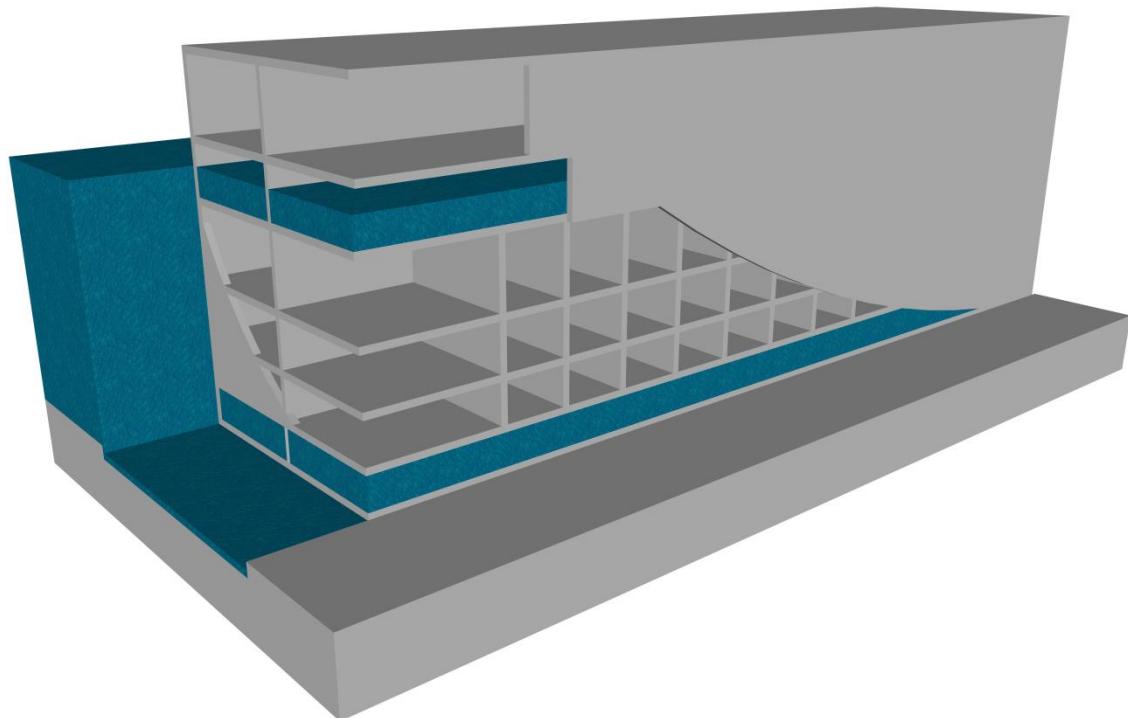


# Afstudeerverslag

*HAALBAARHEIDSSTUDIE NAAR GROTE SLUISDEUREN UITGEVOERD IN  
HOGESTERKTEBETON*

*CIE5060-09 MASTER THESIS*



Sander van Alphen  
9 oktober 2013



# COLOFON

---

## **Studie**

Delft University of Technology  
Faculteit of Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Master Structural Engineering  
Specialisatie Hydraulic Structures

## **Afstudeercommissie**

Prof.ir. A.Q.C. van der Horst	(Voorzitter)
Dr.ir. C.R. Braam	(Begeleider TU Delft)
Ir. A. van der Toorn	(Begeleider TU Delft)
Ir. P. Wernsen	(Begeleider BAM infraconsult)

## **Auteur**

S.F.C. van Alphen  
ID: 1364006  
Telefoon: 06-18999007  
Emailadres: s.van.alphen@baminfraconsult.nl

## VOORWOORD

---

Met deze scriptie sluit ik mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit te Delft af. Mijn specialisatie binnen de master Structural Engineering is Hydraulic Structures. Het afstudeeronderzoek betreft de haalbaarheid van een betonnen sluisdeur voor de Nieuwe Zeesluis te IJmuiden.

Graag wil ik mijn Afstudeercommissie, Prof.ir. A.Q.C. van der Horst, Ir. P. Wernsen, Dr.ir. C.R. Braam en Ir. A. van der Toorn, bedanken voor de begeleiding en adviezen die zij mij gegeven hebben tijdens de afstudeerperiode.

Sander van Alphen,

Delft, 26 september 2013

## SAMENVATTING

De duurzaamheid van een constructie is tegenwoordig een zeer belangrijk aspect. Daarom wordt veel onderzoek gedaan naar toepassing van ‘nieuwe’ materialen in constructies om de duurzaamheid te verhogen. Twee voorbeelden van zulke toepassingen zijn hogesterktebeton en composiet. Beide materialen zijn zeer duurzaam, ze behoeven weinig onderhoud en hebben een goede levensduur. Echter een constructie in composiet is echter in initiële kosten plus onderhoudskosten duurder dan een stalen constructie en is minder geschikt voor grote vervallen. In dit afstudeeronderzoek is onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van een sluisdeur in hogesterktebeton voor de Nieuwe Zeesluis IJmuiden, als alternatief op een stalen sluisdeur.

Eerst is in het onderzoek gekeken wat de aandachtspunten zijn in het ontwerp van een betonnen sluisdeur. Een belangrijk aandachtspunt is de brosheid van het materiaal. De betonnen sluisdeur is hierdoor onder andere minder goed bestand tegen aanvaringen. Voordat aan de variantenstudie is begonnen, is daarom eerst onderzocht of het mogelijk is om de maatgevende aanvaarbelasting op te nemen met de betonnen sluisdeur. Door extra wapening in de achterwand van de sluisdeur te leggen is het mogelijk de totale kinetische energie op te nemen door plastisch vervormen van de sluisdeur.

Vervolgens zijn aan de hand van de morfologische box methode zes varianten ontwikkeld. De drijvende variant bleek het gunstigst uit de Multi Criteria Analyse te komen. Dit komt vooral door de hoge duurzaamheid van de variant. Omdat de belangrijkste onderdelen die onderhoud behoeven zich boven water bevinden.

De drijvende deur wordt drijvend geopend en gesloten via een horizontale translerende beweging. In gesloten stand wordt door ballastwater toe te voegen de sluisdeur op de bodem gezet, hierdoor dicht de sluisdeur ook af. Aan de zijkanten dicht de sluisdeur af tegen de aanslagen. Via een pennenbaan in het sluishoofd wordt de sluisdeur geopend en gesloten.

In de uitwerking van de drijvende variant zijn de verticale stabiliteit en de drijvende stabiliteit belangrijke aspecten tijdens het ontwerp. Het volume van de drijfkist en de breedte van de sluisdeur zijn zo bepaald, dat de sluisdeur in operationele fase, tijdens uitdrijven voor onderhoud en tijdens uitdrijven na een aanvaring kan drijven en ook drijvend stabiel is. De dimensies en materiaalhoeveelheden van de sluisdeur zijn via een iteratief proces bepaald omdat ze allemaal afhankelijk van elkaar zijn. De uiteindelijke breedte van de sluisdeur is 13,5m en er is 3.381m<sup>3</sup> beton nodig.

Ten slotte zijn de stichtingskosten en de onderhoudskosten van de betonnen sluisdeur bepaald en vergeleken met de stichtingskosten en onderhoudskosten van de stalen sluisdeur. Een belangrijk verschil in de kosten van de stalen en de betonnen sluisdeur is het vul- en ledigsysteem. De stalen sluisdeur heeft schuiven in de sluisdeur en de betonnen sluisdeur heeft omloopriolen, deze zorgen voor hogere stichtingskosten. De stichtingskosten van de betonnen sluisdeur zijn bepaald voor twee betonsterkteklassen,

C55/67 en C100/115. Het bleek dat er bijna geen verschil is in kosten van de betonnen sluisdeur uitgevoerd in deze twee betonsterkteklasse. De stichtingskosten van de betonnen sluisdeur inclusief bewegingswerk zijn ongeveer €9,2 miljoen en de onderhoudskosten €279.000 per jaar. De stichtingskosten van de stalen sluisdeur zijn €19,1 miljoen en de onderhoudskosten €810.000 per jaar. Over een levensduur van 100 jaar zijn de kosten van de betonnen sluisdeur een stuk lager dan van een stalen sluisdeur. De betonnen sluisdeur is dus een goed alternatief van een stalen sluisdeur.

## SUMMARY

---

Nowadays the durability of a structure is a very important aspect. Therefore, much research is done on the application of 'new' materials in structures to increase the durability. Two examples of such materials are high-strength concrete and composite. Both materials are very durable, they require little maintenance and have a good service life. A composite structure is in initial cost plus maintenance more expensive than a steel structure and is less suitable for large water level differences. In this thesis, the feasibility of a lock gate in high strength concrete is investigated for the New Sea Lock IJmuiden, as an alternative for steel lock gate.

First is in the research examined what the concerns are in the design of a concrete lock gate. The main concern is the brittleness of the material. The concrete lock gate is therefore less resistant to collisions. Prior to the study of different variants, is investigated whether it is possible that the concrete lock gate can take the governing collision force. By laying additional reinforcement in the back wall of the lock gate, it is possible that the lock gate can hold the collision force by plastically deforming.

Thereafter, six variants were developed using the morphological box method. From the multi-criteria analysis, the floating variant turned out to be most favorable. This is mainly due to the high durability of the variant, because the main serviceable parts are above water.

The floating lock gate will open and close with a horizontal translational motion, during opening and closing the lock gate floats. In closed position, the lock gate is sunk on the bottom by adding ballast water to the buoyancy chamber. On the sides the lock gate is sealed against vertical support. Using a locomotive operating system in the lock head, the lock gate is opened and closed.

In the elaboration of the floating variant, the vertical stability and the floating stability are important aspects during the design. The volume of the buoyancy chamber and the width of the lock gate are determined so that the lock gate can float and is stable during floating when the gate is in operational phase, when the gate is floated out for maintenance reasons and when the gate is floated out after a collision. The dimensions and material quantities of the lock gate are determined by an iterative process because they are all interdependent.

Finally, the construction and maintenance costs of the concrete lock gate are determined and compared to the construction and maintenance costs of the steel lock gate. A important difference in the costs of the steel lock gate and the concrete lock gate, is the filling and emptying system. The concrete lock gate has culverts and the steel lock gate has valves in the gate, which are cheaper. The construction costs of the concrete lock gate including gate operating mechanisms are approximately €9,2 million and the maintenance cost €279.000 per year. It turned out that there is almost no difference in the cost of a concrete lock gate made of concrete in strength class C55/67 and C100/115. The

construction costs of the steel lock gate are € 19,1 million and the maintenance cost €810.000 per year. Over a lifetime of 100 years, the cost of the concrete lock gate is much lower than a steel lock gate. The concrete lock gate is therefore a good alternative to a steel lock gate.

## INHOUDSOPGAVE

Colofon .....	i
Voorwoord.....	.ii
Samenvatting.....	iii
Summary .....	.v
Inhoudsopgave.....	vii
Figurenlijst.....	xi
Tabellenlijst.....	xiv
1. Inleiding .....	1
1.1 Bestaande grote sluizen.....	1
1.2 Materialen gebruikt voor sluisdeuren .....	6
1.3 "Nieuwe" Materialen voor sluisdeuren .....	7
1.4 Vergelijking van verschillende materialen .....	12
1.5 Innovatief.....	13
1.6 Vraagstelling.....	14
1.7 Aandachtspunten.....	14
1.8 Onderzoeksvragen .....	17
1.9 Afbakening .....	17
2. Sluizen.....	19
2.1 Algemene lay-out en basis werking .....	19
2.2 Sluisdeuren .....	20
2.3 Vul- en ledigsysteem .....	23
3. Hogesterktebeton.....	25
3.1 Inleiding.....	25
3.2 Uitvoeringsaspecten.....	28
3.3 Duurzaamheid eigenschappen.....	29

3.4 Mechanische eigenschappen .....	30
4. Referentiesituatie.....	37
4.1 Achtergrond Nieuwe Zeesluis IJmuiden .....	37
4.2 Randvoorwaarden .....	38
4.3 Functionele eisen.....	43
5. Belastingen .....	46
5.1 Belastinggevallen.....	46
5.2 Belastingsituaties .....	51
6. Aannames .....	53
6.1 horizontaal transferende sluisdeur .....	53
6.2 Oplegging .....	53
6.3 Geleidingsysteem.....	54
6.4 Materiaal .....	55
6.5 Minimale dikte van een wand en vloer.....	57
6.6 Bouwlocatie .....	58
6.7 Vul- en ledigsysteem .....	59
7. Aanvaring .....	60
7.1 Inleiding.....	60
7.2 Aannames .....	61
7.3 Aanvaarbelasting volgens de Eurocode .....	64
7.4 Berekening energieopname door vorming plastisch scharnier .....	66
7.5 Resultaten.....	78
7.6 Kleiner aanvaargebied .....	80
7.7 Reserve capaciteit .....	81
7.8 Conclusie .....	83
7.9 Grafieken.....	84
8. Variant ontwikkeling.....	90

8.1 Morfologie box.....	90
8.2 Gereduceerde morfologische box.....	91
8.3 Varianten.....	94
9. Multi Criteria Analyse.....	106
9.1 Criteria .....	106
9.2 Gewichtsfactoren.....	107
9.3 Beoordeling varianten.....	107
9.4 Conclusie.....	111
10. Uitwerking Drijvende Sluisdeur.....	112
10.1 Beschrijving variant .....	112
10.2 Drijven.....	112
10.3 Oplegging, afdichting en geleiding .....	118
10.4 Bewegingsmechanisme.....	120
10.5 Reserve sluisdeur .....	121
11. Dimensies sluisdeur .....	125
11.1 Iteratiestappen .....	125
11.2 Afmeting drijfkist en breedte sluisdeur .....	126
11.3 Maatgevende belasting op wanden en vloeren.....	137
11.4 Afstand tussen vloeren.....	139
11.5 Dwarskracht in wanden en vloeren.....	142
11.6 Dikte vloeren en wanden .....	144
11.7 Uitvoeringsaspecten.....	154
12. Kosten .....	155
12.1 Kosten stalen sluisdeur.....	155
12.2 Kosten betonnen sluisdeur.....	156
12.3 Onderhoudskosten.....	162
12.4 Onderlinge Vergelijking op Kosten .....	163

13. Conclusies en aanbevelingen.....	164
13.1 Conclusies.....	164
13.2 Aanbevelingen .....	165
14. Bibliografie.....	166
A. Berekening van de Waterdruk ten gevolge va golven .....	170
B. Afstand vloeren, 6 vloeren .....	172
C. Afstand vloeren, 7 vloeren .....	181
D. Berekening Dwarskracht, veld- en supportmoment in wanden en vloeren .....	193
E. Dikte vloeren en wanden, bij toepassing van betonsterkteklasse C55/67 .....	203
F. Dikte vloeren en wanden, bij toepassing van betonsterkteklasse C100/115.....	217
G. Benodigde dwarskrachtwapening volgens Eurocode en NEN 6720 .....	233
H. Benodigde aanvaarwapening.....	238
I. Benodigde wapening bij toepassing van betonsterkteklasse C55/67 .....	241
J. Opsomming wapening bij toepassing betonsterkteklasse C55/67 .....	260
K. Benodigde wapening bij toepassing van betonsterkteklasse C100/115.....	265
L. Opsomming wapening bij toepassing betonsterkteklasse C100/115 .....	286
M. Stabiliteit van sluisdeur.....	291
N. Berekening voorspanning .....	302
O. Berekening energie dissipatie wanden.....	313

# FIGURENLIJST

---

Figuur 1-1 Tekening van een roldeur met lucht-/ballastkisten (2) .....	2
Figuur 1-2 Links: Impressie van de roldeur, Rechts: Bouw van een roldeur op de constructiewerkplaats (2) .....	3
Figuur 1-3 verschil nieuwe en oude sluiscomplex panamasluizen (1) .....	3
Figuur 1-4 Boven: deurgeleiding via twee onder-rolwagens, Onder: Kruiwagentype (3) .....	4
Figuur 1-5 Links: Roldeur ontwerp, Rechts: Horizontale verplaatsingen van de halve sluisdeur (1) .....	5
Figuur 1-6 Impressie Kattendijksluis (4) .....	7
Figuur 1-7 Links: composieten puntdeur, Rechts: composieten verticale booghefdeur (1) .....	9
Figuur 1-8 Rechts: ontwerp van de sluisdeur (5), links: plaatsing van de sluisdeur (6) .....	10
Figuur 1-9 Wapening in de sluisdeur (5) .....	11
Figuur 1-10 Integrale kosten vergelijking bij vervangen stalen schuiven in de Oosterscheldekering (12) .....	13
Figuur 1-11 Diagram met aandachtspunten ontwerp .....	16
Figuur 2-1 Typische lay-out van een navigatiesluis (13) .....	19
Figuur 2-2 Puntdeuren van de Kleine Sluis in IJmuiden (14) .....	20
Figuur 2-3 Prins Bernardsluis (15) .....	22
Figuur 2-4 Toepassingsgebied per sluisdeur type (16) .....	23
Figuur 2-5 Voorbeeld van sluisdeur met deuropeningen (13) .....	24
Figuur 2-6 sluis met duikers in de sluiskolk wand (13) .....	24
Figuur 3-1 Ontwikkeling hogesterktebeton (17) .....	25
Figuur 3-2 Links: Schematische weergave van de spanning-rekrelatie, Midden: vereenvoudiging naar parabolischrechthoekdiagram, Rechts: vereenvoudiging naar bi-lineair spanning-rekrelatie .....	26
Figuur 3-3 a: krachtsafdracht, b, c: bezijkmechanisme conventioneel beton (20) .....	27
Figuur 3-4: Doorsneden van verschillende betonsoorten (17) .....	27
Figuur 3-5 Chloride indringing (17) .....	30
Figuur 3-6 Typische spanning rek diagram van hoog, gemiddeld en conventioneel beton (21) .....	31
Figuur 3-7 Spanning-rek diagram van beton (23) .....	31
Figuur 3-8 Waarden voor de nominale onbelemmerde uitdrogingskrimpverkorting (%) .....	34
Figuur 3-9 Schematische weergave van kruip in beton [CAE Nederland B.V.] .....	34
Figuur 3-10 Methode voor de bepaling van de kruipcoëfficiënt (23) .....	35
Figuur 4-1 Zeesluizencomplex en omgeving (27) .....	37
Figuur 4-2 Bestemmingsplan (29) .....	39
Figuur 4-3 Inpassingsgebied Nieuwe Zeesluis (30) .....	39
Figuur 4-4 Maatgevend verval, links: positief, rechts: negatief .....	40
Figuur 4-5 Maatgevend verval bij schutten, Links: positief, Rechts: negatief .....	41
Figuur 4-6 Sonderingen bij sluizencomplex IJmuiden (32) .....	42
Figuur 5-1 Waterdruk bij maximaal positief verval .....	47
Figuur 5-2 Waterdruk bij maximaal negatief verval .....	47
Figuur 5-3 Waterdruk bij maximaal positief verval tijdens schutten .....	47
Figuur 5-4 Waterdruk bij maximaal negatief verval tijdens schutten .....	48
Figuur 5-5 Golfdrukken volgens de methode van Goda (36) .....	48
Figuur 5-6 Golfdruk bij maximaal positief verval .....	49
Figuur 5-7 Golfdruk bij maximaal positief en negatief verval tijdens schutten .....	50
Figuur 6-1 Hydrovoet (rechts); schematische weergave hydrofender (39) .....	55
Figuur 6-2 Platte duct en ankerplaat van Dywidag (41) .....	56
Figuur 6-3 Kopdeuvelstaven (42) .....	57
Figuur 6-4 Minimale dikte van een plaat .....	58
Figuur 7-1 Mogelijkheden om de kinetische energie van het schip te dissiperen .....	60
Figuur 7-2 Vertraging schip in sluiskolk (44) .....	61
Figuur 7-3 Zijde van aanvaring van de sluisdeur .....	62
Figuur 7-4 Aanvaarsnelheid gekoppeld aan de kans van optreden, vb. sluis Sambeek (14) .....	63
Figuur 7-5 Relatieve sterkte toename bij impactbelasting (47) .....	64
Figuur 7-6 Bots oppervlakten bij aanvaring (45) .....	66
Figuur 7-7 Eenvoudige schematisatie aanvaring .....	66
Figuur 7-8 Schematisatie aanvaring .....	67
Figuur 7-9 Plastische krommingen van een statisch bepaald opgelegde ligger (48) .....	68
Figuur 7-10 Schematisering sluisdeur .....	69
Figuur 7-11 Hoogte drukzone .....	70
Figuur 7-12 Rekdiagram .....	71
Figuur 7-13 Rekdiagram .....	73

Figuur 7-14 Moment bij een eenheidsbelasting .....	75
Figuur 7-15 Berekening van de plastische lengte .....	76
Figuur 7-16 Excel sheet, berekening van plastische rotatie .....	77
Figuur 7-17 Schematisatie doorsnede sluisdeur bij bezwijken wand .....	78
Figuur 7-18 Vloeilijnen vierzijdig ingeklemde plaat (49) .....	81
Figuur 7-19 Bepalen plastische lengte .....	82
Figuur 7-20 Legenda bij de grafieken in 7.9 .....	84
Figuur 8-1 Gekromde deur 1 .....	95
Figuur 8-2 Mogelijke vormen van de oplegging bij een gekromde sluisdeur (30) .....	96
Figuur 8-3 Mogelijke verbinding tussen twee deuren in het midden .....	96
Figuur 8-4 Vereenvoudigd krachtsafdracht schema 1.1.1 Gekromde deur 1 .....	97
Figuur 8-5 Gekromde deur 2 .....	98
Figuur 8-6 Benodigde breedte sluishoofd varianten .....	98
Figuur 8-7 Vereenvoudigd krachtsafdracht schema gekromde deur 2 .....	98
Figuur 8-8 Gekromde buigligger .....	99
Figuur 8-9 Afdracht horizontale kracht op sluishoofd dubbel gekromde buigligger .....	100
Figuur 8-10 Dwarsdoorsnede roldeur met verende onderrand (14) .....	100
Figuur 8-11 Afdichting onderzijde dubbel gekromde buigligger .....	101
Figuur 8-12 Dubbel gekromde deur .....	102
Figuur 8-13 Afdracht horizontale kracht op sluishoofd dubbel gekromde deur .....	102
Figuur 8-14 Vereenvoudigd krachtsafdracht schema dubbel gekromde deur .....	103
Figuur 8-15 Verschil in totale lengte van de sluis van de eerste vier varianten .....	103
Figuur 8-16 Speling drijvende sluisdeur in de drempel tijdens openen en sluiten .....	104
Figuur 8-17 Metacentrische hoogte (36) .....	104
Figuur 8-18 Drijvende deur/Glijdeur .....	105
Figuur 9-1 Uitkomst Multi Criteria Analyse .....	111
Figuur 10-1 Drijvende situaties sluisdeur .....	112
Figuur 10-2 Volume ballast in drie situatie: in bedrijf, tijdens uitvaren en bij een aanvaring .....	113
Figuur 10-3 Verticaal evenwicht sluisdeur tijdens drijven .....	114
Figuur 10-4 Opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur .....	115
Figuur 10-5 Indeling compartimenten .....	116
Figuur 10-6 Schatting afmetingen bulbsteven van de Emma Maersk (52) .....	117
Figuur 10-7 Schatting van de afmetingen van de bulbsteven van de Emma Maersk .....	117
Figuur 10-8 Geleiding onderkant van de deur .....	119
Figuur 10-9 Positie van de opleggingen .....	119
Figuur 10-10 Principe werking pennenbaan .....	120
Figuur 10-11 Drijvende sluisdeur met pennenbaan .....	121
Figuur 10-12 Maatgevende situaties sluisdeur .....	122
Figuur 10-13 Maximale vervallen .....	122
Figuur 10-14 Inpassing schetsontwerp sluisvariant 70m breedte (30) .....	124
Figuur 11-1 Iteratiestappen om de dimensies van de sluisdeur te bepalen .....	125
Figuur 11-2 Doorsnede sluisdeur .....	126
Figuur 11-3 Invloed van slingerschot op de stabiliteit (36) .....	129
Figuur 11-4 Invloed slingerschot op metacentrische hoogte .....	129
Figuur 11-5 Sluisdeur met slingerschot .....	130
Figuur 11-6 Bepalen metacentrische hoogte .....	131
Figuur 11-7 Minimale breedte sluisdeur .....	132
Figuur 11-8 Lay-out sluisdeur, met ruimte tussen onderste vloeren open .....	132
Figuur 11-9 Opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur, met open ruimte onder de drijfkist .....	133
Figuur 11-10 Bepalen metacentrische hoogte .....	134
Figuur 11-11 Benodigde breedte sluisdeur .....	135
Figuur 11-12 De diepgang behorende bij de uiteindelijke dimensies .....	136
Figuur 11-13 Maatgevende belasting op de wanden .....	138
Figuur 11-14 indeling vloeren wanden, met 6 vloeren .....	139
Figuur 11-15 Tabel voor berekening moment en dwarskracht van een vierzijdig ingeklemde plaat, uniform belast en driehoeksbelasting .....	141
Figuur 11-16 Dwarskracht in wanden per strekende meter .....	143
Figuur 11-17 Hoogte van de drijfkist (m) uitgezet tegen de breedte van de sluisdeur (m), links: C55/67, Rechts: C100/115146 .....	146
Figuur 11-18 Dwarskracht in de wanden en de $V_{Rd,max}$ bij $21,8^\circ$ en $45^\circ$ .....	146
Figuur 11-19 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C55/67 en $\theta_{vbc} = 45^\circ$ .....	148
Figuur 11-20 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C55/67 en $\theta_{vbc}=30^\circ$ .....	148
Figuur 11-21 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C100/115 en $\theta_{vbc}=45^\circ$ .....	148

Figuur 11-22 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C100/115 en $\theta_{vbc}=30^\circ$ .....	148
Figuur 11-23 Wapeningsverdeling in Wand (links) en vloer (rechts).....	149
Figuur 11-24 Schematische weergave dwarskrachtwapening in de wand.....	150
Figuur 11-25 Bepalen afstand waarover dwarskrachtwapening nodig is .....	151
Figuur 12-1 Integrale kosten betonnen sluisdeur en stalen sluisdeur .....	163

# TABELLENLIJST

---

Tabel 1-1 Grote sluizen, eerst gesorteerd op breedte vervolgens op lengte (1).....	1
Tabel 2-1 Keuze sluisdeur als functie van het type sluisdeur en de deurbreedte (14).....	22
Tabel 3-1 Materiaaleigenschappen beton, in N/mm <sup>2</sup> .....	26
Tabel 4-1 Maatgevend positief en negatief verval (frequentie van 10 <sup>-4</sup> ) .....	40
Tabel 4-2 Waterstand Noordzee-zijde (m + NAP) .....	40
Tabel 4-3 Maatgevend positief en negatief verval bij schutten .....	41
Tabel 4-4 Uurgemiddelde windsnelheden (m/s) voor verschillende windrichtingen.....	41
Tabel 4-5 Grondeigenschappen.....	42
Tabel 4-6 Maatgevende schepen.....	43
Tabel 4-7 Berekening ontwerpwaterstand keerdeuren (m + NAP).....	43
Tabel 4-8 Eisen ten behoeve van spuicapaciteit.....	44
Tabel 5-1 Belastingfactoren.....	52
Tabel 5-2 Belastingcombinaties in UGT .....	52
Tabel 6-1 Afmetingen van de platte duct en ankerplaat (41).....	56
Tabel 6-2 Partiële factoren voor materialen voor uiterste grenstoestanden (23).....	57
Tabel 6-3 Waarde van de minimale dekking, met betrekking tot de duurzaamheid voor betonstaal .....	58
Tabel 7-1 Gegevens beton, gebruikt in de berekening .....	69
Tabel 7-2 Resultaten smaller aanvaaroppervlak.....	81
Tabel 7-3 Lengte en rotatie van elke vloeilijn.....	82
Tabel 7-4 Energie dissipatie per wandgedeelte.....	83
Tabel 8-1 Morfologische box (de afbeeldingen zijn schematische afbeeldingen).....	92
Tabel 8-2 Gereduceerde morfologische box (de afbeeldingen zijn schematische afbeeldingen) .....	93
Tabel 9-1 Ontwerpcriteria voor sluisdeuren .....	106
Tabel 9-2 Bepaling gewichtsfactor.....	107
Tabel 9-3 Beoordeling van verschillende varianten .....	110
Tabel 10-1 Benodigde diepgangen als sluisdeur in bedrijf is.....	113
Tabel 10-2 Maximale diepgang bij uitdrijven sluisdeur .....	113
Tabel 11-1 Diktes van vloeren en wanden.....	145
Tabel 11-2 Hart op hart afstand wapening.....	151
Tabel 11-3 Benodigde hoeveelheid voorspanning .....	153
Tabel 11-4 Uiteindelijke diktes wanden en vloeren.....	153
Tabel 12-1 Kosten stalen sluisdeur (30).....	156
Tabel 12-2 Benodigde hoeveelheid wapening en voorspanning bij toepassing van sterkteklaas c55/67 .....	156
Tabel 12-3 Benodigde hoeveelheid wapening en voorspanning bij toepassing van sterkteklaas c100/115 .....	157
Tabel 12-4 Stichtingskosten betonnen sluisdeur in sterkteklaas C55/67, zonder bewegingswerk en vul- en ledigingssysteem.....	158
Tabel 12-5 Stichtingskosten betonnen sluisdeur in sterkteklaas c100/115, zonder bewegingswerk en vul- en ledigingssysteem.....	159
Tabel 12-6 Stichtingskosten stalen en betonnen sluisdeur.....	162
Tabel 12-7 Onderhoudskosten van de stalen sluisdeur .....	162
Tabel 12-8 Onderhoudskosten Stalen en betonnen sluisdeur .....	162

# 1. INLEIDING

Dit onderzoek richt zich op sluizen met een relatief grote breedte. Dit zijn sluizen met een breedte van ongeveer zestig meter. Een voorbeeld van een dergelijke sluis is de Noordersluis te IJmuiden, zie hoofdstuk 1.1.1. Deze afbakening wordt gedaan omdat voor grote sluisdeuren een aparte ontwerpstudie gedaan moet worden omdat deze sluizen vaak een ander type sluisdeur hebben dan een kleine sluis. Een ontwerp van kleine sluisdeuren kan daarom niet worden geëxtrapoleerd tot een ontwerp van grote sluisdeuren.

In het hoofdstuk 2 is de basiskennis over sluizen gegeven en een korte beschrijving van de werking van sluizen is opgenomen. In dit hoofdstuk is een overzicht van grote sluizen gegeven, en de algemene lay-out van grote sluisdeuren is onderzocht. Vervolgens is gekeken welke materialen gebruikt worden voor sluizen en welke voor- en nadelen zij hebben. Vervolgens wordt aangegeven welke innovaties er zijn op het gebied van materiaalgebruik voor sluisdeuren, en welke mogelijke alternatieve materialen voor de sluisdeur beschikbaar zijn. Op basis hiervan is de vraagstelling geformuleerd en zijn de onderzoeks vragen van het onderzoek beschreven.

## 1.1 Bestaande grote sluizen

Wereldwijd zijn er veel sluizen om transport via schepen mogelijk te maken. Het aantal grote sluizen is echter nog beperkt. In Tabel 1-1 is een lijst gegeven van de twaalf grootste sluizen ter wereld, dit zijn de sluizen met een breedte groter dan vijftig meter. Wat opvalt is dat deze sluizen allemaal stalen roldeuren hebben. Hieronder zijn een tweetal van deze sluizen kort beschreven, hierbij zal vooral naar de constructie van de sluisdeur gekeken worden.

*Tabel 1-1 Grote sluizen, eerst gesorteerd op breedte vervolgens op lengte (1)*

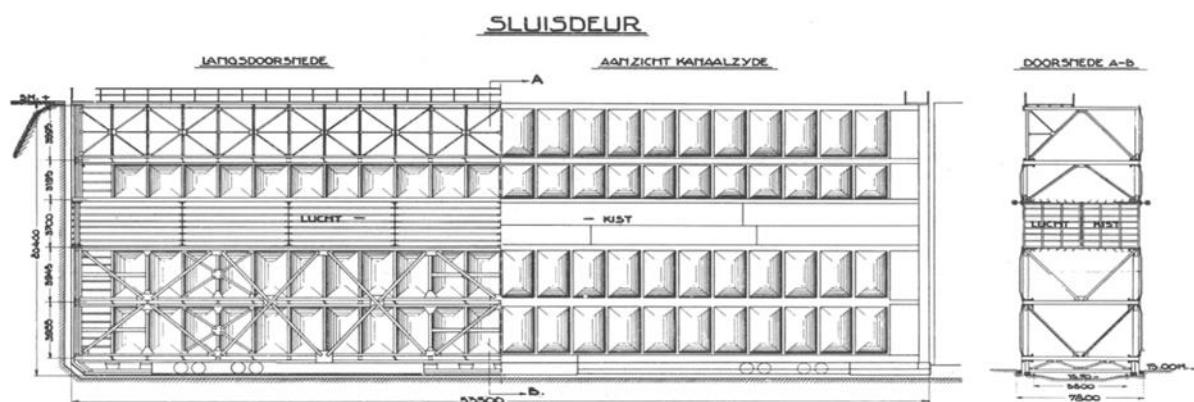
	sluis	waar	jaar	lengte	breedte	diepte	materiaal	deur type
1	Kallosluis	België	1979	360	50	11,5/17	staal	roldeuren
2	Noordersluis	Nederland	1929	400	50	15	staal	roldeuren
3	kallo sea lock	België	2006	350	50	11.5	staal	roldeuren
4	Charles de Gaulle	Frankrijk	1970	364	50	13.5	staal	roldeuren
5	Kaiserschleuse	Duitsland	2011	305	55	8.8	staal	roldeuren
6	Panama Canal 3rd lock lane	Panama	≈2014	427-488	55	18.3	staal	roldeuren
7	Zandvlietsluis	België	1979	500	57	12,6/17,8	staal	roldeuren
8	Pierre Vandammesluis, Zeebrugge	België	1985	500	57	15/18,5	staal	roldeuren
9	Wilhemshaven	Duitsland	1972	390	57	11.7	staal	roldeuren
10	Francois I, le havre	Frankrijk	1972	401	67	14.5	staal	roldeuren
11	Berendrechtssluis	België	1989	500	68	12,6/17,8	staal	roldeuren
12	Deurganckdoksluis	België	≈2016	500	68	17.8	staal	roldeuren

### 1.1.1 Noordersluis

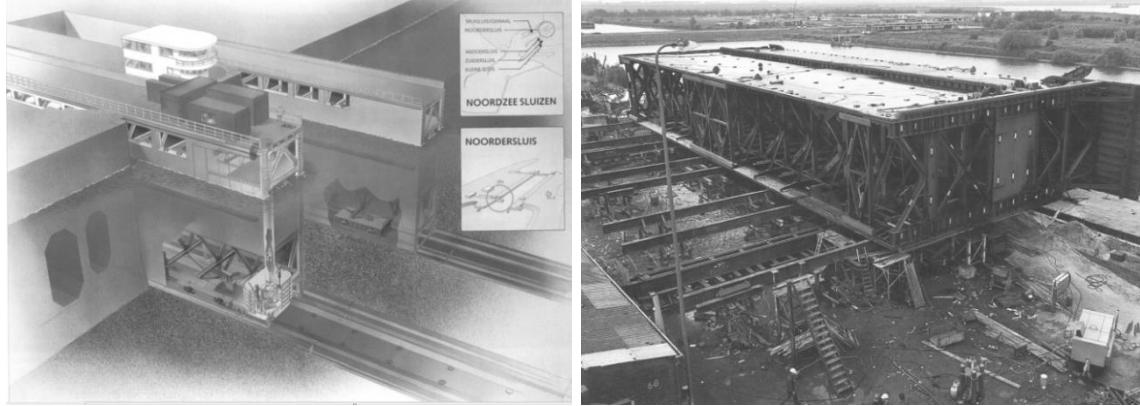
De Noordersluis is momenteel de grootste sluis in het sluizencomplex te IJmuiden, en het is ook de oudste van de in Tabel 1-1 genoemde grote sluizen. Begin twintigste eeuw is onderzoek gedaan naar een nieuwe grotere sluis om de passage van de steeds groter wordende schepen mogelijk te maken in IJmuiden en zo de concurrentiepositie van de Amsterdamse haven te handhaven. Uit dit onderzoek bleek dat er een nieuwe sluis moest komen met een lengte van 400 meter, 15 meter diep en 50 meter breed. In 1929 is de Noordersluis in gebruik genomen. Als afsluitmiddel is gekozen voor stalen roldeuren en als vul- ledigsysteem voor omloopriolen. In Figuur 1-1 en Figuur 1-2 zijn een aantal afbeeldingen van de Noordersluis te zien.

De stalen roldeuren zijn gebouwd in een gemeentelijk dok van Rotterdam. De deuren hebben een lengte van 53,5 meter, een breedte van 7,3 meter en zijn 20 meter hoog. Het totale gewicht van de sluisdeur is ongeveer 1.175 ton. De deuren werden met sleepboten in horizontale stand naar IJmuiden gesleept waar de deuren werden gekanteld en op hun plaats gebracht. Met behulp van waterdichte luchtkisten halverwege de hoogte van de sluisdeur kan de sluisdeur drijven en wordt de druk op de wielen en de rails verlicht. De maximale opdrijvende kracht is 1.450 ton zodat de sluisdeur blijft drijven. Het gewicht van de roldeur in bedrijf is ongeveer 80 ton. Drie jaar na opening van de sluis zijn alle railbanen die de roldeur geleiden vervangen omdat de liplassen tussen de verschillende railstukken door de grote horizontale belasting het begaven. Ook was de rails aan sterke slijtage onderhevig. Dit was blijkbaar één van de kwetsbare onderdelen.

De hoofdconstructie van sluisdeur is opgebouwd uit een aantal regels die met de uiteinden aan de beide eindstijlen zijn bevestigd. De constructiehoogte van de regels is groot waardoor het aantal beperkt is en deze uitgevoerd kunnen worden als vakwerk, dit zorgt voor besparing van materiaal en dus van gewicht. Alleen de liggers die aan de luchtkisten grenzen zijn volwandig uitgevoerd. Over geheel de twee waterkerende zijden is beplating aangebracht. De roldeuren staan op twee losse rolwagens. De oplegging van de sluisdeur op de wagens vindt plaats via twee rolopleggingen per wagen, waarvan de as in de lengterichting van de sluisdeur loopt. Door de roloplegging kan de sluisdeur tegen de aanslag worden geduwd. (2)



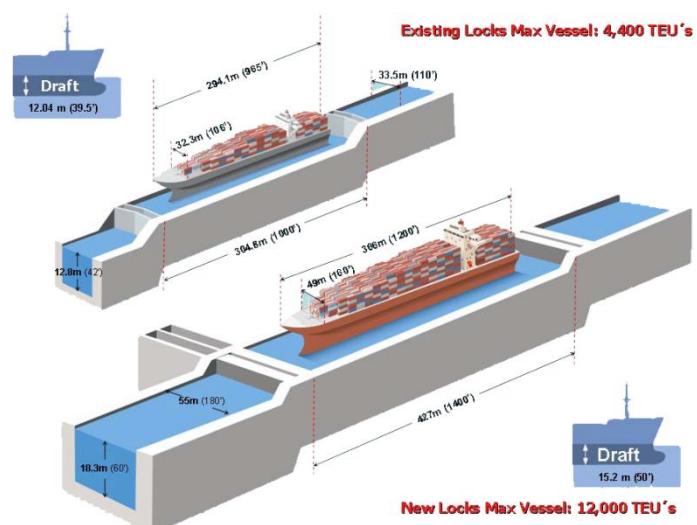
Figuur 1-1 Tekening van een roldeur met lucht-/ballastkisten (2)



Figuur 1-2 Links: Impressie van de roldeur, Rechts: Bouw van een roldeur op de constructiewerkplaats (2)

### 1.1.2 Panama

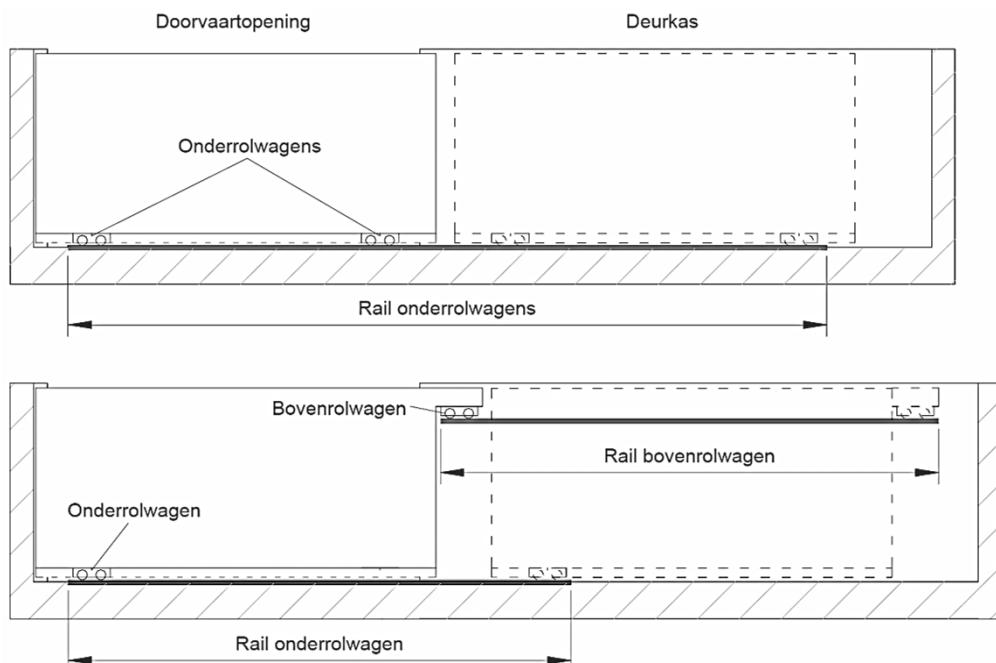
Het Panamakanaal wordt uitgebreid met nieuwe grotere sluizen om de steeds grotere schepen, zie Figuur 1-3, en de toenemende hoeveelheid containerverkeer te laten passeren. De sluizen moeten in 2014 in gebruik genomen worden. Voor dit sluizencomplex zijn verschillende deurtypen onderzocht, waaronder segmentdeuren, puntdeuren en roldeuren. Echter het enige type sluisdeur dat als betrouwbaar en als 'bewezen techniek' wordt beschouwd is de roldeur. Een andere belangrijke reden voor de keuze voor een roldeur is het onderhoud van de sluisdeur. De deurkas van een roldeur kan als drooggdok gebruikt worden, zodat de sluisdeur snel en eenvoudig onderzocht en onderhouden kan worden. Het onderhoud aan de sluisdeur moet zo kort mogelijk zijn om de beschikbaarheid van de sluis zo hoog mogelijk te houden, en zo de inkomsten zo groot mogelijk te houden. Bij het ontwerp van de Panamasluisdeuren is veel kennis gehaald uit huidige roldeurontwerpen in België en Duitsland, waar de laatste jaren nieuwe grote sluizen zijn gebouwd. De laatste decennia is het ontwerp van de roldeur sterk verbeterd door de moderne methode van ontwerpen en de verbeterde techniek van lassen. (1)



Figuur 1-3 verschil nieuwe en oude sluiscomplex panamasluizen (1)

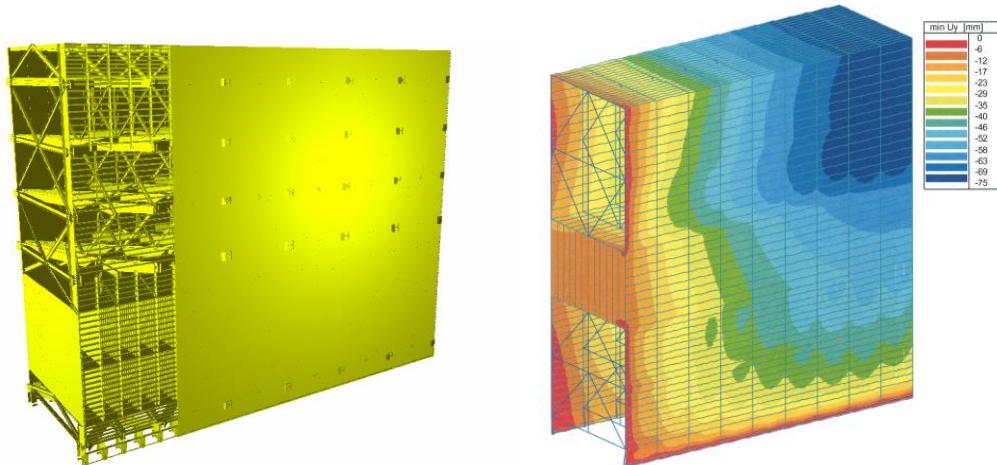
Het ontwerp van de panamasluisdeur is een ruimtelijk vakwerk welke zijn volledige draagkracht benut. In Figuur 1-5 is het ontwerp van de roldeur te zien en een figuur met

de berekende verplaatsingen, die laat zien dat bovenin in het midden de grootste verplaatsingen optreden. De 'intermediate gates' van de panamasluis zijn 31 meter hoog, 10 meter breed en wegen 2550 ton. De luchtkisten zijn 6,5 meter hoog en bevinden zich ongeveer in het midden van de sluisdeur en verminderen het operationeel gewicht van de sluisdeur tot zeven procent van het echte gewicht. Het gewicht per lateraal oppervlak is 1450 kg/m<sup>2</sup>, bij de noordersluis is dit een stuk minder, ongeveer 1100 kg/m<sup>2</sup>. Dit grotere gewicht van de panamasluisdeuren wordt veroorzaakt door de grotere hoogte van de sluisdeur en door de grotere belasting op de constructie waardoor een zwaardere constructie nodig is.



Figuur 1-4 Boven: deurgeleiding via twee onder-rolwagens, Onder: Kruiwagentype (3)

In tegenstelling tot de Noordersluis is bij deze sluis het kruiwagen-type roldeur toegepast, dat wil zeggen dat de sluisdeur gesteund wordt door één rolwagen op een rail op de bodem en één rolwagen op een rail boven het water, zie Figuur 1-4. Bij de toepassing van twee onder-rolwagens wordt de verticale belasting evenredig verdeeld over de twee rolwagens, dit is bij het kruiwagentype niet het geval. Door deze scheve oplegging ontstaat een extra moment in de sluisdeur. Een voordeel van het kruiwagen-type roldeur is dat er minder rails onderwater nodig zijn omdat er maar één onder-rolwagen is. Dit is gunstig met betrekking tot de onderhoudskosten.



Figuur 1-5 Links: Roldeur ontwerp, Rechts: Horizontale verplaatsingen van de halve sluisdeur (1)

### 1.1.3 Ontwerp roldeur

In de vorige twee sub paragrafen zijn twee voorbeelden van grote stalen rolsluisdeuren beschreven. Bij stalen rolsluisdeuren is het belangrijk dat tijdens de conceptfase de constructie al in detail bestudeerd wordt. Onder andere de breedte van de sluisdeur moet met een redelijke nauwkeurigheid bepaald worden. De breedte van de sluisdeur heeft een grote invloed op de sluis lay-out en op veel operationele onderdelen zoals de bewegingswerken. Ook de grootte en plaats van de luchtkisten moet met een redelijke nauwkeurigheid bepaald worden. Deze positie en grootte bepalen de mogelijke posities van de regels. De positie van de boven- en onderkant van de luchtkisten staat vast met inachtneming van het minimale schutpeil en het feit of de sluisdeur moet kunnen drijven. Als kleppen toegepast worden in de sluisdeur moet de onderkant van de luchtkisten verhoogd worden. Ook de positie van de horizontale liggers en de verticale stijlen worden vastgesteld, evenals de wijze waarop de afschuifkrachten worden afgedragen.

Met een lokale analyse wordt de dikte van de beplating geschat en een geschikt bovendek wordt ontworpen voor de verkeersbelastingen op het dek. Dan wordt een 2D-balkenrooster model van de deurconstructie gemaakt, geïntegreerd over de lengte. Hiermee worden de geschatte spanningen gecontroleerd. Dit is vooral belangrijk voor het ontwerpen van de langsverstijvers en voor het ontwerpen van de op druk belaste onderdelen die op knik getoetst worden. Deze twee onderdelen kunnen een aanzienlijke invloed hebben op de uiteindelijke verdeling van het gewicht, waarmee de hoogte van de luchtkisten gecontroleerd kan worden evenals de reactiekrachten op de oplegging en de rotatiestabiliteit tijdens drijven. Na het conceptontwerp wordt het ontwerp verder geoptimaliseerd. De afmetingen en positie van alle constructieonderdelen worden nauwkeuriger bepaald. Dit wordt onder andere gedaan met behulp van geavanceerde 3D-modellen.

#### *Kenmerken grote sluisdeuren*

Een van de kenmerken van een grote sluisdeur is dat het allemaal roldeuren zijn. De roldeur bestaat uit stalen plaatwerk aan de voor- en achterzijde die zorgen voor de

waterkerende functie. Horizontale liggers hiertussen zorgen voor de koppeling tussen de wanden en dragen de belasting af naar de eindstijlen. De stijlen van de wanden vormen samen met de verstijvingen van de horizontale liggers een raamwerk. Deze raamwerken zorgen voor de torsiestijfheid van de sluisdeur. De roldeuren zijn meestal driezijdig opgelegd, op de zijkanten en op de bodem.

De breedte van de roldeur varieert ongeveer tussen de 6 - 10 meter. Deze wordt enerzijds bepaald door de benodigde stijfheid en sterkte voor de belasting tijdens keren en is anderzijds afhankelijk van de minimale breedte van de rolwagens. De roldeur wordt gedragen door deze rolwagens en langs een geleiderail kan de sluisdeur met behulp van kabels en een aandrijftrommel worden geopend en gesloten.

## 1.2 Materialen gebruikt voor sluisdeuren

Voor sluisdeuren worden verschillende materialen toegepast. Voor het ontwerp van een sluisdeur wordt meestal staal gebruikt en soms nog hout. In de eerste paragraaf is staal als materiaal voor sluisdeuren besproken. Daarna is hout als constructiemateriaal besproken. Wat zijn de voordelen en nadelen van het materiaal als toepassing voor sluisdeuren.

### 1.2.1 Staal

Hieronder zijn een aantal voor- en nadelen van een stalen roldeur besproken. Wat zijn voordelen van het gebruik van staal als constructie materiaal voor grote sluisdeuren en wat zijn de nadelen. Soms wordt een voordeel of nadeel vergeleken met het ontwerp van een composiet sluisdeur of hogesterktebeton sluisdeur. Deze materialen voor sluisdeuren zijn in de volgende twee paragrafen beschreven.

#### *Voordelen en nadelen*

Voordelen van een stalen roldeur zijn:

- *Het is een 'bewezen' concept voor grote sluisdeuren, dus bij het ontwerp kan (af)gekeken worden naar bestaande sluisdeuren;*
- *Relatief lichte constructie;*
- *Lichte schade aan de stalen sluisdeur is relatief eenvoudig te repareren/vervangen, bijvoorbeeld een stuk plaatwerk kan eruit gesneden worden en een nieuw stuk plaatwerk terug gelast;*
- *Met staal kan slank geconstrueerd worden;*
- *De constructie kan eenvoudig uit losse onderdelen geassembleerd worden;*

Nadelen van een stalen roldeur zijn:

- *Ongeveer elke 15 jaar moet de constructie gestraald en gecoat worden, wat leidt tot hoge onderhoudskosten. Als de sluis niet met dubbele deuren is uitgerust, dan is gedurende het onderhoud de sluis niet beschikbaar.*

### 1.2.2 Hout

In het verleden werden kleine sluisdeuren altijd van hout gemaakt. Hout wordt nog steeds veel gebruikt in kleine sluisdeuren maar vooral voor sluizen voor de recreatievaart. Houten sluisdeuren zijn meestal uitgevoerd als puntdeuren. Maar tegenwoordig wordt vooral staal gebruikt voor sluisdeuren. Door de verbeteringen van lasttechnieken kunnen tegenwoordig steeds grotere sluisdeuren gemaakt worden in staal. Hout wordt nog veel gebruikt in ontwikkelingslanden, vanwege de kostenbesparing.

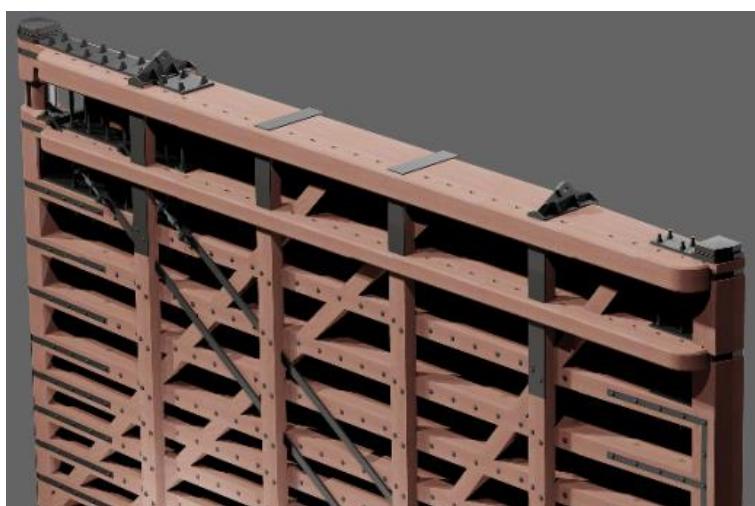
#### *Voordelen en nadelen*

Aantal voordelen van een houten sluisdeur zijn:

- *Milieu vriendelijk;*
- *Esthetisch;*
- *Relatief goedkoop in verhouding tot andere constructiematerialen;*
- *Relatief licht van gewicht;*
- *Het materiaal is eenvoudig combineerbaar met bijna elk ander materiaal.*

Aantal nadelen van een houten sluisdeur zijn:

- *Sommige houtsoorten moeten regelmatig preventief onderhouden worden;*
- *Om de 15 a 25 jaar moet de gehele conservering vernieuwd worden;*
- *Hout is niet geschikt voor grote sluisdeuren omdat het een lage sterkte heeft. De grootste houten sluisdeur in Europa is de Kattendijksluis in Antwerpen. Deze is 'slechts' 13,9 meter breed, Figuur 1-6.*



Figuur 1-6 Impressie Kattendijksluis (4)

### 1.3 “Nieuwe” Materialen voor sluisdeuren

In het PIANC rapport “Innovations in navigation lock design” (1) worden verschillende gebieden van innovatie onderscheiden in het sluisontwerp of de bouw. In de categorie ontwerp/bouw worden de volgende gebieden van innovatie genoemd:

- *Ontwerpregels en codes;*

- *Sluis grootte – capaciteit, schipgeometrie, cyclustijd;*
- *Constructie systemen – funderingen, wanden, geleidewerken;*
- *Nieuwe materialen;*
- *Deuren – materiaal, systeem, type;*
- *Constructie middelen en methoden;*
- *Renovatie, herstellen en grootte modificaties.*

Dit afstudeeronderzoek zal zich richten op de categorie innovatie van de sluisdeuren, en dan voornamelijk op de mogelijkheden voor het gebruik van nieuwe materialen. Twee materialen die tegenwoordig ook gebruikt worden voor sluisdeuren zijn composiet en hogesterktebeton. Deze materialen zijn hieronder besproken.

### 1.3.1 Composiet

Een van de nieuwe materialen als toepassing voor sluisdeuren is composiet. Twee voorbeelden van een composietsluisdeur die gebouwd is of waar onderzoek naar gedaan is, zijn puntdeuren en een verticale hefdeur (1), zie Figuur 1-7. Deze twee voorbeelden zijn hieronder kort besproken.

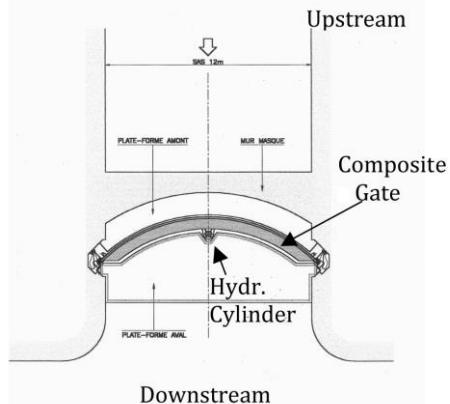
#### *Puntdeuren*

In Frankrijk zijn in 1997 de oude stalenpuntdeuren van een sluis vervangen door composiet deuren. De breedte van de sluisdeur is 5,2 meter en ze zijn 6 meter hoog. De sluisdeur is samengesteld uit cirkelvormige beplating gemaakt van glasvezel versterkt polymeer (CVR) verstevigd met blokken van CVR en foam. De geschatte kosten van het totale project liggen 30 procent boven de kosten van een vergelijkbare stalen sluisdeur.

In Nederland zijn de puntdeuren van de Spieringsluis in 2000 vervangen door composiet deuren, de kolk is hier 6 meter breed. Het gewicht van de composiet deuren is 50 procent lager dan van vergelijkbare stalen deuren en de minimale levensverwachting van de composiet deuren is vijftig jaar. Om deze levensduur te halen zijn speciale materiaalfactoren toegepast die het effect van veroudering en osmose meenemen. Uit de verrichte studies en de ervaringen tot nu toe blijkt dat de toepassing van composiet materiaal leidt tot hogere kosten. De initiële kosten plus onderhoudskosten zijn ongeveer 1,5 keer hoger dan bij stalen deuren met aluminium coating en 1,1 hoger dan bij normaal geverfde stalen deuren.

#### *Verticale hefdeur*

Een Frans bedrijf heeft onderzoek gedaan naar een verticale booghefdeur. De sluisdeur is 12,4 meter breed en bestaat uit drie identieke monolithische gebogen secties. De sluisdeur is verstevigd met twee composieten verstevigers met een constante hoogte van 600 millimeter en een dikte van 30 tot 40 millimeter en de binnenkant is gevuld met foam. Door de gebogen vorm wordt de meeste belasting via druk afgedragen. Een schatting van de verticale composietbooghefdeur is dat dit concept 20 procent duurder is dan een vergelijkbaar stalen ontwerp.



Figuur 1-7 Links: composieten puntdeur, Rechts: composieten verticale booghefdeur (1)

### Voordelen en nadelen

Aantal voordelen van een composiet sluisdeur zijn:

- *Geen last van corrosie;*
- *Goede weerstand tegen veroudering in een vochtige omgeving;*
- *Afwerking met verf niet nodig uit duurzaamheidsoogpunt. Waardoor substantiële vermindering van de onderhoudskosten;*
- *De constructie is licht, vergemakkelijkt het transport en de montage van de sluisdeur;*
- *De constructie is licht, vermindering van de aankoop- en onderhoudskosten van de machines;*
- *Heeft een minimale levensduur van 50 jaar.*

Een aantal nadelen van een composiet sluisdeur zijn:

- *Nog onbewezen concept voor grote sluisdeuren;*
- *De constructie is duur vergeleken met een stalen- en hogesterktebeton sluisdeur;*
- *Doorbuigingen van een composiet sluisdeur zijn groter dan van een vergelijkbare stalen sluisdeur, en daardoor minder geschikt voor grote vervallen.*

### 1.3.2 Hogesterktebeton

Een materiaal wat de laatste jaren steeds meer toegepast wordt voor constructies is hogesterktebeton. Het materiaal wordt echter nog weinig gebruikt in de constructieve waterbouw. De technologie van het materiaal is de laatste jaren sterk ontwikkeld en het wordt steeds meer toegepast in civiele constructies. Er zijn tegenwoordig nog hogere sterkeklassen produceerbaar als zeer-hogesterktebeton en ultra-hogesterktebeton.

Van sluisdeuren in hogesterktebeton zijn weinig voorbeelden, er is er namelijk nog maar één van gebouwd. In 2010 is de eerste sluisdeur ter wereld gemaakt van hogesterktebeton geplaatst in Amsterdam. De sluisdeur is 6,3 meter breed en 4.25 meter hoog en maar 10

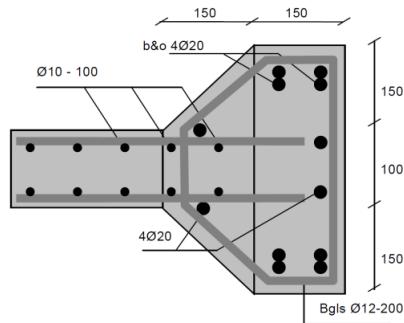
centimeter dik tussen de randbalken. In Figuur 1-8 is te zien hoe de sluisdeur eruit ziet. Hieronder wordt een korte beschrijving gegeven van het ontwerp.



Figuur 1-8 Rechts: ontwerp van de sluisdeur (5), links: plaatsing van de sluisdeur (6)

De sluisdeur bestaat uit een monoliete plaat met aan elke zijde een verzwaring. De belasting wordt door de plaat afgedragen aan de balken rondom welke de belasting op de opleggingen afdragen. Het balkenframe rondom de plaat is buig- en torsiestijf en de sluisdeur is driezijdig opgelegd. De invloed van de niet-lineaire opleggingen op de krachtswerking blijkt aanzienlijk. Vooral de krachten in de hoeken van de constructie worden veel minder groot wanneer deze tegen de belastingsrichting kunnen vervormen. De belangrijkste krachten voor de balken zijn trek en buiging in de bovenrand en wringende momenten in de voor- en achterhoek (7).

Voor de sluisdeur is beton met een sterkteklaas van C90/105 gebruikt dat met staalvezels is versterkt. Door toevoeging van 12 mm lange roestvrijstalen vezels blijft het beton na uitharding voldoende ductiel en wordt voorkomen dat micro oppervlaktescheurtjes ontstaan. Naast toepassing van staalvezels in het beton is er ook veel wapening toegepast, in Figuur 1-9 is het ontwerp van de wapening in de sluisdeur te zien. Het materiaal heeft een verwachte levensduur van minimaal honderd jaar, en uit onderzoek van Haitsma (8) blijkt dat de levensduur van prefab elementen in hogesterktebeton meer dan driehonderd jaar is. In vergelijking tot de stalen variant is het gewicht van de sluisdeur niet toegenomen, waardoor het bewegingswerk niet aangepast hoeft te worden. Dit is een relatief kleine sluis die niet al te grote belastingen te verduren krijgt. Hierdoor zijn de afmetingen vooral praktisch; het beton wordt niet tot de maximale sterkte belast. In het afstudeerverslag "Sluis0124: variant in ZHSB" (5) zijn de kosten van een stalen sluisdeur vergeleken met een sluisdeur in zeer hogesterktebeton, hieruit blijkt dat de stichtingskosten en de totale 'Life Cycle Costs' van de hogesterktebeton sluisdeur lager zijn dan voor de stalen sluisdeur.



Figuur 1-9 Wapening in de sluisdeur (5)

Ook uit andere verslagen blijkt dat hogesterktebeton een goed alternatief is voor staal in sluisdeuren. In het afstudeerrapport van J.J. van Sloten, die onderzoek heeft gedaan naar een roteerbare betonnen waterkering (9), blijkt dat een waterkering in hogesterktebeton qua stichtingskosten een concurrent alternatief voor een stalen waterkering en dat de onderhoudskosten van een hogesterktebeton sluisdeur aanzienlijk lager zijn. Het gewicht van de betonnen waterkering is wel 67 procent meer dan dat van de stalen variant.

In het rapport van N. Kaptijn (10) is vermeld dat een constructie in (zeer) hogesterktebeton het gewicht van hout en staal kan benaderen en dat de 'life cycle costs' lager zijn. Het gewicht van de sluisdeur kan in dit onderzoek belangrijk zijn: Als de sluisdeur zo zwaar wordt dat deze niet meer drijvend uitgevoerd kan worden heeft dat veel invloed op het ontwerp. Als de sluisdeur via het water naar de plek van bestemming getransporteerd moet worden, is het handig als de sluisdeur van zichzelf genoeg drijvend vermogen heeft.

Uit het verslag "Primeur voor de Diefdijk" (11) blijkt een besparing van 50 procent op lifecyclebasis mogelijk te zijn. De stichtingskosten van de betonnen waterkering bij de Diefdijk zijn 50 procent van dezelfde oplossing in stalen kokers. In een LCA over vijftig jaar is deze variant 75 procent goedkoper. Voor de waterkering is sterkteklaas B85 gebruikt, bij toepassing van een hogere sterkteklaas was een gewichtsbeperking van tientallen procenten mogelijk. De kosten zouden daardoor echter iets hoger worden.

### *Voordelen en nadelen*

Voordelen van een hogesterktebeton sluisdeur zijn (10):

- *Hogesterktebeton heeft een dichte poriëنstructuur en is hierdoor beter bestand tegen aantasting. Dit zorgt voor een duurzame constructie waar weinig onderhoud voor nodig is;*
- *Bouw- plus onderhoudskosten zijn lager dan van een houten en stalen sluisdeur;*
- *Het materiaal heeft een hoge stijfheid vergeleken met staal en kunststof, hierdoor zijn de vervormingen kleiner.*
- *Hogesterktebeton heeft een hoge slijtvastheid, waardoor het goed geschikt is voor constructies die blootgesteld zijn aan slijtage door stromingen;*
- *Door de hoge (druk)sterkte kan slanker en lichter geconstrueerd worden dan met normaal beton.*

Aantal nadelen van een hogesterktebeton sluisdeur zijn:

- *Nog onbewezen concept voor grote sluisdeuren;*
- *Door de stijvere constructie in vergelijking met stalen of composiet sluisdeur wordt minder kinetische energie van een stootbelasting omgezet in vervormingsenergie;*
- *Als de sluisdeur kapot of beschadigd raakt, is deze lastig of niet te repareren;*
- *De constructie zal in vergelijking met een composiet en stalen sluisdeur waarschijnlijk zwaarder zijn;*
- *Zonder (staal)vezels in het betonmengsel is hogesterktebeton bros;*
- *Bij toepassing van staalvezels is het beton (nog) niet recyclebaar;*
- *Omdat het hogesterktebeton veel sterker is dan ‘normaal’ beton en niet veel stijver, gaan stijfheidsproblemen een grote rol spelen bij het ontwerp, zoals doorbuiging en knik;*
- *Uitvoerbaarheid vergt extra aandacht, maar moet niet voor grote problemen zorgen;*
- *Een betonnen constructie is lastig uit verschillende onderdelen te assembleren en om er onderdelen aan te bevestigen;*
- *Van een aantal eigenschappen van hogesterktebeton is nog weinig bekend. Vooral van vermoeiing van het materiaal is weinig bekend.*

#### 1.4 Vergelijking van verschillende materialen

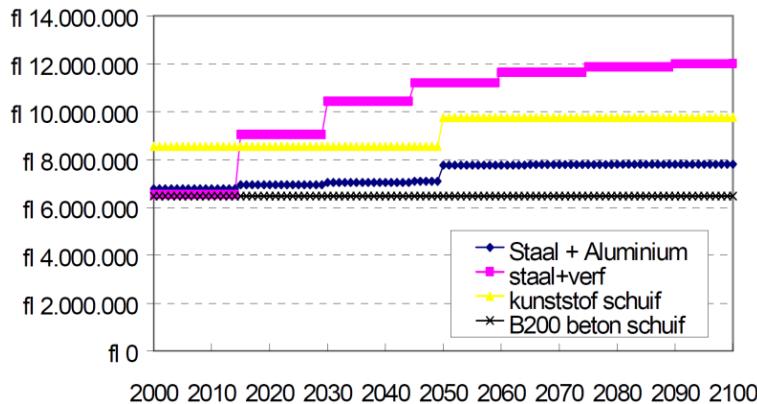
Zoals in paragraaf 1.1 is beschreven, zijn alle huidige grote sluisdeuren van staal en zijn het allemaal roldeuren. In de paragrafen daarna zijn ook andere materialen genoemd die gebruikt worden voor sluisdeuren, namelijk hout, hogesterktebeton en composiet. Hiervan zijn ook de belangrijkste voor- en nadelen gegeven. De vraag is: waarom worden deze materialen niet gebruikt voor grote sluisdeuren?

Het materiaal waar de eerste sluisdeuren ter wereld van gemaakt werden is hout. Dit materiaal kan snel weggestreept worden als alternatief materiaal voor grote sluisdeuren, het heeft een korte levensduur en is niet geschikt voor grote overspanningen.

Composiet zou een alternatief materiaal voor sluisdeuren kunnen zijn. Het materiaal is zeer duurzaam, het heeft een verwachte levensduur van minimaal vijftig jaar. En de composiet sluisdeur behoeft minder onderhoud dan een stalen sluisdeur. Maar een sluisdeur in composiet is in initiële kosten plus onderhoudskosten duurder dan een stalen sluisdeur en is minder geschikt voor grote vervallen.

Een hogesterktebeton sluisdeur heeft een verwachte levensduur van minimaal honderd jaar en is zo goed als onderhoudsvrij, wat een groot voordeel is ten opzichte van een stalen sluisdeur en de composiet sluisdeur. Ook de stichtingskosten en onderhoudskosten van een sluisdeur in beton zijn naar verwachting lager dan van een stalen sluisdeur. In Figuur 1-10 is een integrale kostenvergelijking tussen verschillende varianten weergegeven die door H. Tol in zijn afstudeeronderzoek (12) is gemaakt. In zijn onderzoek heeft H. Tol gekeken naar vervanging van de stalen schuiven in de Oosterscheldekering door schuiven

in hogesterktebeton. In de kostenvergelijking is te zien dat op een levensduur van honderd jaar de betonnen schuif goedkoper is dan de varianten in staal of composiet. Een groot nadeel van hogesterktebeton is dat het nog een bijna niet is toegepast in sluisdeuren, en nog helemaal niet in grote sluisdeuren; het is nog een onbewezen concept. Maar op het eerste gezicht lijkt hogesterktebeton een goed alternatief voor staal als materiaal voor grote sluisdeuren.



Figuur 1-10 Integrale kosten vergelijking bij vervangen stalen schuiven in de Oosterscheldekering (12)

#### 1.4.1 Vergelijking voor- en nadelen stalen sluisdeur en hogesterktebeton sluisdeur

Hieronder zijn de voor- en nadelen genoemd in de voorgaande paragrafen van een stalen sluisdeur en van een hogesterktebeton sluisdeur met elkaar vergeleken.

- *Een stalen sluisdeur is onderhoudsgevoeliger dan een hogesterktebeton sluisdeur;*
- *De totale kosten van een stalen sluisdeur zijn hoger dan van een hogesterktebeton sluisdeur;*
- *Een stalen sluisdeur is een 'proven concept' en een hogesterktebeton sluisdeur niet;*
- *Een stalen sluisdeur is lichter dan een hogesterktebeton sluisdeur;*
- *Een stalen sluisdeur is eenvoudiger te repareren dan een hogesterktebeton sluisdeur;*
- *Een stalen sluisdeur neemt beter de kinetische energie opnemen bij een aanvaring dan een hogesterktebeton sluisdeur, door de lagere stijfheid;*
- *Een stalen sluisdeur kan eenvoudig geassembleerd worden uit verschillende onderdelen en er kan relatief eenvoudig onderdelen aan bevestigd worden. Bij een hogesterktebeton sluisdeur is dit lastig.*

#### 1.5 Innovatief

Toepassing van hogesterktebeton in grote sluisdeuren zou tot een innovatief concept leiden. Maar waarom zou je een innovatief concept toepassen als efficiënte en bewezen technologieën al bestaan? Een aantal mogelijk antwoorden zijn (1):

- *Kostenbesparing door toepassen van nieuwe oplossingen welke beter en goedkoper zijn;*
- *Om de betrouwbaarheid te verbeteren. Dit is niet altijd mogelijk met bestaande technologieën, dus nieuwe technologieën kunnen nodig zijn om het risico van falen te verminderen;*
- *De opdrachtgever stelt nieuwe strenge eisen (bv. kortere schutlijden, hoge beschikbaarheid, waterbesparingsbeleid, milieu impact, terrorisme);*
- *Geen standaard dimensies of prestatiecriteria (bv. groot verval, grote sluisafmetingen, korte nivelleertijd).*

In dit onderzoek gaat het om het eerste punt. Is een ontwerp in hogesterktebeton goedkoper dan een ontwerp in staal? Kunnen hiermee kosten bespaard worden? Het tweede punt kan echter wel een gevolg zijn van toepassing van hogesterktebeton.

## 1.6 Vraagstelling

Uit vorige paragraaf blijkt dat hogesterktebeton een mogelijk alternatief zou kunnen zijn voor staal als constructiemateriaal voor grote sluisdeuren. De vraagstelling die hieruit volgt is:

*Is het mogelijk met de gegeven voor- en nadelen van hogesterktebeton als constructiemateriaal voor grote sluisdeuren een ontwerp te maken van een grote sluisdeur in hogesterktebeton welke in vergelijking met een ontwerp in staal voordeliger is op basis van stichtings- en onderhoudskosten?*

## 1.7 Aandachtspunten

Zoals uit voorgaande paragrafen blijkt zijn er verschillen tussen een stalen sluisdeur en een sluisdeur van hogesterktebeton. Een aantal van de verschillen tussen een stalen sluisdeur en een hogesterktebeton sluisdeur leiden tot aandachtspunten voor het ontwerp. In Figuur 1-11 is een diagram gegeven met daarin de aandachtspunten die belangrijk zijn bij het ontwerp van een betonnen sluisdeur. Een aantal van deze aandachtspunten zijn hieronder besproken. Voor een aantal van de aandachtspunten zijn aannames gedaan, deze zijn beschreven in hoofdstuk 5.

### 1.7.1 Materiaal

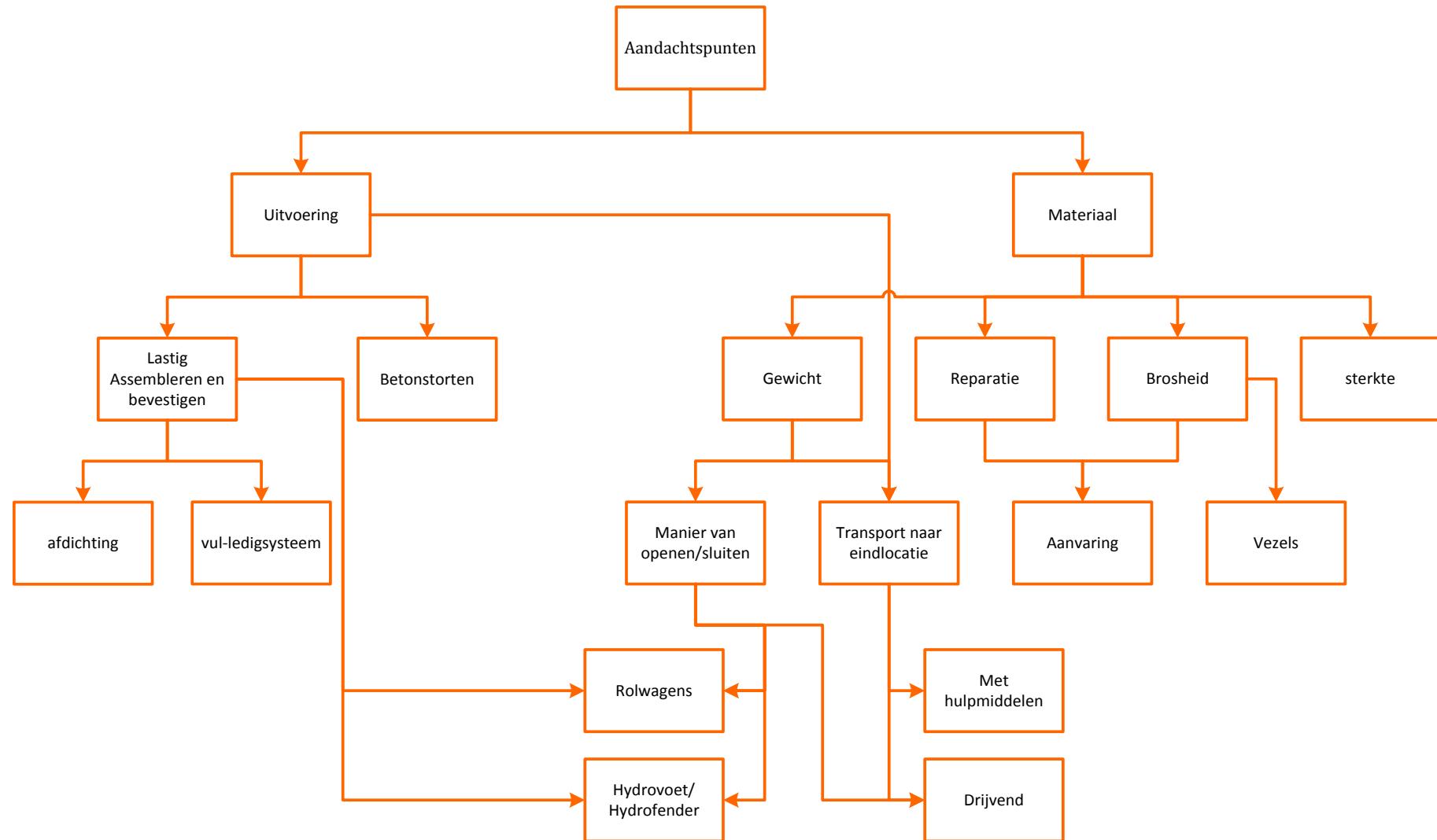
Het materiaal heeft een grote sterke. Een belangrijk aspect is dus om deze grote sterke optimaal te benutten. Dat een hogesterktebeton sluisdeur waarschijnlijk zwaarder is dan een stalen sluisdeur is een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerpen. Het hoge gewicht heeft invloed op het geleidingssysteem en op het transporteren van de sluisdeur naar de eindlocatie. Vragen die rijzen zijn: Kunnen er rolwagens toegepast worden om de sluisdeur te openen en sluiten of moet er een ander geleidingsysteem toegepast worden? Is het voordeliger om de sluisdeur genoeg drijvend vermogen te geven om de sluisdeur drijvend via water te transporteren of kan dit beter op een andere manier, bijvoorbeeld met een kraanschip?

Een constructie van hogesterktebeton is aanzienlijk stijver. Hierdoor is de constructie minder goed bestand tegen aanvaringen. Verder is de betonnen constructie ook lastig te repareren. Een aanvaring met een hogesterktebeton sluisdeur kan dus voor grote problemen zorgen. Dus dit is een belangrijk aandachtspunt. Wordt de sluisdeur beschermd tegen aanvaringen door een aanvaarconstructie voor de sluisdeur of neemt de sluisdeur de aanvaarbelasting zelf op?

### 1.7.2 Uitvoering

Ook de bouw van een stalen sluisdeur is heel verschillend van een sluisdeur in beton. Beton is lastig te assembleren uit verschillende onderdelen en het bevestigen van onderdelen aan beton is lastiger dan bij staal. Vragen die hieruit rijzen zijn: Is het toepassen van rolwagens onder de sluisdeur en het toepassen van een vul- en ledigsysteem met deuropeningen de beste optie? En, wat is de beste manier om de sluisdeur af te dichten?

Een ander aandachtspunt bij de uitvoering is storten van beton. In hoofdstuk 3.2 zijn de uitvoeringsaspecten beschreven welke belangrijk zijn bij hogesterktebeton en waar extra aandacht aan besteed moet worden.



Figuur 1-11 Diagram met aandachtspunten ontwerp

## 1.8 Onderzoeks vragen

Op basis van de hierboven genoemde vraagstelling en aandachtspunten is het doel van het afstudeeronderzoek en de onderzoeks vragen geformuleerd:

Doel:

*Het doel van dit afstudeeronderzoek is aan de hand van functionele en operationele eisen tot een 'optimaal' ontwerp van grote sluisdeuren in hogesterktebeton te komen.*

Onderzoeks vragen:

- *Wat is voor het ontwerp de optimale betonsterkteklasse op basis van kosten?*
- *Wat is een optimale constructievorm voor een grote sluisdeur in hogesterktebeton welke aan alle gestelde eisen voldoet?*
- *Wat is de beste manier om de ontworpen sluisdeur te bouwen en te verplaatsen naar locatie?*
- *Wat is de beste manier om de sluisdeur te geleiden tijdens openen en sluiten en op welke wijze kan de sluisdeur het best afgedicht worden?*
- *Is het op basis van investeringskosten en onderhoudskosten gedurende een levensduur van honderd jaar voordelig om hogesterktebeton te gebruiken voor de sluisdeur in plaats van staal?*

## 1.9 Afbakening

Om het afstudeeronderzoek haalbaar te maken binnen de tijd zijn grenzen gesteld waarbinnen het onderzoek plaats zal vinden.

Er zal in dit afstudeeronderzoek specifiek naar de sluisdeur gekeken worden en niet naar de gehele sluis. Van de sluisdeur zullen berekeningen en tekeningen gemaakt worden. De sluishoofden worden ook bekeken met betrekking tot het plaatsen en afdichten van de sluisdeur, deze zullen niet uitgerekend worden. De werktuigbouwkundige installaties, voor onder andere het sluiten en openen van de sluisdeur en het nivelleren, zullen niet in detail behandeld worden.

Om realistische eisen en randvoorwaarden te hebben voor het ontwerpproces wordt er ontwerpstudie gedaan naar een referentiesituatie. Er zal gekeken worden naar de Nieuwe Zeesluis te IJmuiden. Hier moet in 2015 begonnen worden met de aanleg van een nieuwe grotere zeesluis, zodat er meer ruimte komt voor goederentransport en de steeds groter wordende schepen vlot en veilig door het Noordzeekanaal kunnen.

Echter, sommige eisen en randvoorwaarden kunnen beperkingen opleveren voor het ontwerp. Bijvoorbeeld de beperkte ruimte, waardoor bepaalde conceptontwerpen afvallen. Van deze eisen kan worden afgezien, als daarvan sprake is wordt dat duidelijk vermeld. Vooral de functionele eisen en randvoorwaarden worden ontleend aan deze referentiesituatie.

Het onderzoek zal zich richten op de constructieve- en uitvoeringstechnische haalbaarheid van de sluisdeur in hogesterktebeton. Er zal gebruik gemaakt worden van de huidige kennis van de materialen en technieken. Er zal geen materiaalkundig onderzoek gedaan worden.

Verder wordt zoveel mogelijk aan de hand van de Eurocodes en de nationale bijlagen de haalbaarheid van het ontwerp getoetst. Voor de berekeningen die gedaan worden zal een beperkt aantal belastinggevallen gebruikt worden, de maatgevende belastinggevallen worden gebruikt.

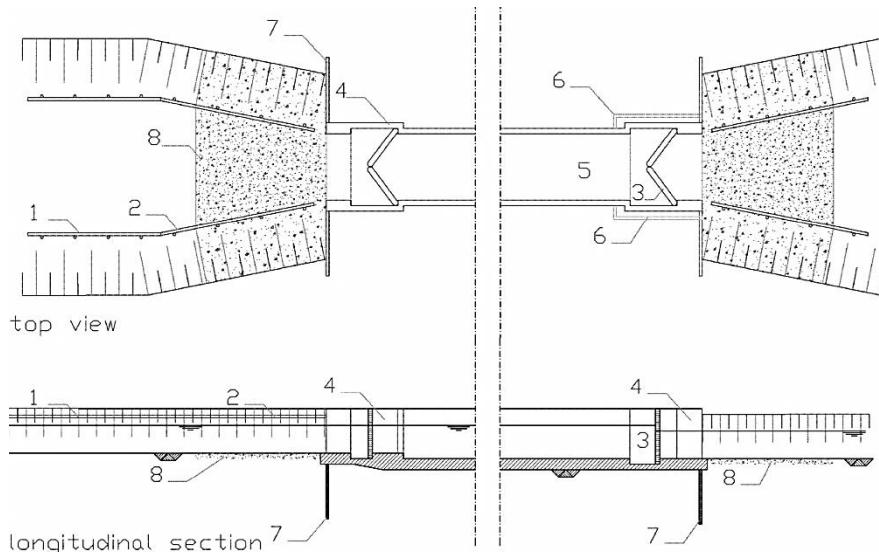
## 2. SLUIZEN

Sluizen hebben als doel dat schepen een waterhoogteverschil kunnen overbruggen, terwijl het waterhoogteverschil aan beide zijden van de sluis niet verandert. De belangrijkste functies van een sluis zijn het keren van water en het horizontaal en verticaal verplaatsen van schepen. Dus sluizen zijn nodig wanneer een schip een waterkerende constructie moet passeren.

Dit hoofdstuk zal eerst beknopt de algemene lay-out en de basis werking van een sluis beschrijven. Daarna zullen de verschillende typen sluisdeuren en hun toepassingsgebied beschreven worden. Dit hoofdstuk moet de lezer, zonder enige civiele kennis, basis kennis van sluizen geven.

### 2.1 Algemene lay-out en basis werking

Figuur 2-1 geeft de typische lay-out van een sluis weer. Het hoofdonderdeel van de sluis is de sluiskolk [5], waarin het water niveau aangepast kan worden tot het gewenste niveau. Het water niveau kan verhoogd of verlaagd worden afhankelijk van de richting waarin het schip zich verplaatst. Dit wordt gedaan via een vul- en ledigingsysteem, zie hoofdstuk 2.3. De sluiskolk wordt ingesloten door aan iedere zijde een sluisdeur [3], zie hoofdstuk 2.2, elke sluisdeur bevindt zich in een sluishoofd [4]. Voor deze sluishoofden bevinden zich wachtplaatsen [1], welke veilige aanlegplaatsen voor schepen verschaffen zodat ze, als nodig, veilig kunnen wachten. Achter deze wachtplaatsen bevindt zich een fuik [2], die de constructie beschermt als een schip de controle verliest. Verder dient de fuik ook als (visuele) geleiding (13). De wachtplaatsen en de fuik bevinden zich in de voorhaven.



Figuur 2-1 Typische lay-out van een navigatiesluis (13)

Een beknopte beschrijving van het schutproces: Het schip wacht buiten de sluishoofden in de voorhaven, en de sluiskolk is gesloten. Het water niveau in de sluiskolk wordt via het

vul- ledigsysteem genivelleerd aan het water niveau van de voorhaven waar het schip zich bevindt. Vervolgens kan het schip naar binnen varen als de deuren geopend zijn. Als het schip zich in de sluiskolk bevindt kan de het water niveau worden genivelleerd naar het niveau van de andere voorhaven. Hierna kan het schip uitvaren als de sluisdeur is geopend.

## 2.2 Sluisdeuren

Een essentieel onderdeel van de sluis is de sluisdeur. Dit zijn beweegbare onderdelen van de sluis. Als ze dicht zijn keren ze water, zodat het waterstandsverschil in stand wordt gehouden. En als de deuren open zijn, kunnen de schepen passeren om de sluiskolk in of uit te varen. Er zijn veel verschillende soorten sluisdeuren, welke hieronder beknopt zullen worden besproken.

### 2.2.1 Overzicht verschillende sluisdeuren

Een overzicht van de meest voorkomende sluisdeuren:

- *Deuren draaiend om de verticale as:*
  - *Puntdeuren*
  - *Enkele draaideur*
  - *Staande segmentdeuren*
  - *Waaierdeuren*
- *Deuren draaiend om de horizontale as:*
  - *Segmentdeur*
  - *Klepdeur*
- *Horizontaal bewegende deuren*
  - *Roldeuren*
  - *Glijdeur*
- *Verticaal bewegende deuren*
  - *Hefdeur*
  - *Zakdeur*
  - *Dubbelblads hefdeur*



Figuur 2-2 Puntdeuren van de Kleine Sluis in IJmuiden (14)

Tegenwoordig zijn de meest voorkomende type sluisdeuren in Nederland de puntdeur, de enkele draaideur, de hefdeur en de roldeur. Deze vier typen sluisdeuren zijn op de volgende pagina kort beschreven. (14)

Belangrijke aspecten bij het kiezen van een type sluisdeur zijn het verval over de sluisdeur, één- of tweezijdig kerend, doorvaarthoogte en doorvaarbreedte, veiligheid, betrouwbaarheid, beschikbaarheid en de kosten van een sluisdeur. Deze aspecten verschillen per project. Voor elk project wordt een optimaal ontwerp gezocht dat aan de randvoorwaarden en eisen voldoet. In paragraaf 2.2.2 wordt beschreven hoe de keuze van het type sluisdeur meestal wordt gemaakt.

### *Puntdeuren*

Dit type sluisdeur is een symmetrische sluisdeur met de symmetrielinie in het midden van de sluis. De sluisdeur bestaat uit twee deuren welke om een verticale as draaien en in gesloten stand leunen de twee deuren tegen elkaar, zie Figuur 2-2. Een aantal voordelen van de puntdeuren zijn dat het de doorvaarthoogte niet limiteert, de constructie werkt als een ligger met drie scharnieren en dat de constructie relatief snel opent en sluit. Nadelen van puntdeuren zijn dat ze vooral bedoeld zijn om eenzijdig water te keren, tweezijdig is wel mogelijk, verder zijn ze voor kleine overspanningen geschikt en met een verval over de sluisdeur kunnen ze niet openen of sluiten.

### *Enkele draaideur*

Dit type sluisdeur lijkt veel op de puntdeuren, alleen bestaat dit type sluisdeur maar uit één sluisdeur. Een ander groot verschil is dat de puntdeuren de hydrostatische belasting vooral afdragen via normaalkrachten, de enkele draaideur draagt alle kracht af via momenten omdat de sluisdeur loodrecht op de sluishoofd staat, waardoor de scharnieren zwaar uitgevoerd moeten worden. De constructie is ook groter omdat er langere uitsparingen nodig zijn voor de sluisdeur. Net zoals bij de puntdeuren is dit type sluisdeur goed bruikbaar voor kleine overspanningen en heeft het geen doorvaarthoogte limitatie.

### *Roldeur*

De roldeur sluit de doorgang af met een platte sluisdeur welke loodrecht op de sluisas beweegt. In één van de sluishoofden zit een diepe inham, een deurkas, waarin de sluisdeur zich bevindt wanneer deze geopend is. De sluisdeur staat op enkele rolwagens die via een rails geleid worden. In de sluisdeur bevinden zich drijfkisten om het gewicht op de rolwagens te reduceren, maar hierdoor kan de sluisdeur wel gevoelig zijn voor golven. Dit type sluisdeur wordt meestal toegepast wanneer de overspanning groot is en als water tweezijdig gekeerd moet worden. De diepe deurkas en het geleidingsysteem voor de sluisdeur maken de constructie duur. In plaats van rolwagens kunnen hydrostatische glijlagers toegepast worden, de zogenaamde gliedeur.

### *Hefdeuren*

In principe is de hefdeur bijna hetzelfde als de roldeur. De hefdeur opent niet zijwaarts maar verticaal door een lift constructie, Figuur 2-3. Een voordeel hiervan is dat de constructie makkelijker geïnspecteerd en onderhouden kan worden. Maar de constructie limiteert de doorvaarthoogte en de lift constructie maakt dit type sluisdeur ook duur. Dit sluisdeur type wordt eigenlijk alleen gebruikt als de bouwruimte gelimiteerd is.



Figuur 2-3 Prins Bernardsluis (15)

## 2.2.2 Keuze sluisdeur

De keuze van de sluisdeur hangt af van een aantal zaken, maar hoofdzakelijk van de doorvaartbreedte en van het type sluis, één- of tweezijdig kerend. In Tabel 2-1 is voor deze twee eisen weergegeven voor welk type sluisdeur meestal wordt gekozen. Hierin is te zien dat voor zeer grote sluisdeuren ( $>24\text{m}$ , dit zijn zeesluizen) eigenlijk altijd roldeuren worden toegepast. Andere deurtypen zijn ook mogelijk, zoals puntdeuren en sectordeuren, maar meestal zijn deze typen niet economisch voordelig (14).

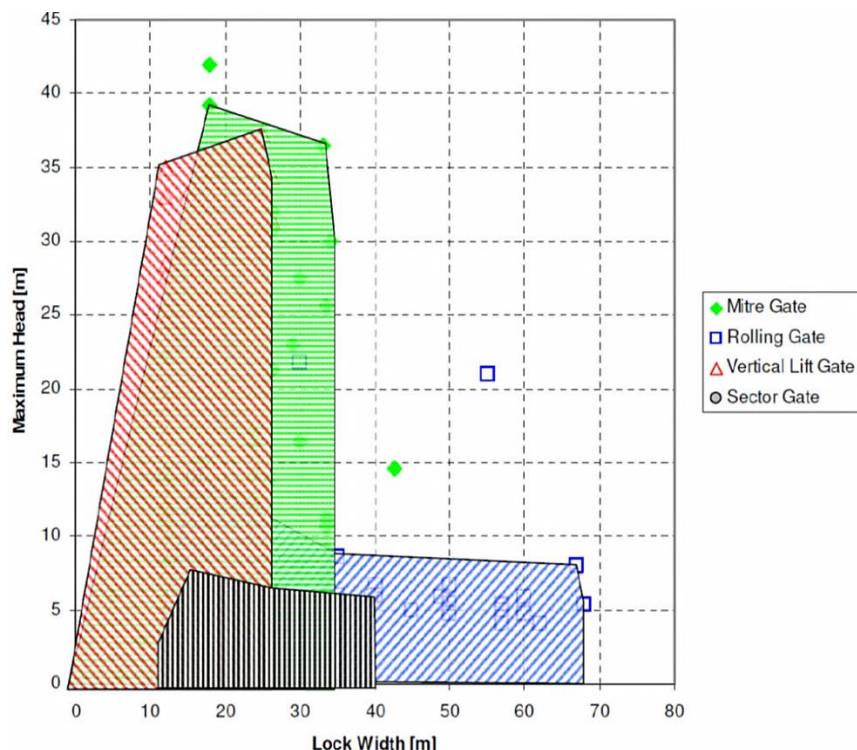
Tabel 2-1 Keuze sluisdeur als functie van het type sluisdeur en de deurbreedte (14)

Type sluis	Sluisbreedte	Eenzijdig kerende puntdeuren	Dubbel stel puntdeuren	Tweezijdig kerende puntdeuren	Eenzijdig kerende draaideur	Tweezijdig kerende draaideur	Tweezijdig kerende roldeur	Eenzijdig kerende hefdeur	Tweezijdig kerende hefdeur
Tweezijdig kerende zeevaartsluis	Klein 6-10 m Middelgroot 10-16 m Groot 16-24 m Zeer groot $> 24\text{ m}$		X X X	X X X		X X	X X		
Tweezijdig kerende binnenvaartsluis	Zeer klein 4-6 m Klein 6-10 m Middelgroot 10-16 m Groot 16-24 m		X X X	X X X		X X X	X		X
Eenzijdig kerende binnenvaartsluis	Zeer klein 4-6 m Klein 6-10 m Middelgroot 10-16 m Groot 16-24 m	X X X			X X			X X	

J.W. Doeksen heeft in zijn afstudeerwerk (16) onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van sluisdeuren. Hiervoor zijn 220 sluizen bekeken, waarbij de focus vooral lag op grote

sluisdeuren (12 -68 meter). In Figuur 2-4 is het resultaat van dit onderzoek weergegeven. In het figuur staan van de vier meest voorkomende sluisdeuren hun toepassingsgebied.

Hierin is te zien dat voor grote vervallen of een verticale hefdeur wordt toegepast (tot doorvaarbreedtes van ongeveer 25 meter) of puntdeuren (tot doorvaarbreedtes van ongeveer 35 meter). Bij kleine vervallen tot ongeveer 7 meter en bij doorvaarbreedtes tussen de 10 meter en 40 meter worden soms ook sectordeuren toegepast. Bij grotere doorvaartbreedtes dan 40 meter worden altijd roldeuren toegepast.



Figuur 2-4 Toepassingsgebied per sluisdeur type (16)

### 2.3 Vul- en ledigsysteem

Verschillende alternatieven bestaan voor het nivelleren van het water niveau in de sluiskolk. De sluis wordt gevuld via instroom door zwaartekracht vanuit het boven pand en geleegd via uitstroom naar het beneden pand. De meest gebruikte vul- en ledigsystemen in Nederland zijn het type met deuropeningen of het type met omloopriolen en woelkelder. Het grootste verschil tussen deze twee typen is dat het vullen via de deuropening leidt tot veel turbulentie in de sluiskolk wat bij gebruik van omloopriolen een stuk minder is. Dit is vooral belangrijk voor het veilig afmeren van schepen in de sluiskolk. Maar het type met omloopriolen is wel complexer en duurder.



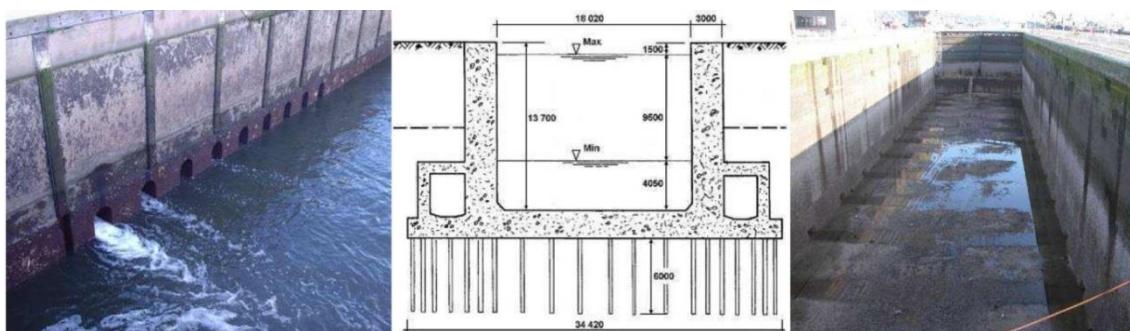
Figuur 2-5 Voorbeeld van sluisdeur met deuropeningen (13)

### 2.3.1 Keuze type

De keuze van het type vul- ledigsysteem is afhankelijk van verschillende aspecten. Een van de aspecten is het verval over de sluisdeur. Bij sluizen met een verval tot 6 meter wordt het deuropening type doorgaans gebruikt. Bij sluizen met een groter verval wordt het type omloopriolen met woelkelder gebruikt als vul- ledigsysteem. Een ander belangrijk aspect is de nivelleertijd. Voor sluizen met een groot verval over de sluisdeur en waar korte nivelleertijden belangrijk zijn, worden omloopriolen met vloer/wand vulsysteem toegepast.

Een ander aspect is of het een binnenvaart- of zeesluis is. Bij binnenvaart sluizen hangt het type vul- ledigsysteem meestal af van het verval. Bij kleine zeevaartsluizen wordt meestal het type deuropeningen gebruikt. En bij grote zeesluizen, groter dan 30 meter, is het de eerst aangewezen type een vul- ledigsysteem met riolen. Om de turbulentie in de sluis te verminderen, omdat de toelaatbare krachten op grote zeeschepen (relatief gezien) geringer zijn door de beperkte afmeeruitrusting.

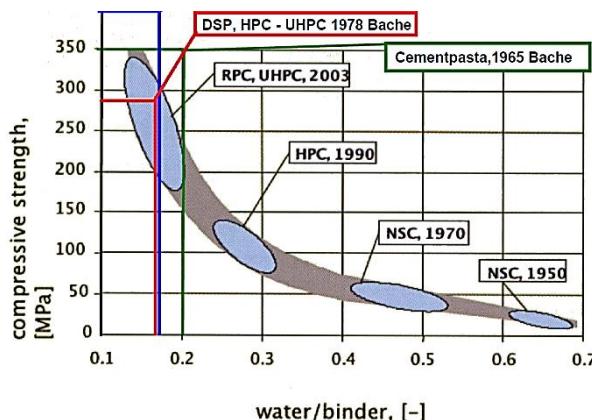
Andere aspecten die van invloed kunnen zijn is de zout/zoetscheiding, waterbesparing en kosten. (14).



Figuur 2-6 sluis met duikers in de sluiskolk wand (13)

# 3. HOGESTERKTEBETON

Hogesterktebeton is de laatste jaren steeds meer gebruikt als constructiemateriaal. De laatste decennia komen er steeds hogere sterke betonsoorten op de markt. Het materiaal wordt onder andere al veel toegepast in bruggen, hoogbouw, wanden en tunnels. In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste eigenschappen van hogesterktebeton besproken worden. De mechanische eigenschappen zullen bekeken worden maar ook de duurzaamheideigenschappen, kosten en uitvoeringaspecten.

