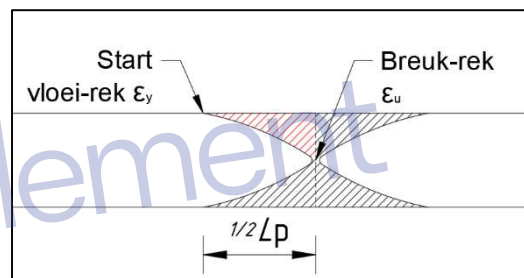
de lengte van de ligger tussen de oplegging. In de vergelijking wordt gebruik gemaakt van een vormfactor, *Vergelijking 16-6*. De vormfactor geldt voor de buiging van het profiel en is de verhouding tussen de plastische- en elastische moment eigenschappen van het profiel. Het geeft de hoeveelheid reserve vermogen weer van de doorsnede, voordat deze geheel vloeit.

Voor het bepalen van de plastische rotatiecapaciteit, de maximale plastische rotatie van het plastische scharnier, geeft het onderzoeksrapport: (Rotatiecapaciteit van plastische scharnieren in beton, p. 38) *Vergelijking 16-9*. In dit onderzoeksrapport wordt geconcludeerd dat de rotatie afhankelijk is van de plastische kromming (k) en de plastische lengte (L_p) van het scharnier. De plastische kromming is te herleiden uit het rek-diagram van de toegepaste staalsoort en doorsnede van het profiel, *Figuur 16.4*. Naarmate de rek toeneemt zal de kromming ook toenemen, waardoor de plastische zone waarin vloeispanning ontstaat steeds groter wordt.^a In de vergelijking is uitgegaan van een ligger op twee steunpunten met een centrische belasting.



Figuur 16.4 Kromming (k) in rek-diagram (plastische fase)

De plastische kromming, de totale kromming van elastisch tot aan breuk, is afhankelijk van de rek, *Vergelijking 16-8*. Vanwege de verschillende fases van vloeï in de plastische zone is er gesteld dat er ook verschillende fases van rek zijn in de plastische zone. Aangenomen is dat de waarde voor de plastische kromming (K_{pl}) volgt uit het gemiddelde van de optredende rek (ϵ) in de plastische zone. De gemiddelde rek is afhankelijk van de plastische lengte, *Figuur 16.5*, en de staalkwaliteit. Voor de beschouwde staalkwaliteiten worden de percentages rek aangehouden zoals weergegeven in *Tabel 16.1*.



Figuur 16.5 Visualisatie gemiddelde rek

Tabel 16.1 Percentages rek

Staalkwaliteit [N/mm ²]	Vloeï-rek ϵ_y	Breuk-rek ϵ_u
235	0,11%	19,00%
270	0,13%	16,00%
355	0,17%	16,00%

Vergelijking 16-7 benaderd de gemiddelde waarde van de rek. Bij extreme grote of -kleine plastische lengtes is de benadering van de gemiddelde rek onvoldoende. Hiervoor wordt er een onder- en bovengrens aangehouden. Waarbij er voor de ondergrens 4% rek en voor de bovengrens 7,5% rek wordt aangehouden. Het is aannemelijk om te stellen dat de waarde voor het gemiddelde van de rek in de plastische zone eerder de waarde behorend bij de vloeï-rek benaderd dan dat de gemiddelde waarde de breuk-rek waarde benaderd. Er is namelijk een dusdanig lange vloeïrek in vergelijking met die van de breukrek.

^a (Basisboek Toegepaste Mechanica, p. Hfdstk. 2)

De maximale vervorming volgt uit de maximale plastische rotatiecapaciteit, de hoekverdraaiing (φ), en de lengte van de ligger. De weerstand tegen de op te nemen energie volgt uit het plastisch moment en de hoekverdraaiing.

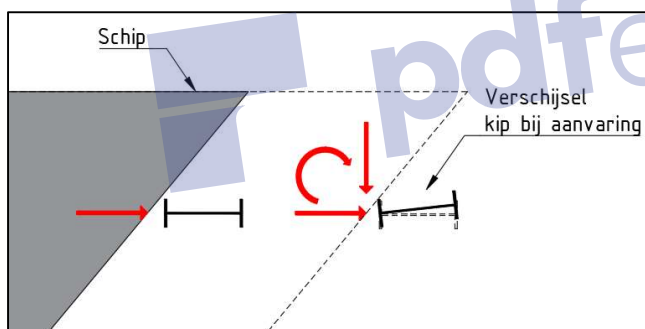
Doorbuiging

De ligger in rust wordt door zijn eigengewicht belast in de zwakke richting (I_z). De ligger dient niet te gaan doorbuigen, de ligger moet voldoen aan een maximale doorbuigingseis. De maximale doorbuiging bedraagt 0,3% van de lengte van de ligger, deze wordt gecontroleerd doormiddel van het toepassen van; *Vergelijking 16-14*. In een nadere uitwerking van het ontwerp kan ervoor worden gekozen bij het toepassen van meerdere staalprofielen deze onderling te verbinden, doormiddel van bijvoorbeeld lassen, waardoor de weerstand tegen doorbuigen wordt vergroot.

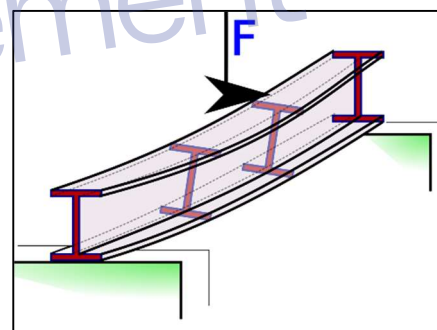
Kip

Tijdens het vervormen van de ligger tijdens aanvaring bestaat de kans dat het profiel zijdelings gedraaid weg wordt gedrukt in de zwakke richting, *Figuur 16.6*. Doormiddel van de maximale doorbuiging eis wordt grotendeels voorkomen dat er onmiddellijk kip optreedt bij aanvaring. De ligger wordt bij aanvaring in de Y-richting vervormd. Een schip welke met de onderzijde van de boeg de ligger aanvaart geeft een belasting in Y-richting en Z-richting waardoor het profiel zijdelings weg kan knikken, *Figuur 16.18*. IPE-profielen zijn kipevoeliger vanwege zijn lange lijf in combinatie met kleine en smalle flens. H-profielen zijn minder kipevoelig vanwege bredere en dikkere flensen.

De ligger kan enkel, dubbel, driemaal en viermaal op elkaar worden toegepast. Door het koppelen van de profielen wordt de weerstand tegen kip groter, een enkel profiel is kipevoeliger dan een gecombineerde ligger.



Figuur 16.7 Verschuif kip bij aanvaring van de ligger



Figuur 16.6 Schematisatie kippen van een ligger

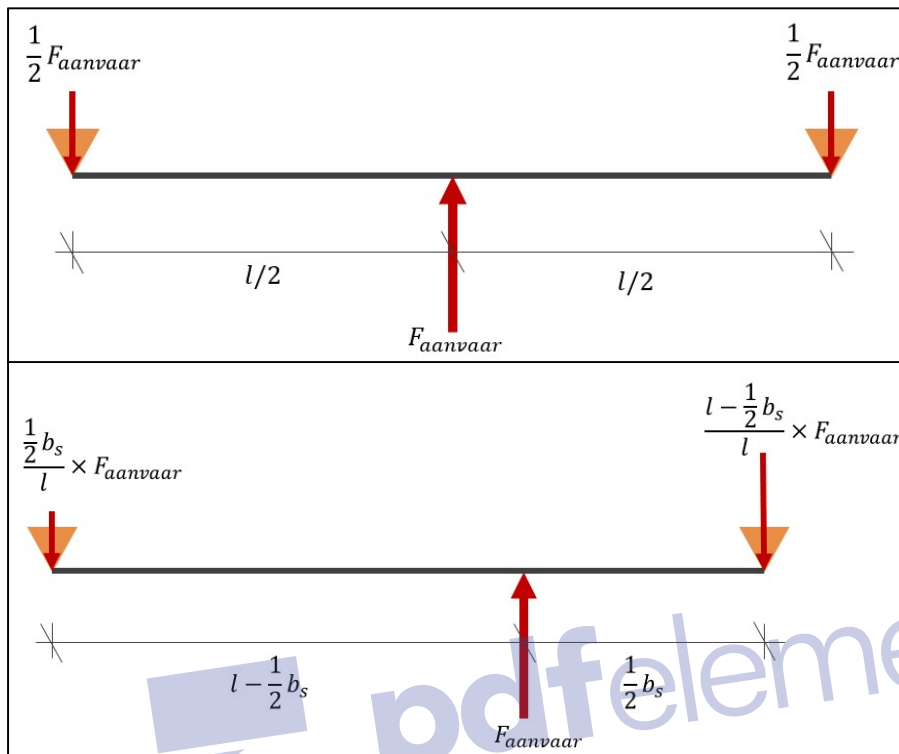
16.1.3 Reactiekrachten

De reactiekrachten in de oplegging zijn afhankelijk van de grootte van:

- Aanvaarenergie;
- Lengte van de remweg;
- Het toegepaste profiel;
- Plaats van aanvaring.

Door de aanvaarenergie te delen door de remweg wordt de aanvaarbelasting bepaald. Het verdelen van de aanvaarbelasting over de opleggingen geeft de oplegreactie in y-richting. De maatgevende belasting voor de oplegreactie is een excentrische aanvaring. Bij een excentrische aanvaring wordt één oplegging zwaarder belast dan de andere oplegging, de gevonden maximale kracht is maatgevend voor beide zijde, omdat aanvaring aan beide zijde kan voorkomen. De ligger is scharnierend opgelegd waardoor de aanvaring enkel een drukkracht zal geven op de kolkwand.

Uit de tool volgt het profiel welke de laagste reactiekracht geeft op de kolkwanden, dit profiel wordt het maatgevende profiel genoemd. De oplegreacties worden berekend voor het profiel welke de hoogste aanvaarenergie opneemt. De reactiekrachten vrijkomend bij excentrische aanvaring kunnen worden gevonden doormiddel van een nadere uitwerking welke is toegevoegd in de rekentool. De vergelijkingen voor het bepalen van de plastische vervorming zijn opgesteld uitgaande van een centrische aanvaring.



Figuur 16.8 Reactiekrachten bij centrische en excentrische aanvaring

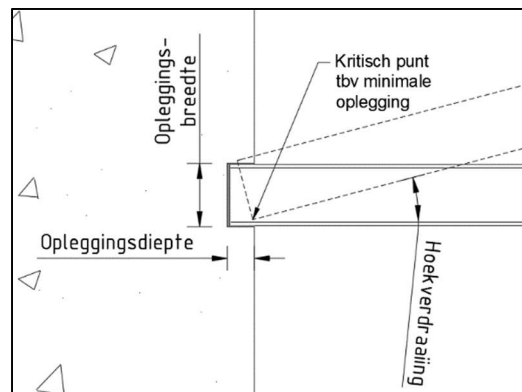
Doormiddel van de nadere uitwerking wordt er een benadering van de vervorming bij excentrisch aanvaring gegeven en de reactiekrachten weergegeven. In de nadere uitwerking is ervan uit gegaan dat de totale hoekverdraaiing van het plastisch scharnier gelijk aan die van een centrische aanvaring is maar de vervorming kleiner wordt. Met behulp van verhoudingen van de hoeken wordt de vervorming gevonden passend bij de plaats van optreden van de belasting.

Voor de oplegging is een excentrisch aanvaring maatgevend vanwege de hoge oplegreacties. De maximale vervorming bij een excentrisch aanvaring is kleiner waardoor de reactiekrachten op de oplegging groter zijn. De op te nemen reactiekracht wordt voor één zijde aanzienlijk groter door de kleinere vervorming maar ook door de plaats van aanvaring waardoor de krachten niet gelijkzijdig wordt verdeeld, *Figuur 16.8*. Een zijde zal daardoor een veel grotere reactiekracht op moeten nemen dan de tegenovergestelde zijde waar de reactiekrachten beduidend lager zijn. De maatgevende oplegreactie bij een excentrische aanvaring geldt voor beide zijde, er is immers niet bekend welke zijde wordt aangevaren.

16.1.4 Oplegging

Opleggingsdiepte

De opleggingsdiepte is afhankelijk van de hoekverdraaiing en de kolkbreedte, daaropvolgend wordt de lengte van de ligger bepaald. De opleggingsdiepte dient zodanig te zijn dat bij doorbuiging de hoekverdraaiing bij uiteinde van de ligger er niet voor zorgt dat de ligger van oplegging afkomt, *Figuur 16.9* geeft dit weer. De opleggingsdiepte wordt aangenomen, doormiddel van *Vergelijking 16-15* wordt gecontroleerd of de ligger niet uit de sponning valt, en de aangenomen opleggingsdiepte correct is.

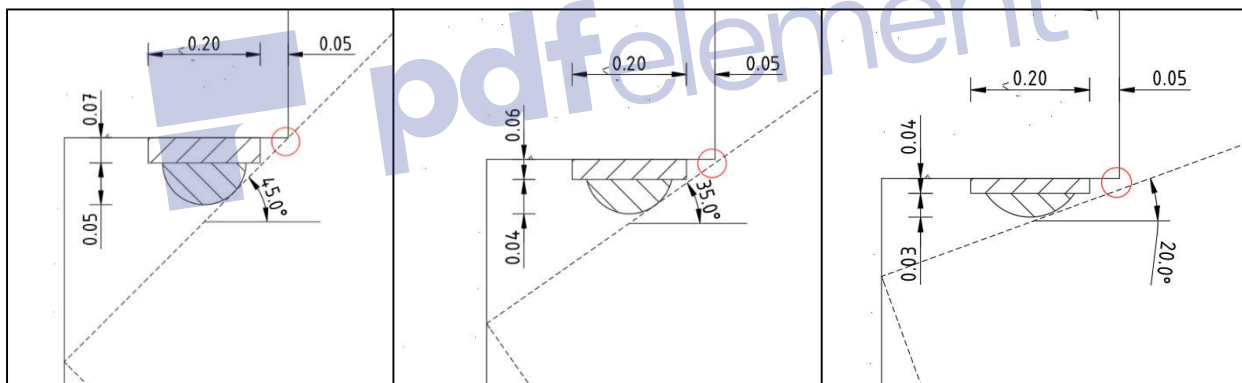


Figuur 16.9 Hoekverdraaiing door vervorming ligger in relatie tot minimale opleggingsdiepte

Opleggingsbreedte

Ditzelfde kan gesteld worden voor de opleggingsbreedte. Bij het verdraaien van de ligger zal deze tevens in de sponning verdraaien. Door het toepassen van een aanslagnok grijpen de krachten niet aan op de hoek van de sponning maar op de nok welke de krachten verdeeld. Hierbij wordt verbrijzeling van het de betonnen randen voorkomen. Het is wenselijk de nok zodanig vorm te geven dat de ligger hierop roteert/draait. Er is gekozen voor een nok welke een bolling heeft. De grootte/hoogte van de nok is afhankelijk van de hoek verdraaiing van de ligger.

Er is gekozen voor drie gestandaardiseerde types nokken welke variëren in hoogte. De drie types



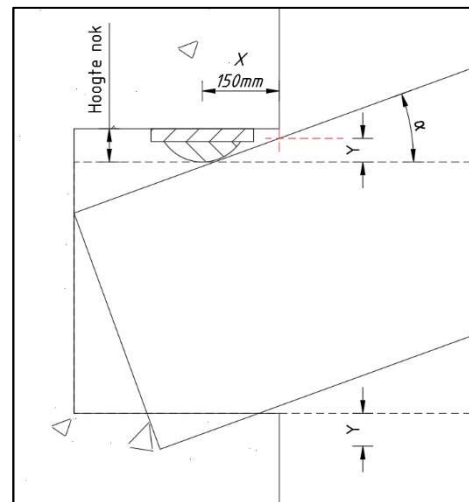
Figuur 16.10 Verschillende stootnokken ter bescherming van sponningshoek

volgen zijn bepaald aan de hand van drie situaties; ligger verdraaiing lager dan 20 graden, groter dan 20 graden maar lager dan 35 graden, groter dan 35 graden tot en met een maximale verdraaiing van 45 graden, *Figuur 16.10*. Deze waarde zijn gekoppeld aan een hoogte van de nok, waarbij de ligger niet de sponning hoek raakt; *Tabel 16.2*.

Tabel 16.2 Hoogte aanslagnok

Verdraaiing ligger [graden]	Hoogte aanslagnok [mm]
≤ 20	70
$>20 \leq 35$	100
≥ 35	120

De breedte van de sponning is afhankelijk van de plaats-, de hoogte van de nok, de breedte van het profiel en de verdraaiing in de sponning. De benodigde sponningsbreedte is de som van de hoogte van de nok de breedte van de nok en afstand (Y), *Vergelijking 16-16*. Afstand (Y) wordt bepaald worden doormiddel van afstand (X) en de hoekverdraaiing (α), *Figuur 16.11*. De ligger draait op de bolling van de nok; Afstand (X), hart nok tot buitenzijde kolkwand, wordt aangenomen als 150mm, hierbij draait de ligger tot een hoek van 45 graden.



Figuur 16.11 Opleggingsbreedte in relatie tot hoekverdraaiing

16.1.5 Discussie

Discussie

Er zijn enkele onzekerheden aangaande de berekenmethode en de mogelijkheid tot toepassing van de buigzame ligger in de praktijk. Onderwerpen welke geadviseerd worden om nader te onderzoeken zijn:

- Het verloop van de vervorming na optreden van het plastisch scharnier tot aan breuk; In de aanvaarbeveiligingstool wordt enkel de vervorming tot aan breuk bepaald. Er is niet onderzocht hoe het verloop van vervorming is tijdens aanvaring. Dit geeft inzicht in de exacte vervorming van de ligger bij een gegeven aanvaarenergie waarbij er nog geen breuk optreedt.
- De grootte van de vervorming bij een vlakke boeg (duwvaart); Er is uitgegaan van een aanvaring van een schip met een spitse boeg, geschematiseerd als een puntlast. Een vlakke boeg geeft een kleinere vervorming en grotere oplegreacties, dit kan worden geschematiseerd als een lijnlast op een ligger.
- De werkelijke (plastische-)lengte (L_p) van plastische zone; In dit onderzoek is de (plastische-)lengte van de plastische zone bepaald met de vormfactor van het profiel en de lengte van de ligger. De vormfactor is voor de beschouwde staalprofielen (IPE, HEA, HEB en HEM) vrijwel gelijk; 1,15. Dit resulteert in het feit dat de plastische lengte enkel afhankelijk is van de lengte van de ligger, wat een zeer conservatieve manier is van bepalen. Er dient te vergeleken te worden wat het verschil is tussen de plastische lengte bepaling met behulp van de vormfactor of met behulp van de optredende rek in de plastische zone;
- Het voorkomen van het verschijnsel kip bij aanvaring; Wat is invloed van het type profiel op de kipstabiliteit en hoe kan de weerstand worden vergroot. Daarnaast geeft een schip welke een aflopende boeg heeft een grotere kans op kip, het is aan te raden nader onderzoek te doen om de invloed hiervan te bepalen;
- Het werkelijke gemiddelde van de optredende rek in de plastisch zone; Voor het bepalen van de plastische kromming (K_{pl}) is in dit onderzoek aangenomen dat het gemiddelde van de rek (ε) dient te worden aangehouden. Het is echter niet bekend hoe dit gemiddelde dient te worden bepaald.

- Uitwerking van de aanslagnok; De vormgeving en de werkelijke afmetingen van de aanslagnok. Wat is de invloed van de dimensionering op de verdraaiing van de ligger in de oplegging en hoe kan deze zo worden ontworpen dat de oplegging onbeschadigd blijft bij aanvaring.

In de praktijk, zie *paragraaf 2.2.2 Sluis III (Tilburg)*, heeft de aanvaarbeveiliging zich nog niet bewezen. Waardoor er nog niet geconcludeerd worden dat de buigzame ligger een goed en betrouwbaar alternatief is op de overige aanvaarbeveiligingen.

16.1.6 Validatie

Om na te gaan of de toegepaste rekenmethode de praktijk benaderd, wordt deze geverifieert met een bestaande toepassing. Bij *Sluis III (Tilburg)* is er een buigzame ligger toegepast met oplegging in de schotbalksponning. *Tabel 16.3* Weergeeft de gegevens van Sluis III, deze zijn beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat. Vanuit deze gegevens berekend de tool de maximale vervorming en de reactiekracht.

Tabel 16.3 Gegevens Sluis III

Gegevens Sluis			
Maatgevende belasting	$E_{aanvaar}$	2.000,00	kNm
Breedte sluis	b_k	10.700,00	mm ¹
Remweg	S	5.500,00	mm ¹
Sponningsdiepte	l_{opleg}	200,00	mm ¹
Lengte ligger	l	11.100,00	mm ¹
Gegevens ligger			
Type profiel		HEB500	-
Vloei spanning	F_y	355,00	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus	$E_{-modulus}$	2,10E+05	N/mm ²
Weerstandsmoment plastisch	W_{pl}	4,81E+06	mm ³
Oppervlaktmoment sterke as	I_y	1,07E+09	mm ⁴
Moment plastisch	M_{pl}	1,71E+09	N*mm

Resultaat energieopname ligger

Uit de gegevens volgt dat de ligger een totale aanvaarenergie opneemt van 2.000 kNm. Er is hierbij gekozen voor een buigzame ligger in de vorm van driemaal een HEB500 van staalkwaliteit S355 met een liggerlengte van 11,10 meter. De ligger bevindt zich in een sponning van 200 mm, *Tabel 16.3*.

De energie wordt opgenomen doormiddel van vervorming wat resulteert in een belasting voor de kolkwanden. In de berekening is uitgegaan van een centriscie aanvaring. Dit resulteert volgens de berekening gemaakt voor Sluis III in de volgende vervorming en af te dragen kracht:

- Vervorming totaal 1.238 mm
 - o Vervorming ligger elastisch 68mm
 - o Vervorming ligger plastisch 1.170 mm
- Op te nemen belasting door de kolkwanden van 1.661 kN

Uit de rekentool volgt dat doormiddel van de vervorming tot aan breuk een driemaal HEB500, 2258 kNm aanvaarenergie opneemt. Dit geldt bij de volgende vervorming (*Figuur 16.12*):

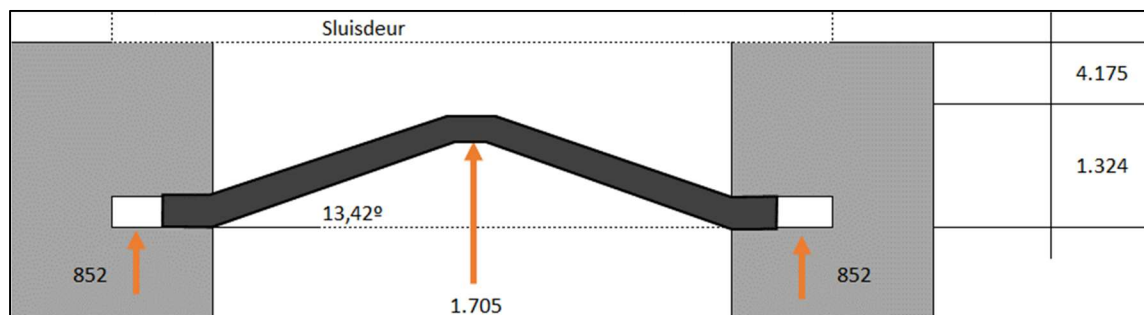
- Vervorming totaal 1.324 mm
 - o Vervorming ligger elastisch 78 mm
 - o Vervorming ligger plastisch 1.246 mm
- Op te nemen belasting door de kolkwanden van 1.705 kN

De maatgevende vervorming komt overeen met de maximale vervorming van de ligger, op basis van dit onderdeel komt het resultaat van de tool overeen met de berekening van Sluis III.

De opleggingsdiepte van 200 mm is voldoende bij aanvaarbebelasting van 1705 kN, de ligger komt niet uit de oplegging. Wel is er bij Sluis III geen aanslagnok toegepast waardoor de sponningshoek mogelijk een zodanig kracht te verduren krijgt dat er het beton van de kolkwand zwaar beschadigd raakt. De ligger komt daarnaast klem te zitten in de sponning omdat de sponningsbreedte vrijwel gelijk aan de breedte van het profiel is.

Tabel 16.4 Resultaat vervorming en op te nemen aanvaarenergie - rekentool

Elastische vervorming			
Vervorming elastisch	δ_{el}	77,97	mm ¹
Hoekverdraaiing elastisch	φ_{el}	0,014	rad
Energieopname door elastische fase	$E_{aanvaar}$	48,021	kNm
Plastische vervorming			
Vervorming plastisch	δ_{pl}	1246,31	mm ¹
Hoekverdraaiing plastisch	φ_{pl}	0,22	rad
Energieopname door plastische fase	$E_{aanvaar}$	752,66	kNm
Totale vervorming			
Hoekverdraaiing totaal	φ_{tot}	0,23	rad
Vervorming totaal	δ_{tot}	1324,28	mm
Resultaat Energieopname ligger			
Enkel profiel	$E_{aanvaar, enkel}$	752,66	kNm
Dubbel profiel	$E_{aanvaar, dubbel}$	1505,32	kNm
Driemaal profiel	$E_{aanvaar, driemaal}$	2257,99	kNm
Viermaal profiel	$E_{aanvaar, viermaal}$	3010,65	kNm



Figuur 16.12 Verdeling aanvaarenergie bij centrische aanvaring Sluis III

16.2 Stootbalk met dempcilinder

16.2.1 Benodigde vergelijkingen

Vergelijking 16-17 "Vergeet mij nietje" bepalen doorbuiging ligger op twee steunpunten met een puntlast

$$\delta = \frac{Fl^3}{48EI}$$

Waarin:	δ	= Doorbuiging	[mm]
	F	= Aanvaarbelasting	[N]
	l	= Lengte stootbalk	[mm]
	E	= Elasticiteitsmodulus	[N/mm ²]
	I	= Traagheidsmoment	[mm ⁴]

Vergelijking 16-18 Bepalen traagheidsmoment rechthoekige doorsnede

$$I_y = \frac{1}{12}bh^3$$

Waarin:	I_y	= Traagheidsmoment in sterkte as	[mm ⁴]
	b	= Breedte doorsnede	[mm]
	h	= Hoogte doorsnede	[mm]

Vergelijking 16-19 Unity Check op basis van traagheidsmoment

$$u.c. = \frac{I_{ben}}{I_{st}}$$

Waarin:	I_{ben}	= Benodigd traagheidsmoment vanuit doorbuiging en belasting	[mm ⁴]
	I_{st}	= Traagheidsmoment berekend uit het staalprofiel	[mm ⁴]

Vergelijking 16-20 Bepalen moment ligger op twee steunpunten met een puntlast centrisc

$$M = \frac{1}{4} \times F \times l$$

Waarin:	M	= Moment	[kNm]
	F	= Aanvaarbelasting	[kN]
	l	= Lengte stootbalk	[m]

Vergelijking 16-21 Bepalen moment ligger op twee steunpunten met een puntlast excentrisch

$$M = \frac{F \times a \times b}{l}$$

Waarin:	a	= Afstand tussen punt A en C	[m]
	b	= Afstand tussen punt B en C	[m]

Vergelijking 16-22 Weerstandsmoment bepalen aan de hand van het traagheidsmoment

$$W_y = \frac{I_y}{e}$$

Waarin: W_y = Weerstandsmoment in y richting [mm³]
 e = Afstand van de neutrale lijn tot uiterste vezel [mm]

Vergelijking 16-23 Staalspanning door buigend moment

$$\sigma_{c,s} = \gamma \times \frac{M}{W}$$

Waarin: $\sigma_{c,s}$ = Staalspanning [N/mm²]
 γ = Materiaalfactor staal = 1,10 [-]

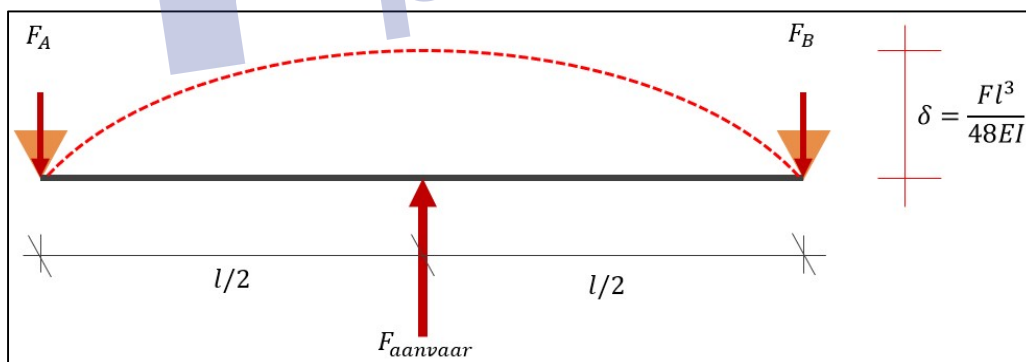
Vergelijking 16-24 Unity Check staalspanning

$$u.c. = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{c,s}}$$

Waarin: σ_{max} = Vloeispanning staal [N/mm²]
 $\sigma_{c,s}$ = Staalspanning door moment [N/mm²]

16.2.2 Maximale doorbuiging stootbalk

De stootbalk dient een starre constructie te zijn, welke de aanvaarenergie overbrengt van het schip naar de energievernietigers. Hiervoor dient de stootbalk minimaal te vervormen. Voor de maximale vervorming is een maximale doorbuigingseis opgesteld voor de stootbalk. De maximale doorbuiging bedraagt 0,3% van de lengte van de stootbalk. Aan de hand van de maximale doorbuiging en de maatgevende belasting bestaat de mogelijkheid om het benodigde traagheidsmoment van het profiel te berekenen, doormiddel van *Vergelijking 16-17*. De belasting volgt uit de reactiekrachten van de energievernietigers. De reactiekrachten bepalen de oplegreacties van de stootbalk, de oplegreacties bepalen de aanvaarbelasting.

