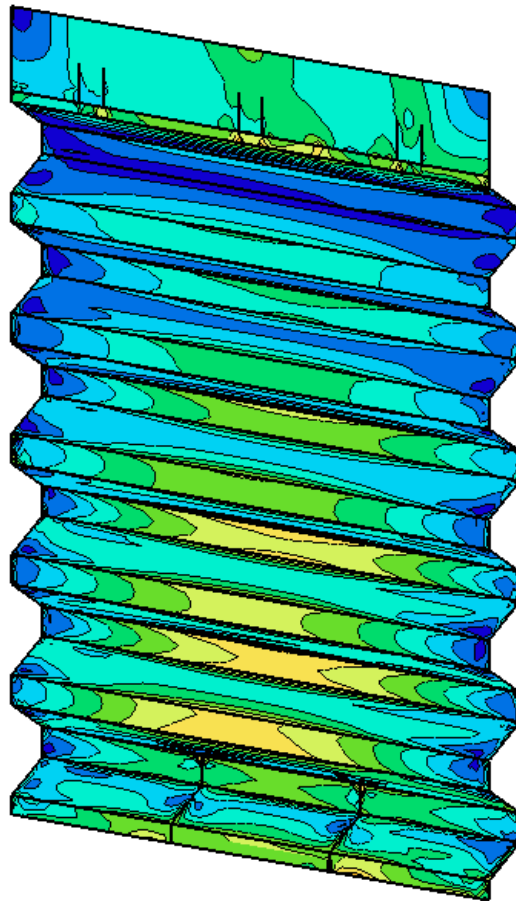




Geprofileerde wand op een sluisdeur

Afstudeerrapport

Auteur: Tim Erkelens

Datum: 13-06-2017

Geprofileerde wand op een sluisdeur

Afstudeerrapport

Versie 2.0
13 juni 2017, Sliedrecht

Student

Tim Erkelens
0882391
Europastraat 33
4671 ET Dinteloord
Erkelens.tim@gmail.com

Afstudeerbegeleider bedrijf

Dhr. Th.P.M van der Tol
Hoofdconstructeur
088 943 2398
Th.P.M.vanderTol@lv-Infra.nl

Afstudeerbedrijf

Iv-Infra
Trapezium 322
3364 DL Sliedrecht

Docentbegeleider

Dhr. P.M.J. Stoutjesdijk
010 794 5871
p.m.j.stoutjesdijk@hr.nl

Onderwijsinstelling

Hogeschool Rotterdam
Civiele Techniek
G.J. de Jonghweg 4-6
3015 GG Rotterdam

2^e Lezer

Dhr. G.J. Verkerk
010 794 4935
g.j.verkerk@hr.nl

Voorwoord

Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek naar het toepassen van een geprofileerde wand op een sluisdeur. Dit onderzoek dient als afrondende opdracht voor mijn studie Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam en moet aantonen dat ik de competenties bezit die door de hogeschool zijn opgesteld. Het onderzoek is uitgevoerd bij Iv-Infra van februari 2017 tot en met juni 2017.

Allereerst wil ik Iv-Infra bedanken voor het bieden van een prettige werkomgeving. Dit onderzoek zou ik echter niet hebben kunnen uitvoeren zonder mijn begeleiders. In het speciaal wil ik Dirk van der Tol bedanken voor de begeleiding tijdens het gehele proces van het afstuderen.

Verder wil ik mijn begeleider vanuit Hogeschool Rotterdam, Mark Stoutjesdijk, bedanken voor zijn advies en hulp tijdens het onderzoek. Als laatste wil ik alle mensen bedanken die mijn verslag hebben gecontroleerd en feedback hebben gegeven.

Sliedrecht 13 juni 2017
Tim Erkelens



Samenvatting

Dit onderzoek gaat over het toepassen van een geprofileerde wand als vervanging van de vlakke, verstijfde wand in een puntdeur. Hiermee wordt geprobeerd een kostenreductie te behalen op basis van conservering en lassen.

De gedachte is dat de conservering eenvoudiger is, omdat verstijvers lastig te conserveren zijn door de scherpe hoeken, terwijl een geprofileerde plaat hier minder last van heeft. Verder zijn bij verstijvers veel lassen nodig, omdat deze over de gehele breedte van de deur gelast moeten worden. Een geprofileerde plaat kan worden gezet, waardoor alleen bij de opleggingen lassen nodig zijn.

Voor het onderzoek zijn de puntdeuren in de Prins Bernhardsluizen gebruikt als referentieproject. Voor dit project is gekozen, omdat het ontwerp van de deuren is gemaakt door Iv-Infra. De berekeningen van dit project kunnen hierdoor worden opgevraagd en de mensen die destijds betrokken waren bij het ontwerp, geraadpleegd. De verstijfde waterkerende wand, is vervangen door een geprofileerde waterkerende wand, waarbij de rest van de constructie (zoveel mogelijk) onaangetast is gelaten.

De constructie met de geprofileerde wand is gemodelleerd en berekend met SCIA Engineer. De resultaten konden hierdoor worden vergeleken met de verstijfde wand, die eveneens in SCIA Engineer is berekend. De invloed van de geprofileerde wand op de overige constructie onderdelen kon met deze resultaten ook worden onderzocht.

De toetsingen volgens de norm zijn alleen uitgevoerd voor de geprofileerde wand en de aansluitingen van de wand met de overige onderdelen van de constructie. De plaat zelf was maatgevend op plooi stabiliteit in combinatie met de waterdruk. Verder zijn de aansluitingen van de wand ook getoetst op vermoeiing. Voor de overige constructie onderdelen is alleen gekeken of de vloeispanning voldeed bij het gebruik van staalkwaliteit S355.

Uiteindelijk blijkt dat de constructie met de geprofileerde wand ook daadwerkelijk goedkoper is dan de verstijfde wand. De kostenbesparing wordt geschat op ongeveer € 32.000,-, wat 18% goedkoper is dan de puntdeur met een verstijfde wand. Het kostenverschil tussen de wanden zelf bleek niet zo groot te zijn. De winst wordt vooral behaald doordat er bepaalde onderdelen van de deur kunnen worden weggelaten bij een geprofileerde wand, die wel nodig zijn bij een verstijfde wand.

Al met al blijkt het toepassen van een geprofileerde wand op een puntdeur daadwerkelijk interessant. Buiten de voordelen op basis van kosten, is ook de conservering eenvoudiger. Bij volgende tenders voor puntdeuren, zal deze oplossing dan ook door Iv-Infra worden meegenomen.

Summary

This report contains the research on the application of a profiled sheeting, as alternative for a flat, stiffened skin plate for a steel miter gate. The purpose is to achieve a cost reduction based on conservation and welding.

The philosophy is that conserving is simpler because stiffeners are difficult to conserve, due to their sharp corners. A profiled plate is less affected by this. Stiffeners also require more welds, because they must be welded along the full length of the gate. A profiled plate can be bent into shape, so that the only welds necessary are the ones at the supports of the plate.

For this research, the miter gates in the “Prins Bernhardsluizen” were used as a reference project. This project was chosen, because the design of the doors was made by Iv-Infra. This way, the calculations of the project can easily be requested and the people who were involved in the design of the doors, can be consulted. The stiffened skin plate is replaced by a profiled skin plate, leaving the rest of the structure untouched (where possible).

The miter gate is modeled and calculated with SCIA Engineer. This way, the results could be compared with the stiffened skin plate, which was also calculated with SCIA Engineer. The impact of the profiled skin plate on the other structural parts could be investigated with these results.

The tests according to the standards are only performed for the profiled skin plate and the connections of the skin plate with other parts of the structure. For the plate itself, a combination of plate buckling and water pressure proved to be governing. Furthermore, the connections of the skin plate with the rest of the structure were tested for fatigue. For the other structural parts it was only checked whether the yield stress didn't exceed the maximum yield stress for steel grade S355.

Finally, the structure with the profiled skin plate proved to be cheaper than the structure with the stiffened skin plate. The cost savings are estimated at approximately € 32.000,-, which is 18% cheaper than the miter gate with a stiffened skin plate. The cost difference between the skin plates themselves did not prove to be so great. The cost reduction is mainly achieved because certain parts of the gate, which are required with a stiffened skin, can be omitted with a profiled skin

All in all, applying a profiled skin plate to a miter gate does prove to be interesting. Besides the benefits based on costs, conservation is also easier. With subsequent tenders for miter gates, this option will be taken into account by Iv-Infra.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	8
1.1	Doelstelling	10
1.2	Opbouw hoofdrapport	10
2	Probleemanalyse	11
2.1	Conservering	11
2.2	Lassen	12
2.3	Zetten van platen	13
3	Theoretisch kader	14
3.1	Algemene werking puntdeuren	14
3.2	Analyse Prins Bernhardsluizen	15
3.2.1	Constructie puntdeuren	15
3.2.2	Belastinggevallen	18
3.2.3	Belastingen	19
3.2.4	Belastingcombinaties	21
3.3	Analyse Julianasluis	22
3.4	Wijzigingen constructie puntdeur	23
3.5	Keuze damwand of gezette plaat	24
3.5.1	Damwandprofiel	24
3.5.2	Gezette plaat	25
3.5.3	Vergelijking	25
3.6	Toetsingen	26
3.6.1	Plooi met spanning in het vlak	26
3.6.2	Plooi met spanning uit het vlak	28
3.6.3	Vermoeiing	29
4	Onderzoeksopzet	31
4.1	Uitgangspunten & randvoorwaarden	32
5	Uitwerking onderzoek	33
5.1	Optimalisatie geprofileerde plaat	33
5.2	Wijzigingen in de constructie	36
5.2.1	Achterhar	36
5.2.2	Voorhar	37
5.2.3	Cilinder aansluitingen	37
5.3	Toetsingen	38
5.3.1	Sterkte	38
5.3.2	Vervorming	39
5.3.3	Plooi	40
5.3.4	Vermoeiing	40
5.4	Kostenvergelijking	40
5.4.1	Grove schatting totaalprijs	41
5.4.2	Controle resultaat	41
5.4.3	Totaal & procentueel kostenverschil	41
5.4.4	Kosten verschillende onderdelen	41

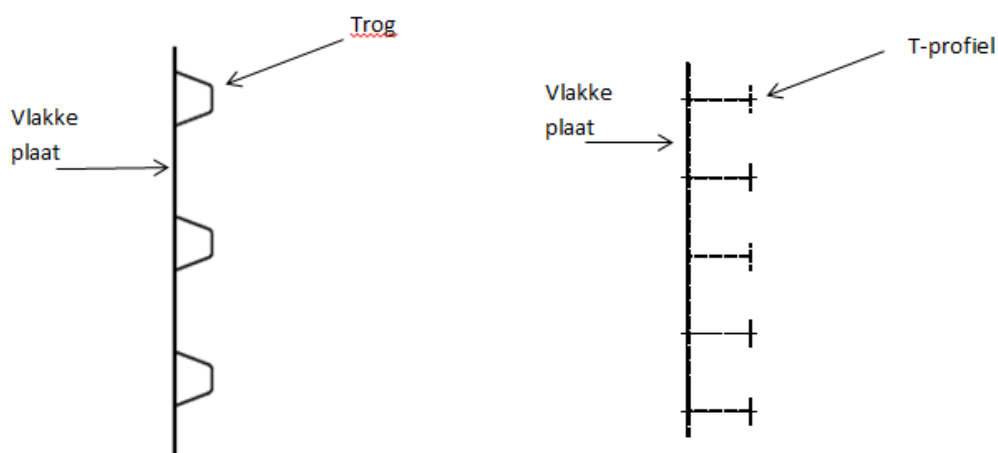


5.4.5	Prijsopbouw deuren	42
5.5	Verbeteringen in ontwerp	43
6	Conclusies & aanbevelingen	45
7	Bibliografie	47

Bijlage 1:	Plan van aanpak
Bijlage 2:	Literatuuronderzoek
Bijlage 3:	Analyse Prins Bernhardsluizen
Bijlage 4:	Analyse Julianasluis
Bijlage 5:	Optimalisatie geprofileerde plaat
Bijlage 6:	Constructierapport
Bijlage 7:	Verschil nieuwe & oude deur
Bijlage 8:	Kostenvergelijking
Bijlage 9:	Tekeningen oude deur
Bijlage 10:	Tekeningen nieuwe deur
Bijlage 11:	Bedrijfsbeoordeling

1 Inleiding

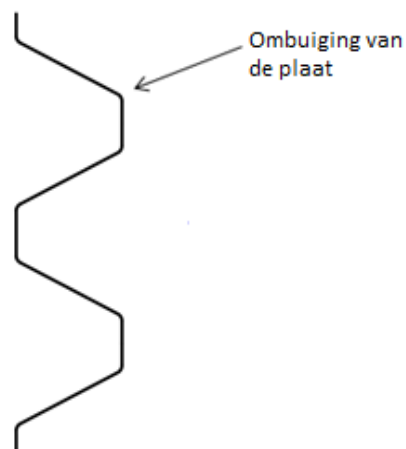
Een traditionele sluisdeur heeft een vlakke waterkerende wand (huid), met daarachter verstijvers. Verstijvers zijn opgelaste constructieonderdelen die ervoor zorgen dat een vlakke plaat sterker en stijver wordt. Twee voorbeelden van verstijvers zijn weergegeven in Figuur 1. Afhankelijk van het type dat wordt toegepast, geven verstijvers veel extra laswerk. Verder zijn verstijvers vaak lastig te conservering, omdat ze uit scherpe hoeken bestaan zoals t-profielen, of helemaal niet meer bereikbaar zijn zoals bij trogprofielen. De lastige conservering, in combinatie met het laswerk maakt dat de waterkerende wand een duur onderdeel is.



Figuur 1: Links een vlakke plaat met troggen als verstijvers, rechts een vlakke plaat met t-profielen als verstijvers

Iv-Infra heeft de vraag gesteld of het toepassen van een geprofileerde plaat als waterkerende wand, zoals deze is weergegeven in Figuur 2, goedkoper is dan een traditionele wand. Een geprofileerde plaat bevat namelijk geen scherpe hoeken, waardoor deze eenvoudiger te conserveren is. Verder zijn er minder lassen nodig, omdat de plaat wordt "omgebogen" (gezet).

Dat het kan, is al bewezen met de twee puntdeuren die in Figuur 3 zijn weergegeven. Het is echter niet duidelijk of deze oplossing goedkoper is dan een traditionele wand. Om deze reden wordt een vergelijk gemaakt tussen een sluisdeur met een traditionele wand en een sluisdeur met een geprofileerde wand.



Figuur 2: Geprofileerde plaat.



Figuur 3: Links de puntdeuren van de Julianasluis te Gouda, rechts de puntdeuren van de scheepslift te Niederfinow.¹

Om het vergelijk te maken is een traditionele sluisdeur gekozen die is ontworpen door Iv-Infra. Het betrof een renovatieproject van de puntdeuren in de Prins Bernhardsluizen, in Figuur 4 is een foto gegeven van een van deze puntdeuren. De verstijvers die zijn toegepast, zijn in dit geval trogvormig. De reden dat deze deur gekozen is, is omdat de berekeningen en tekeningen allemaal door Iv-Infra zijn gemaakt. Hierdoor kan dit eenvoudig worden opgezocht in het archief en kunnen er vragen worden gesteld aan de personen die destijds betrokken waren bij de engineering.

Er is bewust gekozen voor een puntdeur, omdat de verwachting is dat korte overspanningen voordeliger zijn voor de geprofileerde wand, doordat er dan geen tussensteunpunten nodig zijn. Bij langere overspanningen moet de wand waarschijnlijk wel ondersteund worden en dit is lastig te realiseren bij een geprofileerde wand. De steunpunten moeten namelijk de "golvende" vorm van de wand volgen, wat veel pas- en meetwerk tot gevolg heeft.



Figuur 4: Eén van de puntdeuren in de Prins Bernhardsluizen te Tiel¹ (in het vervolg wordt dit type puntdeur aangeduid als "traditionele puntdeur").

¹ (Archief Iv-Infra)



Voor deze deur wordt een geprofileerde wand ontworpen die aangepast is aan de afmetingen van de deur. Wanneer de deur met deze wand voldoet, wordt er een kostenvergelijk gemaakt tussen de traditionele deur en de “nieuwe” deur (deur met geprofileerde wand). De winst kan worden behaald door het verminderen van de hoeveelheid lasmeters, maar ook door het reduceren van het aantal staalkilo's. Verder zal de constructie eenvoudiger te conserveren zijn. Als de deur slanker kan worden met een geprofileerde wand, kan de kolkwand van de sluis indirect ook goedkoper worden. De dikte van deze kolkwand is namelijk mede afhankelijk van de dikte van de deur. De indirecte besparingen worden echter niet meegenomen in het vergelijk, omdat deze kosten van meerdere factoren afhankelijk zijn.

1.1 Doelstelling

De hoofdvraag van het onderzoek is:

“Kan een kostenreductie worden gerealiseerd door het toepassen van een geprofileerde wand op de puntdeuren van de Prins Bernhardsluizen?”

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, zijn er ook een aantal deelvragen opgesteld:

- Wat zijn de optimale afmetingen voor de geprofileerde wand?;
- Voldoen de verbindingen in de sluisdeur op vermoeiing bij het toepassen van de geprofileerde wand?;
- Wat is het verschil in kosten voor een geprofileerde of een vlakke wand voor een traditionele puntdeur?;
- Kan de puntdeur met geprofileerde wand verder geoptimaliseerd worden op basis van de resultaten?