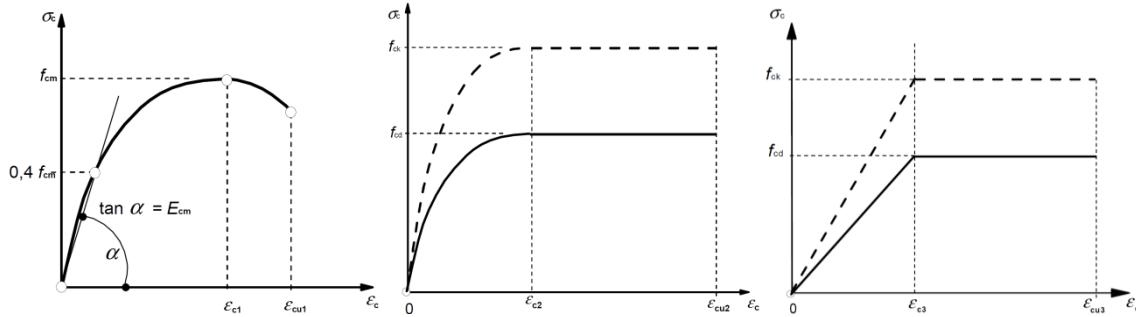


Figuur 3-1 Ontwikkeling hogesterktebeton (17)

## 3.1 Inleiding

Hier zullen de belangrijkste verschillen tussen hogesterktebeton en conventioneel beton beschreven worden. In dit onderzoek wordt hogesterktebeton hetzelfde als in de CUR-aanbeveling 97 gedefinieerd: "beton waarvan de karakteristieke kubusdruksterkte  $f_{ck}$  hoger is dan  $65 \text{ N/mm}^2$ , maar niet hoger dan  $105 \text{ N/mm}^2$ ". In Tabel 3-1 zijn de materiaaleigenschappen samengevat zoals ze in de Eurocode (18) gegeven zijn. Hierin is:

- $f_{ck}$ : karakteristieke cilinderdruksterkte van beton na 28 dagen;
- $f_{ctm}$ : gemiddelde waarde van de axiale treksterkte van beton;
- $f_{ckt,0,05}$ : karakteristieke betontreksterkte (5% ondergrens);
- $E_{cm}$ : gemiddelde elasticiteitsmodulus van beton;
- $\varepsilon_{c1}$ : betonstuik bij de piekspanning;
- $\varepsilon_{cu1}$ : grenswaarde van de betonstuik;
- $\varepsilon_{c2}$ : betonstuik bij de piekspanning;
- $\varepsilon_{cu2}$ : grenswaarde van de betonstuik;
- $\varepsilon_{c3}$ : betonstuik bij de piekspanning;
- $\varepsilon_{cu3}$ : grenswaarde van de betonstuik.



Figuur 3-2 Links: Schematische weergave van de spanning-rekrelatie, Midden: vereenvoudiging naar parabolorechthoekdiagram, Rechts: vereenvoudiging naar bi-lineair spanning-rekrelatie

Er wordt in dit onderzoek niet gekeken naar zeer-hogesterktebeton, er wordt gekeken tot een betonsterkteklasse met een kubusdruksterkte tot ongeveer 105/115 N/mm<sup>2</sup>. Uit een eerdere ontwerpstudie gedaan door onder andere H.J. de Bruijn (19) is gebleken dat hogere sterkteklassen economisch niet voordelig zijn. Bij een hogere sterkteklaasse wordt niet volledig gebruik gemaakt van de beschikbare druksterkte omdat een zeker traagheidsmoment nodig is om niet te grote vervormingen te hebben. Een hogere sterkte is dus niet zinvol zolang de stijfheid niet toeneemt. Voor de lagere sterkteklassen is er een overcapaciteit op doorbuiging en op dwarskracht en wordt wel de volledige druksterkte gebruikt. Het optimale mengsel zal ergens in de 'zone' van hogesterktebeton liggen, zie Tabel 3-1.

Uit overleg met ing. R. van Berkel is gebleken dat een kubusdruksterkte hoger dan sterkteklaasse C90/105 mogelijk is onder zeer goed geconditioneerde omstandigheden, binnen in een hal waar het beton na het mengen meteen gestort kan worden. Dus alleen als prefab elementen worden toegepast zijn hogere sterkteklassen haalbaar.

Tabel 3-1 Materialeigenschappen beton, in N/mm<sup>2</sup>

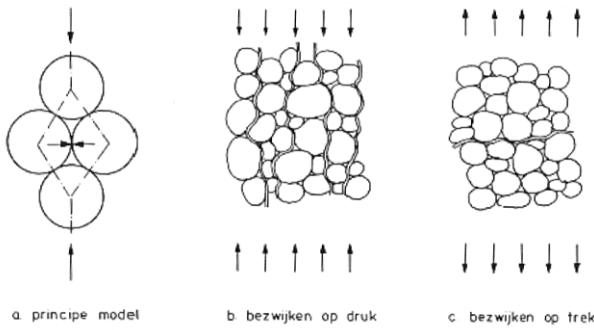
	f <sub>ck</sub> [MPa]	f <sub>ctm</sub> [MPa]	f <sub>ctk,0,05</sub> [MPa]	E <sub>cm</sub> [Gpa]	ε <sub>c1</sub> [%]	ε <sub>cu1</sub> [%]	ε <sub>c2</sub> [%]	ε <sub>cu2</sub> [%]	ε <sub>c3</sub> [%]	ε <sub>cu3</sub> [%]
C16/20	16	1,9	1,3	29	1,9	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C20/25	20	2,2	1,5	3	2	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C25/30	25	2,6	1,8	31	2,1	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C30/37	30	2,9	2	33	2,2	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C35/45	35	3,2	2,2	34	2,25	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C40/50	40	3,5	2,5	35	2,3	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C45/55	45	3,8	2,7	36	2,4	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C50/60	50	4,1	2,9	37	2,45	3,5	2	3,5	1,75	3,5
C55/67	55	4,2	3	38	2,5	3,2	2,2	3,1	1,8	3,1
C60/75	60	4,4	3,1	39	2,6	3,0	2,3	2,9	1,9	2,9
C70/85	70	4,6	3,2	41	2,7	2,8	2,4	2,7	2,0	2,7
C80/95	80	4,8	3,4	42	2,8	2,8	2,5	2,6	2,2	2,6
C90/105	90	5	3,5	44	2,8	2,8	2,6	2,6	2,3	2,6

Conventioneel beton  
 X  
 Hogesterktebeton

Beton wordt gekarakteriseerd als een 3 componentensysteem, bestaande uit:

- *Toeslagkorrels;*
- *De cementmatrix;*
- *En het contactoppervlak korrel en matrix.*

In conventioneel beton is de toeslagkorrel niet maatgevend voor de sterkte van het beton, omdat deze een hoge sterkte heeft. De eerste scheuren ontstaan meestal op het contactoppervlak tussen de korrel en matrix, zie Figuur 3-3.

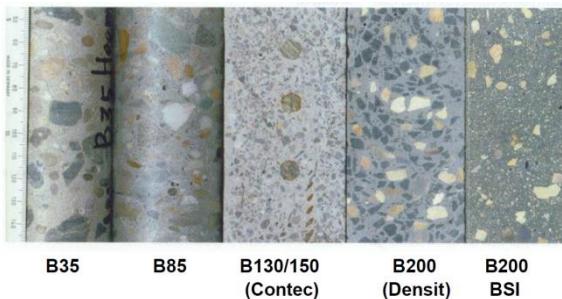


Figuur 3-3 a: krachtsafdracht, b, c: bezwijkmechanisme conventioneel beton (20)

In hogesterktebeton kunnen de toeslagkorrels wel maatgevend zijn voor bezwijken. In dat geval lopen de scheuren door de toeslagkorrel in plaats van er om heen.

Een hogere druksterkte kan bereikt worden op verschillende manieren (20):

- *Door de pakkingsdichtheid te vergroten, wat duidelijk te zien is in Figuur 3-4. De horizontale krachtscomponent, zie Figuur 3-3, wordt kleiner bij de krachtsafdracht en de cementmatrix en de contactzone worden minder belast;*
- *De sterkte van de cementmatrix kan verhoogd worden door het verlagen van de water-cementfactor, toepassen van hoge sterkte cement en het gebruik van puzzolanen.*
- *Toepassen van sterker toeslagmateriaal.*



Figuur 3-4: Doorsneden van verschillende betonsoorten (17)

Zoals hierboven kort beschreven zijn de mechanische eigenschappen van beton dus sterk afhankelijk van de eigenschappen van de drie componenten. In 3.4 zijn de mechanische eigenschappen van hogesterktebeton beschreven worden.

Maar de mechanische eigenschappen zijn niet het belangrijkste onderwerp bij het ontwikkelen van hogesterktebeton. De realisatie van de mechanische eigenschappen is relatief eenvoudig, de juiste materialen gebruiken en het goed doseren van het mengsel. De echte uitdaging is deze mechanische eigenschappen te bereiken terwijl ook aan de duurzaamheid- en uitvoerbaarheidseisen wordt voldaan. In de volgende twee paragrafen zijn de belangrijkste aspecten hiervan besproken worden (3.2 en 3.3).

## 3.2 Uitvoeringsaspecten

Bij hogesterktebeton zijn een aantal aspecten van belang betreffende de uitvoering, waaronder de consistentie, verwerkbaarheid, verpompbaarheid en afwerkbaarheid. Een aantal aspecten waaraan het betonmengsel moet voldoen zijn (21):

- *Gemakkelijk te maken en te leveren;*
- *Redelijke uniformiteit in een lading beton en tussen verschillende ladingen;*
- *Handhaven van de gewenste consistentie gedurende de beoogde stortperiode;*
- *En wanneer nodig moet het goede afwerkings eigenschappen hebben.*

De bouwdienst Rijkswaterstaat heeft in het rapport "Hogere Sterkte Beton, Ervaringen met sterkteklaasse B65 en hoger" (22) een overzicht van belangrijke uitvoeringsaspecten. Hieronder zijn de belangrijkste punten gegeven uit dit rapport.

### 3.2.1 Mengprocedure

Dit is een belangrijk aspect omdat het laag watergehalte en een hoog hulpstofaandeel leidt tot een droog mengsel. Hierdoor is het betonmengsel moeilijk te mengen. Uit onderzoek is gebleken dat het mengsel gefaseerd in de menger gedoseerd moet worden, vooral het tijdstip waarop de vul- en hulpstoffen worden gedoseerd zijn belangrijk. Door deze fasering duurt het totale mengproces langer dan normaal. Als silica fume, een puzzolaan, wordt gebruikt moet er voor worden gezorgd dat dit niet in aanraking komt met het nog droge cement.

### 3.2.2 Productiecapaciteit

De aangepaste mengprocedure, zoals in vorige sub paragraaf genoemd, heeft invloed op de productie van de betoncentrale. Met de volgende punten moet rekening gehouden worden bij de productie van het hogesterktebeton:

- *De gereduceerde capaciteit van de betoncentrale, dit is sterk afhankelijk van het mengertype. Bij C55/67 kan de capaciteit gereduceerd worden tot 75-90 procent en voor C70/85 zelfs tot 25-50 procent.*
- *Tijdens de productie van beton zijn ook spoel pauzes nodig, wat kan leiden tot onregelmatige aanvoer van beton op de bouwplaats.*
- *Bij hogesterktebeton is een continu stortproces belangrijk. Dus een goede afstemming tussen de toevoercapaciteit en de stortcapaciteit is van belang. Lange wachttijden voor de mixer kan leiden tot slecht verwerkbaar beton;*
- *Hogesterktebeton verhard snel.*

### 3.2.3 Verwerkbaarheid

Het storten, verdichten en afwerken wijkt af ten opzicht van normaal beton, de specie lijkt soms hoog vloeibaar door de hoge zetmaat maar is dat eigenlijk niet. Door de grote hoeveelheid cementpasta en fijne hulpstoffen kan een tixotroop gedrag ontstaan. Zonder toevoeging van energie, bijvoorbeeld trilenergie, kan een heel stijf mengsel ontstaan.

Hogesterktebeton is gevoelig voor kleine variaties in grondstoffen vanwege de lage watercementfactor. Ook wisselingen in weersomstandigheden zijn belangrijk. Dus bij de verwerking van hogesterktebeton is extra aandacht vereist om de kwaliteit te waarborgen. In een fabriek met geconditioneerde omstandigheden speelt dit een minder belangrijke rol, prefabricage van onderdelen in hogesterktebeton heeft dus veel voordelen.

Het continue en op het juiste moment aanvoeren van hogesterktebeton is erg belangrijk. Reeds gestort beton stabiliseert snel, beton dat 30 minuten later wordt gestort dan het aanwezige beton mengt niet altijd meer met al gestort beton. Door de lage watercementfactor is het mengsel ook gevoelig voor uitdroging. Door de uitdroging van het betonoppervlak kan een vel ontstaan dat de afwerking bemoeilijkt. Om dit te voorkomen moet het gestorte beton zo snel mogelijk worden afgedekt.

### 3.3 Duurzaamheid eigenschappen

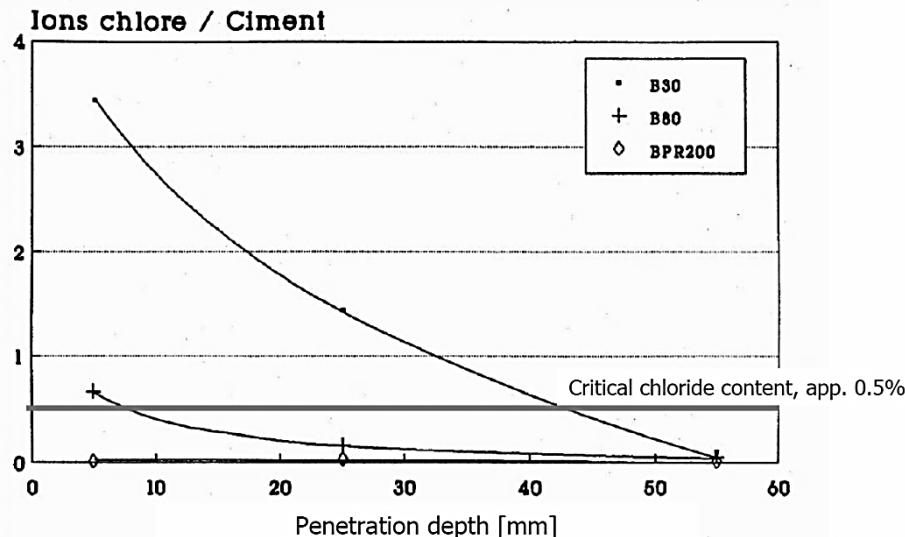
Duurzaamheid van beton is de belangrijkste zorg van de betonindustrie. Beton wordt standaard gespecificeerd op sterkteklasse, dit is daarom ook de meest belangrijke eigenschap van beton. Maar wanneer een constructie toe is aan sloop, reparatie of vervanging, is de oorzaak meestal duurzaamheid gerelateerd en niet sterkte gerelateerd (21).

#### 3.3.1 Permeabiliteit

De meeste duurzaamheidsproblemen van beton worden veroorzaakt door indringing van schadelijke stoffen in beton, zoals water, zout en sulfaat houdende stoffen. Deze stoffen kunnen in het beton uitzetten. Wat kan leiden tot scheurvorming. Ook corrosie van het wapeningstaal heeft dit effect, omdat ijzerroest een groter volume heeft dan materiaal waar het uit ontstaan is.

Reduceren van de permeabiliteit van het beton is de beste manier om de duurzaamheid van beton te verbeteren. Maar alleen een lage permeabiliteit betekent niet dat het beton duurzaam is, dit hangt van meer factoren af, waaronder geschiktheid van het ontwerp, duurzaamheidspotentieel van het beton geproduceerd en geleverd en de kwaliteit van de uitvoering.

De pakkingsdichtheid van hogesterktebeton is een stuk groter dan van conventioneel beton (3.1), dit komt door toevoeging van silica fume, dus de permeabiliteit is ook lager. Figuur 3-5 laat zien dat de indringing van chloride bij conventioneel beton veel hoger is dan bij hogesterktebeton. De lage permeabiliteit en het hoge cementgehalte van hogesterktebeton zorgen voor een beter bestandheid tegen carbonatatie dan conventioneel beton. Deze betere bestandheid tegen carbonatatie en de lagere indringing van chloride zorgt voor een betere bescherming tegen corrosie van staal in beton.



Figuur 3-5 Chloride indringing (17)

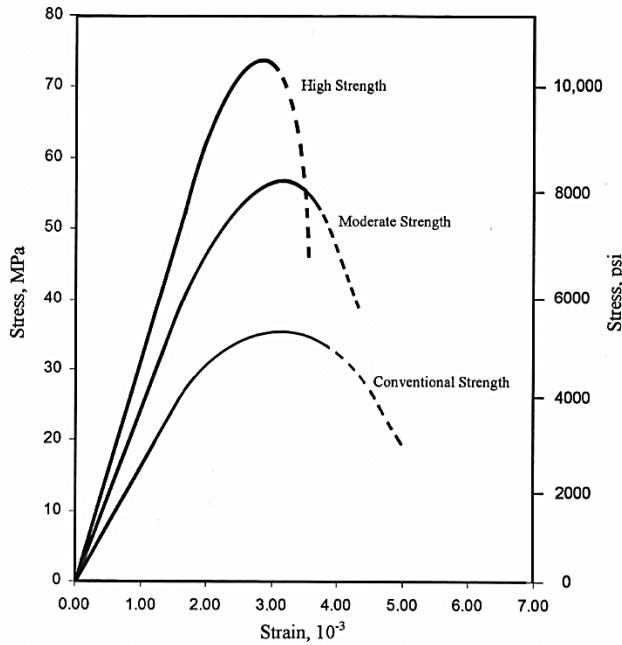
### 3.3.2 Alkali-toeslagreactie

Doordat hogesterktebeton grotere hoeveelheden cementgebonden materiaal bevat, wat veel oplosbare alkaliën bevat, moet extra aandacht besteedt worden aan alkali-toeslagreactie om scheurvorming te voorkomen. Toevoeging van silica fume kan economisch ingezet worden om de alkali-toeslagreactie te reduceren. Silica fume is in staat om de alkalicontenties in het poriënwater te verminderen, waardoor ze niet meer kunnen reageren met het toeslagmateriaal.

## 3.4 Mechanische eigenschappen

### 3.4.1 Spanning-rek

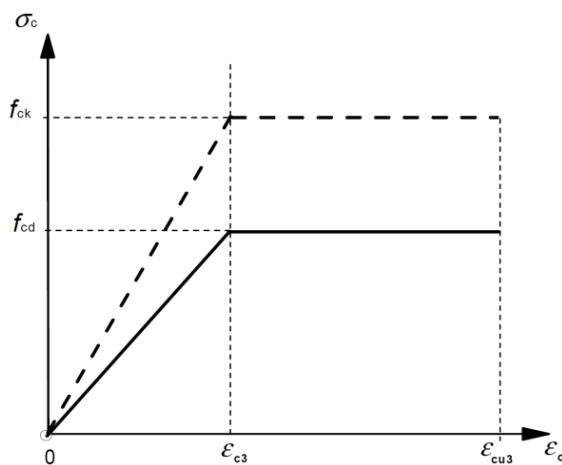
Het spanning-rek gedrag is vooral afhankelijk van de relatieve stijfheid van het cement en toeslagmaterialen en de bindingskracht hiertussen op het contactoppervlak. Figuur 3-6 geeft het typische spanning-rek diagram weer van verschillende typen beton. Als de sterkte groter wordt, wordt ook de helling groter, oplopend en aflopend en wordt het falen op druksterkte veel explosiever. Hogesterktebeton heeft dus een veel brosser gedrag. De constructie 'waarschuwt' dus niet voor falen door grote vervormingen te laten zien (21).



Figuur 3-6 Typische spanning rek diagram van hoog, gemiddeld en conventioneel beton (21)

#### Eurocode 2, art. 3.1.7

Figuur 3-7 geeft het spanning-rek diagram weer dat aangehouden moet worden en Tabel 3-1 de bijbehorende parameters voor hogesterktebeton.



Figuur 3-7 Spanning-rek diagram van beton (23)

#### 3.4.2 Elasticiteitsmodulus

Beton is geen perfect lineair-elastisch materiaal, maar de wet van Hooke kan toegepast worden op constructief beton binnen het spanningsbereik dat vaak gebruikt wordt in berekeningen. (21). De elasticiteitsmodulus is vooral afhankelijk van de grove toeslagmaterialen en de cementmatrix. Gebruik van groter of sterker toeslagmateriaal in beton leidt tot een hogere elasticiteitsmodulus.

*Eurocode 2, art. 3.1.3*

Voor beton met kwarts als toeslagmateriaal is de Elasticiteitsmodulus te berekenen met:

$$E_{cm} = 22 \left[ \frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad [ 3-1 ]$$

Indien gebroken granaat, gebroken basalt of harde dichte kalksteen als basistoeslagmateriaal is toegepast, moeten de representatieve waarde en de rekenwaarde van de elasticiteitsmodulus van beton C60/75 of hoger worden berekend met bovenstaande formule en worden vermenigvuldigd met 1,2.

Indien gebroken harde zandsteen als basistoeslagmateriaal is toegepast, moeten de representatieve waarde en de rekenwaarde van de elasticiteitsmodulus van beton C60/75 of hoger worden berekend met bovenstaande formule en worden vermenigvuldigd met 0,7.

De genoemde verhoging en verlaging van de waarde van de elasticiteitsmodulus moet alleen worden toegepast indien de aard van de toeslagmaterialen is voorgeschreven.

### 3.4.3 Druksterkte

De druksterkte van een betonmengsel is vooral afhankelijk van de interne structuur bestaande uit de toeslagkorrel en de cementmatrix. Dichtere pakking en verhoogde sterke van de cementmatrix zorgen voor een betonmengsel met een hogere betondruksterkte.

*Eurocode 2, art. 3.1.6*

De rekenwaarde van de druksterkte  $f_{cd}$  moet worden bepaald uit:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad [ 3-2 ]$$

Waarin:  $f_{ck}$  is de karakteristieke kubusdruksterkte;  
 $\alpha_{cc}$  is de coëfficiënt die rekening houdt met langeduureffecten op de druksterkte = 1,0;  
 $\gamma_m$  = 1,5 bij blijvende en tijdelijke ontwerpsituatie.

### 3.4.4 Treksterkte

De treksterkte is erg belangrijk voor de gevoeligheid voor scheurvorming en afschuifsterkte, dus belangrijk voor de duurzaamheid van de constructie. Dat is in dit onderzoek belangrijk omdat de betonnen sluisdeur veel in contact staat met water.

*Eurocode 2, art. 3.1.6*

De rekenwaarde van de treksterkte  $f_{ctd}$  moet worden bepaald uit:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad [3-3]$$

Waarin:

$f_{ctk,0,05}$	5% fractiel van de betontreksterkte;
$\alpha_{ct}$	is de coëfficiënt die rekening houdt met lange duur effecten op de treksterkte =1,0;
$\gamma_c$	= 1,5 bij blijvende en tijdelijke ontwerpsituatie.

### 3.4.5 Krimpverkorting

Betonkrimp is de volumevermindering van beton na storten. Verschillende aspecten hebben invloed op krimp, het belangrijkste aspect is de vochtigheidsgraad. Wanneer het betonelement ingeklemd is kan betonkrimp trek veroorzaken in het element. Dit kan leiden tot scheurvorming wat de duurzaamheid en levensduur vermindert. Er zijn verschillende mechanismen van krimp te onderscheiden (24):

- *Plastische krimp: krimp door verdamping van water in de nog plastische fase, ontstaat altijd in de eerste uren na het storten. Kan voorkomen worden door goede nabehandeling;*
- *Chemische- of verhardingskrimp: volumevermindering door de reactie van cement en water, het volume van de hydratieproducten is kleiner dan het oorspronkelijke volume van cement en water;*
- *Autogene krimp: bijzondere vorm van verhardingskrimp in beton met zeer lage w/c factor. Als door hydratatie het water opgebruikt is ontstaat door interne uitdroging volume vermindering van cementsteen;*
- *Uitdrogingskrimp: krimp door verdamping van niet gebonden water uit het beton.*

Van deze verschillende mechanismen is autogene krimp de belangrijkste in hogesterktebeton, omdat deze gerelateerd is aan de hoeveelheid vocht in het hardende beton. Door hydratatie van het cement neemt het water gehalte van het mengsel af. Door een lagere water-cementfactor is er eerder een gebrek aan het vocht in het mengsel, waardoor meer lege poriën ontstaan. De capillaire druk die dan ontstaat veroorzaakt dan krimp.

#### Eurocode 2, art. 3.1.4

De totale specifieke krimpverkorting moet worden berekend uit de som van de specifieke uitdrogingskrimp  $\varepsilon_{cd}$  en de specifieke verhardingskrimp  $\varepsilon_{ca}$ :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad [3-4]$$

De aan te houden waarde voor uitdrogingskrimp  $\varepsilon_{cd}$  is te zien in onderstaande tabel.

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relatieve vochtigheid (%)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

Figuur 3-8 Waarden voor de nominale onbelemmerde uitdrogingskrimpverkorting (%)

Voor de berekening van de specifieke verhardingskrimp  $\varepsilon_{ca}$  voor  $f_{ck} \geq 75 \text{ N/mm}^2$  geldt:

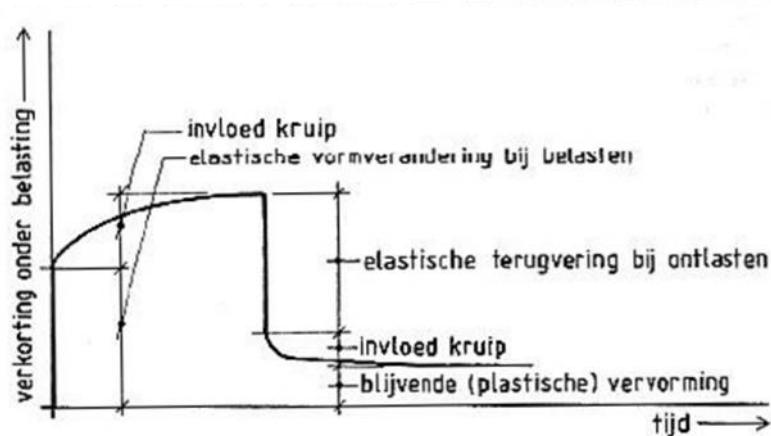
$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \times 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad [3-5]$$

Waarin:  $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$

### 3.4.6 Kruip

Kruip is een tijdsafhankelijke vervorming onder aanhoudende belasting. Dit betekent dat als een constructie wordt belast met een constante belasting, de vervorming toeneemt over de tijd. De totale kruip bestaat uit twee delen: reversibel deel en de plastische rek (25), zie Figuur 3-9 voor een schematische voorstelling. Het reversibel deel verdwijnt als de belasting eraf is, de plastische rek is permanent.

Ook kruip is sterk afhankelijk van de water-cementfactor. Meer water resulteert in meer poriën en dus een minder dicht cementsteen. Vochttuitwisseling treedt dus gemakkelijker op door deze open structuur. Dus hogesterktebeton, met een lagere water-cementfactor, heeft minder kruip dan conventioneel beton.



Figuur 3-9 Schematische weergave van kruip in beton [CAE Nederland B.V.]

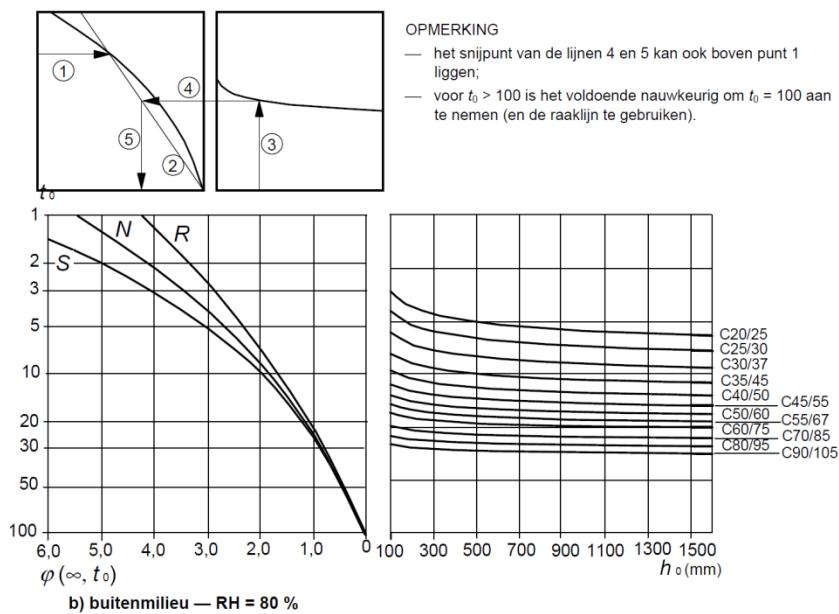
### Eurocode 2, art. 3.1.4

Hoewel kruip in principe een blijvende vervorming is, is er een duidelijk verband tussen de kruipvervorming ( $\varepsilon_\varphi$ ) en de elastische vervorming ( $\varepsilon_e$ ). Dit verband wordt aangegeven met de kruipcoëfficiënt  $\varphi$ :

$$\varepsilon_\varphi = \varphi \times \varepsilon_e$$

$\varphi_{\max}$  is de maximaal aan te houden rekenwaarde van de kruipcoëfficiënt, afhankelijk van  $f_{ck}$  en van de relatieve vochtigheid. Hieronder is de methode weergegeven voor de bepaling van de kruipcoëfficiënt. In deze grafieken zijn S, N en R een klasse van het beton die afhangt van de soort cement.

Maximaal aan te houden waarden van de kruipcoëfficiënt



Figuur 3-10 Methode voor de bepaling van de kruipcoëfficiënt (23)

### 3.4.7 Vermoeiing

Over vermoeiing van hogesterktebeton is nog weinig bekend, en rekenregels voor vermoeiing van hogesterktebeton zijn er ook niet. Een conservatieve vermoeiingsberekening kan gedaan worden via de regel van Miner, te vinden in NEN 6723, artikel 9.6.2.1:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad [3-6]$$

Waarin:  $m$  is het aantal beschouwde intervallen met vastgelegde spanningsomstandigheden;  
 $n_i$  is het aantal spanningswisselingen binnen interval  $i$ ;  
 $N_i$  is het aantal spanningswisselingen dat leidt tot bezwijken onder spanningsomstandigheden die overeenkomen met die in interval  $i$ .

*Het aantal spanningswisselingen  $N_i$  dat het beton kan ondergaan bedraagt bij:*

- *Een wisselende drukspanning:*

$$\log N_i = \frac{10}{\sqrt{1-R}} \left( 1 - \frac{\sigma'_{b;d;\max}}{f'_{b;v}} \right) \quad \text{voor } \frac{\sigma'_{b;d;\max}}{f'_{b;v}} > 0,25$$

$$N_i = \infty \quad \text{voor } \frac{\sigma'_{b;d;\max}}{f'_{b;v}} < 0,25$$

Waarin:  $R$  is de grootte van de spanningswisseling =  $\frac{\sigma'_{b;d;min}}{\sigma'_{b;d;max}}$ ;  
 $\sigma'_{b;d;max}$  is de rekenwaarde van de maximaal optredende drukspanning in het beton, in N/mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma'_{b;d;min}$  is de rekenwaarde van de minimaal optredende drukspanning in het beton, in N/mm<sup>2</sup>;  
 $f'_{b,v}$  is de rekenwaarde van de druksterkte van beton in de grenstoestand bij vermoeiing, in N/mm<sup>2</sup>;

Waarin:  $f'_{b,v} = \frac{f'_{rep;v}}{\gamma_m}$ ;  
 $\gamma_m$  is de materiaal factor (= 1,2);  
 $f'_{rep;v}$  is voor sterkteklassen groter dan C25/30 in N/mm<sup>2</sup>:  
 $= 0,5(f'_{rep;k} - 0,85 \times 30) + 0,85 \times 30$ ;  
 $f'_{rep;k}$  is de representatieve waarde van de eenassige kortduursterkte van beton gelijk aan  $0,85 \times f'_{ck}$  in N/mm<sup>2</sup>.

- *Een wisselende trekspanning:*

$$\log N_i = 10 \left( 1 - \frac{\sigma_{b;d;max}}{f_{b,v}} \right) \quad \text{voor } \frac{\sigma_{b;d;max}}{f_{b,v}} > 0,25$$

$$N_i = \infty \quad \text{voor } \frac{\sigma_{b;d;max}}{f_{b,v}} < 0,25$$

Waarin:  $\sigma_{b;d;max}$  is de rekenwaarde van de maximaal optredende trekspanning in het beton, in N/mm<sup>2</sup>;  
 $f_{b,v}$  is de rekenwaarde van de treksterkte van beton in de grenstoestand bij vermoeiing, in N/mm<sup>2</sup>.

Waarin:  $f_{bv} = \frac{1,00 + 0,05 \times f'_{b;rep;v}}{\gamma_m}$ ;  
 $\gamma_m = 1,4$ .

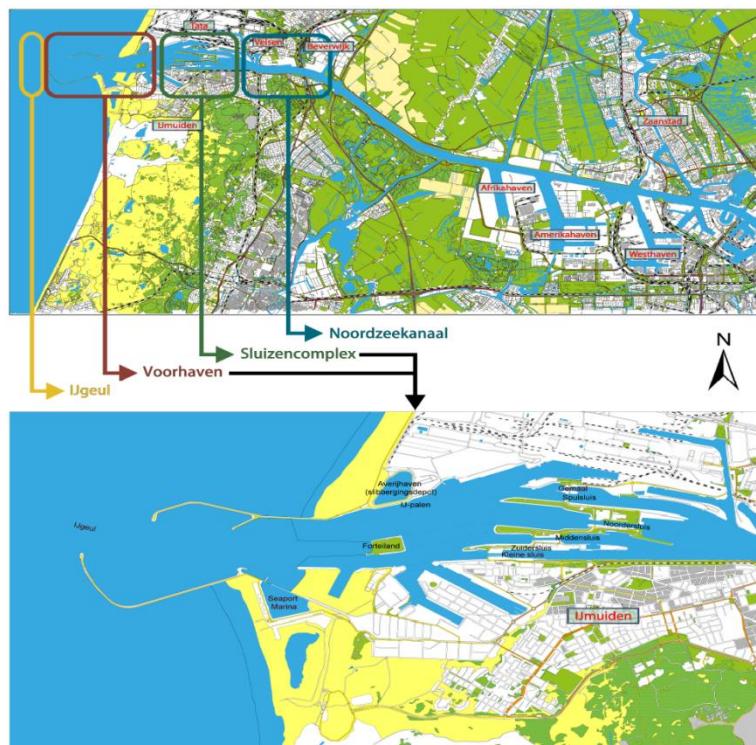
## 4. REFERENTIESITUATIE

Voordat met de varianten ontwikkeling begonnen wordt, is er naar een referentiesituatie gekeken. Om tot verschillende varianten voor grote sluisdeuren te komen moeten er realistische randvoorwaarden en eisen zijn. Hiertoe is naar de nieuwe zeesluis in IJmuiden gekeken welke realistische randvoorwaarden en eisen zal leveren die binnen het onderzoeksgebied passen, zie hoofdstuk 1.

Dit hoofdstuk behandelt eerst kort de achtergrond van de “Nieuwe Zeesluis IJmuiden”. In de paragrafen daarna worden de randvoorwaarden en functionele eisen besproken. Hierbij zullen alleen de gegevens die nodig zijn voor het ontwerp van een sluisdeur beschouwd worden.

### 4.1 Achtergrond Nieuwe Zeesluis IJmuiden

In Figuur 4-1 is het Zeesluizencomplex bij IJmuiden te zien en ook hoe dit complex in de omgeving gelegen is. Het Noordzeekanaalgebied strekt zich uit van de IJgeul tot aan de Oranjehavens in Amsterdam. Het Noordzeekanaal zorgt ervoor dat schepen vanuit de havens de Noordzee kunnen bereiken en andersom. De IJgeul en het zeesluizencomplex in IJmuiden zorgen ervoor dat schepen vanaf de Noordzee het Noordzeekanaal kunnen bereiken (26).



Figuur 4-1 Zeesluizencomplex en omgeving (27)

Het sluizencomplex bestaat uit drie schutsluizen, de Zuiderluis (1876), de Middensluis (1896), de Noordersluis (1929). Verder zijn er een gemaal en spuisluizen. Dit hele complex heeft een waterkerende functie.

In 2008 heeft Rijkswaterstaat een Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport-verkenning (MIRT-verkenning) gedaan. Hieruit kwam als belangrijkste conclusie naar voren dat binnen niet te lange tijd de Noordersluis om technische redenen aan grondige renovatie of vervanging toe is, zodat de zeehavens van Noordzeekanaalgebied bereikbaar blijven. Uit deze MIRT-verkenning is naar voren gekomen dat het vervangen van de Noordersluis de beste oplossing is om de economische ontwikkeling in het Noordzeekanaalgebied mogelijk te maken en knelpunten rond de zee toegang aan te pakken.

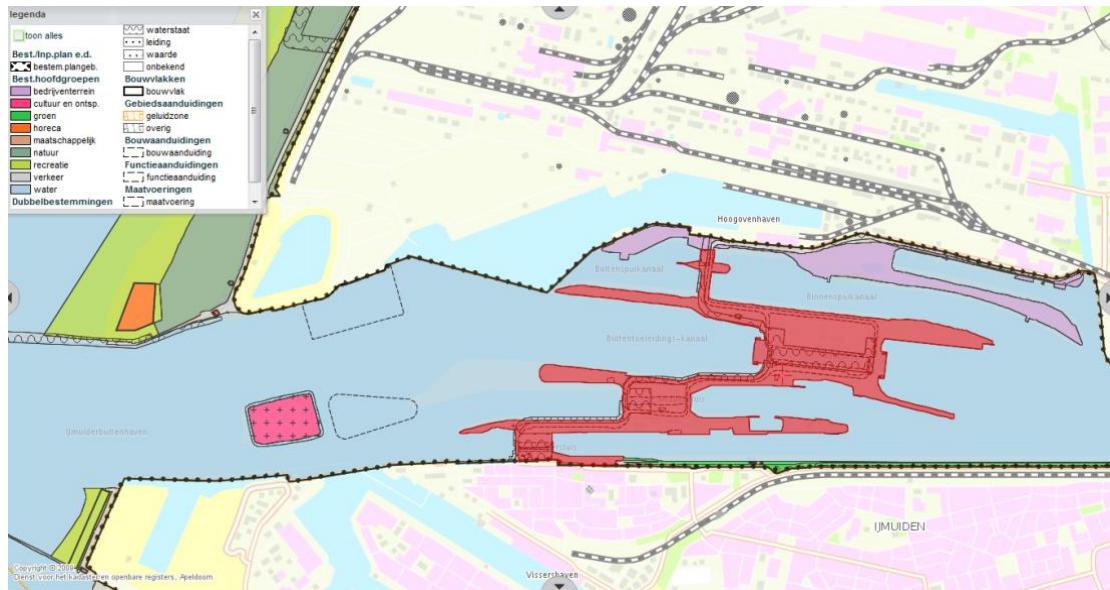
De Provincie Noord-Holland en de gemeente Amsterdam hebben als eis gesteld dat de nieuwe sluis ruimere afmetingen heeft dan de huidige Noordersluis en dat de Noordersluis uiterlijk in 2029 vervangen moet zijn. Door een nieuwe grotere zeesluis aan te leggen wordt de capaciteit van de zee toegang vergroot en schepen hoeven minder lang te wachten.

## 4.2 Randvoorwaarden

Randvoorwaarden zijn gegevens met betrekking op de natuurlijke en bebouwde omgeving die van invloed zijn op het kunstwerk. Hieronder vallen ook toekomstige veranderingen die het functioneren van de sluis beïnvloeden. De meeste randvoorwaarden komen uit het rapport "update hydraulische randvoorwaarden ter plaatse van de Nieuwe Zeesluis te IJmuiden" (28). Dit is een update van de hydraulische ontwerprandvoorwaarden die in 2003 door RWS zijn opgesteld (OR2003).

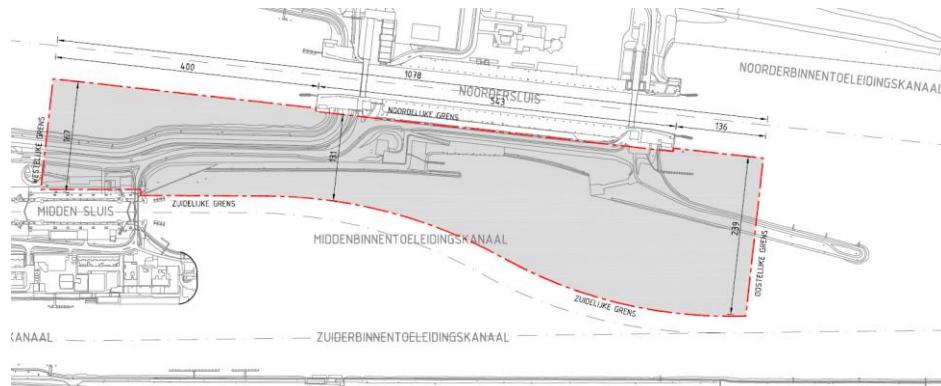
### 4.2.1 Topografie

In Figuur 4-1 en Figuur 4-2 laten zien dat ten zuiden van het sluizencomplex bebouwing van IJmuiden is, ten noorden industrie en ten westen duingebied. De figuren laten ook zien dat er aan het vaste land geen vrije ruimte is die eventueel gebruikt kan worden als bouwterrein.



Figuur 4-2 Bestemmingsplan (29)

In de Subvariantennota (30) is onderzocht wat het inpassinggebied is van de Nieuwe Zeesluis. Hierbij is gekeken naar de constructieve grenzen, bestaande en nieuwe constructies en nautische grenzen. In Figuur 4-3 is het inpassingsgebied weergegeven. De minimale breedte in het inpassingsgebied is 131 meter en de maximale lengte 1078 meter.



Figuur 4-3 Inpassingsgebied Nieuwe Zeesluis (30)

#### 4.2.2 Waterstanden

De waterstanden en golf gegevens die nodig zijn voor het ontwerp van sluisdeur zijn hier gegeven.

## Maatgevend verval

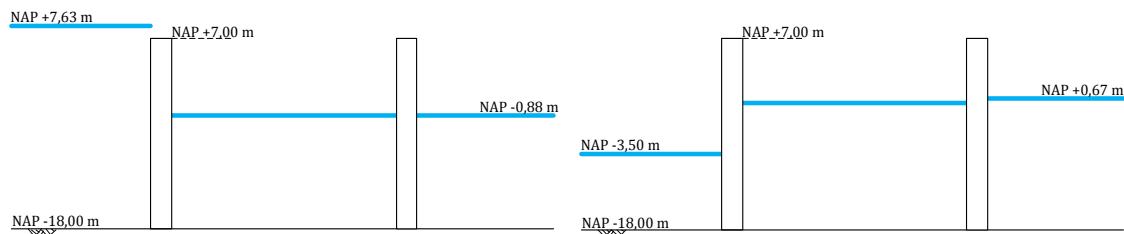
Tabel 4-1 Maatgevend positief en negatief verval (frequentie van  $10^{-4}$ )

	maximaal positief verval	maximaal negatief verval
waterstand Noordzee-zijde	6,86 m +NAP	-3 m +NAP
afwaaing Noordzee-zijde		-0,11 m
waterstand Noordzeekanaal-zijde	-0,58 +NAP	-0,07 m +NAP
op- of afwaaing Noordzeekanaal-zijde	-0,3 m	0,3 m
verval tussenresultaat	7,74 m	-3,34 m
robuustheidstoeslag (10%)	0,77 m	-0,33 m
<b>waterstand Noordzeekanaal-zijde</b>	<b>-0,88 m +NAP</b>	<b>0,67 m +NAP</b>
<b>waterstand Noordzee</b>	<b>7,63 m +NAP</b>	<b>-3,5 m +NAP</b> inclusief golven ( $H_d=0,50$ m)
<b>Verval</b>	<b>8,51 m</b>	<b>-4,17 m</b>

De bepaling van de waterstand aan de Noordzee-zijde is te zien in Tabel 4-2.

Tabel 4-2 Waterstand Noordzee-zijde (m + NAP)

MHW	5,16
Opwaaiing (inclusief 10% toeslag)	0,25
zeespiegelstijging	0,85
seiche ( $H/2$ )	0,6
<b>waterstand</b>	<b>6,86</b>



Figuur 4-4 Maatgevend verval, links: positief, rechts: negatief

## Schutpeilen

- Schutten zeezijde (frequentie van  $10^{-1}/jaar$ )

Minimaal schutpeil (2010) NAP -2,20 meter.  
Minimaal schutpeil (2110) NAP -1,35 meter.

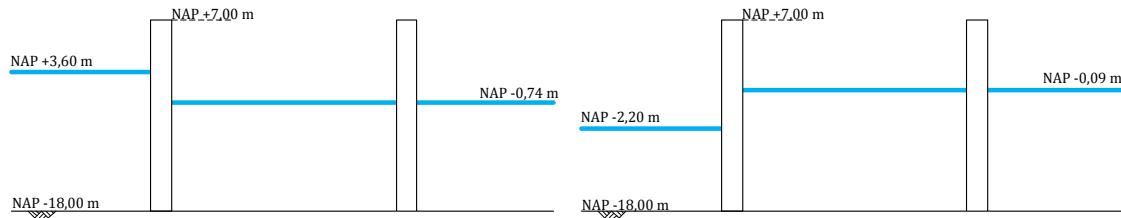
Maximaal schutpeil (2010) NAP +2,95 meter.  
Maximaal schutpeil (2110) NAP +3,60 meter.

- Schutten kanaalzijde (frequentie van  $10^{-1}/jaar$ )

Minimaal peil NAP -0,54 meter.  
Maximaal peil NAP -0,29 meter.  
Afwaaing +/- 0,20 meter.

Tabel 4-3 Maatgevend positief en negatief verval bij schutten

	maximaal positief verval	maximaal negatief verval
waterstand Noordzee-zijde	3,60	-2,20
waterstand Noordzeekanaal-zijde	-0,74	-0,09
verval	4,34	-2,11



Figuur 4-5 Maatgevend verval bij schutten, Links: positief, Rechts: negatief

#### 4.2.3 Golven

Hieronder zijn de golven karakteristieken gegeven die nodig zijn op de belasting ten gevolge van deze golven te berekenen. Hierin is  $H_s$  de significante golfhoogte en  $T_s$  de significante golfperiode.

- *Extreme situatie (zeezijde)*       $H_s = 2,24 \text{ meter}$        $T_s = 5,00 \text{ seconden};$
- *Normale situatie (zeezijde)*       $H_s = 0,80 \text{ meter}$        $T_s = 2,60 \text{ seconden};$
- *Normale situatie (kanaalzijde)*       $H_s = 0,40 \text{ meter}$        $T_s = 2,00 \text{ seconden};$

De amplitude door translatiegolven is aan de zeezijde 0,10 meter en aan de kanaalzijde 0,20 meter. Voor beide is de steilheid 0,10 m/min.

#### 4.2.4 Wind

In Tabel 4-4 staan voor verschillende frequenties en windrichtingen de uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte voor de Buitenhaven van IJmuiden.

Tabel 4-4 Uurgemiddelde windsnelheden (m/s) voor verschillende windrichtingen

Frequentie	0° N (N)	330° N (NW)	300° N (WNW)	270° N (W)	180° N (Z)	90° N (O)
1/jaar	12,3	14,7	15,6	17,8	15	12,3
10 <sup>-1</sup> /jaar	17,1	19,9	22,5	24,1	19,2	16,2
10 <sup>-2</sup> /jaar	20,8	24	27,6	29	23,3	19,1
10 <sup>-3</sup> /jaar	23,9	27,4	31,9	33,2	25	21,6
10 <sup>-4</sup> /jaar	26,6	30,4	35,7	36,9	27,2	23,7

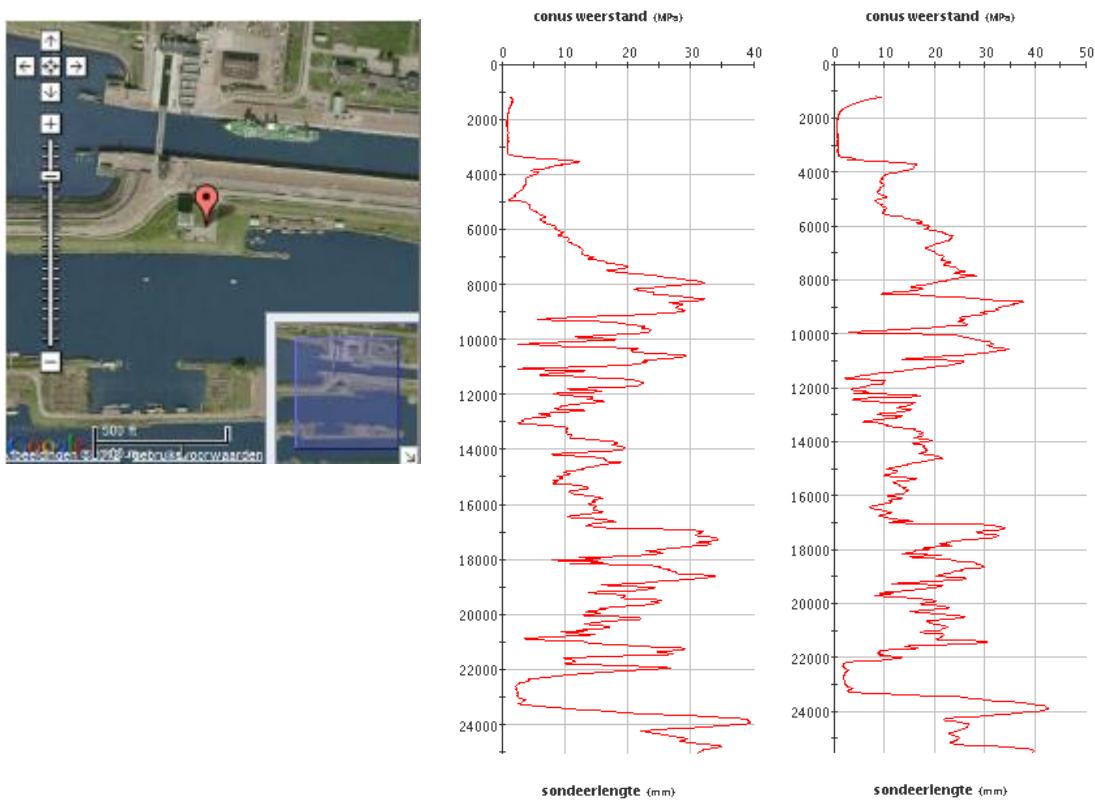
#### 4.2.5 Bodemgesteldheid

In Figuur 4-6 zijn twee sonderingen te zien die in 1998 zijn gemaakt. Deze sonderingen zijn ongeveer op de plek gemaakt waar de Nieuwe Zeesluis zou moeten komen. Te zien is dat zich over ongeveer de eerste 5 meter een slappe laag bevindt. Hieronder bevindt zich een stevige zandlaag. Op 22 meter is een flinke daling in de conusweerstand te zien. Hier bevindt zich een kleilaag van ongeveer 2 meter.

In een ontwerpnota van Rijkswaterstaat (31) is de bodemopbouw geschematiseerd. Deze is in Tabel 4-5 gegeven met bijhorende grondeigenschappen. Deze schematisering verschilt met de gegevens uit TNO-dinoloket, maar deze schematisering wordt aangehouden tijdens het afstudeeronderzoek. Vanaf het niveau van NAP – 20,00 meter naar beneden bevindt zich de vaste zandlaag en de 2e afsluitende laag bevindt zich op ongeveer NAP -50,0 m.

Tabel 4-5 Grondeigenschappen

grondsoort	Bovenzijde [m NAP]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'$ [°]	$\Psi$ [°]	$\delta'$ [°]	$c'$ [kPa]
Zand met kleilagen (DKL)	5	18/20	27	0	2/3 $\phi$	0,1
Pleistoceen Zand	-20	18/20	32,5	2,5	2/3 $\phi$	0,1



Figuur 4-6 Sonderingen bij sluizencomplex IJmuiden (32)

## 4.3 Functionele eisen

De functionele eisen van de schutsluis zijn in drie aspecten op te splitsen; de functionele eisen betreffende de scheepvaart, de functionele eisen betreffende de waterkering en het verbinden van het landverkeer.

### 4.3.1 Functionele eisen betreffende de scheepvaart

De belangrijkste functionele eis is dat een maatgevend schip de sluis voldoende snel en veilig kan passeren. Hieronder zijn de functionele eisen gegeven die belangrijk zijn betreffende de scheepvaart.

#### *Maatgevend schip*

De maatgevende schepen die de sluis moeten kunnen passeren zijn gegeven in Tabel 4-6. De maximale snelheid bij in- en uitvaren is 5 km/h.

Tabel 4-6 Maatgevende schepen

Schip	afmetingen [m]	gewicht [DWT]
containerschip Emma Maersk	398x56,4x13,75	156907
Bulkcarrier	300x57x13,75	200000

#### *Afmetingen sluiskolk en sluishoofd*

De volgende afmetingen van de sluiskolk en sluishoofd worden aangenomen om de globale afmetingen van de sluisdeur te bepalen (26):

- *De drempeldiepte is op 18 meter – NAP;*
- *De kerende hoogte van de sluisdeur is 7 meter + NAP;*
- *Sluiskolk breedte 70 meter;*
- *Lengte kolk 500 meter;*
- *Onbeperkte doorvaartheight, inclusief 10 meter over de kade.*

De kerende hoogte van de sluisdeur is als volgt berekend:

Tabel 4-7 Berekening ontwerpwaterstand keerdeuren ( $m + NAP$ )

MHW	5,16
Opwaaiing (inclusief 10% toeslag)	0,28
zeespiegelstijging	0,85
seiche ( $H/2$ )	0,60
robuustheidtoeslag	0,10
<b>ontwerpwaterstand</b>	<b>6,99</b>

Bij deze constructie hoogte is er geen spraken van overlopen, maar wel van overslag, hierbij moet rekening gehouden met het ontwerp van de terrein verharding.

#### *Passeertijden en Nivelleertijden*

De bewegingstijd van het keringsmiddel dient voor het openen maximaal 7 minuten te bedragen en voor het sluiten ook maximaal 7 minuten.

Het nivelleren van een schip in de sluiskolk mag niet langer duren dan 12 minuten onder normale omstandigheden. Onder normale omstandigheden wordt verstaan de dagelijkse waterstanden aan de Noordzeezijde bij extreem astronomisch getij, namelijk een hoogwaterstand NAP +1,45 meter en Laagwaterstand NAP -1,07 meter. Bij extreme situaties (maximale schutpeilen) mag de nivelleertijd maximaal 19 minuten zijn (33).

### Beschikbaarheid

De beschikbaarheid van de nieuwe sluis dient minimaal 98% te bedragen van de tijd. Hierbij is rekening gehouden met planbaar onderhoud, niet-gepland onderhoud en niet beschikbaarheid door overschrijding maximaal schutpeil en onderschrijding minimaal schutpeil (33).

#### 4.3.2 Functionele eisen betreffende de waterkering

De schutsluis bevindt zich in een dijkring welke in tact moet blijven tijdens de uitvoering en na de uitvoering. De sluis, inclusief de aansluitende waterkeringen dient te functioneren als onderdeel van de primaire waterkering. De veiligheidsnorm waarmee gerekend dient te worden volgens de waterwet bedraagt 1:10.000 jaar. De ontwerplevensduur van niet vervangbare civiele onderdelen moet minimaal honderd jaar zijn; van eenvoudig vervangbare onderdelen moet de levensduur minimaal 50 jaar zijn.

De sluis dient bij een hoogwatersituatie op het Noordzeekanaal te kunnen spuien met een navolgende capaciteit (34):

*Tabel 4-8 Eisen ten behoeve van spuicapaciteit*

Verval [m]	Debit [m <sup>3</sup> /s]
0,2	50
0,4	70
0,6	85
0,8	100
1	110

In de TAW-leidraad "waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies" (35) worden eisen geformuleerd ten aanzien van overlopen en overslag, de sterkte en stabiliteit en betrouwbaarheid van sluiting van het afsluitmiddel. De eisen ten aanzien van overlopen en overslag zijn van belang voor de waterkerende hoogte. De kans op overlopen moet kleiner zijn dan  $10^{-4}$  per jaar. De waterkerende hoogte is in het rapport "Update hydraulische ontwerpstandaarden ter plaatse van de Nieuwe Zeesluis te IJmuiden" berekend. Zoals hierboven gegeven, is deze 7 meter.

De sterkte- en stabiliteitsberekening en de betrouwbaarheid van sluiting van de sluisdeur worden gedaan volgens de Eurocode en de TAW-leidraad. Om aan de eis ten aanzien van niet sluiten te voldoen moet de gehele sluis waterkerend zijn. Wanneer één van de sluisdeuren niet sluit moet de sluis alsnog waterkerend zijn, de kolkwanden moeten dezelfde hoogte hebben als de sluisdeur om ervoor te zorgen dat de sluis waterkerend is

als een sluisdeur niet dicht is. Er kan dus niet getrapt worden gekeerd en de kolkwanden moeten dezelfde (kerende)hoogte hebben als de sluisdeur, +7 meter NAP. (34). En beide sluisdeuren moeten het maximale verval kunnen keren.

#### 4.3.3 Functionele eisen betreffende verbinden landverkeer

Over de sluis dient een wegverbinding te worden gerealiseerd, die aansluit op de bestaande wegen over het sluizencomplex. Verder dient er ook een vrij liggend fietspad over de Nieuwe Zeesluis te zijn aangelegd, dat aansluit op de bestaande fietspaden.

# 5. BELASTINGEN

Op de constructie werken verschillende belastingen, deze worden hieronder gegeven. Vervolgens zijn de belastingsituaties gegeven die maatgevend zijn voor de constructie en waarop de constructie getoetst wordt.

## 5.1 Belastinggevallen

Er is een onderscheid gemaakt tussen drie verschillende belastinggevallen, permanente belasting, variabele belasting en bijzondere belastingen.

### 5.1.1 Permanent

#### *Eigengewicht*

De belasting uit het eigengewicht van de constructie, de constructieonderdelen die altijd aanwezig zijn.

#### *Opdrijvende krachten*

Deze opwaartse kracht komt voornamelijk van de drijfkisten in de sluisdeur. Aangenomen is dat de drijfkisten zich altijd volledig onderwater bevinden. Deze reduceren de verticale belasting van de sluisdeur. De sluisdeur moet vervangen kunnen worden bij een minimum peil van NAP -2,2m, en dient zelfstandig stabiel te zijn in drijvende situatie ook na een aanvaring.

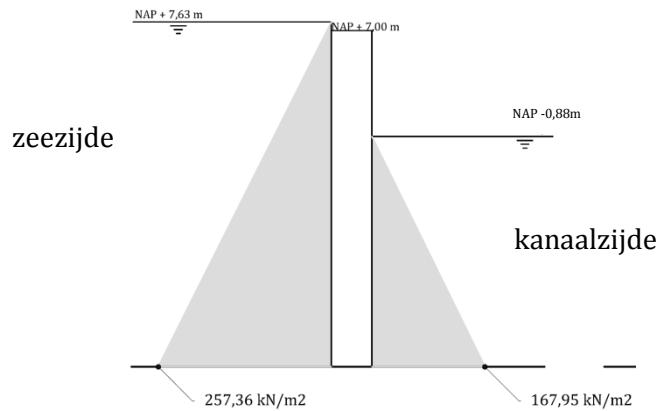
### 5.1.2 Variabele belastingen

#### *Waterdruk door maximaal verval*

Hieronder zijn in figuren de waterdrukken gegeven bij maximaal positief verval en bij maximaal negatief verval, zoals in 4.2.2 bepaald. Voor het water aan de Noordzeezijde wordt gerekend met een dichtheid van 1022kg/m<sup>3</sup> en aan de kanaalzijde met een dichtheid van 1000 kg/m<sup>3</sup>.

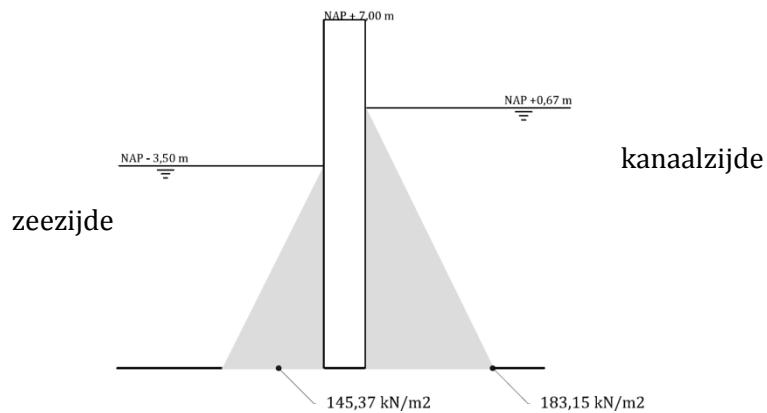
De sluisdeur aan de Noodzeezijde (de buitendeur) moet de maximale waterstand kunnen keren. Om de belastingen t.g.v. het verval te reduceren bestaat een mogelijkheid om de waterstand in de kolk hoger in te stellen dan de waterstand op het Noordzeekanaal (getrapt keren). Er moet echter ook rekening worden gehouden met de kans dat de sluiting van de sluisdeur faalt, waardoor de binnendeur deze functie overneemt (op deze wijze ontstaat een dubbele kering). Ook is het mogelijk dat juist de binnendeur faalt. Het te keren verval is in beide gevallen een combinatie van de maximale waterstand aan de Noordzee-zijde en een lage waterstand op NZK. Dit is een conservatieve aanname omdat het gelijktijdig optreden van het falen van de sluisdeur en de extreme storm klein is.

- *Maximaal positief verval*



Figuur 5-1 Waterdruk bij maximaal positief verval

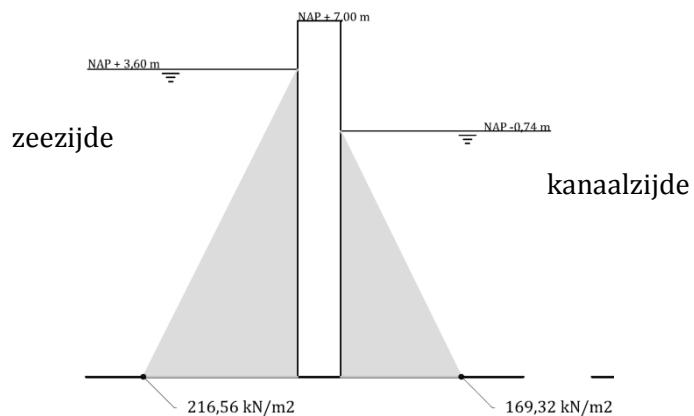
- *Maximaal negatief verval*



Figuur 5-2 Waterdruk bij maximaal negatief verval

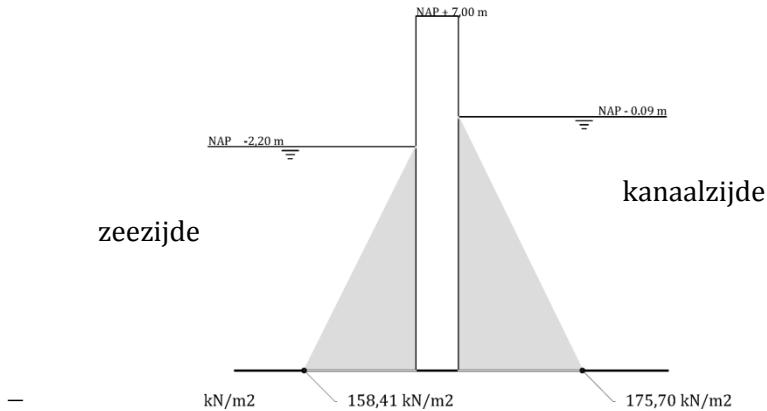
### Waterdruk door maximaal verval tijdens schutten

- *Maximaal positief verval*



Figuur 5-3 Waterdruk bij maximaal positief verval tijdens schutten

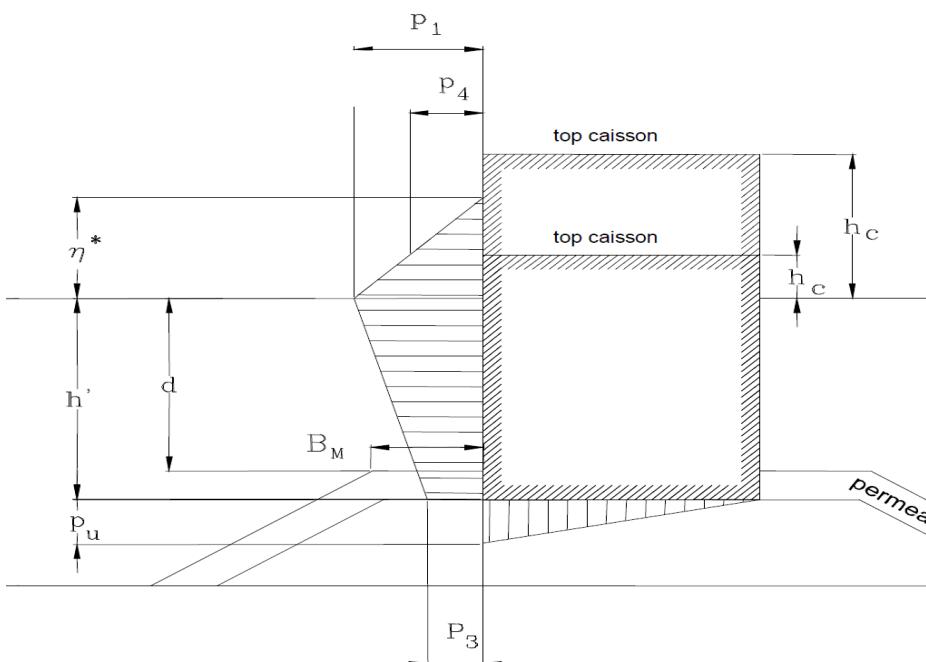
- *Maximaal negatief verval*



Figuur 5-4 Waterdruk bij maximaal negatief verval tijdens schutten

### Waterdruk ten gevolge van golven

Bij een maximaal positief verval moet extra waterdruk op de sluisdeur meegenomen worden veroorzaakt door de windgolven, de quasi-statische windbelasting. Deze waterdruk door de golven wordt berekend volgens de methode van Goda, zie Figuur 5-5. Hierbij is verwaarloosd dat de waterstand bij maximaal verval 0,63 meter boven de sluisdeur staat.



Figuur 5-5 Golfdrukken volgens de methode van Goda (36)

De maximale waterdrukken zijn:

$$p_1 = 0,5(1 + \cos(\beta))(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2\cos^2(\beta))\rho g H_D \quad [5-1]$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

Waarin:  $p_1$ ,  $p_4$  en  $p_3$  zijn de maximale waterdrukken [ $\text{kN}/\text{m}^2$ ]

$\lambda_1, \lambda_2$  zijn factoren afhankelijk van de vorm van de constructie en van golfcondities (rechte muur en niet brekende golven:  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ )

$\beta$  is de hoek van de inkomende golf

$$\alpha_1 := 0.6 + 0.5 \frac{\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{h}{L_D}\right)}{\sinh\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{h}{L_D}\right)}$$

$$\alpha_2 := \min \left[ \left(1 - \frac{d}{h_b}\right) \cdot \frac{\left(\frac{H_D}{d}\right)^2}{3}, 2 \cdot \frac{d}{H_D} \right]$$

$$\alpha_3 := 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{L_D}\right)}\right)$$

$h_b$  is de waterdiepte op  $5H_D$  voor de muur

$H_D$  is de ontwerp golfhoogte, is 4,9m, zie bijlage A

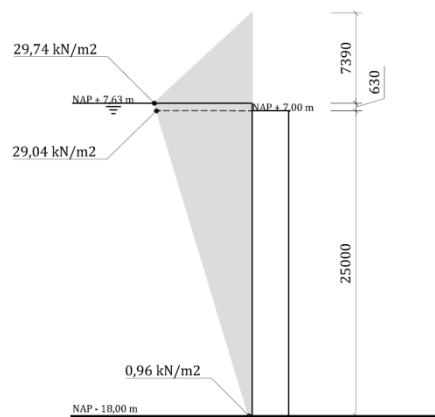
$L_D$  is de ontwerp golflengte, is 39m, zie bijlage A

$d$  is de waterdiepte boven de drempel

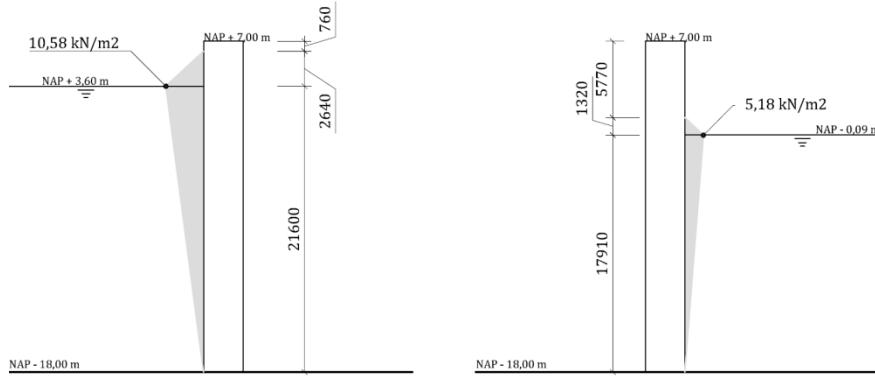
$h'$  is de waterdiepte boven de muur fundering

$h$  is de waterdiepte voor de drempel

In bijlage A is de berekening gegeven voor de waterdrukken bij een maximaal positief verval. In Figuur 5-6 en Figuur 5-7 zijn de resultaten te zien van respectievelijk de extra waterdrukken bij maximaal positief verval en bij maximaal positief en negatief verval tijdens schutten. Golven vanuit het Noordzeekanaal worden niet beschouwd, alleen een opwaaiing van 0,2m is daar in rekening gebracht.



Figuur 5-6 Golfdruk bij maximaal positief verval



Figuur 5-7 Gofdruk bij maximaal positief en negatief verval tijdens schutten

### Wind

De stuwdruk veroorzaakt door de wind kan worden berekend met de formule hieronder (36).

$$p_{\text{rep}} = C_{\text{dim}} C_{\text{index}} p_w \quad [5-2]$$

Waarin:  $p_{\text{rep}}$  is de wind belasting als gevolg van de winddruk, zuiging, frictie en over- en onderdruk [kN/m<sup>2</sup>];

$C_{\text{dim}}$  is een factor voor de afmetingen van de constructie, uit tabel 8-3 van (36) volgt: 0,87 [-];

$C_{\text{index}}$  is de wind type factor, uit figuur 8-3 van (36) volgt: 0,8 [-];

$p_w$  is de extreme stuwdruk,  $p_w = (1 + 7 \times l(z))^{\frac{1}{2}} \rho v_w^2(z)$  [N/m<sup>2</sup>];

$v_w$  is de windsnelheid op hoogte  $z$  [m/s], Tabel 4-4 geeft als maximale waarde voor de frequentie van 10<sup>-4</sup>/jaar. Voor wind uit het westen is deze 36,9 m/s en voor wind uit het oosten 23,6 m/s.

$\rho$  is de massadichtheid van lucht, 1,25 kg/m<sup>3</sup>;

$l(z)$  is de turbulentie-intensiteit op hoogte  $z$  [-];  $l(z) = \frac{k}{\ln(\frac{z-d}{z_0})} = \frac{1,0}{\ln(\frac{10-0,0}{0,1})} =$

0,217; waarde van  $k$ ,  $d$  en  $z_0$  komen uit tabel 8-1 van (36).

Wind vanaf zee:

$$p_w = (1 + 7 \cdot 0.217 \cdot 0.5 \cdot 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left( \frac{36.9 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2) = 2.14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$p_{\text{rep}} = 0.87 \cdot 0.82 \cdot 2.14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Wind vanaf het kanaal:

$$p_w = (1 + 7 \cdot 0.217 \cdot 0.5 \cdot 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left( \frac{23.6 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2) = 0.88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$p_{\text{rep}} = 0.87 \cdot 0.80 \cdot 0.88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0.61 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### 5.1.3 Bijzondere belastingen

#### *Aanvaring*

Deze belasting is in een los hoofdstuk behandeld, zie hoofdstuk 7.

## 5.2 Belastingsituaties

Er worden twee belastingsituaties onderscheiden die maatgevend zijn voor de belasting op de sluisdeur. De sluisdeur in gesloten stand en de sluisdeur in gebruik, wanneer het waterpeil zich tussen het minimum en maximum schutpeil bevindt.

#### *Gesloten situatie*

In deze situatie wordt de waterkerende functie van de waterkering onderzocht. In deze situatie is geen navigatie meer mogelijk, of door de extreem hoge waterstand of door de extreem lage waterstand. Er worden twee belastingsituaties onderscheiden, te weten maximum positief verval en maximum negatief verval. Dit zijn de maatgevende belastinggevallen voor de sluisdeur.

#### *De sluisdeur in gebruik*

In deze situatie wordt gekeken naar het open- en sluitproces van de sluisdeur. In deze situatie moet de stabiliteit van de sluisdeur gegarandeerd worden. Het ontwerp moet gedurende het hele proces van sluiten/openen van de sluisdeur voldoen aan de stabiliteitseisen, voor alle mogelijke waterstanden tussen maximum en minimum schutpeil. In deze belastingsituatie wordt ook gekeken naar eventuele aanvaringen tegen de sluisdeur.

### 5.2.1 belastingfactoren

Voor de belastingfactoren zijn de waarden aangehouden volgens de "Leidraad Kunstwerken" (37). Voor de belastingfactor op de resulterende waterdruk wordt afgeweken van de leidraad. Volgens de leidraad moet een belastingfactor van 1,25 aangehouden worden. In het rapport "uitgangspunten civiele constructies" (34) is deze waarde geverifieerd en blijkt een belastingfactor van 1,1 veilig genoeg te zijn. Dit leidt tot een beter ontwerp.

Tabel 5-1 Belastingfactoren

<b>Belasting</b>	<b>Toelichting/beschrijving</b>	<b>Factor (y)</b>
<b>PERMANENT</b>	als eigengewicht enige belastingsbron is in combinatie met andere belastingen indien de belasting gunstig werkt	1,35 1,20 0,90
	drukverschillen t.g.v. waterstanden	1,10
	drukverschillen t.g.v. golven	1,25
<b>VERANDERLIJK</b>	windbelasting	1,50
	temperatuur	1,50
	verkeer	1,50
	aanvaring	1,00
	ijs	1,00
<b>BIJZONDER</b>		

### 5.2.2 Belastingcombinaties

Aan de hand van Leidraad Kunstwerken" zijn zeven belastingcombinaties opgesteld waar de sluisdeur op getoetst wordt, zie Tabel 5-2.

Tabel 5-2 Belastingcombinaties in UGT

		<b>BC 1</b>	<b>BC2</b>	<b>BC3</b>	<b>BC 4</b>	<b>BC 5</b>	<b>BC6</b>	<b>BC 7</b>
<b>PERMANENT</b>	eigengewicht	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1
	opdrijvende kracht	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1	1
<b>VERANDERLIJK</b>	maximaal positief verval	1,1						
	maximaal negatief verval		1,1					
	maximaal positief verval tijdens schutten			1,1			1	1
	maximaal negatief verval tijdens schutten				1,1			
	golven	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25		
	wind	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
	temperatuur	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
	verkeer			1,5	1,5			
	Belasting bij openen sluisdeur					1,5		
<b>BIJZONDER</b>	aanvaring						1	
	ijs							1

De verschillende belastingcombinaties zijn:

- *BC1 belastingcombinatie bij maximaal positief verval;*
- *BC2 belastingcombinatie bij maximaal negatief verval;*
- *BC3 belastingcombinatie bij maximaal positief verval tijdens schutten;*
- *BC4 belastingcombinatie bij maximaal negatief verval tijdens schutten;*
- *BC5 belastingcombinatie bij openen of sluiten van de sluisdeur;*
- *BC6 belastingcombinatie bij aanvaring van de sluisdeur;*
- *BC7 belastingcombinatie bij ijsbelasting op de sluisdeur.*

# 6. AANNAMES

Voordat met het ontwerpen begonnen wordt, zijn enkele aannames gedaan. Deze zullen in dit hoofdstuk besproken worden. De meeste aannames volgen uit de aandachtspunten, zie hoofdstuk 1.7.

## 6.1 horizontaal translerende sluisdeur

In hoofdstuk 2.2.2 is te zien dat voor sluisdeuren groter dan 40 meter altijd het type roldeur toegepast wordt. Puntdeuren zijn niet geschikt voor een grote overspanning en voor tweezijdig keren moeten ze dubbel uitgevoerd worden. Voor segmentdeuren uitgevoerd in hogesterktebeton geldt ook dat ze niet geschikt zijn om tweezijdig te keren.

Aangenomen wordt dat de horizontaal translerende sluisdeur wordt toegepast om de schutkolk af te sluiten. Voor het geleidingssysteem om de sluisdeur te openen en sluiten zijn een aantal opties, in 6.3 is hier een aanname over gedaan.

## 6.2 Oplegging

In de kerende stand kan de sluisdeur op meerdere manieren zijn opgelegd. De twee meest logische manieren om een roldeur op te leggen zijn op de twee zijkanten of op de twee zijkanten en een derde oplegging op de vloer. In dit onderzoek wordt aangenomen dat de sluisdeur tweezijdig is opgelegd. Alle belasting wordt in horizontale richting afgedragen naar de twee zijkanten. Hieronder staan aantal voordelen en nadelen van beide typen opleggingen.

Het belangrijkste punt waarom voor een tweezijdige oplegging is gekozen is dat de aanvaarbelasting opgenomen moet worden door plastische vervorming van de sluisdeur. Als aan de onderkant van de sluisdeur de verplaatsing verhindert wordt kan een stuk minder kinetische energie van het schip opgenomen worden door de sluisdeur.

Een nadeel is wel dat de afstand waarover de belasting afgedragen moet worden een stuk groter is wat een groter veldmoment tot gevolg heeft. Hieronder is berekend hoeveel groter het moment is als de sluisdeur tweezijdig is opgelegd in plaats van driezijdig. Hierbij is van een uniforme belasting over de hoogte uitgegaan. Voor het bepalen van het moment van de driezijdig opgelegde plaat is gebruik gemaakt van een tabel uit de betonkalender (38).

Het moment bij een tweezijdig opgelegde sluisdeur is:  $M_1 = \frac{1}{8} \times q \times l_x^2$ . En bij een 3-zijdig opgelegde sluisdeur is deze bij een verhouding van  $\frac{l_x}{l_y} = \frac{70}{25} = 2,8$ :  $M_2 = \frac{1}{4,31} \times q \times l_y^2$  (38).

De verhouding tussen het moment bij tweezijdig opgelegde sluisdeur en bij een driezijdig opgelegde sluisdeur is, met  $l_x=2,8$   $l_y$ :  $x = \frac{\frac{1}{8} \times q \times l_x^2}{\frac{1}{4,31} \times q \times l_y^2} = 4,2$ .

Het moment is dus ruim 4 keer zo groot bij een tweezijdig opgelegde sluisdeur. De sluisdeur moet zwaarder gedimensioneerd worden dan bij een tweezijdig opgelegde sluisdeur.

### 6.3 Geleidingsysteem

Als geleiding voor een horizontaal transferende sluisdeur zijn er verschillende opties. Rolwagens onder de sluisdeur zijn tot nu toe altijd toegepast bij grote sluisdeuren. Door de hoog belaste lijncontacten treedt veel slijtage op aan rail bij iedere passage. Regelmatige inspectie en onderhoud zijn daardoor nodig.

Een alternatief is de sluisdeur drijvend openen en sluiten. Hierdoor is er geen frictie meer met de ondergrond. De sluisdeur moet hierdoor wel bij alle waterstanden drijvend stabiel zijn en genoeg diepgang hebben voor een waterdichte afdichting op de drempel.

Een ander alternatief van rolwagens is hydro-geleiding. Het systeem is voor het eerst in de wereld toegepast bij de Oranje sluizen in de rivier de IJ in Amsterdam die in 1995 zijn opgeleverd. Hier zijn twee hydrostatische lagers (hydrovoeten) onder de 25 meter lange sluisdeur geconstrueerd, zie Figuur 6-1. Hiermee is een slijtage vrij openen en sluiten zonder onderhoud gerealiseerd. Bij toepassing van rolwagens is de deurkas dieper, zodat aan de achterkant de rolwagens onder de sluisdeur weggetakeld kunnen worden voor onderhoud.

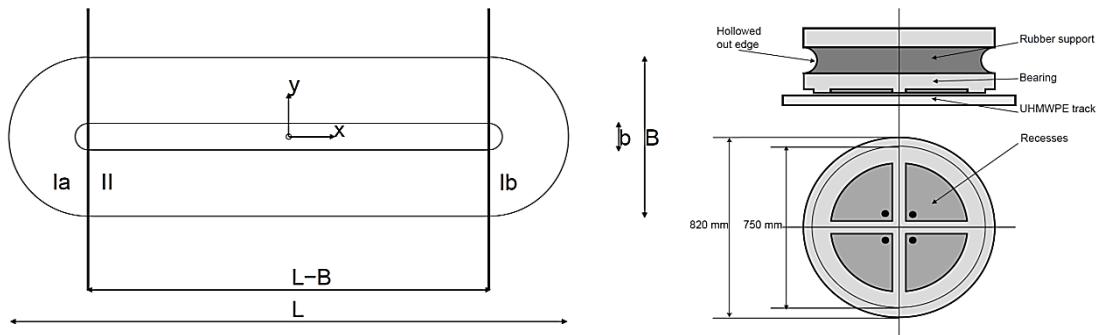
Een nieuw systeem wat een hoger draagvermogen heeft dan een hydrovoet is een hydrofender. Hydrovoeten zijn rond en voorzien van vier lagerkamers in tegenstelling tot de hydrofender, die langwerpig is en maar één lagerkamer heeft, zie Figuur 6-1. Dit zorgt voor een vereenvoudiging van de pomplijninstallatie en kan worden volstaan met een smallere glijbaan. Een hydrofender heeft een veel groter draagvermogen dan een rolwagen. De tot nu toe maximale draagvermogen van rolwagens is 120 ton, deze zijn toegepast bij de Van Cauwelaert sluis en bij de panamasluizen. Bij een hydrofender is dit afhankelijk van het oppervlak van de hydrofender en de toegepaste pomp. In het proefschrift van R. van Ostayen (39) is een hydrofender ontworpen voor de zeesluis van Terneuzen, de hydrofender is ontworpen voor een gewicht van 220 ton. Dit is al aanzienlijk meer dan de maximale belasting op een rolwagen. Bij toepassing van een grotere hydrofender en grotere pompen is een groter draagvermogen mogelijk.

Een aantal voordelen van de hydrofender zijn (40):

- *Lage slijtage;*
- *Weinig onderhoud noodzakelijk, hierdoor wordt de scheepvaart minder gestremd. En het systeem is relatief gemakkelijk te onderhouden en te vervangen;*
- *Geen bewegende onderdelen;*

- De belasting wordt over een groter oppervlak gespreid;
- Lagere totale kosten in vergelijking met de rolwagen;
- Een hydrofender heeft een groot draagvermogen.

Een belangrijk nadeel is dat er een gebrek aan voldoende ervaring in de praktijk is. Een tweede nadeel is dat hogedrukpompen nodig zijn om een waterfilm te creëren tussen de sluisdeur en de drempel.



Figuur 6-1 Hydrovoet (rechts); schematische weergave hydrofender (39)

Op basis van de voordelen van het innovatieve geleidingssysteem zal in het ontwerp geen rolwagens worden toegepast.

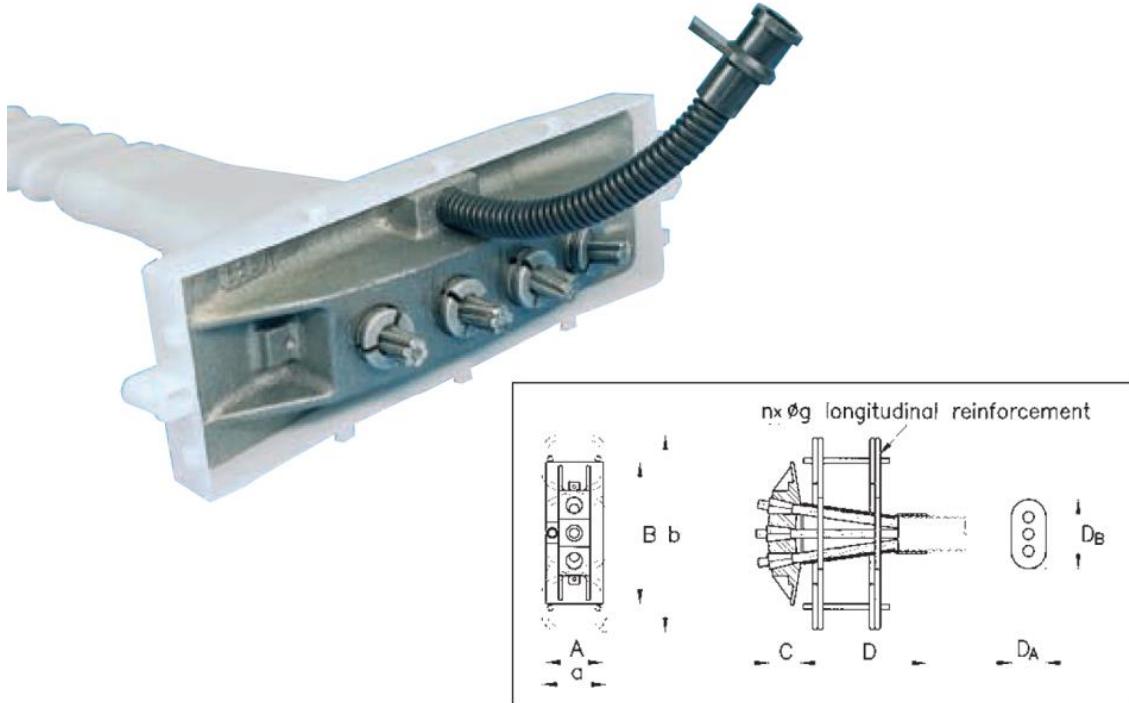
## 6.4 Materiaal

### 6.4.1 Hogesterktebeton

Zoals in hoofdstuk 3.1 beschreven zal voor beton een sterkeklasse van C55/67 tot ongeveer C90/105 toegepast worden. Van deze waarde zijn in de huidige Eurocode de eigenschappen opgenomen, zie Tabel 3-1.

### 6.4.2 Wapening en voorspanning

Voor wapening wordt een karakteristieke vloeigrens van  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$  aangehouden en een elasticiteitsmodulus van  $E_s=200 \text{ GPa}$ . Voor de wapening wordt klasse B gebruikt. De breukrek bij deze staalklasse is  $\varepsilon_{uk} = 0.9 \times 5 \% = 4.5\%$ .



Figuur 6-2 Platte duct en ankerplaat van Dywidag (41)

Bij toepassing van voorspanning in de constructie wordt voorspanning met nagerekt staal toegepast. Omdat de autogene krimp van hogesterktebeton vrij hoog is waardoor de voorspanverliezen groot zullen zijn bij toepassing van voorgerekt staal.

Bij de berekening van de voorspanning wordt als representatieve waarde van de treksterkte  $f_{pk} = 1860 \text{ N/mm}^2$  aangehouden. De 0,1 % rekgrens ligt bij  $f_{p0.1k} = 1640 \text{ N/mm}^2$  en de elasticiteitsmodulus is  $E_p=205 \text{ GPa}$ .

Voor de duct en het ankerplaat wordt gekozen voor de "Flat PE/PP Duct en de flat anchorage" van Dywidag (41), zie Figuur 6-2. In Tabel 6-1 zijn de afmetingen van de ankerplaat en de duct gegeven.

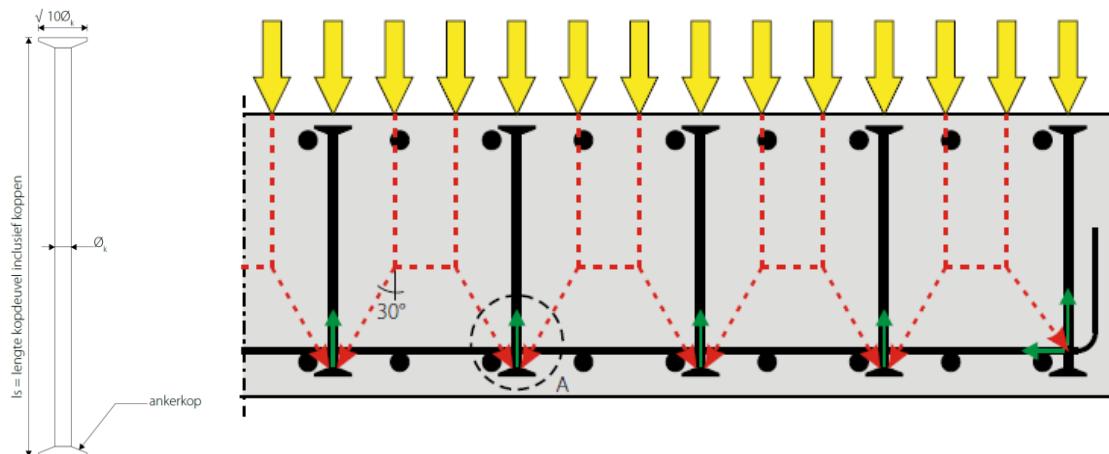
Tabel 6-1 Afmetingen van de platte duct en ankerplaat (41)

A	B	C	D	$D_A$	$D_B$
100mm	330mm	57mm	220mm	21mm	72mm

#### 6.4.3 Dwarskrachtwapening

Bij toepassing van dwarskrachtwapening zal in plaats van beugels kopdeuvelstaven toegepast worden, zie Figuur 6-3. Het gebruik van kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening wordt door de Eurocode toegestaan. Het gebruik van kopdeuvelstaven heeft een aantal voordelen. De kopdeuvelstaaf is in staat de volledige verticale component van de drukdiagonaal op te nemen zodat de langswapening niet verticaal wordt belast. Daarnaast kan in platen een doorgaande dwarsstaaf voor evenwicht zorgen in de dwarsrichting, hierdoor hoeft de langswapening niet omsloten te worden. Verder gedraagt de verankering van de kop zich aanzienlijk stijver dan die van een omgebogen staaf; waardoor de optredende slip nagenoeg verwaarlosbaar is. Dit

resulteert in een kleinere scheurvorming. Een ander groot voordeel is eenvoudiger vlechtwerk, en daardoor snellere wapeningsmontage en lagere arbeidskosten (42).



Figuur 6-3 Kopdeuveelstaven (42)

#### 6.4.4 Partiële factoren

In Tabel 6-2 staan de partiële factoren die toegepast moeten worden.

Tabel 6-2 Partiële factoren voor materialen voor uiterste grenstoestanden (23)

Ontwerpsituaties	$\gamma_c$ voor beton	$\gamma_s$ voor betonstaal	$\gamma_s$ voor voorspanstaal
Blijvend en tijdelijk	1,5	1,15	1,15
Buitengewoon	1,2	1,0	1,0

#### 6.5 Minimale dikte van een wand en vloer

Aan de hand van de minimale dekking op de wapening en de minimale vrije ruimte tussen de wapeningstaven, die zijn voorgeschreven in de Eurocode, is een minimale dikte vastgesteld voor een plaat. Bij het ontwerpen van een variant wordt als minimale waarde deze dikte voor de wanden en vloeren gebruikt.

##### 6.5.1 Dekking

De minimale betondekking is bepaald aan de hand van de Eurocode (18), deze geeft voor de nominale betondekking:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad [6-1]$$

$\Delta c_{dev}$  is de uitvoeringstolerantie, deze is gegeven in de nationale bijlage en is 5 mm. En  $c_{min}$  is de minimum betondekking, deze is gegeven in Tabel 6-3. De milieuklasse voor een constructie die gedeeltelijk of helemaal in zeewater bevindt is XS3. En de constructieklaasse voor een ontwerplevensduur van honderd jaar en een sterkteklaasse groter dan C45/55 is S5. Dus de minimale dekking op betonstaal is  $c_{nom} = 45 + 5 = 50$  mm.

Tabel 6-3 Waarde van de minimale dekking, met betrekking tot de duurzaamheid voor betonstaal

Constructie-klasse	Omgevingseisen voor $c_{min,dur}$ mm						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	25
S2	10	10	15	20	25	30	30
S3	10	10	20	25	30	35	35
S4	10	15	25	30	35	40	40
S5	15	20	30	35	40	45	45
S6	20	25	35	40	45	50	50

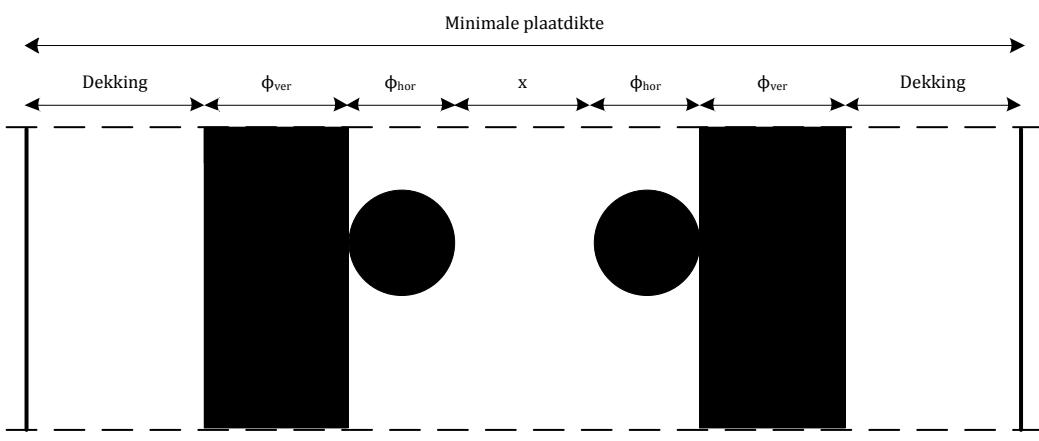
### 6.5.2 Vrije ruimte tussen wapeningstaven

Volgens de Eurocode (18) moet de vrije ruimte tussen afzonderlijke evenwijdige staven niet kleiner zijn dan het maximum van: 1x de staafdiameter en 20 mm. Deze staalafstanden moeten zo zijn zodat goed gestort en voldoende verdicht kan worden zodat een goede aanhechting kan ontstaan. In Figuur 6-3 is deze afstand aangegeven met x.

### 6.5.3 Minimale dikte plaat

In Figuur 6-4 is de minimale dikte van een plaat te zien. Deze is:

$$h_{wand,min} = 2 \times \text{dekking} + 2\Phi_{ver} + 2\Phi_{hor} + x$$



Figuur 6-4 Minimale dikte van een plaat

## 6.6 Bouwlocatie

Aangenomen wordt dat de sluisdeur in een droogdok gebouwd wordt zodat de sluisdeur via het water getransporteerd kan worden naar de eindlocatie. Een eis is dat de sluisdeur zelfstandig drijvend stabiel is (33), het drijvend transporteren van de sluisdeur is daarom de eenvoudigste manier van transporteren. Een sluisdeur van deze grootte is niet per weg te transporteren. Als de sluisdeur op het land gebouwd zou worden moet de sluisdeur te water gelaten worden met behulp van kranen. Hierdoor ontstaat een extra belastingsituatie waarop de constructie gedimensioneerd moet worden. Een eerste

schatting van het gewicht is 5100 ton. Voor deze schatting is 2 keer het lateraal gewicht van de panamasluizen genomen,  $2 \times 1450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times 70 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 5100 \text{ ton}$ . Dit gewicht is nog te tillen zijn door een kraan. Bijvoorbeeld de Svanen, deze heeft een hijsvermogen van 8700 ton (43). In de planstudie voor de Nieuwe Zeesluis IJmuiden (26) is aangenomen dat een onderhoudsdok gebouwd wordt voor het onderhoud aan de sluisdeur. In dit onderzoek is aangenomen dat de betonnen sluisdeur ook in dit onderhoudsdok wordt gebouwd.

Uit de uitvoeringsaspecten, zie hoofdstuk 3.2, blijkt dat een continu stortproces belangrijk is bij hogesterktebeton. Om hiervoor te zorgen wordt aangenomen dat ter plaatse van het drooggdok een betoncentrale is of gemaakt wordt. Uit de uitvoeringsaspecten blijkt dat onder geconditioneerde omstandigheden de kwaliteit van beton beter gewaarborgd kan worden. Als het nodig blijkt voor de betonkwaliteit moeten de omstandigheden in het drooggdok verbeterd worden. Bijvoorbeeld door een dak boven het drooggdok en/of door klimaatbeheersing in het drooggdok.

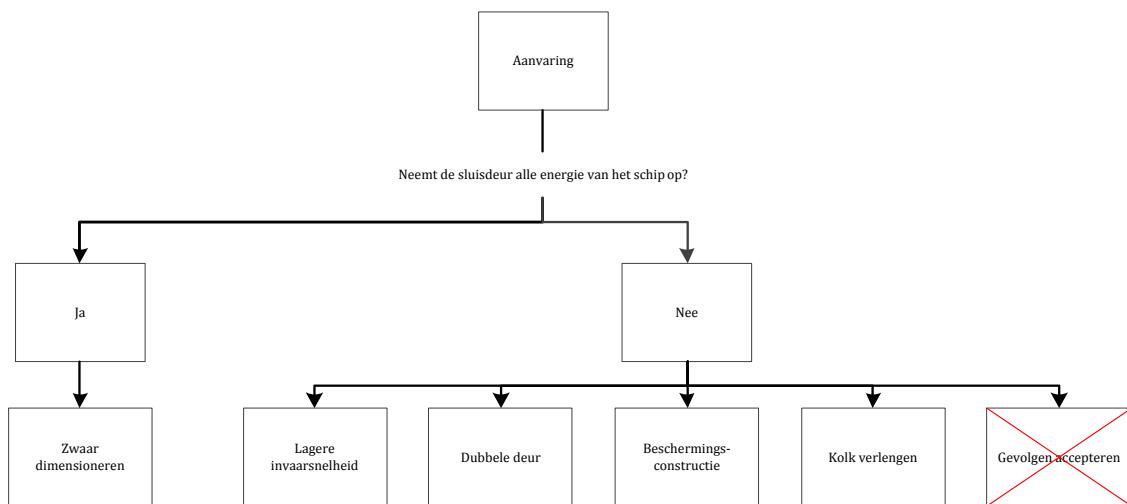
## 6.7 Vul- en ledigsysteem

Als vul- en ledigsysteem wordt voor het type omloopriolen gekozen. Bij dit type vul- en ledigsysteem hoeven geen deuropeningen in de sluisdeur gemaakt te worden om het water niveau in de sluiskolk te nivelleren. Dit heeft als voordeel dat de constructie van de sluisdeur eenvoudig gehouden kan worden, omdat geen uitsparingen vrij gehouden hoeven te worden voor de nivelleerschuiven. Ook hoeven dan geen bewegende onderdelen aan het beton van de sluisdeur bevestigd te worden wat lastiger is dan bij staal. Verder heeft het niet toepassen van schuiven in de sluisdeur als voordeel dat meer ruimte vrij is voor luchtkisten of ballastkisten. Zoals in hoofdstuk 2.3.1 genoemd is het vul- en ledigsysteem met riolen meestal toegepast bij grote zeesluizen.

# 7. AANVARING

## 7.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 1.7 genoemd is de aanvaring met een betonnen sluisdeur een belangrijk aandachtspunt. De sluis is een primaire waterkering en dus moet de waterkerende functie van de sluis te allen tijde betrouwbaar zijn. Bij het invaren van de sluis heeft het schip een bepaalde hoeveelheid kinetische energie, die bij een aanvaring opgenomen moet worden door de sluisdeur en vervorming van het schip zelf. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden, zie Figuur 7-1. Wanneer de sluisdeur zelf alle kinetische energie opneemt, moet deze op deze zware belasting gedimensioneerd worden zodat de sluisdeur waterkerend blijft na de aanvaring.

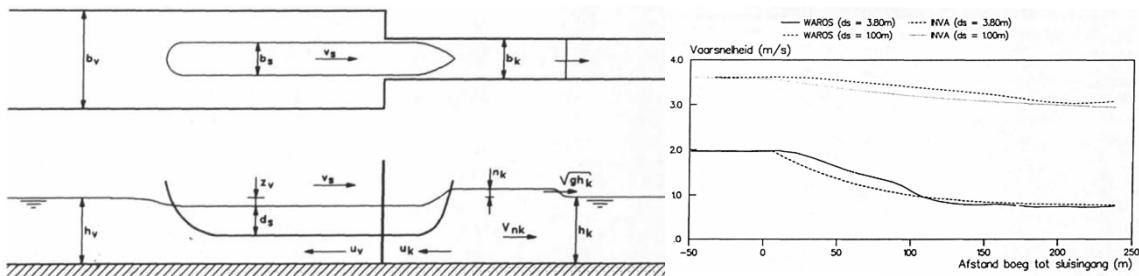


Figuur 7-1 Mogelijkheden om de kinetische energie van het schip te dissiperen

Als de sluisdeur niet alle energie opneemt moet de energie op een andere manier gedissipeerd worden. Door in elk sluishoofd twee deuren te plaatsen, mag één sluisdeur bezwijken bij een aanvaring waarbij de waterkerende functie nog steeds behouden wordt. Of een beschermingsconstructie kan voor de sluisdeur geplaatst worden die alle energie opneemt in plaats van de sluisdeur. Hierdoor hoeft de sluisdeur niet ontworpen worden op een aanvaarbelasting. Deze oplossingen zullen beide tot veel hogere stichtingskosten leiden dan bij alleen één sluisdeur per sluishoofd. Door de extra constructie wordt ook het sluishoofd langer en de totale kolk wordt langer. Een voordeel is dat de sluisdeur minder zwaar gedimensioneerd hoeft te worden, dit weegt echter niet op tegen de hogere kosten van de extra constructie.