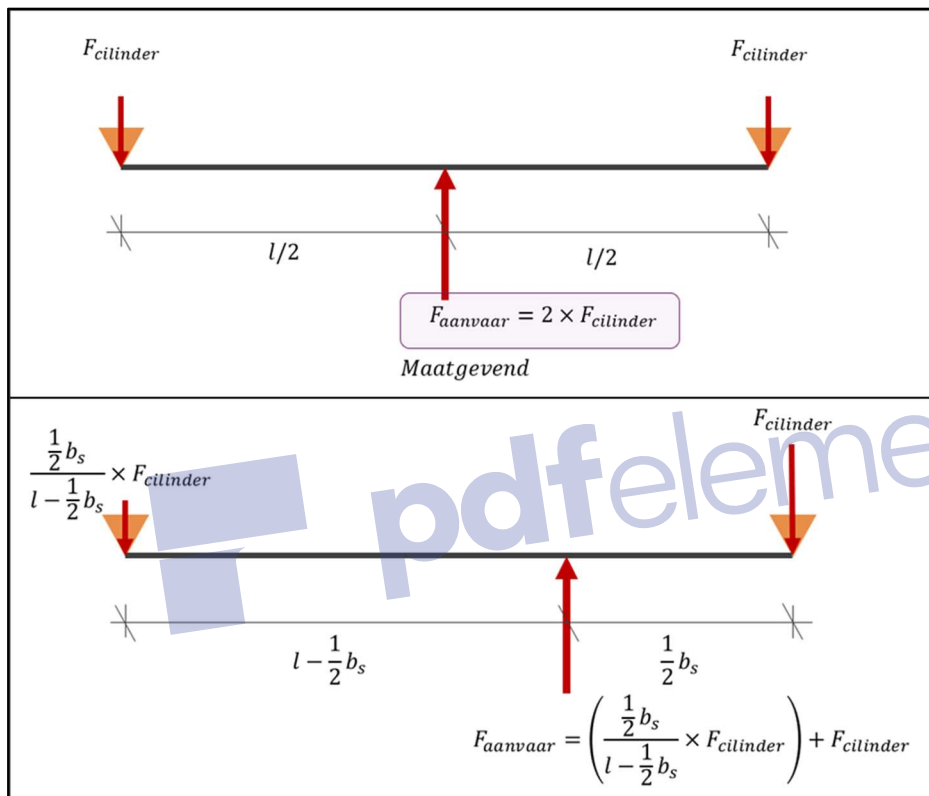


Figuur 16.13 Doorbuiging van de stootbalk

Naast de doorbuiging heeft de stootbalk een limiet voor de hoeveelheid scheefstand. Bij een excentrische aanvaring gaat een grotere kracht naar één zijde, de cilinder aan deze zijde wordt hierdoor verder ingedrukt. Dit betekent dat de stootbalk schuin gaat liggen in de kolk, om dit te voorkomen wordt de stootbalk aan weerszijden geleid. Dit is een rails waarover de stootbalk wordt geleid, deze rails voorkomt dat de stootbalk scheef komt te liggen.

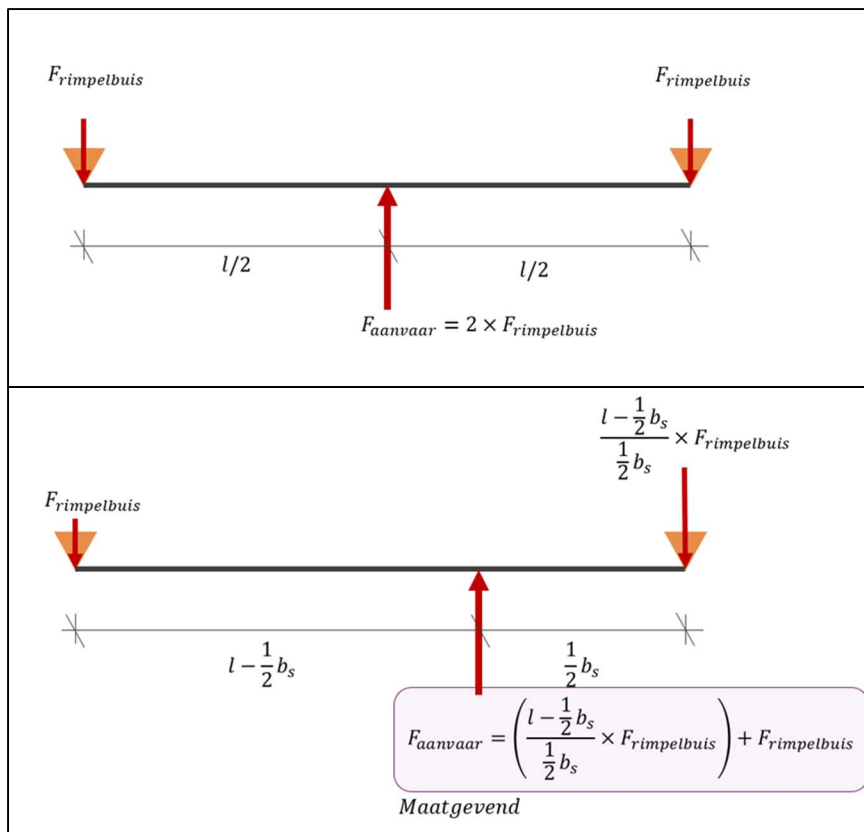
16.2.3 Oplegreacties

Bij een centrische aanvaring zijn oplegreacties gelijk aan de maximale reactiekracht van de dempcilinders, de aanvaarbeasting is gelijk aan de oplegreacties bij elkaar opgeteld. Een centrische aanvaring geeft een aanvaarbeasting gelijk aan twee keer de maximale reactiekracht van de cilinder. Bij een excentrische aanvaring wordt één oplegging zwaarder belast dan de andere oplegging. De grootste oplegreactie is gelijk aan de maximale reactiekracht van de dempcilinder, de andere oplegreactie is lager dan de maximale reactiekracht van de dempcilinder. Hierdoor is de aanvaarbeasting bij een excentrische aanvaring altijd kleiner dan twee keer de maximale reactiekracht van de dempcilinder. Bij de stootbalk met dempcilinders geeft een centrische aanvaring de maatgevende dwarskracht waarop de stootbalk wordt gedimensioneerd. *Figuur 16.14* geeft de beredenering in een schema weer.



Figuur 16.14 Bepalen maatgevende aanvaarbeasting bij stootbalk met dempcilinders

Bij een stootbalk met rimpelbuizen zijn de reactiekrachten anders dan bij een stootbalk met dempcilinders. *Figuur 16.15* geeft de beredenering weer in een schema. Een rimpelbuis wordt ingedrukt bij een gegeven kracht, dit wordt de bezwijkkracht genoemd. Bij een excentrische aanvaring is de kracht aan de ene zijde groter dan aan de andere zijde, net als de stootbalk met dempcilinders. Omdat de stootbalk wordt geleid, kan deze minimale scheefstand verdragen. Om de energie van de aanvaring op te nemen, moet de zijde welke een kleinere reactiekracht heeft ook indrukken. Aan deze zijde neemt de reactiekracht toe tot aan de bezwijkkracht. Aan de zijde waar de reactiekracht gelijk is aan de bezwijkkracht neemt de reactiekracht toe. Door de excentrische aanvaring blijft deze zijde groter dan de andere zijde. Met verhoudingen wordt de reactiekracht bepaald. Hieruit is af te leiden dat de aanvaarbeasting bij een excentrische aanvaring met een stootbalk met rimpelbuizen altijd groter is dan twee keer de reactiekracht van een rimpelbuis. De oplegreactie is aan één zijde groter dan de bezwijkkracht, aan de andere zijde is de oplegreactie gelijk aan de bezwijkkracht. Bij een centrische aanvaring zijn de oplegreacties gelijk aan de bezwijkkracht van de rimpelbuizen.



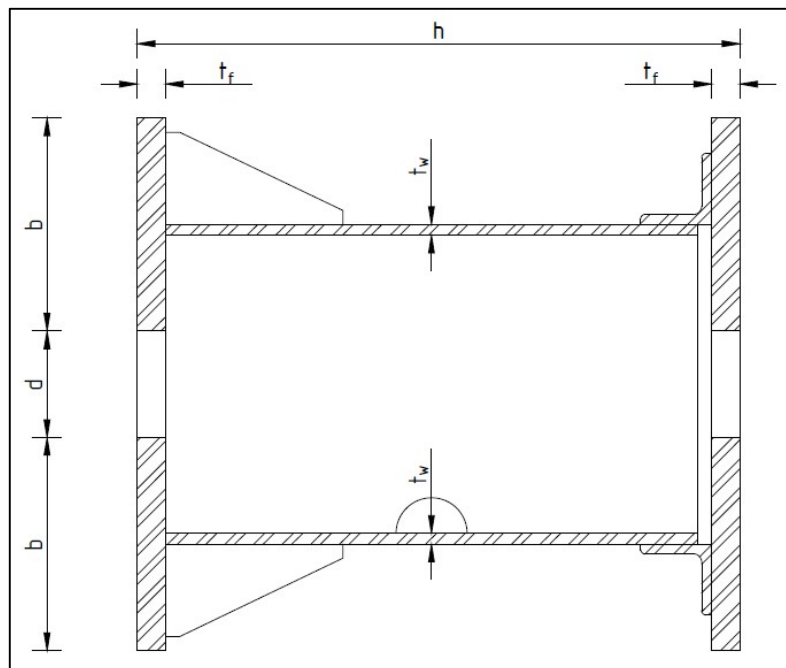
Figuur 16.15 Bepalen maatgevende aanvaarbelasting bij stootbalk met rimpelbuizen

16.2.4 Bepalen profiel stootbalk

Uit de maximale doorbuiging en de maatgevende belasting volgt de benodigde stijfheid (I_{ben}) van de stootbalk. Door de benodigde stijfheid (I_{ben}) gelijk te stellen aan de stijfheid van de stootbalk ($I_{stootbalk}$) kan de geometrie van de stootbalk worden bepaald. In *Vergelijking 16-19* is deze vergelijking weergegeven, de Unity Check dient dan kleiner of gelijk aan 1,00 te zijn.

Geometrie stootbalk

In *Figuur 16.16* is de doorsnede van de stootbalk weergegeven, op basis van dit ontwerp worden de breedte, hoogte, dikte lijf en dikte flens bepaald. De stootbalk bestaat uit twee identieke profielen welke verbonden worden middels schotten. De stijfheid van de balk is gelijk aan tweemaal de stijfheid van een profiel. De afstand tussen de profielen (d) heeft geen invloed op de stijfheid, op basis van het ontwerp stootbalk Sluis Delden wordt ervoor dit 142,0 mm aangehouden.



Figuur 16.16 Doorsnede stootbalk op basis van de stootbalk Delden en Hengelo

De stootbalk dient een samengesteld profiel te zijn. Bestaande profielen (HEM of HEB) zijn theoretisch mogelijk, enkel is het lastig om de schotten tussen beide profielen aan te brengen. Het is vrijwel onmogelijk de profielen te verbinden, doormiddel van lassen, vanwege ruimtegebrek door de geringe afstand onderling. Ook voor onderhoudbaarheid is een bestaand profiel ongewenst, er is onvoldoende ruimte gecreëerd voor inspecties. De stootbalk bestaat uit losse platen die met lasverbindingen zijn uitgevoerd. Aan één zijde zijn de flensen uitneembaar, hier zijn de flensen met boutverbindingen uitgevoerd. Hierdoor is er een mogelijkheid om bij inspecties ruimte te maken om de binnenzijde van de stootbalk te inspecteren.

De stootbalk is opgebouwd uit twee profielen, dit zijn identiek samengestelde profielen. Eén samengesteld profiel bestaand globaal uit 3 platen, onderverdeeld in 2 flensen en 1 lijf. Voor de breedte van de flensen (b) wordt 300 mm aangehouden, dit is aangenomen op basis van bestaande HEM- en HEB-profielen.

De dikte van de flens wordt bepaald aan de hand van de hoogte. De maximumdikte is 40 mm, dit is gelijk aan de maximale dikte van HEM300 tot en met HEM1000. Een kleinere hoogte geeft een kleinere stijfheid, ook een dünnere flens geeft een kleinere stijfheid. Bij kleinere benodigde stijfheid wordt de hoogte kleiner en de dikte van de flens wordt kleiner. De verdeling voor de dikte van de flens wordt conform *Tabel 16.5* opgenomen in de tool.

Tabel 16.5 Dikte flens op basis van hoogte profiel

h [mm]	t_f [mm]
≤ 300	25
$>300; \leq 500$	30
$>500; \leq 800$	35
>800	40

Het lijf van de ligger heeft een vaste dikte van 15 mm. De schotten in de stootbalk zijn tevens 15 mm dik. In een verder ontwerpstadium dient de plaatsing en tussenafstand van de schotten te worden bepaald.

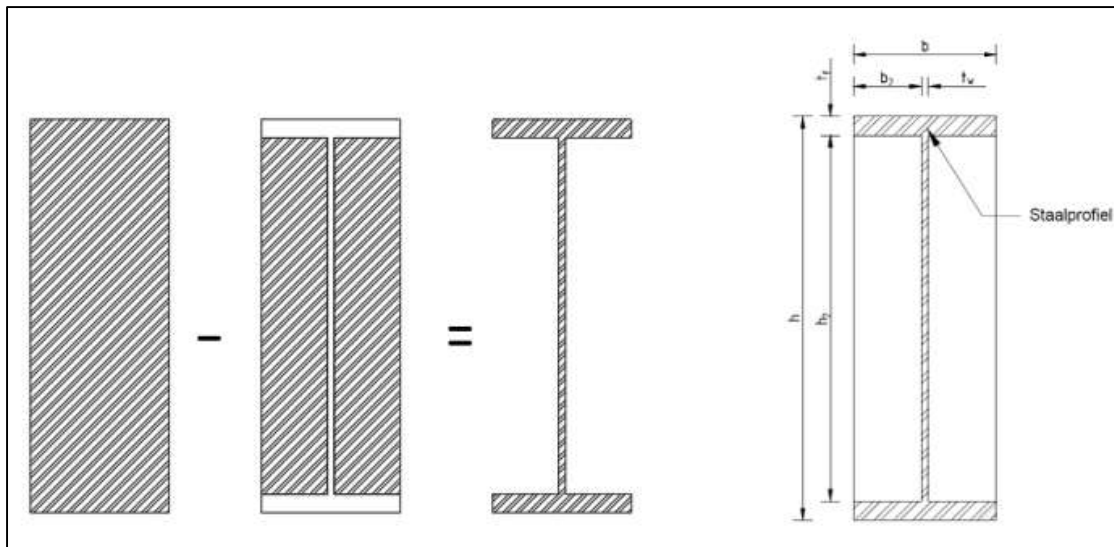
Door de parameters een vaste waarde te geven, of op basis van de hoogte te bepalen, is er slechts 1 variabele in het ontwerp van het profiel, namelijk de hoogte. Door te variëren in de hoogte wordt de benodigde stijfheid van de stootbalk bepaald.

Stijfheid profiel berekenen

Voor het bepalen van de stijfheid van het samengesteld profiel is *Vergelijking 16-18* toegepast. De formule is herschreven tot *Vergelijking 16-25*, *Figuur 16.17* geeft dit weer. Hierin is het bijkomend oppervlakte van lassendiktes en extra schotten/steunen weggelaten.

Vergelijking 16-25 Stijfheid van het samengesteld profiel bepalen

$$I_{\text{stootbalk}} = 2 \times I_{\text{profiel}} = 2 \times \left(\frac{1}{12} \times b \times h^3 - 2 \times \left(\frac{1}{12} \times b_2 \times h_2^3 \right) \right)$$



Figuur 16.17 Stijfheid samengesteld profiel bepalen uit een rechthoekig profiel

Unity Check op buigend moment

Ter controle wordt er een Unity Check gedaan op het buigend moment in de stootbalk. Het buigend moment geeft een staalspanning, dit wordt berekend middels *Vergelijking 16-23*. Het moment wordt met “vergeet me nietjes” bepaald en het weerstandsmoment wordt bepaald vanuit het traagheidsmoment. De Unity Check controleert of de spanning door het moment niet de vloeispanning van staal overschrijdt. Wanneer de spanning door het moment de vloeispanning overschrijdt dient er een groter profiel worden gekozen. De Unity Check bevat zowel de excentrische aanvaring als centrische aanvaring.

16.2.5 Dempcilinder

Aan de uiteinden van de stootbalk bevinden zich dempcilinders, dit zijn cilinders welke voor een project op maat worden gemaakt. Van de cilinders zijn drie gegevens van belang voor het ontwerp van de stootbalk en aanvaarbeveiliging. Te weten:

- De totale energieopname;
- De slag van de cilinder en gehele lengte van de cilinder;
- De maximale reactiekracht van de cilinder.

Berekening

Uit civieltechnisch standpunt is er maar te rekenen aan één parameter van de cilinder. Met *Vergelijking 16-26* wordt gecontroleerd of de cilinder voldoende energie kan opnemen. Hierin is E_{cil} een gegeven van de leverancier en E_{ber} dient te worden berekend. De waarde (E_{ber}) wordt bepaald met de mate van excentriciteit van het aangrijppunt naar de opleggingen. Deze verhouding in afstand bepaald hoeveel energie dat naar één zijde gaat. Dit resulteert in de maatgevende energie welke de cilinders aan weerszijden minimaal dient op te nemen.

Vergelijking 16-26 Unity Check op voldoende opnamecapaciteit voor maatgevende aanvaring

$$u.c. = \frac{E_{ber}}{E_{cil}}$$

Waarin: E_{ber} = Maatgevende aanvaarenergie bij excentrische aanvaring [kNm]
 E_{cil} = Maximale energieopname van één cilinder [kNm]

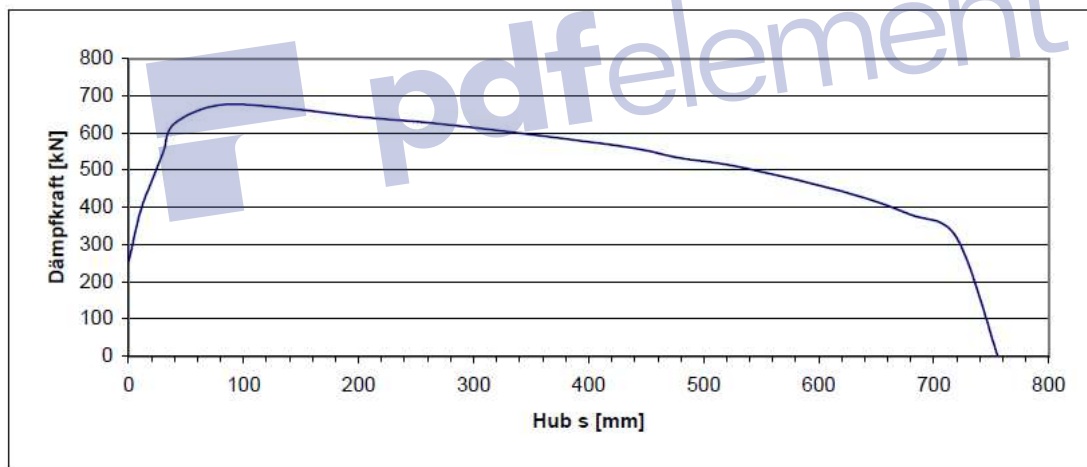
Dempcilinder uitwerking

Aan de hand van een voorbeeld wordt het gedrag van een cilinder toegelicht. In dit voorbeeld worden waarden gebruikt welke afkomstig zijn van ACE, ACE heeft de dempers geleverd voor de sluisen Maasbracht, Born, Heel, Delden en Hengelo. In dit voorbeeld worden uitgangspunten gebruikt, te weten:

- Aanvaring door een maatgevend schip van 6.400 ton met een aanvaarsnelheid van 0,5 m/s;
- Bij centrische aanvaring last verdeeld gelijk, 3.200 ton; Energie naar cilinder = $0,55mv^2 = 0,55 \cdot 3.200 \cdot 0,5^2 = 440 \text{ kNm}$;
- Bij excentrische aanvaring 5/8 deel naar één zijde, 4.000 ton. Energie naar cilinder = $0,55mv^2 = 0,55 \cdot 4.000 \cdot 0,5^2 = 550 \text{ kNm}$.

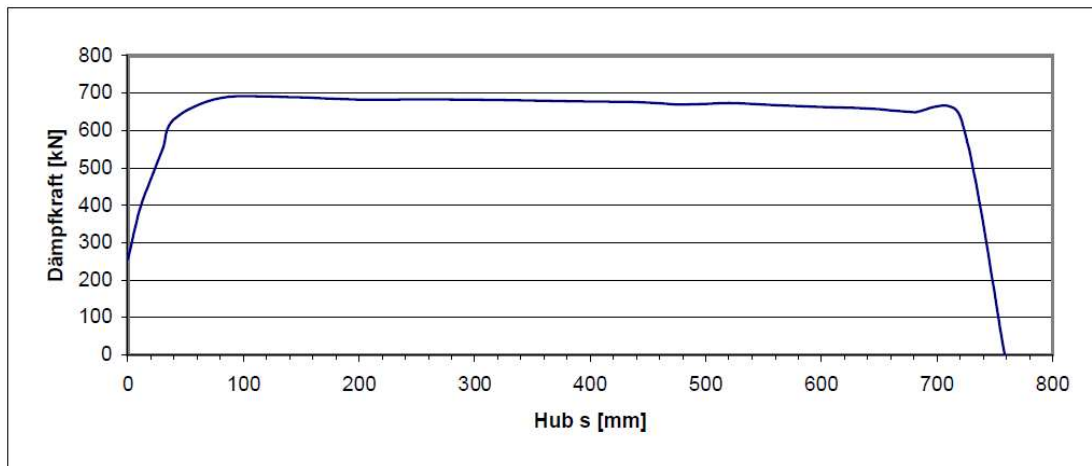
In *Figuur 16.18* is de reactie van de dempcilinder weergegeven bij een centrische aanvaring, hierbij neemt de dempcilinder 440 kNm op. *Figuur 16.19* geeft de reactie weer bij de maatgevende aanvaring met een energie van 550 kNm. In beide gevallen wordt er gebruik gemaakt van dezelfde dempingscilinder.^a

De grafiek geeft weer dat de dempcilinder een maximale slag heeft van 760 mm en een maximale reactiekracht van ongeveer 700 kN. Het verschil tussen de energie van de twee situaties volgt uit het verloop van de kracht over de indrukking van de dempcilinder. Bij de maatgevende aanvaarenergie van 550 kNm, is af te leiden dat de maximale reactiekracht over bijna de gehele slag voorkomt. Bij een energie van 440 kNm treedt de maximale reactiekracht enkel in het begin op, de kracht neemt tijdens het indrukken geleidelijk af.



Figuur 16.18 Grafiek met reactiekracht over de lengte van een cilinder bij indrukking door een schip met een relatieve massa van 3200 ton en een vaarsnelheid van 0,5 m/s (centrische aanvaring)

^a Afkomstig van ACE: (ACE, 2010)

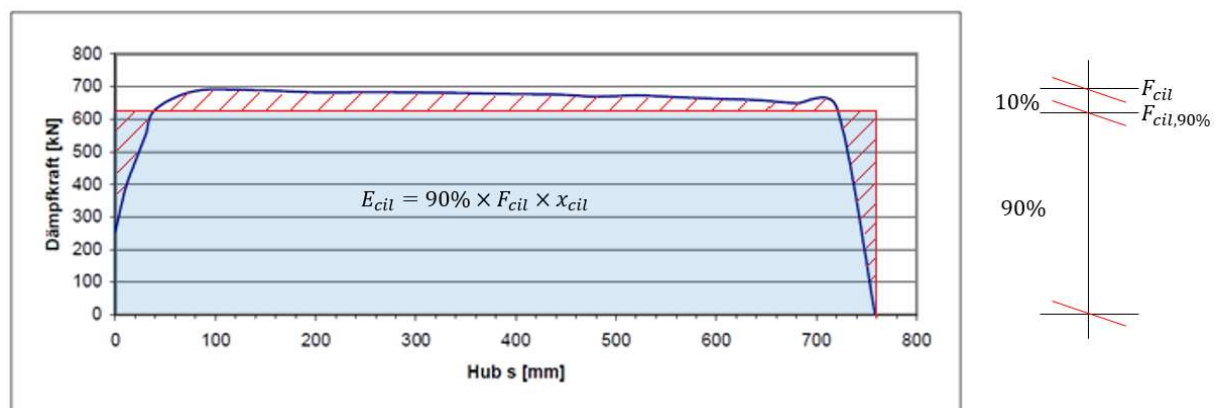


Figuur 16.19 Grafiek met reactiekracht over de lengte van een cilinder bij indrukking door een schip met een relatieve massa van 4000 ton en een vaarsnelheid van 0,5 m/s (excentrische aanvaring); afkomstig van ACE

Inschatting energieopname zonder gegevens dempcilinder

Wanneer er onbekend is welke demper wordt toegepast bij een stootbalk met dempcilinder wordt er een inschatting gemaakt voor de dempcilinder. De totale energieopname wordt geschat door de maatgevende energie bij een excentrische aanvaring, dit geldt als het minimum de dempcilinder dient op te nemen. De lengte wordt geschat op basis van de beschikbare ruimte. Hierbij wordt er rekening gehouden met de ruimte voor de opleggingen en de ruimte die de stootbalk inneemt. Bij onbeperkte lengte kan een cilinder onbeperkt groot worden, om dit te voorkomen is er een bovengrens van 4 meter voor de totale lengte van de dempcilinder vastgesteld. De slag van de cilinder bepaald de reactiekracht van de dempcilinder.

Zoals is weergegeven met de blauwe lijn in [Figuur 16.20](#), is de kracht waarmee een dempcilinder wordt ingedrukt niet constant of lineair. Door aan te nemen dat de dempcilinder constant op 90% van zijn kracht wordt ingedrukt, is een inschatting gedaan van de energie die wordt opgenomen. [Figuur 16.20](#) geeft de indrukking van een dempcilinder weer, hierin is met rood de inschatting voor de energie weergegeven. De energie wordt bepaald door de slag te vermenigvuldigen met de kracht. Om de kracht te bepalen wordt de energieopname gedeeld door de slag van de dempcilinder. Hieruit volgt 90% van de kracht waarbij de dempcilinder wordt ingedrukt, door de eerdergenoemde aanname. De maximale reactiekracht van de dempcilinder wordt bepaald door 90% van de kracht om te rekenen naar 100%, dit geeft de maximale reactiekracht welke voorkomt bij de dempcilinder. [Vergelijking 16-27](#) geeft de vergelijking weer voor het bepalen van de energieopname van de dempcilinder. Deze vergelijking is alleen geldend bij het bepalen van de maximale energieopname.