1.2 Opbouw hoofdrapport

Het hoofdrapport is opgedeeld in de volgende hoofdstukken:

- 2. *Probleemanalyse*. Hierin worden de problemen en randvoorwaarden uitgewerkt die van belang zijn bij een traditionele wand en een geprofileerde;
- 3. *Theoretisch kader*. In het theoretisch kader wordt inzicht gegeven in de problemen uit hoofdstuk 3, verder wordt hierin algemene informatie gegeven die van belang is voor het onderzoek;
- 4. *Onderzoeksaanpak*. Dit hoofdstuk beschrijft de stappen die worden gezet om tot een antwoord te komen op de hoofdvraag, op basis van de inzichten die verkregen zijn in hoofdstuk 3 & 4;
- 5. *Uitwerking onderzoek*. Omschrijving van het uitgevoerde onderzoek en de resultaten;
- 6. *Conclusies en aanbevelingen*. Het laatste hoofdstuk bevat het antwoord op de onderzoeksvraag, inclusief de aanbevelingen;



2 Probleemanalyse

In dit hoofdstuk wordt een inzicht gegeven in de problemen van de traditionele waterkerende wand en de aandachtspunten van de geprofileerde waterkerende wand. De onderwerpen die worden behandeld, zijn:

- Conservering van een sluisdeur;
- Lassen;
- Zetten van platen.

2.1 Conservering

Het conserveren van een stalen sluisdeur bestaat uit een aantal stappen, deze zijn:²

1. Stralen;
2. Schoonmaken en ontvetten;
3. Aanbrengen coating.

De eerste stap is het stralen van de deur, dit kan worden gedaan met zand of met grit. De oude coatings worden verwijderd en het oppervlak wordt hierdoor grondig gereinigd.³ Vervolgens wordt de deur schoongemaakt en ontvet, waarna de coating kan worden aangebracht. De coating is meestal opgebouwd uit meerdere lagen. Dit coaten kan enerzijds gedaan worden met poedercoating, waarbij de coating elektrostatisch op de sluisdeur wordt verspoten en vervolgens op hoge temperatuur wordt gebracht.⁴ Een andere manier is het zogenaamd natlakken, hierbij wordt één of meerdere lagen coating simpelweg op het oppervlak gespoten.⁴ Deze laatste methode is ook bij de puntdeuren van de Prins Bernhardsluizen gebruikt.²

Een andere manier om de deur te beschermen tegen corrosie is “schooperen”, wat hetzelfde betekent als metalliseren.⁵ Schooperen vindt plaats na het stralen en betekent het aanbrengen van een laag zink – aluminium legering.⁵ De werking van deze laag is kathodisch, wat betekent dat de legering zich “opoffert”. Het staal zal niet gaan corroderen, maar de laag wel. Deze laag is poreus, waardoor er meestal wordt nabehandeld met een poedercoating of een laag natlakken.⁵ Het voordeel van schooperen is dat de levensduur langer is dan wanneer er alleen maar gecoat wordt.²

Het nadeel van een traditionele waterkerende wand is dat de t-verstijvers lastig te conserveren zijn. Dit komt doordat er scherpe hoeken in de verstijvers zitten en de hoeken lastig te bereiken zijn, omdat de “t” deze hoeken als het ware afschermt. De trogvormige verstijvers op de puntdeuren van de Prins Bernhardsluizen zijn wat eenvoudiger te conserveren, doordat er wat stompere hoeken in zitten. Deze verstijvers hebben echter het probleem dat ze binnenin niet geconserveerd kunnen worden, waardoor ze luchtdicht moeten worden gemaakt. Dit brengt extra kosten met zich mee, doordat er tests moeten worden uitgevoerd om de luchtdichtheid te controleren.

² Dit is gebleken uit een gesprek met Dirk van der Tol, hoofdconstructeur op de afdeling “stalen en beweegbare kunstwerken” bij Iv-Infra.

³ (Ketelaars, 2001)

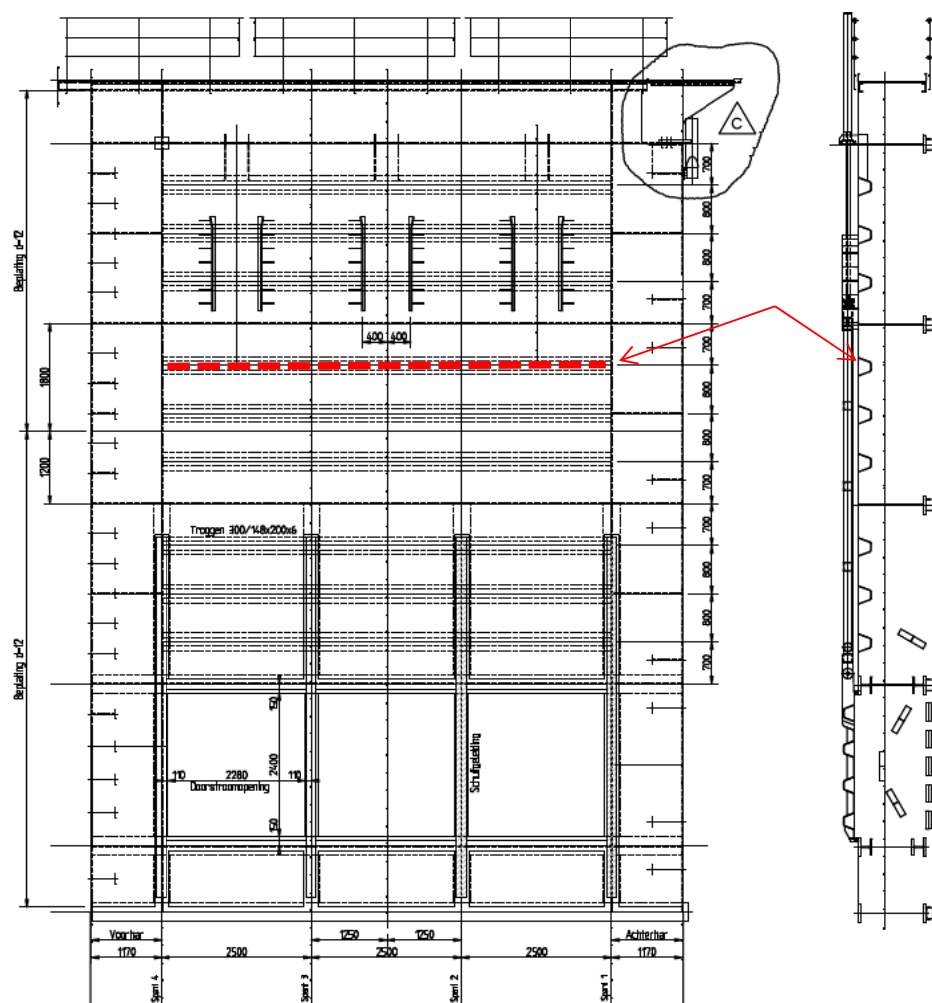
⁴ (coating.nl, 2017)

⁵ (stralenpoedercoaten.nl, 2017)

De geprofileerde wand heeft geen van de nadelen zoals deze hiervoor zijn beschreven. Dit komt doordat er geen scherpe hoeken in de constructie zitten, zoals bij de t-vormige verstijvers het geval is. Ook zit er geen opgesloten lucht in de constructie, waarvoor tests moeten worden uitgevoerd

2.2 Lassen

De verstijvers op de Prins Bernhardsluizen zitten bijna over de gehele breedte van de sluisdeur, zoals te zien is in Figuur 5. De trogvormige verstijvers moeten op twee plaatsen op de vlakke plaat worden gelast, waardoor de aantal lasmeters van deze verstijvers snel oplopen. Het nadeel van de lassen op de constructie is dat deze relatief duur zijn. Ook worden er vermoeiingsgevoelige details toegevoegd door het aanbrengen van lassen (voor meer uitleg over vermoeiing van staal, zie paragraaf 3.6.3).



Figuur 5: Aanzicht en doorsnede van de puntdeuren in de Prins Bernhardsluizen, één van de verstijvers is aangegeven met de rode pijlen.⁶

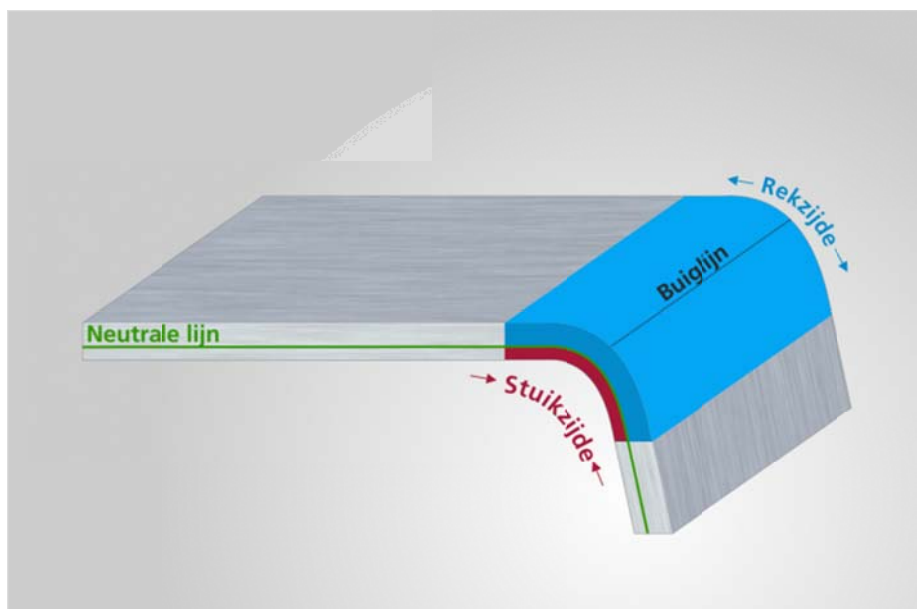
⁶ (Archief Iv-Infra)

Verder zou het mogelijk kunnen dat naast de trogvormige verstijvers, ook nog andere constructieonderdelen kunnen worden weggelaten. Waardoor er nog meer lasmeters kunnen worden bespaard. Hiervoor moet echter eerst wat meer duidelijk zijn over de krachtswerking van puntdeuren en wordt daarom pas uitgewerkt in paragraaf 3.4.

2.3 Zetten van platen

Zetten betekent dat een plaat wordt omgebogen onder een bepaald hoek, dit gebeurt meestal op een kantbank. Hierbij wordt de plaat op een matrijs gezet die de juiste kanthoek bevat. Vervolgens duwt de pers een stuk gereedschap naar beneden die de plaat in deze matrijs perst, waardoor de plaat wordt omgebogen.

Als een plaat wordt gebogen, ontstaat er een kwaliteitsvermindering door rekken en stuiken. Aan de buitenzijde van de buiging treedt trek op en aan de binnenzijde druk. Wanneer de buigradius te klein wordt genomen, kan de trekzijde gaan scheuren, terwijl de binnenzijde kan gaan stuiken (zie Figuur 6). Een vuistregel is dat de minimale buigradius van een stalen plaat gelijk is aan 1x de plaatdikte.⁷



Figuur 6: Zetten van een stalen plaat.⁷

De maximale plaatdikte die gezet kan worden is afhankelijk van het vermogen van de zetbank. Ter referentie zijn de maximale diktes van het bedrijf "Tosec" aangehouden. Platen van s235 tot 30 mm dik kunnen worden gezet, wanneer de lengte van de plaat niet meer is dan 16 meter. Wanneer de lengte kleiner is, kunnen grotere diktes worden gezet. Zo kan er tot 70 mm dik worden gezet, bij een lengte van 2 meter (staalkwaliteit s235). De grens voor de geprofileerde plaat wordt op 20 mm dik gesteld, omdat deze uit s355 bestaat, terwijl de maximale dikte bij s235, 30 mm is.⁷

⁷ (Tosec, 2017)

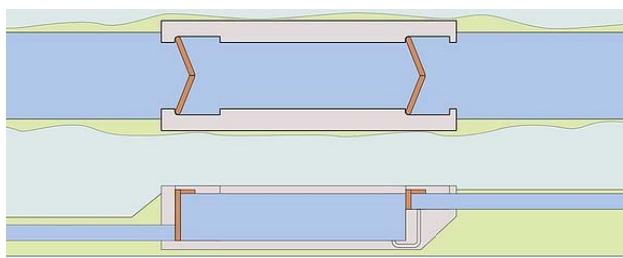
3 Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt er wat meer over de achtergrond van de onderwerpen verteld, die in voorgaande hoofdstukken zijn behandeld. Voor een wat uitgebreidere beschrijving van de onderwerpen, zie bijlage 2. Verder wordt er nog wat verteld over het ontwerp en de engineering van zowel de deuren in de Julianasluizen (puntdeuren met een geprofileerde wand) als die in de Prins Bernhardsluizen. De onderwerpen die worden behandeld, zijn:

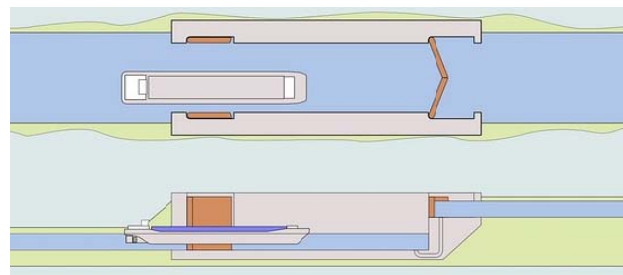
- Algemene werking puntdeuren;
- Analyse puntdeuren Prins Bernhardsluizen;
- Analyse puntdeuren Julianasluis;
- Wijzigingen van de oude constructie t.b.v. de geprofileerde wand;
- Keuze tussen een damwand of een gezette plaat;
- Plooi;
- Vermoeiing.

3.1 Algemene werking puntdeuren

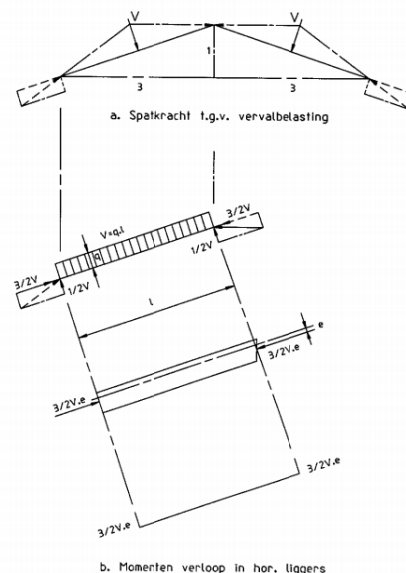
Puntdeuren zijn deuren die in gesloten toestand met de punten tegen elkaar aan steunen, hier ontleen ze hun naam dan ook aan.⁸ De deuren staan meestal onder een helling van 1:3 tegen elkaar, waardoor een soort driescharnierligger ontstaat. De deuren draaien om verticale assen die in de deurkassen zitten. Wanneer de deuren geopend zijn, bevinden deze zich in de deurkassen. In Figuur 8⁹ zijn de deuren weergegeven in gesloten toestand en in Figuur 7⁹ zijn de deuren in geopende toestand afgebeeld, hierbij zitten de deuren in de deurkassen.



Figuur 8: Puntdeuren in gesloten stand.⁹



Figuur 7: Puntdeuren in geopende stand.⁹

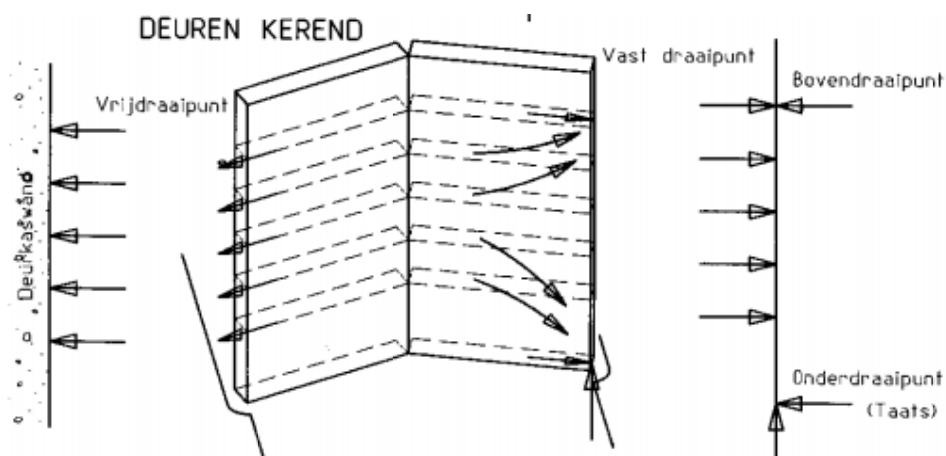


Figuur 9: Globale krachtswerking deuren.⁸

⁸ (Beem, et al., Ontwerp van schutsluizen 1, 2000)

⁹ (Klein, 2017)

Als er een positieve vervalbelasting over de deuren staat (deuren zijn gesloten en keren de hoogte van het water), dan wordt dit als druk en buiging opgenomen (zie Figuur 9). De deuren dragen de krachten die zij opnemen via oplegvlakken, die zich evenwijdig aan en loodrecht op de deuras bevinden, af aan de deurkaswanden¹⁰. Deze oplegvlakken zijn weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10: oplegvlakken van een puntdeur uitgerust met draaipunten met speling (links) en een puntdeur met draaipunten zonder speling (rechts)¹⁰. De drempel is in dit figuur niet weergegeven.