Andere mogelijkheid is de kinetische energie van het schip te verlagen, door de snelheid van het schip in de kolk te verlagen. Dit kan bijvoorbeeld gedaan worden door de invaarsnelheid te verlagen, hierdoor is de aanvaarsnelheid lager maar duurt het schutten langer. En dan is er nog het risico dat een schip nog steeds te hard vaart. Een andere optie

om de vaarsnelheid te verminderen is de kolk verlengen. Door de kolk te verlengen heeft het schip een langere remweg in de kolk, in Figuur 7-2 is dit weergegeven voor een binnenvaartsluis. Het schip wekt een positieve translatie golf op die de kolk inloopt, dit komt doordat de retourstroom verhinderd wordt door het nauwe profiel. Deze translatie golf vertraagt het schip gedurende invaart. Na volledige reflectie tegen de twee sluisdeur komt de golf weer bij het schip waardoor het schip nog meer vertraagt (44). Door de lagere aanvaarsnelheid hoeft de sluisdeur minder zwaar gedimensioneerd te worden, maar de kosten worden wel hoger door de langere kolk. De vraag is dan of de meer kosten van de kolkwand opwegen tegen te lagere kosten van sluisdeur. In dit afstudeeronderzoek zal niet gekeken worden naar de mogelijkheid om de vaarsnelheid te verminderen. Er wordt een sluisdeur ontworpen die de kinetische energie van het schip tot een bepaalde vaarsnelheid opneemt.



Figuur 7-2 Vertraging schip in sluiskolk (44)

In dit hoofdstuk wordt onderzocht of de kinetische energie van het maatgevende schip opgenomen kan worden door de sluisdeur, of dat dit bij lange aan niet haalbaar is en dus naar een andere oplossing gezocht moet worden. Verder wordt gekeken wat de invloed is van verschillende parameters op de opname van de kinetische energie. Parameters als de breedte van de sluisdeur, de wapening in de buitenwand en de dikte van de buitenwand.

In hoofdstuk 7.2 zijn eerst de aannames beschreven die zijn gemaakt, zoals de aanvaarsnelheid en de aanvaarzijde van de sluisdeur. In hoofdstuk 7.3 is de aanvaarbelasting bepaald volgens Eurocode 1 (45). In deze formule wordt uitgegaan van een harde botsing, de energie wordt geabsorbeerd door het botsende object, de constructie is star en onverplaatsbaar. Dit is een zeer conservatieve aanname, in werkelijkheid zal de constructie ook een gedeelte van de kinetische energie opnemen.

In de paragraaf daarna is onderzocht of de kinetische energie van het schip volledig opgenomen kan worden door de constructie. Door het berekenen van de energie dissipatie bij plastisch vervormen van de sluisdeur. De kracht die dan door de sluisdeur wordt afgedragen is vergeleken met de aanvaarbelasting berekend volgens de Eurocode.

## 7.2 Aannames

### 7.2.1 Waterkering

Bij zeesluizen worden deuren niet beschermd tegen aanvaringen maar dient de sluisdeur zelf de aanvaring op te nemen. De sluisdeur moet dus voldoende flexibiliteit en draagvermogen hebben om de kinetische energie van het schip op te nemen, zelfs na

zware lokale beschadiging. De sluisdeur moet te allen tijden de waterkerende functie vervullen, dus ook na een aanvaring (1). Om deze functie te vervullen wordt de gehele sluis op waterkerende hoogte aangelegd en is altijd één van de deuren gesloten. Bij een aanvaring met de sluisdeur mag deze niet bezwijken, dit zou ernstige gevolgen hebben.

### 7.2.2 Aanvaarzijde

Bij een aanvaring van de sluisdeur wordt aangenomen dat dit vanaf de kolkzijde gebeurt. Het grootste risico is dat een schip de sluiskolk invaart zonder te remmen (46), zie Figuur 7-3. Het risico dat een schip te vroeg de sluiskolk invaart, als de sluisdeur nog dicht is, is minimaal (1). Bij het ontwerp wordt dus rekening gehouden met een aanvaring vanaf de kolkzijde en niet vanaf de buitenzijde.



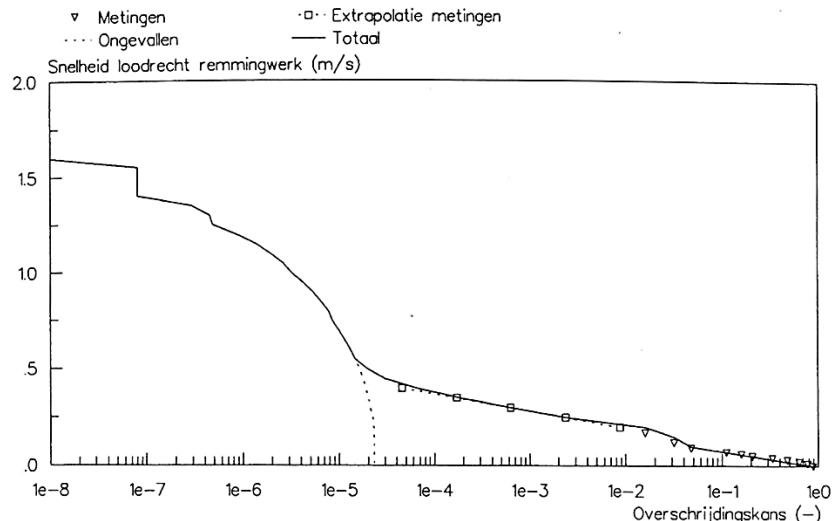
Figuur 7-3 Zijde van aanvaring van de sluisdeur

### 7.2.3 Aanvaarsnelheid

Naast de scheepsmassa is de aanvaarsnelheid belangrijk voor de kinetische energie bij aanvaringen. De aanvaarsnelheid hangt af van aantal factoren (14):

- *Het menselijk handelen;*
- *Het schip;*
- *De constructie;*
- *De voorhaven;*
- *De sluisbreedte;*
- *De waterdiepte;*
- *Externe omstandigheden (wind, zicht en stroming);*
- *Verkeersintensiteit.*

De aanvaarsnelheid is gekoppeld aan de kans van optreden. Belangrijk hierbij is de verkeersintensiteit. Bij een hoge verkeersintensiteit is de kans op een aanvaring veel groter dan bij een lage. In Figuur 7-4 is voor de sluis van Sambeek de aanvaarsnelheid uitgezet tegen de overschrijdingskans.



Figuur 7-4 Aanvaarsnelheid gekoppeld aan de kans van optreden, vb. sluis Sambeek (14)

Bij zeesluizen zijn er heel weinig ervaringsgetallen van aanvaringen, waardoor de kans op een aanvaring hier niet op gebaseerd kan worden en dus ook niet de aanvaarsnelheid. In de TAW Leidraad Kunstwerken (37) wordt gesteld dat de kans op een aanvaring per schip gemiddeld  $3 \times 10^{-5}$  is. Per jaar passeren ongeveer 13.140 schepen de sluis (31). De kans dat de sluis wordt aangevaren is dan  $\frac{13140}{365 \times 24} \times 3 \times 10^{-5} = 4,5 \times 10^{-5}$  per uur, dit is eens in de 2,5 jaar. Het grootste deel van deze aanvaringen hebben geen ernstige gevolgen en zijn binnen enkele uren verholpen. Om een conservatieve aanvaarsnelheid te bepalen waar de sluisdeur op ontworpen wordt is gekeken naar een vergelijkbaar project, the third set of locks in Panama, en is met iemand van Rijkswaterstaat gesproken (46).

Bij de “the third set of locks” in Panama is als eis gesteld: de sluisdeur moet een aanvaring met een schip van 160.000 ton varend met een snelheid van 0,5 m/s kunnen weerstaan, zonder verlies van het waterkerend vermogen en de weerstand tegen de waterdruk (1).

Volgens (46) is een meest conservatieve inschatting een maatgevend schip dat met een snelheid van 0,5 m/s de sluiskolk invaart en niet kan stoppen omdat de motor blijft draaien.

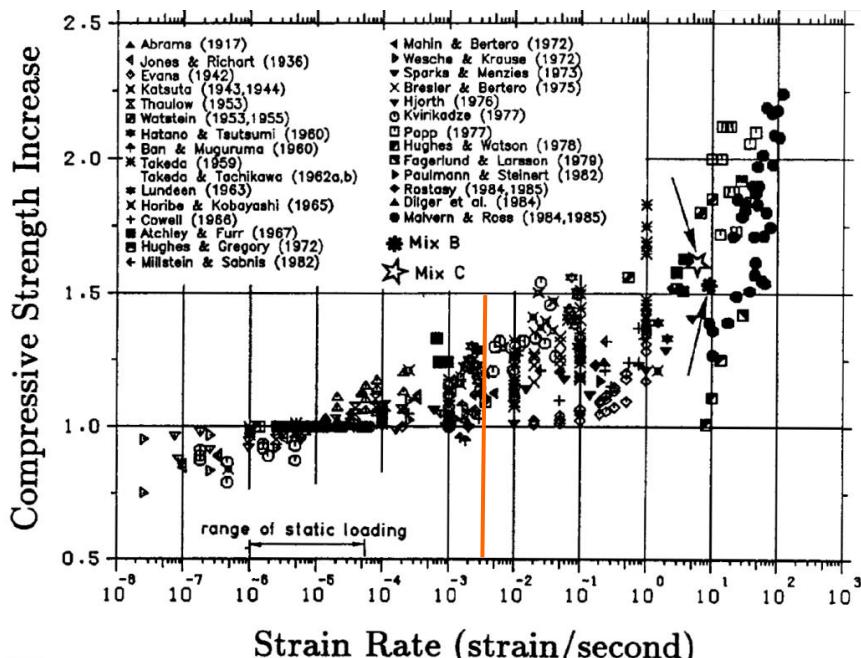
Het maatgevend schip wat de zeesluis in IJmuiden moet kunnen passeren weegt 200.000 ton. Daarom wordt aangenomen dat de sluisdeur een aanvaring met een schip van 200.000 ton varend met een snelheid van 0,5 m/s moet kunnen weerstaan.

Aangenomen is dat de volledige kinetische van het schip door de sluisdeur opgenomen moet worden en niets door het schip zelf. Dit is gedaan omdat niet bekend is hoeveel energie geabsorbeerd wordt door de kruikzone van het schip, hierdoor is een soort reserve ingebouwd.

### 7.2.4 Vergrotingsfactor betondruksterkte

De druksterkte van beton wordt beïnvloed door de snelheid van belasten. Bij het snel belasten van beton vergroot de druksterkte van beton lineair bij een logaritmische toename van de reksnelheid, zie Figuur 7-5.

Wanneer een schip tegen de sluisdeur aanvaart bereikt het beton in enkelen seconden een grootte rek. Om te kijken of de impactbelasting van een schip invloed heeft op de druksterkte van beton, wordt geschat dat binnen 1 seconde de maximale rek wordt bereikt. De strain rate (zie Figuur 7-5) is dan:  $\dot{\varepsilon} = \frac{3,5}{1\text{sec}} = 3,5 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{sec}}$ . In de grafiek is af te lezen dat de vergroting van de druksterkte dan tussen de 1,0 en de 1,3 ligt. De belastingssnelheid moet stuk groter zijn, in orde grote van een honderdste seconde, om echt invloed te hebben op de druksterkte van beton. In dit onderzoek zal geen vergrotingsfactor voor de druksterkte toepast worden bij een aanvaringbelasting.



Figuur 7-5 Relatieve sterke toename bij impactbelasting (47)

### 7.3 Aanvaarbelasting volgens de Eurocode

De kracht op de sluisdeur,  $F_{bow}$ , wordt bepaald met formule [ 7-1 ]. De aanvaarbelasting is berekend voor een vaarsnelheid van 1,39 m/s (5km/h). Dit is de maximale snelheid tijdens schutten, zie 4.3.1. Ook is een berekening gemaakt voor een vaarsnelheid van 0,5 m/s. Dit is de snelheid die de sluisdeur moet kunnen weerstaan.

$$F_{bow} \begin{cases} F_0 \bar{L} [\bar{E}_{imp} + (5,0 - \bar{L}) \bar{L}^{1,6}]^{0,5} & \text{voor } \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2,6} \\ 2,24 F_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0,5} & \text{voor } \bar{E}_{imp} \leq \bar{L}^{2,6} \end{cases} \quad [ 7-1 ]$$

Waarin:  $F_0$  is de referentiebotskracht = 210 MN;  
 $\bar{L} = L_{pp}/275 \text{ m}$ ;

$$\bar{E}_{imp} = E_{ipm}/1425 \text{ MNm} ;$$

$E_{imp}$  is de opgenomen energie door plastische vervorming  $= \frac{1}{2} m_x v_r^2$ ;

$F_{bow}$  is de maximale frontale botskracht [MN];

$L_{pp}$  is de lengte van het schip [m];

$m_x$  is de massa van het schip plus de toegevoegde massa bij beweging in de lengte richting;

$v_r$  is de vaarsnelheid (aanvaarsnelheid) van het schip.

### Aanvaarbelasting ( $v_r=1,39 \text{ m/s}$ )

$L_{pp} := 300 \cdot \text{m}$  De bulkcarrier heeft het grootste gewicht en zal worden gebruikt voor berekening van de aanvaarbelasting, zie 4.3.1

$$\bar{L} = L_{pp}/275 \text{ m} = 1.091$$

$$m_x := 200 \cdot 10^6 \cdot \text{kg}$$

$$m_x = C_m \times 200 \times 10^6 = 1,1 \times 200 \times 10^6 = 220 \times 10^6 \text{ kg}$$

$C_m$  is de coëfficiënt voor de toegevoegde massa. =1,1, aanbevolen bij Pianc (1).

$$v_r := 1.39 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$E_{imp} := \frac{1}{2} \cdot m_x \cdot v_r^2 =$$

$$\bar{E}_{imp} = E_{ipm}/1425 \text{ MNm} = 0.149$$

$$F_0 := 210 \cdot \text{MN}$$

$\bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6}$  Dit klopt, dus de botskracht is:

$$F_{bow} = 2.24 F_0 (\bar{E}_{imp} \bar{L})^{0.5} = 189,75 \text{ MN}$$

### Aanvaarbelasting ( $v_r=0,5 \text{ m/s}$ )

$$v_r := \left( 0.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

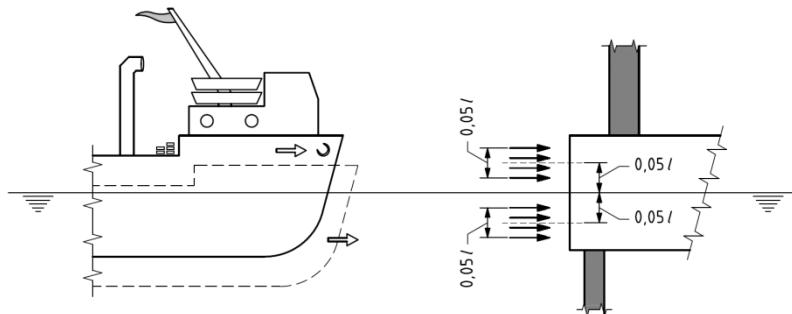
$$E_{imp} := \frac{1}{2} \cdot m_x \cdot v_r^2 = 27.5 \text{ MN} \times \text{m}$$

$$\bar{E}_{imp} = E_{ipm}/1425 \text{ MNm} = 0.019$$

$\bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6}$  Dit klopt, dus de botskracht is:

$$F_{bow} = 2.24 F_0 (\bar{E}_{imp} \bar{L})^{0.5} = 68,17 \text{ MN}$$

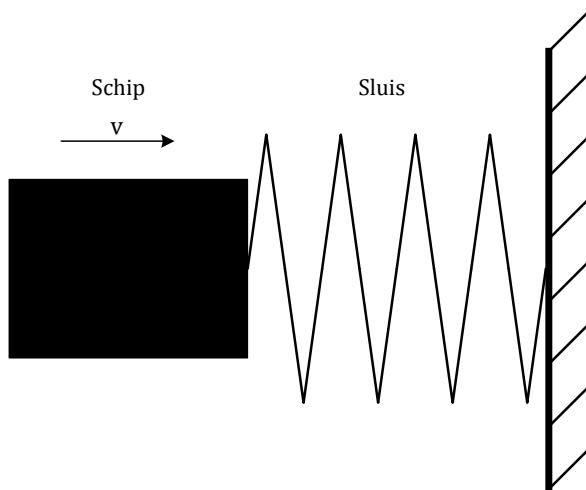
De grenzen voor de oppervlakte van de aanvaring zijn voor de impacthoogte 0,05 keer de lengte van het schip (=15 meter) en voor de impactbreedte 0,1 keer de lengte van het schip (=30 meter). De positie van de kracht in verticale richting is 0,05 keer de lengte van het schip (=15 meter) boven of onder het water niveau, zie Figuur 7-6.



Figuur 7-6 Bots oppervlakten bij aanvaring (45)

#### 7.4 Berekening energieopname door vorming plastisch scharnier

Om te onderzoeken of de constructie niet bezwijkt door een aanvaring van een schip, wordt gekeken of de constructie door plastische vervorming, vorming van een plastisch scharnier in het midden van de overspanning, de kinetische energie van het maatgevende schip kan opnemen. De sluisdeur moet genoeg vervormen zodat alle kinetische energie van het schip is opgenomen. In het figuur hieronder is dit geschematiseerd weer gegeven als massa veersysteem. Het schip is een massa die met een snelheid tegen een veer (de sluis) aanbotst. De veer moet genoeg kunnen vervormen en genoeg veerstijfheid hebben om de energie van de massa op te nemen.

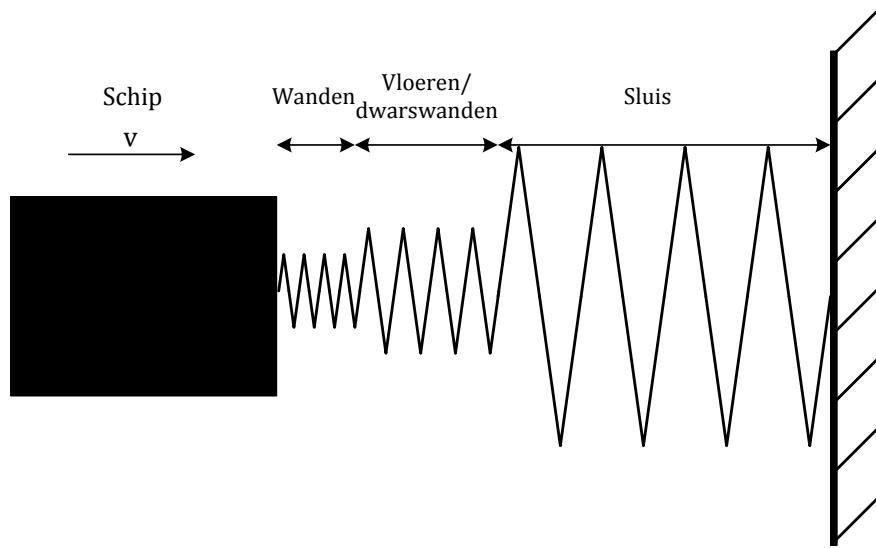


Figuur 7-7 Eenvoudige schematisatie aanvaring

Dit is een grove schematisatie. Eerst zal het schip kinetische energie verliezen als de voorste wanden vervormen/bezwijken en vervolgens als de vloeren en dwarswanden vervormen, voordat de energie gedissipeerd wordt via de hierboven genoemde schematisatie (het globale systeem). Dit is in het figuur hieronder geschematiseerd weergegeven als massa veersysteem. Het schip moet eerst de voorste 'veren' activeren voordat het globale systeem geactiveerd wordt.

In de berekening in dit hoofdstuk is conservatief aangenomen dat de totale kinetische energie van het schip opgenomen wordt door het globale systeem. De energie die gedissipeerd wordt door de wanden en vloeren wordt niet meegenomen. Ook is de waterverplaatsing aan de achterzijde van de sluis niet meegenomen. Als de sluisdeur

doorbuigt door de aanvaring moet water verplaatst weg, dit neemt ook kinetische energie op. Er zit dus nog veel reserve capaciteit in de constructie. In hoofdstuk 7.7 is wel berekend hoeveel energie ongeveer door de voorste wanden wordt opgenomen.



Figuur 7-8 Schematisatie aanvaring

#### 7.4.1 Berekening op te nemen energie betonnen sluisdeur

Er zijn twee verschillende situaties onderzocht:

- *Situatie 1: bij de aanvaring treedt geen lokaal bezwijken van de buitenwand op;*
- *Situatie 2: de wand ter plaatse van de aanvaring bezwijkt.*

Dit zijn de twee extremen, de werkelijkheid zal hier waarschijnlijk tussen liggen. De oppervlakte van de aanvaring volgens de Eurocode is 15 meter voor de hoogte en 30 meter voor de breedte, zie hoofdstuk 5.1.3. Voor beide situaties is bekeken hoeveel energie de constructie kan opnemen door plastisch vervormen.

Met formule [ 7-2 ] wordt een schatting gemaakt van de aanvaarenergie die de constructie op kan nemen door plastische vervorming,  $E_{constructie}$ . Dit is de plastische rotatie vermenigvuldigd met het bezwijkmoment.

$$E_{constructie} = \varphi_{pl} \times M_u \quad [ 7-2 ]$$

Waarin:  $\varphi_{pl}$  = plastische rotatie =  $l_{pl} \times (\kappa_u - \kappa_{sy})$

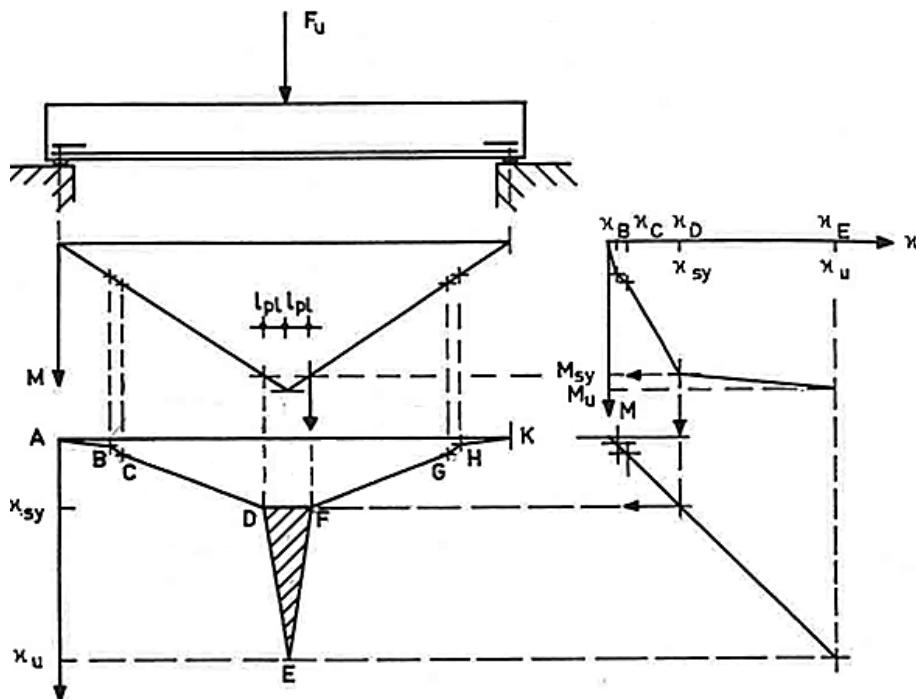
$\kappa_u$  is de kromming behorende bij het bezwijkmoment =  $\frac{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_s}{d}$ ;

$\kappa_{sy}$  is de kromming behorende bij het bezwijkmoment =  $\frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d}$ .

$l_{pl}$  = plastische lengte

$M_u$  is het bezwijkmoment

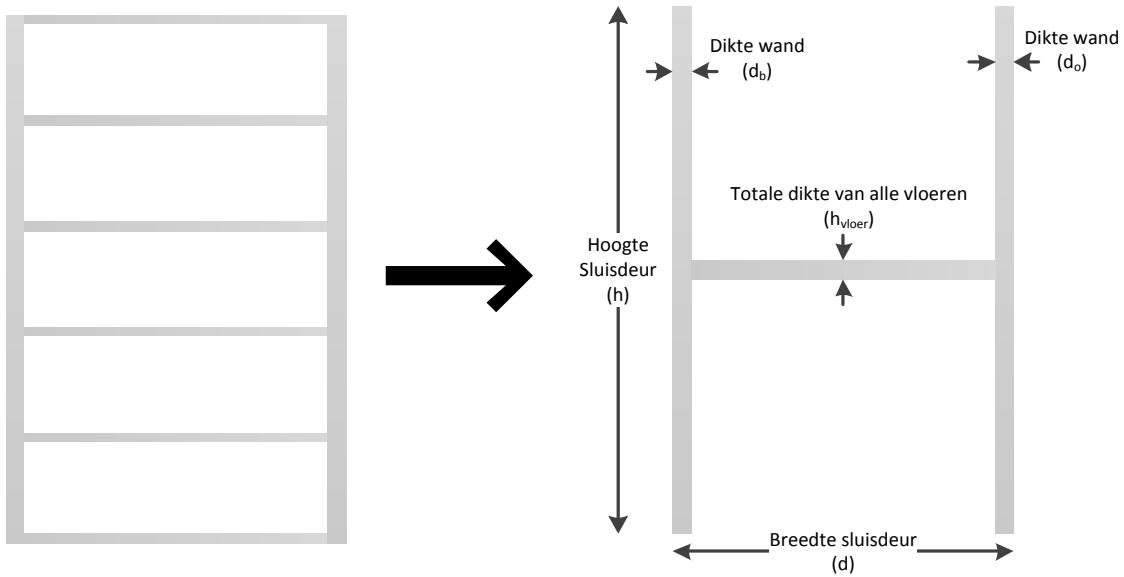
In Figuur 7-9 is voor een eenvoudig opgelegde balk, die in het midden belast wordt door een puntlast, weergeven hoe de plastische rotatie berekend kan worden. De plastische rotatie is het gearceerde oppervlak in het krommingdiagram. Dit is het verschil tussen de kromming behorend bij het bezwijkmoment en de kromming behorend bij het vloeimoment vermenigvuldigd met de lengte die plastische vervormt,  $l_{pl}$ .



Figuur 7-9 Plastische krommingen van een statisch bepaalde opgelegde ligger (48)

Om een schatting te maken van het Bezwijkmoment,  $M_u$ , en het Vloeimoment,  $M_e$  (in Figuur 7-9 is dit  $M_{sy}$ , de oude notatie), en de bijbehorende krommingen, is de doorsnede van de sluisdeur geschematiseerd tot een grote I-ligger, zie Figuur 7-10. Hierin zijn alle tussenvloeren geschematiseerd tot één vloer in het midden van de sluisdeur.

Van deze vereenvoudigde doorsnede van de sluisdeur is met een Excel sheet, zie Figuur 7-16, voor verschillende dimensies en voor verschillende sterkteklaasse van beton de plastische rotatie en de plastische lengte berekent voor de twee situaties (zie 7.3). Zo is gekeken bij welke dimensies en sterkteklaasse de sluisdeur voldoet. Hieronder is de berekening voor één situatie uitgewerkt. Aan het einde van dit hoofdstuk zijn voor de twee situaties voor verschillende waarde van de parameters de resultaten weergegeven in grafieken en tabellen.



Figuur 7-10 Schematisering sluisdeur

### Voorbeeld berekening op te nemen energie betonnen sluisdeur

In deze paragraaf is voor de onderstaande parameters van de doorsnede de energie berekend die door de constructie opgenomen kan worden. In deze berekening is uitgegaan van situatie 1, waarbij geen lokaal bezwijken van de sluisdeur optreedt. In Figuur 7-16 is de Excel sheet te zien behorende bij onderstaande parameters. Dit zijn niet de uiteindelijk parameters, ze zijn gebruikt om de berekening uit te leggen.

- Breedte van sluis:  $d = 10.000 \text{ mm}$ ;
- Dikte voor- en achterwand:  $d_b = d_o = 400 \text{ mm}$ ;
- Hoogte sluisdeur:  $h = 25.000 \text{ mm}$
- Totale dikten vloeren:  $h_{vloer} = 6 \times 500 \text{ mm} = 3.000 \text{ mm}$ ;
- Betonsterkteklasse: C55/67, in Tabel 7-1 staan de bijbehorende materiaaleigenschappen;
- Wapeningspercentage:  $\rho = 7\% \text{ van de flens, dit wapeningspercentage is alleen hier toegepast om de berekening weer te geven.}$

Tabel 7-1 Gegevens beton, gebruikt in de berekening

Sterkte klasse beton	C55/67
$f_{ck}$	55 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_c$	1,2 (buitengewoon, zie Tabel 6-2)
$f_{cd}$	45,8 N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{cu3}$	3,1 %
$\varepsilon_{c3}$	1,8 %
$E_{cm}$	38 GPa
$\alpha$ (vormfactor)	0,71
$\beta$ (afstandsfactor)	0,37

## Staaltrekkkracht bij vloeien van staal

Het oppervlakte betonstaal in de achterwand is:

$$A_s = \rho \times d_o \times h = \frac{7}{100} \times 400 \text{ mm} \times 25.000 \text{ mm} = 700.000 \text{ mm}^2$$

Dit is een extreme hoeveelheid wapening, per meter is dit:  $28.000 \text{ mm}^2/\text{m}$ . Bij toepassing van betonstaalstaven met een diameter van 40 mm liggen deze hart op hart 89,8 mm bij een dubbel wapeningsnet, dit is praktisch niet uitvoerbaar. Bij toepassing van drie lagen in de wand liggen ze hart op hart 134,6mm. Aangenomen wordt dat het zwaartepunt van de wapening in het midden van de achterwand ligt.

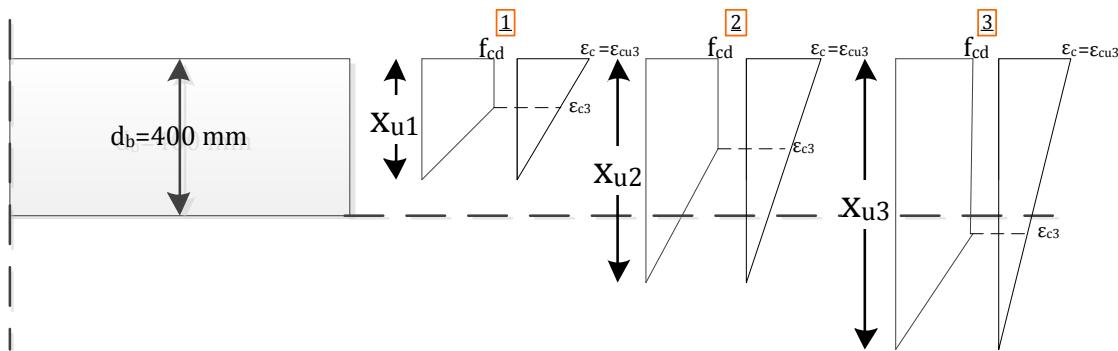
De trekkracht waarbij het wapening gaat vloeien is:

$$N_s = A_s \times f_{yd} = 350.000 \text{ kN}$$

Zie 6.4.2 voor de aangehouden staalkwaliteit. Omdat het hier gaat om een buitengewone ontwerpsituatie wordt is de partiële factor voor het betonstaal:  $\gamma_s = 1,0$ .

## Hoogte van de drukzone behorende bij het bezwijkmoment, wanneer betonstuik maatgevend is

De hoogte van de drukzone wordt op drie manieren berekend waarbij ervan uit gegaan wordt dat de betonstuik maatgevend is, zie Figuur 7-11. Welke waarde de juiste is hangt er van af of de hoogte van de drukzone kleiner is dan de wanddikte (1), of  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu3}$  in de wand ligt (2), of  $\varepsilon_c$  buiten de wand ligt (3). In Figuur 3-7 is  $\varepsilon_c$  weergegeven, dit is de betonstuik bij het bereiken van de maximale sterkte.



Figuur 7-11 Hoogte drukzone

**1**

$$N_s = N_c = \alpha \times h \times x_{u1} \times f_{cd}$$

$$350.000 \text{ kN} = 0.71 \times 25.000 \text{ mm} \times x_{u1} \times \frac{55}{1,2}$$

$$x_{u1} = 430 \text{ mm} < 400 \text{ mm}$$

**2**

$$N_s = \alpha \times h \times x_{u2} \times f_{cd} - \frac{1}{2} \times (x_{u2} - d_b)(h - h_{vloer}) \times f_{cd} \times \frac{x_{u2} - d_b}{x_{u2} \times (\frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}})}$$

$$x_{u2} \times N_s = \alpha \times h \times x_{u2}^2 \times f_{cd} - \frac{1}{2} \times (x_{u2}^2 - 2 \times d_b \times x_{u2} + d_b^2)(h - h_{vloer}) \times f_{cd} \times (\frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{c3}})$$

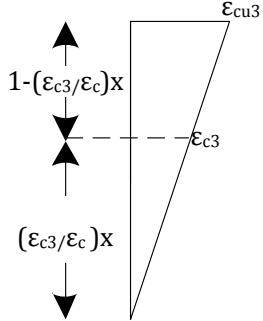
Deze vergelijking kan met de Abc-formule opgelost worden. Hieruit volgt:  $x_{u2} = 433 \text{ mm}$ .

$$\left(1 - \frac{0,18}{0,31}\right) \times 433 = 182 \text{ mm} < 400 \text{ mm}$$

- 3

$$N_s = \alpha \times h \times x_{u3} \times f_{cd} - \frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}} x_{u3} \right) (h - h_{vloer}) f_{cd} - \\ \left( \left(1 - \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}}\right) x_{u3} - d_b \right) \times (h - h_{vloer}) f_{cd}$$

$$x_{u3} = -541 \text{ mm.}$$

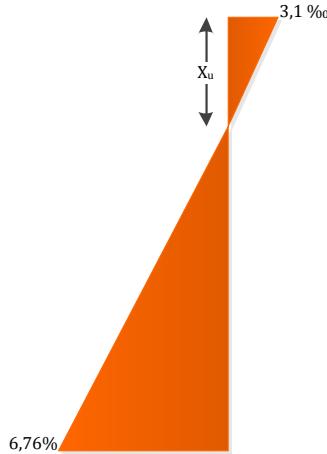


Dit is een foutieve waarde omdat de rek  $\varepsilon_{c3}$  in de flens ligt en niet erbuiten. De hoogte van de drukzone is dus 433 mm.

### Rek

Vervolgens kan de staalrek berekend worden:

$$\varepsilon_s = \frac{d - \frac{d_o}{2} - x_u}{x_u} \times \varepsilon_{cu3} = \frac{10.000 - 200 - 433}{433} \times 3,1\%_0 = 6,76\%$$



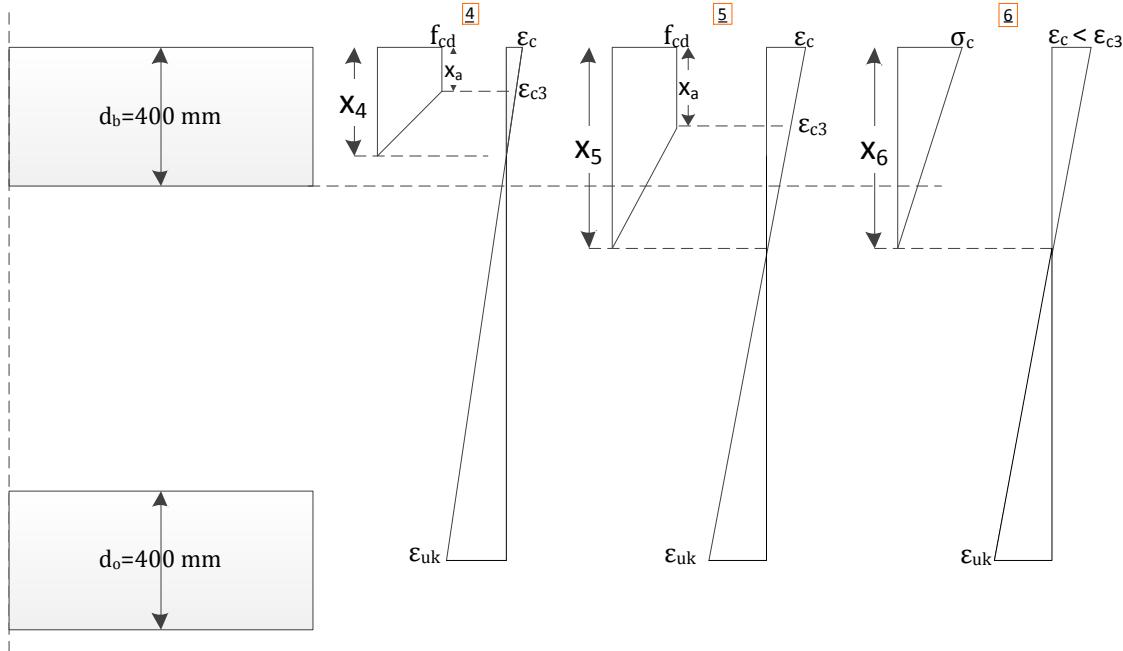
Figuur 7-12 Rekdiagram

Deze staalrek is groter dan de 4,5% breukrek van staal, zie hoofdstuk 6.4.2. Dus in deze situatie is de rek van staal maatgevend.

### Hoogte van de drukzone behorende bij het bezwijkmoment, wanneer breukrek van staal maatgevend is

Nu is de hoogte van de drukzone berekend als de breukrek van staal maatgevend is. Hierbij wordt uitgegaan dat de betonrek groter is dan  $\varepsilon_{c3}$  (de betonstuik bij het bereiken van de maximale spanning) bij situatie (4) en (5), waarbij de betonrek  $\varepsilon_{c3}$  altijd binnen de

wandhoogte ligt. Bij situatie (6) is de betonrek kleiner dan  $\varepsilon_{c3}$ . In de Excel sheet wordt getoetst welke situatie geldig is.



**4**

$$N_s = \frac{1}{2} \times h \times (x_4 - x_a) \times f_{cd} + h \times x_a \times f_{cd}$$

$$\text{Waarin: } x_a = x_4 \left(1 - \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_c}\right)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{uk} \times \frac{x_4}{d - \frac{d_o}{2} - x_4}$$

$$x_4 = \frac{N_s + \frac{1}{2}h \times f_{cd} \times \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{uk}} \times \left(d - \frac{d_o}{2}\right)}{h \times f_{cd} + \frac{1}{2}h \times f_{cd} \times \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{uk}}}$$

Hieruit volgt:  $x_4 = 494 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_c = 0.23\%$

**5**

$$N_s = \frac{1}{2} \times h \times (x_5 - x_a) \times f_{cd} + h \times x_a \times f_{cd} - \frac{1}{2} \times (x_5 - d_b) \times (h - h_{vloer}) \times \frac{f_{cd}(x_5 - d_b)}{x_5 \times \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_c}}$$

$$\text{Hierin: } x_a = x_5 \left(1 - \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_c}\right)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{uk} \times \frac{x_5}{d - \frac{d_o}{2} - x_5}$$

Deze vergelijkingen zijn met Maple, een computeralgebrasysteem, opgelost. Na oplossen:  
 $x_5 = 507 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_c = 0.25\%$

**6**

$$N_s = \frac{1}{2} \times h \times x_6 \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c3}} \times f_{cd}$$

Waarin:  $\varepsilon_c = \varepsilon_{uk} \times \frac{x_6}{d - \frac{d_o}{2} - x_6}$

Hieruit volgt:  $x_6 = 480 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_c = 0.23\%$

In deze situatie is  $x_u >$  wanddikte en de betonrek  $\varepsilon_c > \varepsilon_{c3}$ , dus  $x_u = 507 \text{ mm}$ .

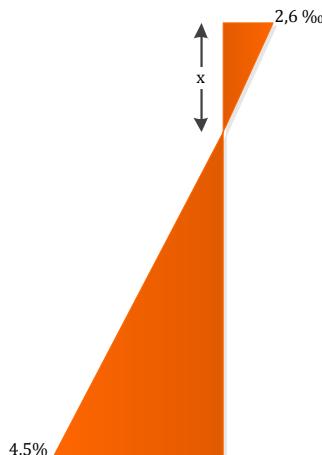
### Rek en kromming

De betonrek is nu:

$$\varepsilon_c = \frac{x}{d - \frac{d_o}{2} - x} \times \varepsilon_s = \frac{507 \text{ mm}}{10.000 \text{ mm} - 200 \text{ mm} - 507 \text{ mm}} \times 4,5\% = 2,5\%$$

En de kromming:

$$\kappa = \frac{0,045}{10.000 \text{ mm} - 200 \text{ mm} - 484 \text{ mm}} = 4,80 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}}$$



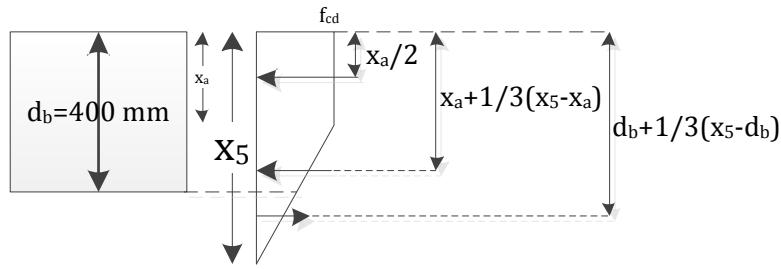
Figuur 7-13 Rekdiagram

### Bezwijkmoment

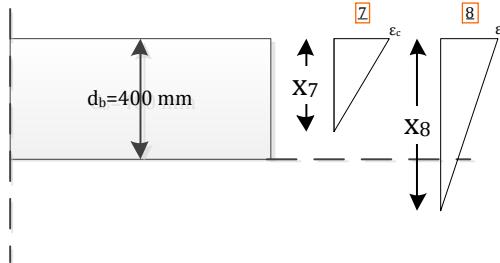
Nu kan het bezwijkmoment berekend worden:

$$M_u = \left( \frac{1}{2} \times h \times (x_5 - x_a) \times f_{cd} \right) \times \left( d - \frac{d_o}{2} - x_a - \frac{x_5 - x_a}{3} \right) + \left( h \times x_a \times f_{cd} \right) \times \left( d - \frac{d_o}{2} - x_a/2 \right) - \left( \frac{1}{2} \times (x_5 - d_b) \times (h - h_{vloer}) \times \frac{f_{cd}(x-d_b)}{x_5 \times \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_c}} \right) \times \left( d - \frac{x_5 - d_b}{3} - \frac{d_o}{2} - d_b \right)$$

$$M_u = 3,37 \times 10^{12} \text{ Nmm}$$



### Hoogte van de drukzone behorende bij het vloeimoment



**7**

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_c \times (d - \frac{d_o}{2} - x_7)}{x_7}$$

$$\frac{1}{2}h \times \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c3}} \times f_{cd} \times x_7 = A_s \times E_s \times \epsilon_s = A_s \times f_{yd}$$

$$\frac{1}{2}h \times \frac{f_{cd}}{\epsilon_{c3} \times E_s} \times x_7^2 - A_s \times (d - \frac{d_o}{2}) + A_s \times x_7 = 0$$

Oplossen met de Abc-formule geeft:  $x=1.877$  mm. Deze waarde is niet kleiner dan 400 mm dus is niet juiste oplossing.

**8**

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_c \times (d - \frac{d_o}{2} - x_8)}{x_8}$$

$$\frac{1}{2}h \times \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c3}} \times f_{cd} \times x_8 - \frac{1}{2}(h - h_{vloer})(x_8 - d_b) \times \frac{\epsilon_c(x-d_b)}{x_8 \times \epsilon_{c3}} \times f_{cd} = A_s \times E_s \times \epsilon_s$$

$$\frac{1}{2}h \times \frac{E_{cm}}{E_s} \times x_8^2 - \frac{1}{2}(h - h_{vloer})(x_8^2 - 2d_b \times x_8 + d_b^2) \frac{E_{cm}}{E_s} - A_s \times (d - \frac{d_o}{2}) + A_s \times x_8 = 0$$

Oplossen met de Abc-formule geeft:  $x=2.984$  mm. Deze waarde is groter dan 400 mm dus de juiste waarde voor de hoogte van de drukzone.

### Rek en kromming

De staalrek is:

$$\epsilon_s = \frac{500 \text{ N/mm}^2}{200.000 \text{ N/mm}^2} = 2,5 \%$$

Bij deze hoogte van de drukzone en staalrek is de rek in het beton:

$$\varepsilon_c = \frac{x_u}{d - \frac{d_o}{2} - x_u} \times \varepsilon_s = \frac{2.984 \text{ mm}}{10.000 \text{ mm} - 200 \text{ mm} - 2.984 \text{ mm}} \times 2,5\%_0 = 1,09 \%_0$$

De kromming is:

$$\kappa_e = \frac{0,0025}{10.000 \text{ mm} - 200 \text{ mm} - 2.984 \text{ mm}} = 3,67 \times 10^{-7} \frac{1}{\text{mm}}$$

### Vloeimoment

$$N_{c1} = \frac{1}{2} h \times \varepsilon_c \times \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c3}} \times x = \frac{1}{2} \times 25.000 \text{ mm} \times 1,09\%_0 \times \frac{45,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,18\%} \times 2.984 \text{ mm} = 1.029.164 \text{ kN}$$

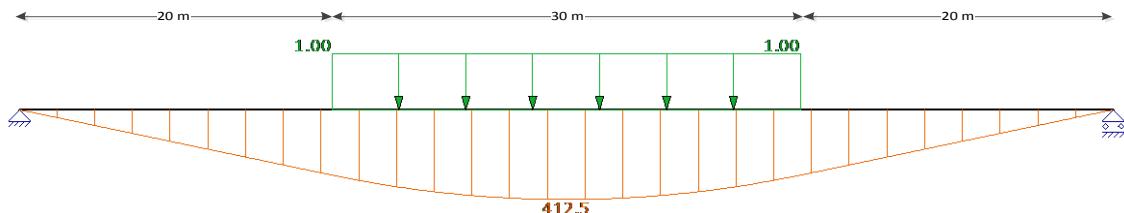
$$N_{c2} = \frac{1}{2} (h - h_{vloer}) \times \frac{f_{cd} \times \varepsilon_c (x - d_b)}{x \times \varepsilon_{c3}} \times (x - d_b) = \frac{1}{2} \times (25.000 \text{ mm} - 3000 \text{ mm}) \times 0,79\%_0 \times \frac{2355 - 200}{2355} \times \frac{45,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,18\%} \times (2355 \text{ mm} - 200 \text{ mm}) = 679.164 \text{ kN}$$

$$N_s = N_{c1} - N_{c2} = 1.029.164 - 679.164 = 350.000 \text{ kN} \text{ (klopt)}$$

$$M_e = N_{c1} \times \left( h - \frac{d_o}{2} - \frac{x}{3} \right) - N_{c2} \times \left( h - d_b - \frac{d_o}{2} - \frac{x-d_b}{3} \right) = 1.029.164 \times \left( 10.000 - 200 - \frac{2355}{3} \right) - 679.164 \times \left( 10.000 - 400 - 200 - \frac{2355-400}{3} \right) = 3,26 \times 10^{12} \text{ Nmm}$$

### Plastische lengte

Om de plastische lengte te bepalen is eerst het moment in het midden van de overspanning bepaald met een uniforme belasting van 1 N/m over een breedte van 30m. Het moment bij deze uniforme belasting is  $M = \frac{30m}{2} \times \left( 35 - \frac{30m}{4} \right) \times 1 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 412,5 \text{ Nm}$ , zie Figuur 7-14. In deze situatie is het bezwijkmoment  $M_u = 3,37 \times 10^9 \text{ Nm}$ . Dit moment teruggerekend naar een uniforme belasting is:  $q = \frac{M_u}{412,5 \text{ Nm}} \times 1 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 0,82 \times 10^7 \text{ N/m}$ . De oplegreactie is:  $V = \frac{1}{2} \times 30 \text{ m} \times q = 1.23 \times 10^8 \text{ N}$ .

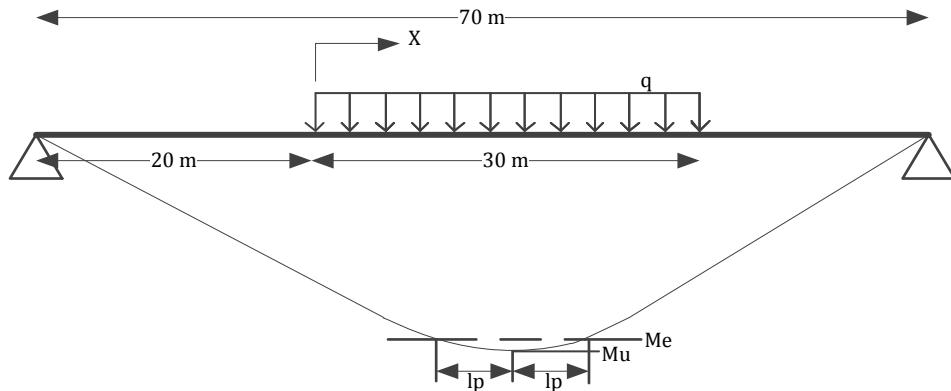


Figuur 7-14 Moment bij een eenheidsbelasting

Nu kan het punt berekend worden waar het moment even groot is als het vloeimoment, zie Figuur 7-15.

$$M_e = V \times (20 + x) - \frac{1}{2} \times q \times x^2 = 1,23 \times 10^8 \times (20 + x) - \frac{1}{2} \times 0,82 \times 10^7 \times x^2$$

Hieruit volgt dat  $x = 9,8 \text{ m}$ . De plastische lengte  $l_p$  is dus  $l_{pl} = 15 - 9,8 = 5,2 \text{ m}$ .



Figuur 7-15 Berekening van de plastische lengte

### Plastische rotatie en Energie:

Nu kan de plastische rotatie berekend en vervolgens de energie die constructie op kan nemen worden berekend met formule worden met formule [ 7-2 ]:

$$\varphi_{pl} = l_{pl} \times (\kappa_u - \kappa_{sy}) = 5.159 \text{ mm} \times (4.80 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}} - 3.67 \times 10^{-7} \frac{1}{\text{mm}}) = 0.0229$$

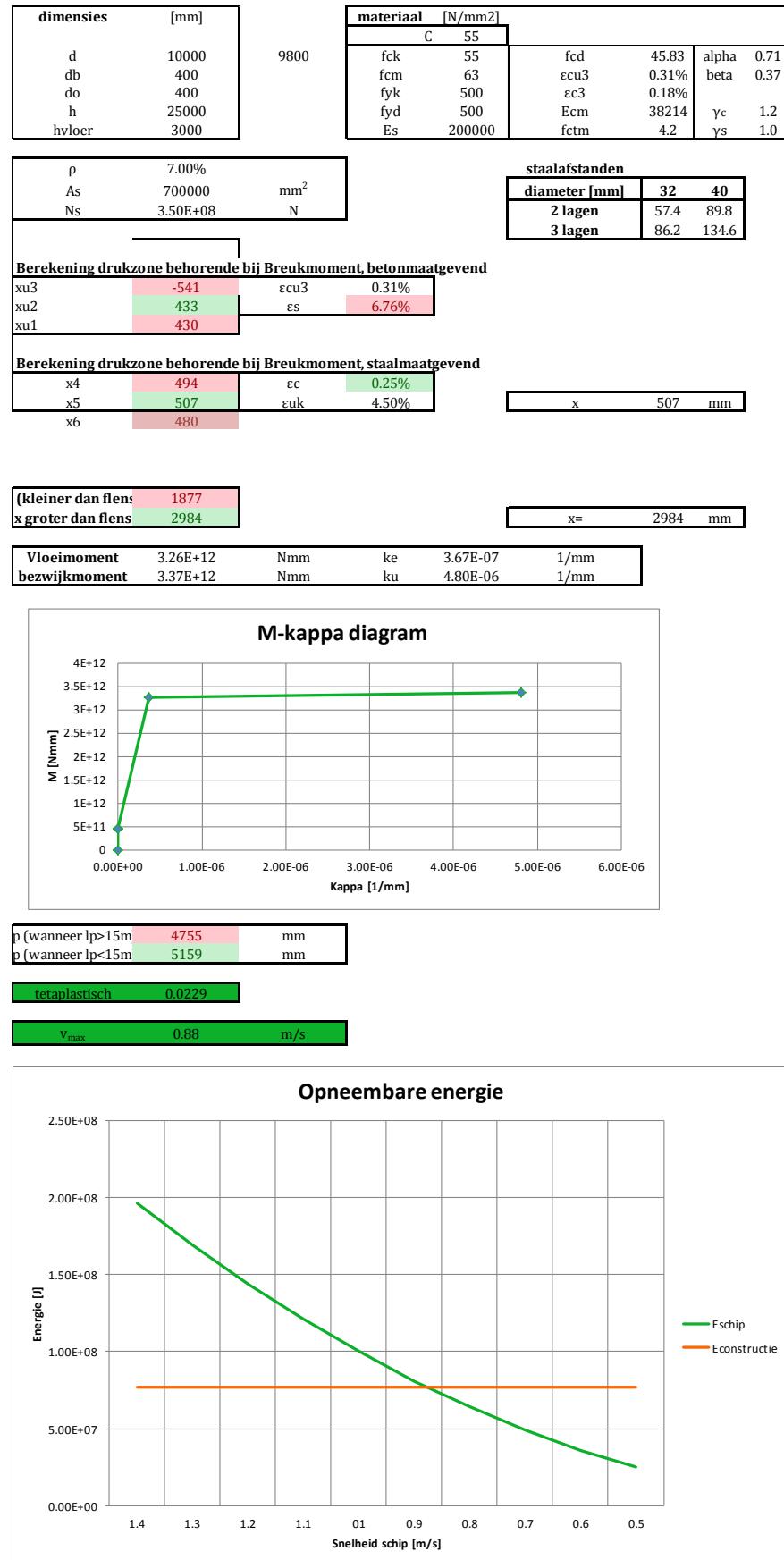
De energie die door de constructie opgenomen kan worden is:

$$E_{constructie} = \varphi_{pl} \times M_u = 0.0229 \times 3.37 \times 10^{12} \text{ Nmm} = 7,7 \times 10^{10} \text{ Nmm} = 7,7 \times 10^7 \text{ J}$$

### Maximale snelheid van het schip die door de constructie opgenomen kan worden

De kinetische energie van het schip is:  $E_{schip} = \frac{1}{2} \times m_{schip} \times v^2$ . De maximale snelheid van het schip die nog door de constructie opgenomen kan worden door plastische vervorming is dan:

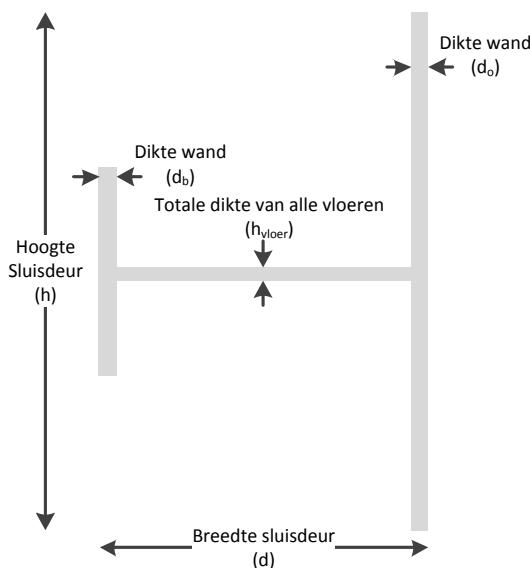
$$v_{max} = \sqrt{\frac{2 \times E_{constructie}}{m_{schip}}} = \sqrt{\frac{2 \times 7,7 \times 10^7 \text{ J}}{200 \times 10^6 \text{ kg}}} = 0,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Figuur 7-16 Excel sheet, berekening van plastische rotatie

## Situatie 2

De berekening is voor situatie 2 een soortgelijke berekening. In deze situatie is echter aangenomen dat de wand aan één zijde kapot wordt gevaren over de 15 meter hoogte van het aanvaar oppervlak, dus aan de kant van de aanvaring (de gedrukte zijde) is de hoogte gereduceerd tot 10 meter. In Figuur 7-17 is de schematisatie weergegeven. De doorsnede is weer vereenvoudigd tot een grote I-ligger om zo eenvoudig een schatting te maken van de plastische rotatie en plastische lengte.



Figuur 7-17 Schematisatie doorsnede sluisdeur bij bezwijken wand

## 7.5 Resultaten

Aan het einde deze paragraaf zijn een aantal grafieken weergegeven. Hierin is gevarieerd in de betonsterkte, breedte van de sluisdeur en de wanddiktes voor beide situaties. In de grafieken is de maximale snelheid van het schip waarbij de energie nog opgenomen kan worden door de constructie en de plastische rotatie uitgezet tegen het wapeningspercentage.

### 7.5.1 Variatie beton sterkeklasse

In de eerste drie grafieken zijn de breedte van de sluisdeur en de wanddiktes hetzelfde gehouden. In de eerste grafiek is de maximale snelheid van het schip berekend waarbij de constructie de kinetische energie van het schip nog op kan nemen met betonsterkeklasse C55/67, in de tweede grafiek met C70/85 en in de derde grafiek met C90/105. Zo is onderzocht wat de invloed van de sterkteklasse is op de opneembare energie van de constructie. In de vierde grafiek is de invloed van de verschillende betonsterkeklassen goed te zien.

Wat opvalt, is dat voor situatie 1 (de doorgetrokken lijnen in de grafieken) de waarden voor de plastische rotatie en de maximale snelheid ongeveer gelijk zijn voor de verschillende sterkteklassen. Dit komt omdat tot dit wapeningspercentage de rek van het

wapeningstaal maatgevend is en niet de betonrek. Situatie 1 geeft eigenlijk een minimum wapeningspercentage waarbij de kinetische energie van het schip bij een 0,5 m/s opgenomen kan worden, dit is bij alle sterkteklasses en deze parameters  $\approx 3\%$ .

Bij situatie 2 (de gestippelde lijnen in de grafiek) geeft in feite een maximum wapeningspercentage. Hierin zit een groot verschil, dit komt doordat de lijn (Maximale snelheid, situatie 2) bij hogere sterkte klasse hoger ligt en dat de lijn bij hogere wapeningspercentages steeds vlakker gaat lopen. De lijn ligt steeds hoger bij grotere sterkteklasses omdat het verschil tussen het bezwijkmoment en het vloeimoment groter is omdat het verschil tussen  $x_u$  en  $x$  groter is. Drukhoogte  $x$  behorende bij het vloeimoment blijft hetzelfde voor de verschillende sterkteklasses alleen  $x_u$  wordt kleiner bij grotere sterkteklasses. Hierdoor is de plasticke lengte groter en dus plasticke rotatie en de maximale snelheid die sluisdeur op kan nemen.

De betonsterkteklasses maakt dus weinig uit voor de opneembare energie van de constructie. De optimale betonsterkteklasses zal dus vooral afhangen van het gewicht van de constructie, bij hogere betonsterkteklasses kunnen de wanden dunner uitgevoerd worden, en van een economische afweging, hogere sterkteklasses beton zijn duurder.

### 7.5.2 Variatie breedte

In grafieken 5 en 6 is de breedte van sluisdeur gevarieerd en de rest van de parameters hetzelfde gehouden als in grafiek 1. In grafiek 5 is de breedte van de sluisdeur versmald tot 9 meter en bij grafiek 6 verbreed tot 11 meter.

Het eerste wat opvalt, is dat het minimum wapeningspercentage waarbij de sluisdeur nog voldoet weinig verandert, deze is nu  $\approx 3,0\%$ . Dit komt door de factor waarmee het verschil tussen het bezwijkmoment en het vloeimoment toeneemt door het verbreden van de sluisdeur. Het verschil tussen bijbehorende krommingen neemt met dezelfde factor af. Vice versa geldt voor het versmallen van de sluisdeur breedte. In grafiek 8 is te zien dat tot een bepaald wapeningspercentage de maximale snelheid voor verschillende breedtes hetzelfde zijn.

Het maximum wapeningspercentage waarbij de sluisdeur nog voldoet is wel verschillend voor de verschillende breedtes. Net als voor bij de hogere betonsterkteklasses ligt de lijn voor de maximale snelheid hoger voor grotere breedtes, zie grafiek 9. Hierdoor ligt het maximaal wapeningspercentage bij grotere breedtes hoger. Dat de constructie meer energie op kan nemen bij een grotere breedte bij hetzelfde wapeningspercentage komt doordat het verschil tussen de drukhoogtes  $x_u$  en  $x$  groter wordt bij grotere breedtes. Hoogte  $x_u$  blijft hetzelfde voor de verschillende breedtes terwijl hoogte  $x$  groter wordt voor grotere breedtes. Doordat dit verschil groter wordt, wordt het verschil tussen het vloeimoment en het bezwijkmoment groter en het verschil tussen de krommingen  $\kappa_u$  en  $\kappa_e$ . Hierdoor is de op te nemen energie groter. Het punt waar de maximale snelheid afneemt in de grafiek is bij het wapeningspercentage waar de hoogte  $x_u$  groter wordt dan de wanddikte.

De breedte van de sluisdeur moet zo klein mogelijk gehouden worden om zo materiaal te sparen. De minimale breedte waarbij de constructie nog voldoende kinetische energie van het schip op kan nemen, uitgaande van een aanvaarsnelheid van 0,5m/s, is in beide situaties 6,5m. De breedte zal in het verder onderzoek gedimensioneerd worden op onder andere stabiliteit en op de grote van de luchtkisten, waarbij 6,5m dan de minimale breedte is.

### 7.5.3 Dikte buitenwand

De dikte van de wand heeft weinig invloed op de opneembare kinetische energie van de sluisdeur. Dit komt omdat de rek van het staal maatgevend is en niet de rek van het beton. In grafiek 7 is de dikte van de wand verhoogd tot 500 mm en de andere parameters hetzelfde gehouden als bij grafiek 1. Hier is het minimum wapeningspercentage 2,3%. Uitgedrukt in vierkante millimeter is dit hetzelfde als het wapeningspercentage van 2.9% bij de wanddikte van 400 mm,  $\frac{2,9}{100} \times 400 \times 1000 \approx \frac{2,3}{100} \times 500 \times 1000 \approx 11.500 \text{ mm}^2$ .

## 7.6 Kleiner aanvaargebied

In hoofdstuk 10.2.4 is te zien dat de breedte van het aanvaargebied van de sluisdeur voor het maatgevende schip de Emma Maersk geen 30m is zoals de Eurocode (45) voorschrijft. De bulb van het schip die de sluisdeur als eerst zal raken is geen 30m breed.

Om te onderzoeken wat de invloed is van het smallere aanvaaroppervlak, is berekend wat de minimale wapening is bij een breedte van 15m voor het aanvaaroppervlak. Dit is gedaan voor een deurbreedte van 10m met wanddiktes van 400mm en betonsterkteklasse C55/67.

Door het smallere raak oppervlak is de plastische lengte kleiner. Hieronder is de berekening van de plastische lengte gegeven voor een breedte van 15m voor het aanvaaroppervlak:

Het moment bij een uniforme belasting over een breedte van 15m is  $M = \frac{15m}{2} \times \left(35 - \frac{15m}{4}\right) \times 1 \frac{N}{m} = 234,4 \text{ Nm}$ . Dit moment teruggerekend naar een uniforme belasting is:

$$q = \frac{M_u}{234,4 \text{ Nm}} \times 1 \frac{N}{m} = 1,44 \times 10^7 \text{ N/m}$$

De oplegreactie is:  $V = \frac{1}{2} \times 15 \text{ m} \times q$ .

Nu kan het punt berekend worden waar het moment even groot is als het vloeimoment:

$$M_e = V \times (27,5 + x) - \frac{1}{2} \times q \times x^2$$

Hieruit volgt de waarde van x, waarmee de plastische lengte berekent kan worden:  $l_{pl}=7,5-x$ .

In Tabel 7-2 zijn de resultaten opgesomd behorende bij een aanvaarbreedte van 30m en 15m, waarbij de constructie net de kinetische energie van het schip varend met 0,5m/s op kan nemen.

Hierin is te zien dat het wapeningspercentage wat benodigd is in de flens groter is. Bij een aanvaaroppervlak van 30m is het minimale wapeningspercentage 2,9% en bij een

aanvaarbreedte van 15m is deze 3,6%. Dit hogere wapeningspercentage komt vooral door de kleinere lengte waarover de deur plastisch vervormd. In het ontwerp zal echter de aanvaarbreedte van 30m die de Eurocode voorschrijft aangehouden. De wapening die benodigd is om de aanvaarenergie op te nemen is gedimensioneerd op een aanvaarbreedte van 30m.

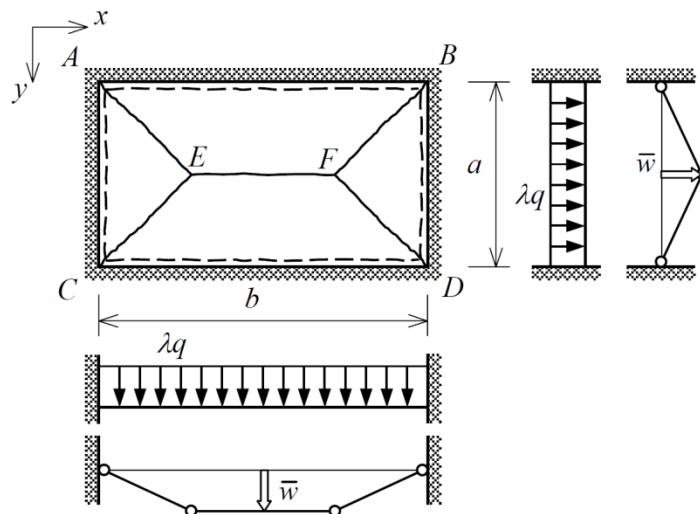
Tabel 7-2 Resultaten smaller aanvaaroppervlak

Aanvaarbreedte	$\rho$	$l_{pl}$	$\kappa_e$	$\kappa_u$	$\varphi_{pl}$	$v_{max}$
30m	2,9%	4005	$3,11 \times 10^{-7}$	$4,68 \times 10^{-6}$	0,0175	0,5m/s
15m	3,6%	3206	$3,22 \times 10^{-7}$	$4,70 \times 10^{-6}$	0,0140	0,5m/s

## 7.7 Reserve capaciteit

In de berekening in hoofdstuk 7.4 is er vanuit gegaan dat alle kinetische energie gedissipeerd wordt door het plastisch vervormen van de totale sluisdeur. Maar als een schip tegen de sluisdeur aanvaart zal eerst kinetische energie dissiperen door het bezwijken van de voorste wanden. In deze paragraaf is een schatting gemaakt hoeveel energie dit ongeveer is.

De hoeveelheid energie die een vierzijdig ingeklemde plaat dissipeert wanneer deze maximaal vervormt is berekend aan de hand van de vloeilijn-theorie (49). In Figuur 7-18 is het vloeilijn patroon weergeven van een vierzijdig ingeklemde plaat belast door een uniforme belasting. De vloeilijnen AE, BF, CE en DF maken een hoek van  $45^\circ$  met de rand.



Figuur 7-18 Vloeilijnen vierzijdig ingeklemde plaat (49)

De energie die de plaat dissipeert bij een verplaatsing in het midden van  $\bar{w}$  kan worden berekend met formule [ 7-3 ].

$$E_d = \sum m_p \times |\Delta\varphi_d| \times l_s \quad [ 7-3 ]$$

Waarin:  
 $E_d$  is de gedissipeerde energie;  
 $m_p$  is het bezwijkmoment van de plaat;  
 $\Delta\varphi_d$  is de hoek tussen twee plaatdelen;

$l_s$  is de lengte van de vloeilijn.

In de tabel hieronder is van de vloeilijnen de rotatie en de lengte gegeven.

Tabel 7-3 Lengte en rotatie van elke vloeilijn

Vloeilijn	$l_x$	$l_y$	$ \Delta\varphi_x $	$ \Delta\varphi_y $
<b>AB</b>	b	0	$2\bar{w}/a$	0
<b>AC</b>	0	a	0	$2\bar{w}/a$
<b>FE</b>	b-a	0	$4\bar{w}/a$	
<b>AE</b>	$\frac{1}{2}a$	$\frac{1}{2}a$	$2\bar{w}/a$	$2\bar{w}/a$

De energie dissipatie kan nu als volgt berekend worden:

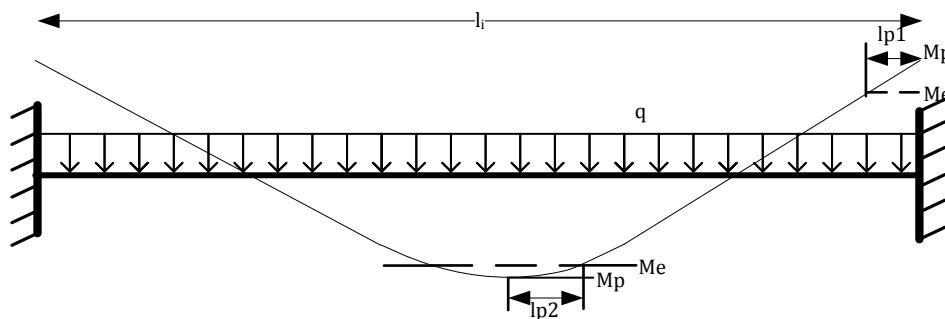
$$\begin{aligned} E_d &= m_p \left( 2 \left( b \times \frac{2\bar{w}}{a} \right) + 2 \left( a \times \frac{2\bar{w}}{a} \right) + (b - a) \times \frac{4\bar{w}}{a} + 4 \left( \frac{1}{2}a \times \frac{2\bar{w}}{a} \right) + 4 \left( \frac{1}{2}a \times \frac{2\bar{w}}{a} \right) \right) \\ &= 8m_p \left( \frac{b}{a} + 1 \right) \bar{w} \end{aligned}$$

Om de maximale energie dissipatie te bepalen is een schatting gemaakt van de maximale verplaatsing van de plaat. Dit is gedaan door verplaatsing te berekenen die behoort bij de plastische rotatie van een ingeklemde ligger, zie berekening hieronder.

$$\bar{w} = \frac{1}{2} l_i \times \varphi_{pl}$$

Waarin:  $l_i$  is de overspanning van de plaat

De plastische lengte is op dezelfde manier berekend als in hoofdstuk 7.4, alleen zijn de zijkanten niet vrij opgelegd maar ingeklemd. Bij een ingeklemde ligger ontstaat een plastisch scharnier bij de oplegging en in het midden van de ligger, zie Figuur 7-19. De plastische lengte  $l_{p1}$  is als volgt berekend:



Figuur 7-19 Bepalen plastische lengte

Bij een uniforme belasting  $q$  is het moment bij de oplegging:  $M = \frac{1}{12} \times q \times l_i^2$ . Het bezwikkelmoment terug gerekend naar een uniforme belasting is:  $q = \frac{M_p}{\frac{1}{12}l_i^2}$ . De plastische

lengte bij de oplegging (lp1) kan berekend worden door:  $M_p - \frac{1}{2} l_p^2 q_1 = M_e$ . De plastische lengte lp2 is op dezelfde manier berekend alleen  $q = \frac{M_p}{\frac{1}{2} l_i^2}$ .

In bijlage O is berekend hoe groot de energie dissipatie van elk stuk wand is. Hierbij zijn de uiteindelijk dimensies uit hoofdstuk 11 gebruikt. In de tabel hieronder zijn de uitkomsten opgesomd. In de eerste kolom staat de geschatte verplaatsing, in de tweede kolom de energie die de wand dissipeert. En in de laatste kolom is verhouding gegeven tussen deze energie en de kinetische energie van het schip, bij een snelheid van 0,5m/s.

Wat opvalt is dat de energie die de onderste wanden opneemt een stuk groter is dan de van de andere wanden. Dit komt omdat deze wanden dikker en groter zijn. Als de bulb van de Emma Maersk bij een aanvaring de bovenste 5 wanden raakt over een breedte van twee cellen, zie hoofdstuk 10.2.4 voor het aanvaargebied, dan is ongeveer 11% van de kinetische energie van het schip gedissipeerd. In de aanname dat de totale kinetische energie opgenomen wordt door plastische vervorming van de totale sluisdeur zit dus nog een redelijke marge.

Tabel 7-4 Energie dissipatie per wandgedeelte

	$\bar{w}$ [mm]	$E_d$ [ $10^3$ J]	$E_d/E_{schip}$ [%]
<b>Wand 1</b>	162	1341	5,4
<b>Wand 2</b>	77	228	0,9
<b>Wand 3</b>	88	250	1,0
<b>Wand 4</b>	100	280	1,1
<b>Wand 5</b>	100	293	1,2
<b>Wand 6</b>	158	411	1,6

## 7.8 Conclusie

Uit de uitgevoerde berekening in dit hoofdstuk blijkt dat de aanvaarbelasting van het schip opgenomen kan worden door een betonnen sluisdeur met redelijk normale dimensies. Alleen moet er redelijk veel wapeningstaal toegepast worden om de aanvaarbelasting op te vangen door plastische vervormen.

Een minimum wapening van 2,9% blijkt nodig te zijn in het geval dat er geen lokaal bezwijken optreedt. Bij het optreden van lokaal bezwijken over een hoogte van 15 meter is er een minimum wapeningspercentage nodig van 2,2%, wat een stuk lager is. Het wapeningspercentage zal hier tussen moeten liggen. Ervan uitgaande dat bij een forse aanvaring lokale bezwijking optreedt, zal het wapeningspercentage van 2,9% niet nodig zijn. De breedte van de sluisdeur moet minimaal 6,5 meter zijn, uit verder onderzoek moet blijken of dit voldoende is.

Om deze berekening te vergelijken met de berekening uit de Eurocode, zie hoofdstuk 5.1.3, is de kracht bepaald die afgedragen wordt op het sluishoofd. Bij een sluisdeur van 10m breed is het bezwijkmoment  $M_u = 1,5 \times 10^{12}$  Nmm als  $E_{constructie} = E_{schip}$ , zie eerst drie grafieken. De bijbehorende oplegreactie is:  $V = \frac{1}{2} \times 30m \times \frac{M_u}{412,5Nm} = 55MN$ . De totale

botskracht die opgenomen wordt door plastische vervorming is 110 MN. De aanvaarbelasting volgens de Eurocode bij een aanvaarsnelheid van 0,5m/s is 68 MN, dit is een groot verschil. Dit verschil wordt nog groter bij grotere breedtes van de sluisdeur, omdat het bezwijkmoment dan ook groter wordt.

Het grote verschil in de berekening gemaakt in dit hoofdstuk en de berekening volgens de Eurocode is dat hier is uitgegaan van een zachte botsing en in de Eurocode van een harde botsing. In de Eurocode wordt er vanuit gegaan dat alle kinetische energie wordt opgenomen door het schip zelf, dus door vervorming van het schip zelf. En in berekening gemaakt in dit hoofdstuk wordt alle energie opgenomen door vervorming van de constructie en niks door het schip. De 'echte' botskracht zal tussen beide waarden inliggen. Een gedeelte van de botskracht wordt opgenomen door de vervorming van de sluisdeur en een gedeelte door indrukking van het schip. Welk gedeelte van de kinetische energie van het schip opgenomen wordt door het schip en welk gedeelte door de sluisdeur is heel moeilijk te bepalen en afhankelijk van veel factoren, waaronder de vorm en stijfheid van het schip en sluisdeur. Dit zal in dit onderzoek niet onderzocht worden.

## 7.9 Grafieken

- plastische rotatie, situatie 1
- plastische rotatie, situatie 2
- Maximale snelheid, situatie 1
- Maximale snelheid, situatie 2

Figuur 7-20 Legenda bij de grafieken in 7.9

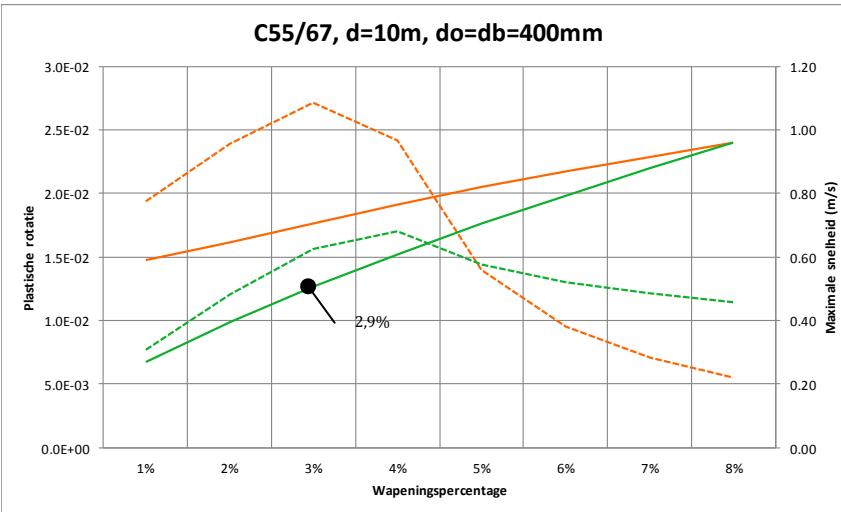
## Waarde voor situatie 1

$p$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0148	0.0161	0.0176	0.0191	0.0205	0.0218	0.0229	0.0240
Bezwijkmoment (Nmm)	4.9E+11	9.7E+11	1.5E+12	1.9E+12	2.4E+12	2.9E+12	3.4E+12	3.8E+12
Opneembare energie (J)	7.2E+06	1.6E+07	2.6E+07	3.7E+07	5.0E+07	6.3E+07	7.7E+07	9.2E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.27	0.40	0.51	0.61	0.70	0.79	0.88	0.96

## Waarde voor situatie 2

$p$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0194	0.0239	0.0271	0.0242	0.0140	0.0095	0.0071	0.0055
Bezwijkmoment (Nmm)	4.85E+11	9.67E+11	1.44E+12	1.91E+12	2.37E+12	2.84E+12	3.32E+12	3.81E+12
Opneembare energie (J)	9.4E+06	2.3E+07	3.9E+07	4.6E+07	3.3E+07	2.7E+07	2.4E+07	2.1E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.31	0.48	0.63	0.68	0.58	0.52	0.49	0.46

1



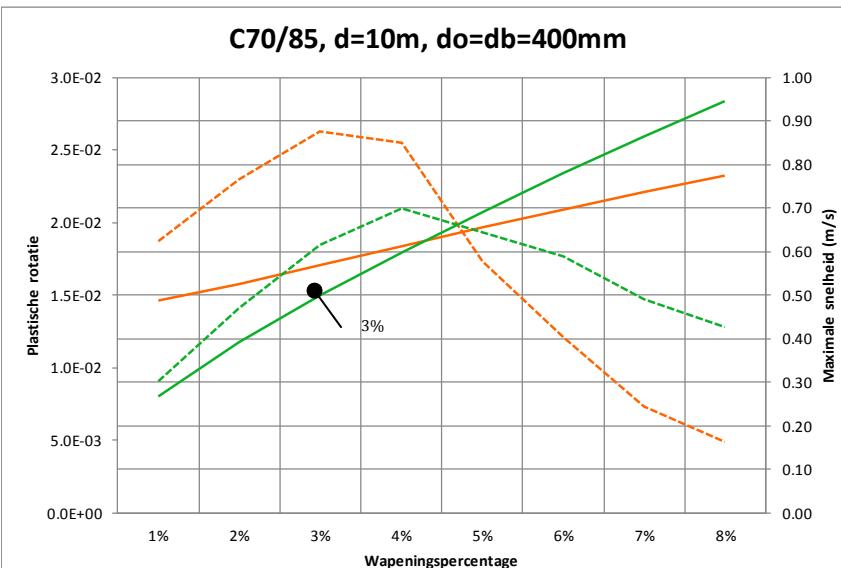
## Waarde voor situatie 1

$p$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0146	0.0158	0.0171	0.0184	0.0197	0.0209	0.0221	0.0232
Bezwijkmoment (Nmm)	4.9E+11	9.7E+11	1.5E+12	1.9E+12	2.4E+12	2.9E+12	3.4E+12	3.9E+12
Opneembare energie (J)	7.1E+06	1.5E+07	2.5E+07	3.6E+07	4.8E+07	6.1E+07	7.5E+07	9.0E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.27	0.39	0.50	0.60	0.69	0.78	0.86	0.95

## Waarde voor situatie 2

$p$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0187	0.0230	0.0263	0.0255	0.0173	0.0121	0.0074	0.0049
Bezwijkmoment (Nmm)	4.9E+11	9.7E+11	1.4E+12	1.9E+12	2.4E+12	2.9E+12	3.4E+12	3.7E+12
Opneembare energie (J)	9.1E+06	2.2E+07	3.8E+07	4.9E+07	4.1E+07	3.5E+07	2.4E+07	1.8E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.30	0.47	0.62	0.70	0.64	0.59	0.49	0.43

2



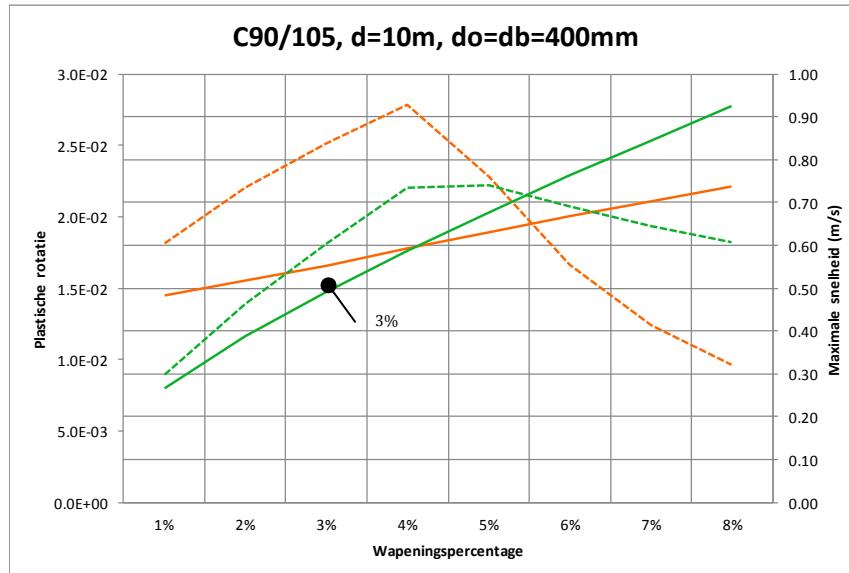
Waarde voor situatie 1

$\rho$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0145	0.0155	0.0166	0.0178	0.0189	0.0201	0.0211	0.0221
Bezwijkmoment (Nmm)	4.9E+11	9.7E+11	1.5E+12	1.9E+12	2.4E+12	2.9E+12	3.4E+12	3.9E+12
Opneembare energie (J)	7.1E+06	1.5E+07	2.4E+07	3.4E+07	4.6E+07	5.8E+07	7.1E+07	8.5E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.27	0.39	0.49	0.59	0.68	0.76	0.85	0.92

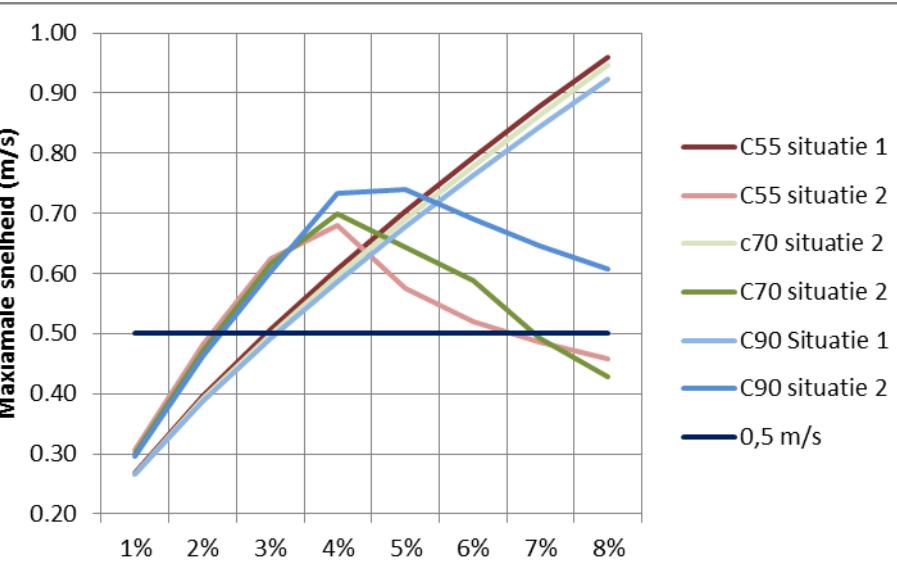
Waarde voor situatie 2

$\rho$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0181	0.0221	0.0251	0.0279	0.0228	0.0166	0.0124	0.0096
Bezwijkmoment (Nmm)	4.9E+11	9.7E+11	1.4E+12	1.9E+12	2.4E+12	2.9E+12	3.4E+12	3.8E+12
Opneembare energie (J)	8.8E+06	2.1E+07	3.6E+07	5.4E+07	5.5E+07	4.8E+07	4.2E+07	3.7E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.30	0.46	0.60	0.73	0.74	0.69	0.65	0.61

3

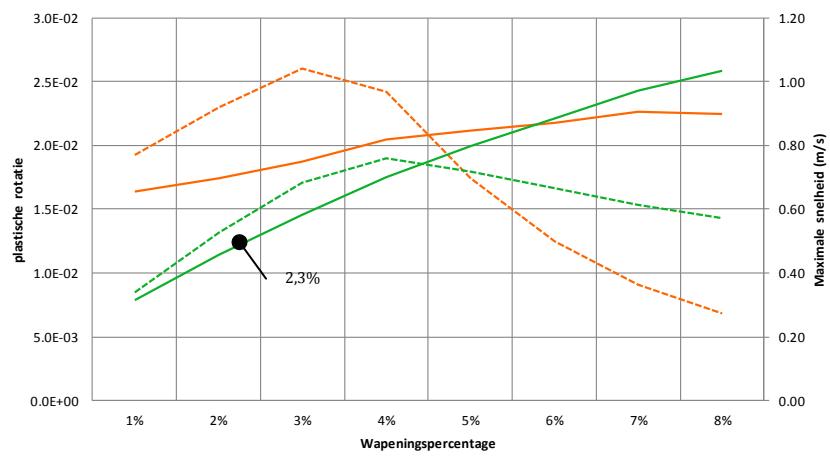


4



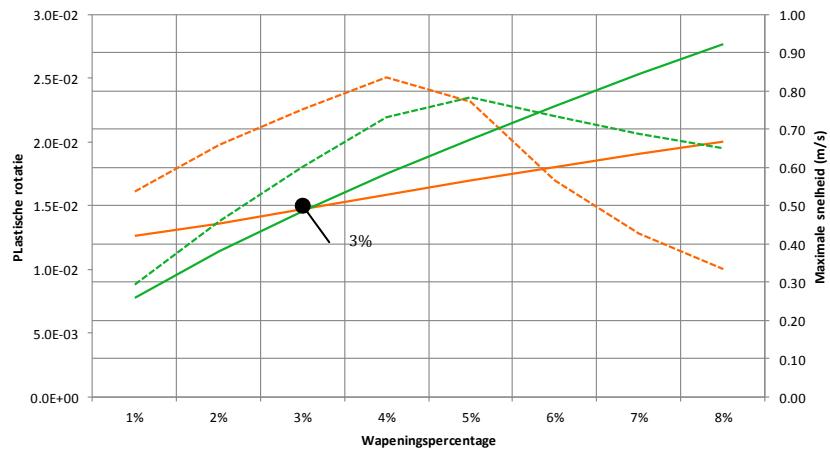
<b>Waarde voor situatie 1</b>	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
p								
Plastische rotatie	0.01634134	0.017463048	0.0187	0.0204	0.0211	0.0218	0.0226	0.0225
Bezwijkmoment (Nmm)	6.1E+11	1.2E+12	1.8E+12	2.4E+12	3.0E+12	3.6E+12	4.2E+12	4.8E+12
Opneembare energie (J)	9.9E+06	2.1E+07	3.4E+07	4.9E+07	6.3E+07	7.8E+07	9.4E+07	1.1E+08
Maximale snelheid schip (m/s)	0.31	0.46	0.58	0.70	0.80	0.88	0.97	1.03

<b>Waarde voor situatie 2</b>	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
p								
Plastische rotatie	0.019214879	0.022981213	0.0260	0.0242	0.0174	0.0124	0.0091	0.0069
Bezwijkmoment (Nmm)	6.03459E+11	1.20212E+12	1.8E+12	2.4E+12	3.0E+12	3.6E+12	4.1E+12	4.7E+12
Opneembare energie (J)	1.2E+07	2.8E+07	4.7E+07	5.8E+07	5.2E+07	4.4E+07	3.8E+07	3.3E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.34	0.53	0.68	0.76	0.72	0.66	0.61	0.57

**C55/67, d=10m, do=db=500mm****5**

<b>Waarde voor situatie 1</b>	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
p								
Plastische rotatie	0.0126	0.0136	0.0147	0.0159	0.0170	0.0181	0.0191	0.0200
Bezwijkmoment (Nmm)	5.4E+11	1.1E+12	1.6E+12	2.1E+12	2.7E+12	3.2E+12	3.7E+12	4.3E+12
Opneembare energie (J)	6.8E+06	1.5E+07	2.4E+07	3.4E+07	4.5E+07	5.8E+07	7.1E+07	8.5E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.26	0.38	0.49	0.58	0.67	0.76	0.84	0.92

<b>Waarde voor situatie 2</b>	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
p								
Plastische rotatie	0.0161	0.0197	0.0226	0.0251	0.0231	0.0170	0.0128	0.0100
Bezwijkmoment (Nmm)	5.4E+11	1.1E+12	1.6E+12	2.1E+12	2.6E+12	3.2E+12	3.7E+12	4.2E+12
Opneembare energie (J)	8.6E+06	2.1E+07	3.6E+07	5.3E+07	6.1E+07	5.4E+07	4.7E+07	4.2E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.29	0.46	0.60	0.73	0.78	0.73	0.69	0.65

**C90/105, d=11m, do=db=400mm****6**

Waarde voor situatie 1

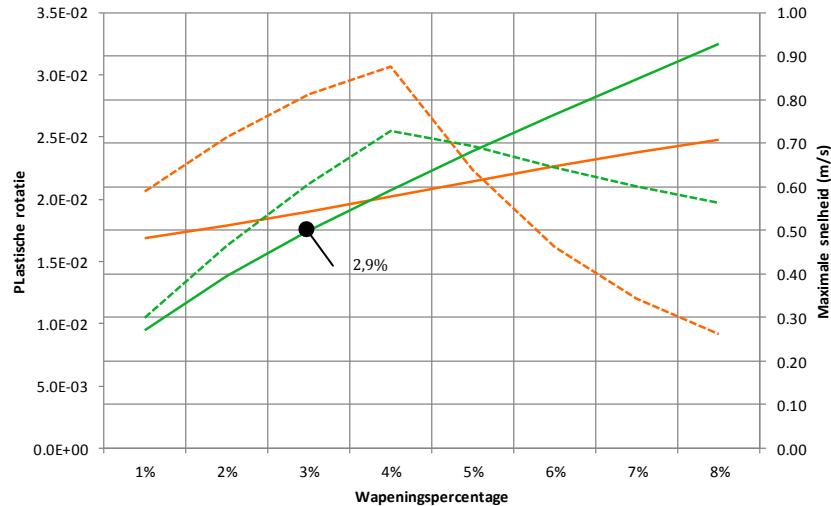
$\rho$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0169	0.0179	0.0190	0.0202	0.0214	0.0226	0.0237	0.0248
Bezwijkmoment (Nmm)	4.4E+11	8.7E+11	1.3E+12	1.7E+12	2.2E+12	2.6E+12	3.0E+12	3.5E+12
Opneembare energie (J)	7.4E+06	1.6E+07	2.5E+07	3.5E+07	4.7E+07	5.9E+07	7.2E+07	8.6E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.27	0.40	0.50	0.59	0.68	0.77	0.85	0.93

Waarde voor situatie 2

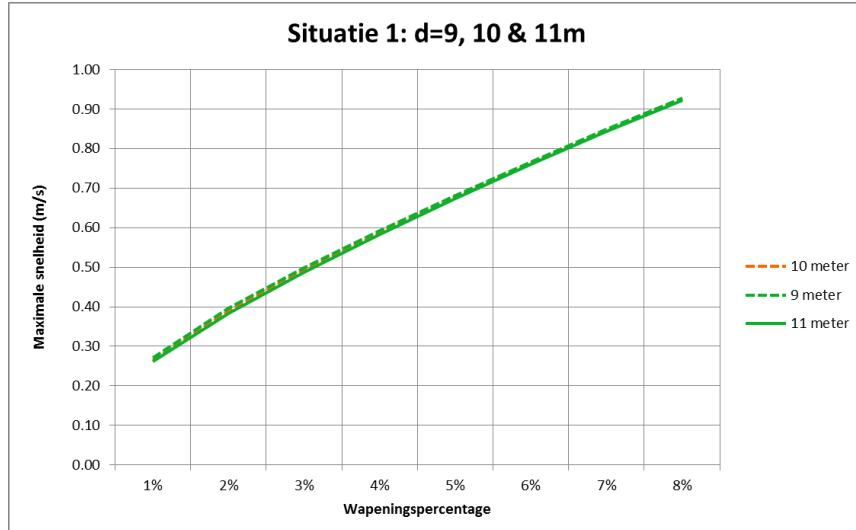
$\rho$	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Plastische rotatie	0.0206	0.0250	0.0284	0.0307	0.0224	0.0162	0.0120	0.0092
Bezwijkmoment (Nmm)	4.4E+11	8.7E+11	1.3E+12	1.7E+12	2.1E+12	2.6E+12	3.0E+12	3.4E+12
Opneembare energie (J)	9.0E+06	2.2E+07	3.7E+07	5.3E+07	4.8E+07	4.2E+07	3.6E+07	3.2E+07
Maximale snelheid schip (m/s)	0.30	0.47	0.61	0.73	0.69	0.64	0.60	0.56

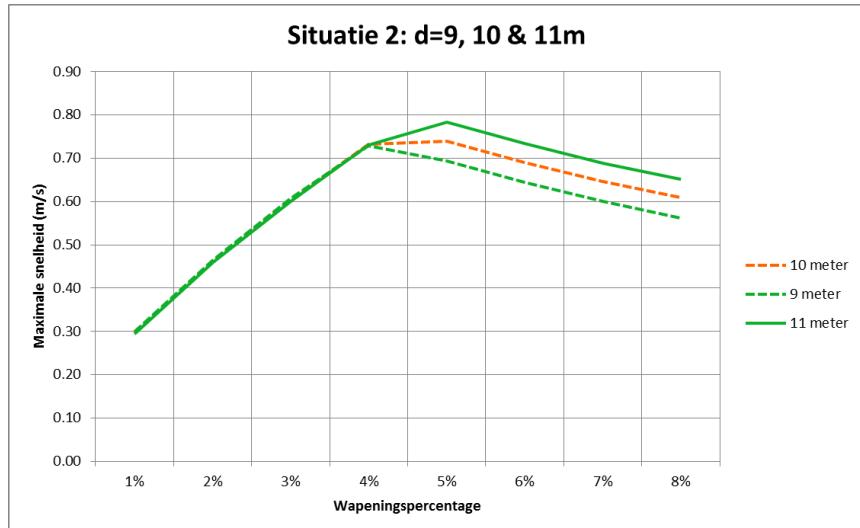
**C90/105, d=9m, do=db=400mm**

7



8



**9**

# 8. VARIANT ONTWIKKELING

---

Om tot een optimaal ontwerp te komen zijn verschillende varianten ontworpen. De variant ontwikkeling is gedaan aan de hand van de morfologische box methode. Deze methode wordt in de volgende paragraaf uitgelegd.

Bij het bedenken van de verschillende varianten is rekening gehouden met de aandachtspunten beschreven in hoofdstuk 1.7. Eerst zijn verschillende varianten geschatst met een korte beschrijving erbij, zie hoofdstuk 8.3. Vervolgens is in hoofdstuk 9 onderzocht aan de hand van een Multi Criteria Analyse (MCA) wat de meest belovende variant is; die vervolgens is uitgewerkt in hoofdstuk 10.

## 8.1 Morfologie box

Bij de variant ontwikkeling is gebruik gemaakt van de morfologische box methode, welke beschreven is in "Handboek specificeren" (50). Hiermee wordt op een gestructureerde wijze buiten de kaders gedacht van de conventionele oplossingen voor een probleem.

Voor elke functie waaraan een sluisdeur moet voldoen zijn meerdere alternatieven om deze functie te vervullen. In de morfologische box zijn verschillende alternatieven per functie weergegeven in een matrix. Om tot een basis van een ontwerp te komen worden per functie één of meerdere alternatieven gekozen, zo kunnen vele varianten gemaakt worden. Als er vier verschillende functies zijn die alle vijf verschillende opties hebben, zijn er  $5 \times 5 \times 5 \times 5 = 625$  verschillende varianten te maken. Niet alle combinaties vormen een ontwerp dat realistisch is of dat voldoet aan alle eisen. Maar door in te zien aan welke eisen het ontwerp moet voldoen en welke varianten een goed eindresultaat geven, blijven er een aantal kansrijke alternatieven over.

De twee belangrijkste functies van de sluis, zie hoofdstuk 2, zijn het keren van water en het passeren van schepen mogelijk maken. Deze twee functies zijn de basis van morfologie box. Beide functies zijn verder opgedeeld in een aantal basis kenmerken, welke zo algemeen mogelijk gehouden zijn. Hieronder zijn de functies weergegeven met een korte uitleg en in Tabel 8-1 is de morfologische box weergegeven.

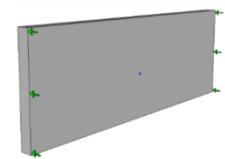
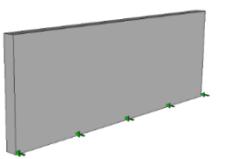
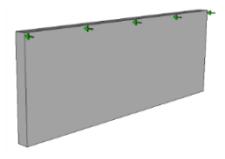
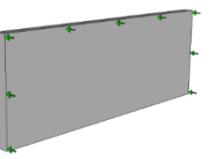
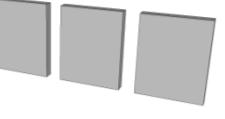
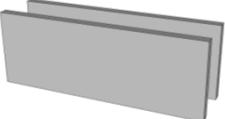
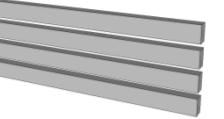
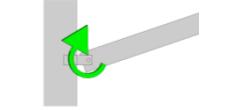
- *Waterkerende functie: in gesloten stand de sluiskolk waterdicht afsluiten;*
- *de constructievorm, hoe worden de krachten afgedragen;*
- *opleggingen, hoe wordt de sluisdeur ondersteund;*
- *het aantal elementen in x-, y- en z- richting waaruit de constructie bestaat;*
- *Passeren van schepen mogelijk maken naar of uit de sluiskolk;*
- *In welke richting beweegt de sluisdeur om schepen te laten passeren;*
- *Welk geleidingssysteem wordt toegepast om de sluisdeur te bewegen.*

## 8.2 Gereduceerde morfologische box

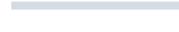
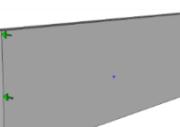
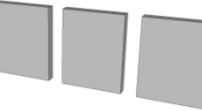
Naar aanleiding van de aannames die zijn gedaan in hoofdstuk 6 kan de morfologische box sterk gereduceerd worden. Aangenomen is dat de sluisdeur op de zijkanten en de bodem is opgelegd (6.2), hierdoor vallen de drie andere mogelijke opleggingen af. Aangenomen is dat de bewegingsrichting een horizontale translatie is (6.1), waardoor de andere drie opties afvallen. Voor het geleidingssysteem is aangenomen dat het of glijdend, via een hydrovoet, of drijvend wordt uitgevoerd (0). Door deze aannames wordt de morfologische box sterk gereduceerd, deze gereduceerde morfologische box is weergegeven in Tabel 8-2. Het aantal mogelijk varianten is zo sterk verminderd.