Figuur 16.20 Bepalen aanvaarenergie met schatting voor een dempcilinder

Vergelijking 16-27 Energieopname cilinder inschatten

$$E_{cil} = 90\% \times F_{cil} \times x_{cil}$$

Waarin:	E_{cil}	= Energieopname dempcilinder	[kNm]
	F_{cil}	= Maximale reactiekracht dempcilinder	[kN]
	x_{cil}	= Slaglengte dempcilinder	[m]

16.2.6 Validatie Stootbalk met dempcilinder***Stootbalk met dempcilinder Sluis Maasbracht***

Om te valideren als de Aanvaarbeveiligingstool een reëel resultaat geeft, dient de tool te worden ingevuld voor een bestaand sluiscomplex waar de stootbalk met dempcilinder is uitgevoerd. Sluis Maasbracht maakt gebruik van een stootbalk met dempcilinders. In *Tabel 16.6* zijn de gegevens van Sluis Maasbracht weergegeven, deze zijn beschikbaar gesteld door Ingenieursbureau Boorsma. Vanuit deze gegevens berekend de tool de geometrie van de stootbalk, waarna deze wordt vergeleken met de werkelijk toegepaste stootbalk in Sluis Maasbracht.

Gegevens*Tabel 16.6 Gegevens Sluis Maasbracht^a*

Vaarweg			
Algemeen			
Vaarwegklasse	CEMT-	Va	
Sluis			
Kolk			
Kolkbreedte	b_k	16,00	m
Scheepvaart			
Algemeen			
Maatgevend schip	CEMT-	Va-M9	
Breedte maatgevend schip		11,40	m
Aanvaarenergie			
Algemeen			
Maatgevende Aanvaarenergie	$E_{aanvaar}$	880	kNm
Dempcilinder			
Algemeen			
Maximale reactiekracht	$F_{cilinder}$	680	kN
Maximale slag	$l_{cilinder}$	0,80	m
Diepte oplegging in kolkwand [Advies]	l_{opleg}	0,75	m
Maximale energieopname cilinder	$E_{cilinder}$	560	kNm

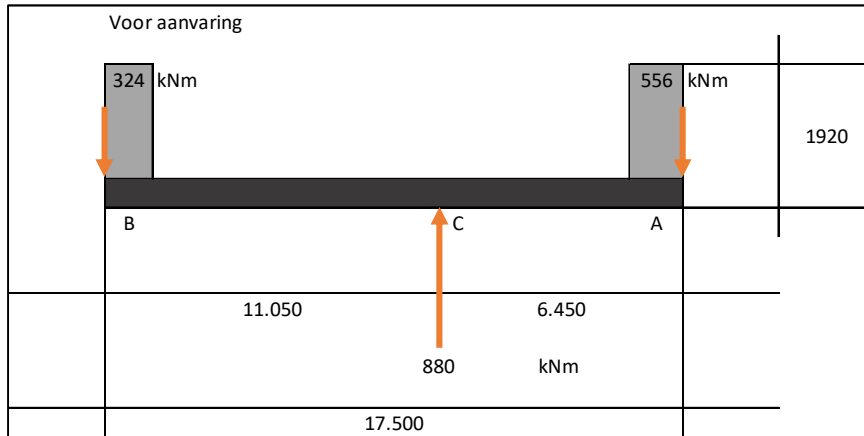
Resultaat cilinder

Uit de gegevens volgt dat de maatgevende cilinder 556 kNm aan energie dient op te nemen, dit valt binnen de maximale energieopname van de cilinder. In *Figuur 16.21* is de verdeling van de aanvaarenergie weergegeven voor de maatgevende situatie betreffende de maximaal op te nemen

^a (Hoekstra, 2019)

aanvaarenergie voor een cilinder. Excentrisch aanvaring is hierin maatgevend, centrisc aanvaring geeft een energieopname van $880 \text{ kNm} / 2 = 440 \text{ kNm}$ per cilinder welke kleiner is dan 556 kNm .

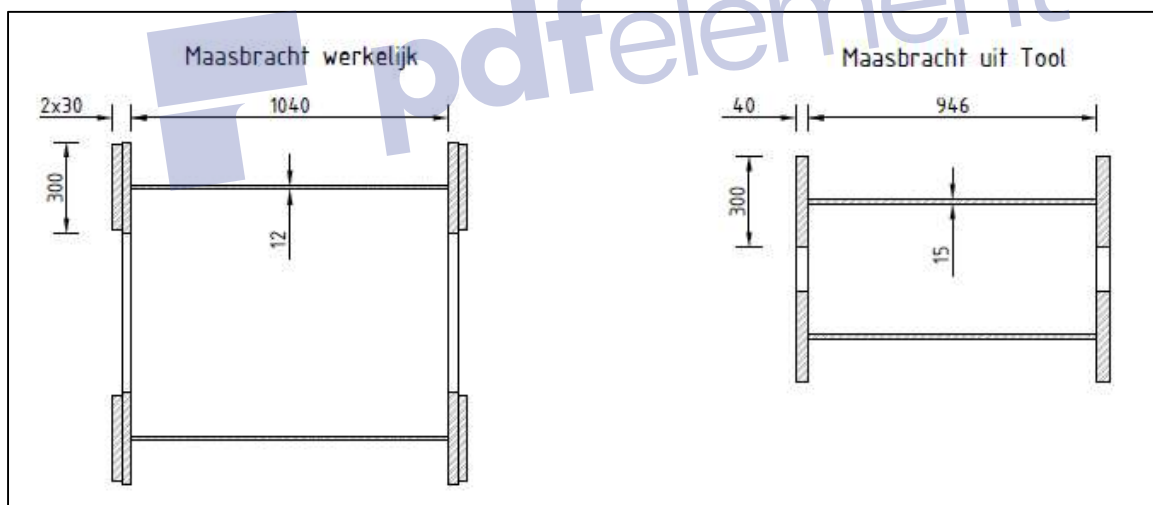
De maatgevende energie komt overeen met de maximale energieopname van een cilinder, op basis van dit onderdeel komt het resultaat van de tool overeen met de berekening van Sluis Maasbracht.



Figuur 16.21 Verdeling aanvaarenergie bij excentrische maatgevende aanvaring Sluis Maasbracht

Resultaat stootbalk

De geometrie van de stootbalk volgt eveneens uit de tool, dit is het minimaal toe te passen profiel. Uit veiligheidsoverwegingen kan worden gekozen om een iets groter profiel toe te passen, waarbij de waarden uit de tool als uitgangspunt fungeren.



Figuur 16.22 Profieldoorsnede stootbalk Maasbracht in werkelijkheid en resultaat uit de Aanvaarbeveiligingtool

De profieldoorsnede van de stootbalk in Maasbracht is links weergegeven in [Figuur 16.22](#), de maatvoering is afkomstig uit de UO-tekeningen van Maasbracht, beschikbaar gesteld door Ingenieursbureau Boorsma. Rechts in het figuur is het ontwerp weergegeven welke volgt uit de tool, er is duidelijk een verschil in hoogte te zien. Dit is te verklaren door de ruimte tussen de twee profielen. Deze ruimte heeft geen invloed op de sterkte van de stootbalk en kan worden genegeerd. De sterkte van de stootbalk wordt bepaald door de profielen. In beide gevallen zijn er twee profielen gebruikt van ongeveer 1000 mm met een flensbreedte van 300 mm. De dikte van het lijf is 12 mm om 15 mm. De dikte van de flens is 60 mm om 40 mm.

Door het oppervlak van beide profielen uit te werken en te vermenigvuldigen met de dichtheid, wordt het gewicht per meter bepaald. In Maasbracht is het werkelijke gewicht 742 kg/m op basis van het bovenstaande profiel. Uit de tool volgt een gewicht van 600 kg/m. Het profiel uit de tool wijkt met 24% af van het werkelijk toegepaste profiel. De variaties in de dikte van het lijf en de flens zijn te verklaren door het ontwerp. In Maasbracht is ervoor gekozen om een gestandaardiseerd profiel te kiezen en op de flensen extra stalenplaten te lassen. In de tool wordt er een profiel ontworpen welke de minimale benodigde stijfheid heeft.

Stootbalk met dempcilinder Sluis Delden

Naast de aanvaarbeveiliging van Sluis Maasbracht is er ook bij Sluis Delden een stootbalk met dempcilinders toegepast. Ingenieursbureau Boorsma heeft de benodigde informatie gedeeld, de gegevens zijn weergegeven in *Tabel 16.7*.

Gegevens

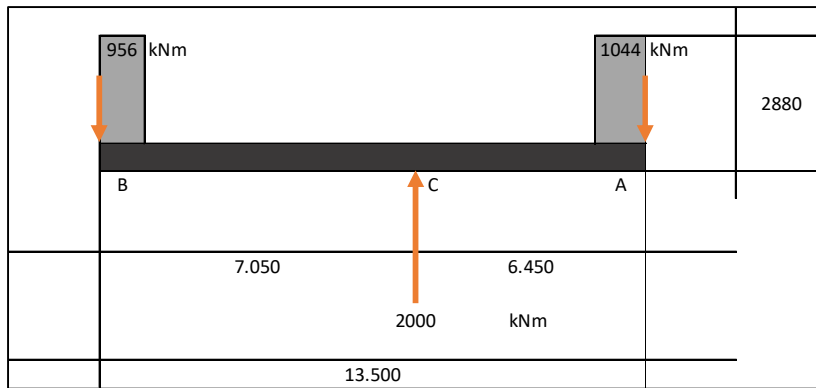
Tabel 16.7 Gegevens Sluis Delden^a

Vaarweg			
Algemeen			
Vaarwegklasse	CEMT-	Va	
Sluis			
Kolk			
Kolkbreedte	b_k	12,00	m
Scheepvaart			
Algemeen			
Maatgevend schip	CEMT-	Va-M9	
Breedte maatgevend schip		11,40	m
Aanvaarenergie			
Algemeen			
Maatgevende Aanvaarenergie	$E_{aanvaar}$	2.000	kNm
Dempcilinder			
Algemeen			
Maximale reactiekracht	$F_{cilinder}$	990	kN
Maximale slag	$l_{cilinder}$	1,20	m
Diepte oplegging in kolkwand [Advies]	l_{opleg}	0,75	m
Maximale energieopname cilinder	$E_{cilinder}$	1.080	kNm

Resultaat cilinder

Uit de tool volgt dat de dempcilinder bij een maatgevende aanvaring maximaal 1044 kNm moet kunnen opnemen. Dit valt binnen de capaciteit van de dempcilinder van 1080 kNm. In *Figuur 16.23* is de verdeling van de aanvaarenergie weergegeven bij een excentrische maatgevende aanvaring. Een excentrische aanvaring geeft wederom de maatgevende opnamecapaciteit.

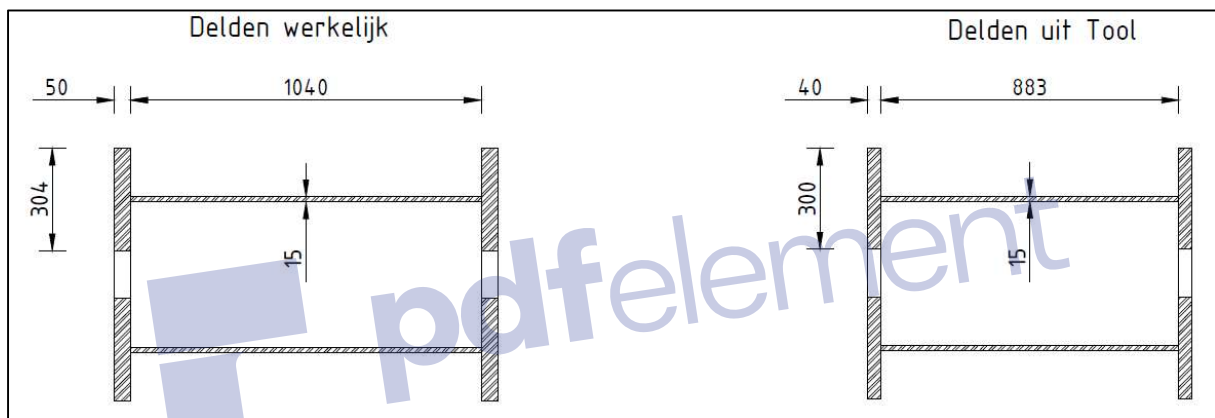
^a (Hoekstra, 2019)



Figuur 16.23 Verdeling aanvaarenergie bij excentrische maatgevende aanvaring Sluis Delden

Resultaat stootbalk

De geometrie van de stootbalk volgt eveneens uit de tool, dit is het minimaal toe te passen profiel. Uit veiligheidsoverwegingen kan worden gekozen om een iets groter profiel toe te passen, waarbij de waarden uit de tool als uitgangspunt fungeren.



Figuur 16.24 Profieldoorsnede stootbalk Delden in werkelijkheid en resultaat uit de Aanvaarbeveiligingtool

In *Figuur 16.24* zijn de profieldoorsneden van de stootbalken van Sluis Delden weergegeven, links de werkelijk toegepaste stootbalk en rechts het resultaat uit de tool. Het grootste verschil tussen de twee profielen is de breedte van de stootbalk en de dikte van de flens, de andere onderdelen komen overeen. Door het oppervlak van beide profielen uit te werken en te vermenigvuldigen met de dichtheid, wordt het gewicht per meter bepaald. In Delden is het werkelijke gewicht 722 kg/m op basis van het bovenstaande profiel. Uit de tool volgt een gewicht van 585 kg/m. Het profiel uit de tool wijkt met 24% af van het werkelijk toegepaste profiel. Bij het verdere ontwerp wordt het resultaat van de tool opgeschaald uit veiligheidsoverwegingen. Daarmee het profiel van de toegepaste stootbalk benaderen.

Discussie

In de praktijk is gebleken dat de stootbalk met dempcilinder een goede manier is voor het opnemen van energie. Er zijn weinig onzekerheden betreffende de werking enkel zijn er wel enkele aannames gedaan welke gevalideerd dienen te worden. Daarnaast zijn er optimalisaties denkbaar om de toepassing te vergroten. Onderwerpen welke geadviseerd worden om nader te onderzoeken zijn:

- De werkelijke energieopname van de dempcilinder; Aangenomen is dat de dempcilinder constant op 90% van zijn kracht wordt ingedrukt;

- Invloed op de reactiekracht in relatie tot slaglengte; De invloed op de maximale reactiekracht bij slaglengtes groter dan de aangehouden 760 mm;
- De uitwerking van de stootbalk is versimpeld om deze toepasbaar te maken in de tool, in verder uitwerking dient rekening te worden gehouden met:
 - Plooien van de flensen en schotten;
 - Kippen van de balk;
 - Geleidingsysteem aan de uiteinden van de balk;
 - Bezwijkgedrag van de stootbalk bij overschrijding van de ontworpen energie.

Conclusie

Uit deze gegevens wordt geconcludeerd dat bij een centrische aanvaring de maximale reactiekracht gelijk is aan de reactiekracht bij een excentrische aanvaring. Voor het bepalen van de maatgevende energieopname geldt een excentrische aanvaring.

Per situatie wordt een unieke dempcilinder ontworpen. Ontwerpparameters zijn: slaglengte, reactiekracht en totale energieopname. Dit zijn eveneens de parameters welke de input vormen voor de tool waaruit de aanvaarconstructie wordt ontworpen.

Op basis van de resultaten van de validatie wordt geconcludeerd dat de Aanvaarbeveiligingtool een juist resultaat weergeeft. Het resultaat is een ondergrens van wat dient te worden toegepast, waar nodig kan ervoor worden gekozen om op te schalen.



16.3 Rimpelbuis

De rimpelbuis neemt energie op door het vloeien van staal, om dit te bereiken wordt er een rondbuisprofiel belast op druk, waarbij de buis moet gaan plooiën. Bij de toepassing van een gladde buis, één zonder rimpels, is het vrijwel onmogelijk nauwkeurig vast te stellen waar plooï optreedt in de buis en wat het exacte gedrag is. Door de toepassing van rimpels worden er zwakke plekken gedefinieerd. Hierdoor is bekend waar er vloeï optreedt, dat gebeurt namelijk in de zwakke plekken, de rimpels.

16.3.1 Benodigde vergelijkingen

Vergelijking 16-28 Bepalen moment door kracht en arm

$$M = F \times a$$

Waarin:	M	= Moment	[kNm]
	F	= Kracht	[kN]
	a	= Arm	[m]

Vergelijking 16-29 Bepalen vloeimoment uit weerstandsmoment en staalkwaliteit

$$M_{vloeï} = W_{pl} \times f_{vloeï}$$

Waarin:	$M_{vloeï}$	= Moment waarbij staal vloeï	[Nmm]
	W_{pl}	= Weerstandsmoment plastisch	[mm ³]
	$f_{vloeï}$	= Onderste vloeïgrens	[N/mm ²]

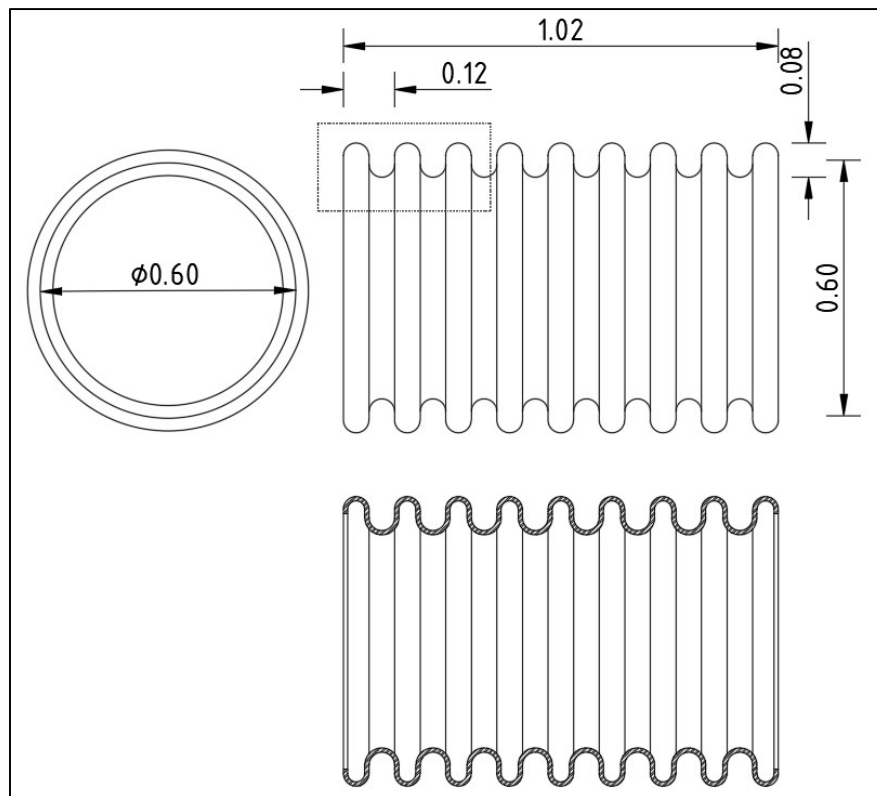
Vergelijking 16-30 Bepalen plastisch weerstandsmoment rechthoekige doorsnede

$$W_{pl} = \frac{1}{4} \times b \times h^2$$

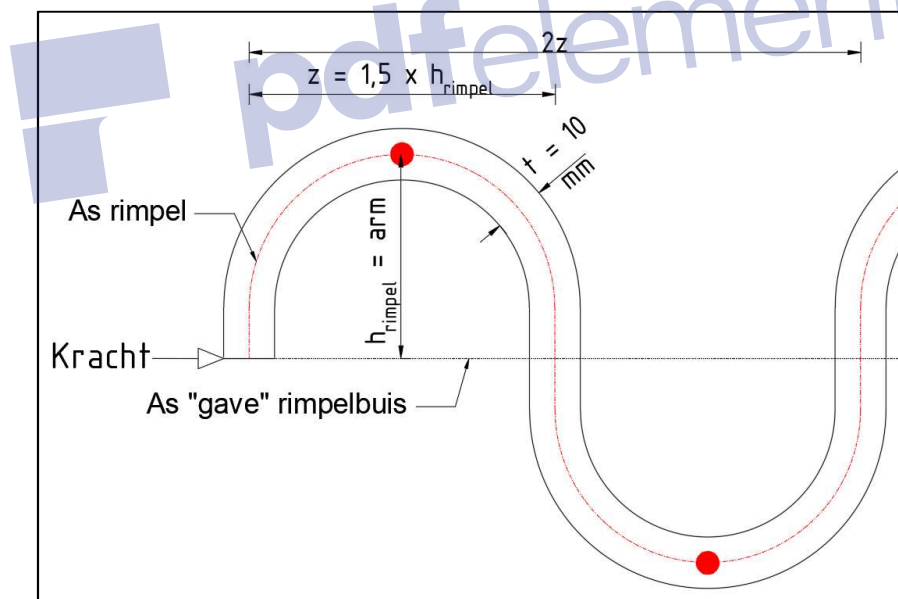
Waarin:	b	= Omtrek van de buis	[mm]
	h	= Dikte lijf buisprofiel	[mm]

16.3.2 Bepalen profiel rimpelbuis

De vorm van de rimpels bepalen de hoeveelheid energie die wordt opgenomen samen met de diameter van de buis (d), de dikte van het lijf (t) en de lengte van een rimpel (z). Er is gekozen om een ronding met straal ' r ' te gebruiken die gelijk is aan ' $0,5z$ ', waarbij ' z ' is gelijk aan 1,5 maal de hoogte van de rimpel (h_{rimpel}). Als de factoren bij elkaar worden gevoegd dan resulteert dit in een straal welke gelijk is aan 0,75 van de hoogte van de rimpel. In *Figuur 16.25* is het schetsontwerp van een rimpelbuis weergegeven. In *Figuur 16.26* is het detail weergegeven met de bovengenoemde parameters.



Figuur 16.25 Schetsontwerp rimpelbuis met diameter van 60 cm en rimpels van 4 cm hoog (maten weergegeven in meters)



Figuur 16.26 Detail rimpel

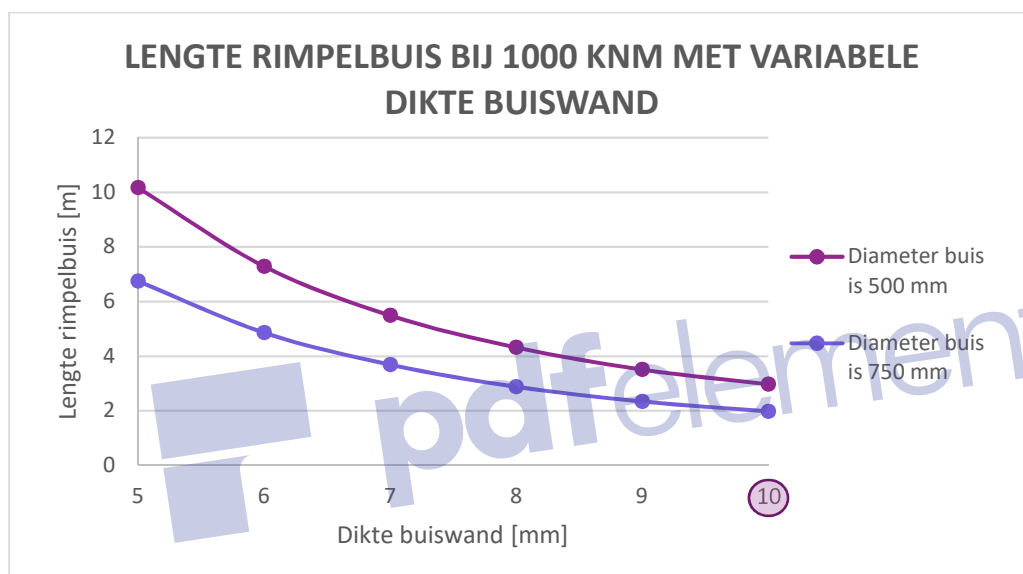
16.3.3 Voorgeschreven afmetingen rimpelbuis

Er worden afmetingen voorgeschreven op basis van de berekende reactiekrachten en opname van energie zoals berekend in paragraaf 16.3.7. Voor de dikte van de buis (t) is een vaste waarde van 10 mm aangehouden. De diameter van de buis (d) is variabel, de afmetingen die zijn opgenomen bedragen: 500, 550, 600, 650, 700 en 750 mm. De hoogte van de rimpel (h_{rimpel}) is eveneens variabel, de hoogtes die zijn opgenomen bedragen: 30, 40 en 50 mm.

Bepaling van de dikte van de rimpelbuis

In *Figuur 16.27* is de dikte (t) als een variabele weergegeven, welke van invloed is op de buislengte. Het uitgangspunt is dat de buis 1000 kNm dient op te nemen, met een rimpelhoogte van 30 mm. *Figuur 16.27* weergeeft een uitwerking van zowel een diameter van 500 mm en een diameter van 750 mm.

Doormiddel van het streven naar een vrijwel gelijke lengte van de rimpelbuis als die van de dempcilinder, zoals toegepast bij Sluis Delden, is er gestreefd naar het toepassen van realistische afmetingen. Voor 1000 kNm heeft de dempcilinder een indrukking van 1,2 meter. Waarbij er een totale benodigde lengte ongeveer 2,9 meter bedraagt. Als er een soortgelijke lengte van de rimpelbuis wordt toegepast blijkt dat de benodigde dikte minimaal 10 mm is. Dikker wordt niet beschouwd omdat deze moeilijker te realiseren zijn. Dunnere buiswanden dan 10 mm zijn tevens niet geschikt, enkel bij een buisprofiel van 750 mm nemen deze over de gewenste afstand de maatgevende energie op. Bij overige buisprofielen wordt de lengte zodanig groter, meer dan 3 meter, wat als ongewenst is beschouwd. In dit onderzoek wordt ervoor de dikte van de buis (t) is een vaste waarde van 10 mm aangehouden.



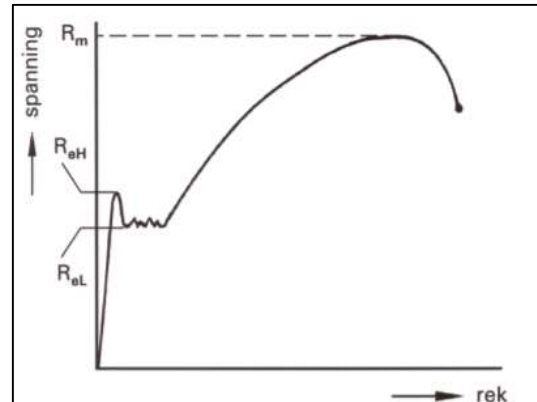
Figuur 16.27 Lengte van de rimpelbuis bij variabele dikte buiswand met energieopname van 1000 kNm; S355; rimpelhoogte 30 mm en buisdiameter van 500 mm

Ploeigevoelige buis

Uit *Vergelijking 2-4* in *paragraaf 2.4.3* volgt of een profiel plooigevoelig is, het profiel bezwijkt eerder op plooï dan op knik. Doormiddel van de rimpels is er een plek gedefinieerd waar vloeï optreedt, dit gebeurt in de toppen en dalen van de rimpels. In *Figuur 16.26* is dit weergegeven met een rode stip. De arm voor het bepalen van de kracht is gelijk aan de hoogte van een rimpel. De kracht vermenigvuldigt met de arm resulteert in een moment in het staal, wanneer dit moment gelijk is aan het vloeïmoment gaat het staal vloeïen.