Bij de oplegvlakken kan een onderscheid worden gemaakt tussen draaipunten met speling en draaipunten zonder speling. Draaipunten met speling nemen geen krachten op bij het keren, terwijl draaipunten zonder speling dit juist wel doen. In geopende stand nemen de draaipunten met speling wel belasting op, doordat de deur als het ware aan deze punten gaat “hangen”, waardoor er een koppel ontstaat tussen het draaipunt boven en onder. Dit heeft invloed op de krachtsinleiding in een deur. De draaipunten van de puntdeuren in de Prins Bernhardsluizen zijn uitgevoerd met draaipunten met speling.¹¹

3.2 Analyse Prins Bernhardsluizen

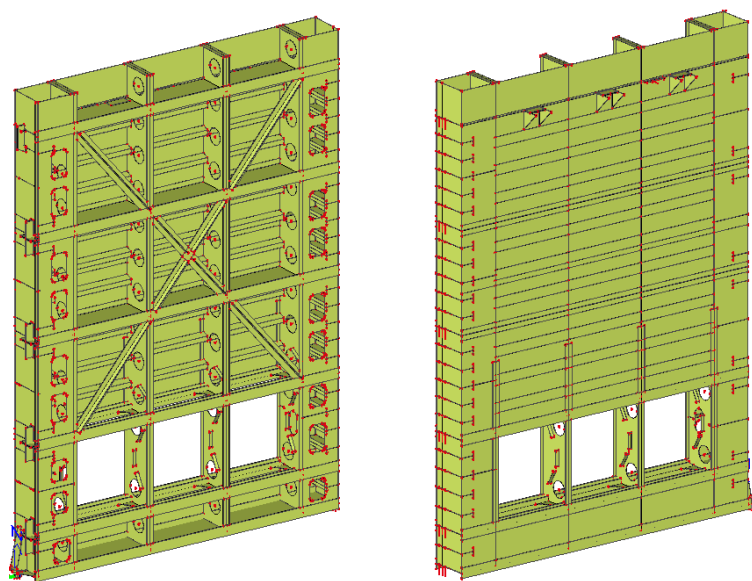
In deze paragraaf zal eerst de constructie van de puntdeur worden beschreven en vervolgens worden de belastingen die gebruikt zijn bij de berekening, geanalyseerd. De volledige analyse van deze puntdeuren staat in bijlage 3.

3.2.1 Constructie puntdeuren

Puntdeuren bestaan uit een aantal onderdelen met allemaal een eigen naam en functie. In het rapport wordt regelmatig naar deze onderdelen gerefereerd. Om een inzicht te geven, wordt in deze paragraaf de verschillende onderdelen van de puntdeuren in de Prins Bernhardsluizen omschreven en visueel weergegeven. De algehele constructie van deze deuren is gegeven in Figuur 12.

¹⁰ (Beem, et al., Ontwerp van schutsluizen 1, 2000)

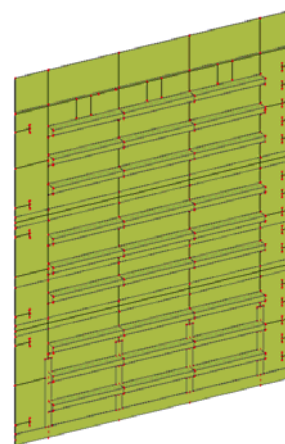
¹¹ (Almen, Sterkte en vervorming, 2008)



Figuur 12: Links de open zijde van de puntdeuren, rechts de dichte zijde van de puntdeuren¹²

Beplating

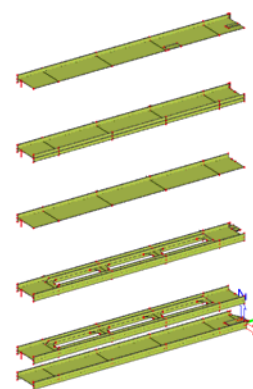
De beplating is de scheiding tussen het lage water en het hoge water, deze neemt de druk van het water op. Vaak zijn de plaatvelden verstijfd, dit kan gebeuren met opgelaste verstijvers, bestaande uit troggen, t-profielen, hoekstalen of andere vormen. Deze verstijvers zorgen ervoor dat de plaat extra stijfheid en sterkte krijgt (zie Figuur 11)



Figuur 11: beplating van de puntdeuren met verstijvers¹²

Horizontale harren

Horizontale harren, ook wel regels genoemd, bevinden zich eveneens achter de beplating (zie Figuur 13). Deze harren dienen ervoor om de buiging uit de plaatvelden over te brengen naar de voor- en achterhar. Tevens nemen ze het grootste deel van de normaalkrachten op die volgen uit de oplegging van de andere deur en leidt deze krachten door naar de stalen aanslagen op de achterhar. Harren bestaan uit stalen liggers/profielen die worden gedimensioneerd op basis van de lengte van de deur en de vervalbelasting.¹³



Figuur 13: Horizontale harren van de puntdeuren¹²

Kolommen

Kolommen, ook wel stijlen genoemd, bevinden zich tussen de horizontale regels (zie Figuur 14). De kolommen dienen om de buiging van de plaatvelden over te brengen naar de harren (horizontale regels)¹³

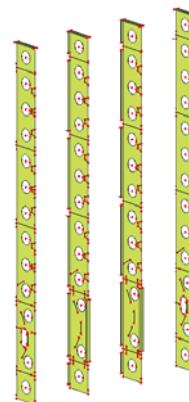
¹² (Archief Iv-Infra)

¹³ (Beem, et al., Ontwerp van schutsluizen 1, 2000)

Voor- en achterhar

De voorhar (zie Figuur 15) bevindt zich op de plaats waar de twee puntdeuren tegen elkaar steunen, deze dient ervoor om de krachten die t.p.v. de tussenaanslag ontstaan (houten aanslag tussen de deuren), over te brengen naar de rest van de deur.¹⁴ De deur zorgt dan voor een verdere geleiding van de krachten naar de deurkassen.

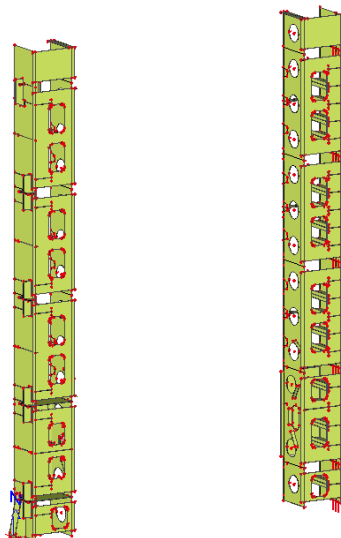
De achterhar (zie Figuur 15) heeft ongeveer dezelfde functie als de voorhar. In dit geval bevindt deze zich echter bij de aansluiting tussen de deur en deurkas. De achterhar dient ervoor om de krachten van de deur naar de wand van de deurkas te geleiden. De draaipunten van de deur zitten hier ook op bevestigd.



Figuur 14: Kolommen van de puntdeuren.¹⁵

Stalen aanslagen

De krachten van de deur op de sluiswand wordt overgebracht door stalen aanslagen die op de achterhar zitten. Deze opleggingen steunen op de deurstoelen die in de wand van de deurkassen zitten.¹⁴



Figuur 15: Links is de achterhar en rechts is de voorhar.¹⁵

Houten afdichtingen

Langs de achterhar en de wand van de deurkassen, loopt een houten balk die voor de waterafdichting tussen de deur en de wand zorgt en tevens als oplegvlak werkt. Hetzelfde principe wordt op de onderste regel gebruikt, maar nu om de aansluiting af te dichten en de krachten over te brengen tussen de drempel op de sluisvloer en de deur. Als laatste zit er op de voorhar, tussen de twee deuren, nog een houten aanslag die functioneert als waterdichting en oplegvlak¹⁴, deze aanslag wordt ook wel de tussenaanslag genoemd.

Nivelleerschuiven

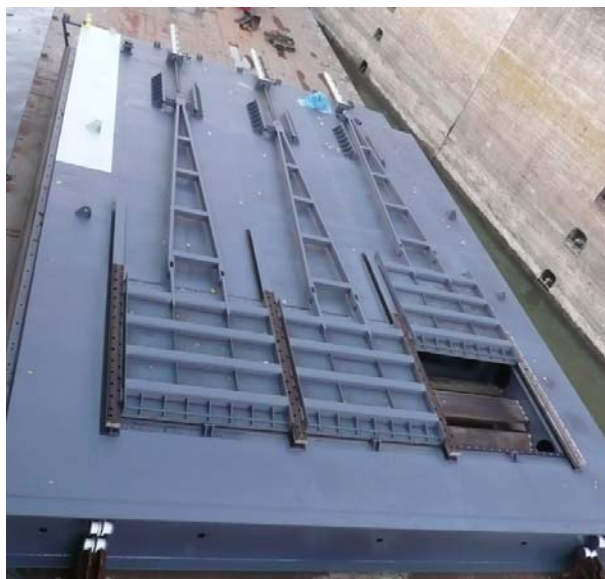
Onderin de deuren, aan de hoogwaterzijde, zitten drie openingen in de deur. Deze 3 openingen worden afgedekt met nivelleerschuiven (zie Figuur 16¹⁵). Wanneer deze schuiven openen, laten ze het hoogwater door naar de zijde met laagwater. Hierdoor nivelleert het waterstandsverschil, waarna de deuren geopend kunnen worden.

Aandrijving

De aandrijving van een puntdeur met een hydraulische cilinder bestaat simpelweg uit een cilinder die horizontaal in de sluiswand zit (kelder). De verbinding tussen de sluisdeur en de zuigerstand is scharnierend, hetzelfde geldt voor de verbinding tussen de cilinder en de kelderwand.¹⁴

¹⁴ (Beem, et al., Ontwerp van schutsluizen 1, 2000)

¹⁵ (Archief Iv-Infra)



Figuur 16: Puntdeur inclusief de nivelleerschuiten.

16

3.2.2 Belastinggevallen

In de berekeningen van de oude deuren in de Prins Bernhardsluizen is met een groot aantal belastinggevallen en bedrijfstoestanden gerekend. Om voor de nieuwe constructie te bepalen welke belastinggevallen benodigd zijn in de berekening, is uitgewerkt welk geval de grootste spanning in de constructieonderdelen veroorzaakt. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 1, waarin direct opvalt dat er maar één geval is die de hoogste spanning veroorzaakt in de verschillende onderdelen. Hierbij moet wel gezegd worden dat de draaipunten zijn weggelaten bij dit vergelijk, dit heeft als reden dat het onderzoek zich focust op de geprofileerde wand en niet op de overige onderdelen van de deur.

	bg 1.1a	bg 1.1b	bg 1.2a	bg 1.2b	bg 2.1a/b	bg 2.2a	bg 2.2b	bg 2.3	bg 2.4	bg 3.1
Waterkerende wand	273	129	30	0	74	30	0	121	180	40
Harren	344	238	30	30	139	30	18	0	180	40
Kolommen	273	131	0	0	65	20	0	0	0	0
Troggen	212	23	0	30	17	0	0	121	80	0
Verstijvers	201	107	100	100	72	60	48	70	140	156,6
Voor- en achterhar	212	190	100	100	93	60	60	70	140	156,6

Tabel 1 Optredende spanningen [mPa] in de traditionele deur per belastinggeval (voor een beschrijving van alle belastinggevallen zie bijlage 3).

¹⁶ (Archief Iv-Infra)



Om de maximale spanning te verkrijgen moet bg 1.1 a worden aangehouden, dit is de maximale positieve vervalbelasting in de berekeningen van de traditionele deur.

Voor de vervorming moet hetzelfde geval worden aangehouden, alleen dan in de BGT. Dit is aangegeven in de berekeningen van de traditionele deur, omdat in dit geval de grootste vervorming optrad.

Voor de vermoeiing is het wat lastiger te bepalen welk belastinggeval precies moet worden aangehouden. De vermoeiingschade is afhankelijk van de grootte van de spanningswisseling, maar ook van het aantal wisselingen. In Tabel 2 is de spanning weergegeven die optreedt bij verschillende belastinggevallen. Hieruit kan niet direct worden opgemaakt welke belasting maatgevend is, waardoor er wordt gekozen om ze alle drie toe te passen.

	bg 1.3b	bg 1.3a	bg 3.3
Waterkerende wand	228	72	68
Harren	346	90	176 ¹⁷
Kolommen	255	55	89
Troggen	200	39	12
Verstijvers	151	30	68 ¹⁷
Voor- en achterhar	191	41	152 ¹⁷
Aantal wisselingen [n]	6000	400000	406000

Tabel 2: Vermoeiingsspanning [mPa] in verschillende onderdelen van de deur en het aantal spanningswisselingen per belastinggeval.

In totaal zijn er dus 3 belastinggevallen en 2 modellen nodig om de constructie onderdelen te kunnen controleren op de nieuwe deur, in een kort overzicht zijn dit:

- Model 1: deur gesloten;
 - o Bg 1.1: Maximaal positief verval;
 - o Bg 1.2: Maximaal positief verval vermoeiing;
 - o Bg 1.3: Normaal positief verval vermoeiing;
- Model 2: deur geopend;
 - o Bg 2.1: Normaal geopende deur vermoeiing.

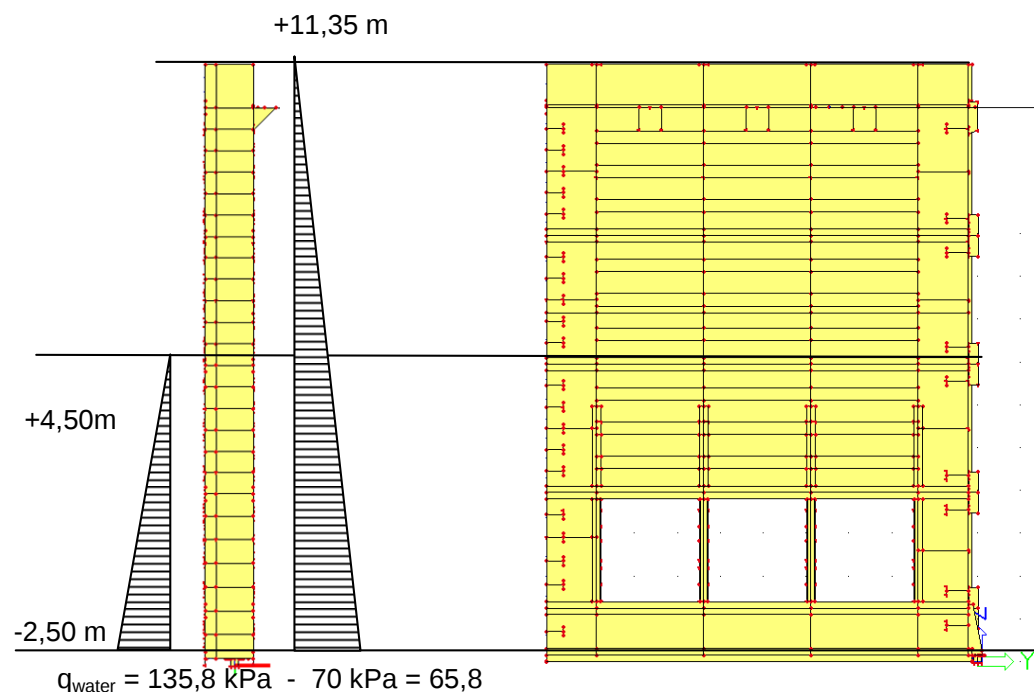
3.2.3 Belastingen

De belastingen die zijn gebruikt om de verschillende belastinggevallen op te kunnen stellen, worden hieronder verder uitgewerkt. Gewichten van de verschillende onderdelen van de deuren worden hier niet uitgewerkt, maar wel in bijlage 3. De grootte van de belastingen wordt hetzelfde gehouden als in de berekeningen van de traditionele deur.

¹⁷ Zeer lokale spanning ter plaatse van het bovenste draaipunt (halsbeugel)

Extreem verval [F10]

Het extreem verval is het maximale waterstandsverschil dat over de deur kan plaatsvinden. In Figuur 17 is dit verschil weergegeven, deze belasting bepaald voor een groot deel van de onderdelen de sterkte.

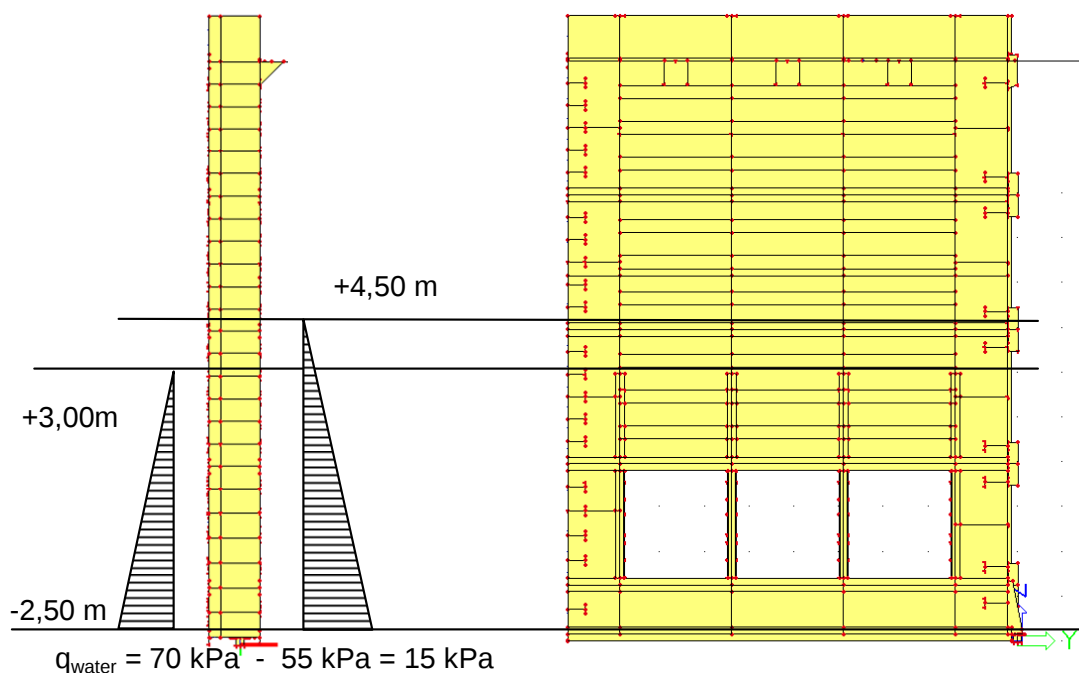


Figuur 17: Extreem verval over de traditionele deur¹⁸

Vervalbelasting maximaal schutpeil [F12]

Het maximale schutpeil, is het peil dat wordt bereikt bij eenmaal schutten (zie Figuur 18), dit verschil is minder groot dan bij het extreme verval. Deze belasting zal dan ook worden toegepast om de vermoeiing te toetsen.