Uit de gereduceerde morfologische box volgt dat vooral in constructievorm gevarieerd kan worden, vooral in de vorm van het bovenaanzicht en het aantal elementen in de verschillende richtingen. Een groot verschil in varianten ontstaat ook door de keuze van het geleidingssysteem. Moet de constructie kunnen drijven of dragen de hydrostatische lagers het resterende verticale gewicht?

Tabel 8-1 Morfologische box (de afbeeldingen zijn schematische afbeeldingen)

<b>Waterkeren</b>	<b>Vorm sluisdeur bovenaan-zicht</b>					
	<b>opleggingen</b>					
	<b>Aantal elementen</b>					
<b>Passeren van schepen</b>	<b>Bewegingsrichting</b>	 Horizontale translatie	 Verticale translatie	 Rotatie om horizontale as	 Rotatie om verticale as	
	<b>Geleidingsysteem</b>	 Scharnier	 Glijden	 Rollen	 Drijven	 Hijsen

Tabel 8-2 Gereduceerde morfologische box (de afbeeldingen zijn schematische afbeeldingen)

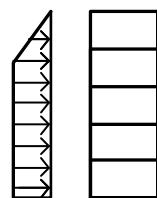
<b>Waterkeren</b>	<b>Vorm sluisdeur bovenaan-zicht</b>	 Boog	 recht	 punt	
	<b>opleggingen</b>	 Zijkanten			
	<b>Aantal elementen</b>	 1 element	 Meerdere elementen in x-richting	 Meerdere elementen in y-richting	 Meerdere elementen in z-richting
<b>Passeren van schepen</b>	<b>Bewegings-richting</b>	 Horizontale translatie			
	<b>Manier van openen</b>	 Drijven	 Glijden		

## 8.3 Varianten

Met behulp van de morfologische box methode zijn zes varianten bedacht die mogelijk een kansrijke oplossing zijn. Deze varianten zijn in de volgende zes sub-paragrafen beschreven. De eerste vier varianten zijn gebaseerd op de gekromde vorm van het bovenaanzicht en de laatste twee op de rechte vorm.

Van elke variant is een tekening gemaakt om een schematische voorstelling te geven van de sluisdeur. Met een korte omschrijving is de constructie beschreven, de vorm van de sluisdeur en hoe de sluisdeur opent en sluit. Van alle varianten zijn bondig de voordelen en nadelen beschreven. Hierbij is vooral naar de complexiteit van de constructie gekeken, bijvoorbeeld de moeilijkere uitvoering van de oplegging, de afdichting of het bewegingsmechanisme.

Alle varianten zijn dubbelwandig uitgevoerd met hiertussen vloeren die voor de stijve verbinding tussen de twee buitenwanden zorgen en genoeg buigstijfheid geven om de belasting op te nemen. Een dwarsdoorsnede die lijkt op de hiernaast weergegeven doorsnede. Verder zijn alle varianten uitgevoerd met Hydro geleiding om de sluisdeur te openen of sluiten tenzij anders vermeldt.

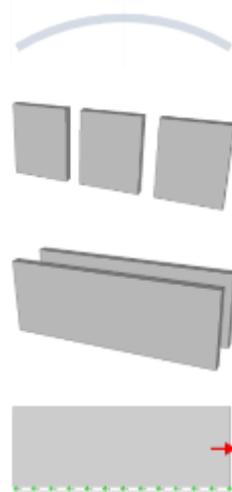


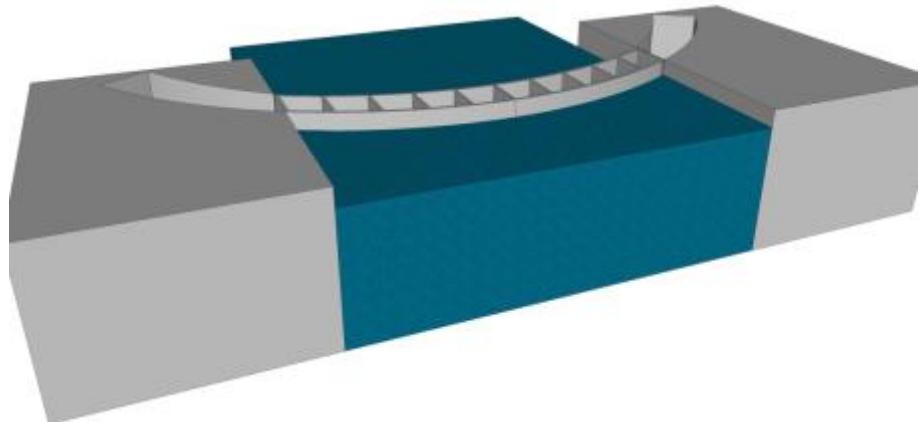
Tussen de onderste vloeren komen wanden om verschillende compartimenten te creëren voor lucht- en ballastkisten. Dit hebben alle varianten om zo het verticale gewicht te reduceren en de sluisdeur stabiel te maken. Naar de indeling en vormgeving van deze cellen is in de uitwerking van de variant gekeken, zie hoofdstuk 10.

### 8.3.1 Gekromde deur 1

De eerste variant is weergegeven in Figuur 8-1. De sluisdeur is opgedeeld in twee gekromde sluisdeuren die vanuit beide sluishaofden naar binnen toe bewegen om het kanaal af te sluiten. Door toepassing van een gekromde sluisdeur wordt de belasting grotendeels door normaalkrachten afgedragen, waardoor de materiaaleigenschappen maximaal benut kunnen worden. Dit leidt tot een slanker ontwerp.

In gesloten situatie steunen de deuren in het midden tegen elkaar. De 'gekromde' kant bevindt zich aan de zeezijde. Aan deze zijde bevindt zich de grootste resulterende belasting. Bij deze belasting draagt de sluisdeur de belasting af via een drukboog en niet via een trekboog.





Figuur 8-1 Gekromde deur 1

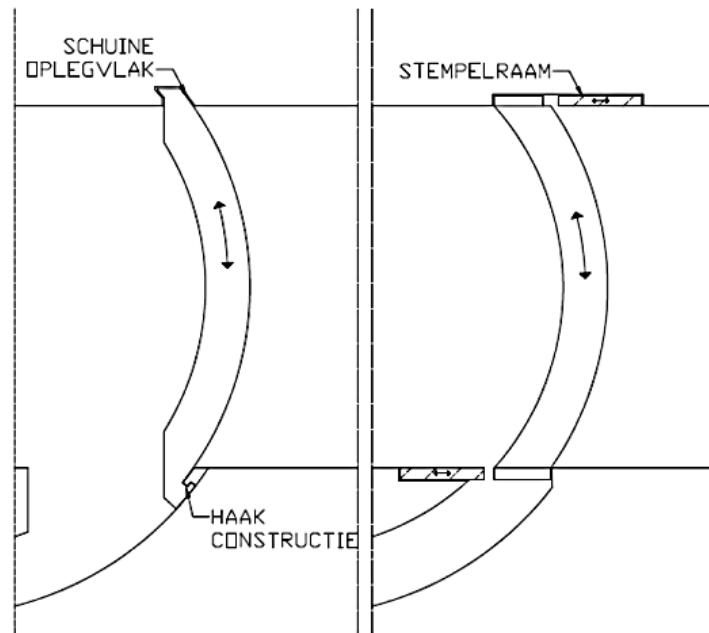
Een voordeel van een boogconstructie is dat de belasting vooral via normaalkracht wordt afgedragen en nauwelijks via momenten, alleen bij niet uniforme belasting. In Figuur 8-4 is schematisch weergegeven hoe de belasting wordt afgedragen. In het midden van de geschematiseerde ligger bevindt zich een scharnier, de aansluiting tussen de twee sluisdeuren. Echter omdat de sluisdeur tweezijdig water moet keren, functioneert de constructie als drukboog of als trekboog. Bij een negatief verval ontstaat dus grote trekspanningen. Deze trekspanningen moeten opgenomen worden door wapeningsstaal en/of door voorspanstaal. Het scharnier in het midden moet dus ook trekkrachten kunnen overdragen. Een ander nadeel van het scharnier in het midden is dat de sluisdeur minder goed bestand is tegen aanvaringen. Een aanvaring zorgt voor een grote niet uniforme belasting. Hierdoor ontstaan grote dwarskrachten en momenten in de constructie, die door het scharnier overgedragen moeten worden.

Door de gekromde sluisdeuren zijn de sluishoofden minder breed dan bij toepassing van rechte deuren. Hierdoor is de breedte van het sluishoofd kleiner, zie Figuur 8-6. Dit is wel afhankelijk van hoe groot de kromming van de sluisdeur is. De lengte van de sluishoofden is wel groter door de gekromde deuren. Hierdoor is ook de totale lengte van de sluis groter dan bij toepassing van rechte deuren. In Figuur 8-15 is dit duidelijk te zien. Het groene vlak is de grootte van de sluiskolk, 500 meter x 70 meter. Door de gekromde deuren is de totale lengte van de sluis dus groter dan bij rechte deuren. Het water wat zich tussen de twee sluisdeuren bevindt en buiten het groene vlak is 'extra' water dat ook geschut moet worden.

Door de boogwerking ontstaan grote horizontale krachten die door de oplegging opgenomen moeten worden. Hierdoor moet een complexe oplegging ontworpen worden die op druk en trek op belast wordt. In Figuur 8-2 zijn twee mogelijke opleggingen weergegeven om de horizontale spatkrachten op te vangen.

Bij de variant met haakconstructie wordt de belasting, zowel positief als negatief verval in de deurkas aan één zijde opgenomen. In geval van een positief verval wordt de belasting direct op de aanslag van de kolkwand afgedragen. In geval van een negatief verval wordt de belasting door een haakconstructie opgenomen.

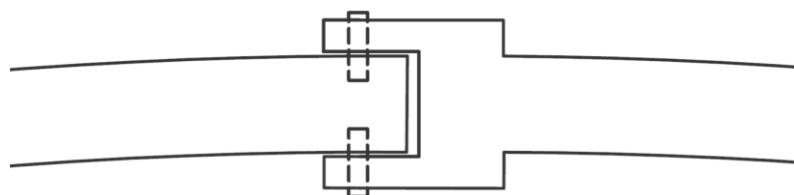
Bij de tweede variant zorgt een stempelraam voor de krachtsafdracht naar de kolkwanden. In gesloten stand ligt de gekromde roldeur tegen twee van de vier aanslagen. Afhankelijk van de richting van het verval wordt één stempelraam bewogen naar de aanslag van de roldeur. De oplegkrachten worden via het stempelraam naar de kolkwanden afgedragen.



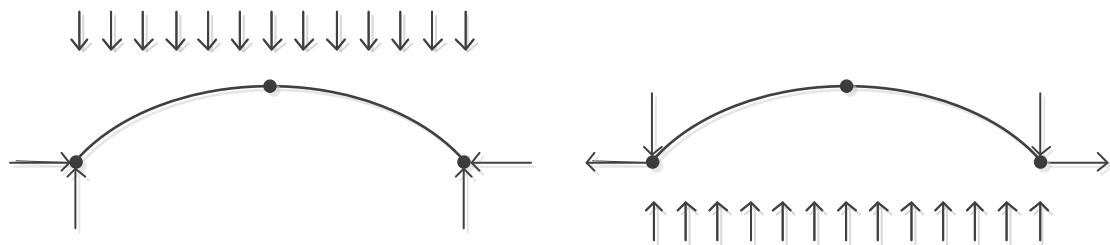
Figuur 8-2 Mogelijke vormen van de oplegging bij een gekromde sluisdeur (30)

Bij het sluiten van de deuren moet de deuren geleid worden zodat ze in het midden goed op elkaar aansluiten. Als de deuren niet recht op elkaar aansluiten ontstaan grote problemen.

De verbinding tussen de twee deuren zorgt voor complexiteit. De twee deuren moeten in het midden goed op elkaar aansluiten. De aansluiting moet waterdicht zijn en de verbinding moet de normaalkracht (trek en druk) en dwarskracht (bij niet uniforme belasting) over kunnen dragen. In Figuur 8-3 is een mogelijke verbinding weergegeven. Eén deur krijgt aan het uiteinde een u-vorm waarin de andere deur valt. Met gestippelde lijnen zijn stalen pinnen aangegeven die moeten zorgen voor de trek overdracht.



Figuur 8-3 Mogelijke verbinding tussen twee deuren in het midden



Figuur 8-4 Vereenvoudigd krachtsafdracht schema 1.1.1 Gekromde deur 1

De gebogen constructie heeft naast de moeilijke oplegging als nadeel dat geleiding van een gekromde sluisdeur lastig is. De sluisdeur transleert niet horizontaal zoals bij ‘normale’ roldeuren maar in een bocht. De sluisdeuren kunnen dus niet met kabels open en dicht getrokken worden. Hiervoor is dus een ander systeem toegepast worden. De gekromde sluisdeur wordt geopend en gesloten door een tandbaan met aandrijfwielen.

Ook ontstaan door de kromme beweging, krachten loodrecht op de bewegingsrichting. Deze krachten moeten opgenomen worden door de geleiding, die dus aan slijtage onderhevig is.

Omdat de sluis sluisdeur uit twee delen bestaat zijn ook twee aandrijvingsmechanismen nodig, aan elke zijde één. Dus beide sluishoofden moeten worden uitgevoerd met een machinekamer. Dit zorgt voor extra onderhoud en kosten. De uitvoering van deze variant is lastig door de gekromde vorm. De sluisdeur, drempel en de sluishoofden moeten door deze vorm krom bekist worden.

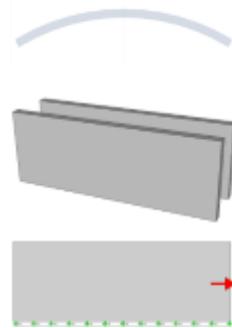
Een voordeel is dat twee kleinere sluisdeuren eenvoudiger te vervoeren en te plaatsen zijn dan één grote sluisdeur. De vele nadelen van deze variant wegen niet op tegen de voordelen. Deze variant zal niet meegenomen worden in de MCA.

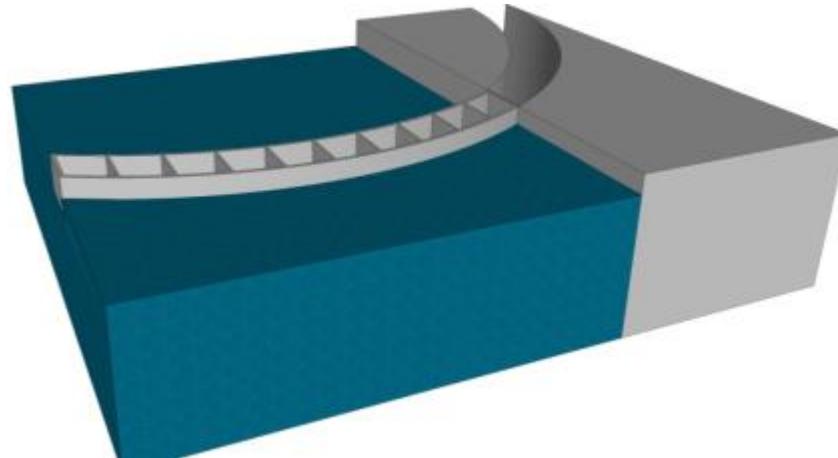
### 8.3.2 Gekromde deur 2

De tweede variant is afgeleid van de eerste variant. De variant is weergeven in Figuur 8-5. Omdat de variant bijna hetzelfde is als de vorige heeft deze dus zo goed als dezelfde voor- en nadelen.

Het grootste verschil is dat de sluisdeur uit één geheel bestaat. Dit heeft als voordelen dat geen lastige aansluiting in het midden van de sluisdeur nodig is, maar één aandrijvingsmechanisme nodig is en in maar één van de twee sluishoofden is een nis nodig. Dit laatste heeft een nog grotere invloed op de benodigde breedte van het sluishoofd dan bij twee losse sluisdeuren. De breedte van sluis is nog kleiner, zie Figuur 8-6.

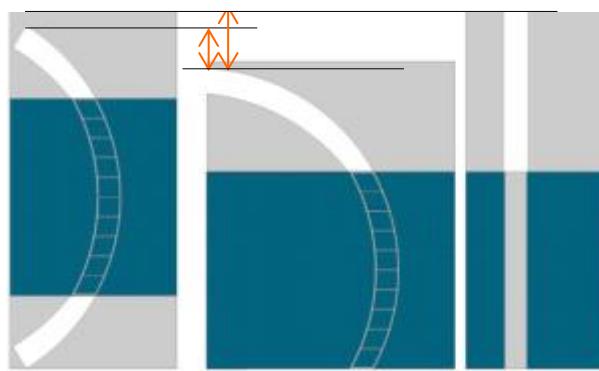
De totale lengte van de sluis, het extra te schutten water en de uitvoering is zo goed als hetzelfde als bij gekromde deur 1. Het vervoeren van de sluisdeur lastiger omdat deze uit één geheel bestaat.



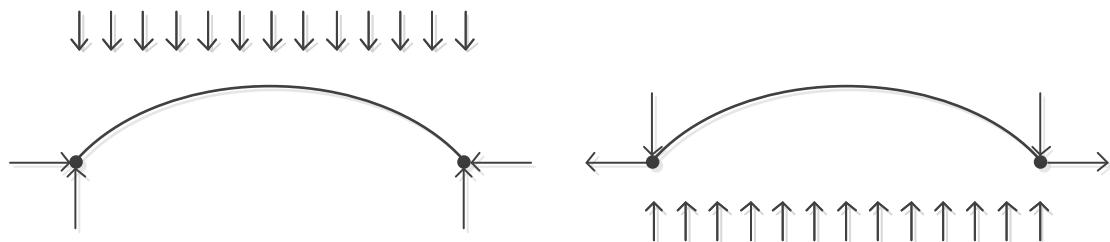


Figuur 8-5 Gekromde deur 2

Twee gekromde deuren   één gekromde deur   één rechte deur



Figuur 8-6 Benodigde breedte sluishoofd varianten



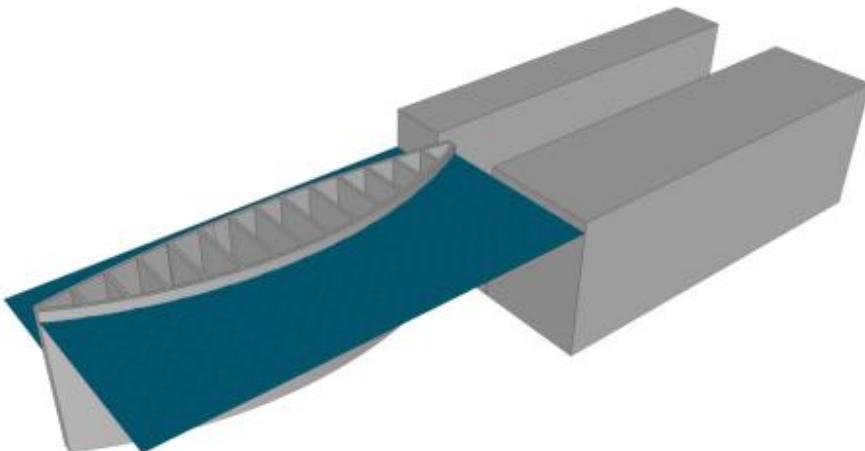
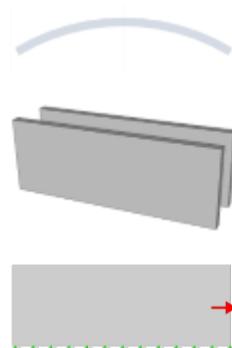
Figuur 8-7 Vereenvoudigd krachtsafdracht schema gekromde deur 2

Het krachtsafdracht schema van deze variant verschilt niet veel van de vorige variant, zie Figuur 8-7. In deze variant bevindt zich geen scharnier in het midden van de overspanning. Waardoor een groot risico bij openen en sluiten van sluisdeur en bij aanvaringen weggenomen wordt.

### 8.3.3 Gekromde buigligger

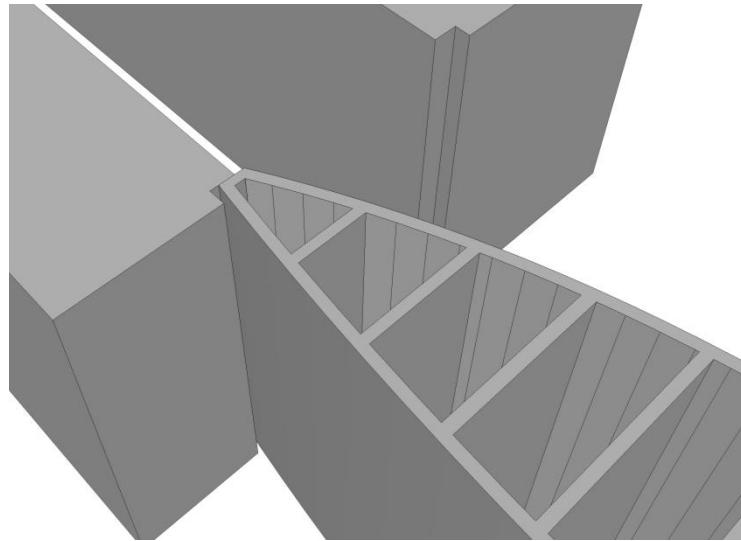
Het principe van de derde variant, zie Figuur 8-8, is dat bij een positief en een negatief verval de belasting afgedragen wordt door buiging, net als bij rechte roldeuren. Echter door de gekromde vorm is de sluisdeur het breedst waar het moment het grootst is, dit is gunstig voor de spanning in de buitenwanden.

Het voordeel van de kleinere breedte van het sluishoofd heeft deze variant niet omdat de sluisdeur zijwaarts transleert in een rechte baan en niet via een gekromde baan, zie Figuur 8-8. De totale lengte van de sluis is kleiner dan bij de vorige twee varianten, zie Figuur 8-15. Ook bij deze variant is extra water wat geschut moet worden, water wat binnen de sluisdeuren bevindt en buiten het groene vlak.

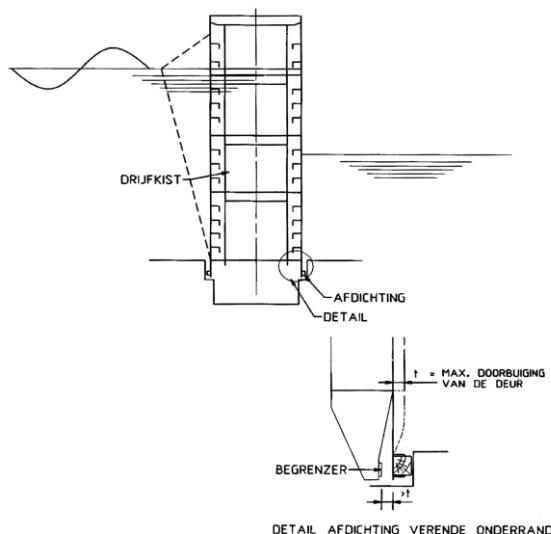


Figuur 8-8 Gekromde buigligger

In deze variant hoeft de oplegging geen trek op te nemen, wat bij de vorige twee varianten het geval was. Maar de opleggingen in deze variant hebben wel een nadeel. De opening in het sluishoofd is iets breder dan het breedste stuk sluisdeur terwijl de uiteinden van de sluisdeur juist het smalst zijn. Hierdoor moet de sluisdeur naar de aanslag toe bewegen om voor een waterdicht afdichting te zorgen. Om de horizontale krachten af te dragen op het sluishoofd wordt een inkeping gemaakt in het sluishoofd, zie Figuur 8-9. Een nadeel is dat de sluisdeur in twee richtingen moet bewegen. Tijdens sluiten eerst zijwaarts om de doorgang te sluiten en vervolgens een stuk naar voren voor de afdichting.

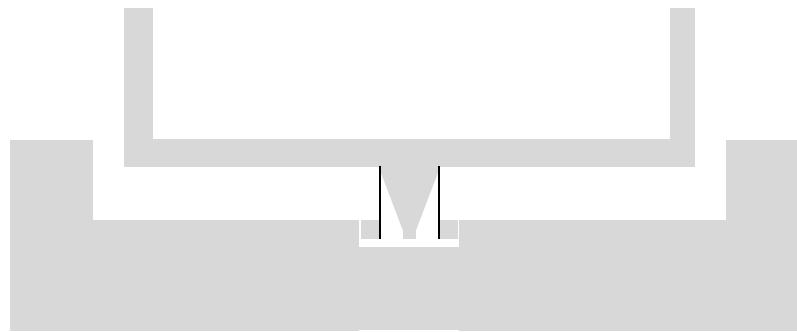


Figuur 8-9 Afdracht horizontale kracht op sluishoofd dubbel gekromde buigligger



Figuur 8-10 Dwarsdoorsnede roldeur met verende onderrand (14)

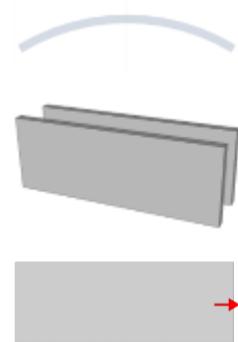
Ook de afdichting aan de onderzijde is lastig. Normaal gesproken wordt de flexibele afdichting gebruikt, zie Figuur 8-10, om de sluisdeur af te dichten. De flexibele plaat is aan de onderkant tegen de buitenwand bevestigd die door de waterdruk tegen de drempel wordt geduwd wat zorgt voor een waterdichte aansluiting. Maar omdat de drempel over de hele lengte iets breder is als het breedste stuk van de sluisdeur en de sluisdeur niet overall even breed is kan deze flexibele afdichting aan de buitenkant van de wand niet gebruikt worden. Als oplossing is de afdichting in het midden onder de sluis geplaatst, in een extra verdieping in de drempel, zie Figuur 8-11.

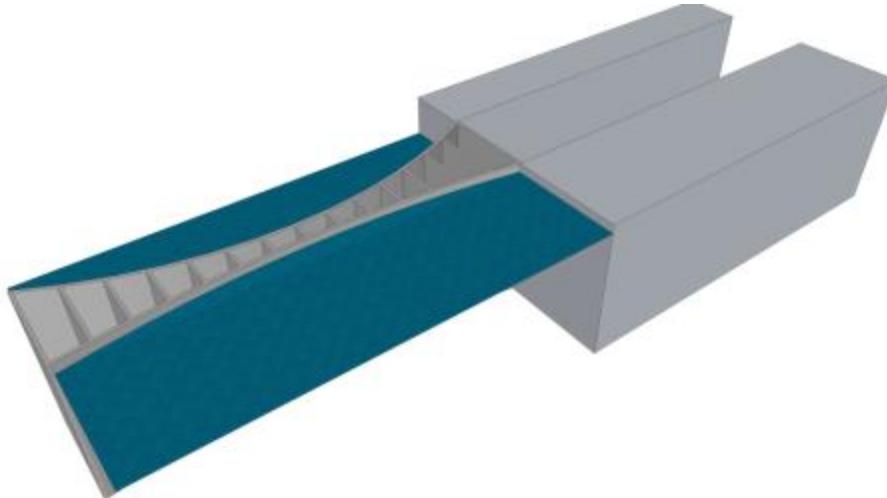


Figuur 8-11 Afdichting onderzijde dubbel gekromde buiglijgger

#### 8.3.4 Dubbel gekromde deur

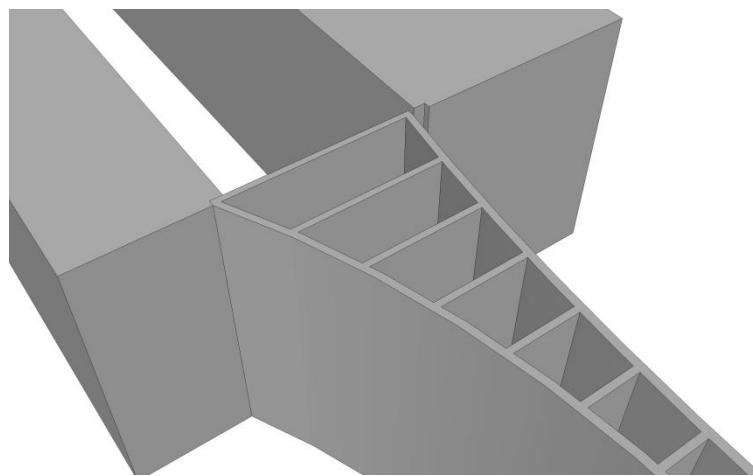
De volgende variant is de vierde variant met gekromde deuren. Deze variant bestaat ook uit twee bogen zodat bij een positief en negatief verval de belasting via een drukboog wordt afgedragen. Bij deze variant zijn de krommingen naar binnen gericht in plaats van naar buiten zoals bij de dubbel gekromde deur, zie Figuur 8-12. In Figuur 8-14 is het schema van de krachtsafdracht weergegeven, deze is ongeveer het tegenovergestelde van een hangbrug. De belasting die op de buitenwand van de sluisdeur werkt wordt via de vloeren afgedragen op de andere buitenwand. Via boogwerking draagt deze buitenwand de belasting af via druk naar de opleggingen.





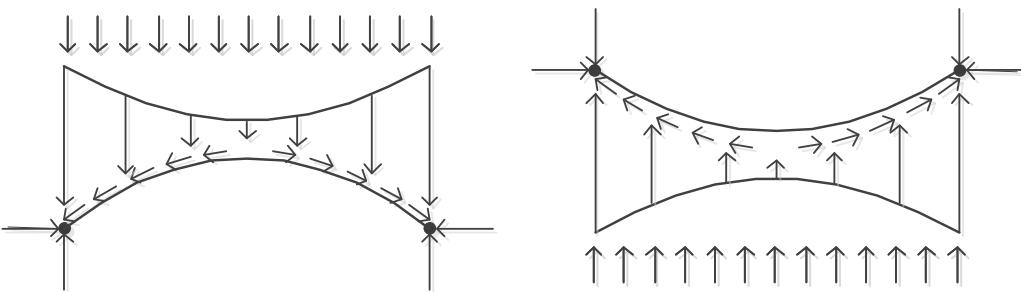
*Figuur 8-12 Dubbel gekromde deur*

Omdat de krommingen van de buitenwanden naar binnen zijn gericht en de sluisdeur bij de opleggingen het breedst is, heeft deze variant geen probleem met de oplegging die de vorige variant wel had. Het afdichten aan de onderzijde van de sluisdeur is ook in deze variant door de gekromde buitenwanden lastig, en gebeurt op dezelfde wijze als bij de vorige variant, zie Figuur 8-11. De horizontale belasting zal, net als de vorige variant, afgedragen worden door de inkeping in het sluishoofd, zie Figuur 8-13. En heeft dus hetzelfde nadeel, echter deze variant hoeft minder ver naar voren te bewegen.

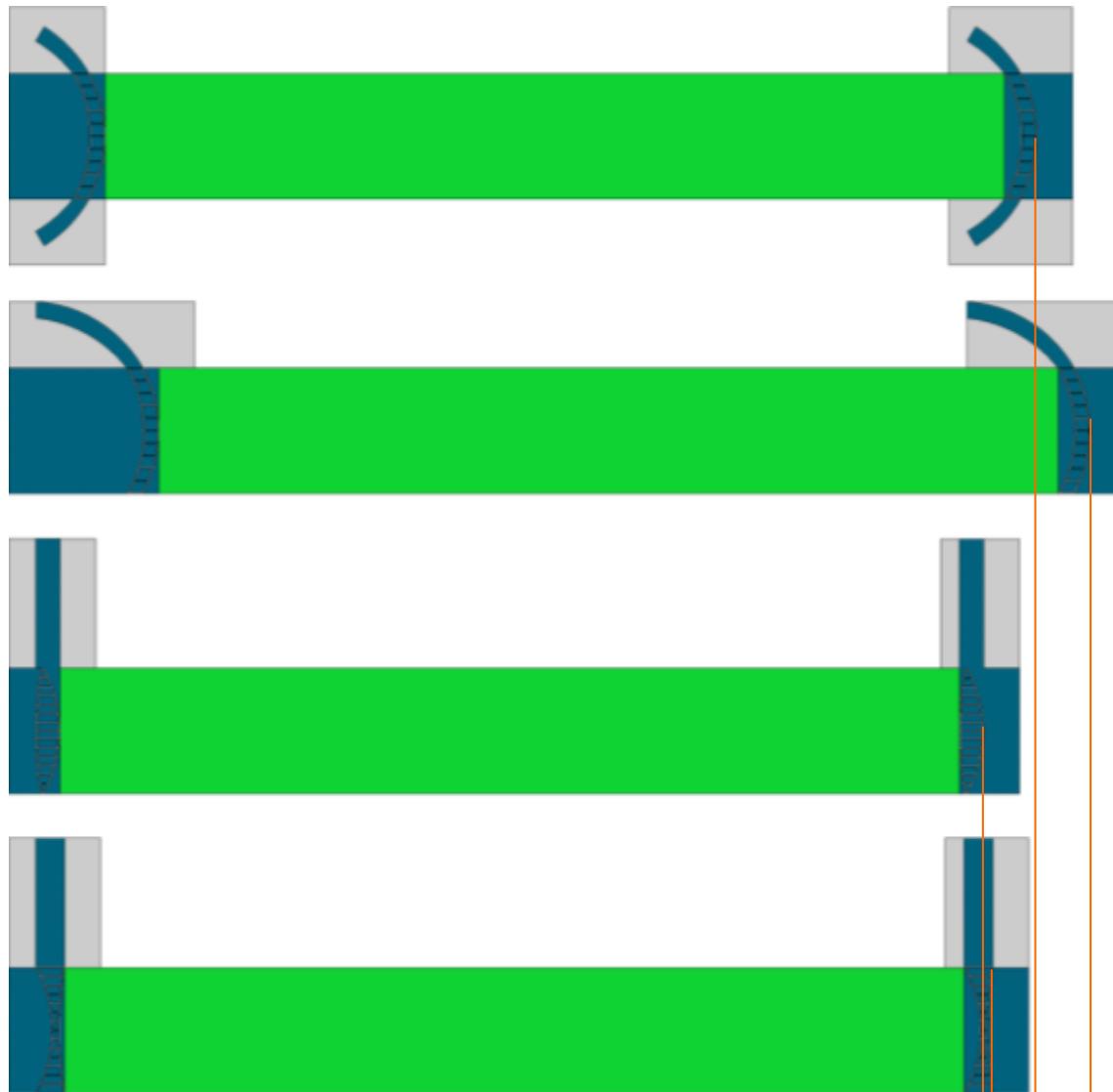


*Figuur 8-13 Afdracht horizontale kracht op sluishoofd dubbel gekromde deur*

Net als bij de vorige variant heeft de sluisdeur brede sluishoofden nodig en is de totale lengte van de sluis kleiner dan bij de eerste twee varianten, zie Figuur 8-15.



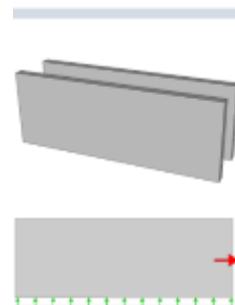
Figuur 8-14 Vereenvoudigd krachtsafdracht schema dubbel gekromde deur



Figuur 8-15 Verschil in totale lengte van de sluis van de eerste vier varianten

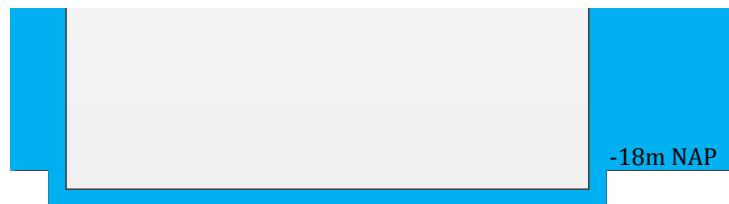
### 8.3.5 Drijvende sluisdeur

De vijfde variant is qua vorm een stuk eenvoudiger dan de vorige varianten, zie Figuur 8-18. De vorm van de sluisdeur is recht en niet gekromd, de sluisdeur is een tweezijdig opgelegde buiglijgger. De sluisdeur wordt drijvend geopend en gesloten. In de gesloten positie wordt de sluisdeur afgezonken en dicht het af tegen de en drempel. Door de sluisdeur in een diepe drempel te laten drijven is er speling in de diepgang van de sluisdeur en kan de sluisdeur altijd geleid worden door de drempel, zie Figuur 8-16.



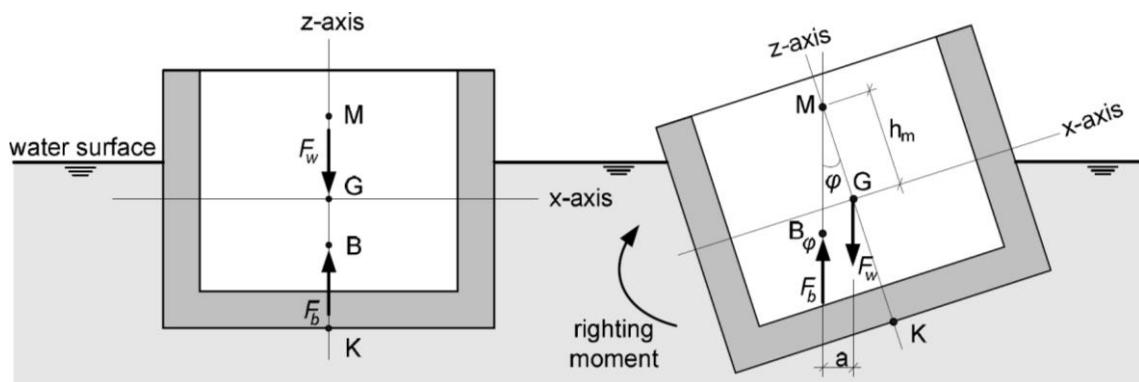
Een eis is dat de sluisdeur bij minimum schutpeil vervangen kan worden, dit geldt dus voor elke variant. Echter deze variant moet ook kunnen drijven als de sluisdeur in bedrijf is, de andere varianten alleen bij vervanging van de sluisdeur. Bij een drijvende sluisdeur is rotatiestabiliteit een belangrijk aspect. De drijvende sluisdeur moet ook drijvend stabiel zijn bij grote wind en golfbelasting. De metacentrische hoogte, zie Figuur 8-17, van de sluisdeur moet bij deze variant dus groter zijn dan bij de andere varianten.

Hierdoor zal de sluisdeur iets breder zijn dan wanneer de sluisdeur niet drijvend wordt uitgevoerd. Een voordeel van een drijvende sluisdeur is dat geen bewegende onderdelen onderwater nodig zijn. Dus hoeft geen onderhoud onderwater plaats te vinden.



Figuur 8-16 Speling drijvende sluisdeur in de drempel tijdens openen en sluiten

Om eventueel nog extra rotatiestabiliteit te creëren kan ballast onderin de sluisdeur geplaatst worden om zo het zwaartepunt te verlagen, zodat de metacentrische hoogte groter wordt.



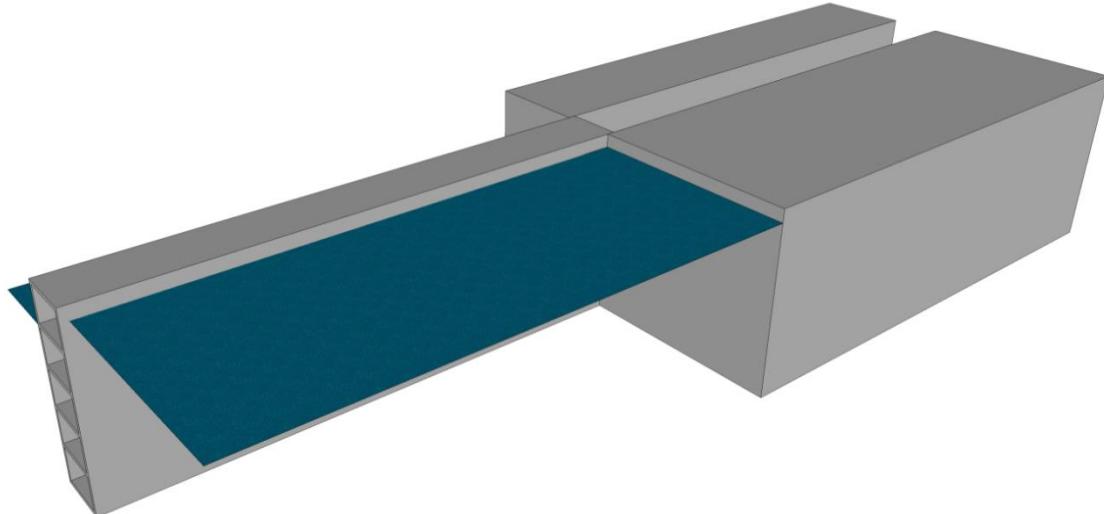
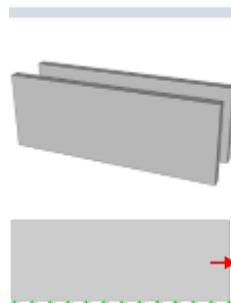
Figuur 8-17 Metacentrische hoogte (36)

Door de eenvoudige vorm van de constructie is de uitvoering van deze variant niet zo ingewikkeld als bij de vorige varianten waar de buitenwanden rond bekist moeten worden.

Onder de sluisdeur hoeft geen geleidingssysteem bevestigd te worden wat de uitvoering vergemakkelijkt maar ook de constructie duurzamer maakt, omdat er minder stalen onderdelen zijn en geen slijtage plaatsvindt door frictie met de bodem.

### 8.3.6 Glijdeur

De laatste variant is net als de vorige variant een rechte sluisdeur. Alleen deze sluisdeurvariant zal met behulp van hydrolagers open en dicht glijden in plaats van drijvend. De voordelen van de vorige variant, dat geen geleidingssysteem aan de sluisdeur bevestigd hoeft te worden, heeft deze variant dus niet. Een voordeel is dat de metacentrische hoogte, voor de drijvende stabiliteit, minder hoog hoeft te zijn.



Figuur 8-18 Drijvende deur/Glijdeur

# 9. MULTI CRITERIA ANALYSE

In hoofdstuk 8 zijn zes sluisdeur varianten beschreven. Om een selectie uit deze varianten te maken is in deze paragraaf een Multi Criteria Analyse gemaakt. De varianten worden beoordeeld op de criteria beschreven in hoofdstuk 9.1. Niet elke criterium is even belangrijk, in 9.2 krijgt daarom elk criterium een gewichtsfactor. Op basis van de totale beoordeling van alle varianten gemaakt in 9.3, kan één of meerdere varianten gekozen worden om verder uit te werken. De keuze is gemaakt en beschreven in hoofdstuk 9.4.

## 9.1 Criteria

Ontwerpcriteria zijn nodig om de verschillende varianten met elkaar te kunnen vergelijken. De lijst van criteria is grotendeels afkomstig uit het InCom WG26 report over stuwen (51). In Tabel 9-1 zijn de criteria gegeven waarop de varianten beoordeelt zijn:

Tabel 9-1 Ontwerpcriteria voor sluisdeuren

Criteria	Beschrijving
<b>Betrouwbaarheid</b>	Faalkans tot sluiten of openen; Kwetsbaarheid van funderings-zetting en bodemerosie; Gevoeligheid voor storing, menselijke fouten en aanvaring;
<b>Eenvoud</b>	Eenvoud van de constructie, de oplegging en het bewegingsmechanisme; Eenvoud van de uitvoering; Robuustheid van de sluisdeur;
<b>Navigatie</b>	Veiligheid navigatie; Impact onderhoud op navigatie condities; Impact constructie op navigatiecondities;
<b>Onderhoud</b>	Eenvoud van onderhoud; Bereikbaarheid van de onderhoudsgevoelige onderdelen;
<b>Duurzaam</b>	Benodigd onderhoud; Slijtage/ouderdom gevoelig; Levensduur constructie;
<b>Omgeving</b>	Impact op milieu; Benodigde ruimte; Waterverbruik;

De kosten van de variant is niet meegenomen als criterium. Dit is gedaan omdat in deze fase van het onderzoek nog moeilijk de kosten van verschillende varianten te schatten is en de varianten hier lastig op te beoordelen zijn. Aan de andere kant zit het criterium kosten gedeeltelijk ook in andere criteria meegenomen. Bijvoorbeeld als een variant moeilijk te onderhouden is of als de variant een complexe oplegging heeft, heeft dit negatieve invloed op de kosten van de variant.

## 9.2 Gewichtsfactoren

Er zijn twee mogelijkheden om varianten te beoordelen. Een kwalitatieve beoordeling en een kwantitatieve beoordeling. Bij een kwantitatieve beoordeling krijgen alle criteria een gewichtsfactor en bij een kwalitatieve beoordeling zijn de criteria ongewogen. Een kwalitatieve beoordeling wordt meestal toegepast als er te weinig tijd of geld is, of als het te analyseren project relatief simpel is, of als de klant al een keuze heeft gemaakt en hij een "onderbouwde motivering" waardeert om zijn keuze te onderbouwen. Een kwantitatieve beoordeling wordt meestal toegepast bij grotere of meer complexe projecten. Kwalitatieve beoordeling zijn simpel en snel maar zijn wel vrij arbitrair en niet erg transparant, voor een kwantitatieve beoordeling geldt dit niet (51).

In Tabel 9-2 is de gewichtsfactor van alle criteria bepaald. Deze gewichtsfactor geeft de belangrijkheid van elk criterium tot alle andere criteria weer. Alle criteria hebben gewichtsfactor tussen de 0 en 1 zodanig dat de som van alle gewichtsfactoren 1 is.

De gewichtsfactor is bepaald door elke criterium te vergelijken met elke ander criterium. Als het criterium op de horizontale rij belangrijker is dan op de verticale kolom wordt een 1 in de cel ingevuld. De gewichtsfactor kan vervolgens bepaald worden door de som van de rij bij een criterium te nemen en deze te delen door de som van de totale tabel. Als voorbeeld Onderhoud: Onderhoud wordt belangrijker geacht dan het criterium Navigatie. De andere criteria worden als belangrijker beschouwd dan het criterium onderhoud. De som bij onderhoud is dus 1, en de gewichtsfactor dus:  $\frac{1}{15} = 0,07$ .

Tabel 9-2 Bepaling gewichtsfactor

Criteria	Betrouwbaarheid	Eenvoud	Navigatie	Onderhoud	Duurzaam	Omgeving	Som	Gewichtsfactor
<b>Betrouwbaarheid</b>		1	1	1	1	1	5	0,33
<b>Eenvoud</b>	0		0	1	0	1	2	0,13
<b>Navigatie</b>	0	1		0	0	1	2	0,13
<b>Onderhoud</b>	0	0	1		0	0	1	0,07
<b>Duurzaam</b>	0	1	1	1		1	4	0,27
<b>Omgeving</b>	0	0	0	1	0		1	0,07
							15	1

## 9.3 Beoordeling varianten

In Tabel 9-3 zijn de beoordelingen per criteria van de verschillende varianten te zien. Elke variant wordt beoordeeld door ze voor alle criteria een score te geven. Voor de scores is een schaal van 0 tot 5 gebruikt. Als een variant heel slecht presteert op een bepaald

criterium krijgt het een 0 als score en als een variant optimaal presteert op een criterium krijgt het een 5 als score. Nadat alle varianten beoordeeld zijn op alle criteria kunnen alle waarde van de verschillende criteria vermenigvuldigd met hun gewichtsfactor bij elkaar opgeteld worden om tot een totale waarde per variant te komen. In Figuur 9-1 is de uitkomst weergeven van de Multi Criteria Analyse.

### 9.3.1 Onderbouwing scores

In deze paragraaf is per criterium de beoordeling van elke variant uitgelegd.

#### *Betrouwbaarheid*

De betrouwbaarste variant is de glijdeur. Het principe van deze variant is vergelijkbaar met de huidige stalen zeesluisdeuren. Het heeft een eenvoudige oplegging aan de zijkant en onderkant wat ook meteen zorgt voor de afdichting. Dit geldt ook voor de drijvende deur, echter deze variant scoort lager omdat het drijvend openen en sluiten van de sluisdeur een nieuw concept is, wat deze variant minder betrouwbaar maakt. Een voordeel van een drijvende sluisdeur is dat deze niet gevoelig is voor zettingen van de drempel. Dit kan bij de andere varianten problemen geven voor de geleiding in de drempel, vooral in het geval van hydrogeleiding.

De dubbel gekromde deur en de gekromde buigligger scoren nog iets lager omdat deze een complexe manier van opleggen en afdichten hebben. Dat de deur in twee richtingen moet bewegen verhoogt de kans op falen, dit is bij de gekromde buigligger groter dan bij de dubbel gekromde deur. De dubbel gekromde deur is wel gevoeliger voor aanvaringen, doordat de sluisdeur smaller is in het midden. Hierdoor zijn deze varianten minder betrouwbaar.

Gekromde deur 2 scoort op dit criterium net zo laag als de dubbel gekromde varianten. Dit komt omdat het openen en sluiten van deze variant minder betrouwbaar is. De sluisdeur beweegt niet in een rechte lijn maar beweegt in een kromming. Het is belangrijk dat het bewegingswerk en deurgeleiding nauwkeurig worden afgesteld, en is hierdoor gevoelig. Verder is er voor het tweezijdig keren een extra stempelraam nodig met bewegingswerk, hiermee worden extra faalmechanisme geïntroduceerd.

#### *Eenvoud*

Zoals hierboven bij betrouwbaarheid beschreven hebben de gekromde varianten een moeilijke oplegging. Verder hebben de dubbel gekromde varianten een lastige afdichting en de gekromde deur een nieuw soort bewegingsmechanisme. Verder zijn de gekromde varianten lastiger uit te voeren. De glijdeur en de drijvende scoren beter op eenvoud omdat de constructies simpel van vorm zijn, geen ingewikkelde oplegging, afdichting of bewegingswerk hebben. De drijvende deur scoort nog beter omdat deze variant geen hydrogeleiding heeft. Deze variant is een grote drijvende betonnen caisson, waaraan weinig bevestig hoeft te worden.

## Navigatie

In de beoordeling op navigatie is geen verschil. Bij alle varianten zijn de sluisdeuren goed zichtbaar. Als er bij in- of uitvaren problemen zijn met de positie van de sluisdeuren kan de schipper hiernaar handelen.

## Onderhoud

De drijvende deur scoort hier het best op, de belangrijkste onderdelen die onderhoud behoeven, het aandrijvings-mechanisme, bevinden zich boven water. Dit maakt het onderhoud eenvoudig en de te onderhouden onderdelen goed bereikbaar. De pompen benodigd voor het ballastwater bevinden zich onderwater, maar deze heeft elke variant nodig.

De andere varianten scoren op dit criteria allemaal een stuk minder, omdat deze allemaal uitgevoerd zijn met hydrogeleiding. Hierdoor moet veel onderhoud onderwater gebeuren. Dus onderhoud is bij deze varianten lastiger en de onderhoudsgevoelige onderdelen zijn lastig te bereiken.

## Duurzaamheid

De drijvende deur scoort ook hier het best op, er zijn maar weinig onderdelen die onderhoud nodig hebben. De andere varianten scoren op dit criteria allemaal een stuk minder. Omdat deze allemaal uitgevoerd zijn met hydrogeleiding, welke regelmatig onderhouden moet worden. De gekromde deur 2 scoort nog iets lager omdat de gekromde sluisdeur vaker onderhoud/inspecties behoeft, omdat de geleiding aan slijtage onderhevig is.

## Omgeving

Op het criteria omgeving zijn de varianten allemaal gelijk beoordeeld. De impact op het milieu zal tussen de varianten weinig verschil zijn. De benodigde ruimte is wel verschillend voor de varianten, vooral de gekromde deur. Door de gekromde vorm is de lengte van deze sluis een stuk langer dan de andere vier varianten. Maar door de gekromde vorm is de breedte van het sluishoofd een stuk kleiner, wat gunstig is voor het ruimtegebruik.

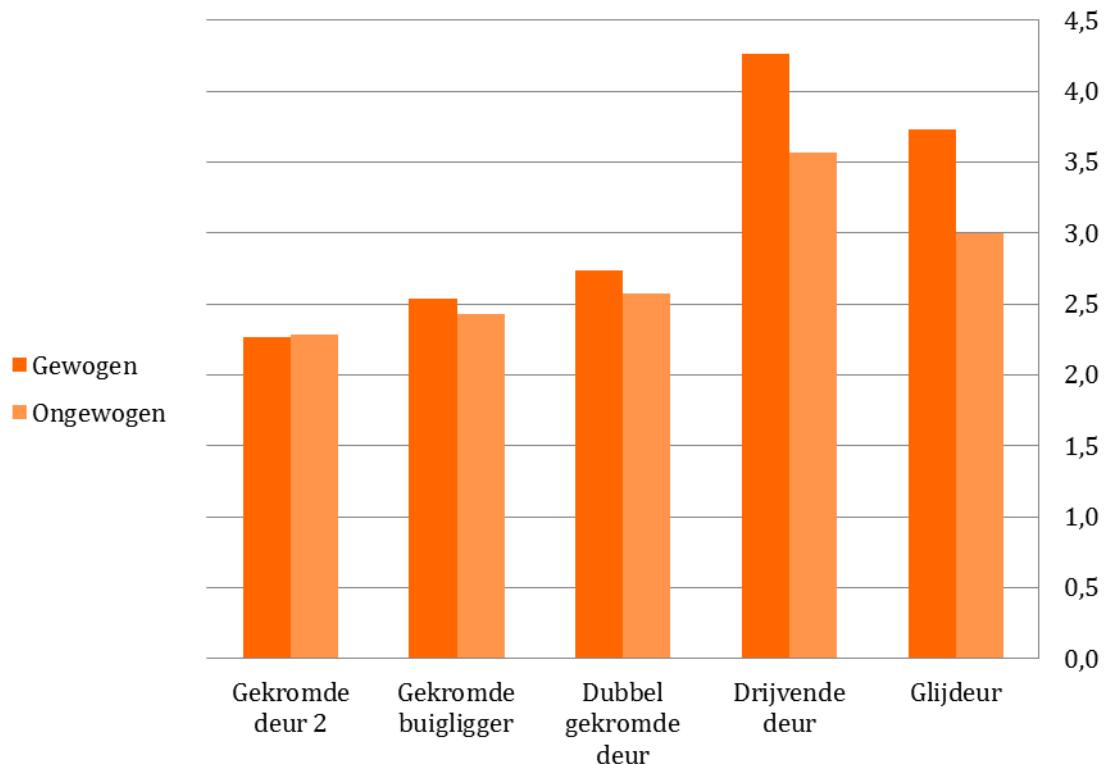
Tabel 9-3 Beoordeling van verschillende varianten

Criteria	Gewichtsfactor	ongewogen		gewogen		ongewogen		gewogen		ongewogen		gewogen	
		ongewogen	gewogen										
Betrouwbaarheid	0.33	2	0.67	2	0.67	2	0.67	4	1.33	5	1.67		
Eenvoud	0.20	2	0.40	2	0.40	3	0.60	4	0.80	3	0.60		
Navigatie	0.07	4	0.27	4	0.27	4	0.27	4	0.27	4	0.27		
Onderhoud	0.07	2	0.13	2	0.13	2	0.13	4	0.27	2	0.13		
Duurzaam	0.27	2	0.53	3	0.80	3	0.80	5	1.33	3	0.80		
Omgeving	0.07	4	0.27	4	0.27	4	0.27	4	0.27	4	0.27		
	Score	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	3.6	4.3	3.0	3.7		

## 9.4 Conclusie

In Figuur 9-1 zijn de resultaten van de MCA weergegeven in een grafiek. Hieruit blijkt de drijvende deur de meest geschikte variant is. Het levert gemiddeld over alle criteria de beste prestatie. Dit komt vooral door de variant goed scoort op de belangrijke criteria eenvoud en duurzaamheid. Uit de MCA blijkt dat de varianten met een gekromde vorm minder goed scoren.

De drijvende sluisdeur is niet alleen de meest belovende variant, maar ook de meest interessante variant om verder te onderzoeken. Daarom is deze variant gekozen voor verdere uitwerking.



Figuur 9-1 Uitkomst Multi Criteria Analyse

# 10. UITWERKING DRIJVENDE SLUISDEUR

## 10.1 Beschrijving variant

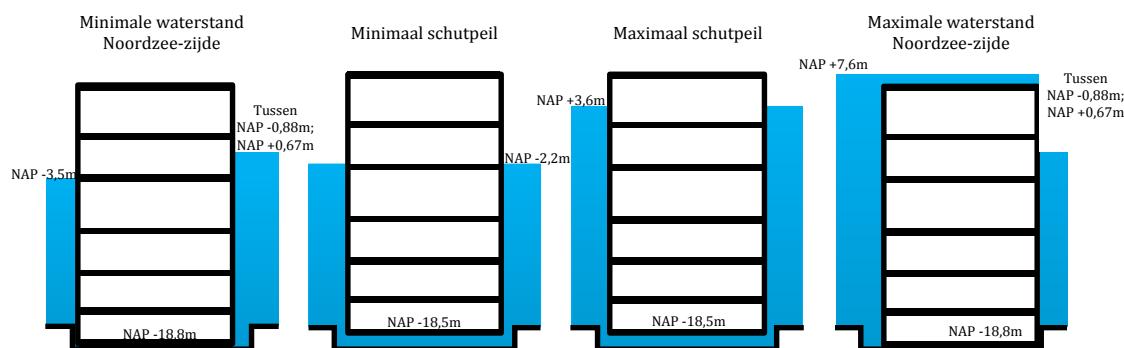
Het basisidee van dit concept is dat de deur drijvend geopend en gesloten wordt, via een horizontale translerende beweging. Tijdens het nivelleren van de schutkolk wordt ballastwater in de sluisdeur gepompt zodat de sluisdeur in gesloten stand op de bodem van de drempel staat.

Het grote voordeel van dit concept is, dat onderwater geen rolwagens of hydrovoeten nodig zijn. Hierdoor wordt de constructie simpel gehouden en is de duurzaamheid hoger. En is er ook minder onderhoud nodig, vooral onderwater.

In de volgende paragrafen zullen verschillende aspecten/onderdelen van de sluisdeur beschreven worden. Als eerste is de drijvende situatie van de sluisdeur beschreven. In welke situatie moet de sluisdeur drijven en hoe wordt dit bewerkstelligd. Vervolgens is de manier van afdichten beschreven en hoe de sluisdeur geleidt wordt tijdens in- en uitvaren. Als laatste is het bewegingsmechanisme beschreven om de sluisdeur de sluiskolk in te bewegen en weer terug.

## 10.2 Drijven

Bij waterstand tussen minimaal en maximaal schutpeil moet de sluisdeur kunnen drijven, zodat de sluisdeur geopend of gesloten kan worden. De laagste waterstand waarbij de sluisdeur moet drijven is minimaalschutpeil. Als de waterstand lager wordt dan dit peil blijft de deur gesloten. De hoogste waterstand waarbij de sluisdeur moet drijven is maximaal schutpeil, bij een hogere waterstand staat de sluisdeur op de bodem. In Figuur 10-1 is dit grafisch weergegeven.



Figuur 10-1 Drijvende situaties sluisdeur

### 10.2.1 Diepgang

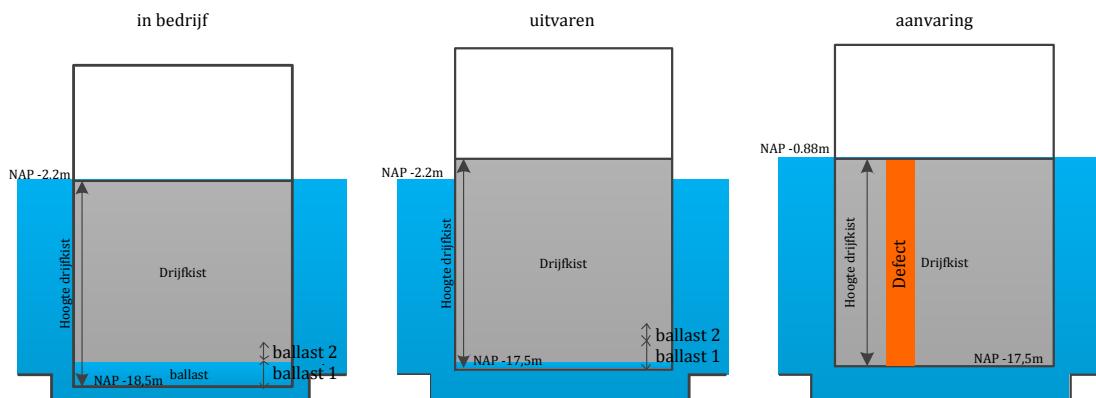
Voor de drie situaties weergegeven in Figuur 10-2 gelden verschillende eisen voor de benodigde diepgang. Als de sluisdeur in bedrijf is, is de drijfkist gedeeltelijk gevuld met

waterballast. Om te zorgen dat de sluisdeur een halve meter in de drempel drijft moet de diepgang van de sluisdeur bij minimum schutpeil 16,3m zijn, en bij maximaal schutpeil 22,1m. In kerende stand staat de sluisdeur op de bodem, zie hoofdstuk 10.3. De sluisdeur moet bij de maximale en minimale waterstand stabiel op de bodem staan.

Tabel 10-1 Benodigde diepgangen als sluisdeur in bedrijf is

	Bodem Sluisdeur	Minimale waterstand	Benodigde diepgang	Maximale waterstand	Benodigde diepgang
<b>Openen/Sluiten</b>	NAP - 18,5m	NAP -2,2m	16,3m	NAP +3,6m	22,1m
<b>Gesloten stand</b>	NAP - 18,8m	NAP -3,5m	15,3m	NAP +7,6m	26,4m

De tweede situatie is als de sluisdeur uitgedreven moet worden. Om de sluisdeur op te drijven boven de drempel wordt een gedeelte van het ballastwater uit de drijfkist gepompt, zodat de onderkant van de sluisdeur minimaal een 0,5m boven de drempel ligt. De sluisdeur moet bij minimaal schutpeil uitgedreven kunnen worden (33). Dit is een strenge eis waaraan voldaan moet worden. Door deze eis moet de drijfkist laag in de sluisdeur geplaatst worden wat ongunstig is voor de drijvende stabiliteit. De diepgang mag in deze situatie maximaal  $-2,2m - -17,5m = 15,3m$  zijn als de waterstand gelijk is aan minimaal schutpeil.



Figuur 10-2 Volume ballast in drie situatie: in bedrijf, tijdens uitvaren en bij een aanvaring

De laatste situatie is de diepgang na een aanvaring van de sluisdeur. Aangenomen wordt dat de sluisdeur na een aanvaring niet bij minimaal schutpeil gewisseld hoeft te worden maar bij minimaal kanaalpeil NAP -0,88m. Bij dit waterpeil is geen waterballast in de drijfkist aanwezig. Bij een hoger waterpeil hoeft niet alle waterballast uit de drijfkist gepompt te worden. Ook nu moet de onderkant van de sluisdeur minimaal 0,5m boven de sluisdrempel liggen. De diepgang mag dan maximaal  $-0,88m - -17,5m = 16,62m$  zijn.

Tabel 10-2 Maximale diepgang bij uitdrijven sluisdeur

Situatie	Bodem Sluisdeur	Minimale waterstand	Maximale diepgang
<b>Utvaren</b>	NAP - 17,5m	NAP -2,2m	15,3m

<b>Uitvaren na aanvaring</b>	NAP – 17,5m	NAP -0,88m	16,62m
------------------------------	-------------	------------	--------

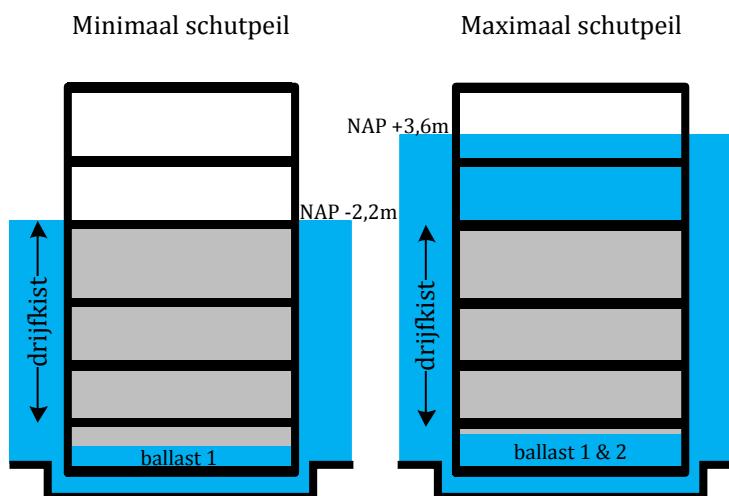
### 10.2.2 Verticaal evenwicht

Om de sluisdeur te laten drijven tijdens het openen en sluiten is de sluisdeur uitgerust met een drijfkist, zie Figuur 10-3. De opdrijvende kracht van de sluisdeur moet even groot zijn als het verticale gewicht van de sluisdeur. In hoofdstuk 11 is het benodigde volume van de drijfkist berekend.

#### Ballast

Omdat rekening gehouden moet worden met een aanvaring, waarbij een aantal compartimenten kunnen bezwijken en vol lopen met water, is de drijfkist een stuk gevuld met semipermanent ballastwater. In Figuur 10-3 is dit ballastwater aangegeven met "ballast 1". Dit ballastwater kan uit de drijfkist gepompt worden bij een aanvaring zodat de sluisdeur nog uitgedreven kan worden.

Zoals hierboven genoemd moet de sluisdeur bij verschillende waterstanden kunnen drijven, zie Figuur 10-1. De minimale waterstand waarbij de sluisdeur moet drijven is -2,2m NAP en de maximale waterstand +3,6m NAP. Dit is een verschil van 5,8m.



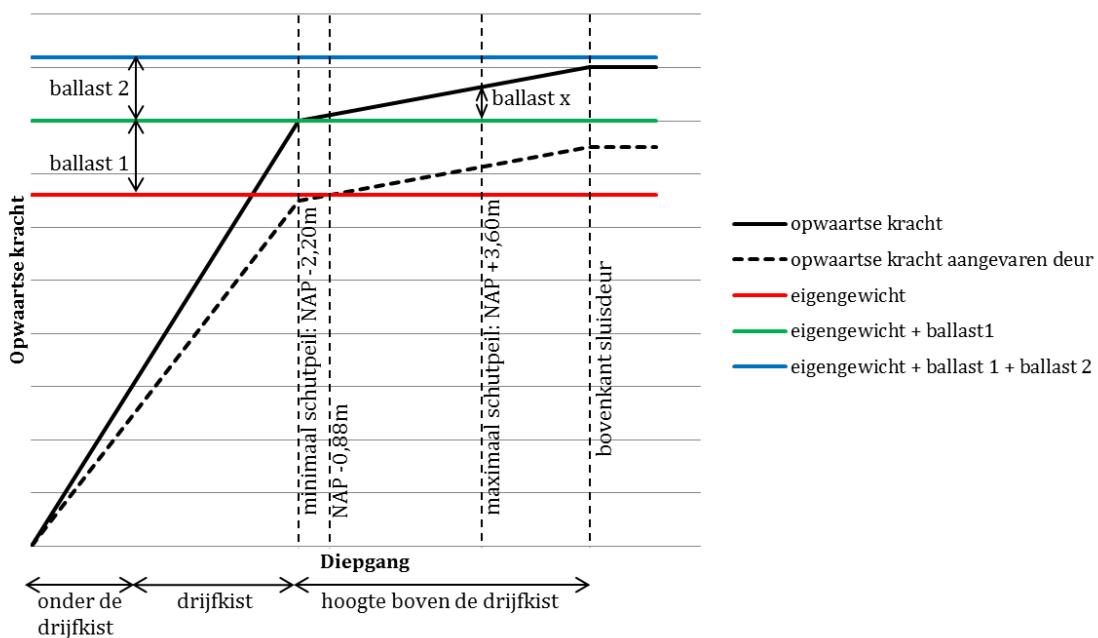
Figuur 10-3 Verticaal evenwicht sluisdeur tijdens drijven

De hele drijfkist wordt onder het niveau van het minimum schutpeil gelegd. Wanneer het water niveau stijgt of verhoogd wordt, stroomt de ruimtes boven de drijfkisten vol. Echter de wanden en vloeren boven minimaal schutpeil leveren een opwaartse kracht door het water wat ze verplaatsen als ze onderwater komen. Om ervoor te zorgen dat het gewicht van de sluisdeur gelijk blijft aan de opwaartse kracht moet 'extra' ballastwater in de drijfkist gepompt worden, in Figuur 10-3 is het ballastwater aangegeven met "ballast 2". Bij het verhogen van de waterstand in de kolk neemt de waterstand in de compartimenten boven de drijfkist met dezelfde snelheid toe als in de kolk. Als de sluisdeur gesloten is, wordt de drijfkist geballast zodat de sluisdeur op de bodem staat.

In Figuur 10-4 is in een grafiek de opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur. Als de diepgang groter wordt stijgt de opwaartse kracht snel door opdrijvende

kracht van de drijfkist. Boven de drijfkist wordt opwaartse kracht alleen geleverd door de wanden en vloeren die onderwater komen. Aangenomen is dat de opwaartse kracht geleverd door de vloeren en wanden constant is over de hoogte. Het verloop van de opwaartse kracht onder en boven de drijfkist is dus lineair over de diepgang in de grafiek.

Als door een aanvaring een aantal compartimenten vol lopen met water is de opwaartse kracht die de drijfkist levert een stuk minder, zie de gestippelde lijn in Figuur 10-4. Aangenomen is dat de opwaartse kracht van de defecte drijfkist constant is over de hoogte van de drijfkist. In het figuur is te zien dat het totale gewicht van de sluisdeur, het eigengewicht met maximale waterballast, groter is dan de maximale opwaartse kracht. Zodat de sluisdeur in gesloten stand altijd op bodem gezet kan worden met een overgewicht, en dus altijd de kolk kan afdichten.



Figuur 10-4 Opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur

Figuur 10-2 laat zien dat voor drie situaties (sluisdeur in bedrijf, uitvaren van de sluisdeur en na een aanvaring), dat het volume waterballast verandert moet worden bij verschillende waterstanden.

Als de sluisdeur in bedrijf is moet de bodem van de sluisdeur zich op NAP -18,5m bevinden. Bij het minimumschutpeil NAP -2,2m, is de drijfkist alleen gevuld met 'ballast 1', de groene lijn in Figuur 10-4. Ballast 1 is semipermanente waterballast, deze wordt uit de sluisdeur gepompt als de sluisdeur aangevaren is of als de sluisdeur uitgevaren moet worden.

Als het waterniveau stijgt, wordt de opwaartse kracht groter en moet dus waterballast toegevoegd worden, tot een maximum van 'ballast 2'. Bij deze hoeveelheid waterballast is het gewicht van de sluisdeur groter dan de maximaal opdrijvende kracht, zie blauwe lijn in Figuur 10-4.

Door de bovenkant van de drijfkist op 16,3m van de bodem van de sluisdeur te plaatsen, moet bij waterstanden tussen maximum en minimum schutpeil met maximaal 'ballast x' geballast te worden, zie Figuur 10-4.

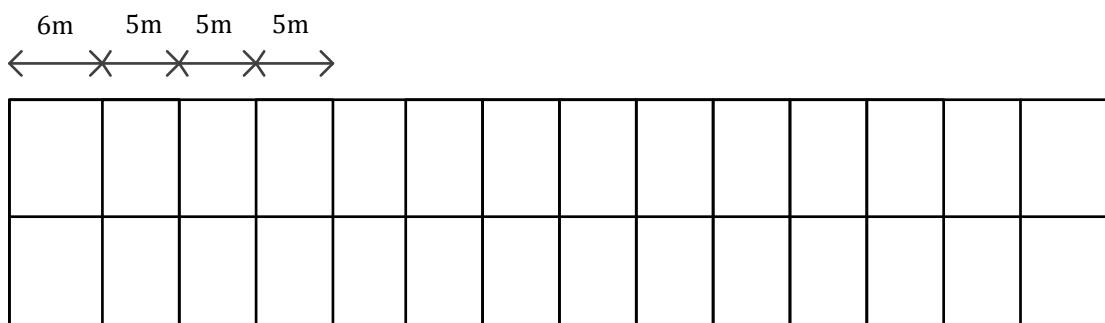
### 10.2.3 Metacentrische hoogte

Normaal gesproken wordt voor sluisdeuren altijd een metacentrische hoogte aangehouden van 0,5m. Deze sluisdeuren hoeven alleen te drijven bij het verwisselen van de deuren, volgens de 'Manual Hydraulic Structures' (36) is een metacentrische hoogte van 0,5m voldoende voor caissons en tunnelementen. Maar omdat dit ontwerp ook in bedrijf stabiel moet zijn wordt een hogere metacentrische hoogte aangehouden.

Voor grote zeeschepen moet een metacentrische hoogte van tenminste 1,1m aangehouden worden volgens de manual. De metacentrische hoogte moet ook niet veel groter zijn dan wordt het schip te 'stijf': het zal dan te snel rechtop terug schieten, wat grote spanningen kan veroorzaken in de constructiedelen en eventueel verschuiven van de lading. Dit laatste is geen probleem bij een sluisdeur. In de berekeningen zal een metacentrische hoogte van minimaal 1,1m aangehouden worden als de sluisdeur in bedrijf is. Wanneer de sluisdeur uitgedreven moet worden wordt een metacentrische hoogte van minimaal 0,5m aangehouden in de berekeningen.

### 10.2.4 Compartimenten

De drijfkist is opgedeeld in compartimenten zodat als de sluisdeur aangevaren wordt maar een klein gedeelte van de drijfkist vol loopt met water. De hoogte van de compartimenten is afhankelijk van de afstand tussen de vloeren. De breedte van de compartimenten is 5m, dit is even breed als in het schetsontwerp van de stalen roldeur (30). In de paragraaf hieronder is te zien dat een groot zeeschip nooit de zijkant van de sluisdeur kan aanvaren. Alleen veel kleinere schepen kunnen de compartimenten aan de zijkant raken, deze zullen een stuk minder schade aanrichten. De buitenste cellen worden echter niet breder gemaakt. Hierdoor zou de overspanning van de vloeren een groter worden waardoor de vloeren waarschijnlijk dikker uitgevoerd moeten worden.



Figuur 10-5 Indeling compartimenten

Bij een aanvaring met het maatgevende schip de Emma Maersk zal de bulb van 7m breed twee compartimenten breed over een hoogte van 16meter lek varen, zie in de paragraaf hieronder over het aanvaargebied van het schip. De hoogte van de bulb van 16 meter zal

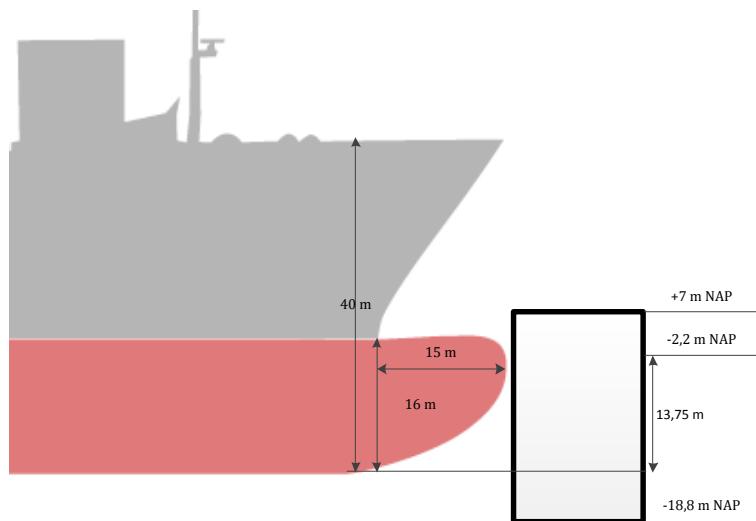
de volledige hoogte van de drijfkist kapot varen, de hoogte van de drijfkist is in hoofdstuk 11 bepaald.

### Bulbsteven

In hoofdstuk 5.1.3 is volgens de Eurocode het aanvaringsoppervlak bepaald, dit is  $30\text{ m} \times 15\text{ m}$ . Als de vorm van de voorkant van de Emma Maersk wordt bekeken, Figuur 10-6, dan is echter te zien dat deze een grote bulbsteven heeft welke de sluisdeur het eerst raakt. In Figuur 10-6 en Figuur 10-7 is een schatting gemaakt van de grootte van de bulbsteven van de Emma Maersk, deze is 7 meter breed, 16 meter hoog en 15 lang. Dit is een stuk kleiner dan het aanvaaroppervlak volgens de Eurocode.

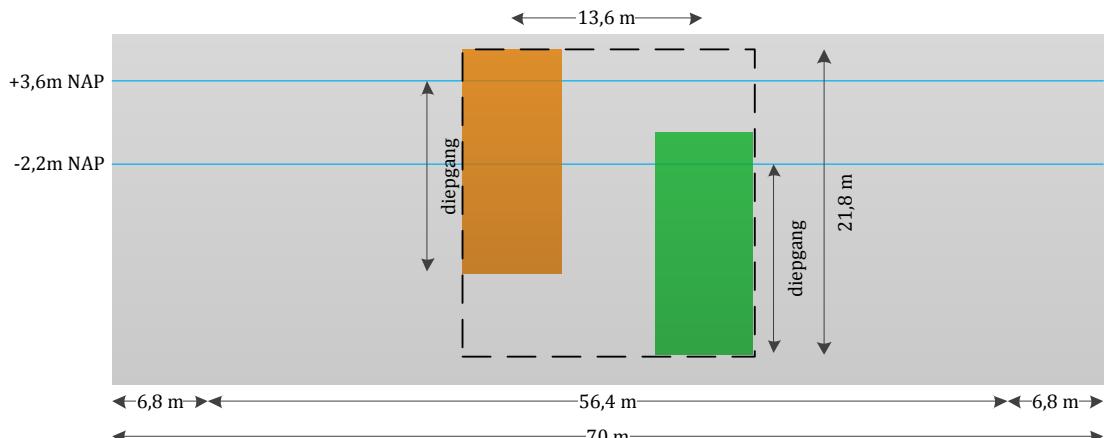


Figuur 10-6 Schatting afmetingen bulbsteven van de Emma Maersk (52)



Figuur 10-7 Schatting van de afmetingen van de bulbsteven van de Emma Maersk

## Aanvaargebied



### 10.3 Oplegging, afdichting en geleiding

De sluisdeur is in gesloten stand aan twee zijden opgelegd en afgedicht (zie hoofdstuk 6.2), op beide zijwanden. In Figuur 10-9 is met oranje cirkels aangegeven waar de opleggingen zich bevinden. Het hangt van het verval af tegen welke oplegging de sluisdeur gedrukt wordt om de kolk waterdicht af te sluiten. De sluisdeur is 72m breed, dit is 2 meter breder dan de doorvaarbreedte van de sluis, zodat de sluisdeur aan beide zijde op 1m is opgelegd in de nis.

Om ervoor te zorgen dat de sluisdeur altijd geleid wordt in de drempel, drijft de sluisdeur een 0,5m in de drempel. Hierdoor heeft de sluisdeur speling tijdens het drijven. Onder andere het verschil in opdrijvende kracht van zoet- en zoutwater kan hiermee opgevangen worden, zie sub paragraaf hieronder. De diepgang van de sluisdeur in de drempel is niet te groot gemaakt, want bij het verwisselen van de sluisdeuren moet de sluisdeur opgedreven worden uit deze drempel. Als de sluisdeur dieper in de drempel zou drijven, moet er veel meer waterballast uit de drijfkist gepompt worden zodat de sluisdeur boven de drempel komt te drijven.

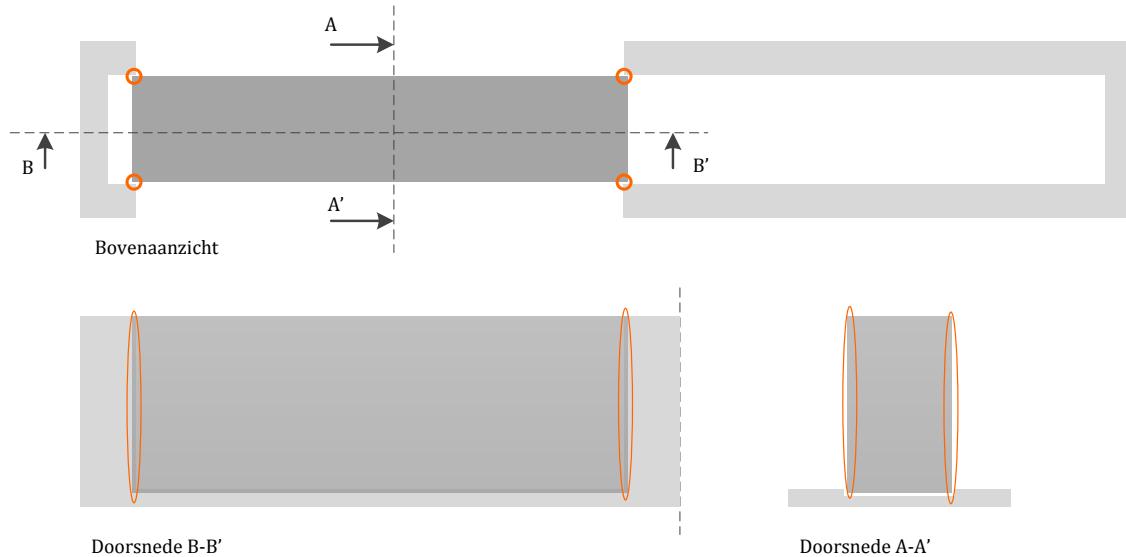
In het pianc rapport (1) is een "Self-propelled floating lock gate" beschreven. Dit is een ook een sluisdeur van 70m die drijft, en die zelf aangedreven wordt om de sluisdeur te openen en sluiten. De self-propelled lock gate drijft ongeveer 30 cm boven de drempel bodem tijdens openen en sluiten. Deze hoogte boven de drempel bodem wordt in dit onderzoek aangenomen. De diepte van de drempel is 0,8m. Dus wanneer de sluisdeur in bedrijf is drijft deze een 0,3 meter boven de drempel, zie Figuur 10-8.

#### 10.3.1 Verschil in diepgang bij zoet- en zoutwater

Bij berekening van de diepgang is de volumieke massa van zoetwater gebruikt, omdat dit resulteert in een grotere diepgang dan bij zoutwater. De diepgang van de sluisdeur in bedrijf bij zoutwater is 16,1m, dit is 0,2m minder dan de diepgang bij zoetwater. Dit verschil kan geballast worden, zodat de diepgang in zoutwater ook 16,3m is.



Figuur 10-8 Geleiding onderkant van de deur



Figuur 10-9 Positie van de opleggingen

Omdat er op de bodem geen rolwagens of Hydro lagers aanwezig zijn, zal de sluisdeur op de bodem op een andere manier geleid moeten worden. De sluisdeur zal op de bodem geleid worden met een UHMWPE materiaal tegen de drempel, zie Figuur 10-8. De sluisdeur is aan de onderzijde afgedicht door een indrukbaar rubberprofiel. Als de sluisdeur op de bodem gezet wordt dicht deze goed af op de drempel, kleine oneffenheden van de drempel zijn dus veroorloofd. Aan de onderkant zijn twee UHMWPE stroken bevestigd. In kerende stand wordt de sluisdeur afgezonken op de drempel en staat de sluisdeur op deze UHMWPE Stroken. In hoofdstuk 10.3.2 is het UHMWPE materiaal beschreven.

### 10.3.2 UHMWPE materiaal

Ultra-high-molecular-weight polyethene is een deelverzameling van de thermoplastische polyetheneen. UHMWPE is een zeer taai materiaal met een hoge impact sterkte (1,6KJ/m). Het heeft een toelaatbare statische vlaktdruk van 6N/mm<sup>2</sup>. Het materiaal heeft de volgende voordelen (40):

- *Goed bestand tegen corrosieve chemicaliën;*
- *Extreem lage vochtopname*
- *Zeer lage wrijvingscoëfficiënt*
- *Zeer goed bestand tegen slijtage*
- *Is zelfsmerend*

- Geurloos, smaakloos en niet toxicisch

Hieronder is de minimale breedte van de aanslagen aan de zijkant geschat.

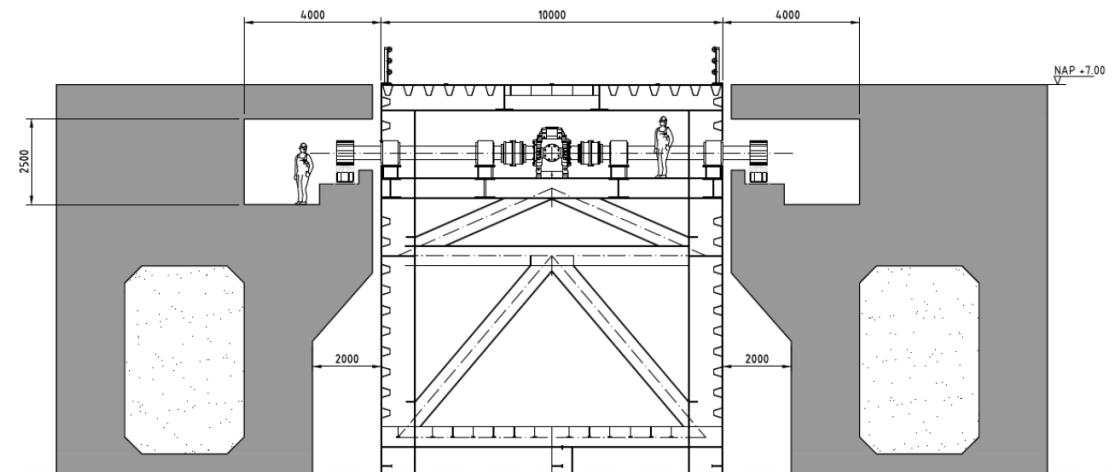
$$\text{De oplegreactie is per meter hoogte: } \frac{1}{2} \cdot 70\text{m} \cdot 8.51\text{m} \cdot 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2986 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{De minimaal benodigde breedte van de UHMWPE aanslagen is: } \frac{2986 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0.50\text{m}$$

## 10.4 Bewegingsmechanisme

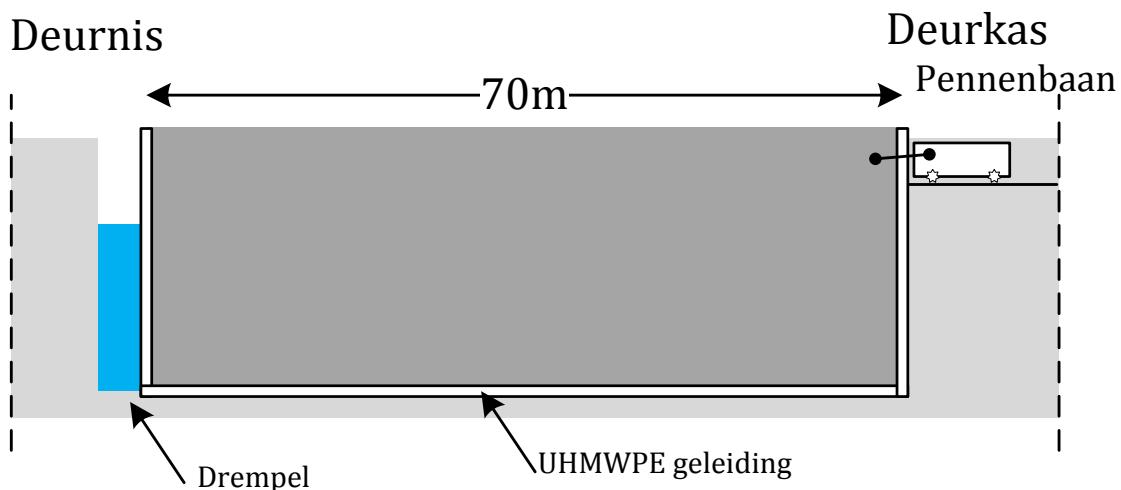
Voor het bewegingswerk van de sluisdeur is net als in de planstudie van de nieuwe zeesluis IJmuiden (30) gekozen voor een pennenbaan. In Figuur 10-10 is het principe van een aandrijving met een pennenbaan weergegeven.

De life cycle costs van een pennenbaan blijken laag te liggen ondanks de hoge stichtingskosten van dit type bewegingswerk. Een pennenbaan heeft een goede betrouwbaarheid, omdat de rondsels aan beide zijden van de roldeur mechanisch zijn gekoppeld.



Figuur 10-10 Principe werking pennenbaan

Omdat de diepgang van de sluisdeur niet constant is, is de bovenwagen dubbel scharnierend verbonden met de sluisdeur. De bovenwagen rijdt over de pennenbaan en trekt of duwt de sluisdeur open en dicht, Figuur 10-11.



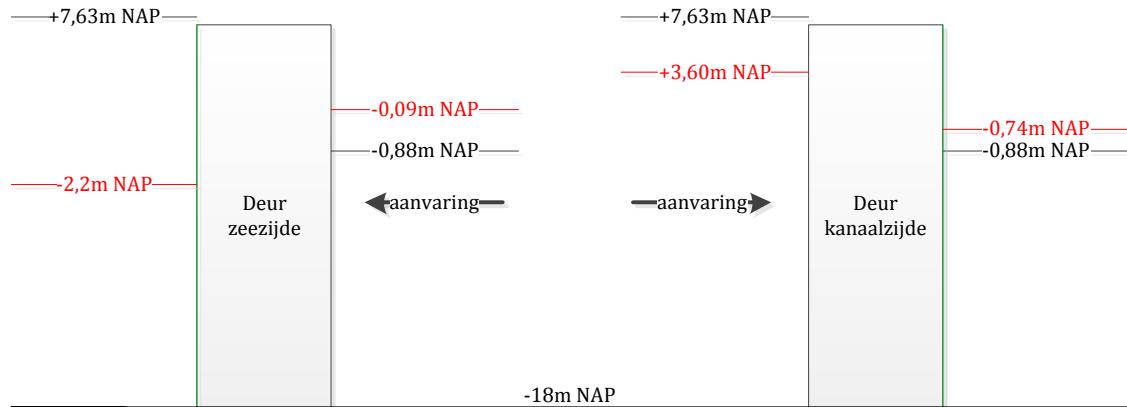
Figuur 10-11 Drijvende sluisdeur met pennenbaan

## 10.5 Reserve sluisdeur

Om aan de beschikbaarheidseis van 98% te voldoen zijn er reservedeuren aanwezig. Daarom is het toegestaan dat de sluisdeur plastisch vervormt bij bijvoorbeeld een aanvaring. Zonder plastisch vervormen is het onmogelijk om de aanvaarbelasting, berekend in hoofdstuk 5.1.3, op te nemen.

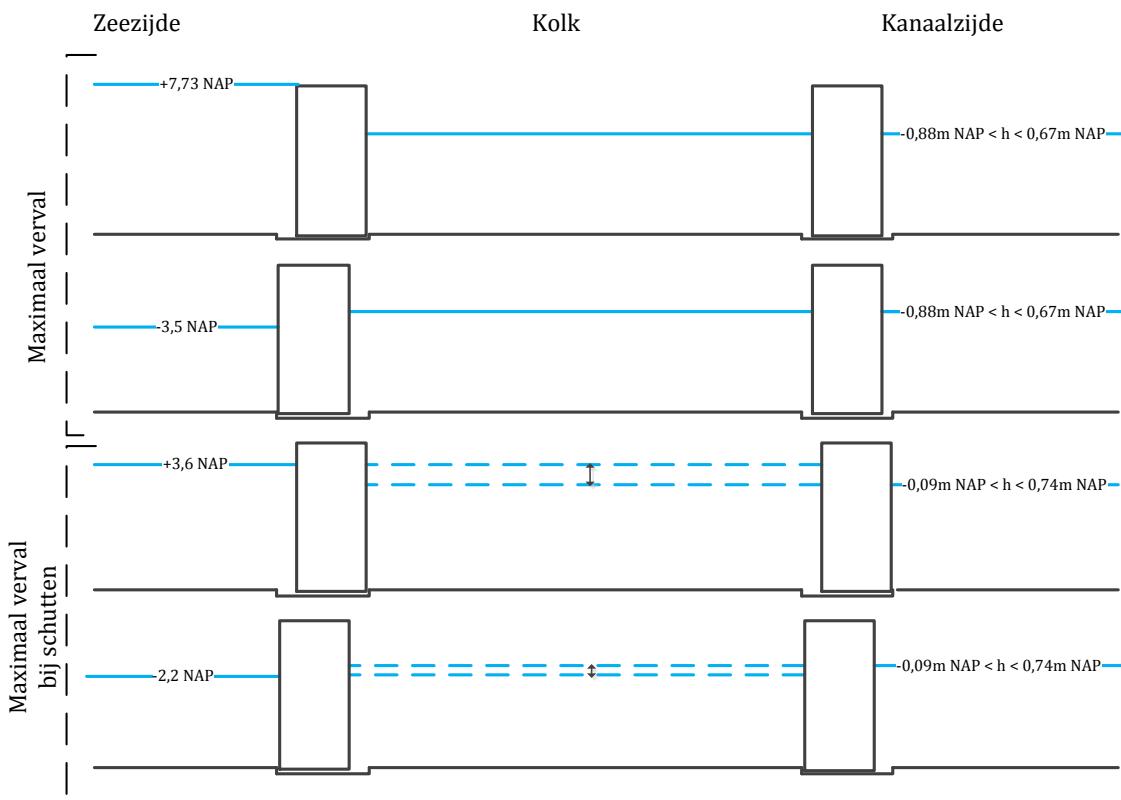
In de planstudie van de Nieuwe Zeesluis is aangenomen dat er in totaal 4 sluisdeuren zijn, die identiek worden uitgevoerd, zodat jaarlijks één sluisdeur kan worden onderhouden in een drooggdok aan de kanaalzijde van de sluis. Vanwege het aanvaarrisico wordt ook één sluisdeur aan de zeezijde van de sluis bewaard. In dit onderzoek wordt ook aangenomen dat er vier deuren zijn.

Beide sluisdeuren (zeezijde en kanaalzijde) moeten hetzelfde maximaal positief verval van 8,51 meter kerend (aangegeven in het zwart), zie Figuur 10-12. Zie hoofdstuk 4.2.2 voor de maatgevende waterstanden. Alleen de zijde waar de sluisdeur aangevaren kan worden is voor beide sluisdeuren verschillend. Wapening die voor deze aanvaarbelasting nodig is moet voor de sluisdeur aan de zeezijde aan de zeezijde liggen en voor de sluisdeur aan de kanaalzijde aan de kanaalzijde, in de figuur met de groene lijn aangegeven. Ook het maximaal verval waarbij nog geschut wordt en dus nog een aanvaring kan plaats vinden is verschillend. In Figuur 10-12 is het maximaal verval tijdens schutten in dezelfde richting van de aanvaring weergegeven in het rood.



Figuur 10-12 Maatgevende situaties sluisdeur

Wanneer alle deuren identiek zijn, moeten de sluisdeuren of in beide buitenwanden 'extra' wapening hebben om de aanvaringbelasting op te vangen, of de deuren moet vanaf beide zijde het maximaal positief verval kunnen keren, in plaats van het maximaal positief verval van 8,51 meter vanaf de ene zijde en het maximaal negatieve verval van 4,17 meter vanaf de ander zijde. Beide oplossingen zijn nadelig voor het ontwerp van de sluisdeur.

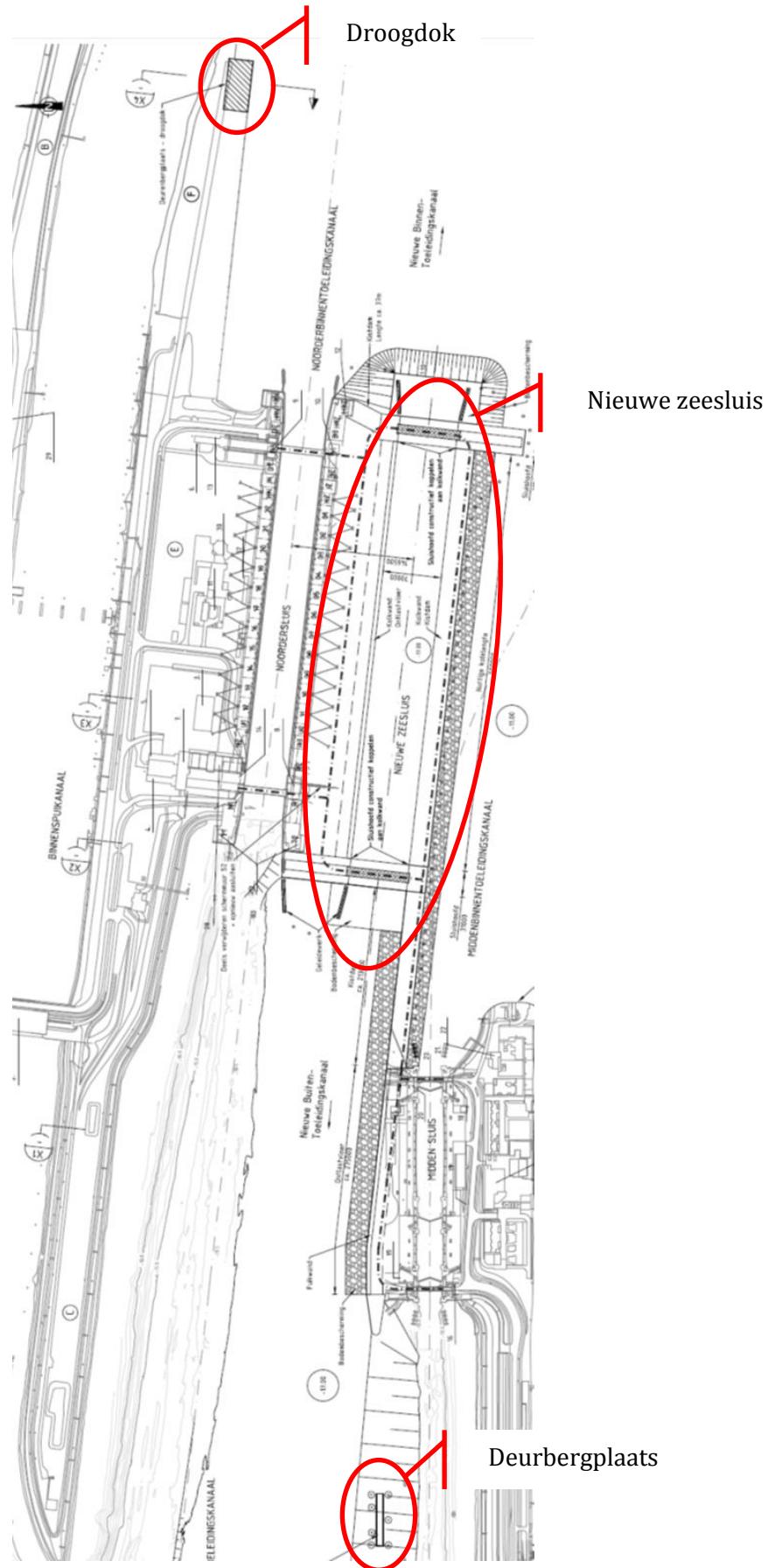


Figuur 10-13 Maximale vervallen

In Figuur 10-13 is te zien dat de deur aan de zeezijde bij een lager waterniveau moet kunnen drijven dan de sluisdeur aan kanaalzijde. De laagste waterstand waarbij de sluisdeur aan de zeezijde moet kunnen drijven is -2,2m NAP. En de laagste waterstand waarbij de sluisdeur aan de kanaalzijde moet drijven is -0,88m NAP. Wanneer de sluisdeuren voor de zeezijde en kanaalzijde niet identiek uitgevoerd worden, kan de sluisdeur voor de kanaalzijde ontworpen worden met minder drijfkisten die ook hoger in

de sluisdeur geplaatst kunnen worden. Dit is gunstig voor de drijvende stabiliteit van de sluisdeur, waardoor deze sluisdeur minder breed wordt.

Echter als de sluisdeuren niet identiek uitgevoerd worden, moet het mogelijk zijn om de sluisdeuren door de Noordersluis te verplaatsen. Wanneer de sluisdeur aan de zeezijde aangevaren wordt, en de reservedeur voor deze kant ligt aan de kanaalzijde in het dok, dan moet de reservedeur naar de andere kant vervoerd worden. De Nieuwe Zeesluis kan nu niet gebruikt worden, dus moet de sluisdeur dan door de Noordersluis. In Figuur 10-14 is in het inpassingsplan aangeven waar de twee reserve deuren opgeborgen zijn, een droogdok aan de kanaalzijde en deurbergplaats aan zeezijde waar de sluisdeur drijvend wordt afgemeerd (30). De Noordersluis sluis heeft echter maar een diepte van -15,5m NAP, 2,5m minder dan de Nieuwe Zeesluis. Dus moet de sluisdeur gelift worden om door de Noordersluis te kunnen. Als dit mogelijk is door de ballast uit de deur te pompen, dan worden de 4 sluisdeuren niet identiek uitgevoerd. Maar worden twee dezelfde deuren voor de zeezijde en twee dezelfde deuren voor kanaalzijde gemaakt, die dan uitgewisseld kunnen worden voor onderhoud of reparatie. Anders worden de vier deuren alle 4 hetzelfde uitgevoerd.