16.3.4 Vloeigrens staal

Voordat staal gaat vloeien heeft het een korte periode waarin de kracht iets hoger is dan de vloeigrens. Dit wordt de bovenste vloeigrens genoemd, deze bovenste grens is maatgevend voor de oplegreacties. In *Figuur 16.28* is de bovenste vloeigrens aangegeven met R_{eH} en de onderste vloeigrens met R_{eL} .^a



Figuur 16.28 Spanning-rek-diagram staal

De onderste vloeigrens en andere technische leveringsvoorwaarde voor warmvervaardigde buisprofielen zijn vastgesteld conform de norm NEN-EN 10210. Voor elke staalkwaliteit is de onderste vloeigrens gegeven, dit is bij S235; 235 N/mm² en bij S355; 355 N/mm². De voorgeschreven vloeigrens geeft

een ondergrens welke hoogstzelden wordt overschreden, met andere woorden: de werkelijke vloeigrens is lager dan welke is voorgeschreven in de norm. De onderste vloeigrens is gebruikelijk voor berekeningen waarbij er minimale vervormingen worden toegelaten, maar in het geval van een rimpelbuis is de ondergrens onvoldoende. Bij een hogere vloeigrens is de reactiekracht groter en hierdoor ook de energieopname. Voor het bepalen van de reactiekrachten dient de bovenste vloeigrens te worden aangehouden, dit geeft de grootste reactiekrachten en daardoor de grootste krachten in de stootbalk.

De exacte energieopname is niet vast te stellen, er is enkel een inschatting te geven wat de ondergrens, gemiddelde en bovengrens van de energieopname bedraagt. De ondergrens zal altijd moeten voldoen betreffende de hoeveelheid op te nemen aanvaarenergie.

De bovenste vloeigrens staat niet vastgesteld in normen en dient met behulp van proefstukken te worden bepaald. Jaarlijks voert de TU-Delft proeven uit van de treksterkte van staal^b, in *Tabel 16.8* zijn de resultaten benoemd van de bovenste vloeigrens.

Tabel 16.8 Resultaten bovenste vloeigrens uit trektest staal S235 en S355 van TU-Delft

Proefstuk	1	2	3	4	5
S235	340	325	343	324	312
S355	415	390	370	374	382

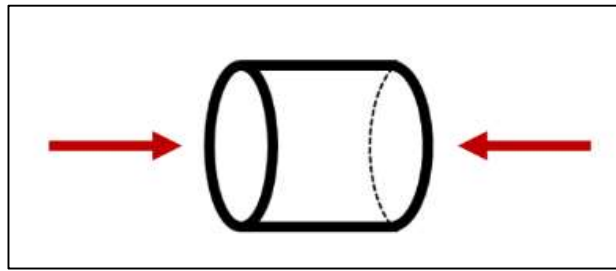
Uit deze proeven wordt geconcludeerd dat de bovenste vloeigrens bij S235 1,46 hoger is en bij S355 gemiddeld 1,17 hoger is. Voor het bepalen van de kracht bij de oplegreactie wordt er gerekend met een vloeigrens bij S235 van $235 \times 1,5 = 353 \text{ N/mm}^2$ en bij S355 een vloeigrens van $355 \times 1,2 = 426 \text{ N/mm}^2$. De gemiddelde vloeigrens ligt bij S235 bedraagt 329 N/mm^2 , een factor 1,40 hoger dan de norm. Voor S355 is de gemiddelde vloeigrens 386 N/mm^2 .

^a (Wetenschapinfo, 2017)

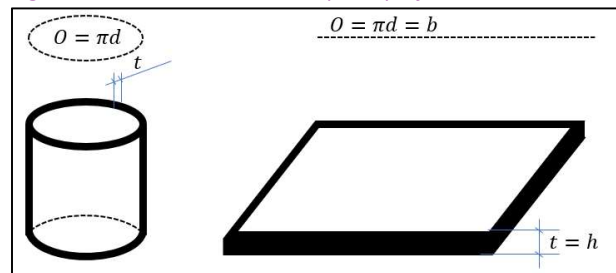
^b (TU-Delft, 2015)

16.3.5 Bepalen plastisch weerstandsmoment rimpelbuis

Door dat het plastisch weerstandsmoment van een rimpelbuis onder druk van normaalkrachten niet bekend is, is deze bepaald. Voor het bepalen van het weerstandsmoment wordt een aanname gedaan; Het plastisch weerstandsmoment van de buis is gelijk aan het plastisch weerstandsmoment van een vlakke plaat. Hierbij is de dikte, gedefinieerd als de hoogte van de plaat ($t = h$), gelijk aan de dikte van de buis (t) en de breedte is gelijk aan de omtrek van de buis. De buis wordt als het ware uitgerold. Waarna het plastisch weerstandsmoment bepaald wordt middels *Vergelijking 16-30*. Het gaat om een benadering van het weerstandsmoment van de rimpelbuis, het aannemelijk dat in werkelijkheid het weerstandsmoment groter is. De invloed van de buis op het weerstandsmoment is niet mee genomen. Bij druk wordt het staal van de buis naar buiten en binnen gedrukt (buiten de vorm van de cirkel) wat resulteert in extra weerstand. De aanbeveling is dan ook om doormiddel van nader onderzoek het exacte weerstandsmoment te bepalen.

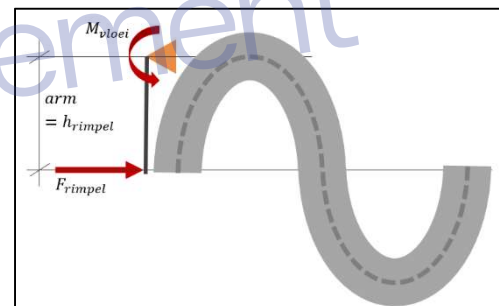


Figuur 16.29 Normaalkrachten op buisprofiel



Figuur 16.30 Inschatting plastisch weerstandsmoment buis onder druk door normaalkrachten

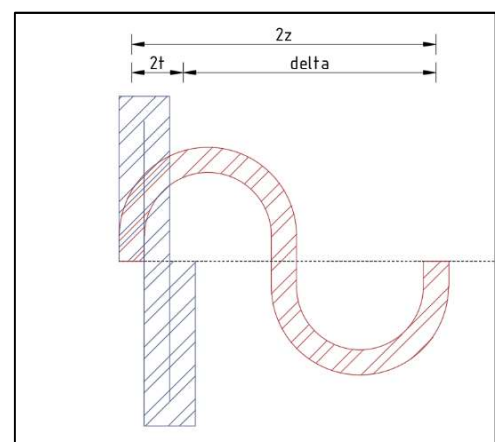
Bij de bepaling van het plastisch weerstandsmoment, *Vergelijking 16-30*, wordt er een buisprofiel zonder rimpels aangehouden. Door de opstaande rimpels wordt de buisdiameter groter en hiermee het plastisch weerstandsmoment ook. Daartegenover geven de neerwaartse rimpels een kleinere buisdiameter en een kleiner plastisch weerstandsmoment. Het gemiddelde van deze twee weerstandsmomenten is gelijk aan het plastisch weerstandsmoment van het buisprofiel zonder rimpels.



Figuur 16.31 Kracht benodigd om rimpelbuis in te drukken

16.3.6 Indrukking rimpelbuis

Met *Vergelijking 16-29* wordt bepaald bij welke moment de rimpelbuis gaat vloeien. Doormiddel van het vloeimoment wordt met *Vergelijking 16-28* bepaald bij welke benodigde kracht de rimpelbuis gaat vloeien. Hierin is er uitgegaan dat de arm gelijk is aan de hoogte van de rimpel. Door het moment te delen door de arm wordt de kracht gevonden welke de rimpelbuis doet vloeien. In *Figuur 16.31* is dit schematisch weergegeven. De hoeveelheid energie welke wordt opgenomen door indrukking wordt berekend door de kracht benodigd voor indrukking te vermenigvuldigen met de afstand waarover de rimpelbuis wordt ingedrukt. In een ideale situatie wordt een rimpelbuis volledig ingedrukt, de resterende lengte is alleen de dikte van het lijf van de buis maal het aantal rimpels. In *Figuur 16.32* is de indrukking van een rimpelbuis schematisch weergegeven, de delta is de afstand waarover de buis is ingedrukt.



Figuur 16.32 Rimpelbuis voor indrukken (rood) en volledig ingedrukt (blauw)

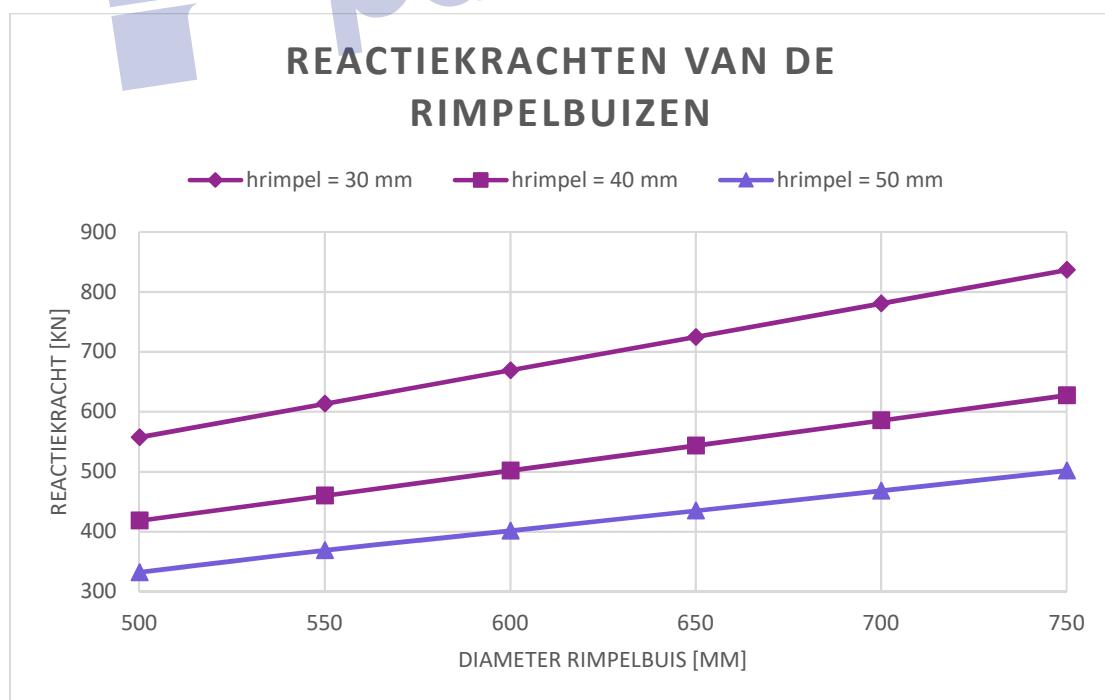
16.3.7 Bepalen waarden voorgeschreven afmetingen rimpelbuis

Voor de voorgeschreven afmetingen van de rimpelbuis wordt de energieopname per rimpel berekend, de lengte van de rimpelbuis bij een benodigde energieopname van 1.000 kNm en de reactiekracht van de rimpelbuis. Dit is weergegeven in *Tabel 16.9*. De waarden zijn berekend voor een rimpelbuis met staalkwaliteit S355, deze staalkwaliteit is meer ploeigevoeilig dan S235. S355 heeft de voorkeur om toe te worden gepast.

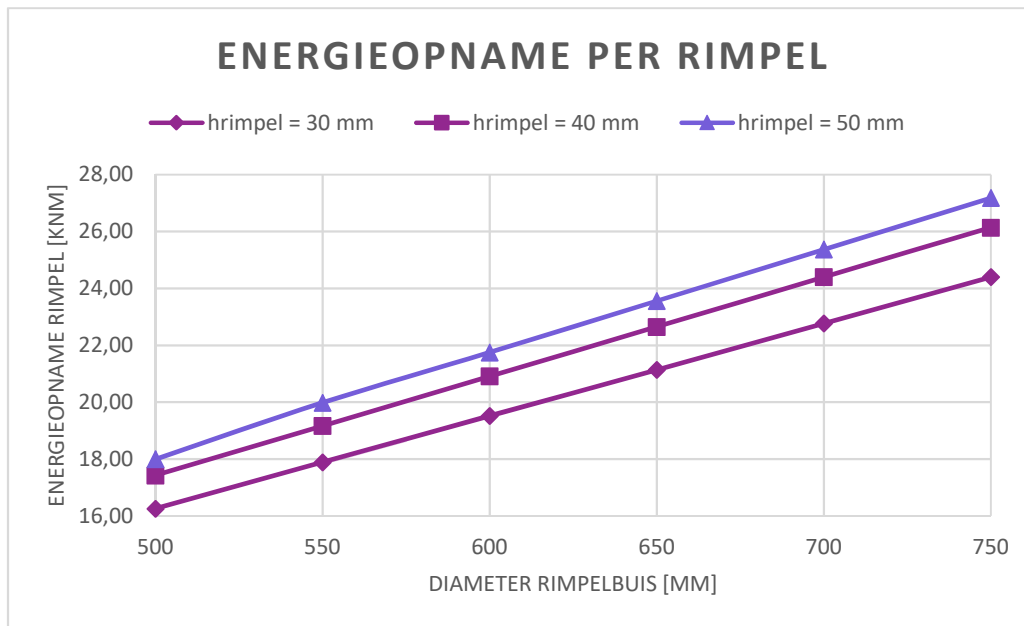
De energieopname is berekend met de benoemde methode. De dikte van de rimpelbuis (t) is 10 mm, de lengte van een rimpel (z) is $1,5 \times h_{\text{rimpel}}$ en de afstand van de indrukking (Δ) is $z - t$ ($t = 10 \text{ mm}$). Voor het bepalen van de reactiekracht is de bovenste vloeigrens bepaald, de energieopname is berekend met de onderste vloeigrens.

Tabel 16.9 Waarden voorgeschreven afmetingen rimpelbuis bij S355

S355	$h_{\text{rimpel}} = 30 \text{ mm}$			$h_{\text{rimpel}} = 40 \text{ mm}$			$h_{\text{rimpel}} = 50 \text{ mm}$		
	E_{rimpel}	l_{rimbuis} bij 1.000 kNm	F_{rimpel}	E_{rimpel}	l_{rimbuis} bij 1.000 kNm	F_{rimpel}	E_{rimpel}	l_{rimbuis} bij 1.000 kNm	F_{rimpel}
	[kNm]	[mm]	[kN]	[kNm]	[mm]	[kN]	[kNm]	[mm]	[kN]
500	16,26	2.790	557	17,43	3.480	418	18,00	4.200	332
550	17,89	2.520	613	19,17	3.240	460	19,98	3.900	369
600	19,52	2.340	669	20,91	2.880	502	21,75	3.450	402
650	21,14	2.160	725	22,65	2.760	544	23,56	3.300	435
700	22,77	1.980	781	24,40	2.520	586	25,37	3.000	468
750	24,40	1.890	837	26,14	2.400	627	27,18	2.850	502



Figuur 16.33 Reactiekrachten van de voorgeschreven rimpelbuizen



Figuur 16.34 Energieopname per rimpel van de voorgeschreven rimpelbuizen

16.3.8 Discussie

Er zijn enkele onzekerheden aangaande de toepassing van de rimpelbuis in de praktijk. Het is aan te raden om een onderzoek uit te voeren naar de methode van energieopname. Onderwerpen welke geadviseerd worden om te onderzoeken zijn:

- Het bepalen van het werkelijke plastische weerstandsmoment bij indrukken van de rimpelbuis;
- Invloed van de variatie in (werkelijke-) vloeigrens van staal op de reactiekrachten en de kracht benodigd om de buis in te drukken; In dit onderzoek is er gekozen om een bovengrens voor de reactiekrachten te gebruiken en een ondergrens voor de indrukkraft;
- Bezwijkgedrag van een rimpelbuis; er is in dit onderzoek aangenomen dat de rimpelbuis niet gaat knikken en de rimpels geheel worden ingedrukt, bij excentriciteit is het mogelijk dat de rimpelbuis scheef wordt ingedrukt en gaat knikken;
- Het fabricatieproces van de rimpelbuis; de methode van het aanbrengen van rimpels in de buis. Hierbij doelend op een buis van 10 mm dik met rimpels van 30 tot en met 50 mm hoog. De inschatting is dat het in werkelijkheid hoogst onzeker is dat er een rimpelbuis van dit formaat kan worden gerealiseerd, gezien de rimpels over de hele omtrek van de buis gelijkmatig moeten zijn om knikken van de buis te voorkomen;
- Het plaatsen en vervangen van de rimpelbuis in het werk; bij een kleine energieopname dient er al een buis met een diameter van 500 mm en een lengte van 2 meter met een gewicht van +- 250 kg te worden toegepast. Het uitgangspunt van de rimpelbuis was dat deze na aanvaring gemakkelijk dient te kunnen worden vervangen. Wanneer er sprake is van grove en zware buizen is de vraag of dit in werkelijkheid goed vervangbaar is.
- (Kosten-)Vergelijking tussen de dempcilinder en rimpelbuis; een vergelijking van de te maken kosten bij realisatie en na x aantal aanvaringen. Een dempcilinder duurdurder in aanschaf, maar kan na een aanvaring worden hergebruikt. Waar de rimpelbuis dient te worden vervangen na een aanvaring.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de toepassing van een rimpelbuis interessant is als energievernietiger voor een aanvaarbeveiliging. Het is echter niet mogelijk om te concluderen uit dit onderzoek dat de rimpelbuis een betrouwbaar alternatief op een dempcilinder is, hiervoor is nader onderzoek aan te raden.

16.4 Kabel met remcilinder

16.4.1 Benodigde vergelijkingen

Vergelijking 16-31 Totale verlenging van de kabel

$$\Delta l = l_{\text{uittrek}} + l_{\text{speling}} + l_{\text{rek}}$$

Waarin:	Δl	= Totale verlenging kabel bij aanvaring	[m]
	l_{uittrek}	= Maximale lengte kabel uitgetrokken bij aanvaring	[m]
	l_{speling}	= Verlenging van de kabel door aanvangsspeling	[m]
	l_{rek}	= Verlenging door rekken van de kabel bij trek	[m]

Vergelijking 16-32 Maximale uittreklengte kabel bepalen aan de hand van de slaglengte van de remcilinder

$$l_{\text{uittrek}} = x_{\text{cil}} \times n$$

Waarin:	x_{cil}	= Slaglengte remcilinder	[m]
	n	= Aantal slagen van de kabel om de remcilinder	[-]

Vergelijking 16-33 Kabelkracht uit reactiekracht remcilinder

$$F_{\text{kabel}} = \frac{F_{\text{cil}}}{n}$$

Waarin:	F_{kabel}	= Kracht in de kabel	[kN]
	F_{cil}	= Maximale reactiekracht remcilinder	[kN]

Vergelijking 16-34 Energieopname cilinder benaderen

$$E_{\text{cil}} = 90\% \times F_{\text{cil}} \times x_{\text{cil}}$$

Waarin:	E_{cil}	= Energieopname remcilinder	[kNm]
---------	------------------	-----------------------------	-------

Vergelijking 16-35 Verlenging door rek van de kabel bij trek

$$l_{\text{rek}} = \frac{F_{\text{kabel}} \times l_{\text{kabel}}}{\sigma_{\text{max}} \times E}$$

Waarin:	l_{kabel}	= Lengte van de kabel	[m]
	σ_{max}	= Maximale spanning kabel	[N/mm ²]
	E	= Stijfheid kabel	[N/mm ²]

16.4.2 Maximale remweg

Het is mogelijk de kabel met remcilinder op twee manieren worden ontworpen. De eerste methode maakt gebruik van de maximale remweg en bepaalt vanuit dit gegeven de slag van de remcilinder en de bijhorende krachten. De tweede methode gaat uit van de volledige benutting van de kabelkracht, deze methode wordt uitgewerkt in [paragraaf 16.4.3](#). De maximale remweg geeft een resultaat wat wordt aangehouden als de ondergrens. De volledige benutting van de kabelkracht is de bovengrens welke niet overschreden mag worden. In [paragraaf 0](#) wordt middels de onder- en bovengrens een uitgebreide berekening toegelicht.

De maximale remweg limiteert de maximale lengte van de kabel welke over de kolk wordt getrokken bij een aanvaring. Bij een grote uittrekking (lange remweg) zijn de resulterende krachten kleiner dan bij een korte uittrekking (korte remweg) uitgaande van een gelijke aanvaarenergie. De verlenging van de kabel over de kolk wordt bepaald vanuit de remweg en het aangrijppunt van de aanvaarenergie op de kabel. Bij een gelijke energie is de verlenging gelijk bij ieder mogelijk aangrijppunt, echter de remweg is korter bij een excentrische aanvaring. Dit heeft te maken met de verhouding tussen de ontbondenden van de kabellengte over de kolk.

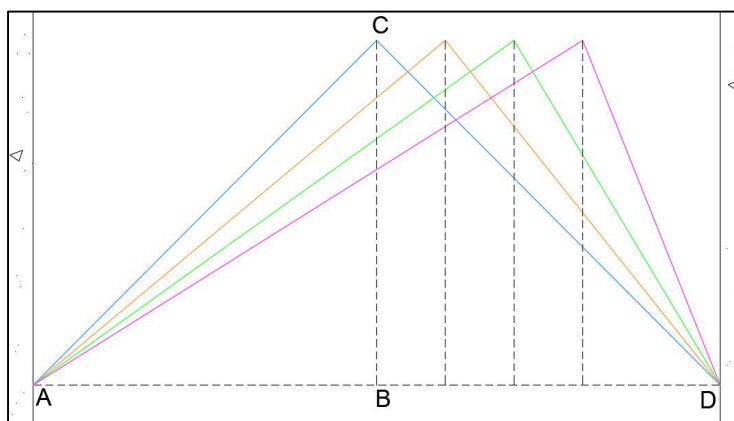
Maatgevende aanvaarsituatie

In [Tabel 16.10](#) is de verlenging (Δl) bepaald voor vier situaties, hierbij is er 10 meter voor de kolkbreedte aangehouden en constante remweg van 5 meter. Wiskundig worden AC en DC bepaald. De verlenging is het verschil tussen de som van AC en DC en de kolkbreedte (originele kabellengte). Uit de resultaten in de tabel is af te leiden dat bij een gelijke remweg een excentrische aanvaring meer verlenging geeft dan een centrische aanvaring. De verlenging heeft een recht evenredig verband met de energieopname, [Vergelijking 16-34](#) geeft dit weer. Dit betekent dat de centrische aanvaring maatgevend is, omdat er een kleinere uittrek lengte is dan bij een excentrische aanvaring bij een gelijke remweg.

Tabel 16.10 Verlenging kabel bij (ex-)centrische aanvaring bij een kolkbreedte van 10 meter en een remweg van 5 meter

	AB	BD	x_{rem}	AC	DC	Δl
Centrisch	5	5	5	7,07	7,07	4,14
Excentrisch	6	4	5	7,81	6,40	4,21
Excentrisch	7	3	5	8,60	5,83	4,43
Excentrisch	8	2	5	9,43	5,39	4,82

Ter verduidelijking zijn in [Figuur 16.35](#) de vier situaties uit [Tabel 16.10](#) weergegeven. Waarbij de blauwe lijn een centrische aanvaring vertegenwoordigt en de overige lijnen excentrisch aanvaringen.

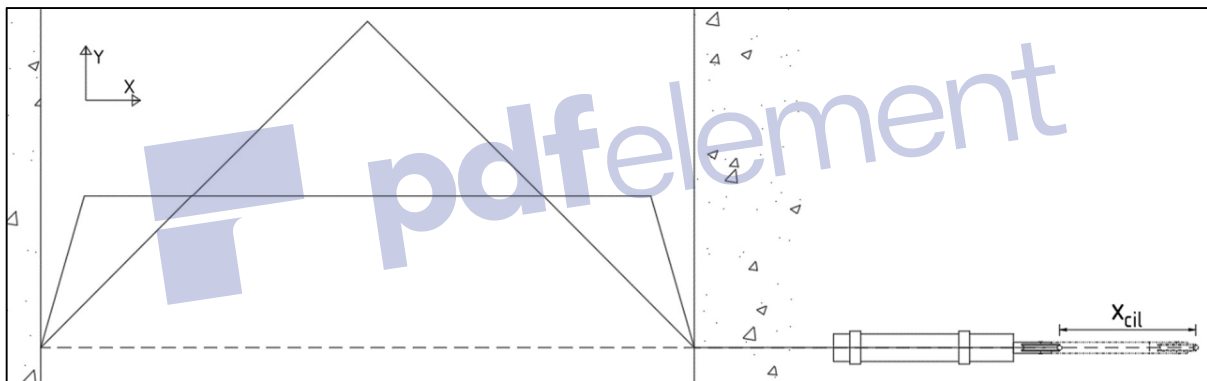


Figuur 16.35 Weergave verlenging kabel overeenkomend met Tabel 16.10

Slaglengte cilinder bepalen

Vanuit de uittrek lengte van de kabel wordt de slag van de cilinder bepaald, door de toepassing van *Vergelijking 16-32*. De uittrek lengte volgt uit de verlenging, hierbij dient de verlenging door aanvangsspel en de verlenging door rek bekend te zijn. De verlenging ten gevolge van rek wordt bepaald met *Vergelijking 16-35*. De rek is afhankelijk van: de staalkwaliteit, lengte kabel en de kabelkracht. De kabelkracht is een onbekende en volgt vanuit de aanvaarenergie en slag van de cilinder. Omdat deze methode de ondergrens bepaald met de maximale remweg, wordt voor de eerste bepaling de verlenging door rek verwaarloosd. In de uitgebreide uitwerking, beschreven in *paragraaf 0*, wordt de ondergrens gebruikt voor de bepaling inclusief de verlenging ten gevolge van rek. Voor de verlenging door aanvangsspel wordt 0,30 meter aangehouden.

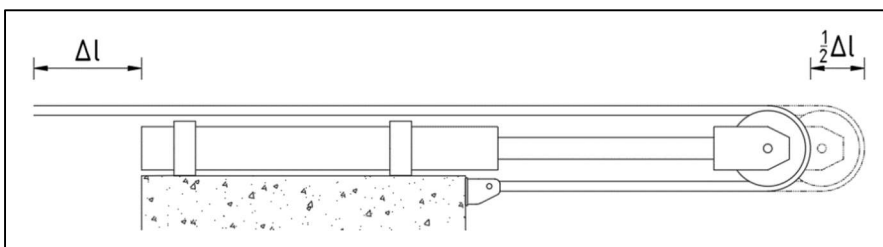
De uittrek lengte is gelijk aan de totale verlenging minus de aanvangsspel van 0,30 meter, daaruit volgt de slaglengte van de cilinder. Met de slag van de cilinder en de maatgevende aanvaarenergie wordt de reactiekracht van de cilinder bepaald. De reactiekracht bepaald de kabelkracht. Door de kabelkracht te ontbinden, worden de krachten in x- en y-richting bepaald op de kolkwanden. Voor het bepalen van de maatgevende krachten op de kolkwand worden er twee situaties van aanvaring beschouwd; spits schip en een duwvaart schip. *Figuur 16.36* geeft een weergave van een aanvaring met een duwvaart- en een spits schip, de verlenging bij beide gevallen is gelijk. De reactiekrachten in x- en y-richting zijn verschillend door de hoekverdraaiing van de kabel om de boeg. De x-richting is loodrecht op de kolkwand en de y-richting is parallel aan de kolkwand.



Figuur 16.36 Overzicht constructie kabel met remcilinder bij aanvang én na aanvaring - en vlakke boeg

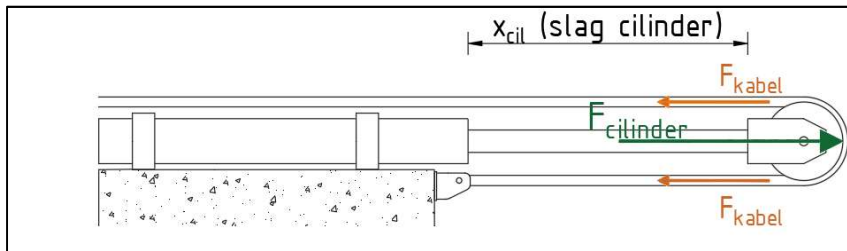
Remcilinder

Figuur 16.37 weergeeft een schematisatie van de remcilinder. De kabel slaat om de kop van de cilinderstang waarna deze is bevestigd aan de fundering. Omdat de kabel om de kop van de cilinder loopt, is de uittrek lengte (Δl) van de kabel gelijk aan tweemaal de indrukking van de cilinder (x_{cil}).