¹⁸ (Almen, Sterkte en vervorming, 2008)



*Figuur 18: Verval maximaal schutpeil traditionele deur*¹⁹

Opzetkracht van de hydraulische cilinder [F33]

De opzetkracht is de voorspankracht die de hydraulische cilinder uitoefent, zodat wordt voorkomen dat de deur gaat “klapperen”. De opzetkracht van de cilinder is 465 kN.

3.2.4 Belastingcombinaties

De belastingcombinaties volgen uit het boek “Ontwerp van schutsluizen deel 2”. De combinaties die worden aangehouden voor de berekening van de deur met een geprofileerde wand, staan weergegeven in Tabel 3. De afkorting voor eigengewicht in de combinaties is F0.

B.G.	Naam	Combinatie
1.1	Maximaal positief verval UGT	$1,26 * F_0 + 1,25 * F_{10} + 1,2 * F_{33}$
	Maximaal positief verval BGT	$1,05 * F_0 + 1,0 * F_{10} + 1,0 * F_{33}$
1.2	Maximaal positief verval vermoeiing	$1,2 * F_{10} + 1,2 * F_{33}$
1.3	Normaal positief verval vermoeiing	$1,2 * F_{12} + 1,2 * F_{33}$
2.1	Normaal geopende deur vermoeiing	$1,2 * F_{33}$

Tabel 3: Combinaties voor de berekening van de deur²⁰

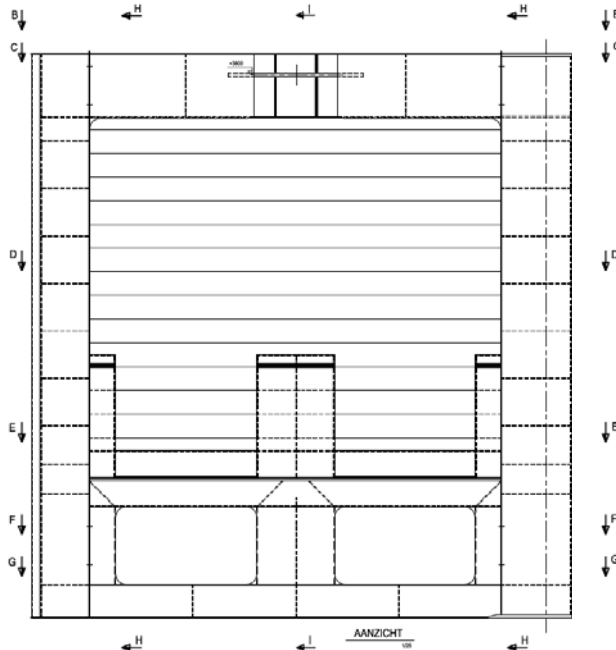
¹⁹ (Almen, Vermoeiing, 2008)

²⁰ (Beem, et al., Ontwerp van schutsluizen 2, 2000)

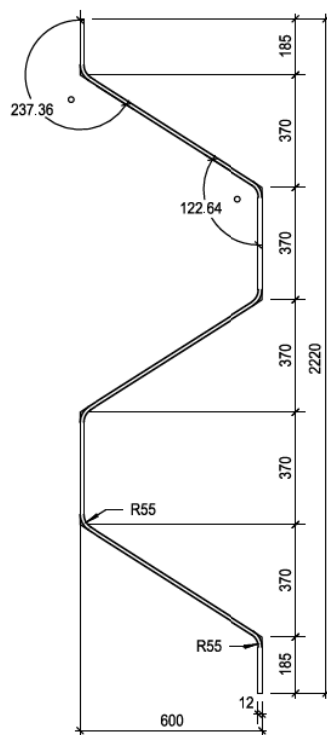
3.3 Analyse Julianasluis

De Julianasluis is gelegen nabij Gouda en verbindt het Gouwekanaal met de Hollandse IJssel. De reden dat deze sluis interessant is, is omdat de nieuwe tweede kolk, is uitgerust met puntdeuren die een geprofileerde waterkerende wand bevatten. De deuren zijn ontworpen door Hollandia en ingenieursbureau Stendess. De productie van de deuren is uitgevoerd door Hollandia.²¹ In bijlage 4 wordt er wat meer informatie gegeven over de kolken en de constructie van de deur.

In Figuur 20 is een vooraanzicht van deze deur gegeven en in Figuur 19 is een deel van de doorsnede van de geprofileerde waterkerende wand gegeven. De profielhoogte van de deur is 600 mm, terwijl de dikte van de plaat 12 mm bedraagt. Verder valt op dat er geen gebruik is gemaakt van horizontale harren en kolommen in de deur, maar dat de wand zelf dragend is. De algehele deur is getoetst op sterkte en vervorming. De geprofileerde wand is getoetst op plooi en vermoeiing, waarbij de vermoeiingstoets het meest maatgevend bleek te zijn.



Figuur 20: Vooraanzicht van de puntdeuren in de Julianasluis.²¹



Figuur 19: Doorsnede van de geprofileerde wand.²¹

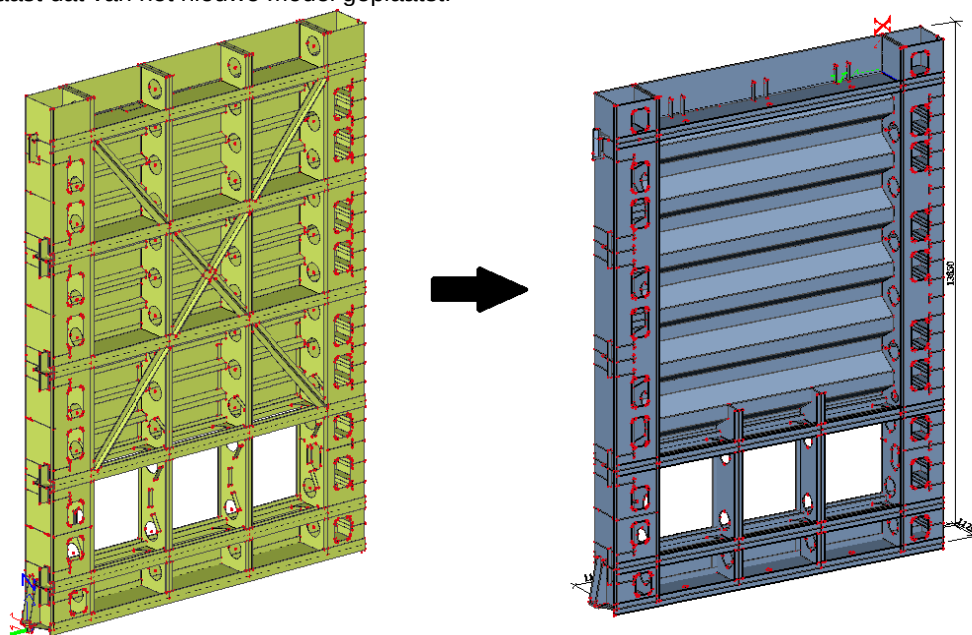
²¹ Berekeningen en tekeningen van de puntdeuren in de Julianasluis zijn aangeleverd door de heer A. Verheul op 06-03-2017. Dhr. Verheul is werkzaam bij de Provincie Zuid-Holland en was betrokken bij het ontwerp van de nieuwe kolk van de Julianasluisen.

3.4 Wijzigingen constructie puntdeur

Nu wat meer bekend is over hoe de traditionele puntdeur van de Prins Bernhardsluizen in elkaar zit en hoe de geprofileerde wand is toegepast op de puntdeur van de Julianasluis, kan worden uitgewerkt hoe de traditionele deur wordt aangepast.

In de inleiding is al eens beschreven dat een geprofileerde wand de verstijfde waterkerende wand zou kunnen vervangen. Echter na het analyseren van de puntdeuren in de Julianasluis, lijkt het voordeliger om ook de harren en kolommen te verwijderen en de geprofileerde wand "zelf dragend" te maken. Hiermee wordt voorkomen dat er lastige aansluitingen moeten worden gemaakt met de kolommen, omdat deze het profiel van de geprofileerde wand moeten volgen.

Voor het onderzoek wordt wel aangenomen dat de geprofileerde wand alleen boven de nivelleeropeningen wordt toegepast. De nivelleeropeningen worden dus zoveel mogelijk hetzelfde gehouden als in de oude deur. Dit wordt gedaan, omdat de grootte van de openingen zijn gedimensioneerd op basis van een benodigd debiet, dat van invloed is op de schuttijd. Verder worden deze openingen op een bepaalde manier vormgegeven, zodat de krachten ten gevolge van de stroming, op de schepen die in de kolk liggen, niet te groot worden.²² Door de openingen onaangetast te laten, wordt het stroombeeld in de kolk dus niet verstoord. Om een beeld te krijgen wat er wordt bedoeld met bovenstaande uitleg, is in Figuur 21 een plaatje van het oude model naast dat van het nieuwe model geplaatst.



Figuur 21: Links de puntdeur met de verstijfde waterkerende wand²³, rechts de puntdeur met de geprofileerde waterkerende wand.

²² (Beem, et al., Ontwerp van schutsluizen 1, 2000)

²³ (Archief Iv-Infra)

3.5 Keuze damwand of gezette plaat

Als geprofileerde wand moet er een keuze worden gemaakt tussen een gezette plaat en een damwand. In de onderstaande sub paragrafen wordt informatie gegeven over de damwand en de geprofileerde plaat. Na deze paragrafen wordt een keuze gemaakt tussen de twee opties op basis van de voor- en nadelen, voor zowel de gezette plaat als de damwand wordt gekozen voor staal S355. Het volledig vergelijk is terug te vinden in Bijlage 2, het literatuuronderzoek.

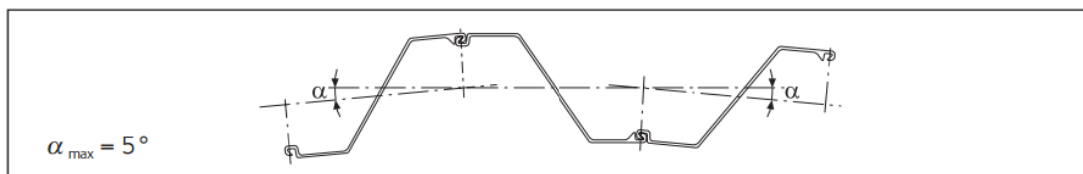


Figuur 22: Een voorbeeld van een slot tussen twee damwandplanken.²⁴

3.5.1 Damwandprofiel

Er is gekozen voor een warmgewalste damwandplank, omdat hierdoor voorkomen kan worden dat er rekening moet worden gehouden met zettingstoleranties (zie 3.5.2). Verder zijn gezette damwanden alleen als kleinere profielen beschikbaar.²⁵ Tussen damwandplanken bevinden zich sloten (zie Figuur 22²⁴ voor een voorbeeld) om de planken op elkaar aan te laten sluiten. Door deze sloten wordt een redelijke waterdichtheid behaald.

De sloten hebben echter een aantal nadelen als ze op de sluisdeur worden toegepast. Het eerste nadeel is dat de sloten wat kunnen roteren, waardoor de damwand extra kan vervormen. De verdraaiing is maximaal 5° ²⁵, dit is te zien in Figuur 23. Om de sloten extra stijf te maken zouden deze kunnen worden dichtgelast, dit levert echter wel extra lasmeters op.



Figuur 23: Hoekverdraaiing van de sloten.²⁵

Het tweede nadeel is dat de sloten een “redelijke waterdichtheid” halen, dit is echter niet voldoende. De damwand moet in staat zijn het water te kunnen keren, er mogen geen kieren aanwezig zijn, dit is wel vaak het geval zoals te zien is in Figuur 22. Om dit te voorkomen moeten de sloten dubbelzijdig worden dichtgelast, zodat de sloten écht waterdicht zijn. Enkelzijdig is niet mogelijk, omdat tussen de sloten niet geconserveerd kan worden (hetzelfde probleem als bij trogvormige verstijvers). Om de sloten luchtdicht af te sluiten moet er dan dubbelzijdig worden gelast, wat extra lasmeters oplevert.

Het derde nadeel treed op wanneer er alsnog extra constructieonderdelen als harren en kolommen nodig blijken te zijn. Deze kruisen namelijk de sloten, waardoor een lastig lasdetail moet worden gemaakt.

²⁴ (skylinesteel, 2017)

²⁵ (Baxter, et al., 2016)



De maximum afmetingen van de damwanden, zijn:

- Hoogtematen: 290 tot 456 mm;²⁶
- Breedtematen: 400 tot 750 mm.²⁶

Deze hoogtes lijken echter wel wat aan de lage kant om op de deur toe te passen, omdat er op de puntdeuren van de Julianasluis al een hoogte van 600 mm is toegepast, terwijl deze deuren korter zijn en een minder groot verval ondervinden.

Het voordeel is dat de damwand waarschijnlijk wat goedkoper is dan een gezette plaat, omdat het een standaard product is.

3.5.2 *Gezette plaat*

Het grootste voordeel van de gezette plaat is waarschijnlijk dat er minder lassen nodig zijn dan bij een damwand. Dit komt doordat de breedte van de segmenten zelf kan worden bepaald en het aantal lassen dus minimaal kan worden gehouden. De begrenzingen van de gezette plaat zijn afhankelijk van de plaatgrootte en de breedte van de kantbank.

Verder heeft een gezette plaat geen last van sloten die de constructie onderbreken. Er hoeft dus geen dubbelzijdige las uitgevoerd te worden, omdat er anders opgesloten lucht in de constructie blijft zitten. Ook hebben onderdelen als harren en kolommen (indien deze nodig zijn), geen last van sloten in de plaat.

Het nadeel van de gezette plaat is dat deze waarschijnlijk duurder is dan een standaard damwandplank, doordat de plaat op maat gemaakt dient te worden. Dit geeft echter wel meer vrijheid in het ontwerpen van de profilering. Verder kunnen er wat zettingstoleranties ontstaan, wat betekent dat de plaat na het zetten iets terug buigt. Hierdoor kan het zijn dat de plaat niet perfect recht meer is na het zetten.

3.5.3 *Vergelijking*

De vergelijking volgt uit het literatuuronderzoek in bijlage 2, waarin twee typen damwanden zijn meegenomen (Z- en U-profielen). In dit verslag zijn deze twee profielen niet vergeleken, omdat de verschillen in voor- en nadelen klein zijn. In Tabel 4 is de vergelijking tussen een damwand en een gezette plaat gegeven.

Gezien de nadelen van de damwand, wordt er gekozen voor de gezette plaat. Er wordt geen exact kostenvergelijking meer gemaakt, omdat sommige nadelen van de damwand onoverkomelijk zijn. De maximale hoogte van een damwand wordt te klein geacht, zeker als er wordt gekeken naar de profielhoogte in de Julianasluis. Verder moeten er meer lasmeters worden toegevoegd t.o.v. de geprofileerde plaat, wat weer extra kosten en vermoeiingsdetails met zich mee brengt.

²⁶ (Baxter, et al., 2016)

Damwanden	
<i>Voordelen</i>	<i>Nadelen</i>
• Ononderbroken lijf;	• Mogelijk hoekverdraaiing in de sloten;
	• Relatief veel laswerk;
	• Aansluiting met harren en/of kolommen kan lastig zijn (indien deze noodzakelijk zijn);
	• Maximale hoogte 511 mm.
Gezette plaat	
<i>Voordelen</i>	<i>Nadelen</i>
• Vrijwel onbeperkt in de hoogte van de profilering;	• Relatief duur;
• Vrijheid in het bepalen van de breedte en dikte van de plaat;	• Zettingstoleranties.
• Relatief weinig lasmeters.	