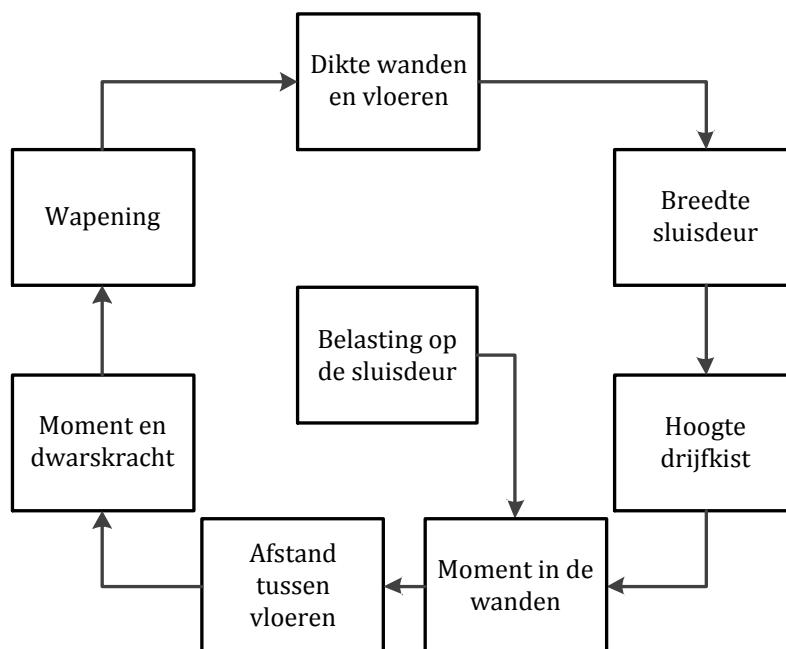
Figuur 10-14 Inpassing schetsontwerp sluisvariant 70m breedte (30)

# 11. DIMENSIES SLUISDEUR

Om de dimensies te berekenen van de sluisdeur is de calculatie software Mathcad gebruikt. Om tot de uiteindelijke dimensies van de sluisdeur te komen is in het programma aantal een iteratie stappen uitgevoerd. In de eerste paragraaf is aangegeven welke iteratiestappen zijn uitgevoerd. In de paragrafen erna zijn de verschillende stappen beschreven en zijn de bijbehorende resultaten gegeven.

## 11.1 Iteratiestappen

Omdat veel dimensies van de sluisdeur afhankelijk zijn van elkaar, moeten de dimensies geïtereerd worden. Bijvoorbeeld: Als de sluisdeur zwaarder wordt, door dikkere wanden en vloeren, wordt de sluisdeur breder om te zorgen dat de metacentrische hoogte groot genoeg is. De overspanning van de vloeren is dan groter is en dus ook de belasting. Wat weer invloed heeft op de afmetingen van de vloeren. Hieronder is omschreven hoe de dimensies van de sluisdeur zijn geïtereerd.



Figuur 11-1 Iteratiestappen om de dimensies van de sluisdeur te bepalen

Met een eerste schatting van de diktes van de wanden en vloeren is het gewicht van de sluisdeur bepaald waarmee de breedte van de sluisdeur is berekend die nodig is voor de drijvende stabiliteit. Met de breedte van de sluisdeur kan de hoogte van de drijfkist bepaald worden. Vervolgens is de afstand tussen de vloeren bepaald, zodat het maximale moment in de wanden even groot zijn. Met de berekende afstand tussen de vloeren en wanden kunnen het moment en dwarskracht in de wanden en vloeren berekend worden. Waarmee de benodigde wapening in de constructie uitgerekend kan worden. Met de

berekende wapening en dwarskracht zijn de diktes van de vloeren en wanden berekend. Hiermee is opnieuw het gewicht van de sluisdeur bepaald. Dan begint het iteratieproces opnieuw. In Figuur 11-1 is het iteratieproces weergeven.

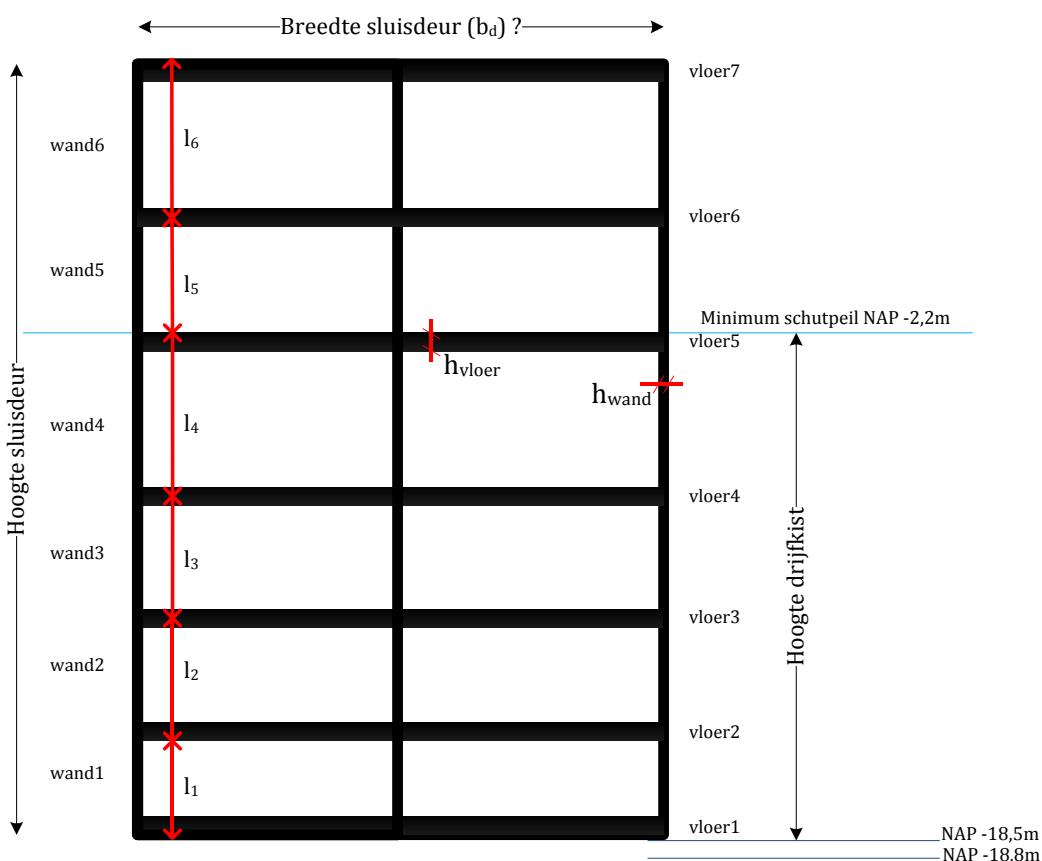
## 11.2 Afmeting drijfkist en breedte sluisdeur

De breedte van de sluisdeur wordt vooral bepaald door de breedte benodigd voor de drijfkist, die nodig is om de sluisdeur drijvend te houden, en de breedte die nodig is voor de drijvende stabiliteit.

In de berekening is eerst de hoogte van de drijfkist bepaald. Vervolgens is berekend wat de breedte van de sluisdeur moet zijn om te zorgen dat de sluisdeur drijvend stabiel is.

### 11.2.1 Hoogte van de drijfkist

In eerste instantie is aangenomen dat de hoogte van de drijfkist 16,3m is. Dit is de volledige hoogte tussen minimum schutpeil en NAP -18,5m is, zie Figuur 11-2. Zodat als de sluisdeur in bedrijf is, de volledige hoogte van de drijfkist altijd onderwater bevindt. Hierdoor is de waterballast, 'ballast 2', zo klein mogelijk. Zodat wanneer de sluisdeur in bedrijf is zo min mogelijk ballastwater verpompt hoeft te worden.



Figuur 11-2 Doorsnede sluisdeur

### 11.2.2 Ballast

Vervolgens is de hoogte van het ballastwater berekend, zie hoofdstuk 10.2.1. Hiervoor is eerst het gewicht van de sluisdeur bepaald. Daarna is berekend hoeveel semipermanente waterballast  $h_{ballast1}(b_d)$  aanwezig is die ervoor zorgt dat de diepgang van de sluisdeur in bedrijf 16,3m is bij een waterstand van NAP -2,2m, zie Figuur 10-4.

Het gewicht van de sluisdeur is bepaald door het volume van alle wanden en vloeren te vermenigvuldigen met het volumieke gewicht van beton. Voor de berekening van de vloer- en wanddiktes zie hoofdstuk 11.6. De breedte van de sluisdeur is een nog onbekende waarde. Het gewicht van de sluisdeur is daarom als functie van de breedte van de sluisdeur geschreven,  $Fv(b_d)$ .

$$h_{ballast1}(b_d) := \frac{b_d \cdot L_{deur} \cdot (16.3\text{m}) \cdot \gamma_w - Fv(b_d)}{(L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1}) \gamma_w}$$

Waarin:

Fv( $b_d$ )	is het gewicht van de sluisdeur, afhankelijk van de breedte van de sluisdeur;
$b_d$	is de breedte van de sluisdeur;
$L_{deur}$	is de lengte van de sluisdeur;
$\gamma_w$	is het volumieke massa van water.

Vervolgens is berekend hoeveel ballast er maximaal toegevoegd moet worden, zodat de sluisdeur altijd op de bodem afgezonken kan worden. Dit is berekend door de opdrijvende kracht te bereken die de vloeren en wanden boven de drijfkist leveren als de sluisdeur volledig onder water staat. De waterballast moet evenwicht maken met deze opdrijvende kracht. Om te zorgen dat de sluisdeur bij de maximale waterstand nog steeds met overgewicht op de bodem staat, is  $h_{ballast2}$  verhoogd met 0,2 meter. De sluisdeur staat dan bij extreme waterstand met een overgewicht van

$$0,2\text{ m} \times (L_{deur} - f \times h_{wand})(b_d - c \times h_{wand}) \times 10 \frac{kN}{m^3} = 1.730\text{ kN}$$

op de bodem (bij invullen waarden uit hoofdstuk 11.6.6).

$$h_{ballast2}(b_d) := \frac{c h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{(L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1})} + 0.2\text{m}$$

Hierin is:

b <sub>d</sub>	breedte van de sluisdeur;
$h_{wand}$	dikte van de wand;
c	het aantal langswanden;
f	het aantal tussenwanden, die de compartimenten vormen.

### 11.2.3 Diepgang

Om de metacentrische hoogte te bepalen is eerst de diepgang van de sluisdeur berekend voor drie situaties bij minimum schutpeil.

Als de sluisdeur in bedrijf is, is de drijfkist gevuld met waterballast,  $h_{\text{ballast}1}$ . De diepgang kan dan worden berekend met:

$$d_{\text{bedrijf}} := \frac{Fv(b_d) + h_{\text{ballast}1}(b_d) \cdot (L_{\text{deur}} - f \cdot h_{\text{wand}1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{\text{wand}1}) \gamma_w}{b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot \gamma_w}$$

Tijdens uitdrijven wordt een gedeelte van de waterballast eruit gepompt, tot de diepgang bij minimum schutpeil 15,3m is. De diepgang bij uitdrijven is berekend zonder waterballast, om te toetsen of de diepgang kleiner is dan 15,3m:

$$d_{\text{uitdrijven}} := \frac{Fv(b_d)}{b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot \gamma_w}$$

Na een aanvaring is geen ballast aanwezig in de drijfkist (deze wordt eruit gepompt). De kapotte compartimenten zijn volgelopen met water wat voor verlies van waterverplaatsing zorgt. De opdrijvende kracht wordt geleverd door de drijfkist en door een gedeelte van de wanden boven de drijfkist, rechts van het gelijkteken in de formule.

$$Fv(b_d) = b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) \cdot \gamma_w - b_d \cdot 2 \cdot b_{\text{cel}} \cdot \gamma_w \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) \dots \\ + \frac{3h_{\text{wand}5} \cdot L_{\text{deur}} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{\text{vloer}6} + h_{\text{vloer}7}) \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d}{l_6 + l_5} (d_{\text{aanvaring}} - 16.3m) \cdot \gamma_w$$

De diepgang kan berekend worden met:

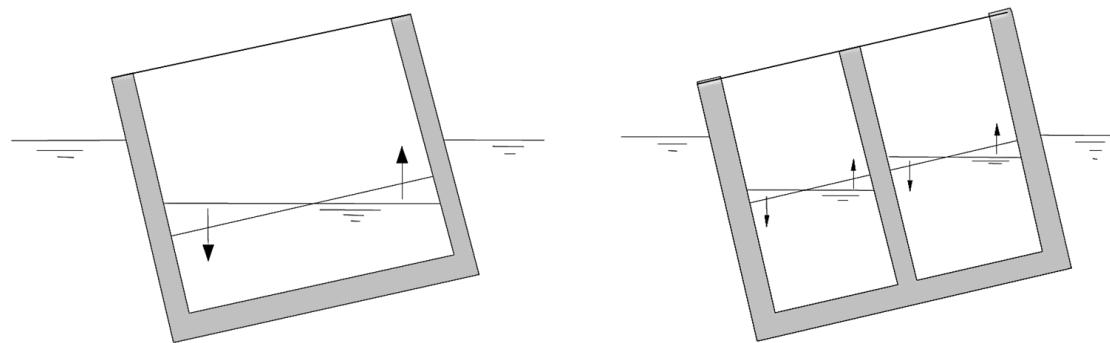
$$d_{\text{aanvaring}} := 16.3m + \frac{Fv(b_d) + b_d \cdot 2 \cdot b_{\text{cel}} \cdot \gamma_w \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) - b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) \cdot \gamma_w}{\frac{3h_{\text{wand}5} \cdot L_{\text{deur}} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{\text{vloer}6} + h_{\text{vloer}7}) \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d}{l_6 + l_5} \cdot \gamma_w}$$

#### 11.2.4 Metacentrische hoogte

Met de diepgang kan de metacentrische hoogte berekend worden met als onbekende parameter de breedte van de sluisdeur. Dit is gedaan voor de situatie dat de sluisdeur uitgedreven wordt. De metacentrische hoogte ( $h_m$ ) moet in deze situatie 0,5m zijn, zie hoofdstuk 10.2.3. Met deze formule is de breedte van de sluisdeur bepaald die nodig is voor de metacentrische hoogte. En vervolgens is gecontroleerd of de metacentrische hoogte voldoet als de sluisdeur in bedrijf is ( $h_m$ ).

#### *Slingerschot*

Waterballast in de drijfkist heeft negatieve invloed op de stabiliteit als de drijfkist niet volledig gevuld is. Het wateroppervlak kan dan bewegen en bezit dus massatraagheid. Dit zorgt voor een destabiliserend effect van de sluisdeur, zie Figuur 11-3. In hetzelfde figuur is te zien dat dit effect een stuk minder is als de doorsnede wordt gepartitioneerd.



Figuur 11-3 Invloed van slingerschot op de stabiliteit (36)

De ongunstige invloed van het ballastwater op de stabiliteit kan in rekening worden gebracht door het traagheidsmoment als volgt te definiëren (36):

$$I = I_u - \sum I_i$$

Hierin is:  $I_u$  Traagheidsmoment om de y-as ter hoogte van de waterlijn.

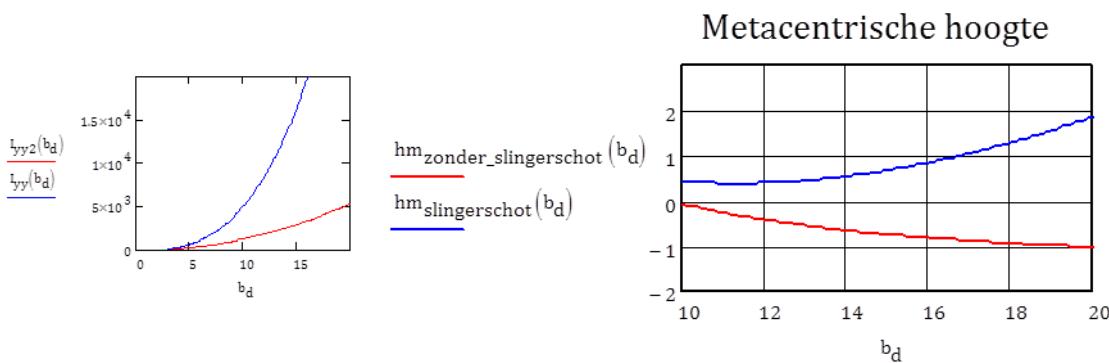
$I_i$  Traagheidsmoment van het ballastwater gebied ten opzichte van het zwaartepunt van het desbetreffende compartiment.

Het traagheidsmoment van de sluisdeur zonder slingerschot kan als volgt worden berekend:

$$I_{yy2}(b_d) := \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot b_d^3 - \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot (b_d - 2h_{wand1})^3$$

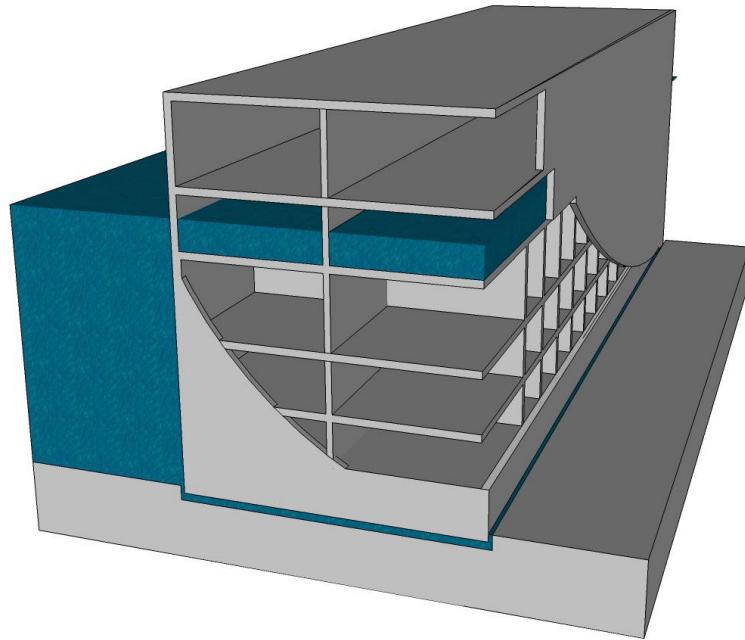
En voor de sluisdeur met slingerschot:

$$I_{yy}(b_d) := \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot b_d^3 - 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot \left( \frac{b_d - 3 \cdot h_{wand1}}{2} \right)^3$$



Figuur 11-4 Invloed slingerschot op metacentrische hoogte

In Figuur 11-4 is het verschil weergegeven tussen een sluisdeur met slingerschot (de blauwe lijn) en een sluisdeur zonder slingerschot (de rode lijn). Het verschil in traagheidsmoment bij grotere breedtes van de sluisdeur is zeer groot. De metacentrische hoogte van de sluisdeur zonder slingerschot neemt zelfs af bij toenemende breedte. Om te zorgen dat de sluisdeur stabiel is in het water moet dus een slingerschot gebruikt worden, zie Figuur 11-5.



Figuur 11-5 Sluisdeur met slingerschot

### Metacentrische hoogte als de sluisdeur wordt uitgedreven

De breedte van de sluisdeur is zo bepaald dat de metacentrische hoogte van de sluisdeur tijdens uitdrijven ( $h_{m1}$ ) bij minimaal schutpeil (NAP -2,2m) een halve meter is.

$$h_{m1}(b_d) := WG(b_d) - MW(b_d) = 0,5m$$

Waarin:

$$WG(b_d) := d_{uitdrijven}(b_d) - KG(b_d) \quad \text{Afstand zwaartepunt tot waterlijn}$$

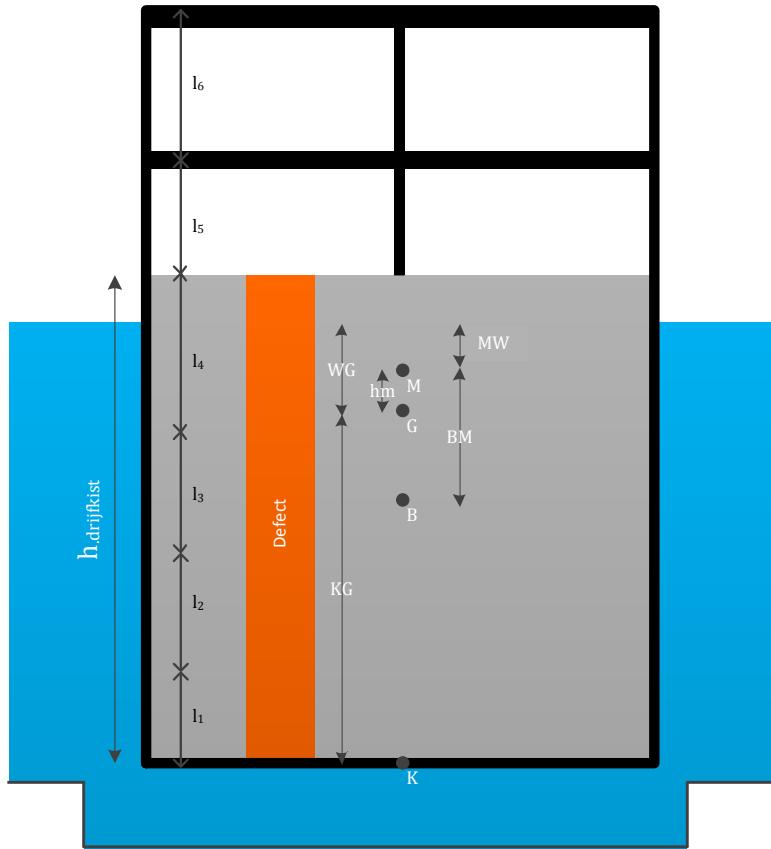
$$d_{uitdrijven} = 15,3m \quad \text{zie Tabel 10-2}$$

$$MW(b_d) := WB(b_d) - BM(b_d) \quad \text{Afstand metacentrum tot waterlijn.}$$

$$WB(b_d) := \frac{d_{uitdrijven}(b_d)}{2} \quad \text{Afstand drukkingspunt tot waterlijn.}$$

$$BM(b_d) = \frac{I_{yy}(b_d)}{V} \quad \text{Afstand drukkingspunt tot metacentrum.}$$

$$I_{yy}(b_d) := \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot b_d^3 - 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot \left( \frac{b_d - 3 \cdot h_{wand1}}{2} \right)^3 \quad \text{Traagheidsmoment om de y- as ter hoogte van de waterlijn.}$$



Figuur 11-6 Bepalen metacentrische hoogte

### Metacentrische hoogte als de sluisdeur in bedrijf is

Voor de situatie als de sluisdeur in bedrijf is wordt de metacentrische hoogte op eenzelfde manier berekend als hierboven. Hieronder zijn de variabelen gegeven die veranderen ten opzichte van de berekening van de metacentrische hoogte als de sluisdeur wordt uitgedreven:

$$hm_2(b_d) := WG_2(b_d) - MW_2(b_d) > 1,1m$$

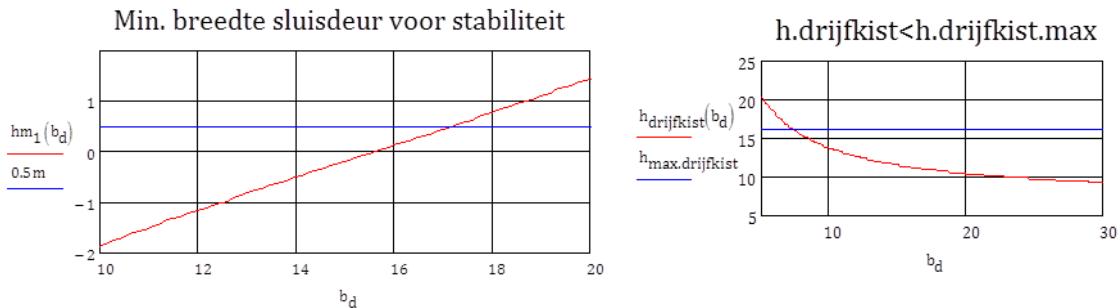
$$WG_2(b_d) := d_{bedrijf} - KG(b_d)$$

$$d_{bedrijf} = 16,3m, \text{ zie Tabel 10-2}$$

$$KG(b_d) := d_{bedrijf} - KG(b_d)$$

#### 11.2.5 Vrije ruimte in doorsnede

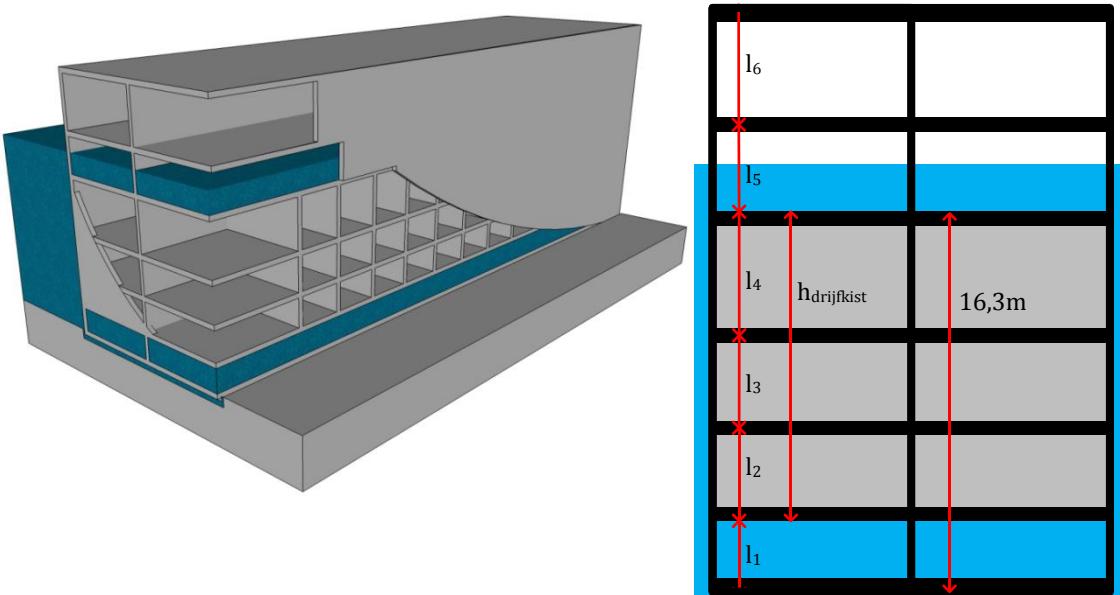
De breedte van de sluisdeur is afhankelijk van de grootte van de drijfkist en de metacentrische hoogte. De breedte moet zo groot zijn dat de hoogte van de drijfkist niet groter is dan de maximale hoogte van de drijfkist, zie als voorbeeld Figuur 11-7. Met een eerste schatting van 300 mm voor de wandiktes, is de breedte van de sluisdeur berekend die minimaal nodig is, zie Figuur 11-7. Om te zorgen dat de sluisdeur drijvend stabiel is, moet de sluisdeur minimaal 17 m breed zijn. Maar om te zorgen dat de hoogte van de drijfkist niet groter is dan de maximale hoogte hoeft de sluisdeur maar 8m breed te zijn.



Figuur 11-7 Minimale breedte sluisdeur

Omdat de drijvende stabiliteit maatgevend is voor de breedte en niet het volume van de drijfkist, is een hoogte in de dwarsdoorsnede over die niet benodigd is voor de drijfkist. Deze hoogte moet of geballast worden met water of deze hoogte kan open gehouden worden aan de zijkant waardoor het water er door kan stromen. Eén van deze twee opties moet toegepast worden om te zorgen dat de sluisdeur de juiste diepgang heeft.

De tweede optie zorgt voor minder weerstand bij het openen en sluiten van de deur omdat het oppervlak wat dicht is aan de zijkant kleiner is, en er is minder ballastwater nodig. Daarom is voor deze optie gekozen. De vrije hoogte moet even groot zijn als de ruimte tussen de eerste en tweede vloer zodat geen extra tussenvloer nodig is, zie Figuur 11-8.



Figuur 11-8 Lay-out sluisdeur, met ruimte tussen onderste vloeren open

### Hoogte drijfkist

Met het gewicht van de sluisdeur is de hoogte van drijfkist berekend. De hoogte van de drijfkist is nu dus nog afhankelijk van de breedte van de sluisdeur,  $h_{\text{drijfkist}}(b_d)$ . In de berekening is uitgegaan van de situatie dat de sluisdeur is aangevaren, zodat na een aanvaring de sluisdeur nog kan drijven. Maximaal twee cellen van de drijfkist over de hoogte en breedte van de drijfkist leveren dan geen opwaartse kracht omdat ze zijn volgelopen met water, zie hoofdstuk 10.2.4. De hoogte van de drijfkist is berekend door

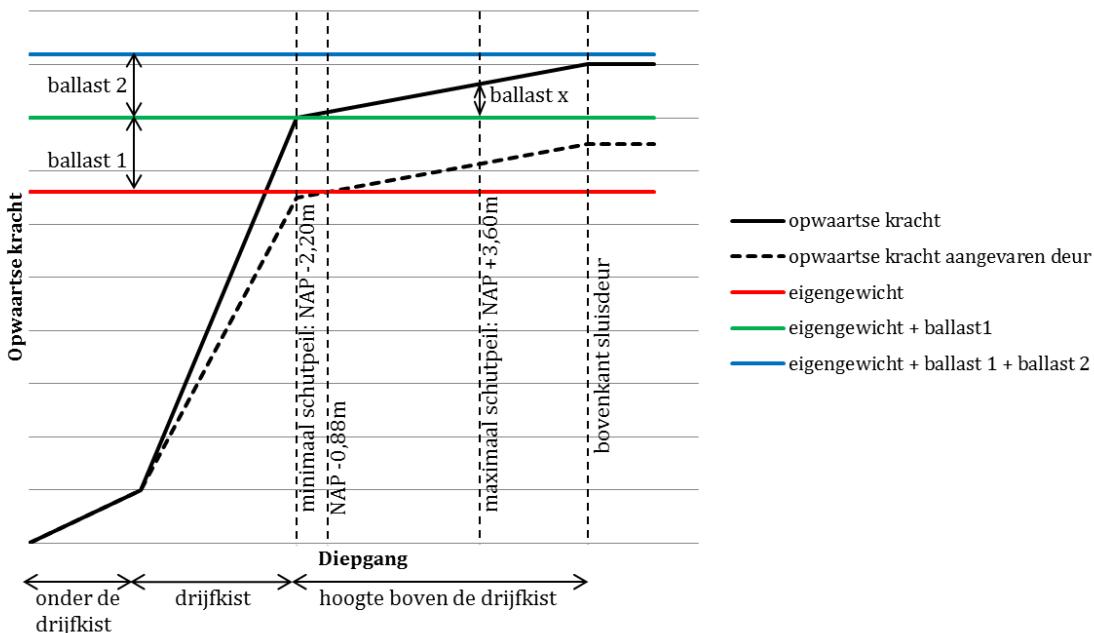
het gewicht van de sluisdeur gelijk te stellen aan de opdrijvende kracht van de drijfkist bij een waterniveau van NAP -0.88m.

De hoogte van de drijfkist kan nu berekend worden met:

$$h_{drijfkist}(b_d) := \frac{F_v(b_d) - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w - \frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} (16.62m - 16.3m) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w - b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w}$$

Deze waarde moet gelijk zijn aan  $h_{drijfkist} = l_2 + l_3 + l_4 = 16,3m - l_1$ , zie Figuur 11-8. In Mathcad is geïtereerd zodat deze waarde gelijk aan elkaar zijn.

In Figuur 11-9 is de opnieuw de opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur, met nu een open ruimte tussen de onderste vloeren. Nu wordt tot aan de onderkant van de drijfkist de opwaartse kracht alleen geleverd door de wanden en vloeren, dus stijgt de opwaartse kracht in het begin een stuk minder.



Figuur 11-9 Opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur, met open ruimte onder de drijfkist

### Diepgang

De berekening van de diepgang is nu ook veranderd. Hieronder is de berekening van de diepgang van de sluisdeur bij minimum schutpeil gegeven voor de drie situaties.

Voor de situatie dat de sluisdeur in bedrijf is:

$$(d_{bedrijf} - l_1) \cdot (b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w) + (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w = F_v(b_d) + h_{ballast1}(b_d) \cdot (L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1}) \cdot \gamma_w$$

Hieruit volgt de diepgang:

$$d_{bedrijf} := \frac{F_v(b_d) + h_{ballast1}(b_d) \cdot (L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1}) \cdot \gamma_w - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w} + l_1$$

De diepgang tijdens uitdrijven van de sluisdeur is nu:

$$d_{uitdrijven} := \frac{Fv(b_d) - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w} + l_1$$

De diepgang van de sluisdeur na een aanvaring volgt uit het volgende evenwicht:

$$Fv(b_d) + b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w \cdot h_{drijfkist}(b_d) = (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w + b_d \cdot L_{deur} \cdot h_{drijfkist}(b_d) \cdot \gamma_w \dots \\ + \frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} (d_{aanvaring} - 16.3m) \cdot \gamma_w$$

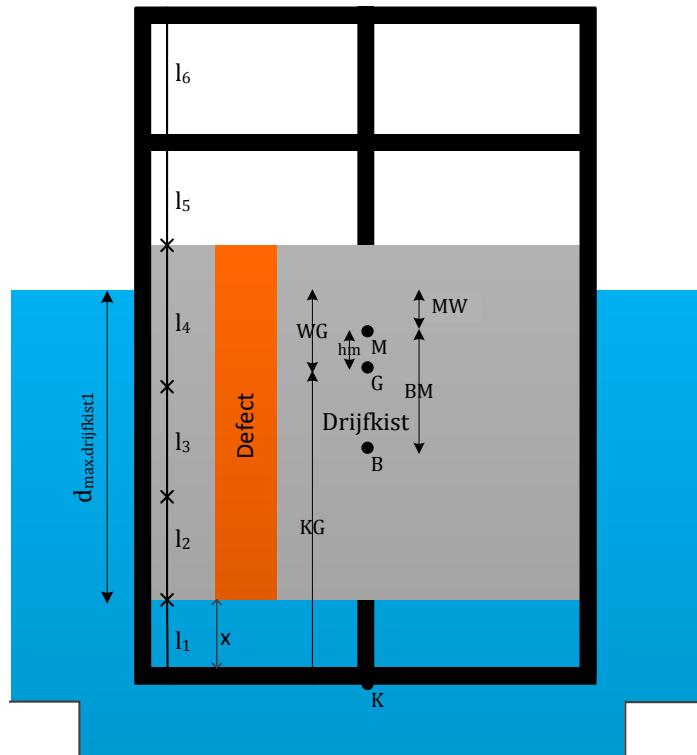
$$d_{aanvaring} := 16.3m + \frac{Fv(b_d) + b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w \cdot h_{drijfkist}(b_d) - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w - b_d \cdot L_{deur} \cdot h_{drijfkist}(b_d) \cdot \gamma_w}{\frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} \cdot \gamma_w}$$

### Metacentrische hoogte

De berekening van de metacentrische hoogte blijft zo goed als hetzelfde als in hoofdstuk 11.2.4. De enige formules die veranderen in de berekening van de metacentrische hoogte is de afstand van het drukkingspunt tot de waterlijn. Deze zijn:

$$WB(b_d) := \frac{d_{uitdrijven}(b_d) - l_1}{2}$$

$$WB2(b_d) := \frac{d_{bedrijf} - l_1}{2}$$

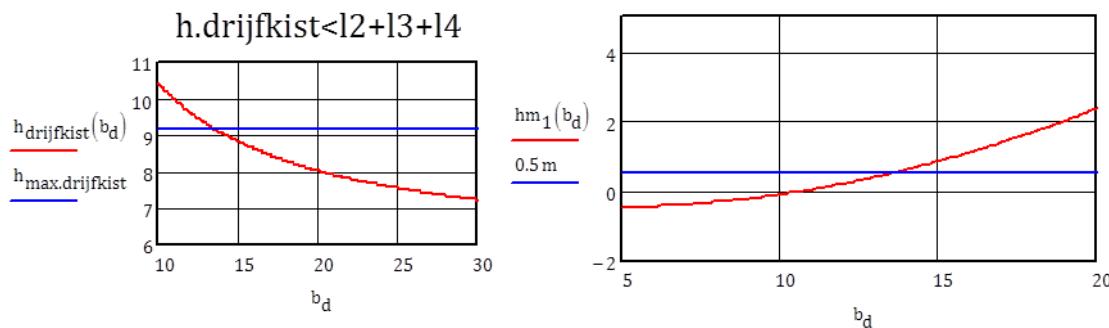


Figuur 11-10 Bepalen metacentrische hoogte

### 11.2.6 Uit eindelijke breedte sluisdeur en afmetingen drijfkist

In bijlage M is de berekening toegevoegd waarin met de uiteindelijke vloer- en wanddiktes uit 11.6.6 de breedte van de sluisdeur en de hoogte van de drijfkist zijn berekend. Hieronder zijn kort de resultaten weergeven.

In de rechter grafiek in Figuur 11-11 is te zien dat de breedte van de sluisdeur minimaal 13,5 m moet zijn om te zorgen dat de sluisdeur stabiel is. De hoogte van de drijfkist is zo gekozen dat de breedte van de sluisdeur benodigd voor de drijfkist gelijk is aan de breedte benodigd voor de metacentrische hoogte. Dit is bij een hoogte van de drijfkist van 9 m, zie linker grafiek hieronder.



Figuur 11-11 Benodigde breedte sluisdeur

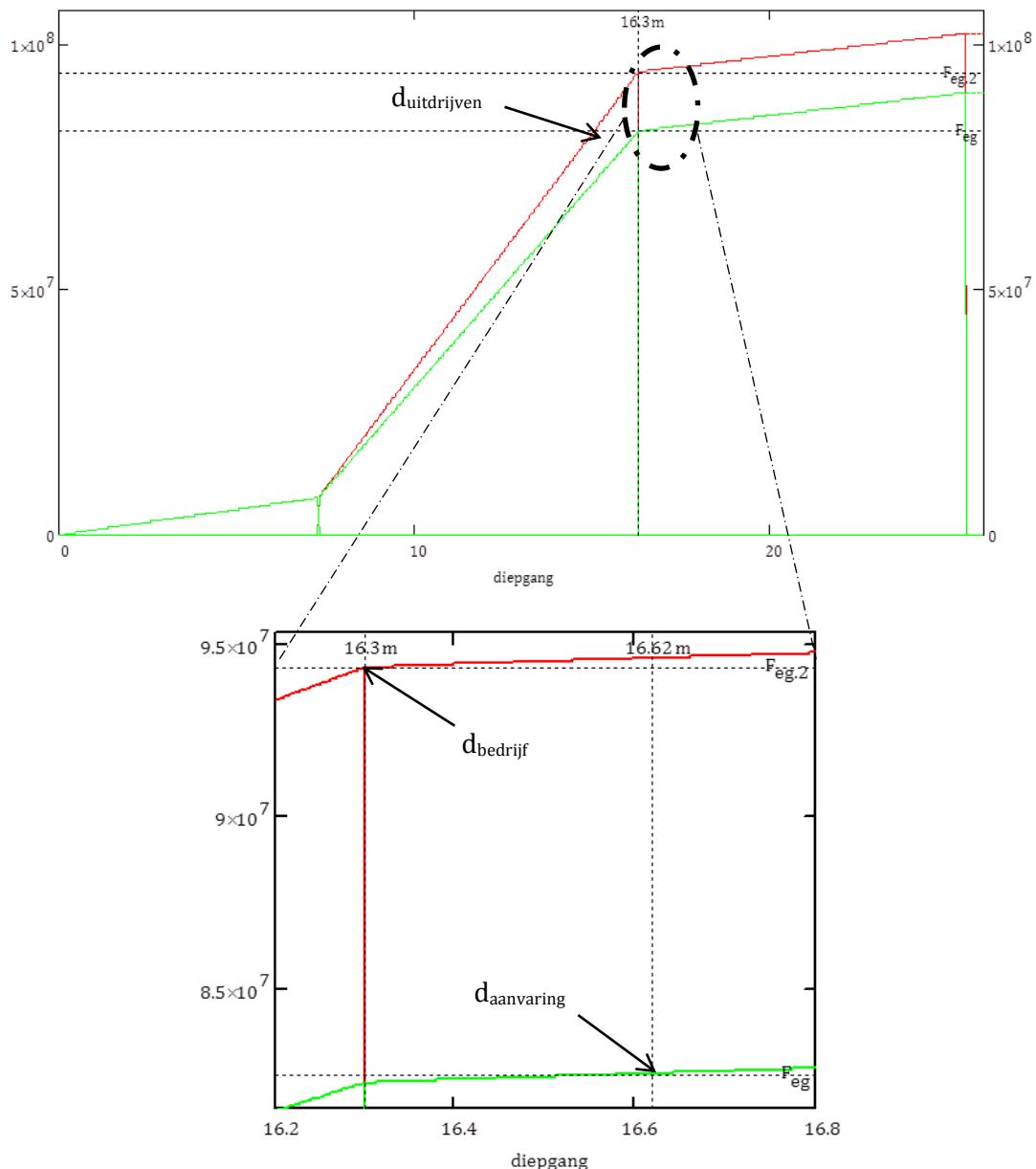
In Figuur 11-12 is de opwaartse kracht uitgezet tegen de diepgang van de sluisdeur van de sluisdeur behorende bij de uiteindelijke dimensies van de vloeren en wanden, zie hoofdstuk 11.6.6. De rode lijn in de grafiek is de opwaartse kracht van de sluisdeur en de groene lijn is de opwaartse kracht van de sluisdeur na een maatgevende aanvaring waarbij een aantal compartimenten vol zijn gelopen met water. De onderste gestippelde lijn in de grafiek is het eigengewicht van de sluisdeur. De gestippelde lijn erboven is het gewicht van de sluisdeur waarbij de drijfkist gevuld is met waterballast met een hoogte  $h_{\text{ballast}1}$ .

Hieronder zijn de diepgangen gegeven zoals berekend volgens hoofdstuk 11.2.5 . Deze zijn ook aangegeven in de grafiek.

$$d_{\text{bedrijf}} = 16,30 \text{ m}$$

$$d_{\text{aanvaring}} = 16,62 \text{ m}$$

$$d_{\text{uitdrijven}} = 15,03 \text{ m}$$



Figuur 11-12 De diepgang behorende bij de uiteindelijke dimensies

De diepte van de sluisdeur is zonder ballast dus 15,0m. Dit betekent dat de sluisdeur niet door de noordersluis vervoerd kan worden; hier is de diepgang bij minimaal kanaalpeil slechts NAP - 0,88m - NAP - 15,5m = 14,62m. Alle sluisdeuren worden identiek uitgevoerd, zie hoofdstuk 10.5. De sluisdeur moet dus van beide zijden het maximaal verval kunnen keren.

### Verschil in diepgang bij zoet- en zoutwater

Bij berekening van de diepgang is de volumieke massa van zoetwater gebruikt, omdat dit resulteert in een grotere diepgang dan bij zoutwater. De diepgang van de sluisdeur in bedrijf bij zoutwater is 16,1m, dit is 0,2m minder dan de diepgang bij zoetwater. Dit verschil kan geballast worden, zodat de diepgang in zoutwater ook 16,3m is.

### 11.3 Maatgevende belasting op wanden en vloeren

Bij de berekening van de dimensies van de vloeren en wanden is het maximum verval op de sluisdeur gezet, zie bovenste afbeelding in Figuur 11-13. Dit is het maximale verval dat de sluisdeur moet kunnen keren. In de onderste afbeelding is de resulterende belasting op de wanden gegeven. De wand onder de drijfkist wordt minder zwaar belast dan de wand ter hoogte van de drijfkist omdat de ruimte hier open is. De resulterende waterdruk op deze wand is de waterdruk aan zeezijde min de waterdruk aan kanaalzijde.

Dit geldt ook voor het gedeelte waar de waterstand aan de kanaalzijde boven de drijfkist uitkomt. Dit is echter verwaarloosd in de berekening omdat anders het belasting diagram niet eenvoudig op te splitsen is in een uniforme belasting en een driehoeksbelasting, zie hoofdstuk 11.4.

De maximale waterdruk aan de onderkant van de sluisdeur aan de zeezijde is:

$$q_{\max} := \left[ \gamma \cdot (18.8 + 7.63) \text{ m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 291,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

En aan kanaalzijde:

$$q_{\text{kanaal}} := \left[ \gamma \cdot (18.8 - 0.88) \text{ m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 197,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Hierin  $\gamma=1,1$  Belastingfactor voor de waterdruk, zie hoofdstuk 5.2.1.

#### *Belasting op de wanden*

Elk stuk wand is gedimensioneerd op de belasting die op dat gedeelte van de wand werkt. Bijvoorbeeld alle wanden tussen vloeren 3 en 4 (de buitenwanden, slingerschot en de tussenwanden) wordt belast met een uniforme belasting  $q_4$  en een driehoeksbelasting van  $q_3-q_4$ . Als een buitenwand kapot gaat, door bijvoorbeeld een aanvaring, moeten de andere wanden niet bezwijken door de waterdruk.

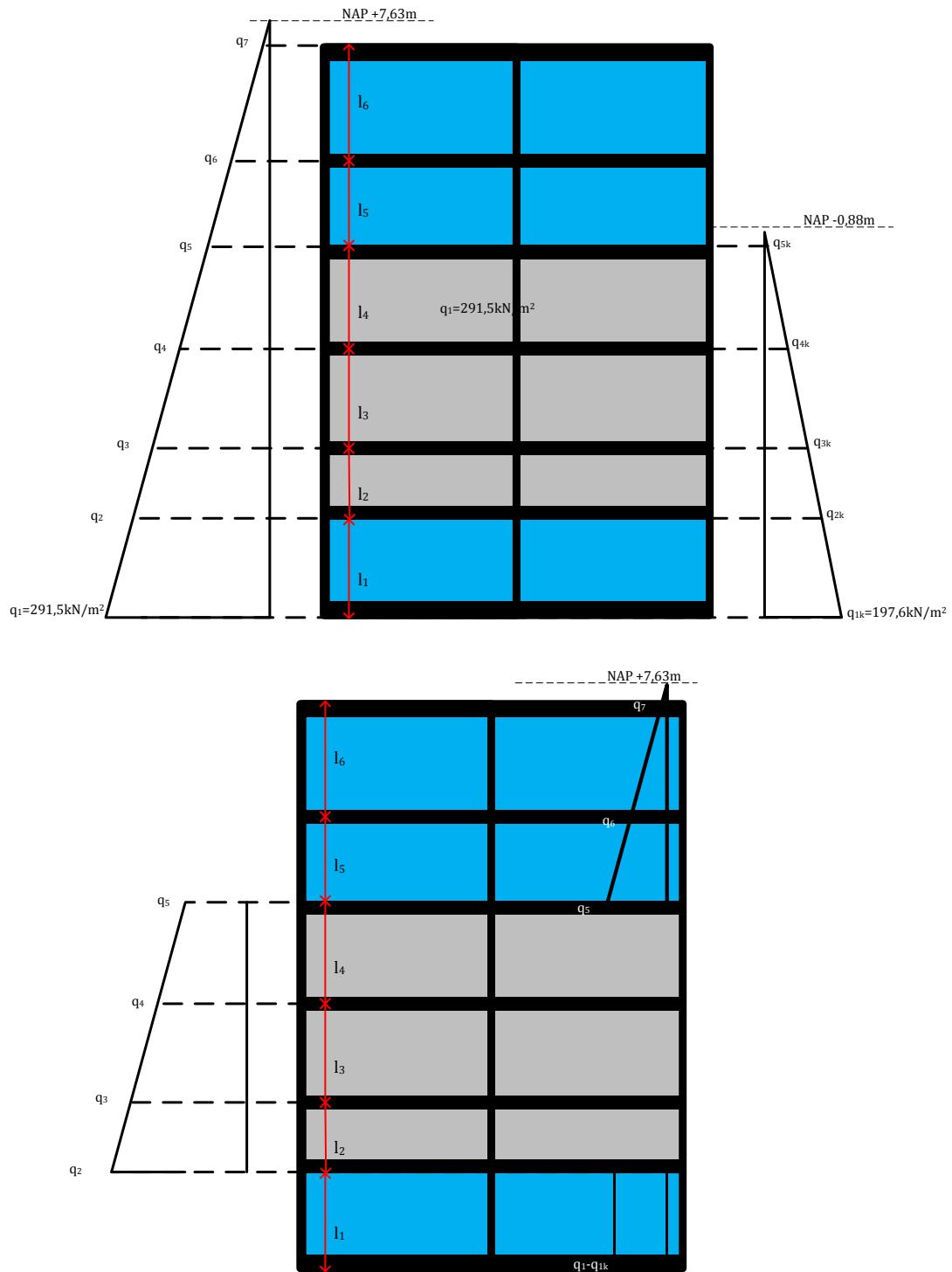
#### *Belasting op vloeren*

De vloeren worden gedimensioneerd op de maximale waterdruk die van de boven- en onderkant op de vloer werkt en het eigengewicht. De onderste vloer (vloer1) wordt zo goed als niet belast door de waterdruk. Omdat de vloer van boven en onder wordt belast door de waterdruk. Vloer 1 wordt alleen gedimensioneerd op het eigengewicht van de vloer.

Op vloer 2, de onderkant van de drijfkist, werkt een grote waterdruk  $q_2$  tegen de onderkant van de vloer. Op de bovenkant van deze vloer werk alleen een waterdruk als een wand aan de zijkant of de vloer erboven kapot gaat. De opwaartse waterdruk is bij deze vloer dus maatgevend en hierop wordt de vloer gedimensioneerd.

Op vloeren 3 en 4 staat geen waterdruk, alleen als de drijfkist kapot gaat. Dan kunnen de compartimenten boven de vloer of onder de vloer of beide vol stromen met water. Deze vloeren worden gedimensioneerd op waterdruk die van de bovenkant en van de

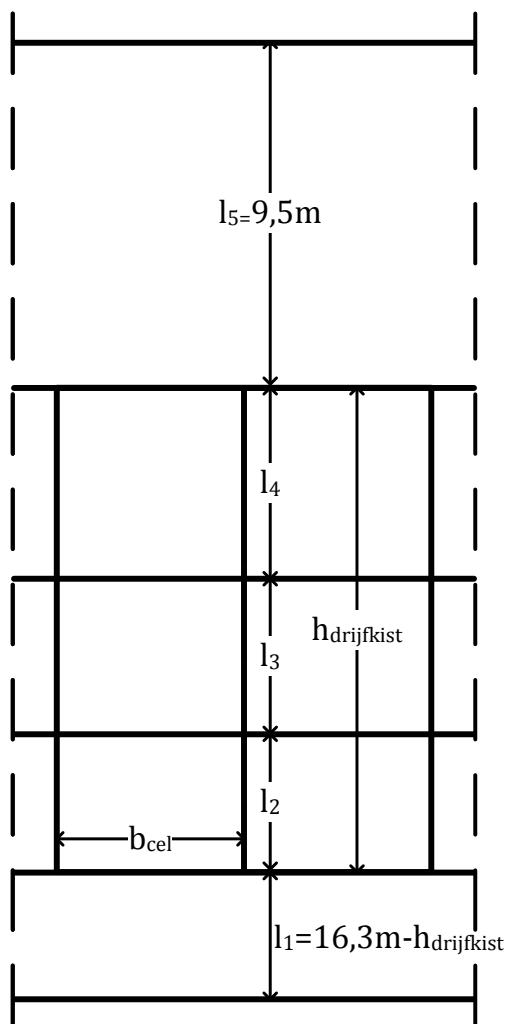
onderkant op de vloeren werken. Vloer 5 wordt bij maximaal verval van bovenkant belast met uniforme belasting  $q_5$ , op deze belasting wordt de vloer gedimensioneerd. En vloeren 6 en 7 werkt net als bij vloer 1 zo goed als geen waterdruk omdat boven en onder vloer water staat. Deze vloeren worden op het eigengewicht gedimensioneerd.



Figuur 11-13 Maatgevende belasting op de wanden

## 11.4 Afstand tussen vloeren

Als eerste zijn de afstanden bepaald tussen de vloeren. Eerst is gekeken om 6 vloeren toe te passen, zie bijlage A. Als één vloer op 16,3m van de bodem ligt, en de sluisdeur in bedrijf is, ligt deze vloer op minimum schutpeil. Tussen de vloeren onder minimum schutpeil en boven vloer 2 zijn compartimenten aangebracht, die voor de opdrijvende kracht zorgen zodat de sluisdeur blijft drijven. De bovenste vloer ligt op 25,8m van de bodem, de afstand tussen de 5<sup>e</sup> vloer en de bovenste vloer is dus 9,5m. En de afstand tussen de eerste en de vijfde vloer is 16,3m. De afstand tussen de onderste twee vloeren is 16,3m min de hoogte van de drijfkist. Dus bij een hoogte van de drijfkist van 9m, zie hoofdstuk 11.2.5, geldt dus  $l_1=7,3\text{m}$



Figuur 11-14 indeling vloeren wanden, met 6 vloeren

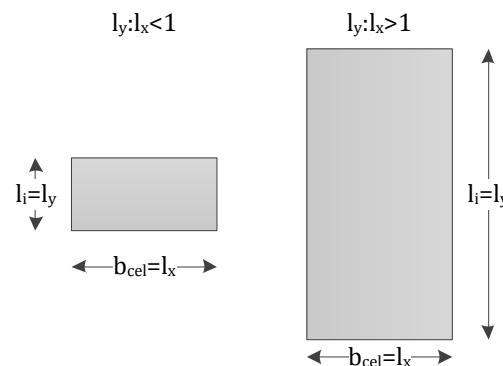
De afstanden tussen de overige vloeren zijn zo bepaald dat het maximum moment in elke wand tussen twee vloeren gelijk is. Bij de wanden tussen vloer 2 en vloer 5 is er vanuit gegaan dat ze vierzijdig ingeklemd zijn, tussen de vloeren en dwarswanden. De afstand tussen de dwarswanden is 5 meter, zie hoofdstuk 10.2.4. De buitenwand tussen de 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> vloer en de 5<sup>e</sup> en 6<sup>e</sup> vloer overspannen in één richting, tussen deze buitenwanden zitten geen dwarswanden. In Figuur 11-14 zijn schematisch de vloeren en wanden weergegeven.

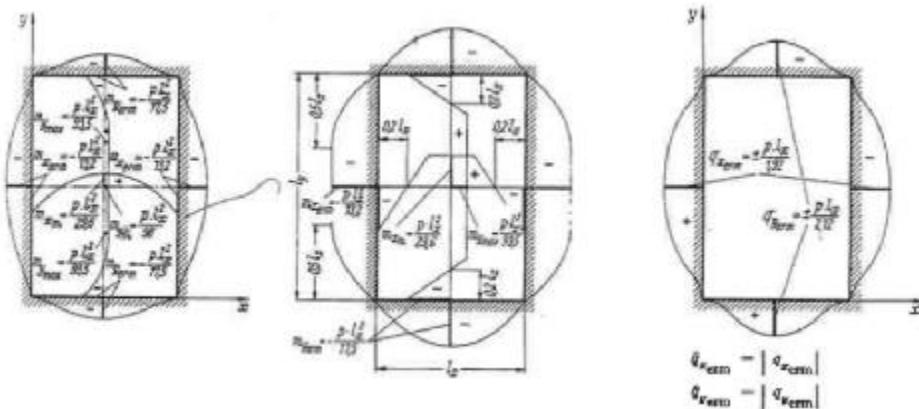
### 11.4.1 Moment in wanden

De momenten zijn bepaald aan de hand van tabellen uit de Betonkalender (38), zie Figuur 11-15. Eerst is de verhouding  $l_y:l_x$  bepaald,  $l_y$  is de afstand tussen de vloeren en  $l_x$  is de breedte van de cel. Vervolgens kan de coëfficiënt afgelezen worden waarmee het moment berekend kan worden:  $M = p * b_{cel}^2 / \text{coëfficiënt}$ .

De tabel in de Betonkalender geeft echter alleen waardes voor een  $l_y:l_x$  verhouding tussen 1,00 en 2,00. Om in Mathcad onderscheid te houden tussen het moment in de x-richting en moment in de y- richting, is de breedte van de cel altijd  $l_x$  en  $l_i$  altijd  $l_y$ . Er zijn ook waardes voor  $l_y:l_x$  kleiner dan 1,00, de afstand tussen de vloeren is hier groter dan de breedte van de cel. Daarom is de tabel doorberekend tot  $l_y:l_x$  verhouding van 0,5.

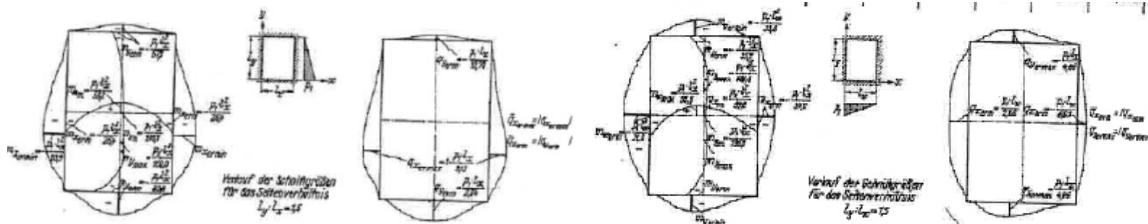
Bijvoorbeeld de coëfficiënt voor  $m_{xerm}$  behorend bij  $l_y:l_x = 0,5$  is 17,5, dit is de coëfficiënt in de tabel die hoort bij  $m_{yerm}$  bij  $l_y:l_x = 2,0$ . Het moment voor waarden van  $l_y:l_x$  kleiner dan 1,00 zijn dan berekend met:  $M = p * l_i^2 / \text{coëfficiënt}$ .





$l_y : l_x$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
$m_{x,erm} = -$	19,4	18,2	17,1	16,3	15,5	14,9	14,5	14,0	13,7	13,4	13,2
$m_{x,m} =$	56,8	50,8	48,1	42,4	39,4	37,0	34,8	33,3	31,9	30,6	29,6
$m_{y,erm} = -$	19,4	18,8	18,4	18,1	17,9	17,7	17,6	17,5	17,5	17,5	17,5
$m_{y,max} =$	56,8	58,2	60,3	62,6	65,8	69,4	73,6	78,4	83,4	89,4	98,5
$q_{x,erm} = \pm$	2,24	2,17	2,10	2,05	2,01	1,98	1,96	1,94	1,92	1,92	1,92
$q_{y,erm} = \pm$	2,24	2,20	2,16	2,14	2,12	2,11	2,10	2,09	2,10	2,12	2,12
$f_m = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot d^3}$	0,0152	0,0167	0,0181	0,0195	0,0207	0,0219	0,0230	0,0240	0,0248	0,0257	0,0264

$l_y : l_x$	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,0
$m_{x,erm} = -$	13,2	13,0	12,8	12,7	12,5	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0
$m_{x,m} =$	29,6	28,8	28,1	27,5	26,9	26,4	26,0	25,7	25,4	25,2	25,0
$m_{y,erm} = -$	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
$m_{y,max} =$	93,5	96,1	98,1	99,9	101,3	102,4	103,3	104,0	104,6	104,9	105,0
$q_{x,erm} = \pm$	1,92	1,92	1,92	1,92	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91
$q_{y,erm} = \pm$	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,13	2,13	2,13
$f_m = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot d^3}$	0,0264	0,0271	0,0277	0,0282	0,0287	0,0291	0,0294	0,0297	0,0300	0,0302	0,0304



$l_y : l_x$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2,0	$l_y : l_x$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2,0	
$m_{x,erm,0}$	—	35,9	33,1	29,8	27,5	25,6	23,9	20,2	—	30,0	26,7	24,7	23,8	22,2	21,8	20,2
$m_{x,m}$	—	113,6	91,7	73,7	69,9	63,7	59,2	50,9	—	56,3	47,1	41,7	38,1	35,5	34,0	30,4
$m_{y,erm} (p=0)$	—	30,0	27,5	26,1	25,0	24,1	23,8	21,9	—	98,0	82,6	73,0	65,8	60,8	56,8	48,5
$m_{y,erm} (p=1)$	—	56,2	55,5	57,2	59,5	62,9	67,1	92,5	—	36,9	38,0	35,1	34,6	34,4	33,8	33,8
$m_{y,max}$	—	98,0	98,0	98,0	99,0	99,0	100,0	100,0	—	113,6	120,4	131,5	147,0	166,6	181,8	212,6
$q_{x,erm} (\pm 0 \text{ u. } l_x)$	—	4,14	3,86	3,59	3,39	3,25	3,13	2,83	—	3,07	2,93	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
$q_{y,erm} (\pm 0)$	—	8,07	2,90	2,80	2,74	2,70	2,64	2,49	—	8,25	7,35	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
$q_{y,erm} (p=1)$	—	8,25	8,40	8,77	9,40	9,99	10,70	14,29	—	4,14	4,12	4,08	4,07	4,07	4,06	4,06
$f_m = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot d^3}$	—	0,0076	0,0091	0,0104	0,0115	0,0124	0,0132	0,0152	—	0,0076	0,0091	0,0104	0,0115	0,0124	0,0132	0,0152

Figuur 11-15 Tabel voor berekening moment en dwarskracht van een vierzijdig ingeklemde plaat, uniform belast en driehoeksbelasting

Hieronder zijn de resultaten weergeven die berekend zijn in bijlage A:

- $I_1 = 7,3m$
- $I_2 = 2,74m$
- $I_3 = 2,96m$

- $I_4=3,31m$
- $I_5=9,50m$

De maximale momenten in de wanden tussen vloer 2 en vloer 5 zijn aan elkaar gelijk gesteld en zijn 127 kNm/m. Echter het maximum moment in de bovenste wand is 697 kNm/m. De waterdruk op deze wand is een stuk lager, maar de overspanning is een stuk groter en de wand is maar tweezijdig opgelegd. Omdat dit moment bijna 5,5 keer zo groot is dan het maximum moment in de wanden eronder is een extra vloer toegevoegd tussen de bovenste twee vloeren.

Het moment in de onderste wand is ook een stuk groter dan in de wanden ter hoogte van de drijfkist. Dit is 422 kNm/m, ruim drie keer zo groot als in de wanden er boven. Hier wordt geen extra wand toegepast om gewicht te besparen en de dwarsdoorsnede zo open mogelijk te houden. De onderste wanden zullen om het moment op te nemen iets dikker gemaakt worden.

Nu is op dezelfde wijze als in bijlage A de afstand tussen de vloeren bepaald bij toepassing van zeven vloeren, zie bijlage C. Het maximum moment en de afstanden tussen de onderste vijf vloeren zijn niet veranderd ten opzichte van de hierboven gegeven waarde. De belasting is hetzelfde en de vijfde vloer ligt ook hier 16,3 meter van de onderkant. De plaats van de zesde vloer is berekend door het maximum moment in de bovenste twee wanden gelijk te stellen. Hieruit volgt:

- $I_1=7,3m$
- $I_2=2,74m$
- $I_3=2,96m$
- $I_4=3,31m$
- $I_5=4,20m$
- $I_6=5,30m$

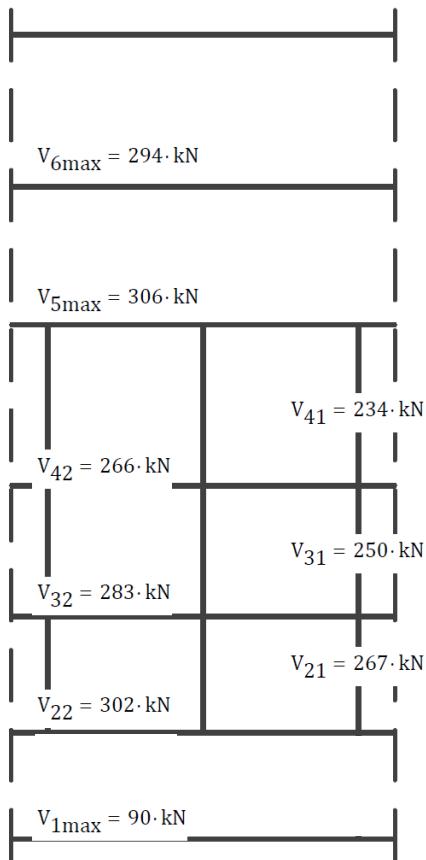
Het maximum moment in de bovenste wanden is nu 164 kNm/m in plaats van 697 kNm/m.

## 11.5 Dwarskracht in wanden en vloeren

Met de bekende afstanden tussen de vloeren is het veldmoment in de wanden in x- en y-richting, de dwarskracht in de wanden en het veld- en supportmoment in de vloeren berekend, zie bijlage D.

Met de dwarskracht is in hoofdstuk 11.6 de dikte van de wanden en vloeren berekend. Met deze afmetingen van de vloeren en wanden is de benodigde breedte voor de stabiliteit van de sluisdeur berekend en met de support- en veldmomenten is in hoofdstuk 11.6.4 de wapening in de wanden en vloeren uitgerekend.

Voor berekening van de dwarskracht in de wanden zijn dezelfde aannames gedaan als voor berekening van het moment. De wanden ter hoogte van de drijfkist zijn vierzijdig ingeklemd en de overige tweezijdig. Hieronder is de dwarskracht in de wanden weergegeven:



Figuur 11-16 Dwarskracht in wanden per strekkende meter

In de berekening van de dwarskracht en moment van de vloeren zijn dezelfde aannames gedaan als voor de wanden. De vloeren 2 tot en met 5 zijn vierzijdig ingeklemd en de overige vloeren tweezijdig. De belasting op de vloer is even groot als de waterdruk ter hoogte van de vloer plus of min het eigengewicht van de vloer, dit hangt af of de waterdruk omhoog of omlaag werkt op de vloer. De grootte van de dwarskracht en moment is dus afhankelijk van de dikte van de vloer. De dwarskracht en het moment zijn als functie van de vloerdikte opgeschreven.

Hieronder is de berekening van het support moment in de vloeren weergegeven. Het maximale moment op vloeren 3 en 4 is berekent voor de waterdruk die er van boven op werkt, echter de waterdruk zou ook van onderaf op de vloer kunnen werken. Bij het bepalen van de wapeningshoeveelheden is hier mee rekening gehouden door in deze vloeren aan beide zijde wapening te leggen om dit moment op te vangen. Op de andere vloeren werkt de maatgevende waterdruk maar vanaf één zijde. In deze vloeren wordt aan één zijde wapening gelegd om dit moment op te vangen en aan de andere zijde de minimumwapeninghoeveelheid.

Het veldmoment en de dwarskracht in de vloer zijn op vergelijkbare manier berekend, zie bijlage C.

$$M_{vloer11}(h_{vloer1}) = \frac{1}{12} (1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer1}) \left(\frac{b_d}{2}\right)^2$$

$$M_{vloer21}(h_{vloer2}) = \frac{1}{p_{1u1vl}}(q_{vloer2} - 0,9\gamma_c \times 1m \times h_{vloer2})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer22}(h_{vloer2}) = \frac{1}{p_{1u2vl}}(q_{vloer2} - 0,9\gamma_c \times 1m \times h_{vloer2})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer31}(h_{vloer3}) = \frac{1}{p_{1u1vl}}(q_{vloer3} + 1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer3})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer32}(h_{vloer3}) = \frac{1}{p_{1u2vl}}(q_{vloer3} + 1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer3})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer41}(h_{vloer4}) = \frac{1}{p_{1u1vl}}(q_{vloer4} + 1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer4})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer42}(h_{vloer4}) = \frac{1}{p_{1u2vl}}(q_{vloer4} + 1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer4})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer51}(h_{vloer5}) = \frac{1}{p_{1u1vl}}(q_{vloer5} + 1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer5})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer52}(h_{vloer5}) = \frac{1}{p_{1u2vl}}(q_{vloer5} + 1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer5})(b_{cel})^2$$

$$M_{vloer61}(h_{vloer6}) = \frac{1}{12}(1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer6})\left(\frac{b_d}{2}\right)^2$$

$$M_{vloer71}(h_{vloer7}) = \frac{1}{12}(1,2\gamma_c \times 1m \times h_{vloer7})\left(\frac{b_d}{2}\right)^2$$

Hierin:	$M_{vloer i1}$	support moment in de breedte richting van de deur
	$M_{vloer i2}$	support moment in de lengte richting van de deur
	$\gamma_c$	volumiek gewicht van beton
	$p_{1u1}$	coëfficiënt voor support moment in de breedte richting van de deur
	$p_{1u2}$	coëfficiënt voor support moment in de lengte richting van de deur

## 11.6 Dikte vloeren en wanden

Nu de dwarskracht in de vloeren en wanden bekend is, met als onbekende de vloerdikte, is de dikte van de vloeren en wanden berekend. Dit is eerst gedaan voor twee situaties: bij toepassing van betonsterkteklasse C55/67 (bijlage E), en bij toepassing van betonsterkteklasse C100/115 (bijlage F).

### 11.6.1 Berekening dikte vloeren en wanden zonder dwarskrachtwapening

In deze situatie moet de dikte van de wand en vloer zo groot zijn dat de maximale dwarskracht opgenomen kan worden zonder dwarskrachtwapening.

$$V_{Rd.c} = V_{Ed} \quad [11-1]$$

Voor alle wanden en vloeren is  $V_{Rd,c}$  berekend, en gekeken hoe groot de dikte van de wand moet zijn zodat aan formule [ 11-1 ] wordt voldaan.  $V_{Rd,c}$  is bepaald volgens hoofdstuk 6.2.2 uit NEN1992-1-1:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \times k \times (100 \rho f_{ck})^{1/3} \times d \times b > 0.035 \times k^{3/2} \times f_{ck}^{1/2} b * d$$

Waarin:  $d$  is de effectieve dikte, geschat op 0,9 maal dikte wand

$$C_{Rd,c} = 0.12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} < 2$$

$\rho$  is de wapeningsverhouding voor de langswapening

$$= \frac{\alpha f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{1}{2\beta} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4\beta}{\alpha} \times \frac{M}{f_{cd} * b * d^2}} \right) > \rho_{l,min} \quad (53)$$

$\alpha$  is de vormfactor

$\beta$  is de afstandsfactor

## 11.6.2 Vloer- en wanddiktes zonder dwarskrachtwapening

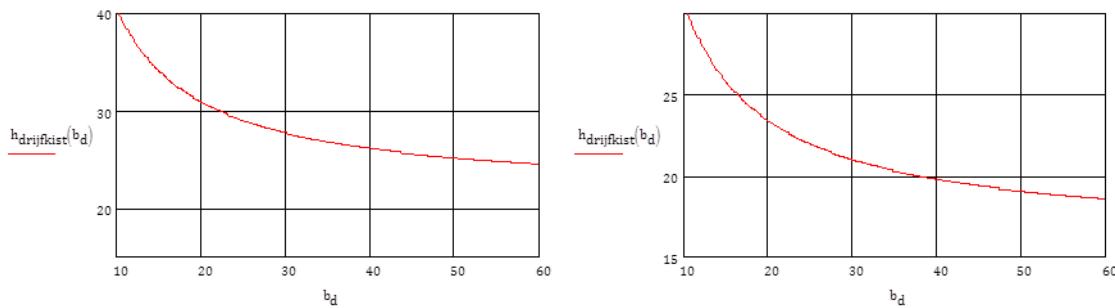
In Tabel 11-1 zijn de berekende diktes uit bijlage E, F van de wanden en vloeren weergeven.

Tabel 11-1 Diktes van vloeren en wanden

C55/67		C100/115	
Wand1=0,23m	Vloer1=0,17m	Wand1=0,23m	Vloer1=0,17m
Wand2=0,95m	Vloer2=1,67m	Wand2=0,62m	Vloer2=1,21m
Wand3=0,87m	Vloer3=2,90m	Wand3=0,57m	Vloer3=1,63m
Wand4=0,81m	Vloer4=2,20m	Wand4=0,52m	Vloer4=1,22m
Wand5=0,94m	Vloer5=1,40m	Wand5=0,62m	Vloer5=0,79m
Wand6=0,94m	Vloer6=0,17m	Wand6=0,62m	Vloer6=0,17m
	Vloer7=0,17m		Vloer7=0,17m

### Benodigde hoogte drijfkist

In Figuur 11-17 is weergegeven voor de twee situaties zonder toepassing van dwarskrachtwapening wat de hoogte van de drijfkist moet zijn. Te zien is dat bij toepassing van betonsterkteklasse C55/67 en C100/115 de hoogte van de drijfkist niet kleiner wordt dan 18m. Hoe breed de sluisdeur ook gemaakt wordt, de benodigde hoogte van de drijfkist (rode lijn) is altijd veel te groot. Het gewicht van de sluisdeur is te hoog als er geen dwarskrachtwapening toegepast wordt. In de volgende paragraaf zal de dwarskracht in de wand getoetst worden.



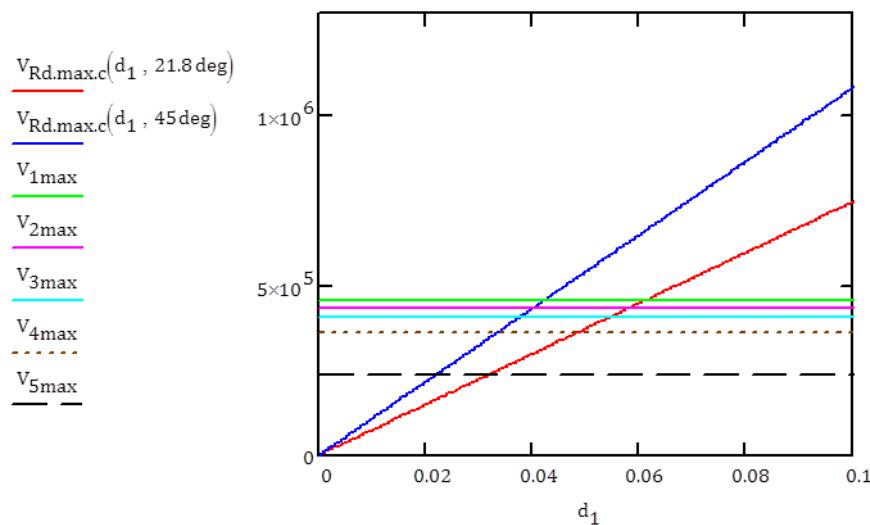
Figuur 11-17 Hoogte van de drijfkist (m) uitgezet tegen de breedte van de sluisdeur (m), links: C55/67, Rechts: C100/115

### 11.6.3 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening

Bij toepassing van dwarskrachtwapening zullen de resulterende wand- en vloerdiktes een stuk kleiner zijn. De benodigde dwarskrachtwapening is berekend volgens de Eurocode en volgens de NEN 6720. Er kunnen grote verschillen zijn tussen de benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens deze twee normen.

#### Eurocode

Eerst is berekend wat de maximaal op te nemen dwarskracht is door dwarskrachtwapening ( $V_{Rd,max}$ ) bij de minimale hoek van de betondrukdiagonaal  $\theta=21,8^\circ$  en bij de maximale hoek  $\theta=45^\circ$ . In Figuur 11-18 is te zien dat bij een hoek van de betondrukdiagonaal van  $21,8^\circ$  een wanddikte van 60 mm al voldoet. Een kleinere hoek is gunstiger voor de benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening.



Figuur 11-18 Dwarskracht in de wanden en de  $V_{Rd,max}$  bij  $21,8^\circ$  en  $45^\circ$

De benodigde hoeveelheid dwarskracht wapening is vervolgens berekend door:

$$A = \frac{V_d}{f_{yd} \times 0,9d \times \cot(\theta)}$$

**NEN 6720**

De opneembare schuifspanning door een doorsnede is volgens de NEN 6720 is:

$$\tau_1 = 0,4 \times f_{ctd} \times k_h \times \sqrt[3]{\rho} \leq 0,4f_{ctd}$$

Waarin:  $f_{ctd}$  is de betontreksterkte;

$$k_h = 1,6 - h \leq 1;$$

$\rho$  is het wapeningspercentage.

De benodigde dwarskrachtwapening kan vervolgens bepaald worden door:

$$A = \frac{V_d - \tau_1 \times d \times 1m}{d \times f_{yd} \times \cot(\theta)}$$

Waarin:  $\theta$  is de betondrukdiagonaal, deze waarde moet tussen  $30^\circ$  en  $60^\circ$  liggen volgens de NEN 6720;

$V_d$  is de rekenwaarde van de dwarskracht.

### *Vergelijking benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens Eurocode en NEN6720*

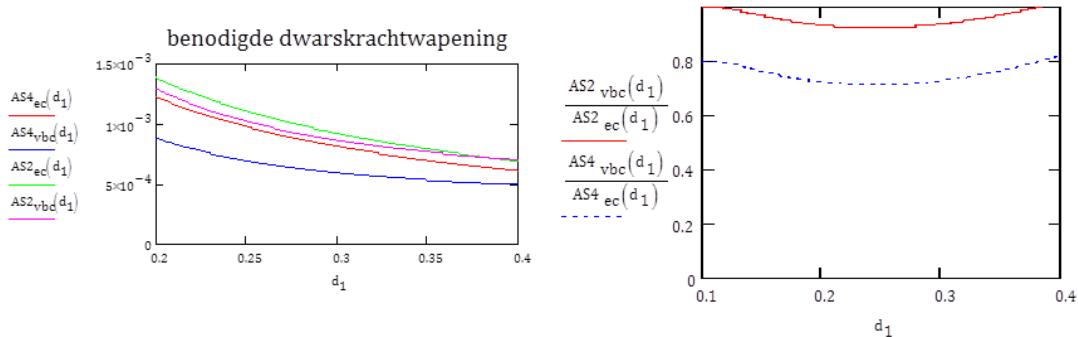
Om de hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode en NEN6720 te vergelijken, is in bijlage G voor wand 2 (wand tussen vloer 1 en 2) en wand 4 (wand tussen vloer 3 en 4) de benodigde dwarskrachtwapening berekend voor betonsterkteklasse C55/67 en C100/115. De benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de NEN6720 is berekend voor een betondrukdiagonaal met een helling van  $30^\circ$  en  $45^\circ$ . De benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode is berekend met een hoek van de betondrukdiagonaal van  $21,8^\circ$ .

In Figuur 11-19 tot en met Figuur 11-22 is het verschil weergeven tussen de benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode en NEN 6720. In de linker figuren is de benodigde dwarskrachtwapening in  $m^3$  uitgezet tegen de wanddikte in m. In de rechter figuren is verhouding van de benodigde dwarskrachtwapening volgens twee normen uitgezet tegen wanddikte in m.

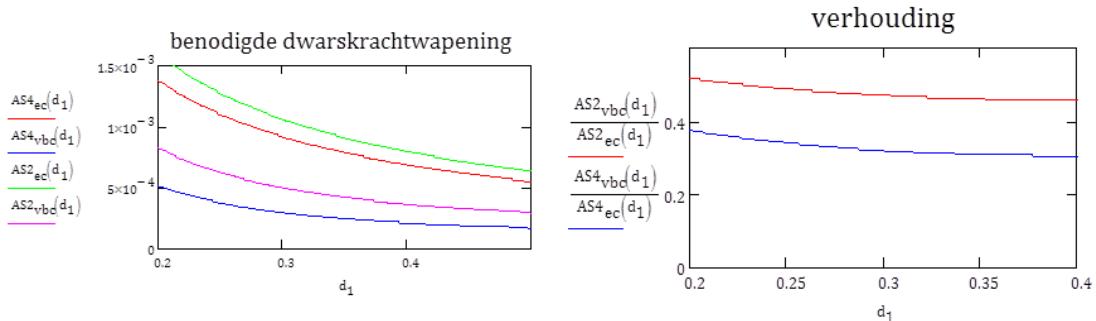
In deze figuren is duidelijk verschil te zien in de benodigde dwarskrachtwapening berekend volgens de twee normen. Het verschil is niet zo groot als een betondrukdiagonaal van  $45^\circ$  is gekozen en betonsterkteklasse C55/67 is toegepast. In wand 2 is de verhouding in benodigde dwarskrachtwapening berekend volgens de twee normen bijna 1. Bij wand 4 is bij dezelfde betondrukdiagonaal en betonsterkteklasse de verhouding 0,8. De benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening is dus volgens NEN 6720 0,8 keer zo klein ten opzichte van de dwarskrachtwapening berekend volgens de Eurocode.

Bij een gekozen betondrukdiagonaal van  $30^\circ$  en dezelfde betonsterkteklasse is de verhouding een stuk groter. Bij wand 2 is de verhouding ongeveer een 0,5 en bij wand 4 is

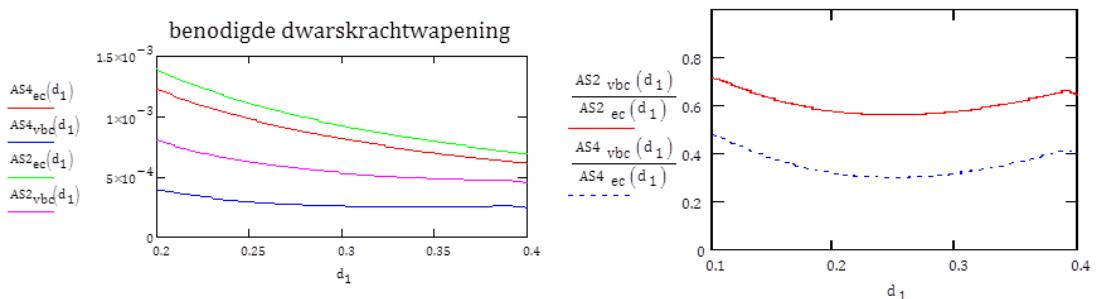
de verhouding kleiner dan 0,4. Bij toepassing van betonsterkteklasse 100/115 is het verschil nog groter. Bij een betondrukdiagonaal van  $30^\circ$  is voor wand 4 de verhouding in benodigde dwarskrachtwapening berekend volgens twee normen kleiner dan 0,1. Omdat het verschil in hoeveelheid dwarskrachtwapening tussen de twee normen groot is, is gekozen om de dwarskrachtwapening uit te rekenen volgens de oude NEN 6720 norm.



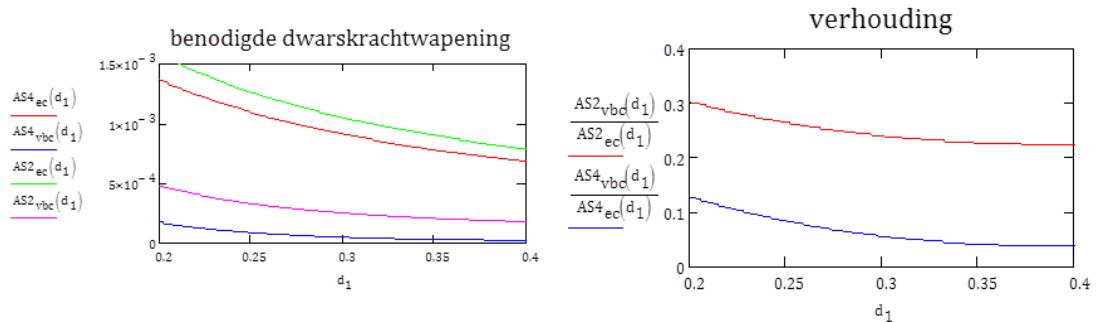
Figuur 11-19 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C55/67 en  $\theta_{vbc} = 45^\circ$



Figuur 11-20 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C55/67 en  $\theta_{vbc}=30^\circ$



Figuur 11-21 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C100/115 en  $\theta_{vbc}=45^\circ$



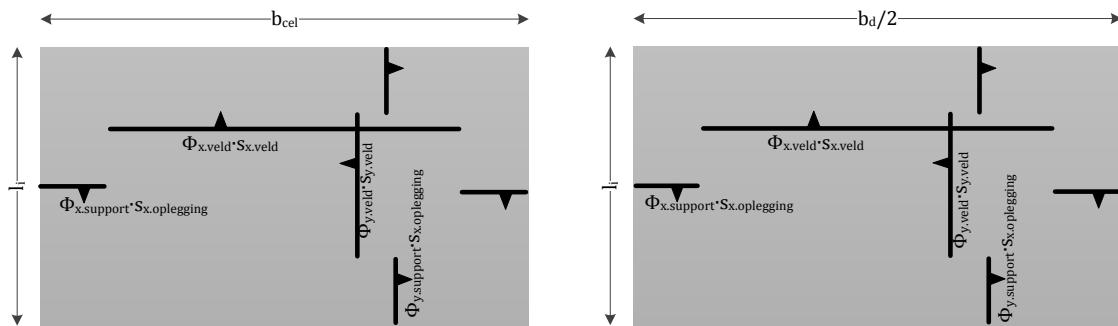
Figuur 11-22 Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening in wanden 2 en 4, bij C100/115 en  $\theta_{vbc}=30^\circ$

#### 11.6.4 Berekening langs- en dwarskrachtwapening

Met toepassing van dwarskrachtwapening is de wanddikte zo dun mogelijk gemaakt om zo het gewicht te minimaliseren zodat de sluisdeur minder breed is en de drijfkist minder hoog. Zie hoofdstuk 6.5.3 hoe groot de wanddikte minimaal moet zijn.

In bijlagen I en K is de benodigde hoeveelheid langswapening en dwarskrachtwapening berekenend voor betonsterkteklasse C55/67 (bijlage I) en C100/115 (bijlage K). In bijlage J en L is in een tabel per wand- en vloerveld de benodigde wapening opgesomd die in het veld en bij de support nodig is.

In het figuur hieronder is de wapeningsverdeling in de wand en vloer gegeven behorende bij waterdruk werkend vanaf één zijde. Als de waterdruk ook vanaf de andere kant op de vloer/wand kan staan, zie hoofdstuk 11.3, wordt in de andere zijde ook wapening gelegd. Met de momenten bij de opleggingen is de wapening bij de opleggingen berekend en met de veldmomenten is de wapening in het veld berekend. De lengte van de wapening bij de oplegging is volgens de betonkalender (38) bij een vierzijdig ingeklemde plaat 0,2 keer de breedte van de kortste zijde van de rechthoek. De lengte van de veldwapening is dus de breedte of hoogte van de plaat min twee keer de wapeningslengte van de oplegging.



Figuur 11-23 Wapeningsverdeling in Wand (links) en vloer (rechts)

#### Langswapening

De langswapening in x en y richting in elke wand en vloer is op de volgende manier bepaald:

$$d_y = h_{wand} - c_{dekking} - \frac{\phi_y}{2}$$

$$d_x = h_{wand} - c_{dekking} - \phi_y - \frac{\phi_x}{2}$$

$$\rho_y = \frac{\alpha f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{1}{2\beta} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4\beta}{\alpha} \times \frac{M_y}{f_{cd} * b * d_y^2}} \right)$$

$$\rho_x = \frac{\alpha f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{1}{2\beta} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4\beta}{\alpha} \times \frac{M_x}{f_{cd} * b * d_x^2}} \right)$$

$$A_y = \rho_y \times d_y \times 1m$$

$$A_x = \rho_x \times d_x \times 1m$$

$$S_y = \frac{\frac{\pi \phi_y^2}{4}}{A_y}$$

$$S_x = \frac{\frac{\pi \phi_x^2}{4}}{A_x}$$

Waarin:  $d_y/d_x$  is de effectieve hoogte van de dwarsdoorsnede

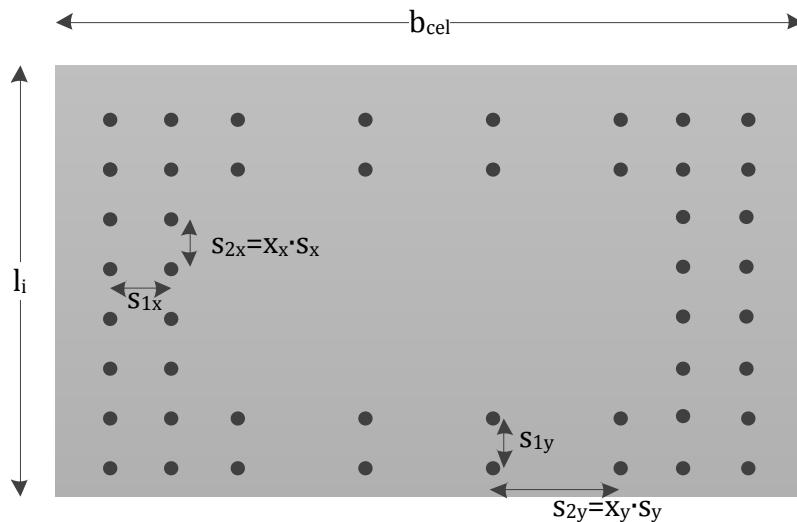
$\rho_y/\rho_x$  is de wapeningsverhouding

$A_y/A_x$  is de oppervlakte van de doorsnede van de wapening per meter

$s_y/s_x$  is de hart op hart afstand wapeningstaven

### Dwarskrachtwapening

Hieronder is schematisch de dwarskrachtwapening weergeven in de wand weergegeven, de afstand en het aan kopdeuvelstaven is niet correct.



Figuur 11-24 Schematische weergave dwarskrachtwapening in de wand

De oppervlakte van de dwarskrachtwapening per  $\text{mm}^2$  is als volgt bepaald:

$$A_{sw.x1} = \frac{V_x - \tau_1 \times d}{(h_{wand} - 2 \times c_{dekking}) \times f_{yd} \times \cot(30^\circ)} \quad [\text{mm}^2/\text{mm}^2]$$

$$A_{sw.y1} = \frac{V_y - \tau_1 \times d}{(h_{wand} - 2 \times c_{dekking}) \times f_{yd} \times \cot(30^\circ)} \quad [\text{mm}^2/\text{mm}^2]$$

De maximale afstand tussen de dwarskrachtwapening volgens de Eurocode (23) is:

$$s_{1max} = 0,75 \times d$$

$$s_{2max} = 1,5 \times d$$

De dwarskrachtwapening moet op het wapeningsnet worden bevestigd. De afstand tussen de wapeningsstaven in dwarsrichting ( $s_2$ ) moet dus gelijk zijn aan  $x_i$  keer de afstand tussen de langswapening, zie Figuur 11-24. De waarde  $x_x$  is bepaald door  $\frac{s_2}{s_x}$  naar beneden af te ronden op een heel getal, en  $x_y$  door  $\frac{s_2}{s_y}$  naar beneden af te ronden op een heel getal.

De minimale oppervlakte van de dwarskrachtwapeningstaaf is als volgt bepaald:

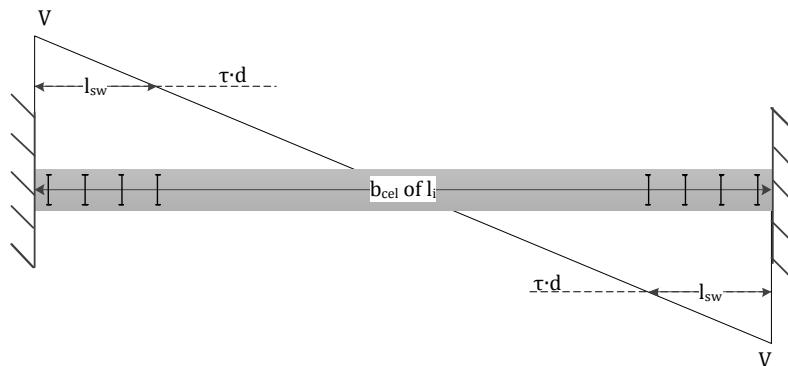
$$A_{sw.x} = (x_x \times s_x) \times s_{1max} A_{sw.x1} \quad [\text{mm}^2]$$

$$A_{sw.y} = (x_y \times s_y) \times s_{1max} A_{sw.y1} \quad [\text{mm}^2]$$

Niet over de volledige breedte en hoogte is dwarskrachtwapening nodig. De afstand ( $l_{sw}$ ) vanaf de oplegging waarover dwarskrachtwapening nodig is:

$$V_x - \frac{V_x}{\frac{1}{2}b_{cel}} l_{sw} = \tau_1 \times d_x$$

$$V_y - \frac{V_y}{\frac{1}{2}l_i} l_{sw} = \tau_1 \times d_y$$



Figuur 11-25 Bepalen afstand waarover dwarskrachtwapening nodig is

### Aanvaarwapening

In bijlage H is de minimale wapening uitgerekend bij invullen van de uiteindelijk dimensies van de sluisdeur uit hoofdstuk 11. Bij toepassing van betonsterkteklasse C55/67 wordt een dubbelwapeningsnet toegepast met  $\phi 32 - 151$ . En bij betonsterkteklasse c100/115 is een dichter wapeningsnet nodig:  $\phi 32 - 137$ .

De aanvaarwapening is niet over de volledige breedte van de sluis toegepast. Alleen in de cellen waar de bulb van het maatgevend schip de sluis kan raken, zie hoofdstuk 10.2.4, wordt de bovengenoemde wapeningshoeveelheid in de achterwand gelegd. Het gebied waar de bulb het schip de sluis kan raken is 13,6m breed. In de middelste 4 cellen (20m) is dus aanvaarwapening toegepast.

### 11.6.5 Voorspanning

In de lengte richting van de sluisdeur is in de vloeren ter hoogte van de drijfkist (vloeren 2, 3, 4 en 5) een hoog wapeningspercentage langswapening nodig. In de tabel hieronder is weer gegeven wat de hart op hart afstand van de langswapening minimaal is bij toepassing van rond 20, zie bijlage I.

Tabel 11-2 Hart op hart afstand wapening

	C55/67	C100/115
<b>Vloer 2</b>	59mm	64mm
<b>Vloer 3</b>	65mm	70mm
<b>Vloer 4</b>	83mm	87mm
<b>Vloer 5</b>	113mm	117mm

Omdat de vloeren van boven en onder belast kunnen worden, zie hoofdstuk 11.3, moet de vloeren aan de boven- en onderzijden gewapend worden. In plaats van de diameter van de

langswapening te vergroten naar 25mm aan beide zijden van de plaat, worden de vloeren 2, 3, 4 en 5 centrisch voorgespannen met een voorspankanaal van 21mm, zie hoofdstuk 6.4.2. Hierdoor wordt de minimale dikte van de plaat nog kleiner.

In de berekening van de voorspanning zijn de volgende eisen gesteld (54):

- *Er zijn geen trekspanningen in het beton toegestaan in de BGT.*
- *In UGT mag de drukspanning in het beton niet groter zijn dan  $0,6 \times f_{ck}$*

De minimale voor spankracht is berekend met formule [ 11-2 ] en maximale voorspankracht met formule [ 11-3 ].

$$\frac{-(1 - loss)P_{m0}}{A_c} + \frac{M_{bgt}}{W} < 0 \frac{N}{mm^2} \quad [ 11-2 ]$$

$$-\frac{P_{m0}}{A_c} - \frac{M_{ugt}}{W} > -0,6 \times f_{ck} \quad [ 11-3 ]$$

Waarin:	$loss$	$= \frac{\sigma_{pm0} + \Delta\sigma_{p.c.s.r}}{\sigma_{pm0}}$ , is het tijdsafhankelijk voorspanverlies;
	$\sigma_{pm0}$	is de spanning in het spanelement onmiddellijk na het spannen of na de overdracht, $0,75 \times f_{pk}$ ;
	$f_{pk}$	is de karakteristieke treksterkte van voorspanstaal;
	$\Delta\sigma_{p.c.s.r}$	is de absolute waarde van de spanningsverandering in de voorspankabel ten gevolge van krimp, kruip en relaxatie, berekent met formule [ 11-4 ] (23).
	$A_c$	is de oppervlakte van de betondoorsnede;
	$P_{m0}$	aanvangskracht aan het spaneinde van de voorspankabel onmiddellijk na het spannen;
	$M_{bgt}$	is het moment in bruikbaarheidsgrenstoestand;
	$M_{ugt}$	is het moment in uiterste grenstoestand;
	$W$	$= \frac{1}{6} b_{cel} \times h_{vloer}^2$ , is het weerstandsmoment van de dwarsdoorsnede.

$$\Delta\sigma_{p.c.s.r} = A_p \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8\Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} (1 + 0,8\varphi(t, t_0))} \quad [ 11-4 ]$$

Waarin:	$\varepsilon_{cs}$	is de absolute waarde van de krimpvervorming;
	$E_p$	is de elasticiteitsmodulus van het voorspanstaal;
	$E_c$	is de elasticiteitsmodulus van het beton;
	$\Delta\sigma_{pr}$	is de absolute waarde van de spanningsverandering in de spanelementen ten gevolge van de relaxatie van het voorspanstaal;
	$\varphi(t, t_0)$	is de kruipfactor op het tijdstip $t$ voor een belasting aangebracht op het tijdstip $t_0$ ;
	$\sigma_{c,QP}$	is de spanning in het beton ter hoogte van de spanelementen;

- $A_p$  is de oppervlakte van de doorsnede van alle voorspanelementen;  
 $A_c$  is de oppervlakte van de betondoorsnede;

In bijlage N is de berekening van de voorspanning bijgevoegd. In de tabel hieronder zijn de resultaten weergegeven.

Tabel 11-3 Benodigde hoeveelheid voorspanning

	$P_{m0}$ (MN)	$A_p$ (mm <sup>2</sup> )	Aantal strands	Aantal voorspankanalen	Afstand tussen voorspankanalen (mm)
Vloer 2	8,5	6111	41	11	636
Vloer 3	7,8	5614	38	10	700
Vloer 4	6,4	4613	31	8	875
Vloer 5	4,9	3498	24	6	1167

#### 11.6.6 Uiteindelijke dikte van de wanden vloeren

De minimale dikte van de wanden is bepaald volgens 6.5. In de wanden is de langswapening benodigd voor aanvaring, zie hoofdstuk 11.6.4, maatgevend voor de minimale dikte. In horizontale richting in de wand ligt aan beide zijde rond 32, en in verticale richting rond 16. De minimale wanddikte is:

$$\begin{aligned} h_{wand,min} &= 2 \times \text{dekking} + 2\Phi_{ver} + 2\Phi_{hor} + x \\ &= 2 \times 50\text{mm} + 2 \times 16\text{mm} + 2 \times 32\text{mm} + 32\text{mm} = 228\text{mm} \sim 230\text{mm} \end{aligned}$$

De vloeren met voorspanning zijn maatgevend voor de minimale vloerdikte. In breedte richting van de vloer ligt een voorspankanaal van 21mm hoog, en in de lengte richting ligt wapening met diameter van 20mm. De minimale vloerdikte is:

$$h_{vloer,min} = 2 \times \text{dekking} + 21\text{mm} + 2 \times 20\text{mm} = 161\text{mm} \sim 170\text{mm}$$

In de Tabel 11-4 zijn de uiteindelijk toegepaste diktes van de wanden en vloeren opgesomd. Hierin is te zien dat niet voor alle vloeren en wanden de minimale dikte is gekozen. Voor de vloeren 2, 3, 4, en 5en wand 1 zijn dikkere afmetingen gekozen. Uit de berekening van de langswapening met toepassing van de minimale dikte voor deze vloeren en wand kwam een wapeningspercentage die te hoog is. Een hoeveelheid wapening die niet in de doorsnede past. Deze vloeren en wand zijn daarom dikker gemaakt.

Tabel 11-4 Uiteindelijke diktes wanden en vloeren

Vloer 1	170mm
Vloer 2	270mm

<b>Vloer 3</b>	270mm
<b>Vloer 4</b>	270mm
<b>Vloer 5</b>	270mm
<b>Vloer 6</b>	170mm
<b>Vloer 7</b>	170mm

<b>Wand 1</b>	385mm
<b>Wand 2</b>	230mm
<b>Wand 3</b>	230mm
<b>Wand 4</b>	230mm
<b>Wand 5</b>	230mm
<b>Wand 6</b>	230mm

## 11.7 Uitvoeringsaspecten

In deze paragraaf zijn kort de uitvoeringsaspecten van de sluisdeur besproken. In hoofdstuk 6.6 is aangenomen dat de sluisdeur in een droogdok wordt gebouwd. Hierdoor kan de sluisdeur in goed gecontroleerde omstandigheden gebouwd worden, wat belangrijk is voor hogesterktebeton, zie hoofdstuk 3.2.