Figuur 16.37 Verlenging kabel door indrukken remcilinder

Wanneer de uittrek lengte van de kabel tweemaal groter is dan de indrukking van de cilinder, is de kabelkracht (F_{kabel}) de helft van de reactiekracht van de cilinder (F_{cil}). *Figuur 16.38* geeft dit weer.



Figuur 16.38 Krachtenwerking reactiekracht remcilinder met kabelkracht

Voor de remcilinder is aangenomen dat de energieopname van de cilinder gelijk is aan 90% van de maximale reactiekracht maal de slaglengte. Deze aanname komt overeen met de aanname betreffende de dempcilinder in *paragraaf 16.2.5*.

16.4.3 Volledige benutting kabelkracht

In de methode welke is uitgewerkt in *paragraaf 0* is uitgegaan dat de maximale remweg wordt benut. Hierbij treden de minimale reactiekrachten op doordat er bij een maximale remweg ook maximale verlenging optreedt. De bezwijkgrens van de constructie bepaald de minimale remweg. Dit is de remweg waarbij de krachten zo groot zijn dat de aanvaarconstructie het begeeft op het zwakste punt. Dit is de bezwijkgrens van de constructie.

Breukgrens

Om te kunnen bepalen hoe groot de remweg is, dient het zwakste punt van de constructie te worden gedefinieerd. Het bezwijken in het zwakste punt dient op te treden wanneer de cilinder volledig is ingedrukt. Om de kostbare cilinder te beschermen moet in de kabel een zwak punt worden gedefinieerd. De breukkracht van de staalkabel is afhankelijk van: gekozen opbouw, diameter en staalkwaliteit. De exacte plek waar de staalkabel breekt is onbekend, omdat er geen constant zwak punt is bij staalkabels. Door aan de kabelbevestiging bij het aangrijppunt op de kolkwand én niet bij de cilinder een breekpunt te plaatsen, wordt er een zwakke plek in de kabel gedefinieerd. De kabelbevestiging breekt boven de kolk wanneer deze kracht wordt overschreden. Niet in de buurt van de cilinder, om de te voorkomen dat de cilinder wordt beschadigd.

De breukgrens van het zwakke punt dient lager te zijn dan de breukkracht van de kabel. Voor Sluis Empel^a is er een bezwijkbelasting van 700 kN aangehouden, de bezwijkbelasting van de kabel bedraagt 1.010 kN. De bezwijkbelasting voor de kabel is een factor 1,44 hoger dan de bezwijkbelasting van de kabelbevestiging. De waarde voor de remkracht is een factor 1,40 lager dan de bezwijkbelasting van de kabelbevestiging.

Bij de Noordersluis te Eefde^b is de bezwijkbelasting van de kabelbevestiging vastgesteld op 1.084 kN. De bezwijkbelasting voor de kabel bedraagt 1.523 kN, welke een factor 1,40 hoger is dan bezwijkbelasting van de kabelbevestiging. De remkracht heeft een waarde van 761 kN, welke een factor 1,42 lager is dan de bezwijkbelasting van de kabelbevestiging.

Uit deze gegevens wordt geconcludeerd dat de breukgrens van de kabel een factor 1,40 hoger is dan de breukgrens van de kabelbevestiging en de kabelkracht tijdens aanvaren een factor 1,40 lager is dan de breukgrens van de kabelbevestiging. Deze factoren worden opgenomen in de tool, vanuit de

^a (Berekeningsrapport Aanvaarbeveiliging Sluis Empel - BER-22118-0200, 26-11-2012)

^b (Berekening aanvaarbeveiliging 33869-2561_Rev A-Final, 2019)

breukgrens van de kabel wordt de breukgrens van het zwakke punt bepaald en hieruit wordt de kabelkracht (F_{kabel}) bepaald.

16.4.4 Nadere uitwerking met onder- en bovengrens

De maximale remweg geeft de ondergrens weer. De maximale remweg bepaald de grootte van de remcilinder, bij een grotere remcilinder wordt de maximale remweg overschreden. De bovengrens is bepaald op basis van de maximale kracht in de kabel. Bij het toepassen van een kleinere cilinder wordt de kabelkracht overschreden. Dit is de minimale grootte van de cilinder.

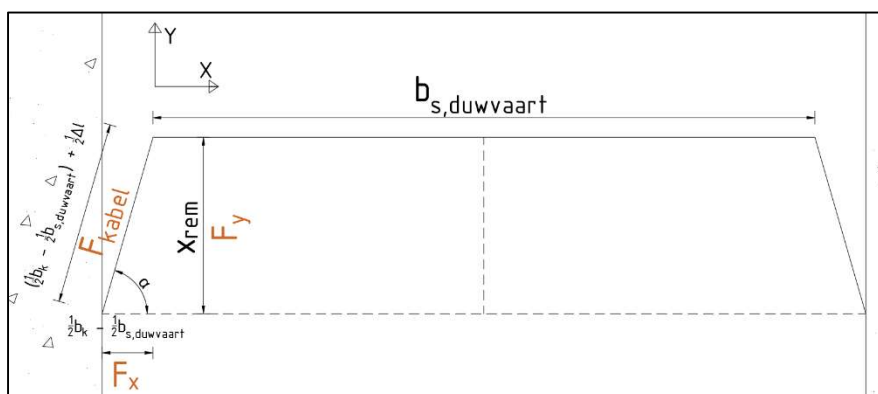
De onder- en bovengrens zijn bepaald met de aanname dat de verlenging door rek in de kabel verwaarloosbaar is. Door een tabel op te stellen waarin de reactiekracht van de cilinder oploopt, wordt de berekening uitgewerkt. In de tabel wordt in stappen de cilinderkracht vergroot van de ondergrens tot en met de bovengrens. Door de kabelrek is er een grotere verlenging van de kabel, dus de ondergrens schuift op. De slag van de cilinder dient kleiner te zijn, hierdoor is de reactiekracht hoger dan bij de eerder aangenomen ondergrens. De bovengrens verandert niet, wel wordt de remweg langer.

De kabelkracht volgt uit de reactiekracht van de cilinder. Samen met de staalkwaliteit en de lengte van de kabel wordt de verlenging door rek bepaald. *Vergelijking 16-35* geeft deze bepaling weer. De maximale verlenging van de kabel over de kolk volgt uit de som van de verlenging rek van de kabel, de aanvangsspel en de uitrek lengte. Hieruit wordt de remweg bepaald bij een spitse boeg en een valkke boeg, waarna de krachten worden bepaald.

16.4.5 Oplegreacties

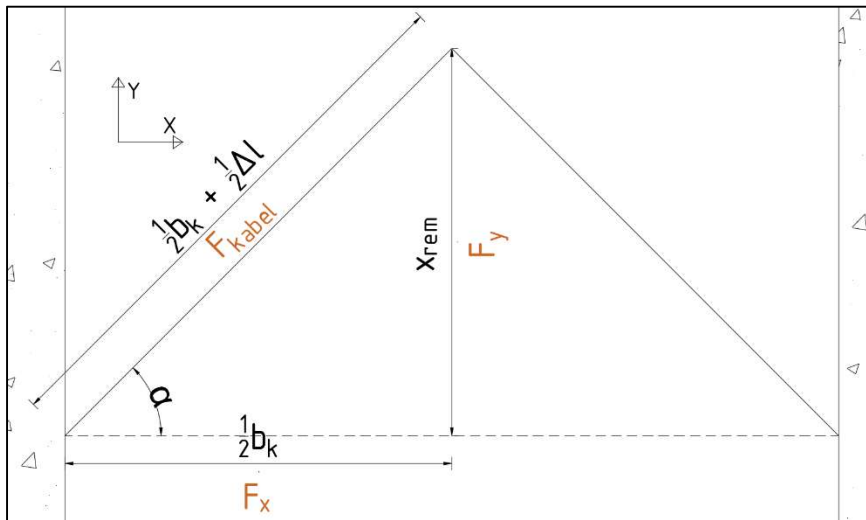
De oplegreacties worden bepaald voor een maatgevende aanvaring van zowel een duwvaartschip, *Figuur 16.39* als van een binnenvaartschip met spitse boeg, *Figuur 16.40*. Beide berekeningen maken gebruik van verhoudingen tussen de zijden van de driehoek.

De lengtematen (zwart in de figuren) zijn te bepalen door de afmetingen van de sluis en de afmetingen van het maatgevend schip met elkaar te vergelijken. De kabelkracht (F_{kabel}) wordt berekend door de reactiekracht van de cilinder. De ontbondenden van de kabelkracht zijn de krachten op de kolkwanden in x- en y-richting.



Figuur 16.39 Verhoudingen lengtes/krachten bij centrische aanvaring met vlakke boeg

Beide situaties geven verschillende waarde van de kracht in x-richting (F_x) en de kracht in y-richting (F_y), van de situaties worden de grootste waarden aangehouden als de maatgevend reactiekrachten op de kolkwand. De maatgevende aanvaarbebelasting wordt bepaald door de kracht in y-richting (F_y) op te tellen per situatie.



Figuur 16.40 Verhoudingen lengtes/krachten bij centrale aanvaring met spitse boeg

16.4.6 Discussie

In de praktijk is gebleken dat de kabel met remcilinder een goede manier is voor het opnemen van energie. Er zijn weinig onzekerheden betreffende de werking enkel zijn er wel enkele aannames gedaan welke gevalideerd dienen te worden. Daarnaast zijn er optimalisaties denkbaar om de toepassing te vergroten. Onderwerpen welke geadviseerd worden om nader te onderzoeken zijn:

- Werkelijke energieopname van de remcilinder; Voor de remcilinder is aangenomen dat de energieopname van de cilinder gelijk is aan 90% van de maximale reactiekracht maal de slaglengte;
- De invloed van de verlenging door aanvangsspeling; In dit onderzoek is hiervoor een gestandaardiseerde waarde van wordt 0,30 meter aangehouden.

16.4.7 Validatie kabel met remcilinder

Ter validatie van de Aanvaarbeveiligingstool, kabel met remcilinder, dient deze te worden ingevuld voor een bestaande situatie. Sluis Empel maakt gebruik van een aanvaarbeveiliging in de vorm van een kabel met remcilinder. De gegevens van Sluis Empel zijn beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat en een overzicht van de belangrijkste gegevens zijn in *Tabel 16.11* weergegeven.

Gegevens

Tabel 16.11 Gegevens Sluis Empel^a

Vaarweg			
Algemeen			
Vaarwegklasse	CEMT-	IV	
Sluis			
Kolk			
Kolkbreedte	b_k	12,60	m
Remweg	x_{rem}	5,50	m
Scheepvaart			
Algemeen			
Maatgevend schip	CEMT-	IV-M5	
Breedte maatgevend schip		8,20	m
Aanvaarenergie			
Algemeen			
Maatgevende Aanvaarenergie	$E_{aanvaar}$	2.000	kNm
Remcilinder			
Algemeen			
Maximale reactiekracht	$F_{cilinder}$	1.000	kN
Maximale slag	$l_{cilinder}$	2,00	m
Kabel			
Algemeen			
Breuksterkte	$F_{kabel,breuk}$	1.010	kN
Kabelkracht	F_{kabel}	500	kN

Resultaat

Uit de Aanvaarbeveiligingstool volgen de krachten zoals weergegeven in *Figuur 16.41*. Hieruit volgt dat de remcilinder bij een aanvaarenergie en een maximale remweg van 5,50 meter een slag heeft van 1,87 meter. De reactiekracht van de cilinder is 1.189 kN, de kabelkracht is de helft van de reactiekracht, 595 kN.

In vergelijking met de berekening van Sluis Empel zijn de resultaten uit de tool verschillend, de slaglengte van de cilinder is kleiner waardoor de krachten groter zijn. Wanneer de berekening van Sluis Empel wordt geraadpleegd ^b wordt geconcludeerd dat er geen rekening is gehouden met aanvangsspel en met verlenging van de kabel ten gevolge van rek. Wanneer de aanvangsspel en de verlenging door rek worden verwaarloosd, komen de waarden vrijwel overeen met elkaar. De

^a (Berekeningsrapport Aanvaarbeveiliging Sluis Empel - BER-22118-0200, 26-11-2012)

^b (Berekeningsrapport Aanvaarbeveiliging Sluis Empel - BER-22118-0200, 26-11-2012)

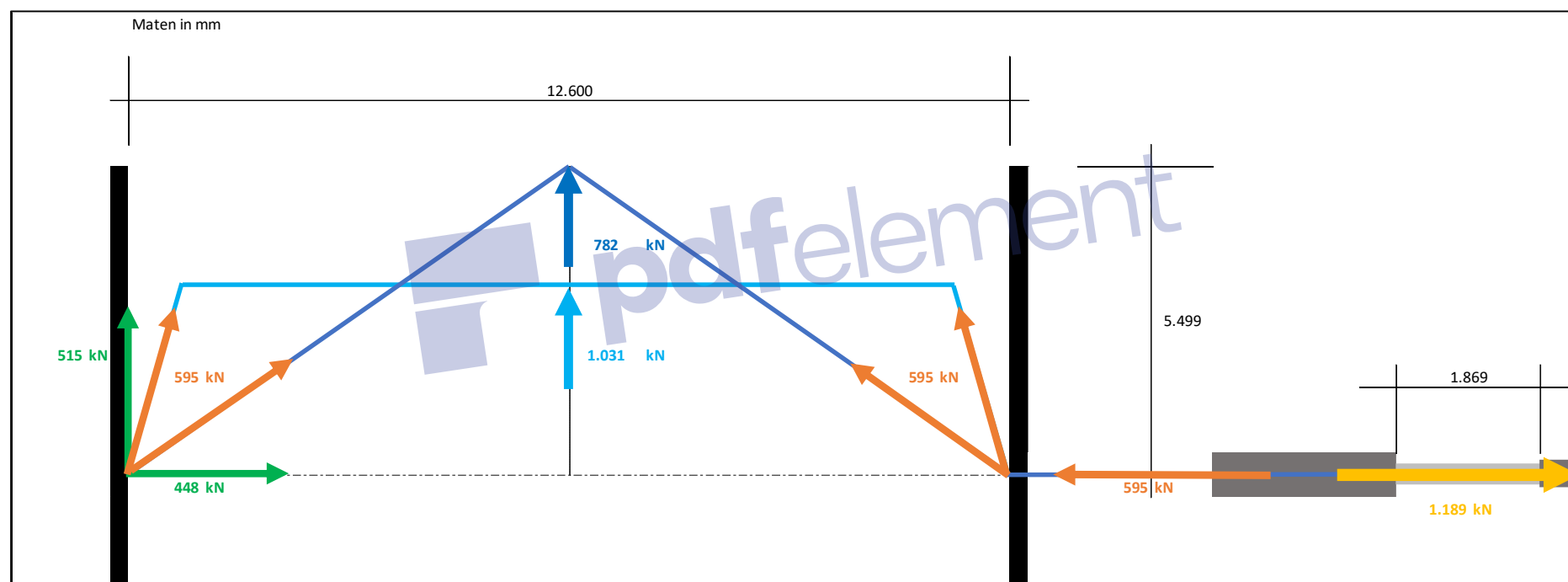
slaglengte bedraagt 2,06 meter wat resulteert in een reactiekracht van 1.077 kN. Hierbij is de kabelkracht 539 kN. Deze waarden wijken respectievelijk 77 kN en 39 kN af van de werkelijke waarde. Dit verschil is te verklaren door de genomen aanname dat de energieopname van de cilinder 90% van de maximale kracht bedraagt vermenigvuldigd met de slaglengte. Verondersteld wordt dat de energieopname van de cilinder anders verloopt dan dat er is aangenomen. Vanwege een onderschatting van de energieopname resulteert dit in een acceptabel verschil.

Conclusie

De Aanvaarbeveiligingstool geeft een nauwkeurige inschatting van de maximale remweg op basis van de totale verlenging door indrukken van de cilinder, de kabelrek en de aanvangsspel. Hieruit volgt een inschatting van de kabelkracht en de reactiekracht van de remcilinder én de bijhorende krachten op de kolkwanden. Deze krachten zijn sterk afhankelijk van het werkelijk verloop van de kracht/indrukking van de remcilinder. Deze dienen wanneer het diagram gegeven is, nagerekend te worden. De tool geeft uitsluitend een inschatting van de grootte van de krachten.



Legenda		
Aanvaarkracht Duwvaart	$F_{Duwvaart}$	
Aanvaarkracht Spits	F_{Spits}	
Maatgevende reactiekracht in x-richting F_x		
Maatgevende reactiekracht in y-richting F_y		
Kabel kracht	F_{kabel}	
Reactiekracht remcilinder	$F_{cilinder}$	



Figuur 16.41 Resultaat berekening kabel met remcilinder Sluis Empel uit Aanvaarbeveiligingtoo

16.5 Kunststofvangkabel

16.5.1 Benodigde vergelijkingen

Vergelijking 16-36 Normaalspanning inwerkend op een voorwerp

$$\sigma = \varepsilon \times E$$

Waarin: σ = Spanning [N/mm²]
 E = Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

Vergelijking 16-37 Kabelrek bij maatgevende aanvaarenergie

$$l_{rek} = \varepsilon \times l_{kabel}$$

Waarin: l_{kabel} = Kabellengte voor aanvaring [m]
 ε = Kabelrek bij $E_{aanvaar}$ [%]

Vergelijking 16-38 Verlenging kunststofvangkabel

$$\Delta l = l_{speling} + l_{rek}$$

Waarin: Δl = Totale verlenging kabel bij aanvaring [m]
 $l_{speling}$ = Verlenging van de kabel door aanvangsspelings [m]
 l_{rek} = Verlenging door rekken van de kabel bij trek [m]

Vergelijking 16-39 Trekkkracht in kabel

$$F_{kabel} = A \times \sigma_{kabel}$$

Waarin: F_{kabel} = Kracht in kabel [kN]
 A = Oppervlak kabeldoorsnede [mm²]
 σ_{kabel} = Spanning in kabel bij $E_{aanvaar}$ [N/mm²]

Vergelijking 16-40 Rek bij voorspannen voor aanvaring

$$\varepsilon_{voorspan} = \varepsilon_{bezwijk} - \varepsilon_{toegestaan}$$

Waarin: $\varepsilon_{voorspan}$ = Ideale voorspanningsrek [%]
 $\varepsilon_{bezwijk}$ = Bezwijk rek (breukrek x conversiefactor) [%]
 $\varepsilon_{toegestaan}$ = maximale rek tot aan sluisdeur [%]

Vergelijking 16-41 Voorgespannen lengte tussen oplegging voor aanvaring

$$l_{aanvang} = \frac{l_{kabel}}{1 + \varepsilon_{voorspan}}$$

Waarin: $l_{aanvang}$ = Gerekte lengte tussen steunpunten [m]

Vergelijking 16-42 Kracht benodigd om kabel voor te spannen

$$F_{voorspan} = A \times \sigma_{voorspan}$$

Waarin: $F_{voorspan}$ = Benodigde kracht om voor te spannen [kN]
 $\sigma_{voorspan}$ = Spanning behorend bij $\varepsilon_{voorspan}$ [N/mm²]

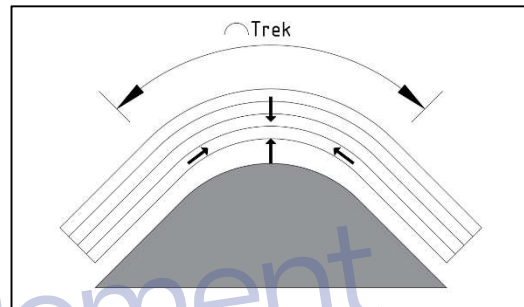
16.5.2 Uitwerking

De toepassing kunststofvangkabel als aanvaarbeveiliging maakt gebruik van een polyesterkabel, welke als: 3-, 8- en 12-strengs gevlochten wordt uitgevoerd. Gevlochten betekend: de strengen zijn om elkaar gedraaid. In de rekentool wordt er gebruik gemaakt van kabeldiameters, breekkrachten en energieopname-vermogen opgevraagd bij kabelproducent Van der Lee, *Bijlage 17*. Een kabeldiameter van 168mm wordt aangehouden als het absoluut maximum. Wanneer de benodigde kabeldiameter groter is dan het maximum wordt de kunststofvangkabel als ongeschikt beschouwd.

Rek

De maximale verlenging van een polyesterkabel kan berekend worden wanneer de rek tot aan breuk van de kabel bekend is. Producent Van der Lee geeft middels een kracht-rek-diagram, *Bijlage 4*, weer dat de maximale rek tot aan breuk 35% is van een polyesterkabel. Deze rek treedt op bij een trekkracht in de langsrichting van de kabel. Deze rek treedt op omdat de (polyester-)vezels in de kabel in de langsrichting zijn georiënteerd. De vezels in de kabel worden in de sterke richting belast, de langsrichting, waardoor het mogelijk is een rek tot aan breuk te behalen van 35%.

Bij aanvaring met de kabel raakt de boeg van het schip haaks de kabel, de kabel én de vezels worden in de dwarsrichting belast. Het is niet aannemelijk dat er in het contactpunt een rek tot aan breuk optreedt van 35%. In de overige lengte wordt de kabel wel in de langsrichting belast, doormiddel van trek, waardoor in theorie hier wel 35% rek tot breuk kan optreden. Bij het contact tussen de boeg van het schip en de kabel worden de lagen vezels in de kabel samengedrukt. Bij een schematisatie van de kabel als *Figuur 16.42* is er waar te nemen dat erin de buitenste lagen trekspanning optreedt welke de binnenste lagen doet samendrukken. Dit geeft een verlies in sterkte in de doorsnede bij het contactvlak.^a



Figuur 16.42 Spanningen in contactvlak schip en kabel

Figuur 16.42 geeft het detail weer hoe de kabel om de boeg van een schip vormt, hierbij treedt de grootste trek in de buitenzijde van de kabel op. Aan de buitenzijde worden de lagen/vezels van de kabel verder uitgerekt dan aan de binnenzijde, hier treden de hoogste spanning op. In de buitenzijde wordt er eerder de breukspanning bereikt, deze bezwijkt eerder. De binnenste laag van de kabel krijgt de meeste aanvaarbebelasting te verduren. Er vindt een spanningsverhoging plaats op het punt waar de kabel de boeg van het schip raakt. Gaande het remmen daalt de spanning exponentieel. Dit komt door de wrijving tussen de kabel en de boegvorm, de kabel draagt gaandeweg een deel van zijn belasting af over het vlak waarover de kabel is gebogen^b. Hoe de lagen worden samengedrukt en hoe groot het verlies in sterkte van de doorsnede is te bepalen met behulp van proeven, welke buiten de scope van het onderzoek vallen.

Het is van belang dat de kabel op het punt van contact niet vroegtijdig breekt. De kabel dient voldoende aanvaarenergie op te nemen voordat deze breekt. Het kritieke punt van de kabel bevindt zich op de plaats waar deze de scheepsboeg het eerst raakt, op dit punt is de spanning het hoogst in de kabel. Het bezwijken van de kabel bij een breukspanning behorend bij 35% breukrek wordt als onmogelijk

^a (Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren, 1998)

^b (Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren, 1998)

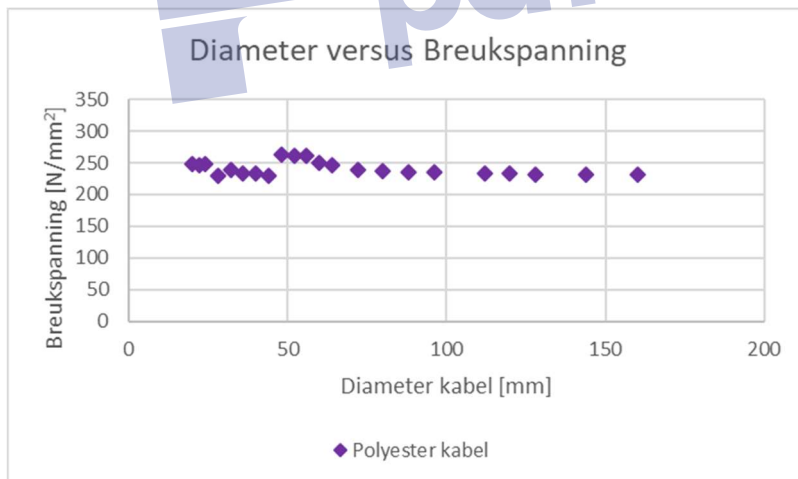
geacht. Er is geconcludeerd dat het wenselijk is reductie doormiddel van een conversiefactor op de breukspanning toe te passen.

(Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren, 1998) beschrijft het volgende: *“De factor tussen de spanning in dit punt en de gemiddelde spanning in de kabel tussen schip en boeg geeft een reservefactor die moet worden aangehouden om de kabel niet te laten breken. In het geval van een 84 mm diameter kabel met een buigradius van 100 mm bedraagt de reservefactor 1,22. Oftewel men kan 82% van de sterkte van de kabel gebruiken.”* Hierbij geldt dat dikte van de kabel van invloed is op deze factor, een dikkere kabel geeft een hogere reservefactor. Deze kan wanneer gebogen minder goed een last dragen. De conversiefactor in de Aanvaarbeveiligingtool dient hoger te zijn dan de reservefactor uit het haalbaarheidsonderzoek omdat er in de Aanvaarbeveiligingtool ook wordt gebruik gemaakt van kabeldiameters groter dan 86 mm.

De breukrek treedt op in de polyesterkabel op het punt waar de boeg van het schip en de kabel contact maken. Bijhorend aan de breukrek is de breukspanning, deze treedt tevens op in het contactpunt van de kabel en het schip. Over de gehele lengte van de kabel is het niet aannemelijk dat de breukrek en breukspanning optreden, hiervoor dient er te worden gerekend met verlaagde rek en spanning. De waarde voor deze rek en spanning wordt bepaald door de breukspanning van de kabel te vermenigvuldigen met de conversiefactor van 0,77. Met het spanning-rek-diagram wordt de rek bepaald die optreedt bij de berekende spanning.

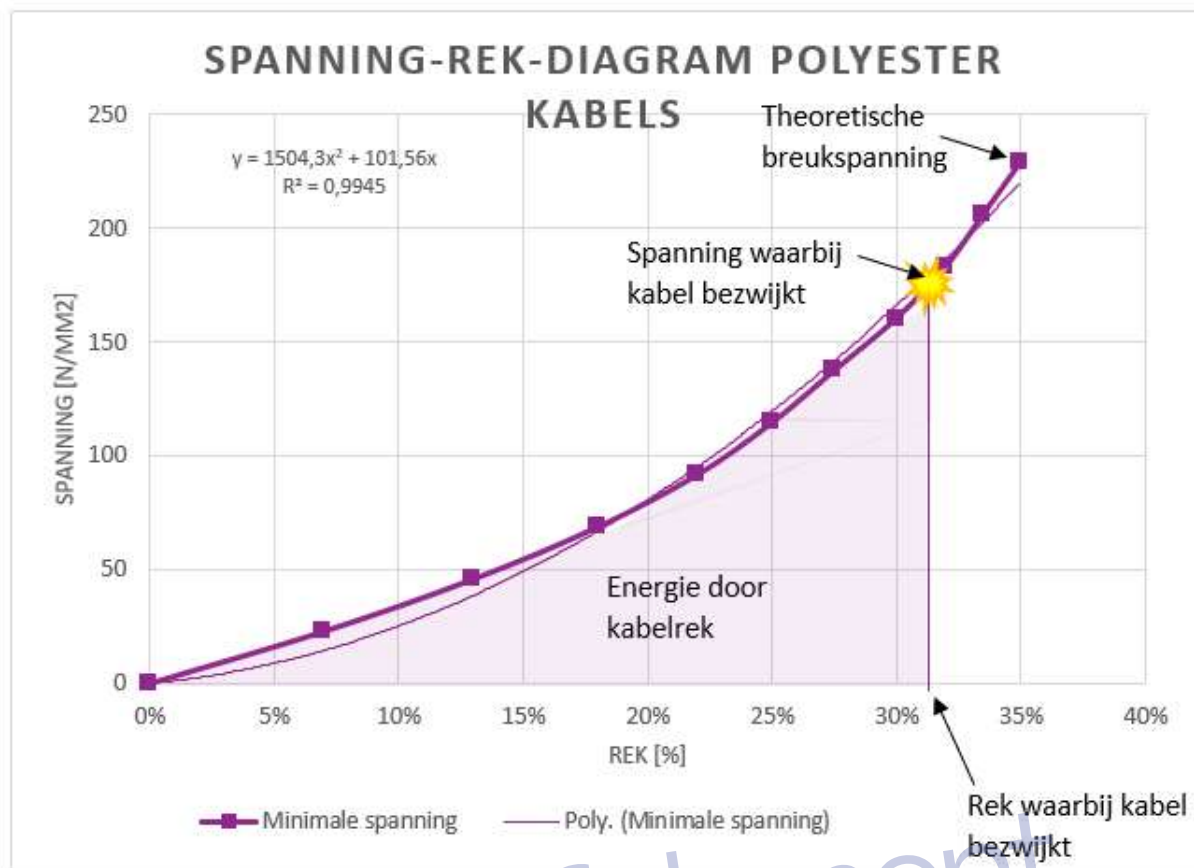
16.5.3 Spanning-rek-diagram

In *Figuur 16.43* zijn de waarden van de toelaatbare spanning tot aan breuk gegeven behorend bij *Bijlage 17*. Er is af te leiden dat er maar geringe verschil in breukspanning is. Op basis van de minimale breukspanning wordt er spanning-rek-diagram opgesteld. De breukrek bedraagt 35%, deze treedt op bij de breukspanning.