Tabel 4: Vergelijk tussen damwand en gezette plaat

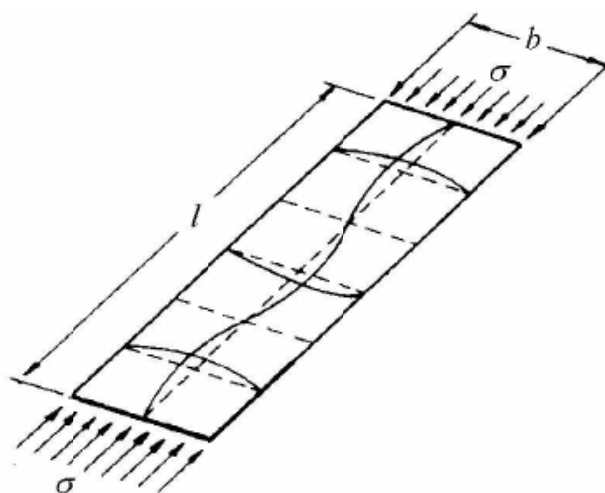
3.6 Toetsingen

Naast de toetsingen op sterkte en vervorming, moet de geprofileerde wand ook getoetst worden op plooiinstabiliteit en vermoeiing. In deze paragraaf wordt uitgewerkt wat deze begrippen inhouden en hoe dit wordt getoetst.

3.6.1 Plooi met spanning in het vlak

Plooi is een instabiliteitsverschijnsel dat ontstaat bij op druk- en of schuifspanning belaste platen.²⁷

Wanneer een plaatveld met druk in het vlak wordt belast, zal dit plaatveld eerst korter worden, als de belasting toeneemt kan het plaatveld uit het vlak vervormen.²⁸ In Figuur 24²⁹ is het plooiën van een plaat weergegeven. Het is vergelijkbaar met het uitknikken van staven.

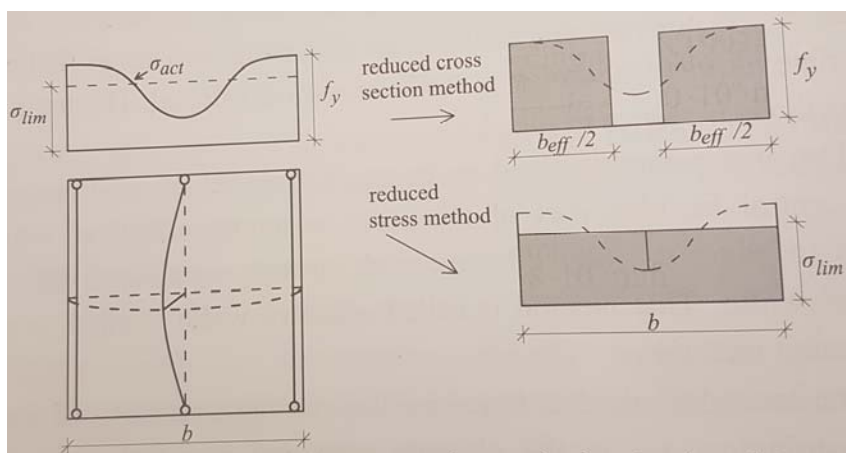

Figuur 24: Plooiën van een plaat²⁹
²⁷ (INCAS, 2015)

²⁸ (Snijder & Steenberg, 2011)

²⁹ (Fagerberg, 2003)

Plooi kan alleen optreden wanneer relatief dunne plaatvelden door druk- en of schuifspanningen worden belast. In NEN-EN 1993-1-1 worden doorsneden van verschillende profielen ingedeeld in zogenaamde “doorsnede klassen”. Deze klassen zeggen iets over de slankheid (hoogte-dikte verhouding) van een doorsnede. In totaal zijn er vier verschillende klassen (klasse 1 t/m 4), waarbij klasse 1 staat voor de minst slanke doorsneden en klasse 4 voor de meest slanke doorsneden. Plooi hoeft alleen gecontroleerd te worden wanneer een doorsnede in klasse 4 valt.³⁰

Voor de berekening van platen, is de NEN-EN 1993-1-5 in het leven geroepen. Deze NEN-norm geeft twee methodes om de berekening van plooi uit te voeren, het algemene idee van deze methoden is weergegeven in Figuur 25.



Figuur 25: Algemene idee van de gereduceerde spanning en de gereduceerde doorsnede methode³¹

De eerste methode is de “effectieve breedte” methode, welke ook toepasbaar is voor de berekening van dwarskracht in een plaat. Deze methode richt zich op het reduceren van de doorsnede in het middelste, meest plooi gevoelige gedeelte van de plaat. Verder wordt aangenomen dat de effectieve doorsnede (totale doorsnede – reductie) een belasting kan opnemen die gelijk is aan de vloeispanning van de plaat. Deze methode is erg efficiënt, omdat het zowel de reststerkte van de plaat na het bereiken van de kritieke plooi spanning meeneemt, als de herverdeling van de krachten in de totale doorsnede.³¹ Deze methode mag alleen gebruikt worden als aan onderstaande voorwaarden wordt voldaan:³⁰

- De platen zijn (vrijwel) rechthoekig of vierkant, met flenzen die niet meer dan 10° afwijken van een horizontale lijn (anders moet sectie 2.2.3 van EN 1993-1-5 worden gevolgd);
- Platen mogen alleen in de dwars- en of langs richting verstijft zijn;
- Onverstijfde sparingen in een plaat mogen niet groter zijn dan 0,05*b, waarbij b de breedte van een plaat is. Verstijfde sparingen mogen groter zijn, echter NEN-EN 1993-1-5 geeft hier geen regels over;
- Platen hebben overal dezelfde dikte, anders moet de minimale dikte worden aangehouden.

³⁰ (Europese commissie voor normalisatie, NEN-EN 1993-1-1, 2016)

³¹ (Beg, Kuhlmann, Davaine, & Braun, 2010)

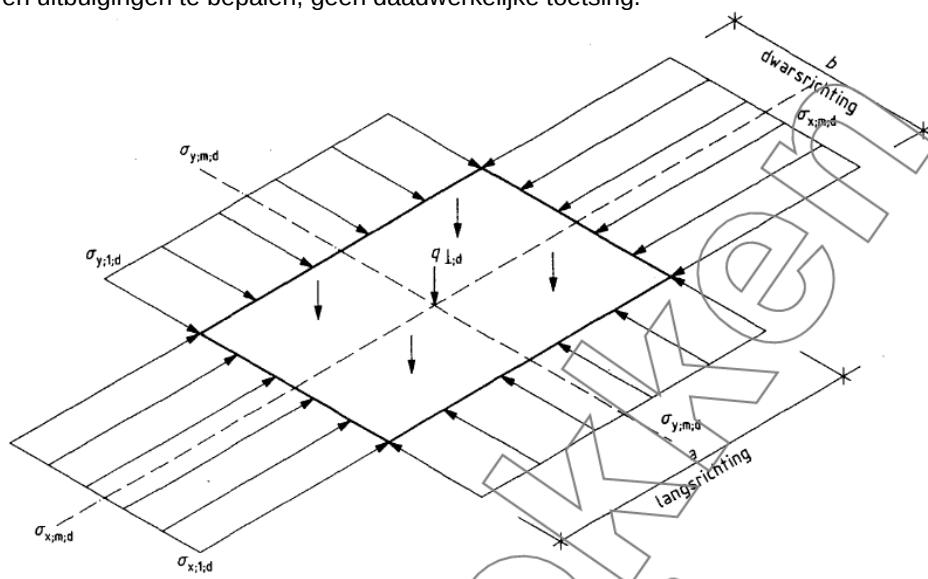
De tweede methode is de “gereduceerde spanning” methode, deze richt zich op de gemiddelde spanning σ_{lim} van de daadwerkelijke spanningsverdeling σ_{act} . Deze gemiddelde spanning in een doorsnede mag dan niet overschreden worden, om plooien te voorkomen. Voor enkele platen die alleen op druk worden belast, zullen dezelfde uitkomsten worden verkregen als bij de methode van de effectieve breedte. Bij andere gevallen, zoals bij samengestelde doorsneden, zal de gereduceerde spanning methode minder efficiënt zijn dan de effectieve breedte methode. Dit komt doordat de plaat met de kleinste weerstand tegen plooien als maatgevend wordt beschouwd in een doorsnede, er vindt dus geen herverdeling van de spanningen plaats.

Het voordeel van de gereduceerde spanningsmethode is dat er twee spanningen uit twee verschillende richtingen in het vlak kunnen worden meegenomen. Dit is bij de effectieve breedte methode niet zo.

In het literatuuronderzoek zijn de formules voor beiden methodes gegeven, tevens is er een stappenplan voor de plooicontrol uitgewerkt.

3.6.2 Plooi met spanning uit het vlak

De geprofileerde wand van de sluisdeur zal belast worden op een spanning in het vlak en een spanning uit het vlak (zie Figuur 21). De huidige Eurocodes geven echter geen complete toetsing voor een plaat die door beide spanning wordt belast. Wel bestaat de NEN-EN 1993-1-7 voor platen die loodrecht op het vlak belast zijn (uit het vlak), deze geeft echter alleen formules om spanningen en uitbuigingen te bepalen, geen daadwerkelijke toetsing.



Figuur 26: Plaatveld in en loodrecht op het vlak belast³²

³² (Nederlands Normalisatie-instituut, 2000)

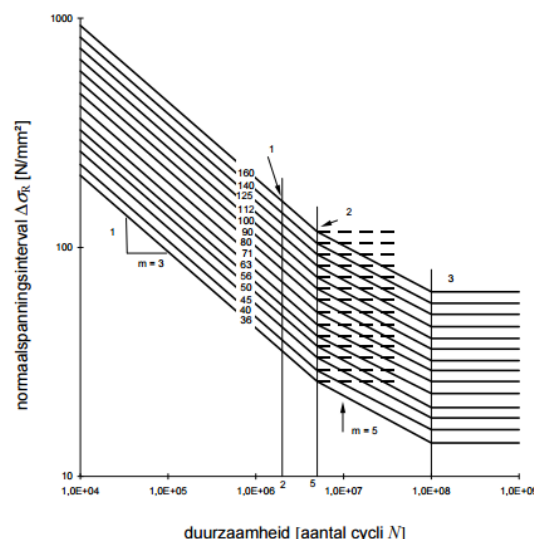
Om de toetsing wel te kunnen maken, zijn de formules uit zowel de NEN-EN 1993-1-5 en 1993-1-7 aangevuld met een aantal formules uit de NEN 6771 voor de toetsing. Echter kunnen niet alle componenten tegelijk worden getoetst, de spanningen in x- en y richtingen (zie Figuur 26) moeten allebei apart met de spanning uit het vlak worden getoetst. Bij de controle van de nieuwe deur moet dus de combinatie van de hoogste waarde worden getoetst. In bijlage 2 is een stappenplan gemaakt voor de plooi-toets met spanning uit het vlak, inclusief de formules.

3.6.3 Vermoeiing

Vermoeiing in staal betekent het ontstaan van scheuren na herhaald belasten. Vaak ontstaat een vermoeiingsscheur aan de teen van een las. Door de oneffenheden t.p.v. van de teen, neemt de spanning in het materiaal toe. Als de belasting dan wisselt, ontstaat er een gebied waar hoge spanningen elkaar afwisselen. Door deze wisselingen kan dan uiteindelijk een scheur ontstaan. Nadat een vermoeiingsscheur ontstaat, groeit deze verder door de wisselende belastingen, totdat de veiligheid van de constructie in gevaar komt (of zelfs bezwijkt). Vermoeiingsscheuren kunnen dus in twee fasen worden ingedeeld:³³

- De initiatiefase;
- De scheurgroefase.

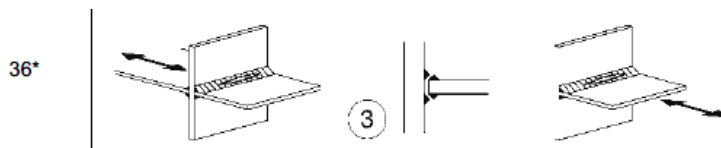
Er zit een verband tussen de grootte van de spanning en het aantal spanningswisselingen. Bij relatief lage spanning, is de levensduur lang en bij relatief hoge spanningen is de levensduur korter, in Figuur 27³⁴ is een grafiek weergegeven die dit verband laat zien. Sluisdeuren zitten meer aan de linkerkant van de



grafiek. Het aantal spanningswisselingen is niet heel hoog, omdat het aantal schuttingen niet hoog is. De belasting is echter wel relatief hoog.

Figuur 27: Vermoeiingssterktekrommen voor normaalspanningsintervallen.³⁴

Om een onderdeel op vermoeiing te toetsen zal eerst een vermoeiingsdetail uit de NEN-EN 1993-1-9 moeten worden gekozen (norm voor de controle op vermoeiing). Een voorbeeld van zo'n detail staat weergegeven in Figuur 28. Vervolgens kan de maximale vermoeiingsgrens worden bepaald.



Figuur 28: Detail 3 uit tabel 8.5 in NEN-EN 1993-1-9

³³ (Dijkstra & Straalen, 1998)

³⁴ (Europese commissie voor normalisatie, NEN-EN 1993-1-9, 2005)



De formule om de vermoeiingsgrens bij een constante amplitude $\Delta\sigma$ te berekenen, is:

$$1. \quad \Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} * \Delta\sigma_c \quad 35$$

De formule om de afkaplimiet te bepalen, is:

$$2. \quad \Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} * \Delta\sigma_D \quad 35$$

Als de optredende spanning onder de afkaplimiet valt, is de toegelaten aantal spanningswisselingen in principe oneindig.

Met formules 1 & 2 en de grafiek in Figuur 27 kan de vermoeiingsschade berekening worden gemaakt voor een enkele belasting. Deze vermoeiingsschade is afhankelijk van de optredende spanningswisseling en het aantal wisselingen, zoals weergegeven in de grafiek. Doormiddel van aflezen kan nu worden bepaald of de vermoeiingssterkte wordt overschreden.

Palmgren-Miner

De vermoeiingstoets die hiervoor is beschreven, is eigenlijk alleen maar toepasbaar voor een schadeberekening met één enkele vermoeiingsbelasting. Wanneer vermoeiingsbelastingen met een bepaald aantal wisselingen bij elkaar moeten worden opgeteld, wordt gebruik gemaakt van de "Palmgren-Miner" regel.

Deze regel deelt het optredend aantal wisselingen (n) door het aantal wisselingen dat leidt tot bezwijken (N), bij een bepaalde spanning.³⁶ De formule om de schade te toetsen wordt dan:

$$3. \quad \sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots \leq 1,0 \quad 36$$

Om het aantal wisselingen dat tot bezwijken leidt, te bepalen, kan gebruik gemaakt worden van onderstaande formules:

$$4. \quad N_{fi} = \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_m * \Delta\sigma_x}\right)^3 * 2 * 10^6 \quad \text{als} \quad \Delta\sigma_x \geq \Delta\sigma_D$$

$$5. \quad N_{fi} = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_m * \Delta\sigma_x}\right)^3 * 5 * 10^6 \quad \text{als} \quad \Delta\sigma_D > \Delta\sigma_x \geq \Delta\sigma_L$$

De $\Delta\sigma_x$ hierin is de optredende vermoeiingsspanning. In principe zijn dit de formules 1 & 2, maar dan zo uitgewerkt dat het maximaal aantal wisselingen kan worden bepaald.

³⁵ (Europese commissie voor normalisatie, NEN-EN 1993-1-9, 2005)

³⁶ (Bak, 2015)

4 Onderzoekopzet

Om de hoofdvraag en de daarbij behorende deelvragen te beantwoorden, is het opzet van het onderzoek in dit hoofdstuk uitgewerkt. De blokken uit Figuur 29 zullen hieronder worden toegelicht.

Bepalen optimale afmetingen geprofileerde wand

Voordat wordt begonnen met het modelleren van de deur in SCIA, worden eerst de afmetingen van de geprofileerde wand bepaald op basis van de reactiekrachten (krachten geleverd door de steunpunten) van de berekeningen van de traditionele deur en het verval over de deur.

De profielhoogte en –dikte van de Julianasluis is als uitgangspunt voor de optimalisatie genomen. Vervolgens is voor drie profielhoogtes bepaald vanaf welke dikte deze niet meer voldoen. Uit de resultaten hiervan is bepaald welke profielhoogte is toegepast op de deur.

De breedte van de profilering is bepaald door de hoogte van de deur en de aansluitingen met de cilinders. De profilering begint en eindigt precies zodat er geen verspringing nodig is en de cilinderaansluitingen goed samenvallen.

Constructie modelleren in SCIA

Vervolgens is de deur met de geprofileerde wand in SCIA Engineer gemodelleerd. SCIA Engineer is een eindige elementen programma, waarmee constructies kunnen worden berekend en geanalyseerd. Het model dat in dit geval is gebruikt is een platen model, daar een puntdeur vooral uit platen is opgebouwd en weinig gebruikt maakt van liggers (staven).

Opstellen modellen in SCIA

In totaal worden er twee modellen met verschillende randvoorwaarden opgesteld in SCIA. Het ene model geeft de situatie weer als de deur is gesloten, het andere model doet hetzelfde voor de geopende deur. De modellen worden gecontroleerd aan de hand van een aantal handberekeningen. Als extra check worden de modellen door een constructeur van Iv-Infra gecontroleerd.

Toetsen op sterkte en vervorming

Deze stap hangt samen met het opstellen van het model. Eerst wordt er namelijk voor gezorgd dat alle onderdelen voldoen op sterkte. Aanpassingen die nodig zijn om de deur te laten voldoen moeten doorgevoerd worden in de SCIA modellen, waarna opnieuw de sterkte van de deur moet worden getoetst.



Figuur 29: Opzet van het onderzoek



Toetsen vermoeiing

De vermoeiing wordt getoetst met de spanning uit beide modellen. Alleen de aansluitingen van de geprofileerde wand met de rest van de constructie is getoetst, overige aansluitingen in de deur zijn buiten beschouwing gelaten.