Een belangrijk uitvoeringsaspect is de grote hoeveelheid wapeningsstaal. De vloeren en wanden zijn gedimensioneerd zodat het voldoet aan de minimale afstand tussen de wapeningstaven volgens de Eurocode, hierbij is wel tot de grens gegaan van de minimale dikte van de wanden. In de wanden ligt op sommige plekken wapening met een diameter van 20mm hart op hart 95mm aan beide zijde van de wand, en in de vloeren ligt wapening met een diameter van 20mm hart op hart 100mm. En om de wapeningsstaven te 'verlengen' worden overlappendlassen toegepast, hier liggen de wapeningstaven dus nog dichter op elkaar. Omdat lokaal veel wapening aanwezig is en de wanden en vloeren dun zijn, wordt zelfverdichtende beton toegepast.

Het is onmogelijk om de sluis in één keer te storten. Gezien de afmetingen van sluisdeur dient de sluisdeur in delen gestort te worden in verband met kruip. Er zijn dus verbindingen nodig tussen de verschillende betononderdelen. De verschillende onderdelen worden met doorlopende wapening met elkaar verbonden.

De constructie van de sluisdeur zal in stappen gebeuren waarbij eerst de vloer van de sluisdeur zal worden gestort. Vervolgens zal per verdieplagslaag de wanden en vloer gestort worden in verschillende fases. Door telkens een aantal cellen in de lengterichting en alle cellen in de breedterichting in één keer te storten kan in fases gewerkt worden. Op deze manier kan het bekisting gebruik worden gereduceerd en is er een hoge maat van herhaling. Door de hoge herhaling factor, zal de leercyclus leiden tot minder manuren.

Als de sluisdeur klaar is, zal het droogdok gevuld worden met water en wordt de sluisdeur naar de plaats van bestemming gevaren met sleepboten. Daar zal de sluisdeur geballast worden zodat de sluisdeur in de drempel drijft.

# 12. KOSTEN

In dit hoofdstuk is globaal een kostenraming voor de drijvende betonnen sluisdeur gegeven. De kosten van de sluisdeur zijn geraamd op basis van de stichtingskosten en de onderhoudskosten van de sluisdeur. Dit is een globale kostenraming en bedoeld om een idee te vormen hoe de kosten van een betonnen sluisdeur in verhouding staan met de kosten van een stalen sluisdeur.

In hoofdstuk 12.1 zijn de stichtingskosten gegeven van de stalensluisdeur waarmee de betonnen sluisdeur is vergeleken. De stichtingskosten van de betonnen sluisdeur zijn geschat aan de hand van de materiaalhoeveelheden, het bewegingswerk en het vul- ledigingssysteem in hoofdstuk 12.2. In hoofdstuk 12.3 zijn de onderhoudskosten van de betonnen en stalen sluisdeur geschat. In hoofdstuk 12.4 zijn de kosten van de stalen en betonnen sluisdeur met elkaar vergeleken op basis van stichtingskosten en onderhoudskosten.

Bij het bepalen van de stichtingskosten van de sluisdeur, zijn de volgende onderdelen van de sluisdeur bekeken:

- Sluisdeur;
- Bewegingswerken en elektrische voorzieningen;
- Vul- en ledigingssysteem (riolen, in- en uitstroomopeningen).

Andere onderdelen van de sluis worden niet meegenomen in de kosten raming. Dit om een zo duidelijk mogelijk beeld te krijgen in het verschil in kosten van de stalen sluisdeur en betonnen sluisdeur.

## 12.1 Kosten stalen sluisdeur

De stichtingskosten van de stalen sluisdeur zijn in de planstudie van de Nieuwe Zeesluis IJmuiden (30) geraamd. In Tabel 12-1 staan de geraamde kosten van een stalen roldeur van 70m breed. De bouwkosten van de sluisdeur zijn berekend met een staalprijs van €6,00/kg.

In de planstudie is uitgegaan van schuiven in de stalen sluisdeur als vul- en ledigingssysteem. De kosten van dit vul- en ledigingssysteem is in de kostenraming van de stalen sluisdeur meegenomen in de bouwkosten van de deur, het bewegingswerk en de elektrische voorzieningen. De kosten van de schuiven in de sluisdeur zijn opgesplitst in kosten van de stalen frames en geleidingen, schuiven, hydraulische cilinders en de aggregaten. De stalen frames en geleidingen van de schuiven zijn opgenomen in het gewicht van de sluisdeur en dus in de bouwkosten van de sluisdeur meegenomen. De kosten van de schuiven, hydraulische cilinders en aggregaten zijn in de kosten van het bewegingswerk en de elektrische voorzieningen meegenomen (55).

Tabel 12-1 Kosten stalen sluisdeur (30)

<b>Staalgewicht</b>	2461 ton
<b>Bouwkosten sluisdeur (incl. montage)</b>	€ 14.800.000
<b>Bewegingswerk en elektrische voorzieningen</b>	€ 4.300.000
<b>Totale bouwkosten sluisdeur</b>	€ 19.100.000

## 12.2 Kosten betonnen sluisdeur

Om de kosten van de betonnen sluisdeur te bepalen, is in de volgende paragrafen de benodigde hoeveelheid wapening, voorspanning, beton en bekistingsoppervlak berekend. Dit is gedaan voor de laagste en hoogste betonsterkteklasse van hogesterktebeton, respectievelijk C55/67 en C100/115 (56), om de invloed van de sterkteklasse op de kosten weer te geven.

### 12.2.1 Hoeveelheid wapening en voorspanning

Voor betonsterkteklasse C55/67 en C100/115 is de benodigde hoeveelheid wapening en voorspanning berekend in bijlagen H tot en met L. In Tabel 12-2 en Tabel 12-3 zijn de totaal benodigde hoeveelheid wapening en voorspanning voor de sluisdeur opgesomd. Voor het wapeningsstaal is per toegepaste wapeningsdiameter de benodigde lengte berekend, en daarmee het totaal benodigd gewicht van het wapeningstaal. Voor de dwarskrachtwapening is het totaalgewicht berekend aan de hand van het totaal aantal benodigde kopdeuvelstaven. Voor de voorspanning is het totaal aan benodigde voorspankanalen berekend en hiermee het totaal gewicht.

Tabel 12-2 Benodigde hoeveelheid wapening en voorspanning bij toepassing van sterkteklasse c55/67

#### Wapeningsstaal

diameter:	6mm	8mm	16mm	20mm	32mm
aantal meter:	12.701	47.676	97.507	48.990	15.312

#### Totaal benodigd gewicht wapeningstaal

393 ton

#### Dwarskrachtwapening

aantal:	97.952
mm <sup>3</sup> :	551.318.007
kg	4.328

#### voorspanning

aantal strengen per voorspankanaal:	mm <sup>2</sup>	aantal:	lengte (m):	kg/m
4	450	70	72.00	4,72

#### Totaal gewicht benodigd voorspanstaal

24 ton

Tabel 12-3 Benodigde hoeveelheid wapening en voorspanning bij toepassing van sterkteklasse c100/115

**Wapeningsstaal**

<b>diameter:</b>	<b>6mm</b>	<b>8mm</b>	<b>16mm</b>	<b>20mm</b>	<b>32mm</b>
<b>aantal meter:</b>	11.534	48.838	54.698	48.335	15.992

**Totaal benodigd gewicht wapeningstaal**

397 ton

**Dwarskrachtwapening**

<b>aantal:</b>	46.184
<b>mm<sup>3</sup>:</b>	259.944.369
<b>kg</b>	2.041

**voorspanning**

<b>aantal strengen per voorspankanaal:</b>	<b>mm<sup>2</sup></b>	<b>aantal:</b>	<b>lengte (m):</b>	<b>kg/m</b>
4	450	70	72	4,72

**Totaal gewicht benodigd voorspanstaal**

24 ton

## 12.2.2 Volume beton

Met de uiteindelijke wand en vloer diktes uit hoofdstuk 11.6.6 is de benodigde hoeveelheid beton berekend van de betonnen sluisdeur, met de formules hieronder weergeven. Het betonvolume van de sluisdeur is 3.381m<sup>3</sup>.

$$V_{vloer}(b_d) := h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand1}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand1}) + h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand2}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand2}) + h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand3}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand3}) \dots \\ + h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand4}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand4}) + h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand5}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand5}) + h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand6}) \dots \\ + h_{vloer} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand7}) \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand7})$$

$$V_{wand}(b_d) := c \cdot [h_{wand1} \cdot l_1 \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand1}) + h_{wand2} \cdot l_2 \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand2}) + h_{wand3} \cdot l_3 \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand3}) + h_{wand4} \cdot l_4 \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand4}) \dots \\ + h_{wand5} \cdot l_5 \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand5}) + h_{wand6} \cdot l_6 \cdot (l_{deur} - 2 \cdot h_{wand6})]$$

$$V_{tussenwand}(b_d) := f \left[ h_{wand2} \cdot \left( l_2 - h_{vloer} - \frac{h_{vloer}}{2} \right) \cdot (b_d - ch_{wand2}) \dots \\ + h_{wand3} \cdot \left[ l_3 - \left( \frac{h_{vloer}}{2} - \frac{h_{vloer}}{2} \right) \right] \cdot (b_d - ch_{wand3}) + h_{wand4} \cdot \left[ l_4 - \left( \frac{h_{vloer}}{2} - h_{vloer} \right) \right] \cdot (b_d - ch_{wand4}) \right]$$

$$V_{kopwand}(b_d) := 2 \cdot (b_d \cdot h_{wand2} \cdot l_2 + b_d \cdot h_{wand3} \cdot l_3 + b_d \cdot h_{wand4} \cdot l_4)$$

$$V_{totaal}(b_d) := V_{vloer}(b_d) + V_{wand}(b_d) + V_{tussenwand}(b_d) + V_{kopwand}(b_d)$$

Waarin:  $b_d$  is de breedte van de sluisdeur

$h_{vloer}$  is de dikte van de vloeren

$h_{wand}$  is de dikte van de wanden

$c$  is aantal wanden in lengte richting

$f$  is het aantal tussenwanden

### 12.2.3 Bekisting

Hieronder is het benodigd oppervlak bekisting berekend benodigd voor de 3 wanden in lengte richting, de 15 dwarswanden en de 7 vloeren.

$$6(h_{deur} \times L_{deur}) + 30(l_2 + l_3 + l_4) \times b_d + 7(L_{deur} \times b_d) = 21.546\text{m}^2$$

### 12.2.4 Stichtingskosten betonnen sluisdeur

In overleg met P. Vooijs, calculator bij BAM Civiel, zijn eenheidsprijzen voor de wapening, voorspanning, beton en bekisting opgesteld om de bouwkosten van de betonnen sluisdeur te bepalen, de directe kosten. Ook in overleg met P. Vooijs zijn de indirecte kosten geschat op 25% van de directe kosten. De indirecte kosten bestaan uit het inrichten van het werkterrein, aan- en afvoer materieel, uitvoeringskosten en bouwplaatskosten, algemene kosten (bedrijfsleiding, bedrijfsbureau), kwaliteitsborging; en kosten voor winst en uitvoeringsrisico's.

In Tabel 12-4 en Tabel 12-5 zijn de resultaten weergeven van sluisdeur in betonsterkteklasse C55/67 en C100/115. Wat opvalt, is dat het verschil in kosten tussen twee betonsterkteklasse verwaarloosbaar klein is. Omdat de uitvoeringsaspecten van hogesterktebeton met sterkteklasse C55/67 beter zijn dan van beton met sterkteklasse C100/115, zie hoofdstuk 3.2, is voor het sluisdeur ontwerp in betonsterkteklasse C55/67 gekozen.

Wat verder nog meer opvalt, is het enorme verschil in bouwkosten van de stalen sluisdeur (€14,8 miljoen) en van de betonnen sluisdeur (€4,1 miljoen).

*Tabel 12-4 Stichtingskosten betonnen sluisdeur in sterkteklasse C55/67, zonder bewegingswerk en vul- en ledigingssysteem*

	hoeveelheid	eenheid	prijs /eenh	totaal
<b>wapening</b>	393	ton	€ 900	€ 354.000
<b>Dwarskrachtwapening</b>	4	ton	€ 5.000	€ 22.000
<b>voorspanning</b>	24	ton	€ 4.000	€ 95.000
<b>beton</b>	3381	m <sup>3</sup>	€ 200	€ 676.000
<b>bekisting</b>	21469	m <sup>2</sup>	€ 100	€ 2.147.000
<b>Directe kosten</b>				€ 3.294.000
<b>Indirecte kosten</b>		25%		€ 824.000
<b>Stichtingskosten</b>				€ 4.100.000

Tabel 12-5 Stichtingskosten betonnen sluisdeur in sterkteklasse c100/115, zonder bewegingswerk en vul- en ledigingssysteem

	<b>hoeveelheid</b>	<b>eenheid</b>	<b>prijs /eenh</b>	<b>totaal</b>
<b>wapening</b>	397	ton	€ 900	€ 357.000
<b>Dwarskrachtwapening</b>	2	ton	€ 5.000	€ 10.000
<b>voorspanning</b>	24	ton	€ 4.000	€ 95.000
<b>beton</b>	3381	m <sup>3</sup>	€ 240	€ 811.000
<b>bekisting</b>	20631	m <sup>2</sup>	€ 100	€ 2.063.000
<b>Directe kosten</b>				€ 3.336.000
<b>Indirecte kosten</b>		25%		€ 834.000
<b>Stichtingskosten</b>				€ 4.200.000

## 12.2.5 Kostenraming systeem van vul- ledigsysteem

Zoals in hoofdstuk 6.7 beschreven, worden omloopriolen toegepast voor het vul- en ledigsysteem. Echter, in de planstudie voor de Nieuwe Zeesluis IJmuiden (30) wordt als vul- en ledigsysteem schuiven in deur toegepast en geen omloopriolen, behalve voor de nul-variant (rechte roldeur van 50 meter breed), waar wel omloopriolen worden toegepast. Het toepassen van omloopriolen is duurder dan schuiven in de sluisdeur (14). Om de kosten van de stalen en betonnen sluisdeur goed te kunnen vergelijken moeten de kosten van de omloopriolen meegenomen worden in de stichtingskosten van de betonnen sluisdeur.

De prijs van omloopriolen is niet zo eenvoudig te achterhalen. In de totale kostenraming van een sluis zijn de kosten van omloopriolen in de kosten van de sluishoofden, bewegingswerken en elektrische voorzieningen meegenomen. Er is geen prijs gegeven voor alleen de omloopriolen. Het is dus lastig om het verschil in kosten voor omloopriolen en schuiven in de deur met elkaar te vergelijken.

Uit een vergelijk van de variant met omloopriolen en de variant met schuiven in de sluisdeur uit de planstudie Nieuwe Zeesluis IJmuiden, gaf de variant met omloopriolen een meerprijs van €1,5 miljoen op de totale kosten van de sluis (55). Door het toepassen van omloopriolen in plaats van schuiven in de stalendeur, zijn de stichtingskosten van de sluis dus €1,5 miljoen hoger dan bij toepassing van schuiven in de sluisdeur. Per sluishoofd is dit een meerprijs van €0,75 miljoen. Dit is alleen de meerprijs ten op zichtte van schuiven in de sluisdeur. Dus om de kosten van de omloopriolen mee te nemen in stichtingskosten van de betonnen sluisdeur zijn ook de kosten van de schuiven in de stalen sluisdeur nodig.

Zoals in hoofdstuk 12.1 genoemd zijn de kosten van de schuiven in de stalen sluisdeur meegenomen in de bouwkosten van de sluisdeur, het bewegingswerk en de elektrische voorzieningen. Hoe duur de schuiven in de sluisdeur zijn is niet te bepalen aan de hand van de beschikbare informatie. Om de kosten van de omloopriolen mee te nemen in de kostenraming van de betonnen sluisdeur, zijn de kosten van het bewegingswerk, elektrische voorzieningen en de meerprijs van omloopriolen mee genomen in de stichtingskosten van de betonnen sluisdeur.

## 12.2.6 Kostenraming bewegingswerk en elektrische voorzieningen

Om de kosten te bepalen van het bewegingswerk en elektrische voorzieningen van de betonnen sluisdeur, is gekeken naar de weerstandskracht van de deur tijdens openen en sluiten. Een lagere weerstandskracht leidt vanzelfsprekend tot lagere kosten en vice versa. De krachten die voor bewegingsweerstand zorgen tijdens openen en sluiten van een stalen roldeur zijn:

- *Kracht veroorzaakt door de massatraagheid van de sluisdeur;*
- *Rollende wrijving van de rolwagens op de rails;*
- *Hydrodynamische kracht veroorzaakt door stroming langs en door de sluisdeur;*
- *De slepende wrijving tussen de aanslagen en drempel als gevolg van zijdelingse krachten op de sluisdeur.*

De betonnen sluisdeur is een stuk zwaarder dan een stalen sluisdeur. De stalen sluisdeur weegt 2461 ton en de betonnen sluisdeur weegt  $3.381m^3 \times 2500 \frac{kg}{m^3} = 8453$  ton, dit is ruim 3 keer zo zwaar. Om de betonnen sluisdeur te openen en sluiten moet dus aanzienlijk meer massa versneld worden om de sluisdeur in beweging te brengen. Ook moet een groter oppervlak door het water heen bewogen worden. De dwarsdoorsnede van de betonnen sluisdeur is breder en over een grotere hoogte dicht, omdat het benodigde volume van de drijfkist groter is. De hydrodynamische weerstandskracht tijdens openen en sluiten is dus een stuk hoger. De sluisdeur is drijvend uitgevoerd en heeft dus geen wrijvingsweerstand op de bodem tijdens openen sluiten.

### *Verschil in hydrodynamische weerstandskracht*

De hydrodynamische weerstandskracht combineert het effect van de plaatweerstand en de vormweerstand van de deur, met formule [ 12-1 ] kan deze hydrodynamische kracht berekend worden.

$$F = 0,5 \times \rho \times v_d^2 \times A_b \times C_D \quad [ 12-1 ]$$

Waarin:

$C_D$	is de weerstand coëfficiënt, deze is voor rechthoekige boxen 2,0
$\rho$	= $1022 \text{ kg/m}^3$ , massadichtheid water
$v_d$	is de stroomsnelheid door de deur = $v \times \frac{A_o}{A_d}$
$A_o$	Is oppervlak van de deur onderwater
$A_b$	is het geblokkeerde oppervlak, geschat op: $h_{drijfkist} \times b\_deur$
$A_d$	Doorstroomoppervlak in de deur = $A_o - A_b$
$v$	is de maximale snelheid van de deur. De sluisdeur moet in maximale 7 minuten sluiten (33). Bij een acceleratietijd van de deur van 30sec (57) is de maximale snelheid: $v = \frac{72m}{390sec} = 0,185 \frac{m}{s}$

$$F_{stalendeur} = 0,51022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left[ 0,185 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{(18,5\text{m} + 3,6\text{m}) \cdot 12\text{m}}{(18,5\text{m} + 3,6\text{m}) \cdot 12\text{m} - 7\text{m} \cdot 12\text{m}} \right]^2 \cdot 7\text{m} \cdot 12\text{m} \cdot 2 = 6\text{kN}$$

$$F_{betonnendeur} = 0.5 \cdot 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left[ 0.185 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{(18.5\text{m} + 3.6\text{m}) \cdot 13.5\text{m}}{(18.5\text{m} + 3.6\text{m}) \cdot 13.5\text{m} - 9\text{m} \cdot 13.5\text{m}} \right]^2 \cdot 9\text{m} \cdot 13.5\text{m} \cdot 2 = 12\text{kN}$$

De hydrodynamische weerstand is bij het openen en sluiten van de betonnen sluisdeur twee keer zo groot als bij de stalen sluisdeur.

### *Verschil in massatraagheid van de deur*

De kracht die nodig is om de sluisdeur te versnellen kan worden bepaald met formule [ 12.2 ].

$$F = m \times a \quad [ 12.2 ]$$

Waarin:      m      is de massa van de sluisdeur  
                   a      is de maximale acceleratie van de sluisdeur

De massa van de betonnen sluisdeur is 3,5 keer zo groot als van de stalen sluisdeur. Dus de kracht die nodig is om betonnen sluisdeur te versnellen ook.

### *Verschil totale weerstandskracht*

De rolweerstand zorgt bij een sluisdeur op rolwagens voor een grote weerstandskracht tijdens openen en sluiten. De rolweerstand is 15% van de totale weerstandskracht, en de hydrodynamische weerstand en massatraagheid samen slechts 5%. De voornaamste weerstand zit hem in de slepende wrijving van de deur tegen de aanslagen en drempel als gevolg van zijdelingse krachten op de deur, deze is 80% van de totale weerstandskracht tijdens openen en sluiten (57).

De betonnen sluisdeur heeft geen rolweerstand. Maar de hydrodynamische weerstand en de massatraagheid zijn wel hoger, zie sub paragrafen hierboven. De slepende wrijving als gevolg van de zijdelingse krachten is bij de betonnen sluisdeur ongeveer hetzelfde als bij de stalen sluisdeur.

Door geen rolweerstand en toename van de hydrodynamische weerstand en de massatraagheid zal de totale bewegingsweerstand van de betonnen sluisdeur niet veel verschillen van de bewegingsweerstand van de stalensluisdeur. Voor het bewegingsmechanisme en elektrische voorzieningen van de betonnen sluisdeur wordt daarom dezelfde kosten aangehouden als voor de stalen sluisdeur.

#### **12.2.7 Stichtingskosten betonnen sluisdeur**

In de tabel hieronder zijn de totale stichtingskosten van de stalen en betonnen sluisdeur naast elkaar gezet. Wat opvalt, is dat de stichtingskosten van de betonnen sluisdeur een stuk lager zijn dan van de stalen sluisdeur.

Tabel 12-6 Stichtingskosten stalen en betonnen sluisdeur

	<b>Stalen deur</b>	<b>Betonnen deur</b>
<b>Bouwkosten sluisdeur</b>	€ 14.800.000	€ 4.100.000
<b>Bewegingswerk en elektrische voorzieningen</b>	€ 4.300.000	€ 4.300.000
<b>Meerprijs vul- en ledigingssysteem</b>		€750.000
<b>Stichtingskosten sluisdeur</b>	€ 19.100.000	€ 9.200.000

### 12.3 Onderhoudskosten

In de planstudie Nieuwe Zeesluis IJmuiden is een grove raming gemaakt van de jaarlijkse onderhoudskosten van de verschillende deurtypen die zijn onderzocht. Deurtypen die zijn onderzocht zijn de rechte roldeur, gekromde roldeur, puntdeuren en sectordeuren voor vier verschillende breedtevarianten (50m, 60m, 65m en 70m). Basis van de grove raming is de inschatting van de onderhoudskosten van de rechte roldeur en de puntdeuren, deze zijn min of meer bekend. Op basis van de globale kostenraming van 65m breedtevariant zijn de onderhoudskosten van de andere breedtevarianten bepaald, deze zijn weergegeven in Tabel 12-7 (30).

Tabel 12-7 Onderhoudskosten van de stalen sluisdeur

Breedte	Jaarlijkse onderhoudskosten per sluisdeur
<b>50m</b>	€610.000
<b>60m</b>	€710.000
<b>65m</b>	€750.000
<b>70m</b>	€810.000

De onderhoudskosten aan de stalen sluisdeur zijn op te splitsen in onderhoudskosten aan het bewegingswerk en het conserveren van het staaloppervlak. 40% van de onderhoudskosten zit in het bewegingswerk, de overige 60% in het conserveren van het staal oppervlak (55).

Voor de onderhoudskosten aan de betonnen sluisdeur is aangenomen dat deze alleen is opgebouwd uit de onderhoudskosten aan het bewegingswerk, deze zijn 40% van de totale onderhoudskosten van de stalensluisdeur. Voor het conserveren van het beton oppervlak zijn geen kosten gerekend. Ook is er een verschil in onderhoudskosten aan het vul-ledigingssysteem. De onderhoudskosten bij toepassing van omloopriolen ligt €4,5 miljoen lager over een levensduur van 100 jaar (55).

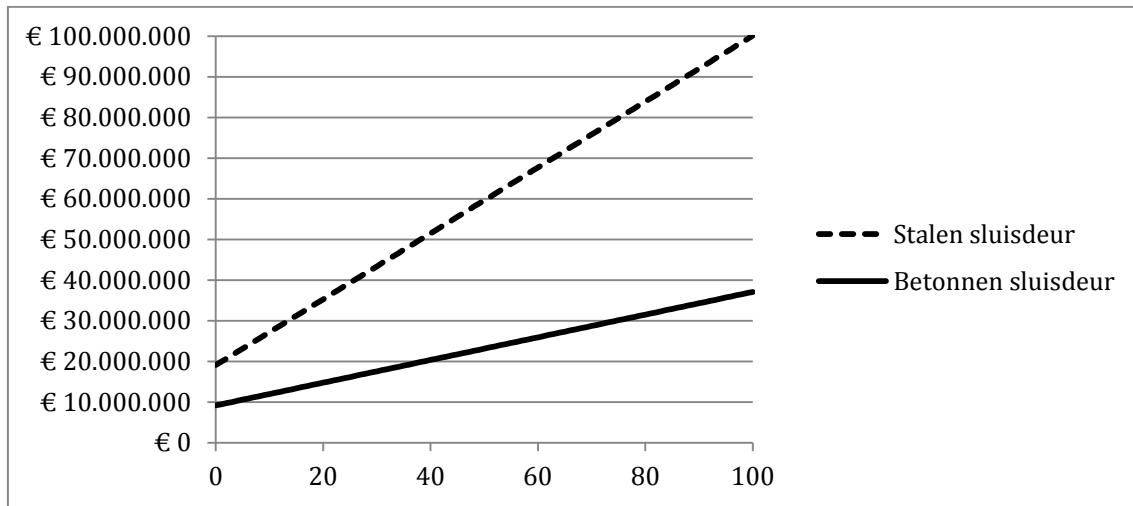
In de tabel hieronder zijn onderhoudskosten weergegeven.

Tabel 12-8 Onderhoudskosten Stalen en betonnen sluisdeur

Jaarlijkse onderhoudskosten	<b>Stalen deur</b>	<b>Betonnen deur</b>
<b>Conserveren van het staaloppervlak</b>	€ 486.000	
<b>Onderhoud bewegingswerk</b>	€324.000	€324.000
<b>Lagere onderhoudskosten omloopriolen</b>		-€45.000
<b>Totale jaarlijkse onderhoudskosten</b>	<b>€810.000</b>	<b>€279.000</b>

## 12.4 Onderlinge Vergelijking op Kosten

Aan de hand van bovenstaande bepaald stichtings- en onderhoudskosten kunnen de kosten over de levensduur van 100 jaar bepaald worden, zie Figuur 12-1. Hierin is geen indexering van de kosten en geen rentelasten meegenomen.



Figuur 12-1 Integrale kosten betonnen sluisdeur en stalen sluisdeur

Uit de integrale kosten blijkt dat de verschillen tussen de stalen en betonnen sluisdeur aanzienlijk zijn over de levensduur. De stichtingskosten van de betonnen sluisdeur zijn een stuk lager en de onderhoudskosten zijn per jaar ook lager. Dus over de levensduur van 100 jaar neemt het verschil tussen de betonnen en stalen sluisdeur fors toe. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat in de kostenraming van de betonnen sluisdeur veel aannames zijn gedaan, zoals voor de kosten van het bewegingswerk en de bouwkosten van de deur.

# 13. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk zijn de conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van het verrichte onderzoek gegeven.

## 13.1 Conclusies

De belangrijkste conclusie van dit onderzoek is dat het technisch haalbaar is een betonnen sluisdeur te maken. Ondanks het hogere gewicht, is een betonnen sluisdeur een goede concurrent van een stalen sluisdeur. De stichtingskosten van de betonnen sluisdeur zijn aanzienlijk lager dan van een stalen sluisdeur en ook de onderhoudskosten van de betonnen sluisdeur zijn fors lager, omdat hogesterktebeton als voordeel heeft dat het weinig onderhoud behoeft. Verder bleek uit de kostenraming van de betonnen sluisdeur dat de betonsterkteklasse weinig invloed heeft op de kosten van de betonnen sluisdeur.

Een nadeel van hogesterktebeton ten opzichte van staal bij het ontwerp van de betonnen sluisdeur is de hoge stijfheid van het materiaal. Door de hoge stijfheid van het materiaal is de sluisdeur minder goed bestand tegen aanvaringen. Uit hoofdstuk 7 blijkt dat het mogelijk is om een aanvaarbelasting op te nemen door plastisch vervormen van de sluisdeur.

In hoofdstuk 8 zijn aan de hand van morfologische box zes varianten bedacht die in hoofdstuk 9 met behulp van een Multi Criteria Analyse zijn beoordeeld. De drijvende sluisdeur bleek qua vorm en geleidning de optimale variant van de zes varianten. Door de drijvende sluisdeur te ballasten, zal de sluisdeur afdichten tegen de bodem en tegen de aanslagen aan de zijkant. De sluisdeur wordt geopend en gesloten met een pennenbaan. Dit type bewegingswerk heeft lage life cycle costs en heeft een goede betrouwbaarheid.

Omdat de sluisdeur drijvend wordt uitgevoerd en omdat een eis is dat de sluisdeur zelfstandig drijvend stabiel is, wordt de sluisdeur drijvend getransporteerd naar de plek van bestemming. In het onderzoek is kort naar de uitvoering van de constructie gekeken. De constructie wordt per verdieping in fasen gebouwd. Of dit de beste bouwwijze is moet uit verder onderzoek blijken.

## 13.2 Aanbevelingen

Uit de conclusies blijkt dat betonnen sluisdeur een haalbaar concept is. Een aanbeveling is dat er verder onderzoek moet worden gedaan naar de sluisdeur in hogesterkebeton. In dit afstudeerwerk is een globaal ontwerp gemaakt van een sluisdeur. Een aantal zaken moeten verder worden onderzocht en gedetailleerd, waaronder de betonconstructie en de bewegingswerken.

Aanbevolen wordt om een 3D eindige elementen analyse van de gehele constructie te doen, om de constructie op alle verschillende belastingscombinaties te toetsen.

Een belangrijke aanbeveling is om de aanvaring van een betonnen sluisdeur in meer detail te onderzoeken. In dit afstudeerwerk is onderzocht of de aanvaarbelasting opgenomen kan worden, waarbij een aantal conservatieve aannames zijn gedaan. Om definitieve uitspraken over de haalbaarheid te doen moet dit nader onderzocht worden. In dit onderzoek is aangenomen dat alle kinetische energie van het schip opgenomen wordt door plastisch vervormen van de sluisdeur. Er kan bijvoorbeeld onderzocht worden of een gedeelte van de energie gedissipeerd kan worden door een “inwendig damping systeem” in de sluisdeur, zodat een groot deel van de kinetische energie is gedissipeerd voordat de totale sluisdeur gaat vervormen.

In het onderzoek zijn een aantal aannames gedaan die nader bekeken moeten worden. Zoals de benodigde metacentrische hoogte van de sluisdeur, is de aangenomen metacentrische hoogte van de sluisdeur in bedrijf niet te hoog? Dit heeft veel invloed op de benodigde breedte van de sluisdeur. Aangenomen is dat de sluisdeur na een aanvaring uitgedreven moet kunnen worden bij minimum kanaalpeil, is dit een aannemelijk aanslag? Is de vrije ruimte onder de drijvende sluisdeur voldoende als de sluisdeur in bedrijf is?

De bouw van de betonnen sluisdeur is in dit afstudeeronderzoek globaal bekeken in hoofdstuk 11.7. Omdat dunne wanden en vloeren worden toegepast met een hoog wapeningspercentage, is het belangrijk dat dit goed onderzocht wordt.

In de kostenraming van de betonnen sluisdeur zitten nog onzekerheden, door verdere detaillering van de constructie en uitwerking van de uitvoering moeten de kosten nauwkeuriger bepaald worden.

# 14. BIBLIOGRAFIE

---

1. **World Association for Waterborne Transport Infrastructures.** *Innovations in navigation lock design, Report n°106.* Brussel : PIANC, 2009.
2. **Arends, G.J.** *Sluizen en gemalen in het Noordzeekanaal.* Utrecht : Matrijs, 2001.
3. **Bonnes, J.M.** *Flexibele zeesluis als nieuwe maritieme toegang kanaal Gent Terneuzen.* Delft : Tudelft, 2005.
4. digisketch. [Online] [Citaat van: 16 10 2012.]  
<http://digisketch.nl/projecten/civiele%20ontwerpen/kattendijksluis/ktsluis%20004.html>.
5. **Moor, A. de en Hattink, C.** *Sluis0124: variant in ZHSB.* Amsterdam : Ingenieursbureau Amsterdam, 2006.
6. **Schuurmans Betonbouw.** <http://www.schuurmansbetonbouw.nl>. [Online] 19 10 2010. [Citaat van: 15 10 2012.]
7. **Cement.** *Sluisdeur in HSB.* Boxtel : Aeneas, 2010.
8. www.haitsma.nl. [Online] [Citaat van: 17 10 2012.]  
[http://www.haitsma.nl/page\\_10530.asp](http://www.haitsma.nl/page_10530.asp).
9. **Sloten, J.J. van.** *Ontwerp van een roteerbare betonnen waterkering.* sl : DHV, 2011.
10. **Kaptijn, N.** *Nieuwe mogelijkheden van HSB en ZHSB voor waterbouwkundige constructies.* sl : Rijkswaterstaat, 2004.
11. **Kaptijn, N. en Pluis, M.P.J.** *Primeur voor de Diefdijk, Eerste betonnen (B85) beweegbare hoogwaterkering.* sl : Cement, 2006. 6.
12. **Tol, H.** *B200-betonnen schuiven voor de Stormvloedkering Oosterschelde.* Delft : TU Delft, 2000.
13. **Molenaar, W.F.** *Hydraulic Structures: Locks.* Delft : Delft University of Technology, 2011.
14. **Beem, R., et al., et al.** *Ontwerp van schutsluizen (Deel 1 & 2).* Utrecht : sn, 2000.
15. **Rijkswaterstaat.** [www.rijkswaterstaat.nl](http://www.rijkswaterstaat.nl). [Online] 20 Juli 2012.  
<http://www.rijkswaterstaat.nl/>.
16. **Doeksen, J.W.** *Gate Design For Large, High Head Locks, "The development of an innovative lock gate".* Delft/Amersfoort : sn, 2012.
17. **Breugel, K. en Braam, C.R.** Concrete science and technology; lecture 11-10-2011: High Strength Concrete. Delft : sn, 2011.

18. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Ontwerp en berekening van betonconstructies - Betonnen bruggen - Regels voor ontwerp, berekening en detaillering NEN 1992-1+ C1.* Delft : sn, 2011.
19. **Bruijn, H.J. de.** *Hoofdstudie voorgespannen spoorbrug in hogere sterkte beton.* sl : Technische Universiteit Delft & Holland Railconsult, 2005.
20. *Hoge sterkte beton; technologie, eigenschappen en rekenwaarden.* Gouda : Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, 1991.
21. **Caldarone, M.A.** *High-strength concrete.* 2009.
22. **Bouwdienst rijkswaterstaat.** "Hogere Sterkte Beton, Ervaringen met sterkteklaasse B65 en hoger". *Rapport BSW 99-20.* Utrecht : sn, 1999.
23. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Ontwerp en berekening van betonconstructies - Algemene regels en regels voor gebouwen NEN 1992-1-1+ C2.* Delft : sn, 2011.
24. **Cement en Beton Centrum.** [www.cementenbeton.nl.](http://www.cementenbeton.nl) [Online] 20 7 2012. [Citaat van: 20 juli 2012.] <http://www.cementenbeton.nl/innovaties/472-hogesterktebeton>.
25. **Reinhardt, H.W.** *Beton als constructiemateriaal: eigenschappen en duurzaamheid.* Delft : sn, 1985.
26. **IV Infra/DHV B.V.** *Planstudie Nieuwe Zeesluis IJmuiden fase 1: Eindrapport Nieuwe Zeesluis IJmuiden.* sl : Rijkswaterstaat Noord Holland, 2012.
27. **Rijkswaterstaat Noord Holland.** *Planstudie Nieuwe Zeesluis IJmuiden - fase 1: Proof of Concept.* sl : Rijkswaterstaat Noord Holland, 2012.
28. **Henrotte, Johan.** *Zeetoegang IJmond, update hydraulische ontwerprandvoorwaarden ter plaatse van de Nieuwe Zeesluis te IJmuiden.* sl : Rijkswaterstaat Noord Holland, 2012.
29. [www.ruimtelijkeplannen.nl.](http://www.ruimtelijkeplannen.nl) [Online] [Citaat van: 13 09 2012.] <http://www.ruimtelijkeplannen.nl/web-roo/?planidn=NL.1MRO.0453.BP0100ZEEZICHT1-V003>.
30. **Iv Infra/DHV B.V.** *Planstudie Nieuwe Zeesluis fase 1: Subvariantennota.* sl : Rijkswaterstaat Noord-Holland, 2011.
31. **Brasser, E.A.** *Planstudie Nieuwe Zeesluis fase 1: Ontwerpnota Ontwerp dossier Variant 1.* sl : Rijkswaterstaat Noord Holland, 2012.
32. **TNO.** [dinoloket.nl.](http://www.dinoloket.nl) [Online] [Citaat van: 13 09 2012.] <http://www.dinoloket.nl/dinoLks/map/map.jsp?setLayerId=M07M0045>.
33. **Visser, M. en Vreman, C.** *Klanten Eisen Specificatie zeetoegang IJmond.* sl : Rijkswaterstaat Noord Holland, 2011.
34. **Veen, M.M. van der.** *Planstudie Nieuwe Zeesluis fase 1: Uitgangspunten Civiele Constructies.* sl : Rijkswaterstaat Noord-Holland, 2012.

35. **Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.** *Leidraad Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies.* Delft : sn, 1997.
36. **Vrijling, J.K., et al., et al.** *Manual Hydraulic Structures CT3330.* sl : TU Delft, 2011.
37. **Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.** *Leidraad Kunstwerken.* Delft : sn, 2003.
38. **Eibl, J.** *BetonKalender.* 1999.
39. **Ostayen, R.A.J.** *The Hydro-Support: An Elasto-Hydrostatic Thrust Bearing with Mixed Lubrication.* Delft : sn, 2002.
40. **Ory, T.** "Van rijden naar glijden", *Haalbaarheidsstudie naar het toepassen van Hydrogeleiding in de Kallosluis.* Delft : sn, 2003.
41. **Dywidag.** *DYWIDAG Bonded Post-Tensioning Systems using Strands.* 2006.
42. **Cement.** *Kopdeuvels als dwarskrachtwapening.* 2011.
43. **Ballast Nedam.** Ballast Nedam Offshore. v. [Online] [http://www.bnoffshore.com/page\\_9945.asp](http://www.bnoffshore.com/page_9945.asp).
44. **Vrijburcht, A.** *Aanvaarrisico's voor sluisdeuren.* Delft : Waterloopkundig Laboratorium, 1992. Q 1399.
45. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Belastingen op constructies, Deel 1-7: Algemene belastingen - Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen NEN 1991-1-7+C1.* Delft : sn, 2011.
46. **Jansen, P. Jr.** 25 februari 2013.
47. **Bischoff, P.H. en Perry, S.H.** *Compressive behaviour of concrete at high strain rates.* 1991.
48. **Bruggeling, A.S.G. en Bruijn, W.A. de.** *Theorie en praktijk van het gewapend beton; Deel 2: Buiging, afschuiving en wringing.* Delft : TU Delft, 1985.
49. **Vrouwenvelder, A.C.W.M. en Witteveen, J.** *The plastic behaviour and the calculation of plates subjected to bending.* Delft : Technical University Delft, 2003.
50. **CROW.** *Handboek specificeren.* Ede : CROW, 2011.
51. **PIANC.** *Design of movable weirs and storm surge barriers.* Brussel : PIANC General Secretariat, 2006.
52. admin-topix.blogspot.nl. [Online] April 2012. <http://admin-topix.blogspot.nl/2012/04/worlds-biggest-ships.html>.
53. **Betonvereniging.** *GTB 2010 - Grafieken en tabellen voor beton.* Gouda : sn, 2010.
54. **Walraven, J.C. en Braam, C.R.** *Prestressed Concrete (Textbook of CT4160).* Delft : sn, 2011.

55. **Wiel, W.D. van der.** persoonlijke mededeling. 2013.
56. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Beton - Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. NEN-EN 206-1;* . Delft : sn, 2005.
57. **Kortenhof, Britte van.** *Ontwerp gekromde roldeur, Nieuwe Zeesluis IJmuiden.* 2012.
58. **Elling, Rien, et al., et al.** *Rapportagetechniek.* sl : Wolters-Noordhoff, 2005.
59. **Koninklijke BAM Groep.** *SE-wijzer.* 2008.
60. *Aanbeveling 97, Hogesterketebeton.* Gouda : Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, 2004.
61. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Voorschriften beton, Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995) TGB 1990 NEN 6720.* Delft : sn, 1995.
62. —. *Voorschriften beton, Bruggen, Constructieve eisen en rekenmethoden, NEN 6723.* Delft : sn, 2009.
63. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Belastingen op constructies, Deel 1-5: Algemene belastingen - Thermische belasting NEN 1991-1-5+C1.* Delft : sn, 2011.
64. **Berkel, R. van. ing.** Gouda, 23 10 2012.
65. **Rijkswaterstaat.** www.rijkswaterstaat.nl. [Online] 20 Juli 2012.  
[http://www.rijkswaterstaat.nl/water/plannen\\_en\\_projecten/vaarwegen/noordzeekanaal/zeetoegang\\_ijmond/](http://www.rijkswaterstaat.nl/water/plannen_en_projecten/vaarwegen/noordzeekanaal/zeetoegang_ijmond/).
66. **Bruijn, H.J. de.** *Literatuur- en voorstudie: Hoge sterke beton nader belicht.* Utrecht : sn, 2005.
67. **Rigo, P.H.** *Self propelled floating lock goate.* Liege : ANAST, University of Liege, 2008.
68. **Nederlands Normalisatie Instituut.** *Het vervaardigen van betonconstructies, NEN-EN 13670.* Delft : sn, 2009.
69. **DSI.** www.dywidag-systems.com. [Online] Augustus 2006. [http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI-DYWIDAG\\_Bonded\\_PT\\_using\\_Strands\\_eu\\_02.pdf](http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI-DYWIDAG_Bonded_PT_using_Strands_eu_02.pdf).
70. Wikipedia. [Online] 9 Mei 2007. [Citaat van: 11 Februari 2013.]  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bateaux\\_comparaison2.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bateaux_comparaison2.svg).
71. **Projectgroep KGT2008.** *Kostenstudie KGT2008 Kostenraming van het nulalternatief en de projectalternatieven.* 2008.

## A. BEREKENING VAN DE WATERDRUK TEN GEVOLGE VAN GOLVEN

---

$$\lambda_1 := 1 \quad h := 18 \cdot m + 7.63 \cdot m = 25.63 \text{ m} \quad d := h \quad h_b := h \quad h' := h$$

$$\lambda_2 := 1 \quad H_S := 2.24 \cdot m \quad T_S := 5 \cdot s \quad g := 9.81 \cdot \frac{m}{s^2}$$

$$\lambda_3 := 1 \quad H_D := 2.2 \cdot H_S = 4.928 \text{ m} \quad \rho := 1022 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$\beta := 0$  -> golven vallen haaks in.

$$\eta := 0.75 \cdot (1 + \cos(\beta)) \cdot \lambda_1 \cdot H_D = 7.392 \text{ m}$$

$L_{D1} := 40 \cdot m$  -> schatting

$$L_D := \text{root} \left( L_{D1} - \frac{g \cdot T_S^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh \left( h \cdot \frac{2 \cdot \pi}{L_{D1}} \right), L_{D1} \right) = 38.999 \text{ m}$$

$$\alpha_1 := 0.6 + 0.5 \cdot \frac{\left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{h}{L_D} \right)}{\sinh \left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{h}{L_D} \right)} = 0.602$$

$$\alpha_2 := \min \left[ \left( 1 - \frac{d}{h_b} \right) \cdot \frac{\left( \frac{H_D}{d} \right)^2}{3}, 2 \cdot \frac{d}{H_D} \right] = 0$$

$$\alpha_3 := 1 - \frac{h'}{h} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\cosh \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{L_D} \right)} \right) = 0.032$$

$$p_1 := 0.5 \cdot (1 + \cos(\beta)) \cdot \left[ \lambda_1 \cdot \alpha_1 + \lambda_2 \cdot \alpha_2 \cdot (\cos(\beta))^2 \right] \cdot \rho \cdot g \cdot H_D = 29.74 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

$$p_3 := \alpha_3 \cdot p_1 = 0.957 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

## B. AFSTAND VLOEREN, 6 VLOEREN

---

# Berekening dimensies

## Belasting

$$\gamma := 1.1 \quad \text{Belastingfactor waterdruk}$$

$$h_{deur} := 25.8 \text{m} \quad \text{Hoogte sluisdeur}$$

$$b_{cel} := 5 \text{m} \quad \text{Breedte drijfkistcompartment}$$

$$q_{\max} := \left[ \gamma \cdot (18.8 + 7.63) \text{m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 1 \text{m} = 291.48 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Waterdruk bij de maximale waterstand

$$q_{\min} := \gamma \cdot 0.63 \text{m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{m} = 6.95 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Waterdruk aan de bovenkant van de deur bij de maximale waterstand

$$dq := \frac{(q_{\max} - q_{\min})}{h_{deur}}$$

$$q_{kanaal} := \left[ \gamma \cdot (18.8 - 0.88) \text{m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 1 \text{m} = 197.63 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Waterdruk bij de minimale waterstand aan kanaalzijde

$$\gamma_{golven} := 1.25 \quad \gamma_{wind} := 1.5$$

$$q_{wind} := \gamma_{wind} \cdot 1.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1 \text{m} = 2.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{golven,max} := \gamma_{golven} \cdot 29.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{golven,min} := \gamma_{golven} \cdot 0.96 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad dq_{golven} := \frac{q_{golven,max} - q_{golven,min}}{h_{deur}}$$

### Berekenen belasting ter hoogte van de vloeren:

$$q_1 := q_{\max} + q_{golven,min}$$

$$q_2(l_1) := q_{\max} - l_1 \cdot dq + q_{golven,min} + l_1 \cdot dq_{golven}$$

$$q_3(l_1, l_2) := q_{\max} - (l_1 + l_2) \cdot dq + q_{golven,min} + (l_1 + l_2) \cdot dq_{golven}$$

$$q_4(l_1, l_2, l_3) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3) \cdot dq + q_{golven,min} + (l_1 + l_2 + l_3) \cdot dq_{golven}$$

$$q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \cdot dq + q_{golven,min} + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \cdot dq_{golven} + q_{wind}$$

$$q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \cdot dq + q_{golven,min} + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \cdot dq_{golven} + q_{wind}$$

## Momenten

$\text{coefM}_{\text{vol}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45
1	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.7	18	18.3	18.8	19.4	18.2	17.1	16.3	15.5	14.9	14.5	14	13.7	13.4
2	12	12.3	12.6	13	13.5	14.2	14.9	15.9	16.9	18.1	19.4	18.8	18.4	18.1	17.9	17.7	17.6	17.5	17.5	...

$\text{coefM}_{\text{driehoek}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
1	33.8	33.8	34.2	34.9	35.9	36.9	33.1	29.8	27.5	25.6	23.9	23.16	22.42	21.68	20.94	20.2
2	20.2	19.1	22.1	24	26.5	30	27.5	26.1	25	24.1	23.8	23.42	23.04	22.66	22.28	21.9

Nu is voor elke laag de coëfficiënten bepaald voor het moment aan de zijkant en aan de onderkant van de plaat voor de gelijkmatige belasting en de driehoeksbelasting. Eerst is de verhouding  $ly/lx$  bepaald, deze is afhankelijk van de afstand tussen de vloeren.

$$lylx1(l_1) := \frac{l_1}{b_{cel}}$$

Met behulp van lineaire interpolatie zijn de coëfficiënten bepaald:

$$\text{Floor11}(l_1) := \text{Floor}(lylx1(l_1), 0.05) \quad \text{Floor12}(l_1) := \text{Floor}(lylx1(l_1), 0.1)$$

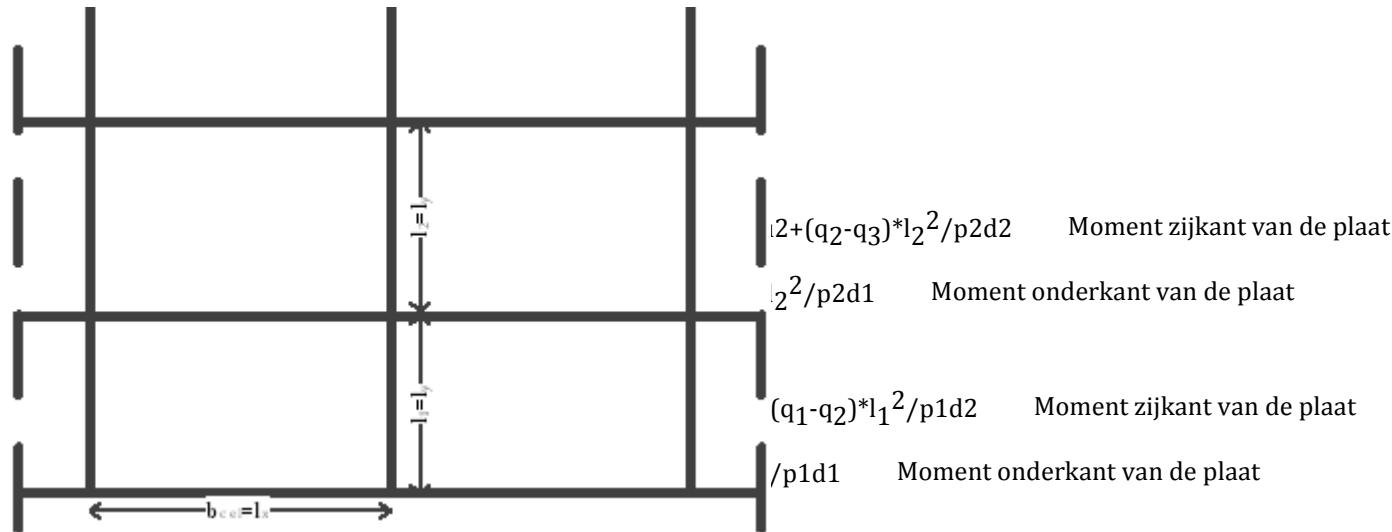
$$\text{Ceil11}(l_1) := \text{Ceil}(lylx1(l_1), 0.05) \quad \text{Ceil12}(l_1) := \text{Ceil}(lylx1(l_1), 0.1)$$

$$p1u1(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Ceil11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 1)}{0.05} \cdot (lylx1(l_1) - \text{Floor11}(l_1))$$

$$p1d1(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor12}(l_1), \text{coefM\_driehoek}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor12}(l_1), \text{coefM\_driehoek}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil12}(l_1), \text{coefM\_driehoek}, 1)}{0.1} \cdot (\text{lylx1}(l_1) - \text{Floor12}(l_1))$$

$$p1u2(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM\_vol}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM\_vol}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil11}(l_1), \text{coefM\_vol}, 2)}{0.05} \cdot (\text{lylx1}(l_1) - \text{Floor11}(l_1))$$

$$p1d2(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor12}(l_1), \text{coefM\_driehoek}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor12}(l_1), \text{coefM\_driehoek}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil12}(l_1), \text{coefM\_driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (\text{lylx1}(l_1) - \text{Floor12}(l_1))$$



$$\text{lylx2}(l_2) := \frac{l_2}{b_{cel}}$$

$$\text{Floor21}(l_2) := \text{Floor}(\text{lylx2}(l_2), 0.05) \quad \text{Floor22}(l_2) := \text{Floor}(\text{lylx2}(l_2), 0.1)$$

$$\text{Ceil21}(l_2) := \text{Ceil}(\text{lylx2}(l_2), 0.05) \quad \text{Ceil22}(l_2) := \text{Ceil}(\text{lylx2}(l_2), 0.1)$$

$$p2u1(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefM\_vol}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefM\_vol}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil21}(l_2), \text{coefM\_vol}, 1)}{0.05} \cdot (\text{lylx2}(l_2) - \text{Floor21}(l_2))$$

$$p2d1(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1)}{0.1} \cdot (lylx2(l_2) - \text{Floor22}(l_2))$$

$$p2u2(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefM}_\text{vol}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefM}_\text{vol}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil21}(l_2), \text{coefM}_\text{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx2(l_2) - \text{Floor21}(l_2))$$

$$p2d2(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (lylx2(l_2) - \text{Floor22}(l_2))$$

$$lylx3(l_3) := \frac{l_3}{b_{cel}}$$

$$\text{Floor31}(l_3) := \text{Floor}(lylx3(l_3), 0.05) \quad \text{Floor32}(l_3) := \text{Floor}(lylx3(l_3), 0.1)$$

$$\text{Ceil31}(l_3) := \text{Ceil}(lylx3(l_3), 0.05) \quad \text{Ceil32}(l_3) := \text{Ceil}(lylx3(l_3), 0.1)$$

$$p3u1(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 1)}{0.05} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor31}(l_3))$$

$$p3d1(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1)}{0.1} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor32}(l_3))$$

$$p3u2(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor31}(l_3))$$

$$p3d2(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor32}(l_3))$$

$$lylx4(l_4) := \frac{l_4}{b_{cel}}$$

$$\text{Floor41}(l_4) := \text{Floor}(lylx4(l_4), 0.05) \quad \text{Floor42}(l_4) := \text{Floor}(lylx4(l_4), 0.1)$$

$$\text{Ceil41}(l_4) := \text{Ceil}(lylx4(l_4), 0.05) \quad \text{Ceil42}(l_4) := \text{Ceil}(lylx4(l_4), 0.1)$$

$$p4u1(l_4) := hlookup(Floor41(l_4), coefM_{vol}, 1) - \frac{hlookup(Floor41(l_4), coefM_{vol}, 1) - hlookup(Ceil41(l_4), coefM_{vol}, 1)}{0.05} \cdot (lylx4(l_4) - Floor41(l_4))$$

$$p4d1(l_4) := hlookup(Floor42(l_4), coefM_{driehoek}, 1) - \frac{hlookup(Floor42(l_4), coefM_{driehoek}, 1) - hlookup(Ceil42(l_4), coefM_{driehoek}, 1)}{0.1} \cdot (lylx4(l_4) - Floor42(l_4))$$

$$p4u2(l_4) := hlookup(Floor41(l_4), coefM_{vol}, 2) - \frac{hlookup(Floor41(l_4), coefM_{vol}, 2) - hlookup(Ceil41(l_4), coefM_{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx4(l_4) - Floor41(l_4))$$

$$p4d2(l_4) := hlookup(Floor42(l_4), coefM_{driehoek}, 2) - \frac{hlookup(Floor42(l_4), coefM_{driehoek}, 2) - hlookup(Ceil42(l_4), coefM_{driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (lylx4(l_4) - Floor42(l_4))$$

Met de coëfficiënten voor elke laag kan nu het moment berekent worden. Als de verhouding ly/lx groter is dan 1, dan is de  $b_{cel}$  de kleinste overspanning van de plaat en moet gebruikt worden in de berekening van het moment. Als de coëfficiënt kleiner is dan 1, is de hoogte van de plaat maatgevend. Dit is in de berekening van het moment meegenomen door een 'if' functie.

$$M1_{\max}(l_1) := \frac{1}{12} \cdot (q_1 - q_{kanaal}) \cdot l_1 \cdot l_1 \quad \text{Maximaal moment in onderste plaat}$$

$$M_{21}(l_1, l_2) := \begin{cases} \frac{1}{p2u1(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot b_{cel}^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p2d1(l_2)} & \text{if } lylx2(l_2) > 1 \\ \frac{1}{p2u1(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot l_2^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{l_2^2}{p2d1(l_2)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{22}(l_1, l_2) := \begin{cases} \frac{1}{p2u2(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot b_{cel}^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p2d2(l_2)} & \text{if } lylx2(l_2) > 1 \\ \frac{1}{p2u2(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot l_2^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{l_2^2}{p2d2(l_2)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M2_{\max}(l_1, l_2) := \max(M_{21}(l_1, l_2), M_{22}(l_1, l_2))$$

$$M_{31}(l_1, l_2, l_3) := \begin{cases} \frac{1}{p3u1(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot b_{cel}^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p3d1(l_3)} & \text{if } lylx3(l_3) > 1 \\ \frac{1}{p3u1(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot l_3^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{l_3^2}{p3d1(l_3)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

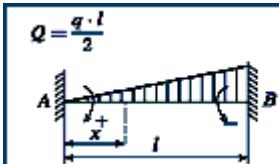
$$M_{32}(l_1, l_2, l_3) := \begin{cases} \frac{1}{p3u2(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot b_{cel}^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p3d2(l_3)} & \text{if } lylx3(l_3) > 1 \\ \frac{1}{p3u2(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot l_3^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{l_3^2}{p3d2(l_3)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{3\max}(l_1, l_2, l_3) := \max(M_{31}(l_1, l_2, l_3), M_{32}(l_1, l_2, l_3))$$

$$M_{41}(l_1, l_2, l_3, l_4) := \begin{cases} \frac{1}{p4u1(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot b_{cel}^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p4d1(l_4)} & \text{if } lylx4(l_4) > 1 \\ \left[ \frac{1}{p4u1(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot l_4^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{l_4^2}{p4d1(l_4)} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{42}(l_1, l_2, l_3, l_4) := \begin{cases} \frac{1}{p4u2(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot b_{cel}^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p4d2(l_4)} & \text{if } lylx4(l_4) > 1 \\ \left[ \frac{1}{p4u2(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot l_4^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{l_4^2}{p4d2(l_4)} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{4\max}(l_1, l_2, l_3, l_4) := \max(M_{41}(l_1, l_2, l_3, l_4), M_{42}(l_1, l_2, l_3, l_4))$$



$$R_A = \frac{3}{10}Q$$

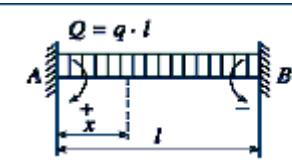
$$R_B = \frac{7}{10}Q$$

$$D = Q \left( \frac{3}{10} - \frac{x^2}{l^2} \right)$$

$$M = Q \left( \frac{3x}{10} - \frac{l}{15} - \frac{x^3}{3l^2} \right)$$

$$M_{max+} = \frac{+Q \cdot l}{15} \text{ in } A$$

$$M_{max-} = \frac{-Q \cdot l}{10} \text{ in } B$$



$$R_A = \frac{Q}{2}$$

$$R_B = \frac{Q}{2}$$

$$D = \frac{Q}{2} \left( 1 - \frac{2x}{l} \right)$$

$$M = \frac{Q}{2} \left( x - \frac{x^2}{l} - \frac{l}{6} \right)$$

$$M_{max+} = \frac{Q \cdot l}{24} \text{ bij } x = \frac{l}{2}$$

$$M_{max-} = \frac{Q \cdot l}{12} \text{ in } A \text{ en } B$$

$$M5_{max}(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) := \frac{1}{12} \cdot q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) \cdot l_5^2 + \frac{1}{10} \cdot (q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) - q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)) \cdot \frac{l_5}{2} \cdot l_5$$

## Bepalen afstanden tussen vloeren:

Vervolgens zijn de afstanden tussen de eerste vier vloeren bepaald. Door aan te nemen dat het maximum moment in iedere wand even groot is, en dat de vijfde vloer op 16,3 meter van de onderkant ligt. Als de sluisdeur uitgevaren wordt, ligt deze vloer op minimum schutpeil.  
l<sub>1</sub> is de hoogte van NAP -18.5m tot minimum schutpeil min de hoogte van de drijfkist.

$$l_1 := 16.3m - 9.m = 7.3m \quad l_2 := 3m \quad l_3 := 4m \quad l_4 := 5m \quad \text{schatting}$$

drie vergelijkingen om de drie onbekenden, l<sub>2</sub> t/m l<sub>4</sub> op te lossen:

Giver

$$M3_{max}(l_1, l_2, l_3) = M2_{max}(l_1, l_2)$$

$$M3_{max}(l_1, l_2, l_3) = M4_{max}(l_1, l_2, l_3, l_4)$$

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = 16.3m$$

Oplossen van de vergelijkingen geeft:

$$\begin{pmatrix} l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{pmatrix} := \text{Find}(l_2, l_3, l_4) = \begin{pmatrix} 2.74 \\ 2.96 \\ 3.3 \end{pmatrix} m$$

$$l_5 := 25.8m - l_2 - l_3 - l_4 - l_1 = 9.5m$$

Waardes afronden op 1cm:

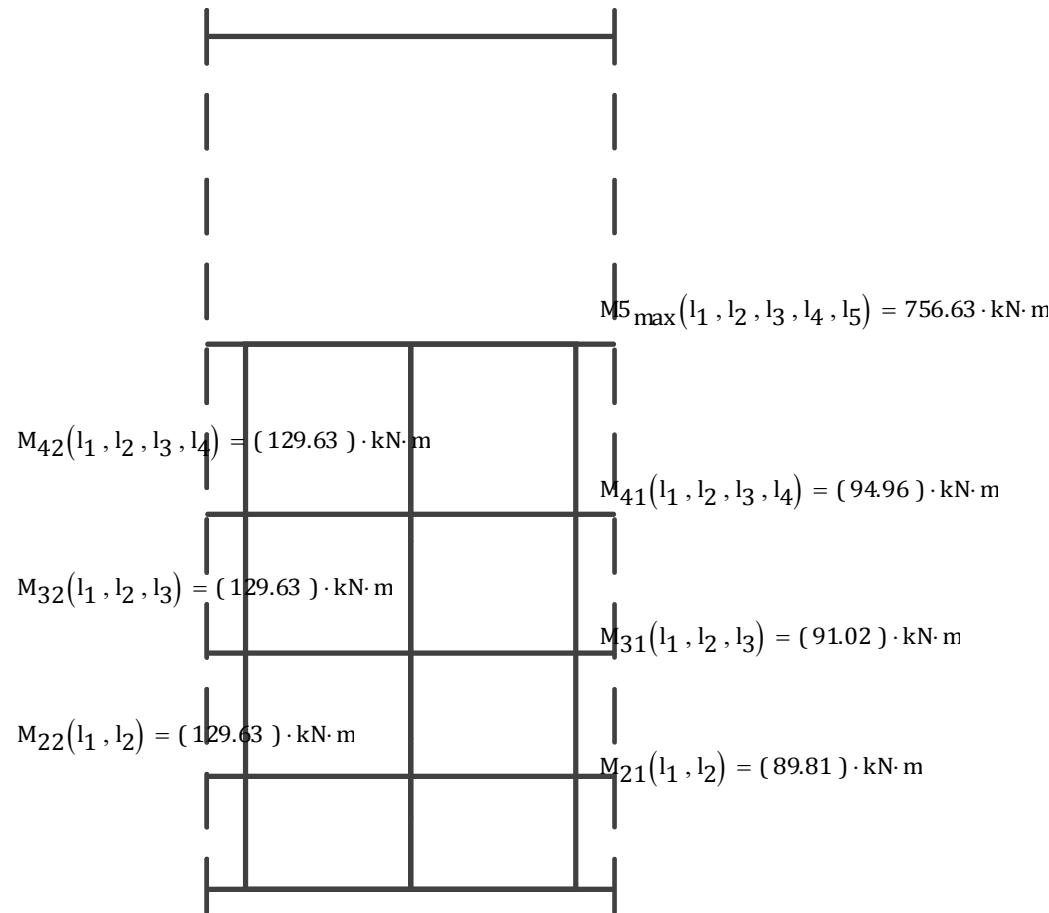
$$l_1 = 7.3m \quad l_2 = 2.74m \quad l_3 = 2.96m \quad l_4 = 3.3m \quad l_5 = 9.5m$$

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 25.8 \text{ m}$$

De totale afstand is gelijk aan de hoogte van de sluisdeur, dus dat klopt.

$$M_{1\max}(l_1) = 422.11 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Hieronder is in het aanzicht van de deur de verschillende momenten weergeven.



## C. AFSTAND VLOEREN, 7 VLOEREN

---

# Berekening dimensies

## Belasting

$$\gamma := 1.1 \quad \text{Belastingfactor waterdruk}$$

$$h_{deur} := 25.8 \text{m} \quad \text{Hoogte sluisdeur}$$

$$b_{cel} := 5 \text{m} \quad \text{Breedte drijfkistcompartment}$$

$$q_{max} := \left[ \gamma \cdot (18.8 + 7.63) \text{m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 1\text{m} = 291.48 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Waterdruk bij de maximale waterstand aan zeezijde

$$q_{kanaal} := \left[ \gamma \cdot (18.8 - 0.88) \text{m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 1\text{m} = 197.63 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Waterdruk bij de minimale waterstand aan kanaalzijde

$$q_{min} := \gamma \cdot 0.63 \text{m} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1\text{m} = 6.95 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Waterdruk aan de bovenkant van de deur bij de maximale waterstand

$$dq := \frac{(q_{max} - q_{min})}{h_{deur}}$$

$$\gamma_{golven} := 1.25 \quad \gamma_{wind} := 1.5$$

$$q_{wind} := \gamma_{wind} \cdot 1.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1\text{m} = 2.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{golven,max} := \gamma_{golven} \cdot 29.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{golven,min} := \gamma_{golven} \cdot 0.96 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad dq_{golven} := \frac{q_{golven,max} - q_{golven,min}}{h_{deur}}$$

**Berekenen belasting ter hoogte van de vloeren:**

$$q_1 := q_{\max} + q_{golven\min}$$

$$q_2(l_1) := q_{\max} - l_1 \cdot dq + q_{golven\min} + l_1 \cdot dq_{golven}$$

$$q_3(l_1, l_2) := q_{\max} - (l_1 + l_2) \cdot dq + q_{golven\min} + (l_1 + l_2) \cdot dq_{golven}$$

$$q_4(l_1, l_2, l_3) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3) \cdot dq + q_{golven\min} + (l_1 + l_2 + l_3) \cdot dq_{golven}$$

$$q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \cdot dq + q_{golven\min} + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \cdot dq_{golven} + q_{wind}$$

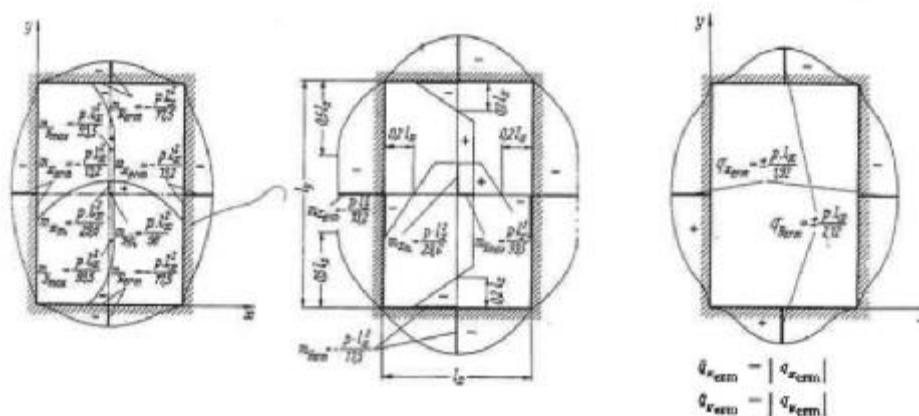
$$q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \cdot dq + q_{golven\min} + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \cdot dq_{golven} + q_{wind}$$

$$q_7(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \cdot dq + q_{golven\min} + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \cdot dq_{golven} + q_{wind}$$

## Momenten

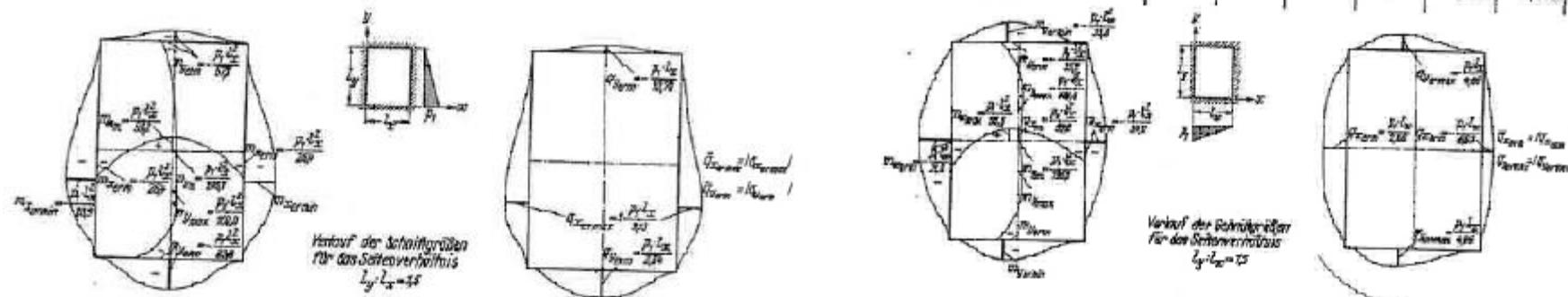
Met behulp van tabellen uit de betonkalender uit 1999, hieronder gedeeltelijk weergegeven. Aangenomen is dat elk stuk wand aan de vier zijde volledig is ingeklemd. Door de verhouding  $l_y : l_x$  te bepalen, kan de coëfficiënt afgelezen worden waarmee het moment berekent kan worden:  $M = p \cdot l_x^2 / \text{coef}$ . Dit is voor de wanden tussen de verschillende vloeren gedaan.

Tabel behorende bij gelijkmatig verdeelde belasting op een vierzijdig ingeklemde plaat:



$l_y : l_x$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
$m_{x,\text{erm}} = -$	19,4	18,2	17,1	16,3	15,5	14,9	14,5
$m_{x,\text{em}} =$	$p \cdot l_x^{2,5}$	56,8	50,6	48,1	42,4	39,4	37,0
$m_{y,\text{erm}} = -$	19,4	18,8	18,4	18,1	17,9	17,7	17,6
$m_{y,\text{em}} =$	$p \cdot l_x^{2,5}$	56,8	58,2	60,3	62,6	65,8	69,4
$q_{x,\text{erm}} = \pm$	$p \cdot l_x^{2,5}$	2,24	2,17	2,10	2,05	2,01	1,98
$q_{y,\text{erm}} = \pm$	$p \cdot l_x^{2,5}$	2,24	2,20	2,16	2,14	2,12	2,11
$f_m = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot d^3}$	0,0152	0,0167	0,0181	0,0195	0,0207	0,0219	0,0230

Voor een vierzijdig ingeklemde plaat met een driehoeksbelasting, zie figuren hieronder, zijn ook tabellen.



Hieronder zijn de tabellen overgenomen in Mathcad. In de eerste rij staat de verhouding ly/lx. In de tweede rij de coëfficiënten die behoren bij het maximum moment aan de zijkant van de plaat, en in de derde rij de coëfficiënten voor het moment aan de onderzijde van de plaat.

$\text{coefM}_{\text{vol}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35
1	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.7	18	18.3	18.8	19.4	18.2	17.1	16.3	15.5	14.9	14.5	14
2	12	12.3	12.6	13	13.5	14.2	14.9	15.9	16.9	18.1	19.4	18.8	18.4	18.1	17.9	17.7	17.6	...

$\text{coefM}_{\text{driehoek}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	
1	33.8	33.8	34.2	34.9	35.9	36.9	33.1	29.8	27.5	25.6	23.9	23.16	22.42	21.68	20.94	20.2	
2	20.2	19.1	22.1	24	26.5	30	27.5	26.1	25	24.1	23.8	23.42	23.04	22.66	22.28	21.9	

Nu is voor elke laag de coëfficiënten bepaald voor het moment aan de zijkant en aan de onderkant van de plaat voor de gelijkmatige belasting en de driehoeksbelasting. Eerst is de verhouding ly/lx bepaald, deze is afhankelijk van de afstand tussen de vloeren.

$$\text{lylx1}(l_1) := \frac{l_1}{b_{\text{cel}}}$$

Met behulp van lineaire interpolatie zijn de coëfficiënten bepaald:

$$\text{Floor11}(l_1) := \text{Floor}(\text{lylx1}(l_1), 0.05)$$

$$\text{Floor12}(l_1) := \text{Floor}(\text{lylx1}(l_1), 0.1)$$

$$\text{Ceil11}(l_1) := \text{Ceil}(\text{lylx1}(l_1), 0.05)$$

$$\text{Ceil12}(l_1) := \text{Ceil}(\text{lylx1}(l_1), 0.1)$$

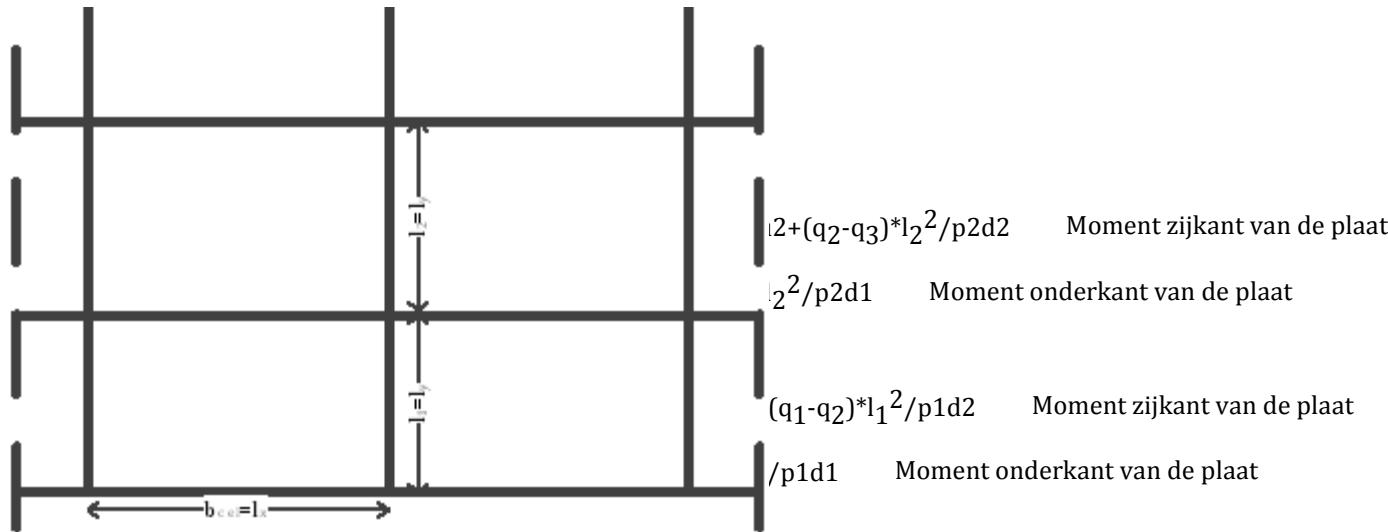
$$p1u1(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 1)}{0.05} \cdot (\text{lylx1}(l_1) - \text{Floor11}(l_1))$$

$$p1d1(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor12}(l_1), \text{coefM}_{\text{driehoek}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor12}(l_1), \text{coefM}_{\text{driehoek}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil12}(l_1), \text{coefM}_{\text{driehoek}}, 1)}{0.1} \cdot (\text{lylx1}(l_1) - \text{Floor12}(l_1))$$

$$p1u2(l_1) := \text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil11}(l_1), \text{coefM}_{\text{vol}}, 2)}{0.05} \cdot (\text{lylx1}(l_1) - \text{Floor11}(l_1))$$

Afstand vloeren, 7 vloeren

$$p1d2(l_1) := hlookup(Floor12(l_1), coefM_driehoek, 2) - \frac{hlookup(Floor12(l_1), coefM_driehoek, 2) - hlookup(Ceil12(l_1), coefM_driehoek, 2)}{0.1} \cdot (lylx1(l_1) - Floor12(l_1))$$



$$lylx2(l_2) := \frac{l_2}{b_{cel}}$$

$$Floor21(l_2) := Floor(lylx2(l_2), 0.05) \quad Floor22(l_2) := Floor(lylx2(l_2), 0.1)$$

$$Ceil21(l_2) := Ceil(lylx2(l_2), 0.05) \quad Ceil22(l_2) := Ceil(lylx2(l_2), 0.1)$$

$$p2u1(l_2) := hlookup(Floor21(l_2), coefM_vol, 1) - \frac{hlookup(Floor21(l_2), coefM_vol, 1) - hlookup(Ceil21(l_2), coefM_vol, 1)}{0.05} \cdot (lylx2(l_2) - Floor21(l_2))$$

$$p2d1(l_2) := hlookup(Floor22(l_2), coefM_driehoek, 1) - \frac{hlookup(Floor22(l_2), coefM_driehoek, 1) - hlookup(Ceil22(l_2), coefM_driehoek, 1)}{0.1} \cdot (lylx2(l_2) - Floor22(l_2))$$

$$p2u2(l_2) := hlookup(Floor21(l_2), coefM_vol, 2) - \frac{hlookup(Floor21(l_2), coefM_vol, 2) - hlookup(Ceil21(l_2), coefM_vol, 2)}{0.05} \cdot (lylx2(l_2) - Floor21(l_2))$$

$$p2d2(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}(l_2), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (lylx2(l_2) - \text{Floor22}(l_2))$$

$$lylx3(l_3) := \frac{l_3}{b_{cel}}$$

$$\text{Floor31}(l_3) := \text{Floor}(lylx3(l_3), 0.05) \quad \text{Floor32}(l_3) := \text{Floor}(lylx3(l_3), 0.1)$$

$$\text{Ceil31}(l_3) := \text{Ceil}(lylx3(l_3), 0.05) \quad \text{Ceil32}(l_3) := \text{Ceil}(lylx3(l_3), 0.1)$$

$$p3u1(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 1)}{0.05} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor31}(l_3))$$

$$p3d1(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1)}{0.1} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor32}(l_3))$$

$$p3u2(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}(l_3), \text{coefM}_\text{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor31}(l_3))$$

$$p3d2(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}(l_3), \text{coefM}_\text{driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (lylx3(l_3) - \text{Floor32}(l_3))$$

$$lylx4(l_4) := \frac{l_4}{b_{cel}}$$

$$\text{Floor41}(l_4) := \text{Floor}(lylx4(l_4), 0.05) \quad \text{Floor42}(l_4) := \text{Floor}(lylx4(l_4), 0.1)$$

$$\text{Ceil41}(l_4) := \text{Ceil}(lylx4(l_4), 0.05) \quad \text{Ceil42}(l_4) := \text{Ceil}(lylx4(l_4), 0.1)$$

$$p4u1(l_4) := \text{hlookup}(\text{Floor41}(l_4), \text{coefM}_\text{vol}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor41}(l_4), \text{coefM}_\text{vol}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil41}(l_4), \text{coefM}_\text{vol}, 1)}{0.05} \cdot (lylx4(l_4) - \text{Floor41}(l_4))$$

$$p4d1(l_4) := \text{hlookup}(\text{Floor42}(l_4), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor42}(l_4), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil42}(l_4), \text{coefM}_\text{driehoek}, 1)}{0.1} \cdot (lylx4(l_4) - \text{Floor42}(l_4))$$

$$p4u2(l_4) := hlookup(Floor41(l_4), coefM_{vol}, 2) - \frac{hlookup(Floor41(l_4), coefM_{vol}, 2) - hlookup(Ceil41(l_4), coefM_{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx4(l_4) - Floor41(l_4))$$

$$p4d2(l_4) := hlookup(Floor42(l_4), coefM_{driehoek}, 2) - \frac{hlookup(Floor42(l_4), coefM_{driehoek}, 2) - hlookup(Ceil42(l_4), coefM_{driehoek}, 2)}{0.1} \cdot (lylx4(l_4) - Floor42(l_4))$$

Met de coëfficiënten voor elke laag kan nu het moment berekent worden. Als de verhouding ly/lx groter is dan 1, dan is de  $b_{cel}$  de kleinste overspanning van de plaat en moet gebruikt worden in de berekening van het moment. Als de coëfficiënt kleiner is dan 1, is de hoogte van de plaat maatgevend. Dit is in de berekening van het moment meegenomen door een `if` functie.

$$M1_{max}(l_1) := \frac{1}{12} \cdot (q_1 - q_{kanaal}) \cdot l_1 \cdot l_1 \quad \text{Maximaal moment in onderste plaat}$$

$$M_{21}(l_1, l_2) := \begin{cases} \frac{1}{p2u1(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot b_{cel}^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p2d1(l_2)} & \text{if } lylx2(l_2) > 1 \\ \frac{1}{p2u1(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot l_2^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{l_2^2}{p2d1(l_2)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{22}(l_1, l_2) := \begin{cases} \frac{1}{p2u2(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot b_{cel}^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p2d2(l_2)} & \text{if } lylx2(l_2) > 1 \\ \frac{1}{p2u2(l_2)} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot l_2^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{l_2^2}{p2d2(l_2)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M2_{max}(l_1, l_2) := \max(M_{21}(l_1, l_2), M_{22}(l_1, l_2))$$

$$M_{31}(l_1, l_2, l_3) := \begin{cases} \frac{1}{p3u1(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot b_{cel}^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p3d1(l_3)} & \text{if } lylx3(l_3) > 1 \\ \frac{1}{p3u1(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot l_3^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{l_3^2}{p3d1(l_3)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{32}(l_1, l_2, l_3) := \begin{cases} \frac{1}{p3u2(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot b_{cel}^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p3d2(l_3)} & \text{if } lylx3(l_3) > 1 \\ \frac{1}{p3u2(l_3)} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot l_3^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{l_3^2}{p3d2(l_3)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

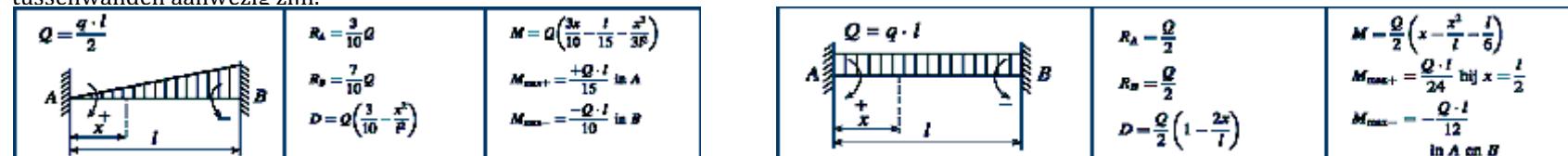
$$M_{3 \max}(l_1, l_2, l_3) := \max(M_{31}(l_1, l_2, l_3), M_{32}(l_1, l_2, l_3))$$

$$M_{41}(l_1, l_2, l_3, l_4) := \begin{cases} \frac{1}{p4u1(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot b_{cel}^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p4d1(l_4)} & \text{if } lylx4(l_4) > 1 \\ \left[ \frac{1}{p4u1(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot l_4^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{l_4^2}{p4d1(l_4)} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{42}(l_1, l_2, l_3, l_4) := \begin{cases} \frac{1}{p4u2(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot b_{cel}^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p4d2(l_4)} & \text{if } lylx4(l_4) > 1 \\ \left[ \frac{1}{p4u2(l_4)} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot l_4^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{l_4^2}{p4d2(l_4)} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{4 \max}(l_1, l_2, l_3, l_4) := \max(M_{41}(l_1, l_2, l_3, l_4), M_{42}(l_1, l_2, l_3, l_4))$$

Moment in de bovenste twee delen is bepaald aan de hand van de vergeet-me-nietjes hieronder. Wordt beschouwd als overspanning in één richting omdat er geen tussenwanden aanwezig zijn.



$$M_{5 \max}(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) := \frac{1}{12} \cdot q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) \cdot l_5^2 + \frac{1}{10} \cdot (q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) - q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)) \cdot \frac{l_5}{2} \cdot l_5$$

$$M_{6 \max}(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) := \frac{1}{12} \cdot q_7(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) \cdot l_6^2 + \frac{1}{10} \cdot (q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) - q_7(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)) \cdot \frac{l_6}{2} \cdot l_6$$

## Bepalen afstanden tussen vloeren:

Vervolgens zijn de afstanden tussen de eerste vier vloeren bepaald. Door aan te nemen dat het maximum moment in iedere wand even groot is, en dat de vijfde vloer op 16,3 meter van de onderkant ligt. Als de sluisdeur uitgevaren wordt, ligt deze vloer op minimum schutpeil.

$$l_2 := 3\text{m} \quad l_3 := 3\text{m} \quad l_4 := 3\text{m} \quad \text{schatting} \quad l_1 := 16.3\text{m} - 9.183\text{m} = 7.12\text{m}$$

$l_1$  is de hoogte van NAP -18.5m tot minimum schutpeil min de hoogte van de drijfkist.

drie vergelijkingen om de vier onbekenden,  $l_1$  t/m  $l_4$  op te lossen:

Giver

$$M_3 \max(l_1, l_2, l_3) = M_2 \max(l_1, l_2)$$

$$M_3 \max(l_1, l_2, l_3) = M_4 \max(l_1, l_2, l_3, l_4)$$

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = 16.3\text{m}$$

Oplossen van de vergelijkingen geeft:

$$\begin{pmatrix} l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{pmatrix} := \text{Find}(l_2, l_3, l_4) = \begin{pmatrix} 2.79 \\ 3.02 \\ 3.38 \end{pmatrix} \text{m}$$

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = 16.3\text{m}$$

Voor de bovenste twee vloeren is hetzelfde gedaan. De afstanden zijn zo bepaald dat de momenten gelijk zijn.

$$l_5 := 5\text{m} \quad l_6 := 5\text{m} \quad \text{schatting}$$

Twee vergelijkingen:

Giver

$$M_5 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) = M_6 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)$$

$$l_5 + l_6 = h_{deur} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4)$$

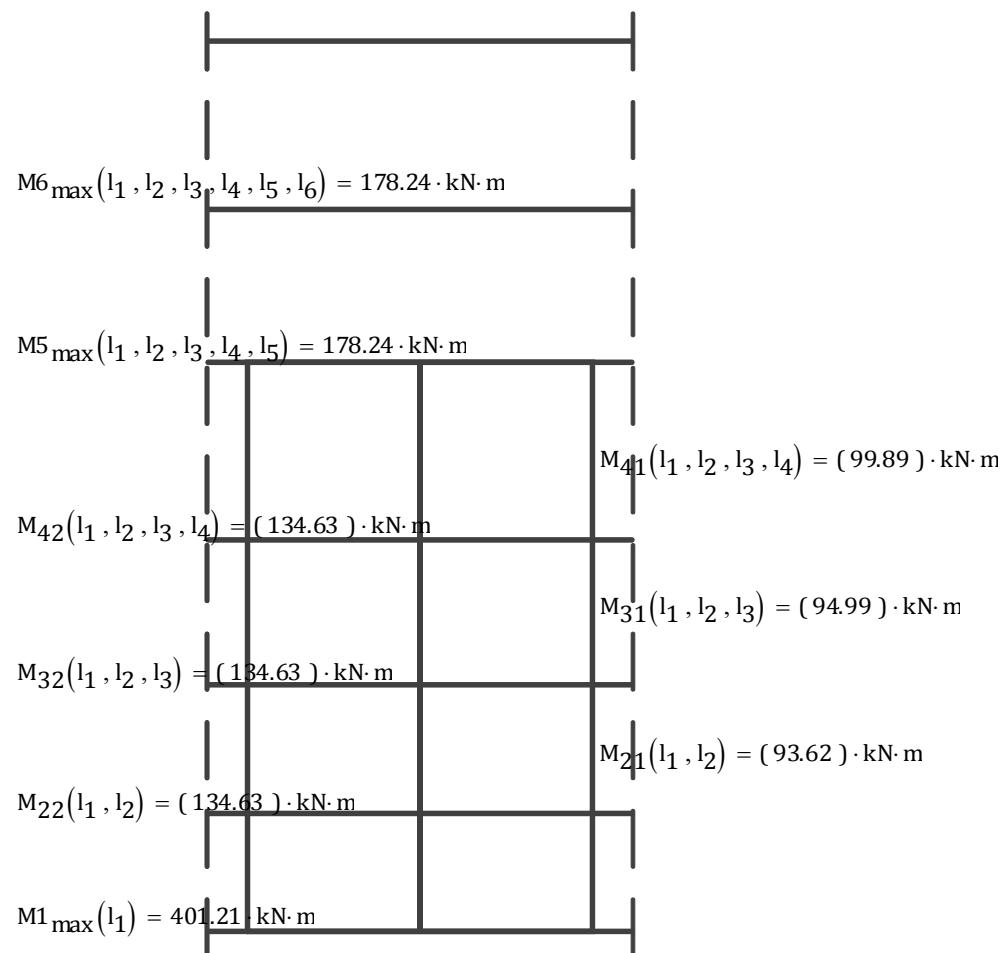
Oplossen geeft:

$$\begin{pmatrix} l_5 \\ l_6 \end{pmatrix} := \text{Find}(l_5, l_6) = \begin{pmatrix} 4.20 \\ 5.30 \end{pmatrix} \text{m}$$

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 = 25.8 \text{ m}$$

De totale afstand is gelijk aan de hoogte van de sluisdeur, dus dat klopt.

Hieronder is in het aanzicht van de deur de verschillende momenten weergeven.



## D. BEREKENING DWARSKRACHT, VELD- EN SUPPORTMOMENT IN WANDEN EN VLOEREN

---

## Dwarskrachten

Nu is op de zelfde manier als voor de momenten de dwarskrachten berekend, alleen zijn de afstanden van de vloeren nu bekend:

$\text{coefV}_{\text{vol}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45
1	2.13	2.12	2.12	2.12	2.1	2.09	2.11	2.13	2.16	2.2	2.24	2.17	2.1	2.05	2.01	1.98	1.96	1.94	1.92	1.92
2	1.91	1.91	1.92	1.92	1.92	1.95	1.98	2.03	2.09	2.17	2.24	2.2	2.16	2.14	2.12	2.11	2.1	2.09	2.09	...

$\text{coefV}_{\text{driehoek}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
1	4.08	4.07	4.07	4.08	4.12	4.14	3.8	3.59	3.39	3.25	3.13	3.07	3.01	2.95	2.89	2.83
2	2.86	2.86	2.86	2.86	2.92	3.07	2.9	2.8	2.74	2.7	2.64	2.61	2.58	2.55	2.52	...

$$t2u1(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefV}_{\text{vol}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefV}_{\text{vol}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil21}(l_2), \text{coefV}_{\text{vol}}, 1)}{0.05} \cdot (\text{lylx2}(l_2) - \text{Floor21}(l_2))$$

$$t2d1(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}(l_2), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 1)}{0.1} \cdot (\text{lylx2}(l_2) - \text{Floor22}(l_2))$$

$$t2u2(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefV}_{\text{vol}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor21}(l_2), \text{coefV}_{\text{vol}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil21}(l_2), \text{coefV}_{\text{vol}}, 2)}{0.05} \cdot (\text{lylx2}(l_2) - \text{Floor21}(l_2))$$

$$t2d2(l_2) := \text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}(l_2), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}(l_2), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 2)}{0.1} \cdot (\text{lylx2}(l_2) - \text{Floor22}(l_2))$$

$$t3u1(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefV}_{\text{vol}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}(l_3), \text{coefV}_{\text{vol}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}(l_3), \text{coefV}_{\text{vol}}, 1)}{0.05} \cdot (\text{lylx3}(l_3) - \text{Floor31}(l_3))$$

$$t3d1(l_3) := \text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}(l_3), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}(l_3), \text{coefV}_{\text{driehoek}}, 1)}{0.1} \cdot (\text{lylx3}(l_3) - \text{Floor32}(l_3))$$

## Veld moment

$\text{coefM}_{\text{vol.veld}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35
1	105	103.7	100.4	95.5	86.9	76.8	69.4	64.3	60.8	58.3	56.8	50.6	46.1	42.4	39.4	37	34.8	33.3
2	25	25.9	27.3	29	31.1	33.8	37	40.8	45.2	50.4	56.8	58.2	60.3	62.6	65.8	69.4	73.6	...

$\text{coefM}_{\text{driehoek.veld}} :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	
1	212.6	192.1	170.9	139.3	121.6	113.6	91.7	78.7	69.9	63.7	59.2	57.36	55.52	53.68	51.84	50	
2	48.5	54	59.5	69.4	81.5	98	98	98	99	99	100	100	100	100	100	100	

$$\text{lylx2} := \frac{l_2}{b_{\text{cel}}} = 0.56$$

Met behulp van lineaire interpolatie zijn de coëfficiënten bepaald:

$$\text{Floor21} := \text{Floor}(\text{lylx2}, 0.05) = 0.55$$

$$\text{Floor22} := \text{Floor}(\text{lylx2}, 0.1) = 0.50$$

$$\text{Ceil21} := \text{Ceil}(\text{lylx2}, 0.05) = 0.60$$

$$\text{Ceil22} := \text{Ceil}(\text{lylx2}, 0.1) = 0.60$$

$$p2u1_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor21}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor21}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil21}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1)}{0.05} \cdot (\text{lylx2} - \text{Floor21}) = (103.21)$$

$$p2d1_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor22}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1)}{0.1} \cdot (\text{lylx2} - \text{Floor22}) = (200.82)$$

$$p2u2_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor21}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor21}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil21}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2)}{0.05} \cdot (\text{lylx2} - \text{Floor21}) = (26.11)$$

$$p2d2_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor22}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor22}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil22}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2)}{0.1} \cdot (\text{lylx2} - \text{Floor22}) = (51.66)$$

$$\text{lylx3} := \frac{l_3}{b_{\text{cel}}} = 0.60$$

Met behulp van lineaire interpolatie zijn de coëfficiënten bepaald:

$$\text{Floor31} := \text{Floor}(lylx3, 0.05) = 0.60$$

$$\text{Floor32} := \text{Floor}(lylx3, 0.1) = 0.60$$

$$\text{Ceil31} := \text{Ceil}(lylx3, 0.05) = 0.65$$

$$\text{Ceil32} := \text{Ceil}(lylx3, 0.1) = 0.70$$

$$p3u1_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor31}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1)}{0.05} \cdot (lylx3 - \text{Floor31}) = (100.10)$$

$$p3d1_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor32}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1)}{0.1} \cdot (lylx3 - \text{Floor32}) = (191.46)$$

$$p3u2_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor31}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor31}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil31}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2)}{0.05} \cdot (lylx3 - \text{Floor31}) = (27.40)$$

$$p3d2_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor32}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor32}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil32}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2)}{0.1} \cdot (lylx3 - \text{Floor32}) = (54.17)$$

$$lylx4 := \frac{l_4}{b_{\text{cel}}} = 0.68$$

Met behulp van lineaire interpolatie zijn de coëfficiënten bepaald:

$$\text{Floor41} := \text{Floor}(lylx4, 0.05) = 0.65$$

$$\text{Floor42} := \text{Floor}(lylx4, 0.1) = 0.60$$

$$\text{Ceil41} := \text{Ceil}(lylx4, 0.05) = 0.70$$

$$\text{Ceil42} := \text{Ceil}(lylx4, 0.1) = 0.70$$

$$p4u1_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor41}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor41}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil41}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 1)}{0.05} \cdot (lylx4 - \text{Floor41}) = (91.01)$$

$$p4d1_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor42}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor42}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1) - \text{hlookup}(\text{Ceil42}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 1)}{0.1} \cdot (lylx4 - \text{Floor42}) = (175.96)$$

$$p4u2_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor41}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor41}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil41}, \text{coefM}_{\text{vol.veld}}, 2)}{0.05} \cdot (lylx4 - \text{Floor41}) = (30.10)$$

$$p4d2_{\text{veld}} := \text{hlookup}(\text{Floor42}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2) - \frac{\text{hlookup}(\text{Floor42}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2) - \text{hlookup}(\text{Ceil42}, \text{coefM}_{\text{driehoek.veld}}, 2)}{0.1} \cdot (lylx4 - \text{Floor42}) = (58.19)$$

$$M_{1,veld} := \frac{(q_1 - q_{kanaal}) \cdot l_1^2}{24} = 200.61 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{21,veld} := \begin{cases} \frac{1}{p_{2u1,veld}} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot b_{cel}^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p_{2d1,veld}} & \text{if } lylx2 > 1 \\ \frac{1}{p_{2u1,veld}} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot l_2^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{l_2^2}{p_{2d1,veld}} & \text{otherwise} \end{cases} = 15.87 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{22,veld} := \begin{cases} \frac{1}{p_{2u2,veld}} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot b_{cel}^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p_{2d2,veld}} & \text{if } lylx2 > 1 \\ \frac{1}{p_{2u2,veld}} \cdot q_3(l_1, l_2) \cdot l_2^2 + (q_2(l_1) - q_3(l_1, l_2)) \cdot \frac{l_2^2}{p_{2d2,veld}} & \text{otherwise} \end{cases} = 62.65 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{31,veld} := \begin{cases} \frac{1}{p_{3u1,veld}} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot b_{cel}^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p_{3d1,veld}} & \text{if } lylx3 > 1 \\ \frac{1}{p_{3u1,veld}} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot l_3^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{l_3^2}{p_{3d1,veld}} & \text{otherwise} \end{cases} = 16.62 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{32,veld} := \begin{cases} \frac{1}{p_{3u2,veld}} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot b_{cel}^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p_{3d2,veld}} & \text{if } lylx3 > 1 \\ \frac{1}{p_{3u2,veld}} \cdot q_4(l_1, l_2, l_3) \cdot l_3^2 + (q_3(l_1, l_2) - q_4(l_1, l_2, l_3)) \cdot \frac{l_3^2}{p_{3d2,veld}} & \text{otherwise} \end{cases} = 60.55 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{41,veld} := \begin{cases} \frac{1}{p_{4u1,veld}} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot b_{cel}^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p_{4d1,veld}} & \text{if } lylx4 > 1 \\ \left[ \frac{1}{p_{4u1,veld}} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot l_4^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{l_4^2}{p_{4d1,veld}} \right] & \text{otherwise} \end{cases} = 19.22 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{42.veld} := \begin{cases} \frac{1}{p^4 u^2_{veld}} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot b_{cel}^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{b_{cel}^2}{p^4 d^2_{veld}} & \text{if } l_4 l x_4 > 1 \\ \left[ \frac{1}{p^4 u^2_{veld}} \cdot q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) \cdot l_4^2 + (q_4(l_1, l_2, l_3) - q_5(l_1, l_2, l_3, l_4)) \cdot \frac{l_4^2}{p^4 d^2_{veld}} \right] & \text{otherwise} \end{cases} = 58.13 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{5.veld} := \frac{(q_5(l_1, l_2, l_3, l_4) - q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)) \cdot l_5}{2} \cdot \left[ \frac{3 \cdot \frac{1}{2} l_5}{10} - \frac{l_5}{15} - \frac{\left(\frac{l_5}{2}\right)^3}{3l_5^2} \right] + \frac{q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) \cdot l_5^2}{24} = 86.13 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{6.veld} := \frac{(q_6(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) - q_7(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)) \cdot l_6}{2} \cdot \left[ \frac{3 \cdot \frac{1}{2} l_6}{10} - \frac{l_6}{15} - \frac{\left(\frac{l_6}{2}\right)^3}{3l_6^2} \right] + \frac{q_7(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) \cdot l_6^2}{24} = 83.13 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Moment en dwarskracht vloer

$$q_{\max} := \left[ \gamma \cdot (18.5 + 7.63) \text{ m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 1 \text{ m} = 288.17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{\text{kanal}} := \left[ \gamma \cdot (18.5 - 0.88) \text{ m} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1022 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 1 \text{ m} = 194.32 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$dq := \frac{(q_{\max} - q_{\min})}{h_{\text{deur}}}$$

$$q_{\text{vloer1}} := q_{\max}$$

$$q_{\text{vloer2}}(l_1) := q_{\max} - l_1 \cdot dq$$

$$q_{\text{vloer3}}(l_1, l_2) := q_{\max} - (l_1 + l_2) \cdot dq$$

$$q_{\text{vloer4}}(l_1, l_2, l_3) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3) \cdot dq$$

$$q_{\text{vloer5}}(l_1, l_2, l_3, l_4) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) \cdot dq$$

$$q_{\text{vloer6}}(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) := q_{\max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \cdot dq$$

$$q_{vloer7}(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) := q_{max} - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \cdot dq$$

## Bij oplegging

$$lylx1vl := \frac{b_d}{2b_{cel}} = 1.35$$

$$Floor11vl := Floor(lylx1vl, 0.05)$$

$$Floor12vl := Floor(lylx1vl, 0.1)$$

$$Ceil11vl := Ceil(lylx1vl, 0.05)$$

$$Ceil12vl := Ceil(lylx1vl, 0.1)$$

$$t1u1vl := hlookup(Floor11vl, coefV_{vol}, 1) - \frac{hlookup(Floor11vl, coefV_{vol}, 1) - hlookup(Ceil11vl, coefV_{vol}, 1)}{0.05} \cdot (lylx1vl - Floor11vl) = (1.94)$$

$$t1u2vl := hlookup(Floor11vl, coefV_{vol}, 2) - \frac{hlookup(Floor11vl, coefV_{vol}, 2) - hlookup(Ceil11vl, coefV_{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx1vl - Floor11vl) = (2.09)$$

$$p1u1vl := hlookup(Floor11vl, coefM_{vol}, 1) - \frac{hlookup(Floor11vl, coefM_{vol}, 1) - hlookup(Ceil11vl, coefM_{vol}, 1)}{0.05} \cdot (lylx1vl - Floor11vl) = (14.00)$$

$$p1u2vl := hlookup(Floor11vl, coefM_{vol}, 2) - \frac{hlookup(Floor11vl, coefM_{vol}, 2) - hlookup(Ceil11vl, coefM_{vol}, 2)}{0.05} \cdot (lylx1vl - Floor11vl) = (17.50)$$

## Moment

$$M_{vloer11}(d_{vloer1}) := \frac{1}{12} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer1}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)^2$$

$$M_{vloer21}(d_{vloer2}) := \frac{1}{p1u1vl} \cdot \left( q_{vloer2}(l_1) - 0.9 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer2}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer22}(d_{vloer2}) := \frac{1}{p1u2vl} \cdot \left( q_{vloer2}(l_1) - 0.9 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer2}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer31}(d_{vloer3}) := \frac{1}{p1u1vl} \cdot \left( q_{vloer3}(l_1, l_2) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer3}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer32}(d_{vloer3}) := \frac{1}{p_{1u2vl}} \cdot \left( q_{vloer3}(l_1, l_2) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer3}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer41}(d_{vloer4}) := \frac{1}{p_{1u1vl}} \cdot \left( q_{vloer4}(l_1, l_2, l_3) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer4}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer42}(d_{vloer4}) := \frac{1}{p_{1u2vl}} \cdot \left( q_{vloer4}(l_1, l_2, l_3) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer4}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer51}(d_{vloer5}) := \frac{1}{p_{1u1vl}} \cdot \left( q_{vloer5}(l_1, l_2, l_3, l_4) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer5}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer52}(d_{vloer5}) := \frac{1}{p_{1u2vl}} \cdot \left( q_{vloer5}(l_1, l_2, l_3, l_4) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer5}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer61}(d_{vloer6}) := \frac{1}{12} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer6}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)^2$$

$$M_{vloer71}(d_{vloer7}) := \frac{1}{12} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer7}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)^2$$

### Dwarskracht

$$V_{vloer11}(d_{vloer1}) := \frac{1}{2} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer1}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)$$

$$V_{vloer21}(d_{vloer2}) := \frac{1}{t_{1u1vl}} \cdot \left( q_{vloer2}(l_1) - 0.9 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer2}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer22}(d_{vloer2}) := \frac{1}{t_{1u2vl}} \cdot \left( q_{vloer2}(l_1) - 0.9 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer2}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer31}(d_{vloer3}) := \frac{1}{t_{1u1vl}} \cdot \left( q_{vloer3}(l_1, l_2) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer3}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer32}(d_{vloer3}) := \frac{1}{t1u2vl} \cdot \left( q_{vloer3}(l_1, l_2) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer3}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer41}(d_{vloer4}) := \frac{1}{t1u1vl} \cdot \left( q_{vloer4}(l_1, l_2, l_3) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer4}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer42}(d_{vloer4}) := \frac{1}{t1u2vl} \cdot \left( q_{vloer4}(l_1, l_2, l_3) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer4}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer51}(d_{vloer5}) := \frac{1}{t1u1vl} \cdot \left( q_{vloer5}(l_1, l_2, l_3, l_4) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer5}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer52}(d_{vloer5}) := \frac{1}{t1u2vl} \cdot \left( q_{vloer5}(l_1, l_2, l_3, l_4) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer5}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}$$

$$V_{vloer61}(d_{vloer6}) := \frac{1}{2} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer6}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)$$

$$V_{vloer71}(d_{vloer7}) := \frac{1}{2} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer7}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)$$

## In veld

$$p1u1vl_{veld} := \left| hlookup(Floor11vl, coefM_{vol.veld}, 1) - \frac{hlookup(Ceil11vl, coefM_{vol.veld}, 1)}{0.05} \cdot (lylx1vl - Floor11vl) \right| = 33.30$$

$$p1u2vl_{veld} := \left| hlookup(Floor11vl, coefM_{vol.veld}, 2) - \frac{hlookup(Ceil11vl, coefM_{vol.veld}, 2)}{0.05} \cdot (lylx1vl - Floor11vl) \right| = 78.40$$

$$M_{vloer11.veld}(d_{vloer1}) := \frac{1}{24} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer1}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)^2$$

$$M_{vloer21.veld}(d_{vloer2}) := \frac{1}{p1u1vl_{veld}} \cdot \left( q_{vloer2}(l_1) - 0.9 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer2}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer22.veld}(d_{vloer2}) := \frac{1}{p_{1u2vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer2}(l_1) - 0.9 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer2}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer31.veld}(d_{vloer3}) := \frac{1}{p_{1u1vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer3}(l_1, l_2) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer3}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer32.veld}(d_{vloer3}) := \frac{1}{p_{1u2vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer3}(l_1, l_2) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer3}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer41.veld}(d_{vloer4}) := \frac{1}{p_{1u1vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer4}(l_1, l_2, l_3) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer4}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer42.veld}(d_{vloer4}) := \frac{1}{p_{1u2vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer4}(l_1, l_2, l_3) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer4}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer51.veld}(d_{vloer5}) := \frac{1}{p_{1u1vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer5}(l_1, l_2, l_3, l_4) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer5}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer52.veld}(d_{vloer5}) := \frac{1}{p_{1u2vl\_veld}} \cdot \left( q_{vloer5}(l_1, l_2, l_3, l_4) + 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer5}}{z_{vloer}} \right) \cdot b_{cel}^2$$

$$M_{vloer61.veld}(d_{vloer6}) := \frac{1}{24} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer6}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)^2$$

$$M_{vloer71.veld}(d_{vloer7}) := \frac{1}{24} \cdot \left( 1.2 \cdot \gamma_c \cdot 1m \cdot \frac{d_{vloer7}}{z_{vloer}} \right) \cdot \left( \frac{b_d}{2} \right)^2$$

## E. DIKTE VLOEREN EN WANDEN, BIJ TOEPASSING VAN BETONSTERKTEKLASSE C55/67

---

parameters beton:

$$\alpha := 0.71 \quad f_{cd} := 36.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \beta := 0.37 \quad f_{ck} := 55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \rho_{min,c} := 0.156\% \quad f_{yd} := 435 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{yk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## Bepalen dikte wanden

$$k1(d_1) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_1}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_1}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M1}(d_1) := \rho_{\min.c} \quad \text{on error} \quad \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M1 \max(l_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_1^2}\right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M1 \max(l_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_1^2}\right)} \right] \right] > \rho_{\min.c} \\ \rho_{\min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$c_{Rd,c} := 0.12$$

$$v_{1Rd,c}(d_1) := \begin{cases} c_{Rd,c} \cdot k1(d_1) \cdot \left(100 \cdot \rho_{M1}(d_1) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{\text{mm}^4}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_1 & \text{if } c_{Rd,c} \cdot k1(d_1) \cdot \left(100 \cdot \rho_{M1}(d_1) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{\text{mm}^4}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_1 > 0.035 \cdot k1(d_1)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_1 \\ \left[0.035 \cdot k1(d_1)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_1\right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$v_{1Rd,c}(d_1)$ =opneembare dwarskracht zonder dwarskrachtwapening

$$k2(d_2) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_2}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_2}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

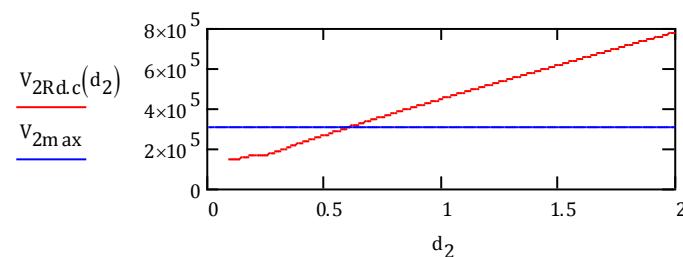
$$\rho_{M2}(d_2) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M2 \max(l_1, l_2)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_2^2}\right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M2 \max(l_1, l_2)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_2^2}\right)} \right] \right] > \rho_{\min.c} \\ \rho_{\min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{2Rd,c}(d_2) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k2(d_2) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M2}(d_2) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_2 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k2(d_2) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M2}(d_2) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_2 > 0.035 \cdot k2(d_2)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_2 \\ \left[ 0.035 \cdot k2(d_2)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_2 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_2 := 0.01m, 0.02m..2m \quad \text{dikte buitenwand}$$

Hieronder is in een figuur te zien wat de minimale dikte van de wand moet zijn om de dwarskracht op te nemen zonder dwarskrachtwapening.