Figuur 16.43 Breukspanning in relatie tot Diameter - Polyesterkabel

Producent Van der Lee geeft middels een kracht-rek-diagram, *Bijlage 17*, het verloop van de rek tot aan behorend bij polyesterkabels aan. Voor de kracht kan de spanning worden ingevuld, hieruit volgt het spanning-rek-diagram welke is weergegeven in *Figuur 16.44*. In de grafiek is de minimale breukspanning behorend bij de mogelijke kabeldiameters van de producent uitgezet. De minimale breukspanning geeft de kleinste energieopname, deze is maatgevend in de bepaling van de energieopname van de polyesterkabel.



Figuur 16.44 Spanning-rek-diagram polyesterkabel^a

Met *Vergelijking 16-36* wordt de spanning bepaald behorend bij een rek, dit is de Wet van Hooke. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van de elasticiteitsmodulus. De elasticiteitsmodulus van een polyesterkabel is onbekend. De spanning dient te worden bepaald met het spanning-rek-diagram. Door het trekken van een parabolische trendlijn over de verloop tot de minimale breukspanning wordt de functie bepaald van de spanning-rek-diagram. *Vergelijking 16-43* geeft de spanning-rek-functie weer.

Vergelijking 16-43 Spanning polyesterkabels in functie van de rek

$$\sigma_{\text{polyesterkab}} = 1504,3 \times \varepsilon^2 + 101,56 \times \varepsilon$$

Waarin: $\sigma_{\text{polyesterkabel}}$ = Spanning in Polyesterkabel [N/mm²]
 ε = Kabelrek [%]

16.5.4 Energieopname

Om de energie te bepalen dient het oppervlak onder de spanning-rek-functie worden bepaald en worden vermenigvuldigd met de inhoud van de polyesterkabel. Dit wordt bereikt door de primitieve functie van *Vergelijking 16-43* te bepalen en te integreren. Waarbij de ondergrens het punt (0;0) is en de bovengrens het punt van de breukspanning maal de conversiefactor en de bijhorende rek. Dit is de spanning in de gehele kabel waarbij de kabel bezwijkt op het zwakste punt, het contactvlak. De rekenwaarde voor de breukspanning bedraagt $229 \text{ N/mm}^2 \times 0,77 = 176 \text{ N/mm}^2$. De rek die optreedt bij 176 N/mm^2 bedraagt 31%. De bovengrens is het punt (176;31). De primitieve van *Vergelijking 16-43*

^a Minimale kromme Van der Lee uit *Figuur 2.41* in *Bijlage 2*

wordt bepaald door de toepassing van rekenregels en resulteert in de vergelijking welke is weergegeven als *Vergelijking 16-44*.

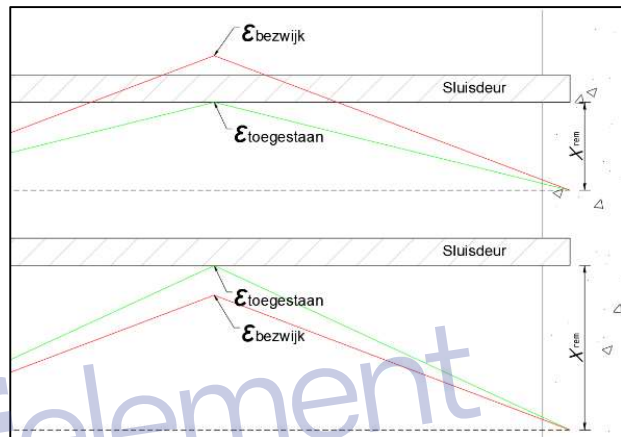
Vergelijking 16-44 Energieopname polyesterkabel bepalen als primitieve van $\sigma_{polyester}$

$$E_c = (501,4 \times \varepsilon_{bezwijk}^3 + 50,78 \times \varepsilon_{bezwijk}^2) \times V_{kabel}$$

Waarin:	E_c	= Energieopname polyesterkabel	[kNm]
	V_{kabel}	= Inhoud kabel	[dm ³]
	$\varepsilon_{bezwijk}$	= Rek van de gehele polyesterkabel bij bezwijken	[%]
		= 31%	

Omdat de ondergrens voor het integreren de oorsprong is, wordt de maximale energieopname bepaald door *Vergelijking 16-44* in te vullen voor de rek bij bezwijken van de kabel.

De maatgevende rek ($\varepsilon_{rekenwaarde}$) hangt af van de toegestane rek ($\varepsilon_{toegestaan}$) tot aan de sluisdeur en de kabelrek tot aan bezwijken ($\varepsilon_{bezwijk}$), *Figuur 16.45*. De toegestane rek geeft aan hoeveel rek er mag optreden in de gegeven remweg, tot de kabel de deur raakt. Wanneer de toegestane rek kleiner is dan de bezwijkrek is deze maatgevende rek ($\varepsilon_{rekenwaarde}$) en vice-versa. De toegestane rek is afhankelijk van de kolkbreedte en de maximale remweg. De maximaal toegestane rek is bij een gegeven kolkbreedte en remweg wiskundig te bepalen.



Figuur 16.45 Verskil tussen rek toegestaan en rek bij bezwijken

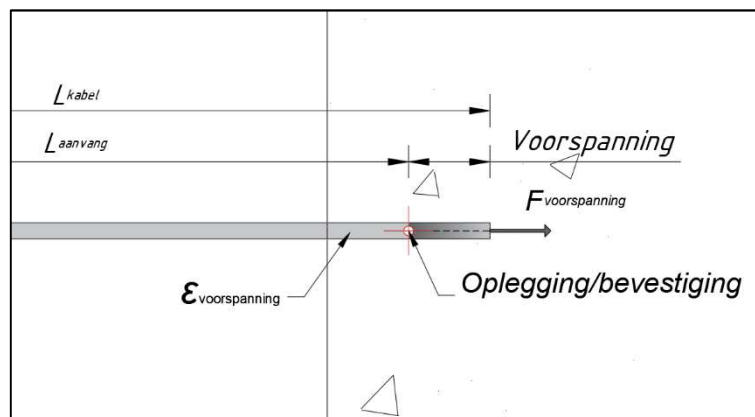
De benodigde energieopname van de kabel wordt bepaald door de maatgevende aanvaarenergie. De totale energieopname van de kabel dient groter of gelijk te zijn aan de aanvaarenergie. Zo blijft er in *Vergelijking 16-45* één onbekende over, de inhoud van de kabel. Met deze methode wordt er per sluis een minimaal benodigde kabel voorgeschreven.

Vergelijking 16-45 Energieopname polyesterkabel bepalen met de rekenwaarde van de rek

$$E_c = (501,4 \times \varepsilon_{rekenwaarde}^3 + 50,78 \times \varepsilon_{rekenwaarde}^2) \times V_{kabel}$$

16.5.5 Voorspanning

Doormiddel van het voorspannen van de kabel wordt de niet-werkzame remweg teruggebracht wat resulteert in kleinere optredende remweg. Uit *Figuur 16.44* is af te leiden dat de kabel een geringe energieopname heeft in de beginfase van de rek. Dit resulteert in een grote niet-werkzame remweg bij aanvaring, met gebruik van voorspanning wordt dit enigszins teruggebracht. De ideale voorspanning is afhankelijk van de



Figuur 16.46 Voorspanning in kabel

toegestane rek tot aan de deur en de breukrek. Als de toegestane rek tot aan de deur kleiner is dan bezwijkrek is voorspanning aan te raden. Het verschil in rek is de ideale voorspanning, *Vergelijking 16-40*. Hierbij wordt de bezwijkrek uitermate benut wat resulteert in een zo klein mogelijke inhoud van de kabel. Het uitgangspunt is het verkrijgen van een zo klein mogelijke kabel diameter, wanneer de mogelijkheid er is dat bezwijkrek kan optreden binnen de gegeven remweg is er geen voorspanning benodigd.

De hoeveelheid voorspanning in rek geeft aan met hoeveel kracht er voorgespanssen dient te worden. De voorspankracht is afhankelijk van het kabeloppervlakte en de spanning behorend bij de voorspanrek, *Vergelijking 16-42*.

De maximale hoeveelheid op te nemen energie van de kabel wordt kleiner bij het toepassen van voorspanning. *Vergelijking 16-44* wordt wederom gebruikt voor het bepalen van energieopname van een polyesterkabel. De ondergrens voor het integreren is anders in het geval van voorspanning. De rek door voorspanning dient bekend te zijn. De energieopname is de maximale energieopname van de polyesterkabel tot het punt van bezwijken minus het energieverlies door voorspannen. *Vergelijking 16-46* geeft de integraal weer voor de bepaling van de energieopname bij voorspannen.

Vergelijking 16-46 Energieopname polyesterkabel met voorspanning

$$\int_{\varepsilon_{voorspan}}^{\varepsilon_{bezwijk}} E_c = ((501,4 \times \varepsilon^3 + 50,78 \times \varepsilon^2) \times V_{kabel})$$

Waarin:	E_c	= Energieopname polyesterkabel	[N/mm ²]
	$\varepsilon_{bezwijk}$	= Rek van de gehele polyesterkabel bij bezwijken	[%]
	$\varepsilon_{voorspan}$	= Rek door voorspanning	[%]
	V_{kabel}	= Inhoud kabel	[dm ³]

16.5.6 Oplegreacties

Het traject waarover het materiaal rekt moet groot genoeg zijn om een acceptabele remweg te krijgen. Wanneer de lengte waarover de kabel kan rekken langer is resulteert dit in de kleine oplegreacties in vergelijking met een korte lengte bij een gelijke aanvaarenergie. Het bepalen van de reactiekrachten wordt uitgevoerd voor centrische aanvaring, dit is maatgevend over een excentrische aanvaring. Dit is aangetoond bij de kabel met remcilinder, het bepalen van de oplegreacties wordt bepaald conform paragraaf *16.4.5 Oplegreacties*.

Zonder voorspanning

De oplegreacties worden bepaald voor een maatgevende aanvaring met een duwvaartschip en voor een maatgevende aanvaring met een binnenvaartschip met een spitse boeg. Het bepalen van de maatgevende oplegreacties geschied volgens dezelfde wijze als bij *16.4.5 Oplegreacties*. De kabelkracht, zonder gebruik van voorspanning, (F_{kabel}) wordt berekend door de spanning bij aanvaring te vermenigvuldigen met het kapeloppervlak. Hieruit worden vervolgens de krachten in x-richting en y-richting bepaald met de hoek alpha (α) of verhouding in zijden van de driehoeken.

Beide situaties geven een waarde voor de F_x en F_y , van de situaties wordt alleen de grootste waarde weergegeven in de resultaten. Dit is de maatgevende belasting in de x- of y-richting. De maatgevende aanvaarbelasting wordt bepaald door de F_y te vermenigvuldigen met twee.

Met gebruik van voorspanning

De wijze van het bepalen van de oplegreacties is vrijwel gelijk aan die van de kabel zonder voorspanning. Bij gebruik van voorspanning is naast de kabelkracht, (F_{kabel}) de bepaling van de

hoekverdraaiing, hoek α), anders. Voor aanvaring is er door de voorspanning al een kracht in de kabel aanwezig welke bij de kabelkracht bij aanvaring opkomt. Bij bepalen van de kabelrek na aanvaring, de schuine zijde uit *Figuur 16.39*, wordt voor de kabelrek; $\frac{1}{2}\Delta l$, niet gebruik gemaakt van de kabellengte maar de voorgespannen lengte tussen de opleggingen/bevestigingen ($l_{aanvang}$), weergegeven in *Figuur 16.46*.

16.5.7 Discussie

Er zijn enkele onzekerheden aangaande de berekenmethode en de mogelijkheid tot toepassing van de kunststofvangkabel in de praktijk. Onderwerpen welke geadviseerd worden om nader te onderzoeken zijn:

- Validatie op de conversiefactor op de bezwijkspanning, bij aanvaring in het contactvlak, bij verschillende groottes kabel; Validatie of de aangenomen conversiefactor ook geldt bij grotere en kleinere kabels dan de 84mm diameter, welke is aangehouden in het (Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren, 1998);
- Grootte van doorhangen; Bij de toepassing van grotere diameters kabel wordt de inhoud tevens groter waardoor de kabel zwaarder wordt. Hoe zwaarder de kabel hoe meer deze gaat doorhangen wat een verlies geeft in de werkzame remweg en de juiste plaatsingshoogte waarop de kabel het beste kan worden aangevaren;
- Mogelijkheid en de manier van voorspannen; In dit onderzoek wordt uit gegaan van de mogelijkheid tot voorpannen van de vangkabel. Uit eerdere onderzoeken blijkt dat de mogelijkheid bestaat, enkel is dit nooit aangetoond in de praktijk en worden er zelden manieren beschreven met welke methode of spansysteem de vangkabel het beste kan worden voorgespannen;
- Ophaalmechanisme met voorspanning; Het uitgangspunt is dat er enkel een ophaalmechanisme toegepast bij een vangkabel welke geen gebruik maakt van voorspanning;
- Dimensionering bevestigingspunt; De kunststofvangkabel gaat uit van de afdracht van aanvaarkrachten op de bolder. Een bolder is volgens het RVW-2017 niet bestand tegen deze krachten waardoor er een over dimensionering moet plaatsvinden. Er dient onderzocht te worden hoe groot de dimensionering van de bolder dient te zijn of als er andere manieren bestaan om de kabel te bevestigen.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de toepassing van een kunststofvangkabel interessant is als energievernietiger, enkel zijn er nog onzekerheden welke weggenomen dienen te worden om daadwerkelijk toe te passen als aanvaarbeveiliging.

16.5.8 Validatie

Ter validatie van de Aanvaarbeveiligingtool kabel met remcilinder dient deze te worden ingevuld voor een bestaande situatie. Sluis Hengelo is gekozen omdat deze sluis een vaste aanvaarbeveiliging gebruikt in de vorm van een staalkabel (met koker omhulsel). De gegevens van Sluis Hengelo zijn beschikbaar gesteld door Ingenieursbureau Boorsma en een overzicht van de belangrijkste gegevens zijn in *Tabel 16.12* weergegeven.

Gegevens

Tabel 16.12 Gegevens Sluis Hengelo

Uitgangspunten vaarweg			
Algemeen			
Vaarwegklasse	CEMT-	Va	
Uitgangspunten Sluis			
Kolk			
Kolkbreedte	b_k	12,00	m
Remweg	x_{rem}	4,50	m
Scheepvaart			
Algemeen			
Maatgevend schip	CEMT-	Va-M9	
Breedte maatgevend schip		11,90	m
Aanvaarenergie			
Algemeen			
Maatgevende Aanvaarenergie	$E_{aanvaar}$	2000	kNm
Polyesterkabel			
Algemeen			
Toegestane rek tot aan deur.	$\varepsilon_{toegestaan}$	23,6%	
Rekenwaarde breukrek	$\varepsilon_{bezwijk}$	31,0%	

Resultaat

Uit **Tabel 16.13** volgt bij een aanvaarenergie en een maximale te behalen remweg er een kabeldiameter van 107 mm dient te worden toegepast, hierbij is er gebruik gemaakt van voorspanning. In werkelijkheid zal er gezocht worden naar een gestandaardiseerde kabeldiameter, volgens de specificaties van de producent zal dit resulteren in een kabeldiameter van 112 mm. Hierbij is er voor een aanvaarenergie van 2.000 kNm een maximale remweg van 4.326 mm benodigd, **Tabel 16.14**.

Uit de Aanvaarbeveiligingtool volgen de krachten zoals weergegeven in **Figuur 16.47**. Een schip met een spitse boeg is maatgevend voor de maximale kracht in de langsrichting (F_y) een duwvaartschip is maatgevend voor de kracht loodrecht op de kolkwand (F_x).

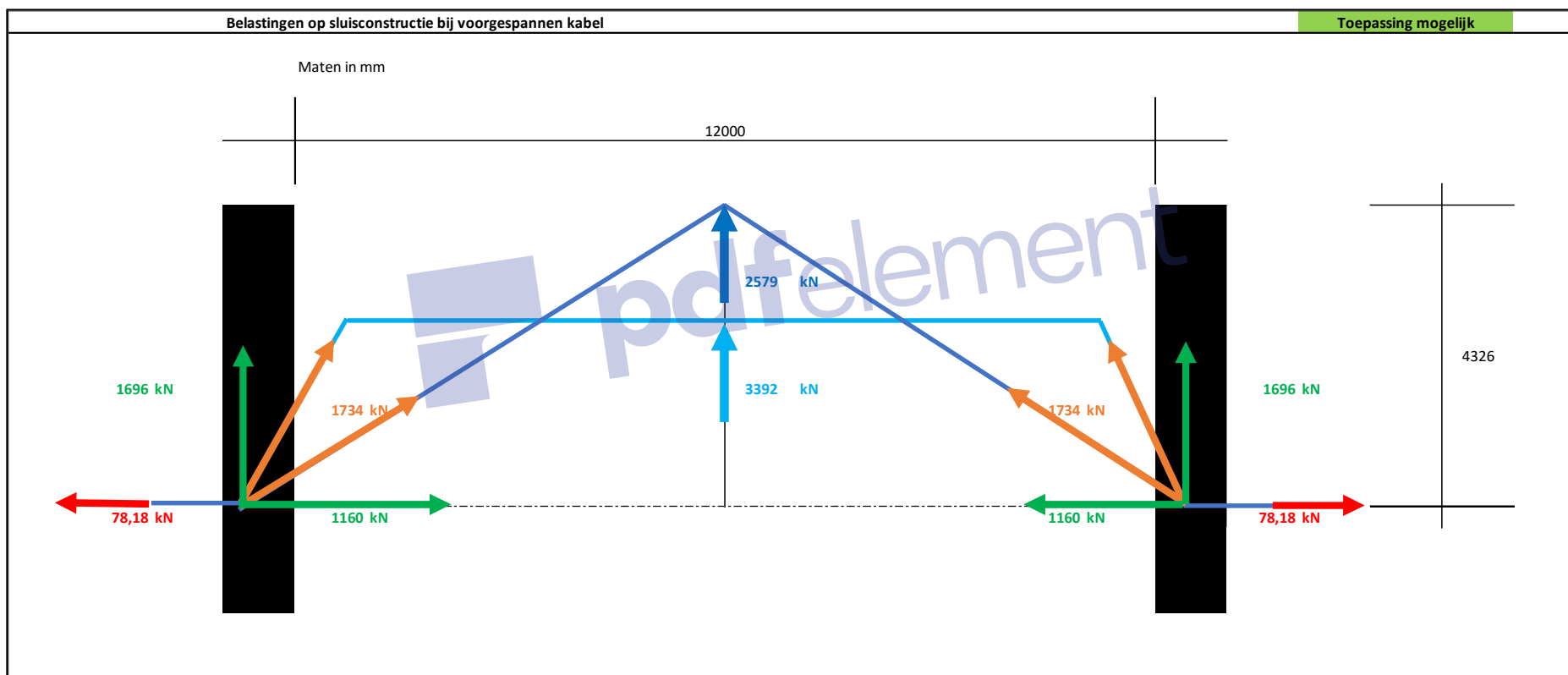
Tabel 16.13 Minimaal benodigde kabeldiameter en voorspanning

Minimaal Benodigd met voorspanning (bij $E_{aanvaar}$)			
Ideale voorspanning	ε_p	7,44%	
Lengte ongerekt	$l_{ongerekt}$	11,54	m
Diameter	ϕ_{kabel}	107	mm
Inhoud	V_{kabel}	103	dm ³

Tabel 16.14 Aanbeveling op basis van minimaal toe te passen kabeldiameter producent

Aanbeveling met voorspanning			
Ideale voorspanning	ε_p	7,4%	
Lengte ongerekt	$l_{ongerekt}$	11,54	m
Spanning in kabel	σ_p	15,87	N/mm ²
Voorspankracht	F_p	156	kN
Diameter kabel	ϕ_{kabel}	112	mm
inhoud kabel	V_{kabel}	114	dm ³
Kracht in kabel	F_{kabel}	1.734	kN
Energieopname tot aan breukrek	E_{max}	2.198	kNm
Spits			
Remweg	S	4,33	m
Hoekverdraaiing	α_{spits}	0,84	rad
Kracht in x-richting	F_x	1.159	kN
Kracht in y-richting	F_y	1.290	kN
Duwvaart			
Remweg	S	1,97	m
Hoekverdraaiing	$\alpha_{duwvaart}$	1,21	rad
Kracht in x-richting	F_x	617	kN
Kracht in y-richting	F_y	1.696	kN

Legenda		
Aanvaarkracht Duwvaart	$F_{Duwvaart}$	
Aanvaarkracht Spits	F_{Spits}	
Maatgevende reactiekracht in x-richting	F_x	
Maatgevende reactiekracht in y-richting	F_y	
Kabel kracht	F_{kabel}	
Benodigde voorspankracht	$F_{voorspanning}$	



Figuur 16.47 Resultaat berekening polyesterkabel Sluis Hengelo uit Aanvaarbeveiligingstool

Bolderkracht

In de variantenstudie, *paragraaf 2.4.6*, is beschreven dat de kunststofvangkabel wordt bevestigd aan een bolder welke op de kolkwanden (sluisplateau) wordt bevestigd. De bolder wordt bij aanvaring belast op trekkracht. Het is van belang dat de bolder niet bezwijkt bij aanvaring van de kabel. De RVW-2017 schrijft voor dat bolders dienen gedimensioneerd te worden op een minimale belasting behorend bij een vaarwegklasse. In *Tabel 16.15* zijn deze waardes weergegeven, de belasting op de bolders afkomstig van een troskracht.

Tabel 16.15 Bolderkracht volgens RVW-2017

CEMT-klasse	Belasting [kN]
I en II	150
II	200
III en IV	200
V	250
Vla	300
Vlb	350

Wanneer dit gevalideerd wordt met de kabelkrachten uit *Figuur 16.47* is een toepassing van een kunststofvangkabel welke bevestigd aan een bolder niet mogelijk. Het is mogelijk om te kiezen voor een over-dimensionering van de bolder waardoor deze wel de krachten kunnen opnemen.

Conclusie

Op basis van de uitkomst van de benodigde remweg uit de Aanvaarbeveiligingtool is de kabel toepasbaar bij Sluis Hengelo. Op basis van de krachten behorend bij de aanvaarenergie is het hoogst onrealistisch dat de kabel (trek-)kracht aangrijpen op een bolder. De bolder dient in zoverre mate over gedimensioneerd worden wil het toepasbaar zijn.

De inschatting welke is gemaakt op de reductie op breukspanning/rek van de kabel is niet te valideren omdat een kunststofvangkabel in de praktijk nooit is toegepast. Daarbij is er in de Aanvaarbeveiligingtool geen rekening gehouden met de manier van voorspannen en de mate van doorhangen van de kabel door zijn eigengewicht. De tool geeft uitsluitend een globale inschatting van de grootte van de krachten.

Bijlage 17 Eigenschappen (polyester-)kunststofvangkabel^a

 G. VAN DER LEE ROPE FACTORY SINCE 1545			
Polyester kabel ¹			
Omtrek [duim]	Diameter [mm]	Rek 35%	
		Breekkracht [kN]	Energieabsorptie vermogen [kJ/dm ³]
0,50	4	2,90	29,8
0,75	6	5,54	29,8
1,00	8	12,50	29,8
1,25	10	19,50	29,8
1,50	12	27,80	29,8
1,75	14	39,00	29,8
2,00	16	49,70	29,8
2,25	18	62,20	29,8
2,50	20	77,80	29,8
2,75	22	93,30	29,8
3,00	24	112,00	29,8
3,50	28	141,50	29,8
4,00	32	192,40	29,8
4,50	36	236,50	29,8
5,00	40	292,80	29,8
5,50	44	348,00	29,8
6,00	48	476,40	29,8
6,50	52	555,80	29,8
7,00	56	644,10	29,8
7,50	60	708,80	29,8
8,00	64	791,10	29,8
9,00	72	975,40	29,8
10,00	80	1195,10	29,8
11,00	88	1434,30	29,8
12,00	96	1700,00	29,8
13,00	104	1948,00	29,8
14,00	112	2298,00	29,8
15,00	120	2627,00	29,8
16,00	128	2972,50	29,8
17,00	136	3178,00	29,8
18,00	144	3756,80	29,8
19,00	152	4086,00	29,8
20,00	160	4648,00	29,8
21,00	168	4948,00	29,8

^a (Brochure van der Lee, 2019)

Bijlage 18 Casestudy Zuidersluis Eefde

18.1 Voorstel aanvaarbeveiliging Zuidersluis Eefde

De benodigde parameters van de Zuidersluis zijn ingevoerd in de Input en Output sheet van de Aanvaarbeveiligingtool, *Bijlage 18.1.6*. Voor de aanvaarenergie van zowel de Noorder- als de Zuidersluis heeft opdrachtgever Rijkswaterstaat een systeem(contract)-eis opgenomen, *Figuur 18.2*. De aanvaarbeveiliging dient 2500 kNm (2,5 MJ) te kunnen opnemen, deze waarde is dient te worden ingevoerd in; “*Uitgangspunt Aanvaarenergie volgens (contract)-eis*”.

Eis-ID	Eistekst
SYS-1172	Benedenhoofd dient Sluisdeuren in gesloten toestand vanaf de kolkzijde door middel van een scheepsvaartvriendelijke constructie te beschermen tegen aanvaring van alle voorkomende schepen bij aanvaring met een energie van maximaal 2,5 MJ zonder functioneel verlies.

Figuur 18.2 Systeem-eis Zuidersluis Eefde

Uit de Aanvaarbeveiligingtool volgt de “Kabel met Remcilinder” als aanbeveling. De variant dient open te stellen zijn voor scheepvaart. Dit is gebaseerd op het feit dat het maatgevende schip niet onder een vaste aanvaarbeveiliging kan doorvaren. De ruimte nabij de kolkwanden is zodanig dat er een remcilinder kan worden toegepast, *Figuur 18.1* geeft dit weer. Hierin vertegenwoordigden de rode en blauwe arcering de benodigde ruimte voor de remcilinder.



Figuur 18.1 Overzicht ruimte nabij kolkwanden - Benedenhoofd Zuider Sluis Eefde

De kabel met remcilinder wordt tevens toegepast in de Noordersluis te Eefde waardoor het wenselijk is dat hetzelfde type wordt ingepast. Het voordeel hierbij is dat het ontwerp welke gemaakt is voor de Noordersluis ook inpasbaar gemaakt is voor de Zuider Sluis. Daarnaast kunnen reserveonderdelen in geval van een calamiteit bij beide aanvaarbeveiligingen worden toegepast.

18.1.1 Benodigde ruimte voor remcilinder

Uit de Aanvaarbeveiligingtool is af te leiden dat de minimaal benodigde ruimte voor inpassing van de remcilinder minimaal 5 meter bij 2 meter bedraagt. Hierbij is er een mogelijkheid om de remcilinder zowel in lengterichting als dwars op de kolkwand worden geplaatst. Wanneer de mogelijke plaatsen voor de remcilinder nader worden beschouwd valt te concluderen dat erin beide gearceerde delen uit *Figuur 18.1* ruimte is voor het toepassen van een remcilinder. In *Bijlage 18.3 Schetsontwerpen voorstel inpassing*, zijn beide situaties weergegeven met benodigde maatvoering van de remcilinder in relatie tot de beschikbare ruimte.