Toetsen plooi

De geprofileerde wand is getoetst op plooi met zowel spanning in het vlak, als uit het vlak. Dit is gedaan voor de meest maatgevende flens en het meest maatgevende lijf.

Maken kostenvergelijking

Om een kostenvergelijking te maken is de deur met de verstijfde waterkerende wand en de deur met de geprofileerde waterkerende wand geraamd. De eenheidsprijzen die zijn gebruikt bij de ramingen, zijn overlegd met de kosten expert van Iv-Infra. Met de uitkomsten van de ramingen is een kostenvergelijking opgesteld, waarbij zowel de onderdelen van de deur, als de verschillende soorten kosten (staal kilo's, lassen en conserveren) met elkaar vergeleken.

Beschouwen van de resultaten

Met de uitkomsten die in voorgaande stappen zijn verkregen, is bepaald op welke manier de constructie van de deur kan worden aangepast zodat de geprofileerde wand beter tot zijn recht komt.

Conclusies & aanbevelingen

Uitschrijven van de conclusies en aanbevelingen.

4.1 **Uitgangspunten & randvoorwaarden**

Voordat begonnen wordt aan de uitwerking van het onderzoek, worden een aantal aannames gedaan:

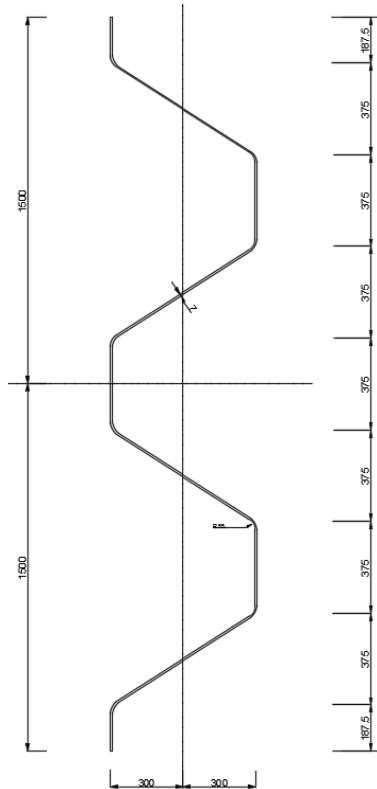
- De draaipunten van de deur worden buiten beschouwing gelaten;
- Constructie en aansluitingen van de nivelleerschuiven worden buiten beschouwing gelaten;
- De plaatsing van houten aanslagen wordt buiten beschouwing gelaten;
- De onderdelen van de puntdeur worden enkel op sterkte gecontroleerd, op de geprofileerde wand na.

5 Uitwerking onderzoek

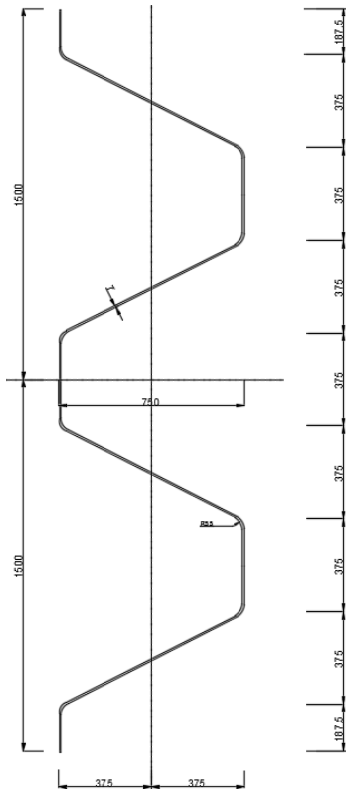
5.1 Optimalisatie geprofileerde plaat

Voordat er wordt begonnen met het modelleren van de constructie in Autocad en SCIA Engineer, moeten eerst de afmetingen van de geprofileerde plaat, die als wand wordt gebruikt, bepaald worden. Als basis is uitgegaan van de profilering op de deuren van de Julianasluis, deze hebben namelijk een hoogte van 600 mm en een dikte van 12 mm. De reactiekracht die wordt aangehouden is de oplegreactie in har 4 van de berekening van de traditionele deur, deze bedraagt 1877 kN^{37} (rekenwaarde). De rekenwaarde van de q-last t.g.v. van de vervalbelasting is in bijlage 5 bepaald op $251,25 \text{ kN/m}$.

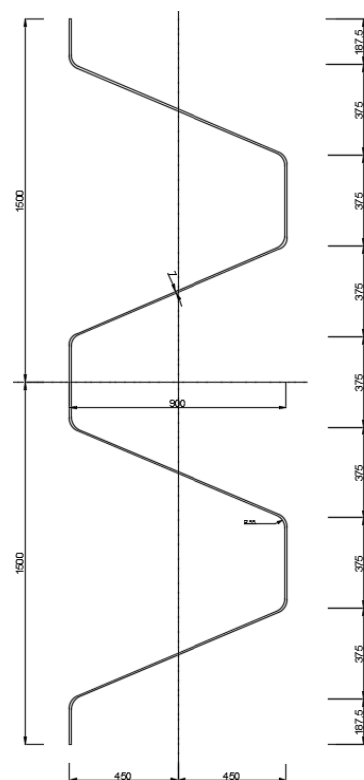
Naast een hoogte van 600 mm, zijn ook hoogtes van 750 en 900 mm beschouwd (zie Figuur 30, Figuur 31 en Figuur 32) waarbij de profilering dunner kan worden t.o.v. de sterkte en de doorbuiging. Uit de berekeningen (zie bijlage 5) blijkt echter dat niet de sterkte, maar de plooiweerstand van de wand maatgevend is. Hierdoor is het juist voordeliger om een lagere profilering te kiezen die wat dunner wordt gemaakt, omdat deze wand minder slank is dan een hogere wand met dezelfde dikte (zie Tabel 5).



Figuur 30: Profiel 1



Figuur 31: Profiel 2



Figuur 32: Profiel 3

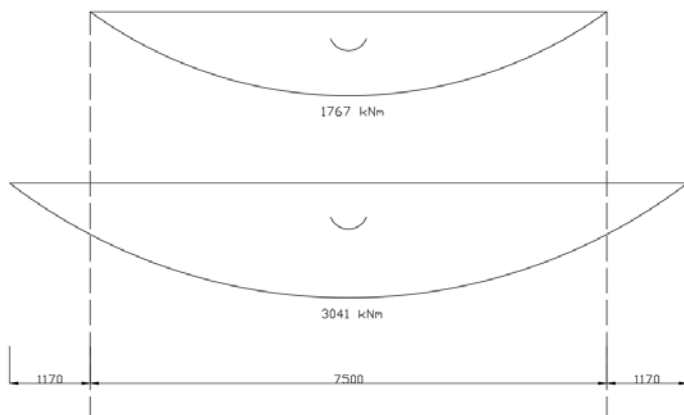
³⁷ (Almen, Sterkte en vervorming, 2008)

Profiel	Profiel dikte [MM]	Profiel hoogte [MM]	Profiel gewicht [KG/M]	U.C. Sterkte	U.C. doorbuiging	U.C. lokale plooi	U.C. globale plooi	U.C. knik
1	7	600	79	0,53	0,39	0,85	0,85	n.v.t.
2	7	750	88	0,42	0,23	0,87	0,85	n.v.t.
3	7	900	98	0,37	0,17	0,94	0,59	n.v.t.
4	8	600	90	0,47	0,34	0,65	0,68	n.v.t.
5	8	750	101	0,35	0,2	0,66	0,64	n.v.t.
6	8	900	112	0,29	0,13	0,7	0,46	n.v.t.
7	9	600	101	0,41	0,31	0,51	0,57	n.v.t.
8	9	750	113	0,32	0,18	0,51	0,5	n.v.t.
9	10	600	112	0,37	0,28	0,43	0,45	n.v.t.
10	10	750	126	0,29	0,16	0,42	0,41	n.v.t.
11	12	600	133	0,31	0,23	n.v.t.	n.v.t.	0,13

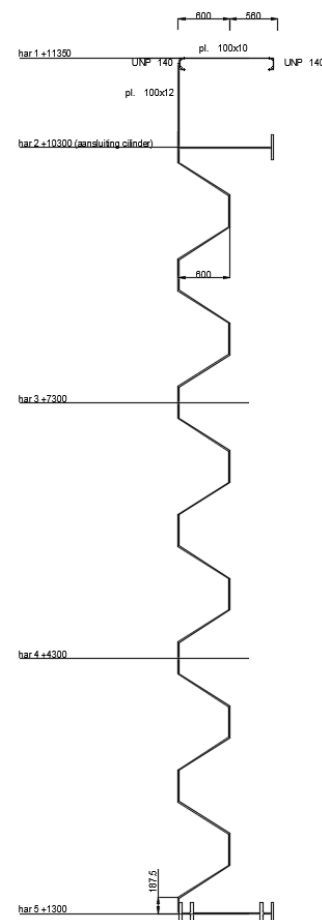
Tabel 5: Resultaten optimalisatie geprofileerde wand

In het document is echter een fout gemaakt met de overspanning. In de optimalisatie wordt uitgegaan van een overspanning voor de geprofileerde wand van 7,5 meter. Dit is de afstand tussen de achterhar en de voorhar, waar de geprofileerde wand is bevestigd. Echter de overspanning had de gehele deurlengte moeten zijn, dus 9,84 meter.

Dit komt doordat de deur als één geheel werkt, alle onderdelen zitten met een las aan elkaar verbonden, er zitten geen scharnierende verbindingen in. De opleggingen van de deur in de horizontale doorsnede, bevindt zich bij de deurstoelen en de tussenaanslag. De momentenlijn die is aangehouden voor de geprofileerde wand is uitgezet tegenover die eigenlijk aangehouden had moeten worden in Figuur 34.



Figuur 34: Aangehouden schema (boven), goede schema (onder)

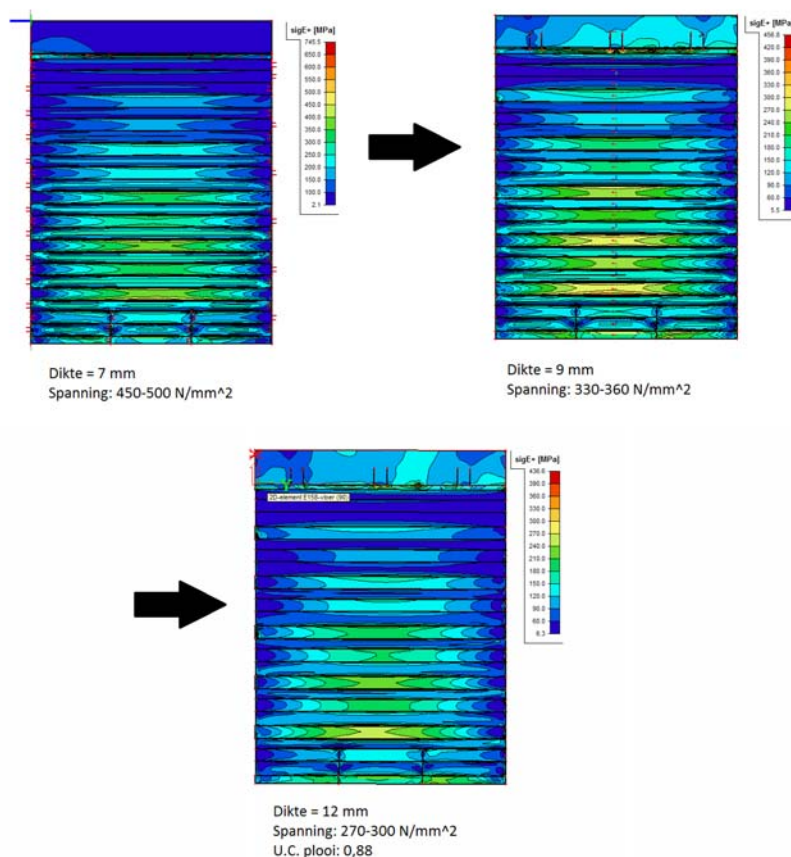


Figuur 33: Doorsnede van de geprofileerde wand op de puntdeur

Doordat de overspanning groter is geworden, is ook het moment groter geworden. Door dit vergrote moment, wordt de vloeispanning overschreden wanneer er een dikte wordt aangehouden van 7 mm. Om de geprofileerde wand niet te laten bezwijken door vloeien, moet deze een dikte krijgen van 9 mm (zie Figuur 35).

Bij de optimalisatie van de wand is uitgegaan van de eenvoudige plooi controle met belasting in het vlak. De wat ingewikkelder controle met belasting uit het vlak is buiten beschouwing gelaten, omdat deze meestal redelijk dichtbij elkaar in de buurt zitten. Echter bleek bij de plooi toets in paragraaf 5.3 dat de plooi toets met spanning uit het vlak in deze situatie wel maatgevend. Hierdoor moest de dikte van de wand nog verder omhoog naar 12 mm. In Figuur 35 is de uiteindelijke dikte van 12 mm weergegeven, inclusief het resultaat van de plooi controle

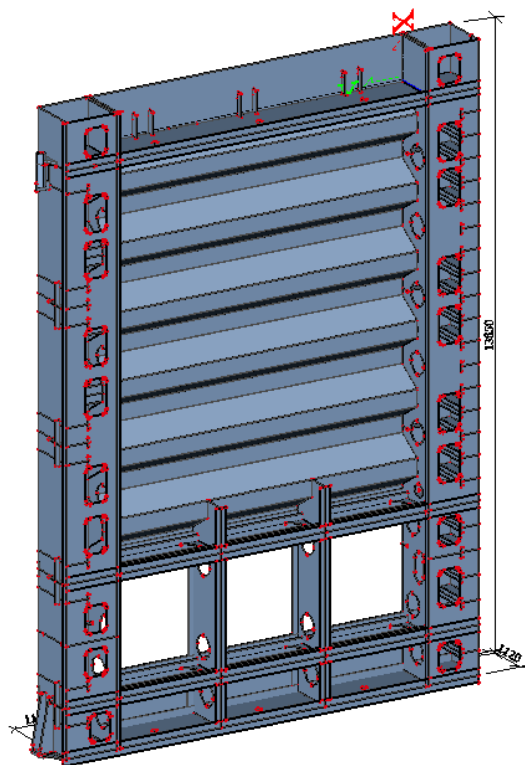
De breedte van de profilering wordt op 375 mm gehouden, omdat dit het beste uitkomt op de overige onderdelen van de deur, zoals de aandrijving en de horizontale harren. (zie Figuur 33). Verder komt de boven- en onderkant van de deur precies uit, zonder ergens de profilering te laten verspringen.



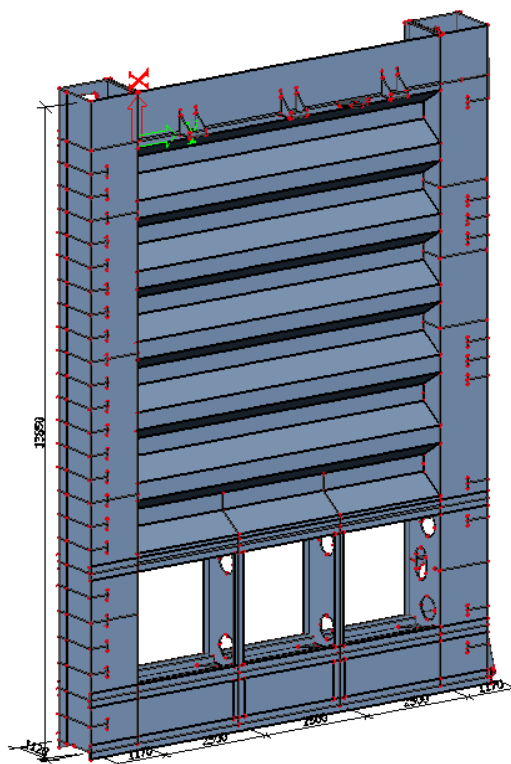
Figuur 35: Ontwikkeling van de spanning in de geprofileerde wand bij de maximaal positieve vervalbelasting

5.2 Wijzigingen in de constructie

In deze paragraaf zullen de wijzigingen in de constructie van de deur worden besproken die nodig waren om de deur te laten voldoen op sterkte (zie bijlage 7 voor een volledige uitwerking). Hierbij wordt de geprofileerde wand buiten beschouwing gelaten, omdat deze in de vorige paragraaf al behandeld is. In bijlage 9 zijn de tekeningen van de oude deur gegeven, terwijl in bijlage 10 hetzelfde is gedaan voor de nieuwe deur. Een voor- en achteraanzicht van de deur is gegeven in Figuur 37 en Figuur 36.



Figuur 36: Achteraanzicht deur met geprofileerde plaat



Figuur 37: Vooraanzicht deur met geprofileerde plaat

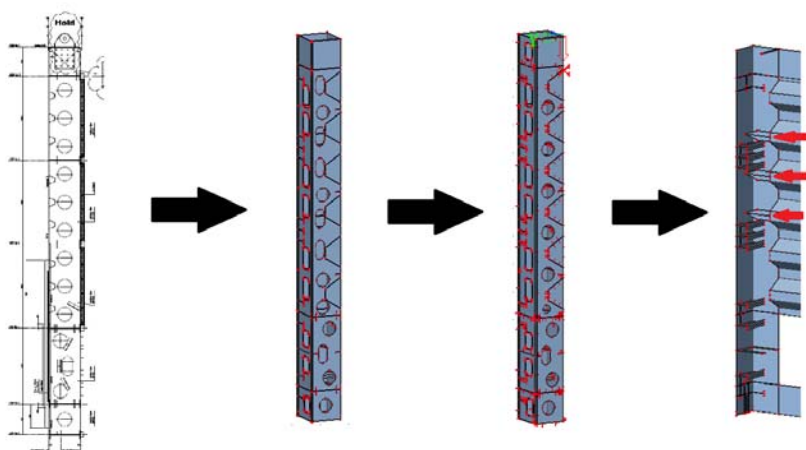
5.2.1 Achterhar

In de achterhar zitten een aantal cirkelvormige en vierkante sparingen, zoals te zien is in Figuur 36. Deze sparingen dienen ervoor om de deurstoelen aan de achterhar te kunnen bevestigen. Deze stoelen zitten namelijk met een boutverbinding vast en moet dus van binnenuit worden aangedraaid.