Deze is voor de tweede wand:  $d_{min2} = 0.61m$



$$k3(d_3) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200mm}{d_3}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200mm}{d_3}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M3}(d_3) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M3 \max(l_1, l_2, l_3)}{fcd \cdot b \cdot d_3^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M3 \max(l_1, l_2, l_3)}{fcd \cdot b \cdot d_3^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{3Rd,c}(d_3) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k3(d_3) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M3}(d_3) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_3 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k3(d_3) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M3}(d_3) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_3 > 0.035 \cdot k3(d_3)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_3 \\ \left[ 0.035 \cdot k3(d_3)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_3 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k4(d_4) := \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_4}} & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_4}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M4}(d_4) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M4 \max(l_1, l_2, l_3, l_4)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_4^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M4 \max(l_1, l_2, l_3, l_4)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_4^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{4Rd,c}(d_4) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k4(d_4) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M4}(d_4) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_4 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k4(d_4) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M4}(d_4) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_4 > 0.035 \cdot k4(d_4)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_4 \\ \left[ 0.035 \cdot k4(d_4)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_4 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k5(d_5) := \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_5}} & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_5}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M5}(d_5) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M5 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_5^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M5 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_5^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$v_{5Rd,c}(d_5) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k5(d_5) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M5}(d_5) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_5 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k5(d_5) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M5}(d_5) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_5 > 0.035 \cdot k5(d_5)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_5 \\ \left[ 0.035 \cdot k5(d_5)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_5 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k6(d_6) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_6}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_6}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M6}(d_6) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M6 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_6^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M6 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_6^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{6Rd,c}(d_6) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k6(d_6) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M6}(d_6) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_6 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k6(d_6) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M6}(d_6) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_6 > 0.035 \cdot k5(d_6)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_6 \\ \left[ 0.035 \cdot k5(d_6)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_6 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Voor elke deel is nu bepaald wat de minimale dikte van de wand moet zijn om de dwarskracht op te nemen zonder dwarskrachtwapening.

$d_1 := 0.5 \text{ m}$  schatting

$$d_1 := d_{wand,min} \quad \text{on error} \quad \text{root}[v_{1Rd,c}(d_1) - v_{1max}, d_1] = 0.13 \text{ m}$$

$d_2 := 0.5 \text{ m}$  schatting

Giver

$$v_{2Rd,c}(d_2) = v_{2max}$$

$$d_2 := \text{Find}(d_2) = 0.61 \text{ m}$$

$$d_3 := 0.5 \text{m} \text{ schatting}$$

Giver

$$V_{3Rd,c}(d_3) = V_{3\max}$$

$$\underline{d_3} := \text{Find}(d_3) = 0.56 \text{m}$$

$$d_4 := 0.5 \text{m} \text{ schatting}$$

Giver

$$V_{4Rd,c}(d_4) = V_{4\max}$$

$$\underline{d_4} := \text{Find}(d_4) = 0.52 \text{m}$$

$$d_5 := 0.5 \text{m}$$

Giver

$$V_{5Rd,c}(d_5) = V_{6\max}$$

$$\underline{d_5} := \begin{cases} \text{Find}(d_5) & \text{if } \text{Find}(d_5) > d_{\text{wand,min}} \\ d_{\text{wand,min}} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.605 \text{m}$$

$$d_6 := 0.5 \text{m}$$

Giver

$$V_{6Rd,c}(d_6) = V_{6\max}$$

$$\underline{d_6} := \begin{cases} \text{Find}(d_6) & \text{if } \text{Find}(d_6) > d_{\text{wand,min}} \\ (d_{\text{wand,min}}) & \text{otherwise} \end{cases} = 0.605 \text{m}$$

$$h_{\text{wand1}} := \frac{d_1}{z_{\text{wand}}} = 0.20 \text{m} \quad h_{\text{wand2}} := \frac{d_2}{z_{\text{wand}}} = 0.95 \text{m} \quad h_{\text{wand3}} := \frac{d_3}{z_{\text{wand}}} = 0.87 \text{m}$$

$$h_{\text{wand4}} := \frac{d_4}{z_{\text{wand}}} = 0.81 \text{m} \quad h_{\text{wand5}} := \frac{d_5}{z_{\text{wand}}} = 0.94 \text{m} \quad h_{\text{wand6}} := \frac{d_6}{z_{\text{wand}}} = 0.94 \text{m}$$

$V_6$  groter dan  $V_5$ ,  $d_5$  even breed als  $d_6$  gekozen.

## Bepalen dikte vloeren

$$k_{vloer1}(d_{vloer1}) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer1}}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer1}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M1vl}(d_{vloer1}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11}(d_{vloer1})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer1}^2}\right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11}(d_{vloer1})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer1}^2}\right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

De langswapening is bepaald door  $M_{Rd}$  gelijk te stellen aan  $M_{Ed}$ .

$$M_{Ed} = M_{Rd} = \rho_1 b d f_{yd} (d - \beta \rho_1 f_{yd} d / (\alpha f_{cd}))$$

Deze moet wel groter zijn dan de minimum wapeningspercentage.

$$v_{11Rd.c.vl}(d_{vloer1}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer1}(d_{vloer1}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M1vl}(d_{vloer1}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer1}$$

$$v_{1Rd.c.vl}(d_{vloer1}) := \begin{cases} v_{11Rd.c.vl}(d_{vloer1}) & \text{if } v_{11Rd.c.vl}(d_{vloer1}) > 0.035 \cdot k_{vloer1}(d_{vloer1})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer1} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer1}(d_{vloer1})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer1} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer2}(d_{vloer2}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer2}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer2}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M2vl}(d_{vloer2}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer2}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer2}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{22Rd.c.vl}(d_{vloer2}) := \left[ c_{Rd.c} \cdot k_{vloer2}(d_{vloer2}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M2vl}(d_{vloer2}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b \cdot d_{vloer2}$$

$$v_{2Rd.c.vl}(d_{vloer2}) := \begin{cases} v_{22Rd.c.vl}(d_{vloer2}) & \text{if } v_{22Rd.c.vl}(d_{vloer2}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer2}(d_{vloer2})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p2} \right] \cdot b \cdot d_{vloer2} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer2}(d_{vloer2})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p2} \right] \cdot b \cdot d_{vloer2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer3}(d_{vloer3}) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer3}}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer3}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M3vl}(d_{vloer3}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer3}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer3}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{33Rd.c.vl}(d_{vloer3}) := C_{Rd.c} \cdot k_{vloer3}(d_{vloer3}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M3}(d_{vloer3}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{p3} \cdot b \cdot d_{vloer3}$$

$$V_{3Rd.c.vl}(d_{vloer3}) := \begin{cases} V_{33Rd.c.vl}(d_{vloer3}) & \text{if } V_{33Rd.c.vl}(d_{vloer3}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer3}(d_{vloer3})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p3} \right] \cdot b \cdot d_{vloer3} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer3}(d_{vloer3})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p3} \right] \cdot b \cdot d_{vloer3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer4}(d_{vloer4}) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer4}}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer4}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M4vl}(d_{vloer4}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41}(d_{vloer4})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer4}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41}(d_{vloer4})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer4}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{44Rd.c.vl}(d_{vloer4}) := \left[ C_{Rd.c} \cdot k_{vloer4}(d_{vloer4}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M4}(d_{vloer4}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{p4} \right] \cdot b \cdot d_{vloer4}$$

$$V_{4Rd.c.v}(d_{vloer4}) := \begin{cases} V_{44Rd.c.v}(d_{vloer4}) & \text{if } V_{44Rd.c.v}(d_{vloer4}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer4}(d_{vloer4})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p4} \right] \cdot b \cdot d_{vloer4} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer4}(d_{vloer4})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p4} \right] \cdot b \cdot d_{vloer4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer5}(d_{vloer5}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer5}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer5}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M5vl}(d_{vloer5}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer5}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer5}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{55Rd.c.v}(d_{vloer5}) := C_{Rd.c} \cdot k_{vloer5}(d_{vloer5}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M5}(d_{vloer5}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{p5} \cdot b \cdot d_{vloer5}$$

$$V_{5Rd.c.v}(d_{vloer5}) := \begin{cases} V_{55Rd.c.v}(d_{vloer5}) & \text{if } V_{55Rd.c.v}(d_{vloer5}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer5}(d_{vloer5})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p5} \right] \cdot b \cdot d_{vloer5} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer5}(d_{vloer5})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p5} \right] \cdot b \cdot d_{vloer5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer6}(d_{vloer6}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer6}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer6}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M6vl}(d_{vloer6}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer6}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer6}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{66Rd.c.vl}(d_{vloer6}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer6}(d_{vloer6}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M6}(d_{vloer6}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer6}$$

$$V_{6Rd.c.vl}(d_{vloer6}) := \begin{cases} V_{66Rd.c.vl}(d_{vloer6}) & \text{if } V_{66Rd.c.vl}(d_{vloer6}) > 0.035 \cdot k_{vloer6}(d_{vloer6})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer6} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer6}(d_{vloer6})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer6} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer7}(d_{vloer7}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer7}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer7}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M7vl}(d_{vloer7}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer7}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer7}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{77Rd.c.vl}(d_{vloer7}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer7}(d_{vloer7}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M7vl}(d_{vloer7}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer7}$$

$$V_{7Rd.c.v}(d_{vloer7}) := \begin{cases} V_{77Rd.c.v}(d_{vloer7}) & \text{if } V_{77Rd.c.v}(d_{vloer7}) > 0.035 \cdot k_{vloer7}(d_{vloer7})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer7} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer7}(d_{vloer7})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer7} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Voor elke deel is nu bepaald wat de minimale dikte van de wand moet zijn om de dwarskracht op te nemen zonder dwarskrachtwapening.

$$d_{vloer1} := 0.5m \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer1a} := d_{vloer1} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{1Rd.c.v}(d_{vloer1}) - V_{vloer11}(d_{vloer1}), d_{vloer1}) = 0.10m$$

$$d_{vloer1a} := d_{vloer1a} = 0.10m$$

$$d_{vloer2} := 1.0m \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer2a} := d_{vloer2} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{2Rd.c.v}(d_{vloer2}) - V_{vloer21}(d_{vloer2}), d_{vloer2}) = 0.98m$$

$$d_{vloer2a} := d_{vloer2a} = 0.98m$$

$$d_{vloer3} := 1.0m \quad \text{schatting}$$

Giver

$$V_{3Rd.c.v}(d_{vloer3}) = V_{vloer31}(d_{vloer3})$$

$$d_{vloer3a} := \text{Find}(d_{vloer3})$$

$$d_{vloer3a} := d_{vloer3a} = 1.71m$$

$$d_{vloer4} := 0.5m \quad \text{schatting}$$

Giver

$$V_{4Rd.c.v}(d_{vloer4}) = V_{vloer41}(d_{vloer4})$$

$$d_{vloer4a} := \text{Find}(d_{vloer4}) = 1.28 \text{ m}$$

$$d_{vloer4a} := d_{vloer4a} = 1.28 \text{ m}$$

$$d_{vloer5} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer5a} := d_{vloer5} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{5Rd.c.v}(d_{vloer5}) - V_{vloer51}(d_{vloer5}), d_{vloer5}) = 0.84 \text{ m}$$

$$d_{vloer5a} := d_{vloer5a} = 0.84 \text{ m}$$

$$d_{vloer6} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer6a} := d_{vloer6} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{6Rd.c.v}(d_{vloer6}) - V_{vloer61}(d_{vloer6}), d_{vloer6}) = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer6a} := d_{vloer6a} = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer7} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer7a} := d_{vloer7} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{7Rd.c.v}(d_{vloer7}) - V_{vloer71}(d_{vloer7}), d_{vloer7}) = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer7a} := d_{vloer7a} = 0.10 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} h_{vloer1} &:= \frac{d_{vloer1a}}{z_{vloer}} = 170.00 \cdot \text{mm} & h_{vloer2} &:= \frac{d_{vloer2a}}{z_{vloer}} = 1670.60 \cdot \text{mm} & h_{vloer3} &:= \frac{d_{vloer3a}}{z_{vloer}} = 2900.05 \cdot \text{mm} & h_{vloer4} &:= \frac{d_{vloer4a}}{z_{vloer}} = 2179.52 \cdot \text{mm} \\ h_{vloer5} &:= \frac{d_{vloer5a}}{z_{vloer}} = 1423.93 \cdot \text{mm} & h_{vloer6} &:= \frac{d_{vloer6a}}{z_{vloer}} = 170.00 \cdot \text{mm} & h_{vloer7} &:= \frac{d_{vloer7a}}{z_{vloer}} = 170.00 \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

# F. DIKTE VLOEREN EN WANDEN, BIJ TOEPASSING VAN BETONSTERKTEKLASSE C100/115

---

Parameters beton:

$$\alpha := 0.54 \quad f_{cd} := 66.67 \cdot \frac{N}{mm^2} \quad \beta := 0.34 \quad f_{ck} := 100 \frac{N}{mm^2} \quad \rho_{min,c} := 0.193\% \quad f_{yd} := 435 \frac{N}{mm^2} \quad f_{yk} := 500 \frac{N}{mm^2}$$

## Bepalen dikte wanden

$$k1(d_1) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_1}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_1}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M1}(d_1) := \rho_{\min.c} \quad \text{on error} \quad \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M1 \max(l_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_1^2}\right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M1 \max(l_1)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_1^2}\right)} \right] \right] > \rho_{\min.c} \\ \rho_{\min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$c_{Rd,c} := 0.12$$

$$v_{1Rd,c}(d_1) := \begin{cases} c_{Rd,c} \cdot k1(d_1) \cdot \left(100 \cdot \rho_{M1}(d_1) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{\text{mm}^4}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_1 & \text{if } c_{Rd,c} \cdot k1(d_1) \cdot \left(100 \cdot \rho_{M1}(d_1) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{\text{mm}^4}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_1 > 0.035 \cdot k1(d_1)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_1 \\ \left[0.035 \cdot k1(d_1)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_1\right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$v_{1Rd,c}(d_1)$ =opneembare dwarskracht zonder dwarskrachtwapening

$$k2(d_2) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_2}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_2}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

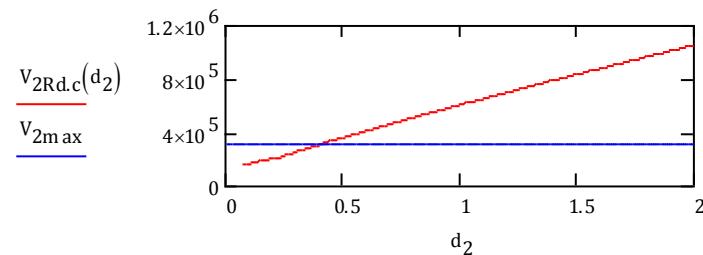
$$\rho_{M2}(d_2) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M2 \max(l_1, l_2)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_2^2}\right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M2 \max(l_1, l_2)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_2^2}\right)} \right] \right] > \rho_{\min.c} \\ \rho_{\min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{2Rd,c}(d_2) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k2(d_2) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M2}(d_2) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_2 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k2(d_2) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M2}(d_2) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_2 > 0.035 \cdot k2(d_2)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_2 \\ \left[ 0.035 \cdot k2(d_2)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_2 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$d_2 := 0.01m, 0.02m..2m$       dikte buitenwand

Hieronder is in een figuur te zien wat de minimale dikte van de wand moet zijn om de dwarskracht op te nemen zonder dwarskrachtwapening.

Deze is voor de tweede wand:       $d_{min2} = 0.40m$



$$k3(d_3) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200mm}{d_3}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200mm}{d_3}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M3}(d_3) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M3 \max(l_1, l_2, l_3)}{fcd \cdot b \cdot d_3^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M3 \max(l_1, l_2, l_3)}{fcd \cdot b \cdot d_3^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{3Rd,c}(d_3) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k3(d_3) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M3}(d_3) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_3 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k3(d_3) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M3}(d_3) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_3 > 0.035 \cdot k3(d_3)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_3 \\ \left[ 0.035 \cdot k3(d_3)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_3 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k4(d_4) := \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_4}} & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_4}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M4}(d_4) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M4 \max(l_1, l_2, l_3, l_4)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_4^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M4 \max(l_1, l_2, l_3, l_4)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_4^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{4Rd,c}(d_4) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k4(d_4) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M4}(d_4) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_4 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k4(d_4) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M4}(d_4) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_4 > 0.035 \cdot k4(d_4)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_4 \\ \left[ 0.035 \cdot k4(d_4)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_4 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k5(d_5) := \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_5}} & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_5}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M5}(d_5) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M5 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_5^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M5 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_5^2} \right)} \right] \right] > \rho_{min,c} \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{5Rd,c}(d_5) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k5(d_5) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M5}(d_5) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_5 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k5(d_5) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M5}(d_5) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_5 > 0.035 \cdot k5(d_5)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_5 \\ \left[ 0.035 \cdot k5(d_5)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_5 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k6(d_6) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_6}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_6}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M6}(d_6) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M6 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_6^2} \right)} \right] & \text{if } \left[ \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M6 \max(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)}{f_{cd} \cdot b \cdot d_6^2} \right)} \right] > \rho_{min,c} \right] \\ \rho_{min,c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{6Rd,c}(d_6) := \begin{cases} C_{Rd,c} \cdot k6(d_6) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M6}(d_6) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_6 & \text{if } C_{Rd,c} \cdot k6(d_6) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M6}(d_6) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_6 > 0.035 \cdot k5(d_6)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_6 \\ \left[ 0.035 \cdot k5(d_6)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_6 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Voor elke deel is nu bepaald wat de minimale dikte van de wand moet zijn om de dwarskracht op te nemen zonder dwarskrachtwapening.

$d_1 := 0.5 \text{ m}$  schatting

$$d_1 := d_{wand,min} \quad \text{on error} \quad \text{root}[v_{1Rd,c}(d_1) - v_{1max}, d_1] = 0.15 \text{ m}$$

$d_2 := 0.5 \text{ m}$  schatting

Giver

$$v_{2Rd,c}(d_2) = v_{2max}$$

$$d_2 := \text{Find}(d_2) = 0.40 \text{ m}$$

$$d_3 := 0.5 \text{m} \text{ schatting}$$

Giver

$$V_{3Rd.c}(d_3) = V_{3\max}$$

$$\underline{d_3} := \text{Find}(d_3) = 0.37 \text{m}$$

$$d_4 := 0.5 \text{m} \text{ schatting}$$

Giver

$$V_{4Rd.c}(d_4) = V_{4\max}$$

$$\underline{d_4} := \text{Find}(d_4) = 0.34 \text{m}$$

$$d_5 := 0.5 \text{m}$$

Giver

$$V_{5Rd.c}(d_5) = V_{6\max}$$

$$\underline{d_5} := \begin{cases} \text{Find}(d_5) & \text{if } \text{Find}(d_5) > d_{\text{wand,min}} \\ d_{\text{wand,min}} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.397 \text{m}$$

$$d_6 := 0.5 \text{m}$$

Giver

$$V_{6Rd.c}(d_6) = V_{6\max}$$

$$\underline{d_6} := \begin{cases} \text{Find}(d_6) & \text{if } \text{Find}(d_6) > d_{\text{wand,min}} \\ (d_{\text{wand,min}}) & \text{otherwise} \end{cases} = 0.397 \text{m}$$

$$h_{\text{wand1}} := \frac{d_1}{z_{\text{wand}}} = 0.23 \text{m} \quad h_{\text{wand2}} := \frac{d_2}{z_{\text{wand}}} = 0.62 \text{m} \quad h_{\text{wand3}} := \frac{d_3}{z_{\text{wand}}} = 0.57 \text{m}$$

$$h_{\text{wand4}} := \frac{d_4}{z_{\text{wand}}} = 0.52 \text{m} \quad h_{\text{wand5}} := \frac{d_5}{z_{\text{wand}}} = 0.62 \text{m} \quad h_{\text{wand6}} := \frac{d_6}{z_{\text{wand}}} = 0.62 \text{m}$$

$V_6$  groter dan  $V_5$ ,  $d_5$  even breed als  $d_6$  gekozen.

## Bepalen dikte vloeren

$$k_{vloer1}(d_{vloer1}) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer1}}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer1}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M1vl}(d_{vloer1}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11}(d_{vloer1})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer1}^2}\right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11}(d_{vloer1})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer1}^2}\right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

De langswapening is bepaald door  $M_{Rd}$  gelijk te stellen aan  $M_{Ed}$ .

$$M_{Ed} = M_{Rd} = \rho_1 b d f_{yd} (d - \beta \rho_1 f_{yd} d / (\alpha f_{cd}))$$

Deze moet wel groter zijn dan de minimum wapeningspercentage.

$$v_{11Rd.c.vl}(d_{vloer1}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer1}(d_{vloer1}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M1vl}(d_{vloer1}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer1}$$

$$v_{1Rd.c.vl}(d_{vloer1}) := \begin{cases} v_{11Rd.c.vl}(d_{vloer1}) & \text{if } v_{11Rd.c.vl}(d_{vloer1}) > 0.035 \cdot k_{vloer1}(d_{vloer1})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer1} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer1}(d_{vloer1})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer1} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer2}(d_{vloer2}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer2}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer2}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M2vl}(d_{vloer2}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer2}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer2}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{22Rd.c.vl}(d_{vloer2}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer2}(d_{vloer2}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M2vl}(d_{vloer2}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer2}$$

$$v_{2Rd.c.vl}(d_{vloer2}) := \begin{cases} v_{22Rd.c.vl}(d_{vloer2}) & \text{if } v_{22Rd.c.vl}(d_{vloer2}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer2}(d_{vloer2})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p2} \right] \cdot b \cdot d_{vloer2} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer2}(d_{vloer2})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p2} \right] \cdot b \cdot d_{vloer2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer3}(d_{vloer3}) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer3}}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer3}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M3vl}(d_{vloer3}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer3}^2}\right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer3}^2}\right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{33Rd.c.vl}(d_{vloer3}) := C_{Rd.c} \cdot k_{vloer3}(d_{vloer3}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M3}(d_{vloer3}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{p3} \cdot b \cdot d_{vloer3}$$

$$V_{3Rd.c.vl}(d_{vloer3}) := \begin{cases} V_{33Rd.c.vl}(d_{vloer3}) & \text{if } V_{33Rd.c.vl}(d_{vloer3}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer3}(d_{vloer3})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p3} \right] \cdot b \cdot d_{vloer3} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer3}(d_{vloer3})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p3} \right] \cdot b \cdot d_{vloer3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer4}(d_{vloer4}) := \begin{cases} \left(1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer4}}}\right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d_{vloer4}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M4vl}(d_{vloer4}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41}(d_{vloer4})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer4}^2}\right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41}(d_{vloer4})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer4}^2}\right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{44Rd.c.vl}(d_{vloer4}) := \left[ C_{Rd.c} \cdot k_{vloer4}(d_{vloer4}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M4}(d_{vloer4}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{p4} \right] \cdot b \cdot d_{vloer4}$$

$$V_{4Rd.c.v}(d_{vloer4}) := \begin{cases} V_{44Rd.c.v}(d_{vloer4}) & \text{if } V_{44Rd.c.v}(d_{vloer4}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer4}(d_{vloer4})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p4} \right] \cdot b \cdot d_{vloer4} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer4}(d_{vloer4})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p4} \right] \cdot b \cdot d_{vloer4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer5}(d_{vloer5}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer5}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer5}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M5vl}(d_{vloer5}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer5}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer5}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{55Rd.c.vl}(d_{vloer5}) := C_{Rd.c.} \cdot k_{vloer5}(d_{vloer5}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M5}(d_{vloer5}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{p5} \cdot b \cdot d_{vloer5}$$

$$V_{5Rd.c.vl}(d_{vloer5}) := \begin{cases} V_{55Rd.c.vl}(d_{vloer5}) & \text{if } V_{55Rd.c.vl}(d_{vloer5}) > \left[ 0.035 \cdot k_{vloer5}(d_{vloer5})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p5} \right] \cdot b \cdot d_{vloer5} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer5}(d_{vloer5})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{p5} \right] \cdot b \cdot d_{vloer5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer6}(d_{vloer6}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer6}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_{vloer6}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M6vl}(d_{vloer6}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer6}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer6}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{66Rd.c.vl}(d_{vloer6}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer6}(d_{vloer6}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M6}(d_{vloer6}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer6}$$

$$V_{6Rd.c.vl}(d_{vloer6}) := \begin{cases} V_{66Rd.c.vl}(d_{vloer6}) & \text{if } V_{66Rd.c.vl}(d_{vloer6}) > 0.035 \cdot k_{vloer6}(d_{vloer6})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer6} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer6}(d_{vloer6})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer6} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{vloer7}(d_{vloer7}) := \begin{cases} \left( 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer7}}} \right) & \text{if } 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{vloer7}}} < 2 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_{M7vl}(d_{vloer7}) := \begin{cases} \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer7}^2} \right)} \right] & \text{if } \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{vloer7}^2} \right)} \right] > \rho_{min.c} \\ \rho_{min.c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{77Rd.c.vl}(d_{vloer7}) := c_{Rd.c} \cdot k_{vloer7}(d_{vloer7}) \cdot \left( 100 \cdot \rho_{M7vl}(d_{vloer7}) \cdot f_{ck} \cdot \frac{N^2}{mm^4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d_{vloer7}$$

$$V_{7Rd.c.v}(d_{vloer7}) := \begin{cases} V_{77Rd.c.v}(d_{vloer7}) & \text{if } V_{77Rd.c.v}(d_{vloer7}) > 0.035 \cdot k_{vloer7}(d_{vloer7})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer7} \\ \left[ 0.035 \cdot k_{vloer7}(d_{vloer7})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( f_{ck} \cdot \frac{N}{mm^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d_{vloer7} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Voor elke deel is nu bepaald wat de minimale dikte van de wand moet zijn om de dwarskracht op te nemen zonder dwarskrachtwapening.

$$d_{vloer1} := 0.5m \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer1a} := d_{vloer1} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{1Rd.c.v}(d_{vloer1}) - V_{vloer11}(d_{vloer1}), d_{vloer1}) = 0.10m$$

$$d_{vloer1a} := d_{vloer1a} = 0.10m$$

$$d_{vloer2} := 1.0m \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer2a} := d_{vloer2} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{2Rd.c.v}(d_{vloer2}) - V_{vloer21}(d_{vloer2}), d_{vloer2}) = 0.71m$$

$$d_{vloer2a} := d_{vloer2a} = 0.71m$$

$$d_{vloer3} := 1.0m \quad \text{schatting}$$

Giver

$$V_{3Rd.c.v}(d_{vloer3}) = V_{vloer31}(d_{vloer3})$$

$$d_{vloer3a} := \text{Find}(d_{vloer3})$$

$$d_{vloer3a} := d_{vloer3a} = 0.96m$$

$$d_{vloer4} := 0.5m \quad \text{schatting}$$

Giver

$$V_{4Rd.c.v}(d_{vloer4}) = V_{vloer41}(d_{vloer4})$$

$$d_{vloer4a} := \text{Find}(d_{vloer4}) = 0.72 \text{ m}$$

$$d_{vloer4a} := d_{vloer4a} = 0.72 \text{ m}$$

$$d_{vloer5} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer5a} := d_{vloer5} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{5Rd.c.v}(d_{vloer5}) - V_{vloer51}(d_{vloer5}), d_{vloer5}) = 0.46 \text{ m}$$

$$d_{vloer5a} := d_{vloer5a} = 0.46 \text{ m}$$

$$d_{vloer6} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer6a} := d_{vloer6} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{6Rd.c.v}(d_{vloer6}) - V_{vloer61}(d_{vloer6}), d_{vloer6}) = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer6a} := d_{vloer6a} = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer7} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer7a} := d_{vloer7} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{7Rd.c.v}(d_{vloer7}) - V_{vloer71}(d_{vloer7}), d_{vloer7}) = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer7a} := d_{vloer7a} = 0.10 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} h_{vloer1} &:= \frac{d_{vloer1a}}{z_{vloer}} = 170.00 \cdot \text{mm} & h_{vloer2} &:= \frac{d_{vloer2a}}{z_{vloer}} = 1213.20 \cdot \text{mm} & h_{vloer3} &:= \frac{d_{vloer3a}}{z_{vloer}} = 1632.39 \cdot \text{mm} & h_{vloer4} &:= \frac{d_{vloer4a}}{z_{vloer}} = 1218.65 \cdot \text{mm} \\ h_{vloer5} &:= \frac{d_{vloer5a}}{z_{vloer}} = 786.79 \cdot \text{mm} & h_{vloer6} &:= \frac{d_{vloer6a}}{z_{vloer}} = 170.00 \cdot \text{mm} & h_{vloer7} &:= \frac{d_{vloer7a}}{z_{vloer}} = 170.00 \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

# Stabiliteit

Vervolgens is gekeken hoe breed de deur moet zijn om er voor te zorgen dat de deur drijvend stabiel is.

## parameters:

$$b_d := 3m, 3.1m..60m$$

Breedte sluisdeur, gevarieerd tussen 3 meter en 30 meter

$$L_{deur} := 72 \cdot m$$

Lengte sluisdeur

$$\gamma_b := 2500 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \cdot \frac{m}{s^2} = 24.52 \cdot \frac{kN}{m^3}$$

Soortelijk gewicht beton

$$\gamma_w := 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \cdot \frac{m}{s^2} = 9.81 \cdot \frac{kN}{m^3}$$

Soortelijk gewicht zoetwater

$$a := 7$$

aantal vloeren

$$c := 3$$

aantal wanden

$$f := \frac{60}{5} + 1 = 13.00$$

aantal tussenwanden

$$h_{vloer1} := \frac{d_{vloer1a}}{z_{vloer}} = 0.17 \cdot m$$

$$h_{vloer2} := \frac{d_{vloer2a}}{z_{vloer}} = 0.66 \cdot m$$

$$h_{vloer3} := \frac{d_{vloer3a}}{z_{vloer}} = 0.67 m$$

$$h_{vloer4} := \frac{d_{vloer4a}}{z_{vloer}} = 0.55 m$$

$$h_{vloer5} := \frac{d_{vloer5a}}{z_{vloer}} = 0.29 m$$

$$h_{vloer6} := \frac{d_{vloer6a}}{z_{vloer}} = 0.17 m$$

$$h_{vloer7} := \frac{d_{vloer7a}}{z_{vloer}} = 0.170 m$$

$$h_{wand1} := \frac{d_1}{z_{wand}} = 0.23 \cdot m$$

$$h_{wand2} := \frac{d_2}{z_{wand}} = 1.28 \cdot m$$

$$h_{wand3} := \frac{d_3}{z_{wand}} = 1.17 m$$

$$h_{wand4} := \frac{d_4}{z_{wand}} = 0.950 m$$

$$h_{wand5} := \frac{d_5}{z_{wand}} = 0.57 m$$

$$h_{wand6} := \frac{d_6}{z_{wand}} = 0.57 m$$

### Beton volume van de sluisdeur:

$$V_{vloer}(b_d) := h_{vloer1} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand1}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand1}) + h_{vloer2} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand2}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand2}) + h_{vloer3} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand3}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand3}) \dots \\ + h_{vloer4} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand4}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand4}) + h_{vloer5} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand5}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand5}) + h_{vloer6} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (L_{deur} - 2 \cdot h_{wand6}) \dots \\ + h_{vloer7} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (L_{deur} - 2 \cdot h_{wand6})$$

$$V_{wand}(b_d) := c \cdot \left[ h_{wand1} \cdot l_1 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand1}) + h_{wand2} \cdot l_2 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand2}) + h_{wand3} \cdot l_3 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand3}) + h_{wand4} \cdot l_4 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand4}) \dots \right. \\ \left. + h_{wand5} \cdot l_5 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand5}) + h_{wand6} \cdot l_6 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand6}) \right]$$

$$V_{tussenwand}(b_d) := f \left[ h_{wand2} \cdot \left( l_2 - \frac{h_{vloer2} + h_{vloer2}}{2} \right) \cdot (b_d - ch_{wand2}) \dots \right. \\ \left. + h_{wand3} \cdot \left( l_3 - \frac{h_{vloer3} + h_{vloer3}}{2} \right) \cdot (b_d - ch_{wand3}) + h_{wand4} \cdot \left( l_4 - \frac{h_{vloer4} + h_{vloer4}}{2} \right) \cdot (b_d - ch_{wand4}) \right]$$

$$V_{kopwand}(b_d) := 2 \cdot (b_d \cdot h_{wand2} \cdot l_2 + b_d \cdot h_{wand3} \cdot l_3 + b_d \cdot h_{wand4} \cdot l_4)$$

$$V_{totaal}(b_d) := V_{vloer}(b_d) + V_{wand}(b_d) + V_{tussenwand}(b_d) + V_{kopwand}(b_d) \quad \text{Volume van het beton in de deur } (m^3)$$

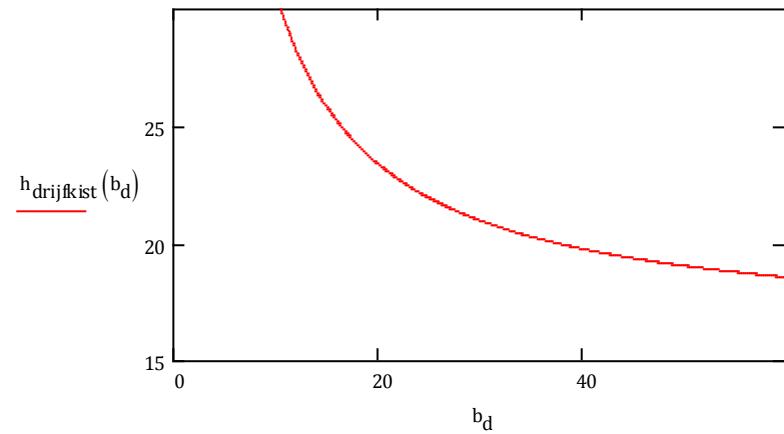
$$Fv(b_d) := V_{totaal}(b_d) \cdot \gamma_c \quad \text{Gewicht van het beton } (kN)$$

### Hoogte drijfkist:

$$h_{drijfkist}(b_d) := \frac{Fv(b_d) - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w - \frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} \cdot (16.62m - 16.3m) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w - b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w}$$

$$h_{ballast1}(b_d) := \frac{(3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w + b_d \cdot L_{deur} \cdot (16.3m - l_1) \cdot \gamma_w - Fv(b_d)}{(L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1}) \cdot \gamma_w}$$

$$h_{ballast2}(b_d) := \frac{3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{(L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1})} + 0.2m$$



# G.

## BENODIGDE DWARSKRACHTWAPENING VOLGENS EUROCODE EN NEN 6720

---

**Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode en de NEN 6720 bij betonsterkteklasse C55/67, met  $\theta=30^\circ$** 

$$k_h(d_1) := \begin{cases} \left(1.6m - \frac{d_1}{z_{wand}}\right) & \text{if } (1.6m - d_1) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

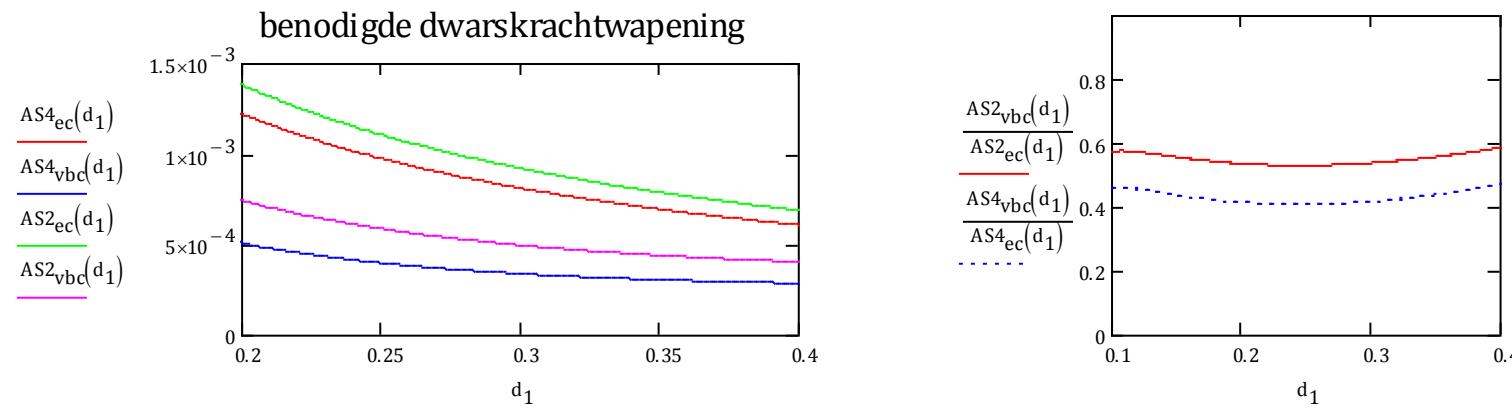
$$V_{VBC2}(d_1) := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M2}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1 \quad V_{VBC4}(d_1) := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M4}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1$$

$$AS2_{ec}(d_1) := \frac{V_{2max} \cdot 1m}{f_{yd}(d_1) \cdot \cot(21.8deg)}$$

$$AS2_{vbc}(d_1) := \frac{(V_{2max} - V_{VBC2}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30deg)}$$

$$AS4_{ec}(d_1) := \frac{V_{4max} \cdot 1m}{f_{yd}[(d_1) \cdot \cot(21.8deg)]}$$

$$AS4_{vbc}(d_1) := \frac{(V_{4max} - V_{VBC4}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30deg)}$$



**Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode en de VBC bij betonsterkteklasse C55/67, met  $\theta = 45^\circ$**

$$k_h(d_1) := \begin{cases} \left(1.6m - \frac{d_1}{z_{\text{wand}}}\right) & \text{if } (1.6m - d_1) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

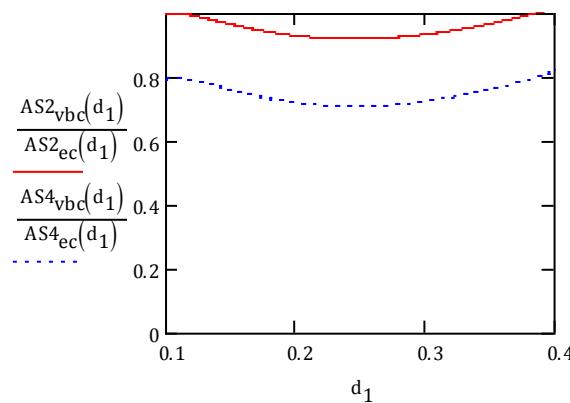
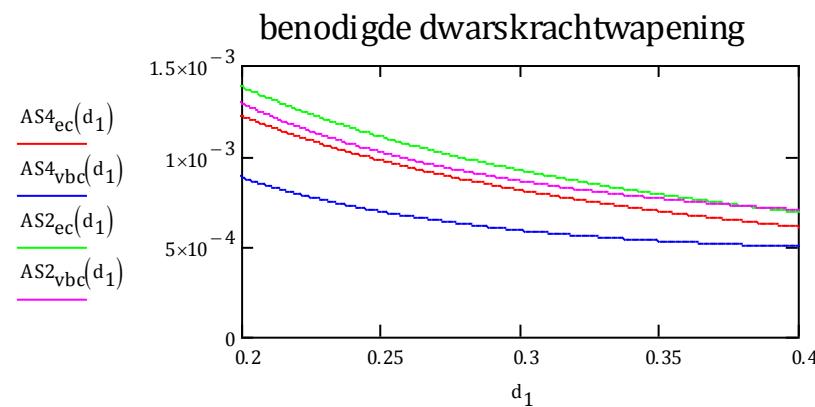
$$V_{\text{VBC2}}(d_1) := 0.4 \cdot f_{\text{ctd}} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M2}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1 \quad V_{\text{VBC4}}(d_1) := 0.4 \cdot f_{\text{ctd}} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M4}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1$$

$$AS2_{\text{ec}}(d_1) := \frac{V_{2\max} \cdot 1m}{f_{yd}(d_1) \cdot \cot(21.8\text{deg})}$$

$$AS2_{\text{vbc}}(d_1) := \frac{(V_{2\max} - V_{\text{VBC2}}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(45\text{deg})}$$

$$AS4_{\text{ec}}(d_1) := \frac{V_{4\max} \cdot 1m}{f_{yd}[(d_1) \cdot \cot(21.8\text{deg})]}$$

$$AS4_{\text{vbc}}(d_1) := \frac{(V_{4\max} - V_{\text{VBC4}}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(45\text{deg})}$$



**Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode en de VBC bij betonsterkteklasse C100/115, met  $\theta=30^\circ$** 

$$k_h(d_1) := \begin{cases} \left(1.6m - \frac{d_1}{z_{wand}}\right) & \text{if } (1.6m - d_1) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

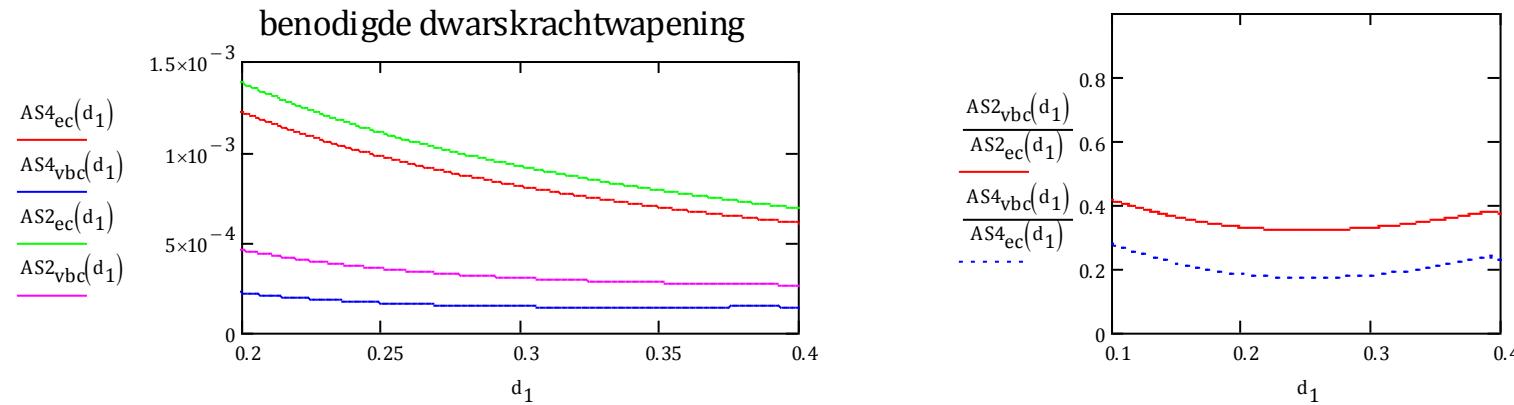
$$V_{VBC2}(d_1) := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M2}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1 \quad V_{VBC4}(d_1) := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M4}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1$$

$$AS2_{ec}(d_1) := \frac{V_{2max} \cdot 1m}{f_{yd}(d_1) \cdot \cot(21.8deg)}$$

$$AS2_{vbc}(d_1) := \frac{(V_{2max} - V_{VBC2}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30deg)}$$

$$AS4_{ec}(d_1) := \frac{V_{4max} \cdot 1m}{f_{yd}[(d_1) \cdot \cot(21.8deg)]}$$

$$AS4_{vbc}(d_1) := \frac{(V_{4max} - V_{VBC4}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30deg)}$$



**Benodigde hoeveelheid dwarskrachtwapening volgens de Eurocode en de VBC bij betonsterkteklasse C100/115, met  $\theta=45^\circ$**

$$k_h(d_1) := \begin{cases} \left(1.6m - \frac{d_1}{z_{\text{wand}}}\right) & \text{if } (1.6m - d_1) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

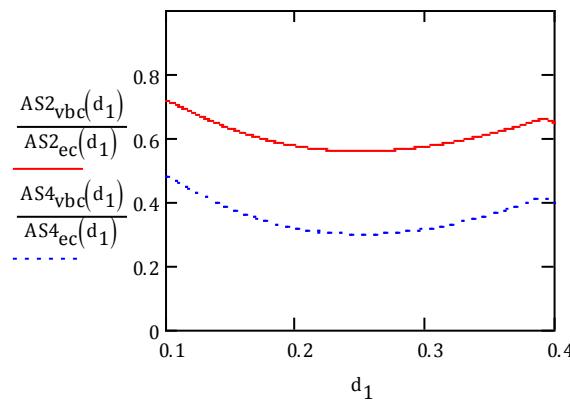
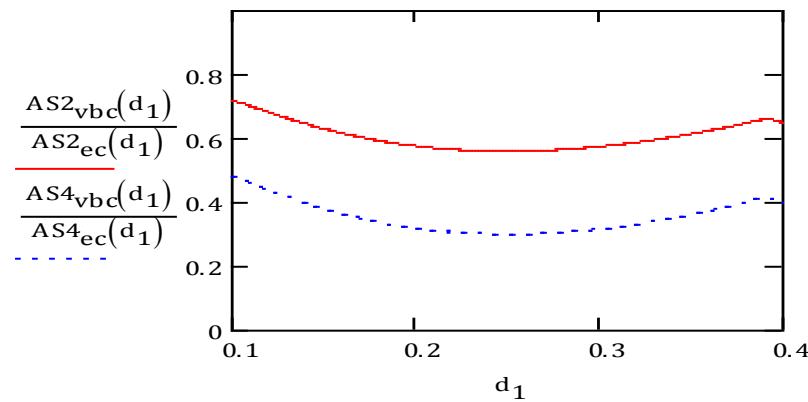
$$V_{\text{VBC2}}(d_1) := 0.4 \cdot f_{\text{ctd}} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M2}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1 \quad V_{\text{VBC4}}(d_1) := 0.4 \cdot f_{\text{ctd}} \cdot \frac{k_h(d_1)}{m} \cdot \sqrt[3]{100 \rho_{M4}(d_1)} \cdot 1m \cdot d_1$$

$$AS2_{\text{ec}}(d_1) := \frac{V_{2\max} \cdot 1m}{f_{yd}(d_1) \cdot \cot(21.8\text{deg})}$$

$$AS2_{\text{vbc}}(d_1) := \frac{(V_{2\max} - V_{\text{VBC2}}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(45\text{deg})}$$

$$AS4_{\text{ec}}(d_1) := \frac{V_{4\max} \cdot 1m}{f_{yd}[(d_1) \cdot \cot(21.8\text{deg})]}$$

$$AS4_{\text{vbc}}(d_1) := \frac{(V_{4\max} - V_{\text{VBC4}}(d_1)) \cdot 1m}{(d_1) \cdot f_{yd} \cdot \cot(45\text{deg})}$$



# H. BENODIGDE AANVAARWAPENING

---

dimensies	[mm]
d	13600
db	230
do	230
h	25000
hvloer	3000

13485

materiaal	[N/mm <sup>2</sup> ]				
C	55				
fck	55	fcd	45,83	alpha	0,71
fcm	63	εcu3	0,31%	beta	0,37
fyk	500	εc3	0,18%		
fyd	500	Ecm	38214	γc	1,2
Es	200000	fctm	4,2	γs	1,0

ρ	4,63%
As	265995 mm <sup>2</sup>
Ns	1,33E+08 N

staalafstanden	28	32	40
2 lagen	115,7	151,2	236,2
3 lagen	173,6	226,8	354,3

**Berekening drukzone behorende bij Breukmoment, betonmaatgevend**

xu3	-1003	εcu3	0,31%
xu2	179	εs	25,47%
xu1	163		

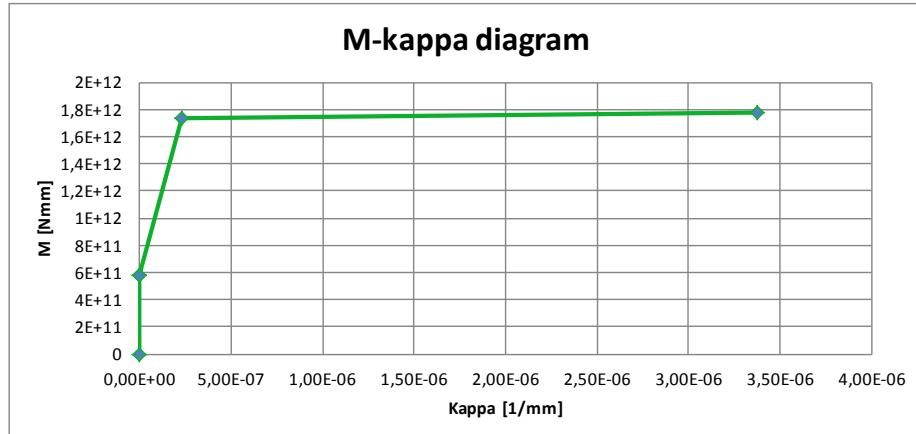
**Berekening drukzone behorende bij Breukmoment, staalmaatgevend**

x4	381	εc	0,12%
x5	406	εuk	4,50%
x6	351		

(kleiner dan flens)	1427
x groter dan flens	2618

x= 2618 mm

Vloeimoment	1,73E+12	Nmm	ke	2,30E-07	1/mm
bezwijkmoment	1,78E+12	Nmm	ku	3,38E-06	1/mm



p (wanneer lp>15m)	4533	mm
p (wanneer lp<15m)	4556	mm

tetaplastisch	0,0143
---------------	--------

v <sub>max</sub>	0,50	m/s
------------------	------	-----

dimensies	[mm]
d	13600
db	230
do	230
h	25000
hvloer	3000

13485

materiaal	[N/mm <sup>2</sup> ]				
C	100				
fck	100	fcd	83,33	alpha	0,54
fcm	108	εcu3	0,26%	beta	0,34
fyk	500	εc3	0,24%		
fyd	500	Ecm	44921	γc	1,2
Es	200000	fctm	5,2	γs	1,0

ρ	5,10%
As	293250
Ns	1,47E+08
	mm <sup>2</sup>
	N

staalafstanden	28	32	40
2 lagen	105,0	137,1	214,3
3 lagen	157,5	205,7	321,4

**Berekening drukzone behorende bij Breukmoment, betonmaatgevend**

xu3	-1835	εcu3	0,26%
xu2	158	εs	26,68%
xu1	130		

**Berekening drukzone behorende bij Breukmoment, staalmaatgevend**

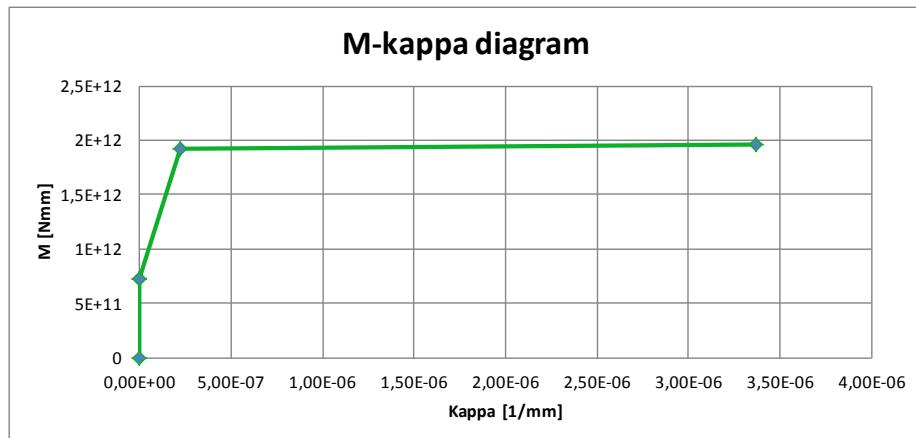
x4	424	εc	0,11%
x5	455	εuk	4,50%
x6	317		

x = 317 mm

(kleiner dan flens)	1294
x groter dan flens	2314

x = 2314 mm

Vloeimoment	1,92E+12	Nmm	ke	2,24E-07	1/mm
bezwijkmoment	1,96E+12	Nmm	ku	3,37E-06	1/mm



p (wanneer lp>15m)	4409	mm
p (wanneer lp<15m)	4181	mm

tetaplastisch	0,0132
---------------	--------

v <sub>max</sub>	0,50	m/s
------------------	------	-----

## I. BENODIGDE WAPENING BIJ TOEPASSING VAN BETONSTERKTEKLASSE C55/67

---

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} d_{wand,min} + 0.1m \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \end{pmatrix} m$$

## Langswapening wand

### support

$$\phi_{1y} := 20\text{mm}$$

$$d_{1y} := h_{wand1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y}}{2}$$

$$\rho_{M1y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{1y}}{fcd \cdot b \cdot d_{1y}^2} \right)} \right] = 0.97 \cdot \%$$

$$A_{s1y} := 1m \cdot \rho_{M1y} \cdot d_{1y} = 3158.48 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y} := \frac{1m}{\frac{A_{s1y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y}^2}{4}}} = 99.47 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y} := 16\text{mm}$$

$$d_{2y} := h_{wand2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y}}{2}$$

$$\rho_{M2y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{2y}}{fcd \cdot b \cdot d_{2y}^2} \right)} \right] = 1.06 \cdot \%$$

$$\phi_{1x} := 12\text{mm}$$

$$d_{1x} := h_{wand1} - c_{dekking} - \phi_{1y} - \frac{\phi_{1x}}{2}$$

$$A_{s1x} := 20\% \cdot A_{s1y} = 631.70 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{M1x} := \frac{A_{s1x}}{d_{1x} \cdot 1m} = 0.20 \cdot \%$$

$$s_{1x} := \frac{1m}{\frac{A_{s1x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x}^2}{4}}} = 179.04 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x} := 16\text{mm}$$

$$d_{2x} := h_{wand2} - c_{dekking} - \phi_{2y} - \frac{\phi_{2x}}{2}$$

$$\rho_{M2x} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{2x}}{fcd \cdot b \cdot d_{2x}^2} \right)} \right] = 0.88 \cdot \%$$

$$A_{s2y} := 1m \cdot \rho_{M2y} \cdot d_{2y} = 1828.34 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y} := \frac{1m}{\frac{A_{s2y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y}^2}{4}}} = 109.97 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y} := 16 \text{mm}$$

$$d_{3y} := h_{wand3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y}}{2}$$

$$\rho_{M3y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{3y}}{fcd \cdot b \cdot d_{3y}^2} \right)} \right] = 1.06 \cdot \%$$

$$A_{s3y} := 1m \cdot \rho_{M3y} \cdot d_{3y} = 1828.34 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y}^2}{4}}} = 109.97 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y} := 16 \text{mm}$$

$$d_{4y} := h_{wand4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y}}{2}$$

$$\rho_{M4y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{4y}}{fcd \cdot b \cdot d_{4y}^2} \right)} \right] = 1.06 \cdot \%$$

$$A_{s4y} := 1m \cdot \rho_{M4y} \cdot d_{4y} = 1828.34 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s2x} := 1m \cdot \rho_{M2x} \cdot d_{2x} = 1380.10 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2x} := \frac{1m}{\frac{A_{s2x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x}^2}{4}}} = 145.69 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3x} := 16 \text{mm}$$

$$d_{3x} := h_{wand3} - c_{dekking} - \phi_{3y} - \frac{\phi_{3x}}{2}$$

$$\rho_{M3x} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{3x}}{fcd \cdot b \cdot d_{3x}^2} \right)} \right] = 0.9 \cdot \%$$

$$A_{s3x} := 1m \cdot \rho_{M3x} \cdot d_{3x} = 1400.04 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x}^2}{4}}} = 143.61 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x} := 16 \text{mm}$$

$$d_{4x} := h_{wand4} - c_{dekking} - \phi_{4y} - \frac{\phi_{4x}}{2}$$

$$\rho_{M4x} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{4x}}{fcd \cdot b \cdot d_{4x}^2} \right)} \right] = 0.94 \cdot \%$$

$$A_{s4x} := 1m \cdot \rho_{M4x} \cdot d_{4x} = 1467.09 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y}^2}{4}}} = 109.97 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y} := 20 \text{mm}$$

$$d_{5y} := h_{wand5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y}}{2}$$

$$\rho_{M5y} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{5y}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y}^2} \right)} \right] = 1.43 \cdot \%$$

$$A_{s5y} := 1m \cdot \rho_{M5y} \cdot d_{5y} = 2437.99 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y} := \frac{1m}{\frac{A_{s5y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y}^2}{4}}} = 128.86 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y} := 20 \text{mm}$$

$$d_{6y} := h_{wand6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y}}{2}$$

$$\rho_{M6y} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{6y}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6y}^2} \right)} \right] = 1.43 \cdot \%$$

$$A_{s6y} := 1m \cdot \rho_{M6y} \cdot d_{6y} = 2437.99 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y} := \frac{1m}{\frac{A_{s6y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y}^2}{4}}} = 128.86 \cdot \text{mm}$$

$$s_{4x} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x}^2}{4}}} = 137.05 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5x} := 12 \text{mm}$$

$$d_{5x} := h_{wand5} - c_{dekking} - \phi_{5y} - \frac{\phi_{5x}}{2}$$

$$A_{s5x} := 20\% \cdot A_{s5y} = 487.60 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{M5x} := \frac{A_{s5x}}{d_{5x} \cdot 1m} = 0.32 \cdot \%$$

$$s_{5x} := \frac{1m}{\frac{A_{s5x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x}^2}{4}}} = 231.95 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x} := 12 \text{mm}$$

$$d_{6x} := h_{wand6} - c_{dekking} - \phi_{6y} - \frac{\phi_{6x}}{2}$$

$$A_{s6x} := 20\% \cdot A_{s6y} = 487.60 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{M6x} := \frac{A_{s6x}}{d_{6x} \cdot 1m} = 0.32 \cdot \%$$

$$s_{6x} := \frac{1m}{\frac{A_{s6x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x}^2}{4}}} = 231.95 \cdot \text{mm}$$

## Veld

$$\phi_{1y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{1y.veld} := h_{wand1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M1y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{1.veld}}{fcd \cdot b \cdot d_{1y.veld}^2} \right)} \right] = 0.5 \cdot \%$$

$$A_{s1y.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M1y.veld} \cdot d_{1y.veld} = 1518.98 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y.veld}^2}{4}}} = 132.37 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{2y.veld} := h_{wand2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M2y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{22.veld}}{fcd \cdot b \cdot d_{2y.veld}^2} \right)} \right] = 0.48 \cdot \%$$

$$A_{s2y.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2y.veld} \cdot d_{2y.veld} = 823.73 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y.veld}^2}{4}}} = 244.09 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y.veld} := 16\text{mm}$$

$$\phi_{1x.veld} := 12\text{mm}$$

$$d_{1x.veld} := h_{wand1} - c_{dekking} - \phi_{1y.veld} - \frac{\phi_{1x.veld}}{2}$$

$$A_{s1x.veld} := 20\% \cdot A_{s1y.veld} = 303.80 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1x.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x.veld}^2}{4}}} = 372.28 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{2x.veld} := h_{wand2} - c_{dekking} - \phi_{2y.veld} - \frac{\phi_{2x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M2x.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{21.veld}}{fcd \cdot b \cdot d_{2x.veld}^2} \right)} \right] = 0.14 \cdot \%$$

$$A_{s2x.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2x.veld} \cdot d_{2x.veld} = 216.20 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2x.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x.veld}^2}{4}}} = 232.50 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{3y.veld} := h_{wand3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M3y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{32}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{3y.veld}^2} \right)} \right] = 0.46 \cdot \%$$

$$A_{s3y.veld} := 1m \cdot \rho_{M3y.veld} \cdot d_{3y.veld} = 795.89 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y.veld}^2}{4}}} = 252.63 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{4y.veld} := h_{wand4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M4y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{42}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{4y.veld}^2} \right)} \right] = 0.44 \cdot \%$$

$$A_{s4y.veld} := 1m \cdot \rho_{M4y.veld} \cdot d_{4y.veld} = 763.86 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y.veld}^2}{4}}} = 263.22 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{5y.veld} := h_{wand5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y.veld}}{2}$$

$$d_{3x.veld} := h_{wand3} - c_{dekking} - \phi_{3y.veld} - \frac{\phi_{3x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M3x.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{31}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{3x.veld}^2} \right)} \right] = 0.14 \cdot \%$$

$$A_{s3x.veld} := 1m \cdot \rho_{M3x.veld} \cdot d_{3x.veld} = 225.74 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x.veld}^2}{4}}} = 222.67 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{4x.veld} := h_{wand4} - c_{dekking} - \phi_{4y.veld} - \frac{\phi_{4x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M4x.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{41}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{4x.veld}^2} \right)} \right] = 0.16 \cdot \%$$

$$A_{s4x.veld} := 1m \cdot \rho_{M4x.veld} \cdot d_{4x.veld} = 255.47 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x.veld}^2}{4}}} = 196.76 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{5x.veld} := h_{wand5} - c_{dekking} - \phi_{5y.veld} - \frac{\phi_{5x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M5y.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{5.veld}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y.veld}^2} \right)} \right] = 0.64 \cdot \%$$

$$A_{s5y.veld} := 1m \cdot \rho_{M5y.veld} \cdot d_{5y.veld} = 1105.47 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s5y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y.veld}^2}{4}}} = 181.88 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{6y.veld} := h_{wand6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M6y.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{6.veld}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6y.veld}^2} \right)} \right] = 0.62 \cdot \%$$

$$A_{s6y.veld} := 1m \cdot \rho_{M6y.veld} \cdot d_{6y.veld} = 1066.68 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s6y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y.veld}^2}{4}}} = 188.49 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s5x.veld} := 20\% \cdot A_{s5y.veld} = 221.09 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s5x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x.veld}^2}{4}}} = 227.35 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{6x.veld} := h_{wand6} - c_{dekking} - \phi_{6y.veld} - \frac{\phi_{6x.veld}}{2}$$

$$A_{s6x.veld} := 20\% \cdot A_{s6y.veld} = 213.34 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s6x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x.veld}^2}{4}}} = 235.62 \cdot \text{mm}$$

Giver

$$V_{4Rd.c.v}(d_{vloer4}) = V_{vloer41}(d_{vloer4})$$

$$d_{vloer4a} := \text{Find}(d_{vloer4}) = 0.72 \text{ m}$$

$$d_{vloer4a} := d_{vloer4a} = 0.72 \text{ m}$$

$$d_{vloer5} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer5a} := d_{vloer5} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{5Rd.c.v}(d_{vloer5}) - V_{vloer51}(d_{vloer5}), d_{vloer5}) = 0.46 \text{ m}$$

$$d_{vloer5a} := d_{vloer5a} = 0.46 \text{ m}$$

$$d_{vloer6} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer6a} := d_{vloer6} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{6Rd.c.v}(d_{vloer6}) - V_{vloer61}(d_{vloer6}), d_{vloer6}) = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer6a} := d_{vloer6a} = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer7} := 0.5 \text{ m} \quad \text{schatting}$$

$$d_{vloer7a} := d_{vloer7} \text{ on error} \quad \text{root}(V_{7Rd.c.v}(d_{vloer7}) - V_{vloer71}(d_{vloer7}), d_{vloer7}) = 0.10 \text{ m}$$

$$d_{vloer7a} := d_{vloer7a} = 0.10 \text{ m}$$

## Langswapening Vloer oplegging

$$\phi_{1x,vl} := 12\text{mm}$$

$$d_{1x,vl} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \phi_{1y,vl} - \frac{\phi_{1x,vl}}{2}$$

$$\rho_{M1x,vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11}(d_{vloer1})}{fcd \cdot b \cdot d_{1x,vl}^2} \right)} \right] = 0.4 \cdot \%$$

$$A_{s1x,vl} := 1\text{m} \cdot \rho_{M1x,vl} \cdot d_{1x,vl} = 427.35 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1x,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1x,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x,vl}^2}{4}}} = 264.65 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y,vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{2y,vl} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y,vl}}{2}$$

$$\rho_{M2y,vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer22}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2y,vl}^2} \right)} \right] = 1.68 \cdot \%$$

$$A_{s2y,vl} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2y,vl} \cdot d_{2y,vl} = 3520.07 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2y,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y,vl}^2}{4}}} = 89.25 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{1y,vl} := 6 \cdot \text{mm}$$

$$d_{1y,vl} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y,vl}}{2}$$

$$A_{s1y,vl} := 20\% \cdot A_{s1x,vl} = 85.47 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1y,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y,vl}^2}{4}}} = 330.81 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x,vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{2x,vl} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \phi_{2y,vl} - \frac{\phi_{2x,vl}}{2}$$

$$\rho_{M2x,vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2x,vl}^2} \right)} \right] = 2.78 \cdot \%$$

$$A_{s2x,vl} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2x,vl} \cdot d_{2x,vl} = 5281.22 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2x,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2x,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x,vl}^2}{4}}} = 59.49 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{3y.vl} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y.vl}}{2}$$

$$\rho_{M3y.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer32}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3y.vl}^2} \right)} \right] = 1.53\% \quad$$

$$A_{s3y.vl} := 1m \cdot \rho_{M3y.vl} \cdot d_{3y.vl} = 3207.15 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y.vl}^2}{4}}} = 97.96 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{4y.vl} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y.vl}}{2}$$

$$\rho_{M4y.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer42}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4y.vl}^2} \right)} \right] = 1.23\% \quad$$

$$A_{s4y.vl} := 1m \cdot \rho_{M4y.vl} \cdot d_{4y.vl} = 2590.88 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y.vl}^2}{4}}} = 121.26 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{5y.vl} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y.vl}}{2}$$

$$\phi_{3x.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{3x.vl} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \phi_{3y.vl} - \frac{\phi_{3x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M3x.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3x.vl}^2} \right)} \right] = 2.51\% \quad$$

$$A_{s3x.vl} := 1m \cdot \rho_{M3x.vl} \cdot d_{3x.vl} = 4764.48 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x.vl}^2}{4}}} = 65.94 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{4x.vl} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \phi_{4y.vl} - \frac{\phi_{4x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M4x.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4x.vl}^2} \right)} \right] = 1.99\% \quad$$

$$A_{s4x.vl} := 1m \cdot \rho_{M4x.vl} \cdot d_{4x.vl} = 3783.11 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x.vl}^2}{4}}} = 83.04 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5x.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{5x.vl} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \phi_{5y.vl} - \frac{\phi_{5x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M5y.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer52}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y.vl}^2} \right)} \right] = 0.92 \cdot \%$$

$$A_{s5y.vl} := 1m \cdot \rho_{M5y.vl} \cdot d_{5y.vl} = 1931.89 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s5y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y.vl}^2}{4}}} = 162.62 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x.vl} := 12 \text{mm}$$

$$d_{6x.vl} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \phi_{6y.vl} - \frac{\phi_{6x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M6x.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6x.vl}^2} \right)} \right] = 0.4 \cdot \%$$

$$A_{s6x.vl} := 1m \cdot \rho_{M6x.vl} \cdot d_{6x.vl} = 427.35 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s6x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x.vl}^2}{4}}} = 264.65 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7x.vl} := 12 \text{mm}$$

$$d_{7x.vl} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \phi_{7y.vl} - \frac{\phi_{7x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M7x.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{7x.vl}^2} \right)} \right] = 0.4 \cdot \%$$

$$\rho_{M5x.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5x.vl}^2} \right)} \right] = 1.46 \cdot \%$$

$$A_{s5x.vl} := 1m \cdot \rho_{M5x.vl} \cdot d_{5x.vl} = 2776.41 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s5x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x.vl}^2}{4}}} = 113.15 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y.vl} := 6 \text{mm}$$

$$d_{6y.vl} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y.vl}}{2}$$

$$A_{s6y.vl} := 20\% \cdot A_{s6x.vl} = 85.47 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s6y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y.vl}^2}{4}}} = 330.81 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7y.vl} := 6 \text{mm}$$

$$d_{7y.vl} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \frac{\phi_{7y.vl}}{2}$$

$$A_{s7x,vl} := 1m \cdot \rho_{M7x,vl} \cdot d_{7x,vl} = 427.35 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7x,vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s7x,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7x,vl}}{4}^2}} = 264.65 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s7y,vl} := 20\% \cdot A_{s7x,vl} = 85.47 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7y,vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s7y,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7y,vl}}{4}^2}} = 330.81 \cdot \text{mm}$$

## Veld

$$\phi_{1x,vl,veld} := 8 \text{mm}$$

$$d_{1x,vl,veld} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \phi_{1y,vl,veld} - \frac{\phi_{1x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M1x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11,veld}(d_{vloer1})}{fcd \cdot b \cdot d_{1x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.19 \cdot \%$$

$$A_{s1x,vl,veld} := 1m \cdot 1.25 \rho_{M1x,vl,veld} \cdot d_{1x,vl,veld} = 258.83 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s1x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x,vl,veld}}{4}^2}} = 194.20 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y,vl,veld} := 12 \text{mm}$$

$$d_{2y,vl,veld} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M2x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21,veld}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.93 \cdot \%$$

$$A_{s2y,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M2y,vl,veld} \cdot d_{2y,vl,veld} = 698.52 \cdot \text{mm}^2$$

$$\phi_{1y,vl,veld} := 6 \text{mm}$$

$$d_{1y,vl,veld} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y,vl,veld}}{2}$$

$$A_{s1y,vl,veld} := 20\% A_{s1x,vl,veld} = 51.77 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s1y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y,vl,veld}}{4}^2}} = 546.19 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x,vl,veld} := 16 \text{mm}$$

$$d_{2x,vl,veld} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \phi_{2y,vl,veld} - \frac{\phi_{2x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M2y,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer22,veld}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2y,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.33 \cdot \%$$

$$A_{s2x,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M2x,vl,veld} \cdot d_{2x,vl,veld} = 1859.31 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s2y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y,vl,veld}^2}{4}}} = 161.91 \cdot mm$$

$$\phi_{3y,vl,veld} := 12mm$$

$$d_{3y,vl,veld} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M3y,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer32,veld}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3y,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.3 \cdot \%$$

$$A_{s3y,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M3y,vl,veld} \cdot d_{3y,vl,veld} = 641.89 \cdot mm^2$$

$$s_{3y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y,vl,veld}^2}{4}}} = 176.19 \cdot mm$$

$$\phi_{4y,vl,veld} := 12mm$$

$$d_{4y,vl,veld} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M4y,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer42,veld}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4y,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.25 \cdot \%$$

$$A_{s4y,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M4y,vl,veld} \cdot d_{4y,vl,veld} = 527.16 \cdot mm^2$$

$$s_{4y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y,vl,veld}^2}{4}}} = 214.54 \cdot mm$$

$$s_{2x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s2x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x,vl,veld}^2}{4}}} = 108.14 \cdot mm$$

$$\phi_{3x,vl,veld} := 16mm$$

$$d_{3x,vl,veld} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \phi_{3x,vl,veld} - \frac{\phi_{3x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M3x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31,veld}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.85 \cdot \%$$

$$A_{s3x,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M3x,vl,veld} \cdot d_{3x,vl,veld} = 1702.69 \cdot mm^2$$

$$s_{3x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x,vl,veld}^2}{4}}} = 118.08 \cdot mm$$

$$\phi_{4x,vl,veld} := 16mm$$

$$d_{4x,vl,veld} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \phi_{4x,vl,veld} - \frac{\phi_{4x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M4x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41,veld}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 3.35 \cdot \%$$

$$A_{s4x,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M4x,vl,veld} \cdot d_{4x,vl,veld} = 3353.77 \cdot mm^2$$

$$s_{4x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x,vl,veld}^2}{4}}} = 59.95 \cdot mm$$

$$\phi_{5y.vl.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{5y.vl.veld} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M5y.vl.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer52.veld}(d_{vloer5})}{fcd \cdot b \cdot d_{5y.vl.veld}^2} \right)} \right] = 0.18 \cdot \%$$

$$A_{s5y.vl.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M5y.vl.veld} \cdot d_{5y.vl.veld} = 396.05 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s5y.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y.vl.veld}}{4}^2}} = 126.92 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x.vl.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{6x.vl.veld} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6x.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M6x.vl.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61.veld}(d_{vloer6})}{fcd \cdot b \cdot d_{6x.vl.veld}^2} \right)} \right] = 0.19 \cdot \%$$

$$A_{s6x.vl.veld} := 1\text{m} \cdot 1.25 \rho_{M6x.vl.veld} \cdot d_{6x.vl.veld} = 258.83 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6x.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s6x.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x.vl.veld}}{4}^2}} = 194.20 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7x.vl.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{7x.vl.veld} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \frac{\phi_{7x.vl.veld}}{2}$$

$$\phi_{5x.vl.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{5x.vl.veld} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \phi_{5y.vl.veld} - \frac{\phi_{5x.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M5x.vl.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51.veld}(d_{vloer5})}{fcd \cdot b \cdot d_{5x.vl.veld}^2} \right)} \right] = 0.5 \cdot \%$$

$$A_{s5x.vl.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M5x.vl.veld} \cdot d_{5x.vl.veld} = 1023.87 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5x.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s5x.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x.vl.veld}}{4}^2}} = 196.37 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y.vl.veld} := 6\text{mm}$$

$$d_{6y.vl.veld} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y.vl.veld}}{2}$$

$$A_{s6y.vl.veld} := 20\% A_{s6x.vl.veld} = 51.77 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s6y.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y.vl.veld}}{4}^2}} = 546.19 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7y.vl.veld} := 6\text{mm}$$

$$d_{7y.vl.veld} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \frac{\phi_{7y.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M7xvlveld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71,veld}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{7xvl,veld}^2} \right)} \right] = 0.19 \cdot \%$$

$$A_{s7xvlveld} := 1m \cdot 1.25 \rho_{M7xvlveld} \cdot d_{7xvl,veld} = 258.83 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7x,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s7x,v1veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7x,v1veld}}{4}^2}} = 194.20 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s7y,v1veld} := 20\% A_{s7xvlveld} = 51.77 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7y,v1veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s7y,v1veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7y,v1veld}}{4}^2}} = 546.19 \cdot \text{mm}$$

## Dwarskrachtwapening vloer VBC

$$\sigma_{p2} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p2l} = 4.51 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p3} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p3l} = 4.14 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p4} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p4l} = 3.40 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p5} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p5l} = 2.58 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$k_h := \begin{cases} (1.6m - h_{vloer1}) & \text{if } (1.6m - h_{vloer1}) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{VBC,v1l1y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(20\% \rho_{M1x,v1})} \cdot 1m \cdot d_{1y,v}$$

$$V_{VBC,v1l2y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M2y,v1} + 20\% \rho_{M1x,v1})} + 0.15 \sigma_{p2l} \right] \cdot (1m \cdot d_{2y,v}) = 433.24$$

$$V_{VBC,v1l3y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M3y,v1})} + 0.15 \sigma_{p3l} \right] \cdot 1m \cdot d_{3y,v}$$

$$V_{VBC,v1l4y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M4y,v1})} + 0.15 \sigma_{p4l} \right] \cdot 1m \cdot d_{4y,v}$$

$$V_{VBC.vl5y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M5y.vl} + 20\% \rho_{M1x.vl})} + 0.15 \sigma_{p5l} \right] \cdot 1m \cdot d_{5y.v}$$

$$V_{VBC.vl7y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(20\% \rho_{M7x.vl} + 20\% \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{7y.v}$$

$$V_{VBC.vl1x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{1x.vl}$$

$$V_{VBC.vl3x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M3x.vl})} + 0.15 \sigma_{p3} \right] \cdot 1m \cdot d_{3x.vl}$$

$$V_{VBC.vl5x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M5x.vl} + \rho_{M1x.vl})} + 0.15 \sigma_{p5} \right] \cdot 1m \cdot d_{5x.vl}$$

$$V_{VBC.vl7x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M7x.vl} + \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{7x.vl}$$

$$x_{2y.vl} := 1m$$

Giver  $V_{vloer22}(d_{vloer2}) - \frac{V_{vloer22}(d_{vloer2})}{\frac{1}{2} b_d} x_{2y.vl} = V_{VBC.vl2y}$   $x_{2y.vl} := \text{Find}(x_{2y.vl}) = 387 \cdot \text{mm}$

$$V_{VBC.vl6y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(20\% \rho_{M6x.vl} + 20\% \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{6y.v}$$

$$V_{VBC.vl2x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M2x.vl} + \rho_{M1x.vl})} + 0.15 \sigma_{p2} \right] \cdot (1m \cdot d_{2x.vl})$$

$$V_{VBC.vl4x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M4x.vl})} + 0.15 \sigma_{p4} \right] \cdot 1m \cdot d_{4x.vl}$$

$$V_{VBC.vl6x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M6x.vl} + \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{6x.vl}$$

$$A_{sw2y.vl} := \frac{(V_{vloer22}(d_{vloer2}) - V_{VBC.vl2y})}{(d_{vloer2}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\deg)} = 0.47 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{2x.vl} := 1m$$

Giver  $V_{vloer21}(d_{vloer2}) - \frac{V_{vloer21}(d_{vloer2})}{\frac{1}{2} b_{cel}} x_{2x.vl} = V_{VBC.vl2x}$   $x_{2x.vl} := \text{Find}(x_{2x.vl}) = 980 \cdot \text{mm}$

$$A_{sw2x.vl} := \frac{(V_{vloer21}(d_{vloer2}) - V_{VBC.vl2x})}{(d_{vloer2}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\deg)} = 1.73 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.vl2} := 0.75 d_{2y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl2} := 1.5 \cdot d_{2y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.vl2} := s_{2y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl2}}{s_{2y.vl}}, 1\right) = 263.67 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.vl2} := \frac{s_{2yw.vl2}}{1m} \cdot s_{1yw.vl2} \cdot A_{sw2y.vl} = 19.45 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.vl2} := 0.75d_{2x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl2} := 1.5 \cdot d_{2x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl2} := s_{2x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl2}}{s_{2x.vl}}, 1\right) = 234.88 \cdot \text{mm}$$

$$x_{3y.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer32}(d_{vloer3}) - \frac{V_{vloer32}(d_{vloer3})}{\frac{1}{2} b_d} x_{3y.vl} = V_{VBC.vl3y} \quad x_{3y.vl} := \text{Find}(x_{3y.vl}) = -227 \cdot \text{mm}$$

$$x_{3x.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer31}(d_{vloer3}) - \frac{V_{vloer31}(d_{vloer3})}{\frac{1}{2} b_{cel}} x_{3x.vl} = V_{VBC.vl3x} \quad x_{3x.vl} := \text{Find}(x_{3x.vl}) = 575 \cdot \text{mm}$$

$$s_{1yw.vl3} := 0.75d_{3y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl3} := 1.5 \cdot d_{3y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2yw.vl3} := s_{3y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl3}}{s_{3y.vl}}, 1\right) = 289.35 \cdot \text{mm}$$

$$s_{1xw.vl3} := 0.75d_{3x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl3} := 1.5 \cdot d_{3x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl3} := s_{3x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl3}}{s_{3x.vl}}, 1\right) = 260.35 \cdot \text{mm}$$

$$x_{4y.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer42}(d_{vloer4}) - \frac{V_{vloer42}(d_{vloer4})}{\frac{1}{2} b_d} x_{4y.vl} = V_{VBC.vl4y} \quad x_{4y.vl} := \text{Find}(x_{4y.vl}) = -560 \cdot \text{mm}$$

$$x_{4x.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer41}(d_{vloer4}) - \frac{V_{vloer41}(d_{vloer4})}{\frac{1}{2} b_{cel}} x_{4x.vl} = V_{VBC.vl4x} \quad x_{4x.vl} := \text{Find}(x_{4x.vl}) = 340 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl2} := \frac{s_{2xw.vl2}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl2} \cdot A_{sw2x.vl} = 57.78 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sw3y.vl} := \frac{(V_{vloer32}(d_{vloer3}) - V_{VBC.vl3y})}{(d_{vloer3}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.25 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{sw3x.vl} := \frac{(V_{vloer31}(d_{vloer3}) - V_{VBC.vl3x})}{(d_{vloer3}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.93 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{staaf.y.vl3} := \frac{s_{2yw.vl3}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.vl3} \cdot A_{sw3y.vl} = -11.53 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{staaf.x.vl3} := \frac{s_{2xw.vl3}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl3} \cdot A_{sw3x.vl} = 34.62 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sw4y.vl} := \frac{(V_{vloer42}(d_{vloer4}) - V_{VBC.vl4y})}{(d_{vloer4}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.52 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{sw4x.vl} := \frac{(V_{vloer41}(d_{vloer4}) - V_{VBC.vl4x})}{(d_{vloer4}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.46 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.vl4} := 0.75d_{4y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl4} := 1.5 \cdot d_{4y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2yw.vl4} := s_{4y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl4}}{s_{4y.vl}}, 1\right) = 238.41 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.vl4} := \frac{s_{2yw.vl4}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.vl4} \cdot A_{sw4y.vl} = -19.36 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.vl4} := 0.75d_{4x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl4} := 1.5 \cdot d_{4x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl4} := s_{4x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl4}}{s_{4x.vl}}, 1\right) = 245.58 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl4} := \frac{s_{2xw.vl4}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl4} \cdot A_{sw4x.vl} = 15.93 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{5y.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{vloer52}(d_{vloer5}) - \frac{V_{vloer52}(d_{vloer5})}{\frac{1}{2}b_d} x_{5y.vl} = V_{VBC.vl5y} \quad x_{5y.vl} := \text{Find}(x_{5y.vl}) = -464 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw5y.vl} := \frac{(V_{vloer52}(d_{vloer5}) - V_{VBC.vl5y})}{(d_{vloer5}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.33 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{5x.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{vloer51}(d_{vloer5}) - \frac{V_{vloer51}(d_{vloer5})}{\frac{1}{2}b_{cel}} x_{5x.vl} = V_{VBC.vl5x} \quad x_{5x.vl} := \text{Find}(x_{5x.vl}) = 307 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw5x.vl} := \frac{(V_{vloer51}(d_{vloer5}) - V_{VBC.vl5x})}{(d_{vloer5}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.31 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.vl5} := 0.75d_{5y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl5} := 1.5 \cdot d_{5y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2yw.vl5} := s_{5y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl5}}{s_{5y.vl}}, 1\right) = 159.57 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.vl5} := \frac{s_{2yw.vl5}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.vl5} \cdot A_{sw5y.vl} = -8.20 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.vl5} := 0.75d_{5x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl5} := 1.5 \cdot d_{5x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl5} := s_{5x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl5}}{s_{5x.vl}}, 1\right) = 222.69 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl5} := \frac{s_{2xw.vl5}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl5} \cdot A_{sw5x.vl} = 9.97 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{6x.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{vloer61}(d_{vloer6}) - \frac{V_{vloer61}(d_{vloer6})}{\frac{1}{2}b_{cel}} x_{6x.vl} = V_{VBC.vl6x} \quad x_{6x.vl} := \text{Find}(x_{6x.vl}) = -14034 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw6x.vl} := \frac{(V_{vloer61}(d_{vloer6}) - V_{VBC.vl6x})}{(d_{vloer6}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -1.28 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1xw.vl6} := 0.75d_{6xvl} = 81.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl6} := 1.5 \cdot d_{6xvl} = 162.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2xw.vl6} := s_{6xvl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl6}}{s_{6xvl}}, 1\right) = 0.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl6} := \frac{s_{2xw.vl6}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl6} \cdot A_{sw6x.vl} = 0.00 \cdot \text{mm}^2$$

# J. OPSOMMING WAPENING BIJ TOEPASSING BETONSTERKTEKLASSE C55/67

---

		dikte (mm)	Wapening							
			Veld				Support			
			φ(mm)	s	aantal per veld	l (mm)	φ(mm)	s	aantal per veld	l (mm)
Aanvaarwapening	Wand 1 y	385	16	131	39	5370	20	99	51	2000
	x		32	151	49	3000	32	151	49	2000
	Wand 2 y	230	16	251	20	1644	16	115	44	1096
	x		32	151	19	3904	32	151	19	1096
	Wand 3 y	230	16	259	20	1776	16	115	44	1184
	x		32	151	20	3816	32	151	20	1184
	Wand 4 y	230	16	269	19	1986	16	115	44	1324
	x		32	151	22	3676	32	151	22	1324
	Wand 5 y	230	16	184	28	2448	20	133	38	1632
	x		32	151	28	3368	32	151	28	1632
	Wand 6 y	230	16	191	27	3072	20	133	38	2048
	x		32	151	34	2952	32	151	34	2048
Zonder Aanvaarwapening	Wand 1 y	385	16	131	39	5370	20	99	0	2000
	x		12	367	21	3000	12	179	0	2000
	Wand 2 y	230	16	251	20	1644	16	115	44	1096
	x		8	238	12	3904	16	152	19	1096
	Wand 3 y	230	16	259	20	1776	16	115	44	1184
	x		8	229	13	3816	16	150	21	1184
	Wand 4 y	230	16	269	19	1986	16	115	38	1324
	x		8	205	17	3676	16	144	14	1324
	Wand 5 y	230	16	184	28	2448	20	133	38	1632
	x		8	231	18	3368	12	240	17	1632
	Wand 6 y	230	16	191	27	3072	20	133	38	2048
	x		8	239	22	2952	12	240	22	2048
	Vloer 1 y	boven		0		2300	12	249	28	2700
	x			0		4050	6	312	17	2700
	y	onder	8	182	38	2300		0		2700
	x		6	450	12	4050		0		2700
	Vloer 2 y	boven		0		2300		0		2700
	x		12	174	29	4050	12	312	17	2700
	y	onder			38	2300				2700
	x		6	450	12	4050	20	93	54	2700
	Vloer 3 y	boven		0		2300		0		2700
	x		12	189	27	4050	20	102	50	2700
	y	onder		0		2300		0		2700
	x		12	189	27	4050	20	102	50	2700
	Vloer 4 y	boven	270		0	2300		0		2700

<b>x</b>			12	229	22	4050	20	125	40	2700		
<b>y</b>	<b>onder</b>			0		2300		0		2700		
<b>x</b>			12	229	22	4050	20	125	40	2700		
<b>Vloer 5</b>	<b>y</b>	<b>boven</b>			0	2300		0		2700		
<b>x</b>			270	8	135	38	4050	20	166	31	2700	
<b>y</b>	<b>onder</b>				0	2300		0		2700		
<b>x</b>				8	135	38	4050	20	166	31	2700	
<b>Vloer 6</b>	<b>y</b>	<b>boven</b>			0	2300	12	249	28	2700		
<b>x</b>			170		0	4050	6	312	17	2700		
<b>y</b>	<b>onder</b>			8	182	38	2300		0		2700	
<b>x</b>				6	450	12	4050		0		2700	
<b>Vloer 7</b>	<b>y</b>	<b>boven</b>			0	2300	12	249	28	2700		
<b>x</b>			170		0	4050	6	312	17	2700		
<b>y</b>	<b>onder</b>			8	450	15	2300		0		2700	
<b>x</b>				6	182	28	4050		0		2700	
<b>Tussenwand 2</b>	<b>y</b>			230	16	251	28	2280	16	115	60	1096
	<b>x</b>				8	238	12	4080	16	152	19	1096
<b>Tussenwand 3</b>	<b>y</b>			230	16	259	27	2280	16	115	60	1184
	<b>x</b>				8	229	13	4080	16	150	20	1184
<b>Tussenwand 4</b>	<b>y</b>			230	16	269	26	2280	16	115	60	1324
	<b>x</b>				8	205	17	4080	16	144	24	1324

		Dwarskracht		
		Lengte waarover dwarskrachtwapening nodig is:	aantal deuvels per veld	totaal:
Aanvaarwapening	<b>Wand 1 y</b>			
	x			
	<b>Wand 2 y</b>	394	160	1920
	x	782	168	2016
	<b>Wand 3 y</b>	356	120	1440
	x	658	156	1872
	<b>Wand 4 y</b>	481		1920
	x	505		1440
	<b>Wand 5 y</b>	475	160	1920
	x			0
Zonder Aanvaarwapening	<b>Wand 6 y</b>	1441	480	5760
	x			0
	<b>Wand 1 y</b>			
	x			
	<b>Wand 2 y</b>	394	144	3456
	x	782	154	3696
	<b>Wand 3 y</b>	356	108	2592
	x	658	144	3456
	<b>Wand 4 y</b>	481		3456
	x	505		2496
Vloer	<b>Vloer 5 y</b>	475	144	3456
	x			0
	<b>Vloer 6 y</b>	1441	432	10368
	x			0
	<b>Vloer 1 y</b>			
	x			
	y			
	x			
	<b>Vloer 2 y</b>	980		9504
	x	387		864
<b>Vloer 3 y</b>	y	0		0
	x	0		0
	<b>Vloer 4 y</b>	575		5280
	x	0		0
<b>Vloer 5 y</b>	y	0		0
	x	0		0
	<b>Vloer 6 y</b>	340		3168
<b>Vloer 7 y</b>	x	0		0
	y	0		0

	x	0		0
<b>Vloer 5</b>	y	307		4224
	x	0		0
	y			
	x			
<b>Vloer 6</b>	y			
	x			
	y			
	x			
<b>Vloer 7</b>	y			
	x			
	y			
	x			
<b>Tussenwand 2</b>	y	394	162	2592
	x	782	156	2016
<b>Tussenwand 3</b>	y	356	216	1944
	x	658	120	1872
<b>Tussenwand 4</b>	y	481	0	2592
	x	505	0	1440

## K. BENODIGDE WAPENING BIJ TOEPASSING VAN BETONSTERKTEKLASSE C100/115

---

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} d_{wand,min} + 0.1m \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \\ d_{wand,min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \end{pmatrix} m$$

## Langswapening wand

### support

$$\phi_{1y} := 20\text{mm}$$

$$d_{1y} := h_{wand1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y}}{2}$$

$$\rho_{M1y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{1y}}{fcd \cdot b \cdot d_{1y}^2} \right)} \right] = 0.95 \cdot \%$$

$$A_{s1y} := 1m \cdot \rho_{M1y} \cdot d_{1y} = 3089.46 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y} := \frac{1m}{\frac{A_{s1y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y}}{4}^2}} = 101.69 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y} := 16\text{mm}$$

$$d_{2y} := h_{wand2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y}}{2}$$

$$\rho_{M2y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{2y}}{fcd \cdot b \cdot d_{2y}^2} \right)} \right] = 1.04 \cdot \%$$

$$\phi_{1x} := 12\text{mm}$$

$$d_{1x} := h_{wand1} - c_{dekking} - \phi_{1y} - \frac{\phi_{1x}}{2}$$

$$A_{s1x} := 20\% \cdot A_{s1y} = 617.89 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{M1x} := \frac{A_{s1x}}{d_{1x} \cdot 1m} = 0.20 \cdot \%$$

$$s_{1x} := \frac{1m}{\frac{A_{s1x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x}}{4}^2}} = 183.04 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x} := 16\text{mm}$$

$$d_{2x} := h_{wand2} - c_{dekking} - \phi_{2y} - \frac{\phi_{2x}}{2}$$

$$\rho_{M2x} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{2x}}{fcd \cdot b \cdot d_{2x}^2} \right)} \right] = 0.87 \cdot \%$$

$$A_{s2y} := 1m \cdot \rho_{M2y} \cdot d_{2y} = 1784.23 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y} := \frac{1m}{\frac{A_{s2y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y}^2}{4}}} = 112.69 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y} := 16 \text{mm}$$

$$d_{3y} := h_{wand3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y}}{2}$$

$$\rho_{M3y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{3y}}{fcd \cdot b \cdot d_{3y}^2} \right)} \right] = 1.04 \cdot \%$$

$$A_{s3y} := 1m \cdot \rho_{M3y} \cdot d_{3y} = 1784.23 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y}^2}{4}}} = 112.69 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y} := 16 \text{mm}$$

$$d_{4y} := h_{wand4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y}}{2}$$

$$\rho_{M4y} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{4y}}{fcd \cdot b \cdot d_{4y}^2} \right)} \right] = 1.04 \cdot \%$$

$$A_{s4y} := 1m \cdot \rho_{M4y} \cdot d_{4y} = 1784.23 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s2x} := 1m \cdot \rho_{M2x} \cdot d_{2x} = 1352.82 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2x} := \frac{1m}{\frac{A_{s2x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x}^2}{4}}} = 148.62 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3x} := 16 \text{mm}$$

$$d_{3x} := h_{wand3} - c_{dekking} - \phi_{3y} - \frac{\phi_{3x}}{2}$$

$$\rho_{M3x} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{3x}}{fcd \cdot b \cdot d_{3x}^2} \right)} \right] = 0.88 \cdot \%$$

$$A_{s3x} := 1m \cdot \rho_{M3x} \cdot d_{3x} = 1371.93 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x}^2}{4}}} = 146.55 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x} := 16 \text{mm}$$

$$d_{4x} := h_{wand4} - c_{dekking} - \phi_{4y} - \frac{\phi_{4x}}{2}$$

$$\rho_{M4x} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{4x}}{fcd \cdot b \cdot d_{4x}^2} \right)} \right] = 0.92 \cdot \%$$

$$A_{s4x} := 1m \cdot \rho_{M4x} \cdot d_{4x} = 1436.11 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y}^2}{4}}} = 112.69 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y} := 20\text{mm}$$

$$d_{5y} := h_{wand5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y}}{2}$$

$$\rho_{M5y} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{5y}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y}^2} \right)} \right] = 1.39 \cdot \%$$

$$A_{s5y} := 1m \cdot \rho_{M5y} \cdot d_{5y} = 2355.98 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y} := \frac{1m}{\frac{A_{s5y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y}^2}{4}}} = 133.35 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y} := 20\text{mm}$$

$$d_{6y} := h_{wand6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y}}{2}$$

$$\rho_{M6y} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{6y}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6y}^2} \right)} \right] = 1.39 \cdot \%$$

$$A_{s6y} := 1m \cdot \rho_{M6y} \cdot d_{6y} = 2355.98 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y} := \frac{1m}{\frac{A_{s6y}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y}^2}{4}}} = 133.35 \cdot \text{mm}$$

$$s_{4x} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x}^2}{4}}} = 140.01 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5x} := 12\text{mm}$$

$$d_{5x} := h_{wand5} - c_{dekking} - \phi_{5y} - \frac{\phi_{5x}}{2}$$

$$A_{s5x} := 20\% \cdot A_{s5y} = 471.20 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{M5x} := \frac{A_{s5x}}{d_{5x} \cdot 1m} = 0.31 \cdot \%$$

$$s_{5x} := \frac{1m}{\frac{A_{s5x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x}^2}{4}}} = 240.02 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x} := 12\text{mm}$$

$$d_{6x} := h_{wand6} - c_{dekking} - \phi_{6y} - \frac{\phi_{6x}}{2}$$

$$A_{s6x} := 20\% \cdot A_{s6y} = 471.20 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_{M6x} := \frac{A_{s6x}}{d_{6x} \cdot 1m} = 0.31 \cdot \%$$

$$s_{6x} := \frac{1m}{\frac{A_{s6x}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x}^2}{4}}} = 240.02 \cdot \text{mm}$$