Zuidzijde

Aan de zuidelijke zijde van de Zuidersluis bevindt zich nabij de aanvaarbeveiliging in de huidige situatie het bediengebouw van de sluis. Dit bediengebouw wordt tijdens de renovatieperiode vervangen door een bediengebouw welke meer oostelijk gelegen is. Dit betekent dat er een mogelijkheid is om de remcilinder aan de zuidzijde te plaatsen. Hierbij dienen er wel enkele wijzigingen in het ontwerp plaats te vinden. Een "ongedefinieerde ruimte" welke is gesitueerd nabij de aanvaarbeveiliging dient te worden verplaatst, *Figuur 18.3*. Afhankelijk van de omhullende constructie benodigd voor de remcilinder bestaat de mogelijkheid dat deze eventueel boven op de omhullende constructie wordt geplaatst.

Figuur 18.3 Zuidzijde - Zuidersluis Eefde

Noordzijde

Aan de noordelijke zijde tussen beide sluizen bevindt zich een beperkte ruimte van 5,5 meter tot aan het installatiegebouw van de Noordersluis. De mogelijkheid is er om ook hier de remcilinder in te passen.



Figuur 18.4 Overzicht Zuidersluis na renovatie

18.1.2 Remweg

In de huidige situaties is het hart van de aanvaarbeveiliging 4,20 meter gelegen vanaf de voorzijde van de hefdeur, de beschikbare remweg van de aanvaarbeveiliging. De aanvaarbeveiliging is 2 meter gelegen achter de stopstreep. Rijkswaterstaat heeft aangegeven aan Lock To Twente dat de nuttige kolklengthe gewaarborgd moet blijven. De nuttige kolklengthe is de lengte tussen beide stopstrepen, deze bedraagt 132,20 meter.

Het (Richtlijnen Vaarwegen 2017, p. 73) beschrijft het volgende: “Voor de stopstrepen gelden de volgende minimumafstanden tot karakteristieke punten op de kolkwand: Bij beveiligde sluisdeuren: 1,00 meter vanaf de opvangconstructie.” In de huidige situaties is er de mogelijkheid om de aanvaarbeveiliging 1 meter op te schuiven richting de stopstreep, hierbij wordt de gestelde RVW-eis gewaarborgd wat resulteert in een langere remweg. Dit resulteert in een beschikbare remweg van 5,20 meter.

Uit de Aanvaarbeveiligingtool volgt dat de maximale remweg van een schip met spitse boeg 5,20 meter bedraagt. In de praktijk is gebleken dat de kabel niet direct op spanning komt waardoor de remweg veelal iets langer is, er wordt aangenomen dat deze een factor 1,05 hoger is, dit resulteert in een remweg van 5,50 meter. Hierbij wordt er voorkomen dat de sluisdeur wordt aangevaren.

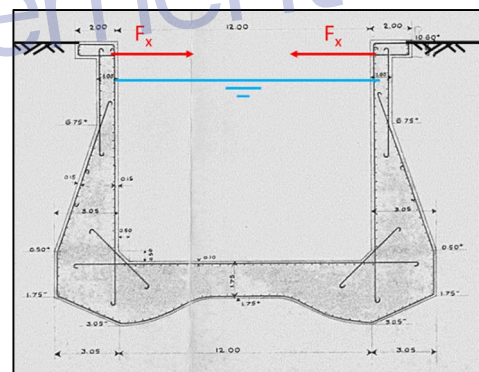
De beschikbare remweg bij het waarborgen van de stopstreepafstand van 1 meter blijkt dan onvoldoende voor de benodigde remweg. Het advies aan Lock To Twente is om Rijkswaterstaat het resultaat van de benodigde remweg van de variant voor te leggen. Hierbij kunnen bepaalde opties worden besproken om te voldoen aan de gestelde aanvaarenergie eis van 2500 kNm, te weten:

- Afwijken van de RVW-eis; Het hart van de aanvaarbeveiliging 0,30 meter opschuiven richting de stopstreep;
- Inleveren op de nuttige kolk lengte; De stopstreep 0,30 meter opschuiven;
- Veiligheidsmarge negeren; Uit de berekeningen volgt dat de benodigde remweg 5,20 meter bedraagt, welke overeenkomt met de beschikbare ruimte na het opschuiven van de aanvaarbeveiliging tot 1 meter voor de stopstreep.

18.1.3 Huidige status kolkwanden

De huidige status van de kolkwanden zijn niet bekend, net als de exacte hoeveelheid, soort en plaats van de wapening in de wanden. Er wordt er doormiddel van een benaderingsberekening gecontroleerd als de kolk voldoende weerstand biedt tegen het optredend moment bij aanvaring.

Bij aanvaring werken er trekkrachten (F_x) van de kabel op de kolkwanden, de richting van de krachten is naar de binnenzijde van de kolk, *Figuur 18.5*. Dit resulteert in een moment in de kolkwand. Er is tevens een bijkomend moment uit het grondpakket gelegen tegen de kolkwand. Het tegenmoment is afkomstig uit het aanwezige waterpakket in de kolk. De hoogwaterstand is hierbij maatgevend. Een aanvaring treedt altijd op wanneer het water in de kolk hoog is, gelijk met de waterstand in het bovenpand. *Figuur 18.6* geeft de maatgevende momenten bij aanvaring weer.

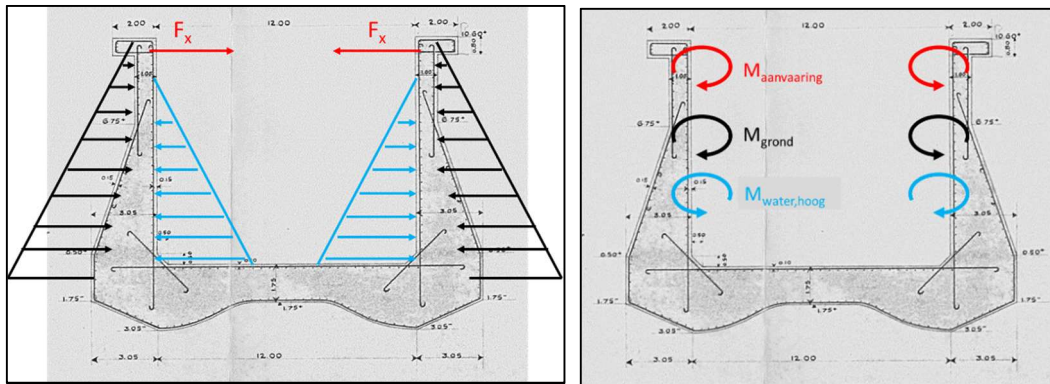


Figuur 18.5 Trekkrachten op kolkwand bij aanvaring

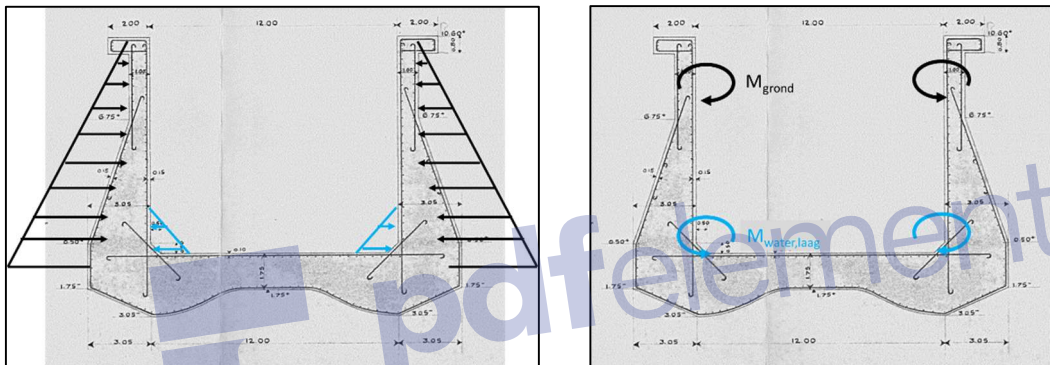
Er wordt aangenomen dat de kolkwandconstructie bestand is tegen de aanvaarbebelasting wanneer het gezamenlijk moment bij aanvaring kleiner is dan het optredend moment bij een zeer lage waterstand in de kolk, *Vergelijking 18-1*. De sluis in Eefde is bij een calamiteit vrijwel droog worden te zetten. In deze situatie treedt er een moment op door het achtergelegen grondpakket naast de kolkwand. *Figuur 18.7* geeft de maatgevende momenten bij een vrijwel lege sluis weer. De sluisconstructie bezwijkt niet bij dit optredend moment, het is aannemelijk dat wanneer het moment ten gevolge van aanvaring kleiner is de constructie ook niet bezwijkt.

Vergelijking 18-1 Controle optredende momenten bij aanvaring

$$(M_{\text{grond}} + M_{\text{aanvaring}}) - M_{\text{water,hoo}} \leq M_{\text{grond}} - M_{\text{water,laag}}$$



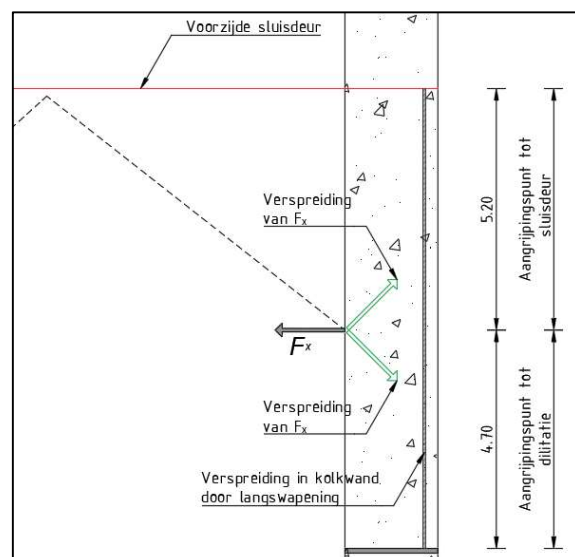
Figuur 18.6 Optredende momenten bij aanvaring bij hoge waterstand



Figuur 18.7 Optredende momenten bij droog zetten kolk (lage waterstand)

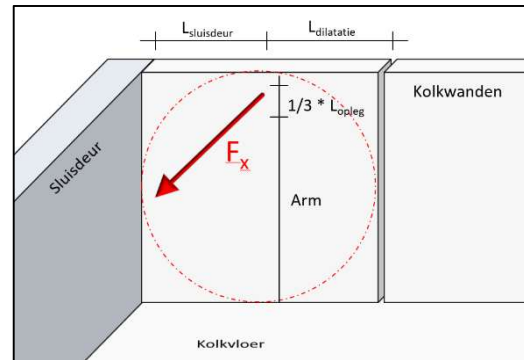
Optredend moment bij aanvaring

De optredende trekkracht bij aanvaring wordt grotendeels verdeeld over de kolkwand. De wapening in de kolkwand zorgt voor een verspreiding van de kracht in de lengte en hoogte. De verspreiding is afhankelijk van de oppervlakte waarover spreading plaatst vindt. Het aangrijpingspunt van de kracht bevindt zich tussen de sluisdeur en aan de andere zijde een dilatatievoeg. De dilatatievoeg is een onderbreking in de kolkwand in functie van het opvangen van het uitzetten en krimpen van het beton. De dilatatie representeert het uiterst punt tot waar spreading van de kracht gaat. Ditzelfde geldt voor de andere zijde waar er een onderbreking is bij de sluisdeur.



Figuur 18.8 Verspreiding krachten in de kolkwand

Hoe de krachtsverdeling exact werkt kan worden berekend met de oneindig-elementenmethode beschikbaar in bijvoorbeeld berekeningssoftware. In dit onderzoek wordt er een aanname gedaan voor het optredend moment bij aanvaring. Aangenomen is dat de krachtspreiding over de twee lengtes plaatsvindt en een krachtenafdracht naar de onderzijde. De kracht wordt gedeeld door de som van beide lengtes en vermenigvuldigd met een arm tot aan onderzijde kolkvloer. De arm is afhankelijk van het aangrijpingspunt van de kracht, *Figuur 18.9*.



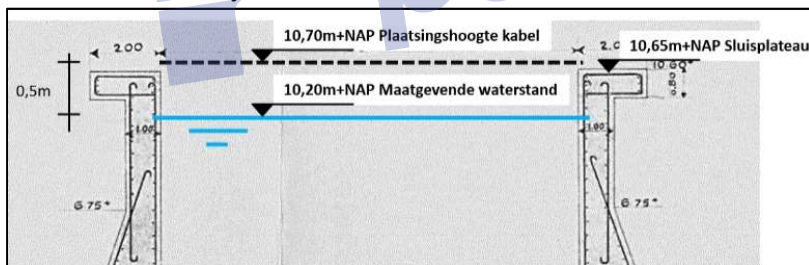
Figuur 18.9 Aangrijpingspunt kracht bij aanvaring

Dit resulteert dat het optredend moment bij een vrijwel lege sluis kolk groter is dan het moment bij aanvaring, *Bijlage 18.2 Controle berekening optredende momenten*. Op basis van de resultaten wordt geconcludeerd dat de kolkwanden bestand zijn tegen de belasting vrijkomend bij aanvaring, uitgaande van de variant; kabel met remcilinder.

18.1.4 Inpassing aanvaarbeveiliging

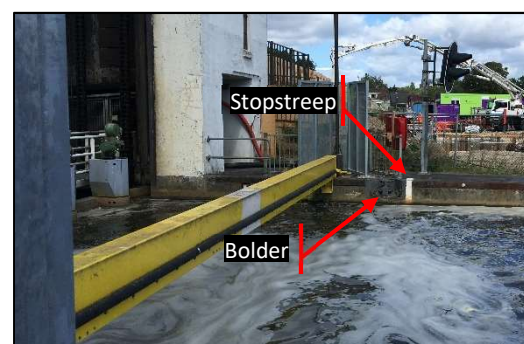
De onderzijde van de aanvaarbeveiliging dient zich 0,5 meter boven de ontwerpwaterstand te bevinden wat resulteert dat de aanvaarbeveiliging boven het sluisplateau dient te worden geplaatst, *Figuur 18.10*.

In de Noordersluis is sluisplateau hoger waardoor de slagboom zich bevindt in een sparing. Het bevestigingspunt van de kabel aan de overzijde grijp aan in een aanslagkom in de kolkwand. De hefcilinder voor de slagboom kan op de kolkwand van de Zuidersluis worden bevestigd. Enkel is er aan de overzijde dan geen aangrijpingspunt op 10,70 m+NAP. Het sluisplateau bevindt zich op een lager niveau dan wenselijk is.



Figuur 18.10 Relevante ontwerphoogtes Zuidersluis

Op een geringe afstand voorbij de stopstreep bevindt zich aan beide zijde een bolder in het sluisplateau, *Figuur 18.11*. Onder de bolder bevinden zich van bovenzijde sluisplateau tot aan de kolkvloer een rij haalkommen. Voor het creëren van een langere remweg dient de aanvaarbeveiliging 1 meter naar achter te worden geschoven. Hierbij wordt tevens de haalkommen en de bolder benaderd. Voor inpassing zijn er een aantal opties denkbaar:



Figuur 18.11 Bolder ter plaatse van aanvaarbeveiliging

- Bolders en haalkommen uitwerking stellen; Dit leidt tot functieverlies van de bolder en haalkommen. Tevens dienen de bolders aan beide zijden te worden verwijderd om inpassing van de hefcilinder en bevestigingspunt van de kabel mogelijk te maken;

- Aanvaarbeveiliging naar achter verplaatsen; Inleveren op de nuttige kolk lengte en functieverlies bolders en haalkommen;
- Aanvaarbeveiliging naar voren plaatsen; Inleveren op de benodigde remweg wat leidt tot een lagere op te nemen aanvaarenergie.

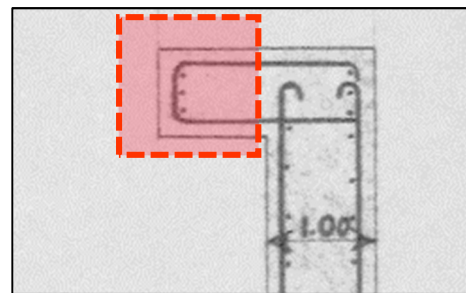
Inpassing in de bestaande constructie

Voor inpassing van de hefcilinder en de remcilinder dienen er enkele aanpassingen plaatst te vinden. Uitgaande van het handhaven van de benodigde remweg van 5,2 meter en behoud van de plaatsingshoogte dient de hefcilinder op het plateau van de kolkwanden te worden bevestigd. Dit geeft als resultaat dat de huidige kolkwanden dienen te worden aangepast, *Bijlage 18.3 Schetsontwerpen voorstel inpassing*. Hierbij is er uitgegaan van plaatsing van de remcilinder aan de zuidzijde, een inpassing aan de noordzijde geeft vrijwel eenzelfde resultaat.

Verdieping remcilinder

Het is wenselijk de remcilinder verdiepend aan te brengen, in een kelder, op vrijwel gelijke hoogte met het naast gelegen maaiveld. De remcilinder in zijn geheel verdiepend aan te brengen is bij de Zuidersluis vrijwel onmogelijk vanwege het lagergelegen sluisplateau.

De remcilinder dient net als de remcilinder van de Noordersluis wel enige een verdieping te hebben in relatie tot de plaatsingshoogte van de hefcilinder. In de huidige situatie is er geen mogelijkheid om de remcilinder verdiepend in te passen. *Figuur 18.13* geeft de beoogde verdieping weer. Het kolkwandplateau heeft aan beide zijde over de gehele lengte een uitkraging van 1 meter waarvan het wenselijk is deze plaatselijk in te korten, *Figuur 18.12*.



Figuur 18.12 Uitkraging kolkwandplateau

Fundatie remcilinder

De remcilinder dient te worden bevestigd op een fundatie. Het is wenselijk de fundatie met de bestaande kolkwand te koppelen om mogelijke zakking te voorkomen. Na het inkorten van de uitkraging dienen er op de benodigde hoogte in de kolkwand ankers worden aangebracht, *Figuur 18.13*. Vervolgens dient de betonnen funderingsplaat in het werk te worden gewapend en gekoppeld met de ingebrachte ankers, waarna deze wordt afgestort.

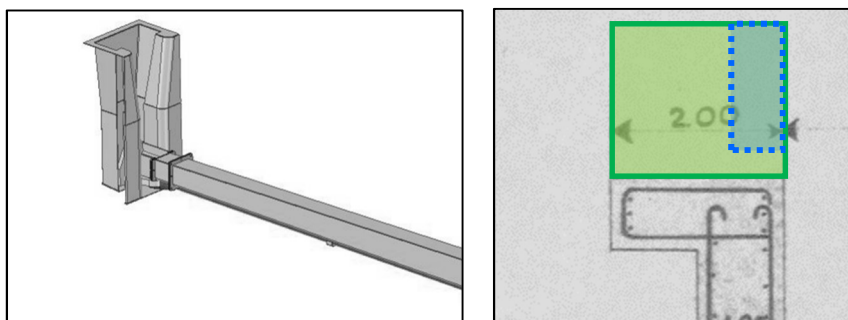
Hefcilinder

De hefcilinder van de slagboom kan worden bevestigd op de bovenzijde van het bestaande kolkwandplateau. Door de bovenzijde gering te verdiepen wordt er een vlakke ondersteuningsvloer gecreëerd waarop hefcilinder rust. Hierbij dient er na het verdiepen (chemische-)ankers worden ingeboord waarop de bevestigingsplaat van de hefcilinder wordt gemonteerd, *Figuur 18.13*.

Figuur 18.13 Doorsnede inpassing hefcilinder en remcilinder

Fuikconstructie

Het uiteinde van de kabel is gekoppeld met een hamerstuk welke in een fuikconstructie in de kolkwand valt. De hamer op het uiteinde van de kabel is een speciaal ontworpen stalenonderdeel dat bij een aanvaring in de fuikconstructie blijft haken, *Figuur 18.14*. De fuik dient te worden gefundeerd in de kolkwand. In de huidige situatie is het vanwege de plaatsingshoogte niet mogelijk een fuikconstructie te realiseren in de bestaande kolkwand. Het benodigde niveau van de fuikconstructie bevindt zich boven het kolkwandplateau. Doormiddel van het creëren van een opstort op het kolkwandplateau kan de fuikconstructie worden ingepast. Het groen gearceerde deel in *Figuur 18.14* weergeeft de opstort en het blauw gearceerde deel geeft de fuikconstructie weer welke dient te worden gerealiseerd in de opstort.



Figuur 18.14 Fuikconstructie & opstort op kolkplateau t.b.v. fuikconstructie

18.1.5 Aanvaarenergie Zuidersluis

Rijkswaterstaat geeft middels een contracteis een aanvaarenergie van 2500 kNm. De Casestudy van de Aanvaarenergietool voor Sluis Eefde, *Bijlage 12*, bevestigt dat de gestelde eis van 2500 kNm een goede benadering is van de aanvaarenergie. De 2500 kNm kan optreden voor een schip CEMT-Va klasse.

Rijkswaterstaat geeft aan dat het te verwachten is dat scheepvaart CEMT-Va enkel nog door de Noordersluis mag varen: (Aanvaarbescherming sluizen Delden en Hengelo en Eefde, 13-11-2015). Dit betekent dat CEMT-IV maatgevend wordt ten bate van de aanvaarenergie. Hieruit volgt een aanvaarenergie van 1840 kNm bijpassend bij een CEMT-IV M6 schip, *Bijlage 12*.

De benodigde remweg blijft hierbij hetzelfde, de reactiekrachten op de kolkwanden zijn kleiner, *Paragraaf 18.1.7*. De reactiekracht in langsrichting bedraagt 536 kN tegenover de 873 kN bij 2500 kNm op te nemen aanvaarenergie. De reactiekracht dwars op de kolkwanden bedraagt 467 kN tegenover 710 kN.



18.1.6 Aanvaarbeveiligingtool resultaten op basis van contracteis aanvaarenergie

Uitgangspunten vaarweg			
Algemeen			
Vaarwegklasse		CEMT-Va	
Benedenpand			
Max. waterstand	$h_{\text{max,beneden}}$	7,60	m+NAP
Min. waterstand	$h_{\text{min,beneden}}$	3,00	m+NAP
Bovenpand			
Max. waterstand	$h_{\text{max,boven}}$	10,20	m+NAP
Min. waterstand	$h_{\text{min,boven}}$	9,70	m+NAP
Verval			
Min. verval	$h_{\text{min,verval}}$	2,10	m
Uitgangspunten Sluis			
Bovenhoofd			
Breedte	b_d	12,00	m
Peil drempel	h_d	6,50	m+NAP
Kolk			
Kolk lengte	l_k	140,00	m
Kolkbreedte	b_k	12,00	m
Peil kolkvloer	h_k	0,00	m+NAP
Maatgevende waterstand kolk	$h_{\text{max,kolk}}$	10,20	m+NAP
Remweg			
Stopstreepafstand	$X_{\text{stopstreep}}$	6,20	m
Remweg	X_{rem}	5,20	m
Soort project			
Nieuwbouw / Bestaand(renovatie)		Bestaand (renovatie)	
Limiet scheepvaart toegestaan in kolk (optioneel)			
Max. toegestane lengte	$l_{s,\text{lim}}$	140,00	m
Max. toegestane breedte	$b_{s,\text{lim}}$	12,00	m
Ruimte nabij kolkwanden			
Beschikbare ruimte nabij kolkwanden	l	2,00	m
Beschikbare ruimte nabij kolkwanden	d	5,00	m
Ruimte in kolkwand achter stopstreep			
Mogelijkheid tot het realiseren van een sparing in de kolkwand		Ja	
Sluisplateau			
Hoogte sluisplateau	$h_{\text{sluisplateau}}$	10,65	m+NAP
Benodigde verdieping voor aanvaarbeveiliging		plaatsen op kolkwand	m
Plaatsingshoogte Aanvaarbeveiliging			
Onderzijde aanvaarbeveiliging		10,70	m+NAP
Doorvaarhoogte			
Min. doorvaarhoogte		2,60	m

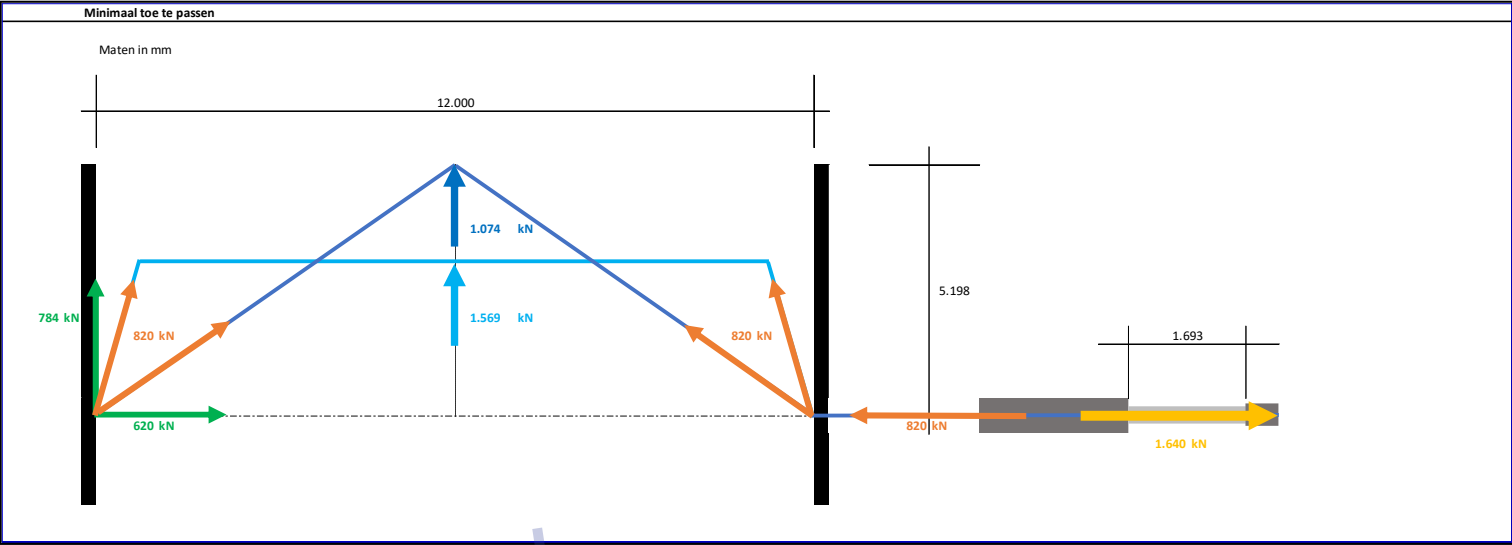
Uitgangspunten Aanvaarenergie			
Aanvaarenergie volgens contracteis			
Maatgevende aanvaarenergie	$E_{\text{eis,aanvaar}}$	2500	kNm
Maatgevend schip bij centrische aanvaring	CEMT-Va M9	11,40	m
Schatting maatgevende aanvaarenergie bij excentrisch		1075,00	kNm
Maatgevende aanvaarenergie scheepsklassen			
	E_{aanvaar}		kNm
	E_{aanvaar}		kNm
	E_{aanvaar}		kNm
	E_{aanvaar}		kNm
Schatting maatgevende energie bij excentrische aanvaring voor oplegging scheepsklassen			
			kNm
			kNm
			kNm
			kNm
Maatgevende excentrische aanvaring			
Maatgevend schip bij excentrische aanvaring			m
Maatgevende aanvaarenergie bij excentrisch			kNm
Maatgevende centrische aanvaring			
Maatgevend schip bij centrische aanvaring			m
Maatgevende aanvaarenergie bij centrisch			kNm