In eerste instantie is geprobeerd om de sparingen zoveel mogelijk hetzelfde te houden als in de oude deur. Sommige cirkelvormige sparingen zijn hiervoor als een ovaal gemodelleerd, omdat deze anders niet meer op de har paste, samen met de geprofileerde wand.

De spanningen rond de sparingen werd echter veel te hoog, waardoor er voor is gekozen om de sparingen in de "holle ruimte" van de geprofileerde wand te plaatsen. Dit was mogelijk, omdat horizontale harren zijn verwijderd, waardoor de bereikbaarheid van de deurstoelen in de achterhar is verbeterd. Verder is de onderste sparing verkleind van 500 mm in diameter naar 300 mm en is de plaat dikker gemaakt van 10 naar 14 mm.

Ook zijn er verstijvers in het verlengde van de geprofileerde wand geplaatst, zodat de spanningen beter worden ingeleid. Alle aanpassingen aan de achterhar zijn weergegeven in Figuur 38, waarbij met rode pijlen de extra verstijvers zijn aangegeven.



Figuur 38: Ontwikkeling van de achterhar

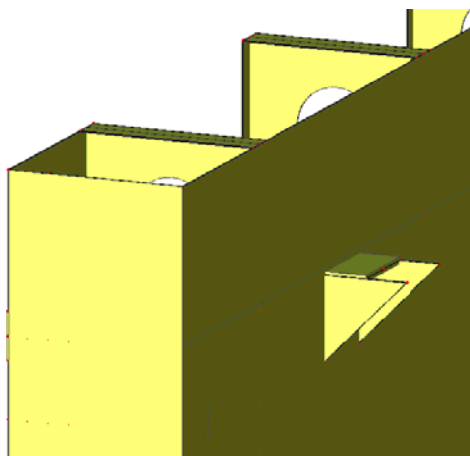
5.2.2 Voorhar

De voorhar is ook wat aangepast om te kunnen voldoen op sterkte. De verandering die is doorgevoerd is de plaatsing van de sparingen op de voorhar, zoals deze ook op de achterhar zijn geplaatst.

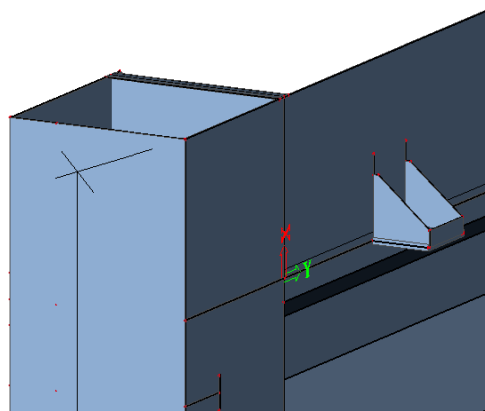
De verklaring dat de voorhar minder aanpassingen nodig heeft dan de achterhar, is de oplegging van deze voorhar. De oplegging is de tussenaanslag die over de gehele hoogte is verdeeld, waardoor de lastinleiding in de har en de geprofileerde wand beter verdeeld wordt. Bij de achterhar worden de spanningen geconcentreerd t.p.v. de deurstoelen, waardoor meer aanpassingen nodig zijn om deze spanningen goed in de deurstoelen te leiden.

5.2.3 Cilinder aansluitingen

De cilinder aansluitingen zijn ook wat verandert t.o.v. het oude model. De platen zijn 180 graden gedraaid, eerst gingen de ondersteunende platen naar de onderzijde (zie Figuur 40). Hier was echter te weinig plaats door de geprofileerde wand. Om dit op te lossen zijn ze omgedraaid, zoals te zien is in Figuur 39.



Figuur 40: Oorspronkelijke stoel voor de aandrijving van de nivelleerschuiif.³⁸



Figuur 39: Gedraaide stoel voor de aandrijving van de nivelleerschuiif

5.3 Toetsingen

De toetsingen van sterkte, stijfheid, stabiliteit en vermoeiing zijn allemaal uitgevoerd voor de geprofileerde wand. In onderstaande paragrafen zal worden beschreven waar de grootste UC waarde optreedt per controle. In bijlage 6 worden de volledige toetsingen en rapporten uit SCIA uitgewerkt.

5.3.1 Sterkte

De sterkte van de deur is per onderdeel bepaald, in Tabel 6 is een overzicht gegeven van de verschillende onderdelen. Bij het controleren van de sterkte zijn de piekspanningen die in het SCIA model ontstonden, genegeerd. Deze spanningen ontstonden vooral bij rechte aansluitingen van platen en ontstaan in principe altijd in een SCIA model met zulke aansluitingen. Een oplossing zou zijn om een afrondingsstraal toe te voegen, zodat de spanning zich beter verdeelt i.p.v. op één punt te concentreren. Verder zouden kleine pieken genegeerd kunnen worden, lokaal zal de plaat dan waarschijnlijk wat plastisch gaan vervormen. De spanning zal zich echter herverdelen over een wat groter gebied, zodat deze plastische vervorming niet te extreem zal worden.

Onderdeel	Maximale spanning [N/mm ²]	UC
Achterhar	345	0,97
Schotten achterhar	289	0,81
Voorhar	345	0,97
Schotten voorhar	306	0,86
Geprofileerde wand	221	0,62
Kolommen	269	0,76
Horizontale harren	345	0,97

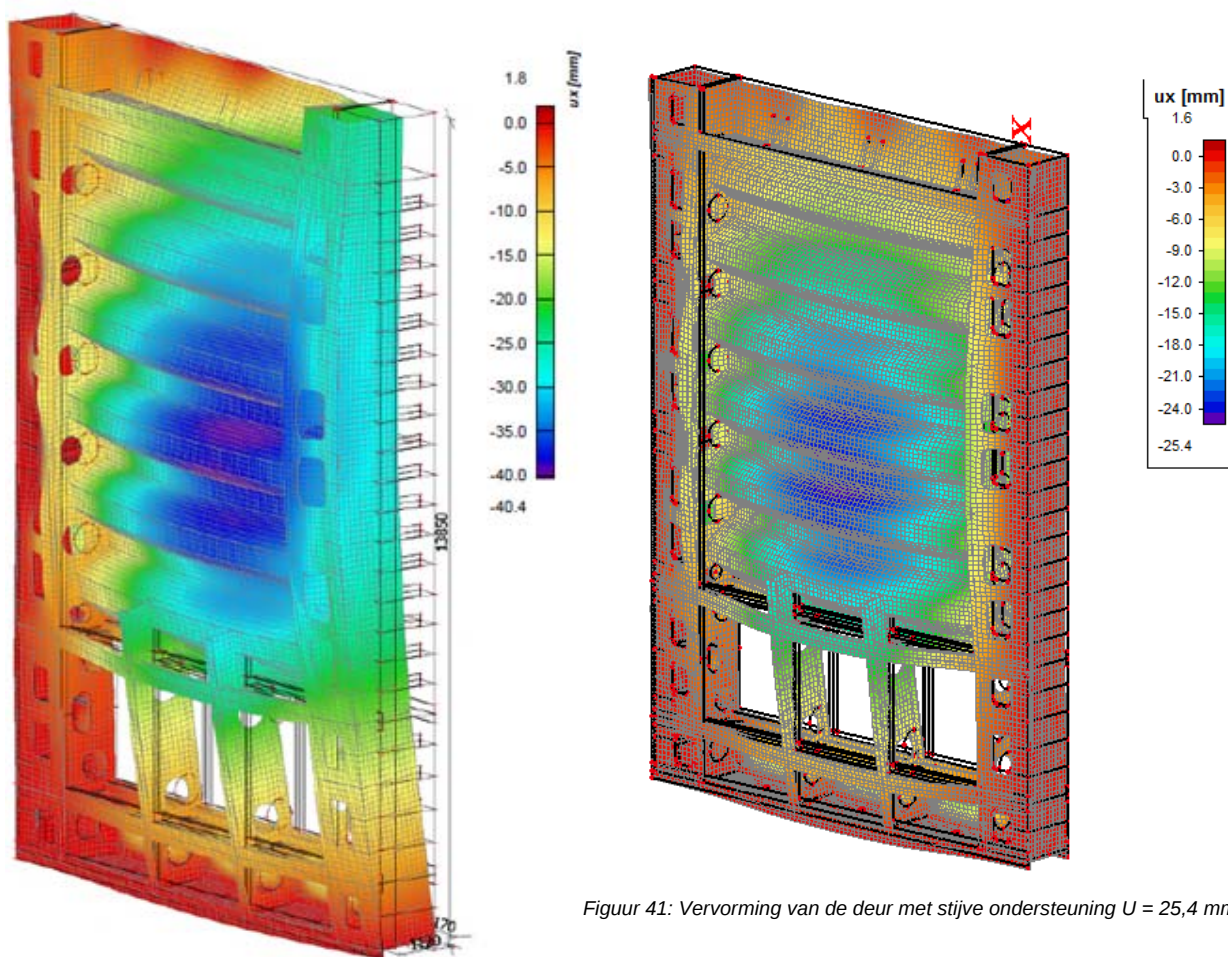
Tabel 6: Overzicht van de sterkte in de deur

³⁸ (Archief Iv-Infra)

5.3.2 Vervorming

De grootste vervorming ontstaat t.p.v. de geprofileerde wand en dan meer aan de zijde van de tussenaanslag. In Figuur 42 is de maximale vervorming van de deur gegeven, deze maximale vervorming is 39,5 mm.

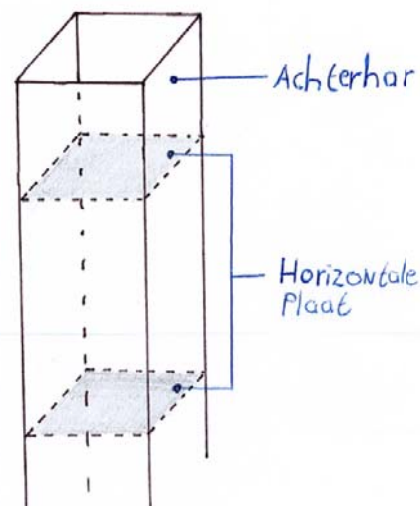
Uit de berekeningen van de traditionele deur blijkt dat de deur op alle randen stijf ondersteund is. Dit is echter niet geheel de werkelijkheid, omdat de deur t.p.v. de tussenaanslag helemaal niet stijf ondersteund is in de x-richting (loodrecht op de overspanning). Wat betekent dat in de x-richting de deur 'gewoon' kan vervormen bij de tussenaanslag. Om een vergelijking te maken tussen de oude deur en de nieuwe deur, is in het nieuwe model deze ondersteuning ook tijdelijk stijf gemaakt. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 41



Figuur 41: Vervorming van de deur met stijve ondersteuning $U = 25,4$ mm

Figuur 42: Vervorming van de deur zonder stijve ondersteuning
 $U = 39,5$ mm

De constructie vervormt in het midden een stuk meer dan de oude constructie, meer dan twee keer zoveel (oude vervorming was 12,1 mm). Dit komt enerzijds doordat de stijfheid van de geprofileerde wand minder is dan die van de oude constructie. Anderzijds komt het door de rotatie van de achterhar, deze vervormt veel sterker dan in de oude constructie. Dit is te verklaren doordat de geprofileerde wand de achterhar veel intensiever gebruikt dan de oude constructie. Een oplossing zou kunnen zijn om horizontaal platen in de achterhar te lassen (zie Figuur 43) zodat deze minder gaat roteren. De doorbuiging in het midden is $\frac{U_{nieuw}}{U_{oud}} * 100 = \frac{25,4}{12,1} * 100 = 210 \%$ van wat de oude doorbuiging in het midden was.



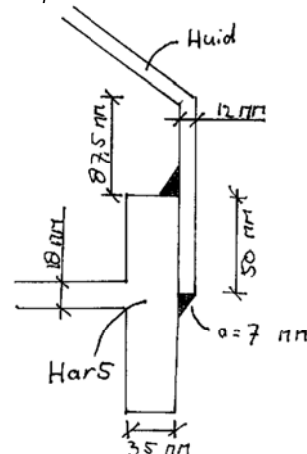
Figuur 43: Torsiestijver maken achter m.b.v. horizontale platen

De doorbuiging aan de randen van de constructie is echter minder groot geworden. Dit is kritischer dan in het midden, omdat hier lekopeningen kunnen ontstaan. De doorbuiging aan de randen is $\frac{U_{nieuw}}{U_{oud}} * 100 = \frac{1,6}{1,9} * 100 = 84 \%$ van wat het oorspronkelijk was.

5.3.3 Plooi

Uit de plooicontroles blijkt dat plooi met belasting uit het vlak de meest maatgevende controle is voor zowel de flens als het lijf. Globale plooi is niet gecontroleerd, omdat de druk vooral ontstond op basis van buiging, waardoor de andere flens op trek werd belast. De grootste UC-waardes die ontstaan:

- Flens: UC: 0,88;
- Lijf: UC: 0,75.



Figuur 44: Aansluiting geprofileerde wand met har 5

5.3.4 Vermoeiing

De meest maatgevende aansluiting die op vermoeiing wordt gecontroleerd is die tussen de geprofileerde wand en har 5. Een schets van deze aansluiting is weergegeven in Figuur 44. De vermoeiing in de bovenste las is het meest maatgevend en heeft een UC-waarde van 0,94.

5.4 Kostenvergelijking

De richtprijzen die zijn gebruikt voor de raming van beide deuren volgen uit een gesprek met Ed van der Blom, kosten expert van Iv-Infra. De ramingen die zijn opgesteld, zijn terug te vinden in bijlage 8. In deze paragraaf wordt alleen de kosten vergelijking gemaakt.



5.4.1 Grove schatting totaalprijs

Voor een eerste schatting van de twee deuren wordt een vuistregel gebruikt op basis van het staalgewicht van de twee deuren. Deze vuistregel gaat er vanuit dat 1000 kilo sluisdeur (= 1 ton), ongeveer 4500 euro kost. Deze prijs is inclusief:

- Materiaalprijs;
- Handling van de materialen;
- Samenstellen deur;
- Conservering deur;
- Staart aanneming.

Deze regel wordt gebruikt om de ramingen te controleren, bij een te grote afwijking zal er waarschijnlijk een fout zijn gemaakt in de raming. De verwachting is dat de vuistregel dichter bij de raming van de oude deur in de buurt komt, omdat dit type deur “normaal gesproken” wordt geraamd. De nieuwe deur gebruikt een andere constructie, waardoor er mogelijk een afwijking tussen de vuistregel en de raming zit.

De oude en de nieuwe deur wegen 41,3³⁹ en 37,9⁴⁰ ton, uit de vuistregel volgt:

Oude deur: 41,3*4500 = € 185.000,-

Nieuwe deur: 37,9*4500 = € 170.000,-

5.4.2 Controle resultaat

In de vorige paragraaf is met een vuistregel een kostprijs voor beide deuren geschat. De prijs voor de oude deur werd geschat op € 185.000,-. Uit de raming in bijlage 8 volgt een kostprijs van € 178.000,-. Dit bedrag ligt redelijk dichtbij de schatting, waardoor het aannemelijk is dat deze prijs ongeveer klopt.

De nieuwe deur werd geschat op € 170.000,-, terwijl de raming uit bijlage 8 uitkomt op een bedrag van € 146.000,-. Dit verschil is toch wel wat groter als bij de oude deur, dit was echter wel te verwachten doordat de constructie anders (goedkoper) is dan waar de vuistregel normaal gesproken voor wordt gebruikt.

5.4.3 Totaal & procentueel kostenverschil

Het totale verschil tussen de twee ramingen is: $178.000 - 146.000 = € 32.000,-$ in het voordeel van de nieuwe deur met de geprofileerde wand. Procentueel gezien, ten opzichte van de constructie van de oude deur is dit: $\frac{32000}{178000} * 100 = 18 \%$ goedkoper.

5.4.4 Kosten verschillende onderdelen

In Tabel 7 zijn de kosten per onderdeel voor de nieuwe en de oude deur weergegeven, evenals de verschillen tussen beide.

³⁹ Het gewicht van de oude deur volgt uit de oude sterkteberekening (Almen, Sterkte en vervorming, 2008)

⁴⁰ Het gewicht van de nieuwe deur volgt uit de SCIA berekening in het constructierapport (bijlage 6)

De grootste winst wordt behaald in het kruisverband, wat logisch is omdat er in de nieuwe constructie helemaal geen kruisverband zit. De grootste winst hierna zit in de horizontale harren, omdat har 3 en 4 volledig zijn verwijderd ten opzichte van de oude constructie. De overige verschillen zijn wat minder groot.