## Veld

$$\phi_{1y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{1y.veld} := h_{wand1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M1y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{1.veld}}{fcd \cdot b \cdot d_{1y.veld}^2} \right)} \right] = 0.5 \cdot \%$$

$$A_{s1y.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M1y.veld} \cdot d_{1y.veld} = 1503.79 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y.veld}^2}{4}}} = 133.70 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{2y.veld} := h_{wand2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M2y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{22.veld}}{fcd \cdot b \cdot d_{2y.veld}^2} \right)} \right] = 0.47 \cdot \%$$

$$A_{s2y.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2y.veld} \cdot d_{2y.veld} = 815.22 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y.veld}^2}{4}}} = 246.64 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y.veld} := 16\text{mm}$$

$$\phi_{1x.veld} := 12\text{mm}$$

$$d_{1x.veld} := h_{wand1} - c_{dekking} - \phi_{1y.veld} - \frac{\phi_{1x.veld}}{2}$$

$$A_{s1x.veld} := 20\% \cdot A_{s1y.veld} = 300.76 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1x.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x.veld}^2}{4}}} = 376.04 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{2x.veld} := h_{wand2} - c_{dekking} - \phi_{2y.veld} - \frac{\phi_{2x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M2x.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{21.veld}}{fcd \cdot b \cdot d_{2x.veld}^2} \right)} \right] = 0.13 \cdot \%$$

$$A_{s2x.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2x.veld} \cdot d_{2x.veld} = 215.58 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2x.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x.veld}^2}{4}}} = 233.16 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{3y.veld} := h_{wand3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M3y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{32}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{3y.veld}^2} \right)} \right] = 0.46 \cdot \%$$

$$A_{s3y.veld} := 1m \cdot \rho_{M3y.veld} \cdot d_{3y.veld} = 787.95 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y.veld}^2}{4}}} = 255.17 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{4y.veld} := h_{wand4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M4y.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{42}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{4y.veld}^2} \right)} \right] = 0.44 \cdot \%$$

$$A_{s4y.veld} := 1m \cdot \rho_{M4y.veld} \cdot d_{4y.veld} = 756.56 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y.veld}^2}{4}}} = 265.76 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{5y.veld} := h_{wand5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y.veld}}{2}$$

$$d_{3x.veld} := h_{wand3} - c_{dekking} - \phi_{3y.veld} - \frac{\phi_{3x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M3x.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{31}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{3x.veld}^2} \right)} \right] = 0.14 \cdot \%$$

$$A_{s3x.veld} := 1m \cdot \rho_{M3x.veld} \cdot d_{3x.veld} = 225.07 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x.veld}^2}{4}}} = 223.33 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{4x.veld} := h_{wand4} - c_{dekking} - \phi_{4y.veld} - \frac{\phi_{4x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M4x.veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{41}.veld}{fcd \cdot b \cdot d_{4x.veld}^2} \right)} \right] = 0.16 \cdot \%$$

$$A_{s4x.veld} := 1m \cdot \rho_{M4x.veld} \cdot d_{4x.veld} = 254.61 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x.veld}^2}{4}}} = 197.42 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{5x.veld} := h_{wand5} - c_{dekking} - \phi_{5y.veld} - \frac{\phi_{5x.veld}}{2}$$

$$\rho_{M5y.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{5.veld}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y.veld}^2} \right)} \right] = 0.63 \cdot \%$$

$$A_{s5y.veld} := 1m \cdot \rho_{M5y.veld} \cdot d_{5y.veld} = 1089.92 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s5y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y.veld}^2}{4}}} = 184.47 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{6y.veld} := h_{wand6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y.veld}}{2}$$

$$\rho_{M6y.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{6.veld}}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6y.veld}^2} \right)} \right] = 0.61 \cdot \%$$

$$A_{s6y.veld} := 1m \cdot \rho_{M6y.veld} \cdot d_{6y.veld} = 1052.23 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s6y.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y.veld}^2}{4}}} = 191.08 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s5x.veld} := 20\% \cdot A_{s5y.veld} = 217.98 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s5x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x.veld}^2}{4}}} = 230.59 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{6x.veld} := h_{wand6} - c_{dekking} - \phi_{6y.veld} - \frac{\phi_{6x.veld}}{2}$$

$$A_{s6x.veld} := 20\% \cdot A_{s6y.veld} = 210.45 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6x.veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s6x.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x.veld}^2}{4}}} = 238.85 \cdot \text{mm}$$

## Dwarskrachtwapening VBC

$$k_h := \begin{cases} (1.6m - h_{wand1}) & \text{if } (1.6m - h_{wand1}) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{VBC1.y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2\rho_{M1y})} \cdot 1m \cdot d_{1y}$$

$$V_{VBC3.y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2\rho_{M3y})} \cdot 1m \cdot d_{3y}$$

$$V_{VBC5.y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2\rho_{M5y})} \cdot 1m \cdot d_{5y}$$

$$V_{VBC1.x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2\rho_{M1x})} \cdot 1m \cdot d_{1x}$$

$$V_{VBC3.x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2\rho_{M3x})} \cdot 1m \cdot d_{3x}$$

$$V_{VBC5.x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2\rho_{M5x})} \cdot 1m \cdot d_{5x}$$

$$x_{2y} := 1m$$

$$\text{Giver } V_{22} - \frac{V_{22}}{\frac{1}{2}l_2} \cdot x_{2y} = V_{VBC2.y}$$

$$x_{2y} := \text{Find}(x_{2y}) = 203 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw2y} := \frac{(V_{22} - V_{VBC2.y})}{(h_{wand2} - 2c_{dekking}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\deg)} = 0.467 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{2x} := 1m$$

$$\text{Giver } V_{21} - \frac{V_{21}}{\frac{1}{2}b_{cel}} \cdot x_{2x} = V_{VBC2.x}$$

$$x_{2x} := \text{Find}(x_{2x}) = 436 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw2x} := \frac{(V_{21} - V_{VBC2.x})}{(h_{wand2} - 2c_{dekking}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\deg)} = 0.494 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$\frac{V_{VBC2.x} - V_{21}}{V_{21}} = 435.73 \cdot \text{mm}$$

$$-\frac{1}{2}b_{cel}$$

$$s_{1yw.2} := 0.75d_{2y} = 129.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.\max.2} := 1.5 \cdot d_{2y} = 258.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.2} := s_{2y} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.\max.2}}{s_{2y}}, 1\right) = 213.42 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.2} := \frac{s_{2yw.2}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.2} \cdot A_{sw2y} = 12.85 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.2} := 0.75d_{2x} = 117.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.\max.2} := 1.5 \cdot d_{2x} = 234.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2xw.2} := s_{2x} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.\max.2}}{s_{2x}}, 1\right) = 140.24 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.2} := \frac{s_{2xw.2}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.2} \cdot A_{sw2x} = 8.10 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{3y} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{32} - \frac{V_{32}}{\frac{1}{2}l_3}x_{3y} = V_{VBC3.y}$$

$$x_{3y} := \text{Find}(x_{3y}) = 136 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw3y} := \frac{(V_{32} - V_{VBC3.y})}{(d_3) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.24 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{3x} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{31} - \frac{V_{31}}{\frac{1}{2}b_{cel}}x_{3x} = V_{VBC3.x}$$

$$x_{3x} := \text{Find}(x_{3x}) = 289 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw3x} := \frac{(V_{31} - V_{VBC3.x})}{(d_3) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.27 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.3} := 0.75d_{3y} = 129.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.\max.3} := 1.5 \cdot d_{3y} = 258.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.3} := s_{3y} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.\max.3}}{s_{3y}}, 1\right) = 213.42 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.3} := \frac{s_{2yw.3}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.3} \cdot A_{sw3y} = 6.54 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.3} := 0.75d_{3x} = 117.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.\max.3} := 1.5 \cdot d_{3x} = 234.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2xw.3} := s_{3x} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.\max.3}}{s_{3x}}, 1\right) = 138.12 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.3} := \frac{s_{2xw.3}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.3} \cdot A_{sw3x} = 4.35 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{4y} := .11\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{42} - \frac{V_{42}}{\frac{1}{2}b_{cel}}x_{4y} = V_{VBC4.y}$$

$$x_{4y} := \text{Find}(x_{4y}) = 91 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw4y} := \frac{(V_{42} - V_{VBC4.y})}{(d_4) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.090 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{4x} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{41} - \frac{V_{41}}{\frac{1}{2}b_{cel}}x_{4x} = V_{VBC4.x}$$

$$x_{4x} := \text{Find}(x_{4x}) = 114 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw4x} := \frac{(V_{41} - V_{VBC4.x})}{(d_4) \cdot f_y d \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.10 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.4} := 0.75d_{4y} = 129.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.4} := 1.5 \cdot d_{4y} = 258.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.4} := s_{4y} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.4}}{s_{4y}}, 1\right) = 213.42 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.4} := \frac{s_{2yw.4}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.4} \cdot A_{sw4y} = 2.49 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.4} := 0.75d_{4x} = 117.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.4} := 1.5 \cdot d_{4x} = 234.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2xw.4} := s_{4x} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.4}}{s_{4x}}, 1\right) = 131.07 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.4} := \frac{s_{2xw.4}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.4} \cdot A_{sw4x} = 1.53 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{5y} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{5max} - \frac{V_{5max}}{\frac{1}{2}l_5}x_{5y} = V_{VBC5.y}$$

$$x_{5y} := \text{Find}(x_{5y}) = 183 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw5y} := \frac{(V_{5max} - V_{VBC5.y})}{(d_5) \cdot f_y d \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.25 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.5} := 0.75d_{5y} = 127.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.5} := 1.5 \cdot d_{5y} = 255.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.5} := s_{5y} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.5}}{s_{5y}}, 1\right) = 244.49 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.5} := \frac{s_{2yw.5}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.5} \cdot A_{sw5y} = 7.88 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{6y} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver } V_{6max} - \frac{V_{6max}}{\frac{1}{2}l_6}x_{6y} = V_{VBC6.x}$$

$$x_{6y} := \text{Find}(x_{6y}) = 1272 \cdot \text{mm}$$

$$A_{sw6y} := \frac{(V_{6max} - V_{VBC6.y})}{(d_6) \cdot f_y d \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.14 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.6} := 0.75d_{6y} = 127.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.6} := 1.5 \cdot d_{6y} = 255.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.6} := s_{6y} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.6}}{s_{6y}}, 1\right) = 244.49 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.6} := \frac{s_{2yw.6}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.6} \cdot A_{sw6y} = 4.42 \cdot \text{mm}^2$$

## Langswapening Vloer oplegging

$$\phi_{1x,vl} := 12\text{mm}$$

$$d_{1x,vl} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \phi_{1y,vl} - \frac{\phi_{1x,vl}}{2}$$

$$\rho_{M1x,vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11}(d_{vloer1})}{fcd \cdot b \cdot d_{1x,vl}^2} \right)} \right] = 0.39\%$$

$$A_{s1x,vl} := 1\text{m} \cdot \rho_{M1x,vl} \cdot d_{1x,vl} = 423.72 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1x,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1x,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x,vl}^2}{4}}} = 266.91 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y,vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{2y,vl} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y,vl}}{2}$$

$$\rho_{M2y,vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer22}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2y,vl}^2} \right)} \right] = 1.61\%$$

$$A_{s2y,vl} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2y,vl} \cdot d_{2y,vl} = 3378.62 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2y,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y,vl}^2}{4}}} = 92.98 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{1y,vl} := 6 \cdot \text{mm}$$

$$d_{1y,vl} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y,vl}}{2}$$

$$A_{s1y,vl} := 20\% \cdot A_{s1x,vl} = 84.74 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s1y,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y,vl}^2}{4}}} = 333.64 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x,vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{2x,vl} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \phi_{2y,vl} - \frac{\phi_{2x,vl}}{2}$$

$$\rho_{M2x,vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2x,vl}^2} \right)} \right] = 2.57\%$$

$$A_{s2x,vl} := 1\text{m} \cdot \rho_{M2x,vl} \cdot d_{2x,vl} = 4890.97 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2x,vl} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s2x,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x,vl}^2}{4}}} = 64.23 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{3y.vl} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y.vl}}{2}$$

$$\rho_{M3y.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer32}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3y.vl}^2} \right)} \right] = 1.47 \cdot \%$$

$$A_{s3y.vl} := 1m \cdot \rho_{M3y.vl} \cdot d_{3y.vl} = 3091.31 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y.vl}^2}{4}}} = 101.63 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{4y.vl} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y.vl}}{2}$$

$$\rho_{M4y.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer42}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4y.vl}^2} \right)} \right] = 1.2 \cdot \%$$

$$A_{s4y.vl} := 1m \cdot \rho_{M4y.vl} \cdot d_{4y.vl} = 2517.24 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y.vl}^2}{4}}} = 124.80 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{5y.vl} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y.vl}}{2}$$

$$\phi_{3x.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{3x.vl} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \phi_{3y.vl} - \frac{\phi_{3x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M3x.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3x.vl}^2} \right)} \right] = 2.34 \cdot \%$$

$$A_{s3x.vl} := 1m \cdot \rho_{M3x.vl} \cdot d_{3x.vl} = 4455.03 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x.vl}^2}{4}}} = 70.52 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{4x.vl} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \phi_{4y.vl} - \frac{\phi_{4x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M4x.vl} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_y d} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4x.vl}^2} \right)} \right] = 1.89 \cdot \%$$

$$A_{s4x.vl} := 1m \cdot \rho_{M4x.vl} \cdot d_{4x.vl} = 3597.24 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x.vl}^2}{4}}} = 87.33 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5x.vl} := 20\text{mm}$$

$$d_{5x.vl} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \phi_{5y.vl} - \frac{\phi_{5x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M5y.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer52}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y.vl}^2} \right)} \right] = 0.9 \cdot \%$$

$$A_{s5y.vl} := 1m \cdot \rho_{M5y.vl} \cdot d_{5y.vl} = 1892.05 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s5y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y.vl}^2}{4}}} = 166.04 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x.vl} := 12 \text{mm}$$

$$d_{6x.vl} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \phi_{6y.vl} - \frac{\phi_{6x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M6x.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6x.vl}^2} \right)} \right] = 0.39 \cdot \%$$

$$A_{s6x.vl} := 1m \cdot \rho_{M6x.vl} \cdot d_{6x.vl} = 423.72 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s6x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x.vl}^2}{4}}} = 266.91 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7x.vl} := 12 \text{mm}$$

$$d_{7x.vl} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \phi_{7y.vl} - \frac{\phi_{7x.vl}}{2}$$

$$\rho_{M7x.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{7x.vl}^2} \right)} \right] = 0.39 \cdot \%$$

$$\rho_{M5x.vl} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5x.vl}^2} \right)} \right] = 1.41 \cdot \%$$

$$A_{s5x.vl} := 1m \cdot \rho_{M5x.vl} \cdot d_{5x.vl} = 2681.02 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5x.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s5x.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x.vl}^2}{4}}} = 117.18 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y.vl} := 6 \text{mm}$$

$$d_{6y.vl} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y.vl}}{2}$$

$$A_{s6y.vl} := 20\% \cdot A_{s6x.vl} = 84.74 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y.vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s6y.vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y.vl}^2}{4}}} = 333.64 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7y.vl} := 6 \text{mm}$$

$$d_{7y.vl} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \frac{\phi_{7y.vl}}{2}$$

$$A_{s7x,vl} := 1m \cdot \rho_{M7x,vl} \cdot d_{7x,vl} = 423.72 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7x,vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s7x,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7x,vl}}{4}^2}} = 266.91 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s7y,vl} := 20\% \cdot A_{s7x,vl} = 84.74 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7y,vl} := \frac{1m}{\frac{A_{s7y,vl}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7y,vl}}{4}^2}} = 333.64 \cdot \text{mm}$$

## Veld

$$\phi_{1x,vl,veld} := 8 \text{mm}$$

$$d_{1x,vl,veld} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \phi_{1y,vl,veld} - \frac{\phi_{1x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M1x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer11,veld}(d_{vloer1})}{fcd \cdot b \cdot d_{1x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.19 \cdot \%$$

$$A_{s1x,vl,veld} := 1m \cdot 1.25 \rho_{M1x,vl,veld} \cdot d_{1x,vl,veld} = 257.81 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s1x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1x,vl,veld}}{4}^2}} = 194.97 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2y,vl,veld} := 12 \text{mm}$$

$$d_{2y,vl,veld} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \frac{\phi_{2y,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M2x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer21,veld}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.91 \cdot \%$$

$$A_{s2y,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M2y,vl,veld} \cdot d_{2y,vl,veld} = 693.66 \cdot \text{mm}^2$$

$$\phi_{1y,vl,veld} := 6 \text{mm}$$

$$d_{1y,vl,veld} := h_{vloer1} - c_{dekking} - \frac{\phi_{1y,vl,veld}}{2}$$

$$A_{s1y,vl,veld} := 20\% A_{s1x,vl,veld} = 51.56 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s1y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{1y,vl,veld}}{4}^2}} = 548.36 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{2x,vl,veld} := 16 \text{mm}$$

$$d_{2x,vl,veld} := h_{vloer2} - c_{dekking} - \phi_{2y,vl,veld} - \frac{\phi_{2x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M2y,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{f_yd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer22,veld}(d_{vloer2})}{fcd \cdot b \cdot d_{2y,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.32 \cdot \%$$

$$A_{s2x,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M2x,vl,veld} \cdot d_{2x,vl,veld} = 1820.53 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{2y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s2y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2y,vl,veld}^2}{4}}} = 163.04 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3y,vl,veld} := 12 \text{mm}$$

$$d_{3y,vl,veld} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \frac{\phi_{3y,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M3y,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer32,veld}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3y,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.3 \cdot \%$$

$$A_{s3y,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M3y,vl,veld} \cdot d_{3y,vl,veld} = 637.80 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3y,vl,veld}^2}{4}}} = 177.32 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4y,vl,veld} := 12 \text{mm}$$

$$d_{4y,vl,veld} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \frac{\phi_{4y,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M4y,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer42,veld}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4y,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.25 \cdot \%$$

$$A_{s4y,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M4y,vl,veld} \cdot d_{4y,vl,veld} = 524.41 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4y,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4y,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4y,vl,veld}^2}{4}}} = 215.67 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s2x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{2x,vl,veld}^2}{4}}} = 110.44 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{3x,vl,veld} := 16 \text{mm}$$

$$d_{3x,vl,veld} := h_{vloer3} - c_{dekking} - \phi_{3x,vl,veld} - \frac{\phi_{3x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M3x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer31,veld}(d_{vloer3})}{fcd \cdot b \cdot d_{3x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 0.84 \cdot \%$$

$$A_{s3x,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M3x,vl,veld} \cdot d_{3x,vl,veld} = 1670.39 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{3x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s3x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{3x,vl,veld}^2}{4}}} = 120.37 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{4x,vl,veld} := 16 \text{mm}$$

$$d_{4x,vl,veld} := h_{vloer4} - c_{dekking} - \phi_{4x,vl,veld} - \frac{\phi_{4x,vl,veld}}{2}$$

$$\rho_{M4x,vl,veld} := \alpha \cdot \frac{fcd}{fyd} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer41,veld}(d_{vloer4})}{fcd \cdot b \cdot d_{4x,vl,veld}^2} \right)} \right] = 3.04 \cdot \%$$

$$A_{s4x,vl,veld} := 1m \cdot \rho_{M4x,vl,veld} \cdot d_{4x,vl,veld} = 3037.47 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{4x,vl,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s4x,vl,veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{4x,vl,veld}^2}{4}}} = 66.19 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{5y.vl.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{5y.vl.veld} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \frac{\phi_{5y.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M5y.vl.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer52.veld}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5y.vl.veld}^2} \right)} \right] = 0.18 \cdot \%$$

$$A_{s5y.vl.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M5y.vl.veld} \cdot d_{5y.vl.veld} = 394.52 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5y.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s5y.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5y.vl.veld}}{4}^2}} = 127.41 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6x.vl.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{6x.vl.veld} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6x.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M6x.vl.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer61.veld}(d_{vloer6})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{6x.vl.veld}^2} \right)} \right] = 0.19 \cdot \%$$

$$A_{s6x.vl.veld} := 1\text{m} \cdot 1.25 \rho_{M6x.vl.veld} \cdot d_{6x.vl.veld} = 257.81 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6x.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s6x.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6x.vl.veld}}{4}^2}} = 194.97 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7x.vl.veld} := 8\text{mm}$$

$$d_{7x.vl.veld} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \frac{\phi_{7x.vl.veld}}{2}$$

$$\phi_{5x.vl.veld} := 16\text{mm}$$

$$d_{5x.vl.veld} := h_{vloer5} - c_{dekking} - \phi_{5y.vl.veld} - \frac{\phi_{5x.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M5x.vl.veld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer51.veld}(d_{vloer5})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{5x.vl.veld}^2} \right)} \right] = 0.5 \cdot \%$$

$$A_{s5x.vl.veld} := 1\text{m} \cdot \rho_{M5x.vl.veld} \cdot d_{5x.vl.veld} = 1012.76 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{5x.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s5x.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{5x.vl.veld}}{4}^2}} = 198.53 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{6y.vl.veld} := 6\text{mm}$$

$$d_{6y.vl.veld} := h_{vloer6} - c_{dekking} - \frac{\phi_{6y.vl.veld}}{2}$$

$$A_{s6y.vl.veld} := 20\% A_{s6x.vl.veld} = 51.56 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{6y.vl.veld} := \frac{1\text{m}}{\frac{A_{s6y.vl.veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{6y.vl.veld}}{4}^2}} = 548.36 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{7y.vl.veld} := 6\text{mm}$$

$$d_{7y.vl.veld} := h_{vloer7} - c_{dekking} - \frac{\phi_{7y.vl.veld}}{2}$$

$$\rho_{M7xvlveld} := \alpha \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{4 \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{M_{vloer71,veld}(d_{vloer7})}{f_{cd} \cdot b \cdot d_{7xvl,veld}^2} \right)} \right] = 0.19 \cdot \%$$

$$A_{s7xvlveld} := 1m \cdot 1.25 \rho_{M7xvlveld} \cdot d_{7xvl,veld} = 257.81 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7x,veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s7x,v1veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7x,v1veld}}{4}^2}} = 194.97 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s7y,v1veld} := 20\% A_{s7xvlveld} = 51.56 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{7y,v1veld} := \frac{1m}{\frac{A_{s7y,v1veld}}{\pi \cdot \frac{\phi_{7y,v1veld}}{4}^2}} = 548.36 \cdot \text{mm}$$

## Dwarskrachtwapening vloer VBC

$$\sigma_{p2} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p2l} = 4.51 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p3} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p3l} = 4.14 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p4} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p4l} = 3.40 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p5} = 0.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{p5l} = 2.58 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$k_h := \begin{cases} (1.6m - h_{vloer1}) & \text{if } (1.6m - h_{vloer1}) > 1m \\ (1m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_{VBC,v1l1y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(20\% \rho_{M1x,v1})} \cdot 1m \cdot d_{1y,v}$$

$$V_{VBC,v1l2y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M2y,v1} + 20\% \rho_{M1x,v1})} + 0.15 \sigma_{p2l} \right] \cdot (1m \cdot d_{2y,v}) = 496.39$$

$$V_{VBC,v1l3y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M3y,v1})} + 0.15 \sigma_{p3l} \right] \cdot 1m \cdot d_{3y,v}$$

$$V_{VBC,v1l4y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M4y,v1})} + 0.15 \sigma_{p4l} \right] \cdot 1m \cdot d_{4y,v}$$

$$V_{VBC.vl5y} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M5y.vl} + 20\% \rho_{M1x.vl})} + 0.15 \sigma_{p5l} \right] \cdot 1m \cdot d_{5y.v}$$

$$V_{VBC.vl7y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(20\% \rho_{M7x.vl} + 20\% \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{7y.v}$$

$$V_{VBC.vl1x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{1x.vl}$$

$$V_{VBC.vl3x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M3x.vl})} + 0.15 \sigma_{p3} \right] \cdot 1m \cdot d_{3x.vl}$$

$$V_{VBC.vl5x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M5x.vl} + \rho_{M1x.vl})} + 0.15 \sigma_{p5} \right] \cdot 1m \cdot d_{5x.vl}$$

$$V_{VBC.vl7x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M7x.vl} + \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{7x.vl}$$

$$x_{2y.vl} := 1m$$

Giver  $V_{vloer22}(d_{vloer2}) - \frac{V_{vloer22}(d_{vloer2})}{\frac{1}{2} b_d} x_{2y.vl} = V_{VBC.vl2y}$   $x_{2y.vl} := \text{Find}(x_{2y.vl}) = -49 \cdot \text{mm}$

$$V_{VBC.vl6y} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(20\% \rho_{M6x.vl} + 20\% \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{6y.v}$$

$$V_{VBC.vl2x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M2x.vl} + \rho_{M1x.vl})} + 0.15 \sigma_{p2} \right] \cdot (1m \cdot d_{2x.vl})$$

$$V_{VBC.vl4x} := \left[ 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(2 \cdot \rho_{M4x.vl})} + 0.15 \sigma_{p4} \right] \cdot 1m \cdot d_{4x.vl}$$

$$V_{VBC.vl6x} := 0.4 \cdot f_{ctd} \cdot \frac{k_h}{m} \cdot \sqrt[3]{100(\rho_{M6x.vl} + \rho_{M1x.vl})} \cdot 1m \cdot d_{6x.vl}$$

$$A_{sw2y.vl} := \frac{(V_{vloer22}(d_{vloer2}) - V_{VBC.vl2y})}{(d_{vloer2}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\deg)} = -0.06 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{2x.vl} := 1m$$

Giver  $V_{vloer21}(d_{vloer2}) - \frac{V_{vloer21}(d_{vloer2})}{\frac{1}{2} b_{cel}} x_{2x.vl} = V_{VBC.vl2x}$   $x_{2x.vl} := \text{Find}(x_{2x.vl}) = 668 \cdot \text{mm}$

$$A_{sw2x.vl} := \frac{(V_{vloer21}(d_{vloer2}) - V_{VBC.vl2x})}{(d_{vloer2}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\deg)} = 1.18 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.vl2} := 0.75 d_{2y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl2} := 1.5 \cdot d_{2y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2yw.vl2} := s_{2y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl2}}{s_{2y.vl}}, 1\right) = 274.91 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.vl2} := \frac{s_{2yw.vl2}}{1m} \cdot s_{1yw.vl2} \cdot A_{sw2y.vl} = -2.57 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.vl2} := 0.75d_{2x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl2} := 1.5 \cdot d_{2x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl2} := s_{2x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl2}}{s_{2x.vl}}, 1\right) = 253.96 \cdot \text{mm}$$

$$x_{3y.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer32}(d_{vloer3}) - \frac{V_{vloer32}(d_{vloer3})}{\frac{1}{2} b_d} x_{3y.vl} = V_{VBC.vl3y} \quad x_{3y.vl} := \text{Find}(x_{3y.vl}) = -799 \cdot \text{mm}$$

$$x_{3x.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer31}(d_{vloer3}) - \frac{V_{vloer31}(d_{vloer3})}{\frac{1}{2} b_{cel}} x_{3x.vl} = V_{VBC.vl3x} \quad x_{3x.vl} := \text{Find}(x_{3x.vl}) = 180 \cdot \text{mm}$$

$$s_{1yw.vl3} := 0.75d_{3y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl3} := 1.5 \cdot d_{3y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2yw.vl3} := s_{3y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl3}}{s_{3y.vl}}, 1\right) = 300.39 \cdot \text{mm}$$

$$s_{1xw.vl3} := 0.75d_{3x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl3} := 1.5 \cdot d_{3x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl3} := s_{3x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl3}}{s_{3x.vl}}, 1\right) = 278.75 \cdot \text{mm}$$

$$x_{4y.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer42}(d_{vloer4}) - \frac{V_{vloer42}(d_{vloer4})}{\frac{1}{2} b_d} x_{4y.vl} = V_{VBC.vl4y} \quad x_{4y.vl} := \text{Find}(x_{4y.vl}) = -1216 \cdot \text{mm}$$

$$x_{4x.vl} := 1\text{m}$$

$$\text{Giver} \quad V_{vloer41}(d_{vloer4}) - \frac{V_{vloer41}(d_{vloer4})}{\frac{1}{2} b_{cel}} x_{4x.vl} = V_{VBC.vl4x} \quad x_{4x.vl} := \text{Find}(x_{4x.vl}) = -119 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl2} := \frac{s_{2xw.vl2}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl2} \cdot A_{sw2x.vl} = 42.59 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sw3y.vl} := \frac{(V_{vloer32}(d_{vloer3}) - V_{VBC.vl3y})}{(d_{vloer3}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.89 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{sw3x.vl} := \frac{(V_{vloer31}(d_{vloer3}) - V_{VBC.vl3x})}{(d_{vloer3}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = 0.29 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{staaf.y.vl3} := \frac{s_{2yw.vl3}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.vl3} \cdot A_{sw3y.vl} = -42.17 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{staaf.x.vl3} := \frac{s_{2xw.vl3}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl3} \cdot A_{sw3x.vl} = 11.57 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sw4y.vl} := \frac{(V_{vloer42}(d_{vloer4}) - V_{VBC.vl4y})}{(d_{vloer4}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -1.12 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{sw4x.vl} := \frac{(V_{vloer41}(d_{vloer4}) - V_{VBC.vl4x})}{(d_{vloer4}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.16 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.vl4} := 0.75d_{4y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl4} := 1.5 \cdot d_{4y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2yw.vl4} := s_{4y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl4}}{s_{4y.vl}}, 1\right) = 245.52 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.vl4} := \frac{s_{2yw.vl4}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.vl4} \cdot A_{sw4y.vl} = -43.29 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.vl4} := 0.75d_{4x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl4} := 1.5 \cdot d_{4x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl4} := s_{4x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl4}}{s_{4x.vl}}, 1\right) = 258.50 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl4} := \frac{s_{2xw.vl4}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl4} \cdot A_{sw4x.vl} = -5.87 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{5y.vl} := 1\text{m}$$

Giver  $V_{vloer52}(d_{vloer5}) - \frac{V_{vloer52}(d_{vloer5})}{\frac{1}{2}b_d}x_{5y.vl} = V_{VBC.vl5y}$   $x_{5y.vl} := \text{Find}(x_{5y.vl}) = -1111 \cdot \text{mm}$

$$A_{sw5y.vl} := \frac{(V_{vloer52}(d_{vloer5}) - V_{VBC.vl5y})}{(d_{vloer5}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.78 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$x_{5x.vl} := 1\text{m}$$

Giver  $V_{vloer51}(d_{vloer5}) - \frac{V_{vloer51}(d_{vloer5})}{\frac{1}{2}b_{cel}}x_{5x.vl} = V_{VBC.vl5x}$   $x_{5x.vl} := \text{Find}(x_{5x.vl}) = -177 \cdot \text{mm}$

$$A_{sw5x.vl} := \frac{(V_{vloer51}(d_{vloer5}) - V_{VBC.vl5x})}{(d_{vloer5}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -0.18 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1yw.vl5} := 0.75d_{5y.vl} = 157.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2y.max.vl5} := 1.5 \cdot d_{5y.vl} = 315.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2yw.vl5} := s_{5y.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2y.max.vl5}}{s_{5y.vl}}, 1\right) = 163.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.y.vl5} := \frac{s_{2yw.vl5}}{1\text{m}} \cdot s_{1yw.vl5} \cdot A_{sw5y.vl} = -20.03 \cdot \text{mm}^2$$

$$s_{1xw.vl5} := 0.75d_{5x.vl} = 142.50 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl5} := 1.5 \cdot d_{5x.vl} = 285.00 \cdot \text{mm} \quad s_{2xw.vl5} := s_{5x.vl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl5}}{s_{5x.vl}}, 1\right) = 230.77 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl5} := \frac{s_{2xw.vl5}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl5} \cdot A_{sw5x.vl} = -5.96 \cdot \text{mm}^2$$

$$x_{6x.vl} := 1\text{m}$$

Giver  $V_{vloer61}(d_{vloer6}) - \frac{V_{vloer61}(d_{vloer6})}{\frac{1}{2}b_{cel}}x_{6x.vl} = V_{VBC.vl6x}$   $x_{6x.vl} := \text{Find}(x_{6x.vl}) = -17835 \cdot \text{mm}$

$$A_{sw6x.vl} := \frac{(V_{vloer61}(d_{vloer6}) - V_{VBC.vl6x})}{(d_{vloer6}) \cdot f_{yd} \cdot \cot(30\text{deg})} = -1.63 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$s_{1xw.vl6} := 0.75d_{6xvl} = 81.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2x.max.vl6} := 1.5 \cdot d_{6xvl} = 162.00 \cdot \text{mm}$$

$$s_{2xw.vl6} := s_{6xvl} \cdot \text{Floor}\left(\frac{s_{2x.max.vl6}}{s_{6xvl}}, 1\right) = 0.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{staaf.x.vl6} := \frac{s_{2xw.vl6}}{1\text{m}} \cdot s_{1xw.vl6} \cdot A_{sw6x.vl} = 0.00 \cdot \text{mm}^2$$

## L. OPSOMMING WAPENING BIJ TOEPASSING BETONSTERKTEKLASSE C100/115

---

		dikte (mm)	Wapening								
			Veld				Support				
			Φ(mm)	s	aantal per veld	l (mm)	Φ(mm)	s	aantal per veld	l(mm)	
Aanyaarwapening	Wand 1 y	385	16	134	38	5370	20	102	50	2000	
	x		32	137	54	3000	32	137	54	2000	
	Wand 2 y	230	16	247	21	1644	16	113	45	1096	
	x		32	137	20	3904	32	137	20	1096	
	Wand 3 y	230	16	255	20	1776	16	113	45	1184	
	x		32	137	22	3816	32	137	22	1184	
	Wand 4 y	230	16	265	19	1986	16	113	45	1324	
	x		32	137	25	3676	32	137	25	1324	
	Wand 5 y	230	16	184	28	2448	20	133	38	1632	
	x		32	137	30	3368	32	137	30	1632	
	Wand 6 y	230	16	191	27	3072	20	133	38	2048	
	x		32	137	38	2952	32	137	38	2048	
Zonder Aanyaarwapening	Wand 1 y	385	16	134	38	5370	20	102	0	2000	
	x		12	376	20	3000	12	183	0	2000	
	Wand 2 y	230	16	247	21	1644	16	113	45	1096	
	x		8	233	12	3904	16	149	20	1096	
	Wand 3 y	230	16	255	20	1776	16	113	45	1184	
	x		8	233	13	3816	16	140	22	1184	
	Wand 4 y	230	16	265	19	1986	16	113	38	1324	
	x		8	197	17	3676	16	140	14	1324	
	Wand 5 y	230	16	184	28	2448	20	133	38	1632	
	x		8	231	18	3368	12	240	17	1632	
	Wand 6 y	230	16	191	27	3072	20	133	38	2048	
	x		8	239	22	2952	12	240	22	2048	
	Vloer 1 y	boven	170	0		2280	12	334	21	2720	
	x			0		4080	6	267	19	2720	
	y	onder		8	195	35	2280	0		2720	
	x			6	450	12	4080	0		2720	
	Vloer 2 y	boven	270	0		2280	0			2720	
	x			12	163	31	4080	12	267	19	2720
	y	onder		0	35	2280	0	0		2720	
	x			6	450	12	4080	20	93	54	2720
	Vloer 3 y	boven	270	0		2280	0	0		2720	
	x			12	177	29	4080	20	102	50	2720
	y	onder		0		2280	0	0		2720	
	x			12	177	29	4080	20	102	50	2720

<b>Vloer 4 y</b>	<b>boven</b>	270		0		2280		0		2720
x			12	216	24	4080	20	125	41	2720
y				0		2280		0		2720
x			12	216	24	4080	20	125	41	2720
<b>Vloer 5 y</b>	<b>boven</b>	270		0		2280		0		2720
x			8	127	40	4080	20	166	31	2720
y				0		2280		0		2720
x			8	127	40	4080	20	166	31	2720
<b>Vloer 6 y</b>	<b>boven</b>	170		0		2280	12	334	21	2720
x				0		4080	6	267	19	2720
y			8	195	35	2280		0		2720
x			6	450	12	4080		0		2720
<b>Vloer 7 y</b>	<b>boven</b>	170		0		2280	12	334	21	2720
x				0		4080	6	267	19	2720
y			8	195	35	2280		0		2720
x			6	450	12	4080		0		2720
<b>Tussenwand 2 y</b>		230	16	247	28	2280	16	113	61	1096
x			8	233	12	4080	16	149	19	1096
<b>Tussenwand 3 y</b>		230	16	255	27	2280	16	113	61	1184
x			8	233	13	4080	16	140	22	1184
<b>Tussenwand 4 y</b>		230	16	265	26	2280	16	113	61	1324
x			8	197	17	4080	16	140	24	1324

		Dwarskracht		
		Lengte waarover dwarskrachtwapening nodig is:	aantal deuvels per veld	totaal:
Aanvaarwapening	<b>Wand 1 y</b>			
	x			
	<b>Wand 2 y</b>	176	80	960
	x	395	96	1152
	<b>Wand 3 y</b>	105	40	480
	x	244	52	624
	<b>Wand 4 y</b>	30	40	480
	x	57	30	360
	<b>Wand 5 y</b>	132	80	960
	x		0	0
	<b>Wand 6 y</b>	1195	400	4800
	x		0	0
Zonder Aanvaarwapening	<b>Wand 1 y</b>		0	0
	x		0	0
	<b>Wand 2 y</b>	176	72	1728
	x	395	88	2112
	<b>Wand 3 y</b>	105	36	864
	x	244	48	1152
	<b>Wand 4 y</b>	30	36	864
	x	57	26	624
	<b>Wand 5 y</b>	132	72	1728
	x		0	0
	<b>Wand 6 y</b>	1195	360	8640
	x		0	0
Vloer	<b>1 y</b>		0	0
	x		0	0
	y		0	0
	x		0	0
	<b>2 y</b>	668	220	5280
	x			
	y			
	x			
	<b>3 y</b>	180	88	2112
	x			
	y			
	x			
<b>Vloer 4 y</b>	0	0	0	0

<b>x</b>	0	0	0
<b>y</b>		0	0
<b>x</b>		0	0
<b>Vloer 5 y</b>	0	0	0
<b>x</b>	0	0	0
<b>y</b>			
<b>x</b>			
<b>Vloer 6 y</b>			
<b>x</b>			
<b>y</b>			
<b>x</b>			
<b>Vloer 7 y</b>			
<b>x</b>			
<b>y</b>			
<b>x</b>			
<b>Tussenwand 2 y</b>	176	108	1296
<b>x</b>	395	96	1152
<b>Tussenwand 3 y</b>	105	54	648
<b>x</b>	244	52	624
<b>Tussenwand 4 y</b>	30	54	648
<b>x</b>	57	30	360

# M. STABILITEIT VAN SLUISDEUR

---

# Stabiliteit

Vervolgens is gekeken hoe breed de deur moet zijn om er voor te zorgen dat de deur drijvend stabiel is.

**parameters:**

$$b_{\text{deur}} := 3 \text{m} , 3.1 \text{m} .. 60 \text{m}$$

Breedte sluisdeur, gevarieerd tussen 3 meter en 30 meter

$$L_{\text{deur}} := 72 \cdot \text{m}$$

Lengte sluisdeur

$$\gamma_{\text{c}} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 24.52 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Soortelijk gewicht beton

$$\gamma_w := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9.81 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Soortelijk gewicht zoetwater

$$a := 7$$

aantal vloeren

$$c := 3$$

aantal wanden

$$f := \frac{60}{5} + 1 = 13.00$$

aantal tussenwanden

$$h_{\text{vloer}1} := \frac{d_{\text{vloer}1}}{z_{\text{vloer}}} = 0.17 \cdot \text{m}$$

$$h_{\text{vloer}2} := \frac{d_{\text{vloer}2}}{z_{\text{vloer}}} = 0.27 \cdot \text{m}$$

$$h_{\text{vloer}3} := \frac{d_{\text{vloer}3}}{z_{\text{vloer}}} = 0.27 \text{ m}$$

$$h_{\text{vloer}4} := \frac{d_{\text{vloer}4}}{z_{\text{vloer}}} = 0.27 \text{ m}$$

$$h_{\text{vloer}5} := \frac{d_{\text{vloer}5}}{z_{\text{vloer}}} = 0.27 \text{ m}$$

$$h_{\text{vloer}6} := \frac{d_{\text{vloer}6}}{z_{\text{vloer}}} = 0.17 \text{ m}$$

$$h_{\text{vloer}7} := \frac{d_{\text{vloer}7}}{z_{\text{vloer}}} = 0.170 \text{ m}$$

$$h_{\text{wand}1} := \frac{d_1}{z_{\text{wand}}} = 0.39 \cdot \text{m}$$

$$h_{\text{wand}2} := \frac{d_2}{z_{\text{wand}}} = 0.23 \cdot \text{m}$$

$$h_{\text{wand}3} := \frac{d_3}{z_{\text{wand}}} = 0.23 \text{ m}$$

$$h_{\text{wand}4} := \frac{d_4}{z_{\text{wand}}} = 0.230 \text{ m}$$

$$h_{\text{wand}5} := \frac{d_5}{z_{\text{wand}}} = 0.23 \text{ m}$$

$$h_{\text{wand}6} := \frac{d_6}{z_{\text{wand}}} = 0.23 \text{ m}$$

**Beton volume van de sluisdeur:**

$$\begin{aligned} V_{vloer}(b_d) := & h_{vloer1} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand1}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand1}) + h_{vloer2} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand2}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand2}) + h_{vloer3} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand3}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand3}) \dots \\ & + h_{vloer4} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand4}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand4}) + h_{vloer5} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand5}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand5}) + h_{vloer6} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (L_{deur} - 2 \cdot h_{wand6}) \dots \\ & + h_{vloer7} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (L_{deur} - 2 \cdot h_{wand6}) \end{aligned}$$

$$V_{wand}(b_d) := c \cdot \left[ h_{wand1} \cdot l_1 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand1}) + h_{wand2} \cdot l_2 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand2}) + h_{wand3} \cdot l_3 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand3}) + h_{wand4} \cdot l_4 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand4}) \dots \right] \\ + h_{wand5} \cdot l_5 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand5}) + h_{wand6} \cdot l_6 \cdot (L_{deur} - 2h_{wand6})$$

$$V_{tussenwand}(b_d) := f \left[ h_{wand2} \cdot \left( l_2 - h_{vloer2} - \frac{h_{vloer3}}{2} \right) \cdot (b_d - ch_{wand2}) \dots \right. \\ \left. + h_{wand3} \cdot \left[ l_3 - \left( \frac{h_{vloer3}}{2} - \frac{h_{vloer4}}{2} \right) \right] \cdot (b_d - ch_{wand3}) + h_{wand4} \cdot \left[ l_4 - \left( \frac{h_{vloer4}}{2} - h_{vloer5} \right) \right] \cdot (b_d - ch_{wand4}) \right]$$

$$V_{kopwand}(b_d) := 2 \cdot (b_d \cdot h_{wand2} \cdot l_2 + b_d \cdot h_{wand3} \cdot l_3 + b_d \cdot h_{wand4} \cdot l_4)$$

$$V_{totaal}(b_d) := V_{vloer}(b_d) + V_{wand}(b_d) + V_{tussenwand}(b_d) + V_{kopwand}(b_d)$$

Volume van het beton in de deur (m<sup>3</sup>)

$$Fv(b_d) := V_{totaal}(b_d) \cdot \gamma_c$$

Gewicht van het beton (kN)

**Hoogte drijfkist:**

$$h_{drijfkist}(b_d) := \frac{Fv(b_d) - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w - \frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} \cdot (16.62m - 16.3m) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w - b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w}$$

$$h_{ballast1}(b_d) := \frac{(3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w + b_d \cdot L_{deur} \cdot (16.3m - l_1) \cdot \gamma_w - Fv(b_d)}{(L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1}) \cdot \gamma_w}$$

- Extra volume drijfkist in geval van kapotte compartimenten

$$h_{ballast2}(b_d) := \frac{3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{(L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1})} + 0.2m$$

**Bepaling zwaartepunt van de deur:**

$$\begin{aligned} lxV_{vloer}(b_d) := & h_{vloer1} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand1}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand1}) \cdot \frac{h_{vloer1}}{2} + h_{vloer2} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand2}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand2}) \cdot l_1 \dots \\ & + h_{vloer3} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand3}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand3}) \cdot (l_1 + l_2) + h_{vloer4} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand4}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand4}) \cdot (l_1 + l_2 + l_3) \dots \\ & + h_{vloer5} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand5}) \cdot (L_{deur} - 2h_{wand5}) \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) + h_{vloer6} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (L_{deur} - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) \dots \\ & + h_{vloer7} \cdot (b_d - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (L_{deur} - 2 \cdot h_{wand6}) \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \end{aligned}$$

$$\text{lxV}_{\text{wand}}(b_d) := c \cdot \left[ h_{\text{wand}1} \cdot l_1 \cdot (L_{\text{deur}} - 2h_{\text{wand}1}) \cdot \frac{l_1}{2} + h_{\text{wand}2} \cdot l_2 \cdot (L_{\text{deur}} - 2h_{\text{wand}2}) \cdot \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right) + h_{\text{wand}3} \cdot l_3 \cdot (L_{\text{deur}} - 2h_{\text{wand}3}) \cdot \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}\right) \dots \right. \\ \left. + h_{\text{wand}4} \cdot l_4 \cdot (L_{\text{deur}} - 2h_{\text{wand}4}) \cdot \left(l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}\right) + h_{\text{wand}5} \cdot l_5 \cdot (L_{\text{deur}} - 2h_{\text{wand}5}) \cdot \left(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2}\right) \dots \right. \\ \left. + h_{\text{wand}6} \cdot l_6 \cdot (L_{\text{deur}} - 2h_{\text{wand}6}) \cdot \left(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + \frac{l_6}{2}\right) \right]$$

$$\text{lxV}_{\text{tussenwand}}(b_d) := f \cdot \left[ h_{\text{wand}2} \cdot \left(l_2 - \frac{h_{\text{vloer}2} + h_{\text{vloer}2}}{2}\right) \cdot (b_d - 2h_{\text{wand}2}) \cdot \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right) \dots \right. \\ \left. + h_{\text{wand}3} \cdot \left(l_3 - \frac{h_{\text{vloer}3} + h_{\text{vloer}3}}{2}\right) \cdot (b_d - 2h_{\text{wand}3}) \cdot \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}\right) \dots \right. \\ \left. + h_{\text{wand}4} \cdot \left(l_4 - \frac{h_{\text{vloer}4} + h_{\text{vloer}4}}{2}\right) \cdot (b_d - 2h_{\text{wand}4}) \cdot \left(l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}\right) \right]$$

$$\text{lxV}_{\text{kopwand}}(b_d) := 2 \cdot \left[ b_d \cdot h_{\text{wand}2} \cdot l_2 \cdot \left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right) + b_d \cdot h_{\text{wand}3} \cdot l_3 \cdot \left(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}\right) + b_d \cdot h_{\text{wand}4} \cdot l_4 \cdot \left(l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}\right) \right]$$

$$KG(b_d) := \frac{\text{lxV}_{\text{vloer}}(b_d) + \text{lxV}_{\text{wand}}(b_d) + \text{lxV}_{\text{tussenwand}}(b_d) + \text{lxV}_{\text{kopwand}}(b_d)}{V_{\text{totaal}}(b_d)}$$

Afstand zwaartepunt tot onderkant deur

## Metacentrische hoogte tijdens uitdrijven (hm<sub>1</sub>):

$$d_{\text{uitdrijven}}(b_d) := 15.3 \text{m}$$

Afstand zwaartepunt tot waterlijn

$$WG(b_d) := d_{\text{uitdrijven}}(b_d) - KG(b_d)$$

Traagheidsmoment om de y-as ter hoogte van de waterlijn

$$I_{yy}(b_d) := \frac{1}{12} \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d^3 - 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot L_{\text{deur}} \cdot \left(\frac{b_d - 3 \cdot h_{\text{wand}1}}{2}\right)^3$$

Volume van verplaatst water

$$V_{w.\text{uitdrijven}}(b_d) := L_{\text{deur}} \cdot b_d \cdot (h_{\text{drijflist}}(b_d))$$

$$BM(b_d) := \frac{I_y(b_d)}{V_{w.uitdrijven}(b_d)}$$

Afstand drukkingspunt tot metacentrische hoogte

$$WB(b_d) := \frac{d_{uitdrijven}(b_d) - l_1}{2}$$

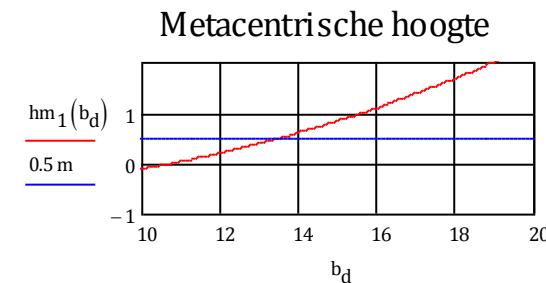
Afstand drukkingspunt tot waterlijn

$$MW(b_d) := WB(b_d) - BM(b_d)$$

Afstand metacentrische hoogte tot waterlijn

$$hm_1(b_d) := WG(b_d) - MW(b_d)$$

Metacentrische hoogte

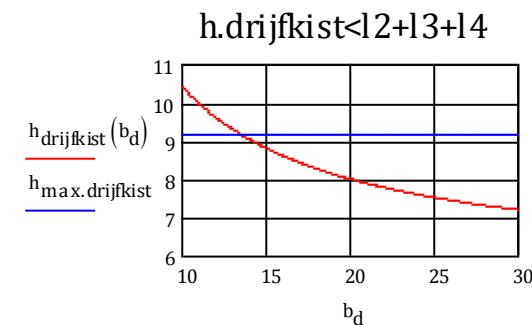
 $b_d := 20\text{m}$  schatting

Giver

$$h_{max.drijfkist} = h_{drijfkist}(b_d)$$

$$b_{min2} := \text{Find}(b_d)$$

$$b_{min} := 0\text{m} \quad \text{on error} \quad b_{min2} = 13.469 \text{ m}$$

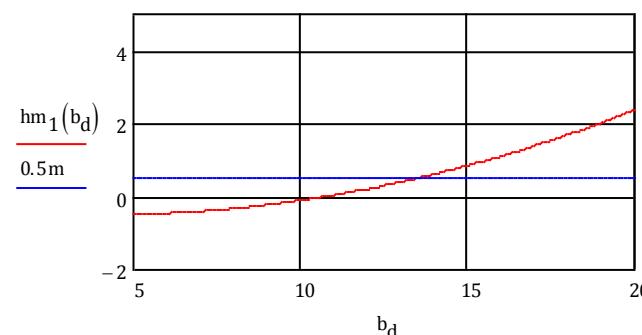


In het figuur hierboven is te zien wat de breedte van de sluisdeur minimaal moet zijn zodat de totale hoogte van de drijfkist onder minimum schutpeil ligt. Links voor het de situatie dat de sluisdeur uit gedreven moet worden en rechts voor de situatie dat de sluisdeur in bedrijf is. De breedte is minimaal:

Bepalen breedte van de sluisdeur zodat metacentrische hoogte minimaal een halve meter is:

$$b_d := 17\text{m} \quad (\text{schatting})$$

$$b_{hm} := \text{root}(hm_1(b_d) - 0.5\text{m}, b_d) = 13.466\text{ m}$$



De minimale breedte van de sluisdeur moet  $b_{hm} = 13.47\text{ m}$  zijn, zodat de metacentrische hoogte groter is dan 0,5m.  
En minimaal  $b_{min} = 13.47\text{ m}$  zodat het totale volume drijfkist onderwater past.

$$b_d := b_{min} \text{ on error} \quad \begin{cases} b_{hm} & \text{if } b_{hm} \geq b_{min} \\ b_{min} & \text{otherwise} \end{cases} = 13.469\text{ m}$$

### Controle metacentrische hoogte als sluis in bedrijf is:

$$d_{bedrijf} := \frac{Fv(b_d) - (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \gamma_w + h_{ballast1}(b_d) \cdot (L_{deur} - f \cdot h_{wand1}) \cdot (b_d - c \cdot h_{wand1}) \gamma_w}{b_d \cdot L_{deur} \cdot \gamma_w} + l_1 = 16.3\text{ m}$$

$$V_w(b_d) := L_{deur} \cdot b_d \cdot (h_{drijfkist}(b_d))$$

$$WG2(b_d) := d_{bedrijf} - KG(b_d)$$

$$I_{yy}(b_d) := \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot b_d^3 - 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot L_{deur} \cdot \left( \frac{b_d - 3 \cdot h_{wand1}}{2} \right)^3$$

$$BM2(b_d) := \frac{I_{yy}(b_d)}{V_w(b_d)}$$

$$WB2(b_d) := \frac{d_{bedrijf} - l_1}{2}$$

$$MW2(b_d) := WB2(b_d) - BM2(b_d)$$

$$hm_2(b_d) := WG2(b_d) - MW2(b_d)$$

$$hm_2(b_d) = 1.11 \text{ m} \quad \text{Groter dan } 1.1 \text{ m}$$

## Opsomming resulaten:

$$b_d = 13.6 \text{ m}$$

$$hm_1(b_d) = 0.5 \text{ m}$$

$$hm_2(b_d) = 1.11 \text{ m}$$

$$V_{\text{totaal}}(b_d) = 3365 \cdot m^3$$

Aantal kuub beton

$$h_{\text{drijfkist}}(b_d) = 9.02 \text{ m}$$

$$h_{\text{ballast1}}(b_d) = 1.44 \text{ m}$$

$$h_{\text{drijfkist}}(b_d) = 9.02 \text{ m}$$

$$h_{\text{drijfkist}}(b_d) \cdot b_d \cdot L_{\text{deur}} = 8840 \cdot m^3$$

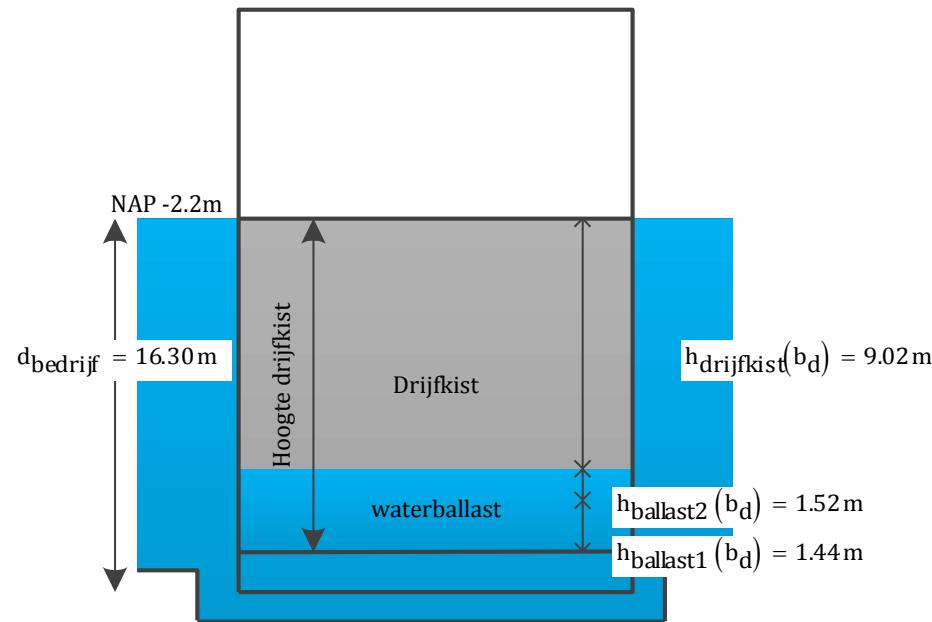
$$d_{\text{bedrijf}} := \frac{Fv(b_d) + h_{\text{ballast1}}(b_d) \cdot (L_{\text{deur}} - f \cdot h_{\text{wand1}}) \cdot (b_d - c \cdot h_{\text{wand1}}) \gamma_w - (3h_{\text{wand1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot l_1 + h_{\text{vloer1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot \gamma_w} + l_1 = 16.30 \text{ m}$$

$$d_{\text{uitdrijven}} := \frac{Fv(b_d) - (3h_{\text{wand1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot l_1 + h_{\text{vloer1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d) \cdot \gamma_w}{b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot \gamma_w} + l_1 = 15.07 \text{ m}$$

$$d_{\text{aanvaring}} := 16.3 \text{ m} + \frac{Fv(b_d) + b_d \cdot 2 \cdot b_{\text{cel}} \cdot \gamma_w \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) - (3h_{\text{wand1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot l_1 + h_{\text{vloer1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d) \cdot \gamma_w - b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) \cdot \gamma_w}{\frac{3h_{\text{wand5}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{\text{vloer6}} + h_{\text{vloer7}}) \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d}{l_6 + l_5} \cdot \gamma_w} = 16.62 \text{ m}$$

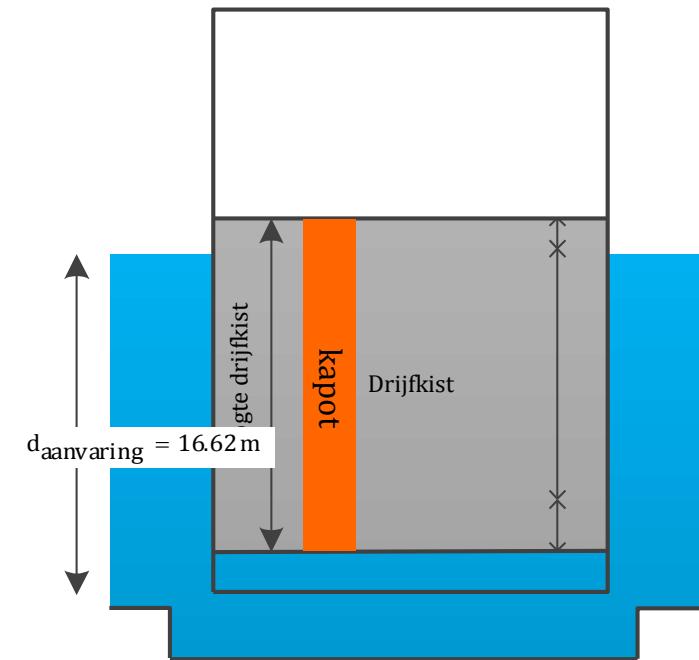
$$hm_2(b_d) = 1.11 \text{ m}$$

in bedrijf



$$hm_1(b_d) = 0.50 \text{ m}$$

aanvaring



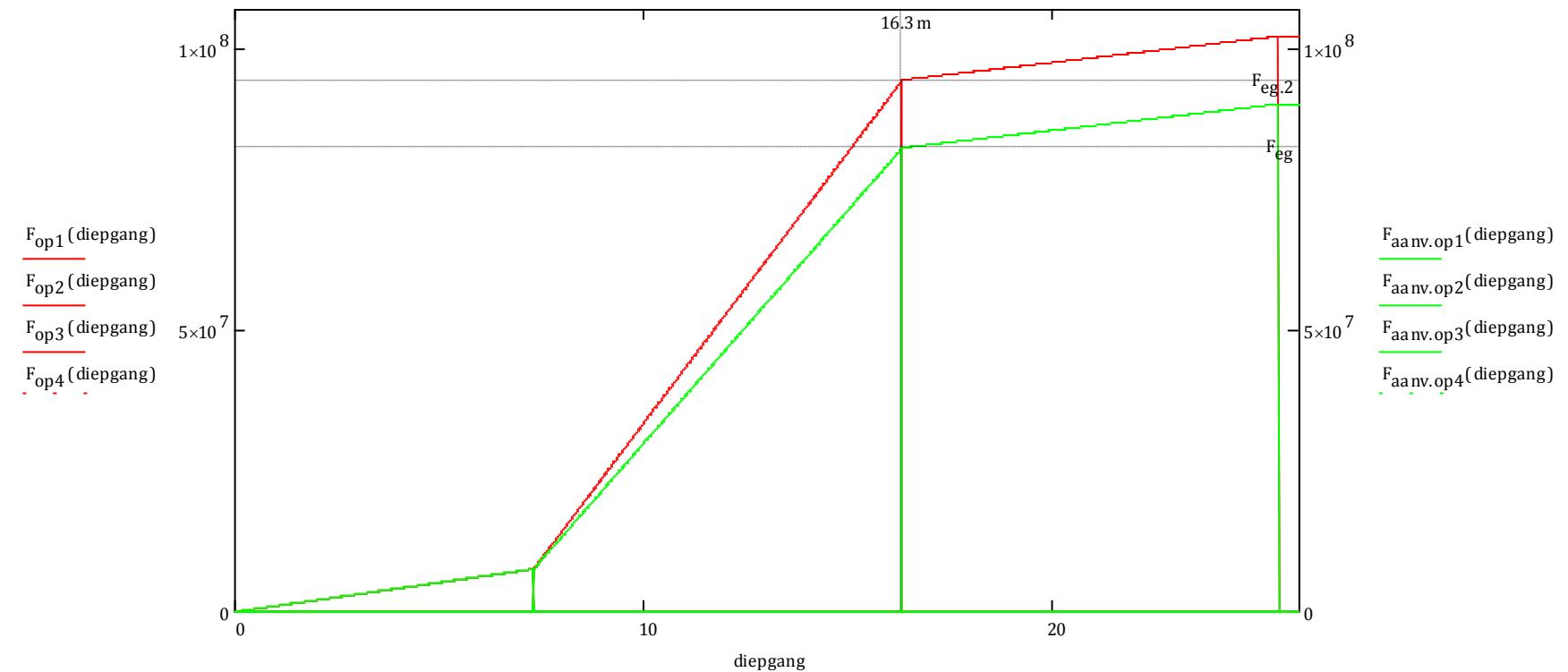
$$\begin{aligned}
F_{op1}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} \frac{3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_1} \cdot \text{diepgang} \cdot \gamma_w & \text{if } \text{diepgang} \leq l_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
F_{op2}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w + b_d \cdot L_{deur} \cdot (\text{diepgang} - l_1) \cdot \gamma_w & \text{if } l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \geq \text{diepgang} \geq l_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
F_{op3}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w \dots & \text{if } l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \leq \text{diepgang} \leq h_{deur} \\ + b_d \cdot L_{deur} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) \cdot \gamma_w \dots \\ + \frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} (\text{diepgang} - l_1 - l_2 - l_3 - l_4) \cdot \gamma_w & \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
F_{op4}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w \dots & \text{if } 25.5m \leq \text{diepgang} \\ + b_d \cdot L_{deur} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) \cdot \gamma_w \dots \\ + [3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d] \gamma_w & \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
F_{aanv.op1}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} \frac{3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_1} \cdot \text{diepgang} \cdot \gamma_w & \text{if } \text{diepgang} \leq l_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
F_{aanv.op2}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w + b_d \cdot L_{deur} \cdot (\text{diepgang} - l_1) \cdot \gamma_w \dots & \text{if } l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \geq \text{diepgang} \geq l_1 \\ + \frac{-b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w \cdot h_{drijfkist}(b_d)}{l_2 + l_3 + l_4} \cdot (\text{diepgang} - l_1) & \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
F_{aanv.op3}(\text{diepgang}) &:= \begin{cases} (3h_{wand1} \cdot L_{deur} \cdot l_1 + h_{vloer1} \cdot L_{deur} \cdot b_d) \cdot \gamma_w + b_d \cdot L_{deur} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) \cdot \gamma_w \dots & \text{if } l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \leq \text{diepgang} \leq h_{deur} \\ + \frac{3h_{wand5} \cdot L_{deur} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{vloer6} + h_{vloer7}) \cdot L_{deur} \cdot b_d}{l_6 + l_5} (\text{diepgang} - l_1 - l_2 - l_3 - l_4) \cdot \gamma_w \dots & \\ + -b_d \cdot 2 \cdot b_{cel} \cdot \gamma_w \cdot h_{drijfkist}(b_d) & \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
= &
\end{aligned}$$

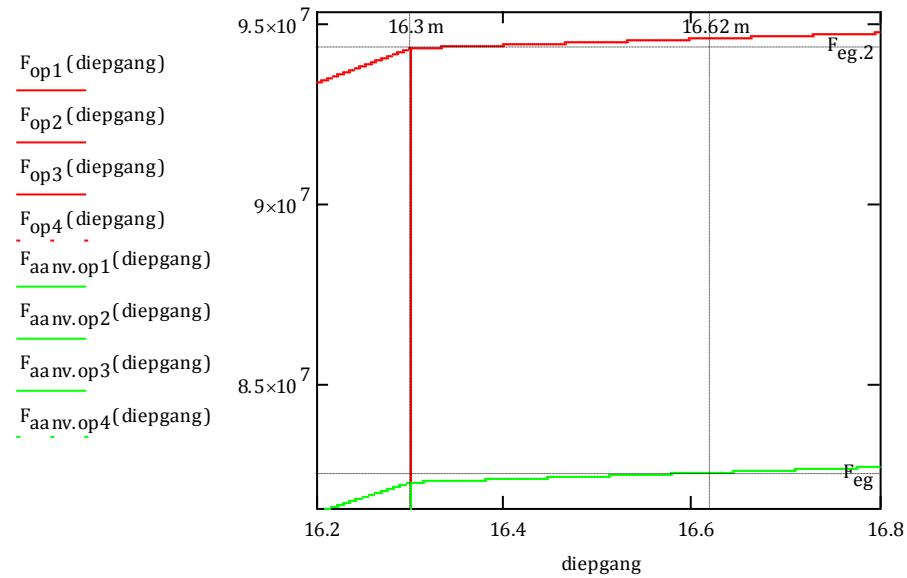
$$F_{\text{aanv.op4}}(\text{diepgang}) := \begin{cases} (3h_{\text{wand1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot l_1 + h_{\text{vloer1}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d) \cdot \gamma_w & \text{if } 25.5m \leq \text{diepgang} \\ + b_d \cdot L_{\text{deur}} \cdot (l_2 + l_3 + l_4) \cdot \gamma_w \\ + [3h_{\text{wand5}} \cdot L_{\text{deur}} \cdot (l_6 + l_5) + (h_{\text{vloer6}} + h_{\text{vloer7}}) \cdot L_{\text{deur}} \cdot b_d] \gamma_w - b_d \cdot 2 \cdot b_{\text{cel}} \cdot \gamma_w \cdot h_{\text{drijfkist}}(b_d) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{\text{eg}} := F_v(b_d) = 8.253 \times 10^4 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{eg.2}} := F_v(b_d) + h_{\text{ballast1}}(b_d) \cdot (L_{\text{deur}} - f \cdot h_{\text{wand1}}) \cdot (b_d - c \cdot h_{\text{wand1}}) \gamma_w = 94317.70 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{eg.3}} := F_v(b_d) + [h_{\text{ballast1}}(b_d) + h_{\text{ballast2}}(b_d)] \cdot (L_{\text{deur}} - f \cdot h_{\text{wand1}}) \cdot (b_d - c \cdot h_{\text{wand1}}) \gamma_w = 106739899.44 \text{ N}$$





# N. BEREKENING VOORSPANNING

---

parameters :

$$f_{pk} := 1860 \frac{N}{mm^2} \quad A_{strand} := 150 mm^2 \quad \sigma_{pm0} := 1395 \frac{N}{mm^2}$$

$$E_p := 205 \cdot GPa$$

$$E_{cm} = 38.00 \cdot GPa$$

$$\begin{aligned} M_{vloer21}(d_{vloer2}) &= 365.22 \cdot kN \cdot m & M_{vloer41}(d_{vloer4}) &= 277.59 \cdot kN \cdot m \\ M_{vloer22}(d_{vloer2}) &= 292.17 \cdot kN \cdot m & M_{vloer42}(d_{vloer4}) &= 222.07 \cdot kN \cdot m \\ M_{vloer31}(d_{vloer3}) &= 336.28 \cdot kN \cdot m & M_{vloer51}(d_{vloer5}) &= 211.78 \cdot kN \cdot m \\ M_{vloer32}(d_{vloer3}) &= 269.02 \cdot kN \cdot m & M_{vloer52}(d_{vloer5}) &= 169.43 \cdot kN \cdot m \end{aligned}$$

$$E_s := 210 GPa$$

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.53$$

$$k_t := 0.4 \quad k_3 := 3.4 \quad k_2 := 0.5 \quad k_1 := 0.8 \quad k_4 := 0.425$$

## Vloer 2

### Lengte richting

$$W_{2l} := \frac{1}{6} \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer2}^2 = 81.82 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$loss_l := 11.56\%$$

$$A_{c2l} := h_{vloer2} \cdot \frac{b_d}{2} = 1.82 m^{2.00}$$

$$\frac{-(1-loss_l)P_{m0}}{A_{c2l}} + \frac{\frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{\gamma}}{W_{2l}} < 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{-P_{m0}}{A_{c2l}} - \frac{\frac{M_{vloer21}(d_{vloer2})}{\gamma}}{W_{2l}} > -0.6 \cdot f_{ck}$$

$$P_{m0} \text{ moet minimaal } P_{2l} := P_{m0minl} = 8 \cdot MN \quad \text{zijn}$$

$$\text{en maximaal } P_{m0maxl} = 53 \cdot MN$$

$$A_{p2l} := \frac{P_{2l}}{\sigma_{pm0}} = 5980 \cdot mm^2 \quad n_{strands2l} := \text{ceil}\left(\frac{A_{p2l}}{A_{strand}}\right) = 40.00$$

$$duct2l := 4 \quad n_{duct2l} := \text{ceil}\left(\frac{n_{strands2l}}{duct2l}\right) = 10.00$$

$$s_{p2l} := \frac{\frac{b_d}{2}}{n_{duct2l}} = 673 \cdot mm$$

## Verlies lengte richting krimp

$$h_{0,vl2l} := \frac{2 \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vl2l}}{b_{cel}^2} = 364 \cdot \text{mm}$$

$$h_0 := \begin{pmatrix} 100 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \\ 500 \text{ mm} \\ 600 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad k_h := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0.85 \\ 0.75 \\ 0.7 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad k_{h,vl2l} := \text{linterp}(h_0, k_h, h_{0,vl2l}) = 0.73$$

RH := 60%      100% aan de buitenkant en 20% aan de binnenkant)

$$\varepsilon_{cd,0} := 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot 4) \exp \left( -0.12 \cdot \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \left[ 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100\%} \right)^3 \right] \right] = 3.2 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cdl} := \varepsilon_{cd,0} \cdot k_{h,vl2l} = 2.35 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca} := 2.5 \left( \frac{\frac{f_{ck}}{N}}{\frac{mm^2}{mm^2}} - 10 \right) 10^{-6} = 1.13 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{csl} := \varepsilon_{cdl} + \varepsilon_{ca} = 0.03\%$$

## relaxatie

$$\mu := \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} = 0.75 \quad \rho_{1000} := 2.5 \quad t := 500000$$

$$\Delta \sigma_{pr} := 0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(9.1\mu) \cdot \left( \frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pm0} = 68 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,QPI} := \frac{-P_{m0minl}}{A_{c2l}} = -4.59 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

## kruipfactor

$$\varphi_{RHl} := \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt{\frac{3}{h_{0,vl2l}} \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^2}} \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^{0.2} = 1.71$$

$$t_0 := 28$$

$$\varphi_{0l} := \varphi_{RHl} \cdot \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{N}}} \cdot \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}$$

$$\beta_{Hl} := \begin{cases} 1.5 \left[ 1 + (0.12RH)^{18} \right] \frac{h_{0,vl2l}}{mm} + 250 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^{0.5} & \text{if } 1.5 \left[ 1 + (0.12RH)^{18} \right] \frac{h_{0,vl2l}}{mm} + 250 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^{0.5} < 1500 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^{0.5} \\ 1500 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{N}} \right)^{0.5} & \text{otherwise} \end{cases} = 732$$

$$\beta_{cl} := \left( \frac{t - t_0}{\beta_{Hl} + t - t_0} \right)^{0.3} = 1.00$$

$$\varphi_l := \varphi_{0l} \cdot \beta_{cl} = 1.77$$

$$\Delta \sigma_{p.c.s.rl} := \frac{-\varepsilon_{csl} \cdot E_p - 0.8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi_l \cdot \sigma_{c.QPl}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_{p2l}}{A_{c2l}} (1 + 0.8 \varphi_l)} = -162.37 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{loss}_{\text{loss}} := 1 - \frac{\sigma_{pm0} + \Delta \sigma_{p.c.s.rl}}{\sigma_{pm0}} = 11.64 \cdot \%$$

$$\Delta P_{c.s.rl} := A_{p2l} \cdot \Delta \sigma_{p.c.s.rl} = -971.00 \cdot kN$$

## Vloer 3

### Lenge richting

$$W_{3l} := \frac{1}{6} \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer3}^2 = 81.82 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$\text{loss}_{\text{loss}} := 11.36 \cdot \%$$

$$A_{c3l} := h_{vloer3} \cdot \frac{b_d}{2} = 1.82 m^{2.00}$$

$$\frac{-(1 - \text{loss}_l) P_{m0}}{A_{c3l}} + \frac{\frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{\gamma}}{W_{3l}} < 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{-P_{m0}}{A_{c3l}} - \frac{M_{vloer31}(d_{vloer3})}{W_{3l}} > -0.6 \cdot f_{ck}$$

$P_{m0}$  moet minimaal  $P_{3l} := P_{m0\min l} = 8 \cdot \text{MN}$  zijn

en maximaal  $P_{m0\max l} = 53 \cdot \text{MN}$

$$A_{p3l} := \frac{P_{3l}}{\sigma_{pm0}} = 5494 \cdot \text{mm}^2 \quad n_{strands3l} := \text{ceil}\left(\frac{A_{p3l}}{A_{strand}}\right) = 37.00 \quad \text{duct3l} := 4 \quad n_{duct3l} := \text{ceil}\left(\frac{n_{strands3l}}{\text{duct3l}}\right) = 10.00 \quad s_{p3l} := \frac{\frac{b_d}{2}}{n_{duct3l}} = 673 \cdot \text{mm}$$

## Verlies lengte richting krimp

$$h_{0,vl3l} := \frac{2 \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer3}}{b_{cel}^2} = 364 \cdot \text{mm}$$

$$h_0 := \begin{pmatrix} 100 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \\ 500 \text{ mm} \\ 600 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad k_h := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0.85 \\ 0.75 \\ 0.7 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad k_{h,vl3l} := \text{linterp}(h_0, k_h, h_{0,vl3l}) = 0.73$$

$RH := 60\% \quad 100\% \text{ aan de buitenkant en } 20\% \text{ aan de binnenkant}$

$$\varepsilon_{cd,0} := 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot 4) \exp\left(-0.12 \cdot \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \left[ 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100\%} \right)^3 \right] \right] = 3.2 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cd,l} := \varepsilon_{cd,0} \cdot k_{h,vl3l} = 2.35 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca} := 2.5 \left( \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}} - 10 \right) 10^{-6} = 1.13 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{csl} := \varepsilon_{cdl} + \varepsilon_{ca} = 0.03\%$$

**relaxatie**

$$\mu := \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} = 0.75 \quad \rho_{1000} := 2.5 \quad t := 500000$$

$$\Delta \sigma_{pr} := 0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(9.1\mu) \cdot \left( \frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pm0} = 68 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,QPL} := \frac{-P_{m0minl}}{A_{c3l}} = -4.21 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

**kruipfactor**

$$\varphi_{RHl} := \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt{\frac{h_{0,vl3l}}{mm}}} \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{mm^2}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{mm^2}} \right)^{0.2} = 1.71$$

$$t_0 := 28$$

$$\varphi_{0l} := \varphi_{RHl} \cdot \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{mm^2}}} \cdot \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}$$

$$\beta_{Hl} := \begin{cases} \left[ 1.5 \left[ 1 + (0.12RH)^{18} \right] \frac{h_{0,vl3l}}{mm} + 250 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{mm^2}} \right)^{0.5} \right] & \text{if } 1.5 \left[ 1 + (0.12RH)^{18} \right] \frac{h_{0,vl3l}}{mm} + 250 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{mm^2}} \right)^{0.5} < 1500 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{mm^2}} \right)^{0.5} \\ 1500 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{mm^2}} \right)^{0.5} & \text{otherwise} \end{cases} = 732$$

$$\beta_{cl} := \left( \frac{t - t_0}{\beta_{Hl} + t - t_0} \right)^{0.3} = 1.00 \quad \varphi_{cl} := \varphi_{0l} \cdot \beta_{cl} = 1.77$$

$$\Delta\sigma_{p.c.s.rl} := \frac{-\varepsilon_{csl} \cdot E_p - 0.8 \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi_l \cdot \sigma_{c.Qpl}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_{p3l}}{A_{c3l}} (1 + 0.8 \varphi_l)} = -159.49 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta P_{c.s.rl} := A_{p3l} \cdot \Delta\sigma_{p.c.s.rl} = -876.23 \cdot \text{kN}$$

$$\text{loss}_{rl} := 1 - \frac{\sigma_{pm0} + \Delta\sigma_{p.c.s.rl}}{\sigma_{pm0}} = 11.43 \cdot \%$$

## Vloer 4

### Lengte richting

$$W_{4l} := \frac{1}{6} \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer4}^2 = 81.82 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

$$\text{loss}_{rl} := 10.95 \cdot \%$$

$$A_{c4l} := h_{vloer4} \cdot \frac{b_d}{2} = 1.82 \text{ m}^{2.00}$$

$$\frac{-(1 - \text{loss}_{rl}) P_{m0}}{A_{c4l}} + \frac{\frac{M_{vloer4l}(d_{vloer4})}{\gamma}}{W_{4l}} < 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{-P_{m0}}{A_{c4l}} - \frac{\frac{M_{vloer4l}(d_{vloer4})}{\gamma}}{W_{4l}} > -0.6 \cdot f_{ck}$$

$$P_{m0} \text{ moet minimaal } P_{4l} := P_{m0minl} = 6 \cdot \text{MN} \quad \text{zijn}$$

$$\text{en maximaal } P_{m0maxl} = 54 \cdot \text{MN}$$

$$A_{p4l} := \frac{P_{4l}}{\sigma_{pm0}} = 4514 \cdot \text{mm}^2 \quad n_{strands4l} := \text{ceil}\left(\frac{A_{p4l}}{A_{strand}}\right) = 31.00$$

$$\text{duct4l} := 4 \quad n_{duct4l} := \text{ceil}\left(\frac{n_{strands4l}}{\text{duct4l}}\right) = 8.00 \quad s_{p4l} := \frac{\frac{b_d}{2}}{n_{duct4l}} = 842 \cdot \text{mm}$$

### Verlies lengte richting krimp

$$h_{0.vl4l} := \frac{2 \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer4}}{b_{cel2}} = 364 \cdot \text{mm}$$

$$h_0 := \begin{pmatrix} 100 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \\ 500 \text{ mm} \\ 600 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad k_h := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0.85 \\ 0.75 \\ 0.7 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad k_{h,vl4l} := \text{linterp}(h_0, k_h, h_{0,vl4l}) = 0.73$$

$RH := 60\% \quad 100\% \text{ aan de buitenkant en } 20\% \text{ aan de binnenkant}$

$$\varepsilon_{cd,0} := 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot 4) \exp \left( -0.12 \cdot \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \left[ 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100\%} \right)^3 \right] \right] = 3.2 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cdl} := \varepsilon_{cd,0} \cdot k_{h,vl4l} = 2.35 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca} := 2.5 \left( \frac{f_{ck}}{\frac{N}{\text{mm}^2}} - 10 \right) 10^{-6} = 1.13 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{csl} := \varepsilon_{cdl} + \varepsilon_{ca} = 0.03\%$$

### relaxatie

$$\mu := \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} = 0.75 \quad \rho_{1000} := 2.5 \quad t := 500000$$

$$\Delta \sigma_{pr} := 0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(9.1\mu) \cdot \left( \frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pm0} = 68 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{c,QPl} := \frac{-P_{m0minl}}{A_{c4l}} = -3.46 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

### kruipfactor

$$\varphi_{RHI} := \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt{\frac{h_{0,vl4l}}{3}} \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} \right)^{0.7}} \right] \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} \right)^{0.2} = 1.71$$

$$t_0 := 28$$

$$\varphi_{Ql} := \varphi_{RHI} \cdot \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}}} \cdot \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}$$

$$\beta_{\text{HI}} := \begin{cases} \left[ 1.5 \left[ 1 + (0.12 \cdot R_H)^{18} \right] \frac{h_{0,vl4l}}{\text{mm}} + 250 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} \right)^{0.5} \right] & \text{if } 1.5 \left[ 1 + (0.12 \cdot R_H)^{18} \right] \frac{h_{0,vl4l}}{\text{mm}} + 250 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} \right)^{0.5} < 1500 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} \right)^{0.5} \\ \left[ 1500 \cdot \left( \frac{35}{\frac{f_{cm}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}} \right)^{0.5} \right] & \text{otherwise} \end{cases} = 732$$

$$\beta_{\text{cl}} := \left( \frac{t - t_0}{\beta_{\text{HI}} + t - t_0} \right)^{0.3} = 1.00 \quad \varphi_{\text{cl}} := \varphi_{0l} \cdot \beta_{\text{cl}} = 1.77$$

$$\Delta \sigma_{\text{p.c.s.rl}} := \frac{-\varepsilon_{csl} \cdot E_p - 0.8 \Delta \sigma_{\text{pr}} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi_l \cdot \sigma_{c.QPl}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_{p4l}}{A_{c4l}} (1 + 0.8 \varphi_l)} = -153.63 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{loss} := 1 - \frac{\sigma_{pm0} + \Delta \sigma_{\text{p.c.s.rl}}}{\sigma_{pm0}} = 11.01\%$$

$$\Delta P_{\text{c.s.rl}} := A_{p4l} \cdot \Delta \sigma_{\text{p.c.s.rl}} = -693.54 \cdot \text{kN}$$

### Lengte richting

$$W_{5l} := \frac{1}{6} \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer5}^2 = 81.82 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3 \quad \text{loss} := 10.41\%$$

$$A_{c5l} := h_{vloer5} \cdot \frac{b_d}{2} = 1.82 \text{ m}^{2.00}$$

$$\frac{-(1 - \text{loss}) P_{m0}}{A_{c5l}} + \frac{\frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{\gamma}}{W_{5l}} < 0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{-P_{m0}}{A_{c5l}} - \frac{M_{vloer51}(d_{vloer5})}{W_{5l}} > -0.6 \cdot f_{ck}$$

$P_{m0}$  moet minimaal  $P_{5l} := P_{m0\min l} = 5 \cdot M_N$  zijn

en maximaal

$$P_{m0maxl} = 56 \cdot MN$$

$$A_{p5l} := \frac{P_{4l}}{\sigma_{pm0}} = 4514 \cdot mm^2 \quad n_{strands5l} := ceil\left(\frac{A_{p5l}}{A_{strand}}\right) = 31.00 \quad duct5l := 4 \quad n_{duct5l} := ceil\left(\frac{n_{strands5l}}{duct5l}\right) = 8.00 \quad s_{p5l} := \frac{b_d}{2} = \frac{842}{2} = 842 \cdot mm$$

## Verlies lengte richting

### krimp

$$h_{0.vl5l} := \frac{2 \cdot \frac{b_d}{2} \cdot h_{vloer5}}{b_{cel2}} = 364 \cdot mm$$

$$h_0 := \begin{pmatrix} 100 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \\ 500 \text{ mm} \\ 600 \text{ mm} \end{pmatrix} \quad k_h := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0.85 \\ 0.75 \\ 0.7 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad k_{h.vl5l} := \text{linterp}(h_0, k_h, h_{0.vl5l}) = 0.73$$

RH := 60% (100% aan de buitenkant en 20% aan de binnenkant)

$$\varepsilon_{cd,0} := 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot 4) \exp\left(-0.12 \cdot \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \left[ 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100\%} \right)^3 \right] \right] = 3.2 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cdl} := \varepsilon_{cd,0} \cdot k_{h.vl5l} = 2.35 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca} := 2.5 \left( \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}} - 10 \right) 10^{-6} = 1.13 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{csl} := \varepsilon_{cdl} + \varepsilon_{ca} = 0.03 \cdot \%$$

### relaxatie

$$\mu := \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} = 0.75 \quad \beta_{1000} := 2.5 \quad t := 500000$$

$$\Delta\sigma_{pr} := 0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(9.1\mu) \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pm0} = 68 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c,QPL} := \frac{-P_{m0minl}}{A_{c5l}} = -2.63 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

### kruipfactor

$$\varphi_{RHl} := \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt{\frac{h_{0,vl5l}}{mm}}} \cdot \left( \frac{\frac{35}{f_{cm}}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left( \frac{\frac{35}{f_{cm}}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{0.2} = 1.71$$

$$t_0 := 28$$

$$\varphi_{0l} := \varphi_{RHl} \cdot \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{N}} \cdot 0.1 + t_0^{0.2}}$$

$$\beta_{Hl} := \begin{cases} \left[ 1.5 \left[ 1 + (0.12RH)^{18} \right] \frac{h_{0,vl5l}}{mm} + 250 \cdot \left( \frac{\frac{35}{f_{cm}}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{0.5} \right] & \text{if } 1.5 \left[ 1 + (0.12RH)^{18} \right] \frac{h_{0,vl5l}}{mm} + 250 \cdot \left( \frac{\frac{35}{f_{cm}}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{0.5} < 1500 \cdot \left( \frac{\frac{35}{f_{cm}}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{0.5} \\ \left[ 1500 \cdot \left( \frac{\frac{35}{f_{cm}}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{0.5} \right] & \text{otherwise} \end{cases} = 732$$

$$\beta_{cl} := \left( \frac{t - t_0}{\beta_{Hl} + t - t_0} \right)^{0.3} = 1.00 \quad \varphi_{0l} := \varphi_{0l} \cdot \beta_{cl} = 1.77$$

$$\Delta\sigma_{p,c,s,r1} := \frac{-\varepsilon_{csl} \cdot E_p - 0.8 \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi_l \cdot \sigma_{c,QPL}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_{p5l}}{A_{c5l}} (1 + 0.8 \varphi_l)} = -145.91 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{loss} := 1 - \frac{\sigma_{pm0} + \Delta\sigma_{p,c,s,r1}}{\sigma_{pm0}} = 10.46 \cdot \%$$

$$\Delta P_{c,s,r1} := A_{p5l} \cdot \Delta\sigma_{p,c,s,r1} = -658.66 \cdot kN$$

# O. BEREKENING ENERGIE DISSIPATIE WANDEN

---

**Wand 1:**

$$x_{u1} := \frac{A_{s1y}}{\alpha \cdot 1m} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 52.77 \cdot \text{mm}$$

$$z_1 := d_{1y} - \beta \cdot x_{u1} = 305.88 \cdot \text{mm}$$

$$M_{p1} := \frac{A_{s1y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot z_1 = 420 \cdot \text{kN}$$

$$\varepsilon_{s1} := \frac{(d_{1y} - x_{u1})}{x_{u1}} \cdot 0.31\% = 1.60 \cdot \%$$

$$\kappa_{u1} := \frac{0.31\% + \varepsilon_{s1}}{d_{1y}} = 0.06 \frac{1}{\text{m}}$$

$$l_{p11} := \sqrt{\frac{M_{p1} - M_{e1}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{M_{p1}}{\frac{1}{12} \cdot b_{cel}^2}}} = 381.01 \cdot \text{mm}$$

$$\varphi_1 := (\kappa_{u1} - \kappa_{e1}) \cdot (l_{p11} + l_{p12}) = 0.03$$

$$w_1 := \varphi_1 \cdot b_{cel} = 162.36 \cdot \text{mm}$$

$$E_{d1} := w_1 \cdot 8 \cdot M_{p1} \left( \frac{l_1}{b_{cel}} + 1 \right) = 1341 \cdot 10^3 \cdot \text{J}$$

**Wand 2:**

$$x_{u2} := \frac{A_{s2y}}{\alpha \cdot 1m} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 31.23 \cdot \text{mm}$$

$$z_2 := d_{2y} - \beta \cdot x_{u2} = 160.44 \cdot \text{mm}$$

$$M_{p2} := \frac{A_{s2y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot z_2 = 130 \cdot \text{kN}$$

Giver

$$0.5 \cdot 1m \cdot \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot x^2 + A_{s2y} \cdot x - A_{s2y} \cdot d_{2y} = 0$$

$$\varepsilon_s := \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$x_2 := \text{Find}(x) = 90.55 \cdot \text{mm}$$

$$M_{e2} := \frac{A_{s2y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot \left( d_{2y} - \frac{x_2}{3} \right) = 126268.05 \text{ N}$$

$$\varepsilon_{c1} := \frac{x_1}{d_{1y} - x_1} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{e1} := \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_s}{d_{1y}}$$

$$l_{p12} := \sqrt{\frac{M_{p1} - M_{e1}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{24} \cdot b_{cel}^2}} = 269.41 \cdot \text{mm}$$

Giver

$$0.5 \cdot 1m \cdot \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot x^2 + A_{s2y} \cdot x - A_{s2y} \cdot d_{2y} = 0$$

$$x_2 := \text{Find}(x) = 50.17 \cdot \text{mm}$$

$$M_{e2} := \frac{A_{s2y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot \left( d_{2y} - \frac{x_2}{3} \right) = 126268.05 \text{ N}$$

$$\varepsilon_{s2} := \frac{(d_{2y} - x_{u2})}{x_{u2}} \cdot 0.31\% = 1.40\% \quad \varepsilon_{c2} := \frac{x_2}{d_{2y} - x_2} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{u2} := \frac{0.31\% + \varepsilon_{s2}}{d_{2y}} = 0.10 \frac{1}{m}$$

$$l_{p21} := \sqrt{\frac{M_{p2} - M_{e2}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{12} \cdot l_2^2}} = 200.77 \cdot \text{mm}$$

$$\varphi_2 := (\kappa_{u2} - \kappa_{e2}) \cdot (l_{p21} + l_{p22}) = 0.03$$

$$w_2 := \varphi_2 \cdot l_2 = 77.25 \cdot \text{mm}$$

$$E_{d2} := w_2 \cdot 8 \cdot M_{p2} \left( \frac{b_{cel}}{l_2} + 1 \right) = 228 \cdot 10^3 \cdot J$$

### Wand 3:

$$x_{u3} := \frac{A_{s3y}}{\alpha \cdot 1 \text{m}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 31.78 \cdot \text{mm}$$

$$z_3 := d_{3y} - \beta \cdot x_{u3} = 160.24 \cdot \text{mm}$$

$$M_{p3} := \frac{A_{s3y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot z_3 = 133 \cdot \text{kN}$$

$$\varepsilon_{s3} := \frac{(d_{3y} - x_{u3})}{x_{u3}} \cdot 0.31\% = 1.37\% \quad \varepsilon_{c3} := \frac{x_3}{d_{3y} - x_3} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{u3} := \frac{0.31\% + \varepsilon_{s3}}{d_{3y}} = 0.10 \frac{1}{m}$$

Giver

$$0.5 \cdot 1 \text{m} \cdot \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot x^2 + A_{s3y} \cdot x - A_{s3y} \cdot d_{3y} = 0$$

$$x_3 := \text{Find}(x) = 50.53 \cdot \text{mm}$$

$$M_{e3} := \frac{A_{s3y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot \left( d_{3y} - \frac{x_3}{3} \right) = 128377.88 \text{ N}$$

$$\varepsilon_{c3} := \frac{x_3}{d_{3y} - x_3} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{e3} := \frac{\varepsilon_{c3} + \varepsilon_s}{d_{3y}}$$

$$l_{p31} := \sqrt{\frac{M_{p3} - M_{e3}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{12} \cdot l_3^2}} = 215.53 \cdot \text{mm}$$

$$\varphi_3 := (\kappa_{u3} - \kappa_{e3}) \cdot (l_{p31} + l_{p32}) = 0.03$$

$$w_3 := \varphi_3 \cdot l_3 = 87.76 \cdot \text{mm}$$

$$E_{d3} := w_3 \cdot 8 \cdot M_{p3} \left( \frac{b_{cel}}{l_3} + 1 \right) = 250 \cdot 10^3 \cdot \text{J}$$

#### Wand 4:

$$x_{u4} := \frac{A_{s4y}}{\alpha \cdot 1 \text{m}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 33.47 \cdot \text{mm}$$

$$z_4 := d_{4y} - \beta \cdot x_{u4} = 159.62 \cdot \text{mm}$$

$$M_{p4} := \frac{A_{s4y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot z_4 = 139 \cdot \text{kN}$$

$$\varepsilon_{s4} := \frac{(d_{4y} - x_{u4})}{x_{u4}} \cdot 0.31\% = 1.28\% = 1.28\%$$

$$\kappa_{u4} := \frac{0.31\% + \varepsilon_{s4}}{d_{4y}} = 0.09 \frac{1}{\text{m}}$$

$$l_{p41} := \sqrt{\frac{M_{p4} - M_{e4}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{12} \cdot l_4^2}} = 235.10 \cdot \text{mm}$$

$$\varphi_4 := (\kappa_{u4} - \kappa_{e4}) \cdot (l_{p41} + l_{p42}) = 0.03$$

$$w_4 := \varphi_4 \cdot l_4 = 100.26 \cdot \text{mm}$$

$$l_{p32} := \sqrt{\frac{M_{p3} - M_{e3}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{24} \cdot l_3^2}} = 152.40 \cdot \text{mm}$$

Giver

$$0.5 \cdot 1 \text{m} \cdot \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot x^2 + A_{s4y} \cdot x - A_{s4y} \cdot d_{4y} = 0$$

$$x_4 := \text{Find}(x) = 51.62 \cdot \text{mm}$$

$$M_{e4} := \frac{A_{s4y}}{m} \cdot f_{yd} \left( d_{4y} - \frac{x_4}{3} \right) = 134879.44 \text{ N}$$

$$\varepsilon_{c4} := \frac{x_4}{d_{4y} - x_4} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{e4} := \frac{\varepsilon_{c4} + \varepsilon_s}{d_{4y}}$$

$$l_{p42} := \sqrt{\frac{M_{p4} - M_{e4}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{24} \cdot l_4^2}} = 166.24 \cdot \text{mm}$$

$$E_{d4} := w_4 \cdot 8 \cdot M_{p4} \cdot \left( \frac{b_{cel}}{l_4} + 1 \right) = 280 \cdot 10^3 \cdot J$$

**Wand 5:**

$$x_{u5} := \frac{A_{s5y}}{\alpha \cdot 1m} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 40.73 \cdot mm$$

$$z_5 := d_{5y} - \beta \cdot x_{u5} = 154.93 \cdot mm$$

$$M_{p5} := \frac{A_{s5y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot z_5 = 164 \cdot kN$$

$$\varepsilon_{s5} := \frac{(d_{5y} - x_{u5})}{x_{u5}} \cdot 0.31\% = 0.98\% \cdot 0.31\% = 0.98\%$$

$$\kappa_{u5} := \frac{0.31\% + \varepsilon_{s5}}{d_{5y}} = 0.08 \frac{1}{m}$$

$$l_{p51} := \sqrt{\frac{M_{p5} - M_{e5}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{12} \cdot l_5^2}} = 248.12 \cdot mm$$

$$\varphi_5 := (\kappa_{u5} - \kappa_{e5}) \cdot (l_{p51} + l_{p52}) = 0.02$$

$$w_5 := \varphi_5 \cdot l_5 = 100.20 \cdot mm$$

$$E_{d5} := w_5 \cdot 8 \cdot M_{p5} \cdot \left( \frac{b_{cel}}{l_5} + 1 \right) = 293 \cdot 10^3 \cdot J$$

Giver

$$0.5 \cdot 1m \cdot \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot x^2 + A_{s5y} \cdot x - A_{s5y} \cdot d_{5y} = 0$$

$$x_5 := \text{Find}(x) = 55.54 \cdot mm$$

$$M_{e5} := \frac{A_{s5y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot \left( d_{5y} - \frac{x_5}{3} \right) = 160656.53 N$$

$$\varepsilon_{c5} := \frac{x_5}{d_{5y} - x_5} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{e5} := \frac{\varepsilon_{c5} + \varepsilon_s}{d_{5y}}$$

$$l_{p52} := \sqrt{\frac{M_{p5} - M_{e5}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{24} \cdot l_5^2}} = 175.45 \cdot mm$$

**Wand 6:**

$$x_{u6} := \frac{A_{s6y}}{\alpha \cdot 1m} \cdot \frac{f_{yd}}{fcd} = 40.73 \cdot \text{mm}$$

$$z_6 := d_{6y} - \beta \cdot x_{u6} = 154.93 \cdot \text{mm}$$

$$M_{p6} := \frac{A_{s6y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot z_6 = 164 \cdot \text{kN}$$

$$\varepsilon_{s6} := \frac{(d_{6y} - x_{u6})}{x_{u6}} - 0.31\% = 0.98\% \quad 0.31\% + \varepsilon_{s6}$$

$$\kappa_{u6} := \frac{0.31\% + \varepsilon_{s6}}{d_{6y}} = 0.08 \frac{1}{\text{m}}$$

$$l_{p61} := \sqrt{\frac{M_{p6} - M_{e6}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{12} \cdot l_6^2}} = 311.62 \cdot \text{mm}$$

$$\varphi_6 := (\kappa_{u6} - \kappa_{e6}) \cdot (l_{p61} + l_{p62}) = 0.03$$

$$w_6 := \varphi_6 \cdot l_6 = 158.05 \cdot \text{mm}$$

$$E_{d6} := w_6 \cdot 8 \cdot M_{p6} \cdot \left( \frac{b_{cel}}{l_6} + 1 \right) = 411 \cdot 10^3 \cdot \text{J}$$

Giver

$$0.5 \cdot 1m \cdot \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot x^2 + A_{s6y} \cdot x - A_{s6y} \cdot d_{6y} = 0$$

$$x_6 := \text{Find}(x) = 55.54 \cdot \text{mm}$$

$$M_{e6} := \frac{A_{s6y}}{m} \cdot f_{yd} \cdot \left( d_{6y} - \frac{x_6}{3} \right) = 160656.53 \text{ N}$$

$$\varepsilon_{c6} := \frac{x_6}{d_{6y} - x_6} \cdot \varepsilon_s = 0.00$$

$$\kappa_{e6} := \frac{\varepsilon_{c6} + \varepsilon_s}{d_{6y}}$$

$$l_{p62} := \sqrt{\frac{M_{p6} - M_{e6}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{24} \cdot l_6^2}} = 220.35 \cdot \text{mm}$$