Aanbeveling variant			
Mogelijkheid tot vaste aanvaarbeveiliging			
Volgens RVW-2017 (5.4.2 Doorvaarhoogte)		Nee	
Volgens RVW-2017 (5.4.2 Doorvaarhoogte) minus veiligheidsmarge, "schrikhoogte" van 0,30 meter		Nee	
Maximale strijkhoogte maatgevend schip		Nee	
Leidende eis volgens gebruiker			
Maximale strijkhoogte maatgevend schip		Geen mogelijkheid tot vaste aanvaarbeveiliging	
Aanbeveling vaste aanvaarbeveiliging			
Optie 1			
Optie 2			
Aanbeveling dynamische aanvaarbeveiliging			
Optie 1		Kabel met remcilinder	

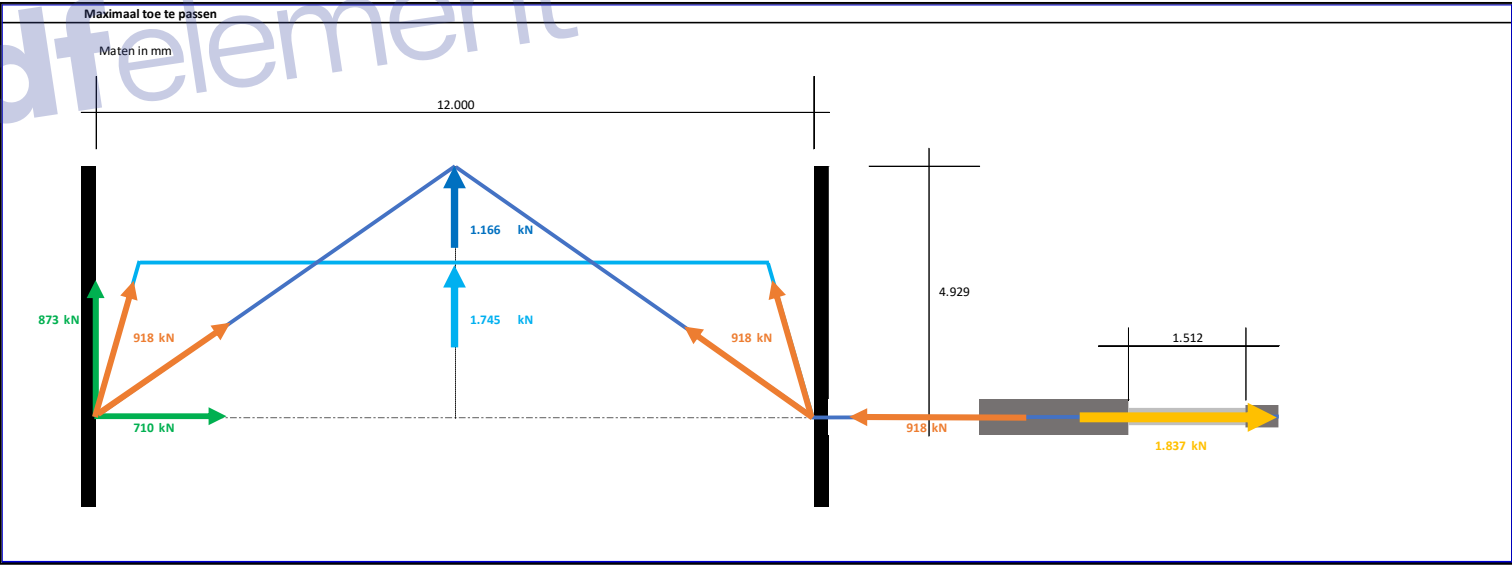
Berekenmethode

Gegevens				
Gegevens Staalkabel				
E	=	1,05E+05	N/mm ²	
σ_{max}	=	1.060	N/mm ²	
$F_{kabel,breuk}$	=	1.800	kN	
$F_{bezwijk}$	=	1.286	kN	
F_{kabel}	=	918	kN	
Gegevens kolk				
b_k	=	12.000	mm	
x_{rem}	=	5.200	mm	
Aanvaarenergie				
$E_{aanvaar}$	=	2.500	kNm	
Gegevens constructie/cilinder				
$l_{speling}$	=	300	mm	
l_{opleg}	=	5.000	mm	
n	=	2	maal	Omwentelingen kabel om cilinderkop

Legenda		
Aanvaarkracht Duwvaart	$F_{Duwvaart}$	
Aanvaarkracht Spits	F_{Spits}	
Maatgevende reactiekracht in x-richtin	F_x	
Maatgevende reactiekracht in y-richtin	F_y	
Kabel kracht	F_{kabel}	
Reactiekracht remcilinder	$F_{cilinder}$	



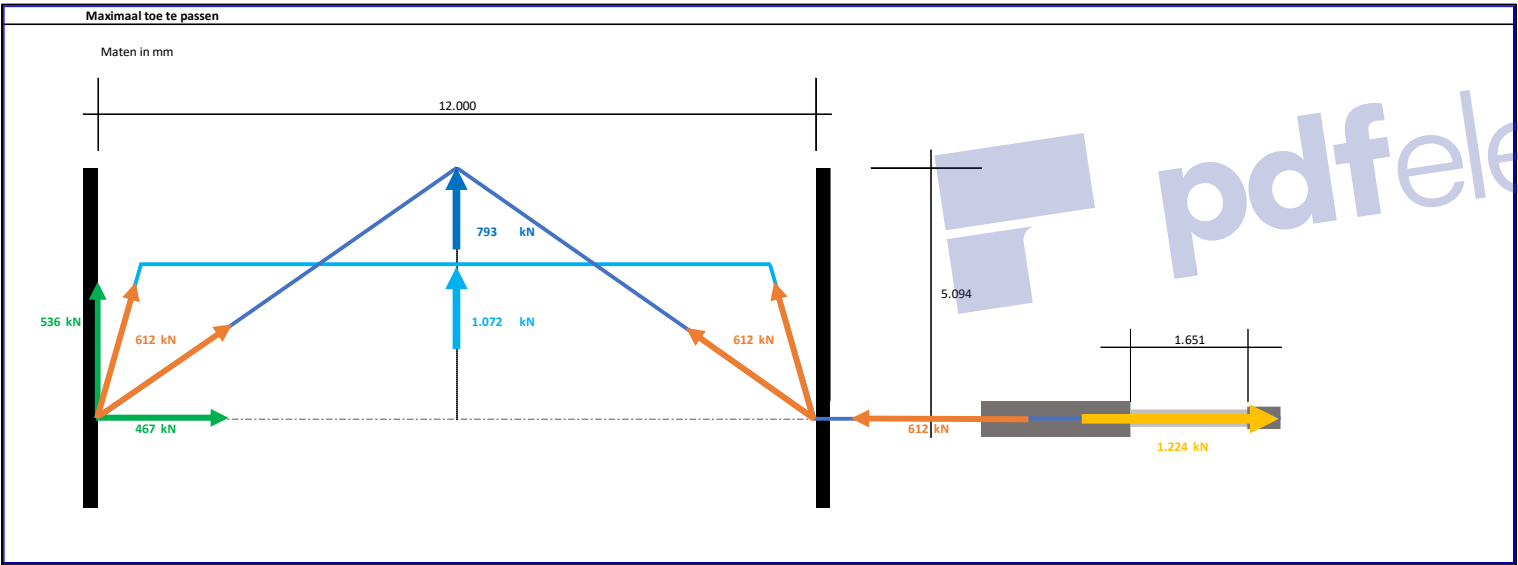
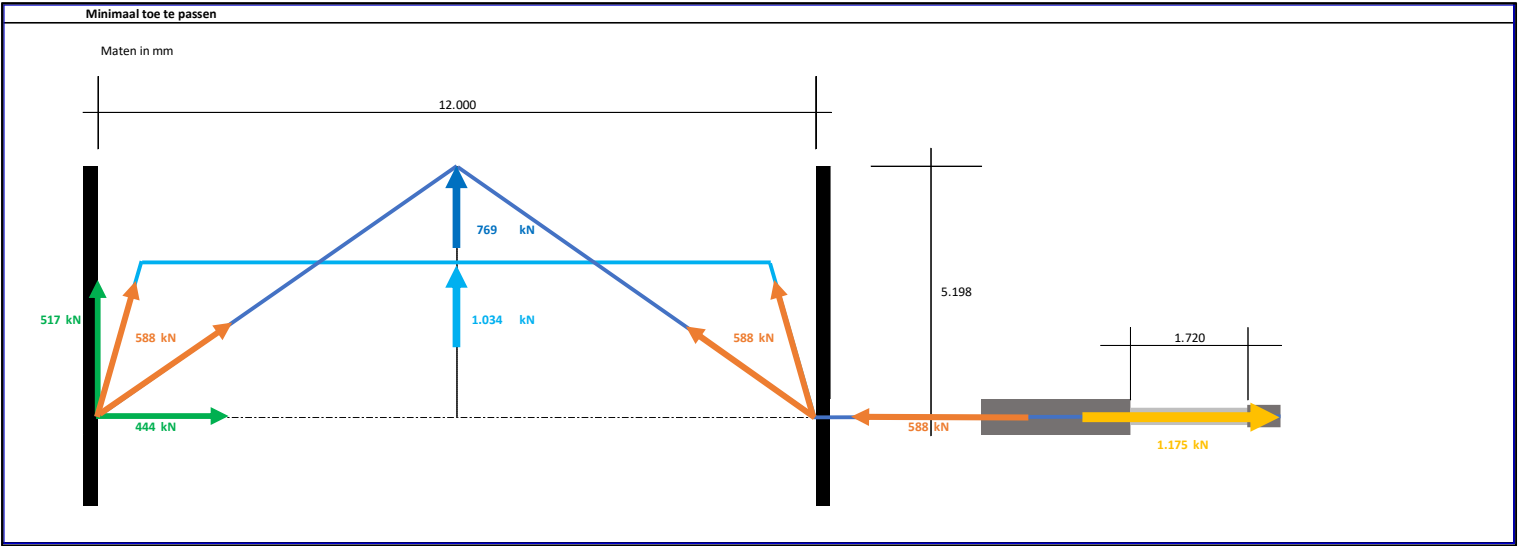
Constructie				
Resultaten maximale krachten				
Remweg	x_{rem}	=	4,93	m
Kracht in y-richting	F_y	=	873	kN
Kracht in x-richting	F_x	=	710	kN
Kracht in kabel	F_{kabel}	=	918	kN
Kracht cilinder	F_{cil}	=	1.837	kN
Lengte slag cilinder	x_{cil}	=	1.512	mm
Aanvaarbelasting Spitse boeg	$F_{aanvaar,spits}$	=	1.166	kN
Aanvaarbelasting duwbak boeg	$F_{aanvaar,duw}$	=	1.745	kN
Resultaten minimale krachten				
Remweg	x_{rem}	=	5,20	m
Kracht in y-richting	F_y	=	784	kN
Kracht in x-richting	F_x	=	620	kN
Kracht in kabel	F_{kabel}	=	820	kN
Kracht cilinder	F_{cil}	=	1.640	kN
Lengte slag cilinder	x_{cil}	=	1.693	mm
Aanvaarbelasting Spitse boeg	$F_{aanvaar,spits}$	=	1.074	kN
Aanvaarbelasting duwbak boeg	$F_{aanvaar,duw}$	=	1.569	kN



Berekening op basis van maximale benutting remweg, rek door spanning wordt hier verwaarloosd				
Spitse boeg				
Hoek kabel ten opzichte van origineel bepalen uit de remweg				
	α_{spits}	=	40,9 °	
	Δl	=	3.880 mm	
	$l_{uittrek}$	=	3.580 mm	is minus de speling
Grootte en kracht cilinder bepalen uit uittrekkingslengte				
	x_{cil}	=	1.790 mm	Slaglengte cilinderkop
	$F_{cil,90\%}$	=	1.397 kN	Energie is slaglengte maal 90% max kracht cilinder
	F_{cil}	=	1.552 kN	Maximale kracht cilinder
Bezwijkbelastingen bepalen				
	F_{kabel}	=	776 kN	
	$F_{bezwijk}$	=	1.086 kN	
	$F_{kabel,breuk}$	=	1.521 kN	
Unity Check dat breukkracht kabel niet is overschreden				
	u. c.	=	0,43	VOLDOET
Kracht op constructie				
	F_y	=	508 kN	
	F_x	=	586 kN	
Aanvaarbelasting				
	$F_{aanvaar}$	=	1.016 kN	
Duwbak				
Hoek kabel vanuit zelfde Δl_{totaal} als spits schip				
	$b_{duw,schuin}$	=	500 mm	
	$b_{s,duw}$	=	10.400 mm	Breedte voorkant/boeg
	$b_{k,duw}$	=	800 mm	Ruimte tussen kolk en boeg
	Δl	=	3.880 mm	
	α_{duw}	=	73,0 °	
	$x_{rem,duw}$	=	2.620 mm	
Kracht kabel, slaglengte en kracht cilinder blijven gelijk aan spitse boeg				
	F_{kabel}	=	776 kN	
	x_{cil}	=	1.790 mm	
	$F_{cil,90\%}$	=	1.397 kN	
	F_{cil}	=	1.552 kN	
Kracht op constructie				
	F_y	=	742 kN	
	F_x	=	227 kN	
Aanvaarbelasting				
	$F_{aanvaar}$	=	1.484 kN	

Berekening op basis van maximale benutting kabelkracht, rek door spanning wordt hier verwaarloosd				
Spitse boeg				
Grootte en kracht cilinder bepalen uit kabelkracht				
F_{kabel}	=	918 kN		
F_{cil}	=	1.837 kN		
$F_{cil,90\%}$	=	1.653 kN		
x_{cil}	=	1.512 mm		
Lengte kabel over de kolk bepalen door slag cilinder				
$l_{uittrek}$	=	3.025 mm		
Δl	=	3.325 mm		
$b_k + \Delta l$	=	15.325 mm	Kabel over de kolk na aanvaring	
Hoek kabel ten opzichte van origineel bepalen uit de remweg				
α_{spits}	=	38,46 °		
x_{rem}	=	4.766 mm		
Kracht op constructie				
F_y	=	571 kN		
F_x	=	719 kN		
Aanvaarbelasting				
$F_{aanvaar}$	=	1.142 kN		
Duwbak				
Hoek kabel vanuit zelfde Δl_{totaal} als spits schip				
$b_{duw,schuin}$	=	500 mm		
$b_{s,duw}$	=	10.400 mm	Breedte voorkant/boeg	
$b_{k,duw}$	=	800 mm	Ruimte tussen kolk en boeg	
Δl	=	3.325 mm		
α_{duw}	=	71,04 °		
$x_{rem,duw}$	=	2.329 mm		
Kracht kabel, slaglengte en kracht cilinder blijven gelijk aan spitse boeg				
F_{kabel}	=	918 kN		
x_{cil}	=	1.512 mm		
$F_{cil,90\%}$	=	1.653 kN		
F_{cil}	=	1.837 kN		
Kracht op constructie				
F_y	=	869 kN		
F_x	=	298 kN		
Aanvaarbelasting				
$F_{aanvaar}$	=	1.737 kN		

18.1.7 Aanvaarbeveiligingtool resultaten op basis van aanvaarenergie CEMT-IV



18.2 Controle berekening optredende momenten

Uitgangspunten			
Sluisplateau			
Hoogte sluisplateau	$h_{\text{sluisplateau}}$	10,65	m+NAP
Plaatsingshoogte			
Onderzijde aanvaarbeveiliging		10,70	m+NAP
Kolk			
Kolkbreedte	b_k	12,00	m
Peil kolkvloer	h_k	0,00	m+NAP
Minimale waterstand kolk	$h_{\text{min,kolk}}$	1,20	m+NAP
Maximale waterstand kolk	$h_{\text{max,kolk}}$	10,20	m+NAP
Kracht op kolkwand bij aanvaring			
Kracht in Y-richting	F_y	710,00	kN
Dimensionering kolkwand oplegging			
Aangrijpingspunt tot sluisdeur	$L_{\text{opleg,a}}$	5,20	m
Aangrijpingspunt tot dilatie	$L_{\text{opleg,b}}$	4,78	m
Vergelijkingen			
$M_v = (\gamma * n) * \left(\frac{1}{2} * h\right) * \text{arm}$ $\text{Arm} = \frac{1}{3} * h \quad M_{\text{aanvaring}} = \left(\frac{F_x}{2 * L_{\text{opleg,b}}}\right) * \left(h - \frac{1}{3} * L_{\text{opleg,b}}\right)$			
Optredende momenten			
Optredend moment bij minimale waterstand kolk ($M_{\text{kolk,1}}$)			
Onderdeel	Soortelijkgewicht [kN/m ³]	Hoogte [m]	Moment [kNm]
Grond	20,00	10,65	2013,25
Laag water	10,00	1,20	2,88
Maatgevend moment:			2010,37
Optredend moment bij aanvaring ($M_{\text{kolk,2}}$)			
Onderdeel	Soortelijkgewicht [kN/m ³]	Hoogte [m]	Moment [kNm]
Grond	20,00	10,65	2013,25
Hoog water	10,00	10,20	1768,68
Onderdeel	Kracht F_x [kN]	Hoogte [m]	Moment [kNm]
Aanvaring	710	10,65	672,62
Maatgevend moment:			917,19
$U.C. = \frac{M_{\text{kolk,2}}}{M_{\text{kolk,1}}} \leq 1,0 \quad = \quad 0,46 \quad \text{VOLDOET}$			

18.3 Schetsontwerpen voorstel inpassing



3.00

[Z= 10.663]

[Z= 11.012]

[Z= 10.862]

pdfelement

Overzicht inpassing Remcilinder te zuiden van de Zuidersluis Eefde

				TBI Mobilis B.V.		Hogeschool Windesheim	
				T. Vlijm en C. de Kruyf			
				Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging			
Kabel met Remcilinder – Zuidersluis Eefde						VOE: BT.AFST-CT.V17	
Deelvraag 6 Schetsontwerp benodigderuimte Remcilinder Te zuiden van de Zuidersluis						Aansluitend document: Bijlage 18.2	
						Paragraaf Rapport: 10.1.3	
getekend	T. Vlijm	datum	24-05-2019	schaal:	1:100	in 1 bladen, bladnr. 2	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	28-05-2019	formaat:	A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	29-05-2019	tekeningnummer: 01 SO Remcilinder (OVZ)			
status	Definitief	versie	A				

[Z= 10,657]

[Z= 11,005]

pdfelement

Overzicht inpassing Remcilinder te noordenen van de Zuidersluis Eefde

 mobilis TBI infra		TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim  Windesheim
Kabel met Remcilinder – Zuidersluis Eefde						VOE: BT.AFST-CT.V17
Deelvraag 6						Aansluitend document: Bijlage 18.2
Schetsontwerp benodigderuimte Remcilinder						
Te noorden van de Zuidersluis						Paragraaf Rapport: 10.1.3
getekend	T. Vlijm	datum	24-05-2019	schaal: 1:100	in 2 bladen, bladnr. 2	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	28-05-2019	formaat: A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	29-05-2019	tekeningnummer: 02 SO Remcilinder (OVZ)		
status	Definitief	versie	A			



Probleemanalyse - weergave

Voorstel: Realisatie benodigde funderingsconstructie

 mobilis TBI infra		TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim 
Kabel met Remcilinder – Zuidersluis Eefde						VOE: BT.AFST-CT.V17
Deelvraag 6						Aansluitend document: Bijlage 18.3 Paragraaf Rapport: 10.1.4
Doorsnede (schets) Inpassing Kabel met Remcilinder – Zuidersluis						
Probleemanalyse & Voorstel realisatieplan						
getekend	T. Vlijm	datum	28-05-2019	schaal: 1:100	in 2 bladen, bladnr. 1	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	29-05-2019	formaat: A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	29-05-2019	tekeningnummer: 01 SO Inpassing (DRSN)		
status	Definitief	versie	A			



Voorstel: Realisatie funderingsconstructie en opstort
t.b.v. kabelbevestigingspunt

Weergave eindsituatie

 mobilis TBI infra		TBI Mobilis B.V. T. Vlijm en C. de Kruyf Afstudeeronderzoek Aanvaarbeveiliging				Hogeschool Windesheim  Windesheim
Kabel met Remcilinder – Zuidersluis Eefde						VOE: BT.AFST-CT.V17
Deelvraag 6						Aansluitend document: Bijlage 18.3 Paragraaf Rapport: 10.1.4
Doorsnede (schets) Inpassing Kabel met Remcilinder – Zuidersluis						
Voorstel funderingsconstructie & weergave eindsituatie						
getekend	T. Vlijm	datum	28-05-2019	schaal: 1:100	in 2 bladen, bladnr. 2	
gecontroleerd	C. de Kruyf	datum	29-05-2019	formaat: A3	projectnummer:	
vrijgegeven	C. de Kruyf	datum	29-05-2019	tekeningnummer: 02 SO Inpassing (DRSN)		
status	Definitief	versie	A			

Bibliografie

- A.Vrijburcht, R. . (1992). *Aanvaarrisico voor sluisdeuren Q1399*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Aandrijftechniek. (2017, 08 01). *Sluisdempers bewijzen hun dienst na aanvaring bij sluis*. Opgehaald van [www.at-aandrijftechniek.nl](https://www.at-aandrijftechniek.nl/algemeen/sluisdempers-bewijzen-dienst-aanvaring-sluis/54527/): <https://www.at-aandrijftechniek.nl/algemeen/sluisdempers-bewijzen-dienst-aanvaring-sluis/54527/>
- ACE. (2010). *Documentatie ACE BOMaHe*.
- ACE. (sd). *Tubus (Axial Damping)*. Opgehaald van ACE: <https://www.acecontrols.com/us/products/automation-control/profile-dampers/tubus-ta.html>
- Adviesdienst Verkeer en Vervoer. (2002). *Classificatie en kenmerken van de Europese vloot en de Actieve vloot in Nederland* . Rotterdam: Rijkswaterstaat .
- archives-outvertes, H. (2017). *Experimental investigation of the crash energy absorption of 2.5D-braided thermoplastic composite tubes*.
- Berentsen, R. (2019, 02 25). Interview met Rijkswaterstaat. (T. Vlijm, & C. de Kruijf, Interviewers)
- Bos, P. (2019, 03 11). Interview met Hollandia Infra BV. (T. Vlijm, & C. de Kruijf, Interviewers)
- Breen, J. (1999). *Haalbaarheidsstudie nylon vangkabels ter bescherming van sluisdeuren (TNO Industrie)*. Zoetermeer: Bouwdienst Rijkswaterstaat - Hoofdafdeling Natte Infrastructuur .
- Broeke, E. t. (1998). *Haalbaarheidsonderzoek naar kunststof vangkabels ter bescherming van sluisdeuren*. TU Delft.
- Bruijn, W. D. (sd). *Installatiebedrijf W.J. De Bruijn*. Opgehaald van wjdb: <http://www.wjdb.nl/projecten/?id=2>
- Daniëls, R., & Riep, R. (2007). *Rotatiecapaciteit van plastische scharnieren in beton*. Eindhoven: TU Eindhoven.
- De Groot, R., & Schippers, R. (2013). Het sluitstuk van de Zuid-Willemsvaart: Sluis Empel. *Cement*, 20-25.
- De Leeuw van Weenen, R., Van der Meulen, S., & Van der Geest, W. (2017). *Middellange Termijn Prognoses voor de binnenvaart (Vervoer in relatie tot Nederland, periode 2017 - 2021)*. Zoetermeer: Panteia.
- De Vries, C. (2006). *De toekomst van het goederenvervoer en de binnenvaart in Europa*. Rotterdam: Bureau Voorlichting Binnenvaart.
- Helpdesk Water. (2017). *Primaire waterkering > Beoordelen (WBI)*. Opgehaald van Helpdesk Water (RWS): <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/>
- Hendriksen, R., Spruijt, P., & Van Vuren, G.-J. (2008). *Sluis Empel: Naar een veiliger, goedkoper en innovatief sluishoofd* . Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
- Hensen, M. (sd). *Binnenvaartinbeeld Sluizen*. Opgehaald van Binnenvaartinbeeld: <https://binnenvaartinbeeld.com/nl/sluizen>

- Hoekstra, T. (2019, 03 19). Interview met Ingenieursbureau Boorsma. (T. Vlijm, & C. de Kruijf, Interviewers)
- Hollandia Infra BV. (30-10-2017). *Uitgangspuntenrapport Aanvaarbeveiliging versie 2.0*. Hollandia INFRA BV.
- Joustra, N., & Pater, R. (1993). *Aanvaarbeveiliging door schepen op starre constructies*. Delft: TU Delft.
- Klinken, v. E. (1991). *Onderzoek naar energieabsorptie in hybride composieten*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Kootwijk-Damman, C. M. (1992). *Een visco-elastische benadering van plastische vloeit*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- M. Rijkers, L. F. (13-11-2015). *Aanvaarbeveiliging sluizen Delden en Hengelo en Eefde*. Eefde.
- MNV'13, M. P. (december 2013). *Monitoring Nautische Veiligheid 2013*. Delft: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Afdeling Veiligheidsmanagement en Verkeersveiligheid.
- Mobilis, TBI. (21 september 2017). *Memo advies aanvaarbeveiliging bovenhoofd 2e sluiskolk Eefde*. Krimpen a/d IJssel: TBI Mobilis B.V.
- Nijssen, d. i. (2015). *Basiskennis composieten*. Hogeschool Inholland (VKCN-publicatie).
- Nortier, I. i., & de Koning, I. P. (1996). *Toegepaste Vloeistofmechanica* (7e ed.). Halsteren: Stam Techniek.
- PIANC. (1986). *Final Report of the International Commission for the Study of Locks*. Brussel: PIANC.
- Pled, F., Wen, C., & Yan, W. (2012). *Crushing Modes of Aluminium Tubes under Axial Compression*. Brisbane, Australia: Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007 .
- Reed Business Information bv. (2004). *Polytechnisch zakboek*.
- Rijkswaterstaat. (2 januari 2017). *WBI 2017 Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk*. Utrecht: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Richtlijn Ontwerp Kunstwerken ROK-1.4*. Utrecht: RWS GPO.
- Rijkswaterstaat. (2019). *Vaarwegen en objecten*. Opgehaald van www.vaarweginformatie.nl: <https://vaarweginformatie.nl/frp/main/#/geo/map?layers=LOCK>
- Rijkswaterstaat, W. A. (2017). *Richtlijnen Vaarwegen 2017*. Rijkswaterstaat.
- Schuttevaer. (sd). *Aanvaarbeveiliging bewijst zich*. Opgehaald van Schuttevaer: <https://www.schuttevaer.nl/nieuws/havens-en-vaarwegen/nid27028-aanvaarbeveiliging-bewijst-zich.html>
- TAW. (2003). *Leidraad Kunstwerken*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).
- TBI Mobilis BV. (2019). *Berekening aanvaarbeveiliging 33869-2561_Rev A-Final*.

- Ten Broeke, E. (1997). *Alternatieve materialen en methoden in aanvaarconstructies*. Delft: Technische Universiteit Delft, Faculteit der Luchtvaart -en Ruimtevaarttechniek.
- TU-Delft. (2015). *Staalpracticum B03*. Opgehaald van www.studeersnel.nl: <https://www.studeersnel.nl/nl/document/technische-universiteit-delft/beton-staalconstructies/practicum/staalpracticum-b03/174836/view>
- Van der Lee. (2019). *Brochure van der Lee*. Opgehaald van www.gvanderlee.nl: https://www.gvanderlee.nl/_asset/_public/G-Van-der-Lee/Van-der-Lee-Brochure-NL.pdf
- Vrijburcht, A. (1992). *Aanvaarrisico voor sluisdeuren - Q1339*. Rijkswaterstaat.
- Vrijburcht, A. (2000). *Ontwerp van schutsluizen*. Utrecht: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Bouwdienst.
- Welleman, I. J. (2016, 03). *Op buiging belaste staafconstructies - Plasticiteitsleer*. Opgehaald van tudelft.nl: http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT3109/collegestof/plasticiteitsleer/files
- Welleman, J., Dolging, A., & Hartman, J. (2011). *Basisboek Toegepaste Mechanica*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Wetenschapinfo. (2017, 07 09). *De trekproef: Het spannings-rekdiagram van metalen*. Opgehaald van www.wetenschap.infonu.nl: <https://wetenschap.infonu.nl/techniek/171686-de-trekproef-het-spannings-rekdiagram-van-metalen.html>
- WillemsUnie. (26-11-2012). *Berekeningsrapport Aanvaarbeveiliging Sluis Empel - BER-22118-0200*. WillemsUnie en Rijkswaterstaat.