In zowel de voor- als de achterhar wordt verlies gemaakt, wat ook logisch verklaarbaar is gezien de verzwaarde constructie hier. Het valt wel op dat de verliezen eigenlijk maar heel marginaal zijn ten opzichte van de winst in de andere onderdelen.

Onderdeel	Oude deur	Nieuwe deur	Vershil
Horizontale harren	€ 44.321	€ 34.759	€ 9.563
Kolommen	€ 27.734	€ 23.062	€ 4.672
Wand	€ 42.561	€ 41.470	€ 1.092
Voorhar	€ 13.434	€ 14.236	€ -802
Achterhar	€ 10.632	€ 11.235	€ -603
Kruisverband	€ 13.347	€ 0	€ 13.347

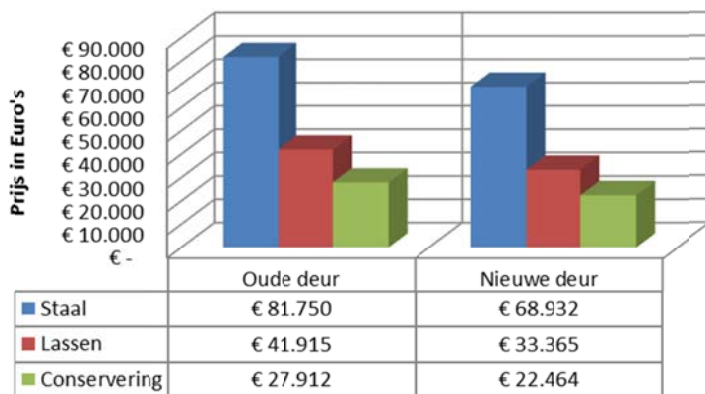
Tabel 7: Verschil in kosten tussen de onderdelen (groen = winst en rood = verlies met de nieuwe constructie)

5.4.5 Prijsopbouw deuren

De ramingen zijn grofweg opgebouwd uit: staalprijs, lassen en de conservering. In Figuur 45 zijn deze kosten van beide deuren tegenover elkaar gezet. De verwachting was eigenlijk dat de oude deur duurder zou zijn op staalkilo's en conservering en de nieuwe deur wat duurder op de lassen, omdat de geprofileerde wand met een volledige doorlassing aan de voor- en achterhar is bevestigd.

Uit de ramingen blijkt echter dat de deur met de geprofileerde wand op alle fronten goedkoper is dan de oude deur. Dit komt doordat er behoorlijk wat lassen zijn weggenomen bij har 3 & 4 en kolom 2 & 3.

Prijsopbouw deuren



Figuur 45: Prijsopbouw van de oude en de nieuwe deur

5.5 Verbeteringen in ontwerp

Wanneer in de toekomst besloten wordt om een sluisdeur met een geprofileerde wand toe te passen, zijn er een aantal punten waarmee rekening moet worden gehouden bij het ontwerpen van zo'n deur. Doordat er een bestaand ontwerp is aangepast, is de constructie op een aantal plaatsen niet optimaal in combinatie met de geprofileerde wand.

De eerste verbetering zou zijn om geen deurstoelen meer toe te passen als ondersteuning in de sluiswand. Door de deurstoelen wordt de belasting geconcentreerd in de wand, waardoor die door lokale spanning maatgevend wordt belast. Dit betekent dat de wand vervolgens op andere punten is overgedimensioneerd, omdat hier geen gebruik gemaakt wordt van de sterkte van de wand. Het beste zou zijn als er een aanslag in de wand wordt gebruikt die over de volle hoogte doorloopt. De spanning wordt hierdoor veel beter verdeeld in de geprofileerde wand, zodat deze over het algemeen wat beter wordt benut. Het nadeel hiervan is dat er een grote nauwkeurigheid wordt vereist ter plaatse van de in te storten onderdelen in de kolkwand, wat weer kostenverhogend werkt.

De tweede verbetering, die hetzelfde wil bereiken als de eerste verbetering, is voorkomen dat er relatief stijve onderdelen (t.o.v. de geprofileerde wand) worden gebruikt die horizontaal dragen. Wanneer dit niet wordt gedaan, leiden de relatief stijve delen namelijk meer krachten in dan de geprofileerde wand. Hierdoor is de spanningsverdeling niet meer gelijk verdeeld, maar ontstaan er weer een aantal pieken t.p.v. de stijve onderdelen.

De derde verbetering zou zijn om de aandrijving van zowel de deur als de cilinders gelijk te laten vallen met de bovenregel. Hierdoor ontstaat namelijk een keuzevrijheid in de flensbreedte van de geprofileerde wand, zodat hiermee ook ontworpen kan worden op basis van de plooiestabiliteit.

Het vierde en laatste punt is niet zozeer een verbetering, maar meer een aandachtspunt met betrekking tot de schuifgeleiding. Deze schuifgeleiding valt buiten het kader van het onderzoek, maar wordt wel benoemd. Op de traditionele deur bestaat de onderste geleiding uit een stalen h-profiel, waarbij de schuif tussen de flenzen van dit profiel loopt. Dit is echter wat lastiger op de geprofileerde wand, omdat dit h-profiel niet over de volle hoogte ondersteund kan worden (zie Figuur 47). Een optie zou zijn om dezelfde oplossing te kiezen als op de puntdeuren van de Julianasluis. Hierbij zijn namelijk een aantal vlakke elementen toegevoegd t.b.v. de schuifgeleiding (zie Figuur 46).

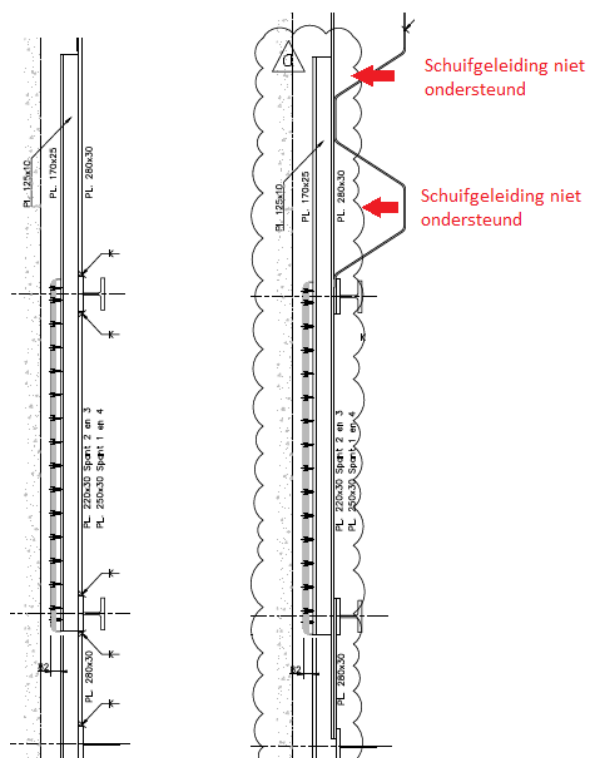


Figuur 46: Vlak element op de puntdeuren van de Julianasluis

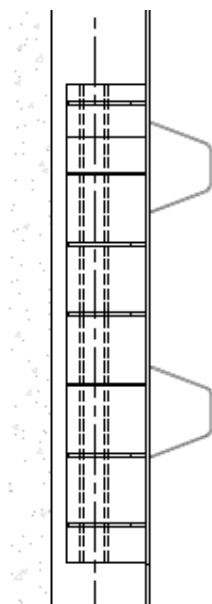
Naast de onderste schuifgeleiding, bestaat er een bovenste schuifgeleiding, die de aandrijving van de schuiven geleid. Deze ondervind ongeveer hetzelfde probleem, omdat die niet over de volle hoogte kan worden ondersteund.

De schuifgeleiding van de traditionele puntdeuren staat weergegeven in Figuur 48. Deze bestaat uit een verticale plaat met verstijvingsschotten. Deze plaat is eigenlijk niet terug te plaatsen op de geprofileerde wand, omdat deze dan de golvende vorm van deze wand moet volgen.

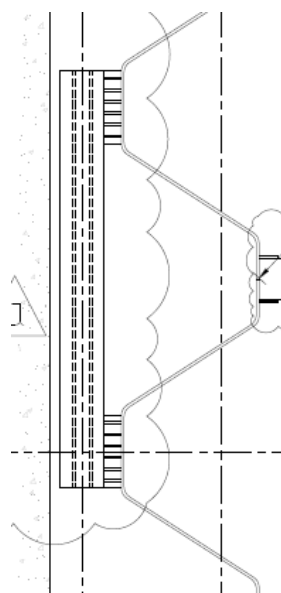
Om deze reden is er een principedetail met een holle buis weergegeven in Figuur 49. Door deze holle buis loopt de hydraulische cilinder van de schuiven en dient dus als geleiding. Deze buis kan eenvoudig op de geprofileerde wand worden bevestigd. Dit idee is ook al toegepast op de puntdeuren van de Julianasluis.



Figuur 47: Schuifgeleiding op de traditionele deur (links) en op de deur met de geprofileerde wand (rechts)



Figuur 48: Schuifgeleiding op de traditionele deur



Figuur 49: Principe detail schuifgeleiding op de deur met de geprofileerde wand



6 Conclusies & aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt allereerst een antwoord gegeven op de deelvragen, alvorens antwoord gegeven kan worden op de hoofdvraag. Na de beantwoording van de hoofdvraag, worden nog een aantal aanbevelingen gedaan voor het ontwerp van een geprofileerde wand op een puntdeur.

Deelvraag 1: Wat zijn de optimale afmetingen voor de geprofileerde wand?

De optimale afmeting wordt op twee manieren beschouwd. Enerzijds is de wand geoptimaliseerd op de hoogte van de deur. In de hoogte blijkt de optimale breedte van de flensen en lijven 375 mm. De wand sluit dan precies aan op har 2 en 5 en de profilering hoeft niet te verspringen.

Anderzijds is de optimale verhouding tussen de hoogte van de profilering en de dikte beschouwd. Een profielhoogte van hoger dan 600 mm blijkt eigenlijk nooit optimaal, omdat plooi dan zeer maatgevend is. Bij een profielhoogte van 600 mm blijkt een dikte van 12 mm benodigd.

Deelvraag 2: Voldoen de verbindingen in de sluisdeur op vermoeiing bij het toepassen van de geprofileerde wand?

In totaal zijn er 7 verbindingen op vermoeiing getoetst, waarbij bleek dat de verbinding tussen de geprofileerde wand en har 5 de meest maatgevende is. De unity check bedraagt 0,94 en komt voort uit de combinatie tussen normaal en extreem verval over de puntdeur.

De verbinding van de geprofileerde wand en de voor- en achterhar moet op basis van vermoeiing, verbonden worden met een volledige doorlassing. Dit komt doordat op een aantal flenzen de vermoeiingsspanning piekt, waardoor de verbinding niet met een hoeklas kan worden gemaakt.

Deelvraag 3: Wat is het verschil in kosten voor een geprofileerde of een vlakke wand voor een traditionele puntdeur?

Als er puur wordt gekeken naar de kosten voor het produceren van een geprofileerde wand en een vlakke wand, dan blijkt dat het kostenverschil vrijwel nihil is. De winst zit hem echter in de onderdelen als harren en kolommen, welke kunnen worden weggelaten. Verder is de geprofileerde wand eenvoudiger te conserveren dan de verstijfde wand, waardoor nog wat winst in kosten kan worden behaald die niet is meegenomen in dit onderzoek.

Deelvraag 4: Kan de puntdeur met geprofileerde wand verder geoptimaliseerd worden op basis van de resultaten?

De deur kan nog verder worden geoptimaliseerd. Om dit te bereiken moet hiermee wel rekening worden gehouden vanaf de beginfase van het ontwerp. Uit de resultaten blijkt dat de geprofileerde wand op een aantal punten zwaar wordt belast, wat te wijden is aan de deurstoelen die op de achterhar zitten. De krachten moeten in de deurstoelen worden geleid, waardoor spanningsconcentraties in de wand ontstaan. Een betere oplossing zou zijn om geen deurstoelen meer te gebruiken, maar een aanslag die over de volle hoogte van de deur loopt. De belasting



wordt hierdoor beter in de wand verdeeld. Het nadeel hiervan is dat er een grote nauwkeurigheid wordt vereist ter plaatse van de in te storten onderdelen in de kolkwand, wat kostenverhogend werkt.

Verder zou het een verbetering zijn als er geen hele stijve onderdelen zoals horizontale harren in de constructie worden toegepast. Doordat deze onderdelen zo stijf zijn, wordt er veel belasting door opgenomen. De spanning in deze onderdelen wordt dan relatief hoog, terwijl een deel van de geprofileerde wand onbelast blijft.

Hoofdvraag: "Kan een kostenreductie worden gerealiseerd door het toepassen van een geprofileerde wand op de puntdeuren van de Prins Bernhardsluizen?"

Door het toepassen van een geprofileerde wand zou een kostenreductie zeer zeker mogelijk zijn. Buiten het feit dat de geprofileerde wand eenvoudiger te conserveren is, kunnen ook een aantal constructieonderdelen worden weggelaten. Hierdoor ontstaat een reductie op basis van lassen en kilo's staal. Het verschil op de puntdeuren van de Prins Bernhardsluizen wordt geschat op ongeveer € 32.000. Iv-Infra zal deze optie dan ook bij een volgende tender voor puntdeuren meenemen.

Aanbevelingen

Hieronder worden een aantal aanbevelingen gedaan die volgen uit het onderzoek:

- De optie onderzoeken om een aanslag over de volledige hoogte van de deur aan te brengen t.p.v. van de achterhar, zodat de lasten beter worden verdeeld in de geprofileerde wand;
- Voorkomen dat hele stijve onderdelen in de constructie worden toegepast, omdat deze relatief veel belasting opnemen, terwijl de geprofileerde wand hierdoor wat onbelast blijft;
- Als bovenste horizontale har een koker toepassen, zodat deze kan worden gebruikt voor de aandrijving van de schuiven, aandrijving van de deur en het loopbordes;
- Vanaf het begin van het ontwerp rekening houden met de schuiven en de geleiding hiervan, daar deze wat lastiger aan zijn te sluiten bij een geprofileerde wand.

7 Bibliografie

Almen, M. v. (2008). *Sterkte en vervorming*. Staal. Papendrecht: Iv-Infra.

Almen, M. v. (2008). *Vermoeiing*. Staal. Papendrecht: Iv-Infra.

Bak, M. (2015, februari 13). */blog/how-calculate-fatigue-life-when-load-history-complex*.
Opgeroepen op juni 9, 2017, van www.caeai.com: <https://caeai.com/blog/how-calculate-fatigue-life-when-load-history-complex>

Baxter, D., Hechler, O., Martins, J., Weber, E., Werner, P.-N., White, G., . . . Zück, F. (2016). *Piling handbook*. Luxemburg, Luxemburg, Luxemburg: ArcelorMittal. Opgeroepen op februari 16, 2017

Beem, R., Boogaard, A., Glerum, A., Graaf, M. d., Henneberque, S., Hiddinga, P., . . . Weijers, J. (2000). *Ontwerp van schutsluizen 1*. Utrecht, Utrecht, Nederland: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Beem, R., Boogaard, A., Glerum, A., Graaf, M. d., Henneberque, S., Hiddinga, P., . . . Weijers, J. (2000). *Ontwerp van schutsluizen 2*. Utrecht, Utrecht, Nederland: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Beg, D., Kuhlmann, U., Davaine, L., & Braun, B. (2010). *Design of Plated Structures* (1e ed.). European Convention for Constructional Steelwork.

coating.nl. (2017). */staal-coating/*. Opgehaald van www.coating.nl: <http://coating.nl/staal-coating/>

Dijkstra, O., & Straalen, I. v. (1998, juli/augustus). Alert blijven op vermoeiing. *Bouwen met Staal*, 143, pp. 40-45.

Europese commissie voor normalisatie. (2005). *NEN-EN 1993-1-9*. (Nederlands Normalisatie-instituut, Red.) Brussel, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België: Europese commissie voor normalisatie.

Europese commissie voor normalisatie. (2016). *NEN-EN 1993-1-1*. (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut, Vert.) Brussel, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België: Europese commissie voor normalisatie.

Fagerberg, L. (2003). *Wrinkling in sandwich panels for marine applications*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.

INCAS. (2015). *Buckling of Flat Thin Plates under Combined Loading*. Roemenie: National Institute for Aerospace Research "Elie Carafoli".

Ketelaars, T. (2001). */Lucht/Stralen.htm*. Opgehaald van rustbuster.nl:
<https://www.rustbuster.nl/Lucht/Stralen.htm>

Klein, P. (2017, februari). */binnenvaarttaal/aanvullende_teksten/teksten.php?tekst=sluizen-schutten*. Opgehaald van debinnenvaart.nl:
http://www.debinnenvaart.nl/binnenvaarttaal/aanvullende_teksten/teksten.php?tekst=sluizen-schutten

Nederlands Normalisatie-instituut. (2000). *NEN 6771*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.

skylinesteel. (2017, februari). */nz*. Opgehaald van skylinesteel.com: <http://www.skylinesteel.com/nz>

Snijder, H., & Steenbergen, H. (2011). *Krachtswerking*. Zoetermeer, Zuid-Holland, Nederland: Bouwen met Staal.

stralenpoedercoaten.nl. (2017). */schooperen-of-metalliseren/*. Opgehaald van www.stralenpoedercoaten.nl: <https://www.stralenpoedercoaten.nl/schooperen-of-metalliseren/>

Tosec. (2017, maart). */wiki/*. Opgehaald van tosec.nl: <http://www.tosec.nl/wiki/>